

## 2.3.4 MEMS・センシングデバイス

### (1) 研究開発領域の定義

健康で便利に暮らせ安心・安全なスマート社会の実現にはInternet of Things (IoT) が重要であり、その主要な構成要素としてMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) センサを代表とするセンシングデバイスの技術開発を目的とする。MEMS センサや化学センサなどセンシングデバイスの高感度化、高信頼化、低消費電力化、小型軽量化、低コスト化、MEMS プロセス技術の高度化、複数のセンサの融合、プリントドエレクトロニクス技術などの研究開発課題がある。

### (2) キーワード

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)、弾性波デバイス、慣性センサ、マイクロフォン、LiDAR、圧電デバイス、化学センサ、バイオセンサ、分子識別センサ、匂いセンサ、ガスセンサ、電気化学デバイス、グラフェンFET、アプタマー、集積化、アレイ化、5G、セキュリティ、ストレス

### (3) 研究開発領域の概要

#### [本領域の意義]

Society 5.0やIoTに代表されるスマート社会を築くために、人工知能や通信 (ネットワーク) と並んで主要な構成要素がセンサ (センシングデバイス) である。センサは人工知能や制御システムの入力となり、その応用はIT機器、オーディオ機器、ロボット、ドローン、VR・ARシステム、自動運転車、医療機器など、今後のイノベーションのキーとなるほとんどのシステムに広がっている。これらの応用のためのセンサとしては、画像・映像を取得するイメージセンサや、加速度、圧力、音などの多様な物理量を検出・測定可能なMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) センサがもっとも重要であるが、今後はこれらに加えて健康・医療などの応用分野で安定して使い易い化学センサ (バイオセンサ、分子識別センサ、匂いセンサ、ガスセンサなど) の開発も期待され、各種の物理センサや化学センサと集積回路 (IC) やプリントドエレクトロニクス (Printed Electronics) との組み合わせも重要になる。イメージセンサはすでに企業主体の開発フェーズにあるため、本領域ではMEMS技術、MEMSセンサおよび化学センサを中心に扱う。

MEMSセンサに代表される物理センサは、アカデミアから企業まで高性能化、小型化、低価格化などに対する研究開発がダイナミックに進展している。一方、有害物質のモニタリング、病気診断、健康管理などで用いられる化学センサの研究開発は大きく遅れている。多くの化学センサでは、センサ部位が外界と接触しなくてはならず、集積化エレクトロニクスで培われてきたパッシベーション技術 (デバイスの堅牢性を担保する表面保護技術) を適用することが本質的に困難であり、安定性や再現性を確保するために使用のたびに表面清浄化やキャリブレーションなどが必要な状況にある。今後は個々のセンサの性能向上だけでなく、この問題点を克服する必要がある。また、各種の物理センサや化学センサをアレイ化・集積化することでさまざまなデータ・情報を併せて取得することを可能にし、新しい価値の創造や産業展開を期待したい。

スマート社会に関連する産業では、欧米中のサービスプラットフォームが覇権を握り、高い利益率を確保しているが、それ以上に高い利益率を確保しているのがデバイス・モジュールメーカーである。実際、DRAMの利益率は変化が激しいものの平均的には高い水準にあり、また、弾性波フィルタとそれを含む無線フロントエンドモジュールの利益率も高い水準にある。日本の企業がサービスプラットフォームに食い込むことは容易ではないが、デバイス・モジュールに強い企業が多く、また、この図式は自動運転やカーシェアリングが急速

に進む自動車産業にも広がる可能性があり、日本にとって本研究開発領域の重要性は極めて高い。

## [研究開発の動向]

### (a) MEMS技術・センサ

MEMS技術によるセンサとしては、スマートフォンを例にとると、マイクロフォン、加速度センサ、ジャイロスコープ、および圧力センサ(気圧センサ)などが使われている。また、クロック発振器の一部もMEMSである。これらのセンサの技術は継続的に革新され、その結果、低コスト化・小形化と高性能化が進んでいる。小形化について、例えば、加速度センサの大きさは、最近5年でチップ面積にして約1/10になっているが、これはウェハレベルパッケージングやTSV(Through Silicon Via)といった技術の高度化によるところが大きい。

