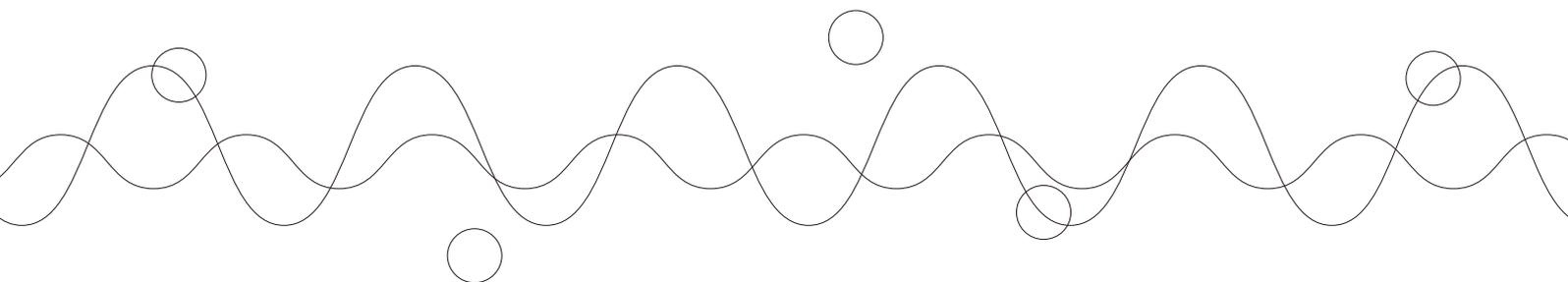


科学技術未来戦略ワークショップ報告書

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～

2019年12月22日(日)開催



エグゼクティブサマリー

本報告書は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）が令和元年12月22日に開催した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～」に関するものである。

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、介護・医療・健康管理など、安全・安心な社会の実現に向けて我が国が抱える課題は山積している。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）である。IoTでは様々な場所に設置したセンサで様々な情報を継続的に取得し、分析・解析をおこない、その結果を何らかの動作（アクチュエーション）としてフィードバックする。IoTで取得すべきデータは多種・多様であるが、それらを高度に活用するには様々なデータを統合的に処理・分析して高次の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である。一方、ネットワークにかかる負荷の低減やセキュリティ、プライバシー保護、リアルタイム情報処理の必要性などから、IoTにおいては情報を生み出す側（エッジ側）における情報処理の重要性が認識され、センサ端末およびエッジ側情報処理機器、ネットワークによって構成されるエッジ側のセンシングシステムの果たす役割が重要になっている。このような背景を踏まえ、CRDSでは多様なセンシングデータの取得とその統合的処理を可能にするための基盤的技術（＝センサ融合基盤技術）の構築を重要テーマの一つとして掲げ、その推進方策を検討している。

本ワークショップでは、IoT・センシングの主な応用分野における最近の研究や、重要基盤技術の研究、技術シーズに関する専門家からの話題提供をもとに、現状で不足している技術や今後注力すべき研究開発課題、研究開発を進める上で必要な視点について議論することで、センサ融合基盤技術の構築に向けた重要課題の抽出を図った。また、CRDSが事前調査を通じて用意した仮説に基づいて議論をおこない、研究開発課題の推進方策や必要な環境、支援体制などについて検討した。CRDSによる仮説は次の2つである。

【仮説1】センシング情報の高付加価値化には、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が必要である。センサ融合基盤技術を構築するための研究開発課題は、階層構造的に、システムレベル（課題1：センシング情報の統合的処理、高度分析）、端末レベル（課題2：センサ端末の最適化・高機能化）、センサレベル（課題3：センサ性能の飛躍的向上）の3つで構成される。異なるレベル間で連携を図りながら研究開発を推進する必要がある。

【仮説2】仮説1の研究開発課題の推進には、基盤技術の開発プラットフォームの形成が有効である。基盤技術開発プラットフォームに求められる機能としては、デバイス集積・MEMS・実装、アナログ・デジタル混在回路などの共通基盤技術の開発とともに、連携の促進（異分野研究者間連携、産学官連携、シーズとニーズのマッチング等）および得られた成果のオープン化・共通化などが挙げられる。

話題提供1～3と、話題提供および仮説をもとにおこなわれた総合討論のまとめを以下に示す。

「話題提供 1 IoT・センシングの応用分野」においては、IoT の活用が期待される応用領域側からの視点で、センシングに関連する研究開発の動向や課題について紹介があった。

- ・医療・ヘルスケアのための人センシングでは、生体情報の経時変化を測ることが重要。生体ガスなど非侵襲連続計測に適した生体サンプルの取得法や、検出感度の向上が求められる。
- ・道路や橋梁など社会インフラ監視への IoT・センシング活用においては、必要な精度を確保するとともに安価・簡便な手法の開発が重要。また、複数種類のセンシングデータの融合が必要であり、それには各々の正確な位置座標と時刻座標の取得・活用が求められる。
- ・農業機械の自動化・無人化を実現するロボット農機においては、高精度の測位システムが必要。今後、圃場間の無人走行を実現するには GNSS や LiDAR、カメラ等を組み合わせた高度な周囲の環境認識能力が求められる。
- ・IoT システムにおいては、センサデバイスとそれを使ったアプリケーションの間に存在する様々なギャップ埋めるプラットフォーム構築が必要。その際、センサデバイスとプラットフォームの機能分担を考慮することが重要である。

「話題提供 2 重要基盤技術 (デバイス)」では、独自の技術シーズに基づくセンシングデバイスの研究開発について、その内容や推進戦略、今後の方向性などが示された。

- ・高選択性、高増幅率、低ノイズ化の 3 つの基軸でシート型センサの研究開発を推進している。体に貼り付けて微小信号を計測可能なフレキシブルデバイスを実現、脳波や胎児心電など極めて微弱な生体信号のモニタリングが可能になっている。
- ・多成分の分子群を識別可能な化学センサを実現するには、物理的・化学的ノイズに対して堅牢な分子識別界面が必要。酸化ナノ構造を用いたアプローチによって、GCMS (ガスクロマトグラフィー質量分析法) の機能をセンサで実現することを目指している。
- ・選択性は高くないが、既知の特性をもつ異なる複数のセンサを用いることで、複数種類の情報を一度に計測可能なマルチモーダルセンシングが可能になる。CMOS 技術による電位検出アレイを用いると、様々なセンシング材料を印刷により集積可能である。

「話題提供 3 重要基盤技術 (回路・実装)」では、センシングデバイス・システムの構築に必要な基盤技術や、その技術開発に関する取り組みについて紹介があった。

- ・地球インクルーシブセンシング研究機構では「サイレントボイスとの共感」をテーマに、センシングを中心とする様々な機能の実装・融合を図っている。機構の運営にあたっては、参加している複数の大学・企業間の取り決め、知財の扱い、人材確保が重要である。
- ・アナログフロントエンドはセンサデバイスとデジタル情報機器の間を取り持つ部分であり、尖った特性をもつセンサを使いこなす上で極めて重要。その研究開発にはセンサデバイスの専門家と回路・インターフェースの専門家が密接に連携する必要がある。
- ・センシングシステムの実現においては全体を俯瞰し、材料、MEMS、信号処理、ソフトウェア、無線、電源など全ての領域にわたる最適設計が必要。価格や量産性の観点では、応用によっては使用しないセンサも含む多種類のセンサをチップ上に集積して汎用化するとの考え方もある。
- ・MEMS と LSI を使った集積化触覚センサにより、センサを多数配置する際に生じる配線の難しさやデータ量増加の問題をシリアルバス通信とイベントドリブン動作で解決した。この技術をより洗練・拡張して、次世代ロボット向けのセンサ・プラットフォーム LSI を提供している。

総合討論では、センサ融合基盤技術を構築する上での課題として、センサ単体レベルでは化学センサの再現性、安定性、堅牢性、リセット性、寿命などの弱点克服やさらなる高感度化、システムレベルではリアルタイム処理などが挙げられた。新たな物理現象・化学反応、新材料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や化学量のセンシングを可能にする取り組みが重要との指摘もあった。また、研究開発を進める上で必要な視点として、いかに社会課題の解決に貢献し得るかセンサ研究者以外のコミュニティへ示していくべき、日本に強みのあるセンシング技術を活かしてデータの収集と活用のサイクルを構築し、世界的な競争力を発揮すべき、といった指摘があった。さらに、研究開発を推進する上で必要な環境や体制、基盤技術開発プラットフォームの制度設計などについて議論がおこなわれた。

本ワークショップでの議論を踏まえて CRDS では、今後国として重点的に推進すべき研究開発領域、具体的な研究開発課題を検討し、研究開発の推進方法を含めて戦略プロポーザルを作成し、関係府省や関連する産業界・学会等へ提案する予定である。

目次

エグゼクティブサマリー

1.	ワークショップの開催趣旨	荒岡 礼 (JST-CRDS)	1
2.	話題提供 1 IoT・センシングの応用分野		6
2.1	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)	6
2.2	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)	13
2.3	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)	21
2.4	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)	27
3.	話題提供 2 重要基盤技術 (デバイス)		34
3.1	フレキシブル高感度計測	関谷 毅 (大阪大学)	34
3.2	堅牢な分子識別センサ	柳田 剛 (九州大学)	40
3.3	マルチモーダルセンシング	澤田和明 (豊橋技術科学大学)	47
4.	話題提供 3 重要基盤技術 (回路・実装)		56
4.1	低電力アナログフロントエンド	石黒仁揮 (慶應義塾大学)	56
4.2	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)	64
4.3	センサ端末	前中一介 (兵庫県立大学)	69
4.4	MEMS と LSI をコアとしたエッジヘビーセンシング	室山真徳 (東北大学)	76
5.	総合討論	ファシリテータ: 田中秀治 (東北大学)	83
	付録		88
	付録 1. 開催趣旨・プログラム		88
	付録 2. 参加者一覧		90

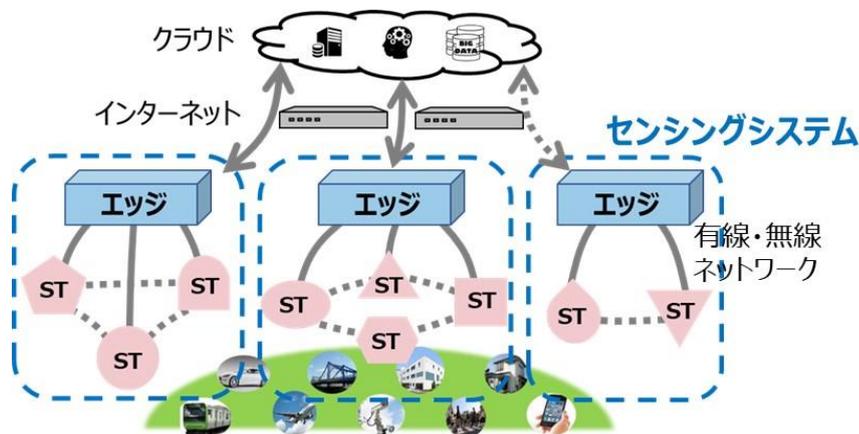
1. ワークショップの開催趣旨

荒岡 礼 (JST-CRDS)

IoT システムの構築には、多様な情報を高効率かつ安定に取得するセンシング技術と、取得した多様なデータ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の高付加価値化が重要である。また、IoT では、ネットワークにかかる負荷やセキュリティ、プライバシー保護といった観点から、データを生み出す側（エッジ側）におけるセンシングシステムが重要性を増している。これらの点に着目して CRDS では調査・分析をおこない、多様なセンシングデータの取得とその統合的処理を可能にするための基盤的技術（＝センサ融合基盤技術）の構築を重要テーマの一つとして検討している。本ワークショップはその検討の一環として、センサ融合基盤技術を構築する上で必要な研究開発課題や、研究開発を支える基盤技術開発プラットフォームのあり方などについて議論をおこなう。

以下、CRDS で検討中の内容と仮説について、概要を述べる。

図 1.1 に IoT 全体と、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）の概念図を示す。センシングシステムはエッジ側情報処理機器とセンサ端末、それらをつなぐネットワークで構成される。図中に示すように、センサ端末には、センサそのものに加えてアナログフロントエンド、電源、通信など様々な機能が搭載されている。IoT においてはサイバー空間側のクラウド、フィジカル空間側のエッジ側情報処理機器の両方で情報処理がおこなわれるが、これまでクラウドでおこなわれていた処理が、負荷分散やリアルタイム性確保などの観点からエッジ側に求められるようになってきている。



- エッジ** **エッジ側情報処理機器**
センサ端末で取得された情報（データ）を処理して意味あるデータに変換する機器。通信負荷低減、セキュリティ向上、センシング情報のリアルタイム処理において重要。
- ST** **センサ端末**
情報を取得する目的で、測定対象物の内部や表面、近傍に設置される機器。継続的かつ安定に情報を取得し、適切に動作するため、センシング能力に加えて種々の他の機能が必要であり、**センサおよび種々の機能デバイス**によって構成される。
- センサ**
その他の機能
アナログフロントエンド、電源、通信、など
- センシングシステム**
センサ端末、エッジ情報処理機器、それらをつなぐネットワークからなるシステム。

図 1.1 IoT とセンシングシステムの概念図

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、CRDSにおける検討の過程では、IoT普及が期待される主な応用領域として、Society5.0の実現に必要とされる11システムをもとに「モビリティ」「インダストリー」「スマート農業」「社会インフラ管理」「ライフ・ヘルスケア」の5領域を選び、現状認識と問題点の抽出を図った（図1.2）。これらの応用領域において特に要求される機能をまとめたものが図1.3である。これを見ると、応用領域によって必要な機能に違いはあるが、共通の方向性が浮かび上がってくる。すなわち、時間情報や空間情報、異種の情報など多様な情報を取得し、そこから高次の情報を引き出すこと、つまり情報の高付加価値化がどの領域でも求められている。そして、それには端末の高機能化や、センサ性能の向上が必要になる。

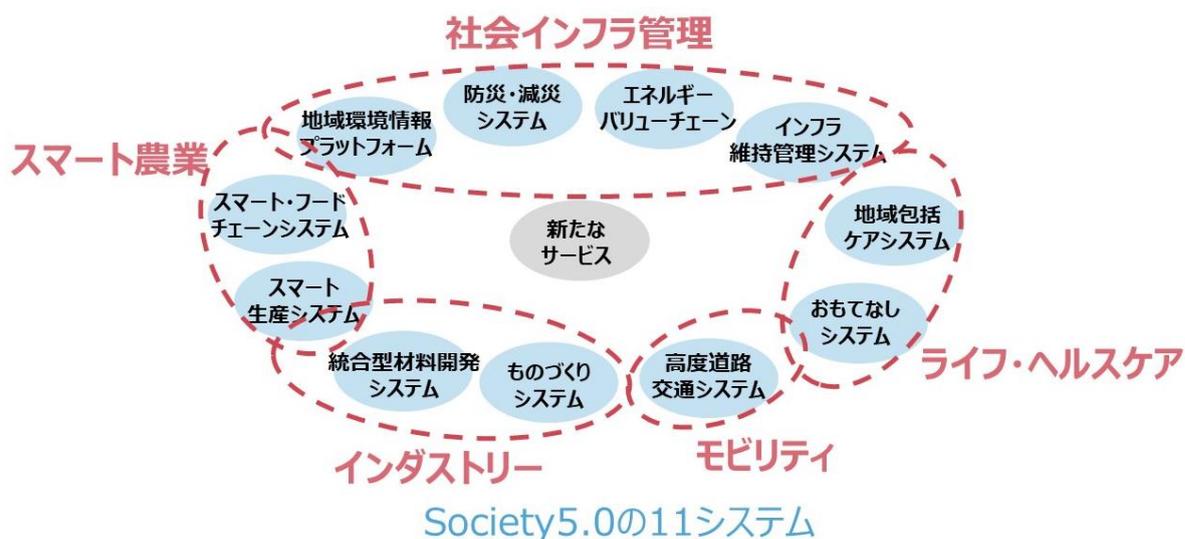


図 1.2 IoT普及が期待される主な応用領域

特に要求される機能		モビリティ	インダストリー	社会インフラ管理	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	○		○	○	○
センサレベル	小型	○				○
	高感度	○	○	○	○	○
	高選択性（選別能）				○	○

図 1.3 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

このセンシング情報の高付加価値化について説明したものが図 1.4 である。フィジカル空間で多様なセンシング情報を取得し、情報を統合的に処理・分析することによって高次の情報を得る。それによって予兆の検知や推定などをおこない、さらには必要に応じてフィードバックをする。その例をいくつか図中に挙げた。例えば自動車であれば LiDAR や超音波センサ、イメージセンサなどを活用して車の周囲に関する様々な情報を取得し、それらを統合的に処理することで、より正確な周囲状況の認識・把握をおこない、危険回避や運転支援といったフィードバックにつなげる。

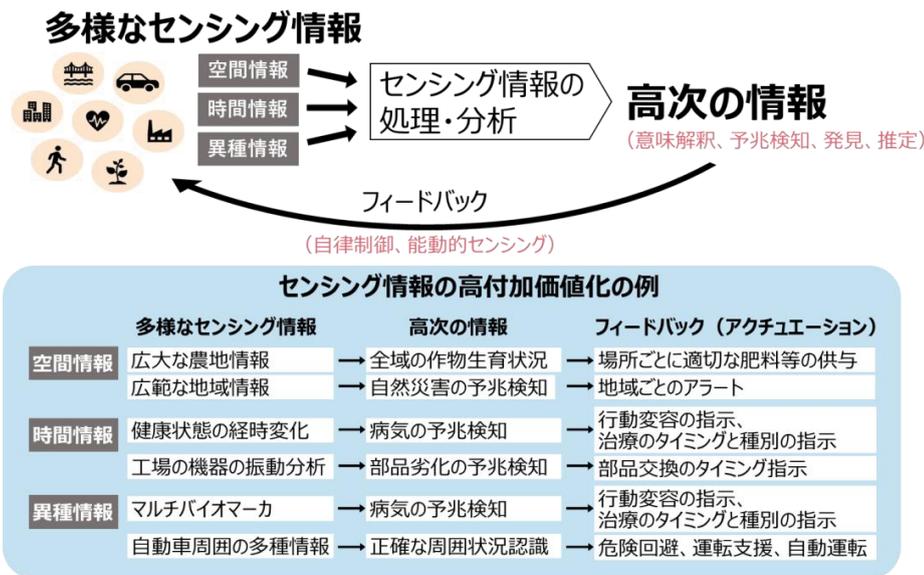


図 1.4 センシング情報の高付加価値化

そして、このようなセンシング情報の高付加価値化を実現するための基盤技術、すなわちセンサ融合基盤技術を構築する上で必要な研究開発課題は、図 1.5 に示すように、システムレベル (課題 1)、センサ端末レベル (課題 2)、センサレベル (課題 3) の異なる 3 つのレベルで存在するというのが本ワークショップの一つ目の仮説である。

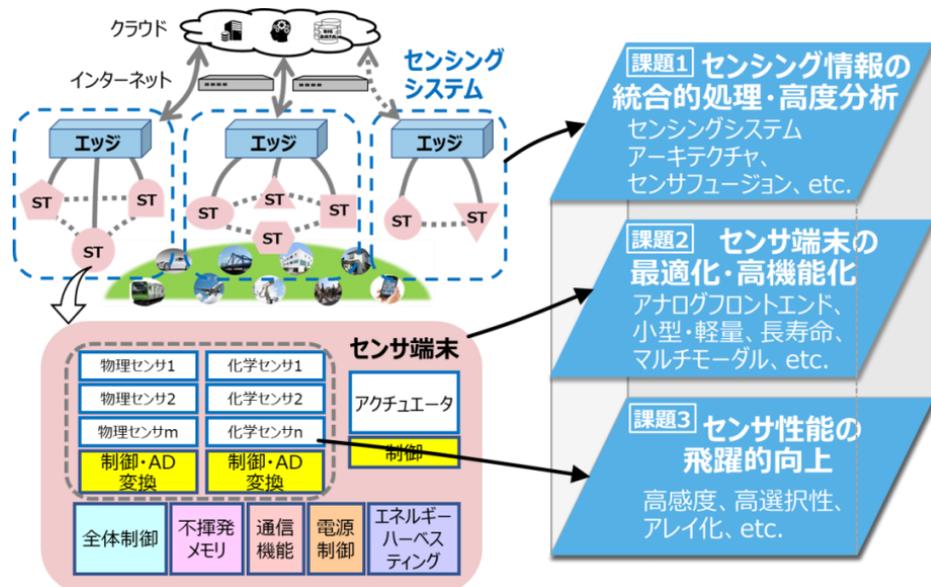


図 1.5 【仮説 1】 必要な研究開発課題

まず、課題1では、多様なセンシング情報からより高次の情報を導き出すためのシステム構築をおこなう必要がある。センシングシステムの全体設計をおこなうセンシングシステムアーキテクチャ、複数のセンシング情報を融合して高次の情報を引き出すためのセンサフュージョンやセンサネットワーク、さらにはアクチュエーションとの融合、能動的センシング、イベントドリブンセンシングなどが課題として挙げられる。

次に、課題2として、センサ端末は用途に応じて使用環境も違えば要求される機能も異なることから、様々な用途に応じて最適な機能・性能をもつ端末を創製するための技術開発が必要である。集積・実装技術、1チップ化などの基盤技術開発に加えて、低消費電力・低ノイズを実現するためのアナログフロントエンドや、エネルギーハーベスティング、電池、通信といった機能の研究開発が重要である。

また、課題3では、センサそのものの性能を飛躍的に向上させることによって、これまで取れなかったデータを取れるようにする、すなわちセンシング可能なデータ範囲の拡大を図る必要がある。センサのさらなる高感度化や、アレイ化による情報の質の向上、選択性や安定性の向上などが課題として挙げられる。

なお、重要なのは、これら3つの課題は独立ではなく、階層構造的な関係性を持っていることである。つまり、各々が独立に研究開発を進めても、センシングシステムは実現できない。そこで、どうやって連携を図りながら研究開発を推進していくかというのが、図1.6に示した二つ目の仮説、基盤技術開発プラットフォームの構築である。3つの課題のうち、課題1は情報処理・システムアーキテクチャの分野が中心に、課題2、課題3は回路・デバイス・材料の分野が中心になると考えられ、これら異なる分野の専門家が一体的に研究開発を進めていく必要がある。しかし、現状ではそのための環境が十分に整っていないという懸念があり、例えば端末を作る上で必要な基盤技術開発の能力を有し、センシングシステムを具現化することが可能なプラットフォームを構築する必要があるのではないかと考えている。

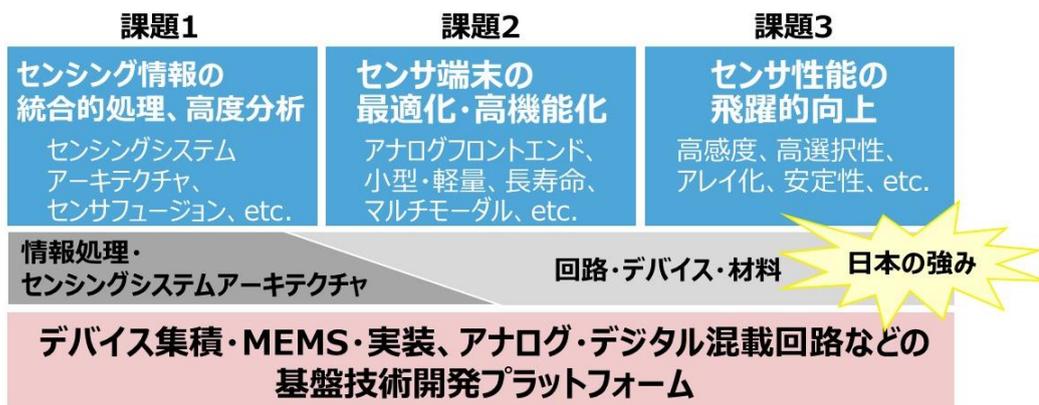


図1.6 【仮説2】 研究開発課題推進のための基盤技術開発プラットフォーム

基盤技術開発プラットフォームに期待される機能を図1.7に挙げた。一つには連携で、異なる分野のアカデミア研究者同士の連携、アカデミアとメーカーの技術開発者との連携などが考えられる。ユーザやIoTサービス提供者との連携によって、ニーズを把握することも重要になるであろう。

う。また、プラットフォームに期待されるもう一つの機能として、得られた成果のオープン化・共通基盤技術化などが重要と考えている。この他にどのような機能が必要か、あるいは必要でないか、本日の議論で是非アイデアをいただきたい。

