

CRDS-FY2019-SP-10

戦略プロポーザル

IoT時代のセンサ融合基盤技術の構築

～センシング情報の高付加価値化に向けた
多様なデータの取得と統合的処理～

STRATEGIC PROPOSAL

Sensor Fusion Technologies in IoT era

- Multimodal Sensing and Data Processing for Creating New Value -



国立研究開発法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

研究開発戦略センター（CRDS）は、国の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析、提案を中立的な立場に立つて行う公的シンクタンクの一つで、文部科学省を主務省とする国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）に属しています。

CRDSは、科学技術分野全体像の把握（俯瞰）、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較を踏まえて、さまざまな分野の専門家や政策立案者との対話を通じて、「戦略プロポーザル」を作成します。

「戦略プロポーザル」は、今後国として重点的に取り組むべき研究開発の戦略や、科学技術イノベーション政策上の重要課題についての提案をまとめたものとして、政策立案者や関連研究者へ配布し、広く公表します。

公的な科学技術研究は、個々の研究領域の振興だけでなく、それらの統合によって社会的な期待に応えることが重要です。「戦略プロポーザル」が国の政策立案に活用され、科学技術イノベーションの実現や社会的な課題の解決に寄与することを期待しています。

さらに詳細は、下記ウェブサイトをご覧ください。

<https://www.jst.go.jp/crds/>

エグゼクティブサマリー

IoTでは様々な場所に設置したセンサで様々な情報（データ）を取得し、そこからより高度で重要な情報を導き出すこと、すなわちセンシング情報の高付加価値化が求められる。これを実現するには多様なセンシングデータの取得とその統合的処理が必要であり、そのための基盤的技術を本提言ではセンサ融合基盤技術と称する。本提言では、特にデータを生み出す側（エッジ側）のセンシングシステムに着目し、システムレベル、センサ端末レベル、センサレベルの3つの異なるレベルにおける研究開発を連携して推進することで、センサ融合基盤技術の構築を目指す。なお、ここでいう「センサ」とは目的の物理量や化学量を電気信号に変換して検出するデバイスのことであり、「センサ端末」とはセンサを含み、アナログ・デジタル変換回路、電池、通信回路等で構成され、測定対象近くに設置される機器のことを指す。このように、本提言では「センサ」と「センサ端末」を戦略の構成上、区別して扱う。

センシング情報の高付加価値化を実現する高度なIoTシステムの構築には、高性能のクラウド・サーバ、ネットワークとともに、多様かつ有用なデータを取得・処理してクラウドに送るエッジ側のセンシングシステムが必要である。従来のセンシングシステムは、工場内のように限られた場所で特定の用途に使用されるものであり、取得・処理されるデータの種類・量も限定的であった。それに対してIoTでは、データ収集の範囲が大きく拡張され、環境の情報、装置の稼働情報、人の健康情報など様々なデータを人間を介さずに収集する必要がある。それにはエッジ側のセンシングシステムによって多様な情報を自動的に収集し、その場で判断し必要な措置を施す、あるいは情報処理を施してクラウドへ送り、クラウド側の判断を求めるといったことが極めて重要になる。

また、クラウドなどIoTシステムの上層側におけるビッグデータやAI関連の技術・サービスについては、既に米国のGAFaを中心としたプラットフォーム企業が市場を席卷し、世界の関心はIoTシステムの下層側、すなわちエッジ側に移ってきている。日本はIoTシステムの最下層にあたるセンシング技術に強いことから、優れたエッジ側のセンシングシステムを実現することで、下層側からIoT産業を牽引することが期待される。

このエッジ側センシングシステム（以下、単にセンシングシステムと記載）は、データ取得のため測定対象の近くに設置される機器（センサ端末）と、センサ端末で取得されたデータを処理してクラウドに送信する機器（エッジ側情報処理機器）によって構成される。センシングシステムに対する要求機能は用途によって異なるが、多様な情報の取得と統合的処理によってセンシング情報を高付加価値化することが、様々な応用領域で求められる共通の方向性となっている。

そこで、本提言では、応用領域において要求される多様なデータの取得とその統合的処理をおこなうセンシングシステムの実現に向けて、センサ融合基盤技術の構築を提案する。そのために取り組むべき研究開発課題は、以下に示すように、システムレベル、センサ端末レベル、センサレベルの3つのレベルで存在する。

【研究開発課題①】センシング情報の統合的処理（システムレベル）

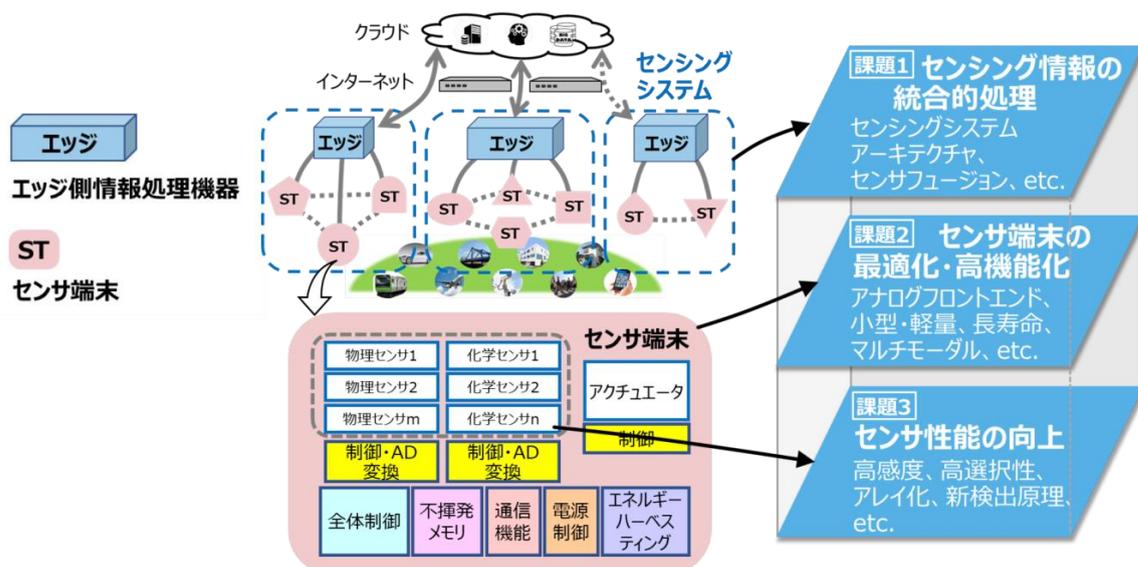
IoTシステムの上層側にあるクラウドの役割を考慮した上で、エッジ側情報処理機器およびセンサ端末、ネットワークからなるセンシングシステムのアーキテクチャを設計する必要がある。

【研究開発課題②】センサ端末の最適化・高機能化（センサ端末レベル）

センサ端末レベルでは、様々な用途に応じて最適な機能・性能をもつセンサ端末を創製するための基盤技術開発が必要である。

【研究開発課題③】センサ性能の向上（センサレベル）

センシング情報の高付加価値化に向けて、センシングデータの種類・範囲の拡大が必要であり、センサそのものの性能向上や、新たな検出原理をセンシングに適用することが求められる。



IoT・センシングシステム概念図とセンサ融合基盤技術の構築に必要な研究開発課題

これらの研究開発課題の実施においては、全体のシステムアーキテクチャに基づいて、システム、センサ端末、センサを設計し、異なる技術レイヤー間で連携して研究開発を進める必要がある。それには必要な基盤技術の開発能力を備えた研究開発基盤プラットフォームを構築し、異分野の専門家間の連携を促進することが有効である。また、応用サイドからの多様なニーズに基盤技術によって応えていくことが重要であり、そのためには（1）センシングシステムを実現する多様な基盤技術が常に最先端の形で整備され、利用可能になっていること、（2）センシングシステムの応用サイドと基盤技術提供サイドとのニーズ・シーズマッチングを強力に進めるコーディネータが存在していることが鍵となる。これらの機能を実現する物理的な拠点の形成が求められる。

センシングシステムの研究開発、特に新規センサやセンサ端末などのハードウェア開発は時間を要するため、国の政策と産学連携の下、長期的な視点での取り組みが求められる。上記の研究開発基盤プラットフォームを早期に整備するとともに、センサ融合基盤技術の構築に向けた研究開発課題に腰を据えて取り組むことが重要である。研究開発課題への取り組みには、アカデミアの研究に軸足を置いた研究開発と、産業界のニーズに基づく研究開発が想定されるが、いずれの場合もアカデミアと産業界の連携が重要である。アカデミアが個々に有する基盤技術を集積・統合し、社会への還元を促進する場としての役割が研究開発基盤プラットフォームには期待される。

Executive Summary

The IoT is required to acquire a wide range of data through sensors installed at a variety of places to derive sophisticated, valued information from such data, i.e., it is required to add high values to sensing information. To realize this, it is essential to acquire a wide range of sensing data and process it in an integrated manner, which requires the buildup of the base technology that enables this. This proposal focuses particular attention on the sensing system used on the data creation side (edge side). Based on this, we propose that in order to build the base technology required for adding high values to sensing information, we should work on the research and development challenges at three different levels (system, sensor terminal, and sensor levels) collaboratively. It should be noted that the term “sensor” used in this document refers to a device that detects desired physical/chemical quantities by converting them into electric signals, and the term “sensor terminal” means a device consisting of components such as sensors, analog-digital converter circuits, battery units, and communication circuits, installed near the object to be measured. As such, this proposal differentiates between the sensor and sensor terminals in terms of strategy structure.

The buildup of a sophisticated IoT system capable of adding high values to sensing information requires a high-performance cloud server and network along with an edge-side sensing system that acquires a variety of useful data, and processes such data in order to send it to the cloud. Traditional sensing systems are used in limited places, such as factories, for a specific application and only acquire and process limited types and amounts of data. On the other hand, the IoT must collect a much wider range of data—information such as on the environment, device operation, and human health—without human intervention. To this end, it is important to use the sensing system at the edge side to automatically collect a variety of information in order to make a determination on the spot and take necessary action, or, in order to process information, send it to the cloud for determination at the cloud side.

For big data and AI-related technologies and services in the upper layers of the IoT system such as the cloud, GAFAs in the U.S.A. and other platformers have already dominated the market, and thus many players around the world start to take interest in the lower layers, i.e., the edge side. With strength in sensing technology, which is positioned in the lowest layer of the IoT system, Japan is expected to lead the IoT industry from the lower layer by delivering an excellent edge-side sensing system.

This edge-side sensing system (hereafter simply referred to as the sensing system) consists of a sensor terminal installed near the object to be measured for the purpose of acquiring data, and a device (for processing edge-side information) that processes data acquired by the sensor terminal to send it to the cloud. Although the capabilities required for the sensing system depend on the application, it is recognized as a common direction of the sensing system to

acquire a variety of information and add high values to sensing information through integrated processing.

Under this situation, this proposal proposes that toward a sensing system capable of acquiring a variety of information and processing it in an integrated manner, we should work on the following research and development challenges:

Research and development challenge 1: Integrated processing of sensing information (system-level challenge)

With consideration given to the role of the cloud, located in the upper layers of the IoT system, we must design the architecture of an edge-side information processing device and sensing system consisting of sensor terminals and a network. The specific architecture highly depends on each application and thus must be designed so as to reflect the requirements of the users. The research and development challenges also include those associated with sensor fusion, which fuses multiple sensing data items to derive high-value added information; event-driven sensing, which detects temporal changes in data to make changes of commands to be communicated to upper/lower layers for causing actuation; and active sensing, which works together with an actuator to change the way of next data acquisition based on the data acquired.

Research and development challenge 2: Optimization and sophistication of sensor terminals (sensor-terminal-level challenge)

It is required to develop base technology for creating sensor terminals that provide functions and capabilities best suited for each of a variety of applications. Sensor terminals involve individual blocks of functions such as those related to sensor control, analog front end (AFE), temporary storage of data, data conversion/feature amount extraction, communication, and power-supply control/energy harvesting. Further research and development activities are required for each of these blocks. In addition, as the technologies that integrate the function blocks, the integration and mounting technologies are vital in creating sensor terminals with optimal functions and capabilities.

Research and development challenge 3: Improvement in sensor performance (sensor-level challenge)

In order to add high values to sensing information, it is required to increase the types and range of sensing data, and it is important to improve the performance of sensors and apply new detection principles to sensing. For biological information sensing based on a chemical sensor or biosensor, it is required to increase the sensitivity of the sensor and improve selectivity in order to detect infinitesimal biomarker molecules. Physical sensors, many of which are already in practical use, are required, for example, to be further sensitized and downsized depending on the application. It is also an important challenge to improve the

sensor capabilities by arraying multiple sensors. In addition, it is also important to apply to the sensing principles, new physical phenomena/chemical reactions and/or new materials that have never been applied, with the object of making it possible to sense physical/chemical quantities that have been undetectable.

In addressing these research and development challenges, it is required to design the system, sensor terminal, and sensor based on the entire system architecture, with information exchanged among different technology layers. To this end, it is effective to build a research and development platform with a capability for developing necessary base technology to promote cooperation among experts in different areas. In addition, it is important to respond to a variety of needs of users based on the base technology; to do so, it is essential that (1) a wide range of base technologies that realize the sensing system should be always maintained in the most advanced way and (2) coordinators should exist, who strongly promote needs and seeds matching between sensing system users and base technology providers. A physical base must be formed to realize these functions.

Under this situation, where time is required for the research and development of the sensing system, in particular, the development of hardware such as new sensors and sensor terminals, efforts are required from a long-term perspective based on a government policy and with cooperation between academia and industry. It is important to build the research and development platform mentioned above at an early stage, as well as to work steadily on the research and development challenges. In working on the challenges, it is assumed that research activities will be conducted by academia with focus placed on seeds research, and that research and development activities will be carried out based on needs from industry. In both cases, the key is cooperation between academia and industry. The research and development platform is expected to provide a basis that plays a role of collecting and integrating excellent base technologies individually owned by universities to promote their utilization in the society.

目 次

エグゼクティブサマリー

Executive Summary

1. 研究開発の内容	1
2. 研究開発を実施する意義	5
2-1. 現状認識および問題点	5
2-2. 社会・経済的効果	13
2-3. 科学技術上の効果	17
3. 具体的な研究開発課題	21
3-1 センシング情報の統合的処理（システムレベル）	21
3-2 センサ端末の最適化・高機能化（端末レベル）	22
3-3 センサ性能の向上（センサレベル）	25
4. 研究開発の推進方法および時間軸	27
付録1. 検討の経緯	32
付録2. 国内外の状況	36
付録3. 専門用語の説明	40

1. 研究開発の内容

センサ融合基盤技術とは、IoTにおいて期待されるセンシング情報の高付加価値化に向けて、多様なデータの取得とその統合的処理をおこなうために必要となる基盤的技術を指す。本提言は、特にデータを生み出す側（エッジ側）のセンシングシステムに着目し、システムレベル、センサ端末レベル、センサレベルの3つのレベルに存在する研究開発課題に連携して取り組むことで、センサ融合基盤技術を構築することを提案する。なお、ここでいう「センサ」とは目的の物理量や化学量を電気信号に変換して検出するデバイスのことであり、「センサ端末」とはセンサを含み、アナログ・デジタル変換回路、電池、通信回路等で構成され、測定対象近くに設置される機器のことを指す。このように、本提言では「センサ」と「センサ端末」を戦略の構成上、区別して扱う。

CO₂排出量削減、省エネルギー化、安全な交通システム構築、社会インフラの効率的な維持・管理、健康寿命の延伸、少子高齢化による労働力不足の解消、さらにはSDGsに代表されるサステナビリティの実現など、我が国が抱える将来に向けた課題は枚挙にいとまがない。これら数多くの社会的課題を解決するための鍵として期待される技術がIoT（Internet of Things:モノのインターネット）である。IoTでは身の回りのあらゆるモノの情報が様々なセンサにより収集され、ネットワークを通じてクラウドに送られ蓄積される。蓄積された情報にはビッグデータ解析やAI・機械学習による高度な分析が施され、そこから導き出された高次の情報によって状況認識・把握や異常検知、推定が可能になり、さらには現実社会へフィードバックするための動作（アクション）がおこなわれる。このようにセンサによって収集された多様な情報（データ）から高次の重要な情報を導出すること、すなわちセンシング情報の高付加価値化によって、様々な社会的課題への対処が可能になると期待されている。

センシング情報の高付加価値化を実現する高度なIoTシステムの構築には、ビッグデータ解析やAI・機械学習による高度な分析・判断をおこなう高性能のクラウド・サーバ、ネットワークとともに、様々なデータを正確に取得してクラウドに送るエッジ側のセンシングシステムが重要である。現状、クラウドなどIoTシステムの上層側におけるビッグデータやAI関連の技術・サービスについては、既に米国のGAFaを中心としたプラットフォーム企業が市場を席卷し、世界の関心はIoTシステムの下層側、すなわちエッジ側に移りつつある。日本はIoTシステムの最下層にあたるセンシング技術に強く、世界シェア50%以上を有するイメージセンサを筆頭に、日系企業によるセンサの世界シェアは3割を超える。レベルの高い日本のセンサ技術をもとに、優れたセンシングシステムの実現が期待される。

従来のセンシングシステムは、限られた場所で特定の用途に使用されるものが大半であり、取得・処理されるデータの種類・量も限定的であった。それに対してIoTでは、データ収集の範囲が大きく拡張され、環境の情報、装置の稼働情報、人の健康情報などの様々なデータを人間を介さずに収集する必要がある。また、センシングデータの加工、リアルタイム処理、簡単な認識処理など、これまでクラウドでおこなわれていた情報処理の一部を、負荷分散、リアルタイム性の確保などの観点からエッジ側（データを生み出す側）が担うことが求められている。加えて、センシングデータをクラウドに上げずにエッジ側で処理することは、個人に紐付く情報をそのままクラウドに上げることで生じるプライバシーの問題等の負の影響を減らす上でも重要である。このように人間を介さずに様々な情報を自動的に収集し、情報処理を施してクラウドに送るために、

