

# 産業のマメ：MEMS (メムス)

## *Micro Electro Mechanical Systems*



## 2025年1月改訂 一般財団法人マイクロマシンセンター

### はじめに

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems、メムス) は、製造業における革新的なキーデバイスとして注目を集めています。その波及効果の大きさから「産業のマメ」と称され、製品の高付加価値化を支える重要な技術として位置づけられています (半導体が「産業のコメ」と呼ばれるのに対して)。

また、MEMSは小型・高機能な特性を生かし、自動車や医療機器、情報通信分野をはじめとする幅広い産業で活躍しつつあり、次世代のライフスタイルを支える革新的技術としても期待されています。

本資料では、MEMSの基本概念から応用事例、そして未来への展望までをわかりやすく解説します。

### お問い合わせ

一般財団法人マイクロマシンセンター

〒101-0026 東京都千代田区神田佐久間河岸67 MBR99ビル6階

Tel: 03-5835-1870 Fax: 03-5835-1873

URL: <https://www.mmc.or.jp>

# 内容

---

## 1. MEMSとは

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) の定義、その特長、及び開発の歴史について解説します。

## 2. MEMSプロセス

MEMSの製造方法として代表的な表面マイクロマシニングとバルクマイクロマシニングのプロセスを紹介します。

## 3. MEMSデバイスと応用

MEMSを活用した製品の事例や、産業・医療・自動車分野での具体的な応用例について取り上げます。

## 4. 国内外の市場と研究開発

世界のMEMS市場動向、主要な関連企業及び学会技術動向について紹介します。

## 5. 産業化とMEMSの活用場面

商用化されているMEMSデバイスの成功事例や、その活躍の場を具体的に解説します。

## 6. センサネットワークへの期待

センサネットワークに対するスマートモニタリングについて、プロジェクト事例を中心に紹介します。

## 7. 革新センサへの期待

革新センサを実現する微量センシング技術について、プロジェクト事例を中心に紹介します。

## 8. MEMSのSDGsへの貢献

MEMS技術が持続可能な開発目標 (SDGs) の達成に貢献する取り組みについて解説します。

# 1 MEMSとは

## 1.1 産業のマメ

### MEMS : Micro Electro Mechanical Systems

半導体製造技術やレーザ加工技術等、各種の微細加工技術を応用し、微小な電気要素と機械要素を一つの基板上に組み込んだデバイス/システム(センサ、アクチュエータ等)。

各種の最終製品に組み込まれ高付加価値化のキーデバイスとなっており、「産業のマメ」とも言われている。



加速度計  
ローム(Kionix)<sup>②</sup>



超音波センサ  
TDK<sup>④</sup>



非接触温度センサ  
オムロン<sup>①</sup>



MEMSミラー  
搭載車載LiDAR  
三菱電機<sup>③</sup>



排気ガス圧センサ  
デンソー<sup>⑤</sup>

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems、メムス) は、半導体製造技術やレーザー加工技術などの微細加工技術を応用し、電氣的要素と機械的要素を一つの基板上に統合したセンサやアクチュエータなどのデバイス/システムを指します。MEMSはさまざまな最終製品に組み込まれることで**高付加価値化を実現するキーデバイス**となっており、その波及効果の大きさから「**産業のマメ**」と称されています(半導体が「産業のコメ」と呼ばれるのに対して)。

最近の開発・製品例としては、自動車用部品などに用いられる圧力センサ、ヒトやモノの存在を検出する非接触温度センサ、先行車両や歩行者などの距離や形状を高精度に計測する車載LiDARのレーザ光源を制御するMEMSミラー、超音波で対象物との相対距離を測定する超音波センサ、排気ガスのフィルタ目詰まりを測定する圧力センサなどがあります。

MEMSが産業のマメと称されるのは、MEMSは非常に小型でありながら、製品に高機能・高効率をもたらす活力源となる技術です。また、MEMSデバイスには多くの種類が存在し、その応用範囲も広いことから、「豆」にたとえられています(豆には大豆、小豆、落花生など多くの種類があり、製品も納豆、味噌、豆腐、豆乳など多岐にわたることから)。

① <https://components.omron.com/jp-ja/products/sensors/D6T>

② <https://www.rohm.co.jp/products/sensors-mems/accelerometer-ics/kx132-1211-product>

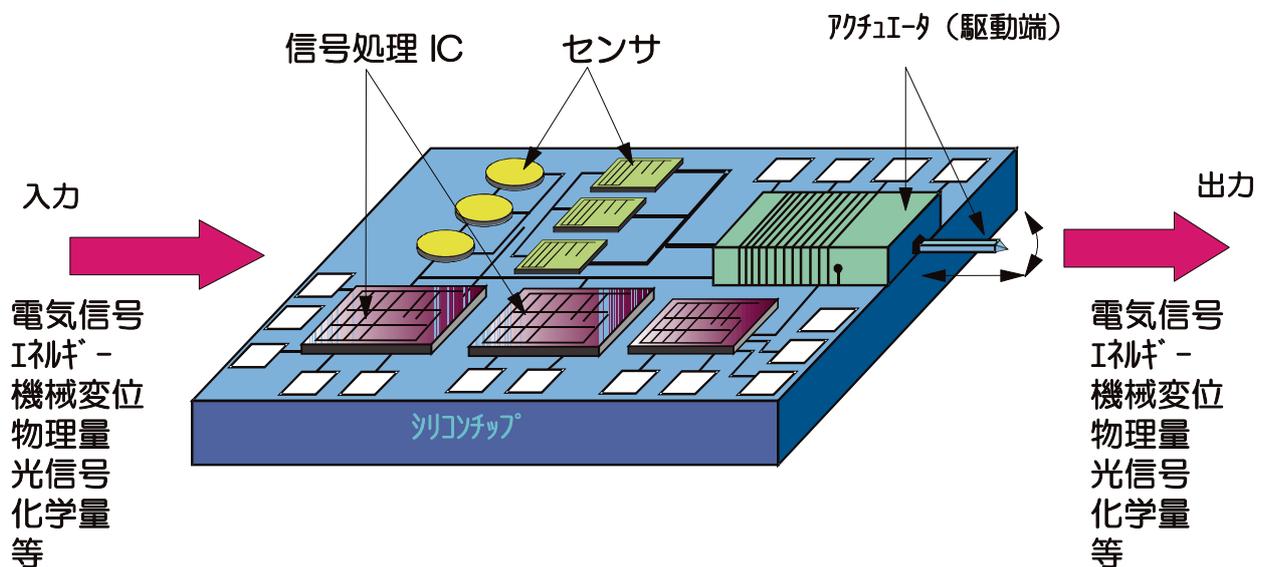
③ <https://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2020/0312.html>

④ [https://www.jp.tdk.com/corp/ja/news\\_center/press/20200107\\_03.htm](https://www.jp.tdk.com/corp/ja/news_center/press/20200107_03.htm)

⑤ [https://www.denso-iwate.co.jp/business/semiconductor\\_sensor.html](https://www.denso-iwate.co.jp/business/semiconductor_sensor.html)

## 1.2 MEMSの特長 1

- 微細加工技術  
小型・高精度・高品質・低コストを実現
- 3次元構造体  
多様な入出力(電気信号、物理量)に対応



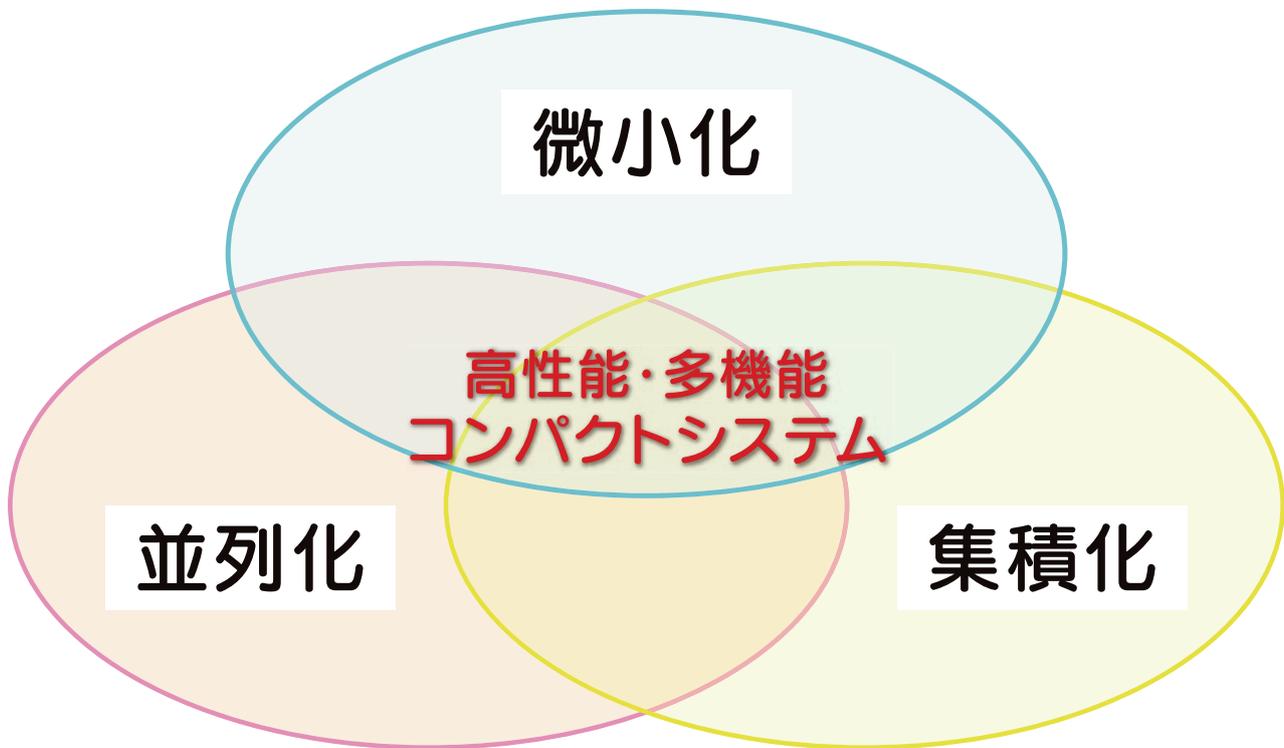
NEDO発表資料より

MEMSは半導体微細加工技術（一括加工）を用いて製作されるため、**超小型でありながら高精度・高品質な機構部品**が得られるという特長があります。また、一つの部品を作るのと同じ工程で多数の構造を同時に製作できるため、低コストな大量生産が可能です。

さらに、MEMSは**3次元構造体**としてセンサ、信号回路、アクチュエータなどが一つの基板上に集積されています。**入出力は電気信号だけでなく、エネルギー、機械変位、物理量など多岐にわたることも大きな特長**と言えます。

## 1.3 MEMSの特長2

より小さく、より多く、より賢く



MEMSには「微小化」、「並列化」、「集積化」といった特長があります。

MEMSデバイスは**小型化が可能**で、狭いケースに収めたり、狭い場所で動作させることができます。そのため、携帯機器や複雑な装置内部の保守・検査機器など、スペースが限られた環境に適しています。

さらに、同じMEMSセンサやアクチュエータを**多数並べて協働させる**ことで、単一の要素では実現できない多機能・高性能を引き出すことができます。

また、MEMSセンサ、アクチュエータ、電子回路などの異なる部品を集積化することができ、さまざまな機能を一つのデバイス内に統合し、より**賢いデバイス**を実現します。

これらの3つの特長は互いに重なり合うことで、さらに大きな効果を発揮します。微小化によってサイズが小さくなり、並列化によって多くの機能が同時に動作し、集積化によって異なる機能を一つのデバイスに統合されることで、より高性能で多機能かつコンパクトなシステムが実現します。

# 1.4 開発の歩み

- マイクロマシンの概念の萌芽(1960年代)
- MEMSモータの開発(1988)
- マイクロマシン技術プロジェクト(1991~2000)
- マイクロマシンセンター設立(1992)
- MEMS関連の国/NEDOプロジェクトの推進

- ・ MEMSプロジェクト (2003~2005)
- ・ MEMS-ONEプロジェクト (2004~2006)
- ・ ファインMEMSプロジェクト (2006~2008)
- ・ BEANSプロジェクト (2008~2012)
- ・ グリーンセンサ・ネットワークシステム技術開発プロジェクト (2011~2014)
- ・ 社会課題対応センサーシステム先導研究 (2013)
- ・ SIP次世代精密家畜個体管理システム開発 (2014~16)
- ・ インフラ状態モニタリング用センサシステム (2014~18)
- ・ エネルギー・環境新技術先導研究 (2015~16)
- ・ 学習型スマートセンシングシステム (2016~21)
- ・ AI融合高精度物体認識システム (2017~18)
- ・ 量子干渉効果による小型時計用発振器の高安定化の基礎研究 (2019~23)
- ・ IoT社会実現のための革新的センシング技術開発 (2019~23)
- ・ メタサーフェスSiハイパースペクトル赤外光センシングデバイス (2023~27)

## 「驚きの時代」

1987~1994



(3) マイクロ空間光学系 (UCLA '93)



(1) 3連マイクロ歯車 (AT&T '87)  
直径80~120 μm



(2) 静電マイクロモータ (UCB '88)  
直径120 μm

## 「驚きの時代」

1987~1994



(4) 回路集積型加速度センサ  
(アナログデバイス社)



(5) デジタルミラーデバイス(DMD)  
(テキサスインスツルメンツ社)

