平成２５年度成果報告書

社会課題対応センサーシステム開発プロジェクト
（研究開発成果等の他分野での先導研究）
社会課題対応常時・継続モニタリングシステムの開発

平成２６年３月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

（委託先）技術研究組合ＮＭＥＭＳ技術研究機構

まえがき

本報告書は、技術研究組合 NMEMS 技術研究機構が新エネルギー・産業技術総合開発機構から委託を受けた「社会課題対応センサーシステム開発プロジェクト（研究開発成果等の他分野での先導研究）社会課題対応常時・継続モニタリングシステムの開発」の平成 25 年度の研究成果をとりまとめたものである。

本研究開発は種々の社会課題を解決するために「対象を常時・継続的にモニタリングし、現象を把握し、管理者に最適な判断材料を提供することを可能とする」という統一的な視点から①社会・産業インフラ分野、②農業分野、③健康医療分野の３分野全ての社会課題対応センサーシステムに係る「社会課題対応常時・継続モニタリングシステム」を検討し、研究開発の課題、内容と目標ならびに期待できる効果を明らかにするとともにキーとなるセンサの原理検証を行ったもので、技術研究組合 NMEMS 技術研究機構が平成 25 年 7 月 11 日から平成 26 年 3 月 20 日にかけて実施した。

研究責任者　下山　勲

目　次

１．研究開発の成果と達成状況 1
１．１　研究開発の成果 1
（１）要約（和文） 1
（２）要約（英文） 3
１．２　本文 5
①　社会・産業インフラ分野 5
①-(1)　多点無線センサネットワークによるモニタリングシステムの開発 5
①-(1-1)　プラント・パイプラインモニタリングシステムの開発 5
①-(1-1)-1　研究の目的 5
①-(1-1)-2　振動による配管モニタリング用センサ仕様の検討 6
①-(1-1)-3　自立電源による配管モニタリングシステムの実現可能性の検討 9
①-(1-1)-4　ユーザ機関による成果の有効性の検証 13
①-(1-1)-5　まとめ 14
①-(1-2)　幹線道路（橋梁）モニタリングシステムの開発 16
①-(1-2-1)　加速度センサによる橋梁モニタリングシステムの開発 16
①-(1-2-1)-1　研究の目的 16
①-(1-2-1)-2　振動による配管モニタリング用センサ仕様の検討 17
①-(1-2-1)-3　橋梁モニタリングシステムの実現性の検討 52
①-(1-2-1)-4　ユーザ機関による成果の有効性の検証 58
①-(1-2-1)-5　まとめ 58
①-(1-2-2)　アコースティックエミッションセンサによる橋梁モニタリングシステムの開発 62
①-(1-2-2)-1　研究の目的 62
①-(1-2-2)-2　橋梁と AE 63
①-(1-2-2)-3　MEMS-AE センサの開発 71
①-(1-2-2)-4　自立電源とシステム要求仕様 78
①-(1-2-2)-5　海外における AE 商用事例・開発動向調査 83
①-(1-2-2)-6　ユーザ機関による成果の有効性の検証 88
①-(1-2-2)-7　まとめ 89
①-(1-3) 幹線道路（トンネル付帯構造物）モニタリングシステムの開発 91
①-(1-3)-1　研究の目的 91
①-(1-3)-2　研究成果(1) センシング技術課題の明確化 93
①-(1-3)-3　研究成果(2) 発電デバイス技術課題の明確化 107

①-(1-3)-4　学会・セミナー・技術展示調査 115
①-(1-3)-5　ユーザ機関による成果の有効性の検証 115
①-(1-3)-6　まとめ 116
①-(1-4)　公共施設設備モニタリングシステムの開発 118
①-(1-4)-1　研究の目的 118
①-(1-4)-2　設備機器、配管設備などの基礎データ計測試験 119
①-(1-4)-3　センサ仕様及び診断仕様の抽出 134
①-(1-4)-4　ユーザ機関による成果の有効性の検証 143
①-(1-4)-5　まとめ 145
①-(2)　高密度面パターンセンシングシステムの開発 147
①-(2)-1　研究の目的 147
①-(2)-2　社会インフラの振動調査 148
①-(2)-3　無線センサ自立電源化の予備実験 150
①-(2)-4　構成要素の調査 153
①-(2)-5　ユーザ機関による成果の有効性の検証 154
①-(2)-6　まとめ 155
①-(3)　広域(衛星リモート)センシングシステムの開発 157
①-(3)-1　研究の目的 157
①-(3)-2　衛星リモートセンシングシステムにおける要求仕様の調査・検討 ... 159
①-(3)-3　プラズモニック吸収体を用いた波長選択型赤外線センサ 166
①-(3)-4　非対称性を導入したプラズモニック吸収体による偏光検知赤外線センサ 171
①-(3)-5　ユーザ機関による成果の有効性の検証 174
①-(3)-6　まとめ 175
①-(4) 自立型無線高耐久センサシステムの開発 179
①-(4)-1　研究の目的 179
①-(4)-2　環境因子の調査・高耐久性仕様の設定 180
①-(4)-3　シールド実装構造 182
①-(4)-4　コーティング材料について 189
①-(4)-5　調査及び実験の結果 196
①-(4)-6　ユーザ機関による成果の有効性の検証 196
①-(4)-7　まとめ 196
②農業分野 199

②-(1)　センサ活用マイクロ環境制御型次世代植物工場の開発 199
②-(1)-1　研究の目的 199
②-(1)-2　微小気候測定技術開発と最適な微小気候の制御技術開発のセンサ仕様の決定 203
②-(1)-3　地上部の最適微小気候制御技術開発の基礎データ収集 206
②-(1)-4　地下部の最適微小環境制御技術開発の基礎データ収集 209
①-(1)-5　ユーザ機関による成果の有効性の検証 211
②-(1)-6　まとめ 212
②-(2)　センサ活用次世代繁殖農家システムの開発 213
②-(2)-1　研究の目的 213
②-(2)-2　ホルモン検出デバイスの設計 217
②-(2)-3　ホルモン検出デバイスの動作検証 220
②-(2)-4　無線システムの動作検証 226
②-(2)-5　学会調査 235
②-(2)-6　ユーザ機関による成果の有効性の検証 236
②-(2)-7　まとめ 240
②-(3)　センサ活用次世代健全肥育システムの開発 243
②-(3)-1　研究の目的 243
②-(3)-2　接触型センサ端末による子牛の特定部位の体温の連続計測 246
②-(3)-3　サーモグラフィによる子牛の体表面温度分布の断続計測 250
②-(3)-4　経口投与型ルーメンセンサ端末の試作及び pH の連続計測 255
②-(3)-5　ユーザ機関による成果の有効性の検証 260
②-(3)-6　まとめ 260
③　健康医療分野 262
③-(1)　常時装着型循環器機能センサシステムの開発 262
③-(1)-1　研究の目的 262
③-(1)-2　実施内容 264
③-(1)-2-1　原理検証の内容（血圧） 264
③-(1)-2-2　原理検証の内容（心音） 269
③-(1)-2-3　実験方法と結果（血圧） 276
③-(1)-2-4　実験方法と結果（心音） 284
③-(1)-2-5　調査方法と結果 285
③-(1)-2-6　ユーザ機関による成果の有効性の検証 286

③-(1)-3　まとめ 287
③-(2)　予測型血糖センサシステムの開発 294
③-(2)-1　研究の目的 294
③-(2)-2　マルチバイタルサイン連続モニタリングシステムの確立 296
③-(2)-3　マルチバイタルサインデータ解析手法の検討 302
③-(2)-4　考察 307
③-(2)-5　ユーザ機関による成果の有効性の検証 307
③-(2)-6　まとめ 308
③-(3)　非侵襲血液成分センサシステムの開発 311
③-(3)-(a)　非侵襲血液成分センサシステムの開発―呼気ガス成分分析手法 311
③-(3)-(a)-1　研究の目的 311
③-(3)-(a)-2　半導体式 MEMS ガスセンサについて 313
③-(3)-(a)-3　具体的な方式・コンセプトの提案とその原理検証 318
③-(3)-(a)-4　技術課題の抽出と開発の方向性決定 324
③-(3)-(a)-5　ユーザ機関による成果の有効性の検証 326
③-(3)-(a)-6　まとめ 327
③-(3)-(b)　非侵襲血液成分センサシステムの開発　光学的手法 328
③-(3)-(b)-1　研究の目的 328
③-(3)-(b)-2　ユーザニーズのヒアリングと開発の方針 329
③-(3)-(b)-3　原理検証の内容 332
③-(3)-(b)-4　共焦点光学系の原理検証 333
③-(3)-(b)-5　光学方式の MEMS 化の検討 337
③-(3)-(b)-6　ユーザ機関による成果の有効性の検証 343
③-(3)-(b)-7　まとめ 344
③-(4)　即時生化学センサシステムの開発 346
③-(4)-1　研究の目的 346
③-(4)-2　ユーザニーズのヒアリングと開発の方針 348
③-(4)-3　動的封入送液デバイス方式 351
③-(4)-4　マルチウェル PCR 方式 354
③-(4)-5　ウオッシュレス DNA アレイ方式 358
③-(4)-6　ユーザ機関による成果の有効性の検証 361
③-(4)-7　まとめ 362
③-(5)　生活行動見守りセンサシステムの開発 366

③-(5)-1　研究の目的 366
③-(5)-2　各センサなどの開発 369
③-(5)-2-(a)　筋量センサの開発 369
③-(5)-2-(b)　モーションセンサの開発 387
③-(5)-2-(c)　フォースセンサプレートの開発 399
③-(5)-2-(d)　歩行機能高精度計測技術の開発 408
③-(5)-3　ユーザ機関による成果の有用性の検証 427
③-(5)-4　まとめ 428
③-(6)　健康医療としての全体システムの取り組み方向性に関する調査 433
③-(6)-1　調査の目的 433
③-(6)-2　調査の方法 433
③-(6)-3　調査結果と考察 434
③-(6)-4　まとめ 442
④　プロジェクト推進及び研究支援 443
④-(1)　研究会、委員会活動 443
④-(1)-1　リーダ・サブリーダ会議 443
④-(1)-2　分野別研究会 443
④-(1)-3　3 分野合同会議 445
④-(1)-4　知財委員会 445
④-(2)　広報普及活動及び調査活動 445
④-(2)-1　広報普及活動 445
④-(2)-2　調査活動 447
１．３　目的に照らした達成状況 472
①社会・産業分野 472
②農業分野 476
③健康医療分野 479
２．研究発表・講演、文献、特許等の状況 483
（１）研究発表・講演（発表年月日、発表媒体、発表タイトル、発表者） 483
①社会・産業インフラ分野 483
②農業分野 484
③健康医療分野 484
（２）文献（発表年月日、発表媒体、発表タイトル、執筆者） 485
①社会産業インフラ分野 485

②農業分野 485
③健康医療分野 485
（３）特許等(出願日、受付番号、特許標題、出願人) 486
①社会・産業インフラ分野 486
②農業分野 486
③健康医療分野 486
（４）その他の公表(プレス発表、受賞等) 487
①社会・産業インフラ分野 487
②農業分野 487
③健康医療分野 487

１．研究開発の成果と達成状況

１．１　研究開発の成果

（１）要約（和文）

社会・産業インフラ分野に関しては（１）多点無線センサネットワークによるモニタリングシステム、（２）高密度面パターンセンシングシステム、（３）広域（衛星リモート）センシングシステムの技術ニーズ､実用化に向けた課題の抽出などの検討を行い､さらに、（４）自立型無線高耐久性センサシステムの仕様検討を行った。主な成果としては、（１）配管モニタリングとして、配管の輸送状態・漏洩検出の可能性の見通しを得た。加速度及び AE(Acoustic Emission)センサによる橋梁モニタリングとして、運用・分析ニーズを明らかにし、センサ・自立電源（振動・太陽光）の要求仕様を纏めた。トンネル付帯構造物モニタリングとして､ジェットファンのアンカーボルトの変状をアクティブに振動計測し、気流発電の要求仕様を纏めた。また、（２）高密度面パターンセンシングとして、フレキシブルシート上に超小型圧電振動センサを多数配置する基本構造の仕様を纏めた。（３）プラズモニック吸収体を用いることで、従来の分光系のサイズ・重量を大幅に軽減できることを示した。（４）センサ・無線・自立電源特性に影響を与えず、野外環境耐性を満足させるための評価項目・基準を抽出し、10 年の耐久性パッケージ仕様を纏めた。

農業分野に関しては、農業として、高付加価値の植物を生産性高く栽培できる（１）センサ活用マイクロ環境制御型次世代植物工場の共通課題の抽出とそれに必要なセンサシステムの要求仕様を明らかにするとともに機能性野菜の最適栽培のための基礎データを取得した。乳用牛・肉用牛の繁殖として、年 1 産を実現する（２）センサ活用次世代繁殖農家システムに必要なホルモンセンサの設計・試作と原理検証を行うとともに個体に装着したセンサから得られる情報を､低消費電力で集約可能な通信仕様を実証実験で明らかにした。乳用牛・肉用牛の肥育として、子牛の疾病の早期発見と症状程度の判断並びに成牛の消化器病の早期発見により死廃・病傷事故を低減する（３）センサ活用次世代健全肥育システムに必要な各種センサシステムを設計・試作し、接触型体温センサにより子牛の実験肺炎に伴う体温上昇を計測できること、サーモグラフィシステムによりほ乳中の子牛眼縁部の最高表面温度を安定して取得できること､ルーメンセンサによりルーメン内の pH の無線測定が可能なことを実証した。

健康医療分野に関しては、健康寿命を延伸し高い QOL を確保し、医療費削減等の社会課題に対応すべく、日常生活、院内、予後管理、リハビリ及び行動補助の各シーンでのセンサシステムとして、（１）常時装着型循環器機能センサシステム（非侵襲無拘束血圧、心音）（２）予測型血糖センサシステム、（３）非侵襲血液成分センサシステム（呼気ガス方式、光学方式）、（４）即時生化学センサシステム（感染症）、（５）生活行動見守り

センサシステム（筋量、モーション、フォース、歩行機能）の５システムを想定し、ユーザニーズに基づくセンサの原理検証と本格検討に向けて取り組むべき課題について検討した。医療機関等の利用者側をユーザ機関として、そこに必要なニーズを踏まえ、各センサシステムとも従来にない新しい検出原理が多く含まれており、積極的に検討した成果として当初想定した検証と課題の抽出を完了できた。さらに、（６）健康医療としての全体システムの取り組み方向性に関する調査として、上記取り組みの成果を踏まえ医療を大きく変えることができるようなセンサシステムコンセプトと必要な横断的技術要素について整理した。

プロジェクトの効率的な推進を図るとともに、本先導研究の普及・広報を図った。

（２）要約（英文）

Social and Industrial Infrastructure: (1) clarified operational and analytical requirements of a monitoring system implemented with a multipoint wireless sensor network and finalized required specifications for the sensors and standalone power supply; (2) finalized specifications for a basic structure comprising numerous ultra-small piezoelectric vibration sensors arranged on a flexible sheet for sensing high-density surface patterns; (3) studied the technical requirements of a wide-area (satellite remote) sensing system and identified issues regarding its implementation; (4) identified evaluation points and criteria for making a highly-durable standalone wireless sensor system durable enough for outdoor use and finalized package specifications for a 10-year service life.

Agriculture: for agriculture, (1) identified common problems in next-generation plant factories using sensors for micro-environmental control, clarified specifications of the sensor system required to overcome these problems, and acquired basic data on the optimal cultivation of functional vegetables; for dairy and beef cattle breeding, (2) designed, prototyped, and tested the principles of hormone sensors required for a next-generation sensor-driven breeding farm system and clarified through demonstration experiments communication specifications required for data aggregation under low power; for dairy and beef cattle fattening, (3) designed and prototyped a contact-type body temperature sensor, thermography system, and lumen sensor required for a sensor-driven next-generation healthy fattening system and completed verification of their principles.

Health and Medicine: conceived of five sensor systems for use in daily life, in-hospital care, prognosis and treatment, rehabilitation, and mobility assistance, including (1) a 24-hour cardiovascular function sensor system, (2) a predictive glucose sensor system, (3) a non-invasive blood component sensor system, (4) a real-time biochemical sensor system, and (5) a daily activity monitoring sensor system, and summarized the challenges faced in verifying principles of sensors based on user needs and in conducting a full-scale study on the sensor systems; (6) clarified our concept of sensor systems and the required cross-disciplinary technological elements for vastly altering the landscape of medical care to investigate our approach toward developing a comprehensive system for health and medicine.

We have endeavored to carry out the project efficiently and to publicize and disseminate our pioneering research.

１．２　本文

①　社会・産業インフラ分野

①-(1)　多点無線センサネットワークによるモニタリングシステムの開発

①-(1-1)　プラント・パイプラインモニタリングシステムの開発

【株式会社日立製作所】

①-(1-1)-1　研究の目的

＜社会課題＞

各種プラントや石油備蓄設備などの産業インフラでは、膨大な量・距離に及ぶ配管設備が用いられており、その維持管理は、生産性の向上に直結すると共に、事故防止の観点でも重要である。現状では、配管設備のモニタリングは、測定器が高価なため、プロセス設備などの重要区画の一部にしか適用できていない。プロセス設備などの重要区画については、比較的高価かつ大型の測定器を配管設備に設置し、有線ネットワークにより情報を収集することで、配管設備の異常検出や、配管内容物の温度・圧力・流量などの監視を行うシステムが構築・運用されている。

しかしながら、配管へ測定器を設置するには、配管を動作停止させたうえで切断挿入する必要があり、工事コストが高くなること、及び、配線の敷設コストも高いことから、極少数の測定点に限定されている。よって、異常の発生を検出することは可能であるが、異常発生箇所の特定や、小規模な異常を早期に検出することは困難である。

＜現状の取り組みと課題＞

現状、異常・損傷発生の検出は、設置前の安全診断、現場作業者による日常的な点検、そして、数か月から数年に１回の定期点検により異常を診断することによって成されるのが一般的である。しかしながら、これらの対策では事故の発生を完全に防ぐことは困難である。同規模の設備であっても、周囲環境の差や、運用方法の変更などにより、想定とは異なる条件での使用が成される場合があり、設置前の安全診断では、想定しなかった劣化モードによる損傷や配管の詰まりなどの発生が有り得る。そのため、日常点検や定期点検が重要であるが、検査で異常を発見できるかどうかについては、検査者の技能や、暗黙知に依存する要素がある。そのうえ、膨大な数の配管に対し、全てを漏れなく検査することは容易ではない。また、高圧配管などでは微細な損傷を起点に、急速に損傷が進行することがあるため、定期検査では発見できない微細な損傷や漏洩を起点として、大事故や長期間の設備停止に発展する場合があった。

以上の理由より、無線センサネットワークによるプラントの配管設備監視システムの実現が期待されており、一部の測定設備の無線ネットワーク化が試みられている。しかしな

がら、配管設備を測定可能な高感度なセンサは大型で高価なこと、設置に比較的大規模な工事が必要となること、多数点にセンサを設置すると、そのセンサのメンテナンスコストが高価になること､などの課題があることから普及せず､日常的な点検が困難な箇所など、限定的な運用に留まっていた。

＜実施内容と最終目標＞

現状の課題を解決し、事故を防止する次世代のプラント・パイプライン監視システムを実現するセンサシステム仕様の検討を行った。そのためには、小型で設置が容易であり、かつ、メンテナンス頻度の少ないセンサを実現する必要があり、センサを低消費電力化することが必須である。一方、一般的に、センサの帯域や感度と、消費電力はトレードオフの関係にあるため、測定の周波数や、感度・分解能をできるだけ絞ることが、自立電源で動作する革新的センサにとっては重要となる。

本検討では、設置コストを低減可能な構成で、配管の運用状況のモニタリングを実現するため、配管外からの測定により移送量（流量）及び漏洩などの異常検出を可能とする情報因子を実験により抽出した。抽出した結果を基に、ユーザ機関（（株）東京電力）と共同で稼働中のプラント設備を実測し、プラント・パイプライン監視システムの実現可能性を検討した。さらに、適用可能な自立電源及び無線の仕様について、配管設備の温度と無線環境の実測を基に検討し、実用的なプラント・パイプライン監視システムの構成を考察した。

①-(1-1)-2　振動による配管モニタリング用センサ仕様の検討

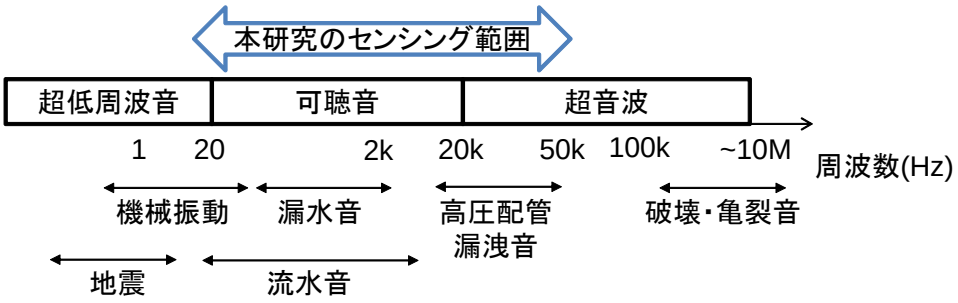
①-(1-1)-2-1　検討内容と方法

配管外からの測定により配管の運用状態、特に移送量（流量）及び漏洩などの異常検出を行うセンサの実現を目指し、配管の振動に着目し、実測による検討を行った。

一般に、回転機などの振動を発生する設備においては、その振動状態を点検者の聴覚や測定器でモニタし、異常を起こしていないかを診断することが行われている。また、配管からの漏洩が発生した場合、約 40 kHz の超音波が発生することが知られており、漏洩箇所の探索に用いられている。

そこで､本研究では､配管の振動をモニタすることで､漏洩による超音波検出と同時に、配管の運用状態を推定できないかを検討した。配管設備は、接続されている各種機器の振動や、周辺環境からの振動、及び、配管内を流れる流体からの影響で様々な周波数で振動している。そのため、回転機と同様に、配管の振動をモニタすることで、配管の状態を推定できる可能性がある。

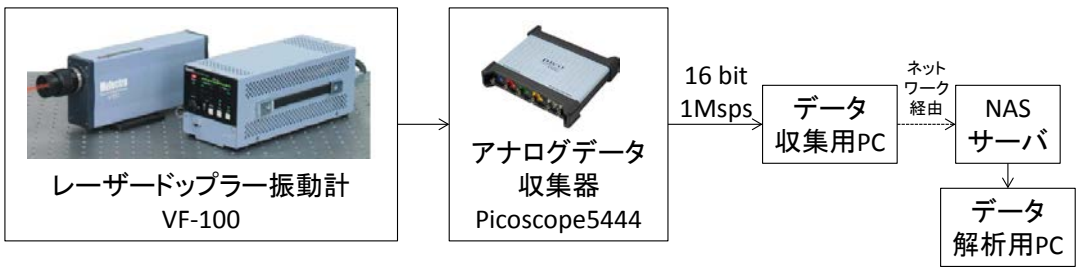
図①-(1-1)-2-1.1 に振動・音による設備診断の各種取り組みで用いられる周波数範囲の例（報告例により、適用している周波数範囲は各々、若干の幅がある）を示す。本検討では、これらの振動のうち、配管設備の運用状態モニタリングに対し有用性が期待できる、漏洩音や流水音を含む、20Hz～50 kHz 程度の振動を中心に解析し、配管の移送量（流量）の推定や漏洩などの異常検出の可能性を検討した。



図①-(1-1)-2-1.1　振動・音による診断アプリケーション例

本検討の振動測定には、配管の振動状態に影響を与えずに測定するため、電子技研工業㈱製のレーザドップラ振動計 VF-100（図①-(1-1)-2-1.2）を用いた。この振動計は、レーザ光を用いて非接触で、0.5Hz～300 kHz の広い周波数の振動を、3μm/s～10 m/s の広いダイナミックレンジで振動測定が可能であり、振動と流量の依存性を分析するのに十分な計測性能を有している。

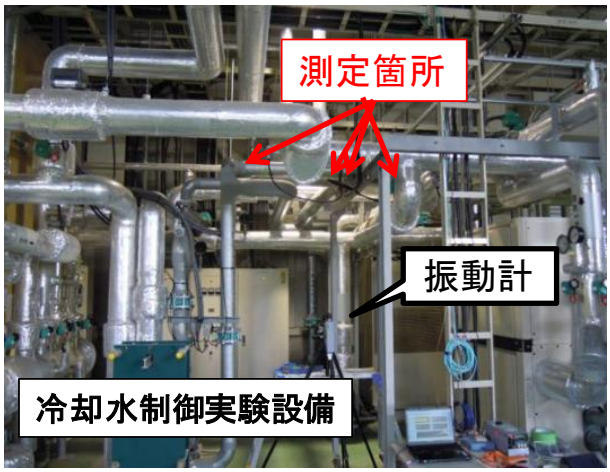
このレーザドップラ振動計を用い、プラント設備の稼働状態の遷移に伴う配管振動の変化を捉えるため、長時間に渡り高精度な測定が可能な計測系を製作した（図①-(1-1)-2-1.2）。自作のフィルタ回路と、PC にアナログ-デジタル変換データを取り込む Pico Technology 社製の Picoscope5444、測定用 PC により構成され、レーザドップラ振動計の出力を、1 MHz のサンプリング速度、16bit の分解能で、数時間に渡り連続で記録が可能である。また、この計測系は、小型で持ち運びが可能な構成であり、実プラントにおける実測にも適用可能な構成とした。



図①-(1-1)-2-1.2　製作した配管振動の計測系の概略

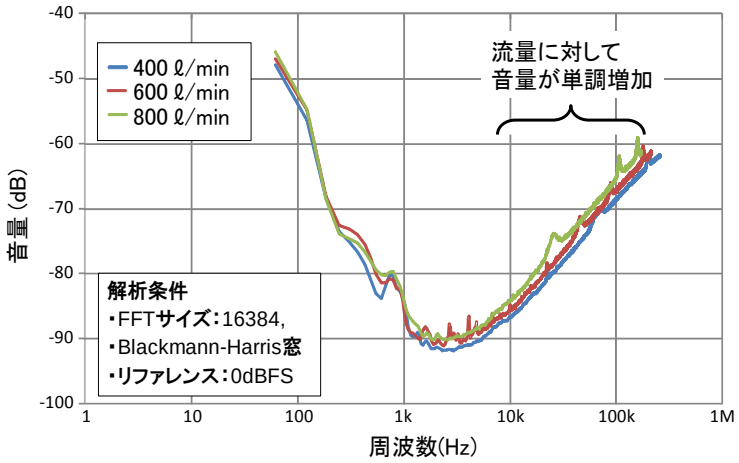
①-(1-1)-2-2　振動による配管移送状態推定の原理検証実験

配管の振動モニタによる、配管の運用状態の推定可能性を検討するため、㈱日立製作所松戸開発センターが保有する実験設備（図①-(1-1)-2-2.1）の配管系を用い、配管内の流量と、振動の相関について実測を行った。この配管設備は、100A の配管に流れる冷却水の流量を、インバータ制御により 400～900ℓ/min の範囲で任意に設定することが可能である。本検討では、流量を 400ℓ/min、600ℓ/min、800ℓ/min の 3 通りに設定し、それぞれにおける、配管の振動を前述のレーザドップラ振動計を用いた測定系で測定した。

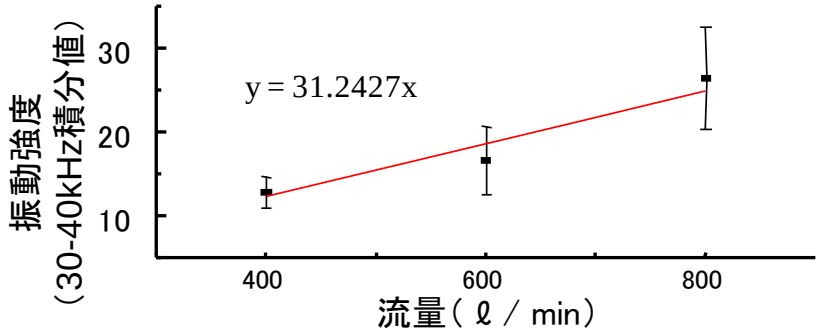


図①-(1-1)-2-2.1　配管振動と冷却水流量の相関取得に用いた実験設備
（㈱日立製作所 松戸開発センター）

振動を測定した結果を、FFT により周波数分析したものを図①-(1-1)-2-2.2 に示す。流量及び計測したタイミングによる周囲環境の違いなどに起因して、各流量による振動の周波数成分は異なるが、200Hz 以下の振動は概ね一致しており、測定の再現性については問題無いことが判る。また、200Hz～数 kHz では、測定毎に差異が見られるが、この周波数範囲は、可聴領域であり、周囲の騒音に起因すると考えられる。そして、数 kHz 以上の周波数領域では、いくつかの周波数でピークのようなものが見られるが、ほとんどの周波数において、音量が流量に比例して単調に増加していることが判る。各流量における 30Hz～40kHz の振動強度を積分し、横軸を流量、縦軸を音量の積分値としてプロットした結果を図①-(1-1)-2-2.3 に示す。測定値のバラツキが大きいが、概ね、流量と 30Hz～40kHz の振動強度が比例することが確認できた。



図①-(1-1)-2-2.1　配管振動と冷却水流量の依存性測定結果



図①-(1-1)-2-2.3　30kHz-40kHz の振動強度と流量の解析結果

以上より、10kHz～40kHz 程度の配管振動をモニタすることで、配管内の流量を推定できる可能性があることが判った。また、一般に、配管における漏洩発生時には、40kHz 前後の周波数成分を含んだ超音波が発生することが知られており、漏洩の探索に実用化されていることから、10kHz～40kHz 程度の振動をモニタリングするセンサの開発により、配管の運用状態の常時モニタリングに有用なセンサシステムの実現可能性があると考える。

①-(1-1)-3　自立電源による配管モニタリングシステムの実現可能性の検討

自立電源を用いた無線センサを適用した、配管モニタリングシステムの実現可能性について検討を行った。そのために、適用可能な自立電源による発電量を見積もった。そして、適用可能な無線仕様を検討し、前項で検討したセンサデータを送信するのに必要なエネルギを見積り、実用的なセンサ端末システムが理論上、実現可能かを検討した。

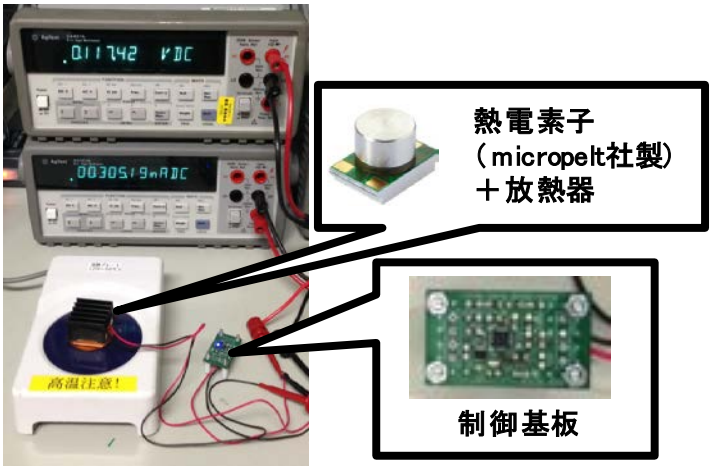
まず、配管設備環境で利用可能な自立電源については、配管内を流体が流れることで、熱の移送が生じることを鑑み、熱電素子が有力な候補の一つと考える。熱電発電に利用で

きる熱は、配管内を流れる物体の種類や、運用方法に大きく依存するが、その温度は、ほぼ一定に保たれている配管も少なくないためである。例えば、冷却水を流れる配管は、冷却水を用いる機器の仕様により冷却水の温度範囲が定められている。また、結露を防止するため、低くなり過ぎないように、23℃前後に制御されている場合が多い。このような、周囲の気温と一定の温度差を有する配管では、熱電素子を用いた発電が可能なことが期待できる。実際に、配管の温度を実測した例を表①-(1-1)-3.1 に示す。これらの配管では、稼働時は、概ね一定の温度となっていた。配管の種類や、外気温の状況にも依存するが、この配管温度と外気温の差ΔT= 5～70 ℃程度を利用した熱電素子による自立電源の利用が期待できる。

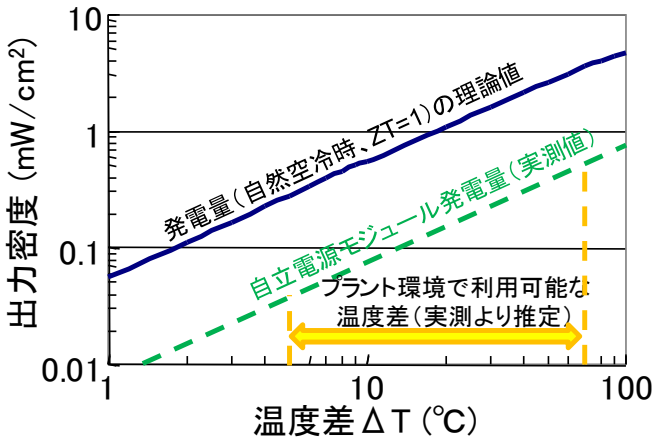
表①-(1-1)-3.1　配管の表面温度の測定例

測定対象	表面温度
冷却水配管	22 ℃
ボイラ配管（断熱材上）	30～50 ℃
ボイラ配管（断熱材下）	90 ℃

配管の温度を用いて、実際の熱電素子でどの程度発電可能かを確認するため、市販の熱電素子を用い、配管設備環境で発電可能な量について評価した。評価は、環境発電用として販売されている micropelt 社製の熱電素子モジュール TGP-751 と、制御・蓄電用回路を組み合わせて行った（図①-(1-1)-3.1）。この TGP-751 の評価結果と、理想的な熱電素子を適用できた場合の理論値を図①-(1-1)-3.2 に示す。この結果より、温度差ΔT=10 ℃程度で約 0.1 mW/cm^{2}の発電が可能なことが判る。また、将来、熱電素子の性能が向上すれば、さらに 10 倍程度の発電量が利用可能になることが期待できる。



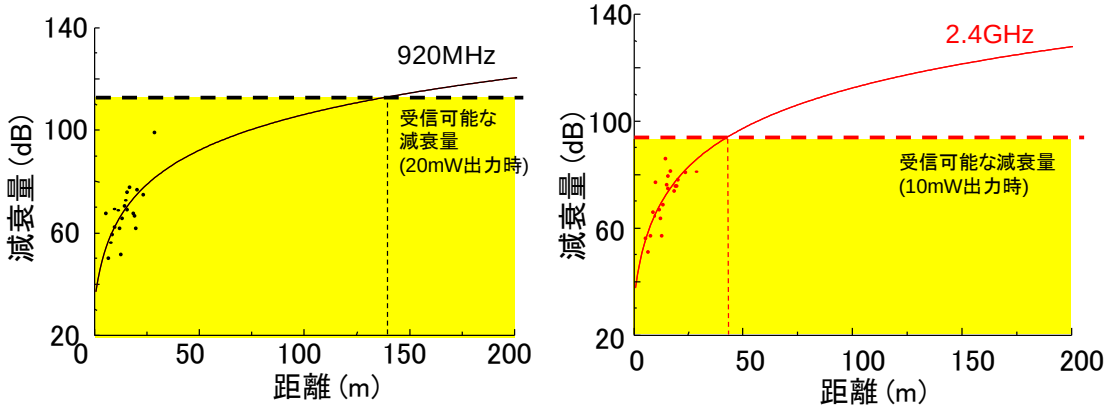
図①-(1-1)-3.1 製作した熱電素子 TGP-751 の評価系



図①-(1-1)-3.2　熱電素子 TGP-751 と理想的な熱電素子を適用時の発電量

次に、配管設備環境で適用可能な無線仕様について検討した。実際のプラント環境においては、電波を遮蔽する金属配管や、大型の金属製の設備が多いことから、周波数によっては減衰が多く到達し難くなることが懸念される。しかしながら、送信に用いる無線の出力は、自立電源で動作するにはできる限り抑える必要がある。

本検討では、実際に、配管環境における 920MHz と 2.4GHz の無線信号の減衰量の実測を行った。その結果を図①-(1-1)-3.3 に示す。バラツキはあるが、同程度の距離の場合、2.4GHz の無線信号の方が、920MHz と比較して減衰量が大きかった。この結果を基に、電波法で免許不要で用いることができる送信出力と、市販の無線受信用 IC の測定感度から、それぞれの通信可能距離を見積もると、920MHz、20mW 送信の場合で約 130m 程度、2.4GHz、10 mW 送信の場合では 70m 程度という結果となった。この結果より、配管設備環境において、20mW の無線出力を用いることで、50～100m の範囲で通信可能な無線端末を実現可能なことが判る。

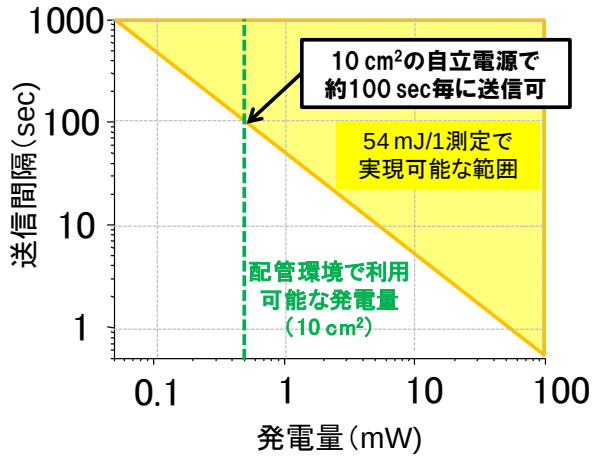


図①-(1-1)-3.3　配管設備環境における無線減衰量の実測例

以上の、自立電源と無線仕様の検討結果を基に、端末システムの仕様を考察する。センサの消費電力を 10mW、サンプリング周波数を 100kHz、サンプリング点数を 16384 点と仮定する。そして、無線送信出力を 20mW、送信データ量 16bit×16384 点とし、送信速度を 100kbps と仮定すると、1 回のセンサ測定に必要なエネルギは

$$10\text{mW} \times 16384/100\text{kHz} + 20\text{ mW} \times 16\text{bit} \times 16384/100\text{ kbps} = 54\text{ mJ}$$

と見積もられる。一方、先に検討した自立電源の検討より、自立電源の大きさを 10 cm^2 程度とした場合、約 0.5mW の発電量と見積もられる。これら、センサ測定の消費エネルギと、自立電源の発電量の見積りから、約 100 秒に 1 回であればセンサ測定と無線送信動作を実現できる計算となる（図①-(1-1)-3.4）。このセンサシステムのモニタリング間隔は、現状のプラントにおいて 1 日に数回程度の間隔で実施されている日常点検と比較して、十分に短く、実用的な間隔で、運用状況の把握や事故の防止を行うシステムの実現可能性があると結論する。



図①-(1-1)-3.4　配管環境における自立電源で振動データの無線送信可能な頻度の見積り

①-(1-1)-4　ユーザ機関による成果の有効性の検証

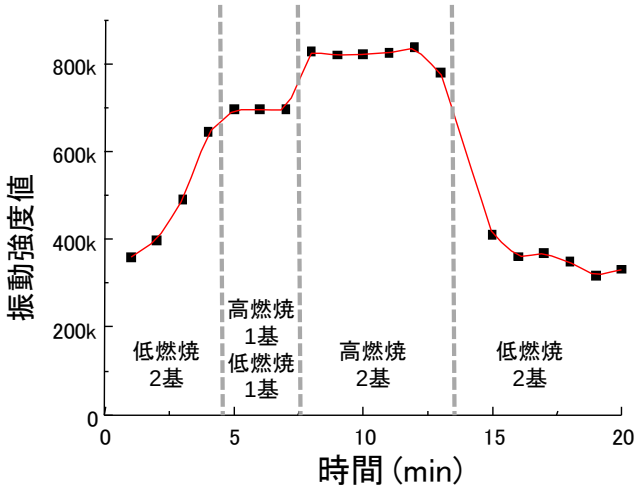
検討した、配管の振動測定による、運用状態の推定可能性について、ユーザ機関（東京電力㈱）と共同で、稼働中のプラントの実測による検証を実施した。

プラントにおける熱処理工程用の 2 基のボイラ設備（図①-(1-1)-4.1）に接続されている配管について、レーザドップラ振動計を用いた配管振動の実測し、前述した検討結果に基づき解析を行った。この測定の間、2 基のボイラは必要な熱量を生成するため、低燃焼状態から、1 基ずつ、高燃焼状態に推移し、その後、2 基とも低燃焼状態へと戻っていた。

解析した結果を図①-(1-1)-4.2 に示す。横軸に時間を取り、縦軸には、30kHz～40kHz の振動を積分した振動強度値をプロットしたものである。2 基のボイラの燃焼状態に対応して、振動強度値が推移していることが、明瞭に判別できた。配管外に容易に取り付けたセンサ端末による、配管の運用状態をモニタリングするセンサシステムの実現可能性を確認できたと考える。



図①-(1-1)-4.1　実測した稼働中プラントのボイラ設備



図①-(1-1)-4.2　振動強度値による配管の運用状態推定実験結果

①-(1-1)-5　まとめ

＜将来開発すべきセンサシステム像＞

次世代のプラント・パイプライン監視システムを実現するセンサシステムとして、配管外からの測定により配管の運用状態、特に移送量（流量）及び漏洩などの異常検出を行うセンサの実現可能性を検討した。

センサ仕様の検討として、配管の振動と移送状態の相関を実測し、配管外部に設置したセンサにより、10kHz～40kHz 程度の配管振動をモニタすることで、配管内の流量を推定できる可能性があることを確認した。また、配管温度及び、市販の熱電素子による自立電源の発電量を実測し、約 0.1mW/cm2 の発電が可能なことを確認した。加えて、配管設備環境における無線伝搬特性を実測し、920MHz、20mW 送信の場合で約 130m 程度の通信距離が期待できることを確認した。以上のセンサ、自立電源及び無線仕様の検討結果を基に検討すると、約 100 秒に 1 回程度、振動測定データを無線送信可能な、自立電源動作の無線センサ端末を実現可能な見通しとなる。

このセンサシステムのモニタリング間隔は、現状のプラントにおいて 1 日に数回程度の間隔で実施されている日常点検と比較して、十分に短く、実用的な間隔で、運用状況の把握や事故の防止を行うシステムの実現可能性がある。以上より、理想的な条件下においては、10kHz～40kHz 程度の配管振動をモニタするセンサを開発することで、プラント・パイプライン監視システムを構築可能であると結論する。

＜開発すべきセンサシステムの技術課題・開発内容と目標＞

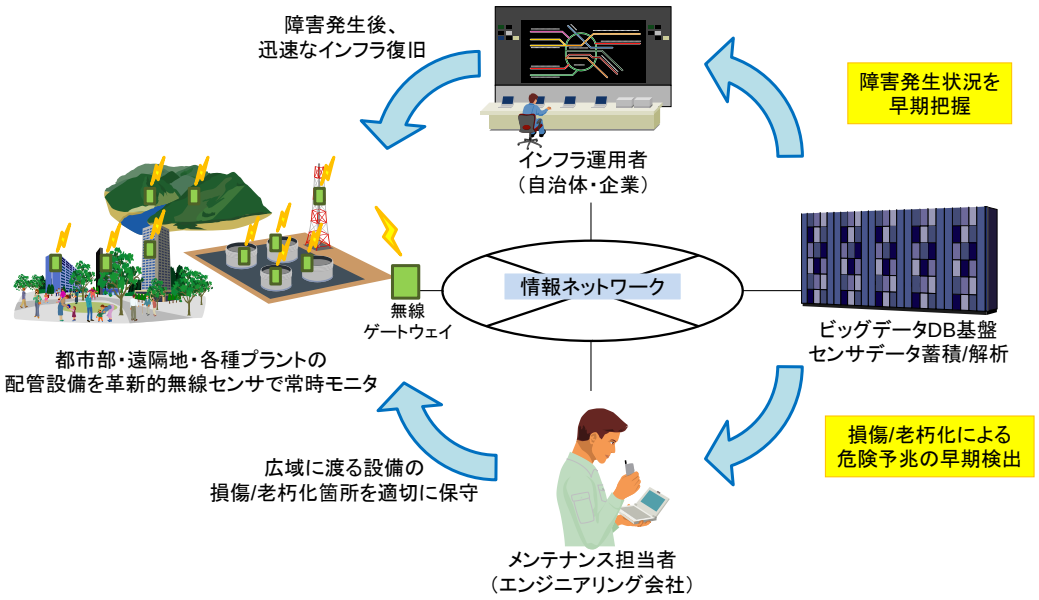
実用的なプラント・パイプライン監視システムを実現するためには、実際のプラント環境下において、十分な精度で動作するセンサシステムを構築する必要がある。そのためには、10kHz～40kHz の振動を、周囲のノイズや温度変化に依らずに高精度に取得するセンサを、自立電源で動作可能とする 10mW 程度の低消費電力で実現することが必須である。そして、そのセンサを場合によっては 300～700℃という高温となる配管に対して設置し、かつ、振動は高精度に計測可能とするセンサの配管への実装技術の検討が必要である。加えて、誤報が多い監視システムは信頼されないことから、複数のデータから異常状態を正確に判定する信号処理技術の開発も必須であると考える。

＜開発されるセンサシステムを適用した場合に期待できる具体的効果、インパクト＞

本検討によるセンサ仕様を実現し、さらに、配管の運用状態を推定するアルゴリズム及びデータベースを開発することで、図①-(1-1)-5.1 に示すような、産業インフラ設備モニタリングシステム・サービスの提供が可能となる。このシステムは、各種プラント設備の他、

上下水道や石油・ガスなどの移送を行う配管インフラ設備の運用状態を、常時モニタリング可能とする。そして、常時モニタリングにより収集したデータを解析することで、災害や各種の障害発生状況の早期把握を可能とし、インフラ設備の運用者に対して提供することで、迅速な復旧をサポートする。これにより、インフラ設備のメンテナンス担当者は、広域・多数に渡る設備に対し、適切な保守が可能となり、最小限のコストで維持することが可能となる。

この、プラント・パイプラインモニタリングシステムは、産業インフラの稼働率を高めることができることから、各種産業の国内生産能力の向上に資する。さらには、こうした次世代インフラ設備技術は、海外展開するうえでの技術優位性を高め、また、日本のインフラ技術への信頼度を高めるのにも資することから、海外への展開による、世界規模の大きな市場が見込める。



図①-(1-1)-5.1　プラント・パイプラインモニタリングシステムが提供するサービスのイメージ

①-(1-2)　幹線道路（橋梁）モニタリングシステムの開発

①-(1-2-1)　加速度センサによる橋梁モニタリングシステムの開発

【オムロン株式会社】

①-(1-2-1)-1　研究の目的

＜社会課題＞

現在の幹線道路（橋梁）の管理では、日常の道路点検における主観的な異常事象（変形、変色、異音、異常振動など）の観測と概ね 5 年毎の詳細点検（目視、打音検査など）が行われている。しかしながら、これらの管理手法では、日常においては近接検査が困難であり主観的判断によるため、早期の発見が難しく、見逃されやすく、判断に差が出やすい。また詳細点検では近接目視が必要なため、高所や狭隘部への接近や点検箇所の網羅性を高めるため多くのコストを要している。これらの日常及び詳細点検のおける手間、コストの低減と定量判断の一助となるシステムの実現が望まれている。

＜現状の取り組みと課題＞

現状の取り組みとして、幹線道路(橋梁)の管理では、日常の道路点検における主観的な異常事象(変形、変色、イオン、異常振動など)の観測と概ね 5 年毎の詳細点検(目視、打音検査など)が行われている。また日常の巡回目視点検、定期点検は、1 回／年以上で実施され、数千件(NEXCO 東日本、首都高速道路)の異常個所があり、順次対応しているが増加傾向である。点検は手順化されデータベース（DB）管理されているが常時の状態監視には至っておらず、NEXCO 東日本では SMH(スマートメンテナンスハイウェイ)構想としてインフラ管理センターの構築が計画されている。一方、自治体道路では予算、人財の両面で不足しており多くは未着手の状況である。

課題としては、モニタリングにより効率的な点検(期間固定から状態に応じた点検への変換)を実現することが課題となっている。また、構造物の劣化がどの程度進むかを予測したいが適切な手法が見出せておらず、モニタリングによる解決において、どのような変化に着目すべきか、その変化をどうやって把握(センシング)するか、健全度をいかに評価するかが課題である

＜実施内容と最終目標＞

橋梁モニタリングシステムでは、関係機関やユーザのヒアリングを実施、システムへの要求仕様を明確にし、現在考えられている推定目標の妥当性を検討する。また、加速度センサ、自立発電デバイスについては、既存のデバイスを利用して、実際の性能評価を実施することで目標値の妥当性と実現性の検討を行い、最終報告する。 システムにおいては、

必要に応じ予備実験にて実現性を見極める事前検証も実施する。

①-(1-2-1)-2　振動による配管モニタリング用センサ仕様の検討

①-(1-2-1)-2-1　検討内容と方法

①-(1-2-1)-2-1-1　橋梁モニタリングシステムの機能要件、性能の検討

システムを実現するにあたっての機能要件、性能緒元を検討し、その妥当性を検証した。具体的には、現時点で実装可能技術を集約して評価システムを構成し、所定の事象の検知、データ計測、健全性推定に関する実験を行い、事前評価を行った。また、評価を通して最終的な機能及び性能目標、実用に向けての開発要件(センサの性能／寿命／耐久性、複数センサの集約化、自立電源によるセンサ端末／中継器、データ分析手法など)、開発プランを提示した。さらに、実橋梁での実証実験データの提供を受け妥当性を検証した。

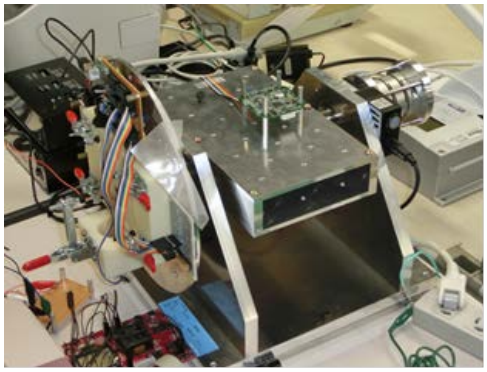
①-(1-2-1)-2-1-2　保有デバイスの性能の評価

a.　センサの性能評価

オムロンが独自に開発した MEMS 加速度センサ(図①-(1-2-1)-2-1-2.1)を使用し、センサ性能の測定と評価を実施した。基本特性評価には、新たに評価用の低ノイズ信号検出可能な評価基板を製作し、使用した。特性測定環境を図①-(1-2-1)2-1-2.2 に示す。寿命については、耐衝撃性及び高温高湿試験を実施して評価した。



図①-(1-2-1)-2-1-2.1　評価した加速度センサチップと新たに製作した評価基板



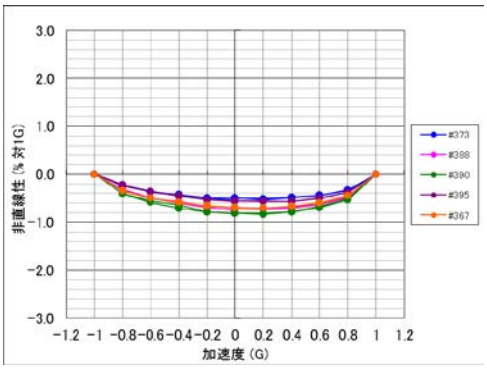
図①-(1-2-1)-2-1-2.2a　基本特性評価環境（静的特性用）



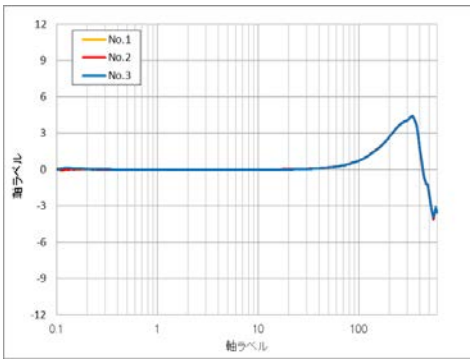
図①-(1-2-1)-2-1-2.2b　基本特性評価環境（動的特性用）

本テーマにて計測した性能について、以下に示す。

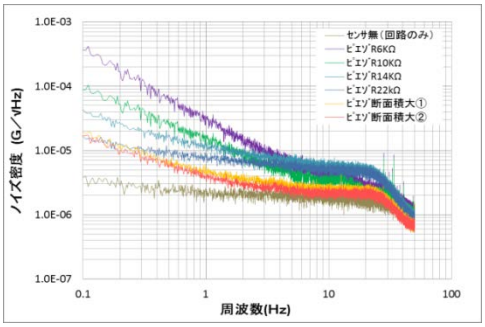
非線形性を図①-(1-2-1)-2-1-2.3、感度周波数特性を図①-(1-2-1)-2-1-2.4、ノイズ密度特性を図①-(1-2-1)-2-1-2.5 に示す。ノイズ密度特性については、他の加速度センサとの比較グラフをノイズ密度特性を図①-(1-2-1)-2-1-2.6 に示す。



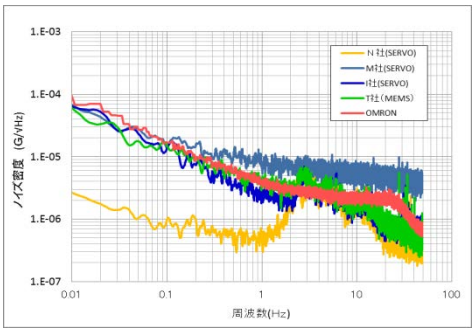
図①-(1-2-1)-2-1-2.3　非直線性



図①-(1-2-1)-2-1-2.4　感度周波数特性



図①-(1-2-1)-2-1-2.5 ノイズ密度特性



図①-(1-2-1)-2-1-2.6 ノイズ密度特性

加速度センサの性能についてまとめたものを表①-(1-2-1)-2-1-2.1 に示す。

表①-(1-2-1)-2-1-2.1　加速度センサの性能まとめ

特性項目	要求値	現状
非直線性	3 % FSO	0.8%
周波数帯域	DC　～　50Hz	DC　～　200Hz
他軸感度	5 %（ｼｽﾃﾑ状態）	3% 以下
ノイズ密度	1 uG/√Hz　want	3.6uG/√Hz(@1Hz)
最大計測加速度	≧ ± 4G	≧ ± 4G
耐衝撃性	30cm	75cm

非線形性、周波数帯域、最大計測加速度、他軸感度耐衝撃性に関して、現状で問題ないことが分かった。ノイズ密度に関しては、課題があることが分かった。

b.　電源の自立供給性能評価

自己給電の実現検討のために、オムロン保有の振動発電デバイス(図①-(1-2-1)-2-1-2.7 左)を使用し、自立供給性能の測定、評価を実施した。測定には、振動試験機に設置するための治具を製作し、保有加振機にて性能測定、評価を実施した。

耐久性に最も影響すると考えられる外気水分を遮断するためのキャンパッケージ（図①-(1-2-1)-2-1-2.7 右）を製作して、長時間での発電量減衰を測定し、評価を実施した。また、特性測定環境を図①-(1-2-1)-2-1-2.8 を示す。デバイスの性能評価結果である、出力電力波形と振動台の変位波形、振動数 vs 発電量(シミュレーション結果)、 振動数 vs 発電量(30Hz ﾀｲﾌﾟ 実測)をそれぞれ図①-(1-2-1)-2-1-2.9～11 に示す。



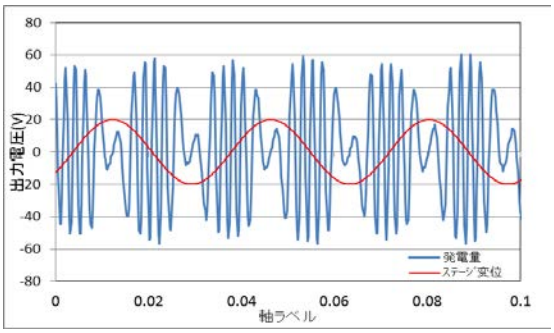
図①-(1-2-1)-2-1-2.7

振動発電デバイス(左)と振動発電デバイスのキャンパッケージ(右)(26x26x6mm)



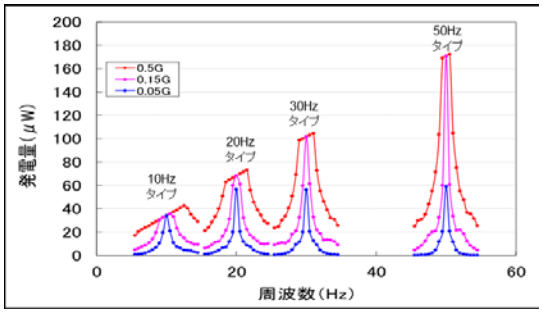
図①-(1-2-1)-2-1-2.8

振動発電デバイス特性測定環境



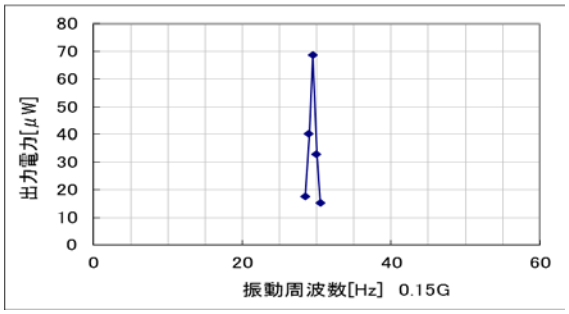
図①-(1-2-1)-2-1-2.9

デバイスの出力電力波形と振動台の変位波形



図①-(1-2-1)-2-1-2.10

振動数 vs 発電量(シミュレーション結果)



図①-(1-2-1)-2-1-2.11

振動数 vs 発電量(30Hz ﾀｲﾌﾟ実測)

これらの測定結果から得られた振動発電デバイス性能データをまとめた表を表①-(1-2-1)-2-1-2.2 に示す。

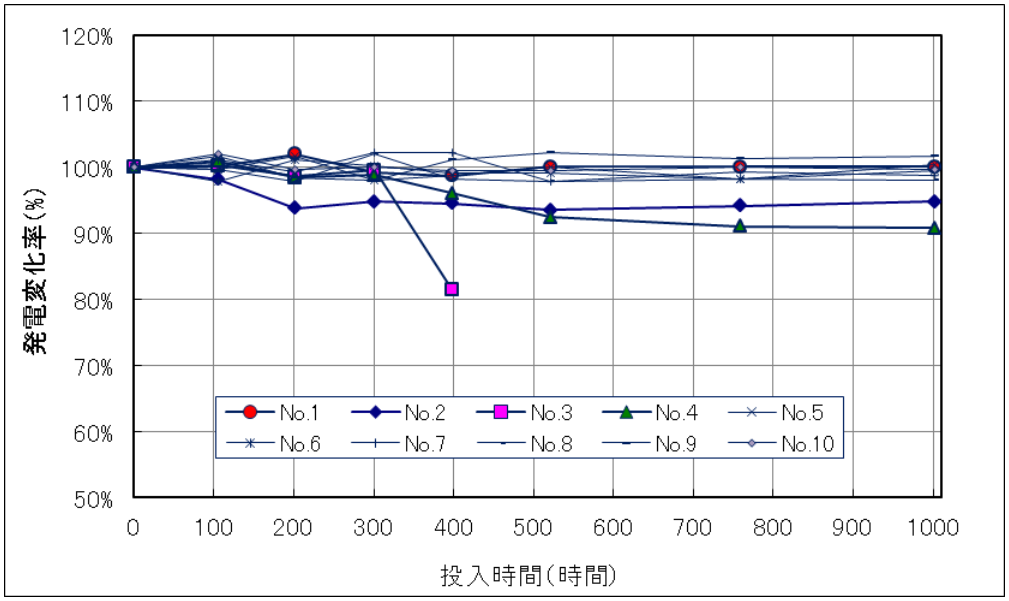
表①-(1-2-1)-2-1-2.2 振動発電デバイス性能まとめ

特性項目	要求値	現　　状
発電量	≧ 100μW	≧ 70μW
出力	AC 出力	AC 出力
最大出力電圧	(60V)	60V
耐温性（保存）	-20～85℃	-40～100℃
耐湿性（保存）	85%	85%
機械寿命	(100 億回)	10 億回を確認
耐衝撃性	2000G	20000G

発電量に関して、要求値に到達していない。また、発電量は特定周波数を外れると急激に低下する特性である。今後、発電量の増加と周波数帯域の拡大が課題である。

c. 耐久性の評価

先導研究では、振動発電デバイスの寿命となる発電量の耐久性の評価を実施した。加速度センサについては、先導研究以前に 85℃85%1000h(10 年相当)の長期信頼性試験を実施した。結果を図①-(1-2-1)-2-1-2.12 に示す。システム全体での耐久性評価については、システム開発を行わないため、本研究での取組課題とする。



図①-(1-2-1)-2-1-2.12　耐久性(キャンパッケージ発電量経時変化)

①-(1-2-1)-2-1-3　データ分析手法の妥当性の評価

主構造材の固有振動数を把握する手法について、道路橋梁を MEMS 加速度センサにより計測したデータの提供を受け、妥当性を検証した。なお、当該実験は舞鶴高専・玉田研究室が当該橋梁において行われた計測実験に付帯して MEMS 加速度センサの性能評価のために実施されたもので、その計測データを活用したものである。

計測対象：物部大橋（京都府綾部市）　鋼鈑桁橋、橋長 32m、径間 16m

計測方法：センサノードを道路側道上に平置き設置し、重錘衝撃起振器で加振して、減衰振動を計測する。主桁下フランジを順次溶断し剛性を順次低下させる。

分析方法:加振時の加速度波形を FFT 分析し卓越周波数を評価する。(図①-(1-2-1)-2-1-3.1～5 参照)

計測性能に関しては、測定結果からは一次モード及びねじれモードと推定される卓越周波数をほぼ毎回把握することができ、要求を満たしている。測定は半日にわたり実施したが乖離することはなく再現性は高かった。橋梁主桁を溶断し損傷を与えることを行ったが、損傷の前後における顕著な変化を把握するには至らなかった。（図①-(1-2-1)-2-1-3.6～10 参照）また、計測中に地震発生があり、その地震動を調査したところ固有周波数を把握できる程度の観測ができていることを確認できた。（図①-(1-2-1)-3-1-3.11～15 参照）計測波形及び FFT スペクトルをみると、低レベル時のノイズ成分が数 gal 程度あり、減衰時の微弱振動が完全には計測できていない。常時微動などの微弱振動を用いた計測から分析を行うには不足する点であり、本格研究への課題となる。

設置性に関しては、設置作業は当該機器を配置し、LAN ケーブル及び AC 給電（発電機を使用）の配線を行うことに 15 分程度を要したのみであり、従来手法に比べ利便性が高いとの評価であった。ただし給電を要する点は配線の手間が多くなるため、内蔵電源もしくは PoE((Power over Ethernet)による LAN 配線からの給電が望ましいとの要望があった。無線化と自律電源化ができればより理想的であることは言うまでもない。

他の要件としては、機器のサイズ、堅牢さ、屋外使用への要望があった。今回は路面上への設置であったが、高欄の隙間、桁フランジ上や補助構上面など幅 10cm 程度のスペースに設置できる小型化が望まれる。堅牢さにおいては、従来のセンサ課題であった耐衝撃性の強化、具体的には設置や移動時における破損の回避が望まれる。設置環境に関しては、通常の橋梁が置かれている環境に等しい耐環境性が求められる。動作温度では-10～70℃の想定は最低限必要であり、寒冷地においてはこれ以下の低温の可能性がある。防水防塵に関しては、道路環境での粉塵、降水降雪時の連続飛沫を想定すると IP64 相当の対策が望まれる。



図①-(1-2-1)-2-1-3-1　物部大橋の概観・下部構造



図①-(1-2-1)-2-1-3.2　重錘衝撃起振器



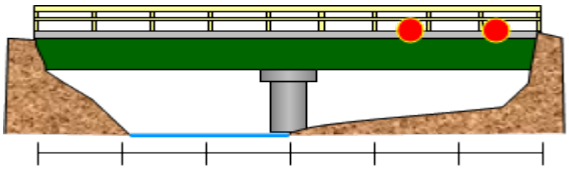


図①-(1-2-1)-2-1-3.3　主桁下フランジの溶断

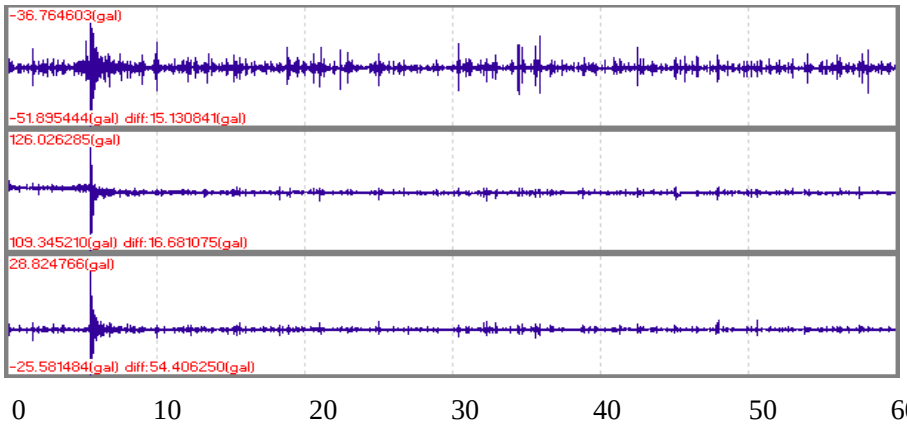




図①-(1-2-1)-2-1-3.4　計測状況、MEMS 加速度センサの配置

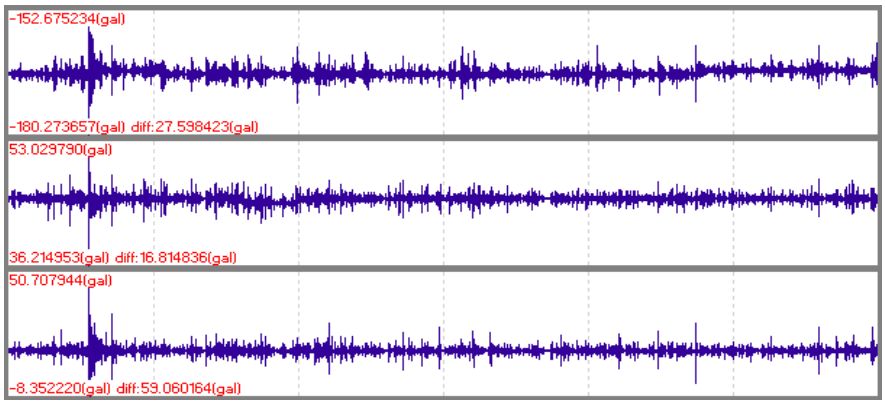


図①-(1-2-1)-2-1-3.5　センサ設置位置



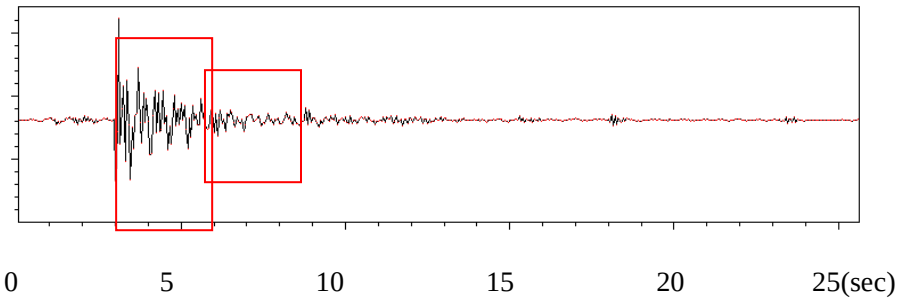
図①-(1-2-1)-2-1-3.6　加速度計測波形

（径間 1/2 位置、上から橋軸、横断、鉛直の各方向、最大値で正規化）

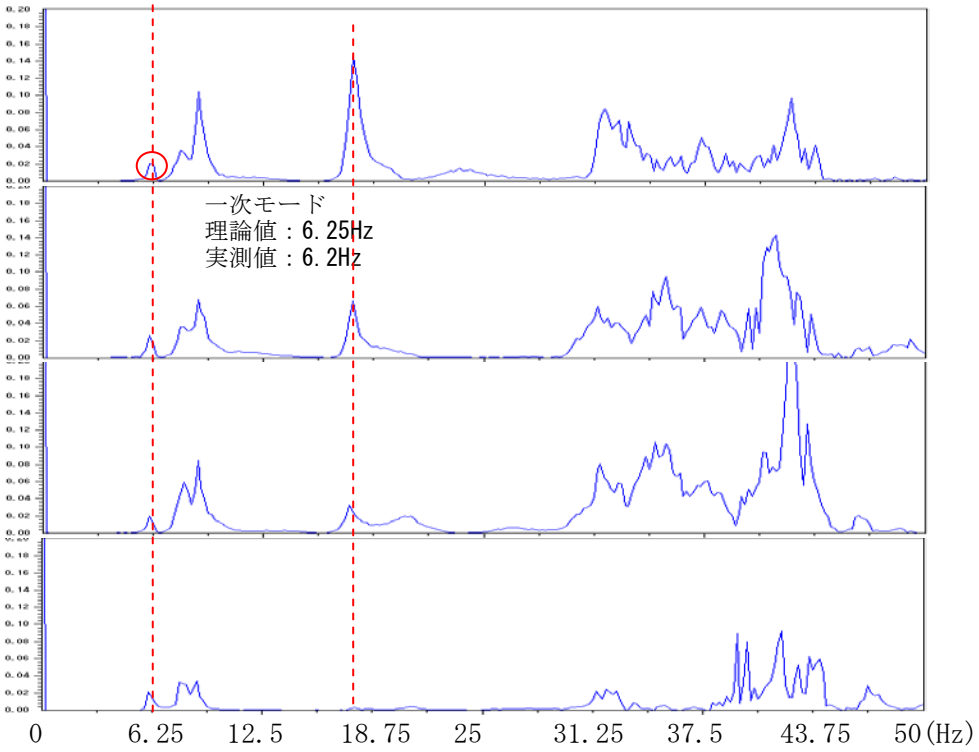


図①-(1-2-1)-2-1-3.7　加速度計測波形

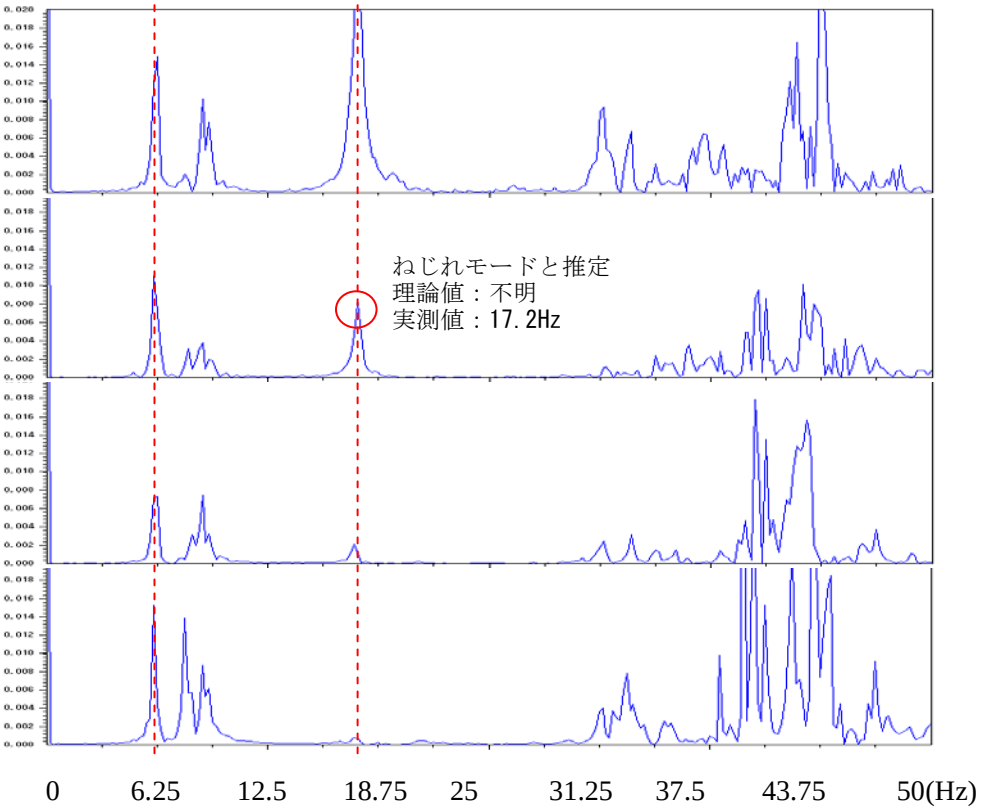
（径間 1/6 位置、上から橋軸、横断、鉛直の各方向、最大値で正規化）



図①-(1-2-1)-2-1-3.8　重錘衝撃起振器の加振による加速度波形（1/2 位置鉛直）



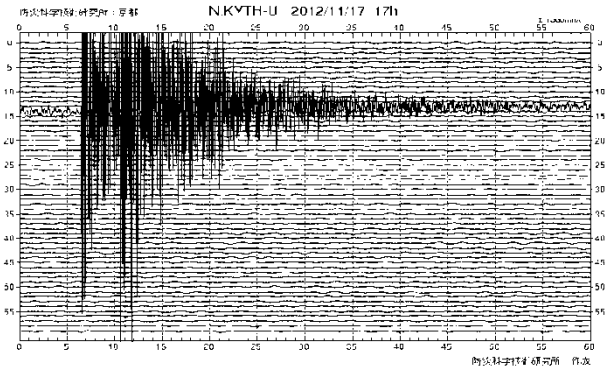
図①-(1-2-1)-2-1-3.9　FFT スペクトル解析結果（加振直後の 2.5 秒）



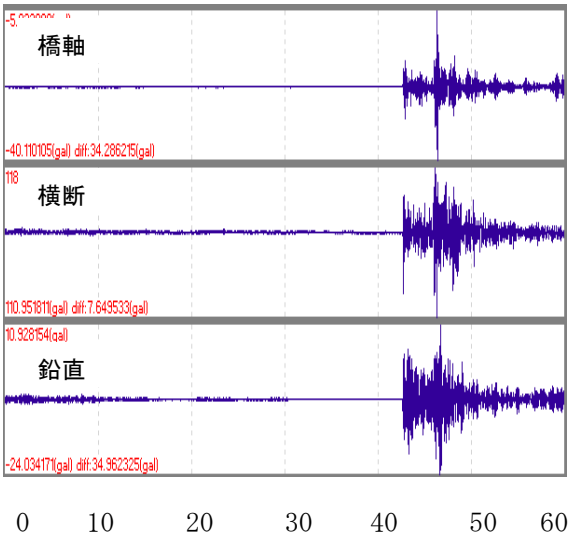
図①-(1-2-1)-2-1-3.10　FFT スペクトル解析結果

（加振後の 2 秒後からの自由減衰 2.5 秒）

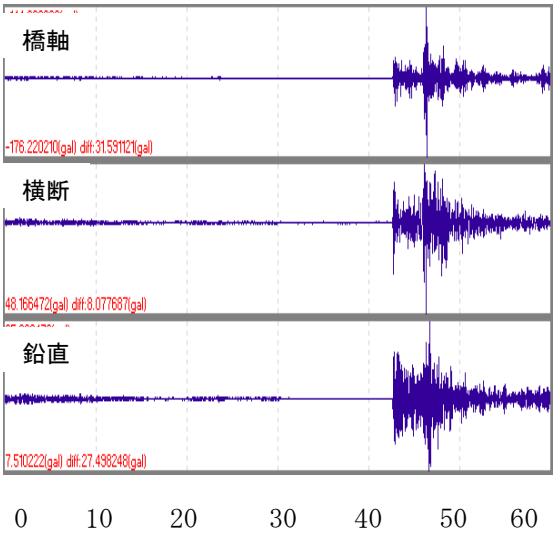




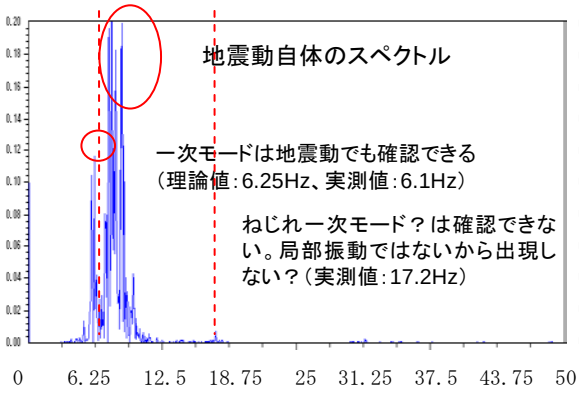
図①-(1-2-1)-2-1-3.11 地震状況及び地震波形（出典:防災科学研究所の高感度地震観測網記録 http://www.hinet.bosai.go.jp/strace/view.php?orgid=01&netid=01&stcd=N.FKCH&tm=2012111717&comp=&pv=1H&LANG=ja）



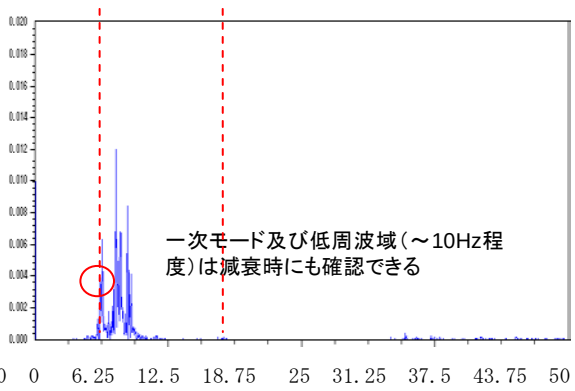
図①-(1-2-1)-2-1-3.12　加速度計測波形図（径間 1/2 位置）



①-(1-2-1)-2-1-3.13　加速度計測波形（径間 1/6 位置）



図①-(1-2-1)-2-1-3.14 FFT 解析結果 (地震波検知 10 秒後から 10 秒間)



図①-(1-2-1)-2-1-3.15FFT 解析結果 (地震波検知から 10 秒間)

①-(1-2-1)-2-1-4　ニーズに関する調査

a. 先行事例調査

橋梁の設計、施工、維持管理に関する情報を収集した。当該分野の主たる学会である土木学会を中心に 2004～2013 年度における橋梁モニタリングに関する論文を探索し、153 件を抽出した。（一部重要な論文は 1980～90 年代のものを含む）これら論文を分析したところ振動、加速度を利用したものは表①-(1-2-1)-2-1-4.1 に示す 28 件あり、これら論文で行われている評価手法からモニタリングシステムの概要、センサの利用方法、技術的な課題と展望について整理を行った。

表①-(1-2-1)-2-1-4.1 振動･加速度を用いた橋梁モニタリング事例

	タイトル	研究機関	対象	橋種	評価項目	使用センサ	加速度計測方法	計測範囲
1	非接触振動計測を用いた既設橋梁の振動特性把握に関する研究	長崎大学大学，九州大学	構造全体	その他	振動，変位	変位，速度	レーザードップラー速度計	不明
2	携帯情報端末を用いた簡易振動測定の試み	東京理科大学	構造全体	鋼橋	振動	加速度	MEMS(iPod内蔵)	5-30gal
3	ニューラルネットワークによるアーチ橋の健全度診断に関する基礎的研究	IHI ｲﾝﾌﾗｼｽﾃﾑ，大阪市立大学，関東学院大学	構造全体	その他	振動		(シミュレーション)	—
4	ロバスト性を考慮した交通振動による橋梁構造物の健全度推定に関する研究	京都大学	構造全体	鋼橋	振動		(モデル)	—
5	固有振動数に着目した鋼橋腹板の腐食損傷簡易評価法	大阪大学	部材(桁)	鋼橋	振動	加速度	不明(ｻｰﾎﾞ型と想定)	不明
6	単純桁橋と車両連成系の起振機実験における応答特性	神戸大学，京都大学	部材(桁)	ｺﾝｸﾘｰﾄ橋	振動	加速度	不明(ｻｰﾎﾞ型，MEMSと想定)	1-20gal
7	鋼・コンクリートポータルラーメン橋（大黒橋）の動的計測	片山ストラテック，大阪市立大学	構造全体	その他	振動，たわみ，ねじれ	変位	レーザー変位計	0.5-20gal
8	コンパクト断面を導入した金谷郷高架橋の実橋振動実験	東京鐵骨橋梁，東日本高速道路	構造全体	鋼橋	振動，たわみ	加速度	不明(サーボ型と想定)	?-5gal
9	空気励起振動するトラス橋梁部材の遠隔計測システムの構築と運用	長崎大学　西川貴文	システム	鋼橋	振動，応力	加速度，ひずみ，風速	不明	不明
10	橋の動特性変化と健全性評価についての提案	舞鶴工業高等専門学校，長岡技術科学大学	構造全体	鋼橋	振動	加速度	サーボ型加速度計	数gal
11	鋼方杖ラーメン橋の固有振動特性評価に関する振動実験と固有振動解析	室蘭工業大学，構研エンジニアリング，釧路工業高等専門学校	構造全体	鋼橋	振動	加速度	サーボ型加速度計	1-5gal
12	異なる振動レベルにおける橋梁模型の振動特性の把握	宇都宮大学，川田工業	部材	鋼橋	振動	加速度	不明(サーボ型と想定)	?-3gal
13	三方向成分に着目した道路橋交通振動モニタリングの検討	神戸大学，京都大学	部材	鋼橋	振動	加速度	不明(サーボ型と想定)	0.1-200gal
14	無線加速度センサを用いた橋梁の3 次元可視化と振動モードの抽出に関する研究	愛媛大学	システム	その他	振動，モード	加速度	MEMS(KXM52-1050)	不明
15	阿波しらさぎ大橋の起振機を用いた桁振動実験	横河ブリッジ，徳島県，本州四国連絡高速道路	構造全体	鋼橋	振動	加速度	サーボ型加速度計	0.2-20gal
16	人道吊橋を対象とした水平加振実験と神経振動子を組み込んだ動的応答解析	近畿大学	範囲限定・部材	吊橋	振動	加速度	(モデル)	—
17	スマートセンサーを用いた人道吊橋の振動特性同定	北見工業大学，国道交通省北海道開発局	構造全体	吊橋	振動，モード	加速度	MEMS(MEMSIC iMOTE2)	不明
18	RC連結ジョイント工法による橋梁や走行車両の応答振動に関する軽減効果	中日本高速道路，中日本ﾊｲｳｪｲ･ｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ名古屋，長岡技科大	部材(ｼﾞｮｲﾝﾄ)	ｺﾝｸﾘｰﾄ橋	振動	加速度	サーボ型加速度計	?-0.2gal
19	跨座型モノレールPC 軌道桁高架橋交通振動の比較	神戸大学，京都大学，大阪府茨木土木事務所，阪急設計ｺﾝｻﾙﾀﾝﾄ	構造全体	ｺﾝｸﾘｰﾄ橋	振動，変位	加速度，画像	不明	1-200gal
20	常時微動・地震動観測による高経年化したアーチダムの動特性（その４）－2011 年東北地方太平洋沖地震時のダムの振動挙動－	宮城大学，電力中央研究所，日本大学，弘前大学	構造全体	その他(ダム)	振動	加速度	地震計	?-600gal
21	既存コンクリート橋梁を対象にした定量的健全度調査法の開発	愛媛大学	構造全体	ｺﾝｸﾘｰﾄ橋	振動	速度	速度計(CR4.5-2S)	速度 ?-1mm/s
22	精密小型加振機を用いて計測された周波数伝達関数時間安定性	東京理科大学	部材(梁)	鋼橋	振動，変位	加速度，変位	MEMS，レーザー変位計	不明
23	精密小型加振機と加速度無線センサによる周波数応答関数の計測精度の実験的検討	東京理科大学	部材(梁)	鋼橋	振動，変位	加速度，変位	MEMS，レーザー変位計	不明
24	単純梁の振動実験に基づく減衰パラメータの推定	東京理科大学	部材(梁)	鋼橋	振動，変位	加速度，変位	MEMS，レーザー変位計	不明
25	圧電素子を用いた橋梁構造物の損傷同定センシングシステムに関する実験的研究	大阪府立大学工業高等専門学校	ｿﾘｭｰｼｮﾝ	その他	振動，ひずみ	加速度，変位	不明	不明
26	中性化による損傷を受けたRC 床板橋の安全性検討	香川高専，徳島大学	部材(床版)	ｺﾝｸﾘｰﾄ橋	振動	振動ｾﾝｻ	サーボ型加速度計	?-2gal
27	表面波を用いた構造物の健全性試験方法の検討	iTECS技術協会，ｱﾌﾟﾗｲﾄﾞﾘｻｰﾁ，大進ｺﾝｻﾙﾀﾝﾄ，東洋計測ﾘｻｰﾁ	部材	ｺﾝｸﾘｰﾄ橋	振動	振動ｾﾝｻ	(モデル)	—
28	表面波トモグラフィによる一面配置型内部損傷可視化技術の開発	飛島建設技術研究所，University of MALAYA，京都大学	部材	ｺﾝｸﾘｰﾄ橋	振動	振動ｾﾝｻ	(モデル)	—

これらの事例から橋梁の健全度を振動特性によって推定する手法としては、主に以下の特性値が用いられることが多い[1)]。

・固有振動数

・減衰率

・振動モード

これらの特性の計測に必要なセンサの性能、計測手法について考察する。

固有振動数に関しては既存橋の実測データから橋梁の基本振動数と径間長の関係[1)]、及び島田式と呼ばれる算定式①-(1-2-1)-2-1-4.1 が知られており、一般的に用いられている。[2)]

$F=86.65\ L^{-0.8869}$　・・・・・式①-(1-2-1)-2-1-4.1

F：固有振動数(Hz)、L：径間長(m)

これらの指標から、中規模（径間長 15～50ｍ）の橋梁の固有振動数はおおよそ 2～10Hz を想定する。また 50m 以上の長大橋梁では、径間長(m)／100 が目安となり、例えば中央径間長 440m の東京ゲートブリッジでは 0.4～0.5Hz となる。

また、個々の計測事例をみると、神戸大学・京都大学による三方向成分に着目した道路橋交通振動モニタリングの検討[3)]では、橋長 62.3m の鋼単純合成箱桁橋において、鉛直方向曲げ一次で 1.5～1.6Hz、ねじれ一次で 5Hz 程度、曲げ二次で 6.6Hz 程度の卓越周波数を計測しており、振動計測がモニタリングに適用できる可能性が示されている。

北見工業大学によるスマートセンサを用いた人道吊橋の振動特性同定[4)]では、支間長 68m の人道用吊橋で固有振動数が 1～5 次モードで 1.27～8.41Hz を、愛媛大学の無線加速度センサを用いた橋梁の 3 次元可視化と振動モードの抽出に関する研究[5)]では、橋長 24m の歩道橋で曲げ 1 次 3.8Hz、3 次 24.7Hz を、JR 東海による列車通過時の残留振動による高架橋健全度評価[6)]では、連続高架橋の列車通過後時の残留振動からの卓越周波数で 2.56～5.30Hz を計測している。

これらの事例から主桁及び構造材の固有振動計測を行う場合、加速度センサの周波数を 0.1～50Hz と設定することは概ね妥当と考える。

固有周波数に比べ顕著な傾向ではないが、損傷の影響が減衰や振動モードに現れる可能性がある。例えば事例として参照している妙高大橋での計測ではたわみ増加のメカニズム解明には、固有周波数の観測だけでなく、高次を含めたモード形の比較、減衰の導出などの動特性を活用することが有効であることが述べられている。これらの計測を検討システムで実現するには、減衰の計測においては、その差異把握に見合う振動計測性能が求められる。具体的には、減衰計測に関しては加速度センサがどの程度の減衰時にまで計測追従できるかが問題となる。通常の重錘加振もしくは車両通過による突入振動が概ね数十~100gal 程度であり、一般的橋梁の減衰定数が 0.003～0.06 にある[1)]から、その 1/100～1/1000 まで、少なくとも 0.1gal の微振動まで追従できることが望ましい。

また振動モードに関しては、モード形状の差異を把握できるだけの計測点密度及び位置が問題となる。一般的な径間 30m 程度の橋梁であれば、自由振動により計測可能な振動モードは３次モード程度までである。これを把握するには、振幅の節／腹となる位置に置き効率的に配置することが望まれる。実施例をみると、径間長さの 1/8 毎に 1/8、1/4、3/8、1/2、5/8、3/4、7/8 の位置に配置する例、一部を間引き 1/8、1/6、1/4、1/3、1/2 の位置もしくは 1/4、1/2、3/4 か 1/6、1/4、1/2 の位置に配置する例が多い。概ね橋軸方向に 3～8 台のセンサを使用するのが一般的である。これに加え、横断方向の振動（ねじれモード）の把握には、横方向にもセンサを置くケースがある。多くは横断方向に 2 台を配するので、台数は 2 倍となることが多い。

モードの把握に関しては、個々のセンサの計測時刻の同期が必要となる。その精度は、100～200Hz の想定サンプリング周期から勘案して 1ms 以上が望まれる。

b. 主な先行事例

i) BRIMOS: BRIdge MOnitoring System

NTT データ㈱は、東京工業大学、横浜国立大学、首都高速道路㈱と共同で、道路橋に発生した異常を、継続的かつリアルタイムに検知するモニタリングシステム（BRIMOS: BRIdge MOnitoring System） を開発し、実橋梁での実証を行っている。この実証では道路橋に設置した光ファイバセンサから橋桁及び橋脚の段差、間隔、振動、傾斜などのデータを連続的かつ継続的に収集し、解析することで道路橋の異常や損傷の検知が試みられている。その中で橋桁の固有振動を長期にわたり監視し、温度収縮のような平常変動と異常な傾向を示す変動の見極めに有用な情報としている。また災害発生時にも継続して計測が可能となるように耐久性の高い電源系統や通信ネットワーク、センタ設備が採用されている [7)~9)]。

当該システムでは、光ファイバ自体をセンサとして利用する FBG 光ファイバセンサを用いてひずみ、変位、傾斜などを計測している。単独のセンサだけではなく、橋梁の様々な箇所に設置された複数のセンサデータを組み合わせて総合的に分析が行われている。複数センサを総合的にみて、単独のセンサで発生した異常データが他のセンサでも発生しているか、どれくらいの遅延があるかなどをリアルタイムに分析することにより、単なるセンサ異常なのか、橋梁全体が揺れているのかを識別し、異常が生じている状態を抽出している。

これらの実証により、平常時と異常時の両方に利用可能な橋梁遠隔監視システムの可能性が検証されているが、光ファイバを用いることから以下の課題がある。

・計測システムのコストが高いため、ある程度の規模異常でないと投資対効果が見込

めない。

・ファイバを線的に敷設するため施工の手間が大きい。

・断線に対するフェールセーフが困難

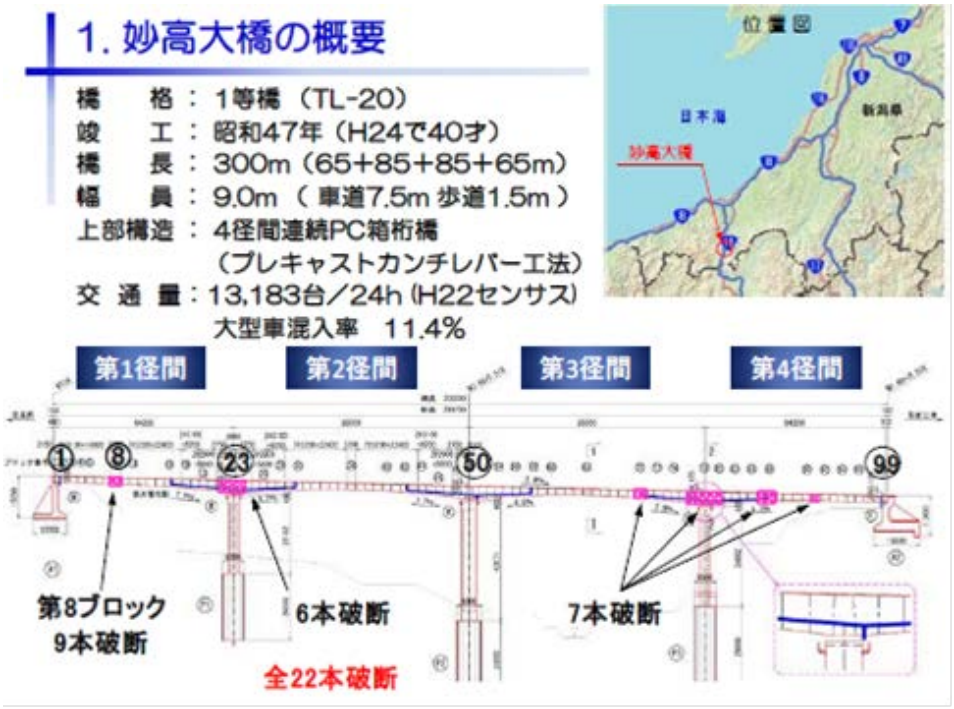
これらの課題に対し、コスト、設置性、通信の安定を解決できる無線センサネットワークによる解決は有効と思われる。ただし、ひずみ、傾斜、変位挙動などの性能は光ファイバ方式に相当するセンサ技術の確立が課題となる。

ii) 妙高大橋

新潟県の国道 18 号線妙高大橋（4 径間連続 PC 箱桁橋）では定期点検で PC ケーブルの破断が発見され補修を行い供用が継続されている。橋梁本体の架替えが計画されているが施工には長い時間がかかるためセンサを使用したモニタリングにより管理強化をすることで異変を常時観測している。（図①-(1-2-1)-2-1-4.1 参照）

道路管理者である国土交通省北陸地方整備局の監視システムでは、目地変位（亀裂変位計）、橋桁のたわみ（水管式沈下計）、補強ケーブル張力、温湿度を自動計測している。（図①-(1-2-1)-2-1-4.2～4 参照）[10)]

また、横浜国立大学の西尾准教授、長岡科学技術大学の宮下准教授のグループにより橋梁振動や音響を用いたモニタリングが試みられている。ケーブル補強などの補修工事前後に通過車両による自由減衰振動を計測し比較分析が行われた。剛性低下が固有振動スペクトルに影響すると考えられるが、ピーク周波数の顕著な変化はないものの各ピークのパワー大小が逆転する変化が観測されている。またモード形の比較、減衰の導出による動特性の変化把握の可能性が示されている。 （図①-(1-2-1)-2-1-4.5～6 参照）[11)]

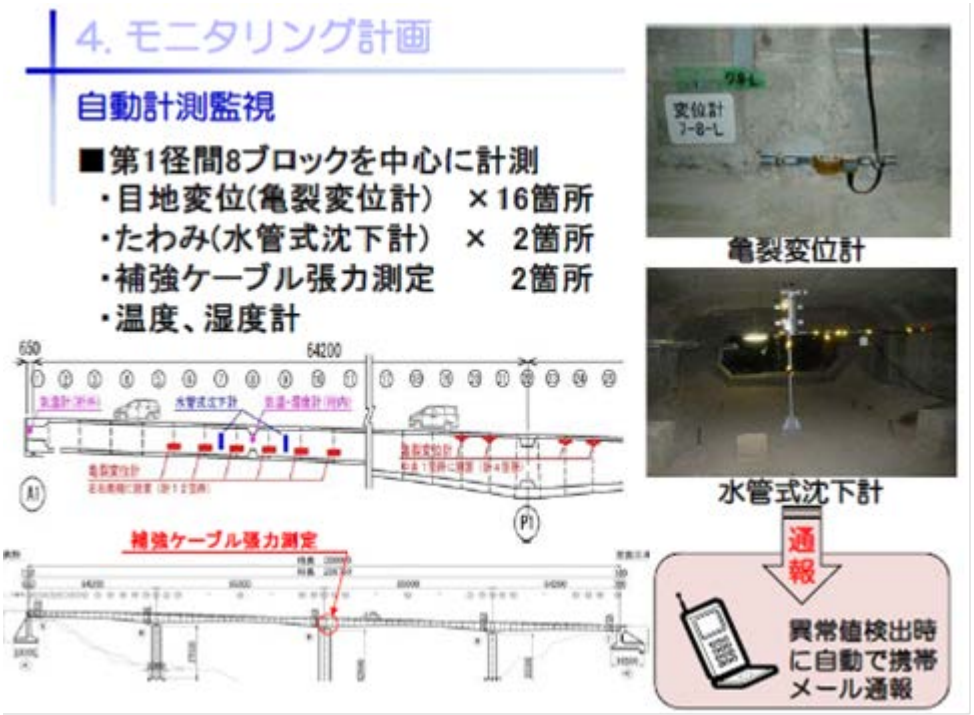


図①-(1-2-1)-2-1-4.1　妙高大橋及び損傷の状況 [10)]

4. モニタリング計画

モニタリング内容		測定位置	測定間隔
自動計測	目地変位（亀裂変位計/支間部）	第1径間12箇所	10分
	目地変位（亀裂変位計/支点部）	P1支点上4箇所	
	たわみ（水管式沈下計）	第1径間 2箇所	
	補強ケーブル張力	P2支点2箇所	
	温度	桁内・桁外2箇所	
	湿度	桁内1箇所	
ＰＣケーブル内視鏡追跡調査		全　体	適時
載荷試験		第1, 4径間	適時
回転灯装置		第1径間	常時
ＣＣＴＶ監視		全　体	常時

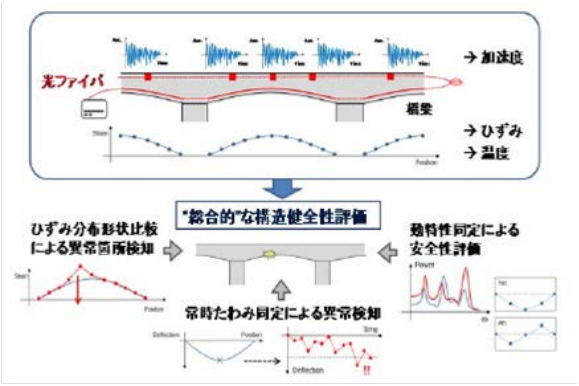
このほか日常パトロール，橋梁定期点検，地震時（震度３）の異常時点検等を実施



図①-(1-2-1)-2-1-4.5　妙高大橋のモニタリング計画 [10)]



図①-(1-2-1)-2-1-4.3 妙高大橋の管理基準 [10)]

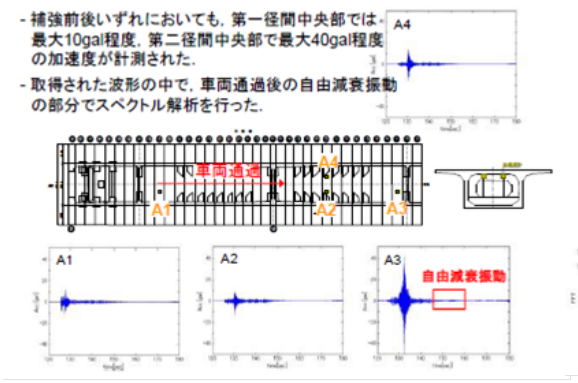


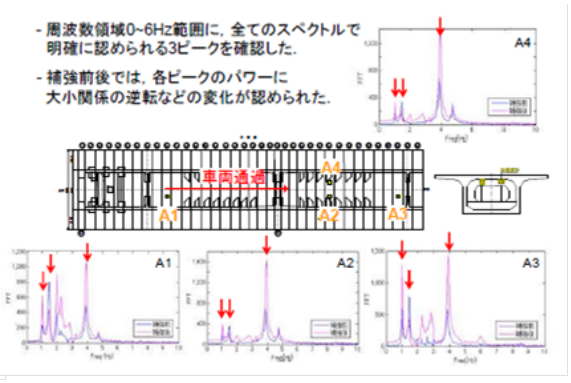
図①-(1-2-1)-2-1-4.4 妙高大橋の光ﾌｧｲﾊﾞ計測 [10)]





図①-(1-2-1)-2-1-4.5　計測システム及びセンサの状況 [11)]





図①-(1-2-1)-2-1-4.6　振動計測による補修工事前後の比較 [11)]

iii)　Bridge Health Monitoring Systems in Hong Kong

香港特別区の高速道路公社では橋梁 Tsing Ma Bridge、 Kap Shui Mun Bridges & Ting Kau Bridge の 3 橋において Wind And Structural Health Monitoring System（WASHMS）と呼ばれるモニタリングシステムが稼動している。加速度センサの利用としては、吊橋・斜張橋であるこれら橋梁のメインケーブル、防振ケーブルなどの振動を加速度センサで、また通過車両や列車の加重による変形や歪みを変位計もしくは張力計などで計測することで、加重による疲労や風の影響を継続的にモニタリングしている[12)]。

計測対象である橋梁が長大橋であるため長周期の振動が卓越しており風による常時振動は 1Hz を下回る。このため低周波域での計測性能が求められており加速度センサの低周波性能の目安となる。また構造体の変形状態を観測するため計測システムのデータ収集系は大掛かりなものとなっているが、センサノードの時刻同期により簡便化できる可能性がある。

このようなシステムを軽量化し設置性を容易にできれば、一般の橋梁にも展開できる可能性がある。

iv)　東海道新幹線富士川橋梁

東海旅客鉄道会社では、橋脚の洗掘状況を計測・把握できる装置を開発し、運用を行っている。河川にかかる橋梁では、増水時に橋脚の周りの地盤が掘られる洗掘と呼ばれる現象が起こり、橋脚の強度が低下する恐れがある。東海道新幹線の一部の橋梁では洗掘の深さを推定するため水位を基準とした運転規制値を設けている。しかし水位によって一律に規制しているため天候が回復して実際に橋脚の健全度に問題がなくても、運転規制を解除できず運行再開が遅れるという問題があった。

これを解決する手段として、規制水位を下回らない時点でも安全を確認するために、橋脚に設置した自動衝撃振動装置と加速度センサにより橋脚の固有振動数を測ることで、橋脚の洗掘の程度を判定するシステムを稼動させている。

ここでは高精度の加速度計測が必要なため固定型のサーボ式加速度センサが用いられており、常時通電可能な環境下での稼動であるが、同様の監視システムが一般の橋梁においても橋脚の健全度を把握する手段として可能性がある。そのためには、加振装置を必要としない常時微動での計測の実現、商用電源を必要としない給電方法の確立、機器・システム及び通信手段の低廉化などが課題となるであろう。

c. ユーザ、研究機関の研究開発動向調査

上記調査に加えユーザとなりうる道路維持管理者、当該関連技術の研究開発を行っている機関に対して橋梁点検の実態、モニタリングシステム実現の可能性、関連技術開発におけるセンサ･モニタリングシステムに関する期待事項を調査し、設定目標に関する確認を行った。

i) NEXCO 東日本

日時　　平成 25 年 10 月 25 日（木）13:30～15:30

場所　　本社

出席者　NEXCO 東日本　管理事業本部　施設部　狩野雄一　調査役

同　管理事業本部　管理事業計画課　松坂敏博　課長

同　管理事業本部　管理事業統括課　久保竜志　課長代理

同　管理事業本部　管理事業計画課　矢崎敏之　課長代理

同　管理事業本部　施設部　施設計画課　大越秀治　課長代理

同　建設・技術本部　技術・環境部　技術企画課　水口和之　課長

同　建設・技術本部　技術・環境部　技術企画課　広瀬剛　課長代理

同　管理事業本部　管理事業計画課　梅澤元樹　係長

同　管理事業本部　SMH 推進 T　木村信隆　係長

同　管理事業本部　SMH 推進 T　五十嵐裕貴

（株）ネクスコ東日本エンジニアリング　開発部　松村英嗣　副部長

国内最大の高速道路会社である NEXCO 東日本で道路メンテナンスの高度化を推進すべく「スマートメンテナンスハイウェイ（SMH:Smart Maintenance Highway）」構想を策定し実現に向けた取り組みを行っている。本検討における橋梁モニタリングの高度化も想定されておりその概要を把握すべくヒアリングに参画した。また、SMH 構想に先駆け㈱ネクスコ東日本エンジニアリングにおいて取り組まれてきた、ICT を活用した道路モニタリングシステム「夢シス」においても類似の検討がされており参考とした。

ヒアリングの結果、橋梁維持管理におけるモニタリングシステムについては以下のような意見を頂いた。

【定期点検における費用、工数、予算規模】

土木構造物の点検：39 億、施設設備の点検：66 億

【点検において特に重視している項目】

表面上の状態だけでなく、異常の潜んでいる根本原因、異常に至ったプロセスを把握することが大事である。これをわからずに対策しても再発し根本解決にならない。これを見極められる能力が求められる。橋などの点検では、構造を知り脆弱な部分を理解していることが必要である。闇雲に見るのではなく本当に重要な部位をしっかり見ることが大事である。

【今後改善したい項目】

見えにくい場所、アクセスしにくい場所への対応が必要である。例えば足場や高所作業車では届かない場所が、どうしても生じる。こういった箇所で見逃しがないようにしたい。

点検マニュアル、トレーニングによりスキルアップを図っている。ベテランとの差が出ることは起こる。これを改善できるよう現場で過去の事例写真を検索提示して判定を支援するシステムを東京大学と共同研究している。

【モニタリングシステムで実現したい事】

SMH 構想を持っている。多くは構想の段階であり一部を実証評価している。先ずデータを蓄積している段階である。

予測による判定を行いたい。塩害では劣化の進行推定曲線があり計測によって残存性能が評価できる。

【どのような検査機器を使っている？これらへの要望は？】

現在行っているのは、のり面盛土の崩落モニタリングセンサを設置して事務所単位で危険箇所を監視している。加速度（振動）やひずみセンサを用いている例は今のところない。劣化で基本周波数が変化するはずだが、顕著な低下が起こるのは相当にひどくなってからだろう。絶対値ではなく日常観察の中で変化を予兆として捉えられないか。

振動に関しては、加速度（振動）やひずみセンサを用いている例はない。クラックなどにより全体剛性が低下すると基本周波数が変化するはずだが、顕著な低下が起こるのは相当に損傷がひどくなってからである。絶対値ではなくこれらの値が日常観察の中で顕著に変化して、これを何かの予兆として判定できれば使えるのではないか。

【精度、寿命、耐環境性能、強度などへの要望は】

概ね 10 年以上の耐用は求められる。耐環境に関しては寒冷地が多く 30℃のケースも想定される。電源に関しては、路側に電源線があるので原則は給電可能である。配線困

難な場所にはソーラーを使う場合もある。

ii) 首都高速道路㈱

日時　平成 25 年 11 月 29 日（金）　13:30～15:30

場所　首都高速道路㈱　本社ビル　7 階

出席者　保全･交通部　点検･保全計画課　今村幸一 課長、齊藤一成 部長代理

技術コンサルティング部　吉崎龍太郎 課長代理

首都圏の高速道路会社である首都高速道路（株）では、約 300km の営業路線があり、東京 23 区内の交通量の 15%、走行台キロ･貨物輸送では 30%を占める重要ライフラインである。路線のうち 90km が昭和 45 年以前の建設でその維持管理は重要な課題である。ヒアリングでは特に重要とされる 2 つの課題を議論した。

課題①：高齢化の進展、過酷な使用状況による損傷の増加

総延長 300km のうち 3 割にあたる 90km が経過年数 40 年以上、5 割にあたる 140km が 30 年以上であり高齢化が進展している。しかも橋梁（高架）やトンネルなどの構造物比率が 95%と高く維持管理に多大な手間がかかっている。橋梁数は鋼橋 6200 橋、コンクリート橋 1700 橋、橋脚数はコンクリート橋脚 5800 基、鋼製橋脚 2900 基にのぼる。また、通行する車両のうち大型車交通量が一般道に比べ 5 倍であり、床版の設計荷重である軸重 10 トンを超える過積載車両が数多く通行し損傷を増加させている。一説には構造物の疲労は加重の 4 乗に比例するとも言われている。このような環境下にあって維持管理の手間は年々増加している。

これらの課題に対して、不具合のリスクや耐用年数に応じた点検方法･間隔を設定実施し、緊急度に応じた即応性の高い補修が行われている。また計画的な補修、定期更新、予防保全観点での補修も行われている。これらの点検補修の実績を確実に記録するため保全情報管理システム(MEMTIS)が運用されている。

課題②：維持管理上の課題

限られた用地や厳しい建設条件といった都市高速の抱える問題から、維持管理における様々な制約が生じている。用地条件や構造の制約から密閉構造、狭隘部、土中／水中の構造物などがあり接近目視点検を困難にしている。また直下の通行車両、通行人への第 3 者被害防止の安全対策として遮音壁、内外装板、裏面板なども点検を困難にしている。鉄道や河川との交差部においては、近接作業自体の制約が大きくなる。

これらの課題に対し、点検のための新技術の検討、導入が数多く進められている。この中から加速度、振動センサ技術を適用する事例を示す。

【簡易式高所転換用打音診断システム】

機械足場やバケット車が設置できない狭隘部のコンクリート構造物のたたき点検を行う。ポールに取り付けた打撃機器で打撃を与え打撃音をセンサで検知し波形を分析する。

【鋼床版 Semi-Automatic UT】

鋼床版 U リブに発生する亀裂を超音波で探傷する。短触子(センサ部)の移動をスライド操作のみとすることで位置把握を自動化している。超音波センサを使用している。

【衝撃弾性波による内部欠陥の測定】

ハンマなどの打撃により弾性波を発生させ、受振子で捉えた反射エコーや伝播波の速度、周波数、位相などを分析することで、内部の欠陥有無や欠陥の位置を測定する。振動センサを使用している。

ヒアリングの結果、橋梁維持管理におけるモニタリングシステムについては以下のような意見を頂いた。

【固有振動数による診断の取り組み】

民間会社と行っているが途中段階である。地震時の挙動観測には期待できるが、課題は長期の進展が可視化できるかである。5 年に 1 回でも近づけないところがあり、異常が発生したら知らせてもらえたら非常にありがたい。

【センサの設置について】

土木構造物と同様の耐久性、取り付けしやすさが重要である。センサのための点検はしたくない。現状でも大量の付属物があって、管理をしていかないといけないという現状がある。いかなるものでも落下してはダメである。接着しても永久に固定したい。例えば塗膜でも落下すると苦情が来る。苦情が来たら第 3 者被害となる。何かが落ちるという恐れをいただかせてはいけない。設置物が、怪我をさせないほど軽い、と言うことには意味がある。自立電源は魅力である。

【センサは災害時の点検代替になりうるか】

昔は検討したが、結局、人が見ないと、という話になってしまった。点検は路面や支承だけでなく付帯設備全般を見る必要があり目視にならざるを得ない。

支承の周りに付属物が多くなり、支承がどんどん点検しづらくなっている。そのため、センサによる点検ニーズがあると考える。耐震基準が変わる毎に支承に付属物が増える。例えば変位制限、落橋防止装置など。

地震の時には挙動が特に複雑であり、3 次元の挙動がわかればありがたい。

【その他のセンシングニーズ】

旧式のポールは応力集中での破損事例があり対策している。これをモニタリングできると点検負担が減る。柱点検は車線規制を伴うため大変であり、夜間しかできないので、センサ化のメリットが見込める。

固定物の緩み(ボルト)を検知できないか。河川上や鉄道交差部の点検で苦労している。照明柱など、製品として MEMS を入れて販売したら良いのではないか。振動系が単純であり、その一方で単柱や標識は数が多いから点検するのも大変である。最初からセンサが付いていれば楽だと思う。

特に点検が難しいところにセンサを設置して、異常を知らせて欲しい。

iii)　土木研究所

日時　　平成 25 年 12 月 5 日（木）　10:00～12:00

場所　　技術研究組合 NMEMS 技術研究機構　新テクノサロン A、B

出席者　独立行政法人 土木研究所　構造物メンテナンス研究センター

　　木村嘉富 上席研究員

国土交通省が主管である土木研究所では、今後の社会インフラの高齢化に向けて土木構造物の保全技術の中核的研究機関として平成 20 年に構造物メンテナンス研究センター(CAESAR)を設立した。その活動は

・現場の支援　：課題のある橋梁の診断、処方、蓄積されて知見の提供、技術移転

・研究開発　　：臨床研究に基づき現場活用できる技術の開発

・情報交流の場：最先端の技術情報が集まり交流発信できる場の設定

などである。ヒアリングでは主席研究員である木村氏より橋梁維持管理の状況と異業種技術応用の必要性について議論した。以下要約する（図①-(1-2-1)2-1-4.7～11 参照）。

【ICT、センサ技術活用の可能性】

国交省の中でもITを活用しよう、使ってみましょう、という話はある。20%の道路構造物にセンサをつけようという方針があるが、母数は省庁で異なる。対策をしたあと、フォローアップについても、モニタリングに期待する。特に、再劣化の監視に有望と思う。逆に言えば、何も情報が無いところから橋をいろいろモニタリングして、劣化している橋を見つけるのが難しい状況である。国交省のモニタリング委員会でモニタリングの公募が始まるので、そちらでも取り組んでもらいたい。

【加速度センシングについて】

橋桁の健全性をモニタリングができるかというと難しいというのが私見である。つまり、局所的な損傷をしても、剛性が変わるまでに至らないから。剛性が劣化しても固有周波数は数%しか変わらない。コンクリート橋では一般的だと思う。PCだと出にくい。

PCワイヤの場合、剛性の劣化の影響は出にくく、大きく振動が変わることはない。高次モード（2〜3次）の変化に現れる可能性はある。震災で被害にあった水門の例を見ると、3次のモードだけ変化が出ている例がある。高次のモードを取らないと局所的な損傷がとれない。温度の影響も考慮が必要である。

【センサへの要求要件】

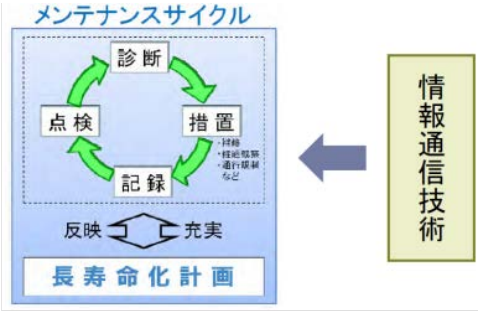
寿命：センサ自体の寿命ではなくモニタリングの寿命で考えるべきでは？　モニタリングの目的に応じてセンシングの方法は異なる。いつまで測る必要があるのかで変わってくる。例えば鉄道なら10年で詳細点検し塗装も変えるので、この周期で更新できる。

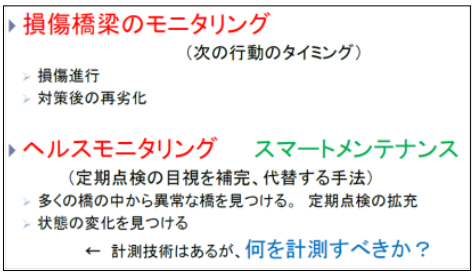
電源：主要国道であれば光ファイバ網も整備されており電源利用は可能である。地方道では考慮が必要である。電気防食の電源をソーラーパネルで確保している事例がある。

取付け方法：接着剤が多いのではないか。コンクリであればかぶりへの打ち込みは可能である。鉄筋を避ければ内部への打ち込みも可能である。

【災害時のセンサ活用について】

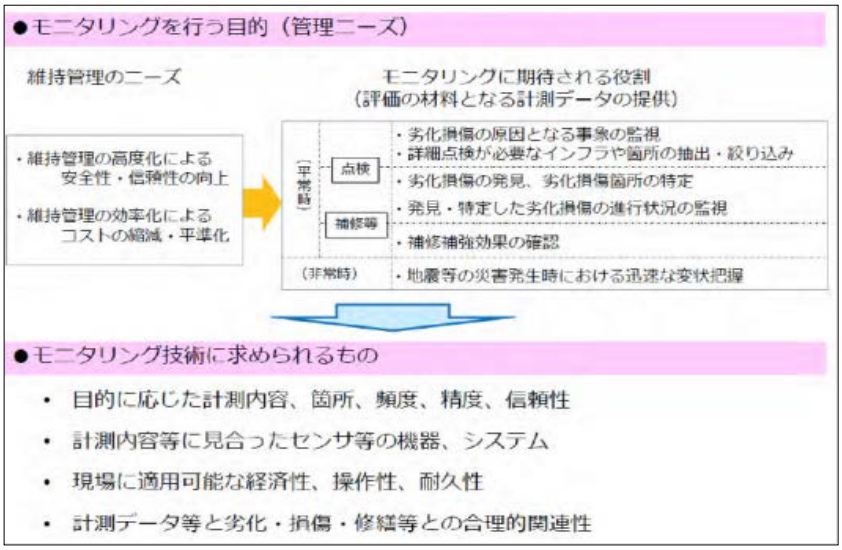
応答、塑性伝達の変化により判定可能では？　早期の安全性確認へのニーズはある。ただしセンサの信頼性が重要で、地震のときの壊れてはならない。





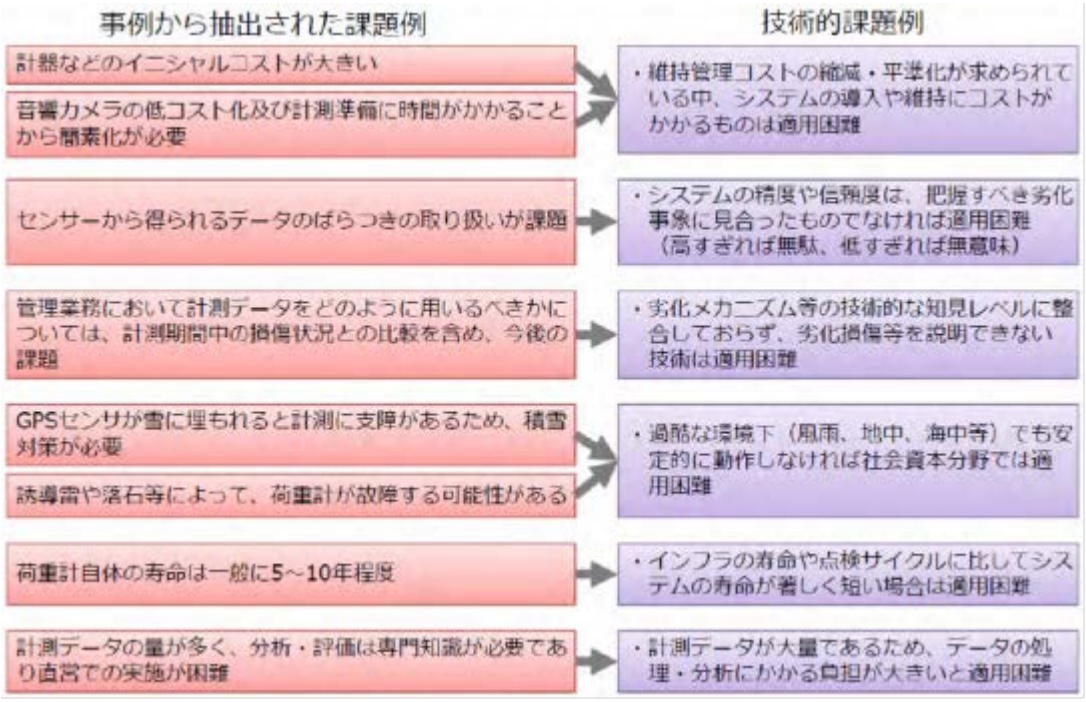
図①-(1-2-1)-2-1-4.7 道路ﾒﾝﾃﾅﾝｽｻｲｸﾙ構築　図①-(1-2-1)-2-1-4.8 モニタリングの位置づけ

（出典：国土交通省道路ﾒﾝﾃﾅﾝｽ技術小委員会第 4 回、2013 年 5 月 13 日、資料 2 p.1 図版）



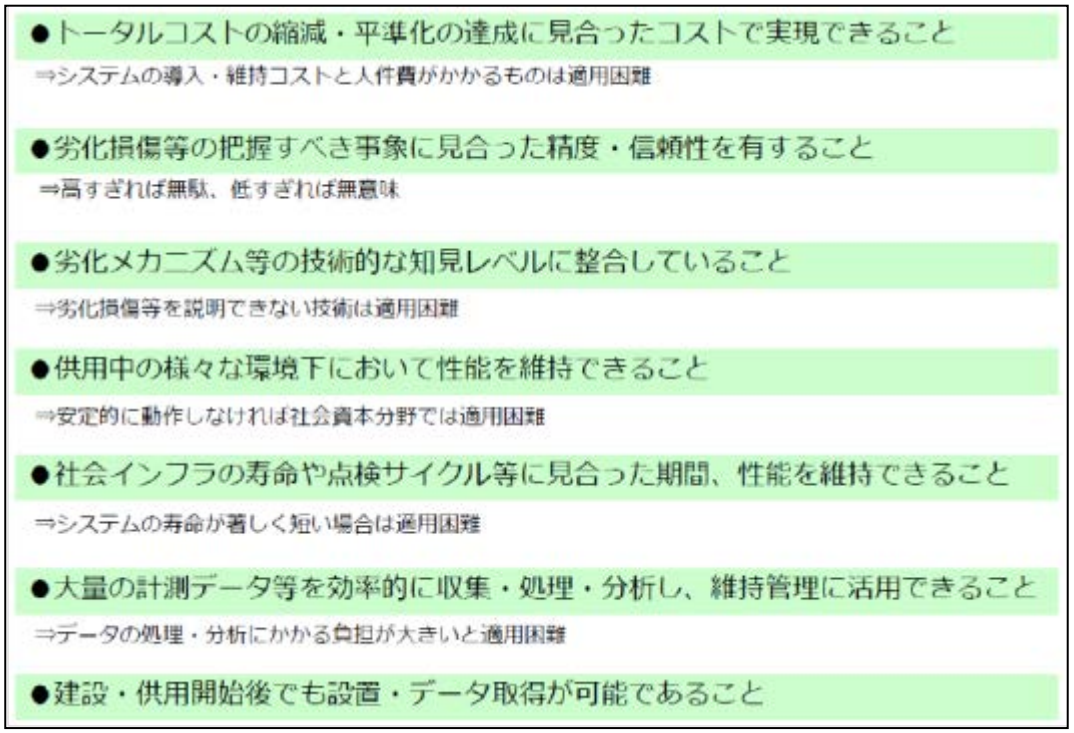
図①-(1-2-1)-2-1-4.9　モニタリング技術活用にあたっての論点

（出典：国土交通省社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会第 1 回、平成 25 年 10 月 18 日、資料 5 p.3 図版）



図①-(1-2-1)-2-1-4.10　モニタリングシステムの技術的課題

（出典：国土交通省社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会第 1 回、平成 25 年 10 月 18 日、資料 3 p.14 図版）



図①-(1-2-1)-2-1-4.11　モニタリング技術の現場適用にあたって備わるべき要件

（出典：国土交通省社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会第 1 回、平成 25 年 10 月 18 日、資料 5　p.4 図版）

iv)　横浜国立大学

日時　　平成 25 年 12 月 5 日（木）　10:00～12:00

場所　　技術研究組合 NMEMS 技術研究機構　新テクノサロン A、B

出席者　横浜国立大学 大学院都市イノベーション研究院　西尾真由子 准教授

橋梁モニタリングに関する研究実績を持たれている横浜国立大学の西尾准教授から橋梁モニタリングのためのデータマネジメント及び常時・継続モニタリングのニーズヒアリングを行った。議論の概要を示す。図①-(1-2-1)-2-1-4.12～18 参照。

【加速度センシングについて】

構造体の固有振動（1~3 次モード、場合によっては 5～6 次モードを含む低次全体モード）を計測するのが一般的である。計測の精度は、対象とする振動に応じて高低があるが、最も高い精度の場合は振幅で数 gal、分解能で 1/10～1/100gal が求められる。

対応周波数は概ね 2～50 Hz。センサのサンプリング周波数は 500Hz なども使う。長大橋の場合は 1Hz 以下もあるが一般ではない。サーボを使う。径間 30m 程度の橋であれば 1～5Hz に 1 次モードがあるのでこれをカバーできれば良いので DC まで必要ではない。

卓越周波数単独で判断することは難しい。振動特性が局所損傷を捕らえることは困難である。例えば温度による変化は 30 度で数%変化するが、これは剛性が 1 割低下した場合の変化より大きい。温度の影響も把握することが必要である。10 数年前にロスアラモス研の研究で一部鋼材の 3/4 を欠損させても数%の変化に留まるといった事例もある。

個々の部材近傍や境界条件で判定は可能だが多くのセンサが必要なので、全体挙動＋損傷しやすい箇所の局所挙動　の両面を同時に観測すべきではないか。

自然振動であれば～３次モード程度までが限界なので、これを超える想定は不要と思う。橋を高次モードで計測するには加振方法を研究する必要があり、そこまでの必要は感じない。よってセンサの設置場所は、概ね端部、1/4、1/2、3/4 の計測でいいのではないか。

個々の部材近傍や境界条件で判定は可能だが多くのセンサが必要である。局所的な挙動（＝計測すべき箇所は分かっている）と、全体挙動を一緒に見ていくべきではないか、という学会での意見がでている。

【環境因子の計測】

温度は必ず影響するのでセンサには必ず必要である。全体ではなく網羅的に把握する

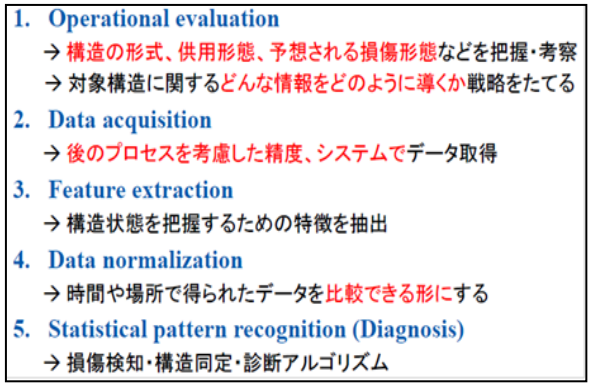
ことも必要である。例えば日照箇所の差、径間毎の差が影響してくる。他に湿度･湿潤はコンクリートの特性に影響する。降雪状態が重量や湿度として影響してくるケースもある。

【モニタリングシステムの要件】

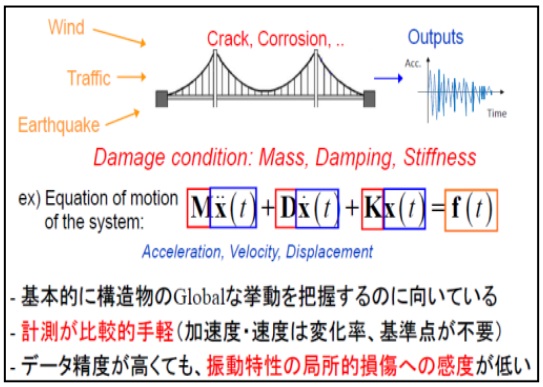
ヘルスモニタリングを実用化するには特徴量の抽出、指標化、推定手法の確立が必要である。データ取得～特徴抽出の事例は多いが、最終的な損傷検知、診断に到達した事例はない。無線システムは今のところ使っていないが今後は使ってみたい。ただし時刻の同期が重要である。100Hz 程度の分析を行うので ms 程度の同期精度は欲しい。

【設置方法について】

簡易な設置方法が必要である。メタルの場合はマグネットで問題ない。コンクリートであればかぶりにアンカーを打って固定しても良い。かぶりは 3~5ｃｍあるので小型なら大丈夫、強度に影響はない。

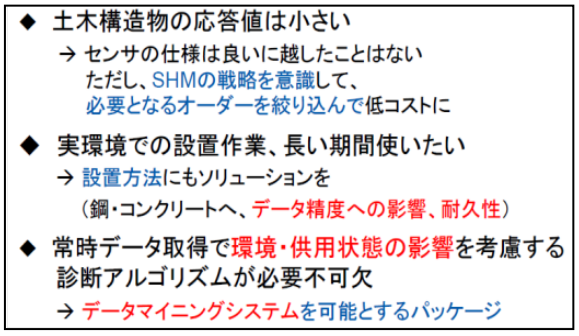


図①-(1-2-1)-2-1-4.12　構造ﾍﾙｽﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞ流れ

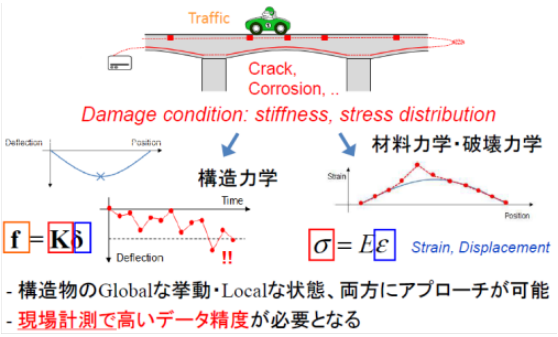


図①-(1-2-1)-2-1-4.13 橋梁ﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞ動的応答

（出典：西尾先生ヒアリング、NMEMS 講演資料、2013 年 11 月 29 日、 p.3、11 図版）



図①-(1-2-1)-2-1-4.14 ﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞの計測ｼｽﾃﾑ



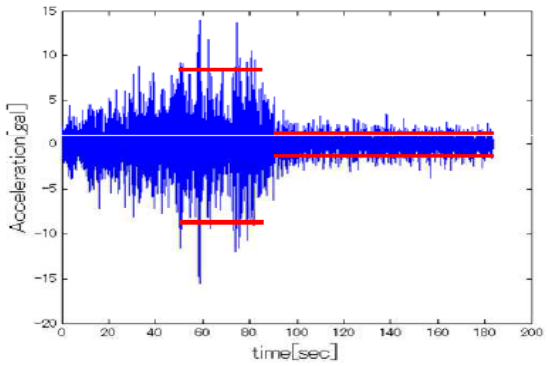
図①-(1-2-1)-2-1-4.15 橋梁ﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞ静的応答

（出典：西尾先生ヒアリング、NMEMS 講演資料、2013 年 11 月 29 日、 p.38、12 図版）



図①-(1-2-1)-2-1-4.16　吊橋の加振実験（ベトナム Thuan Phuoc 橋）

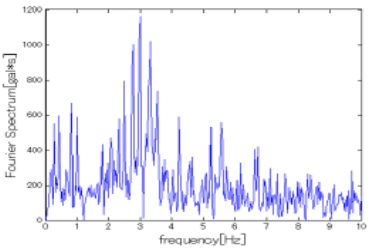
（出典：西尾先生ヒアリング、NMEMS 講演資料、2013 年 11 月 29 日、 p.15、17 図版）





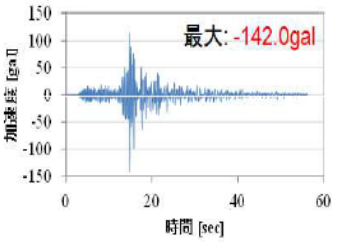
トラックでの加振

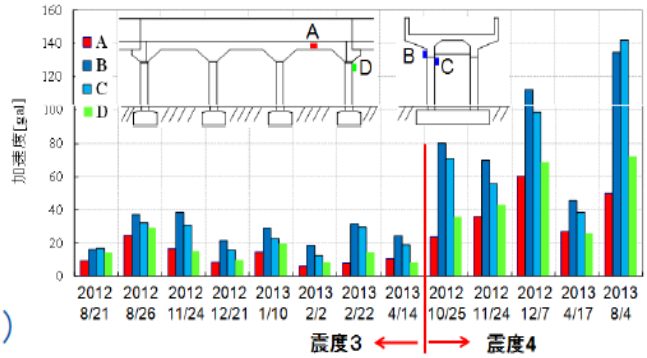
FFT



10gal弱RMSに対して
±2gal程度のノイズ

- 地震発生時データからの振動特性比較(現時点では最大加速度)





- タイミングは不確定
- 入力依存性(非線形)
- 非定常性

鉄道高架橋の振動計測

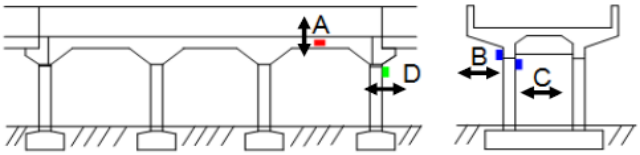
対象橋梁

形式: 連続ラーメン高架橋のうち1スパン

計測

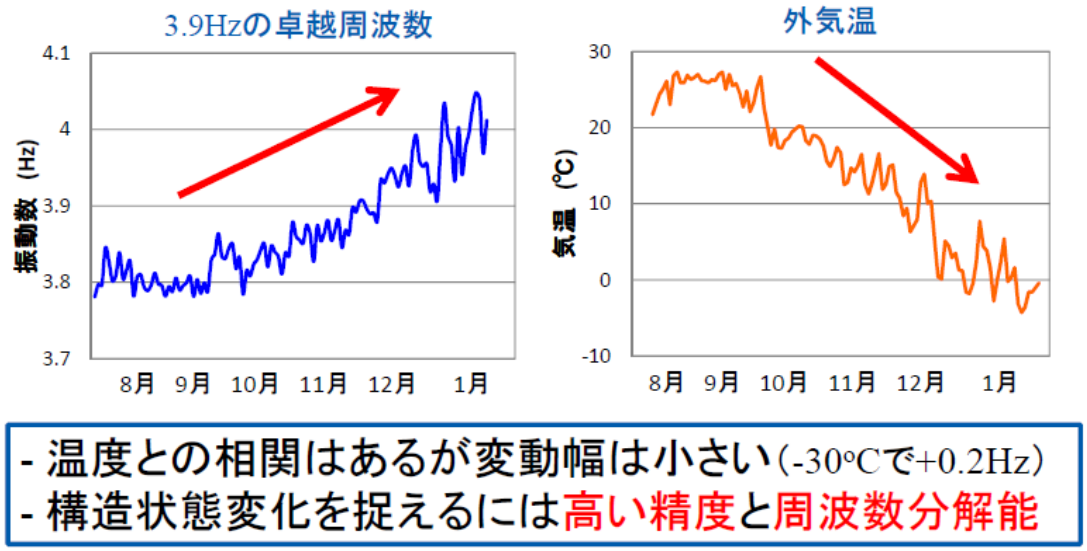
目的　: 振動特性によるモニタリング検討
センサ: 加速度センサ4台(0.01gal分解能)
項目　: 定時列車通行時の加速度計測＋
　　地震時トリガ計測





図①-(1-2-1)-2-1-4.17　鉄道高架橋の振動計測

(出典：西尾先生ヒアリング、NMEMS 講演資料、2013 年 11 月 29 日、 p.23、27 図版)



図①-(1-2-1)-2-1-4.18　道路橋の常時振動特性モニタリング

（出典：西尾先生ヒアリング、NMEMS 講演資料、2013 年 11 月 29 日、 p.32、33 図版）

v) 舞鶴高等専門学校

日時　平成 26 年 1 月 7 日（日）　10:00～12:00

場所　舞鶴高等専門学校　会議室

出席者　舞鶴高等専門学校　建設システム工学科　玉田 教授

高速道路や都市部道路とは異なる環境が想定される地方道路での維持管理の実態を把握するため、京都府北部自治体での橋梁維持管理の知見を持たれている舞鶴高等専門学校建設システム工学科の玉田教授へのヒアリングを行った。玉田教授は京都府の安心・安全整備事業の審査委員会の委員であり、「京都府北部・橋梁維持管理研修会」の運営にも携わっておられ、地方道橋梁の問題について多くの講演を行っておられる。

地方自治体の橋梁管理では、都市部に比べ人口に対する管理対象の橋数が多く予算不足が深刻であり、さらに維持管理に携わる人材も不足している。この現状を踏まえた技術開発が必要であると指摘されている。

国の指導と予算化でようやく点検、修繕計画の立案の段階に至っているが、多くの自治体では少ない予算の中で最小限の対応に留まっている。1 つの橋梁にかかる費用は約 2.5～10 万であり、3～4 人が 2～3 時間かけて点検するのが限界と思われる。小さい自治体では点検・修繕予算の確保も難しいのが実態である。

以上の背景を考慮した上でモニタリングに関しては以下の想定と期待を持たれている。

【単機能な簡易モニタリングシステム】

1 軸（鉛直）加速度センサで固有振動、または変位量センサで変位･変形を計測するコンパクトな軽設置ユニット

設置は 1 箇所もしくは重要箇所に限定、単独で計測

内部メモリへのデータ蓄積、一次処理によるアラーム

数時間～数日間の計測／回収

【精密計測システム】

上記簡易計測で異常発見されたものを供用継続するにあっての監視用途

加速度は 3 軸を常時計測し、時刻同期（1m s 程度）して 3~6 箇所が連動動作

センサ間はケーブルもしくは無線、常時設置

【高度モニタリング】

上記に加え、架橋環境の把握、異常損傷の要因分析につながるセンシングを希望

温度、湿度、風速（風圧）、風向、ガス（CO_2）、塩分、加重

特異状況の把握のために、以下の補完的センシングを検討

音、画像、水分（浸水）

これらのデータに加え、気象、地形などのデータを合わせビックデータ解析による異常発生にいたる因果関係を探索したい。

【部材機能の検証】

支承、伸縮装置の健全性を部材挙動のモニタリングにより検証する。

加振時の部材の変位、振動を計測することで部材機能の残存力を把握する。

また、既設橋梁の健全度を固有振動数の計測によって評価する方法についての検討がされている[2)]。単純桁橋を対象に 2 つの方法が示されている。

- 直接評価法 : 理論式や既往の実測結果から提案されている予測式と実橋動数を比較する手法
- 経年評価法 : 同じ橋梁の固有振動数を長期間計測し、固有振動数の経年変化で評価する。

橋梁の固有振動数は、理論と実構造物では種々の乖離があり、予測値にも計測値にも不確定要素が含まれやすいことが指摘されている。一方で、多くの橋梁のデータを数年

毎に計測し蓄積することによって、その傾向から橋梁の健全度を判定することは可能であることも示されている。これらの計測結果が詳細点検を行うべきかの前段階検査として有効であることが想定できる。

d. 技術に関する調査

ニーズ調査において抽出した加速度センサによる評価が可能と思われる橋梁の健全度推定技術について整理を行い、各手法におけるセンサへの要求要件を明らかにする。

ｉ）主構造材の健全性を固有振動数から推定する手法

構造物の健全性を評価する方法としては、土木学会論文や先行事例調査にみられるように固有振動数からの推定が多く行われている。一般的には、橋梁やビルのような長さを持つ構造物は、質量と剛性によって決まる固有周波数を持っている。このような構造物が固有周波数の変化を生じるとすれば、何らかの要因によって構造的な剛性が変化したと考えられる。剛性の変化、特に低下することは、構造物に劣化を生じている可能性が高く、固有周波数の経年変化をモニタリングすることで構造物の健全度の変化を推定することが可能と考えられる[13)]。

橋梁を単純モデル化すると、質量(死荷重)及び構造剛性によってなる単弦振動系である。単純桁の場合の固有振動数 f は式①-(1-2-1)-2-1-4.2 によって求められる。また、自重による等分布荷重が作用すると考えると死荷重によるたわみ量 δ は、式①-(1-2-1)-2-1-4.3 によって求められる[14)]。

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{G}{\delta}}$$ ・・・式①-(1-2-1)-2-1-4.2

$$\delta = \frac{5}{384}\frac{WL^3}{EI}$$ ・・・式①-(1-2-1)-2-1-4.3

ただし、G：重力加速度、W：橋梁自重、L：橋梁長、E：縦弾性係数、I：断面二次モーメント

固有周波数が変化するとしたら EI の変化である。E の場合は材質の劣化、たとえば材質の強度劣化、内部破損、締結部材の損傷、亀裂の発生進行が考えられる。I の場合は

桁材の腐食や破断による断面積の現象が相当する。このような要因により EI が低下し固有周波数の変化として表出する。

このような原理により固有周波数の経年計測により橋梁に生じる異常を発見することが試みられ多くの事例を見ることができる。しかしながら、式からもわかるように損傷の度合い比べ固有周波数の変化率が少ない。また、損傷以外の要因、例えば温度による長さや特性への影響、降雨や降雪などによる含水や自重への影響といった変動要因が多くあり周波数を長期にわたり安定して計測することが困難であることも課題となっている。センサ自体の性能に加え長期計測と外部要因による影響を排除できるシステム、アルゴリズムの実現が必要である。

ⅱ）主構造材の健全性を減衰定数などから推定する手法

構造部材の振動を計測して健全性を評価する方法としては、固有値と減衰乗数の変化を同時に考慮し評価することが考えられる。

構造物は、地震力に対して大きな減衰性を持つことが望ましいことは認知されていることである。その減衰は、内部摩擦と外部摩擦に分けられる。内部摩擦には、弾性範囲での材料による粘性減衰や、非弾性域での接合部のすべりや部材の塑性変形による構造減衰がある。外部減衰は構造物とそれを取り巻く物質との相互作用によって生じるもので、空気や地盤などと構造体との摩擦や拘束によるものがある。一般的には前者は小さく、後者は構造物からエネルギを解放する大きな役割を担う（免震構造など）。健全性の評価に対しては、この前者を計測する方法であり、特に主要構造体が塑性域及び破壊された場合に、構造減衰が小さくなり長期間揺れることで損傷や劣化を評価する。

しかし、この方法の場合に橋梁上部工などのように構造体が独立している場合や不静定次数が小さい場合には、比較的明確な変化を見えることができるが、下部構造や建物のような場合は、後者の影響を排除することが重要である。

また、昨今の研究では、車両の繰り返し走行から得られる橋梁振動応答により実橋の時系列線形システムモデルのシステムパラメータを同定することで、橋梁の損傷を評価する可能性について考察しているものがある。橋梁劣化の検知のための指標として橋梁の固有振動数及び減衰定数に加え、自己回帰モデルのモデル係数(AR 係数)で構成される損傷検知指標(DamageIndicator: DI)も採用し、損傷前後の変化を調べている。DI は推定の際のばらつきが小さく、損傷導入位置付近で損傷前後の変化が相対的に大きくなる傾向が見られている。また、統計的分析の一手法である多次元統計空間の統計的距離（Mahalanobis-Distance)を DI に適用した結果、橋梁の損傷検知の実現可能性を確認している[15)]。

ⅲ）構造部材結合部の健全性を部材周辺の計測から推定する手法

構造物の接合部における最も重大な損傷は、接合部がその構造耐荷力を有しなくなることである。鋼構造の場合、このような損傷と懸念されるのが高力ボルト（HTB）の軸力の低下である。その要因として考えられるのが、ボルトのヘッド部分の腐食によるボルト軸部の張力の減少（図①-(1-2-1)-2-1-4.19）と F11T などの高張力鋼材によるボルトの遅れ破壊（図①-(1-2-1)-2-1-4.20）である。



図①-(1-2-1)-2-1-4.19 箱桁内面の HTB の腐食



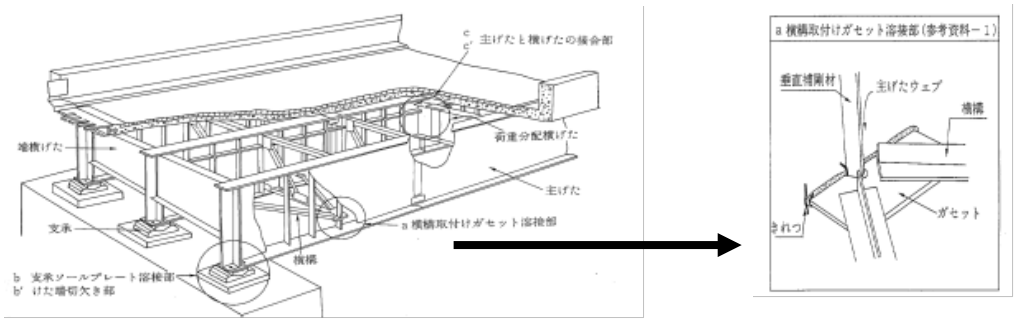
図①-(1-2-1)-2-1-4.20　HTB の遅れ破壊

HTB の導入軸力が低下すると接合部の摩擦力が減少し、構造体としての安全性が著しく低下する。そのために、HTB に導入されている明確な軸力を計測する技術が重要になるが、現時点では簡易で適切な計測精度を有する計測技術が見当たらない。

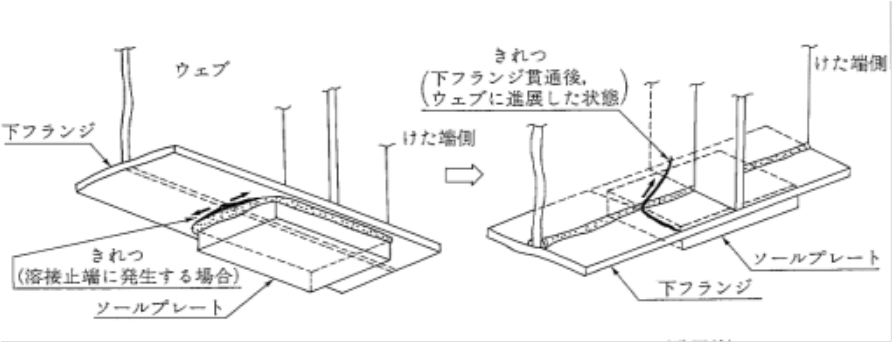
ⅳ）個々の部材の健全性を部材もしくは周辺の振動挙動などから推定する手法

構造物の個々の健全性を評価するには、その部材の構造特性や部材設置場所などに合わせた適切な計測技術が求められる。

例えば、鋼橋の横構のような細長比の大きな部材においては、その横構の部材振動及び横構ガセット接合部に加わる活荷重応力振幅によりにガセットのまわし溶接部から疲労亀裂が生じる場合がある（図①-(1-2-1)-2-1-4.21）。このような場合、横構の振動固有値を計測していれば部材の劣化に伴う固有値の変化により、損傷を評価することが可能であると予測される。



図①-(1-2-1)-2-1-4.21　横構ガセット溶接部の疲労亀裂



図①-(1-2-1)-2-1-4.22　ソールプレート前面下フランジの疲労亀裂

また、鋼橋のソールプレート前面の下フランジの疲労亀裂（図①-(1-2-1)-2-1-4.22）や鋼床版トラフリブの溶接部の疲労亀裂などは、損傷発生場所が特定できるため、適切間隔での定期的な点検時にその損傷を見逃さない点検センサの開発が望まれる。そのひとつとして赤外線センサによる損傷部発見機器などの開発が進んでいる[16)]。

①-(1-2-1)-3　橋梁モニタリングシステムの実現性の検討

ここでは分析から加速度センサ及び計測システムの求められる要求仕様を整理し、実現性について述べる。

①-(1-2-1)-3-1　加速度センサシステム、及び加速度センサ要求仕様

表①-(1-2-1)-3-1.1　に、加速度センサシステム仕様を示す。

表①-(1-2-1)-3-1.1　加速度センサシステム仕様

性能要件	内容
出力データ	24bit デジタルデータ
最大計測加速度	≧ ± 4　G
周波数帯域	DC　～　50Hz（ want 200Hz）
出力	2000digit/gall
分解能	0.01gal
他軸感度	5 %（システム状態）
非直線性	3 % FSO
ノイズ密度	1 uG/√Hz　want
供給電源種類	無線化、PoE　（システムとの整合要）
消費電力	待機時：数 μA 計測動作時：数 mA 送受信動作時：10mA 程度
サイズ、重量	明確な要求なし（橋梁に設置できる大きさ）
自己診断、調整、校正機能	実装の要望あり、具体的仕様の検討には至らず
時刻同期精度	1ms
マルチセンサ化など	温度の同時計測は必須 他に振動への影響因子（湿度、水分、風圧）

中核となる加速度センサに関しては、高分解能 0.01gal が要求されると同時に、地震による挙動からの劣化状況を診断することを考慮すると、上限 4G の計測も求められており、大きいダイナミックレンジとなっている。そのため 20bit 以上のデジタル化が必要になり、24bit 変換が要求されている。この点に関しては、すでに実現しているため技術的な課題ではない。しかしながら、高分解能化は省電力化と相反条件となるため、現在の市販部品での低消費電力化と高分解能化の両立は困難なため、システムの ASIC 化や解析方法の検討により実現させる必要がある。周波数帯域、他軸感度、非直線性に関しては、本テーマでの評価では問題とはならず、また一般的な MEMS 加速度センサで実現できているため、課題ではない。MEMS 加速度センサで最も課題とされる性能は、SNR(信号対雑音比)であり、回路も合わせたもので満足するものはないと言われ、今回評価した加速度センサでも満足していないことが分かった。ただし、要求は絶対的な値ではないため、データ解析手法と合わせた整合で実現は可能と考える。

電源の供給及び消費電力に関しては、高所や狭隘部への設置が必須であることから配線工事への配慮が求められる。有線の場合は単ケーブルでの給電が望ましく電源重畳や PoE などの使用が望ましい。一方無線の場合は、電源供給の容易さが課題であり、自己給電可能であることが理想的である。太陽光、風力、温度差、振動などの発電が想定されるが確立されたシステムの出現には至っていない。上記の消費電力の目安と稼動想定から算定される単位時間あたりの消費電力に見合う電力供給設計が必要となる。当面は、数 10mWh／日程度の電力量を想定し、中長期には 1mWh／日以下を期待したい。

サイズ・重量に関しては、橋梁への取付け想定から鋼橋においては桁部材のフランジ上部スペース設置、コンクリート橋では壁面への接着もしくアンカー締結が前提になる。これらの想定では 100mm 立方程度のサイズが期待される。重量に関しては、設置上の制約はないが、落下事故時の第 3 者被害が懸案となる。万一落下してしまい橋下を通行する車両や歩行者に重篤な被害を与えないことが望まれる。パッケージの形状や外装にも依存するが 100～200g 程度が限界と思われる。

センサ類の実装に関しては、計測対象である加速度以外に、温度の計測は必須とする要望が強い。これは橋梁振動の固有値計測において、その変動が温度に依存する事例が多くあり温度補正を行うためである。また、温度以外にもコンクリート橋の場合は、水分の含有度が桁の重量や剛性に影響を与える可能性があり、これを推定できるセンサデータが求められる。具体的にはコンクリート内部／表面の含水率、桁内部の湿度、表面の浸水度などを、湿度または水伝導率センサにより計測する。これらのセンサを同時に実装できるようセンサ端末の入力デバイスが拡張可能であることが期待される。

時刻同期に関しては、加速度を分布的に計測することで橋梁のモード振動や形状変化を

把握したい要望から、高精度の同期性能を求める意見が多くの研究者から出された。その精度要件も観測すべき振動の上限周波数が概ね 50～100Hz であることから、1ms 程度を目標とすべきである。

①-(1-2-1)-3-2　使用環境に関する耐久性　防水、防塵、温湿度、衝撃要求仕様

表①-(1-2-1)-3-2.1　に、加速度センサシステムへの耐久性仕様を示す。

表①-(1-2-1)-3-2.1　加速度センサシステム要求仕様(耐久性)

性能要件	内容
動作温度	-10～70℃（-20～85℃）
耐衝撃性	2000 G（ or 30cm 落下）
防水	飛沫保護
防塵	耐塵形保護

動作温度に関しては、使用環境の想定から-10～70℃が望まれる。高温域では直射日光による鋼材の高温が予想され日射対策が取れない場合は当該の想定が必要と思われる。また、一部寒冷地においては-20℃を下回る場合もあり別途仕様を設定する必要がある。

防塵防水に関しては、橋梁付近の環境は厳しく多くの粉塵と飛沫は想定すべきである。ただし浸水の恐れは、完全な水没までは費用対効果の面でも過剰と思われるので、ここでは想定しない。該当規格としては、電気機器保護等級による耐塵形保護及び飛沫保護を適当と想定し IP64 とすべきである。

①-(1-2-1)-3-3　通信機能、無線通信の必要性

参考事例の多くでは、有線（光ファイバ含む）での接続が主流である。橋梁では橋桁下部への設置が多く高所作業が必要となることから有線では配線工事の負担が大きくなる。工事を簡略化できる無線方式への期待は大きいが、伝送速度、データ伝送の品質、時刻同期の難しさが課題である。ここ数年の実験ではこれらの課題が克服され無線を使用する事例もみられるようになっている。近年使用されている電波は 2.4GHz 帯域の WiFi もしくは ZigBee が多い。また昨年の使用解禁に伴い 920MHz 帯域での事例が出てきている。しかし加速度計測においては小規模のセンサネットワーク事例はあるものの、長期に稼動させた大規模なシステムの事例には至っていない。サンプリング速度の大きい加速度データを確実に無線経由で収集できるかは今後の研究において確立すべき課題である。

①-(1-2-1)-3-4　手電力消費及び自己給電

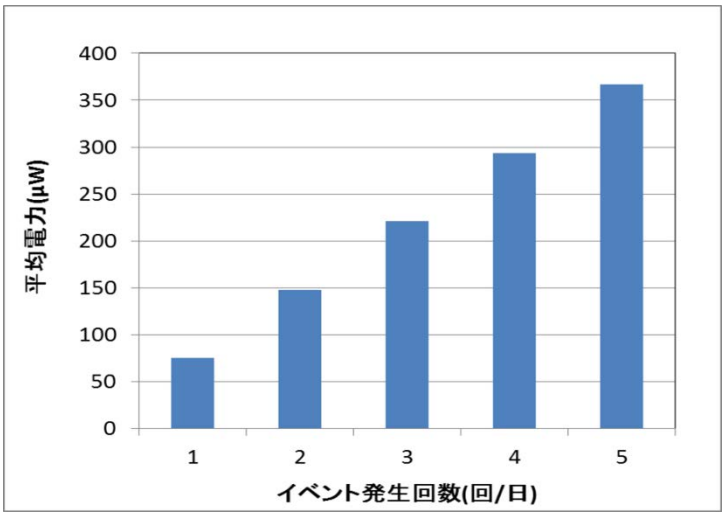
自己給電のための自立発電デバイスへの要求仕様は、表①-(1-2-1)-3-4.1 の通りであった。

表①-(1-2-1)-3-4.1　自立発電デバイス要求仕様

特性項目	要求値
発電量	≧100uW want
出力	AC 出力
最大出力電圧	（60V）
耐温性（保存）	-20～85℃
耐湿性（保存）	（85%)
機械寿命	(100 億回）
耐衝撃性	≧ 2000G
絶縁耐圧（端子間）	≧ 900V

今回評価した振動発電デバイスは、発電量以外の仕様をクリアしている。発電量に関しては、デバイスの発電効率向上と共振装置による周波数帯域の拡大、システム全体の低消費電力化の両方アプローチで対策する必要がある。

現在の橋梁の振動計測回数とシステム全体の消費電力の関係を試算すると、図①-(1-2-1)-3-4.1　のグラフの通りとなった。



図①-(1-2-1)-3-4.1　橋梁振動計測回数とシステム全体の消費電力の関係

試算前提条件：

・計測時のサンプリング間隔　100 [sps］
・計測時間　180［sec］
・送信時間　180［sec］
・通信　イベント毎
・送信消費電力　20［mW］
・計測消費電力（マイコン、センサ）　15［mW］
・待機電力(スリープ)　2［μW］

現行の技術でシステムを構成させた場合でも、計測を 10 回/日程度制限すれば 1mW/日の低消費電力システムとして稼働は可能である。ただし、短時間の計測を 10 回/日程度の計測で橋梁の診断が可能かどうかは、未知であり本研究での検証が必要と考える。

①-(1-2-1)-3-5　長期使用に関する安定性

長期使用に関する安定性は、道路点検の間隔である５年を最低限度としその 2 巡程度の安定稼動を求める意見が多い。長期の耐久性は道路や鉄道における屋外機器の設計仕様（概ね 10～15 年の耐用年数）が基準となる。屋外環境において電子機器を 10 年越えて使用することは点検、交換を前提とした運用設計となることは適正なコストの実現の上では不可避である。稼働中の自己診断･通知の機能、校正の機能、交換時の調整機能などの検討が必要となる。現時点においてこれらの事例は乏しく新規の開発要素となる。

①-(1-2-1)-3-6　次のステップで実施すべき調査事項

以上の検討結果から、本システムの実用化に向けて実現すべき課題と調査事項を整理する。

①-(1-2-1)-3-6-1　システムの信頼性

本システムの導入にあたっては、設置環境の厳しさが想定される。温湿度、粉塵、雨雪、日光などへの対策が重要であり、これら環境要因に対応する規格を充足するための実装、実橋での実証を通じての評価が必要である。設置環境は、地域、設置位置、橋の規模・種類により異なっており、環境要因の変動を考慮し複数の実橋を選定することが望ましい。

①-(1-2-1)-3-6-2　センシング

MEMS 加速度センサで最も課題とされている性能は、SNR(信号対雑音比)であり、今回の評価においても want 要求仕様ではあるが満たせないことが分かった。今後高分解能化を

行うためには、SNR の向上が不可欠である。ただこの性能はセンサ後段の増幅回路やフィルタ回路､デジタル変換回路の性能も大きく影響するため､チップを含めた総合的な対策、例えばシステムの ASIC 化などの対策が必要と考える。

また、SNR 向上及び高分解能化は、省電力化と相反条件となるため、省電力化の観点でも、将来的にシステム ASIC 化も視野に入れてシステム開発を実施することが望まれる。

①-(1-2-1)-3-6-3　自立電源化

社会インフラ向けシステムでは電源の確保が課題となる。電源供給が困難な箇所が多く、山間部では商用電源にも遠いケースも想定される。従来技術である小型太陽光発電に加え振動や風力などを利用したエネルギ・ハーベスティング技術が必要である。

自立発電デバイスに関しては、本テーマで評価した振動発電デバイスの発電効率向上が課題と分かった。また、適応周波数帯域が狭いため周波数帯域の拡大も課題となった。今後振動発電タイプの自立発電デバイスを使用するにあたっては、加工精度向上による発電効率向上及び共振器などによる周波数帯域拡大の対策を実施することが望まれる｡ただし、デバイス性能の向上以外のアプローチも可能と考える。例えばデバイスの多重化やシステム全体での低消費電力化、太陽電池や風力発電との併用、間欠計測などのデータ収集手法の工夫により、システム全体の取組で対応可能と考えられ、次ステージでの検討を期待したい。

太陽光発電に関しては、橋梁での採光環境は周辺建築物がすくないことから比較的良好と思われる。しかし、常時振動が加わることから振動対策が重要となる。また粉塵の飛散が多いため長期稼動では汚れによる影響を低減する工夫が求められる。

いずれの技術も橋梁本体における実績が乏しいため、システム評価と同様に実橋での長期間の実証が不可欠である。

①-(1-2-1)-3-6-4　無線センサネットワーク

橋梁モニタリングではデータ収集の手段としては無線ネットワークが必要となる。個々のセンサ機器へのアクセスが難しいため個別のデータ回収は難しい。また、有線による配線も設置環境の厳しさから工事コストが大きく障害となっている。近距離無線を経由してデータを集約することが効率の良い実現手段である。一方で電波であるが故に伝送速度や信頼性の制約を受ける。本システムでは加速度データを扱うことから高サンプリングでの計測データは大きくなりがちであり長時間の通信時間を要することで電源消費が大きくなる課題がある。データの伝送量を削減するためにデータの切り出し、圧縮といった対策を

検討する必要がある。また、信頼性については、使用する電波帯域での伝播特性を把握し綿密な配置設計を行う必要がある。特に、鋼橋の場合は電波の反射による影響が多く発生しており無線システムのロバスト性を含め伝送性能の評価が必要である。

①-(1-2-1)-3-6-5　アルゴリズム

本システムでの監視では、振動波形や周波数の変化から異常を把握しようとしている。一般には正常時の状態を計測し、これを基準にして変動に閾値を設けて異常を判定する。しかしながら、加速度センサで把握できる異常事象は未だ明確ではなく、異常検知のロジック、判定のアルゴリズムは、引き続き研究開発が必要である。モニタリングに関する土木関連研究機関の動向も把握しつつ、当該技術に必要となるセンサの要件を見極めていくことが必要である。

①-(1-2-1)-4　ユーザ機関による成果の有効性の検証

検討した加速度センサ及び振動発電システムを想定した橋梁の振動測定による健全度の把握の可能性について、先行事例の調査、ユーザ機関（NEXCO 東日本、首都高速道路）及び関係研究機関（土木研究所、横浜国立大学、舞鶴高専）へのヒアリングを行い、その有効性を確認した。また舞鶴高専より本研究での想定に近い MEMS 加速度センサを用いた実橋梁での計測データの提供を受けその妥当性を確認した。加速度センサの仕様に関しては、先行事例及びヒアリングから表①-(1-2-1)-3-1.1 及び表①-(1-2-1)-3-2.1 に示す仕様が妥当であることを確認した。また電源に供給に関しては、センサノードの自立電源化を求める要望から振動発電での供給を仮定し表①-(1-2-1)-3-4.1 に示す仕様を前提とし図①-(1-2-1)-3-4.1 に示す供給関係での実現が可能であることを確認した。

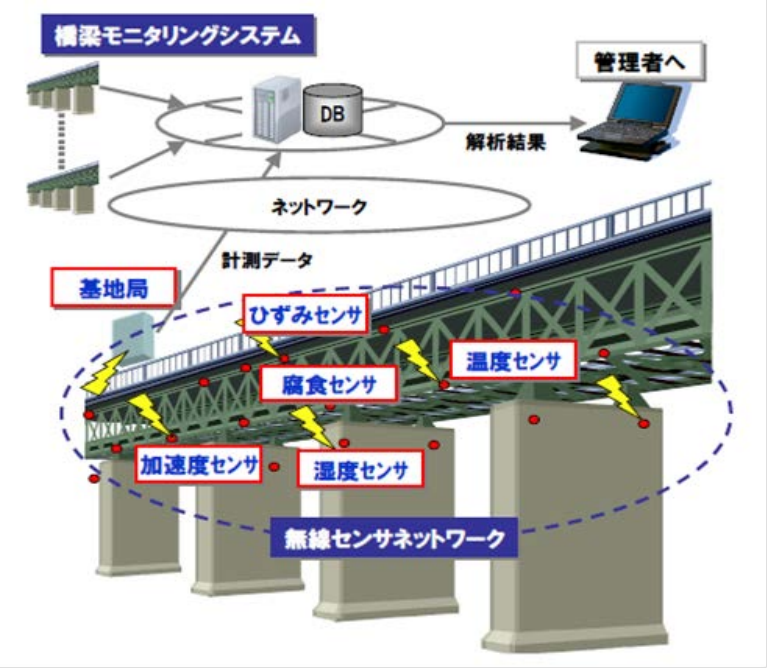
①-(1-2-1)-5　まとめ

＜将来開発すべきセンサシステム像＞

次世代の橋梁モニタリングシステムを構成するセンサシステムとして、加速度センサ、WSN(Wireless Sensor Network)及び振動発電による自立給電を用いた常時計測システムの実現可能性を検討した。

結論として、橋梁の健全度把握システム(ハード)の実現は可能と考える。

本検討によるセンサ仕様を実現し、さらに橋梁の健全度を把握、推定できるアルゴリズム及びデータベースを開発することで、図①-(1-2-1)-5.1 に示すような、将来開発すべきセンサシステム像である橋梁モニタリングシステム及びサービスの提供が可能となる。



図①-(1-2-1)-5.1　橋梁モニタリングシステム及びサービスのイメージ

＜開発すべきセンサシステムの技術課題・開発内容と目標＞

(1)システムの信頼性

10 年を超えて安定した動作を継続するための屋外稼動への対応については長期かつ多様性を想定した実験検証が課題である。設置環境は、地域、設置位置、橋の規模・種類により異なっており、環境要因の変動を考慮し複数の実橋の選定が課題である。

(2)センシング

よりニーズに応えるためには SNR(信号対雑音比)の向上が課題である。

センサ後段の増幅回路やフィルタ回路、デジタル変換回路の性能も大きく影響するため、チップを含めた総合的な対策も課題である。ただ SNR 向上と高分解能化は、省電力化と相反条件となるため、省電力化とのバランスを考えたシステム開発が課題となる。

また、挙動解析に応じたセンサの配置、動的挙動把握のためのセンサ間の連係動作、加速度以外の環境要因の計測も課題である。

(3)自立電源化

小型太陽光発電に加え振動や風力などを利用したエネルギ・ハーベスティング技術が必要である。自立発電デバイスに関しては、本テーマで評価した振動発電デバイスの発電効率向上が課題である。また、適応周波数帯域が狭いため周波数帯域の拡大も課題となる。

(4)無線センサネットワーク

低消費電力化が課題があり、データの伝送量を削減するためにデータの切り出し、圧縮といった対策が開発課題となる。

信頼性については、使用する電波帯域での伝播特性を把握し綿密な配置設計が課題である。

(5)アルゴリズム

加速度センサで把握できる異常事象は未だ明確ではなく、異常検知のロジック、判定のアルゴリズムは技術課題である。モニタリングに関する土木関係の研究開発と連携し、必要とされるセンサシステムを構築していく必要がある。

＜開発されるセンサシステムを適用した場合に期待できる具体的効果、インパクト＞

今後 10～20 年で橋梁の老朽化が飛躍的に進み、維持管理対策の重要性が高まる。梁の維持管理は「予防保全」が中心となる。橋梁モニタリングシステムの実現は、人手による点検の負荷を低減し、インフラ維持管理のコスト削減、マネジメントの高度化、効率化が図れるため、橋梁の予防保全に大きな役割を果たせる。このシステムは国内の橋梁の大半である中小規模の橋梁を含め､ほとんどの橋梁を対象に､常時モニタリングを可能にする。これにより収集できるデータを伝送、解析することで、災害や事故などの障害発生状況の早期把握を可能とし、インフラ設備の運用者に対して提供することで、迅速な復旧をサポートする｡さらに､緩やかに進行する劣化状態を見える化し社会インフラの保守管理者に、適切な保守管理情報の提供を可能とし、ライフサイクルコストの最適化を図ることができる。このように、橋梁モニタリングシステムは、社会インフラの安全性を高めることで国民への安心安全な社会の実現に寄与する。さらには、今後急速に進行する高齢化、人口減少の社会状況において、限られた社会資本を最適かつ効率的に利用し続けることへの基盤を確立するものである。このような新たな社会インフラ管理技術は、日本のインフラ技術への信頼度と技術優位性を高める効果がある。 加えて海外への展開による､世界規模の大きな市場が見込めるであろう。

参考文献

1) 加藤雅史､島田静雄 : 橋梁実測振動特性の統計解析､土木学会､論文報告集第 311 号､pp.49-58､（昭 56-07）
2) 玉田和也、小島善明、西嶋久勝：舞鶴市の橋梁を対象とした固有振動数による健全度評価の検討、土木学会、第 64 回年次学術講演会、Ⅰ-104、pp.207-208、（平成 21-09）
3) 川谷充郎、金哲佑、土井宏政、山野歩今：三方向成分に着目した道路橋交通振動モニタリングの検討、土木学会、第 67 回年次学術講演会、Ⅰ-500、pp.999-1000、（平成 24-09）
4) 岡本覚人、宮森保紀、三上修一、山崎智之、坂和平：スマートセンサーを用いた人道

吊橋の振動特性同定、土木学会、第 67 回年次学術講演会、Ⅰ-505、pp.1009-1010、（平成 24-09）

5) 川原正人、高本龍直、中畑和之、大賀水田生：無線加速度センサを用いた橋梁の 3 次元可視化と振動モードの抽出に関する研究、土木学会、第 67 回年次学術講演会、Ⅰ-501、pp.1001-1002、（平成 24-09）

6) 砂原啓人、竹村紗織、齋藤修：列車通過時の残留振動による高架橋健全度評価、土木学会、第 66 年次学術講演会、Ⅰ-109、pp.217-218、（平成 23-09）

7) 石川裕治、竹本健一、宮崎早苗：リアルタイム橋梁遠隔監視システムの開発、NTT 技術ジャーナル 2006.9

8) 石川裕治、宮崎早苗：橋梁モニタリングシステム BRIMOS の開発、NTT 技術ジャーナル 2009.9

9) ビッグデータ実証実験 ～橋梁モニタリング・システム～、NTT DATA Technology Foresight 2012

10) 樋口徳男：妙高大橋のモニタリング、第 30 回土木学会新潟会調査研究発表会討論会鋼・コンクリート討論会、同資料集「妙高大橋のモニタリング」、（平成 24-10-30）

