

2.3.4 IoT センシングデバイス

(1) 研究開発領域の定義

MEMSセンサーを代表とする高性能・高機能なセンシングデバイスの研究開発により、健康で便利に暮らせ安心・安全なスマート社会の基盤となる Internet of Things (IoT) を実現する。MEMSセンサーや化学センサー、光学センサー、量子センサー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、複数のセンサーの融合、プリンテッ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、慣性センサー、気圧センサー、マイクロフォン、光学センサー、LiDAR、TOF イメージセンサー、圧電デバイス、化学センサー、バイオセンサー、病原体・生体機能分子センサー、人工嗅覚センサー、IoT 分子センサー、量子計測、量子センシング、ダイヤモンド NV 中心 (Diamond Nitrogen-Vacancy Center)、量子生命科学

(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ー（センシングデバイス）である。センサー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ーとしては、画像・映像を取得するイメージセンサーや、加速度、圧力、音などの多様な物理量を検出・測定可能なMEMSセンサーが重要であるが、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ー（バイオセンサー、分子識別センサー、匂いセンサー、ガスセンサーなど）や、従来手法よりも感度の高いダイヤモンド中のNV中心（Nitrogen-Vacancy Center）を用いた量子センサーなどの開発も期待され、各種の物理センサーや化学センサーと集積回路（IC）やプリンテッドエレクトロニクスとの組み合わせも重要になると考えられる。

本研究開発領域ではIoTに関わるMEMS技術・センサー、化学センサーを中心に、新たな光学センサー、ダイヤモンドNV中心による量子センサーを取り扱う。MEMSセンサーに代表される物理センサーは、アカデミアから企業まで高性能化、小型化、低価格化などのための研究開発がダイナミックに進展している。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ーについては、できることできないことを明確にした上で、その特徴を活かして目的を達するための研究開発が求められるようになってきている。光学センサーの代表であるイメージセンサーは防犯カメラやスマホのカメラなどですでに広く使われているが、最近では自動車への応用を目指して3次元的な位置情報を取得するLiDAR（Light Detection and Ranging, Laser Imaging Detection and Ranging）の研究開発も活発になっており、光センサーによる新たな情報の取得も重要になっている。さらに、量子効果を利用して従来よりも高感度な検出が可能なセンサーとして量子センサーが期待されており、応用に向けた機能実証が求められる。

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。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、日本にとって本研究開発領域の重要性は極めて高い。

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

〔研究開発の動向〕

• 論文・特許動向

領域全体の論文数は毎年増加しており、日米欧も増加しているが、中国の増加率が高く2017年以降トップになって他国を引き離している。日米欧の論文数シェアは減少し、中国やインドのシェアが増加し最近の伸び率も大きい。また、論文の質を表すTop1%論文数・Top10%論文数でも中国が2018年頃からトップになり、欧米など他国との差を広げている。論文執筆者数は各国とも増加しているが、中国は2017年にトップになってからもさらに大きく増加しており、他国との差が大きくなっている。国際共同研究の特徴として、多くの国で共著率のトップは米国だが、米国よりも中国との共著率が高い国（日本、オーストラリア）もある。領域全体の特許ファミリー件数は増加傾向にあるが、2013年時点ではシェアトップだった日本の割合が急速に低下し、2020年に中国に逆転され、さらに差が開いている。Patent Asset Indexトップ3のオーナーは日本（ソニー：イメージセンサー／カメラ）、韓国（サムソン：イメージセンサー／半導体）、日本（キャノン：イメージセンサー／カメラ）の企業であり、IoTセンサーの特許ではイメージセンサーの割合が多い。（詳細は「研究開発の俯瞰報告書 論文・特許データからみる研究開発動向（2024年）」を参照）