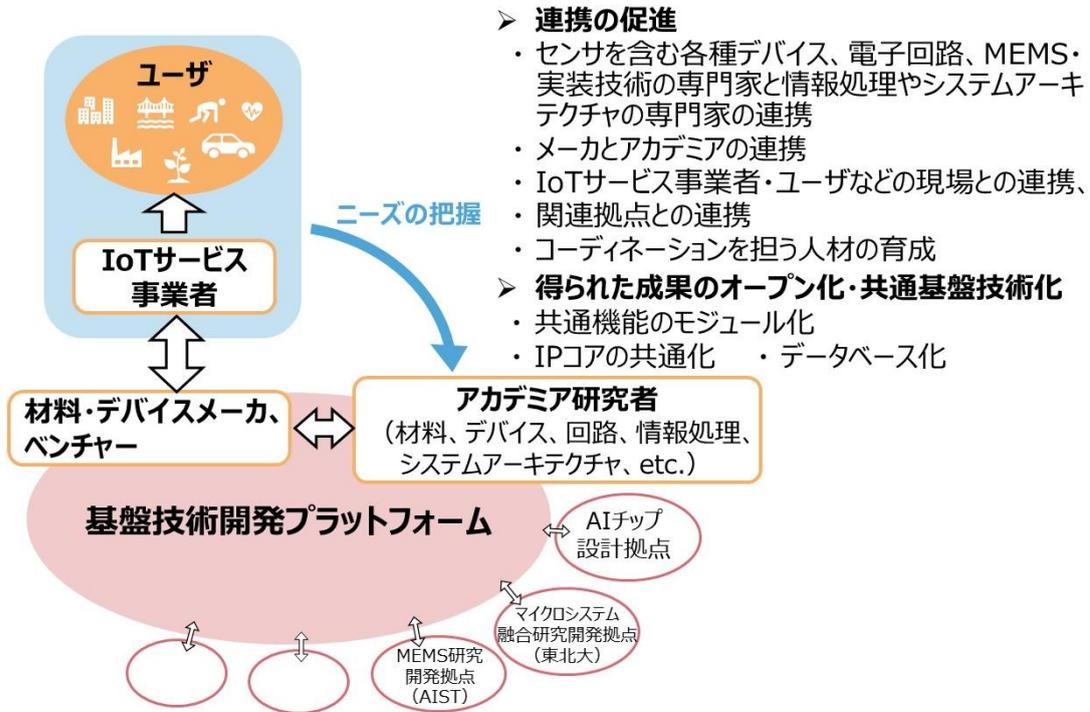


図 1.7 プラットフォームに期待される機能

具体的な研究開発の推進イメージとしては、例えば IoT のニーズを重視した研究開発プロジェクトであれば、各府省の IoT 関連施策の下で進めることが適していると考えられる。一方で、IoT・センサの技術開発については、産業界が中心であれば経産省や NEDO で、アカデミアが中心であれば文科省や JST が主体となって進めることが望ましい。いずれにしても、各々が独立でやるのではなく、府省間、施策間の連携を図りながら、研究開発のサイクルを回していくことが重要である。

以上で述べたことは CRDS において検討中の内容、仮説であり、より説得力のある提言につなげるため、本日の活発な議論に期待する。

2. 話題提供 1 IoT・センシングの応用分野

2.1 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）

医療、ライフ、そしてヘルスケアへの応用という観点で情報提供したい。全体的に網羅するという意味を込めて、「健康IoT 社会のため」というタイトルとした。

医療分野ではIoTやセンサ技術が非常に期待されているが、今後はヘルスケア分野に落とし込んでいく必要がある。さらに、ヘルスケアだけではなく、「喜び」「楽しみ」に向かうことが市場形成には必要である。人のリアルタイム計測は期待されているが実はあまり上手くいっていない。その原因はニーズマッチングの不足にあり、「本当に欲しい測定対象からの情報が得られているか」、「本当にそれを必要とする人たちが購入可能な状況か、購買力があるのか」、さらには「リアルタイムセンシングでその場の情報が得られているか」といった検討が十分尽くされていない。また、人の計測では「生体適合性の材料」等が重要であるが、そこのマッチングも進んでない。人の計測に関しては、特にセンサ端末における課題が大きい。

物理デバイスを使ったセンシングについては、既に多くの製品がある。2011年頃に多くのウェアラブルデバイスが出てきた後、一旦トーンダウンしたが、ここに来て一気に加速している。これは、医療ニーズに合ったデバイスの開発がようやく本格化してきたことによる（図2.1.1）。

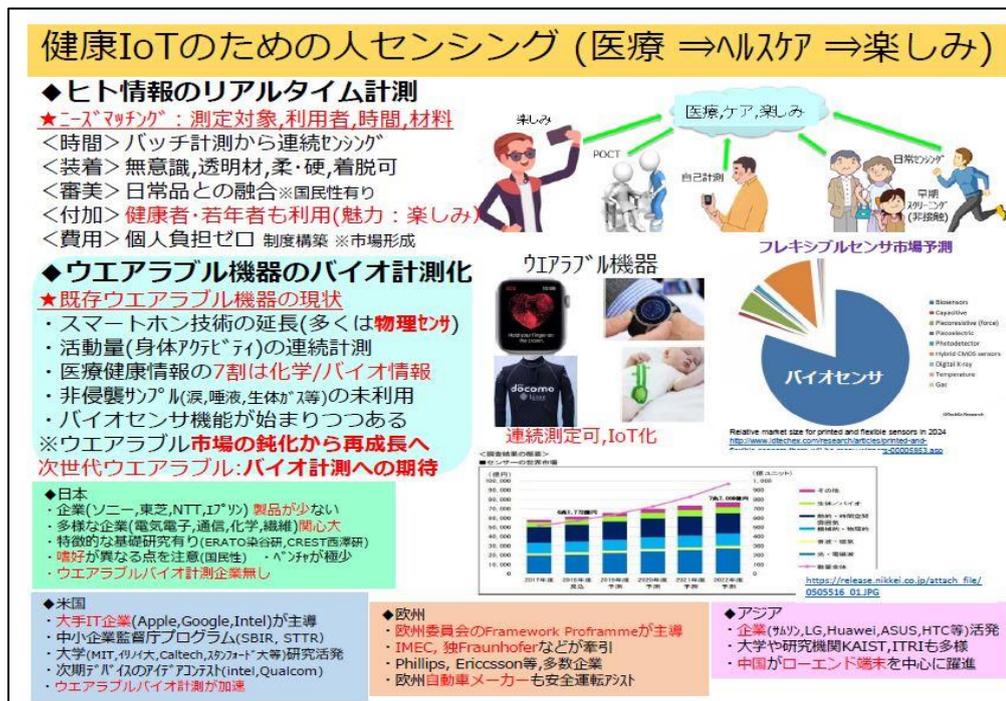


図 2.1.1 健康 IoT のための人センシング

医療、そしてヘルスケアの観点では、医療健康情報の 7 割が化学もしくはバイオ情報であり、次世代のウェアラブルデバイスにはバイオセンサの適用が必須と考えられる。将来のフレキシブルセンサの市場予測でも、その 7～8 割はバイオセンサが占めている。ウェアラブルなバイオセ

ンシングは既に始まっており、米国では、後ほど紹介するアボット社の血糖値センサ「リブレ」のような製品が出ている。一方、日本では製品化されているものは皆無であり、研究開発を急がないといけない状況にある。

今後、人の計測ではセンサで膨大な情報を扱う必要が生じるが、ゲノムのような時間的に変化しないものを IoT で連続的に取ることは全く意味がない。図 2.1.2 に示すように、IoT ではバイオ/化学情報の中でも日内変動など、変化する情報を取り続けることが重要である。

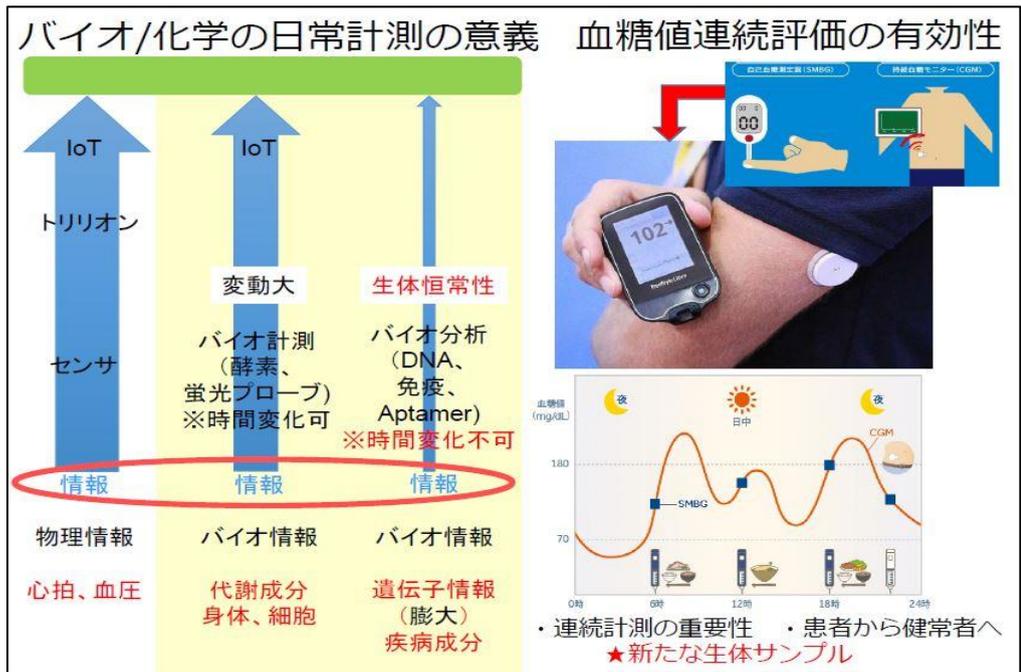


図 2.1.2 バイオ/化学情報の計測と有効性

アボット社の血糖値センサ「リブレ」は、採血不要で、2 週間の連続使用ができる非常に優秀なバイオセンサであり、自分の周りにいる糖尿病患者の多くもリブレに移行している。このままでは、「市場を全て取られてしまうのでは」という危機感がある。患者の多くがリブレに移行している理由が重要である。リブレは血液ではなく間質液で血糖値を測るため、測定値は誤差を含んでいるものの、患者が欲しい情報である経時変化を捉えることができ、リブレは十分にニーズマッチングができています。つまり、自分の血糖値がこのあと上がるのか、下がるのか、それが患者にとっては非常に重要であり、測定結果からその傾向を捉える必要がある。

さらに、リブレを健常者が使えれば、「自分が何を食ったら血糖値が上がるのか」といったことが分かるようになる。デバイスが安くなって一般化すれば、健康管理用のセンサとしても非常に有益なものになるだろう。ただ、間質液を採取するために針を刺す必要があり、リブレは侵襲的なデバイスである。我々が目指さなければいけないのは非侵襲のセンサである。既存の医療検査の歴史はまだ 50 年程度で、これまで測られていなかった「新たな生体サンプル」についても、今後は測定対象を広げていく必要がある。

今、我々が提案しているのは、ウェアラブルでもインプラントでもなく、キャピタス（窩腔）である（図 2.1.3）。我々の体には、口腔や咽頭腔、結膜嚢などのたくさんの空間があり、そこには必ず体液が存在する。これらの体液は、まだ医療の分野ではほとんど使われてない。その

2.
話題提供 1
IoT・センシングの
応用分野

ような体液を対象とし、非侵襲で生体のバイオ情報を計測することを目指している。

新たな非侵襲サンプル(1) : 高腔体液(涙液, 唾液)

◆キャピタス(高腔)バイオセンサ
(体腔の体液成分/体腔粘膜を対象とした生体計測)

キャピタス(体腔)バイオセンシング

Wearable (ウェアラブル) **Implantable** (埋入型)

キャピタスセンサの開発(着脱可能な安全・簡便なセンサ)

- ・体腔に着脱できる安全・簡便なバイオセンサ開発
- ・柔軟で身体融和に優れた“安全・安価な使いきりセンサ”

<材料> センサ用の生体適合性材料の合成開発
医療・歯科医療用の材料を活用

<成膜> 高分子材料ベースとしたSoft-MEMS技術

<形状> 3Dプリンタ, 歯科成形技術による立体構造

<対象> 体腔内の体液や粘膜

◆コンタクトレンズ型センサ (結膜嚢用)

- ・血糖値評価のためのグルコースセンサ
- ・涙液糖の連続計測(血糖値の1/10, 数分遅れ)
- ・**瞼結膜**での経皮ガス計測(tcpO_2 , tcpCO_2 , NH_3)
- ・動脈血ガス的高速モニタリング(加温不要)
- ・涙液分泌能を評価(ドライアイ, シェーグレン症候群)

◆マウスガード型バイオセンサ (口腔用) <医歯学大, UCSD>

- ・歯科材料と3D構造を利用したバイオセンサ(装着性, 審美性)
- ・口腔用のBluetooth 4.0 (BLE)超小型テレメータ(大田区中小企業)

UCSD 2015

2019

★医歯学大2009 日経産業2009/6/30

★医歯学大2015

Mouthguard biosensor with monitoring saliva glucose

human Sensor100 May 2016 will be a major step

図 2.1.3 キャピタスバイオセンサ

例えば、コンタクトレンズ型センサを開発し初めて涙液中の糖の連続計測に成功したのは我々の研究室である。マウスガード型センサや、最近ではチュアブル型、赤ちゃん用のセンサもある。これらのセンサにより、「涙」や「唾液」が新しい生体サンプル(情報の源)になる可能性がある。我々が10年以上前に開発したコンタクトレンズ型のセンサは、ウサギの涙液中の糖をリアルタイムに計測可能であった。血糖値の10分の1程度の涙液中の糖の濃度変化が計測できる。この結果は非常に注目され、世界中のセンサ関係者が研究開発を始めており、Googleは失敗したが、国内では名古屋大学のグループが発電・センシング一体型の血糖センサという非常に面白い研究をしている。

コンタクトレンズ型では通信が難しいが、マウスガード型であれば通信は簡単であり、Bluetoothとバッテリーも搭載したデバイスで唾液成分や口腔・身体の情報を得ている。実際に、小さなサーミスターを載せて温度測定をおこない、口腔の情報を腕時計でモニタリングするということを実現している。そして、このようなデバイスを本当に必要とするのは年配者や病気の方であるが、これらの人たちは必ずしも購買力が高いとは言えない。少し視点を変え、購買欲と購買力のある若い年代層に向けて、若者が使いたいと思うものを作る必要がある。これにより、本当にデバイスを必要としている患者や高齢者を、下支えするような市場をつくることを考えていかなければならない。

もう一つの新たなサンプルは呼気である。がんや代謝、生活習慣に関するにおい(ガス成分)はたくさんあるが、今のところ生体ガス計測用の高感度なセンサはない。呼気診断は、病院まで行かなくても日常生活の中で評価できるという簡便性から期待が大きく、これからはウェアラブル

ル化にも向かうと思われる。生体ガス計測に関しては、ヨーロッパで研究が盛んで、特に英国では国の事業となっている。なお、においという嗅覚が想起されるが、我々は、生体がにおいを取り込んだ後の代謝を担う肝臓に着目し、肝臓に存在する酵素を使ったセンサを開発している(図 2.1.4)。簡単な例では、飲酒后、アルコールは肝臓で代謝されるが、それは肝臓にアルコールやアルデヒドをそれぞれ分解する酵素が存在しているからで、これらの酵素を利用することでエタノールやアセトアルデヒド用の高感度なガスセンサをつくるのが可能になる。

新たな非侵襲サンプル(2) : 生体ガス(呼気, 皮膚ガス)

◆ 簡便・選択的, 高感度(pppt, ppq)なガス計測 : 世界的潮流

疾病・代謝由来ガス成分の高感度センシング

- 生活習慣: 糖尿病(アト), 口臭(メチルカプロン), 年代臭(ノナール, ジアセチル)
- 代謝異常: 魚臭症候群(トリメチルアミン), フェニルケトン尿症, メイプルシロップ尿症
- 悪性腫瘍: 肺癌(?), ペンタノ, シロヘキサノ, 乳癌(?), ジメチルトリケチルアイト

★血液-呼気分配係数(成分依存)に基づき, 呼気より血中濃度を評価可
※米国では, Sniffer-dogが産業化

◆分析機器 (GC-MS, FAIMS, テラヘルツレーザー吸収, ラマン) 爆弾探知免疫SPR(九大) 昆虫嗅覚レセプタ検知(東大)

◆ガスセンサ (半導体, 燃焼式, eNOSE)

◆バイオ計測(特異的: 抗体, レセプタ, 代謝酵素, アプタ) - 日本

- <免疫反応(アフィニティ)> 九大(爆薬), 阪大(薬物)
- <嗅覚レセプタ(膜タンパク質)> 東大(昆虫アロマト), カピ臭)
- <代謝酵素> 医科歯科大(多数) リアルタイムsub-ppt計測

※高感度、高いガス選択性、湿度に不感応

◆バイোসニファ: Bio-sniffer(気相用バイオセンサ)

- 疾病, 代謝メカニズムに基づく酵素計測
- 非濃縮リアルタイム計測、多サンプル計測可
- 特異性に基づく選択性(混合ガスOK), 湿度OK

◆ガスのリアルタイム可視化(探嗅カメラ: Sniff-cam)

- [酵素メッシュ]+[高感度HARP-CCD]+[UV-LEDソフト光源]+[画像処理]
- 非接触(呼気, 皮膚), リアルタイム, 分布計測
- <呼気中成分の選択的リアルタイム可視化計測>
- <皮膚ガスの非接触での高感度(ppb)な蛍光可視化計測>





「におい」でがんを超早期発見
NHK「クローズアップ現代」15/6/30

図 2.1.4 生体ガス成分の高感度センシング

一例として、アセトンを検出可能なセンサを紹介する(図 2.1.5)。糖尿病患者は、エネルギー産生にて脂肪代謝を行うため、呼気中のアセトン濃度が高くなる。健常者と糖尿病患者(一型と二型)を比較すると、治療を受けている患者であっても高い値を示し、閾値 1ppm で識別できる。未治療の、いわゆる「隠れ糖尿病の人」であればさらに高い値となるため、そのような人を簡単にスクリーニングできることから、今、医療業界、産業界から非常に多くのリクエストを受けている。

また、我々のセンサでは「ガス情報を、酵素反応を介して光情報に変換」して検出していることから、検出器をフォトマルから高感度な撮像素子にすることでガスの可視化が可能であり、皮膚から放出されるガスの連続可視化を実施している(図 2.1.4)。皮膚から放出される物質量は、呼気の 1000 分の 1(血中の 10 万分の 1)程度であるが、これを可視化できる。飲酒后に手のひらや皮膚から放出されるエタノールやアセトアルデヒドを見ることができ、また、耳で可視化すると、まずエタノールが可視化され、その後にアセトアルデヒドが観察される。

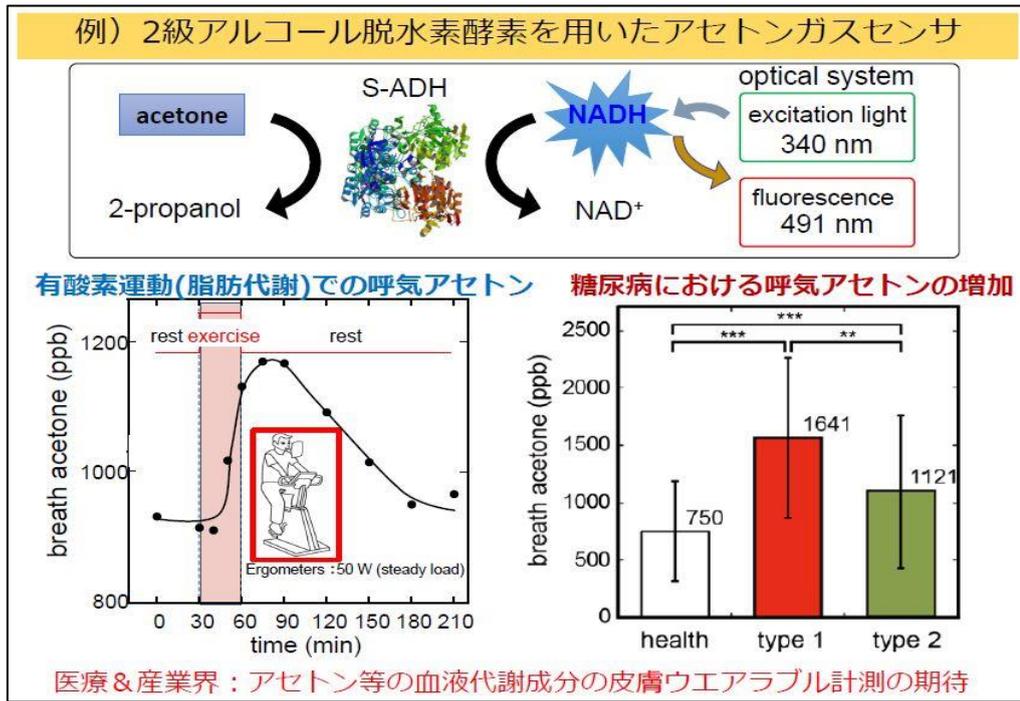


図 2.1.5 アセトンガスセンサによる測定

ウェアラブルデバイスは省エネルギー化が進んではいるが、エネルギー・ハーベスティングの研究開発も重要である。我々はバイオを使ったエネルギーの取得や自立駆動型デバイスも開発している。バイオ電池では発電効率の向上を目指して、反応を律速するカソード電極での酸素供給を促進することにより、高効率の新しいバイオ電池を実現している(図 2.1.6)。さらに、化学成分を認識して、化学エネルギーで駆動するデバイスというも開発している。高血糖の場合に、糖エネルギーで自立的にインスリンを放出して、血糖を下げる「ケモメカなデバイス」を開発している。化学エネルギーを力学変換することで、電池や電源が不要な人工臓器が実現できる。また、ウェアラブルでは通信技術も重要であり、センサ情報の集約技術、特に体の中で情報を集約するような技術も必要になると考えられる。

最後に、アメリカでは IT 企業が主体となって健康 IoT を進めているが、日本では中心となる事業者がないため、国と大学が一層連携する必要がある。そのためには、デバイス・IoT 機器に特化した医療研究機関とダブルディグリーに相当するような人材育成(物理の学士を有する医師の育成など)が重要と考えている。

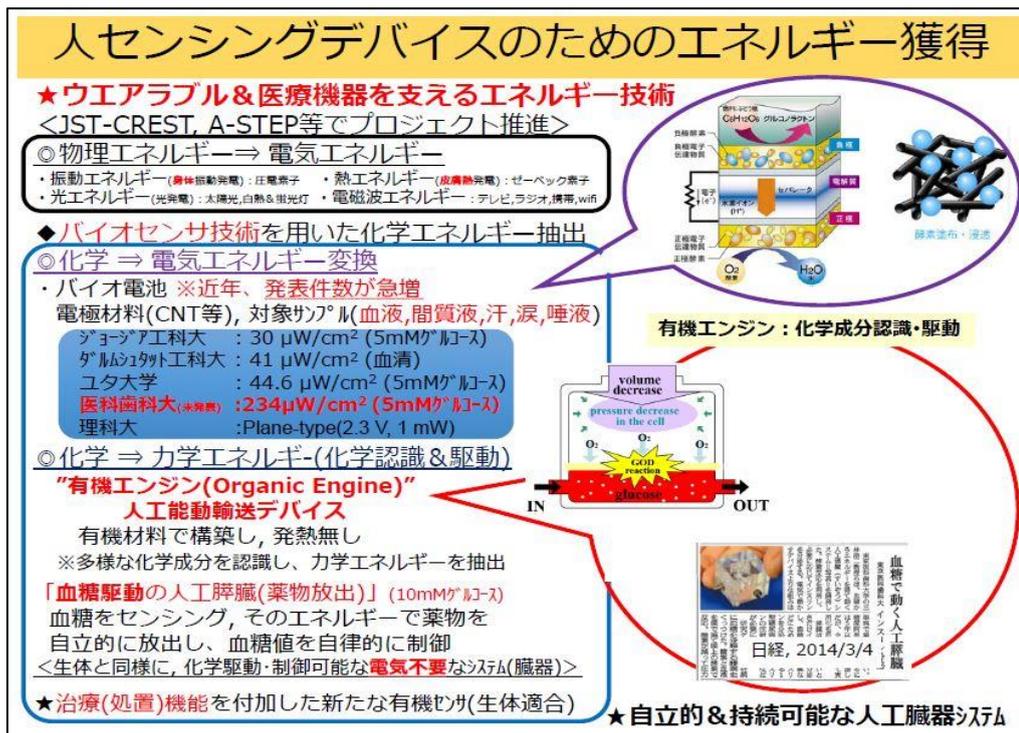


図 2.1.6 人センシングのためのエネルギー獲得

【質疑応答】

- Q: 呼気には色々なものが混在しているが、肝臓の酵素を使ったセンサで目的物質をどのように分離するのか。選択性はあるのか。
- A: 普通のガスセンサは選択性がほとんどなく前処理が必要であるが、バイオセンサは選択性が高いので、夾雑物の存在下でも、対象ガス物質を検出することは容易である。また、一般のガスセンサの最大の弱点は湿度の影響を受けやすいことである。生体ガスのサンプルとして呼気を用いる場合には、ほぼ湿度 100%であり、皮膚ガスも湿度が高い。我々のセンサは認識素子が気体と液体の層の間に位置しており、その素子が若干濡れているため、湿度の影響を受けずに高感度にかつ選択的に計測可能である。ただし、タンパク質を利用しているため、検出を液相中でおこなう必要があり、気相中の対象ガスを検出とすることは容易ではない。
- Q: 絶対値よりも変化、兆しを捉えることが重要で、絶対値は必要ないとの理解で良いか。
- A: 絶対値は不要ではないが、重要視しすぎて、全ての作業が遅れることが問題である。リブレの場合、その出力値は必ずしも正確ではないが、ユーザ（糖尿病患者）は濃度変化のモニタリングを求めている。FDA も最初はその誤差に厳しかったが、ユーザや社会的な要求から許容するようになったのだと考える。精度が不要というわけではなく、許容できる誤差の範囲で、濃度変化をリアルタイムに捉えることも重要ということ。
- Q: 患者のニーズと健康な人のニーズに応え、その上で、健康な人の側がお金を払って下支える仕組みをつくるための戦略はあるか。

