

## 平成 26 年度～平成 28 年度成果報告書

開発項目「エネルギー・環境新技術先導プログラム／究極の省エネを実現する「完全自動化」自動車に不可欠な革新認識システムの研究開発」

平成 29 年 2 月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

委託先 国立大学法人 東京大学  
国立大学法人 電気通信大学  
一般財団法人 マイクロマシンセンター  
株式会社 デンソー

## 目次

まえがき .....	4
要約（和文） .....	5
要約（英文） .....	7
第1章 研究開発の目的.....	9
第2章 研究開発の内容と実施体制.....	9
2-1 研究開発の内容.....	9
2-2 研究開発の実施体制.....	11
第3章 研究開発の成果.....	14
3-① 分子慣性ジャイロ.....	14
3-①-(1) 原理検証.....	14
3-①-(1)-(1) 目標.....	14
3-①-(1)-(2) 角速度の新しい検出原理の検証とドリフト要因の洗い出し.....	14
3-①-(1)-(3) ドリフト要因の排除.....	14
3-①-(1)-(4) 感度向上によるドリフトの低減.....	15
3-①-(2) MEMS フォースセンサチップの試作ラインへの適用検証.....	16
3-①-(2)-(1) 目標.....	16
3-①-(2)-(2) センサ特性を改善するピエゾ抵抗構成の導出.....	17
3-①-(2)-(3) 実用化可能性の見極め.....	18
3-①-(2)-(4) 小型ジャイロ製作の課題抽出完了.....	19
3-①-(2)-(5) まとめ.....	21
3-①-(3) 実環境を想定した動作検証.....	21
3-①-(3)-(1) 目標.....	21
3-①-(3)-(2) 車載環境における外乱の想定.....	21
3-①-(3)-(3) 他軸感度の評価結果と課題抽出.....	21
3-①-(3)-(4) 温度変化による影響評価結果と課題抽出.....	22
3-①-(3)-(5) まとめ.....	24
3-② 分光イメージャ.....	24
3-②-(1) 原理検証.....	24
3-②-(1)-(1) 目標.....	24
3-②-(1)-(2) 赤外光検出部のアンテナ構造.....	25
3-②-(1)-(3) 光電変換素子の検出波長の長波長化及び熱ノイズ対策.....	26
3-②-(1)-(4) アンテナ構造を含めた光電変換部の検証.....	29
3-②-(1)-(5) まとめ.....	29
3-②-(2) 分光検出器の試作ラインへの適用検証.....	30

3-②-(2)-(1)	目標.....	30
3-②-(2)-(2)	センサアレイのマクロモデルの試作検証.....	30
3-②-(2)-(3)	イメージャプロセスの検討.....	37
3-②-(2)-(4)	まとめ.....	40
3-②-(3)	実環境を想定した動作検証.....	41
3-②-(3)-(1)	目標.....	41
3-②-(3)-(2)	イメージャの温度特性評価の必要性と手法.....	41
3-②-(3)-(3)	温度特性評価結果及び抽出された課題.....	42
3-②-(3)-(4)	まとめ.....	43
3-③	認識アルゴリズム.....	44
3-③-(1)	アルゴリズム基礎検討・分光イメージャへの適用検討.....	44
3-③-(1)-(1)	目標.....	44
3-③-(1)-(2)	マルチスペクトルデータセットの構築.....	44
3-③-(1)-(3)	マルチスペクトルデータからの認識アルゴリズムの開発.....	45
3-③-(1)-(4)	まとめ.....	46
3-③-(2)	認識アルゴリズム開発のための想定実環境の明確化.....	46
3-③-(2)-(1)	目標.....	46
3-③-(2)-(2)	路上での障害物.....	46
3-③-(2)-(3)	分光イメージャでの検知有用性.....	47
3-③-(2)-(4)	まとめ.....	48
3-④	技術動向調査.....	49
3-④-(1)	自動運転全般に係る研究開発動向.....	49
3-④-(1)-(1)	調査の目的.....	49
3-④-(1)-(2)	自動運転車とは.....	49
3-④-(1)-(3)	自動運転車に活用されるセンサと当プロジェクト技術の位置づけ.....	50
3-④-(1)-(4)	自動運転車の市場規模と実用化時期の見通し.....	53
3-④-(1)-(5)	自動運転車に必要な技術.....	55
3-④-(1)-(6)	自動運転のプレイヤー.....	57
3-④-(1)-(7)	自動運転車へのルール作り.....	63
3-④-(1)-(8)	社会への影響.....	64
3-④-(1)-(9)	本プロジェクト実施中の環境変化.....	65
3-④-(2)	自動運転に必要な認識センシングに係る技術動向.....	67
3-④-(2)-(1)	調査方法の概要.....	67
3-④-(2)-(2)	自動運転（運転支援システム）の動向.....	68
3-④-(2)-(3)	運転支援システムに用いられる認識センシング技術の動向.....	77
3-④-(2)-(4)	車両用衝突予知装置（システム）の認識方法.....	80

3-④-(2)-(5) 自動運転自動車における IRiS 研究テーマの位置づけ .....	83
3-④-(2)-(6) 調査結果のまとめ .....	84
3-⑤ プロジェクト推進 .....	85
3-⑤-(1) 研究推進委員会、研究会による研究推進 .....	85
3-⑤-(2) 本格研究等の検討 .....	88
3-⑤-(2)-(1) 総括 .....	88
3-⑤-(2)-(2) 活動記録の概略 .....	89
第 4 章 目標に照らした達成状況 .....	90
第 5 章 研究発表・講演、文献、特許等の状況 .....	93
(1) 研究発表・講演 .....	93
(2) 文献 .....	94
(3) 特許等 .....	94

## まえがき

平成 27 年度、28 年度の 2 年度に渡って「究極の省エネを実現する「完全自動化」自動車に不可欠な革新認識システムの研究開発」を実施した。省エネのために自動車を効率的に運用するには、完全自動化が重要な技術となる。完全自動化自動車はロボットと同様、センサからの情報をもとに、コンピュータを使って判断し、自動車のアクセル・ブレーキ・ステアリングを制御するものとなるはずだ。自動化に必須のセンサとしては、慣性センサとしての加速度センサ・ジャイロセンサ、GPS、可視光カメラが候補になるが、既存の小型慣性センサの性能はドリフトや分解能に課題があり、GPS は電波が届かない場所で利用不可能であり、例えば熱画像情報は可視光カメラでは得られない。本研究では、完全自動化に必須のセンサに焦点を絞り、小型にも関わらずドリフトせず精度よく自動車の姿勢を計測できる分子慣性ジャイロ、可視光に加えて近・中・遠赤外線の画像も同一光軸同一拡大率で得られる多波長イメージャ、及び機械学習を用いて多波長イメージャの認識精度を高める認識アルゴリズムについて先導研究を行った。

いずれの研究開発項目も最先端の基礎的な研究を活用するもので、一朝一夕には製品として完成するものではないが、先導研究を通して、実現可能性を示すとともに課題を明らかにできたことは意義が大きいものであった。今後は、この先導研究の成果が完全自動化自動車をはじめ、日本の産業に資するよう、実用化を目指して、研究開発を継続していきたい。

最後になりましたが、プロジェクトの推進にご尽力をいただきました関係各位、並びにプロジェクトに参加したメンバーに感謝いたします。

研究開発責任者  
国立大学法人東京大学  
大学院情報理工学系研究科  
教授 下山 勲

## 要約（和文）

本事業は、エネルギー・環境新技術先導プログラムの中で、平成 27 年 3 月より平成 29 年 2 月までの 2 年間で実施したものである。究極のエネルギー効率により 30%の CO<sub>2</sub>の削減が見込まれる未来交通システムを実現すべく、従来技術では到達不可能な「完全自動化」自動車を実現するための革新技術として、①分子慣性ジャイロ：自車位置を常に厳密に把握する技術、②分光イメージャ：周辺環境を常に正確に把握する技術、③高精度認識アルゴリズム技術、の三つの未踏認識技術の可能性を確保することを目的としている。先導研究としてそれぞれの技術の可能性について、自動車の実環境を見据えた視点で東京大学、電気通信大学、デンソー、マイクロマシンセンターが分担実施した。

分子慣性ジャイロは、回転による慣性力検出センサである MEMS フォースセンサチップを搭載した分子慣性ジャイロのラージスケールモデルによる評価から、正確な角加速度を検出し、良好な他軸感度特性が得られた。そして、ドリフト特性の評価指標であるアラン分散評価において時間条件を踏まえた良好な結果を確認した。さらに慣性力検出の温度特性がドリフトに大きく影響することから、温度特性の極めて低いフォースセンサチップのピエゾ抵抗試作条件を検討・評価し、目標である低ドリフト化の実現可能性を確認した。これらは、量産を想定した MEMS 試作ラインでのプロセスに基づいた設計試作したデバイスを用い、実車搭載の実環境を踏まえた条件を考慮して実施したものである。

分光イメージャは、ナノアンテナによるシリコン単体では吸収できない波長領域の光を検出する機能の検証として、赤外光の吸収特性から近赤、中赤、遠赤外までの最適なナノアンテナ構造を明確化し、さらに光電効果における低ショットキー化と、光信号検出方式の工夫により、目標である非冷却での NETD 特性を確認できた。また量産を想定した MEMS 試作ラインでの作製プロセスを明確化し、Si 可視光イメージャとコンパクトなプロセスとして可視・近赤外混載光検出素子を試作した。そして、近赤、中赤、遠赤外素子に関する温度特性を評価し、高温側での課題を明確化した。これらは、実車搭載の実環境を踏まえた条件を考慮して実施したものである。

高精度認識アルゴリズムは、分光イメージャより得られる可視、近赤、中赤、遠赤外の 4 つの画像情報から従来にない高い認識情報を得られることを想定し、疑似同軸光学カメラの作成を用いて、可視画像と近赤、中赤、遠赤外面像からなる、人を含めた路上対象物を特定しそれらを撮影対象としたデータセットを構築した。上記データセットを用いて、ディープラーニングにより画像認識率の向上を検証した。人はもちろんのこと、路上縁石や、カラーコーン、車止めなど想定される障害物を特定し、そこから得られる画像情報を、従来にない可視～遠赤までの膨大な量の情報を認識処理するための高速化についても検討し、良好な結果が得られた。これらは、実車搭載の実環境を踏まえた条件を考慮して実施したものである。

本取り組みは、1 年目の成果を踏まえ平成 27 年 12 月に実施されたステージゲート審

査に合格し、2年目を最終年度として取り組み終了時目標を達成したものである。2年間にわたり、月1回の頻度で、研究会を実施し研究開発の進捗状況の共有化及び課題についての取り組みの整合等を密に行った。また、研究推進委員会を年3回程度実施し、今後の取り組みの方向性の検討等を実施した。それらを踏まえて、関連機関への情報発信や展示会展示等を実施した。

## 要約 (英文)

This project was conducted from March 2015 to February 2017 in Advanced Research Program for Energy and Environmental Technologies. Final goal is realizing ultimately energy-effective transportation system which cuts CO<sub>2</sub> emission by 30% via innovative technologies for autonomous driving. These technologies are divided into: (1) a molecular inertial gyroscope such that a car always grasps its exact location, (2) a spectroscopic imager for accurate and regular recognition of the car's surroundings, and (3) an algorithm of visual recognition with high accuracy. This project evaluated feasibility of these three by considering actual driving environments. Four groups, the University of Tokyo, the University of Electro-Communications, DENSO Corporation, and Micromachine Center, executed the project.

### (1)Molecular inertial gyroscope

A molecular inertial gyroscope measures an inertial force by rotation using a MEMS piezoresistive sensor. Good gyroscope performances were confirmed with a large scale model: accurate angular acceleration and low cross-axis sensitivities. Moreover, the gyroscope presented a low drift by an Allan deviation analysis. Drift increased as the temperature coefficient of the resistor (TCR) of the piezoresistor increased. We thus searched for an appropriate fabrication condition to obtain extremely low TCR. The MEMS force sensors were designed and fabricated using MEMS 8-inch production line for checking applicability to mass production and an actual car use.

### (2)Spectroscopic imager

We investigated a Si infrared photodetector to construct a spectroscopic imager compatible with a Si visible imager. Detection of the infrared light, which cannot be detected with solely Si, was established by lowering the Schottky barrier height and developing instruments. The target spec of noise equivalent temperature difference was achieved in a non-cooling condition. We fabricated a test device, a mixture of visible and near-infrared photodetectors, with MEMS 8-inch production line. We also confirmed integration process steps with a conventional visible imager. Characteristics at high temperature were left to be an issue.

### (3)Algorithm of visual recognition with high accuracy

The algorithm pursued recognition with unprecedentedly high accuracy using four different wavelength images, which are to be taken by the spectroscopic imager. We constructed a practical pseudo-coaxial camera, and prepared image data sets composed of visible, near-, mid- and far-infrared images. The deep learning of the data presented that performance of human discrimination was improved. Discrimination scores of road obstacles also improved. Speeding up of recognition was also performed.

This project was inspected at the stage gate in December 2015, and was accepted to continue for another year. Research meetings were held every month. Research progress committee meetings were held three times a year to discuss the project directions. Results are publicly announced and exhibited suitably.

## 第1章 研究開発の目的

我が国が省エネルギー・新エネルギー・CO<sub>2</sub>削減等のエネルギー・環境分野の中長期的な課題を解決していくために必要となる技術シーズの発掘という本プロジェクトの目的を踏まえ本研究開発では、「究極の省エネを実現する「完全自動化」自動車に不可欠な革新認識システムの研究開発」の先導研究を実施する。

快適な移動空間、交通事故ゼロの実現を目指す、未来の交通システムには、究極のエネルギー効率の実現を可能とする。この未来交通システムを担う自動車の自動化への取り組みとして、米国のSAEをはじめ、国内でも各自動車メーカーやIT企業、それらを横断的に取り組む研究開発プログラムを中心に、近年SAEで示す自動化レベル2~3(部分的な自動化、条件付き自動化)の主要幹線道路での運転や物資輸送の自動化を目指した研究開発が進められている。これら自動運転の研究開発の方向は人の運転作業を徐々に自動車へと置き換える過程と捉えられる。

さらに2025年以降には運転者の適切な応答を期待しない「高度な自動化(SAEレベル4)」があり、その究極として、運転手の存在を全く必要とせずに移動が可能となる「完全自動化(SAEレベル5)」が想定され、未来の新しい交通システムの実現が可能となる。SAEレベル3、4、5と進むに従って技術面のハードルが加速度的に高くなり現在の延長線上の技術改善では実現不可能であり、これらは技術ロードマップ上でも未知数な領域にある。本研究開発は未来のエネルギー環境に資する先導プログラムとして、自動車の「完全自動化」を実現に不可欠な、従来にない新原理に基づく革新的認識システムの実現の可能性を得ることを目的とする。

## 第2章 研究開発の内容と実施体制

### 2-1 研究開発の内容

究極のエネルギー効率により30%のCO<sub>2</sub>削減が見込まれる未来交通システムを実現すべく、従来技術では到達不可能な「完全自動化」自動車を実現するための革新技術として、①分子慣性ジャイロ：自車位置を常に厳密に把握する技術、②分光イメージャ：周辺環境を常に正確に把握する技術、③高精度認識アルゴリズム技術、の3つに取り組む。この3つの課題に対し、国立大学法人東京大学は新センサ原理の検証と認識アルゴリズム開発、一般財団法人マイクロマシンセンターが革新デバイスの実用に向けた製作技術等の見極め、さらに株式会社デンソーは「完全自動化」自動車に求められる性能レベルの明確化と技術課題の抽出、をそれぞれ実施した。それぞれの課題に対する取り組み実施の内容は以下の通りである。

#### ①分子慣性ジャイロ

##### ①- (1) 原理検証：国立大学法人東京大学

本研究で提案した、従来のMEMS振動ジャイロのような可動部がなく、円環管路

と超高感度フォースセンサからなる新原理のジャイロセンサに関する低ドリフト化主体とした原理検証を実施。終了時目標を、ドリフトレス 0.1 deg/hour の実現可能性確認とした。

①- (2) MEMS フォースセンサチップの試作ラインへの適用検証：

一般財団法人マイクロマシンセンター

超高感度フォースセンサチップの実用化を見極めるために、実際に MEMS8 インチ試作ライン(つくば産総研内のナノテク拠点 TIA-NMEMS 保有の MEMS ライン)で試作検討を実施した。終了時目標を、試作ラインでノイズ低減チップの試作と実用化の見極めとした。

①- (3) 実環境を想定した動作検証：株式会社デンソー

車載に必要な低ドリフトレベルの暫定仕様の明確化と試作ジャイロの温度特性やドリフトを評価し、車載実環境で想定される課題の抽出を実施した。終了時目標を、車載想定課題抽出、チップコスト試算とした。

②分光イメージャ

②- (1) 原理検証：国立大学法人東京大学、国立大学法人電気通信大学

汎用可視光画像センサの材料である Si 上にナノアンテナ構造等を形成することによる。赤外光領域は、Si では検出できない波長 1.1 $\mu\text{m}$  以上から遠赤外 10 $\mu\text{m}$  レベルまでの、検出感度等が得られることを想定した。

また本研究 2 年目で、原理検証の主要な部分である構造等の設計や検証について研究内容を電気通信大学に承継して実施し、東京大学では検証試料作製等を行った。

終了時目標を、波長 10  $\mu\text{m}$  帯で感度半値幅 6 $\mu\text{m}$  と NETD10 mK の実現性を確認とした。

②- (2) 分光検出器の試作ラインへの適用検証：一般財団法人マイクロマシンセンター

Si 上にナノアンテナなどの赤外光検出構造と可視光画像センサを混載する構造を想定し、実際に MEMS 8 インチ試作ライン(つくば産総研内のナノテク拠点 TIA-NMEMS 保有の MEMS ライン)で試作検討を実施した。終了時目標を、試作ラインでアンテナ・光電変換・可視光検出部を同一基板に混在可能な製作方法導出とした。

②- (3) 実環境を想定した動作検証：株式会社デンソー

車載に必要な雑音透過特性や半値幅の暫定仕様の明確化と試作した光検出器の温度特性や光検出特性を評価、車載実環境で想定される課題の抽出を実施した。終了時目標を、試作分光イメージャの温度特性、波長依存性を評価、車載想定課題抽出とした。

③認識アルゴリズム開発

③- (1) アルゴリズム基礎検討・分光イメージャへの適用検討：国立大学法人東京大学

従来の可視光画像認識に関する機械学習の手法を拡張し、分光イメージャが想定する可視、近赤外、中赤外、遠赤外の画像情報のデータセットを構築、可視画像を凌駕

できる認識アルゴリズムに関する検討を実施した。終了時目標を、場面ごとに、認識における各波長の重要性を定量的に評価、波長選択性を設計にフィードバックとし

### ③- (2) 認識アルゴリズム開発のための想定実環境の明確化：株式会社デンソー

完全自動化に必要な想定実環境として人や、道路上の様々な障害物等に関し認識のロバスト性を向上させるマルチスペクトル画像情報の想定を明確化した。

併せて、本先導プログラム期間中に以下を実施した。

#### ④プロジェクト推進及び本格研究化に向けた調整

目標達成に向け、的確かつ効率的に開発を進めていくべく毎月研究会を開催、進捗チェック、問題発生に関する取り組み修正等を実施した。本研究プログラムは、一年目に中間評価としてのステージゲートが設けられており、先ずは一年目の中間目標を設定し、それを達成すべく研究会で議論して進めた。ステージゲート審査に合格し、さらに先導研究としての終了時目標に向け同様な研究会で議論して進めた。

また、革新認識システム研究推進委員会を年2回から3回開催し、経済産業省、NEDOイノベーション推進部の関係者をオブザーバーとして招聘する中、本格研究化含め先導研究以降の取り組みについても検討を進めた。

また、共同研究者間の知財方針のすり合わせ等を踏まえ、知財運営委員会を適時開催した。

以上についてマイクロマシンセンターが取り纏めとして取り組んだ。

## 2-2 研究開発の実施体制

本研究開発は、初年度国立大学法人東京大学、一般財団法人マイクロマシンセンター、株式会社デンソーの3機関の共同研究として進めた。各研究機関は、①分子慣性ジャイロ、②分光イメージャ、③認識アルゴリズムの3つの研究テーマに対し、(1) 原理検証、(2) 試作ラインへの適用による実用化の見極め、(3) 実環境を想定した動作検証の3つの課題に分担して取り組んだ。図2.2-(1)に実施体制図を示す。

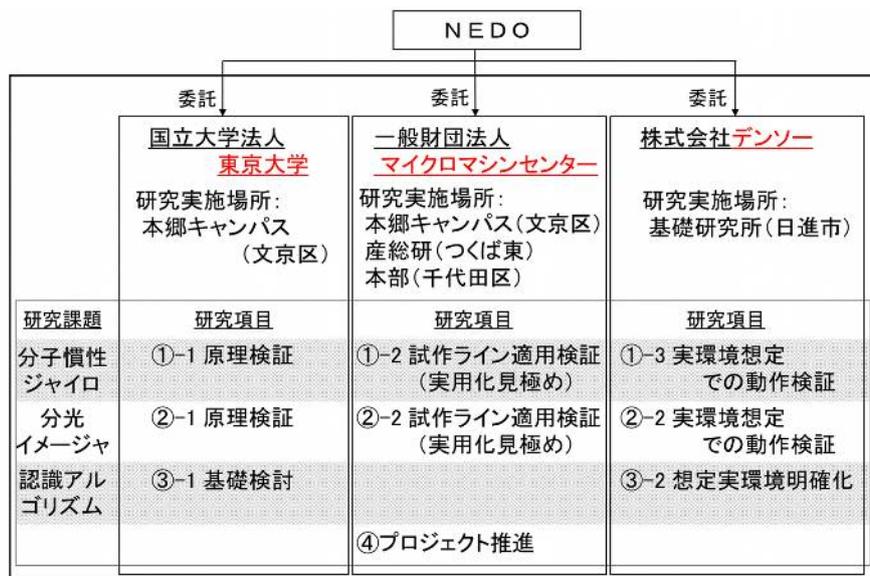


図 2-2-(1) 初年度の実施体制図

また、中間評価を経て 2 年目では、分光イメージャの原理検証の主な部分を、国立大学法人電気通信大学に承継し、国立大学法人東京大学／国立大学法人電気通信大学、一般財団法人マイクロマシンセンター、株式会社デンソーの 4 機関の共同研究として進めた。図 2-2-(2)に実施体制図を示す。



図 2-2-(2) 2 年目の実施体制図

研究を効果的効率的に進めるための研究会は下山研究開発責任者の元、研究員をメンバーとして実施した。

また、共同研究機関間の知財方針等の整合を実施すべく知財運営委員会を設置した。その委員構成を表 2-2-(1)に示す。

表 2-2-(1) 知財運営委員会における委員構成

氏名	所属・役職
下山 勲	委員長 東京大学大学院情報理工学研究科 教授
時田 稔	委員 東京大学 産学連携本部 知的財産部 知的財産総括 主幹
飛田 弥生	委員 株式会社東京大学TLO リエゾン アソシエイト
森下 敏之	委員 株式会社デンソー基礎研究所研究企画部研究企画2 課長
阿出川 俊一	委員 一般財団法人マイクロマシンセンター 技術開発推進室 主幹研究員
小池 智之	委員 一般財団法人マイクロマシンセンター 技術開発推進室 主幹研究員

主に、本先導研究以降の取り組み方について検討する革新認識システム研究推進委員会は、本研究提案時のプロジェクトマネージャ候補であるデンソー服部研究員を委員長とした。その委員構成を表 2-2-(2)に示す。

表 2-2-(2) 革新認識システム研究推進委員会における登録委員

氏名	所属・役職
服部 有	委員長 株式会社デンソー基礎研究所 基礎研究2部 担当部長
下山 勲	委員 東京大学大学院情報理工学研究科 教授
原田 達也	委員 東京大学大学院情報理工学研究科 教授
和戸 弘幸	委員 株式会社デンソー基礎研究所 基礎研究2部 デバイス研究1室 室長
菅 哲朗	委員 東京大学大学院情報理工学研究科 特任講師
太田 亮	委員 一般財団法人マイクロマシンセンター マイクロナノオープンイノベーションセンター副センター長
内田 和義	委員 一般財団法人マイクロマシンセンター 成果普及部 部長
小池 智之	委員 一般財団法人マイクロマシンセンター 技術開発推進室 主幹研究員

## 第3章 研究開発の成果

### 3-① 分子慣性ジャイロ

#### 3-①-① 原理検証

国立大学法人東京大学

##### 3-①-①-① 目標

テーマ終了時目標として、分子慣性ジャイロの出力を調べ、ドリフトレス0.1deg/hourの実現可能性を確認、と設定する。具体的には下記について実施する。

平成27年度の取り組みとして、中間目標「角速度の新しい検出原理を検証し、さらにドリフト要因の洗い出しと対策を行い、ドリフトレスが実現の可能なことの確認」を実施した。

平成28年度の取り組みとして、温度変化に伴うドリフト要因の排除、分子慣性ジャイロのS/N比向上、即ちノイズに対する信号比を上げ、ドリフトレス0.1deg/hourの実現可能性を確認する。

また量産化検討として、8インチウェハを用いたMEMSプロセスによる、MEMSフォースセンサの量産化可能性を確認する。

##### 3-①-①-② 角速度の新しい検出原理の検証とドリフト要因の洗い出し

非圧縮性液体を封入した液環に対し、MEMSフォースセンサチップを隔壁として配置する、新原理のジャイロを提案する。原理検証として、ラージスケールの円環流路を試作し、この円環内部に非圧縮性液体を封入させ、MEMSフォースセンサチップを配置した、ラージスケールモデルを構築した。この分子慣性ジャイロラージスケールモデルを、既製MEMSコリオリ型ジャイロとともに回転させる実験を行い、目的の角加速度、角速度が得られることを確認した。

また、分子慣性ジャイロのドリフト要因の洗い出しのため、既製MEMSコリオリ型ジャイロとともに静置実験を行った。両ジャイロについて、角速度の時間波形、ノイズスペクトルを確認した結果、既製MEMSコリオリ型ジャイロよりも分子慣性ジャイロの方が、ノイズが低いことを確認した。一方、慣性力検出部であるMEMSフォースセンサチップを、温度計とともに静置させる実験を行ったところ、外界の温度由来の低周波ノイズの影響を受けることを確認した。分子慣性ジャイロラージスケールモデルは既製品と異なり、温度補償機構を備えていない状態であるため、ドリフト要因となる温度の影響を排除する温度補償機構、MEMSフォースセンサチップの設計及び試作と評価が必要であることを確認した。

##### 3-①-①-③ ドリフト要因の排除

MEMSフォースセンサチップにはピエゾ抵抗カンチレバーが形成されており、機構回転時の慣性力を、ピエゾ抵抗カンチレバーの抵抗変化から検出する。このピエゾ抵抗カンチレバーについて温度由来のドリフトを排除するために、まず、同種のピエゾ抵抗を

MEMS フォースセンサチップ内部に形成する温度補償抵抗を設計、試作した。片側の抵抗は慣性力を検出するピエゾ抵抗カンチレバーであり、もう片側に温度補償用のダミーのピエゾ抵抗である（図 3-①-(1)-(3)-1）。この温度補償抵抗の温度特性を評価した結果、ないものに比べ温度係数を下げることができ、温度由来のドリフトが低減できることを確認した。

さらに、ドーズ量の異なるピエゾ抵抗カンチレバーを複数用意し、恒温槽を用いて温度特性を評価した。すなわち、ピエゾ抵抗層の形成条件と温度係数との関係を確認し、温度の影響を受けないピエゾ抵抗層の条件を確かめる実験を行った。その結果、ピエゾ抵抗カンチレバー単体で温度係数ゼロの実現可能性を確認した。

また MEMS フォースセンサチップを、非圧縮性液体が封止された分子慣性ジャイロラージスケールモデルに搭載し、この分子慣性ジャイロラージスケールモデルをデュワー瓶に入れた。以上のセンサチップのパッケージングにより、光や温度等の環境の定常化を行った。

なお、MEMS フォースセンサチップおよび分子慣性ジャイロラージスケールモデルの静置実験では、低雑音電源や低雑音の増幅器（アンプ）やデータロガーを用い、計測

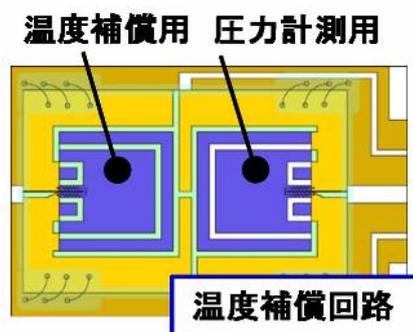


図 3-①-(1)-(3)-1 温度補償

系由来のノイズの低減を行った。また計測系由来のノイズであるのか、センサ由来のノイズであるのかを切り分けるために、別途これらの計測装置のノイズ評価を行い、ジャイロセンサとしてのノイズ、ドリフトの評価を行った。

#### 3-①-(1)-(4) 感度向上によるドリフトの低減

3-①-(1)-(3)で確認した、温度係数がゼロに近いピエゾ抵抗層が形成されたピエゾ抵抗カンチレバーに対して、圧力  $P$  [Pa] を印加し、圧力感度  $(\Delta R/R)/P$  [Pa<sup>-1</sup>] を確認した。

圧力を印加する実験では、ピエゾ抵抗カンチレバーを PCB に配線し、PCB の両面にチャンバーを設けた。チャンバーに対して、圧力校正器から圧力  $P$  [Pa] を印加することで、チャンバーを通してピエゾ抵抗カンチレバーに圧力  $P$  [Pa] を印加した。複数の印加

圧力の条件で抵抗変化率  $\Delta R/R$  [-]を確認し、単位圧力当たりの抵抗変化率である、圧力感度  $(\Delta R/R)/P$  [ $\text{Pa}^{-1}$ ]を確認した。

実験の結果、平成 27 年度試作のピエゾ抵抗カンチレバーに対して、ピエゾ抵抗カンチレバーの圧力感度を 3 倍程度向上させることができた。また、ピエゾ抵抗カンチレバーの薄型化、微小化によるピエゾ抵抗カンチレバーの感度向上、流路長を延長するような構造にすることで、ジャイロとしての感度向上を図り、分子慣性ジャイロとしてドリフトが低減できることを確認した。

### 3-①-(1)-(5) ジャイロセンサの小型化

8 インチウェハを用いる MEMS プロセスによって、分子慣性ジャイロの小型化の実現可能性を確認した。8 インチウェハを用いる MEMS プロセスで、ピエゾ抵抗カンチレバーと流路の形成が可能な分子慣性ジャイロの構造について、設計を行い、まず 3D プリンタを用いてラージスケールモデルの試作を行った。試作した分子慣性ジャイロラージスケールモデルの回転実験を行ったところ、目的の角加速度、角速度が得ら得ることを確認した。