• MEMS技術・センサー

MEMS技術によるセンサーとしては、スマートフォン、TWS（True Wireless Stereo）イヤホン、スマートウォッチなどのIoT機器を例にとると、マイクロフォン、加速度センサー、ジャイロスコプ、および圧力センサー（気圧センサー）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。これらのセンサー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、加速度センサーの大きさは、近年、チップ面積にして約1/10に小型化されているが、これはウエハー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用いられるジャイロセンサー、LiDAR、音声認識のためのマイクロフォン、上下動を測定する気圧センサー、資源探索等のための重力センサー（高感度加速度センサー）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ーは、典型的には100万円台以上と高価な光学式であり、MEMSジャイロセンサー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。MEMSマイクロフォンも高性能化が進んでいる。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ですが、数年前に新方式のMEMSマイクロフォンがInfineon社によって実用化され、ハイエンドのTWSイヤホン等に使われている。高性能MEMSマイクロフォンを用いて、CO₂を光音響法で検出するガスセンサーも登場している。この方法は、前述の化学物質吸着にともなう問題とは関係なく、CO₂の長期間・高感度モニタリングに好適である。最近では、高性能MEMSマイクロフォンを用いたレンジファインダーも登場している。気圧センサーの高性能化も進み、これまで多くの気圧センサーがシリコン歪ゲージ式であったが、静電容量式で汎用的なものが各社から発売された。そのノイズレベルは1 Pa（100万分の1気圧）以下であり、数cmの上下動を測定できる水準である。ここまで気圧センサーの高性能化が進むと、ユーザーの身体運動の測定などが可能になるので、これまでとは異なる使い方・応用が広がると期待できる。

MEMS技術の応用として重要なものに弾性波フィルタがある。これはセンサーではなくスマートフォン等のアンテナとベースバンドプロセッサの間に使われるRFフロントエンドモジュール（RFFE）に使われるキー部品であり、その役割は特定のバンド（周波数帯）を選択することであるが、MEMS技術によるBAW（Bulk Acoustic Wave）フィルタが大量に用いられ、MEMS最大の商品となっている。弾性波フィルタは、科技日報による中国の「ボトルネック技術35」の7番目に掲載され、米国・日本からの供給が止まるとスマートフォンなどを製造できなくなるため、中国が国産化を熱望しているハイテク製品の1つである。そのため、中国では弾性波フィルタのための開発と工場建設への投資が過熱しており、数十社が取り組んでいる。

・化学センサー

大部分の化学センサーは、センシング対象の化学物質を吸着し、それによる周波数変化、質量変化、歪（変形）、抵抗/導電性変化などを測定する。化学センサーを高感度にするには、感膜等の化学物質の吸着性を上げる必要があるが、そうすると化学物質が脱離しにくくなり、またセンシング対象の化学物質以外の化学物質も吸着しやすくなるため、時間応答性、感度安定性、バイアス安定性などが悪くなる。これらは吸着を用いる化学センサーの本質的な課題であるため、特定の応用に必要な性能をバランスよく実現することが重要になってきている。例えば、1回だけ使用するのか、IoT応用で長期間モニタリングするのか、目的に最適な化学センサーの特性やセンシングシステムの設計が求められる。

揮発性分子を長期間安定的にセンシングする上で、多湿環境によるセンサーの劣化や感度変化が非常に大きな課題であるが、最近はこの課題を克服するための研究が盛んになっており、主に以下の3つの戦略で行われている。①センサー材料表面への貴金属/疎水性有機分子修飾や温度変調を行うことで、センサー自体の水分に対する影響を抑制する。②水分や温度による影響を考慮してセンサー応答を読み取るモデルを構築する。③ガスライン中でセンサーの手前にCaCl₂などの吸湿剤を設置する。特に3番目はどんなセンサーを用いた場合でも汎用的に使用できる点で優れており、長期間利用可能な吸湿剤の開発が望まれる。

我々の身の回りに存在する様々な化学的な分子情報・データを分子識別センサーを介してサイバー空間に長期的に蓄積することで、新たな学術領域と産業分野が生み出されることが期待されている。時空間的に多成分が相互作用しあう複雑な現象（例えば、生体活動）に対して、新しい切り口で現象を解明するアプローチとして注目されている。この研究アプローチでは、データを継続的に計測・蓄積することが本質であるため、現在は物理センサーによる研究が主に進展しているが、堅牢な人工嗅覚センサーのような化学センサーを介して分子情報を時空間情報として長期的にデータ蓄積できれば、その社会的なインパクトは計り知れない。分子情報の中でも、揮発性分子群（匂い:嗅覚）は、非侵襲的な長期的な連続データ計測に最も適したアプローチであり、今後の発展が期待される。

・光学センサー

イメージセンサー分野では、最新の技術で製造されるハイエンドセンサーは大規模なB2Bビジネスの中でメーカー企業とユーザー企業の間でカスタマイズされ、デジタルカメラシステムやスマートフォンに搭載されている。汎用IoTソリューション向けには、仕様が公開され入手しやすいミドルレンジからローレンジのセンサーを利用するのが合理的である。すでに汎用電子パーツとして多様なイメージセンサーを入手することが可能であり、それらの中には単なるイメージングだけでなく、モーション検出や顔認識といった付加機能を備えるものもある。イメージセンサー分野において研究開発途上、あるいは最近実用化された新しい技術もあり、これについては『注目動向』で記載する。