高性能化については、自動運転やロボット制御などに用いられるジャイロセンサとLiDAR(Light Detection and Ranging)、音声認識のためのマイクロフォン、資源探索等のための重力センサ(高感度加速度センサ)などの研究開発が進んでいる。現在、自動運転に用いられているジャイロセンサは、100万円台以上と高価な光学式であり、MEMSジャイロセンサを高性能化することによってこれを置き換えることが期待されている。ほぼ同じことがLiDARにもいえる。音声認識率はマイクロフォンの性能によるところが大きい。2018年から2年の間に新方式のMEMSマイクロフォンがInfineonによって実用化され、最新のTWS(True Wireless Stereo)イヤホンに使われている。高性能MEMSマイクロフォンを用いて、CO<sub>2</sub>をフォトアコースティック法で検出するガスセンサも登場している。

まだ実用化されていないが、研究開発が行われているものとしては、イメージセンサと組み合わせて用いるMEMS方式の手ぶれ防止アクチュエータと可変レンズがある。現在、手ぶれ防止はボイスコイルモータでレンズを並進させることで実現されているが、CMOSイメージャをMEMSで並進だけでなく回転させれば、回転方向の手ぶれも補正可能になる。その他、ロボットの機械学習に用いる触覚センサ、環境認識や医療などに用いられるハイパースペクトラムイメージャ、ボタンレスタッチセンサなども研究開発されている。

### (b) MEMS技術による弾性波フィルタ

MEMS技術の主要な用途はセンシングであるが、通信分野でもその重要性が高まっている。無線通信フロントエンドモジュールにおいて周波数選別を担うのがMEMS技術によるBAW(Bulk Acoustic Wave)フィルタやSAW(Surface Acoustic Wave)フィルタといった弾性波フィルタであり、第5世代通信規格(5G)の普及やポスト5Gに向けて、性能向上が求められている。5Gでは、3.5 GHz帯と4~5 GHz帯、およびミリ波帯の28 GHz帯が新たに使えるようになる。長距離の無線通信に適した周波数は数百MHzから6 GHzの領域であり、従来から用いられている900 MHz~2.5 GHz帯は非常に混雑しており、キャリアアグリゲーションに代表される高度な利用法が進み、弾性波フィルタへの技術的要求(挿入損失、温度安定性、カットオフ特性、線形性、パワーハンドリングなど)はますます高くなっている。また、5G用に新たに割り当てられた高い周波数領域(3.5 GHz帯、4~5 GHz帯)に対応するため、弾性波フィルタには今までにない技術が求められる。現状、この周波数帯では弾性波フィルタは用いられていないが、遠くない未来に効率的利用のため弾性波フィルタが必要になる。ポスト5Gでは、さらに高い周波数でも弾性波フィルタが用いられることが予想されており、そのための研究開発が始められている。

### (c) 化学センサ

化学センサにはガスセンサのように空気中で特定の分子をモニタリングするものや、血液中のバイオマーカー

の検出のように溶液中で特定の化学物質を検出するものなどがあるが、基本的な検出方法はほぼ共通している。それぞれの目的に沿って検出する分子・物質と特異的に相互作用する認識分子（核酸、ペプチド、タンパク質、低分子化合物など）を電気化学デバイス（トランジスタ）や光素子のトランスデューサ上に付着しておき、分子・物質と認識分子との相互作用による電気信号や光信号の変化を検出している。一般的に検出する分子・物質の量は少ないので、化学センサの高感度化は重要な課題となっている。また、先に述べた安定性や再現性の問題についても克服する必要がある。さらに、測定する空気中や溶液中には目的とする分子・物質以外にもさまざまな夾雑物が混じっているため、高選択性を得る手法や、低選択性の認識分子の場合にも異なる種類の測定から目的の分子・物質の濃度を導き出す手法を見つけることが重要である。

化学センサの研究開発では、ガスセンサや抗原抗体センサのように、既知の限られた特定の分子種を計測する従来タイプのもの、空気中や溶液中に存在する多種多様な分子群を網羅的にセンシングして、個々の分子に対する選択性は高くなくとも複数のセンサで得られたデータから望みの分子の量を求めるような新しいタイプのものに大別することができる。従来タイプのセンサ研究開発では、例えば、すでに実用化されているガス検知器のような消費電力、デバイスサイズ、安定性等の素子スペックの要請が厳しくない分野に応用展開が図られてきた。一方、IoTには低消費電力、制御性、分子選択性、堅牢・安定性等が要求されるため、これら従来タイプのセンサ研究開発で培われた技術をそのままIoTに適用することが困難である。このため、IoTに適した新たな化学センサの技術や、複数のセンサをアレイ化・集積化した新しいタイプの研究開発が強く求められるようになってきている。