2. 話題提供 1
センシングの
応用分野

A：健康な人が使いたい方向に持っていくことが必要である。健康な人が自分で測って、自らケアできるようにする。保険会社との協力もあり得る。実際に、人間ドックの結果を保険会社に提出すると保険料が割引になるという事例もある。

Q：個人のイベントであれば差分を取ればよいが、ビッグデータ化する場合には基準がないとデータの質を担保できないのではないか。

A：エッジ、フォグ、クラウドに情報を上げる時にそれぞれどうするか、情報の規格を決める必要があるだろう。エッジレベルでは変化が分かればユーザにとって十分であるが、これをクラウドに上げるには「意味あるデータ」にする必要がある。

Q：データを集めるために、まずはユーザにインセンティブを与えながら利用してもらい、最終的には精度や合理性の高いビッグデータを取るといえるか。

A：その通りで、精度やビッグデータなど、先に色々考えすぎると後手に回ってしまうことが問題である。

Q：生体情報取得に必要な ppt レベルの測定はほぼ未踏領域だが、実際に ppt レベルの測定が必要なのはどのような場合か。また、測定した例はあるのか。

A：ppt レベルの測定は GCMS であれば可能である。飲酒していない場合に呼気に含まれるアルコール濃度は ppb レベルで、これを皮膚で測るには ppt レベルが必要である。現状、我々の研究室では sub-ppb の計測が可能で、ppt レベルのセンサができつつある。ただし、標準ガスを作る装置が一般的にはないので、そこについても研究をおこなっている。

Q：非侵襲性を担保するには ppt レベルの検出感度が必要ということか。

A：その通りである。

2.2 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）

我々の研究室では、社会インフラ、その中でも主に道路、橋梁を対象としたモニタリングの研究に取り組んでいる。社会インフラは多様であり、最近の IoT を用いたモニタリングのよい事例では、河川の水位計が挙げられる。2019 年 10 月の台風 19 号の時に河川の水位が上がったが、以前は大規模な河川だけに水位計を設置し、監視していたのに対して、近年は中小河川も含めて、リアルタイムに近い状態で水位のデータを取得可能になってきている。昔は 1 カ所あたり千万円規模の費用がかかったが、今は百万円規模で設置できるようになっており、社会の災害に対する耐性を高めつつある。ここでは、今後、道路や橋梁においてどのようなことが考えられるかについて述べる。

インフラの維持管理にかかる費用が近年の社会的な課題になっている。その中で、舗装と橋梁はいずれも予算規模が大きい。舗装では補修費が年間 3,000 億円、新設費用が 1,600 億円かかっており、新設より補修により多くの費用がかかっている。また、橋梁は新設が 4,300 億円、補修が 2,000 億円の規模である。車重を直接受ける舗装の方が寿命が短く、補修費の比率が高くなっている。このような中、舗装は点検が十分に実施されていない場所も多く、道路のどこがどのような状態になっているか分からない状態のまま修繕計画を立てなければならない状況にある。一方、橋の方は比較的点検の実施率が高く、状況はある程度分かっているが、点検した中でも様々な事故が起きている。こうした状況に対して、IoT 技術、あるいはセンシングを使って主にスクリーニングをおこない、効率的、効果的に健全度を評価することで、補修、補強、更新の実施につなげていければと考えている。ここでは、まず初めに舗装関連、次に橋梁関係について述べる。

一つ目に、我々が長く取り組んでいる、スマートフォン等を利用して車両の動揺を測り路面の状態を評価する技術を紹介する。この技術では、スマートフォンの内蔵センサを使って加速度、角速度、位置情報を測り、データ処理と解析を行う。図 2.2.1 に示すように、上手く処理を行うと、1 台 1 億円するとも言われる路面性状測定車での計測とかなり近い結果が得られる。この技術は、外部機関による性能検定試験やブラインド試験を受けて、すでに路面性状測定車と同等の精度が出るという認定を受けている。

この裏にどのような技術があるかという点、普通のスマートフォンを使っているだけである。しかし、単に加速度や角速度等を測ってそのまま使うのではない。加速度等のデータが上がってくる時刻の情報、すなわちサンプリングタイミングがずれていたり、ランダムにばらついていたりするので、これを厳密に補正することで、非常に精度の高いデータを得ている。スマートフォンのセンサはハードとしては精度が悪くないが、スマートフォン内部の時間を処理する過程で精度が落ちてしまうため、そこを厳密に扱うことで、きれいなデータが得られる。

また、我々は加速度と角速度の 2 種類のデータを使って路面プロファイルのデータを出しているが、加速度と角速度のデータが違うタイミングで入ってくると処理が難しい。それを上手くタイミングを揃える処理を行うと、非常にきれいなデータが得られる。データの処理方法もいろいろあるが、様々なシミュレーション技術を使って処理する方法を工夫し、逆解析するアルゴリズムを開発している。

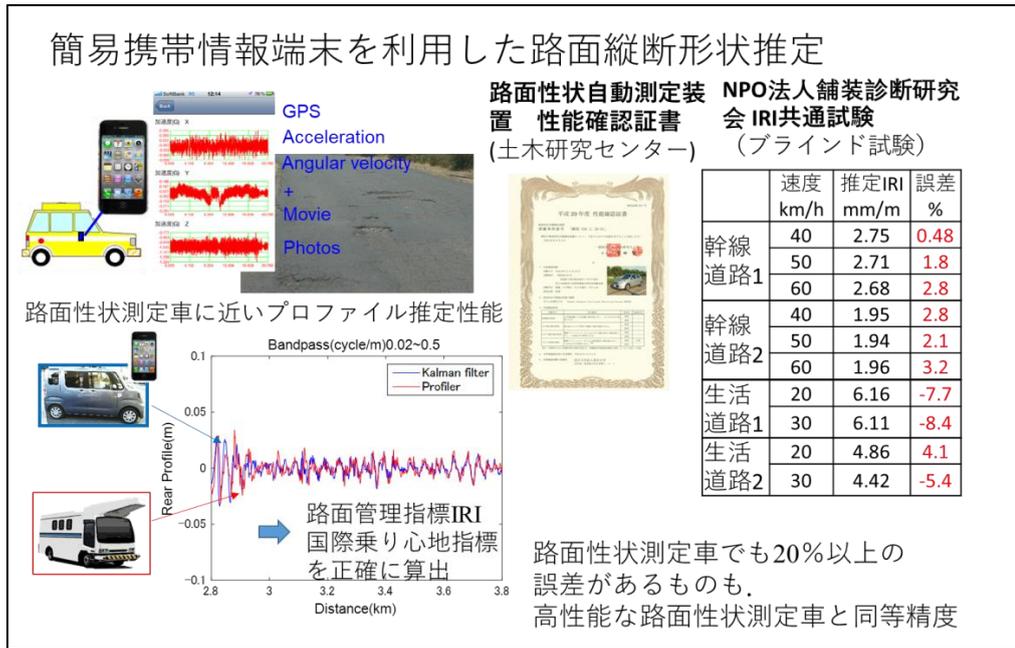


図 2.2.1 スマートフォンを利用した路面評価技術

図 2.2.2 は、国内の道路を 13km にわたって、スマートフォンを搭載した 3 台の車と、路面性状測定車で計測した結果である。上のグラフは縦軸が IRI と呼ばれる道路管理指標（凸凹の度合い）であり、4 台ともほぼ同じ結果となっている。下のグラフは走行速度で、一般道なので停車したり渋滞することもあり、様々な走行速度のパターンが含まれるが、それでもいずれも同じような結果が得られている。

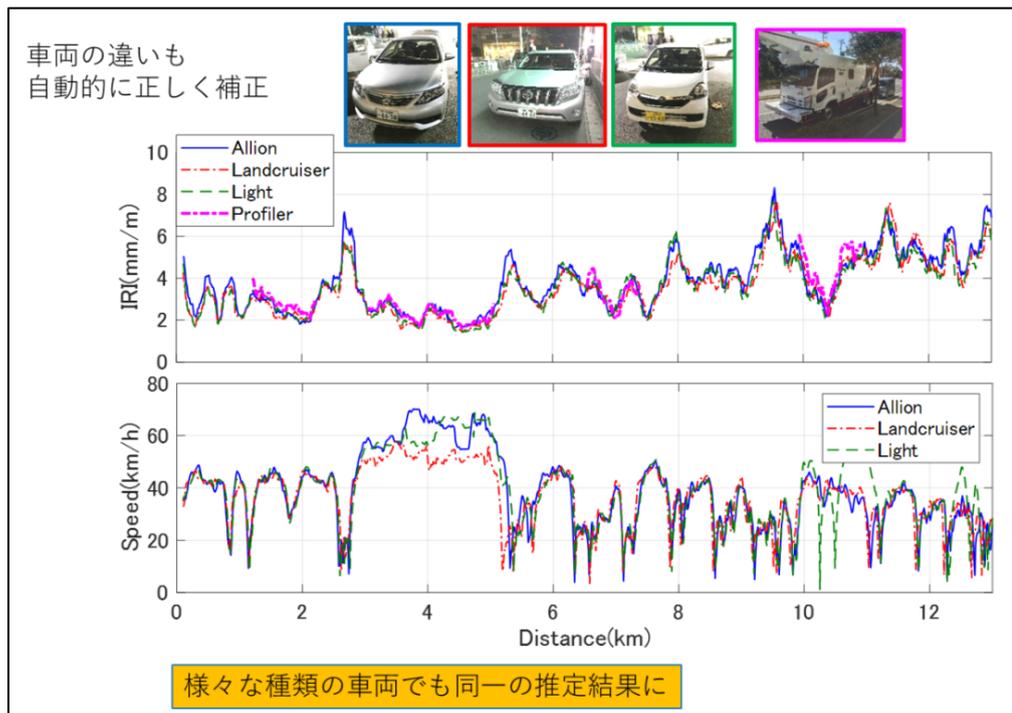


図 2.2.2 実道路における路面評価性能

なお、このような技術をコンセプトの実証だけでなく、実際に使用するためには、一定の精度が満たされなければならない。我々は様々な種類の車や走行環境で精度を満たすことを重視して開発を進めている。

この技術を我々は15年以上かけて開発し、国内外に展開している。JICA 関連事業でパキスタンやケニアの道路を計測しており、途上国でも簡単に使えるというメリットが示されている。また、国内でも大規模に展開しており、バス、タクシー、警備車両等、様々な車両に搭載して、国内の道路の状況を一目で分かるようにしている。それと合わせて、ドライブレコーダーの画像も記録し、機械学習を使ってポットホールやひび割れ等もすぐ分かるようになっている。

ここで、海外に展開する場合の開発方針について述べる。我々はケニア以外にも、スコットランドや中国にも展開準備中で、これまで比較的上手くいっているが、長く守ってきた開発方針として、安価で簡易に実装可能であることを重視している。車両改造を必要としないなど、安く出来る仕組みを守っている。一方で、精度も犠牲にしないようにしている。それがかなわない場合もあるが、必要な精度は確保しないと、コンセプト実証の先になかなか進めない。また、ニーズに応じて臨機応変に使えることも重視しており、近年はスマートフォンとドライブレコーダーを組み合わせた仕組みで展開している。

次に、橋梁のモニタリングについて紹介する。我々は、無線センサネットワークを使った橋梁のモニタリングに取り組んでいる。地震が起こると橋梁には様々な被害が生じるが、現状では震度6以上や5以上など震度を閾値にして区切って、そのエリアだけ目視で確認しに行くことになっている。これに対してIoT 技術を適用できれば、センサネットワーク等を橋梁に設置して、迅速、定量的に評価することが可能になる。

そのときに、データをどのように解析するかが重要で、我々は地表と橋梁の上にセンサネットワークを置き、加速度応答を測ることにより、橋の損傷程度を評価する仕組みを開発している。ただし、今のところ実際に大地震で壊れた橋で計測したデータは無いので、国内のE-Defense という振動台で実験したデータを用いてアルゴリズムを開発している。地震の波形と、それに対する構造物の応答を計測し、それらを処理することで、構造物の剛性、すなわち建物（橋梁）の硬さが推定できる。地震が来る前は構造物は比較的硬いが、損傷を受けると柔らかくなる。剛性は、加速度から計算した変位と復元力（戻ろうとする力）の関係から推定する。図 2.2.3 に示すように、建物に損傷が無ければ変位と復元力は比例関係にある。これはフックの法則と同じである。一方で、損傷してくると、図に示すようにループを描くようになる。これを自動的に推定することに取り組んでいる。

今後、このような技術を被災リスクの高い橋梁へ臨機応変に展開していきたいと考えている。国内には15万橋もあるため、全ての橋梁にIoT ノードを設置するという事は現実的ではないが、例えば耐震補強するまでにまだ2年、3年かかるという橋梁はたくさんある。また、腐食など維持管理上の問題が見つかっていても、直すまでに何年もかかるという橋梁もある。このような橋に優先的にIoT ノードを設置していくことを考えている。

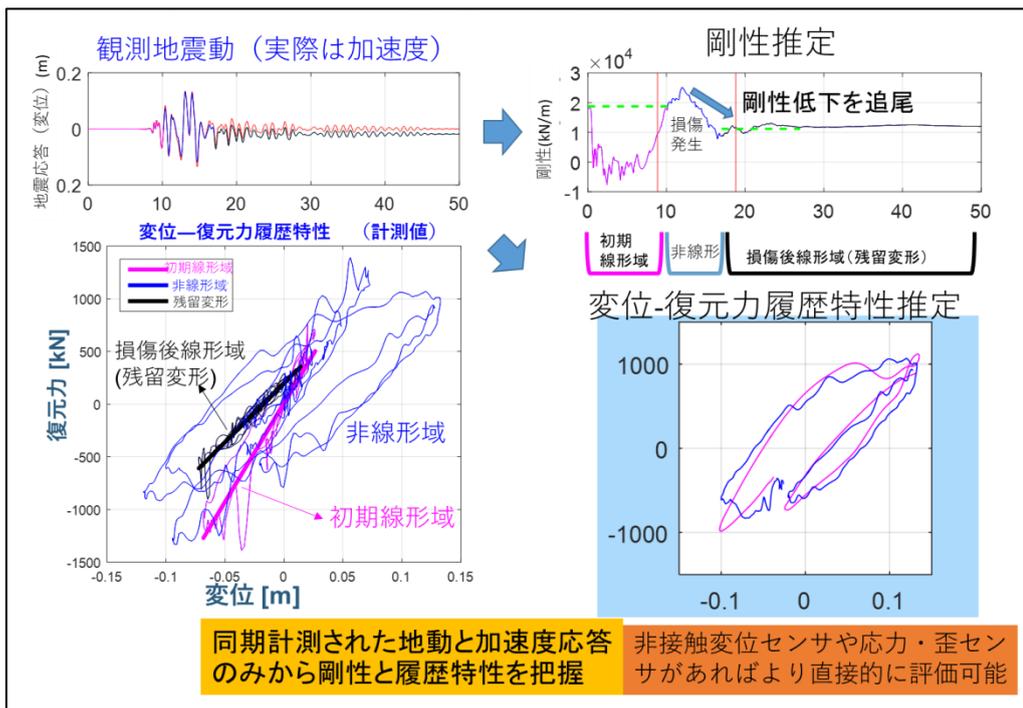


図 2.2.3 建物の変位－復元力特性の履歴からの剛性推定

また、近年、洪水後の橋梁の状態というのも問題になっている。台風 19 号では、橋脚の下の土が無くなって沈む現象である洗掘が発生した。現在はこのようなものを人力で評価しているが、IoT ノードを用いて迅速に評価できることが望ましいと考えて取り組んでいる。

ここまでは橋梁の防災上の問題への対応について述べてきたが、次に、維持管理上の問題に対する IoT ノードを用いた取り組みについて述べる。橋梁の疲労劣化の要因としては、交通荷重というのが大きく支配的であるが、橋梁の上を走る車の重さは簡単に測る方法が無く、実はそれほど分かっていない。既往技術で道路にセンサを埋めて計測する方法があるが、これは 1 セット 1 億円規模の費用がかかる。また、橋の上にセンサを埋めるという方法もあり、こちらは多少安いですが、それでも既往技術ではそれほど安くはならない。そこで我々は、IoT ノードを使って加速度を計測し、橋梁の応答を逆解析することにより車の重さを測る技術を開発している。図 2.2.4 に示す例では、車が 4 台同時に走った時の各車両の重量を自動的に解析し、バスは重さ 10 トン程度というような結果が出ている。これを 1 週間、2 週間という長期間のデータに対して適用すると、例えば 20 トン、あるいは日本の過積載の基準である 25 トンの車両がその期間にどのくらい走っていたか知ることができる。これは安価な技術であり、広域に展開することが可能である。

橋の詳細調査の例として、図 2.2.5 に IoT 技術を活用して斜張橋のケーブルの揺れを計測した結果を示す。計測した斜張橋はケーブルが 300 本以上あり、既往技術での計測はなかなか難しい。お金をかければできないことはないが、少数のセンサでは揺れの原因解明に限界があって上手くいかなかった。それに対して我々は 40 ノードの無線センサを使って橋の動きを計測し、揺れの実態と、桁に生じているひび割れとの関連を評価した。

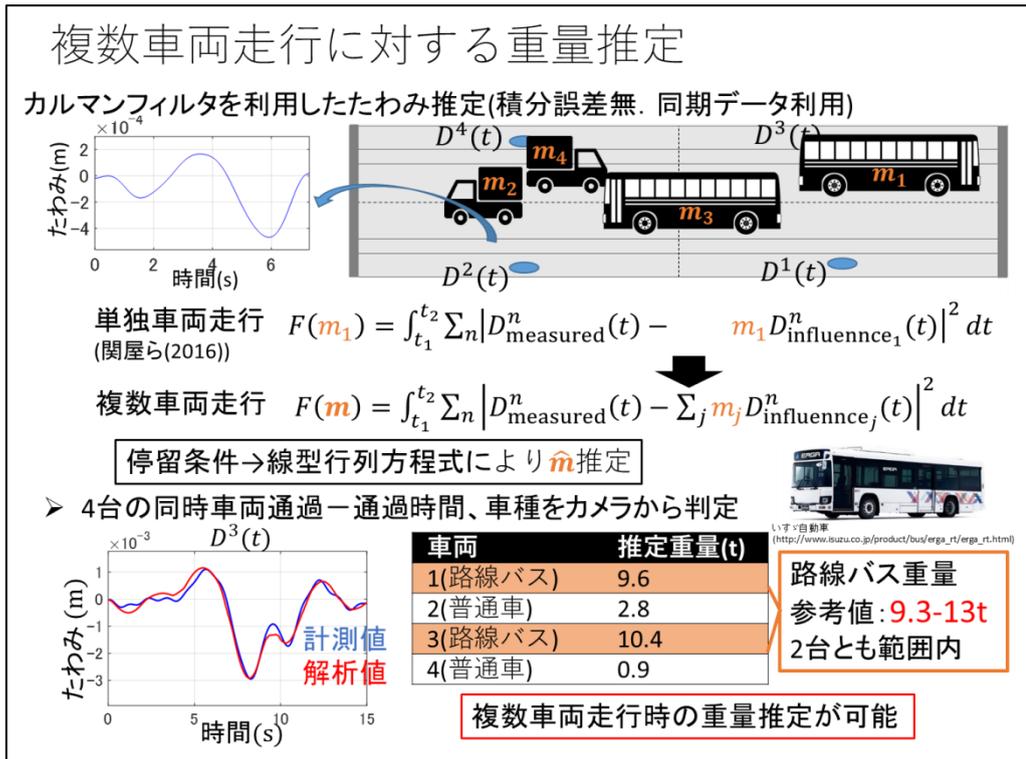


図 2.2.4 加速度計を用いた複数走行車両の重量推定

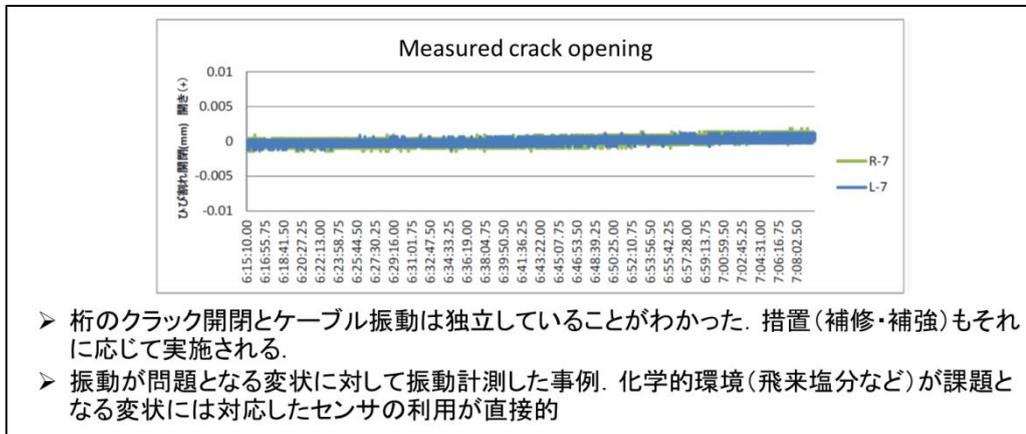


図 2.2.5 加速度計を用いた複数走行車両の重量推定

これらの無線センサネットワークの開発方針としては、簡易、安価にできることを重視すべきと考えている。今までお金をかけても実現しなかったことを、お金をかけずに簡易に実現する仕組みを考える必要がある。また、開発、維持管理においても人件費が発生しそうな仕組みは避ける。例えば、無線通信に複雑な仕組みを使うこともあり得るが、それではIoT技術のメリットが相殺されることになりかねない。そのような点に注意して開発を進めている。

最後に、様々なセンサを融合して利用する際に、正確な位置座標、時刻座標を有効に活用することが重要である。初めのスマートフォンのデータの場合、位置座標を持ってきてマップ上に落とすと同時に、加速度や角速度の時刻を正確にすることでデータの質を向上させた。また、後半の橋梁のモニタリングも、各ノードの時刻を共通にすることでデータの使用価値が上がっている。

2. 話題提供1
IoT・センシングの
応用分野

逆に、多数のセンサやノード、様々な種類のセンサがあっても時刻がばらばらであったり、位置情報が不明であると、データが使いにくくなり解析方法が限られる。位置座標と時刻座標を軸に、上手くデータを融合していくことが重要と考えている。

【質疑応答】

Q：スマートフォンを利用した路面評価では、車に加速度センサや角速度センサ、いわゆるジャイロメーターを積み込んでおくということか。

A：スマートフォンを車の上に貼り付けているだけである。

Q：スマートフォンの能力だけで、道路のひずみや形状がすべて検出できるのか。新たなデバイスは必要ないのか。

A：性能面を考えれば、例えばタイヤの近くにセンサを置くなど色々な方法が考えられるが、それでは展開するときには限度が出てくるので、本日紹介した事例では、展開が容易なスマートフォンだけを使うものの、データ処理のところを工夫することで、内部センサの情報を有効に融合し、これだけの精度を出している。個別のセンサの能力も重要であるが、それには限度もあるため、如何に有効に融合するかも重要である。現状ではスマートフォンとドライブレコーダーだけを使っているが、今後、これに化学系のセンサを加えて広域の環境モニタリングをするなど、付加価値を高めていくということはあり得る。他にも、スマートフォンのセンサでは実現できない、非接触による正確な変位計測や高精度な赤外線カメラ、電磁波レーダーといった技術も小型化、低価格化して車両に実装できると、道路の舗装評価を高度化できる可能性がある。

Q：橋梁の話題にあったセンサノードで、設置されるセンサは基本的に加速度センサか。

A：紹介した例は加速度センサだが、他にも歪み、傾斜、カメラノードが付いている。地震後の構造健全性評価などには変位が重要になることも多いことから、非接触の変位センサも搭載できるように検討している。これらを時刻座標や位置座標を活用してうまく融合していくことが重要と考えている。

Q：センサノードに通信機能を持たせて、色々な所からの情報を集めてくるというのはすばらしいが、リスクに対する不安はないか。医療の問題に似ているが、例えばセンサで測って大丈夫と言った後に、地震で崩壊するといったことが起こるかも知れない。そのような社会的なリスクに対するケアはどうなっているか。