11) 西尾真由子：光ケーブルによるモニタリング、第 30 回土木学会新潟会調査研究発表会討論会資料集（平成 24-10-30）

12) WONG Kai-Yuen：Current and Future Bridge Health Monitoring Systems in Hong Kong、The Government of the Hong Kong Special Administrative Region Highways Department Reports、2003-04-07

13) 島田静雄：構造物の振動調査と診断法、橋梁と都市 Project、2005-11-17

14) 中野泰宏、久保元樹、久保元、金田重夫：固有振動数を用いた橋梁の健全性試験方法、土木学会、第 66 回年次学術講演会、Ⅵ-252、pp.503-504、（平成 23-09）

15) 金哲佑、北内壮太郎、 杉浦邦征、 川谷充郎、 甲斐正義：多径間連続鋼トラス橋の交通振動を用いた損傷検知手法、土木学会論文集 A1、Vol69、No.3、pp.557-571、2013.11

16) 溝上善昭、和泉遊以、阪上隆英：赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ検知による疲労亀裂検出技術、第 68 回年次学術講演会、pp.1115-1116、2013.9

①-(1-2-2)　アコースティックエミッションセンサによる橋梁モニタリングシステムの開発

【株式会社東芝、再委託先：国立大学法人東京大学 IRT 研究機構】

①-(1-2-2)-1　研究の目的

＜社会課題＞

建設後 50 年以上を経過した日本の橋梁は今後飛躍的に増加し、その多くが老朽化の危機にある。たとえば、全国の橋梁の数は約 14 万箇所であり、2009 年時点で建設後 50 年以上を経過した「老朽化施設」の割合は、2009 年には 8%（約 1.1 万箇所）、2019 年には 25%（約 3.5 万箇所）、2029 年には 51%（約 7 万箇所）に増える見込みである。

橋梁の修復、架け換えには膨大な時間と費用を要するため、正しい優先順位付けを行い、真に必要な橋梁から順次修復架け換えを行う必要が生じる。さらには架け換えが必要な状態の橋であっても、橋の新設が完了するまでの間は常時モニタリングにより使い続けなければならないケースが増える事も予想される。

＜現状の取り組みと課題＞

AE(Acoustic Emission)センサによる異常診断は、構造物の劣化過程における進展の度合いを知ることができる手段として 1970 年ごろから研究が活発に行われており、国内では石油タンク底板の腐食による減肉測定などのプレン系の適用例に留まるが、欧米では鋼橋に発生する亀裂の活性度の推定と、亀裂の発生タイミングを正しく予測する手段としても活用されている。

最も有名な例であるオークランドベイブリッジの例では、修復で対応できず架け換えが必要と判定されたが、社会的インパクトを考慮して通行止めにせず、膨大な費用を掛けて AE センサによる常時リモートモニタリングをすることで運用を継続することができた。

しかしながら、AE センサによる常時モニタリングは以下の問題を抱えており、限定的な利用に留まっている。

1)ノイズ除去に高度なノウハウを必要とする。

2)感度の高い共振型 AE センサは、材料にあわせてセンサを選ぶ必要があり、設置にあたっては経験的な知識が必要となる。

3)圧電セラミックス AE センサは低コスト化が難しい。また、サイズも大きく分析装置との間は有線で接続されているため、社会インフラへの常時設置は困難である。

＜実施内容と最終目標＞

上記課題を可決するために、低コスト広帯域無線自立電源 AE センサモジュールの実現

と、信頼性の高いノイズ除去システムの実現を目指し、以下の 3 項目を検討した。

1)主たる故障モードで発生する AE 信号とそのノイズ源との関連性の検討

2)自立電源の発電量に合わせたアナログフロントエンド回路と無線通信モジュールへの電力配分の検討

3)カンチレバー式 MEMS-AE センサのポテンシャル調査と、カンチレバー式 MEMS-AE センサの特徴を活かした利用方法の検討

①-(1-2-2)-2　橋梁と AE

【株式会社東芝】

橋梁における損傷は、橋梁の種類や故障モードによって様々な形態をとる。橋梁における AE 測定の可能性を検討する上で、橋梁構造を把握し、AE によって検出が求められる亀裂がどのような場所に発生するかを把握する必要がある。本章では、橋梁の種類、橋梁の故障モードについて調査した結果を記す。

①-(1-2-2)-2-1　橋梁の種類と故障モード

①-(1-2-2)-2-1-1　橋梁の種類

橋梁は大きく分けてコンクリート橋と鉄橋（鋼橋）に分かれる。コンクリート橋は主要部材としてコンクリートを用いており、一般にコンクリートの引張特性の改善を目的として、鉄筋と組み合わせて使用される。鉄筋コンクリートは大きく分けて 2 種類に分かれ、コンクリート内部に鉄筋を配置して引張応力を負担させる構造を鉄筋コンクリート（RC 材、Reinforced Concrete）、さらに、内部の鉄筋に初期状態で引張力を加えることにより、より引張力に対する強度を向上させたプレストレストコンクリート（PC 材、Pre-stressed Concrete）が存在する。コンクリート橋と鋼橋には以下のような特徴が存在し、周囲の環境や橋長などに応じて使い分けられている。

コンクリート橋の特徴

メリット

・耐久性、耐火性、耐震性に優れている。

・様々な形状・寸法の構造物を容易に作ることができる。

・維持修理費が少なくて済む。

デメリット

・自重が大きい。

・ひび割れが生じやすく、局部的に破損しやすい。

・検査・改造が困難である。

鋼橋の特徴

メリット

・比強度が大きいため、部材断面が小さくて済む。結果として軽量化できる。

・材質が均一、強度のばらつきが少ない。

・工場で生産されるため、製作精度が高い。

・現場作業が少なくなるため工事期間が短い。

・部材の改良・補強が容易である。

デメリット

・さび・腐食に弱く、定期的な塗装管理が必要である。

・振動音がコンクリート橋よりも大きい。

さらに、橋の形式として、以下に示すような 5 種類の形式に分類することができる。これらの橋はコンクリート橋、鋼橋いずれでも架橋することができる。コンクリート材と鋼材の両方を使用する（たとえば主構は鋼材、床版は PC 材、など）ことも可能である。

・ガーダー橋　（図①-(1-2-2)-2-1-1.1）

板や箱状の橋げたで荷重を支える鉄橋。

・トラス橋　（図①-(1-2-2)-2-1-1.2）

三角形に組んだ鉄骨で、橋げたを補強した鉄橋。ガーダー橋より、橋脚の間隔（スパン）を長くとることができる。

・アーチ橋　（図①-(1-2-2)-2-1-1.3、図①-(1-2-2)-2-1-1.4）

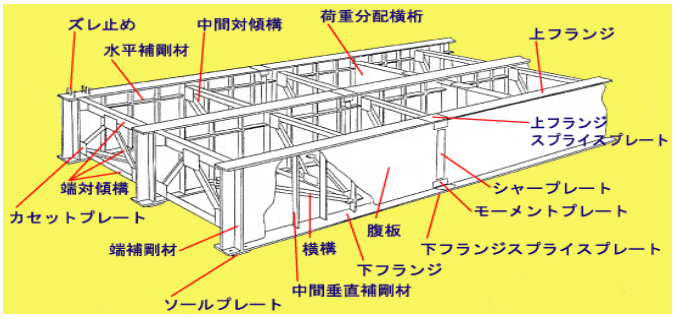
半円形のアーチで橋げたを支える鉄橋。トラス橋よりも、橋脚のスパンをより長くとることができる。

・ラーメン橋　（図①-(1-2-2)-2-1-1.5）

トラス橋の回転結節部を剛結合させた鉄橋。不静定構造（自由度より拘束数が多い）のため、地震などに強いとされる。

・吊り橋　（図①-(1-2-2)-2-1-1.6）

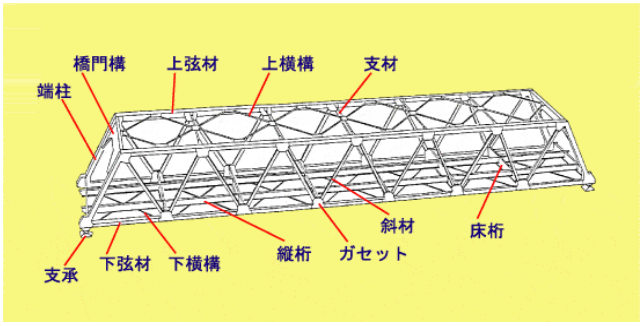
長いワイヤで橋げたをつり上げた鉄橋。アーチ橋よりも橋げたのスパンを長くとれるので、峡谷や海峡といった橋脚を置くことができない場所に使われる。



図①-(1-2-2)-2-1-1.1　ガーダー橋

（出典：国土交通省東北地方整備局道路部 HP　橋梁の概要）

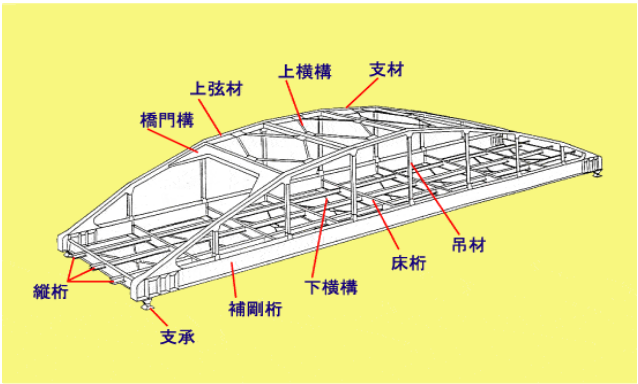
http://www.thr.mlit.go.jp/road/gakusyu/kyoryo/gaiyo.html



図①-(1-2-2)-2-1-1.2　トラス橋

（出典：国土交通省東北地方整備局道路部 HP　橋梁の概要）

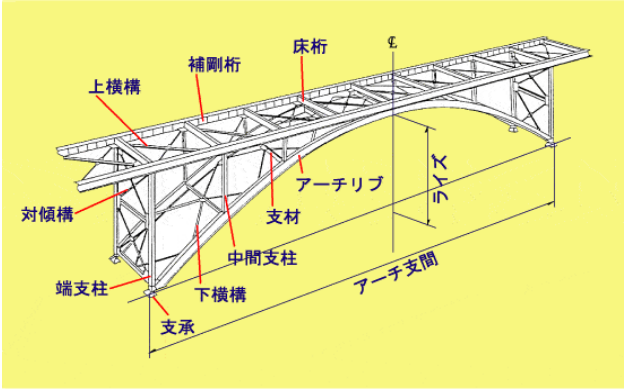
http://www.thr.mlit.go.jp/road/gakusyu/kyoryo/gaiyo.html



図①-(1-2-2)-2-1-1.3　下路アーチ橋

（出典：国土交通省東北地方整備局道路部 HP　橋梁の概要）

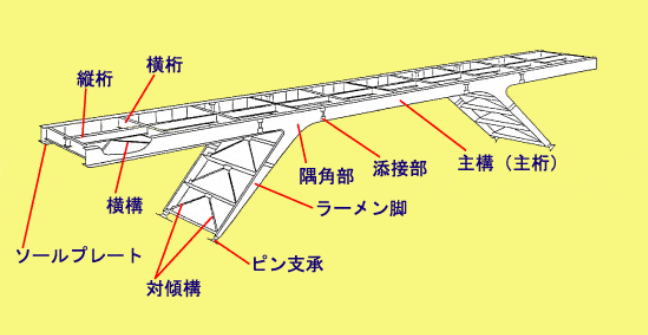
http://www.thr.mlit.go.jp/road/gakusyu/kyoryo/gaiyo.html



図①-(1-2-2)-2-1-1.4　上路アーチ橋

（出典：国土交通省東北地方整備局道路部 HP　橋梁の概要）

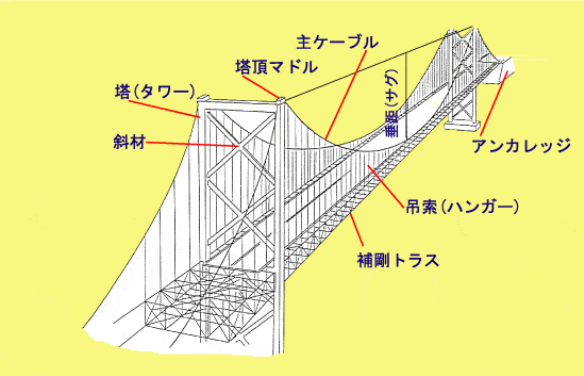
http://www.thr.mlit.go.jp/road/gakusyu/kyoryo/gaiyo.html



図①-(1-2-2)-2-1-1.5　ラーメン橋

（出典：国土交通省東北地方整備局道路部 HP　橋梁の概要）

http://www.thr.mlit.go.jp/road/gakusyu/kyoryo/gaiyo.html



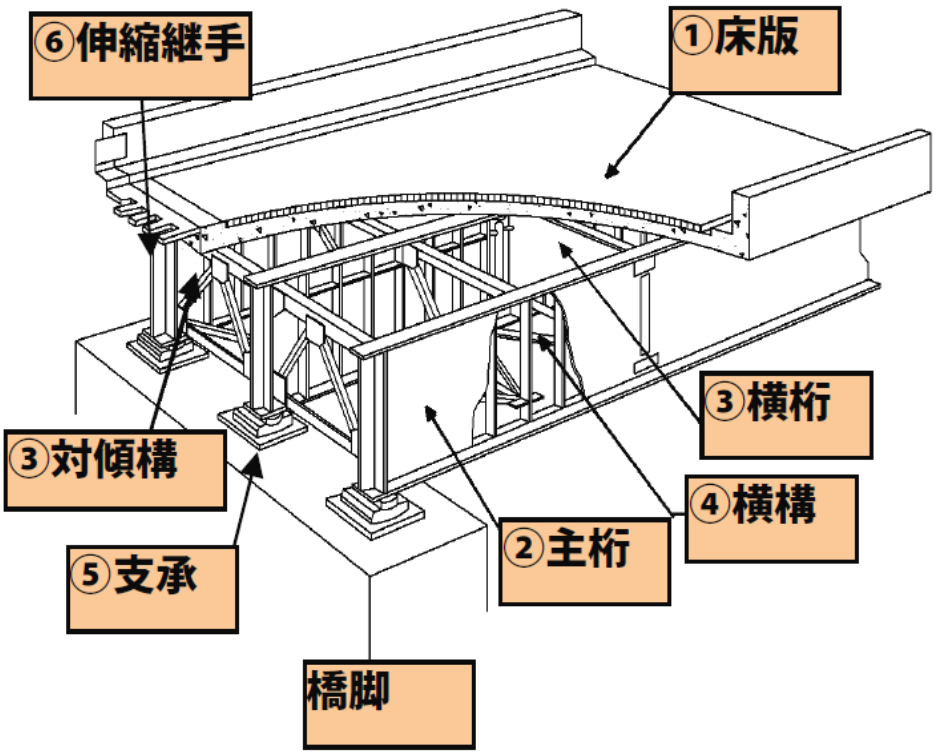
図①-(1-2-2)-2-1-1.6　吊り橋

（出典：国土交通省東北地方整備局道路部 HP　橋梁の概要）

http://www.thr.mlit.go.jp/road/gakusyu/kyoryo/gaiyo.html

①-(1-2-2)-2-1-2　橋梁の故障モード

本章では、鋼橋の主要な損傷の種類を分類した例を示す。図①-(1-2-2)-2-1-2.1 は桁橋の構造例を示したものであり、主桁と呼ばれる鋼の板を横構、対斜構が補強する構造をとる。

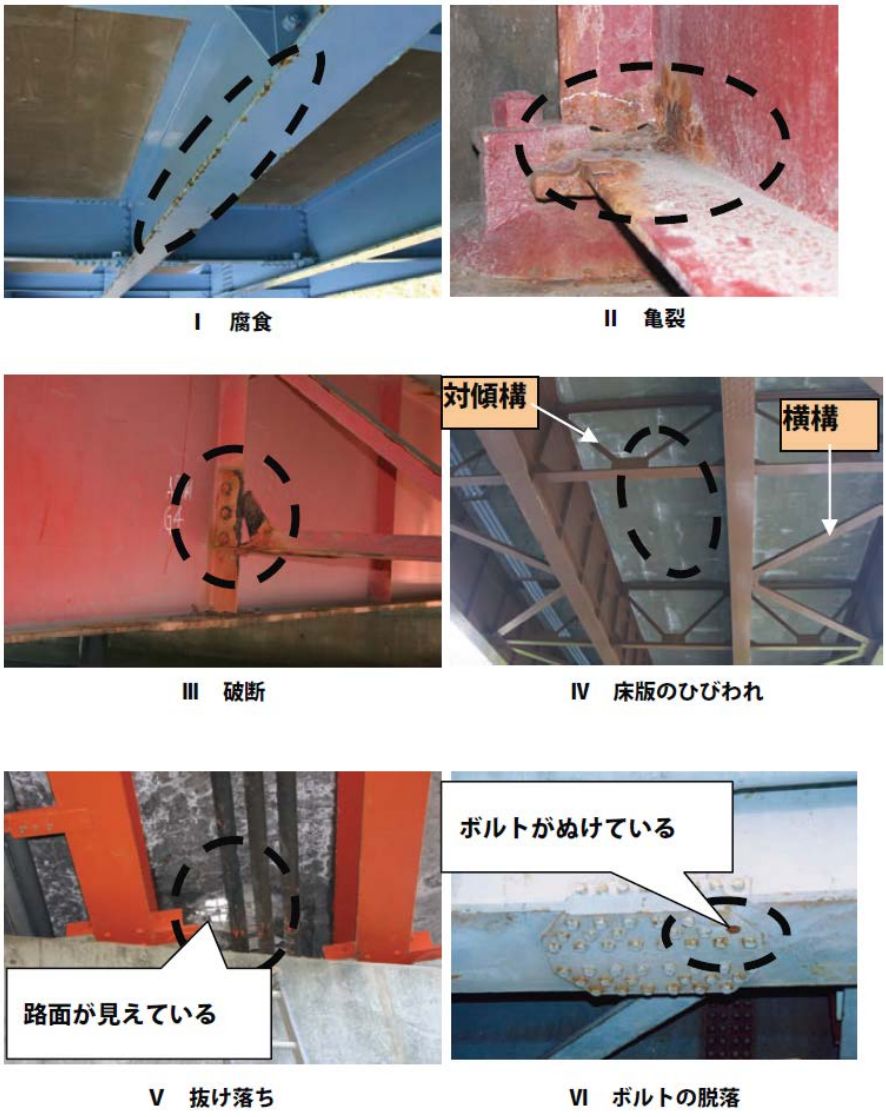


図①-(1-2-2)-2-1-2.1　桁橋の構造

（出典：橋の基礎知識「橋梁点検・補修計画の立案のために」北海道土木技術会）

http://www.decnet.or.jp/kenmane/aset_kiso.pdf

図①-(1-2-2)-2-1-2.2 に鋼橋の故障モード分類を示す。鋼橋の場合、特に問題になるのは、腐食と亀裂の 2 つである。腐食が進むと板厚が減肉し、最終的には穴があき強度が激減する。亀裂は進展すると部材の破断に至り、橋梁全体の強度を低下させる。腐食については、数年に 1 度の適切な塗装（防錆剤）により、進行、発生を大幅に減らすことができる。亀裂については、ある程度以上の亀裂が入って構造強度上問題が出る場所については、補強などの対策がとられる。通常、これらの損傷は日常点検もしくは 5 年に一度の定期点検でチェックされ、損傷の程度に応じて適切な対応がとられる。



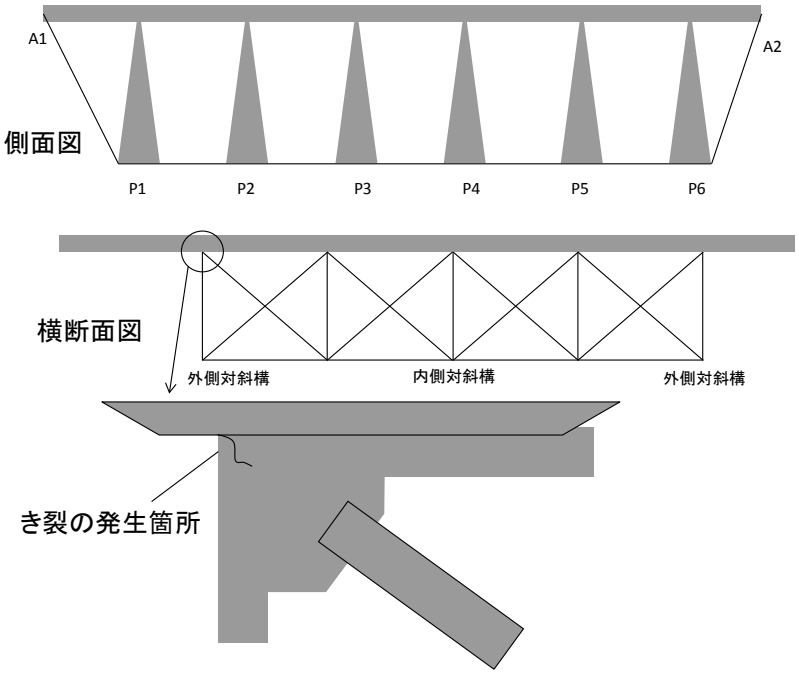
図①-(1-2-2)-2-1-2.2　鋼橋の故障モード分類

（出典：橋の基礎知識「橋梁点検・補修計画の立案のために」北海道土木技術会）

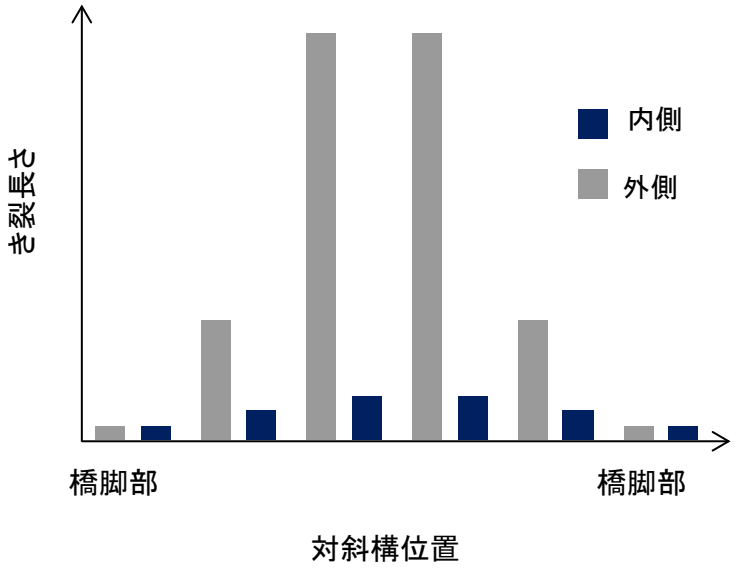
http://www.decnet.or.jp/kenmane/aset_kiso.pdf

本章では、実橋梁の例を対象として、亀裂が入った場所と亀裂の長さを調査した例を示す。図①-(1-2-2)-2-1-2.3 は東名高速道路 T 高架橋（鋼プレートガータ橋）の一つにおいて、分配対斜構を取り付けた垂直補剛材の上端部に亀裂が入り、その亀裂の長さを調査した結果である [1)]。亀裂は図①-(1-2-2)-2-1-2.3 下図のガセットプレートと RC 床版との境界近傍から発生している。図①-(1-2-2)-2-1-2.4 に示すように、この例では、橋の外側、かつ橋脚と橋脚の間に亀裂が集中していることがわかる。この傾向は、車が床版上を走行する際に、内側の対斜構は複数の部材で荷重を受けられるものの、外側の対斜構は外側のみで荷重を受ける必要があることから、外側に集中しているものと考えられる。また、橋脚間に集中

する理由としては、橋脚間の中央部は車が走ったときに最もたわむ部分であり、その部分の対斜構が変形によって最も大きなひずみを受けたものと推測される。この結果から、亀裂が入る場所は完全にランダムではなく、傾向があることが伺える。このような傾向は、定期点検時に亀裂の長さを測定したり、設計時に有限要素法で解析することにより知ることができるものと考えられる。



図①-(1-2-2)-2-1-2.3　東名高速道路Ｔ高架橋の対斜構に発生した亀裂



図①-(1-2-2)-2-1-2.4　各対斜構位置における亀裂の長さ

①-(1-2-2)-2-2　文献調査

鉄製橋梁への AE センサ適用例について下記の文献を調査し、MEMS-AE センサ試験計画に反映した。以下、代表的な 4 編について概要を述べる。

カナダでは実橋梁向け AE モニタリングの実例として、36 橋の 353 箇所でのモニタリング結果から亀裂の active を AE で判定し、Crack Safety Index を適用したもの [2)]がある。

14 の CT(Comapct Tension)試験片と 9 の溶接ジョイントへの AE 試験を通して AE 信号と亀裂進展の相関を調査し、AE 累積エネルギと亀裂進展に関する予測モデルを構築したものがある [3)]。

PWAS(Piezoelectric Wafer Active Sensor)という新しいセンサを鉄製構造物の疲労センサとして適用を検討し、CT(Compact Tension)試験片に対する疲労サイクル試験でも市販 AE センサと変わらない結果を得たものがる [4)]。

鉄製橋梁に対しての修繕(retrofit)の効果を AE 試験によって確認したものもあった [5)]。

①-(1-2-2)-2-3　国内ヒアリング結果

国内のユーザ機関、大学・研究機関などにセンサシステムへの要望をヒアリングした結果を表①-(1-2-2)-2-3.1 に示す。

表①-(1-2-2)-2-3.1 センサシステムへの要望ヒアリング結果

対象構造物	（橋梁を有する事業者、橋梁の研究者にヒアリングを実施）
常時・継続モニタリングしたい事象	損傷確認後その進行度合いをチェックしたい場合と、損傷対策後にその効果確認と再劣化が無いことを確認したい場合に常時モニタリングに対してお金が使える（土木研　木村先生）
モニタリングのエリア	従来法による点検がしにくい場所に使えたら良い（京都大学大島先生） 損傷が発生している場所、対策を行った場所（土木研　木村先生）
計測項目・形態	周波数帯域が広いセンサーになるのであれば周波数分析を正確に行えるのでメリットを感じる（京都大学大島先生）
計測データ収集方法	希望無し（データ収集車を使い一定間隔でデータを吸い上げるシステムはある）
データ処理・活用方法	AEによる損傷モニタリングはAEの発生頻度で判断する為、AE波以外の類似信号を除去する事が必須（IHI検査計測）
施工場所・周辺環境	建設時に埋め込んでおくことはできないか（京都大学塩谷先生）
電源・耐久性	5年～10年の耐久性が必要（JR東、NEXCO東）
システム導入・維持コスト	事故発生時に社会的インパクトの大きさの見積もり方で大きく変わる。（JR東）
その他	

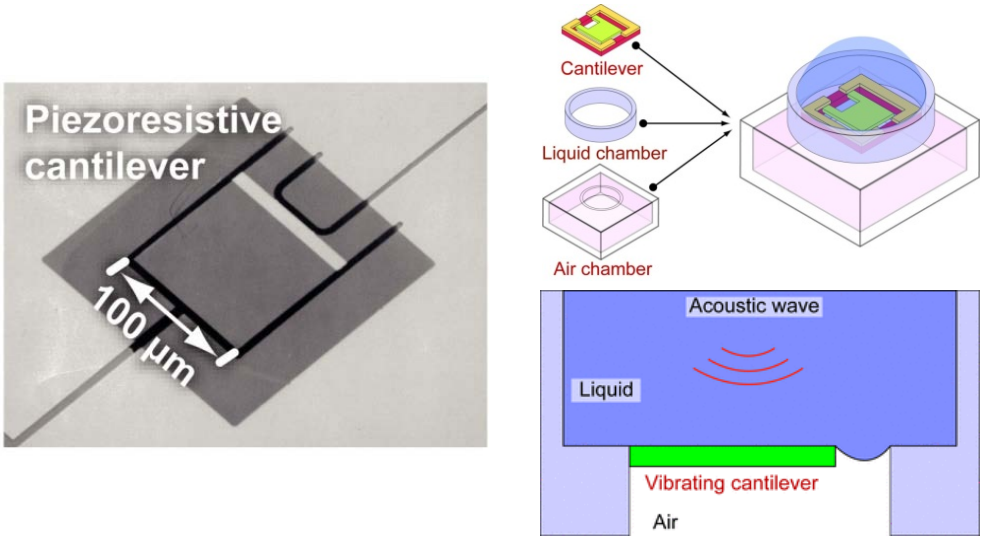
①-(1-2-2)-3　MEMS-AE センサの開発

【再委託先：国立大学法人東京大学 IRT 研究機構、株式会社東芝】

小型・低コストセンサの実現可能性を見極めるために、厚さがサブミクロンであるピエゾ抵抗型カンチレバー式 MEMS 圧力センサをベースにした AE センサを試作した。試作したデバイスと、従来の圧電型センサとの性能比較を行い、カンチレバー式 MEMS センサの開発目標を定量化した。さらに、得られた結果を基にカンチレバー式 MEMS センサの特徴を活かした利用方法を検討した。

①-(1-2-2)-3-1　MEMS-AE センサの概要

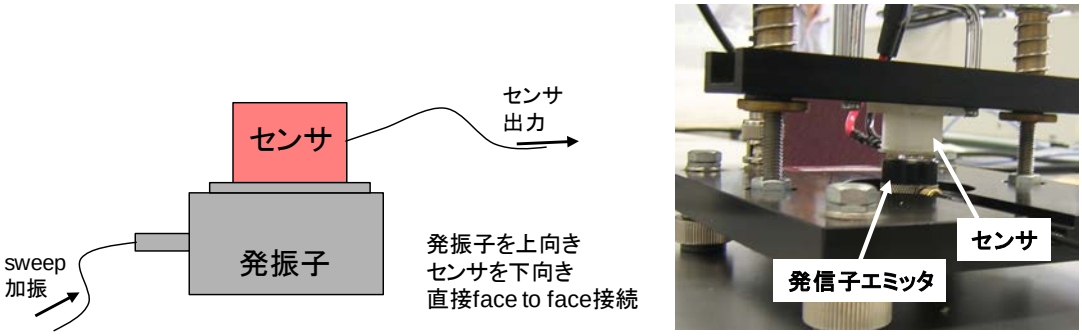
図①-(1-2-2)-3-1.1 に MEMS-AE センサを示す。左図がセンサ単体の写真であり、カンチレバー根元に圧電素子を配置し、カンチレバーの変形に伴う抵抗変化を検知する。右図がセンサシステムの概観であり、カンチレバーの片面に液体を配置し、液体を通して AE 波を受信することで広い周波数特性を持つことを特徴とする。



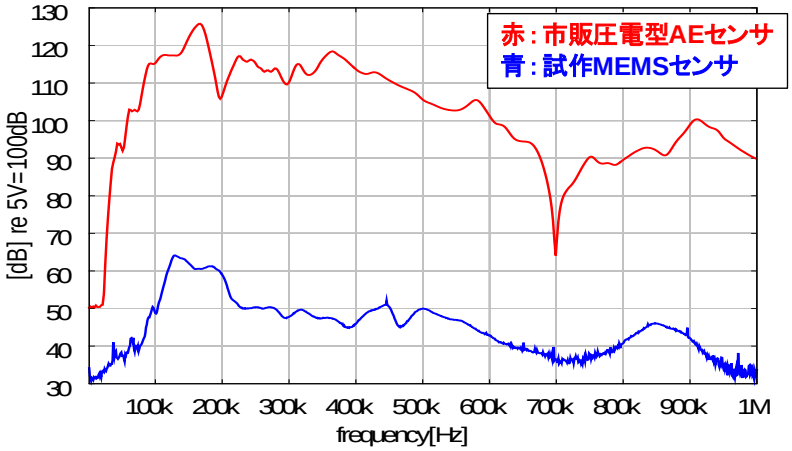
図①-(1-2-2)-3-1.1　MEMS-AE センサ

①-(1-2-2)-3-2　AE センサ単体超音波信号受信試験

MEMS-AE センサの特性を把握するために、AE センサ単体超音波信号受信試験を実施した。AE センサの特性把握試験の一つとして知られている手法を踏襲し、超音波発振子(エミッタ)に face to face でセンサを設置し、sweep 加振による感度周波数特性の取得を行った。図①-(1-2-2)-3-2.1 に face to face 接続の模式図と実際の実験時の写真を示す。図①-(1-2-2)-3-2.2 に市販圧電タイプの AE センサと試作 AE センサの周波数特性を示す。図から分かるように試作 MEMS センサは広い周波数特性を持つことが確認できたが、感度には大きな差があることが確認できた。

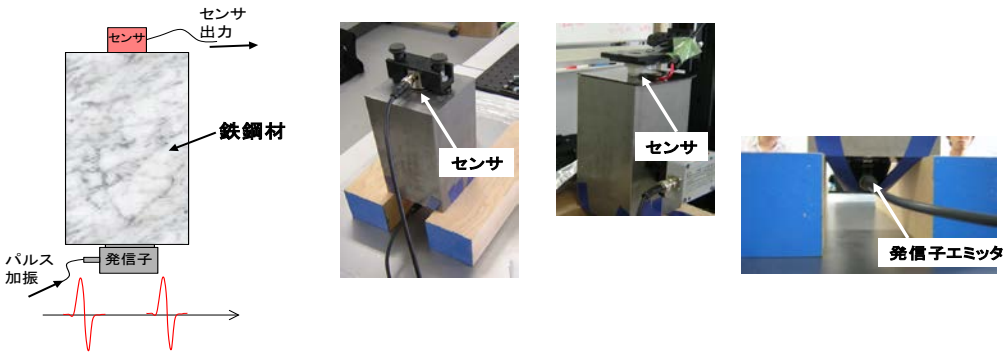


図①-(1-2-2)-3-2.1　face to face 試験

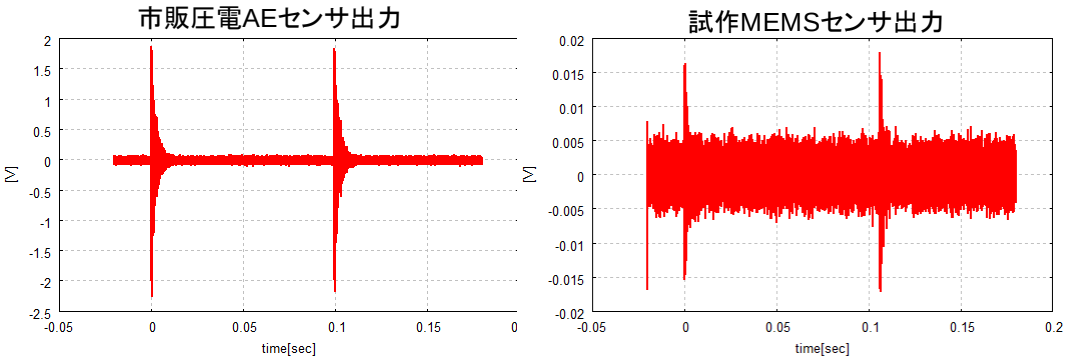


図①-(1-2-2)-3-2.2　周波数特性

次に、実際に鉄鋼材を伝搬する信号を取得できるかを確認するために、鉄鋼材の底面にエミッタを配置し、上面にセンサを設置しての試験を実施した。図①-(1-2-2)-3-2.3 に 鉄鋼材伝搬試験の模式図と実際の実験時の写真を示す。図①-(1-2-2)-3-2.4 に市販圧電タイプの AE センサの受信時系列波形と試作 MEMS センサの波形を示す。ノイズは大きいものの実際に鉄鋼材を伝搬する波形を試作 MEMS センサで観測できることが確認できた。



図①-(1-2-2)-3-2.3　鉄鋼材伝搬試験



図①-(1-2-2)-3-2.4　受信時系列波形

表①-(1-2-2)-3-2.1 に受信試験のまとめを示す。以上より、試作 MEMS センサは AE 信号の周波数帯域を有することが確認でき、試作 MEMS センサの感度、SN 比の現時点での性能を把握し、目標との差を確認できた。

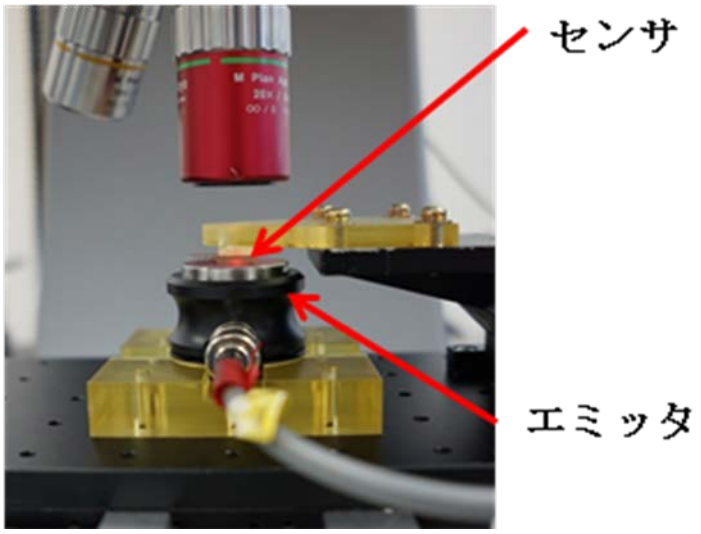
表①-(1-2-2)-3-2.1: 受信試験まとめ

	現状	目標
周波数帯域	～400kHz	◎
感度	64dB	125dB
S/N比	32dB	60dB

①-(1-2-2)-3-3　AE センサ単体実稼働形状計測試験

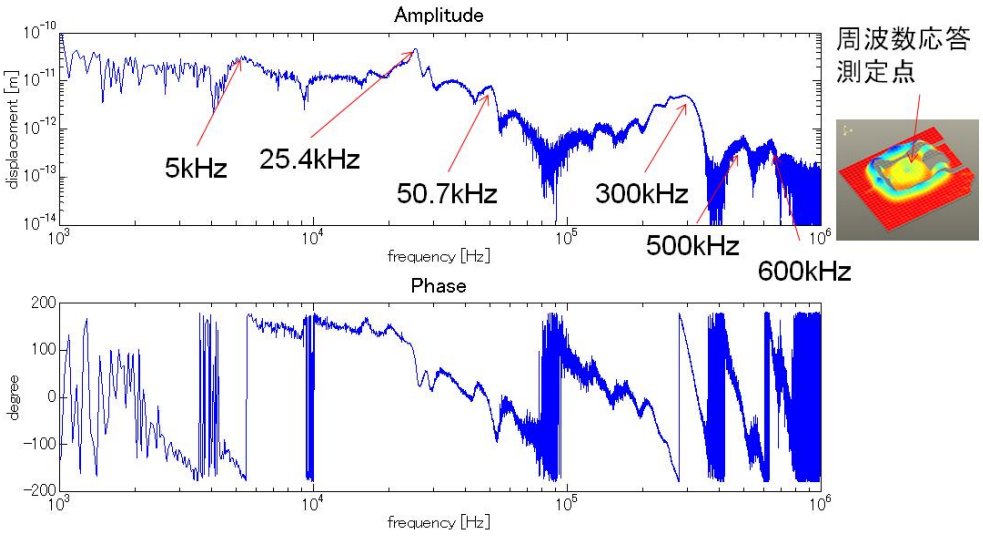
MEMS-AE センサの感度向上のためには、センサの動特性を把握することが重要である。本章では、MEMS カンチレバーの振動形状を、Polytec 社 MSA-500（SLDV、Scanning Laser Doppler Vibrometer）で測定し、約 10kHz～1MHz における動特性を取得した結果を記す。

図①-(1-2-2)-3-3.1 に本計測における測定系の写真を示す。センサの直下にエミッタ（オリンパス製 V101）を配置し、センサをスイープにより直接加振する。事前にセンサの直上から測定範囲を指定し、測定された範囲の入力電圧に対する周波数応答をレーザにより各点で測定し、振動形状を動画で表示する。

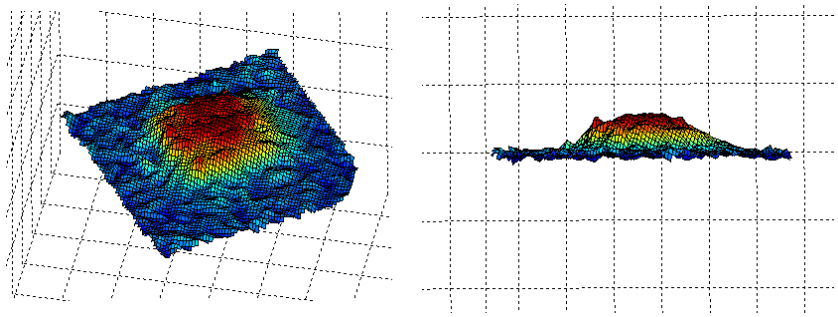


図①-(1-2-2)-3-3.1　SLDV による実振動形状測定

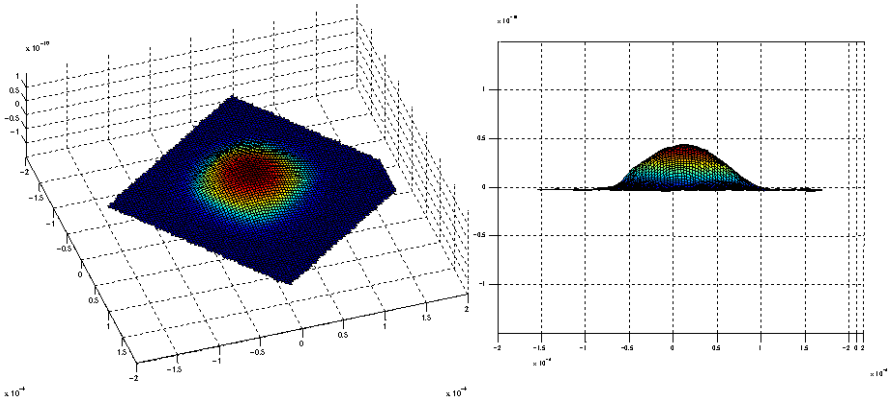
図①-(1-2-2)-3-3.2 にカンチレバー中央の周波数応答を測定した例を示す。周波数応答によると、10kHz から 1MHz 近傍までの広い範囲における応答が確認できる。赤い矢印で示した 6 点の周波数における実振動形状（ODS）を図①-(1-2-2)-3-3.3 から図①-(1-2-2)-3-3.8 に示す。この結果から、カンチレバーの振動形状は水面に発生する表面波の形状と同じであり、周波数が高くなるに従って波長が短くなる様子が観察された。



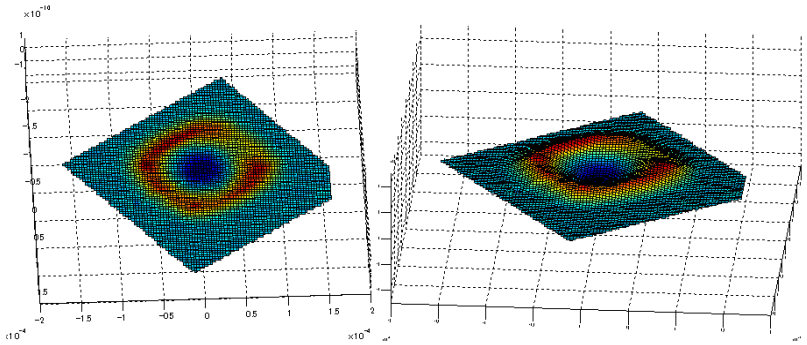
図①-(1-2-2)-3-3.2　カンチレバー中央の周波数応答



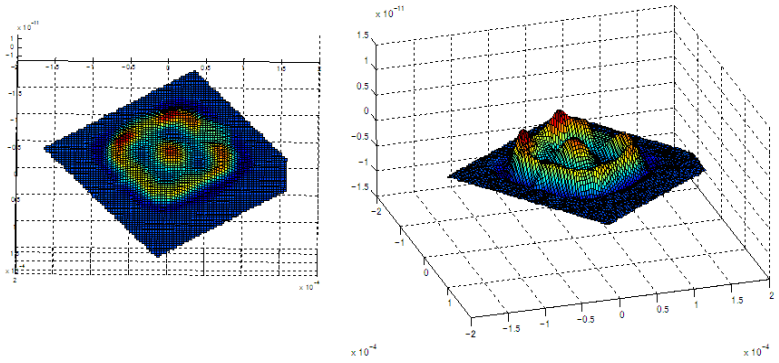
図①-(1-2-2)-3-3.3　5kHz における振動形状



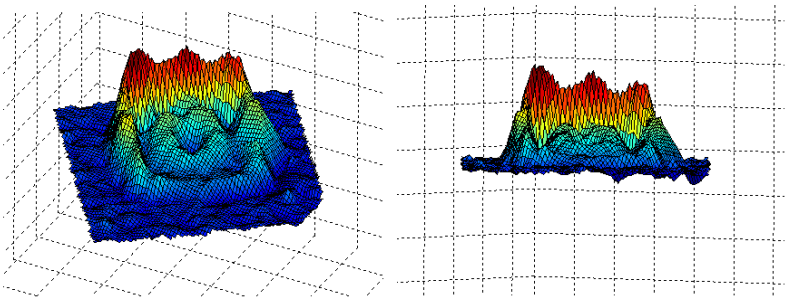
図①-(1-2-2)-3-3.4　25.4kHz における振動形状



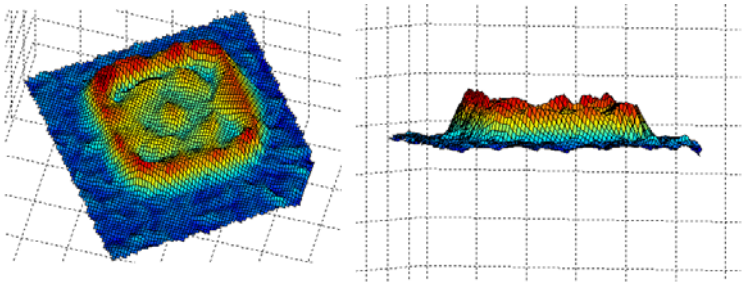
図①-(1-2-2)-3-3.5　50.7kHz における振動形状



図①-(1-2-2)-3-3.6　300kHz における振動形状



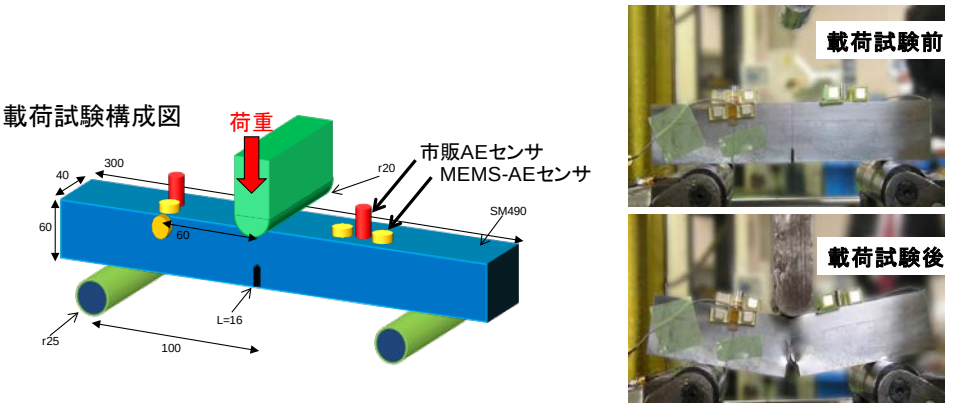
図①-(1-2-2)-3-3.7　500kHz における振動形状



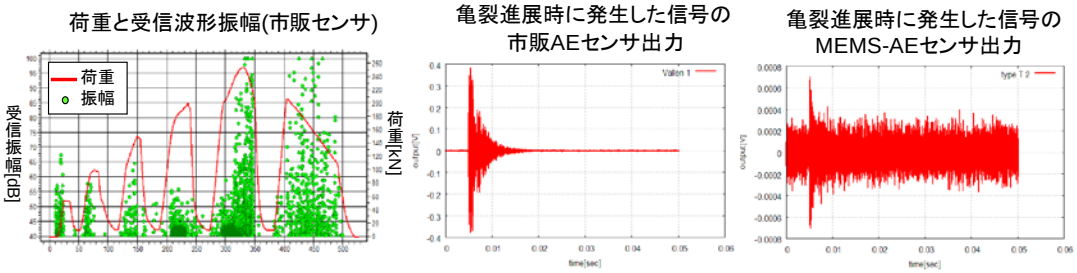
図①-(1-2-2)-3-3.8　600kHz における振動形状

①-(1-2-2)-3-4　AE センサの鋼材亀裂による信号受信試験

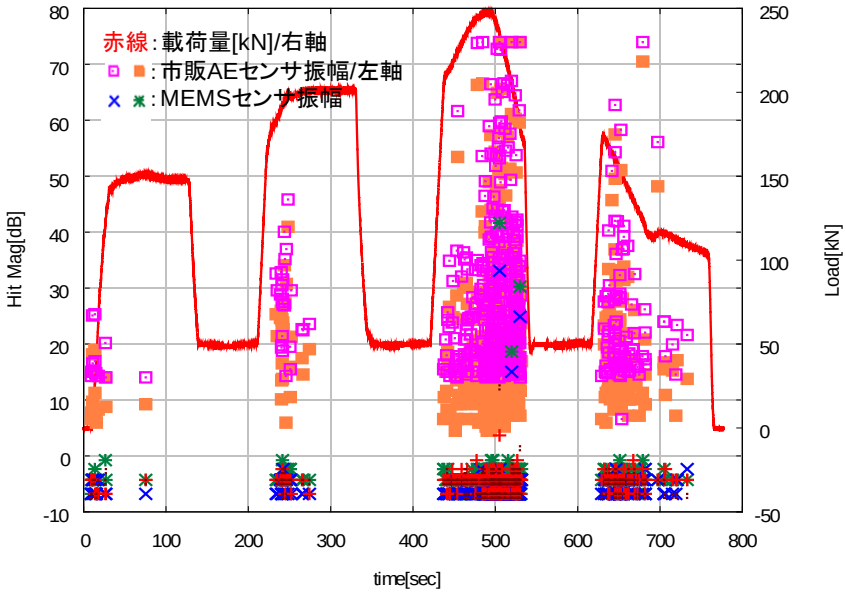
前節の試験は人工的にエミッタによって発生させた信号をセンサで取得する試験であった。実際の亀裂進展に伴った AE 波形を取得できるかを確認するために、鉄鋼材に対する載荷試験を実施した。長さ 300mm の鉄鋼材に対して 3 点荷重をかけ、亀裂進展に伴う AE 波形を取得する。図①-(1-2-2)-3-4.1 に載荷試験の模式図と実験時の写真を示す。なお、MEMS-AE センサの出力増幅のために専用のアンプ回路を試作した。図①-(1-2-2)-3-4.2 に市販センサの荷重-受信波形振幅グラフ、及び亀裂進展時の市販圧電タイプセンサと MEMS-AE センサの受信時系列波形を示す。図①-(1-2-2)-3-4.3 に載荷試験におけるセンサの荷重-受信波形振幅グラフを示す。赤線が載荷パターンであり、4 回にわたって荷重開放を繰り返し、そのたびに桃橙で示す市販 AE センサがヒットしている様子が分かる。青緑の MEMS センサも 3 回目の荷重においては合計で 8～10 ヒットを観測することができている。図①-(1-2-2)-3-4.4 に載荷試験における受信波形の周波数スペクトルを示す。赤線に示す Back Ground Noise に対して、亀裂進展時に 70-150kHz のスペクトルが観測されていることが分かる。感度とアンプ回路の周波数特性の問題で、荷重の増大に対して MEMS-AE センサの出力はわずかなものではあったが、実際の亀裂進展に伴う信号が受信できることが確認できた。以上より、MEMS センサでの亀裂による信号受信を確認すると共に、アンプ回路の基礎構成を確認し、市販 AE センサとの定量的評価を実施することができた。



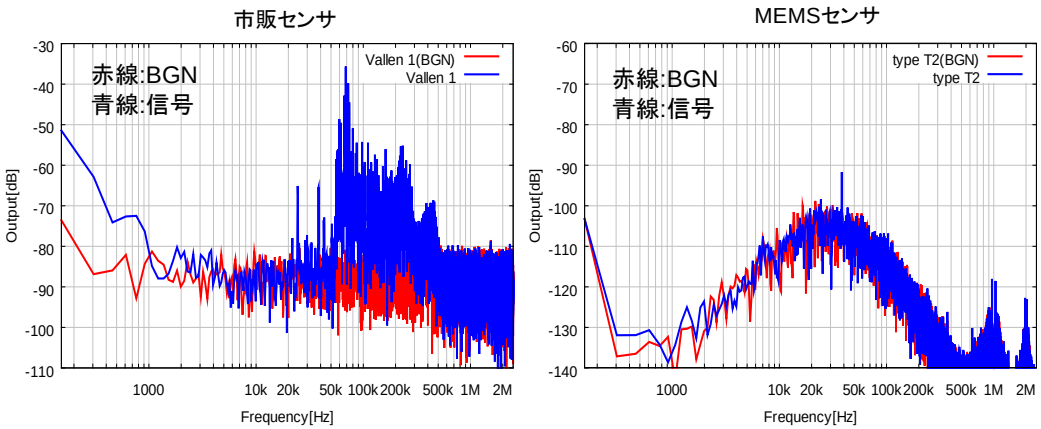
図①-(1-2-2)-3-4.1　載荷試験



図①-(1-2-2)-3-4.2　載荷試験受信波形



図①-(1-2-2)-3-4.3　センサ荷重-受信波形振幅



図①-(1-2-2)-3-4.4　センサ受信波形周波数スペクトル

①-(1-2-2)-4　自立電源とシステム要求仕様

【株式会社東芝】

①-(1-2-2)-4-1　自立電源から見たシステム要求仕様

一般的に自立電源として使用する場合には、乾電池やボタン電池を利用する方法と、振動発電や光・太陽光発電など（エネルギ・ハーベスティング）技術と組み合わせて使用する方法が考えられる。表①-(1-2-2)-4-1.1 に、一般的に使用されているアルカリ単三電池 LR6 やボタン電池 CR2450 の電池容量と、エネルギ・ハーベスティング装置の発電量をまとめているが、振動発電や温度差発電の発電量は mW のオーダでありバッテリなしで構成するには無理がある。光・太陽光発電の場合には、パネルを大きくすることにより発電量を大きくすることは可能であるが、夜間や天候によっては安定的な電力供給が難しくなるため、バッテリ（二次電池）との組み合わせる方が望ましい。

コストの観点から見ると、乾電池やボタン電池だけで構成されることが望ましいが、頻繁に電池交換が必要なシステムでは、メンテナンスのコストが増大してしまう。インフラ点検の間隔が 5 年程度であることを考えると、5 年以上は電池交換などメンテナンスが発生しないシステムとする必要がある。

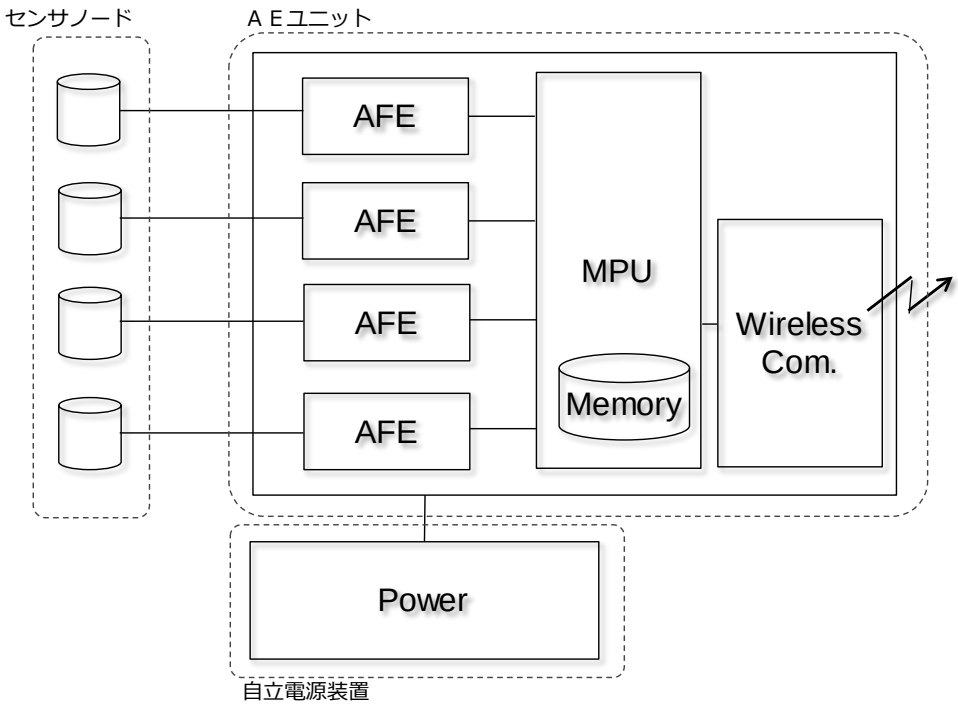
表①-(1-2-2)-4-1.1 一般的な電池とエネルギ・ハーベスティング発電量のまとめ

分類	発電原理	体積(cm2)	電力量	参考価格（USD）
アルカリ単3電池 LR6	アルカリ	7.3	容量: 2000mAh (1.5V) Max: 1000mA	～1（USD）
ボタン電池 CR2450	リチウム	0.47	容量: 610mAh (3V) Max: 30mA	～ 2（USD）
振動発電 20～60Hz	電磁誘導	73～230	発電: ～20mW	～ 300（USD）
振動発電 80～175Hz	圧電	40	発電: 6～8mW	～ 400（USD）
光・太陽光	光電変換	27	発電: 1W	～ 10（USD）
温度差	ゼーベック効果	78	発電5.1 mW	～ 300（USD）

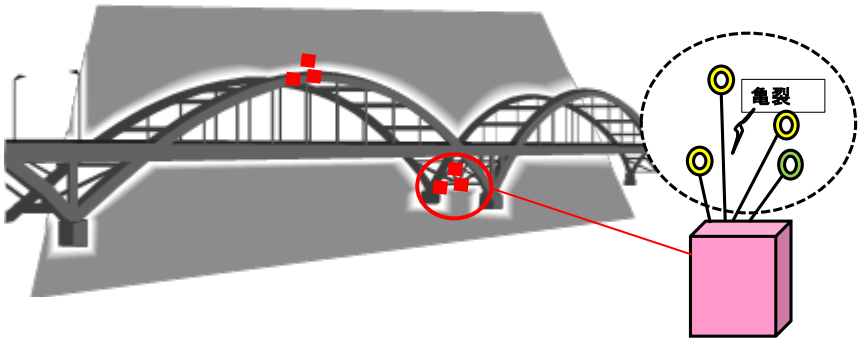
①-(1-2-2)-4-2　システム仮想設計

AE センサシステムの基本構成ブロック図を図①-(1-2-2)-4-2.1 に示す。本システムは 4 つのセンサノードと AE ユニット、及び自立電源装置からなる一群の AE モジュールとして構成される。各センサノードと AE ユニットは同軸ケーブルにより接続され、給電とセンサ信号の通信が行われる。センサノードの内一つはウェイクアップセンサとして監視を行う。ウェイクアップセンサの信号が所定の条件に達した場合にのみスリープ状態の解除、ならびにセンサノードへの給電を行うことで、動作タイミングを最適化し消費電力を抑える。

また、センサノードと監視対象とするポイント（亀裂発生推測箇所）の配置例を図①-(1-2-2)-4-2.2 に示す。AE 信号の各センサノードへの到達時間差を利用した亀裂位置の評定を行い、監視対象領域外からのノイズ信号を除去する。

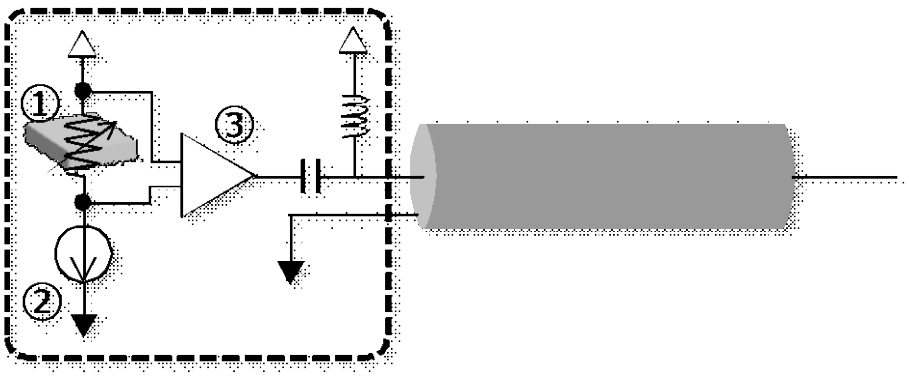


図①-(1-2-2)-4-2.1　AE センサシステム基本構成ブロック図



図①-(1-2-2)-4-2.2　AE センサシステム基本構成ブロック図

図①-(1-2-2)-4-2.3 にセンサノード 1 チャネルのブロック図を示す。センサノードは AE 信号の検出及び増幅を行う。抵抗変化型 AE センサ①、センサ駆動用電流源②、前置増幅器③の 3 要素により構成される。電気回路用電源は信号線と共用するラインドライブ方式を用いる。

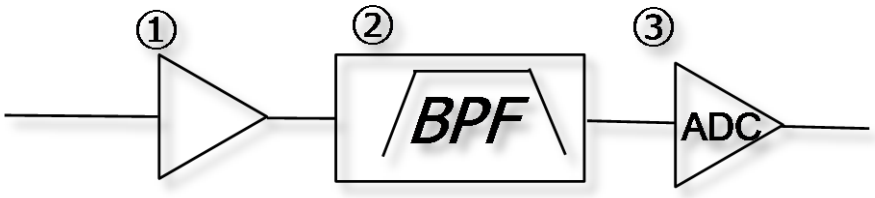


図①-(1-2-2)-4-2.3　センサノード構成図

AE ユニットはさらに下記 3 つのブロックで構成される。

◆アナログフロントエンド（AFE）

アナログフロントエンドはセンサノードから出力される信号の増幅、帯域制限、量子化を行う（図①－(1-2-2)-4-2.4)。主増幅器①、バンドパスフィルタ②、AD コンバータ③によって構成される。バンドパスフィルタの通過帯域は 70kHz～200kHz で、観測対象物に応じて変更する。



図①-(1-2-2)-4-2.4　アナログフロントエンド構成図

◆演算器（MPU）

演算器は、各センサノードからの信号を分析し AE パラメータとして、振幅、持続時間、エネルギ、周波数、評定位置などの情報を抽出し、メモリに蓄積する。また、システム全体の制御を行う。これは不揮発 FPGA 及び同 FPGA 内に構築されるマイクロコントローラにより構成される。不揮発 FPGA を用いることで、待機時の消費電力を抑え、高速なウェイクアップ動作を可能とする。

◆無線通信部

無線通信部は、メモリに蓄積された AE パラメータ情報を中継器、及び管理サーバへ無線送信する。

①-(1-2-2)-4-3　消費電力

ここでは前記システム構成に基づいて各ブロックの消費電力を見積もる。計測時、通信時ならびに待機時における各ブロックの動作状態及び消費電力を表①-(1-2-2)-4-3.1 に示す。

表①-(1-2-2)-4-3.1　状況別ブロック動作状態と消費電力

	センサノード	AFE	演算器	通信モジュール	消費電力
計測時	Active	Active	Active	Sleep	114.6
通信時	Sleep	Sleep	Sleep	Active	56.1
待機時	Sleep	Sleep	Sleep	Sleep	0.031

（単位：mW）

各ブロック消費電力の算出根拠、及び内訳を以下に記載する。前提条件としては、センサ電源電圧 3V、センサ素子抵抗 600Ω、前置増幅器出力電圧±100mV、主増幅器出力電圧±1V、増幅器静止電流 1mA、出力負荷 100kΩ、AD コンバータは 12bit:2MSPS、演算器としては不揮発 FPGA を用いて 4 チャネル分の AE パラメータ抽出処理を実行している文献値を用いた。無線は 2.4GHz 帯無線モジュールにおけるカタログ値を参考とした。スリープ時は、センサノードへの給電は停止し、演算器ならびに無線通信部は待機状態とし、ウェイクアップセンサの監視のみを行う。

◆センサノード（1 チャネルあたり）

	Active	Sleep
抵抗変化素子	0.15 mW	0.000 W
電流源	4.50 mW	0.000 W
前置増幅器	3.00 mW	0.000 W
出力負荷	<0.01 mW	0.000 W
計	7.65 mW	0.000 W

◆アナログフロントエンド（1 チャネルあたり）

	Active	Sleep
主増幅器	3.75 mW	0.003 mW
バンドパスフィルタ	0.30 mW	0.000 mW
AD コンバータ	6.45 mW	0.003 mW
計	10.5 mW	0.006 mW

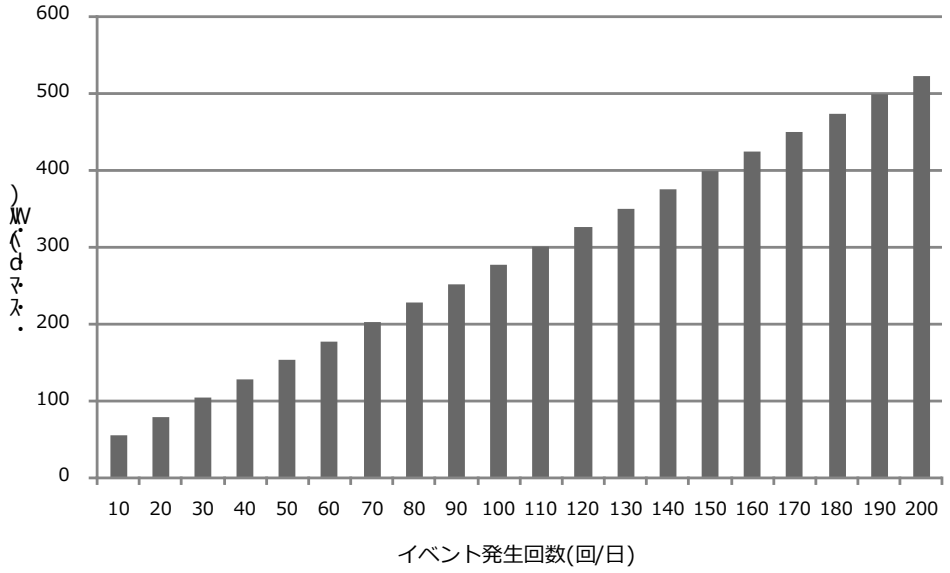
◆演算器

	Active	Sleep
不揮発 FPGA	42.0 mW	0.002 mW
計	42.0 mW	0.002 mW

◆無線通信部

	Active	Sleep
通信モジュール	56.1 mW	0.005 mW
計	56.1 mW	0.005 mW

1 回あたりの計測時間を 1 s 、通信時間を 1 s と仮定すると、1 日のイベント発生回数と平均消費電力の関係は図①-(1-2-2)-4-3.1 となる。1 日 200 回の計測イベントが発生した場合の平均消費電力はおよそ 522μW と見積もられる。



図①-(1-2-2)-4-3.1　イベント発生回数と平均消費電力

①-(1-2-2)-5　海外における AE 商用事例・開発動向調査

①-(1-2-2)-5-1　アメリカ PAC 社

【国立大学法人東京大学 IRT 研究機構】

PAC 社（Physical Acoustics Corporation）は、1978 年設立の AE センサユニット・検査 HW・SW の北米最大のベンダである。現在は、MISTRAS Group の AE 部門という位置付けである。AE モニタリング市場、AE センサへの要求仕様、AE 診断技術の進歩のポイントにつ

いて調査した。

①-(1-2-2)-5-1-1　AE モニタリングの市場規模

今後確実に伸びていくだろうとの見解であった。但し、具体的数値は公表していない。

①-(1-2-2)-5-1-2　AE センサ価格と市場規模

センサ単体というより導入コストを低減することがカギとのことであった。小型、高機能、低価格の AE センサが実現に寄与する。その結果、AE モニタリング市場規模の拡大は可能とのことであった。

①-(1-2-2)-5-1-3　AE センサの要求仕様

サイズ：　5cm×5cm×5mm 程度

寿命　　：5 年程度。バッテリ交換も課題。

環境　　：低温・高温耐性が重要（具体的数値は得られず)

周波数特性：広帯域であること。10kHz～300kHz で平坦な特性であると理想的。
地震～振動～ＡＥの帯域をすべてカバーできるとなお良い。

その他：(1) GPS を搭載し、センサの位置同定を可能とすると良い。

(2) 送信源として、受信帯域と同程度のパルスが送信できると適用範囲が広がる。

(3) AE 発信源(診断対象)の位置標定のため複数センサ間の同期が重要。
同期精度は、100μsec 以下。

①-(1-2-2)-5-1-4　過去の AE 技術との差異

2～30 年前の AE 技術と現在との主な違い（実用化が可能となったポイント）は以下に集約される。

(1)　高速サンプリングレートでの計測を可能とするデバイス面での進化

(2)　計測データを評価するノウハウの蓄積

(3)　データの無線通信の容易化

①-(1-2-2)-5-2　ドイツ Vallen 社

【株式会社東芝】

Vallen 社（Vallen Systems GmbH）は、1980 年設立の AE センサユニット・検査 HW・SW の欧州最大のベンダである。同社にて、AE センサの適用市場、AE センサへの要求仕様な

どを調査した。

①-(1-2-2)-5-2-1　AE センサの適用市場

・ガスタンクへの適用事例では、球形タンクに数 m 間隔で 30 個のほどのセンサを配置し、欠陥の位置標定を行う。
・碍子の製造工程検査に AE センサを用いる事例あり。FRP(Fiber Reinforced Plastics)とメタルの嵌合強度検査に適用している。
・その他の適用例として、石油タンク、水素タンク、パイプライン、海底油田、圧力容器、化学プラントなどの紹介があった。
・直近の適用範囲の拡大例としては、航空機への適用、変圧器碍子の絶縁不良の検知診断の要求がある。

①-(1-2-2)-5-2-2　AE センサへの要求仕様

・温度範囲が重要な仕様である。-30℃～80℃程度が標準であり、この温度範囲をカバーすれば大多数のアプリケーションに適用可能である。
・極低温や極高温の対象に対しては、ウェーブガイドによりセンサ接触面の温度を室温に近づけることで実質的に温度範囲を拡大することも可能である。
・周波数帯域としては 150kHz がセンサのボリュームゾーンである。但し、MHz オーダのセンサが実現できれば、新たなアプリケーションへの適用も可能となる。
・現状のセンサは、インストレーションコストが高く、置きっぱなしに出来れば大きなメリットとなる。

①-(1-2-2)-5-2-3　AE センサの橋梁への適用事例 [6)]

・米・カリフォルニア州サクラメントの Bryte Bend Bridge(ガーダー橋、1971 年開通)の補修良否判定に AE を適用した事例がある。
・クロスフレームのウェブへの溶接部位に亀裂が発生した。本格補修を実施する前に、2 種の補修を試験的に実施し、AE にて診断している。補修の良否を定量的に判定する。
・試験にて良判定となった手法にて、本格補修を実施する。補修前後の AE 診断により、亀裂の活性度が大幅に低減されたことを確認した。

これは、補修部位の補修効果を定量的に判定するツールとして AE が有効であることを確認した事例と言え、興味深い。

①-(1-2-2)-5-3　TUV Austria

【株式会社東芝】

TUV Austria は、欧州を中心に 20 ヶ国で工業サービスを提供する会社である。主に、エレベータ、圧力機器、医療機器、電子機器、などの検査サービス、認証サービスを実施している。AE センサシステムを用いた検査サービス部門（Institute of technical physics and calibration laboratory）を訪問し、AE センサの適用事例、要求仕様、検査規格の標準化などを調査した。

①-(1-2-2)-5-3-1　AE センサの適用市場

・現状、最大の適用市場は石油タンクの腐食検査である。TUV で数百タンクを検査している。1 タンクあたり、50～60 個程度のセンサを用いるのが一般的である。

・センサの数を多く用いているのは、オイルのパイプラインであり、デンマークの例で最大 50km のパイプラインに 50m おきにセンサを設置している(約 1000 個のセンサ)。

・今後有望なのが船(オイルタンカなど）の検査である。腐食と疲労亀裂の両面での検査が必要となる。航空機の燃料配管の燃料漏れ検知も有望だが、センサの小型化・低コスト化が望まれる。

①-(1-2-2)-5-3-2　ノイズ除去

鉄道タンク車の測定の例では、バックグラウンドノイズの除去のため、タンク全域をカバーするようにセンサを配置する。疲労・腐食起因の信号測定と並行してノイズレベルの測定も行なう。

①-(1-2-2)-5-3-3　AE センサへの要求仕様

・耐久性が実用上の大きなポイントであり、構造物に製造工程で埋め込まれるケースについては基本的に構造物の寿命同等が望まれる。

・環境温度範囲もセンサの重要な仕様である。低温側は-50℃まで対応できると概ねすべてのアプリケーションに適用可能となる。高温側は、80℃程度が標準だが、極高温まで対応出来れば自動車エンジンや格納容器など応用範囲は広がる。

①-(1-2-2)-5-3-4　AE 診断の標準化

・TUV は、標準に基づいて検査サービスを実施する。

・検査規格はベルギー・ブリュッセルに本拠を置く CEN（欧州標準化委員会)により EN（欧州規格)化される。

・EN は規格原案の ISO との並行投票が可能であり、EN/ISO 規格化され得る。

①-(1-2-2)-5-4 UCLA

【株式会社東芝】

AE センサによるモニタリングの第一人者である UCLA 小野教授を訪問し、欧米における AE センサによる社会インフラモニタリングの現状を伺った。

①-(1-2-2)-5-4-1 AE センサ社会インフラモニタリングの現状

・米国ではサンフランシスコベイブリッジで常時モニタリングが行われ約 600 個のセンサが使用された（4 百万ドル）。

・ミネソタ州では全ての重要な橋のモニタリングをする計画が進められている。実際の数は公開されていない。

・イギリスの有料道路の橋は PAC 社がモニタリングの受注をしたとの情報を公開しているが、詳細は不明である。

・カナダでは TISEC 社が鉄道橋の AE モニタリングを継続的に受注している。鉄道会社は結果をもとに修繕計画を立てている。AE センサは自主開発しており、社会インフラで商業ベースで採算が取れているケースである。

・ポーランド、チェコでは大型トラックを通過させたときの AE を測定し、健全性を判別している。チェコでは AE 診断結果で通行止めにした例もある。

①-(1-2-2)-5-4-2 AE センサへの要求仕様

・環境温度範囲は－50 度から 80℃程度が必要である。

・北米ではケーブル、センサ類は盗難の対象になるので、取り付け方法に工夫が必要である。

①-(1-2-2)-5-4-3 AE センサの適用市場について

・橋梁以外での適用では、プラントでの適用が多い。石油プラントでは Vallen 社のセンサが多く使用されている。

・10kHz、20kHz 程度で感度の良いセンサができればコンクリート構造物への適用ができる。

なお、本節では文献 7）を参考とした。

①-(1-2-2)-6　ユーザ機関による成果の有効性の検証

ユーザ機関による成果の有効性検証は来年度からの本研究での課題であるが、MEMS-AE センサとそれによるリモートモニタリングにシステム構築の可能性に関して、インフラ保有会社である JR 東日本及び既存の AE センサによる検査サービスを実施ている（株）IHI 検査計測、TUV へのヒアリングにて、以下のコメントを得た。

- 事故発生時に予想される社会的インパクトと経済的損失の大きさと導入コストを比較し導入が検討されるだろう。橋梁以外で大きな経済的損失が予測され早期に立ち上がる常時モニタリング市場として石油タンカ、海底油田、環境保護区を通過するパイプラインが考えられる。
- 既存 AE センサによる検査はワイヤリングなどの設置コストに膨大な費用がかかり、無線でデータが転送できる事は魅力的だ。まずはセンサだけでも設置したままにできると良い。
- 30 年前に一度 AE センサによる損傷検査のブームが起きたが、当時はデジタル処理によるフィルタリングが不十分でノイズ分離ができず良い結果が得られなかった。それゆえ AE によるモニタリングに対しネガティブな印象を持たれており普及の妨げになっている。

以上の結果から、デジタル処理を含めた使い勝手の良いシステムを適切な価格で提供することで新規市場を開拓できる可能性が高いことが確認できた。

①-(1-2-2)-7　まとめ

＜将来開発すべきセンサシステム像＞

将来開発すべきセンサシステムに対する要求仕様や機能をまとめると表①-(1-2-2)-7.1 のようになる。センサの基本性能としては、必要十分な仕様を満足しつつ、飛躍的な低コスト化、小型化を目指すこととなる。

表①-(1-2-2)-7.1 求められるセンサシステム像

センサの性能	周波数: ～200KHz　-95～-80[dB](re 1V/ubar) の感度が要求される
耐久性・耐環境性	5年～10年の設置に耐えられる。
センサ電源の種類	自立電源とバッテリーにより電源供給。
各センサ～中継器～管理サーバへのデータ伝送	損傷進展モニタリングが必要な場所のまわりに複数のセンサを設置し、ノイズの分離とAEパラメータの抽出を行う。 低消費電力化とノイズ除去性能を向上させる為に、ターゲット周りの複数のセンサで一つのモジュールを構成しモジュール内CPUでノイズ除去、AEパラメータ抽出を行う。 （モジュール間の同期は不用） 抽出されたAEパラメータおよびキャリブレーション結果は中継器を介して管理サーバへ伝送する。 ローカルメモリーを有し、AE波形データを蓄積し大規模データを伝送できる仕組み（例えばデータ回収車の利用）があれば効率的なシステムﾊﾞｰｼﾞｮﾝｱｯﾌﾟが可能となる。
サイズ、重量	センサのパッケージサイズは従来の圧電センサの1/10以下を目標とする
センサ価格	センサー単体で、圧電素子の1/10以下の価格、分析装置を含めて常時設置が可能な価格（10万円以下）を目標とする 小型低価格AEセンサを実現できれば、センサ設置場所を厳選する必要が無くなり、モニタリングポイントの設置ミスによる重大な損傷進展の見逃しリスクを低減できる。
その他	AEセンサで取得された損傷データから橋梁全体のリスク分析を行うためには、純粋なデータマイニングではなく、物理モデルを考慮した推定アルゴリズムの導入が必要である。

＜開発すべきセンサシステムの技術課題・開発内容と目標＞

低コストのモニタリングの実施には設置コストの削減が最も効果的であり、それを実現するために、カンチレバー式 MEMS-AE センサによるセンサコストの削減と長寿命化を計画している。

カンチレバー式 MEMS-AE センサによるモニタリングシステムの実用化に向けては、カンチレバー式 MEMS-AE センサの改良と、AE 信号とノイズ信号の効率的な分離技術を確立する必要がある。AE センサの改良は、先導研究において見出した方向性に基づく改良案を実施し、ノイズ分離に関しては先導研究で調査した結果に加え、東芝独自の構造解析

とビックデータ解析技術を適用して効果的な方式を検討する。

＜開発されるセンサシステムを適用した場合に期待できる具体的効果インパクト＞

本格研究などを実施することにより想定される実用化される製品、サービスは以下である。

①製品：MEMS-AE センサユニット、検査システム

②サービス：鋼橋梁点検モニタリングサービス

橋梁の老朽化が問題視されており、精度の高いモニタリングを低コストで実現できれば、ユーザは費用対効果の高いメンテナンスを実施することができる。

参考文献

1) 三木千壽、“橋梁の疲労と破壊”、朝倉出版、PP．78-84、（平 23）

2）Z.Gong、 E.O.Nyborg and G.Oommen：“Acoustic Emission Monitoring of Steel Railroad Bridges"、 Materials Evaluation 、 pp.883-887（1992 July）

3）J.Yu、 P.Ziehl、 J.Caicedo and F.Matta：“Acoustic Emission Monitoring and Fatigue Prediction of Steel Bridge Components”、 Proc. of SPIE 8694、 Nondestructive Characterization for Composite Materials、 Aerospace Engineering、 Civil Infrastructure、 and Homeland Security（2013）

4）L.Yu、 V.Giurgiutiu、 P.Ziehl、 D.Ozevin and P.Pollock、 "Steel Bridge Fatigue Crack Detection with Piezoelectric Wafer Active Sensors"、Proc. of SPIE 7647、Sensors and Smart Structures Technologies for Civil、 Mechanical、 and Aerospace Systems（2010）

5）D.E.Kosnik、 T.Hopwood and D.J.Corr、 "Acoustic Emission Monitoring for Assessment of Steel Bridge Details“、 AIP Conf. Proc. 1335、 1410（2010）

6）D.E. Kosnik、 D. R. Marron：“Acoustic emission evaluation of retrofits on the I-80 Bryte Bend Bridge、 Sacramento、 California”、 Proceedings of Advances in Acoustic Emission、 (2007）

7) K. Ono: “Application of acoustic emission for structure diagnosis”, Proceedings of Scientific Conference Poland, (2010).

①-(1-3) 幹線道路（トンネル付帯構造物）モニタリングシステムの開発

【パナソニック株式会社】

複数年間隔で実施される点検の間の変状の無人監視化に対し、ボルトなどによって固定されている箇所は局所的な応力・疲労があること、またコンクリートと金属などの異種材料の界面であり、劣化現象が現れやすいことなどの理由から、重要課題と考えられるトンネル付帯構造物に着目し、自立無線センサ端末による取付け部の変状のセンシングの可能性を調査検討した。センサ種については振動センサ（加速度センサなど）を候補に、センサ端末の自立化手段については気流を用いた環境発電デバイスを対象とし、長期間及び高所などの理由で人手が入りにくい付帯構造物の常時監視の実現によって、維持管理の高度化・省力化に貢献する。

①-(1-3)-1　研究の目的

＜社会課題＞

1960～70 年代の高度経済成長期に多く建設された社会インフラが、一斉に老朽化の問題を迎える時期にきている。国内のトンネルについては、建設後 50 年を経過するものの数は 2012 年時点で全数（約 10000）の約 18％であるが、2022 年には約 30％に、2032 年には半数近くになる。トンネルの維持管理は、マニュアルに基づいた綿密な点検によって行われているが、老朽化トンネル数の増加は、同時に点検コストの増大につながり、限られた財源の中でどのように対処していくかが喫緊の課題となりつつある。

＜現状の取り組みと課題＞

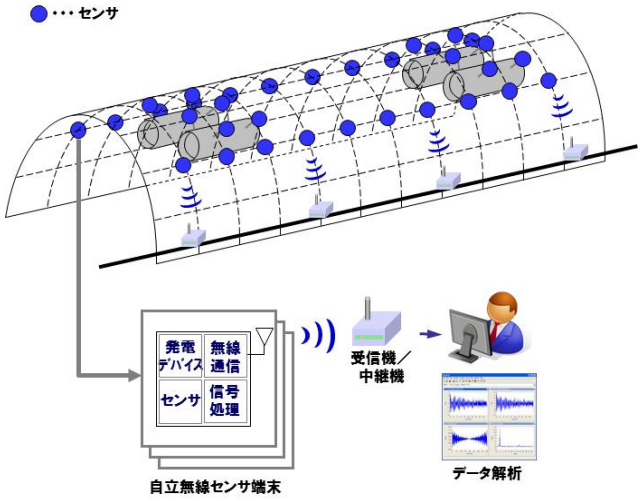
トンネルの維持管理は概ね 5 年毎の作業員による目視及び打音検査によって行われているが、人員作業であることによる検査頻度の限界、スキル・経験への依存性、高所作業などの作業負担の大きさなどの理由からセンサなどを用いた遠隔モニタリングのニーズが高まっている。トンネルの覆工コンクリートに関しては、凹凸形状やクラックの状態を走行しながら測定・記録するレーザ応用測定器が実用化され、また、光ファイバセンサを張り巡らせた全体の歪み検知の試みなどが行われている。一方、覆工コンクリートにアンカーボルトなどで取付けされている付帯構造物（換気設備、標識板など）については、取付け部のような特異点の計測には前記の方法を用いることができず、センサなどによる遠隔モニタリングのニーズが非常に高い。また、センサは概ね高所に取り付けられるため、作業性を高めるために配線不要であることが好ましく、一度取り付けた後も電池交換などの手間がないことが望まれている。

また、打音や目視以外の非破壊検査技術も精力的に研究開発されており、橋梁分野で実用化されている衝撃振動法などがあるが、トンネル分野ではまだ決め手となる手法はないといって良い。現在の非破壊検査に用いられる音源やセンサは大掛かりなもので、かつ給電・情報のための配線が必要であり、運搬・設置・配線他にかかるコストの問題もあり、検査が常時もしくは高頻度にできるものでないことが課題であると考える。

＜実施内容と最終目標＞

以上の現状課題を解決するシステムとしては、既設トンネルに対して配線工事が極力不要で設置が容易であり、かつ、設置後はコストがかかるメンテナンスが不要であり、しかも、万が一の故障時には容易に取替えできる、バッテリレスの無線センサ端末によるモニタリングシステムが最適と考える。これを実現するには、前記従来手法と比較すると、連続監視に必要なモニタリングデータをセンサで取得できること、及びセンサ端末の駆動エネルギを供給する環境発電デバイス技術がキーとなると考える。システム全体のイメージを図①-(1-3)-1.1 に示す。

かかる常時モニタリングシステムを導入することにより、複数年に一回の点検の間の変状が見える化でき、次回点検の重点箇所の絞込みによる検査確度の向上や、地震などの災害発生前後の変化度合の即時把握（人が現場に向かう前の把握）も期待され、現在の点検スキームと両輪で運用することで、トンネルインフラの維持管理の一層の精密化、省力化が図れるものと考える。以上の背景、課題を鑑み、本研究においては、トンネルの付帯構造物（換気設備、標識板など）の取付け部の変状監視を対象とした、無線センサ端末によるセンシング及び自立電源の可能性を調査検討した。



図①-(1-3)-1.1　本研究におけるトンネル付帯構造物モニタリングシステムのイメージ

本先導研究期間においては、トンネル付帯構造物取付け部を対象とした、無線センサ端末によるセンシング及び自立電源の可能性を調査検討し、端末構築のための仮仕様及び技術的課題を明確にした。可能性検討のための必須重点課題はセンシング手法と環境発電デバイス技術の 2 点である。

センシング手法については、連続監視に用いるパラメータ（固有振動数など）を取得するためのセンサ種及びその仕様などを検討した。取付け部は、例えば覆工コンクリートとアンカーボルトから構成され、コンクリートの亀裂やボルトの腐蝕などによってその界面に空隙などが生じた場合、取付け構造体の振動状態を決める境界条件が変化することによって、その振動スペクトルが変化する可能性が考えられる。したがって、センサ種として振動センサ（加速度センサなど）を候補とし、計測に適するセンサの仕様、サンプリング方法などを検討した。先導研究においては、模擬構造に対する解析シミュレーション及び予備実験などによって、前記仮設の検証と技術課題の把握を行った。

次に、環境発電デバイス技術についてはトンネルの特性上、気流を利用した発電デバイスに着目し、これの適用可能性について検証した。現在想定される技術課題としては、トンネル環境への適合性・耐性が挙げられる。これらを解決する方法として耐環境性を確保できるデバイス及び端末構造の検討を行った。

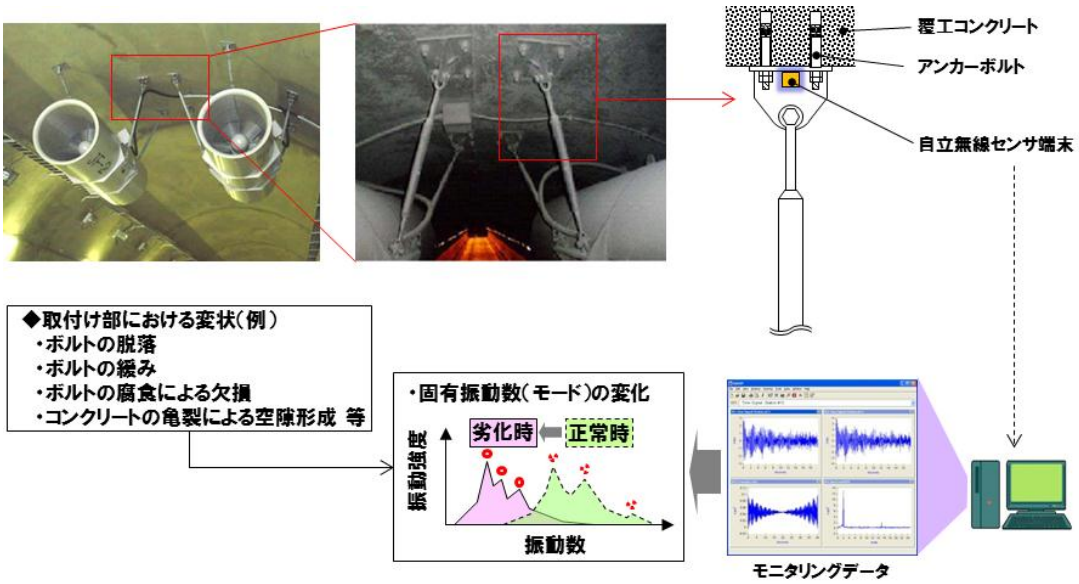
以上、本研究の最終目標として次の 2 つを設定した。第 1 に、振動センサ（加速度センサなど）の適用に関し、振動スペクトルの取得に必要なセンサ仕様、サンプリング方法、設置方法などを解析シミュレーション及び模擬実験によって明確にした。また、振動スペクトルから変状監視に必要なデータ（固有振動数など）を得るための解析手法に関する技術課題を明確にした。第 2 に、環境発電デバイス、具体的には気流発電デバイスをトンネル環境へ適用するための課題、具体的には、一定でない風量・風向、及び窒素酸化物などの雰囲気ガスへの耐性に関する対策案を調査・立案した。また、センシング（センサ駆動）及び無線通信に必要な発電量を明確にし、そのためのデバイス構造及び後段回路構成を暫定設定し、具体的技術課題の設定につなげる。

①-(1-3)-2　研究成果(1) センシング技術課題の明確化

①-(1-3)-2-1　検討の方向性

付帯構造物の取付け部は、例えば覆工コンクリートとアンカーボルトの界面を有し、コンクリートの亀裂やボルトのゆるみや腐蝕などによってその界面に空隙などが生じた場合、境界条件の変化による付帯構造物や取付け部材の振動モードが変化すると予測される。これを振動センサ（加速度センサなど）でセンシングするための技術課題を明確化し、仕様設定などにつなげる必要がある。本研究では、付帯構造物の仮ターゲットを換気設備（ジ

ェットファン）に定め（図①-(1-3)-2-1.1 参照）、具体的構造について振動解析シミュレーション及び模擬構造体による振動計測実験によるアプローチをとり、原理検証から具体的仕様設定、課題抽出に繋げる。また、センシング仕様（周波数帯域、サンプリング条件、センサ分解能など）の明確化には、解析シミュレーションによる振動モード及びその振動数の当り付けと、実験による検証及び解析シミュレーション精度向上のためフィードバックを循環させることが重要であると考える。従って、解析モデルの精度向上とセンシング実験データ解釈向上の循環、さらに、具体的なセンサ仕様への落とし込みが課題である。なお、ここで蓄積された解析シミュレーション手法及び振動計測手法は、他の付帯構造物（例えば、標識板、吸音板、天井板、他）へも展開可能である。



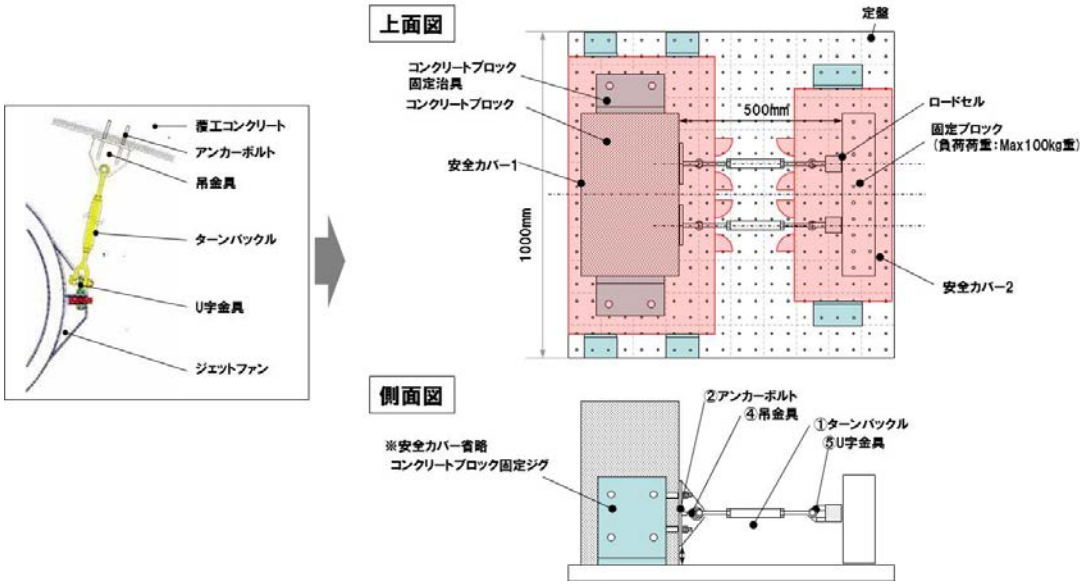
図①-(1-3)-2-1.1　トンネル換気設備（ジェットファン）取付け部を仮ターゲットとしたモニタリングシステムのイメージ

①-(1-3)-2-2　模擬構造体による振動計測実験

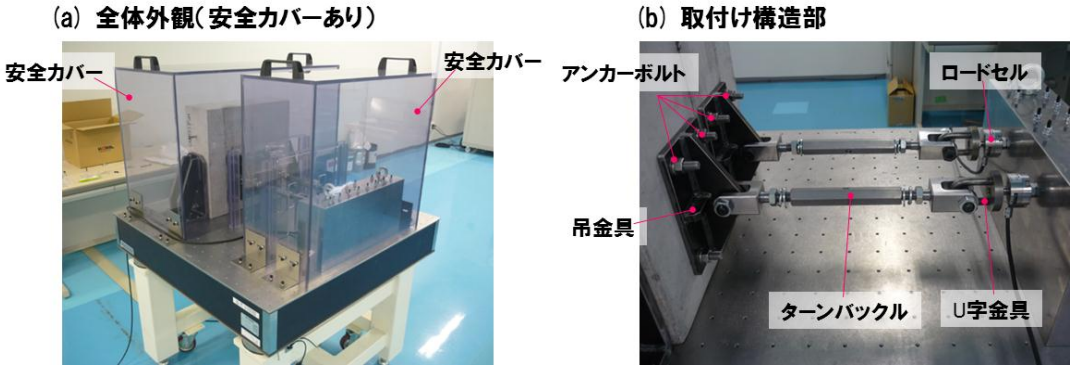
①-(1-3)-2-2-1　模擬構造体の作製

振動計測に関する原理検証を目的とし、換気設備（ジェットファン）の取付け構造部の実物の 1/2 サイズの模擬構造体を作製し、実験室内に設置した。その概略図を図①-(1-3)-2-2-1.1 に、写真を図①-(1-3)-2-2-1.2 に示す。模擬構造体は、吊り金具、アンカーボルト、ターンバックル、吊りボルト、U字金具からなり、コンクリートブロックと固定ブロック（ジェットファン本体の模擬）の間に橋渡しされる状態で固定されている。本来、かかる取り付け構造部はコンクリートから下方に向かい、ジェットファンの重量によって張力がかかっているものであるが、安全上の理由から模擬体では水平置きとし、ターンバ

ックルによって張力を調整できるようにした。張力を一定（本研究では 500N）とするため、U 字金具と固定ブロックの間には（本来ない）ロードセルが挿入されている。



図①-(1-3)-2-2-1.1　トンネル換気設備（ジェットファン）取付け部の 1/2 サイズ模擬構造体の概略図



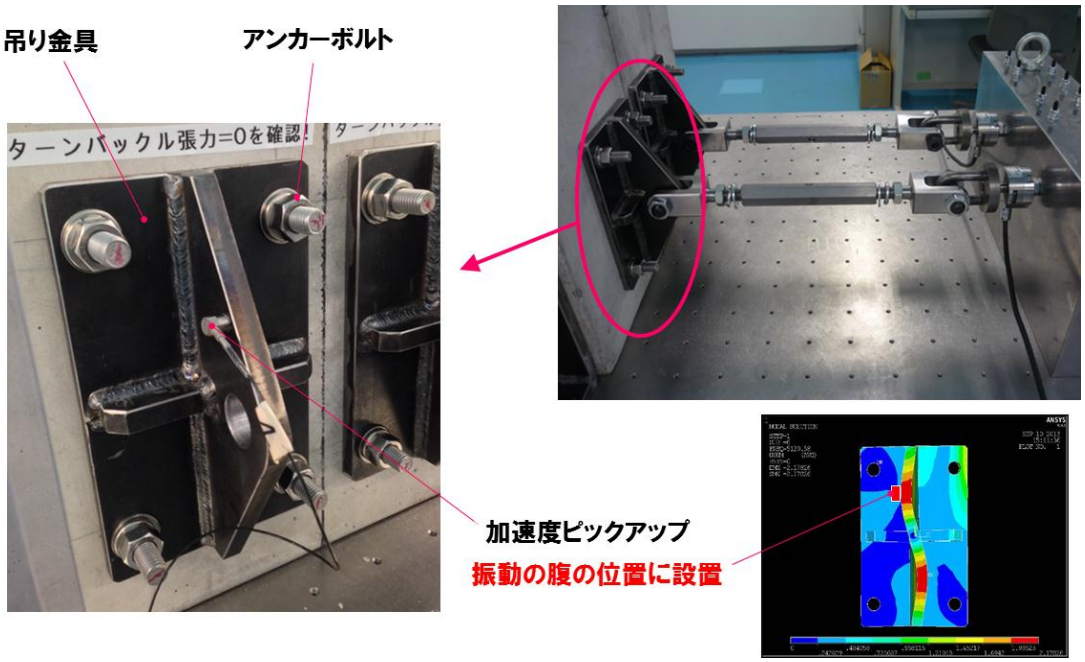
図①-(1-3)-2-2-1.2　トンネル換気設備（ジェットファン）取付け部の 1/2 サイズ模擬構造体

(a)全体外観（安全カバーあり）、(b)取付け構造部

①-(1-3)-2-2-2　実験方法

後述する解析シミュレーション結果より、アンカーボルト及びその近傍に関わる変状検知には、吊り金具の中央の立板部に振動センサを設置することが好適と予測されたため、図①-(1-3)-2-2-2.1 に示すように振動センサ（加速度ピックアップ；Brüel & Kjær 社、品番 4375-S、周波数範囲 0.1-16500Hz）を専用ワックスで固定し、励振ハンマ（Brüel & Kjær 社、

品番 8202、周波数範囲 0-7000Hz）にて励振して、FFT アナライザ（小野測器、品番 CF5220、周波数範囲 10mHz～100kHz、ダイナミックレンジ 90dB）で振動センサからの振動波形を取得した。振動波形は FFT アナライザにて振動スペクトルに変換されるが、その中の固有振動数ピークの同定は、同時に生成される位相スペクトルにおいて位相が±90°となる周波数位置のピークを抽出した。



図①-(1-3)-2-2-2.1　振動センシング実験：振動センサ（加速度ピックアップ）の取付け

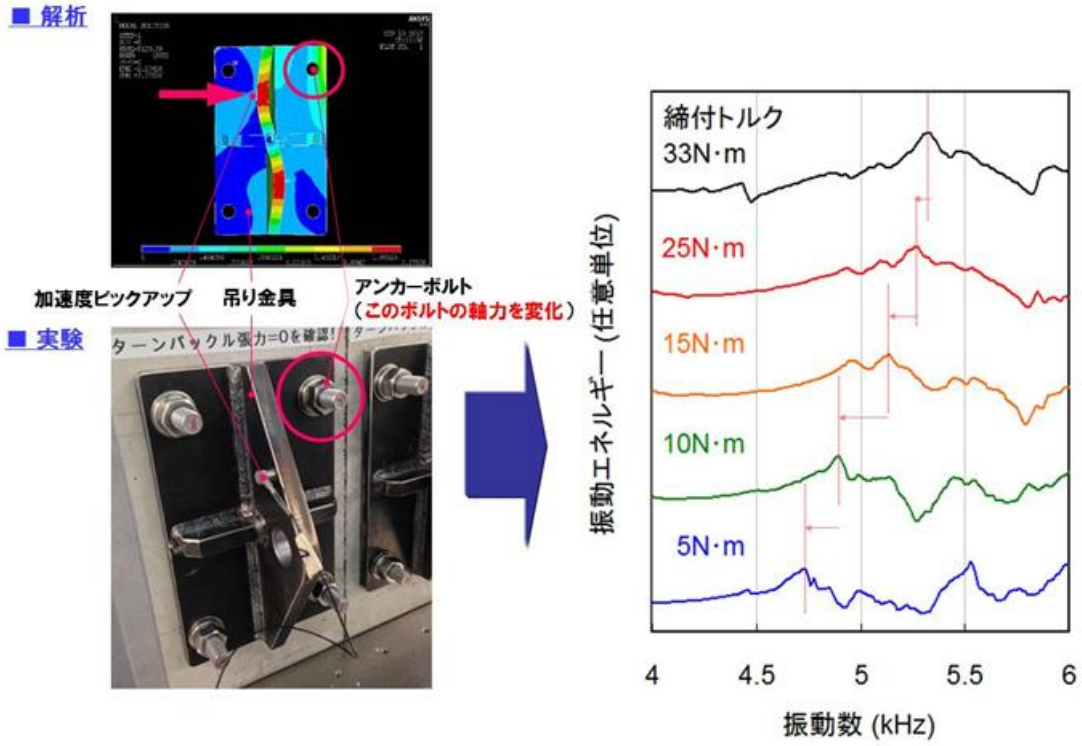
①-(1-3)-2-2-3　実験結果

a.　吊り金具固有振動スペクトルのアンカーボルト軸力依存性

取付け部の変状の一例として、アンカーボルトの軸力低下が挙げられる。まず、実験室内で最も簡便に実施できる実験として、軸力低下をアンカーボルトの締付トルクの調整で模擬し、吊り金具の固有振動スペクトルの変化として出現するかを確認した。

図①-(1-3)-2-2-3.1 に、右上の 1 本のアンカーボルト締付トルクを変化させたときの固有振動スペクトル変化の状態を示す。また、固有振動ピーク位置を強調する赤線は、前述した位相スペクトルでの±90°点から抽出した位置を示す。本模擬体における規定トルク値 33N･m で締め付けられている時の固有振動数ピークは約 5.3kHz で、後述する解析シミュレーションで予測された値とほぼ一致しており、本ピークが吊り金具の中央立板のねじれ振動モードのピークであることが分かる。締付トルクの低下に伴い、（後述する解析シミュレーションでも予測されたように）このピークが徐々に低周波数側にシ

フトしていくことが示され、また、その最大幅は約 0.5kHz と、後述する温度変化の影響を考慮したとしても、判別可能なシフト量であることが示された。以上より、吊り金具をコンクリートに固定するアンカーボルトの軸力低下に伴い、吊り金具の振動境界条件が変化することで固有振動スペクトルの変化として検知できることが検証された。また、センシングには狙いの振動モードを検知できる最適な取付け位置があり、その位置を決めるためにも解析技術による事前予測が非常に有効であることが示された。

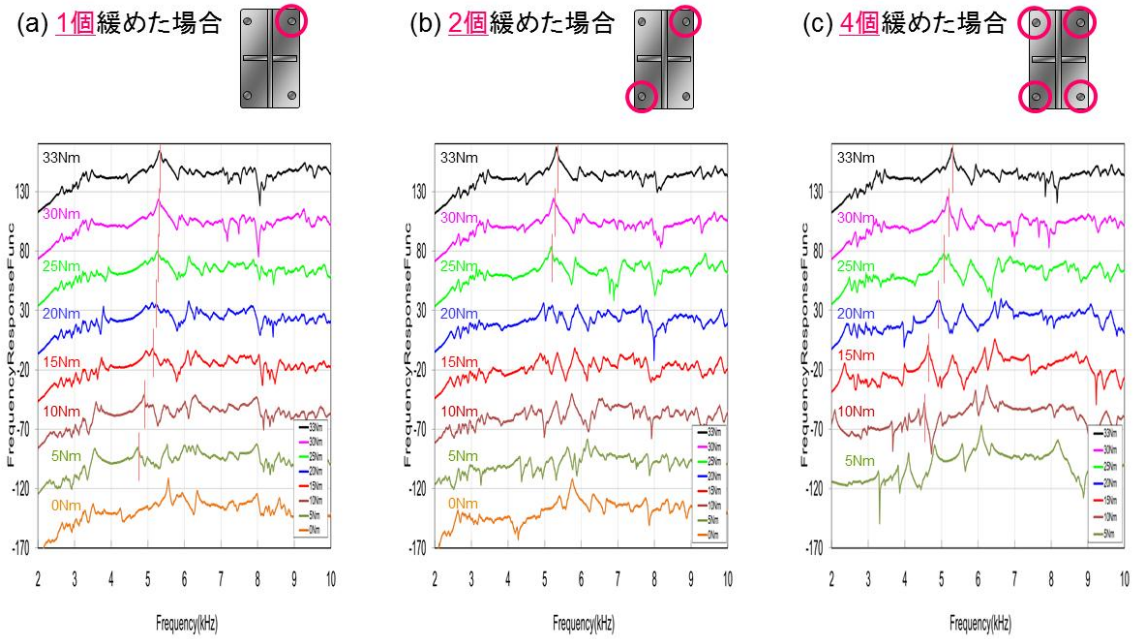


図①-(1-3)-2-2-3.1　アンカーボルト締付トルクの変化に対する振動スペクトル変化の結果

b.　複数のアンカーボルト軸力変化によるスペクトルへの影響

起こりうる変状の複雑さの模擬として、複数のアンカーボルトの軸力（締付トルク）を同時に変化（低下）させたときの、振動スペクトルの変化を調査した。結果を図①-(1-3)-2-2-3.2 に示す。(a)は 1 本（前項と同じデータ）、(b)は 2 本、(c)は 4 本（全数）を同時に締付トルク変化させた結果である。また、位相スペクトルより判定した固有振動ピークに赤線を付してある。この図から、変状がより複雑になると、特定ピークのシフトの追跡による変状検知は難しいことが分かる。しかしながら、スペクトルの全体形状の変化を見れば、変状が起きている、または、進展していることを知ることができると

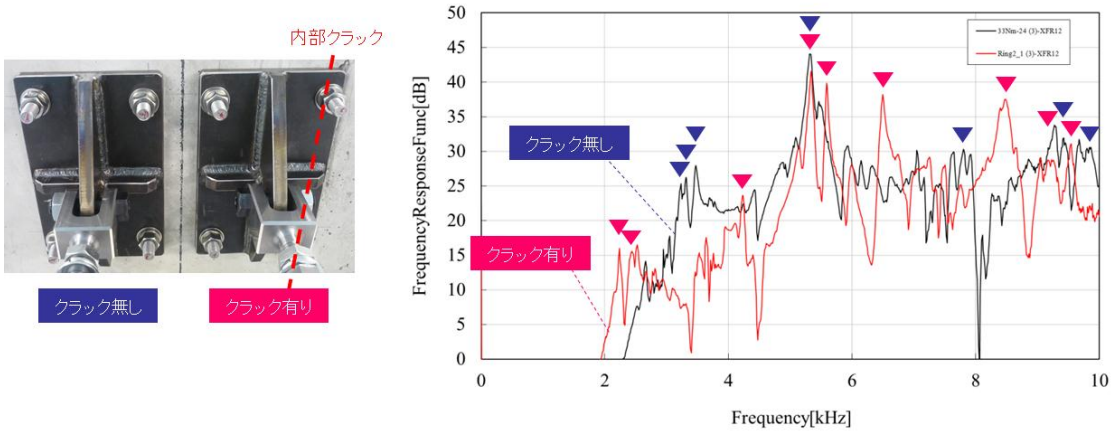
考える。よって、実際の変状検知としては、特定ピークシフトではなく、対象スペクトル域全体波形のパターンマッチング的手法によって行うのが良く、従って、センシング端末に求められる性能は、このパターンマッチングに必要な情報量のデータの取得であると考える。なお、以上の変状検知コンセプトでは、変状の種類の特定までは困難である。特定には、その変状に関わるデータベースとのパターンマッチングがさらに必要になると考える。



図①-(1-3)-2-2-3.2　複数のアンカーボルト締付トルクを同時に変化させたときの振動スペクトル変化　(a) 1 本、(b)2 本、(c)4 本（全数）

c.　コンクリートクラックの影響

変状の模擬として、アンカーボルトの穿孔部を貫通するコンクリートクラックの検知可能性を調査した。模擬体には、一つのコンクリートブロックに、対象位置となるよう同じ仕様の 2 つの取付け構造が具備されているが、その片方は、あらかじめコンクリートに人為的に形成したクラック面を貫通するように、アンカーボルト用の穿孔を行っている。結果を図①-(1-3)-2-2-3.3 に示す。▼は位相スペクトルから同定した固有振動数ピーク位置を示す。吊り金具の固有振動数ピーク 約 5.3kHz の位置は同じであるが、周囲のサブピークの様子が異なっているため、前述した波形形状の差として変状（クラック）の検知可能性があることが示された。ただし、本実験では、クラック貫通ボルトも規定のトルクで締付けられているため、吊り金具の固有振動数変化としては見られなかったのではないかと考える。施工後発生したクラックについては、軸力低下などにもつながると思われるため、また違った波形となる可能性がある。



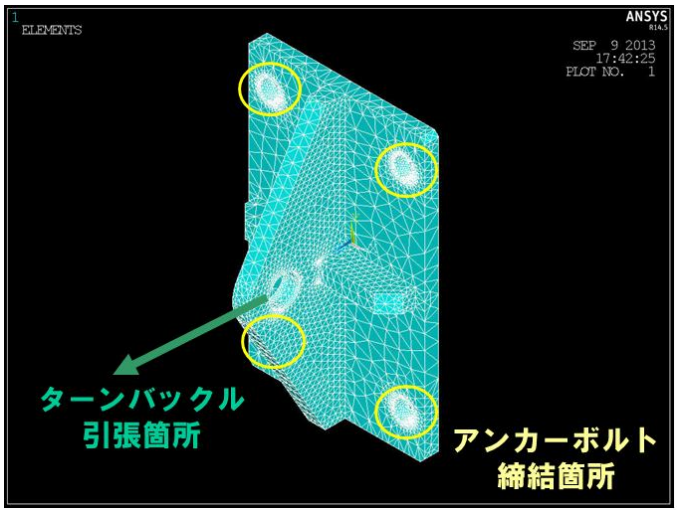
図①-(1-3)-2-2-3.3　コンクリートブロック内のクラックの影響

（▼は位相スペクトルから同定した固有振動数ピーク）

①-(1-3)-2-3　解析シミュレーション

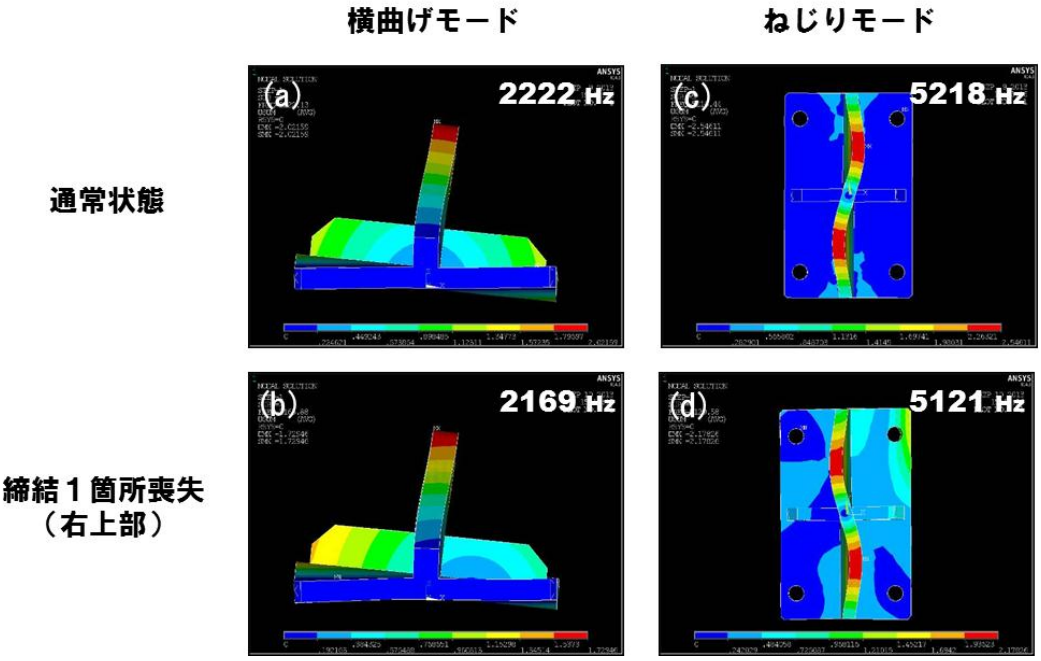
①-(1-3)-2-3-1　センシングに適した振動モードの予測

前項の模擬体実験に先立ち、アンカーボルトの軸力低下に伴う吊り金具の固有振動モードの変化の可能性をおおまかにつかむため、解析シミュレーションを用いた試算を行った。図①-(1-3)-2-3-1.1 は解析ソフト ANSYS で作成した吊り金具の解析モデルの例である。解析モデルは、模擬実験結果との比較を想定し、模擬体と同じく実物の 1/2 サイズで作成した。



図①-(1-3)-2-3-1.1　吊り金具の解析モデルの作成例

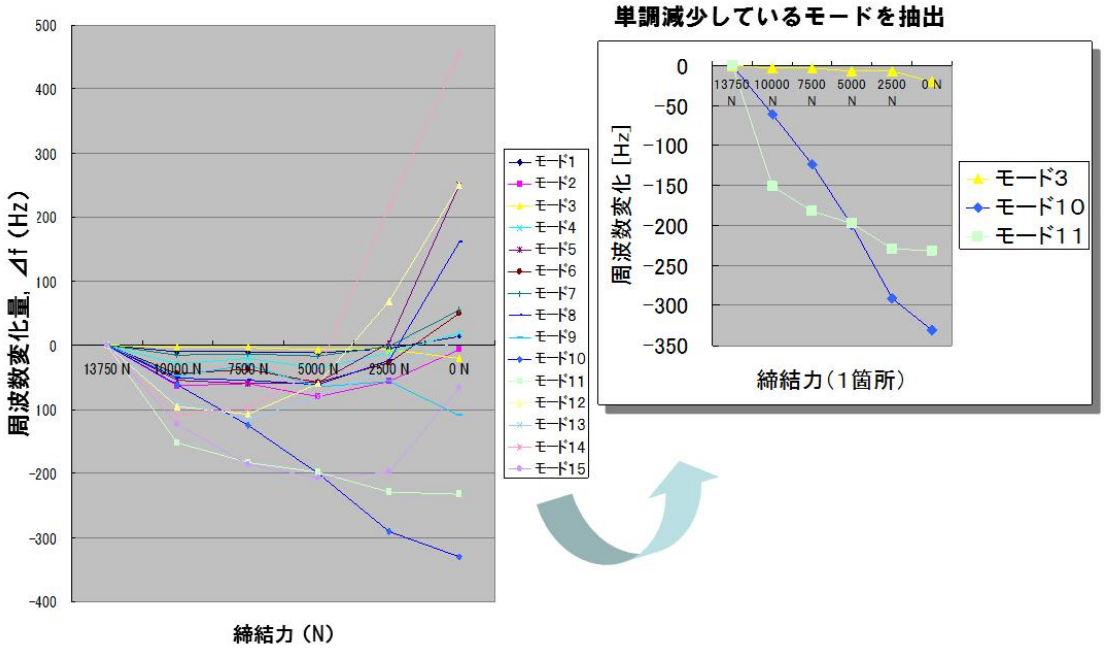
このモデルを使って、アンカーボルトの締結力が 1 箇所だけ喪失したときに、顕著な振動数変化が見られた解析結果例を図①-(1-3)-2-3-1.2 に示す。図は変位の大きさをデフォルメして表現したコンター図で、赤色ほど変位が大きく、青色ほど変位が小さいことを表している。この結果より、固定箇所が喪失することによって、吊り金具の固有振動数に変化が生じ、その周波数は数 kHz、周波数変化幅は約 100Hz と予測される。また、ねじれモードの赤色の箇所は振動の腹の位置を示しており、ここに振動センサを取り付ければ良いことを示している。前述したように、模擬体での振動実験はこの解析結果（ねじりモード）を参考にして実施しており、実験期間の大幅な短縮に役立っただけでなく、効果的・効率的なインフラセンシングには解析技術が大変重要であることを示唆している。



図①-(1-3)-2-3-1.2　締結 1 箇所喪失時に顕著な差が現れる振動モードの解析結果例（変位コンター図）　(a)横曲げモード（通常状態）、(b)同モード（喪失状態）、(c)ねじりモード（通常状態）、(d)同モード（喪失状態）

ところで、実際にはモーダル解析で求められた固有振動モードは非常に多数存在する。センシング実験に入る前に、どのモードを狙うべきか、前述したねじれモードが最適なのかを、解析を用いて検討した。図①-(1-3)-2-3-1.3 は締結力に対する周波数変化量の解析シミュレーション結果である。ピークシフトで変状を検知する場合、単調でない変化は、初期の変状なのか、終盤の変状なのか判定ができないことになるため、単調に変化（減少）した 3 個のモードだけを再抽出した。このうち、モード 3 は前述したねじれモードであり、

モード 10 と 11 はその高次モードであったため、よりピーク強度が大きい基本モード 3 が好適と判断した。ただし、周波数変化量が図①-(1-3)-2-3-1.2（ねじれモード）よりも小さくなっているのは、境界条件の違いによるもので、ここでは意味を持たない。

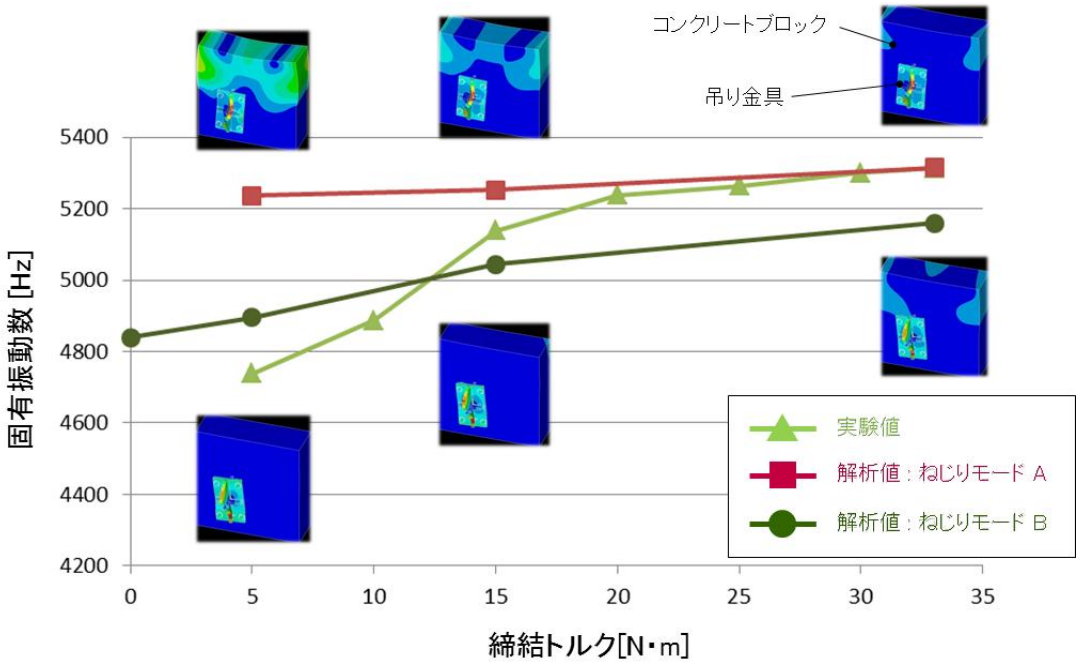


図①-(1-3)-2-3-1.3　締結 1 箇所喪失時に顕著な変化が現れる振動モードの解析結果例

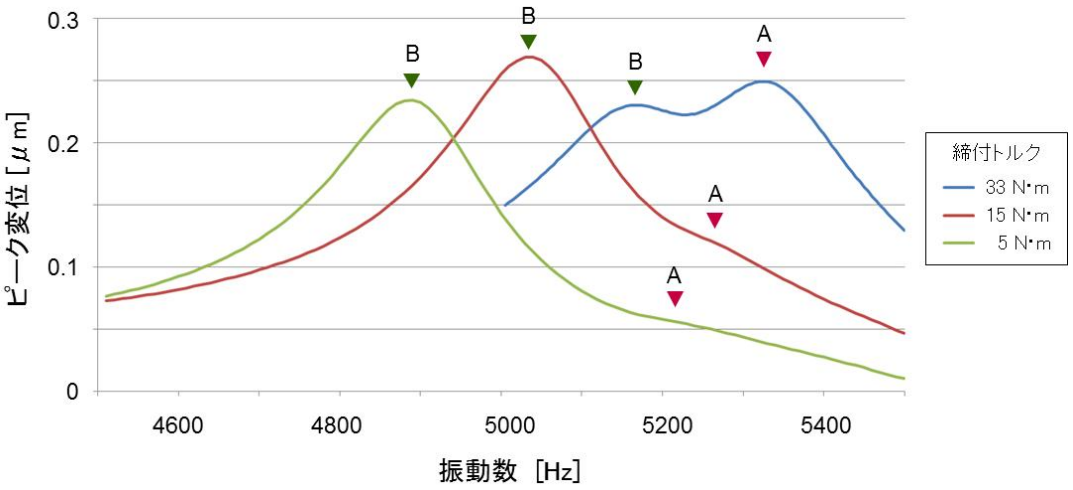
①-(1-3)-2-3-2　模擬実験結果の解析

前項では、モーダル解析によるおおまかな振動数領域の試算と狙いのモードの当たり付けについて記載したが、実験で得られた振動スペクトル変化の理論的裏づけや解析手法のノウハウ蓄積を図るため、①-(1-3)-2-2-3 a.項で述べた模擬実験結果（アンカーボルト 1 本の締結トルク低下時の固有振動数変化）と、解析シミュレーションとの合致性を検討した。種々モデルの作成方法やコンクリート構造物の組込み、コンクリートとの界面条件の検討を行い、最終的に得られた結論を図①-(1-3)-2-3-2.1 に示す。詳細な検討結果より、模擬実験ではねじりモードには 2 つの固有振動数が存在し（図中 ねじりモード A 及び B）、さらに有限のコンクリートブロックの振動モードが重畳された結果、2 つのねじりモードを遷移する（モード A→モード B）ようなピークシフトであると推測された。さらに、周波数応答解析を行い、スペクトル形状をシミュレーションした結果を図①-(1-3)-2-3-2.2 に示す。同図より、規定トルク値（33N･m）時には 2 つのピークが明瞭であったものが、トルク低下に伴い、低周波数側が顕著に、かつ大きくシフトしていく様子がシミュレーションできた。以上より、模擬実験で観測された固有振動数のピークシフトは、近接する 2 つの

ねじれモードのピーク自体のシフトと、支配ピークの変更（高周波数側から低周波数側へ）によるものであることが明らかとなった。



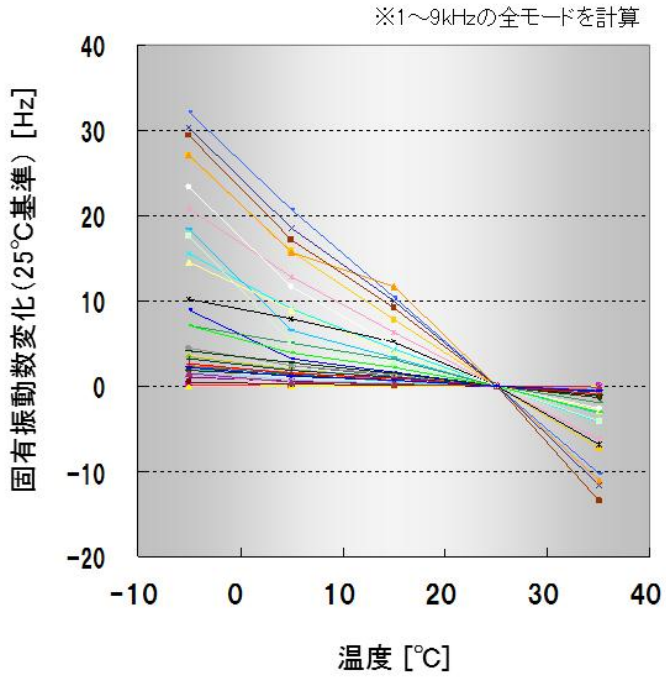
図①-(1-3)-2-3-2.1　模擬実験結果（図①-(1-3)-2-2-3.1）のモーダル解析による詳細検討結果



図①-(1-3)-2-3-2.2　2 つのねじりモード A 及び B の締付トルク依存性に関する周波数応答解析結果

①-(1-3)-2-3-3　温度の影響のシミュレーション

前項までで、吊り金具の固定状態変化に対する固有振動数変化について検討してきたが、固有振動数を変化させる因子として温度が考えられる。これは、固有振動数を決める材料の物性値、例えばヤング率とポアソン比が温度特性を持つためである。例えば、SUS304 ステンレスでは1℃上昇する毎に、ヤング率は0.1GPa減少、ポアソン比は0.0001増加する。各温度毎の両値を用い、温度に対する固有周波数変化度合を解析シミュレーションにて試算した結果を図①-(1-3)-2-3-3.1 に示す。同図は25℃時を基準とした時の相対変化量を表し、また、1～9kHz に存在する全モードについて計算している。この結果より、最も変化が大きいものでも 1℃（増加）あたり 1Hz（減少）の変化量であり、前述した模擬実験の結果と比較すると、経年的変化よりも小さな値と考えられるため、固有振動数を用いた変状モニタリングの可能性はあると言える。ただし、毎日の測定など、微小な変化をトレースする場合には温度の影響は無視できないと考えられるため、振動センシングデータには補完的に温度データも取得し、データ分析に活用すべきと考える。



図①-(1-3)-2-3-3.1　各モード毎の固有振動数変化の温度依存性
（25℃時を基準とした時の相対変化量）

①-(1-3)-2-3-4　模擬体と実物大の差異の検討

本研究では実物の 1/2 サイズの模擬体を用いているため、実物大では固有振動数の値が異なる。この差異を、代表的な固有振動モードについて解析を用いて計算した。結果を表

①-(1-3)-2-3-4.1 に示す。この結果より、実サイズの固有振動数は 1/2 サイズの模擬体のそれのおよそ 1/2 となることが分かる。片持ち梁の固有振動数の理論解（次式）を参考にして妥当性を考察する。次式のうち、E : ヤング率、l : 梁長さ、I : 断面 2 次モーメント、A : 断面積、 ρ ：密度、 λ ：無次限定数 である。サイズが 2 倍となることで、l（梁長さ）は 2 倍、I（断面 2 次モーメント）は 16 倍、A（断面積）は 4 倍となることから、次式右側に当てはめると固有振動数 f は 1/2 が得られる。従って、解析結果は妥当であり、模擬体を使った実験と実物への適用における解析シミュレーションの併用は実用上有効であると言える。

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{\lambda}{l}\right)^2\sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad \Rightarrow \quad f \propto \frac{1}{l^2}\sqrt{\frac{I}{A}}$$

表①-(1-3)-2-3-4.1　模擬体（1/2 サイズ）と実サイズの固有振動数計算結果

単位［Hz］	横曲げモード	縦曲げモード	ねじりモード
模擬体（1/2）	2222	3620	5218
実サイズ	901	1668	2315

①-(1-3)-2-4　振動センシング仕様の設定

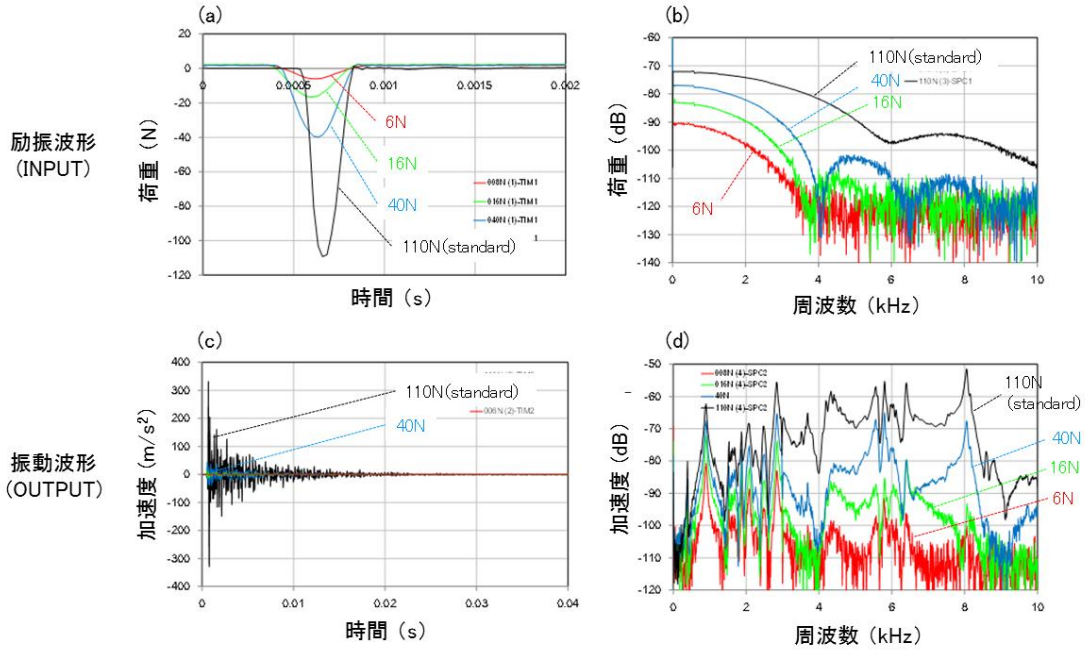
①-(1-3)-2-4-1　模擬体実験条件から小型センサ条件への落とし込み

前述の通り、模擬体による振動計測実験及び解析シミュレーションの結果から、アンカーボルトの軸力低下などの変状が、取付け構造体（吊り金具）の固有振動数変化として検知できることが示されたので、以降はこれを小型センサ端末として実現するためのセンシング条件への落とし込みを検討した。表①-(1-3)-2-4-1.1 は模擬体センシング条件及びそれを低減化した小型センサ端末向け条件案を示す。一般的な MEMS 振動センサ（加速度センサ）では最大検知加速度が数 G であるため、これを基準に各部を 1/100 化（励振荷重では 1/10 化に相当）して仮設定した。

表①-(1-3)-2-4-1.1　模擬体振動センシング条件と小型センサ端末向け条件案

	項目	模擬体実験	端末案
励振	荷重(N)	100	10
	半値幅(ms)	0.2	0.2
センサ	最大加速度 (G)	40	1
	分解能 (mG)	100	1
	ノイズ(rms)(mG)	10	10
	サンプリング	24μs×4096 点 (100ms)	24μs×4096 点 (100ms)以下
	周波数帯域(Hz)	0～10k	0～10k
積算回数 (回)		1	1

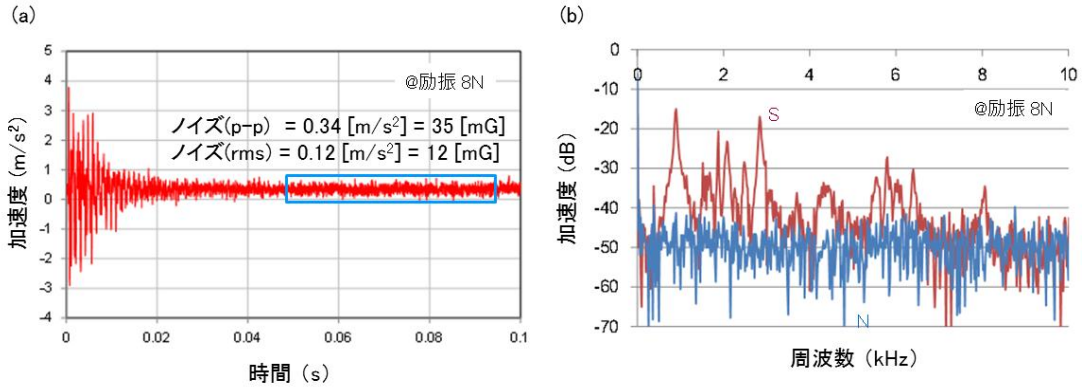
この設定案の妥当性を確認するため、模擬体実験にて励振荷重を弱めながら振動スペクトルを取得する実験を行った。結果を図①-(1-3)-2-4-1.1 に示す。同図(d)より、励振荷重 16N ではノイズに対してスペクトルが観測できるものの、6N となるとノイズと同レベルになり、検出が困難であることが分かる。また、励振荷重低下(a)に伴い、半値幅が増加することによって励振スペクトルの高周波域が不十分になってきている(b)。以上より、本計測系のノイズレベルを前提とした場合、励振条件として 10N 以上、半値幅 0.2ms 以下が必要である。



図①-(1-3)-2-4-1.1 模擬体における振動スペクトルの励振荷重依存性確認
(a)励振波形（時間軸）、(b)励振スペクトル（周波数軸）、
(c)振動波形（時間軸）、(d)振動スペクトル（周波数軸）

次に、本測定系のノイズレベルについて調査した結果を図①-(1-3)-2-4-1.2 に示す。ノイズレベルは励起振動が収束した後の時間帯の波高値を参考にした（図①-(1-3)-2-4-1.2(a)）。ピーク値で 35mG、rms 値で 12mG であった。また、8N で励振した時の振動スペクトルをノイズスペクトルと重ね合わせたところ（図①-(1-3)-2-4-1.2(b)）、前述の通り高周波域が不十分のため 6kHz 以上ではノイズに埋もれている。

以上より、前述した励振条件及び本測定系と同等のノイズレベルは必須であり、表①-(1-3)-2-4-1.1 に示す小型センサ端末向けセンシング条件案は目標仕様として妥当であると言える。

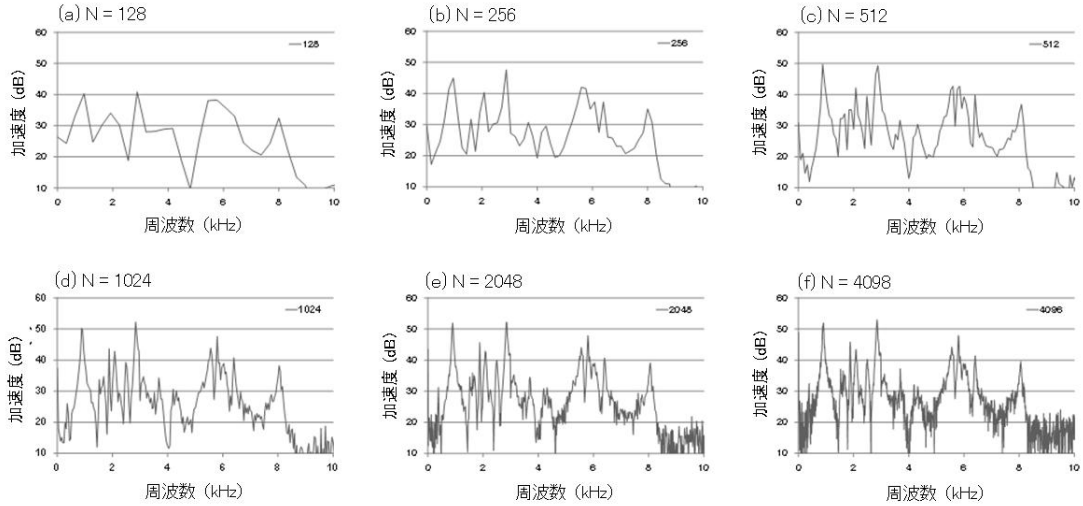


図①-(1-3)-2-4-1.2　模擬体実験における測定系のノイズレベル測定

(a)振動波形（時間軸）、(b)振動スペクトル（周波数軸）

①-(1-3)-2-4-2　サンプリング条件の検討

表①-(1-3)-2-4-1.1 に示すセンシング条件では、100ms の間、24μs 毎に振動データを取得しているが、エネルギ量が限られる環境発電を電源として使用する場合、できる限り測定時間を短くし、消費エネルギを低減することが望まれる。図①-(1-3)-2-4-1.1(c)や図①-(1-3)-2-4-1.2(a)の波形から分かるように、測定振動波形は 100ms よりも早く収束しているため、収束後の時間を除く、すなわちサンプリング点数を減らす（サンプリング間隔はそのまま）ことが考えられるが、このときスペクトル形状に与える影響を把握しておく必要がある。この検討結果を図①-(1-3)-2-4-2.1 に示す。同図より、サンプリング点数 1024 点（測定時間にして 25ms）であれば、スペクトルの特徴を維持できていることが分かる（同図(d)）。逆に、これよりも多くのサンプリング点数を取得したとしても（同図(e)、(f)）、ノイズ域の成分が増えているだけであり、あまり意味がないといえる。ただし、これは模擬体を前提とした結果であるため、実物への適用時には適宜確認が必要であるが、このような励振型の振動センシング原理を用いる場合は最小限の振動初期のデータで良い可能性があり、環境発電で駆動するセンサ端末には相性の良いセンシング手法であると考えられる。



図①-(1-3)-2-4-2.1　振動スペクトルに対するサンプリング点数削減の影響
サンプリング間隔 24μs 一定　(a)サンプリング点数 128 点、(b)同 256 点、
(c)同 512 点、(d)同 1024 点、(e)同 2048 点、(f)同 4096 点

①-(1-3)-3　研究成果(2) 発電デバイス技術課題の明確化

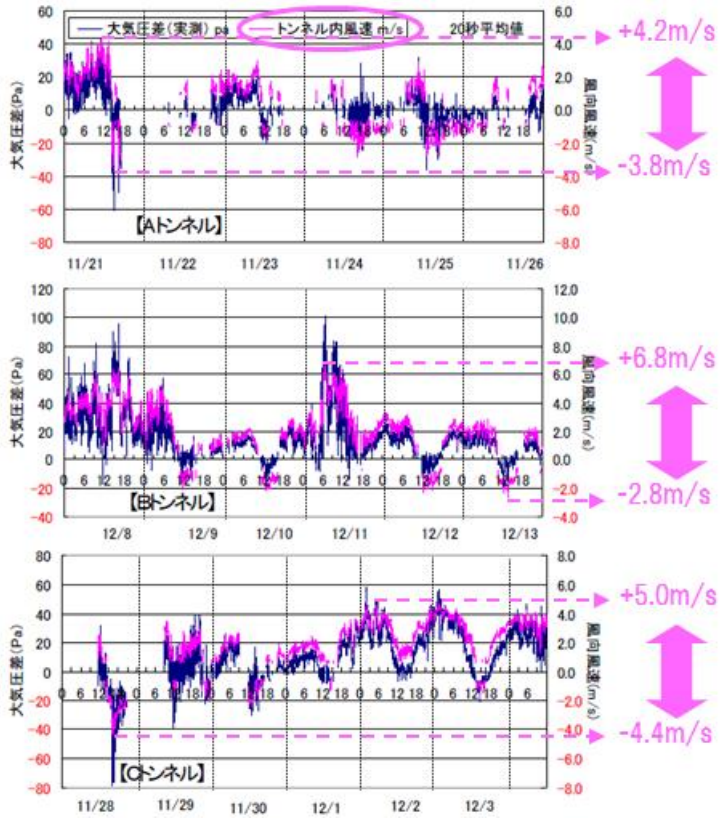
①-(1-3)-3-1　検討の方向性

環境発電デバイス技術についてはトンネルの特性上、気流を利用した発電デバイスに着目し、耐環境面や必要発電量などの仕様及び技術課題について明確化する必要がある。トンネル環境へ適用するための風量・風向、環境耐性を中心に、現状品の技術課題を試作評価及び環境曝露試験などによって明らかにした。また、発電デバイスの仕様設定について、前述のセンシング手法／条件やその他端末を構成するための回路（制御部や無線部など）の試算から消費エネルギの総量計算（エネルギバジェット）を試算し、発電量などの目標値の設定につなげた。

①-(1-3)-3-2　トンネル内風速の調査

気流発電デバイスの適用風速を設定するため、文献 1)を参照した。図①-(1-3)-3-2.1 は 6 日間にわたるトンネル内の自然風（トンネル両坑口における大気圧差によって生じる風）の風向風速（超音波式断面風速計値の補正値を含むギル型風向風速計の計測値）のデータ[1)]である。数値の符号は気流の向きを示しており、その絶対値及び向きは日及び時間によって大きく変化していることが分かる。同図より読み取った最大振幅を図の右側に示すが、最大公約数的に捕らえると発電デバイスの利用風速はほぼ±4m/s 以内と考えられる。また、現状のデバイスの性能（1m/s～発電）を考慮し、適用風速範囲を ±1～4m/s と設定する。この風速範囲は現状の仕様とほぼ同等のため、素子の基本構造は特に変更なしとした。た

だし、範囲以上の強い気流が起こる可能性があるため、これの対策（ストッパーなど）は必要となる。また、実使用においては、ランダムな風向風速に対してランダムな発電量となるためこれを蓄電する回路や、正負両方の向きに発電できる流路構造が必要となる。



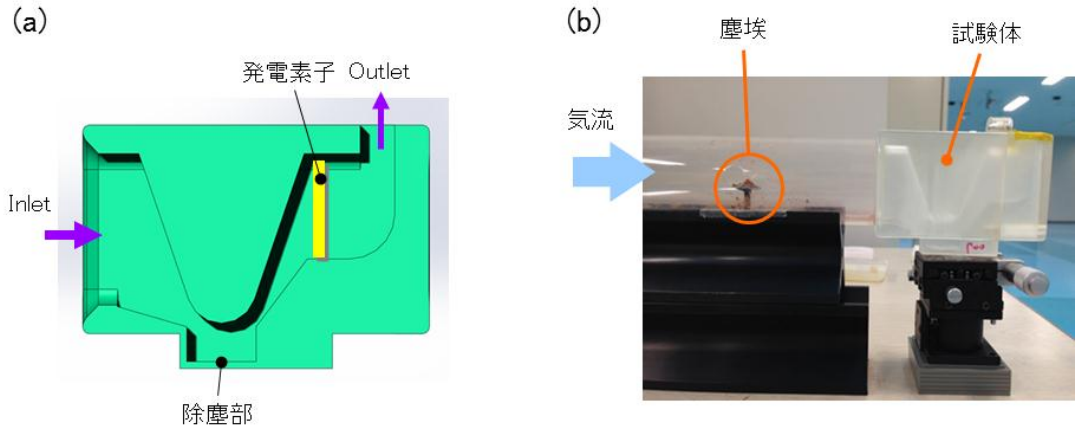
図①-(1-3)-3-2.1　実トンネルにおける自然風の風向風速測定データ（ピンク色）
濃青色は両坑口間大気圧 [1)]

①-(1-3)-3-3　防塵構造の検討

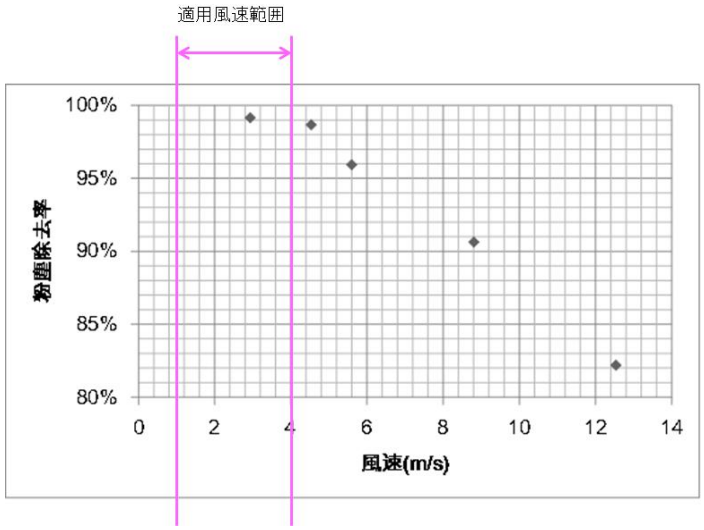
気流発電デバイスは気流がスリットを通過することで発電する構造であるため、スリットを塞ぐような塵埃などの付着を防止する構造が必要と考える。しかしながら、トンネル内の気流に含まれる塵埃の具体的データが得られなかったため、デバイスの最も細い箇所（約 20 μ m）とほぼ同サイズの一般的な塵埃を選定し、防塵構造を試作（外注費活用）して、その塵埃除去率を評価することで防塵可能性に関する予備検討を行った。

図①-(1-3)-3-3.1 に試作した防塵構造流路の一例とその評価の様子を示す。同図(a)は防塵構造流路の一例であり、図中の「Inlet」から流入した塵埃は同図中「除塵部」近傍の曲げ管流路部で除塵される構造である。この曲げ管の曲げを大きくし、かつ流路幅を一時的にせばめて流速を高め、慣性力にて塵埃を振り落とす構造となっている。同図(b)は評価の様子を示したものであり、直径 5cm の風洞中に塵埃「関東ローム 7 種（粒径 27-31 μ m）」

（※耐塵試験用 JIS 規格粉体）を設置し、上流側から風速（可変）を与えて試験体（防塵構造流路）に塵埃を導入した。塵埃除去率の測定は、試験体に付着した塵埃の全重量と発電素子設置位置より前の部分の塵埃付着重量から求めた。評価では発電素子は設置せず、「Outlet」部に塵埃を外へ逃がさないためのフィルタを設置した。評価結果を図①-(1-3)-3-3.2 に示す。適用風速範囲 1～4m/s の範囲で塵埃除去率 99%以上が得られ、予備検討としては、本構造にて防塵効果が得られることが明らかとなった。仮に、発電デバイスに到達し、かつ通過せず付着した塵埃によって動作停止する付着量を 10mg と仮定する（デバイス面積や付着状態から仮定）と、99%の除塵構造の場合 1.2g までの耐塵寿命があることになる。長寿命のためにはさらに塵埃除去率の向上が好ましいが、前記値や前述した仮定の妥当性については、継続した検討及び実地テストなどのさらなる検証が必要である。



図①-(1-3)-3-3.1　防塵構造流路実験　(a)試験体　(b)評価の様子



図①-(1-3)-3-3.2　防塵構造流路試験結果（塵埃除去率）

①-(1-3)-3-4　防蝕構造の検討

気流発電デバイスはその構造上、発電素子自身が直接雰囲気に接触するため、もう一つの大きな環境因子として腐蝕性ガスを挙げておく必要がある。腐食性ガス及びその評価方法については、本項担当機関の事業部門（トンネル照明）にヒアリングを行い、商品に対する耐ガス試験実績を参考とした。その結果、塩水噴霧試験、SOx 曝露試験を選定した。現在の我が国の道路環境は、排ガスのクリーン化によって SOx 濃度は極めて低く、絶対的な必要性はないとのことであったが、商品に対する試験実績があったこと、海外では SOx 濃度は高い国があり、将来的には試験の必要性があること、また当初予定していた NOx 試験では殆ど腐蝕などが起こらないことが調査の結果判明したことから、あえて厳しい SOx 曝露試験を選定した。表①-(1-3)-3-4.1 に塩水噴霧試験条件を、表①-(1-3)-3-4.2 に SO_2 曝露試験条件を示す。本来は目安として 1500h 実施されるが、本研究期間を考慮し、100h の予備検討という位置づけで実施した（外注費活用）。なお、サンプルは発電素子（Si チップ、金表面電極）とその実装基板（FR4、金メッキ電極、ソルダーレジスト有り）とした。

表①-(1-3)-3-4.1　塩水噴霧試験条件

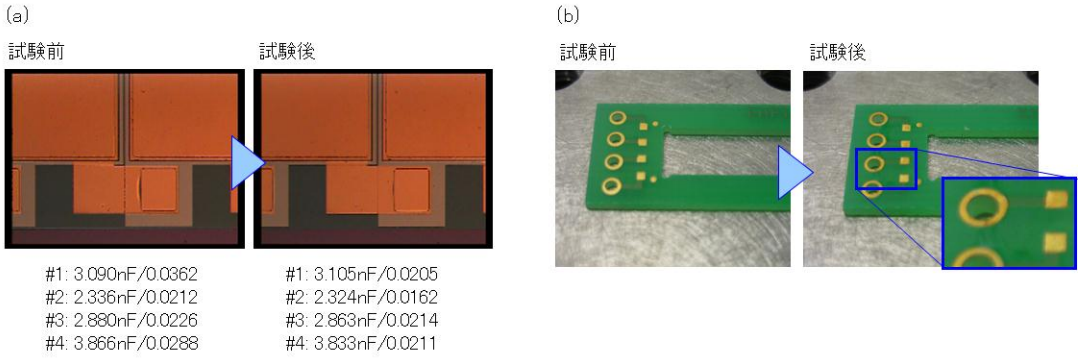
項目	条件
塩水濃度	50g/L
pH	6.5
温度	35℃
試験時間	100h

表①-(1-3)-3-4.2　SO2 曝露試験条件

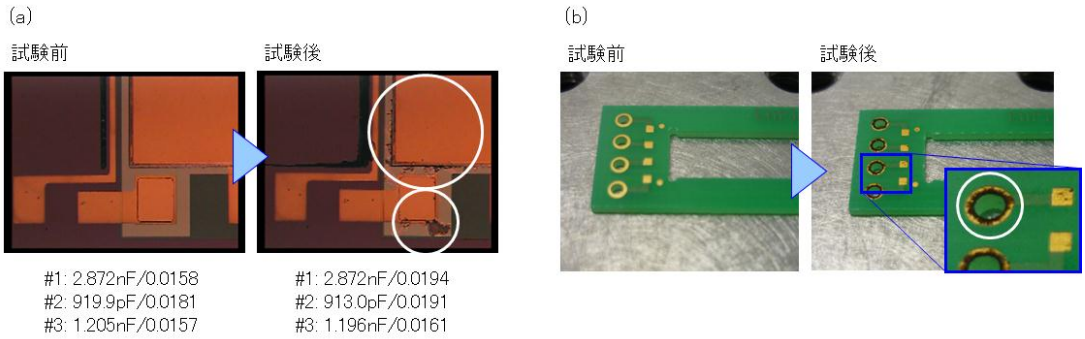
項目	条件
SO_2濃度	25ppm
温度	40℃
湿度	80%
試験時間	100h

図①-(1-3)-3-4.1 に塩水噴霧試験結果を、図①-(1-3)-3-4.2 に SO_2曝露試験結果を示す。それぞれ、(a)は発電素子の外観及び電気容量と誘電正接の測定値、(b)は実装基板の外観である。塩水噴霧においては、発電素子、実装基板とも異常は認められなかったが、SO_2曝露においては、電気特性には異常は見られなかったものの、発電素子の外観においてパシベーション膜（上部電極と下部電極の間の SiO_2絶縁膜）の端部において侵食剥離が、実装基板のスルーホール部で腐蝕が認められた（図①-(1-3)-3-4.2(a)で白丸で囲んだ箇所）。パシベーション膜の侵食は膜の粗密や密着性が十分でなかったためと考えられ、成膜法の改善

または変更が必要と判明した。また、実装基板においてはスルーホール形成（ドリル加工）によって端面に下部層（Ni、Cu）が露出したためと考えられる。



図①-(1-3)-3-4.1　塩水噴霧試験結果（従来パシベーション膜）
(a)発電素子、下の数字は電気容量及び誘電正接値、(b)実装基板

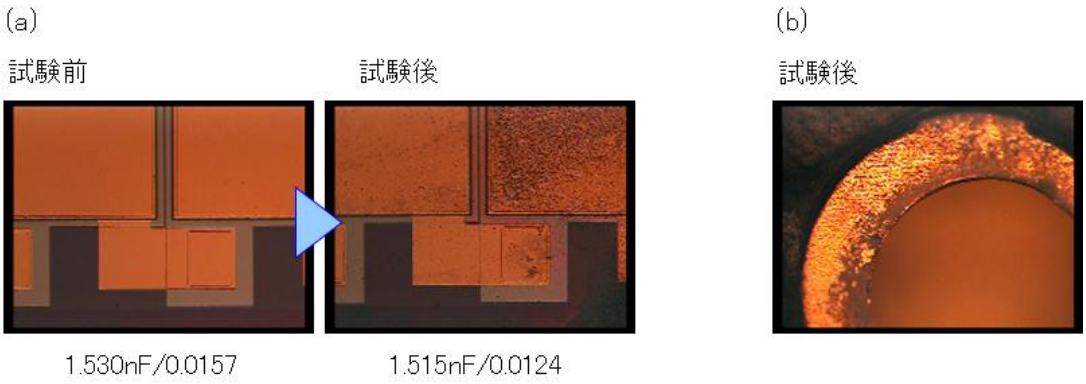


図①-(1-3)-3-4.2　SO_2曝露試験結果（従来パシベーション膜）
(a)発電素子、下の数字は電気容量及び誘電正接値、(b)実装基板

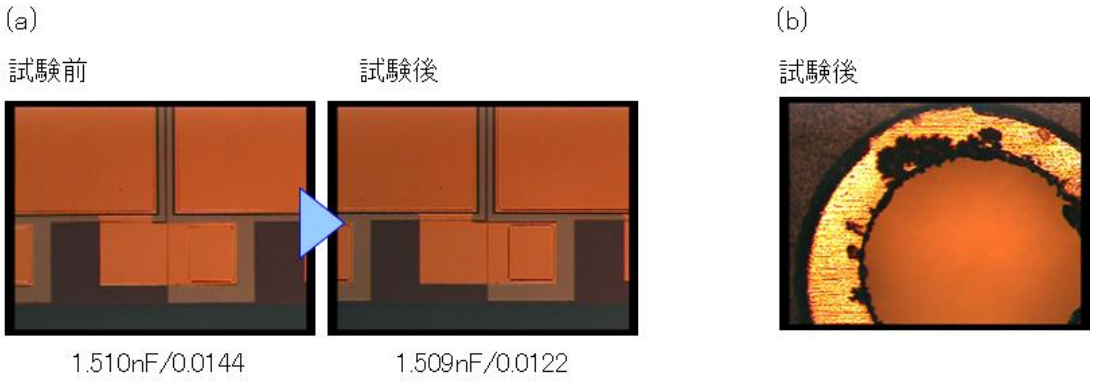
前述の結果を受け、発電素子のパシベーション膜を従来のスパッタによる成膜法から、より緻密で密着性の高い成膜が期待される CVD（化学気相合成）法に変更・試作し（外注費活用）、同様の試験を実施した。図①-(1-3)-3-4.3 に塩水噴霧試験結果を、図①-(1-3)-3-4.4 に SO_2曝露試験結果を示す。それぞれ、(a)は発電素子の外観及び電気容量と誘電正接の測定値、(b)は実装基板スルーホール部の外観である。塩水噴霧、SO_2曝露両試験において、発電素子の外観、電気特性、ともに異常は認められなかったため、変更後のパシベーション膜が有効であったことが分かった。実装基板のスルーホールに関しては、特に製法を変更しなかったため、SO_2曝露で腐蝕が生じているがその原因は明確であるので、スルーホールの金メッキ順の変更、もしくはスルーホール自体をなくすことで改善可能である。

以上、外部に晒されて使用される気流発電デバイスの発電素子の雰囲気耐性に関し、代

表的な曝露環境において使用可能であるという予備検討結果を得た。今後は長時間の試験や他の要件（他ガス、温湿度など）について検討していく必要がある。



図①-(1-3)-3-4.3　塩水噴霧試験結果（パシベーション膜変更後）
(a)発電素子、下の数字は電気容量及び誘電正接値　　(b)実装基板（スルーホール）



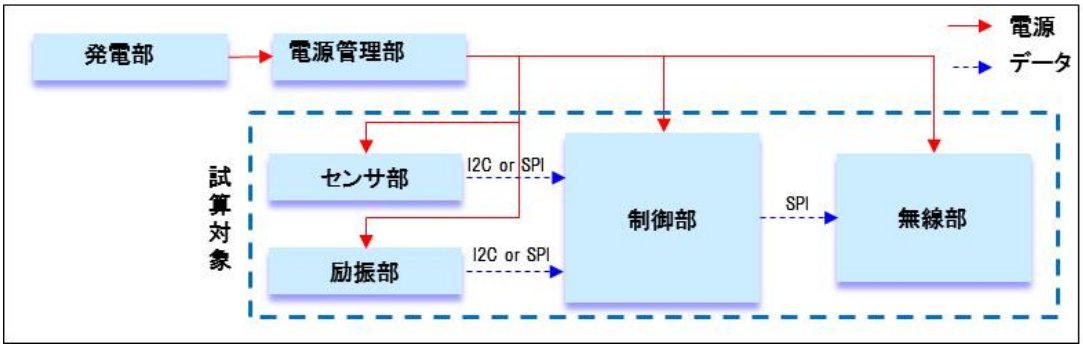
図①-(1-3)-3-4.4　SO_2曝露試験結果（パシベーション膜変更後）
(a)発電素子、下の数字は電気容量及び誘電正接値　　(b)実装基板（スルーホール）

①-(1-3)-3-5　センサ端末のエネルギバジェット及び発電量の検討

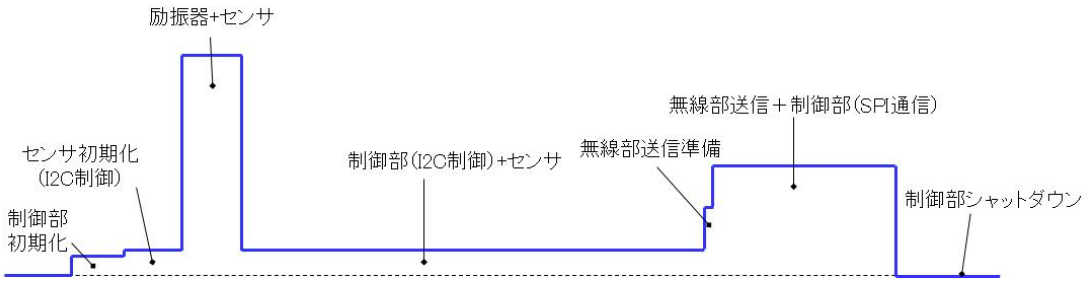
前項までに検討した、センシング仕様、及び発電デバイス仕様を基本に、センサ端末として必要となる消費エネルギ（エネルギバジェット）の試算を行い、その結果発電デバイスの必要発電量を試算した。

試算前提となるセンサ端末の構成を図①-(1-3)-3-5.1 に、起動から停止までのエネルギ（消費電力）変化を図①-(1-3)-3-5.2 に示す。センシング仕様の箇所で述べたように、本端末は励振を行って振動波形を取得する方式とし、また、動作は必要量が蓄積されてから逐次起動、停止するものとし、スリープ動作は行わないものとした。無線はセンサ端末として一

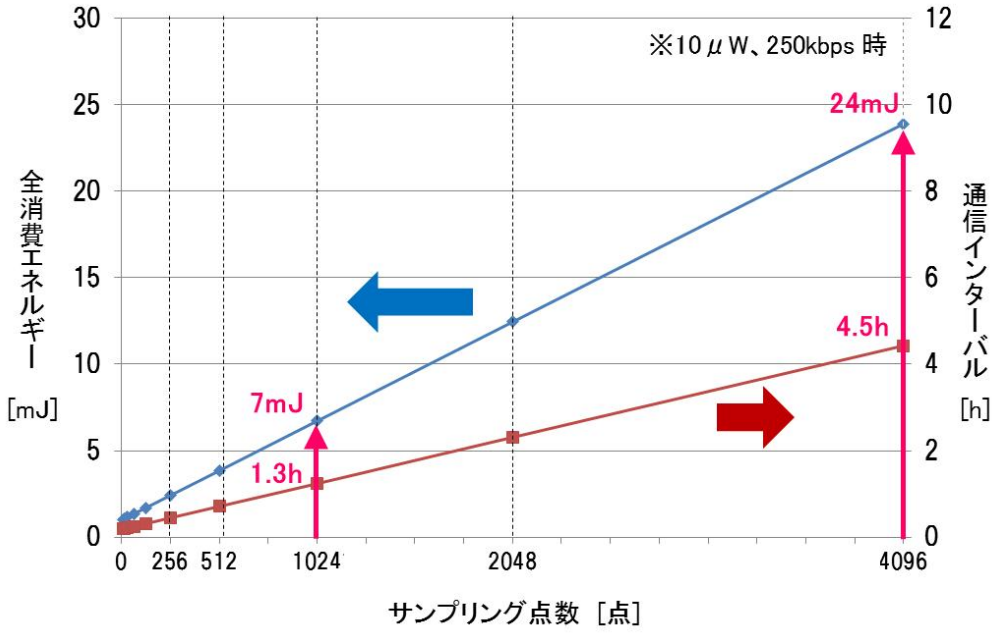
般的な、920MHz 帯（通信速度 100kbps）もしくは 2.4GHz 帯（同 250kbos）とし、送信電力は見通し 50m 程度が得られる -10dBm とした。振動センサは上市品の仕様値を、励振部は圧電スピーカの駆動回路を参考にした。以上の前提条件をもとに試算した、発電デバイス発電量 10μW、通信速度 250kbps 時の、全消費エネルギ及び通信インターバルとサンプリング点数依存性を図①-(1-3)-3-5.3 に示す。本試算では、サンプリング点数 4096 点の時は全消費エネルギ 24mJ、通信インターバル 4.5 時間、サンプリング点数 1024 点の時はそれぞれ 7mJ、1.3 時間となることが分かる。以上より、発電量 10μW とした時の通信インターバルは、通信速度を 250kbps と速め、サンプリング点数を 1024 点に低減した場合でも 1 時間を切ることができないことが分かった。



図①-(1-3)-3-5.1　エネルギバジェット試算用センサ端末構成

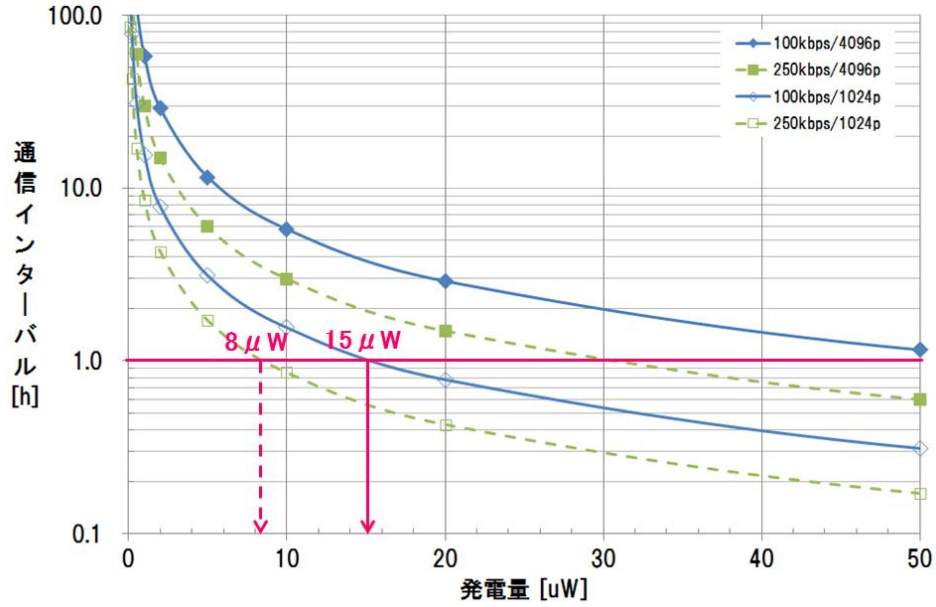


図①-(1-3)-3-5.2　センサ端末の動作模式図（横軸は時間）



図①-(1-3)-3-5.3　センサ端末の全消費エネルギと通信インターバルの
サンプリング点数依存性試算結果

次は、発電量をパラメータとし、通信インターバルを試算した結果を図①-(1-3)-3-5.4 に示す。凡例として通信速度 2 種類、サンプリング点数 2 種類を挙げた。同図より通信インターバルを 1h とするには、100kbps かつ 1024 点の時発電量 15μW が、さらに 250kbps にすると 8μW が必要であることが分かった。



図①-(1-3)-3-5.4　通信インターバルの発電量依存性試算結果

①-(1-3)-4　学会・セミナー・技術展示調査

本研究期間において行った調査活動で明らかになったことを以下にまとめる。

・センサエキスポジャパン（平成 25 年 9 月）に参加し、インフラモニタリングを目指した振動センサ(最大周波数帯域20Hz、検出範囲±10G、分解能10μG、消費電力3.3V、30mA）や、感振スイッチ（周波数帯域 0.1Hz～50Hz、検出範囲±1.5G、分解能 20μG、消費電力 不明）をピックアップできた。ただし、μG クラスの分解能をもつセンサは消費電力が高いという課題があることが判明した。

・研究産業・産業技術振興協会 先導技術交流会講演会（平成 25 年 10 月）に参加し、清水建設の建築物及び土木インフラの先端的構造ヘルスモニタリング技術を聴講、建築物（RC 造 20 層、1/4 サイズ）に小型 MEMS 加速度センサ 152 台（912 軸）設置し、多点センシングの有効性を実証する試みがあることが分かった。

・NEXCO 東日本ヒアリング（平成 25 年 10 月）に参加し、同社のスマートメンテナンスハイウェイ構想、モニタリングセンサに関する意見を聴く事ができた。その結果、センサに求めるものは、目で見えない箇所や内面を測るセンシング（トンネルでは化粧板のアンカーボルトなど）、打音検査の機械化などであることが分かった。

・ものづくり NEXT↑2013（平成 25 年 11 月）に参加し、インフラ検査、維持管理及び非破壊評価技術に関し、インパルスタイプの加振検査データ収集システム、70km 以上の速度で目視可能エリアのヒビを 1mm 以下の精度で検出可能な検査用走行車、の展示があり、非常に有望な手段と認識した。今後も継続してウォッチングする。

①-(1-3)-5　ユーザ機関による成果の有効性の検証

本研究においてトンネル付帯構造物の仮ターゲットとした換気設備（ジェットファン）の事業者（パナソニック エコシステムズ株式会社）から以下のコメントを得、有効性を確認することができた。

・模擬体による振動センシング実験データと解析シミュレーションによる裏づけを行い、小型のセンサによる取付け部の変状検知の可能性を示す成果であり、有用である。

・励振を用いた振動センシング方式のため、安定したセンシングデータが得られること、また、周波数域を kHz 帯とすることで周囲の振動や揺れなどの外乱（数～数十 Hz）の影響を受けにくいことなどのメリットが考えられる。

・気流発電については、適用風速量や基本的な防塵や防蝕性など、適用可能性を示しており有効である。

・一般にトンネルにおける点検作業は、交通規制が必要なため深夜帯などに非常に短時間のうちに行われないといけないことが多い。常時モニタリング型センサがあれば、

作業効率を損なうこと無く点検を行える可能性がある。

・本センサ端末は経時変化を捉えるものであるから、通信インターバルは 1 日に数回以下で良い。

①-(1-3)-6　まとめ

＜将来開発すべきセンサシステム像＞

本研究によって、振動センシングによるトンネル付帯構造物取付け部の変状検知の可能性、及び自立発電デバイスとしての気流発電デバイスの適用可能性が示された。

将来開発すべきセンサシステム像は前出の図①-(1-3)-1.1 及び図①-(1-3)-1.2 に示すイメージを基本とし、トンネル付帯構造物のコンクリート取付け部のセンシング方法に関しては、模擬体及び解析を用いたアプローチから、励振を用いた振動センシング手法が有効であり、表①-(1-3)-2-4-1.1 に示される周波数帯域、検知加速度範囲、サンプリング条件、励新条件などを有するセンサ端末を開発・実証する必要がある。また、気流発電デバイスについては、対応風速範囲が定められ、防塵性や耐腐蝕性の可能性が示されたことから、この機能サンプルを早期に創出し、前述のセンサ端末に搭載することによって自立無線センサ端末として確立することが重要である。