これらの新たな要求に対して、カーボンナノチューブ（CNT）やグラフェン、ナノ構造金属酸化物などのナノ構造体を用いた化学センサ、センサアレイの研究開発が活発化している。ナノ構造体は高い表面对体積比と表面自由エネルギーを有していることや、量子効果の発現やバルクとは異なる特異なバンド構造のために高い移動度を有するなど、センサの高感度化と低消費電力化につながる可能性があり、期待が高い。

複数の分子・物質の同時検出、化学反応の可視化のために、集積回路技術と化学センサの融合によるアレイ化技術が注目されている。多くの生体反応は単一の化学物質を見ているだけでは判断できず、多項目の組み合わせの理解が重要と考えられ、機械学習の活用により、これが可能になりつつある。その代表的なものが匂いのセンシング技術分野であり、複数の匂い検出膜を用いて同時に検出し、機械学習により匂いの物質と量を推定することがなされている。このような複数の分子・物質の情報の可視化（デジタル化）は医療・健康分野だけでなく、環境など他の分野への展開が期待されている。

化学センサの応用としては、先に述べた健康・医療分野だけでなく、環境、安心、豊かな暮らしなどへの展開が期待されている。身体の状態だけでなく、ストレスや心の状態を知るために、血液中に分泌されるホルモンなどを検出するセンサ（ストレスセンサ）の研究開発も進められている。また、農業分野の応用をめざして、土壌のセンシング、植物体の活動センシングなどの研究も活発になってきている。

#### (4) 注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

##### (a) MEMS技術・センサ

MEMSはこれまで広くセンサに用いられ、産業的にも成功を収めているが、アクチュエータに用いられて成功した例は限られており、インクジェットプリンタヘッドが唯一の産業的成功例である。しかし、最近、圧電材料をはじめとする技術の進歩によって、新しいMEMSアクチュエータが実用化されつつある。具体的には、LiDAR、ARヘッドセット内の画像投影、配向制御などに用いられる走査型マイクロミラーデバイス、カメラ

の手ぶれ防止アクチュエータ、可変ミラー、MEMSスピーカなどである。これらの技術の多くは、大学や公的研究機関の技術をシーズにしてベンチャー企業で開発されており、本研究開発領域でもシーズ技術がベンチャー企業によってスピード感を持って実用化される動きがますます顕著になっている。これらのうちでも、最近、特にLiDARの研究開発競争が熾烈であり、大手企業とベンチャー企業が入り乱れている。LiDARを研究開発している企業は50社を下らないと思われ、各国で公的資金も投入されている。LiDARには、従来からある機械走査型、走査型マイクロミラーデバイスを用いたMEMS型、およびソリッドステート型がある。機械走査型は高性能であるが、値段と大きさが問題であるため、MEMS型とソリッドステート型がさかんに研究開発されている。

SAWフィルタは無線通信に欠かせないデバイスであるが、10年以上前にはおおよそ技術的に成熟し、その後、非連続な進歩から遠ざかっていた。その間、競合するBAWフィルタは日本発の新圧電材料ScAlNの導入などもあり、欧米企業によって技術的にも事業としても大きく発展した。しかし、最近、厚さ1 $\mu\text{m}$ 程度以下と薄い単結晶圧電材料をシリコンや水晶の基板で支持した構造が利用可能になり、新しいSAWデバイスや派生デバイスが登場し、実用化が進むとともに研究開発が活発化している。この技術では、日本が先行し、欧米が追っている。中国では、無線通信システムの基幹部品である無線フロントエンドモジュールを国産化するための投資が活発になっている。現在、SAWフィルタとBAWフィルタの研究開発に取り組む中国企業は、それぞれ10社を下らず、そのなかには既存企業もベンチャー企業も含まれる。

## (b) 分子センサ技術

さまざまな応用に向けて、新たな材料、検出原理、作製プロセスによる超高感度の化学センサの研究開発が活発になっている。例えば、グラフェンFETによる化学センサにおいて、単層グラフェンを活用することで、緩衝液およびヒト血清サンプルで、それぞれ600 zmol/Lおよび20 amol/Lまでの超高感度検出が可能との報告がある。また、a-IGZO FETを活用したさまざまなイオンセンサが実現しており、0.001 pHの分解能が得られた報告もある。