MEMSの開発は、1960年代に芽生えたマイクロマシン概念<sup>\*1)</sup>に始まり、国際学会 Transducers '87を契機に、「驚きの時代」(1987~1994)へと移行しました。この時期には、AT&Tベル研究所(当時)の3連マイクロ歯車(1)や、カリフォルニア大学バークレー校(UCB)のY.C.Taiらによる静電マイクロモータ(2)、UCLAのM.C.Wuらが発表したマイクロ空間光学系(3)など、画期的な技術が数多く登場し、夢のような未来への期待が語られました。この流れに呼応して、日本では1991年にマイクロマシン技術研究開発プロジェクト(1991~2000)がスタートし、翌1992年には財団法人マイクロマシンセンターが設立されました。

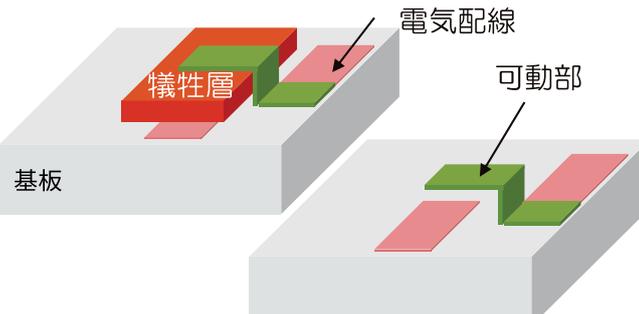
1995年頃から、MEMS技術は実用化が進み、「働きの時代」に入りました。この時代を象徴する代表的なMEMS応用製品として、アナログデバイス社の回路集積型加速度センサ(4)、テキサスインスツルメンツ社のデジタルミラーデバイス(5)が挙げられます。日本ではMEMS開発を推進するために、上記の通り次々とMEMS関連の国/NEDOプロジェクトが立ち上がり、MEMS産業の発展に寄与しています。

\*1): 今日の情報化社会やコンピュータのもつ可能性をいち早く予見した渡辺茂氏(元東京都立科学技術大学学長)は1962年に著した「機構学講義」のなかで究極のマイクロマシンと言える増殖機械の夢について触れている(「超技術 マイクロマシン」東京大学マイクロマシン研究共同体著より)

# 2 MEMSプロセス

## 2.1 ふたつの作り方

### 表面 マイクロマシニング



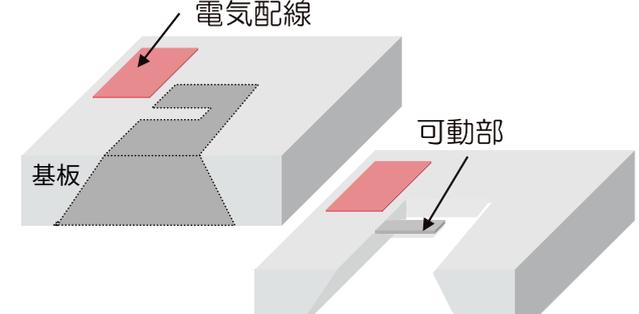
The diagram illustrates the surface micro-machining process. It shows a substrate (基板) with a sacrificial layer (犠牲層) and electrical wiring (電気配線). The sacrificial layer is selectively removed to create a movable part (可動部).

基板上に複数層の膜を形成し、一部を選択的に除去加工して構造体を作製

↓

CMOS回路との集積化に適する

### バルク マイクロマシニング



The diagram illustrates the bulk micro-machining process. It shows a substrate (基板) with electrical wiring (電気配線). The substrate is selectively deep-etched to create a movable part (可動部).

基板自体を選択的に深堀加工して構造体を作製

↓

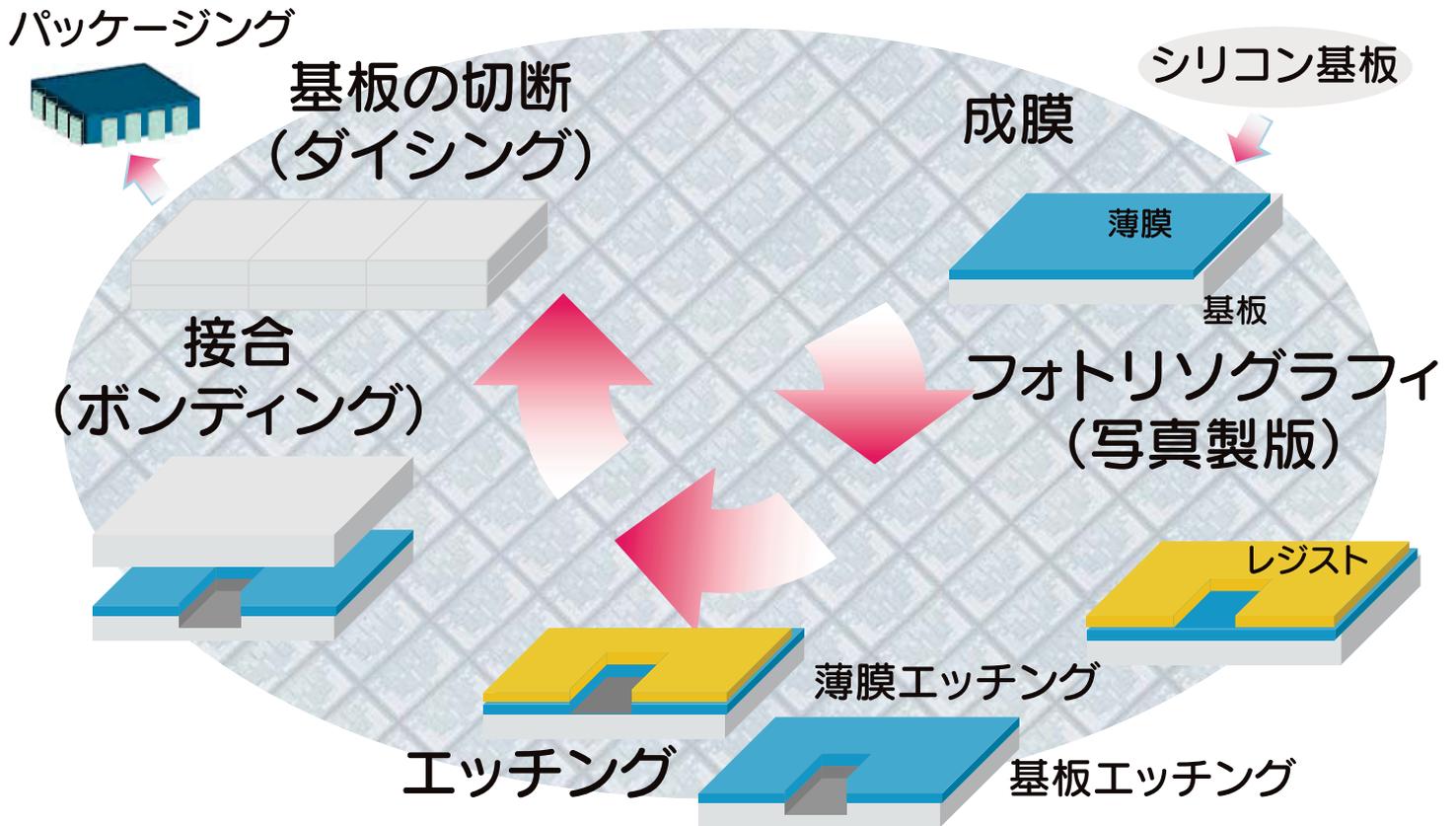
自由度の大きな3次元構造に適する

MEMSには、**表面マイクロマシニング**と**バルクマイクロマシニング**の2つの製造方法があります。

**表面マイクロマシニング**では、シリコン基板上に複数の薄膜を形成し、犠牲層エッチングという技術を使ってMEMS構造体を作ります。この方法は半導体製造技術との親和性が高く、**CMOS回路との集積化に適している**点が特長です。

一方、**バルクマイクロマシニング**は、基板そのものを深く掘り込むなどの加工を施してMEMS構造体を作ります。この方法の特長は、**自由度の高い3次元構造を実現**できる点にあります。

## 2.2 基本的なプロセスフロー



表面マイクロマシニングとバルクマイクロマシニングは、両者とも半導体プロセスを基本としています。ここでは表面マイクロマシニングを例に基本的なプロセスフローについて解説します。

まず、シリコンなどの基板を起点に**成膜工程**からスタートします。ここで形成される薄膜は、MEMS構造体の一部やエッチング用のマスク材となり、成膜には熱酸化法、スパッタ法、CVD法 (Chemical Vapor Deposition) などが必要に応じて選択されます。

次の**フォトリソグラフィ工程** (写真製版工程) では、薄膜上全面にレジスト (感光性樹脂) を塗布または貼付け、フォトマスクを介した光照射により所望のパターンを同時に数多く描写します。

続く**エッチング工程**では、ガスや薬液を使って薄膜やシリコン基板の不要部分を除去します。これらのプロセスフローを何度も繰り返すことで最終的に狙いのMEMS構造体が形成されます。

一方、バルクマイクロマシニングでは、これらの基本プロセスに加えて**接合工程** (ボンディング工程) を行うことで、複数の基板を貼り合わせ、自由度の高い3次元構造体を作り出すことができます。

最後に、**基板の切断** (ダイシング) とパッケージングが行われMEMSデバイスが完成します。

## 2.3 3次元構造の作り方のポイント

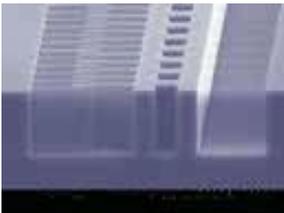
### 【シリコン異方性エッチング】

主にバルクマイクロマシニング  
で用いられる

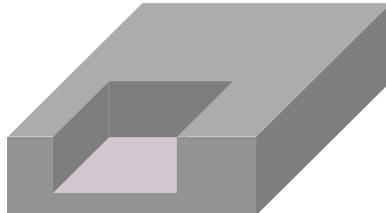
ウエットエッチング  
(結晶異方性エッチング)



ドライエッチング (D-RIE)  
(深掘り反応性イオンエッチング)

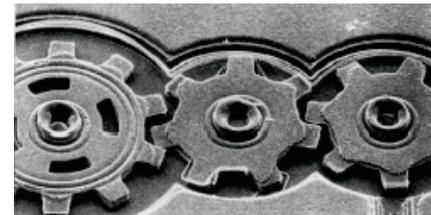
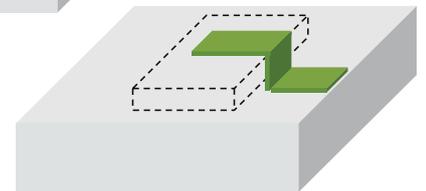
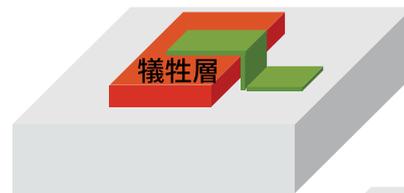


加工例



### 【犠牲層エッチング】

主に表面マイクロマシニング  
で用いられる



加工例

バルクマイクロマシニングでよく使われる**シリコン異方性エッチング技術**には、ウエットエッチング（結晶異方性エッチング）とドライエッチング（深掘り反応性イオンエッチング、D-RIE：Deep-Reactive Ion Etching）に大別されます。

**ウエットエッチング**は、KOHやTMAHと呼ばれるアルカリ水溶液を用い、シリコン基板を結晶面に沿って深く溶かしていく技術です。この方法は、シリコン結晶方位に強く制限されるものの、**特殊な製造装置が不要**であり、**バッチ処理が可能**といった利点から、従来より幅広く利用されています。

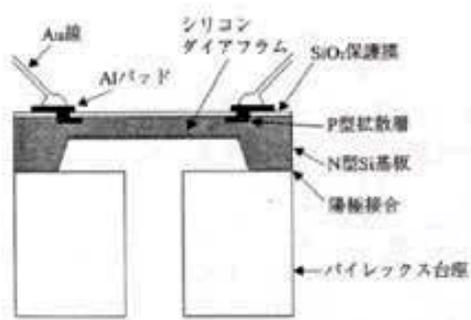
**ドライエッチング(D-RIE)**は、半導体プロセスで一般的なRIE技術に「BOSCHプロセス」と呼ばれる特殊なレシピを付加したもので、**シリコンを垂直方向に深掘り**することができます。この技術により、複雑な構造が容易に実現可能で、MEMS研究開発を加速させる強力な加工ツールとなっています。

一方、表面マイクロマシニングでは、**犠牲層エッチング技術**がよく用いられます。この技術では、フォトリソグラフィ工程とエッチング工程を繰り返し、構造体と一緒に犠牲層をスペーサとして形成しておき、最終的にこの犠牲層をエッチング除去することでMEMS構造体を形成します。構造体、犠牲層、エッチング液の組み合わせにより、多様な材料をMEMS構造体に適用することが可能です。

# 3 MEMSデバイスと応用

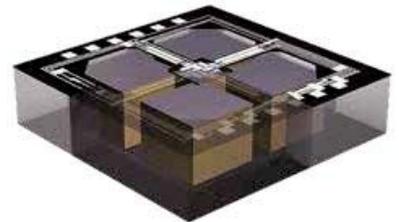
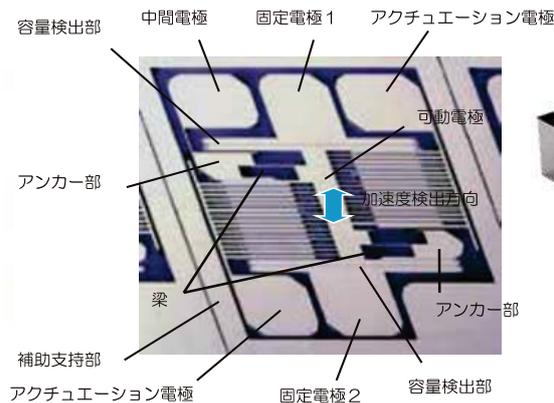
## 3.1 フィジカルMEMS：センサ