エッジ側での効率的なセンシングシステムが必要になっている。

このエッジ側センシングシステム（以下、本提言中では単にセンシングシステムと記載）は、データ取得のために測定対象物の内部や表面、近傍に設置される機器（センサ端末）と、センサ端末で取得されたデータを処理してクラウドに送信する機器（エッジ側情報処理機器）で構成される（図 1-1）。センサ端末は、微小な信号を検出するセンサと、センサのアナログ信号をデジタルに変換するアナログフロントエンド、センサの動作を制御する回路、電源制御回路、メモリ回路、通信制御回路、アクチュエータ制御回路などからなる。また、エッジ側情報処理機器は、センサ端末の制御、センサ端末から送られてくる情報の統合的処理、ネットワークにかかる通信負荷低減（データ量削減）、プライバシー保護・セキュリティ向上、センシング情報のリアルタイム処理、アクチュエータ制御などの情報処理機能が求められる。センシングシステムに対する要求機能は応用領域によって異なるが、センシング対象の時間情報、空間情報、異なる複数種類の情報など多様な情報の取得と統合的処理によりセンシング情報を高付加価値化することは、様々な応用領域で求められる共通の方向性といえる。これを実現する上で必要なセンサおよびセンサ端末の機能・性能の向上、システム化を可能にする技術的基盤の構築が課題となっている。

そこで、本提言では、応用領域において要求される性能を十分に備え、かつ多様なデータの取得とその統合的処理をおこなうセンシングシステムの実現に資するセンサ融合基盤技術の構築を提案する。センサ融合基盤技術の構築に向けて取り組むべき研究開発課題は、以下に示すように、システムレベル、センサ端末レベル、センサレベルの異なる3つのレベルで存在する。

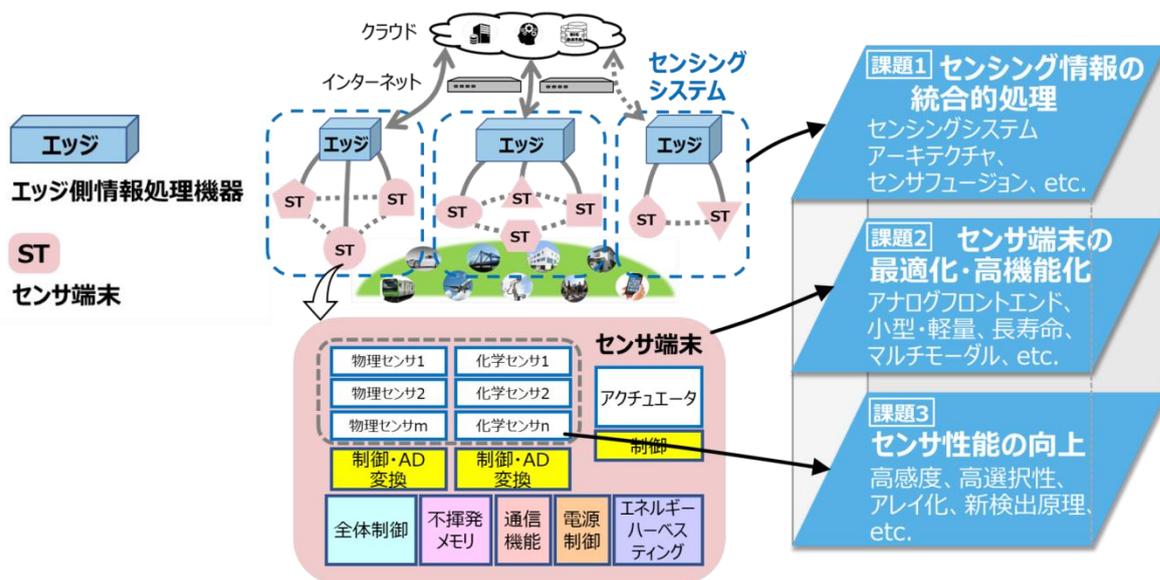


図 1-1 IoT・センシングシステム概念図とセンサ融合基盤技術の構築に必要な研究開発課題

研究開発課題①（システムレベル）：センシング情報の統合的処理

IoT システムの上層側にあるクラウドの役割を考慮した上で、エッジ側情報処理機器およびセンサ端末、ネットワークからなるセンシングシステムのアーキテクチャを設計する必要がある。センサ端末、エッジ側情報処理機器、クラウドの3層について、各層の機能と、各層間でやりとりするデータを定義することが重要である。具体的なアーキテクチャは応用領域による個別性が

高く、サービス事業者等システムの利用者自身による設計、もしくは利用者の要求を十分に取入れた設計が求められる。何を目的としたシステムか、どのようなデータを得て、どのようなフィードバックやアクションをおこなうか明確に定義する必要がある。

センシングにおけるデータの統合的処理については、複数のセンシングデータを融合して高付加価値の情報を引き出すセンサフュージョン、データの時間的変化を検出し、上層や下層への伝達情報の変更やアクションを行うイベントドリブンセンシング、さらにはアクチュエータと一体になり、取得したデータに基づいて次のデータの取得方法を変える能動的センシングなどの研究開発課題がある。いずれもシステム全体のアーキテクチャと一体で検討する必要がある。

多様なニーズに対応可能な汎用アーキテクチャや、それに用いる汎用端末や部品なども研究開発対象として重要であり、部品間のインターフェースや通信、データの標準化、各層に搭載するソフトウェア、API (Application Programming Interface) の構築などが期待される。いずれも性能とコストにスケラビリティを持たせる必要がある。

研究開発課題② (センサ端末レベル) : センサ端末の最適化・高機能化

センサ端末レベルでは、様々な用途に応じて最適な機能・性能をもつセンサ端末を創製するための基盤技術開発が必要である。センサ端末にはセンサ制御機能、アナログフロントエンド (AFE)、データの一時記憶、データ変換・特徴量抽出、通信機能、電源制御・エネルギーハーベスティングなどの個別の機能ブロックが存在し、各々について、さらなる研究開発が求められる。

AFE は検出感度の向上や、低消費電力化の観点から特に重要であり、微弱なアナログ信号を低ノイズ (高 S/N 比)、低消費電力でデジタル信号に変換することが期待される。バイオ系の計測などでは、ppb から ppt レベルの超高感度が要求され、センサからの出力電圧はナノボルトという非常に小さな値になる。また、センサ端末では低消費電力動作が必須であり、通常のオペアンプと AD 変換器を用いた回路とは異なる新たな AFE 回路の研究開発が求められる。

IoT では電源の接続が難しい環境でのセンシングも求められるため、センサ端末の電源およびその制御が重要である。特に、年単位のような長期にわたって電池交換ができない使用環境では、電力消費を極力抑えるための電源制御回路が必要になる。また、自然に存在するエネルギー源 (光、振動、熱、電波など) から電力を供給するエネルギーハーベスティングや、エネルギーを無線で送る無線給電技術も重要な課題である。

集積・実装技術は、最適な機能・性能をセンサ端末に搭載する上で極めて重要である。どの機能を端末に持たせ、どこまでの信号処理を端末でおこなうか、システムアーキテクチャに基づいて仕様を最適化した上で、それを実現可能な集積・実装技術を選択する必要がある。また、端末の小型・軽量化に有効な 1 チップ化への期待は大きく、異なる機能をもつ複数のチップを 1 チップに集積する技術が課題となる。

研究開発課題③ (センサレベル) : センサ性能の向上

センシング情報の高付加価値化には、センサで検出可能なデータの種類・範囲の拡大が必要であり、センサ自体の性能向上や、新たな検出原理のセンシングへの適用が期待される。

化学・バイオセンサを用いた生体情報のセンシングでは、有用なバイオマーカであっても極めて微量しか存在しないために検出感度以下となるものが多く、センサの超高感度化が求められる。また、生体由来の試料には多数の夾雑物が混在しており、バイオマーカ分子だけを特異的に認識

可能な高選択性が要求される。センサ自体の選択性向上に加え、試料から夾雑物を分離・除去する前処理機能やバイオマーカの濃縮機構によって高選択性を実現することも重要な課題である。

物理センサに関しては、変位、加速度、磁気、温度、圧力、イメージなどを計測するセンサがすでに実用に供されているが、応用領域によってはさらなる高感度化、低消費電力化、小型化が求められる。イメージセンサは、これまで肉眼の分光感度を規範とした RGB スペクトルでの撮像が主流であったが、赤外線や紫外線の利用、多波長化、偏波や ToF (Time of Flight) 等の情報を取得できるマルチパラメータ化が期待される。物体を透過するイメージングを目的として、電磁波やテラヘルツ波の利用も期待される。

多様な情報を一度に取得するため、複数のセンサを並列で使用するアレイ化技術によるセンサ機能の向上も重要な課題である。同種のセンサをアレイ化することで、計測対象の方向性や空間情報が取得可能になる。また、異種のセンサを組み合わせることで、同時に複数の計測ターゲットの検出・分析をおこなうことも期待される。

新たな物理現象・化学反応、新材料などを積極的にセンシングに適用することで、これまで検出できなかった物理量・化学量のセンシングを可能にする取り組みも重要である。材料の量子的な性質を利用する高感度な磁気センサ、特定の分子の形状を鋳型として持つナノ材料による高感度の分子センサなどが期待される。新たな検出原理に基づくセンサの研究開発は、多くの基礎研究、シーズ研究の中から生まれる可能性が高く、様々な分野の研究をセンサの視点から見直すことが重要である。

上記の研究開発課題①～③の実施においては、全体のシステムアーキテクチャに基づいて、システム、センサ端末、センサを設計し、異なる技術レイヤー間で連携して研究開発を進める必要がある。それにはセンシングシステムの実現に必要な基盤技術（デバイス集積・MEMS・実装、アナログ・デジタル混載回路など）の開発能力を備えた研究開発基盤プラットフォームを構築し、異分野の専門家間の連携を促進することが有効である。また、このような研究開発基盤プラットフォームにおいて、メーカーとアカデミアの連携、IoT サービス事業者・ユーザとの連携を促進し、シーズ・ニーズを的確に反映した研究開発を推進することが期待される。そのためには（1）センシングシステムを実現する多様な基盤技術が常に最先端の形で整備され、利用可能になっていること、（2）センシングシステムの応用サイドと基盤技術提供サイドとのニーズ・シーズマッチングを強力に進めるコーディネータが存在していることが鍵となる。これらの機能を実現する物理的な拠点の形成が求められる。

センシングシステムの研究開発、特に新規センサやセンサ端末などのハードウェア開発には時間を要するため、国の政策と産学連携の下、長期的な視点での取り組みが求められる。上記の研究開発基盤プラットフォームを早期に整備するとともに、センサ融合基盤技術の構築に向けた研究開発課題に腰を据えて取り組むことが重要である。研究開発課題への取り組みには、アカデミアの研究に軸足を置いた研究開発と、産業界のニーズに基づく研究開発が想定されるが、いずれの場合もアカデミアと産業界の連携が重要である。アカデミアが個々に有する基盤技術を集積・統合し、社会への還元を促進する場としての役割が研究開発基盤プラットフォームには期待される。

2. 研究開発を実施する意義

2-1. 現状認識および問題点

IoT (Internet of Things:モノのインターネット) が注目を集めている。従来は人と人とのネットワークをつなぐことがインターネットの主な用途であったが、最近では種々のセンサを介して得られたモノの情報が直接インターネットに流れるようになってきた。実世界のモノから直接情報が得られると、様々なことが可能になる。例えば、家電製品や電力計から得られる情報によって、家庭内のエネルギー使用状況が一目瞭然になり、無駄なエネルギー消費を抑えることができる。鉄道や道路、トンネルなどの社会インフラにセンサを設置して、それらの状態を常にモニターできるようになると、人手をかけて定期的に点検することなく、必要なときに必要な保守をおこなえば良いことになる。同様に、畑や家畜にセンサを取り付けることで、これまで IT の恩恵があまり受けられなかった農業分野でも効率化や省力化が期待できる。

モノから得られる情報には、そのモノの状態を表す情報 (車のエンジンの回転数や燃料消費量など) と、そのモノが置かれた環境に関する情報 (畑の温度や湿度、橋や道路の振動の情報など) がある。IoT ではこれらの多様な情報がネットワークを介してクラウドに伝わり、集まった情報が可視化され、人間による分析や判断に用いられる。あるいはビッグデータ解析や AI (Artificial Intelligence:人工知能) によって自動的に判断がおこなわれる。判断結果はネットワークを通じて現実社会に伝えられ、自動車の制御や、畑の水遣り、橋の補修などの動作 (アクション) を実行する。ここで重要なのは、取得すべきデータは多種・多様であり、それらの様々なデータを統合的に処理・分析することで高次で重要な情報を抽出すること、すなわちセンシング情報の高付加価値化が必要なことである。それによって、IoT による効率的な社会インフラの維持・管理や安全な交通システムの実現、医療・介護の最適化、二酸化炭素排出量の削減など、安全・安心でサステナブルな社会の実現に向けた課題への対処が可能になると期待される。

センシング情報の高付加価値化を実現する高度な IoT システムの構築には、ビッグデータ解析や AI・機械学習による高度な分析・判断をおこなう高性能のクラウド・サーバ、ネットワークとともに、様々なデータを正確に取得してクラウドに送るエッジ側のセンシングシステムが重要である。現状、クラウドなど IoT システムの上層側におけるビッグデータや AI 関連の技術・サービスについては、既に米国の GAFA を中心としたプラットフォーマー企業が市場を席卷し、世界の関心は IoT システムの下層側、すなわちエッジ側に移りつつある。日本は IoT システムの最下層にあたるセンシング技術に強く、世界シェア 50%以上を有するイメージセンサを筆頭に、日系企業によるセンサの世界シェアは 3 割を超える。レベルの高い日本のセンサ技術をもとに、優れたセンシングシステムの実現が期待される。

従来のセンシングシステムは、限られた場所で特定の用途に使用されるものが大半であり、取得・処理されるデータの種類・量も限定的であった。それに対して IoT では、データ収集の範囲が大きく拡張され、環境の情報、装置の稼働情報、人の健康情報などの様々なデータを人間を介さずに収集する必要がある。また、センシングデータの加工、リアルタイム処理、簡単な認識処理など、これまでクラウドでおこなわれていた情報処理の一部を、負荷分散、リアルタイム性の確保などの観点からエッジ側 (データを生み出す側) が担うことが求められている。加えて、センシングデータをクラウドに上げずにエッジ側で処理することは、健康情報など個人に紐付く情

報をそのままクラウドに上げることで生じるプライバシーの問題等の負の影響を減らす上でも重要である。このように人間を介さずに様々な情報を自動的に収集し、情報処理を施してクラウドに送るためには、エッジ側での効率的なセンシングシステムが必要になるが、様々な応用領域からの要求に十分応えるセンシングシステムの構築には、解決すべき様々な技術的課題がある。

このセンシングシステムは、データ取得のために測定対象物の内部や表面、近傍に設置される機器（センサ端末）と、センサ端末で取得されたデータを処理してクラウドに送信する機器（エッジ側情報処理機器）で構成される。センサ端末は、微小な信号を高感度に検出するセンサと、センサのアナログ信号をデジタルに変換するアナログフロントエンド、センサの動作を制御する回路、電源制御回路、メモリ回路、通信制御回路、アクチュエータ制御回路などからなる。また、エッジ側情報処理機器は、センサ端末の制御、センサ端末から送られてくる情報の統合的処理、ネットワークにかかる通信負荷低減（データ量削減）、プライバシー保護・セキュリティ向上、センシング情報のリアルタイム処理、アクチュエータ制御などの情報処理機能が求められる。このようなセンシングシステムの重要性については世界的にも認識が進み、特にリアルタイム性や低消費電力性を重視した情報処理・AI処理・セキュリティなどへの関心が高くなっている。日本でも内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期「フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」、文科省の2018年度戦略目標「Society5.0を支える革新的コンピューティング技術の創出」（JST-CREST「Society5.0を支える革新的コンピューティング技術」、さきがけ「革新的コンピューティング技術の開拓」）、経産省の「AIチップ開発加速のためのイノベーション推進事業」などで次世代技術に関する研究開発がおこなわれている。

一方、センシングシステムのセンサ端末部分に関しては、情報処理側に比べて大幅に技術開発が追いついていない。センサ技術やアナログフロントエンド技術、エネルギーハーベスティング技術などが個別に開発されているものの、センサ端末全体としての各種機能の集積・実装、低消費電力化や低ノイズ化といった、個別の要素技術を実際に使える技術にする上で必要不可欠な包括的取り組みができていない。また、センサ端末には用途に応じて必要な機能を搭載していること、安価であることが必須であるが、特定の用途に特化したセンサ端末の開発には多大なコストを要することが、センサ端末への取り組みを難しくしている。想定される利用範囲・適用分野に応じた機能を備えると同時に、ある程度の汎用性をもち、誰もが簡便に使えるセンサ端末の実現が期待されるが、そのための基盤技術が現状では整っていない。

センサ端末に搭載されるセンサそのものについても、現状のセンサでは機能・性能が不足しているケースが多数ある。イメージセンサやMEMS技術によるマイクロフォン、圧力センサ、加速度センサなどの物理センサでは実用レベルでの高性能化・高感度化が進んでいるが、化学およびバイオセンサ（ガスセンサ、臭いセンサ、生体物質センサなど）については、研究開発はおこなわれているものの、IoT用途として普及しているものは現時点では極めて少ない。その要因としては、化学・バイオセンサは直接的に大気や液体にさらされ不要なものが付着しやすく、安定な動作が阻害されて経時変化が起こり、安定性や再現性の確保が難しいことなどが挙げられる。ライフ・ヘルスケア分野、スマート農業分野で実現が期待されるIoTシステムにおいては、化学・バイオセンサに求められる役割は大きく、これらの用途に適する化学・バイオセンサの研究開発は極めて重要になっている。化学・バイオセンサの抱える本質的な問題に対しては、センサだけを見ていても解が見つからない可能性もあり、センサの制御回路、アナログフロントエンド、ア