2020年に始まった新型コロナウイルス感染拡大においては、ネットワークを介した情報集約を必ずしも伴わない場合もあるが、センサー搭載型IoT機器の需要が生じた。代表的なものとしては、非接触型体温計（半導体赤外線センサー）、CO₂濃度計（光学式CO₂センサー）、酸素飽和度計（光学式SpO₂センサー）、タブレット端末型来訪者体温計測システム（イメージセンサーと半導体赤外線センサー）などがある。これらの一般向け装置類に利用されるセンサー技術の大半は光学センサーを中心とする技術であり、すでに実績のある光学センサー技術を採用したシステムが普及した側面が強い。

・量子センサー

単一ダイヤモンドNV中心の光検出磁気共鳴（Optically Detected Magnetic Resonance, ODMR）が1997年に初めて報告されてから、ドイツとアメリカを中心に政府資金による基礎研究が強力に進められ、磁場、電場、温度、圧力、pHなどのセンシングにおいて従来技術（超伝導量子干渉計（SQUID）磁気センサー、光ポンピング（OPM）磁気センサー、蛍光分子イメージング、高速AFMなど）を凌ぐ可能性が見いだされた。

また最近、ダイヤモンドの表面近傍に配置したNV中心により、ダイヤモンド基板上の分子の核磁気共鳴（NMR）分光にも成功しており、ミクロ領域での分子構造化学を開拓する基礎分析ツールになると期待されている。NVision（ドイツ）、SQUTEC（ドイツ）、QNAMI（スイス）、QZABRE（スイス）、Quantum Diamond Technologies Inc.（米国）、Hyperfine（米国）、Quantum Brilliance（オーストラリア）など、基礎的な知財をおさえた上で当該分野の先駆者を擁するスタートアップが多数立ち上がっており、今後数年のうちに市場が確立されていくと考えられる。中国は10年ほど前からNV中心の研究を本格的に実施している。日本では、筑波大や産業技術総合研究所が材料面において当該分野の発展に大きく貢献してきた。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

• MEMS技術・センサー

MEMSはこれまで広くセンサーに用いられ産業的にも成功を収めているが、最近では圧電材料をはじめとする技術の進歩、および量産に耐えられる加工装置の登場によって、LiDARなどに用いられる走査型マイクロミラーデバイスやMEMSスピーカーなどの新しいMEMSアクチュエータが実用化されつつある。ADAS（Advanced Driver-Assistance Systems）・自動運転用LiDARには多くの参入者がおり、その研究開発競争は熾烈を極めており、投資またはリソースを確保できないプレイヤーは脱落しつつある。MEMSスピーカーが狙う用途は市場が拡大しているTWSイヤホン（2021年に2億台以上生産）である。TWSイヤホンの高級機にはウーハーとツイータの2つのスピーカーが搭載されているが、MEMSスピーカーが最初に置き換えを狙うのはツイータであり、MEMSスピーカーの採用によって小型化・低消費電力化が可能になる。なお、多くのTWSイヤホンには、片耳に2つまたは3つのMEMSマイクロフォン、MEMS加速度センサー、タッチセンサーなどが搭載されてセンサーの塊となっている。

MEMS技術を用いた超音波デバイスは、静電容量式のcMUT（Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer）と圧電式のpMUT（Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducer）に大別され、両方式とも医療応用、特に患者自身による検査とリモート医療のために、集積回路と一体化されたチップが開発されている。米国のベンチャー企業（Butterfly Network、EXOなど）では独自の携帯型超音波撮像デバイスを開発し、診断・医療データ集積・活用ビジネスを行おうとしている。このような超音波トランスデューサチップは、医療画像を取得するためセンサーの有効面積は2～3 cm四方程度と大きい。このような大きなチップを、MEMS量産で一般的な8インチウエハーで製造すると、ウエハー毎のチップ取れ数が少なくなってしまうため、Butterfly Networkはファウンドリと協力して製品を12インチウエハーで製造するための開発を行っている。