### 【圧力センサ】



アズビル（株）

### 【加速度センサ】



パナソニック（株）

三菱電機（株）

自動車用、血圧計、気圧計、  
ガス圧計、など

自動車用、携帯電話、HDD、  
アミューズメント、など

### 【圧力センサ】

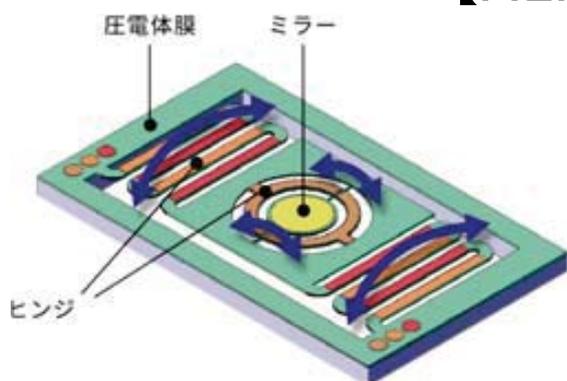
圧力センサはMEMS技術の中でも最も歴史が古く、実用化が進んでいるセンサです。受圧部のシリコンダイアフラムが圧力を受けた際の応力や変位を電気信号に変換して圧力を計測します。圧力センサは**ピエゾ抵抗式**、**静電容量式**、**振動式**に分類されますが、最も一般的に利用されているのは**ピエゾ抵抗式**です。例えば、**アズビルの圧力センサ**では、シリコンダイアフラム表面に作り込まれた抵抗体のピエゾ抵抗効果を利用して圧力を計測します。このような圧力センサは、**自動車エンジンの圧力測定**、**血圧計**、**気圧計**、**ガス圧計**など幅広い分野で普及しています。

### 【加速度センサ】

加速度センサはセンサ内に大きな「おもり」を梁などで支えた構造を持ち、加速度によって発生する慣性力が支持構造を変形させ、その変形をさまざまな方式で検出します。検出方式には**静電容量型**、**ピエゾ抵抗型**、**圧電型**があり、支持構造と検出素子の配置によって検出可能な加速度の方向が決まります。具体例として、**三菱電機の静電容量式加速度センサ**や**パナソニックのピエゾ抵抗型加速度センサ**が挙げられます。これらの加速度センサは、**自動車エアバッグの衝撃検知**、**携帯電話の動作検知**、**ハードディスクの落下検知**、さらに**アミューズメント分野**にも応用展開されています。

## 3.2 光MEMS：アクチュエータ

### 【MEMSミラー】



スタンレー電気（株）

<https://www.stanley-components.com/jp/mems/>



### ARグラス／スマートグラス



HUD

Infinion Technologies

<https://www.infineon.com/cms/jp/about-infineon/press/press-releases/2021/INFX202108-091.html>



LiDAR

三菱電機（株）

<https://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2020/0312.html>

### 【MEMSミラー】

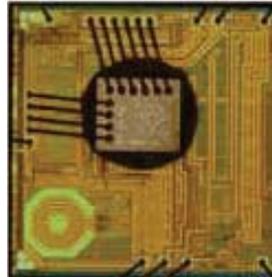
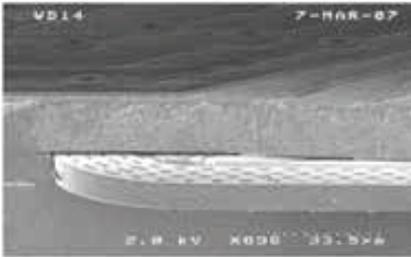
MEMSミラーは、シリコンウェハ上に圧電体膜を成膜し、電圧を印加することで発生する反りの動作をヒンジを通じてミラーに伝達し、ミラーを駆動させる構造です。シリコン上に形成されたミラーは、入射したレーザー光を反射・走査することでレーザースキャニング動作を実現します。

MEMSミラーの駆動方式には圧電方式のほか、磁界中のコイルに電流を流してミラーを駆動する電磁方式や、ミラー両端のアクチュエータを用いて静電力でミラーを動かす静電方式があります。

MEMSミラーはさまざまな分野で活用されており、代表例としてARグラス／スマートグラス、プロジェクタ、LiDAR（Light Detection And Ranging）及びHUD（Head-Up Display）などがあり、近年その応用が拡大しています。

# 3.3 RF-MEMS：アクチュエータ

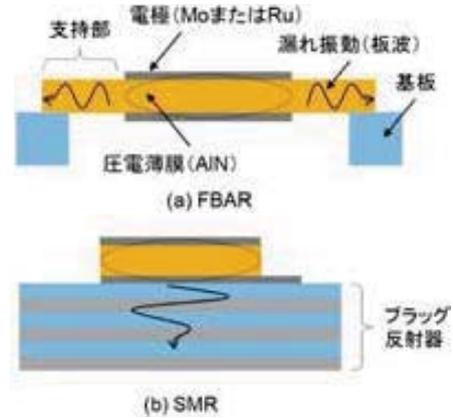
## 【共振器（レゾネータ）】



SiTimes社

<https://www.sitime.com/support/resource-library/technology-papers/mems-tcxo-sub-ppm-stability>

## 【BAWフィルタ】



<https://sensait.jp/14350/>

移動通信やIoT向け多周波対応デバイスなど

## 【共振器（レゾネータ）】

高周波無線機器などでは、特定の周波数のみを通す機能を持つフィルタの帯域設定に共振器が必要となります。米国SiTimes社が開発したMEMS共振器は、シリコン基板内に共振するシリコン製の梁を埋め込み、さらに信号処理回路を集積化することで、小型かつ低消費電力という特長を実現しています。

## 【BAWフィルタ】

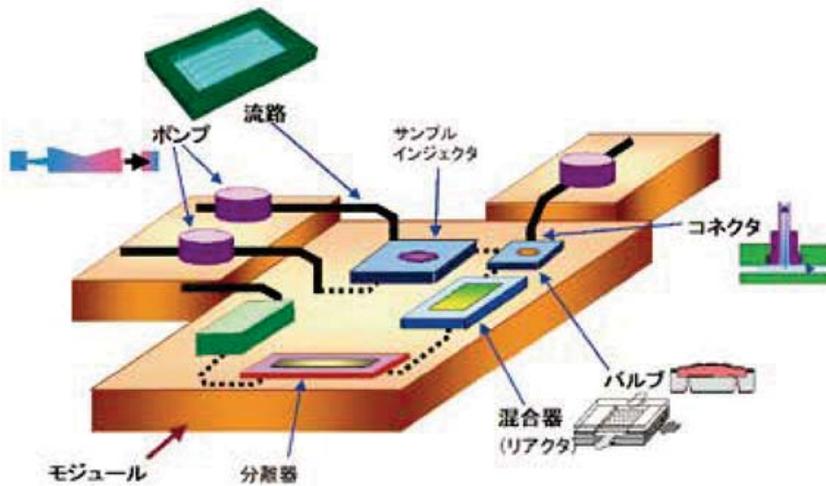
BAW (Bulk Acoustic Wave) フィルタは、弾性波がSAW (Surface Acoustic Wave) フィルタの水平伝播パスとは異なり、垂直方向に伝播します。BAWフィルタにはFBAR (Film Bulk Acoustic Resonator) 方式とSMR (Solidly Mounted Resonator) 方式の2種類があります。

FBARは、金属電極で挟まれた圧電膜が自己支持された構造を持ち、膜厚方向に共振します。主なメーカーにはBroadcomや太陽誘電が挙げられます。

一方、SMRは金属電極で挟まれた圧電膜が同じく膜厚方向に共振しますが、自己支持される代わりに音響ブラッグ反射器で支えられている点が特徴です。こちらはQorvoやQualcommが主要メーカーとして知られています。

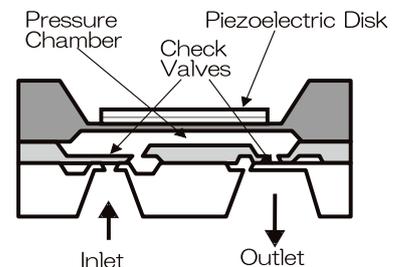
これらのRF-MEMS部品は、小型、高性能、低消費電力といった特長を持つことから、移動通信やIoT向けの次世代RFパッシブコンポーネントとしての展開が期待されています。

## 3.4 $\mu$ TAS: センサ/アクチュエータ集積

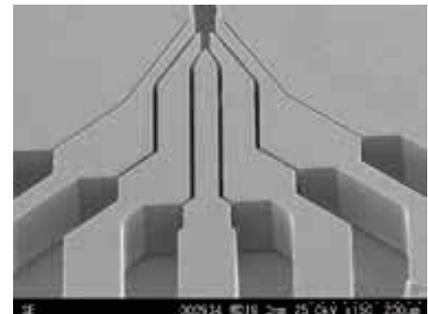


$\mu$ TAS (Micro Total Analysis Systems)

### 【マイクロポンプ】



### 【マイクロミキサ】



### 化学/バイオ（血液など）分析の小型高速化

$\mu$ TAS(Micro Total Analysis Systems)は、ポンプやバルブ、混合器（ミキサ・リアクタ）、分離器などを集積し、ひとつのチップ上で化学分析、化学反応、化学合成を行うことができるシステムです。この技術は、分析システムの小型高速化を実現し、さらに省薬品や省スペースを可能にすることから、研究開発が盛んに進められています。

### 【マイクロポンプ】

2つの逆止弁とアクチュエータで駆動する可変圧力室から構成されるダイヤフラム型が報告されています。この型のマイクロポンプは、吐出圧力が大きく、気泡の影響を受けにくいという特長があります。

### 【マイクロミキサ】

マイクロ領域で液体を効率よく混合させるために、液の接触界面を大きくし、両層の厚さを薄くすることが効果的です。MEMS加工技術を用いることで、流路構造をより狭く深く設計する工夫が可能となり、高い混合効率が得られています。

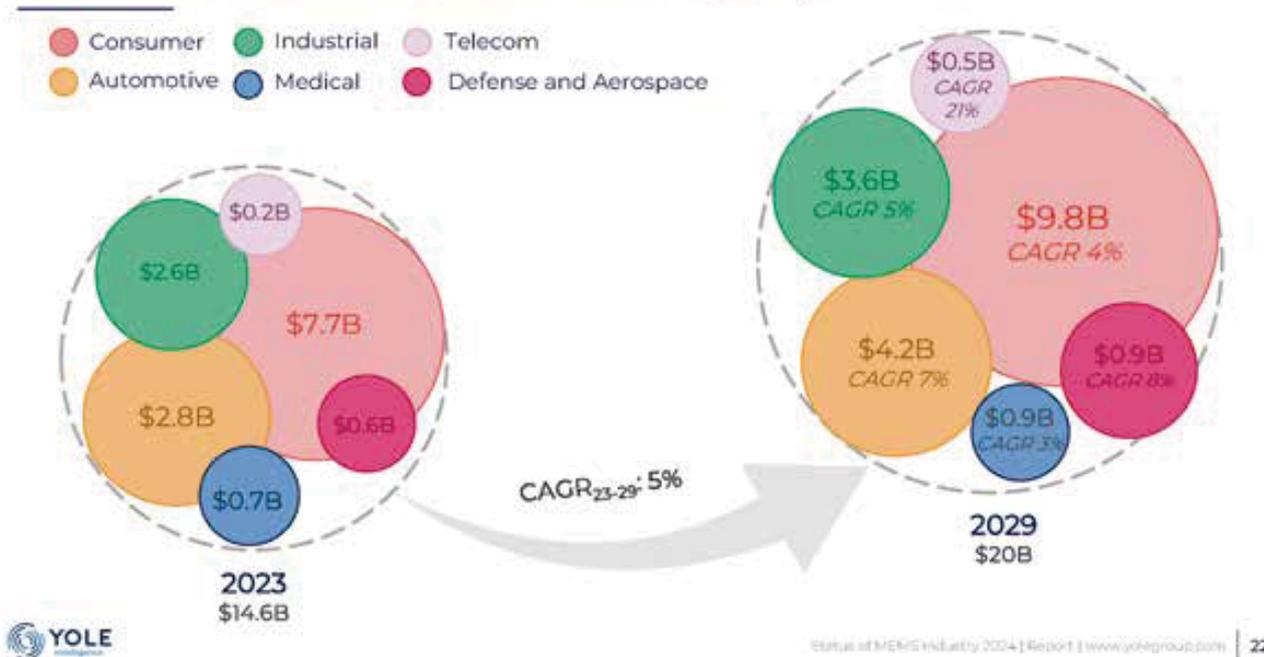
# 4 国内外の市場と研究開発

## 4.1 半導体の中のMEMSの位置づけとMEMSの用途別売上高

WSTS分類	2023市場実績 億\$	構成比 %
Total Semiconductor	5,268	
Analog	812	15.4
Micro	763	14.5
Logic	1,785	33.9
Memory	922	17.5
Discrete	365	6.7
Optoelectronics	431	8.2
<b>Sensor &amp; Actuator</b>	<b>197</b>	<b>3.7</b>