クチュエータ制御回路などと併せて検討しなければならない。一方、イメージセンサや MEMS センサなどの物理センサにおいても、用途によっては現在の感度や価格では実用に適さない場合がある。さらなる高感度化、低価格化はもとより、従来センシングに活用されていなかった物理現象、たとえば光の偏光や位相などに基づく新たな検出原理を追求し、これまで検出できなかった新たな物理量のセンシングを可能にすることが期待されている。

センシングシステムに求められる機能は用途によって異なるため、問題点の抽出には応用領域ごとの状況を理解する必要がある。そこで、本提言では IoT 普及が期待される主な応用領域として「モビリティ」「インダストリー」「スマート農業」「社会インフラ」「ライフ・ヘルスケア」の 5 領域に着目し、現状認識および問題点の抽出を図った。なお、この 5 領域は、我が国が目指すべき未来社会の姿として第 5 期科学技術基本計画が掲げている Society5.0 の実現に必要とされる、11 システムの大まかな分類に基づいている（図 2-1）。

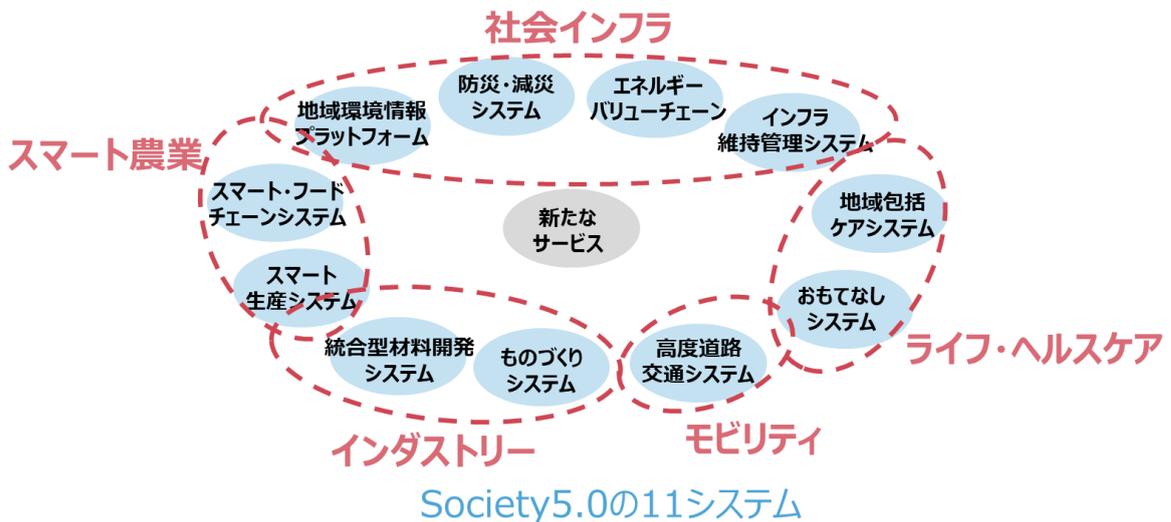


図 2-1 IoT 普及が期待される主な応用領域

モビリティ

モビリティでは自動車・自動運転を例として取り上げる。自動車における従来の最優先の技術課題は燃費向上であった。現在は、先進運転から将来の自動運転、安全安心の実現に向けた技術開発が急速に進展しつつある。高度な自動運転システムの実現には、画像認識機能に必要な高解像ステレオカメラやミリ波レーダに加えて、レーザ光の照射により車両周辺を 3次元の点群情報として取得できる 3次元 LiDAR の開発が不可欠である。また、位置情報取得機能に必要な、GPS センサ、高性能 3軸地磁気センサの開発も欠かせない。走行状態を正確に把握するには、高精度な加速度センサ、ジャイロセンサの開発も必要になる。さらに、センシングデータから多様な対象物を認識するため、高度な画像処理能力を有する高性能画像認識プロセッサも求められる。これら全てが開発され、環境変化に対するロバスト性を有するシステムが構築されれば、信頼性が向上し、安全かつ完全な自動運転が可能になる。しかし、完全自動運転に要求される各種センサは現状では非常にコストの高いことが、完全自動運転の実現を妨げている。例えば LiDAR などは、現在数万円から数百万円の価格であるが、一般に普及させるには、さらに 1～2 桁の価格低

減が必要である。

完全自動運転は運転者自身による制御が不可能なシステムであることから、最も大きな問題点はシステム上の不安である。ヒューマンエラーに比べてシステムエラーは発生確率が低いとはいえ、決してゼロではない。予想外の障害や予測できない事象への対応も課題である。人間は経験を積むことで、ある程度これらへの対応が可能になるが、システムの場合、事前にプログラムされた対応しか行うことができない。マルチモーダルで統合的なセンシングシステムがもたらす自動運転技術の高度化によって、不測の事態への対応がどれだけ可能になるかが将来の完全自動運転実現の鍵となる。

また、自動運転においては、できる限り不確実性を排除することが求められる。センサによって多くのデータが正確に取得できるようになったとしても、これらのセンシングデータを組み合わせ（センサフュージョン）、空間および時間分解能が高く高信頼な情報を取得しなければならない。そのためには、センサフュージョンのための最適なアルゴリズムの開発も必要になる。なお、自動運転は自動化のレベルが上がるにつれて、安全性への要求がより厳しくなる。運転者が運転操作や周辺監視から離れる場面が多くなると、システム側の責任が増すため、自動運転向けの機能安全規格の制定が必要になると考えられる。

インダストリー

インダストリーの代表例として生産工場について示す。IoT・センシングシステムの導入が最も早く進んでいる分野の一つである。これまで大量生産を目的に効率化が追求され、単純な作業を流れ作業でおこなうラインが構築されてきた。近年では生産ラインの無人化を促進するために、温度センサ、重量センサなどのセンサを多数搭載した製造装置・組み立て装置の導入が進んでいる。また、労働者の安全確保のために、有害ガス検知器、酸素濃度計などのセンサ機器も早期に導入されている。

今後の課題は、市場の変化に即座に対応し、安定な生産を継続することであり、多品種少量生産に対応した生産ラインの構築、従業員・作業者の安全確保・健康管理、装置の計画的なメンテナンス、緻密な資材管理・在庫管理などが求められる。多品種少量生産への対応では、多様な製品に対応して作業内容や工程を変更することが必要であり、多様な形状の資材・部品に対応できる自動化装置／ロボットの導入、人の作業状況や物の流れの把握と適切な配置などが求められる。従業員・作業者の安全確保・健康管理では、作業環境の温度、湿度、空気中の様々なガス濃度、粉塵などの検知や、作業者の体温、心拍数などから体調の異常を検知することが重要である。装置の計画的なメンテナンスでは、振動や音などの定常的な計測により、装置の状態変化や故障に至る兆候を事前に捉える必要がある。また、緻密な資材管理・在庫管理では、市場の動向、ユーザの状況、生産現場の状況、資材を供給する企業の状況など、バリューチェーンやサプライチェーン全体に関する情報を的確に把握することが重要になる。これらを全体として最適な状態で稼働させるためには、インダストリー4.0（Industrie4.0）に代表されるように、生産およびそのバリューチェーンに関する様々なデータを集めて、最適な生産計画を策定しシミュレーションすることが必要である。

このような将来のインダストリーの姿を実現するために、生産の効率化や生産現場における安全確保の視点から以下のような課題がある。

(生産の効率化)

- ・物の流れ、人の動き、装置の稼働状況、ボトルネックの把握
工場内に多くのモニタリング用のカメラ・センサを配置して、物や人の動き、作業環境や装置などに関する情報をモニタリングシステムへ送り、その後の対応を判断できるようにリアルタイムにAI画像解析などで状態を分析し、把握する必要がある。
- ・現状の問題点の分析による効率的な生産システムの設計
現状を把握してその問題点を認識することで、改善策の検討が可能になる。それには工場内から収集した各種情報のリアルタイムデータ処理に加え、バリューチェーンの状況から推測する需要シミュレーション、需要にマッチした生産体制を構築するラインの配置シミュレーション、生産のシミュレーションなどの各種シミュレーションツールが求められる。

(生産現場における安全確保)

- ・異常の検知や予測・予知に基づく最適な装置メンテナンス
装置の異常を検知するには、日常的に装置に由来する振動や音などのデータを取得・蓄積し、データの比較・分析をおこなうことが重要であり、例えばAIによる時系列データの分析が求められる。また、時系列データから状態変化予測(装置の故障/寿命予測を含む)をおこなう予測シミュレーションや、故障に至る前にメンテナンスをおこなうメンテナンス計画、異常事態が起きたことを想定した行動シミュレーション、異常事態における装置の緊急停止機構などの整備をしておくことが望まれる。
- ・作業環境の異常検知とリアルタイムの対策提示
作業環境の安全確保のため、様々なガス(酸素、CO、CO₂、使用ガスなど)や粉塵(浮遊物)などの継続的で安定的な検出が必要であり、これらに対応する化学センサなどのセンサ技術の研究開発が求められる。
- ・人の健康状態や作業効率の把握と適切な対策提示
作業効率や生産効率に影響を及ぼす作業者の体調管理のため、非侵襲のウェアラブルセンサによってバイタルデータ(脈拍、歩数、体温、発汗など)を定常的に計測することが求められる。

社会インフラ

我が国では高度成長期に建設された道路、橋梁や発電プラントなどの社会インフラの老朽化が進んでいる。例えば橋梁は全国で70万橋あり、建設年度が分かっている40万橋のうち、2023年には43%、2033年には67%が建設後50年を超えるとされている(図2-2)^(※)。また、トンネルは約1万本あり、2023年には34%、2033年には50%が建設後50年を超えるとされ、そのような状況下で笹子トンネル崩落などの重大な事故も発生している。新たな建設や大規模改修が財政的に望めない中、いかに効率的にインフラの維持管理をおこなうかが問題となっている。

現状、橋梁やトンネルの維持管理は目視と打音による検査が中心であり、費用、効率、精度などに課題がある。センサネットワークを用いた遠隔監視の試みは始まっているが、インフラごとに異なる取得データの種類(加速度、変位等)と取得方法、および異常を判定するためのパラメータの絞り込みなどに技術的な課題がある。

(※) 出典：「道路構造物の現状(橋梁)」(国土交通省) https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo1_1.pdf

例えば橋梁劣化の評価には、部材の変位と復元力から剛性を推定する方法があるが、これらを直接計測する手段は少なく、地動と橋梁各部の加速度を同期計測し、加速度応答から剛性と履歴特性を把握する方法等が用いられている。もし非接触で計測可能な変位センサや応力・歪センサがあれば、より直接的に剛性を評価することが可能になる。また、剛性の変化からの劣化判断は、現状、人間がおこなっており、これを自動化するためのパラメータの絞り込みなども今後の課題である。

また、設置場所によっては電源の確保が難しく、端末やセンサの省電力化、エネルギーハーベスティング技術も重要な開発課題である。現状、太陽電池パネルや振動発電といったエネルギーハーベスティング技術があるが、太陽電池パネルは設置場所によっては太陽光が当たらない、振動発電は得られる電力が小さいなどの問題があり、まだ必ずしも使いやすいものとはなっていない。

さらに、普及を促進するためには十分な市場性の確保やコスト低減も課題となる。現状の点検手段を代替するためには、現状以下のコストか、現状以上のメリットが求められるが、増大する一方の維持管理コストを考えると一般には前者が重視される。さらに、センサ端末を常設するとなれば、端末そのものの維持管理も必要になるが、50～100年といったインフラの長い寿命を考えると、何度かの交換が必要となる可能性がある。IoTデバイスの寿命や特性を考慮すると、常設するよりも定期点検時や災害時などに限って、安価、簡易、臨機応変に設置・計測できる方が望ましいとの声もある。このような状況下で、IoT・センシングシステムによるインフラの維持管理に十分な市場性が確保できるかどうかは大きな課題である。

別の視点として、インフラには防災・減災、地球環境情報プラットフォーム、エネルギーバリューチェーンに資する機能も求められる。橋梁モニタリング用のセンサ端末を、河川の水位計測、あるいは交通量のリアルタイム計測といった複数用途に利用すれば、災害状況のモニタリング、効率的な道路利用によるCO₂排出量やエネルギー削減といった新たなメリットが生まれ、市場性確保に有利に働く可能性がある。また、多用途のセンサ端末は、単体としてはコスト高となるが、用途別に異なる端末を複数設置するよりも安価となる可能性がある。

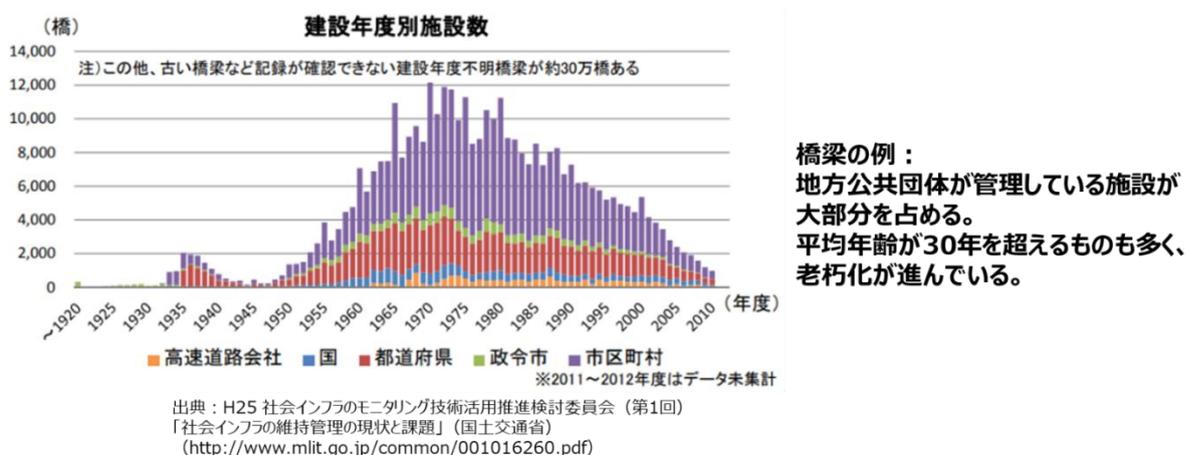


図 2-2 橋梁の建設年度と建設数

スマート農業

我が国の農業の現場では、担い手の高齢化が急速に進み、労働力不足が深刻になってきている。また、従来の農法では、作業者の勘や経験に頼る部分が多く、新規就農者にとっての障壁となっている。スマート農業の実現により、農作業における省力、軽労化を一層進め、効率性・生産性を増大するとともに、新規就農者の確保や栽培技術力の継承等が期待される。

スマート農業においては、様々なロボット技術の活用が考えられている。自動走行トラクターにより作業の軽減、より広い面積での耕作が可能となり、超省力・大規模生産の実現が見込まれる。人が手でおこなっていた収穫作業を自動でおこなう収穫ロボットも研究開発が進められており、センサによって作物の状態を確認し、最適な熟度のものを判別して収穫することも可能になると期待される。また、農薬の散布は重労働であるが、ヘリコプターによる散布は高コストであり、ドローンによる低コスト化、省力化が期待されている。さらに、ドローンは比較的近距離で作物の生育状況の把握が可能であるため、必要な部分だけへの農薬散布に加え、生育状況のばらつきに応じた追肥の実施が試みられている。これらのロボット技術の実現にはセンシングとアクチュエーションの連携が必要であり、高度なIoT・センシングシステムの構築が重要である。

様々な衛星データの活用も開始されている。GPSや準天頂衛星の測位データは、自動走行トラクターの圃場内自動動作、圃場間の自動走行移動に用いられる。さらに衛星からは、広範囲における圃場での作物生育状況、土壌状態の計測が可能であり、生育管理に必要な情報を圃場ごとに得て、効率的な生育管理を実施することが可能になると期待される。

従来、農作業の各プロセス条件については、熟練農業者の作業ノウハウという形で蓄積されていた。今後、新規就農者を増加させるには、AI等の活用によりノウハウを継承可能にすることが必要になる。また、様々なセンシングデータを取得し、AIによる予測技術を活用して生産最適化をおこなうことがスマート農業には期待されている。農業は計測対象が幅広く、気温・湿度、日照・降雨時間などの気象・気候データ、葉・茎等の成長・状態などの生育データ、病害虫の種類、病害の進行状況・範囲などの病害虫データ、土壌のpH、栄養素含有量、水分保有量などの土壌・水データ、作物の形質（フェノタイプ）データなど、極めて多種類のデータ取得が必要となる。また、センシング対象の空間的なダイナミックレンジも極めて大きい。農場全体を対象とする計測から、各植物、葉・茎・根などの個別部分に対する計測、さらには各植物の細胞、病原菌などの細胞レベルでの計測が必要な場合もある。このように、スマート農業に求められるセンシングは対象が幅広く、物理・化学・バイオセンサなど多種類のセンサが必要であり、空間的なダイナミックレンジもマクロからマイクロまで極めて大きい。その中で真に取得すべきデータ、センシングに必要な機能を絞り込み、最適化することも重要な課題である。

ライフ・ヘルスケア

我が国では高齢化の進展に伴い、介護などを必要とせず健康でいられる期間「健康寿命」の延伸の実現が喫緊の課題となっている。そのため、これまでは主に医療分野においてセンシングシステムの開発が期待されてきたが、近年では未病検知、疾患予防、健康管理といったヘルスケア分野にまで対象が拡大され、センシングシステム開発の進展が顕著となっている。特に、スマートウォッチに代表されるウェアラブルデバイスを利用したIoT・センシング技術により、個人のヘルスケアデータの取得と管理を行うデジタルヘルスケアサービスが急速に普及してきている。一方、最近になって、糖尿病患者向けに血糖量の変動を連続的に計測できるセンサデバイスが実

用化され、医療応用可能な新たなセンシング技術の開発も本格化しつつある。

ライフ・ヘルスケア分野において、センシングの主要な対象はヒトであるが、現状でヒト計測に関して計測可能な主要項目は、活動量、歩数、脈拍、睡眠状態等であり、ほとんどが物理センサを用いて計測されている。一方、ヒトの疾患予防や健康管理に関してより高精度に役立つ生体情報の多くは、生体由来の化学物質や生体分子等（バイオマーカ）の計測・解析により得られる。しかし現状では、そのようなバイオマーカの情報を簡便に取得可能な化学センサおよびバイオセンサに関して、実用化されているものは極めて少ない。