酵素/抗体フリーおよびラベルフリーのバイオセンシングのために、MIP（分子インプリンティング）技術が活発化している。MIPはCMOS型/FET型のゲートに修飾することができ、生体-電気インターフェースに適している。ゲートにMIPコーティングされたFETセンサは、標識された材料を使用せずに、グルコース、ドーパミン、シアル酸、オリゴ糖などのさまざまな小さな生体分子を選択的に検出できる。

通常FETバイオセンサは中性の分子を捕獲しても信号を得ることはできない。一方、アプタマーのような核酸分子は、ターゲット分子を捕獲して二次構造が変化することが報告されており、例えば核酸を構成するリン酸基は負電荷を持っているため二次構造変化は電荷分布の変化をもたらし、検出可能となる。これまではターゲット分子が引き起こす化学反応を利用して、pHの変化などにより間接的に検出する方法が知られていたが、一本鎖のDNAアプタマーを固定化したFETバイオセンサにより、中性のストレスホルモンであるコルチゾールを高い感度で検出することが確認されている。

印刷技術で作製して体に装着できる化学センサにより、汗からの様々なイオンやバイオマーカをセンシングした報告が増えている。通常のイオンFETと同様に、バックゲート側に酵素、抗体、イオノフォア（ionophore）等を固定化することで実現しており、PEDOT:PSSを基板材料とした有機トランジスタやIGZO、グラフェンなどを用いたものがある。

化学センサをアレイ化することで、多項目のバイオ物質や化学物質の2次元分布を可視化する検討が進んでいる。イリノイ大学とTSMCのグループは複数種類の生理活性物質を同時に検出するための計測モジュール

ルを含んだCMOS型の100万画素のオープンイノベーション・プラットフォームを実現している。また、英国のインペリアルカレッジやグラスゴー大学のグループは、ドリフト補正回路やデジタル出力回路などが内蔵されている様々なタイプのCMOSベースのISFETセンサアレイを報告している。このような集積化・アレイ化されたセンサは、単独のセンサとは異なり要求される性能や仕様が集積化エレクトロニクスレベルになるため、研究開発のパラダイムシフトが求められる。例えば、分子識別センサにおいては、分子センサ部位のチャンネル材料探索（堅牢な分子選択性）、電極材料（堅牢な電氣的接合）等においてもエレクトロニクス素子としての消費電力、制御性、分子選択性・堅牢・安定性等の性能を満足する新しい材料・デバイス・回路設計技術の開発が求められている。

### [注目すべき国内外のプロジェクト]

#### (a) MEMS技術・センサ

米国では、DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) が約30年にわたりMEMS技術を強力に支援している。DARPAはMEMS技術を管轄するMicrosystems Technology Office (MTO)を設置し、継続的に研究開発プログラムを推進している。DARPAが特に重要視しているのは、兵器の定位やナビゲーションに必須の慣性センシング技術とクロック技術を含むPNT (Positioning, Navigation and Timing) 技術である。このカテゴリの下、高性能ジャイロスコープ、量子センサ、量子クロックなどのプログラムが行われている。また、超省消費電力（ゼロ待機電力）センサのプログラムも引き続き行われている。

欧州では、フランスのLeti、ドイツのフラウンホーファー研究機構（特にISIT、IPMS、ENASの各研究所）、フィンランドのVTT、スイスのCSMCなどの大型研究拠点がMEMS・マイクロシステムの研究を主導し、それらを中心に大学がネットワーク化されている。ドイツでは、The Research Fab Microelectronics Germany (FMD) というプログラムが推進され、7つのフラウンホーファー研究所と2つのライプニッツ研究所がこれに参加し、Federal Ministry of Education and Research (BMBF) によって2020年までに3.5億ユーロの資金が投じられる。2019年は7千万ユーロの研究開発プロジェクトが行われ、多くの装置が最新型に更新された。産業界に近い研究開発が行われていることが特徴である。