- ・MEMSは世界半導体統計（WSTS）では「Sensor & Actuator」として分類されており、CMOSイメージセンサが「Optoelectronics」に分類されていることと同様に、世界中の半導体関係者には公知。
- ・経済安全保障上、先端電子部品に位置付けられたSAW/BAWフィルタも、この「Sensor & Actuator」に入っている。

MEMS MARKET FORECAST BY END MARKET (IN \$M)



2023年及び2029年のMEMSの最終用途別売上高

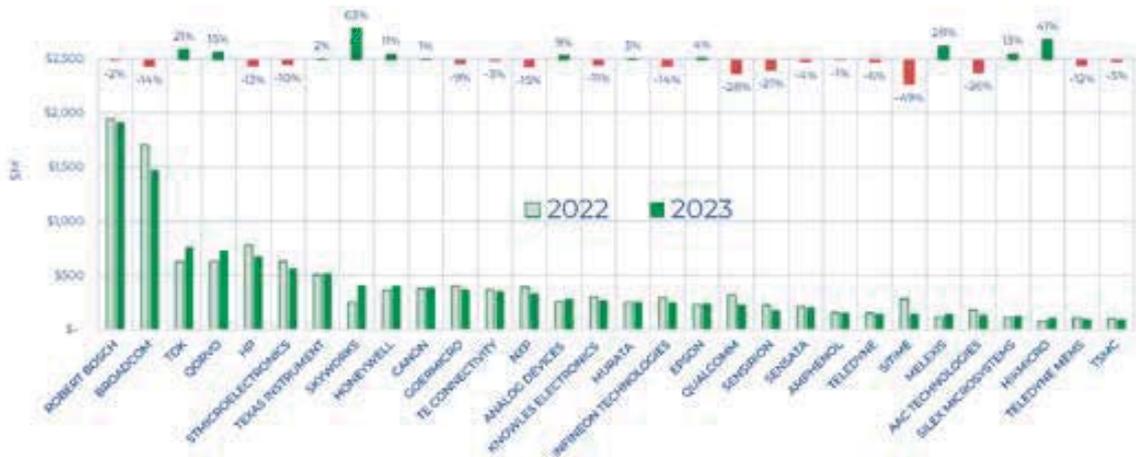
(出所) Status of the MEMS Industry 2024, Yole Intelligence

2023年のMEMS市場は146億ドル。2029年まで平均成長率(CAGR)は5%で、2029年には数量は約430億個、売上高も200億ドルとなると予測している。

# 4.2 世界の主要MEMS企業

MEMS ECOSYSTEM  
Top MEMS companies ranking - 2023

\*Comments for each player are provided in the Ecosystem & Supply Chain chapter.



Status of MEMS Industry 2024 | Research | www.yoleintelligence.com

## 2023年のMEMSサプライヤ売上高ランキングトップ30

(出所) Status of the MEMS Industry 2024, Yole Intelligence

### 欧州

- ROBERT BOSCH
- STMICROELECTRONICS
- TE CONNECTIVITY
- NXP
- INFINEON TECHNOLOGIES
- SENSIRION
- MELEXIS
- SILEX MICROSYSTEMS

### 日本

- TDK
- CANON
- MURATA
- EPSON

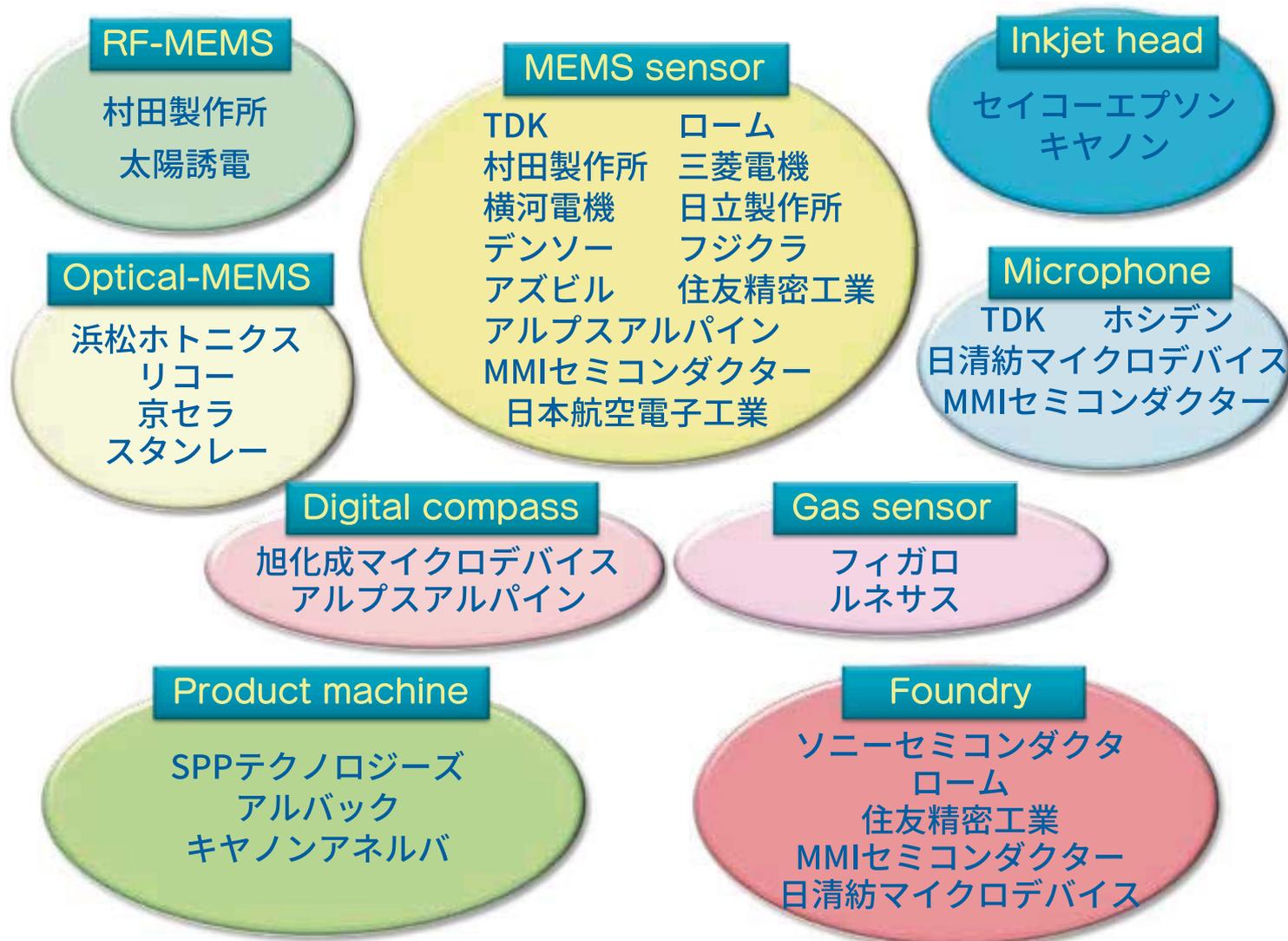
### 北米

- BROADCOM
- QORVO
- HP
- TEXAS INSTRUMENT
- SKYWORKS
- HONEYWELL
- ANALOG DEVICES
- KNOWLES ELECTRONICS
- QUALCOMM
- SENSATA
- AMPHENOL
- TELEDYNE
- SITIME
- TELEDYNE MEMS

### アジア（日本を除く）

- GOERMICRO
- AAC TECHNOLOGIES
- HIKMICRO
- TSMC

## 4.3 日本の主要MEMS企業



わが国でも様々な企業がMEMS市場で活躍しています。

各種MEMSセンサ：TDK、村田製作所、横河電機、デンソー、アズビル、ローム、三菱電機、日立製作所、フジクラ、住友精密工業、アルプスアルパイン、MMIセミコンダクター、日本航空電子工業

RF-MEMS：村田製作所、太陽誘電

光学MEMS：浜松ホトニクス、リコー、京セラ、スタンレー

電子コンパス：旭化成マイクロデバイス、アルプスアルパイン

ガスセンサ：フィガロ、ルネサス

マイクロフォン：TDK、ホシデン、日清紡マイクロデバイス、MMIセミコンダクター

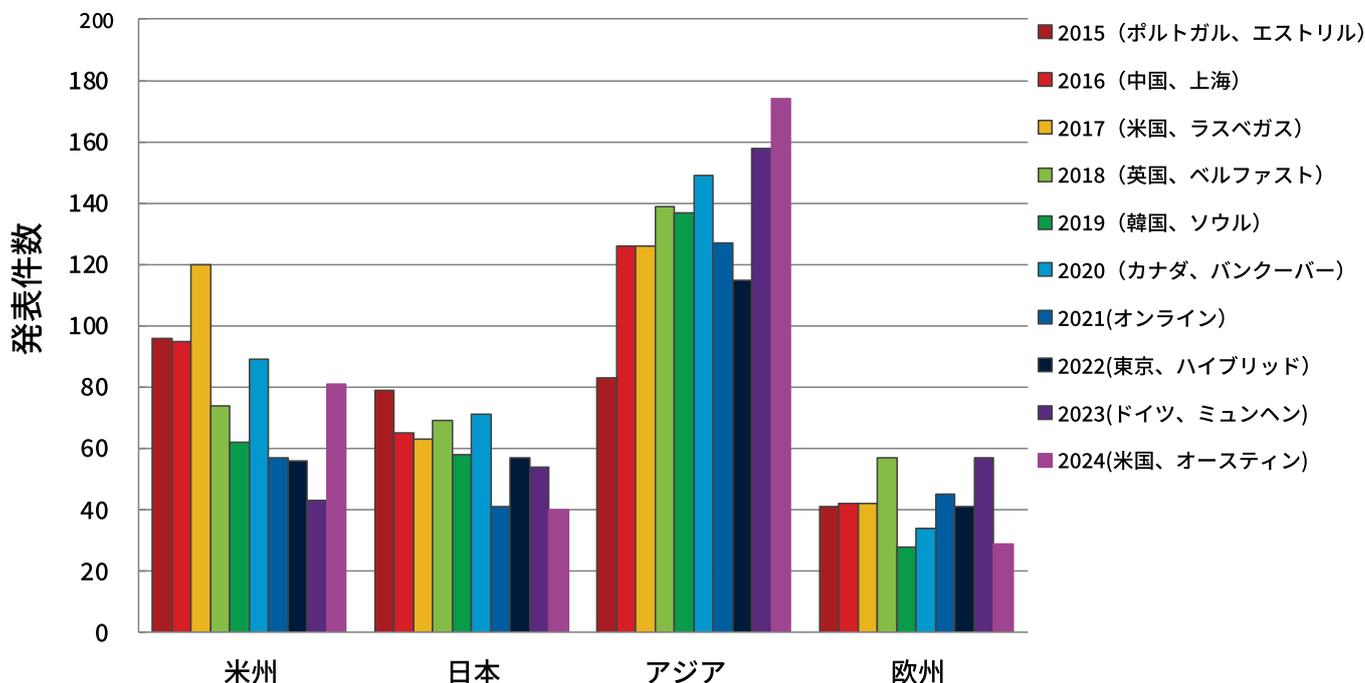
インクジェットヘッド：セイコーエプソン、キヤノン

製造装置：SPPテクノロジーズ、アルバック、キヤノンアネルバ

ファウンドリ：ソニーセミコンダクタ、ローム、住友精密工業、MMIセミコンダクター、日清紡マイクロデバイス

## 4.4 世界の研究開発動向

### IEEE-MEMSの地域別論文発表件数の推移



(一財) マイクロマシンセンター「2023年度国内外技術動向調査報告書」より

マイクロマシンセンターの国内外技術動向調査報告書（2023年度）では、主要国際学会における技術分野別の研究論文件数比較を行い、研究開発動向をまとめています。

発表件数が多い分野としては、非シリコン製造技術 (Fabrication Technologies (non-Silicon))、生体組織・臓器及び医療アプリケーション (Tissue/Organ & Medical Applications)、放射線・物質センサ (Radiation/Material Substance Sensor) の順となっています。

地域別ではアジアが最も多く、国別では中国がトップで、続いて米国、日本が続きます。2018年までは米国がトップでしたが、中国の発表件数が急増したことで、2019年以降は米国を抜いてトップとなっています。