化学およびバイオセンサによるバイオマーカのセンシングにおいては、疾患予防や健康管理の観点から、病院等の医療機関ではなく、自宅や介護現場などで利用者が簡便に使用できることが望まれる。そのためには、簡単に、かつ非侵襲に採取が可能である呼気、唾液、涙、尿などの生体試料を計測対象としたセンサの開発が必要である。また、これらの生体試料中に存在するバイオマーカ量は、極微量である場合がほとんどであり、高感度な検出方法が求められる。さらには、より精度の高い生体情報を獲得するため、複数のバイオマーカなどの多項目測定を安定して実施できるセンサの開発も必要になっている。

また、計測対象のバイオマーカによっては、血糖値のように連続的に計測をおこなうことが必要な場合があるため、化学およびバイオセンサをウェアラブルに使用するための技術開発も重要となる。さらに、ウェアラブル化によるリアルタイムセンシングが可能となった場合には、センシングによって得られる情報量が膨大となり、また情報を即時に利用する必要があることから、エッジ側での情報処理に重きを置いたセンシングシステムの開発が求められる。

以上に示した通り、各応用領域にはそれぞれ異なる多くの課題が存在し、センシングシステムに求められる機能も様々である。図 2-3 に、各応用領域において特に要求されるセンシングシステムの機能についてまとめた。この図からも応用領域により必要な機能は異なることが明らかであるが、一方で、センシングシステムへの要求には次のような共通する方向性が見られる。

- 1) 時間情報、空間情報、異種情報（複数種類のセンサで取得される異なる種類の情報）などの多様な情報の取得
- 2) 高次の重要な情報導出（センシング情報の高付加価値化）
- 3) 上記 1)、2) を実現するためのセンサの高性能化、センサ端末の高機能化

特に要求される機能		モビリティ	インダストリー	社会インフラ	スマート農業	ヘルスケア
システムレベル	分析の高度化	○	○	○	○	○
	異常検知	○	○	○	○	○
	広域性			○	○	
端末レベル	マルチモーダル	○	○	○	○	○
	長寿命	○	○	○	○	
	電源・低消費電力			○	○	
	低コスト	○		○	○	○
	小型	○				○
センサレベル	高感度	○	○	○	○	○
	高選択性（選別能）				○	○

図 2-3 各応用領域で特に要求されるセンシングシステムの機能

すなわち、応用領域において要求される性能を十分に備え、かつ多様なデータの取得とその統合的処理によって高次の重要な情報を導出すること、すなわちセンシング情報を高付加価値化することがセンシングシステムに対する共通の要求になっている（図 2-4）。このようなセンシングシステムを実現する上で必要なセンサおよびセンサ端末の機能・性能の向上、システム化をおこなうための技術的基盤の構築が今後の課題といえる。

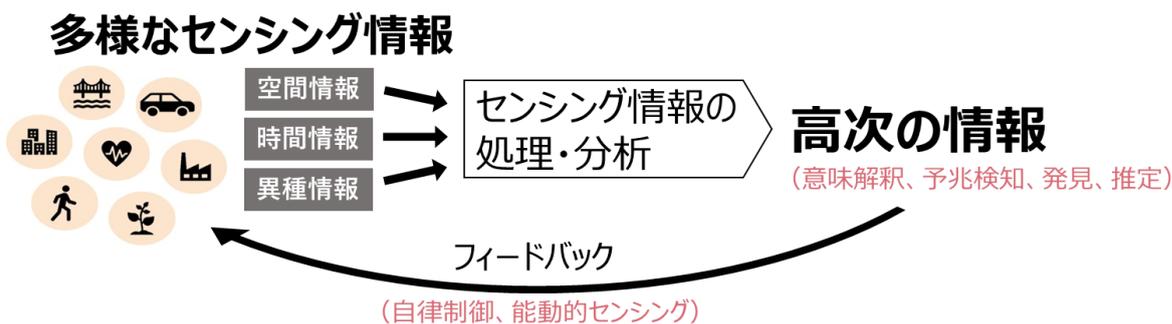


図 2-4 センシング情報の高付加価値化

2-2. 社会・経済的効果

現状、クラウドなど IoT システムの上層側にあるビッグデータや AI 関連の技術・サービスについては、米国の GAF A を中心としたプラットフォーム企業が市場を席巻している。しかし、現実社会においてリアルなデータを取得するセンシング技術は日本企業が強く、世界シェア 50%

以上を有するイメージセンサを筆頭に、日本企業によるセンサデバイスの世界シェアは3割を超える。小型・安価で高機能のセンサやセンサ端末の開発が進み、各種のデータを効率的に収集し高付加価値のデータとしてクラウド側に提供するセンシングシステムが実現・普及することによって、我が国のデバイス産業における国際競争力強化、新たなIoT産業の創出・牽引が期待できる。また、環境問題や感染症対策、食糧問題など、世界的な課題の解決やSDGsの達成に向けた取り組みにおいても、センシングシステムを活用した高度なIoTシステムに期待される役割は大きい。

以下、主な応用領域ごとに、高度なIoTシステム・センシングシステムの実現と普及によって期待される社会・経済的効果を示す。

モビリティ

すでに自動車に搭載されているセンサは1台あたり120個を超え、画期的な燃費向上に加え、タイヤの空気圧監視、前方・後方・路面監視、加速度センサ等によって安全安心な運転をアシストするシステムが普及しつつあり、2030年には2兆円を超える市場を形成すると予測されている。より高度なセンシングシステムの実現により、高齢の運転者等による操作・判断ミスに起因する痛ましい事故がゼロに近づくことが期待される。また、完全な自動運転が実現されると、安全安心な運転の実現だけでなく、社会的、経済的に大きな変革をもたらす可能性がある。

インダストリー

インダストリーにおいて最適なセンシングシステムが構築されると、大きな経済的効果や社会効果を生むと期待される。バリューチェーン全体での生産の効率化が進むことにより、無駄のない生産が可能になり、利益率の向上や競争力の強化が実現されることで、企業が安定した経営を継続できるようになる。また、多品種少量生産への対応が容易になると、個人の細かな要求に応じた製品を作ることが可能になり、満足度の高い製品の提供を通して顧客の拡大も期待される。フラウンホーファー労働経済・組織研究所（IAO）は、インダストリー4.0を通じて生産性の向上、新製品・新サービスの出現等が期待されることから、ドイツの経済付加価値が年1.7%伸びると予測している。また、マッキンゼーは、製造分野へのIoTの導入により、保守や業務効率化により0.9～2.3兆ドル/年のコスト削減効果が期待されると試算している^(※1)。

社会インフラ

社会インフラ管理において期待される直接的な効果としては、インフラの維持管理費の縮減が挙げられる。例えば国が管理する国道は22,362kmあり、これに費やす道路事業費は、改築費等（更新費を含む）が11,662億円、修繕費（橋梁やトンネルの補修や耐震補強費用を含む）が1,192億円、維持費（日常における除草や除雪、照明の電気代、道路監視費用等を含む）が966億円となっている（いずれも平成23年度）。国交省では、この費用を予防保全の考え方に基づいて縮減する計画である（詳細は【コラム2】参照）^(※2)。将来的にはIoT・センシングを活用したモニタ

^(※1) 出典：戦略プロポーザル 次世代ものづくり ～高付加価値を生む新しい製造業のプラットフォーム創出に向けて～（CRDS-FY2015-SP-01）

^(※2) 出典：国道（国管理）の維持管理等に関する検討会（国土交通省）
「国道（国管理）の維持管理等の現状と課題について」
https://www.mlit.go.jp/road/ir/ircouncil/road_maintenance/pdf/4.pdf
「国道（国管理）の維持管理基準に基づく管理状況（フォローアップ）と課題」
http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/road_maintenance/pdf/45.pdf

リングによって予防保全の効果を最大化し、維持管理にかかる費用を大幅に縮減することが期待される。

また、防災・減災の観点からも、IoT技術に対する期待は大きい。平成28年4月に発生した熊本地震では、主要な道路が複数箇所です断され、阿蘇大橋（国道325号）の崩落、俵山トンネル（国道57号）の崩落などの被害が発生した。地震直後の道路状況の把握は、損傷したインフラによる二次被害の防止や、緊急支援のための輸送路確保の点から特に重要である。監視カメラやIoTデバイスの設置・普及が進めば、被害状況の速やかな把握が可能になり、通行止めなどの措置や、利用可能な輸送経路の確保を迅速におこなうことができることと期待される。

近年多発する風水災害に対しても、IoT・センシングに期待される役割は大きい。令和元年10月に発生した台風19号による被害は全国で死者99名に上り、新幹線の水没（想定被害額300億円）など経済的にも大きな被害を生んだ。川崎市の浸水被害では、増水した多摩川からの水が排水管を逆流して被害が拡大したとされ、大河川と中小河川あるいは排水管が合流する場所では、両者の水位をリアルタイムで計測し、水門を操作する必要が生じている。近年では水位計が安価になり、より小さな河川の水位も計測可能になってきているため、IoT・センシング技術を十分に活用することで、強靱でレジリエントな社会インフラの構築が可能になると期待される。

さらに、社会インフラにおいてIoT・センシングを活用した新たな価値の提供も期待される。例えば、電力、ガス、水道において導入が進むスマートメーターは、人手による検針作業を自動化するばかりか、リアルタイムの需要把握によって、供給側の機器の効率的な運転が可能になる。将来的には、需要と供給のマッチングを図る過程で電気料金をリアルタイムに設定することによって、株式売買のような市場原理に基づく効率的な電力市場の構築が可能になると期待される。このような需給調整の仕組みができれば、太陽光や風力などの再生可能エネルギーの導入を大胆に進めるための切り札となる可能性がある。また、リアルタイムモニタリングとそれに基づく需給調整は、物流や人の流れ（MaaS：Mobility as a Service）の最適化、観光地のオーバーユース問題など、様々な社会課題の解決に応用できる可能性がある。需給調整の結果として見いだされる新たな需要は、新たな観光地、新たな交通路、新たな特産品などの供給を促し、地方創生につながることも期待できる。

スマート農業

スマート農業の導入により、超省力・大規模生産が実現し、農業生産の効率化、生産性向上が見込まれる。例えば、自動走行トラクターの導入により農業機械の夜間走行、複数走行、自動走行等が可能になり、生産性を大きく伸ばすことができると期待される。また、収穫、除草作業のロボットによる肩代わり、あるいは収穫物の積み卸しなどの重労働をアシストスーツで軽労化することで、農業従事者の作業負担が大幅に低減されると期待される。

IoT・センシング技術を活用し、作物の能力を最大限に引き出す農業生産をおこなうことにより、付加価値の高い農作物の効率的な生産が可能になると期待される。作物の生育状況を様々なセンサでモニターして生育条件を最適化し、品質を高め、さらに最高の品質で収穫することが可能な収穫ロボットを導入することで、コメ、野菜、果物などを、味、香り、外観などで高付加価値化・ブランド化することが可能になる。また、コメ、麦といった穀物については、主食という観点から野菜等に比べてコストダウン要求がより高く、また食物自給率の観点からはより生産性をあげる必要がある。穀物に関しても自動トラクターによる耕作の自動化、ドローンによる生育

状況の把握、農薬散布など、スマート化による生産性の向上が期待される。

市場の動向や消費者ニーズをIoTの活用によって正確に把握することで、ニーズに対応した農産物の生産が可能になる。需要予測が成り立てば、必要とする人に確実に野菜などを届けることができる。生産・流通・販売段階のデータを共有し、生産者と飲食店・小売店とのオンライン取引仲介サービスやスマートフードチェーンを構築することで、需要に応じた適時・適量の出荷が可能となり、輸送コストの低減、さらにはフードロス低減も可能になる。また、ブロックチェーンを利用して農産物の生産プロセスや流通過程を記録し、トレーサビリティを確実にすることで、農薬使用履歴の表示や産地偽装の防止などを通して、消費者にとっての食の安全性を高めることが期待される。トレーサビリティのIT化によって、生産者にとっての消費者ニーズの直接的な把握など、生産者と消費者との結びつきをより密にすることが可能になると考えられる。

ライフ・ヘルスケア

ライフ・ヘルスケアにおいては、化学・バイオセンサの進展による未病検知を可能とする鋭敏なバイオマーカーセンシングシステムの開発が期待される。また、ウェアラブル化学・バイオセンサの実現により、これまでウェアラブル物理センサによって取得されていた生体活動量情報に加えて、バイオマーカーデータの連続的な取得が可能になると期待される。複数のバイオマーカーデータによるIoTを活用した生体情報の統合的センシングシステムの開発によって、革新的な未病検知、疾患予防、健康管理に向けた検査方法の確立に大きく近づくと思込まれる。

このような新たなセンシングシステムが広範に普及し、利用が一般に広がることで、健康寿命延伸の実現につながると期待される。我が国においては急激な高齢化の進展による労働力の減少が避けられず、産業活動の低下により今後の経済成長が阻害されるとの懸念があるが、健康寿命の延伸により高齢者の社会活動期間の延長が可能となれば、高齢者の生き甲斐向上に加え、高齢者の就業促進による労働力の増加が期待される。また、健康寿命の延伸は介護・医療費削減につながる等、医療経済的効果も期待できる。さらに、就労している高齢者ほど消費活動が活発になる傾向があることから、経済活動の活性化にも寄与すると考えられる。

また、新たな生体情報センシングシステムの実現により、センシングデータを蓄積し解析をおこなうビッグデータ解析システムに関連した市場の拡大、さらには、それらIoTシステムを活用した健康増進・生活習慣病予防サービスや企業の健康経営支援システムなど、新しいヘルスケアサービスビジネスの創成が期待され、将来的に大きな経済的効果をもたらすと期待できる。

なお、ライフ・ヘルスケア分野において開発された生体情報センシングシステムについては、他分野への横展開も期待される。例えば、農業分野においては、生体情報センシングシステムの高感度検出、連続計測といった特長を活かし、植物体から発生している極微量植物ホルモン等の検出による生育モニタリングや、病害虫や植物病原性微生物の影響で植物体から放出されるガスの微量検知による早期病害発見・診断などへの展開が想定される。また、ヒトの生体情報モニタリングという観点から、生産現場における作業従事者等の健康状態や疲労度、飲酒検知などへの展開も期待される。

2-3. 科学技術上の効果

本提言の「センサ融合基盤技術の構築」に向けた研究開発を推進することにより、システムアーキテクチャ、回路、材料・デバイス等の異なる技術レイヤー間の垣根を超えて、創発的な異分野連携の先導的活動が生まれ、技術レイヤー間をつなぐ垂直統合的な新学術領域や新技術領域が形成されると期待される。センサ融合基盤技術の研究開発がもたらす科学技術上のインパクトは、以下に示すように様々な分野に及ぶ。

モビリティ関連の分野では、マルチモーダルで統合的なセンシングにより自動運転における状況理解・判断の高度化が進み、不測の事態における最適な対処が可能な自動運転技術につながる事が期待できる。

インダストリー関連の分野では、スマートファクトリー化が加速され、工場内のマルチモーダルな情報をリアルタイムで可視化・処理・分析することで工場管理のための知見が導出される。その解析結果を自動で実世界にフィードバック制御し、工場の全体最適化をリアルタイムで行う技術の深化が期待できる。

社会インフラ管理においては、多種多様なセンシングデータを高精度に時刻同期させてマルチセンシングし、処理・蓄積・解析する技術（例えば、マルチモーダル多点監視による異常検知システム、実時間異常検知・通報システム等の基盤技術）が生まれるとともに、社会インフラに関するセンシングデータの統合的データ管理基盤構築につながると期待される。

スマート農業関連の分野では、ドローンを使ったリモートセンシングによるハイスループット植物生体情報計測が、農業生産の現場に普及していくと考えられる。特に、人間の目視による観察と経験（および勘）に基づいておこなわれてきた植物の生育状態評価から、人間の目に見えない波長を捉えることが可能なマルチスペクトルセンサ技術を用いたハイパースペクトル画像による生理状態評価へと変貌すると期待される。また、従来の静的な生体情報（草丈、茎の太さ等）だけでなく、動的な生体情報（茎伸長、光合成速度、吸水速度等）も、植物生育診断技術として農作物生産現場で利用されるようになると期待される。さらに、農業分野においても膨大な情報を取り扱う情報科学の急速な発展が見込まれる。

ライフ・ヘルスケア分野においては、連続的に、かつ多数の活動量やバイオマーカの情報が得られることで、より精度の高い未病検知、疾患予防、健康管理が実現することに加え、得られた大規模センシングデータの解析により、疾患要因の解明といった医学的・生物学的な科学技術上の発見が期待される。また、将来的には、マルチモーダルヘルスケア AI 技術が拓かれ、認知症情報学と融合することで、人類未踏の超高齢社会に対処していくことが期待される。さらに、マルチモーダル・トラッキング技術により、生体情報（表情、血圧、心拍、脈拍、脳波、呼吸、眼球運動等）や対話内容から総合的に感情や思考を推定できるようになり、ヘルスケアの概念が深化すると期待される。

深層学習におけるブレークスルーと破壊的なイノベーションは、ハードウェア工学・データ科学・アルゴリズム理論の共進化によって引き起されたと言っても過言ではない。機械学習における予測・分類精度は、様々な状況におけるタスクにおいて、驚異的な速さで向上している。近年は、同一対象に対して複数のセンサから異なるモダリティ（modality）の情報を上手く組み合

わせて「マルチモーダル学習 (multimodal learning)」させることで、さらなる予測精度やロバスト性の向上が可能になってきた。センサ融合基盤技術によって実現される高度なセンシングはこのような機械学習の飛躍をも支え、「深層学習の先にある技術 (次世代 AI 技術)」につながる と期待できる。