＜開発すべきセンサシステムの技術課題・開発内容と目標＞

前項に記載のセンサシステム像より、開発すべき技術課題・開発内容と目標は以下の通りである。

・アクティブ振動センシングブロックの開発
・センシングブロックの開発（目標値 表①-(1-3)-2-4-1.1 参照）
・耐環境気流発電デバイスの開発
・発電量 10～20μW @適用風速範囲 1～4m/s
・防塵・防蝕、その他耐環境性能の実証
・振動伝達及び防塵を具備した高耐久性パッケージング
・地震などの突発事象に対する動作ブロックの追加（感震スイッチ他）

＜開発されるセンサシステムを適用した場合に期待できる具体的効果、インパクト＞

本センサ端末を適用した場合、トンネルの覆工コンクリートに固定される付帯構造物の固定状態の変状を無人で常時モニタリングが可能となり、長期間に 1 回という検査の間隔を補完することによって、より効率的に短時間で検査を行えるようになる。また、点検時の作業員間のばらつきの補完や遠望目視などの高頻度簡易検査を補助するバックデータと

もなり、点検精度の向上、作業時間・人員数の低減が図れる効果がある。そのほかには、防音板などにように固定部が露出していないためにそのままでは点検できず、変状進行が発見しにくい固定部に関しても、本センサ端末の設置は非常に有効であると考えられる。

参考文献

1) 石村利明、森本智、角湯克典:”トンネル内の自然風の把握および予測に関する検討”、土木学会第 64 回年次学術講演会 資料 IV-051、 pp.101-102（平 21-09）

①-(1-4)　公共施設設備モニタリングシステムの開発

【高砂熱学工業㈱】

①-(1-4)-1　研究の目的

＜社会課題＞

東日本大震災以降、建築物においては省エネ、CO_2排出量削減に加え BCP（Business Continuity Plan：事業継続計画）が求められるようになってきている。特に、防災拠点となる消防、警察、病院、データセンターなどの施設やそれにつながる地域冷暖房施設などのインフラ施設において、電気・都市ガス・上下水道などのユーティリティを含む設備機器の故障や配管の破損・漏洩、情報の喪失は物的な損害のみならず、人的な被害にも及ぶ危険性があるため、BCP への対応は最重要課題である。また、(社)空気調和・衛生工学会で実施された「2011.3.11. 東北地方太平洋沖地震建築設備被害に関する調査報告」[1)]では、建築に関してはホールなどの大規模面積を持つ天井材の崩落といった内装材などの建築 2 次部材の被害が大きかったこと、設備に関しては機器、ダクト、配管を支持している吊りボルトの脱落が多かったことが指摘されている。特に、図①-(1-4)-1.1 の災害事例のように、耐震基準の整備の遅れている天吊の設備機器や配管の耐震化は人的被害防止の観点から重要である。



図①-(1-4)-1.1　東日本大震災での配管の落下による災害事例（NHK ホームページより）

＜現状の取り組みと課題＞

建築物や設備の劣化診断や維持管理が重要であるという認識は広まりつつあるが、従来の劣化診断・維持管理は保守員の経験と勘に頼っているのが現状である。建築物に加速度センサなどを設置し耐震診断などを行うシステムや設備の回転機器の劣化診断を行うモニタリングシステムはいくつか開発されているが、これらのシステムはセンサ端末や設置工事費に費用がかかるとともに、建物に合わせた診断システムの開発が必要となるためシス

テム全体の価格が高くなり普及が進んでいないのが現状である。また、得られたデータをもとに非常時の 2 次災害防止や災害直後のサービスの早期再開のためのシステムの実用化は今後の課題である。

＜実施内容と最終目標＞

本研究開発では以下の検討を行った。

1)ビル設備の管理者などのユーザや有識者へのヒアリング、先行研究の動向調査などをもとに公共施設設備モニタリングシステムを構築するに当たって必要な測定項目・測定場所の特定を行った。その結果をもとに既設建物を対象とし、設備機器や配管設備、配線設備に既存もしくは開発中の加速度センサや環境センサなどを複数個設置し、プレモニタリングシステムを構築し、基礎データの収集を行った。

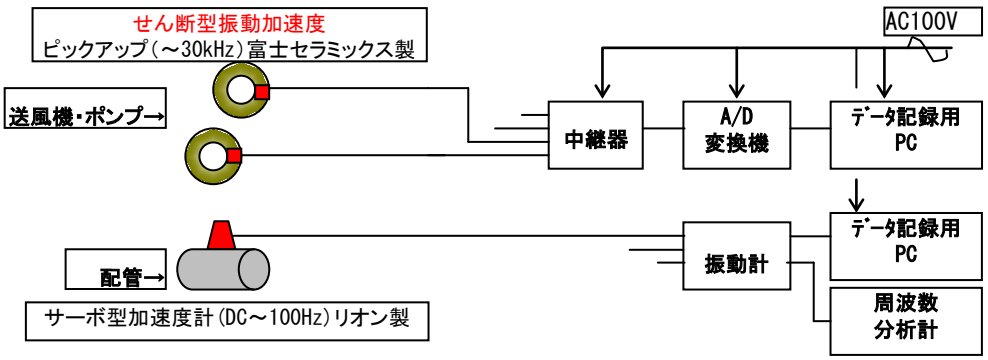
2)得られた計測データ、ビル管理者などのユーザや有識者へのヒアリング及び先行研究の動向調査などをもとに、必要なセンサ仕様の抽出し、診断システム構築に向けた仕様の検討と技術的課題の抽出を行った。

①-(1-4)-2　設備機器、配管設備などの基礎データ計測試験

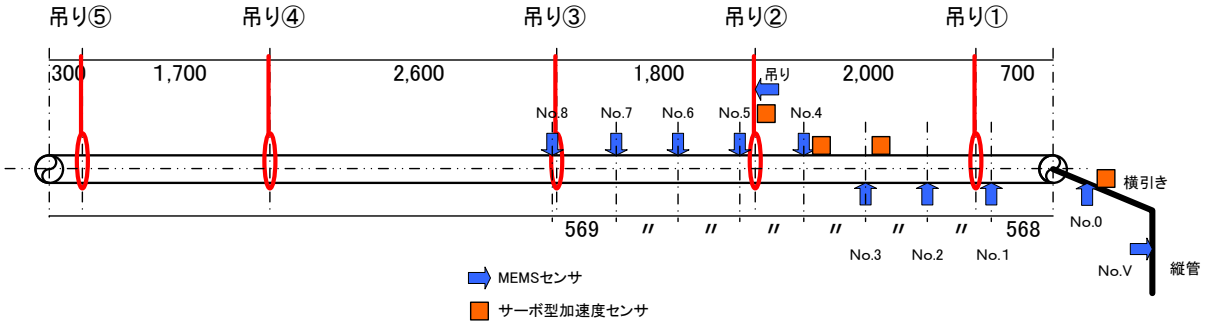
①-(1-4)-2-1　実設備での基礎データ計測試験方法

①-(1-4)-2-1-1　基礎データ計測試験の概要

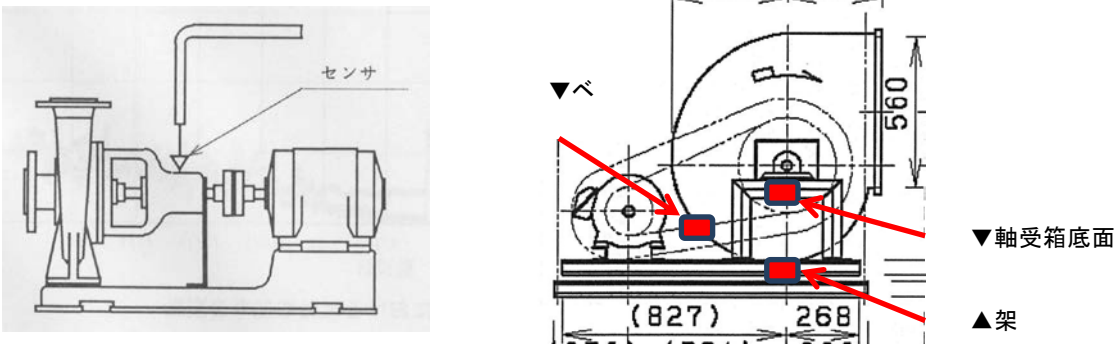
実設備の稼働中における振動特性を取得するため、高砂熱学工業㈱総合研究所に設置されている設備機器（冷却水ポンプ、給気送風機）と配管設備を対象として振動計測を行った。実設備でのデータ計測装置の概要を図①-(1-4)-2-1-1.1～4 に、計測機器の仕様を表①-(1-4)-2-1-1.1 に示す。



図①-(1-4)-2-1-1.1　実設備での基礎データ計測用機器の基本構成



図①-(1-4)-2-1-1.2　配管表面のセンサ設置位置



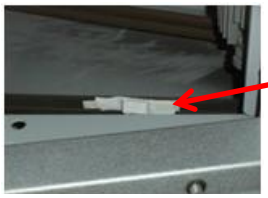
図①-(1-4)-2-1-1.3　ポンプ、送風機のセンサ設置位置



(1)ポンプ架台の測定



(2)ポンプ軸受けの測定



(4)送風機ベルトの測定状況



(3)送風機架台の測定状況



(5)横引き配管の測定状況



(6)配管吊りボルトの測定状況

図①-(1-4)-2-1-1.4　設備機器、配管の測定の様子

表①-(1-4)-2-1-1.1　計測機器の仕様

		機器仕様	特性	備考
測定対象	ポンプ	渦巻き型冷却水ポンプ 722L/min×38.8m×7.5kW	軸回転数 50Hz	定速運転
	送風機	片吸込みシロッコ型給気送風機 8、300m3/h×300Pa×2.2kW	モータ回転数 1、500rpm 送風機回転数 655rpm	インバータ付き可変速運転
	配管	冷却水配管 SGP100A	配管内流速 1.4m/s	定流量
振動センサ	サーボ型 ﾘｵﾝ製 LS-10C	測定範囲±30m/s^2 感度 0.3V/m/s^2	周波数特性 DC～100Hz	サーボ型
	圧電型 ﾘｵﾝ製 PV-85	測定範囲±5、000m/s^2 感度 6.42PC/m/s^2	周波数特性 1～7kHz (±1dB)	せん断圧電型
	圧電型 富士ｾﾗﾐｯｸｽ製 SAF11	測定範囲±3、600m/s^2 感度 1mV/m/s^2	周波数特性 5～10kHz (±3dB)	せん断圧電型
	H34C(MEMS) 産総研開発	測定範囲 3G(29.4m/s^2) 感度 333mV/G(34mV/m/s^2)	周波数特性 DC～100Hz	3 軸センサ
振動計他	低周波ﾘｵﾝ製 VM-83	加速度 0.3、1、3～1、000 m/s^2 速度 3、10、30～1、000mm/s 変位 1、3、10～1、000mm	HPF 0.1Hz、LPF 50Hz サンプリング周期 0.1s	サーボ型、圧電型の両方接続可
	周波数解析 小野測器製 CF-5220	外部ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ入力±10V 周波数分析ﾚﾝｼﾞ 10mHz～100kHz	サンプリング周波数：分析ﾚﾝｼﾞの 2.56 倍 分解能 25～1600 ライン	入力 2ch

①-(1-4)-2-1-2　基礎データ計測試験の計測条件

a.　日常監視（設備機器、配管設備）

性能劣化や経年劣化といった日常監視用の基礎データとして以下の測定を行った。

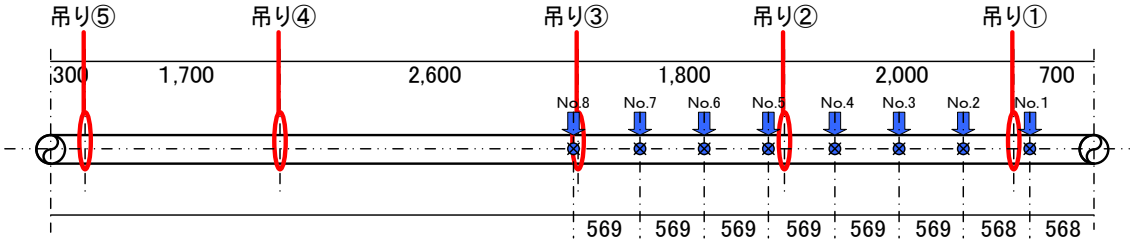
・ポンプ、配管に周波数特性の異なる 2 種類のセンサを設置し振動特性を取得した。

・送風機の軸受け部､架台及びベルトに MEMS センサを設置し､振動特性を取得した。なお、MEMS センサ（無線）を用いることで、送風機の回転とベルトのバタツキを同時に測定することができる。

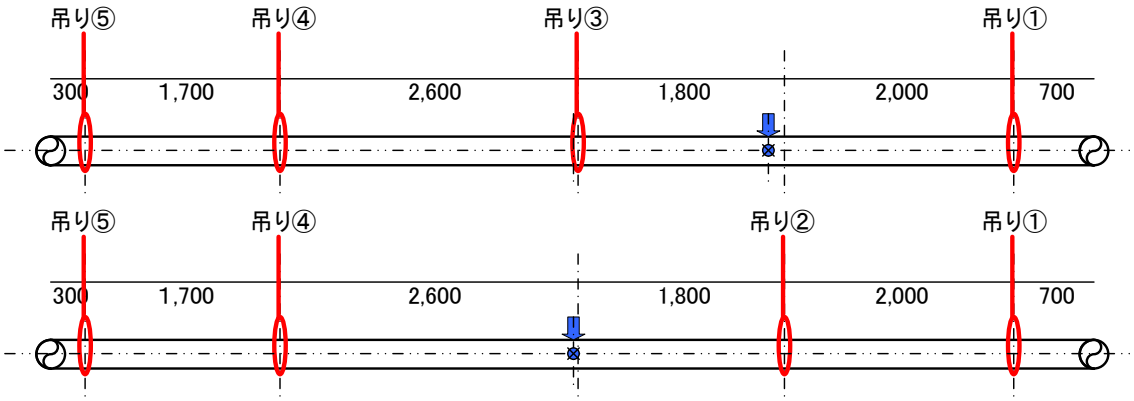
b.　**非日常用監視（配管設備）**

地震発生などの非日常時において設備の健全性が担保できるよう、非日常用監視を行う。今回の試験では、配管支持用の吊りボルトを監視対象とした。図①-(1-4)-2-1-2.1 に示す通り、通常の吊り状態に対して、吊りボルトを緩める、吊りボルトを外すなど、故意に配管支持用の吊り異常を発生させた時の、配管表面の振動の変化を測定した。

(a)通常状態での測定



(b)異常状態での測定（吊り②もしくは吊り③を外す、緩める）



図①-(1-4)-2-1-2.1　配管設備の吊り状態を変えた条件での計測試験

①-(1-4)-2-2　実設備での基礎データ計測試験結果

①-(1-4)-2-2-1　日常監視（設備機器、配管設備）の測定結果

a.　**センサの周波数特性と監視感度**

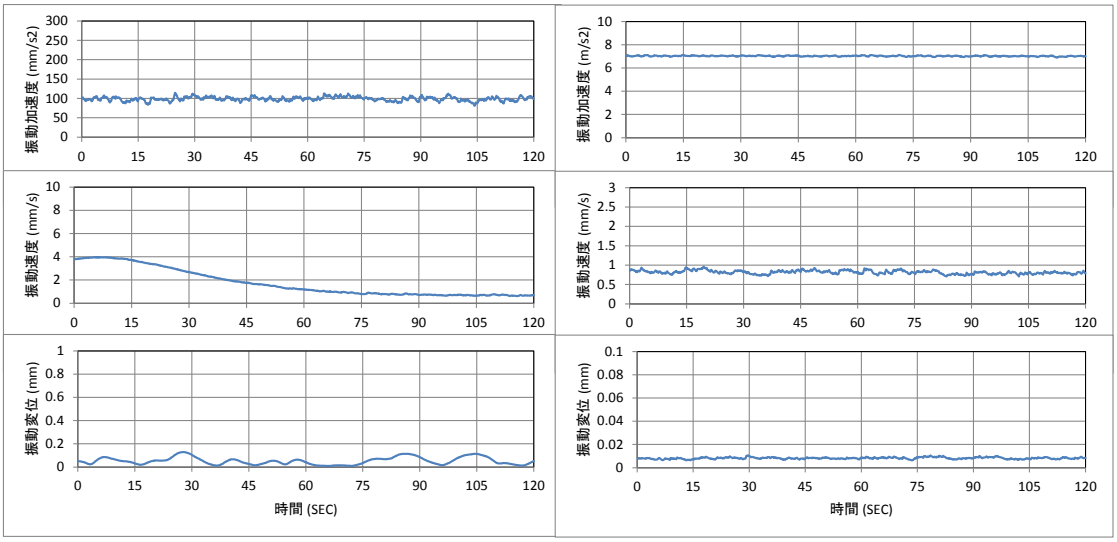
サーボ型加速度計と圧電型ピックアップによるポンプ架台での振動加速度の違いを図①-(1-4)-2-2-1.1 に振動計 VM-83 での時間波形（サンプリング周期 0.1 秒）、図①-(1-4)-2-2-1.2 に FFT 分析計 CF-5220 でのパワースペクトルで示す。なお、測定条件は次の通りである。

【測定条件】

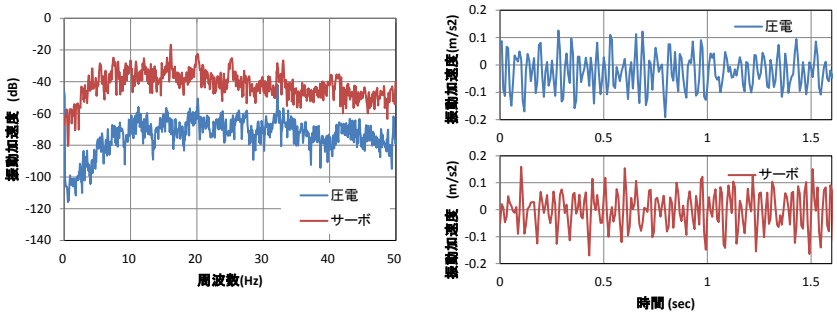
センサ	フィルタ		レベルレンジ		
	HPF	LPF	振動加速度	振動速度	振動変位
サーボ型ﾘｵﾝ製 LS-10C	0.1Hz	50Hz	300 mm/s^2	30 mm/s	3 mm
圧電型ﾘｵﾝ製 PV85	10Hz	10kHz	10 m/s^2	3 mm/s	0.3 mm

時間波形より、周波数帯域の違いにより振動加速度では圧電型が 1 ケタ大きな値となっているが、振動変位では 1 ケタ小さな値となっている。これは、周波数帯域の違いにより、サーボ型は機械や構造体の振動に由来する低周波領域の揺れを検出し、圧電型は軸受けの回転に由来する高周波領域の振動を検出しているためと考えられる。また、パワースペクトルはサーボ型の特性に合わせて 50Hz 以下の低周波帯域を解析した。10Hz 以下の極低周波においてセンサの周波数特性により圧電型の振動レベルが 20dB 程度小さいが、周波数が高くなるにつれて圧電型とサーボ型の差異が小さくなる。なお、ピーク値の周波数は、ほぼ同様の結果であった。

(1)サーボ型　　(2)圧電型



図①-(1-4)-2-2-1.1　ポンプ架台の振動値

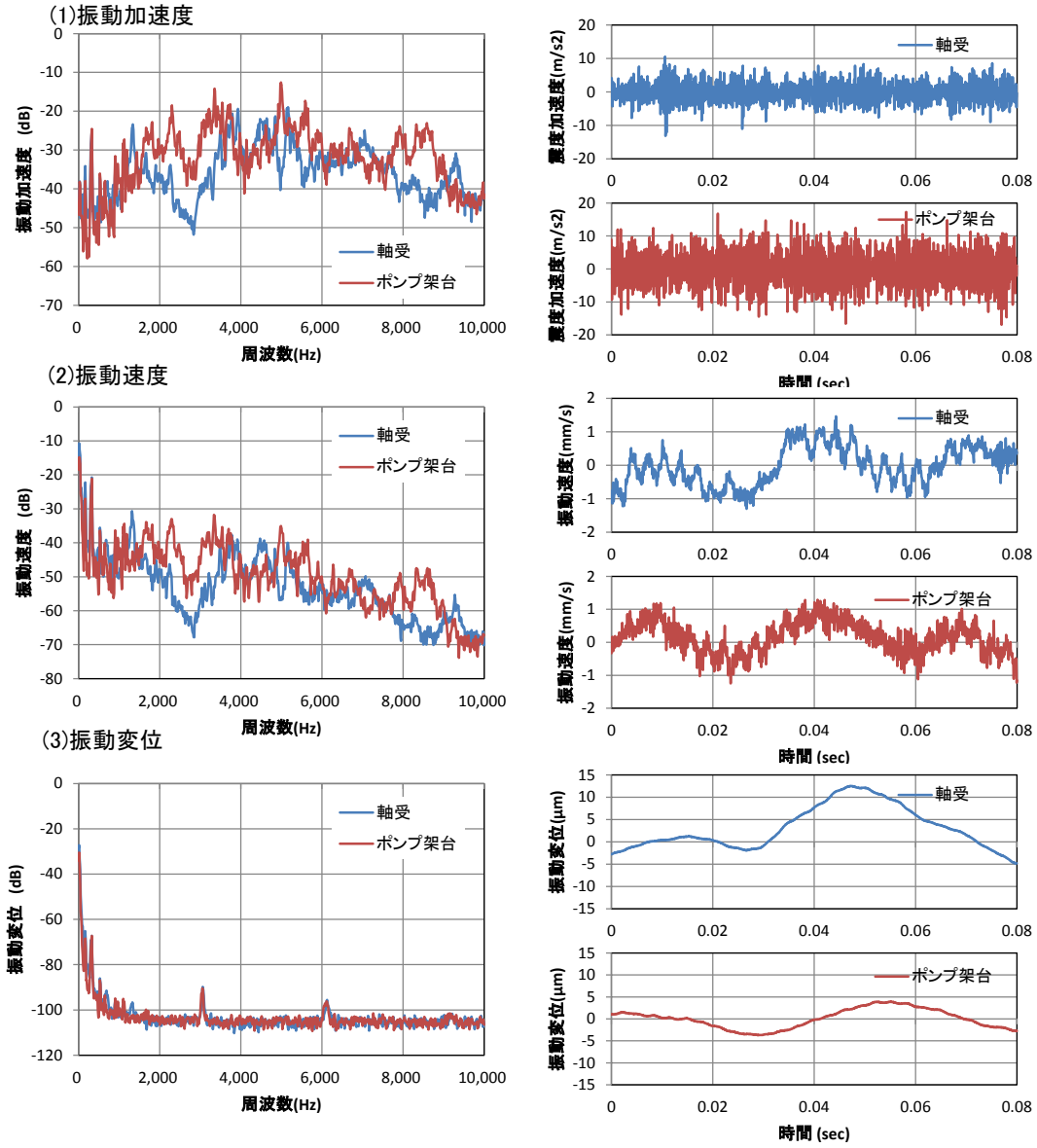


図①-(1-4)-2-2-1.2　ポンプ架台の振動加速度のパワースペクトルと時間波形

b.　監視部位による振動値の違い

ポンプの日常監視として、軸受けの摩耗、ガタなどの機械振動が想定できる。そこで、図①-(1-4)-2-2-1.3 に、ポンプ軸受け及び架台での振動加速度、振動速度、振動変位のパワースペクトルと時間波形を示す。なお、図には広帯域の振動を比較するために圧電型ピックアップの計測値を用いた。

図より、振動加速度では 10kHz までの高周波帯域で軸受け、架台の各測定部位に特有の振動強度が確認でき、十分に監視対象の周波数領域として使えることが分かった。一方、振動速度では 4kHz 以降で徐々に振動強度が低下している。さらに、振動変位では高周波帯域では急激に振動強度が低下している。これらの様子は時間波形からも十分見て取れる。



図①-(1-4)-2-2-1.3　ポンプ軸受、架台の振動加速度のパワースペクトルと時間波形

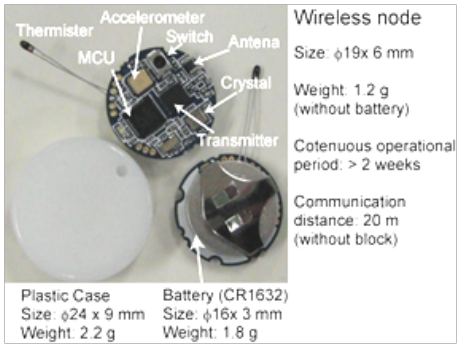
c. 送風機ベルトの状態監視の可能性

送風機の運転中にベルトの劣化監視は非常に困難である。熟練した保守員であれば異音による検知も期待できるが、一般には定期保全でベルトの撓みを測定して良否を判定している。従って、次回定期保全までの健全性を担保するためには、早期交換が最善の策となる。そこで、振動加速度によるベルトの状態監視の可能性を試験した。試験では、回転しているベルトの振動を直接測定できるよう、無線のデータ伝送機能を持つ（独)産総研が開発した H34C（MEMS）センサを用いた（図①-(1-4)-2-2-1.4 参照）。なお、測定条件は次の通りである。

【測定条件】

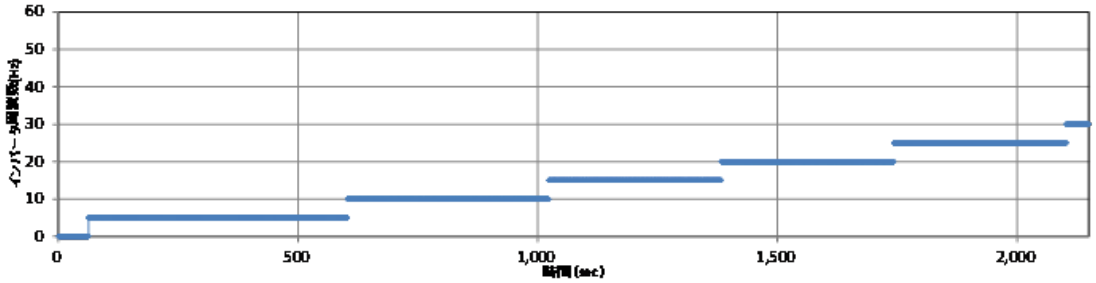
センサ	フィルタ(周波数特性)		出力レンジ		
	HPF	LPF	振動加速度	振動速度	振動変位
H34C 産総研 MEMS	－(DC)	－(100Hz)	333 mV/g	－	－

図①-(1-4)-2-2-1.5 に送風機のインバータ周波数とベルト厚み方向（Z 方向）ほかの振動加速度を示す。試験では、両面テープを用いて振動センサをベルトに貼り付けたため、インバータ周波数が 40Hz を超えるとセンサ電源用蓄電池のガタツキやセンサの脱落により測定不能となった。図①-(1-4)-2-2-1.6 にインバータ周波数と振動加速度の相関を示す。Z 方向の振動は主としてベルトのバタツキに起因し、X 方向と Y 方向の振動は主としてベルトの角速度とブレに起因する。図①-(1-4)-2-2-1.6 より、周波数に応じた振動加速度の増加傾向がみられ、X 方向では線形増加、Z 方向では対数関数的増加であった。

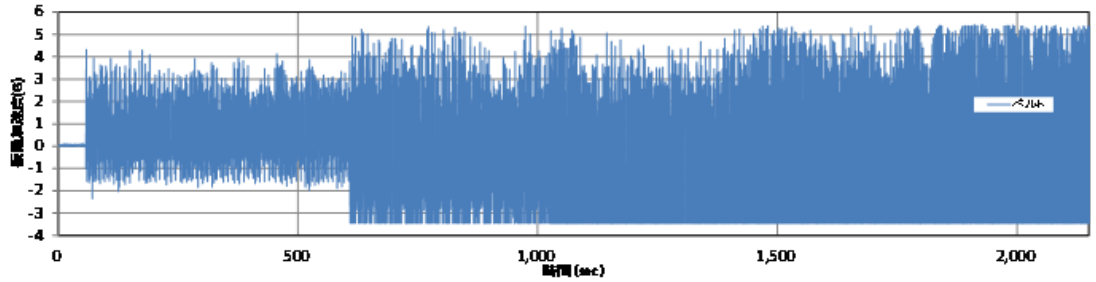


図①-(1-4)-2-2-1.4　MEMS センサの仕様

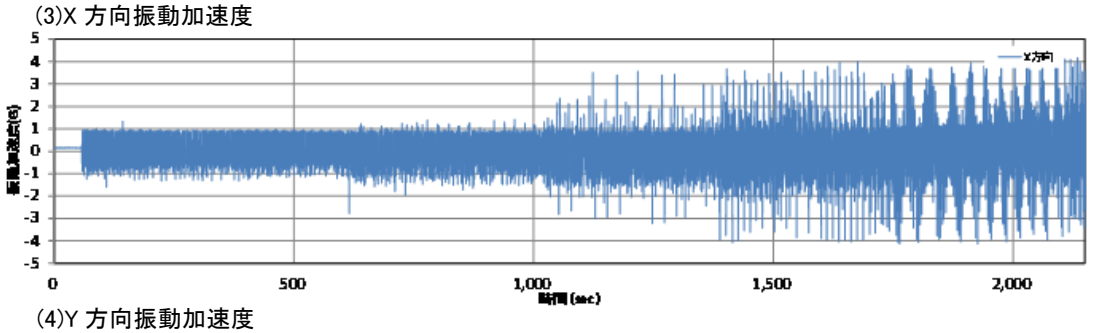
(1)インバータ周波数



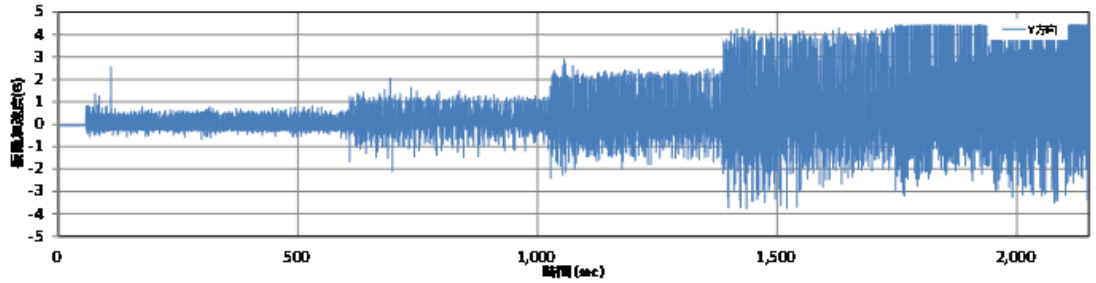
(2)Z 方向振動加速度



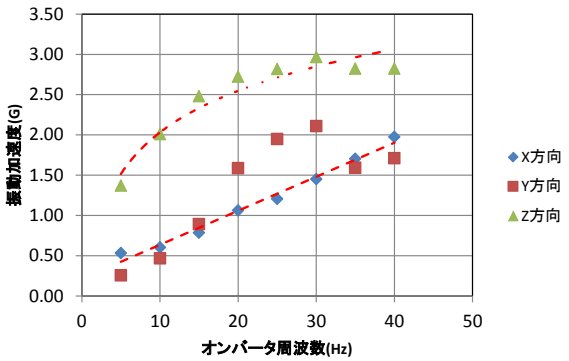
(3)X 方向振動加速度



(4)Y 方向振動加速度



図①-(1-4)-2-2-1.5　送風機の振動加速度

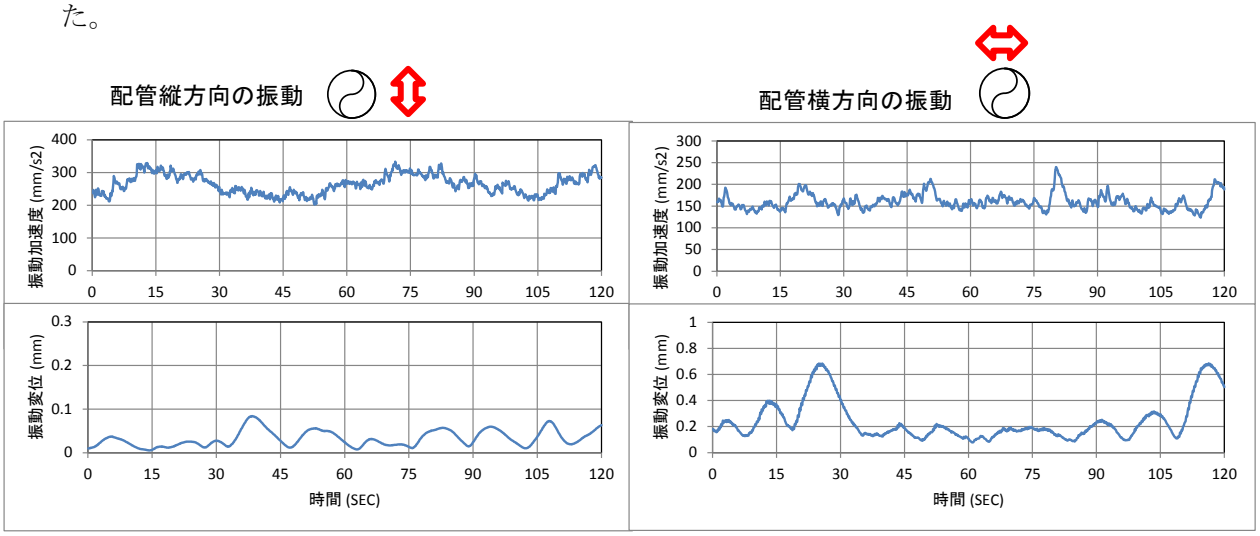


図①-(1-4)-2-2-1.6　送風機のインバータ周波数と振動加速度の関係

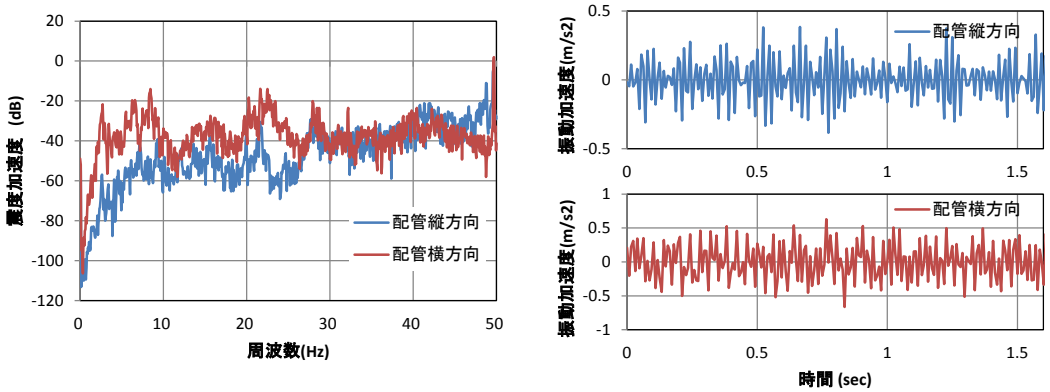
①-(1-4)-2-2-2　非日常用監視（配管設備）の試験結果

a.　配管の振動特性

低周波帯域用のサーボ型加速度計を用いて測定した配管の縦方向と横方向の振動加速度と変位の時間波形を図①-(1-4)-2-2-2.1 に、振動加速度のパワースペクトルを図①-(1-4)-2-2-2.2 に示す。時間波形より、配管の縦方向にて振動加速度が大きくなるが、振動変位は横方向が大きく、長周期の緩やかな揺れが見られる。また、パワースペクトルより、縦方向より横方向の振動が 10Hz 以下の低周波領域にピークがあることが分かった。



図①-(1-4)-2-2-2.1　配管の縦方向、横方向の振動値

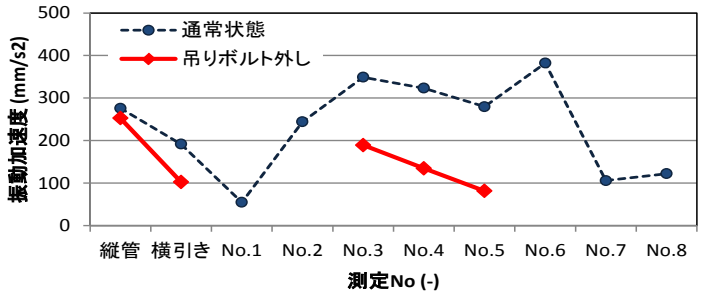


図①-(1-4)-2-2-2.2　配管の振動加速度のパワースペクトル

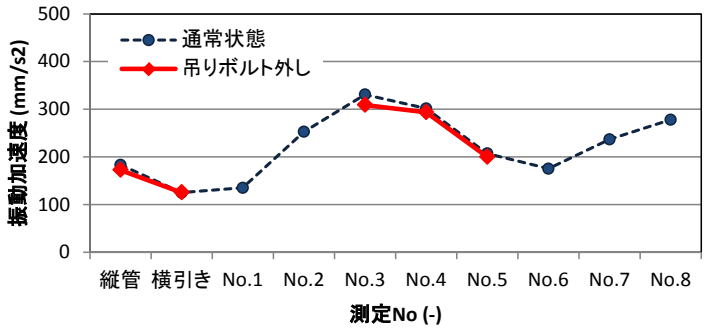
b.　配管支持用吊りボルトの外れによる振動の変化

配管の直管部にある 2 箇所の支持用吊りボルトを交互に外した時の振動値の変化を図①-(1-4)-2-2-2.3～4 に示す。図より、外す場所により振動加速度の変化に違いが見られる。今回は、配管直管部の 2 次振動モードの腹に合致する No.2 吊りボルトを外した方が、振動加速度が低下する現象が見られた。これは、配管の振動が曲管部から増加し、通常の

吊り状態では吊りボルトに伝播して上階スラブでの反射波で上下方向に揺れているのが、吊りボルトを外したことで、反射波が無くなったからと想定する。



図①-(1-4)-2-2-2.3　配管縦方向の振動加速度の変化



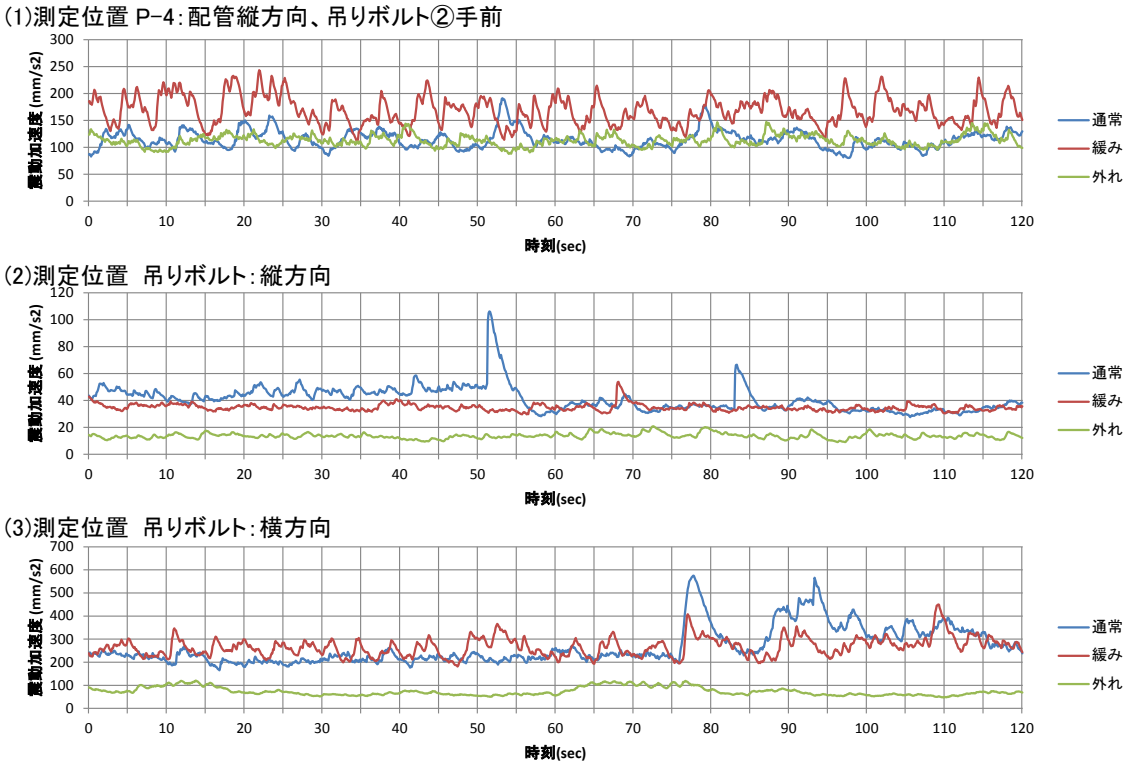
図①-(1-4)-2-2-2.4　配管横方向の振動加速度の変化

c.　配管支持用吊りボルトの緩みと振動の変化

先の結果で顕著な変化が見られた No.2 吊りボルトの有無について、支持張力と振動の変化を試験した。通常の状態、ネジを緩めてガタツキのある状態と外した状態の 3 条件における振動加速度の変化を図①-(1-4)-2-2-2.5、表①-(1-4)-2-2-2.1 に示す。ここでは、振動の変化が顕著な配管の上下振動に加え、吊りボルトの振動も計測した。図①-(1-4)-2-2-2.5 より、通常に対して緩みがある状態では振動加速度が増加し、外れると減少に転じている。これにより、吊りボルト不良の兆候としては振動加速度の増加傾向があり、外れると振動加速度が減少するという顕著な振動加速度の変化が確認できた。

表①-(1-4)-2-2-2.1　吊り状態と振動加速度

	等価ピーク値			RMS		
測定場所	通常	緩み	外れ	通常	緩み	外れ
横引き	1.0	1.03	0.77	0.0	1.00	0.75
No.3	1.0	1.15	0.77	0.0	1.10	0.83
No.4	1.0	1.27	0.77	0.0	1.47	0.98
吊・縦	1.0	0.51	0.20	0.0	0.82	0.33
吊・横	1.0	0.78	0.21	0.0	0.97	0.27



図①-(1-4)-2-2-2.5　吊り状態と振動加速度の変化

①-(1-4)-2-3　既存収集データの解析

公共性の高い都内某施設に設置された約 300 台の空調機、給排気送風機の軸受け監視として稼働している振動監視システムで計測されている振動加速度の収集データを対象に、送風機の振動加速度を解析した。本解析では、送風機の保守履歴（主として軸受け交換）と各種振動値の因果解析を行うことで、劣化兆候の特定を目的とした。

①-(1-4)-2-3-1　既存収集データでの監視項目

既存監視システムで収集されている各種振動データは、次に示す通りである。

- 周波数帯域でフィルタリングした振動値（数 Hz～1kHz、1kHz～30kHz)、及び高周波帯域の波形を包絡線処理した後の振動値
- 振動値：振動加速度、振動速度、振動変位
- FFT 解析によるパワースペクトル
- 時間波形の特性値：CF（波高率）、歪み度、尖り度

◆ＣＦ（波高率）：振動波形の高さの指標。

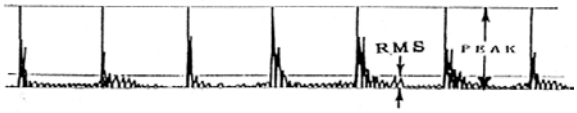
$$CF = X_{peak} / X_{rms}$$

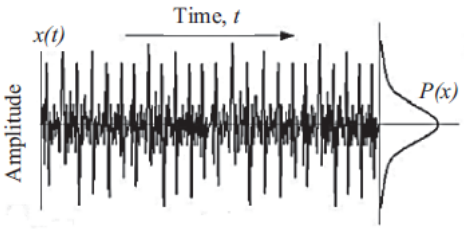
◆尖り度：振動波形の衝撃性を示す。正規分布(=3)からのずれを示す。

$$尖り度 = \Sigma(|X_i| - X)^4 / (N-1)X_{rms}^4$$

◆歪み度：振動波形の正負の歪を表し対称性を示す。

$$歪度 = \Sigma(|X_i| - X)^3 / (N-1)X_{rms}^3$$



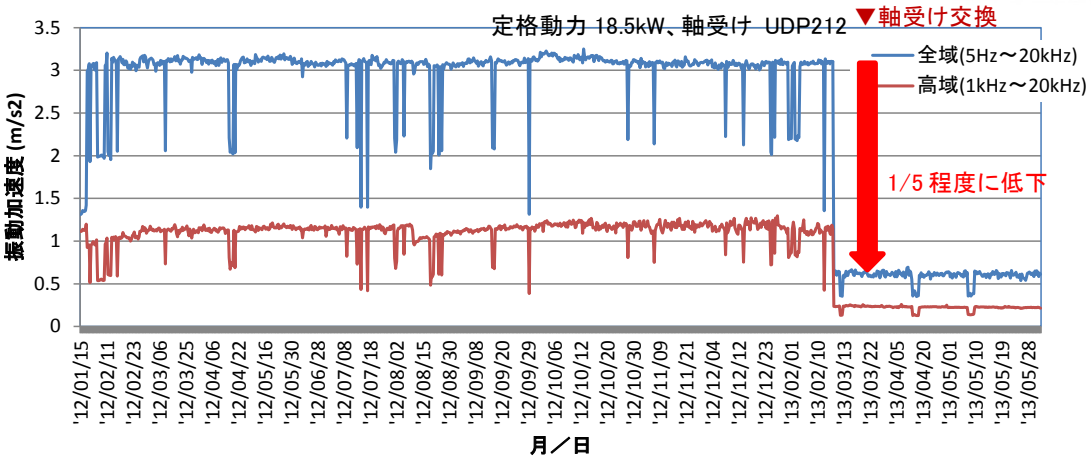


①-(1-4)-2-3-2　軸受け交換前後での解析結果

a.　周波数帯域による変化

インバータによる回転数制御をしている送風機（定格動力 18.5kW）の軸受け保全前後での振動加速度のオールパス値を図①-(1-4)-2-3-2.1 に示す。低周波数帯域では変化が見られないものの、高周波帯域並びに全域では大幅に低下し、軸受けの状態が改善している様子が見られる。これは、低周波数帯域が主として機械的振動を要因とするのに対し、高周波帯域が軸受けの摩耗・傷を要因とする定性的概念と合致している。





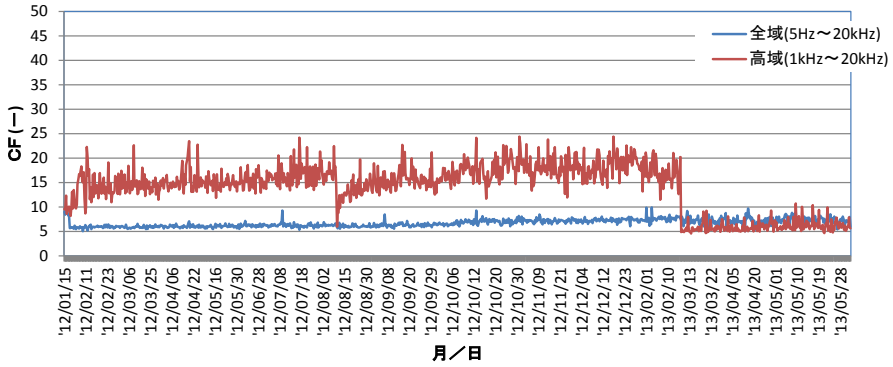
図①-(1-4)-2-3-2.1　軸受交換前後での振動加速度の変化

b.　各種波形特性値による変化

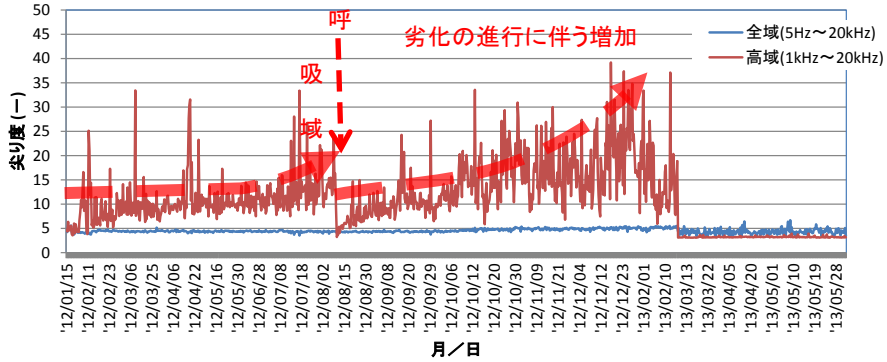
軸受け交換前後での CF、歪み度、尖り度の変化を図①-(1-4)-2-3-2.2 に示す。図より、各特性値とも運転時間の経過に伴い増加傾向が見られる。特に、尖り度の増加傾向が顕著で、劣化の進行過程に見られる増加と減少の繰り返しと、重度の損傷前に見られる急

激な増加を顕著にトレースしている。

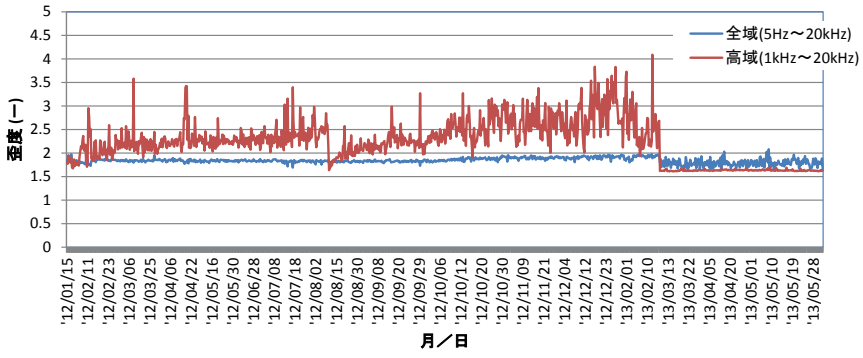
(1)軸受振動加速度のCF



(2)軸受振動加速度の尖り度



(3)軸受振動加速度の歪み度



図①-(1-4)-2-3-2.2　軸受交換前後での各種特性値の変化

c.　劣化兆候の再現性の確認

先に示した送風機を含む各種給排気送風機について、軸受け交換前後の振動値の変化を表①-(1-4)-2-3-2.1 に示す。ここで、低域 AP とは LPF 1kHz でのオールパス値、高域 AP とは HPF 1kHz でのオールパス値を指す。表より、軸受け交換前後でオールパス値の降下率（交換前に比べて交換後の割合）は、0.12～0.84 倍と幅広い。これは、保全の段取り替えによる手間を省くため、軸受け劣化に加えその周囲にある送風機も友連れで交換しているためである。ただし、交換の前後によるオールパス値の減少は明らかであることから、劣化兆候として状態監視するには有意な指標値といえる。また、低域では軸受け交換前後で必ずしも低減していない。これは、低域 AP が主として機械的振動に由来するためである。

表①-(1-4)-2-3-2.1　軸受交換前後での振動加速度の変化度合い

機種	定格動力 kW	ｲﾝﾊﾞｰﾀ有無	軸受け	軸回転数 rpm	交換前 m/s2		交換後 m/s2		変化率(交換後／前)	
					低域AP	高域AP	低域AP	高域AP	低域AP	高域AP
ch11-5　空調機給気ファン	18.5	有	UDP212	1,140	1.76	1.13	0.35	0.20	0.20	0.18
ch10-13 空調機還気ファン	3.7	無	UKP208	1,365	0.67	1.72	0.80	0.37	1.19	0.21
ch10-12 空調機給気ファン	5.5	無	UKP211	1,455	0.88	2.32	0.82	0.28	0.93	0.12
ch10-19 空調機給気ファン	18.5	有	UKP315	1,085	0.87	0.45	0.93	0.37	1.07	0.84
ch12-25 空調機給気ファン	18.5	有	UDP212	1,140	1.67	1.20	0.56	0.33	0.34	0.28
ch14-12 空調機給気ファン	11	無	EWP205	2,770	2.55	1.85	2.01	1.44	0.79	0.78
ch14-13 空調機還気ファン	2.2	無	EWP209	1,985	1.22	1.80	1.05	0.74	0.86	0.41

①-(1-4)-2-4　設備機器、配管設備の振動特性

実設備でのポンプ、送風機、配管の振動実測値、及び都内某施設での空調機、給排気送風機の振動監視システムで収集されている振動データの解析から、設備機器、配管設備の振動特性について、表①-(1-4)-2-4.1 に示す結果が得られた。

これらの結果は、設備機器の性能劣化や経年劣化といった日常監視、地震発生などにおいても運転が担保できるように非日常時向け監視での、振動センサの周波数特性、振動レベルの仕様特定に有意な情報である。

表①-(1-4)-2-4.1　設備機器、配管設備の振動特性

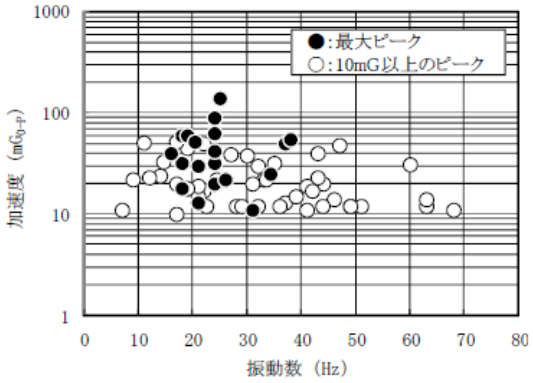
計測対象機器、部位		振動加速度（m/s^2）		周波数帯域	備考
		低域 AP 0.1Hz~100Hz	高域 AP 1kH z~20kHz		
ポンプ	冷却水ポンプ 7.5kW、軸受	－	3	軸受の傷 1kHz～10kHz	定速運転
	冷却水ポンプ 7.5kW、架台	0.07	5	機械振動 100Hz～300Hz	定速運転
送風機	空調機内送風機 2.2～18.5kW	0.67～2.55	0.44～2.32	機械振動 10Hz～100Hz 軸受の傷 1kHz～10kHz	軸受交換前
	空調機内送風機 2.2～18.5kW	0.35～2.01	0.22～1.46		軸受交換後
	インバータ付き送風機 2.2kW 軸受箱	0.2～1.3	－		Z(垂直)方向、インバータ周波数 5Hz～50Hz
	インバータ付き送風機 2.2kW 架台	0.3～3.7	－		
	インバータ付き送風機 2.2kW Vベルト	14.7～29.4	－	回転周波数	
配管	冷却水 100A 横引き、縦方向	0.2～0.3	－	DC～50Hz	通常の配管支持
	冷却水 100A 横引き、横方向	0.15～0.2	－		通常の配管支持
	冷却水 100A 横引き、縦方向	0.05～0.25	－		配管支持用吊りの緩み、外れ
	冷却水 100A 横引き、横方向	0.13～0.33	－		配管支持用吊りの緩み、外れ
	冷却水 100A 配管吊ボルト、縦方向	0.01～0.11	－	DC～30Hz	配管支持用吊りの緩み、外れ
	冷却水 100A 配管吊ボルト、横方向	0.05～0.58	－	DC～30Hz	配管支持用吊りの緩み、外れ

①-(1-4)-3　センサ仕様及び診断仕様の抽出

①-(1-4)-3-1　文献調査結果

①-(1-4)-3-1-1　自立電源（振動発電）

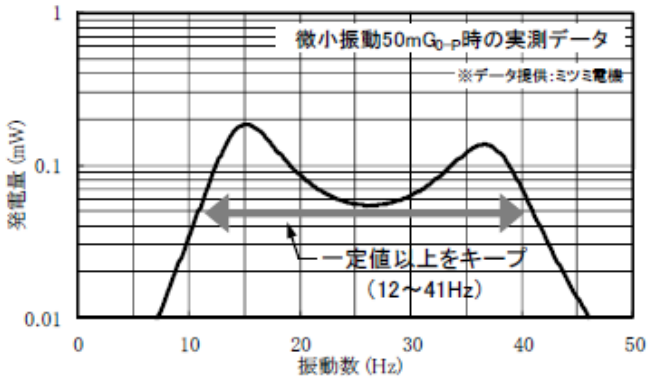
建築設備の振動を利用した自立電源の応用事例はまだ少ないが、文献 2)ではダクト設備の振動を利用した振動発電デバイスを開発している。この研究では、空調ダクトの振動のピークが測定場所により異なり広範囲の周波数帯に分布（図①-(1-4)-3-1-1.1 参照）することに着目し、2 質点系の発電デバイスを開発（図①-(1-4)-3-1-1.2、3 参照）している。配管の振動を利用した自立電源においても、振動のピークが広範囲にわたるため同様の発電デバイスの検討が必要と考えられる。



図①-(1-4)-3-1-1.1　空調ダクトの振動分布 [2)]



図①-(1-4)-3-1-1.2
振動発電デバイスと無線センサモジュール [2)]



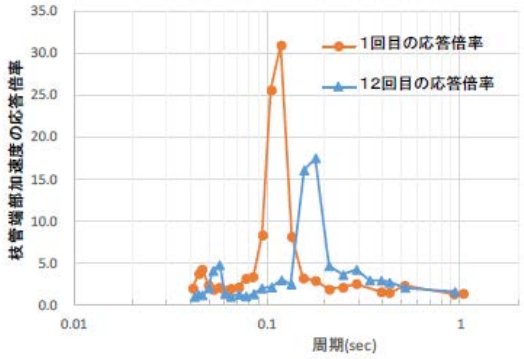
図①-(1-4)-3-1-1.3
振動発電デバイスの発電特性 [2)]

①-(1-4)-3-1-2　配管の耐震実験

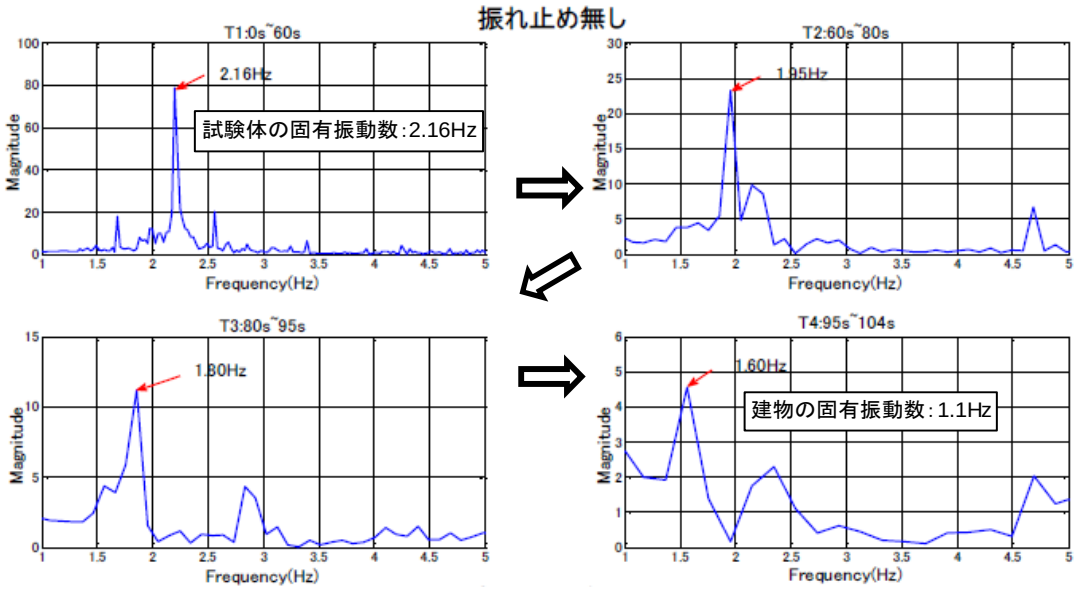
文献 3)では、スプリンクラー配管を対象に小型起振機を用いて、分岐を有する配管を加振し、枝管端部の応答加速度と変位を計測、加振を続けていくにつれて枝管の最大応答周波数が 10Hz から 5Hz 程度まで低下して、その後枝管のねじ込み部で断裂に至ったことを確認している（図①-(1-4)-3-1-2.1 参照）。同様に行った繰り返し加振を受けた吊りボルトの実験でも加振を続けるにつれ剛性が低下し破断に至っていることを確認している。

文献 4)、5)では、東日本大震災を想定した設備配管の振動実験（対象：冷温水配管 200A の吊りボルト、計測項目：加速度、変位）を行い、加振開始後、ピークの周波数帯が減少し建物の固有振動数に近づき 105 秒後に吊りボルトが破断した事例（図①-(1-4)-3-1-2.2 参照）を報告している。

これらのことにより、配管や吊りボルトの振動加速度を計測し、固有振動数の変化を捕らえられれば、配管設備の耐震診断に活用できると考えられる。



図①-(1-4)-3-1-2.1　Sweep 加振周期と応答倍率の関係 [3)]



図①-(1-4)-3-1-2.2　応答加速度の応答分析 [5)]（横軸：周波数、縦軸：加速度）

①-(1-4)-3-1-3　電気設備の劣化診断

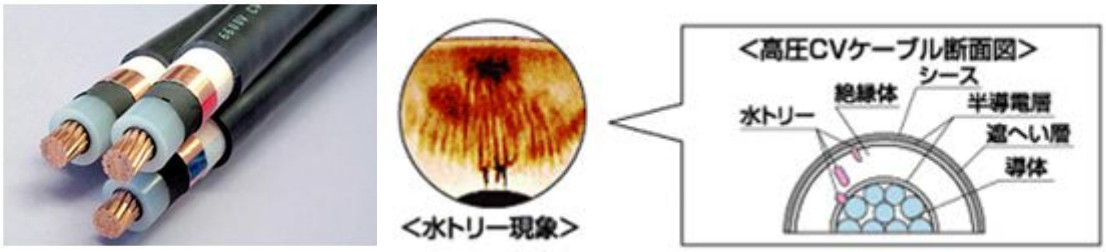
公共施設の電気設備は、受変電設備→ケーブル→配電盤→ケーブル→負荷という流れで電源供給を行っている。受変電設備や配電盤は開閉器、遮断機、変流器、変圧器、コンデンサなどから構成されていて、それぞれの機器の更新目安は 20～25 年を推奨とされている。これらの電気設備機器は、毎年の定期点検によるメンテナンスや、推奨時期に合わせて更新する予防保全を行っているケースが多く、経年劣化による突然の停電を伴う事故は発生しにくい状況である。ただし、配電盤間や機器・装置間を結ぶケーブルに関しては、施設内を広範囲に敷設されていることが多く、設計寿命約 30 年とされているが、簡単に全面更新といった予防保全を行うことは経済性の観点より非常に困難である。そこで、供給される負荷が多く重要性が高い系統側（電力会社側）で一般的によく使用される高圧 CV ケー

ブルについて、センサによる劣化診断の需要がないかを文献及びヒアリングにより調査を行った。

CV ケーブルの劣化は、運転電圧や過電圧やサージ電圧要因による電気的劣化、異常温度上昇による熱的劣化、油などによる化学的劣化、外傷や衝撃による機械的劣化、動植物による生物的劣化といったものに分類される。この中でも電気的劣化である水トリー劣化（図①-(1-4)-3-1-3.1 参照）が多くを占めている。水トリー劣化とは、微量の水や異物がケーブルの絶縁層に侵入し、絶縁体内に発生する樹枝状の劣化であり、時間の経過とともに拡大し、最終的には絶縁破壊に至る劣化である。この水トリー劣化に対して各企業が、診断技術の公開や新技術の検討をしている状況である。この中で、電力中央研究所の「経年 CV ケーブルに対する水トリー劣化診断」[6)]では、活線検出のための微小信号高感度検出手法の検討をされていた。この検討資料より、グリーンセンサにより異常検知が可能となれば、広域の重要系統の CV ケーブルについて常時監視による異常診断により事故回避や予防保全につながると推測した。

センサモニタリングシステムによる異常検知の常時監視のニーズについて、電力中央研究所へヒアリングを行った。ヒアリングの結果、活線での異常検知システムには様々なセンサや保安装置を使用していて、我々の検討しているセンサシステムで異常を検知することは容易でなく、ニーズも多くないとのことであった。

以上の文献とヒアリングによる調査より、電気設備の高圧ケーブルにおいてはセンサモニタリングシステムの活用場所は少ないと結論づけた。



図①-(1-4)-3-1-3.1　高圧 CV ケーブルの水トリー現象の概要（四電エンジニアリング HP より）

①-(1-4)-3-2　市販振動デバイスの評価

①-(1-4)-3-2-1　市販振動デバイスの概要

公共施設設備のモニタリングでは、性能劣化や経年劣化といった日常監視、地震発生などにおいて設備の健全性が担保できるよう非日常用監視において､振動監視が主体となる。よって、測定に対するハーベスト電源では、振動発電のデバイスを検討する。

設備監視用の振動発電デバイスについては、「文献調査結果」の項で述べたように、空調用ダクトの板振動を活用する既往の研究がある [2)]。そこでは、板振動の周波数特性が 8～68Hz の広帯域で、振動加速度が 11～120mG と微弱であることから、2 質点系の発電デバイスを製作し、12～41Hz で 0.054mW 以上の発電出力を得ている。さらに、センサへの応用として振動発電デバイスにコンデンサと Zigbee 準拠の温湿度センサを組み合せ、1 分周期でデータ収集、伝送を実現している。

この現状を踏まえ今回の研究では、既に応用開発が進んでいる振動発電デバイスについて先ずはカタログ性能の実態を試験し、設備機器や配管設備において、その実用性の有無を評価することとした。なお、今回試験対象とした振動発電デバイスは、国内での調達が容易な Mide 社の Volture で､圧電素子を用いて共振周波数を 50Hz に調整したものである。

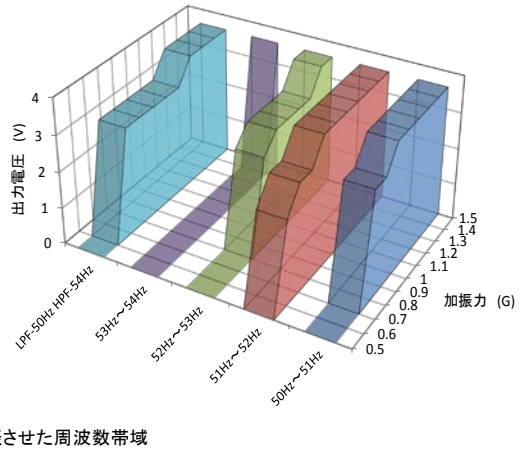
①-(1-4)-3-2-2　市販振動デバイスの評価

a.　発電出力の簡易評価

簡易的な評価では、振動発電デバイスと Zigbee 準拠の温度センサを組み合せた評価ユニットを用いた。加振器にて振動発電デバイスに振動を与え、評価ユニットの操作ソフトを用いて温度センサへの電源供給を確認した。図①-(1-4)-3-2-2.1 に評価装置の構成、図①-(1-4)-3-2-2.2 に加振の周波数帯と加振力、振動発電デバイスからの出力電圧を示す。出力電圧より、共振周波数 50Hz の成分を含む振動であれば発電するものの、共振周波数を外れた 53Hz～54Hz の振動では相当に大きな加振力でないと発電しない。さらに、共振周波数の振動でも 0.7G 以上の加振力が必要であることを確認した。



図①-(1-4)-3-2-2.1　評価装置の構成



図①-(1-4)-3-2-2.2
振動発電デバイスの周波数特性

b. 発電出力の評価

直流電子負荷装置を用いて、振動発電デバイス単体での発電出力を評価した。図①-(1-4)-3-2-2.3 に評価装置の構成を示す。直流電子負荷装置の設定は、コンダクタンスを 1mS の「定抵抗モード」とした。振動発電デバイスからの発電出力は、直流電子負荷装置の外部出力端子（発電電流）を 256Hz のサンプリング周期でロギングした。試験対象の振動発電デバイスには、電圧安定化回路が組み込まれているため、所定の電圧（3.6V）に達するまで発電出力が得られない。そこで、ロギングした発電電流に 3.6V を乗じて発電電力とした。図①-(1-4)-3-2-2.4 に代表加振力と電力出力のトレンド、図①-(1-4)-3-2-2.5 に加振力と発電出力の関係を示す。トレンドより、加振力が大きくなるほど発電出力の頻度が高くなる。なお、加振力が 0.6G 以下では、ほとんど発電出力が得られなかった。また、加振力と平均の発電出力の関係から、加振力と発電出力には正の相関が見られ、今回試験した振動発電デバイスでは、1G の加振力で 0.4mW の電力を得ることができる。

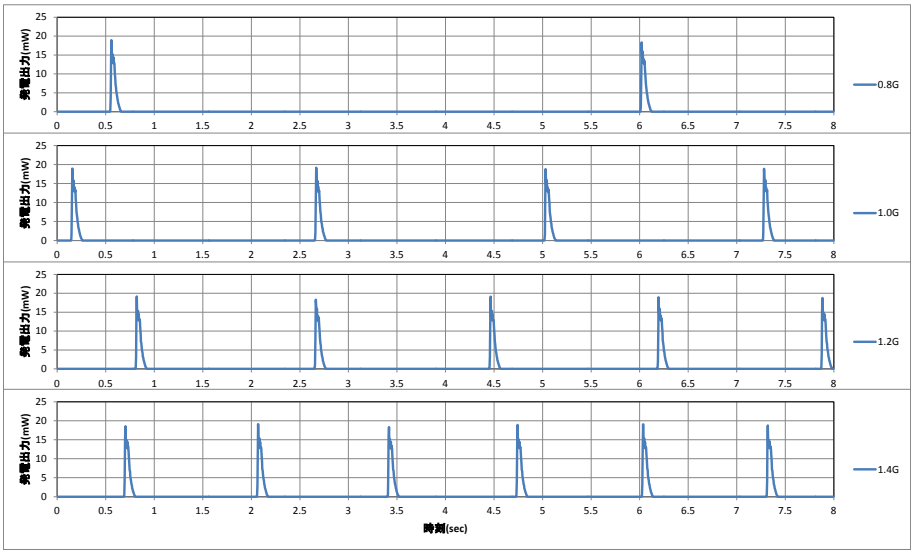
これらの結果から、設備機器や配管設備でのセンサ電源取得の可能性を整理すると、

- 配管：縦方向の振動加速度の全域 AP で 0.03G 以下、共振周波数も低いため取得困難
- ポンプ：軸受保護カバーの振動加速度で 0.7G 超となる場合もあり、取得可能
- 小型送風機：架台、軸受の振動加速度の全域 AP で 0.4G 以下であるが、50Hz の振動加速度は 0.7G の場合もあり、取得可能

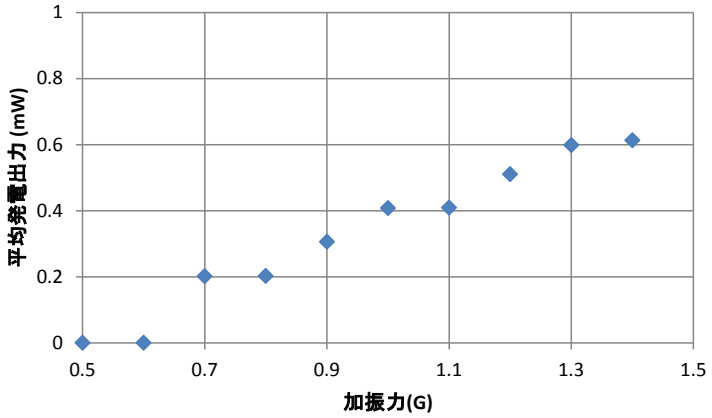
以上、今回試験した振動発電デバイスは、設備監視用の電源装置としての適用箇所が限定されるものの、センサ電源として利用可能である。さらに、適用箇所を広げるには、共振周波数を 10Hz 程度の低周波数帯に調整するか、2 質点系の振動発電デバイスとして広帯域の振動で発電可能とすることが課題である。



図①-(1-4)-3-2-2.3　振動発電デバイスの発電出力の評価装置



図①-(1-4)-3-2-2.4　加振力と発電出力のトレンド



図①-(1-4)-3-2-2.5　加振力と発電出力の相関

①-(1-4)-3-3　センサ仕様の抽出と課題

文献調査や後述のヒアリングの結果から公共施設モニタリングシステムに必要なセンサとして、設備機器や配管設備を対象とした振動加速度センサ、配管設備を対象とした漏水検知センサ、設備機器や配線設備を対象とした温度センサの 3 種類を抽出した。それぞれのセンサの要求仕様を表①-(1-4)-3-3.1 に示す。

表①-(1-4)-3-3.1　抽出されたセンサの要求仕様

センサ種別	項目	仕様
振動加速度センサ（設備機器用）	対象物・目的	設備機器の回転体軸受け等、軸受け等の劣化診断に使用
	性能	1kHz～10kHz、最大 10m/s^2、分解能 0.1mm/s^2
	耐久性・耐環境性	10年以上の耐久性、屋内、屋外設置可能
	電源	ハーベスト電源、災害時おいても自給可能なもの
	測定頻度	1回/日で十分、災害、緊急時にwakeup測定
	価格	センサ単価 数千円/個、システム構築 1千万円以下
振動加速度センサ（配管設備用）	対象物・目的	配管及び吊り棒等の支持材、支持材の劣化診断、耐震診断に使用
	性能	DC～50Hz、最大 10m/s^2、分解能 0.1mm/s^2
	耐久性・耐環境性	10年以上の耐久性、屋内、屋外設置可能
	電源	ハーベスト電源、災害時おいても自給可能なもの
	測定頻度	1回/日で十分、災害、緊急時にwakeup測定
	価格	センサ単価 数千円/個、システム構築 1千万円以下
漏水センサ	対象物・目的	配管の水漏れ検知に使用、漏水の検知を早期に行うことでインフラ設備の被害拡大を防ぐ
	耐久性・耐環境性	10年以上の耐久性、屋内、ピット内設置、屋外仕様不要
	電源	ハーベスト電源、災害時おいても自給可能なもの
	測定頻度	1回/日で十分、災害、緊急時にwakeup測定
	価格	多数設置が求められるのでセンサ単価 数百円/個
温度センサ	対象物・目的	配線、開閉器、リレー、配管の表面温度、表面温度の変化により劣化診断に使用
	性能	0～100℃　分解能 0.1℃
	耐久性・耐環境性	10年以上の耐久性、屋内、屋外設置可能
	電源	ハーベスト電源、災害時おいても自給可能なもの
	測定頻度	1回/日で十分、災害、緊急時にwakeup測定
	価格	センサ単価 数千円/個、システム構築 1千万円以下

設備機器及び配管設備に使用する振動加速度センサに関して自立電源の検討を行った結果を表①-(1-4)-3-3.2 に示す。センサ部の消費電力 10mW、送信部の消費電力 30ｍW（通信は 920MHz 帯を使用すると想定）としてセンサ部と送信部に掛かる電力消費量を試算した結果、それぞれ 43mJ、85mJ と見積もられた。サンプリング間隔 1 日 1 回以上というヒアリングの結果より、送信間隔を 12hr とすると、必要振動発電としては設備機器で 0.001mW 以上、配管設備で 0.002mW 以上となる。演算部、制御部に掛かる電力消費量を仮に 50mJ 見込んだとしても、必要振動発電としては設備機器で 0.002mW 以上、配管設備で 0.003mW 以上程度である。

既存の振動デバイスでみると、Mide 社の振動デバイスでの実験結果では、共振周波数 50Hz で加振力 0.7G 以上あれば振動発電は 0.2ｍW 以上得られている。また、英国の Perpetuum 社の振動発電機は、ポンプなどの振動に共振するようにチューニングでき、最大出力は 20mW（DC5V、4ｍA、0.25～0.5gRMS）である [7]。ポンプ、送風機などの回転体

を持つ設備機器に関しては、特定の周波数帯に振動加速度のピークがあるため、市販の発電素子デバイスの改良で対応が可能であると考えられる。

一方、配管設備に関しては、50Hz 以下の周波域に振動加速度のピークがあるとともに、配管サイズや設置箇所などによりピークの周波数帯が異なるため、文献調査で記述した 2 質点系振動デバイス [2)]や借電型デバイスの開発が必要となってくる。

表①-(1-4)-3-3.2　振動加速度センサの自立電源の検討結果（センサ部と送信部のみで試算）

	設備機器（軸受）	配管設備
センサ部　周波数帯 消費電力 測定精度 計側時間	1kHz～10kHz 10mW 16bit 25,600Hz × 8,192点 = 0.32sec	DC～50Hz 10mW 16bit 128Hz × 1,024点 = 8sec
送信部　消費電力 送信時間	30mW（送信距離 最大100m程度） 8,192 × 16bit / 100kbps = 1.3 sec	30mW（送信距離 最大100m程度） 1,024 × 16bit / 100kbps = 0.2 sec
電力消費量	10mW×0.32sec + 30mW×1.3sec = 43 mJ	10mW×8sec + 30mW×0.2sec = 85 mJ
送信間隔	12hr	12hr
必要振動発電	0.001mW以上	0.002mW以上

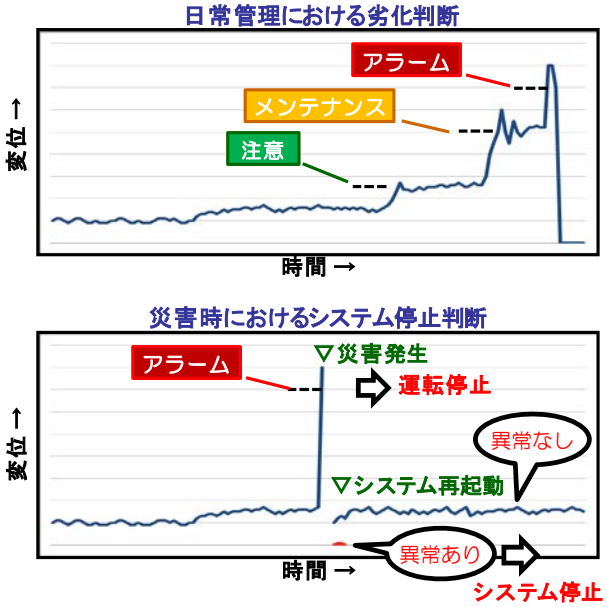
①-(1-4)-3-4　診断仕様の抽出と課題

文献調査や後述のヒアリングの結果から抽出された公共設備施設モニタリングシステムの診断項目を表①-(1-4)-3-4.1 に示す。

表①-(1-4)-3-4.1　抽出された診断項目

対象設備	診断項目
設備機器	・軸受けの振動加速度のオールパス値、尖り度等の変化やFFT解析による劣化診断
配管設備	・配管並びに吊り棒等の振動加速度のオールパス値の変化やFFT解析で支持部材を劣化診断 ・インフラ設備の被害拡大防止のための漏水検知、発報
配線設備	・配線、開閉器、リレー等の表面温度の変化による劣化診断

診断アルゴリズムのイメージを図①-(1-4)-3-4.1 に示す。診断は、日常データ（基準データ）からの変化量により、2 段階の判断基準を用いシステムの安定運用を行う。平常時の日常管理においては、計測データの傾向管理、域値判断によりメンテナンスシグナルを発信することにより予防保全を行い、システムの突発的停止の防止を行う。災害や非常時は、エラーの早期発見により緊急アラームを発報、システム停止を行い被害の拡大を防止する。



図①-(1-4)-3-4.1　診断アルゴリズムのイメージ

①-(1-4)-4　ユーザ機関による成果の有効性の検証

①-(1-4)-4-1　ユーザ機関へのヒアリング概要

社会インフラの課題として、電気・都市ガス・上下水道などのユーティリティを含む設備機器の故障や配管の破損・漏洩は物的な損害のみならず、人的な被害にも及ぶ危険性があるため、特に防災拠点となる消防、警察、病院、データセンターなどの施設やそれにつながる地域冷暖房施設などのインフラ施設における劣化診断が挙げられる。従来の劣化診断は定期巡回において保守員の経験と勘に頼っており、異常を発見した時には既に遅く、被害が甚大になっている場合が多い。非常時の 2 次災害防止や災害直後のサービス早期再開を行うためには、モニタリングシステムが必要でその構築のためには、従来から劣化診断を行っている保守員の経験と勘による判断要素が重要になってくる。先導研究では、ビル設備の保守メンテ会社や地域冷暖房施設の運用会社、公共施設の管理者にヒアリングを行い、モニタリングシステムを構築するに当っての必要な測定項目・測定場所の特定を行った。ユーザ機関へのヒアリング実施状況の概要を表-(1-4)-1-1.1 に示す。

表①-(1-4)-4-1.1　ヒアリング実施状況

日時	対象者	用途	ヒアリング内容
2013/11/13	電力中央研究所	研究機関	電線ケーブルの劣化診断方法とニーズの収集
2013/11/26	丸誠	ビルメンテ会社	ビル設備における劣化診断方法とニーズの収集
2013/11/27	高砂エンジニアリングサービス	ビルメンテ会社	ビル設備における劣化診断方法とニーズの収集
2014/1/7	東京都市サービス	地域冷暖房施設運用会社	地域冷暖房設備における劣化診断方法とニーズの収集
2014/1/23	公共施設①営繕課	公共施設	公共施設設備における劣化診断方法とニーズの収集
2014/1/24	公共施設②営繕課	公共施設	公共施設設備における劣化診断方法とニーズの収集

①-(1-4)-4-2　ヒアリング結果と成果の有効性の検証

表①-(1-4)-4-2.1 にヒアリングによりまとめた劣化診断を行うに当り必要なセンサシステムへの要望を示す。設備機器については、振動加速度の測定が有効で夜間などあまり日変化がない時間帯で1日1回程度測定することで劣化診断が可能であるとしている。また、1 日 1 回の簡易計測から変化が見られれば連続計測に切り替えるという方法を取れば、サーバ容量の最適化が可能でシステム構築費用も抑えられる。電気設備については、表面温度が簡易に計測できれば有効である。機器の回転体も表面温度においても劣化は分かることから、赤外線アレイやサーモグラフィなどの温度センサの高度化が求められる。配管設備においては腐食発見や漏水検知に対する要望が多く、漏水センサや腐食モニタリングシステムの開発が求められる。

常時モニタリングによる劣化診断システムが普及していくためには、メンテナンスの人件費削減分により 5 年程度で投資回収できるような廉価なセンサや構築が簡易なシステムが必要でセンサの電源自給や無線通信は必要不可欠な要素になってくる。

表①-(1-4)-4-2.1　センサシステムへの要望事項まとめ

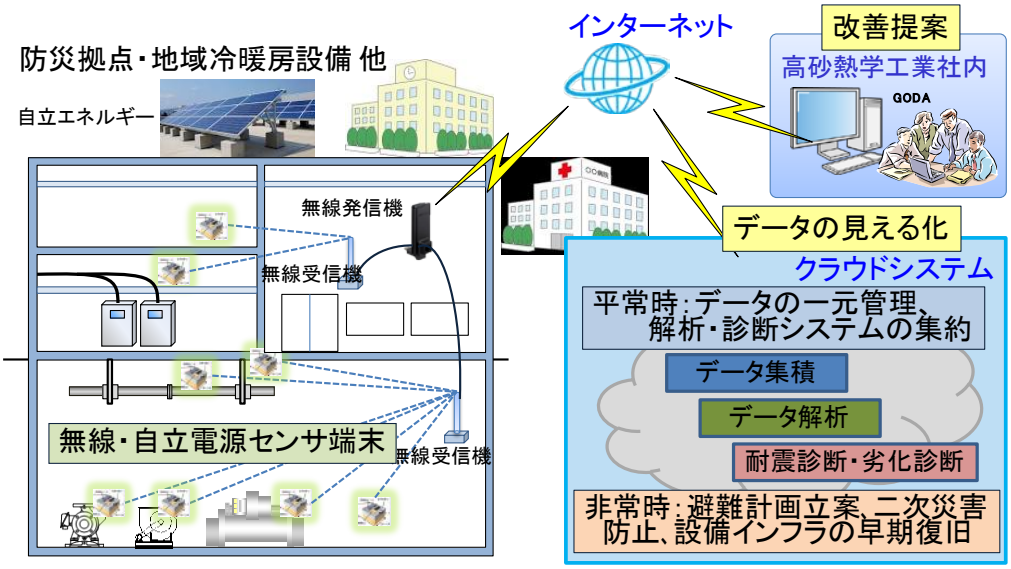
対象構造物	設備機器、電気設備、配管
常時・継続モニタリングしたい事象	振動、加速度、表面温度、電流値、漏水
モニタリングのエリア	電動部（モータ、コンプレッサ）、開閉器、配管部
計測項目・形態	振動・加速度変化、温度変化、電流値変化、漏水検知
計測データ・収集方法	無線通信によるリアルタイム計測
データ処理・活用方法	日常管理：通常値からの変化にて劣化度合いを診断し予防保全を行う。 非常時：震災などの非常時後の状態を診断し、異常値を示すものに対し早期に対策を施す。
施工場所・周辺環境	電動機本体（屋内、屋外）、盤内、配管表面（屋内、屋外）屋外設置も考えられるので耐候性が求められる。
電源・耐久性	振動によるハーベスト電源、寿命は10年程度
システム導入	センサ単価は数千円、システム価格としては1千万円以下
その他	日常計測において、サンプリング間隔は1日1回程度

①-(1-4)-5　まとめ

＜将来開発すべきセンサシステム像＞

公共施設設備モニタリングシステムの開発に当たって、設備機器、配管設備などの基礎データ計測試験とセンサ仕様及び診断仕様の抽出を行った。

本研究開発で得られた将来開発すべきセンサシステムは、非接触で簡易に計測出来る計測技術や無線通信技術、クラウド上でのデータ分析診断技術の活用による、建築物の①設備機器、②配管設備、③電気・計装配線設備を対象として定常時の劣化診断・耐震診断と非常時の早期の異常検知を行う安価な公共施設設備モニタリングシステムである。最終目標のイメージを図①-(1-4)-5.1 に示す。



図①-(1-4)-5.1　公共施設設備モニタリングシステムの最終目標

＜開発すべきセンサシステムの技術課題・開発内容と目標＞

本格研究では、センサに関しては自立電源として振動発電方式やキャパシタ容量を明確化し上で、周波数帯域 DC～10kHz の振動加速センサをセンサメーカと共同で開発していく。診断システムに関しては、クラウド型ネットワークシステムの構築、ビッグデータの解析機能､劣化診断アルゴリズムや非常時対応アルゴリズムの開発を行っていく｡さらに、要素技術開発に加えて、実証現場でのフィールド検証、実証試験を踏まえた課題の抽出により実用化開発を進める。

実用化時期としては、要素技術開発、システム開発、システムテスト、実証実験の期間を総合すると、実用化までは最長 5 年程度と考えられるが開発が完了したものから順次実用化していくこととし、実用化時期としては 2018 年までを想定する。

＜開発されるセンサシステムを適用した場合に期待できる具体的効果、インパクト＞

開発されたシステムが、国内の地域冷暖房施設や防災拠点に設置されることにより産業インフラなどの安全性が向上する効果に加え、センサ端末やシステム開発などの製造業や設置などのエンジニアリング業、運用・管理などのメンテナンス業などの広範な産業領域へ及ぼす波及効果は大きいと判断される。

参考文献

1) 空気調和衛生工学会東日本大地震調査支援本部調査部会調査団、”2011.3.11. 東北地方太平洋沖地震建築設備被害に関する調査報告”、空気調和・衛生工学会、PP.8-9、(平23)
2) 阿部隆之、井上竜太、平林信二、”空調設備の振動発電利用に関する研究(その 1)、 (その 2)”、日本建築学会学術講演会、PP.1349-1352、(平成 25.8)
3) 水谷国男、中井拓也、”建築設備の耐震設計法に関する研究(その 2)(その 3)”、日本建築学会学術講演会、PP.599-602、(平成 25.8)
4) 橋本信、松島俊久、千葉隆文、川島隆朗、水谷国男、元結正次郎、金恵英、”地震時の建築設備用配管の挙動と損傷に関する実験(その 1)”、日本建築学会学術講演会、PP.603-604、(平成 25.8)
5) 金恵英、橋本信、水谷国男、川島隆朗、元結正次郎、中井拓也、”地震時の建築設備用配管の挙動と損傷に関する実験(その 2)”、日本建築学会学術講演会、PP.605-606、(平成 25.8)
6) 電力中央研究所、”電力機器の劣化・異常診断技術”、電力中央研究所研究紹介リーフレット、(平成 24.11)
7) 竹内敬治、”エネルギーハーベスティングの現状”、伝熱、Vol.52、No.218、PP.1-6、(平成 25.1)

①-(2)　高密度面パターンセンシングシステムの開発

【独立行政法人産業技術総合研究所、一般財団法人マイクロマシンセンター、大日本印刷株式会】

①-(2)-1　研究の目的

近年橋梁の劣化が問題となっており、その補修・補強が急務となっている。橋梁などのコンクリート構造物の劣化要因は、土木学会コンクリート標準示方書によれば、中性化、塩害、凍害、化学的浸食、アルシリカ反応、疲労の 6 要因とされている [1)]。いずれの場合もコンクリート構造物の劣化は、ひびの発生や打音に対する異常音の発生という形で認識され、劣化の度合いに応じて補修・補強が行われる。

補修・補強箇所を特定するために、目視によるひびの確認や打音検査が標準に用いられるが、人手によるため高速道路や国が管理する橋梁ですら 5 年に 1 度の頻度であり、地方自治体が管理する橋梁では全てを見切れないのが現状である。しかしながら、橋梁の劣化は今後さらに進展することが見込まれ､コンクリートの劣化箇所の特定と補修･補強が益々必要となってくる。

＜現状の取り組みと課題＞

橋梁のコンクリートの検査は目視と打音を基本とするが、超音波、X 線、電磁波などによる非破壊検査などもあわせて用いられる。前者は人材確保の困難さや人件費の問題から 5 年単位での検査しか行えなかった。また、後者は特殊な機器を用いるため高コストとなり使用箇所は限定的となっていた。常時モニタリングとしては日立の AirSense、NTT データの Brimos などの無線センサネットが実用化されているが､無線センサ端末が高価であるため局所的な検査になってしまう。

＜実施内容と最終目標＞

このような背景から、コンクリートの劣化箇所を人手による目視や打音検査ではなく、センサによるモニタリングにより迅速に特定するシステムが望まれる。そこで、本研究では、センサとしては高精度のセンサを用いて点で劣化をとらえるのではなく、安価なセンサを大量に並列配置して面情報としてコンクリートをモニタリングし、劣化箇所を特定することに特化した高密度面パターンセンシングシステムについての実現可能性を示すことを目的とする。このために本研究では以下を実施する。

・橋梁の振動モニタリングに関する研究開発状況を文献やヒアリングにより調査する。また、歪や温度など振動以外でのモニタリングについても調査を行う。

・振動モニタリングの具体的方法として、我々がこれまでに開発してきた積算型無線セ

ンサ端末の適用可能性について、実際にデバイスを試作、評価することで検討する。また、実用上必要不可欠な自立電源化についての実現可能性についても検討する。

・以上の調査、検討を経て、高密度面パターンセンシングシステムを実現するためのシート型センサ端末の電源方式と基本仕様を決定する。

①-(2)-2　社会インフラの振動調査

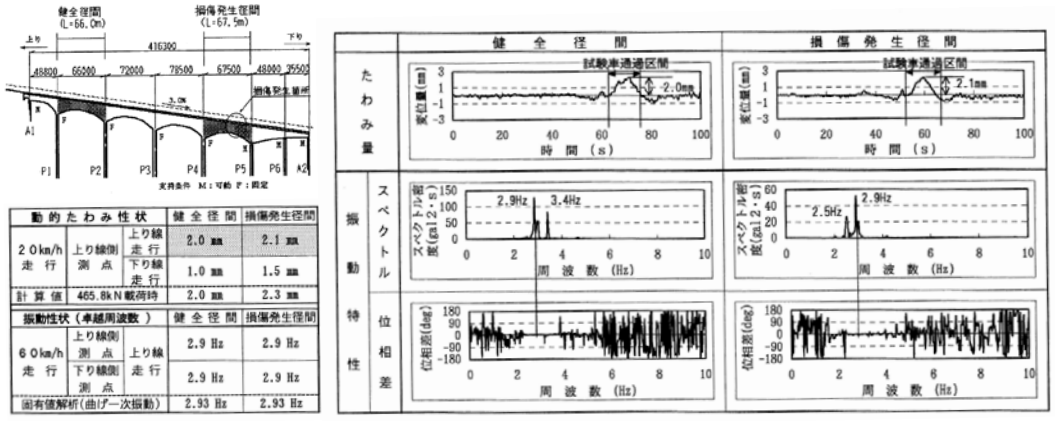
【独立行政法人産業技術総合研究所】

①-(2)-2-1　振動によるモニタリングの調査

橋梁の振動について、土木、コンクリート工学関連の文献調査と横浜国大にヒアリングを行った。日本道路公団の樅山らは局部的に損傷を有する PC7 径間連続ラーメン箱桁橋を対象に、非破壊検査手法及び載荷試験により健全度評価を実施している [2)]。その中で実際に試験車両を走行させた場合の振動をサーボ加速度計（測定範囲±2G、感度 3V/G、感度精度±3%以内）で評価しており、その固有振動数は健全径間、損傷発生径間いずれにおいても 2.9Hz であることを示している（図①-(2)-2-1.1）。

また、横浜国大西尾准教授は、新潟県の PC 箱桁連続高架橋に加速度センサ（分解能 1/10000G）を設置し振動のモニタリングを行っている。振動強度は 0.01-0.1G 程度であり、固有振動数と気候による変化は 3.9±0.2Hz であり、振動により橋梁の状態変化を捉えるには高精度の加速度センサが必要であることを指摘している（図①-(2)-2-1.2）。このように、実橋において車両通過時の振動を加速度で計測するにはサーボ加速度計などの高精度のセンサが必要であり、なおかつ固有振動数のシフトから橋梁の状態変化を捉えるのは容易ではないことが明らかになった。

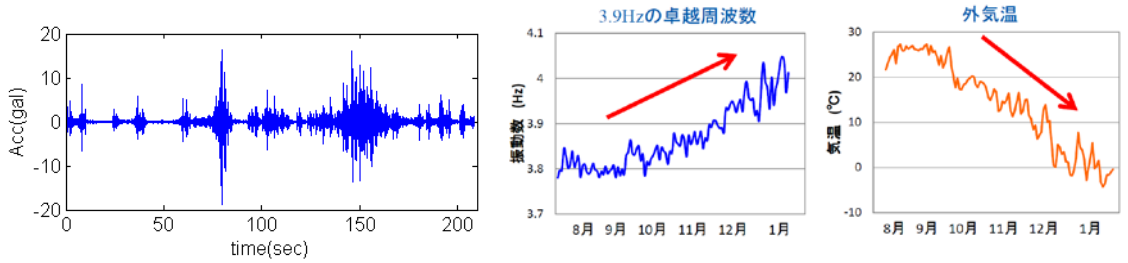
これに対し、阪大の大西らはハンマや鋼球などでコンクリートに打撃を与えた際に発生する振動を加速度センサで検出する衝撃振動試験によっては、固有振動数と劣化の対応が明確に表れてくることを、試験供試体レベルではあるが報告している [3)]（図①-(2)-2-1.3）。



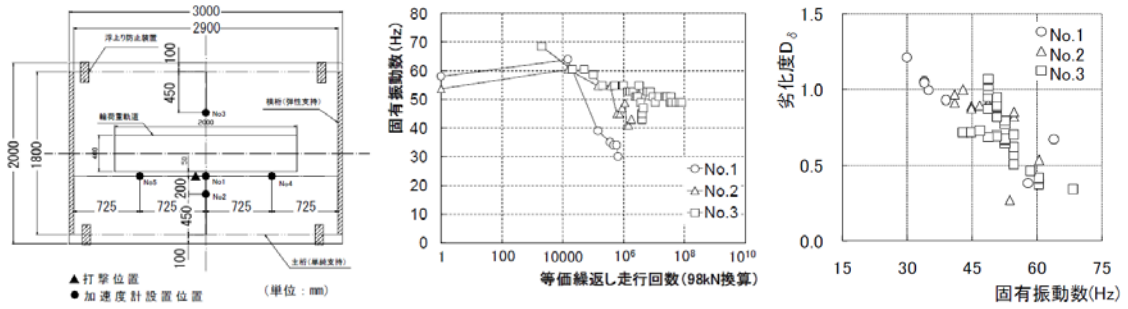
動的たわみ性状			健全径間	損傷発生径間
20km/h 走行	上り線側測点	上り線走行	2.0 mm	2.1 mm
		下り線走行	1.0 mm	1.5 mm
計算値	465.8kN載荷時		2.0 mm	2.3 mm

振動性状（卓越周波数）			健全径間	損傷発生径間
60km/h 走行	上り線側測点	上り線走行	2.9 Hz	2.9 Hz
	下り線側測点		2.9 Hz	2.9 Hz
固有値解析（曲げ一次振動）			2.93 Hz	2.93 Hz

図①-(2)-2-1.1　PC7 径間連続ラーメン箱桁橋のたわみ、振動評価結果



図①-(2)-2-1.2　PC 箱桁連続高架橋に車両通過時の振動強度、外気温による固有振動数変化



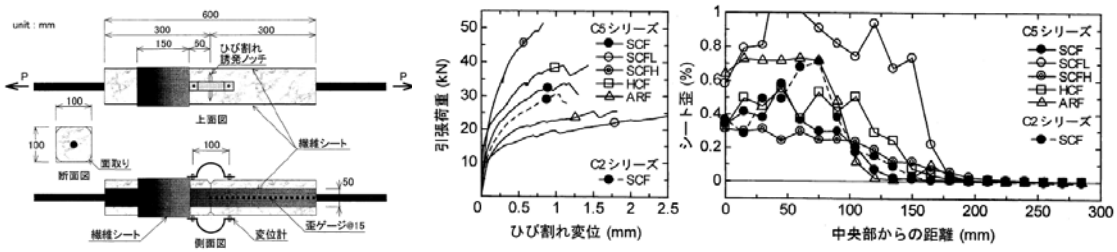
図①-(2)-2-1.3　衝撃振動試験による劣化と固有振動数の変化

①-(2)-2-2　振動以外でのモニタリングについての調査

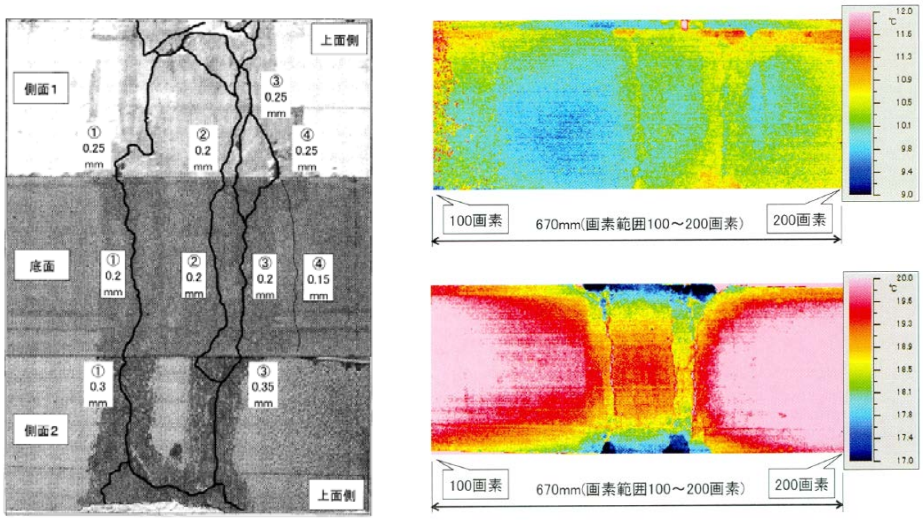
土木研へのヒアリングの結果、コンクリートの状態は振動よりも歪でモニタリングするケースが多いことが判明した。歪のモニタリングには光ファイバや歪ゲージが活用されているが、光ファイバは敷設の問題から本研究の目的に対しては歪ゲージが有効である。詳細は後述するが、高密度面パターンセンシングシステムを実際に施工することを考え、シート上に多数のセンサを配置しこれを補強に用いられる炭素繊維シートと共に施工するシート型高密度面パターンセンシング端末を本研究では提案する。そこで、炭素繊維シート上に歪ゲージを形成して歪をモニタリングしている文献の調査を行った。

筑波大学の金久保らはコンクリート試験供試体に炭素繊維シートを施工し、その上に歪ゲージを 15mm 間隔で設置し、引っ張り試験を行った。その結果、予亀裂を入れた箇所の歪が 1%であり、そこから遠くになるについて歪が低下するという分布を得ている [4]（図①-(2)-2-2.1）。その他茨城大学からも同様の報告がされている [5]。

振動、歪以外では温度によるモニタリングの可能性もある。日大のグループはサーモグラフィによるひびの検出について報告をしている [6]。同報告では温度計測に赤外線カメラ（2 次非冷却マイクロボロメータ型、波長領域 8.0-14.0um、感度 0.15℃）を用いて、ひびを入れたコンクリート試験供試体のサーモグラフィを撮影し、舗装熱が発生するケースを想定したコンクリート加熱時には、ひび割れに対応した表面温度分布が得られることを示している（図①-(2)-2-2.2）。



図①-(2)-2-2.1　歪ゲージによるコンクリート上炭素繊維シートの歪分布



図①-(2)-2-2.2　サーモグラフィによるコンクリートの温度分布にひびが与える影響

。

①-(2)-3　無線センサ自立電源化の予備実験

【独立行政法人産業技術総合研究所、一般財団法人マイクロマシンセンター】

①-(2)-3-1　積分型無線センサ端末の試作と評価

上述の調査結果にもあるように、ハンマや鋼球などでコンクリートに打撃を与えた際に発生する振動を加速度センサで検出する衝撃振動試験によって、コンクリートの劣化をモニタリングできる可能性が示唆された。

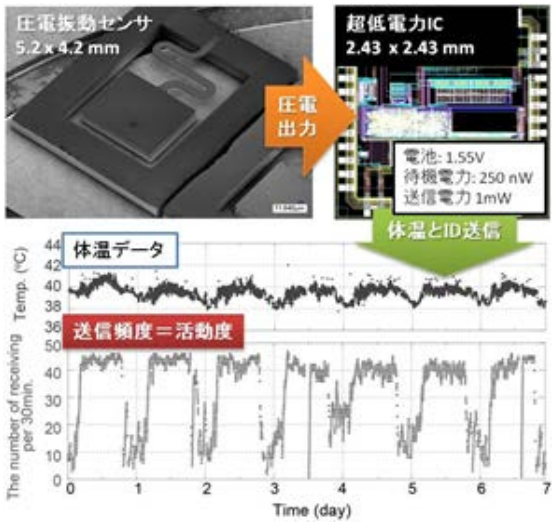
我々の研究グループはこれまでに、動物の活動量と体温をモニタリングして、健康管理を行うための無線センサネットシステムの開発を行ってきた 7。そこでは、圧電 MEMS 振動センサからの出力電圧をトリガに無線センサ端末 ID を送信し、送信頻度を活動度として評価することで健康管理を行う積算型無線センサ端末を開発した（図①-(2)-3-1.1）。そこで、このような振動による積算型無線センサ端末のコンクリートの劣化への適用可能性について、実際に圧電 MEMS 振動センサ、無線センサ端末を試作して検討を行った。

図①-(2)-3-1.2 は積算型無線センサ端末の動作原理、回路図及び実際に試作したデバイスである。無線センサ端末はカスタム IC にて制御される。カスタム IC は閾値電圧を任意に

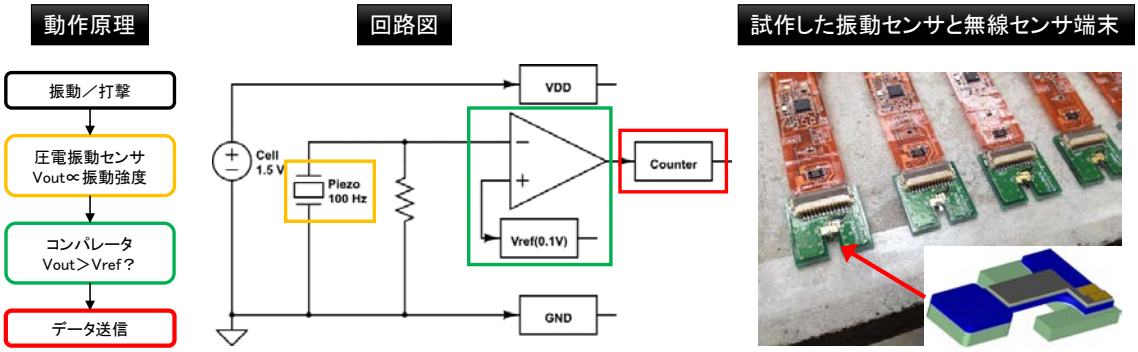
設定可能なアナログコンパレータを有しており、圧電 MEMS 振動センサからの出力電圧が閾値電圧を超えると、カスタム IC が ID と端末上の温度センサの温度を送信する。この方式をコンクリートのひびのモニタリングに適用した想定例を図①-(2)-3-1.3 に示す。コンクリートに振動が入った場合、正常部は振動が伝わりやすいが、亀裂が入って浮いている部分は振動が伝わりにくくなるため送信頻度が相対的に小さくなる。このため、無線センサ端末を並列配置することで、ひびの進展を面パターンとして捉えることが可能となる。

実際に試作した圧電 MEMS 振動センサ（共振周波数 420Hz）と積算型無線センサ端末の動作を実証するため、圧電 MEMS 振動センサを加振源に搭載して、加振周波数を変えながら出力電圧をアナログコンパレータで判定した結果を図①-(2)-3-1.4 に示す。後述のように今回の圧電 MEMS 振動センサを自立電源として用いるのは発電量の問題から困難であったため、今回は酸化銀電池（1.55V）で積算型無線センサ端末を駆動した。

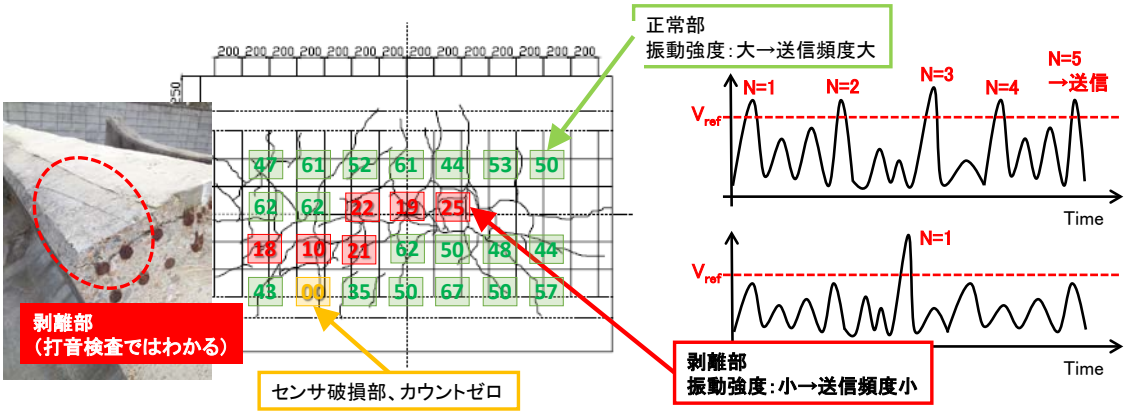
圧電 MEMS 振動センサからの出力電圧が設置した閾値電圧（今回は 680mV）を超えると、ID と温度が受信機に送信されることを確認できた。また、出力電圧が最も大きくなる共振点において送信頻度が最大となることも確認でき、試作した無線センサ端末が想定通りに機能していることを実証できた。さらに、打撃によって圧電 MEMS 振動センサを加振した際でも、ID と温度の送信が可能であることが実証され（図①-(2)-3-1.5）、上述のような衝撃振動試験を今回試作した圧電 MEMS 振動センサと無線センサ端末の組み合わせで行える可能性を示すことができた。また、同じ程度の打撃を加えても閾値電圧を変えることで送信頻度が異なることも示されたおり、閾値電圧の設定により通常の振動と地震など、異なる振動レベルを区別して検知するという応用の可能性も示された。



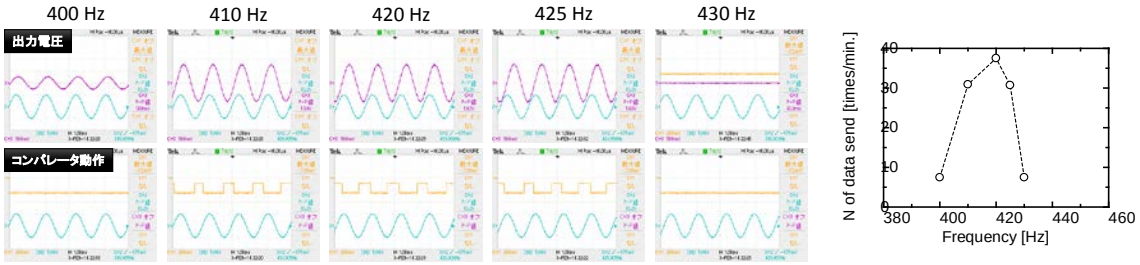
図①-(2)-3-1.1　動物モニタリング用無線センサ端末



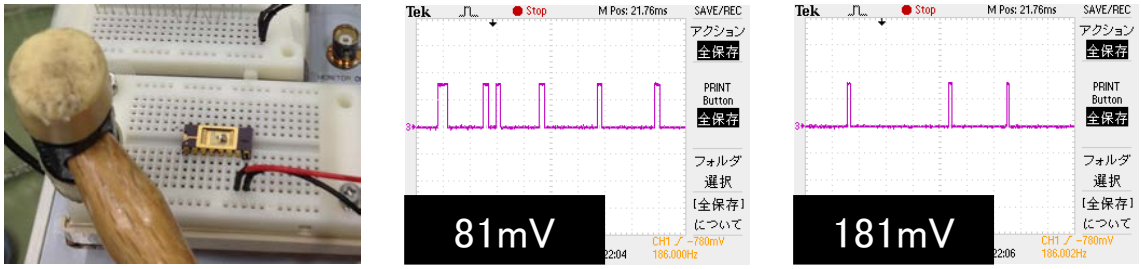
図①-(2)-3-1.2　積算型無線センサ端末の動作原理、回路図及び実際に試作したデバイス



図①-(2)-3-1.3　積算型無線センサ端末によるコンクリート疲労の面パターンセンシング



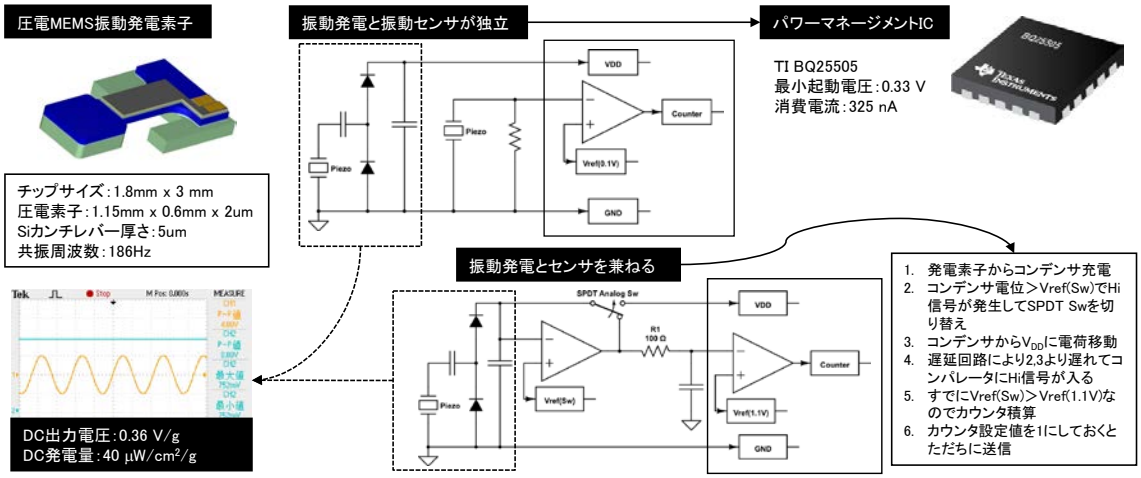
図①-(2)-3-1.4　試作した圧電 MEMS 振動センサ出力電圧（上段）と、その出力をコンパレータに入力した際の起動状態（下段）の加振周波数依存性及びそこから得た送信頻度の加振周波数依存性



図①-(2)-3-1.5　打撃によって加振した際の、閾値電圧が異なるコンパレータの起動状態

①-(2)-3-2　自立電源のための回路構成の検討

前節では積算型無線センサを酸化銀電池で駆動したが、実際には自立電源で駆動することが望まれる。そこで、圧電 MEMS 振動センサを自立電源としても用いた場合の回路構成を検討した。図①-(2)-3-2.1 は振動発電と振動センサを独立にした場合、及び兼ねた場合の回路構成である。前者の場合は振動発電素子が整流回路に接続され、直流電源として機能する。後者の振動発電と振動センサを兼ねる構成においては、発電素子からコンデンサを充電し、コンデンサ電位が Vref(Sw)になると Hi 信号が発生して SPDT Sw を切り替える、その後コンデンサから VDD に電荷移動し遅延回路により、上述のプロセスより遅れてコンパレータに Hi 信号が入り、その時点ですでに Vref(Sw)＞Vref(1.1V)なのでカウンタが積算され、ただちに送信という動作が想定される。



図①-(2)-3-2.1　振動発電と振動センサを独立にした場合の回路構成及び振動発電と振動センサを兼ねた場合の回路構成

①-(2)-4　構成要素の調査

【独立行政法人産業技術総合研究所、大日本印刷株式会社】

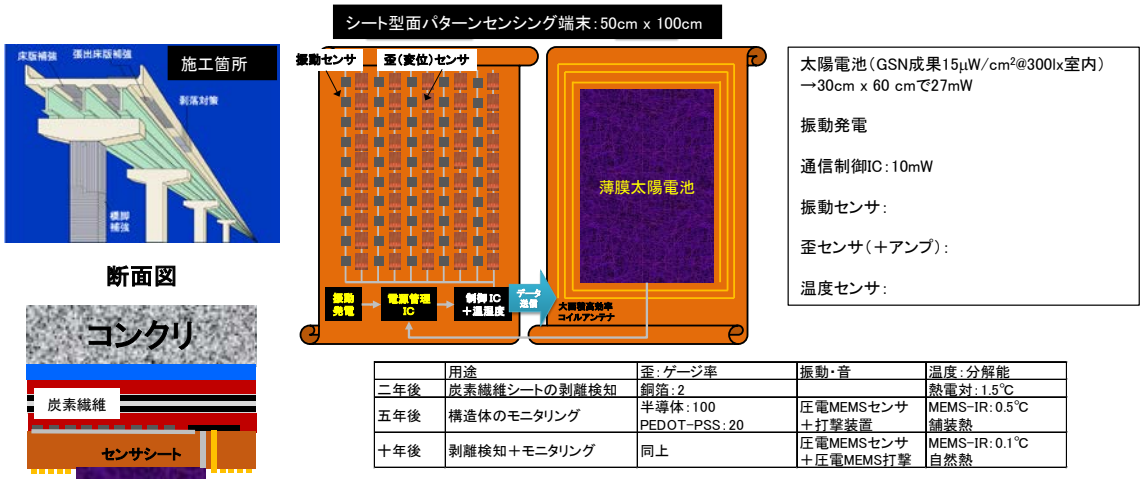
①-(2)-4-1　研究開発状況の調査

前節前半で示した振動発電と振動センサを独立にした構成で無線センサ端末が動作可能かを検証するため、実際に試作した圧電 MEMS 振動センサと整流回路を接続して、その発電量を評価した。発電の実験に用いた圧電 MEMS 振動センサの共振周波数は 186Hz である。共振周波数で加振し、負荷とのインピーダンスマッチングが取れた状態で、DC 出力電圧 0.36 V/G、DC 発電量：40 μW/cm2/G という性能であった（図①-(2)-3-2.1 左下）。この結果は 1G 以上の比較的大きな振動が得られれば、市販のパワーマネージメント IC（TI BQ25505、最小起動電圧：0.33 V、消費電流：325 nA など）を起動するに十分な出力を得

られることを示している。しかしながら、上述のように実橋の振動強度は 0.01-0.1G と 1-2 桁小さい。したがって、橋梁モニタリングの電源に直接圧電 MEMS を用いることは困難であることが示唆された。圧電 MEMS 振動発電を適用可能なケースはむしろ、回転機械周辺など 1G 以上の加振が得られる環境であると言える。

①-(2)-4-2　センサ端末の電源方式と基本仕様の決定

以上の調査、検討を経て、高密度面パターンセンシングシステムを実現するためのシート型高密度面パターンセンサ端末の電源方式と基本仕様を決定した。図①-(2)-4-2.1 のように、橋梁の床版や橋脚の補強に用いられる炭素繊維シート上、あるいは近傍を高密度面パターンセンシングシステムの施工箇所として選定した。センサとして振動センサ、歪センサ、温度センサをシート上にアレイ化し、制御・通信 IC にデータをシリアル通信で送り、シート周囲に配置したアンテナから受信機へ無線送信する。電源には薄膜太陽電池をシート背面に形成し、シート状の電源線を通じて IC やセンサに電源を供給するシステムを基本仕様とした。



	用途	歪：ゲージ率	振動・音	温度：分解能
二年後	炭素繊維シートの剥離検知	銅箔：2		熱電対：1.5℃
五年後	構造体のモニタリング	半導体：100 PEDOT-PSS：20	圧電MEMSセンサ ＋打撃装置	MEMS-IR：0.5℃ 舗装熱
十年後	剥離検知＋モニタリング	同上	圧電MEMSセンサ ＋圧電MEMS打撃	MEMS-IR：0.1℃ 自然熱

図①-(2)-4-2.1　今回の研究開発成果を元に提案したシート型高密度面パターンセンサ端末

①-(2)-5　ユーザ機関による成果の有効性の検証

土木研へのヒアリングの結果、ユーザの立場からは、振動センサのデータと劣化を直接的に対応させることは困難であり、扱いなれた歪センサの無線化の方がメリットが大きいように思えるという指摘を受けた。炭素繊維シートを建築物、橋梁などに施工している東レ建設にニーズをヒアリングした結果、今回提案したような高密度面パターンセンシングシステムは、炭素繊維シートの密着性の評価に有効であるという意見を頂いた。また、

NEXCO 中日本からはひびの進展を面で把握するために活用できないかという問い合わせを受けた。

①-(2)-6　まとめ

＜将来開発すべきセンサシステム像＞

以上の調査、検討を経て、高密度面パターンセンシングシステムを実現するためのシート型高密度面パターンセンサ端末の電源方式と基本仕様を決定した。図①-(2)-4-2.1 のように、橋梁の床版や橋脚の補強に用いられる炭素繊維シート上、あるいは近傍を高密度面パターンセンシングシステムの施工箇所として選定した。センサとして振動センサ、歪センサ、温度センサをシート上にアレイ化し、制御・通信 IC にデータをシリアル通信で送り、シート周囲に配置したアンテナから受信機へ無線送信する。電源には薄膜太陽電池をシート背面に形成し、シート状の電源線を通じて IC やセンサに電源を供給するシステムを基本仕様とした。

＜開発すべきセンサシステムの技術課題・開発内容と目標＞

歪センサについては 0.1%以下の歪が精度よく検出できるように、PEDOT-PSS や半導体歪ゲージなど、ゲージ率の高いものをシート上に集積化する方法を開発する必要がある。振動センサについては打撃装置も必須のため、低コスト、低消費電力の打撃装置を開発する必要がある。また、将来的には打撃装置なしで 0.001G 程度の分解能で検出できるように、センサの高感度化が課題となる。温度センサもひびのモニタリングに有効であり、MEMS 技術を活用して 0.5℃程度の分解能のセンサをシート上に集積化する技術を開発する必要がある。

センサの電力としては、NEDO 共同研究事業「グリーンセンサ・ネットワークシステム技術開発プロジェクト」の薄膜太陽電池を用いればシートあたり 30mW の電力が期待できるが、夜間や暗所での適用を考え、振動発電素子や電波給電とのハイブリット化も検討する。また、センサシートの施工において密着を確実に取る方法の開発、及び対候性のあるコーティング技術もあわせて開発する必要がある。

＜開発されるセンサシステムを適用した場合に期待できる具体的効果、インパクト＞

炭素繊維シートによる補強は橋梁・トンネルのほか、建築現場でも広く適用されており、建物用の劣化モニタリングへの市場も見込まれる自動車のボディへの炭素繊維の適用が注目されており（経産省革新的新構造材料等技術開発 PJ など）、車体のモニタリングという強大な市場展開も期待できる。

参考文献

1) 魚本健人、加藤佳孝、コンクリート構造診断工学（オーム社）、p.27

2) 樅山好幸、宮川豊章、野村勝義、枡本正信、コンクリート工学論文集 12 (2001) pp.39-50

3) 大西弘志、岡田裕昭、内田慎哉、鎌田敏郎、コンクリート工学年次論文集 29 (2007) pp.1693-1698

4) 金久保利之、中場和正、吉田智基、吉澤弘之、コンクリート工学論文集 12 (2001) pp.33-43

5) 吉澤弘之、呉智深、コンクリート工学年次論文集 20 (1998) pp. 467-472

6) 金光寿一、柳内睦人、木田哲量、コンクリート工学年次論文集 16 (2005) pp. 31-44

7) T. Okada、H. Nogami、T. Kobayashi、T. Masuda、and T. Itoh、Proc. Transducers 2013、pp. 26-2

①-(3)　広域(衛星リモート)センシングシステムの開発

【三菱電機株式会社】

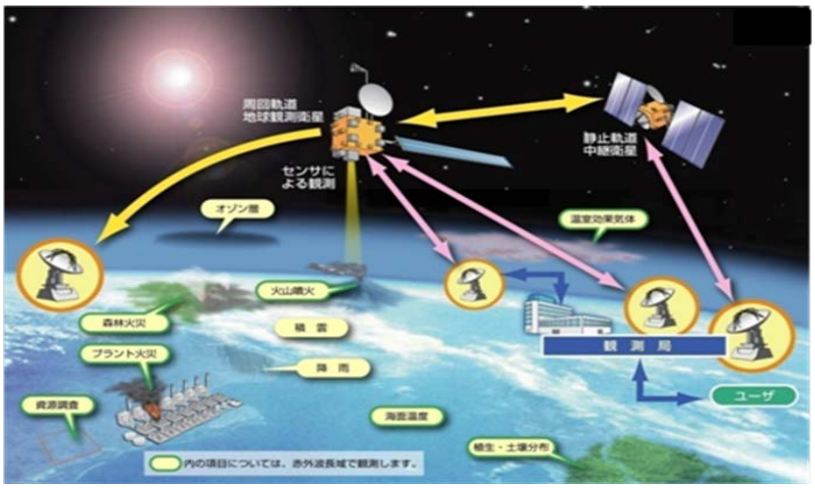
①-(3)-1　研究の目的

＜社会課題＞

地震、自然火災、工場火災、火山噴火などの災害時には、災害発生状況を大規模地域で捉えるリモートセンシングが有効である。特に、地上のシステムが機能不全に陥る可能性が高い大災害においては、リモートセンシングが唯一の監視システムとなる。また、住民の避難誘導のためには、画像情報だけでなく火災や有毒ガスの発生状況、分布範囲などを即座に分析する必要がある。そのため、図①-(3)-1.1 に示すような、衛星から地球環境を観測する衛星リモートセンシングが重要視される。さらに、従来のように物体/環境を単純に検知あるいは撮像するだけでなく、宇宙における人工衛星のネットワークを利用し、関心対象を高度に分析し、社会の安全に寄与することが求められている。近年、特に物体・環境の分析方法として赤外波長域の波長/偏光分析が、火災の探知やプラント火災における有毒ガスの分析など災害時の避難に役立つ情報収集手段として期待されている。したがって、衛星リモートセンシングにおいて、波長/偏光分析機能 [1)] を導入した小型赤外線センサシステムの開発が重要となる。

＜現状の取り組みと課題＞

現状の波長分析、偏光分析にはフィルタまたは、偏光子を追加する手法が一般的である。しかし、この場合には選択波長を画素毎に変更できないため一括した波長情報の取得が困難であり、観測頻度の低下をもたらしていた。また、偏光探知においては、偏光角度の精度が重要である。しかし、外部に偏光子を設置する方法では、センサに対する角度精度の向上が困難であった。



図①-(3)-1.1　衛星リモートセンシングの概念図

＜実施内容と最終目標＞

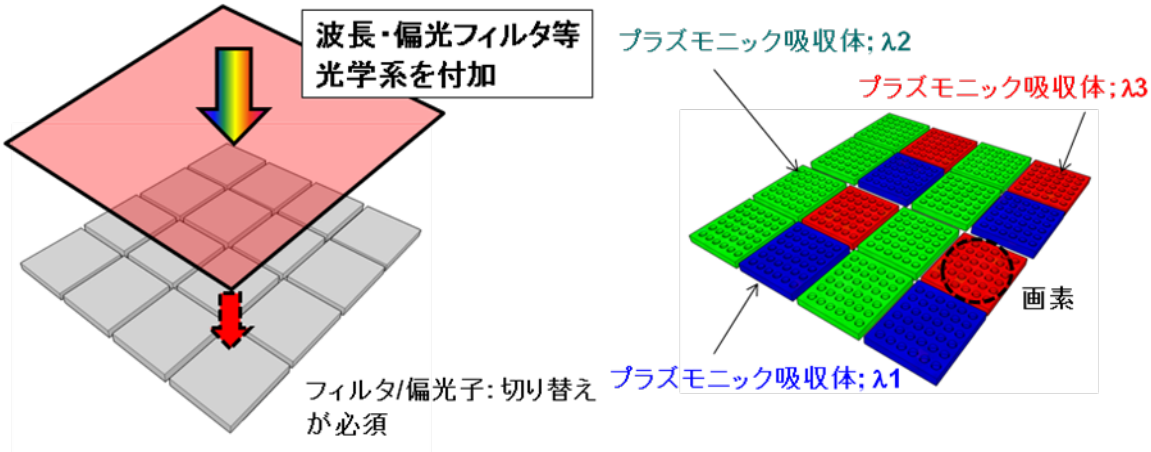
以上に述べた社会課題と現状の取り組みと課題を踏まえて本先導研究では図①-(3)-1.1のように災害監視用途を目的とした衛星リモートセンシングシステムの開発として以下の実施内容と最終目標を設定した。

(a) 衛星リモートセンシングシステムにおけるデバイスへの要求仕様の調査検討ならびに最新の光制御技術に関して、各種文献調査及び SPIE Remote Sensing(ドイツ、9 月)、SPIE Security＋Defense(ドイツ、9 月)の国際会議に参加し、調査を行った。

(b) 波長選択における構造パラメータが光学特性に与える影響を検証するために、プラズモニック吸収体の構造パラメータが、赤外波長域である約 3-12μm のうち複数の波長における吸収特性に与える影響について、シミュレーション又は理論検討を行い、試作・評価により検証した。さらに、光吸収材料についてシミュレーション又は試作により検証した。

(c) 偏光を識別する構造の検証として、周期構造に非対称性を導入するなどにより、特定の偏光角度のみを検知する表面構造についてシミュレーションにより検討した。

波長/偏光分析機能を導入した小型赤外線センサシステムを実現するために、我々はプラズモニクス [2)-5)]を応用したプラズモニック吸収体 [6)-8)]を提案した。後述するように、非冷却赤外線センサの赤外線吸収部にプラズモニック吸収体を導入することでセンサ自体に波長/偏光識別機能を融合することが可能となる。このため、従来はセンサとは別に付加する必要があった分光フィルタ、分光器やフーリエ干渉計などの複雑で巨大な光学系が不要となり、衛星の小型化、低コスト化が期待できる。従来の分光システムと提案するプラズモニック吸収体による分光赤外線センサについて、図①-(3)-1.2 に示す。



図①-(3)-1.2　従来システムの問題点(左)とプラズモニック吸収体による分光センサ

つまり、小型衛星を必要に応じで複数製造し、災害監視を行うことで回帰日数を低減し、常時監視に近い小型衛星群のシステムが構築できると期待できる。以下、災害監視用途における波長/偏光識別の有効性を調査し、調査結果を基にしたシステムの要求仕様を検討する。さらに、プラズモニック吸収体の構造について検討することでセンサ感度の高感度化、偏光検知用のプラズモニック吸収体の構造について明らかにする。

①-(3)-2　衛星リモートセンシングシステムにおける要求仕様の調査・検討

①-(3)-2-1　主要衛星におけるセンサ仕様の調査

本節では、欧米における主要な衛星における光学センサの仕様を調査した結果について報告する。表①-(3)-2-1.1 に米国 LANDSAT 衛星、表①-(3)-2-1.2 に米国 Terra、表①-(3)-2-1.3 に欧州 Sentinel-3 の光学センサの仕様をそれぞれ示す。基にしたのは参考文献 9)-12)である。我々が注目する波長体である赤外波長域についてはオレンジ色で示す。

表①-(3)-2-1.1　米国 LANDSAT 衛星における光学センサ仕様

衛星名とその特徴	搭載センサ（搭載衛星）	観測分光バンド	波長 (μm)	分解能 (m)
LANDSAT-1～5、 7 (L-1～5、 7) 米国	TM(L4、 L5) ETM+(L7)	1	0.45-0.52	30
		2	0.52-0.6	30
		3	0.63-0.69	30
		4	0.75-0.9	30
		5	1.55-1.75	30
		7	2.08-12.5	30
		6	10.4-12.5	120(60:L7)
	ETM+ (L7)	白黒バンド	0.52 - 0.9	15
	MSS (L1～L3)	4	0.5-0.6	79
		5	0.6-0.7	79
		6	0.7-0.8	79
		7	0.8-1.1	79
		8	10.4-12.6	237
Landsat-8 米国	OLI	1	0.43-0.45	30
		2	0.45-0.51	30
		3	0.53-0.59	30
		4	0.64-0.67	30
		5	0.85-0.88	30
		6	1.57-1.65	30
		7	2.11-2.29	30
		8(パンクロ)	0.50-0.68	15
		9	1.36-1.38	30
	TIRS	10	10.60-11.19μm	100m
		11	11.50-12.51μm	100m

表①-(3)-2-1.2　米国 Terra 衛星における光学センサ仕様

衛星名とその特徴	搭載センサ（搭載衛星）	観測分光バンド	波長（μm)	分解能 (m)
Terra 米国	ASTER	1	0.520-0.600	15
		2	0.630-0.690	15
		3	0.760-0.860	15
		4	0.760-0.860	30
		5	1.600-1.700	30
		6	2.145-2.185	30
		7	2.185-2.225	30
		8	2.235-2.285	30
		9	2.295-2.365	30
		10	2.360-2.430	90
		11	8.125-8.475	90
		12	8.475-8.825	90
		13	8.925-9.275	90
		14	10.250-10.950	90
		15	10.950-11.650	90

表①-(3)-2-1.3　欧州 Sentinel-3 衛星における光学センサ仕様

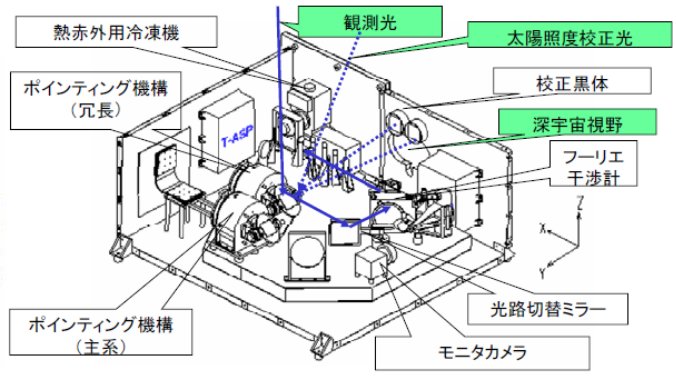
衛星名とその特徴	搭載センサ（搭載衛星）	観測分光バンド	波長（μm)	分解能 (m)
sentinel -3	SLSTR	1	0.55	500
		2	0.6959	500
		3	0.865	500
		4	1.375	500
		5	1.61	500
		6	2.25	500
		7	3.74	1 km
		8	10.85	1 km
		9	12	1 km

以上のように世界的に主たる観測衛星においては、赤外波長域は 2 バンド以上が搭載されていることが分かる。

①-(3)-2-2　分光系調査

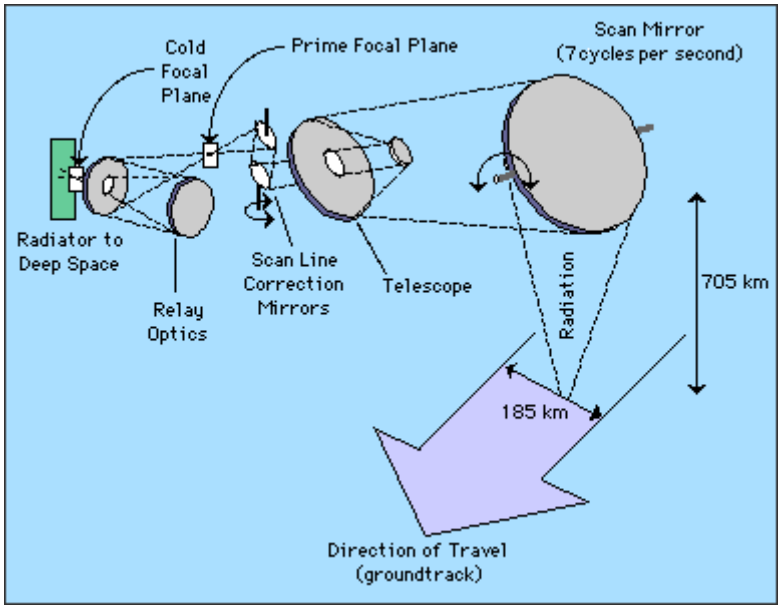
次に分光系の調査を行った。図①-(3)-2-2.1 に日本の衛星である GOSAT に搭載されているフーリエ干渉分光系を示す。本図は、インターネットサイト：
http://www.gosat.nies.go.jp/jp/proposal/download/GOSAT_RA_A_jp.pdf よりダウンロードした

「GOSAT 衛星及び搭載センサ TANSO の概要 A-4」より転載した。



図①-(3)-2-2.1　GOSAT 搭載フーリエ干渉計

次に、Landsat-7 ETM+の分光系の模式図を図①-(3)-2-2.2 に示す。本図は、NASA インターネットサイト : http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/payload/prog_sect3_2.html より転載した。



図①-(3)-2-2.2　　Landsat-7 ETM+の分光系

各センサには各バンドに対応するフィルタが装着されており、走査鏡は 1 秒間に 7 回振動して、各バンド波長のセンサに光を照射する。

以上のように、分光測定のためには非常に複雑な機構が必要とされる。特に宇宙空間においては、機械的な可動部分は信頼性の低下になるため好ましくない。このためセンサ自体で分光を行うプラズモニック吸収体のメリットは非常に大きいと考えられる。

①-(3)-2-3　災害監視適用事例調査

次に、我々の目標である災害監視用途において、衛星リモートセンシングがどのような寄与を果たしているかについて調査を行った。調査は、2013 年 9 月、ドイツで開催された国際学会である SPIE Remote Sensing、SPIE Security + Defense の両学会に参加した結果を基にして行った。上記学会は衛星リモートセンシングにおいて最大規模の学会である。よって国際的な衛星リモートセンシングの動向、応用事例調査、センサ仕様についての調査を行う学会として最適である。また、学会での動向調査を基にして論文誌である Remote Sensing of Environment (Elsevier)などを中心としてさらなる技術調査を行った。

調査を行った結果、衛星リモートセンシングによる災害監視用途としては以下が主要であることが明らかになった。但し、地滑り予知は研究段階であると考えられる。

1.自然/工場火災

2.火山監視

3.ガス分析（環境監視）

4.農作物生育状況調査

5.（地滑り予知）

以下に、主要な例について述べる。自然火災（山火事）の観測例は例えば参考文献 13)が挙げられる。複数のスペクトルを観測することで高温領域を判別できる。広域災害における避難経路の判別などに適用可能である。その他、表①-(3)-2-1.2 に示した ASTER センサによる山火事やプラント火災などの熱赤外において観測事例がある。

火山の観測例としては、例えば参考文献 14)が挙げられる。溶岩流など、高温部分が判別されていることが分かる。上記と同じく、火山爆発時の被害範囲、避難経路などの判別に有用であることが分かる。

ガス分析の観測例としては、例えば参考文献 15)が挙げられる。エチレンガスや 2 酸化炭素は固有の赤外線吸収スペクトルをもつため、吸収スペクトルを分析することでガスの種類が視覚的に判別できることが分かる。

農作物判別の観測例としては、例えば参考文献 16)が挙げられる。農作物に含まれる水分などを利用したスペクトル解析により農作物の分布が判別できる。

地滑り予知についての斜面の分析例としては、参考文献 17)が挙げられる。但し、本例は研究段階である可能性が高いため、実際の応用にはさらなる検討が必要と思われる。また、実際に分析を行っている崖はヒマラヤであり、岩が露出した状態である。そのため、樹木や植物に覆われた斜面には適用が困難であると考えられる。

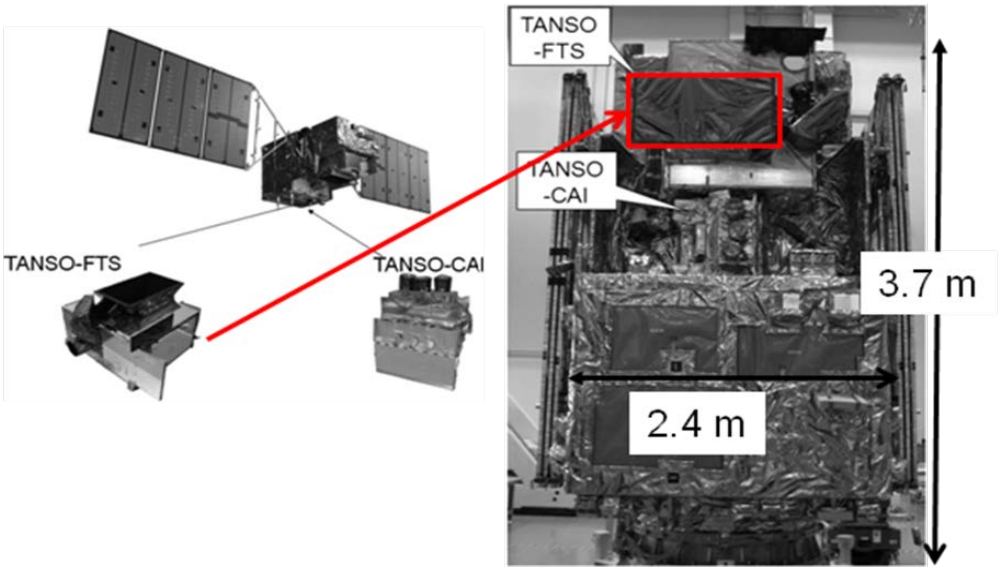
以上のように、衛星リモートセンシングによって、波長分光を利用した災害監視用途は

有効であり、世界的に利用ならびに研究が活発に行われていることが分かった。

①-(3)-2-4　小型衛星適用検討

前節までの検討で、赤外域における分光計測は、衛星リモートセンシングの災害監視用途において有効であることが分かった。しかし、①-(3)-2-2 における分光系調査によって明らかになったように分光システムは非常に複雑かつ大型化している。このため、衛星搭載においては重量、コスト、信頼性においてデメリットが大きい。一例として、日本の衛星である GOSAT に搭載されているフーリエ分光系と衛星全体の写真を図①-(3)-2-4.1 に示す。

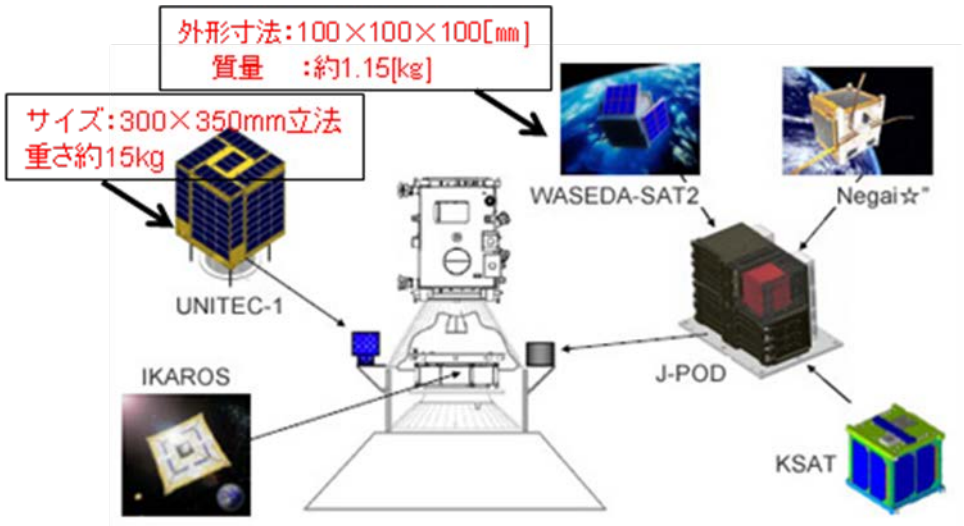
全体の寸法は概算である。図は参考文献 18)から転載し加工している。



図①-(3)-2-4.1　　GOSAT に搭載されているフーリエ分光系と衛星全体の写真

図①-(3)-2-4.1 から明らかなように、サイズ；約 1.2m×0.6m×0.3 m、（約 0.22 m^3）、重量は約 30kg 程度と推察される。概算したサイズ、重量は一般用途の分光器、フーリエ干渉計とほぼ同じである。このように、分光光学系を衛星システムとして搭載した場合、衛星自体が大型化する。また、回折格子を用いた一般的な分光器も同等のサイズ・重量となり、同様に衛星搭載を考慮すると、図①-(3)-2-4.1 と同程度となることが予測される。

次に、一般的な小型衛星のサイズ・重量について検討する。図①-(3)-2-4.2 に金星探査機あかつきと一緒に H-IIA ロケットにより打ち上げられた 5 つの小型副衛星の模式図を示す。図は JAXA サイト；　http://www.jaxa.jp/countdown/f17/overview/sub_payload_j.html から転載し寸法重量などを追記した。



図①-(3)-2-4.2　小型衛星の例と寸法、重量

図①-(3)-2-4.2 に示すように、小型衛星は相乗りで打ち上げられるためコストが低い。また、小型衛星に明確な定義はないが、一般的なサイズ及び重量は 30 cm^3、15 kg 程度といって良い。よって、小型衛星のサイズ・重量に、前述したフーリエ干渉計や一般的な分光器などの分光観測系を収めることは非常に困難と考えられる。よって、小型衛星に分光機能を搭載するためには、センサ自体に分光機能を有するプラズモニック吸収体が最適と考える。

①-(3)-2-5　要求仕様

本節では、分光機能を有する小型衛星に搭載するための衛星システムを検討する。赤外のバンドについては、表①-(3)-2-1.1～3 の主要衛星に関する赤外波長域のバンド帯から、3~12 μm の波長域において、最低 2 バンドが必要であることが分かる。しかし、例えば炎の分析においては CO_2 の共鳴吸収ピークである 4.3 μm を検知する場合、ピーク波長の上下で 3 波長必要である。よって、災害監視用途としては、赤外波長域においては 3 バンド必要である。

次に、具体的な赤外カメラを用いて検討する。非冷却赤外線センサの衛星搭載を検討した参考文献 19)、20)を基に述べる。図①-(3)-2-5.1 に 25 μ m 画素ピッチ 640×480 画素センサを内蔵した CIRC　(Compact Infrared Camera)の概観を示す。また、表①-(3)-2-5.1 に CIRC の仕様を示す。画像・仕様は参考文献 19)より転載した。

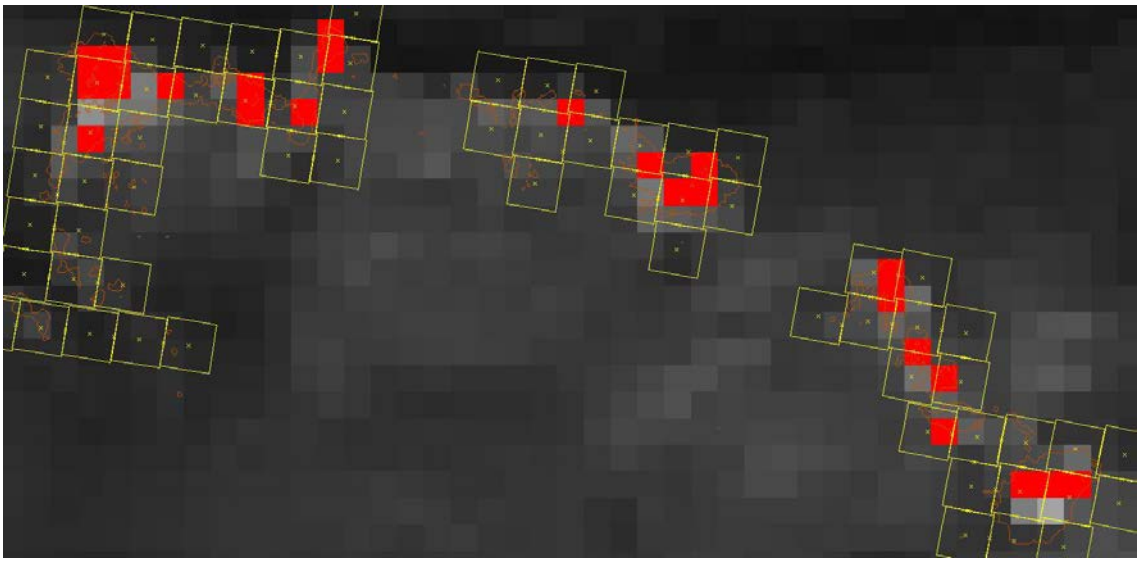


図①-(3)-2-5.1　CIRC(Compact Infrared Camera)の概観：
25μm 画素ピッチ 640×480 画素センサ

表①-(3)-2-5.1　CIRC の仕様

Parameter	Specifications
Size	110 mm × 180 mm × 230 mm
Mass	3 kg
Detector	Uncooled infrared detector
Wavelength	8-12 μm
Number of pixels	640 × 480
Special resolution	<200 m @600 km (ALOS-2) <130 m @400 km (CALET)
Field of view	12° × 9°
Exposure	33 ms
Dynamic range	180–400 K
NEdT	0.2 K @300 K
FPN	0.3 K @300 K
Power	<20 W

表①-(3)-2-5.1 に示すように、CIRC は前節で検討した小型衛星に収まる程度のサイズ及び重量となっている。次に、画素数について検討する。参考文献 19)、20)に記載のように、Terra/ASTER (90m TIR resolution)で取得された森林火災データを基に、異なる分解能のイメージを作成(180m、 270m、 540m)し、 TIR(Thermal Infrared：熱赤外)のデータのみから火災検知を実施する。最後に、MODIS(MODerate resolution on Imaging Spectroradiometer：NASA によって開発された可視・赤外域の放射計、1km 分解能)の森林火災検知結果(MOD14v4)と比較することによって検証する。図①-(3)-2-5.2 は TIR を用いた森林火災の検知結果である。赤い部分が火災として検知された点、黄色い枠が MODIS による検知結果である。現状ベースライン仕様である 200m 分解能でも TIR バンドのみで、火災検知が可能であるとの結果を得ている。



図①-(3)-2-5.2　TIR のみから検知：分解能 270m

また、同様に参考文献 19)、 20)には火山の観測結果についてもまとめられている。比較的低温と思われる火砕流の痕は、TIR の方が識別能力が高く有効であることも示されている。分解能が 270m 以上では、ほとんど火口周辺の温度分布を識別できないが、火口は識別できる。以上のように、CIRC によっても災害監視には有効である可能性が示されている。

以上、まとめると小型衛星に搭載する分光機能を有する赤外線センサは表①-(3)-2-5.2 に示す仕様が要求されることが明らかになった。

表①-(3)-2-5.2　小型衛星に搭載する分光機能を有する赤外線センサの要求仕様

波長（μm）	バンド数	画素数
3-5、 8-12	3 バンド以上	500×500 以上

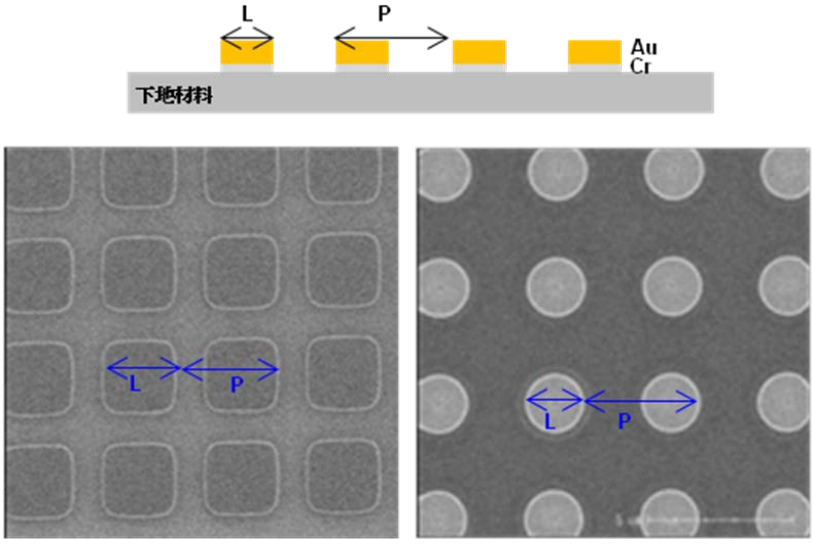
①-(3)-3　プラズモニック吸収体を用いた波長選択型赤外線センサ

本章では、プラズモニクスを応用したプラズモニック吸収体の基礎検討ならびに表面構造の最適化について述べる。これまで我々は、プラズモニック吸収体の周期を制御することで、中波長赤外から長波長赤外の広帯域において波長選択性を実証した。吸収波長は周期に等しくなる。本研究では、センサの感度を最大化するために、表面構造の最適化を行った。

①-(3)-3-1　プラズモニック吸収体の基礎構造

波長選択に用いられる赤外吸収体について検討する。これまで様々な構造が波長選択として提案されている。一例としては、吸収体下面に反射構造を設けた共振構造[21)]や表面に周期的な金属構造を酸化膜上に形成した多層膜構造[22)、23)]である。また、プラズモン共鳴を利用した波長/偏光フィルタ[24)]も提案されている。共振構造は画素毎に異なる構造の集積化が困難であることが明らかである。また、フィルタ装着型もセンサ以外の余分な光学系を付加する必要があり、小型衛星リモートセンシングシステムには適さないため、ここでは除外する。基礎検討として多層構造を試験的に作製し、有効性を検証した。

図①-(3)-3-1.1 に、今回の試作形状の模式図と、試作結果の SEM 写真を示す。金属ドットの寸法：L と金属ドットの配置ピッチ：P を一定とし、試作後に仕上がり形状評価を行った。また下地材料としては、Si、SiO_2、カーボンを用いた。金属パターンの形成にはリフトオフなどの中空処理を用いた。

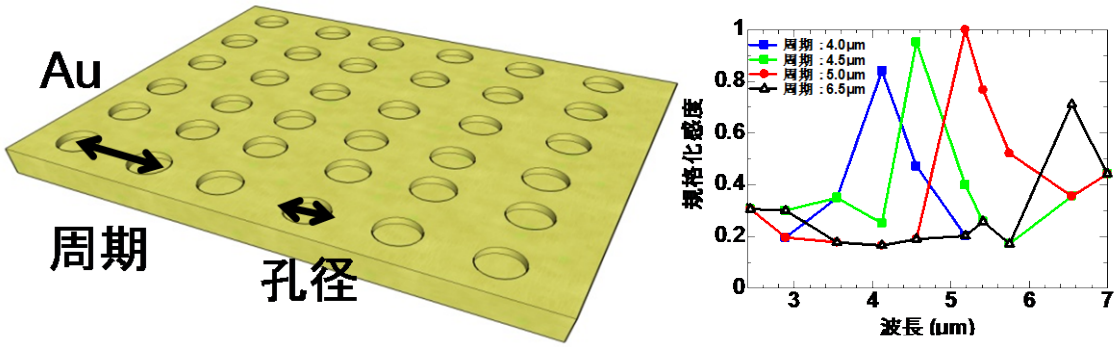


図①-(3)-3-1.1　多層構造の模式図と試作検証結果

任意の領域のパターン寸法を評価した結果、正方形パターンにおいては L の平均値が 2.070μm、円形パターンにおいては L の平均値が 2.006μm であった。正方形パターンは、円形パターンに比べて仕上がり寸法の設計値からのズレが大きく、かつ角部分が丸みを帯びた形状となっている。また、作製方法もリフトフなどが必要とされるため複雑になる。さらに、技術調査の結果、金属パターンの寸法揺らぎが直接的に検知波長に反映されるためデメリットが大きく改善の余地が大きいことが明らかになった。また、酸化膜の絶縁性を測定したが、薄膜の場合に絶縁性が悪化する場合があるなど、材料による課題も明らかになった。

よって、今回の基礎検証では、図①-(3)-3-1.2 に示すように、凹が 2 元周期的に形成され

たプラズモニック吸収体を採用した。

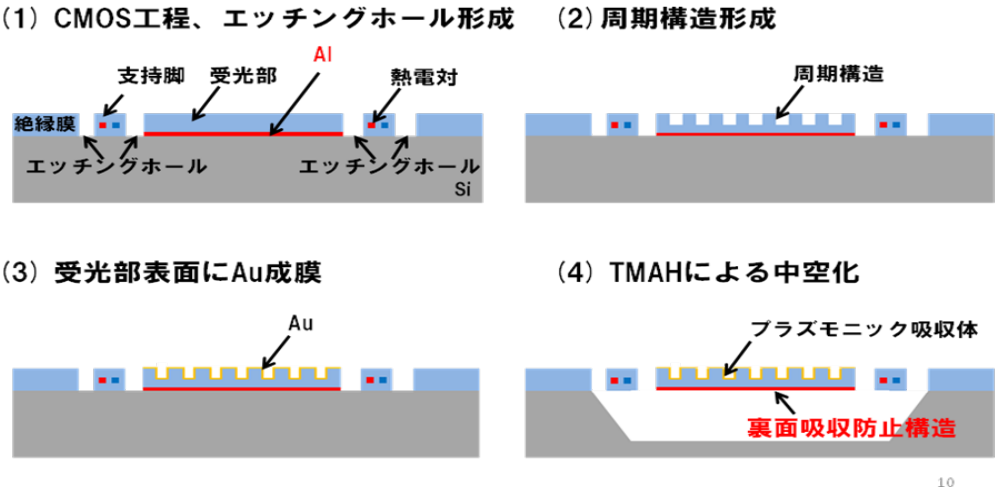


図①-(3)-3-1.2　2 次元プラズモニック吸収体の模式図(左)と吸収特性(右)

図①-(3)-3-1.2 に示すように、我々が提案したプラズモニック吸収体は中波長赤外～長波長赤外(3-12 μm)の広い波長域で波長選択性が実証されている。火災検知から人体検知まで広い応用が可能である。本構造においては、周期によって吸収波長が決定される。また、周期はフォトリソグラフィによって決定されるため構造揺らぎが少ない。よって、検知波長の揺らぎも少ないと考える。

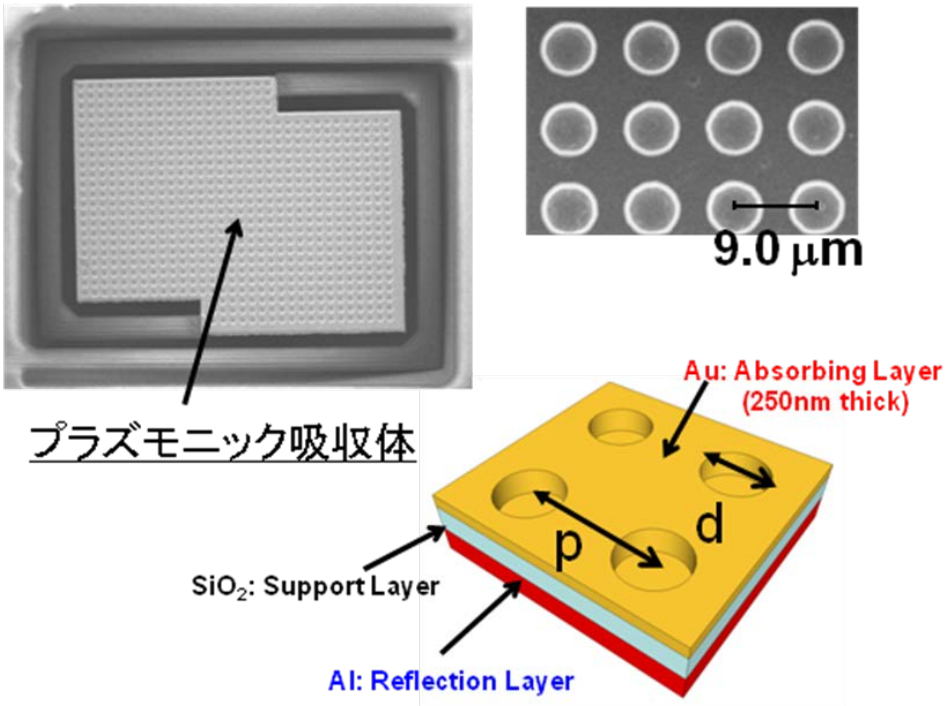
①-(3)-3-2　表面構造の最適化

図①-(3)-3-2.1 に本研究で用いた 2 次元プラズモニック吸収体(2D-PLA:Two dimensional plasmonic absorber)を導入した非冷却赤外線センサの作製方法を示す。



図①-(3)-3-2.1　2 次元プラズモニック吸収体を導入した非冷却赤外線センサの作製方法

図①-(3)-3-2.2 に完成したセンサの SEM 写真と 2 次元プラズモニック吸収体の模式図を示す。



図①-(3)-3-2.2　2 次元プラズモニック吸収体を導入した非冷却赤外線センサの SEM 写真と吸収体の模式図

2D-PLA における構造パラメータと光学特性に及ぼす影響を表①-(3)-3-2.1 にまとめる。

表①-(3)-3-2.1　2D-PLA の構造パラメータとその影響

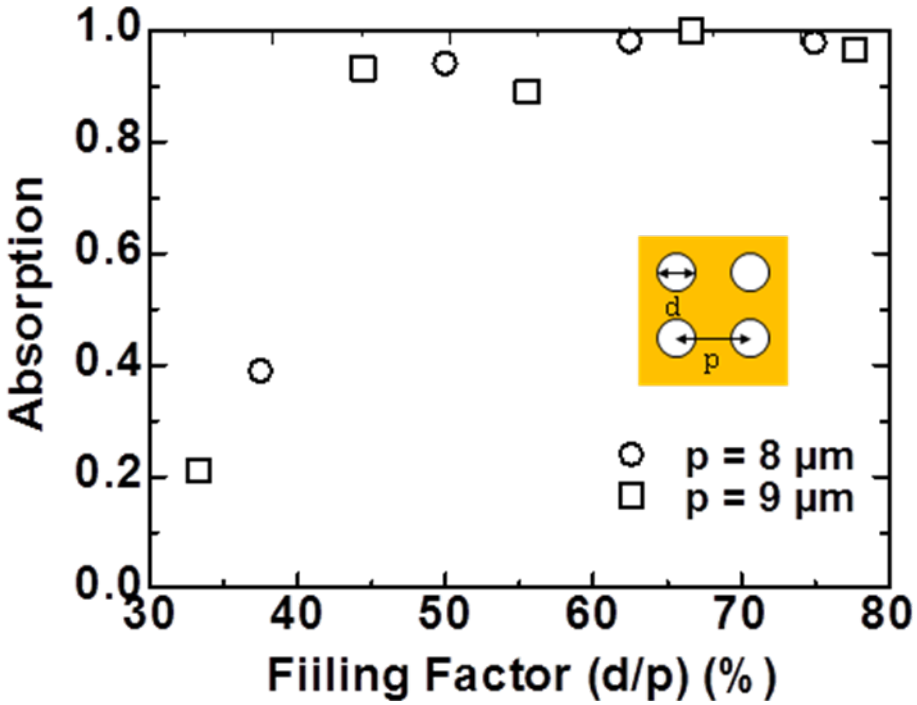
構造パラメータ	光学特性に及ぼす影響
周期	吸収波長を決定
深さ	影響はほぼ無視できる
孔径	不明

参考文献 6)、7)によって、2D-PLA は凹部の深さの影響は、吸収波長・吸収率ともにほぼ無視することができることが明らかである。よって、吸収率の最大化は孔径が重要であることが分かる。また、赤外波長域においては表面構造の線形性が成立するため、周期で規格化する充填率の概念を導入することで、より一般性を持たせることが可能である。図①-(3)-3-2.3 に 2D-PLA の断面図と充填率の定義を表す図を示す。但し、周期を p、孔径を d としている。



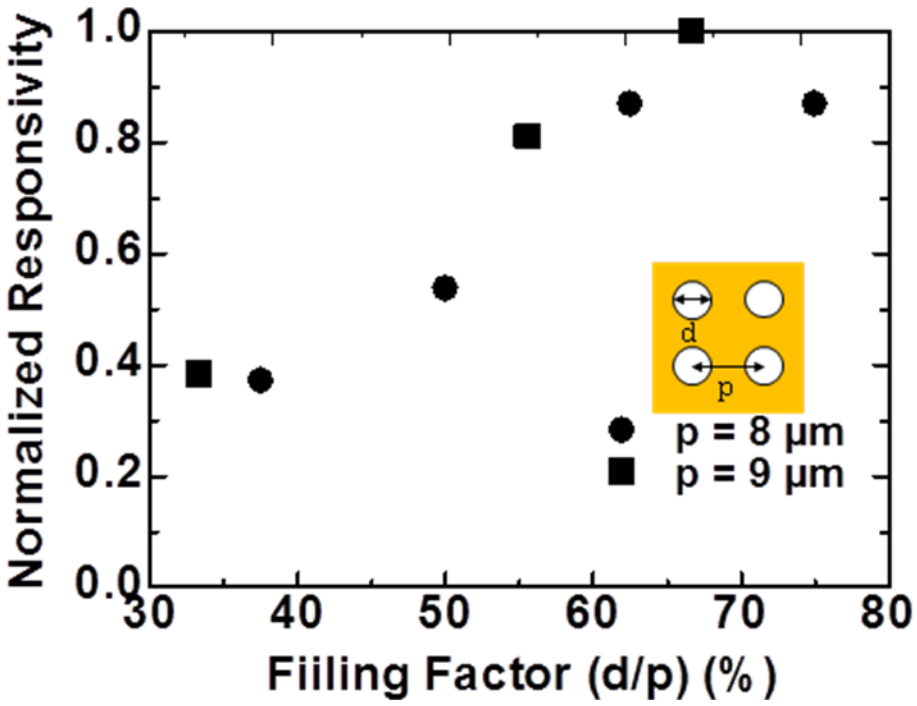
図①-(3)-3-2.3　2D-PLA の断面図と充填率(d/p)の定義

充填率による吸収率の変化について検討した。検討した波長は、人体検知などで重要な 8、9 μm を評価した。よって、周期を 8、9 μm とし、孔径を様々に変化させたセンサを作製した。図①-(3)-3-2.4 は孔径を変化させた場合、それぞれの波長における吸収率を解析によって求めた結果である。解析方法は RCWA(Rigorous Couples Wave Analysis:厳密結合波解析)を用いた。



図①-(3)-3-2.4　解析結果：充填率と吸収率

次に、実センサでそれぞれの波長におけるセンサ感度を求めた結果を図①-(3)-3-2.5 に示す。測定方法は参考文献 6)、7)と同一であるため、ここでは繰り返さない。



図①-(3)-3-2.5　センサ感度測定結果：充填率と吸収率

図①-(3)-3-2.4、5 から、充填率が 60%以上であれば、吸収率及び規格化感度が 80%以上であることが解析及びセンサの実測から明らかになった。一般的な非冷却赤外線センサの吸収部分における吸収率は 80%であることから、センサ応用を考えても十分である。本成果は論文誌 Sensors and Materials に投稿し受理された。

以上のように、2D-PLA においては充填率を制御するだけでセンサ感度が最大化することが可能であることが分かった。表面構造のみの制御でセンサ感度が制御できることから、最終的な目標である多画素化工程では、様々な構造の画素を形成しなければならないが、フォトリソグラフィなどの平面プロセスで一括して形成できることから、メリットは非常に大きい。

①-(3)-4　非対称性を導入したプラズモニック吸収体による偏光検知赤外線センサ

本章では、2D-PLA を用いた偏光検知赤外線センサについて報告する。偏光を利用したイメージングは近年注目されておりリモートセンシング学会でも報告されている [25]。

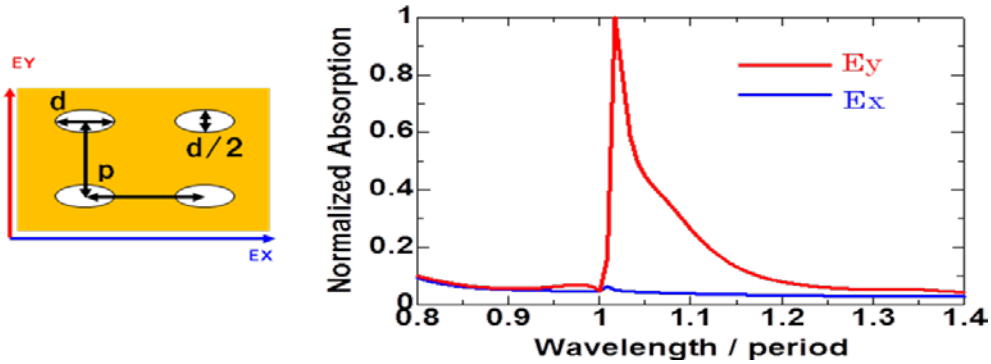
①-(3)-4-1　偏光イメージング

本節では偏光イメージングについて概説する。参考文献 26)、27)にあるように、被写体からの偏光を分析することで自然な環境から人工物を判別することができる。これは自然物が樹木、草原、岩肌などランダムな面を有するのに対し、人工物はビルや車など平均的

に平坦あるいは均一な面などが多い。このため、人工物からの反射波や放射波には偏光に分布が生じる。よって、統計的に被写体の偏光角度の分布を分析すれば人工物が判別できる。

①-(3)-4-2　非対称性の導入

特定の偏光のみを検知するために、我々は 2D-PLA に非対称性を導入することを提案した。構造検討の結果、図①-(3)-4-2.1（左）に示すように、楕円形状を導入した。また、楕円形状に関して、吸収率を RCWA で解析した結果を同図右に示す。但し、前章と同じく周期を p、孔径を d としている。横軸は波長を周期で規格化している。

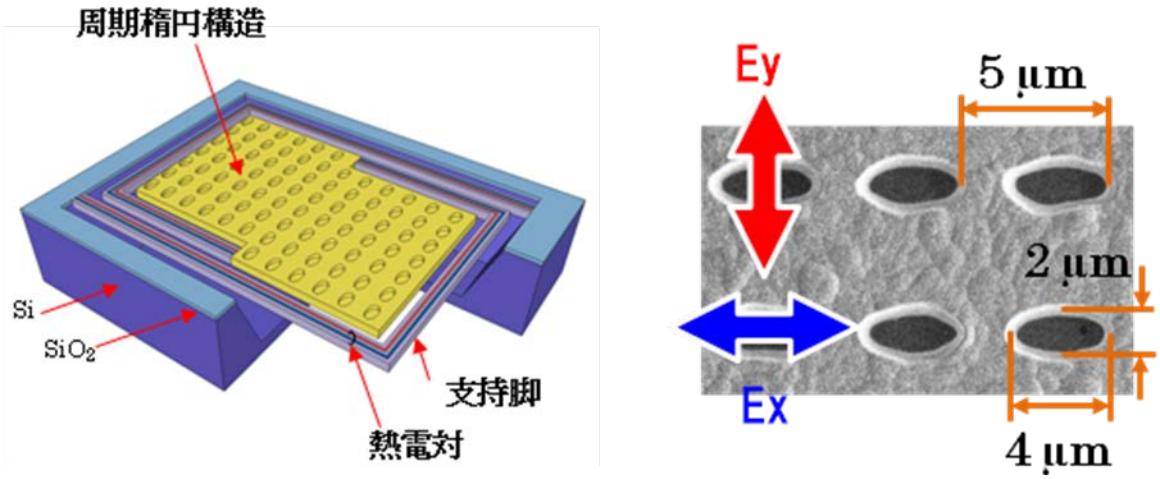


図①-(3)-4-2.1　偏光検知を目的とした楕円構造と吸収率の偏光特性

図①-(3)-4-2.1 から分かるように、楕円の長径方向に垂直な電界(Ey)を強く吸収し、長径方向に平行な電界(Ex)はほぼ吸収しないことが分かる。このように 2D-PLA の周期凹部の形状を楕円化するというシンプルな構造によって、偏光が選択的に吸収されていることが分かる。前節で述べたように、充填率によって吸収率が変化する特性を利用し、2 二つの逆格子ベクトル方向の一方のみの方向における充填率を相対的に下げることによって、吸収を抑制されたためであると考えられる。

①-(3)-4-3　偏光検知センサの作製

次に前節の設計を基にして楕円周期構造を有する偏光検知非冷却赤外線センサを作製した。作製方法は既に示した図①-(3)-3-2.1 と同じである。作製した偏光検知非冷却赤外線センサの模式図と、プラズモニック吸収体部分の表面 SEM 写真を、図①-(3)-4-3.1 に示す。

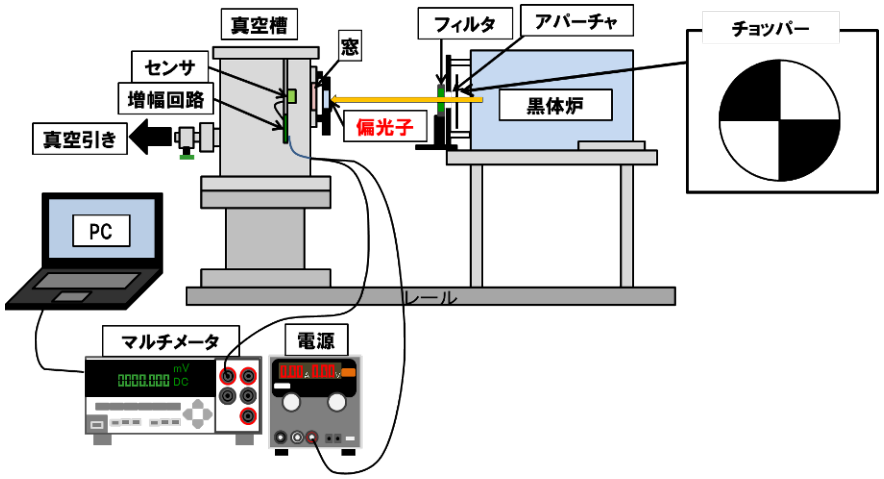


図①-(3)-4-3.1　偏光検知非冷却赤外線センサの模式図と表面楕円周期構造の SEM 写真

非冷却赤外線センサの方式は、前章と同じサーモパイルである。楕円の周期は測定時の入射光の強度が最も大きい 5 μm とした。

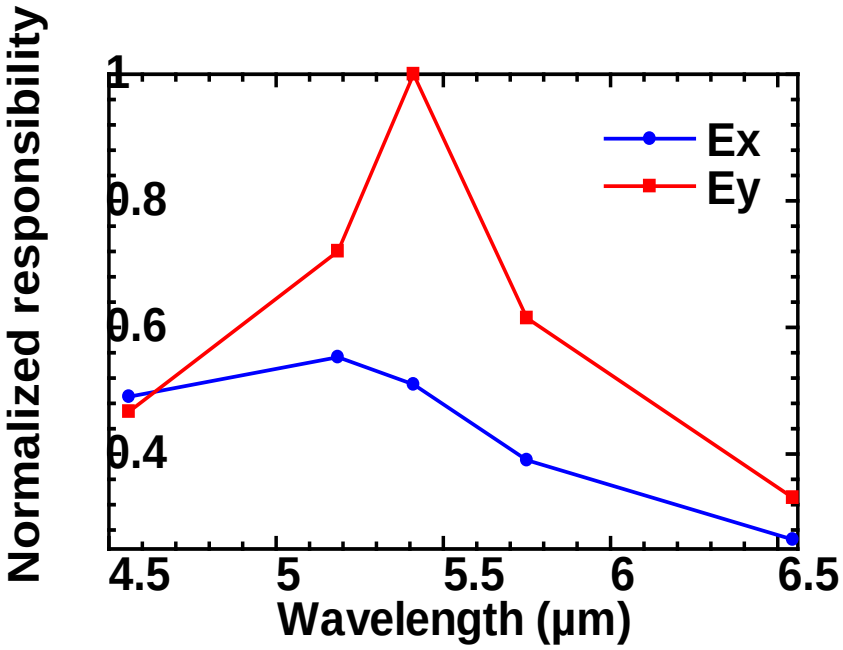
①-(3)-4-4　偏光検知センサの光学特性

前節で示した偏光検知非冷却赤外線センサの偏光特性測定系を図①-(3)-4-4.1 に示す。



図①-(3)-4-4.1　偏光検知非冷却赤外線センサの測定系

偏光子を用いて、入射赤外線の偏光角度を制御している。他の測定系は一般的な分光感度測定系 [6]である。測定結果を図①-(3)-4-4.2 に示す。



図①-(3)-4-4.2　偏光検知非冷却赤外線センサの測定結果

図①-(3)-4-4.2 に示す測定結果から明らかなように、楕円形状の非対称性に対応して検知される偏光が異なっていることが分かる。以上の結果から、非対称構造によって偏光が識別できることが原理的に明らかになった。本成果は 2014 年 5 月 7 日に国際学会 SPIE にて発表予定である。

現状の測定系ではノイズ成分が多いため、測定で得られた感度は一定の DC レベルのノイズがあると考えられる。測定系の改善ならびに、センサ構造を最適化することで偏光の分離度はさらに高くなると考える。

①-(3)-5　ユーザ機関による成果の有効性の検証

2013 年 9 月、ドイツで開催されたモートセンシングに関する世界最大規模の国際学会である SPIE Remote Sensing、SPIE Security + Defense の両学会に参加し、成果の有効性の検証を行った。特筆すべきは、一般の学術会議よりも実際の運用または製品に近い内容の発表が大多数であり、また、近未来の衛生運用動向に関して活発な討議がなされることが本学会の特徴である。よって、本先導研究の対象としての要求仕様、最新技術調査に加え、成果の有効性の検証も含む広範な調査が可能となった。

波長情報による分析では可視~短波長赤外が中心となっており、CO_2などのガス分析などで熱赤外が近年用いられてきている。しかし、現行の波長分析において用いられるハイパ

ースペクトルや分光器システムにおいては、分光系が巨大かつ複雑であり、さらに、波長校正システムが別に必要である。このような事情があるため、波長域が広い熱赤外に関しては応用が進んでいない印象を受けた。本研究の対象であるプラズモニック吸収体による分光機能一体型センサは対称物によっては、大きなメリットがあることが分かった。さらに、ポスターセッションでは各テーマの報告者と口頭発表では聞けない詳細な研究内容についても情報収集できた。特に、偏光子を装着したカメラで偏光画像を取得する研究発表では、背景から車を浮かび上がらせる写真が示されており、先導研究における人工物と自然物の判別についての有効性を検証できた。

①-(3)-6　まとめ

＜将来開発すべきセンサシステム像＞

以上、これまでの検討結果をまとめる。

衛星リモートセンシングにおける要求仕様調査を行い、災害監視用としてサイズ及び重量が 30 cm^3、15 kg 程度の小型衛星システムのセンサ要求仕様として波長帯域波長 : 3-5μm、8-12μm、観測バンド数：3 以上、画素数： 500×500 以上を明らかにした。これらを実現する要素技術として、2 次元プラズモニック吸収体の充填率（孔径/周期）が 60%以上であれば、高感度な分光センサが実現できることを解析及び実測で示した。また、楕円構造を導入することで、人工物識別に有用な偏光検知が可能であることを解析ならびに実センサによる原理検証で実証した。

＜開発すべきセンサシステムの技術課題・開発内容と目標＞

先導研究により、検知波長制御はセンサの表面周期構造によって自由に制御可能であること、表面周期構造に非対称構造の導入によって偏光を識別する原理検証を完了した。

これにより、衛星システムの大型化、複雑化の要因となる分光、偏光分離系を不要とする技術的目途が得られた。今後の開発目標は策定した仕様である 500 x 500 画素アレイセンサの試作検証である。具体的には、アレイ化に向けた最適画素構造設計と最適画素配置設計が技術課題となる。また、アレイセンサ検証のための地上試験用カメラ開発も必要となる。地上試験においては、各種被写体を用いた識別性評価とともに、センサ単体の耐宇宙環境試験を行うことになる。これら技術課題に関して、ベースとなる非冷却赤外線センサは既に当社にて実用化しており、また、衛星システム関連技術も保有するため、実用化の見込みは高いと考える。

＜開発されるセンサシステムを適用した場合に期待できる具体的効果、インパクト＞

衛星リモ-トセンシングの市場規模は国内 100 億円(2015 年 : 200 億円)、海外 1000～2000 億程度である。年 15%程度の成長率で推移し、今後 10 年で約 4 倍に拡大するとの見通しである。現状では、顧客は官庁・大学が中心であるが、本研究によって衛星リモートセンシングの防災、農業、漁業など幅広い分野への利用が拡大し、官民での利用を促進することが可能になる。

波長・偏光分析赤外線センサはこれまでセンサ単体では不可能であった分析機能を、センサ自体に組み込むことが可能になる。よって、センサとは別の光学系を有する従来の衛星システムよりも、小型化、低コスト化、信頼性向上が期待できる。それにより衛星数の増加が期待できるため、衛星開発などの宇宙産業への貢献も大きい。広域で高精度、継続的な災害監視、環境監視、安全監視が実現でき、人々の安全・安心な社会の実現に大きく貢献するため、その社会的経済的なインパクトは大きい。また、災害の被害の拡大の防止、ならびに復旧の加速が図られ、災害時の経済再生に大きく貢献できる。また、このような新たなセンサ技術は人工衛星以外においても用途が広い。一例として、ガス漏えい検知や火災検知に利用可能であり、家庭用から工場プラントなどの社会インフラまで応用範囲は広い。本研究によって生み出される技術は、様々な分野における民生展開が可能であり、国内経済へ大きく寄与することが期待できる。

参考文献

1) P. D. LeVan、 "Space-based hyperspectral technologies for the thermal infrared、" *Opt. Eng.* **52**(6)、 061311 (2013).
2) S. Kawata、 "Plasmonics: Future Outlook、" *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**(1)、 010001 (2012).
3) E. Ozbay、 "Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions、" *Science* **311**(5758)、 189-193 (2006).
4) D. K. Gramotnev and S. I. Bozhevolnyi、 "Plasmonics beyond the diffraction limit、" *Nat. Photon.* **4**(2)、 83-91 (2010).
5) William L. Barnes、 Alain Dereux、 and T. W. Ebbesen、 "Surface plasmon subwavelength optics、" *Nature* **424**(6950)、 824-830 (2003).
6) S. Ogawa、 K. Okada、 N. Fukushima、 and M. Kimata、 "Wavelength selective uncooled infrared sensor by plasmonics、" *Appl. Phys. Lett.* **100**(2)、 021111 (2012).
7) S. Ogawa、 J. Komoda、 K. Masuda、 and M. Kimata、 "Wavelength selective wideband uncooled infrared sensor using a two-dimensional plasmonic absorber、" *Opt. Eng.* **52**(12)、 127104 (2013).