中国では、IT機器や無線通信機器のキーデバイスであるMEMSの国産化を進めるため、中央政府と地方政府が主導し大きな投資が行われている。これらの投資は網羅的であり、半導体デバイスやMEMSについて、欧米とデカップリングしても困らないように、サプライチェーンの全てを中国内で完結させる方針がみえる。MEMS技術に関連して、ここ10年で多くの新興企業が登場し、これらの企業と政府機関や政府系研究所が一体となって、蘇州、上海、重慶、厦門、淄博、南昌、煙台など、各地で競うように巨額投資が行われ、研究開発と産業の集積地が建設されている。例えば、蘇州納米城（蘇州ナノシティ）、上海インテリジェントセンサ工業団地、淄博高新区MEMS产业基地（淄博ハイテクゾーン）、常州スマートセンシングタウン、鄭州智能传感谷（鄭州インテリジェントセンシングバレー）などである。中国最大のMEMSの研究機関は、中国科学院上海微系统与信息技术研究所（SIMIT）であり、傘下に複数の研究所や企業を有し、学位も授与する巨大な組織である。上海に8インチラインを有する研究拠点SITRI (Shanghai Industrial  $\mu$ Technology Research Institute) もSIMIT傘下にある。また、この分野の主要な国際会議で、中国の大学からの研究論文が急増しており、その水準が高くなっていることから、これらの大学は巨額投資の恩恵を受け、人材供給元として機能していると思われる。

## 2.3

### 俯瞰区分と研究開発領域 ICT・エレクトロニクス応用

## (b) 分子センサ技術

多種類の分子群を連続的に計測することを可能にするIoTセンサデバイスの開発を押し進めるプロジェクトが世界的に進められている。米国では、UC BerkeleyのBERKELEY SENSOR & ACTUATOR CENTERで、シリコンデバイスを基軸とした集積化分子識別センサを提案するなど、分子識別センサに関する研究が精力的に進められている。また、Intel社とコーネル大学の共同研究チームはIntelのニューロモルフィックチップ「Loihi」を用いて、化学物質データの高効率な識別を達成している。この研究は直接的なセンサデバイスの研究ではないが、入力データとして72個の化学センサのデータセットを用いており、多数のセンサを集積化することで分子群の識別が可能であることを示す重要な研究となっている。

欧州では、Horizon 2020のなか、大掛かりな研究開発が進められており、取得されるビッグデータとそこから得られる解釈を用いた新たなサイエンスと新しい産業のイニシアティブを取ることをめざしている。例えば、イタリアでは、金属酸化物半導体化学センサの低消費電力化およびシリコン基板上への作製に取り組んでおり、Brescia大学では、酸化物ナノ材料を基軸として分子識別センサを初めて提唱し、さまざまな分子種を網羅的に検知するとともに、それらの実績に基づいたナノセンサに関するベンチャー（Nano Sensor Systems）を設立している。スイスのETH Zurichでは、ナノ粒子を用いたアレイ型センサ（3種の酸化物センサで湿度とCO<sub>2</sub>を測定）による呼吸疾病診断（糖尿病等）のデバイス開発を行っており、Sensirion社は金属酸化物アレイセンサ（4種）を商用化している。ドイツでも、JLM Innovation社とHaickグループと共同で呼吸からがんを検知するSniffphone（20種のセンサアレイを利用）を開発している。

中国では、IoTセンサに関するセンターが2016年に立ち上がっており、産官学を巻き込んだ大きな研究開発の流れとなっている。北京大学で多種多様なナノ材料を用いた揮発性化合物センシングを行っており、分子だけでなく呼吸中のウィルス等の検出にも成功している。

韓国では、KAISTがCenter for Integrated Smart Sensorsを設立し、集積化センサのR&Dを精力的に推し進めており、動物由来タンパク質触媒を利用したナノセンサ（16種）を用いて、呼吸による疾病診断・個人認証が可能な小型デバイスを開発している。

インドでは、MEMS技術を用いて、SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、CO等を検出する集積化金属酸化物ガスセンサの作製と実証が行われており、Nanosniff社では4種のMEMSセンサアレイからなる温度特性解析技術を利用して10 ngレベルで爆発物の分子識別が可能な爆発物センサを開発している。

日本では、「MSSフォーラム」において物質・材料研究機構が開発したMSSセンサ（膜型表面応力センサ）を基盤にして、40社以上が有効なユースケースや計測方法の研究開発を連携して行っている。また、産業界では、第一精工（強誘電体膜+感応膜の匂いセンサ）、太陽誘電（MEMS+感応膜の匂いセンサ）、パナソニック（多チャンネル+感応膜の集積化分子センサ）、アロマビット（センサ+感応膜）、コニカミノルタ（複数の金属酸化物センサの組み合わせ）などのIoT分子識別センサデバイスが開発されている。このように産学連携や個別での研究開発が進められているが、新たな化学センサの研究開発を目的にした大型のプロジェクトは実施されていない。