実世界を完全に記述したり、完璧に予測することは本質的に不可能 (フレーム問題) と考えられている。また、実世界で観測できるのも、そのうちのごく一部に過ぎない (情報の部分性)。しかし、センサ融合基盤技術によって実現されるマルチモーダルなセンシングによって、限られた情報に基づいて実世界で日々遭遇する想定外の (未知の) 局面に柔軟に対処するための科学技術的知見が蓄積されるとともに、その工学的解決方法がやがて明らかになると期待される。センサ融合工学・ハードウェア工学・データ科学・アルゴリズム理論の共進化の誘起が期待される。

一方、物質を同定するセンサは、これまで無機/有機の物質や生体物質が有する特定の物理的、化学的、生化学的性質の検出、あるいは特定の物質構造の検出を通じて、物質科学、生命科学分野において重要な役割を果たしてきた。これらのセンサでは、より高い感度、より高い選択性が常に求められており、それらが達成されることで、経時的な、あるいは空間的な物質の特性の微妙な変化、あるいは夾雑物の中に隠された微量の生体物質の検出につながる。物質の持つ新たな特性や機能の発見、あるいは化学反応の動的観察、さらには疾患特有の新たなバイオマーカーの発見などを通して、物質科学、生命科学の進展に大きく貢献していくと期待される。

また、新たな検出原理に基づくセンサの開発により、既存のセンサでは得られなかった物理的、化学的、あるいは生化学的な情報の取得を実現することで、既存のセンサからの情報と組み合わせ、より正確な物質の同定も可能になると期待される。新たに開発されるセンサからの情報に加え、他のセンサ群からの異種情報と組み合わせた統合的な解析は、新たな物質の発見、また特定の物質の持つ特有の性質、構造のより正確な同定を可能とし、こちらも物質科学、生命科学の発展につながる と期待される。

【コラム1 センサフュージョン】

センサフュージョン (Sensor Fusion) とは、センサ融合あるいはセンサ統合とも呼ばれ、複数のセンサ情報から、単一のセンサでは得られない有用な情報（高付加価値の情報）を引き出す処理技術の総称である[1]。正確に表現すれば、センサデータフュージョン (Sensor Data Fusion) であるが、省略型のセンサフュージョンが一般的に定着している。日本では石川正俊らが、人間の五感（視覚、聴覚、触覚、嗅覚、味覚）に迫る「はかる」技術としてセンサフュージョンを捉え、多くの種類の感覚情報から融合した知覚を用いたセンシング技術の開発研究に先駆的に取り組んできた[1,2]。彼らによれば、センサフュージョンは、次の①～④の処理に分類できる[2]。①複合的処理（複数のセンサから得られた情報を並列的・相補的に組み合わせた出力を得ること）、②統合的処理（それぞれのセンサから得られた情報に演算処理を行い、まとまった情報を得ること）、③融合的処理（ある現象に対して、それを測定する複数のセンサの出力から、データ同士の処理を行い、1つの知覚を得ること）、④連合的処理（センサから得た情報間の関係を調べ、出力を得ること）。

センサフュージョンにおいて、最も一般的で有名なアルゴリズムはカルマンフィルタである[3]。これは、ノイズの多い入力データを平滑化し、状態を推定するための強力なアルゴリズムであり、現在ではナビゲーションや追跡のために携帯電話や衛星で使用されている。カルマンフィルタは、1960年にルドルフ・エミル・カルマン (Rudolf Emil Kalman) によって提案されたが、その名を一躍有名にしたのは、アメリカ航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration: NASA) のアポロ計画において、アポロの乗組員を月に送り、そして返すミッションで用いられたことによる。カルマンフィルタは逐次ベイズフィルタの一種であり、このフィルタをセンサフュージョンに使用すれば、確率的な枠組みで、現在、過去、または未来の（時間とともに変化する）動的システムの状態を推定することが可能となるので、様々な用途（誘導・航法システム、コンピュータービジョン、バッテリー充放電状態推定など）に用いられている。

革新的センサフュージョン技術が必要とされる代表例は自動運転車である。自動運転車には、車両の周囲 360 度を監視する数多くのセンサが組み込まれ、それぞれの特性を考慮したセンサフュージョンに最適なアルゴリズムでデータ処理を行わなければならない[4]。その際に、センサの不正確さ（ノイズ）は非常に重要な問題であり、自動運転車の自動化レベルが上がるにつれて、センサフュージョンに要求される安全性も厳しくなり、多種多様なセンサから取得したデータを組み合わせて適切な判断を下すことは必要不可欠となってくる。

センサフュージョンは本プロポーザルで目指すセンシング情報の高付加価値化における要とも言える技術である。カルマンフィルタが人類を月面に運んだように、センサフュージョン技術の革新がもたらす IoT の普及と進化は、様々な社会的課題の解決に挑む人類の飛躍を支えると期待される。

(参考文献)

- [1] 山崎弘郎(編), 石川正俊(編), 科学技術庁(監修), 『センサフュージョン—実世界の能動的な理解と知的再構成』 (コロナ社, 1992).
- [2] 石川正俊, “センサフュージョン: 五感に迫るはかる技術”, 日本機械学会誌 Vol.98 No.918 (1995) p.378-381.

- [3] 足立修一, 丸田一郎, 『カルマンフィルタの基礎』(東京電機大学出版局, 2012).
- [4] Hanky Sjafrie, *Introduction to Self-Driving Vehicle Technology* (Chapman and Hall/CRC, 2019).

【コラム 2 道路インフラの予防保全】

予防保全とは、損傷が深刻化してから大規模な修繕を行う事後保全に対して、損傷が軽微なうちに補修をおこない、橋梁等の道路インフラを長寿命化する考え方であり、長寿命化によって更新投資を抑制できると期待されている。例えば、図 2-5 に示す鋼橋（橋長 150m、5 径間連続橋）の修繕・更新に係わる費用の試算例では、大きな補修をせずに橋梁を使い続ける場合には、鋼橋の耐用年数である 45 年ごとに更新が必要となり、100 年間で 31 億円の費用が必要となる。これに対して、10 年毎の塗装塗り替え、15 年毎の床版防水伸縮装置交換、35 年毎のコンクリート床版のひび割れ注入を行う予防保全を実施することにより、100 年間のトータルコストを 8 億円まで縮減できるとしている。

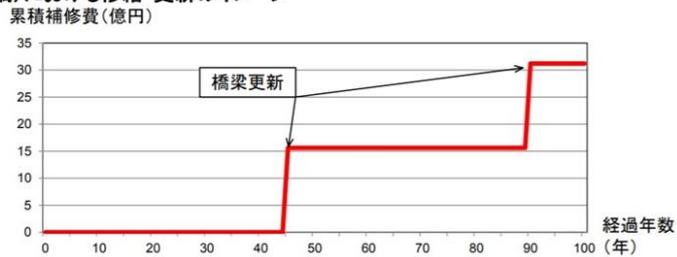
この予防保全においては、道路インフラのきめ細かなモニタリングが必要であり、IoT や AI 技術に対する期待は大きい。例えば首都高速道路（株）では、パトロールカーに 180° の画角をカバーするカメラを搭載し、全走行映像を位置と時刻情報とともに記録し、損傷発見時には、緊急通報システムによりリアルタイム映像を事務所・メンテナンス会社等と共有する取り組みを開始している。また、中部地方整備局では、道路巡回業務において、現地ではタブレット端末にて道路異状の状況（位置座標、写真、音声）を記録し、登録した情報を事務所の PC 端末上で共有する「道路巡回支援システム」を導入している。これらの取り組みはまだ始まったばかりであるが、将来は IoT・センシングを活用したより効果的なモニタリングの実現によって、予防保全の効果を最大化し、維持管理にかかる費用を大幅に縮減することが期待される。

■ 損傷が軽微なうちに補修を行う予防保全によって、長寿命化とコストの縮減及び平準化が可能

○ 鋼橋(L=150m、5径間連続橋)における修繕・更新のイメージ

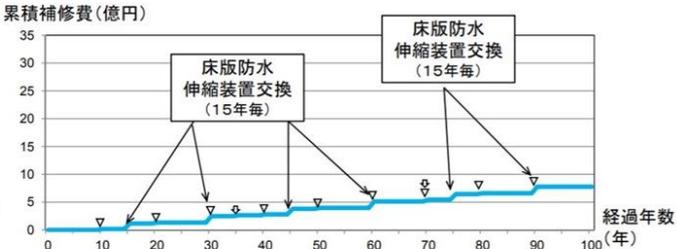
① 補修を実施しない場合
トータルコスト: 約31億円

※減価償却資産の耐用年数等に関する省令(S40. 3. 31財務省令第15号)において、鋼橋の耐用年数は45年とされている。



② 予防保全を実施する場合
トータルコスト: 約8億円

- ▽ 塗装塗り替え (10年毎)
- ◇ コンクリート床版ひび割れ注入 (35年毎)



出典：H24 国道（国管理）の維持管理等に関する検討会（第1回）
「国道（国管理）の維持管理等の現状と課題について」（国土交通省）
(https://www.mlit.go.jp/road/ir/ircouncil/road_maintenance/pdf/4.pdf)

図 2-5 予防保全による橋梁の維持管理費用縮減の試算例

3. 具体的な研究開発課題

センシング情報の高付加価値化には、空間情報、時間情報、異種情報などの多様な情報の取得とその統合的処理をおこなうセンシングシステムが必要である。このようなセンシングシステムを実現するセンサ融合基盤技術の構築に向けて取り組むべき研究開発課題は、図 1-1 に示すように、システムレベル、センサ端末レベル、センサレベルの 3 つの異なるレベルで存在する。下記 3-1、3-2、3-3 に各々の詳細を示す。

なお、2 章 2-1 で述べた通り、IoT では多様な情報を人間を介さず自動的に収集する必要があること、また、これまでクラウドでおこなわれてきた情報処理の一部を今後はエッジ側（データを生み出す側）が担う必要性の増加により、本提言では特にエッジ側のセンシングシステムに着目する。ただし、センシングシステムの設計をおこなう際にはクラウドなどの上層を含む IoT システムの全体を検討する必要があるため、システムレベルで求められる研究開発課題（下記、3-1）には上層まで考慮して記載する。

3-1 センシング情報の統合的処理（システムレベル）

IoT システムの上層側にあるクラウドの役割を考慮した上で、エッジ側情報処理機器およびセンサ端末、ネットワークからなるセンシングシステムのアーキテクチャを設計する必要がある。センサ端末、エッジ側情報処理機器、クラウドの 3 層について、各層の機能と、各層間でやりとりするデータを定義することが重要である。クラウドとエッジ側情報処理機器の間の通信はインターネットや公衆回線、エッジ側情報処理機器とセンサ端末の間は Wi-Fi、Zigbee、Bluetooth、あるいは LoRa といった近距離無線もしくは有線接続などが主に想定される。

一般には下層（センサ端末側）ほどやりとりするデータは大容量で低付加価値であり、上層（クラウド側）へ行くに従って、データは意味のある情報、情報は集約されて汎用的な知識、さらには膨大な知識から導き出される知恵と、より高付加価値なものになっていく。

設計の制約条件としては、各層の情報処理能力（演算能力）や各層間の通信容量（スループット）などが挙げられる。前者は各層で許容される物理的寸法や利用可能な電力、後者は各層間の通信距離や通信に割ける電力、公衆回線を利用する場合の通信コストなどによって制約を受ける。また、各層間でフィードバックやアクションをおこなう場合は、各層での情報処理や通信に伴う遅延（レイテンシ）も考慮する必要がある。

具体的なアーキテクチャの設計は、応用分野による個別性が高いため、サービス事業者等システムの利用者自身による設計、もしくは利用者の要求を十分に取り入れた設計が求められる。要求に従って策定するシステムの要件定義は極めて重要であり、何を目的とするシステムか、どのようなデータや情報を得て、どのようなフィードバックやアクションをおこなうかを明確に定義しておく必要がある。これに基づき各層の機能や層間の通信内容を決定して具体的な処理の検討をおこなうが、検討結果によっては各層の機能の再配分と再検討が必要になる。また、2-1 で述べたように、IoT デバイスの普及により端末側で扱うデータ量は膨大になり、データの効率的な収集やセキュリティの観点から、エッジ側での情報処理の重要性が増すことを念頭に置く必要がある。

システムレベルの研究開発課題として、センサフュージョン、イベントドリブンセンシング、

能動的センシングなどの検討が挙げられる。センサフュージョンは、複数のセンシングデータを融合して高付加価値の情報を引き出す処理であり、端末やエッジ側情報処理機器などの各層で、どのデータ・情報をどのように融合するか、アプリケーションごとに検討する必要がある。また、イベントドリブンセンシングは、データや情報の時間的な変化を検出し、上層や下層への伝達情報の変更やアクチュエーションをおこなうセンシングであり、やはり各層でどのような処理を行い、上層や下層にどのようなフィードバックを行うかアプリケーションごとの検討が必要である。また、能動的センシングは、ロボットのようにアクチュエータと一体になり、取得したデータや情報に基づいて次のデータの取得方法を変えるセンシングである。エッジ側情報処理機器をロボットの頭脳、それ以下の層を身体とする形態や、端末のみがマイクロマシンとして動作する形態などが考えられる。いずれもアーキテクチャと大いに関係するため、IoTシステム全体と一体で検討する必要があるが、通信容量やリアルタイム性を考慮すると、情報処理はエッジ側が中心になると考えられる。

一方、個別の設計ではなく、多様なニーズに対応可能な汎用アーキテクチャ、それに用いる汎用端末や部品なども研究開発対象として重要である。このような研究開発のアウトプットとしては、部品間のインターフェースや通信、データの標準化、各層に搭載するソフトウェアの開発などが期待される。ソフトウェア開発では、例えばリアルタイム実装に適したOSの開発・改修や、センサ制御に関わるミドルウェア、各層での個別開発を容易にするAPI (Application Programming Interface) の開発などが考えられる。いずれも多様なニーズに応えるだけでなく、性能とコストにスケラビリティを持たせることが求められる。また、汎用を目指したものであっても、ある程度は具体的なアプリケーションを想定した上で研究開発をおこなうことが、将来の普及につなげる上では重要となる。

3-2 センサ端末の最適化・高機能化（端末レベル）

センサ端末レベルにおいては、センサ制御、アナログフロントエンド、データの一時記憶、データ変換・特徴量抽出、電源制御・エネルギーハーベスティング、通信機能などの個別の機能ブロックや、これらを統合する集積・実装において研究開発課題があり、様々な用途に応じて最適な機能・性能をもつセンサ端末を創出する基盤技術開発が必要である。以下、それぞれについて具体的な研究開発課題を示す。

- センサ制御

センサの低消費電力動作、検出感度の制御、イベントドリブン制御、他のセンサとの時刻同期、センサの経時変化補正、センサのリフレッシュ動作などについて、さらなる研究開発が必要である。これらに対する要求は用いるセンサの種類や用途によって異なるため、具体的な用途やセンサを念頭に置いて制御回路を構築することが必要になる。特に、センサそのものと制御回路の消費電力を抑えるため、供給する電圧・電流の設定や駆動回路の設計、検出感度の制御、イベントドリブン制御は重要である。また、社会インフラのメンテナンスなどへの利用を考えると、多地点にセンサ端末を設置して多くのデータを取得し、それらのデータの相関を取る必要がある、多数のセンサ端末で同時刻に測定することが可能な時刻同期の機能を持たせることが求められる。さらに、化学センサのように、センサそのものが経時変化や劣化を伴う場合には、経時変化を補

正して測定する機能や、センサに熱を加えて吸着ガスを除去し清浄な表面を再生するようなりフレッシュ動作が必要になる。

- アナログフロントエンド (アナログ制御・A/D 変換)

アナログフロントエンド (AFE) においては、センサの微弱なアナログ信号を低ノイズ (高 S/N 比)、低消費電力でデジタル信号に変換することが重要である。特に、バイオ系の計測などでは、ppb から ppt レベルの超高感度が要求され、センサからの出力電圧はナノボルトという非常に小さな値になる。これは従来のセンサの 1/1000 の大きさの信号計測に相当する。また、センサ端末では低消費電力動作が必須であり、アナログフロントエンドには 1V 以下、0.5V 以下といった低い動作電圧が求められる。通常のオペアンプと AD 変換器を用いた回路ではこれらの要求に対応できないため、新たな AFE 回路の研究開発が必要になっている。例えば、逐次比較レジスタ (SAR) 型 AD コンバータの低電圧化を進めた回路や、時間領域で直接 AD 変換を行う時間領域信号処理などの研究開発を進める必要がある。また、複数のセンサやセンサアレイの信号を切り替えてデジタル信号への変換を可能にするような、スイッチ回路との組み合わせについても検討する必要がある。

アナログフロントエンドにおけるノイズの低減については、内部のノイズは回路の工夫で低減を図り、外部からのノイズは極力遮断するような対策が必要であり、いずれにしてもセンサとアナログフロントエンドを同時に検討することが重要である。

また、アナログ回路設計は職人的な経験を要するといわれるが、アナログ設計の経験がない研究者もある程度で設計できる環境を提供可能なプラットフォームの整備も課題である。

- データの一時記憶

センシングデータを一時的に蓄える不揮発メモリについても、低消費電力化、低電圧化の取り組みが求められる。不揮発メモリの代表であるフラッシュメモリは電源の無い状態でも長期の保持が可能であるが、データの書き込み時や消去時に高い電圧が必要であり、低電圧動作のセンサ端末には使いにくい。センサ端末では長期の保持は必要なく、用途によっては数日程度の保持で十分と考えられるため、保持特性は劣っても動作電圧が低く低消費電力の不揮発メモリも必要となる。

- データ変換・特徴量抽出

アナログフロントエンドでデジタル化された信号は生のデータであり、そのままではデータ量が膨大になってしまいセンサ端末と情報処理機器との通信に大きな負荷がかかるため、端末側で特徴量の抽出をおこなうことで生データから意味のあるデータ、価値あるデータに変換することが求められる。このようなデータ変換回路についても、測定対象やセンサの特性を把握した上で設計する必要がある。

- 電源制御・エネルギーハーベスティング

センサ端末には外部から電源を接続できない場合が多く、電源およびその制御は極めて重要である。特に、年単位のような長期にわたり電池交換ができない使用環境では、電力消費を極力抑えるための電源制御回路が必要になる。また、センサやアナログフロントエンドの使用状況に応