• 化学センサー

近年、金属酸化物や有機高分子などに替わる新たなガスセンサー材料として、金属有機構造体（MOF）が注目されている。MOFは金属と有機配位子を組み合わせて作製した配位高分子であり、多孔性と多様性、設計性の高さから、設計次第でMOFが有する孔とガス分子との相互作用の精密制御が可能である。これまで課題とされていた導電性MOFの合成やMOFのデバイス実装に関する技術が発展したことで、ガスセンサー材料としての利用が急速に進んでいる。例えば、2019年にMengらはMOFガスセンサーを利用して、高湿度環境において、低濃度のガス分子（0.3 ppmのNH₃、20 ppbのH₂S、1 ppbのNO）をセンシングすることに成功している。また、キラルな有機配位子を有したMOFセンサーによるエナンチオマー選択的なセンシングや、MOFセンサーを複数組み合わせた人工嗅覚センサーによる類似骨格を持つ芳香族ガス分子の判別なども報告されている。今後は感度や選択性だけでなく、長期間安定駆動が可能な堅牢性を実現するためのMOF設計戦略が鍵になる。

化学センサーによって食品から揮発する分子群を計測し、食品の状態をモニタリングすることで食の安全や

フードロス削減を実現する技術が注目を集めている。鮮魚や精肉といった劣化の早い食品はもちろん、青果（野菜・果物）や加工食品についても適熟期間（食べ頃）や安全性（腐ったりしていないか）の卸や小売店での判定が強く求められている。従来技術では、青果物の状態は光を用いたセンサー（基本的に糖度と色の評価）によるモニタリングか破壊的な検査が中心であり、揮発分子センシングは非破壊に多様な情報を取得できる技術として期待されている。基礎研究レベルでは化学センサーを用いた食品揮発分子のセンシングも数多く実証されている。

• 光学センサー

高機能光センサー・イメージセンサー技術はIoTソリューション向けとして技術革新が進んでいる。特に近年実用化され普及したあるいは普及しつつあるものとして、①3Dイメージング技術（パターン光を利用した測距イメージング）、②TOF（Time of Flight）方式測距機能イメージング技術、③LiDAR（Light Detection and Ranging）技術、④SPAD（Single Photon Avalanche Diode）センサー技術、⑤偏光イメージセンサー技術がある。①～③は重複する要素があるが、いずれも制御された光源と光センサーによって構成されるものである。PC、スマートフォンやタブレットなどからの近距離の顔認識やモーションキャプチャには、光源から2次元的に制御されたパターン光を被写体に照射して、得られた画像をもとにした3D構造解析を行う方式（①3Dイメージング技術）が利用される。また、自動運転等で利用や屋外を含む環境で比較的長距離（数m～数百m）の位置把握を行うことも、センサーユニットから照射した光が戻ってくるまでの時間を計測する②TOF方式や③LiDARが可能となっている。

④のSPAD技術は、半導体イメージセンサーにおいて超高感度・高速計測を実現することのできる要素技術である。アバランシェフォトダイオードは、高電圧をかけた半導体フォトダイオードで感度増倍を行うものであり、光通信などで広く用いられてきた。アバランシェフォトダイオードをイメージセンサー画素に搭載して実用化に至ったのは近年の大きな進歩である。SPADセンサーは高感度・高速性に優れるため、特に②や③との親和性が高い。

⑤の偏光イメージセンサー技術は、従来の入射する光強度と光の波長の情報に加え、入射光の偏光方向を取得することにより、被写体の情報（材質や面の向きなど）を取得することができるようになる。2019年にソニーより市販の偏光イメージセンサーが実現され、ファクトリーオートメーションやセキュリティ用途などで応用が期待されている。

• 量子センサー

近年、ダイヤモンドの表面近傍に配置したNV中心により、ダイヤモンド基板上の分子の核磁気共鳴(NMR)分光に成功したことに加え、Qdyne (quantum heterodyne) 法などの新規な手法についても開発が進み、高い周波数分解能でNMR信号を観測することが可能になってきている。2021年には、ハーバード大グループがパラ水素を用いた核スピンの超偏極手法 (SABRE) を用い、6.6 mTの磁場強度において0.5%の分極を実証した。これは同磁場において、ボルツマン分布よりも5桁も分極が多くなることに相当し、1 mMの濃度の10 pLの量の分子を検出することに相当する。

生命現象や細胞内環境を精密計測するための超高感度センサーとしてダイヤモンドナノ粒子が注目されている。ナノダイヤモンドを用いることで、例えば生体内のpHや温度の計測や、高感度なウイルス検出が報告されており、今後の生命科学応用が期待される。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

米国では、MEMSセンサー関係としてDARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) が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。特に、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）技術を重視し、高性能ジャイロ스코プ、量子センサー、量子クロックなどのプログラムが行われている。