# 5 産業化とMEMSの活用場面

## 5.1 MEMS技術とアプリケーション

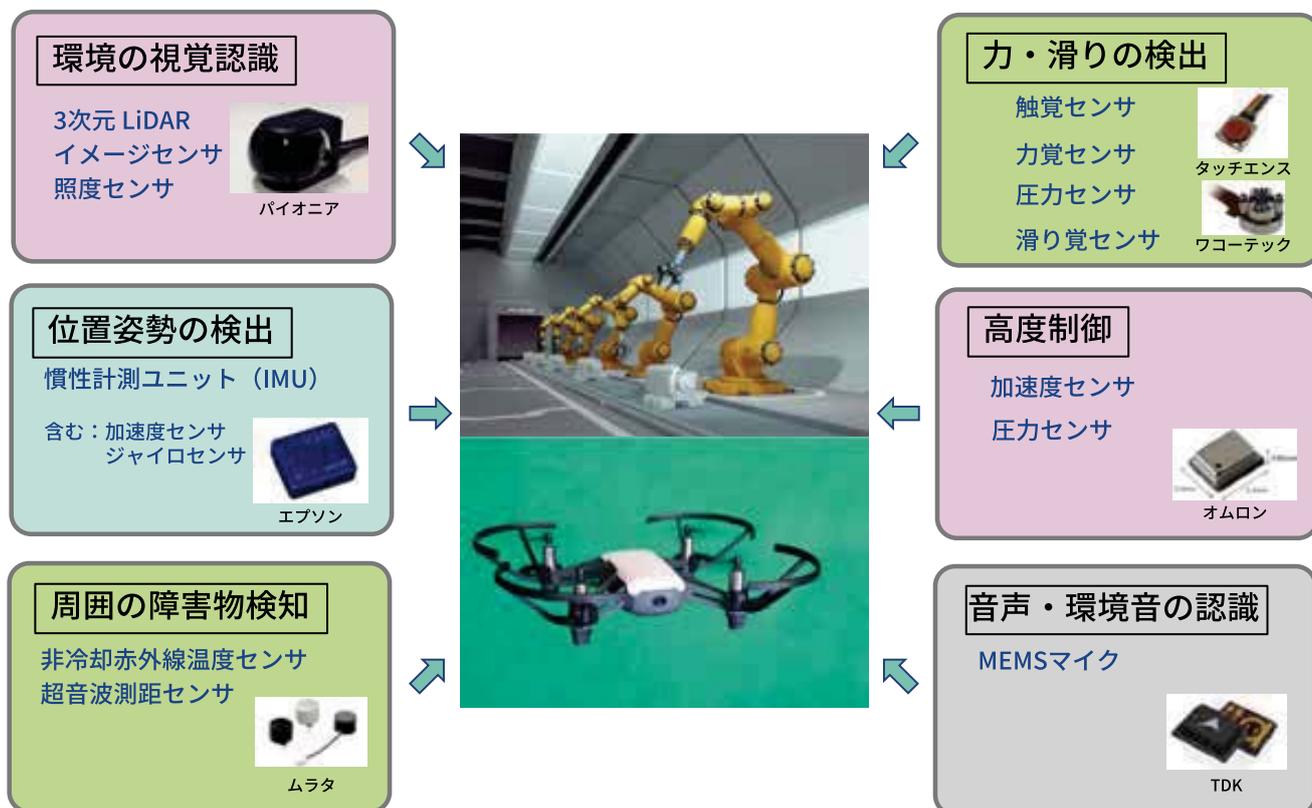


MEMS技術は、社会のさまざまな場面で活用されています。小型化の利点を生かして既存部品を置き換える単機能デバイスとして、圧力センサ、加速度センサ、インクジェットプリンタヘッドなどが大きな市場を形成しています。さらに、自動車、情報通信、安全・安心、環境、医療分野における多様なニーズに対応し、超小型・高機能・高信頼性を備えた多機能MEMSデバイス（ファインMEMS）の実用化が進んでいます。

また、社会課題への対応として、省エネ効果に寄与するグリーンMEMSセンサの開発や、無線通信機能、自立電源、低消費電力を備えたシステムの開発が「グリーンセンサネットワーク技術開発プロジェクト」（2011～2014年）において実施されました。

将来を展望すると、MEMS技術はナノテク材料技術やバイオ技術と融合し、新たなライフスタイルを創出する夢のデバイス「MEMSフロンティア未来デバイス」（BEANS: Bio Electromechanical Autonomous Nano Systems）の出現が期待されます。これにより、環境・エネルギー、健康・医療、快適生活空間などの分野で画期的な製品が登場し、私たちの生活が豊かになるだけでなく、わが国産業の国際競争力強化にも大いに貢献すると期待されます。

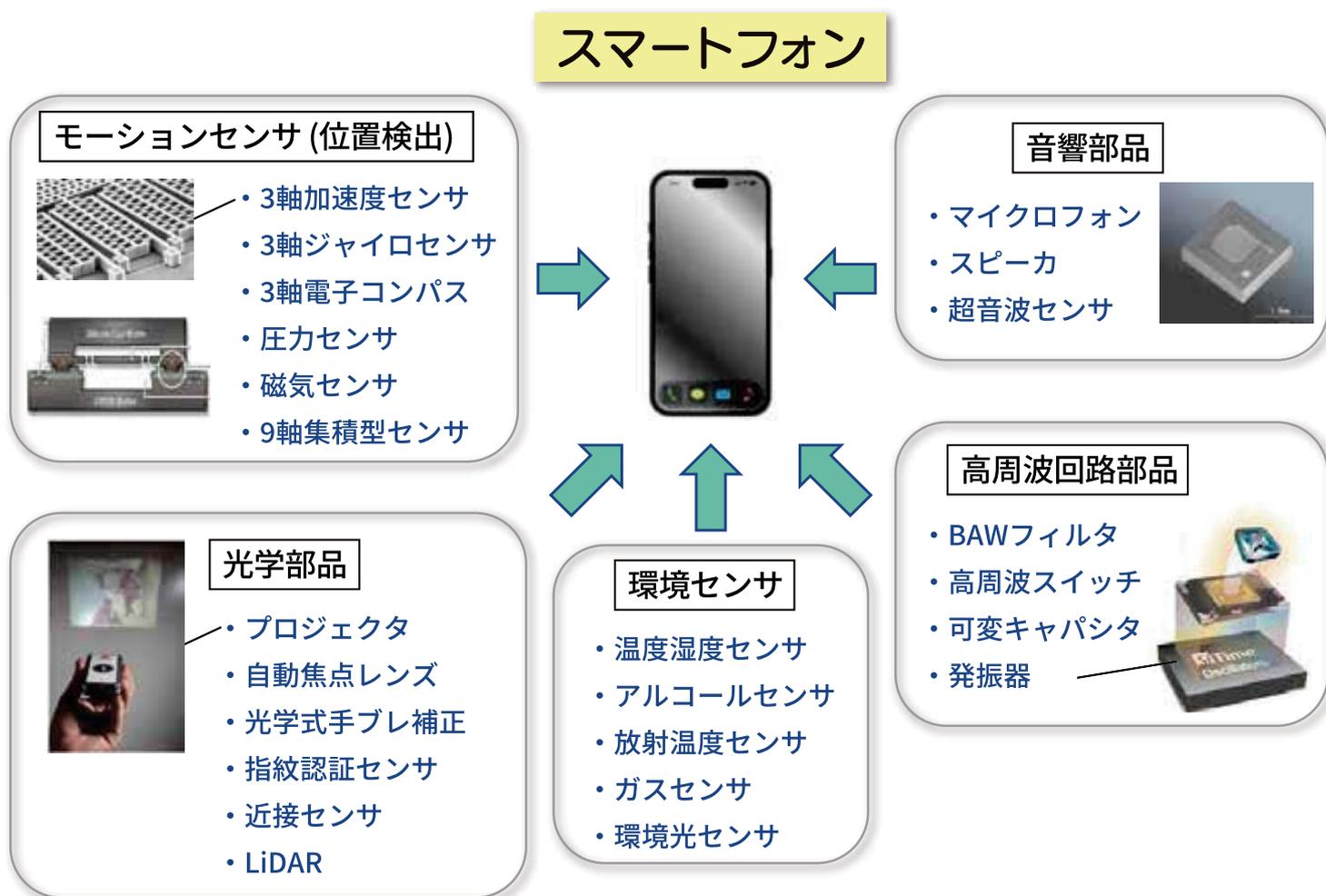
## 5.2 ロボットの機能や安全性の確保にはMEMSセンサが必須



ロボットやドローンに使われるセンサもまた、人間の五感並みに進化しています。例えば、環境の視覚認識には3次元LiDAR (Laser Imaging Detection And Ranging)、イメージセンサ、照度センサが用いられ、ロボットの位置や姿勢の検出には加速度センサやジャイロセンサが利用されます。暗闇の中にある障害物の検知には非冷却赤外線温度センサが、物体把持の検出には触覚センサ、力覚センサ、圧力センサ、滑り覚センサが使用されます。さらに、高度制御には加速度センサや圧力センサが、音声・環境音の認識にはMEMSマイクが使われています。

これらのMEMSセンサ技術は、生き物の感覚を模しながら、はるかに超えた性能を実現することを目指しており、ロボットに組み込まれる知覚・識別・認識機能の進化を促す重要な要素となっています。

## 5.3 MEMSのかたまりスマートフォン

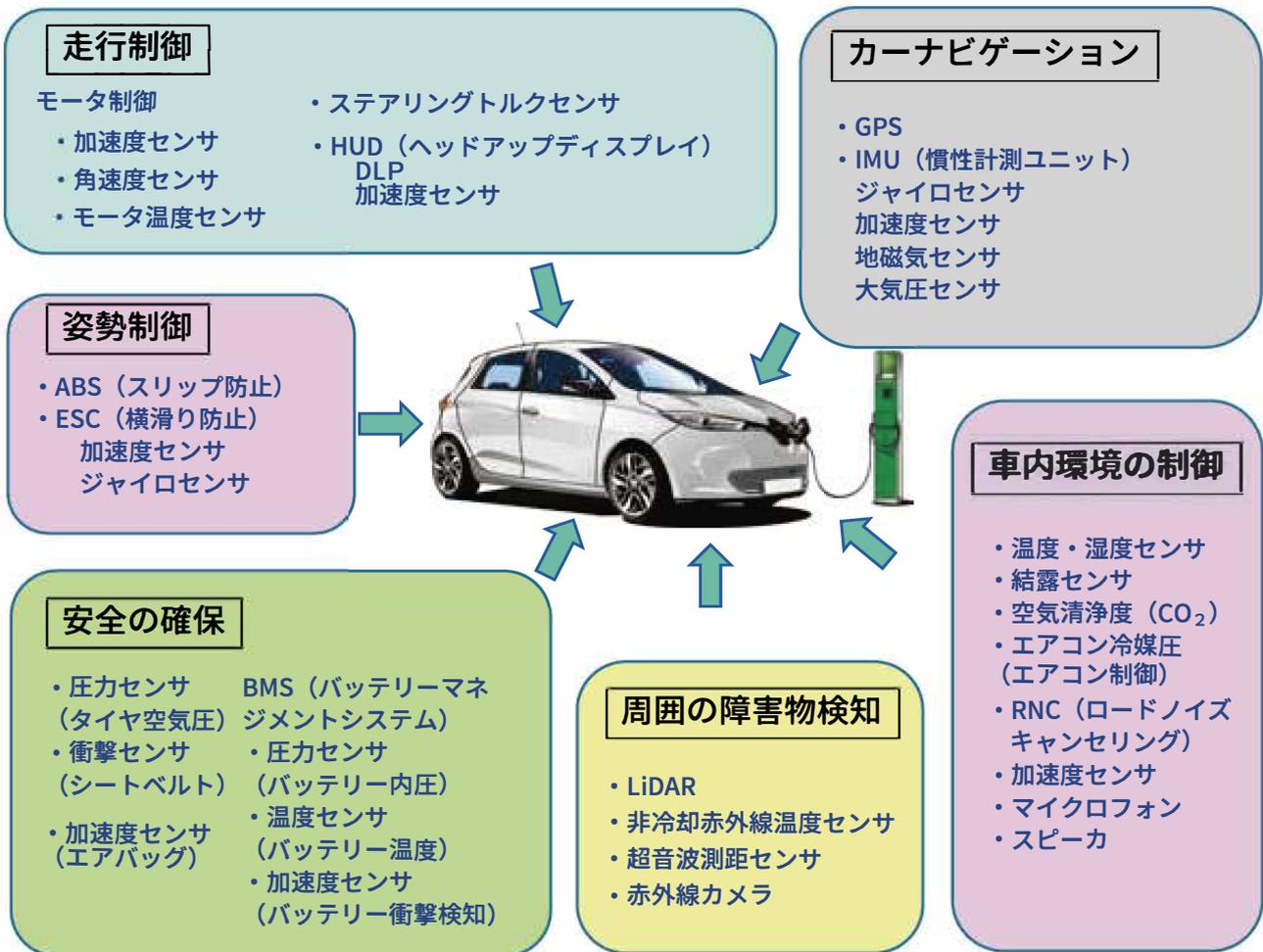


多機能MEMSが開拓した代表的なアプリケーションの一つに**スマートフォン**があります。小型・高機能・低価格なMEMSデバイスがなければ、スマートフォンは存在し得ないと言っても過言ではありません。

スマートフォンには、通信用部品としてBAW (Bulk Acoustic Wave) フィルタや発振器などの高周波回路部品をはじめ、位置検出のための加速度センサ、ジャイロセンサ、圧力センサ、磁気センサが使われています。さらに、音響部品としてマイクロフォンやスピーカが搭載され、個人認証機能を実現する光学指紋認証センサや超音波センサも不可欠です。また、手振れ補正機能にはジャイロセンサ、明るさを検出するためには環境センサが使われており、これらはスマートフォンの機能を支える必須デバイスとなっています。

さらに、映像を投射するプロジェクタを搭載したスマートフォンや、LiDARを搭載して3D計測が可能なスマートフォンも登場しつつあり、MEMS技術によってその機能は日々進化を続けています。

# 5.4 電気自動車にとってセンサは必須



普及が進んでいる電気自動車には、さまざまなMEMSセンサが搭載されています。駆動系がモータとなることで、従来のエンジン制御（燃焼制御や燃料供給）に代わり、モータ制御には加速度センサ、角速度センサ、温度センサが活用され、バッテリー制御には圧力センサ、温度センサ、加速度センサが走行の安定性を支えています。