じ、一部の回路への電源供給を遮断するなどして電力の供給を最適化することも求められ、これを実現する電源制御回路の研究開発も必要である。

さらに、電池を搭載できない状況もあるため、自然界に存在するエネルギー源（光、振動、熱、電波など）を利用して電力を供給するエネルギーハーベスティングの研究開発も重要である。センサ端末の動作時や待機時の消費電力を考慮し、高効率発電、高出力化の取り組みが必要になる。また、センサ端末の大きさにもよるが、エネルギーハーベスティングの小型化も重要である。どのエネルギー源の利用が適しているか、センサ端末の使用環境を含め検討する必要がある。

- 通信機能

膨大な数のセンサ端末をネットワークキングする際にはケーブル不要の無線技術が便利であり、Bluetooth や LoRa 等の標準化された低電力の無線通信技術が普及している。しかし、高度なIoT・センシングシステムの実現には、現状の標準化技術では機能・性能的にカバーできない課題が存在する。例えば社会インフラ管理を目的とした構造物の共振周波数解析には、複数地点に設置されたセンサ端末間のミリ秒以下の時刻同期が必要になる。各センサに絶対精度の高い時計を持たせることはコストの面で非現実的であり、通信を介して時刻同期する技術が求められる。現在、インターネットにおいてはNTP（Network Time Protocol）という標準的な時刻同期プロトコルが存在するが、インターネット内ではパケットの遅延時間の影響があるためミリ秒級の時刻精度の実現は難しい。今後はエッジ側のローカルな空間において、各センサ端末が高精度のマスタクロックと時刻同期をおこなう技術が無線通信技術と組み合わせる必要がある。同様の課題が位置情報についても存在し、現在のGPSでは追いつけないようなダイナミックな動きへの追従が必要な場合がある。高精度な時空間情報に低コスト・低電力なセンサ端末で容易にアクセス可能になることが重要であり、現在のNTPやGPSに替わる次世代の時空間情報インフラとセンサ端末との通信制御方式、回路の検討や標準化が必要である。また、無線通信をさらに低電力化する技術とともに、エネルギーを無線通信で送る無線給電技術の研究開発も必要である。

- 集積・実装

センサ端末にはセンサそのもの、センサから出力されたアナログ信号をデジタル信号に変換する機能、デジタル信号処理、データ通信機能などの集積・実装が必要である。図3-1はセンサ端末に搭載する機能の一例を示したブロック図である。

どのような機能を端末に持たせるか、どこまでの信号処理を端末でおこなうかは電力、処理速度を勘案したシステムアーキテクチャによるが、全てのデータをクラウド側に送信することは考えられず、ある程度のデジタル信号処理機能も端末に集積する必要がある。また、センサ自体の高精度化に加えて、端末内での精度保証機能やマルチモーダル化によるさらなる精度向上も検討されている。複数のセンサの構成や精度保証機能をどのようなモジュール構造で実現していくかも重要な研究課題である。

端末の小型化・軽量化を実現する上で有効な1チップ化も重要な研究開発課題である。基本プロセスは今後もシリコンCMOS技術が採用されていくだろうが、センサにはシリコン以外の材料を使用したものも多い。これらの非シリコン・デバイスをCMOSチップ上に集積する技術も検討する必要がある。異なる機能をもつ複数のチップを1チップに集積する技術は、世界的にも注目されている。

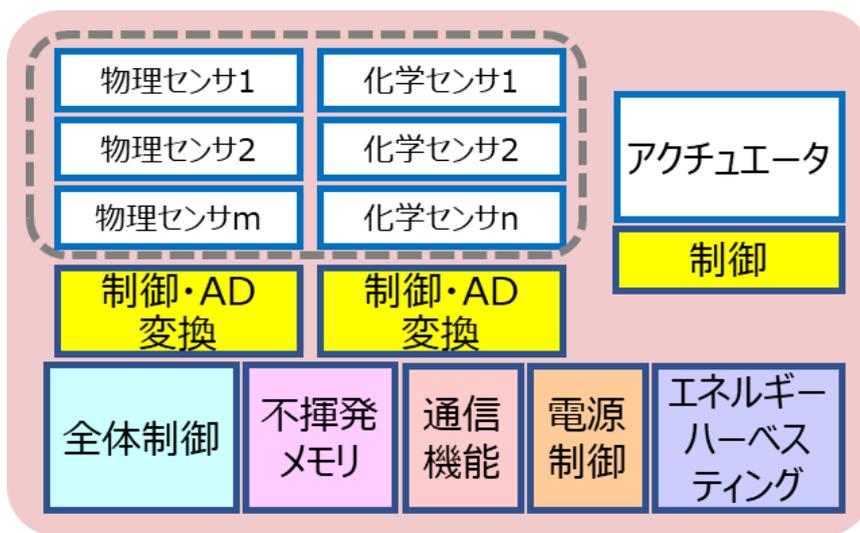


図 3-1 典型的なセンサ端末ブロック図

3-3 センサ性能の向上（センサレベル）

センシング情報の高付加価値化に向けては、センサで検出可能なデータの範囲・種類を拡大することが求められる。それにはセンサ自体の性能向上や、新たな検出原理をセンシングへ適用することなどが必要である。

センシングで得られるデータの範囲を拡張する上では、まず、センサの超高感度化が求められる。特に、化学・バイオセンサを用いた生体情報のセンシングにおいては、計測対象である生体試料中の化学物質や生体分子等のバイオマーカの存在量が極微量であるため、センサの超高感度化が最も期待される。要求される感度については、計測対象や目的によって様々であり、一概には目標値を設定できないが、例えば比較的高感度化が進んでいるガスセンサの場合では、現状の最高感度である ppb レベルが、さらに ppt レベルまで感度が向上すると呼気中のがんバイオマーカの検出等が可能となることから、3桁以上の高感度化が望まれる。

化学・バイオセンサの超高感度化には、計測対象分子（バイオマーカ）を高効率・高精度に認識可能な方法の開発が必要であり、バイオマーカ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、低分子化合物等）の親和性や結合能向上による高感度化や、認識分子からのシグナルを電気信号に変換するトランスデューサーでのシグナル増強方法等の検討が必要である。

生体情報のセンシングにおいては、センサの選択性向上も重要である。生体由来の試料には、ほとんどの場合、多数の夾雑物が混在しているため、センサにはバイオマーカ等の計測ターゲット分子だけを特異的に検出する高選択性が要求される。化学物質やバイオマーカに対する特異性を向上させた認識分子の創成や、特異的な分子吸着が可能な材料、もしくは夾雑物の非特異的な吸着を抑制可能な材料や表面処理技術等の研究開発が必要である。また、試料から夾雑物を分離・除去する前処理機能や、目的のターゲット分子を濃縮する機構をセンサ検出の前段に備えることで高選択性を実現する等も重要な課題である。

連続的な生体情報センシングも、センシング情報の高付加価値化に貢献する。連続的な生体情報計測の実現には、利用者に体の痛み等の負担を与えない非侵襲的なセンシング法の開発が必須となる。非侵襲的なセンシングには、採取が容易な呼気や体液（唾液、涙、尿等）を試料として用いることになるが、これら生体試料には、前述の通り夾雑物が含まれている。そのため、連続的な

センシングの際には、センサ表面への夾雑物の非特異的吸着によるセンシング性能の低下が問題となる。また、ターゲット分子がセンサ表面の認識分子に捕捉された状態のままであると連続的センシングの障害となる。連続的な生体情報計測には、センサ表面に非特異的に吸着した夾雑物の洗浄・除去や、認識分子に捕捉されたターゲット分子の脱離など、センサにリセット機能を持たせることが必要になる。また、センサのリセット機能に関して検討する際、認識分子として核酸、ペプチド、タンパク質などの生体分子をセンサ表面に固定して用いる場合には、認識分子の変性、分解が起こらないようリセット条件や方法など、センサ（特にバイオセンサ）の耐久性についても考慮する必要がある。

一方、物理センサに関しては、変位、加速度、磁気、温度、圧力、イメージなどを計測するセンサがすでに実用に供されているが、さらなる高感度化、低消費電力化、小型化が求められる応用分野も存在する。例えば、自動運転では安価で高精度（バイアス安定度： $\sim 0.1\text{deg./h}$ ）のジャイロスコープが要求されるが、安価に作れるMEMS技術では、約二桁の精度向上が必要である。このように用途によってはコストが優先される場合もあり、ニーズに応じた開発が必要となる。また、イメージセンサは、これまで肉眼の分光感度を規範としたRGBスペクトルでの撮像が主流であったが、今後は赤外線や紫外線の利用、多波長化、偏波やToF（Time of Flight）等の情報を取得できるマルチパラメータ化が期待される。さらに、物体を透過するイメージングを目的として、ミリ波やテラヘルツ波の利用も期待される。

複数のセンサを並列で使用するアレイ化技術によって、センサ機能を向上させることも重要な課題である。同種のセンサをアレイ化することで、計測対象の方向性に関する情報や、空間情報を取得することが可能になる。また、物理センサ、化学・バイオセンサなど異種のセンサを組み合わせアレイ化することで、同時に複数の計測ターゲットの検出・分析が可能になる。特に生体情報センシングにおいては、アレイ化した化学・バイオセンサによって単一ではなく複数のバイオマーカーを同時検出することで、未病検知や健康維持に関わるより精度の高い生体情報へのアプローチが期待できる。また、特定のターゲット分子に対して異なる特性をもつ複数のセンサをアレイ化することで、個々には分子選択性の高くないセンサであっても、高精度な検出・計測が実現可能になる。アレイ化技術に関しては、センサ部の並列化方法やそこからのシグナル検出、変換方法についても併せて研究開発をおこなう必要がある。センサアレイの小型化や、アレイ化に伴って増大するセンシングデータの処理方法も検討が必要である。

新たな検出原理をセンシングに適用することで、これまで検出できなかった物理量・化学量のセンシングを可能にすることも重要な課題である。近年研究が進んでいるAI技術の活用を意識したセンシングや、新たな物理現象・化学反応、新材料などを積極的にセンシングへ適用することが期待される。例えば、分子選択性の低い複数のセンサをアレイ化してセンシングをおこなう場合に、深層学習によって検出した信号のパターン認識をおこなうことで、ターゲット分子の高精度の識別が実現できると考えられる。また、ダイヤモンド中のNVセンターのような材料中の欠陥に起因する量子的性質をセンサの原理に利用することで、高感度な磁気センサなどが可能になると考えられる。さらに、特定の分子の形状を鋳型として持つナノ材料を創り出すことで、特定の分子だけが抗原抗体反応のように特異的に結合する、安定で再現性の高い高感度の分子センサが実現できると期待される。このような新たな検出原理に基づくセンサの研究開発は、多くの基礎研究、シーズ研究の中から生まれる可能性が高く、様々な分野の研究をセンサの視点から見直すことが重要である。

4. 研究開発の推進方法および時間軸

・異なる技術レイヤー間連携による研究開発

前章までに述べてきた通り、本提言で目指すセンシング情報の高付加価値化には、空間情報、時間情報、異種情報（複数種類のセンサで取得される異なる種類の情報）などの多様な情報の取得とその統合的処理をおこなうセンシングシステムが必要である。また、このようなセンシングシステムを実現するセンサ融合基盤技術の構築に向けて取り組むべき研究開発課題は、システムレベル、センサ端末レベル、センサレベルの3つの異なるレベルで存在する（図1-1）。システムレベルでは、多様な情報の取得からフィードバックに至るまでのセンシングシステムの全体設計（アーキテクチャ）や、センサフュージョンやセンサネットワークを実現するシステムを構成するセンサ端末・ネットワークの設計、アクチュエーションとの融合や能動センシング、イベントドリブンセンシングなどを実現するシステムの設計が必要となる。これらの研究開発は情報処理、システムアーキテクチャの専門家を中心に進められる。一方、センサ端末レベルでは、用途に応じた最適な機能・性能をもつセンサ端末を創出するための基盤技術として、集積・実装、アナログフロントエンド、電力源、通信機能、分析・制御等の研究開発が必要となる。また、端末を構成するセンサのレベルでは、検出可能なデータの範囲・種類の拡大に向けて、センサ自体の性能向上や、新たな検出原理をセンシングに適用するための研究開発が必要になる。これらのセンサ端末およびセンサの研究開発については、材料・デバイス・回路・実装などの専門家を中心になって進められる。このように、各レベルにおける研究開発に対応する技術レイヤーおよび主要なプレイヤーは異なっているが、センシングシステムにおいてシステム、端末、センサは独立ではなく、有機的な関係性をもって存在する。すなわち、各レベルで独立に研究開発を進めてもセンシングシステムの実現は不可能であり、全体のシステムアーキテクチャに基づいてシステム、端末、センサを設計して、異なる技術レイヤー間で連携を図り研究開発を進める必要がある。

・基盤技術開発プラットフォームの構築

異なる技術レイヤーの専門家が連携して研究開発を進めるには、センシングシステムの実現に必要な基盤技術（デバイス集積・MEMS・実装、アナログ・デジタル混載回路など）の開発能力を備えた研究開発基盤プラットフォームを形成し、異分野の専門家間の連携を促進することが有効である。研究開発基盤プラットフォームはその機能を具現化する物理的な研究開発拠点を中心に、後述するように、研究開発側のみならず、エンドユーザまでを巻き込んだ連携を可能にする仕組みを含むものである。このような研究開発基盤プラットフォームにおいて、メーカーとアカデミアの連携、IoTサービス事業者・ユーザとの連携も促進され、シーズ・ニーズを的確に反映した研究開発の推進が期待される（図4-1）。

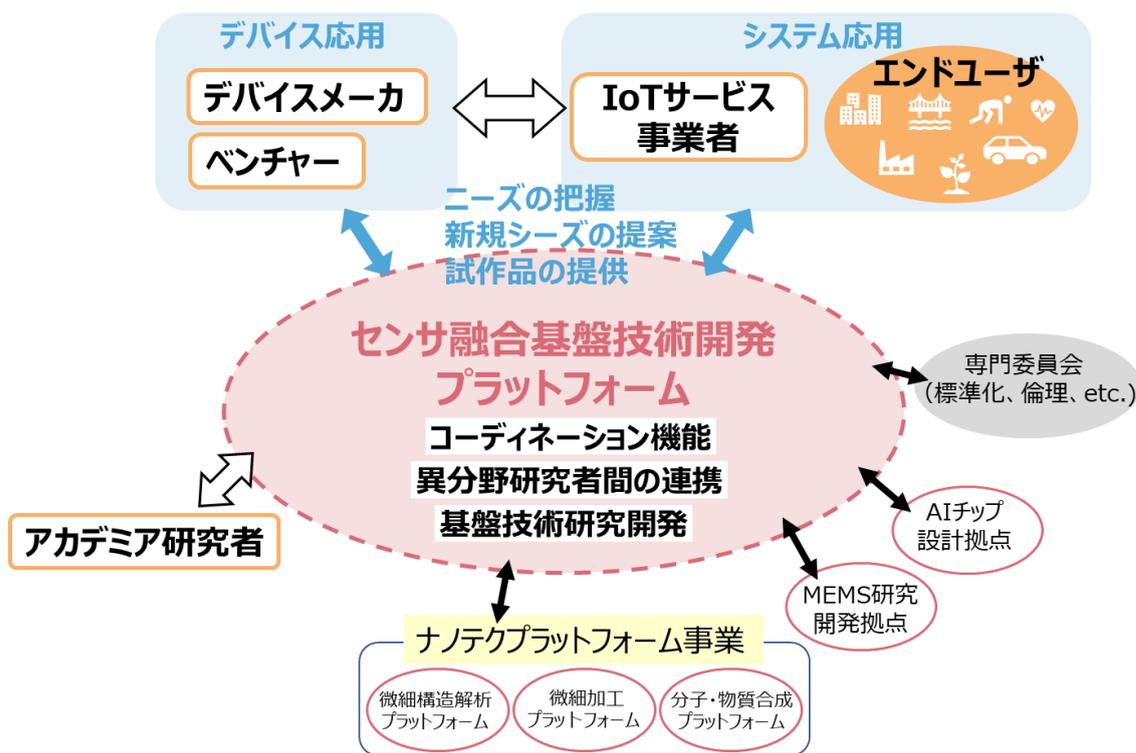


図 4-1 センサ融合基盤技術開発プラットフォーム

- 具体的な拠点の形成

基盤技術によって、多様な応用サイドからのニーズに応じていくためには、応用サイドと基盤技術を提供するサイドとの密なコミュニケーションが必要である。これを実現するには、(1) センシングシステムを具現化する多様な基盤技術が常に最先端の形で整備され、しかもそれらが利用可能になっていること、(2) センシングシステムの応用サイドと基盤技術提供サイドとの円滑なコミュニケーションを可能にするコーディネータが存在していることが望まれる。それには、上記の機能を担う単一、または複数の拠点（以下、単に拠点と記載）の形成が必要である。

- 関連拠点との連携、サプライチェーンの強化

拠点にはセンサ特有の基盤技術を研究開発する研究者が存在し、その拠点を特徴づける独自の技術を保有していることが重要である。また、拠点が保有する基盤技術だけでは目的のセンシングシステムを構築するのに不十分な場合は、必要に応じて外部の研究者、あるいは他の国家プロジェクトとの連携も必要となる。特に整備・維持が容易でない最先端の製造装置、評価装置を有効に利用するためには、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業や、各種 MEMS 拠点などとの連携が重要である。前者は、全国の大学、研究機関が一体となって最先端の研究設備の共用体制を構築しており、センシングシステム実現に必要な基盤技術提供の場として活用が期待できる。これら基盤技術が整備された拠点からなる基盤技術開発プラットフォームにおいて、情報処理やセンシングシステムアーキテクチャの研究者と基盤技術の研究者との共同研究、IoTサービス事業者やセンシングシステムのユーザなどの産業界との共同研究、新たな物理・化学現象や動作原理を活用したセンサの研究開発が実行される。

