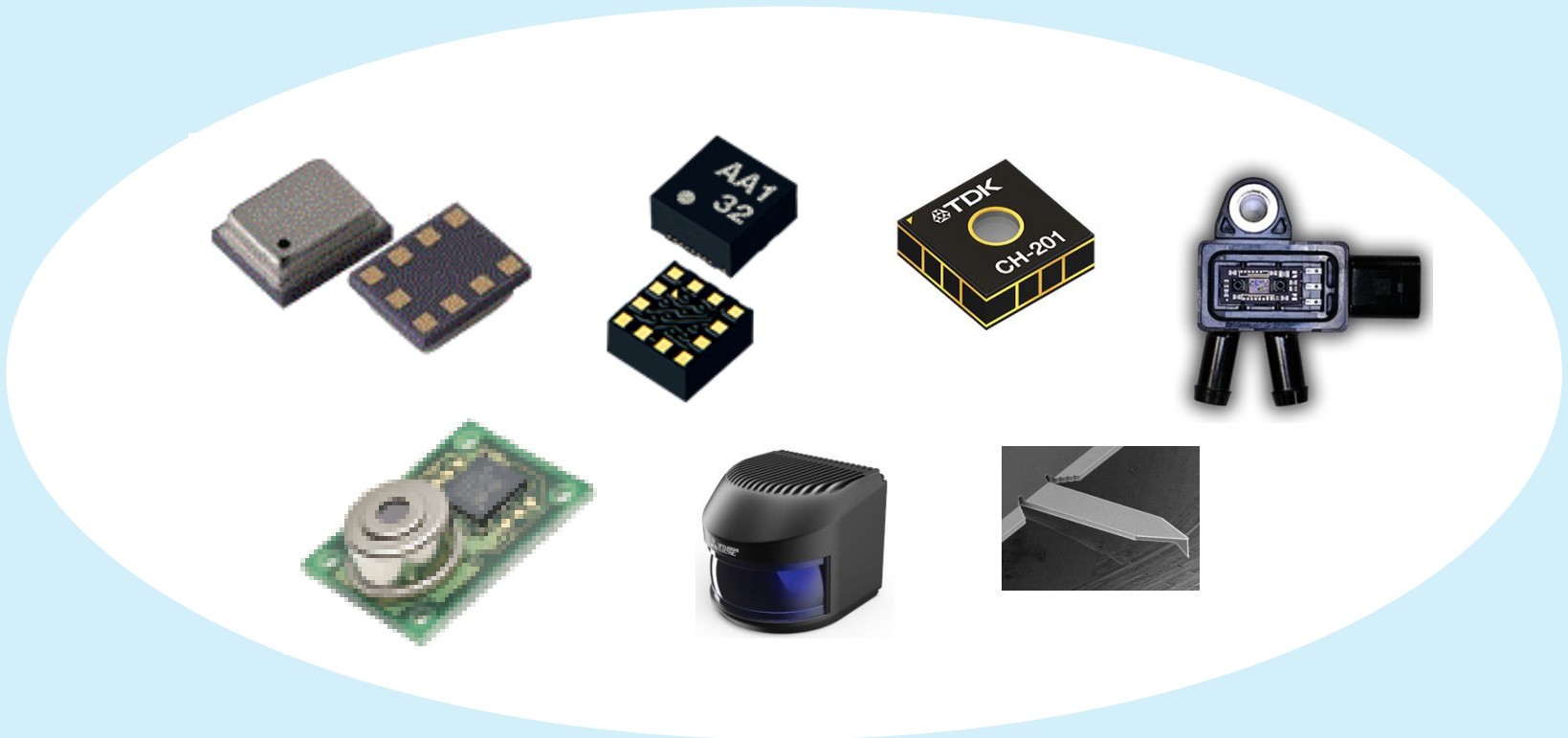


産業のマメ：MEMS (メムス)

Micro Electro Mechanical Systems



2020年10月改訂 一般財団法人マイクロマシンセンター

はじめに

今や製造業のキーデバイスとなりつつあるMEMS(メムス)は、その産業的な波及効果の大きさから、産業のマメと言われています(半導体が産業のコメと呼ばれていることに対応)。また、MEMSは未来の新たなライフスタイルを創出することも期待されています。ここでは、素晴らしい可能性を秘めているMEMSについて、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
電話 03-5835-1870 Fax 03-5835-1873
www.mmc.or.jp research@mmc.or.jp

内容

1. MEMSとは
2. MEMSプロセス
3. MEMSデバイスと応用
4. 国内外の市場と研究開発
5. 産業化とMEMSの活用場面
6. センサネットワークへの期待
7. 革新センサへの期待
8. MEMSのSDGsへの貢献

【1. MEMSとは】

MEMSということばの持つ意味とその特長、さらには開発の歴史について

【2. MEMSプロセス】

MEMS(メムス)の代表的な作り方とその流れについて

【3. MEMSデバイスと応用】

MEMS開発品・製品の事例とその応用分野について

【4. 国内外の市場と研究開発】

国内外のMEMS市場動向、関連企業と研究開発動向について

【5. 産業化とMEMSの活用場面】

商用化されているMEMSデバイスの活躍場面について

【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の今後の期待について

【7. 革新センサへの期待】

微小量センシングをセンシングする革新センサについて

【8. MEMSのSDGsへの貢献】

MEMSのSDGs達成にかかる貢献について

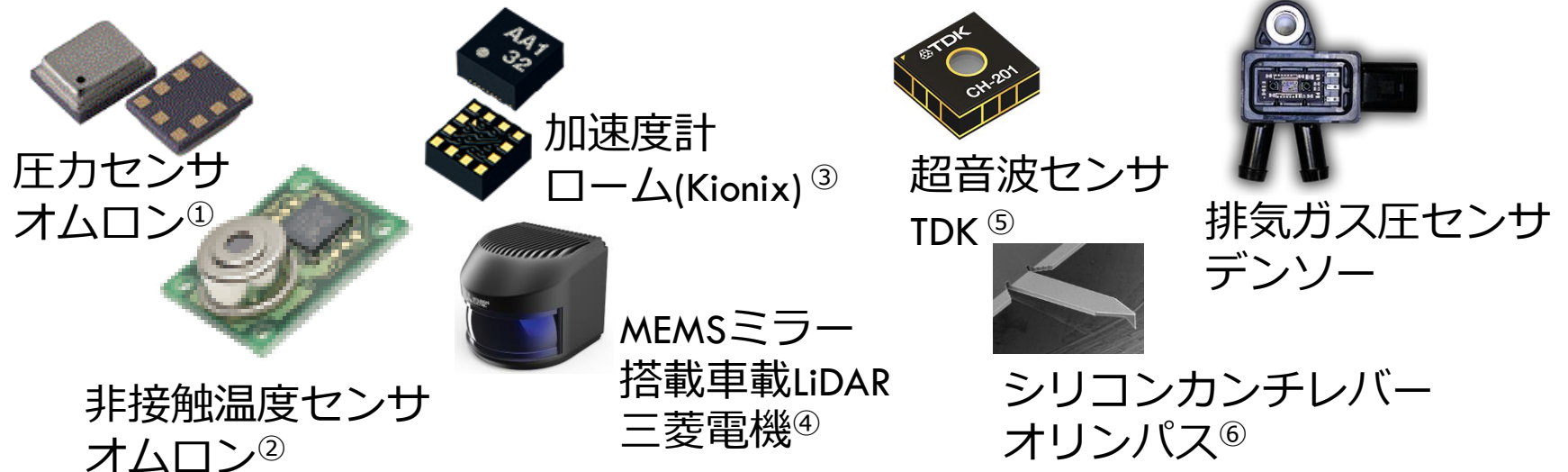
1 MEMSとは

1.1 産業のマメ

MEMS : **M**icro **E**lectro **M**echanical **S**ystems

半導体製造技術やレーザー加工技術等、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、最近では産業のマメと言われている。



MEMSは、Micro Electro Mechanical Systemsの略で、半導体製造技術やレーザー加工技術等、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センサ、アクチュエータ等のデバイス/システムのことを指します。

MEMSは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、最近では**産業のマメ**と言われています(半導体は産業のコメと言われています)。

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、車両や人の動作を検出する3次元加速度センサ、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のレーザー光源を制御する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、力や変位などの力学量を検出するカンチレバー、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、体は小さいもののMEMSを組み込んだ製品に素晴らしい効用・機能を与える活力源となっていることに由来します。また、多くの種類のMEMSデバイスがあること、MEMSの応用製品が多岐にわたることもマメに類似しています。(マメには大豆、小豆、落花生、グリーンピースなどの多くの仲間があり、豆製品も納豆、味噌、豆腐、豆乳、あずき餡など多岐にわたる。)

① <https://www.omron.co.jp/ecb/parametric-search?nodeId=802010&nodeParentId=8020>

② <https://www.omron.co.jp/ecb/parametric-search?nodeId=804010&nodeParentId=8040>

③ <https://www.kionix.com/product/KX132-1211>

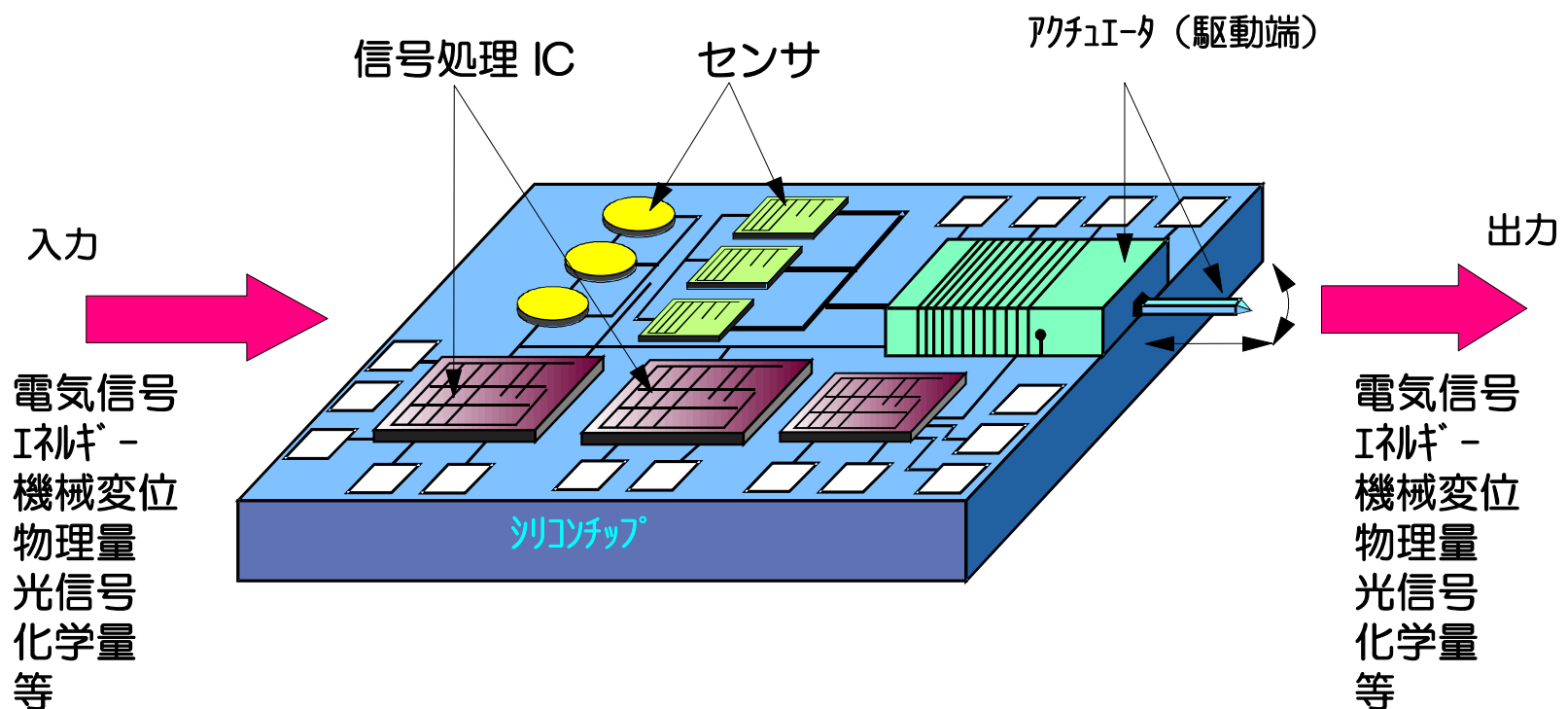
④ <https://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2020/0312.html>

⑤ https://www.jp.tdk.com/corp/ja/news_center/press/20200107_03.htm

⑥ http://probe.olympus-global.com/jp/product/omcl_ac160ts_r3/

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
- 3次元構造体であり入出力が多岐多様



NEDO発表資料より

MEMSは主に半導体微細加工(一括加工)技術を用いて作りますので**超小型で、非常に高精度・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、ひとつの部品を作るのと同じ手間と時間で沢山の構造を同時に作りこむことができ大量生産による**低コスト化**も可能となります。

また、MEMSは一つの基板にセンサや信号回路、アクチュエータなどが搭載された**3次元の構造体**であり、**入出力が電気信号以外にエネルギーや機械変位、物理量など、多岐多様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

微小化

微細操作・位置決め
狭所動作

分散配置

高密度実装

コラボレーション

並列化

集積化

またMEMSには「微小化」、「並列化」、「集積化」といった特長もあります。MEMSはデバイスの**微小化が可能**ですので、狭いケースに収まったり、狭い場所で稼働することもでき、携帯機器や複雑な装置内部の保守検査機械などに適しています。

また、同じセンサやアクチュエータなどの要素を**たくさん並べ協働させる**ことで、ひとつの要素では得られない高機能・高性能を引き出すこともできます。

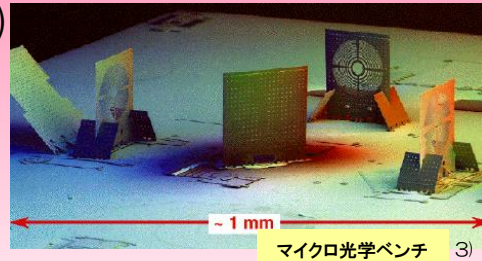
さらには、センサ、電子回路、アクチュエータなどの異なった部品を集積化することができ、**賢いデバイス**となります。