A：人が見に行くというのが地震などの災害後の検査の基本であり、そこを置きかえることは恐らく当面難しいと思う。ただ、現状では全数を見に行っているが、特に地震後は交通渋滞もあって、必ずしも全てを迅速に見には行けない。そのようなときに、見に行く必要性の高いところの優先順位をつけることができると考えられる。また、地震のハザードのレベルが低いときであっても、直接見に行っても確認しないと稼働を再開できない、開放できないという問題がある。明らかに応答が小さい時などには、センサに頼って判断することで、迅速に再開することが可能になるかも知れない。人が判断するところ、センサに任せるところ、センサによる情報やその加工情報による支援を受けて人が判断するところを予め整理すること

が重要と考える。

Q：橋などの保守は国交省や地方自治体など行政がやっている。これらがカスタマーになってモニタリングの費用を負担するというのか。

A：その通りであると思う。ただし、地方自治体レベルでは、お金の出所は自治体であっても、コンサル会社などが間に入って、このような技術を使って評価することになると考えている。

Q：今回紹介された技術は、今現在、必ずしも普及していないと思われる。何がネックになっているのか。なぜ橋梁の測定は人手でおこなわれていて、自動計測にならないのか。

A：橋梁点検は全体として色々な項目を見る必要があるため、2、3個のセンサで測れば十分ということにはならない。全体的に評価するには、最終的に人が見に行くことが必要になる。ただし、センサが有効な対象については、これを順次置きかえていくと考えられる。それは、例えば先ほど説明した、地震後の評価のような例である。

ただ、地震後の評価に関しては、技術としてのレベルの高いものは今でも存在しているが、それを導入するには予算が足りない。近年、安価で簡易な技術が出てきたので、今後入っていく可能性はあるが、自治体というのは、自らが1人目になって新しい技術を導入することが難しい。新たな事例ができるか、あるいは国や委員会等が事例をつくって先導事例として示されると、次が続いていくと思う。

Q：スライドの中で、エネルギーハーベスティングよりも電池の方が良いとあったが、電池交換はどのようにするのか。また、今後電池レスという方向性は必要ではないのか。

A：使い方のシナリオ次第と思うが、橋梁分野ではソーラーパネルを使ったものなど、エネルギーハーベスティングを使ったものでコンセプトの実証レベルのものは比較的多く出ている。しかし、現地で直面するのは、現状のエネルギーハーベスティングは設置に非常に手間がかかるということ。ソーラーパネルにしても太陽の向きに合わせる必要があるなど、日の当たる所と測りたい所は必ずしも同じではないので、現状では結果的に電源を引いた方が楽ということが多い。これも、今後どこまで簡易化できるかというところにかかってくると思う。今のところは、簡易なものは取得できるエネルギーの大きさが単一乾電池にかなわないケースが多々あるので、乾電池を使った方が現実的という面がある。ただ、将来的に利用可能なエネルギーが大きくなれば、状況は全く異なりエネルギーハーベスティングは有効な解決策になると思い、期待している。また、設置コスト等が重要ではあるが、複数の箇所でも多数のセンサを使う場合、その中の一つだけ、例えば基地局、シンクノードだけはエネルギーハーベスティングを使用するといったことが必要になると考えられ、我々も検討している。

Q：今使用しているスマートフォンのセンサについて、そのセンサがもう少し性能が良ければ良いということはあるか。

A：我々が測っている車両の応答に関しては、現状のセンサで十分である。スマートフォンは時刻管理の点でセンサの性能を十分に発揮できない仕組みになっているので、そこを直すことで、つまり、センサ融合の方法を改善することで、今回紹介したアプリケーションにとっては十分な性能にできる。ただし、もっとセンサ性能がよくなれば、現在のアプリケーション

の高度化や全く新しいアプリケーションが考えられる。例えば、加速度や角速度の精度が良くなればトンネル内のように GPS が届かない場所における位置同定精度が向上し、地上、地下、トンネル内などシームレスに道路インフラの評価が可能になると考えられる。GPS 精度が向上すればピンポイントでの舗装評価が可能となる。カメラやマイクの性能がよくなれば、画像ベースで路面損傷を詳細に評価したり、橋のジョイントを通過する際の音の解析によりその損傷を評価したり、といったことができる可能性がある。

2.3 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）

現在、日本国内の農業従事者は175万人だが、65歳以上が3分の2以上を占めつつある年齢構成になっている（図2.3.1）。ここ5年、6年くらいずっと6万人、7万人くらいの新規就農者がいるが、それと同等以上の離農者がいるという状況である。これから10～20年後となると、現在の65歳以上は第一線から離れ、20年後には今現在の3分の1程度、すなわち60～70万人で日本の農業を担っていく可能性がある。食料自給率も現在37%で急減しており、今の農業生産を20年後も維持しようとする、この3分の1の就農者で維持しなければならず、現在の3倍以上の生産性を持つ農業技術を開発して、現場に導入していく必要が出てくると考えられる。なお、農業生産法人組織経営体なり、一般法人の農業参入の推移は増加傾向にあり、注目に値するものであり、今後の新たな技術体系の導入先としても期待できる。

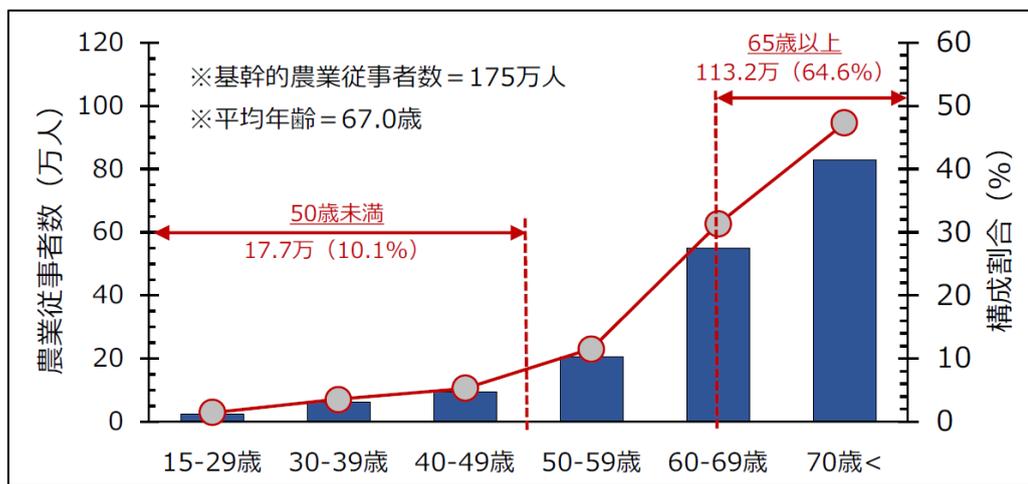


図 2.3.1 日本国内の農業従事者の動向

この半世紀で、米を作る時間は10アール当たり140～150時間から25時間にまで短縮されている。この8割程の労働時間削減の背景は、様々な栽培技術の開発・導入、農地基盤整備、さらにトラクタや田植え機、コンバイン等の農業機械技術の開発・導入によるものだが、今後さらに高能率化したとしても前述の生産性を3倍以上に拡大することは難しい。その理由は、現行の農業機械は人間が乗って操作、作業することが大前提となっているからである。より高い生産性を求めるとなれば、人間の乗車を要さない農業機械、すなわちロボットという選択肢が必要になる。

2016年3月に開催された、政府の未来投資に向けた官民対話において、2018年までに圃場内で無人作業することができるロボットを市販化するという目標が掲げられた（図2.3.2）。そして2020年までに遠隔監視による圃場間移動の技術を含む全自動の無人化システムを実現するための制度整備等を行うことが提言された。この2018年までの無人化：レベル2の実現において有人監視とは一つの安全確保策であって、同一圃場内でロボットと随伴機による協調作業を意味している。人は機械に乗車して作業しながらロボットを監視する役目を担う、こうした作業体系が既に生産現場に導入されつつある。現在、レベル3に向けた完全無人化を目的とした技術開発が進められ、車両系ロボット農機が公道を走行することをも視野に入れているので、そうしたロボ

ット農機の高度運用の実現に向けては、研究開発の推進方策と社会実装のための諸制度との調整方針について検討を重ねている段階である。

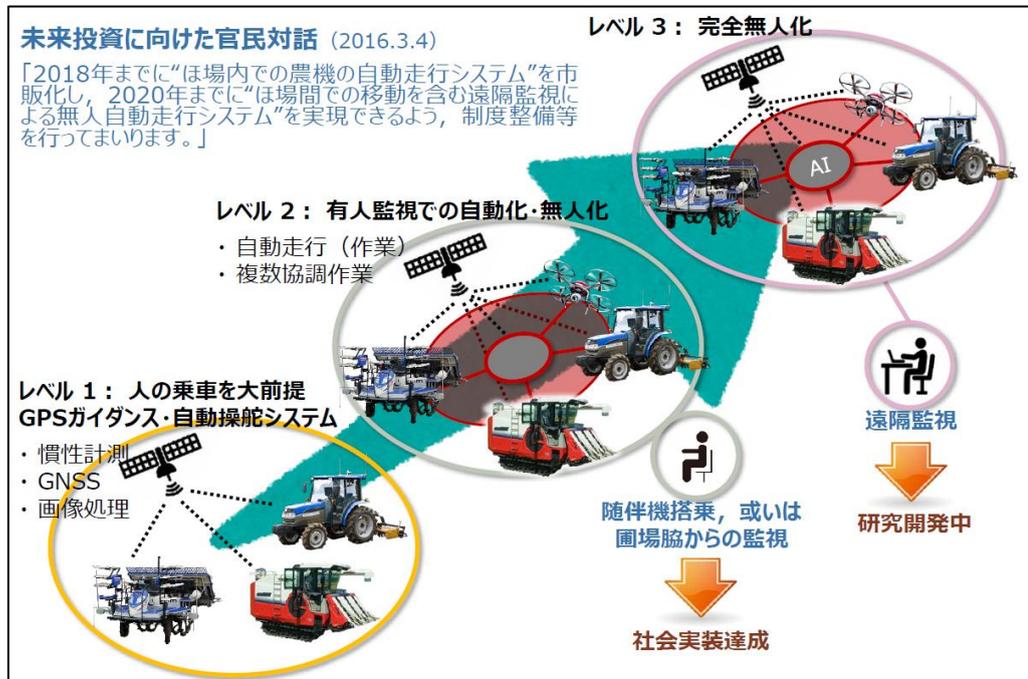


図 2.3.2 ロボット農機の社会実装化

動画は、100PS 程の 2 台のロボットトラクタを 2 筆の田んぼに投入して代掻き作業を無人で行わせており、畦畔内側の最外周まで無人で作業をしている様子。このシステムはレベル 2 の位置付けなので、オペレータは圃場脇で 2 台のロボットを監視している。ロボットは、市販のトラクタをベースに、航法センサとして RTK-GNSS 受信機、GPS コンパスおよび慣性計測装置 (IMU) を搭載し、位置情報や方位情報を取得する。操舵用モータと制御用 PC による自律走行機能に加え、遠隔からロボットトラクタ周辺の監視を行うため、全方位カメラをロボットのキャビン内の中央上に搭載し、無線通信装置 (2.4GHz Wi-Fi) を用いてイーサネット経由で作業者の遠隔監視システムにカラー画像を送信する。また、ロボット周囲の人を検知するため、ロボットのキャビン内の前後に 2 台の RGB 単眼カメラを搭載し、制御用 PC に接続している。2018 年までに開発を終え、農機メーカーに技術移転して 2018 年末に市販化された。

次の動画は、代掻きを終えた後の田んぼに苗を植え付ける田植機をロボット化する目的で開発した自動運転田植機の様子。通常の田植作業においては、田植機に 1～2 名の作業者が乗車、圃場脇で苗を補充したりする作業者が 1 名の計 2～3 名の組作業で行われる。この自動運転田植機では、田植え作業と苗補給を 1 名で実現可能であり、主な特徴としては、①直進と旋回的大幅な速度アップを可能とする、②無人運転で熟練者以上の速度と精度で植え付け、③事前の経路生成不要で、外周以外は無人運転可能 (不整形な圃場でも走行経路の作成可)、④リモコンとの通信や衛星測位情報が途絶えた場合、作業を中止する安全機能を具備といった点が挙げられる。

これら土地利用型農業の車両系ロボット農機の最も重要なキーテクは、測位システムである。現段階では、GNSS 用受信機の価格は基地局も含め、150～200 万円ほど要する。ロボットに改

良したコスト高に加えて、車両系ロボットに必要な不可欠な測位システムのみならず 100 万円以上も付加されるようでは、ロボット農機の普及は限定的と思われ、より広範囲な普及に向けては低価格の受信機が求められる。

ご存知のように、JAXA が開発した準天頂衛星は 2010 年の初号機から現在は 4 基体制となって実運用の状況にあり、数年後には 7 基体制になるとされている。内閣府の SIP のもとで、前述のロボットトラクタ開発研究の一環で準天頂衛星を用いた試験を実施してきた経験上、農業分野で積極的に用いるに際してはより高い測位精度が求められると考える。

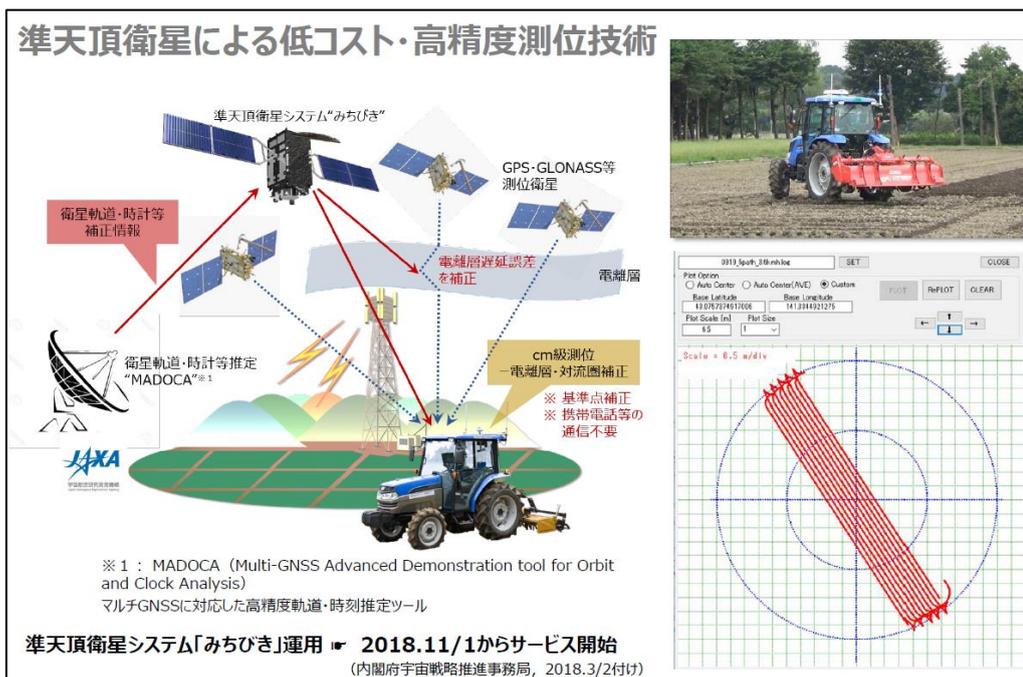


図 2.3.3 準天頂衛星による低コスト・高精度測位技術

前述のとおり、圃場内限定で自動で作業するロボットは市販化に至ったが、今後は圃場と圃場を繋ぐ農道をも無人で走行する技術とその作業体系化を図る必要がある。農業は移動産業とも言われるくらいで、農作業全体に要する時間の 2 割位を移動作業に費やす現状であり、自動運転の農業版と言っても良い。農道を走るに当たっては、GNSS のデータが基本になるが、その他に LiDAR やカメラがどうしても必要になる (図 2.3.4)。すなわち、GNSS によるマップデータに基づいて、LiDAR やカメラで人や障害物の検出を行い、動的な経路形成を行う必要がある。ドリフト問題を解決するため、今現在、既に GNSS、IMU、さらに LiDAR 等をセンサフュージョン化して、グローバル経路計画で計算した経路をベースとして農道の幅、農道のノード間の巡回半径などを考慮した経路生成アルゴリズムを開発してロボット車両制御に反映させる技術開発を進めている。農道は一般道に比べて狭く悪条件であることが多い。安全・効率的な圃場間移動を実現するためには、機械技術の開発と同時並行で、新しい技術導入を想定した農道等基盤整備を進める必要がある。

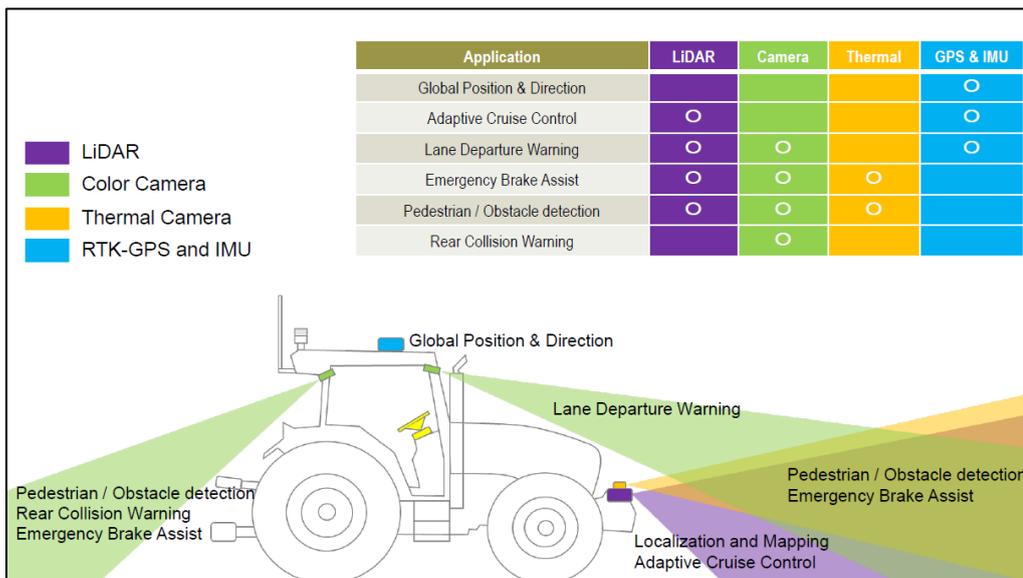


図 2.3.4 ロボット農機の圃場間移動に向けた環境認識センシングシステム

ここまで水田稲作用ロボットについて述べてきた。水田作関係のロボットに関しては、世界各国の中でも日本は少なからず優位な位置にいると思われるが、一方で、畑野菜作関係においては欧米に遅れを取っている。野菜作のロボット化に向けてまず必要なのが、特に生育管理に係わるロボット化である（図 2.3.5）。生育管理においては、種や苗を畑に植えた後、収穫するまでの 2～3 ヶ月間に幾度となく除草作業、病害虫への防除をおこなう必要がある。イメージとしては、先程の水田作業ロボットに比べるとより小型の車両系で良いと思うが、その車両をプラットフォームとして自己位置認識技術、作物と雑草を識別するカメラセンサ等を搭載して、一株一株をくまなくセンシングしてリアルタイムで物理除草するとともに、病虫害の発生状況をマップ化する。なお、畑の規模に応じて複数台の小型ロボット車両による協調作業体系を構築する必要がある。さらに、マップに基づいて、それぞれの病虫害に適した薬剤を搭載した自律型ロボットドローンで局所防除することにより、適材適所の農薬散布のシステム化を図ることとなる。そのために、多様な画像データベースの構築を経て、AI（深層学習）を活用した作物・雑草の識別、病害・虫害の自動同定・診断技術を開発している。

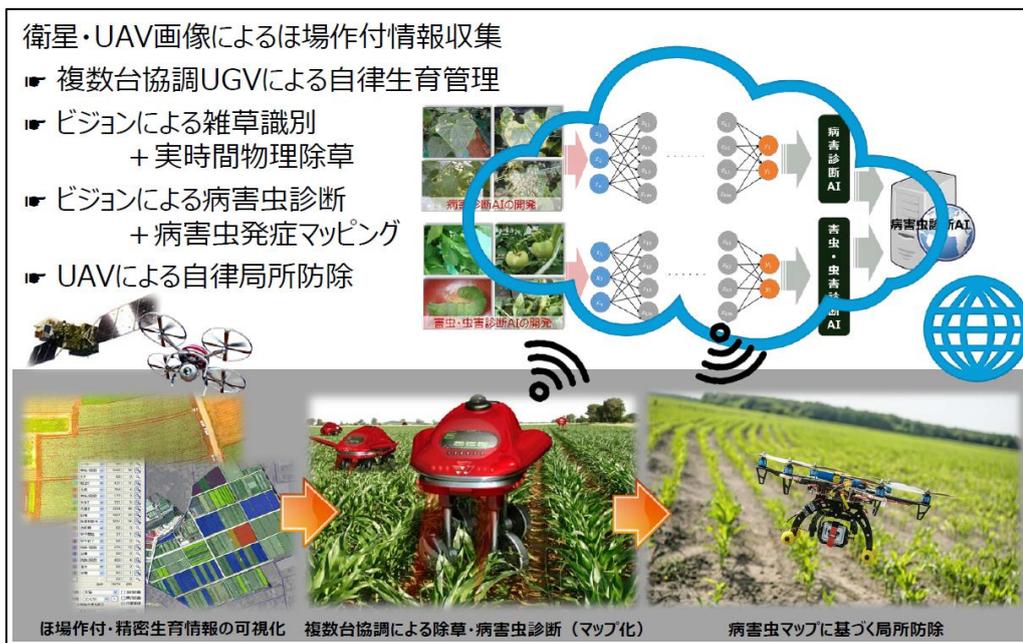


図 2.3.5 畑野菜作における智能化生育管理システム

【質疑応答】

Q：センシング、センサシステムにおいて、今求められていることは何か。

A：RTKのGNSSはとても高価格であるが、測位精度2~3cmという高精度が得られ、ロボット農機では往々にしてその精度が必要である。準天頂衛星を利用した受信機は販売され導入する価値は十分あると思われるが、一方で今年後半になって通信キャリアが衛星測位を用いた高精度の位置情報配信サービスに参入しているため、その測位精度やコストを含めてその動向を見極める必要があると考える。

LiDARに関して、昨年末に60万円ほどの製品を購入したが、急速に価格破壊が既に起き始めている。圃場間移動できるロボットの社会実装は2023年を目標にしているが、その頃には一桁価格が下がる可能性が示唆されている。

Q：欧米のロボット農機を買ってくるだけではない理由は何か。また、日本ならではの注目点、あるいは、日本ならではの技術課題にはどのようなものがあるか。

A：稲作関連の機械技術に関しては、日本は極めて高いレベルにある。アメリカでも稲作はあり、例えば米国のジョージアでもトラクタのロボット化を進めてきているが、実用化には至っていない。米国では圃場の規模に応じて200~300PSのトラクタがロボット化されると考えられる。しかしながら、そのようなサイズ感のトラクタは日本の水田圃場の規模・区画と全くマッチしない。また、大型のトラクタを入れると、土壌に圧密をかけてしまい、作物の生育の根圏域の活性を阻害してしまう。圧密がかかると、土壌の中に空気を入れるためのプラウイングという作業が必要となるが、そのための化石エネルギーの投入という悪循環を招いてしまう。このため、日本・アジア向けには、中小型のトラクタ、最大100PSクラスが適当と考えている。一方、日本はこれまで稲作に特化した技術開発をしてきたので、

畑野菜作りに向けての技術開発は後手に回ってしまっている現状は否めないが、既に様々なアプローチで研究が進められている。

Q：日本は零細な小さい農家ばかりなので、シェア、あるいは集約化についての仕組みを含めて考えないといけないように思われるが、どのように進んでいるか。

A：高齢化や後継者の減少など現在集落が抱える問題や、組織化・法人化した際のメリット・デメリットを踏まえ、法人化を視野に入れて集落営農にて農業機械・施設の共同所有など組織としての機能を持ち、最終的には法人格を取得できる団体になる傾向がある。結果として経営規模の拡大、圃場一筆の拡張の傾向は間違いなくある。日本国内の水田の現状は、その65%以上が概ね30a～1haの標準区画圃場と呼ばれる規模であるが、ロボットを用いて農作業を最大限に効率化しようとする、こうした既存の農地基盤の概念を改める必要があり、さらに無人化を進めるに際しては夜間の農作業の実施という選択肢もある。ご紹介したロボット農機は、主に稲作・畑作を対象とした平場の大規模法人での導入を視野に入れており、スケールメリットを生かした営農作業体系に組み入れていく必要がある。前述した通り、ロボットが自律的に圃場で一通り作業を終えた後に、無人で安全・効率的に次の圃場に移動することができる圃場間移動技術とこれを容易にするためのインフラ整備をすとなれば、一定程度環境が整備された集落営農、または農業生産法人が当面のロボット農機導入の前提条件となる。

申し上げたように、こうしたロボット農機の運用システムの策定に向けて、技術開発と並行して、行政やメーカー等関係機関の関係者参集のもとでその方向性等を検討する場を設置して、研究開発の効率的な推進方策と社会実装のための諸制度改革に向けた取り組み方針を策定したところ。