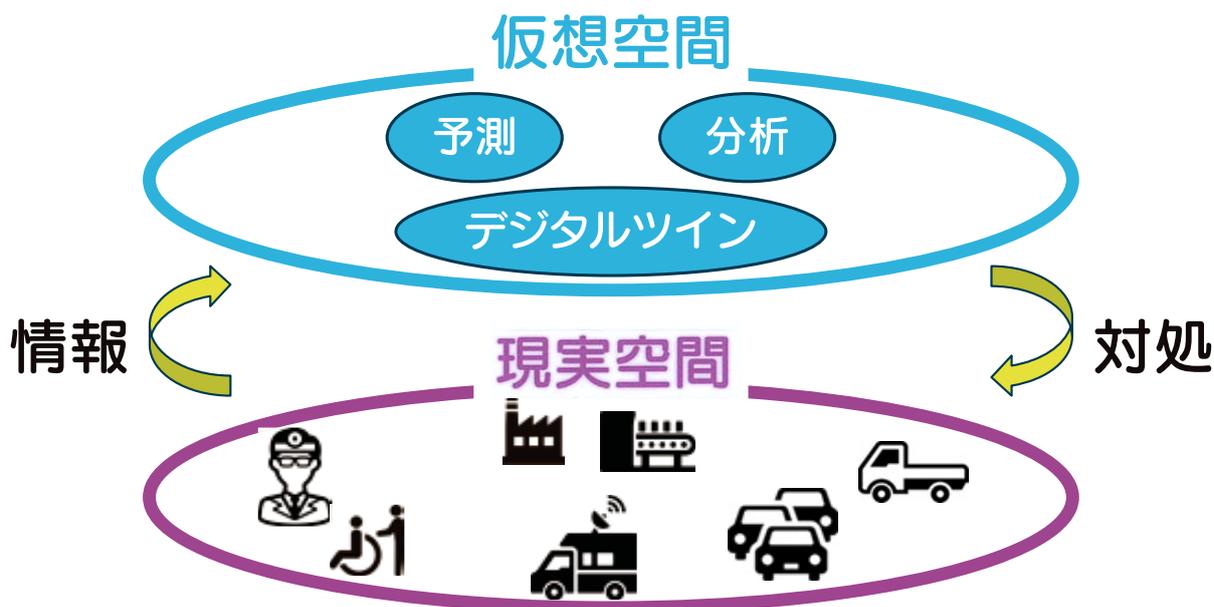
安全性の面では、エアバッグの衝撃感知に加速度センサ、ESC (Electric Stability Control: 横滑り防止装置) には加速度センサとジャイロセンサ、タイヤ空気圧監視には圧力センサが使用され、安全確保に貢献しています。

カーナビゲーションシステムでは、GPS (Global Positioning System: 全地球測位システム) とIMU (Inertial Measurement Unit: 慣性計測ユニット) に含まれる加速度センサとジャイロセンサが搭載されており、トンネル内でも走行位置を特定し、快適なドライビングを実現します。

また、エンジン音がない静かな車内では、ロードノイズをキャンセルするためにマイクロフォンやスピーカが使われ、より快適な空間を提供します。

さらに、自動運転レベルの高度化においては、周囲障害物検出などのためにLiDARや非冷却赤外線センサといったMEMSセンサが不可欠となっています。

## 5.5 CPSに必要なMEMSセンサ



CPS (Cyber Physical Systems) とは、現実空間から取り込んだデータを仮想空間に伝え、高度な分析や知識化を通して現実社会の課題解決に役立てるシステムです。例えば、デジタルツイン技術を活用し、現実空間のデータを基に仮想空間上で同様の環境を構築することで、現実空間に影響を与えずに課題の対処方法を導き出し、その結果を現実空間にフィードバックすることが可能です。MEMS技術は、CPSにおいて現実空間の情報をセンシングし、サイバー空間に伝える重要な役割を果たしています。

### <製造業における活用例>

- ・シミュレーションを用いて在庫や部品置場の最適化（圧力センサ、RFID等）
- ・工場内の状況に合わせて作動する無人搬送車の導入（IMU、赤外センサ、バッテリー温度センサ等）
- ・仮想工場で設備運用シミュレーションを実施（温度センサ、振動センサ、ガスセンサ等）

### <医療・介護業界における活用例>

専門医不足を解消する遠隔医療（イメージセンサ、触覚センサ、温度センサ等）  
高齢者や障がい者の生活をサポートする介護ロボット（力覚センサ、音響センサ、温度センサ等）  
ウェアラブルデバイスによる健康管理や支援（心拍センサ、血圧センサ、酸素飽和度センサ等）

### <交通分野における活用例>

渋滞や事故の削減に貢献する自動運転システム（IMU、LiDAR、赤外線カメラ等）  
人流予測による交通・物流の最適化（監視カメラ、振動センサ、加速度センサ等）  
車載センサによる事故防止システム（IMU、LiDAR、赤外線カメラ等）  
安全で快適な環境を実現する駅やホームの環境制御（音響センサ、人感センサ、ガスセンサ等）

参考

<https://www.cct-inc.co.jp/koto-online/archives/73>

<https://www.ieice.org/publications/conference-FIT-DVDs/FIT2021/data/pdf/CO-001.pdf>

# 6 センサネットワークへの期待

## 6.1 今後期待されるスマートモニタリング

### 自立型センサネットワークによる省エネ、安全・安心、生産性の向上

【エネルギー】	無駄のモニタリング&最適制御による省エネの実現
【社会インフラ】	インフラ状態モニタリングによる異常検知
【ヘルスケア】	健康状態の常時モニタリングによるQOLの向上
【農業・畜産】	生育環境モニタリングによる生育・収量の向上
【製造業】	製造情報モニタリングによるフレキシブル化、生産性向上



トンネル



ファクトリ



コンビニエンスストア



オフィス



自動車



橋梁



プラント・パイプライン



植物工場



家庭



大規模災害地域



ビル・都市設備



牛舎

放牧場



医療機関

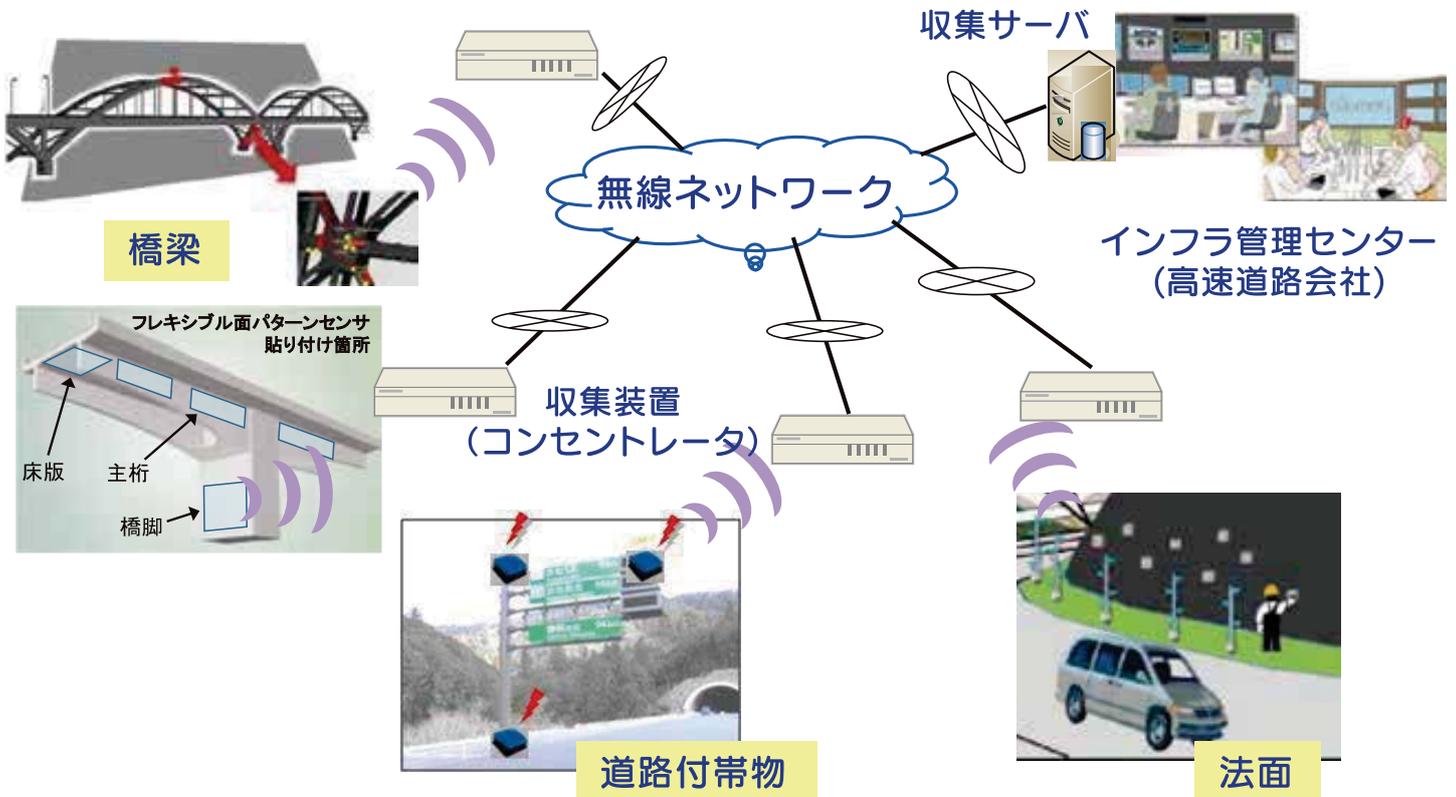


介護施設

センサネットワークを活用した常時・継続的な監視（スマートモニタリング）は、社会のさまざまな課題への対応策として大きな期待が寄せられています。スマートモニタリングでは、さまざまな対象を常時継続的にモニタリングすることで、適切なメンテナンスによる対象の長寿命化や、障害・事故の事前把握を通じた適切な対応策の実施を目的としています。

特に、社会インフラの老朽化、少子高齢化社会の到来、農畜産業の競争力強化、そしてますます求められる省エネルギー化といった我が国が直面する課題に対し、画期的な対応策の一つとしてスマートモニタリングの実現に着目しています。

## 6.2 道路インフラのモニタリング



社会課題の一つとして挙げられるのが道路のモニタリングです。我が国の陸上輸送は9割以上を道路が担っていますが、道路インフラの老朽化に伴う維持・管理が大きな課題となっています。国民の豊かな生活を支える道路インフラを対象に、まずは高速道路のモニタリングを行うシステムを開発しました（2014年～2018年）。

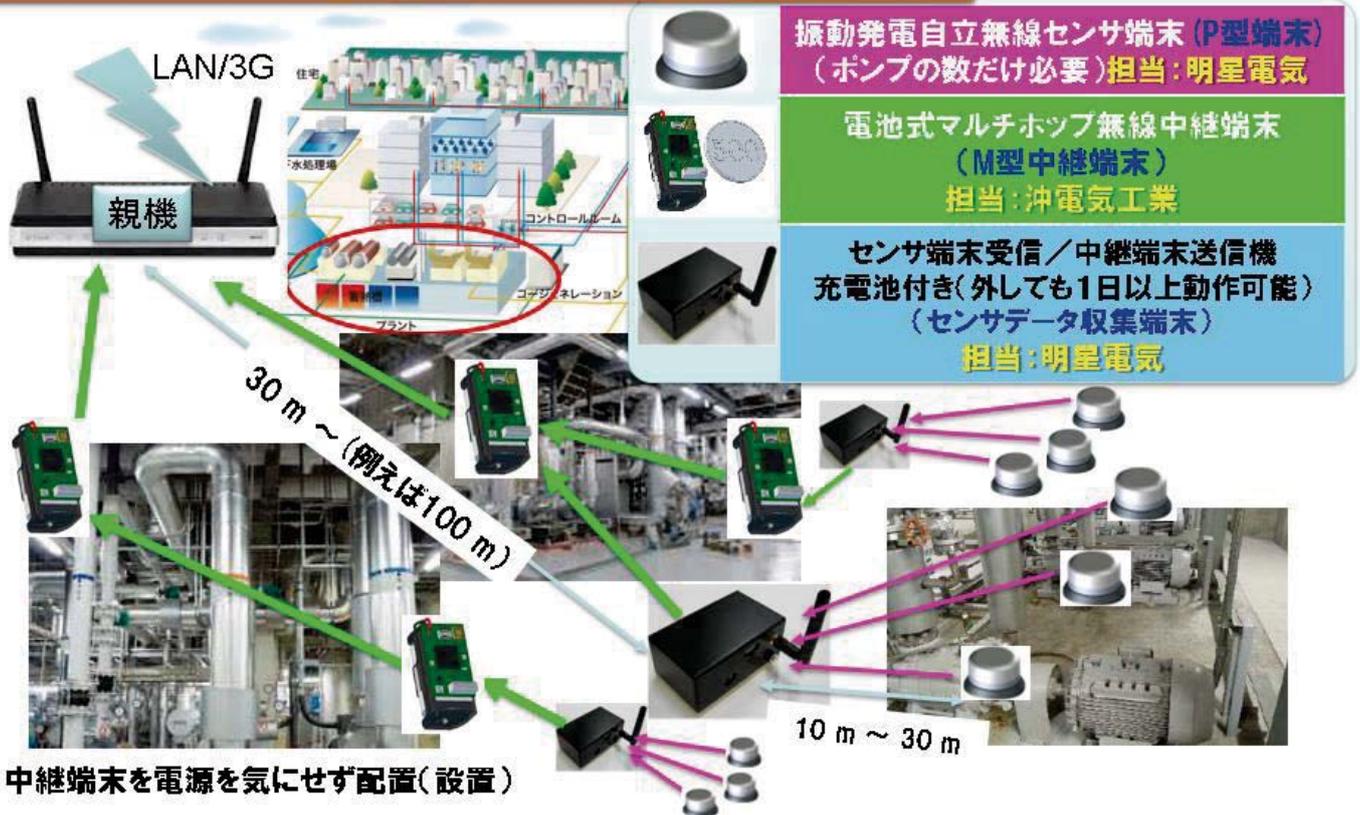
主な開発内容は以下のとおりです：

- (1) 橋梁の劣化を振動から検知する広帯域振動センサの開発
- (2) 橋梁の劣化を面パターンで検知するひずみセンサの開発
- (3) 標示板や照明等の道路付帯物の異常変化を検知する傾斜マルチセンサの開発
- (4) 道路法面の土砂崩れ等の異常変化を検知する法面変位センサの開発