1.4 開発の歩み

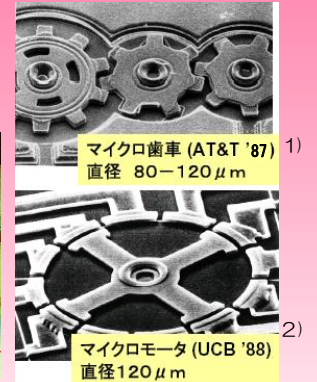
- マイクロマシンの概念の萌芽(1960年代)
- MEMSモータの開発(1988)
- マイクロマシン技術プロジェクト(1991~2000)
- マイクロマシンセンター設立(1992)
- MEMS関連の国/NEDOプロジェクトの推進
 - ・ MEMSプロジェクト(2003~2005)
MEMS製造拠点(ファンドリー)作り
 - ・ MEMS-ONEプロジェクト(2004~2006)
MEMS設計支援ソフトの開発(MEMS普及)
 - ・ ファインMEMSプロジェクト(2006~2008)
高集積・複合MEMSの製造技術の開発
 - ・ BEANSプロジェクト(2008~2012)
異分野融合型次世代デバイスの開発
 - ・ 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)
グリーンSNで省エネ社会の実現を目指す

「驚きの時代」

1987~1994



マイクロ光学ベンチ ③

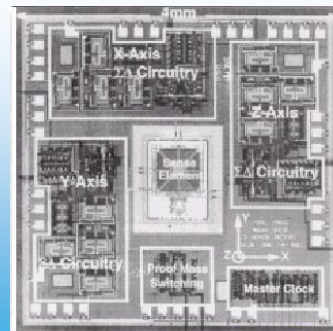


マイクロ歯車(AT&T '87) ①
直径 80-120 μm

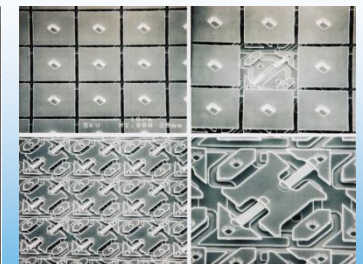
マイクロモータ(UCB '88) ②
直径 120 μm

「働きの時代」

1995~



回路を一体化して検出感度を向上、自己校正も可能な加速度センサ ④



XGA対応したミラーアレイを有するDMD ⑤

MEMS開発の歩みを概観すると、1960年代に芽生えたマイクロマシン概念^{*1)}に始まり、国際学会 Transducers' 87を契機として「驚きの時代」(1987~1994)に移行しました。この時代には、例えば AT&Tベル研究所(当時)の3連マイクロ歯車¹⁾や、カルフォルニア大学バークレー校(UCB)のY.C.Taiらが作った静電気モータ²⁾、UCLAのM.C.Wuらが作ったシリコンチップ上の空間光学系³⁾など画期的な発表が数多くされており、夢のような期待が語られた時代です。このような動きに呼応して、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、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年頃からは私たちの身の回りでもMEMS応用製品が使われ始め、「働きの時代」に入りました。この頃のMEMS応用製品の代表例としては、アナログデバイス社のトランジスタ回路集積型の加速度センサ⁴⁾やテキサスインスツルメンツ社のディスプレイ用デジタルミラーデバイス⁵⁾などがあります。

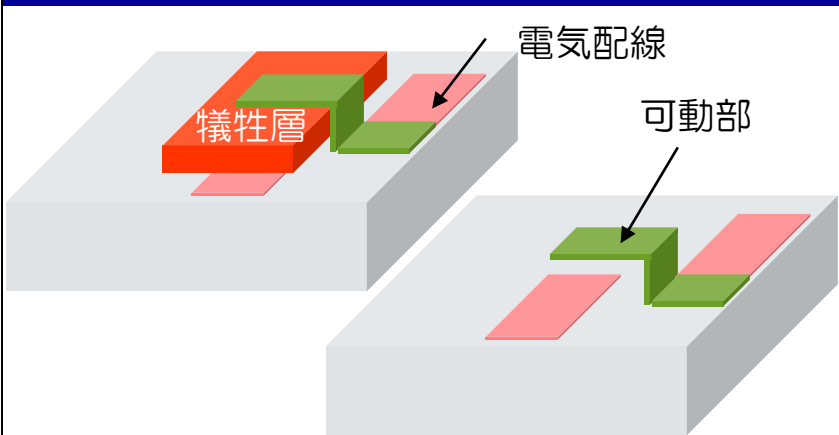
「働きの時代」と言われて以降、わが国ではMEMS開発を促進するため、MEMSプロジェクト(2003~2005)、MEMS-ONEプロジェクト(2004~2006)、ファインMEMSプロジェクト(2006~2008)、BEANSプロジェクト(2008~2012)、グリーンセンサ・ネットワークシステム技術開発プロジェクト(2011~2014)など次々とMEMS関連の国/NEDOプロジェクトが立ち上がり、MEMS産業の発展に寄与しています。

*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

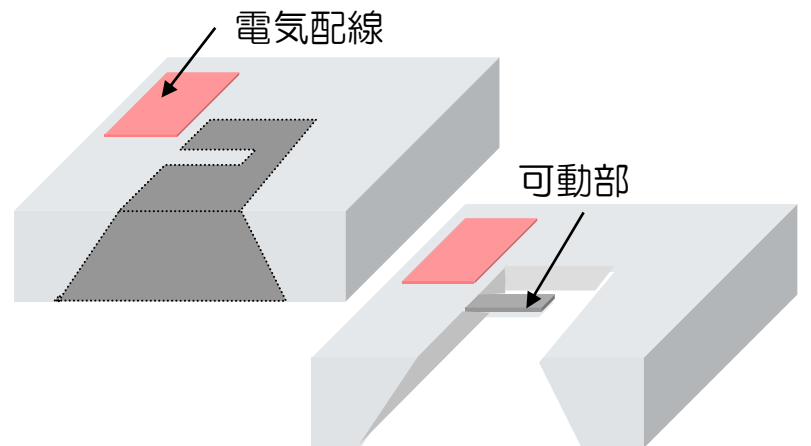


基板の上に複数層の膜を形成、
その一部を選択的にエッチ
ングして空間を作製



CMOS回路との集積化に適
する

バルク マイクロマシニング



基板自体を3次元的に加工



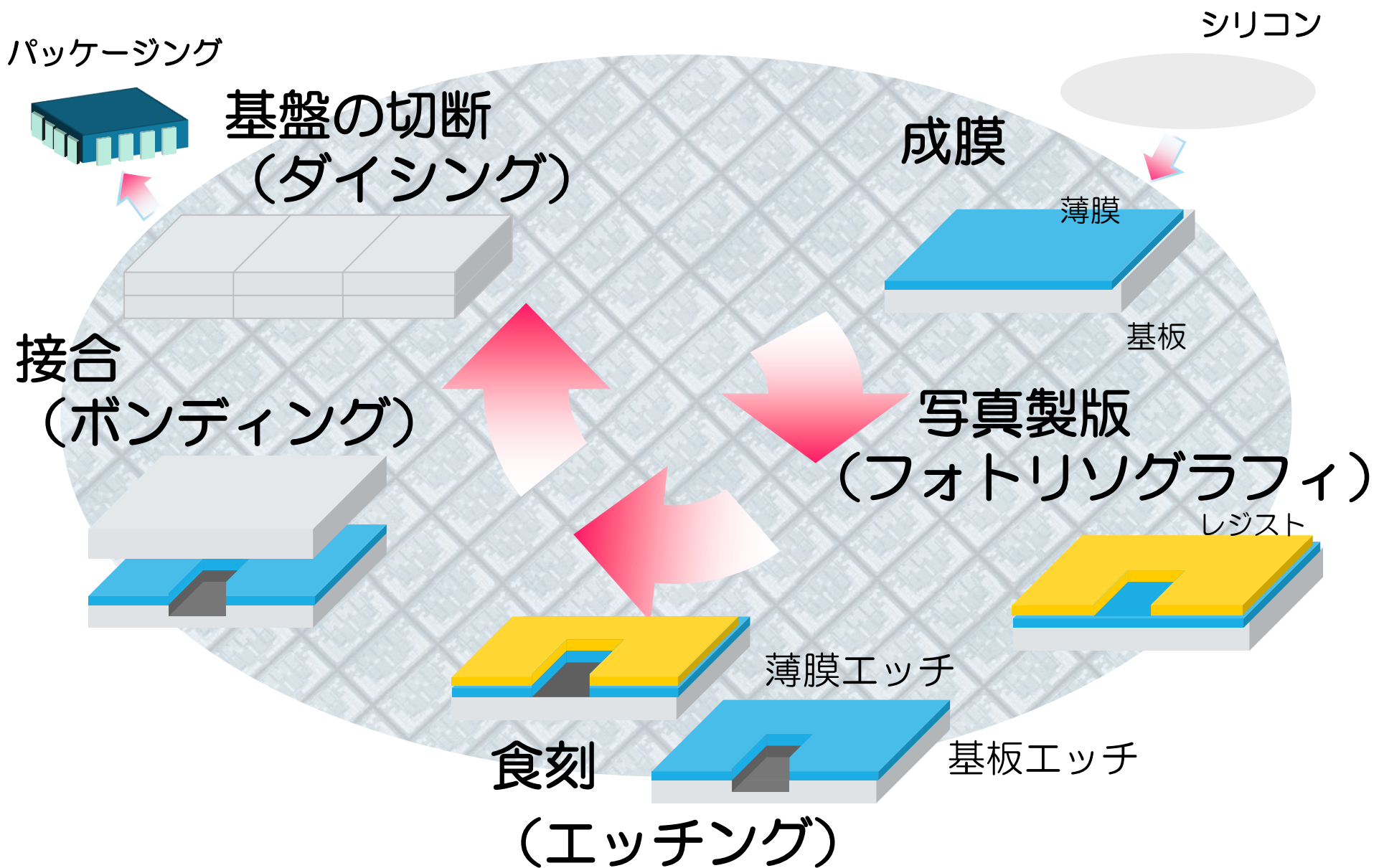
自由度の大きな3次元構造
に適する

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つの作り方があります。

表面マイクロマシニングの作り方では、シリコン基板の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つかってMEMS構造体を作ります。特長として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ます**。

一方、**バルクマイクロマシニング**の作り方では、基板自体を深く掘り込むなどの加工を施しMEMS構造体を作ります。特長として**自由度の高い3次元構造体を実現**できます。

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、ともに半導体プロセスフロー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一般的なプロセスの流れについて解説します。

まず、シリコンなどの基板を振り出しとして**成膜工程**からプロセスが開始します。ここで形成される薄膜はMEMS構造体の一部、あるいは後のエッチング(食刻)のためのマスク材となり、製作には熱酸化法、スパッタ法、CVD(Chemical Vapor Deposition)法などが必要に応じて選ばれます。

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**では薄膜、あるいはシリコン基板などの不要部分をガスや薬液を使って削り取ります。これらのプロセスフローを何度か繰り返すことで狙いのMEMS構造体を作り上げていきます。

なお、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)で複数基板を貼り合わせることもあります。

そして最後に**基盤の切断**(ダイシング)とパッケージングをおこないMEMSデバイスを完成させます。

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】

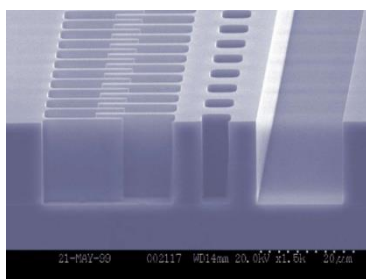
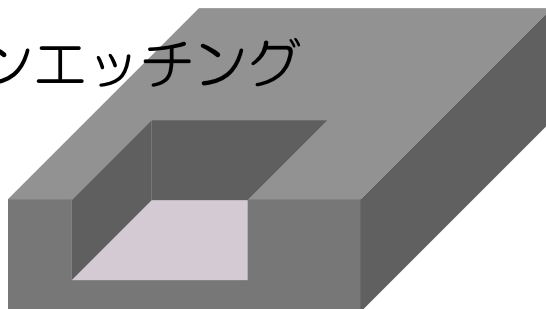
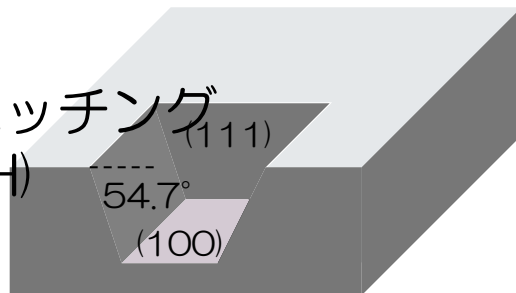
主にバルクマイクロマシニング
で用いられる

ウエット

結晶異方性エッチング
(111)
(KOH, TMAH)

ドライ

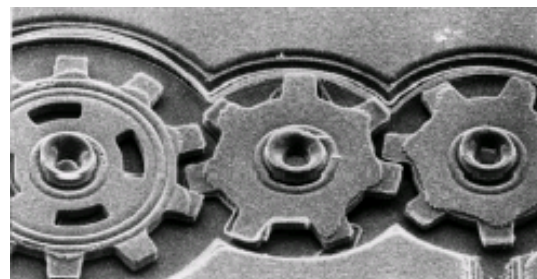
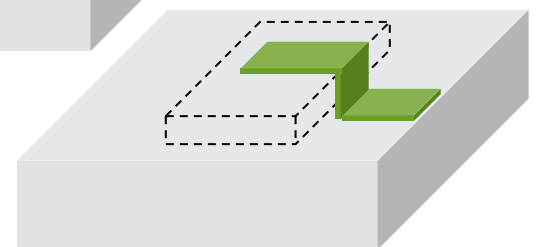
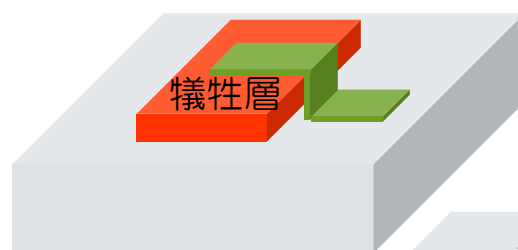
反応性イオンエッチング
(D-RIE)



6)

【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



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**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(D-RIE: Deep - Reactive Ion Etching)に大別されます。

ウエットエッチングはKOH、TMAHと呼ばれるアルカリ水溶液でシリコン基板を結晶面に沿って深く溶かしていくものです。このウエットエッチングは出来上がりの構造がシリコン結晶方位に強く制限されますが、**特殊な製造装置が不要、バッチ処理ができる**などの特長から、以前から幅広く利用されています。