Q：農場内に設置したセンサネットで色々測り、農業サーバーで集約的に処理するという話がある。一方で、先ほどの話にあった除草のために圃場内を繁く運動するロボットに、土壌センサや湿度センサなどを搭載するというのにも何か未来を感じる。どのように考えれば良いか。

A：例えば、先ほどの除草ロボットも、いつ動かせば効率的に雑草を取ることができるかについては、野菜の苗を植えて以降の積算温度等から、どのような雑草が繁殖するかということを経営サーバー上で予測した上で、ロボットを適宜稼働・配置するということが必要になってくる。無人農作業システムの将来像は、作物の生育状態を認識して最適な処方箋に基づいて作業を行うことができる前出図 2.3.5 に示したスマートロボットと言える。インターネットに接続して、ご指摘のような作物・土壌・気象・圃場情報など様々な情報を収集・分析・活用して的確な作業を自律的に行うことができ、IoT 機器を介して低コストなスマート農業の実現を目指す。ICT の活用によって収集される農業情報は、通年で毎年取得される時空間データとなるために、いわゆるビッグデータとなり得る。このビッグデータから「営農ノウハウ」の抽出が可能となる。抽出された「営農ノウハウ」によって土地生産性とともにも収益性が高まり、この有用情報を地域の農家に配信することで、新規就農者への円滑な技術伝承が図られることが期待される。

2.4 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）

過去 10 年ほど IoT システムの構築に携わってきたので、IT 側の視点から課題について述べてみたい。これまでスマートグリッド、スマートコミュニティ、工場、農業などの実証に関わる中で、IT ベンダーだけでは解決できない様々な問題が出てきた。

現在、様々な機器や場所にセンサを設置し、そのデータを、無線を使ってクラウド、あるいは途中にあるサーバに収集し、そこでデータ分析するサービスが増えている。データ分析では、機械学習が良く使われるが、機械学習では GPU を利用することが多いので、エッジで処理するにしても、ある程度高性能なサーバが必要になる。クラウドに接続するセンサシステムの構成は、図 2.4.1 に示すように 2 通りある。一つは、センサ（デバイス）を無線 LAN、Bluetooth など接続して、ローカルネットワーク経由でゲートウェイ（エッジ）でデータを集約し、インターネットを通してクラウドに接続する方法である。もう一つは、今後期待される方法で、LTE（4G）や 5G 等の携帯ネットワークを使って、センサ情報をそのままクラウドに転送する方法である。データ分析は、クラウドとゲートウェイで行うことになる。

2. 話題提供 1
IoT・センシングの
応用分野

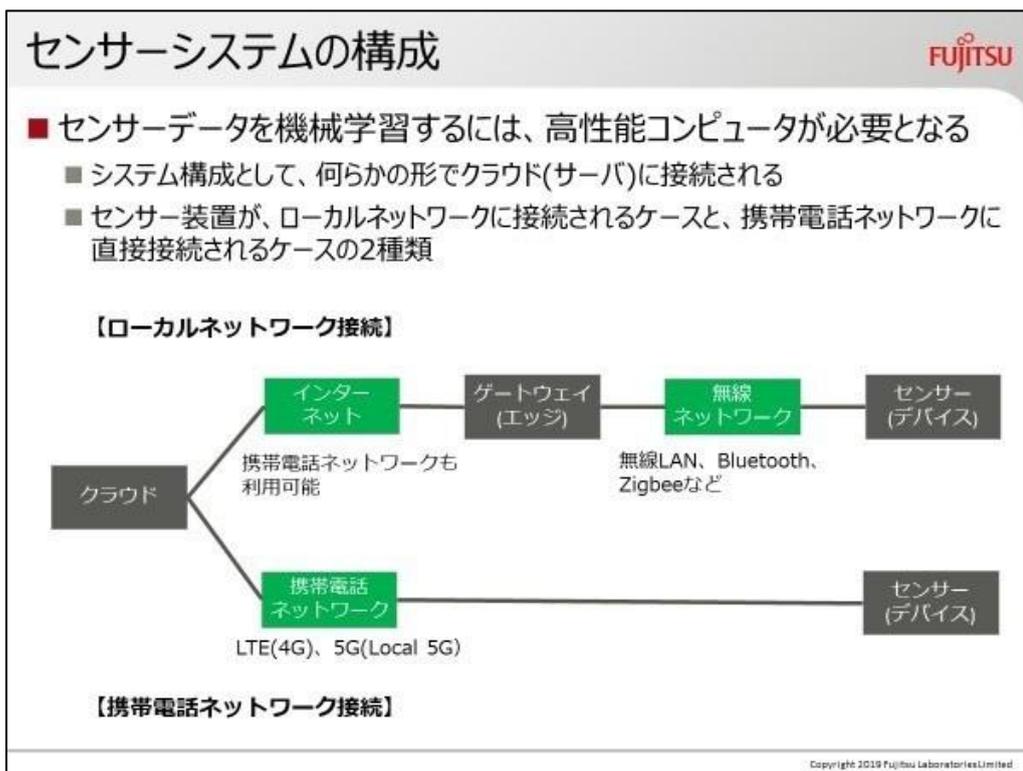


図 2.4.1 センサシステムの構成

ここでの問題は、既存のセンサや装置をどのようにネットワークに接続するかである。既に多くのデバイスが存在するため、従来はこのデバイスインターフェースに合わせて、ネットワークやアプリケーションが合わせなければならない。今後は、デバイスベンダーとシステムベンダーが協力してインターフェースを作っていく必要がある。

従来のアプリケーション開発は、図 2.4.2 に示すように、個々のデバイスインターフェースに合わせて一つ一つ手作りして合わせてきた。例えば、家庭内のビデオやテレビにつなげる場合、DLNA という規格に合う様にアプリケーションを作る必要がある。

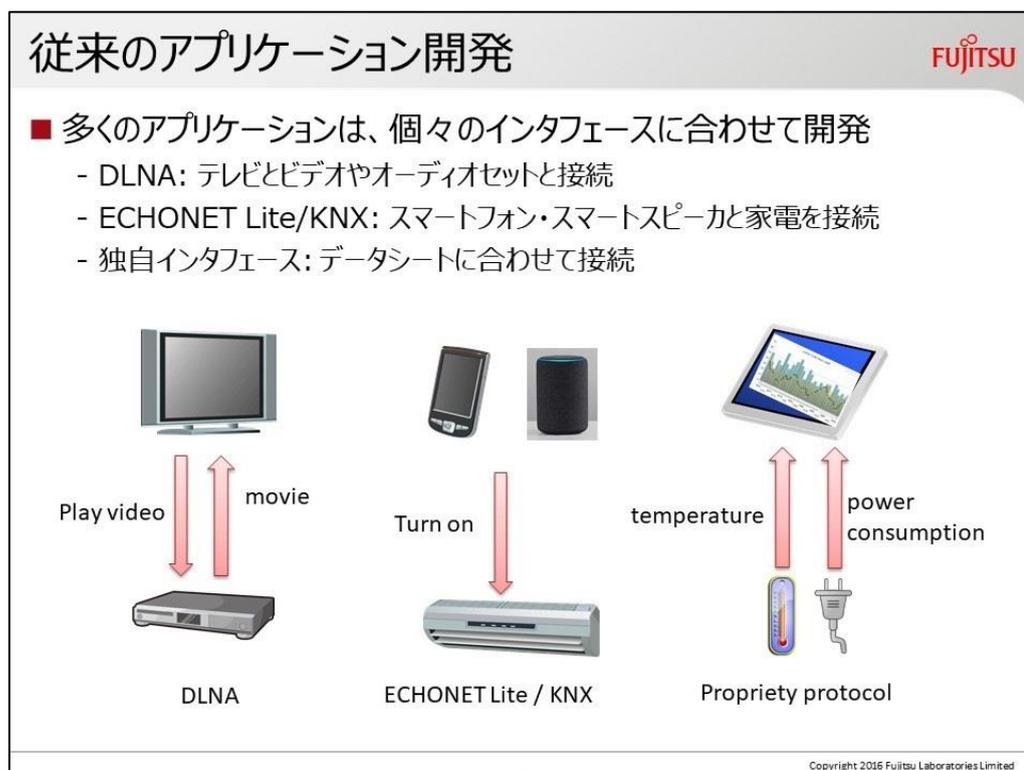


図 2.4.2 独自のインターフェースを持つ従来のアプリケーション開発

この問題を解決するために、我々はプラットフォームという概念を持ち込んだ。図 2.4.3 の左にあるように、デバイス毎に専用のプログラムを開発することで起こるサイロ化を避けるために、同図の右のようにデバイスとエッジ・クラウドの境界を埋めるものである。つまり、デバイスを接続するところとアプリケーションを接続するところを分けることで、アプリケーションに対するインターフェースを共通化することができる。これが実現されると、様々なセンサ情報を複数のアプリケーションが利用可能となる、いわゆるサイバーフィジカルシステムが出来上がる。様々なところにあるセンサがクラウドからアクセス可能となり、物理世界のコピーがクラウド上でできる「デジタルツイン」が実現される。デジタルツインを活用することにより、物理世界の事象を、クラウドの中で AI を利用してシミュレーションすることができるようになる。

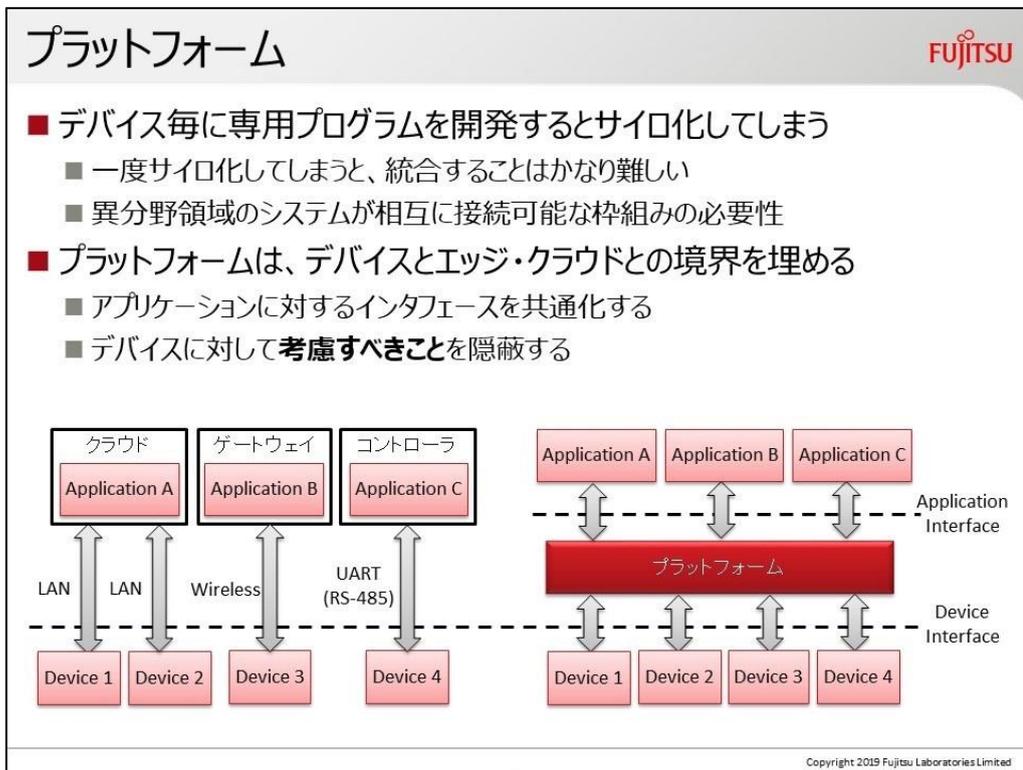


図 2.4.3 デバイスとエッジ・クラウドの境界を埋めるプラットフォーム

このようなサイバーフィジカルシステムにおいては、Web 技術がよく使われている。そのため、デバイスやセンサを Web ページと同様に扱いたいという、アプリケーション開発側の希望がある。現在の Web ページは、HTML や JSON というフォーマットでコンテンツの内容が書かれており、テキストや写真、他のページへのリンクなどのコンテンツ情報は全てブラウザから取得できるようになっている。これと同様に、センサの機能を JSON 等で記述しておき、ブラウザから取り出すことができれば Web ページと同様に扱える。そしてさらに、Web アプリケーションとデバイスの世界を融合できることになる。すべてが Web 技術で実現可能になれば、Web の中でアプリケーションも IoT (デバイス) も扱えるようになり、いわゆる「Web of Things」と呼ばれているデジタルトランスフォーメーションの世界が実現できる。イメージとしては、図 2.4.4 に示すように、デバイスの側には様々なインターフェース規格があるが、これをプラットフォームのところで Web インターフェース一つにしてしまおうという考えである。実際には、デバイスは複数の規格を組み合わせを使っており、非常に複雑な構成をしているが、プラットフォームを導入することで、これらを隠蔽して簡単になる可能性がある。現在あるソフトウェア、例えばアマゾンやグーグルから提供されるアプリケーションプログラミングインターフェース (API) もほとんどが Web インターフェースで作られている。最近では楽天市場で API マーケットが開かれており、世の中にある 1 万個以上の API がここで購入できる。エッジで利用されるインターフェースの例を図 2.4.5 に示す。今後も新しい技術やデバイスが導入されるにつれて、新しい規格が増える可能性があり、アプリケーション向けのインターフェース整備がますます重要になるであろう。

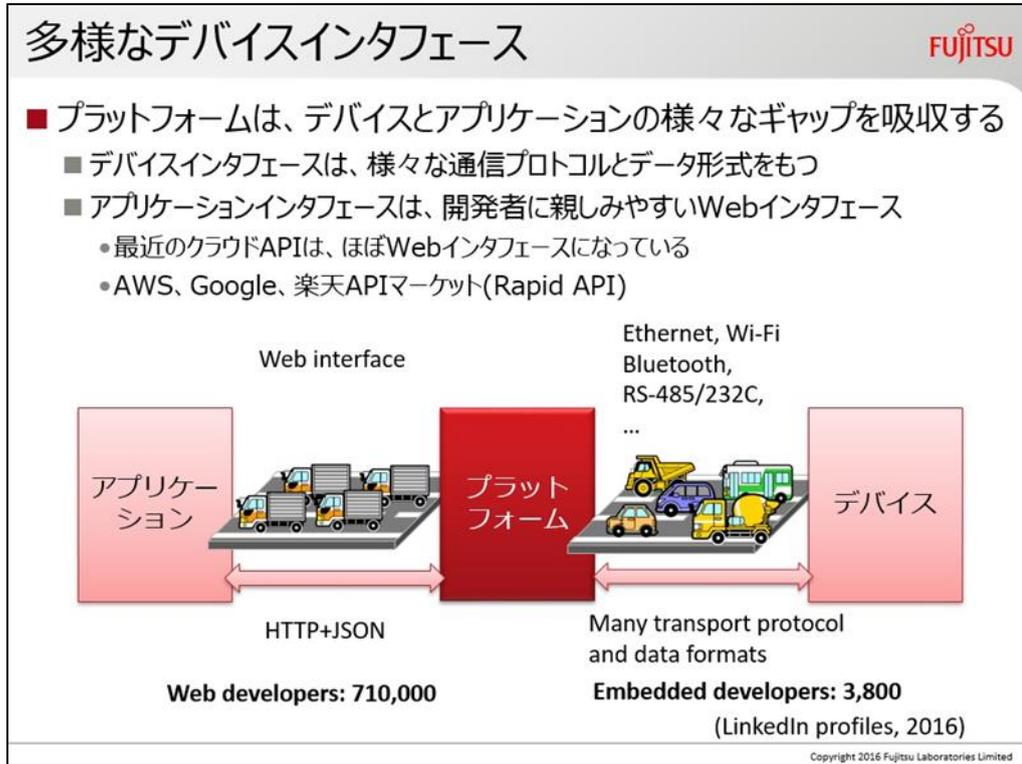


図 2.4.4 多様なデバイスインターフェース

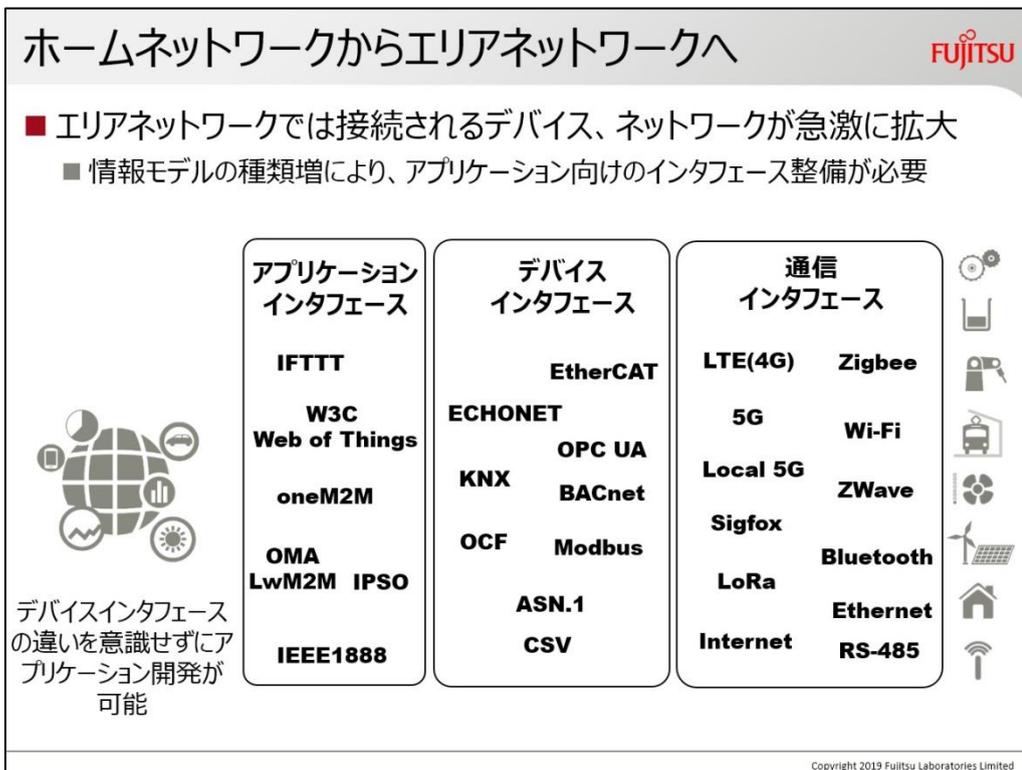


図 2.4.5 エッジで利用されるインターフェースの例

具体的な例としてスマート農業での実践例を挙げる。農業の現場では、電源やネットワークが十分に用意されていないので、センサを設置するには制約が多い。この例では、センサデバイスに太陽光パネルとキャパシタを搭載し、無電源で24時間365日動作可能なものを開発した。これらを圃場の中に設置したゲートウェイ機器を経由させて、クラウドにつなげる方法を採用した。昼間、センシングしてデータを無線で送信しながら、太陽光パネルの余剰電力をキャパシタに充電する。夜間は充電したキャパシタの電力を使って、1分に1回の割合でデータを送信している。Bluetoothは30m程度しか飛ばないので、100m通信可能なLoRaを併用することで、大規模なハウスにおいても、ゲートウェイが2つか3つあれば対応できる。実際に開発したバッテリーレスセンサを図2.4.6に示した。

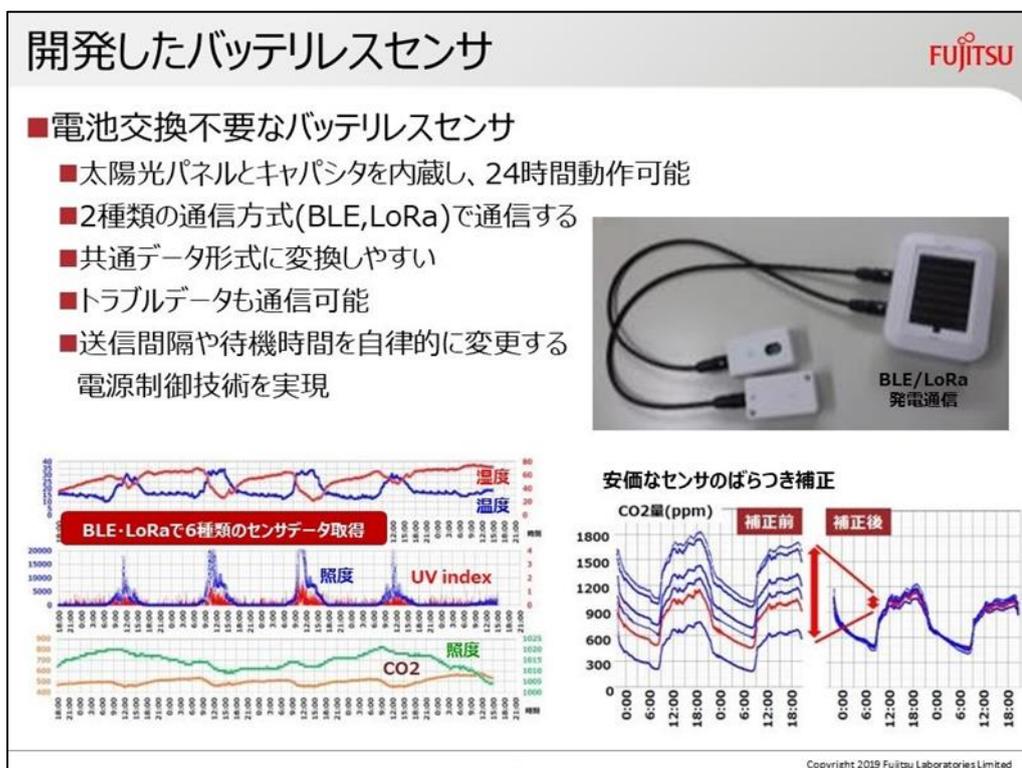


図 2.4.6 開発した電池交換不要なバッテリーレスセンサ

重要なのは、図2.4.7に示すように、デバイスとプラットフォームの間の機能分担をしっかりとしておくこと。インターフェースには流行があり、今使われている規格は5年後には使われていない可能性が高い。プラットフォームは、こうした変化があったとしても、アプリケーションに同様の機能を提供し続けなければならない。また、センサデータの通信にだけ注意が向きがちだが、実際の現場ではデータ通信の環境を維持することも大事である。特に、無線で通信するときには混信などのトラブルが多く、ネットワークが切れやすい。また、安価なデバイスが利用されるために、測定精度の問題や故障の問題をプラットフォーム側でカバーする必要もあり、プラットフォームの重要性は今後増すと思われる。

デバイスとプラットフォームの機能分担

- 今後開発するデバイスは、機能分担を考慮することが望ましい
 - インタフェース変換
 - インタフェースには流行があり、**変化に合わせて追従できる**ことが必要
 - センサーデータの通信でなく、故障診断等の運用管理データの通信も考慮
 - デバイスの物理特性の考慮
 - **センシング可能になるための起動時間の考慮**(ITでは0→1の変化は一瞬)
 - センサと通信の消費電力を考慮した、動作スケジュール
 - デバイス故障、ネットワーク不良などのトラブル検出と復旧
 - デバイスの自己診断機能、もしくは**外部への診断方法の提供**
 - センサーの経年変化、補正方法(精度を数年にわたり維持する方法)
 - ネットワーク状況の把握
 - 機械学習等の分析処理
 - **機械学習にはGPUを搭載したサーバが必要**になる。クラウドで学習、エッジで認識。
 - 処理しきれないデータの処理方法 (重要なデータを選択して分析するなど)
 - 処理しやすいデータ形式、複数センサの時刻同期
 - 単体でのセンサー精度向上と、**複数の安価なセンサーによる精度向上**

Copyright 2019 Fujitsu Laboratories Limited

図 2.4.7 デバイスとプラットフォームの機能分担

以上述べてきたように、現在の IoT システムはデバイスとアプリケーションとの役割を明確にして、それぞれで分担することが課題である。この課題を解決するには、デバイス研究者と ICT 研究者の密なコラボレーションが不可欠である。理想的には、両分野を十分に理解している人が、それぞれの機能分担を考え、システム全体を設計することが必要になる。しかし、他分野に精通することは困難であり、これを克服するコミュニティ等の場所が必要である。また、現状では IoT は十分に普及しているとは言い難く、事例がまだまだ少ない。今後は、異分野にまたがるコラボレーションを促進し、デバイスとプラットフォームの機能分担を本気で考えていく必要がある。

【質疑応答】

Q：プラットフォームにはどのような機能を持たせたら良いのか。

A：メインの機能は2つである。一つは、デバイスを接続すること。もう一つは、デバイスの情報表現を実現すること。デバイス接続は、無線や有線の通信方式があり、複数の規格をサポートする必要がある。情報表現は、アプリケーションから利用しやすいデバイスの表現方法が求められる。アプリケーションは Web インターフェースを利用することが多いので、JSON 等で表現することでデバイスの表現を統一している。
ソフトウェアではないが、今後、IoT デバイスを開発するためのハードウェアのプラットフォーム化も重要になるであろう。