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、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。Letiは200 mmウエハーの試作ラインを有し、開発技術の量産への移行、および量産ラインでの課題の解決に強みを有するが、新しい独自技術の研究開発にも熱心で、スタートアップを継続的に生み出している。ドイツでは、FMD（Research Fab Microelectronics Germany）プログラムによって、合計13のフラウンホーファー研究所とライプニッツ研究所に3.5億ユーロが投入され、マイクロエレクトロニクスの研究開発インフラが整備・更新された。化学センサー関係としては、新型コロナウイルス感染症の感染者を判別するために、人工嗅覚センサーによる呼気診断研究が欧州やアメリカ、中国などで行われ、オランダでは合計4510人から取得した呼気を利用した比較的大規模な試験が行われた。この試験では、7種類の金属酸化物半導体ガスセンサーからなる人工嗅覚センサーで取得した呼気パターンを利用して、感度98–100%、特異度78–84%で新型コロナウイルス感染者の判別に成功している。量子センサー関係では、Quantum Flagshipが2018年から進められており、ASTERIQS（Advancing Science and Technology through diamond Quantum Sensing）（2018～2021年）がダイヤモンドNVセンサーのプロジェクトとして行われ、ダイヤモンドNVセンサーによるナノレベル高空間分解能磁気センサー、電池モニタリングシステム開発、小型NMRなどの開発がなされた。また、医療応用（心血管疾患）へ向けたダイヤモンドNV中心を用いた核スピン超偏極を目指すプロジェクトとして、MetaboliQs（2018～2021年）も行われた。

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国内で完結させる方針がみえる。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200 mmウエハーラインを有する研究拠点SITRI（Shanghai Industrial μ Technology Research Institute）もSIMIT傘下にある。

日本では、量子センサー関係として、2018年度より開始された文部科学省の「光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）」の中で、ダイヤモンドNV中心による磁気センサー応用を目指したプロジェクトが進められており、脳磁計などの医療応用や、電池やパワーデバイスの電流・温度をモニタリングするシステム開発がターゲットとなっている。また、2020年度より、量子科学技術研究開発機構を代表機関としたQ-LEAP量子生命Flagshipプロジェクトが立ち上がり、ナノダイヤモンド中のNV中心を用いた医療への応用研究開発などが行われている。

（5）科学技術的課題

MEMS技術・センサー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センサーの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、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・進歩させつつ、研究施設を動かし、その上で新規アイデアを比較的小投資で試みる事が望まれる。MEMSでは“One Device, One Process, One Package”という言葉があるように設計とプロセスとが切り離せないが、欧米では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高いシェアを占めるようになった。このような状況で、日本がMEMSデバイスの高性能化、低消費電力化、高集積化とい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。

化学センサーの中のガスセンサーについては、性能に関わる重要な科学技術的課題がいくつかあるが、実用化を考えると選択性と堅牢性は特に注目すべきである。天然の嗅覚受容体は高い選択性を有しているが、

それを人工的に利用したガスセンサーは非常に脆弱である。一方、金属酸化物半導体ガスセンサーは堅牢性に優れているが、選択性が低い。選択性と堅牢性の両立は非常に困難な課題であるが、ブレークスルーを起こすためにはそのデバイス設計が重要である。また、食品モニタリングの応用に向けては、水分子と検出対象となる分子群に対する識別能や、低価格で長期間（理想的には数年単位）に渡って安定的に動作するセンサー材料・デバイス設計技術が必要となる。さらに、近年のデータ解析技術の発展普及により、空気中の揮発性有機化合物（VOC：Volatile Organic Compounds）が有する成分情報が医学・工学分野において極めて有用であり注目されているが、IoTセンシングデバイスによって得られるVOC組成データは、ガスクロマトグラフィ等の大型機器を用いたものと比較すると、データの量・質ともに遥かに劣っているため、優れた濃縮技術の開発とともに検出感度、擾乱耐性、分子識別能の飛躍的な改善が必要である。

量子センサーにおいては、脳磁計などの非常に高い感度を要求される応用に対しては、さらなる高感度化が要求され、手法および物質科学的な改善が必要である。手法による高感度化では、環境からのノイズの低減などのための量子プロトコル開発などが今後の課題として挙げられる。物質科学的な改善では、ダイヤモンドのさらなる高品質化やNV中心の効率的な生成技術開発などが挙げられる。実用化の観点からは、如何に安価にするかが重要であり、小型化・集積化技術の開発が重要である。NV中心においては、光学的なスピン状態の初期化と検出が主流であるが、電気的な制御と検出の技術開発が今後の課題として挙げられる。また、ダイヤモンドの高速成長技術、大面積化などの研究開発も長期的に取り組むべき課題である。