8) S. Ogawa、 J. Komoda、 K. Masuda、 Y. Takagawa、 and M. Kimata、 "Wavelength selective uncooled infrared sensor using triangular-lattice plasmonic absorbers、" *Proc. Optical MEMS and Nanophotonics (OMN)*、 *2013 International Conference on*、 61-62 (2013).

9) J. R. Irons、 J. L. Dwyer、 and J. A. Barsi、 "The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission、" *Remote Sensing of Environment* **122**、 11-21 (2012).

10) M. J. Wooster、 W. Xu、 and T. Nightingale、 "Sentinel-3 SLSTR active fire detection and FRP product: Pre-launch algorithm development and performance evaluation using MODIS and ASTER datasets、" *Remote Sensing of Environment* **120**、 236-254 (2012).

11) 社団法人日本機械工業連合会、財団法人資源探査用観測システム、 "宇宙環境利用研究開発機構平成２１年度 小型衛星への赤外センサ搭載可能性に関する調査研究報告書."

12) 岡本謙一（編）、 川田剛之（著）、 熊谷博（著）、 五十嵐保（著）、 浦塚清峰（著）、 *宇宙からのリモートセンシング*、 コロナ社、 2009.

13) D. S. Matheson and P. E. Dennison、 "Evaluating the effects of spatial resolution on hyperspectral fire detection and temperature retrieval、" *Remote Sensing of Environment* **124**、 780-792 (2012).

14) G. Ganci、 A. Vicari、 A. Cappello、 and C. Del Negro、 "An emergent strategy for volcano hazard assessment: From thermal satellite monitoring to lava flow modeling、" *Remote Sensing of Environment* **119**(0)、 197-207 (2012).

15) S. Ullah、 M. Schlerf、 A. K. Skidmore、 and C. Hecker、 "Identifying plant species using mid-wave infrared (2.5–6μm) and thermal infrared (8–14μm) emissivity spectra、" *Remote Sensing of Environment* **118**、 95-102 (2012).

16) I. Mariotto、 P. S. Thenkabail、 A. Huete、 E. T. Slonecker、 and A. Platonov、 "Hyperspectral versus multispectral crop-productivity modeling and type discrimination for the HyspIRI mission、" *Remote Sensing of Environment* **139**、 291-305 (2013).

17) U. Michel、 A. P. Krishna、 S. Kumar、 D. L. Civco、 K. Schulz、 M. Ehlers、 and K. G. Nikolakopoulos、 "Landslide hazard assessment along a mountain highway in the Indian Himalayan Region (IHR) using remote sensing and computational models、" in *SPIE Remote Sensing 2013*、 2013、 p. 88930Q.

18) A. Kuze、 H. Suto、 M. Nakajima、 and T. Hamazaki、 "Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring、" *Appl. Opt.* **48**(35)、 6716-6733 (2009).

19) E. Kato、 H. Katayama、 M. Naitoh、 M. Harada、 R. Nakamura、 and R. Sato、 "Development of the Compact Infrared Camera (CIRC) for earth observation、" *Proc. SPIE* **8353**、 83533J-83533J-83512 (2012).

20) 片山晴善、 内藤聖貴、 菅沼正洋、 原田昌朋、 中右浩二、丹下義夫、 "地球観測用小型赤外カメラ(CIRC)の開発について、"(2010).

21) Y. Wang、 B. J. Potter、 and J. J. Talghader、 "Coupled absorption filters for thermal detectors、" *Opt. Lett.* **31**(13)、 3 (2006).

22) N. Landy、 S. Sajuyigbe、 J. Mock、 D. Smith、 and W. Padilla、 "Perfect Metamaterial Absorber、" *Phys. Rev. Lett.* **100**(20)、 207402 (2008).

23) T. Maier and H. Brueckl、 "Multispectral microbolometers for the midinfrared、" *Opt. Lett.* **35**(22)、 3766-3768 (2010).

24) R. Haïdar、 G. Vincent、 S. Collin、 N. Bardou、N. Guérineau、 J. Deschamps、 and J.-L. Pelouard、 "Free-standing subwavelength metallic gratings for snapshot multispectral imaging、" *Appl. Phys. Lett.* **96**(22)、 221104 (2010).

25) G. W. Kamerman、 G. Bieszczad、 S. Gogler、 M. Krupiński、 O. K. Steinvall、 G. J. Bishop、 and J. D. Gonglewski、 "Polarization state imaging in long-wave infrared for object detection、" *Proc. SPIE* **8897**、 88970R (2013).

26) J. S. Tyo、D. L. Goldstein、D. B. Chenault、and J. A. Shaw、"Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications、" *Appl. Opt.* **45**(22)、 5453-5469 (2006).

27) J. S. Tyo、 B. M. Ratliff、 J. K. Boger、 W. T. Black、 D. L. Bowers、 and M. P. Fetrow、 "The effects of thermal equilibrium and contrast in LWIR polarimetric images、" *Opt. Exp.* **15**(23)、 15161-15167 (2007)

①-(4) 自立型無線高耐久センサシステムの開発

【一般財団法人マイクロマシンセンター、独立行政法人産業技術総合研究所、大日本印刷株式会社】

①-(4)-1 研究の目的

社会インフラにおける安全性を確保するためのセンサネットワークによる普及を飛躍的に進めるためには、低コストで、設置が容易で簡単な施工が出来、長期にメンテナンスフリーであり、塩害、高温・高湿のような外部環境に長期に晒されていても性能を維持できる高耐久性を有する自立電源を搭載した無線通信機能を持ったセンサ端末が望まれている。そのようなセンサ端末を実現するために、発電素子、センサ素子及び通信信号処理回路システム全体を耐久性のあるパッケージで実装する方法を検討し、その仕様を設定することを目的とする。

＜社会課題＞

これまで我が国で建設された社会・産業インフラの多くは、高度経済成長期に集中的に整備されているため、経年劣化、老朽化による突発故障・事故が急激に増加することが懸念されている。たとえば道路橋では、2030 年には建設後 50 年以上を経過した「老朽化施設」の割合は 50%を超えることが示されている。同様に、京浜・阪神などの都市周辺臨海部に立地している、石油コンビナート、LNG 基地、発電所、化学・素材プラントなどの多くも高度成長期に設備投資されたものである。

このため、インフラの維持管理の目的とした高耐久性のあるモニタリングシステムが求められている。

＜現状の取り組みと課題＞

インフラ全般を鳥瞰すると、通常・定期点検時において、インフラの状態変化を見ている。

インフラの管理者にとって点検の負担が大きい。点検の方法は、熟練者での目視や打音検査機によるもので自動化・機械化モニタリングが行われていない。人的事故につながる重要箇所、見えない箇所、見づらい箇所、過酷環境箇所を診るための常時モニタリングシステムがない。

そのような現状を考えると、点検の負担を軽減し、人的事故につながる重要箇所、見えない箇所、見づらい箇所、過酷環境箇所を診断するための常時モニタリングシステム導入により、従来の人型管理から負担が少ない高度管理体制を早急に確立することが課題である。

低コスト及びマルチセンシングかつ自立電源を搭載し、過酷環境やインフラが破損した場合でも、動作を長期に渡って保証するセンサ端末の構築が急務となっている。

＜実施内容と最終目標＞

(a)環境因子の調査・高耐久性仕様の設定

先行事例として、電子部品、太陽電池モジュール、自動車用電子部品、一般工業計測機における信頼性評価項目及び評価基準を調査した。また、NEXCO での設備、機械装置に関する評価項目を調査した。首都高速、NEXCO への耐久性にかんする要求仕様のヒアリングを実施した。また、現状のセンサの信頼性、耐久性の水準を調査した。

(b-1)シールド実装構造

センシング、通信に悪影響を与えないで、かつ耐久性のある水分、ガスを透過させない材料、及び封止材料プロセスを調査し、それらを用いて、基本実験して可能性を検討した。

(b-2)コーティング材料

構造物にセンサ端末が固定され、はがれなくする材料及びプロセスの調査を行い、それらを用いて基本実験を行い、可能性を検討した。

最終目標として、以下を設定した。

(a)インフラでの耐久性に影響のある環境因子の収集・解析の調査を実施する。得られた結果から、センサ端末の耐久性に関する仕様値を設定する。

(b-1)センサ端末の基本耐久性モデリング及び基本シミュレーションを調査する。それらの結果から、高耐久性を持つシールド実装構造のセンサ端末基本構想を立案する。

(b-2)高い環境性を持ったコーテイング材料、耐腐食材料を備えたセンサ及び自立電源の基本構想の立案を行い、高耐久性センサ端末の基本仕様を決定する。

①-(4)-2　環境因子の調査・高耐久性仕様の設定

【一般財団法人マイクロマシンセンター】

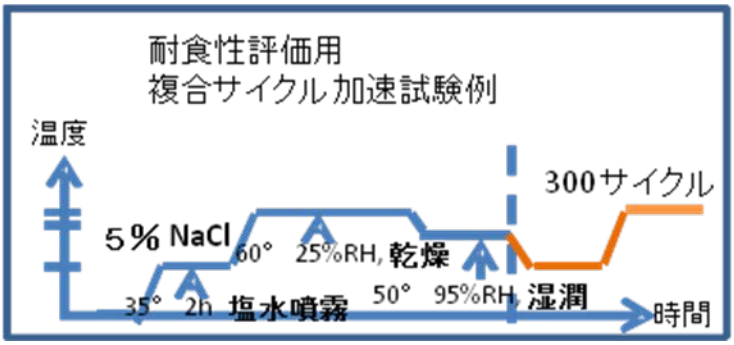
塩害、高温・高湿のような外部環境に長期に晒されていても性能を維持できる高耐久性を要求される製品として、すでに太陽電池モジュールや自動車用電子部品がある。これら製品にはすでに信頼性評項目がある。本自立型センサ端末の構成要素として、MEMS 発電素子、畜電素子、MEMS 型センサ、無線モジュールがあり、それらは、基本電気部品及び機械部品からなるものであるから、表①-(4)-2.1 に示す太陽電池モジュールでの規格（JIS8990）や車載用電子部品規格（AE-Q100、Q200）などに準拠するように設定すれば、評価項目と

して満足できるものになると考える。耐久性の期間に関しては、加速試験及び実モデルでの自然暴露実験とを勘案して決めることになる。

表①-(4)-2.1　自動車部品及び太陽電池モジュール規格

	自動車用電装部品 AEC-Q1000 、Q2000	NEXCO 電気設備 照明、標識	太陽電池モジュール (JIS C 8990)
1，屋外環境耐性評価 ガス耐性評価 耐水耐性評価 耐食評価 紫外線耐性評価 塵埃耐性評価	温度40℃、湿度100% SO2 濃度 0.67%,8hr ->室温16hr（6サイクル） 塩水噴霧35 ℃、5% Nacl, 100 Hr-> 乾燥加熱 ->蒸気加熱 塵埃5 g/m^3	筐体部の防水及び防塵性能は、JIS C0920 耐食性　JIS Z2371	対候性 水蒸気透過率　40℃ 90%　2-3g/m2/day 屋外暴露 UV照射　2000hr
2，温湿度環境耐性評価 熱衝撃耐性評価 温度サイクル耐性評価 温湿度サイクル耐性評価 高温・低温保存	AEC-Q1000 、Q2000 JESD22 A104,105 JESD22A101	JEITA ED-4701/100 ［半導体デバイスの環境及び耐久性試験方法 ???? IEC60721 -3-4	長期耐久性ｶﾃｺﾞﾘｰ
3，機械環境耐性評価 振動耐性評価 衝撃耐性評価 落下耐性評価 定加速度評価	AEC-Q1000 、Q2000 JESD22 B103 JESD22 B104 MIL-STD-883		さまざまな運用ストレスに対する耐久性ｶﾃｺﾞﾘｰ 10.16 機械的荷重試験

また、海岸沿いの橋梁におけるセンサ端末においては、特に塩害によるセンサ端末の性能劣化に留意しなければならない。図①-(4)-2.1 に示すような耐食用複合サイクル加速試験による試験法が、さびに対する方法として、自動車用で各社独自に実施されている。本格研究においては、それらの要因パラメータの水準を実験的に決めていくことになる。



図①-(4)-2.1　耐食性評価用複合サイクル

1）耐塩水噴霧 35℃、5%食塩水、500 時間

2）冷熱サイクル試験　(70℃/-30℃) 200 サイクル

3）耐アルカリ試験 水酸化カルシウム飽和溶液を含むガーゼをスポット、24 時間後の実装接合部状態

4）耐酸試験 5%硫酸水溶液に 24 時間沈漬(20℃)

5）耐薬品性 ・スポットテスト、24 時間後の接合部の状態
10%硫化水素水溶液、10%チオ硫酸ナトリウム水溶液、

10%硫酸ナトリウム水溶液､10%亜硫酸ナトリウム水溶液、
10%硝酸ナトリウム水溶液など

６）促進耐候性（紫外線） サンシャインウェザーオメータ 2000 時間異常なし、
スーパーUV テスター1500 時間異常なし

①-(4)-3　シールド実装構造

【独立行政法人産業技術総合研究所、一般財団法人マイクロマシンセンター】

社会インフラモニタリング用無線センサネットワークにおけるセンサ端末は、塩害、高温・高湿のような外部環境に長期に晒されることが想定される。そこで、高耐久性を持つシールド実装構造のセンサ端末基本構想を立案する設計指針を得るために、センサ端末のパッケージ封止接合における耐久性モデリングを想定した封止接合部の強度信頼性に関する基本評価を実施した。

①-(4)-3-1　セラミックス接合試験片製作

自立型の無線センサ端末の構成電子部品として、センサ、LSI、抵抗、コンデンサ、無線アンテナ、自立電源などが必要である。これらの電子部品を高耐久性シールド実装することが可能で、かつ、センシング及び通信環境に悪影響を及ぼさないパッケージ材料として LTCC セラミックス基板が有望である。LTCC 基板を用いて電子部品を封止実装することを想定して、セラミックス接合部の耐久性を評価するために接合試験片を製作した。

①-(4)-3-1-1　試験片製作方法

a. 試験片素材

センサ端末の実装基板として使用を予定している LTCC 基板と類似のアルミナ/シリカからなる機械加工に適したマシナブルセラミックス「MACOR (R)」を試験片の素材として選定した。

b. 加工手順

セラミックス接合試験片を製作するために、以下に示す機械加工法を選択した。このうち、研摩加工はセラミックス表面のうちの接合面の表面粗さを鏡面に仕上げるために、切削加工は気密性試験のための空間を形成するために選択した。

①切削(エンドミル)加工
②研削、ブレードダイシング
③研摩
④洗浄

①-(4)-3-1-2　試験片製作結果

製作したセラミックス接合試験片の形状を図①-(4)-3-1-2.1 に示す。



図①-(4)-3-1-2.1　セラミックス接合試験片

①-(4)-3-2　試験片接合

製作したセラミックス接合試験片を接合した結果について以下に説明する。

①-(4)-3-2-1　接合方法･プロセス手順

a. 接合方法

・接合対象材：せん断強度試験片及び気密性試験片

・接　着　剤：低融点ガラスペースト

本材料は 220～300℃程度の低温度で流動･融解する低融点ガラス製接着材のサンプル品で、溶剤とバインダを混ぜてペースト状に調製されたものである。

・接合方法　：樹脂成型用ホットプレス装置による加熱･加圧ガラス融着接合

使用する低融点ガラス製接着剤の標準推奨プロセスを参考にして、加熱によりガラスを融解させつつ、加圧により部材同士の密着･化学反応を促進させるホットプレスによるガラス融着接合法を採用した。

せん断強度試験用には、ばらつきを評価するため、ベース基板上に 3mm 角の試験片を 9 個配置し同時に接合した。気密性試験用には、同時に 3 セット接合した。

b. 接合プロセス

①接合対象材の有機洗浄

接合面の塵埃有機物除去

②ガラスペースト塗布、乾燥

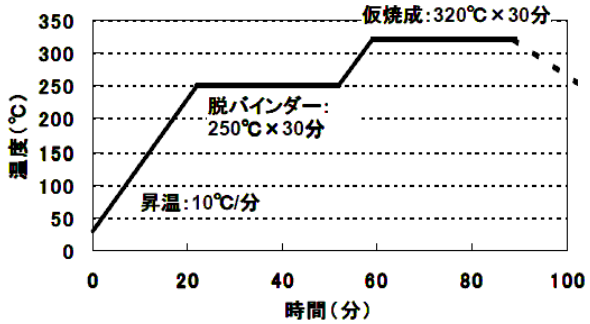
150℃×10 分ベーキング

③ガラスペースト仮焼成

250℃×30 分＋320℃×30 分

（図図①-(4)-3-2-1.1 参照）

④ガラス融着接合



図①-(4)-3-2-1.1　ガラスペースト仮焼成条件

各種接合条件パラメータの中から、接合部評価試験の結果を分析しつつ、より低温度で接合が可能な条件を探索した。

c. 接合条件

ガラス融着接合において、代表的な接合パラメータを表①-(4)-3-2-1.1 に示す。接合雰囲気は封止するデバイスに応じて大気中、ガス雰囲気中、真空中が適宜選択される。以下の接合･評価実験では、接合温度、接合時間、加圧力を各種設定した。

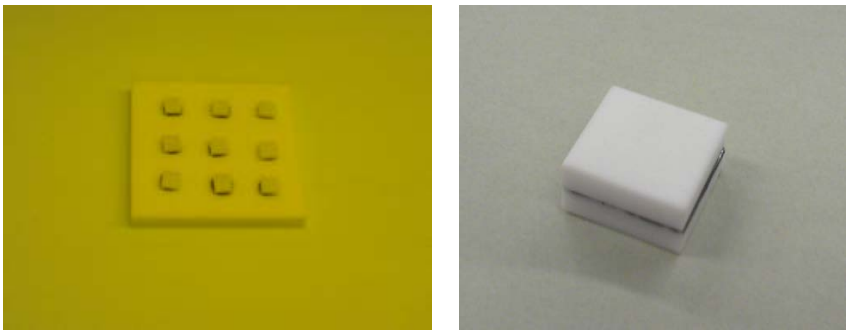
表①-(4)-3-2-1.1　ガラス融着接合の代表的な接合パラメータ

	条件項目	標準条件	実験条件
	接合雰囲気	大気中	大気中
	接合温度	300℃	240～280℃
	接合時間	10分	1～120分
	加圧力	＞0.1 MPa	1～5 MPa

①-(4)-3-2-2　試験片接合結果

a. 接合試験片

接合した試験片の形状を図①-(4)-3-2-2.1 に示す。



せん断強度試験用　　気密性試験用

図①-(4)-3-2-2.1　接合した試験片の形状

①-(4)-3-3　接合部評価試験

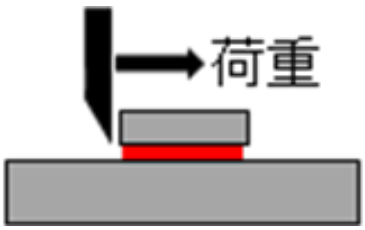
接合したセラミックス接合試験片の接合部の品質評価試験を実施した結果について以下に説明する。

①-(4)-3-3-1　せん断強度試験

a. 試験方法

・試験方式：横押しせん断強度試験

・試験装置：BONDTESTER　2000 PLUS、



図①-(4)-3-3-1.1　せん断強度試験の概念図

デイジ・ジャパン㈱製

本装置は図①-(4)-3-3-1.1 に示すように、接合部材に微小なバーで横方向の荷重を印加し、接着部が弾塑性変形から破壊に至る時の最大荷重を測定するものである。

b. 試験後の接合試験片

試験後の接合試験片を図①-(4)-3-3-1.2 に示す。

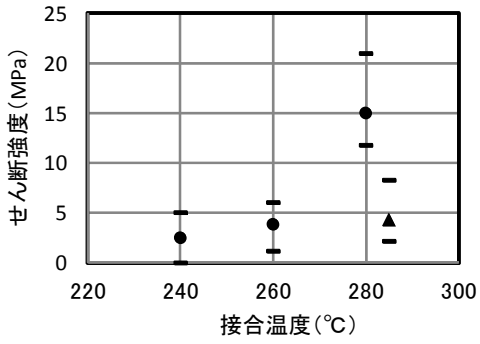


図①-(4)-3-3-1.2　試験後の接合試験片

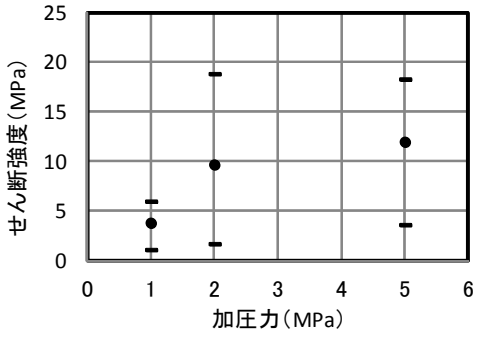
c. 試験結果

せん断強度試験結果を接合条件パラメータ依存性として図①-(4)-3-3-1.3～5 にまとめて示す。各評価せん断強度は接合条件毎に 9 個の接合部のばらつきをエラーバーで表現した。

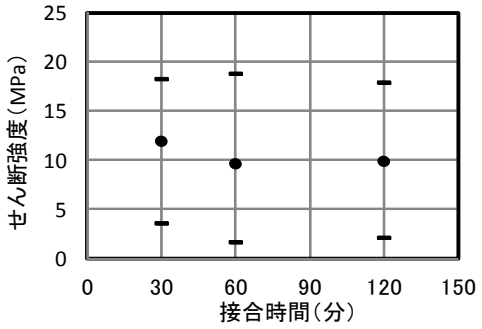
本結果から、接合温度 280℃の条件で、十分な強度が得られ、接合温度を低減させるためには加圧力を高くすることが効果的であること、接合時間については依存性は認められないことが分かった。



図①-(4)-3-3-1.3 せん断強度の接合温度依存性



図①-(4)-3-3-1.4 せん断強度の加圧力依存性



図①-(4)-3-3-1.5　せん断強度の接合時間依存性

センサ端末パッケージの封止接合を想定した場合、デバイス配線接続部への熱影響を抑えるためには、接合時間を極力短くする必要がある。図①-(4)-3-3-1.3 の接合温度依存性グラフにおける、▲プロットは、接合温度 280℃を維持したまま、接合時間を 1 分に短縮した場合のせん断強度データを示している。せん断強度は低下するが接合温度 260℃の結果よりは高い値が得られているので、接合時間 30 分以下での短時間接合プロセス条件探索が今後の課題である。

①-(4)-3-3-2　気密性試験

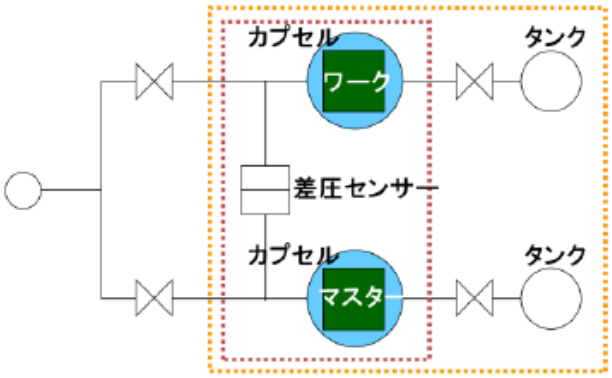
a. 試験方法

・接合対象材：気密性試験片

・接合方法　：せん断強度試験と同様

・気密性試験 1：グロスリーク試験（JIS Z2330：2012 準拠）

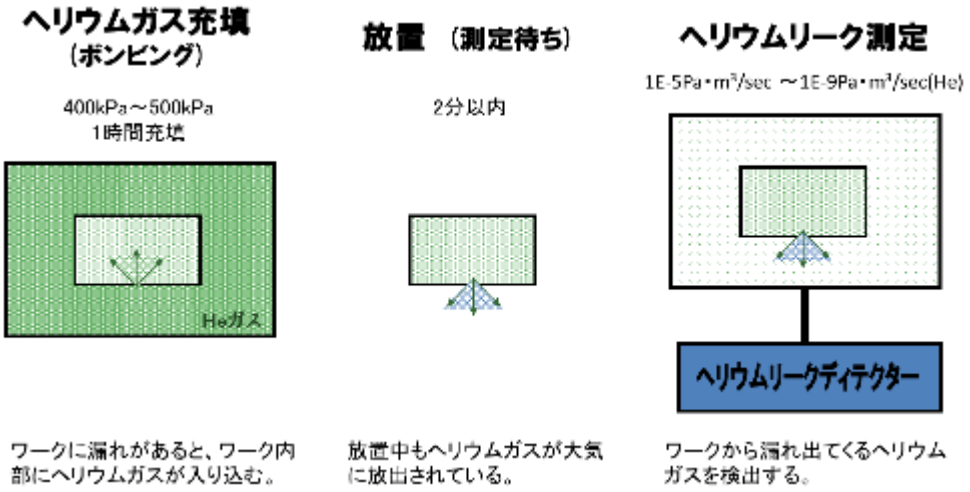
グロスリーク試験の概念図を図①-(4)-3-3-2.1 に示す。本試験では JIS Z2330：2012 に規定されている差圧式圧力変化法を用いた。本方法は比較的大きいリークを高感度に評価する試験法で、試験サンプルと漏れのない標準サンプルにそれぞれ高圧力で乾燥空気を押し込め、空気がサンプル内部から漏れてくる速度の違いを差圧で評価する方法である。



図①-(4)-3-3-2.1　グロスリーク試験の概念図

・気密性試験 2：ファインリーク試験（JIS Z2331：2006 準拠）

ファインリーク試験の概念図を図①-(4)-3-3-2.2 に示す。本試験では JIS　Z2331：2006 に規定されている浸せき法（ボンビング法）を用いた。本方法は微少なリークを高感度に評価する試験法で、試験サンプルに高圧力でヘリウム(He)ガスを押し込め、真空排気雰囲気中でサンプルから漏れてくる He ガスの量を空気量に換算して評価する半導体パッケージの封止性能評価に適した試験方法である。



図①-(4)-3-3-2.2　ファインリーク試験の概念図

・気密性試験装置：小型電子部品専用気密検査装置、MSX-0100、㈱フクダ製

本装置は、上記 JIS 規格に準拠したグロスリーク試験とファインリーク試験を 1 台の装置で評価できる市販装置としては国内唯一の装置と思われる。

b.　試験条件

せん断強度試験において最も良好な結果を得た条件を用いて接合した気密性試験片

について、上記の気密検査装置を用いてリーク速度を評価した。

評価においては、まず空気によるグロスリーク試験で大きなリークの有無を判定し、大きなリークのない試験片に対して He ガスによるファインリーク試験を実施して、He ガスのリーク速度を測定した。その結果をもとに JIS　Z2331 に規定された手順により空気によるリーク速度の換算値を求め、それが最終の試験結果となる。

c. 試験結果と考察

気密性試験片試料 3 個についての試験結果を表①-(4)-3-3-2.1 に示す。試料①②については、1E-9 Pa･m^3/s 程度のリーク速度となった。試料③についてはグロスレート試験の段階で大きなリークが認められた。これら 3 試料は同一条件で接合されたものであるが、ガラスペースト塗布段階での塗布むらや接合界面でのボイド発生などの変動因子による結果のばらつきと考えられる。

表①-(4)-3-3-2.1　気密性試験結果

	試験条件	グロスリーク	ファインリーク	試験結果
	テスト圧力	300 kPa	300 kPa	He→空気換算
	加圧時間	5 s	1Hr	JIS Z2331
	放置時間	5 s	10min～24Hr	準拠

試料	封入ガス	空気	He	(空気換算)
①	リーク速度 (Pa･m^3/s)	＜1E-05	2.39E-11	1.1E-09
②		＜1E-05	2.53E-11	1.2E-09
③		＞1E-03	ー	＞1E-03

次に、試料①②で得られたリーク速度の妥当性について考察する。

表①-(4)-3-3-2.2 に JIS Z2331：2006 で規定されているリーク速度の合格判定基準を示す。今回用いた気密性試験片の内部空間容積は 0.036 cm^3で、合格判定基準の 1E-8 Pa･m^3/s 未満を満足しているので合格となる。

表①-(4)-3-3-2.2　リーク速度の JIS Z2331 合格判定基準

	内部空間容積 (cm^3)	JIS合格判定基準 (Pa･m^3/s)
	＜0.01	＜5E-09
	≧0.01～＜0.5	＜1E-08
	≧0.5	＜1E-07

なお、上記の合格判定基準は一般的なものであり、本来は実際に使用する実装パッケ

ージの使用環境条件から導かれる合格基準に基づいて判定することが望ましい。そこで、今回検討のセンサ端末において想定される使用条件･周辺環境に基づき、合格判定基準をその一例として算出してみる。

当該センサ端末の目標外形寸法は 2×5×2～7×10×5 cm^3であるので、内部空間容積を外形体積と同じとみなすと 20～350 cm^3となる。センサ端末パッケージの使用環境温度は-40～85℃程度が想定されているので､使用環境における室温との最大温度差を 60℃とすると、パッケージ内部との最大差圧は 18 kPa になる。また、目標保証動作時間は 10 年である。以上のことから、内部空間容積 20～350 cm^3のパッケージに差圧 18 kPa がかかって内部封入ガスが汚染された外界ガスに置き換わった時点で寿命 10 年と仮定すると、合格判定基準は下表に示す数字になり、今回の気密性試験は一部合格といえる。

表①-(4).5　本研究課題を想定したリーク速度の合格判定基準

	想定センサ端末	内部空間容積 (cm^3)	合格判定基準 ($Pa \cdot m^3/s$)
	グリーンセンサ	2×5×2	＜1E-09
	インフラセンサ	7×10×5	＜2E-08

①-(4)-3-4　実装構造設計指針

自立型の無線センサ端末の構成電子部品である、センサ、LSI、抵抗、コンデンサ、無線アンテナ、自立電源などを内蔵する高耐久性シールド実装構造として、低融点ガラスを用いて接合封止する LTCC セラミックス基板実装の採用が適切である。特に、LTCC 基板を用いて電子部品を封止実装することを想定したセラミックス基板の封止接合評価実験において､低融点ガラスによる接合温度 260℃でのプロセスが可能であることが確認された。ただし、内蔵電子部品への熱影響を極力抑制するためには、電子部品実装と封止接合全体工程の低熱影響実装レシピの探索が必要である。

①-(4)-4　コーティング材料について

【大日本印刷株式会社】

屋外使用に長時間耐える自立無線型センサ端末を作る際、自立電源・無線通信・センサをワンパッケージ化して、耐久性ある材料で封止する必要がある。セラミックパッケージを含む電子モジュール上を耐久性材料でコーティングすることを検討する。コストと耐久性を考慮し、コーティング材料調査とコーティング方法の設定及び実験を実施した。

①-(4)-4-1　コーティング材料調査

コストと耐久性を考慮し、コーティング材料は樹脂フィルムを中心に調査を実施した。

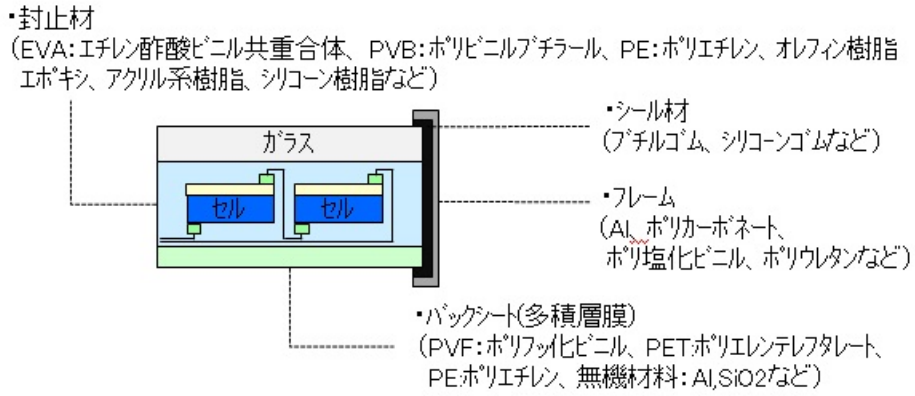
①-(4)-4-2　コーティング材料調査結果

樹脂系のコーティング材料として、太陽電池パネル用バックシート・封止材（エネルギ関連）、建材用コーティング（建材関連）、ハードコートフィルム（ディスプレイ関連）、リチウムイオン電池用ソフトパック（エネルギ関連）を、樹脂以外では塩害地玄関ドア向け化粧鋼板・外装用アルミ化粧板（建材関連）を調査し、材料構成・無線適正・耐候性・水蒸気バリア性についての一覧化を表①-(4)-4-2-1 に行った。無線適正を考慮するとコーティング材料構成にメタルがない必要があり、無線適正判定としては、材料構成にメタルありを”×”、一部メタル蒸着層ありを”△”とした。耐候性判定としては、屋外環境使用実施ありを”○”、実績なしを”-“で表した。水蒸気透過率はハードコートフィルムの性能が良いが屋外環境使用実績が無く、太陽電池用部材の屋外長期使用実績を重視した。なお、水蒸気透過率の”-“についてはデータなしである。一覧表から無線適正・耐候性・水蒸気透過率の項目より、太陽電池パネル用バックシート・太陽電池パネル用封止材がコーティング材料候補である。

表①-(4)-4-2.1 コーティング材料

コーティンング材料	構成	無線適正	耐候性	水蒸気透過率
太陽電池パネル用バックシート	樹脂フィルム	○	○	0.01g/m^2/day
太陽電池パネル用封止材	樹脂フィルム	○	○	3g/m^2/day
建材用コーティング材	樹脂フィルム	○	○	-
ハードコートフィルム	樹脂フィルム	○	-	10^{-7}g/m^2/day
Li 電池用ソフトパック	樹脂フィルム	△	-	-
塩害地玄関ドア向け化粧鋼板	亜鉛めっき鋼板	×	○	-
外装用アルミ化粧板	アルミ	×	○	-

屋外長期使用実績がある太陽電池モジュールの構成材料が高耐久材料候補となるため、太陽電池モジュール構成材料を調査した。太陽電池モジュール構成材料の例を図①-(4)-4-2.1 に示す。



図①-(4)-4-2.1　太陽電池モジュール構成材料例

太陽電池モジュールは、セルを封止材で立体的に封止し、封止材の外側をガラスとバックシートで封入し、周囲を枠組みするものである。太陽電池のセルをコーティング対象とみたてた場合、まず立体的な封止が必要となる。封止材は従来エチレン酢酸ビニル共重合体である EVA 樹脂を用いたものが長年の実績があるが、加工時に酸性ガスが発生する課題がある。大日本印刷ではオレフィン樹脂を基材とした封止材を開発しており、EVA 樹脂を用いた封止材と比べ水蒸気バリア性に優れ、酸性ガスが発生しない特徴がある。大日本印刷製の封止材を使って予備実験を行うことにした。

①-(4)-4-3　基礎実験方法

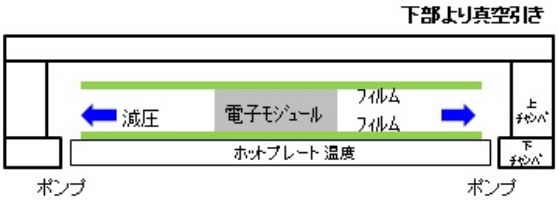
実際のセンサ端末高さは 5 ㎜以上が想定され、太陽電池セル高さ 0.2 ㎜程度に比べ高さがある。そのため、高さのあるコーティング対象に対するコーティング性の評価を行った。評価方法は目視観察とした。

①-(4)-4-3-1　コーティング材料

125μm 厚オレフィン樹脂のダイシングテープをフィルムに使用した。

①-(4)-4-3-2　コーティング方法

真空方式：真空テープ貼り装置を使用し、70℃で加熱し 200Pa・1min でコーティングした（図①-(4)-4-3-2.1）。



図①-(4)-4-3-2.1　真空方式

①-(4)-4-3-3　コーティング評価対象物

Si・ガラス接合の無機物をセラミックパッケージを含む電子モジュールと想定し、コーティング評価に使用した。コーティング評価対象物は 11.6 ㎜角で高さは 1.125 ㎜と 2.25 ㎜の 2 種類を用意した。

①-(4)-4-4　基礎実験結果

高さ 1、125 ㎜のコーティング対象物では真空方式で図①-(4)-4-4.1 のように、空隙なくコーティングできていることが分かる。

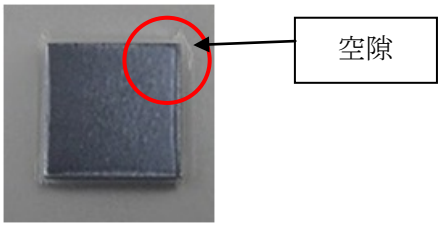
上フィルム厚	0.125mm t
対象高さ	1.125mm t
下フィルム厚	0.125mm t



図①-(4)-4-4.1　1.125mm 高さコーティング上面観察写真

高さ 2.25 ㎜程度の厚みとなると、図①-(4)-4-4.2 のように真空方式でコーナー部に 1 ㎜程の空隙が発生する。真空方式で、コーティング対象物の面の部分はフィルムが密着するが、高さがあるコーナー部はフィルムが付きまわらない。付きまわりやすくするためには、コーティング時に圧力をかけるとともに、加工時に材料の流動性を持たせることが必要である。

上フィルム厚	0.125mm t
対象高さ	2.25mm t
下フィルム厚	0.125mm t

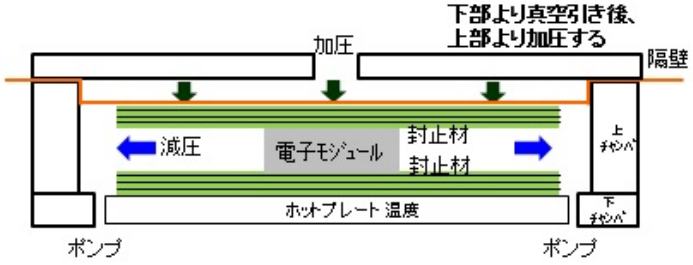


図①-(4)-4-4.2　2.25mm 高さコーティング上面観察写真

①-(4)-4-5　実験方法

基礎実験結果を踏まえ、高耐久性コーティング材料候補である封止材を用いて、コーティング方式を真空加圧方式（図①-(4)-4-5.1）に変更し、評価を行った。高さのあるコーテ

ィング対象において、空隙なく封止ができるかを評価する。また、平坦な封止ができると他材料で追加コーティングが可能となるため、平坦な封止ができるよう封止材の厚みを増やしての評価も行った。評価方法は目視観察とした。



図①-(4)-4-5.1　真空加圧方式

①-(4)-4-5-1　コーティング材料

オレフィン樹脂基材の 600μm 厚封止材を使用し、封止材厚みを増やす場合は積層させた。

①-(4)-4-5-2　コーティング方法

真空加圧方式：真空ラミネータ装置を使用した。2 ステップのコーティング方法で 1 ステップ：150℃加熱し、50Pa・6min 真空引き、2 ステップ：150℃加熱で真空引きしながら 101kPa の圧力を 10min かけて実施した。

①-(4)-4-5-3　コーティング評価対象物

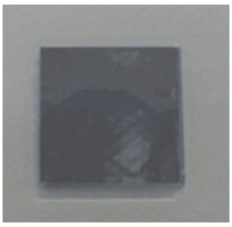
セラミックパッケージを含む電子モジュールと想定したコーティング評価対象物を 3 種類用意した。1 つは Si・ガラス接合の無機物で縦横 11.6 ㎜、高さは 2.25 ㎜とした。こちらは基礎評価で空隙あったコーティング評価対象物と同じである。他の 2 つはコーティング評価対象物の高さ依存性評価として、コーティング評価用セラミックスを 10 ㎜角で高さ 5mm と 10 ㎜に外注加工して用意した。

①-(4)-4-6　実験結果

①-(4)-4-6-1　コーティング評価対象物　無機物結果

図①-(4)-4-6-1.1 より、高さ 2.25㎜ で空隙なくコーティング評価対象物を封止できていることを確認した。空隙ない封止が出来た理由として、コーティング時に圧力をかけたこと・封止材が加工時に流動したことが考えられる。コーティング評価対象物まわりに段差が見られなかったため、封止材を厚くすることで平坦な封止が予想された。

上封止材厚　0.6㎜ t
対象高さ　　2.25㎜ t
下封止材厚　0.6㎜ t

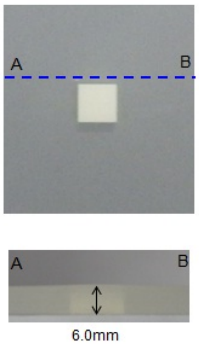


図①-(4)-4-6-1.1　2.25㎜高さコーティング上面観察写真

①-(4)-4-6-2　コーティング評価対象物　セラミックス結果

コーティング対象物周りの封止材を高くするために、封止材厚みを片側 2.4 ㎜と総厚を厚くして、コーティングを実施した。高さ 5mm において上面観察及び断面観察を行った。図①-(4)-4-6-2.1 より空隙なく平坦な封止ができていることを確認した

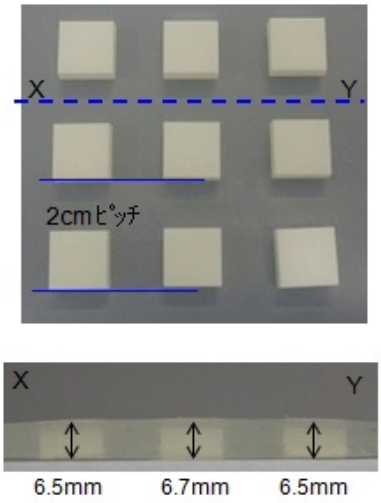
上封止材総厚　2.4㎜ t
対象高さ　　5 ㎜ t
下封止材総厚　2.4㎜ t



図①-(4)-4-6-2.1　5mm 高さコーティング上面・断面観察写真 1 個配置

複数の電子モジュールでの面パターン実装の検討をするために、多面付でのコーティング評価を行った。5mm 高さのコーティング対象物を 9 個多面付し、上面観察及び断面観察を行った。図①-(4)-4-6-2.2 より、空隙なく平坦な封止ができていることを確認した。1 個配置に比べ 9 個配置だとコーティング対象物の面積が 9 倍となり、加工時の単位面積圧力が下がる。多面付の場合、コーティング対象物上の封止材厚みが厚くなること、圧力が外周のコーティング対象物にかかりやすいことが分かった。

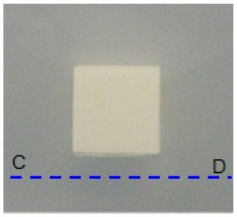
上封止材総厚	2.4mm t
対象高さ	5mm t
下封止材総厚	2.4mm t

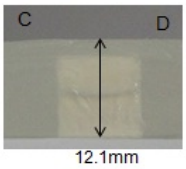


図①-(4)-4-6-2.2　5mm 高さコーティング上面・断面観察写真 9 個配置

10mm 高さにおいて上面観察及び断面観察を行った。図①-(4)-4-6-2.3 の断面観察より平坦な封止ができていることを確認した。上面観察より輪郭がぼやけて見える箇所があり、空隙が見受けられた。断面観察すると、側壁中心付近に黒い空隙がはっきりと見えており、断面観察を行うことで空隙ありの判別が容易となった。コーティング対象高さが高く上下封止材総厚が 4.8 ㎜と厚くなったために真空引き時に引ききらず、コーティング対象の側壁中心付近に空隙が入ったと考える。

上封止材総厚	4.8mm t
対象高さ	10mm t
下封止材総厚	2.4mm t

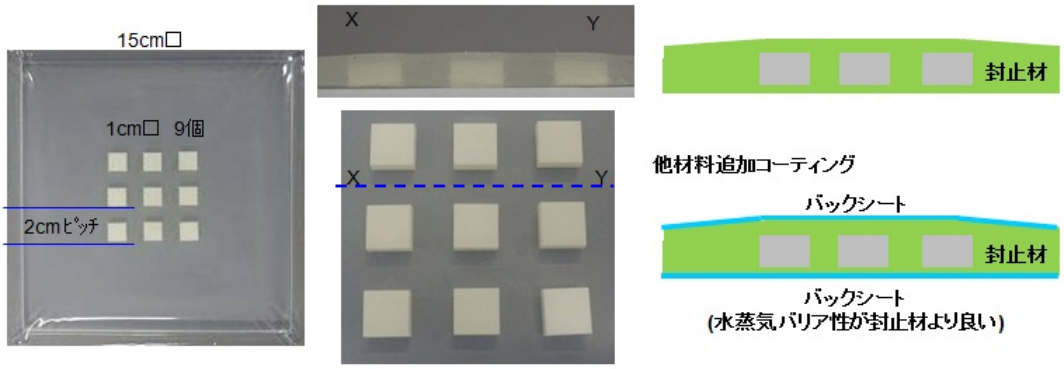




図①-(4)-4-6-2.3　10mm 高さコーティング上面・断面観察写真

①-(4)-4-7　考察

今回の実験結果より、電子モジュール高さを 5mm 以下と想定すると、図①-(4)-4-7.1 の右図のように平坦な密閉封止の後、他材料を追加コーティングすることでバリア性や耐候性を向上させることができる。耐久性を持たせた低コスト実装の可能性がある。



図①-(4)-4-7.1　多面付コーティングの拡張性

①-(4)-5　調査及び実験の結果

10 年以上の高耐久性を達成するために、屋外太陽電池パネル仕様及び車載電子部品仕様準拠に設定した。

材料として、無線アンテナ、抵抗、コンデンサを内蔵出来、センシング及び通信環境に悪影響を及ぼさない LTCC 材料及び低融点ガラスによる接合で、高耐久性パッケージの実現可能性があることが分かった。

高密度面パターンセンシングの実装において、多数分散されている複数センサ、自立電源、通信モジュールを高耐久に実装出来るフィルム材料及び封止で 高耐久性の実現可能性があることがわかった。

①-(4)-6　ユーザ機関による成果の有効性の検証

ユーザ機関である首都高速道路株式会社のヒアリング（11 月 29 日）を実施した。

検査を 5 年毎に行うので、少なくとも 5 年以上の耐久性を持つことが必要とのヒアリング結果から、10 年耐久のための耐久性評価項目を設定した。

振動センサの信頼性が現在のところ確保されていないとの課題が出されたので、センサ自身及び、接続されている無線モジュール、自立電源の配線が外部にさらされないような構造を立案した。

①-(4)-7　まとめ

＜将来開発すべきセンサシステム像＞

将来開発すべきセンサシステム像として以下が挙げられる。

〇センサの性能としては、

・振動、温度などのマルチセンシングが可能なこと。

・位置分解能、感度が優れていること。
・計測範囲として、ゾーンの異常がわかること。
・ゾーン異常診断のため多点及び面センシングが可能なこと。
・対象物の年間変動(異常気象時含む）で動作保証すること。
・センサ間で、時刻同期できること。
・調整、校正、自己診断機能があること。
○耐久性・耐環境性としては、
・10 年以上信頼性があり、1 パッケージ化（センサ、自立電源、無線回路、信号処理回路）での気密性があること。
・耐腐食性があること。
○センサ電源の種類として、
・10 年以上動作する電源システムを有すること。（太陽電池、振動発電、熱発電、無線給電、蓄電キャパシタを組み合わせなど）
○各センサ～中継器～管理サーバへのデータ伝送システムとして、
・10 年以上動作できる無線システムであること。
・無線によるネットワーク・システムであること。
・高信頼性システムであること。（冗長性のある高信頼性確保など）
○サイズ、重量に関しては、
・取付を強固にできる構造であること。
・作業員が容易に設置できる大きさであること。
・重量は、2～25g であること。
・センサ価格は、2、000 円／1 センサ端末～10、000 円/1 のセンサ端末が求められている。

＜開発すべきセンサシステムの技術課題・開発内容と目標＞

開発すべきセンサシステムの技術課題及び目標として、センサ端末の高耐久性化のための気密シールド材料及び実装技術の確立がある。具体的目標としては、10 年以上正常動作保証する。また、自立電源･アンテナ･センサ･通信回路の 1 パッケージ化技術の開発、低温度ガラス封止 LTCC 基板実装技術の開発、高耐久性樹脂フィルム・コーティングの開発、破れない・剥がれない・バリア性を有するフレキシブルなフィルム材料の開発、封止コーテイングプロセスの開発が必要である。さらに、高耐久性センサ端末の評価技術の確立も重要となる。すなわち、高温･高湿、塩水、紫外線の環境負荷に対する耐久性加速試験法の開発、高温･日照、沿岸地でのセンサ端末耐久性検証評価方法を開発する必要がある。

センサの設置についても考慮しなければならない。設置部の剥がれや浮きが無く、センサ端末を保持する設置技術の開発及び取り替え容易化技術、恒久的密着によって様々なフィールドに対応可能なフィルム材料、実装技術を開発する必要がある。

＜開発されるセンサシステムを適用した場合に期待できる具体的効果、インパクト＞

開発されるセンサシステムを現場適用することにより、トータルコストの縮減を図ることができる。劣化損傷を把握すべき事象に見合った耐久性を保証できる。さらに、点検サイクルに合わせた高信頼性性能を維持できる。

②農業分野

②-(1)　センサ活用マイクロ環境制御型次世代植物工場の開発

【ハイトカルチャ株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所】

②-(1)-1　研究の目的

＜社会課題＞

TPP の締結に向け政府が動いているなか、我が国の農業は海外との競争力強化が望まれる。特に農産業、とりわけ農作物については、オーストラリアやアメリカ、中国、東南アジア諸国、南米諸国などからの安価な野菜類の輸入に対抗することが要求されている。

そこで、気候風土が多様な我が国ならではの多種類の有用植物・高付加価値な野菜や、糖尿病や透析を必要とする患者向けに様々な野菜類に対応した低カリウム野菜などの機能性野菜の栽培による国内生産・消費の喚起や、攻めの農業として、これらの高機能で高付加価値な野菜類の輸出を行うことで、農業を取り巻く困難な状況を打破したい。

そのためには、単一品種の大量生産という、価格競争に対抗する安価な生産を目指した大規模栽培ではなく、多種類の機能性野菜や地域独自の植物種を栽培し、生産地域で消費するための多品種で高付加価値な農産物の生産による地産地消型の高度集約農業や、農業のスマート化､すなわち IT を導入して各栽培場所からマイクロセンサにより抽出された情報をネットワーク化し、数カ所の栽培施設の環境を集中して管理・コントロールすることで、農産品の品質・安全性と生産性及び高機能性を高めるセンサシステムを導入することが必要である。

また､現状の我が国農業では社会課題として､次の様な点も問題として取り上げられる。

・農業従事者の高齢化・後継者不足による担い手不足と、それに伴う栽培技術の散逸

・天候に左右された不作、豊作による、価格の乱高下と農作物の不安定供給

・中国大気汚染（PM2.5)や放射能汚染などに対する食の安全・安心への国民要求の高まり

・栽培のトレーサビリティの取れた、食に対する安全・安心への期待

・収益性の向上と、労務軽減による生産性の効率化を目指した、第 1 次産業から第 6 次産業への脱却

・東日本大震災後の津波による塩害や放射能汚染の問題を抱える被災地の農業復興など

以上の様な問題点に対して、会社に通勤する様に誰もが参画できる農業や、栽培方法の改良による収率の向上による「食の安定供給」、中国大気汚染(PM2.5)や放射能汚染の回避や、農薬を使用しない農業、肥料成分のエビデンスと栽培のトレーサビリティにこだわった「食の安心・安全」、汚染土壌を使用しない工場型農業や収益のあがる高付加価値農作

物の生産による「被災地の農業復興」を目的とした研究開発を実践していくことが必要とされている。

＜現状の取り組みと課題＞

これらの解決策として、栽培ノウハウのデータベース化とセンサ活用環境制御による作業の効率化及びセンサ活用環境制御による収量の向上と、閉鎖型植物工場による汚染物質混入の回避及び病害虫の混入防止による無農薬栽培と、汚染土壌を使用しない水耕栽培方式などの研究開発が行われている。農場における栽培データの取得に関しては、ネットワークカメラや温度、湿度、日射量、CO_2などのセンサ情報を無線 LAN を用いて収集する「フィールドサーバ」と呼ばれる web センサノードシステムが研究開発されている。これにより種々のデータが収集されつつあるが、一般的な農場においては、自然環境の影響が大きいこと、土壌栽培では土の耕し方によるバラつきが大きく、なかなか有用な情報が得られないという課題がある。

一方、植物工場は一般農場に比べると閉鎖系を構築して環境を制御しやすいメリットがあり、近年経産省と農水省との農商工連携も進められ、補助金制度が導入されたこともあり、多くの植物工場が導入された。植物工場には「太陽光利用型植物工場」と「完全制御型植物工場」の 2 種類がある。

「太陽光利用型植物工場」は、植物を栽培する光源として太陽光を利用するタイプで「温室での水耕栽培設備を高度化」したようなタイプと、高圧ナトリウムランプなどの人工光源を曇りや雨の日に補光として使用する「人工光併用型」の 2 種類に分けることができる。「太陽光利用型植物工場」は、世界最初の植物工場としてヨーロッパで稼働したことで有名だが、太陽光を利用するため栽培室内の温度管理上、夏場には天窓や側窓を開ける必要があり、一般的に無農薬栽培が難しいとされており、特に我が国では高温多湿の外気の影響を大きく受け易く栽培環境の管理が難しく生産が安定化しにくいという問題がある。また、栽培は平面式に限られ、生産効率は土壌栽培とほぼ同等である。

しかし、「太陽光利用型植物工場」でありながら、閉鎖したガラス温室でパッドアンドファンや、エアコンを使用した温度管理を行った栽培で、出入口にエアシャワーを設置した衛生管理を実施し、完全無農薬栽培をしている施設もある。これは、「完全制御型植物工場」に近い存在だと考えられる。

「完全制御型植物工場」は、植物を栽培する光源、栽培室の温度・湿度・空気成分などを人工的に機械制御して生産する栽培施設で、外界の環境（季節）の影響を受けにくい、閉鎖された栽培室内を、栽培する植物に適した温度や湿度にコントロールして栽培をおこなっているので、1 年を通して安定的な収穫計画と一定の大きさの収穫物を得ることがで

きる。また、酸素や二酸化炭素の濃度をコントロールすることで成長速度をはやくすることが可能である。さらに、栽培を多段で行うことが可能で、小さな面積で多くの収穫を得る高い生産効率を実現できる。

現状の植物工場はこのように環境をある程度制御することは可能であるが、センサが高価であることから、植物工場全体を一定環境に制御することを目指している。しかしながら、植物工場内全体を一定に制御することは難しく、若干の環境の違いにより、同一植物工場内でも場所により収穫量が変動するなどの課題もある。

また、植物工場では一般に水耕栽培が行われているが、水耕栽培では葉菜類の栽培は可能であるが、根菜類の栽培ができないという問題もあり、植物工場で栽培できる植物の種類の拡大が望まれている。これに対して、セラミックの有する毛細管現象を利用して、植物の根をセラミックスに接触させることで植物が使用した量の液肥を根から無動力で連続的に供給し続けるセラミック栽培も開発され、根菜類も栽培可能であることが実証されている。セラミック栽培は他の方法と比較すると根系をある程度制御することは可能ではあるが、植物を最適に栽培するためのパラメータは非常に多く、それらすべてを制御することは困難であるため、これまで、植物の最適栽培のデータベースを構築することはできないでいる。このため、農業は勘と経験に基づいた栽培しかできず、前述した社会課題を根本から解決することが困難であった。

＜実施内容と最終目標＞

そこで、前述の社会課題を解決するためには、（ⅰ）完全閉鎖型の「植物栽培施設」（図②-(1)-1.1）、（ⅱ）環境制御型の「植物栽培環境」、（ⅲ）水耕栽培では生育困難な根菜類（図②-(1)-1.2）などの高付加価値植物栽培が可能な「セラミック栽培方法」が必要であり、さらにそれらを一元的にして高度にコントロールする（ⅳ）無線センサネットを活用した「植物栽培システム」を開発する必要がある。



図②-(1)-1.1 完全閉鎖型施設での「セラミック栽培」の様子



図②-(1)-1.2 大根の栽培様子

以上 4 つの解決要素を組み合わせることにより、センサによる温度、湿度、気圧の測定データと、生育促進性が高い栽培場所「スイートスポット」との相関性を基に、各栽培場所の微小気候を局所的に制御することで、植物に適度なストレスを与え様々な植物種の収率の向上、機能性野菜や高付加価値植物の大量生産が可能となる。

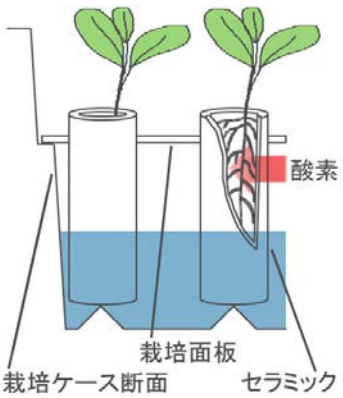
他に光センサ（図②-(1)-1.3）を用いることで、日長や光量、光質の変化を自在に制御させて、植物の地上部に適度なストレスを与え生育速度を速くしたり、栄養成分の生成をコントロールしたり、様々な植物種のさらなる収率の向上、機能性野菜や高付加価値植物の大量生産が可能となる。

さらに、セラミック栽培（図②-(1)-1.4）を用いることで、セラミックに接している部分の根は、その大部分が空気にも接触しているので、根が直接呼吸することが出来る。また、毛細管現象で常に湿っているセラミックに接している根は、空気による乾燥で枯死すること無く空気に接することができるので、適度に制御された水ストレスを受けている。それにより、根には常に緩いストレスがかかり顕著な細根が発達して、土壌中の根と同等の生理機能を発揮することが出来る。

また、以上の様な生理機能を発揮することでセラミック栽培は、主に水耕栽培を利用している既存の閉鎖型栽培施設では栽培が不可能であった、根菜類を含む様々な野菜類や、薬草類、木本類など、多種多様な植物種にまで栽培範囲を拡大することができる。



図②-(1)-1.3 光センサを用いた
日長・光量・光質の制御



図②-(1)-1.4「セラミッ ク栽培方法」
を用いた根の制御

さらに、セラミック栽培による根系ストレス（刺激）制御と、養液成分の制御による統合的な地下部コントロールにより、土壌で栽培された植物とほぼ同じ、味や風味、栄養成分、生成物質などを含む付加価値の高い野菜や植物を栽培したり、糖尿病や透析を必要とする患者向けに様々な種類の野菜類での低カリウム野菜などの生産を可能としたりすることで、国内だけでなく諸外国への輸出も可能な機能性野菜などの高付加価値な植物栽培を

実現させることができる。

以上の様な特徴を用いることで、従来の農業や植物工場のシステムでは実現出来なかった、生育や代謝の促進や抑制をさせるための適度なストレス（刺激）制御を同時並行的に行うことが可能となり、そこに木本類などを含む多種多様な植物の栽培を通じて、機能性のあるより高付加価値な、より高有効成分な植物栽培を可能とする、次世代型の植物工場を誕生させることが出来る。

また、コンパクトながらも多様な野菜類の栽培と付加価値コントロールのできる、この次世代型植物工場を利用することで、収益性の向上と、労務軽減による生産性の効率化を目指した農業の 6 次産業化の取り組みも行うことが可能となる。

以上のように、マイクロセンサによる測定、制御技術を用いて植物の地上部を、セラミック栽培と養液の成分による根系制御技術を用いて植物の地下部を、それぞれ同時並行的にコントロールすることで、植物の地上部と地下部の微小環境を統合的に局所制御するという、今までの水耕栽培を中心とした植物工場の栽培システムではあり得なかった、全く新しい生育・代謝をコントロールするための適度なストレス（刺激）制御技術を用いた「センサ活用マイクロ環境制御型次世代植物工場」を実現することが可能となる。本先導研究では、その基礎検討として、工場内で多段に配置された各栽培場所毎にマイクロセンサを設置して温度、湿度、気圧を測定し、栽培室内の各種測定データを 3 次元マッピング化し、様々な植物種の収穫量の優劣と、温度、湿度、気圧のマッピングデータとの相関関係を調べ、最適な微小気候の制御技術開発の基礎データを得るための微小気候測定技術を開発する。

さらに、様々な食と健康の問題を解決させて国際的な競争力を獲得するために、様々な種類の野菜類においてカリウム成分の低い低カリウム野菜などの機能性野菜を、マイクロセンサを用いた 3 次元マッピングのデータを利用して、効率良く安定生産する基礎データを得る。

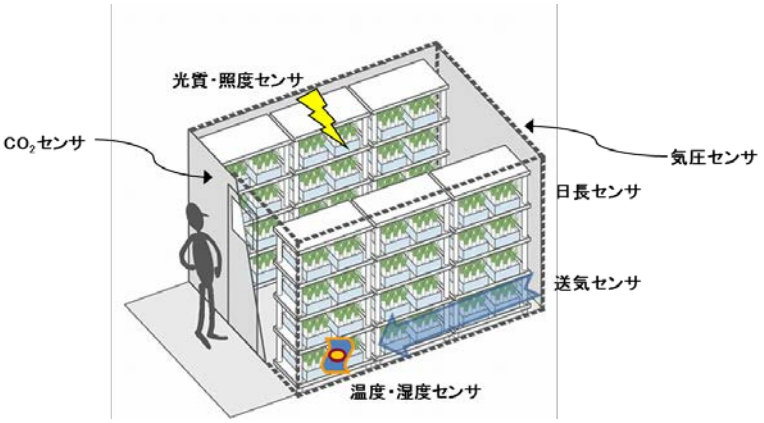
②-(1)-2　微小気候測定技術開発と最適な微小気候の制御技術開発のセンサ仕様の決定

【ハイトカルチャ株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所】

現在の完全閉鎖型植物工場では、工場内の栽培場所の違いによって葉菜類などで収穫量に顕著な差が現れ、生育促進性が高い栽培場所「スイートスポット」 が確認されている。また、同じ温度、湿度に栽培環境を設定した栽培室同士においても、葉菜類などの収穫量に差が現れることが確認されていた。

②-(1)-2-1　実験方法

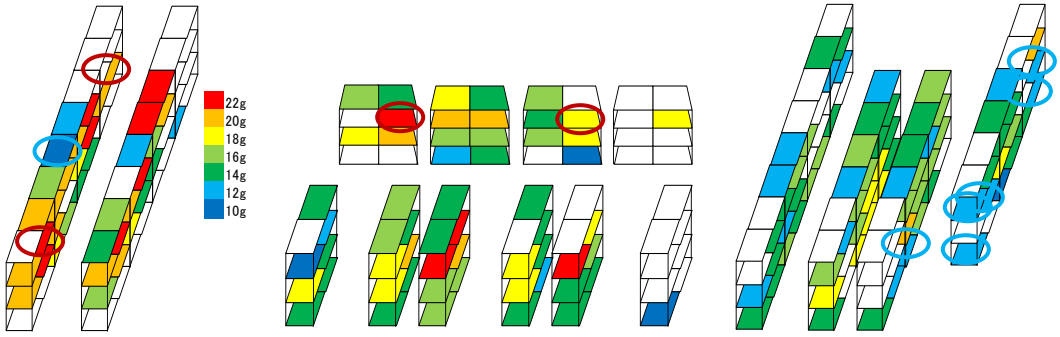
「センサ活用マイクロ環境制御型次世代植物工場」（図②-(1)-2-1.1）を開発するに当たって、「スイートスポット」などの工場内での収穫量差を利用して、閉鎖型栽培設備内で多段に配置された栽培場所毎に、81 箇所のマイクロセンサを設置して温度、湿度、気圧を測定し、栽培場所による葉菜類などの収穫量の優劣と、温度、湿度、気圧のデータとの相関関係を見出し、植物の地上部をどの様な環境に制御することが好ましいかの検証を行った。それによってセンサを用いた、生育や代謝を促進させる適度なストレス制御技術（マイクロ環境制御技術）開発を行うために必須技術となる微小気候測定技術開発と、栽培環境の 3 次元マッピング化による栽培ノウハウのデータベース化の研究開発を行った。



図②-(1)-2-1.1　無線センサネットを活用した「センサ活用マイクロ環境制御型次世代植物工場」

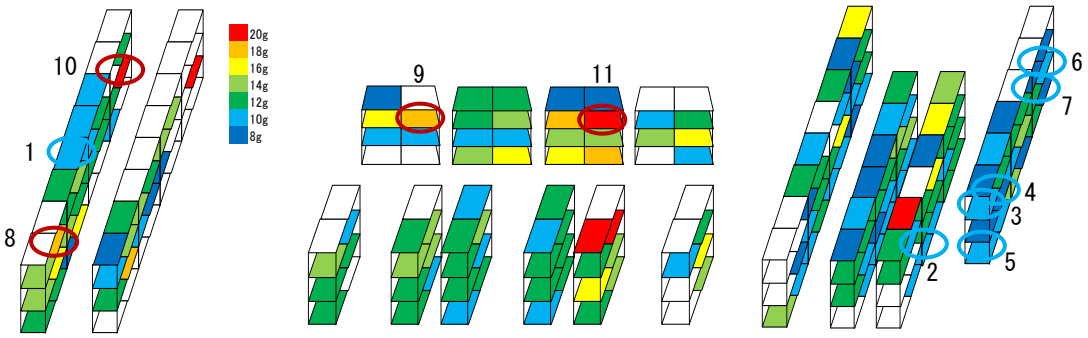
②-(1)-2-2　実験結果

ミズナの 1 株平均重量を、各栽培部屋、栽培棚毎に 3 次元マッピング化したものを図②-(1)-2-2.1 に示す。収穫重量が安定的に多い「スイートスポット」の場所はお互いに比較的近い位置に存在していることが判り、管理された閉鎖型の植物工場においてもその場所々の微小気候の違いによって収穫重量が異なっていることが分かる。



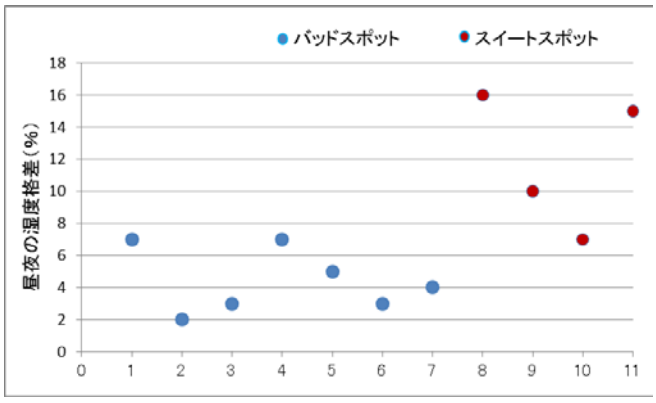
図②-(1)-2-2.1　ミズナの 1 株平均重量の栽培場所毎の 3 次元マップ

また、ホウレンソウの 1 株平均重量を、各栽培部屋、栽培棚毎に 3 次元マッピング化したものを図②-(1)-2-2.2 に示す。ホウレンソウでも収穫重量が安定的に多い「スイートスポット」の場所はお互いに比較的近い位置に存在していることが判り、管理された閉鎖型の植物工場においてもその場所々の微小気候の違いによって収穫重量が異なっていることが分かる。さらに、ミズナの 3 次元マップで示されている「スイートスポット」とホウレンソウの「スイートスポット」の間では、多くの場所で異なっていることが分かる。



図②-(1)-2-2.2　ホウレンソウの 1 株平均重量の栽培場所毎の 3 次元マップ

ただ、両野菜共に「スイートスポット」となっている場所「　」と「バッドスポット」になっている場所「　」もあり、その場所の特徴を図②-(1)-2-2.3 に示す。両野菜とも収穫重量の多い「スイートスポット」は、両野菜とも収穫重量が少ない「バッドスポット」に比べて昼夜の湿度差が高い傾向にあることが判る。



図②-(1)-2-2.3　　スイートスポットとバッドスポットにおける昼夜湿度差の関係

以上のことより、昼夜の湿度差が高めの場所付近では、収穫量が多くなる「スイートスポット」となるので、それに即した湿度の測定センサが必要と考えられる。

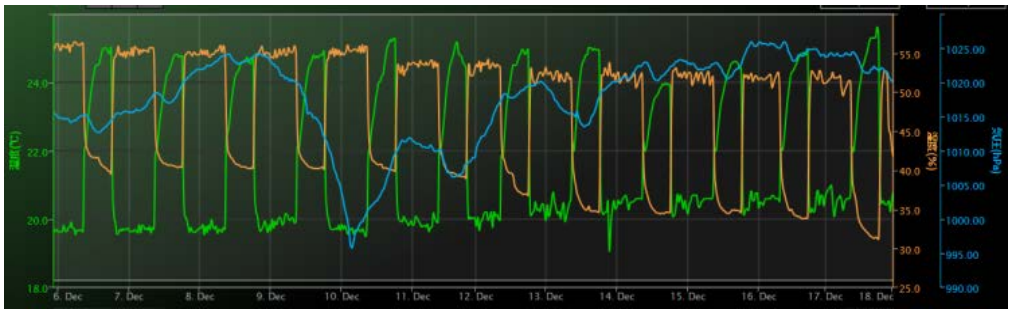
②-(1)-3　地上部の最適微小気候制御技術開発の基礎データ収集

【ハイトカルチャ株式会社】

今までの研究で、栽培室の温度、湿度は管理された状態に置いても、一定時間の間に温度、湿度が周期的に数回上下しており、その上下回数の違いに伴う収穫重量の違いが確認されている。このことからその周期による適度なストレス（刺激）の掛かり方の違いにより収穫量に有意な差が生まれていると考えており、地上部の栽培環境を制御することで植物の生育を制御することが可能と考えられていた。そこで、地上部の最適微小気候制御技術開発の基礎データ収集を行った。

②-(1)-3-1　実験方法

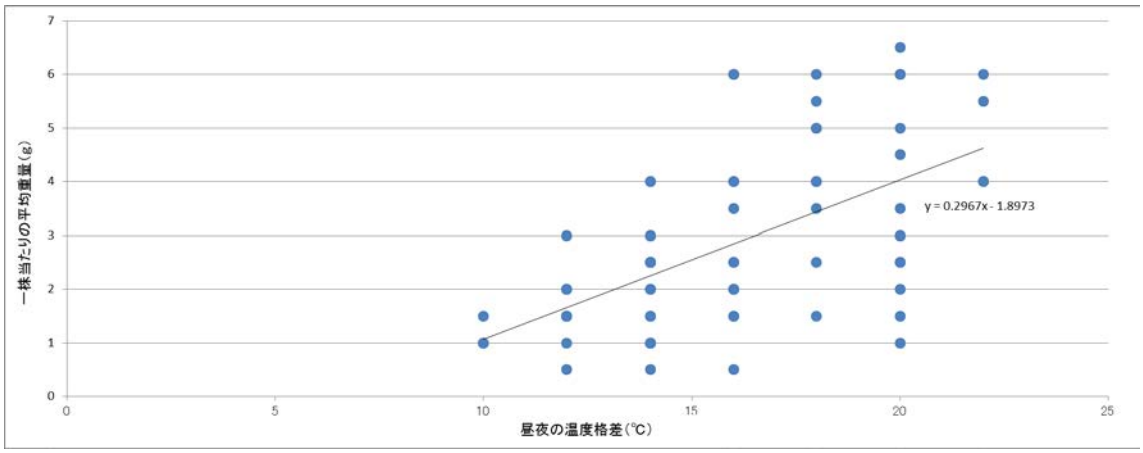
栽培場所の 81 箇所に設置したマイクロセンサを用いて数分単位で温度、湿度、気圧データを測定した結果の 1 例を図②-(1)-3-1.1 に示す。この様にして各栽培場所で測定された各種データと微小気候における温度、湿度の周期、その栽培場所で収穫された各野菜の 1 株当たりの平均収穫重量の基礎データを収集・蓄積して、その相関関係を調べることで、低カリウム野菜などの機能性野菜を効率良く安定生産できるように、地上部の最適微小気候制御技術開発のためのセンサ仕様を決定しようと試みた。



図②-(1)-3-1.1　マイクロセンサによる温度、湿度、気圧データの測定

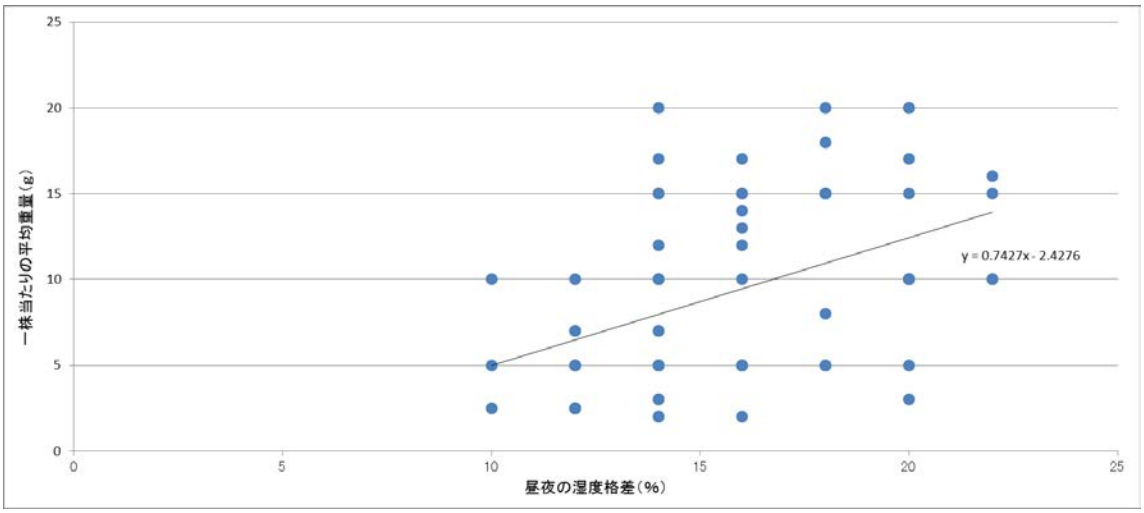
②-(1)-3-2　実験結果

ミズナの栽培時におけるマイクロセンサによる収集データと 1 株当たりの平均収穫重量の相関関係を計算した。その結果、 1 株当たりの平均重量と昼夜の温度格差の間には危険率 0.1%未満の相関関係がみられた（図②-(1)-3-2.1）。



図②-(1)-3-2.1 ミズナの１株当たりの平均重量と昼夜の温度格差の関係

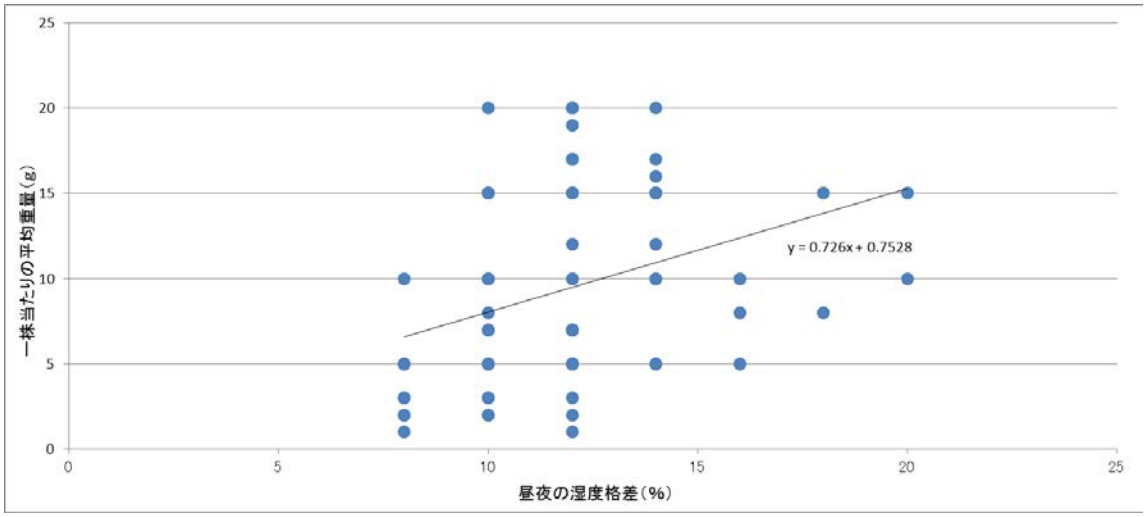
また、ミズナの 1 株当たりの平均重量と昼夜の湿度格差の間にも危険率 0.1%未満の相関関係がみられた（図②-(1)-3-2.2）。



図②-(1)-3-2.2　ミズナの１株当たりの平均重量と昼夜の湿度格差の関係

これらのことより、ミズナにおいては栽培場所の微小気候が、昼夜の温湿度の格差が大きいほど収穫重量が多くなることが判った。よって、ミズナの栽培においては温湿度センサによる微小気候の制御が有効と考えられる。

続いて、ホウレンソウの栽培時におけるマイクロセンサによる収集データと１株当たりの平均収穫重量の相関関係を計算した。その結果、1 株当たりの平均重量と昼夜の湿度格差の間には危険率 1%未満の相関関係がみられた（図②-(1)-3-2.3）。

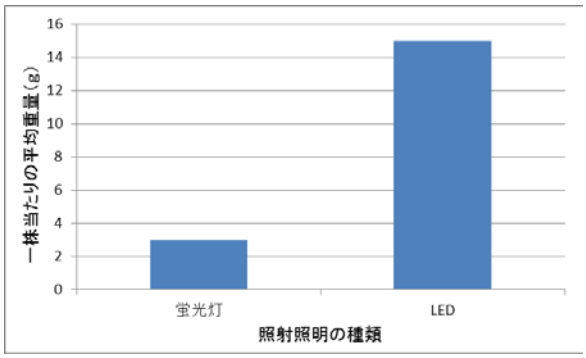


図②-(1)-3-2.3　ホウレンソウの 1 株当たりの平均重量と昼夜の湿度格差の関係

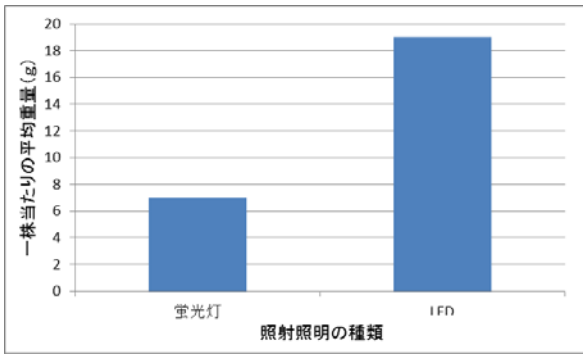
しかし、ホウレンソウにおいてはミズナと異なり 1 株当たりの平均重量と昼夜の温度格差の間には相関関係がみられなかった。

以上のことより、ミズナ・ホウレンソウの収穫重量を多くするための地上部の最適微小気候制御技術開発のためのセンサとしては、昼夜の湿度格差を測定することが重要であることが判った。

次に、地上部の微小気候のうち光が成長に及ぼす影響について検討するため、ダイコンに蛍光灯照射と LED 照射を行った場合の 1 株当たりの平均重量を計測した。図②-(1)-3-2.4 に示すようにダイコンに LED 照射をおこなった場合、蛍光灯照射に比べて根部の肥大速度が 5 倍速かった。また、図②-(1)-3-2.5 に示すように収穫前の 11 日間だけ LED 照射をおこなった場合でも、蛍光灯照射に比べて肥大速度が 2.5 倍速かった。この様に、地上部の微小環境の光刺激を変えることによって生育に大きな差が生まれることが判った。

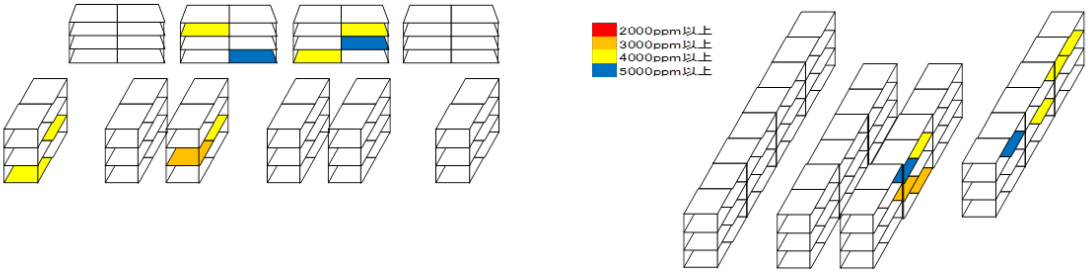


図②-(1)-3-2.4　ダイコン照射照明の違いと重量の関係（LED 照射 21 日間）



図②-(1)-3-2.5　ダイコン照射照明の違いと重量の関係（LED 照射 11 日間）

さらに、地上部の微小気候が栄養成分に及ぼす影響について検討するため、コマツナの 1 ケース平均カリウム量を、各栽培部屋、栽培棚毎に 3 次元マッピング化したものを図②-(1)-3-2.6 に示す。特別に低カリウム化処理を行わずに通常栽培をおこなった場合においても、食品成分表にある標準値の 5000ppm より 2000ppm 程度も低カリウム化する「バリュースポット」の存在と場所が明らかになった。



図②-(1)-3-2.6　コマツナの 1 ケース平均カリウム量の栽培場所毎の 3 次元マップ

②-(1)-4　地下部の最適微小環境制御技術開発の基礎データ収集

【ハイトカルチャ株式会社】

TPP 締結に向かっている将来の農業を考えていく上で、より付加価値の高い野菜類を安定的に生産していくことは、収益性の向上と、労務軽減による生産性の効率化を目指した、第 1 次産業から第 6 次産業への脱却を考えていく上で必要不可欠と考えられる。そのためには各種野菜類の低カリウム化・低硝酸イオン化を目指すことで、これらの問題を解決出来ればと考えている。低カリウム化・低硝酸イオン化を図るためには、地下部の環境制御としての栽培養液制御が重要になる。そこで、栽培養液の組成を変化させて、地下部の最適微小環境制御技術の基礎データを収集した。

②-(1)-4-1　実験方法

閉鎖型植物工場内で栽培している、セラミック栽培の栽培養液の組成を変更させることで地下部の環境制御をおこない、根菜類を含む様々な野菜類の栄養成分（Na、K、Ca、NO_3）を測定することで、低カリウム野菜などの機能性野菜を効率良く安定生産するための検証を行った。

②-(1)-4-2　実験結果

セラミック栽培を用いた閉鎖型植物工場での栽培において、栽培開始時及び栽培後期に栽培養液の組成を通常栽培の養液から変更させることによって、地下部の環境制御を行うことで、根菜類を含む各栽培野菜類の低カリウム化を図った各種栽培試験結果を表②-(1)-4-2.1～表②-(1)-4-2.5 に示す。

表②-(1)-4-2.1　レタスの養液組成の変更と各栄養素量

処理区	成分表値	収穫前1W置換		収穫前2W置換		1/2K栽培後　収穫前2W置換	
		無NO3-,無K		無NO3-,無K		有NO3-,無K	
棚番号		部屋10棚4段4R	部屋13棚13段4L	部屋10棚1段3L	部屋10棚2段4R	部屋13棚12段4L	部屋8棚2段4L
K+	4900	3200	3300	2400	2300	1700	1500
NO3-	2000	2000	3300	1800	1800	2300	2500
Na+	120	93	72	66	64	180	220

表②-(1)-4-2.2　ミズナの養液組成の変更と各栄養素量

処理区	成分表値	収穫前1W置換		収穫前2W置換		1/2K栽培後　収穫前2W置換	
		無NO3-,無K		無NO3-,無K		有NO3-,無K	
棚番号		部屋10棚2段2L	部屋10棚2段3R	部屋10棚1段3R	部屋10棚1段4R	部屋13棚13段4L	部屋13棚9段4R
K+	4000	3800	3700	2700	2600	2400	2400
NO3-	1000	6300	4900	2300	3300	5500	6500
Na+		160	140	120	100	340	550

表②-(1)-4-2.3　ホウレンソウの養液組成の変更と各栄養素量

処理区	成分表値	収穫前1W置換		収穫前2W置換		1/2K栽培後　収穫前2W置換	
		無NO3-,無K		無NO3-,無K		有NO3-,無K	
棚番号		部屋10棚3段3L		部屋10棚1段2R		部屋13棚9段1R	部屋13棚9段1L
K+	6900	4600		3800		3300	3200
NO3-	2000	2100		1400		5400	4700
Na+	160	91		150		340	340

表②-(1)-4-2.4　コマツナの養液組成の変更と各栄養素量

処理区	成分表値	収穫前1W置換		収穫前2W置換		1/2K栽培後　収穫前2W置換	
		無NO3-,無K		無NO3-,無K		有NO3-,無K	
棚番号		部屋10棚2段2R	部屋10棚2段3L	部屋10棚1段4R	部屋10棚1段2R	部屋10棚5段2R	部屋13棚3段2R
K+	5000	4700	4300	2900	2600	2000	2200
NO3-	5000	6800	5800	3000	3000	4900	6000
Na+	150	220	210	250	220	480	480

表②-(1)-4-2.5　ダイコンの養液組成の変更と各栄養素量

処理区	成分表値	収穫前1W置換		収穫前2W置換		1/2K栽培後　収穫前2W置換	
		無NO3-,無K		無NO3-,無K		無NO3-,無K	
棚番号		部屋13棚10段4L		部屋13棚12段4L	部屋13棚12段4R	部屋10棚7段3R	部屋10棚5段3R
K+	4000	2100		2400	2400	1800	2500
NO3-	2000	2000		1000	1300	750	1300
Na+	480	120		150	130	200	300

栽培開始時は通常の栽培養液で栽培して、他の成分量は同量含むが、カリウムと硝酸態窒素だけを含まないように調整した低カリウム・低硝酸イオン化養液に、収穫前 1 週間置換したものでは、カリウム含量が約 20～30%低減した。同様に、低カリウム・低硝酸イオン化養液を収穫前 2 週間置換したものでは、カリウム含量が約 40～50%低減した。

また、栽培開始時から他の成分量は同量含むが、カリウムのみ 1/2 に調整した低カリウム化養液で栽培し、さらに低カリウム・低硝酸イオン化養液に収穫前 2 週間置換したものでは、カリウム含量が 60～70%低減していた。

以上の様に、栽培養液の変更によって付加価値の高い低カリウム野菜を、根菜を含む複数の野菜で生産可能であることが判った。

①-(1)-5　ユーザ機関による成果の有効性の検証

ミズナ・ホウレンソウの 3 次元マップより導き出された「スイートスポット」と、その栽培場所の微小気候との関係をみると、収穫重量が少ない「バッドスポット」に比べて昼夜の湿度差が高い傾向にあった。また、ミズナ・ホウレンソウにおいて栽培場所の微小環境で昼夜の湿度格差があるほど収穫重量が多くなる相関性が見出されたことを考慮すると、湿度格差を測定するセンサを用いることで、収穫重量をある程度予測できるものと考えられる。

さらに、今後、昼夜の湿度格差を比較的高く維持するように栽培場所の微小気候を制御することが出来れば、収穫重量を多くすることがより高い確度で予想される。以上のような成果は、今後のセンサ活用マイクロ環境制御型次世代植物工場の開発には有効な試験結果だったと考えられる。

また、セラミック栽培を用いた閉鎖型植物工場での通常養液栽培でも、コマツナにおいては食品成分表にある基準値の 5000ppm より 2000ppm 程度も低カリウム化する「バリュースポット」の存在が明らかになった。このことは手間のかかる地下部の養液制御ではなく、地上部の微小気候制御により低カリウム化を実現できる可能性を示している。

さらに、セラミック栽培を用いた閉鎖型植物工場によるレタス・ミズナ・ホウレンソウ・コマツナ・ダイコンにおいて、栽培養液の改良として、栽培開始時から他の成分量は同量

含むが、カリウムのみ 1/2 に調整した低カリウム化養液で栽培し、さらに低カリウム・低硝酸イオン化養液に収穫前２週間置換した結果、全ての種類でカリウム含量が 60～70％低減していたことが確認された。

以上のような成果は、TPP 締結に向かっている農業を考えていく上で、収益性の向上と、労務軽減による生産性の効率化を目指した、第1次産業から第6次産業への脱却を目指す、高付加価値植物栽培を実践していく上で有効な試験結果だったと考えられる。

②-(1)-6　まとめ

先導研究の結果より、完全閉鎖型の「植物栽培施設」に環境制御型の「植物栽培環境」を取り入れた「センサ活用マイクロ環境制御型次世代植物工場」の構築には、栽培場所の微小気候をマイクロセンサによる常時モニタリングによって昼夜の湿度格差を測定することが、収穫重量を増やすためにも低カリウム野菜を生産するためにも有効であることが判った。

今後本格研究に相当するものがなされた場合は、収穫重量を増やすためには、栽培場所の微小気候を昼夜の湿度格差を 15％程度に制御する技術、低カリウム野菜を生産するには昼夜の湿度格差を出来るだけ少なくする技術の開発が必要となるものと考えられる。

具体的には、一定の湿度格差が生まれる様にセンサで湿度差を感知して栽培場所のドライミストなどの噴霧を制御したり、送風機による除湿の制御をおこなったりすることが考えられる。

その様な開発が成功すれば、植物栽培の経験が全くない人でも付加価値の高い、多種類の機能性野菜を容易に安定的に生産することが出来るようになり、農業の担い手不足の解消ばかりでなく、若者の新規雇用促進効果も期待できる。

また、慢性腎疾患患者向けに根菜類を含む様々な野菜で低カリウム野菜を生産できれば、カリウムの摂取量制限が 1 日 2000mg 以下の食事療法が必要とされる病期 3～5 の人口が 1098 万人と推定されている日本国内の潜在的マーケットの規模では、野菜で 2678 億円/年（消費量 719310ｔ/年）、生鮮果物で 1029 億円/年（消費量 276389ｔ/年）の需要が存在し合計で 3707 億円規模になる。さらに、ワイン・ビール・ジャムなどの低カリウム加工食品の原材料にまでその範囲を広げるとそのマーケットの規模はさらに大きくなり、TPP 締結に向かっている農業を考えていくと、国内外での農業生産物の競争力 up は十分に可能と考えられる。

②-(2)　センサ活用次世代繁殖農家システムの開発

【独立行政法人産業技術総合研究所生産計測技術研究センター、バイオメディカル研究部門、富士通株式会社】

②-(2)-1　研究の目的

＜社会課題＞

総合科学技術会議本会議でも指摘されているように、地域の基盤産業である農林水産業において、働きやすく、持続可能な農林水産業の確立のために、IT 技術などを導入した知識産業化が望まれている。また、TPP の締結に向けて政府が動くなか、我が国農業の海外との競争力強化が望まれている。特に、畜産、とりわけ食肉業については、オーストラリアやアメリカ、南米諸国などからの安価な牛肉の輸入に対抗することが要求されている。しかしながら、小規模農家の多い日本の畜産システムでは価格の面でこれらの国に対抗することは困難と言える。また、国内市場自体も日本人の高齢化のため先細りが予想されており、畜産農家の収益性をどのようにして保つかが喫緊の課題である。一方、海外市場は世界的な日本食（和牛を含む）ブームの広がりやアジア諸国などにおける経済発展に伴う富裕層の増加などにより、和牛など高品質食品の有望な市場が拡大してきている。特に、高級肉の中国やアラブの富裕層向けの輸出を増やすことが、国内畜産農家の生き残り戦略に重要となる。ここ数年、国産牛肉の生産量は 35 万ﾄﾝ前後で推移しているが、輸出は 2011 年実績で 537 ﾄﾝ、額にして 35 億円程度（畜産の情報 2012 年 7 月号）であり、今後さらに輸出量が飛躍的に増大すると予想されている。この増加分をまかなうためには、国内市場で消費される分に加え、輸出にむけた量産体制の確立、特に良質牛肉の増産が必須である。肉の出荷量を増やすためには、良質肉牛の出生数を増やす必要がある。つまり、優良種の仔牛個体数を増加させる必要がある。このためには、個体生産段階である繁殖農家における受胎効率をいかに高めるかが重要となる。

＜現在の取り組みと課題＞

ところで、現在の仔牛生産は、雌牛の胎内に優良種牛などの精子を管理者が注入して受精させる技術、いわゆる「人工授精」が普及している。和牛の生産については、繁殖農家で雌牛を肥育し、その受胎適期を農家が判別して獣医師もしくは人工授精師が優良種牛の凍結精子を用いて人工授精させるが、その種付けの効率が生産を大きく左右する。つまり、牛肉の生産効率化のためには、繁殖牛に効率良く受精・妊娠させ如何に多くの子牛を出産させるかが重要であり、繁殖牛の発情の時期を的確にとらえる必要がある。しかしながら、農家の熟練した勘に基づいても、現在は 5 割程度の受胎率しか得られていないため、新規就農者には極めて高いハードルとなっている。また、的確な受胎適期の検知が出来ないた

め、獣医師や人工授精師の負担も大きい問題もある。このため、新規就農者でも参入しやすく、関連分野での就労者の負担を軽減するように、旧来の農家の勘に基づく判別以外に、装置により牛の発情を機械的に検知する方法が開発されてきている。主な方法としては、(i)牛が発情すると落ち着きがなくなり動き回る行動特性を活用した歩数計や加速度センサによる検知、(ii)膣内挿入などで牛の体温を感知する温度センサなどが開発されている。これらの牛の発情を検知する方法には、以下のような課題がある。

(i)　歩数計や加速度センサによる検知

・システムとして高価でありコストパフォーマンスが良くない。
・装置が比較的大型のため牛にかかる負担が大きい。
・発情の確認はできるものの受胎適期を特定するのは難しい。
・発情した牛の周囲にいる牛も同等の行動をとることがあり、発情している牛の特定が困難な場合もある。

(ii)　温度センサによる検知

・膣内装着が主流であり、機器自体を固定するために膣内に圧をかけることになり、生体に違和感を与えると考えられる。
・膣内からの脱落の問題がある。
・デバイス経由の膣内感染症や出産時に引っかかってしまうことによる死産のリスクがある。

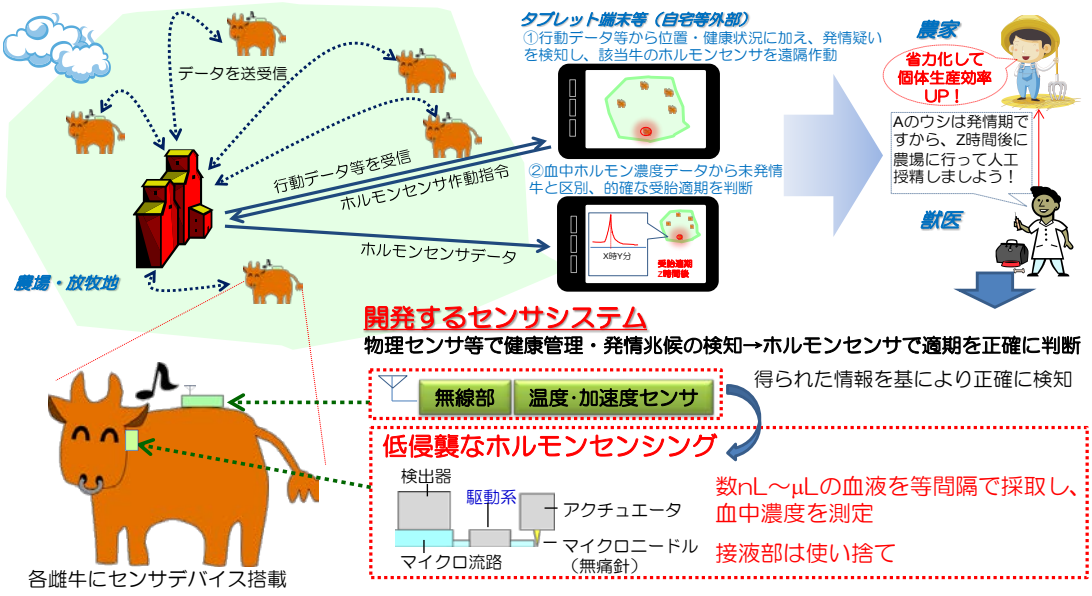
また、これらの方法は、大規模農家向けのシステムであり、中小規模の農家が多い繁殖農家では、これらのシステムを用いるにはコストがかかりすぎることと、特に仔牛生産の盛んな九州地区（国内の 4 割以上）では繁殖の管理を個別農家ではなく、JA や都道府県の畜産試験場が集中管理しているシステムであるため、現存のシステムは実際に即した管理システムとは言いがたい。これらの問題をクリアするためには、大規模農場のみならず、中小規模農場の分散型管理にも対応出来る柔軟性を有する管理システムの構築が必要である。

これらの課題をクリアするための研究開発も行われてきた。センサ側の大きさの課題をクリアする目的では、小型で集積化により多項目の検査が可能な MEMS 技術を用いた小型センサの開発がなされてきている。これまでに加速度センサによる行動モニタやレーザドップラ効果を利用した血流センサなどが開発されてきている。これらのセンサを用いたネットワーク管理技術への応用も試みられている。しかしながら、センサデバイスが小型化出来ているが、電池が大きい問題がある。特に、現在加速度センサなどで使用されているシステムでは、電波出力側にかなりの電力を消費するため、その解決も課題である。また、現有のセンサ項目では、発情の兆候までは検知出来るが、実際の発情牛の特定とその適期

の判断までは困難である。より正確な受胎適期判別法として、血液中の排卵直前の黄体形成ホルモンの一過性放出をモニタする方法があるが、現在の測定装置は大型であり、畜産現場への導入は困難である。また、従来技術では、分析に定期的採血と血液量を要するため、獣医師のみならず牛個体への負担が大きいなどの問題があり、学術的な研究がなされているにも拘わらず、検出方法としては普及していない。

＜実施内容と最終目標＞

そこで、本提案では最終目標として、上記の背景及び従来技術の課題を踏まえて、繁殖農家の実情に即したセンサネットワークによる畜産管理システムの開発を行う(図②-(2)-1.1)。小型で加速度・温度の検知が可能なセンサと組み合わせ、受胎適期を正確に判別するために、無痛針を組み合わせた微量で血液中の排卵直前の黄体形成ホルモンの一過性放出を検知出来る新規のセンサデバイスを開発する。また、大規模農場及び小規模分散型農場のいずれにも対応可能なネットワーク制御システムとその管理用の端末向けアプリケーションの開発を行う。これらを組み合わせて、繁殖農家の実情に即した発情兆候牛の検知から受胎適期の判別を的確に行う繁殖農家向け畜産管理システムの開発を目指す。具体的な発情検出方法としては、まず温度センサと加速度センサにより常時情報を取得する。そして発情の兆候がある個体には血中ホルモンセンサを装着し、より正確な発情の検出を行う。体内の各地で得られた情報を 400MHz 帯の BAN（Body Area Network）により鼻輪などの無線通信デバイスに送り、そこからその個体の生体情報と位置情報を管理システム



図②-(2)-1.1　開発する繁殖農家向けセンサシステム

上に定期的に送信し、これらのデータを解析してタブレット端末やスマートフォンなどで確認出来るシステムを構築する。

本先導研究の実施内容としては、上記開発の礎となるホルモンセンサの動作検証、ならびに MEMS デバイスを用いるセンサネットワークの検証試験を行った。以下に先導研究の具体的実施内容を記載する。

(a) ホルモンセンサ検出デバイスの設計

【独立行政法人産業技術総合研究所バイオメディカル研究部門】

ホルモンセンサの動作検証試験では、無痛針により得られる数十 μl の血液から排卵直前の一過性放出時に見られる黄体形成ホルモンの血中濃度の 100 倍以上の濃度上昇が検知可能かを検証した。産総研でこれまでに開発している高感度ペプチドホルモンセンサ（たばこ数箱分の大きさで数 pg/ml のホルモンを検出・定量可能）をベースとして、これを小型化したセンサを設計した。今回開発したホルモンセンサでは定量性を高めると言うよりもむしろ微量で血中濃度の 100 倍以上の濃度上昇を検出することが肝要であり、この点を踏まえて系の小型化を行った。小型センサは、簡便な検出法である表面プラズモン共鳴法や電気化学測定法を利用した。手のひらサイズの装置で計測できるようにし、薄層流路を利用し、微少量試料に対応できるようにした。

(b) ホルモン検出デバイスの動作検証

【独立行政法人産業技術総合研究所生産計測技術研究センター】

設計したホルモン検出デバイスを用いて微量の試料でホルモンの検知が可能かを検討した。モデルとして、ホルモン自身及び抗体のいずれも市販されているヒトの黄体形成ホルモンを用いて、緩衝液中の数 mIU/ml の定常状態と排卵直前の一過性放出時に相当する 50mIU/ml の濃度を含む 0~200mIU/ml の濃度で測定し、ホルモンセンサの動作検証試験を行った。並行して牛からの血液のサンプリング方法の検討も行った。皮膚表面から数十 μl の血液が採血できるように、様々な太さの針や、メスを用いて皮膚表面から得られる血液量の検討を行った。また、畜産向け管理技術、特にセンサを用いた生産管理に関するヨーロッパの最新技術動向を畜産関連の国際会議（ドイツ、9 月）などで調査した。

(c) センサネットワークの動作検証試験

【富士通株式会社】

ユーザヒアリングなどから肉牛・乳牛に適したホルモンセンサ運用要件を検討した。

この要件を満たす、牛個体に装着したセンサから得られる情報を低消費電力で集約可能

な使用周波数帯、データ速度、データ形式、通信プロトコルを検討、調査した。

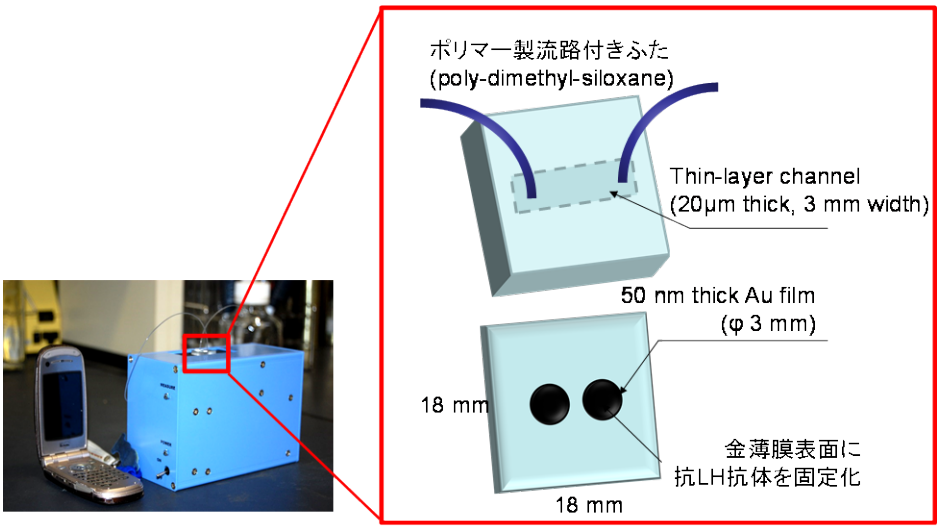
②-(2)-2　ホルモン検出デバイスの設計

【独立行政法人産業技術総合研究所バイオメディカル研究部門】

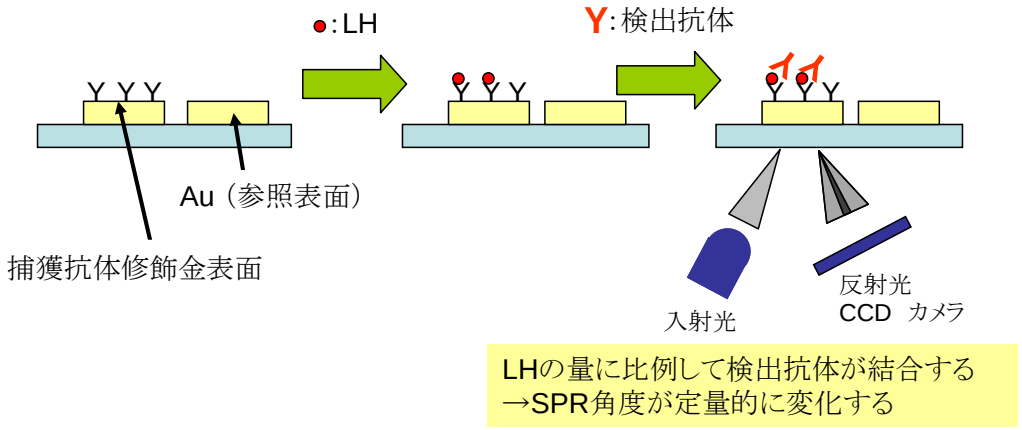
②-(2)-2-1　表面プラズモン共鳴法に基づくホルモン検出デバイスの設計・試作

小型簡便なホルモンセンサの設計は、蛍光や発光試薬で標識する必要がない表面プラズモン共鳴(SPR)を検出器に用い、これに抗原抗体反応によるホルモン捕集を微少量で行うためにマイクロ流路を組み合わせる方式とした。まず、SPR 検出器に関して、従来のビアコアシステムに代表される生体分子の結合ー解離を評価するための SPR 装置は、極めて精密な測定が可能であるが、サイズが 1m 前後と大きく、畜産関係の現場での測定には不向きである。そこで、報告者らが過去に開発したハンディ型の SPR 装置をベースとして、図②-(2)-2-1.1 に示す小型 SPR 装置を用いた。図の検出器は、重さ 1kg 以下、電源もバッテリ駆動が可能なため、電源のない場所でも使用が可能である。

次に牛からの採血量は、多くても数十マイクロリットルレベルの微少量と予想されるため、図②-(2)-2-1.1 に示すマイクロ流路中にホルモンを捕集する抗体を固定化し、微量なサンプルを流すことによりホルモンを抗体で捕捉し、SPR 法で検出することとした。図②-(2)-2-1.2 に原理を示す。マイクロ流路は成形が容易な PDMS により作製した。ターゲットとなる牛黄体形成ホルモンであるが、先導研究の期間と費用で、結合力の強い（解離常数が小さい）牛黄体形成ホルモン用のモノクロナール抗体を開発するのは、極めて困難なため、市販品が簡単に購入できる人黄体形成ホルモン抗体を代わりに用いて実証実験を行うこととした。



図②-(2)-2-1.1　表面プラズモン共鳴装置とセンサーチップ（マイクロ流路）



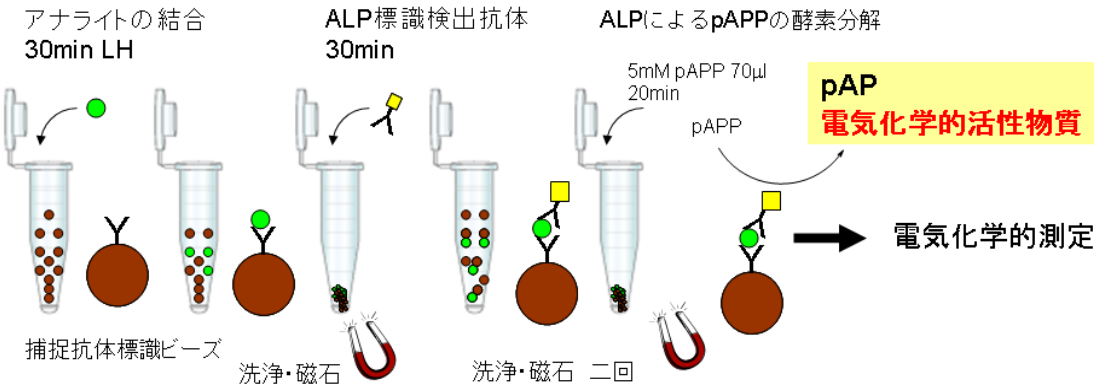
図②-(2)-2-1.2　SPR による LH タンパク測定の原理

②-(2)-2-2　電気化学的手法に基づくホルモン検出デバイスの設計・試作

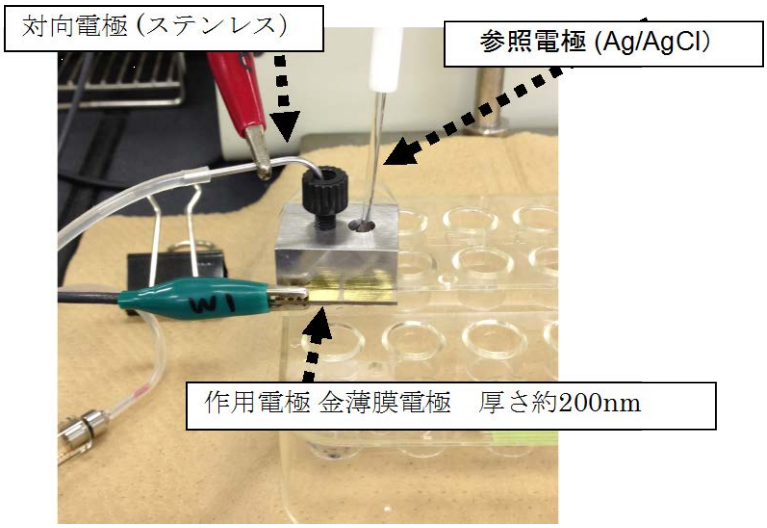
ホルモンセンサの小型化に利用可能な検出法として、SPR 法以外に電気化学検出法を挙げることができる。電気化学法の測定器は、家庭用の血糖センサなどの分野で極めて小型なものが開発されているため、潜在的に本プロジェクトのセンサ候補として本プロジェクトで検討に値する。よって、SPR 法と合せてセンサの設計試作を行った。ホルモンを電気化学法で検出する際に、その濃度が血糖などに比べてかなり低いことが挙げられる。そのため、ホルモンを抗体で捕捉した後、酵素を修飾した 2 次抗体で標識し、酵素と反応する試薬（基質）を加えて、酵素反応により電気化学的に容易に酸化可能な分子を大量に生成させて検出を行うことで信号の増幅を行った。その原理を図②-(2)-2-2.1 に示す。抗原抗体反応により、ホルモンを捕捉した後、酵素（アルカリフォスファターゼ）を結合した 2

次抗体を加えて、捕捉されたホルモンを酵素標識する。その後、酵素の基質であるパラアミノフェニルフォスフェート(PAPP)を加えると、酵素反応により分解され、パラアミノフェノール(PAP)が生成する。PAP は、PAPP に比べてより低い電位で酸化検出が可能であるため、PAP の量を定量することで、ホルモンの量を知ることが可能である。

上記の反応を微少量の試料で行うため図②-(2)-2-2.2 に示す測定用電極を集積化したステンレスを用いてマイクロ流路（マイクロ電気化学セル）を設計・試作した。図中、薄膜作用電極をガラス上に形成し、参照電極を上から挿入し、対向電極として流路の蓋を兼ねたステンレス製の板を用いて測定用の微少量電気化学セルを実現した。



図②-(2)-2-2.1　測定原理（前処理）



図②-(2)-2-2.2　マイクロ電気化学セル

②-(2)-2-3　前処理方法の検討

②-(2)-2-3-1　ポンプシステムを用いた前処理のオートメーション化

ホルモンセンサのプロトコルは、試料中のホルモンと抗体の抗原抗体反応、洗浄、2 次抗体との反応、基質溶液の導入など 4～5 段階の工程が必要になる。そこで、シークエンシャルに試料や洗浄溶液、基質溶液を連続的に導入できるアレイ型のポンプを試作し、ホルモンの免疫測定の自動化を検討した。3 つのポンプを順に使うことで、SPR 検出によるホルモン測定の実証に成功した。しかし、実際の試料量に比べて、先導研究で行える試作には時間的費用的な制限があり、実際の現場で使うには更なる送液量が少ないポンプの試作が必要であることが分かった。

②-(2)-2-3-2　前処理方法の調査

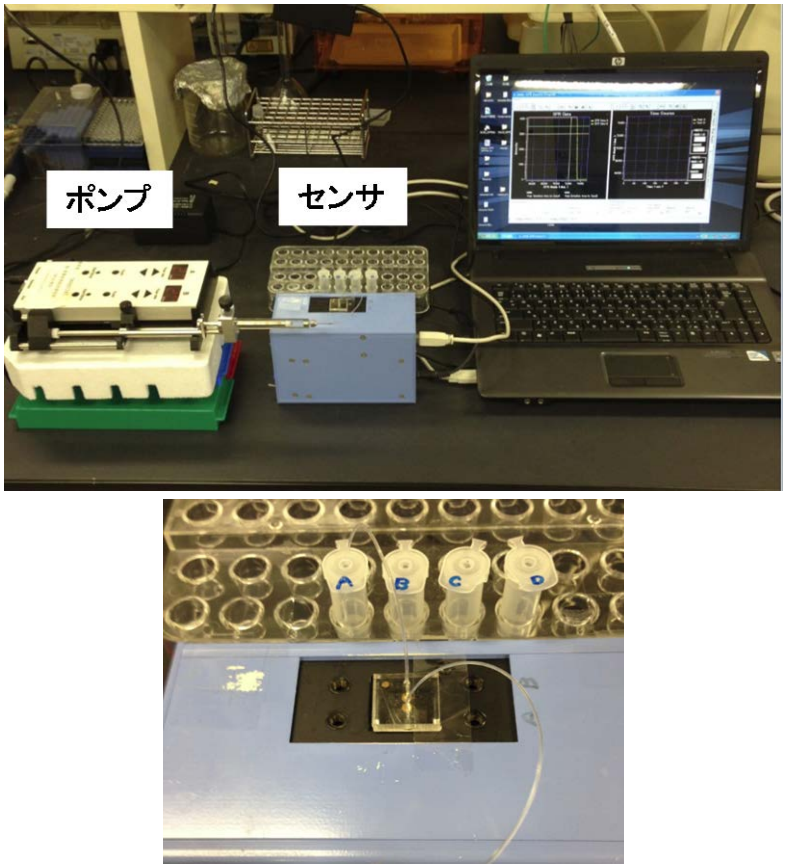
前処理法として、②-(2)-2-3-1 のポンプを使用する方式を実証したが、現場での使用に対応した装置にするには、本格研究でポンプの、極微量化が必要であることが分かった。そこで、より簡便な方法としてポンプレスの送液方法を調査した。ポンプレスで駆動するマイクロ流路としては、PDMS の酸素の吸収を利用した液の吸引による送液 [1)]やキャピラリーフォースを用いたもの [2)]が知られており、ホルモンセンサの様な抗原抗体反応を用いたセンサにも利用可能であると考えられる。実用化されているものでは、インフルエンザ検査や妊娠検査に用いられているイムノクロマトグラフィが知られている。これは紙をベースとするチップであるが、現在は、抗原抗体反応に伴う金粒子の凝集を光学的（主に目視）に測定しているため、今回の牛ホルモンセンサでは、より定量測定が可能な検出器の利用が必要で、今回先導研究で検討した電気化学検出器などの集積化によりホルモンセンサに必要な感度と検出限界が達成可能であることが予想される。

②-(2)-3　ホルモン検出デバイスの動作検証

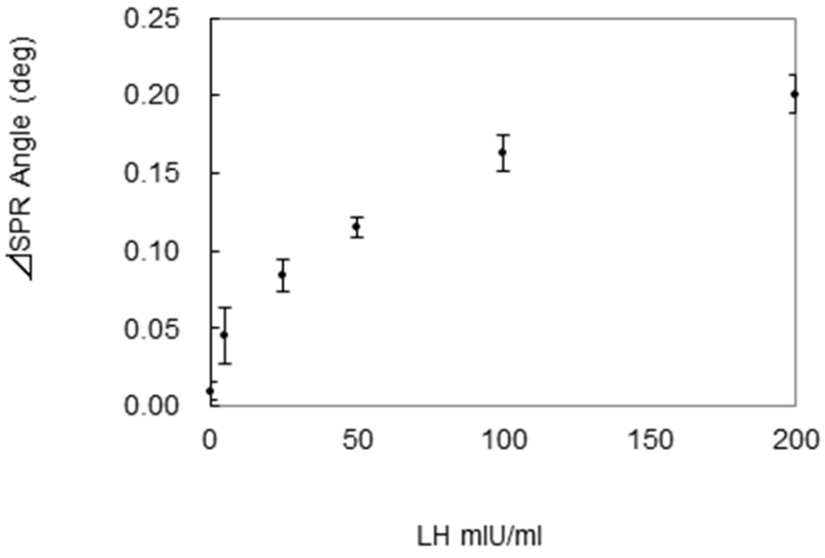
【独立行政法人産業技術総合研究所生産計測技術研究センター】

②-(2)-3-1　表面プラズモン共鳴式ホルモンセンサの動作検証

図②-(2)-3-1.1 にホルモンセンサの SPR 測定の評価系の写真を示す。マイクロシリンジポンプを用いて、それぞれの溶液を流速 0.2μl/min で吸引しながら測定を行った。LH 濃度と SPR 応答（SPR 角の変化）の間に図②-(2)-3-1.2 の様な相関関係が得られた。ホルモンの測定可能範囲は：5～200 mIU/ml、検出限界：5mIU/ml で、誤差もかなり小さいことが分かった。また、測定時間も 15～30 分と免疫反応を利用したセンサとしては、短い時間での測定が可能なことが分かった。



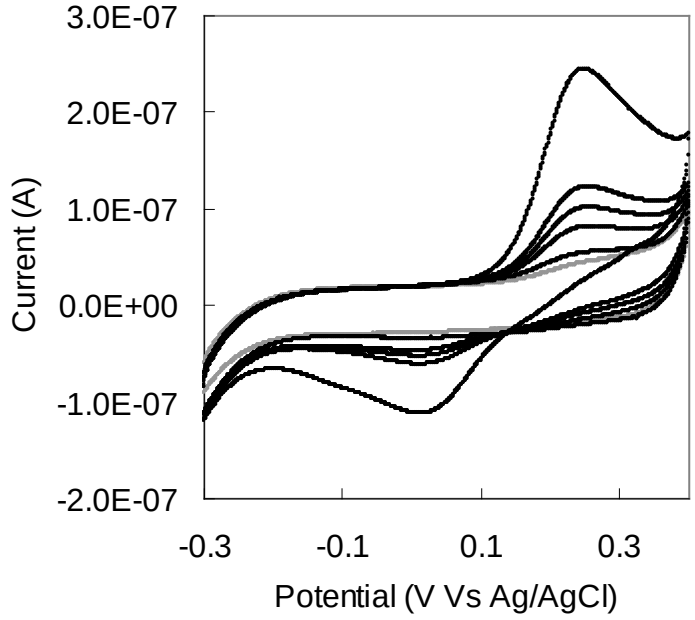
図②-(2)-3-1.1　SPR 測定の評価系と拡大図



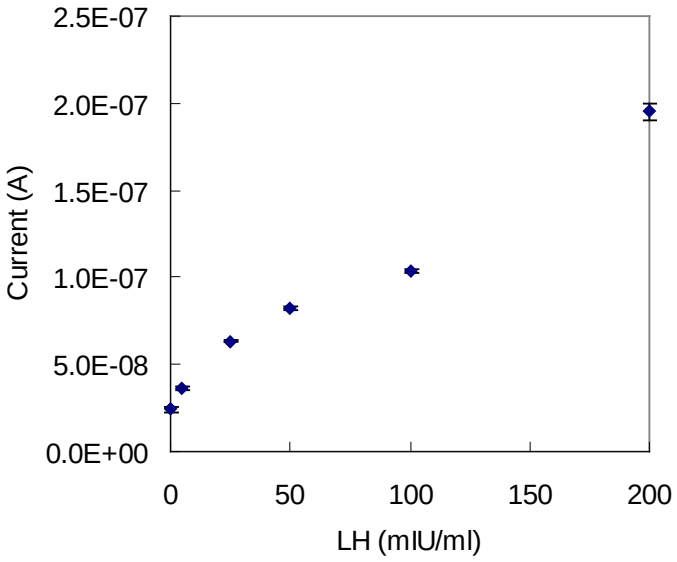
図②-(2)-3-1.2　SPR 測定の検量線

②-(2)-3-2　電気化学式ホルモンセンサの動作検証

電気化学法は、電極の生体物質の汚染を防ぐため前処理が必要なため、ビーズに抗体を固定化し、ホルモンを捕捉した後、酵素を標識した 2 次抗体を結合させた後、酵素と反応する PAPP 試薬を加え、酵素反応で生成した PAP を図②-(2)-2-2.2 に示したようにマイクロ電気化学セルで測定した。以上の反応プロセスは、図②-(2)-2-2.1 に既に示した。マイクロ電気化学セルの作用電極の電位を正側に掃引すると図②-(2)-3-2.1 の様にホルモンの量に比例して酸化ピークが増加した。0.25 V(vs. Ag/AgCl) 付近の酸化ピーク電流の大きさをホルモン濃度に対してプロットすると図②-(2)-3-2.2 のような関係が得られた。ホルモンの測定可能範囲は、5～200 mIU/ml、検出限界は 5mIU/ml であったが、前処理時間が必要なため、測定時間は、SPR 法の約 2 倍の時間（60 min）がかかった。検出感度と生体内ホルモンを測定するための濃度との関係は、②-(2)-3-3 で詳細に議論するが、結果的に SPR、電気化学共に微量で目的濃度のホルモンの計測が可能であることが示された。



図②-(2)-3-2.1 マイクロ電気化学セルのサイクリックボルタモグラム



図②-(2)-3-2.2　検量線(LH と電流値の関係)

②-(2)-3-3　2 方式のホルモンセンサの比較

表②-(2)-3-3.1 に人黄体形成ホルモンの濃度を示す。今回の目的では排卵期の濃度が問題となるが、卵胞期や黄体期での濃度が、0.5～10.5 mIU/ml と低いのに対して、排卵期の濃度は 18.4～61.2 mIU/ml とかなり高い。今回の検討では、SPR センサ、電気化学センサ共に測定可能範囲：5～200 mIU/ml、検出限界：5mIU/ml の性能が得られた。この性能は、排卵期のホルモン濃度を定量検出するために充分な測定濃度範囲と検出限界を有することが確認された。

一方、SPR 方式と電気化学方式の特性を比較した表を表②-(2)-3-3.2 に示す。電気化学方式は、前処理が必要なためトータルの分析時間は、SPR 法に比べて約 2 倍必要である。しかしながら、前処理デバイスは、先導研究の時間内では、本格的な検討は困難であることから市販の免疫測定用のデバイスを使って行った。微少量に対応した前処理装置の試作により電気化学法のトータルの分析時間は大幅に削減されると考えられる。さらに電気化学法はコスト面でも SPR 法に比較し低いため、今後より重点的に検討するべきと予想される。

表②-(2)-3-3.1 人黄体形成ホルモンの濃度

	黄体形成ホルモン（LH）
男性	0.7〜7.4 mIU/ml
女性（卵胞期）	0.5-10.5 mIU/ml
女性（排卵期）	18.4-61.2 mIU/ml
女性（黄体期）	0.5-10.5 mIU/ml
女性（閉経期）	18.2-40.8 mIU/ml

表②-(2)-3-3.2　　２種類のセンサの比較

	SPR	電気化学
測定範囲	5〜200mIU/ml	5〜200mIU/ml
小型化	△ 光学系を用いるため	○ ポテンシオスタットの小型化が必要
再現性	△ 分散が大きい	○ 分散が非常に小さい
免疫反応	センサ表面での免疫反応 必要な液を順番に流すだけ	先に免疫反応をさせ、反応後の溶液を流す 反応場と測定場を分ける必要がある
簡便性	○ 流路に流すだけ	△ 血液サンプルの前処理が必要
前処理時間	10min	60min
測定時間	15~30min	2min

②-(2)-3-4　採血方式の検討

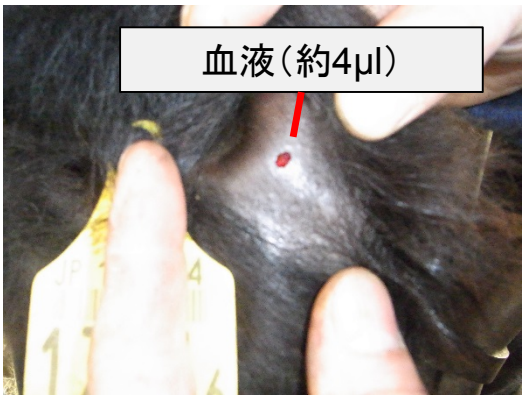
簡便に牛の血液検査を行うには皮膚表面から十分量の血液を採血できるようにする必要がある。一般的には牛をスタンチオンに固定し、さらに、鼻輪に縄をかけて頭を動かせないようにし、頸静脈から採血を行ったり、尻尾の付け根の尾静脈から採血を行ったりする。しかしこれらの方法では、測定デバイスを小型化、簡便化しても測定自体が大変である。そこで、血液は皮膚表面から血管を狙ったりすることなく簡単に採血できるようにする必要がある。皮膚表面から効率良く血液を採取するには、実際に牛の皮膚表面から血液を採血している昆虫を参考にする必要がある。その代表的な昆虫には刺しバエとアブが挙げられる。刺しバエは皮膚表面に針を刺し、毛細血管を探し、血液をゆっくりと吸引する。その量は 10μl 以下である。この刺しバエ式の方法では期待できる採血量が少ないことに

加えて、同じメカニズムを再現しようとすると、小さな毛細血管を見つけるシステムや、そこへ自動で針を刺すシステムを組み込む必要があり、現時点では現実的では無い。一方で、アブは皮膚を切り裂くことで染み出してきた血液を吸引している。その量は 100μl 以上と言われている。このアブ式の方法であれば特別に一本の毛細血管を狙う必要が無く、簡単に皮膚表面から採血できる可能性がある。

日本ベクトンディッキンソン社製のマイクロティナクイックヒールランセットを用いて採血を試みた。このクイックヒールランセットは一般的な無痛針と異なり、穿刺部がカッターのようになっており、刺すというよりも切るという方法で採血をすることができる。このクイックヒールランセットは深さ 1.0mm、幅 2.5mm である。採血部位は腰、背中、耳とした。採血結果を表②-(2)-3-4.1 に示す。皮膚の厚い腰や背中ではクイックヒールランセットを穿刺しても、傷口はできるが、血液が出てくることは無かった。皮膚の薄い耳ではクイックヒールランセットを穿刺すると図②-(2)-3-4.1 の様に血液が染み出てきたが、得られた血液量は約 4μl と少なかった。

表②-(2)-3-4.1　クイックヒールランセット穿刺結果

部位	血液量	備考
腰	採血不可	血液は非常に少ない
背中	採血不可	血液は非常に少ない
耳	5μl以下	少しだけ採血可能



図②-(2)-3-4.1　耳に穿刺時の血液

クイックヒールランセットは深さ 1mm までの物しかなかったため、より深く穿刺するために図②-(2)-3-4.2 に示したようにメスを鉗子で挟み、深さを固定した。メスは深さを変

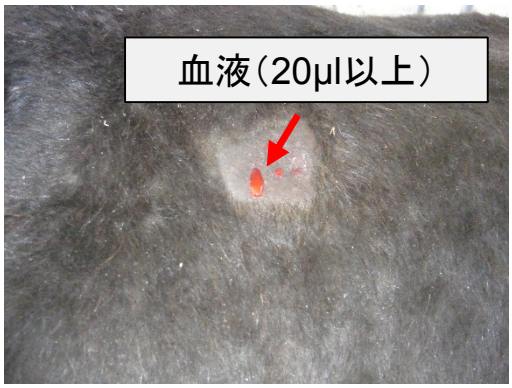
えると刃の幅が変わるため、その関係を表②-(2)-3-4.2 に示す。この深さを固定したメスを用いて腰や背中などの皮膚の厚い部分に深さ 2～4mm で穿刺を行った。メスで穿刺した結果としては、図②-(2)-3-4.3 に示すように深さが 2mm 以上であれば 20μl 以上の採血が可能であった。しかし、どの深さで刺しても 20μl 以上血液が採取できる時と、少しも血液が出てこない時があった。深さが深くなるほどその確率は良くなったが、4mm 穿刺した際は牛が少し痛がることがあった。牛への負担を減らすためには深さ 3～4mm の範囲で穿刺することが望ましい。その中で採血量を増やすためには、幅を大きくするか、刃の側面に溝をつけることで毛細管力によって血液を吸いあげて効率良く回収するなどの工夫をする必要がある。

表②-(2)-3-4.2　穿刺したメスの深さと幅

深さ(mm)	幅(mm)
2	1
3	1.5
4	2



図②-(2)-3-4.2　鉗子で深さを固定したメス



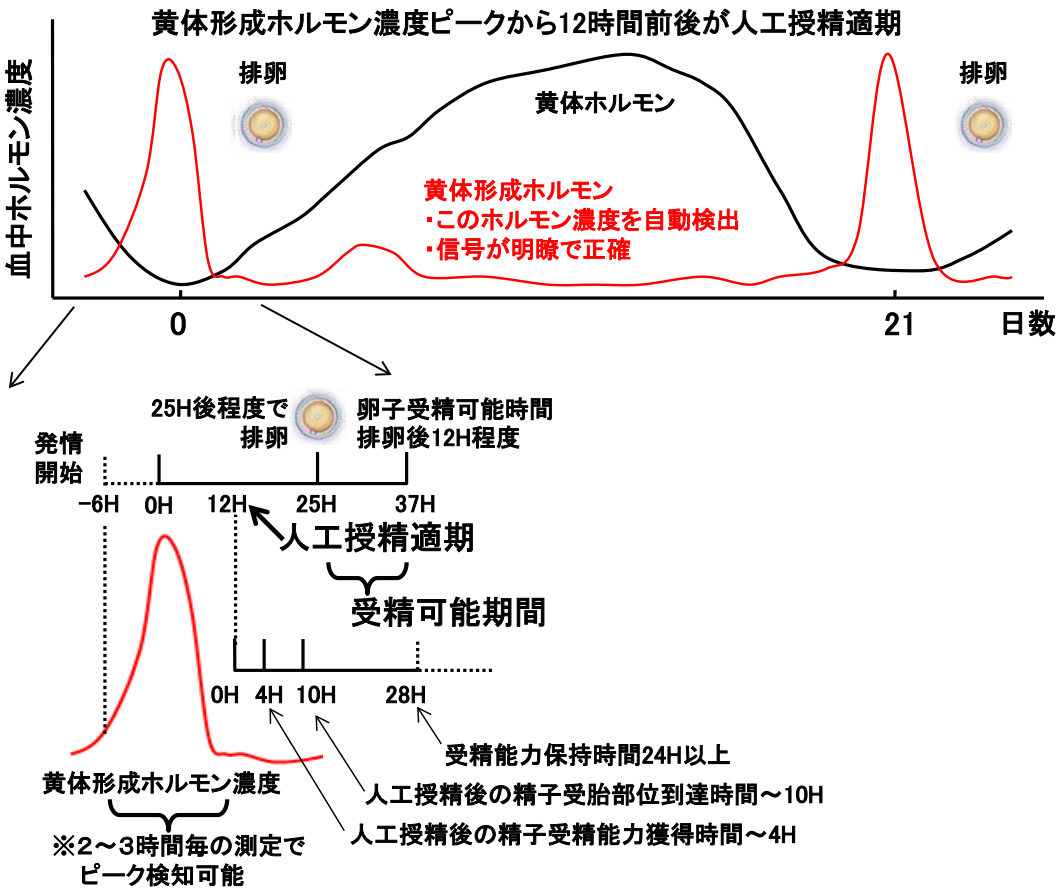
図②-(2)-3-4.3　深さ 2mm 穿刺時の血液

②-(2)-4　無線システムの動作検証

【富士通株式会社】

②-(2)-4-1　ホルモン濃度検出間隔の検討

図②-(2)-4-1.1 に牛の人工授精のタイムチャートを示す。発情開始から 6 時間程度で血中の黄体形成ホルモン濃度がピークとなる。排卵と卵子が受精できる時間、人工授精した精子が受精能力を獲得し受精部位に到達する時間から、濃度ピークより 12 時間後程度が人工授精の適期である。このタイムチャートから、人口受精の適期を予測するには、2～3 時間毎の黄体形成ホルモン濃度測定でピークを捉える必要がある。

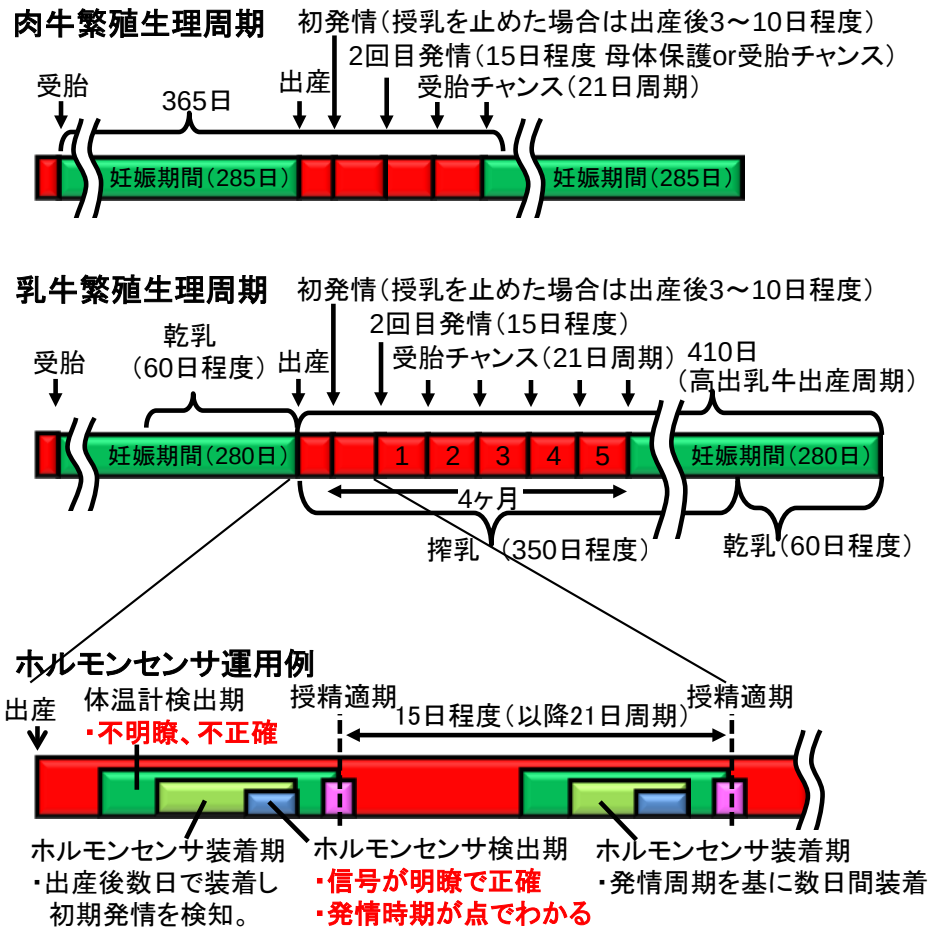


図②-(2)-4-1.1　牛の人工授精タイムチャート

②-(2)-4-2　ホルモン濃度検出期間の検討

図②-(2)-4-2.1 に牛の繁殖生理とホルモンセンサ運用例を示す。肉牛で年 1 産を実現するためには、出産後の初発情から 3 回目までの発情で受胎させる必要がある。乳牛では搾乳期間によって、初発情から 6 回目までの受胎が必要となる。これらから、無線部は連続で動作させた場合でも最大で 10 日＋15 日＋21 日×5＝230 日、4 ヶ月程度の運用期間があれば十分である。

また、ホルモンセンサは出産後数日後から初発情を捉えるまでの期間、初発情からの発情周期を基に発情が予想される時期の数日間に装着する運用が考えられる。



図②-(2)-4-2.1　牛の繁殖生理とホルモンセンサ運用例

②-(2)-4-3　無線部要件の検討

②-(2)-4-3-1　無線方式の検討

数百～数千頭の牛に無線機を装着することを考え、回線使用料及び免許が不要である特定小電力無線の使用を検討した。表②-(2)-4-3-1.1 に検討した特定小電力無線（テレメータ用）の仕様一覧を示す。

表②-(2)-4-3-1.1　特定小電力無線（テレメータ用）の仕様一覧

周波数	空中線電力	占有周波数帯幅の許容値	規格	
315MHz帯	25uW以下	1MHz	ARIB STD-T93	
426MHz帯	1mW	8.5kHz，16kHz	ARIB STD-T67	
429～469MHz帯	10mW	8.5kHz	ARIB STD-T67	今回の研究に使用
920MHz	10mW～20mW	200kHz～1MHz	ARIB STD-T108	
1200MHz帯	10mW	16kHz，32kHz	ARIB STD-T67	

今回の検証には、以下の理由から 429MHz 帯を選択した。

・空中線電力が 10mW と大きい。

・電波伝搬損失

伝搬損失∝ [(4×π×距離× f ）／c]^{n}　　f ：周波数　c ：光速　n ：2 以上

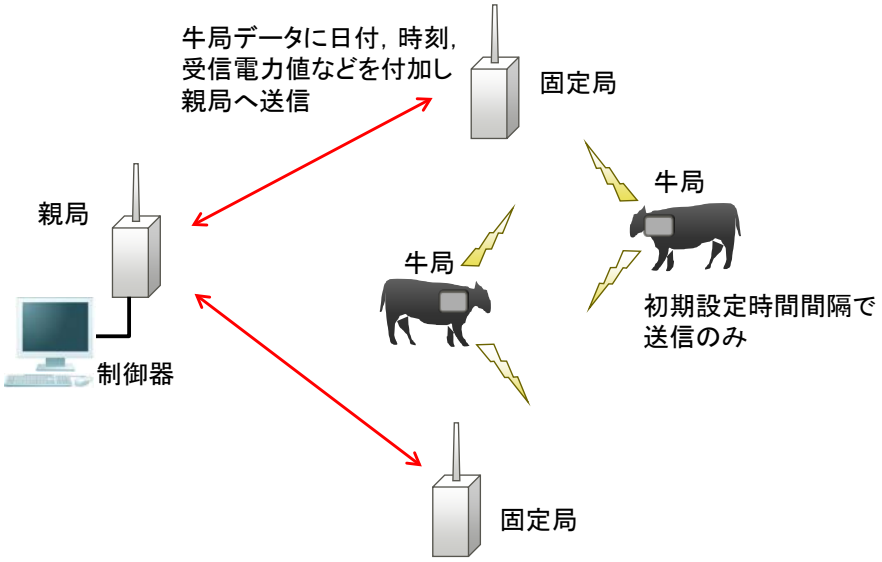
（伝搬損失は周波数の n 乗に比例して大きくなる）

周波数が低く伝搬損失が小さい。

・ホルモンセンサでは濃度値もしくは高濃度 or 低濃度の 2 値とデータ量が小さく狭い帯域で通信が可能。雑音帯域も狭くできる（雑音量が小さい）。

②-(2)-4-3-2　無線機構成と通信方式の検討

図②-(2)-4-3-2.1 に検討した無線システムの無線機構成と通信方式を示す。



図②-(2)-4-3-2.1 無線システムの無線機構成と通信方式

牛に装着する無線機、牛局を省電力にできるよう、データ収集する親局と直接通信ではなく、近くに配した固定局を介してデータ収集する構成とした。牛局は初期に設定した時間間隔で送信のみを行い、日付、時刻、受信電力値などの情報は固定局が付加して親局に送信する。大型のバッテリや太陽電池パネルで構成できる固定局に必要な機能を集約する方式とした。

②-(2)-4-3-3　データフォーマットの検討

図②-(2)-4-3-3.1 に検討した牛局の送信データフォーマットを示す。省電力化のため極力、必要最小限のデータ量となるよう、制御領域に 2Byte、フレキシブルなデータ領域に 8Byte、

温度データと電池電圧データを固定としてそれぞれ 2Byte と 1Byte を割り当てた。

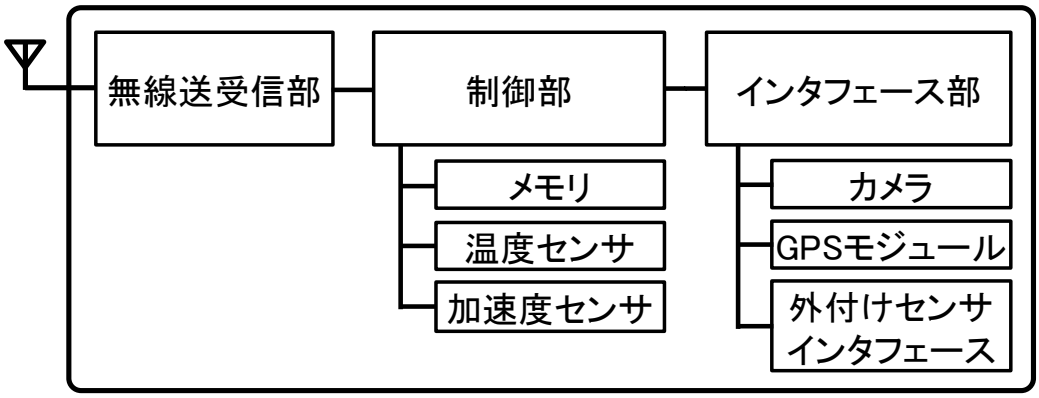
14Byte				
2Byte	8Byte	2Byte	1Byte	1Byte
制御領域	Data領域	温度データ	電池電圧	送信番号

図②-(2)-4-3-3.1 牛局のデータフォーマット

②-(2)-4-4　無線機の評価

②-(2)-4-4-1　無線機の構成

前項で検討した要件を満たす、富士通製無線機の構成を図②-(2)-4-4-1.1 に示す。無線信号を送受信する無線送受信部、全体を制御する制御部、センサなどと制御部を接続するインタフェース部からなる。制御部にはソフトウェアや取得したデータを格納するメモリの他、温度センサと加速度センサを直接接続している。ただし、小型化のため、牛局用無線機には、カメラ、加速度センサなどは備えていない。



図②-(2)-4-4-1.1　無線機の構成

②-(2)-4-4-2　無線機放射パターンの評価

図②-(2)-4-4-2.1 に親局／固定局用無線機と牛局用小型無線機の外観を示す。牛局は牛への装着負担を低減するためベルトで首にぶら下げるタイプのものとしたが、無線機の近傍に牛の体があるため無線信号の放射特性が劣化する。牛の体を食塩水で模擬し、電波暗室で放射パターンを測定した様子を図②-(2)-4-4-2.2 にその結果を図②-(2)-4-4-2.3 に示す。固定局の放射パターンでは全方位に等方に放射されているが、牛局では 10～15dB 程度の劣化となっている。フィールドでの検証では固定局の配置などで補償する。



(a)親局／固定局用無線機

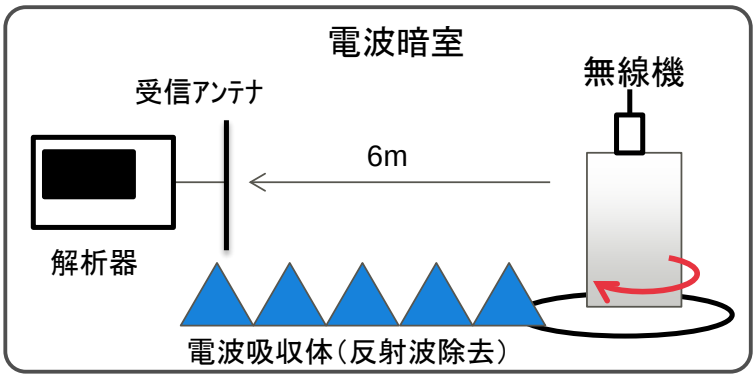
サイズ；23cm×10cm×7cm

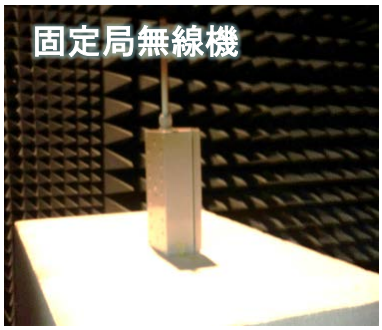


(b)牛局用無線機

サイズ：20cm×8cm×4cm

図②-(2)-4-4-2.1　無線機の外観

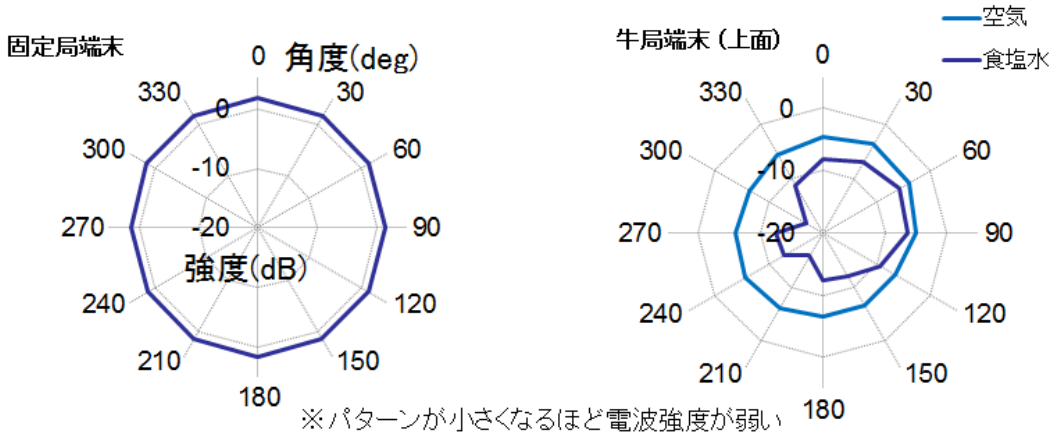








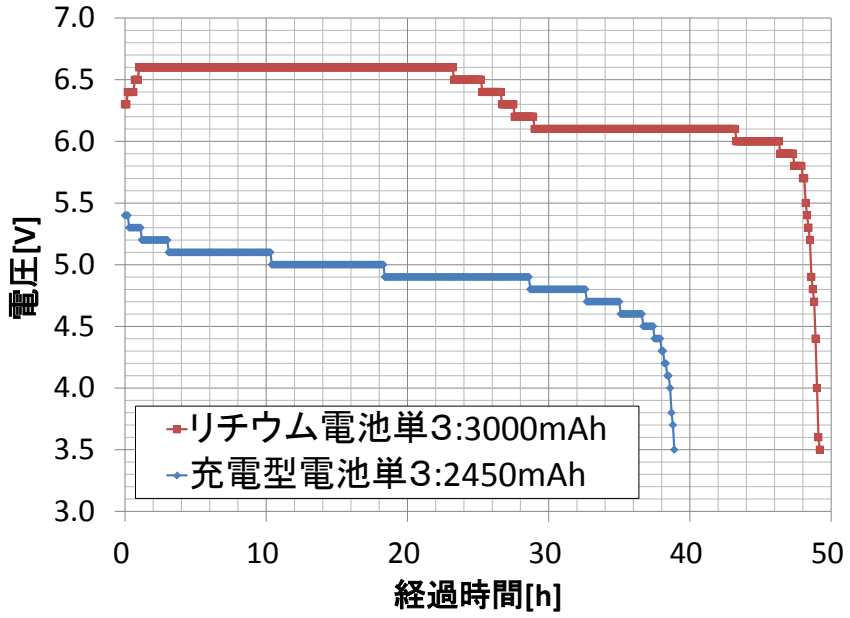
図②-(2)-4-4-2.2　無線機の放射パターン測定の様子



図②-(2)-4-4-2.3　無線機の放射パターン測定結果

②-(2)-4-4-3　無線機消費電流の評価

図②-(2)-4-4-3.1 に無線機消費電流の評価結果を示す。



図②-(2)-4-4-3.1　無線機消費電力の評価結果

電流消費を加速するため、無線部の受信機能、制御部、インタフェース部を常時稼働、消費電流の多いカメラ機能を 6 分毎に稼働するなどして 1 時間あたり 63.6mA の電流を消費させて評価を行った。各機能の消費電流は個々の機能を個別に動作させて電流を測定し、確認したものである。

リチュウム電池単 3 電流容量 3000mAh／63.6mA＝47h

充電型電池単 3 電流容量 2450mAh／63.6mA＝38.5h

図②-(2)-4-4-3.1 から分かるように上記の電池寿命の計算値とほぼ一致する評価結果が得られた。これにより、各機能の消費電流と駆動時間から電池寿命を正しく見積れることが分かった。

②-(2)-4-5　無線システムの評価

九州大学久住実験農場にて、牛 2 頭に牛局を装着し無線システムのデータ収集性能評価を行った。

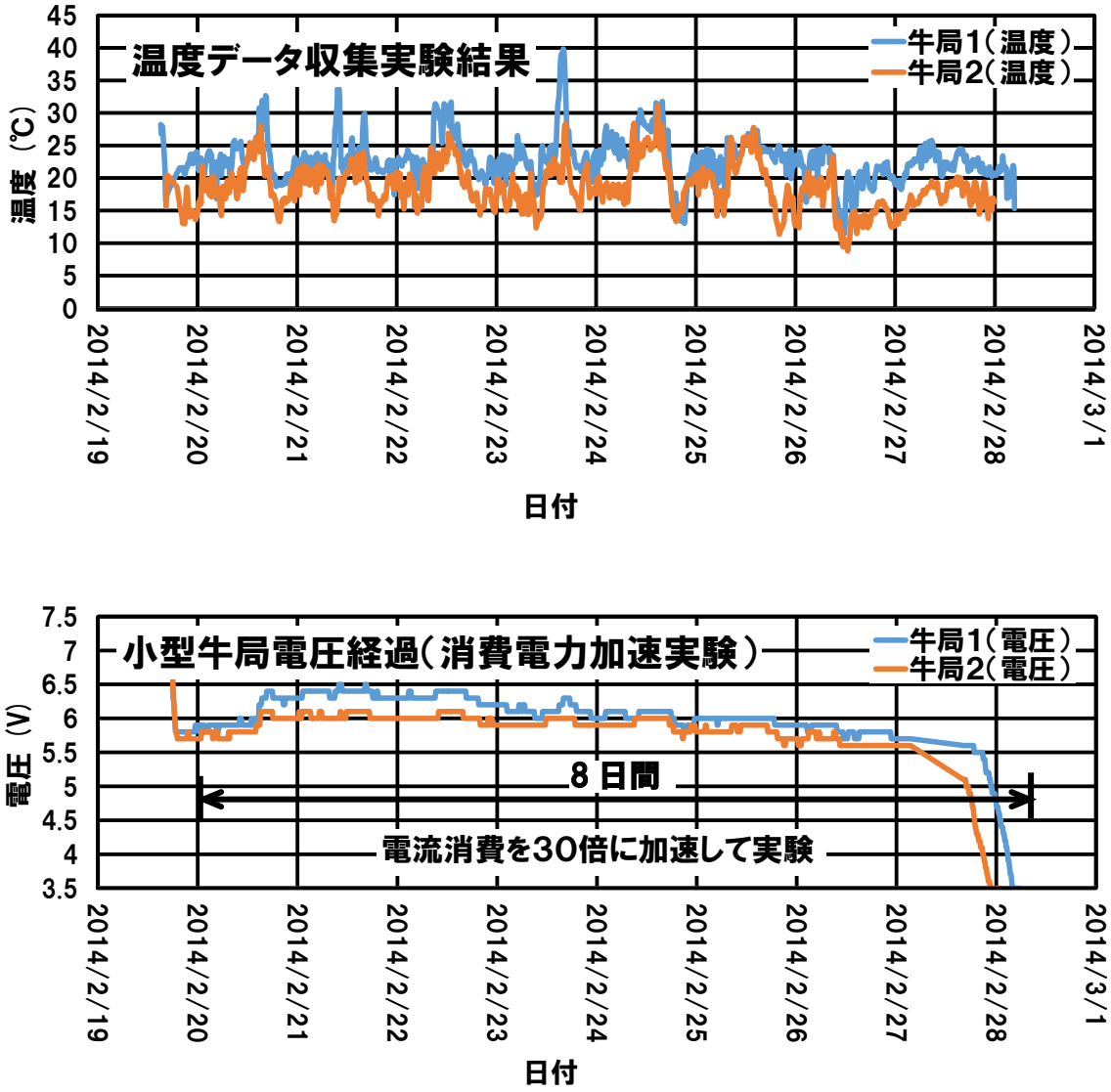
図②-(2)-4-5.1 に無線機の配置を示す。放牧エリアに 2 台の固定局を配置し、牛局からの信号を受信する。固定局と牛局間の最大距離は 300m 程度となる。牛局は小型化のためリチウム単 4 電池駆動、固定局は太陽電池パネルとバッテリにより永続駆動、親局は施設舎にて商用電源駆動とした。



図②-(2)-4-5.1　無線システムのデータ収集性能評価での無線機配置

図②-(2)-4-5.2 に無線システムのデータ収集性能評価結果を示す。ホルモン濃度検出間隔の検討で示した通り、ホルモン濃度の変化は時間オーダであり、無線システムとしてはそれに十分な 10 分毎に、ホルモンセンサデータを模擬する無線機に搭載した温度センサデータを取得して無線システムの動作検証を行った。8 日間の測定で欠損なくデータを収集す

ることができた。



図②-(2)-4-5.2　無線システムのデータ収集性能評価結果

また、今回の評価では実フィールドでの稼働時間を検証するため、制御部を 10 分毎に 1 分間駆動、消費電流の多いGPS測位機能を稼働するなどして消費電流を1日あたり 124mAh と加速させて電池寿命を評価した。この条件下で 8 日間の稼働となった。実際の運用では 10 分毎に 1 秒のデータ送信で 1 日あたりの消費電流は 4mAh とできるため、30 倍（＝124mAh/4mAh）の 8 ヶ月間の稼働となる。ホルモン濃度検出期間の検討で示した 4 ヶ月に十分な稼働時間が得られることが分かった。

②-(2)-5　学会調査

【独立行政法人産業技術総合研究所生産計測技術研究センター】

11th International Conference of Construction, Engineering and Environment in Livestock Farming（BTU2013）に出席し、ICT 牧場における最新技術・動向の調査を行った。

BTU2013 は鶏、豚、牛に関する発表が満遍なく発表されていた。その中でも畜舎内の環境管理や、排ガスなどの空調に関する発表が多かった。家畜の個体管理に関しては、基本的に畜舎内での管理が主であり、放牧中の牛の個体管理や健康管理に関する試みは少なかった。また、健康管理方法については位置情報やカメラによる行動観察で体調を評価するといった試みが多く、体温測定を行っている研究は少なかった。体温は測定しないのかとの質問には「体温は測定したほうがいいが、難しいからやらない」と答えていた。このことから、技術的な問題解決よりも使える技術でどれだけ実用化できるかということに力を入れているという印象を受けた。

畜舎外での測定については、アルプスにおける放牧牛の測位に関する研究があった。アルプスでは 1 日 1 度放牧牛を目視することが義務付けられており、広い放牧地で牛を見つけるのが大変である。一方で、アルプスにはアンテナの基地局を設置することが許可されていない。そこで GPS による放牧牛の測位を試みていた。GPS は消費電力が大きく、2 週間程度しか電池が持たないということで問題を抱えていた。

テクニカルツアーでは農業機械メーカーを訪問した。豚の個体管理システムでは、体温測定や給餌のみでなく、妊娠診断や体重測定による出棺判定までを自動で行えるような装置となっていた。それらの個体情報は畜舎内の環境管理と合わせてすべて ICT で管理できるようになっていた。妊娠診断は装置内に入った豚に機械式のアームが胴体に巻き付くように固定され、アームに内蔵された超音波診断装置により妊娠の診断をするシステムであった。これらの製品は人手のかからない様な工場型の生産システムを実現できるものとなっていた。

②-(2)-6　ユーザ機関による成果の有効性の検証

【富士通株式会社】

受胎適期を検知するホルモンセンサを含め、畜産・酪農の研究現場や農家など国内 10 箇所（図②-(2)-6.1）のヒアリングを行い、ユーザニーズの調査を行った。以下に主なヒアリング内容を示し、それらをまとめる。