この結果を踏まえ、8 インチウェハを用いた MEMS プロセスによる流路構造の試作を、MMC-MNOIC に依頼した。最終的に、8 インチウェハのチップ化を確認し、MEMS プロセスで分子慣性ジャイロの小型化の実現可能性を確認した。

以上、3-①-(1)-(3)および 3-①-(1)-(4)により、分子慣性ジャイロの S/N 比を向上させることができた。その結果、ジャイロ評価指標であるアラン分散として、終了時目標であるドリフトレス  $0.1\text{deg}/\text{hour}$  の実現可能性を確認した。

また、円環流路構造の分子慣性ジャイロラージスケールモデルを設計、試作を行い、動作確認を行った。その上で、原理的に同じ機構を、8 インチウェハを用いた MEMS プロセスによって試作が行えることを確認し、分子慣性ジャイロの小型化の実現可能性を確認した。

## 3-①-(2) MEMS フォースセンサチップの試作ラインへの適用検証

一般財団法人マイクロマシンセンター

### 3-①-(2)-(1) 目標

MEMS フォースセンサチップの実用化を目指して、終了時目標として、「試作ラインで MEMS フォースセンサチップの試作検証」と設定した。さらにこの終了時目標の達成のために、以下の 3 つに目標のブレークダウンを行った。

1. センサ特性を改善するピエゾ抵抗構成の導出
2. 実用化可能性の見極め

### 3. 小型ジャイロ製作の課題抽出

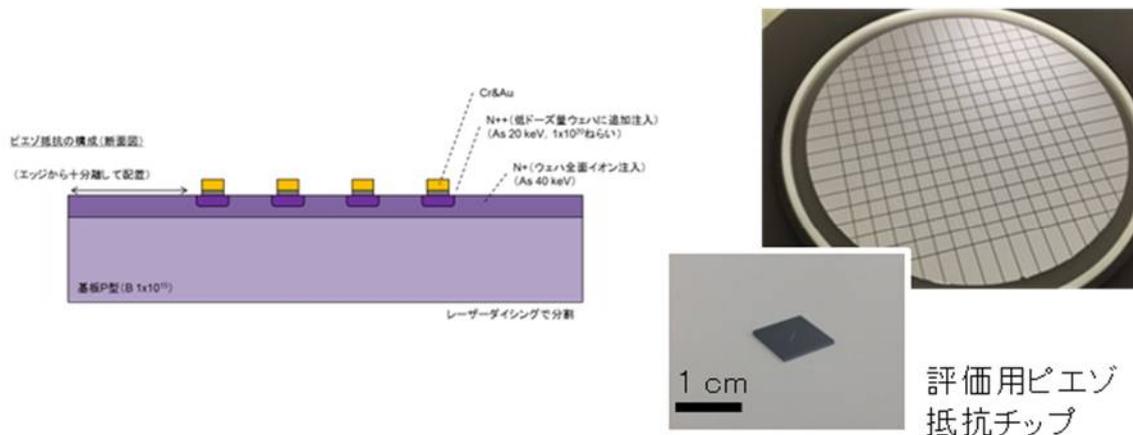
目標達成に向けて、実際に 8 インチ試作ライン（つくば産総研内のナノテク拠点 TIA-NMEMS 保有の MEMS ライン）で、MEMS フォースセンサチップを試作し、試作ラインへの適用検証を行った。

#### 3-①-(2)-(2) センサ特性を改善するピエゾ抵抗構成の導出

原理検証において、現行の MEMS フォースセンサチップでは温度変化によるドリフトが大きいことが示された。このドリフトを低減してセンサ特性を改善することが重要である。ドリフト低減に向けて、抵抗温度係数を低減するピエゾ抵抗構成の検討を実施した。

一年目に極浅ドーピングが可能であることを検証した As イオン注入でのドーズ量の条件を変えて、温度係数評価用ピエゾ抵抗チップを試作した。検討する表面濃度範囲として、 $10^{18} \sim 10^{21}$  atoms/cm<sup>3</sup>を設定し、イオン注入を行った。

ピエゾ抵抗値を 4 端子計測できるように、表面に 4 つの配線用パッドを構成した。以下に試作した評価用チップの構成と写真を示す。作製した評価用チップは東大へ提供し、抵抗温度係数の計測が実施された。ドーパントの表面濃度は SR 分析を行って計測した。



表面濃度と抵抗温度係数の関係を測定した結果、抵抗温度係数が極小値をとることが分かった。このドーパント濃度のピエゾ抵抗を用いれば、温度変化によるドリフト量を従来よりも一桁以上低減できることが示唆される。

以上の結果より、温度係数の低減によりドリフトを低減させて、センサ特性を改善するピエゾ抵抗構成の導出を完了した。

### 3-①-(2)-(3) 実用化可能性の見極め

8インチ試作ラインにおいて、MEMS フォースセンサチップの試作検証を行った。ピエゾ抵抗カンチレバーの形成を含むチップ分割までの全加工工程を8インチウェハで完遂し、ピエゾ抵抗値が計測できるチップを得た。外観とカンチレバー部分の拡大図を図 3-①-(2)-(3)-1 に、加工工程フローを表 3-①-(2)-(3)-1 に示す。

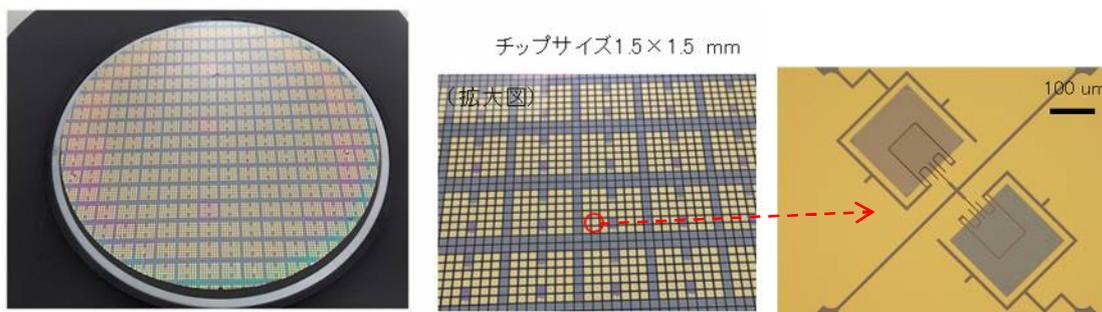


図 3-①-(2)-(3)-1 完成ウェハとチップ外観及びピエゾ抵抗カンチレバーと温度補償部の拡大写真

表 3-①-(2)-(3)-1 8インチ試作ラインでの工程フロー

No	工程名
1	ウェハ準備
2	ピエゾ抵抗形成 イオン注入(外注)
3	ピエゾ抵抗形成 アニール
4	メタル配線形成 メタル成膜
5	カンチレバー形成 フォト
6	カンチレバー形成 メタルエッチング
7	カンチレバー形成 Siエッチング
8	メタル配線形成 フォト
9	メタル配線形成 エッチング
10	支持層除去 フォト(裏面)
11	支持層除去 Siエッチング(裏面)
12	BOX除去 SiO <sub>2</sub> エッチング
13	検査
14	チップ分割

半導体パラメータアナライザを用いて IV 計測を行い、ピエゾ抵抗値を計測した。結果を図 3-①-(2)-(3)-2 に示す。良好な IV の直線関係が見られ、抵抗値は 603 Ω と得られた。こ

の値は原理検証で東大において試作された同じ構成のチップと同等であった。このことから、動作チップが得られる 8 インチ試作ラインでの工程フロー及び工程条件を確定できたといえる。

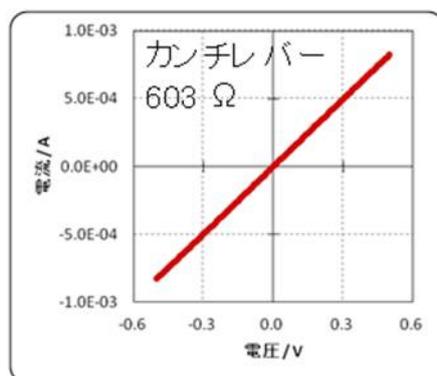


図 3-①-(2)-(3)-2 IV 特性評価結果

さらに抵抗温度係数が極小となるpiezo抵抗構成を有するセンサ特性改善チップの試作を行い、ドーパント濃度のバラツキの評価を行った。

抵抗温度係数が極小となる表面ドーパント濃度前後のpiezo抵抗層を作製するAsイオン注入の4条件を設定し、チップを試作した。完成した試作チップは東大での特性評価実験に提供した。

イオン注入工程でのモニタウェハを用いてドーパント濃度分布 (SR分析) とシート抵抗値 (4探針法) の計測を行った。極小値をもつ工程モニタウェハにおける面内5点でのSR分析の結果、ドーパント濃度プロファイルの面内バラツキは小さく、注入深さ (ジャンクション深さ) は 100 nm であることが分かった。ねらい通りのドーパント濃度が得られていることが確認できた。また、試作した全4条件において、シート抵抗値のバラツキ幅は 0.7-1.6% であることが分かった。piezo抵抗層のドーパント濃度のバラツキは 2% 以下で小さいことを確認した。

以上のことから、試作ラインでの検証として、動作チップが得られる 8 インチ試作ラインでの工程条件の確定とドーパント濃度のバラツキが 2% 以下と小さいpiezo抵抗層を作製できることが確認できたので、実用化可能であると判断し、見極めを完了した。

### 3-①-(2)-(4) 小型ジャイロ製作の課題抽出完了

小型ジャイロ製作に向けて、MEMS フォースセンサチップの小型ジャイロへの組み込みにおける課題の抽出を行った。表 3-①-(2)-(4)-1 のような課題が抽出され、原因と対策を検討した。

表 3-①-(2)-(4)-1 小型ジャイロ製作の課題と対策案

課題	原因	対策
ジャイロ液環への組み込みの容易化	チップが厚い(現状 725 $\mu\text{m}$ )	表面研磨してチップを薄厚化する(300 $\mu\text{m}$ )
電気特性が不安定	配線パッドのメタル層が薄く(現状50 nm)、ワイヤボンディングによる接続が不安定	配線パッドのメタル層を厚くする(500nm)

さらに、8インチ試作ラインでのチップ試作で、対策案を反映したチップが作製可能であるかの検証を行った。図 3-①-(2)-(4)-1、2 に試作したチップの外観写真を示す。

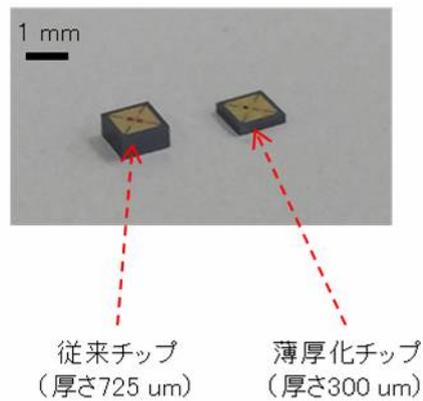


図 3-①-(2)-(4)-1 薄厚化したチップ (従来チップと比較)

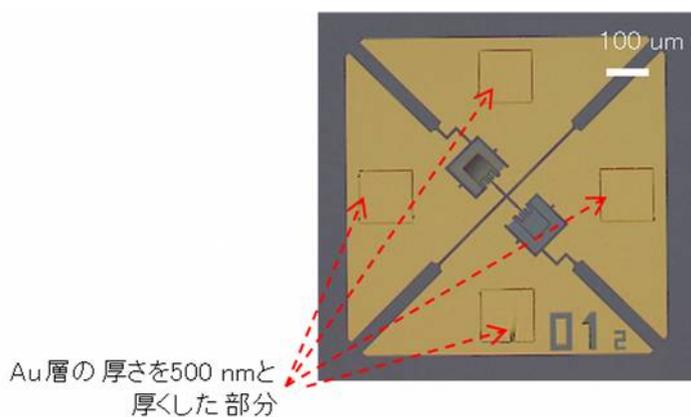


図 3-①-(2)-(4)-2 配線パッドのメタル層を厚くしたチップ

対策案の構成を加えた動作するチップを得た。8インチ試作ラインで対策案の構成を作製可能であることが確認できた。小型ジャイロ製作の課題抽出を完了した。

### 3-①-(2)-(5) まとめ

MEMS フォースセンサチップの実用化を目指し、8インチ試作ラインで、MEMS フォースセンサチップの試作検証を完了し、終了時目標を達成した。

## 3-①-(3) 実環境を想定した動作検証

株式会社デンソー

### 3-①-(3)-(1) 目標

テーマ終了時目標として、試作ジャイロの温度特性やドリフトなどを評価し、車載を想定した課題抽出、と設定する。具体的には下記について実施する。東京大学やマイクロマシンセンターと密に連携し、分子慣性ジャイロに対し車載環境で起こりうる外乱（温度変化、他軸角速度等）の影響を評価する。この結果を元に、分子慣性ジャイロの車載を想定した課題抽出を行い、センサ開発にフィードバックをかける。

### 3-①-(3)-(2) 車載環境における外乱の想定

車載環境における特徴は、走行による車両の傾斜、振動及び、環境温度の大きな変化などが挙げられる。車両の傾斜は、検出対象の軸以外の角速度に対する応答（他軸感度）として現れる。他軸感度がある場合、車両制御に対する精度に影響があるため重要な外乱となる。また、環境温度はセンサに限らず車載製品の動作において重要であることから今回外乱の一つとした。従って、車載環境における外乱として他軸感度、温度を挙げた。

### 3-①-(3)-(3) 他軸感度の評価結果と課題抽出

3-①-(1)に記載のラージスケールモデルを用いて他軸感度の影響を調査し、課題を抽出した。実験方法は以下のようである。

- ・角速度及び角加速度の印加が可能なターンテーブル上にジャイロセンサを配置し主軸応答を確認した。
- ・他軸感度を評価するためターンテーブルとジャイロセンサを互いに傾斜させることでセンサ応答の傾斜角依存性を評価し他軸感度の有無を判定した。
- ・得られた結果から他軸感度に関する課題を抽出した。

今回試作したラージスケールモデルにおける主軸の角速度の応答は 100deg/sec 程度まで良好であった。次にターンテーブルによる角速度の印加は一定の条件としてセンサの傾斜角に対する応答を評価した結果、傾斜に伴う出力低下が観測され、主軸に対し直交する角度においてほぼ 0 となることが分かった。この傾斜に伴う出力低下の度合いは理論的に予測されるものと対応していることから、センサが持つ他軸感度は 0 であるといえる。従っ

て、他軸感度に対するセンサ単体の課題は無く、製品化に向けた開発のステップとして以下のものを抽出した。

- ・車両の傾きを検出する傾斜センサの高精度化
- ・傾斜センサを含めた校正方法の確立
- ・PKG への高精度実装

### 3-①-(3)-(4) 温度変化による影響評価結果と課題抽出

温度変化による影響を本センサの検出原理から検討しその要因を抽出した。まずセンサの検出原理について述べる。本センサの角速度に対する応答は、図 3-①-(3)-(4)-1 に示されるように角加速度の印加に伴う環状流路における流体の圧力に依存することから、

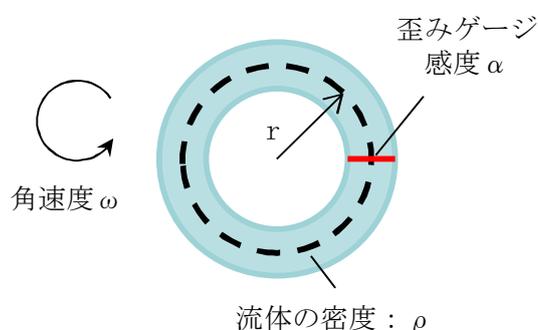


図 3-①-(3)-(4)-1 分子慣性ジャイロの模式図

次式で示される。

$$\text{出力} = 2\pi \alpha \rho r^2 \omega \dots \dots \text{式①}$$

ここで  $\alpha$  は歪みゲージが持つ圧力感度、 $\rho$  は流体の密度、 $r$  は流路の半径、 $\omega$  は角速度を時間積分した角速度である。従って感度の温度変化要因はゲージ感度、流体密度、流路の半径の 3 つである。

一方、センサの温度変化による影響には上記感度の変動以外にも、0 点の変動がある。0 点の変動は本センサの出力方法がブリッジ回路を用いるためピエゾ抵抗の抵抗値の温度係数に依存するものである。一般にブリッジ回路の出力は抵抗変化 ( $\Delta R$ ) が小さい場合近似的に次式で示される。

$$V_{out} = \Delta R / 4 R \times V_{in} \dots \dots \text{式②}$$

ここで  $R$  はある温度におけるピエゾ抵抗の抵抗値、 $\Delta R$  は抵抗値の変化、 $V_{in}$  はブリッジ回路を駆動するための電圧、 $V_{out}$  は出力電圧である。式①と式②を組み合わせることで 0 点の温度による変動を見積もることが可能である。

以上の点から温度変化による影響は感度と 0 点の 2 つがある。これらの要因は圧力感度、流体密度、流路の半径の温度依存性及び、ピエゾ抵抗の抵抗値の温度係数である。これら

の値を実験等により収集し、温度変化による影響を導出した。尚、導出におけるセンサの感度(式①中の  $2\pi\alpha\rho r^2$ )は  $6\times 10^{-3}(s^2)$ とした。

表 3-①-(3)-(4)-1 に温度変化によるセンサの影響と要因及びその温度係数を示す。

表 3-①-(3)-(4)-1 温度変化による影響と要因及びその温度係数

温度変化による影響	要因	温度係数
感度	圧力感度の温度係数(Si のピエゾ抵抗)	-2000ppm/K
	流体密度の温度係数(シリコンオイル)	-800ppm/K
	半径の温度係数(Si の線膨張係数)	2.6ppm/K
0 点	ピエゾ抵抗の温度係数	20ppm/K

圧力感度の温度係数は Si のピエゾ抵抗のゲージ率の温度依存性であり、流体の密度の温度係数はラージスケールモデルで使用しているシリコンオイルの値である。半径の温度係数は流路を構成する材料の線膨張係数であり、上述のように実用化に際してはカンチレバーとの一体化を想定しているため Si の値を使用した。また、0 点に影響を与えるピエゾ抵抗の温度依存性は上述の検討結果から原理的には 0 と見積もられるものの、現実的には性能ばらつきがあるため 20ppm/K 程度を見込んだ。これらの値をもとに影響度合いを見積もり課題抽出した。

#### 感度の温度変化による影響

感度の温度変化による影響は上記 3 つの要因から約-0.3%/K である。これは温度 1 度の変化に対し感度が 0.3%変化するものである。例えば 100deg/s の角速度が与えられている場合、温度が 1 度上昇すると 100.3deg/s と検出するレベルである。車載においては寒冷地における氷点下の環境から灼熱地における車両の使用もあるため温度範囲としてはかなり広い。このため上記レベルの温度依存性でも低減が必要となる。また要因ごとの影響は圧力感度に対して-0.2%/K、流体密度に対して-0.1%/K、半径に対して 0.0005%/K であり主要因は圧力感度の温度依存性である。圧力感度の温度依存性はゲージ感度自体と関連があるため一意的に変更はできない。従って、感度の温度変化に対する影響は約-0.3%/K 程度あり、これをセンサのパラメータで抑制することはできないため、課題は温度補正回路の開発である。

#### 0 点の温度変化による影響

0 点の温度変化による影響は 200deg/s/K である。これは温度 1 度の変化に対し静止時に 200deg/s 相当の値を出力するものである。上述の通りピエゾ抵抗の不純物濃度の最適化を行うことで原理的には 0 となるが、現実的には性能ばらつきがあるため 20ppm/K 程度を見込んだ際の値である。従って、抽出された課題は温度補正回路の開発である。

以上の検討結果から車載環境における課題は以下の4つである。

- ・車両の傾きを検出する傾斜センサの高精度化
- ・傾斜センサを含めた校正方法の確立
- ・PKG への高精度実装
- ・温度補正回路の開発

センサ開発へのフィードバックとしては、本プロジェクトにおいても実施中のピエゾ抵抗の抵抗値及びゲージ感度の温度依存性の抑制技術の開発である。

### 3-①-(3)-(5) まとめ

本プロジェクトにおいて、分子慣性ジャイロの実環境を想定した動作検証として、要求仕様の明確化、省エネ効果の見積り、車載を想定した課題抽出を実施した。

1年目は、要求仕様の明確化、省エネ効果の見積りを実施した。要求仕様の明確化として、ジャイロ単独での走行が必須となるGPSが途絶するシーンを抽出した。これらのシーンでの走行速度、距離を加味しジャイロの必要精度を再確認した。また、完全自動化による渋滞の激減、カーシェアによる交通量の削減の観点で省エネ効果を算出した。渋滞激減対応においては、最適経路選択、交通事故レスによる事故渋滞レス、高速道路での自然渋滞の緩和による効果を算出し、カーシェア対応においては、通勤、通学での自家用車利用を試算対象とした。前記による省エネ効果として合計約30%が期待できることが分かった。

2年目は車載を想定した課題抽出として、車載固有の課題である他軸感度と、温度変化による影響の観点で実施した。その結果他軸感度に関してはセンサ単体での応答には課題は無いことが分かり、車両の傾斜に伴う補正等の重要性を明確にできた。また温度変化による影響は0点の変動が特に大きいことが分かり、補正回路を含めた開発が必要である。

今後実用化に際し、本プロジェクトで得た知見を活かして技術開発を行う予定である。

## 3-② 分光イメージャ

### 3-②-(1) 原理検証

国立大学法人電気通信大学、国立大学法人東京大学

#### 3-②-(1)-(1) 目標

テーマ終了時目標として、波長10 $\mu\text{m}$ 帯において、感度の半値幅100nmと雑音等価温度差10mKの実現可能性の検討を完了、と設定した。ただし、プロジェクト1年目における②-(3)実環境を想定した動作検証：暫定要求仕様の導出と評価(担当：株式会社デンソー)において、波長分解能(感度の半値幅)が近赤、中赤及び遠赤それぞれの帯域において0.1 $\mu\text{m}$ 、0.5 $\mu\text{m}$ 、6.0 $\mu\text{m}$ であることが要求仕様として導出された。そのため、感度の半値幅については、これらの値をプロジェクト最終目標として設定した。以下には、赤外光検出部のアンテナ構造、光電変換素子の検出波長の長波長化及び熱ノイズ対策、及び、アンテナ

ナ構造を含めた光電変換部の検証について述べる。

### 3-②-(1)-(2) 赤外光検出部のアンテナ構造

シリコン自体は赤外光に対して透明なので、効率よく光電変換を行うためには、シリコン上に光吸収層を設ける必要がある。本プロジェクトでは、金ナノピラー構造アンテナを設け、赤外光入射時に金ピラー構造において生じるプラズモン共鳴による光吸収の利用を試みた。1年目において、電子線描画と DeepRIE によるシリコン深掘りエッチングを組み合わせ、シリコンナノピラー構造を形成するプロセス条件を得ることができた。この構造を基板垂直軸に対して回転させながら、斜め方向から金属を蒸着もしくはスパッタすることにより、側壁を金属で完全にコーティングした、金ナノピラー構造を得ることができた。プロセス概要を図 3-②-(1)-(2)-1 の左側に記す。このプロセスを用いて試作した金ナノピラー構造は、図 3-②-(1)-(2)-1 の電子線顕微鏡写真で確認できるように、最小で太さ約 200 nm、長さ約 2  $\mu\text{m}$  であり、10 以上の高いアスペクト比を持つ構造を精度よく形成可能な技術を確認できた。ここで得られたプロセス条件は、MMC-MNOIC と共有をはかり、試作ラインにおけるプロセスに利用した。

アンテナ構造の寸法と吸収波長の関係を調べるために、太さ、ピッチ、長さを変えて試作 10  $\mu\text{m}$  までの吸収性能を計測した。吸収波長の評価においては、本プロジェクトで購入した顕微 FTIR（フーリエ変換赤外）分光器による反射スペクトルを用いた。図 3-②-(1)-(2)-(1)の右上に示すのが、波数（横軸）と反射率（縦軸）のグラフである。この実験から、波長 6  $\mu\text{m}$ ～10  $\mu\text{m}$  の範囲内で目標以下の半値幅を持つ吸収帯が存在することを示唆する結果が得られた。反射率の低下が、吸収以外の散乱や回折などの過程で生じていないかどうかを確認するために、本プロジェクトで購入した黒体炉の赤外光をデバイスに照射し

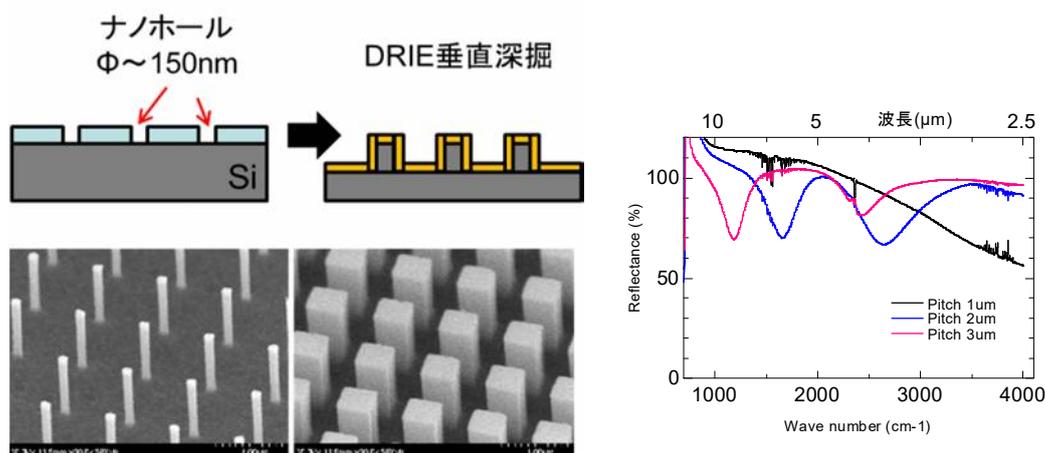


図 3-②-(1)-(2)-1 ナノピラー構造の製作と光学特性

て赤外線カメラでデバイス表面を観察したところ、黒体炉とカメラの位置関係が正反射条件以外の角度においては、赤外光が観察されなかった。このため、反射率の低下は、吸収率の増大によってもたらされていることが分かった。この解釈は、有限要素法によるシミュレーション結果とも整合がある。以上により、中～遠赤領域において、目標とする半波長幅を達成し、アンテナ構造で目標とする波長分解が実現可能であることが分かった。

### 3-②-(1)-(3) 光電変換素子の検出波長の長波長化及び熱ノイズ対策

シリコンはバンドギャップが 1.1 eV なので、カットオフ波長 1.1  $\mu\text{m}$  よりも長い波長の光を電氣的に検出することはできない。一方、シリコンと金属の接触界面に形成されるショットキー障壁  $\phi_b$  は、シリコンのバンドギャップよりも小さい障壁高さを実現できるので、赤外の光を電流に変換することができる (図 3-②-(1)-(3)-1 左上)。通常、金と n 型シリコンによるショットキー障壁  $\phi_b$  は 0.7 eV 程度であり、カットオフ波長は 1.8  $\mu\text{m}$  となる。一方で、クロムやチタンなどの金属と n 型シリコンの界面に形成される障壁  $\phi_b$  は、さらに低い障壁を実現できるので、検出可能な波長の長波長化につながる。今回は、シリコンナノピラー構造に金属膜を成膜する際に、クロムやチタンを数 nm 蒸着して、その上にさらに金を約 50 nm 蒸着することにより、図 3-②-(1)-(3)-1 左下に示すような、低ショットキー障壁を持つ金ピラー構造を形成した。図 3-②-(1)-(3)-1 右に示すグラフは、デバイスの電流電圧 (IV) 特性である。223K と 296K (室温) の二つの条件で得たものである。温度を変えて計測する際には、本プロジェクトにて購入したホットステージを利用した。これを見ると、金属と n 型シリコンのショットキーにより、良好なダイオードが形成できていることが確認できた。温度を下げることで、逆バイアス時における暗電流が低減していることも確認できた。IV 特性のカーブの傾きから、ショットキー障壁の高さを見積もることができる (Chueng, *et al.*, *APL*, 1986)。実験で得られた IV 特性の解析により、チタンを n 型シリコンとの界面に用いた場合の障壁は 0.53 eV 程度となり、金と n 型

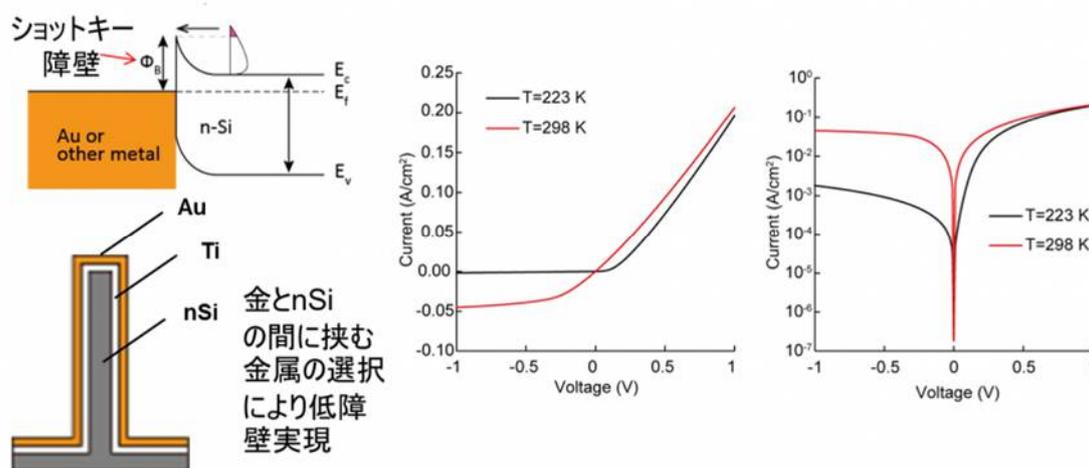


図 3-②-(1)-(3)-1 低ショットキー障壁の形成

シリコンとの障壁と比較して、低い障壁高さを実現できることを確認できた。この場合のカットオフ波長は  $2.7\ \mu\text{m}$  と計算されるので、金と n 型シリコンでデバイスを構成したときと比較して、検出波長を長波長化可能であることが確認できた。

また、逆バイアス電圧をデバイスに印加すると、ショットキー障壁が無バイアス時と比較して低くなる効果があることが知られており、**image force lowering** と呼ばれている。この効果を利用して、さらにショットキー障壁  $\phi_b$  を低下させて検出波長の長波長化を試みた。ショットキー障壁  $\phi_b$  の低下を検証するために、複数の異なるデバイス温度で IV 特性を計測し、特定の逆バイアス電圧時における温度と暗電流の関係から、障壁高さを見積もった。この解析により、クロム/n 型シリコン障壁とチタン/n 型シリコン障壁の双方において、バイアス印加によりカットオフ波長が中赤外の領域に存在するような障壁高さの低下が得られた。以上により、単体では波長  $1.1\ \mu\text{m}$  までの近赤外光しか検出できないシリコンを用いて、中赤外の波長まで検出可能な低障壁を実現できることを確認した。