なお、ハードウェアとソフトウェアを含むセンシングシステムのプロトタイプを作るために必

要な技術やサービス（開発基盤）は、いわゆるサプライチェーンとして存在している。具体的には、LSI ファウンドリ、MEMS ファウンドリ、パッケージサービス、プリント基板作製サービス、実装サービス、システム開発企業、ソフトウェア開発企業、IC デザインハウス、計測サービス企業、コンサルタント等である。センシングシステムの研究開発能力を有する拠点が構築されることにより、サプライチェーンの各プレイヤー間の連携を強化すると同時に、サプライチェーンの中で上記拠点が存在意義を発揮するためにも拠点を特徴づける独自の基盤技術の存在が必要である。逆に言えば、そのような競争力のある技術ポテンシャルを保有する組織を拠点として認定すべきである。

- 成果のオープン化・共通基盤技術化

研究開発基盤プラットフォームの運営にあたっては、将来の事業展開を視野に入れながら、得られた成果のオープン化・共通基盤技術化のためのルール作りをおこなうことが重要であり、基盤技術分野における特許の有効活用が可能なコア IP の管理の仕組みを設けることが必要である。同時に、差別化技術の独占は企業の利益の源泉でもあるため、オープン・クローズの戦略的な使い分けが重要となる。また、研究開発基盤プラットフォームで生み出された独自技術をベースにしたスタートアップ企業の創出、支援も重要であり、独自技術およびその周辺技術の特許化と事業化への手厚い支援体制も必要となってくる。

- インターフェース情報の提供

ユーザや IoT サービス事業者にとって価値があるのはセンシングシステムによって得られる高付加価値の情報であり、センサ端末そのものに関する事業的興味・技術的知識が必ずしもあるわけではない。したがって、ユーザが必要とするセンシングシステムを開発するためには、ユーザ側と、端末の基盤技術を提供する側とを結びつけるための技術上の最低限の取り決めが必要となってくる。これらは例えば、端末の電圧レベル、データレート、消費電力、サイズなどのインターフェースとしての情報である。このようなインターフェース情報を提供することで、技術的に距離のある両者が効率よく連携できるようになると同時に、プラットフォーム側の基盤技術に不特定多数のユーザがアクセス可能になる。そのようなインターフェースの標準化も必要となる。

- 倫理面や合意形成に関する取組

センシングシステムの応用には、研究開発時には想定していなかった負の影響を伴う場合がある。例えばインフラや工場、人の安全を意図して設置された常時観測のシステムが、プライバシー侵害の問題を引き起こす恐れがある。また、健康・医療に関するデータは、まさに個人に紐付く情報であると同時に、ビッグデータとしての利用価値が高く、その帰属やデータの取り扱いには細心の注意を払うべきである。さらに、センサに関わる技術の多くは軍事転用の可能性もあり、デュアルユースの問題を含んでいる。このような ELSI に関わる諸問題を研究開発の当初から想定し、対処するため、プラットフォーム内に検討の場や組織を設けるとともに、外部識者やユーザと連携して検討を進めていく体制を持つ必要がある。

- コーディネータ、エンジニア、研究人材の育成

研究開発基盤プラットフォームでの共同研究の場面では、コーディネータの仲介により、応用

サイドの要求に応じて最適な基盤技術が提供される必要がある。このようなレベルの高いコーディネーションを実行するには、企業などで市場開拓の経験を積んだシニアな専門家が活躍することが有効と考えられる。また、共用装置の有効活用による連携のためには、相応の専門知識を有し技術的なサービスを提供できるエンジニアが必要であるが、一般に、そのような業務は研究論文の形にならず、研究業績として評価されにくい。特に産業界との共同研究においては、研究開発支援に専念してもキャリアが構築できる人事・評価システムが必要であり、それを前提としたエンジニア育成・確保の仕組みが求められる。さらに、上記機能を備えた拠点では、研究人材の育成面での効果も期待される。拠点には多様な専門分野を持つ研究者が集まり、異分野連携、産学連携に関わるセンシングシステムの研究開発が遂行されることから、それに交じって研究開発を実行する若手研究者は多くの刺激を受けて経験を積むことが可能になる。

- メーカーとアカデミアの連携

海外の研究開発基盤プラットフォームの事例には米国 NSF (National Science Foundation) 産学共同研究センターとしてカリフォルニア大学バークレー校に開設された「マイクロセンサ及びマイクロアクチュエータ・センター」(BSAC)がある。BSACでは産業界からの資金および研究者を受け入れて研究開発のためのコミュニティを形成し、スタートアップを含む参画企業は有利な条件で知財を利用することができる。欧州ではベルギーの IMEC (Interuniversity Microelectronics Centre) が代表的であるが、最初は大学の“出島”としてスタートし、発展とともに研究開発機構として独立した組織である。また、オランダの応用科学研究機構 (TNO) と IMEC が共同で設立したホルストセンター (Holst Centre) は、プリントエレクトロニクス分野に特化して研究者とユーザ企業が連携する研究開発センターとして機能している。総合電機会社のフィリップスの跡地に整備されたハイテクキャンパスに立地しており、企業側の研究開発の自前主義からの脱却が背景にある。いずれも産学双方の意識改革による連携強化が実現されており、我が国においても同様の仕組みの拡充が求められる。

- 研究開発の時間軸

IoT は世界的にも注目され新規サービスの創出・提供に向けた競争が激化している。我が国はセンサデバイスの分野に強みを有しており、多様なデータの取得と高付加価値化を可能にするセンシングシステムを一刻も早く実現することで、IoT 産業の牽引を目指すべきである。一方で、センシングシステムの研究開発、特に新規センサやセンサ端末などのハードウェア開発には時間を要するため、国による支援の下、長期的な視点での取り組みが求められる。前述の研究開発基盤プラットフォームを早期に整備するとともに、センサ融合基盤技術の構築に向けた研究開発課題に腰を据えて取り組む必要がある。これらの活動により、プラットフォームに共通基盤技術の適用例が多く積み上がり、それらが IP 化、データベース化されることで再利用が可能となり、共通基盤技術のさらなる高度化が実現すると期待される。その結果として、プラットフォーム自体の価値が高まり、競争的資金や産業界との共同研究資金の獲得につながり、プラットフォーム自立化への道も開けると考えられる。

研究開発の時間軸イメージを図 4-2 に示す。研究開発課題への取り組みには、アカデミアの研究に軸足を置いた研究開発と、産業界のニーズに基づく研究開発が想定され、前者は文部科学省や JST における 10 年程度の目的基礎研究、後者は経済産業省や NEDO による 5 年程度の研究

開発事業が適すると考えられる。いずれの研究開発も、上記プラットフォームにおいてアカデミアと産業界が連携しながら進めることが重要であり、プラットフォームの機能を十分に活用することで、スタートアップ企業の創出や、技術移転可能な成果創出の促進が見込まれる。大学等のアカデミアが個々に有する基盤技術を統合し、社会還元を促進する場としての役割がプラットフォームには期待される。また、応用領域に特化したセンシングシステムの研究開発についても、各府省の施策に基づく研究開発プログラムにおいて推進されることが望ましく、プラットフォームを介した府省間・施策間の連携、研究開発の加速が期待される。

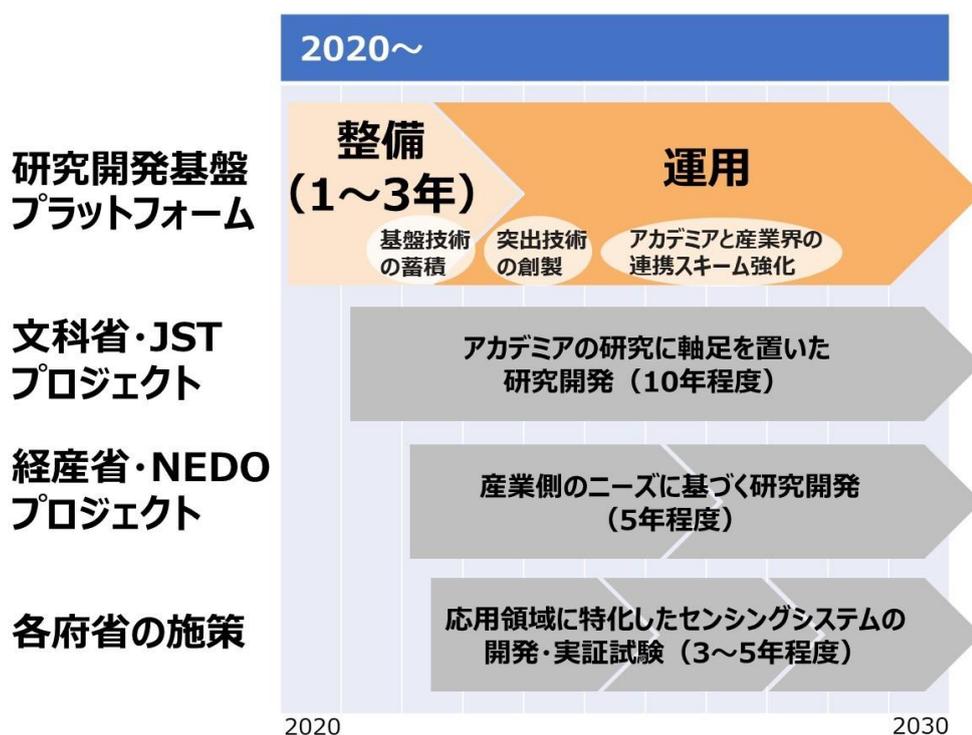


図 4-2 研究開発の時間軸

付録1. 検討の経緯

- ・JST 研究開発戦略センター（CRDS）では、令和元年度に戦略プロポーザルを作成すべきテーマの候補を CRDS 戦略スコープ 2019 検討委員会を経て指定し、令和元年 5 月に検討チームを発足させた。その後、検討チームにおいて提言作成へ向けた調査・分析・検討を重ねた。
- ・チームの活動では、調査によって国内外の研究開発動向・技術水準を明らかにしながらスコープの焦点を絞り、その過程において提言の方向性を検討するため、以下の有識者へのインタビュー・意見交換を実施した。
- ・その上で、センサ融合基盤技術に関する研究開発に関して CRDS が構築した仮説を検証する目的で、科学技術未来戦略ワークショップを開催した（詳細 34 ページ）。ワークショップの結果は報告書として、令和 2 年 3 月に CRDS より発行した（CRDS-FY2019-WR-09）。
- ・CRDS では以上の調査・分析の結果と、ワークショップにおける議論等を踏まえて、令和 2 年 3 月に本戦略プロポーザルを発行するに至った。

■ 意見交換・インタビューを実施した識者（敬称略、所属・役職は実施時点）

氏名	所属・役職
浅野種正	九州大学日本エジプト科学技術連携センター 特任教授
池田 信	PHC 株式会社新規事業開発部 部長
石川正俊	東京大学大学院情報理工学系研究科 教授
石黒仁揮	慶應義塾大学理工学部 教授
一木正聡	産業技術総合研究所センシングシステム研究センター 総括研究主幹
伊藤 聖	ボッシュ株式会社 FIJI プランテクト マネージャー
稲子みどり	Holst Centre Japan, Region Manager
内田 建	東京大学大学院工学系研究科 教授
内海和明	早稲田大学ナノ・ライフ創新研究機構 招聘研究員
大口哲矢	ボッシュ株式会社アグリカルチャービジネスユニット セクションマネージャー
大野圭一	ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社第 1 研究部門 部門長
大橋啓之	早稲田大学ナノ・ライフ創新研究機構 研究院教授
川喜多仁	物質・材料研究機構センサ・アクチュエータ研究開発センター センター長
栗田僚二	産業技術総合研究所バイオメディカル研究部門 研究グループ長
黒岩繁樹	早稲田大学ナノ・ライフ創新研究機構 研究院准教授
小林 健	産業技術総合研究所センシングシステム研究センター 研究チーム長
齋藤淳彦	ボッシュ株式会社アグリカルチャービジネスユニット プロジェクトマネージャー
桜井貴康	東京大学 名誉教授
澤田和明	豊橋技術科学大学大学院工学研究科 教授
下山 勲	富山県立大学 学長

関谷 毅	大阪大学産業科学研究所 教授
高尾英邦	香川大学創造工学部 教授
高橋敏幸	オムロン株式会社品質技術部 経営基幹職
高原佳史	PHC 株式会社新規事業開発部 主任技師
多田英司	東京工業大学物質理工学院 准教授
田中秀治	東北大学東北大学大学院工学研究科 教授
塚越拓哉	富山県立大学工学部 講師
塚田啓二	岡山大学大学院ヘルスシステム統合科学研究科 教授
中村 亨	大阪大学基礎工学研究科 特任教授
長山智則	東京大学大学院工学系研究科 准教授
灘岡正剛	PHC 株式会社新規事業開発部 主任
西澤松彦	東北大学大学院工学研究科 教授
野田堅太郎	富山県立大学工学部 講師
八谷 満	農業・食品産業技術総合研究機構農業技術革新工学研究センター 領域長
林 喜宏	ルネサスエレクトロニクス株式会社 シニア・プリンシパルススペシャリスト
樋口行平	アフォードセンス株式会社 代表取締役 CEO
平山照峰	ソニー株式会社 R&D センター 主席技監
福田伸子	産業技術総合研究所センシングシステム研究センター 研究チーム長
藤巻 真	産業技術総合研究所センシングシステム研究センター 副研究センター長
前中一介	兵庫県立大学大学院工学研究科 教授
松倉隆一	株式会社富士通研究所 ICT システム研究所 特任研究員
松本和彦	大阪大学産業科学研究所 特任教授
三林浩二	東京医科歯科大学生体材料工学研究所 教授
南 豪	東京大学生産技術研究所 講師
室山真徳	東北大学マイクロシステム融合研究開発センター 准教授
柳田 剛	九州大学先導物質化学研究所 教授
山田 真	ソニーネットワークコミュニケーションズ株式会社 IoT 事業部 ビジネスディベロップメントマネジャー
山本勝利	農業・食品産業技術総合研究機構企画戦略本部 経営企画部長
山本万里	農業・食品産業技術総合研究機構企画戦略本部 研究管理役
山本義春	東京大学教育学研究科 教授
吉川元起	物質・材料研究機構センサ・アクチュエータ研究開発センター グループリーダー
若林 整	東京工業大学工学院 教授

■ 科学技術未来戦略ワークショップ

「多様なデータの取得・統合処理を可能にするセンサ融合基盤技術
～センシング情報の高付加価値化に向けて～」

開催日時：2019年12月22日（日）10:00～18:00

開催会場：AP市ヶ谷 8階Aルーム

プログラム：

10:00～10:05	開会挨拶	曾根純一（JST-CRDS）
10:05～10:30	ワークショップの趣旨説明	荒岡礼（JST-CRDS）

話題提供1 IoT・センシングの応用分野 （各発表15分+質疑10分）

10:30～10:55	健康IoT社会のための人センシング	三林浩二（東京医科歯科大学）
-------------	-------------------	----------------

10:55～11:20	IoT技術を利用した道路および橋梁のモニタリング	長山智則（東京大学）
-------------	--------------------------	------------

11:20～11:45	スマート農業・ロボット農機の高度運用に向けて	八谷満（農研機構）
-------------	------------------------	-----------

11:45～12:10	センシングシステム構築上の課題	松倉隆一（富士通研究所）
-------------	-----------------	--------------

話題提供2 重要基盤技術（デバイス） （各発表15分+質疑10分）

13:00～13:25	フレキシブル高感度計測	関谷毅（大阪大学）
-------------	-------------	-----------

13:25～13:50	堅牢な分子識別センサ	柳田剛（九州大学）
-------------	------------	-----------

13:50～14:15	マルチモーダルセンシング	澤田和明（豊橋技術科学大学）
-------------	--------------	----------------

話題提供3 重要基盤技術（回路・実装） （各発表15分+質疑10分）

14:15～14:40	低電力アナログフロントエンド	石黒仁揮（慶應義塾大学）
-------------	----------------	--------------

14:40～15:05	サイレントボイスとの共感を促す地球インクルーシブセンシング社会の実現に向けたマルチセンサー集積実装 AI-Edge ネットワーク技術	若林整（東京工業大学）
-------------	--	-------------

15:05～15:30	センサ端末	前中一介（兵庫県立大学）
-------------	-------	--------------

15:30～15:55	MEMSとLSIをコア技術としたエッジヘビーセンシング	室山真徳（東北大学）
-------------	-----------------------------	------------

16:05～17:55	総合討論 論点	ファシリテータ 田中秀治（東北大学）
-------------	------------	--------------------

1. 仮説について
2. 重要な研究開発課題
3. 必要な環境・体制・人材育成

17:55～18:00	閉会挨拶	曾根純一（JST-CRDS）
-------------	------	----------------

ワークショップ参加識者：

発表者

- ・石黒仁揮 慶應義塾大学理工学部 教授
- ・澤田和明 豊橋技術科学大学大学院工学研究科 教授
- ・関谷毅 大阪大学産業科学研究所 教授
- ・長山智則 東京大学大学院工学系研究科 准教授
- ・八谷満 農業・食品産業技術総合研究機構農業技術革新工学研究センター 領域長
- ・前中一介 兵庫県立大学大学院工学研究科 教授
- ・松倉隆一 株式会社富士通研究所 ICT システム研究所 特任研究員
- ・三林浩二 東京医科歯科大学学生体材料工学研究所 教授
- ・室山真徳 東北大学マイクロシステム融合研究開発センター 准教授
- ・柳田剛 九州大学先端物質化学研究所 教授
- ・若林整 東京工業大学工学院 教授

ファシリテータ

- ・田中秀治 東北大学大学院工学研究科 教授

コメンテータ

- ・稲子みどり Holst Centre Japan, Region Manager
- ・川喜多仁 物質・材料研究機構センサ・アクチュエータ研究開発センター センター長
- ・桜井貴康 東京大学 名誉教授
- ・高橋敏幸 オムロン株式会社品質技術部 経営基幹職