図②-(2)-6.1　国内ユーザヒアリング先

②-(2)-6-1　ユーザヒアリング結果

（１）東北地方精液生産農家（種雄牛 7 頭の飼育の他、20 頭規模の不妊母牛治療）

・発情の見える化で農家は見守りストレスから解放される。

・効率良い繁殖のため、出産後の初発情を検知して発情周期を早期に捉えたい。

・受胎に失敗した場合も授精時期が正しければ農家の納得が得られる。

・母牛の 1 割は不妊である。環境ストレスや太り過ぎなどが原因と考えられる。不妊治療にセンサを活用したい。

・ 繁殖農家の多い拠点毎にホルモンセンサを活用した治療センターがあると良い。不妊母牛 6.2 万頭=62 万頭×10%

・ 繁殖は種付け、分娩、子牛飼育と作業負担が大きいため 50 頭／人程度が飼育の限界。肥育農家では 300 頭／人程度。

（２）東北地方大学研究機関（繁殖雌牛と子牛で 80 頭規模を飼育）

・ホルモンセンサは研究者にとっても有用なツールである。人工授精のみならず、受精　　卵移植、疾病検出などに活用できる。

・出産後の初発情は無発情排卵など発見困難な場合が多い。これを検知して発情周期を早期に捉えたい。

・乳牛では乾乳期の飼育状態や分娩状態の影響で無発情排卵が生じるなど、発情が乱れやすい。

・ホルモンセンサなど ICT 機器を農家に使ってもらうためには農家が導入可能な費用や運用が必要である。

（３）関東地方自治体研究機関（乳牛 65 頭、肉牛 35 頭を飼育）

・分娩は昼夜、寒暖を問わず分娩監視は大きな負担となっている。分娩検知のため自前で温度センサを試作してみたが上手く測れなかった。体温センサが欲しい。

・市販されている、膣に挿入するタイプの体温計は費用が高く、一般農家では導入できない。農家が導入可能な費用や運用が必要である。

・年々の受胎率低下を実感している。温暖化による暑熱ストレスなどが言われているが原因は正直わからない。

・母牛 30 頭中の 9 頭が不妊治療中である。発情が見られないもの、発情があっても妊娠しないものなど症状は様々である。粗飼料給餌、放牧による運動、投薬などで治療している。

（４）関西地方肥育農家（肉用牛 1600 頭を肥育）

・子牛の病気としては肺炎が多く、10 ヶ月齢までに 5%、成績が良くても 2～3%は亡くなる。100 日までは毎日、直腸での体温測定を行っている。

・成牛の死亡率は 1%程度である。外から見て調子が悪いのが分かるようでは手遅れである。

・牛の病気に多い、肺炎や熱射病は体温から分かるので、損失削減に見合うリーズナブルな体温測定システムがあるならすぐにでも欲しい。

（５）離島の町役場（ブランド牛の畜産農家 50 軒を抱える）

・島内で放牧しているが、転落するなど毎年不明牛が出る。とにかく位置が知りたい。

・放牧地はあるが繁殖農家が増えないため、子牛の数が足りない。

（６）九州地方自治体の公共牧場（農家から 40 頭程度を預かり種付けと飼育）

・公共牧場では雌牛に種付けして農家に返すという役割があったが農家が減り有効に機能していない。

・農家の負担を減らすための公共牧場であるが補助金がないと採算が合わない。

（７）九州地方の地方自治体放牧研究機関（総面積 226ha で肉牛 110 頭を飼育）

・放牧中に流産して流産が分からないことがある。妊娠確認後、すぐに流産した場合、何ヶ月も空胎が分からず大きな損失となる。

・放牧中の行動を監視するなど飼養管理を省力化したい。

（８）九州地方飼料生産者（飼料生産と繁殖雌牛 31 頭を飼育）

・飼料栽培は酪農や畜産農家にとって大きな負担となっている。極力リーズナブルな飼料を提供し、農家の負担を減らしたい。

・飼料用トウモロコシの栽培が進まないのは、個人では作業負担が大きく多数の人員が必要で、収穫期も真夏で作業が過酷であるため。

・不妊牛はタイミングではなく体質と思われる。良い餌を与えれば改善する。

・病気、発情、分娩検知にやはり体温が知りたい。

・繁殖農家さんに、この年 1 産（365 日 1 産）を説明してもなかなか分かってもらえない。次の年のどこかで生まれれば年 1 産と思っている。

（９）北海道地方独立行政法人酪農研究機関（70 頭の乳牛を飼育）

・牛の健康管理は 30 日までの子牛の管理が 1 番重要だと考えている。下痢と呼吸器系の病気がほとんどである。下痢が起因で病気になることが多い。ホルスタイン子牛の 30 日までの死亡率は 16%である。

・初産できない乳牛が 19%、2 回目のお産ができない乳牛が 26%、1 頭の平均お産回数は 28 回である。主な要因は病気（成牛では足が多い）、種が付かない、成育不良、事故である。

・搾乳量は飼料と牛舎環境（温湿度、空気）の影響が大きいと考えている。

・搾乳量を維持しながら濃厚飼料と粗飼料の割合を 5 : 5→4 : 6→3 : 7 と濃厚飼料を減らせるような粗飼料（作物）を開発していきたい。

（１０）北海道農協肉牛生産センター（肉牛 1300 頭を肥育）

・ 従業員 5 名で 1300 頭を肥育している。小規模な農家に比べて 1 頭に掛ける手間が少なく、成牛販売価格の成績が良くない。

・あたりまえだが、いかに効率良く（低コストで）良い牛（高価格で売れる良質で大きな牛）を育てられるかが肥育農家の最大の課題である。

・交雑種Ｆ1（乳牛と黒毛和種）子牛の 100 日までの死亡率は 1%と成績が良い。子牛購入時の目利き大切だと思っている。

・子牛は下痢を契機に疾病するパターンが多く下痢の少ないミルクが欲しい。

②-(2)-6-2　ユーザヒアリング結果まとめ

以下にユーザヒアリング結果をまとめる。

・繁殖農家では発情検知、人工授精など種付け、分娩、死亡率の高い子牛育成と作業負担が大きく、飼養頭数が制限される。

・発情の見える化は受胎率向上による経営負担軽減の他、見守りストレスからの解放という効果も大きい。

受胎率 50%（平均授精回数 2 回） → 90%（平均授精回数 1.11 回）の場合の費用削減効果は 2 万円である。

2 万円/頭=精液代 1.2 万円×（2-1.11）+飼料代 500 円/日×21 日×（2-1.11）

※高級な精液でより効果大

・効率良い繁殖のため、出産後の初発情を検知して発情周期を早期に捉えたい。

・母牛の 1 割は不妊である。環境ストレスや太り過ぎなどが原因と考えられる。不妊治療にホルモンセンサを活用したい。

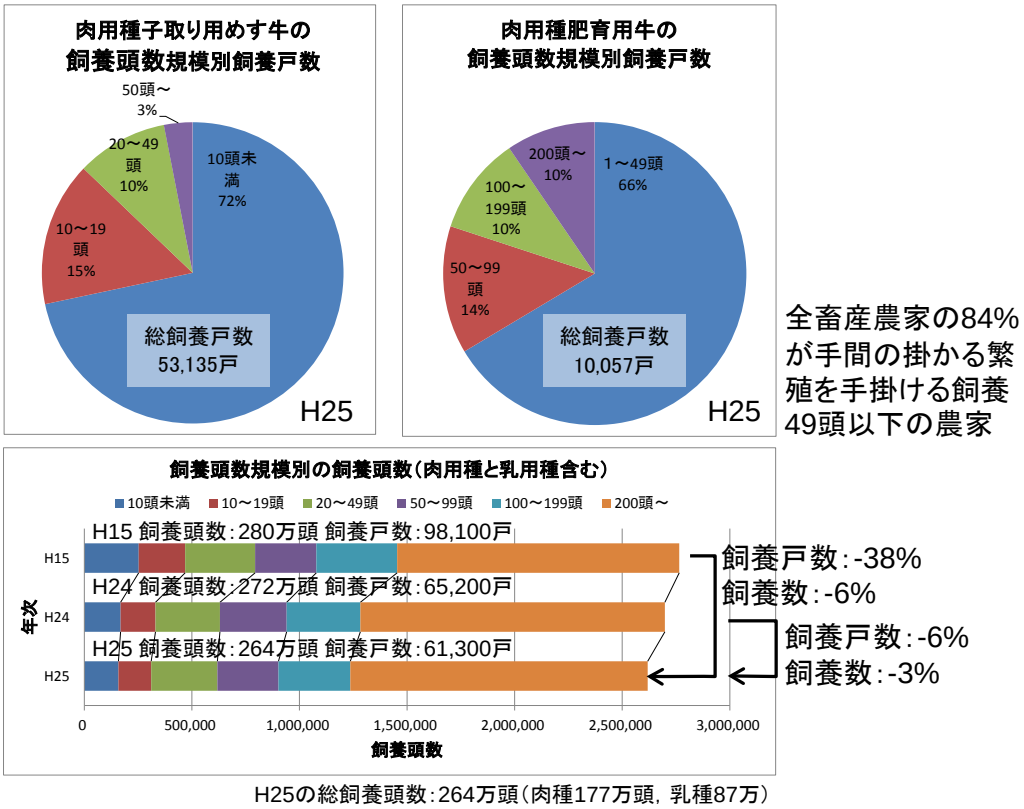
母牛の損失：73 万円=母牛代 94 万円（未経産）+人工授精 3 回費 4 万円+治療費 5 万円-売却代 30 万円

子牛 1 頭当たりの負担：8.1 万円=73 万円/90%　※子牛 1 頭分の利益に相当

・人工授精の他、受精卵移植、疾病検出、不妊早期発見などにホルモンセンサを活用したい。

・ホルモンセンサなど ICT 機器を農家に使ってもらうためには農家が導入可能な費用や運用が必要である。

合わせて、図②-(2)-6-2.1 に農林水産省畜産統計から調べた畜産農家の現状を示す。



H25の総飼養頭数：264万頭（肉種177万頭，乳種87万）

図②-(2)-6-2.1　畜産農家の現状　（農林水産省畜産統計より）

全畜産農家の 84%が手間の掛かる繁殖を手掛ける飼養頭数 49 頭以下の農家となっている。

また、平成 15 年から平成 25 年では飼養頭数が-6%にもかかわらず、農家戸数は-38%と激減している。繁殖農家の減少により子牛頭数も減少し子牛が高騰、また、ひいては食肉生産量の低下を招いている。

以上より、繁殖農家の作業を省力化するなど、子牛生産への支援が重要であると考える。受胎適期検知のためのホルモンセンサは、子牛生産への支援に有効なツールとなる。

②-(2)-7　まとめ

＜将来開発すべきセンサシステム像＞

本センサは農業の現場で働く人が使用することが前提である。そのため、測定に高度な技術、複数の手順が必要な作業は省く必要がある。そのため、本研究では本先導研究が始まった際に提案した図②-(2)-1.1 に示す装着型センサネットワークが開発すべきセンサシステム像であることは変わらない。一方で、ホルモンセンサに関しては、装着型でなくても現場で簡単に測定できるだけでも十分という意見もある。もちろん、全自動式の装着型でなければ LH サージのピークを見逃す可能性があるので装着型であることの方が好ましいが、技術課題を考えると、まずはバッチ式のセンサを開発し、そのシステムを装着型へと改良する方が好ましいと考えられる。

＜開発すべきセンサシステムの技術課題・開発内容と目標＞

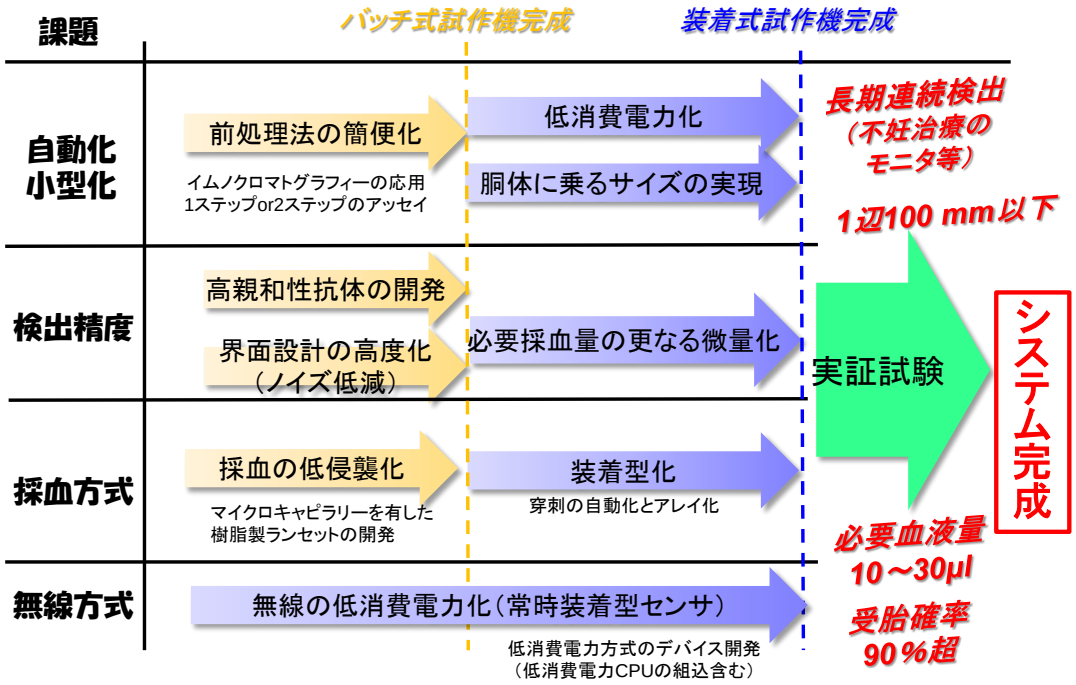
上記を踏まえたうえでの技術課題に対する開発内容を図②-(2)-7.1 に示す。主な課題としては①自動化、小型化、②検出精度、③採血方式、④無線方式がある。自動化、小型化については②-(2)-3 で考察したように前処理方法の簡便化を行う必要がある。イムノクロマトグラフィの様なポンプを用いない方式と本先導研究で検討した電気化学的手法の様な定量的な検査方法を集積化することで、1 ステップか 2 ステップの簡便な方法が実現できると考えられる。また、検出精度の向上については、ウシ LH 測定用の高親和性抗体を開発する必要がある。これにより検出精度が向上すれば、血液サンプルを薄めることが可能なので、必要な採血量を減らすことも可能である。採血方式については、②-(2)-3-4 で述べたように、刃の側面に溝をつけ、毛細管現象により血液を効率良く回収する様な機構を持った刃を開発する必要がある。また、刃を樹脂製にすることで、牛へ与える負荷を小さくすることができる。上述した開発内容をクリアすることで、農業従事者が現場で利用可能な

バッチ式のホルモンセンサを開発することができると考えている。そこから、システムの低消費電力化、集積化、無線の低消費電力化などを行うことで、ホルモンセンサの装着型化が期待できる。

＜開発されるセンサシステムを適用した場合に期待できる具体的効果、インパクト＞

本研究のセンサシステムが適用されると、発情の見逃しや、人工授精のタイミングのミスにより低かった 50%程度の受胎率を 90%まであげることが期待できる。これにより牛 1 頭の生産に対する餌代などの費用を減らすことが可能となり、農家の収入増加に繋がる。さらに、安定して牛を生産することが可能となり、農家にとっては計画生産をやりやすくなるので、経営を安定させることもできる。また、これらのシステムはセンサを装着するだけで良く、熟練度を必要としないので、農業従事者の見守りストレスからの解放や、新規就農の促進も期待できる。

本研究のホルモンセンサはホルモンのみでなく、家畜の疾病マーカーなどの様々な血中成分分析に応用が可能であり、家畜の健康管理全般に適用可能な技術である。また、本研究で将来的に開発するセンサネットワークシステムは、単に牛の繁殖や健康管理のみにとどまらず、馬や豚など多くの動物へ展開が可能な技術であり、さらには、ヒトの健康管理にも視野に入れた開発が可能である。このように、本センサシステムの発展性は非常に大



図②-(2)-7.1　技術課題に対する開発内容と目標

きい。

参考文献

1) Hideyuki Arata, Hiroshi Komatsu, Kazuo Hosokawa, Mizuo Maeda: “Rapid and Sensitive MicroRNA Detection with Laminar Flow-Assisted Dendritic Amplification on Power-Free Microfluidic Chip,” PLOS ONE, 7 (2012)
2) Zilin Chen, Katsuyoshi Hayashi, Yuzuru Iwasaki, Ryoji Kurita, Osamu Niwa, Kenji Sunaawa: “On-Line Monolithic Enzyme Reactor Fabricated by Sol-Gel Process for Elimination of Ascorbic Acid While Monitoring Dopamine,” Electroanalysis, 17, pp. 231 (2005)

②-(3)　センサ活用次世代健全肥育システムの開発

【独立行政法人産業技術総合研究所集積マイクロシステム研究センター、株式会社 CS ソリューション、再委託先：独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構動物衛生研究所】

②-(3)-1　研究の目的

＜社会課題＞

総合科学技術会議でも指摘されているように（「地域資源に関する集中会議」）、畜産業も地域の重要な基盤産業であるが、人口減少下での国内需要の低迷、従事者の高齢化などの課題を抱える一方で、国内外での食品の安全性への高まりから高い期待がかけられている。そして、海外に目を向けた強い畜産業の育成、働きやすく持続可能な畜産業の確立が重要であり、畜産業のスマート化、すなわち IT を農場に導入して、家畜に取り付けるセンサやカメラを設置してネットワーク化し、遠隔から管理・監視をして、品質・安全性と生産性を高めるシステムを構築することが必要である。そして、将来はグローバル化に対応して動物福祉に配慮した畜産ということも重要になってくる。

特に、乳用牛・肉用牛業を巡っては、国際貿易交渉の進展により、さらなる生産コスト低減あるいは高付加価値化への圧力が高まっているだけでなく、口蹄疫や鳥インフルエンザなどの伝染病の脅威の他、食品の安全・安心に対する消費者の意識が高まっており、これまで以上に安全・安心で、おいしい畜産物を低コストに生産・供給することが重要となっている。低コスト化については、生産の大規模化を進展させる必要があり、上述のようなスマート化は必須である。また、一方で我が国には未だ小規模の農家が多数を占めることも確かである。牛は高齢者でも飼養できるため“労働の貯金箱”とも呼ばれ、地域農業を支えているが、小規模であるため、死廃によるダメージは大規模農家とは比べ物にならない。つまり、小規模であっても大規模であっても、我が国の乳用牛・肉用牛業を維持・発展させていくためには、より細やかに牛の健康管理を行うためのシステムの導入が必要不可欠なのである。

肥育における健康管理で、まず重要なのは子牛の健康管理である。なぜなら、死廃による損失もさることながら、病気をした子牛は高い生産性あるいは付加価値を有する成牛に育つことは困難になるからである。しかし、農業災害補償制度家畜共済統計表（平成 21 年度）によると、子牛（乳用牛＋肉用牛）の死廃事故頭数（死亡）は約 12,400 頭、病傷事故件数（治療）は約 18 万件と年々増加しており、その主な原因はウイルス・細菌感染による下痢や肺炎である。また、成牛では濃厚飼料多給技術により肉用牛の成長を早め、乳用牛の乳量を大幅に高める一方で、牛の第一胃（ルーメン）内環境の恒常性に破綻（異常発酵）をきたすことが多く、ルーメンアシドーシス、鼓脹症、胃腸炎などの消化器病を中心

とした生産病と呼ばれる生産過剰に伴う疾病の増加を招き死廃頭数は年間十数万頭（乳用牛：94,829 頭・肉用牛：28,842 頭 ）に及び、生産者にとって大きなリスクとなっている。

つまり、我が国の乳用牛・肉用牛業において、死廃と病傷事故を最少化した健全肥育システムを実現するための喫緊の課題は、子牛のウイルス・細菌感染の予防・早期発見・診断と成牛の生産病罹患の早期発見であると言える。

＜現状の取り組みと課題＞

子牛の主な疾病の多くはウイルス感染・細菌感染による下痢や肺炎であり、その初期症状として発熱を伴う。このため子牛の疾病の早期発見には日常的な体温計測が不可欠であるが、農場における体温計測方法は動物用体温計を用いた直腸温度の計測が一般的であり、子牛への負担と共に手間とコストの点から頻繁には実施されてこなかった(図②-(3)-1.1)。このため、日々変化する子牛の生理情報を、労力をかけずに正確にモニタリングできる技術の開発が強く求められている。体温計測の自動化に関する研究では、ペットなどでは体温計測機能を付加した皮下へ埋め込むタイプの IC チップが実用化されているが、牛では食肉処理時において異物となる IC チップを確実に取り出す必要がある。また、読み取り装置を近づかせなければ体温を計測できないため、自動的に体温を取得することは不可能である。なお、膣内留置型体温センサが実用化されており、雌の成牛において膣内温度をリアルタイムで取得することにより、分娩予測や発熱性疾患の発見、発情発見などへの利用可能性について示されている。しかし、分娩の際には膣外に排出されるため分娩後毎に膣内に留置させる手間や、膣が発達段階である子牛ではその成長を阻害しかねないことなどの問題が挙げられる。いずれにせよ、子牛の健康管理には常時体温計測が必須であるが、子牛群に適用できる体温モニタリングシステムは存在しない。



図②-(3)-1.1 動物用体温計（左）と保定による直腸温度の測定（右）

成牛では、牛のルーメン液を経口採取して分析（pH、温度、脂肪酸組成、LPS(Lipo PolySaccharide、リポ多糖)など）する“ルーメン液検査”は、牛の疾病診断にとって極めて有用な検査法であるが、我が国では近年、牛の集約的多頭飼育が普及し始めており（畜産統計表, 農林水産省 2011）、数百頭規模や数千頭規模で飼育されている個々の牛について胃液採取と分析を頻繁に実施することは、労力・コストの面で現実的には不可能である。また研究用に牛のルーメン液の pH を連続計測できる無線センサ（端末）が開発されている（smaXtec pH monitoring system, smaXtec 社,オーストリア）。このセンサ端末は牛への経口投与が可能であるが、測定項目が pH と温度に限られ、その稼働時間も 50 日間と極めて短いため、そのまま農場で実用することはできない。このタイプのセンサは牛肥育のスマート化には必要不可欠であると言えるが、長寿命化（自立化）、低コスト化、有効性検証など多くの問題が残されている。

＜実施内容と最終目標＞

子牛のウイルス・細菌感染の早期発見・診断と成牛の生産病罹患の早期発見が重要になるが、現状、子牛群に適用できる体温モニタリングシステムや成牛の生産病を早期に検出するルーメン機能の実用的なセンシングシステムは存在しない。そのために本研究開発では、以下の検討を行った。

(1) 接触型センサ端末による子牛の特定部位の体温の連続計測

胴体部、尾根部、耳部、首部をそれぞれ計測できる体温センサ端末を 1 台以上試作するとともに、それを用いた子牛の感染実験（健康時：1 週間、感染時 1 週間）により、その有効性を検証した。

(2) サーモグラフィによる子牛の体表面温度分布の断続計測

子牛の体表面温度を安定的に計測できる部位及び最適な計測距離を特定するとともに、自動ほ乳ロボットにサーモグラフィを取り付けた群頭飼育舎での計測により、その有効性を実証した。

(3) 経口投与型ルーメンセンサ端末の試作及び pH の連続計測

既存のガラス膜式 pH 測定器に無線機能を取り付けた無線機能付き pH 測定器の試作を行い、1 カ月以上の投与試験によりその有効性を検証した。

②-(3)-2　接触型センサ端末による子牛の特定部位の体温の連続計測

【独立行政法人産業技術総合研究所集積マイクロシステム研究センター、再委託先：独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構動物衛生研究所】

②-(3)-2-1　体温の連続的モニタリングに適した体表部位候補の選定

体温の連続的モニタリングに適した体表部位（胴体部、耳部、首部、尾根部）の候補の選定のため、各部位用センサを試作し、装着試験を実施した。

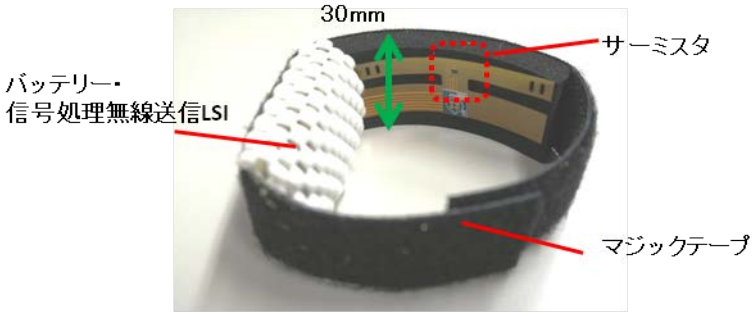
②-(3)-2-1-1　胴体部、耳部、首部、尾根部をそれぞれ計測できる体温センサ端末の試作

体温の連続的モニタリングに適した体表部位を選定するため、胴体部、耳部、首部、尾根部を測定可能な無線センサ端末を試作した。胴体部の体温を計測するために、子牛の保温用ベストに 12 個の無線温度センサ端末を実装して、胴体部計測用ベストを作製した（図②-(3)-2-1-1.1）。信号処理無線送信 LSI 部分はスポンジで保護、温度センサ部分がそのスポンジ上に位置し、子牛に接触しやすい形状である。この無線温度センサ端末の送信距離は 20m 以上である。



図②-(3)-2-1-1.1 胴体部計測用ジャケット

耳部、首部、尾根部の体温を計測するために、その各部位に巻きつけられる形状のベルトを作製した（図②-(3)-2-1-1.2）。バッテリ・信号処理無線送信 LSI 部分はスポンジで保護、温度センサ部はスポンジ状に、測定部に固定でき、かつ脱着が容易なようにマジックテープによって固定される。この無線温度センサ端末の送信距離は 20m 以上である。



図②-(3)-2-1-1.2 尾根部・耳部・首部計測用ベルト

②-(3)-2-1-2　試作した体温センサ端末を用いた子牛での装着試験の方法

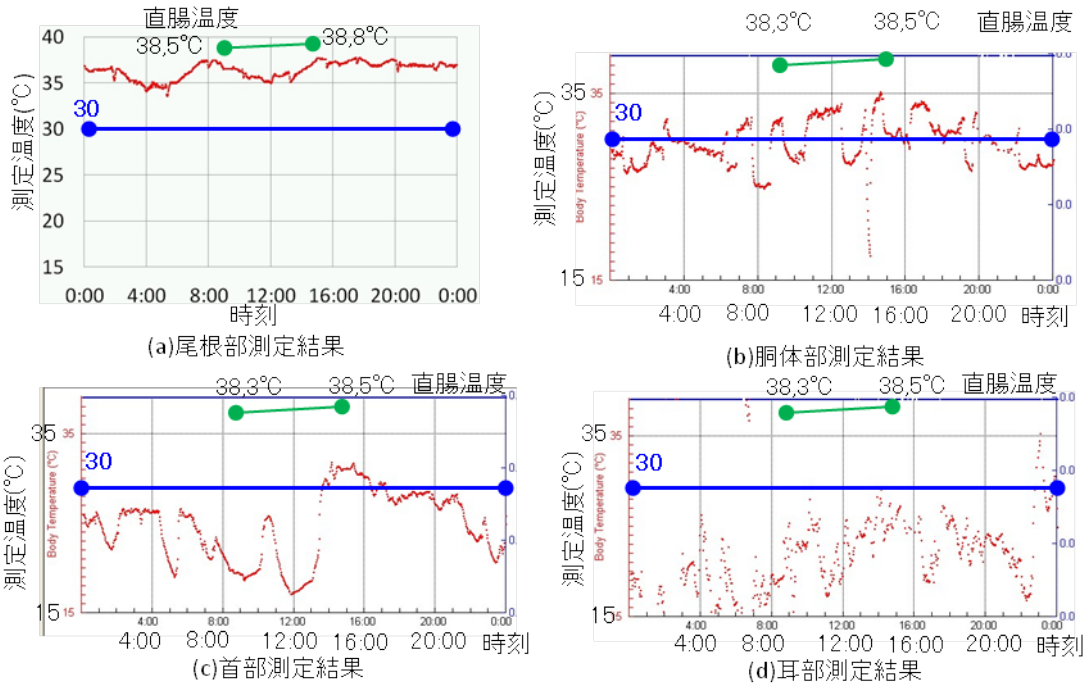
装着試験では、健康な子牛（1～3 ヵ月齢）2 頭に、体温センサ端末を取り付けた。1 頭に胴体部計測用ベスト、耳部計測用ベルト、首部計測用ベルトを取り付け、もう 1 頭に尾根部計測用ベルトを取り付けた（図②-(3)-2-1-2.1）。1 日間の計測を行い、午前と午後に直腸温度を 2 回測定した。その測定結果より、体温の連続的モニタリングに適した体表部位を決定した。



図②-(3)-2-1-2.1 試作した体温センサ端末の装着風景

②-(3)-2-1-3　試作した体温センサ端末を用いた子牛での装着試験の結果

尾根部計測用ベルトが最も高く安定した温度測定結果となり、胴体部計測用ベストも比較的安定的に高い温度が測定可能であった（図②-(3)-2-1-3.1）。一方、首部計測用ベルト・耳部計測用ベルトでは、著しく温度が低くなる場合もあり、全体的に不安定であった。この結果から、体温の連続的モニタリングに適した部位を尾根部として、尾根部用の接触型体温センサ端末の開発を優先して実施することとした。



図②-(3)-2-1-3.1 試作した体温センサ端末の測定結果

②-(3)-2-2　接触型体温センサを用いた子牛の肺炎（感染試験）による、その有効性の検証

接触型体温センサ端末を用いた子牛の肺炎試験（感染実験）による有効性の検証を行うために、尾根部計測用ベルトを用いて実験的肺炎牛（ Mannheimia haemolytica を接種）の連続モニタリングを実施した。

②-(3)-2-2-1　子牛の感染試験の方法

試験では、健康な子牛（3ヵ月齢）に、実験的に Mannheimia haemolytica を接種させた。接触型体温センサ端末は、尾根部計測用ベルトを用いた（図②-(3)-2-2-1.1）。接種 6 日前から尾根部計測用ベルトを取り付け、接種 5 日後まで計測を行った。また 1 日 2 回の直腸温度を測定した。

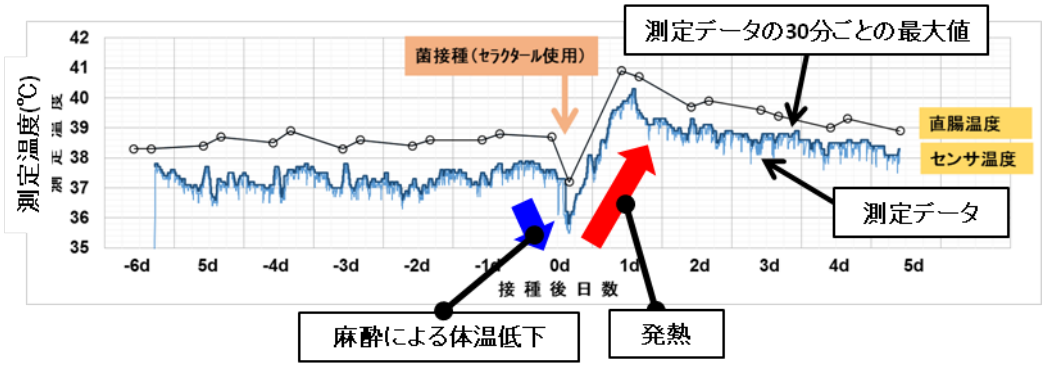


図②-(3)-2-2-1.1 尾根部計測用ベルト装着風景

②-(3)-2-2-2　子牛の感染試験の結果

温度測定部（サーミスタ）を尾部の皮膚露出面に装着することができ、安定的に体表温度のデータを得ることができた。また、実験肺炎に伴う体温上昇を十分反映するデータを得ることができ、その有効性を実証した（図②-(3)-2-2-2.1）。

菌接種時に麻酔をかけたことにより直腸温度が低下しているのと同様に、センサ測定温度も低下した。菌接種 1 日後に子牛は直腸温度が接種前から 2 度以上上昇しており発熱していることが分かる。同様に、センサ温度も接種 1 日後には 40 度を超えており、接種前の最高温度（38 度）から 2 度以上上昇している。また、接種後数日間は発熱を続けており、センサ温度もその傾向を示している。



図②-(3)-2-2-2.1 子牛の感染試験の結果

②-(3)-3　サーモグラフィによる子牛の体表面温度分布の断続計測

【株式会社 CS ソリューション】

②-(3)-3-1　サーモグラフィの設計・試作

高精度な熱画像を取得するための撮影部位、撮影距離、撮影時の温度の影響を明らかにし、深部体温との相関が高い撮影条件について検討した。これらにより子牛の体表面温度を安定的に計測できる部位及び最適な計測距離を特定できるため、サーモグラフィはほ乳装置に取り付けることにした。

体表面までの距離を 50cm から 60cm で計測することとし、高さは子牛の高さに合わせられるように三脚に設置し位置を自由に動かせられるようにした。

サーモグラフィはこれまでの研究で温度精度が高かった株式会社ビジョンセンシング ULVIPS（図②-(3)-3-1.1）を使用することとし、防水ケースに組み込まれた特注品をレンタルして使用した。保護ケースは IP45 相当の防水仕様にした。カメラ仕様、レンズ仕様、保護ケース仕様をそれぞれ表②-(3)-3-1.1～表②-(3)-3-1.3 に示す。

表②-(3)-3-1.1　カメラ仕様

項目	仕様
1）カメラ型式	ULVIPS-03162Ｓ-CS
2）受光面	アモルファスシリコン型非冷却マイクロボロメータ
3）エリア有効画素数	384×288 ピクセル
4）ピクセルピッチ	25μｍ
5）受光面サイズ	9.6ｍｍ×7.2ｍｍ（イメージサークル：φ12ｍｍ）
6）感度波長帯	8～12.5μｍ
7）素子感度	6ｍＶ／Ｋ（標準値）
8）ＡＤ分解能	14 ビット
9）フレームレート	30ｆｐｓ
10）ＴＥＣ	あり
11）画像出力	NTSＣコンポジット出力（適合コネクタ：BNC） または USB2.0（適合コネクタ：MiniB）
12）制御インターフェース	USB 経由のコマンド制御
13）温度補正方式	シャッタレス
14）撮影対象物温度	1 モード：20℃～＋50℃
15）温度分解能（面内ばらつき）	カメラ NETD 100ｍＫ以下
16）絶対温度精度	±0.5℃（目標）以下
17）動作環境温度	－20℃～＋40℃（結露なきこと）
18）保存温度	－25℃～＋60℃（結露なきこと）
19）電源	DC12V-1.0A（12W） （適合コネクタ：HR10A-10P-12P）
20）本体寸法（mm）	60mm(W)×60mm(D)×52mm(H)（レンズ含まず）
21）質量（g）	230ｇ

表②-(3)-3-1.2　レンズ仕様

項目	仕様
1) レンズ	ゲルマニウムレンズ
2) 焦点距離	19ｍｍ
3) Ｆナンバー	1.0以下
4) イメージサークル	13.6ｍｍ以上
5) 波長帯域	8－12μｍ
6) 視野角	28.4°（水平）x21.5°（垂直） 37.9°（対角）
7) 透過率	94%
8) ピント調整	マニュアル方式
9) 使用温度範囲	－40℃～＋85℃

表②-(3)-3-1.3　保護ケース仕様

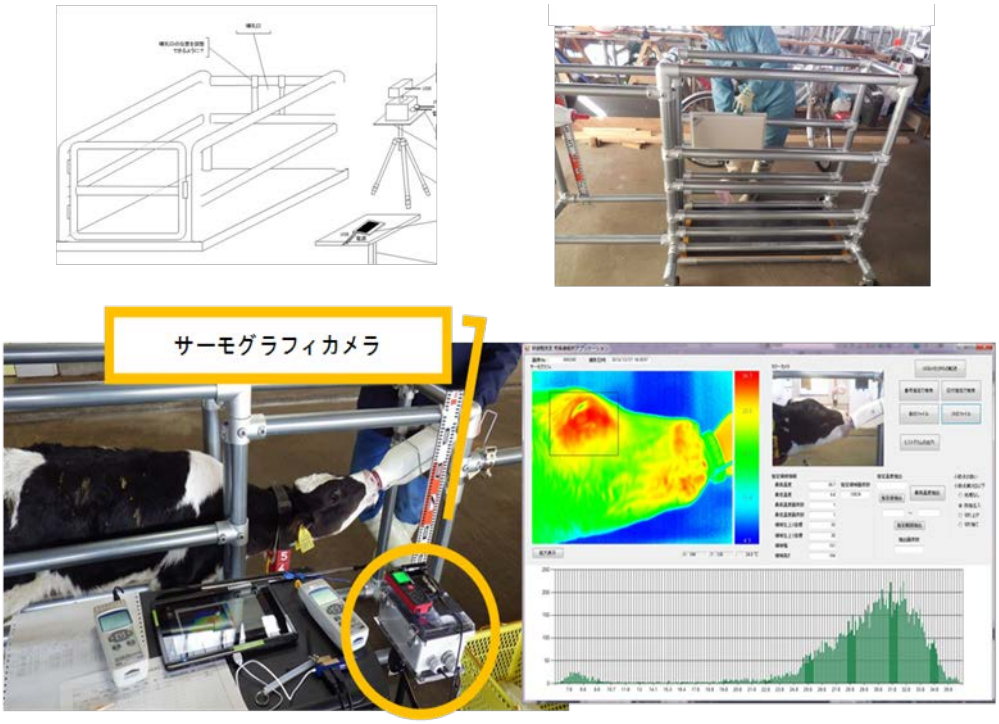
項目	仕様
1) ケース寸法・材質	W124.5×D156.4×H118、材質：ポリカーボネート
2) 保護レンズ窓材	φ50－2ｔゲルマニウム、表面：DLC/裏面AR　コーティング
3) ケース固定	底面の1/4インチねじ（三脚ねじ）にて固定
4) ケーブル	背面より電源ケーブル・USBケーブルを排出
5) 防水	IP45相当



図②-(3)-3-1.1　サーモグラフィ外観

②-(3)-3-2　ほ乳装置の設計・試作

当初、実際に子牛に哺乳をしているロボットを使用し計測することを考えたが、群頭飼育させており計測対象以外の子牛が興味を持ってきて集まる恐れが心配されたため、独自にほ乳装置を設計・試作した（図②-(3)-3-2.1）。これにより温度計測の作業効率が上がり眼縁部の最高温度を安定的に計測することができた。



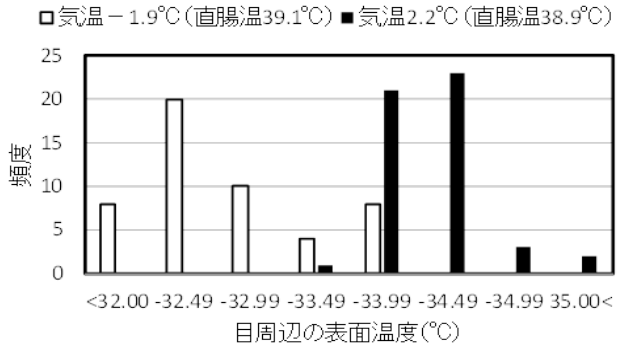
図②-(3)-3-2.1　試作したほ乳装置及びサーモグラフィによる撮影風景

②　-(3)-3-3　　サーモグラフィの温度計測結果

サーモグラフィカメラにより、一定の距離でほ乳中の子牛の眼縁部表面の熱画像を連写撮影した結果、眼縁部の最高表面温度を安定して取得することができた。

熱画像の取得にあたっては、ほ乳ロボットでのほ乳中の子牛の体温を計測することを想定し、撮影用枠場に子牛を入れて、ほ乳中の目周辺部の体表温度を撮影できる位置にサーモグラフィカメラを固定した。1 回の撮影で 50 枚連写撮影したが、ほ乳位置が固定されているため、カメラ位置を変えることはなく熱画像の取得は可能であった。撮影に要する時間は 1～2 分程度であった。

熱画像から得られた子牛の目周辺部の最高表面温度（50 枚の中での最高温度）の分布は安定しており、ばらつきは小さかったが、計測時の気温の影響を強く受けていると考えられた（図②-(3)-3-3.1）。直腸温が高い場合でも、推定温度が低いケースが見られたことから、発熱などの体温の異常を検出するためには、さらなる精度向上が必要であると考えられた。



図②-(3)-3-3.1　眼縁部周辺の表面温度

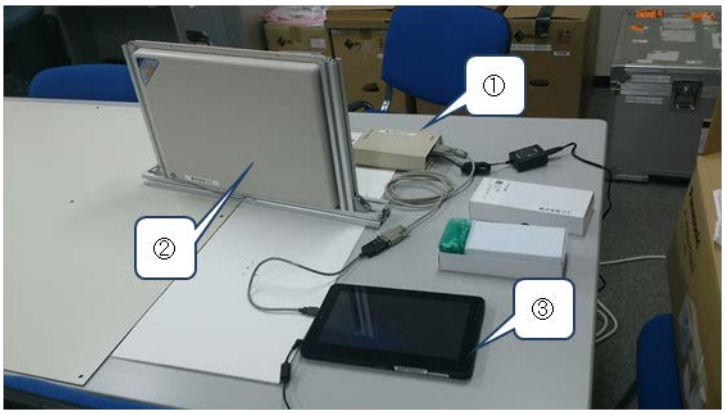
②-(3)-3-4　群頭飼育舎での計測

子牛が群頭飼育されているほ乳場所では複数の子牛の熱画像が得られることになるが、熱画像の情報だけでは子牛の識別番号を判別することができない。子牛毎に、体表面の温度分布を自動的に監視する仕掛けを作るには、得られた熱画像と子牛の個体番号を紐付けることが必須となるため、非接触で情報が読み取れ、脱着が容易である RFID を選定した（表②-(3)-3-4.1、図②-(3)-3-4.1）。

RFID はアンテナと RF タグの通信距離が短いタカヤ株式会社の TR3-LD003C を選定し、実証試験前に RF タグとアンテナ間の交信状態を確認した。

表②-(3)-3-4.1　RFID の仕様

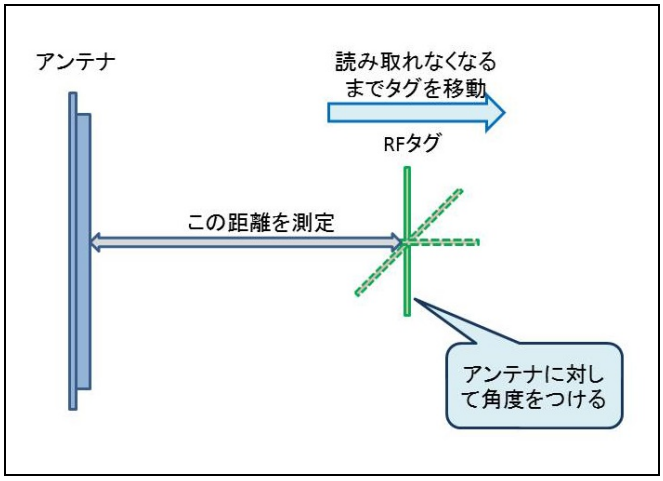
機器名	主要スペック	備考
① TR3-LD003C （本体）	アンテナ制御	シリアルインタフェース
② LA101（アンテナ）	交信距離 60cm	A3 サイズ
③ タブレット PC	Atom	本体制御用



図②-(3)-3-4.1　RFID 機器

②-(3)-3-4-1　RFID の通信距離の計測

アンテナと RF タグに角度がつくと交信距離が短くなりタグ情報が読み取れない可能性がある。このため、アンテナに対して RF タグが水平になる 0 度の状態と、45 度、垂直になる 90 度の 3 つの角度で通信距離を測定した（図②-(3)-3-4-1.1、表②-(3)-3-4-1.1）。



図②-(3)-3-4-1.1　アンテナと RF タグの角度

表②-(3)-3-4-1.1　RF タグの角度と読み取り距離

RF タグの角度	最大読み取り距離
0 度	52.5cm
45 度	40.5cm
90 度	22.6cm

RF タグはアンテナから遠ざかると読み取れないため、アンテナに対して平行にして 10cm から 5cm 刻みで RF タグをアンテナから離していった。この距離を X とする。次に、5cm 移動させる毎に、アンテナの外側にタグを読み取れなくなるまで離して行き、読み取れなくなった時点から読み取れるようになるまで戻してから、アンテナの縁とカードの中央までの距離を計測した。この距離を Y とする。点線の上側（アンテナから外れる方向）をプラス、下側（アンテナの中央に向かう方向）をマイナスとした。その結果を表②-(3)-3-4-1.2 に示す。

表②-(3)-3-4-1.2　ＲＦタグの読み取り距離

X	Y
10cm	23.3cm
15cm	2.5cm
20cm	5.5cm
25cm	5.3cm
30cm	6.5cm
35cm	5.0cm
40cm	2.3cm
45cm	-1.6cm
50cm	-11.0cm
55cm	不可

②-(3)-3-4-2　RFID の通信範囲

タグ認識中にサーモグラフィで自動的に熱画像が得られるかの実証試験を行い、目視とソフトウェアの結果を確認したところ問題なく撮影できた。

アンテナの取り付け位置は、ほ乳装置の上部に設置することで問題はなかったが、首ベルトが子牛にゆるく取り付けられており、RF タグを背中につけても授乳中にベルトが動いてしまい RF タグに角度がついてしまうことが確認できた。

根釧農業試験場で無作為に数頭抽出して実施したかぎりでは問題とならなかったが、タグから情報が読み取れないケースとして留意する必要がある。タグ認識中にサーモグラフィで撮影を行い、目視で必要な熱画像が得られるかどうか確認を行ったところ、問題なく撮影できた。 従って、ソフトウェアでタグ認識中にサーモグラフィの撮影を行うことで、自動的に熱画像が得られることが確認できた。

授乳中に他の牛が寄ってくることで、複数のタグを認識するかどうかの確認を行った。30cm 程度に近づけた程度だと問題なかったが、他の牛が押しのけてニップルを奪った場合、複数のタグを認識してしまう可能性があった。

そのため、ほ乳装置は他の牛が割り込めないか割り込みにくくする必要がある。

②-(3)-4　経口投与型ルーメンセンサ端末の試作及び pH の連続計測

【独立行政法人産業技術総合研究所集積マイクロシステム研究センター、再委託先：独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構動物衛生研究所】

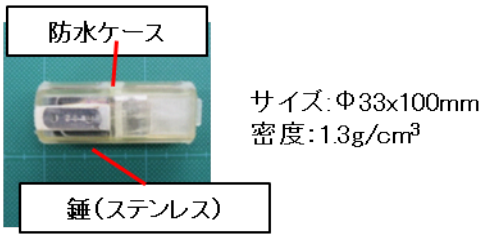
②-(3)-4-1　ルーメン内留置及びルーメン内モニタリング技術の開発

300MHz 帯の周波数は生体透過性が高いとされるが、ルーメンセンサはルーメン液（水分）、草、生体（牛の脂肪・筋肉）を通過して無線信号を受信しなければならず、大きな減衰が考えられる。また体外に排出されずにルーメン内にセンサ端末を留置するためには

一定以上の重量が必要である。ルーメン環境下からの無線信号の安定した送受信状況及びルーメン内留置条件を調べるために 300MHz 帯の無線温度センサ端末をルーメン内に投与し実験を実施した。

②-(3)-4-1-1　300MHz 帯無線温度センサの試作

オーストリアで研究用に開発されている経口投与型ルーメンセンサ（SmaXtec pH monitoging system）のセンササイズは、直径 35mm、長さが 132mm である。このサイズを参考に、温度の測定可能な 300MHz 帯の無線センサ端末を用いて、直径 33mm、長さが 100mm、密度が 1.3g/cm^{3}の、無線温度センサ端末を作製した（図②-(3).4-1-1.1）。ケース内に錘（ステンレス）を追加することで重量を調整した。



図②-(3).4-1-1.1　無線温度センサ端末

②-(3)-4-1-2　試作した端末を用いたルーメンフィステル牛での試験の方法

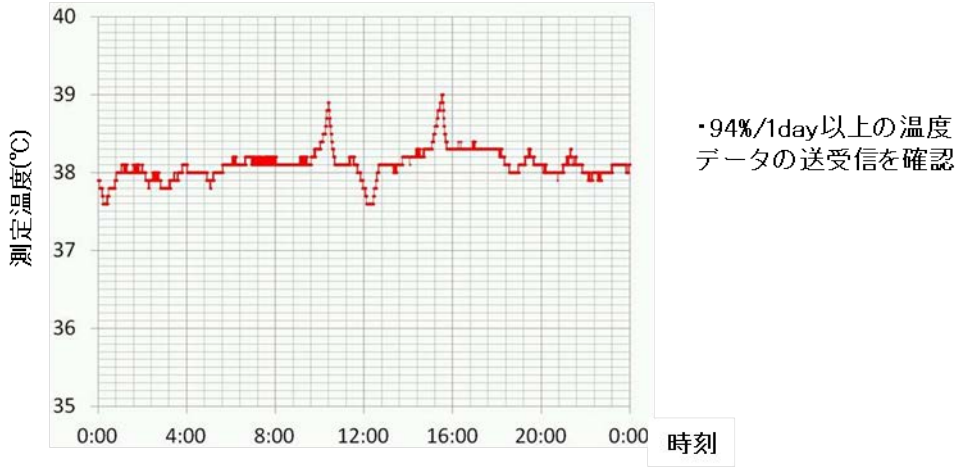
試験のために、ルーメンフィステルを装着したホルスタイン種雄成牛を準備した。外科手術により、ルーメンフィステル（蓋のついた筒）を牛のルーメン（第 1 胃）に取り付けることにより、簡易にルーメン内に無線センサ端末を投与することが可能である。測定する環境は、このルーメンフィステル装着牛をスタンチオンに固定した状態とした（図②-(3).4-1-2.1）。アンテナは八木アンテナを使用しており、成牛とアンテナの距離はおよそ 1m とした。ルーメンフィステルから無線センサ端末を投与し、２週間の測定を行った。



図②-(3).4-1-2.1　無線温度センサ端末

②-(3)-4-1-3　試作した端末を用いたルーメンフィステル牛での試験結果

2 週間の測定を行った結果、データの受信率は 94～98%/1 日であった(図②-(3)-4-1-3.1: ある 1 日の温度測定結果)。また、2 週間の間、体外に排出されることなくルーメン内に留置させることができたため、持続的にルーメン内にセンサを留置させるために重量密度は 1.3g/cm^{3}以上必要であることが明らかになった。



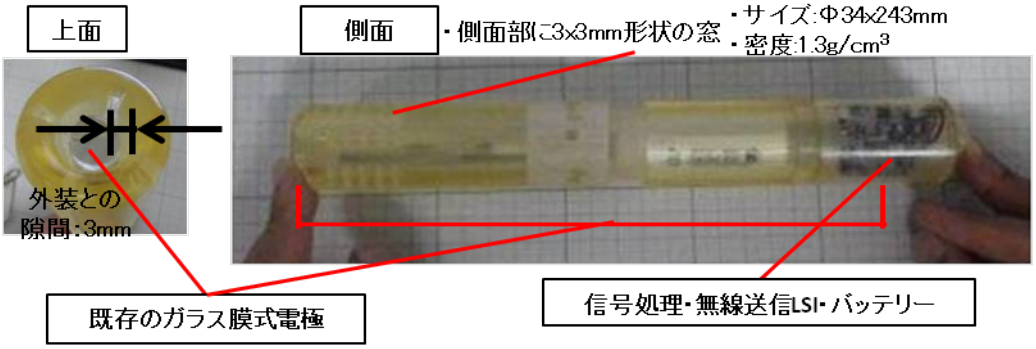
図②-(3)-4-1-3.1　ルーメン環境下での無線データの受信率

②-(3)-4-2　pH センサ端末の無線化及びルーメン内投与試験

ルーメン環境下での pH センサの測定精度・測定間隔などの技術的問題点を明らかにするため、既存のガラス膜式 pH 電極を無線化、ケース（外装）を製作して、ルーメン内投与試験を実施した。

②-(3)-4-2-1　pH センサ端末の無線化

既存のガラス膜式 pH 電極には、スタンダード ToughpH 電極 9625-15D（堀場製作所）を使用した。この電極を無線化するためにデータ送信用 300MHz 無線端末を実装、外装を取り付け、pH と温度を計測可能にした（図②-(3)-4-2-1.1）。ケース（外装）は、pH 電極にルーメン液が浸されるように、上面部は外装と pH 電極部に 3mm の隙間があり、また側面部には 3mm×3mm の窓を 5 個×3 列、作製した。センサ端末全体の大きさは、直径 34mm、長さが 243mm であり、密度は 1.3g/cm^{3}とした。



図②-(3)-4-2-1.1　既存のガラス膜式 pH 電極の無線化

②-(3)-4-2-2　試作した端末を用いたルーメンフィステル牛での試験方法

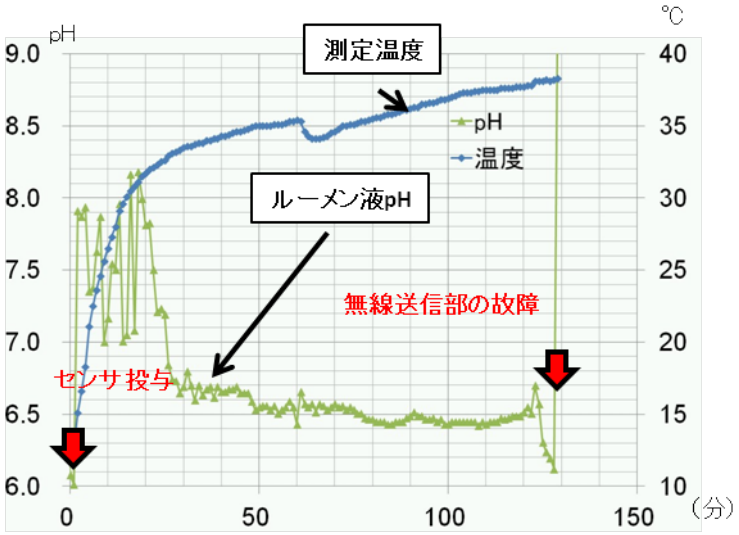
②-(3)-4-1-2 の試験と同様、ルーメンフィステルを装着したホルスタイン種雄成牛に、ルーメンフィステルからセンサ端末を投与した（図②-(3).4-2-2.1）。測定環境もまた、②-(3)-4-1-2 と同様とした。測定期間は 1 カ月以上を予定していた。



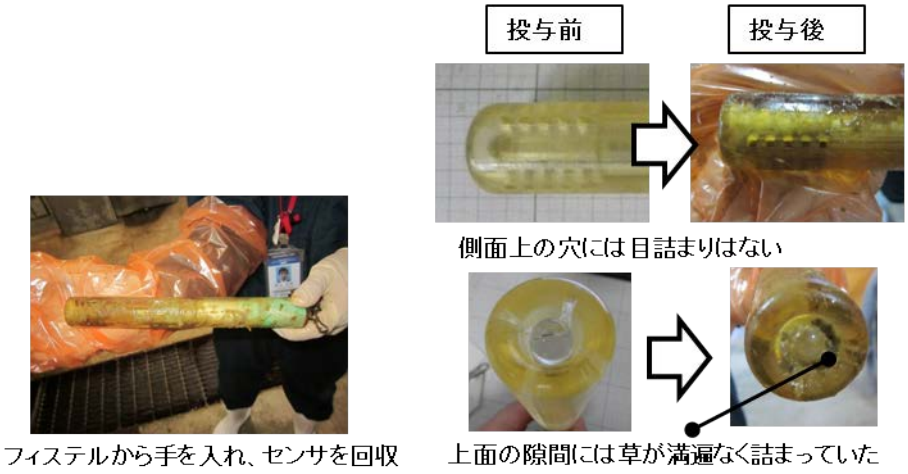
図②-(3).4-2-2.1　無線化した pH センサ端末のルーメン内への投与方法

②-(3)-4-2-3　試作した端末を用いたルーメンフィステル牛での試験結果

投与後 30 分辺りから pH 測定の安定した計測が可能であった（図②-(3).4-2-3.1）。1 カ月以上の測定を行う予定であったが、センサの回路内への胃液の混入による故障でセンサ投与後から 2 時間程しか測定できなかった。このため、半日経過後にルーメンフィステルからセンサ端末を回収した（図②-(3).4-2-3.2）。回収したセンサ端末の電極部分の上面の隙間には満遍なく草が詰まっていた。一方、側面部の 3x3mm の窓には詰まりはみられなかった。



図②-(3).4-2-3.1　ルーメン環境下での pH 測定結果



図②-(3).4-2-3.2　回収した無線センサ端末

この試験結果より、ルーメン内の pH 測定は可能なこと、電極部の汚れは測定の精度に影響を及ぼすことが考えられるため電極部上部のケース形状の改善が必要なことが分かった。また、ガラス膜式 pH 電極自体のサイズが大きいためセンサの小型化は難しく、電極

には参照液が必要なため長期間（2～3 年）使用することはできない。ゆえに、ルーメンセンサの小型化及び長期間使用するためには、ルーメン内に異常が生じたときのみ pH を測定するような方法や pH 以外にルーメン収縮運動の異常をモニタリングできる方式を考案しなければならない。

②-(3)-5　ユーザ機関による成果の有効性の検証

「装着型温度センサ端末による体温の連続計測」は実験肺炎に伴う体温上昇を良く反映するデータを取得できるため、‘子牛の疾病の早期検出’に有効であり、「サーモグラフィによる体表面温度分布の断続計測」は直腸温度と高い相関をもち体表面温度分布を計測できるため、‘子牛の症状の程度の判断’に有効である。また‘成牛の消化器病の早期検出’のためにルーメン内の状態をセンシングできる端末の開発が期待されるとの意見を牧場関係者から得た。

②-(3)-6　まとめ

我が国の重要な地域産業である乳用牛・肉用牛業を維持・発展させていくための喫緊の課題は、死廃と病症事故を最小化する健全肥育システムの実現である。この肥育システムには、農場における子牛のウイルス・細菌感染の自動早期発見・簡易診断機能及び成牛の生産病罹患の早期発見機能は必要不可欠である。そこで本研究では、「接触型センサ端末による子牛の特定部位の体温の連続計測」、「サーモグラフィによる子牛の体表面温度分布の断続計測」、「経口投与型ルーメンセンサ端末の試作及び pH の連続計測」を行った。

（1）接触型センサ端末による子牛の特定部位の体温の連続計測

適切な装着部位として尾根部を特定し、かつ子牛の肺炎（感染実験）試験により実験肺炎に伴う体温上昇を良く反映するデータを取得し、その有効性を実証した。

子牛の発熱や体温低下などの病的状態の発現は、病原体の感染やショックなどが起きて速やか（数時間以内）に生じ、さらに、いつ生じるかも判らないが、連続的（持続的な）な体温測定（接触型センサ）により「疾病の早期検出」を可能とすることが分かった。

今後は、農場環境下において「疾病の早期検出」が可能な実用的なセンサ端末を開発するために、環境温度が体表温度に与える影響について検討し、発熱を確実に診断でき基準を設ける。また、群頭での試験を実施してセンサの耐久性やデータを高い信頼性で受信できるかなどの実用化に向けての問題点を検証する。

（2）サーモグラフィによる子牛の体表面温度分布の断続計測

群頭飼育舎の子牛の熱画像の自動撮影・計測及び、ほ乳中の子牛の熱画像より眼縁部の最高表面温度を安定して取得できること、直腸温度を推定できることが分かった。本格研究では「症状の診断」のために、画像処理の簡易化・高速化手法の開発、環境温湿度と体表面温度との関係、及び疾病の程度と体表温度分布との関係をデータベース化するなどを行い、最終的には牛を感知して赤外線熱画像を撮影・温度分布解析及び症状の診断を自動的に行うシステムを開発する。

（3） 経口投与型ルーメンセンサ端末の試作及び pH の連続計測

端末のルーメン内留置条件及びルーメン環境下での無線 pH 測定が可能なことが分かった。課題は、ガラス膜式 pH 電極自体のサイズが大きいためセンサの小型化は難しく、電極には参照液が必要なため長期間（3 年）使用することはできないことである。産業上ルーメン機能センシングは 3 年程度の連続計測が求められるため、ルーメンセンサの小型化及び長期間使用するためには、ルーメン内に異常が生じたときのみ pH を測定するような方法や pH 以外にルーメン収縮運動の異常をモニタリングできる方式を考案しなければならない。本格研究では、ルーメン機能障害胃運動からルーメン機能障害を検知可能な省電力活動量センサを開発する。この省電力活動量センサと、pH センサ、温度センサを搭載した経口投与可能なルーメンセンサ端末（サイズ 70×12mm 程度）を試作し、成牛の消化器病の早期発見に取り組む。本格研究完了後には、成牛の消化器病の早期発見を目指し、牛群に適用可能なルーメン機能監視システムの開発を行う。

③　健康医療分野

③-(1)　常時装着型循環器機能センサシステムの開発

【オリンパス株式会社、再委託：国立大学法人東京大学 IRT 研究機構、学校法人自治医科大学】

③-(1)-1　研究の目的

＜社会課題＞

高齢者人口の増加に伴って、脳卒中・心不全など循環器機能に関わる疾病を患う人口は増加している。そのため死亡者の割合は減少しているものの半身不随や失語症、認知症などの後遺症が残り、罹患者の社会生活・社会復帰を妨げ、国民の「健康寿命」「QOL」を著しく低下させる主要な原因となり、医療費増大の大きな原因となっている。こうした循環器機能の障害を招く大きな原因が高血圧である。高血圧は心血管病にもつながっており、動脈硬化の主要促進因子で、最近増加の傾向にある動脈瘤（くも膜下出血の主要因）とも密接に関係している。一方、高血圧は自覚症状のないことが特徴で、そのために対策が遅れがちで、ある日突然、上記のような疾患に至ることが多い。高血圧は生活習慣（食事、飲酒・喫煙、運動、睡眠など）の影響を強く受けるので、なんの苦痛・症状もないときにこの生活習慣を改善するという対策（あるいは、医師の処方を受けて降圧剤を日常的に服用する）を実行することは、大変難しい。これを行うための第一歩として、自分の血圧の状況を自覚すること、すなわち、（ダイエットの第一歩が、体重測定であるように）まずは自分で測定することが必要であり、対策の必要性を理解し、それを実行した成果を知ることである。

血圧と並んで、循環器系の日常管理で、注目すべきは心臓の機械的な動作に関わる心拍・心音・心電である。心拍・心音・心電は心不全・脳梗塞などの直接原因となる不整脈の検知・予防に必要だが、不整脈は、健診時にたまたま起こるということは少ないため、発見されにくい。

＜現状の取り組みと課題＞

これに対して、現状の血圧測定は、医用・家庭用を問わず、カフによって、上腕もしくは手首を締め付けて血流を止めて測定するものが主流である。これは、無自覚な健常者・患者にとっては、相当な負担・煩雑な行為であり、実際、健診の要注意者、高齢者など血圧管理を医師が指導しても、測定すらしてくれないというのが現状である。また、最近の研究からは、血圧は循環器疾患の古典的なリスクファクタのひとつであるが、通常の血圧測定を利用した追跡調査では、明確に高いハザード比を示す結果は得られていない。24 時間測定による白衣高血圧や仮面高血圧の影響の除去、モーニングサージや夜間血圧降下度

などの測定が、より精度の高いリスク評価の指標として注目されている。24 時間血圧測定は通常 ABPM（自由行動下血圧計）により行われるが、間欠的にカフが駆動されることによる日常生活での支障、睡眠障害、携帯性など、日常生活の中での血圧モニタの観点からは問題点が多い。そこで、着けていること・測定していることを意識させない装着感・動作感のないセンサシステムが求められている。このために、脈波から測定する方法などが、試みられているが、実用には至っていない。

また、心拍、心音、心電に関しては、健診時その兆候が発見されたとしても、その後の診察などで症状がでるとは限らないため、医師の指導のもとで、ホルタ型心電計を 24 時間装着して連続測定などを行う。しかし、このホルタ型心電計では、大きさ・電源などの問題から、長期にわたって日常的に不整脈を監視するということは難しい。また、心音は心疾患などの診断に関連し、心疾患がある場合には心雑音として記録され、それにより心臓のどの部位の疾患かを判定するのに利用される。しかし、現在実用化されている心音計測装置の人体に固定するセンサヘッドはサイズが大型（φ20㎜×10㎜程度）であるため、24 時間常時モニタリングを実施するには患者の身体的な負担が多い。そのため、患者への装着の負担を減らすため、センサヘッドの小型化が望まれている。

＜実施内容と最終目標＞

ところが、近年、超音波診断装置の進歩により、超音波画像から（相対）血圧を非侵襲に計測できるようになってきた。すなわち、血管の径と血流速を超音波（前者を超音波断層像、後者をドップラー法もしくは血流画像の解析）によって求め、血圧を算定する。加圧が必要ないこと、測定が時間的にも、空間的にも１点で行われることが、上記の目的に適っている。一方、この超音波診断装置に用いられている探触子は数 cm のスケールであるが、高解像の画像を目的としない血圧測定の用途では、MEMS 技術の進歩により、超小型・高性能化が可能となってきた。従って、エネルギハーベスト技術・人体通信技術などと併せて、装着感のないセンサモジュールが実現できる可能性が見えてきた。

一方、心音を広帯域に計測することにより、脈拍数、心雑音に加え、より詳細な情報が得られ、心電図に相当する精度で不整脈が検知・解析できる可能性が示唆されている。音響センサは、ホルタ型心電計より小型・省電力化が可能であり、日常装着型のセンサモジュール化には適している。

このように MEMS 音響センサによって、装着型の循環系機能センサシステムの必須・最重要項目である血圧・不整脈の継続モニタが実現できる可能性がある。

先導研究では、以下の実施内容と目標を設定した。

血管などの循環器の状況を常時センシングして、血圧異常や不整脈を検知し、心不全や脳卒中などのリスクの診断をめざす循環器機能センサシステムの確立が求められている。また、このシステムは常時装着が求められており、そのためには小型化が必要である。

本テーマでは、上記の循環器機能センサシステムを小型化するためのキーデバイスとして想定している超小型 MEMS 音響センサ及びシステム全体が持つべき要件について、医療関係者と情報を共有し、ニーズと技術的実現可能性を考慮して目指すべきセンサシステムの構成・仕様を見出す。

(a) MEMS 音響センサは、超音波を送受信することによって血圧測定に必要な血管径、血流速を測定するものであるが、そもそも超音波によってこれらが正確に測定出来るかわかっていない。そこで、現行の超音波診断装置を用いて測定した血圧と、従来のカフと呼ばれる腕に巻くバンドで加圧する方法で測定した血圧とを比較して、超音波による測定の精度、ばらつき、安定した測定を行うための位置ずれの許容度などを見極める。また、血管径、血流速の調整ができる擬似血管・血液による血管系モデルを試作し、超音波による測定を行う。これらの結果から、超音波による血圧測定の可能性及び課題を抽出する。

(b)の結果とあわせて、血圧センサデバイスの仕様及び設計の指針を得る。

(b) 超小型 MEMS 音響センサを開発するため、その中に組み込む小型・高感度 MEMS マイクロフォン・プローブを用いて、心音を計測し、(c)で得られた心音データの臨床的意味の結果もあわせて、不整脈検出のための要件（超音波周波数など）を見出し、(a)の結果も反映して心不全などの超小型 MEMS 音響センサデバイスの仕様及び設計の指針を得る。

また、循環器機能センサシステム全体の課題である超音波信号の受信、解析手法などを検討する。

(c) (a) (b)で取得したデータの臨床的意味（不整脈、心不全などの心疾患との関連づけができる可能性）を提示するとともに、医療現場でのニーズを示す。

③-(1)-2　実施内容

③-(1)-2-1　原理検証の内容（血圧）

血液の流速と血管径を経時的に測定することにより血圧の測定が可能になることが理論的に予測されている。以下で簡単に導出する。

血液は心臓の拍動によって心臓から末梢に流れるが、この拍動に伴い、血管は規則的

な圧力 p、血管径 A の高低を繰り返し、この p、 A の高低は血管を波として伝わる。この波が脈波、波の速度が脈波速度と呼ばれる。まず、血圧 p が血管中を速度 $c=\sqrt{\frac{A_0}{\rho}\frac{dp}{dA}}$ で伝搬することを示す。

基礎となる方程式は運動方程式(F01)と連続の方程式(F03)である。

・理想流体（熱や粘性によるエネルギの散逸が無視できる流体）に対する Euler の運動方程式：

$$\frac{\partial(\rho \boldsymbol{v})}{\partial t}+(\rho \boldsymbol{v}\cdot\nabla)\boldsymbol{v}=-\nabla p+\boldsymbol{f} \qquad \text{(F01)}$$

特に重力場中の 非圧縮性 流れでは

$$\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t}+(\boldsymbol{v}\cdot\nabla)\boldsymbol{v}=-\frac{1}{\rho}\nabla p-\boldsymbol{g}$$

これから下の式(F02)により脈波速度を導出する。この式は重力場中の非圧縮性流れに対する式の 1 次元版。ただし重力の方向に対して x の向きが変化していくことを考えて最後の項に dh/dx が入っている。（x が重力方向なら 1、水平方向なら 0）

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}-\rho g\frac{dh}{dx} \qquad \text{(F02)}$$

・連続の方程式：

流体力学における連続の方程式は質量の流入、流出の差（第 2 項）がそこでの質量の時間変化（第 1 項）に等しいことから

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho \boldsymbol{v})=0 \qquad \text{(F03)}$$

と書ける

非圧縮性 で 1 次元の流体（ただし 1 次元方向に断面積の変化はある）では、 ρ は微分の外に出るが、x 方向に A が変化する。微小体積の保存を考えると

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(uA)=0 \qquad \text{(F04)}$$

以下、1 次元非圧縮性非粘性流体での圧力波（脈波）の伝搬速度を導出する。

動脈を単純化して、1 次元方向にのびた太さも性質も一様な場合、断面積 A はそこでの圧力 p の関数になる（x、 t の関数ではない）。

$$A = A(p)$$

c をこのように置く。

$$c^2 = \frac{dp/(dA/A)}{\rho} = \frac{A}{\rho}\cdot\frac{dp}{dA} \qquad \text{(F05)}$$

これは p の全微分 dp と A の全微分 dA が

$$dA = \frac{A}{\rho c^2}\cdot dp$$

の関係を満たすことを意味する。従ってそれぞれの偏微分は

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{A}{\rho c^2}\cdot\frac{\partial p}{\partial t} \qquad \text{(F06)}$$

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{A}{\rho c^2}\cdot\frac{\partial p}{\partial x}$$

連続の方程式(F04) （$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(uA)=0$）に(F06)を代入して両辺に$\rho c^2/A$をかけると

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{u\partial p}{\partial x}+\frac{\rho c^2\partial u}{\partial x}=0$$

微小振動と仮定して u、 pに対して非線形な第 2 項を落として線形化する。

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\rho c^2\partial u}{\partial x}=0 \qquad \text{(F07)}$$

オイラーの式(F02)（$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}-\rho g\frac{dh}{dx}$）の左辺第 2 項も非線形項なので落として線形化し、管は水平に置かれているとして、

$$\frac{\rho\partial u}{\partial t}=-\frac{\partial p}{\partial x}$$

上式の両辺を xで微分した式と式(F07)の両辺を tで微分した式から$(\partial^2 u/\partial x\partial t)$の項(微分の順序は交換可能とする）を消去すると

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}=\frac{c^2\partial^2 p}{\partial x^2}$$

を得る。上式は良く知られた波動方程式で、p は速度 c の波動として伝搬することを表す。

従って脈波速度 c は

$$c = \sqrt{\frac{A_0}{\rho}\frac{dP}{dA}} \qquad \text{(F08)}$$

と表すことができる[1)]。

一方、脈波速度 c と流量 Q との間の関係は
以下のように導出される。

u、 *p* だけでなく、*Q*、 *A* も全て波動として伝搬している。

つまり、

$$\begin{aligned} u &= u_0 + u_1 \exp\left(i(kx-\omega t)\right) \\ p &= p_0 + p_1 \exp\left(i(kx-\omega t)\right) \\ A &= A_0 + A_1 \exp\left(i(kx-\omega t)\right) \\ Q &= Q_0 + Q_1 \exp\left(i(kx-\omega t)\right) \end{aligned} \qquad \text{(F09)}$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uA) = 0 \qquad \text{（再掲）}$$

は、

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \qquad (\because Q = uA)$$

なので、ここに(F09)を入れて、

$$-\omega A_1 + kQ_1 = 0$$

$$\therefore \frac{Q_1}{A_1} = \frac{\omega}{k} = c$$

このQ_1、A_1は微少な値なので$\frac{dQ}{dA}$と表記することができる。

すなわち、

$$c = \frac{dQ}{dA} \qquad \text{(F10)}$$

以上の結果から、超音波によって測定可能な血液の流速と血管径により血圧を導出できることを示す。 (F08)を積分することにより、測定された断面積を利用して血圧 p は下式のように求めることが出来る。

$$p(t) - p(0) = \int_{A(0)}^{A(t)} \frac{1}{C}\,dA = \int_{A(0)}^{A(t)} \frac{\rho c^2}{A(0)}\,dA$$

c は(F10)のように流量 Q の断面積 A での微分により求めることができるが、c は短時間（たとえば 1 周期）では変化しないと考え、収縮開始時期（血管の断面積が最も小さい時期）の dQ/dA により求めて、短時間の間では定数とおけば、

$$p_n = p_0 + \frac{\rho c^2}{A_0}\sum_{i=1}^{n}\Delta A_i \qquad \Delta A_n = A_n - A_{n-1} \qquad \text{(F11)}$$

のように、p（の変化分）は測定された断面積と比例して変化する[2)]。

この方法によれば、初期値をカフ式血圧計で校正しておけば(p_0)、理論的には断面積及び血流速の測定により、血圧測定が可能である。血管断面がほぼ円形であると仮定すれば、断面積の測定は血管径の測定でかえることができる。

また、本節の議論から明らかなようにこの方法では、血圧に関連する循環器疾患の指標である下記のデータを計測可能である。

・脈波速度

・脈圧　（最大血圧－最小血圧）（(F11)式右辺第 2 項の振幅）

・脈波形状

・血管硬さ（(F11)式第 2 項の係数）

しかし、この方法による血圧測定は、人体で検証されたことがなく、有効性の確認が必要である。

そこで先導研究では、この方法の有効性について、既存の超音波診断装置で確認した。超音波診断装置はイメージングを目的とした装置のため大型で、血圧測定のために最適化されているわけではないが、血管イメージングと血流速測定が可能であるため、原理検証の目的には利用可能であると考えられる。

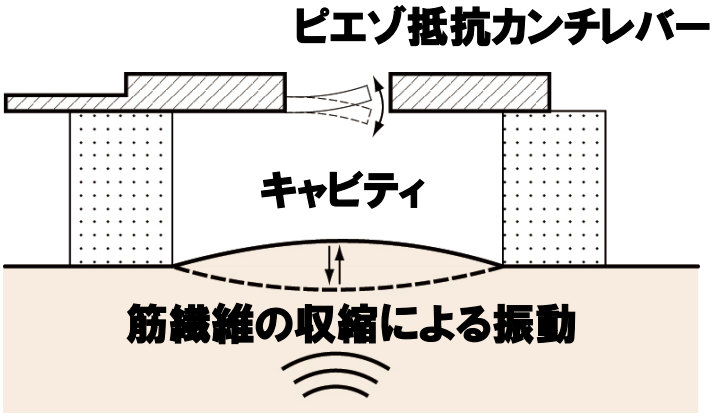
原理検証実験においては、この方式で計測可能な血圧関連の指標のうち、脈圧を例にとって検証を行った。脈波速度と異なり、カフによる従来型の測定装置と直接の比較が可能で、また、校正が必要ないため本方法の本質的な妥当性が確認できると考えられる。

また、上記実験とは別に、超音波による計測の精度の確認などにより必要な仕様、課題を明確化するため、血管モデルを作成して超音波測定を行った。

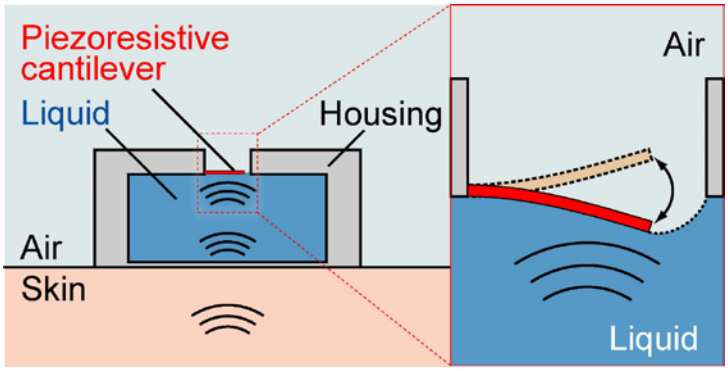
③-(1)-2-2　原理検証の内容（心音）

＜心音センサ計測原理＞

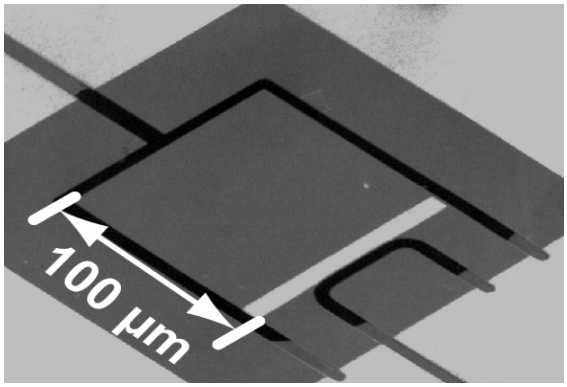
本研究で提案する心音センサの計測原理を図③-(1)-2-2.1 に示す。本センサは、厚さ 300nm のシリコンのカンチレバー（片持ち梁）と、キャビティで構成される。シリコンカンチレバーの表面には、不純物拡散で形成されたピエゾ抵抗層が形成されており、振動などでカンチレバーが歪んだ際には、電気抵抗値が変化する。この電気抵抗変化をブリッジ回路などで電圧変化として計測することで、カンチレバーの歪みをモニタリングする。本



図③-(1)-2-2.1　心音センサ計測原理



図③-(1)-2-2.2　キャビティを液体で満たしたセンサ構造



図③-(1)-2-2.3　シリコンカンチレバーSEM 画像

研究では、心臓の拍動による音を計測することが目的であるが、シリコンカンチレバーを直接、胸部に押し付けると摩擦などでシリコンカンチレバーが壊れてしまう恐れがある。そのため、図③-(1)-2-2.1 のように、シリコンカンチレバーと皮膚の間にキャビティを設け、空気層を介することにより心臓の拍動による振動をカンチレバーに伝達することとした。

＜音響インピーダンス整合による MEMS マイクロフォンの高感度化＞

しかし、空気層を介することで、音響信号が減衰してしまうことが予想されるため、図③-(1)-2-2.2 に示すようにシリコンカンチレバーと皮膚の間を液体で満たすこととした。

そこで異なる媒質間を音波が透過する際の透過率の見積りを行う。比音響インピーダンス Z は、媒質の密度 ρ、媒質中の音速 D を用いて、$Z = \rho D$ kg/(s·m^2)と示される。この比音響インピーダンスを用いて、比音響インピーダンスが Z_1、Z_2 である媒質間の音波の透過率 T は、$T=4Z_1 Z_2/(Z_1+Z_2)^2$ となる。皮膚、空気及び液体としてシリコンオイルの媒質密度、媒質中の音速、比音響インピーダンスを表③-(1)-2-2.1 に示す。

表③-(1)-2-2.1：皮膚、空気、シリコンオイルの媒質密度、媒質中の音速、比音響インピーダンス

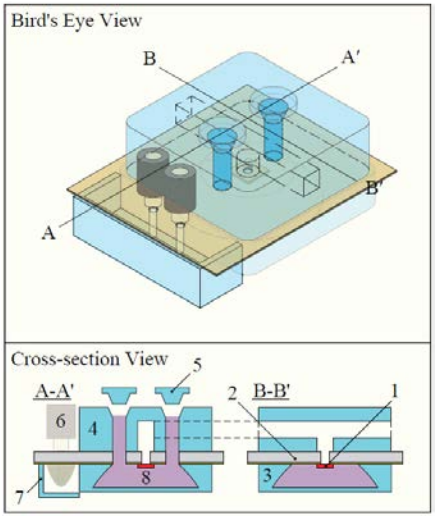
	ρ [g/cm^3]	D [m/s]	z [kg/(s·m^2)]
皮膚	1.15	1.73×10^3	1.99×10^6
空気	1.29×10^{-3}	3.31×10^2	4.28×10^2
シリコンオイル	1.06	1.33×10^3	1.41×10^6

これらの値を用いて計算した結果、皮膚と空気の間の音波の透過率は 0.00085、皮膚とシリコンオイルの間の音波の透過率は 0.971 となった。このため、本研究では、シリコンカンチレバーと皮膚の間にシリコンオイルを満たす構造をとることとした。

【心音センサ製作フロー】

図③-(1)-2-2.3 に製作したシリコンカンチレバーの SEM 画像を示す。カンチレバーのスケールは、長さ 100μm、幅 100μm、厚さ 300nm である。製作方法に関しては、参考文献 3) に詳しい。

図③-(1)-2-2.4 に液体をキャビティに充填した MEMS 心音センサの概観を示す。このセ

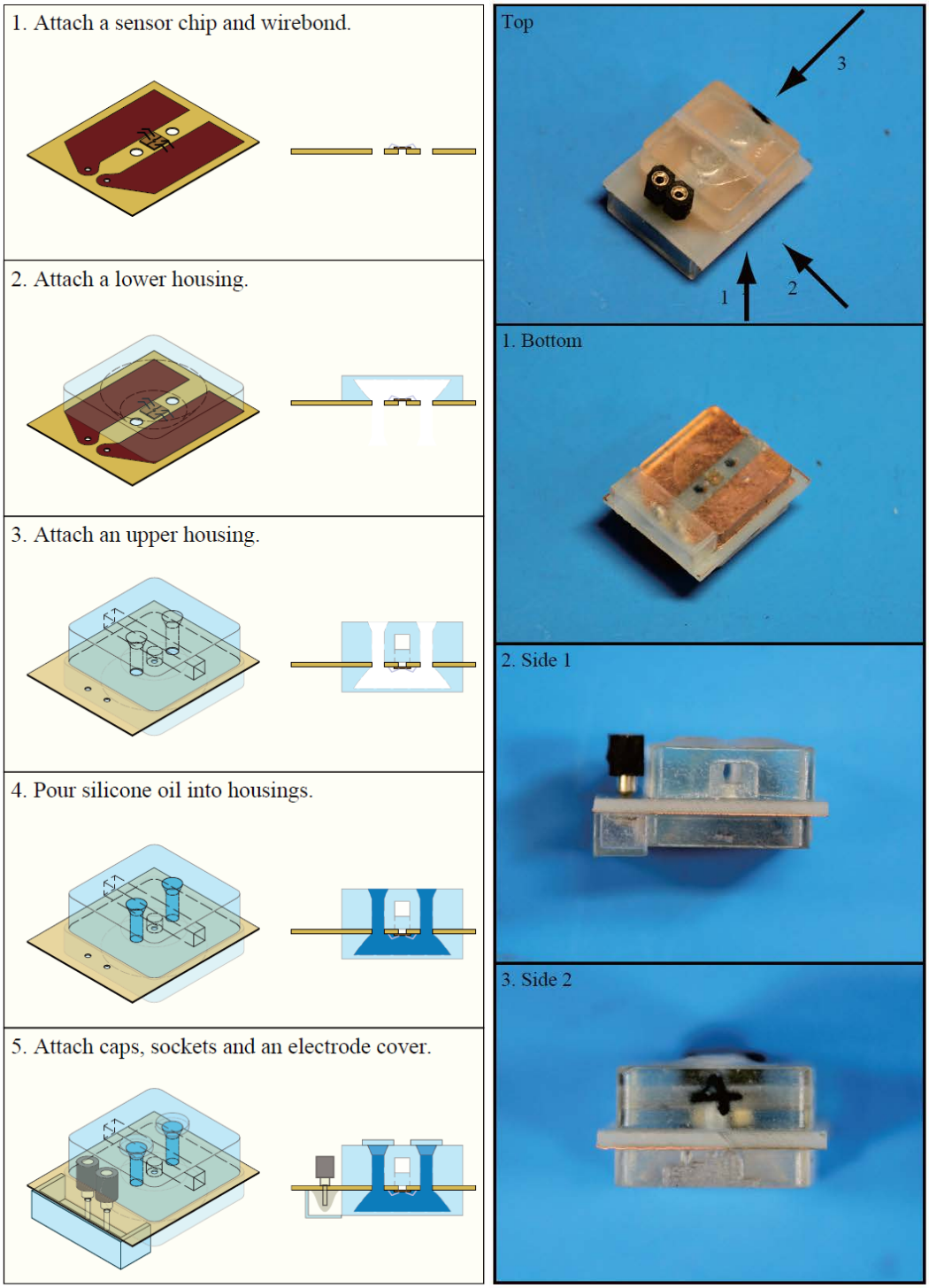


図③-(1)-2-2.4　MEMS 心音センサ構造透視図

ンサは図中の番号に対応する以下の 8 つの要素から構成されている。

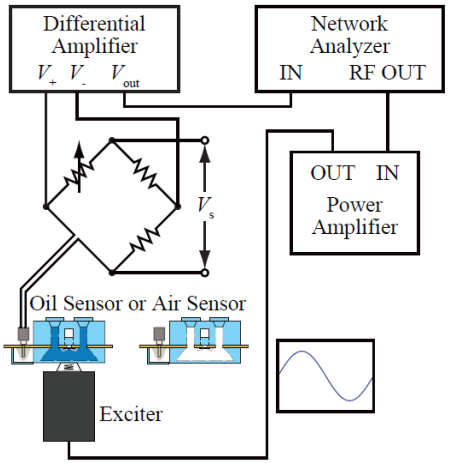
1. MEMS カンチレバー
2. 基板
3. 下部ハウジング
4. 上部ハウジング
5. キャップ
6. 丸ピンソケット
7. 電極カバー
8. シリコンオイル

各要素を図③-(1)-2-2.5左列に示す手順で組み合わせて心音センサを作製した。以下詳細を説明する。最初に、基板の銅箔面にセンサチップを接着剤で固定した。固定の位置は基板中央に空いている穴がセンサチップの中央と一致するようにした。次いで、固定されたセンサチップと基板の銅箔を導線で接続した。次に、基板の銅箔面に下部ハウジングを接着剤で固定した。このとき、基板のオイル注入用の穴が下部ハウジングの穴の中に収まるよう注意した。その後、基板を裏返しにして、上部ハウジングを接着剤で固定した。その際、上からピアノ線を挿入することにより、上部ハウジングのオイル注入用の穴が、基板のオイル注入用の穴と同じ位置となるようにした。このため、基板中央及び上部ハウジングのセンサチップ用空気穴の位置が一致することになる。以上の過程で上部及び下部ハウジングが基板に固定されたその後､注射器を使ってシリコンオイルHIVAC-F4 をハウジング内部に注入した。このとき、ハウジング内部に気泡が残らないように十分注意した。オイルが上下ハウジング内部に満たされ、上部ハウジングの上面に広がる程度まで、オイル

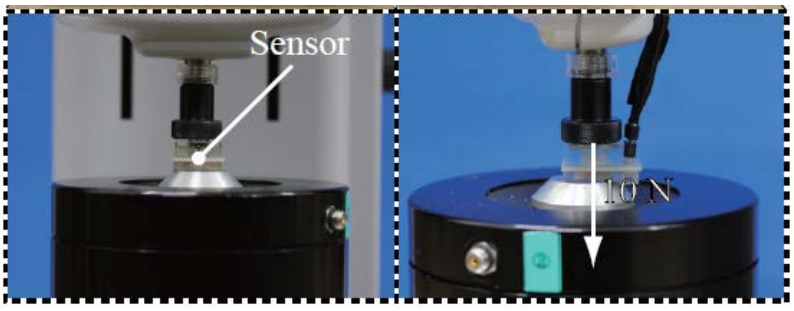


図③-(1)-2-2.5　MEMS 心音センサ組立手順及びセンサ概観

を注入した。ハウジング内部に気泡が見えないことを確認し、キャップを上部ハウジングにはめ込んだ。このとき、キャップにより上下ハウジング内部のオイルが押し込まれ、圧力が上昇しないよう注意した。キャップが上部ハウジングの穴に収まったことを確認した後、上部ハウジング上面に広がっているオイルを拭き取った上で、キャップ及び上部ハウ



図③-(1)-2-2.6　周波数特性計測セットアップ



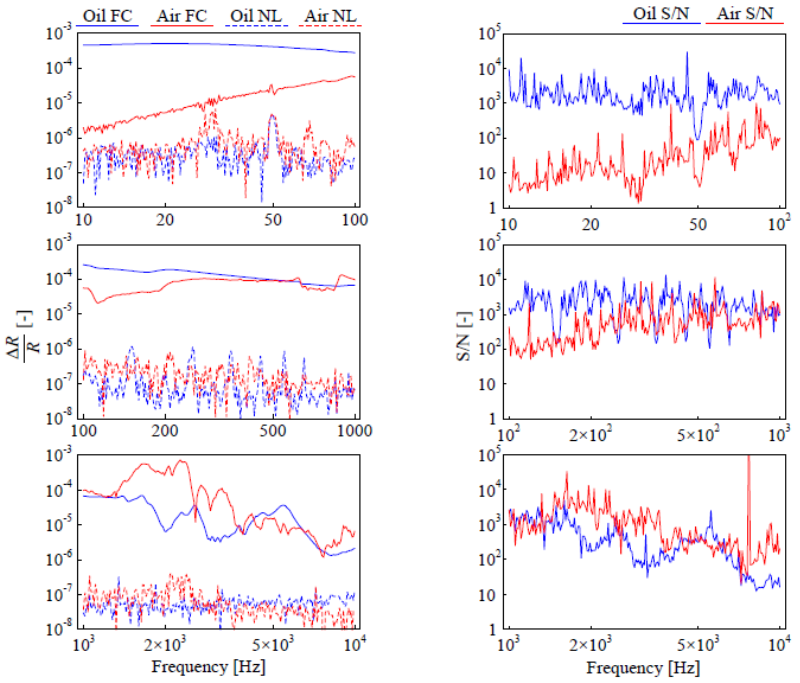
図③-(1)-2-2.7　MEMS 心音センサ加振方法

ジング上面に紫外線硬化樹脂を塗布した。その状態で露光装置に入れて8分程度露光し、紫外線硬化樹脂を硬化させた。最後に、基板に丸ピンソケットをはんだ付けした。さらにはんだを覆うように、電極カバーを基板に接着剤で取り付けた。製作したセンサの写真を図図③-(1)-2-2.5右列に示す。

＜周波数特性＞

音響インピーダンス整合の効果を調べるために、ハウジング内部にシリコンオイルを満たしていないセンサを用意した。以降前者をオイルセンサ、後者を空気センサと呼ぶことにする。オイルセンサと空気センサの基礎特性として、周波数特性及びノイズレベルを以下の方法で計測した。これにより、ノイズに対してセンサが受信可能な信号の大きさがわかる。図③-(1)-2-2.6に示すセットアップを使い、図③-(1)-2-2.7に示すように、MEMS心音センサを加振し、周波数特性を計測した。

図③-(1)-2-2.8左列にオイルセンサ、空気センサそれぞれに対する周波数特性(FC) 及びノイズレベル(NL)の計測結果を示す。これから、ノイズレベルがセンサと周波数によって大きく異なっていることがわかり、このままでは周波数特性の比較は困難である。そこ



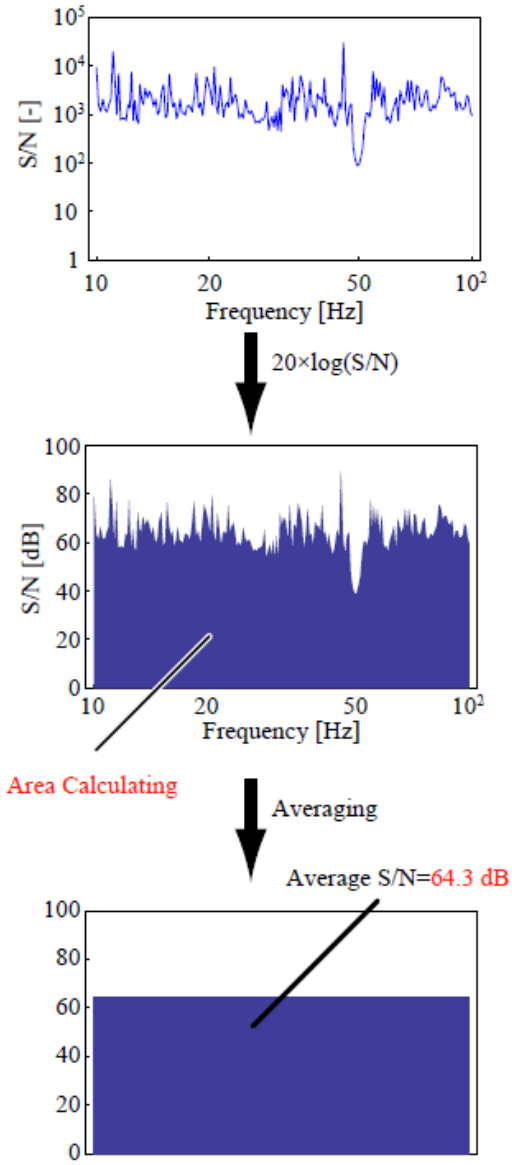
図③-(1)-2-2.8　MEMS 心音センサ周波数特性およびノイズレベル計測結果

で、各センサ、各周波数において、周波数特性(FC) の値をノイズレベル(NL) の値で割ることにより、この計測における各周波数のSN 比を定義する。

図③-(1)-2-2.8の計測結果全てに対してこの処理を行った。その結果、オイルセンサ、空気センサの各周波数におけるSN 比は図③-(1)-2-2.8右列のようになる。これより、SN 比は200 Hz 程度まではオイルセンサの方が空気センサよりも高い。しかし、それ以上の周波数では明確にどちらのSN 比が高いかを判断するのは難しい。そこで、次のような方法である周波数範囲におけるSN 比の平均を求めた。図③-(1)-2-2.9にその手順を示す。始めに、各周波数においてSN = FC/NL によって求めたSN 比をSN1 とおく。そして、次の式によってSN1 をdB 表示にする。

$SN2 = 20 \log_{10} (SN1)$

図③-(1)-2-2.9では、オイルセンサについて10 Hz から100 Hz の範囲で以上の処理を行っている。最後に、SN2 のプロットとSN2 = 0; Frequency = 10; 100 で囲まれる領域の面積を計算して、周波数範囲である90 で割ることにより10 Hz から100 Hz のオイルセンサの平均SN 比を求めることができる。以上の手順で、オイルセンサ及び空気センサについて、10 Hz–100 Hz、100 Hz–1 kHz、1 kHz–10 kHz の平均SN 比を計算したところ表③-(1)-2-2.2のようになった。これより、周波数特性の計測において、オイルセンサは10 Hz から1 kHzまでの範囲でSN 比60 dB の計測が行えていたことがわかる。同じ周波数範囲においては空気センサよりも高いSN 比で計測が可能であり、特に10 Hz–100 Hz においては、SN 比は



図③-(1)-2-2.9　SN 比データ処理の手順

30 dB 大きいという結果になった。オイルセンサについて、1 kHz–10 kHz のSN 比は10Hz–1 kHz に比べると小さくなるものの、SN 比40dB での計測が可能であることが示された。

表③-(1)-2-2.2：各周波数範囲におけるSN比[dB]

	10 Hz–100 Hz	100 Hz–1 kHz	1 kHz–10 kHz
Oil	64.3	64.3	41.9
Air	31.5	56.3	53.0

③-(1)-2-3　実験方法と結果（血圧）

③-(1)-2-3-1　超音波による血圧測定の原理検証：前提

③-(1)-2-1 で述べたように、先導研究においては、超音波診断装置による血管径と血流速の測定結果から脈圧に換算し、カフ加圧による血圧と比較を行うことにより、超音波による血圧測定の原理検証を行う。

脈圧は(F11)の右辺第２項の $\frac{\rho c^2}{A_0}\sum_{i=1}^{n}\Delta A_i$ の最大値と最小値の差になる。すなわち、$\frac{\rho c^2}{A_0}(A\max - A\min)$ である。c は(F10)すなわち $c=\frac{dQ}{dA}$ であるので、$Q=uA$ であることから、血流速、血管径の時間変化を測定することにより、脈圧を計算することができる。

③-(1)-2-3-2　超音波による血圧測定の原理検証：装置

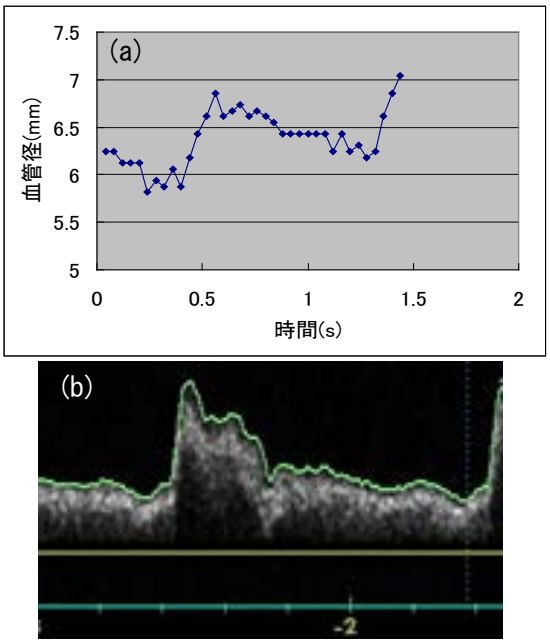
使用した装置は以下の通りである。

・超音波診断装置　GE Vivid S5

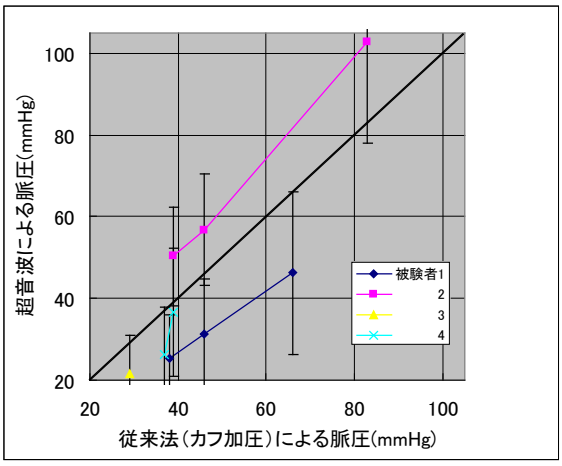
・上腕式デジタル血圧計　NISSEI DSK-1031

③-(1)-2-3-3　超音波による血圧測定の原理検証：測定方法

4 人の被験者に対して、臥位で右頸動脈の超音波エコーと血流速の時間変化を測定した。同時に左上腕部で血圧を測定した。超音波エコー像(周波数 11MHz、30fps の断層像)から血管径を測定した結果の 1 例を図③-(1)-2-3-3.1(a)、血流速（周波数 5MHz）を図③-(1)-2-3-3.1 (b)に示す。4 人のうち 2 人は脈圧上昇時の比較を行うため、安静時と、運動負荷後に測定を行った（図③-(1)-2-3-3.2 の被験者 1、2。運動負荷：約 10m の階段昇降を 1 往復）。



図③-(1)-2-3-3.1 (a)血管径と(b)血流速の測定例



図③-(1)-2-3-3.2 超音波、従来法による脈圧測定結果の相関

③-(1)-2-3-4　超音波による血圧測定の原理検証：結果

超音波と従来法による脈圧測定データの結果を表③-(1)-2-3-4.１に示す。表③-(1)-2-3-4.１の被験者1、2の3回目は運動負荷後の脈圧である。

図③-(1)-2-3-3.2、及び表③-(1)-2-3-4.１のように、超音波による脈圧は従来法に比べて概ね±30%程度の精度をもつ。また、被験者1、2の超音波による脈圧値は、運動負荷後も、安静時とほぼ同じ傾向のずれをもち、脈圧変化に対して良い相関をもつことが示された。

表③-(1)-2-3-4. 1 超音波と従来法による脈圧測定データ

被験者	回数	超音波による脈圧	従来法による脈圧	超音波/従来(%)	従来法最大血圧	従来法最小血圧
1	1	27.1	38	71	118	80
1	2	31.3	46	68	127	81
1	3	46.2	66	70	154	88
2	1	50.2	39	129	106	67
2	2	56.8	46	123	119	73
2	3	102.8	83	124	161	78
3	1	21.6	29	74	93	64
4	1	36.5	39	94	96	57
4	2	25.5	37	69	92	55

③-(1)-2-3-5　超音波による血圧測定の原理検証：考察

超音波による血管径､血流速からの計算により脈圧の導出が可能であることがわかった。今回の予備実験では精度は±30%で、十分な精度ではない。この精度を向上させる可能性について以下で考察する。

本方法の最大の誤差要因は、波長λ=0.14㎜の超音波（周波数11MHz）を利用した血管径の測定である。血管径の変化は0.3㎜（頸動脈、被験者1、2の平均）であるため、血管径分解能をλ/2=0.07㎜としても誤差は±20%となり、今回の測定精度±30%の大半を占める。その他の要因としては、装置の制約により、手作業でデータ入力をする、血管径、血流速が同時測定できないなど、専用機では基本的には解消されるものであるため、血管径分解能の向上がクリティカルな問題になる。

従って、血圧測定の精度向上のためには周波数を上げる必要がある。約2倍の20MHzにすることにより波長λ=0.07㎜となり、精度は2倍に向上する。他の要素を専用機にすることで解決すれば､最終的にはこの改善により±10%の精度が期待され､実用的な装置として利用可能になる。

③-(1)-2-3-6　血管モデルによる超音波測定：概要

本先導研究においては、将来的に患者の身体的負担の少ない非侵襲で且つ、常時装着が可能な血圧センサ及び測定システムを超音波技術及び超音波デバイスなどを用いて実現するために必要な設計仕様や知見、ノウハウなどの取得を目的とした。

具体的には、超音波振動子と血管モデルを用い、「超音波振動子の位置ずれによる血管径の測定」と「超音波振動子の入力電圧を可変させた時の血管径測定」を実施した。尚、血管モデルは医療現場などで血管縫合の訓練などに使用されている人工血管を用い、その

管内に擬似血液を封入し製作した。

③-(1)-2-3-7　血管モデルによる超音波測定：装置

使用した装置及び血管モデルは以下の通りである。

a. 装置

・超音波振動子　YT-001　油化電子株式会社

・ファンクションジェネレータ　33522A　アジレント・テクノロジー株式会社

・アンプ　ALM0010-2840FM　R&K.CO.LTD

・DC 電源　PAN16-10A　菊水電子工業株式会社

・オシロスコープ　DPO4104　Tektronix Corporation

・解析 PC　DELL PRECISION 390　デル株式会社

b. 血管モデル

・人工血管　HG-5X6　L200mm　株式会社ハギテック

・ドップラ擬似血液　707-G　ATS LABORATORIES Inc.

③-(1)-2-3-8　血管モデルによる超音波測定：実験方法

a. 超音波振動子の位置ずれによる血管径測定実験

超音波振動子を用いて人工血管の血管径を測定する際に、人工血管に対し超音波振動子の測定位置を意図的にずらし、超音波振動子の位置ずれによる人工血管径の測定誤差を検証した。実験系については、実験システム系統図を図③-(1)-2-3-8.1、実験系写真及び振動子位置ずれ実験概略図を図③-(1)-2-3-8.2 に示す。

・実験方法

（１）　人工血管の上方 10mm 程度の位置に超音波振動子を配置し、この時に人工血管の中心と超音波振動子の中心を合わせるように振動子を配置する。

（２）　人工血管の血管長手方向に対し、垂直方向に超音波振動子の位置を 0.2mm ピッチで XYZ ステージを用い移動し、バースト波を振動子に入力する。反射波データをオシロスコープにより取得し、得られたデータより人工血管径を算出する。

・超音波振動子入力バースト波条件

入力電圧　振幅 80V（アンプ増幅後）、入力周波数　13MHz、サイクル数　5

バースト波繰り返し周期　30μsec

b. 超音波振動子の入力電圧を可変させた時の血管径測定実験

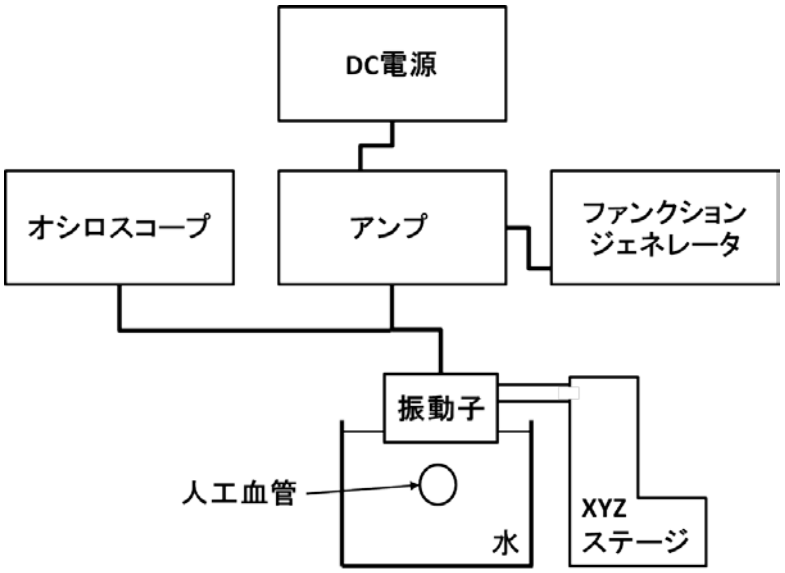
超音波振動子を用いて人工血管の血管径を測定する際に、超音波振動子への入力電圧を可変させ、入力電圧と人工血管径の測定誤差を検証した。

・実験方法

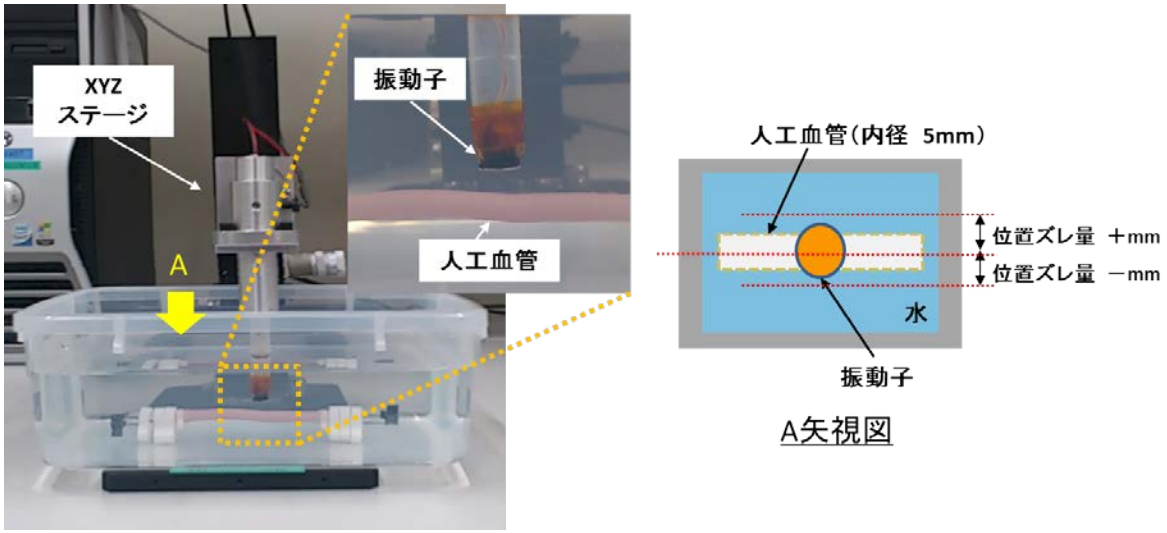
（１）人工血管の上方 10㎜ 程度の位置に超音波振動子を配置し、この時に人工血管の中心と超音波振動子の中心を合わせるように振動子を配置する。

（２）超音波振動子への入力電圧を80Vから4Vピッチで降下し、バースト波を入力する。反射波データをオシロスコープにより取得し、得られたデータより人工血管径を算出する。

なお、実験系及び超音波振動子入力バースト波条件（入力電圧以外）については、「a. 超音波振動子の位置ずれによる血管径測定実験」と同様とした。



図③-(1)-2-3-8.1　実験システム系統図

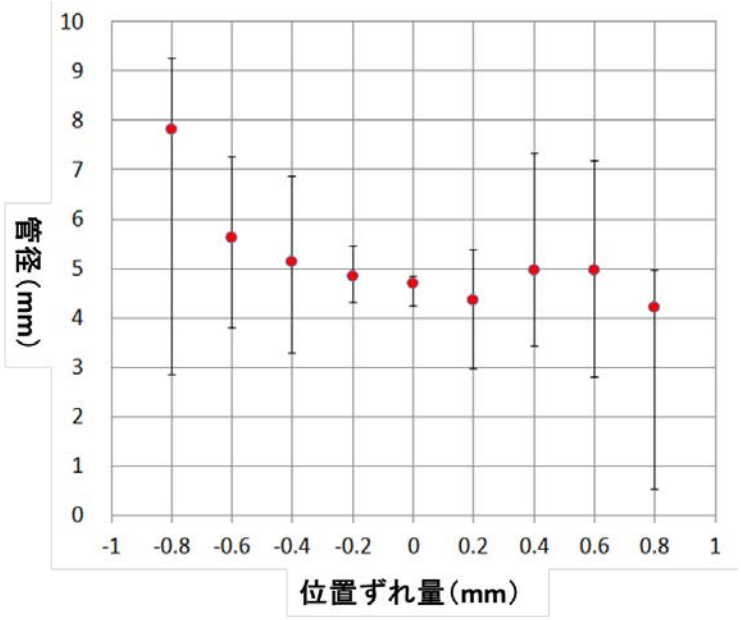


図③-(1)-2-3-8.2　実験系写真及び振動子位置ずれ実験概略図

③-(1)-2-3-9　血管モデルによる超音波測定：結果

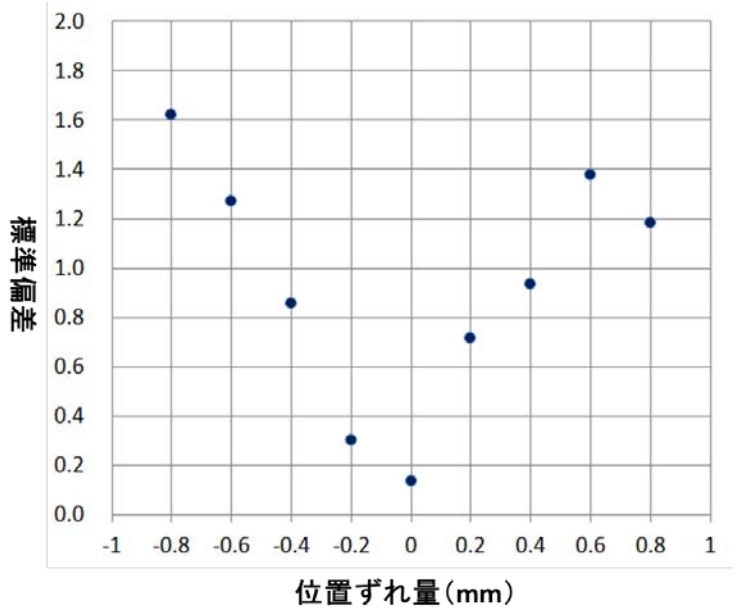
a. 超音波振動子の位置ずれによる血管径測定実験

図③-(1)-2-3-9.1 に超音波振動子の位置ずれと血管径の測定値を示す。本結果より、人工血管に対する超音波振動子の位置ずれを±0.4ｍｍ以下に収めることにより、約 10%以下の精度が得られることが確認できた。



図③-(1)-2-3-9.1　超音波振動子の位置ずれによる血管径測定結果

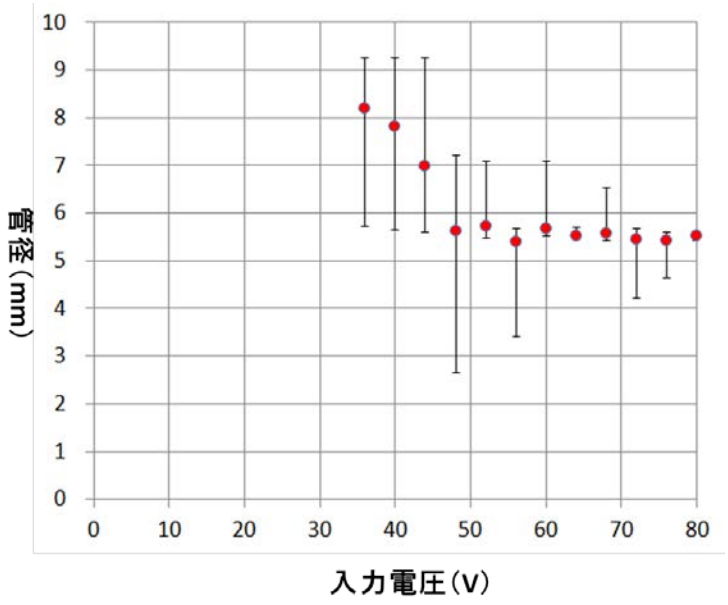
また、図③-(1)-2-3-9.2 より、超音波振動子の位置ずれを±0.2ｍｍ以下に収めることで、標準偏差（σ）0.8 以下が得られることが確認できた。



図③-(1)-2-3-9.2　超音波振動子の位置ずれと標準偏差

b. 超音波振動子の入力電圧を可変させた時の血管径測定実験

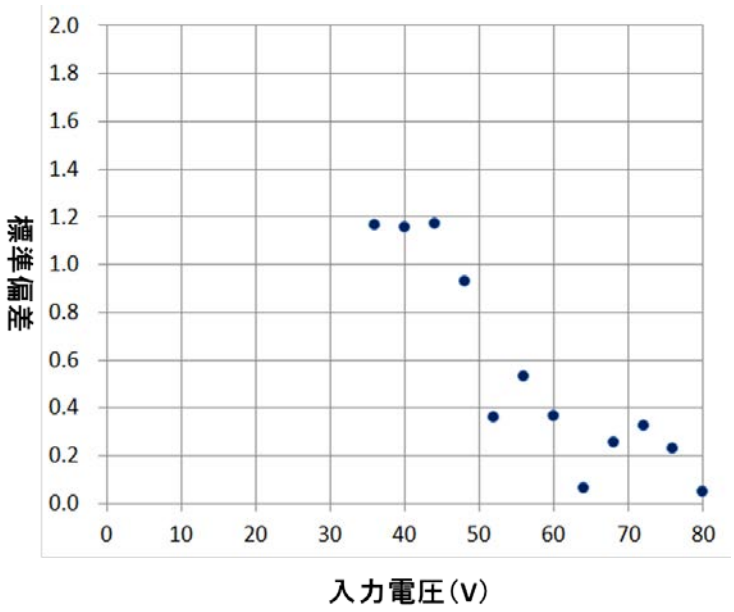
図③-(1)-2-3-9.3 に超音波振動子の入力電圧を可変させた時の血管径の測定値を示す。本結果より、超音波振動子への入力電圧を 60V 以上とすることにより、約 5%以下の高い精度が得られることが確認できた。



図③-(1)-2-3-9.3　超音波振動子の入力電圧と血管径測定結果

また、図③-(1)-2-3-9.4 より、超音波振動子への入力電圧を 60V 以上とすることにより、

標準偏差（σ）0.4 以下が得られることが確認できた。



図③-(1)-2-3-9.4　超音波振動子の入力電圧と標準偏差

③-(1)-2-3-10　血管モデルによる超音波測定：考察

上記のように、今回用いた超音波振動子による「超音波振動子の位置ずれによる血管径の測定と標準偏差」さらに、「超音波振動子の入力電圧を可変させた時の血管径測定と標準偏差」の結果を得た。

超音波振動子の位置ずれによる血管径の測定結果から、超音波振動子の位置ずれを±0.4mm 以下に収めることにより、約 10%以下の血管径の測定精度が得られた。この結果から、位置ずれ量と精度に関しては、ある程度実用的なレベルにあると考える。また、振動子に加える入力電圧を 60V 以上とすることで、±5%程度の血管径の測定精度を得られることが解った。

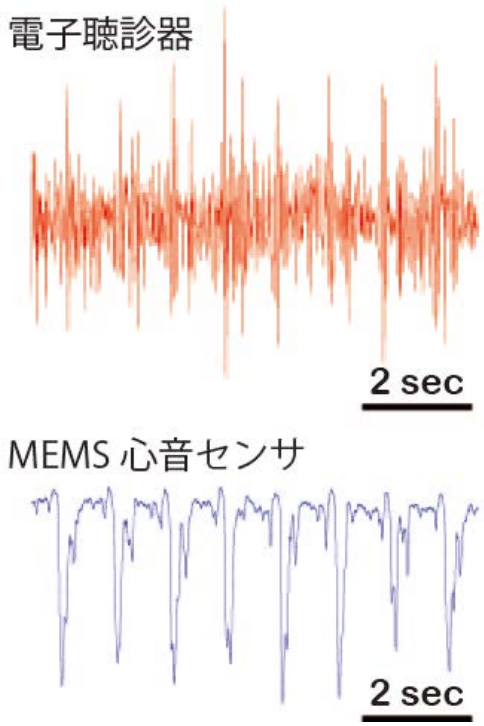
しかし、一方で標準偏差の観点から見ると、超音波振動子の入力電圧が 60V においても標準偏差（σ）は 0.4 程度で、さらに 50V を下回ると、ほぼ 1 以上となりバラツキが大きい。実用的な標準偏差を 0.25 程度にすると、満たしている電圧範囲は 76V～80V となり、今回の実験系では非常に狭い範囲になる。

対策として、1 点目は超音波振動子に入力する電圧の増加で、現状、約 32dB（約 80 倍）増幅するアンプを使用しているが、これを 40dB（約 100 倍）以上のアンプを使用する。2 点目は、S/N 比の向上で、ノイズのフィルタリングや必要な反射波のみ信号を入力できる回路系などが実用化では必要であると考える。

③-(1)-2-4　実験方法と結果（心音）

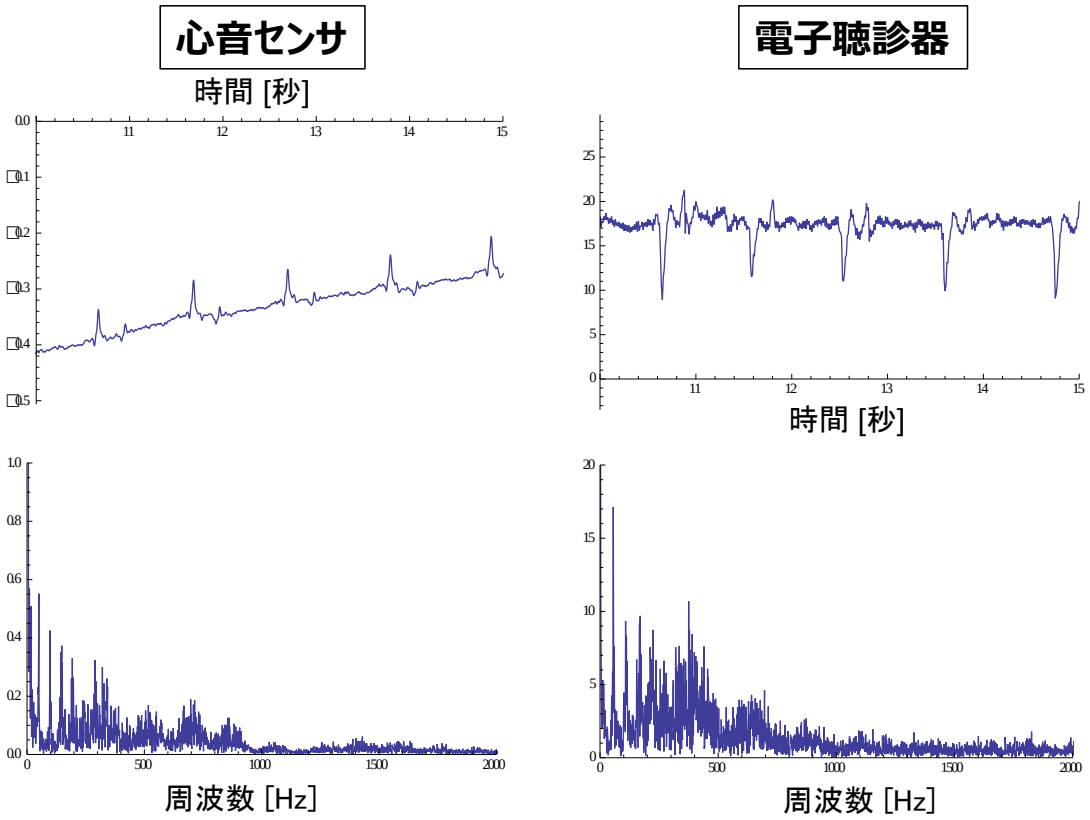
本節では、前節で作製したMEMS心音センサを用いて実際に人間の心音計測を行った実験について述べる。MEMS心音センサが適切に心音を計測しているかを確認するために、比較実験として電子聴診器での心音計測波形との比較を行う。また、MEMS心音センサが従来の聴診器と比較して、高周波領域の心音を計測できることを示すために、計測心音波形の周波数解析を行った。

図③-(1)-2-4.1に電子聴診器での心音計測波形とMEMS心音センサでの心音計測波形を示す。両波形は同一被験者（健常成人男性）のものである。なお、電子聴診器は3M社製、Littmann3200を使用した。電子聴診器による心音波形に比べて、MEMS心音センサではI音（心音のドックンという拍動音のドッに相当）及びII音（心音のドックンという拍動音のクンに相当）がきれいに計測できていることが分かる。



図③-(1)-2-4.1　電子聴診器及び MEMS 心音センサによる心音計測波形

また、図③-(1)-2-4.2にMEMS心音センサと電子聴診器による心音計測波形（上段）と、それらの波形を周波数解析した結果（下段）を示す。MEMS心音センサでは、1kHz以上の高周波領域で信号が検出されているのに対して、電子聴診器ではノイズのみであることが分かる。これらの実験により、本MEMS心音センサが可聴領域では電子聴診器と遜色なく心音を計測でき、加えて電子聴診器では計測できない高周波領域での計測が可能であることが示された。



図③-(1)-2-4.2　MEMS 心音センサと電子聴診器による心音計測波形
及び波数解析結果

③-(1)-2-5　調査方法と結果

東京大学、オリンパスから技術紹介、進捗説明を行い、自治医科大学苅尾先生、星出先生から、取得したデータの臨床的意味、医療現場でのニーズに関するご意見の聞き取りを行った。(2013.8.20、 2013.10.22、 2013.11.15、 2014.2.24) 結果は以下の通りである。

③-(1)-2-5-1　超音波血圧センサに対するニーズ

・血圧の連続モニタを行い、日内変動（モーニングサージ、夜間高血圧など）、長期トレンドを明らかにして医師の高血圧診断の基礎データとする。
・ビートバイビートの血圧を測定して血圧変動の標準偏差σを正確に求める。（人体システムのレギュレーションの診断）

③-(1)-2-5-2　超音波センサのその他のニーズ

・流速測定を行うことにより、測定位置より末梢部分での血管状態の悪化が明確にわかるの

ではないか。

・動脈硬化の指標となる末梢からの脈波の反射強度の連続測定が可能になり、2 次予防の新しい指標になるのではないか。

③-(1)-2-5-3　MEMS マイクロフォンによる心音測定の臨床的意味、ニーズ

・MEMS マイクロフォンは、ホルタ心電計と異なり、不整脈だけではなく III 音、圧較差（大動脈狭窄の際の弁前後の圧力差）などに伴う心雑音を検出できる可能性がある。

・1 週間程度の長期間にわたり、心不全を予測可能な III 音の発生頻度を検出し、重症度の分類を行う。

・圧較差に伴う雑音を検出し、重症度の分類を行う。大動脈狭窄は 70 才以上で 4 人に１人は持っている。加齢で悪くなる（III 音の心不全も同様）ので今後問題になる。

・不整脈の検出による心疾患の可能性の早期発見に利用可能である。

・心不全に対するβブロッカ投与のタイトレーションの際のモニタとして利用する。

③-(1)-2-5-4　MEMS マイクロフォンに対するその他のニーズ

・周期的な血管雑音が捉えることにより血管の狭窄発見が可能である。

・筋音センサとして、各筋肉の音を拾い、転倒防止センサに使うことができる。

以上の実験、調査より超音波による血圧、心音測定は技術的には実現可能であることが判明し、本技術が得意とする連続測定の特徴を活かした様々なニーズが存在することが明らかになった。

③-(1)-2-6　ユーザ機関による成果の有効性の検証

③-(1)-2-6-1　超音波血圧センサ

・連続モニタによりビートバイビート、日内や長期の変動を詳細に捉えることができる可能性が示された。本センサは循環器疾患の可能性のある患者に対する長期モニタ、リスク管理や、１次予防に役立つ。

③-(1)-2-6-2　MEMS マイクロフォンによる心音測定

・③-(1)-2-5 の調査結果で挙げられた III 音、圧較差による心雑音などを捉えることができる可能性が示された。従来心臓の動きの連続モニタリングはホルタ心電計であったが、MEMS マイクロフォンは心音の連続モニタリングができるため、血行動態の新たなモニタリング手法として期待できる。

従って、MEMS マイクロフォンは心疾患の可能性、前歴のある患者に対する長期モニタ、リスク管理に役立つ。

③-(1)-3　まとめ

＜将来開発すべきセンサシステム像＞

【超音波血圧測定】

血圧はヘルスケアのマスタバイオマーカであるが、これまで、カフ加圧を利用した測定方法以外に実用的な方法はなかった。しかし、血圧は大きな日内変動を持ち、この日内変動の大きさは循環器疾患のリスクと関連していることがわかってきている。検診などで高血圧の傾向を認められた患者はこの日内変動など、リスクの正確な把握のために連続的な血圧測定が必要になる、現在実用化されているカフ加圧を利用した 24 時間血圧計（ABPM）では、鬱血の防止のため 15 分から 30 分に 1 回の測定しかできない。また、上腕にカフをまいたまま、15 分に一度ずつ加圧される状態は日常生活には大きな不自由、ストレスになる。つまり、ABPM は、血圧測定に対するニーズを十分に満たしていないことになる。また、収集されるデータは長時間の連続データであるので、医師の判断が可能な形に処理する必要がある。そこで、開発すべきセンサシステムは下記のようになる。

・24 時間以上の連続測定可能
・カフによる加圧がなく、装着時にストレスを感じない。
・収集した連続データを、医師の判断が可能な形に高速処理することができる。

また、血圧の年単位にわたる長期トレンドの把握は 1 次予防のために必須である。このときに問題になるのは、血圧が大きな日内変動を伴うことである。従って、多数回の測定によりこの変動を平均化し、血圧変化の傾向を見いだす必要がある。このために必要なセンサシステムは下記のようになる。

・日常的な測定に負担を感じない高速測定（数秒）可能
・カフによる加圧がなく、装着時にストレスを感じない。
・収集した多数データを、ユーザが生活習慣を改善する参考にできる形に高速処理することが可能。

【MEMS マイクロフォンによる心音測定】

心音は不整脈の予兆を示す重要なファクタであるが、従来の代表的な心音計測手法であ

るホルタ心電計では長期の継続的な計測は困難であった。そのため、本研究で提案するMEMS心音センサの目指すべきセンサシステムとしては下記の機能が求められる。

・ユーザの負担なく、長時間連続測定可能な心音システム。

・センサの体への取り付け方としては、人間の体に負担が少ないパッチ式。

・日常生活では風呂に入ることが想定されるため、センサの着脱が容易、あるいは防水性があるためにセンサを付けたまま風呂に入ることが可能。

＜開発すべきシステムの技術課題･開発内容と目標＞

【超音波血圧測定】

日内変動によるリスクの正確な把握のための血圧測定を達成するためには以下の構成が必要である（図③-(1)-3-2-1.1、表③-(1)-3-2-1.1）。この構成により、血管径測定用、流速測定用の超音波を送信し、受信波により血管径、流速を測定し、これらの結果から連続的に血圧を測定して、データを蓄積することが可能になる。また、姿勢をモニタすることにより心臓との位置関係を把握し、重力による血圧の影響を取り除くことができる。

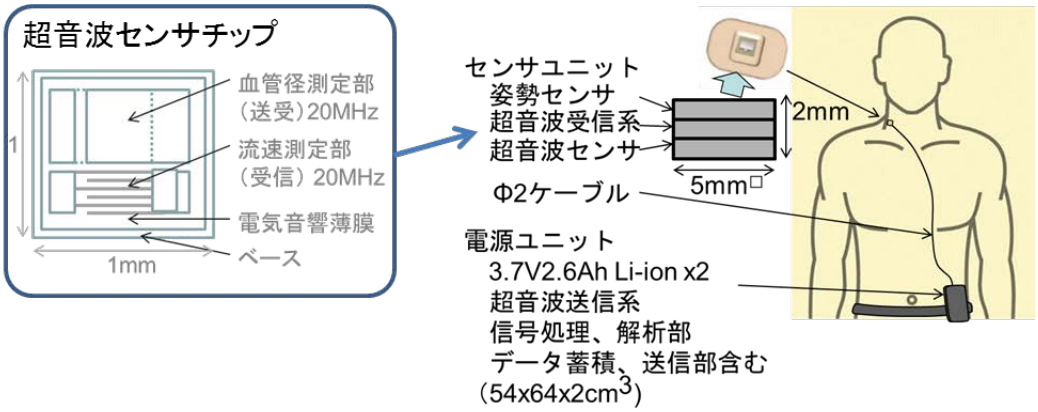
･センサユニット

－頸動脈部へのパッチ接着による装着が可能な5㎜ × 5㎜ × 高さ2㎜のセンサユニット

－センサユニットの下段は皮膚と接触する超音波送受信部から構成される。この受信部はさらに、垂直方向に20MHz超音波を送受信する血管径送信部と、斜め方向に20MHz超音波を送受信する流速測定部からなる。これらは電源ユニット側からの高周波信号により駆動される。

－センサユニットの中段は超音波受信系（プリアンプ）から構成され、送受信部からの信号を増幅し、電源ユニットの信号処理部に送る。電源は電源ユニットから供給される。

－センサユニットの上段は姿勢センサから構成され、鉛直軸に対する角度を検出することにより心臓との位置関係を検出し、重力による血圧変化を補正する。



図③-(1)-3-2-1.1 超音波血圧センサの構成

表③-(1)-3-2-1.1 超音波血圧センサと ABPM との比較

	超音波血圧センサ	ABPM（カフ式24時間血圧計
測定方法	パッチ型センサユニットを接着	カフを巻いて加圧
測定間隔	連続	1回/15分
連続測定時間	5日	2日
電源ユニット重量	200g	200g

・電源ユニット

－超音波送信系は血管径、流速測定用のパルスを送信する。

－信号処理部、解析部により超音波信号から血管径、流速を求め、血圧に換算され、データ蓄積部に蓄積される。

－電源の大半は超音波送信系で消費され、ここでの平均消費電力が 0.1W であることから、約 10Wh の電源により 5 日程度の連続測定が可能になる。

このようなシステムの開発上での技術課題は以下の通りである。

・小型で効率の良い電気音響変換が可能な超音波センサチップ

・効率及び S/N が良く、小型の電気系（送受信）

・原信号から血圧への高速処理が可能な信号処理系

本システムの目標は以下の通りである。

・カフ加圧を必要とせず、5 日間の連続血圧測定を行い、測定データを血圧に換算、蓄積することにより、医師の循環器疾患に対するリスク評価の指標を与える。

一方、1 次予防のために必要なセンサシステムの要件は③-(1)-3-1-1 の後半に記したとおりである。

このような長期にわたる測定では、内部電源による連続測定ではなく、別の方法を考える必要がある。今回の提案では、1 次予防のためには血圧だけでなく複数の生体情報（血糖値、コレステロールなど）の総合的な測定が必要になることから、職場、公共機関など様々な場所にユビキタスバイタルサイン測定パッドが設置されることを想定し、このシステムの中で必須の要素となる超音波血圧センサについて提案する（図③-(1)-3-2-1.2、表③-(1)-3-2-1.2）。

血圧の長期トレンドの正確な把握のための血圧測定のためには以下の構成が必要である。この構成により、血管径測定用、流速測定用の超音波を送信し、受信波により血管径、流速を測定し、これらの結果から血圧を測定して、データを蓄積することが可能になる。

・センサユニット

－指への装着が可能な指輪型センサユニット

－センサユニットは指動脈に接触する超音波送受信部から構成される。この受信部はさらに、垂直方向に 120MHz 超音波を送受信する血管径送信部と、斜め方向に 20MHz 超音波を送受信する流速測定部からなる。これらは測定パッド側からの高周波信号により駆動される。

・測定パッドと後処理系

－超音波送信系は血管径、流速測定用のパルスを送信する。

－信号はサーバに蓄積され、血管径、流速から、血圧、脈圧、PWV に換算される。解析データはスマートホンに送信され、自身の血圧の状態を常時把握することができる。

－血圧は、血管の硬さの変動が少ないと考えて血管径の変動から換算する。ただし,

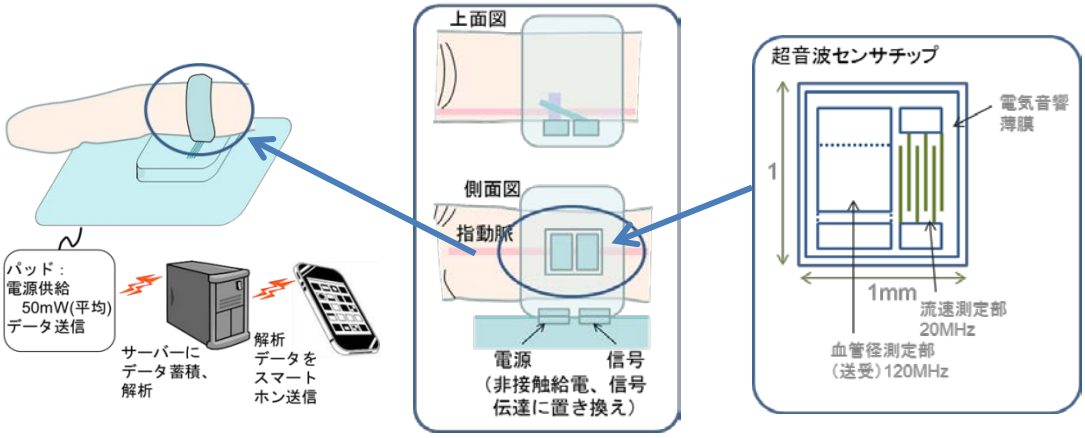
換算血圧は、血流速の測定から計算される脈圧値と常時比較され、異常がある場合は検査を促すアラートを出すことができる。

このようなシステムの開発上での技術課題は以下の通りである。

・小型で効率の良い電気音響変換が可能な超音波センサチップ

・効率及び S/N が良く、小型の電気系（送受信）

・原信号から血圧への高速処理が可能な信号処理系



図③-(1)-3-2-1.2　1次予防のための超音波血圧センサの構成

表③-(1)-3-2-1.2　超音波血圧センサとカフ式血圧計との比較

	超音波血圧センサ	カフ式血圧計
測定方法	測定パッドに接触	カフを巻いて加圧
測定時間	3秒	1分
データ収集、解析	自動	ユーザーが行う

本システムの目標は以下の通りである。

・カフ加圧を必要とせず、短時間でユーザに対するストレスなく血圧測定を行い、測定データを血圧、脈圧、PWVに換算、蓄積してユーザが常に自身の状態をモニタできる環境を構築し、生活習慣改善の指標を与える。

【MEMSマイクロフォンによる心音測定】

将来開発すべきMEMS心音センサシステムとして、2次予防のためのセンサシステムを想定している（図③-(1)-3-2-2.1）。また、表③-(1)-3-2-2.1に提案するMEMS心音センサシステムと、従来の心音計測システムであるホルタ心電計との比較を示す。

・センサ/電極サイズ

我々の目指す心音計測システムはユーザの負担なく長時間連続で計測可能なシステムである。そのため、センサはパッチ式で皮膚に固定することが望ましい。ユーザはパッチ

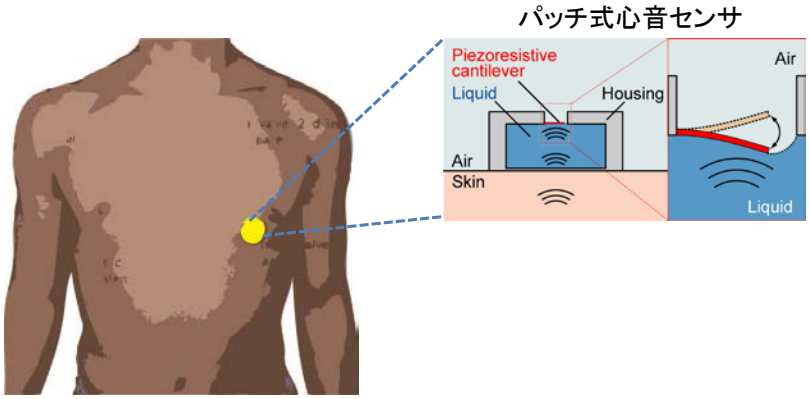
でセンサを固定したまま日常の生活を送ることが可能となる。パッチ式でのセンサ固定を想定すると、センサ本体の大きさは 5mm×5mm、重量は 1g 程度である必要がある。

・連続計測可能時間

従来の心音計測の問題点として、長期の連続計測ができないということが挙げられる。心不全の予兆である不整脈は、常に発生するものではないため、医師の聴診診察時、あるいはホルタ心電計による心電図計測のような短時間では、必ずしも検出することができなかった。そのため、本センサシステムでは最低でも 1 週間程度の連続計測可能時間が望ましいと考えている。1 週間分の心音データをメモリに保存し、次回の医師診察時にデータを提出する。医師が 1 週間分の心音データを観察し、心音パターンに異常が見られないか確認をするといった使用モデルを想定している。

・消費電力

上記のように、長時間の連続計測が想定されているため、消費電力もバッテリの容量を考えると低消費電力であることが重要である。従来のホルタ心電計の計測システムの消費電力はおよそ 1mW で、計測可能時間が 2 日であることを考えると、目指すべき心音センサシステムでは 0.1mW 程度の消費電力であることが望ましい。



図③-(1)-3-2-2.1　　2 次予防のための MEMS 心音センサの構成

、表③-(1)-3-2-2.1　ホルタ心電計と提案する MEMS 心音センサシステムの比較

	ホルタ心電計	MEMS 心音センサシステム
センサ/電極サイズ	20㎜×20㎜	5㎜×5㎜
パッチ重量	5g	1g
消費電力	1㎽	0.1㎽
計測できるもの	不整脈など	III 音、不整脈、血流雑音
汗の影響	あり	なし
連続計測可能時間	2 日	1 週間

＜開発されるセンサシステムを適用した場合に期待できる具体的効果、インパクト＞

循環器疾患のリスク保持者に対して、他の方法では不可能であった血圧、心音の連続的測定手段を医師に提供することにより、より有効な治療に結びつけることができる。また、投薬の際のタイトレーションのモニタとして利用することにより、治療現場でもより精度の高い投薬が可能になる。

また、1 次予防の場でもストレスのない血圧モニタにより、ユーザの自発的な生活習慣の改善に結びつけることができる。

これらの効果により、循環器疾患の悪化を防ぎ、国民の健康寿命、QOL の向上に資する。ひいては増大する一方の医療費の削減にもつなげることができると考えている。

参考文献

1) 菅原他、“血液のレオロジーと血流”、コロナ社、PP. 103-106、(2003)

2) BART W. A. M. M. BEULEN et al.: “TOWARD NONINVASIVE BLOOD PRESSURE ASSESSMENT IN ARTERIES BY USING ULTRASOUND”、 Ultrasound in Med. & Biol.、 37、 788–797 (2011)

3) 1) T. Kaneko, et al., “Measurement of mechanomyogram, ” IEEE MEMS 2014, pp. 845-848, (2014).

③-(2)　予測型血糖センサシステムの開発

【テルモ株式会社、再委託：国立大学法人東京大学竹内研究室】

生活構造の変化に伴い糖尿病や肥満などの生活習慣病を患う人口が増加しており、様々な合併症と合わせた医療費増加の要因となっている。生活習慣病の一つである糖尿病は厳格な血糖コントロールが必要となるが、現在使われている血糖測定は採血方式しか実用化されておらず、１日あたり最低４回の定点測定が必要とされる。血糖値は日内変動が大きいため、インスリン治療を受ける糖尿病患者にとってはこのような定点採血情報だけでは厳格な血糖コントロールをするには情報が不足している。そこで、定点測定した血糖値について、血糖値と各種バイタルサイン、イベント情報を目的に合わせて処理し、血糖コントロールにとって有用な情報を導きだすことができるセンサシステムが強く求められている。これらの課題を解決するために、採血型血糖測定器と併用して、常時装着型の多種類センサのバイタル情報を時系列的に連続的に取得し、定点血糖測定間のトレンド情報などを高精度に推定し、これら血糖値変動情報に基づいたインスリン投与などの最適治療や健康管理を実現するセンサシステムの方向性、技術課題の明確化を目指す。

③-(2)-1　研究の目的

＜社会課題＞

ストレスによる精神疾患、糖尿病や肥満などの生活習慣病を患う人口が増加しており、高齢化社会における医療費の増加の要因となっている。これは、従来の健康管理方法が、現在の生活環境に対して体調をコントロールするための指針を適切に提供できていないためと考えられる。糖尿病などの生活習慣病は、日々変化する生活環境に対し、目に見えない体調（バイタルサイン）の変化に依存するところが大きく、それらをコントロールする能力の欠如によるところが大きい。したがって、日常生活の中で自らの健康状態を無意識にモニタリングすることが予防医療における課題である。そのためには、非侵襲で拘束性なく無意識に計測できる手法が必要となるが、生体情報のうち血糖値など一部の項目については採血検査が必要になり、非侵襲的手法での測定が難しい量となっている。

本研究においては、近年急速にその患者数を伸ばし様々な合併症も引き起こす糖尿病に焦点を当てた。糖尿病の完全な治療法は確立されておらず、糖尿病患者はインスリンなどの血糖降下薬を使って血糖のコントロールをしている。しかし、血糖コントロール不順のため合併症を発症してしまう患者も多く、糖尿病と合併症を合わせた医療費は１兆円を超え、医療費抑制の面からも大きな課題となっている。

＜現状の取り組みと課題＞

糖尿病患者は自分の血糖を一定の範囲にコントロールするため、毎日の血糖測定が必要となるが、現在使われている血糖値計測は最も簡便な方法でも採血方式しか実用化されておらず、１日あたり最低４回の定点測定が必要とされる。不快感や安全性を考慮すると、患者の QOL は低い。また、血糖値は日内変動が大きいため、インスリン治療を受ける糖尿病患者にとっては、このような定点の血糖値情報だけでは、厳格な血糖コントロールを実現するのには情報が不足している。例えば同じ血糖値であっても、下降上昇どちらに向いているのかによってインスリン投与量を変えることが望ましい。これにより過度のインスリン投与による低血糖症状の防止や、効果的な血糖降下作用が得られる。インスリン投与が必要な重篤患者の治療や医療従事者への負担低減の観点から、厳格な血糖コントロールと適切な治療行為につなげるため、高精度で日常の血糖変動のトレンドを示すことができる血糖測定方法の実現が課題である。

上記のような課題に対して、定点測定した血糖値について、血糖値と各種バイタルサインやイベント情報を目的に合わせて処理し、測定時のトレンドや定点測定間の血糖変動を予測できるセンサシステムが強く求められている。

＜実施内容と最終目標＞

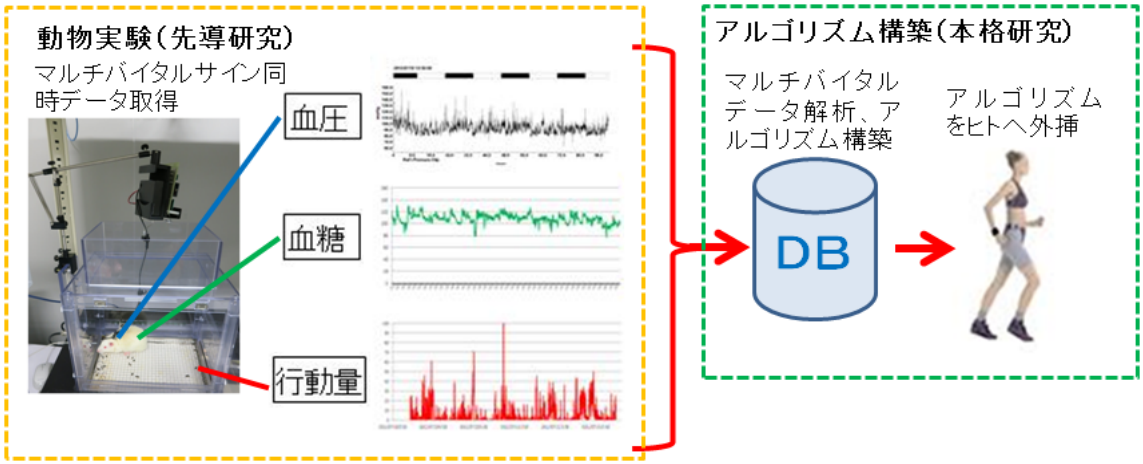
本研究では血糖変動を予測するための予測型血糖値センサシステム実現に向け、マルチバイタルサインデータ処理システムのプロトタイプ開発を目指すことで、本センサシステムの技術的課題や開発の方向性を整理する。具体的な実施内容は以下の a、 b である。

a. 5 種類以上のマルチバイタルサインについて 24 時間常時連続モニタリング実験システムの確立（図③-(2)-1.1）

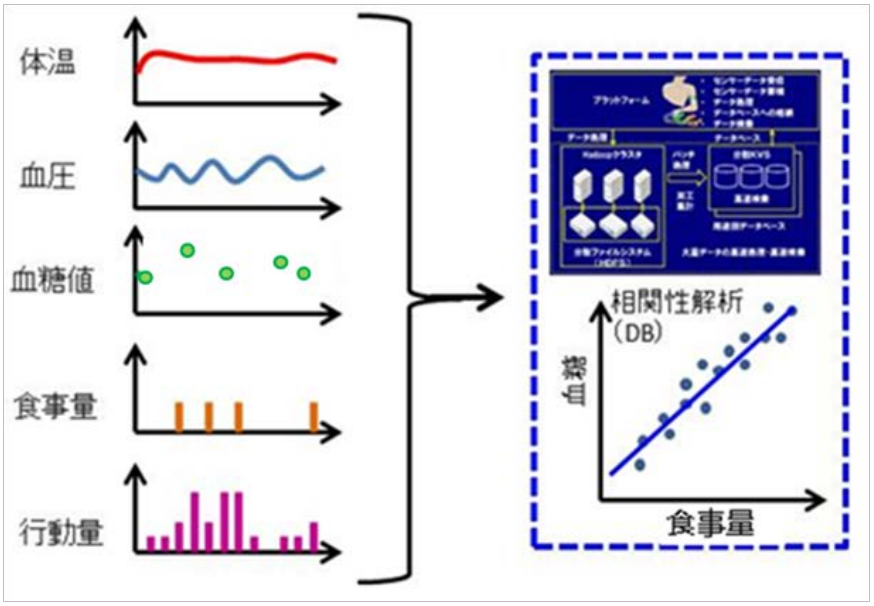
小動物に各種バイタルセンサを埋め込み、マルチバイタルサイン（5 種類以上）の 24 時間常時連続モニタリングを行う。また、上記センサが埋め込まれた小動物を摂食、飲水、行動量などのイベントについて常時測定できるケージ内で飼育し、マルチバイタルサイン及びイベントデータを同時測定する実験システムを確立する。本実験システムを利用し、予測型血糖センサシステムに必要とされるマルチバイタルサインの基礎データを取得する。

b. マルチバイタルサインデータ解析実施へ向けたデータベース設計（図③-(2)-1.2）

24 時間常時連続モニタリング実験にて得られた基礎データに基づき、マルチバイタルサインの相関性を活用した血糖変動予測システムの構築へ向けたデータベース設計指針を検討し、本システムの技術的課題を明確化する。



図③-(2)-1.1　マルチバイタルサイン測定イメージ



図③-(2)-1.2　マルチバイタルサインデータベースイメージ

③-(2)-2　マルチバイタルサイン連続モニタリングシステムの確立

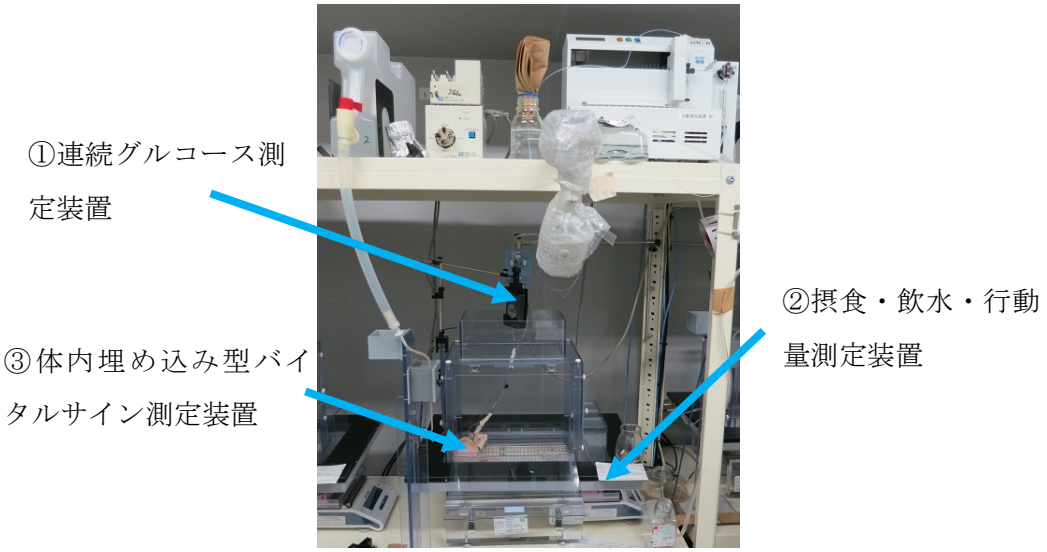
多くのバイタルサインデータを取得でき、扱いが容易な動物としてラットを選択した。ラットを用いた理由は､我々の既存技術としてラットの連続グルコース測定の経験があり、これに各種イベントやバイタルサインを測定可能な各種センサ、特殊ケージを備えることでマルチバイタルサインデータの連続測定が可能だと考えたからである。また、ラットは比較的体が大きく体力があるため様々なセンサを装着した長期間の実験に耐えることができる。本研究で使用したセンサシステムは以下の３つから構成される（図③-(2)-2.1）。

① 連続グルコース測定装置

② 摂食・飲水・行動量測定装置：

③ 体内埋め込み型バイタルサイン測定装置

②の装置は食餌量などのモニタリングだけでなく、食餌の量と時間を自由にコントロールできる機能が備わっており、実験に合わせた条件を規定することができる。以下、マルチバイタルサイン連続モニタリングシステムの構成について詳細に述べる。



図③-(2)-2.1　マルチバイタルサイン連続モニタリングシステム全体図

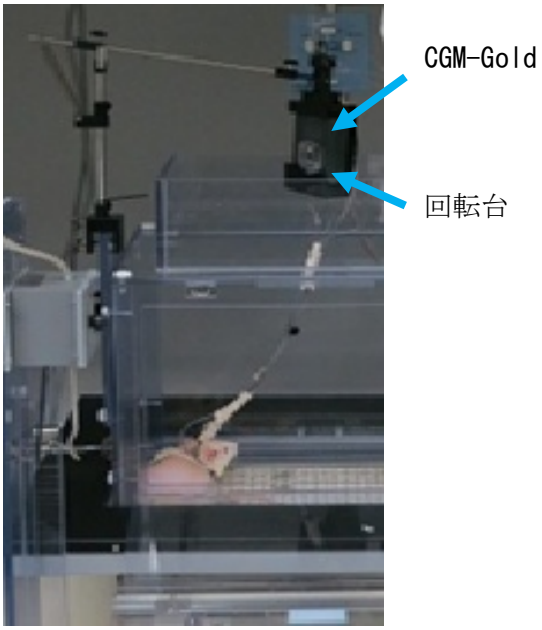
③-(2)-2-1　マルチバイタルサイン連続モニタリングシステムの各論

③-(2)-2-1-1　連続グルコース測定装置

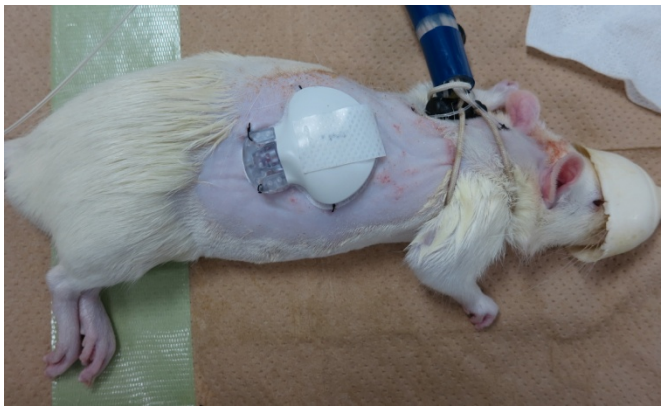
連続グルコース測定にはMedtronic社の連続グルコース測定システム（CGM-GoldとiPro2を併用）を使用した。CGM-Goldはセンサと装置本体がコードで接続されるタイプであり、ラットの腹側部にセンサを装着する。装置は実験ケージ上部に設置された回転台にセットした。回転台がラットの動きに合わせて回転するため、ラットが動き回ってもコードが絡むことはない（図③-(2)-2-1-1.1）。本装置は動物に装着する部分が小さく済むため動物の行動を制限する可能性が低い。通常は、こちらの装置を使用した。ただし、ラットによっては上から多少押さえつけられるようになるのを嫌がる個体もおり、コードを噛み切ってしまう事象が度々発生した。そのため、連続グルコース測定の補助として同様の動作をするiPro2を使用した。iPro2はコードが無いタイプの装置であり、センサを直接装置に接続して使用する（図③-(2)-2-1-1.2）。センサと装置が一体となるため、両方を動物の腹側部にテーピングテープで固定した。iPro2は動物と装置の距離が近いため自ら破壊することが予想されたが、実験期間中の故障はなかった。測定後、両装置とも専用のアダプタを介し

てパソコンと接続し、データを転送した。

なお、本測定装置は 1 日最低 4 回のキャリブレーションを必要とするため、自動採血装置にて採血した血液を簡易型血糖測定器で測定し、定期的に測定値を記録した。



図③-(2)-2-1-1.1　CGM-Gold と絡み防止用回転ジグ

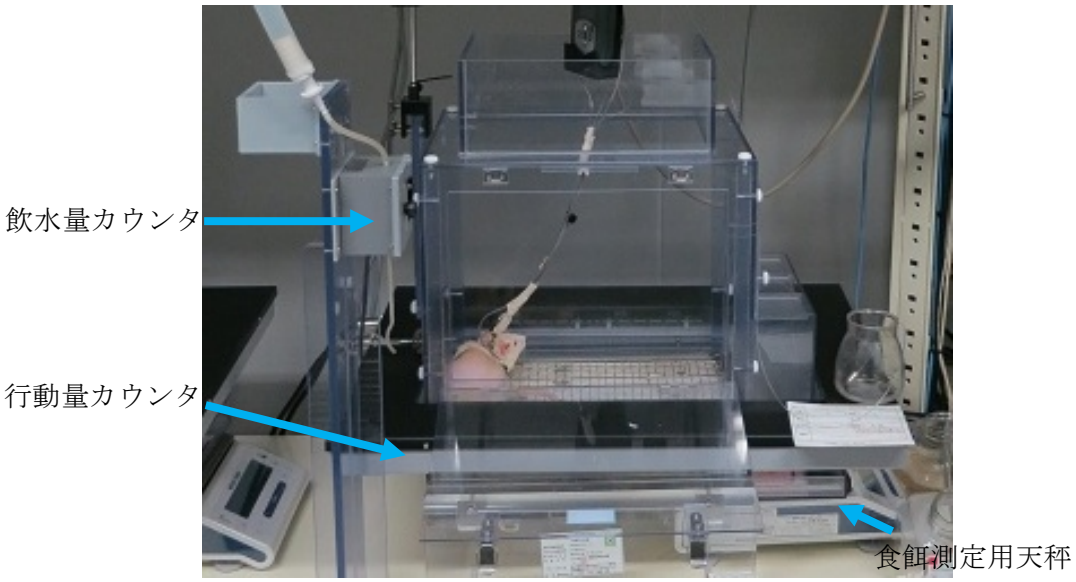


図③-(2)-2-1-1.2　　iPro2 装着写真

③-(2)-2-1-2　摂食・飲水・行動量測定装置

食餌などのイベント測定及び食餌量のコントロールにはシンファクトリー社の摂食・飲水・行動量測定装置を使用した（図③-(2)-2-1-2.1）。摂食量は電子天秤にセットされた餌量の変化を 1 分毎に自動でモニタリングした。飲水量は点滴筒を通過する液滴数を自動でカウントし、液滴数を水量に換算した。行動量はケージ側面に張り巡らされたボード内に内蔵されたセンサ間を通過した数を自動でカウントした。なお、ラットは夜間に摂食行動を取るが、その回数や間隔はランダムでラットが空腹になると食べる。そのため、一旦血

糖値が上昇するとその後は眠るまでほとんど変化することがない。そこで本研究では食餌による血糖変動を作り出すため、本装置を用いて食餌量と時間を調節した。実際のタイムスケジュールは後述する。

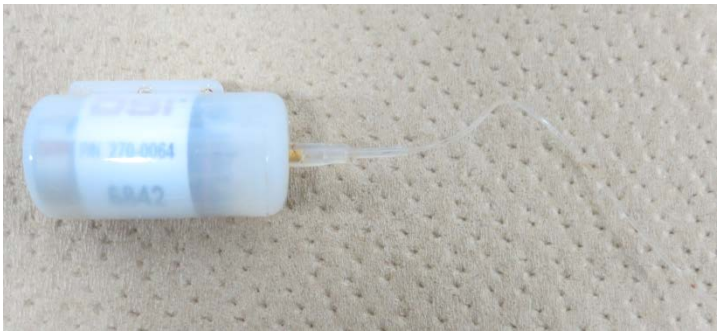


図③-(2)-2-1-2.1　摂食・飲水・行動量測定装置

③-(2)-2-1-3　体内埋め込み型バイタルサイン測定装置

血圧、体温などのバイタルサイン測定には、プライムテック社のテレメトリー自動計測システムを使用した。センサ付属のカテーテルを直接動脈内に留置し、センサ毎体内に埋め込む。センサのデータはケージ外側に設置した通信ボードを介してパソコンにデータが転送され、パソコンの画面ではリアルタイムにデータを解析することが可能である。本センサを用いて血圧、脈圧、体温、脈拍、呼吸数を測定できる。

挿入するセンサを図③-(2)-2-1-3.1 に示す。センサ付属の血圧測定用カテーテルをラットの下肢大腿動脈に挿入し、センサ本体を大腿部付近に埋め込んだ（図③-(2)-2-1-3.2）。なお、無線通信が外部ノイズの影響を受けやすいため、ケージ側面をアルミ箔で覆いノイズの影響を防いだ（図③-(2)-2-1-3.3）。



図③-(2)-2-1-3.1 埋め込み装置外観



図③-(2)-2-1-3.2　下肢大腿動脈へのカテーテル及びセンサ留置の様子



図③-(2)-2-1-3.3　アルミ箔でのノイズ対策

③-(2)-2-2　マルチバイタルサイン連続モニタリングの実験方法

装着するセンサ、装置の数が多くラットへの負担が大きいことから、データの取得は1個体につき2回までの実施とした。なお、連続グルコース測定装置で使用するセンサは3日間しか測定できないため、1度測定した後センサを取り外し、2回目の実験を行った。摂食スケジュールの学習や施術の負担も考慮した各種装置の装着は1個体に対して以下の手順で行った。

0～7 日目　　：実験ケージ内にて摂食スケジュールの学習

(１サイクル目)

8 日目　　：体内埋め込み型センサの留置（麻酔）

9 日目　　：血糖センサ 1 個目装着（麻酔）

10～11 日目　：データ取り

12 日目　　：血糖センサ取り外し（麻酔）

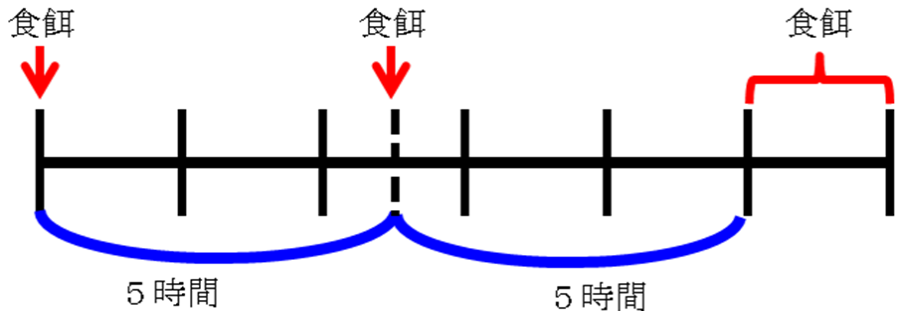
（２サイクル目）

12～14 日目　：回復期間

15 日目　　：血糖センサ 2 個目装着（麻酔）

16～17 日目　：マルチバイタルサインデータ取り

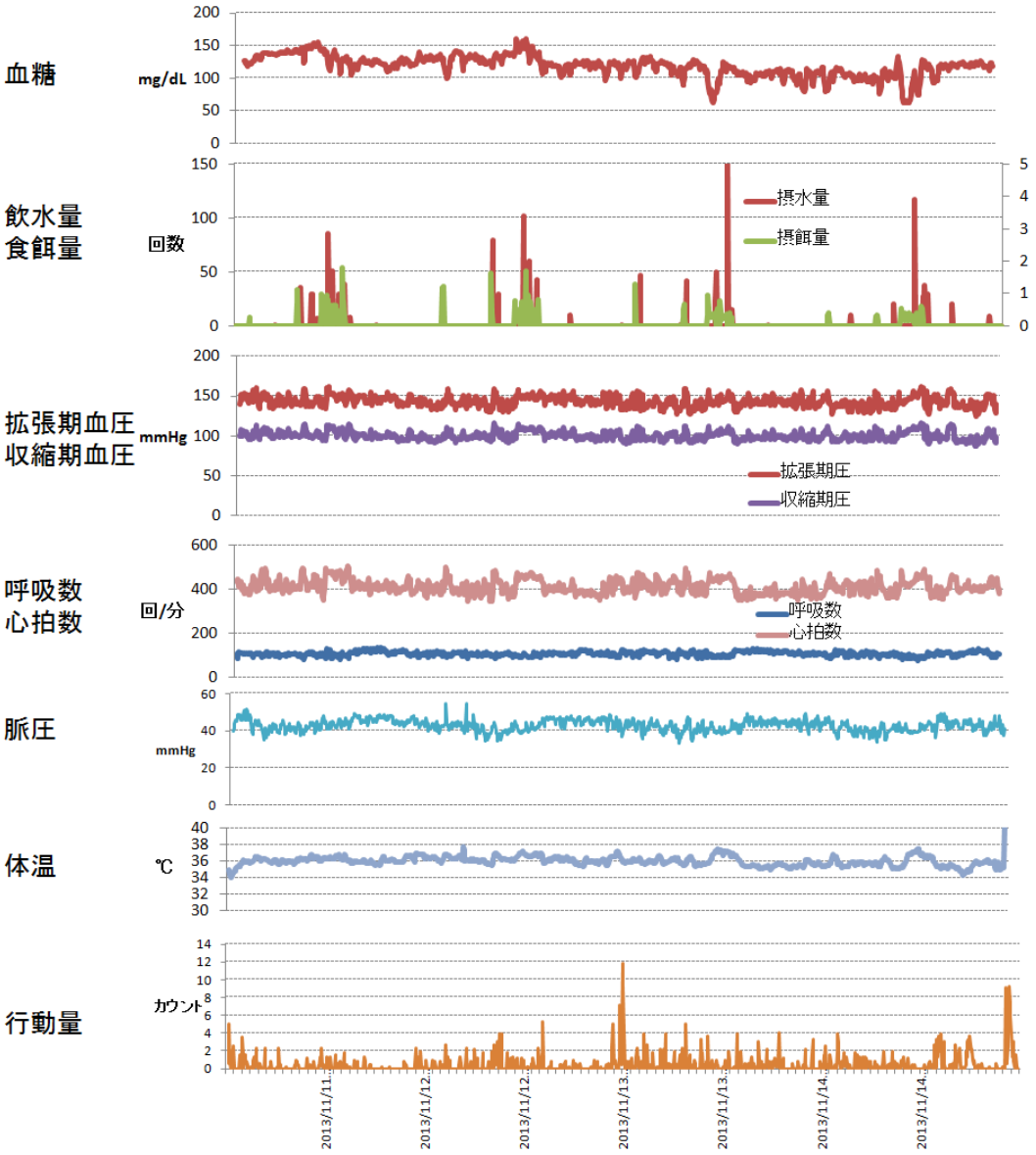
上記述べたように、ラットは通常暗期にランダムな間隔で食餌を摂る。これまでの検討によりラットに食餌をランダムに摂らせた場合、最初の食餌後から睡眠時まで血糖が一定になることが分かっている。そのため、図③-(2)-2-2.1 に示すように、食餌の量と時間が一定になるように制御し、1 回の食事が 2～3g となるように設定した。また、血糖が上昇してから完全に下がりきるまでの時間は個体によって違うため各食事開始から 5 時間の間隔をおいた。なお、ラットは 1 日 20g 以上の餌を食べるため、本検討の終了後 2 時間は自由にえさを食べられる時間とした。



図③-(2)-2-2.1　食事スケジュール

③-(2)-2-3　マルチバイタルサイン連続モニタリング結果

1 サイクル、3 日間におけるマルチバイタルサイン連続測定結果の例を図③-(2)-2-3.1 に示す。このように、本システムでは 10 種類（血糖、食餌量、体温など）の項目について連続測定したデータが同時に得られる。本グラフからも、3 日間における各パラメータの変化や食餌を食べたときの血糖変動が確認できる。なお、測定開始前で各装置間の時計を合わせ、測定中も定期的に時計のずれをチェックした。



図③-(2)-2-3.1　マルチバイタルサイン連続データ

③-(2)-3　マルチバイタルサインデータ解析手法の検討

取得したマルチバイタルサインデータを解析し、血糖以外のパラメータを用いて未来（数十分後）の血糖変動を予測するため、多変量解析手法を用いた。多変量解析では、ノイズ成分を排除するため、まずは血糖変動予測に必要なパラメータについて抽出した。その後、それらを用いて 5 分間隔で血糖変動予測値を計算し、実測血糖値と比較した。

③-(2)-3-1　最適パラメータ探索

より予測精度の高い回帰を実施するためには、パラメータ（説明変数）を選択する必要がある。ノイズ成分となるような変数が存在すると、本来は関係のない変数の変動が予測値（目的変数）の変動となって影響する。本研究ではパラメータ選択を実施するため、ステップワイズ法を用いた。ステップワイズ法は説明変数を増加させたり減少させたりしながら、検定量（F 値）が最も高くなるように変数を選択する方法である。ステップワイズ法の詳しい説明については、すでに多く成書が出ているため、そちらを参照されたい。本研究では目的変数と説明変数を以下のように設定した。

目的変数：血糖値
説明変数（9 種類）：飲水量、摂餌量、行動量、拡張期血圧、収縮期血圧、脈圧、呼吸数、体温、脈拍

表③-(2)-3-1.1 にステップワイズ法を用いて導き出された変数の候補を示す。〇は変数として選ばれたことを表す。左の時間は、何分後の目的変数に対する説明変数候補であるかを示す。例えば 20 分の行は、20 分後の血糖値を予測するために必要となる説明変数となる。本結果より、呼吸数、行動量、収縮期血圧、体温はほとんどの予測において変数として選ばれる傾向があった。以下の多変量回帰では、各時間で使用する説明変数の種類を変更せず、説明変数を呼吸数、収縮期血圧、脈圧、行動量、体温の 5 つとして多変量回帰計算を実施した。