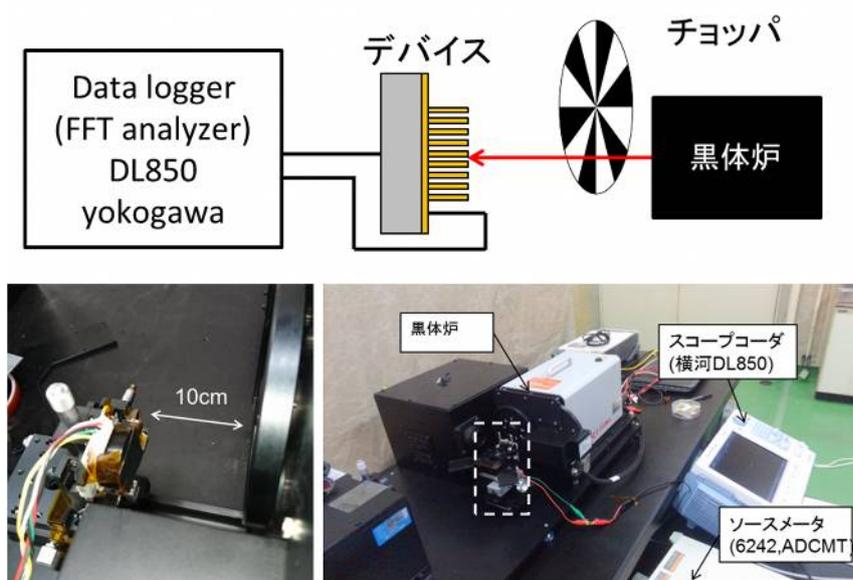


図 3-②-(1)-(3)-2 赤外応答評価方法

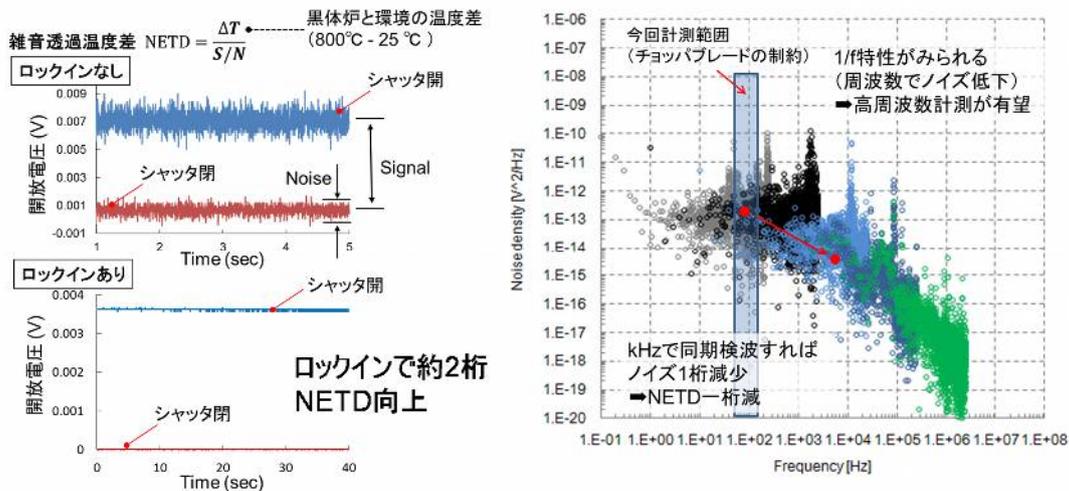


図 3-②-(1)-(3)-3 赤外応答評価方法

本項ではデバイスが赤外光を検出する際の性能として、NETD (Noise Equivalent Temperature Difference : ノイズ等価温度差) を 10 mK 以下に抑えることを目標としている。NETD は  $NETD = \Delta T / (S/N)$  により定義される量である。この目標の達成のためには、ノイズ量を低減するための信号処理が欠かせない。そこで、周波数変調信号を利用したロックイン計測を行うことにより、信号に含まれるノイズ量を低減し、低 NETD の実現に取り組んだ。実験に使用したセットアップを図 3-②-(1)-(3)-2 に示す。黒体炉から出た赤外光を、チョップを用いて変調する。その際に、光によってデバイスに生じた応答を、データロガーを用いて計測した。このとき利用したデータロガーは FFT (高速フーリエ変換) の機能を持ち、周波数成分ごとに信号を解析可能なものであり、本プロジェクトにて購入したものである。ロックイン処理を行わなかった場合と行った場合の時間領域の出力データを図 3-②-(1)-(3)-3 に示す。シャッター閉はデバイスに光が照射されていない状況であり、シャッター開はデバイスに光が照射されている状況である。シャッターを開くと、信号レベルが増大することがわかる。ロックイン処理を行っていない状況においても、光照射の応答は明瞭に見えているが、ノイズ成分が多く、結果的に NETD が高くなる傾向が得られている。一方で、ロックイン処理を行ったところ、S/N に格段の向上がみられ、NETD において約 2 桁の低減をはかることができた。

ロックイン処理は、変調信号周波数近傍のみで信号を検出することにより、ノイズの積分量を減らす処理であるが、ノイズ密度が低い周波数帯でロックイン処理を行えば、さらに S/N を向上させることができる。そこで、デバイスに光を照射しない暗状態で、ノイズ出力の周波数特性を計測したところ、図 3-②-(1)-(3)-3 右側のグラフのように、周波数に対してノイズ密度が右肩下がり傾向を示した。これは、数 kHz の周波数までは、1/f ノイズの影響が大きいので、ロックイン周波数を高くすればするほど、この帯域では低いノイズレベルでの計測が可能となることが分かった。今回利用したチョップでは 230Hz での変調

が変調周波数の上限であったが、さらに変調周波数を高くすることにより、低ノイズ化を図ることが可能との知見が得られた。

### 3-②-(1)-(4) アンテナ構造を含めた光電変換部の検証

上記の知見を融合し、アンテナ構造と光電変換部を融合した検出器を試作した。試作した検出器を図 3-②-(1)-(4)-1 に示す。このうち、(a)は初年度の成果として、大学で試作したものである。(b)は初年度の知見を MMC-MNOIC に移転し、試作された赤外ディテクタに対し、ポストプロセスを施すことによって金属膜にチタン薄膜を挿入する改造を行ったものである。この改造したデバイスに対して、逆バイアス電圧を-5V かけた状態で 180Hz で回転させたチョップを通して出てくる赤外光を検出したデータを(c)に示す。この時の黒体炉の温度は 500°Cであり、一般的に中赤外光の検出評価に用いられる黒体炉温度である。これにより、中赤外光を精度よく検出できることが分かった。これ以外にも、ロックイン検出方法とショットキー障壁の低下を組み合わせることで、近赤外光～遠赤外光に対して、デバイスを冷却することなく、NETD10mK 以下を達成する成果が得られ、当初の目的を達成することができた。

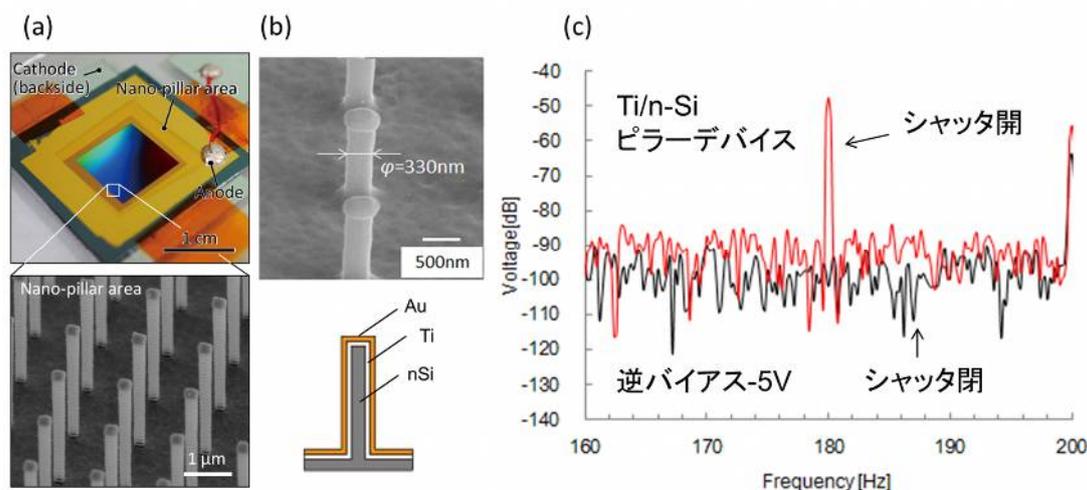


図 3-②-(1)-(4)-1 赤外応答評価方法

### 3-②-(1)-(5) まとめ

本項目では、分光イメージャの実現可能性を検証するために、アンテナ構造とショットキー障壁を組み合わせた、シリコンベースの赤外光検出器について、検証を行った。得られた結果は当初設定した目標を達成し、従来にない非冷却量子型のシリコン赤外検出器の実現可能性を実証したといえる。

### 3-②-(2) 分光検出器の試作ラインへの適用検証

一般財団法人マイクロマシンセンター

#### 3-②-(2)-(1) 目標

1年目の研究開発として、「赤外光ナノアンテナ構造について試作検証をし、それとショットキーダイオードと組み合わせた、統合デバイスにて、赤外光の応答を確認」を達成した。この活動においては、プロジェクト開始前までに得られた、赤外光共鳴アンテナに関する知見も活用している[1]。これにより、センサシステム構築の基礎技術の洗い出しができた。2年目は、そこで得られた知見を用いて、「赤外光アンテナ構造を有する赤外光センサと、可視光イメージャを融合させるためのプロセス導出の完了」を目標とし検討を行った。具体的には、下記を行った。

- 1) 可視光検出部と赤外光検出部とが同一基板に搭載されたデバイス（以下センサアレイのマクロモデル）の試作検証：可視光イメージャの作製プロセスとアンテナ作製プロセスを融合した場合の課題やリスクを抽出し、それらを解決する構造や加工法を、8インチ試作ライン（つくば産総研内のナノテク拠点 TIA-NMEMS 保有の MEMS ライン）を用いて検討した。具体的には、センサアレイのマクロモデルを上記のラインにより試作し検証を行った。
- 2) イメージャプロセスの検討：1)で得られた知見を元に、具体的なイメージャプロセスフロー案を提案した。

以下、各項目について具体的に述べる。

#### 3-②-(2)-(2) センサアレイのマクロモデルの試作検証

センサアレイマクロモデルに於ける、可視光センサアレイの試作

○目的

センサアレイのマクロモデルとして、図 3-②-(2)-(2)-1 のようなデバイスの試作を提案した。このデバイスに於いて、可視光検出部は、シリコン pn フォトダイオードで構成されている。また、赤外光検出部は、本プロジェクトで検証しているナノアンテナ型ショットキーダイオード（統合デバイス）を用いている。そこで、初めに、図 3-②-(2)-(2)-1 のようなセンサアレイのマクロモデルを試作するに当たり、可視光検出部（シリコン pn ダイオード）のみのセンサアレイ部分の試作を、8インチ試作ラインを用いて行い、評価（暗時の電流電圧特性、及び分光感度特性の取得）を行い、市販品レベルの動作がなされているか、確認を行う。

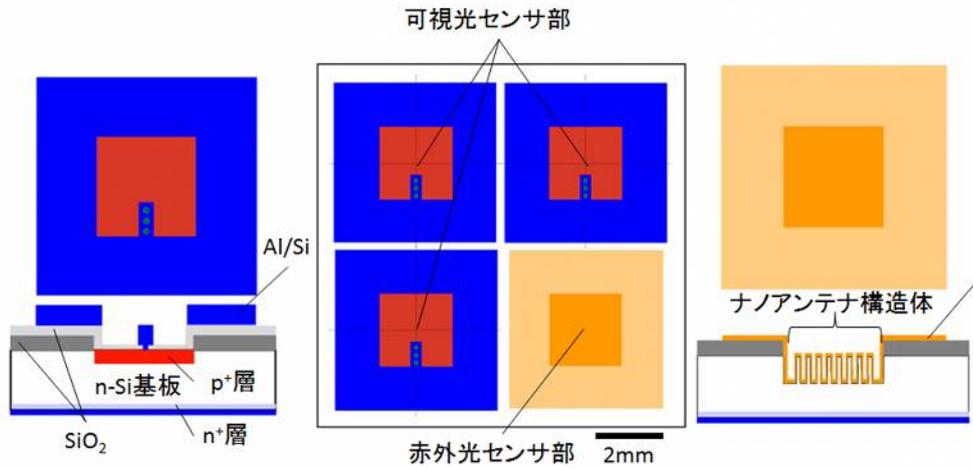


図 3-②-(2)-(2)-1 検証するセンサアレイのマクロモデル

○方法

レイアウト図について、図 3-②-(2)-(2)-2 及び、作製プロセスについて、図 3-②-(2)-(2)-3 に示す。受光部(1画素)の面積は、2mm 角であり、電極金属には、アルミとシリコンとの合金 (AlSi) を利用している。また、p+層とのコンタクトについては、コンタクトホール径  $\phi=100\mu\text{m}$  の穴でコンタクトを取っている。また、pn ダイオードの負極については、n 型基板裏面側と取っている。そのため、基板裏面側にも、n+層を形成している。p+, n+層の形成に関しては、イオン注入法を用いて行った。また、暗時の電流電圧特性の取得については、プローブシステムを用いて測定を行った。一方、分光感度特性の計測系を図 3-②-(2)-(2)-4 に示す。これは、波長可変レーザー (SC450-2T, Fianium, UK)、可視光測定用パワーメータ (Q8221, ADVANTEST, Japan)、測定デバイスから発生する電流を測定するソースメータ (Keithley 2614B, USA) から成っている。

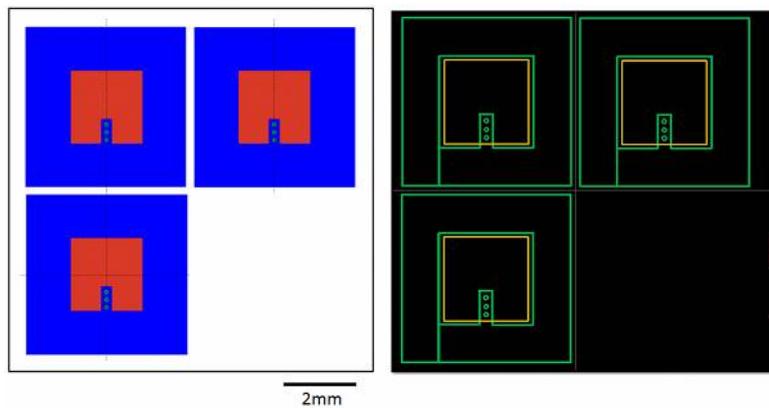


図 3-②-(2)-(2)-2 可視光センサアレイのレイアウト図

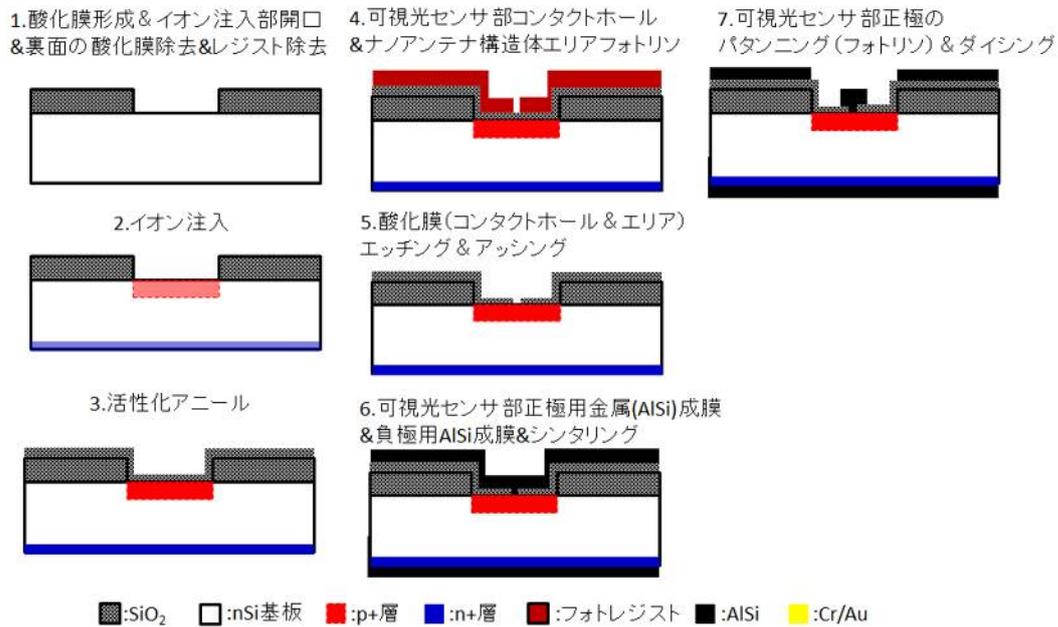


図 3-②-(2)-(2)-3 可視光センサアレイのプロセスフロー

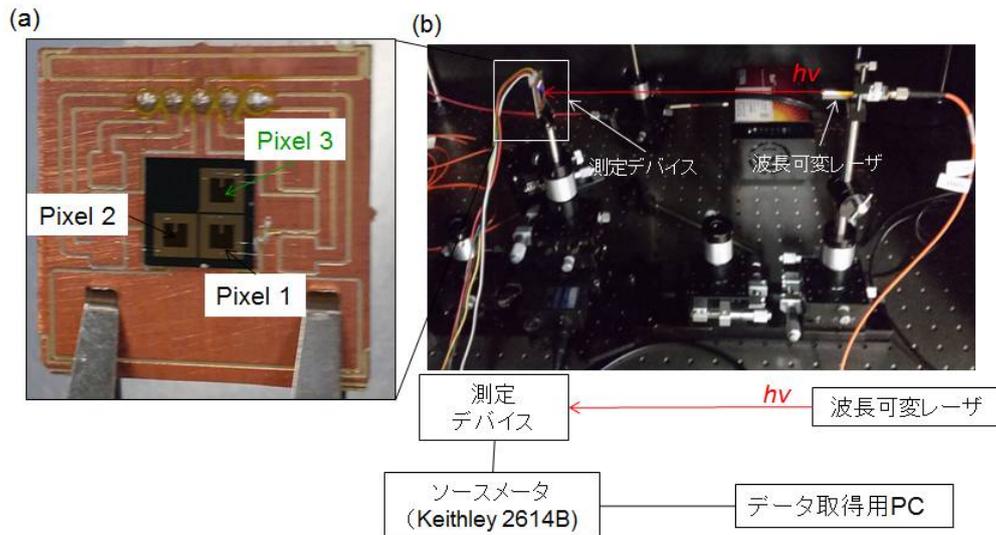


図 3-②-(2)-(2)-4 可視光センサアレイ分光感度特性の評価系

図 3-②-(2)-(2)-4(a)に示したように、可視光センサアレイは、電極取り出し用基板に固定されており、その電極が取り出されている。今回、2画素 (Pixel1 及び、Pixel3) について測定した。今回、可視光センサアレイに、波長可変レーザーを波長 450nm から 650nm まで 10nm 刻みで照射したときの感度を取得した。そのために、可視光測定用パワーメータでそのレーザー光のパワーを取得し、更に、光電流値をそのパワーで割ることにより感度を求めた。また、光電流は、光照射時の電流値と暗時の電流値の差分から求めた。

○結果、考察

作製した可視光センサアレイの写真及びの暗時の電流電圧特性(IV 特性)について、図 3-②-(2)-(2)-5 に示す。これは、同一チップ上の 3 画素 (Pixel1, Pixel2, Pixel3) について取得したものである。この結果から、3 画素とも、約 5 桁の整流特性かつ、ほぼ同一の特性を得ることができた。よって、良好な IV 特性が取得されていると考えられる。また、可視光センサアレイの分光感度特性について、図 3-②-(2)-(2)-6 に示す。今回、2 画素にて測定しているが、二つとも同様の特性を示していることがわかった。また、青、緑、赤色の照射に対する感度を表 3-②-(2)-(2)-1 に示す。この表には、参照としている pn ダイオード(浜フォト S6775)の特性も示している。この結果から、一般的な pn ダイオード (浜松ホトニクス S6775[1]) の光感度と同様の特性を確認することができた。

○結論

試作ラインで検証した可視光センサアレイは、市販品と同等レベルの光特性を有することが分かった。従って、可視光センサアレイについては、このプロセスで確定する。

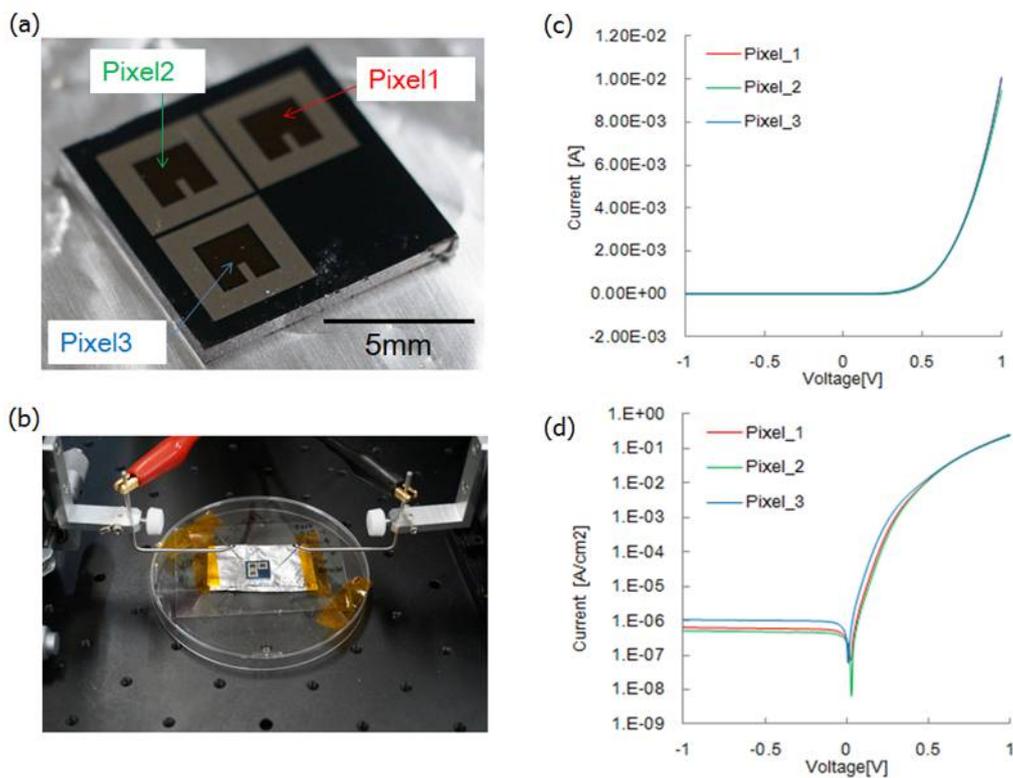


図 3-②-(2)-(2)-5 可視光センサアレイの暗時の電流電圧特性 (a) 1 チップの写真。3 画素 (Pixel1, Pixel2, Pixel3) 入っている。(b)プローバシステムによる評価系(c)得られた暗時の、各画素に於ける電流電圧特性 (縦軸が線形表示) (d)得られた暗時の、各画素に於ける電流電圧特性 (縦軸が対数表示)

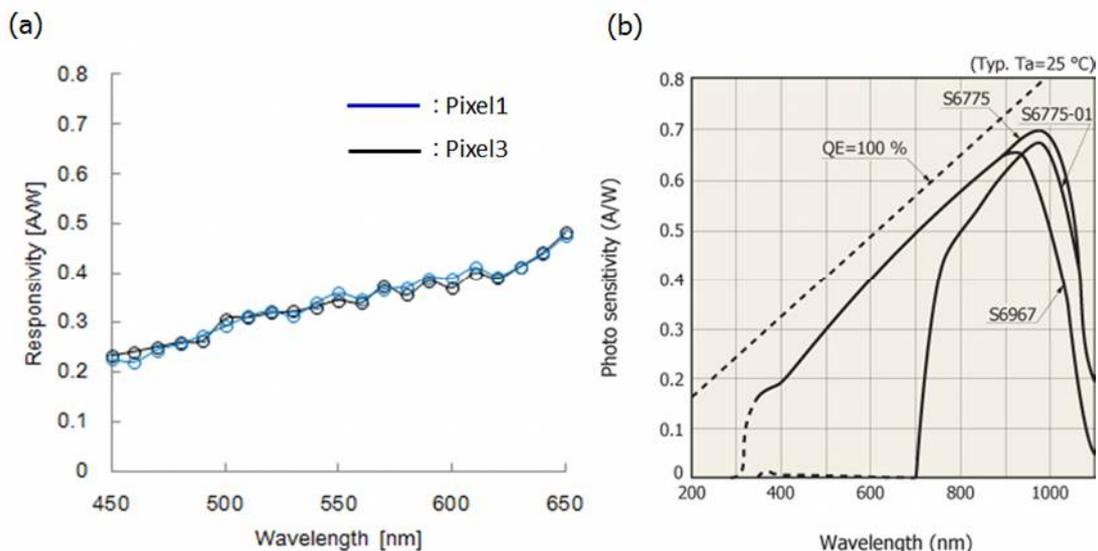


図 3-②-(2)-(2)-6 可視光センサアレイの分光感度特性 (a)可視光センサアレイの分光感度特性(b)市販されている、一般的な可視光検出用単結晶シリコン pn ダイオード（浜フォト S6775 ）の分光感度特性

表 3-②-(2)-(2)-1.青色、緑色、及び赤色の光を入射したときの感度

	Pixel1 [A/W]	Pixel3[A/W]	参照pnダイオード (浜フォトS6775)[A/W]
青色 (λ=450nm)	0.23	0.23	0.22
緑色 (λ=520nm)	0.32	0.32	0.32
赤色 (λ=650nm)	0.48	0.48	0.45

■センサアレイマクロモデルの試作フローの提案

○目的

上記に於いて、可視光センサアレイに関するプロセスフローを確定することができた。そこで、このプロセスフローと初年度試作した統合デバイスのプロセスフロー（図 3-②-(2)-(2)-7 参照）を融合したときの試作プロセスについて、立案し、問題点を抽出し、更にその解決策を提案する。

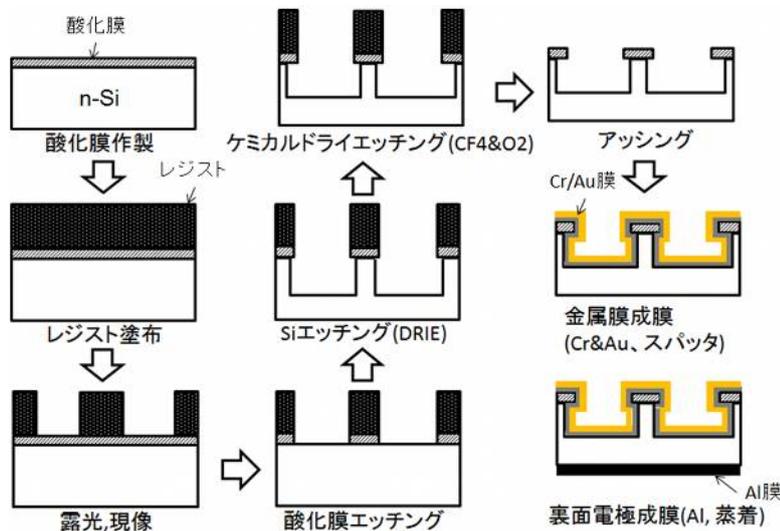


図 3-②-(2)-(2)-7 統合デバイスのプロセスフロー

○結果

1) 立案したプロセスフロー

立案したプロセスフローについて、図 3-②-(2)-(2)-8 に示す。当初、二つのプロセスフローのコンタミネーションを防ぐために、「可視光センサを先に作製し、その後赤外線センサを作製するフロー（以下フロー1）」を検討した。しかし、赤外光センサ部に存在する、ナノアンテナのレジストパターンを作製する際、可視光センサの電極による段差(500nm)があるため、レジスト（厚さ 500nm）の塗布ムラが発生する。そのため、狙い通りにナノアンテナを形成できない可能性がある。そこで、フロー1 を断念し、可視光センサと赤外光センサとを同時に作製するプロセスを立案した。

2) 立案したプロセスフローに於ける問題点及び、その解決策

a)立案したプロセスフローに於ける問題点

図 3-②-(2)-(2)-8 に示したプロセスフローについて、妥当性について検討したところ、以下の問題点があることが分かった。

i) 可視光検出器正極成膜時(工程 10)の残膜エッチング

工程	断面構造		工程	断面構造	
	可視光センサ部	赤外光センサ部		可視光センサ部	赤外光センサ部
1.酸化膜形成 & イオン注入部 開口 &裏面の酸化膜 除去 &レジスト除去			4.可視光セン サコンタクト ホール&ナノア ンテナ 構造体エリア フォトリソ		
2.イオン注入			5.酸化膜 (コンタクト ホール &エリア) エッチング &アッシング		
3.活性化 アニール			6.ナノ アンテナ フォトリソ		
7.シリコン エッチング			10.可視光セン サ部正極用金 属(AISi) 成膜&負極用 AISi成膜 &シタリング		
8.ケミカル ドライ エッチング			11.可視光 センサ部 正極の パタンニング (フォトリソ)		
9.アッシング			12.赤外光 センサ部正 極用金属 (Cr/Au)成膜 &ダイシング		

図 3-②-(2)-(2)-8 統合デバイスのプロセスフロー

可視光検出部の正極電極のパタンニングは、フォトリソで行われる。その際、ナノアンテナ部に一回 AISi が成膜されてから、エッチングで取り除くプロセスが考えられる。ナノ構造体に成膜した、金属をウエットできれいに取り除くことができるのか？

ii) 赤外光検出器正極成膜時の、残膜エッチング

可視光検出部の正極を形成した後、Cr/Au を成膜、エッチングするプロセスを想定している。この際、Cr/Au が可視光検出部上に成膜されており、これも取り除く必要がある。AISi だけを残してエッチングできるのか？

b)解決策

上記 2 点の問題点について、「ハードマスク」を用いて、金属の成膜を行うことにした。ハードマスクを用いることにより、ナノアンテナ部に AISi が成膜されず、逆に、可視光センサ部にも Cr/Au が成膜されないため、上記の問題を回避できると考えている。