(6) その他の課題

設置と維持に大きな資金投入が必要なMEMSの作製に必要な半導体研究施設は、研究費に限りがある以上は集中的に設置せざるをえないが、運営方法については十分に検討していく必要がある。例えば、ナノテクプラットフォーム事業では、研究開発施設側はユーザーへのサービス提供に注力し、自らの研究開発や共同研究は行わないことで、研究の多様性や前例のないほどの多くの成果が得られた。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や施設整備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。

物理センサーから始まっているセンサー内である程度のデータ処理を行うin-sensor computingの化学センサーシステムへの展開を進めるためには、材料からアルゴリズムまでを包括的に考えた対応が必要であり、情報工学（演算アルゴリズム）分野、材料・デバイス分野、集積回路分野の連携が必要である。例えば、食品モニタリングについては、食品の種類ごとに対象となる分子群や計測・保管環境、最終的に得たい情報（糖酸度や含まれる栄養など）が大きく異なるため、センサーのユーザー側（農家とつながりのある卸業者等）とセンサー材料・デバイス研究開発者との密な連携に基づく研究実施体制が不可欠である。

新型コロナウイルスの人工嗅覚センサーによる診断研究に関して、実用化するのに十分な判別精度が得られていない原因の一つとして、データ数の不足が挙げられる。これは世界規模で同一の人工嗅覚センサーを使って呼気データを取得し、かつその情報を共有することで解決できる。これを達成するためには、世界的に信頼性を認められる感度・長期安定性を両立した人工嗅覚センサーを開発すると同時に、その測定データを簡単に共有できるシステムも構築することが必要になる。

イメージセンサーの製造技術面においては、継続的な技術革新が進み製造技術が高度化しており、最新のイメージセンサー技術を備えた企業（ソニーと韓国サムスン）以外ではカメラや携帯電話向けのハイエンドイメージセンサーを製造することはできなくなっている。アカデミアや新規参入を考えている企業が新たな機能の光学センサーの研究開発を進めていくためには、先端半導体プロセスの利用が可能な共用施設の整備や試作サービスが期待される。

量子技術の人材が不足しており、中長期的な観点からはアカデミアのみならず産業界においても人材教育と人材確保は重要な課題と考えられる。量子センサーは、センサーに関する知識や量子物理の他、それを取り巻く材料科学、生命科学、情報工学等の幅広い知識の習得や、理論からシステム開発まで見渡せる力が必

要である。量子技術、量子情報科学に興味をもつ学生は増えているにもかかわらず、大学での既存のカリキュラムでは必ずしも対応できていない点が課題である。また、今後の拡大する市場において、早い段階から企業の関心を惹きつけ新たな市場創生につなげるためにも、アカデミアと企業関係者との間で量子技術に関する最新技術と動向を共有することも重要である。

IoTセンシングデバイスの研究領域においても日本の経済安全保障の視点が重要になっている。この領域は、特定重要技術20分野の「先端監視・測位・センサー技術」に位置付けられ、小型・軽量の多種多様なセンサーが生活・産業で利用できることから汎用性が高く、社会インフラの安全管理、災害検知・防災などに利用可能で公共性も高い。さらに、高感度なカメラ、加速度センサー、高度計、ガスセンサーなどは軍事活動にも活用できることから、先端的な技術の保有や技術情報管理には注意が必要になっている。日本として世界トップレベルのイメージセンサー技術、様々な物理センサーの基本となるMEMS技術、各種の安定的な化学センサー、超高感度な量子センサー技術などの研究開発の環境を整備するとともに、研究開発や人材育成に関する有志国との連携とそのサポートが望まれる。

(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	○	→	- MEMS関係の主要国際会議での論文数が多いが、多くの大学研究者の興味はMEMSデバイスの高性能化、低消費電力化、高集積化といった研究開発の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。 - 集積センサー技術開発で、NIMS（MEMS+感応膜）、豊橋技科大学（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+集積化センサー）、慶應大学（堅牢なセンサー回路設計）などの活動が活発になっている。 - イメージセンサー技術においてはアカデミアにおいても静岡大学や東北大学など、メーカーに劣らぬ高いレベルの技術を提言できるグループが存在する。 - Q-LEAPの中で、量子センサー関係の研究が行われている。また、JSTさきがけ「量子技術を適用した生命科学基盤の創出」が発足し、一部のテーマでNV中心を用いた研究が進められている。
	応用研究・開発	○	→	- 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ー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。 - I-PEX、パナソニック、レボーン、コスモス電機、コニカミノルタ、太陽誘電などの企業で、集積センサー、匂いセンサーなどの研究開発を進めている。 - イメージセンサー製造技術においてソニーが世界トップを走っている。機能性においてもAI搭載センサーや偏光イメージセンサーなど高度化したセンサーを実現しており、優位性は製造技術にとどまらない。LiDAR関連技術においては自動車メーカーの牽引力もある。 - Q-LEAP量子計測・センシング技術領域では、脳磁計などの医療応用や、電池やパワーデバイスの電流・温度をモニタリングするシステム開発が行われている。