表③-(2)-3-1.1　ステップワイズ法の結果

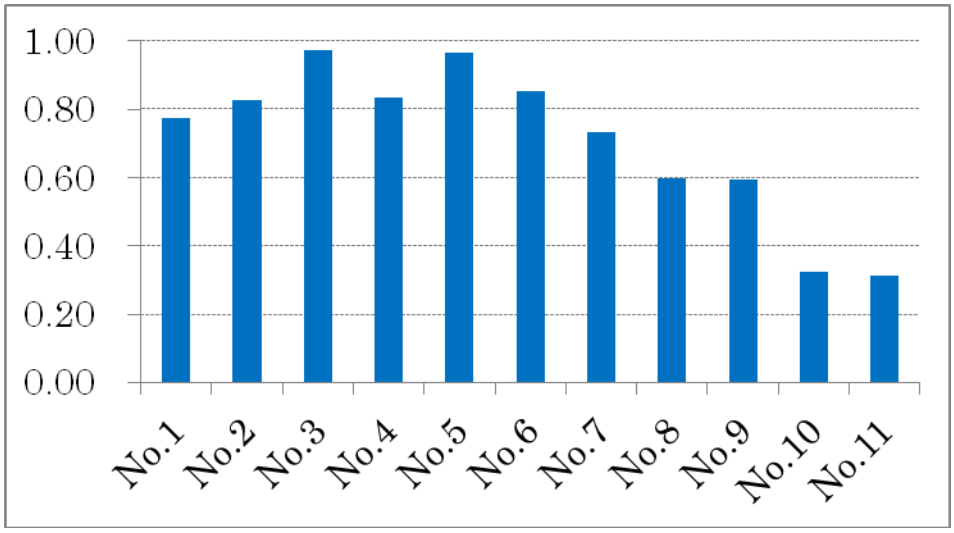
時間(分)	摂水量	摂餌量	呼吸数	拡張期血圧	収縮期血圧	脈圧	行動量	体温	心拍数
5	×	×	×	×	×	〇	〇	〇	〇
10	×	×	×	×	〇	〇	〇	〇	〇
15	×	×	〇	〇	〇	〇	×	〇	×
20	×	×	〇	×	〇	〇	〇	〇	×
25	×	×	×	×	×	〇	〇	〇	×
30	×	×	〇	〇	〇	×	〇	〇	×
35	×	×	〇	〇	〇	×	〇	×	×
40	×	×	×	×	×	×	×	×	〇

③-(2)-3-2　多変量回帰による推定精度の評価（各個体の比較）

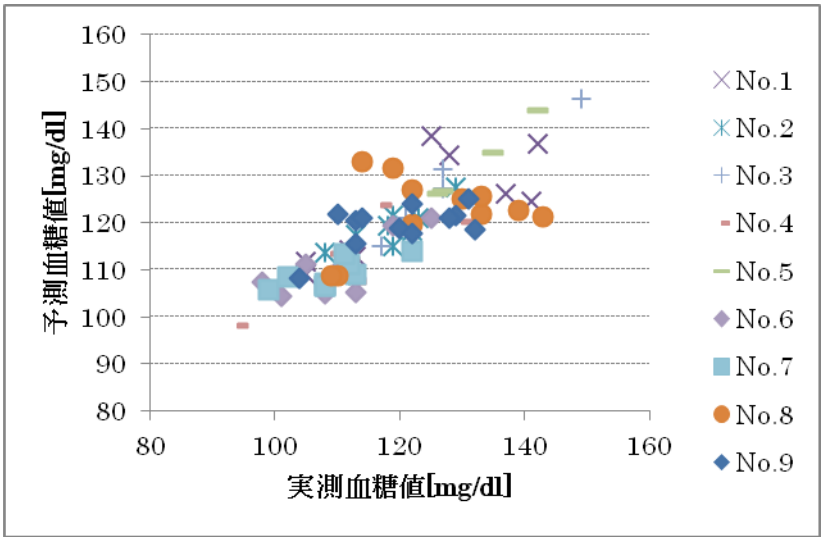
10 分後の目的変数に対して算出した血糖の予測値と、実際に測定した血糖値について、個体毎に相関係数を計算した結果を図③-(2)-3-2.1 に示す。横軸は個体番号、縦軸は相関係

数を示す。No.1～9 の実験においては高い相関性を持った予測値を得ることができた。しかし、残りの 2 つの実験では 0.3 付近であり、相関性は低かった。これらの結果について横軸を実測値、縦軸を予測値としてプロットした結果を図③-(2)-3-2.2、図③-(2)-3-2.3 に示す。相関性が高いプロットではほぼ直線状にデータが存在しているが、相関性の低いプロットはそのような傾向が見られなかった。

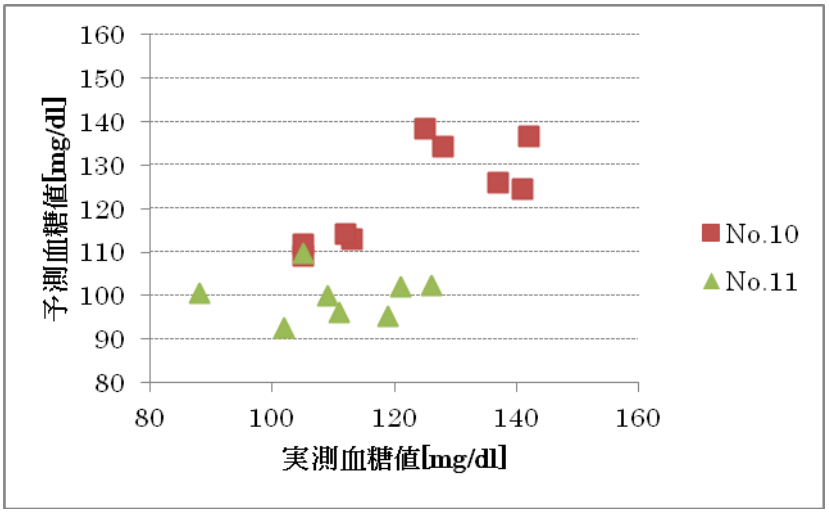
実験毎の相関性に差が出てしまう原因としては、計算で用いた説明変数の重要度が各個体によって違うことが考えられる。今回計算で用いた説明変数は各個体について最適化したものではなく、全ての個体を平均的に考えた場合に得られる情報である。したがって、相関性が低い個体では、ここで選ばれた呼吸数や行動量といったパラメータが血糖値の予測にとって関係がなく、逆にノイズとなってしまった可能性が考えられる。また、体温や血圧は常に一定の値をとっておりそこから徐々に変化するが、行動量については何も行動しない場合と、行動している場合の差が大きく、行動の大きさの程度が血糖の予測値に大きく影響してしまったことが予想される。



図③-(2)-3-2.1　個体毎の相関係数比較



図③-(2)-3-2.2　実測値と予測値の比較（相関性が高い場合）

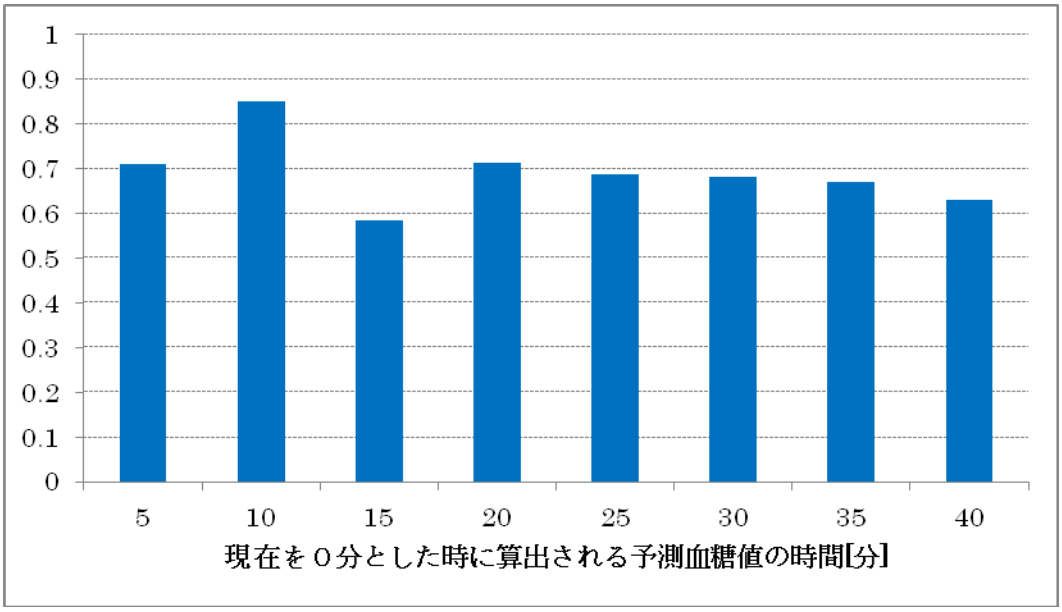


図③-(2)-3-2.3　実測値と予測値の比較（相関性が低い場合）

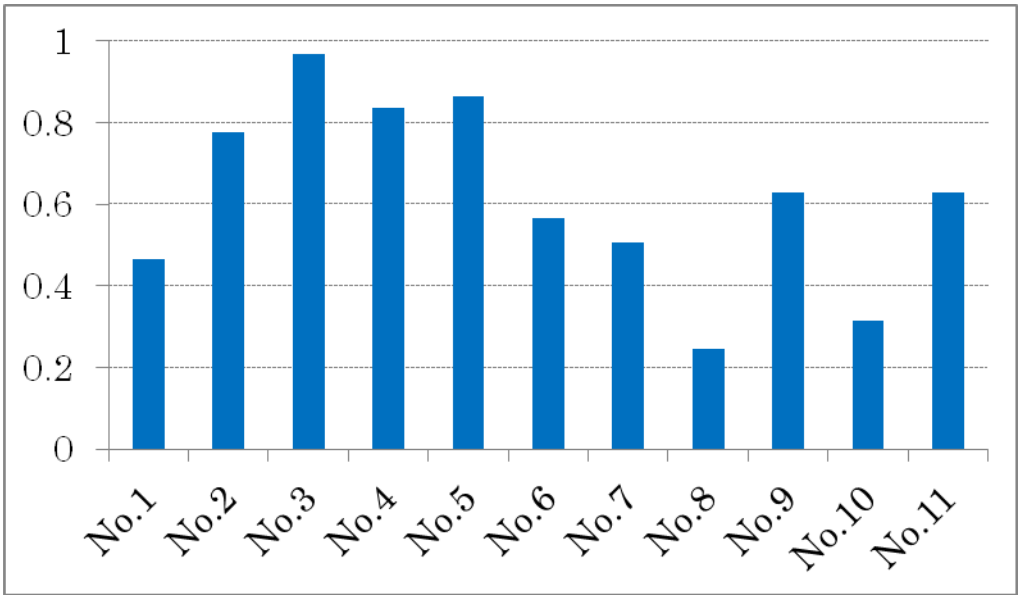
③-(2)-3-3　多変量回帰による推定精度の評価（時間毎の比較）

③-(2)-3-1 にて得られた説明変数を用いて、時間毎、各個体について多変量回帰を実施し、得られた予測血糖値と実測血糖値の相関係数を計算した。次に③-(2)-3-2 で相関係数が明らかに低い No.10、 11 を除いた結果について、各時間について個体全ての相関係数の平均値を計算した。結果を図③-(2)-3-3.1 に示す。縦軸は相関係数、横軸は現在を 0 分とした場合に何分後の目的変数を予測した場合かを示す。本結果より、最も良い予測値を与えるのは 10 分後であった。10 分以降は時間と共に段々と相関係数も減少した。10 分後の結果が最も良かった理由としては、比較的測定値から近くも遠くもない値であったことが考えられる。なお、今回検討に用いたパラメータである 5 種類の変数については、10 分後のパラメータ選択結果に含まれていなかった項目もある。一方、20 分後については 5 種類全てが候

補として挙がっていた。このような差が生じた原因として、個体毎にパラメータの寄与度に差があるためと考えられる。図③-(2)-3-3.2 に示すように、20 分後では 10 分後と違い、0.8 付近の相関係数を維持している個体は半分以下となっている。このような違いが平均値として時間毎の相関係数の差となったと考えられる。



図③-(2)-3-3.1　時間毎の相関係数の変化



図③-(2)-3-3.2　20 分後における個体毎の相関係数

③-(2)-4　考察

③-(2)-4-1　パラメータの選択について

本来、食餌量は血糖の変動に大きく関わるためパラメータとして選択されることが考えられる。しかし、本研究にて得られた結果では食餌量が選択されなかった。この原因として、食餌量と血糖変動幅の相関が低かったことが原因と考えられる。食餌量は 1、 2、 3g の 3 条件に設定した。しかし、食餌量はほとんど血糖変動幅に反映されておらず、どの個体もおよそ 30～40mg/dl 程度の変動幅であった。また、摂食時間についても餌箱のシャッター開閉時間を 15 分としていたが、個体によっては 5 分で食べ終わるラットや食べ終わらないラットもいた。食餌量だけでなく、どのようなスピードで胃に食餌が運ばれるかも消化のスピードに影響し、血糖変動幅がほぼ一定となってしまう原因になったと考えている。今後、食餌の影響を確かめるためには糖尿病ラットなど血糖が上がりやすい動物を用いた検討が必要になるだろう。

③-(2)-4-2　ヒトへの外挿について

本研究で得られた結果では 10 分後の血糖値を予測する場合に、最も相関性の高い結果が得られた。10 分は予測として短期ではあるが、現在の血糖値に対して上昇しているのか、下降しているのか、その変動情報を得るには十分である。なお、本結果はラットでの値であり、ヒトへ応用する場合は各パラメータの変動速度がラットと違うため、単純にこの結果を適用することはできない。また、先の考察でも述べた通り、本研究における説明変数には食餌量が含まれていない。実際、ヒトの場合は食事の種類と量が重要となると考えられ、これらの情報を適切に含み、ヒトの各バイタルサインデータ変動と比較することで検討結果の外挿が可能になるだろう。

③-(2)-4-3　相関係数の大きさについて

本研究で得られた予測値と実測値との相関係数 0.6～0.8 という結果は、市販されている血液を採取して測定するタイプの簡易血糖測定器と比べると相関性が低い（市販品は 0.9 以上）。一方、本研究でも使用した連続グルコース測定器の相関係数とは同程度の性能を示すことができた。実際の医療現場では連続グルコース測定器は値を知るためよりも、変動を知るために使われている。よって、本研究で得られた程度の相関性が備わっていれば、変動を予測するには十分であると考える。

③-(2)-5　ユーザ機関による成果の有効性の検証

ユーザニーズ及び本研究成果の有効性について以下にまとめる。

（ユーザニーズ）

・現在の血糖測定器では、測定後の変化がわからないので、それがわかるようになると血糖コントロールが改善される可能性がある。

・血圧や血糖などマルチバイタル時系列データについて網羅的に調べた例はなく、病態などと絡めて特徴量を抽出できると良い。

（有効性）

・今回の結果はあくまでラットの結果なので、ヒトへの外挿を考慮する必要がある。

・多変量解析データはどの量が関係しているか見えにくい。

・今からある時間経った後、運動をすると血糖がどう変動するのか予測できるようになれば薬剤投与量を調節するのに役立つ。

③-(2)-6　まとめ

＜先導研究における結果のまとめ＞

糖尿病患者における症状の重篤化や合併症のリスクを低くするためには、厳格な血糖コントロールが必要となる。これに対し糖尿病患者は 1 日最低 4 回の侵襲性の高い血糖測定を行う必要があることと、血糖コントロールに欠かせないインスリンなどの薬は投与から効き目が出るまでに数十分の時間を要することが課題となる。これに対し、各種バイタルサイン情報を元に低侵襲で未来の血糖を予測するためのセンサシステムについて動物を用いて検討した。

本研究では動物を用いたマルチバイタルサインの同時連続測定技術を確立し、得られたデータから血糖変動予測に必要となるパラメータ候補の選出と未来の予測血糖値の測定精度について検討した。マルチバイタルサインの連続測定技術では血糖や血圧など 10 種類のバイタルサインデータについて連続して同時に取得できる実験システムを構築した。実験手技や測定環境の改善により最終的には 3 日間の連続測定が可能となった。得られたマルチバイタルサインデータの解析では、多変量解析手法を用いたパラメータ選出により、呼吸数、収縮期血圧、脈圧、行動量、体温の 5 つを選び出した。さらに、これらパラメータを説明変数、血糖値を目的変数として多変量回帰を実施し、数十分後の予測血糖値を計算した。その結果、10 分後の血糖値に対して高い相関性を持った結果が得られた。

本研究は動物で実施された結果であるが、ヒトへの外挿を検討する際も同様のパラメータが重要となることが考えられる。なお、ヒトへ外挿する際は 10 分後の予測値では薬が効くまでの時間よりも短いと考えられる。しかし、短期での血糖変動から現在の血糖値が下降と上昇のどちらに向かっている途中なのか測定者は知ることができるため、インスリンなどの血糖降下薬の量を決める際には重要な情報となることが期待される。

＜将来開発すべきセンサシステム像＞

将来開発すべきセンサシステムは、糖尿病患者の血糖コントロールを正確で効率的に実施できるようにするため、血糖情報も含めた様々なバイタルサインデータを日常的に測定し、それらを瞬時に解析、治療アドバイスとして提示するようなセンサシステムである。血糖値は 1 日の変動が大きいことから、常時モニタリングの効果が大きいパラメータである。また、他のバイタルサインデータも同時に常時モニタリングすることで、運動や食事といった日々変化するイベントにも対応できるようになる。本研究では血糖コントロールに寄与するものとして血糖値の予測を提案したが、これ以外にも本センサシステムを実現させることで、糖尿病の早期診断や低血糖のアラーム、食事指導など糖尿病患者が得られるものは大きい。また、本研究で提案する血糖値の予測や採血以外の方法による血糖の測定が可能となれば、測定の低侵襲化や血糖測定の煩わしさを回避できるようになると期待される。

＜開発すべきセンサシステムの技術課題・開発内容と目標＞

本研究ではラットを用いた実験で得られたマルチバイタルサインデータを解析することで、血糖値のような変動の大きな情報も推定することができた。今回のような検討をヒトで実施する場合、食事量や飲水量など厳密に測定、規定するのが難しいパラメータも多く、血圧や脈圧に関してはヒトで連続的で高精度に測定できるセンサや手法が実現されていない。

これらを踏まえ、今後開発すべきセンサシステムの技術課題としては、大きく 2 つあると考えている。1 つ目は上記述べた通り血圧や脈圧、呼吸数などについて小型でウェアラブルな装置の開発、実現である。特にヒトでのデータでは日常生活におけるパターン解析が重要となるため、小型な装置で無自覚に測定できることが必須と考えている。例え大型の装置で測定可能であったとしても、日常の生活に持ち込めなければ、得られるデータ条件が限られてしまう。2 つめはイベント（行動）の数値化である。ラットの行動はケージ内を動き回ることに限定されていたが、ヒトの行動は睡眠やデスクワーク、読書、運動（野球やジョギングなど）、食事、階段の昇降など多種多様である。これらは歩数計のようなものを利用した単純なカウントでは測ることができず、ラットのように行動量というパラメータ 1 つだけでは足りないことが予想される。これらイベントにはそれぞれ動きの強度もあることから、加速度センサを用いた全身運動の評価や脳波の持続的測定といったことが必要になるだろう。

上記課題を解決することで、まずはヒトでの詳細なマルチバイタルサイン連続データ取得が可能になり、本研究の外挿について、血糖予測などに必要なパラメータの可否や予測

精度についての検討が進められる。

＜開発されるセンサシステムを適用した場合に期待できる具体的効果、インパクト＞

本研究で提案するセンサシステムにより､血糖の予測をスムーズに行えるようになると、どんな糖尿病患者でも正確な血糖コントロールを実現できるようになることが期待される。特に、糖尿病と診断されて血糖コントロールの方法が分からない患者にとっては、重要なガイドとなる。最初に躓いてしまうと、その後も血糖コントロールを継続できないことが予想される。よって、糖尿病早期の患者に対して正確な血糖コントロールツールを提供することは、糖尿病症状の重篤化を防ぎ、合併症の減少、医療費の抑制へ大きく寄与すると期待される。

③-(3)　非侵襲血液成分センサシステムの開発

生活習慣病は深刻な問題になっているが、現行では採血による生化学分析しか検査できない。しかし採血法は不快感による被験者のストレスが大きく、細菌感染を含む危険が伴うため医療従事者が実施する必要がある、といった問題がある。そこで、採血検査に代替する非侵襲血液成分センサシステムとして、(a)呼気ガス成分分析手法、(b)光学的手法、の2つの手法について、血液成分検知の可能性を検証しながら、センサシステムとして必要な構成や仕様などについて検討した。

③-(3)-(a)　非侵襲血液成分センサシステムの開発―呼気ガス成分分析手法

【富士電機株式会社】

③-(3)-(a)-1　研究の目的

＜社会課題＞

医療機関における血液検査は生化学、血球算定、炎症反応、血糖、腫瘍マーカなど多義に渡る検査項目があり、臨床検査におけるその有用性は絶大なものがある。しかし、血液成分検査は、従来から採血法による生化学分析しかなく、採血には危険が伴うため医療従事者が実施する必要があり、細菌感染や不快感による被験者のストレスが大きく、医療従事者への負担の1つとなっている。

生活習慣病の予防や早期発見にむけ、特に加齢により変動の多い血糖値やコレステロール値などの測定のハードルを下げることは重要であるが、このように計測負担が高く、在宅での健康時の予備的検査など日常的な測定には使えないのが実情である。

例えば、世界的な糖尿病患者及び糖尿病予備群の急増から、代表的な生活習慣病のひとつである糖尿病は健康に対し深刻な脅威の1つと認知されるようになった。国際糖尿病連合（IDF）は、2007年世界の成人糖尿病患者数は2億4、600万人で、2025年には3億8、000万人と予想している。我が国の糖尿病患者数は、現在約890万人で、予備群を合わせて約2、210万人と推定されている。糖尿病患者は、少なくとも1日4回の血糖値測定を行い、合併症予防のために血糖値の変化を管理しなければならない。現行の自己血糖値測定（SMBG）は、指先などから微量の血液を採取して酵素電極法で測定している。穿刺による採血は、患者の身体的や精神的な負担、センサチップなどの消耗品購入による経済的な負担となる。その他、日本国内の高脂血症の患者数は現在約190万人、慢性閉塞性肺疾患（COPD）は現在約530万人と推定されているが、これらの患者に対しても非侵襲で計測負担が低い測定法が無いのが現状である。

＜現状の取り組みと課題＞

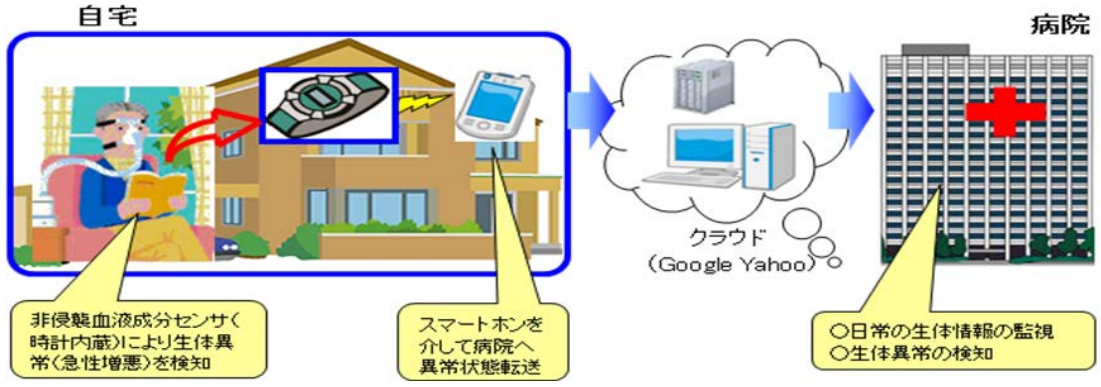
これらの負担の軽減や、感染予防の観点から、在宅医療や予防医療で使いやすい非侵襲・非観血な血液成分を測定できるセンサシステムが強く求められている。血液成分検査は、臨床検査におけるその有用性は絶大なものの、従来から採血法による生化学分析しかなく、採血には危険が伴うため医療従事者が実施する必要があり、細菌感染や不快感による被験者のストレスが大きく、医療従事者への負担の一つとなっている。

そこで、糖尿病や高脂血症などの生活習慣病を主な対象として、非侵襲な血液成分の計測手法を開発し、医療機関の設置型センサシステムや家庭でのポータブルシステムとしてデータをネットワーク配信できる、採血検査に代替する非侵襲血液成分センサシステムの構築を目指す。

＜実施内容と最終目標＞

これらの課題を解決するために、従来なかった採血や体内への埋め込みによらない非侵襲な計測手法が得られれば、血液成分を体の外から計測できることになり、被験者の負担なく血液成分情報を取得し得られたデータを既存のネットワークシステムを活用してサーバなどへの発信・管理などを行えるセンサシステムの構築も容易となる。

したがって、これらの利点を活用し在宅医療や予防医療、さらに医療従事者の負担軽減を目指して、医療機関の設置型センサシステムや家庭でのポータブルシステムとしてデータをネットワーク配信できる、採血検査に代替する非侵襲血液成分センサシステム（図③-(3)-(a)-1.1）を想定し、その具体的内容と必要要件について検討する。



図③-(3)-(a)-1.1　非侵襲血液成分センサシステムのあるべき姿

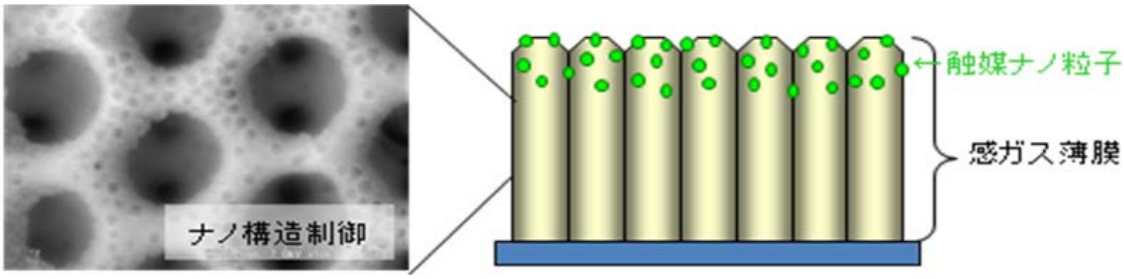
そのために、非侵襲な血液成分の計測手法を開発し、その検出種の可能性の検討と採血検査の代替性を見出すことが最も重要となるが、有望な計測手法である呼気ガス成分分析

手法に着目している。

毛細血管中の血液と肺胞内の空気は非常に薄い膜で隔てられているだけであるので、呼気ガスには疾病に関する生体情報が多く含まれている。例えば、イソプレンはコレステロールの前駆体であり、その呼気中濃度は高脂血症、高血圧症、動脈硬化、糖尿病などと関係があり、アセトン濃度は代謝異常との相関が高く、糖尿病やメタボリック症候群との関係があると考えられている。また、一酸化窒素は COPD（慢性閉塞性肺疾患）や喘息などの肺疾患と関係があると考えられている。

しかし、呼気ガス測定は CO_2濃度による呼吸機能や手術中の気化麻酔薬濃度測定による麻酔状態のモニタリングなどは広く普及しているが、検査方法としてはピロリ菌検出検査である ^{13}C O_2を測定する尿素呼気試験などに限られている。血液検査に比較して呼気ガス分析による検査方法の応用範囲が広がらない原因として、呼気ガス分析装置の感度の問題が考えられる。呼気ガスの成分は大気に対して O_2が CO_2に一部置き換わるだけで殆ど変わらず、診断対象となる成分は非常に微量であるため正確に測定することができなかった。

今回先導研究において、ppm オーダー以下の検出精度を持つ高感度検知技術について、感ガス体の薄膜化やナノ構造制御、触媒添加などにより、ガスセンサを超高感度化することが必須である（図③-(3)-(a)-1.2）。超高感度化のための方式検討、ガスセンサ原理試作、そして ppb レベルの微量ガス検知によりガスセンサ超高感度化の原理検証を行う。



図③-(3)-(a)-1.2　ガスセンサの構造（模式図）と超高感度化のための検討

③-(3)-(a)-2　半導体式 MEMS ガスセンサについて

③-(3)-(a)-2-1　背景

富士電機では、都市ガス警報器の電池駆動化を目指し、現行品の 1/1000 以下という超低消費電力タイプのメタンセンサを開発した。このメタンセンサをベースに、呼気に多く含まれる VOC の検出について検討することとした。まず、その特長について解説する。

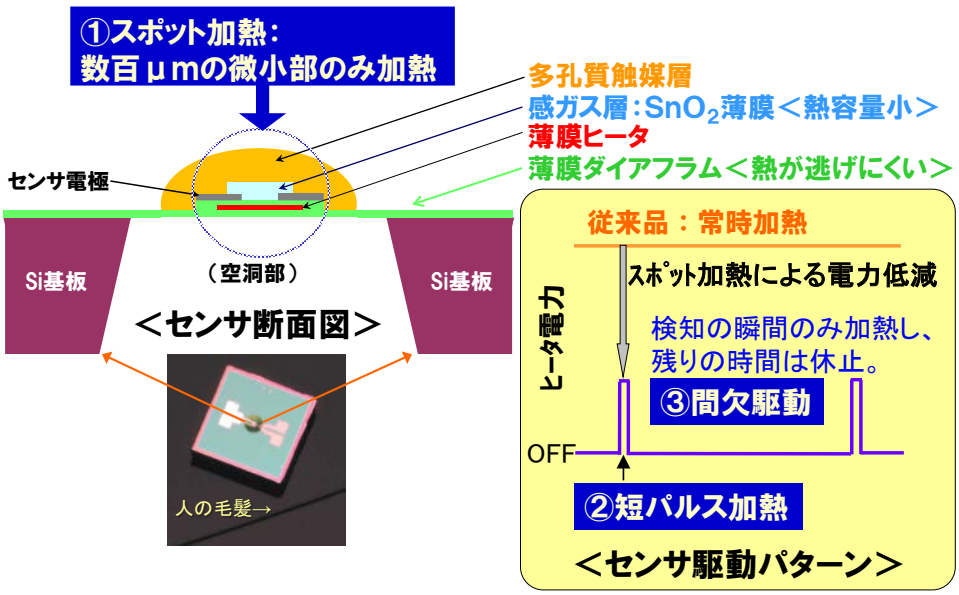
都市ガス警報器用のメタンセンサには、SnO_2（酸化すず）を感ガス材料として用いた半

導体式ガスセンサが広く用いられている。SnO_2は n 形半導体であり、電子がキャリアである。清浄空気中では酸素の吸電子吸着により抵抗値が高くなっているが、メタンなどの可燃性ガスがあると、吸着酸素がガスと反応するために SnO_2中のキャリア濃度が増加し、電気抵抗が減少する。ただし、可燃性ガスの中でも反応性の低いメタンの場合、センサ素子を 400℃程度の高温に加熱する必要がある。

従来のメタンセンサは、一般的に“焼結体型センサ”あるいは“バルク型センサ”と呼ばれているものが主流である。これらはコイル状の金属ヒータの周りに SnO_2を主成分とした感ガス材料を焼結させたもので、微小化による消費電力低減には限界があり、長期電池駆動化のハードルは非常に高く、夢の技術とさえ言われていた。

③-(3)-(a)-2-2　MEMS 技術による超低消費電力化

図③-(3)-(a)-2-2.1 に、センサ断面図と駆動パターンを示す。薄膜ダイヤフラム上に薄膜ヒータ・感ガス層（SnO_2薄膜）・多孔質触媒層を積層した構造とし、センサの駆動は検知の瞬間のみ加熱する間欠駆動としている。



図③-(3)-(a)-2-2.1　センサ断面図と駆動パターン

ここで超低消費電力化のポイントは、次のとおりである。

①スポット加熱： 薄さ数 μm の薄膜ダイヤフラム上に薄膜ヒータを形成することで、熱が逃げにくく数百 μm の微小部のみをスポット加熱できる。

②短パルス加熱： 薄膜ヒータの直上に電気絶縁層を介して、熱容量の小さい SnO_2薄膜

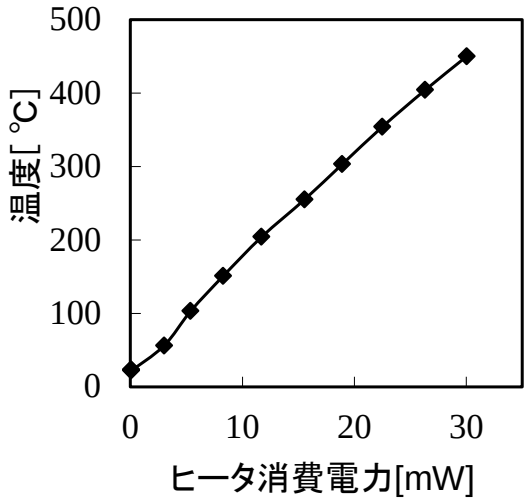
を形成しているために加熱応答性が高く、短パルス加熱ができる。

③間欠駆動： 短パルス加熱が可能なため、検知の瞬間のみ加熱し残りの時間は休止する間欠駆動ができる。

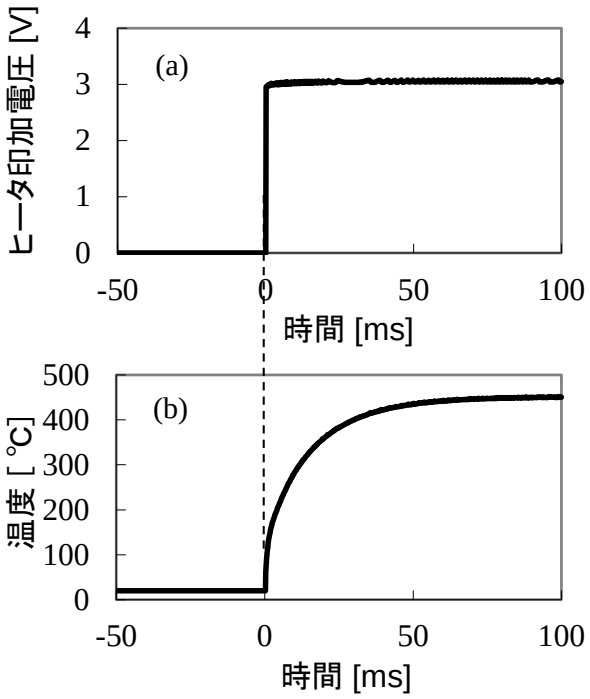
③-(3)-(a)-2-3　ヒータ性能

図③-(3)-(a)-2-3.1 にヒータの消費電力、図③-(3)-(a)-2-3.2 にヒータの応答性を示す。図③-(3)-(a)-2-3.1 は定常状態でのセンサ表面温度（中心部）とヒータ消費電力との関係を示している。図③-(3)-(a)-2-3.2 では、(a)図のようにステップ状に電圧を印加し、ヒータに 30mW の電力を供給した際のヒータ温度の応答性を(b)図に示す。

これらの図から、センサを 450℃に加熱するのに必要なヒータの消費電力は 30mW 以下と低く、かつヒータの応答は速く、室温から 450℃まで約 50ms で昇温できていることがわかる。



図③-(3)-(a)-2-3.1　ヒータの温度と消費電力との関係

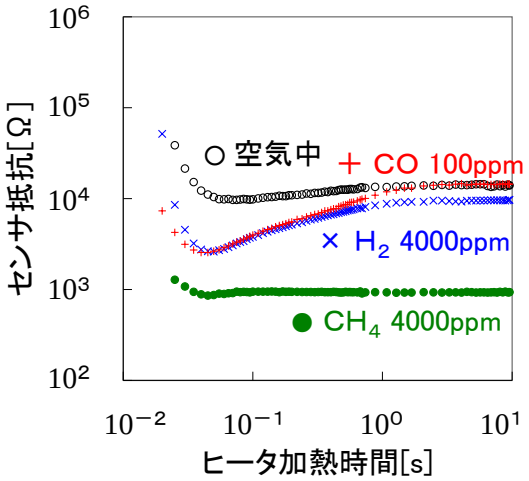


図③-(3)-(a)-2-3.2　ヒータの応答性

③-(3)-(a)-2-4　ガス検出性能

図③-(3)-(a)-2-4.1 に、センサの電気抵抗値の各ガスに対する応答性を示す（雰囲気の温湿度は 20℃65%RH とした。）。センサのガス応答は速く、わずか数十 ms でメタンに対する感度（センサ抵抗値の空気中に対する変化）が発生していることが分かる。このように、センサを加熱するための消費電力を低減し、かつガス応答性の改善により短パルス駆動が可能となったことで、既存のメタンセンサに対し 1/1000 以下の平均消費電力を実現できた。

なお図③-(3)-(a)-2-4.1 では、ヒータ加熱時間＝数十 ms では H_2及び CO で感度が出ているが（Air 中抵抗に対しガス中抵抗が低い）、その後、H_2及び CO の感度が逓減している（H_2中及び CO 中の抵抗値が上昇し Air 中抵抗に近づいている）のがわかる。これは、H_2及び CO は、数十 ms 以降に選択燃焼層で燃焼除去され、SnO_2表面上に到達するガス濃度が逓減していくためである。

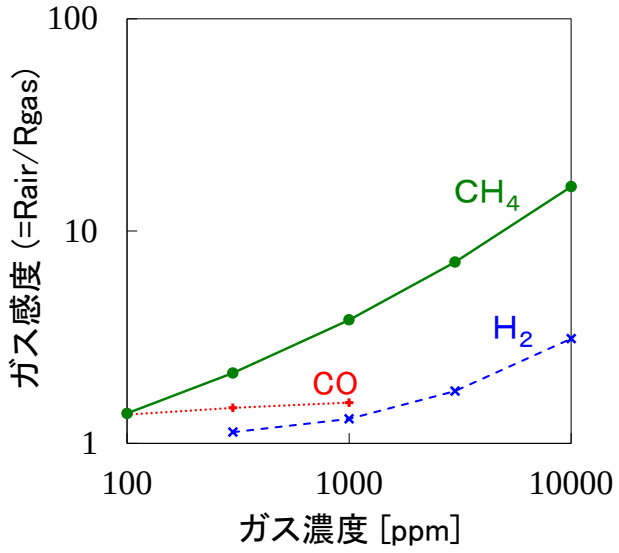


図③-(3)-(a)-2-4.1　センサ抵抗値のガス応答性

図③-(3)-(a)-2-4.2 にガス感度特性を示す。ガス感度は、清浄空気中のセンサ抵抗値（R_{air}）とガス存在下のセンサ抵抗値（R_{gas}）の比率（R_{air}/R_{gas}）で定義し、ヒータ加熱時間が 200ms の時点での値を用いた。

図③-(3)-(a)-2-4.2 から、メタン（CH_4）濃度に対してガス感度が増大し、メタン 2,000ppm での感度は 5 以上であること、一方、妨害ガスである H_2 や CO に対してはガス感度がメタンよりも十分に低く抑えられていること、したがって都市ガス警報器用のメタンセンサとして十分な基本性能を達成していることがわかる。

一方、呼気ガス成分濃度は数十 ppb～数 ppm と想定され、このレベルを検出するための超高感度化が必要である。

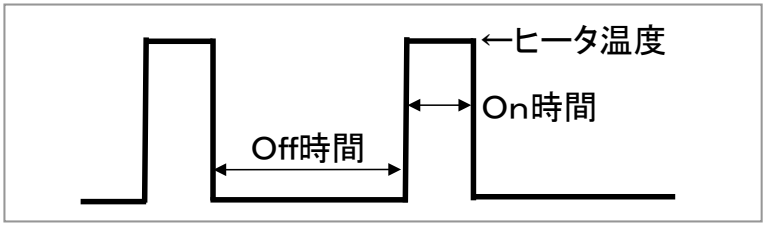


図③-(3)-(a)-2-4.2　センサのガス感度特性

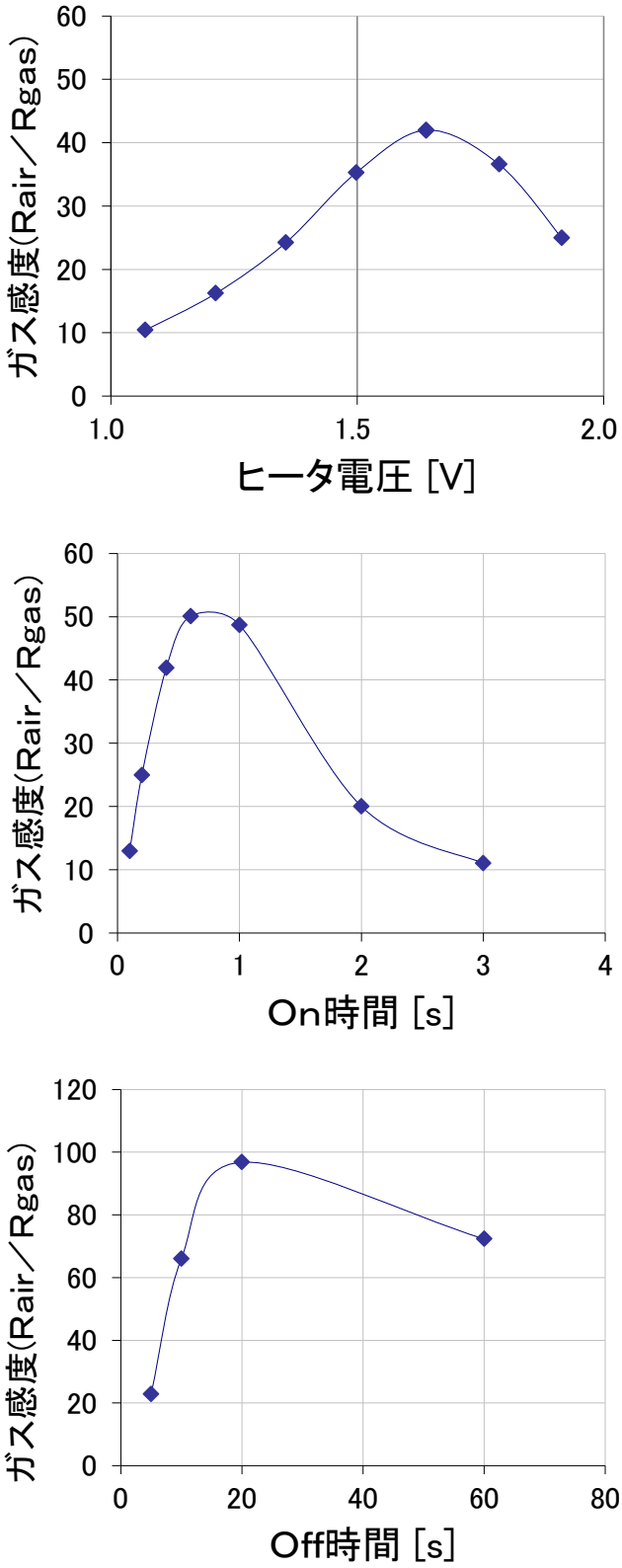
③-(3)-(a)-3　具体的な方式・コンセプトの提案とその原理検証

③-(3)-(a)-3-1　駆動条件の検討

前述のメタン検出用に開発した半導体式 MEMS ガスセンサを用い、ヒータ駆動条件をふって微量 VOC の検出を試みた。ヒータの駆動は図③-(3)-(a)-3-1.1 に示すような間欠駆動である。この間欠駆動のヒータ温度・On 時間・Off 時間の 3 つのパラメータのうち、2 つのパラメータは固定し、1 つのパラメータをそれぞれ変化させた。代表的な VOC としてエタノールを用い、濃度は調整して 8ppm としたときのガス感度の測定結果を図③-(3)-(a)-3-1.2 に示す。



図③-(3)-(a)-3-1.1　間欠駆動のパラメータ

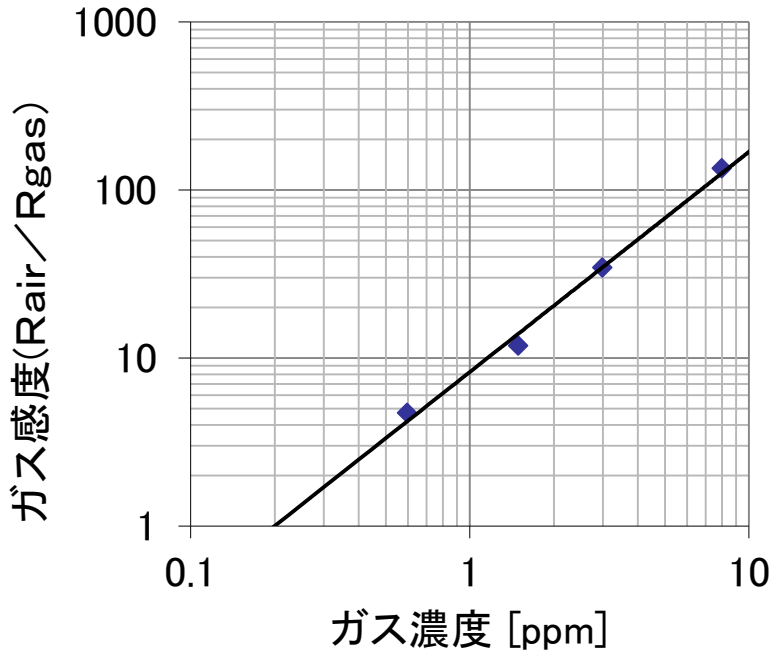


図③-(3)-(a)-3-1.2 エタノール感度の駆動条件依存性

ヒータ温度については、メタン検出よりも低い 300～350℃で感度が極大となった。On 時間については、0.6～1.0s で感度が極大となった。Off 時間については、Off 時間が 0（連続駆動）に近づくときに感度が無くなる傾向であり、非常に特徴的である。つまり、間欠駆動（Off-On 駆動）による高感度化の効果があると考えられる。

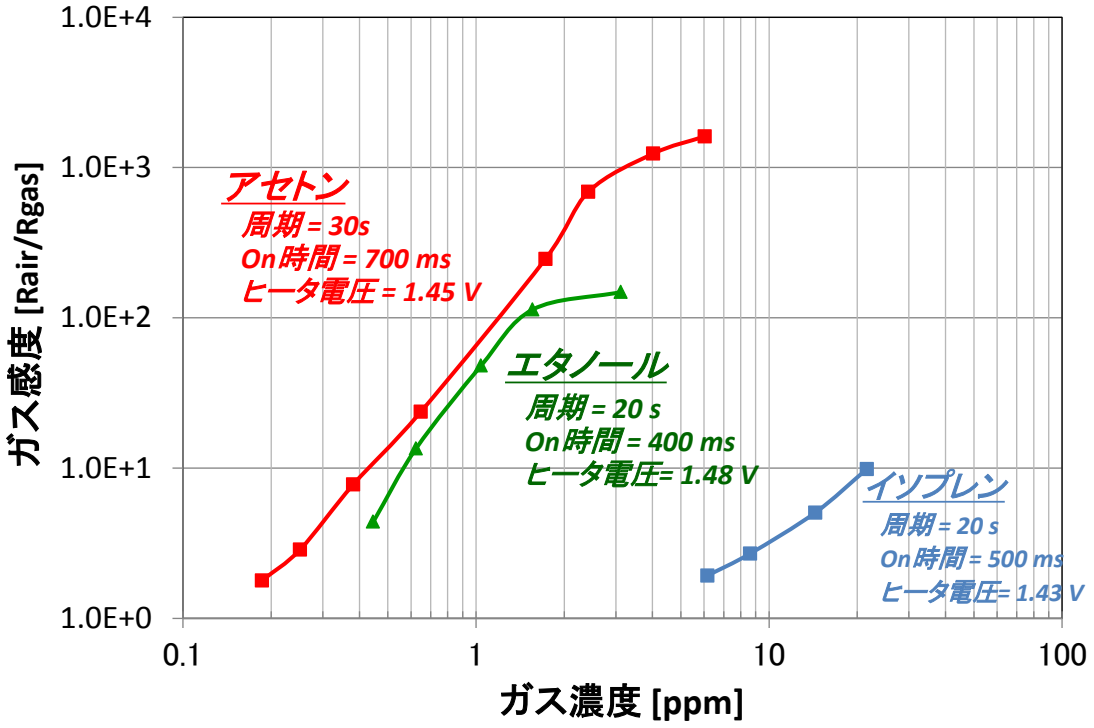
③-(3)-(a)-3-2　ガス感度特性

駆動条件の検討結果を基に、駆動条件をヒータ温度＝335℃、On 時間＝0.6s、Off 時間＝19.4s　に固定して、エタノール濃度 0.6～8ppm の範囲で感度を測定した。結果を図③-(3)-(a)-3-2.1 に示す。結果は 1ppm 以下のガス濃度域まで十分な感度が確認された。



図③-(3)-(a)-3-2.1　エタノール感度のガス濃度依存性

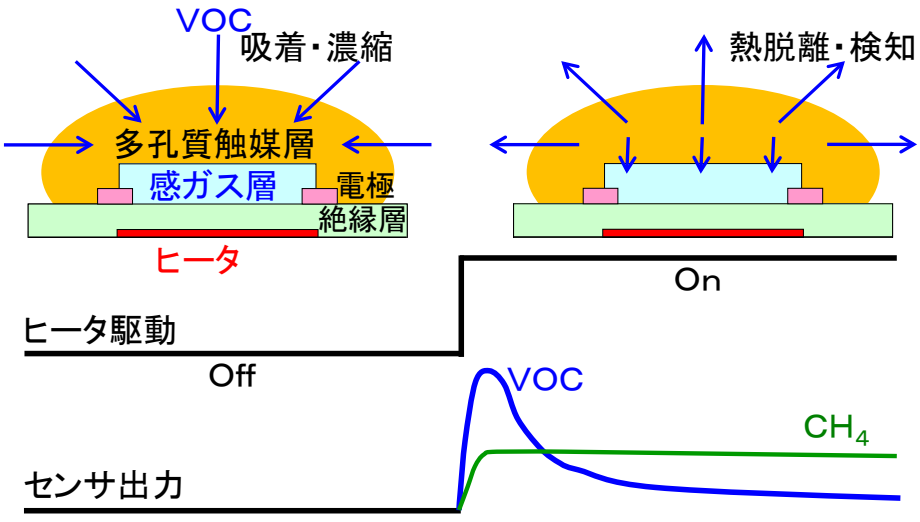
エタノールについて十分な感度が確認されたので、その他の VOC ガスについても同様にヒータ駆動条件をふって評価を行った。各ガスで最も感度が高かった駆動条件の結果を図③-(3)-(a)-3-2.2 に示す。結果、エタノールとアセトンについて 1ppm 以下の低濃度範囲でも十分に感度があることが確認された。しかし、イソプレンについては感度が低い結果となった。



図③-(3)-(a)-3-2.2　VOC ガス感度評価結果

③-(3)-(a)-3-3　考察

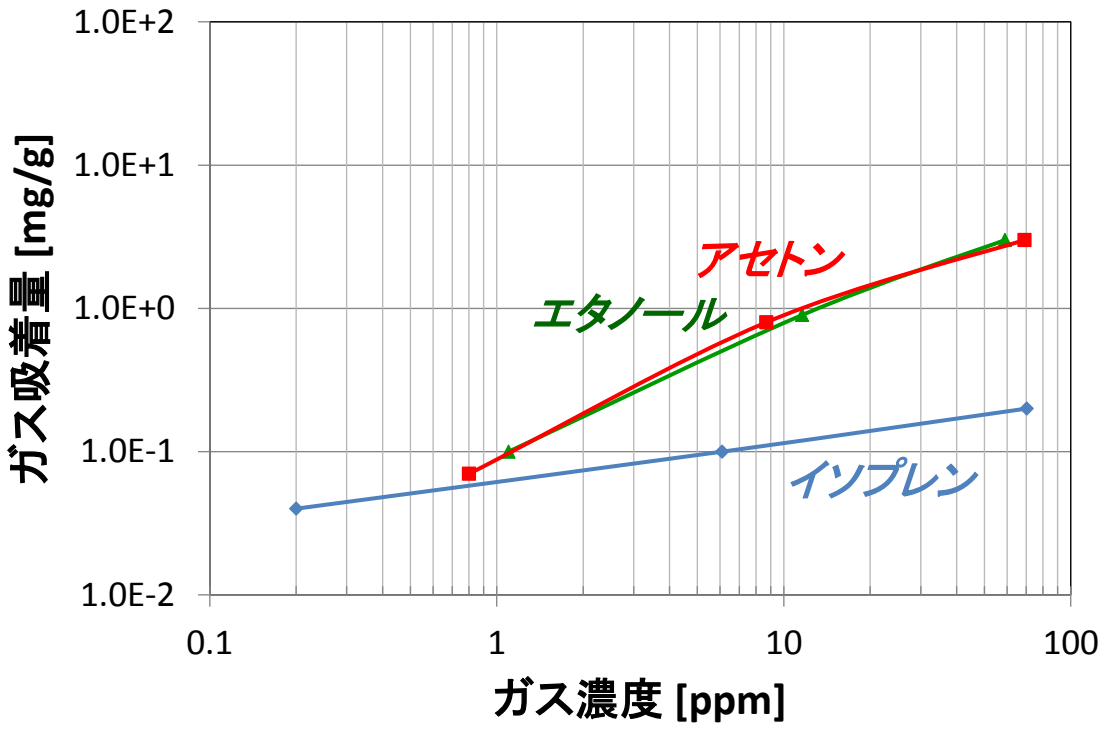
今回得られた結果は、間欠駆動による高感度化の効果である。このメカニズムについての考察を図③-(3)-(a)-3-3.1 を用いて説明する。



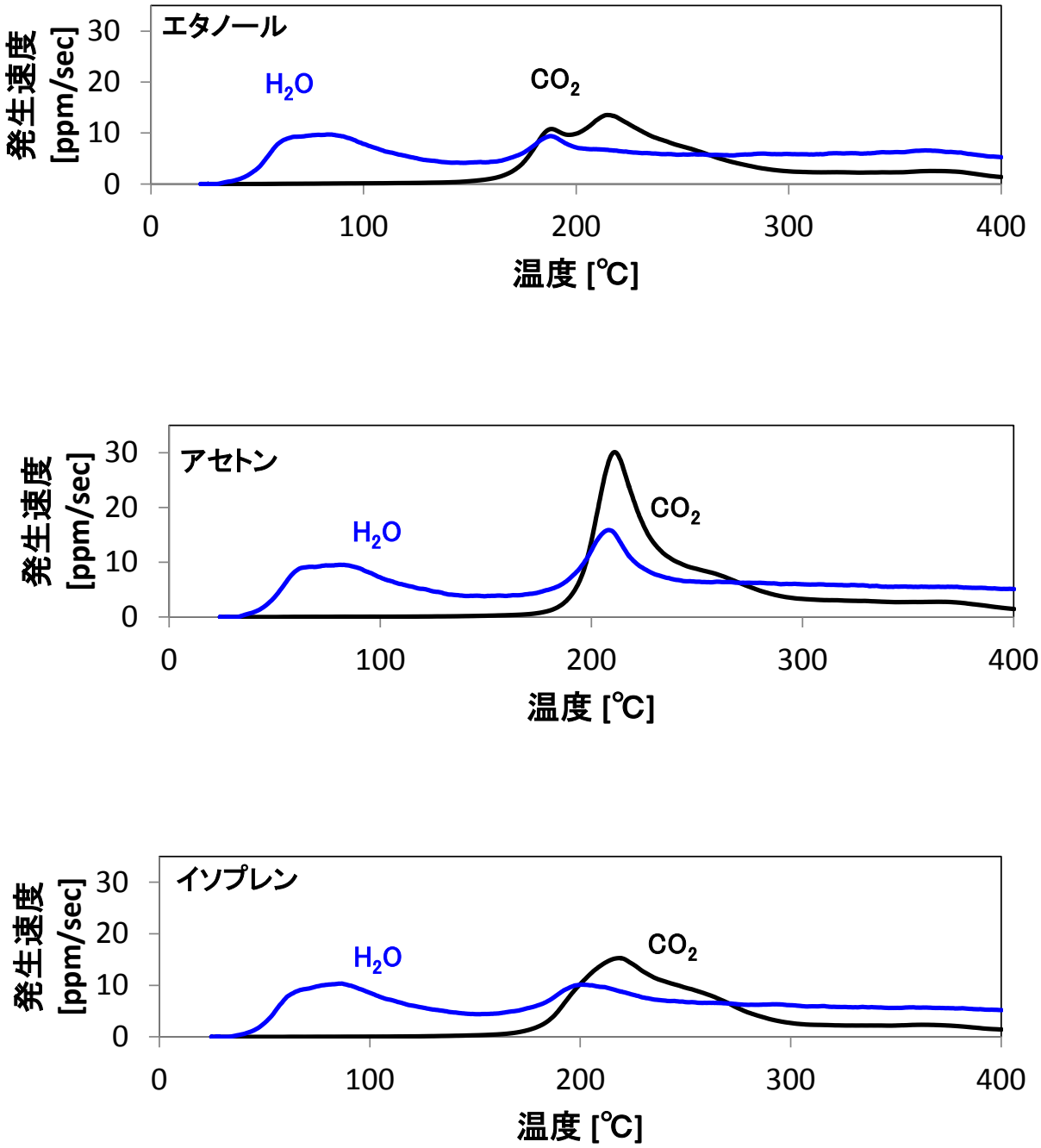
図③-(3)-(a)-3-3.1　間欠駆動による高感度化のメカニズム（模式図）

センサ周囲の VOC ガスは、ヒータが Off の間に多孔質触媒層に吸着し濃縮される。濃縮された VOC はヒータが On になった瞬間に熱脱離し、下の感ガス層（SnO_2薄膜）で検知される。高感度化は Off の間に VOC が濃縮されるためと考えられる。そこで考察を検証するために、多孔質触媒層の VOC 吸着量分析と VOC 昇温脱離分析を実施した。吸着量分析結果を図③-(3)-(a)-3-3.2、昇温脱離分析結果を図③-(3)-(a)-3-3.3 に示す。

図③-(3)-(a)-3-3.2 より、吸着量はエタノールとアセトンは同程度、イソプレンは少ない結果であった。この結果は感度と一致し、考察した高感度化のモデルを支持している。



図③-(3)-(a)-3-3.2　VOC 吸着量分析結果（多孔質触媒層）



図③-(3)-(a)-3-3.3　昇温脱離分析結果（多孔質触媒層）

図③-(3)-(a)-3-3.3 より、昇温脱離分析は VOC がすべて反応し CO_2へと酸化した結果となった。これは、分析装置の昇温速度（10℃/min）によるものと考えられ、実際の MEMS センサの昇温速度（50ms/400℃）では酸化が進行する前に VOC が脱離すると考察した。そこで、MEMS センサ昇温時のガスの脱離を再現するため、VOC を吸着させた多孔質触媒を 300℃に加熱した炉に入れガスを発生させた。発生したガスを捕集し分析した結果、エタノールは 0.5mg/g、アセトンは 0.6mg/g のガス脱離量であった。イソプレンについては測定下限で検出されなかった。以上より、今回の高感度化は MEMS ならではの高速応答性と温度・時間の高い制御性によるものである。

この Off-On による吸着・濃縮−熱脱離・検知の最適条件を見出すことで更なる高感度化・選択性が図れるものと考える。

③−(3)−(a)−4　技術課題の抽出と開発の方向性決定

表③-(3)-(a)-4.1 に技術課題と開発の方向性をまとめた。今後の主な技術課題はセンサの高感度化と妨害ガスの影響排除である。

表③-(3)-(a)-4.1　技術課題の抽出と開発の方向性

技術課題	開発の方向性
センサの高感度化 及び 妨害ガスの影響排除	**① 間欠駆動** **②SnO_2ドナー密度の最適化** **③ 多孔質触媒層の改良** **④ センサアレイ化**

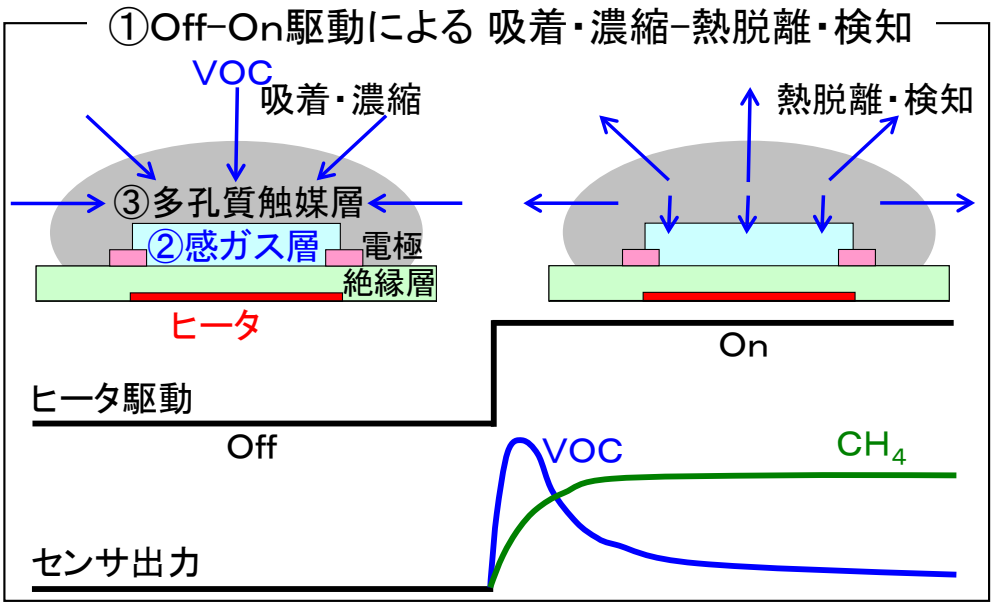
図③-(3)-(a)-4.1 に開発の方向性を示す。

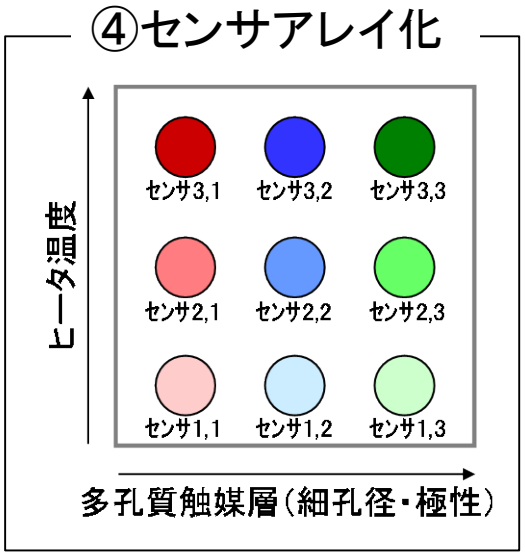
前項③-(3)-(a)-3-3 で、間欠駆動（Off-On 駆動）によるセンサ高感度化のモデルを示した。今後、この Off-On による吸着・濃縮－熱脱離・検知の最適条件を見出すことで、更なる高感度化が図れるものと考える。また、ヒータ温度や On 時間は、検出対象の化学的性質によるものなので、これらの条件により選択性を付与できるであろう。

今回用いたデバイス条件はメタンセンサの標準条件であるので、これを変えることで感度の向上、妨害ガスの影響排除の効果が期待できる。VOC 感度を上げるには、感ガス層である SnO_2感ガス層である SnO_2のドナー密度の最適化と、多孔質触媒層の膜厚最適化、触媒の変更、触媒濃度の最適化が考えられる。

また、図③-(3)-(a)-4.1 に示すように、異なるヒータ温度と異なる多孔質触媒層をアレイ状に配置して同時に計測することで、全センサの出力パターンからガス種を同定し選択性を確保できるのではないかと考えられる。この時、多孔質触媒層に細孔径分布が異なるも

のや表面の極性が異なるものを用いて、各センサの特性を変える。





図③-(3)-(a)-4.1　開発の方向性

③-(3)-(a)-5　ユーザ機関による成果の有効性の検証

③-(3)-(a)-5-1　ユーザ機関１次ヒアリング（テーマ開始段階）

表③-(3)-(a)-5-1.1 に、ユーザ機関である東京女子医科大学大塚教授への１次ヒアリング結果を示す。

非侵襲で連続モニタできる呼気センサが実現できれば非常に有効であるものと考えられる。糖尿病・高脂血症・ガン、その他、骨粗鬆症・認知症・精神疾患に対してニーズの可能性が見出された。

表③-(3)-(a)-5-1.1　ユーザ機関への１次ヒアリング結果

問合せ事項		コメント
計測対象について	糖尿病	低血糖発作を繰り返す患者の連続モニタに良いと思われる。 現状は、CGM(Continuous Glucose Monitor)という針で連続的（1分間隔）に採血する方式が採られているが、針が高価で危険を伴う。
	高脂血症	悪玉コレステロールが多い場合、善玉コレステロールが少ない場合、それぞれ問題（比率で決まる）。 さらに、それ以外に脂肪酸の異常が関わっていて、それらが検出できると良い。イソプレンだけでは無く、いくつかの物質を検出する必要がある。
	ガン	膵臓と肺の早期発見が難しく、それらが判ると良い。
	その他	骨粗鬆症の骨質判定（現状は採血と尿検査）、認知症（アルツハイマー）、精神疾患なども可能性があるのではないか。
留意すべき点		＊個人差が大きく、同じ個人でもいつ採るかで異なると思われる。 ＊感度だけではなく、時間変化（日中・日間変動）や検出物のパターン等の情報が必要。 ＊妨害ガスの影響を排除する必要がある。

③-(3)-(a)-5-2　ユーザ機関２次ヒアリング（テーマ終了段階）

表③-(3)-(a)-5-2.1 に、ユーザ機関である東京女子医科大学大塚教授への 2 次ヒアリング結果を示す。

呼気ガス成分分析手法は、臨床応用への展開が期待できるとの評価を頂いた。

表③-(3)-(a)-5-2.1　ユーザ機関への 2 次ヒアリング結果

	ユーザ機関の評価
呼気ガス成分分析手法に関して	アセトン，エタノール，イソプレンの3種類のVOCに関して、分析結果ともよく合うガス感度特性の評価結果が得られた。 臨床応用への展開が期待できる。呼気ガスは、血液，涙，尿，排便　よりも感度がよく、1次予防に適していると考える。 2次予防・3次予防ならば、呼気ガスだけに囚われずにその他のバイタルサインを活用することも考えるべき。
健康医療としての全体システムに関して	医療機関だけでなく、地域におけるセルフモニタリングとしてのセンサシステムは有用であり可能だと期待する。

③-(3)-(a)-6　まとめ

＜将来開発すべきセンサシステム像＞

生活習慣病の予防や早期発見に対し、血液成分検査の有用性は絶大である。しかし、採血には危険が伴うため医療従事者が実施する必要があり、細菌感染や不快感による被験者のストレスが大きく、医療従事者への負担の１つとなっている。これらの負担の軽減や、感染予防の観点から、在宅医療や予防医療で使いやすい非侵襲・非観血な血液成分を測定できるセンサシステムを開発すべきである。

＜開発すべきセンサシステムの技術課題・開発内容と目標＞

開発すべきセンサシステムの技術課題として、大きくは以下の２点が考えられる。

１）センサの高感度化及び妨害ガスの影響排除

２）呼気ガスのサンプリング方法

上記の技術課題を解決するための開発内容としては、以下が考えられる。

１）センサ感度・選択性の改良

① 間欠駆動

② SnO_2ドナー密度の最適化

③ 多孔質触媒層の改良

④ センサアレイ化

２）センサ製造プロセス開発

⑤ 上記①～④を実現

３）呼気ガスのサンプリング方法開発

これらの開発により達成する目標は、採血検査に替わる呼気ガス成分センサシステムの構築である。

＜開発されるセンサシステムを適用した場合に期待できる具体的効果、インパクト＞

本提案が実用化されれば、糖尿病・高脂血症・慢性閉塞性肺疾患（COPD）などの生活習慣病に対して、予防医療や在宅医療で使いやすい非侵襲な血液成分を測定できるセンサシステムを提供でき、採血法に替わる新たな領域を創造することになり、そのインパクトは非常に大きい。また、本研究開発で獲得された超高感度ガスセンサ技術は、健康医療分野に限らず､プラントやパイプラインあるいはビル設備のガス漏れ監視や環境モニタなど、社会・産業インフラ分野へ応用展開できる可能性もある。

③-(3)-(b)　非侵襲血液成分センサシステムの開発　光学的手法

【横河電機株式会社、再委託：国立大学法人東京大学年吉研究室】

③-(3)-(b)-1　研究の目的

＜社会課題＞

世界的な糖尿病患者と糖尿病予備群の急増から、糖尿病は健康に対して深刻な脅威になっている。日本においては、40 歳以上の「3 人に 1 人」が糖尿病・糖尿病予備群である。糖尿病患者と糖尿病予備群を削減するためには、糖尿病の早期診断、適切な治療、予病が必要で、自己血糖値モニタ（SMBG）による血糖値変化の管理が有効である。SMBG は穿刺による採血が必要で、患者に身体的・精神的な苦痛を与え、センサチップや穿刺針の消耗品による経済的負担が大きく、生活の質（QOL：Quality of Life）を低化させる。これらの負担を低減して QOL を向上すること、さらに採血による医療従事者や患者の感染予防の観点からも、在宅医療や予防医療で使いやすい非侵襲・非観血な血液成分を測定できるセンサシステムが強く求められている。糖尿病治療（予防・予病を含む）の目標は、血糖値コントロールを維持して網膜症や腎症神経障害などの合併症の発症･進展を防ぐことにある。血糖値コントロールの指標として HbA1c が用いられるが、月の平均血糖値を反映する指標であり、1 日の血糖値変動を把握できる持続血糖モニタ（CGMS：Continuous glucose measurement system）への期待が高まっている。

＜現状の取り組みと課題＞

既存製品の SMBG は、指先などから微量の血液を採取して酵素電極法で血糖値を測定する際の穿刺による身体的や精神的な負担を低減するため、採血量の少量化（0.5μL 程度）のための穿刺針やセンサチップの工夫で低侵襲化が行われているが、非侵襲・非観血は実現できていない。血糖を連続的に自動的に測定する用途には、持続血糖モニタ（CGMS：Continuous glucose measurement system）が用いられる。専用の穿刺具でセンサを皮下に挿入して、間質液中のグルコース濃度を一定間隔で 24 時間以上連続して測定する。現時点では、数時間おきに SMGB で血糖値を測定して校正する必要がある。CGMS は、低血糖や高血糖を確実に予測し、予防するための機器として普及させるべきであるが、使用する人の QOL を向上させるためには､補正のために行う SMBG を必要としない機器の開発が望まれる。

低侵襲・非観血な間質液を測定するグルコウォッチ（シグナス社）は、ウォーミングアップに時間がかかること、測定精度が 30mg/dL と悪いこと、センサ跡の皮膚にカブレが発生する課題があった。

非侵襲・非観血な光学的手法は、近赤外光による透過法や反射法、多重散乱法を含む可視光；ラマン分光法、旋光度分光、屈折率（干渉法、散乱強度法など）、蛍光法などの方

法がある。拡散反射で測定して多変量解析する方法の研究事例は臨床試験が行われたが、血糖値以外の変動要因が不明で、測定する光路が皮膚の影響を受けやすい課題があった。いずれの方法も課題があり、実用化には至っていない。

＜実施内容と最終目標＞

想定ニーズは、「非侵襲・非観血の血糖値モニタ」で、「健康寿命を延ばすための予防・予病に有効な手段となる使いやすい血糖値を測定できるセンサシステム」とする。健常者・予備軍向けの１次予防（スクリーニング）を対象とする採血検査に代替する非侵襲血液成分センサシステムとして、光学的手法について血液成分検知の可能性を検証しながら、センサシステムとして必要な構成や仕様などを明確化する。光学的手法は、近赤外分光法による計測方法であり、共焦点方式の光学系と MEMS 技術を用いた高速波長可変面発光レーザ(MEMS-VCSEL)を組み合わせることで、皮膚の表面よりも内側の真皮の情報を選択的に検出することが可能となる。先導研究は、複数波長の近赤外光を切り替えることができる光源を用いた共焦点方式の設計及び試作を行い、皮膚の深さ方向の情報を検出できること、馬鮮血中のグルコース濃度を検出できることを確認して原理検証を行う。また、血糖値モニタとしての原理検証は、2 名以上の被験者で、従来の侵襲・観血の SMBG で測定した実測血糖値と、本提案の光学式で求められた予測血糖値を EGA 解析 (Error Grid Analysis) し、周囲温度、体温、汗といった外乱の影響などの課題を抽出して開発項目の明確化を図る。

共焦点光学系には、構成する光学部品や焦点調整機構が大きいという課題があり、可搬性の良い光学式血糖値センサを実現するために、MEMS 技術を用いて光学系が小型化できる適用可能範囲を検討する。（東京大学年吉研究室）

③-(3)-(b)-2　ユーザニーズのヒアリングと開発の方針

③-(3)-(b)-2-1　調査方法

糖尿病患者と糖尿病予備群の状況（市場動向）について、厚生労働省、国際糖尿病連合、世界糖尿病デー実行委員会、日本糖尿病学会などのデータから把握する。現状の採血型の SMBG の市場規模は、調査会社の市場調査レポートを中心に調査する。

想定ニーズに対して、ユーザ機関である医療機関で「非侵襲・非観血の血糖値モニタ」について、専門家に直接面談してヒアリングを行う。ヒアリング内容は、開発対象としている『非侵襲血液成分センサシステムー光学的手法ー』で対象とする非侵襲・非観血な血糖値モニタのニーズや現状の採血型の自己血糖値モニタの課題、将来の糖尿病の予防・余病などについてヒアリングを行う。以下の国内 2 カ所のヒアリングを行った。

・信州大学医学部医学部内科学講座糖尿病・内分泌代謝内科：駒津光久教授

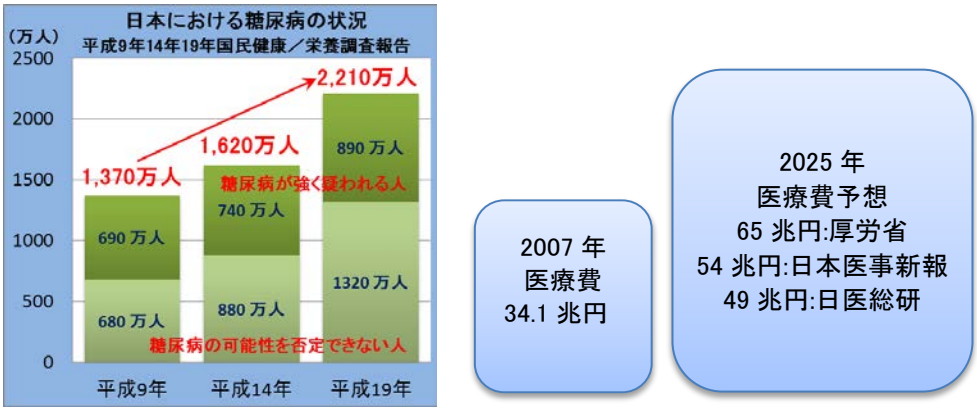
「糖尿病」の「急性期の疾患」から、「生活習慣病」や、その上流である「早期診断・治療」「発症予防」へ積極的に取り組まれている。糖尿病の発症機構、インスリン分泌機構、糖尿病の診断治療、予防及び治療方法の広い知見を持つ糖尿病の専門医の立場からの意見を求める。

・信州大学医学部医学部歯科口腔外科学講座：栗田浩教授

専門医として糖尿病と口腔疾患の合併症、さらに医療現場の意見を広く求める。

③-(3)-(b)-2-2　ユーザニーズのまとめと開発の方針

糖尿病に関する市場動向の調査結果は、世界的に糖尿病患者と糖尿病予備軍が急増し、医療費・保険料増加による経済損失が増加し、医療費・保険料などの経済損失に対して糖尿病患者削減が急務になっている。日本の糖尿病患者数は、2007 年約 890 万人で予備群を合わせて約 2、210 万人、40 歳以上の「3 人に 1 人」が糖尿病・糖尿病予備群という状況で、国民医療費は 1～2 兆円/年の割合で伸び続けている（図③-(3)-(b)-2-2.1）。主たる背景は高齢化にあり、いわゆる高齢化の先進国である日本の動向に世界各国が注目している。医療費の抑制は国や健康保険組合などの重要課題で、中でも糖尿病の早期診断、適切な治療、予病が必須になっている。血糖値モニタ（SMBG、CGM）が診断・治療・予病に有効な医療機器として位置づけられている。



図③-(3)-(b)-2-2.1 日本における糖尿病及び医療費の状況

ユーザ機関におけるニーズ調査結果は、信州大学医学部の 2 名の教授に対してヒアリングを実施し、コメントを下記にまとめる。

・信州大学医学部医学部内科学講座糖尿病・内分泌代謝内科：駒津光久教授

非侵襲の血糖値モニタはニーズがとても高く、いろいろなところで研究している。糖尿病の治療においては、SMBG は重要なツールで、これからの高齢化社会で患者を減

らすための予防・予病にも必要になる。医療現場で使う際は、保険点数の有無が重要な選定理由になる。また、医療事故や医療廃棄物の観点から非観血は重要なポイントとなる。非侵襲で非観血になることで、健康寿命を延ばすための予防・予病に有効な手段となり、新しい治療方法やアプローチも生まれる。成果が製品につながることを期待する。

・信州大学医学部医学部歯科口腔外科学講座：栗田浩教授

現在の SMBG は採血に針を刺して痛みを伴うもので、痛みがないもしくは低侵襲な針が開発されている。痛みがあること、血液に触れることから、非侵襲で非観血のニーズは非常に高いと考えている。本研究のセンサができれば、医療現場での使われ方自体に変化が起きる。糖尿病は歯周病などと密接な関係があり、高齢化や成人病患者の増加で糖尿病が増えていくと歯科関連の疾病も増加する。血糖値モニタが身近になると、健康状態の気づきにもつながり、予防や予病に有効な手段となると考えられる。

以上の調査から、ニーズを総括すると下記の 5 項となった。まとめを図③-(3)-(b)-2-2.2 に示す。本先導研究の実施目標が、ユーザニーズと整合性があることを確認した。

・血糖値モニタは健康寿命を延ばすための予防や予病に有効な手段となる。
・現在の SMBG は採血に針を刺して痛みを伴うもので患者の負担になっている。
・非侵襲で非観血の血糖値モニタはニーズがとても高い。
・非観血になれば医療事故や医療廃棄物を低減が期待できる。
・精度は SMBG 相当で良い。

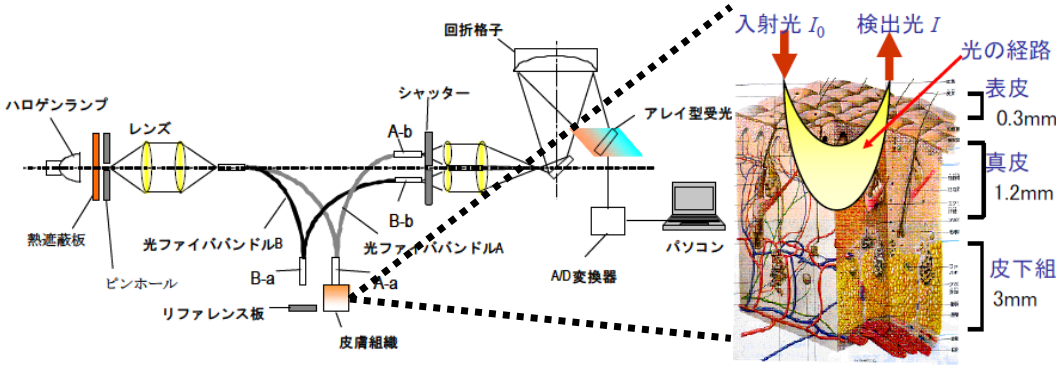


図③-(3)-(b)-2-2.2　自己血糖値モニタの課題に対する要望と期待

③-(3)-(b)-2-3　既存技術の課題・問題点（技術調査）

非侵襲・非観血な血糖値モニタとして、過去の研究事例として文献 1)の光学的血糖値測定システムがある。システムの概要を図③-(3)-(b)-2-3.1 に示す。皮膚からの拡散反射で測定して多変量解析する方法の研究事例があるが、血糖値以外の変動要因が不明で実用化に至っていない。測定する光路が皮膚の影響を受けやすいなどの課題がある。現在、患者や

医療現場で用いられている指先などから微量の血液を採取して酵素電極法で血糖値を測定する SMBG は、穿刺による身体的や精神的な負担やセンサチップなどの経済的な負担といった問題がある。



図③-(3)-(b)-2-3.1　光学的血糖値測定システムの概略

③-(3)-(b)-3　原理検証の内容

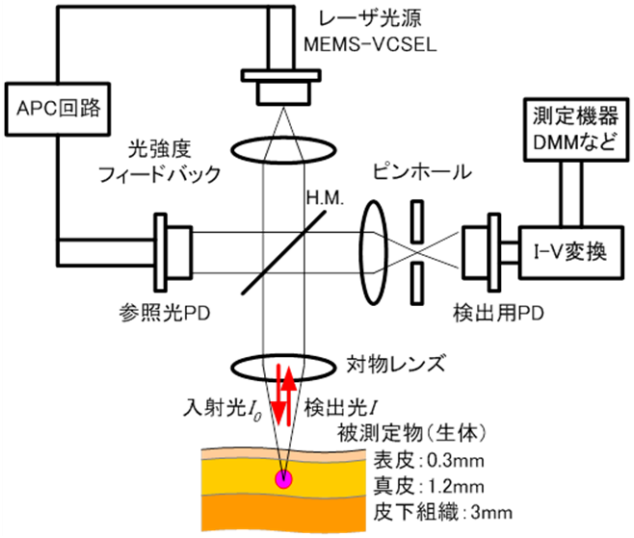
光学的手法では、共焦点方式と複数波長のレーザ光源を組み合わせ、皮膚の表面よりも内側の真皮の情報を選択的に検出して血糖値(グルコース濃度)測定が可能であるか、原理確認する。共焦点方式の設計及び試作を行い、馬鮮血中のグルコース濃度を検出できることで原理的に測定できるかを確認し、皮膚の深さ方向の情報を検出できることを検証する。次に、2 名以上の被験者で、従来の侵襲・観血の自己血糖値モニタ SMBG で測定した実測血糖値と、上記の光学的手法で得られた予測血糖値を比較検討し、EGA 解析 (Error Grid Analysis)を行う。先導研究における目標(可能性の判断基準)は、EGA 解析で血糖値 75mg/dL 以上で±20%以内の範囲に測定データが 80%以上入ることとする。評価中に、周囲温度、体温、汗といった外乱の影響などの課題を抽出する。

以下に、共焦点方式の説明を述べる。本方式は、顕微鏡のような画像を計測する装置に使われる技術である。通常の顕微鏡はランプのような有限の大きさを持つ光源からの光を測定サンプルに照射し、帰ってくる光を有限の大きさを持つ検出器で受けて画像とする。得られる画像は面内及び深さ方向にボケが発生する。特に、3 次元構造を持つサンプルでは課題となる。共焦点方式とは、レーザ光のような点光源を使い、点光源からの光をサンプル上の一点に集光する。その点から帰ってくる光をピンホールで選択的に通過して検出することでボケのない S/N の良い画像が得られる。さらに、サンプル上の焦点を深さ方向に移動させれば、測定したい深さのスライス情報が得られる。

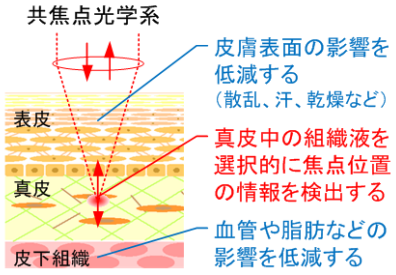
③-(3)-(b)-4　共焦点光学系の原理検証

③-(3)-(b)-4-1　共焦点光学系の設計

共焦点方式実験システムの概要を図③-(3)-(b)-4-1.1 に示す。レーザ光源から照射された光は、ハーフミラーを通って被測定物である皮膚に照射される。反射光は、ハーフミラーからピンホールを通って検出用 PD で検出され、I-V 変換後に測定器で光量信号を得る。この時、光源（または光ファイバ）の出射スポット、焦点、ピンホールが共焦点関係にある光が選択的に検出される。皮膚組織及び真皮を測定対象とする焦点位置について概要を図③-(3)-(b)-4-1.2 に示す。被験者によって個人差はあるものの、表皮は約 0.3㎜、真皮は 0.5㎜～1.2㎜ であることから、皮膚表面からの焦点深さを 0.8㎜ に設定する。光学系は、1 inch 系のレンズ（f 値＝30㎜）を選択する。複数のレーザ光源から出射される光は、光スイッチによっていずれかの波長の光を選択して、シングルモード光ファイバで共焦点光学系に入射される。



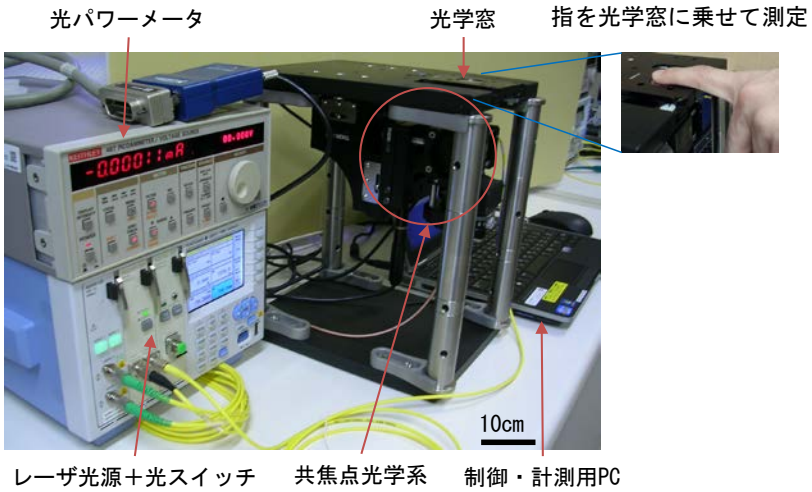
図③-(3)-(b)-4-1.1　共焦点方式実験システムの概要



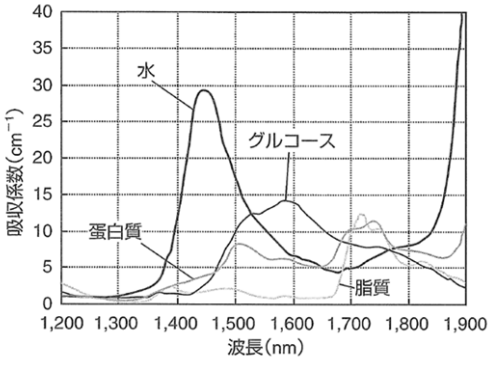
図③-(3)-(b)-4-1.2　皮膚組織と測定対象とする焦点位置

③-(3)-(b)-4-2　共焦点方式実験システムの構築

共焦点方式実験システムの設計に基づき、光源／制御装置と光学部品を選定して組み立てを行った（図③-(3)-(b)-4-2.1）。左側にレーザ光源と光スイッチ、光パワーメータを配置し、右側に XYZ 方向に駆動できるステージに共焦点光学系を搭載した。光学窓に指をのせて測定する。測定機器は、レーザ光源（横河電機、AQ2200-132）、光スイッチ（THORLABS、OSW22-1310E）、光パワーメータ（KEITHLEY、PICOAMMETER487）である。光学系と測定機器は制御用ソフト LabVIEW と GPIB コントローラによって制御する。先導研究の目的は、原理確認であることから、近赤外の可変波長レーザ光源で連続スペクトルではなく、複数のレーザ光源を光スイッチで切り替えて評価する。近赤外光の波長は、文献 2)、3) の積分球を組み込んだ分光光度計（島津製作所、UV-3100）での測定結果から逆モンテカルロ・シミュレーション手法により算出した吸収係数（図③-(3)-(b)-4-2.2）から、参照波長 1530nm、グルコース濃度を測定する測定波長 1547nm、1600nm を選択した。



図③-(3)-(b)-4-2.1　共焦点方式実験システムの構築



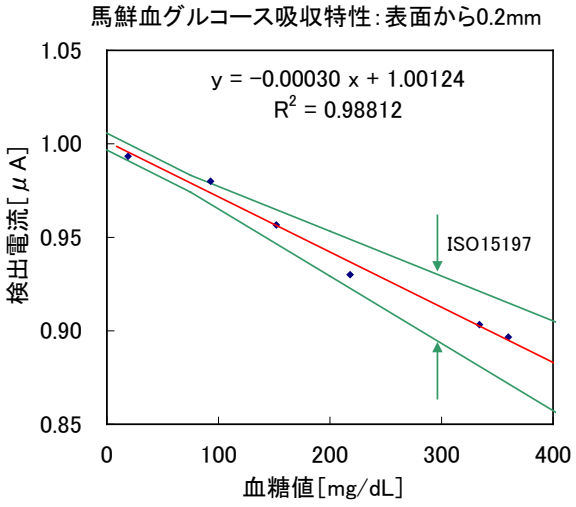
図③-(3)-(b)-4-2.2　血液中に含まれる代表的な物質の近赤外吸収スペクトル

③-(3)-(b)-4-3　共焦点方式実験システムの動作確認

構築した共焦点方式実験は、基本的な共焦点動作及び XYZ 電動ステージを制御して 10μm ステップで焦点位置を変えることで、真皮の情報を選択的に検出する能力があることを確認した。また波長 1530nm、1547nm、1600nm の 3 つの近赤外光を光スイッチによって 50msec で高速切り替えができることを確認した。

③-(3)-(b)-4-4　共焦点方式実験システムのグルコース検出の動作確認

皮膚は散乱が大きく実際に血糖値が測定できているかの判定が難しいことから、馬鮮血（凝固成分除去）にグルコースを添加して血糖値を調整したサンプルを光学的測定で光の検出電流を求め、血糖値と相関があるかを評価した。共焦点の焦点位置は、血液中の表面から 0.2mm、波長 1547nm を用いた。馬鮮血の血糖値は、グルコース分析装置（堀場製作所、アントセンスⅢ）で測定した。実験で得られた血糖値と光の検出電流の関係を図③-(3)-(b)-4-4.1 に示す。血糖値と検出電流には良好な相関があり、相関係数R2＝0.99 が得られた。これにより光学的に血液中の血糖値が測定できる原理確認を行った。グラフ中の緑線は、SMBG の基準である ISO15197 の範囲を検出電流に換算して示す。ISO15197 は、血糖値が 75mg/dL 未満で±15mg/dL 以内、75mg/dL 以上で±20％以内の範囲に 50mg/dL～400mg/dL の濃度に分布した 100 以上の検体で 95%が入ることと規定している。今回の実験は、この範囲内にデータが入っていることから、生体中の血糖値が ISO15197 仕様内で検出できる光学的手法の血糖値モニタの可能性を示唆するものである。

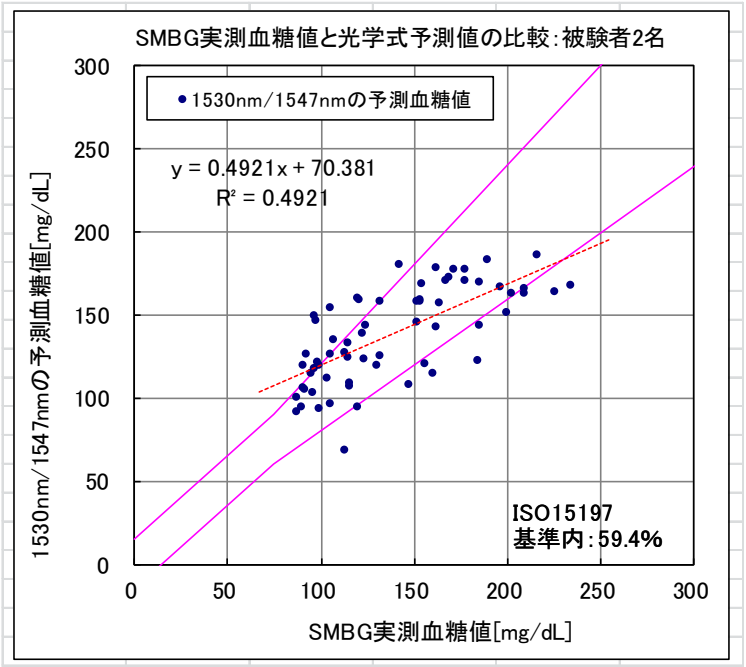


図③-(3)- (b)-4-4.1　共焦点方式実験システムによる馬鮮血中グルコースの濃度の検出

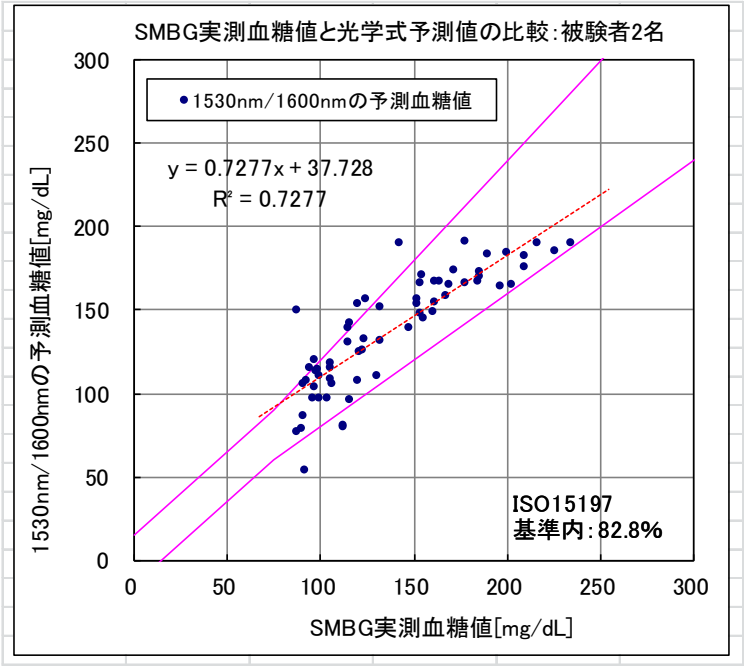
③-(3)-(b)-4-5　光学式予測値と実測血糖値の EGA 解析による原理確認

共焦点方式実験システム（図③-(3)-(b)-4-2.1）の焦点位置が皮膚表面から深さ 0.8mm にな

るように調整し、光学窓に測定対象となる指をのせて反射してくる光量が最大（焦点からの戻り光が最大）となる位置で指を固定する。参照光である波長 1530nm と測定光である波長 1547nm と 1600nm を切り換えて光の検出信号を測定し、それぞれの光量比（参照光量／測定光量）をとる。測定１日目のデータから検量線を求めて、その後のデータは光量比から予測血糖値を求める。比較する実測血糖値は、SMBG（Roche、アキュチェックアビバ）を用いて測定対象の指から穿刺・採血して測定する。被験者は２名、測定期間は７日間、測定タイミングは昼食前の空腹血糖と食後の血糖値ピークを含む変動が捉えられるように数回／日データ収集を行った。参照光 1530nm と測定光 1547nm の光量比から求めた予測血糖値と SMBG 実測血糖値の関係を図③-(3)-(b)-4-5.1 に示す。参照光 1530nm と測定光 1600nm の光量比から求めた予測血糖値と SMBG 実測血糖値の関係を図③-(3)-(b)-4-5.2 に示す。２つのグラフを比較すると、測定光 1600nm の方が測定光 1547nm よりもデータのバラツキが大きく、血糖値（グルコース）の検出感度が高いことがわかった。この結果は、グルコースの吸収係数の波長依存性（図③-(3)-(b)-4-2.2）と同様に 1547nm よりも 1600nm の吸収係数が大きいことを示した。共焦点方式実験システムで波長 1600nm と 1530nm の２波長光量比から求めた光学式予測血糖値と SMBG は相関があり、これらの EGA 解析によりデータの 82.8%が目標の血糖値 75mg/dL 以上で±20%以内に入った。以上より、共焦点方式と複数波長のレーザ光源を組み合わせた光学的手法で、真皮の情報を選択的に検出して血糖値（グルコース濃度）測定を行う原理確認ができた。



図③-(3)- (b)-4-5.1　実測血糖値と光学式予測値の比較（1530nm/1547nm）



図③-(3)-(b)-4-5.2　実測血糖値と光学式予測値の比較（1530nm/1600nm）

③-(3)-(b)-4-6　光学式の原理確認のまとめ

共焦点方式の光学的手法は、先導研究の目標（可能性の判断基準）である EGA 解析で血糖値 75mg/dL 以上で±20%以内の範囲に測定データが 80%以上に対して、被験者 2 名の光学式予測値と実測血糖値の EGA 解析で許容範囲±20%以内にデータの 82.8%が入った。これにより、非侵襲・非観血で血糖値モニタを実現できる可能性があることが確認できた。

今後の課題として、測定時の光検出信号が不安定となる場合があり、その原因として周囲温度、体温、汗の影響が考えられるが、各要素の影響の有無や軽重を評価するには至らなかった。EGA 解析のバラツキを低減するため、周囲温度、体温、汗といった外乱の影響の把握と対策が必要である。

③-(3)-(b)-5　光学方式の MEMS 化の検討

【再委託先：国立大学法人東京大学年吉研究室】

③-(3)-(b)-5-1　MEMS 化検討の目的

技術研究組合 NMEMS 技術研究機構より委託を受けた横河電機（株）が検討する共焦点方式による光学系は、現状構成する光学部品や焦点調整機構が大きいため、ヘルスケア分野の展開を想定し可搬できるモニタが必要となる。可搬性を向上する小型化の方法として、光学系の MEMS の有効性と適用可能範囲を検討する。

③-(3)-(b)-5-2　MEMS 化検討結果

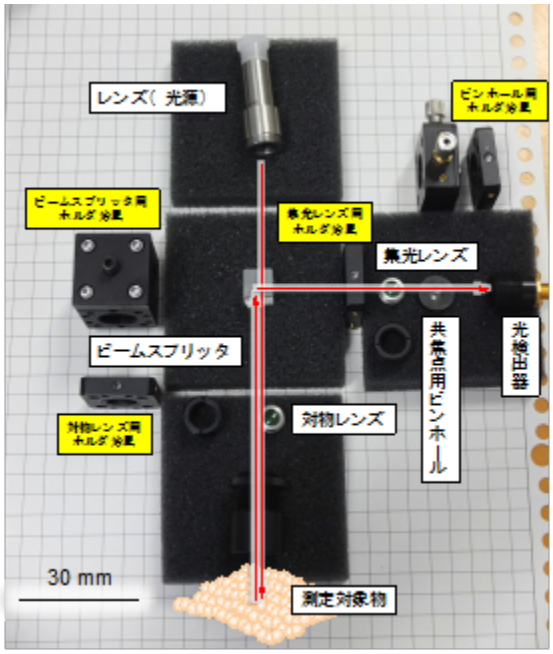
③-(3)-(b)-5-2-1　共焦点光学系の小型化

可搬性の良い光学式血糖値センサとして、図③-(3)-(b)-5-2-1.1 に示すような長さ 10cm、幅 5cm、厚み 2cm 程度の筐体を目標にして光学系を実装する方法を検討した。横河電機株式会社による試作光学系には、図③-(3)-(b)-5-2-1.2 に示すような光学治具一式が配置されている。これらは光学機器メーカ既製品のホルダ治具により位置決めされており、それらの治具が筐体内部の大部分の容積を占める。



目標サイズ：10cm×5cm×2cm

図③-(3)-(b)-5-2-1.1　小型センサ概念図

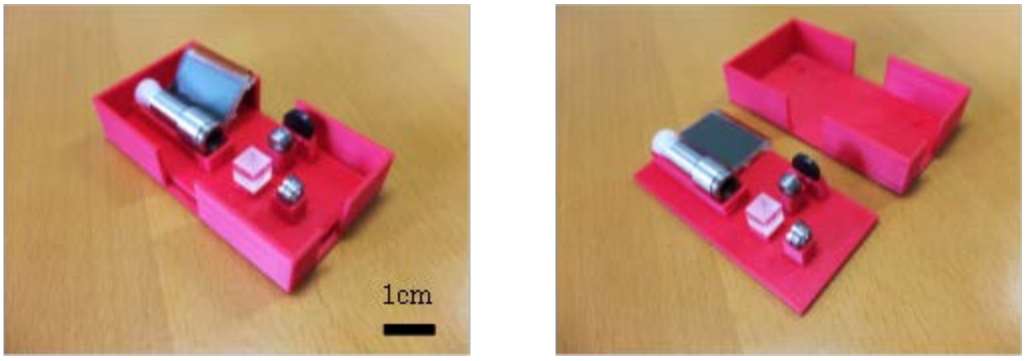


図③-(3)-(b)-5-2-1.2　血糖値センサ光学系

そこで、本研究では、ABS 樹脂フィラメントをヒータで溶かして固める方式の 3D プリンタ（Replicator 2X、日本バイナリー株式会社）を経費で購入して、図③-(3)-(b)-5-2-1.3 に示すような光学部品を位置合わせ・保持する基盤の概念モデルを試作した。試作の結果、以下の項目が明らかになった。

フィラメント素材の熱収縮は、ABS 樹脂が過熱したノズルから射出されて冷却するまでの熱収縮は、筐体寸法が 10cm 程度と大きくなると無視できない。3D プリンタには一定温度でフィラメント積層形成するための簡易恒温槽が付属しているが、積層した部材がプロセス途中で熱収縮してステージから剥がれるなどの問題が散見された。この結果、3D プリンタによる加工はセンサ筐体のみに適用すべきであり、精密な光学アラインメントを必要とする部分には従来通りのアルミダイキャスト製基盤か、あるいは、金属をフライス加工

した基盤が好ましいことが分かった。ただし、今後 3D プリンタの加工精度が改善されれば、実験室レベルの光学ホルダであれば試用に耐えられる可能性がある。なお、図③-(3)-(b)-5-2-1.3 の筐体試作には約 1 時間を要した。



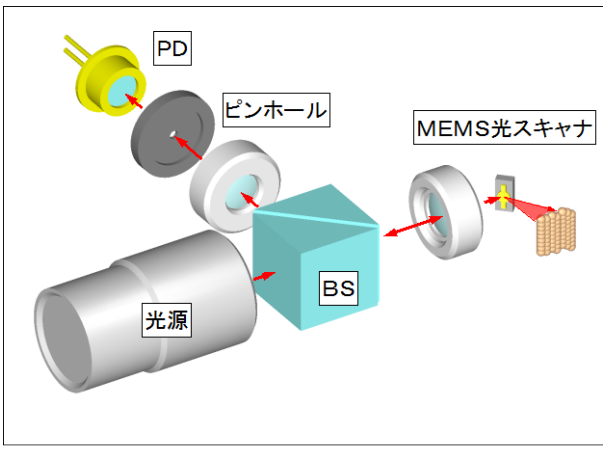
図③-(3)-(b)-5-2-1.3　3D プリンタによる光学ホルダ治具

フィラメント素材寸法とステージ送り精度による加工精度は、試用した ABS 樹脂の積層厚みは 100μm であるため、上下方向の設計は 100μm ルールの制限を受ける。また、ステージの位置精度は XY 平面内で 11μm であるため、as depo 状態で光学アラインメントを完了するには加工精度が不足している。ただし、上記の加工性を許容すべく共焦点光学系の位置決め精度を緩和すれば、光学部品を填め込むだけで簡易アラインメントができる余地はある。製作可能な 3 次元構造の制限は、3D プリンタは線材を下から積層することにより 3 次元構造物を形成するため、たとえば、下部に空洞を設けたテーブル状の構造物形成は不得手である。このため、レンズ部品などを上から保持するラッチ状の構造物の形成が難しい。

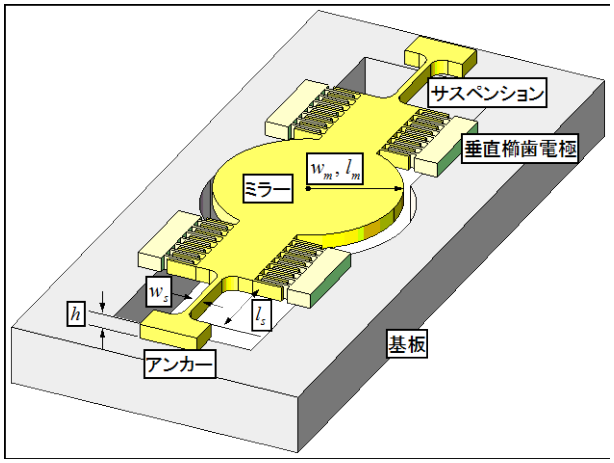
③-(3)-(b)-5-2-2　MEMS 光学系の導入

共焦点光学系型の血糖値センサでは、皮膚直下 1 mm 程度の深度に到達したプローブ光の焦点から光学情報を収集する。ただし、測定する対象（患者）によって皮膚の厚みが異なり、また、光を照射した部分の毛細血管が疎である部分は光学測定に適さないなどの測定毎の条件がばらつくことがある。そこで本研究では複数箇所をサンプリングして信号処理できるように、図③-(3)-(b)-5-2-2.1 に示すように血糖値センサの光学系内に MEMS 光スキャナを導入して、皮膚上でビームスポットを 1mm 程度走査する機構を導入する手法を検討した。なお、このときの設計条件として、対物レンズ通過後のビームウエストφ1mm、ミラー直径 1.5mm、駆動電圧 6V を仮定した。図③-(3)-(b)-5-2-2.2 に、SOI 基板を DRIE 加工して設計可能な垂直櫛歯型ＭＥＭＳ光スキャナの設計概念図を示す。また図③-(3)-(b)-5-2-2.3 は、

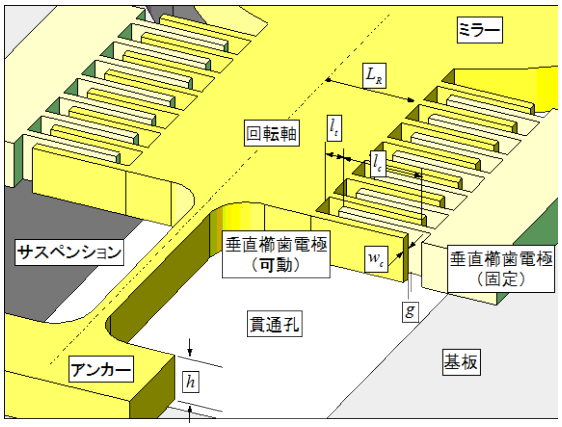
静電駆動解析に用いた櫛歯部分の拡大図面である。



図③-(3)-(b)-5-2-2.1　MEMS 光スキャナを用いたプローブ光の走査



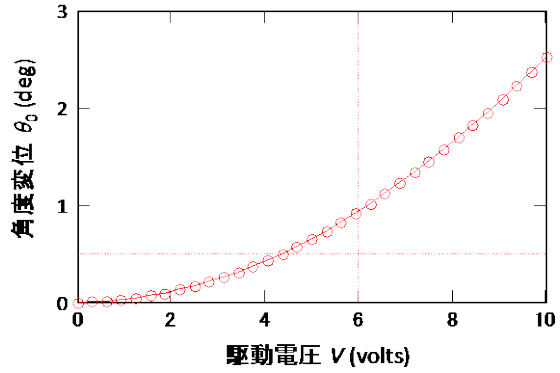
図③-(3)-(b)-5-2-2.2　垂直櫛歯電極による MEMS 光スキャナ構造



図③-(3)-(b)-5-2-2.3　垂直櫛歯電極の拡大図

③-(3)-(b)-5-2-3　静電駆動解析モデルを用いたシミュレーション

静電駆動解析モデルを用いたシミュレーションの結果、下記の項目が明らかになった。文献 4)の静電駆動解析モデルを使用して、直流電圧印加時の直流的なミラー角度を計算した結果、図③-(3)-(b)-5-2-3.1 に示すように 6V で機械角度 1°が出力可能であることが分かった。この角度は、ミラーから 3.5mm 離れた点において片側 0.5mm のビームスポット変位量に相当する。なお、ミラーを共振で振動する場合には、これを Q 値倍（経験値で Q=5）したストロークとして、5mm 程度が得られる見込みである。



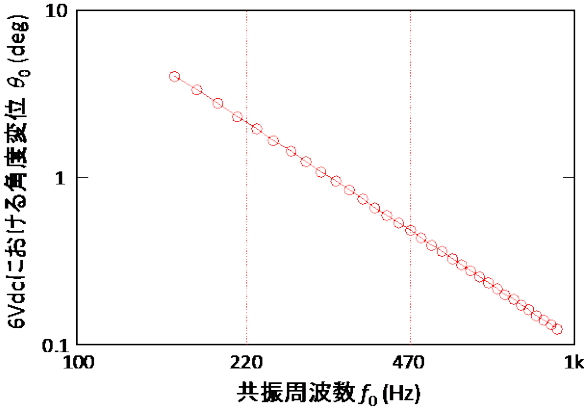
図③-(3)-(b)-5-2-3.1　垂直櫛歯型 MEMS 光スキャナの直流駆動特性

上記の解析結果に使用したスキャナの構造寸法は以下の通りである。SOI 厚み 30μm、サスペンション幅 2.6μm、長さ 250μm、ミラー直径 1.5mm、櫛歯の幅 10μm、長さ 150μm、ギャップ 5.6μm、櫛歯の数 132 対（両側）。なお、任意直流電圧におけるスキャナの角度を計算する簡易版のモデルとして、図③-(3)-(b)-5-2-3.2 に示すような Excel 表計算を用いたプログラムを併せて構築した。

2013.11.14	スキャナ特性計算2013-11-14.xls	オフセット角度つき垂直櫛歯型静電光スキャ			
単位	ナノメートル	nm	1.00E-09		
	ミクロン	um	1.00E-06		
	ミリメートル	mm	1.00E-03		
	ギガパスカル	GPa	1.00E+09		
物理定数	真空の誘電率	ε0	8.85E-12		
材料定数	シリコンのヤング率	E	1.60E+11		
	シリコンの剪断係数	G	6.30E+10		
	シリコンの密度	ρ	2.33E+03		
設計パラメタ	SOI厚み	h	3.00E-05		
	サスペンション　幅	ws	2.60E-06		
	サスペンション　長さ	ls	2.50E-04		
	サスペンション　高さ	hs	3.00E-05		
	ミラー　幅	wm	1.00E-03		
	ミラー　長さ	lm	1.50E-03		
	櫛歯　幅	wc	1.00E-05		
	櫛歯　長さ	lc	1.50E-04		
	櫛歯　高さ	hc	3.00E-05		
	櫛歯先端の隙間	lT	2.00E-05		
	櫛歯の静電ギャップ	g	5.60E-06		
	櫛歯の付け根位置	LR	5.00E-04		
	櫛歯のペア数	N	1.32E+02		
	櫛歯先端が面外に出る角度	θ1	4.61E-02	2.64	deg
	櫛歯根元が面外に出る角度	θ1	5.76E-02	3.30	deg
	慣性モーメント	I	8.74E-15		
計算	共振周波数	f0	4.93E+02	493.00	Hz
	駆動電圧(指定可能)	V	1.00E+01		Volts
	静電トルク	Te	1.59E-09		
	ばね定数	k	8.38E-08		
	オフセット角度(角度振幅には寄与しない)	θ offset	-1.54E-02	-0.88	deg
計算結果	指定した駆動電圧における角度	θ	1.89E-02	1.09	deg

図③-(3)-(b)-5-2-3.2　Excel を用いた MEMS 光スキャナの計算

櫛歯の設計値を確定した後に、サスペンションの幅を微調整することで、６V における直流変位と共振周波数が推移する様子を確認した結果を図③-(3)-(b)-5-2-3.3 に示す。これより、直流駆動時のミラー角度を片側で 0.5° 以上確保するためには、共振周波数がある程度以下になるようにサスペンションの幅を設計すべきであることが分かった。このときのサスペンション幅が 2.6μm（MEMS 加工によるサイドエッチング後の寸法）であり、共振周波数は 493Hz であった。



図③-(3)-(b)-5-2-3.3　一定電圧（6V）における直流変位と共振周波数の関係

③-(3)-(b)-5-2-4　光学方式の MEMS の考察

可搬性の良い光学式の小型血糖値センサのあり方として、内部の光学部品保持には従来通りのアルミダイキャスト、あるいは、フライス加工金属による基盤の利用を提案する。

また、その外形筐体の試作には、ABS フィラメント材による 3 次元プリンタが使えることが分かった。プローブ光検査のばらつきを押さえる手段として小型 MEMS 光スキャナを対物レンズ後に挿入する手法を提案した。また、駆動電圧 6V でプローブ光を 5mm 程度走査する静電駆動型の MEMS 光スキャナが設計可能であることを解析により示した。可搬性を向上する小型化の方法として、光学系の MEMS 化が有効であることを検証した。

③-(3)-(b)-6　ユーザ機関による成果の有効性の検証

③-(3)-(b)-6-1　検証方法

ユーザ機関ニーズ調査のヒアリング先である信州大学医学部の駒津光久教授と栗田浩教授に研究成果を説明してコメントをいただき、成果の有効性の検証を行う。

③-(3)-(b)-6-2　検証結果

ユーザ機関による成果の有効性の検証のヒアリングにおけるコメントな以下の通りである。

・信州大学医学部医学部内科学講座糖尿病・内分泌代謝内科：駒津光久教授

馬鮮血中のグルコース濃度が測定できていること、EGA 解析データをみるとバラツキは大きいが血糖値が光学的測できる結果が得られている。検量線が 2 名でも 1 本となっているが、皮膚や組織液は個人差があることから、被験者毎の検量線でも意味がある。被験者を増やしたデータで、被験者毎の検量線であっても、現状の自己血糖値モニタと同等の精度、今回の EGA 解析のデータバラツキ程度なら十分である。これからの研究に期待する。EGA 解析のリファレンスの血糖値が SMBG による測定値になっているのは残念である。初期段階としてはこれでもいいが SMBG はバラツキが大きく目安としてはいいが、信憑性を考えると勿体ない。これから本格的な研究をするときは POCT に変更してほしい。採血量も 0.6μL で SMBG のような使い勝手の POCT もある。本格的な研究では、被験者数も 10 名程度に増やしてデータを蓄積してほしい。今回の血糖値範囲となった 100mg/dL～250mg/dL は糖尿病の診療で使いやすい範囲になっている。低血糖や高血糖のデータは、生命の危険があり、病院の中の現場でないと収集できない。臨床で確認する範囲である。SMBG は、指先の血液から血糖値を測定するので採血方法や場所によって誤差が大きい問題がある。かえって間質液の方が安定して測定できる可能性がある。事例として、CGM も間質液で測定している。間質液は血糖値の遅れや急激な血糖値の上昇・下降はわからないし、POCT で補正が必要で使い勝手が悪い。連続測定ができる CGM の製品があるから使っているというのが現状ではないか。また、CGM は特殊な患者のみに必要で、通常では必要性が低く、連続測定のニー

ズはある程度の範囲にとどまる。非侵襲・非観血になれば用途も変わってくる。間質液の血糖値もCGMと同様に血中のグルコース濃度に読み替えれば、十分に目安として使うことができる。光学式の間質液モニタは、健康指標のような使い方には適している。成果は、目標を達成したと判断できる。

・信州大学医学部医学部歯科口腔外科学講座：栗田浩教授

EGA 解析データをみると、血糖値が光学的に計測できる結果が得られている。非侵襲・非観血の光学的な血糖値モニタができる期待感がある。医療現場の強いニーズにマッチしていて、本研究のコンセプト通りできればすばらしい。精度は現状の自己血糖値モニタと同等であれば申し分ない。成果は、目標を達成したと判断できる。

今回の試作及び実験結果は、まだ基本原理の確認レベルであるが、ユーザ（2名の先生）に成果をご確認・ご評価いただき、この後の本格研究で計画している非侵襲・非観血な血糖値モニタのコンセプト及び本提案方式のポテンシャルの高さ（期待度）の有効性が検証できた。

③-(3)-(b)-7　まとめ

＜実施内容と結果＞

共焦点方式実験システムを設計し、光源／制御装置と光学部品を選定し、先導研究予算で購入した装置及び光学部品を主として組み立てたシステムによって原理確認の環境が整い、提案した光学的手法で非侵襲・非観血な血糖値モニタを実現できる可能性があることが確認できた。

本システムで波長1547nmを用いて馬鮮血中グルコース濃度とPD検出電流の相関から原理検証ができた。本システムで波長1600nmと1530nmの2波長光量比から求めた光学式予測値と実測血糖値のEGA解析を行い、先導研究の達成目標（EGA解析：被験者2名、血糖値75mg/dL以上で±20%以内に80%のデータ）を達成した。

東京大学年吉研究室で行ったプローブ光走査のための MEMS 光スキャナ設計モデル提案と3Dプリンタによるハンディタイプ検査機器の光学系模型製作から、可搬性を向上する小型化の方法として、光学系のMEMS化が有効であることを検証した。

以上の成果は、ユーザ機関における成果をご確認・ご評価いただき、有効性が検証でき、先導研究の目標を達成した。

＜開発すべきセンサシステムの技術課題・開発内容と目標＞

自己血糖値モニタ SMBG と同等の性能（SMBG 基準：ISO15197）を非侵襲・非観血の光学式血糖値モニタの実現するためには、個人差などの誤差要因の低減が技術課題となる。誤

差要因の特定、血糖値の算出アルゴリズムの確立、被験者血糖値データの測定及び蓄積する実証システムによる総合評価を行う。

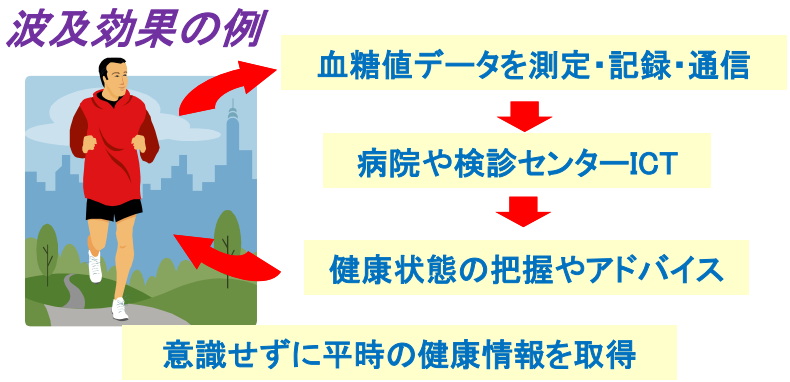
医療機器以外の用途として、ヘルスケア分野の日常的なモニタを想定すると、可搬性の向上（ウエアラブルモニタ）が必要となる。小型化技術（光学系の MEMS 化など）、電源供給の検討を行う必要がある。

＜開発されるセンサシステムを適用した場合に期待できる具体的効果、インパクト＞

非侵襲血液成分センサシステム（光学式血糖値モニタ）は、糖尿病や糖尿病合併症などの早期発見・治療に向けた予防・予病のための日常的な血糖値モニタとして、ヘルスケア分野への応用が期待できる。また、測定精度を高めることで医療現場（診断、ベッドサイドモニタなど）への展開も期待できる。

＜将来開発すべきセンサシステム像＞

自己血糖値モニタ SMBG と同等の性能を有する非侵襲・非観血の光学式血糖値モニタを実現する。可搬性を向上する小型化により、医療現場（診断、ベッドサイドモニタなど）への展開とともにヘルスケア分野に展開する。日常の血糖値モニタリングによって、糖尿病の早期診断、適切な治療、予防・予病に貢献する（図③-(3)-(b)-7-4.1）。



図③-(3)-(b)-7-4.1　将来のセンサシステム像

参考文献

1）田村守，丸尾勝彦，山田幸生，“非観血的血糖計測装置”糖尿病学の進歩第 41 集，pp. 101−106，2007

2）M. Shimada, Y. Masuda, Y. Yamada, M. Itoh, M. Yakahashi and T.Yatagai, Opt., Rev. 7, 348, 2000

3）K. Maruo, M. Tsurugi, J. Chin, T. Ota, H. Arimoto, Y. Yamada, M. Tamura, M. Ishii, Y.Ozaki, IEEE Journal of Selected Topics in Quanyum Electronics, 9,2,322,2003

③-(4)　即時生化学センサシステムの開発

【横河電機株式会社、再委託：国立大学法人東京大学藤井研究室】

③-(4)-1　研究の目的

＜社会課題＞

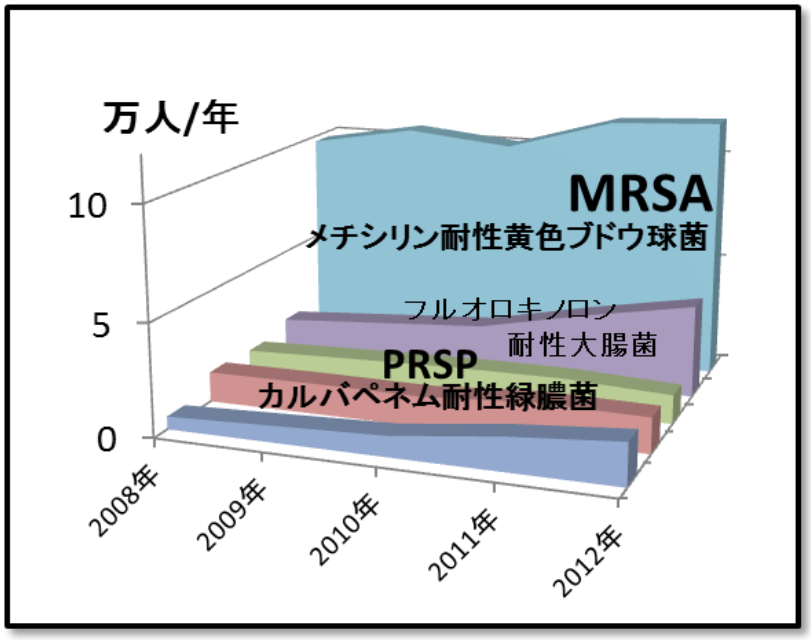
現在、大疾病の早期発見・治療による社会コスト抑制の実現が望まれている。その中で、早期発見を実現するためのセンシング技術への期待は大きい。具体的には、少ないサンプルでも検出が可能な高感度計測、迅速な対応を可能とする測定時間の短縮、だれでも現場で測定ができる計測手法、低価格化などが望まれている。近年、社会問題となっている院内感染では、短時間で原因となる病原体の特定が必要である。国内で 10 万人以上の患者が発生している（平成 24 年度、③-(4)-1.1）。さらに耐性菌の種類が増加し、最強の抗生剤に対しても耐性菌が発生している。従って、感染を広げないためには、感染菌などの迅速な特定を行い、適切な治療薬の選択や処置が求められている。また、食中毒でも感染を広げないためには迅速な感染菌の特定が重要となる。

入院による治療においては、院内感染のアウトブレイクを予防し、発生した場合でも早期の対策を実施することが必要である。そのためには、1 回/週程度の頻度で検査を実施し、トレンドを監視するのが望ましい。しかし、現状の標準的な検査方法である培養法は少なくとも 2 日間が必要である上、陽性と判定された場合は PCR のような検査機器を用いて確定検査を実施することもあり、時間を要する。また、病床が 300 床以上の大きな医療機関は医師、看護師、検査技師、薬剤師からなる感染制御チームを設置して対策するように決められおり、検査技師が検査を担当するが、人手が不足している。このような状況から、医療現場においては、感染症検査に係わる時間的・肉体的・精神的・経済的な負担やストレスを低減することが課題となっている。

また、耐性菌の出現の悪循環により、さらなる感染症の危険性を誘発しないように、菌の特定と迅速判定に基づく抗菌剤の管理も課題である。しかしながら、対象となる菌数が多い場合、現状の方法では迅速な菌の絞り込みには限界がある。

感染症の防止や診断・治療の多くが医療従事者の人手によって行われている点を鑑みれば、医療従事者の負荷低減の観点から、感染症などの病原菌やウイルスを、スキルレス・ハザードフリーで安心して測定できる閉鎖型バイオデバイスの開発が望まれている。

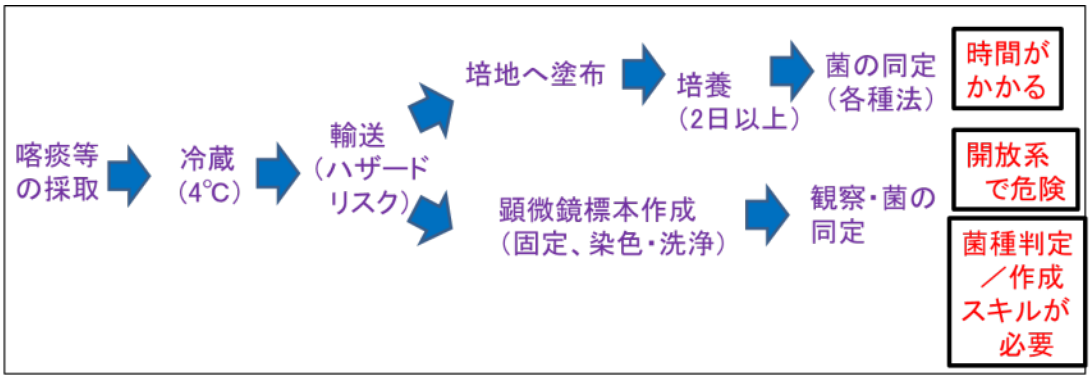
この先導研究では、サンプルを注入するだけで全測定プロセスをデバイス内で実現する、分子認識ナノバイオセンサアレイと、専門知識のない人でも安全に測定できる“閉鎖型バイオデバイス”を実現するための技術的な検討と予備研究を行い、本格研究においてセンサの原理検証、デバイスプロトタイプ開発へと進める。



図③-(4)-1.1　特定の耐性菌患者数(2012 年厚生省院内感染対策サーベイランスより)

＜現状の取り組みと課題＞

図③-(4)-1.2 に従来からの院内感染検査時の手順を示す。従来は、喀痰などを採取し、冷蔵・輸送後に、培地で 2 日以上培養し、菌を同定する。あるいは試料を何度も固定・染色・洗浄して顕微鏡標本を作製し、観察して菌を同定する。このため、時間がかかり、また開放系で危険であり、菌種判定や作成にスキルが必要であった。このように現状の標準的な検査方法である培養法は少なくとも 2 日間が必要である上、陽性と判定された場合は PCR のような検査機器を用いて確定検査を実施することもあり、時間を要する。



図③-(4)-1.2　従来からの院内感染検査時の手順と課題

＜実施内容と最終目標＞

これらの課題を解決するために、「即時生化学センサシステムの開発」のテーマでは、高速で分子レベル高感度センシングにより、迅速な診断、疾病発症/病状変化の早期発見を目指した閉鎖型の即時生化学センサシステムを目指す。このようなシステムを想定した上で、具体的には、今年度は以下の手順により予備研究を行うことより、想定システムの具体的内容と必要要件について検討し、先導研究を進めた。

1）国内外のヒアリングを行い、ユーザニーズの調査を行う。また、先導研究として代表的な数種類の菌種を選定する。

2）これに基づき、センサ/デバイスの方式を決定する。

3）決定したセンサ/デバイスの試作と評価を行う。

以下にその結果を報告する。

③-(4)-2　ユーザニーズのヒアリングと開発の方針

③-(4)-2-1　調査方法

以下の国内外 5 カ所のヒアリングを行った。

国内 3 件 ・国立大学　医学部 1
・国立大学　医学部 2
・国立大学　医学部 3

海外 2 件 ・米国　州立大学　D 教授
・米国　E 社創業メンバ、開発者

ヒアリングの結果を表③-(4)-2-1.1 に示す。

表③-(4)-2-1.1　ユーザヒアリングの結果

	日時	主なコメント
国立大学医学部１　A 教授	平成 25 年 8 月	このような自動検査機器は重要。検査は入院時のスクリーニング検査、アウトブレイク時、平時など。検査時間が短縮されることは歓迎すべきこと。
国立大学医学部２　B 教授	平成 25 年 9 月	対象となる菌種は:100-200種類程度だが、通常は20菌程度。入院時の新患検査は、保険として課題だが、全員に対して実施している病院もある。
国立大学医学部３　C 教授	平成 25 年 9 月	スキルレス、ハザードフリーというコンセプトはとても良い。変異が早いため、型の種類は増えている。PCR のみだと、型の確定まではできない。そのためアレイは有利だ。入院前の検査にも 1 時間であれば適応できる。
米国州立大学 D 教授	平成 25 年 10 月	院内感染は、アメリカにおいても有望な市場が存在する。競合 E 社よりも優位な点は複数の標的を検出できる点である。各社が直面する課題として、テストあたりのコストが挙げられる。
米国 E 社 創業者メンバ 開発者	平成 25 年 11 月	院内感染は、重大な問題となっているため、スクリーニング技術が求められている。病院内で使用されるようになるには、簡便性やハザード防止機構も重要な要素だ。E 社のデバイスにおいては検出原理上、今以上のマルチプレックス化は困難であろう。

③-(4)-2-2　ユーザニーズのまとめと開発の方針

国内外 5 カ所のヒアリングをまとめると以下のようになった。

院内感染の計測・特定が必要な代表的な状況は以下の 3 点であった。

1）アウトブレイク時；

感染源・菌の迅速特定し、迅速な対応を行う。

2）新患の入院時；

保菌者は個室へ隔離する。

3）日常の院内モニタリング；

保菌者を含む管理を行う。

また、ユーザからのニーズをまとめると以下の 3 点となる。

1）多種類の菌種を測定したい

20 菌種程度（×各 3～6 遺伝子/菌）

2）スキルレス・ハザードフリー

ベッドサイド、診療所で、安全に

3)　迅速な測定

1時間以内で：院内感染では早期対策が重要

③-(4)-2-3　代表的な菌種の選定

院内感染などで重要な菌種を調べるため、厚労省院内感染対策サーベイランス（2012年報）を参照した。結果を表③-(4)-2-3.1に示す。

この中で、主要菌分離患者数と特定の耐性菌分離患者数で共に上位を占める、黄色ブドウ球菌と緑膿菌を、今回の院内感染における代表的な菌種とすることとした。

表③-(4)-2-3.1　厚労省　院内感染対策サーベイランス（2012年報）による菌種

主要菌分離患者数		継続的に収集対象とする薬剤耐性菌（全入院患者を対象）	特定の耐性菌分離患者数
黄色ブドウ球菌	15.2%	メチシリン耐性黄色ブドウ球菌（MRSA）	8.60%
大腸菌	11.8%	バンコマイシン耐性黄色ブドウ球菌（VRSA）	0.00%
緑膿菌	7.0%	多剤耐性緑膿菌（MDRP）	0.14%
		ペニシリン耐性肺炎球菌（PRSP）	0.89%
		バンコマイシン耐性腸球菌（VRE）	0.02%
		多剤耐性アシネトバクター属（MDRA）	0.01%

③-(4)-2-4　センサ/デバイスの方式

前記のユーザニーズは、一言で表せば

ニーズ：「多剤耐性菌に対応する多菌種をスキルレス・ハザードフリーに現場で迅速測定したい」

と表現できると考えられる。

これに対応する対策は種々考えられるが、この先導研究では、以下のようにシーズを設定した。

シーズ：「多菌種・高速・自動の測定を廃液を出さない“閉鎖密閉空間”の中で実現する」

これらのニーズを満たすシーズとして、以下のセンサ/デバイスの方式を選定した。

a)デバイス/送液　　：動的封入送液デバイス方式

b)増幅　　：マルチウェルPCR方式

c)検出　　：ウオッシュレス DNA アレイ方式

このニーズとシーズの両者の対応について、縦軸にニーズ、横軸にシーズとして、表③-(4)-2-4.3 にまとめた。それぞれ、太字で示した項目が対応している。

表③-(4)-2-4.3　ニーズとシーズの対応

ニーズ＼シーズ	デバイス・送液	増幅	検出
・多種類の菌種	**手間がかかる →自動処理**	**多種類: →マルチ遺伝子増幅**	**多種類: →マルチ遺伝子検出**
・スキルレス ・ハザードフリー	**閉鎖型・密封自動処理（・廃液なし、焼却可能）**	**閉鎖型・密封空間内（流出、コンタミを防止）**	**閉鎖型・密封空間内（流出、コンタミを防止）**
・迅速測定	**時間がかかる →自動・迅速処理**	**高速遺伝子増幅**	**時間がかかる →後処理なし(迅速)**

次に、各センサ／デバイス毎にその原理と試作、実験結果を示す。

なお、この先導研究では各センサ／デバイスの基本原理などの確認のために、この 3 項目はそれぞれ単独で個別に試作や実験を行う。従って、たとえば「マルチウェル PCR 方式」により増幅された DNA を、「ウオッシュレス DNA アレイ方式」により検出で確認するなど、これらの相互連結の実験などは次の本格研究の課題と考えている。

③-(4)-3　動的封入送液デバイス方式

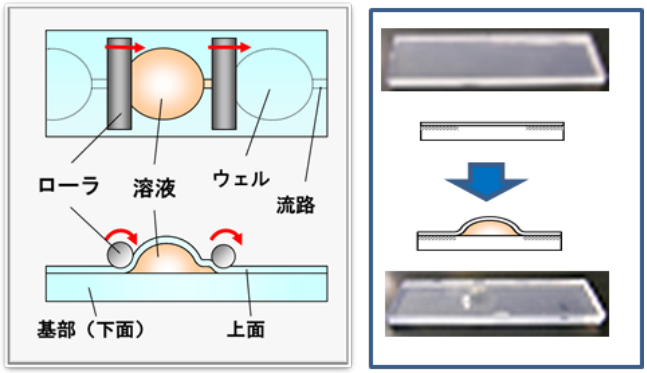
③-(4)-3-1　原理検証の内容

動的封入送液デバイスは、閉鎖型デバイス本体と溶液密封状態での送液を同時に実現できるデバイスである。

すなわち、動的封入送液デバイスは、閉鎖型バイオデバイス本体となる部分を形成するとともに、2 本のローラと弾性体の容器の組み合わせにより、密閉された溶液を自動処理で安全・確実・迅速な送液を実現可能にする（図③-(4)-3-1.1）。

これによって、「多種類の菌種の検出」に対しては「自動処理」、「スキルレス／ハザードフリー」に対しては「閉鎖型密閉処理」（危険な菌体が流出しない、外部からコンタミしない）、「迅速測定」に対しては「自動・迅速処理」、というそれぞれのニーズに対応するシーズを提供できる。

原理の検証のためには、このデバイス動作確認用の簡単な試作を行い、この試作を用いてプリテストを実施した。プリテストはダミーの溶液を使用し、病原体に相当する溶液を、試料（入力）、溶解、増幅、検出に相当する 4 つのステップで送液を行ない、このときの容器外漏れ防止が、小型密封容器で実現可能であることを確認した。



図③-(4)-3-1.1　動的封入送液デバイス方式

③-(4)-3-2　試作内容

プリテスト用の動的封入送液デバイスは、弾性体としてシリコーンゴムを用いて作製することとした。1 つのデバイス内に 4 つのウェルを設計し、各ウェルは直線的に並び流路で結合された構造とした。各ウェルの想定容量は約 20μl とし、溶液の導入は、第 1 のチャンバに設計したインレット部から行うこととした。また、送液を行うためのジグを試作した。送液ジグには、y（y 軸は図③-(4).3-1.1 の水平方向）、z 軸（z 軸は同じく高さ方向）のステージを具備し、2 本のローラ及びデバイスの固定台の移動を可能とした。

③-(4)-3-3　実験方法

プリテスト用の動的封入送液デバイスの試作では、シリコーンゴムで上面及び下面（基部）を作製した。次にプラズマ照射を用いて両者の接着を行った。このとき、4 つのウェル部とその連結部を非接着部とすることで、通常は平面であるが、流体の流入時にのみ弾性部が膨らむことで流路となる構造とした。この構造によって空気の巻き込みも防止可能となっている。

ダミー溶液として、市販の青色の染料を水で希釈した液を用い、約 20μl をピペットを用いて、デバイスのインレット部より導入した。

ダミー溶液を導入したデバイスを送液ジグの固定台に乗せ、z 軸を操作して第 1 ウェルが 2 本のローラの間に収まるようにセットした。その後、デバイスの長軸側である y 軸にステージを動かすことでローラを第 2 ウェルの方向に移動させた。同様に、第 3、第 4 ウェルまで送液を行った。送液の様子は、ビデオカメラにて撮影し、画像編集ソフトにて、内部の溶液の画像をキャプチャした。

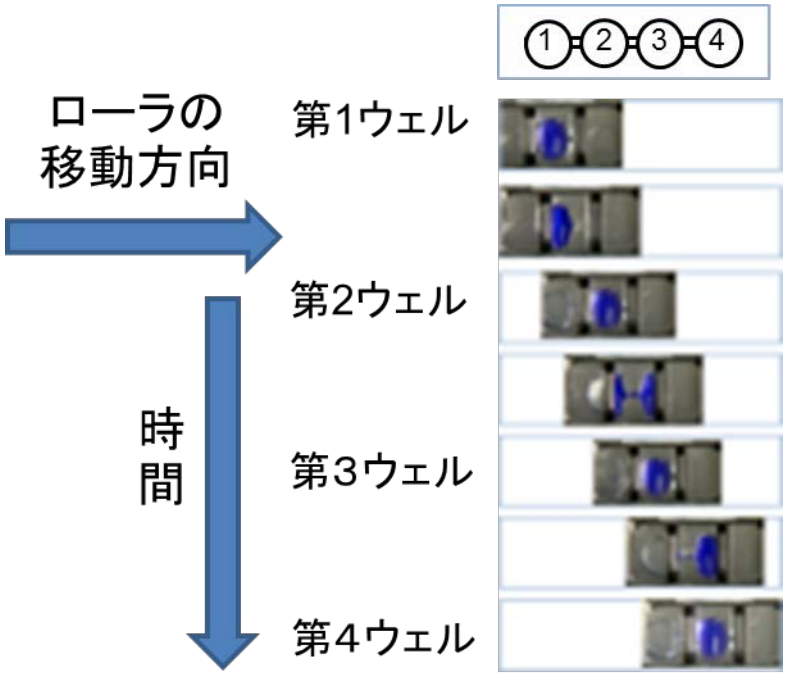
③-(4)-3-4　実験結果

図③-(4)-3-4.1 に実験結果を示す。第 1 ウェルから第 4 ウェルまでの各ステップの画像を 7 枚のスナップ画像で示している。カメラの視野が限られており、動的封入送液デバイスの全体像を同時に見ることはできないため、画像の上に第 1 ウェルから第 4 ウェルまでの位置関係を模式的に図示してある。最初の画像では、青色の溶液は 2 本のローラの間の第 1 ウェルに保持されている。ここで 2 本のローラがその間の距離を保ったまま右方向へ移動する。2 段下の画像では、青色の溶液は第 2 ウェルに保持されていることがわかる。次の画像ではさらに半ピッチ右に移動しており、第 2 ウェルと第 3 ウェルの両方に青色の溶液が保持されていることがわかる。このようにして、第 3 ウェル、そして第 4 ウェルまで送液を行った。

一般にシリコーンゴムは自己吸着性を持つため、軽く流路がふさがれ、インレット部から入れただけの場合は隣接するウェルへの溶液の漏れは見られなかった。

逆に、ローラの移動によりウェルが圧迫・変形し、流路の自己吸着による封止力を超えると、隣接するウェルにダミー溶液は送液される。デバイスに対し一定以上の力でローラを押し当てることで、送液されずに残る溶液の残液はほとんど見られなくなった。またデバイスの上面と下面の接着部分からも溶液が漏れることもなかった。

以上により、溶液を密封した状態で試料（入力）、溶解、増幅、検出に相当する 4 つのウェルを、弾性容器と 2 本のローラによる動的封入送液デバイスにより、連続して送液可能であることが確認できた。



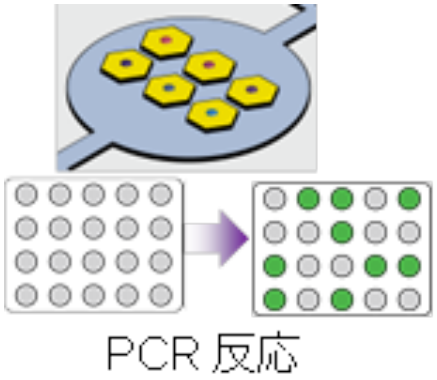
図③-(4)-3-4.1　実験結果

③-(4)-4　マルチウェル PCR 方式

（再委託先：東京大学　藤井研究室）

③-(4)-4-1　原理検証の内容

マルチウェル PCR は、PCR 増幅反応を複数の区画化した密閉微小空間（マルチウェル）で行うため、増幅された PCR 反応産物（増幅生成物）が広い範囲に希釈されず、このため PCR 反応産物を短時間で高速に増幅可能な増幅方法である（**図**③-(4)-4-1.1）。



図③-(4)-4-1.1　マルチウェル PCR 方式

これによって、「多種類の菌種の検出」に対しては「マルチ遺伝子増幅」、「スキルレス／ハザードフリー」に対しては「閉鎖型密閉処理」（外部からノイズとしての遺伝子がコンタミしない、外部へ流出しない）、「迅速測定」に対しては「高速遺伝子増幅」、というそれぞれのニーズに対応するシーズを提供できる。

原理の検証のためには、このデバイス動作確認用の簡単な試作を行い、この試作を用いてプリテストを実施する。プリテストは試料としてダミーの細胞（がん細胞）を使用し、各ウェル内で実際に溶解、増幅、検出を行う。増幅の検出は、SYBR RT-PCR 反応キット（mRNA を DNA に逆転写してから PCR 増幅すると共に、PCR 増幅時に増幅された DNA の 2 本鎖に反応して蛍光発光する試薬）により確認を行った。

③-(4)-4-2　マルチウェル PCR デバイスの設計・試作

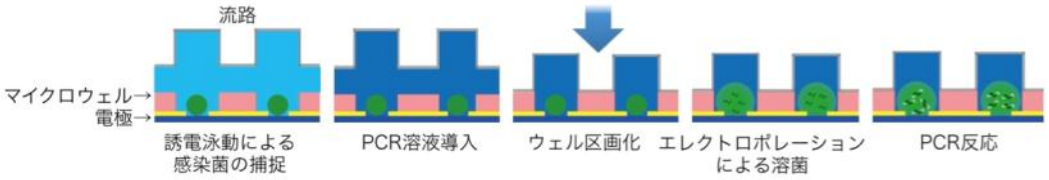
PCR 反応の反応場を微小化して区画化することで、反応産物の拡散による希釈が抑制され、PCR 反応の反応産物由来の蛍光シグナルをリアルタイムに計測するリアルタイム PCR によるサンプル中の感染菌有無を検出する操作の高速化が期待出来ると考えられる。

図③-(4)-4-2.1 に示すように、感染菌をマイクロウェルに誘電泳動力を用いて捕捉し、PCR 反応に必要な試薬の導入、マイクロウェルの区画化、エレクトロポレーションによる

溶菌、PCR 反応を実施することで、感染菌の PCR 反応による検出が可能となる。

また、マイクロウェルをマルチ(アレイ)化し、アレイ毎に異なる DNA プライマを用意することで、多菌種を同時並列的に検出可能であると考えられる。

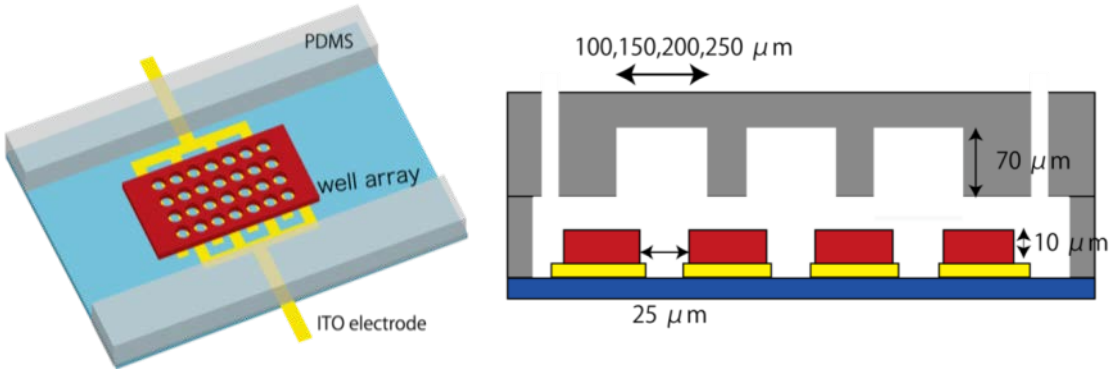
本研究では、上記のコンセプトの基礎的検討として、マルチウェル PCR を実施するマイクロ流体デバイスを設計・試作し、その評価を行なった。



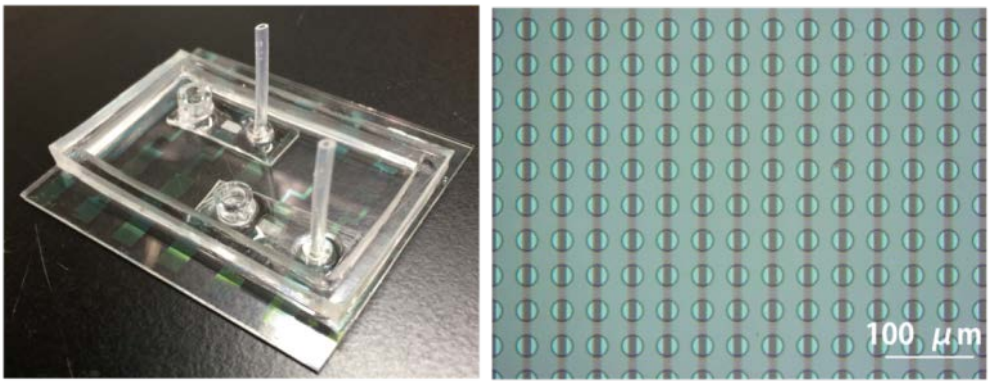
図③-(4)-4-2.1 マイクロウェルでの PCR 反応による感染菌検出の概念図

具体的には、図③-(4) -4-2.2 の模式図に示すデバイスを設計・製作した(図③-(4) -4-2.3)。デバイスは、ガラス基板上に interdigitate 型の ITO(Indium Tin Oxide)製電極がパターニングされており、その上にエポキシ樹脂(SU-8 3010)製マイクロウェル(直径 25 μm)を形成し、この基板上に感染菌懸濁液を導入するための PDMS 製流路構造を貼り合わせたものである(図③-(4) -4-2.3 右)。デバイスには 36 行×49 列の 計 1764 個のマイクロウェルがアレイ化されている(図③-(4) -4-2.3 左)。流路は高さ 30 μm、幅 2.2 mm、長さ 16 mm である。

ITO 製電極はポジ型レジストをフォトマスクとして用いたコンベンショナルなウェットエッチングにより、流路構造部分は SU-8 を鋳型とした PDMS のソフトリソグラフィにより製作した。



図③-(4)-4-2.2 マルチウェル PCR デバイスの模式図(左)と各部の寸法(右)。図中の灰色部分が PDMS 製の流路、茶色部分が SU-8 製のマイクロウェル、黄色部分が ITO 製電極、青色部分がガラス基板。

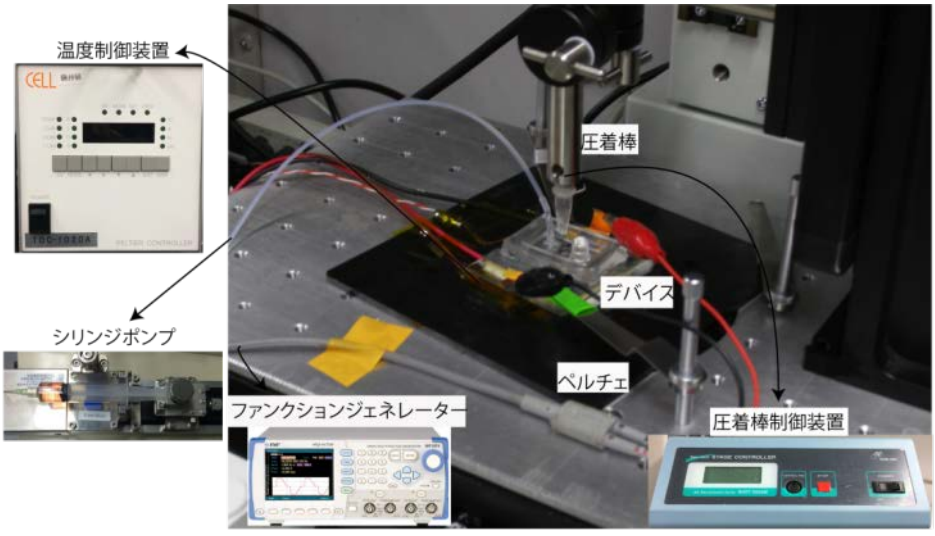


図③-(4)-4-2.3　試作したマルチウェル PCR デバイスの(左)とマルチウェル部分の拡大図(右)

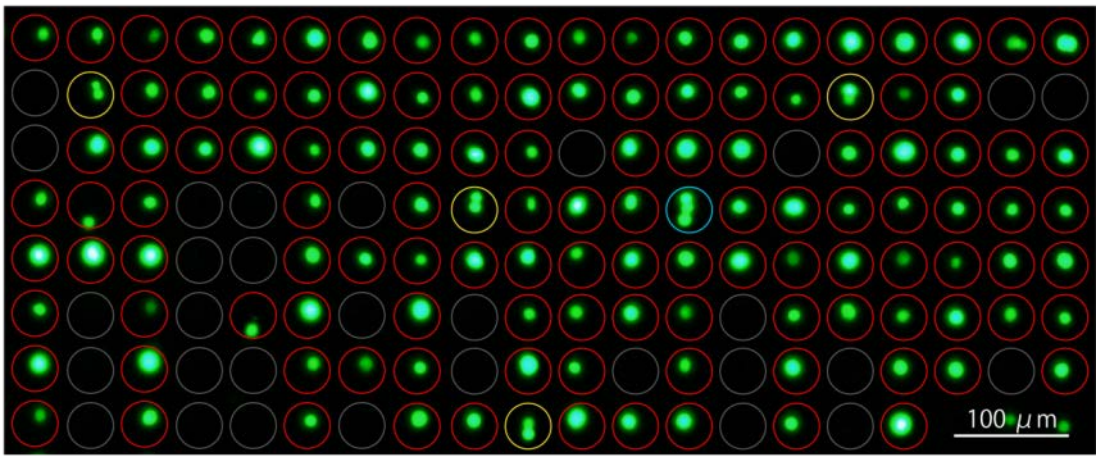
③-(4)-4-3　マルチウェル PCR デバイスの実験方法

試作したデバイス上で PCR 反応を行なうため、図③-(4)-4-3.1 に示す実験セットアップを構築した。蛍光顕微鏡のステージ上に PCR 反応に必要なサーマルサイクルを実施するため、ペルチェ素子を設置し、温度制御を行なった。デバイスへの送液にはシリンジポンプを用い、マイクロウェルの区画化は、圧着棒を位置制御することで行なった。ファンクションジェネレータは誘電泳動力を発生する際とエレクトロポレーションを行なう際に用いる。

前立腺がん細胞株の DU145 細胞を用いたデバイスの基礎評価では、図③-(4)-4-3.2 に示すように、マイクロウェルに誘電泳動バッファー(10 mM HEPES、 0.1 mM CaCl2、 59 mM D-glucose、 236 mM sucrose、 1% wt/vol bovine serum albumin)内に懸濁した DU145 細胞を捕捉可能であることを確認している。



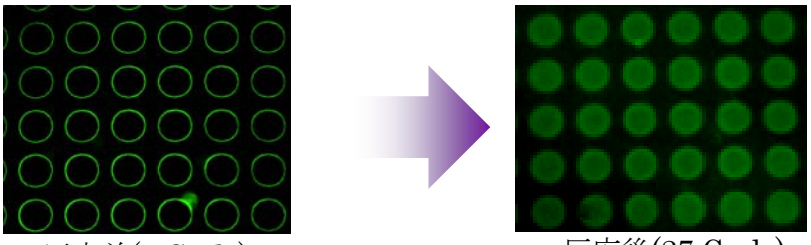
図③-(4)-4-3.1 実験セットアップ



図③-(4)-4-3.2 細胞捕捉した後のマイクロウェルアレイの一区画。図中の○が各マイクロウェルを示す。蛍光染色した細胞がウェルに捕捉されていることが確認出来る。

③-(4)-4-4　マルチウェル PCR デバイスの実験結果

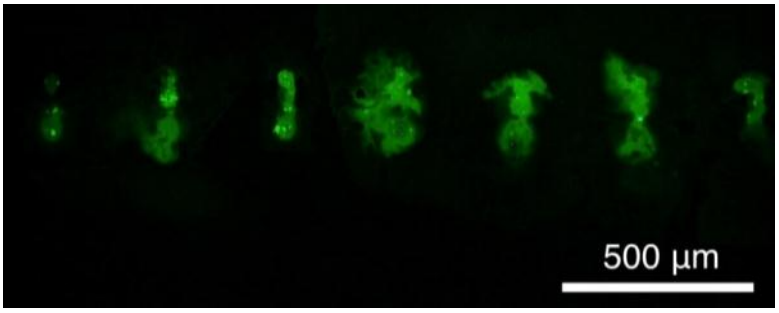
試作したデバイスのマイクロウェル内でPCR反応が可能かどうかを確認するため、LNCaP細胞(前立腺がん細胞)をマイクロチューブ内で溶解した細胞溶解液と PCR 試薬(One Step SYBR PrimeScript PLUS RT-PCR キット、Takara)及び PSMA 遺伝子(138 bp)のプライマ(Takara)を用いてデバイス上で RT-PCR 反応を行なった結果について述べる。RT-PCR 反応はキットの温度条件に従い実施した。図③-(4)-4-4.1 に示すように、PCR 反応を 27 サイクル行った結果、ウェル内の輝度の上昇が確認出来たため、デバイス上のマイクロウェル内で RT-PCR 反応が行えたと考えられる。



図③-(4)-4-4.1　RT-PCR 反応結果。反応前後のマイクロウェルの画像

また、マイクロアレイを並列化し、多菌種の測定を実施するための基礎的検討として、プライマDNAをマルチウェルに固相化するためのDNAスポッティング技術の調査を行った。その結果、直径 50 μm のマイロピンを用いたスポッティング装置((株)アプライド・マイ

クロシステム社製)では、250 μm 程度の空間分解能で、蛍光色素を含む溶液(DNA プライマーのモデルとして使用)を基板にスポッティング可能(図③-(4)-4-4.2 参照)であるとの知見を得た。



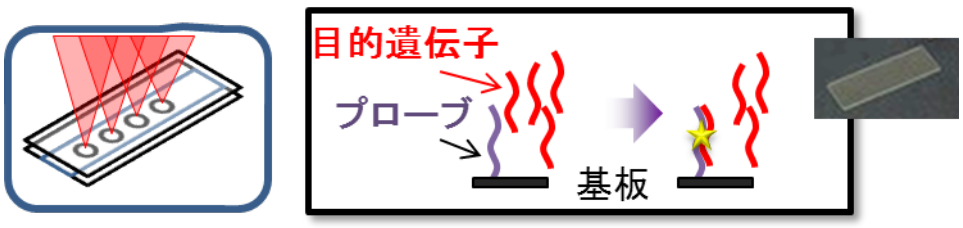
図③-(4)-4-4.2 マイクロピンを用いたスポッティング装置による蛍光色素を含む溶液のスポッティング結果

③-(4)-5　ウオッシュレス DNA アレイ方式

③-(4)-5-1　原理検証の内容

今回選定したウオッシュレス DNA アレイ方式では、多種類の核酸(DNA)を使用した検出プローブが、目的遺伝子（ターゲット DNA）と結合するだけで蛍光発光検出可能な方式のため、DNA アレイによる核酸の検出を、密閉された閉鎖空間の中で迅速に実現可能である（図③-(4)-5-1.1）。

これによって、「多種類の菌種検出」に対しては「マルチ遺伝子検出・自動処理」、「スキルレス／ハザードフリー」に対しては「閉鎖型密閉処理」、「迅速測定」に対しては「後処理のないウオッシュレス検出」、というそれぞれのニーズに対応するシーズを提供できる。



図③-(4)-5-1.1　ウオッシュレス DNA アレイ方式

原理の検証のために、このデバイス動作確認用の簡単なデバイスの試作を行い、このデバイスを用いてプリテストを実施した。プリテストは試料として、院内感染における代表

的な菌種として選定した 2 菌種（黄色ブドウ球菌と緑膿菌）と参照微生物の遺伝子を用いた。試作したデバイスに、この代表的な菌種と参照微生物の遺伝子を溶液密封状態で同時にハイブリダイゼーションし、その後、ウオッシュレス、すなわち洗浄なしで検出可能であるかどうかを蛍光検出により確認した。

③-(4)-5-2　試作内容

ウオッシュレス DNA アレイ方式の検証用デバイスとしては、合成オリゴ DNA を基板にスポットした DNA アレイを試作した。本 DNA アレイでは、消光した状態の蛍光分子が結合したオリゴ DNA をプローブとし、目的遺伝子であるターゲット DNA のハイブリダイズにより消光が解除され蛍光発光する設計とした。

プローブとなる合成オリゴ DNA は、末端にアミノ基修飾されており、基板上の活性エステルと共有結合を形成する設計とした。アレイとしては、検出対象とした緑膿菌用プローブ及び黄色ブドウ球菌検出用プローブの他に、参照用微生物によるポジティブコントロール（PC）用として大腸菌検出用プローブ、またネガティブコントロール(NC)としてスポット溶液のみによるスポット、及び蛍光マーカが固定されたスポットも配置した。合成オリゴ DNA は配列を指定して購入し、アレイの製作は、オリゴ DNA 溶液をスポッターにより基板上にスポットし、24 時間のインキュベーション後、洗浄、乾燥を行い実験に用いた。

また、ハイブリダイズ反応を行う光学検出可能な密閉型のチャンバも合わせて試作した。

③-(4)-5-3　実験方法

今回のハイブリダイゼーションで使用するサンプル（ターゲット DNA）は、対象となる菌体を実際に培養し、その菌体から抽出したゲノム DNA を合成オリゴ DNA のプライマにより、PCR 反応で増幅することで作成した。また、ハイブリダイゼーション後の測定は洗浄なしの液中で直接行っている。

すなわち、以下のステップにより実験を進めた。

1) 大腸菌、緑膿菌、黄色ブドウ球菌を培養し、サンプルとして PCR 反応の鋳型となるゲノム DNA を、それぞれの菌体の培養液から市販の DNA 抽出キットで精製した。
2) 次に各菌の遺伝子（ゲノム DNA ）の PCR 増幅を行った。
3) その PCR 産物を、a)大腸菌のみ、b)大腸菌と緑膿菌、c)大腸菌と黄色ブドウ球菌、d)3 菌種全て、となるように異なる組み合わせで混合した。
4) ターゲット DNA 混合液を調製しハイブリダイゼーション溶液とした。
5) 試作したチャンバに、40μl のハイブリダイゼーション溶液を導入した。溶液に DNA アレイが浸漬されるように基板でチャンバを密閉し、チャンバ全体を 5rpm で回転させ

ながら、60℃で 30 分間ハイブリダイズさせた。

6) ハイブリダイズ後の DNA アレイは室温まで冷却した。チャンバの光学検出用の窓を介し、横河電機製バイオチップリーダーによりターゲット DNA 溶液中の蛍光画像の取得を行った。

③-(4)-5-4　実験結果

実験結果を図③-(4)-5-4.1 に示す。

左端に DNA アレイのレイアウト図を示す。各プローブは 3 スポットのリピートとなっている。

アレイの最上段に蛍光マーカのスポットがあり、3 段目からそれぞれ、スポット溶液のみによるネガティブコントロール(NC)用プローブ、次にポジティブコントロール（PC）用として大腸菌検出用プローブ、そして検出対象である緑膿菌用プローブ、最下段に黄色ブドウ球菌検出用プローブが配置されている。

また、右側の 4 枚の測定画像は、サンプルとして、a)大腸菌のみ、b)大腸菌と緑膿菌、c)大腸菌と黄色ブドウ球菌、d)3 菌種全て、のそれぞれの PCR 産物を用いてハイブリダイゼーションを行った結果の画像である。

これらは反応させたターゲット DNA の種類に応じて、対応する菌種検出用のスポットにのみ蛍光が見られた。すなわち下記の結果となった。

a) 大腸菌のみ、においてはポジティブコントロール（PC）用としての大腸菌検出用プローブのみが光っている。

b) 大腸菌と緑膿菌、においては、大腸菌と緑膿菌検出用プローブのみが光っている。また黄色ブドウ球菌検出用プローブは光っていない。

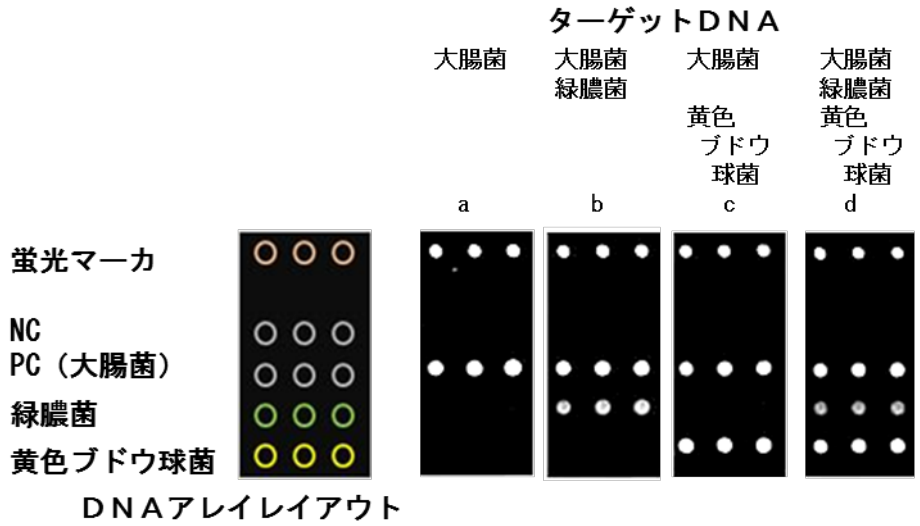
c) 大腸菌と黄色ブドウ球菌、においては、大腸菌と黄色ブドウ球菌検出用プローブのみが光っている。また緑膿菌検出用プローブは光っていない。

d) 3 菌種全て、においては大腸菌、緑膿菌、黄色ブドウ球菌検出用プローブが光っている。

そしていずれの場合にも、蛍光マーカのプローブは光り、スポット溶液のみによるネガティブコントロール(NC) 検出用プローブは光っていない。

以上により、特異的な検出が可能であることが確認できた。また洗浄なしで院内感染で重要な代表的 2 菌種（緑膿菌、黄色ブドウ球菌）の遺伝子を検出するができた。

これらの実験により、ウオッシュレス DNA アレイ方式の基本的な原理動作を確認することができた。



図③-(4)-5-4.1　ウオッシュレス DNA アレイ方式の実験結果

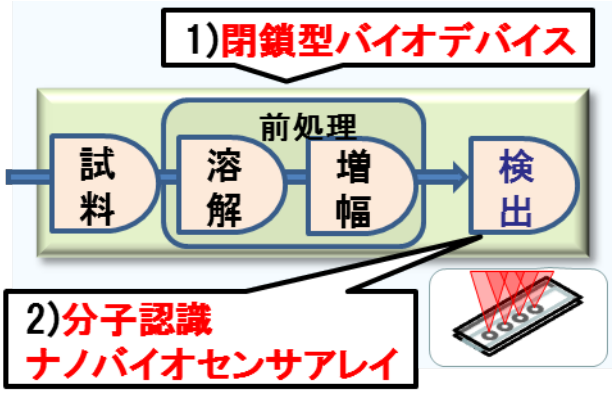
③-(4)-6　ユーザ機関による成果の有効性の検証

この先導研究に先立ち、国内 3 カ所、海外 2 カ所の計 5 カ所でユーザヒアリングを実施してきた。そのヒアリングの場では、ユーザのニーズをお聞きするとともに、これから開発を目指すデバイスのコンセプトの概要（図③-(4)-6.1）もご説明させて頂いた。

すなわち、少ないサンプルでも検出が可能な高感度計測、迅速な対応を可能とする測定時間の短縮、だれでも現場で測定ができる計測手法、低価格化、特に近年、社会問題となっている院内感染では、短期時間で原因となる病原体の迅速な感染菌の特定をめざし、この先導研究では、サンプルを注入するだけで全測定プロセスをデバイス内で実現する、分子認識ナノバイオセンサアレイと、専門知識のない人でも安全に測定できる“閉鎖型バイオデバイス”を実現するための技術的な検討と予備研究を行い、初年度以降にセンサの原理検証、デバイスプロトタイプ開発へと進める。というコンセプトであり、これは図③-(4)-6.1 に示す、今回のプロジェクトの提案とも一致している。

これに対して、先生方は大変強い賛意を示され、開発はぜひ進めるべきであるとのご意見も頂いた。また国内の先生方からは現場でテスト可能な装置が試作できた場合は、フィールドテストにご協力いただくことに対しても快諾いただくことができた。

今回の試作及び実験結果自身は、まだ基本原理の確認レベルであり、ユーザ（先生方）に直接ご確認･ご評価いただくフィールドテストに値するレベルではないが､このように、この後の本格研究で計画しているコンセプトモデルがユーザに広く受け入れられたということは、今回の結果がユーザ機関により有効性が検証できたということであると考えられる。