○結論

今までの知見を反映させて、センサアレイの試作プロセスフローを立案し、その問題点（金

属製膜時の影響)を抽出し、解決法を提案した。問題点については、ハードマスクを用いることにより、回避することを提案した。

#### ■センサアレイマクロモデルの試作

図 3-②-(2)-(2)-8 に記載したプロセスを用いて、具体的な試作を行った。そのプロセスにて得られたセンサアレイのマクロモデルの写真について、図 3-②-(2)-(2)-9 に示す。この結果から、所望のデバイスが試作されていることが分かった。また、図 3-②-(2)-(2)-4 記載の評価系にて、分光感度特性を取得したところ、赤外光領域(波長  $\lambda=1.4\mu\text{m}$ )にて、赤外光センサと、可視光センサの感度を比較した。その結果、580 倍ほど赤外光センサのほうが感度がよいことが分かった。また、赤外光センサに於いて、波長  $1.1\mu\text{m}$  から  $1.7\mu\text{m}$  の範囲で感度を測定したところ、数  $\text{mA/W}$  オーダの値を取っていることが分かった。

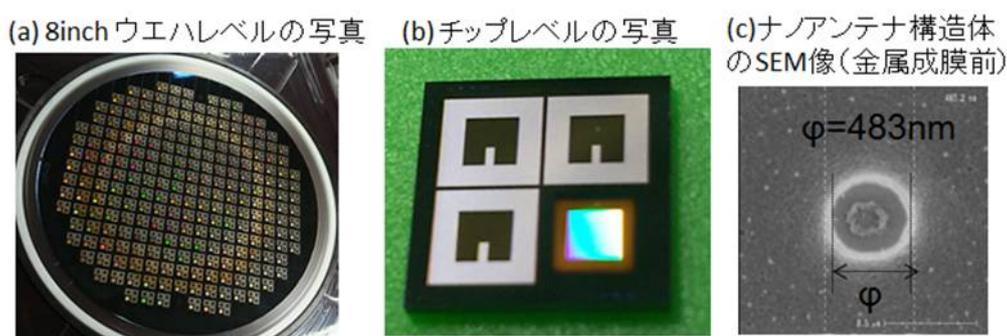


図 3-②-(2)-(2)-9 センサアレイのマクロモデルの写真

#### 3-②-(2)-(3) イメージャプロセスの検討

本プロセス提案を行うにあたり、赤外光イメージャ技術についての知見を得るべく、SPIE Photonic West 2016、EMN Photodetectors 2016 及び SPIE Photonic West 2017 の 3 件の国際会議の聴講及び発表者との議論を行い、以下の知見を得た。

##### a) 積層技術を用いた読み取り回路 (Read On IC:ROIC) とセンサアレイとの融合[2]

積層技術を用いて、3D スタックピクセル検出器と、3D のヘテロジャンクションの X 線、IR ピクセル型センサを提案している。後者は、 $\text{HgCdTe}$  などを  $\text{Si}$  に集積しているものであり、異種デバイスを積層しているものである。

##### b) ブラックシリコンを用いた赤外線センサ[3]

ブラックシリコンは、シリコンのバンド端付近(波長  $\lambda=1.1\mu\text{m}$ )でも吸収をもつ。その効果を利用して、シリコン CMOS イメージャを作製した。画素の量子効率、波長  $1.1\mu\text{m}$  で、10%であり、リファレンスの単結晶シリコン pn ダイオードと比較し、一桁以上の差があり、効果があるとアピールしていた。シリコンベースなので、同一基板上にデバイスを構成することが可能である。

##### c) プラズモン吸収層を用いたイメージャ[4]

ホールのプラズモニック構造を応用すると、数倍光電流が増えている (@T=77K)。表面(プラズモニック層からの照射)だと、共鳴波長が変わらない。裏面照射では1桁光電流が増えた。これをFPA(Focal Plane Array、センサを並べたもの)に展開した。構成は、三次元構造である。

a)、c)については、センサアレイの材料によらず、イメージャを構成することができる。さらに、c)のように、プラズモニック吸収層を用いて、光吸収を促す研究も存在する。一方、b)のように、シリコンCMOSイメージャと同一平面に構成することを考慮し、上にシリコンそのものに赤外光領域に於ける感度を持たせる研究もあるが、カットオフ波長が $1.1\mu\text{m}$ であるので、赤外光検出に限界がある。しかし、我々の技術を用いれば、赤外光領域に感度の持つセンサをシリコンCMOSイメージャと融合できる。そこで、イメージャプロセスフローの提案の一例として、同一基板上にイメージャを構成するプロセスフローを考えた。以下に、ROICにCMOS回路を用いたときのイメージャプロセスのプロセスフローについて、図3-②-(2)-(3)-1に示す。スタート基板はバルクSi基板をイメージしているが、SOI(Silicon On Insulator)基板を用いたプロセスでもよい。また、前述の赤外線イメージャのように、センサアレイとROICとを別で構成し、積層させてもよい。

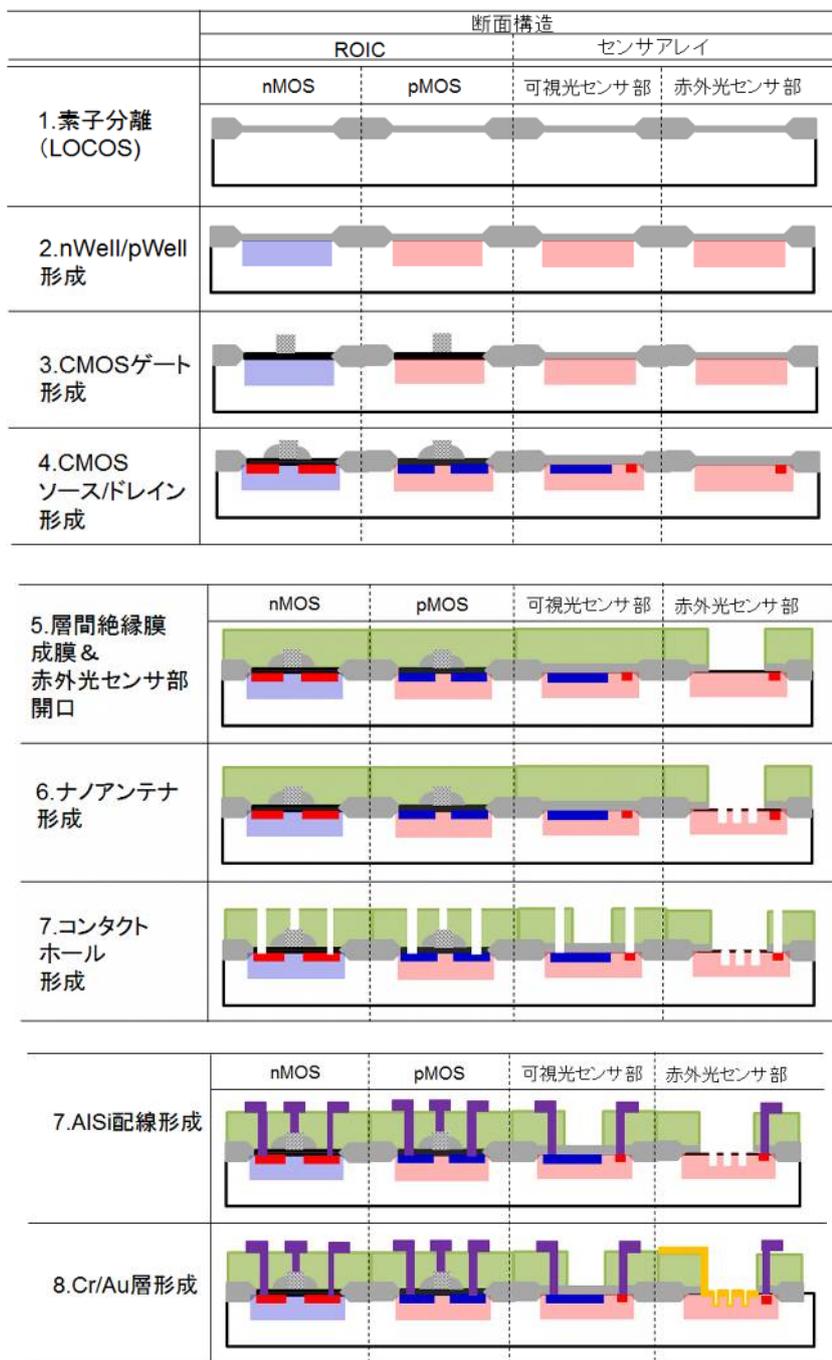


図 3-②-(2)-(3)-1 赤外光アンテナ構造と可視光イメージャを融合させるための  
プロセス導出の一例

### 3-②-(2)-(4) まとめ

本年度は、一年目に得られた知見を用いて、「赤外光アンテナ構造と可視光イメージャを融合させるためのプロセス導出の完了」を目標とし活動を行い、下記の知見を得る事ができた。それについて、以下に纏める

- 1) 可視光センサ部の作製検証を、8インチ試作ラインを用いて行い試作フローを導出した。
- 2) 昨年度赤外線センサとして検証したナノアンテナ型ショットキーダイオードのプロセスフローと、上記1)の可視光センサのプロセスフローとを組み合わせた、プロセスフローを提案することができた。
- 3) 2)のプロセスフローを用いて、8インチ試作ラインで試作した結果、センサアレイのマクロモデルを得る事ができた。
- 4) 3)で試作したマクロモデルにおいて、分光感度特性を取得したところ、近赤外領域(光の波長=1.4 $\mu$ m)での感度を確認することができた。その波長域にて、可視光センサと比較し、1桁以上の感度差を確認することができた。
- 5) 以上を通じて、イメージャプロセスの机上検討を行った。具体的には、同一基板上且つ、読み出し回路 (ROIC)がシリコン CMOS 回路であることを前提としたプロセスフローの一例を導出した。

上記の知見から、当初の目標を達成することができたといえる。

#### 【参考文献】

- [1]Yoshiharu Ajiki, *et.al*: Silicon based near infrared photodetector using self-assembled organic crystalline nano-pillars: Applied Physics Letters Vol.108, pp.151102 (2016)
- [2] S6775 データシート,浜松ホトニクス HP  
([http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s2506-02\\_etc\\_kpin1048j.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s2506-02_etc_kpin1048j.pdf))
- [3] Makoto Motoyoshi : 3D stacked sensor technology using fine C03:3D stacked sensor , EMN Photodetectors,Cancun, Mexico(2016).
- [4] Guiru Gu, *et.al*: Surface plasmonic resonance enhanced type II strain-layer superlattice photodetector, SPIE Photonic West, SanFrancisco, USA(2016).
- [5] Martin U. Pralle, *et.al*: Black silicon: a solution for near-infrared-enhanced imaging, SPIE Photonic West, SanFrancisco, USA(2017).

### 3-②-(3) 実環境を想定した動作検証

株式会社デンソー

#### 3-②-(3)-(1) 目標

終了時目標として、試作分光イメージャの温度特性、波長依存性を評価し、車載を想定した課題抽出完了、と設定する。具体的には下記について実施する。検出原理からネックとなりうる近赤外光より長波長側における温度特性等の基礎特性評価を行い、車載を想定した課題抽出を行いセンサ開発にフィードバックをかける。

#### 3-②-(3)-(2) イメージャの温度特性評価の必要性和手法

本分光イメージャでは特定波長の赤外線を検知することで、可視イメージャと合わせて物体認識精度の向上を狙うものである。車載環境においては、様々な外乱が起こりうるが、使用温度環境の変化が大きく変動するため温度変化に対する評価を行い課題抽出した。

一般に赤外イメージャにおける性能として雑音等価温度差 NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) があるため今回の評価では NETD の温度依存性を評価した。また、本イメージャは分光特性を持たせていることから、分光特性の温度依存性も評価し、これら 2 つの結果から車載における課題抽出を行った。

NETD の評価方法は図 3-②-(3)-(2)-1 に示すセットアップで実施した。試作デバイスは温度変化を与えられるように温調ステージに搭載した。デバイスに照射する赤外線は黒体炉から放射するものを使用し、検出波長に応じてその温度を変更及び、必要に応じて光フィルタを使用した。外乱光との区別を行うため出射光はチョップパにより変調し、その変調周波数に合う周波数の信号を Data Logger で収集することでサンプルの SN 比を計測し、計測時の黒体炉から出射された光パワー及びパワーの温度変化から NETD を算出した。

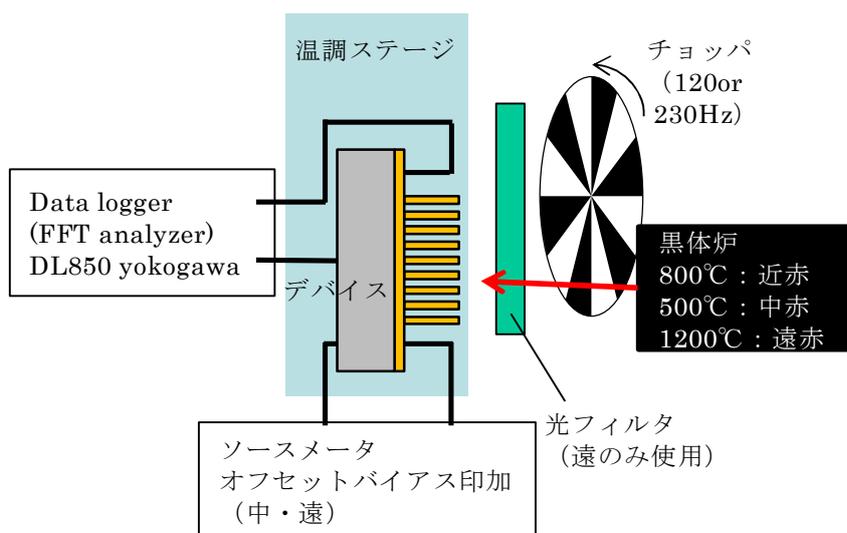


図 3-②-(3)-(2)-1 NETD 評価のセットアップ

一方、分光特性の温度依存性は図 3-②-(3)-(2)-1 と同様にデバイスを温調ステージに搭載し、フーリエ変換赤外分光法 FTIR (Fourier Transform Infrared) を用いて反射スペクトルを計測することで評価した。

### 3-②-(3)-(3) 温度特性評価結果及び抽出された課題

図 3-②-(3)-(3)-1 に NETD の温度依存性を評価した結果を示す。デバイス温度 80°C 程度までは目標 NETD である 10mK を満たしているものの、温度の上昇により NETD が増加することが分かる。これは温度上昇に伴い検出精度が悪化していることを示している。この NETD の温度依存性は、デバイスの暗電流（光の照射がない場合にデバイスに流れる電流）の温度依存性を反映しているものである。

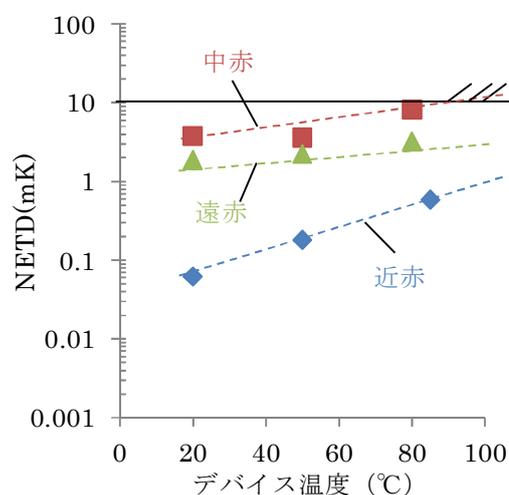


図 3-②-(3)-(3)-1 NETD の温度依存性

検知器の波長域（近赤、中赤、遠赤）によりその温度に対する勾配が異なっているが、これは各波長に対応したデバイスのショットキー障壁高さに依存しているものである。近赤のように比較的短い波長を検知する際は障壁高さを高めに設計するものの、遠赤のように長波長を検知する場合には低いものを設計する。従って、図に示すように近赤、中赤、遠赤の順に温度に対する勾配は低下している。

本評価結果から抽出される課題は、デバイス温度の上昇に伴う検出精度 NETD の増加である。この原因は暗電流の温度依存性であることを確認していることから、暗電流を抑制できるデバイス構造により解決可能である。

図 3-②-(3)-(3)-2 に常温における分光特性の評価結果の例を示す。評価したデバイスは中赤域を検知可能なアンテナ構造をもつものであり、波長 4.0 $\mu$ m 付近の反射率が低下していることが分かる。この反射率の低下はアンテナ構造による光吸収を示している。

このデバイスを用いて光吸収ピーク波長の温度依存性を調査した結果を図 3-②-(3)-(3)-3

に示す。図 3-②-(3)-(3)-3 から、デバイス温度-40～80℃付近では光吸収ピーク波長の変化が現れないことが分かる。同様な評価は近赤域を検知できるアンテナ構造を持つデバイスにおいても実施したが同じ傾向であった。これらのことから、今回提案している分光イメージャにおける分光機能を持たせるアンテナ構造においては光吸収波長の温度依存性は十

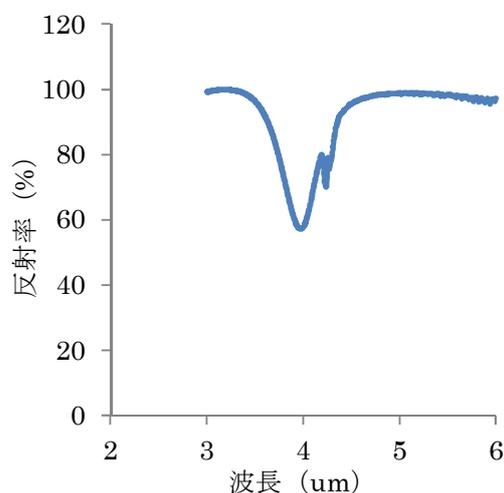


図 3-②-(3)-(3)-2 分光特性の評価結果 (例)

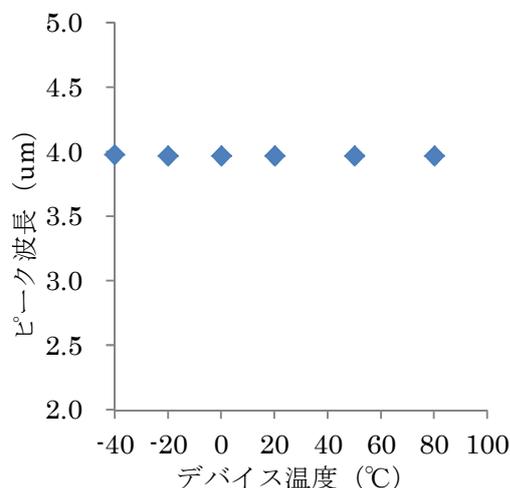


図 3-②-(3)-(3)-3 光吸収ピーク波長の温度依存性

分小さいことが分かる。これは、検知したい波長が環境温度に依存せずに一定であることを示しており、特定波長を検知する分光イメージャにおいては良好な結果であり本項目に対する課題は無い。なお光吸収波長の温度依存性が小さい理由としては、アンテナ形状が温度により大きく変化しないことや、表面プラズモンを起こすための金属膜の誘電率の温度依存性が小さいことなどが挙げられる。

### 3-②-(3)-(4) まとめ

本プロジェクトにおいて、分光イメージャの実環境を想定した動作検証として検知対象の波長域、検知精度の指標及び目標値の設定、評価系の立ち上げ、車載を想定した課題抽出を実施した。1年目は、検知対象の波長域、検知精度の指標及び目標値の設定、評価系の立ち上げを実施した。検知対象の波長域としては、物体の識別、人検知の観点から可視～遠赤と設定した。これは物体の識別に必要なとなる赤外域における光吸収領域が近赤～中赤に集中している点と、人検知においては熱画像 (=遠赤) の使用が有効であることを反映したものである。また、イメージャの画素間ばらつきの指標である NETD を精度指標として設定し、既存技術の開発動向を加味し目標値を定めた。評価系の構築に関しては、評価用の光源を準備することが重要であった。このため、赤外域での分光特性が調査できる黒体炉を選定した。評価に必要な光量及び光量分布を既存の赤外線検知器で評価し、NETD の評価が可能であることを確認し、評価系構築を完了した。

2年目は車載を想定した課題抽出として、検知性能の温度変化による影響の観点で実施し

た。その結果、精度指標である NETD はデバイス温度の高温化により増加（精度悪化）するものの目標仕様である 10mK を満足することを確認した。本評価結果から抽出される課題は、デバイス温度の上昇に伴う検知精度 NETD の増加である。この原因は暗電流の温度依存性であることを確認していることから、暗電流を抑制できるデバイス構造により解決可能である。

一方、光吸収波長の温度依存性を評価した結果、温度依存性が非常に小さいことが分かった。これは、検知したい波長が環境温度に依存せずに一定であることを示しており、特定波長を検知する分光イメージャにおいては良好な結果である。従って、本項目に対する課題は無い。

今後実用化に際し、本プロジェクトで得た知見を活かしてアンテナ形状などの最適化の技術開発を行う予定である。

### 3-③ 認識アルゴリズム

#### 3-③-① アルゴリズム基礎検討・分光イメージャへの適用検討

国立大学法人東京大学

##### 3-③-①-① 目標

本課題の目標は、多波長画像を用いた人、車、自転車などの様々な対象の認識アルゴリズムの構築にある。具体的には、可視、近赤外、中赤外、遠赤外を同時計測したデータセットを構築する。次に、構築したデータセットをもとに、マルチスペクトル画像からの物体検出手法を開発する。物体検出とは、画像中の認識対象物体を取り囲むボックスを推定することである。さらに、マルチスペクトル画像からのセグメンテーション手法を開発する。セグメンテーションは、認識対象物体とそれ以外の背景を境界まで詳細に切り分けることである。

##### 3-③-①-② マルチスペクトルデータセットの構築

マルチスペクトルデータセットは、物体検出用と物体セグメンテーション用の 2 種類のデータセットから構成される。

物体検出用のデータセットは、車載カメラを想定した高さの台車を用いて RGB・近・中・遠 赤外線画像を撮影し、バウンディングボックスとクラスを付与した（図 3-③-①-②-1 参照）。対象物体は交通環境を考え、自転車、車、車止め、カラーコーン、人の 5 クラスとした。データセットの総数は各スペクトル 7512 枚であり、そのうち昼が 3740 枚、夜が 3772 枚である。また、1446 枚の統合データを作成した。

セグメンテーション用のデータセットは、可視光と遠赤外画像を撮影した。このデータセットは、1569 枚（昼 820 枚、夜 749 枚）の RGB+遠赤外の 4 チャンネル画像および、各画像に対しての運転時に障害物として認識する必要と考えられる 8 クラスの物体を対象

としたピクセル単位のラベル情報から構成されている（図 3-③-(1)-(2)-2 参照）。

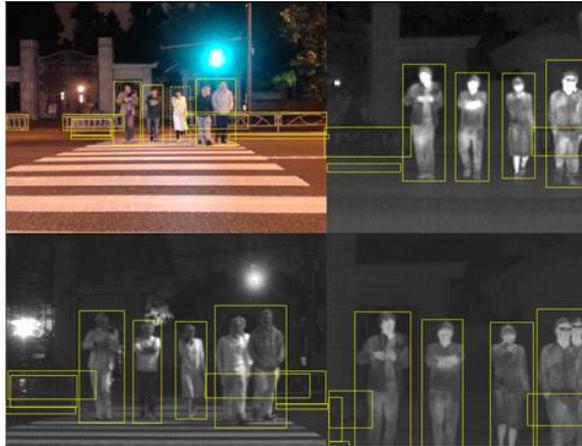


図 3-③-(1)-(2)-1：物体検出データセットの例



図 3-③-(1)-(2)-2：物体セグメンテーションデータセットの例

### 3-③-(1)-(3) マルチスペクトルデータからの認識アルゴリズムの開発

マルチスペクトル画像を活用した物体検出手法として、マルチスペクトルアンサンブル検出手法を構築した。全体のパイプラインは、(a)スペクトル別物体検出モデルと、(b)アンサンブル部分に分かれている。(a)では、回帰による高速な物体検出手法をベースとしたスペクトル別物体検出モデルを構築し、スペクトル別正解データを用いて学習をおこなう。(b)では、各モデルでの検出対象の補完性を活用するため、同一の検出結果についてはスコアの低い方を削除することで、物体検出の統合をおこなっている。

また、物体セグメンテーションでは、RGB+遠赤外を入力とする新たな畳み込みニューラルネットワークのモデルを提案した。新規に提案したモデルは市販のハードウェアである

NVIDIA Titan X を使って、480x640 の画像に対してリアルタイム（50～60FPS）の処理が可能で、同時にセグメンテーション精度は既存手法と比べ、向上もしくは同等である。

### 3-③-(1)-(4) まとめ

本課題では、可視、近赤外、中赤外、遠赤外を同時計測したデータセットを構築した。マルチスペクトル画像からの物体検出手法の開発では、可視、近赤、中赤、遠赤画像を用いた、人、車、自転車等の物体検出手法を開発した。複数の波長の画像を用いることにより、単一波長の画像と比較して高い物体検出性能を実現した。さらに、マルチスペクトル画像からのセグメンテーション手法の開発では、可視、遠赤画像を用いた。人、車、自転車等の物体セグメンテーション手法を開発した。可視、遠赤の双方の画像を用いることにより、単一波長の画像と比較して高い物体セグメンテーション性能を実現した。

### 3-③-(2) 認識アルゴリズム開発のための想定実環境の明確化

株式会社デンソー

#### 3-③-(2)-(1) 目標

テーマ終了時の目標として、路上での障害物となりうる対象を改めて定義し、分光イメージャの有用性の有無を判断と設定する。具体的には下記を実施する。自動運転に必要と想定される路上における障害物を挙げ、対象物の材質等から分光イメージャでの検出有用性を判定する。

#### 3-③-(2)-(2) 路上での障害物

検知対象となる障害物を表 3-③-(2)-(2)-1 に示す。路上においては、自動車、自転車に代表される車両、歩行者の検知が最も重要である。しかし、これらのみでは、完全自動化には不十分であり、路上における構造物や落下物などの検知により事故を防ぐことが求められる。このため、路上の構造物の観点で、縁石、ガードレール、車止め、ポールコーン、カラーコーンを挙げた。

表 3-③-(2)-(2)-1 検知対象の障害物

分類	対象物
構造物	縁石
	ガードレール
	タイヤ片
	ポールコーン
	カラーコーン
落下物	車止め

また落下物としては様々なものが考えられるが、アスファルト上に落下した際、同系色で検出が難しいタイヤ片を挙げた。

### 3-③-(2)-(3) 分光イメージャでの検知有用性

まず、表 3-③-(2)-(2)-1 に挙げた障害物が誤認識されうるシーンを想定し、その際の検知方法を検討した。次に、障害物の近赤及び中赤域における光吸収波長及び遠赤域における放射率を調査した。この 2 つの結果を合わせて想定誤認識シーンにおける検知方法の成立性を判定することで分光イメージャにおける検知有用性を判定した。

表 3-③-(2)-(3)-1 に有用性検討結果を示す。縁石の検知は夜間や日中の日射が強いシーンで誤認識されると想定し、検知方法としては隣接するアスファルトとの違いを検出するものとした。縁石（コンクリート）とアスファルトの放射率は同レベルであることから遠赤での検知は難しい。一方、物質の吸収特性を反映する近赤、中赤ではそれぞれ波長  $1.7\mu\text{m}$ 、 $3.4\mu\text{m}$  においてアスファルトのみ光吸収があることから縁石とのコントラストが取れ認識できるものとする。同様にカラーコーン及び車止めに関しても材質に由来する赤外線吸収特性を利用することで可視、遠赤カメラで検知困難なシーンでも、認識可能と考える。一方、ガードレールは誤認識時の背景との放射率の違いもあることから近赤、中赤だけでなく遠赤での認識も可能であるが、タイヤ片は背景であるアスファルトとの吸収特性の違いが見られないが、放射率が異なることを利用し遠赤での検知が可能である。

従って、再定義した障害物を様々なシーンで精度よく検知するためには可視カメラのみでは不十分で近赤、中赤、遠赤の 4 つを組み合わせることが有効である。

表 3-③-(2)-(3)-1 分光イメージャにおける検知有用性の判定結果

対象物	想定される (誤) 認識シーン	検知方法	可視	波長		
				近赤	中赤	遠赤
縁石	夜間 日中 (日射が強い時)	アスファルト との違い	△	○	○	△
				1.7μm	3.4μm	
	背景との同化					
ガードレール	木々	木々との違い	△			○
	歩道の アスファルト	アスファルト との違い	△	×	○	○
	白っぽい建物 (コンクリート)	コンクリート との違い	△	○	×	○
	自動車	塗料の違い	△	○	○	○
				1.7/2.2μm	4.5μm	
タイヤ片	アスファルト との同化	アスファルト との違い	△	×	×	○
カラーコーン ポールコーン	赤、緑で構成 されているため 誤認識小	アスファルト、 コンクリート との違い (夜間など)	○	○	○	×
				1.7μm 2.2μm	3.4μm 4.5μm	
車止め	アスファルト、 コンクリート との同化	アスファルトとの 違い (再生プラ)	△	○	×	△
		コンクリートとの 違い (ステンレス)	△	×	×	○
				1.2μm		

### 3-③-(2)-(4) まとめ

本プロジェクトにおいて、認識アルゴリズム開発のための想定実環境の明確化としてカメラでの認識に重要性があると思われる障害物検知、車の陰に隠れた人、逆光の人の3つの実環境に絞り込んだ。障害物検知に関しては、2年目改めて検知すべき対象物を定義し、可視（色）による識別が困難な状況でも物体の光吸収帯がある中赤、近赤と組み合わせることで識別の可能性があることを確認した。また人認識に関しては昨年度報告したように遠赤と組み合わせることで認識率が向上することを確認している。今後、これらの結果を分光イメージャの開発目標に反映し、認識技術を開発する予定である。

### 3-④ 技術動向調査

一般財団法人マイクロマシンセンター

#### 3-④-(1) 自動運転全般に係る研究開発動向

##### 3-④-(1)-(1) 調査の目的

自動運転は、週に数回は報道に取り上げられる世界中で注目されている分野である。自動車という巨大産業への影響が大きいのはもちろん、自動車以外の分野からの参入も活発であり、新たなビジネス分野として期待が高まっている。また、自動運転車の普及による自動車の概念の変化と社会におけるサービス構造の変化が予想されている。

本研究開発プロジェクトは自動運転車実現のために必要な要素技術の開発を目的としている。本調査では、研究開発技術の自動運転車における位置づけを明らかにするとともに、自動運転に関する様々な動きにつき調査報告書や新聞・雑誌・ネット等の報道から客観的な動向を報告する。