CRDS 特任フェロー

- ・伊藤聡 ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー、物質・材料研究機構 MI²I 拠点長
- ・岩本敏 ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー、東京大学生産技術研究所 教授
- ・佐藤勝昭 ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー、東京農工大学 名誉教授
- ・清水敏美 ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー、産業技術総合研究所 名誉リサーチャー
- ・本間格 ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー、東北大学多元物質科学研究所 教授

付録2. 国内外の状況

日本は世界的に高水準のセンサ技術を有しており、そのことは日系企業がセンサデバイスの世界シェア3割超を有すること、化学センサが日本で誕生したことなどに現れている。過去のセンサ関連プロジェクトの代表的なものに、1991年～1995年の「センサーフュージョンの基盤技術の開発に関する研究プロジェクト」（科学技術庁・科学技術振興調整費）がある。その後、JST-CREST「先進的統合センシング技術」（2005年～2012年）などを経て、2000年代からAI、ライフ・ヘルスケア、自動運転、インフラ関連、スマート農業関連、セキュリティ関連など、応用を視野に入れた多くのプロジェクトが開始され、一部は現在も継続中である。また、JST-ERATOでは「前中センシング融合プロジェクト」（2007年～2012年）が実施され、その成果をもとに設立されたベンチャーで現在も絆創膏型生体センサの研究開発がおこなわれている。

近年の国内における主なIoT・センサ関連プロジェクトを図S2-1に示す。ライフ・ヘルスケア関連のセンシングを扱うプロジェクトとしては、JSTのCOI STREAMや、昨年度に終了した内閣府 ImPACT「進化を超える極微量物質の超迅速多項目センシングシステム」（2014年～2018年）が代表的なものとして挙げられる。JST産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム（OPERA）の「マルチモーダルセンシング共創コンソーシアム」（2018年～2023年）では、イオンイメージセンサを基盤に、複数の物理・化学現象を同時に検出するマルチモーダルセンシングの研究開発がマッチングファンド形式の産学共同で進められている。また、NEDOではセンサネットワークの普及に向けてセンサ製作プロセス、センサモジュール、それらを活用するためのセンサシステムの開発をおこなう「社会課題対応センサシステム開発プロジェクト」（2011年～2014年）が実施され、実証試験を経てシステムの有効性が示されている。2019年からは、NEDO「IoT社会実現のための超微小量センシング技術開発」が開始、2020年には内容を拡充して「IoT社会実現のための革新的センシング技術開発」と名称を改め推進されている。NEDO「IoT推進のための横断的技術開発プロジェクト」中の「トリリオンノード・エンジンの研究開発」（2016年～2018年）では、センサのプラットフォーム技術を目指した研究開発が進められ、オープンソース・ハードウェアの仕様、回路図、パターン図、応用例、ソフトウェアなどが一般に公開されている。

2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
			【NEDO】高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発								
					【NEDO】AIチップ開発加速のためのイノベーション推進事業						
					【NEDO】IoT社会実現のための革新的センシング技術開発						
			【JST】COI STREAM 人間力活性化によるスーパー日本人の育成拠点（大阪大）								
			【JST】COI STREAM さりげないセンシングと日常人間ドックで実現する理想自己と家族の絆が導くモチベーション向上社会創生拠点（東北大）								
			【JST】COI STREAM 『サイレントボイスとの共感』地球インクルーシブセンシング研究拠点（東工大）								
			【JST】ImPACT 進化を超える極微量物質の超迅速多項目センシングシステム								
					【JST】OPERA マルチモーダルセンシング共創コンソーシアム						
			【第1期SIP】自動走行システム								
			【第1期SIP】インフラ維持管理・更新・マネジメント技術								
			【第1期SIP】次世代農林水産業創造技術								
					【第2期SIP】自動運転（システムとサービスの拡張）						
					【第2期SIP】IoT社会に対応したサイバー・フィジカル・セキュリティ						
					【第2期SIP】フィジカル空間デジタルデータ処理基盤技術						
					【第2期SIP】AIホスピタルによる高度診断・治療システム						
					【第2期SIP】スマートバイオ産業・農業基盤技術						

図 S2-1 主な IoT・センサ関連プロジェクト（日本）

各研究機関の取り組みとしては、2018年6月に物質・材料研究機構にセンサ・アクチュエータ研究開発センターが開設された。「センサ開発領域」「作動機能開拓領域」「アクチュエータ研究領域」の3領域で構成されていることが特徴であり、通常別個に研究開発がおこなわれるセンサ、電源、アクチュエータの3者の中で研究開発のサイクルを回す形になっている。また、2019年4月には産業技術総合研究所にセンシングシステム研究センターが設立され、産総研内で培われてきたフレキシブル実装技術、MEMS集積技術、光センシング技術などの要素技術を集結し、デバイス、実装、伝送、解析の垂直連携によるセンシングシステムの開発、評価・標準などの基盤技術の強化が進められている。

米国では2012年に Trillion Sensors Universe の概念が提唱されたことにより、センサ技術の開発、社会実装への機運が高まった。Trillion Sensors Universe は1兆個を上回るセンサを活用して社会に膨大なセンサネットワークを張り巡らせることにより、地球規模の社会的問題を解決しようとするものであり、SDGs に向けた活動の一部になっている。2013年には、これを早期に実現するために Trillion Sensors Initiative というプロジェクトが開始した。その目的は Abundance（豊かな世界）の早期実現のためにセンサ技術の開発期間を短縮しようとするもので、将来出現する膨大な量のセンサ応用を明らかにし、産学官連携によるセンサ技術開発促進のためのロードマップ提示と、製品化を加速するためのサプライチェーン構築を目指している。

国のプロジェクトとしては DARPA（Defense Advanced Research Projects Agency）が慣性センシング（ジャイロ）技術を中心に、高周波無線、低消費電力センサなどの関連技術の開発を継続的に支援している。例えば PRIGM（Precise Robust Inertial Guidance for Munitions）プログラム、SPAR（Signal Processing at RF）プログラム、N-ZERO（Near Zero Power RF and Sensor Operations）プログラムなどがある。また、NSF（National Science Foundation）では2000年代に Sensors and Sensor Networks プログラムにおいて、民間では行われなかった長期的視野に立ったテーマでセンサに関する多くのプロジェクトを推進した。

その他の動向として、センサ端末の集積化はミシガン大学が実装込みの研究開発で実績を積ん

でおり、存在感を示している。センサに関連する論文の多くは AI、RF、システムソリューションが内容の中心であり、センサでデータを取ることも、データの使い方を重視する傾向が強くなっている。ヘルスケア関連では、NIH (National Institutes of Health) が Mobile Health プログラムにおいてライフログ、生体情報計測、問診情報などをベースに健康管理をおこなうための研究開発を推進している。他にも米国では、UC Berkeley、NASA、JPL (Jet Propulsion Laboratory) など軍事応用を含め活発にセンサ関連の研究開発が行われている。

欧州では、研究・技術開発分野の政策である「フレームワークプログラム」に基づいて将来のスマートシティ実現を目標に掲げ、それに資する各分野でセンサネットワーク関連技術の研究開発を推進している。日米に比べると小規模アプリケーションによる研究事例が多く、比較的小型の個別実験プロジェクトが多い。Horizon2020 の中では、MEMS 関連技術を支援しており、IMEC、MINATEC で MEMS やマイクロ流路を活かした新しいバイタルセンサなどのデバイスを研究している。一般的に欧州は化学センサ、バイオセンサの研究者数が多いことが特徴となっている。また、スマート農業に関してはオランダが進んでいる。オランダでは 30 年前から農業用センサを駆使して生育条件の最適化を図り、それらと水耕栽培の技術を組み合わせることで、トマトの単位面積当たりの収量を従来の 5~7 倍まで上げることに成功している。

アジアでもセンサに関する研究開発は近年盛んになっており、特に中国の研究レベルが急激に上がっている。中国では、政府が MEMS 関連の国内企業に積極的に補助金を出している。韓国では、世界の IT 市場における先進的な位置づけを確保するため、2000 年代に IT8-3-9 戦略を策定し、構築すべき 3 大インフラの一つにユビキタスセンサネットワークを挙げており、情報セキュリティの強化も重要な目的の一つとされている。

2008 年～2018 年に世界で発表されたセンサ関連の論文について、全論文数と被引用トップ 10%論文数の上位 10 ヶ国における推移を図 S2-2 に示す。この 10 年間における中国の伸びは著しく、2016 年には全論文数と被引用トップ 10%論文数ともに米国を抜いて 1 位となっている。その他の国ではインドの伸びがやや目立つが、中国・米国と他国との開きは極めて大きい。日本は横ばいが続いており、2010 年頃までは全論文数でドイツと 3 位を争っていたものの、2018 年には 8 位にまで順位を下げている。被引用トップ 10%論文数は 2018 年では 9 位であり、日本の存在感はさらに薄くなっている。付録 2 の冒頭で述べたとおり、日本はセンサ技術において世界的に高水準と認知されているものの、現状のままでは優位性を失いかねない危うい状況にある。

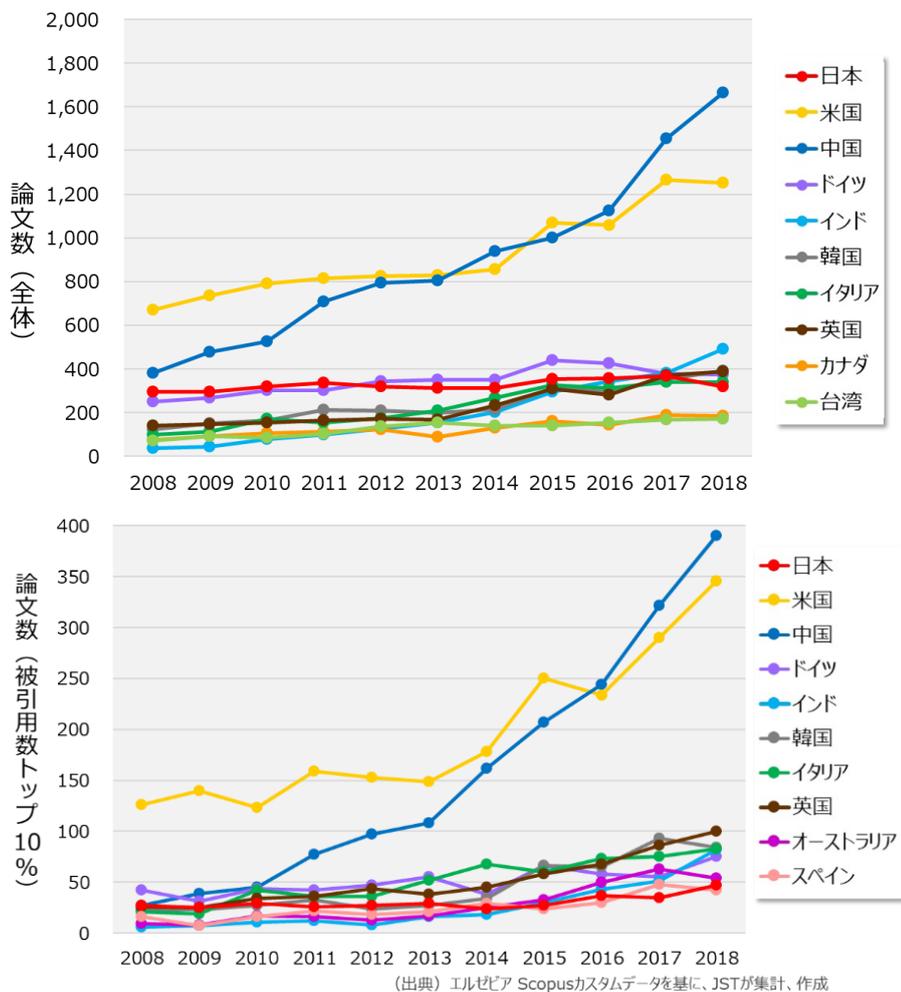


図 S2-2 センサ関連の論文動向

付録3. 専門用語の説明

エッジコンピューティング

クラウドがIoTネットワークの利用者には直接見えない奥のコンピュータシステムを指すのに対し、エッジは利用者に近く、クラウドとはネットワークの反対側に位置する末端部分を指す。IoTの時代を迎え、エッジでおこなうコンピューティング、すなわちエッジコンピューティングの重要性が増している。

GAFA

Google、Apple、Facebook、Amazonの4巨大IT企業を、頭文字を取ってGAFA（ガーファ）と呼ぶ。

プラットフォーマー

一般に、サービスの基盤となるものを扱う企業群をプラットフォーマーと呼ぶ。近年はインターネットが多く新しいサービスを産み出していることから、GAFA等の巨大IT企業群がプラットフォーマーと呼ばれることが多い。

ファウンドリーサービス

半導体業界において、半導体チップを生産する工場がファブ（Fab：fabrication＝製作が語源）であり、生産会社が注文主に対して提供するチップ製造サービスをファウンドリーサービスと言う。

MEMS

Micro Electro Mechanical Systemsの略。半導体集積回路のプロセス技術を用いて、微小な機械要素部品をシリコン基板等の上に作り込む技術であり、既にスマートフォン等では微小な加速度センサがMEMS技術で実現され搭載されている。センサ融合基盤技術を構成する重要技術であり、さらなる活用の広がりが期待される。

マルチモーダル

直訳すると「多様な形式」であり、使用される状況に応じて様々な意味を持つ。マルチモーダルセンシングと言う場合には、物理、化学、バイオなど様々なセンシング原理で取得したデータを合わせて活用することで、より精度などを向上させた有用なセンシングデータを取得する方法のことを意味し、最近ではAI技術を活用して解析的に有効なデータを抽出する方法も含む。

アナログフロントエンド（AFE）

センサ端末において、センサからの電気信号をアナログ量で取得し、マイクロプロセッサ等にデジタル量として出力する回路ブロックを指す。アナログ・デジタル変換器やアナログ量を増幅するアンプ等が含まれる。

Bluetooth

1990年代に規格化が開始された近距離無線通信規格の一つ。主に身の回りのデジタル機器を接続する際に使用されるが、近距離でセンシングネットワークを構成する場合にもよく使用される。WiFiと呼ばれる無線LAN規格よりも通信速度は劣るが低電力である。

LPWA

Low Power, Wide Area の略。正式な定義はないが、近距離無線よりも広域（Wide Area）で使用できる低電力（Low Power）な無線方式を指す用語として最近使われ始めた。LPWAN（Low Power Wide Area Network）と呼ばれる場合もある。屋外の広い空間においてIoTを普及させる上で重要な技術である。携帯電話方式のカバーエリアを越える範囲で使用される場合もある。低電力であるが、通信速度は低い。

LoRa

LPWAの一種であり、2015年に設立されたLoRa Allianceが仕様化している。250bps～50kbpsの通信速度で数km～十数kmの範囲をカバーする。LPWAの中でも免許不要の周波数帯域を用いる方式である。

物理センサ

力学的、電気的あるいは磁気的な量や、光、熱、温度などの物理的諸量を計測の対象とするセンサ。圧力、加速度、ジャイロ、地磁気、画像、光、温度センサなど各種センサが実用化されている。

化学センサ

計測対象となる特定の化学物質に対する分子認識能を有し、対象物質の成分とその構成比、濃度などの化学的諸量を計測の対象とするセンサ。pHセンサに代表されるイオンセンサや、O₂、CO₂などを検出するガスセンサなどがある。

バイオセンサ

タンパク質、抗体、核酸（DNA、RNA）、細胞、微生物等の生体に関連する物質が有する分子認識能を利用し、特定の化学物質や生体分子の計測をおこなうセンサのことを指す。化学センサの一つとして分類される。バイオセンサの代表例としては、血糖値の測定に用いられるグルコースセンサがある。

バイオマーカ

生体内の生物学的変化を定量的に把握するための指標を指し、疾患の有無やその治療効果の判定等に利用される。生化学検査や血液検査におけるマーカ（がんマーカ等も含む）など、非常に多様なバイオマーカが存在する。疾患の特定を目的とした診断マーカ、疾患経過を予測する予後マーカ、さらには、治療効果を予測する予測マーカなどが利用されている。広義には、日常の検査や診察に使われる体温や脈拍なども含まれる。

■戦略プロポーザル作成メンバー■

総括責任者：曾根 純一	上席フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
リーダー：荒岡 礼	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
メンバー：河村 誠一郎	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
馬場 寿夫	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
高島 洋典	フェロー	(システム・情報科学技術ユニット)
的場 正憲	フェロー	(システム・情報科学技術ユニット)
島津 博基	フェロー	(ライフサイエンス・臨床医学ユニット)
村川 克二	フェロー	(科学技術イノベーション政策ユニット)
新井 正伸	主任調査員	(研究プロジェクト推進部グリーンイノベーショングループ)
久野 範人	主任調査員	(研究プロジェクト推進部 ICT/ライイイノベーショングループ)
鈴木 信弘	主任調査員	(研究プロジェクト推進部 ICT/ライイイノベーショングループ)
小島 直人	主任調査員	(経営企画部エビデンス分析室)
勝又 康弘	主任調査員	(戦略研究推進部グリーンイノベーショングループ)

※お問い合わせ等は、下記までお願い致します。

CRDS-FY2019-SP-10

戦略プロポーザル

IoT時代のセンサ融合基盤技術の構築

～センシング情報の高付加価値化に向けた多様なデータの取得と統合的処理～

STRATEGIC PROPOSAL

Sensor Fusion Technologies in IoT era

- Multimodal Sensing and Data Processing for Creating New Value -

令和2年3月 March 2020

ISBN 978-4-88890-679-1

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/crds/>

©2020 JST/CRDS

許可無く複製／複製をすることを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.

Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ATTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC

CT CTCGCC AATTAATA

TAA TAATC

TTGCAATTGGA CCCC

AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC

ATAAGA CTCTA ACT CTCGCC

AA TAATC

AAT A TCTATAAGA CTCTA ACT CTAAT A TCTAT

CTCGCC AATTAATA

ATTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTA ACT

CTCGCC AATTAATA

TTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTA ACT

ATTAATC A AAGA C CT

GA C CTA ACT CTCAGACC

0011 1110 000

00 11 001010 1

0011 1110 000

0100 11100 11100 101010000111

001100 110010

0001 0011 11110 000101

ISBN 978-4-88890-679-1