これらのセンサはすべて自立型電源を備え、無線ネットワークを通じてインフラ管理センターと結ばれます。実際の高速道路において実証実験を実施し、その有効性を検証しました。

## 6.3 産業インフラのモニタリング

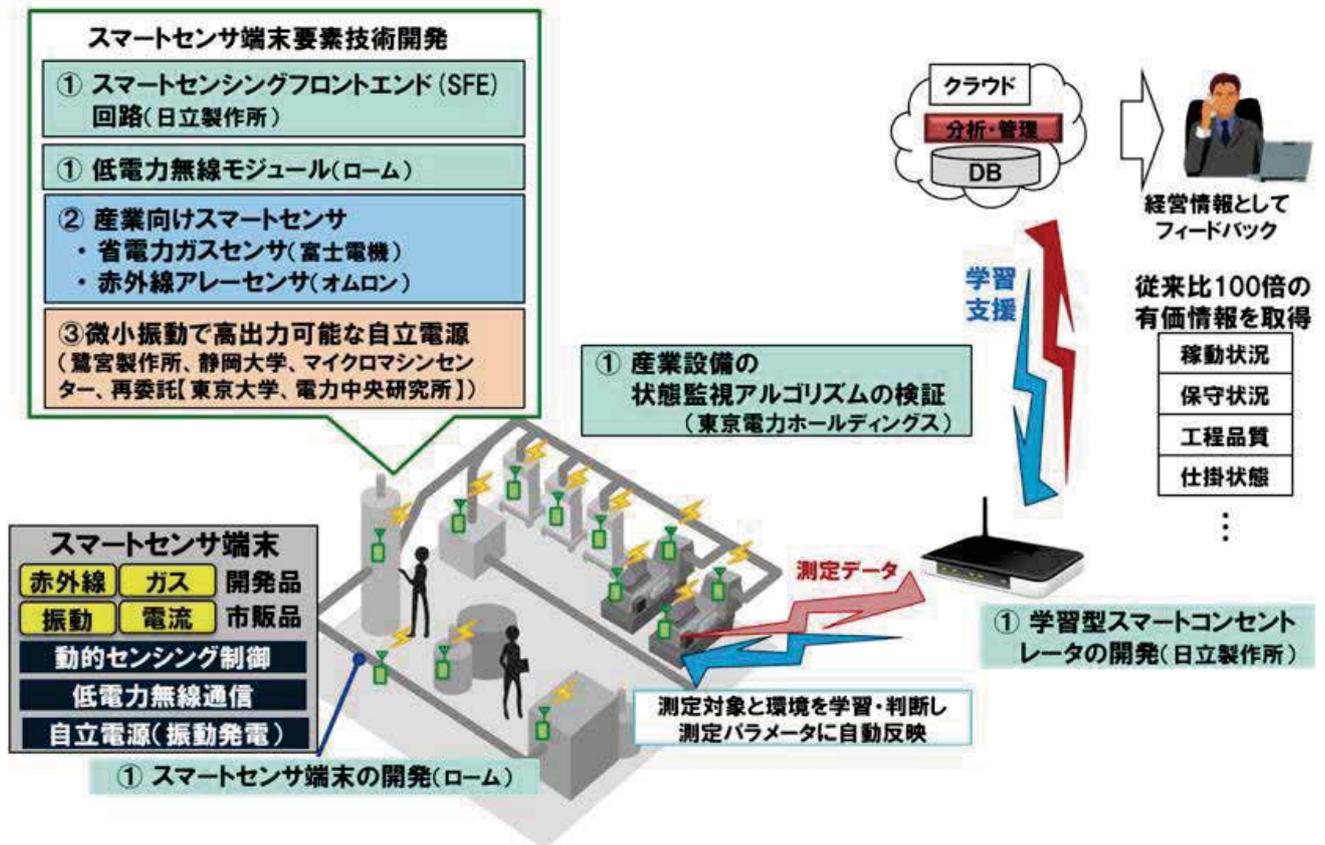
柔軟なルーティングが可能なマルチホップ中継端末と片方向通信（低コスト）センサ端末を適切に組み合わせてネットワークを構成



私たちの生活は、日々何気なく使っている電気・ガス・水道など、さまざまな都市機能に支えられています。これらライフライン系都市インフラ（電気、ガス、上下水道、情報、エネルギー）の安全な保全を目的としたセンサモニタリングシステムの研究開発を実施しました（2014年～2018年）。

特に、ライフラインの心臓部とも言えるモータ、ポンプ、コンプレッサなどの動力機械に焦点を当てたコアモニタリングに取り組みました。

## 6.4 学習型スマートセンシングシステム



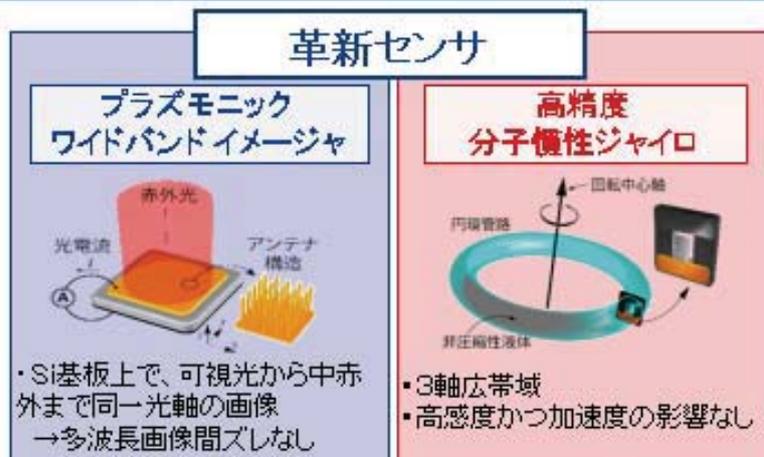
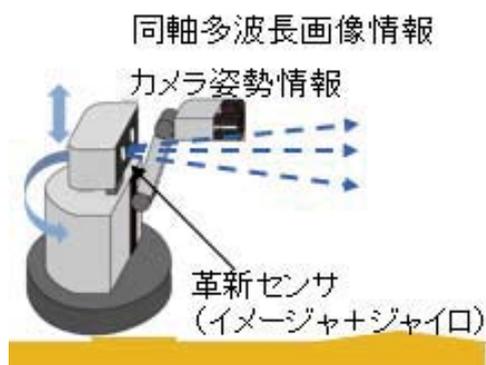
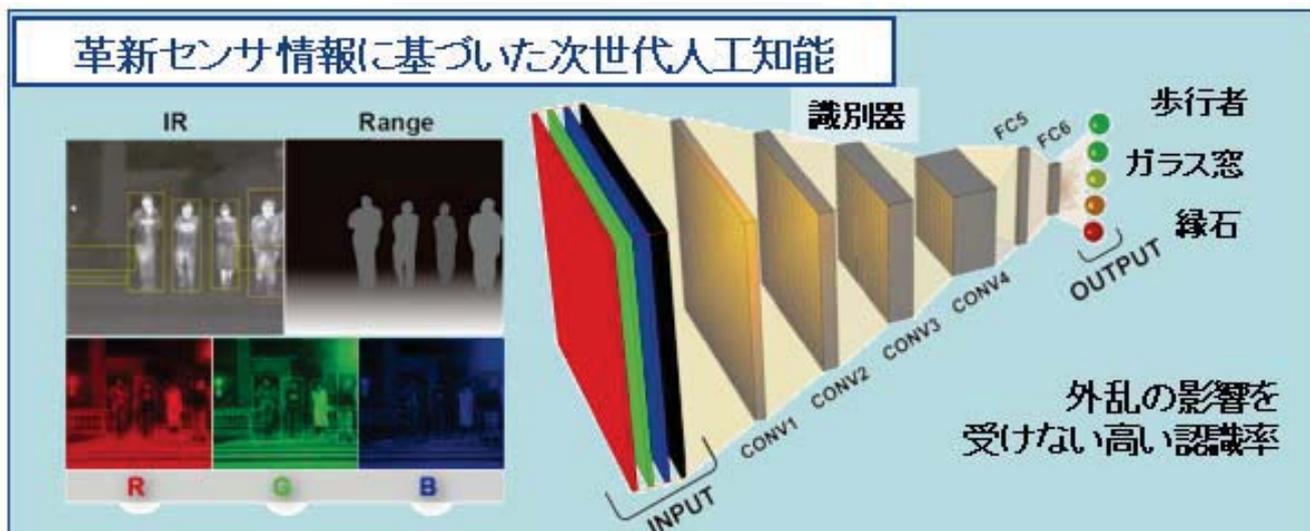
大規模工場・プラント等の生産・原動設備の稼働状況・生産品質の把握を適切かつ効率的に行うことを目的として、スマートセンサモジュール（ガスセンサ、赤外線アレーセンサ）、設備の微小振動で連続的な高出力が可能な自立電源の開発及びスマートセンシングフロントエンド回路の開発を行いました。

さらに、コンセントレータから動的センシング制御可能な無給電センサ端末（スマートセンサ端末）を実現し、それらのスマートセンサ端末から超高効率に有用データ抽出を行うことができる学習型スマートコンセントレータを開発しました。

これらの技術を総合的に活用し、従来の環境発電で収集可能な有価情報量の100倍に相当するデータ収集を可能にする学習型スマートセンシングシステムの基盤開発と実証を行いました（2016年～2020年）。

# 7 革新センサへの期待

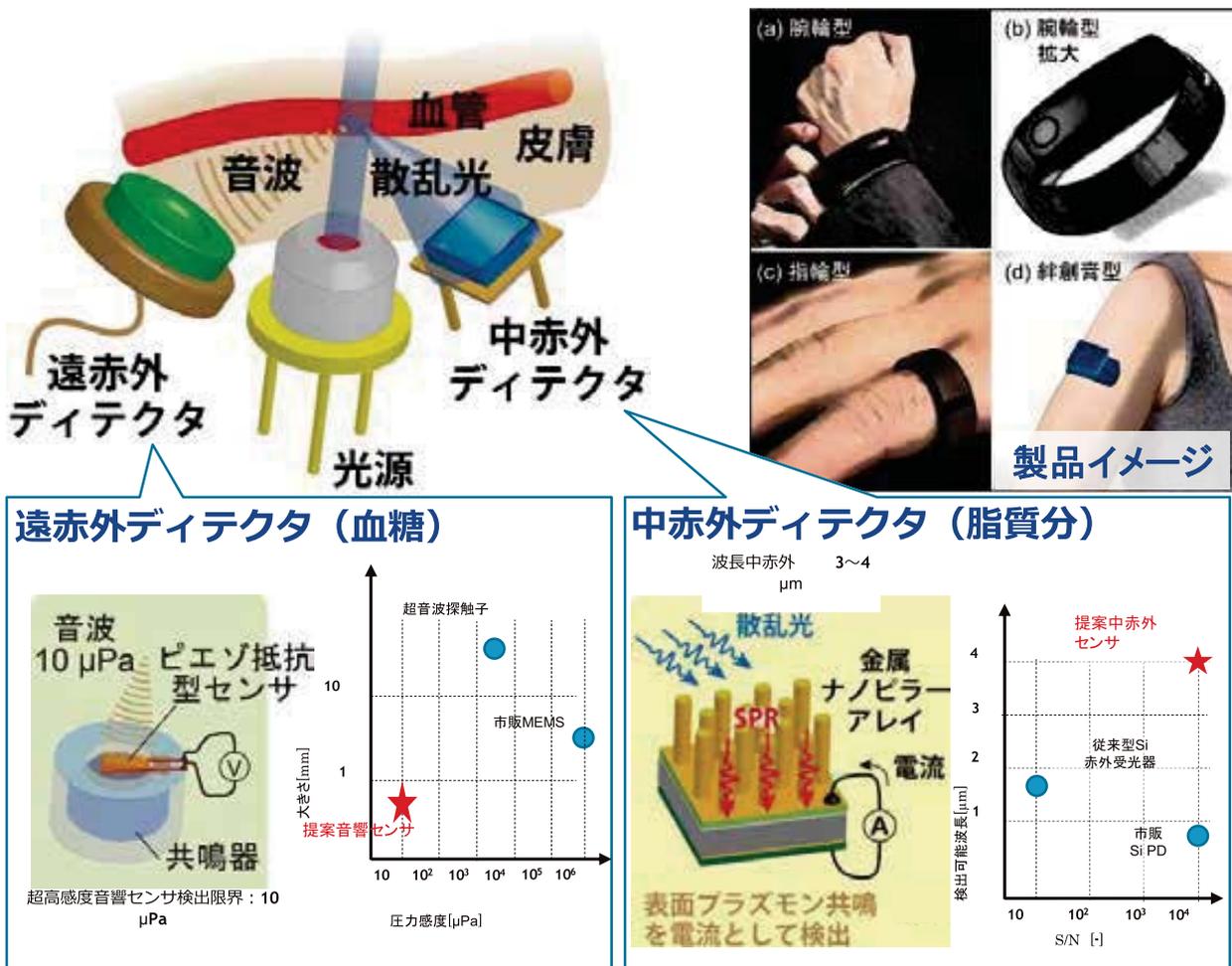
## 7.1 空間移動時のAI融合高精度物体認識システムの研究



五感を超えた革新センサからの入力情報を活用する人工知能により、正確・堅牢・高速な物体認識システムの実現に挑戦しました（2017年～2018年）。この取り組みでは、以下の技術開発を実施しました：