## (5) 科学技術的課題

センサ・MEMS分野の中心的な技術的課題は、チップ面積や消費電力を大きくせずにS/N比を上げること、強力なアクチュエータを実現すること、現実的な方法で異なる要素を集積化することなどである。高い性能を出すためには、高度な微細加工・集積化技術が必要であり、中途半端な研究施設では競争力のある研究開発は行いにくくなっている。この分野では、着実な研究開発によって産業的価値のある基盤技術を維持・進歩

## 2.3

俯瞰区分と研究開発領域  
ICT・エレクトロニクス応用

させつつ、研究施設を動かし、そのうえで新規アイデアを小投資で試みるような研究体制が適している。

半導体集積回路の研究開発では、LSI ファウンドリが提供する様々なプロセスプラットフォームの上で設計がなされる。MEMSについては設計とプロセスとが切り離せず、そのことを言い表した“One Device, One Process, One Package”という言葉がある程である。しかし、デバイスごとに製造プロセスを開発していたのでは実用化に時間とコストがかかり過ぎるため、複数のデバイスに対応する有力なプロセスプラットフォームがいくつか登場し、それらによる欧米発のデバイスがシェアを占めるようになった。メインストリームで勝負するには、プロセスプラットフォームの改良・革新が欠かせない。

バイオマーカの検出、呼気の分析、空気中汚染物質の濃度測定などを低コストで行うためには、ソリッドステート化学センサが必要である。実用的なソリッドステート化学センサとしては、ISFET (Ion Sensitive FET)、触媒燃焼型ガスセンサなどがある。必要な性能を発揮するにあたっては、前者は使用前のキャリブレーションを必要とするため連続使用には向かず、後者はセンサを高温にし、表面を清浄かつ活性に保たなくてはならないので、省消費電力化できない。このような化学センサは、明らかにIoT用途に向かない。一方、論文では、数え切れない程の「高感度」、あるいは「省消費電力」化学センサが報告されている。しかし、残念ながら、ほとんどのものがドリフト、戻りの応答、繰返し性能、あるいは信頼性に問題をかかえている。多くの場合、化学物質に対する結合力や吸着面積を上げれば高感度になるが、同時に前述の問題が発生する。IoT用途に長期間安定して使えるソリッドステート化学センサの新しいアイデアが待たれる。最近、集積回路技術を活用してキャリブレーションをチップ内で行う報告があり、このような技術を含む、堅牢なセンシング技術の創製、センサデバイス構造設計、センサ材料設計、センサ回路設計技術の開発、統合的研究開発の発展を期待したい。

## (6) その他の課題

日本では、大型プログラムによって順調に立ち上がったものの、その後の基盤的支援が行われずに縮小されるMEMSの研究拠点もある。特に、産業に直結した研究開発を行うべき研究拠点に対しては、従来の競争的資金による研究がそぐわないことから、基盤部分（全体の3割程度）を公的資金によって支えるといった議論も必要であろう。この方式では、政府投資総額を増やすことを必要とせず、民間資金によるレバレッジによって研究の速度と成功確率を格段に上げられる。フラウンホーファー研究機構では、民間からの研究資金の額に応じて、基礎的部分の支援額が決まる仕組みがあるが、このようなインセンティブと競争性（従来の競争的資金とは異なる競争性）について、わが国の公的研究所や大学に対しても考えていくことが必要になってきている。