##### 3-④-(1)-(2) 自動運転車とは

###### 3-④-(1)-(2)- i 自動運転車のレベル

自動運転車は次のレベルが設定されている。

表 3-④-(1)-(2)-1： NHTSA：米運輸省高速道路交通安全局、SAE：米自動車技術協会

自動運転のレベル		一般的な名称	概要
NHTSA	SAE		
1	1	安全運転支援	アクセルによる加速、ブレーキによる減速や停止、ハンドル操作のうち一つの機能を車が担う。適切な車間距離の維持や運転負荷を軽減する「アクティブ・クルーズ・コントロール(ACC)」、「自動ブレーキ」等で、すでに実用化されている。
2	2	準自動運転	アクセル・ブレーキによる加減速、ハンドル操作のうち複数の機能を車が担う。車線をキープする「アクティブ・レーンキープ」等がレベル1に追加されたもの
3	3		人が運転状況を監視し、自動運転と手動運転を切り替えられる
4	4	完全自動運転	基本的に人は運転しない (SAE のレベル 4 では手動運転も可、レベル 5 は自動運転のみ)
	5		

なお、2016年10月20日に公表された内閣府政策統括官(科学技術・イノベーション担

当)による「戦略的イノベーション統括プログラム(SIP)自動走行システム研究開発計画」による「自動運転レベル及びそれを実現する自動走行システム・運転支援システムの定義」でも NHTSA と同じレベル分けを採用しているが、いずれのレベルでもドライバーはいつでもシステムの制御に介入できるものとしている。また、市場化期待時期をレベル 3 は 2020 年度、レベル 4 を 2025 年度としている。

### 3-④-(1)-(2)- ii 自動運転車に必要な機能要素

人がすべてを操作する現在の一般的な自動車に比べ、自動運転車では次の三つの機能要素が必要である。ロボット・カーともいわれている。

#### ①認識

自車が今どこにいるのか、自車の周りの状況はどうなのか等につき、ミリ波レーダー、レーザーレーダー (LiDAR)、カメラなどの車載センサ、3 次元地図、車両間通信や路車間通信もしくは GPS 等を使い認識する。

#### ②判断

認識で得られた情報から、操作に必要な車両周辺の環境状況を判断する。車両の走行経路の生成(目的地に向かうのにはどの方向に進めばよいのか)、障害物との衝突可能性を判断し、車の加減速もしくは停止は必要か、その操作タイミングを人工知能で判断する。

#### ③操作

判断結果による走行経路や衝突可能性などの情報をもとに、アクセルとブレーキ、ハンドルを操作する。周辺環境に応じた車内の環境制御も行う。

### 3-④-(1)-(3) 自動運転車に活用されるセンサと当プロジェクト技術の位置づけ

#### 3-④-(1)-(3)- i 当プロジェクト技術の位置づけ

前述の自動運転車に必要な機能要素のうち、当プロジェクトの開発技術対象は認識に関するものである。認識には様々なセンサが使われており、その技術開発も高性能化とコスト低減の面で日々進行している。現在進行中の自動運転車では、レベル 1 と 2 ではカメラ、ミリ波レーダー等を使用して道路や車・障害物を認識することで、衝突の防止や車線の自動走行が実用化されている。レベル 3 以上では、さらにレーザーレーダー (LiDAR) と 3 次元地図を活用することで、実用化を目指した開発が進行中である。これらのセンサについては後述する。

しかし、自動運転車のレベル 3 (ドライバーが関与する) とレベル 4 以降 (ドライバーが関与しない) では技術的に大きなギャップがあり、現在の自動運転車で装着されている GPS、カメラ、ミリ波レーダー、レーザーレーダー(LiDAR)のみでは十分な対応が困難と判断している。また、自動運転車の普及には、対象デバイスの低コスト化が必須である。これらの観点から、自動運転車の認識機能を画期的に高性能化し、かつ低コスト化を図ることを目指すのが当プロジェクトの技術開発項目である。

レベル 4 以降はレベル 3 までと別物とする評価は、損害保険業界において明らかとなっている。日本損害保険協会は自動運転車が事故を起こした場合の法的責任についての報告書を 2016 年 6 月にまとめた。自動車事故に関する賠償責任はあくまでも人の運転が前提となっている。従ってレベル 3 までは現行法での対応が可能だが、レベル 4 では新たな責任体系(法令等)の構築が必要としている(日刊工業新聞 20160707)。

ここで、自動運転車で活用されている主要センサの特質を概観すると以下の通りとなる。

- ① カメラ：画像により物体の識別が可能、逆光・濃霧・豪雨・豪雪などでの検知は苦手である。
- ② ミリ波レーダー：物体との距離を測定する、天候に左右されないが、物体の識別は困難であり電波が反射しないもの(段ボール、発泡スチロール等)は検知困難。
- ③ LiDAR：物体との距離を測定し電波が反射しないものでも検知可能、濃霧・豪雨・豪雪などでの検知は苦手。

### 3-④-(1)-(3)- ii 自車位置の認識

#### (1) 分子慣性ジャイロの位置づけ

現在の車に搭載されているカーナビゲーションでは、GPS の電波により緯度・経度を算出し、2D 地図とのマッチングによりどの方向に進めばよいかをドライバーにアドバイスしている。十分な蓄積がある技術であるが、自動運転においては次の課題がある。

電波が届かないトンネルや地下駐車場等においては GPS 機能は使えない。したがって現状では電波の途絶状態でジャイロセンサによる移動方向の認識と車輪の走行距離による自車位置の推定を行っている。ジャイロセンサとして活用されているものは MEMS 技術を活用した振動センサであり、その精度は十分とは言えない。長大なトンネル等の電波途絶時間が長い場合に、人間が運転に関与しない状況ではジャイロセンサの精度によりずれが生じて位置の判断を誤り、衝突等の事故が発生する可能性がある。航空機・宇宙用として使用されている高精度なジャイロはデバイスとして存在するが、高価かつ大型であり自動車への搭載には適さない。

「分子慣性ジャイロ」の詳細については 3-① で記述されているので割愛するが、航空機・宇宙用ジャイロに匹敵する精度を有し、かつ簡単な構造なので安価に提供できるデバイスである。分子慣性ジャイロの実用化により、ある程度の時間 GPS 電波が途絶しても、自車位置の正確な判断を可能とすることができる。また、MEMS 技術を活用して安価かつ小型に製造できるデバイスである。

また、2D 地図は世界中の広範な地域について供給されている。最新状態を維持するためのデータ更新が課題だが、今後は現在普及し始めているスマホアプリによるカーナビのようにカーコンピュータのアプリとしての位置づけが期待される。つまり、「分子慣性ジャイロ」は 2D 地図等これまでの資産を活用し、自車位置と進行方向について認識するための有効なデバイスである。

## (2)電波途絶環境下における自車位置認識の対抗技術

測位衛星技術株式会社が NEDO から受託した「一般道自動運転システム用 GNSS/IMU/LDV 融合測位システムの研究開発」(2016年4月)では、GPS、IMU(姿勢制御装置)に2軸レーザードップラー速度計(LDV)を組み合わせた測位技術でトンネル内でも正確な位置を把握できるとしている。

## (3)自車位置認識デバイスとしての LiDAR とその課題

LiDAR による自車位置の判定は、はレーザー画像と外部から供給される 3D 地図とのマッチングにより行う仕組みである。現在の位置を把握する手法は SLAM(Simultaneous Location and Mapping) と呼ぶ、自律型移動ロボットで使っている方法である。Velodyne 社のレーダーは、周囲 360 度に存在する物体の形状や距離を把握し、3D 地図を作ることができる。SLAM は 3D 地図を作りながら走行して自分の位置を推定する。ある瞬間の 3D 地図と次の瞬間の 3D 地図では移動した分だけ違いがあり、これを積み重ねることにより現在位置を推定する。しかし、これだけでは十分ではないのであらかじめ作成しておいた 3D 地図とのマッチングや GPS との照合により自車位置を認識する。

自動運転には優れているといわれるこの方式の採用には以下の課題がある。

まずは、LiDAR のコストである。Google Car の LiDAR デバイスは 75,000 ドルである。Ford はコスト削減を進め、現在の Velodyne 社の LiDAR を 100 万円から数万円に引き下げるとしている(日本経済新聞 20160818)。しかしデロイト トーマツ コンサルティングによれば 2030 年時点で 50 万円を下回らないと見通している(日経テクノロジー20160502)。一方、巨大マーケットを見越して技術開発が進展し、価格破壊が進展している。ミラー制御のメカレス化による低コスト化を目指すものである。カナダ LeddarTech 社は開発中の次世代品を 100 ドル以下に、パイオニアは 2022 年以降に 1 万円以下での提供を目標にしている。Velodyne LiDAR 社もメカレスの製品化を発表しており、2017 年以降の製品化時には部品単体で 50 ドルを切る計画という(日経エレクトロニクス 201702)。

メーカーによるミラー制御の場合は機械的機構の耐久性や故障対応が問題であり、メカレスであっても人命に関わることなので航空宇宙デバイスで採用されている冗長性(複数台の評価)の確保等が要求されるようになると、コストはより大きな制約となるのではないかと。結局はドイツ車の例にみられるように高級車に限定されることになるのではないだろうか。

もう一つは 3D 地図の供給である。3D 地図はまだ取り掛かったばかりであり、自動運転車を必要とするあらゆる場所について供給しうるだろうか。また 3D 地図の確実な更新は保証されるのだろうか。地図の更新はネット経由が必須であろうが、3D 地図は情報量が多いため、迅速な更新には高速通信が必要であり、その整備は保証されるのだろうか。3D 地図の供給・更新の負担は誰がするのか、責任体制はどうなるのか。自動運転車が走行可能な範囲は、3D 地図等の環境が整備された地域に限定されることになるのだろうか。

一方、ポケモン GO に見られるように地図データは大きな収益を生む可能性を持つインフラであり、自動運転以外のアプリケーションの出現により 3D 地図データの整備が進展す

る可能性もある。

### 3-④-(1)-(3)-iii 障害物の認識

車の周囲の障害物の認識についてのセンサは、現在の車で導入されている運転支援として、カメラ、超音波センサ、ミリ波レーダー等が用いられ、今後期待されているのがレーザーレーダー(LiDAR)である。それぞれの特徴については後述するが、当プロジェクトで開発している分光イメージャと認識アルゴリズムは、カメラにおける画像認識と検知した画像が何であるのかを判別する技術である。

カメラは2D画像により物体が何であるかと距離を認識するもので、単体カメラとステレオカメラが実用化されている。カメラは可視光が一般的であるが、ヨーロッパでは動物との衝突防止を目的に、発熱体の効果的な検知に赤外光が用いられている。しかし、赤外光の範囲を細分し、遠赤外・中赤外・近赤外と分けて検知することにより、対象物の素材が何であるかまで判別できることが知られている。この場合、可視光と赤外光のカメラを別々に設置すると、デバイス増によるコストアップに加え、同一光軸の画像が得られないための対象物判別処理に負担がかかる。

本プロジェクトの「分光イメージャ」はカメラの画像センサ1画素に、可視光(RGB)と赤外光のセンサを集約した構造を持つ。一台のカメラで可視光画像と赤外光(遠・中・近)画像を取得できる。このような機能を持つデバイスはこれまで存在していない。「認識アルゴリズム」は「分光イメージャ」で獲得した画像から、車や人、道路面の状態(水か油か)、障害物の材質等を判別し、自動運転の判断機能に有用な情報を提供するものである。

### 3-④-(1)-(4) 自動運転車の市場規模と実用化時期の見通し

#### 3-④-(1)-(4)-i 実用化時期

自動運転の実用化時期については早まる見通しが多い。2016年の7月から8月にかけて、BMWとフォード・モーターはレベル4に相当する自動運転車の量産を2021年までに始めると表明した。これを受けて、経済産業省も自動運転車実用化時期を従来の2025年から前倒しして、2020年にレベル3を実用化する目標を掲げている。Volvoも2021年に高速道路におけるレベル4の自動運転の実用化を目指すと表明した(日経テクノロジー20170111)。また、技術のコモディティ化も急速に進んでいる。2016年9月に自動運転ベンチャーのComma.aiはレベル2相当の自動運転機能を実現する後付け装置を999ドルで年内に投入すると発表した。ドイツ自動車部品大手のコンチネンタルは2016年9月に三菱アウトランダーにレベル2相当を実現する後付け装置を発表した。単眼カメラとミリ波レーダーを搭載し、自社開発のソフトウェアで制御することにより、ウインカーを手動で動かすと自動で車線変更ができるという。

自動運転車を活用したサービス化の動きも進んでいる。アメリカ・電気自動車ベンチャーのローカルモーターズがIBMと共同開発した自動運転バスOlliは、IBMのAIワトソン

を搭載しており、乗客が行き先を告げるとバス停まで自動走行して停止し、ドアを開けて乗客を降ろす。Olli は 6 月にワシントンで試験運行を開始し、シンガポールでは公道で自動運転タクシーの試験運行が始まった。国内でもディー・エヌ・エーが自動運転開発ベンチャーの ZMP と共同で自動運転タクシーの開発と自動運転シャトルの走行を 2016 年 8 月から開始した(2017 年 1 月に業務提携を解消した)。

拡大が見込める自動運転を商機と捉え、参入を目指す動きも始まっている。パナソニックは 2020 年以降にレベル 3 のコンピューターを完成させることを目標に自社開発電気自動車の公道走行実験を始める。2 人乗りで、GPS を使って事前設定ルートを自動走行する。時速 40km 以下の低速で、高齢者の利用を想定している。カメラにより周囲の状況を監視し、周囲の自動車との衝突を防ぎ、歩行者の飛び出しや路上の障害物も検知して停止する。信号認識や自動駐車機能も備え、道路標識の読み取りも組み込むとする。

(日経ビジネス 20160926、読売新聞 20161128、20161129)

### 3-④-(1)-(4)-ii 市場規模

市場規模について報道記事からは以下の数字が見られるが、自動運転実用化に向けた個別各社の動きは加速しており、市場拡大の早期化も想定される。一方では、誰が買うのか、個人は車を所有せずにサービスを活用するのか、どのようなサービス(移動)が展開し、社会に受け入れられるのか、夢が多いが見通しが容易ではない面もある。

#### ①IHS オートモーティブ(日刊工業新聞 20160609)

2025 年には 60 万台、2035 年までに世界で 2100 万台、内訳は

米国は市場導入が最も早く、450 万台

日本と韓国では合計で 120 万台

中国は普及が遅れるが 570 万台と世界最大の市場に

西欧では 300 万台、東欧では 120 万台

#### ②フロスト&サリバン(日経テクノロジーオンライン 20160602)

北米で 2020 年~2025 年にかけてレベル 3 の自動運転車の普及が加速し、2025 年以降にレベル 4 の自動運転車が実用化され、その結果として 2030 年にレベル 3 以上が 350 万台以上、総出荷台数の 25%程度となる

#### ③ボストン・コンサルティング・グループ(日経ビジネス 20160905)

2025 年で準自動運転車は 12.4%(1390 万台)、完全自動運転車は 0.5%(60 万台)

2035 年に準自動運転車は 15.0%(1840 万台)、完全自動運転車は 9.8%(1200 万台)

#### ④富士キメラ総研(日経テクノロジーオンライン 20160615)

ADAS(先進運転支援システム)搭載車両は 2015 年に 1030 万台となっており、2030 年には 5800 万台となり全販売台数の 41.5%が ADAS 搭載車となる。

世界市場で、自動運転車レベル 3 は 2020 年ころから生産が拡大し 2030 年には 1050 万台、レベル 4 は 2020 年代後半に量産が始まり 2030 年には 56 万台としている。

以上を集約するとレベル4の自動運転車は2025年に60万台、2035年には1200~2100万台との予測となる。

### 3-④-(1)-(5) 自動運転車に必要な技術

#### 3-④-(1)-(5)- i センサ

障害物を検知するセンサとして、従来から超音波センサが使われている。超音波を発生して数メートルの範囲で障害物を検知するのに適し、駐車する時の障害物までの距離を警告したりする駐車支援に使われてきた。超音波は遠くまでは届かず、風の影響を受けるので自動運転には適していない。以下では、自動運転で活用されているセンサを紹介する。

##### ①ミリ波レーダー

76GHzの電波を発信し、その反射波が届くまでの遅延時間と反射波の到来方向を判別して、障害物が遠ざかっているのか近づいているのか、その速度と方向を検知できる。優れた点は、電波を使用しているため雨、霧、雪など天候の影響を受けにくい。送信波と反射波の周波数のずれという少ない情報から、距離、相対速度、方位がわかるので、信号を処理するプロセッサの負担が少ない。近年は低コスト化が劇的に進展している。

しかし、方位検知の精度が低く、近接した物体の別々の検知ではレーザーレーダーやカメラに劣る。また、検知した物体が何なのかを認識するのは難しい。

##### ②レーザーレーダー(LiDAR)

レーザー光を発生し、反射光が届くまでの遅延時間で、物体までの距離を計測する。

自動ブレーキ用のセンサとして赤外線レーザー光を使用したセンサが使われている。レーザー光は指向性が強いので、レンズを通して照射範囲を広げ、反射光により距離を計測し、ブレーキ操作の要否を判別する。

自動運転のセンサとして本命と言われているのが、スキャン式のレーザーレーダーである。レーザー光をミラー制御により周辺に照射し、周辺の物体との距離情報を3次元で得られる。光の反射率の違いで、道路の白線や縁石の位置も検知できる。Googleカーの上に取り付けられているのはVelodyne社のLiDARで周囲360度の物体について距離情報を収集して3次元地図を作成している。距離精度も高く、自動運転には有用なセンサだが、現状ではかなり高価であり、自動車よりも高いと言われているが、前出のように価格破壊も進展している。ミラー制御のメカレス化等により、カナダLeddarTech社は100ドル以下に、Velodyne LiDAR社もメカレスの製品化を発表するなど低コスト化を目指し、2017年以降の製品化時には部品単体で50ドルを切る計画という(日経エレクトロニクス201702)。

##### ③カメラ

単眼カメラとステレオカメラ、赤外線カメラがある。障害物までの距離や物体が何であるかを判別できる。

単眼カメラは、ドライバーの死角になっているところ(例えば車の後ろ)を見たり、障害物

を検知するのに使われる。画像処理を行えば、障害物が何であるか、車か人かをも判別できる。道路の白線を認識し、走行レーンの逸脱警告や走行維持に使われている。障害物との距離についても、物体までの伏角(水平から見下ろす角度)の測定により、精度は落ちるが検知できる。

ステレオカメラは水平に並べた二つのカメラの視差(像の差)により、物体までの距離を検知する。カメラをある程度の距離を離して設置する必要があり、センサ全体が大型化するし、視差を測る画像処理が必要となる。わが国ではスバルの EyeSight が知られており、衝突事故が激減したとの報告がある。

赤外線カメラは発熱体を検知し、人か構造物かを検知できる。夜間走行中に歩行者や動物を認識するナイトビジョンに使われている。

### 3-④-(1)-(5)- ii センサ以外の技術要素

#### ①アクチュエーター

自動車の運転はハンドルとアクセル、ブレーキの操作による。これらを操作するためのアクチュエーターは既に搭載が進んでいる。ハンドルであれば電動パワーステアリング、アクセルでは電動スロットル、ブレーキでは ESC(横滑り防止装置)の搭載が一般化している。

#### ②AI

センサで検知した情報を判断し、アクチュエーターへの確な操作の情報を伝える人工知能(AI)は重要で、様々な研究開発が進められている。自動車の周囲の物体を、車なのか、自転車なのか、人なのかを正確に見分けるための画像認識では、ディープラーニングという手法により急速に認識率が向上している。一方では、情報処理量の増大と、高速で走行する車の判断と操作に間に合うように瞬時に処理をするためのプロセッサの開発も必要とされている。

また、AI の秘める最大の可能性は学習機能である。標識や白線の表示等の交通ルールは国や地域により異なっており、歩行者の動きや運転マナーも千差万別であるが、学習機能で学べるようになる。

#### ③地図

現在の車でカーナビゲーションは一般化しており、世界中の車が走る場所については 2D 地図が普及し、更新されている。自動運転では、LiDAR による周辺の 3D 認識と、あらかじめ用意された 3D 地図との照合による、正確な自車位置の認識と進行方向の判断による方式が有力とされている。2D 地図はドライバーの参考情報であるが、完全自動運転では 3D 地図の間違いは許されない。3D 地図はデータ収集と作成が始まったばかりであり、その規格化と地域網羅化、更新体制の確立が重要である。

パイオニアはドイツ地図大手の HERE と協力し、自動運転車用の地図システムを開発する。両社が目指すのは一般の消費者が乗る自動車にセンサを搭載し、それぞれ収集したデータをクラウド上で処理し、地図の差分を効率的に更新する仕組み。一般の市街地走行自

動車のデータを活用することで地図を最新の状態に保つという(日経産業新聞 20160511)。

#### ④ネットワーク

完全自動運転では人が運転に関与しないので、事故等が発生しないように万全な対応が求められる。その有力な手段の一つとみられているのがコネクテッドカーというネットワークによる情報収集を活用する車である。例えば、赤信号の認知をカメラですると同時に、信号器からも受け取り、停止すべきかを判断する。渋滞や事故情報についても広範な範囲の情報を受信し、進行ルートの判断に活用する。地図等の更新もネットワークを通じて迅速に行われる。車同士の通信により最新の現地情報を得ることができる。高速でかつ天候や人工物等による影響を受けにくい通信環境の整備が求められる。

また、車内のネットワークとしても「車載 Ethernet」の導入が進められている(日経テクノロジー20160527)。

#### ⑤Car OS

現在の車においても数多くのプロセッサが搭載されているが、自動運転車では電子デバイスとプロセッサの比重はさらに大きく、かつ複雑になる。車に搭載されたコンピュータのコアとなるのが Car OS である。Google が自動運転に熱心なのは、スマホにおける OS である Android の提供・普及によりスマホを介したサービス市場を獲得したように、Car OS を提供することにより自動運転車を活用したサービス市場の獲得が目的と言われている。

欧州ではフォルクスワーゲンやダイムラー、ボッシュ、コンチネンタル等が「AUTOSAR」という OS 開発の国際標準規格を立ち上げ、この規格に基づいた OS をソフト会社が開発し、自動車メーカーが採用している。わが国でもソフト会社の SCSK や富士ソフトが取り組みを始めた(日経産業新聞 20160728)。

人命に関わることなので、ネットワークからハッキングされないセキュリティ上の完璧な防備が必要であり、かつ柔軟な更新に耐える必要がある。パソコンでは再起動でリセットできる場合があるが、人が関与しない自動運転車では事故の発生は許容されない。Windows に見られるようにアップデートの度にフリーズするようでは到底受け入れられるものではない。

### 3-④-(1)-(6) 自動運転のプレイヤー

技術開発が日々進展する自動運転車のプレイヤーについて概観する。既存の自動車メーカー、新規参入社、デバイス等コンポーネントを提供する企業につき、その動向や製品を紹介する。

#### 3-④-(1)-(6)- i 自動車メーカー

##### (1) Daimler(ドイツ)

「完全自動運転モード時においては、運転を完全にシステム任せる」というスタンスであり、同社のコンセプトカーでは運転席を後ろ向きにして後部座席との会話を可能としている。実証実験を積み重ねており、また乗用車と併せて商用車(トラック)の自動運転にも取

り組んでいる。物流業界における自動運転に対するニーズは大きいとみている。

同社 E クラスの「ドライブパイロット」は先行車追従走行する運転支援であり、車間距離維持に加えて、不明瞭な車線であっても車両やガードレール等を監視して先行車に追従する。「アクティブレーンチェンジアシスト」では方向指示器操作による車線変更を行う(日経テクノロジー20160823)。

HERE(3次元地図)、Quanergy Systems(LiDAR)、NVIDIA(画像処理プロセッサ)、Karlsruhe Institute of Technology(認知・判断アルゴリズム)らと協業している。なお、HEREはNokiaからDaimler、BMW、Audiの3社共同で2015年に買収している。

#### (2)BMW(ドイツ)

ドライバーの役割を完全に排除する自動運転ではなく、ドライバーの運転支援を目的としている。ドライバーの「駆け抜ける喜び」を提供したいと強調している。自動駐車機能を2015年に搭載している。

同社は2017年には自動運転車の試験走行を開始し、2021年には量産を目指している。インテル、Mobileyeと提携し、自動運転車用のオープンプラットフォームを開発中である(電波新聞20160705)。

Mobileye(カメラ)、HERE(地図)、Baidu(地図)、Continental(デジタル副操縦士機能)、NVIDIA(画像処理プロセッサ)らと協業している。

#### (3)Volkswagen/Audi(ドイツ)

グループの中でVolkswagenが自動駐車、Audiが自動運転と役割を分けて推進している。BMWと同様に「車に乗る楽しみ」の提供を継続するとしている。

同社は2017年にアウトバーンで60kmまでの速度で自動運転できる「A8」を販売し、2025年には完全自動走行車を投入するとしている(日経テクノロジー20160516)。

Altera(プロセッサ)、ルネサスエレクトロニクス(同)、NVIDIA(同)、TOMTOM(地図)、Mobileye(カメラ)、スタンフォード大らと協業している。

#### (4)General Motors(アメリカ)

自動運転は、パーソナルモビリティの実現、つまり事故防止や安全対策、渋滞や省エネの環境対策、高齢者や障害者でも安全に利用できる車の実現を目的としている。高速道路での自動運転をまずは目指している。また、高価なLiDARの低価格化を進めている。

一方では、半自動運転車の市場投入を2016年から2017年に延期すると発表している。これは2016年5月に発生したテスラの半自動運転車による死亡事故を踏まえ、安全性確保に万全を期す考えとみられている(日経産業新聞20160801)。

Mobileye(カメラ)、Velodyne(LiDAR)、カーネギーメロン大学(アルゴリズム)、Delphi(V2V通信)、Cisco Systems(同)、Google(車載OS)らと協業している。

#### (5)Volvo Car(スウェーデン)

安全性能の追及という観点で自動運転技術を開発し、高速道路での自動運転を搭載している。同社は2020年までに同社の新車による死亡者や重傷者をゼロとする目標を掲げてお

り、その実現のために自動運転車を位置付けている。2017 年末にレベル 4 の自動運転車の自動車専用道路における実証実験を始めるとしている。同社は 2021 年に高速道路におけるレベル 4 の自動運転の実用化を目指す。(日経テクノロジー20110111)

Mobileye(カメラ)、Ericsson(通信機器)らと協業している。

#### (6)Ford(アメリカ)

価格を抑えた大衆向けの自動運転車の実現を目指している。同社は 2021 年までにハンドルやアクセルのない完全自動運転車の量産を始めると発表した。まずはライドシェア(相乗り)などの配車サービスに供給する。LiDAR メーカーの Velodyne にも出資し、価格を数万円単位に引き下げるとしている(日本経済新聞 20160818)。

Velodyne(LiDAR)、スタンフォード大学(スキャンセンサ)、マサチューセッツ工科大学(行動予測)、ミシガン大学(3D モデル)らと協業している。

#### (7)トヨタ(日本)

ドライバーを支援する「高度運転支援システム」の延長を自動運転車と捉えている。また、自動走行に必要なデータ全てを車で収集する Google カーのような「自律型」に対し、信号や道路標識などに設置したセンサや GPS などのインフラと情報をやり取りする「インフラ協調型」の自動運転(コネクテッドカー)に注力している。

同社はコアデバイスである LiDAR の開発も自社で行っている。高価な LiDAR は、試作車では搭載しても実用車には困難ではと判断している他社に比べ積極的な行動である。

同社は AI 研究を加速しており、グーグルが売却する子会社のロボット開発会社ボストン・ダイナミクスをトヨタ・リサーチ・インスティテュート(TRI)を通じて買収する(日刊工業 20160602)。また、コネクテッドカーについても関心を高め、スマホを活用した配車サービスを手掛ける米ウーバーテクノロジーズと資本提携した(日経産業新聞 20160526)。トヨタは 2020 年をめどに車線変更も含めて高速道路で自動走行する車の実用化を目指している(NHK20161222)。

スタンフォード大学(人工知能)、マサチューセッツ工科大学(同)らと協業している。

#### (8)日産(日本)

自動運転技術をドライバーの運転支援と位置付け、ドライバーは運転モードを選択でき、事故発生を低減し安全で楽しい運転をドライバーに提供することを目指している。2016 年 8 月に発売したセレナではレベル 2 の自動運転(プロパイロット、先行者追従機能と車線維持支援)を搭載している。また、EV に注力している。

同社は 2020 年に市街地で自動運転できる車の市販化を目指している(NHK20161222)。

マサチューセッツ工科大学、東京大学等研究機関、Mobileye(カメラ)等と協業している。

#### (9)ホンダ(日本)

トヨタと同様にインフラ協調型の自動運転を推進しつつ、自律型も開発を進めている。同社は二本足走行ロボットのアシモをはじめとするロボティクス機器の研究開発を行っており、自動運転にも応用している。

Mobileye(カメラ)、Google らと協業しており、特に Google とは共同研究に向けた検討を始めると報道された(NHK20161222)。

### 3-④-(1)-(6)-ii 新規参入社

#### (1)Google(アメリカ)

検索エンジンで世界を席卷する Google は、自動車というハードウェアでの利益ではなく、自動運転車を組み込むことによる「効率的な都市の構築」を目指していると考えられている。DARPA が実施した Grand Challenge(2005 年)で優勝、Urban Challenge(2007 年)で 2 位となった自動運転車を引き継ぎ、試作車を作成し、2014 年には公道で走行可能な Google Car を発表している。センサーとして「LiDAR」「ミリ波レーダー」「GPS」「DMI(ホイール回転数から走行距離を測定)」を使用している。同社の目指す自動運転車はステアリングもブレーキ・アクセルもない完全自動運転車であり、2020 年前後の実用化を目指している。

自動運転車により新たに生まれるソフトウェアとサービスの獲得を目指していると考えられている。ソフトウェアでは、スマートフォンにおいて無償の Android を提供することにより市場の主導権を握ったように、自動運転車のロボット用 OS の開発を進めて自動車メーカーへの提供を目指している。サービスについては、車内における人への情報の提供、レストラン等への無料送迎タクシーによる利便性の提供等により新たな広告媒体の獲得を目指しているものとみられている。

Bosch(ミリ波レーダー)、Velodyne(LiDAR)、NVIDIA(プロセッサ)等と協業している。2016 年 5 月にフィアット・クライスラーとの提携を発表しており、上述のように 12 月にホンダとの共同研究が報道されている。

#### (2)Tesla Motors(アメリカ)

電気自動車メーカーの同社が目指すのは「Software-Defined Car」である。カメラやセンサーなど自動運転に必要なデバイスを搭載した車(Hardware)に、自動運転用のソフトウェアをダウンロードすることにより、随時機能を更新した自動運転車を提供しようとするものである。同社はドライバー不在の完全自動運転ではなく、運転支援を行うという考え方である。