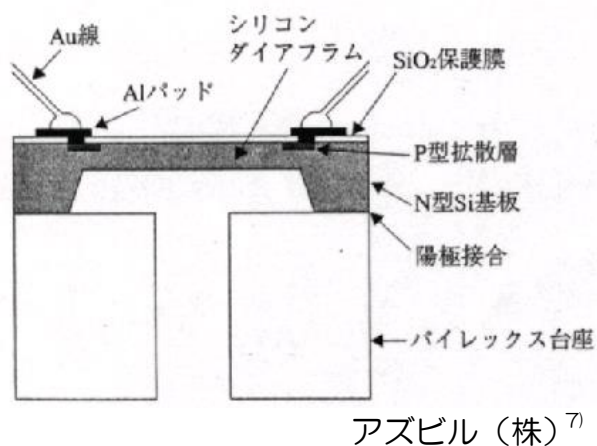
ドライエッチング(D-RIE)は半導体プロセスで一般的に用いられるRIE(反応性イオンエッチング)技術に”BOSCHプロセス”と呼ばれる特殊なレシピなどを付加したもので、**シリコンを垂直に深掘り⁶⁾**できます。このD-RIEを使うことでシリコン加工面をギアとする歯車などが容易に実現でき、最近ではMEMS研究開発を加速させる強力な加工ツールとなっています。

表面マイクロマシニングでよく使われる**犠牲層エッチング技術**は、フォトリソグラフィ工程、エッチング工程を繰り返す過程で構造体と一緒に犠牲層もスペーサとして導入しておき、最後にこの犠牲層をエッチング除去し、MEMS構造体を作る技術を指します。MEMS構造体、犠牲層、エッチング液の組合せで様々な材料をMEMS構造体に用いることができます。

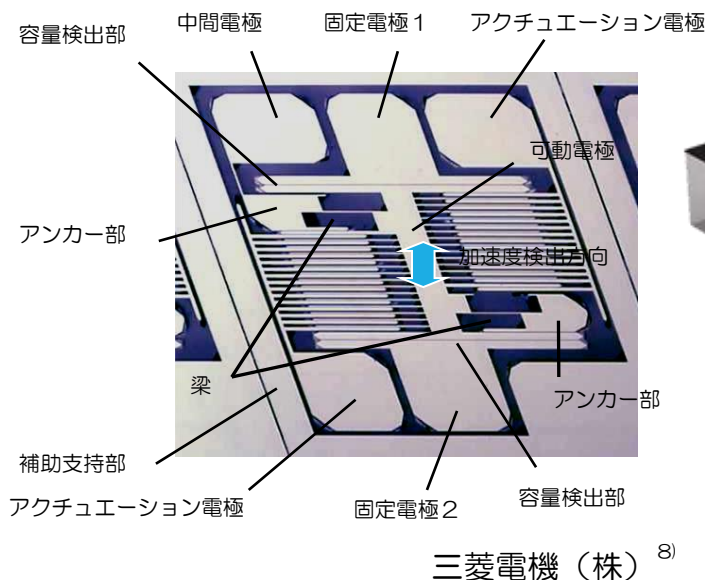
3 MEMSデバイスと応用

3.1 フィジカルMEMS：センサ

【圧力センサ】



【加速度センサ】



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】

MEMSの中でも圧力センサは研究開発の歴史が最も古く、実用化の進んでいるセンサと言えます。受圧部のシリコンダイアフラムが圧力を受けたときの応力・変位を電気信号に変換し圧力を計測するもので、**ピエゾ式、静電容量式と振動式**に分類されます。

ここでは最も一般的に利用されているピエゾ抵抗式の例として**アズビル(株)の圧力センサ**の断面模式図⁷⁾を示します。ピエゾ抵抗式圧力センサ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による変化を利用し圧力を計測します。このような圧力センサは**自動車エンジンなどの圧力測定、血圧計、気圧計、ガス圧計**などに広く普及しています。

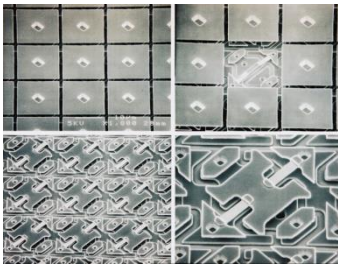
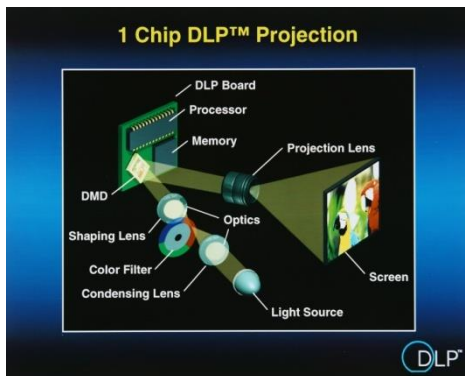
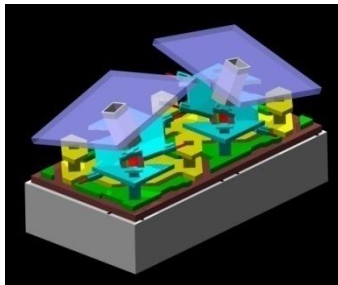
【加速度センサ】

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「おもり」に発生する慣性力が支持構造を変形させ、その変形を様々な方式で検出します。検出方式は**静電容量型、ピエゾ抵抗型、圧電型**などに分類されますが、支持構造と検出素子の配置によって検出できる加速度の方向が決まります。

例として**三菱電機(株)の静電容量式加速度センサ⁸⁾**、および**パナソニック(株)のピエゾ抵抗型加速度センサ⁹⁾**を示します。加速度センサは**自動車エアバックの衝撃検知、携帯電話、ハードディスク落下検知やアミューズメント分野**などに応用展開がされています。

3.2 光MEMS：アクチュエータ

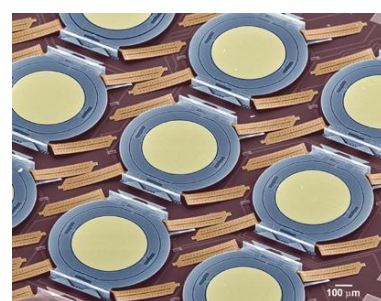
【DMD（デジタルミラーデバイス）】



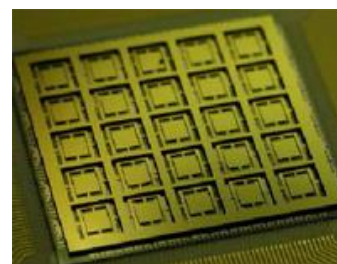
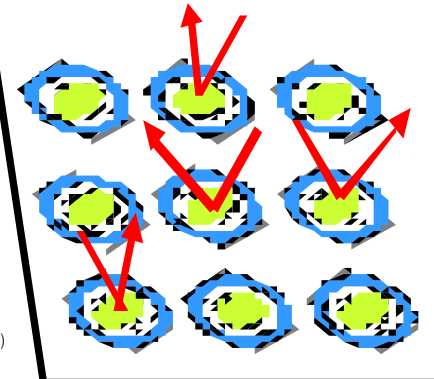
10)

ディスプレイ
大型/小型プロジェクタ

【光スイッチ】

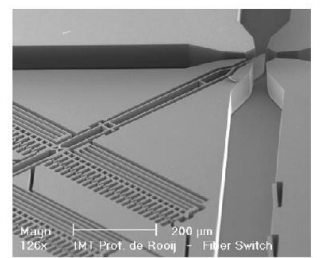


Lucent社¹¹⁾



12)

OLYMPUS



又シャテル大学¹³⁾

情報通信(光通信)

【DMD(デジタルミラーデバイス)】

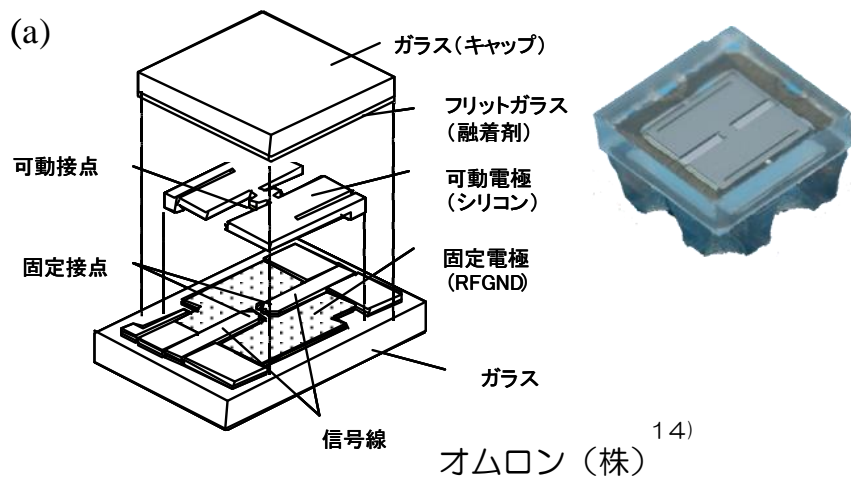
米国テキサスインスツルメンツ社より製品化されたディスプレイ用のDMD¹⁰⁾はMEMS開発の初期より研究がなされ、最も成功したMEMSのひとつと言われています。構造としては、ディスプレイ画像の画素に相当する部分がマイクロミラーから構成され、各ミラーの大きさは十数ミクロン角程度ときわめて小さいミラーからなっています。ディスプレイ画素の明るさはミラー反射光量を制御して調節し、各ミラーの傾きはミラー部分の下に配置されたトランジスタのメモリ素子による静電引力により制御されています。現在ではプレゼンテーション用の小型プロジェクタだけでなく、背面投影型TVや大画面ビデオシアターなどに広く使われています。

【光スイッチ】

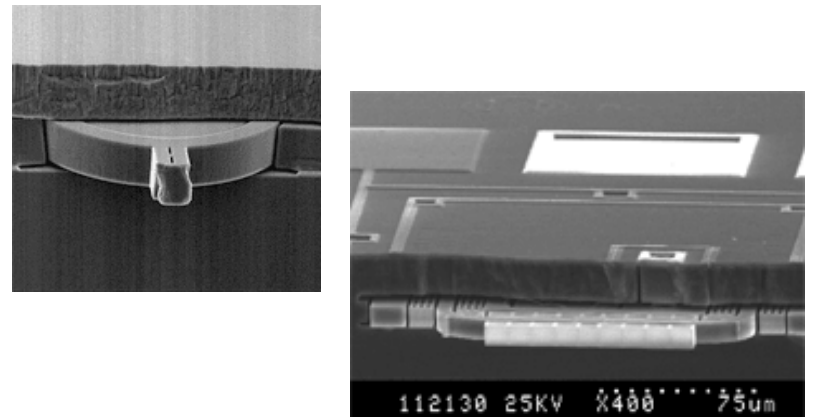
光スイッチは光通信網の中継点において光信号の経路を光のまま切り替える素子として期待されています(電子式では信号の高速化、光電変換のコストと煩雑さの問題を抱えていました)。光スイッチ方式は、扱う光信号の規模などにより2次元型と3次元型が選択されますが、いずれも従来の光電変換方式に比べて省スペース、省エネルギーなどの特長があります。3次元型としてLucent社(当時)¹¹⁾、オリンパス(株)¹²⁾など、また2次元型として又シャテル大学¹³⁾などから発表がされています。

3.3 RF-MEMS：アクチュエータ

【RF-MEMSスイッチ】



【共振器(レゾネータ)】



SiTimes社
<http://www.sitime.jp/products/technology.htm>

15)

情報通信：第5世代携帯電話向け多周波対応デバイスなど

【RF-MEMSスイッチ】

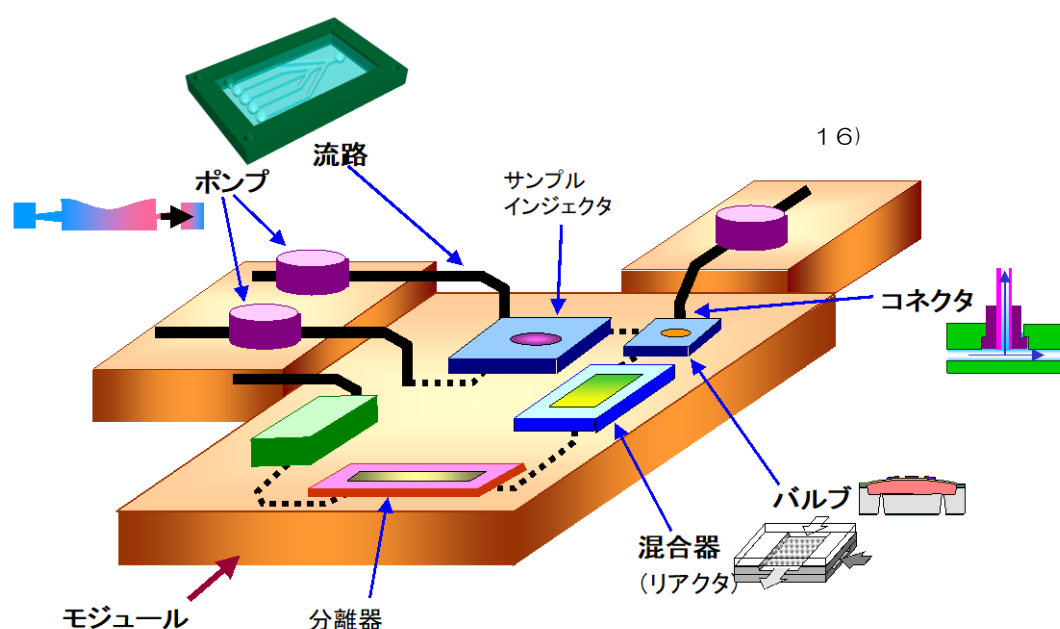
RF-MEMSスイッチは優れた高周波特性から、**高速無線通信機器などへの搭載**が期待されており、容量型 (Capacitive type) と接触型 (Ohmic type) の2種類があります。接触型に分類されている**オムロン(株)のRF-MEMSスイッチ¹⁴⁾**は、可動する金属切片(可動電極)を媒介して、2本の信号線を通る信号のON/OFF切替えを行うことで、DCからGHz領域までの絶縁性や挿入損失など優れた周波数特性が得られるという大きな特長があります。

【共振器(レゾネータ)】

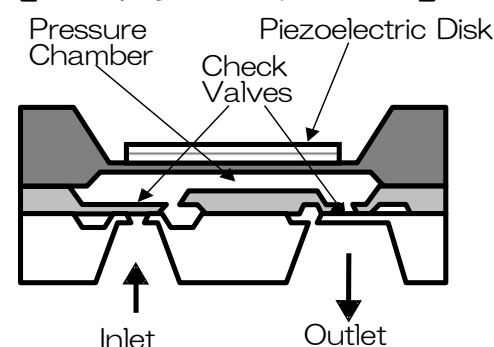
高周波無線機器などでは特定の周波数のみを通す機能をもつフィルタの帯域設定に共振器が必要となります。**米国SiTimes社が開発したMEMS共振器¹⁵⁾**は、シリコン基板内に共振するシリコン製の梁を埋め込み、信号処理回路を集積化することで小型、低消費電力などの特長を有しています。