集積化IoTセンサデバイス開発では、センサ材料、集積化デバイス構造、センサ回路設計技術の研究開発を包括的にかつ同時並行で行う研究体制でないと、世界的に競争力のあるデバイス開発は難しい。例えば、BERKELEY SENSOR & ACTUATOR CENTERではまさに多様なメンバー構成（ナノ材料化学・有機化学・機械工学MEMS・回路設計研究・人工知能等）で新しいアイデアのサイエンスとデバイスを生み出そうとしている。米国・欧州のセンシングデバイスの研究開発例と比較し、日本はダイナミックな時代の変化に対応しうる研究グループの構造・体制になっていない。アカデミックの研究室単独で達成可能な技術には限界があり、センサ材料（材料化学）・デバイス構造（半導体工学）・センサ回路（電気工学）が一体となってシナジーを生む研究体制の構築が強く求められる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>MEMS関係の主要国際会議での論文数は多いが、多くの大学研究者の興味がメインストリームや産業技術から離れつつある。若手研究者の層は比較的厚いが、彼らがメインストリームや産業技術を習得できる機会は少ない。また、企業からの基礎的な研究報告が少なくなっている。</li> <li>集積センサ技術開発で、NIMS (MEMS+感応膜)、豊橋科技大学 (CMOS+感応膜)、東京大学 (シリコンデバイス+金属ナノ構造、堅牢な分子識別界面+集積化センサ)、慶應義塾大学 (堅牢なセンサ回路設計) などの活動が活発になっている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>日本のデバイス・モジュールメーカーの実力は高く、弾性波フィルタ、自動車用慣性センサなどに強みがあるが、デバイス化・製品化に向けた研究開発が低調になっている。</li> <li>従来の日本式の研究開発では、世界の速度に付いていけないため、M&amp;Aで補っている。ベンチャー起業は低調である。</li> <li>第一精工、パナソニック、NTT、コニカミノルタ、富士通、太陽誘電などで、集積センサ、匂いセンサなどの研究開発を進めている。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>研究者の層が厚く、研究開発のスペクトルは広く、新しい発想は米国から出てくることが多い。実力のある有名大学、Stanford大学、UC Berkeley/Davis/Irvine、ミシガン大学、Georgia Techなどは、メインストリームやベンチャー起業でも高い実力を見せている。</li> <li>BERKELEY SENSOR &amp; ACTUATOR CENTERなど、多くの大学で応用を意識した基礎研究がなされている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>InvenSense、SiTimeなどに続く成功しそうなベンチャー企業が次々と現れている。シリコンバレーでは、この分野への投資熱も高い。</li> <li>BAWフィルタの大手企業は全て米国企業であり、BroadcomはRobert Boschを抜いて世界最大のMEMS企業となった。</li> <li>バイオセンサを社会に実装するようなスタートアップ企業が活発。C2 sense社の食品の匂いモニタリングセンサデバイス開発など。</li> <li>Intel社とコーネル大学の共同研究チームが、Intelのニューロモルフフィクチップ「Loihi」を用いて、化学物質データの高効率な識別を達成。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>欧州では応用研究志向が強く、基礎研究と応用研究は一体的に進められている。特に実力のある研究拠点は、論文発表にプライオリティを置いておらず、論文からだけでは実力を測れない。</li> <li>大型研究拠点が産業に直結した研究開発で強さを見せる一方、大学の存在感は薄くなっている。</li> <li>化学センサの基本的な検討だけでなく、集積回路との一体化の検討に関しては米国以上に活発になっている。イタリアの金属酸化物半導体化学センサの低消費電力化およびシリコン基板上への作製、スイスETH Zurichのナノ粒子を用いたアレイ型センサによる呼吸疾病診断 (糖尿病等) のデバイス開発など。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>Robert BoschのMEMSセンサでの地位はゆるぎない。同社は社内で活発な研究開発を行いつつ、シリコンバレーやフラウンホーファー研究機構とも共同研究を積極的に行っている。</li> <li>STMicroelectronicsはビジネスで一時的勢いはないものの、MEMSについて全方位の研究開発を実施している。</li> <li>フランスのLeti、ドイツのフラウンホーファー研究機構などは、世界的に強力な研究機関であり、ベンチャー起業も比較的さかんである。</li> <li>集積化学センサ関係では、Sensirion社 (スイス) が金属酸化物アレイセンサを商用化し、JLM Innovation社 (ドイツ) がTechnion (イスラエル) と共同で呼吸からがんを検知するSniffphone (20種のセンサアレイ利用) を開発している。</li> </ul>