図③-(4)-6.1　コンセプトモデルの提案

③-(4)-7　まとめ

＜実施内容と結果＞

以上のように、この「即時生化学センサシステムの開発」のテーマでは、以下の手順により想定システムの具体的内容と必要要件について検討し、先導研究を進めてきた。

1）国内外のヒアリングを行い、ユーザニーズの調査を行った。また、先導研究として代表的な数種類の菌種を選定した。

2）これに基づき、センサ/デバイスの方式を決定した。

3）決定したセンサ/デバイスの試作と評価を行った。

結論として、以下のことが得られた。

1) 国内外のヒアリング（計 5 カ所）によりユーザニーズを把握・確認できた。

2) 想定システムの具体的内容と必要要件について検討し、センサ/デバイスの方式を決定できた。

a)デバイス/送液　：動的封入送液デバイス方式

b)増幅　　：マルチウェル PCR 方式

c)検出　　：ウオッシュレス DNA アレイ方式

また、院内感染に対しては、黄色ブドウ球菌と緑膿菌を、院内感染における代表的な菌種として選定した。

3) この 3 つの方式によりそれぞれ試作したデバイス及び、選定した代表的な菌種などにより、これらの方式の基本的な原理動作を確認することができた。

＜開発すべきセンサシステムの技術課題・開発内容と目標＞

先導研究における技術課題と、本格研究で開発すべきセンサシステムの開発内容・目標

は以下であると考える。

技術課題 1)　先導研究では基本原理の原理動作の確認のみであった。

→開発内容 1)　必要仕様条件の明確化と、その必要仕様条件の環境での動作確認と改良が必要である。

技術課題 2)　未着手の要素の開発が残されている。

→開発内容 2)　試薬注入や試薬の保存、細胞破砕方法、遺伝子の抽出方法、溶液混合などの開発と改良、確認が必要である。

技術課題 3)　要素技術は単独でのみ確認され、連結されていない。

→開発内容 3)　全体の要素の相互連結とシステム化、デバイスだけではなくヒューマンインターフェイス系やソフト系との結合も必要である。

主要な開発目標は、本格研究において再設定すべきであるが、現時点におけるユーザヒアリングなどからは、以下のように考えられる。

1)多種類の菌種：

先導研究：２菌種（2 遺伝子）→本格研究：２０種類（×3 遺伝子≒60 遺伝子）

2)スキルレス・ハザードフリー：

先導研究：閉鎖・密封内で使用可能な 3 つの方式

→本格研究：閉鎖・密封された容器内で連続して溶菌、増幅、検出を実現

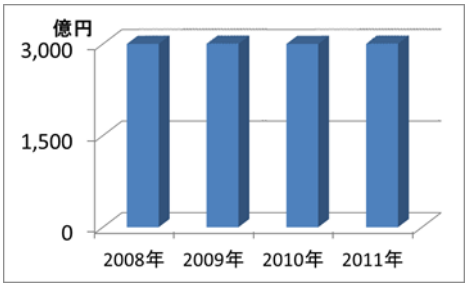
3)迅速測定：

先導研究：迅速測定が可能な 3 つの方式

→本格研究：閉鎖・密封された容器内で、試薬注入から 1 時間以内で検出を実現

＜開発されるセンサシステムを適用した場合に期待できる具体的効果、インパクト＞

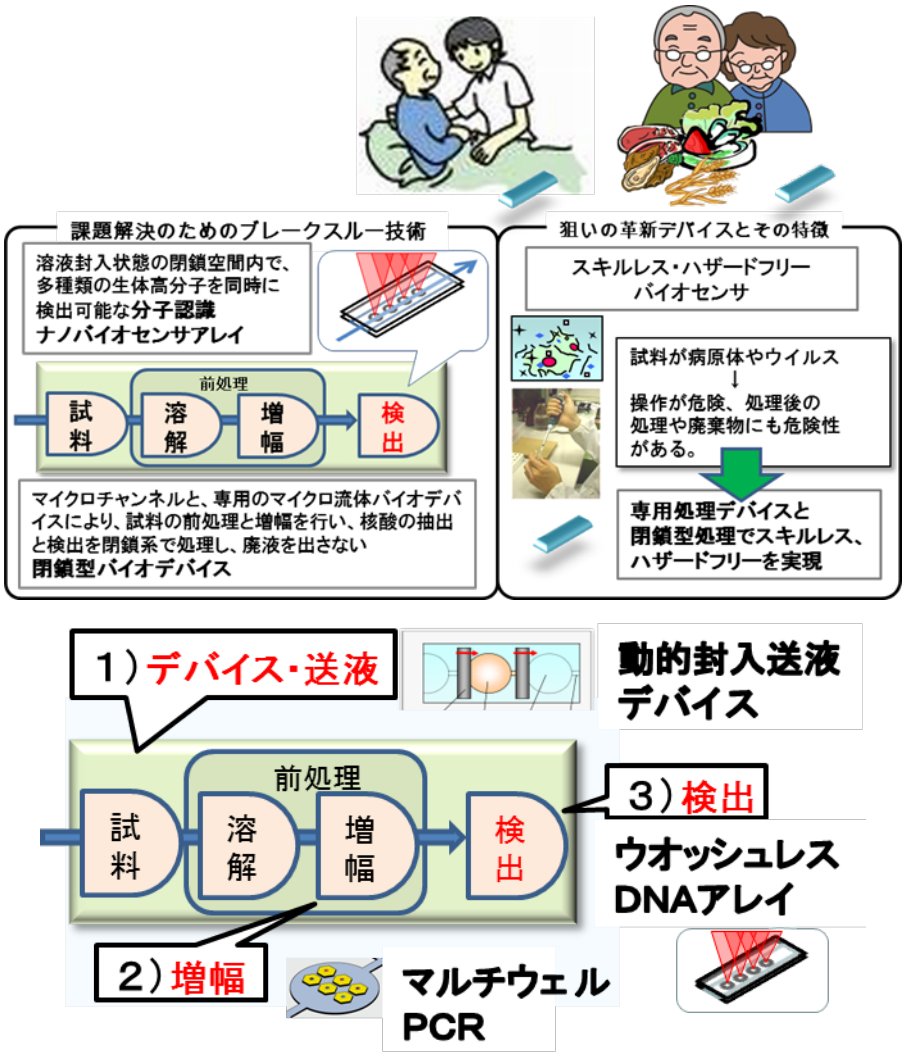
院内感染関連では多くの余分な医療費が必要となっている。世界市場は、2015 年に売上が 103 億米ドルと言われている。また、体外診断薬は 2011 年、10%増に達している。また、この技術は食中毒・簡易検査・自宅検査などを含む医療だけでなく、農業・水産・薬品・化学、などの多くの分野への応用が期待できる。今回、「社会課題対応の確認のための院内感染に関する市場調査」を行った。この中から国内の患者数と医療費から「院内感染により生じている医療費」を推定し図③-(4)-7.1 にまとめた。院内感染のために国内だけでも年間で数千億円の医療費が生じていることがわかる。これらの無駄に生じている医療費を削減することを可能にする、新センサデバイスを開発することにより新しい市場が期待できる。



図③-(4)-7.1　院内感染により生じている医療費

＜将来開発すべきセンサシステム像＞

この新しいセンサシステムによって、迅速に原因となる病原体を特定し、正確な菌種判定で必要な抗菌剤のみを投与できる感染症の管理などが可能となれば、このことは、院内感染だけではなく、食中毒などにおいて、菌種やウイルスなどを遺伝子レベルで捉えた2次感染の防止策への展開も可能とる。さらに、コンテンツである遺伝子や試薬、ヒューマンインターフェイスなどを充実・改良することで、医療だけでなく、農業・水産・薬品・化学などの多くの産業分野への応用が期待できる（図③-(4)-7.2）。



図③-(4)-7.2　将来のセンサシステム像

③-(5)　生活行動見守りセンサシステムの開発

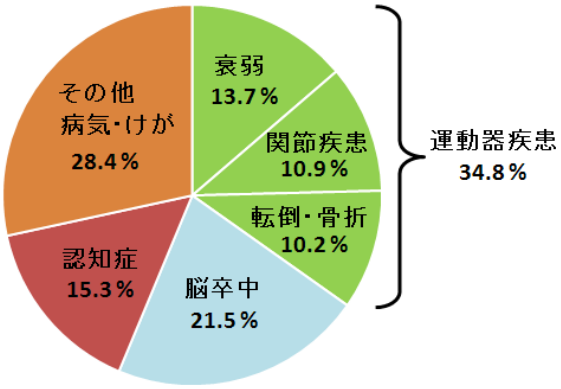
【株式会社タニタ、株式会社デンソー、オリンパス株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所、株式会社日立製作所、再委託：国立大学法人東京大学 IRT 研究機構、国立大学法人九州大学）】

③-(5)-1　研究の目的

＜社会課題＞

急速な高齢化に伴い、介護保険料・医療費が高騰している。これに関連して、厚生労働省では平成 12 年度より国民の健康増進・発病予防の「1 次予防」を重点とした「21 世紀における国民健康づくり（健康日本 21）」を策定し、国と地方公共団体などの行政だけでなく関係団体に強く協力を呼びかけている。さらに、平成 25 年度からは第 2 次健康日本 21 が開始され、[要介護リスクの軽減]・[医療費・介護費の削減]が国の指針となっている。

現在、要支援・要介護者は約 750 万人に上り（独立行政法人福祉医療機構調べ）、平成 22 年国民生活基本調査（厚生労働省）によると、要介護・要支援になる原因は加齢による衰弱、関節疾患、転倒・骨折を含む運動器疾患が 34.8%を占め、次いで脳血管疾患（脳卒中）が 21.5%となっている（図③-(5)-1.1）。



図③-(5)-1.1　介護が必要となった原因（厚生労働省「平成 22 年国民生活基礎調査」）

＜現状の取り組みと課題＞

運動器疾患の原因の一つとして筋力の低下が挙げられる。特に、下肢筋量の低下は転倒・骨折の原因となり、その結果、寝たきり・要介護状態となる例が増えている。骨折などで寝たきりとなった高齢者は筋量が低下し、膝や関節への負担が増すことでさらに身体機能が低下する悪循環に陥り、QOL の低下を招く。減少した筋肉は、筋力トレーニングにより回復が見込めるため、この悪循環を防ぐためには、症状が深刻化する前にリハビリテーションを行うことが重要となる。さらに、1 次予防として筋量減少による身体機能低下を早期発見することも非常に重要である。

また、脳血管疾患では後遺症として運動障害や感覚障害、言語障害を発症することが多く、これらに対して適切なリハビリテーションを行うことで失われた機能のある程度の改善が期待できるとされている。脳卒中による死亡率が著しく減少した現在、リハビリテーションの重要性はますます高まってきており、適切な時期に適切なリハビリテーションを行うことで後遺症が軽くなり、社会復帰への近道となるため、根気強くリハビリテーションを続けることが重要とされている。

以上のように、予防や機能改善のためのリハビリテーションの重要性が高まっており、施設・家庭内において患者自身がリハビリテーション効果を把握し、能動的にリハビリテーションを行えるようにすることで患者の回復機能の向上が見込まれる。しかし、家庭への復帰後は療法士や介護士の目が届かないなどの問題もあり、リハビリ訓練が行えていないのが現状である。また、リハビリテーションに関する評価方法の定量化・客観化ができていないため、リハビリテーション効果が認識できず、モチベーションを保てない患者がいるという課題もある。

これまでリハビリテーション評価の定量化を目指し、様々な機器が開発され研究・評価が行われている。高精度計測機器としては VICON などのモーションキャプチャ、簡易計測機器としては慣性センサを用いたウェアラブル機器（図③-(5)-1.2）などがある。



図③-(5)-1.2　モーションキャプチャ（VICON:インターリハ株式会社）と慣性センサを用いたウェアラブル機器（運動リハビリ・健康支援のためのウェアラブル運動計測システムの開発：東北大学医工学研究科渡邉研究室）

モーションキャプチャは歩行などの動作を高精度に計測できるが、非常に高価で大掛かりな装置であるうえ､計測時のデータ量が膨大なためどのように活用して良いか分からず、リハビリテーションに活用している施設はほとんど無い。また、慣性センサなどを用いたウェアラブル機器は装着する手間や拘束性のあるものが多く、それが患者への心理的ストレスにつながり継続的に使用してもらうことができないといった課題もある。さらに、リハビリテーション分野はデータが圧倒的に少なく、データの活用方法が確立されていないのも現状である。体脂肪や血圧などが病院でしか計測できなかった時代から、現在のように自宅で気軽に計測でき、データの活用方法も広く普及したように、リハビリ訓練につい

ても手軽に計測できるセンサシステムや機器及び計測データの活用方法の確立が望まれている。

＜実施内容と最終目標＞

そこで本研究では、専門施設から在宅まで環境や患者の容態に応じて安全で適切なリハビリテーションメニュを提供できる高精度歩行計測システムを目指し、足の筋肉の状態を検出する筋量センサ、歩行の動作を計測するモーションセンサ、歩行の軌跡を計測するフォースセンサプレート、装着型の下肢関節角を計測する関節角計測サポータや足底圧計測インソールといった歩行機能高精度計測技術を用いて、データ取得できるか実証実験を行う。さらに、得られたデータを集約し、解析することにより歩行を定量化するシステムを開発する上での課題を抽出する。

(a)筋量センサ

筋肉層の深部に磁界を発生させ、かつ導電率の低い生体組織に感度良く反応するセンサの形状・構成を検討する。下肢計測時に筋肉の深部まで計測できるよう、皮膚表層から深度 60mm までの情報が得られるセンサを目指す。下肢で最も太い大腿において日本人 60 歳以上の筋組織と皮下脂肪を合わせた厚みが 60mm 程度[1)]であるため、上記精度を目標とする。さらに、局所的な下肢筋量を計測するセンサを試作し、高齢者の下肢筋量を定量的に評価するための指標を確立する。センサ動作の検証では、生体の姿勢による状態変化や経時変化など様々な誤差要因を除去でき、センサ単体の評価ができるように皮膚層・脂肪層・筋肉層を模した模擬生体ファントムを用いる。各層における導電率などのパラメータは文献から引用し、限りなく生体に近いファントムを試作する。上記センサはこの模擬生体ファントムの筋肉厚及び筋肉量に対し±5%以内の計測精度を目指す。(株式会社タニタ)

(b)モーションセンサ

歩行計測手法におけるモーションセンサとして多波長イメージャ（可視光～赤外光による画像に加えて、赤外光による距離情報を持つ撮像カメラ）を想定し、その一部分を構成する赤外ディテクタについて、低コストのシリコン基板における実現性を検討する。シリコンで赤外光を検出する手法として金属の微細パターンからなる赤外共鳴アンテナの原理を検証する。（株式会社デンソー、オリンパス株式会社）

また、金属の微細パターンの周期などによる赤外線の検出の変化を計測し、その特性を明らかにする。（国立大学法人東京大学 IRT 研究機構）

さらに、簡便な検出部の構成材料として、有機半導体の利用を検討し、赤外検出における有機半導体の有効性評価を行う。（国立大学法人九州大学）

これらの結果と並行して、ニーズや既存技術などを調査し、目指すべきモーションセン

サとその課題を明らかにする。（株式会社デンソー、オリンパス株式会社）

(c)フォースセンサプレート

歩行の軌跡を計測するフォースセンサプレートを試作し、歩行能力を定量的に評価するための指標を確立する。フォーセンサプレートとしては、有機導電性プラスチックを用いた圧力センサアレイを試作し、大きさは 1m×1m 以上を目指す。歩行速度、歩行周期、歩幅、左右バランスなどの歩行時のデータを取得できるかを検証し、前述の歩行能力を定量的に評価するための指標を確立する。（独立行政法人産業技術総合研究所）

(d)歩行機能高精度計測技術

高齢者の運動機能のうち歩行リハビリに必要となる歩行機能の高精度計測技術（フォースプレート（市販品）、関節角計測サポータ、足底圧計測インソールなどの計測によるデータ集約・解析システム）の検討及びデータ解析を行い、歩行機能の数値化を行う。さらに、これらの技術が、高齢者の日常行動見守りなどリハビリ以外のアプリケーションに応用可能か検討する。（株式会社日立製作所）

③-(5)-2　各センサなどの開発

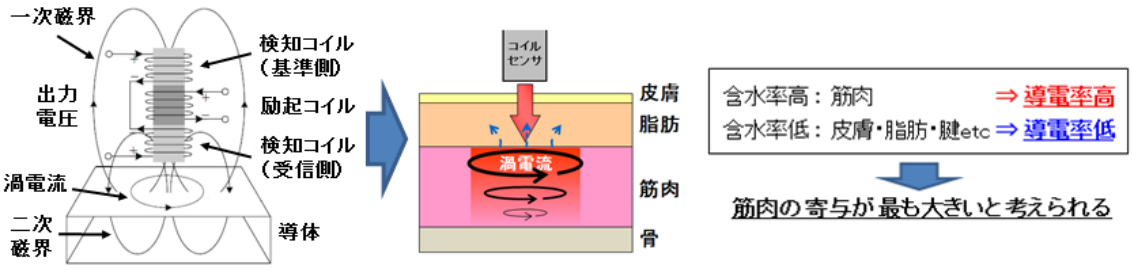
③-(5)-2-(a)　筋量センサの開発

【株式会社タニタ】

電磁誘導法を用いた局所筋量センサの開発を目指し、導電率の低い生体組織に感度良く反応するセンサ形状・構成を検討し、皮膚表層から 60mm までの筋肉量情報を取得できるセンサ開発を行った。また、試作したセンサにてファントムを用いた筋量評価試験を実施し、下肢筋量を定量的に評価するための指標及びその実用性について検討した。

③-(5)-2-(a)-1　原理検証の内容

電磁誘導法とは金属探知機や探傷検査などに用いられている計測方式で、近接導体の導電率や導体までの距離、導体の大きさや状態などを計測できる。一方、生体組織も一種の導体であるため生体組織の中で導電率の高い筋肉に反応するセンサを開発することにより非接触で簡便に、計測したいポイントの筋肉の厚みや筋肉率などの局所筋量評価に応用できる可能性がある（図③(5)-2-(a)-1.1）。



図③-(5)-2-(a)-1.1　筋量測定原理

そこで、本研究では以下の内容で電磁誘導法を用いた局所筋量センサの原理検証を行った。

・ユーザ機関ヒアリングにより筋量センサのニーズを調査し、計測項目及び目標値のすり合わせを行った。

・シミュレーション解析及び実験により高感度化に寄与するパラメータを抽出した。

・筋量センサを試作し、筋肉と同等程度の導電率に感度良く反応するセンサ条件を検討した。また、下肢で最も太い大腿において日本人 60 歳以上の筋組織と皮下脂肪を合わせた厚みが 60mm 程度であるため、皮膚表面から深度 60mm までの情報を取得できるセンサ形状・構成及び励起条件の最適化を図った。

・定量的な指標の確立を目指し、生体を模したファントムを試作し用いることで、試作した下肢筋量評価の実用性検証を行った。

③-(5)-2-(a)-2　ユーザ機関ヒアリングによる想定ニーズと実際のニーズのすり合わせ

本研究で想定しているニーズと実際のニーズの整合性を図るため、最終ユーザ機関である国立障害者リハビリテーション研究所の井上先生にヒアリングを行った。国立障害者リハビリテーション研究所では､脳血管疾患による片麻痺患者が主であるとのことであった。片麻痺患者の場合、筋肉はあるが動かないという症状のため、リハビリによる機能回復過程の確認には筋量ではなく筋電を用いて神経系と筋との繋がりを確認しているようである。しかし、脳血管疾患になり、寝たきりとなると筋肉は確実に落ちてしまうため、どの程度筋量が減少したのかを定量的に認識できるのは良いとの意見が得られた。また、患者によってリハビリのモチベーションに差がありリハビリ効果にもばらつきがあるとの情報も得られた。モチベーション向上のためには、患者本人に結果をフィードバックすることが非常に重要となり、筋量アップを目的としたパワーリハビリ時にリハビリ効果を筋量として定量的にフィードバックすることでモチベーションの維持・向上につながり、リハビリ効

果の向上が期待できるとの意見も得られた。

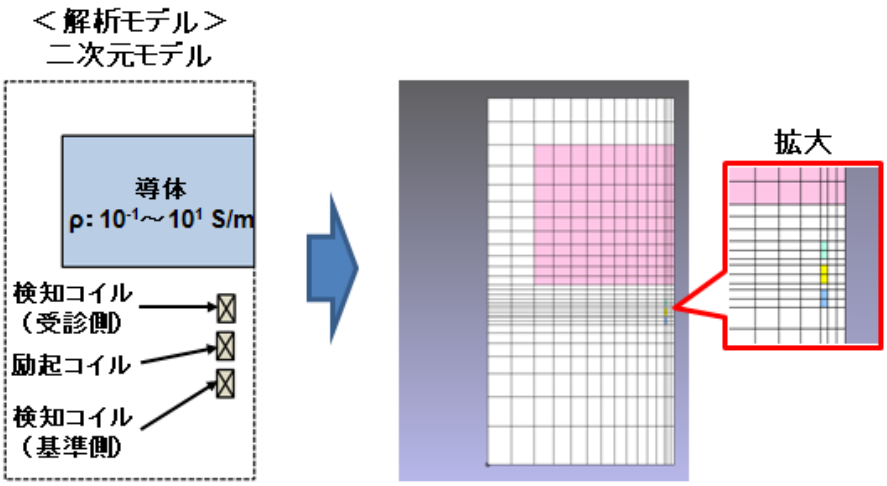
筋量評価の指標及び精度に関しては、筋量と転倒リスクの関係性を正確に把握する必要があること、また、転倒による骨折や脳血管疾患による片麻痺などで寝たきりになった場合に、どの程度の時定数で筋量が減少するのかを調査する必要があるとの助言を頂いた。筋量と転倒リスクの関係性については、本格研究でのサルコペニア診断指標作成時に臨床試験を実施し調査する予定である。今回、筋量センサの目標精度の検討として、文献により寝たきりとなった場合の筋量減少の傾向について調査を行った。その結果、大腿部の筋では 20 日間のベッドレストにより、およそ 7～8%の筋量の減少が確認されたという報告が見つかった[2)]。また、20 日間のベッドレストにおいてレッグプレス装置を用いて膝伸筋運動を実施した結果、膝伸筋トレーニングを実施した群では膝伸筋群の減少が見られなかったという報告もある。このことから、筋量評価の精度は筋量少なくとも 7～8%以下である必要があることが確認でき、先導研究簿目標値である 5%以内は妥当であると考える。さらに、トレーニングにより筋量維持ができることから、リハビリトレーニングの効果を患者自身が確認できることはモチベーション維持・向上の一助となると考えられる。

③-(5)-2-(a)-3　センサ高感度化に寄与するパラメータ抽出

シミュレーション解析及び実験によりコイルセンサの感度向上に寄与するパラメータの抽出を行った。

③-(5)-2-(a)-3-1　シミュレーション解析によるパラメータ抽出

導電率の低い生体組織に感度良く反応するセンサ形状・構成を検討するにあたり、種々のパラメータの中から感度向上に効果のあるパラメータを抽出するためシミュレーション解析を行った。解析には電磁界解析ソフト PHOTO-EDDYjω（株式会社フォトン）を用いた。解析モデルは解析空間上に励起コイル 1 つ、検知コイル 2 つから構成されるコイルセンサとその近傍に導体を配置した構成となっている。なお、解析の計算負荷軽減のためコイルセンサ形状を円筒形、導体が円柱形として設計することで中心軸から回転対象となるため、2 次元モデルに置き換えることができる（図③(5)-2-(a)-3-1.1）。



図③-(5)-2-(a)-3-1.1　解析モデル

以下に解析に用いたパラメータを示す。

・周波数

・励起電力

・巻数

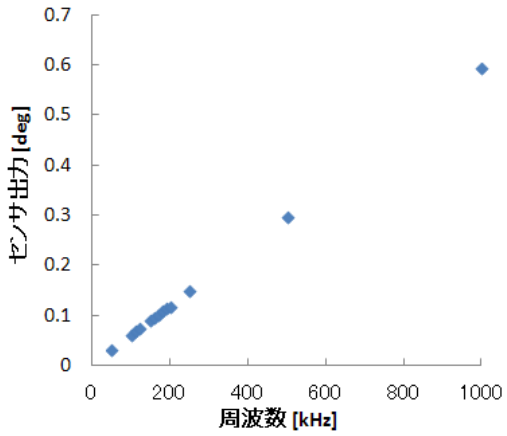
・コイル径

・コイル長さ

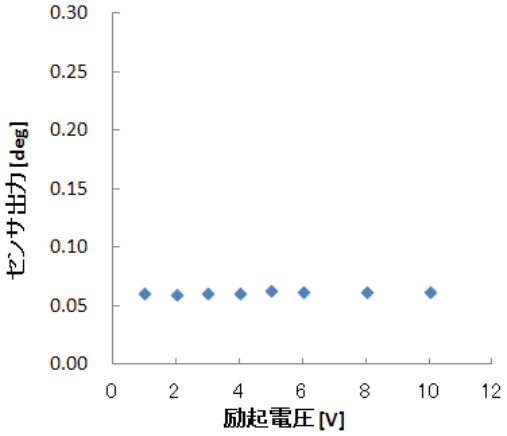
・コイル間間隙

上記パラメータを変化させ、センサ近傍の導体の有無での検知コイル間の誘導起電力の位相をセンサ出力として、よりセンサ出力が大きくなるパラメータを確認した。

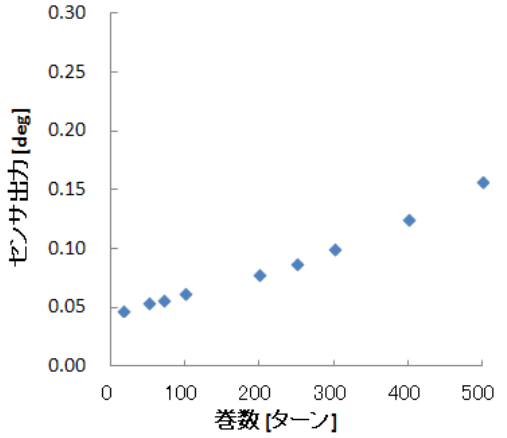
各パラメータを振ってシミュレーション解析を行った結果を図③-(5)-2-(a)-3-1.2 に示す。



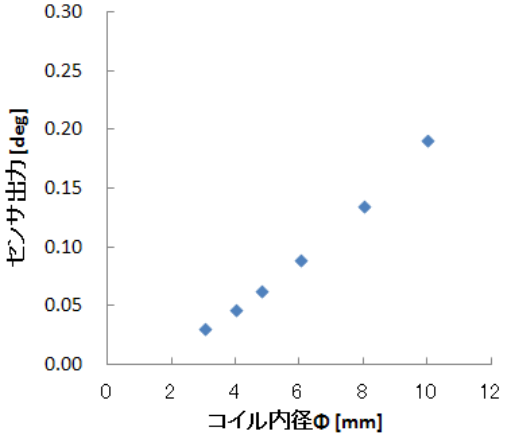
(a)周波数による検討



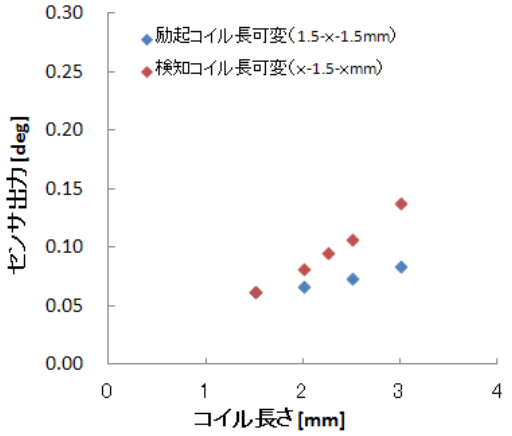
(b)励起電力



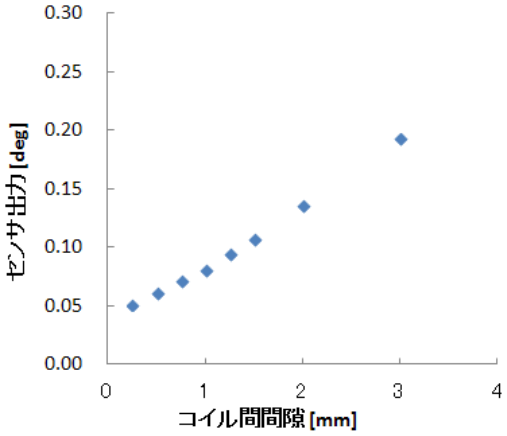
(c)巻数による検討



(d)コイル径による検討



(e)コイル長さによる検討



(f)コイル間間隙による検討

図③-(5)-2-(a)-3-1.2　シミュレーション解析結果

励起条件の検討として、周波数及び励起電力をパラメータとし解析を行った結果、周波数において大きく感度が向上する傾向が見られた（図③-(5)-2-(a)-3-1.2(a)）。今回のモデル

では巻き線 1 本 1 本をモデル化していくと計算負荷が大きくなり、一般のパソコンの性能では計算ができないという問題があり、解析モデルはコイルを簡易的に円筒形として与えている。周波数が上がると表皮効果により、巻き線の内部には電流が流れにくくなりコイル特性が低下する。このため、シミュレーションで得られた結果と乖離する可能性があり、実際に高周波帯で使用する場合は、巻き線材を工夫する必要が出てくる。また、励起電力として励起コイルに印加する電圧をパラメータとした場合では、感度変化は見られなかった。

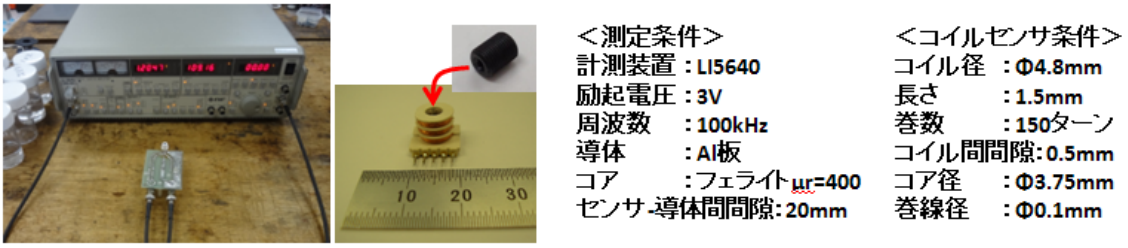
次に、センサ形状・構成の検討として、巻数、コイル径、コイル長さ、及びコイル間間隙をパラメータとして解析を行った結果、すべての項目で感度の向上が確認できた。しかし、これらのパラメータはセンサが大きくなり、局所計測が困難になる可能性があるため、局所計測とのバランスを取る必要が出てくると考える。

③-(5)-2-(a)-3-2　実験によるパラメータ抽出

シミュレーションで確認できなかった項目に対してコイルセンサを試作し、実験により感度向上に寄与するパラメータの抽出を行った。既に他分野で応用されているコイルセンサを基に条件を変更したセンサを試作し、以下の項目に対して検討を行った。

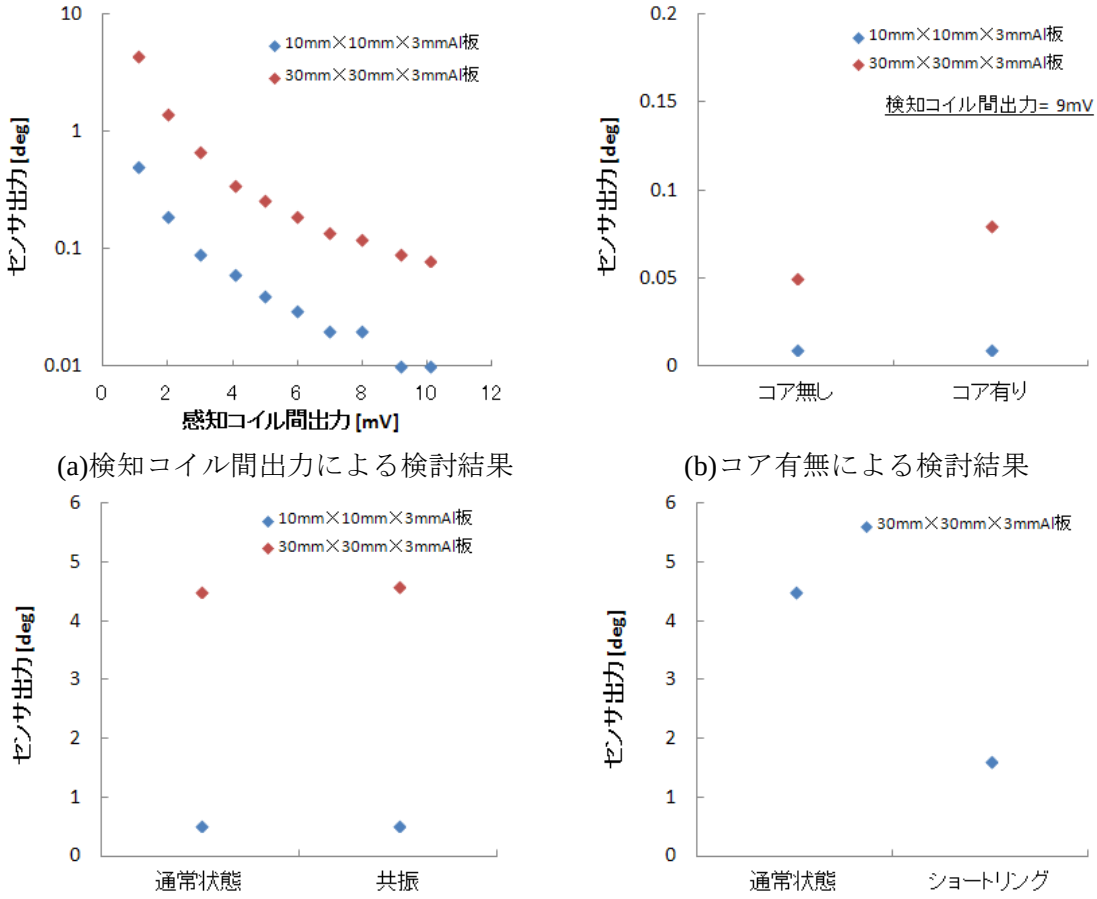
・検知コイル間出力
・コアの有無
・共振
・ショートリング

測定にはロックインアンプ（LI5640：株式会社エヌエフ回路設計ブロック製）を用いた（図③-(5)-2-(a)-3-2.1）。ちなみに、今回試作したコイルセンサでは筋肉と同等程度の低導電率に反応が見られなかったため、感度検証用の導体には金属板を用いた。また、コイルセンサは試作した中で感度の一番高かった 150 ターンコイルを使用した。



図③-(5)-2-(a)-3-2.1　測定系及び測定条件

実験結果を図③-(5)-2-(a)-3-2.2 に示す。



(a)検知コイル間出力による検討結果　(b)コア有無による検討結果

(c)共振による検討結果　(d)ショートリングによる検討結果

図③-(5)-2-(a)-3-2.2　感度向上パラメータ抽出実験結果

ボビンの中にねじ状のフェライトコアを入れ、その位置を変えることで上下検知コイルの特性を変化させて検知コイル間出力の調整を行い、検知コイル間出力による検討を行った結果、検知コイル間出力が小さいほど感度が大幅に向上する傾向が確認された（図③-(5)-2-(a)-3-2.2(a)）。しかし、出力を小さくし過ぎるとセンサ出力がノイズに埋もれてしまい出力が読めなくなってしまったり、ドリフトしてしまったりと安定しなくなることも実験により確認できた。また、コア以外での調整方法としてはコイル間距離を変動させて調整する方法が考えられるが、実用性としてはコアを用いた調整法が調整の際の手間も少ないと考える。

コアの有無による感度向上の検討では、上記結果より、検知コイル間出力によって感度が変化してしまうため、コア無しの際の検知コイル間出力に合わせて調整を行い、感度が向上するか計測を行った。その結果、コアを適用することで多少感度が向上することが確認された（図③-(5)-2-(a)-3-2.2(b)）。コアの大きさや材料により、さらに効果が上がる可能性もあるため、今後材質や大きさについては検討する必要がある。

共振による感度向上の検討では、コイルセンサに並列にコンデンサを接続し、センサを共振状態として感度が向上するか計測を行ったが、感度に変化は見られなかった（図③-(5)-2-(a)-3-2.2(c)）。最後に、ショートリングによる感度向上の検討では、コイルセンサの周りに円筒状の金属を配置し、感度が向上するか計測を行った。その結果、感度が大幅に低下する傾向が見られた（図③-(5)-2-(a)-3-2.2(d)）。これはコイルセンサ周囲に配置した金属内で渦電流が発生し、励起磁束を打ち消したためであると考える。

③-(5)-2-(a)-3-3　感度向上パラメータ抽出結果

シミュレーション及び検証実験により抽出した感度向上に寄与するパラメータを表③-(5)-2-(a)-3-3.1 にまとめる。

表③-(5)-2-(a)-3-3.1　感度向上に寄与するパラメータ

パラメータ	感度向上に対する寄与率	備考
周波数	◎	高周波では表皮効果によりコイル特性が低下するため、線材など検討が必要
励起電力	×	誘導起電力は増加するが、感度への影響は見られなかった
巻数	○	感度向上が確認されたが、効果を上げるためには膨大な巻数を要する
コイル径	○	測定範囲拡大につながるため、局所計測が困難になる可能性がある
コイル長さ	△	多少の効果はあるが、センサが大きくなるため限度がある
コイル間間隙	△	多少の効果はあるが、センサが大きくなるため限度がある
検知コイル間出力	◎	感度が大幅に変化するが、微調整が困難なため調整方法に検討が必要
コア有無	○	形状・材質については別途検討予定 感度調整としても必要となる
共振	×	感度への影響は見られなかった
ショートリング	×	磁束が打ち消されるため感度が低下

感度向上に寄与する大きなパラメータとしては、周波数及び検知コイル間出力が挙げられる。また、巻数やコイル径、コイル長さなどによっても形状は大きくなるが、効果は期待できると考える。しかし、センサ形状が大きくなると本研究で掲げている局所計測が困難になる可能性もあるため、センサ形状と局所計測性のバランスも取りつつセンサ開発を進めていく必要があると考える。今後はこれらパラメータの最適化を図り、生体組織に感度良く反応するセンサの条件の確立を目指す。

③-(5)-2-(a)-4　高感度コイルセンサの検討及び試作

センサの高感度化に向け、初めにコアの材質について検討を行った。コア材検討にあたり、以下の材料に関してコイルセンサ用のコアを試作した（図③-(5)-2-(a)-4.1）。コアはコイルセンサ内で位置の調整ができるようねじ状に加工してある。

・フェライト：周波数特性が良く、広くコア材として用いられる

・SUS430：入手性・加工性が高く、安価

・パーマロイ PC：高い透磁率を有する材料で電磁シールドなどに良く用いられる

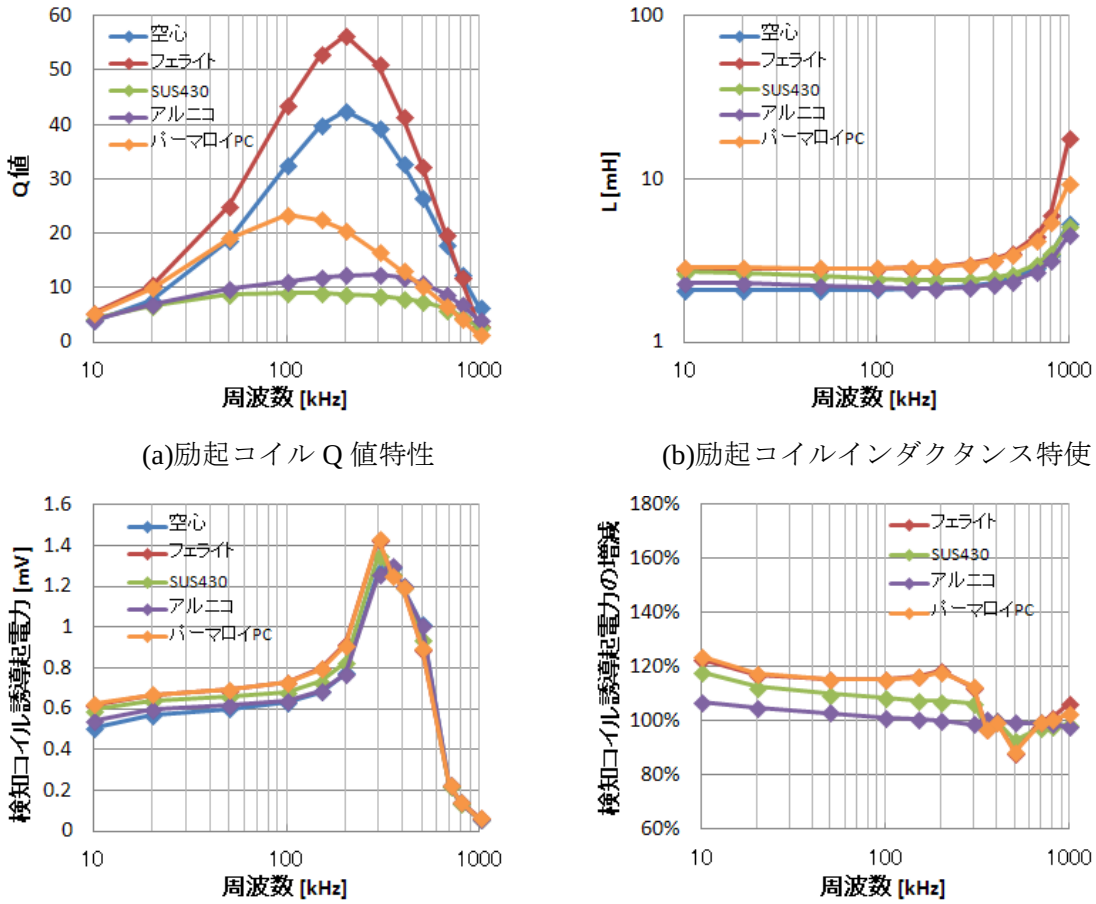
・アルニコ：永久磁石として非常に高い透磁率を有する



図③-(5)-2-(a)-4.1　試作したねじコア

（左からフェライト、SUS430、パーマロイ PC、アルニコ）

コアを適用した場合に、コア材により Q 値やインダクタンス及び誘導起電力などの諸特性がどのように変化するのか確認した。コイルセンサは径φ4.8mm、巻数 150 ターンのセンサを用い、Q 値及びインダクタンスの計測には LCR メータ（4284A：HEWLETT PACKARD 製）を、誘導起電力の計測には DSP ロックインアンプ（Signal Recovery 社製）を用いて検証を行った。結果を図③-(5)-2-(a)-4.2 に示す。



(a)励起コイル Q 値特性　(b)励起コイルインダクタンス特使

(c)誘導起電力測定結果　(d)誘導起電力の増減

図③-(5)-2-(a)-4.2　コア材によるコイル特性結果

測定結果より、コアとしてフェライトを用いることでコイルセンサの Q 値が上昇する傾向が確認された（図③-(5)-2-(a)-4.2(a)）。その他の材料では Q 値が減少する結果となった。また、インダクタンス特性では筋量評価で使用を検討している 100kHz 以上の高周波帯ではフェライト及びパーマロイ PC ではインダクタンスが上昇する傾向が見られた（図③-(5)-2-(a)-4.2(b)）。磁束の強さの指標となる検知コイルの誘導起電力を見てみると、フェライト及びパーマロイ PC では空心時に比べ 1.2 倍程度の増加が見られた（図③-(5)-2-(a)-4.2(d)）。以上の結果より、コア材としてはフェライトもしくはパーマロイ PC を用いることで近接導体への渦電流を増加させることができ、感度向上が見込めると考える。さらに、誘導起電力について見てみると、コイルの共振周波数を過ぎた辺りから急激に低下していく傾向が見られるが、コア材によってはその特性に変化は見られなかった（図③-(5)-2-(a)-4.2(c)）。このことから、感度を向上させるためには、共振周波数付近で計測することで感度向上が期待できると考える。

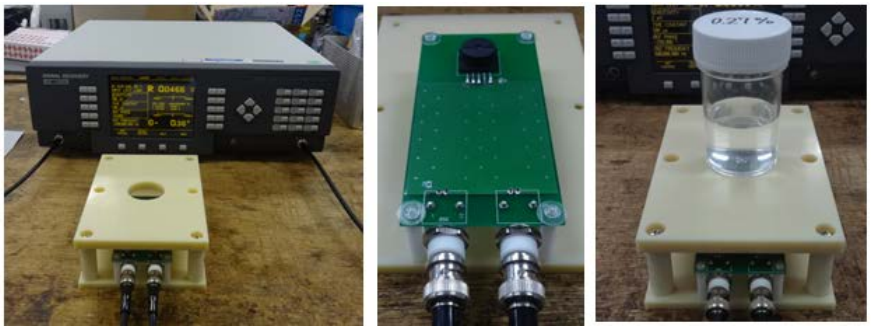
続いて、コイルセンサの感度向上を目指し、センサ構成及び形状の検討を行った。感度向上パラメータ抽出実験の際に試作したコイルセンサは感度が低く、筋肉程度の低導電率に反応しないため、ボビン形状を変更し、巻数を 500 ターンまで上げたセンサを試作した（図③-(5)-2-(a)-4.3）。



＜センサ試作条件＞
コイル内径:Φ5mm
コイル長さ:3.1mm
コイル間間隙:0.5mm
巻数:500ターン
巻線径:Φ0.3mmおよびΦ0.1mm

図③-(5)-2-(a)-4.3　試作したコイルセンサ及びセンサ条件

試作したコイルセンサにおいて、筋肉相当の導電率に反応するか実験により確認を行った。また、周波数を変化させ、感度向上が確認できるか検討を行った。測定には高周波帯まで計測できる DSP ロックインアンプ（Signal Recovery 社製）を用い、導体には筋肉と同等程度の導電率である 0.5[S/m]となるよう作製した NaCl 溶液を用いた（図③-(5)-2-(a)-4.4）。

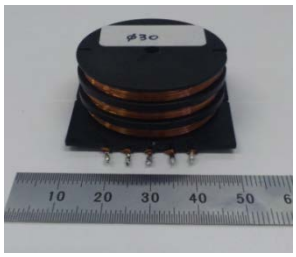


図③-(5)-2-(a)-4.4 センサの感度特性試験内容

実験の結果、試作した 500 ターンコイルでは、検知コイル間出力が数十 mV と大きく、NaCl 溶液には反応しなかった。フェライトねじコアを用いて検知コイル間の出力を調整しても NaCl 溶液への反応は見られなかった。また、周波数を 100kHz から 1MHz まで 100kHz 単位で振り、感度が上がるか確認したが、こちらも反応は見られなかった。さらに、巻線径をφ0.1mm と細くしたコイルセンサも試作したが、巻線径を細くしたためか出力が安定せず、計測には使用できなかった。今回、局所計を重視してコイル径をφ5mm と小さく設計し、巻数及び周波数により感度向上を図ろうとしたが、感度が出ず低導電率の導体へは反応しない結果となった。巻数を増やした場合、コイルが何層にも重ねて巻かれるためき

れいなソレノイド巻きは形成し難く、上下の検知コイル間で特性が大きく離れるため感度が低下してしまうと考えられる。

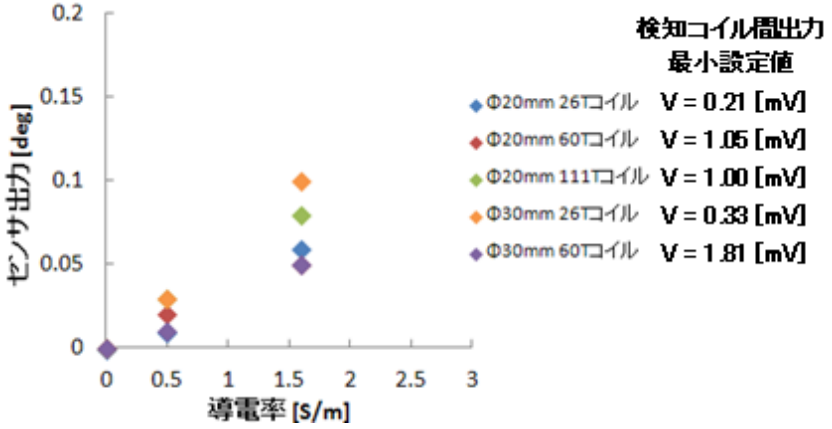
そこで、次にコイル径を大きくしたセンサを試作し、低導電率の導体に反応するセンサ形状を検討した（図③-(5)-2-(a)-4.5）。



＜センサ試作条件＞
コイル内径：Φ20mmおよび30mm
コイル長さ：3.1mm
コイル間間隙：2mm
巻数：26、60、111ターン
巻線径：Φ0.3mm

図③-(5)-2-(a)-4.5　試作したコイルセンサ及びセンサ条件

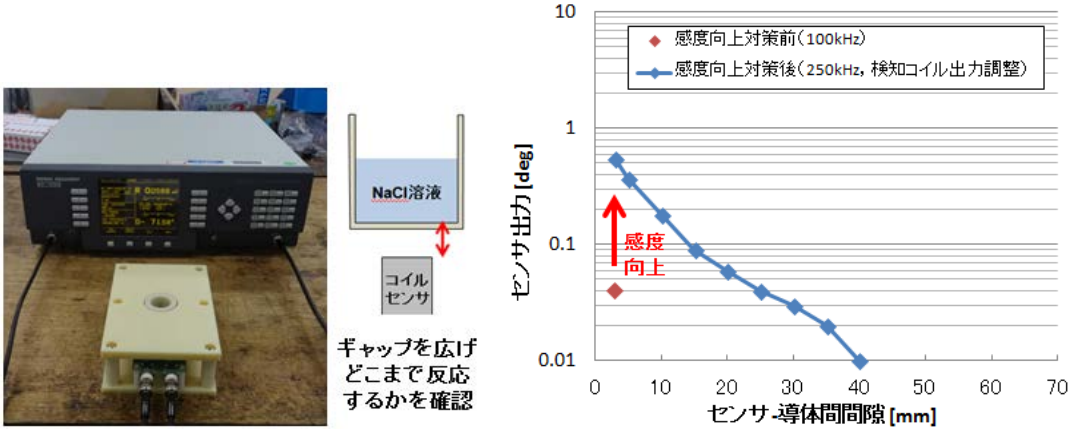
試作したコイルセンサにおいて NaCl 溶液を用いた感度試験を行った。NaCl 溶液は 0%濃度（ろ過フィルターを通した水）、筋肉を仮定した 0.5S/m(0.27%濃度)及び体液を仮定した 1.6S/m（0.9%濃度）の 3 種類で検証を行った。測定には DSP ロックインアンプ（Signal Recovery 社製）を用い、測定周波数 100kHz 時においてフェライトねじコアにより検知コイル間の出力を最小値に設定して検証を行った。結果を図③-(5)-2-(a)-4.6 に示す。



図③-(5)-2-(a)-4.6　低導電率導体の測定結果

コイル径を 20mm 以上に上げたことで感度が大幅に上がり、低導電率の導体に反応することが確認できた。試作したコイルセンサの感度を見てみると、巻数が少ない方が検知コイル間出力の最小値が小さくでき、感度が高くなる傾向が見られた。これは巻線の積層数が少ないために、きれいなソレノイド巻きで作製ができ、上下検知コイルのバランスが取りやすくなるためであると考える。

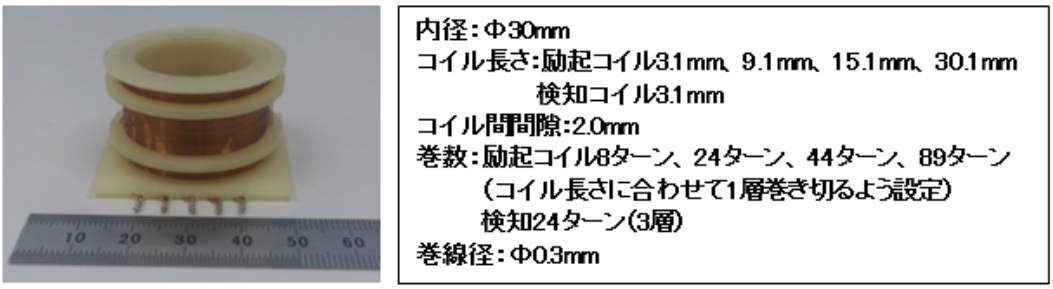
今回試作したコイルセンサの中で一番感度の高かったコイル径φ30mm、巻数 26 ターンのセンサを用い、周波数及び検知コイル間出力を調整することで高感度化の検討を行った。その結果、本コイルセンサの共振周波数付近である 250kHz において検知コイル間の出力を調整することで感度の向上が確認された。この結果により、低導電率にも高い感度で反応することが確認できたため、測定深度の評価を行った。導体には筋肉を仮定した 0.5S/m(0.27%濃度)の NaCl 溶液を用い、センサと NaCl 溶液との間隙を広げていき、どこまでセンサが反応するかで測定深度の評価を行った。測定方法及び結果を（図③-(5)-2-(a)-4.7）に示す。



図③-(5)-2-(a)-4.7　大型コイルセンサの深度検証結果

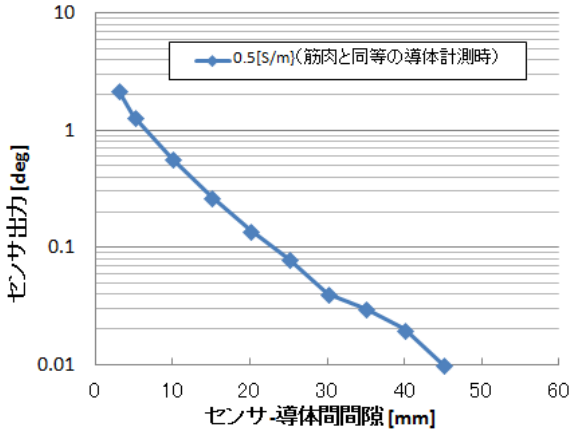
測定深度評価の結果、本センサ条件及び励起条件では 40mm 程度までの情報を得られることが確認できた。

目標である測定深度 60mm を達成するために、コイル長さを長くしたコイルサンプルを試作した。現状のコイルは径がφ30mm で長さが 3.1mm と径の方が大きく、コイルから出た励起磁束が外側に広がっていると考えられる。そこで、励起コイルの長さを増すことで磁束の広がりを抑え、垂直方向に磁束を集中させて測定深度の向上を図ることとした。試作したコイルセンサを図③-(5)-2-(a)-4.8 に示す。



図③-(5)-2-(a)-4.8　励起コイルを長くしたコイルセンサ試作品

試作したコイルにおいて周波数及び検知コイル間出力を調整することで感度特性の評価を行った結果、励起コイル長さが 9.1mm（巻数 24 ターン）のコイルセンサにおいて、周波数 600kHz 時に検知コイル間出力を調整することで、最も感度の高い条件になることが確認された。その条件において、センサ深度の評価を行った結果を図③-(5)-2-(a)-4.9 に示す。

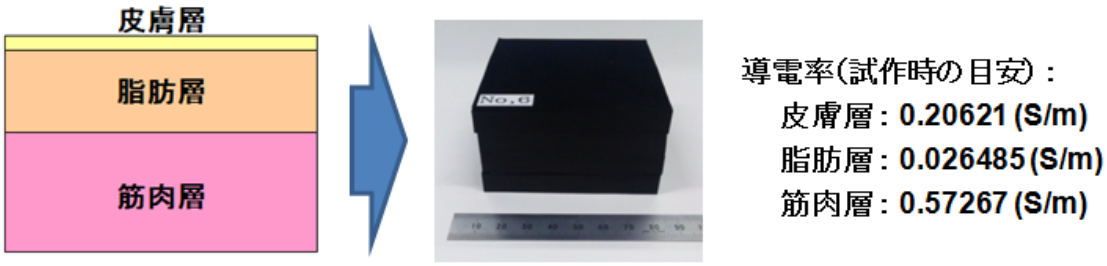


図③-(5)-2-(a)-4.9　励起コイルを長くしたコイルセンサでの深度評価結果

励起コイルを長くしたコイルセンサで最も高感度となる条件での測定深度を検証した結果、45mm という結果が得られ、目標としていた 60mm には届かない結果となった。この結果より、本センサでは皮膚表面から 45mm の深さまでの筋量を計測できると考えられる。目標値である深度 60mm を達成するためには、さらにセンサ径を大きくする必要があると考えられるが、センサ径が大きくなると局所計測が困難となる。そのため、今後測定深度向上を検討する際には測定深度と局所計測性の折り合いをつける必要があると考える。

③-(5)-2-(a)-5　ファントムを用いた筋量評価試験

最後に、試作した高感度コイルセンサにおいて、ファントムを用いた筋量評価試験を行い実用性について検証した。筋量評価試験では、生体の姿勢による状態変化や経時変化など様々な誤差要因を除去でき、センサ単体の評価ができるように皮膚層・脂肪層・筋肉層を模したファントムを試作し用いた（図③-(5)-2-(a)-5.1）。



図③-(5)-2-(a)-5.1　導電性ゴムを用いたファントム

ファントムには導電率の調整・積層などの加工性や経年変化などを考慮し、導電性ゴムを用いることとした。皮膚層、脂肪層、筋肉層の導電率は文献 3)より選定した。また、各層の厚みについても、文献 4)より日本人 60 歳以上の大腿における皮下脂肪厚、筋厚の標準値や分布から厚みの範囲を決め、ファントムの組合せを選定した。表③-(5)-2-(a)-5.1 に試作したファントムの組合せを示す。

表③-(5)-2-(a)-5.1　ファントム組合せ

No.	皮膚層	脂肪層	筋肉層	全体の厚み
1	1mm	4mm	30mm	35mm
2	1mm	4mm	50mm	55mm
3	1mm	10mm	15mm	26mm
4	1mm	10mm	20mm	31mm
5	1mm	10mm	25mm	36mm
6	1mm	10mm	30mm	41mm
7	1mm	10mm	35mm	46mm
8	1mm	10mm	40mm	51mm
9	1mm	10mm	45mm	61mm
10	1mm	10mm	50mm	56mm
11	1mm	15mm	30mm	46mm
12	1mm	20mm	10mm	31mm
13	1mm	20mm	30mm	51mm
14	1mm	20mm	50mm	71mm
15	1mm	25mm	20mm	46mm
16	1mm	25mm	30mm	56mm
17	1mm	25mm	40mm	66mm
18	1mm	30mm	10mm	41mm
19	1mm	30mm	30mm	61mm
20	1mm	30mm	50mm	81mm

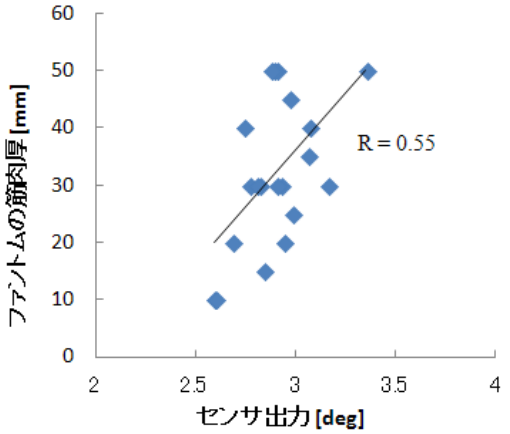
これらファントムを用い高感度コイルセンサによる筋量評価試験を行った。センサ条件及び測定条件を図③-(5)-2-(a)-5.2 に示し、測定結果を図③-(5)-2-(a)-5.3 に示す。



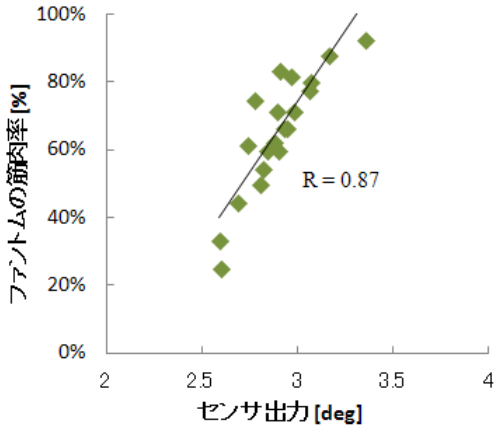
＜測定条件＞
計測装置 ：7280型
（Signal Recovery社製）
励起電圧 ：1V
周波数 ：600kHz
導体 ：各種ファントム
センサ-導体間隙：3mm

＜コイルセンサ条件＞
コイル内径：Φ30mm
長さ ：励起コイル9.1mm
検知コイル3.1mm
巻数 ：24ターン
巻線径 ：Φ0.3mm
コイル間間隙：0.5mm
コア径 ：Φ8mm
コア ：フェライトμr=400

図③-(5)-2-(a)-5.2　センサ条件及び測定条件



(a)筋肉の厚みの検証



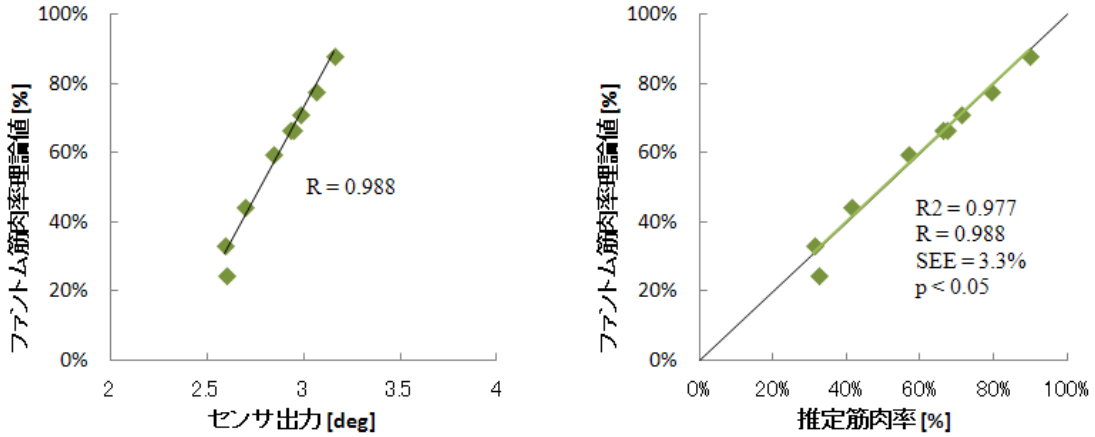
(b)筋肉率の検証

図③-(5)-2-(a)-5.3　ファントム測定結果

筋肉の厚みについては、多少の相関は見られたがばらつきが大きく、評価として用いるには難しいという結果であった（図③-(5)-2-(a)-5.3(a)）。これは本筋量センサには、筋肉の厚みだけでなく筋肉までの距離、すなわち皮下脂肪厚の情報も含まれることから、純粋に筋肉の厚みのみを評価するのは難しいと考えられる。そこで、皮膚、脂肪及び筋肉全体に占める筋肉の割合が評価できるのではないかと考え、筋肉率についても検証を行った（図③-(5)-2-(a)-5.3(b)）。筋肉率とセンサ出力の間には高い相関が得られたが、ばらつきが大きく、この条件で筋肉率の推定式を作成すると、およそ 9%の誤差を含む結果であった。これは、試作したコイルセンサの測定深度が 45mm 程度なのに対し、評価に用いたファントムの厚みが最大で 81mm と大きく測定領域を超えているためであると考える。そこで、評価に用いるファントムを皮膚、脂肪、筋肉全体で 46mm までとし、再試験を行った。評価に用いたファントムを表③-(5)-2-(a)-5.2 に示し、評価結果を図③-(5)-2-(a)-5.4 に示す。

表③-(5)-2-(a)-5.2　全体の厚みを 46㎜ までとしたファントム組合せ

No.	皮膚層	脂肪層	筋肉層	全体の厚み
1	1mm	4mm	30mm	35mm
3	1mm	10mm	15mm	26mm
4	1mm	10mm	20mm	31mm
5	1mm	10mm	25mm	36mm
6	1mm	10mm	30mm	41mm
7	1mm	10mm	35mm	46mm
11	1mm	15mm	30mm	46mm
12	1mm	20mm	10mm	31mm
15	1mm	25mm	20mm	46mm
18	1mm	30mm	10mm	41mm



(a)筋肉率の再検証　　(b)筋肉率の推定精度

図③-(5)-2-(a)-5.4　ファントム再測定結果

ファントム全体の厚みをセンサ深度までに合わせて再評価した結果、筋肉率とセンサ出力には高い相関が得られた。また、この条件にて筋肉率の推定式を作成すると、推定誤差は 3%程度となり、精度良く筋量を推定できる可能性が示された。

③-(5)-2-(a)-6　先導研究のまとめ

本研究では安全で簡便な局所筋量センサの開発を目指し、電磁誘導法という非接触計測技術を用いた筋量センサの原理検証を行った。先導研究の結果として、生体組織に感度良く反応し、皮膚表面から 45mm 程度までの筋肉量情報を取得できるコイルセンサを試作し、ファントムを用いた実用化検証により、測定箇所の深さ方向に対する筋肉率について誤差 3%程度での推定が可能であることが示された。これは、高齢者や寝たきりの要介護者の筋量を定量的に評価するにあたり、有用な成果であると考える。寝たきり状態では、20 日間リハビリなどを行わず放置することで大腿部では約 7~8%筋量が減少するとの報告がある。

しかし寝たきりの状態でもトレーニングを実施することで、筋委縮は軽減するという報告もあることからリハビリ訓練の重要性が伺える。局所筋量センサにより大腿四頭筋や前脛骨筋など筋単位での筋量が定量的評価できるようになれば、減少している筋を特定でき、より具体的なリハビリメニュを提供できるため、有用なデバイスとなり得る。

ユーザ機関である国立障害者リハビリテーションセンター研究所でのヒアリングにおいても筋量評価の関心の高さや、リハビリメニュへの応用などのニーズが得られた。理学療法的観点から見ると回復期からのリハビリでは筋量によって患者に合わせたメニュを組むことが重要と考えられており、興味を持っている人は多くいる。現在は簡便に計測できる手段が無いため周囲径での評価を行っているが、周囲径では脂肪の厚みや浮腫も含んでいるため誤差が大きく正確な評価とは言えず、筋量に着目している割には評価が不十分である。簡便で定量的に筋量を評価できる方法が確立されれば、回復期からのリハビリにおいて、患者の筋量から適切なリハビリメニュを立てることで効率的なリハビリが可能となるため非常に有用である。また、計測機器単体としてではなく、リハビリメニュの提案や評価、もしくはサルコペニアの診断などアプリケーションと上手く組めれば研究も導入施設も増えるとのご講評を頂いた。

今後の課題としては、今回達成できなかった測定深度の向上や、計測デバイス開発及び臨床試験による人での精度検証などが挙げられる。センサ深度に関しては先導研究の目標を 60mm と設定していた。これは、日本人の 60 歳以上の皮下脂肪厚及び筋厚の標準値から下肢で最も太い大腿を計測する場合を考慮しても 60mm までの深度があれば十分計測が可能であると考え設定した数値である。今回試作した筋量センサの測定深度は 45mm と目標値には届かなかったが、ふくらはぎや前脛骨筋などの下腿を計測する場合には測定深度 45mm でも十分応用は可能である。今後、センサ深度 60mm を実現するための方策としては、センサ径を大きくすることが挙げられる。しかし、センサが大きくなることで局所計測性が失われる可能性があり、双方のバランスを取る必要性がある。センサ径以外の方策としては、日本磁気学会で収集した中心磁界を強くする 8 の字コイルの適用や励起コイルの複数化、漏れ磁束の減少を目的としたフェライトを用いたショートリングなどの検討も効果が期待できると考えられるため今後検討を行っていく。

③-(5)-2-(b)　モーションセンサの開発

【株式会社デンソー、オリンパス株式会社、再委託：国立大学法人東京大学 IRT 研究機構、国立大学法人九州大学）】

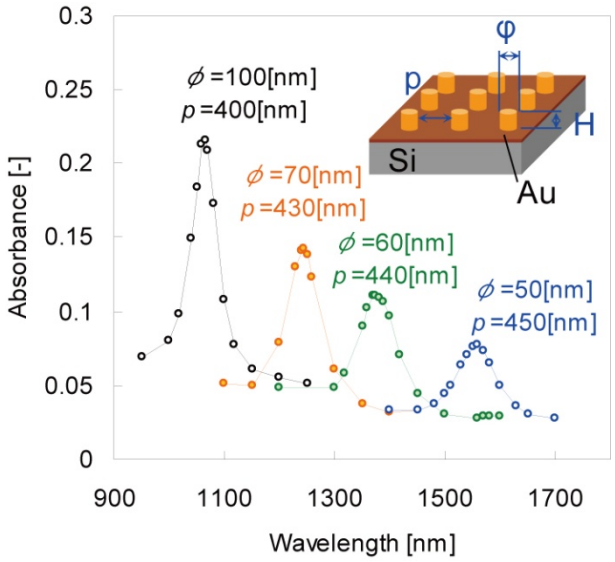
本稿では、モーションセンサの開発の先導研究として、シリコン基板上に形成可能な赤外ディテクタの機能検証を行った。

③-(5)-2-(b)-1　赤外共鳴アンテナパターンによる検知波長選択性の検証

③-(5)-2-(b)-1-1　RCWA によるアンテナパターンと検知波長の検証

赤外共鳴アンテナパターンの構造と検知波長の関係を調べるための基礎段階として、RCWA（Rigrous-Coupled Wave Analysis）法を用いて、赤外共鳴アンテナパターンが吸収する赤外波長の検証を行った。

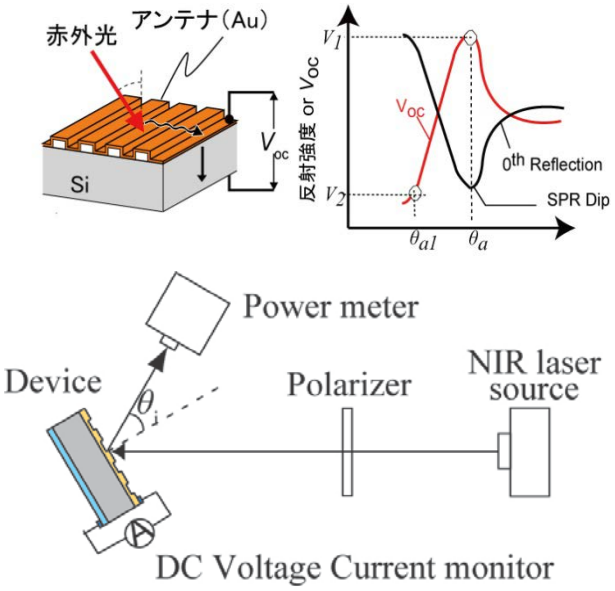
計算モデルとその結果を図③-(5)-2-(b)-1-1.1 に示す。計算モデルは、シリコン基板上に金の薄膜を塗布し、その上に直径 φ、高さ H、ピッチ p のパラメータを持つ金ナノ構造が配置されたものとなっている。高さ H を 200 nm と一定にした状態で φ と p を変え、構造に対して TM 波の光を垂直入射条件で照射し、構造による光吸収量を計算した。その結果、φ のサイズが小さくなり、かつ p が大きくなるにしたがって、共鳴波長の長波長化が見られた。これにより、約 1000～1600nm の近赤外波長領域において、構造パラメータに依存して吸収ピーク位置をコントロールできることが示唆された。



図③-(5)-2-(b)-1-1.1　RCWA シミュレーション結果

③-(5)-2-(b)-1-2　試作赤外共鳴アンテナ構造を用いた共鳴波長コントロール検証

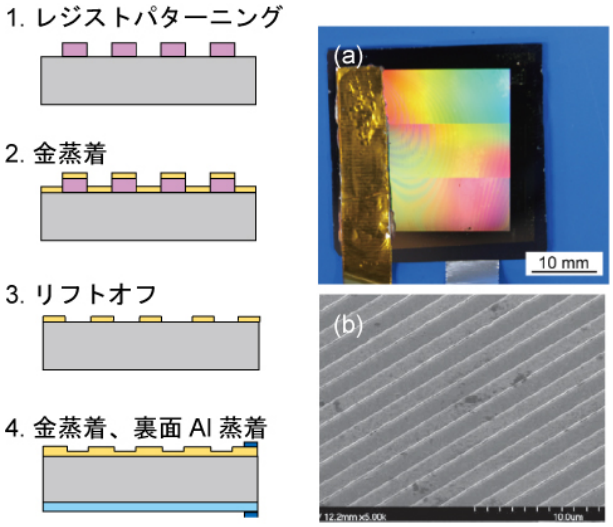
赤外共鳴アンテナ構造の寸法によって、共鳴波長を精度良くコントロールできるかについて、実際にデバイスをトップダウンプロセスにより構成することで検証した。デバイスの構成図と検証実験の概念図を図③-(5)-2-(b)-1-2.1 に示す。デバイスは、n 型シリコン基板上に、金の 1 次元回折格子を形成したものである。近赤外領域の光はシリコンのバンドギャップよりも小さなエネルギしか持たず、シリコン単体では近赤外光を検出することはできない。本方式では、表面プラズモン共鳴とショットキーバリアを利用することで、シリコンデバイス上での検出を実現している。図③-(5)-2-(b)-1-2.1 の上図に示すように、ある入射角度 θ でデバイスに入射した光が表面プラズモン共鳴を励起すると、入射光のエネルギは表面プラズモン共鳴として金属の自由電子に渡され、金属面からの反射光強度が低くなる。金と n 型シリコンの界面に形成されるショットキーバリアの高さは 0.7~0.8 eV であり、近赤外光よりも低い。そこで、エネルギを受けて励起状態になった自由電子はバリアを乗り越えて、シリコン側に流れ込む。この信号は、短絡電流、もしくは電荷移動に伴う静電ポテンシャルとして開放電圧の変化として読み取ることができる。



図③-(5)-2-(b)-1-2.1　赤外共鳴アンテナパターン検証デバイス

具体的な実験方法は図③-(5)-2-(b)-1-2.1 の下図に記載している。デバイスに対して回折格子のラインと直交する方向に電場振動面を持つ赤外光（TM 波）を照射すると、入射光は回折を受け、励起条件が満たされたときに表面プラズモンが生じる。励起条件は、光の波長と入射角度、回折格子のピッチから構成される。実験では回折格子のピッチは固定とし、入射波長と入射角度をスイープできるようにした。

プロセスを図③-(5)-2-(b)-1-2.2 に示す。まず、n 型基板上にレジストを塗布してストライプ状にパターニングする。次に、このパターンの上にダイレクトに金を蒸着し、リフトオフを行うことで金のストライプパターンを得る。次に、もう一度金を蒸着することで、金の回折格子パターンを得た。最後に、背面に電極用のアルミ膜を蒸着した。なお、今回のパターンは、回折格子のピッチ 3.2μm、金下地膜の厚さ 110nm、回折格子の高さは 110nm とした。製作したデバイスの光学顕微鏡像を図③-(5)-2-(b)-1-2.2(a)に、電子顕微鏡像を図③-(5)-2-(b)-1-2.2 (b)に示す。光学像では表面にうねりのような模様が見えているが、電子顕微鏡では構造上の問題点は見つからず、一様な回折格子構造が得られたといえる。

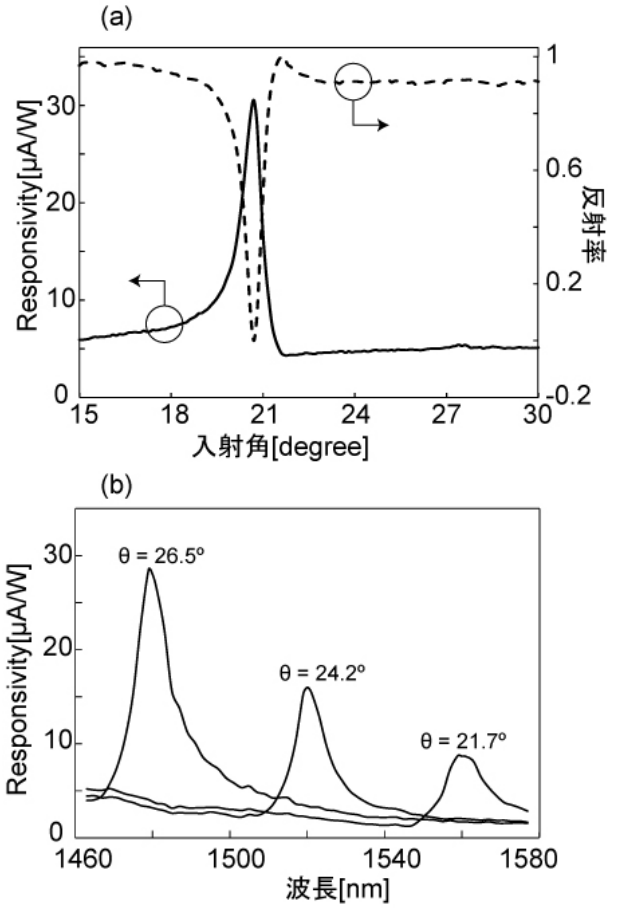


図③-(5)-2-(b)-1-2.2　赤外共鳴アンテナパターン製作工程とデバイスの写真

デバイスによる近赤外光検出評価を行った。デバイスに波長 1463nm の近赤外光を照射した状態で入射角度をスイープし、電流検出を行ったデータを図③-(5)-2-(b)-1-2.3 (a)に示す。点線が反射光強度である。ディップ点は反射光強度が低下している角度、すなわち表面プラズモン共鳴が励起されているポイントに対応する。この場合、約 21° の場所で反射強度が極小値を示した。そのときに得られた短絡電流のカーブが実線で示されている。ちょうど、反射強度のグラフと極性を反転したカーブが得られている。すなわち、表面プラズモン共鳴が生じているときに、電流を多く取り出せることができることを意味している。このとき、ピーク位置での Responsivity は約 30μA/W であった。これは、入射エネルギに対して取り出し可能な電流値を示すものであり、検出器の感度に相当するものである。

次に、デバイスによる近赤外光の選択的計測が可能かどうかについて検証を行った。このときには、入射角度を固定した状態で入射光の波長をスイープし、アンテナ構造がどの程度波長選択性を持つのかを Responsivity から評価した。その結果を図③-(5)-2-(b)-1-2.3 (b)

に示す。それぞれ、θ = 26.5°は波長 1480nm、θ = 24.2°は波長 1520nm、θ = 21.7°は波長 1560nm の波長の光に対する共鳴角度に対応する。結果として、共鳴状態の近傍では、感度曲線は約 10nm の FWHM（Full width at half maximum）を持つことが分かった。これにより、赤外共鳴アンテナ構造により、波長選択的に近赤外光を検出可能であることが判明した。なお、今回は表面プラズモンの鋭い共鳴特性を利用したため、入射角度や偏光に対する許容値が非常に狭いが、後述するナノ粒子タイプの構造を用いれば、対応波長・入射角度･偏光状態のブロード化は可能である。また､Responsivity は波長が長波長化するに従い、小さくなる傾向を示した。これは、入射波長が長くなるにしたがい、光のエネルギが小さくなるため、仮に光エネルギがショットキーバリアより高くても、バリアを乗り越えうる自由電子の数が減少するからである。さらに長波長化を狙うために、バリアハイトの低減化を今後は図っていく必要がある。

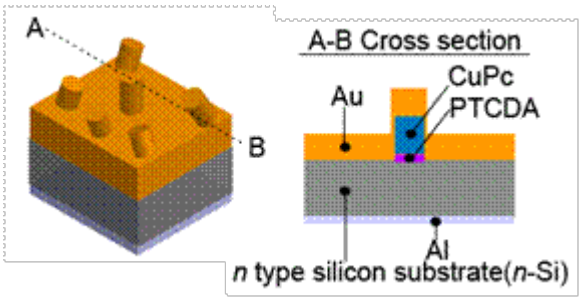


図③-(5)-2-(b)-1-2.3　赤外共鳴アンテナ検証結果

③-(5)-2-(b)-2　有機半導体による高感度化検証

前項までに、金属の微細パターンからなる赤外共鳴アンテナの原理を検証した。本項では、有機半導体ナノピラー構造を、その赤外共鳴アンテナ構造に適用し、その効果につい

て検証したので報告する。この赤外共鳴アンテナは、*n*-シリコン基板上に、自己成長的に有機半導体（銅フタロシアニン:CuPc 及び 3、4、9、10-ペリレンテトラカルボン酸二無水物:PTCDA）ナノピラーを形成し、その上に金属膜（金:Au）を 50nm 程度製膜することにより得られるものである。さらに、そのシリコン基板の裏面にアルミニウム(Al)を製膜することにより、金属半導体接合型の赤外線センサ（図③-(5)-2-(b)-2.1 参照）を構成することができた。



図③-(5)-2-(b)-2.1　提案した赤外線センサ

ここで提案したセンサの特徴として、下に示す二点がある。

(1) 微細パターンを持つ赤外共鳴アンテナ構造が簡易に作製可能

(2) 有機半導体が金属とシリコン基板間に存在するため、金属半導体接合による電子障壁を調整可能

そこで、この二つの特徴に着目して検証を行うため、

(1) 赤外共鳴アンテナ構造の分光光度計による赤外吸収スペクトルと、提案した赤外線センサ自体の光感度特性の取得

(2)ダイオード温度特性取得による、電子障壁高さの取得

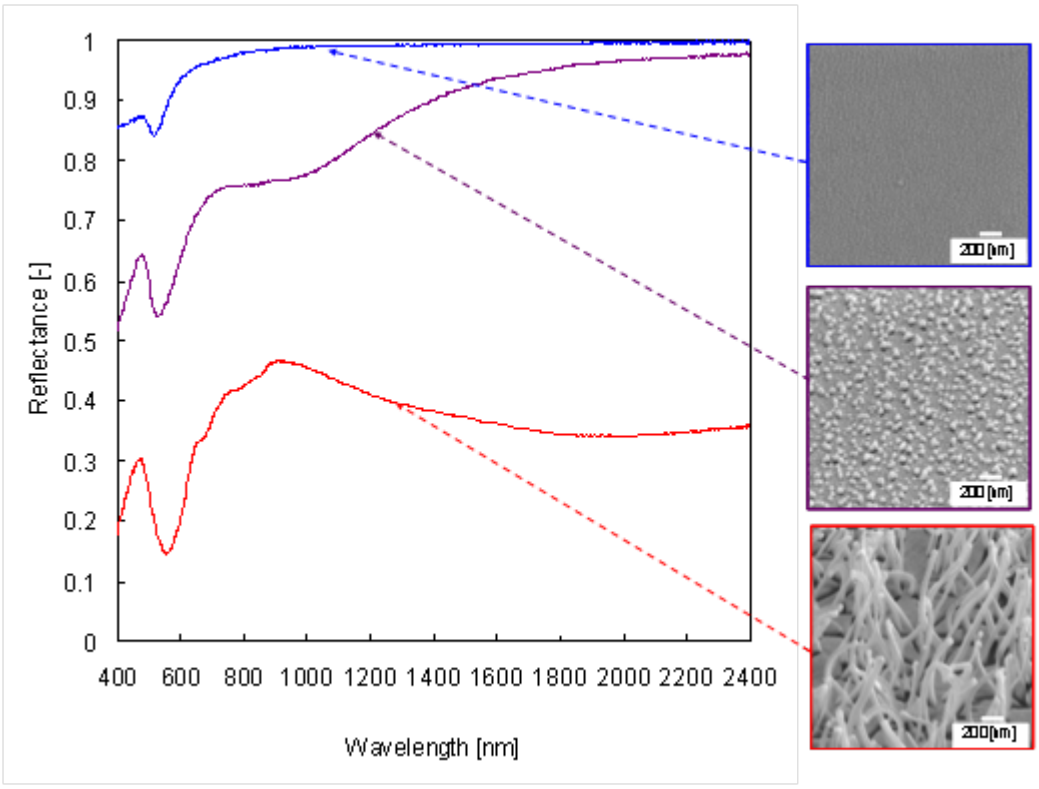
を行った。以下、各項目について報告する。

(1) 赤外共鳴アンテナ構造の分光光度計による赤外反射スペクトル、及び提案した赤外線センサ自体の光感度特性の取得

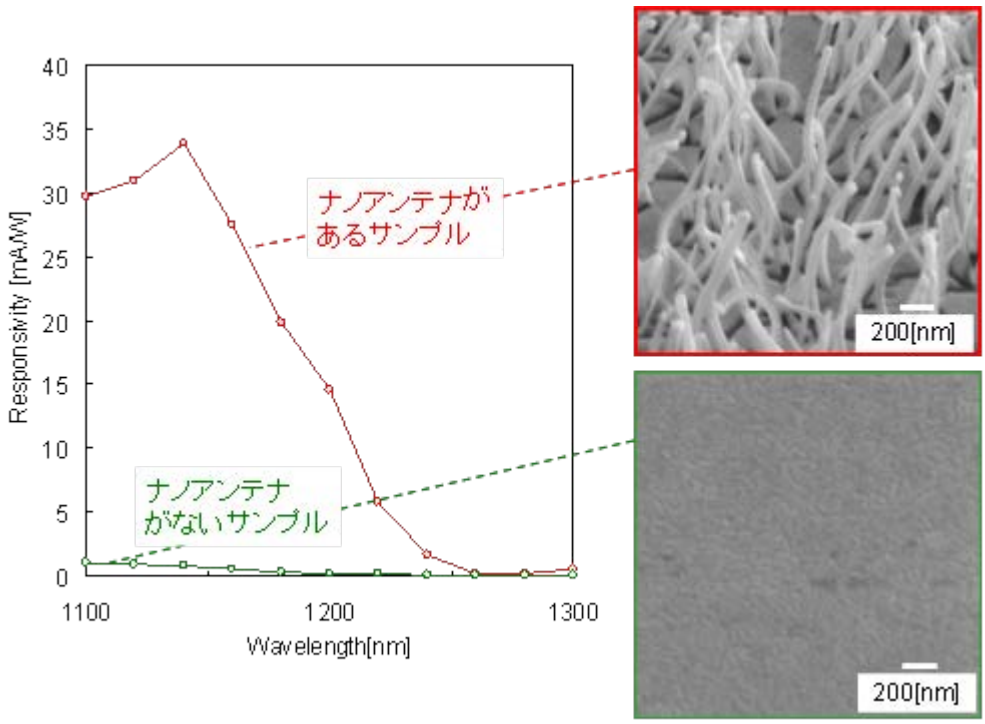
作製したアンテナ構造が、赤外線を吸収する上で有効であるか否かを検証するために、分光光度計による反射スペクトルを取得した。なお、本アンテナ構造は、作製条件により制御することが可能であることが、文献 5)などの知見から分かっている。アンテナ構造が異なるサンプルを 3 種類作製し、赤外吸収スペクトルを取得した。その結果を図③-(5)-2-(b)-2.2 に示す。これらの結果は、アンテナ構造を大きくすると、反射スペクトルの強度が弱くなることを示している。一般に、50nm 程度の膜厚を持つ金膜の赤外光透過は 1%程度であり、入射光はほぼ全反射する。よって、これらの結果は、アンテナ構造が

大きくなることにより、金膜での光吸収が大きくなることを示唆している。

以上の結果より、赤外線センサとして光感度がもっとも高いと期待されるのは、図③-(5)-2-(b)-2.2 中に赤字で示した、共鳴アンテナ構造が大きいサンプルである。従って、このサンプルにおいて、光感度応答を取得した。光感度応答については、赤外線レーザ（SC450、 Fianium）を照射してセンサの光電流を測定することにより、感度（入射光のパワーに対する、センサの光電流との比）を導出した。レーザ光のスポット径は 10mm であり、作製したセンサの寸法は、20mm 角であった。その結果を図③-(5)-2-(b)-2.3 に示す。参照のため、ナノピラーのない、Au/*n*-シリコン接合型赤外線センサを作製した。この結果から、参照のセンサと比較して、赤外領域における感度が大きくなっていることがわかった。例えば、入射光源の波長が 1.2μm では、作製したセンサの感度は 14.3mA/W であった。これは、参照のセンサ（感度が 0.141mA/W）と比較して、100 倍程度の感度向上である。つまり、



図③-(5)-2-(b)-2.2　分光光度計による共鳴アンテナ構造の反射スペクトル測定結果　　（青：アンテナ小、紫：アンテナ中、赤：アンテナ大）

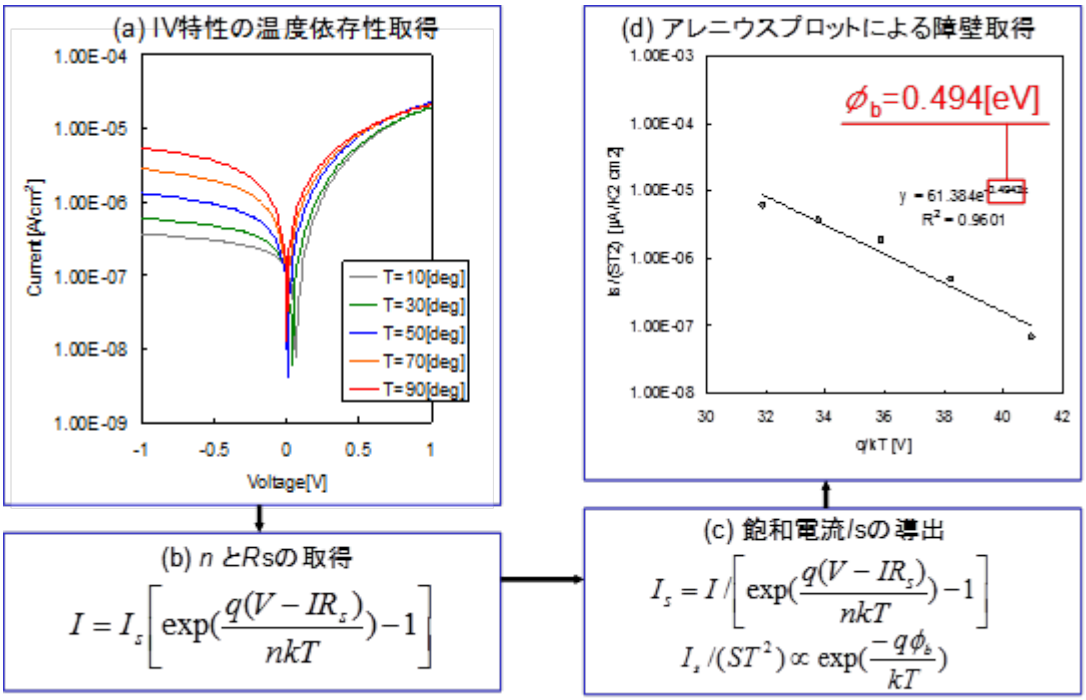


図③-(5)-2-(b)-2.3 提案したセンサの光感度応答

本稿で提案した赤外光共鳴アンテナは、赤外光吸収を促しており、それが感度向上に寄与していると考えられる。しかし、Au/*n* 型シリコン接合型赤外線センサの理論的な感度（100%光吸収時）は、文献 6)に基づいて計算をすると、大凡 10mA/W となり、実測値よりも低くなる。文献 6)によると、理論的な感度は、金属半導体界面の電子障壁（φb）に依存し、φb が小さくなると感度が飛躍的に向上する。提案した赤外線センサは当初、Au/*n*-シリコン接合型赤外線センサと同様の φb を持つものと考察していた。しかし、理論値との比較より、φb が Au/*n*-シリコン接合の値よりも小さいことが想定される。これは金属と *n* 型シリコンとの界面に存在する有機半導体の影響が考えられる。そこで、提案した赤外線センサの温度特性を取得することにより、その電子障壁を求めることを試みた。これを次に示す。

(2) ダイオード温度特性取得による、電子障壁高さの取得

電子障壁高さについての導出方法について、図③-(5)-2-(b)-2.4 に示す。まず、センサ（ダイオード）の電流電圧特性を取得する（図③-(5)-2-(b)-2.4(a)）。次に、文献 7) を用いて、各々の温度におけるパラメータ（直列抵抗 *Rs* とダイオードパラメータ *n*）を導出する（図③-(5)-2-(b)-2.4(b)）。



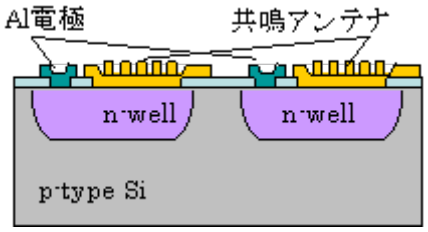
図③-(5)-2-(b)-2.4 アレニウスプロットによる障壁高さの導出

ダイオードの飽和電流 *Io* を取得し（図③-(5)-2-(b)-2.4(c)）、その飽和電流（順方向電圧が 75mV 以上の電圧値、本報告では、順方向電圧が 80mV）をアレニウスプロットする（図③-(5)-2-(b)-2.4(d)）。その傾きが障壁となる。本方法を用いて測定したところ、参照として作製した、Au/*n*-シリコン接合型赤外線センサの障壁値は、0.761eV となり、一般的な Au/*n*-シリコン接合による電子障壁と同等であった。その一方、提案した、有機半導体ナノピラーを用いたものは、0.493eV であり、大凡 0.27eV 程度の障壁低下を示している。つまり、この結果は、有機半導体による電子障壁低下の可能性を示している。提案した赤外線センサは、赤外共鳴アンテナによる影響と、電子障壁低下による影響により、光応答感度が高くなったと考えられる。

③-(5)-2-(b)-3　センサ応用に向けたアレイ化の検証

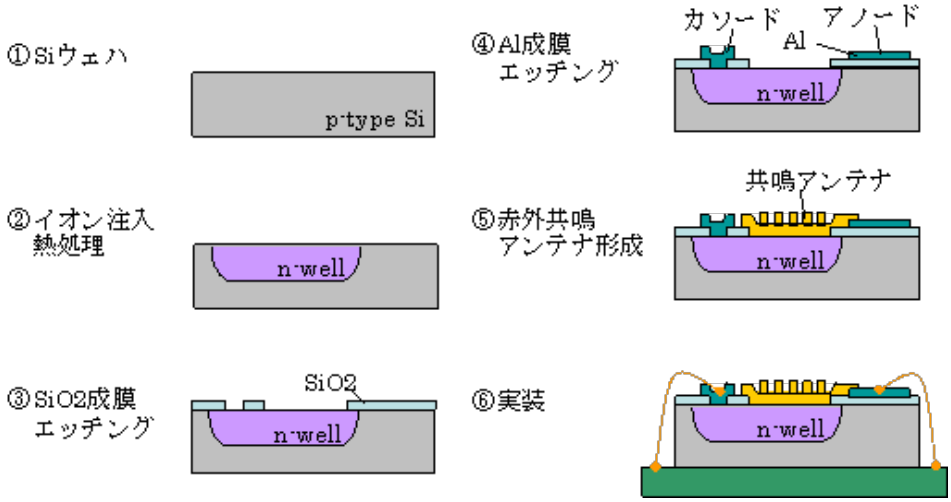
③-(5)-2-(b)-3-1　アレイ化の設計と試作

赤外共鳴アンテナを用いた受光デバイスの産業化を見極めるためには、デバイスのアレイ化の検討が不可欠である。そこで Si 基板にイオン注入することでウェル構造を作り、素子間を分離するアレイ化を検討した（図③-(5)-2-(b)-3-1.1 参照）。

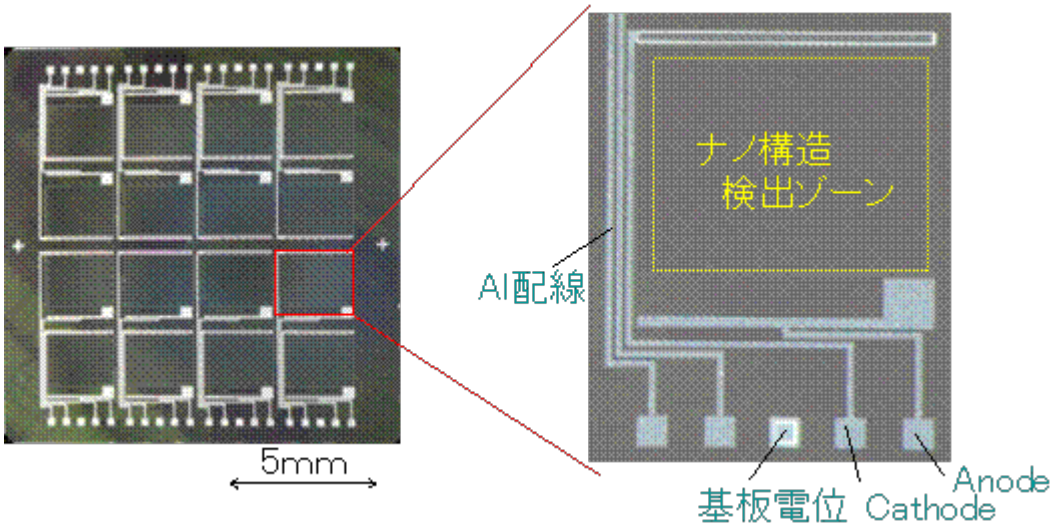


図③-(5)-2-(b)-3-1.1　アレイ化構造

アレイ化構造を作るためのプロセスフローを図③-(5)-2-(b)-3-1.2 に示す。はじめに、p 型 Si ウェハ（抵抗率 80-120Ωcm）上にレジストマスクを用いて n-ウェルを形成する部分にリン（P）をイオン注入した。イオン注入条件としては、加速電圧を 150ｋV とし、ドーズ量を 1×10^{13}、1×10^{14}、1×10^{15}dose/cm^{2}の 3 条件で行った。その後、1170℃で 190min 熱処理することで n-ウェルを形成した。次に、図には記載していないが、Al 電極と p 型基板との電位を取る部分に、レジストマスクを用いてボロン（B）イオン注入（ドーズ量 1×10^{15}dose/cm^2、加速電圧 70ｋV）し、熱処理によって Al 電極とオーミックを取れるように処理をした。その後、電極、配線の下地となる酸化膜をプラズマ CVD 法にて成膜(0.3μm 厚さ)し、パターニングを行った。次に、Al をスパッタにより成膜(0.6μm 厚さ)し、ウエットエッチングにてパターニングを行うことで Al 電極と配線を形成した（図③-(5)-2-(b)-3-1.3 参照）。最後に、Au 蒸着及び、パターニングを行うことで、共鳴アンテナ部分を形成した。なお、今回、n-ウェル部の P イオンドーズ注入条件を 3 条件変えたことで、近赤外光検出に必要なアンテナ材である金とのショットキーバリアの高さを変化させた。



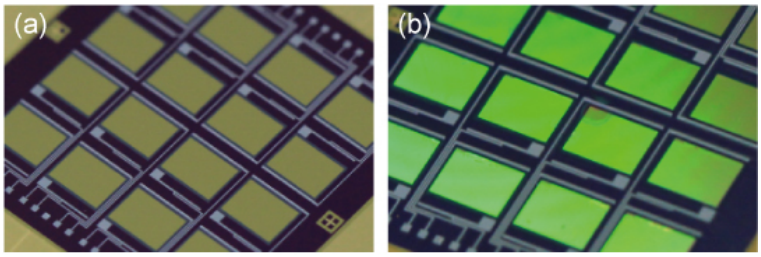
図③-(5)-2-(b)-3-1.2　アレイ化プロセスフロー



図③-(5)-2-(b)-3-1.3　赤外共鳴アンテナ形成（ポストプロセス）前のアレイ化構造の外観

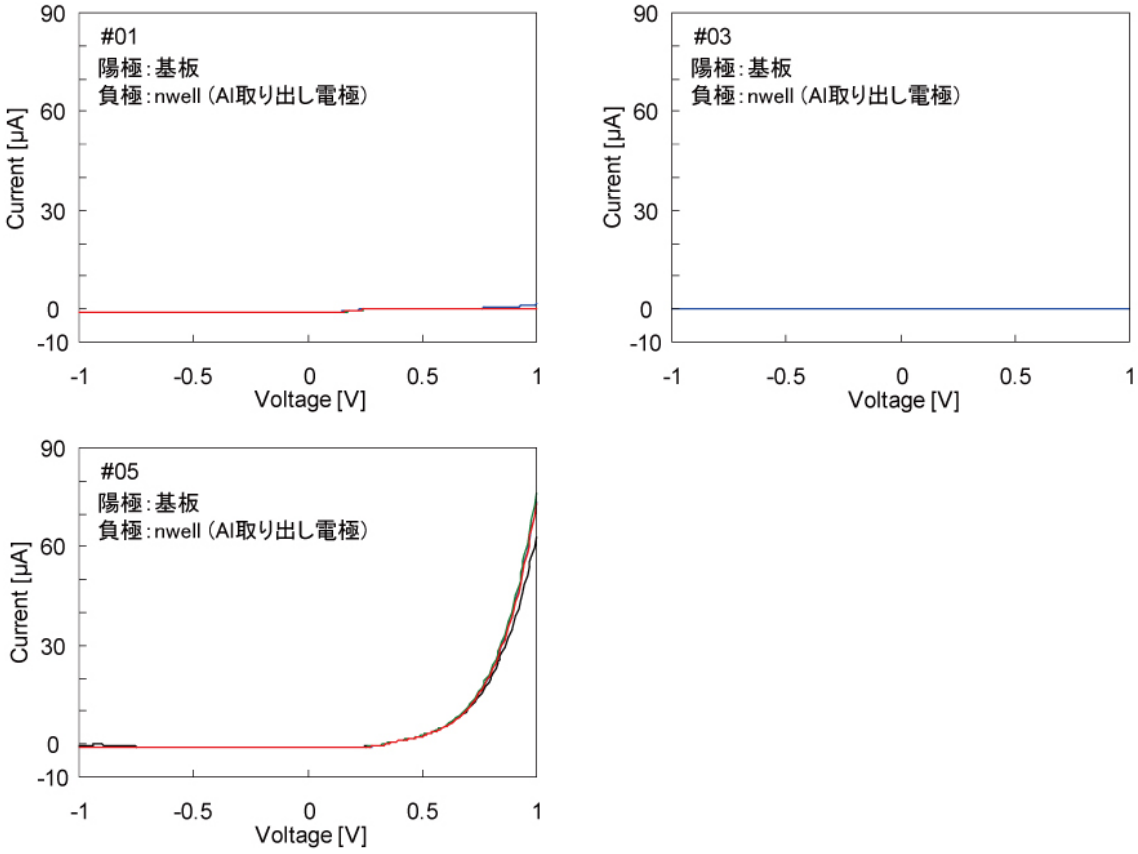
③-(5)-2-(b)-3-2　赤外共鳴アンテナ形成（ポストプロセス）と検証

ナノ構造検出ゾーンに波長 1500 nm の光入射を想定した回折格子構造を形成した。図③-(5)-2-(b)-3-2.1 に実装前（（a）金膜ベタ塗）と実装後（（b）回折格子形成後）における検出ゾーンの図を示す。このとき、金ベタ塗下地膜厚さは 90nm、回折格子高さは 60nm であった。回折光の存在から、光子構造の形成が確認できた。アノード用の Al 電極と赤外共鳴アンテナ構造の間はワイヤボンディングにより電気的接続した。



図③-(5)-2-(b)-3-2.1　赤外共鳴アンテナ形成前（金薄膜ベタ塗）と後（金回折格子形成後）のアレイ化構造の外観

今回は、製作したデバイスの機能検証として、前述の 3 パターンのドープ濃度（#1：1×10^{13}、#3：1×10^{14}、#5：1×10^{15} dose/cm^2）それぞれに対して、p 型基板上の n-well の形成と、Al の電極形成状態について確認を行った。確認方法として、図③-(5)-2-(b)-3-2.1 中の基板電位用の電極を陽極、Al 配線のカソードを負極として IV 特性を検証した。その結果を図③-(5)-2-(b)-3-2.2 に示す。



図③-(5)-2-(b)-3-2.2　基板とウェル間の IV 特性

本来は、P 型基板と n-well の間には PN ダイオードが形成されるため、IV 特性は典型的なダイオードカーブを描くはずであるが、#1 と#3 に関しては、ダイオード的な応答が見られなかった。一方、#5 に関しては、良好なダイオード特性が得られた。#1 と#3 の結果の一因として、カソード電極の Al 電極と n-well の間に、オーミックな接合が形成されていない可能性が考えられる。したがって、アレイ化の際には、Al 電極との接合部分のドープ濃度は 10^{15} dose/cm^{2}に設計する必要性が示唆された。金アンテナと n 型シリコンとの接合におけるショットキーバリア構造においては、高いドープ濃度はリークパスを生み出すため、高感度な応答が阻害される要因となる。したがって、今回の結果から、将来的な検出器のアレイ化においては、アンテナ構造部のドープ濃度と Al カソードのドープ濃度を別々に設定して製作を進める必要があることがわかった。

③-(5)-2-(b)-4　ユーザ期間による成果の有効性の検証

モーションセンサとして、国立リハビリセンターの井上先生へのヒヤリングを実施した結果、以下のご意見を頂いた。①3 次元の歩容姿勢を取得できることは、正常時歩行との姿勢や歩行動作のずれを確認することで、効果的なリハビリに有用である。特に、設備が

整った専門施設よりも、退院後に専門施設で行う訓練の延長を家庭内で行ときに役立つ、②家庭内の毎日の 3 次元歩容姿勢データを蓄積することで、日々の歩容の変化から異変を早期に察知でき、見守りツールとして役立つ。③地域医療と連携し、可搬型にして公民館などの移動定期検診時に老人歩行データを採取し、データベースと比較して診断に利用する。

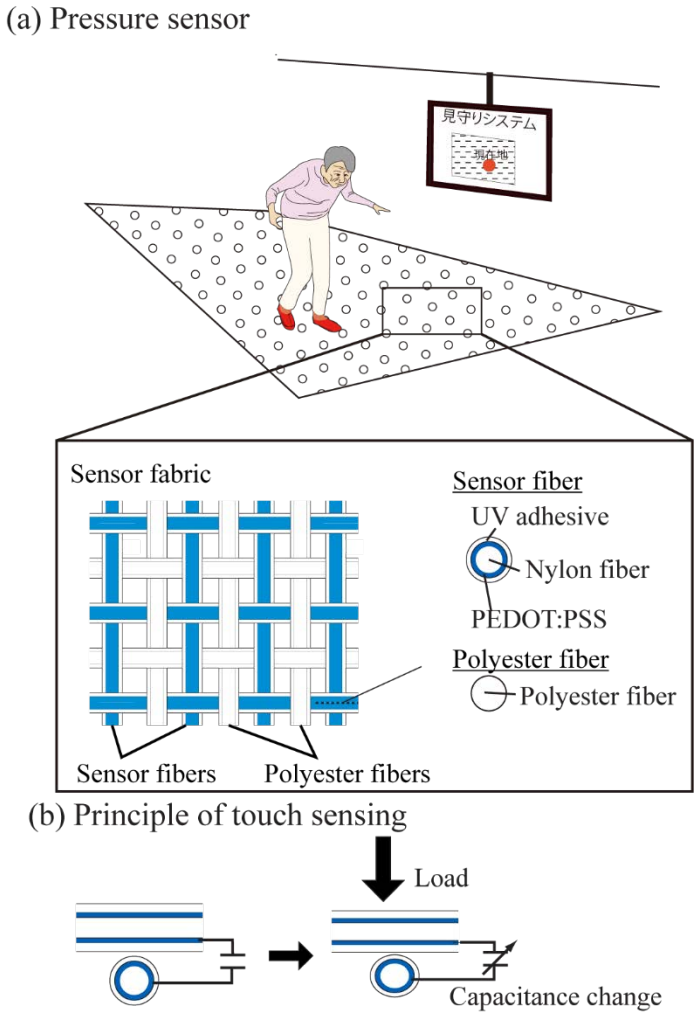
以上のように、モーションセンサの有用性が確認できた。今後、他の用途などへの展開性について、さらなる調査や検討を進めていく。

③-(5)-2-(c)　フォースセンサプレートの開発

【独立行政法人産業技術総合研究所】

本研究では、「１．有機導電性ポリマ PEDOT:PSS を用いた布状フォースプレートの試作」、と「２．人の歩行計測の大きく２つの研究」を行った（図③-(5)-2-(c).1）。

１.の有機導電性ポリマ PEDOT:PSS を用いた布状フォースプレートの試作においては、有機導電性ポリマをファイバ上にコーティングした電極を布に織り込み静電容量型のセンサを試作した。２．においては布状センサを用いて人の場所などを検知し、歩行を計測について評価を行った。



図③-(5)-2-(c).1　提案する布状フォースセンサプレートのコンセプトと原理

③-(5)-2-(c)-1　有機導電性ポリマ PEDOT:PSS を用いた布状フォースプレートの試作

＜布状フォースプレートの研究背景＞

布状フォースプレートは、お年寄りの見守り用の人の位置センサや、介護ロボット用人

との接触検知センサなどへのニーズに応えるものである。大面積フォースプレートは、人の周りで人を検知する必要があり、人の背が 1.7m 程度であるように、人のサイズであるメートル級の大きさが必要となる。また、床やベッドなどに敷くため複雑な形状にそうことができたり、人との接触で曲げがかかっても壊れないというフレキシビリティが必要である。一方で、空間分解能としては、足を検知するなら 5 cm おき程度と、あまり高い密度は必要でなく、感度も、数ミリグラムや数グラムといった高感度は必要ではなく、数キロ程度の感度で良い. このように、人を検知する位置センサは、高感度や高密度ではないが、フレキシブルでメートル級という従来にない特性を持つ圧力センサアレイが必要とされている。

従来の接触センサや圧力センサは、シリコンを加工して試作した MEMS 技術を用いて製作されてきた。MEMS センサは、最大 30 cm 程度のウェハ上に圧電材料やピエゾ抵抗素子をマイクロ加工により 5 mm 角の中に作り、ダイシングする製造工程から、大量の高性能なデバイスを一括してつくることができるという利点がある。ただし、人検知用にメートル級で作ることは 30 cm ではなく 1 m 幅の超大型の製造装置が必要になる点や小さなチップ一個一個ではコストが安いが全体では高コストであるため製造方法上難しい。また、プリント基板を作る技術についても、サイズは大体 30 cm 程度が普通でありメートル級のデバイス製造は非常に難しい。また、これらの製造方法では、固いシリコンなど無機材料を用い、1000℃程度の高温プロセスを用いるため柔らかいプラスチックなどの基板を用いることが難しいため、人に用いるようなメートル級で柔らかいデバイス製造は非常に難しかった。その一方で、人を検知する圧力センサアレイをフレキシブルなプラスチック基板上に作る技術が、有機エレクトロニクスの分野で行われている。PVDF センサの下に、ペンタセンなどでスイッチングするトランジスタを集積したものや有機 EL によるライトペン式タッチセンサなどが研究され、フレキシブルで高性能なタッチセンサが実現されている。これら有機材料でタッチセンサを作る技術においては、ペンタセンや有機 EL、有機フォトダイオードなど高性能な低分子系有機材料を真空蒸着機で成膜するため、デバイスサイズが通常の蒸着機のサイズである 30 cm 程度である。従来の有機材料を用いたタッチセンサは、配線の高精度の貼り合わせなどが必要なため、メートル級で作ることは難しい。

したがって、フレキシブルでメートル級の圧力センサを実現するには、大きくすることが難しい真空装置や、加工に手間がかかる貼り合わせなどがない方法で製作する方法の開発が必要である。また、本研究グループではメートル級センサとして布状タッチセンサを開発してきたが、電気を通す人の皮膚とセンサ電極間の静電容量を測る方式である。そのため、人の歩行を測る場合には、人が裸足でなければならず靴下や靴を履いた場合には検知できないという問題があった。そのため、製造方法の問題と人の皮膚との接触ではなく

圧力を検知するという検知方式の 2 つを解決することが必要である。

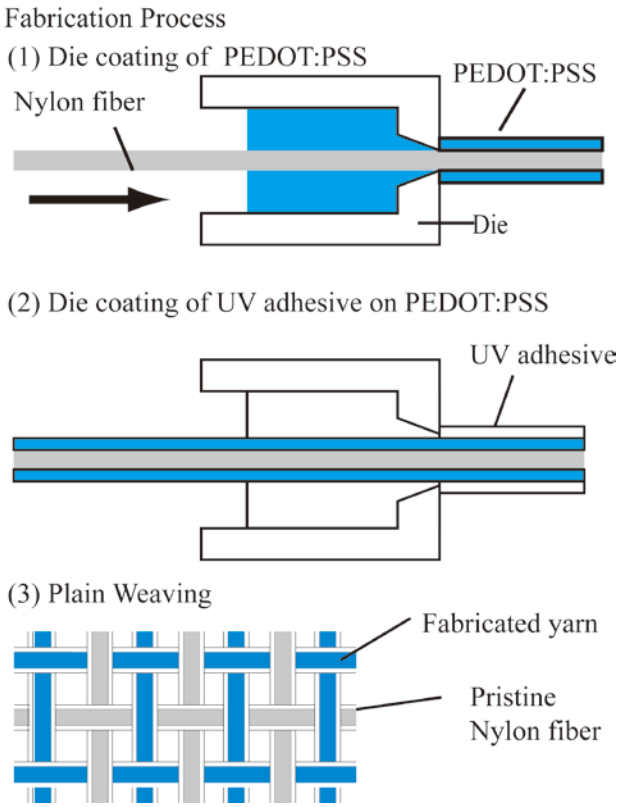
本研究では、メートル級でフレキシブルな圧力センサとして、糸の上に導電性ポリマをコーティングした糸を縦糸、横糸に織りこんだ静電容量型圧力センサを提案した（図③-(5)-2-(c).1 (a)）。また、メートル級に大面積で作る方法として、糸に光ファイバを作るダイコーティング法で長尺で作り、幅 1.2 m の自動織機で連続的に製織する方法を開発した。試作したセンサは、メートル級の大面積で、有機材料であるためフレキシブルである。電極には、有機導電性ポリマ PEDOT:PSS を用いており、糸を一定間隔で必要な数入れた 1.0 m×1.0 m のセンサ布を試作した。従来の布状圧力センサでは静電容量が小さいため、ノイズに埋もれてセンサ出力を検知できなかった。そのため本研究では、糸の数を増やして織り込むことで必要量の静電容量を確保できるようにした。

＜布状フォースプレートの構造＞

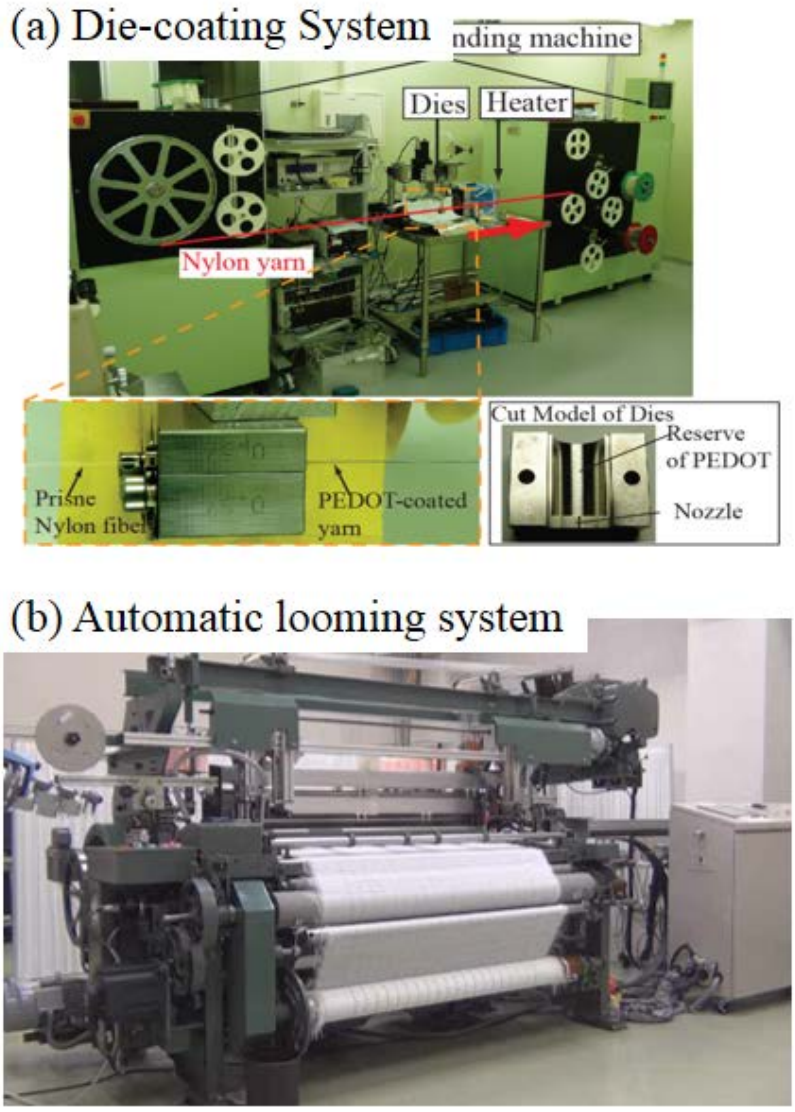
布状フォースセンサプレートの構造は図③-(5)-2-(c).1 のようにナイロン繊維上に電極膜と絶縁膜を形成したセンサ糸を縦糸、横糸として製織したものである。センサ糸同士の交点ではキャパシタが形成されており、これが容量変化型のセンサとして機能する。交点に圧力が加わると接触面積が変わり、結果として圧力に応じてキャパシタの容量が変化する。すなわち、容量変化を測定することにより、機能性繊維同士の交点の圧力計測が可能である。この時、静電容量は糸の太さに比例するため、径 0.5 ㎜ の糸により作られる静電容量は 0.1−0.3 pF と小さい。通常の静電容量計測 LSI は 1pF 程度であるためその程度の大きさの容量まで大きくする必要がある。本研究では、糸そのものを太くすると布状センサそのものが厚くなりフレキシブル性が下がるという問題があるため、本数を増やすことで問題を解決した。実際には糸を 1−6 本並べて形成される静電容量を計測した。

製造プロセスは、図③-(5)-2-(c)-1.1 に示される。(1)において、まずナイロンファイバ上に導電性ポリマ PEDOT:PSS をダイコーティング法で製膜する。(2)で紫外線硬化樹脂をコーティングし、絶縁層とする。(3)でコーティングした糸を横糸として織り込む。織り込んだ布を上下 2 枚重ねることで圧力センサアレイとした。今回の試作には直径 470μm のナイロン繊維を用いた。製造装置は図③-(5)-2-(c)-1.2 に示される。(a)は、ダイコーティング装置であり、両側にあるボビンが付いている装置が搬送装置である。ボビンに力センサが付いており、繊維のテンションをコントロールしながら搬送することができる。搬送速度は 2-50 m/min でコントロールすることができる。中心にダイスが設置されている。ダイスは溶液を溜める部分とノズルの部分からなり、左の穴から入れて、溶液を溜めた部分を通り、ノズル部分からウェット状態の PEDOT:PSS が形成されたナイロン繊維が出てくる。ウェット状態の PEDOT:PSS の膜厚は、ノズルの径とナイロン繊維径の差により決まる。今回

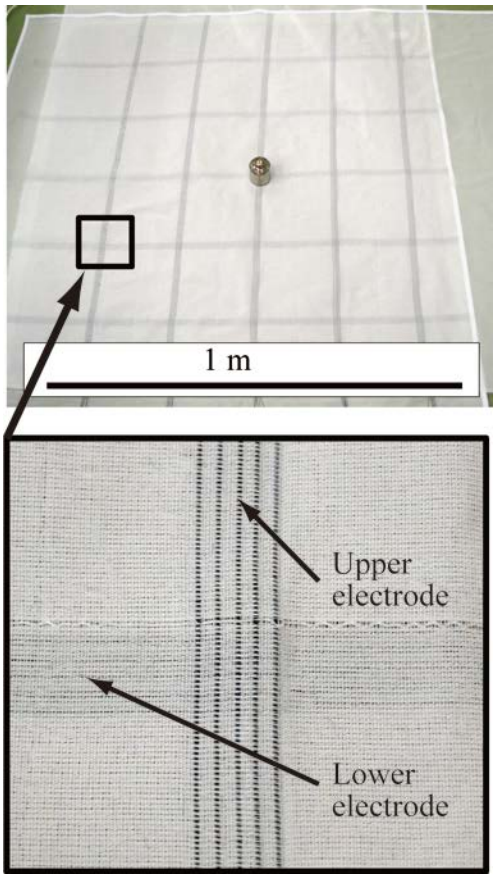
はナイロンファイバの径 470 μm より大きい 540 μm のものを用いた。ダイスの横には管状の赤外線加熱炉が設置されており、ウェット状態の PEDOT:PSS が乾燥される。(b)には、自動織機が示される。自動織機には、横糸は通常のポリエステルファイバを織り込む横入れ装置だけでなく、センサ糸を織り込む横入れ装置を備えている。センサ糸を織り込む横入れ装置には、センサ糸の電極材料を摩擦や静電気から守るため、糸をつかんで縦糸と接触しないように平行に横入れするリニアアクチュエータを用いた。これらの機能によりタッチセンサを布に織り込むことが可能となった。試作した布状フォースセンサプレートを図③-(5)-2-(c)-1.3 に示す。図のように、1m × 1m でありメートル級で大面積なものが形成できていることが分かる。また、センサ糸同士が交差する部分が圧力センサになっている。織り込む糸の数が増えることにより、糸同士の間の静電容量を増やしている。



図③-(5)-2-(c)-1.1　提案する布状フォースセンサプレートの製作方法



図③-(5)-2-(c)-1.2　提案する布状フォースセンサプレートの製作装置

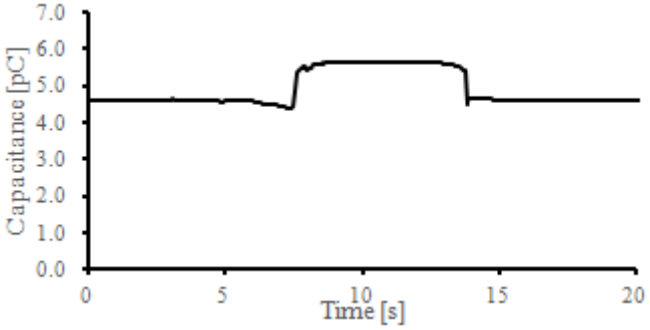


図③-(5)-2-(c)-1.3　試作した布状フォースセンサプレート

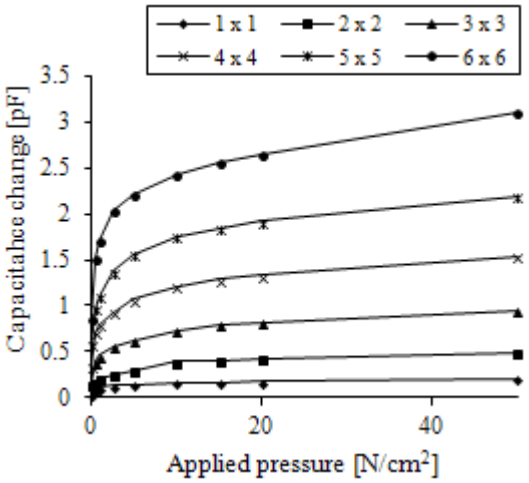
＜布状フォースセンサプレートの圧力センサとしての評価＞

試作した布状フォースセンサプレートが圧力に対する感度を計測した。人が歩く場合の足底の圧力は大体数 N/cm^{2}程度である。人が静止した時の平均の圧力は 5.7N/cm^{2}程度であり、1-50 N/cm^{2}の圧力をフォースゲージ(Aikoh Engineering、 Model FTN1-13A)を用いてかけた場合のセンサ部分の静電容量の変化をキャパシタンスメータ(Hioki 3506 C HiTESTER)を用いて検出した。図③-(5)-2-(c)-1.4 は、センサで押した時の静電容量の過渡応答である。ファイバ状のセンサ電極が圧力によりつぶれる形で変形することで、接触面積が増え静電容量が増える。逆に、圧力が取り除かれると接触面積が小さくなり静電容量が減少して元に戻ることが分かる。図③-(5)-2-(c)-1.5 は、センサ糸の本数を変えた場合を変えて圧力を加えた場合の静電容量の変化を計測したものである。従来研究では、センサ布そのものが小さくノイズが少ないということと、検知にもインピーダンスアナライザーなどの高価な計測装置を用いているため小さな信号でも計測できることからセンサの出力静電容量が小さくてもよかった。ただし、市販の静電容量検知 LSI などを用いて圧力センサを構築する場合には出力静電容量が 1 pF 以上程度必要である。本研究では、センサの本

数を増やすことで静電容量を大きくする方法を試みた。図③-(5)-2-(c)-1.5 に示すように、人の静止圧力 5.7 N/cm^{2}程度で押した場合に 1 pF 以上になるものは、センサ糸が 5 本程度以上であることが分かった。



図③-(5)-2-(c)-1.4　押した場合の静電容量変化

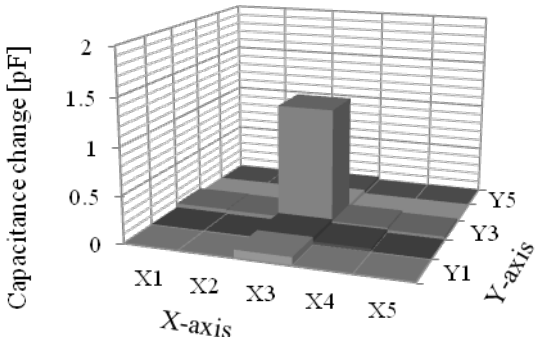


図③-(5)-2-(c)-1.5　センサ糸の数を変えた時の感度変化

また、センサの感度としては、0-5 N/cm^{2}程度は静電容量の変化が大きく 5-20 N/cm^2 程度では緩やかに静電容量が増加し、20-50 N/cm^{2}程度では大きな変化はない。そのため、高い感度で圧力センサとして用いる場合には、0-5 N/cm^{2}程度であり、5-50 N/cm^{2}程度の圧力では低い感度の用途に用いることができる。また、本数が増えることで、面積は 2 乗で増えている。ただし、センサ糸は平面ではなく糸状の円筒形であるため理論的な増加の半分程度となっている。この結果から、センサ部分に必要とされる糸が 5 本ずつであることが分かった。センサ部分に 5 本ずつで 20 cm おきにセンサを入れた布状圧力センサアレイを試作し、評価を行った。

図③-(5)-2-(c)-1.6 は、横方向を X 軸、縦方向を Y 軸としてセンサ糸の番号を X1-5、Y1-5

として、真ん中の部分を 5 N/cm^{2}で押した時の静電容量変化を Z 軸方向にとったものである。押したところは、X3、Y3 の場所のように 1.25 pF の増加であり、他の部分は 0.1 pF 以下の増加であり変化していないことが分かる。そのため、押した部分を検知できることが分かった。センサの静電容量の変化が 1 pF 以上であるので、市販の静電容量検知 LSI を用いることができるため、低コストなセンサシステムを構築することが可能となる。

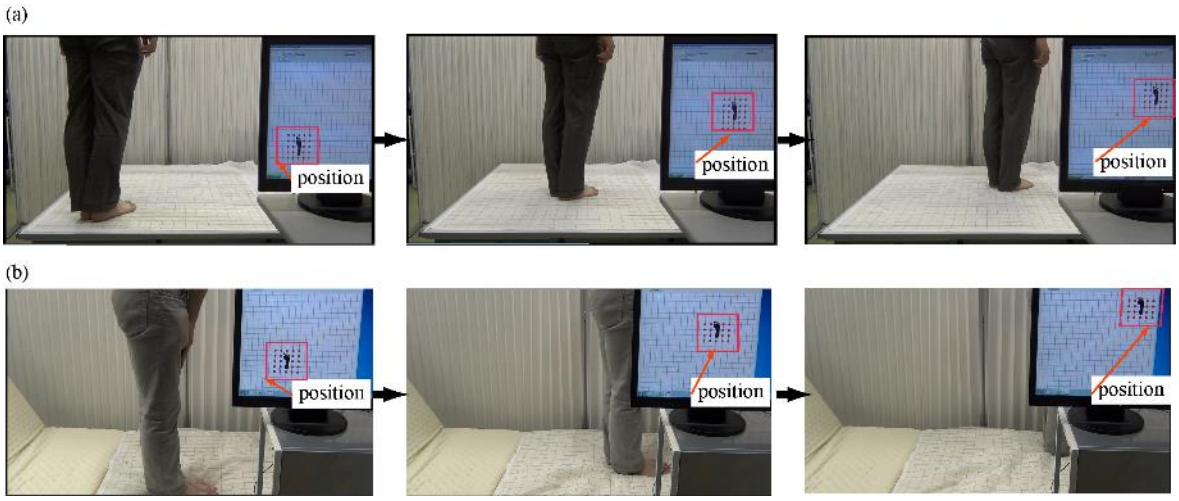


図③-(5)-2-(c)-1.6　X3、Y3 の交差する場所に 5N/cm^{2}の圧力をかけた場合の各センサの応答

③-(5)-2-(c)-2　人の歩行計測

有機導電性ポリマを用いたメートル級の大面積布状センサを用いて人の歩行が検知できるかについての評価を行った。本実験では、人の場所検知などを行うのに、メートル級の布状センサの効果があるのかについて評価を行い、静電容量型布状タッチセンサを用いた。特に、介護用を考えた場合にはセンサが平面の床だけではなく、ベッド上にシーツとして敷いて用いる場合がある。この場合には、センサが変形するため曲げなどがかかっても壊れないことや､曲げた状態でも人を検知できるのかを確認する必要がある｡そのため、センサ布を平面の床とベッドの上においてセンサで人の位置を検知できるかを検証した。

センサ布の X、Y 軸の計測された静電容量をＵＳＢ経由でＰＣに送り、触った部分を画面に表示した。このとき、押した部分は、他の部分に比べて静電容量の増え方が大きい。この増えることを検出する。X、Y 両方で増え方が大きい部分について、触ったとして赤い点で表示している。値が少しずつ異なるため、大きさは、X、Y の線毎に人が触った時の変化量を最大にして 256 の値に変換した。この変換されたデータの中で、人が踏んだ時の変化に相当する閾値を設定し、それ以上の値が検知されたときに人が踏んでいるとして画面に表示を行った｡図③-(5)-2-(c)-1.7(a)のように､平面で硬い床の場合には人がどこにいるのかを検知することができることが分かった。人の場所は画面で赤い点であらわされている。さらに、(b)のようにベッドのような柔らかいものの上にセンサを置いた場合にも、センサは変形をするが破壊せず人を検知できることが分かった。



図③-(5)-2-(c)-1.7　X3、Y3 の交差する場所に 5N/cm^{2}の圧力をかけた場合の各センサの応答

③-(5)-2-(d)　歩行機能高精度計測技術の開発

【株式会社日立製作所】

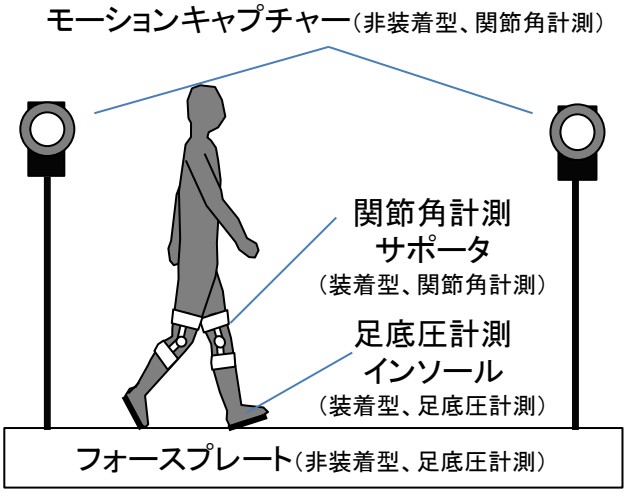
本開発では、関節角計測サポータ、足底圧計測インソール及び市販のフォースプレート、モーションキャプチャを用いて歩行計測システムを試作し、歩行計測実験により歩行機能の数値化を行った。

③-(5)-2-(d)-1　歩行計測システムの構成

歩行計測とは、歩行状態を数値化することである。歩行を数値化するために重要な歩行状態として、股関節、ひざ関節、足関節などの関節の位置、あるいはこれら関節の角度を時系列情報で記述する外見上の歩行状態と、重心移動などに関連する足底圧の分布状態が考えられる。本開発では、外見上の歩行状態を検討するために、関節角計測サポータとモーションキャプチャを用いた計測システムを、重心移動を検討するために足底圧計測インソールとフォースプレートを用いた計測システムの開発を行った。

図③-(5)-2-(d)-1.1 に、本開発で試作した歩行計測システムの概略図を示す。関節角計測サポータとモーションキャプチャを用いて左右の股関節及びひざ関節の関節角時系列変化を、フォースプレートと足底圧計測インソールを用いて足底圧分布の時系列変化をそれぞれ同時に計測することができる。

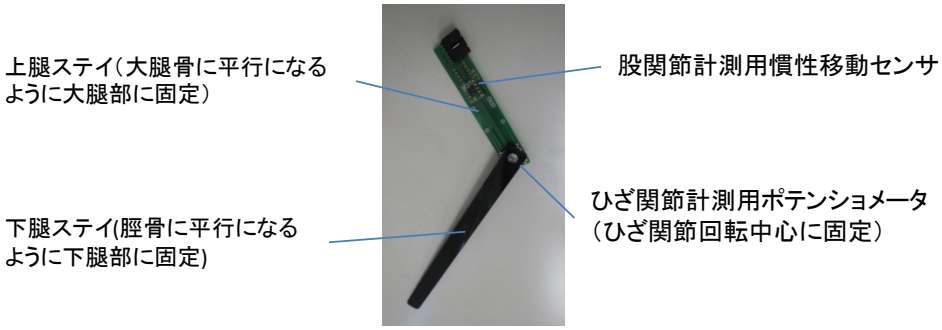
モーションキャプチャは、被験者の歩行方向に対して右側と右斜め後方の２箇所に動画撮影カメラを設置して、歩行時の動画を同時に撮影し、撮影後、撮影した動画を用いてモーションキャプチャソフトを用いて、被験者の関節位置の３次元情報を算出した。歩行時の動画はソニー社製のデジタルカメラ NEX-5RL を用いて、フレームレート 60fps、動画



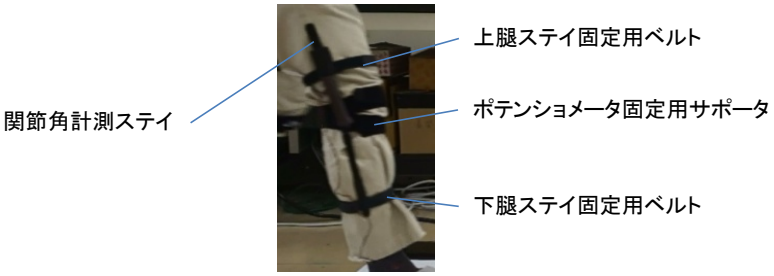
図③-(5)-2-(d)-1.1　歩行計測システム概略図

サイズ 1920×1080 で撮影した。モーションキャプチャソフトにはマーカレスで動きを検出できる L.A.B 社製 PV Studio Character を使用し、ソフトウェアに附属された人体骨格モデルで肩、手首、腰、ひざ、足の関節位置をトレースすることにより、各関節位置の 3 次元情報を算出した。

開発した関節角計測サポータを図③-(5)-2-(d)-1.2 に示す。関節角計測サポータは大腿部に固定する上腿ステイ、下腿部に固定する下腿ステイ、それらを結合する 1 つのジョイントからなるヒンジ構造の関節角計測ステイ、それを固定するサポータ、ベルトで構成される。上腿ステイには慣性移動センサ（InvenSence 社 MPU-9150）が接続され、上腿ステイの傾きから股関節角度を算出する。ジョイント部にはポテンショメータ（アルプス社 RDC803001A）が取り付けられ、上腿ステイと下腿ステイの開閉角によりひざ関節角を算出する。上腿ステイ、下腿ステイはそれぞれベルトで上腿及び、下腿に固定されている。また、ポテンショメータが取り付けられたジョイント部は、ポテンショメータ固定用サポータによりひざ関節の回転中心部分に固定されている。ひざ関節角はポテンショメータで計測するために、1 自由度の回転に限られる。実際のひざ関節は角度により回転中心が移動するボールジョイントであるが、歩行時の膝関節の屈曲角度は最大でも 60 度程度であり、回転中心は固定された 1 自由度の回転で近似しても、歩行状態は再現できると考えられる。



（ａ）関節角計測ステイ



（ｂ）サポータにて下肢に取り付け時

図③-(5)-2-(d)-1.2　関節角計測サポータ

フォースプレートを用いた足底圧計測システムを図③-(5)-2-(d)-1.3 に示す。フォースプレートにはシロク社製 LL600x600（サイズ 60cm × 60cm）を使用した。LL600x600 は 10mm 間隔で感圧センサがマトリクス状に配置されたもので、本開発ではこれを 3 枚並べ、60cm × 180cm のフォースプレートにして使用した。各フォースプレートの各センサの値は USB 経由で計測時間情報とともに計測用 PC に送られ、記録される。



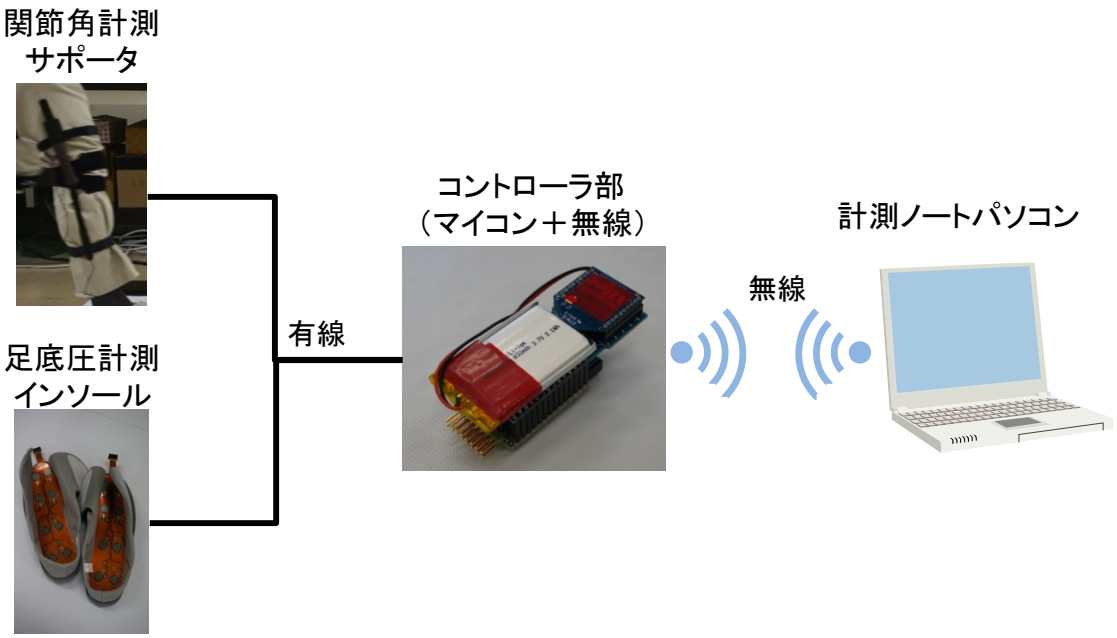
図③-(5)-2-(d)-1.3　足底圧計測用フォースプレート

足底圧計測インソールを図③-(5)-2-(d)-1.4 に示す。足底圧計測インソールは 8 つの圧力センサーを配置した靴のインソール形状のフレキシブル基板であり、サンダルにセットして歩行時の足底圧を計測する。圧力センサーには 0.1kg から 10kg まで計測できる小型で平坦な Interlink 社製 FSR402 を使用した。



図③-(5)-2-(d)-1.4　足底圧計インソール

以上のべた計測システムのうち、関節角計測サポータと足底圧計測インソールは装着型であり、両装置の信号はマイコンと無線機（Digi 社　Xbee ）を用いて 30Hz でサンプリングし、PC に送信される(図③-(5)-2-(d)-1.5)。



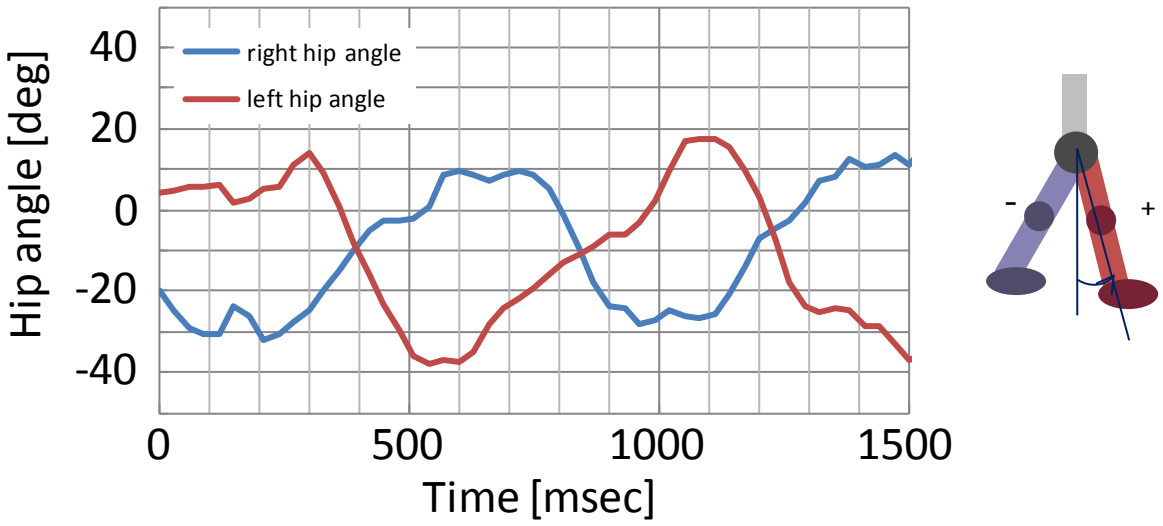
図③-(5)-2-(d)-1.5　装着型歩行計測システム

③-(5)-2-(d)-2　歩行計測システムの検討

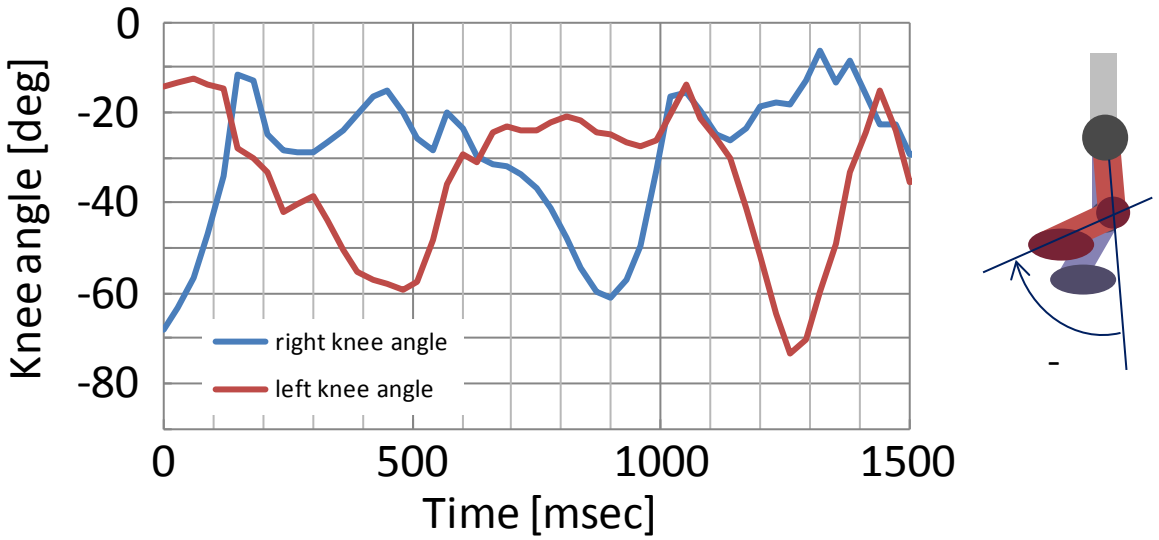
図③-(5)-2-(d)-2.1 にモーションキャプチャにより算出した歩行時の股関節角とひざ関節角の時系列変化の典型例を示す。股関節は地面に対して垂直が 0 度で前方に振り上げる方向をプラス、後方に曲げる方向をマイナスとした。ひざ関節はまっすぐに伸ばしているときを 0 度とし、後方に曲げる方向をマイナスとした。股関節は前方約 10 度から後方約 40 度まで、ひざ関節は前方約-10 度から後方約-70 度までそれぞれ左右交互に動いていることを計測できていることがわかる。しかしながら、本方式のモーションキャプチャでは正確に歩行を再現しようとすると、1 歩行の解析に 8-10 時間程度の解析時間が必要であることがわかった。

図③-(5)-2-(d)-2.2 に関節角計測サポータにより算出した歩行時の股関節角とひざ関節角の時系列変化の典型例を示す。モーションキャプチャにより算出したものと同様に、股関節、ひざ関節ともにそれぞれ左右交互に動いていることを計測できていることがわかる。1 歩行あたりの解析時間は数分程度であり、モーションキャプチャとくらべ短時間で解析が可能であることがわかった。

それぞれの計測システムの誤差要因は、今回採用したモーションキャプチャにおいては、2 つの画像からの 3 次元座標系定義するキャリブレーションの精度と、キャプチャ時の各マーカ設定精度による。一方、関節角サポータは、ひざ関節部に固定する際の位置合わせの精度によると考えられる。

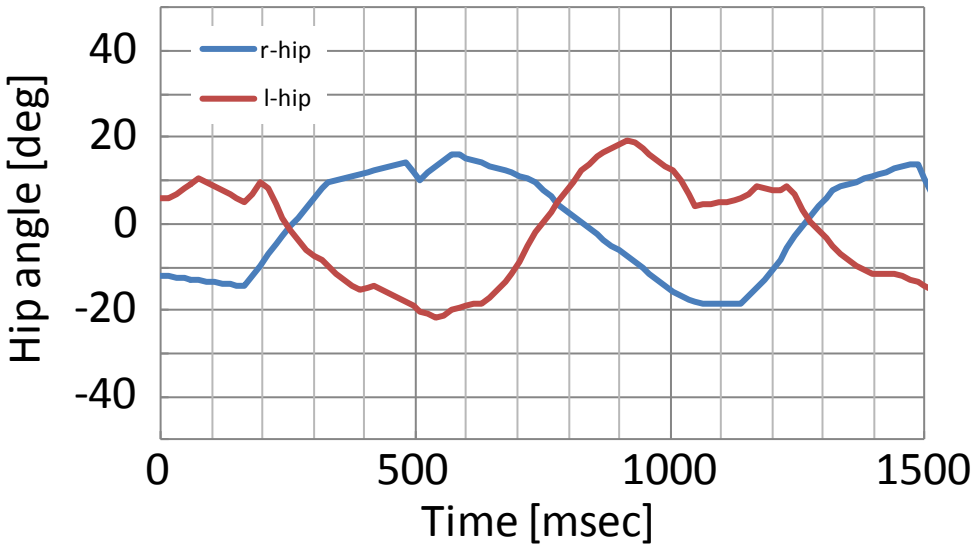


（ａ）股関節角

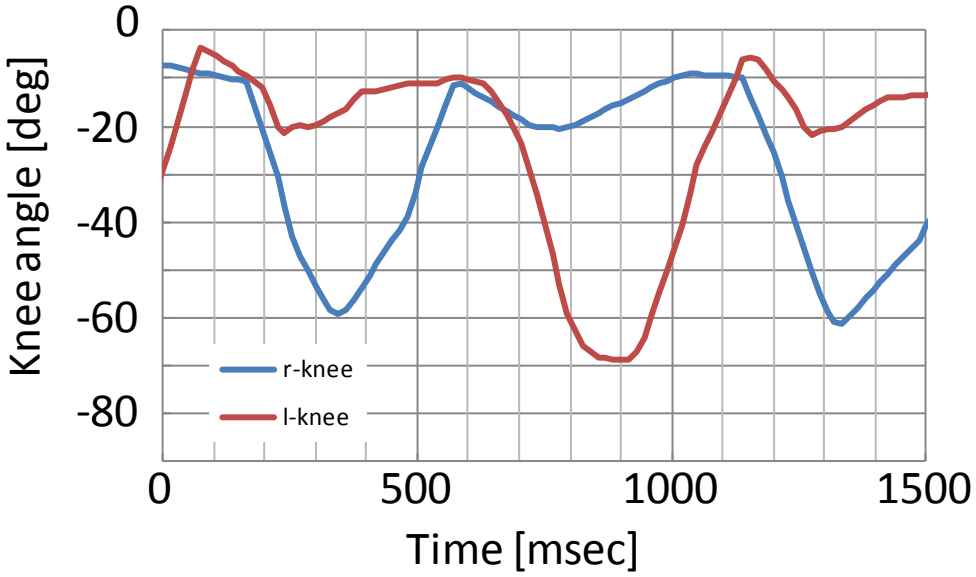


（ｂ）ひざ関節角

図③-(5)-2-(d)-2.1 モーションキャプチャから求めた股関節角とひざ関節角の時系列変化



（ａ）股関節角

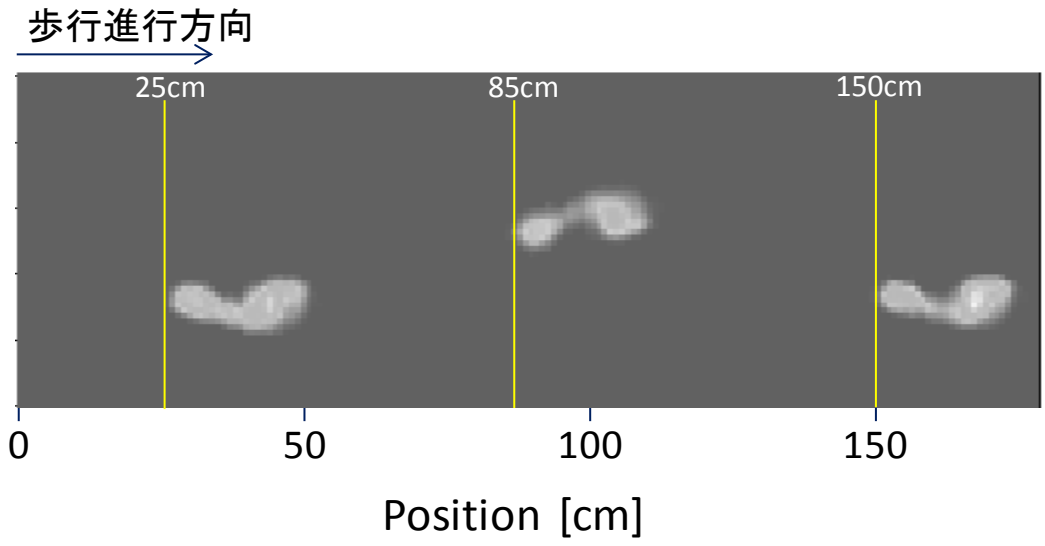


（ｂ）ひざ関節角

図③-(5)-2-(d)-2.2　関節角計測サポータから求めた股関節角及びひざ関節角の時系列変化

図③-(5)-2-(d)-2.3 にフォースプレート上を左から右に歩行した際に計測された圧力の 2 次元分布を示す。フォースプレートでの圧力計測では、サンプリング時間毎にすべての圧力センサの値を記録している（フレーム）。この図は歩行時に計測されたフレームを合計したもので、計測した時間内でのすべての圧力の和である。この図で色が白くなるにつれ高い圧力がかかっている。フォースプレート上の歩行はフォースプレートの端から約 25cm の位置に右足の踵が接地し、その後、右足がつま先にかけて接地し、次に約 85 cm の位置

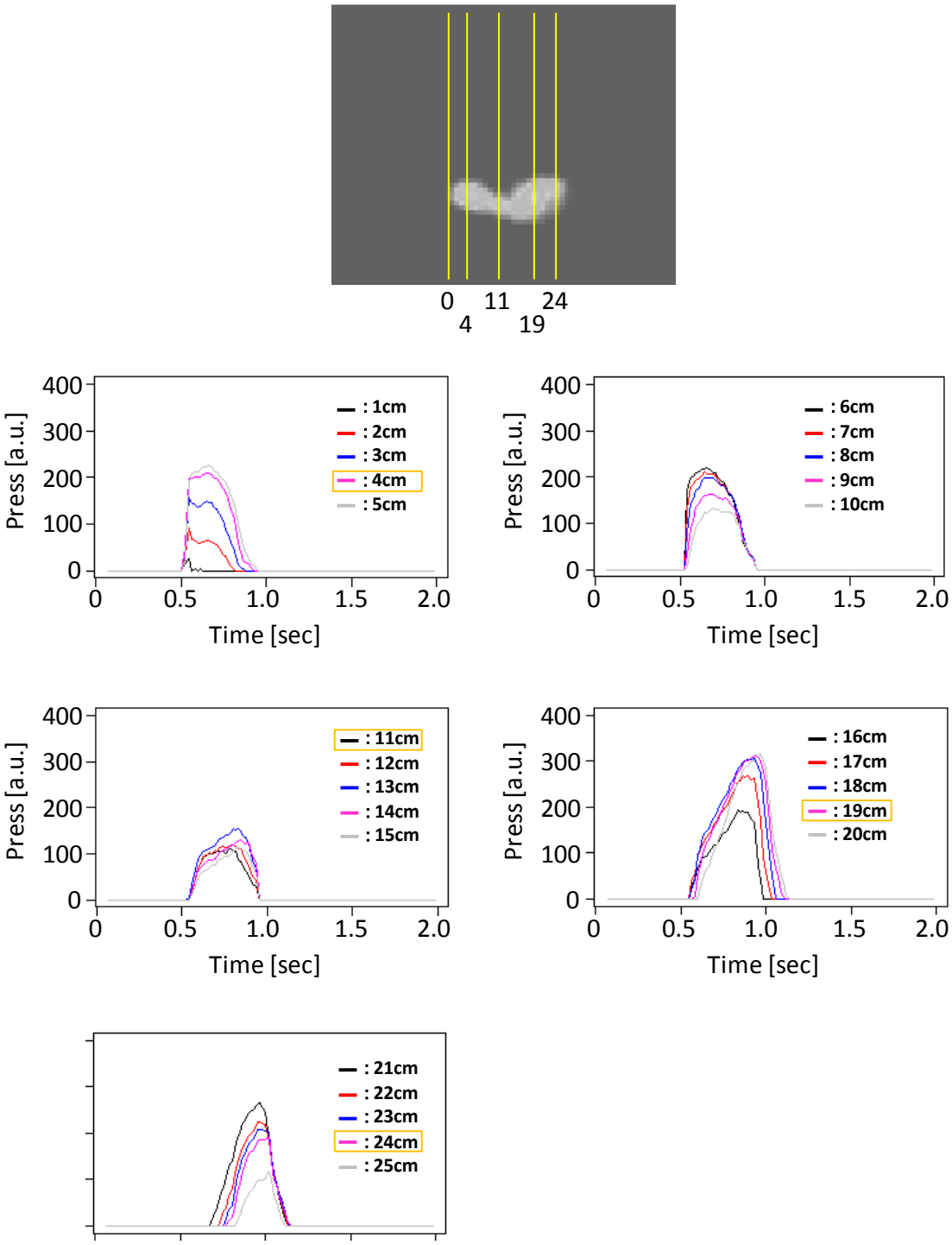
に右足の踵が接地し、再び右足の踵が約 150cm 付近に設置した様子が分かる。



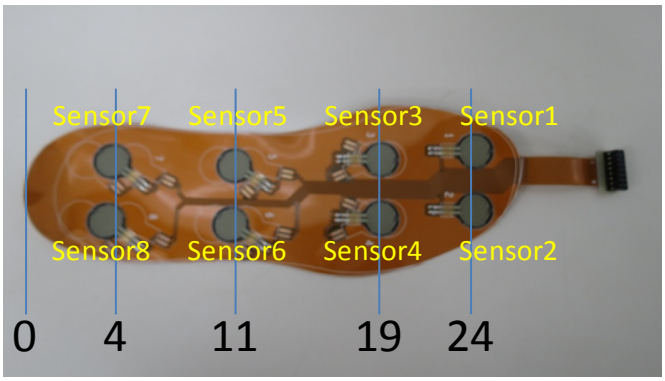
図③-(5)-2-(d)-2.3　フォースプレートで計測した歩行時の時間積分圧力分布

踵が設置した位置を 0 とし、そこから 1cm ずつ右にずらした位置での圧力の時系列変化を図③-(5)-2-(d)-2.4 に示す。踵からつま先まで 26cm の大きさの足では、4 - 8cm、11 -15 cm、17 -20 cm の 3 つの位置に特徴的な形状が現れることがわかる。4 - 8cm に現れるピークは接地時の衝撃、17 - 20 cm に現れるピークは地面を蹴る際の衝撃に起因した圧力ピークであると考えられる。

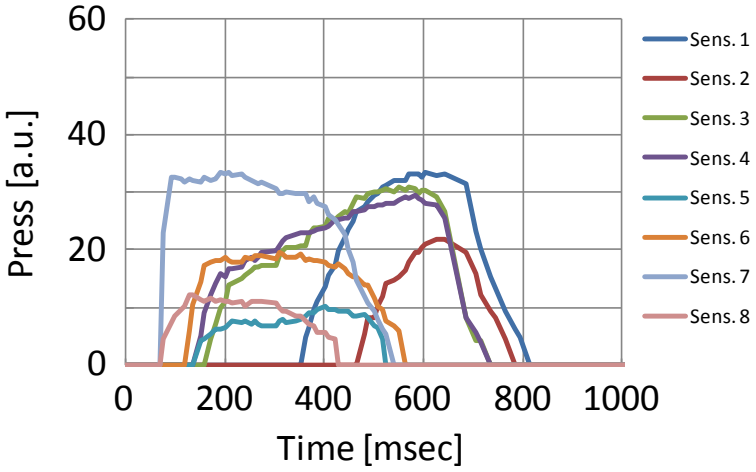
これらのことを考慮し、26cm のサイズの足に適した 28cm の足底圧計測インソールでは、これら 3 つの位置に足指先の接地情報を合わせた 4 cm、 11cm、 19cm、 24cm の位置に、足幅方向の分布を考慮してそれぞれ 2 個ずつ圧力センサを配置した(図③-(5)-2-(d)-2.5)。これらの位置はインソールサイズにより等尺に拡大、縮小して配置した。



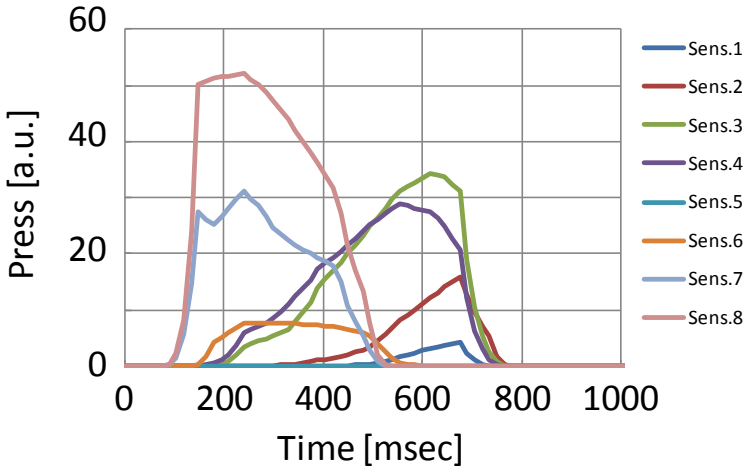
図③-(5)-2-(d)-2.4　歩行計測システムでの足裏圧測定結果



図③-(5)-2-(d)-2.5　足底圧計測インソールのセンサー位置



（a）フォースプレート



（ｂ）足底圧計測インソール

図③-(5)-2-(d)-2.6　足底圧の時系列変化

図③-(5)-2-(d)-2.5 で述べた 8 個の位置で計測された圧力の時系列変化を図③-(5)-2-(d)-2.6 に示す。(a)はフォースプレート、(b)は足底圧計測インソールから求めたものである。各センサでの接地時間（圧力印加開始時間）と離地時間（圧力印加終了時間）は類似しているが、各センサ間の圧力強度の相対値が異なるものがある。これは、靴の中の足底圧と靴の足底圧の違い及び、センサ位置のずれに起因すると考えられる。

以上述べてきたように、本開発で試作した歩行計測システムは、いずれも歩行状態を計測可能であることがわかった。次に、歩行状態の時系列変化より抽出可能な、歩行パラメータについて検討する。

表③-(5)-2-(d)-2.1 に歩行状態を表す歩行パラメータと本開発で試作した歩行計測システムによる抽出の可否を示す。モーションキャプチャとフォースプレートを組み合わせることで、すべての歩行パラメータが抽出可能であるが、システムが高価になり、解析に時間がかかる。また、接地するにために広い面積が必要となる。それに対し、安価で短時間で解析できる関節角計測サポータと足底圧計測インソールを用いても、Heel Contact をセンサ 7、8 接地時間、Foot Flat をセンサ 3、4 接地時間、Heel Off をセンサ 7、8 離地時間、Toe Off をセンサ 1、2 離地時間で近似することで、ストライド幅以外ほぼすべての歩行パラメータを抽出することが可能である。また、表中の“○”は計測可能を示しており、“△”は、付加条件を加えることで計算により導出可能であることを示している。

表③-(5)-2-(d)-2.1　歩行パラメータ一覧

		非装着型		装着型	
		モーションキャプチャ	フォースプレート	関節角計測サポータ	足底圧計測インソール
ストライド	周期	○	○	○	○
	距離	○	○	△	
	幅	○	○		
左右ステップ	周期	○	○	○	○
	距離	○	○	△	
両脚支持期		○	○		○
単脚支持期		○	○		○
Heel Contact	時間		○	○	○
	股関節角	○		○	
	ひざ関節角	○		○	
	足関節角	○		○	
	足底圧		○		○
Foot	時間		○	○	○

Flat	股関節角	○		○	
	ひざ関節角	○		○	
	足関節角	○		○	
	足底圧		○		○
Mid Stance	時間		○	○	○
	股関節角	○		○	
	ひざ関節角	○		○	
	足関節角	○		○	
	足底圧		○		○
Heel Off	時間		○	○	○
	股関節角	○		○	
	ひざ関節角	○		○	
	足関節角	○		○	
	足底圧		○		○
Toe Off	時間			○	○
	股関節角		○	○	
	ひざ関節角	○		○	
	足関節角	○		○	
	足底圧		○	○	
股関節	最大角度	○		○	
	最大角度の時間	○		○	
	最小角度	○		○	
	最長角度の時間	○		○	
ひざ関節	最大角度	○		○	
	最大角度の時間	○		○	
	最小角度	○		○	
	最長角度の時間	○		○	
足関節	最大角度	○		○	
	最大角度の時間	○		○	
	最小角度	○		○	
	最長角度の時間	○		○	
重心移動軌跡	最大横移動量		○		○
	最小横移動量		○		○
	横移動範囲		○		○
	最大前後移動量		○		○
	最小前後移動量		○		○
	横前後移動範囲		○		○

以上を踏まえ、本開発で試作した歩行計測システムの歩行リハビリトレーニングへの適

用について検討する。表③-(5)-2-(d)-2.2 に歩行計測システムの特徴をまとめた。

表③-(5)-2-(d)-2.2　フォースプレートで計測した歩行時の時間積分圧力分布

		計測項目	解析の容易性	計測場所条件	価格	被験者の負担
非装着型	モーションキャプチャ（市販品） フォースプレート（市販品）	関節角 足底圧 位置(距離)	事前処理が必要	専用スペース必要	数百万円以上	装着不要
装着型	関節角計測サポータ 足底圧計測インソール	関節角 足底圧	直接解析可能	専用スペース不要	数万円（材料費）	装着要

モーションキャプチャ（市販品）：動画より解析するため、被験者の負荷が少ない。本開発ではマーカレスで解析できるモーションキャプチャソフトを使用したため、計測のために特別な機器を装着する必要がないため、被験者の負荷は特に少ない。しかし、画像から正確に動きをトレースしようとすると、トレースの処理に時間がかかる。また、複数の場所に設置したカメラで動画を撮影する必要があり、広い空間が必要である。モーションキャプチャには、今回使用したマーカレスで解析できるもののほかに、身体の関節に赤外線マーカをつけて計測するものも市販されている。このタイプのモーションキャプチャでは解析時間が短縮され、精度も向上するが、専用のスーツなどを着る必要があり被験者に負荷が大きく、価格も数千万円と高価である。

フォースプレート（市販品）：歩行する床すべてにマトリクス状のセンサが配置されているため、どこをどのように歩行したかという位置精度は高い。さらに、計測環境に埋め込まれているため被験者の負荷は非常に少ない。しかしその一方、センサ数が多く高価である。また、すべてのセンサを解析するには時間がかかるため、短時間で解析するための工夫が必要である。

関節角計測サポータ：関節角のみを直接計測しているために、歩行解析が容易である。関節角度の計測には携帯電話や家電などの用途に普及しているセンサを使用するため低価格でシステムを構築できる。計測場所も限定されず、廊下や階段、屋外でも計測することができる。センサを装着して計測するため原理的には精度が高いが、歩行することによるステイと肢体とのずれが生じる場合がある。特に激しく動く場合は顕著である。また、センサを装着して計測するため被験者の負荷は生じる。

足底圧計測インソール：靴の中に入れて使用するため、必要な足底圧のみを直接計測しているために、歩行解析が容易である。関節角計測サポータと同様に、計測場所が限定さ

れず、廊下や階段、屋外でも計測することができ、センサを装着して計測するため精度が高い。しかし、足底圧計測インソールを挿入した靴やサンダルと履く必要があり、被験者の負荷は生じる。

次にリハビリへの応用について検討する。先に上げた平成22年国民生活基本調査（厚生労働省）からも分かるように、脳血管疾患（脳卒中）は要介護・要支援になる原因として、加齢による衰弱、関節疾患、転倒・骨折を含む運動器疾患に次いで21.5%と高い。この脳血管疾患の後遺症の一つに片麻痺（運動麻痺）があり、ここでは脳血管疾患などにより発症した片麻痺の歩行リハビリトレーニングでの使用について検討する。

片麻痺は、最初、半身が麻痺状態になり、その後麻痺側に痙縮が現れる。痙縮とは筋肉が常に緊張して突っ張った状態となる現象である。

片麻痺リハビリトレーニングには発症直後の急性期病院でのリハビリ、回復期病院でのリハビリ、生活期の介護施設、自宅でのリハビリがある。急性期、回復期のリハビリは医療保険適用範囲内であり、施設が整備された病院で医師の管理下で行われる。しかし、生活期の介護施設、自宅でのリハビリは、急性期、回復期のリハビリと異なり医師の管理が遠く、回復速度も遅いため、リハビリトレーニングを継続するモチベーションを維持することが難しいことが問題となっている。

リハビリトレーニングを継続するモチベーションを維持するためには、トレーニング効果により回復していることが実感できることと、そのための適切なトレーニングメニュの作成が有効と考えられる。回復速度が遅い生活期で、回復していることを実感するには、動作、動作結果のわかりやすい可視化が効果的である。可視化には動きの数値化、指標化が必要となり、本開発で検討した歩行計測システムが利用できる可能性が高い。特に、装着型の歩行計測システムは、低価格でどの回復ステージでも使用できるため、同一の指標で比較・評価できるため、モチベーション維持に有効と考えられる。介護施設や自宅で使用する場合、低価格性、取り扱いの容易性、使用者に対する低負荷性が必要となる。そのため、非装着型のモーションキャプチャとフォースプレートでは低価格化が、装着型の関節角計測サポータと足底圧計測インソールでは小型軽量化による使用者に対する低負荷化が必要であろう。

③-(5)-2-(d)-3　装着型歩行計測システムによる歩行データ解析

本開発では片麻痺のリハビリテーショントレーニングの検討に、図③-(5)-2-(d)-3.1 に示す(株)特殊衣料から販売されている体験セットを使用した。この体験セットでは、腰回りに装着する腰サポータと片ひじに装着するひじサポータで片手の痙縮を、片足に装着する下肢装具で、足の痙縮を模擬できる。この体験セットを装着した疑似的な片麻痺歩行と装

着をしない通常歩行を、本開発で試作した装着型歩行計測システムにて計測し検討をおこなった。



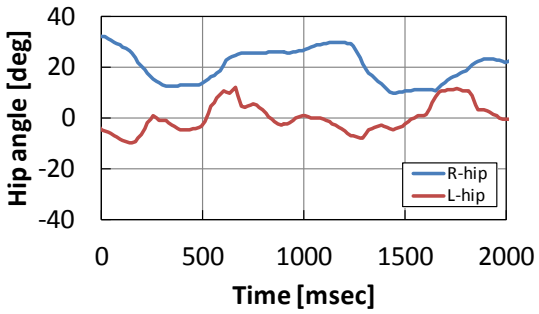
図③-(5)-2-(d)-3.1　片麻痺疑似体験セット装着図

図③-(5)-2-(d)-3.2 に通常歩行と片麻痺体験セットを装着した場合の股関節角、膝関節角、合計足底圧の時系列変化を示す。

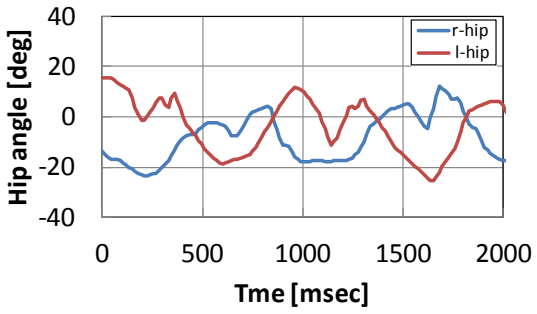
片麻痺セットを装着した歩行の場合、右ひざ関節の時系列変化に、通常の歩行で現れる大きなピークが観測できない。また、左足のセンサ 1 からセンサ 8 までの合計足底圧の時系列変化に、通常の歩行で踵接地と蹴りだしの際に現れる 2 つのはっきりしたピークが観測できず、平坦になっていることがわかる。