これらのRF-MEMS部品は小型、高性能、低消費電力などの特長から**第5世代及びIoT向けの次世代RFパッシブコンポーネント**などに展開が期待されています。

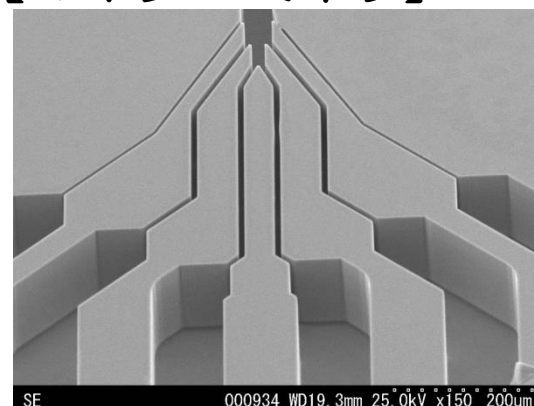
3.4 μ TAS (Micro Total Analysis Systems) : センサとアクチュエータの集積化



【マイクロポンプ】¹⁷⁾



【マイクロミキサ】¹⁸⁾



化学/バイオ (血液など) 分析の小型高速化

ポンプやバルブ、混合器(ミキサ・リアクタ)や分離器などが集積された μ TAS (Micro Total Analysis Systems)¹⁶⁾は、ひとつのチップ上で化学分析、化学反応、化学合成などを行うことができますので、分析システムの小型高速化、ならびに省薬品、省スペースを可能にする技術として研究開発が盛んに行われています。

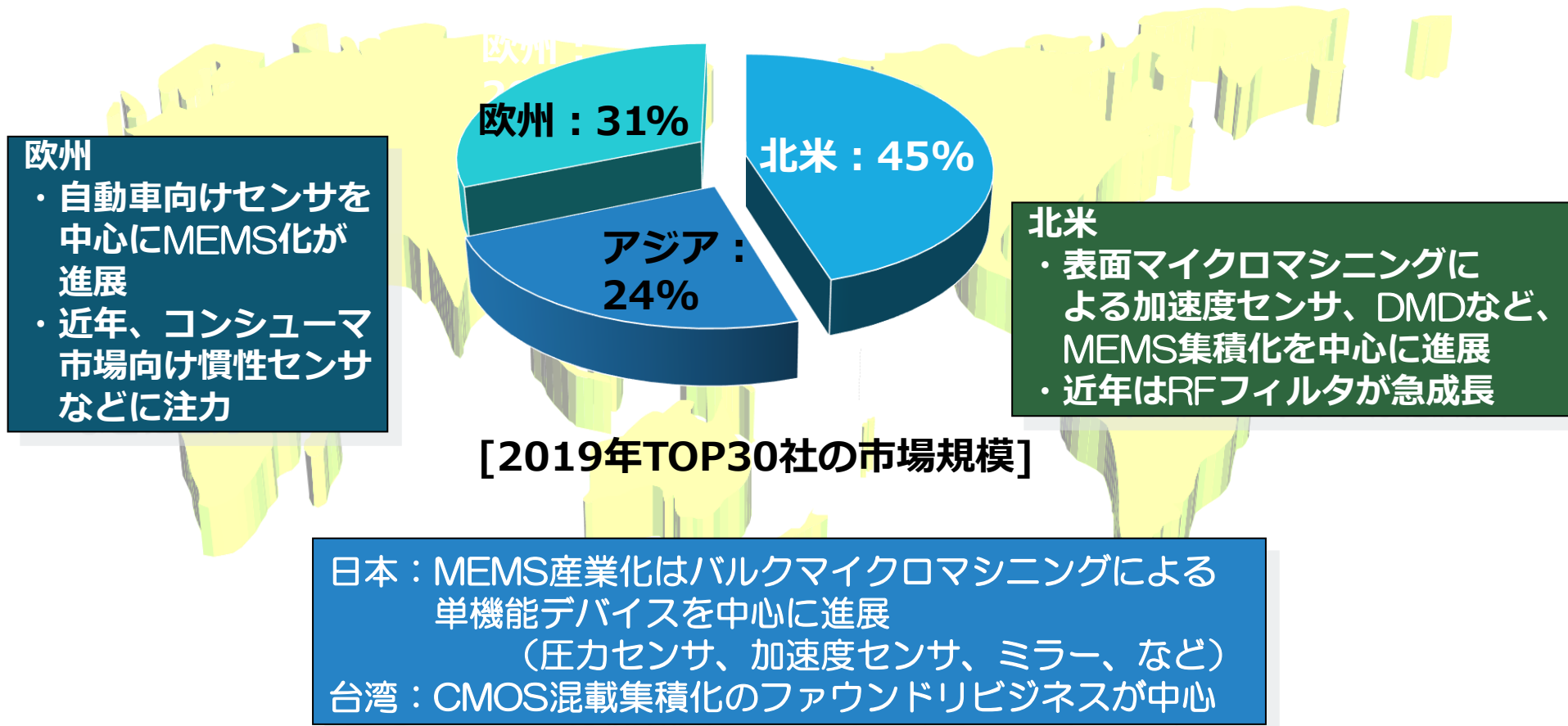
【マイクロポンプ】

液体を送り込むマイクロポンプとして、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なるダイヤフラム型¹⁷⁾のものが報告されています。ダイヤフラム型のものではポンプ吐出圧力が大きく、気泡の影響を受けにくいなどの特長があります。

【マイクロミキサ】 マイクロ領域で液体を混合させるマイクロミキサ¹⁸⁾の場合、液の接する界面の面積をなるべく大きくし、かつ両層の厚さを薄くすることが効果的ですが、MEMS加工技術を用いることで流路構造をより細く、深くするなどの工夫で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 世界のMEMS市場



世界のMEMS市場ではTOP30の企業が市場の88%を占めており、TOP30での地域別市場規模は45%が北米、31%が欧州、24%がアジアとなっています。(Yole Développement 調査、2020年6月)

米国のMEMS製品は、表面マイクロマシニングによる加速度センサやMEMS集積化によるDMDなどを中心に進展していることなどが市場の特徴です。近年はスマートフォン用のRFフィルタが急成長を続けています。

欧州は、自動車向けセンサを中心にMEMS化が進展していること、また近年ではコンシューマ市場向け慣性センサなどに注力している点などが市場の特徴とされています。

日本では、バルクマイクロマシニングによる単機能デバイス(圧力センサ、加速度センサ、ミラーなど)を中心に進展しています。最近では、海外のMEMS企業を買収し、部品メーカーの売り上げが拡大しています。また台湾ではCMOS混載集積化のファウンドリビジネスが中心となっています。

4.2 世界の主要MEMS企業

世界市場で活躍する**世界の主要MEMS企業**は以下の通りです。

北米

BroadCom(アメリカ; RF系)

TI (アメリカ; 光MEMS(DMD))

QORVO(アメリカ; RF)

Hewlett Packard(アメリカ; インクジェット・プリンタノズル)

HONEYWELL(アメリカ; 航空機用加速度センサ)

欧州

Robert Bosch GmbH (ドイツ; 自動車用センサ)

TE CONNECTIVITY(ドイツ; 加速度センサ)

STMicroelectronics (フランス; 自動車用センサ)

INFINEON (フランス; マイクロフォン)

NXP (オランダ; 自動車用センサ)

日本

TDK(モバイル用マイクロフォン、圧力センサ等)

デンソー(車載用圧力センサ等)

パナソニック(ジャイロセンサ、加速度センサ、圧力センサ等)

村田製作所(ジャイロセンサ、磁気センサ等)

旭化成エレクトロニクス(電子コンパス等)

キャノン(インクジェットプリンタヘッド等)

太陽誘電(RF-MEMS等)

アルプス・アルパイン(ジャイロセンサ、気圧センサ、圧力センサ等)

エプソン(インクジェットプリンタヘッド等)

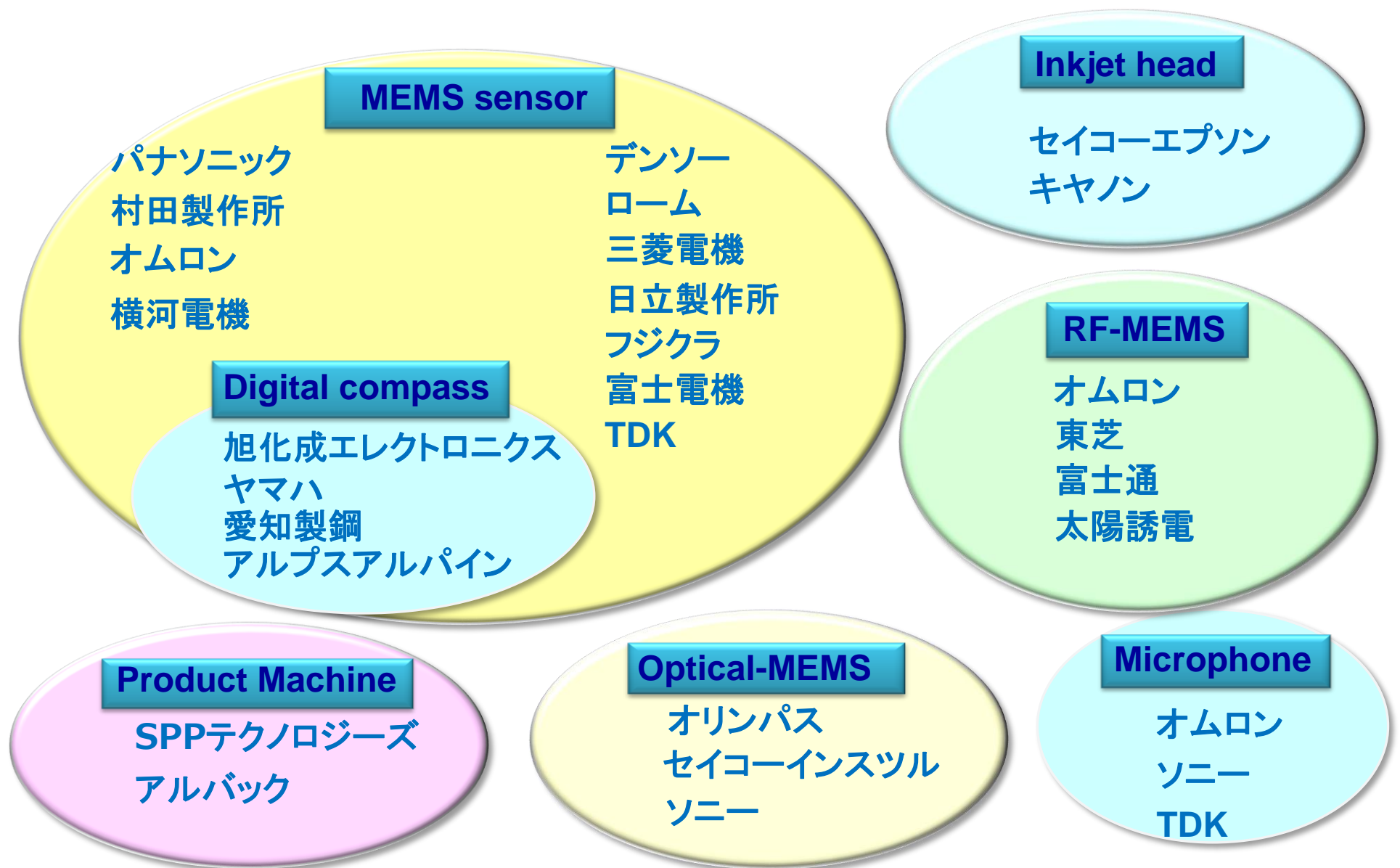
アジア(日本を除く)

AAC (中国; モバイル用マイク)

GOERTEK (中国; モバイル用マイク、スピーカ)

RF360 (シンガポール; RF系 QualcommとTDKの合併会社)

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。

各種センサ : パナソニック、村田製作所、オムロン、横河電機、デンソー、ローム、三菱電機、フジクラ、富士電機、TDK

電子コンパス : 旭化成エレクトロニクス、ヤマハ、愛知製鋼、アルプスアルパイン

インクジェットヘッド: セイコーエプソン、キヤノン

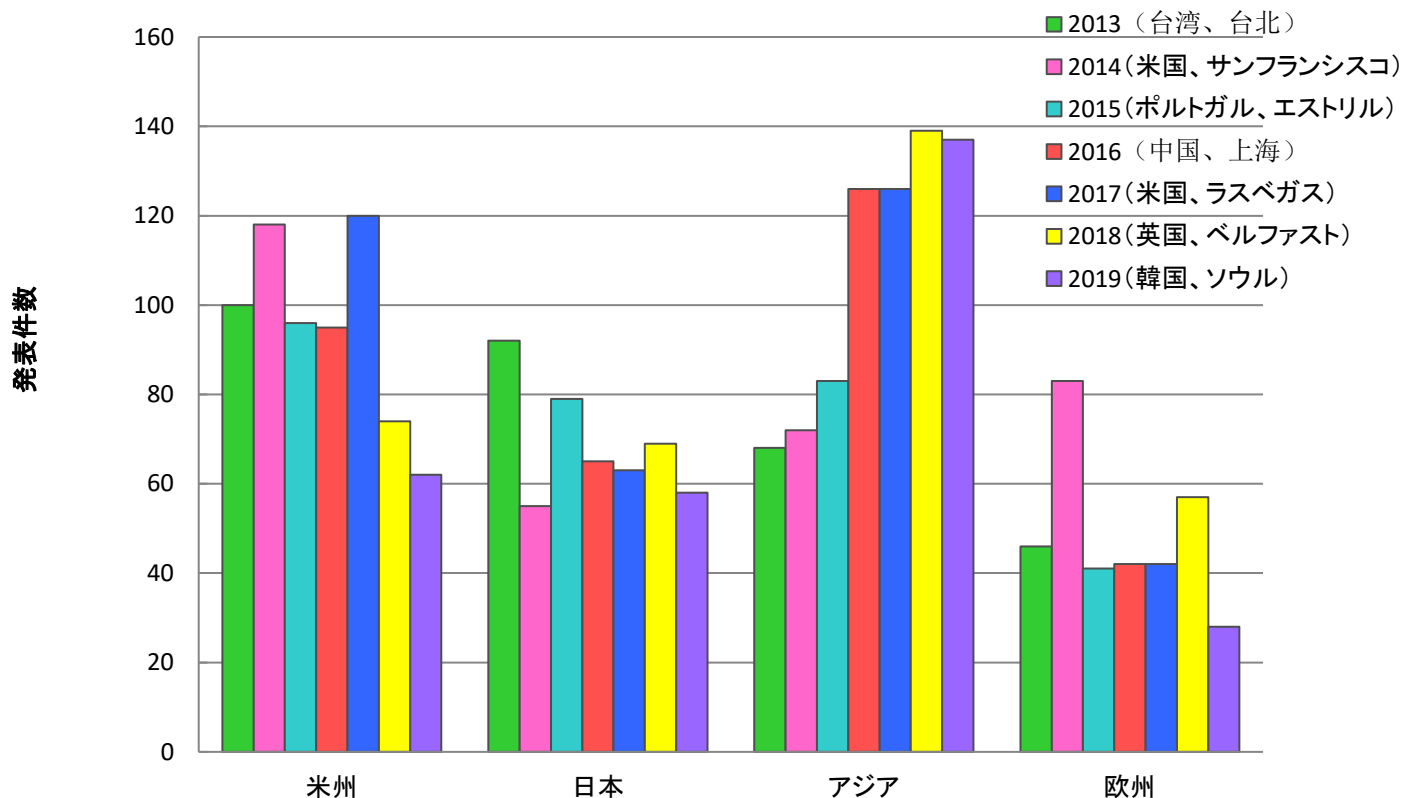
RF-MEMS : オムロン、東芝、富士通、太陽誘電

マイクロフォン: オムロン、ソニー、TDK

光学MEMS : オリンパス、セイコーインスツル、ソニー

製造装置 : SPPテクノロジーズ、アルバック

4.4 世界の研究開発動向



(一財)マイクロマシンセンター「国内外技術動向調査報告書」より
IEEE-MEMSの論文発表件数の推移

マイクロマシンセンターの国内外技術動向調査報告書では、主要国際学会の技術分野別研究論文の件数比較などを行い、研究開発動向をまとめています。

○発表が多い分野は順に、非シリコン製造技術 (Fabrication Technologies (non-Silicon))、機械センサ (Mechanical Sensor)、マイクロ流路 (Fluidics)。