米国	基礎研究	◎	→	- 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、カリフォルニア大学 Berkeley校/Davis校/Irvine校、ミシガン大学、Georgia工科大学などは、MEMSデバイス研究の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。 - BERKELEY SENSOR & 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。 - イメージセンサー、化学センサーをはじめとする各種センサー技術への研究意欲とスペクトルの広さは依然として旺盛である。 - ハーバード大学を中心に、NV 中心の磁場計測や、ナノ粒子による温度計測の実証研究など、研究が活発に行われている。
	応用研究・開発	◎	→	- 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。 - On Semiconductor社（Aptina社買収）、OmniVision社、STMicroelectronics社など、複数のメーカーが光学センサーの高い技術力を備え、IoT 向けセンサーなどミドルレンジセンサーに関して層が厚い。またapple社、Microsoft社やintel社などの3Dイメージング技術の有力ユーザーも存在する。 - ハーバード大学を中心に、神経電流の DC 磁場の計測など、NV 中心のスピンをプローブとしたイメージング技術開発が進められている。
欧州	基礎研究	◎	→	- 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。 - 化学センサーの基本的な検討だけでなく、集積回路と一体化の検討に関しては米国以上に活発になっている。 - EPFLやIMECなどがイメージセンサー技術研究において存在感を維持している。 - 単一ダイヤモンドNV 中心の光検出磁気共鳴（ODMR）が1997年に初めてドイツから報告されて以来、ドイツを中心に先駆的な研究がなされている。
	応用研究・開発	◎	→	- Robert BoschのMEMSセンサーでの地位はゆるぎない。その王者たる技術力は簡単に追いつけるものではない。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。 - STMicroelectronicsはMEMSについて全方位の研究開発を実施しており、ベンチャー企業との繋がりも深く、新しいデバイス開発に積極的である。 - 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盛んである。 - 集積化学センサー関係では、Sensirion 社（スイス）が金属酸化物アレイセンサーを商用化し、JLM Innovation 社（ドイツ）が Technion（イスラエル）と共同で呼気からがんを検知する Sniffphone（20 種のセンサーアレイ利用）を開発している。 - infineon社、ams社が光センサー、イメージセンサーメーカーとして製造販売を行っている。 - MetaboliQs、ASTERIQSのプロジェクトでダイヤモンドNVセンサーを用いた磁気センサー、電池評価センサー、小型NMRなどの開発を進めている。
中国	基礎研究	○	↗	- 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。 - 集積化学センサーでは、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。 - 中国科学技術大学、香港中文大学から、NV 中心を用いた磁場計測やたんぱくのスピンラベルに関する研究が進められている。

中国	応用研究・開発	○	↗	・MEMSやセンサーの国産化の政府方針のもと、巨額投資が行われている。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。 ・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ーでは存在感を高めている。 ・SMEC社、Silex社北京拠点、CR Micro社など、MEMSファウンドリが充実してきた。 ・IoTセンサーに関する研究開発センターが作られている。 ・多数のメーカーが安価なグルコースセンサーを製造するなど、ミドルレンジ以下のエレクトロニクスについてはあらゆる分野で極めて競争力が高い。 ・イメージセンサーにおいても、他の半導体分野同様、西側諸国からの制裁を受けながらも進歩を進めている。
韓国	基礎研究	△	→	・かつてセンサー・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。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。 ・KAIST：Center for Integrated Smart Sensors を設立し、集積化センサーのR&Dを精力的に進めている。
	応用研究・開発	△	→	・財閥系IT企業は、スマートフォン等に搭載するセンサー・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。 ・サムスンがイメージセンサー製造技術においてソニーと並ぶ世界トップレベルの技術を有している。