- (1) 高精度で正確・堅牢・高速な認識画像情報
  - ・・・革新センサに基づいた次世代人工知能
- (2) 画像情報の質を飛躍的に高める革新センサ1
  - ・・・プラズモニックワイドバンドイメージャ
- (3) 画像情報の質を飛躍的に高める革新センサ2
  - ・・・高精度分子慣性ジャイロ

# 7.2 血中成分の非侵襲連続超高感度計測デバイス及び行動変容促進システムの研究

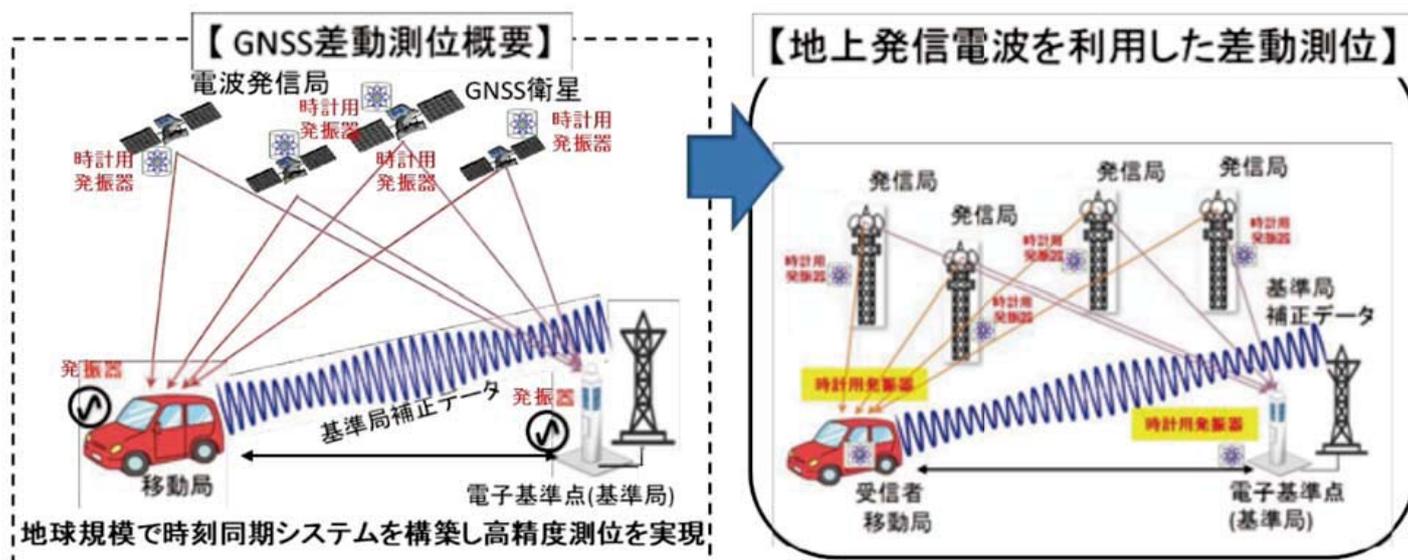


糖尿病、高脂血症、肥満など、生命を脅かす疾病を早期発見するために、血糖値や血中脂質を人体に傷をつけることなく常時モニタリングできる超微量センシング技術の開発を行いました (2019年~2023年)。

この研究では、以下の技術開発を実施しました：

- (1) 血糖値を計測する遠赤外ディテクタの開発
- (2) 血中脂質を計測する中赤外ディテクタの開発
- (3) 二つの計測方法を組み合わせたウェアブルな機器の開発

## 7.3 量子干渉効果による小型時計用発信器の高安定化の基礎研究



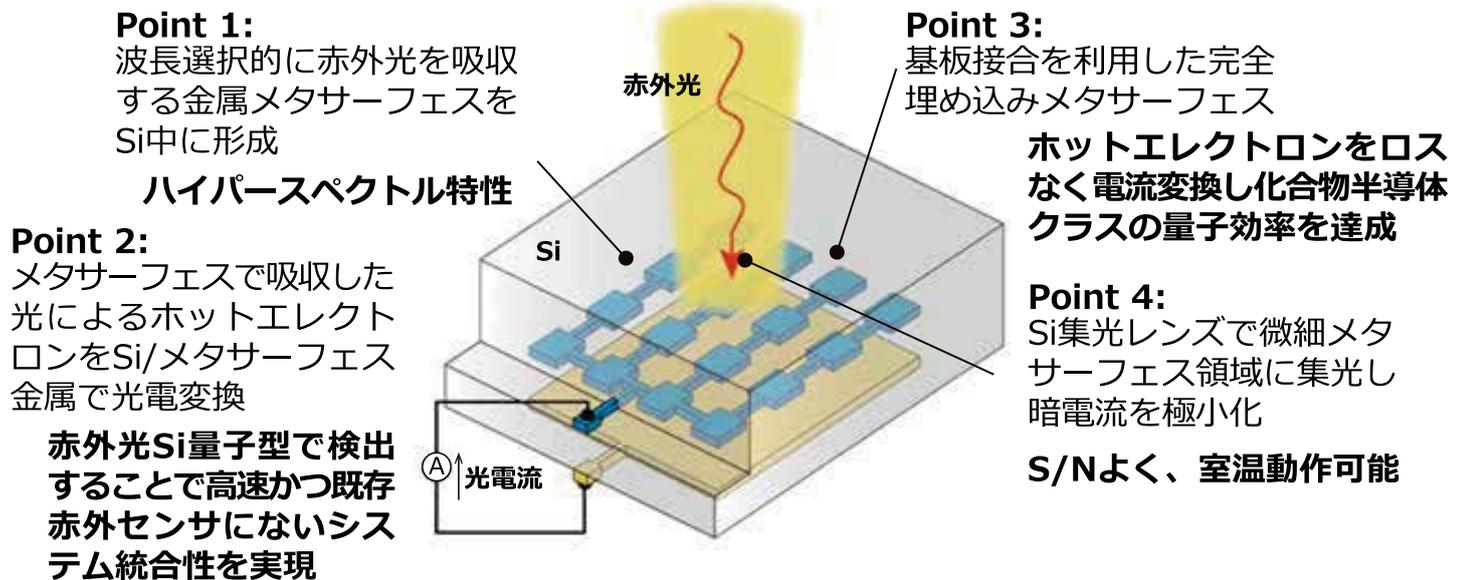
自動車等の移動体及び第5、第6世代の移動通信基地局への搭載を想定し、市販されている測位衛星搭載レベルの時計用発振器の性能をほぼ維持したままで、小型・低消費電力化した小型時計用発振器を実現する技術を確立しました。

この取り組みでは、小型時計用発振器の周波数変動要因を基礎から解明するとともに、高安定な小型時計用発振器（High Stability Ultra Low Power Atomic Clock(HS-ULPAC)）のプロトタイプを試作して、移動体への搭載環境下で評価・実証しました（2019年～2023年）。

ここで確立した主な技術は以下の通りです：

- (1) 周波数シフトとその変動要因の解明及びその制御技術
- (2) 水晶発振器の最適化技術
- (3) 量子部の最適化技術
- (4) プロトタイプモジュールの最適化技術
- (5) 周波数変動要因評価技術

# 7.3 メタサーフェスSiハイパースペクトル赤外光センシングデバイス



本プロジェクトは、NEDO先導研究プログラム／未踏チャレンジを電気通信大学と産業技術総合研究所と3者連名で受託（2023年度）した事業で、半導体プロセスと親和性の高いシリコン製のNIR-MIR向け赤外光センシングデバイスを開発しています。ハイパースペクトル特性を有し、量子効率の向上とノイズ低減を実現することで検出能力を向上させ、10年後には実用化レベルに達する新しい高機能な光センサデバイスの創造を目標としています（2023年～2027年）。

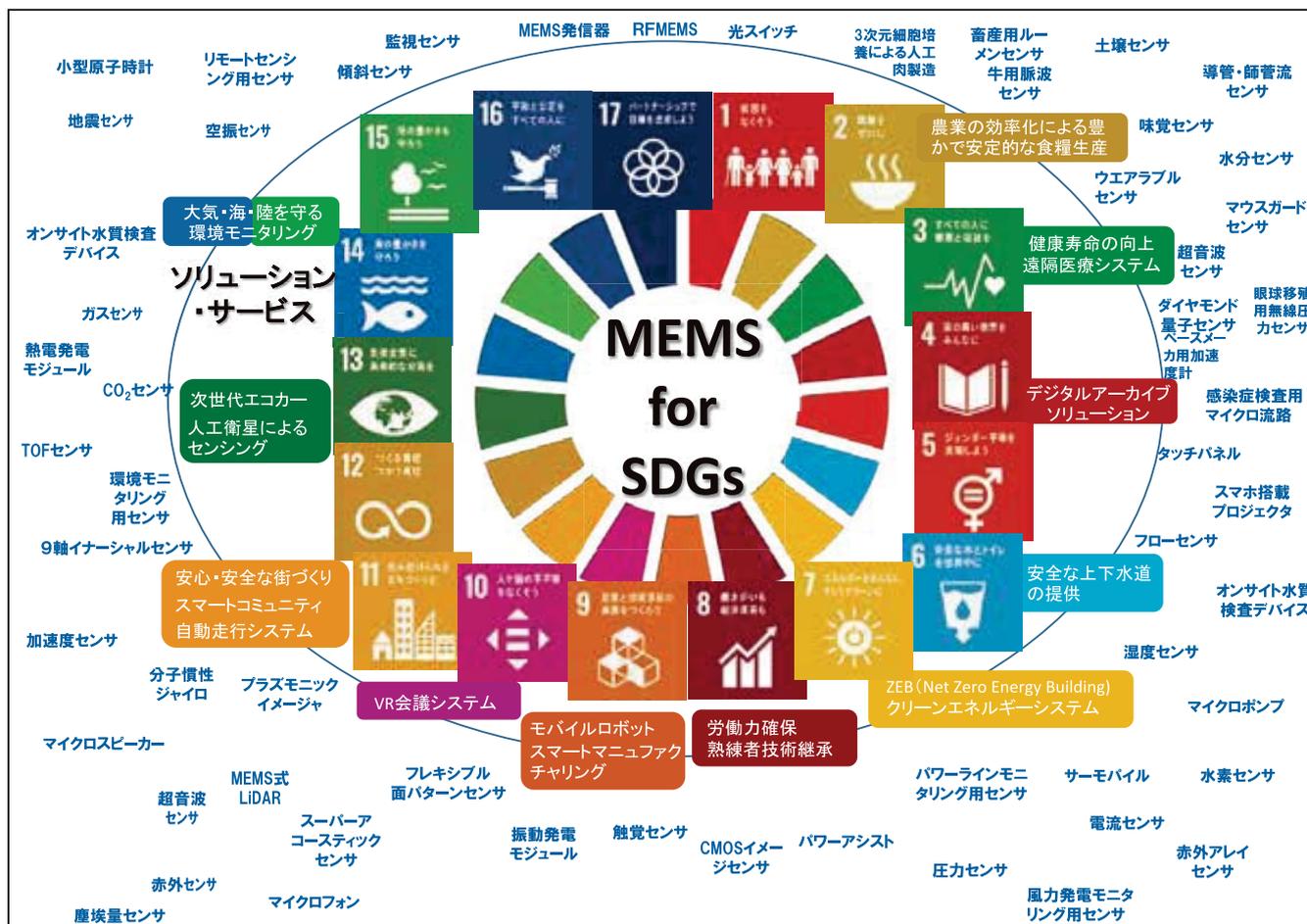
NIR: Near - InfraRed 近赤外線      MIR: Mid-InfraRed 中赤外線

## 【研究分担】

- 電気通信大学                           : Si赤外光センシングデバイスの設計/評価検証
- 産業技術総合研究所               : Si赤外光センシングデバイスのプロセス開発と実試作  
  ⇒埋め込み構造製作
- マイクロマシンセンター         : Si赤外光センシングデバイスのプロセス開発と実試作  
  ⇒メタサーフェスの試作  
  ⇒マイクロ光学系との融合

# 8 MEMSのSDGsへの貢献

## 8.1 SDGsに貢献するMEMS/センサ群



SDGs (Sustainable Development Goals : 持続可能な開発目標) を達成するためには、さまざまなデータを活用して社会課題を分析し、課題解決の手段を示す必要があります。その際、フィジカル空間から必要なデータを取得する入り口として、MEMSやセンサが重要な役割を担います。

上図に示すように、国内企業の事業活動等を中心として SDGs へのMEMSやセンサの貢献をまとめてみると、あらゆるソリューション・サービスの外周に、多種多様なMEMSやセンサを配置することになり、MEMS やセンサの貢献が必須であることが分かります。