○地域別ではアジアが多く、国別では、中国がトップ、続いて米国、日本と続いています。2017年までは米国がトップでしたが、中国の発表が近年急増し、2018年からは米国を抜きました。

(2019年度報告書)

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

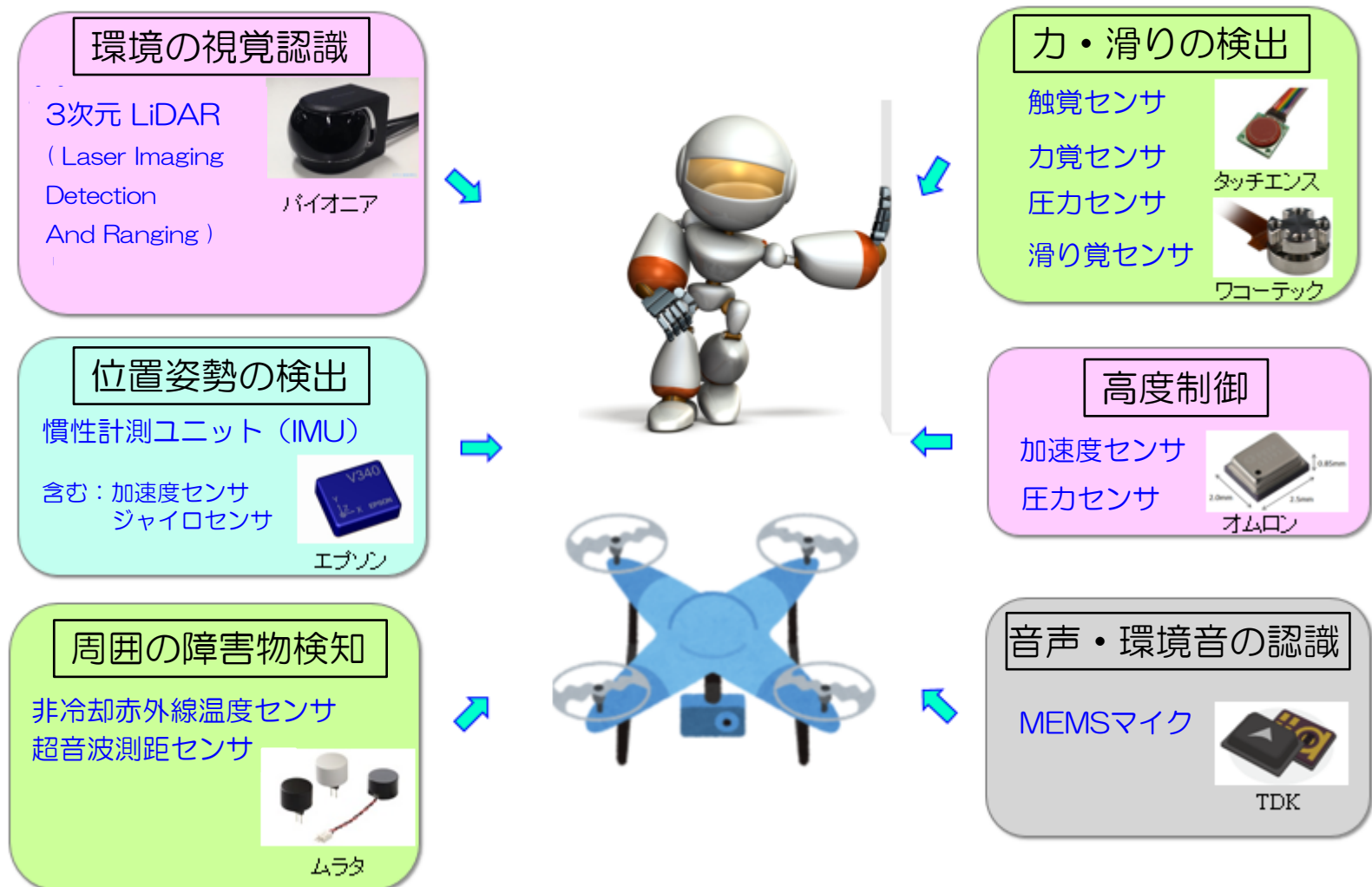


MEMS技術は社会の様々な場面で活用されています。MEMSの小型化の利点を生かして既存部品を置き換える、**単機能デバイス**として、**圧力センサ**、**加速度センサ**、**インクジェットプリンタヘッド**などの製品が大きな市場を形成しています。さらに、自動車、情報通信、安全・安心、環境、医療等の分野におけるニーズに対応し、**超小型・高機能・高信頼性な多機能MEMSデバイス(ファインMEMS)**の実用化が進んでいます。

さらに、社会課題に対応して省エネ効果に寄与するグリーンMEMSセンサと、無線通信機能、自立電源及び低消費電力を付与したシステムの開発を「**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)として実施しました。

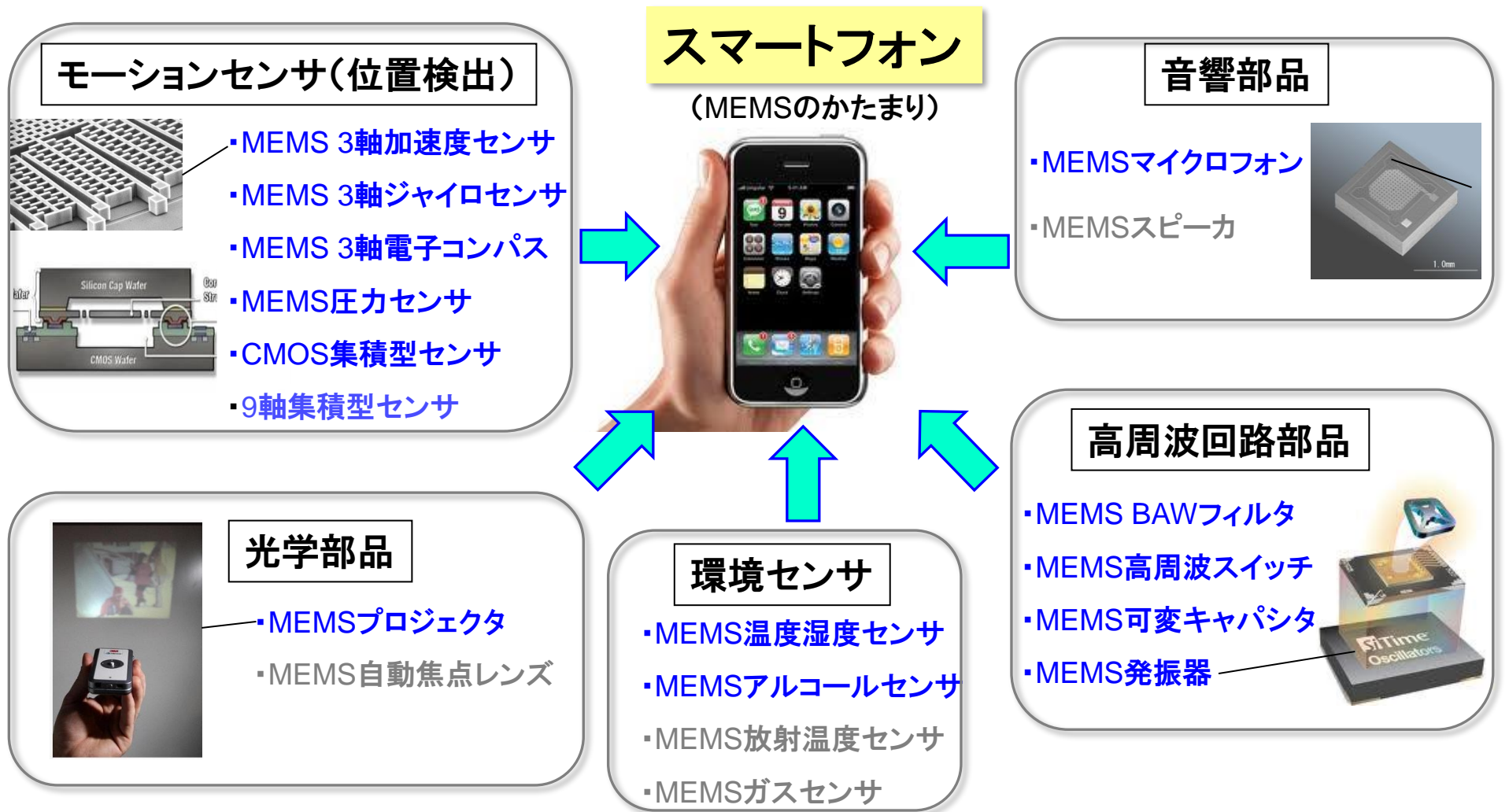
将来社会を展望すると、MEMS技術の発展はナノテク材料技術やバイオ技術と融合して、新たなライフスタイルを創出する**夢のデバイス(MEMSフロンティア未来デバイス; BEANS(Bio Electromechanical Autonomous Nano Systems))**の出現が期待されます。環境・エネルギー、健康・医療、快適生活空間などの分野における画期的な製品の登場が我々の生活を豊かにし、同時にわが国産業の国際競争力強化に貢献していくことが大いに期待されます。

5.2 ロボットの機能や安全性には MEMSセンサが必須



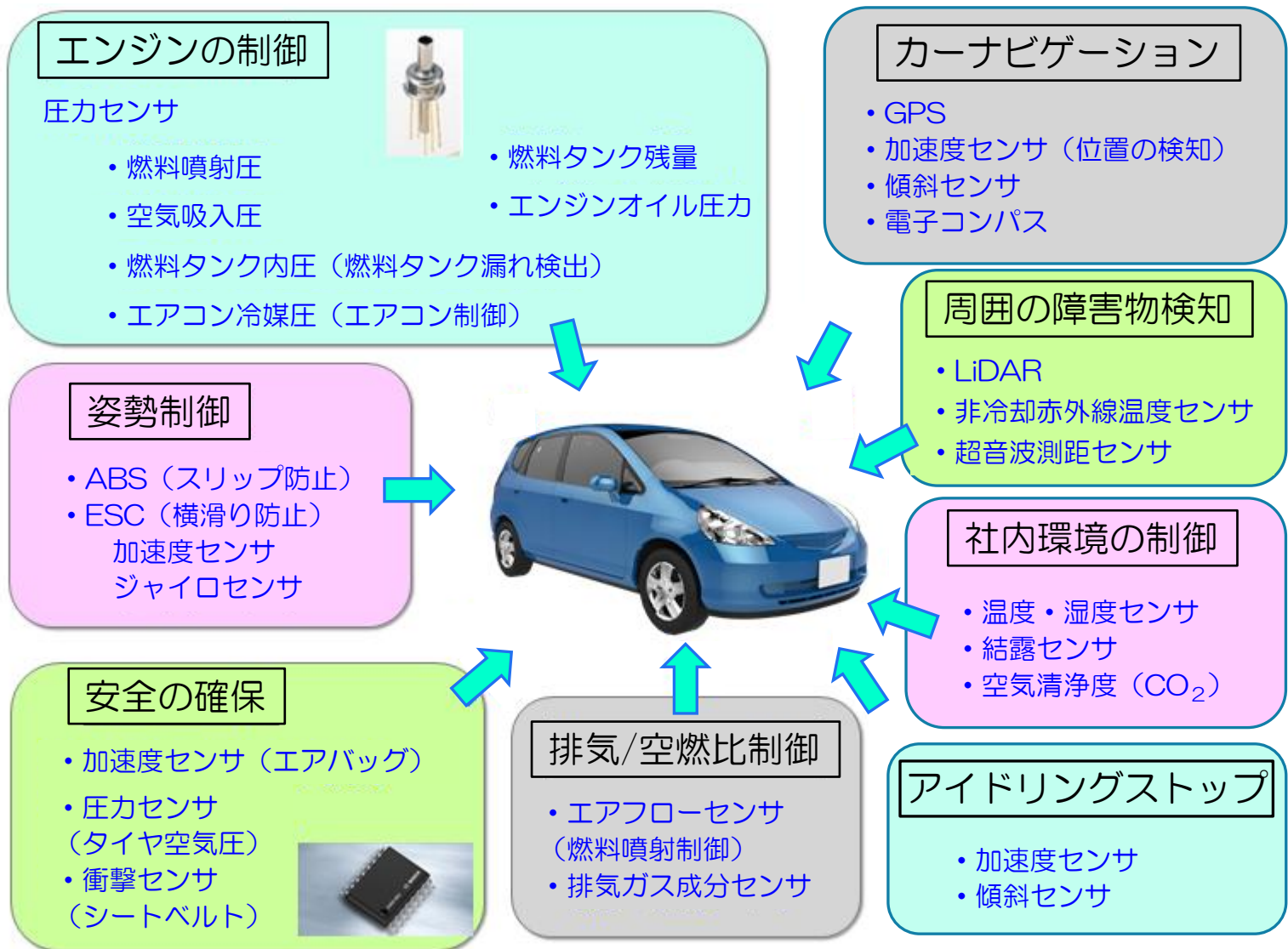
ロボットやドローンに使われるセンサもまた、人間の五感並みに進化しています。例えば環境の視覚認識には3次元LiDARが、ロボットの位置や姿勢の検出には加速度センサやジャイロセンサが、暗闇の中にある障害物などの検知には非冷却赤外線温度センサ等が、物体把持検出には触覚センサ、力覚センサ、圧力センサ、滑り覚センサが、高度制御には加速度センサや圧力センサが、音声・環境音の認識にはMEMSマイクが使われています。生き物の感覚を模しながら、はるかに超えた性能を実現することが現在のMEMSセンサ開発が目指していることであり、ロボットに組み込む知覚・識別・認識機能の進化の方向です。