一方では、2016 年 5 月に発生した同社の「Model S」で簡易的な自動運転機能「Autopilot」を動作中の死亡事故は大きな衝撃であった。同社は 2015 年 10 月にソフトウェアを更新することで Model S にレベル 2 相当の Autopilot を実用化しており、自動追従や自動レーン変更を可能としていた。しかし、高速道路の分岐点で、トレーラーを認識できず、ブレーキをかけずにトレーラーの下に潜り込む形で衝突し、事故が発生した(日経産業新聞 20160704)。

### 3-④-(1)-(6)-iii デバイス等コンポーネントの提供社

#### (1)Bosch(ドイツ)

自動運転に必要なセンサとコンポーネントすべてをカバーすることを目標としており、次の製品を提供している。

- ① 横滑り防止装置
- ② 電動ブレーキブースター
- ③ 電動ステアリングシステム
- ④ ミリ波レーダー：前方監視用としては最大 30 度の検知角と 250m の検知可能距離の長距離ミリ波レーダー、45 度の検知角と 160m の検知可能距離の中距離ミリ波レーダー、150 度の検知角と 100m の検知可能距離の中距離ミリ波レーダーを製品化している。
- ⑤ ステレオカメラ：一つのセンサのステレオカメラと二つのセンサの 3D ステレオカメラを有しており、物体との距離と移動方向を検知できる。
- ⑥ 超音波センサ：最大 2.5m 離れた障害物を検知でき、自動パーキングアシストなどに活用されている。

#### (2)Delphi(アメリカ)

- ① 車線逸脱防止システム：カメラ画像により車線内の位置を検出し警告する
- ② 電子スキャニングレーダー：中長距離用
- ③ 短距離レーダー
- ④ インテリジェント前方ビューカメラ：道路標識、歩行者検知が可能
- ⑤ レーダー・カメラ融合システム

#### (3)ZF TRW(ドイツ)

- ① セーフティドメイン ECU：レーダー、カメラ、運転支援システム、シャーシー、サスペンションからのデータを処理する
- ② 電動パワーステアリング
- ③ 緊急時ステアリング支援システム：ブレーキに加えて自動操舵で衝突を回避す
- ④ 横滑り防止装置
- ⑤ 単眼カメラ：Mobileye 社の画像処理チップを搭載
- ⑥ 複眼カメラ
- ⑦ ミリ波レーダー：中・長距離用

#### (4)Continental(ドイツ)

同社は次のような製品を供給している。

- ① 単眼カメラ、複眼カメラ
- ② 短・中距離用レーザーレーダー
- ③ レーザーレーダー付きマルチファンクショナルカメラ：単眼カメラとレーザーレーダーを融合
- ④ V2X センサシステム：センサと GPS を融合して車両位置を認識する機能と、車両間/車両・インフラ間無線通信システムで構成
- ⑤ eHorizon プラットフォーム：デジタル地図(HERE 社)と外部情報(IBM コネクテッド

カークラウド)を組み合わせ、道路情報を予測

同社は日本でも北海道紋別にテストコースを開設している(日刊工業新聞 20160615)。同社はメカレス LiDAR を 2019 年に量産開始する。同社の方式は、光を拡散して照射し、受光素子をアレー状に配置して 3 次元位置を認識する方法である(日経テクノロジー 20170120)。

#### (5)Valeo(フランス)

- ① ミリ波レーダー
- ② レーザスキャナ「SCALA」：車両周辺をスキャンし、車、歩行者、静止物、ガードレールなどを検知する、150m 先の乗用車、50m 先の歩行者を検知できる。

#### (6)デンソー(日本)

- ① LiDAR
- ② ミリ波レーダー
- ③ 画像センサ
- ④ 走行支援 ECU

#### (7)Velodyne(アメリカ)

- ① HDL-64E：64 個のレーザー送受信機を内蔵し、水平 360 度、垂直 26.8 度の 3D イメージングが可能。最大 133 万ポイントの測定に対し、測定精度は±約 2 cm、測定距離は 100-120m である。価格は 75,000 ドル。
- ② HDL-32E：32 個のレーザー送受信機を内蔵し、水平 360 度、垂直 40 度の 3D イメージングが可能。1 秒間に約 70 万ポイントの測定に対し、測定精度は±約 2 cm、測定距離は 80-100m である。価格は約 30,000 ドル。
- ③ PUCK：16 個のレーザー送受信機を内蔵し、水平 360 度、垂直 30 度の 3D イメージングが可能。1 秒間に約 30 万ポイントの測定に対し、測定精度は±約 3 cm、測定距離は 100m である。価格は約 8,000 ドル。

#### (8)Quanergy(アメリカ)

- ① Mark VIII LiDAR：レーザー送受信機を 8 個備え、レーザー光を 360 度回転させてスキャンする。価格は 1000 ドル。
- ② ソリッドステート LiDAR：固定状態でスキャンし、クレジットカードサイズで、価格は 250 ドル。次のモデルでは切手サイズで 100 ドルとしている。

#### (9)Mobileye(オランダ)

イスラエルに本社機能及び研究開発拠点を有し、単眼カメラと画像処理チップを手がけている。画像処理チップ「EyeQ2」では車線検知、道路形状推定、車両検知、道路標識認識、歩行者認識、インテリジェントヘッドライト制御の機能を持つ。

#### (10)NVIDIA(アメリカ)

世界最大規模の画像処理プロセッサメーカーであり、「Tegra X1」では 1 TFLOPS とスーパーコンピュータ並みの計算能力を指先サイズで実現した。最大 12 台のカメラからの情報

を高速処理することが可能。価格は1万ドル。

#### (11)HERE(ヨーロッパ)

カーナビ用に196か国でデジタル地図、97か国・50言語で音声ガイドナビゲーション、41か国でリアルタイム交通情報を提供しており、欧米で販売されるカーナビの5台に4台が同社の地図を搭載している。同社は2015年にNOKIAの傘下からドイツ自動車3社(Audi,Dimler,BMW)に買収された。2017年にIntelが同社株式の15%を取得すると発表された。同社の3D地図データ「HD Map」はLiDARによる3D地図データで、10-20cmの精度の道路地図。路面のレーン数や、それぞれのレーンごとの情報、道路の傾斜や曲率、レーンのマーク、標識の表示や支柱も含まれている。

#### (12)ゼンリン(日本)

日本のカーナビ用地図データの7割はゼンリンが提供している。同社は大都市の高精度3D地図「Walk eye Map」の作成に取り掛かっている。交差点を中心とし、建物の形状や階数、道路の街路樹や、信号機、中央分離帯、歩道などの情報を収集している。

### 3-④-(1)-(7) 自動運転車へのルール作り

2016年2月、アメリカ運輸省交通安全局(NHTSA)はGoogleの質問に対する回答で、自動運転用ソフトウェアを「運転者」とみなす可能性があるとの見解を示した。米国や日本が加盟するジュネーブ条約や欧州諸国が加盟するウィーン条約では運転者がいない車両は公道を走れないとされている。NHTSAの解釈は完全自動運転車の実用化への扉が開かれたとあってよい。(日経Automotive201604)

我が国が加盟する道路交通に関する「ジュネーブ条約」は人が車を制御することを求めており、国の道路交通法も運転者なしの自動運転を想定していない。しかし、同条約に加盟するフィンランドではドライバーがいない自動運転を認めており、ギリシャでも実証実験を始めている。これは、「運転者は必須でも車中にいる必要はない」という解釈で、緊急時のブレーキ操作は車外からの遠隔操作という実験をしている。同条約は1949年の制定で、自動運転車を想定していないが、運転者が車中にいる必要があるかまでは定義していない。自動車の世界標準を作る国連の欧州経済委員会の作業部会において条約の対応が検討された。その結果、「運転者は車中にいるかどうかにかかわらず、車をコントロールすればよい」との解釈となり、自動運転への条約解釈上のお墨付きが得られた(日本経済新聞20160502)。

自動運転の共通基準を日欧で作ろうとする動きがある。まずは2018年に高速道路で人がハンドルを操作せずに追い越しや合流できる車を走れるようにルールを設け、参加国は国内の基準に採用するというものである。共通基準には、自動追い越しは高速道路に限り、事故発生時はドライバーに責任との原則を盛り込む。さらに①機械より人間の運転を優先、②ドライバーの居眠りやよそ見を防ぐ装置を搭載、③ドライバーが警告に反応しない場合は自動で路肩に駐車という安全に配慮した規定も導入する。米国では自動で追い越し・合流できる車の走行を認めているが、欧州では事実上禁じられており、日本では明確なルー

ルがない。日欧は自動運転車の基準作りに国連を通じ推進していく方向だが、アメリカは独自のルール案作りに動いている(日本経済新聞 20160710)。

事故が発生した時の責任について検討が進められている。政府は 2020 年までに自動運転車の公道利用を解禁する方針である。警察庁は 2016 年 4 月に自動運転車の公道実験の指針案と検討すべき「法的課題」を公表した。公道実験指針案では、ドライブレコーダーの搭載を要請し、「完全自動運転」の実験でも緊急時にはドライバーが操作することを明記した。法的課題では事故時の責任問題が注目され、準自動運転ではドライバー、完全自動運転ではシステムの責任とする考えが多いという。しかし、システムは高度化し、被害者がメーカーに賠償請求する際に、システムのどこに異常があったのかを立証するのは難しいとされている(日本経済新聞 20160408)。

アメリカでは自動運転車の普及団体「より安全な道路のための自動運転連合」が 2016 年 4 月に設立された。グーグル、フォード・モーター、ウーバーテクノロジーズ、リフト(配車仲介)とボルボの 5 社で、安全基準などが州ごとではなく連邦政府レベルでの統一された制度整備により、自動運転実用化の早期化を目指す(日本経済新聞 20160427 夕刊)。自動運転車には、後付けした装置(前述した自動運転ベンチャーの Comma.ai)や、テスラの「Software-Defined Car」のように様々な組み合わせが想定される。十分な検討が必要であるが、一方では課題等が喧伝され、慎重なあまり技術は実現しても実用化が足踏みされる状態は避けるべきであろう。

### 3-④-(1)-(8) 社会への影響

#### (1) 自動運転による社会課題への貢献

自動運転の普及により解決されるとされている社会的課題は次の三つが挙げられている。

##### ①交通事故の削減

交通事故の 9 割は認知・判断・操作ミスというヒューマンエラーと言われている。自動運転による正確な対応をすることにより交通事故を削減することができる。現実にスバルのアイサイト搭載車では 6 割削減されたとの報告がある。

##### ②交通渋滞の削減

自然渋滞は、上り坂やトンネルの入口における無意識の減速等で発生するが、自動運転ではこれを避けることができる。また、渋滞が発生しても最適ルートを選択を自動運転車が行うことにより渋滞を避けることができる。

##### ③少子高齢化への対応

高齢者にとって、ドライバーが不要な自動運転車は重要な交通手段となる。地方、特に過疎地では公共交通機関により利便性が限定され、車が必須であるが、車を所有しなくても自動運転車を呼び出すことで、いつでもどこへでも安全に移動が可能となる。

もう一つが労働力不足への対応である。タクシーや運送業では労働力確保が課題であるが、自動運転車により対応でき、かつ人件費削減が可能となる。運送については複数台ト

トラックの追従自動運行による大量輸送と運転手削減の実証実験がすでに行われている。

## (2)自動車は所有するものから利用するものへ

自動車は、移手段の側面と運転を味わう側面を持っている。トラック等営業車は前者、自家用車は両方といえる。自家用車の代わりに移手段として自動運転タクシーを利用すれば、車は「所有するもの」から「利用するもの」へと変化するとされている。

自家用車は購入という初期投資に加え、その維持費が大きい。ほとんどの自家用車は週末に利用するのみで、平日はガレージに駐車しているのみである。ガレージを含め莫大な費用を週1-2日の乗車のために費やしている。自動運転タクシーは必要な大きさや機能の車を何時でも呼びだせて維持費はゼロである。

自家用車では当然だがドライバーは運転に専念し、同乗者との交流は会話程度に限られる。自動運転タクシーでは、家族との交流はもちろん、仕事をすることもできる。

以上より、自家用車を「所有」するより自動運転タクシーを「利用」する方が、安く便利となる。自家用車は「運転する楽しみ」を目的とする人のみが所有することになるのかも。

このことは、自動車産業にとって大問題である。自家用車の販売台数が激減することになるからである。

### 3-④-(1)-(9) 本プロジェクト実施中の環境変化

#### (1)レベル4自動運転の実用化時期が早まった

2016年の7月から8月にかけて、BMWとフォード・モーターはレベル4に相当する自動運転車の量産を2021年までに始めると表明した。これを受けて、経済産業省も自動運転車実用化時期を従来の2025年から前倒しして、2020年にレベル3を実用化する目標を掲げている。Volvoも2021年に高速道路におけるレベル4の自動運転の実用化を目指すとして表明した。

#### (2)自動運転車の社会への受け入れ環境の検討が始まった

技術的に自動運転車が実現しても、社会の受け入れ条件が整えられなければ、公道を走ることはできない。

2016年2月のアメリカ運輸省交通安全局(NHTSA)の回答以降の各種の動きは3-④-(1)-(7)自動運転車へのルール作りにある通り。

#### (3)新たな市場参入

パナソニックは2020年以降にレベル3のコミューターを完成させることを目標に自社開発電気自動車の公道走行実験を始める。2人乗りで、GPSを使って事前設定ルートを自動走行する。時速40km以下の低速で、高齢者の利用を想定している。カメラにより周囲の状況を監視し、周囲の自動車との衝突を防ぎ、歩行者の飛び出しや路上の障害物も検知して停止する。信号認識や自動駐車機能も備え、道路標識の読み取りも組み込むとする。

電気自動車と自動運転技術のコモディティ化により製造市場参入の壁は低くなり、自動

運転車によるサービスメニューの多様化により様々な事業者の参入と、社会のインフラとしての位置づけが高まるものと考えられる。

参考文献：自動運転の未来 2016-2020、日経 BP 社

### 3-④-(2) 自動運転に必要な認識センシングに係る技術動向

#### 3-④-(2)-(1) 調査方法の概要

##### (1)調査の目的

自動運転自動車に必要な認識センシング技術に係わる最新の特許文献から、研究動向を整理し、「エネルギー・環境新技術先導プログラム／究極の省エネを実現する「完全自動化」自動車に不可欠な革新認識システムの研究開発」の認識センシング技術の取り組みの方向性の客観性を確保することを目的とし、調査した。

##### (2)調査対象技術

自動運転自動車は、人による運転操作がなくても自動走行が可能な完全自動運転と、特定環境下での自動走行が可能な一部自動運転に分けられるが、本調査では、自動車の運転環境に対応する認識センシング技術を調査する観点から、「表 3-④-(2)-(1)-1」に示す運転支援システムに用いられている認識センシング技術を調査対象とした。

表 3-④-(2)-(1)-1. 認識センシング技術の調査対象技術

運転支援システム	内容
駐車支援	目標駐車位置までの走行軌跡を演算して、目標駐車位置までの操舵方向を指示することで、駐車を支援する技術。また、走行軌跡に沿って車両の制駆動力や操舵を制御して自動で駐車させる技術。さらに、これら技術を備え、人による運転操作なく車両を入出庫する技術。
衝突予知／回避	先行車あるいは障害物を認識し、その情報をコンピュータが解析して先行車あるいは障害物に衝突可能性があるとして認識された場合、運転手への警告やブレーキ操作を行い、衝突を回避する技術。
車線維持支援	車線を認識し、電動パワーステアリングに適切なトルクを発生させるなどのステアリング制御を行い、車線維持を支援する技術。
車間距離制御	先行車を認識し、先行車との距離測定しながら、設定した車速に応じた車間距離を保つ技術。先行車の車速変化に応じて一定の車間距離になるよう追従し、先行車との距離が離れ、センサが感知しなくなると設定速度までゆっくり加速する仕組み。車速維持、車両追従システムの側面も持つ。

##### (3)調査方法

調査対象文献は、2005年～2016年のIPC国際出願の公開公報及び日本出願の公開公報とし、特許情報データベース：富士通のATMS PatentSQUAREを使用した。

なお、本調査報告における2015年、2016年のデータは、公開公報発行国からのデータ提供にかかるタイムラグと、データベース会社の作業期間の関係から、真の数値より少な

い可能性があることに留意されたい。

### 3-④-(2)-(2) 自動運転（運転支援システム）の動向

#### (1) 運転支援システムの PCT 国際出願件数の推移

車載センサを利用した運転支援システムでは、既に市場に投入されている衝突被害軽減/回避技術、駐車支援技術、車間距離制御、車線維持支援に関する出願が多く、特に、衝突予知/回避、車間距離制御に関するものは、「図 3-④-(2)-(2)-1」に示すように年々増加傾向にあり、世界的に自動運転自動車の開発が盛んになってきたのは 2008 年～2010 年頃であると考えられる。

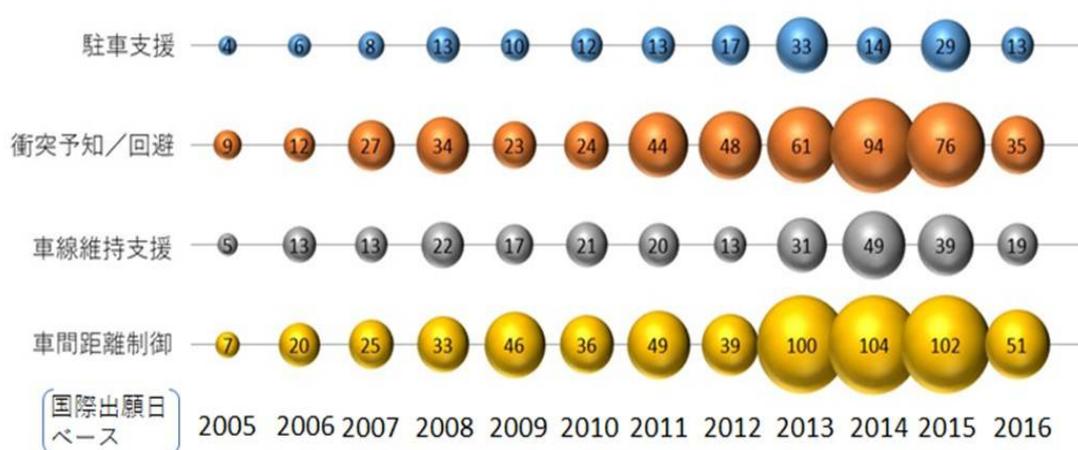


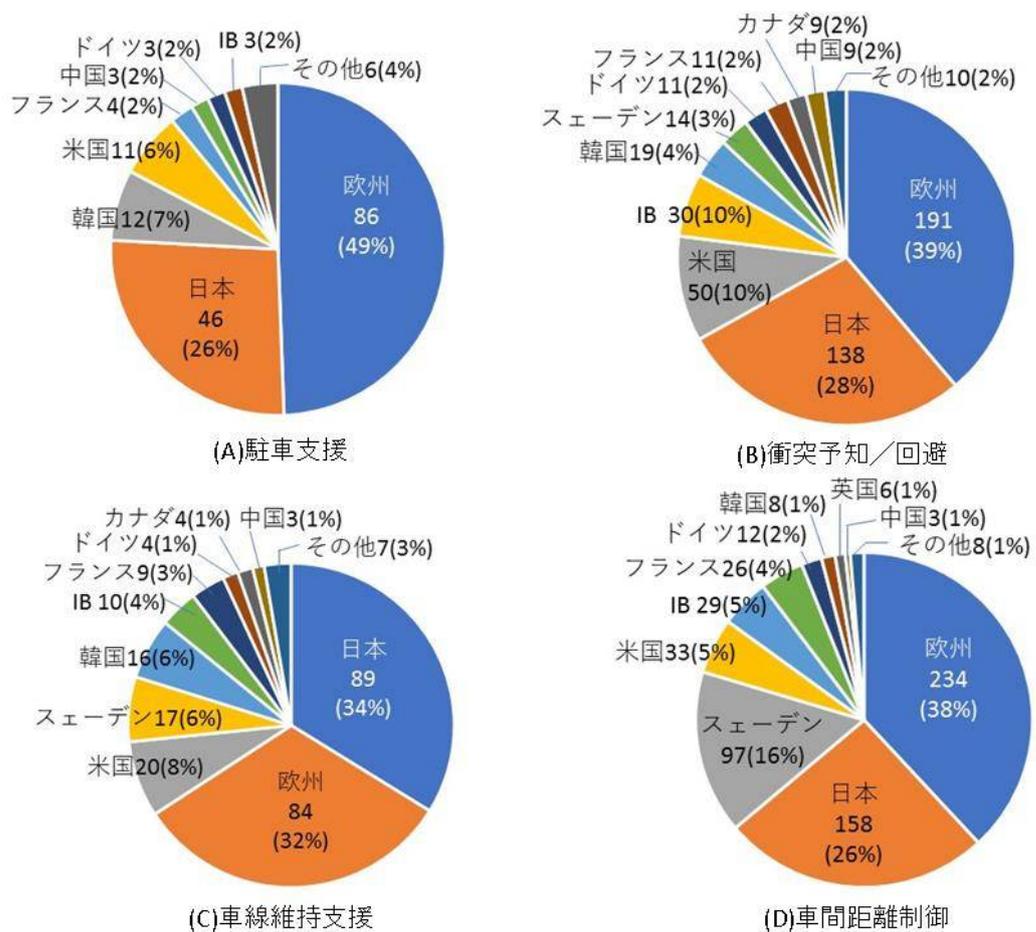
図 3-④-(2)-(2)-1. 運転支援システムの PCT 国際出願件数の推移

また、これらの運転支援システムの具体的な運動制御内容（特許分類）の分布を「図 3-④-(2)-(2)-2」に示す。



(2) 運転支援システムの出願受理国の状況

運転支援システム全体では、「図 3-④-(2)-(2)-3」のとおり、各支援システムとも、欧州への出願件数が最多であり、次いで日本への出願が多くなっている。運転支援システムの研究開発は日本と欧州が他の国に比べてリードしている可能性がある。



(注) 欧州=EPO:欧州特許庁 IB=世界知的所有権機関国際事務局

図 3-④-(2)-(2)-3. 運転支援システムの PCT 国際出願受理国の割合

駐車支援に関する出願は、欧州、日本が多く、衝突予知/回避は、BOSCH、BMW、Audi など欧州地域が多い。なお、衝突予知・回避は、衝突被害軽減ブレーキ (PCS) として 1990 年代初期から出願されており、2000 年代前半には商品化され始めている。これまで欧州の企業の出願が多いが、現在では日本、米国、とも多くなっている。

車線維持支援関連システムは日本、欧州が多い。また、欧州においてはドイツ主導で規格化が行われ、導入が進んでいる。

車間距離制御は欧州、日本ともに出願が多い。米国が、欧州、日本に比べて出願が少ないのは、訴訟の多い米国では PL 法に対するメーカーの対応が慎重であることがその理由

の一つではないかと思われる。

また、データベースの都合上、出願受理国として調査したが、「欧州」は欧州特許庁が受理したもので、「図 3(C)」の車線維持支援では日本が 34%となっているが、欧州特許庁が受理したものとスウェーデン、ドイツ、フランスなどの欧州各国を合わせる欧州全体では 57%となり、出願受理地域では各運転支援システムとも欧州がかなりの割合を占めている。

### (3)運転支援システムの主要出願人

運転支援システム別の主要出願人は「図 3-④-(2)-(2)-4」(外国企業)及び「図 3-④-(2)-(2)-5」(日本企業)のとおりである。BOSCH、Audi、BMW、Volkswagen、Daimler などの欧州の企業は、駐車支援、衝突予知/回避、車線維持支援、車間距離制御のいずれの運転支援システムにも出願しているが、JAGUAR LAND ROVER は車間距離制御を中心に申請している。

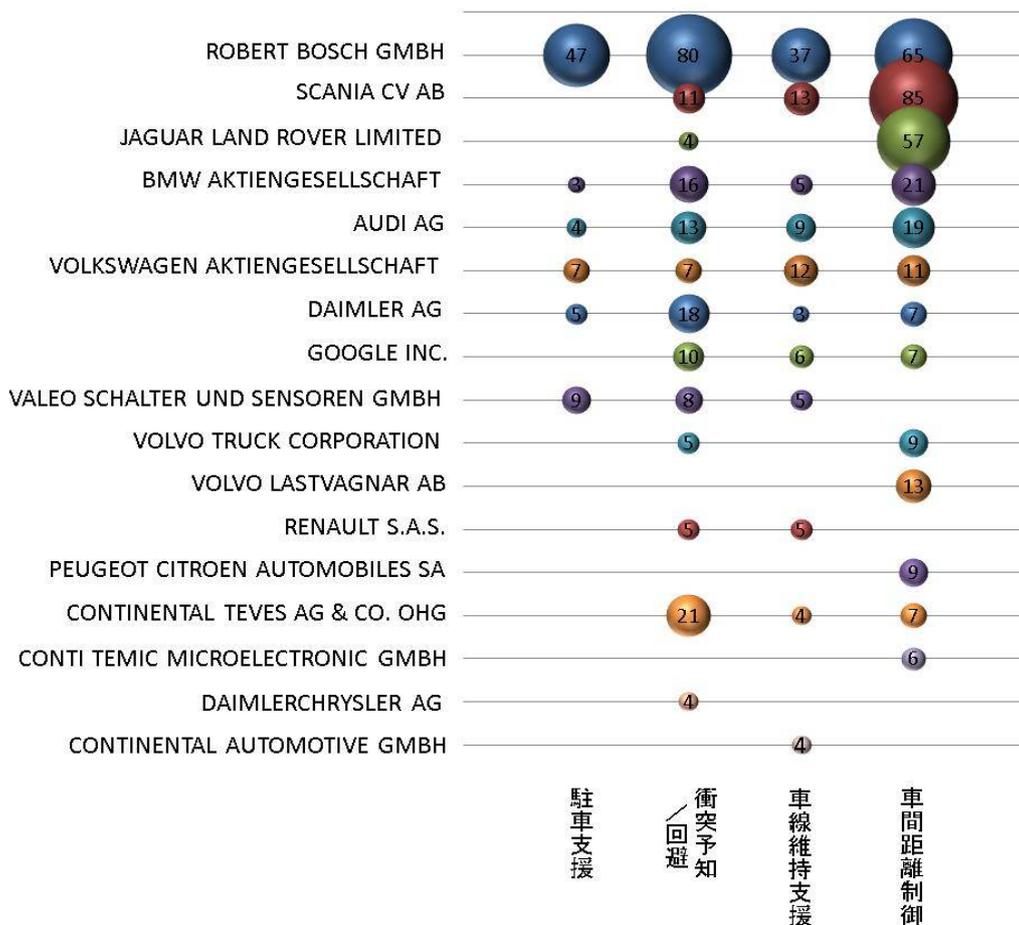


図 3-④-(2)-(2)-4. 運転支援システム別の主要出願人 (外国企業)

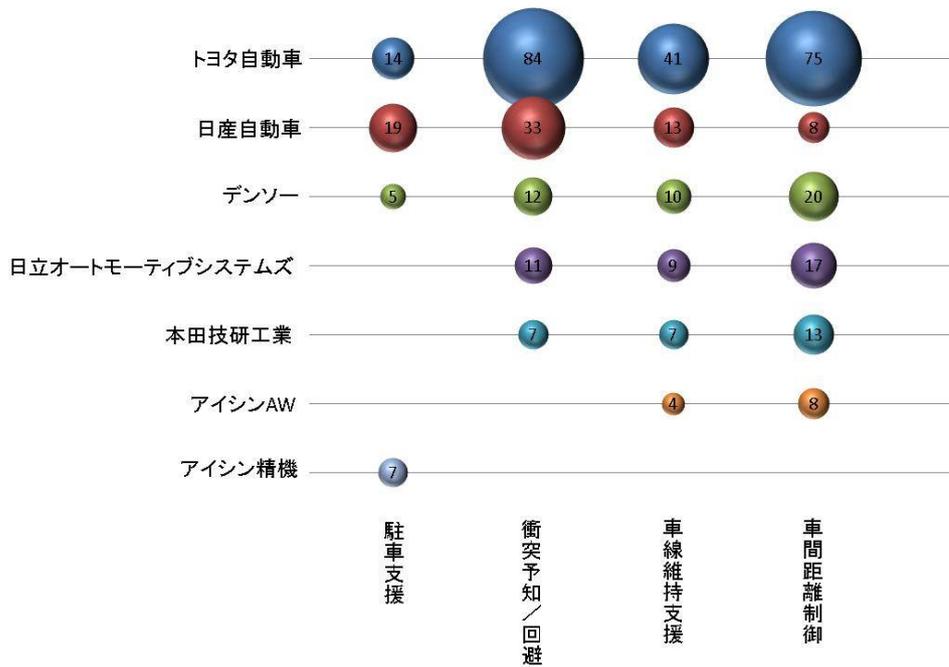


図 3-④-(2)-(2)-5. 運転支援システム別の主要出願人（日本企業）

なお、参考までに、駐車支援、衝突予知/回避、車線維持支援、車間距離制御の別に、主要出願人をそれぞれ「図 3-④-(2)-(2)-6」、「図 3-④-(2)-(2)-7」、「図 3-④-(2)-(2)-8」、「図 3-④-(2)-(2)-9」に示す。