Q：プラットフォームのスケール感ほどの程度か。

A：面積的な話であれば、通信方式の選択による。農業のところで説明したように、狭い範囲で

あれば、Bluetooth で十分であるが、広域対応では LoRa や 5G が必要になる。
 規模的な話であれば、ゲートウェイを地理的に離れたところに設置して、デバイスは最寄りのゲートウェイに接続することで規模を大きくできる。ゲートウェイの情報はクラウドで集約するなど、階層化して管理することでスケールを確保できる。

Q：標準化が進むと思うが、日本が付加できる価値はどこにあるか。

A：標準化に対する意識は欧米がとて強い。日本企業は、小さくまとまってしまう傾向があり、集めたデータの共有も小さなまとまりの中で解決しようとするため、標準化に対するニーズが低いと感じている。一方で、センサシステムや IoT システム全体では、システムがトラブルに陥らないような運用管理が必要であり、我々は運用情報に関する標準化を強化しようと考えている。

Q：スケーラビリティが重要だと考えているが、その際、中央制御ではなく、分散で自己整合的にやるほうが良いのではないかと思っている。その点についてはどうか。

A：おっしゃるとおりだと思う。既に、現場では処理しきれないくらいのデータが発生しており、データ全部は処理できないことが前提になりつつある。全部処理するコストをかけるより、なかでも重要なデータを中心に処理をして、計算結果の精度をあげることが重要である。その意味でも分散処理は当然の流れではある。大規模な処理はクラウドでやることになるが、エッジに設置されるゲートウェイで何をどこまでするかを決めることがポイントになると思う。

Q：富士通としては、標準化とプラットフォーム化の方向で収益を上げることを狙っているのか。

A：弊社ではいろいろなコトをやっていますが、プラットフォームはその一つだと思う。センサやデバイスを開発する会社ではないので、他の企業、機関と連携しながら、それらを集約する部分でのビジネスになる。その際、どこまでオープンにするかが問題である。ビジネスをするためには、クローズにする部分がないと他との差異化が難しい。

Q：インターフェースやデバイスのところで、国の規制が厳しいために困っていることはないか。

A：プライバシーの観点では、今後問題になる可能性がある。せっかく多くのデータを収集して、高い価値を得られそうだとしたとしても、ユーザが許可しないと活用することができないことがありうる。利用者の特定ができないように処理をすれば、公開または第三者の利用ができてよいと思うが、元のセンサから得られる情報には、個人情報に関わるものが含まれる可能性があり、こうしたデータの活用が一律に制限されてしまうと技術活用ができなくなってしまう。広くセンサ情報を利用できるように、センサと IT との連携を密にして、良い解を見つけていく必要がある。

3. 話題提供 2 重要基盤技術（デバイス）

3.1 フレキシブル高感度計測

関谷 毅（大阪大学）

フレキシブル電子デバイスの研究開発、特に高感度計測について説明する。図 3.1.1 において、縦軸がコストと時間であり、横軸が信号の強度や選択性である。今の IoT センサシステムで測れるのはミリボルトの心電や筋電、ナノアンペア、1 時間あたり 1 度、ppm、1L 当たりナノモルリットルといったレベルの信号であり、このような技術によって IoT の計測が容易になってきている。

一方で、認知症を家庭で測るとか、家庭で簡単にがんを見つけるためには、もっと小さな信号を計測しなければならない。測ることのできる化学量、物理量が現状よりも 3 桁小さくなれば、こういったことが実現できる。しかし、小さな信号を測るといのはそれだけコストと時間がかかる。例えば脳波の計測には数百万円から 1 千万円の装置が必要であり、PET も何億円とする。それを例えば家庭で手軽に測れるように、つまり 3 桁小さな信号を手軽に IoT 技術として使えるようにしたい。

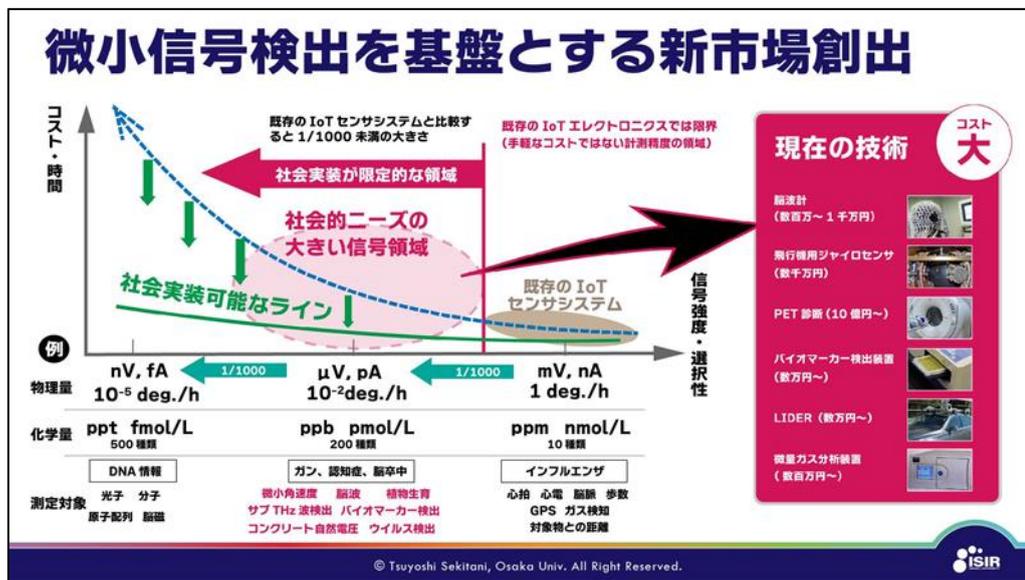


図 3.1.1 微小信号検出

それにはデータをセンシングして、アンプ、AD コンバータ、デジタル信号処理を経てクラウドで高度な信号処理をする必要がある。我々は、材料、ナノテクノロジーの分野、すなわち実空間でいかにしてノイズに負けることなく高度かつ手軽な計測をおこなうかということに注目して、材料とデバイスの本質的なノイズレベルの低減、S/N 比、信号の品質を保つためのアンプの研究開発をしている。品質の高い信号が得られれば、ビッグデータ化したときにも品質の高いビッグデータになる。信号処理をするときにもノイズ処理などの無駄を省くことができる。我々の研究室では、特に、小さな信号が測れるシート型センサについて、さまざまな物理量が計測できる高選択性、高い増幅率、そして低ノイズ化という 3 つの基軸で研究開発をおこなっている（図

3.1.2)。



図 3.1.2 シート型センサ研究開発における三つの軸

研究開発では、まずはサービスメーカーとの連携によって必要とする性能指標を落とし込んでいく。その中で、材料メーカー、プロセスメーカー、デバイスメーカーと連携する。特に我々のおこなっている研究開発は材料、ナノテクノロジーの科学であり、原子位置の制御、配向制御、拡散制御、反応制御、不純物制御、応力や付着の制御をおこない、ナノよりもさらに小さいオンゲストロームレベルでの時間的、空間的な制御を高度におこなうことで、非常に小さな信号を品質高くとることを目指している。

図 3.1.3 では、縦軸が価格指標で、横軸が電圧である。心電、脈波、筋電といったものが数百円の技術で計測できるようになってきた。しかし、脳波というのはそれより3桁小さい信号を取る必要がある。こういったものを測るための技術開発として、シート型のセンサについて紹介する。



図 3.1.3 微小信号計測のニーズとコスト

大きな信号である筋電や心電であれば、既知のデータから仮説、観察、実験、検証と進めて知識にすることができる。しかし、脳波ほどの非常に小さな信号、すなわちノイズにかき消されるような小さな信号を測ろうとすると、実験、検証の過程が極めて困難になる。そのときに重要なのが、品質の高いデータを集めて、統計的に扱うということである。すなわちベイズ統計、ベイズ推論を利用した新しい研究開発と、非常に品質の高いデータの積み重ねによって新しい統計性を見出し、ビッグデータだからこそ導き出される新しいバイオマーカーを見つけ出すというのが我々の取り組みである。既に、分かりやすいバイタルサインは取り尽くされたと言われており、次はこうした揺らぎの中の非常に小さな、統計的に扱うことで初めて見えてくるものから有意性を引き出したいという医療側のニーズがある。

それに対して、我々のおこなっている研究開発を紹介する。我々の研究開発は実空間での信号ノイズ比を飛躍的に上げるための材料の設計、ナノメートル以下の構造揺らぎの制御であり、それによって非常に品質の高い信号をクラウドへと上げていく。図 3.1.4 に示す 7 つのセオリーがあり、それに沿って進めている。

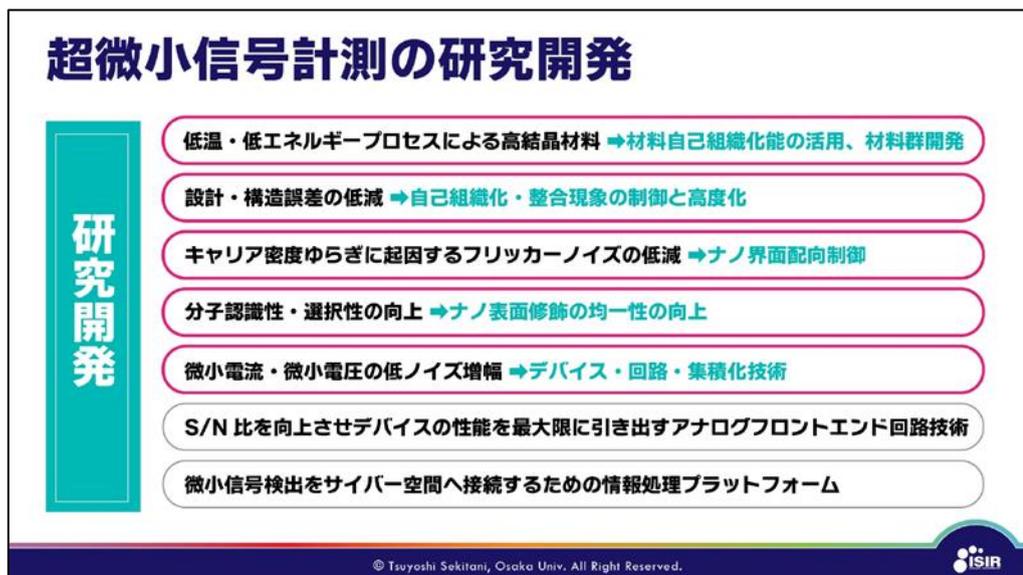


図 3.1.4 超微小信号計測の研究開発

品質の高い材料はノイズが低い。すなわちノイズの小さな材料をつくらうとすると、どうしても結晶性の高い材料が必要になる。高い結晶性材料というのは、シリコンに代表されるように、500℃、1,000℃という高いエネルギーをかけるので、プラスチックフィルムのような安価な基板には使いにくい。そこで、まず取り組んだのは、低エネルギー、低温でプロセスできる高結晶性材料で、その一つが自己組織化分子膜である。これによって構造誤差を抑えること、キャリアの密度揺らぎ、すなわちフリッカーノイズを界面制御によって抑え込むことができる。分子識別性や選択性も重要である。また、微小電流を測るにはトランスインピーダンスアンプ、電圧を測るなら差動増幅アンプというアンプ技術と、その先に比較的安価なアナログフロントエンドと AI 技術を必要とする。

我々は特に材料、デバイス技術を中心に研究開発を進めている。例えば、生体を測りたいとなると、センサは生体に張りついてないと正確に測れない。位置ずれを起こしてもいけない。多チ

チャンネル、大面積で、かつ体は70%以上伸びるので、それに追従する柔らかい電極の開発をしている。図3.1.5の電極は300%程度伸びて、金属のように電気を流し、体の隅々まで張りつけることができる。額に張りつけると、0.01マイクロボルトまでの脳波が計測できる。これは何より額から寸分も外れることなく、体の表面に追従するからこそ可能な計測技術である。

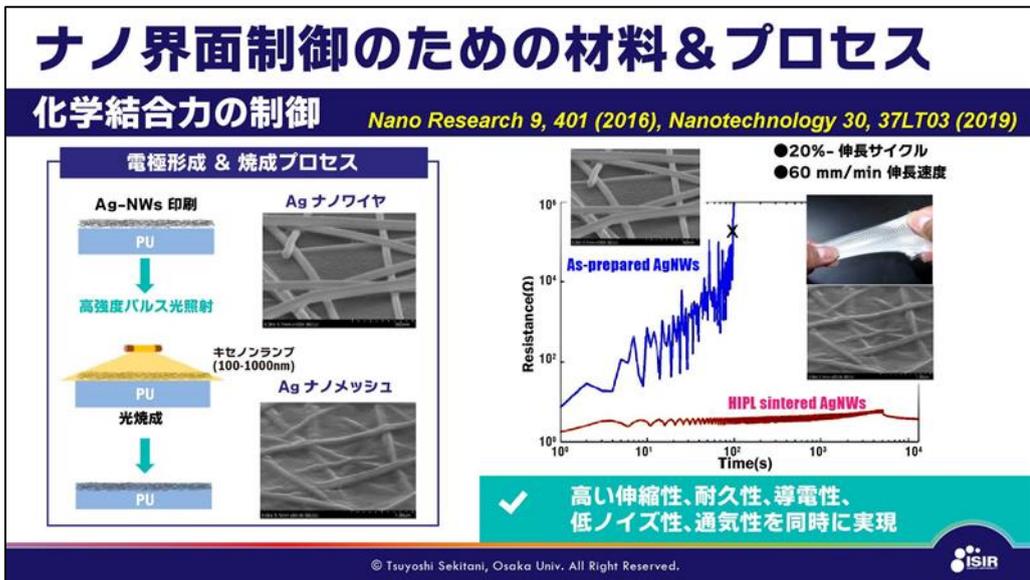


図 3.1.5 ナノ界面制御のための材料&プロセス

通常は、体に張りつけるためにはゲルが必要だが、そのような低ノイズのゲルというのは存在しないため、我々は米に含まれる成分のアミロペクチンを使うことによって、非常に生体適合性が高く、かつバックグラウンドのノイズレベルの小さな材料を開発した。これによって体の表面に的確に張りつきながらも小さな信号を逃さない計測ができるようになった。

次に、体の表面で伸びる必要があるため、伸びる材料としてナノワイヤーやナノフレークというものを使った。これは材料を印刷して用いるが、ポリウレタンの表面に印刷するだけでは、結晶と結晶の間の界面で非常に大きなノイズが発生し、さらに体は動くので、動きによって結晶がずれたりすると抵抗がどんどん変化してしまう。しかし、5秒間フラッシュアニールをかけるだけで、非常に高い結晶性が実現でき、体の表面に張りつけても全く抵抗が変化しなくなる。こういった高い結晶性を出すためのアニール技術や、イオンの揺動を抑えるために1~2nmの貴金属をメッキするナノメッキ技術を有しており、これによって小さな信号を取り出すことができる。

さらに、電極だけではなく、トランジスターも柔らかくしていこうという取り組みがある。プラスチックフィルム上にはSiO₂のような品質の高い絶縁膜をつくることができないため、絶縁膜半導体界面に凹凸ができてしまい、これがキャリア密度の揺らぎになって、マイクロボルトのフリッカーノイズになる。マイクロボルトの脳波を測りたいときには、こういったキャリア密度の揺らぎが全てノイズになるが、自己組織化単分子膜を表面に1層塗って120°Cでアニールするだけで、最表面が完全結晶化し、電子の密度揺らぎを抑えることができる。実際に自己組織化膜をゲート絶縁膜に使うことによって、非常に良いフレキシブルトランジスターが作れるようになってきた。

これでアンプとノイズが測れる装置を新たに準備した。これはプローバを当てるだけで、その

物質の持つノイズを正確に測ることができる。ノイズを測りながら、軌道放射光に持っていき、その物質がオングストロームレベルでどれだけの結晶性があるかについても検討し、ノイズが非常に小さな材料は結晶性が高いということがわかった。これは軌道放射光だからこそ初めて同定できることであり、非常に純度の高い材料を使うことによって、120℃のアニールだけで極めて低いノイズレベルが実現できる。シリコンなどはノイズが小さく、ナノチューブやIGZOもノイズが低い、こうした界面技術を使うことによって、有機トランジスターであっても脳波が測れるくらいに極めてノイズの少ないトランジスターを実現することができた。

これらの技術を使うことによって、世界最薄膜の差動増幅アンプを開発した。身体に張りつけるだけで、既存の技術に比べて圧倒的にきれいな信号がフィルムデバイスで取れるようになり、Nature Electronics の表紙を飾った (図 3.1.6)。これは日本でしかつけれない新しい材料、プロセス技術であり、世界でも十分戦えると認識している。



図 3.1.6 世界最薄の差動増幅アンプ

また、こういったものを LSI と通信技術、電池、アンプ、そして電極を使うことによって、額に貼り付けるだけで右脳から左脳への伝搬や、脳内の周波数成分をリアルタイムで取り出すことができる。頭の中の計測さえもできるようになってきた。アンプ技術と磁気センサを組み合わせることによって、薄い心筋計測システムも開発が進んでいる。独立成分分析アルゴリズムを使うことによって、母体心電と胎児心電をクリアに分離することができ、大阪大学病院や周産期母子医療センターといったところで患者さんに使ってもらっていて、実際に常位胎盤早期剥離を発見したという実績もある。また、脳波を測ることで認知症やうつ病の計測・解析が始まっていて、認知症の判別にも使われ始めている。さらには、構造物のヘルスケアモニタリングなどにも適用している。

日本は言うまでもなく、材料分野に優れた国である。界面技術、材料技術、オングストローム技術を使うことによって新しい低ノイズ材料群、プロセス群、デバイス群、回路群を作り、これまで取れなかった小さな信号を家庭でも手軽に使えるようにして、世界のエコシステムの中に日

本の材料を打ち込むことで、豊かな社会を築いていきたいと考えている。

【質疑応答】

Q：今後 10 年間でどのような科学技術を進めると、この分野がより人々の生活に価値をもたらすと考えられるか。

A：材料の品質や材料の不純物が信号の品質に影響を及ぼすので、それらの計測技術が重要である。SPring-8 という軌道放射光を手軽に使うことでオンダストローム、もしくはそれよりも小さなレベルで正確に測る技術があるからこそ、ノイズの由来がわかる。そのような観点から、共通プラットフォームの整備が重要である。また、クリーンルームなどの設備があるからこそ、材料開発、デバイス開発が進んでいる。一研究室ではできない取り組みを国で進めることによって、材料の研究開発、さらに次世代の IoT につながっていくと考える。

Q：高精度、低ノイズが実現すると、どんな生活が実現するのか。

A：新しいバイオマーカー、バイタルサインを見つけて、薬の開発に役立たせたり、家庭で手軽に認知症に気づいて早目に病院に行ったり、さらに家庭で脳波を計測するといったことが可能になるだろう。

Q：研究成果を提供するためにはリソースが必要であり、維持していくためにもリソースが必要になる。どのような工夫をしているか。

A：いざ実用化に向けた取り組みを開始しようというときに、リソースの問題で動けないということがある。そのようなときに、我々の場合は国プロから大きな力を貰っている。つまり、成果提供の枠組みを作ってからプロジェクトをスタートさせている。国の支援が重要といえる。

3.2 堅牢な分子識別センサ

柳田 剛（九州大学）

本ワークショップ講演者の中で、化学のバックグラウンドを持つのは恐らく自分だけではないかと思う。我々の研究室では、化学の観点からセンサ融合に本質的に必要なものが何であるかを常に考えており、ここではその内容を共有したい。必要なものの1つ目は、物理的・化学的ノイズ、いわゆる外乱に対して極めてロバストな、堅牢な分子識別界面である。これは現状ではほとんど存在しないが、新しい科学技術としてつくり出し、センサに載せる必要がある。2つ目は、異なるレイヤ間の連携を超えた課題抽出・機能創出。これは昨年度までCREST 桜井領域の内田チームで実際にやってきたことで、課題の抽出により、各レイヤに留まっていたらとても思いつかない機能が出てきた。一段上のレイヤで連携を進めることがセンサ融合では重要といえる。

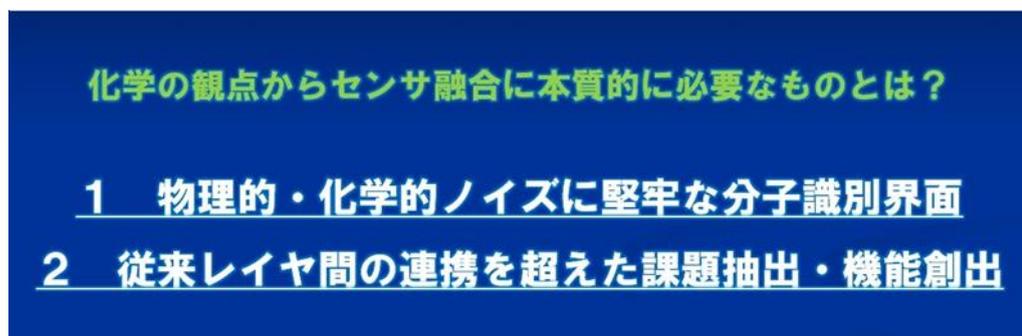


図 3.2.1 化学の観点からセンサ融合に本質的に必要なものとは？

なぜ堅牢な分子識別センサが必要か（図 3.2.2）。サイバー空間とフィジカル空間をつなぐセンサのうち、物理センサに関しては色々なものが生まれており、実用化が進んでいるものも多い。それに対して、化学センサは相当立ち遅れている。分子をきちんと識別してエレクトロニクスに落とすというところに、技術的に乗り越えないといけない壁がある。

また、分子群というのは多成分であることが本質であり、官能基が少し異なるだけで、極めて種類が増える。そのような多成分の分子群のデータを長期に取り続けることで、物理では答えが出せないような複雑系に対して何らかの解が得られるのではないかという根本的なサイエンスも重要であり、大学で研究する者としてのモチベーションになっている。

化学の観点では、多成分の分子を識別する上で最強のマシンは間違いなく GCMS（ガスクロマトグラフ質量分析計）であり、GCMS ではカラムを通して分子を分離した後、質量分析器の中で分子を見分ける。しかし、GCMS は非常に大きく、コストもかかるため、我々の研究室では GCMS の性能をチップで実現できないかということにチャレンジしている。

そのときに非常に重要になるのが、化学的に堅牢な界面である。もちろん物理的な温度や圧力など色々な条件に対して堅牢性は求められるが、酸やアルカリなど、化学的に厳しい条件下で分子識別能を保つ化学的に堅牢な界面が必要である。そこで問題となるのがノイズであり、一つは多成分に起因するアンサンブルノイズで、見たいものが他の多種類の分子によって隠されてしまう（図 3.2.3）。また、湿度が高いと、水というのは極めてアクティブな化学種であるため、それによって目的のものが見えなくなる。もう一つはダイナミックノイズで、微小信号計測技術や、

ノイズの中から分子の指紋を見出すといった新しい方向性がある。このようなアンサンブルノイズとダイナミックノイズの中から、時々刻々と変わるものをいかに抽出していくか、このような本質的な科学技術に挑戦していく必要がある。

なぜ、堅牢な分子識別センサ？

堅牢で多成分の分子群を識別する化学センサエレクトロニクス

3. 話題提供2
重要基盤技術(デバイス)

図 3.2.2 なぜ、堅牢な分子識別センサ？

”化学”的に堅牢な界面の重要性

堅牢な分子識別における問題：2つのノイズ・外乱

問題	アンサンブルノイズ	ダイナミックノイズ
	狙いのシグナルが、多種類の他分子のシグナルで見えなくなる	狙いのシグナルが、周りの時系列の雑音シグナルで見えなくなる
対策	アンサンブルマーカー ハイブリッドデバイス	ダイナミックマーカー 微小信号計測技術

Science Advances (2017) *ACS Sensors (2016)* *ACS Sensors (2017)*

図 3.2.3 “化学”的に堅牢な界面の重要性

まず、ダイミクノイズに関して簡単に説明する。化学センサというのは外界と常に相互作用しているため、時々刻々と変化しており、壊れてしまう。化学反応が起こっているのが当然で、それを踏まえて我々の研究室では有機化学と無機化学、デバイスの人間が一緒になって堅牢なセンサ界面とは本質的に何であるか議論している。一つ考えられるのは、堅牢なセンサ界面というのは、良い固体触媒の界面と方向性が近いのではないかとということ。例えば触媒の界面は酸化と還元のどちらに行き過ぎても駄目で、電子を渡しやすくても、渡しにくくても良くない。これはセンサ界面でも全く一緒ではないかと考えている。