5.3 MEMSのかたまりスマートフォン



多機能MEMSが開拓したアプリケーションの例は**スマートフォン**です。小型、高性能、低価格なMEMSデバイス無しではスマートフォンは存在し得ないと言えます。通信のためのMEMSBAW(Bulk Acoustic Wave)フィルタ等の高周波回路部品をはじめ位置検出のためのMEMS加速度センサやジャイロセンサ等、音響部品のMEMSマイクロフォン等が使われています。さらに、位置を検出する**モーションセンサ**は**圧力センサ**(大気圧)が加わり、建物の何階にいるかをナビゲーションできるようになります。騒音対策として複数のマイクを搭載したり、アルコール検出等の**環境センサ**を搭載したり、さらには**プロジェクタ**を搭載するスマートフォンも姿を現しつつあります。

5.4 現代の自動車にとってセンサは必須



現代の自動車には様々なMEMSセンサが搭載されています。

エアバッグの衝撃感知には**加速度センサ**が、ESC(横滑り防止装置)には**加速度センサ・ジャイロセンサ**が、タイヤ空気圧監視に**圧力センサ**が活用され、安全性確保に貢献しています。カーナビゲーションシステムにはGPSと共に**電子コンパス**や**加速度センサ**が活用され、快適なドライビングを実現しています。エンジン制御や車内環境維持にも**圧力センサ**や**温度・湿度センサ**が活躍しています。省エネのための**アイドリングストップ**には、**加速度センサ**や**傾斜センサ**が、さらに、今後の自動運転実現のための**周囲障害物検出**等にもLiDARや非冷却赤外線センサ等のMEMSセンサが不可欠となります。

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

：

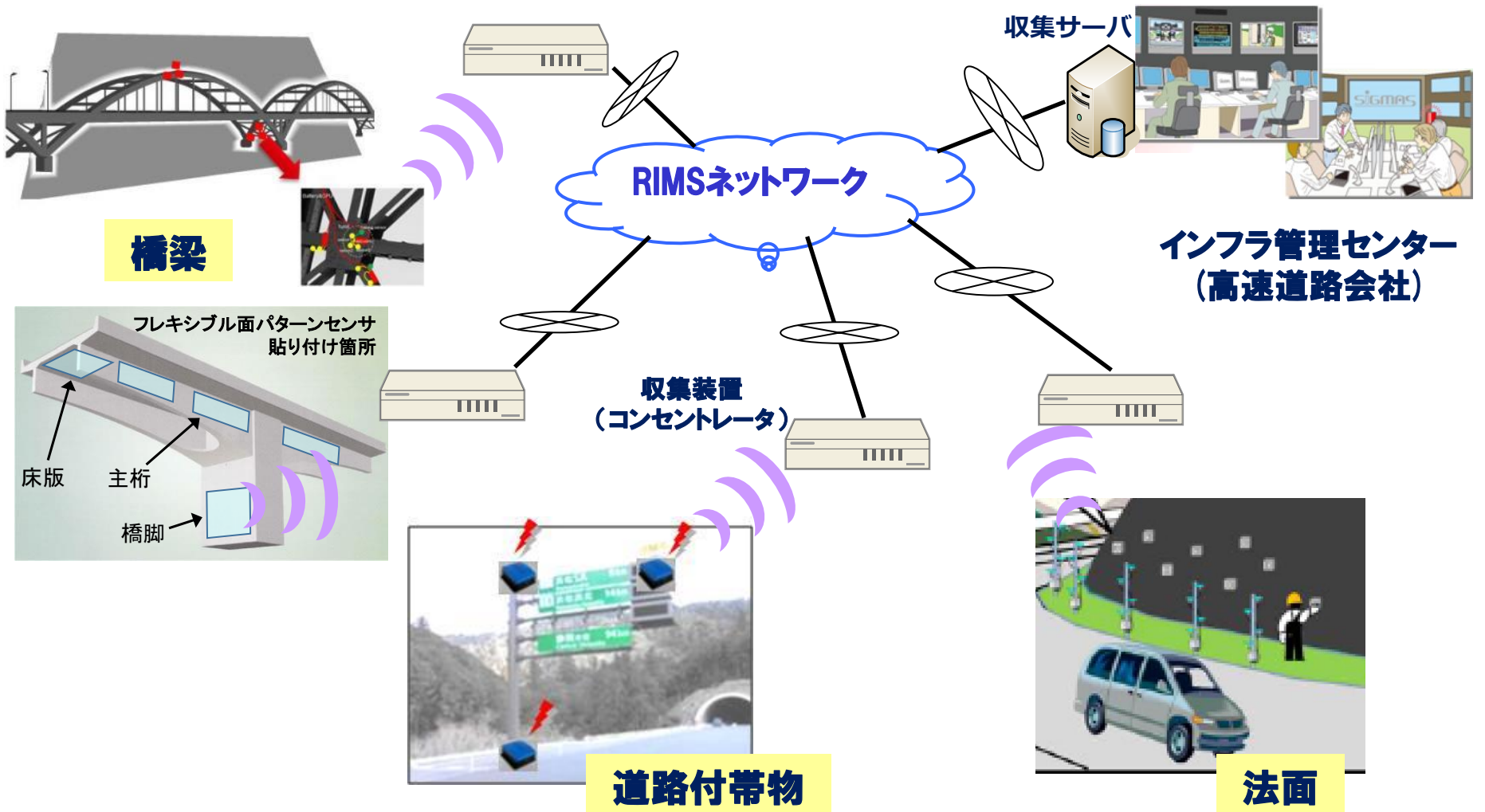


社会の様々な課題への対応策として、センサネットワークを活用した常時・継続的な監視(モニタリング)が期待されています。スマートモニタリングと言われ、様々な対象を常時継続的にモニタリングする事により、適切なメンテナンスによる対象の長寿命化や、障害や事故を事前に把握した適切な対応策を講ずることを目的としています。

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、ますます迫られる省エネルギー化と我が国が直面している課題への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私共は着目しております。

6.2 道路インフラのモニタリング

道路インフラモニタリングシステム概念図



社会課題の一つが道路のモニタリングです。我が国の陸上輸送の9割以上を道路が担っていますが、老朽化への維持・管理が課題です。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)。

- ・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
- ・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
- ・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
- ・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

いずれも自律型電源で、無線ネットワークでインフラ管理センターと結ばれます。実際の高速道路での実証実験実施し、その有効性を検証しました。

6.3 センサ端末同期用原子時計の研究開発

【センサネットワークを時刻同期の手間から解放する超低消費電力原子時計の開発体制】

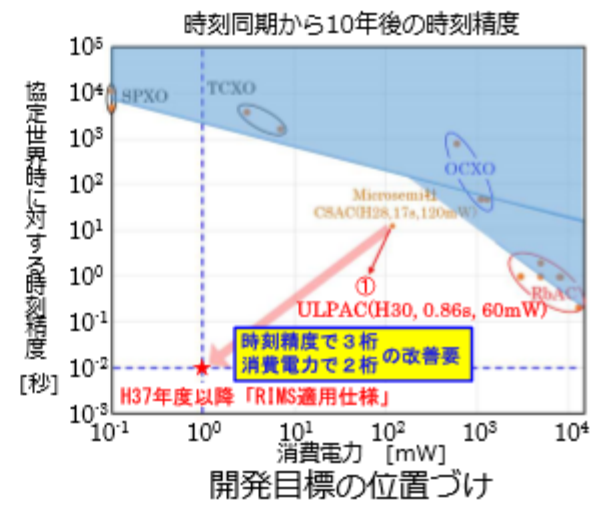
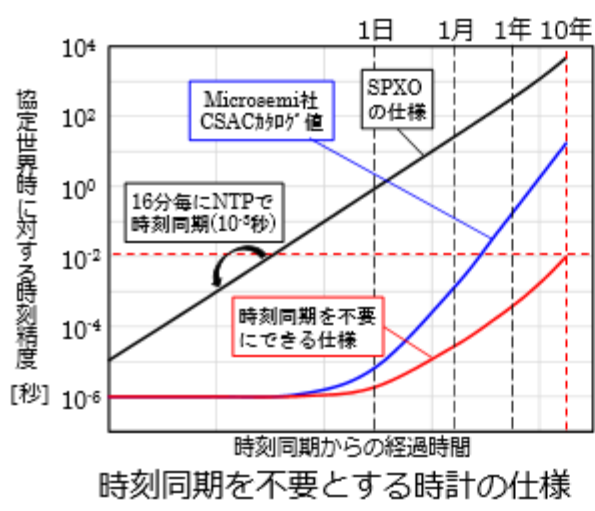
1. ガスセル：時刻精度向上
「環境変動抑制型ガスセル」と
「基準周波数補正技術」による
周波数ドリフトの低減
【産総研、首都大学東京、リコー】

2. 制御回路：消費電力削減
「極低消費電力発振器」と
「PLLレス回路」による
消費電力の削減
【東京工業大学】

3. 励起用レーザ：コスト削減
「波長調整製造技術」による高
精度波長VCSELの高歩留量産
技術の確立
【リコー】

4. 新技術/技術ロードマップ：フォトニック結晶レーザの適用可能性の検討と、事業化に向けた技術ロードマップの策定
【京都大学、マイクロマシンセンター】

超低消費電力 原子時計 (ULPAC) 目標仕様	仕様項目	2015年(CSAC)	2020年	2025年以降
	長期安定度	0.01秒/半年	0.01秒/1年	0.01秒/10年
	消費電力	120mW	60mW	1mW
	サイズ	4×3.5×1.1cm ³	3×3×1.1cm ³	2×2×1cm ³

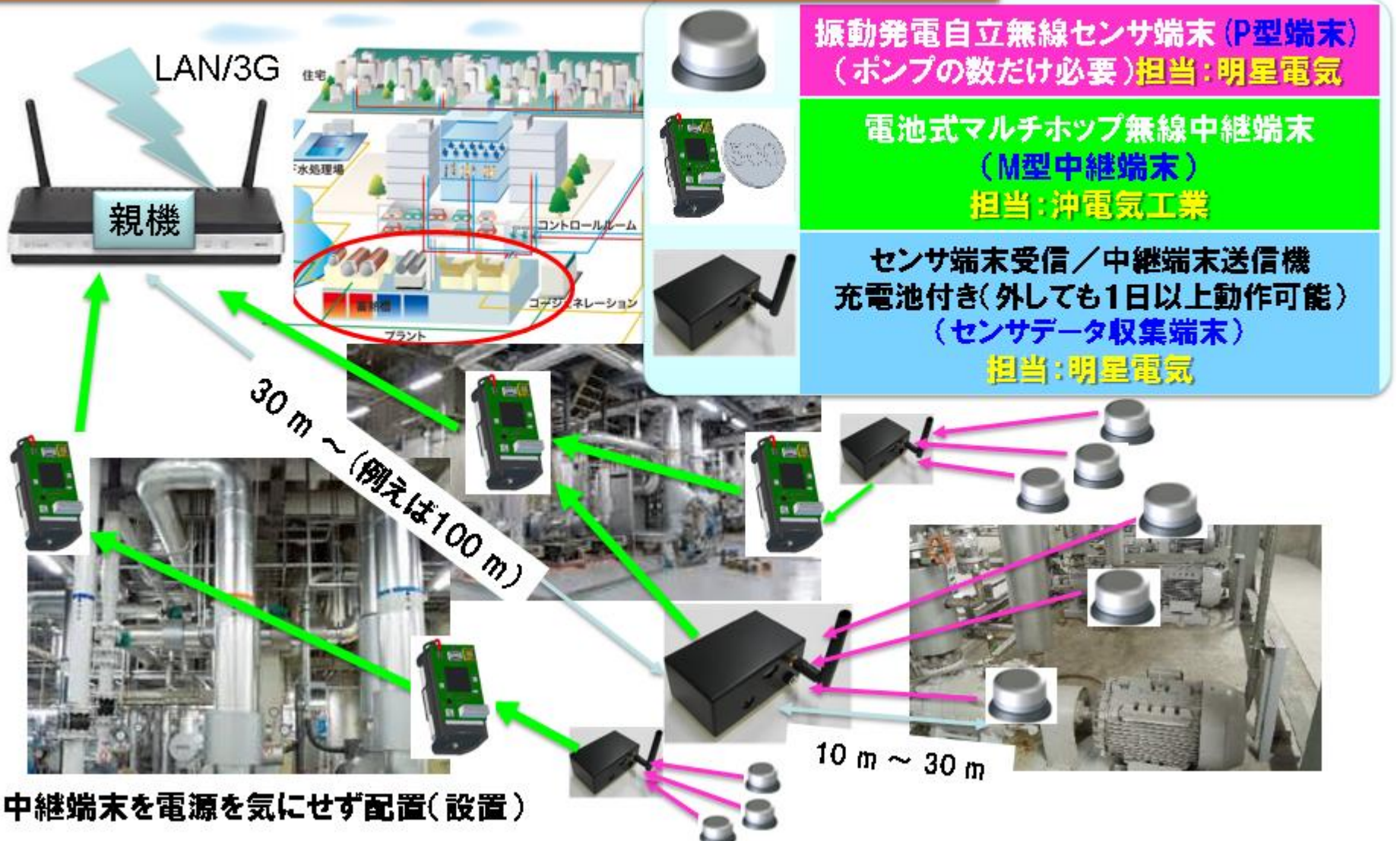


道路インフラモニタリングシステムをはじめとするセンサ端末群は、ネットワークを介して時刻同期をすることで、データ取得の正確な時間を把握し、かつ、データ転送の効率化を図っています。もし、その時刻同期を不要とすることが出来れば、ネットワークの構築や運用にかかる負担を大幅に低減することができます。そこで、正確な時を刻む原子時計をセンサ端末に搭載可能なサイズや消費電力、価格にすることが出来るかを解析や試作を通して、技術的に検討しました(2015年～2018年)。