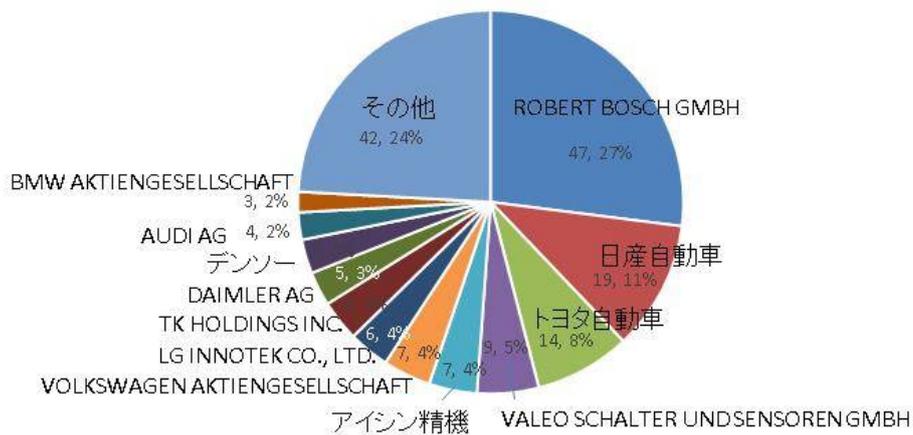


図 3-④-(2)-(2)-6. 駐車支援の主要出願人

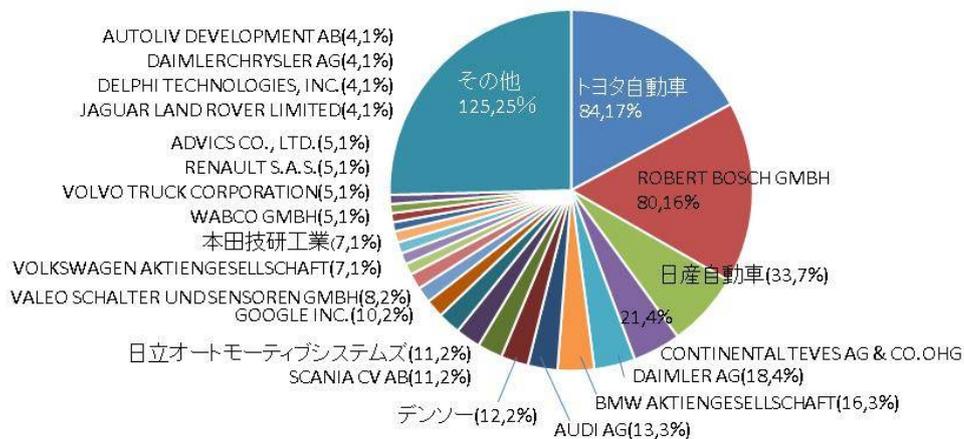


図 3-④-(2)-(2)-7. 衝突予知／回避の主要出願人

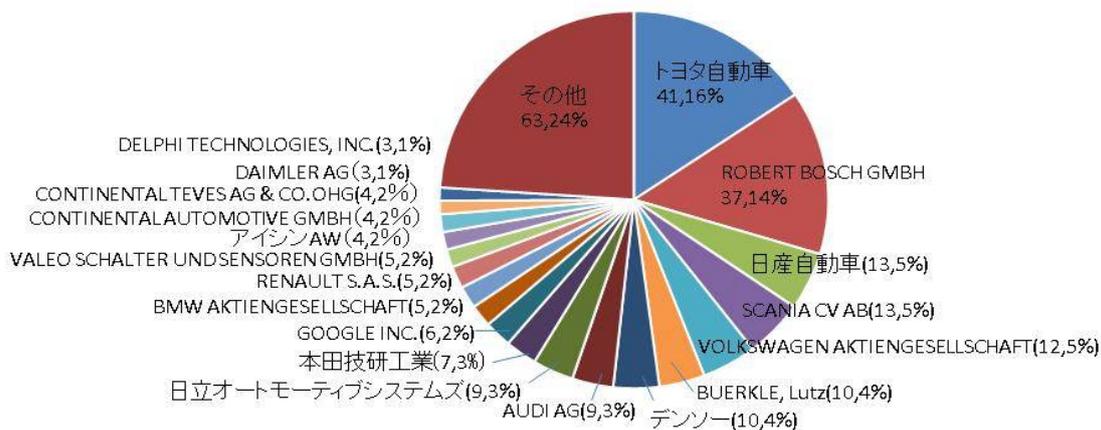


図 3-④-(2)-(2)-8. 車線維持の主要出願人

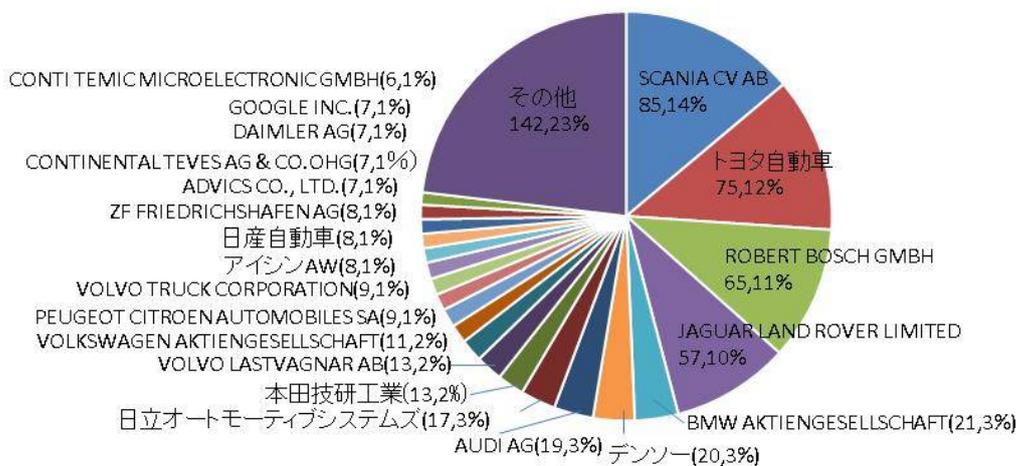


図 3-④-(2)-(2)-9. 車間距離制御の主要出願人

また、各社が取り組む運転支援システムの運動制御の内容の分布を「図 3-④-(2)-(2)-10」に示す。

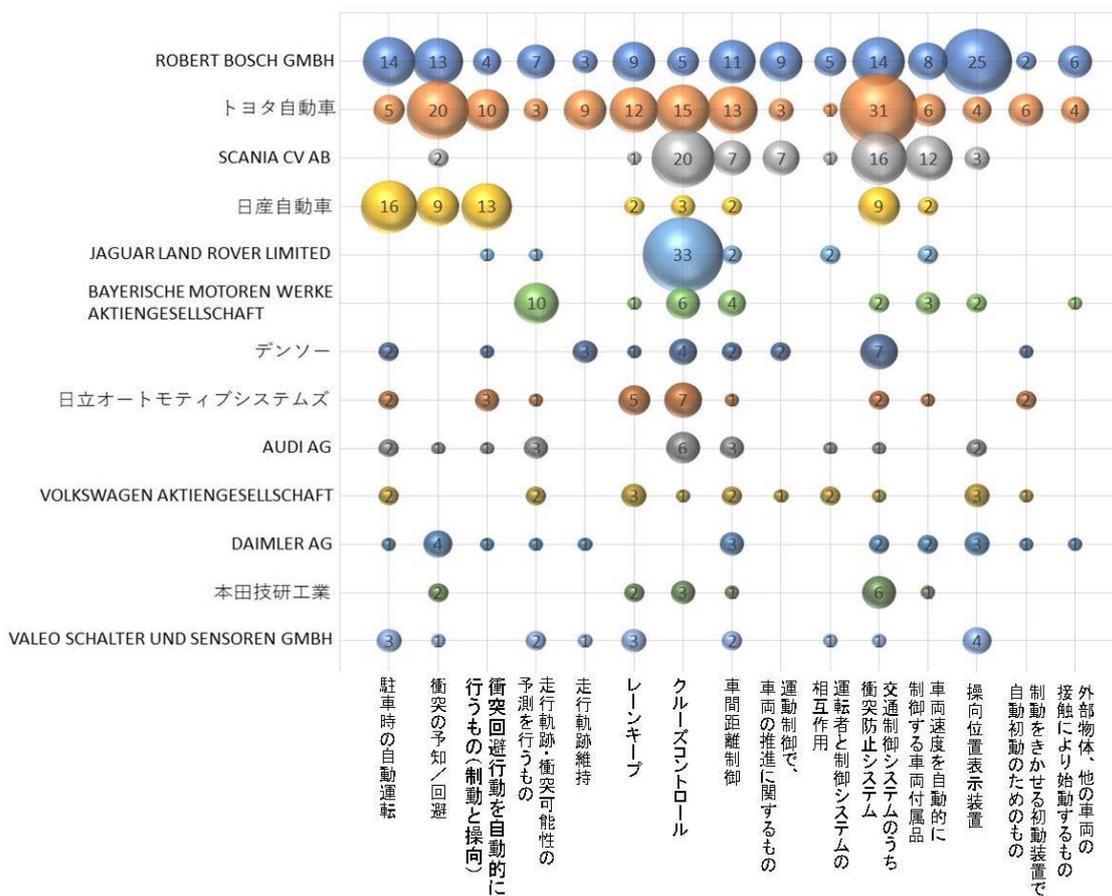


図 3-④-(2)-(2)-10. 主要出願人の運転支援システムの運動制御の内容の分布

主要出願人の運転支援システムの運動制御に関する内容を見ると、BOSCH、トヨタ自動車は、運動制御の各領域で出願していること、SCANIA CV AB は大型車が多いせい、車間距離制御の領域が多く、かつ、道路走行車両の交通システムのうち衝突防止システムのものが多いことなど、主要出願人の運転支援システムへの取り組みの領域の特徴がみられる。

#### (4) 運転支援システム別の国内の動向

運転支援システムについての研究開発は、IPC 国際出願の傾向からみると日本と欧州が他の国に比べてリードしていると思われるので、日本における動向を調査した。

日本出願の調査では、駐車支援、衝突予知・回避、車線維持支援、車間距離制御の他に、車線変更支援、右左折支援、合分流支援についての運転支援システムについての出願傾向も調査した。これらも、信号機情報や、周辺車両の状況を検出することにより、車両の制御動力や操舵を制御して自動で走行させる技術であり、自動運転自動車を実現する上で、より高度な認識センシング技術が不可欠とされるものである。

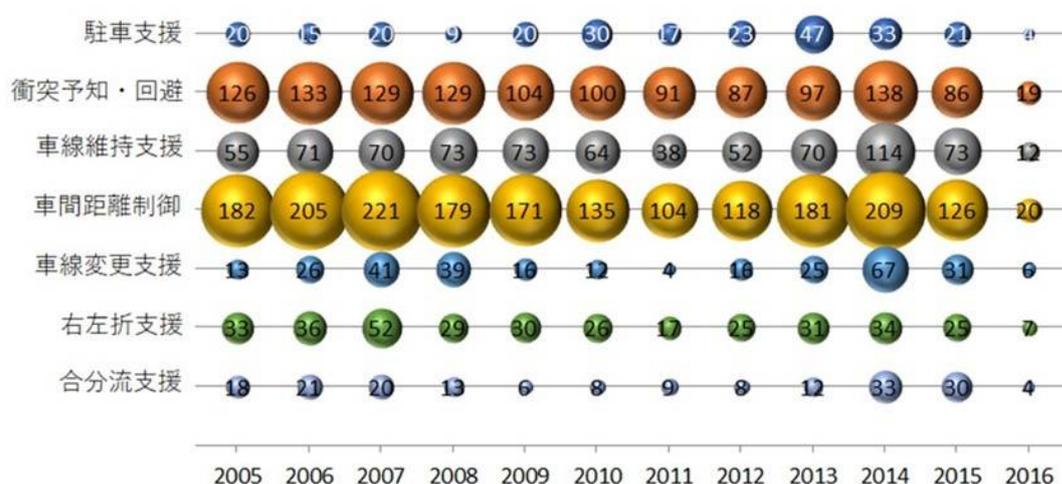


図 3-④-(2)-(2)-11. 日本出願での運転支援システムの出願件数の推移

PCT 国際出願の傾向は「図 3-④-(2)-(2)-1」に見られるように 2008 年頃から増加傾向にあるが、日本出願においては「図 3-④-(2)-(2)-11」で見ると通り、2005 年以降ほぼ継続して出願されており、特に増加傾向が見られるわけではない。日本出願を見ると 2008 年頃から一時減少したが 2012 年頃から再び増加傾向にある。これは、自動運転自動車自体の市場がそれまで立ち上がっておらず、2012 年頃から日本の主要自動車企業が自動運転自動車の研究開発を本格化したからではないかと思われる。

日本出願における主要出願人を「図 3-④-(2)-(2)-12」(日本企業)、「図 3-④-(2)-(2)-13」(外国企業)に示す。

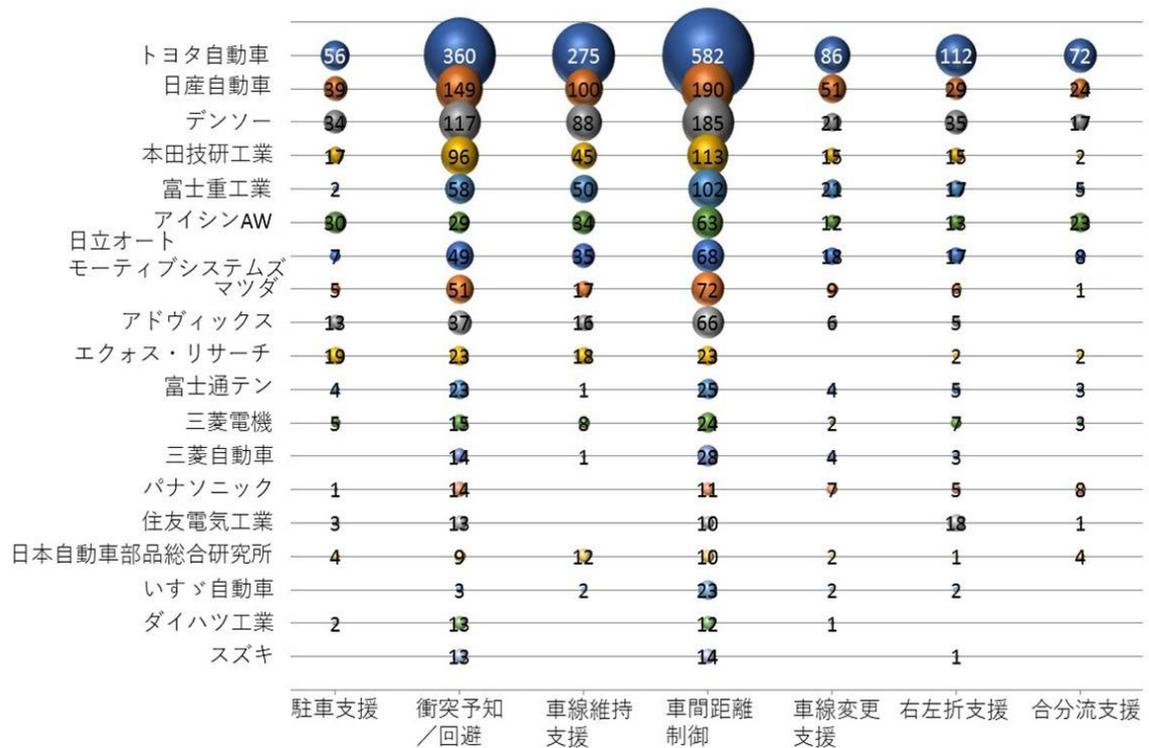


図 3-④-(2)-(2)-12. 日本出願の運転支援システム別主要出願人（日本企業）

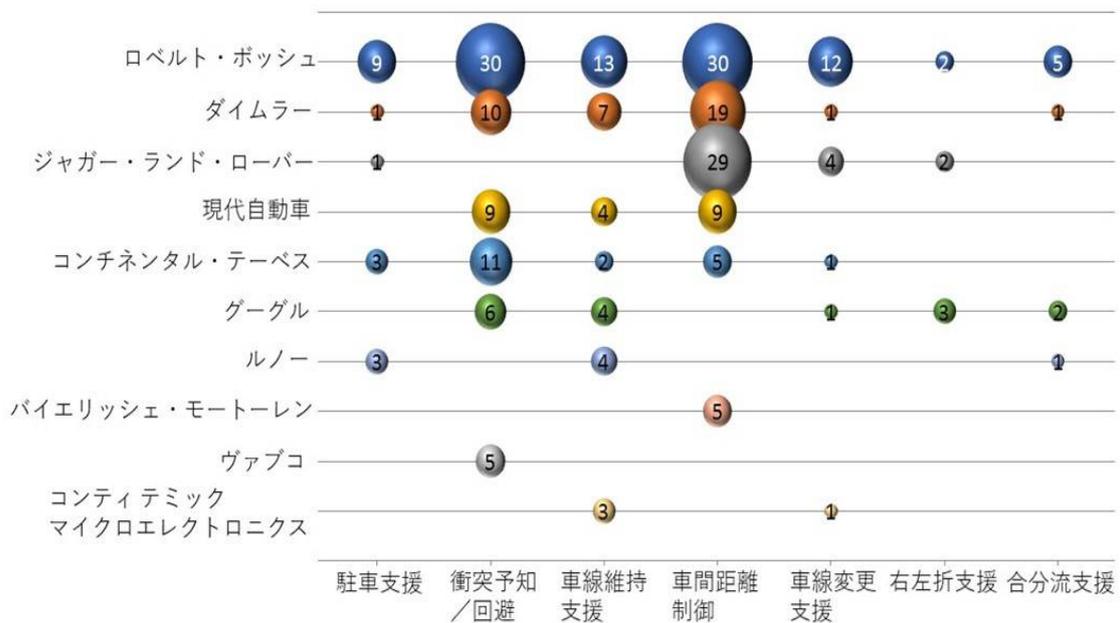


図 3-④-(2)-(2)-13. 日本出願の運転支援システム別主要出願人（外国企業）

日本企業においては、トヨタ自動車はじめ各自動車会社とも衝突予知／回避、車間距離

制御の領域が特に多いが、運転支援システムの各シーン（駐車支援～合分流支援）にわたり出願している。これに比べ、外国企業では BOSCH、Daimler 以外は、JAGUAR LAND ROVER、BAYERISCHE MOTOREN、WABCO にみられるように特定のシーンに出願している。

### 3-④-(2)-(3) 運転支援システムに用いられる認識センシング技術の動向

#### (1) 運転支援システムの検知、推定、制御の具体的手段

自動運転自動車、運転支援を適用するシーン・場所に関する出願では、カーブ、交差点、死角、合流・分流、専用道といった特定の道路環境に関する出願が見られ、特にカーブ、交差点、死角に関する出願が多くなっており、こういったシーン・場所を意識した開発が活発に行われている。これらのシーン・場所の情報を検知・推定し、運転支援システムの運動制御を行う手段を、日本出願の特許文献から調査した結果を「図 3-④-(2)-(3)-1」に示す。

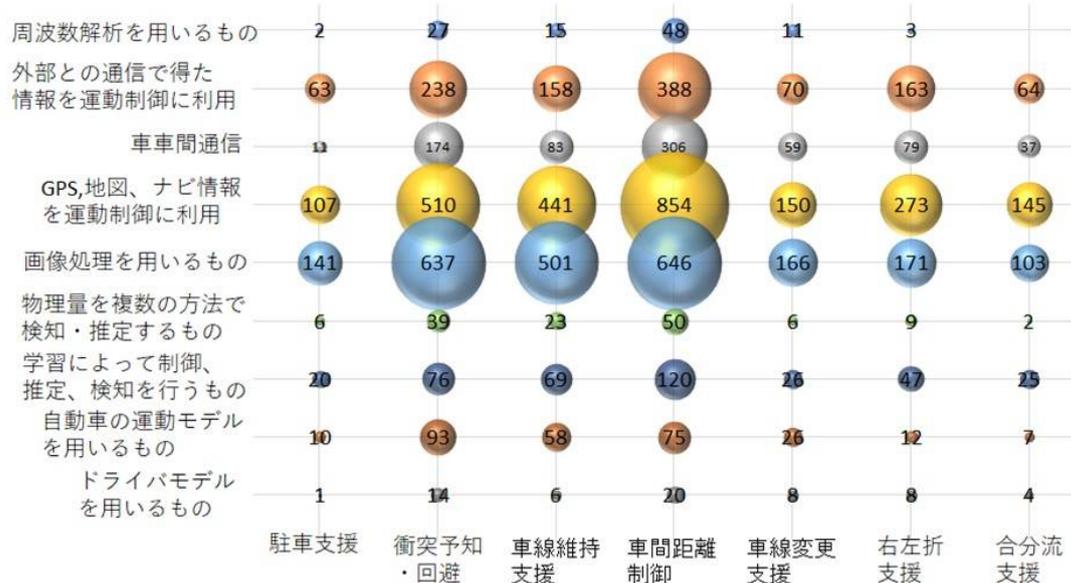


図 3-④-(2)-(3)-1. 運転支援システムの検知、推定、制御の具体的手段

運転支援システムの検知、推定、制御の具体的手段としては、外部との通信で得た情報を運動制御に利用するものや、GPS などナビ情報を運動制御に利用するものが主流であり、車載センサにより検知、推定、制御するものがまだまだ少ない。

具体的手段では、「画像処理を用いるもの」が多く、これは、認識センシング方法がカメラによるものが多いことを示している。衝突予知や車間距離制御では、カメラで障害物を

認識し、レーダーで障害物との距離を測って、その情報を運動制御に活かすものが内容となっているものが多いことによるものと思われる。

また、自動運転自動車の普及のためには、自車位置や周囲環境を把握して動的地図データを作成することが必要なので、動的地図作成のための画像処理の内容が多くなっている。

物理量を複数の方法で検知・推定するものは、ジャイロや加速度センサなどの車載の各種センサからの情報や、燃焼機関の状態、操向角度などの情報を運動制御のパラメータに用いるもので、運動支援システムの特許請求の範囲では、まだまだ少ない。

## (2) 運転支援システムの車外情報の検知・推定情報と検知手段

各シーンの運転支援システムでは、自車位置の把握をはじめ、周囲の環境認識を行う必要があるため、車外情報の内容と検知手段としての認識センシング技術を日本出願で調査した結果を「図 3-④-(2)-(3)-2」に示す。認識センシング技術は、レーダー方式、ライダー方式、カメラ方式、超音波方式、赤外線方式に分類し、レーダー方式についてはミリ波、マイクロ波、レーザーに細分した。

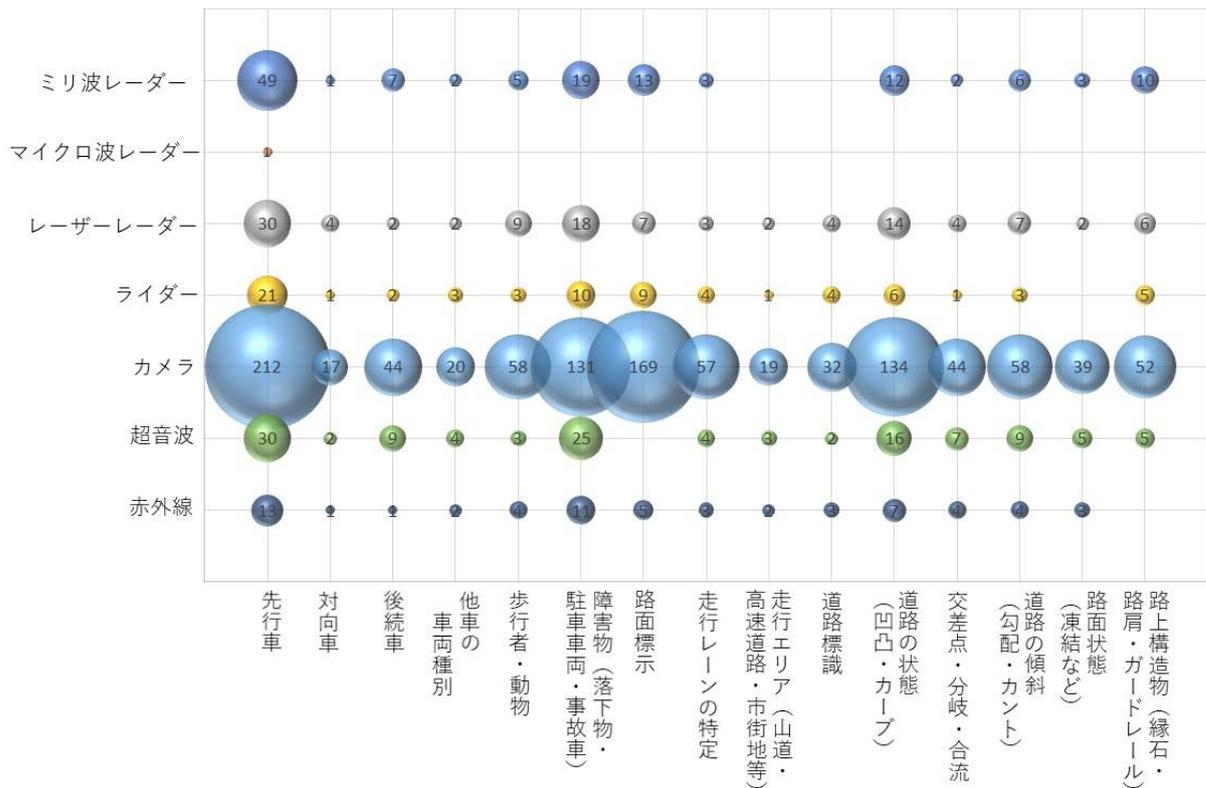


図 3-④-(2)-(3)-2. 運転支援システムの車外情報の検知・推定情報と検知手段

「図 3-④-(2)-(3)-2」を見ると、運転支援システムの車外情報の検知・推定情報と検知手段としては、カメラを用いるものが圧倒的に多い。これは、「図 3-④-(2)-(3)-1」で示した画像処理を用いて運転支援システムの運動制御を行うことから当然であるとの結果であった。

ミリ波レーダーやレーザーレーダー、ライダーなどのレーダー方式は車前方の障害物検知を行うものがほとんどであり、また、超音波や赤外線は車周囲の環境情報の検知であり、多くは車側方、赤外線は多くは車後方の障害物検知の手段で使われている。

### (3) 運転支援システムに用いられる認識センシング技術

車外情報の検知手段としての認識センシング技術を運転支援システム別に「図 3-④-(2)-(3)-3」に示した。なお、自車位置を認識する検知手段として GPS（ナビ情報を含む）も追加した。



図 3-④-(2)-(3)-3. PCT 国際出願の運転支援システムに用いられる認識センシング技術

各運転支援システムに用いられる認識センシング技術は、レーダーによるもの、カメラによるものが圧倒的に多い。

また、認識センシング技術としての赤外線が車間距離制御に用いられる件数がレーダーと同程度に見られるのは、自車両の外界に設定された検出対象領域を複数の角度領域に分割し、赤外光レーザーやミリ波などの電磁波を用いて各角度領域を走査するようにして渋滞予測方法に用いられる例が多いからである。

「図 3-④-(2)-(3)-4」に日本出願の傾向も示すが、日本出願では PCT 国際出願の傾向と同様にレーダを用いるものとカメラを用いるものが大半ではあるものの、車間距離制御に赤外線を用いるものはほとんど無い。日本出願で赤外線を用いる例は、車の周囲、特に後方の障害物検知に用いられている。



図 3-④-(2)-(3)-4. 日本出願の運転支援システムに用いられる認識センシング技術

### 3-④-(2)-(4) 車両用衝突予知装置（システム）の認識方法

#### (1) 車両用衝突予知装置の認識方法の PCT 国際出願件数の推移

運転支援システムの運動制御に用いられる認識方法の観点からの調査とは別に、車両用衝突予知装置で用いられる認識センシング技術の出願傾向を調査した結果を「図 3-④-(2)-(4)-1」に示す。

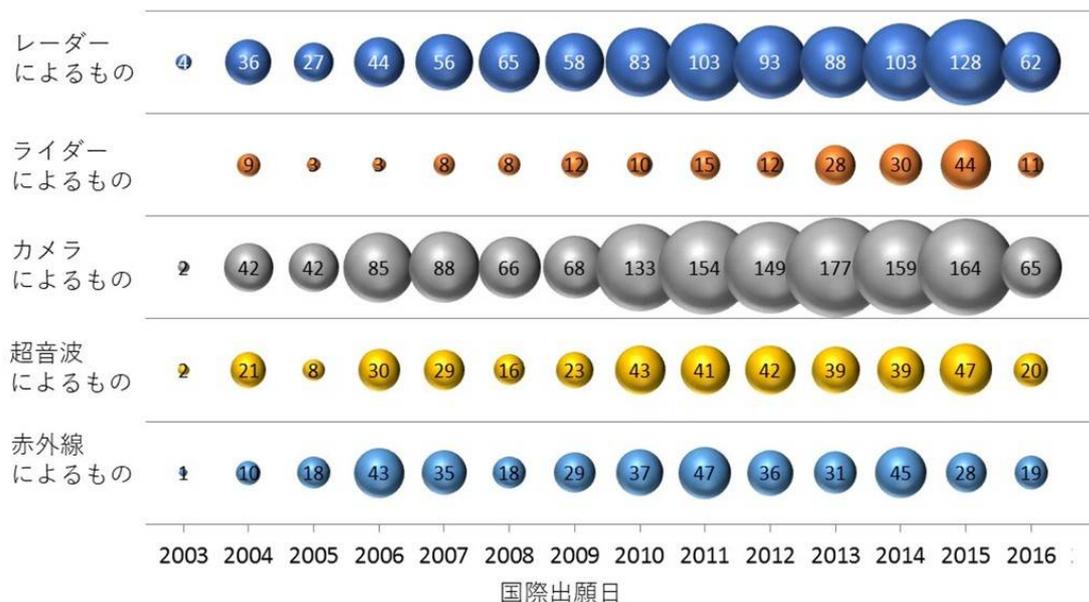


図 3-④-(2)-(4)-1. 車両用衝突予知装置の認識方法別の PCT 国際出願件数の推移

車両用衝突予知装置においても、レーダーによるものとカメラによるもの出願が多い

が、これは、カメラで先行車を検知し、レーダーで距離を測る技術が多いためである。

また、「図 3-④-(2)-(4)-1」を見ると、赤外線によるものも多く出願されている結果となっている。これは、特許文献の記載内容が『障害物検知をミリ波、赤外光レーザーなどの電磁波を用いる』と記されているものが多いことから、文献検索キーワードの「赤外線」が検索されてしまう理由によるものである。しかし、超音波センサとカメラあるいは赤外線やレーザーを用い、障害物の種類の特定や障害物の大きさ、形状を検出するような技術も少ないけれども出てきている。

## (2) 車両用衝突防止装置の認識方法の出願受理国の状況

認識センシング技術別の出願受理国を「図 3-④-(2)-(4)-2」に示す。

出願受理国で「欧州」とされているものは欧州特許庁が受理したもので、この欧州特許庁が受理したものとスウェーデン、ドイツ、フランスなどの欧州各国を合わせた「欧州地域」としてみると、欧州地域はレーダーで 50%、ライダーで 59%、カメラで 41%、超音波で 45%、赤外線で 31%を占めている。