表③-(5)-2-(d)-3.1 に計測した歩行データより抽出した歩行パラメータの一部を示す。

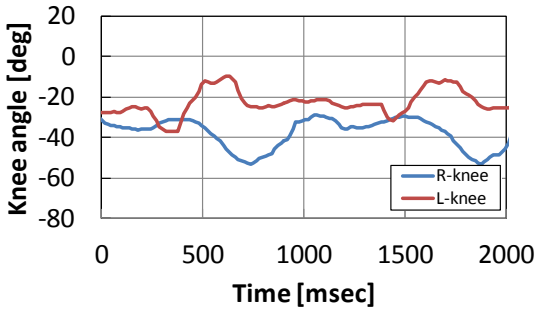
片麻痺セットを装着することにより、右足が固定されるため、「左右の歩行周期がずれること」、「右足の関節角の可動域が狭くなること」が予想される。これらの現象は、歩行パラメータでは、いずれの被験者でも片麻痺セットを装着することにより両足支持期が長くなり、右足の股関節、膝関節の可動角度域が減少することということが確認できた。関節可動角度域の減少は固定された右足だけでなく左足にも見られる。これは、動きが不自由な足をかばって歩くことの影響のためと考えられる。あくまで体験セットでの結果ではあるが、本開発で試作した歩行計測システムを用いれば、このような健脚の歩行状態の変化も含めて片麻痺患者の歩行状態を数値化できる可能が高い。



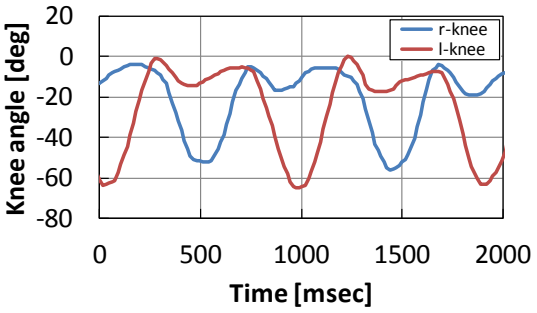
（ａ － １）股関節角（片マヒセット歩行）



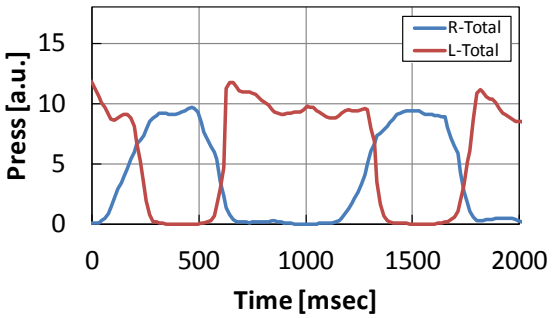
（ｂ － １）股関節角（通常歩行）



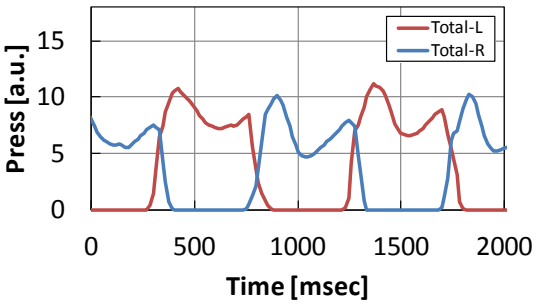
（ａ － ２）ひざ関節角（片マヒセット歩行）



（ｂ － ２）ひざ関節角（通常歩行）



（ａ － ３）合計足底圧（片マヒセット歩行）



（ｂ － ３）合計足底圧（通常歩行）

図③-(5)-2-(d)-3.2　片麻痺体験セット装着歩行と通常歩行の時系列変化

表③-(5)-2-(d)-3.1　関節角に関する歩行パラメータ計測結果

被験者				A				B				C			
片麻痺体験セット				体験セット無し		体験セット装着		体験セット無し		体験セット装着		体験セット無し		体験セット装着	
平均・標準偏差				平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
ストライド周期(ms)				1,019.2	83.7	1,265.0	99.0	987.9	71.5	1,163.3	55.9	968.4	48.1	1,316.8	238.9
ストライド周期に対する時間比	単脚支持期		右	0.365	0.068	0.155	0.017	0.575	0.400	0.258	0.041	0.394	0.015	0.221	0.168
			左	0.364	0.070	0.753	0.042	0.350	0.043	0.681	0.027	0.370	0.016	0.797	0.080
	両脚支持期			0.272	0.133	0.094	0.032	0.075	0.373	0.060	0.033	0.235	0.024	−0.020	0.118
	左右ステップ比			0.516	0.039	0.228	0.027	0.533	0.026	0.297	0.057	0.515	0.017	0.093	0.525
	股関節	最大角度	右	0.458	0.354	0.808	0.100	0.503	0.453	0.809	0.093	0.561	0.377	0.727	0.136
			左	0.296	0.109	0.263	0.085	0.475	0.128	0.350	0.068	0.255	0.034	0.299	0.271
		最小角度	右	0.444	0.089	0.226	0.246	0.452	0.112	0.216	0.165	0.423	0.051	0.362	0.349
			左	0.843	0.192	0.827	0.256	0.921	0.051	0.908	0.028	0.882	0.055	0.810	0.088
	ひざ関節	最大角度	右	0.693	0.281	0.218	0.219	0.691	0.284	0.716	0.185	0.637	0.294	0.627	0.278
			左	0.626	0.200	0.615	0.236	0.562	0.232	0.332	0.131	0.846	0.143	0.463	0.274
		最小角度	右	0.733	0.050	0.601	0.100	0.708	0.168	0.496	0.056	0.724	0.032	0.432	0.082
			左	0.252	0.064	0.098	0.021	0.267	0.030	0.127	0.169	0.246	0.026	0.176	0.306
関節角度	股関節	最大角度	右	18.931	7.707	21.334	2.805	15.629	9.136	31.506	3.100	20.310	6.196	34.866	3.149
			左	19.534	7.364	15.154	7.765	15.095	7.253	17.939	4.897	23.707	3.151	9.514	3.107
		最小角度	右	−18.133	3.708	1.521	4.577	−14.643	6.094	10.543	4.000	−19.130	3.412	21.927	4.310
			左	−19.145	4.088	−11.206	4.435	−11.805	6.020	−13.147	2.349	−17.413	3.312	−14.809	1.538
		可動域	右	37.064	5.466	19.813	3.691	30.272	6.468	20.964	4.203	39.440	4.507	12.939	4.208
			左	38.679	6.517	26.360	7.285	26.899	5.203	31.087	5.557	41.120	3.970	24.323	3.345
	ひざ関節	最大角度	右	−5.816	2.262	−28.932	3.930	−8.692	2.068	−24.284	4.437	−0.072	3.100	−37.925	4.210
			左	−8.758	2.589	−10.086	2.886	−10.236	2.535	−10.752	2.405	−13.091	1.318	−2.221	2.287
		最小角度	右	−63.581	2.818	−45.830	2.825	−51.925	9.562	−56.009	1.944	−64.219	2.129	−64.766	3.732
			左	−70.433	4.844	−37.832	4.234	−63.279	4.795	−38.976	3.285	−72.693	1.801	−37.432	3.479
		可動域	右	57.765	3.496	16.898	3.551	43.234	9.745	31.725	4.977	64.147	3.957	26.842	5.720
			左	61.675	6.369	27.747	4.659	53.043	6.102	28.224	4.427	59.603	2.533	35.211	3.881

③-(5)-2-(d)-4　リハビリ以外のアプリケーションの検討（高齢者の日常行動見守り）

本開発の歩行計測システムのリハビリ以外の応用先として、「高齢者の日常行動見守り」、「スポーツ教育」、「ゲーム」などが考えられる。ここでは、「高齢者の日常行動見守り」への適用の可能性について検討する。

一般に高齢者見守りサービスには表③-(5)-2-(d)-4.1 に示すものなどが知られている。

表③-(5)-2-(d)-4.1

サービス名（提供会社）	内容
みまもりホットライン （象印マホービン(株)）	電気ポットの利用状況を定期的に連絡する。
Mi-Look （KDDI）	歩数計内蔵の携帯端末で、定期的に歩数を連絡する。 非常時スイッチにより緊急メールを送信する。
見守り情報配信サービス （ALSOK）	自宅に設置した各種センサ（赤外線センサなど）の情報を定期的に連絡する。緊急スイッチが押されたときに連絡する。

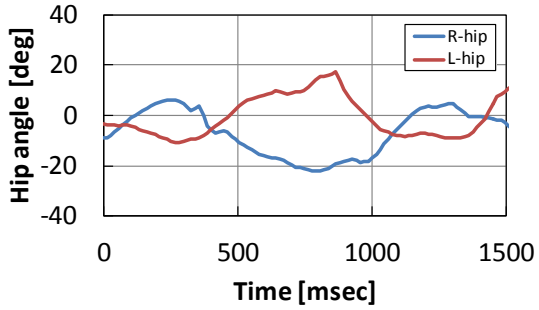
これらのサービスは基本的に現在の状態を見守るサービスであり、高齢者の急激な健康変化を検知するサービスやその検知結果により対応するサービスである。そのため、日常の生活に起こっているわずかな健康変化を把握するまでには至っていない。健康が急激に悪くなる前に健康変化を捉え、アラームをあげることができれば、適切な処置を行うことにより健康状態の悪化を妨げる、あるいは遅らせることができるだろう。このことは、個人の健康寿命の延伸のみならず、医療保険費の削減にも貢献できると考えられる。本開発の歩行計測システムは、歩行状態を常にモニタできるため、このような健康状態悪化の検知に使用できる可能性がある。そこで、本開発の歩行計測システムにて（擬似）高齢者歩行を計測し、通常歩行との差異を検出できるかを検討した。本開発では図③-(5)-2-(d)-4.1に示す高齢者体験セット（(株)特殊衣料社製）を利用することで、健常者が高齢者歩行を疑似的に実現した。この高齢者体験セットはすべてを装着すると、加齢による運動機能の衰えが進んだ状態を再現できる。ここでは、運動機能の劣化の初期に現れる関節痛による歩行状態の検出を目的として、高齢者体験セットのうち、上肢に負荷をかけるためのウエイト付き上着と、片ひじと片膝に装着して関節の屈曲を制限するひじサポート及びひざサポータと、視野の狭窄を模擬するゴーグルを装着して歩行計測を行い、歩行パラメータの変化を検討した。



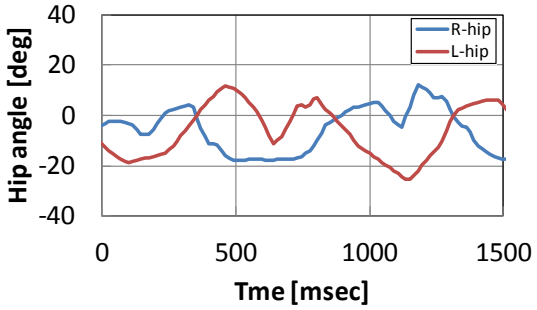
図③-(5)-2-(d)-4.1　高齢者体験セット装着図

図③-(5)-2-(d)-4.2 に通常歩行と高齢者体験セットを装着した場合の股関節角、膝関節角、合計足底圧の時系列変化を示す。高齢者セットを装着した歩行の場合、関節の動きを制限するひざサポータを装着しているため、右ひざ関節の時系列変化に、通常歩行で見られるような鋭いピークが観測できない。また、左右の足ともセンサ 1 からセンサ 8 までの合計

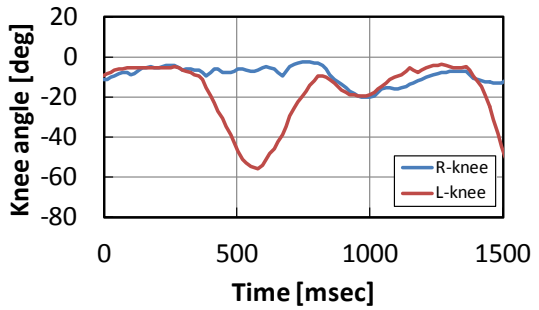
足底圧の時系列変化に、通常の方向で踵接地時と蹴りだしの際のはっきりした 2 つのピークが観測できず、踵接地時のピークが広がり、蹴りだしの際のピークと重なっていることが分かる。



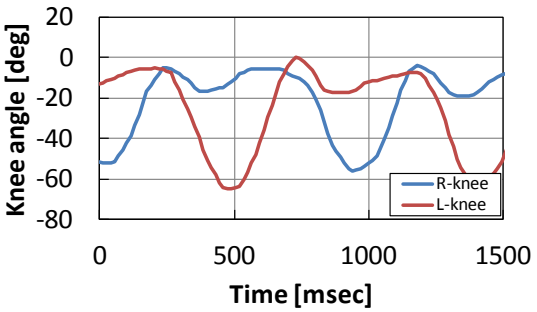
（ａ － １）股関節角（高齢者セット歩行）



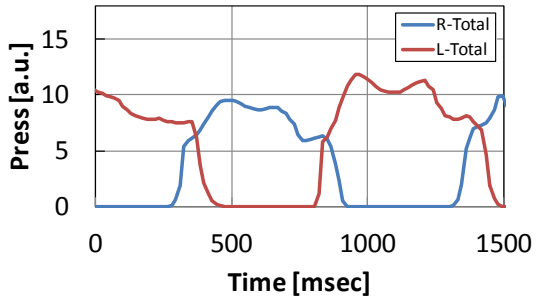
（ｂ － １）股関節角（通常歩行）



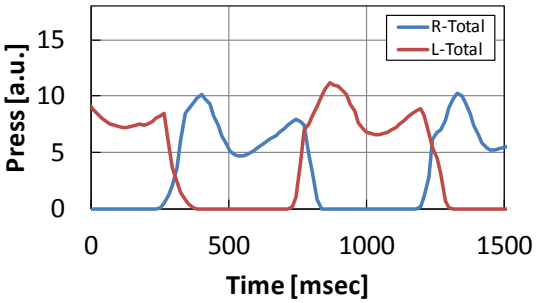
（ａ － ２）ひざ関節角（高齢者セット歩行）



（ｂ － ２）ひざ関節角（通常歩行）



（ａ － ３）合計足底圧（高齢者セット歩行）



（ｂ － ３）合計足底圧（通常歩行）

図③-(5)-2-(d)-4.2　高齢者体験セット装着歩行と通常歩行の時系列変化

次に、表③-(5)-2-(d)-4.2 と表③-(5)-2-(d)-4.3 に計測した歩行データより抽出した歩行パラメータの一部を示す。高齢者セットを装着することにより、ひざサポータにより右ひざ関節角の可動域が小さくなるため、「右足の股間関節の可動域が狭くなること」が予想される。この現象は、歩行パラメータでは、いずれの被験者でも高齢者セットを装着すること

により、左右の歩行周期の変化は少ないが、両足支持期が長くなり、右の股関節の可動領域は減少することに表れている。また、センサ１からセンサ８の合計足底圧の最大圧力時を示す時間についても、通常歩行よりも長くなることが確認できた。これらは、ひざ関節が屈曲しないため足をかばって歩くことの影響のためと考えられる。あくまで体験セットの結果ではあるが、本開発で試作した歩行計測システムを用いればこのように加齢に伴う歩行の変化を検出できる可能性が高い。

表③-(5)-2-(d)-4.2　関節角に関する歩行パラメータ測定結果

被験者				A				B				C			
高齢者体験セット				体験セット無し		体験セット装着		体験セット無し		体験セット装着		体験セット無し		体験セット装着	
平均・標準偏差				平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
ストライド周期(ms)				1156.3	62.5	1208.8	96.6	1156.4	98.7	1416.0	89.4	1178.2	94.0	1252.1	294.9
ストライド周期に対する時間比	単脚支持期		右	0.272	0.201	0.262	0.156	0.398	0.044	0.333	0.029	0.395	0.035	0.372	0.041
			左	0.262	0.194	0.288	0.174	0.377	0.071	0.366	0.034	0.381	0.041	0.389	0.045
	両脚支持期			0.133	0.098	0.201	0.124	0.226	0.037	0.301	0.038	0.224	0.042	0.239	0.039
	左右ステップ比			0.519	0.012	0.499	0.033	0.526	0.053	0.485	0.027	0.522	0.034	0.568	0.250
	股関節	最大角度	右	0.416	0.445	0.716	0.377	0.765	0.024	0.896	0.213	0.667	0.322	0.860	0.270
			左	0.246	0.082	0.443	0.120	0.282	0.047	0.467	0.059	0.450	0.111	0.453	0.079
		最小角度	右	0.379	0.096	0.471	0.101	0.403	0.082	0.646	0.039	0.477	0.079	0.597	0.078
			左	0.828	0.265	0.526	0.492	0.792	0.280	0.702	0.435	0.776	0.335	0.886	0.182
	ひざ関節	最大角度	右	0.368	0.194	0.341	0.143	0.323	0.255	0.564	0.313	0.761	0.291	0.338	0.083
			左	0.563	0.148	0.907	0.051	0.879	0.093	0.682	0.418	0.553	0.139	0.703	0.285
		最小角度	右	0.710	0.023	0.644	0.062	0.759	0.039	0.622	0.194	0.717	0.042	0.625	0.050
			左	0.230	0.020	0.251	0.025	0.267	0.034	0.256	0.028	0.231	0.039	0.226	0.098
関節角度	股関節	最大角度	右	26.537	3.726	16.413	2.487	21.336	3.524	10.356	2.100	19.733	5.470	11.819	2.732
			左	14.963	1.364	12.294	3.019	17.698	1.836	19.053	3.560	16.317	6.066	17.129	4.695
		最小角度	右	−1.933	3.097	−6.271	2.428	−10.523	2.304	−22.840	4.565	−16.790	4.459	−18.567	3.345
			左	−13.347	2.509	−10.458	1.266	−14.020	2.242	−9.932	2.043	−17.288	2.787	−15.879	3.092
		可動域	右	28.470	2.213	22.684	2.828	31.858	2.954	33.197	4.007	36.523	5.907	30.386	2.697
			左	28.310	2.873	22.753	2.827	31.719	3.133	28.985	3.807	33.605	6.511	33.008	4.963
	ひざ関節	最大角度	右	−24.461	1.647	−25.960	1.633	−5.552	2.739	−7.167	4.431	−1.831	2.754	−6.857	1.506
			左	−10.311	2.756	−15.988	1.556	−7.439	4.408	−15.702	2.483	−9.669	3.426	−11.138	1.794
		最小角度	右	−82.620	1.324	−46.573	2.413	−78.879	5.564	−22.183	6.835	−70.465	9.668	−22.776	2.795
			左	−74.598	2.946	−69.307	4.147	−78.056	4.030	−72.382	4.474	−67.988	5.858	−66.462	8.298
		可動域	右	58.159	2.129	20.613	3.019	73.327	6.423	15.146	5.688	68.635	10.636	15.918	2.234
			左	64.287	4.769	53.319	4.028	70.790	3.029	56.680	5.287	58.319	5.386	55.323	7.866

表③-(5)-2-(d)-4.3　足底圧に関する歩行パラメータ測定結果

被験者			A				B				C			
高齢者体験セット			体験セット無し		体験セット装着		体験セット無し		体験セット装着		体験セット無し		体験セット装着	
平均・標準偏差			平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
ストライド接地時間に対する時間比	最大圧力時間	右センサー1	0.871	0.017	0.848	0.038	0.821	0.057	0.810	0.066	0.824	0.041	0.817	0.030
		右センサー2	0.846	0.020	0.855	0.036	0.798	0.051	0.793	0.059	0.831	0.119	0.839	0.045
		右センサー3	0.741	0.030	0.775	0.063	0.685	0.057	0.728	0.066	0.768	0.072	0.775	0.059
		右センサー4	0.814	0.020	0.816	0.068	0.671	0.055	0.718	0.057	0.691	0.102	0.721	0.050
		右センサー5	0.614	0.046	0.657	0.078	0.521	0.076	0.536	0.116	–	–	0.512	0.065
		右センサー6	0.631	0.046	0.685	0.084	0.423	0.105	0.486	0.112	0.428	0.131	0.415	0.120
		右センサー7	0.170	0.060	0.227	0.094	0.198	0.137	0.212	0.189	0.189	0.119	0.156	0.043
		右センサー8	0.188	0.027	0.245	0.090	0.214	0.107	0.209	0.154	0.191	0.125	0.153	0.060
		左センサー1	0.838	0.028	0.812	0.052	0.819	0.086	0.821	0.066	0.806	0.147	0.846	0.076
		左センサー2	0.851	0.029	0.859	0.017	0.828	0.064	0.831	0.066	0.745	0.158	0.806	0.052
		左センサー3	0.793	0.025	0.819	0.032	0.689	0.066	0.761	0.058	0.683	0.098	0.691	0.078
		左センサー4	0.738	0.035	0.736	0.141	0.675	0.063	0.724	0.070	0.690	0.140	0.739	0.066
		左センサー5	0.523	0.185	0.660	0.089	0.417	0.093	0.487	0.075	0.334	0.151	0.374	0.106
		左センサー6	0.590	0.042	0.643	0.058	0.529	0.046	0.538	0.094	0.400	0.143	0.492	0.067
		左センサー7	0.172	0.072	0.167	0.035	0.211	0.077	0.227	0.042	0.118	0.159	0.110	0.061
		左センサー8	0.189	0.059	0.180	0.082	0.170	0.103	0.174	0.102	0.191	0.171	0.140	0.048
		右合計	0.370	0.241	0.470	0.164	0.483	0.183	0.563	0.142	0.379	0.277	0.305	0.192
		左合計	0.360	0.248	0.489	0.151	0.307	0.091	0.452	0.088	0.316	0.209	0.379	0.132

③-(5)-3　ユーザ機関による成果の有用性の検証

本研究で得られた成果に対してユーザ機関である国立障害者リハビリテーションセンター研究所の井上先生へのヒアリングを実施し以下のご意見を頂いた。

(a)筋量センサ

・生活期のリハビリトレーニングのメニュ作りにおいて理学療法的に筋量が注目されているが、現状では評価が不十分であるため、トレーニングメニュを作成するための指標としてのアプリケーションに有用である。

・筋量センサを椅子などに組込み、介護予防教室などに出てこない高齢者に対する見守りとしてのアプリケーションへの展開に期待する。それにより、寝たきりや要介護リスクの高い高齢者をスクリーニングする上で有用である。

(b)モーションセンサ

・赤外光やミリ波、可視光などを全てシリコンベースで形成できることから、タブレットなどへの組込みも今後の展開として考えられる。現在、介護予防教室などではタブレットのカメラで歩行動作を撮り、見た目で評価する方法が最近良く用いられている。そこに本モーションセンサが組込まれることで、見た目の評価に定量的なデータが加わり、評価精度が格段に向上するため有用なアプリケーションになり得る。

(c) フォースセンサプレート

・車椅子患者の褥瘡リスクの低減には安価な座圧センサの普及が必要で、本提案で開発している安価なフォースセンサは座圧センサの普及及び褥瘡患者の低減に非常に有用なデバイスとなる。

・現在普及している座圧センサはほとんどが海外製品のため、安価で一定の性能のある座圧センサが実現すれば、日本経済の活性化という面でも有用となり得る。

(d)歩行機能高精度計測技術

・装着型センサが装具に入れられれば日常のデータ収集や在宅でのリハビリに展開でき有用となる。

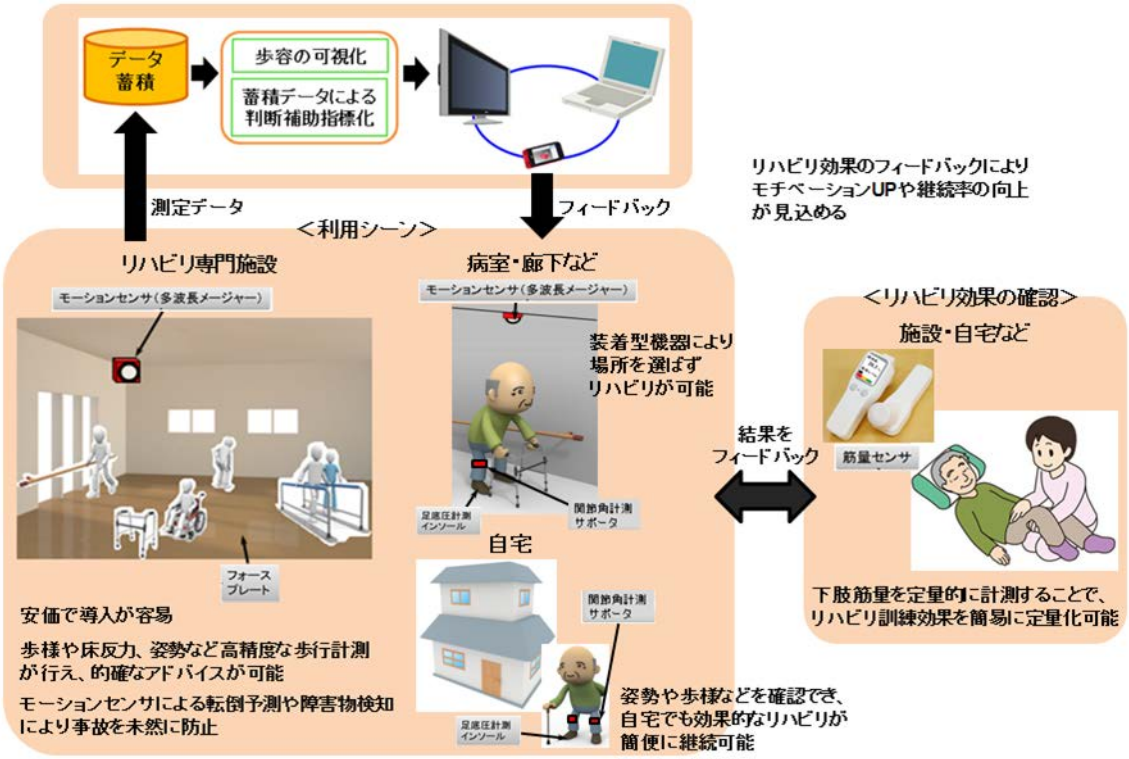
・歩幅や歩行速度まで計測が可能になると、簡易計測装置として病院にも普及すると考えられ、今まで定性的にリハビリ評価を行っていたものが定量的に評価できるようになり、リハビリ効率の向上に対して有用なデバイスとなり得る。

以上より、生活行動見守りセンサシステム全体としては、これらのセンサシステムが施設と在宅を含めてリハビリや日常に入っていくことで様々な環境下でデータ取得が可能になり、そのデータに基づいて療法士が介入できるようになる。このため、療法士が介入できていなかった隙間が埋められ、リハビリ効率や回復曲線の向上に役に立つ。実際に高齢者福祉施設では、現状高齢者に療法士が十分に介入ができていない場合もある。このよう

な場合においても本システムの効果が期待できる。

③-(5)-4　まとめ

本提案で目指すシステムは、リハビリ専門施設や在宅などの環境や患者の容態に合わせて適切なセンサシステムを用いることで最適なリハビリテーションメニュを提供することである（図③-(5)-4.1）。また、リハビリテーションの効果を定量化し患者本人へフィードバックすることでモチベーションの向上・維持を図り、能動的にリハビリテーションを継続させることで回復曲線の向上を目指す。



図③-(5)-4.1　目指すべき高精度歩行計測システム像

このためには以下の項目を満たす必要がある。

・加齢による運動機能の衰えた患者及び、脳血管疾患による運動機能障害者の両方に適応するシステム

・安価で容易に導入でき、一般人でも計測可能な簡易なセンサシステム

・本人へ計測データをフィードバックすることで、リハビリのモチベーション維持ができるシステム

・日常生活での計測データ蓄積が可能なシステム（予兆判断）

上記のシステムを目指すための課題としては、各センサの先導研究で得られた課題の検

討やアプリケーションに対する仕様及び性能の目標値の確立、センサモジュール・計測デバイス開発に加え、リハビリ評価方法の定量化・指標化及びフィードバック手法の確立が挙げられる。本先導研究では各センサシステムのコア技術もしくはその一部の検証が主な内容であったため､今後はセンサモジュール化や計測デバイス開発に着手する必要がある。さらに、計測デバイス開発後、リハビリ評価の定量化・指標化を目指し、各センサシステムにおいて臨床試験を実施し、収集したデータから定量的指標を作成する。

(a)筋量センサ

先導研究で得られたセンサ深度の向上や小型化をなどの課題に取り組む。また、本格研究ではハンディ型の計測デバイスの開発を行う。その後、開発した筋量評価デバイス及びMRI や CT などにより人を対象とした臨床試験を実施し、臨床データを収集する。臨床試験では先導研究で成果のあった筋肉率評価に対する精度検証に加え、筋萎縮に対する転倒リスクなどのサルコペニア診断指標やリハビリトレーニングメニュを作成する。さらに、「日本老年医学会」や「日本整形外科学会」などでの学会発表を通じ、作成した診断指標が一般的な基準として認知されるよう認知活動を行う。また、実用化に向けてスクリーニングから予防改善までを含めたシステム全体に関して、リハビリ専門病院や自治体などとの連携により医療費削減のモデルケースを作成する。（株式会社タニタ）

(b)モーションセンサ

モーションセンサの開発の先導研究として、シリコン基板上に形成可能な赤外ディテクタの機能検証を行った。

赤外共鳴アンテナパターンによる検知波長選択性を検証し、アンテナサイズとアンテナ間隔で検知波長は制御可能であることを明らかにした。また、Responsivity は波長が長波長化するに従い、小さくなる傾向を示した。これは、入射波長が長くなるにしたがい、光のエネルギが小さくなるため、仮に光エネルギがショットキーバリアより高くても、バリアを乗り越えうる自由電子の数が減少するからである。さらに、長波長化を狙うために、バリアハイトの低減化を今後は図っていく必要がある。

また、有機半導体ナノピラー構造を、その赤外共鳴アンテナ構造に適用し、その効果について検証を行った。n 型シリコン基板上に、自己成長的に有機半導体（銅フタロシアニン:CuPc 及び 3、4、9、10-ペリレンテトラカルボン酸二無水物:PTCDA）ナノピラーを形成し､その上に金属膜(金:Au)を 50nm 程度製膜することで､入射光源の波長が 1.2μm では、作製したセンサの感度は 14.3mA/W であった。これは、参照のセンサ（感度が 0.141[mA/W]）と比較して、100 倍程度の感度向上を示した。この理由は、有機半導体による共鳴アンテナによる光吸収の影響と電子障壁低下の可能性を示唆させるものであった。

一方、赤外共鳴アンテナを用いた受光デバイスの産業化を見極めるために、デバイスの

アレイ化を検討した。Si 基板にイオン注入することで n-ウェル構造を作り、素子間を分離する構造を試みた。ウェル分離した構造からの Al 電極との接合部分のドープ濃度は 10^{15} dose/cm^{2}に設計する必要性が示唆された。金アンテナと n 型シリコンとの接合におけるショットキーバリア構造においては、高いドープ濃度はリークパスを生み出すため、高感度な応答が阻害される要因となる。したがって、将来的な検出器のアレイ化においては、アンテナ構造部のドープ濃度と Al カソードのドープ濃度を別々に設定して製作を進める必要があることがわかった。

以上のことから、計画通り赤外共鳴アンテナを用いたディテクタの基本機能の検証は完了した。今後のモーションセンサの実用化に向けては、赤外ディテクタの感度を 100 倍の 1A/W とする高感度化、可視イメージャや測距センサとの一体化を推進する必要がある。(デンソー、オリンパス、東京大学、九州大学)

(c)フォースセンサプレート

用途としては、車いすの椅子の調整やトラックの座席の調整などをするために座圧を測るような座圧センサや、人がどこにいるかや姿勢をシーツからわかるためのロボテックベッド用のシーツ状圧力センサなどに高いニーズがある。これらの用途に用いるには、以下の３点の仕様を満たす必要があることが調査によりわかった。

１．　現在の 100 万円程度のセンサシステムを 10 万円程度と 1/10 程度の低コスト化が必要である。使用する場所は保健所や一般の事業所なので 100 万円もの高価では一般に導入しにくいためである。

２．　床との一体化、もしくはシーツとの一体化など用途に合わせた実装技術が必要である。人の歩行などを調べる場合には、床に敷いて用いるが介護者や患者が躓いたり滑ったりする問題があるため床との一体化が必要である。また、シーツとして用いる場合には薄くシーツと一体化できる技術が必要となる。

３．　衛生上の問題からセンサが洗濯できる必要がある。特にシーツとして用いる場合には、汚れがつくため洗濯して衛生を保つ必要がある。通常の電子デバイスでは必要とされない特性であるため今後解決すべき重要な問題である。

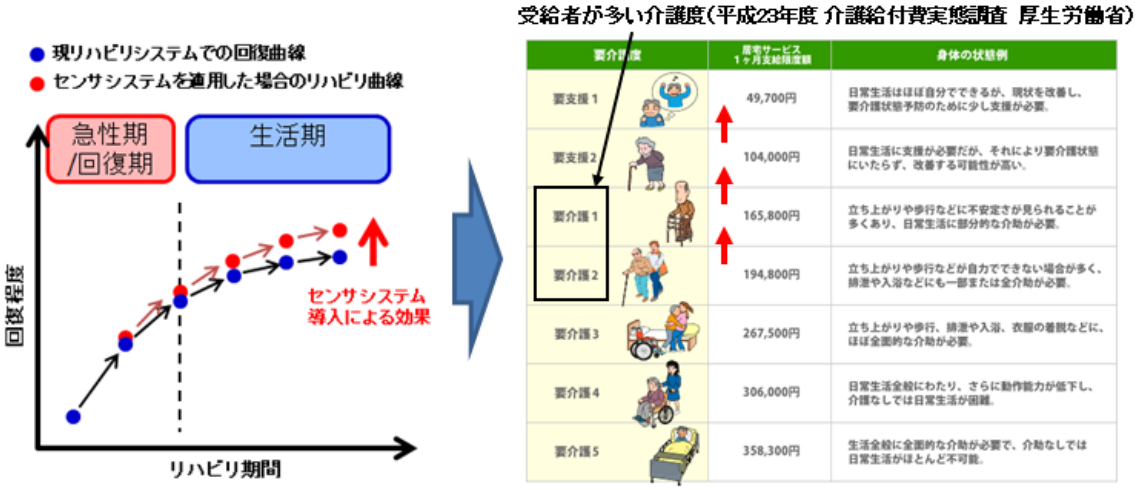
これらの要素をもつ大面積で低コストなフォースセンサプレートを実現できれば、介護施設や事業所への導入が期待される。（産総研）

(d)歩行機能高精度計測技術

先導研究で開発したシステムに利用している計測装置の小型・軽量化などの課題に取り組む。また、関係機関のヒアリングにより、装具を必要とする高齢者などの歩行機能を定量化するなどの様々な要求が明らかになったため、これらに対応した歩行計測システムを開発するという課題も残されている。一方、歩行リハビリトレーニング効果の可視化、リ

ハビリのモチベーション維持を実現するためのリハビリトレーニングサポートシステムに必要となる機能の検討を進める。個々の歩行状態を確認するための歩行計測データ蓄積活動や、転倒危険度などの判断補助となる指標導出の検討及び、その元となる歩行のデータベースの構築を行う。

本システムを適用した場合に期待できる効果としては、リハビリテーション施設における急性期・回復期から、家庭への復帰後における生活期に至るまで継続的なリハビリ訓練ができるため、患者の回復曲線の向上が見込める。その結果として、高齢者の健康寿命の延伸や QOL 向上につながり、患者の要介護度の低減、介護保険料の削減が期待できる（図③-(5)-4.2）。



図③-(5)-4.2　本システムを適用した場合に期待できる効果

また、高齢者の寝たきりや要介護リスクを低下させ、健康寿命の増進を目的としたこのシステムは介護者の負担軽減にもつながる。そのため、現在介護の主な担い手となっている女性や高齢者の社会参加・就労にもつながることから、経済の活性化にも貢献できる。

参考文献

1) 安部孝・福永哲夫、“日本人の体脂肪と筋肉分布”杏林書院、PP. 146-149、（平成7）

2) 福永哲夫：“筋委縮の予防とリハビリテーション”、医学のあゆみ、Vol.193、No.7、PP.617-624（平成 12 年）

3) S Gabriel、R W Lau and C Gabriel：“The dielectric properties of biological tissues: Ⅱ. Measurements in the frequency range 10 Hz of 20 GHz”、Phys、Med. Biol. 41 、2251-2269、（1996）

4) 安部孝・福永哲夫、“日本人の体脂肪と筋肉分布”、杏林書院、PP．146-149、(平成7)

5)（M. Hirade、 *et al.*、 *Applied Materials & Interfaces*、 Vol. 3、 pp. 80-83、 (2010）

6) C. Scales and P. Berini、 *IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS*、Vol. 46、pp.633-643、 (2010)

7) S.K. Chueng、 N.W. Chueng、 *Applied Physics Letters*、 Vol.85、 pp.85-87、 (1986)

③-(6)　健康医療としての全体システムの取り組み方向性に関する調査

【健康医療分野全メンバ】

③-(6)-1　調査の目的

到来する少子高齢化社会において、医療費絶対額の増大とともに、それを負担する若年層・就労人口比率の減少により、相対的負担も増大しており、これは大きな社会課題となっていることを踏まえ、①医療費を発生させないための健康維持・増進、そして、種々の病気の予防。②発病・罹患後の重症化（入院、休職）治療を進めるケア。③早期発見による入院日数の少ない非侵襲・低侵襲な治療。④適切なリハビリテーションと継続的予後管理による再発防止。⑤病後に安全で快適な行動補助システムによる社会生活をおくるが重要である。これを実現するためには、ひとりひとりの健康を継続的に見守るモニタリングシステム（知らぬ間にいつも「健診」を受けているようなシステム）や、自助努力（とくに生活習慣病では、自身の状況を知って自主的に生活習慣を改善してゆくことが基本）の促進・援助から、投薬管理など、モニタシステムを有効に活用し効果を上げてゆく、健康医療の社会制度・システム（ホームドクター制度、生涯共通電子カルテネットワークなど）が必須である。本分野の本格研究を計画するにあたって、これらを有機的に働かせ、我が国の健康医療を大きく変えていくことを想定した場合どのような全体システムを想定すべきか、今回の先導で取り組む 5 種類のセンサシステムの取り組み成果を踏まえながら、どのような横断的要素技術が必要か、などを、求めることが、本研究の目的である。想定された全体システムに新たに必要なセンサやそれに必要なシーズ技術の探索を含め、健康医療に求められる全体システムの方向性について、メンバ全員参加型で調査、議論、総合して明確化する取り組みを実施した。

③-(6)-2　調査の方法

今回の調査の取り組みは、従来想定していたあるべきセンサシステム像をベースに、

1）想定した全体システムでの、各テーマの「位置付け・ソリューション」をテーマ毎に調査検討
2）上記各テーマの検討結果及び内外動向、ヒアリングなどの調査を踏まえて、さらに全体システムをブラッシュアップ
3）上記、全体システムでの、各テーマとして必要な技術要素の分析、将来取組むべき技術要素を整理
4）各テーマ毎の技術分析結果を持ち寄り、全体としての総合的・横断的な技術開発を整理

と言う方法をとった。上記内容は、各月で実施した先導研究健康医療分野研究会で時間

をとって議論、整合、さらなる各テーマ持ち帰りによる深堀を実施した。

中間報告では、上記２）のブラッシュアップした全体システムについて報告することができた。

調査の過程では、5 つのセンサシステムを踏まえながら、ユーザ機関、

１）自治医科大学　内科学講座循環器内科学科部門

２）東京女子医大東医療センター時間医学老年総合科

３）国立障害者リハビリテーションセンター研究所福祉機器開発部

他、関連医師、及び、未病社会診断技術研究会講演会などへのヒアリング、デジタルヘルス展示会（於：パシフィコ横浜、H25.10）の参加を実施した。

これら内外の動向調査に加え、次に示す調査レポートを入手、健康機器を中心とした、市場動向を調査、俯瞰した。

１）パーソナルヘルスケア － ユビキタス、ウェアラブル医療に向けたエレクトロニクス研究最前線（NTS 社、2013/10 版）

２）デジタルソリューション市場の将来展望 2013（富士キメラ総研、2013 版）

３）セルフケア健康機器の市場実態と将来展望（矢野経済研究所、2014 版）

③-(6)-3　調査結果と考察

③-(6)-3-1　全体システム方向性イメージの構築

今回の先導研究③健康医療分野で想定した各センサシステムに関する考え方は、

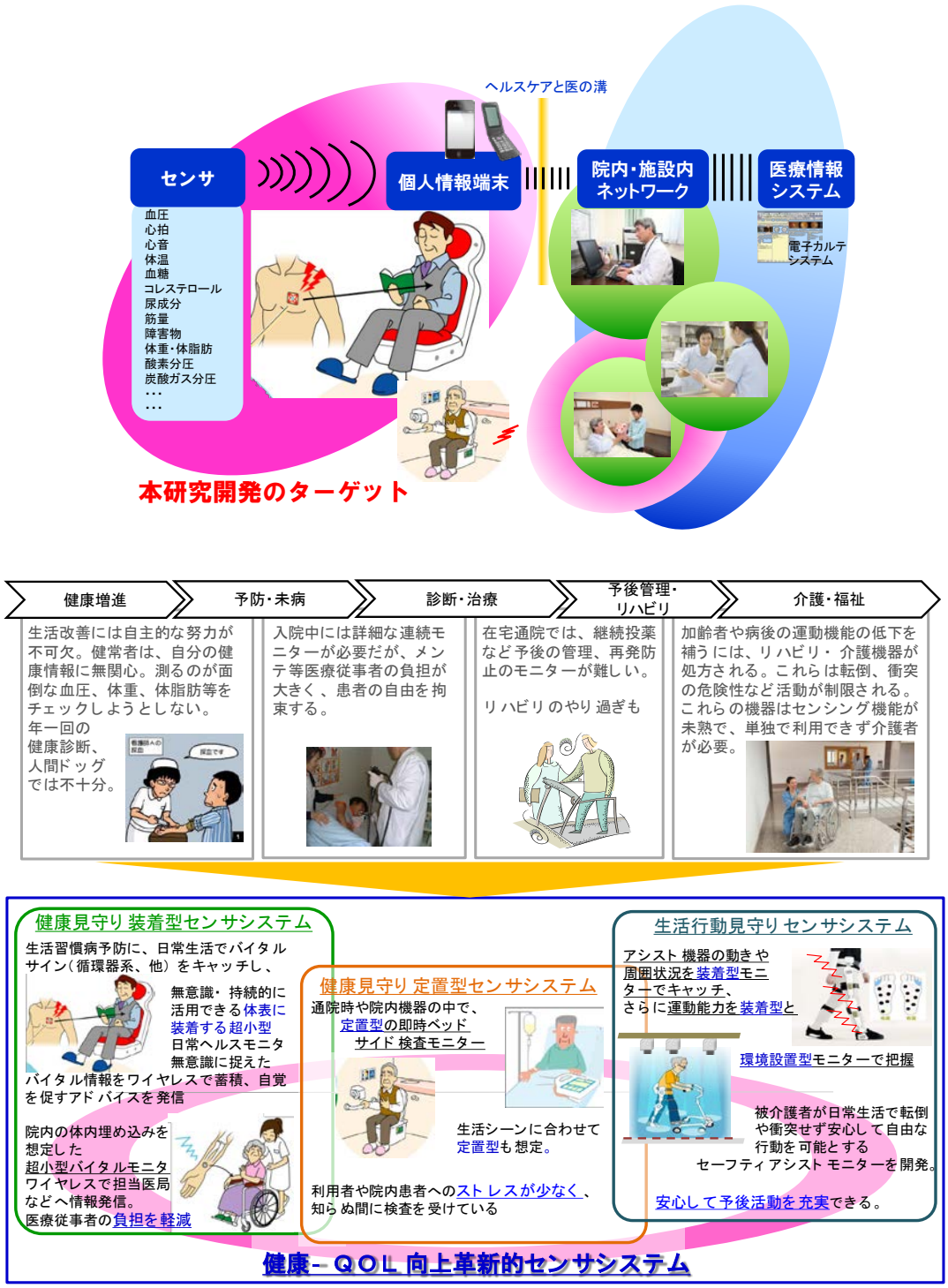
１）多くの対象者が健常者（あるいは無自覚）であり、モニタリングのための煩雑なメンテナンス（試薬や電源の補給など）を期待できない。日常活動を阻害しないように、センサとしては、着けっぱなしで着けていることを忘れてしまうほど装着感のない小型軽量で、動作しているのに気がつかないような、メンテナンスフリーの「パッチ型」（装着型）で、近距離ワイヤレス通信機能によってパーソナルな情報端末へデータ送信・蓄積ができるものとした。

２）連続モニタリングすることで効果が期待できる健診項目としては、生活習慣病の 4 大項目：血圧（高血圧）、体脂肪（体重）（肥満、メタボ）、血糖（糖尿病）、血中コレステロール（高脂血症）などと、特に院内の入院患者管理及び心臓系疾患の予防・予後で有効ないわゆるバイタル信号（体温、心音、心電、血中酸素など）があげられる。

３）センサとそれにつながる（個々人の）ネットワーク端末に注目するが、それらは単に医療・健康機器とその連携システムではなく、医療制度・保険制度あるいはハード、ソフト両面から通信インフラ・制度・情報セキュリティーなどを含む大きな課

題を有する。

これらを踏まえ当初想定したセンサシステムイメージとその位置づけを図③-(6)-3-1.1に示す。

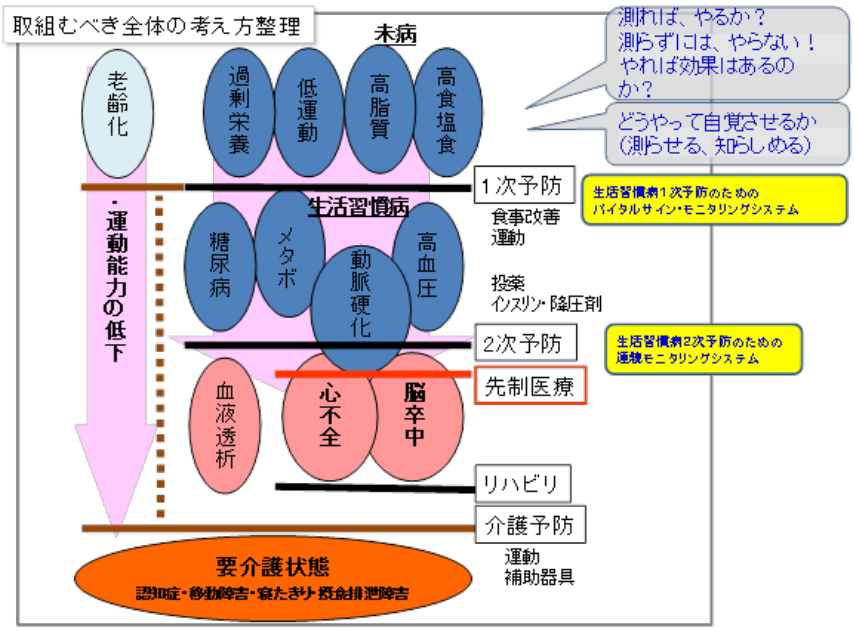


図③-(6)-3-1.1　当初想定した健康医療センサシステムのイメージ

基本的な考え方として、当初想定した健康医療センサシステムイメージは正しいが、従来の取り組みの中で、健常者を対象にした 1 次予防に対する取り組みが、その効果と現状のモニタシステムのギャップが大きいことが現状の生活習慣病予備軍の増加と捉えられない不確定さになっていることがわかった。

また、昨今、血圧や心音、血糖など医療診断に参考にでるレベルの情報をとれるような感度向上、長期連続モニタリングによる変動傾向分析などにより、患者の重篤化（心筋梗塞、心室細動、糖尿病の急変など）の予兆を捉えられるという医療研究の進展がみられ、2 次予防にむけたセンサ技術への取り組みの重要性もみられる。

これら、1 次予防、2 次予防合わせて健康医療に向けて取り組む全体の考え方を整理したものが、図③-(6)-3-1.2 である。



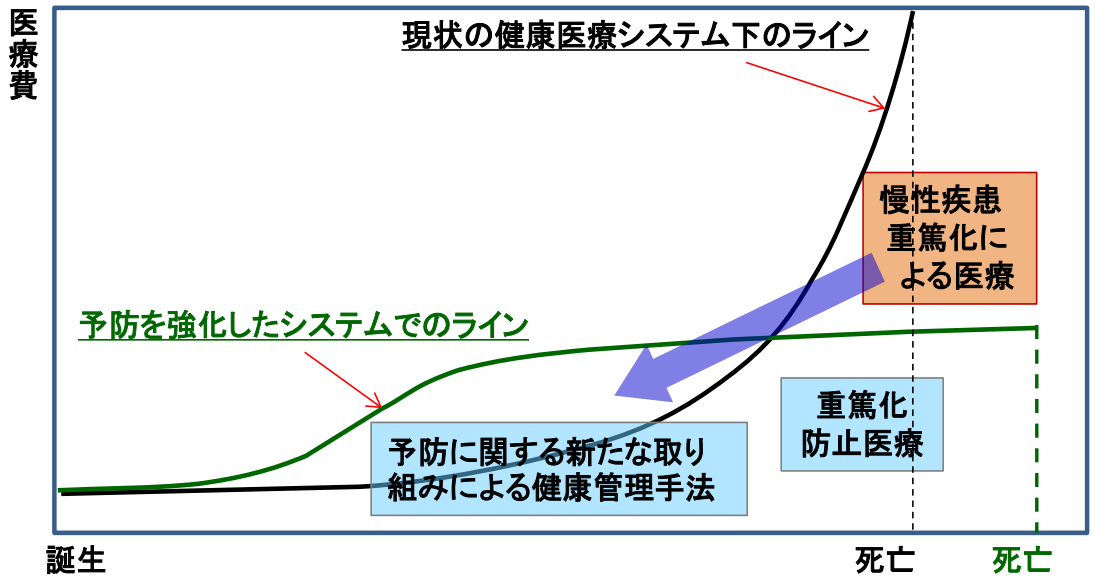
図③-(6)-3-1.2　健康医療に向けて取り組む全体の考え方

③-(6)-3-1-1　1 次予防

健常者は健康であるからゆえに自らの健康には無関心である反面、その無関心さから自ら生活習慣病への道を歩むケースがその主因であり、また、予備軍であるからゆえに常時のモニタリングも必要ない。いかに簡便に、全く負担のない状況で、本当に必要な健康情報を体から正確に捉えるか、その日内の平均値を捉えることさえできれば、生活習慣病の重症化への道は歩まずに済む。

健康なうちに、適切な対応さえすれば、年齢とともに指数関数的に増加する疾患への医療費を抑えることができる。加齢時の疾患分の医療費負担は、現状では生活習慣病の発症から死に至るまで、継続的に増え続けるのが現状であり、その分を 1 次予防として健常時

に手当てし健康寿命を延伸することが、医療費の平準化にも効果的な対策であることがわかる（図③-(6)-3-1-1.1）。



図③-(6)-3-1-1.1　一生の医療費推移と今後の予防に向けた対応による医療費分散の期待

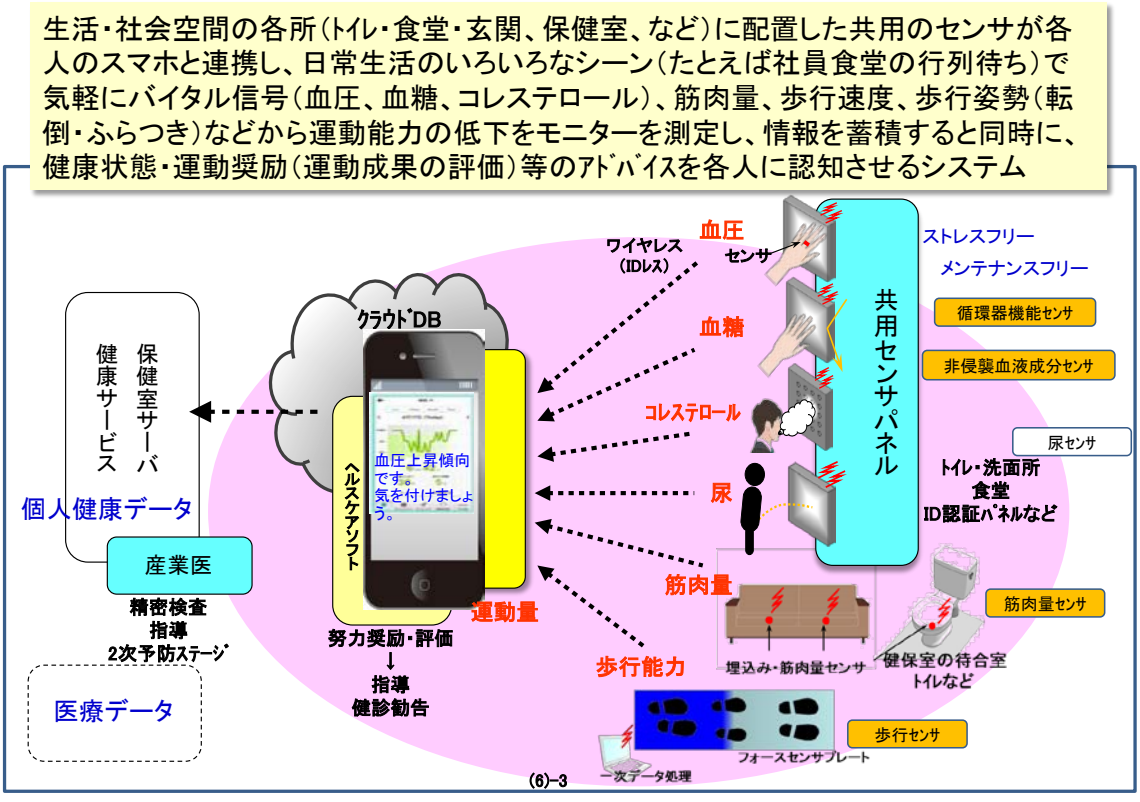
生活習慣病に効果的なモニタ項目は、すべてが血液検査か拘束性の高い測定器によるものである。唯一日常生活で健常者を含め家庭に浸透しているのは、体重計である。

血糖値　　：採血　生化学分析機が必要で、結果まで2時間以上
グルコヘモグロビン　：採血　生化学分析機が必要で、結果まで2時間以上
コレステロール　　：採血　生化学分析機が必要で、結果まで2時間以上
尿酸　　：採血　生化学分析機が必要で、結果まで2時間以上
塩分摂取量　　：採血　生化学分析機が必要で、結果まで2時間以上
血圧　　：カフ型加圧血圧計（腕まくりし測定器に1分ほど拘束
不整脈　　：ホルタ心電計（体に電極を貼りつけるため、健常者不可

従来から上記の検査・モニタリング手法を、定期健康診断時には実施するわけであるが、生活習慣病を捉えるには不十分であり、その健康診断でさえ日常の社会生活の煩雑さから受診しない健常者も後を絶たないとの調査結果もある。特に、採血の必要な検査の実施には医療従事者の判断が不可欠であり、健常者自らの対応になじむものではなく、現状以上の改善は原理的に実現性のないものである。さらに厄介なのは、「従来の検査・モニタリ

ング手法を用いて、ICT を活用し、健康情報をデータ蓄積すれば、生活習慣病の低減を大幅に実現できる」という見通しである。確かに ICT の進展は著しいものがあり、さらにビッグデータと言う新しい概念で、多くのデータの中から効果的な予防方法を見出すことも一見有効に見えるが、本質は、対象者が、健常者や健常者だと思い込んでいる人、そのものの健康情報をいかにモニタするかであり、健康に気を付けてせっせと自分の健康情報を日々面倒な検査方法でモニタして記録することをいとわない生活習慣病患者ではない、ということである。

これらの課題をふまえ、当初から想定したセンサシステムを開発できれば、上記の頑強な課題を克服できる全体システムを構築できることになり、一例として、図③-(6)-2-1-1.2　「生活習慣病１次予防のためのバイタルサイン・モニタリングシステム」を策定した。これは、職場や、公共機関などに設置することで、日常的に自らの健康情報を測定してしまうもので、現状の携帯情報端末や ICT やデータベースシステムを応用することにより、難しい健常者の健康を常に見守れるシステムを容易に構築できる。



図③-(6)-3-1-1.2　「生活習慣病１次予防のためのバイタルサイン・モニタリングシステム」

この中で、体外排泄物を活用する尿については、従来から簡便検査器が市販されている、便器などに取り付けた商品の開発例もあるが、原理的に試薬を必要としメンテナンスの面

倒さから普及していない。今回の先導研究のセンサの中には挙がっていないため、尿などの液状体のメンテナンスフリーなモニタリング方法に関するシーズ探索についても実施し、赤外スペクトルなどの光学的手法による実用化に研究例などを見出した。

③-(6)-3-1-2　2 次予防

上記で示したこれらセンサは、さらに技術的な深掘りをすることにより、医療診断に参考にできるレベルの情報をとれるように連続モニタリングなど高度化することで、患者の重篤化（心筋梗塞、心室細動、糖尿病の急変、などの予兆を捉えられることがわかっており、その 1 例として図③-(6)-3-1-2.1　「生活習慣病 2 次予防のための連続モニタリングシステム」をもう一方の全体システムイメージとして構築した。



図③-(6)-3-1-2.1　「生活習慣病 2 次予防のための連続モニタリングシステム」

③-(6)-3-2　横断的技術要素分析

各センサシステムから、全体システムイメージの構築に必要な横断的技術要素の分析を行った。全体的に、本先導研究では、非侵襲で小型なバイタルセンシング要素として、音波、光学技術、ガス検知などを、マイクロナノ技術を用いた超高感度化やアレー化などの要素技術を駆使して、生化学検査を物理検査に置き換えたり、大型で拘束性の高い検査を簡便で非拘束にするなど、従来にないパラダイムシフト的な要素を多分に含んでいる。今

回の先導研究としてのそれらの原理検証の可能性を踏まえ、本格研究で想定すべき、各テーマから全体システムの中での位置付と横断的要素として提案されたものは以下の通りである。

（1）常時装着型循環器機能センサシステム

位置付け：1次予防ヘルスケアの中での循環器疾患を担当するセンサシステム

技術要素：・小型、高精度、生活シーンでユーザ負担の少ないセット技術、電源、電気系
・サーバ蓄積と医療判断できるような加工抽出データシステム
・循環器の状況の自動判定、フィードバックが可能なデータシステム

（2）予測型血糖センサシステム

位置付け：生活習慣病予防・診断支援　連続モニタリングシステム

技術要素：・マルチバイタルサイン連続測定技術（非侵襲バイタルサインデータ測定技術、小型、高精度）
・マルチバイタルサインデータ解析技術（疾病との相関性解析、特徴量抽出、電子カルテ連携、医療用アンドロイドなどの携帯端末とのデータ連携）

（3）非侵襲血液成分センサシステム

・呼気ガス成分検出方式

位置付け：医療機関などの限られた場所以外で気軽に健康診断を受けられるシステム（1次予防に焦点）

技術要素：簡便・非侵襲なサンプリング方法、及び応答が速く・低価格なセンサ技術

・光学方式

位置付け：糖尿病の治療目的以外の予病・未病管理や早期発見に利用できる血糖値モニタ

技術要素：可搬性向上のための小型化・電源技術、
個人差などの誤差要因の低減化技術（血糖値算出アルゴリズム、実証システム総合評価）、医療臨床試験

（4）即時生化学センサシステム

位置付け：・発病・罹患しても重症に至らせず、早期発見による入院日数の少ないベッドサイドで院内感染（感染症）の簡易的検査、院内の患者管理に資するセンサシステム

技術要素：・多菌種、迅速、スキルレス・ハザードフリー、廃液を出さない「閉鎖型空間」計測技術
・分子認識ナノバイオセンサアレイ（検出方式）、閉鎖型バイオデバイス（検査キット）技術

（5）生活行動見守りセンサシステム

a）筋量センサ：

位置付け：・一次予防：自治体特定健診、特定保健指導による筋減弱症予防・改善システム

・介護予防：高齢者福祉施設や自宅を対象とした見守りシステム

技術要素：小型・埋め込み型センサ・ウェアラブル化技術（・省電力無線、低消費電力、自己・給電技術）

b）モーションセンサ：

位置付け：家庭内など（専門施設以外）での見守り、専門施設の訓練を家庭で行うための見守りツール

技術要素：・カメラモジュール技術（イメージャ、レンズ、高感度化、距離画像用 IR 投受光システム）

・取得データの解析（ビッグデータ解析）

c）フォースセンサプレート：

位置付け：家のなかでアンビエントに多種センシング（活動量、汗、体温血圧、血中酸素、心電、など）

技術要素：・大面積なセンサ製造技術開発（主に実装）

・ウェアラブル無線型センサ端末の開発

・シーツ化への耐水性などや床型化技術

d）歩行機能高精度計測技術：

位置付け：施設から在宅に移ったリハビリの生活期における場所を選ばない歩行計測方法の実現

技術要素：装着型歩行計測システムにおける必要技術

・小型軽量・低消費電力の無線システム

・小型軽量・大容量のバッテリシステム

これらを整理し、横断的要素技術の項目を、「デバイス化技術」、「データ処理技術（携帯端末まで）」、「医療実証」、「大規模データシステム化技術」、「ユーザインターフェース」として、表③-(6)-2-2.1 のように整理して、横断的要素技術のまとめとした。

これらの横断的、及び個別的要素技術項目の抽出に当たっては、我が国の最新の研究動向を内包する電気学会全国大会に参加し関連研究成果などについて調査結果を踏まえた。

表③-(6)-3-2.1　横断的要素技術の整理

☆：先導研究で取り組んでいる項目、○：今後取り組むべき項目（☆と○の重複可）

技術項目		常時装着型循環器機能センサ	予測型血糖センサ	非侵襲血液成分センサ		即時生化学センサ	生活行動見守りセンサ				
大分類	小分類			呼気ガス成分	光学		全体	筋量	モーションセンサ	フォースセンサプレート	歩行計測
デバイス化技術	(1) 超小型センシング	☆○	○	☆○	○	○				○	
	(2) 高精度	○	○	☆○				☆ ○	☆○	☆	
	(3) 非侵襲	☆○	○	☆○	☆○			☆	☆○	☆	
	(4) 低消費電力無線	○						○		○	○
	(5) 小型軽量・高効率電源利用技術	○			○						○
	(6) 非侵襲ウェアラブル実装技術	○	○		○					○	
	(7) センサ低消費電力化							○			
	(8) ウェアラブル簡易計測技術										☆
	(9) 迅速・自動処理					☆○					
データ処理技術（携帯端末まで）	(1) 疾病との相関性解析・特徴量抽出、	○	○	○			○	○		○	○
	(2) 個人差などの誤差要因	☆○	☆	○	☆○			☆ ○	○	○	☆○
	(3) 状況の自動判定、フィードバック	○		○		○	○	○	○	☆	○
	(4) マルチバイタルサイン連続データ処理技術		☆								☆
	(5) 運動（歩行）の特徴量抽出										☆
医療実証	(1) 医療臨床試験	○	○	○	○	○	○	○		○	
	(2) 非臨床試験（大動物）		○								
	(3) リハビリ応用										☆○
大規模データシステム化技術	(1) サーバ蓄積と医療判断	○	○	○		○	○	○		○	○
	(2) 医療用アンドロイド等の携帯端末とのデータ連携	○	○	○	○		○			○	
	(3) 電子カルテ連携	○	○				○			○	○
ユーザインターフェース	*(1) スキルレス*					☆○					
	(2) ハザードフリー					☆○					

③-(6)-4　まとめ

今回の健康医療に関する先導研究を進める一環として、本格研究を行う場合どのようなシステムを想定すれば、高齢化社会における生活習慣病を中心とした、脳疾患、循環器疾患、代謝疾患、などを抑え、増大する医療費を削減し、我が国の健康医療に係る社会課題に資するか、そこに必要な取り組むべき課題について網羅的に調査分析を行った。今後の取り組みに関し客観的な方向性と、先導研究で提案する５つの新しいマイクロナノ技術を駆使したセンサシステムによる従来の医療検査のパラダイムシフトを示唆することができた。今後の、健康医療分野にこの取り組みの方向性を示すとともに、健康医療に関する新たな研究開発政策の指針となるものと言える。これらの結果の一部は、電気学会全国大会で示すことができた。

④　プロジェクト推進及び研究支援

④-(1)　研究会、委員会活動

本プロジェクトの目的・目標達成に向けてプロジェクトの円滑な推進を図るため、進捗管理・調整、技術的課題の検討・対策、知財の有効的な取得ならびにその成果展開などを目的として、研究責任者の下、リーダ・サブリーダ会議、分野毎の研究会及び 3 分野合同会議、知財委員会を開催した。

④-(1)-1　リーダ・サブリーダ会議

2013 年 11 月 11 日（月）及び 2014 年 2 月 21 日（金）の 2 回、リーダ・サブリーダ会議を開催し、研究責任者によるリーダ方針の指示、サブリーダによる各分野の進捗報告ならびに全体の方向性と分野の整合性の議論を実施し、中間報告及び成果報告の対応について審議を行った。

④-(1)-2　分野別研究会

④-(1)-2-1　社会・産業インフラ分野研究会

下記のように、全 7 回の産業インフラ研究会を開催し、今仲サブリーダが研究者の進捗報告を受け、リーダ・サブリーダ会議の方針に従って、研究の方向性の管理、進捗の確認、技術的課題の検討、研究の進め方についての改善指示を行い、プロジェクトの効率的な推進を図って、各テーマとも目標を達成した。さらに、高速道路・プラント管理ユーザ、土木研究所、橋梁モニタリング研究者へのヒアリングを実施し、センサ性能・耐久性へのフィードバックを行った。

【研究会】

- 第 1 回：2013 年 9 月 5 日(木)開催、@NMEMS 技術研究機構本部
- 第 2 回：2013 年 10 月 4 日(金)開催、@NMEMS 技術研究機構本部
- 第 3 回：2013 年 11 月 7 日(木)開催、@NMEMS 技術研究機構本部
- 第 4 回：2013 年 12 月 5 日(木)開催、@NMEMS 技術研究機構本部
- 第 5 回：2014 年 1 月 10 日(金)開催、@NMEMS 技術研究機構本部
- 第 6 回：2014 年 2 月 6 日(木)開催、@NMEMS 技術研究機構本部
- 第 7 回：2014 年 3 月 6 日(木)開催、@NMEMS 技術研究機構本部

【ヒアリング】

・NEXCO 東日本：2013 年 10 月 24 日(木) 開催、@NEXCO 東日本 本社

・旭化成㈱　生産技術本部　佐藤 信義 本部長付：2013 年 11 月 21 日(木) 開催、@NMEMS 技術研究機構本部

・横浜国立大学 大学院都市イノベーション研究院 西尾 真由子 准教授：2013 年 11 月 29 日(金) 開催、@NMEMS 技術研究機構本部

・(独)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 橋梁構造研究グループ 木村　嘉富 上席研究員：2013 年 12 月 5 日(木) 開催、@NMEMS 技術研究機構本部

④-(1)-2-2　農業分野研究会

下記のように、全 6 回の農業分野研究会を開催し、前田サブリーダが研究者の進捗報告を受け、リーダ・サブリーダ会議の方針に従って、研究の方向性の管理、進捗の確認、技術的課題の検討、研究の進め方についての改善指示を行い、プロジェクトの効率的な推進を図って、各テーマとも目標を達成した。農業分野研究会は毎回各研究現場にて実施するとともに、近隣のユーザ機関へのヒアリング調査も合わせて実施した。

・第 1 回：2013 年 9 月 10 日（木）開催、@NMEMS 技術研究機構本部

・第 2 回：2013 年 10 月 2 日（水）～10 月 3 日（木）@地方独立行政法人北海道総合研究機構根釧農業試験場（中標津）、JA 中標津肉牛センター

・第 3 回：2013 年 11 月 12 日（火）@株式会社ハイトカルチャ BIO 研究室、旬穀旬菜シティファーム（大阪）

・第 4 回：2013 年 12 月 11 日（水）～12 月 12 日（木）@独立行政法人産業技術総合研究所九州センター、国立大学法人九州大学農学部附属農場高原農業実験実習場（九州）

・第 5 回：2014 年 1 月 17 日（金）@独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構動物衛生研究所、独立行政法人産業技術総合研究所集積マイクロシステム研究センター（つくば）

・第 6 回：2014 年 2 月 21 日（金）@NMEMS 技術研究機構本部

④-(1)-2-3　健康医療分野研究会

下記のように、全 5 回の健康医療分野研究会をほぼ毎月開催し、唐木サブリーダ、藤田サブリーダが研究者の進捗報告を受け、リーダ・サブリーダ会議の方針に従って、研究の方向性の管理、進捗の確認、技術的課題の検討、研究の進め方についての改善指示を行った。また、健康医療分野全メンバが参画した、⑥全体システム方向性調査について、研究

会で時間をとって議論を進め、プロジェクトの効率的な推進を図って、各テーマとも目標を達成した。

・第 1 回：2013 年 9 月 6 日（金）開催、@NMEMS 技術研究機構本部
・第 2 回：2013 年 10 月 17 日（木）開催、@NMEMS 技術研究機構本部
・第 3 回：2013 年 11 月 28 日（木）開催、@NMEMS 技術研究機構本部
・第 4 回：2014 年 1 月 10 日（金）開催、@NMEMS 技術研究機構本部
・第 5 回：2014 年 2 月 10 日（月）開催、@NMEMS 技術研究機構本部

④-(1)-3　3 分野合同会議

3 分野合同研究会はプロジェクト開始時（2013 年 8 月 5 日（月））とプロジェクト終了時（2014 年 3 月 17 日（月））の 2 回開催し、3 分野の研究状況ならびに情報の共有を図った。

④-(1)-4　知財委員会

知財委員会に関しては、現存のグリーンセンサ知財委員会に新たに先導研究のメンバを追加して､技術研究組合 NMEMS 技術研究機構の知財ポリシーの策定､知的財産権の帰属、知的財産の管理・活用について、合理的なルールを確立した。

④-(2)　広報普及活動及び調査活動

④-(2)-1　広報普及活動

関係機関との技術交流を積極的に進めるとともに、展示会への出展や種々の講演会、発表会、セミナーでの情報収集、調査、発表ならびに以下に示すようにホームページ、ブログ、広報誌などでの発表を通じて本先導研究の普及・広報を図った。

(1)　ホームページの開設

社会課題対応センサーシステム先導研究のホームページ(http://www.nmems.or.jp/sensor/)を開設し、研究アウトライン（研究開発概要、研究コンセプト、研究テーマ）、研究体制について紹介し、本プロジェクトの広報普及を図った。また、ホームページには研究員専用サイトも設け、各種事務手続きのマニュアルや通達事項を掲載し、研究の効率化を図った。

(2)　ブログによる情報発信

組合員である一般財団法人マイクロマシンセンターが管理するブログニュース（MEMS

の波、http://www.nanomicro.biz/mems/cat23550815/index.html ）に「社会課題対応センサーシステム」のカテゴリを設定するとともにプロジェクトの進捗状況や海外調査の内容として、下記７件のブログニュースを発信して、本プロジェクトの広報・普及を図った。下記の【】内は掲載日である。

1) NEDO 委託事業「社会課題対応センサーセステム先導研究」の受託決定【2013/7/19】
2) NEDO 委託事業「社会課題対応センサーセステム先導研究」合同研究会（キックオフ会議）開催【2013/8/21】
3) 欧州における農業 ICT 化に関する技術動向調査【2013/12/1】
4) SPIE Remote Sensing / Security + Defense 2013@ドイツ、ドレスデン参加報告【2013/12/9】
5) μTAS2013 参加報告【2013/12/10】
6) 欧米における AE 診断に関する動向調査【2014/3/14】
7) NEDO 委託事業「社会課題対応センサーセステム先導研究」クロージング会議開催【2014/3/18】

(3) 広報誌及び雑誌への掲載

1) MICRONANO 広報誌

組合員である一般財団法人マイクロマシンセンターが発行する広報誌（MICRONANO Monthly、http://mmc.la.coocan.jp/info/monthly/ ）の 2013 年 8 月号（No.25-05、2013/8/26 発行）と 2014 年 3 月号（No.25-12、2014/3/20 発行）にプロジェクトのキックオフ会議とクロージング会議の様子を紹介し、本プロジェクトの広報・普及を図った。

2) ソーシャル・センシング技術調査研究報告書Ⅱ

一般財団法人電子情報技術産業協会センシング技術専門委員会から首記報告書にホームページ、ブログで紹介した本プロジェクトの概念図を引用掲載したいとの依頼があり、許可をおこない、報告書に掲載された。

(4) マスコミへの発表・掲載

1) プレスリリース【2014/1/27】

再委託先の東京大学より「有機半導体ナノピラー構造を用いた赤外線検出器」に関して MEMS2014 のオーラルセッションへ採択されたことをプレスリリースし、以下４件にプレスリリースの内容が掲載された。

ⅰ) 日経新聞 web サイト

ⅱ) 日経 Tech-on

ⅲ) マイナビニュース

ⅳ) 日本の研究

2) TV インタビュー【2014/2/12】

NHK 大分放送局から九州大学農学部附属農場高原実験演習場で実施している「牛の生産効率改善のための血液検査デバイスの開発に関する研究について」インタビューを受けた。

(5) 展示会への出展

独立行政法人産業技術総合研究所九州センター「産業技術オープンデー」にて「センサ活用次世代繁殖農家システムの開発」に関するポスター展示を行い、本プロジェクトの農業分野の研究活動の広報・普及を行った。

(6) 講演発表

次世代センサ協議会社会インフラ・モニタリングシステム研究会第 5 回情報交流会、国土交通省第２回社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会、MEMS2014 や電気学会全国大会シンポジウムなどの国内外の学会に 10 件の研究成果を発表し､本プロジェクトの成果の広報・普及を図った（詳細は２．研究発表・講演、文献、特許等の状況の章参照）。

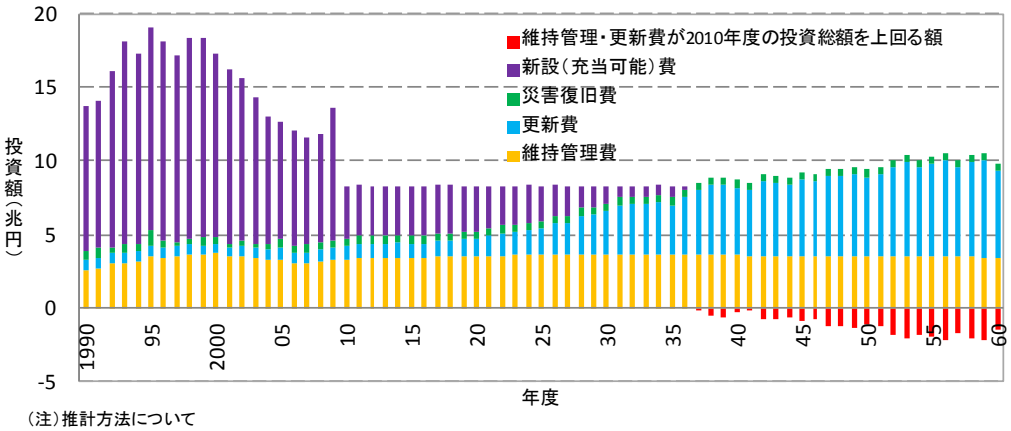
④-(2)-2 調査活動

外注によるニーズ・仕様調査として橋梁モニタリングにおける計測ニーズ調査（外注先：（株）エヌ・ティ・ティ・データ）を行った。

④-(2)-2-1 橋梁モニタリングにおける計測ニーズ調査

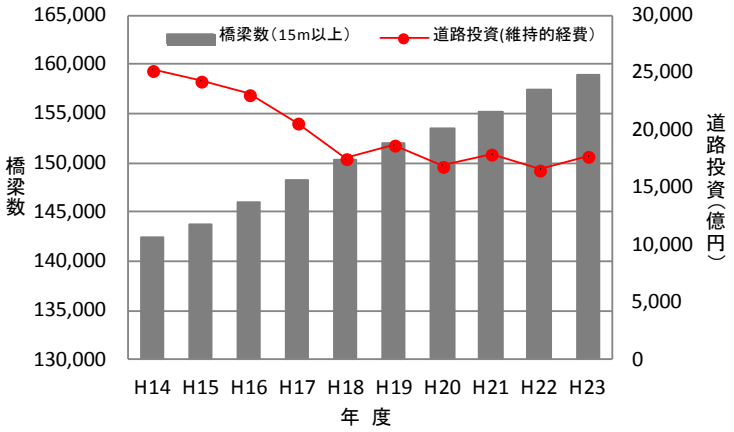
④-(2)-2-1-1 調査の目的

橋梁をはじめとした社会資本施設はその多くが高度経済成長期に建設され、それらの高齢化が問題となってきており、その維持管理の重要性が社会的に認識されてきている（図④-(2)-2-1-1.1、2）。一方で、少子高齢化による技術者の不足や予算の制限により、十分な点検、維持管理が困難な状況になりつつある。



（注）推計方法について
国土交通省所管の8分野（道路、港湾、空港、公共賃貸住宅、下水道、都市公園、治水、海岸）の直轄・補助・地単事業を対象に、2011年度以降につき次のような設定を行い推計。
・更新費は、耐用年数を経過した後、同一機能で更新すると仮定し、当初新設費を基準に更新費の実態を踏まえて設定。
耐用年数は、税法上の耐用年数を示す財務省令を基に、それぞれの施設の更新の実態を踏まえて設定。
・維持管理費は、社会資本のストック額との相関に基づき推計（なお、更新費・維持管理費は、近年のコスト縮減の取組み実績を反映）
・災害復旧費は、過去の年平均値を設定。
・新設（充当可能）費は、投資総額から維持管理費、更新費、災害復旧費を差し引いた額であり、新設需要を示したものではない。
・用地費・補償費を含まない。各高速道路会社等の独法等を含まない。
なお、今後の予算の推移、技術的知見の蓄積等の要因により推計結果は変動しうる。

図④-(2)-2-1-1.1　橋梁数と維持管理経費の推移 [1)]



（注）道路投資額は、下記の費用である。（道路統計年報より）
・舗装補修、橋梁補修等の修繕並びに維持等及び公団関係日における維持改良費
・平成17.年10月の道路公団民営化により、以降は公団有料道路データは含めていない

図④-(2)-2-1-1.2　橋梁数と維持管理経費の推移 [2)]

また、南海トラフ巨大地震などの巨大地震の発生率が高く、多発する局所豪雨などの自然災害による構造物への被害リスクは深刻な状況にある。災害発生時の迅速な救援活動、復旧活動の実現のためには、災害時の構造物状態を効率的にいかに把握するかが重要となるが、現地での目視に依存しているのが現状である。

以上のような構造物維持管理、災害時の状態把握における課題を解決する手段として、センサを活用した効率的な社会インフラ管理の実現が期待されている。特に MEMS センサは小型かつ軽量で設置が容易であり、自立電源の搭載、無線によるデータ通信が可能であ

る。また、低コストであるため、他センサに比べて導入時の経済的負担も小さいという特徴がある。そこで、このような特徴を有する MEMS センサを活用した橋梁モニタリングの適用性を把握するために、本調査では下記について関係部門・有識者へのヒアリング、文献調査を実施し、以下の観点で整理を行った。

・橋梁に生じる劣化・損傷の原因及びメカニズムを整理した。

・整理した橋梁に発生する劣化・損傷について、劣化損傷の進展を判断する指標を列挙し、その指標を得るために現在実施されている計測手法について整理し、MEMS の適用可能性がある指標について、その計測手法を例示した。

④-(2)-2-1-2　現状の点検内容とその状況

現状の橋梁における点検の実施内容とその状況について整理し、纏めた。

現状の橋梁点検（定期点検）に関する実施要領は大きく分けて次のものが採用されている（表④-(2)-2-1-2.1）。これらは要領毎に点検項目や点検方法の詳細度が異なっている。

表④-(2)-2-1-2.1　定期点検に適用する各点検要領

点 検 要 領	出 版 元	適　用	点検の詳細度
高速道路点検要領(各社作成)	高速道路各社	高速道路	詳細
橋梁定期点検要領(案)	国土交通省 道路局	国道 主要地方道(*1)	↕
道路橋に関する基礎データ収集要領(案)	国土交通省 国土技術政策総合研究所	市町村道(*2)	簡易

*1:都道府県及び政令市等主要都市では定期点検要領をもとに独自の要領を作成している場合がある
*2:市町村では基礎データ収集要領をもとに独自の要領を作成している場合がある

管理者によって点検内容に差異はあるが、対象とする損傷など、定期点検要領(国土交通省)が基本となっており、本調査では一般的な点検として直轄国道における定期点検を対象とする。

参考に、定期点検要領における点検項目（損傷の種類）とその点検手法の例を表④-(2)-2-1-2.2 に掲載する。

表④-(2)-2-1-2.2　定期点検要領における損傷の種類とその点検方法 [3)]

材料	番号	損傷の種類	点検の標準的方法	必要に応じて採用することのできる方法の例
鋼	①	腐食	目視，ﾉｷﾞｽ	超音波板厚計による板厚計測
	②	亀裂	目視，ﾃｽﾄﾊﾝﾏｰ	渦流探傷試験，磁粉探傷試験， 超音波探傷試験，浸透探傷試験
	③	ゆるみ・脱落	目視	ﾎﾞﾙﾄﾍｯﾄﾞﾏｰｸの確認，たたき試験 超音波探傷（F11T等），軸力計を使用した調査
	④	破断	目視	－
	⑤	防食機能の劣化	目視	写真撮影（画像解析による調査） ｲﾝﾋﾟｰﾀﾞﾝｽ測定，膜厚測定，付着性試験
コンクリート	⑥	ひびわれ	目視，ｸﾗｯｸｹﾞｰｼﾞ，写真	写真撮影（画像解析による調査）
	⑦	剥離・鉄筋露出	目視，写真	－
	⑧	漏水・遊離石灰	目視，写真	－
	⑨	抜け落ち	目視	－
	⑩	ｺﾝｸﾘｰﾄ補強材の損傷	目視	たたき試験，赤外線調査
	⑪	床版ひびわれ	目視，ｸﾗｯｸｹﾞｰｼﾞ	写真撮影（画像解析による調査）
	⑫	うき	目視	たたき試験，赤外線調査
その他	⑬	遊間の異常	目視，ｺﾝﾍﾞｯｸｽ	－
	⑭	路面の凹凸	目視，ｺﾝﾍﾞｯｸｽ，ﾎﾞｰﾙ	－
	⑮	舗装の異常	目視	－
	⑯	支承の機能障害	目視	移動量測定
	⑰	その他		－
共通	⑱	定着部の異常	目視目視	たたき試験，赤外線調査
	⑲	変色・劣化	目視	－
	⑳	漏水・滞水	目視	－
	㉑	異常な音・振動	聴覚，目視	－
	㉒	異常なたわみ	目視	－
	㉓	変形・欠損	目視，水糸，ｺﾝﾍﾞｯｸｽ	－
	㉔	土砂詰り	目視	－
	㉕	沈下・移動・傾斜	目視，水糸，ｺﾝﾍﾞｯｸｽ	－
	㉖	洗掘	目視，水糸，ﾎﾞｰﾙ	ｶﾗｰｲﾒｰｼﾞﾝｸﾞｿﾅｰ

④-(2)-2-1-3　調査対象の選定

MEMS による構造物モニタリングの普及という観点から、対象とする橋種や橋の規模については、特殊なものではなく、一般的、標準的なものとし、対象範囲を明確にする。劣化や損傷については、進展すれば構造上問題となるような劣化や損傷を対象とした。

a.　橋種・規模の選定

一般的な橋種（鋼橋、PC 橋、RC 橋など）から調査対象を選定した。

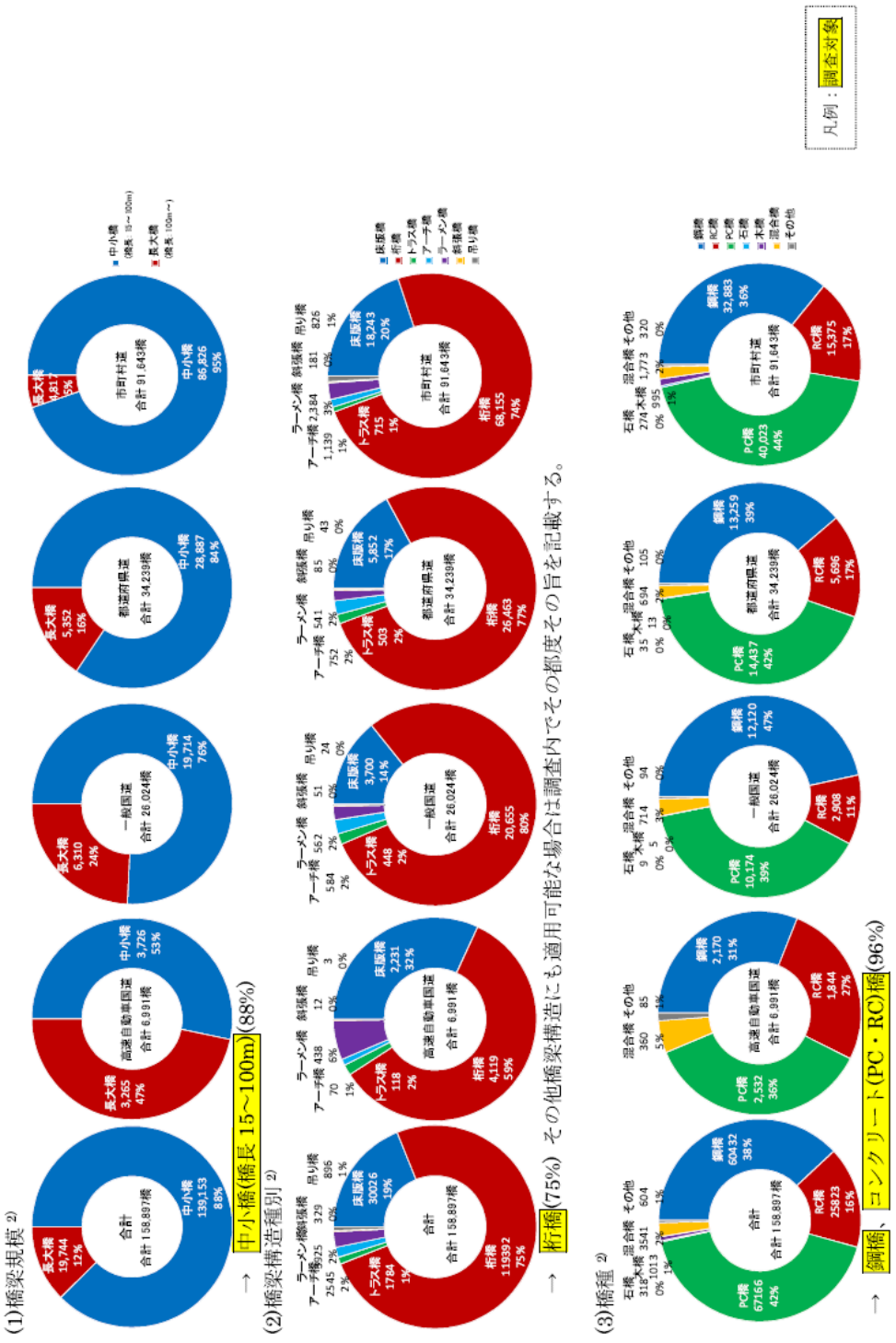
ここでは、平成 23 年道路統計年報（統計対象橋長 15m 以上）を参考にし、（1）橋梁規模、（2）橋梁構造種別、（3）橋種を選定した。

選定にあたって下記を考慮した。

・点検が十分でない市町村道では中小橋が多く、今回調査対象とした。

・鋼橋は長大橋にも多く採用されるため、中小橋が多い市町村道では PC/RC 橋の割合が大きくなる。

・統計は橋長 15m 以上の橋梁を対象としており、15m 以下を含めた場合 RC 橋の割合が劇的に増加すると考えられるが、15m 以下の橋梁については架橋位置や条件などが特殊でない限りは、1 橋に掛けられる維持管理費用の観点から、モニタリングの適用が適切とは考えにくく、今回の調査対象の選定では考慮しない。調査対象を図④-(2)-2-1-3.1 の黄色枠に示す。



図④-(2)-2-1-3.1　橋種・規模の選定

b. 劣化・損傷の選定

橋梁に発生する劣化・損傷について、その劣化損傷が最終的に構造物の健全性に大きな影響を与えるような劣化・損傷を整理し、今回モニタリングの対象とする劣化・損傷

を明確にする。調査対象とする劣化・損傷は、ミクロな変状を捉える材料劣化、マクロな変状を捉える劣化による損傷、及び災害による損傷に分けてピックアップした。

ア.　材料劣化

材料に着目してミクロな変状を捉える材料劣化のプロセスの調査対象を選定した。

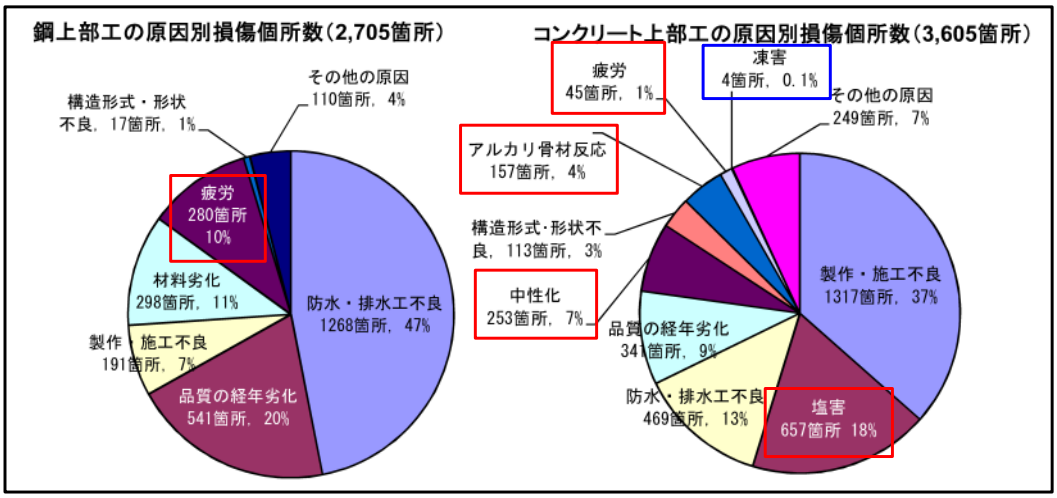
コンクリート及び鋼材に発生する一般的な材料劣化は表④-(2)-2-1-3.1 の通りであり、この中から選定することとした。

表④-(2)-2-1-3.1　材料劣化

一般的な材料劣化

材　料	劣化の種類
コンクリート部材の劣化	アルカリ骨材反応
	塩害
	中性化
	疲労
	凍害
	化学的腐食
	風化・老化
	火災
鋼部材の劣化	腐食
	疲労

次に、劣化損傷原因の割合(近畿地整の例)は図④-(2)-2-1-3.2 の通りである。



損傷発生原因 『橋梁の長寿命化修繕計画 H25版(近畿地方整備局)』

凡例：調査対象

図④-(2)-2-1-3.2　劣化損傷原因の割合(近畿地整の例)[4)]

・鋼：疲労(10%)

：腐食　－本集計には腐食の項目が含まれていないが、「防水・排水工不良(47%)」、「品質の経年変化(20%)」、「材料劣化(11%)」(合計 78%)によって防食機能の劣化が進行

し、鋼部材自体は腐食が進行する。

・コンクリート：アルカリ骨材反応（4%）、塩害（18%）、中性化（7%）、疲労（1%）

「製作、施工不良(37%)」、「防水・排水工不良(13%)」、「品質の経年変化(9%)」は上記劣化の促進要因(合計 59%)である。

凍害については寒冷地において多発すると考えられたが、寒冷地である北陸地整のデータから全体の 1%程度しか発生していないため[5)]、今回の調査対象からは除外する。

以上より、材料劣化の調査対象は表④-(2)-2-1-3.2 の通りとした。

表④-(2)-2-1-3.2　調査対象とする材料劣化

調査対象とする材料劣化

材　料	番号	劣化の種類
コンクリート部材の劣化	①−1	アルカリ骨材反応
	①−2	塩害
	①−3	中性化
	①−4	疲労
鋼部材の劣化	①−5	腐食
	①−6	疲労

イ．　劣化による損傷

マクロな変状を捉える劣化による損傷について調査対象を選定する。

ここでは、橋梁定期点検要領(案)の損傷項目(前出)をベースに下記の観点から損傷種類を選定した。

・観点①損傷の発生数から
・観点②発生した場合に構造に対してクリティカルになるもの
・観点③目視で異常を判断しづらいもの
・観点④近年増加している PC 橋について

i) 観点①損傷の発生数から

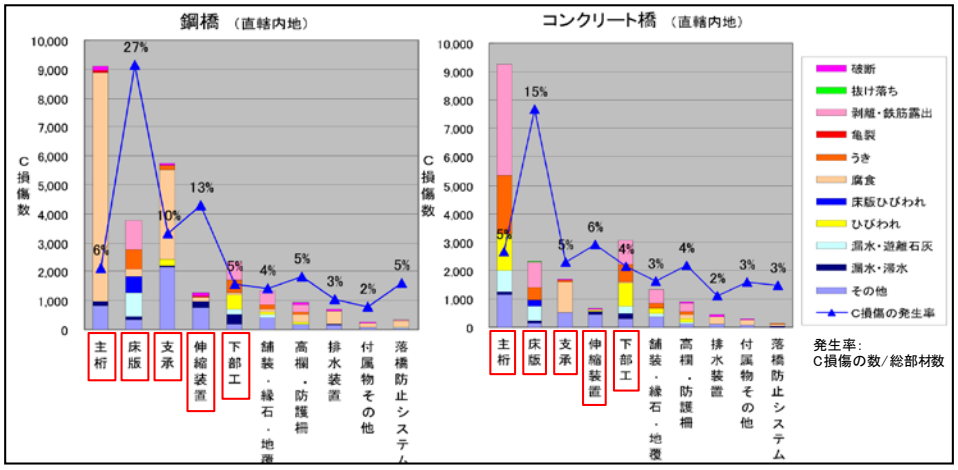
国土交通省資料（図④−(2)−2−1−3. 3）及び NEXCO 中日本高速道路の資料（図④−(2)−2−1−3. 4）より、速やかに補修を行う必要がある C ランク損傷の発生数及び発生率が大きくなっている項目を選定した。

→着目部位：上部工(主桁・床版)、下部工、支承、伸縮装置(発生率が高い)

→鋼：腐食、亀裂

凡例：調査対象

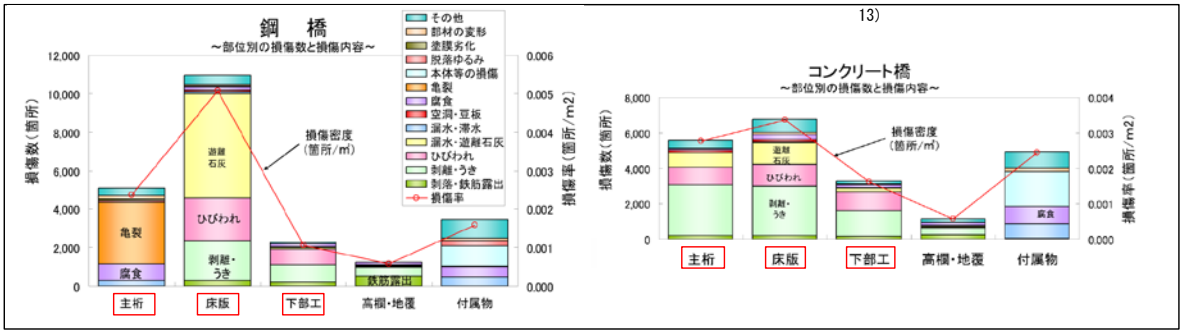
→コンクリート：剥離・鉄筋露出、うき、ひび割れ、漏水・遊離石灰



Cランク損傷発生率 『道路橋の予防保全に向けた有識者会議資料 （国土交通省）』

対策区分	調査対象とする損傷
A	損傷が認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない。
B	状況に応じて補修を行う必要がある。
C	速やかに補修を行う必要がある。
E1	橋梁構造の安全性の観点から、緊急対応の必要がある。
E2	その他、緊急対応の必要がある。
M	維持工事で対応する必要がある。
S	詳細調査の必要がある。

図④-(2)-2-1-3.3　C ランク損傷発生率及び損傷評価区分 [6)]



部位別の損傷数と損傷内容 『H21 高速道路ネットワークの長期保全計画に関する検討会(第3回） NEXCO中日本』

図④-(2)-2-1-3.4　部位別損傷数と損傷内容 [7)]

ii).　観点②発生した場合に構造に対してクリティカルになるもの

発生した場合に、構造物の耐力や剛性が低下し、橋梁全体の健全性に影響を及ぼす項目を選定した。

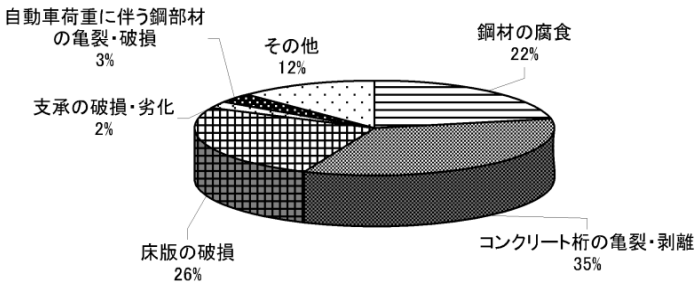
凡例：調査対象

・明らかに部材が破損している

⇒鋼材の破断、コン剥離・鉄筋露出、コン床版抜落、変形・欠損

・下記の掛け替え理由資料（図④-(2)-2-1-3.5）より

⇒鋼材の腐食、コン剥離・鉄筋露出、コン床版抜落



掛替理由 『橋梁の架替に関する調査結果(Ⅳ)（国土技術政策総合研究所』

図④-(2)-2-1-3-5　掛替理由 [8)]

iii).　観点③目視で異常と判断しづらいもの

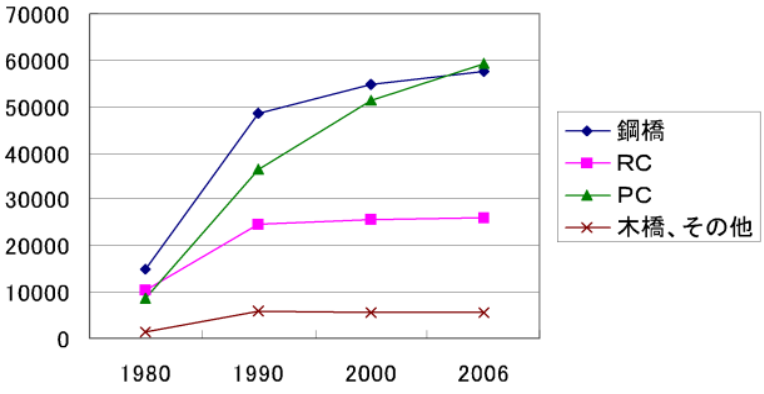
機器を使用しない目視点検や画像により把握できないものを選定した。

⇒異常なたわみ、異常な音・振動

iv). 観点④近年増加の PC 橋

図④-(2)-2-1-3.6 に示す通り、PC 橋の比率は年々多くなってきており、それに伴ってその劣化損傷（図④-(2)-2-1-3.7）も増加していくと考えらえる。

⇒定着部の異常、PC 鋼材の腐食・破断（定期点検項目なし）



橋種別橋梁数の推移(橋長15m以上)
『道路橋の予防保全に向けた有識者会議 第1回資料』

図④-(2)-2-1-3.6　橋種別橋梁数の推移 [6)]



事例）グラウト未充填とPC鋼線の破断(妙高大橋)

図④-(2)-2-1-3.7　PC 鋼線の破断 [9)]

各観点による選定の結果、表④-(2)-2-1-3.3 のとおり損傷項目を絞り込んだ。

表④-(2)-2-1-3.3　劣化による損傷項目

	部材	損傷	観点a 発生数	観点b 危険度	観点c 視認困難	劣化による構造損傷として調査対象		備考
定期点検要領項目	鋼	腐食	○			○	斜材(ﾄﾗｽ橋)、吊材(ｱｰﾁ橋・吊橋) 鋼床版・主桁 :亀裂・腐食から破断へ進展	①材料劣化(腐食)の進展による部材自体の損傷
		亀裂	○			○		①材料劣化(疲労)の進展による部材自体の損傷
		ゆるみ・脱落						
		破断		○		○		腐食及び亀裂の進展による損傷
		防食機能の劣化						①材料劣化で整理する(腐食の原因)
	コンクリート	ひびわれ	○			○	主桁:ひび割れから剥離へ進展 RC床版:ひび割れから抜け落ちへ進展	
		剥離・鉄筋露出	○	○		○		ひび割れの進展過程で考慮
		漏水・遊離石灰	○			○		
		抜け落ち		○		○		
		コンクリート補強材の損傷		○				多岐にわたり事例も少ないことから除外
		床版ひびわれ	○			○		ひび割れの進展過程で考慮
		うき	○			○		
	その他	遊間の異常	○			○	伸縮装置の異常(段差・欠損・漏水) 支承の機能障害(腐食・欠損)	
		路面の凹凸	○			○		
		舗装の異常						
		支承の機能障害	○			○		
		その他						
	共通	定着部の異常		○		○	定着部の異常(定着具・定着部)	PC鋼材定着部
		変色・劣化						
		漏水・滞水						
		異常な音・振動			○	○	異常な音・振動	
		異常なたわみ		○	○	○	異常なたわみ	
		変形・欠損		○		○	変形・欠損	
		土砂詰り						
		沈下・移動・傾斜	○	○				③災害時(地震時)で整理する
		洗掘	○	○				③災害時(増水時)で整理する
追加	観点d PC鋼材	PC鋼材の腐食・破断		○	○	○	PC鋼材の腐食・破断	

上記をまとめると、劣化による損傷の調査対象は表④-(2)-2-1-3.4 のとおりとする。

表④-(2)-2-1-3.4　劣化による損傷の調査対象

損傷項目番号	対象損傷	対象橋種			損傷内容	対象部材
		鋼橋	PC橋	RC橋		
②-1	鋼部材の損傷	○			亀裂の発生から破断への進展	斜材(ﾄﾗｽ橋)、吊材(ｱｰﾁ橋・吊橋)、鋼床版・主桁
②-2	コンクリート部材の損傷		○	○	ひび割れの発生から剥離、抜け落ちへの進展	主桁、RC床版
②-3	伸縮装置の損傷	○	○	○	段差、欠損、漏水	
②-4	支承の損傷	○	○	○	鋼材の腐食	
②-5	定着部の損傷		○		定着具(鋼)の腐食、定着部(ｺﾝｸﾘｰﾄ)の損傷	PC鋼材定着部
②-6	異常な音・振動	○	○	○	異常な音・振動	
②-7	異常なたわみ	○	○	○	異常なたわみ	
②-8	変形・欠損	○	○	○	部材の変形・欠損	主桁
②-9	PC鋼材の腐食・破断		○		主桁内配置鋼材の腐食・破断	

ウ.　災害による損傷

災害時に橋梁に発生する損傷を選定した。

i). 地震時

地震時の緊急点検の主な項目として道路橋の震災時緊急点検・応急調査の手引き(案)/国総研[10]では表④-(2)-2-1-3.5のとおり設定している。

表④-(2)-2-1-3.5　緊急点検・応急調査の主な項目と箇所

表　緊急点検・応急調査の主な項目と箇所

部位・部材	対象とする損傷	着目箇所	被災度判定	
			耐荷力	走行性
鋼部材	腐食	桁端部	○	—
	き裂	桁端部	○	—
	ボルトの脱落		○	—
	破断		○	—
	変形・欠損		○	
コンクリート部材	ひびわれ		○	—
	抜け落ち		○	—
	ＰＣ定着部の異常		○	—
	変形・欠損		○	
その他	遊間(伸縮装置)の異常		○	○
	路面の凹凸		—	○
	支承の機能障害		○	—
	下部工の変状（沈下・移動・傾斜・洗掘）	下部工	○	—

上記は基礎データ収集要領の点検項目に対応した項目であるが、下記抜粋のとおり、道路震災対策便覧では既往地震の調査結果（表④-(2)-2-1-3.6）から特に次の4項目に着眼点を置くとしていることから、下記4つの損傷を対象とした。

→上部工桁端部損傷、橋脚損傷、支承損傷、伸縮装置損傷

表④-(2)-2-1-3.6　橋梁の被害形態と主な事例[11)]

道路震災対策便覧(H14.4日本道路協会)より抜粋

橋梁の被害形態	事　例
上部工の破損・傾斜・移動・落橋	新潟地震，宮城県沖地震，兵庫県南部地震
支承部の損傷	宮城県沖地震，兵庫県南部地震
橋脚・橋台・基礎の損傷	宮城県沖地震，兵庫県南部地震
橋梁取付部の段差	新潟地震，宮城県沖地震

ii).　河川増水時

定期点検要領の下部工損傷として挙げられており、近年頻発している豪雨による河川増水時には特に注意する必要がある損傷である。

→下部工洗掘

上記をまとめると、災害による損傷の調査対象は以下の表④-(2)-2-1-3.7通りとした。

表④-(2)-2-1-3.7 災害による損傷の調査対象

災害	損傷項目番号	調査対象とする損傷
地震時	③-1	上部工桁端部損傷
		橋脚損傷
		支承損傷
		伸縮装置損傷
増水時	③-2	下部工洗掘

④-(2)-2-1-4　劣化・損傷プロセスの整理

ここでは、④-(2)-2-1-3 調査対象の整理で対象とした劣化損傷について、そのプロセスを整理した。以下の表④-(2)-2-1-4.1 にその結果を示す。

表④-(2)-2-1-.1　劣化・損傷プロセスの整理結果

劣化損傷項目		材　料	劣化の種類
① 材料劣化の プロセス	①-1	コンクリート部 材の劣化	アルカリ骨材反応
	①-2		塩害
	①-3		中性化
	①-4		疲労
	①-5	鋼部材の劣化	腐食
	①-6		疲労
② 劣化による 損傷プロセス	②-1	鋼部材の損傷	
	②-2	コンクリート部材の損傷	
	②-3	伸縮装置の損傷	
	②-4	支承の損傷	
	②-5	定着部の損傷	
	②-6	異常な音・振動	
	②-7	異常なたわみ	
	②-8	変形・欠損	
	②-9	PC鋼材の腐食・破断	
③ 災害による 損傷プロセス	③-1	地震時	上部工桁端部損傷
			橋脚損傷
			支承損傷
			伸縮装置損傷
	③-2	増水時	下部工洗掘

④-(2)-2-1-5　計測手法の整理

「④-(2)-2-1-4　劣化・損傷プロセスの整理」において整理した各計測指標について、適用される計測手法を挙げ、その適用性、及び特徴について纏めた。

a. モニタリング適用可能性の整理

各劣化・損傷指標に対する計測手法(単純目視とスケール目視判読を除く)と、そのモニタリングに対する適用性について表④-(2)-2-1-5.1～表④-(2)-2-1-5.3 に纏めた。

表④-(2)-2-1-5.1　モニタリング適用可能性の整理①

○:適合性あり，△:条件付きで満足するが今後期待できる，×:適合性なし(現地計測が不可、構造物の破壊が大きい場合)

番号	計測指標	必要条件			小番号	計測手法	計測性能(※)				条件適合(総合)
		要求精度	要求計測頻度	サンプリング周波数			感度	サンプリング周波数	計測の容易さ	実績	
損傷項目 ②-1 鋼部材の損傷											
8	減肉量	0.1mm	1年	-	8-1	ノギス	0.1mm	-	平面寸法の計測も可能	多	△
					8-2	デプスゲージ	0.1mm	-	容易に孔食深さの測定可能	多	△
					8-3	超音波厚さ計	0.1mm	-	表面処理が必要	多	△
9	亀裂の検知	有無	1年	-	9-1	磁粉探傷	表層部のき裂	-	目視観察により有無を確認	多	△
					9-2	超音波探傷	内部き裂	-	自動的に有無を確認できる	多	△
					9-3	放射線透過探傷	内部き裂	-	放射線防護管理が必要	多	△
					9-4	過流探傷	表層部のき裂	-	目視観察により有無を確認	少	△
					9-5	浸透探傷	表層部のき裂	-	目視観察により有無を確認	少	△
					9-6	破断検知線	※開発段階	-	き裂発生箇所にピンポイントで設置する必要	少	△
10	桁たわみ(動的たわみ)	0.1mm	1日	100Hz	10-1	接触型変位計	0.1mm	100Hz	測定部と変位計を接続するための工夫が必要	多	○
					10-2	レーザー変位計	0.1mm	100Hz	ターゲットと変位計の据付が必要	多	○
					10-3	画像による計測	0.1mm	100Hz	ターゲットとカメラの据付が必要	少	△
					10-4	加速度＋二階積分	0.1mm	100Hz	加速度センサの設置が必要	少	△
11	固有振動数(フーリエ解析+ピーク検出)	0.05Hz	1日	100Hz	11-1	加速度	0.05Hz	100Hz	加速度計の設置が必要	多	○
					11-2	速度	0.05Hz	100Hz	速度計の設置が必要	少	△
					11-3	変位	0.05Hz	100Hz	変位計の設置が必要	少	△
損傷項目 ②-2 コンクリート部材の損傷											
12	ひび割れ幅	0.01mm	1日	100Hz	12-1	亀裂変位計	0.01mm	100Hz	ひび割れ発生箇所に設置	多	○
					12-2	画像処理(専用機器)	0.05mm	-	近接する必要	多	△
					12-3	画像処理(デジカメ)	0.1mm	-	一度に広範囲のひび割れを検知できる	少	△
13	うき・はく離	有無	1年	-	13-1	超音波法	深さ~500mm	-	測定環境や対象表面状態の影響を受ける	少	△
					13-2	衝撃弾性波法	深さ~200mm	-	測定環境や対象表面状態の影響を受ける	少	△
					13-3	打音法	深さ~150mm	-	測定環境や対象表面状態の影響を受ける	少	△
					13-4	赤外線法	深さ~100mm	-	測定環境や対象表面状態の影響を受ける	少	△
					13-5	電磁波レーダ法	深さ~200mm	-	測定環境や対象表面状態の影響を受ける	少	△
					13-6	X線透過撮影法	深さ~400mm	-	測定環境や対象表面状態の影響を受ける	少	△

※計測性能の数値は必要条件以上の性能がある場合も必要条件の数値としている。

表④-(2)-2-1-5-2 モニタリング適用可能性の整理②

○：適合性あり，△：条件付きで満足するが今後期待できる，×：適合性なし（現地計測が不可、構造物の破壊が大きい場合）

番号	計測指標	必要条件			小番号	計測性能※)					条件適合（総合）
		要求精度	要求計測頻度	サンプリング周波数		計測手法	感度	サンプリング周波数	計測の容易さ	実績	
14	鉄筋腐食										
	腐食確率		1年	-	14-1	自然電位法	1mV	-	一部コンクリートをはつり計測	多	△
	腐食速度		1年	-	14-2	分極抵工法	1kΩ cm^2	-	一部コンクリートをはつり計測	多	△
	腐食性		1年	-	14-3	電気抵抗法	1Ω cm	-	はつる必要なし	多	△
	桁たわみ	10たわみ参照									
	固有振動数	11固有振動数参照									
損傷項目	②-3 伸縮装置の損傷										
	交通荷重	5交通荷重参照									
15	温度変化	0.1°	1時間	-	15-1	温度計（熱電対）	0.1°	-	埋込みor貼付が必要	多	○
					15-2	赤外線	0.1°	-	一度に広範囲の温度分布が確認可能	少	△
16	遊間量	0.1mm	1時間	-	16-1	変位計	0.1mm	-	主桁に取り付ける必要	多	○
					16-2	画像解析による遊間量計測手法	0.1mm	-	側面からの撮影が必要	少	△
17	異常音	1dB	1日	20kHz	17-1	マイクロフォン	1dB	20kHz	巡回車両に設置可能	少	△
18	衝撃(加速度)	0.1gal	1日	100Hz	18-1	加速度計	0.1gal	100Hz	巡回車両に設置可能	少	△
損傷項目	②-4 支承の損傷										
	温度変化	15温度変化参照									
	遊間量	16遊間量参照									
19	支承回転角	0.01°	1日	100Hz	19-1	傾斜計	0.01°	100Hz	上部工に固定して計測	多	○
	ひび割れ	12ひび割れ幅参照									
	亀裂	9亀裂の検知参照									
	桁たわみ	10たわみ参照									
	固有振動数	11固有振動数参照									
損傷項目	②-5 PC鋼材の腐食・破断										
	グラウトの充填	13-1超音波法、13-2衝撃弾性波法、13-6X線透過撮影法参照									
	塩化物イオン含有量	2塩化物イオン含有量参照									
	ひび割れ	12ひび割れ幅参照									
20	残存プレストレス（ひずみ）	1 μ	5年	-	20-1	鉄筋切断法	1 μ	-	部材を一部破壊する必要がある	少	×
					20-2	スロットストレス法	1 μ	-	部材を一部破壊する必要がある	少	×
	桁たわみ	10たわみ参照									
	固有振動数	11固有振動数参照									

※計測性能の数値は必要条件以上の性能がある場合も必要条件の数値としている。

表④-(2)-2-1-5.3　モニタリング適用可能性の整理③

○:適合性あり，△:条件付きで満足するが今後期待できる，×:適合性なし(現地計測が不可，構造物の破壊が大きい場合)

番号	計測指標	必要条件			小番号	計測手法	計測性能※)		計測の容易さ	実績	条件適合(総合)
		要求精度	要求計測頻度	サンプリング周波数			感度	サンプリング周波数			
損傷項目 ③-1 地震による損傷											
21	地震動	0.1gal	常時	100Hz	21-1	加速度計	0.01gal	100Hz	固定設置	多	○
22	地盤変動	1mm	地震前後	1Hz	22-1	GPS	1cm	1Hz	計測点を十分に固定する必要 設置や維持管理に工夫・注意が必要	少	△
					22-2	地盤変位計	0.1mm	1Hz		少	△
	ひび割れ	12ひび割れ幅参照									
	亀裂	9亀裂の検知参照									
	桁端衝撃	18衝撃(加速度)参照									
	ひずみ(応力)	7ひずみ(応力)参照									
23	水平変位	0.1mm	常時	100Hz	23-1	変位計	0.1mm	100Hz	固定設置	多	○
					23-2	加速度+二階積分	0.1mm	100Hz	2点間の時間同期が必要	少	△
24	傾斜	0.01°	常時	100Hz	24-1	傾斜計	0.01°	100Hz	固定設置	多	○
	固有振動数	11固有振動数参照									
損傷項目 ③-2 洗掘による損傷											
25	流量	1m3/s	1時間	-	25-1	流速と断面積から計算	1m3/s	-	流速が大きく水深が浅い場合は計測が困難 H-Q曲線の精度によるため誤差が生じやすい	多	△
					25-2	水位から計算	1m3/s	-		多	△
26	洗掘状態	有無	1時間	-	26-1	水中カメラ		-	濁流で適応できない 流速が早く水深が浅いと適用困難	少	×
					26-2	カラーイメージングソナー		-		少	×
	傾斜	24傾斜参照									
	固有振動数	11固有振動数参照									

※計測性能の数値は必要条件以上の性能がある場合も必要条件の数値としている。

b. 計測手法の整理

前節で整理した各計測指標の計測手法については、以下の通りである。各計測手法については、表④-(2)-2-1-5.4 及び次頁の表④-(2)-2-1-5.5 最右列のように区分し、各手法について概要を整理した。

表④-(2)-2-1-5.4　計測手法の整理結果①

指標番号	計測指標	計測手法番号	計測手法	5-2計測手法の整理区分
1	膨張量	1-1	JCI-DD2法	促進膨張試験
		1-2	デンマーク法	
		1-3	カナダ法	
2	塩化物イオン含有量	2-1	化学分析法	化学分析による手法
		2-2	蛍光X線分析装置による手法	電磁波による手法
		2-3	近赤外分光法による手法	
3	飛来塩分量	3-1	ドライガーゼ法	飛来塩分計測法
		3-2	土研式タンク法	
4	中性化深さ	4-1	コア、はつりによる手法	フェノールフタレイン法
		4-2	ドリル粉末法	
5	交通荷重	5-1	軸重計	交通荷重把握手法
		5-2	WIM	
6	塗膜劣化度	6-1	アドヒージョンテスト	塗膜劣化診断法
		6-2	インピーダンス測定	
		6-3	画像による診断手法	
7	ひずみ（応力）	7-1	ひずみゲージ	ひずみ計測による応力推定法
		7-2	応力聴診器	
8	減肉量	8-1	ノギス	減肉量計測手法
		8-2	デプスゲージ	
		8-3	超音波厚さ計	
9	亀裂の検知	9-1	磁粉探傷	表面欠陥非破壊検査
		9-2	渦流探傷	
		9-3	浸透探傷	
		9-4	超音波探傷	内部欠陥非破壊検査
		9-5	放射線透過探傷	
		9-6	破断検知線	破断検知線による手法
10	桁たわみ	10-1	接触型変位計	変位計による手法
		10-2	レーザー変位計	
		10-3	画像解析によるたわみ計測手法	画像解析による手法
		10-4	加速度＋二階積分	加速度＋二階積分による手法
11	固有振動数	11-1	加速度	フーリエ変換による手法
		11-2	速度	
		11-3	変位	

表④-(2)-2-1-5.5　計測手法の整理結果②

指標番号	計測指標	計測手法番号	計測手法	5-2計測手法の整理区分
12	ひび割れ幅	12-1	亀裂変位計	変位計によるひび割れ検知手法
		12-2	画像処理(専用機器)	画像解析によるひび割れ検知手法
		12-3	画像処理(デジカメ)	
		12-4	AE法	AE法
13	うき・はく離	13-1	超音波法	弾性波を利用した検知手法
		13-2	衝撃弾性波法	
		13-3	打音法	
		13-4	赤外線法	電磁波を利用した検知手法
		13-5	電磁波レーダ法	
		13-6	X線透過撮影法	
14	鉄筋腐食	14-1	自然電位法	電気的手法
		14-2	分極低工法	
		14-3	電気抵抗法	
15	温度変化	15-1	熱電対	温度計測手法
		15-2	赤外線	
16	遊間量	16-1	変位計	変位計による遊間量計測手法(10-1と同区分)
		16-2	画像解析による遊間量計測手法	画像解析による手法(10-3と同区分)
17	異常音	17-1	マイクロフォン	マイクロフォンによる手法
18	衝撃(加速度)	18-1	加速度計	加速度計による衝撃検知手法
19	支承回転角	19-1	傾斜計	傾斜計による手法
20	残存プレストレス量	20-1	鉄筋切断法	残存ﾌﾟﾚｽﾄﾚｽ量推定法
		20-2	スロットストレス法	
21	地震動	21-1	加速度計	加速度計測による地震動観測手法
22	地盤変動	22-1	GPS	地盤変動計測手法
		22-2	地盤変位計	
23	水平変位	23-1	変位計	変位計による手法(10-1と同区分)
		23-2	加速度+二階積分	加速度計による手法(10-4と同区分)
24	傾斜	24-1	傾斜計	傾斜計による手法(19-1と同区分)
25	流量の変化	25-1	流速と断面積から計算	流量変化の把握手法
		25-2	水位から計算	
26	洗掘状態	26-1	水中カメラ	洗掘状態の把握手法
		26-2	カラーイメージングソナー	

④-(2)-2-1-6　MEMS の適用性の検討

ここでは、これまでに整理した各指標について、MEMS により計測が可能と考えられるものを挙げ、その計測方法や条件について考察し、例示する。

a. 加速度・傾斜計測によるモニタリング

MEMS による計測指標は、加速度及び傾斜である。そのため、これらの計測値を直接的に、あるいは解析などによって間接的に用いることで把握できる劣化損傷指標につい

ては、現状の計測手法の代替案として、MEMS の適用性があるといえる。

このような観点から、MEMS により把握の可能性があるモニタリングとして、i)路面段差、ii)固有振動数、iii)変位、iv)橋脚傾斜、v)支承回転角が挙げられるが、ここでは加速度センサを用いた i)路面段差と ii)固有振動数の 2 項目について詳細を示す。

i)路面段差の把握
車両通過時の衝撃を加速度により把握
ii)固有振動数
加速度（主桁 : 鉛直、橋脚 : 水平）の数値解析（e.g. FFT）による固有振動数の把握（剛性低下の把握）

i). 路面段差の把握

■概要

路面段差を通過する車両により発生する衝撃の大小を、橋梁もしくは車両側の鉛直加速度を計測することにより把握し、その変化をモニタリングすることで、路面段差の有無や段差の進展を把握する。

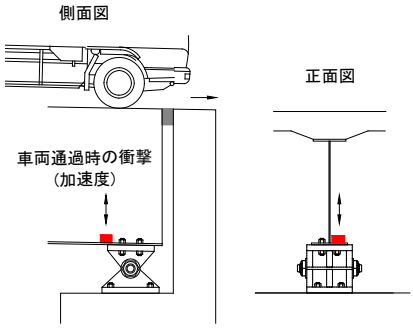
■配置

車両走行による衝撃の検知ということで、橋梁側の振動を検知する手法と車両側の振動を検知する手法が考えらえる。

橋梁側の振動を検知する場合、伸縮装置自体に設置することは困難であることから、桁端部の主桁、横桁に設置し、鉛直加速度を計測する（図④-(2)-2-1-6.1）。

車両側で加速度を検知する場合､センサはバネ下に設置し､鉛直加速度を計測する。バネ上に設置する場合に比べてサスペンションの影響がなく、路面段差から受ける衝撃を直接計測することができる（図④-(2)-2-1-6.2）。

■センサ設置例



■：MEMS センサ

図④-(2)-2-1-6.1　鋼橋下フランジへの設置例



図④-(2)-2-1-6.2　車両バネ下への設置事例 [12)]

■センサ条件

・大きさ：100mm×100mm 程度（主桁、車両に設置できる大きさ）

・設置方法(主桁)：鋼橋－磁石によりウェブ、上下フランジ設置

下フランジ上面に設置すれば落下リスクは小さい

コンクリート橋－アンカや接着剤により桁下面

もしくは側面に設置

・設置方法(車両)：ネジなど治具により機械的に固定

・分解能：0.01gal

・サンプリング周波数：100Hz

・計測期間：同一車両による把握では 1 回（数秒）の計測を年に数回

連続計測の場合、1 週間程度を年に数回

■データの活用

路面段差の状態を把握することで、伸縮装置の異常のみならず、段差発生要因となる支承損傷による上部工の沈下の可能性も把握することが可能である。また、指標は加速度の大小のほか、数値解析により振動特性の変化などを把握することでより精度

良く段差の状態を把握することが出来る可能性がある。

車両通過位置の段差のみ応答に影響するため、伸縮装置の一部変形などを検知することは困難である。

ii). 固有振動数

■概要

主桁や橋脚の固有振動数を加速度から数値解析（e.g. FFT）によって把握する。固有振動数は前述したとおり剛性、部材長を変数とした指標であるため、対象部材の剛性低下や、橋脚の場合は洗掘による根入れ長の変化などの影響を受ける。

加速度は自由振動波形を計測、強制振動を計測する場合は強制振動部の除去や卓越振動数（固有振動数）の抽出などの工夫が必要となる。

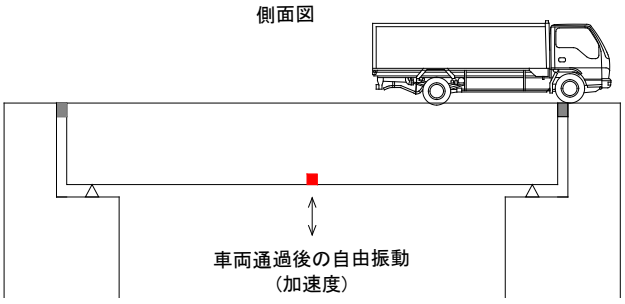
■センサ配置（曲げ 1 次モードを確認する場合）

主桁：支間中央に設置し、鉛直加速度を計測

橋脚：橋脚天端に設置し、水平加速度を計測

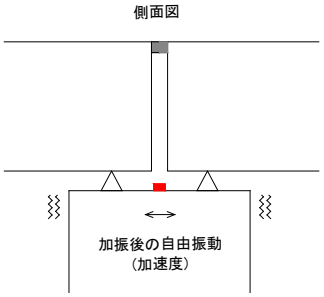
■センサ設置例

具体的なセンサ接地の例を図④-(2)-2-1-6.3、4 に示す。



■：MEMS センサ

図④-(2)-2-1-6.3　上部工固有振動数計測例



■：MEMS センサ

図④-(2)-2-1-6.4　橋脚固有振動数計測例

■センサ条件

・大きさ：100mm×100mm 程度（主桁に設置できる大きさ）

・設置方法(主桁)：鋼橋－磁石によりウェブ、上下フランジ設置下フランジ上面に設置すれば落下リスクは小さい。

コンクリート橋－アンカーや接着剤により桁下面もしくは側面に設置。

主桁に設置出来ない場合、橋上の地覆に設置。

・設置方法(橋脚)：鋼製橋脚－磁石により橋脚天端に設置

コンクリート橋脚－アンカーor 接着剤により橋脚天端に設置

・分解能：0.01gal

・サンプリング周波数：100Hz

・計測期間： 1 回（数秒～数分）の計測を年に数回

増水時の橋脚のようにリアルタイムに洗掘可能性を把握する場合は数分間隔でデータ取得

■データの活用

損傷の位置や程度、種類などの情報は得ることが困難であるため、橋梁全体の状態把握に適用性がある。

橋梁全体の固有振動数を把握する場合、拘束条件の変化が生じた場合にも固有振動数は変化することから、固有振動の変化は、主桁の異常だけでなく支承異常の可能性も含んでいる。

既往計測より、概ねの固有振動数範囲は、主桁：2～10Hz(中小橋)、橋脚：0.5～20Hz となっており、既データから類似橋梁と比較することが可能である。また、解析結果による理論値との比較、経年的な変化の状況の確認により総合的に橋梁の状態を判断する。

一方で、面的なセンサの配置によって、各部材レベルでの固有振動数（e.g. 鋼桁のパネル毎、RC 床版など）を把握することができれば、損傷部位が検知できる可能性がある。この場合、求める部位によっては、振動数として 100Hz 以上の振動数が正確に計測できる必要がある。

同じセンサ配置、取得データで次項に示す変位の推定も可能であり、数値解析によって 1 つのデータから複数の情報を得ることができる。

また、加速度の連続計測によって、車両や船舶の衝突など予測できない外的な衝撃も把握することができる。

④-(2)-2-1-7　今後の展望

冒頭で述べたように、今後、センサを活用した維持管理システムの実現に対する期待はますます大きくなる。そのような中で、MEMS の計測指標である加速度、傾斜の計測は、材料の劣化や一部の変状などのミクロな変化を捉えるというよりも、橋梁全体の変位や振動特性の変化といったマクロな挙動を把握するのに適している。つまり、詳細な状態把握というよりも、下記のようなモニタリングに適しているといえる。

■定期的な点検の補助
・次回点検に致命的な変状が生じないかを把握
■損傷確認後の状態監視
・致命傷ではないが比較的大きな損傷が生じ、すぐに対応できない場合、車両重量制限など実施して限定的に供用しながら、損傷が致命的な変状に至らないか把握
■補修、補強後の経過監視
・補修補強によって橋梁全体が健全となっているかを把握
・一定時間経過後も対策が有効となっているかを把握

また、その他の計測方法として、加速度、傾斜以外の指標についても計測可能となれば、ミクロな変状の把握、すなわち詳細点検へも適用でき、MEMS センサの構造物モニタリングへの適用可能性は極めて大きなものとなり得る。特に現状では、「④-(2)-2-1-5　計測手法の整理」で記載したとおり、現場計測が困難なものや、指標を得るための時間や手間、コストがかかる手法が多いため、これらを改善できる可能性がある。

ただし、加速度やその他指標も含めて、単に必要指標の計測ができれば良いのではなく、コストや設置の容易性、データ収集の容易性、耐久性などのセンサシステム、モニタリングシステム全体としての課題や、解析手法や解析精度といったソフト面での課題を解決していく必要がある。

参考文献

1)国土交通省，国土交通白書 2012
2)国土交通省，道路統計年報，H23
3)国土交通省，橋梁定期点検要領（案），H16
4)近畿地方整備局，橋梁の長寿命化修繕計画，H25
5)北陸地方整備局，管内直轄国道の定期点検結果，H25
6)国土交通省，「道路橋の予防保全に向けた有識者会議」資料，H19

7)中日本高速道路株式会社，「高速道路ネットワークの長期保全計画に関する検討会」資料，H21
8)国土技術政策総合研究所，橋梁の架替に関する調査結果（IV），H20
9)樋口徳男,妙高大橋のモニタリングによる管理,H25
10)国土技術政策総合研究所，道路橋の震災時緊急点検・応急調査の手引き（案），H24
11)日本道路協会，道路震災対策便覧（震前対策編），H14
12 峰岸順一ほか，車軸の加速度測定による舗装路面の段差評価と振動の関係，東京都土木技術支援･人材育成センター年報，H24

１．３　目的に照らした達成状況

実施計画書のテーマ毎に最終目標と研究成果(達成内容)及び達成度、要因分析を下記表のように記載する。

①社会・産業分野

研究開発項目	最終目標	研究開発成果	達成度	成功、失敗の要因分析
①-(1-1) プラント・パイプラインモニタリングシステムの開発	(a)配管設備を実測し、配管運用状態の推定に必要な情報因子の抽出し、センサ開発の技術課題を明確化する。	(a)配管設備における振動と流量の相関を実測し、10k-40kHz超の高周波振動を情報因子として抽出した。検討した結果を基に、稼働中のプラント設備を測定し、配管の運用状態の推定可能性を確認した。	○	プラント運用者へのヒアリング及びユーザ企業と密に議論した結果を基にすることで、実際のプラントの運用現場で適用可能なセンサ仕様を抽出できた。
	(b)配管設備環境の実測により、自立電源及び無線の特性仕様を抽出し、配管環境における無線センサネットワークの構築に関する技術課題を明確化する。	(b)配管における温度及び無線環境を実測し、理想的なプラント環境下においては、0.5 mW/10cm^{2}の発電量と、そのエネルギを用いて約100秒毎に、測定した振動データを無線で約100 m程度の通信可能な見通しを取得した。	○	
①-(1-2-1) 加速度センサによる橋梁モニタリングシステムの開発	(a)橋梁の健全度把握システム ・異常把握に必要なセンシング技術、損傷度の定量に必要なセンサネットワークの性能要件を確認 ・橋梁の長期間にわたる緩やかな変化を把握、計測、健全度推定手法を検討	(a)システムでのセンシングに必要なセンサネットワークの性能に関して、ユーザや研究機関のヒアリングにより確認を行い、要求仕様策定を完了。橋梁の計測、健全度推定手法の検討を行い、報告書を完成した。	○	
	(b)加速度センサ ・ピエゾ抵抗を用いたバルクＭＥＭＳの加速度センサの仕様の調査及び実現性の検討	(b)分解能(ノイズ特性)、周波数特性、時刻同期能力に関する評価を行い、要求仕様の策定及び性能の実現性検討を完了した。	○	
	(c)無線通信・自立電源供給 ・自立電源仕様の調査及び実現性の検討	(c)無線化を考慮した自立電源による駆動と試算するとともに、発電特性、耐久性を評価し、要求仕様の策定及び性能の実現性検討を完了した。	○	
①-(1-2-2) アコースティックエミッションセンサに	(a)先行事例調査 (担当：株式会社東芝)	(a)橋梁特有の故障モードと主なノイズ要因の文献・国内国外事例調査結果を報告 先行事例の調査として、ＡＥセ	△	先行事例調査においては、文献調査は十分な調査が出来たが、海外企業への直接調査では、調査対象会社と

よる橋梁モニタリングシステムの開発		ンサによる橋梁分析の文献調査を実施した。国外機関として、ドイツ Vallen 社、アメリカ PAC 社への会社訪問と実担当者ヒアリング、欧州 TUV 担当者へのヒアリング、アメリカ UCLA 小野教授への訪問とヒアリングを実施。		当社との事業領域の重複への警戒感からか、網羅的な情報収集に困難があった。一方、ＭＥＭＳセンサの開発においては、産学の連携が非常に効果的に働き、当初の目標を十二分に達成できた。
	(b)センサシステムの仕様検討（担当：株式会社東芝）	(b)自立電源を用いた AE センサシステムの要求仕様分析結果を報告 センサシステムの仕様検討として、自立電源・無線技術のまとめを行い、センサシステムの仮想設計を行った。	○	
	(c)MEMS AE センサの FS（担当：国立大学法人東京大学 IRT 研究機構再委託、及び株式会社東芝）	(c)東大式 MEMS センサの開発目標の定量化を完了 MEMS AE センサの FS として、センサ実験 1 回目においてノイズが多いながらも十分な周波数帯域を有することを確認できた。センサ実験 2 回目において亀裂進展に伴う AE 波を実際に取得すると共に、センサ感度目標値を確認した。	◎	
①-(1-3) 幹線道路（トンネル付帯構造物）モニタリングシステムの開発	(a)振動センサ（加速度センサなど）の適用に関し、振動スペクトルの取得に必要なセンサ仕様、サンプリング方法、設置方法などを解析シミュレーション及び模擬実験によって明確にする。また、振動スペクトルから変状監視に必要なデータ（固有振動数など）を得るための解析手法に関する技術課題を明確にする。 (b)トンネル環境へ適用するための課題、具体的には、一定でない風量・風向、及び窒素酸化物などの雰囲気ガスへの耐性　に関する対策案を調査・立案する。また、センシング（センサ駆動）及び無線通信に必要な発電量を明確にし、そのためのデバイス構造及び後段回	(a)換気設備（ジェットファン）取付け部を仮ターゲットに、アンカーボルトの変状などが、固定部材（吊り金具など）の固有振動スペクトル変化として検知可能であることを、模擬体実験と解析シミュレーションを用いて実証、センシング仕様などを明確化できた。また、模擬体での変状実験から、データ解析手法としてはピークシフトではなく、スペクトル波形のパターンマッチングの必要性を明確化した。 (b)気流発電デバイスの適用風速範囲、防塵流路構造、防蝕構造素子を、れぞれ、文献調査、試作実験、環境試験から明確化。トンネル環境へ適用するための基本構造案を立案した。また、センサ端末の構成案を策定し、各部及び全体のエネルギバジェットを試算し、通信インターバル及び必要発電量を明確にした。また、設定仕様から端末の技術課題を明確化した。	○ ○	・成功要因の分析：本研究対象は先行研究例もほとんどなく、実地測定も困難であるとの考えから、着手時より模擬体による実験と解析を併用して推進することとし、効果的な仮説検証につながった。 ・波及効果：社会インフラモニタリングにおいては仮ターゲットとして選定した換気設備だけでなく、配線が困難もしくは煩わしい箇所の取付け構造物全般に設置することが見込まれる。 　また、インフラ以外には、ビルなどの建物のヘルスケアモニタリング、広大な農地で行われる ICT 農業分野、近年関心が高まっている屋外空気質（PM2.5 など）の広域モニタリングなど、非常に広範な用途が考えられ、センサネットワークによる安心・安全な社会の実現に貢献できるものと考えられる。

	路構成を暫定設計し、具体的技術課題の設定につなげる。			
①-(1-4) 公共施設モニタリングシステムの開発	(a)設備機器、配管設備などの基礎データ計測試験	(a)・基礎データ計測試験によりポンプ・送風機・配管などの振動特性を獲得 ・配管設備の吊り状態の異常を振動加速度で検知する方法を獲得 ・既存設備の振動データ解析により簡易的に振動加速度のオールパス値や尖り度での劣化診断が可能であることを確認	○	実設備での計測試験、既存設備の振動データ解析により基礎データの獲得ができた。
	(b)必要なセンサ仕様の抽出と診断システム構築に向けた仕様の抽出	(b)・必要なセンサとして設備機器や配管設備を対象とした振動加速度センサ、配管設備を対象とした漏水検知センサ、設備機器や配線設備を対象とした温度センサの 3 種類を抽出しその要求仕様を整理 ・自立電源として振動発電の検討を行い、仕様を整理するとともに課題を抽出 ・診断項目として軸受けの劣化診断、配管設備の支持部材の劣化診断、漏水検知、配線設備の表面温度計測による劣化診断を抽出 ・定常時と災害時などの非常時に分けた 2 段階の判断基準を用いた診断アルゴリズムを提案	○	得られた計測データやユーザなどへのヒアリング、先行研究の動向調査により、センサ仕様や診断システムの仕様を抽出することができた。
①-(2) 高密度面パターンセンシングシステムの開発 (a)社会インフラの振動調査	(a)社会インフラの振動調査として、市販の加速度センサなどを用いて、加速度、周波数などの振動データを得る	(a)橋梁の固有振動数は数 Hz 程度、振動強度は 0.01-0.1G 程度である。気温変化の影響もあり、劣化による共振周波数シフト（0.1-0.5Hz 程度）を加速度センサで判定するには、打撃により発生する振動を利用することが有効であるという調査結果が得られた。	○	MEMS に関連することにとらわれすぎたため、振動を中心に調べたが、現場のニーズとしては歪センサをもっと手軽に使えるようにしたいというものであった。歪センサについても調査を進め、歪と振動を相補的に利用するようなシステム開発が望まれる。
	(b)振動以外をトリガに送信する砂粒センサ端末の可能性についても調査する	(b)銅箔歪ゲージにより、コンクリートの 0.1-1%程度の歪が、温度では 0.5℃程度の精度があれば、亀裂のモニタリングへの適用可能性が示されている。	△	
①-(2) (b)無線センサ自立電源化の予備実験	(a)積算型無線センサ端末を圧電素子だけで動作できるように改良し、測定した社会インフラの振動を入力して積算と ID 送信についての予備実験を行う	(a)無線センサ端末と圧電 MEMS 振動センサをそれぞれ試作し、電池駆動下で圧電 MEMS 振動センサからの信号を用いて無線センサ端末が積算し、ID 送信できることを実証した。また、打撃による ID 送信も実証することができた。	△	橋梁のような振動が 0.1G 以下の環境では圧電素子のみの発電で無線センサ端末を動作させるのは困難。しかしながら、シート状デバイスとすることで太陽電池を搭載可能な面積が確保可能である。
	(b)圧電振動センサから	(b)圧電 MEMS 振動センサとは別	○	

	の出力だけで動作するための回路構成を検討する	に、発電用の圧電 MEMS デバイスと整流回路からなる構成、及び振動センサと発電を兼ねた構成も示した。		
①-(2) (c)成要素の調査	(a)圧電振動センサ（振動発電）、キャパシタ、整流回路、アンテナについての研究開発状況を調査する (b)センサ端末の電源方式と基本仕様を決定する。	(a)試作した圧電 MEMS 振動発電素子の性能は 0.36V/g 、40mW/cm2/g であり、振動レベルが 1g 程度の環境であれば市販のパワーマネージメント IC でセンサ端末を駆動可能であることが示された。 (b)シート上に振動、歪、温度センサを配列し、シート上で接続した制御・通信 IC からシート上アンテナよりデータを送信、電源は伯間躯体用電池とする。	○ ○	パワーマネージメント IC も市販されており、圧電素子のみの発電の場合は、1G 以上の振動源が期待できる回転機械などには適用可能性があることがわかった。実際の施工までを考え、砂粒センサ端末を改め、シートデバイスという新たなコンセプトを打ち出すことができた。
①-(3) 広域(衛星リモート)センシングシステムの開発	(a)要求仕様/最新技術調査・検討：衛星リモートセンシングシステムにおけるデバイスへの要求仕様の調査検討ならびに最新の光制御技術に調査を行う。	(a)・国際学会(SPIE Remote Sensing、 Security+Defencse)への参加や論文誌を調査することで、衛星リモートセンシングにおける最新技術動向を調査した。 ・衛星リモートセンシングの災害監視用途の調査から、分光系を搭載した小型衛星が災害監視に有効であることを示した。 ・技術調査、検討から分光機能を有する小型衛星を実現するための基本的な要求仕様を決定した。	○	衛星リモートセンシングにおいて最も権威ある学会に参加することで全体の見取り図を把握することができ、最新の要求仕様を検討することができた。
	(b)波長選択構造検討:プラズモニック吸収体の構造パラメータが、赤外域である波長 3-12μm 範囲内の波長における吸収特性に与える影響について、シミュレーション又は理論による検討を行い、試作・評価により検証する。	(b)・プラズモニック吸収体の理論検討及び解析から、センサ感度を決定する吸収率が、充填率（孔径/周期）で制御できることを示した。 ・実センサにおいて、複数の検知波長における感度を実測し、上記解析結果と一致することを示した。 ・充填率が 60%以上で、吸収率が 80%以上となることを明らかにした。	○	複数の構造パラメータから、単一パラメータを絞り込むことによって検証を効率化した。
	(c)偏光選択機能検討：上記プラズモニック吸収体の周期パターン構造に非対称パターンを導入することにより、特定の偏光角度のみを検知することが可能になると予測される。目的とする偏光を選択するプラズモニック吸収体の構造についてシミュレ	(c)・非対称性をプラズモニック吸収体に導入することで形状の非対称性によって、偏光が選択されることを解析的に示した。 ・設計した構造に基づき、センサを作製し、偏光特性を測定することで、実センサにおいても偏光検知の原理実証に成功した。	◎	シミュレーション結果によって得られた構造を、タイムリーに実センサへ適用することで、当初予定成果を上回る実証ができた。

	ーションにより原理検証を行い、偏光検知が可能なプラズモニック吸収体の設計指針を得る。			
①-(4) 自立型高耐久性センサシステム	(a)センサ端末の耐久性に関する仕様値を設定する。 (b)シールド実装構造のセンサ端末基本構想の立案、コーテイング実装の基本仕様	(a)太陽電池モジュールでの規格 JIS8990）、車載用電子部品規格（AE-Q100、Q200 に準拠するように設定すれば、耐久性評価項目として満足できるものと考えられる。 (b)高耐久性シールド実装構造として、低融点ガラスを用いて接合封止する LTCC セラミックス基板実装の採用が適切である。特に、LTCC 基板を用いて電子部品を封止実装することを想定したセラミックス基板の封止接合評価実験において、低融点ガラスによる接合温度 260℃でのプロセスが可能であることが確認された。ただし、内蔵電子部品への熱影響を極力抑制するためには、電子部品実装と封止接合全体工程の低熱影響実装レシピの探索が必要である。 実験結果より、電子モジュール高さ 5mm 以下と想定し、図①-(4).21 の右図のように平坦な密閉封止の後、他材料追加コーティングでバリア性や耐候性を向上させることができる。耐久性を持たせた低コスト実装の可能性がある。	○ ○ ○	インフラの環境条件で使用されているアプリケーション分野として、太陽電池モジュール、車がある。本研究では、無線未ジュール、自立電源、センサ、アンテナなどの複合モジュール連結システムであるので、それらの特殊要因を加味したシステム分析により仕様決定できた。 通信、センシング、電源に悪影響を与えず、高耐久性を維持できるための方策を考えて、技術課題をＬＴＣＣ、接合実装に焦点を当、可能性を追求したので構想案を纏め上げることができた。 面パターンセンシング、配線をセラミック内に格納できないアプリにも適用できる技術としてコーテイング封止実装を構想、課題解決可能性を得た。

②農業分野

研究開発項目	最終目標	研究開発成果	達成度	成功、失敗の要因分析
②-(1)-(a)	微小気候測定技術開発と最適な微小気候の制御技術開発のセンサ仕様の決定	ミズナ・ホウレンソウ双方の「スイートスポット」では、昼夜の湿度格差が高い傾向にあることが分かった。	○	１．多定点での栽培場所の微小気候をマイクロセンサにより常時モニタリング出来たこと
②-(1)-(b)	地上部の最適微小気候制御技術開発の基礎データ収集	ミズナ・ホウレンソウにおいては昼夜の湿度格差があるほど収穫重量が多くなる相関性が見出された。 コマツナにおいては、通常栽培で食品成分表にある基準値	○	多数の収穫重量サンプルを測定して３次元マップが作成できたこと。 ２．多数の野菜を収穫する度に常時栄養成分を測定していたこと。

		より2000ppmも低カリウム化する「バリュースポット」の存在が明らかになった。		
②-(1)-(c)	地下部の最適微小環境制御技術開発の基礎データ収集	栽培養液の改良として、栽培開始時から他の成分量は同量含むが、カリウムのみ1/2に調整した低カリウム化養液で栽培し、さらに低カリウム・低硝酸イオン化養液に収穫前２週間置換した結果、根菜類を含む５種類全てでカリウム含量が60～70％低減していたことが確認された。	○	・根菜類を含む多品種の野菜を栽培養液を変更する以外は同一の栽培方法で栽培できたこと、及び変更が容易であったこと。 ・慢性腎疾患患者向けに根菜類を含む様々な野菜で低カリウム野菜を生産できれば、カリウムの摂取量制限が１日2000mg以下の食事療法が必要とされる、病期3～5の人口が1098万人と推定されている日本国内の潜在的マーケットを活用できる。 ５．農業の担い手不足の解消ばかりでなく、若者の新規雇用促進効果も期待できる。
②-(2)-(a)	ホルモン検出デバイスの設計 高感度ペプチドホルモンセンサをベースとして、これを小型化した黄体形成ホルモンの測定可能なセンサを設計する。小型センサは表面プラズモン共鳴法や電気化学測定法に基づき手のひらサイズで計測できるようにし、薄層流路を利用し、微少量試料に対応できるようにする。	グループで開発を行ってきた電気化学式、表面プラズモン共鳴(SPR)高感度ペプチドホルモンセンサの原理を用いて小型微少量の黄体形成ホルモンの測定可能なセンサを設計、試作した。SPR 法を用いたセンサでは、担当者らが過去に開発したポータブル型センサにマイクロ流路を組み合わせた構造とした。また、電気化学式は、微量容器で、前処理と抗原抗体反応を行い、酵素で増幅された分子をマイクロ流路で検出する方式とした。	○	
②-(2)-(b)	ホルモン検出デバイスの動作検証 畜産向け管理技術、特にセンサを用いた生産管理に関するヨーロッパの最新技術動向を畜産関連の国際会議（ドイツ、９月）などで調査するとともに、設計したホルモン検出デバイスを用いて数 ng/ml の定常状態と排卵直前の一過性放出時に相当する100ng/mlの濃度、及	上記、SPR 式、電気化学式の微量黄体ホルモンセンサの動作確認、性能評価を行った。排卵期と、排卵期以外の期間で、血中黄体ホルモンの濃度に大きな差があるため、排卵期の濃度である 18.4～61.2 mIU/ml の検出をめざした。その結果、両方式とも、検出限界：5mIU/m、測定可能範囲：5～200 mIU/ml と充分な性能が得られた。分析時間に関してもSPR方式15～30分、電気化学方式：1 時間程度と通常よりかなり短縮できた。	○	

	びそれらの中間の濃度で測定し、動作検証試験を行う。	また、国際学会に参加しヨーロッパにおける最新技術動向を調査したところ、牛の放牧管理や、体温管理については革新的な技術は無かった。一方で、体温測定をしたいという意見や、ホルモン測定をしたいという意見は多く聞こえたので、本研究が世界でも望まれていることが分かった。		
②-(2)-(c)	無線システムの動作検証 牛個体に装着したセンサから得られる情報を、低消費電力で集約可能な使用周波数帯、データ速度、データ形式、通信プロトコルなどを検証する。	ユーザヒアリングから、出産後の初期発情を検知し、早期に繁殖生理周期を把握することが繁殖に有用であることが分かった。これから、肉牛と乳牛で所望の出産周期を得るために必要な無線部の連続動作期間は最大で4ヶ月程度となった。 ホルモンセンサでは、濃度値もしくは高濃度 or 低濃度の 2 値とデータ量が小さく狭い帯域で通信が可能であることから、低周波で通信距離が長く、送信電力も大きい 420MHz 帯特定小電力無線を選択し、ホルモンセンサデータの模擬に無線機に搭載した温度センサデータを取得して無線システムの動作検証を行った。 検証の結果、10 分毎測定にて 8 ヶ月間の動作が可能であることが分かった。	○	
②-(3)接触型センサ端末による子牛の特定部位の体温の連続計測	・胴体部、尾根部、耳部、首部をそれぞれ計測できる体温センサ端末の試作 ・子牛の感染実験によるその有効性の検証	・各部位用センサを試作、装着試験を実施して、尾根部用計測ベルトが最も良いことが分かった ・子牛の肺炎（感染実験）試験により、実験肺炎に伴う体温上昇を良く反映するデータを取得＝有効性を実証した	○ ○	
②-(3) サーモグラフィによる子牛の体表面温度分布の断続計測	・子牛の体表面温度を安定的に計測できる部位及び最適な計測距離の特定 ・ほ乳装置にサーモグラフィを取り付け、群頭飼育舎での計測	・ほ乳中の子牛の熱画像を連写撮影した結果、眼縁部の最高表面温度を安定して取得できること及びその計測距離を特定した。 ・ほ乳装置にサーモグラフィを取り付け、子牛の首ベルトのＩＣタグを識別して、群頭飼育舎の子牛の自動計測に成功した。	○ ○	
②-(3) 経口投与型ルーメンセンサ端末の試作及び pH	・既存のガラス膜式pH測定器に無線機能を取り付けた無線機能付きpH測定器の試作	・経口投与サイズの無線温度センサ端末を試作し、ルーメン内留置のためには、密度 1.3g/cm3 以上必要なこと及びルーメン	○	

の連続計測	・１カ月以上の牛への投与試験によりその有効性の検証	内から 300MHz 帯の無線送信化可能なこと明らかにした。また pH センサ端末の無線化したルーメンセンサ端末を試作した。 ・ルーメン内投与試験を実施し、無線 pH 測定が可能なこと及び端末仕様に関する知見を得た。	△	水漏れによる故障でセンサ投与後から２時間程しか測定できず、長期間測定のためには防水加工が必要

③健康医療分野

研究開発項目	最終目標	研究開発成果	達成度	成功、失敗の要因分析
③-（1） 常時装着型循環器機能センサシステム	・超音波による血圧測定と血管径モデルによる測定による課題抽出 ・血圧センサデバイスの仕様及び設計の指針	・超音波により血圧測定可能であることが検証され、モデル実験で必要な電力などを明確化できた。 ・循環器疾患に対するモニタとして必要な項を明確化し、ニーズを　満たす構成を見いだすことができた。	○	・綿密な事前調査による新技術の利用可能性検討 ・それぞれの分野での第一人者である大学、病院との連携
	・MEMS マイクロフォンによる心音計測、不整脈検出のための要件見いだす ・MEMS 音響センサデバイスの仕様及び設計の指針。	・MEMS マイクにより心音測定可能であることが検証された。 ・不整脈などの心疾患モニタとして必要な項目を明確化し、ニーズを　満たす構成を見いだすことができた。	○	・ポテンシャルの高い基本技術を本分野に最適化することにより良い成果を上げることができた。
	(a)(b)で取得したデータの臨床的意味と医療現場でのニーズを示す。	・循環器疾患の可能性のある患者などに対する連続モニタ、リスク管理などに役立つと期待される。	○	・病院との緊密な連絡により、常にニーズを把握し、適切な開発を進めることができた。
③-（２） 予測型血糖センサシステムの開発	５種類以上のマルチバイタルサインについて２４時間常時連続モニタリング実験システムの確立	１０種類のバイタルサインデータを同時に３日間連続して測定できるモニタリングシステムを確立した。	○	マルチバイタルサイン測定について、各バイタルサインに適した既存技術の組み合わせを考え、活用したことが成功につながった。医療産業への波及、特にデータマネジメントに関する分野を念頭において研究開発を行った。
	マルチバイタルサインデータ解析実施へ向けたデータベース設計指針検討	血糖を予測に関係のあるパラメータについて整理し、解析手法について検討した。10分後の予測値として、R=0.8以上の相関性を得られた。	○	
③-(3)-(a) 非侵襲血液成分センサシステムの開発（呼気ガス成分分析方式）	1) 具体的な方式・コンセプトの提案とその原理検証（代表的な呼気成分であるＶＯＣに対し1ppm 以下の微量ガス検知確認）	1)-1　高速応答のＭＥＭＳガスセンサによる間欠駆動方式を新提案。基本特許の出願完了。 1)-2　ＶＯＣ（ｴﾀﾉｰﾙ及びｱｾﾄﾝ）について、1ppm 以下の微量ガス検知確認完了。	◎	微量ガス（１ｐｐｍ以下）の検知は、ＭＥＭＳガスセンサならではの高速応答性と温度・時間の高い制御性により実現した。

		1)-3　間欠駆動方式による高感度化に関して、モデルを考案し分析により検証した。		
	2) 技術課題の抽出と開発の方向性決定	2)-1　技術課題として、①センサの更なる高感度化と選択性付与、②呼気ガスのサンプリング方法　を抽出完了。 2)-2　開発の方向性を「複数種類のセンサのアレイ化」に決定。	○	
③-(3)-(b) 非侵襲血液成分センサシステムの開発（光学的手法）	共焦点方式実験システムの設計と構築を行い、共焦点光学系の基本動作と複数波長のレーザ光の高速可変を確認する。	共焦点方式実験システムの設計と構築を行い、共焦点光学系の基本動作と XYZ 方向スキャンを確認した。３つの波長（1530nm、1547nm、1600nm）のレーザ光を高速可変（50msec 切替）できた。	○	横河電機の保有する共焦点技術及び光計測技術が活用できた。
	共焦点方式実験システムで、外乱の影響を低減する皮膚組織の真皮の情報を選択的に検出する。馬鮮血中（血液中）の血糖値が光学的に測定して原理確認する。	皮膚組織の真皮を選択的に検出できることを確認した。馬鮮血中（血液中）の血糖値が光学的に測定できる確認し、原理検証をした。	○	横河電機の保有する共焦点技術及び光計測技術が活用できた。
	共焦点方式実験システムで、被験者２名の光学式予測値と実測血糖値の EGA 解析を行う。先導研究の目標として、血糖値 75mg/dL 以上で許容範囲±20%以内にデータの 80%以上入るか評価して原理確認する。	被験者２名の光学式予測値と実測血糖値の EGA 解析は、血糖値 75mg/dL 以上で許容範囲±20%以内にデータの 82.8%が入り、目標を達成した。これにより、光学的手法の非侵襲・非観血の血糖値モニタの可能性を確認することができた。	○	横河電機の保有する血糖値モニタ評価手法が活用できた。 糖尿病に関する学会、文献の調査から、仕様や評価方法を選定した。
	MEMS による小型化のコンセプトを提案する。	MEMS による小型化のコンセプトを提案して、可搬性向上に光学系の MEMS 化が有効であることを示した。（東京大学年吉研）	○	東京大学年吉研の保有する MEMS 技術と３D プリンタ技術を活用できた。 月１回程度の定期的な意見交換により必要な情報共有と進捗管理ができた。
③-(4) 即時生化学センサシステムの開発	ユーザ機関の評価： 市場調査及びニーズ調査を行う。また、ユーザ機関による成果の有効性の検証から目標達成を確認する。	市場調査とニーズ調査を行い、目標がユーザニーズと整合性があることを確認した。非侵襲で非観血の血糖値モニタのニーズがとても高い。ユーザ機関における成果の有効性の検証により目標を達成したことを確認した。	○	東大・藤井研の MEMS・バイオデバイスの人脈を活用させて頂いた。
③-(4)　即時生化学センサシステムの開発	前処理、抽出、増幅などの機能を閉鎖空間でコンパクトに実現可能な閉鎖型バイオデバイスの選定と試作	弾性容器とローラによる動的封入送液デバイス方式を選定し、密閉溶液の連続した４つのウェルによる送液により原理動作を確認できた。 課題：未着手の要素の開発（試薬注入/保存、細胞破砕、	○	弾性容器に容器外からローラにより外力を加えるというシンプルな構造・方法により、溶液の密封と連続送液という、相反する目的を両立できた。

		遺伝子抽出、溶液混合など)、コンペチタ調査・対策		
	東大・藤井研の MEMS 技術、マイクロ流体技術などとの融合を検討し、閉鎖型バイオデバイス（検査キット）をプレテスト	東大藤井研によってマルチウェル PCR 方式を試作し、複数の密閉微小空間による PCR の基本的な原理動作を確認できた。 課題：基本原理の検証のみ；必要仕様条件の明確化、必要な環境での動作確認、改良。	○	東大・藤井研の保有するマイクロ流路技術とセルプロセッシング技術を活用できた。
	複数種の核酸を密封状態でも検出できる 分子認識ナノバイオ・センサアレイの選定	密封状態で核酸を検出可能なウオッシュレス型アレイを選定・試作し、院内感染で重要な遺伝子で原理動作確認できた。　課題：全体の要素の相互連結、システム化、マンマシン系、ソフト系との結合	○	横河電機の保有する遺伝子計測技術及び高感度蛍光検出技術が活用できた。
	ユーザ機関の評価： 市場調査及び国内外のヒアリングを行う	「多種類の菌種をスキルレス・　ハザードフリーに迅速測定したい」というニーズを把握できた。課題:必要仕様、環境条件などの明確化、	○	東大・藤井研の MEMS・バイオデバイスの人脈を活用させて頂いた。
③-(5) 生活行動見守りセンサシステム (a) 筋量センサ開発	生体組織に感度良く反応し、皮膚表面から深度 60㎜までの筋肉量情を取得できるセンサの開発	筋肉相当の導電率に反応するコイルセンサを試作。 測定深度は 45㎜まで実証し、目標深度 60㎜の設計指針を得た。	○	感度向上はセンサ径が大きく効いた。局所計測を目指しセンサ径や長さなどセンサ形状が大きくなることを踏まえ踏まえ設計指針を整理した。
	ファントムを用いた筋量評価実験を行い、筋量評価としての実用性を検証する。 ファントムの筋肉厚及び筋肉量に対し±5%以内の計測精度を目指す。	測定箇所の深さ方向に対する筋肉率を精度良く評価できることが示唆された。 ファントムでの評価において誤差 3%程度。	○	リハビリや見守りだけでなく、一般健常者への応用展開も考えられる。また筋量計測をアスリートに特化することで東京オリンピック産業への波及も期待できる。
③-(5) 生活行動見守りセンサシステム (b) モーションセンサ開発	赤外共鳴アンテナパターンによる検知波長選択性の検証	波長選択性は、アンテナサイズとアンテナ間隔で制御可能。吸収係数はサイズに依存を確認。	○	シミュレーションで先行検討したことが早期検証へつながった。
	有機半導体を用いた構造における感度検証（10mA/W）	波長 1200nm において 14mA/W の感度達成。高感度化はプラズモン共鳴による吸収増大と、有機半導体による障壁高さの低下によると推定	○	理論的に困難な部分に対し、トライ＆エラーを早めることで感度向上につながった。

	センサ応用に向けたアレイ化の検証	pn 接合分離を用いて、アレイ化技術に必要な課題抽出完。	○	既存の半導体技術を展開することで、着実にアレイ化検証につながった。
③-(5) 生活行動見守りセンサシステム (c) フォースセンサプレート開発	歩行の軌跡を計測するフォースセンサプレートを試作し、歩行能力を定量的に評価するための指標を確立する。フォーセンサプレートとしては有機導電性プラスチックを用いた圧力センサアレイを試作し、大きさは 1m×1m 以上を目指す。歩行速度、歩行周期、歩幅、左右バランスなどの歩行時のデータを取得できるかを検証し、前述の歩行能力を定量的に評価するための指標を確立する。	歩行の軌跡を計測するフォースセンサプレートを試作と歩行の計測を実施した. フォーセンサプレートとしては有機導電性プラスチックを直径 0.5 ㎜のナイロンファイバ上にコーティングした糸を織り込んだ布からなる圧力センサアレイを目標である１ｍｘ１ｍ以上で試作した。ファイバの織り方を工夫することで 1 pF 以上と従来センサより大きな静電容量が得られ、ノイズの多い大面積センサでも用いることが可能であることが示された。また、有機導電性ポリマを用いたセンサにより、人の歩行を計測し、位置などを検知できることが分かった.	○	テキスタイル蓄積技術を応用し、実際に検証用デバイスに反映させた。
③-(5) 生活行動見守りセンサシステム (d) 歩行機能高精度計測技術開発	歩行計測技術の検討及び歩行計測による歩行機能の数値化	装着型歩行計測システムの開発。 開発したシステムで歩行を計測し、特徴量を抽出。 リハビリ以外のアプリケーションについても検討した。	○	擬似的ではあるが実際の歩行状態を再現して計測を行ったことが検証データとして有効なものとなった。 計測場所を限定しないシステムという点は普及効果として期待できる。
③-(6) 健康医療としての全体システムの取り組み方向性に関する調査	１）医療を大きく変えることができるようなセンサシステム全体システムイメージについて明確化	１）従来の取り組みの課題を踏まえ、健常者や健常だと考える人の健康を見守る「生活習慣病１次予防のためのバイタルサイン・モニタリングシステム」、さらに疾病者の重篤化の予兆を捉える「生活習慣病２次予防のための連続モニタリングシステム」を明確化	○	当初の想定システムの段階の分析が正しく、その後の捉え方と、五つのテーマ、調査レポートの選択の正しさ、及び、適切なサブリーダ取り組み方針により明確化できた。
	２）総合的・横断的にどのような技術開発に取り組んでいくべきかについて明確化	先導研究で提案する５つの新しいマイクロナノ技術を駆使したセンサシステムによる従来の医療検査のパラダイムシフトを示唆することができた。今後の、健康医療分野にこの取り組みの方向性を示すとともに、健康医療に関する新たな研究開発政策の指針	○	各テーマ担当者の問題意識と洞察の深さにより全体を整理した。

以上

２．研究発表・講演、文献、特許等の状況

（１）研究発表・講演（発表年月日、発表媒体、発表タイトル、発表者）

①社会・産業インフラ分野

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	武田　宗久	NMEMS 技術研究機構	グリーンセンサシステムの現状と社会インフラへの期待	次世代センサ協議会社会インフラ・モニタリングシステム研究会第５回情報交流会	2013/9/18
2	中尾 寿朗	オムロンソーシアルソリューションズ	オムロンの社会インフラモニタリングへの取組	Advance Electronics Symposium 2013	2013/10/31
3	青柳　桂一	NMEMS 技術研究機構	センサ技術の課題と現状	国交省　第２回 社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会	2013/12/17
4	ファンクァンカン、グエンミンジュン、グエンビンキェム、ファンフンホアン、松本潔、下山勲	東京大学	MULTI-AXIS FORCE SENSOR WITH DYNAMIC RANGE UP TO ULTRASONIC	The 27th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2014)	2014/01/29
5	増田恭平 1、小川新平 2、高川陽輔 1、宮下晃一 2、木股雅章 2	1. 立命館大学 2. 三菱電機	プラズモニックメタマテリアルによる非冷却赤外線センサの新機能-非対称性による偏光検知-	第 61 回応用物理学会春季学術講演会	2014/3/18
6	Shinpei Ogawa1, Kyohei Masuda2, Yousuke Takagawa2, and Masafumi Kimata2	1.Mitsubishi Electric, 2.Ritsumeikan Univ、	Polarization selective uncooled infrared sensor using an asymmetric two-dimensional plasmonic absorber	SPIE DSS 2014	2014/5/7

②農業分野

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	岩崎　渉	産業技術総合研究所 生産計測技術研究センター	Development of On-site System for Precise Detection of Optimum Impregnation Period by Collaboration of Micro Hormone, Acceleration and Temperature Sensors	Joint Forum of the 2nd Japan-Singapore Exchange Seminar & ICT Farm O¥Project	2013/8/16
2	岩崎　渉	産業技術総合研究所 生産計測技術研究センター	Development of wireless sensor network system for the detection of optimum impregnating period in cattle	The Joint Conference of Research Center for Advanced Biomechanics & Japan Institute of electronics Packaging Kyushu Branch	2014/2/3
3	佐々木孝郎	富士通	世界の草地から！富士通の畜産への挑戦	アフリカの牧畜地域で活用しうる ICT 関連技術に関する研究集会	2014/3/25

③健康医療分野

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	安　食　嘉　晴 1),4) 菅哲朗 2) 八尋正行 3) 浜田明子 3) 安達順治 3) 安達千波矢 3) 松本潔 2) 下山勲 2)	1)　オリンパス 2)　東京大学 3)　九州大学 4)　NMEMS 技術研究機構	Near infrared Photo-detector using self-assembled formation of organic crystalline nano-pillar arrays	The 27th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2014)	2014/01/29
2	鈴木卓弥	富士電機	ＭＥＭＳガスセンサを用いた微量ＶＯＣ検出の基礎検討	電気学会第全国大会	2014/3/18
3	菅哲朗 1)、 松本潔 1) 下山勲 1)、 安　食　嘉　晴 2),3)	1)　東京大学 ２）　オリンパス ３　）NMEMS 技術研究機構	SPR による赤外検出器のイメージャの基礎検討	電気学会マイクロマシン・センサシステム研究会	2014/5/27,28

（２）文献（発表年月日、発表媒体、発表タイトル、執筆者）

①社会産業インフラ分野

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Kyohei Masuda1, Shinpei Ogawa2, Yousuke Takagawa1 and Masafumi Kimata1	1.Ritsumeikan Univ、2. Mitsubishi Electric	Optimization of Two-dimensional Plasmonic Absorbers based on a Metamaterial and Cylindrical Cavity Model Approach for High Responsivity Wavelength Selective Uncooled Infrared Sensors	Sensors and Materials	有	in press

②農業分野

なし

③健康医療分野

なし

（３）特許等(出願日、受付番号、特許標題、出願人)

①社会・産業インフラ分野

番号	出願者	出願番号	国内外国PCT	出願日	状態	名　　称	発明者
1	東京大学、東芝	特願P2014-11851	国内	2014/1/24	出願	センサ	下山勲他
2	パナソニック	特願2013-230489	国内	2013/11/06	出願	センサ装置、異常検知システム	白井健雄他
3	パナソニック	特願2014-049217	国内	2014/03/12	出願	センサ装置、異常検知システム	白井健雄他
4	パナソニック	特願2014-069519	国内	2014/03/28	出願	センサ装置、異常検知システム	野村建太郎他
5	三菱電機	特願2013-263930	国内	2013/12/20	出願	電磁波検出器	前川倫宏他

②農業分野

なし

③健康医療分野

番号	出願者	出願番号	国内外国PCT	出願日	状態	名　　称	発明者
1	富士電機	特願2013-257735	国内	2013/12/13	出願	ガス検出装置およびその方法	鈴木卓弥

（４）その他の公表（プレス発表、受賞等）

①社会・産業インフラ分野

番号	所属	発表の形態	発表場所	発表年月
1	ＮＭＥＭＳ技術研究機構	書籍掲載：「ソーシャル・センシング技術調査研究報告書Ⅱ」	一般社団法人　電子情報技術産業協会センシング技術専門委員会	2014/3

②農業分野

番号	所属	発表の形態	発表場所	発表年月
1	産業技術総合研究所生産計測技術研究センター	展示会：産業技術オープンデー（ラボツアー）	産業技術総合研究所九州センター	2013/11/27

③健康医療分野

番号	所属	発表の形態	発表場所/掲載誌名	発表年月
1	オリンパス、東京大学、九州大学、NMEMS 技術研究機構	プレスリリース：有機半導体ナノピラー構造を用いた赤外線検出器	東京大学プレスリリース	2014/1/27
2	オリンパス、東京大学、九州大学、NMEMS 技術研究機構	プレス掲載：安くて高感度の近赤外線センサー、「有機×ナノ」で実現	日経新聞 web サイト	2014/01/30
3	オリンパス、東京大学、九州大学、NMEMS 技術研究機構	プレス掲載：【MEMS 2014】安く高感度の近赤外線センサー、“有機×ナノ”で実現	日経 Tech-On	2014/01/30
4	オリンパス、東京大学、九州大学、NMEMS 技術研究機構	プレス掲載：東大、MEMS2014 で 3 つのセンサデバイスに関する研究を発表	マイナビニュース（web サイト）	2014/01/29
5	オリンパス、東京大学、九州大学、NMEMS 技術研究機構	プレス掲載：東大、MEMS2014 で 3 つのセンサデバイスに関する研究を発表	日本の研究.com	2014/01/29