この目標に最も近い位置にあるのは、米国で軍事向けに研究開発された超小型原子時計CSAC(Chip Scale Atomic Clock)ですが、それを持ってしてもセンサネットワークでの時刻同期を不要とするには、更なる消費電力の削減と長期安定度の向上が必須となります。時刻同期の技術は、センサネットワークだけでなく、パソコンやスマホなど、ネットワークに繋がる機器では当たり前利用されており、実現した時の社会に与えるインパクトは計り知れません。これを実現するために、世界の標準時間を司る高精度な周波数を作り出している産総研を中心に、国内で原子時計の小型化に取り組んできた大学や企業を集結し、その可能性の限界を追求しました。

6.4 産業インフラのモニタリング

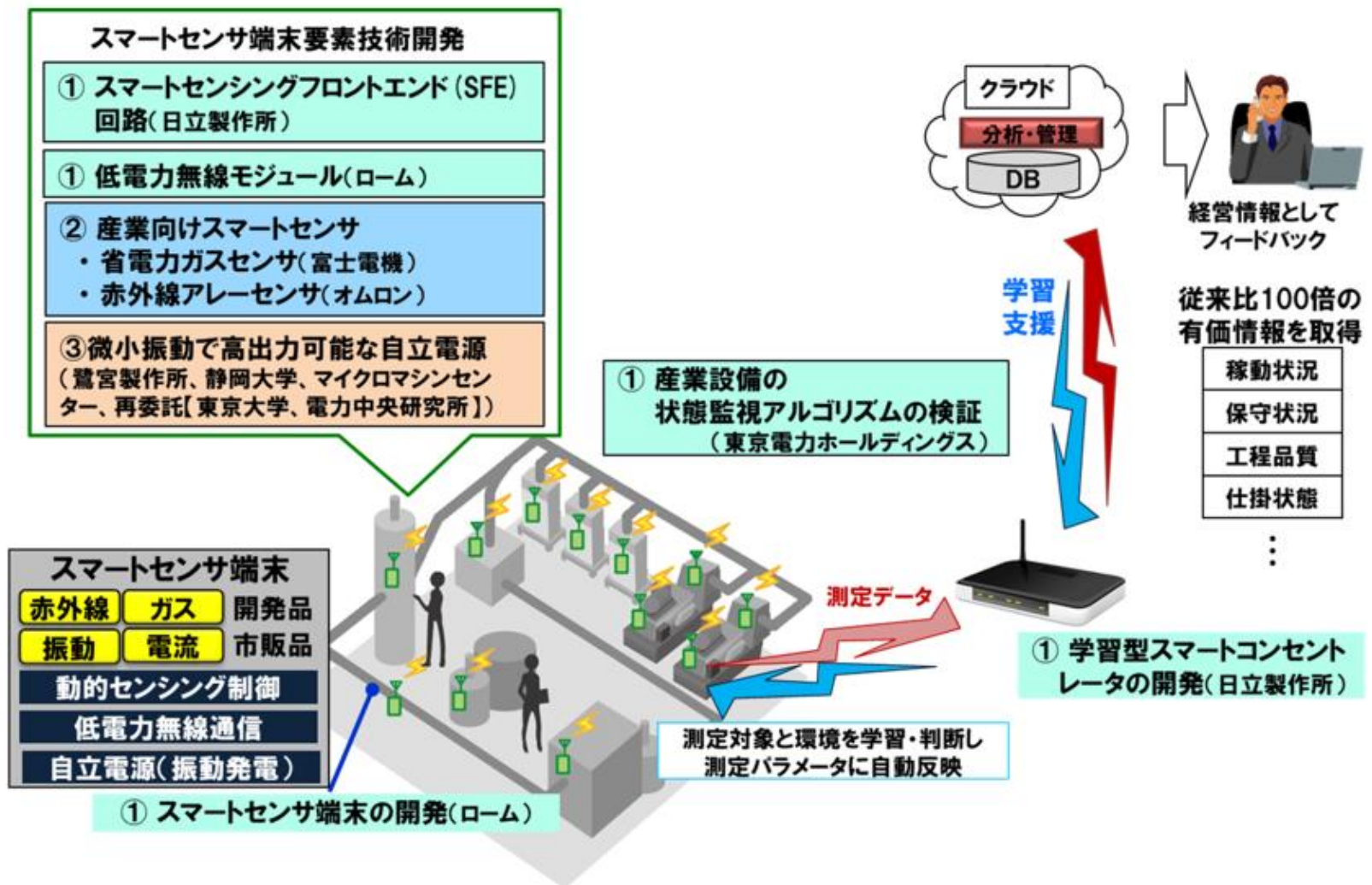
柔軟なルーティングが可能なマルチホップ中継端末と片方向通信
(低コスト)センサ端末を適切に組み合わせてネットワークを構成



日々、何気なく使っている電気・ガスや水道、私達の生活は様々な都市機能に支えられています。これらライフライン系の都市インフラ(電気、ガス、上下水道、情報、エネルギー)の安全な保全のための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にあたるモータ、ポンプ、コンプレッサ等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。

6.5 超高効率データ抽出機能を有する 学習型スマートセンシングシステムの研究



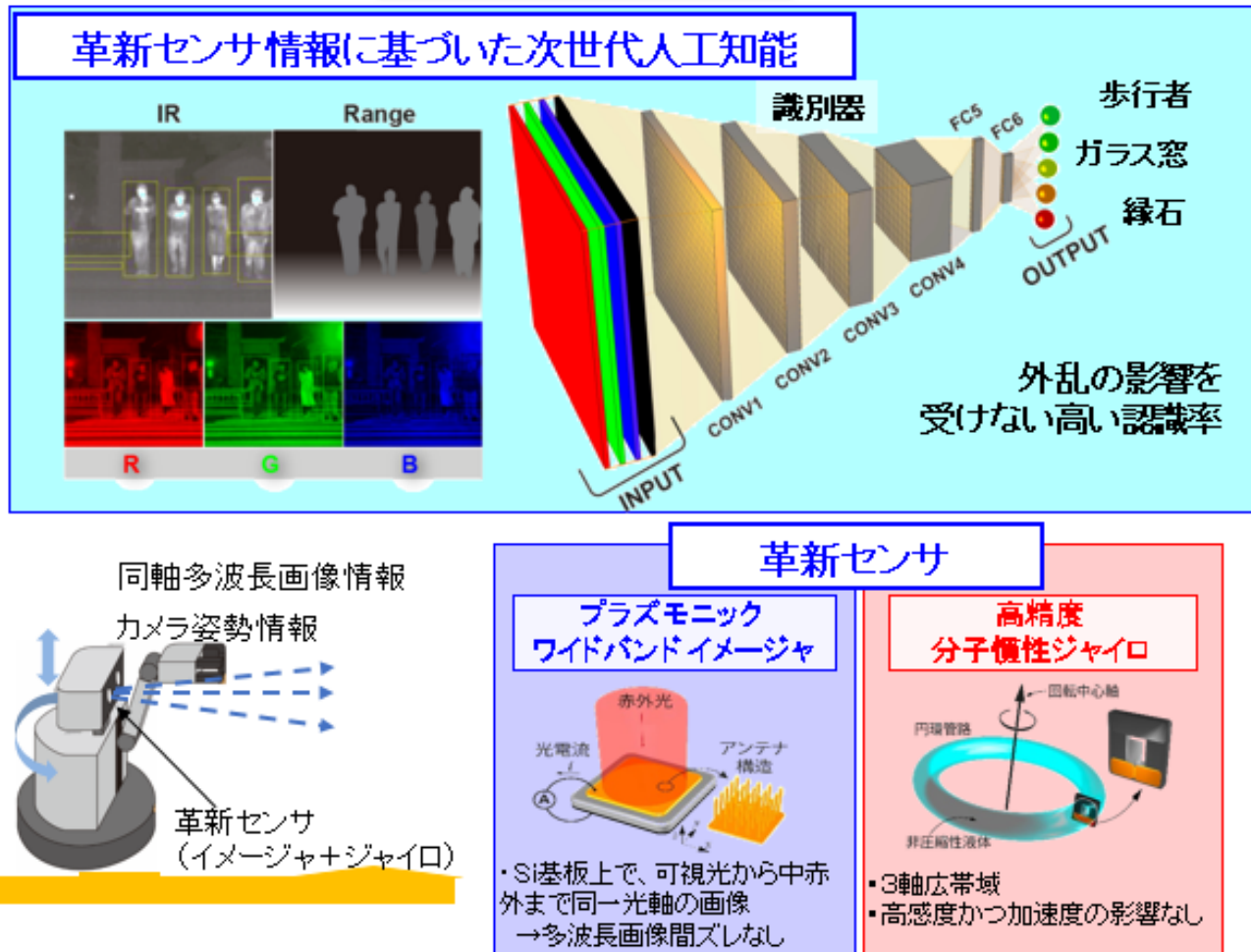
本研究開発では、大規模工場・プラント等の生産・原動設備の稼働状況・生産品質の把握を適切かつ効率的に行うことを目的として、スマートセンサモジュール(ガス、赤外線アレー)、設備の微小振動で連続的な高出力可能な自立電源の開発及びスマートセンシングフロントエンド(SFE)回路の開発を行います。

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す。

これらを総合的にまとめて、従来の環境発電で収集可能な有価情報量の100倍化を可能とする学習型スマートセンシングシステム(LbSS)の基盤開発と実証を行います(2016年～2020年)。

7 革新センサへの期待

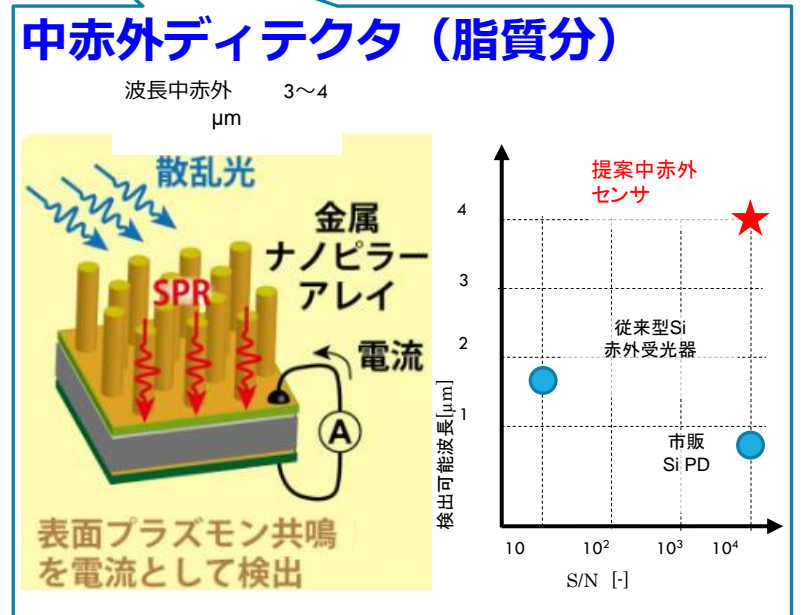
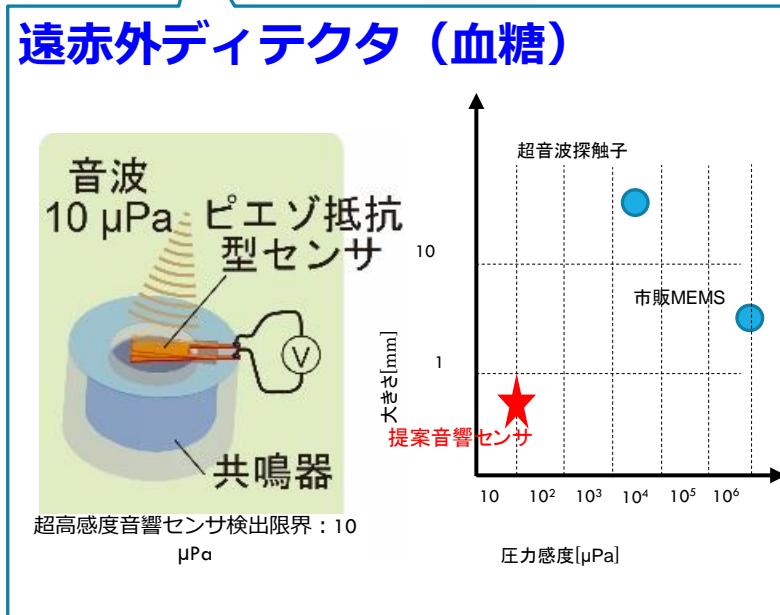
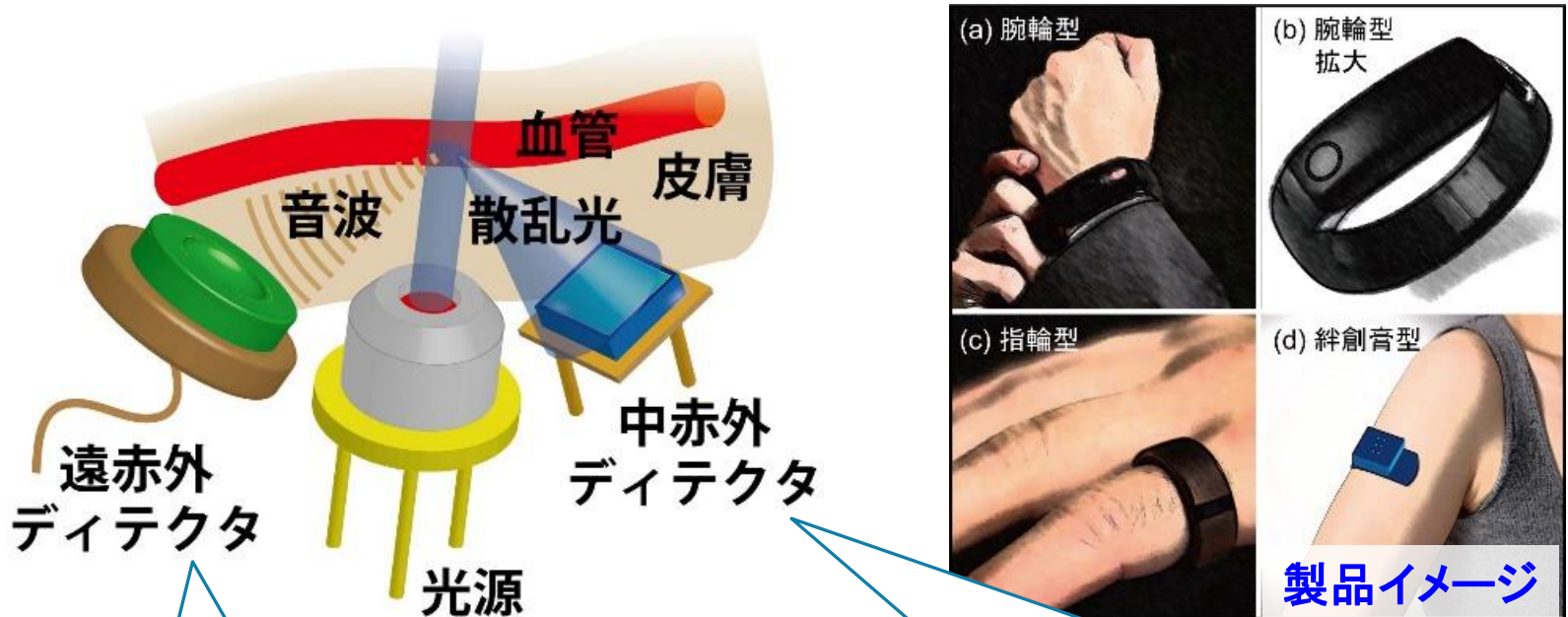
7.1 空間移動時のAI融合高精度物体認識システムの研究