我々は、一つのナノ材料をバルクではなく一個ずつ、そのものの持っているポテンシャルを測ってきた。例えば一個の単結晶、単ナノ構造の電気伝導度やキャリア濃度、ゼーベック係数などを地道に一個ずつ測った（図 3.2.4）。そこから分かったことによって、例えば一つのナノ構造の中に熱を閉じ込める構造を作り、非常に小さなエネルギーで動作する分子センサができた（図 3.2.5）。このようなナノ構造のデバイスというのは、常に外界と接しているため、コンタクト抵抗などが常に変化してしまう。そういうものが変わらない電極を探してスクリーニングをおこない、ここでは酸化物電極というものを提案した。通常、シリコンとの兼ね合いで、どうしてもチタンやクロムなどの金属を使いがちであるが、それでは界面が酸化して時々刻々と変化してしまう。酸化物などの新しい材料系を入れないと、堅牢なナノデバイスは実現できないというのが我々の考えである。センサというのは外界と接する必要があるため、従来のエレクトロニクスのようにパッシベーションができないという本質的な問題があり、材料、デバイスも含めて深く考え、これを乗り越えなければならない。

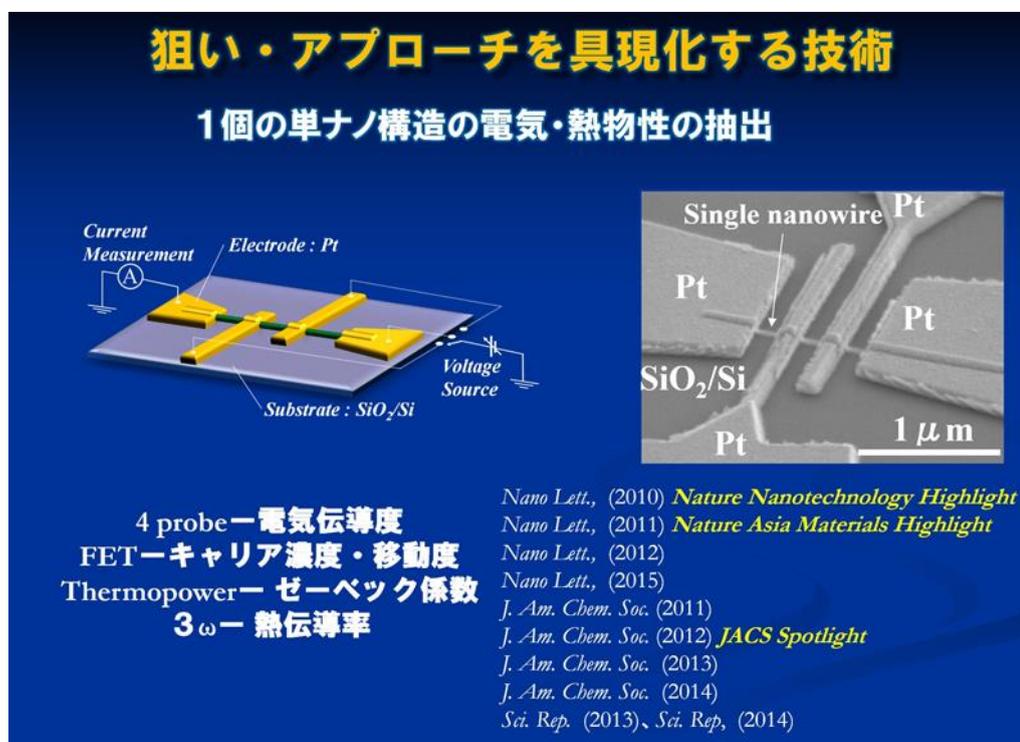


図 3.2.4 1個の単ナノ構造の電気・熱物性の抽出

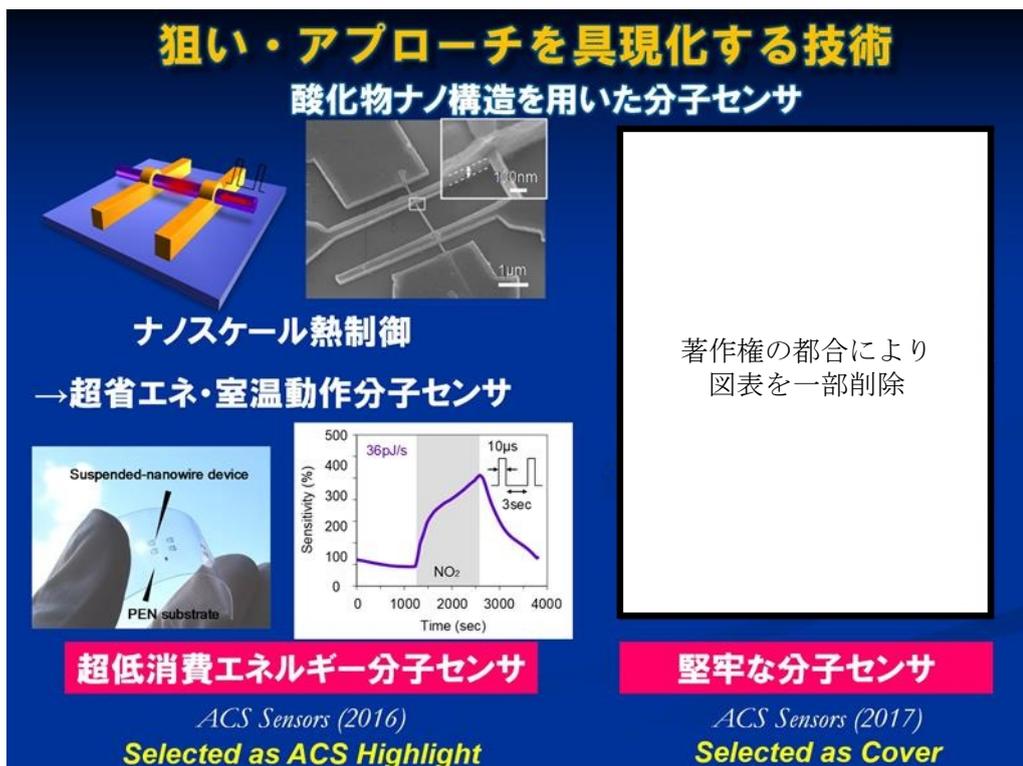


図 3.2.5 酸化物ナノ構造を用いた分子センサ

次にアンサンブルノイズで、これも本質的な問題と考えている。色々なバイオマーカが論文では発表されているが、実際に使おうとしてもほとんど使えない。それは何故かという、人は運動もするしお酒も飲む。すなわち、バックグラウンドがダイナミックに変化している。

我々は何千種類もの分子を含む呼気のおいデータによる画像と、血糖値を相関づけようとしている。図 3.2.6 は二次元のおいデータのマッピングという手法で、GCMS で測ったものである。縦軸は保持時間、横軸 m/Z はいわゆる分子量。この一点一点がおいをマッピングしたもの、おいの画像であり、何千種類もの分子の情報が含まれている。例えば運動した後、お酒を飲んだ後、グルコースを飲ませて高血糖にした後でマッピングしたものを比べると、画像の色々な部分が異なっている。我々は、おい画像をアンサンブルとして取り、その差分をマッピングした画像を機械学習にかけて、自分の欲しい情報と紐付けるという方法を提案している。

図 3.2.7 は、差分マッピングの結果から AI を使った機械学習で得られた血糖値の正答率である。環境 1 というのは血糖値を上げた状態で静かにしていた場合で、1 個か 2 個のマーカを取るだけですぐに正解に辿り着く。環境 2 の状況は、お酒を飲むと同時に血糖値を上げた場合で、100～200 個の分子を見ないと正解が得られない。さらに、こんな過酷な状況はほとんどないと思うが、運動しながらお酒を飲んで血糖値を上げた場合には、正解までに数千個の分子が必要になる。それでもまだ正答率は悪いが、もっと増やせば、さらに過酷な状況で、かなりストイックな環境にいる人の情報でも相関が取れるかも知れない。これが GCMS ではなく、センサでできるようになれば、従来は紐付けることが難しかった情報の時々刻々の変化を追うことが可能になる。また、これはあくまで呼気の話であるが、対象は農業でも、プロセスでも構わない。多種のものを網羅的に取るということが本質的な事象であり、非常に複雑な系を扱うサイエンスに立脚している。

3. 話題提供 2
重要基盤技術 (デバイス)

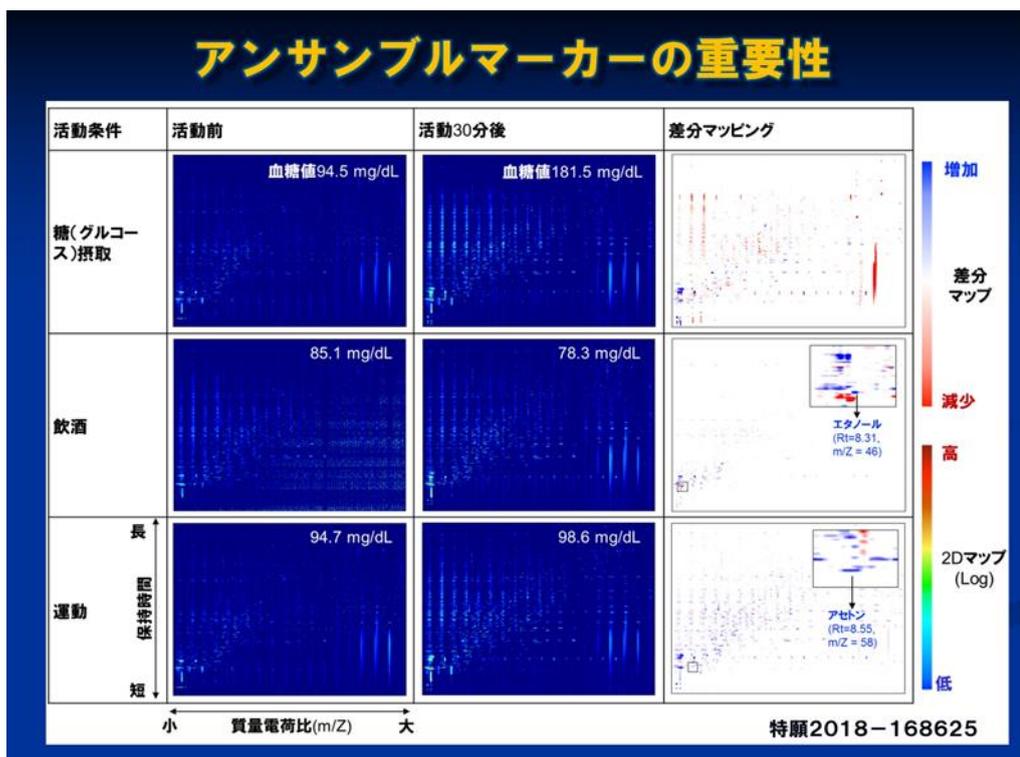


図 3.2.6 アンサンブルマーカールの重要性

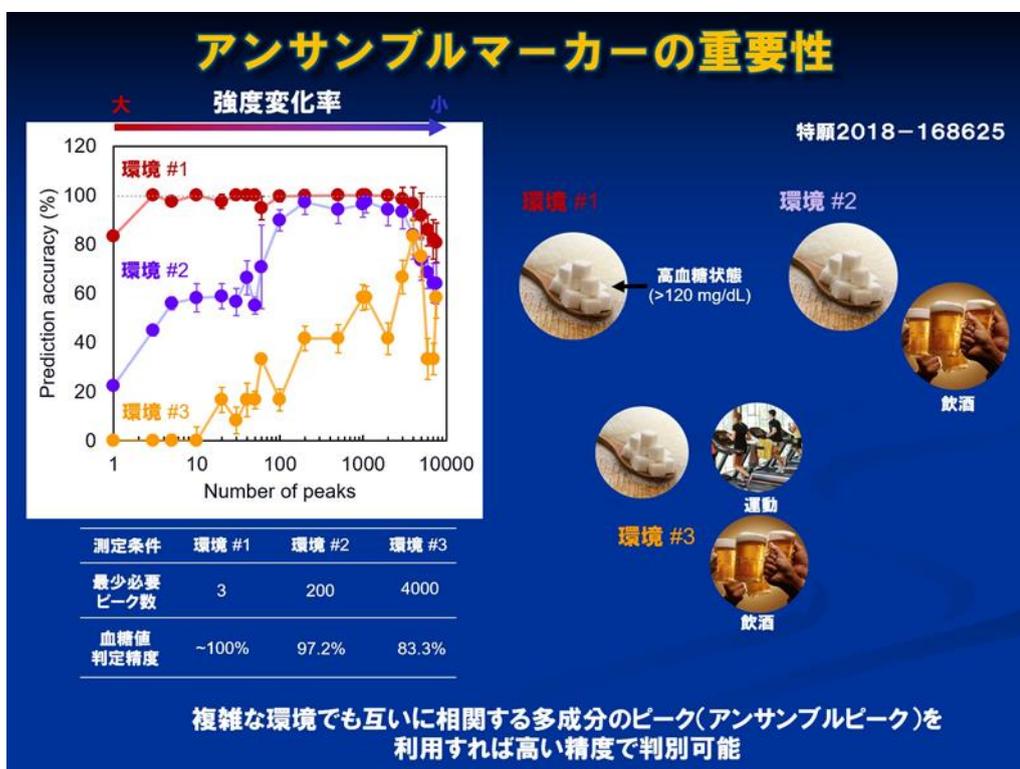


図 3.2.7 アンサンブルマーカールの重要性

図 3.2.8 は名古屋大学・馬場先生との共同研究で、ナノワイヤというナノ構造を固定したマイクロ流路デバイスに尿をかけると、ナノワイヤにエクソソームが補足され、その中の microRNA

を抽出することができる。従来の手法で得られる RNA は数百個だったのに対して、我々の手法を使うと数千個取ることができるようになる。すると、先に述べたのと同様のアンサンブルの効果で、少ない種類では分からなかったことが分かるようになり、がんとの相関づけが可能になる。このように、多数を取ることが本質である事象は多くあるが、現状のエレクトロニクスで実現することは極めて難しい。GCMS のようなことができるエレクトロニクスというのが、これからの融合センサで重要であると考えている。

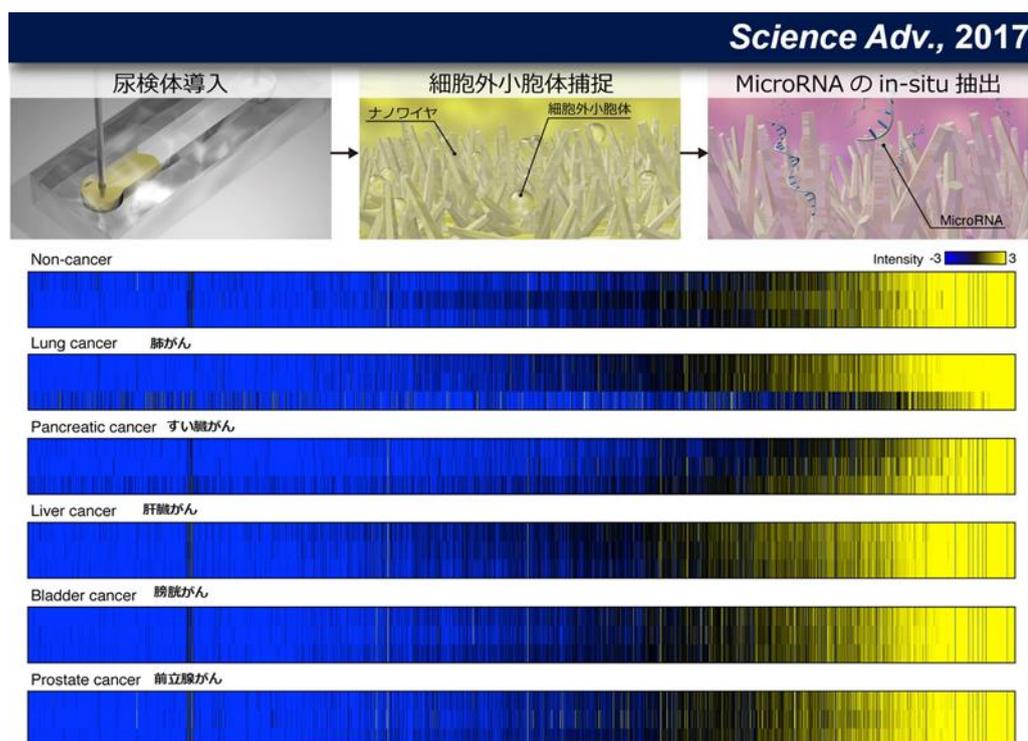


図 3.2.8 ナノワイヤ固定マイクロ流路デバイスを使用した microRNA 抽出

また、我々は生体に倣った分子認識を目指している。例えば、抗原・抗体には究極の選択性があり、化学の目で見ると電子状態も含んだ分子の形によって、非常に精密に分子認識をおこなっている。しかし、抗原・抗体は使える系がかなり限られ、気相系では使えないし、使い切りになってしまう。そこで、我々は、無機固体に分子の形を模倣した構造を形成して、温度に対してもロバストな分子認識界面をつくり、これを集積化するというアプローチを取っている。また、GCMS では検出部の前にカラムがあるが、それと同様に、検出部の前にナノワイヤを置いてフィルタにかけ分子を濃縮する。これをマイクロに多数集積することで、GCMS をエレクトロニクスで実現できると考えている。

我々がこのような無機ナノ構造をつくるのが可能なのは、これまで空間選択性のナノ構造の結晶成長にずっと取り組んできたことによる。分子スケールで空間選択性の結晶成長をおこなうこと、すなわち分子の存在下で結晶成長を精密におこなうことで、狙った分子の形をあたかも固体の上に焼きつけたような無機固体界面というのができつつある。例えば、ベンズアルデヒドについて、分子の離脱する 400°C までの昇温を何回繰り返しても選択性が保たれる界面ができる。

かなり堅牢で、温度に対して極めてロバストであり、良い固体触媒の界面と同様になっていると考えられる。さらに、先に述べた GCMS の模倣系では、カラムと検出部を一体化し、温度を微妙にコントロールすることによって、分子を徐々にも送ることもできる。捕集部とセンサを作り込んで実際にデバイスをつくっており、濃度プロファイルを見ると ppt のレベルまでいけるようになっている。

最後に、集積化に関しては、慶應大・石黒先生と一緒に 1024 個のクロスバージャクションをつくっている。我々には素子 4 個程度までしか測れないが、石黒先生は 1000 個程度のものを同時に、ミリ秒で測る技術がある。石黒先生の技術を用いて、1024 個のセンサでおい画像を取れるようなデバイスを研究している。石黒先生は回路が専門、自分は材料・デバイスが専門だが、非常に密接に連携しており、すばらしいシナジー効果が生まれている。冒頭に述べた通り、レイヤを越えるということがいかに重要かということを感じている。

【質疑応答】

Q：ケミカルセンサは、論文数は極めて多いが、実際には使えないという状況が長く続いている。これは、例えば高感度化してセンサに分子が付着しやすくすると、分子が外れにくくなるために繰り返し性が下がる、選択性が悪くなる、ということに起因すると理解している。これを解決することができる技術というのは存在するのか。

A：本質的には無いのかも知れない。サイエンティフィックに極めて難しい問題。分子と固体の界面が難しいのは固体触媒の分野と同様で、本質的に難しいからこそ固体触媒分野には研究者が多く、長年研究が続けられている。今、我々は固体表面分光に注力しており、その中で新しいことが見えつつある。例えば、材料を有機と無機のハイブリッドにして、分子が両方に付着するような状態をつくると、接着のしやすさを分担することが可能になる。そうしたサイエンスから新しい方向性が出てくると考えているが、現状では容易ではない。

Q：ケミカルセンサのドリフトやヒストリー効果を、動的にフィードバックすることで解決できる可能性はないか。

A：材料が専門の立場では、回路の先生に実現して欲しいと考えていたが、実際には難しいと言われた。例えば 1 個のセンサであれば可能であっても、1000 個のセンサが集積されたときに、一つ一つのキャリブレーションを取り、動的なエイジングを見るというの容易ではないと思われる。

C：確かに難しいが、回路の専門家にとって非常にチャレンジングと言える。微細化すると回路もばらつくが、そのときに個々にキャリブレーションするのではなく、デバイスと回路を一括してキャリブレーションする方法を考えており、単体のセンサデバイスレベルではできそうな感触がある。それをアレイ化したときの問題はまた別にあるが、面白い課題である。

Q：人間の鼻は何回でも使える。それが可能なのは、固体触媒のメカニズムと何か関係があるのか。

A：生体がデバイスと最も違うのは、生体は常に生まれ変わっていること。生体系というのは常に循環している。それをデバイスで実現するのは簡単ではない。

3.3 マルチモーダルセンシング

澤田和明（豊橋技術科学大学）

Society5.0 社会の実現には、フィジカル空間のありとあらゆる情報をサイバー空間に上げる必要がある。もし高い選択性をもったセンサが必要なら、ありとあらゆる情報を取るためには無限のセンサが必要になってくる（図 3.3.1）。センシング情報処理に機械学習が入ってきている現状において、センサに高選択性が本当に必要なのだろうか。ここでは、マルチモーダルセンシングの観点から、本ワークショップ仮説の課題 3（センサ性能の飛躍的向上）に関する話題を提供したい。

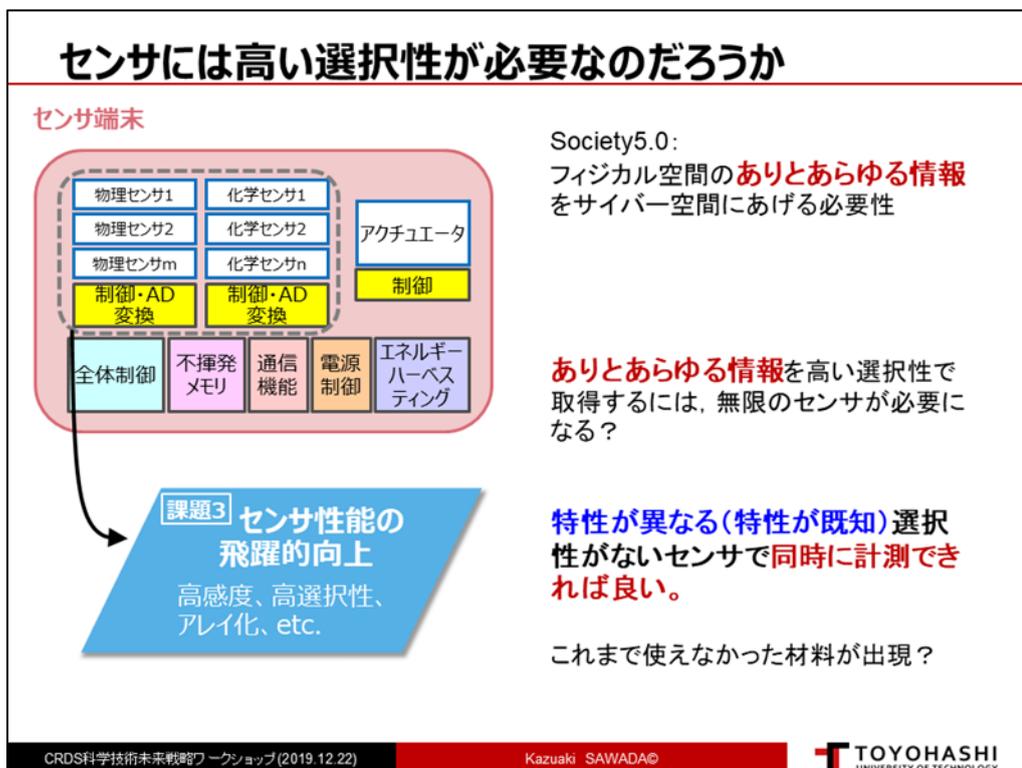


図 3.3.1 センサには高選択性が本当に必要なのか？

画像センサの部品であるカラーイメージセンサには、RGB 三色のカラーフィルターが使われているが、これには選択性がない。しかも、このフィルター特性は既知の情報であり、3つのフィルターを載せた光センサのそれぞれの出力値の組み合わせにより、我々が見ているすべての色（約 420nm・約 800nm）を表すことができている。このことを応用すれば、特性が既知で、選択性がない、異なるセンサを複数使って情報を同時取得することで、種々の物理・化学情報の計測、すなわちマルチモーダルセンシングができるのではないかと考えている。したがって、マルチモーダルセンシングでは特性が既知のセンサであることだけが重要であり、これまで使えなかったような材料がセンサ材料として出てくるのではないかと予想される。従来の考え方では、選択性がない材料はセンサ材料として不適とされたが、そのような材料も含め、日本が世界的に強い材料分野に基づく新しい材料がセンサに使えるようになると期待している。

3. 話題提供 2
重要基盤技術 (デバイス)

マルチモーダルセンサとは、一つで複数種類の情報を計測できるセンサである（図 3.3.2）。一般的に、センサというのは、ある測定項目（位置、加速度、角度、角速度等）が変化していくと出力も変化するのが普通である。ところが、例えば、もしセンサの出力が、圧力だけではなく温度の変化に対しても変化するとしたら、何を計っているのか分からなくなるので、センサ材料として NG となる。しかし、図 3.3.2 に示すように、圧力と温度の両方に応じて出力が変化するが、その特性が異なるセンサを 2 つ使えば、連立方程式を解くようにして圧力と温度を一義的に決定できるので、温度と圧力を同時に計測することが可能になる。つまり、そのような計測がワンチップでできるようになれば、色々なマルチモーダル情報が計測できることになる。