（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

参考・引用文献

- 1) 田中秀治「ジャイロセンサの基礎知識 6: MEMS ジャイロの高性能化」, Tech Note, <https://technote.ipros.jp/entry/basic-gyro-sensor6/>, (2022年12月27日アクセス) .
- 2) 田中秀治「中国スマホの Achilles 腱、BAW フィルターの先端技術」, 日経 xTECH, <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/02135/>, (2022年12月27日アクセス) .
- 3) 田中秀治「マイクに続き来るか、圧電 MEMS スピーカー：TWS で採用の動き」, 日経 xTECH, <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/mag/ne/18/00007/00173/>, (2022年12月27日アクセス) .
- 4) 田中秀治「300mm ウエハーでの MEMS 生産が当たり前に？ポッシュが計画明言」, 日経 xTECH, <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01537/00401/>, (2022年12月27日アクセス) .
- 5) Arunraj Chidambaram and Kyriakos C. Stylianou, “Electronic metal-organic framework sensors,” *Inorganic Chemistry Frontiers* 5, no. 5 (2018) : 979-998., <https://doi.org/10.1039/C7QI00815E>.
- 6) Lin-Tao Zhang, Ye Zhou and Su-Ting Han, “The Role of Metal-Organic Frameworks in Electronic Sensors,” *Angewandte Chemie International Edition* 60, no. 28 (2021) : 15192-15212., <https://doi.org/10.1002/anie.202006402>.
- 7) Zheng Meng, Aylin Aykanat and Katherine A. Mirica, “Welding Metallophthalocyanines into Bimetallic Molecular Meshes for Ultrasensitive, Low-Power Chemiresistive Detection of

- Gases,” *Journal of the American Chemical Society* 141, no. 5 (2019) : 2046-2053., <https://doi.org/10.1021/jacs.8b11257>.
- 8) Peng Qin, et al., “VOC Mixture Sensing with a MOF Film Sensor Array: Detection and Discrimination of Xylene Isomers and Their Ternary Blends,” *ACS Sensors* 7, no. 6 (2022) : 1666-1675., <https://doi.org/10.1021/acssensors.2c00301>.
 - 9) Nan Ma, et al., “Effect of Water Vapor on Pd-Loaded SnO₂ Nanoparticles Gas Sensor,” *ACS Applied Materials & Interfaces* 7, no. 10 (2015) : 5863-5869., <https://doi.org/10.1021/am509082w>.
 - 10) Abdunasser Nabil Abdullah, et al., “Correction Model for Metal Oxide Sensor Drift Caused by Ambient Temperature and Humidity,” *Sensors* 22, no. 9 (2022) : 3301., <https://doi.org/10.3390/s22093301>.
 - 11) Jiangyang Liu, et al., “Water-Selective Nanostructured Dehumidifiers for Molecular Sensing Spaces,” *ACS Sensors* 7, no. 2 (2022) : 534-544., <https://doi.org/10.1021/acssensors.1c02378>.
 - 12) Giorgia Giovannini, Hossam Haick and Denis Garoli, “Detecting COVID-19 from Breath: A Game Changer for a Big Challenge,” *ACS Sensors* 6, no. 4 (2021) : 1408-1417., <https://doi.org/10.1021/acssensors.1c00312>.
 - 13) Rianne de Vries, et al., 2021. “Ruling out SARS-CoV-2 infection using exhaled breath analysis by electronic nose in a public health setting,” *BioRxiv and medRxiv* (2021) ., <https://doi.org/10.1101/2021.02.14.21251712>.
 - 14) Rafaela S. Andre, et al., “Recent Progress in Amine Gas Sensors for Food Quality Monitoring: Novel Architectures for Sensing Materials and Systems,” *ACS Sensors* 7, no. 8 (2022) : 2104-2131., <https://doi.org/10.1021/acssensors.2c00639>.
 - 15) A. Gruber, et al., “Scanning Confocal Optical Microscopy and Magnetic Resonance on Single Defect Centers,” *Science* 276, no. 5321 (1997) : 2012-2014., <https://doi.org/10.1126/science.276.5321.2012>.
 - 16) J. M. Boss, et al., “Quantum sensing with arbitrary frequency resolution,” *Science* 356, no. 6340 (2017) : 837-840., <https://doi.org/10.1126/science.aam7009>.
 - 17) Nithya Arunkumar, et al., “Micron-Scale NV-NMR Spectroscopy with Signal Amplification by Reversible Exchange,” *PRX Quantum* 2, no. 1 (2021) : 010305., <https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.2.010305>.
 - 18) Benjamin S. Miller, et al., “Spin-enhanced nanodiamond biosensing for ultrasensitive diagnostics,” *Nature* 587, no. 7835 (2020) : 588-593., <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2917-1>.

2.3

俯瞰
区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用