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)。

- ・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
- ・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
- ・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

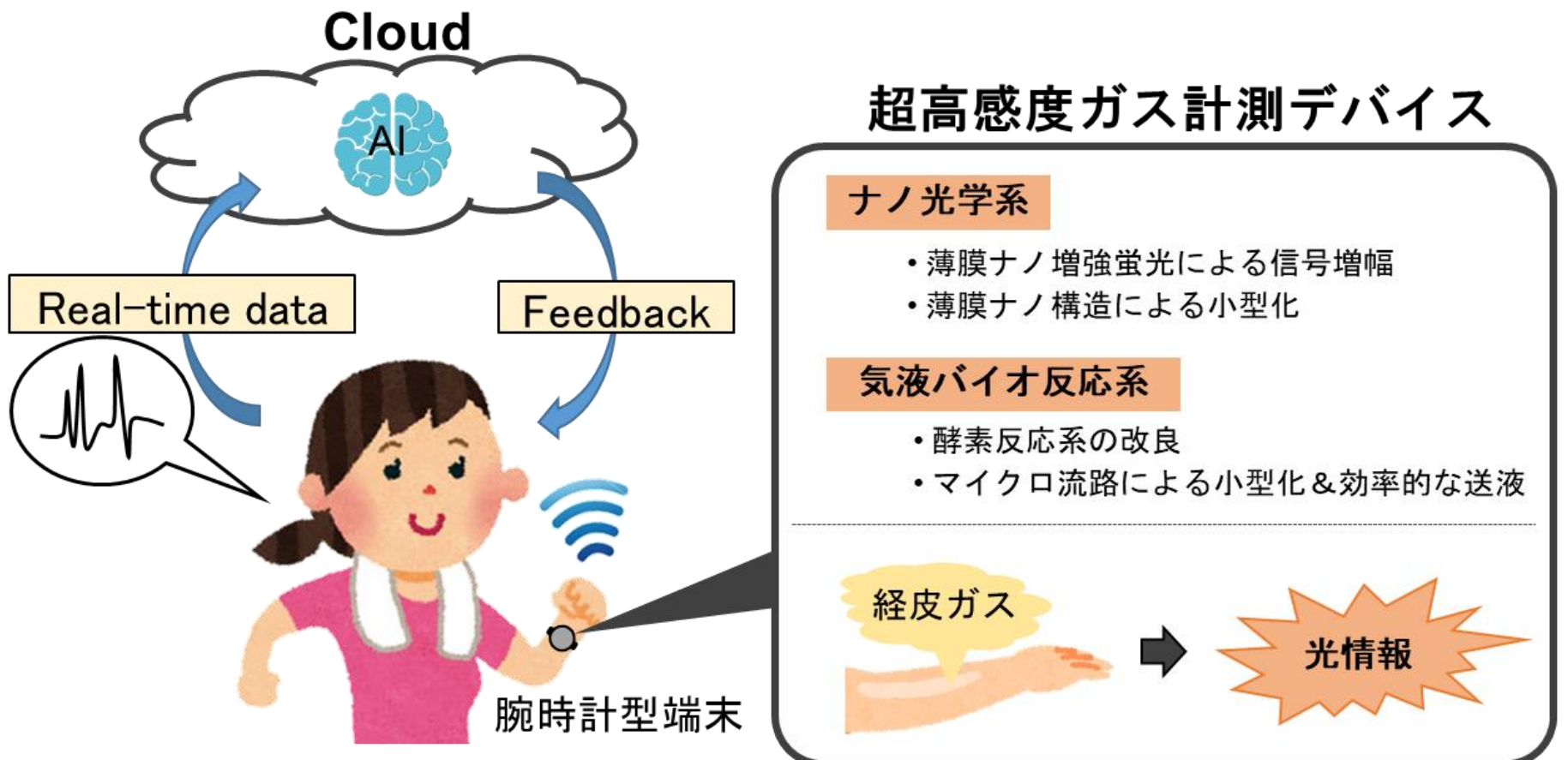
7.2 血中成分の非侵襲連続超高感度計測 デバイス及び行動変容促進システムの研究



糖尿病・高脂血症・肥満など死に至る疾病を早期に発見するため、血糖値や血中脂質を、針を刺す等の人体に傷をつけることなく常時モニタする超微量センシング技術の開発を行っています(2019年~2021年)。

- ・血糖値を計測する遠赤外ディテクタの開発
- ・脂質分を計測する中赤外ディテクタの開発
- ・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

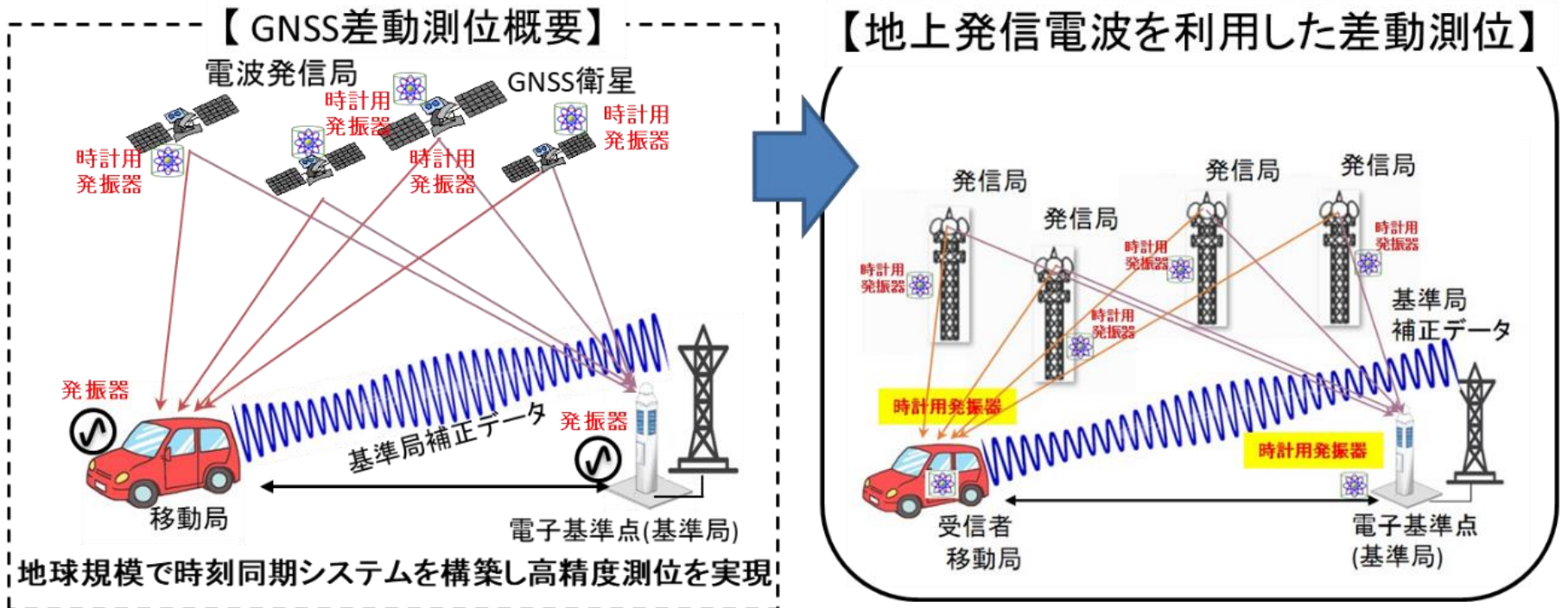
7.3 薄膜ナノ増強蛍光による経皮ガス成分の超高感度バイオ計測端末の開発



呼気中に含まれるアセトンガスが、健常者・糖尿病患者では濃度に違いがあることが確認されています。糖尿病の早期診断のため、血糖値を、針を刺す等の人体に傷をつけることなく経皮アセトンガスを検出、常時モニタする超微量センシング技術の開発を行っています(2019年～2021年)。

- ・経皮アセトンガスセンサの開発
- ・センサを集積化したウェアブルな機器の開発

7.4 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

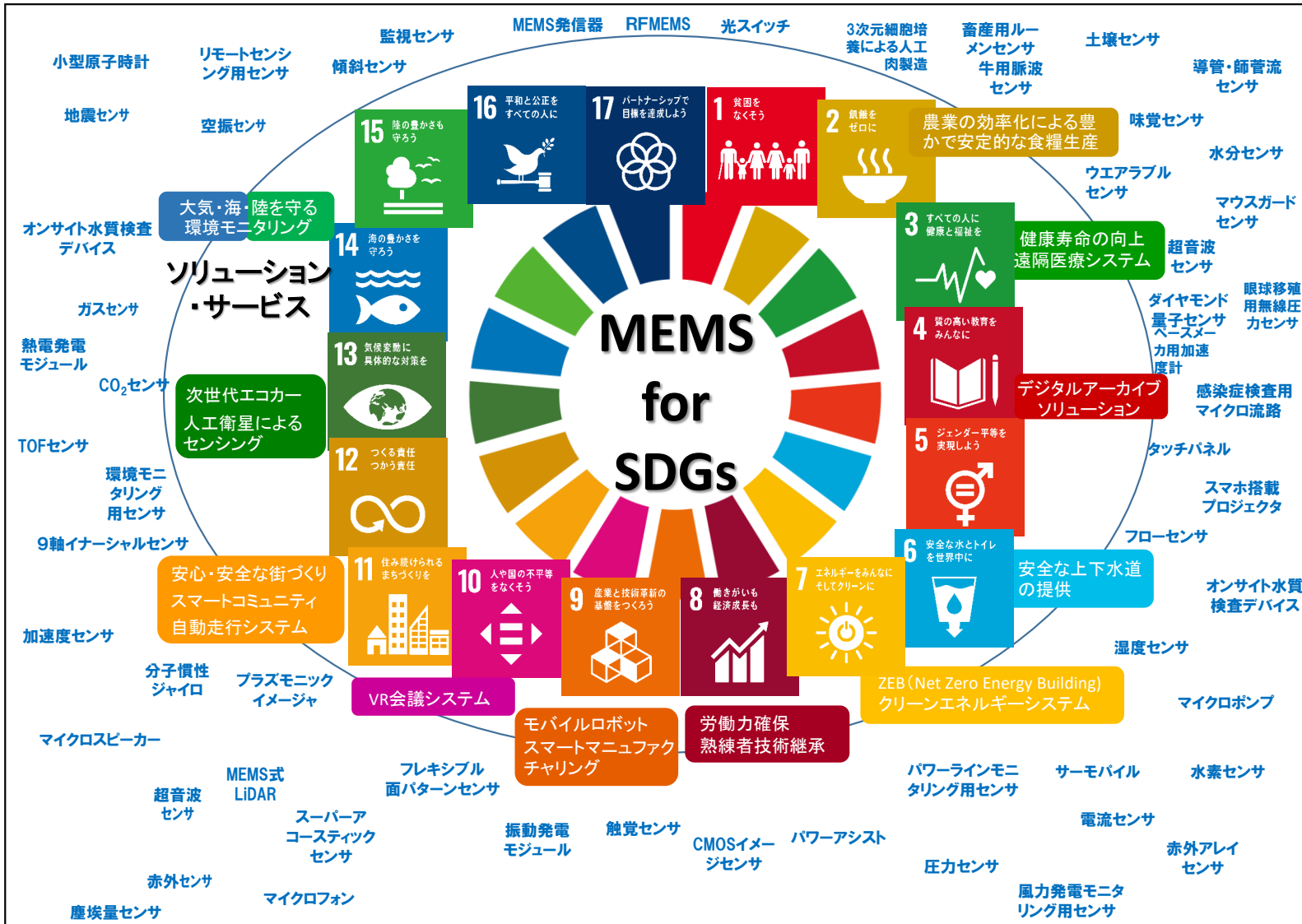


本プロジェクトでは、NEDO委託事業(ULPAC)の成果のさらなる高精度化を推進するため、自動車等の移動体及び第5、第6世代の移動通信基地局への搭載を想定し、市販されている測位衛星搭載レベル時計用発信器の性能をほぼ維持したままで、小型・低消費電力化した小型時計用発信器を実現する技術を確認致します。このため、小型時計用発信器の周波数変動要因を基礎から解明するとともに、高安定な小型時計用発信器(High Stability Ultra Low Power Atomic Clock(HS-ULPAC))のプロトタイプを試作して、移動体への搭載環境下で評価・実証致します(2019年～2022年)。

- ・周波数シフトとその変動要因の解明及びその制御技術の確立
- ・水晶発信器の最適化技術の確立
- ・量子部の最適化技術の確立
- ・プロトタイプモジュールの最適化技術の確立
- ・周波数変動要因評価技術の確立

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)のそれぞれを達成するためには、様々なデータから、社会課題を分析し、課題解決の手段を示すという必要があります。フィジカル空間から種々の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。

上図のように国内企業の事業活動等を中心として SDGs へのセンサ・MEMS の貢献をまとめてみますと、あらゆるソリューション・サービスの外周に、センサや MEMS を当てはめていかなければならず、MEMS やセンサの貢献が必須であることが分かります。

8.2 環境調和型MEMS技術の研究開発に関する戦略策定

環境に配慮した環境調和型MEMSで
実現する「地球環境共生社会」



インフラ・災害・農業モニタリングなどの環境モニタリングを行うためには、屋外に多数のMEMSデバイスを含むセンサを設置する必要があります。しかし、屋外に広範囲に設置されたMEMSデバイスを使用期限が切れた等により回収することは困難です。回収されずに自然界に放置されると、MEMSデバイスに汚染物質や自然分解しないプラスチックの様なものが含まれていると環境破壊につながり、大きな問題となります。

このような問題を解決するために、環境に配慮した環境調和型MEMSの研究開発の戦略策定の検討を行っています(2020年)。

- ・環境調和型MEMSを実現するためのインフラ、災害・農業分野での技術及び応用の検討
- ・自然に還る材料と自然の中に固定化する材料の探索とそのような素材を用いた環境調和型MEMSの検討
- ・上記環境調和型MEMSデバイスを低炭素で作製する製造技術の検討