2.3  
俯瞰区分と研究開発領域  
ICT・エレクトロニクス応用

中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・主要国際会議で中国の占める論文シェアがもっとも高く、1/3程度に達することもあり、最近、研究の質、量ともに急伸している。</li> <li>・大学は拡大する産業界への人材供給元であるため、それに見合った量の研究開発プロジェクトが大学でも行われている。</li> <li>・集積化学センサでは、北京大学で多種多様なナノ材料を用いた揮発性化合物センシングを行っている。分子だけでなく、呼気中のウイルス等の検出にも成功している。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・MEMSやセンサの国産化の政府方針のもと、巨額投資が行われている。</li> <li>・多くの新興企業が登場し、科创板（中国版NASDAQ）に上場する企業も現れている。</li> <li>・現時点では、中国企業は技術とシェアで欧米企業に及ばないが、マイクロフォンと赤外線センサでは存在感を高めている。</li> <li>・IoTセンサに関する研究開発センターが作られている。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>・かつてセンサ・MEMSの研究で上位に位置していたが、実用化の成功例に乏しいため、産業界や政府からの投資熱が冷めている。</li> <li>・その結果、分野に研究資金が行き渡らず、研究者層が薄くなっている。</li> <li>・KAIST：Center for Integrated Smart Sensorsを設立し、集積化センサのR&amp;Dを精力的に進めている。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>・財閥系IT企業は、スマートフォン等に搭載するセンサ・MEMSをグループ内で調達するべく、研究開発を行ってきたが、技術的蓄積と高度人材が不足しており、成功例に乏しい。</li> <li>・KAISTチームによるスタートアップ企業が立ち上がっている。</li> </ul>

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

### 関連する他の研究開発領域

- ・IoTアーキテクチャー（システム・情報分野 2.5.5）
- ・ロボット基盤技術（ナノテク・材料分野 2.3.5）

### 参考・引用文献

- 1) H. Beitollahi et al., "A review on the effect of introducing CNTs in the modification process of electrochemical sensors", *Electroanalysis* 31, no. 7 (2019) : 1195-1203. doi : <https://doi.org/10.1002/elan.201800370>
- 2) S. K. Krishnan et al., "A review on graphene-based nanocomposites for electrochemical and fluorescent biosensors", *RSC Advances* 9, no. 16 (2019) : 8778. doi : [10.1039/C8RA09577A](https://doi.org/10.1039/C8RA09577A)
- 3) Y.Hahn, R. Ahmad and N. Tripathy, "Chemical and biological sensors based on metal oxide nanostructures", *Chem. Commun.* 48, no. 84 (2012) : 10369-10385. doi : [10.1039/c2cc34706g](https://doi.org/10.1039/c2cc34706g)

- 4) Michael Taeyoung Hwang et al., "Ultrasensitive detection of nucleic acids using deformed graphene channel field effect biosensors", *Nature Communications* 11, no. 1 (2020) : 1543. doi : 10.1038/s41467-020-15330-9
- 5) K. Takechi and S. Iwamatsu, "Sensor applications of InGaZnO thin-film transistors", *Jpn. J. Appl. Phys.* 58, no. 9 (2019) : 090504. doi : <https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab1fc0>
- 6) Kuniaki Nagamine et al., "Printed Organic Transistor-based Biosensors for Non-invasive Sweat Analysis", *ANALYTICAL SCIENCES* 36, no. 3 (2020) : 291-302. doi : <https://doi.org/10.2116/analsci.19R007>
- 7) T. Sakata, S. Nishitani and T. Kajisa, "Molecularly imprinted polymer-based bioelectrical interfaces with intrinsic molecular charges", *RSC Adv.* 10 (2020) : 16999–17013. doi : 10.1039/d0ra02793f
- 8) 黒岩 繁樹, 大橋 啓之, 逢坂 哲彌, 電界効果トランジスタを用いたバイオセンサの展開, 「電気化学」, 2020年 88巻 4号 p. 317-325. doi : <https://doi.org/10.5796/denkikagaku.20-FE0030>
- 9) K. Ishida et al., "Microsensor Device for Simultaneously Measuring Moisture & Nutrient Substance Dynamics in Plants", *2019 IEEE SENSORS* (2019) : 1-4. doi : 10.1109/SENSORS43011.2019.8956827
- 10) Carlos Duarte-Guevara et al., "Characterization of a 1024 × 1024 DG-BioFET platform", *Sensors and Actuators B* 250 (2017) : 100–110. doi.org/10.1016/j.snb.2017.04.107
- 11) N. Moser et al., "ISFET Arrays for Lab-on-Chip Technology : A Review", *2019 26th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)* (2019) : 57-60. doi : 10.1109/ICECS46596.2019.8965034
- 12) N. Moser et al., "A Scalable ISFET Sensing and Memory Array With Sensor Auto-Calibration for On-Chip Real-Time DNA Detection", *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems* 12, no. 2 (2018) : 390-401. doi : 10.1109/TBCAS.2017.2789161
- 13) N. Imam and T. A. Cleland, "Rapid online learning and robust recall in a neuromorphic olfactory circuit", *Nature Machine Intelligence* 2 (2020) : 181-191. doi : 10.1038/s42256-020-0159-4