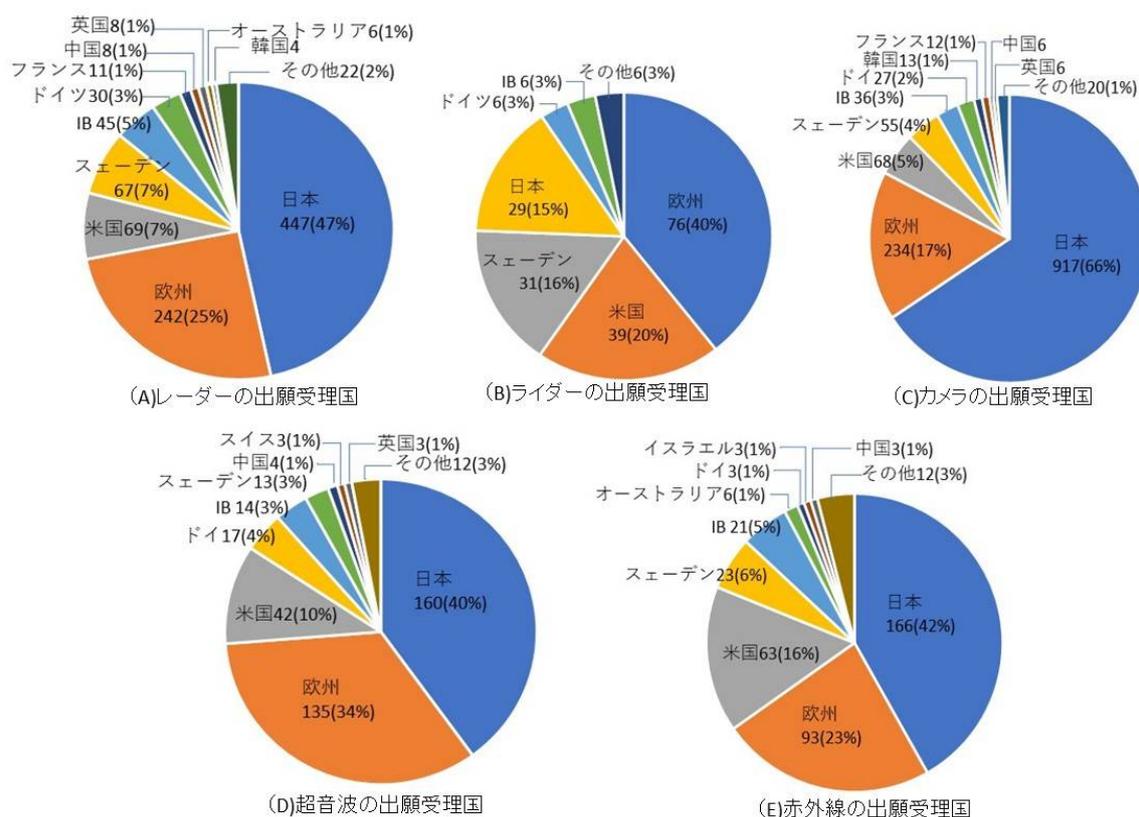


図 3-④-(2)-(4)-2. 車両用衝突予知装置の認識方法の出願受理国

レーダーの出願受理国では、日本が半数近く (47%)、次いで欧州 (25%)、米国 (7%)

の順となっているが、出願受理国を欧州地域とすると、欧州地域が50%となる。

ライダーの出願受理国は、欧州、スウェーデン、ドイツの欧州地域で59%、次いで米国が20%、日本が15%の順で、欧州地域の研究開発が活発となっている。

カメラの出願受理国は日本が66%を占めており、次いで欧州地域が30%で、日本と欧州地域で96%を占めている結果となった。

超音波の出願受理国は、日本が40%を占めているが、欧州地域は45%を占めている。

赤外線の出願受理国は、日本が42%、欧州地域が31%で、米国が16%となっている。

以上のように、車両用衝突予知装置に用いられている認識方法の出願受理国を見ると、運転支援システムと同様に日本と欧州地域がかなりの割合を占めており、この分野でも日本と欧州が他の国に比べてリードしている可能性があるとうかがえる。

### (3) 車両用衝突防止装置の認識方法の主要出願人

車両用衝突予知装置で用いられる認識センシング技術の主要出願人は「図3-④-(2)-(4)-3.」に示すとおりである。



(注1) CONTINENTALは、CONTINENTAL AUTOMOTIVE GMBH、CONTINENTAL SAFETY ENGINEERING INTERNATIONAL GMBH、CONTINENTAL TEVES AG & CO. OHGを含む。

(注2) 日立オートモティブシステムズは、日立製作所を含む。

(注3) VOLVOは、VOLVO LASTVAGNAR AB、VOLVO TRUCK CORPORATIONを含む。

図3-④-(2)-(4)-3. 認識方法別の主要出願人

### 3-④-(2)-(5) 自動運転自動車における IRiS 研究テーマの位置づけ

#### (1) 分子慣性ジャイロ

分子慣性ジャイロの構成要素を次のとおりに分割し、これらを、「図 3-④-(2)-(5)-1」のサーチ領域で、先行あるいは類似の特許文献があるか否かを調査した。

##### 【構成要素】

- 振動・可動要素の無い単純構造（円環管路）
- 角加速度を液体分子慣性による圧力として検出（MEMS フォースセンサ）
- ピエゾ抵抗型カンチレバーに生じる圧力差から角加速度及び角速度を求める
- 円環管路をカンチレバーチップと一体化

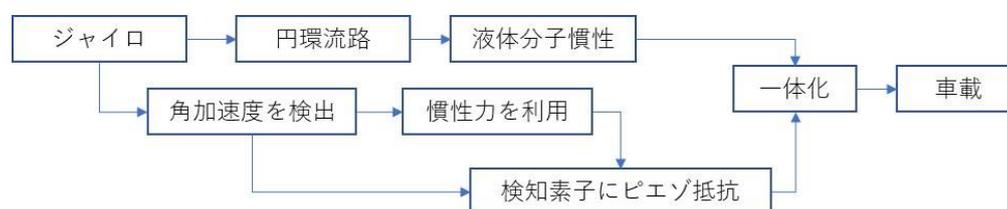


図 3-④-(2)-(5)-1. 分子慣性ジャイロのサーチ領域

円環管路で、液体質量の慣性力を利用し、検知素子にピエゾ抵抗型カンチレバーを使用して角加速度及び角速度を求めるジャイロセンサで、これら要素を網羅した先行技術文献は、特開 2015-227863「ジャイロセンサ」（東京大学）の 1 件であった。なお、車載センサを目的とした先行技術文献はなかった。また、円環管路をカンチレバーチップと一体化した先行技術文献はなかった。

また、自車位置を把握する方法は GPS をはじめ外部からの情報を利用するものが多いが、車載ジャイロのような「物理量により推定する方法」は少ない。（図 3-④-(2)-(3)-1 参照）

IRiS の分子慣性ジャイロは、角加速度（物理量）により位置推定するものであり、新しい自車位置の検知方法として知財戦略的にも有意義なものといえる。

#### (2) 分光イメージャ

分光イメージャの構成要素を次のとおりに分割し、これらを、「図 3-④-(2)-(5)-2」のサーチ領域で先行あるいは類似の特許文献があるか否かを調査した。

##### 【構成要素】

- 3次元 MEMS ナノ加工
- 赤外線分光と可視受光を同一基板上で実現
- シリコン上のナノアンテナで赤外光を直接電流に変換
- 金アンテナ（金ナノピラーによる近赤外検出）

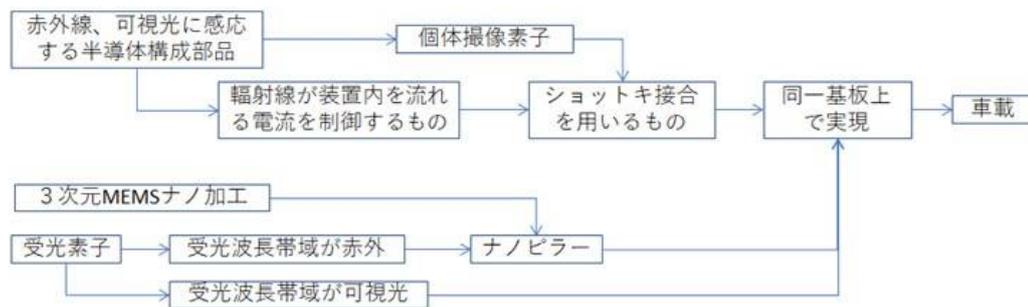


図 3-④-(2)-(5)-2 分光イメージャのサーチ領域

調査の結果、赤外線、可視光に感応する半導体構成部品ではショットキー接合のものは多く、この IRiS テーマの特徴点は見いだせなかった。

受光素子では、ナノピラー形成という観点では類似文献があったが、可視光との同一基板上での形成という観点での先行文献はなかった。

それぞれの構成要素を満たし、赤外線分光と可視受光を同一基板上で形成していると思われるものは、数件検索されたが、車載用途のものはなかった。

### 3-④-(2)-(6) 調査結果のまとめ

- 車載センサを利用した運転支援システムでは衝突被害軽減/回避技術、駐車支援技術が既に市場投入されているが、今後もこれらの特許出願の割合が多くなっているものと考えられる。これらの車載センサは、カメラで障害物等を認識し、レーダーで距離を検知し、これらを組み合わせた情報を運転支援システムの運動制御に利用するのが主流となっている。
- 通信を利用した運転支援システムでは、外部との通信で得た情報を利用するもの、GPS、地図、ナビ情報を利用した衝突被害軽減/回避や、車間距離制御に関する出願件数の割合が多い。今後は、車車間通信で得た情報を利用していくものの他、合分流支援や右左折支援等の運転支援システムの出願も見られ、今後の運転支援システムとして、このような技術の出願も増えていく傾向にある。
- 自車位置を把握する方法は GPS をはじめ外部からの情報を利用するものが多いが、IRiS の分子慣性ジャイロのような物理量（角加速度）により位置推定するものは少なく、新しい自車位置の検知方法として知財戦略からみても有意義なものといえる。
- 車両用衝突予知装置で赤外線が用いられるのは、車側方（車周辺）がほとんどであり、車進行方向の障害物等検知ではあまり用いられていない。

IRiS の分光イメージャは、特に車進行方向でかつ遠方までの障害物判別を狙っており、この領域は今まで特許文献からは少なく、開発の方向性は妥当といえる。

### 3-⑤ プロジェクト推進

#### 3-⑤-(1) 研究推進委員会、研究会による研究推進

本研究開発の目的・目標達成に向けて研究開発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等を目的として、研究会及び知財委員会を設置した。また本格研究等、今後の取り組み等に関して検討することを主目的とした革新認識システム研究推進委員会を設置した。研究会および委員会はマイクロマシンセンターが取り纏めを担当した。

##### (1) 革新認識システム研究推進委員会の実施

革新認識システム研究推進委員会は、提案時の PM 候補を研究推進委員長とした。本研究開発の成果を踏まえながら、本事業目的に係る関連研究や国内外の取り組みを調査するとともに、関連有識者等の見解の収集等を通じて、完全自動化を達成するにふさわしい革新認識システムに関する本格的な研究等今後の取り組みに関する検討を実施した。平成 27 年度の開催実績を表 3-⑤-(1)-(1)-1、平成 28 年度の開催実績を表 3-⑤-(1)-(1)-2 に示す。毎回、委員のほぼ全員とオブザーバーとしての NEDO イノベーション推進部の出席と、適時、経済産業省担当部門の参加が得られ、活発な意見交換が行われた。委員会開催風景を、図 3-⑤-(1)-(1)-1 に示す。

表 3-⑤-(1)-(1)-1 平成 27 年度革新認識システム研究推進委員会 開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第1回	7月14日(金) 15:15~17:00	MMC 新テクノサロン	23名
第2回	11月13日(金) 15:15~17:00	MMC 新テクノサロン	21名

表 3-⑤-(1)-(1)-2 平成 28 年度革新認識システム研究推進委員会 開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第1回	4月7日(金) 15:15~17:00	MMC 新テクノサロン	21名
第2回	7月1日(金) 15:15~17:00	MMC 新テクノサロン	23名
第3回	11月11日(金) 15:15~17:00	MMC 新テクノサロン	21名

MMC：一般財団法人マイクロマシンセンター



図 3-⑤-(1)-(1)-1 革新認識システム研究推進委員会開催風景

(2) 知財運営委員会の実施

知財運営委員会は、知財方針の策定、知的財産権の帰属、知的財産の管理・活用について、合理的なルールの確立等を実施する目的で設置した。開催実績を表 3-⑤-(1)-(2)-1 に示す。

表 3-⑤-(1)-(2)-1 知財運営委員会 開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
平成 27 年	5 月 13 日 (金) 15:00~17:00	MMC 新テクノサロン	10 名
平成 28 年	5 月 13 日 (金) 10:30~12:00	MMC 新テクノサロン	10 名

(3) IRiS 研究会の実施

研究会は、月 1 回実施し、研究開発責任者のもと、各研究者がそれまでの進捗を報告し、中間目標やテーマ終了時目標の達成に向けたそれぞれの研究の進捗や方向性の把握、修正、など研究の進め方についての改善の指示や研究者間の調整を行った。H27 年度の開催実績を表 3-⑤-(1)-(3)-1、H28 年度の開催実績を表 3-⑤-(1)-(3)-2 に示す。

表 3-⑤-(1)-(3)-1 平成 27 年度 IRiS 研究会 開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第 1 回	4 月 7 日 (火) 15:00～16:50	MMC 新テクノサロン	23 名
第 2 回	5 月 21 日 (火) 15:00～17:00	MMC 新テクノサロン	14 名
第 3 回	6 月 12 日 (火) 13:30～17:00	MMC 新テクノサロン	17 名
第 4 回	7 月 14 日 (火) 13:15～15:00	MMC 新テクノサロン	18 名
第 5 回	8 月 6 日 (木) 15:00～17:00	MMC 新テクノサロン	15 名
第 6 回	9 月 11 日 (金) 16:15～18:30	MMC 新テクノサロン	19 名
第 7 回	10 月 2 日 (金) 13:30～15:45	MMC 新テクノサロン	16 名
第 8 回	11 月 13 日 (金) 13:00～15:00	MMC 新テクノサロン	14 名
第 9 回	12 月 11 日 (金) 13:30～17:00	MMC 新テクノサロン	16 名
第 10 回	1 月 20 日 (水) 13:00～17:00	(株) デンソー基礎研究所	13 名
第 11 回	2 月 18 日 (木)	書面会議	書面会議
第 12 回	3 月 11 日 (金) 15:00～17:30	MMC 新テクノサロン	16 名

表 3-⑤-(1)-(3)-2 平成 28 年度 IRiS 研究会 開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第 1 回	4 月 7 日 (木) 13:30～15:00	MMC 新テクノサロン	16 名
第 2 回	5 月 13 日 (金) 13:00～15:00	MMC 新テクノサロン	18 名
第 3 回	6 月 3 日 (金) 15:00～17:30	MMC 新テクノサロン	20 名
第 4 回	7 月 1 日 (金) 12:00～15:00	MMC 新テクノサロン	19 名
第 5 回	8 月 5 日 (金) 15:00～17:30	MMC 新テクノサロン	16 名
第 6 回	9 月 2 日 (金) 15:00～17:30	MMC 新テクノサロン	18 名
第 7 回	10 月 7 日 (金) 15:00～17:30	MMC 新テクノサロン	16 名
第 8 回	11 月 11 日 (金) 11:00～15:00	MMC 新テクノサロン	17 名
第 9 回	12 月 9 日 (金) 15:00～17:30	MMC 新テクノサロン	18 名
第 10 回	1 月 13 日 (金) 15:00～17:30	MMC 新テクノサロン	18 名
第 11 回	2 月 10 日 (金) 13:00～17:30 (成果報告検討会)	MMC 新テクノサロン	23 名

毎回研究員全員の出席と適時オブザーバーとして NEDO イノベーション推進部や経済産業省担当部門の参加が得られ、研究開発責任者や研究推進委員長の指摘を含め活発な意見交換が行われ、課題の取り組み修正や優先順位の整理など研究効率の向上が図られた。研究会開催風景を、図 3-⑤-(1)-(3)-1 に示す。



図 3-⑤-(1)-(3)-1 IRiS 研究会開催風景

### 3-⑤-(2) 本格研究等の検討

#### 3-⑤-(2)-(1) 総括

先導研究 2 年間で原理的に成立することを検証した後、本格研究にて実用化に向けたデバイス試作を行う計画で先導研究に参画した。先導研究の正式発足前から東大、MMC、デンソーが連携した研究計画を策定し、原理検証試作を実施した結果、早い時期に原理的に成立する可能性を見極めた。また、本テーマのような新原理、新構造のデバイスを研究するには MNOIC のような安定したラインで試作検討することが性能向上を加速するためには必須要件であり、ある程度の試作費用も必要であることが判明していた。さらに、イノベーションジャパン 2016 など概要を発表した際、研究内容に関する問い合わせも多く、注目度が高いテーマであることも実証された。このような中、経済産業省への情報発信も積極的に実施し、NEDO イノベーション推進部から提案のあった自動車関連以外への応用も具体的な事例を挙げて提案した。

先導研究終了時点では当該テーマに関する本格研究等へのプロジェクトの実現には至っていないが、規模を縮小して研究を続け、国プロ予算獲得に向けて継続検討する。

### 3-⑤-(2)-(2) 活動記録の概略

世界的に自動運転の実現に向けた活動が活発化しており、我が国においても経済産業省、国土交通省、などが個別に政策予算を実行し、さらに省庁横断型PJであるSIPにおいても自動運転が大きなテーマとして取り上げられている。このような「完全自動化」自動車に不可欠な技術として、NEDO イノベーション推進部の指導を受けながら先導研究をしてきたIRiSの取り組みについて、以下のような情報発信を積極的に行った。

#### 1) 経済産業省への情報発信

完全自動化に不可欠な取り組みであることを例示しながら、3つの課題の研究進捗や、ステージゲート審査のタイミング等に応じて、主に研究推進委員長、研究開発責任者が状況報告を2015年～2016年の間で通算7回行った。自動車関連やそれ以外の担当部門を中心に実施した。

#### 2) 研究推進委員会での議論

経済産業省担当部門やNEDO関係者に積極的に研究推進委員会を紹介し、出席に応じて研究推進委員長を座長として、今後についての取り組みの議論を実施した。経済産業省からは2回、NEDO関係者は毎回の出席を得た。

#### 3) その他の取り組み

上記、議論の中から、ユーザへのヒアリングの重要性の指摘があり、自動車メーカーへのヒアリングを行った。また、自動車以外へのアプリケーションの抽出を行った。これらの活動内容は、上記の情報発信や議論の中で適時活用した。

さらに、平成27年度にはナノ・マイクロビジネス展併設国際シンポジウム、平成28年度にはイノベーションジャパン2016、MEMS センシング&ネットワークシステム展での成果発表会で報告した。詳細を以下に示す。

- ①ナノ・マイクロビジネス展2015 平成27年4月22日～24日 パシフィコ横浜において、主催者（一財）マイクロマシンセンターブース内に新規プロジェクトの紹介としてポスターを掲示した。
- ②イノベーション・ジャパン2016 平成28年8月25日～26日、東京ビッグサイトにおいて、下山 勲研究開発責任者の発表を行った。また研究内容をポスター展示した。
- ③MEMS センシング&ネットワークビジネス展2016 平成28年9月14日～16日、パシフィコ横浜において、下山 勲研究開発責任者の発表を行った。IRiSブースを開設し、MEMS フォースセンサチップの展示、ポスターの展示を行った。

## 第 4 章 目標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)および達成度、要因分析を下記表のように記載する。

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
分子慣性ジャイロ:原理検証	ドリフト要因の排除	a) 支配的なドリフト要因は温度特性であり、搭載する MEMS フォースセンサチップの温度補償を検討、評価、温度係数を一桁下げた。 b) さらに、温度係数を低減するピエゾ抵抗層形成条件の実現可能性を確認。 c) 非圧縮性液体が封止された分子慣性ジャイロの光や温度等の定常化した評価環境を構築。	○	ドリフト要因の洗い出しと、温度係数ゼロの MEMS フォースセンサチップの実現可能性を確認できたことが成功要因
	感度向上による相対的ドリフトの低減	a) 温度係数を低減した MEMS フォースセンサチップで 3 倍の感度向上を確認した。 b) ピエゾ抵抗カンチレバーの薄膜化、流路長の延長でジャイロ感度向上の効果を確認。さらに S/N を向上させた。	○	温度係数がゼロに近く、かつ感度 3 倍のピエゾ抵抗カンチレバーの実現が成功要因
	ジャイロセンサの小型化	a) 8 インチ試作ラインを想定したラージスケールモデルを設計、試作し、目的の角速度が得られることを確認。その上で、8 インチ MEMS プロセスによる、分子慣性ジャイロの小型化の実現可能性を確認した。	○	8 インチ MEMS 試作ラインで試作可能な流路構造を、事前にラージスケールモデルで試作し、目的の角速度が得られることを確認できたことが成功要因
分子慣性ジャイロ: MEMS フォースセンサチップの試作ラインへの適用検証	センサ特性を改善するピエゾ抵抗構成の導出完了	温度係数を低減して低ドリフト化できるピエゾ抵抗構成の導出を完了した。 ・イオン注入ドーズ量の温度係数依存性チップを試作 ・温度係数が従来よりも二桁程度低減できるピエゾ抵抗の構成の導出完了	○	東大と連携して設計し、製作・評価が問題なく実施できた
	実用化可能性の見極め完了	実用化可能性の見極めを完了。 ・動作チップが得られる 8 インチ試作ラインでの工程条件を確定 ・ピエゾ抵抗層のドーパント濃度のバラツキは 2%以下で小さいことを確認	○	8 インチ試作ラインでこれまでに蓄積された工程条件等の情報を活用できた
	小型ジャイロ製作の課題抽出完了	小型ジャイロ製作の課題抽出完了 対策案を反映した構成のチップを試作、作製可能であることを確認	○	東大と連携して実施できた
分子慣性ジャイロ: 実環境を想定した動作検証: 暫定要求仕様の導	他軸感度評価による課題抽出	他軸感度は 0 と判明。 以下の課題抽出完了 ・車両傾斜検出センサ高精度化 ・傾斜センサ含め校正方法の確立 ・PKG への高精度実装	○	評価系の確立、評価項目の合意を大学との連携により実施し、成果に結びつけた

出と評価	温特評価による課題抽出	温特評価を完了 温特要因 ・0点温特：性能ばらつきを含めたピエゾゲージのTCR ・感度温特：ゲージの感度温特、流体の密度温特、流路長さの温特を確認	○	温特要因抽出と実機検証を並行して実施し、成果に結びつけた
	省エネ効果試算	完全自動化で渋滞の激減、カーシェアによる交通量の削減により、合計約30%の削減が期待できることを試算（当初25%削減）	○	事故レス渋滞レスの見積もり精度を上げることにより、より削減が期待できた
分光イメージャ：原理検証	赤外光検出アンテナ構造検証	ナノピラー構造をシリコン基板上に特定形状でアレー化。中～遠赤外の特定の波長帯を、半値幅6 $\mu\text{m}$ 以下で吸収する機能を実験的に確認	○	シリコンナノ加工条件を確立し、精度よくナノアンテナを形成できたこと、偏光FTIR計測方法の確立、及び、シミュレーション手法の確立が成功の要因。
	光電変換検出長波長化・熱ノイズ対策	金属選択等で障壁低下0.7eV(Au/Si)→0.2eV(Ti/Au)へ。長波長化と光電流増加でS/N比増大、検出方式の工夫によりS/N比増大。NETD（性能指数）向上し10mK達成。	○	検出方式で、ノイズを格段に減らすことができたこと、適切な金属選択等で高いショットキー障壁の低下を得られたことが成功の要因。
	アンテナ構造含む光電変換部試作	アンテナ部と光電変換部を含んだ統合デバイスを試作完了、プロセスの条件を試作グループと共有化	○	プロジェクト一年目の早い段階でデバイス製作方法が確立し、MEMSラインで高品質のデバイス試作ができたことが成功の要因。
分光イメージャ：分光検出器の試作ラインへの適用検証	可視・赤外検出器混在デバイスの検討	a)可視光センサ部の作製検証を、8インチMEMS試作ラインを用いて行い、試作フローを導出した。 b)赤外線センサとして検証したナノアンテナ型ショットキーダイオードと、上記a)の可視光センサのプロセスフローとを組み合わせた、プロセスフローを提案することができた。	○	プロセスフローの提案については、昨年度試作したナノアンテナを搭載した統合デバイスの作製結果より得られた知見をフィードバックできたことが大きいと考えられる。
	可視・赤外検出器混在デバイスの検証	a)上記プロセスフローを用いて、8インチMEMS試作ラインで試作した結果、センサアレイのマクロモデルを得た。 b)マクロモデルでの分光感度特性で近赤外領域(光の波長=1.4 $\mu\text{m}$ )での感度を確認することができた。その波長域にて、可視光センサと比較し、一桁以上の感度差を確認することができた。	○	ナノアンテナ形状の決定については、1年目に試作したナノアンテナを搭載した統合デバイスの評価結果より得られた知見をフィードバックできたことが大きい。
	可視・赤外検出器混在デバイスの検証	a)同一基板上且つ、読み出し回路(ROIC)がシリコンCMOS回路であることをと前提としたプロセスフローの一例を導出した。	○	国際会議の聴講及び議論を通じて得られた情報を、この件に応用できたことは大きかった。
分光イメージャ：実環境を想定した動作検証：暫定要求仕様の導出	車載を想定した課題抽出	温特表評価を電気通信大学と共同で完了 NETD（性能指数）：デバイス温度の高温化に伴い悪化する 吸収波長：デバイス温度の変化に	○	評価系の確立、評価項目の合意を大学との連携により実施し、成果に結びつけた

と評価		依存しない 課題抽出完了 高温域における NETD 悪化の抑制 (=暗電流の抑制)		
認識アルゴリズム開発：アルゴリズム基礎検討・分光イメージャへの適用検討	可視、近赤外、中赤外、遠赤外の同時計測データセットの構築	可視、近赤、中赤、遠赤それぞれに対して、対象物体のバウンディングボックス付与を行い、約 7,500 セットの物体検出用データセットを構築した。さらに、可視、遠赤を重畳した画像に対して、対象物体のセグメンテーション付与を行い、約 1,600 セットの物体セグメンテーション用データセットを構築した。	○	計測可能な波長の異なる 4 台のカメラからの映像を同時に計測可能にしたため。
	マルチスペクトル画像からの物体検出手法の開発	可視、近赤、中赤、遠赤画像を用いた、人、車、自転車等の物体検出手法を開発した。複数の波長の画像を用いることにより、単一波長の画像と比較して高い物体検出性能を実現した。	○	それぞれの波長から得られる物体検出結果をできる限り後段の処理で統合できるようにしたため。
	マルチスペクトル画像からのセグメンテーション手法の開発	可視、遠赤画像を用いた、人、車、自転車等の物体セグメンテーション手法を開発した。可視、遠赤の双方の画像を用いることにより、単一波長の画像と比較して高い物体セグメンテーション性能を実現した。	○	可視、遠赤画像から得られた処理を中段で統合することで、入力画像の不整合を吸収できるようにしたため。
認識アルゴリズム開発：認識アルゴリズム開発のための想定実環境の明確化	分光イメージャの有効性明確化	検知対象の定義完了 路上で想定される障害物として以下のものを定義した。 縁石、ガードレール、タイヤ片、車止め、カラーコーン、ポールコーン 有用性判定完了 対象物の吸収スペクトルなどから、可視、遠赤では認識しにくい障害物として以下のものがあることを明確にした。 縁石、車止め、カラーコーン、ポールコーン	○	対象物を的確に絞り込むことで吸収特性や放射特性による認識性の判定が行えた

## 第5章 研究発表・講演、文献、特許等の状況

### (1) 研究発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	下山 勲	東京大学	完全自動運転に向けた最先端モニタリング技術	ナノ・マイクロビジネス展 2015/第 21 回国際マイクロマシン・ナノテクシンポジウム	2015 年 4 月
2	下山 勲	東京大学	完全自動運転に向けて東大とデンソーが新センサー	日経エレクトロニクス 6 月号	2015 年 6 月
3	菅 哲朗	東京大学	ロボット周辺認識力向上のための MEMS 分光イメージャ	第 25 回 MEMS 講習会	2015 年 10 月
4	菅哲朗 安食嘉晴 松本潔 下山勲	・電気通信大学 ・マイクロマシンセンター ・東洋大学 ・東京大学	Si process compatible near-infrared photodetector using Au/Si nano-pillar array	The 29th IEEE international Conference on Micro Electro Mechanical Systems	2016 年 1 月
5	安食嘉晴 菅哲朗	・マイクロマシンセンター ・電気通信大学	Silicon near infrared photodetector using self-assemble formation of organic crystalline nano-pillars	EMN photodetector meeting (招待講演)	2016 年 6 月
6	下山 勲	東京大学	Country Report Japan で IRiS を紹介する	Micromachine Summit 2016	2016 年 5 月
7	下山 勲	東京大学 マイクロマシンセンター	究極の省エネを実現する「完全自動化」自動車に不可欠な革新認識システムの研究開発	イノベーションジャパン	2016 年 8 月
8	下山 勲	東京大学 マイクロマシンセンター	究極の省エネを実現する「完全自動化」自動車に不可欠な革新認識システムの研究開発	MEMS センシング & ネットワークシステム展	2016 年 9 月
9	下山 勲	東京大学 マイクロマシンセンター	究極の省エネを実現する「完全自動化」自動車に不可欠な革新認識システムの研究開発	日本経済新聞科学技術部	2016 年 9 月
10	下山 勲	東京大学 マイクロマシンセンター	究極の省エネを実現する「完全自動化」自動車に不可欠な革新認識システムの研究開発	日刊自動車新聞	2016 年 9 月
11	菅哲朗 安食嘉晴 松本潔 下山勲	・電気通信大学 ・マイクロマシンセンター ・東洋大学 ・東京大学	Au/Si ナノピラーアレイを用いた近赤外光シリコン型フォトディテクタ	第 34 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム	2016 年 10 月
12	下山 勲	東京大学	Innovative Recognition Systems (IRiS) for autonomous driving to make ultimately energy-effective transportation system	IMPACT(International Microsystems, Packing, Assembly and Circuits Technology conference), October 26-28, 台北・台湾	2016 年 10 月
1	Tetsuo	The University	SILICON BASED	The 19th	2017 年

3	Kan Yoshiharu Ajiki	of Electro-Communications Micromachine center	MID-INFRARED PHOTODETECTORS USING PLASMONIC GOLD NANO-ANTENNA STRUCTURES	International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2017)	6月
---	---------------------	---	--	--	----

(2) 文献

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	発表年月
1	菅哲朗 (東大)、安食嘉晴 (MMC)、松本潔 (東大)、下山勲 (東大)	東京大学 マイクロマシンセンター	ナノピラーを用いた Si による近赤外検出器	文部科学省「H27 ナノテクノロジー・プラットフォーム利用報告書」	2016年1月
2	安食嘉晴 菅哲朗	・マイクロマシンセンター ・電気通信大学	Au/Si ナノアンテナを用いた近赤外光シリコン光検出器	電気学会論文誌	未定 (投稿中)

(3) 特許等

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	名称	発明者
1	電気通信大学、他			2017年6月 (予定)	(予定) 遠赤外シリコン受光器	菅哲朗、他

契約管理番号	1 4 1 0 3 0 2 2 - 0
契約管理番号	1 4 1 0 3 0 2 3 - 0
契約管理番号	1 4 1 0 3 0 2 4 - 0
契約管理番号	1 6 1 0 0 3 0 0 - 0