マルチモーダルセンシングの概念

ひとつで複数種の情報が計測可能なセンサ

特徴

- 多数の情報取得が可能
- 高い選択比（他の項目に反応しない）のセンサが不要

ケース1 センサが1つの測定項目のみに応答
センサ出力から測定値が一義的に決定

ケース2 センサが2つの測定項目に応答
測定値1と2の組み合わせしか分からない

ケース3 応答特性の異なる2つのセンサを使用
測定値1と2が一義的に決定

- 測定項目数と同数以上のセンサの組み合わせにより、各測定値を一義的に求められる
- センサ数を増やすと測定精度が上がる

$$V_{\text{sensor1}} = A \phi_1 + B \phi_2$$

$$V_{\text{sensor2}} = C \phi_1 + D \phi_2$$

A, B, C, D: 定数
 ϕ_1, ϕ_2 : センサ出力 (例えば温度, 湿度)

連立方程式で求めることができる

CRDS科学技術未来戦略ワークショップ(2019.12.22)
Kazuaki SAWADA©
TOYOHASHI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

図 3.3.2 マルチモーダルセンシングの概念

我々のマルチモーダルセンシングに関する研究例（図 3.3.3）を紹介する。FET（Field effect transistor：電界効果トランジスタ）として酸化錫（SnO₂）をスパッタして作製したセンサは、溶存酸素と pH の両方に応答する。溶存酸素が ppm で 1 桁変わると 30 mV 程度変わるので、それなりに良い溶存酸素センサではあるが、溶存酸素だけでなく pH にも応答するため、pH が変化しているのか溶存酸素が変化しているのか分からないという理由から、従来の考え方だとこのセンサは使えない。しかし、このセンサの近くに、溶存酸素にほとんど応答しない pH センサを持ってくれば、上記で説明したように、溶存酸素と pH が一義的に決定できるので、この FET で溶存酸素がセンシングできることになる。これは、センサの選択性が劣るので活用できなかったという課題を、マルチモーダルセンシングで解決できた例である。つまり、高い選択比を有するセンサ、すなわち他の項目に応答しないセンサは不要であり、選択性がないセンサを複数使ったマルチモーダルセンシング情報処理の方が、今日の機械学習のトレンドには合っている可能性がある。

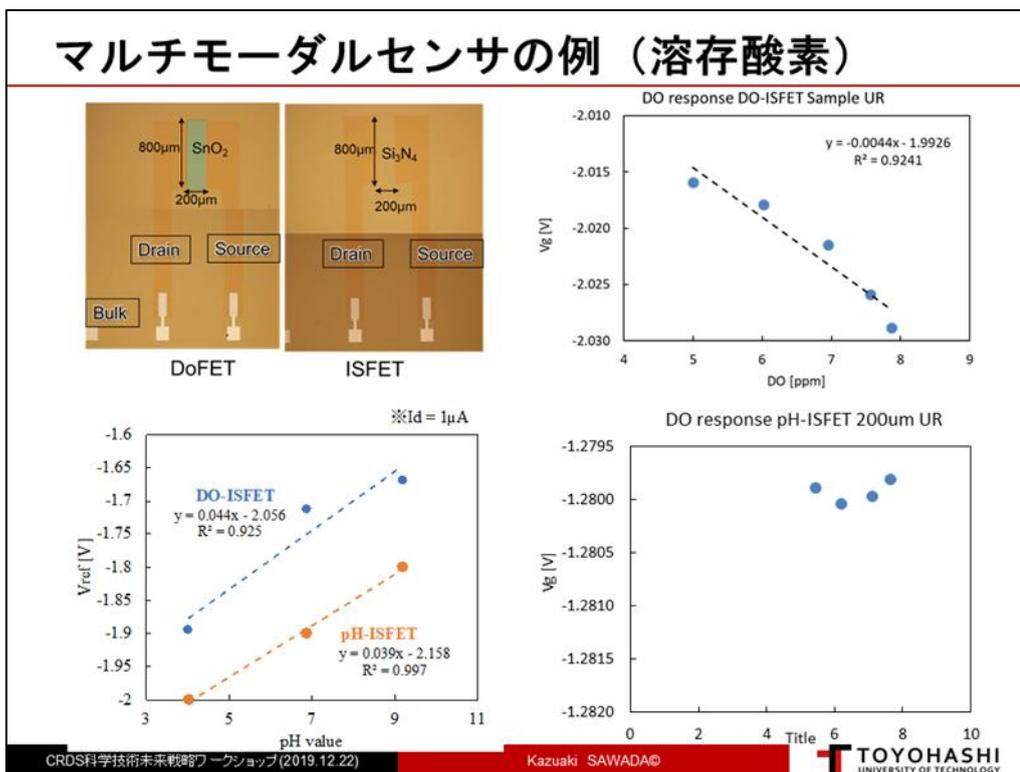


図 3.3.3 マルチモーダルセンサの開発例（溶存酸素）

次に、センサのコストから考えたシナリオについて述べる。図 3.3.4 に示すように、Society5.0 社会を実現するためには様々な情報が取得できる莫大な数のセンサノードをフィジカル空間に設置する必要がある。しかしながら、現状ではコストがネックとなり少数のセンサに留まってしまうので、製造コストや設置コストを考えた新たなプラットフォームを生み出す必要がある。一つのモジュールに搭載するセンサの数が増えたとしても、コストは変わらないようなシナリオが必要不可欠であり、また基本的には製作プロセスの汎用性が高い CMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor：相補型金属酸化膜半導体）でセンサを作るべきと考えている。

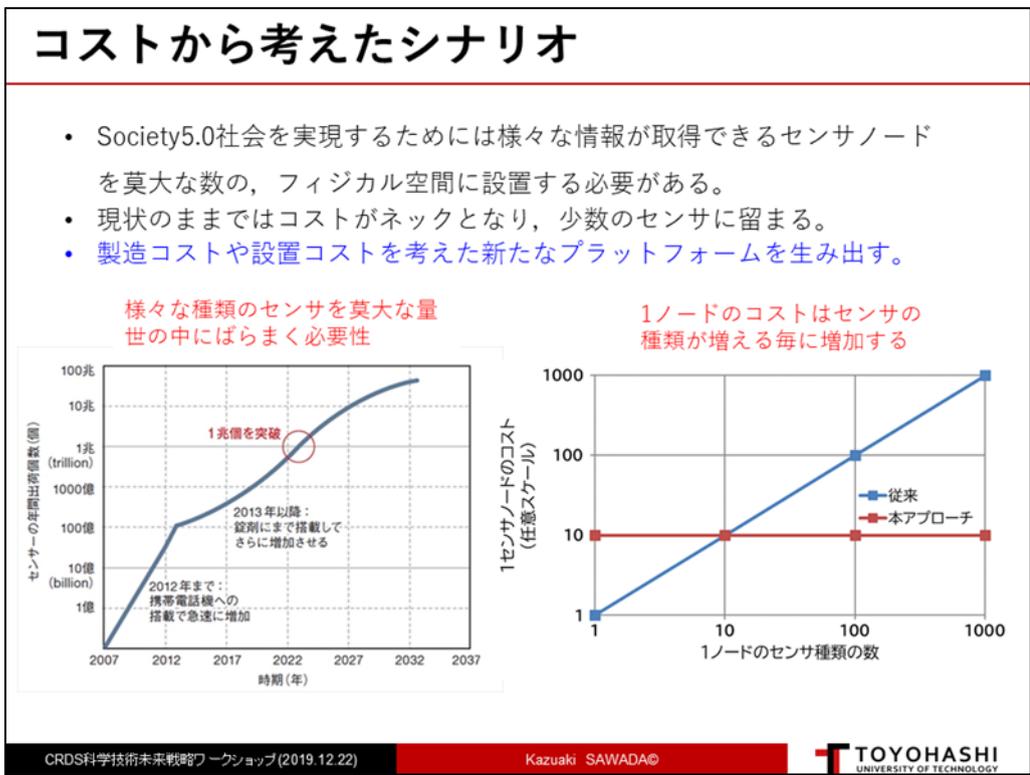


図 3.3.4 センサのコストから考えたシナリオ

実は、自分は元々は CCD (Charged-coupled devices : 電荷結合素子) が専門であり、CCD 対 CMOS の激しいイメージセンサ論争の現場にいた。1993 年に、米国 NASA ジェット推進研究所の Eric Fossum (現、ダートマス大学セイヤー工科大学院教授) が CMOS でイメージセンサを作ると言ったら、CCD 陣営の人々は「感度が悪く、ばらついている CMOS で作れるはずがない」と言って大笑いして、誰も見向きもしなかったことを憶えている。ところが、潮目が大きく変わってきたのは、従来の光イメージセンサを研究開発していない、多くの異分野の研究者が参入したことによる。情報処理 (圧縮技術、符号化技術を研究) やアナログ回路設計の研究者が、CMOS という汎用のプロセスで実際にイメージセンサを作製できたことで、画期的な低雑音、高性能イメージセンサが誕生し、現在の携帯電話に搭載されたり、8K 用のイメージセンサが実用化されたりしている。新しいマルチモーダルセンサを世の中に誕生させるためには、これまで活用されていないセンサ材料を活用できるよう、半導体センサ開発者でない人々が手軽に使えるプラットフォーム (図 3.3.5) を作る必要があると考えている。

センサ出力には、電流、抵抗変化、電圧変化、周波数変化等、色々ある (図 3.3.5)。様々な方式のセンサをチップに集積化するのはコストや面積の観点から難しいので、電位出力方式が基本的に良い。なぜなら、電流を流さないで低消費電力であり、面積が小さくなくても感度が変わらない、出力が低下しないからである。一方、電流型の酸化還元センサは小型化すると電流量が減り、感度が悪くなる。また、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 型の応力センサも小型化すると機械的変位量が小さくなり計測が難しくなる。したがって、まだ原理的には感度が悪いが、電位が変化するようなセンサが一つの解ではないかと考えている。我々のプロジェクトで開発しているマルチモーダルセンサの特徴を図 3.3.6 に示す。電位検出アレイに印刷技術で材

料を転写することで、マルチモーダルセンシングができる。従来技術であれば、センサごとにシリアル通信や AD 変換をやる必要があるが、図 3.3.6 に示すようなプラットフォームでマルチモーダルセンシングの実現を目指している。一例として、センサ表面にガスの吸着膜を付けたマルチモーダルにおいセンシングでコーヒーの香りを比較したものを図 3.3.7 に示す。

次世代センサのプラットフォームの議論

基本は**CMOS**（ありとあらゆる場所に設置する必要）
 (CCD VS. CMOS イメージセンサ論争 1993.)
 材料屋が手軽に使えるプラットフォーム

センサ出力： 電流, 抵抗変化, 電圧変化, 周波数変化 etc
様々な方式のセンサチップに集積化するのは困難 (コスト, 面積)

基本は電位/電荷領域 (Q=CV) 出力が良い.

- 面積が小さくなくても出力は低下しない
- 電流を流さないので低消費電力

(例) 電流型 小型化すると電流量が減る
 MEMS変位型 小型化すると機械的変位量が小さくなる

CRDS科学技術未来戦略ワークショップ(2019.12.22)
Kazuaki SAWADA©


図 3.3.5 次世代センサのプラットフォーム

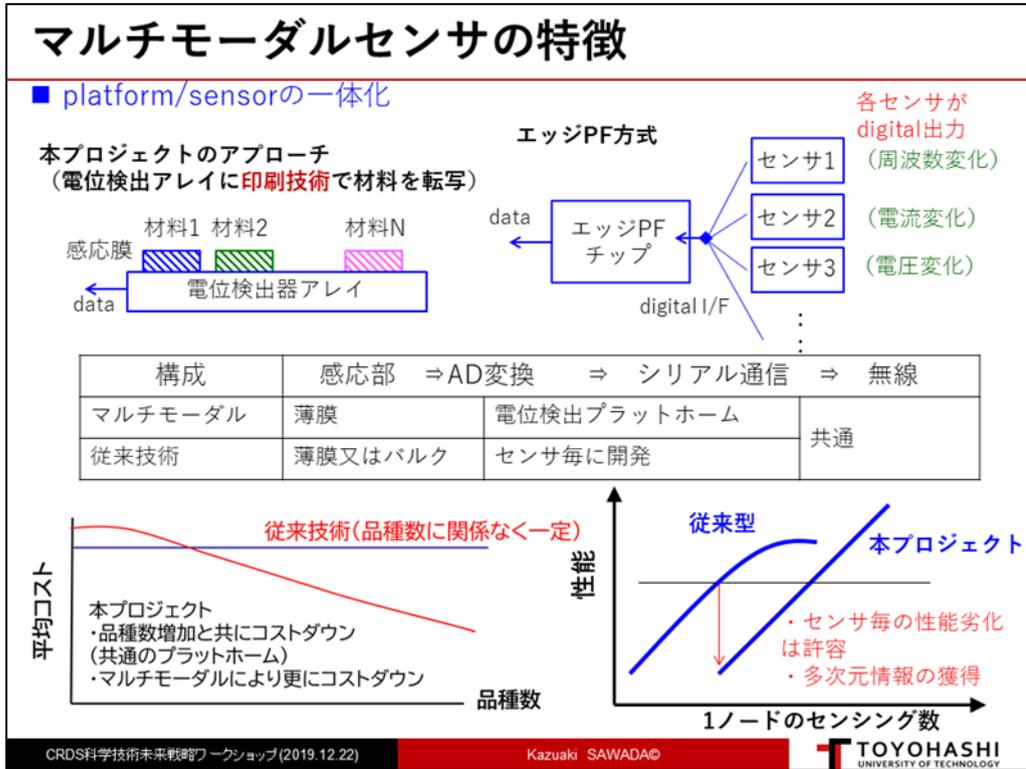


図 3.3.6 マルチモーダルセンサの特徴

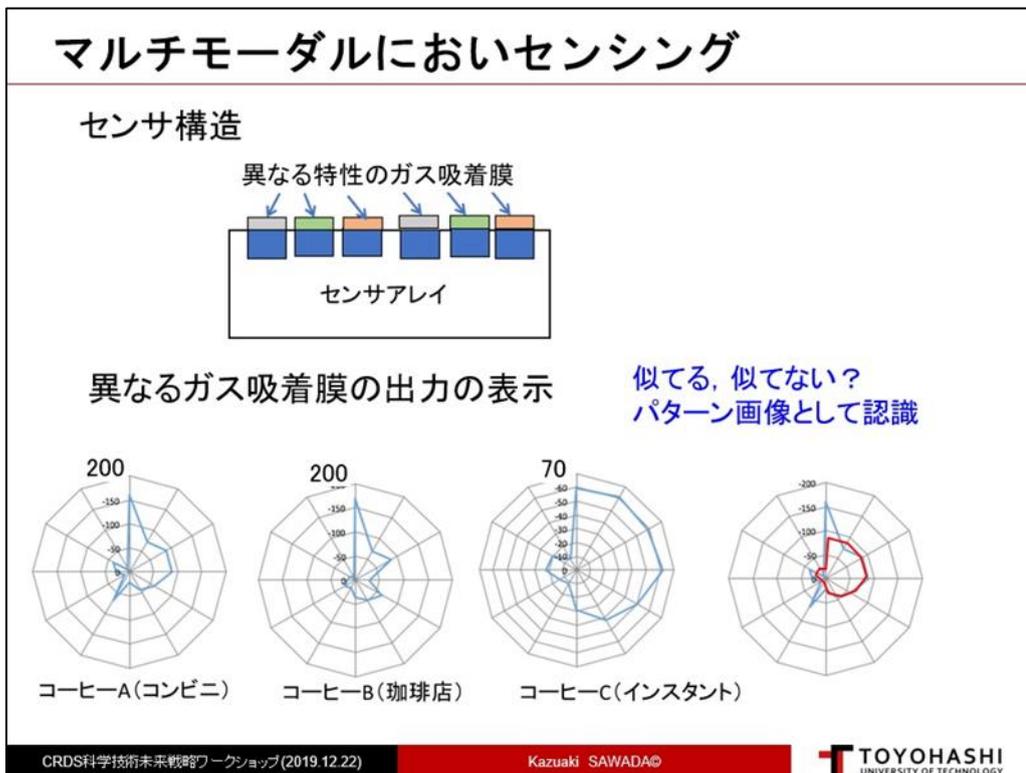


図 3.3.7 マルチモーダルにおいセンシング

CMOS イメージセンサに関しては、CMOS チップ上での様々なオンサイト処理、エッジ処理としての特徴量圧縮などに関する研究が進展している。例えば、イメージセンサから出てきた画像を画像エンジンで解析して（画像 AI 処理技術を利用して）違いを判別することで、人物を推定できるようになってきており、それと光画像を紐づけすれば、どこで何が起こったかというのも分かるようになっている。センサの出力を画像として取り出し、センサの QR コード版のようなことができると、センサのプラットフォーム上で大きなデータを圧縮して取り扱うことができるようになると考えている。

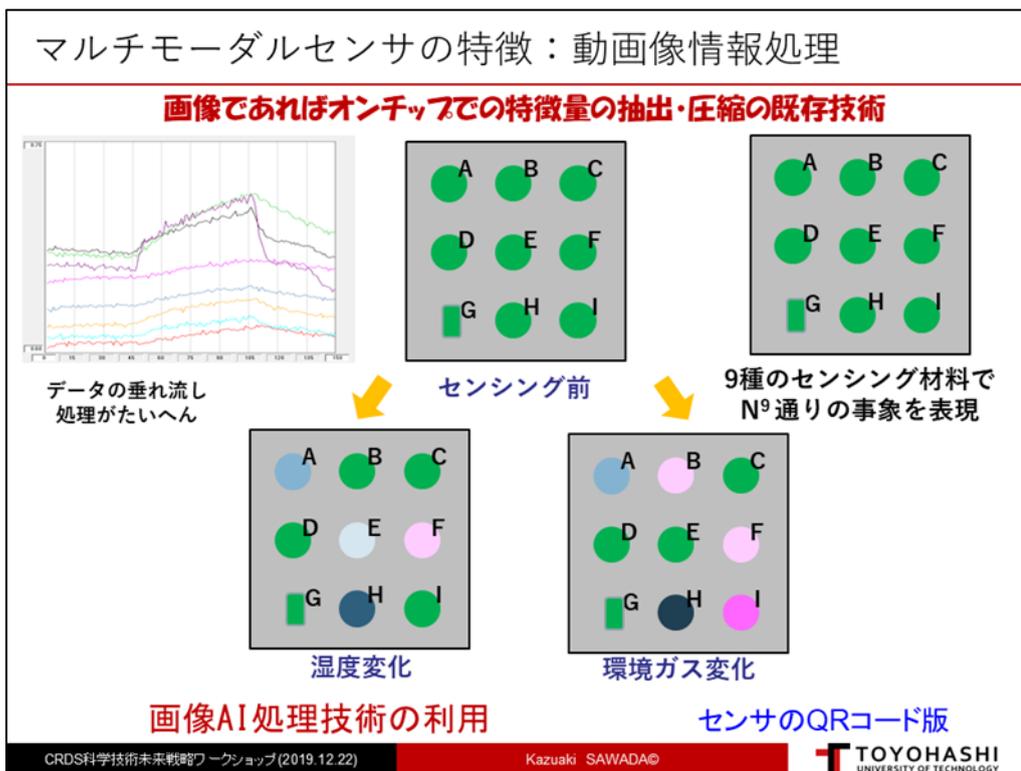


図 3.3.8 マルチモーダルセンサの開発例（動画像情報処理）

センサチップに関しては、どんどん材料屋に提供して、好きなものを載せてもらうことを考えている。センサ屋は、最初はセンサの感度が足りないと思うかも知れないが、様々なセンサを開発できる共通のセンサプラットフォームにしたい。将来は、CMOS が CCD を凌駕したように、ソフトウェアの進化や社会的ニーズの方からもフィードバックを受けながらセンサチップ自体が改良・進化して社会実装されていくことを期待している。さらには、マルチモーダルセンサの中に、普通は要らないと思われるようなセンサも一緒に入れておいて、データを画像として取っておき、後から画像エンジンを使いながらマルチモーダル情報処理をして相関を取っていくことで、なんらかの科学的な真実を見つけていくことができれば良いと考えている。

3. 話題提供 2
重要基盤技術 (デバイス)

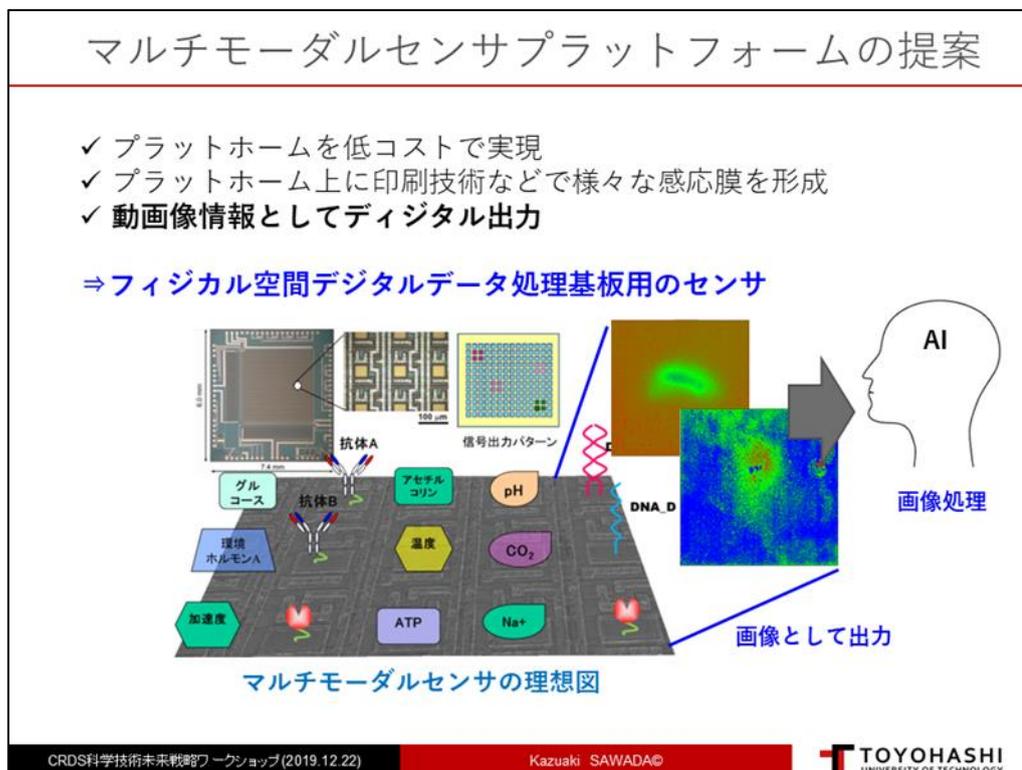


図 3.3.9 マルチモーダルセンサ・プラットフォーム

【質疑応答】

Q：色々なものを測ることにより、それらのパターンを見ることで、選択性を上手く逆手にとって、選択性がないものを最終的には選択性があるように見せるという提案方法は大変理にかなったものだと思う。一方で、化学センサの課題は選択性とリセット性の2つが大きいと思うが、リセット性の方についてはどのように解決するのか。

A：リセットに関して、抗原抗体反応にしても1回くっつくとなかなか離れない点については、今のところ解決方法はない。乖離定数を考えると、少し温度を上げると離れたりすることもあるかもしれないが、リセット性に関して、現在の提案の中では、解決できないと思っている。しかしながら、通常の化学センサに存在する使用制限（一定のpHや、一定の温度下での計測）を打破できる可能性はあると思う。

Q：マルチモーダルセンシングで、いろいろな情報が計測できるのは素晴らしい。2種類の情報を、2つのセンサ情報を使って論理的に連立方程式を逆算して求めることができるということは、安心してオリジナルな情報を引き出せるということだ。しかしながら、コーヒーの特徴のような曖昧なものでも、「マルチモーダルセンシング×AI」技術を使えば、個々の特定の物理量あるいは化学的な量まで引き出せるものなのか。現時点でAIの能力だけを見るのも危険であり、将来性はあるが、なかなか感覚的についていけない。

A：コーヒーの香りの特徴として12の特徴をセンシングしたが、においては実際には無限大あるので、間違える可能性はあると思う。ただし、NTSC (National Television System Committee)

方式のテレビがハイビジョンテレビになって画像がだんだん鮮明になってきたように、おおいに関するデータがたくさん集まって、センシングできる特徴が 12 種類から 36 種類ぐらいに変わってくるとまた状況が変わる。つまり、そこを補完するような材料がセンサとして使えるようになれば、だんだん正解率が上がってくると期待できる。そのためにも、少しの間違いを許容することも必要なのかもしれない。

- Q：本発表の範囲内では、マルチモーダルセンシングは非常に合理的だと思うが、実際にやろうとしたときに、例えば、その上に載せた多くのセンサの感度やバイアスが時間変化したり、あるいはデバイス間でバラバラだったりすると、前の学習データが結局は使えなくなる。我々も、物理センサで同じようなことをやろうとしたが、ユーザから全てが揃っていないと、前の学習データが使えないと言われてしまった。その点が非常に難しいが、何か良い作戦はあるか。
- A：まずセンサを上手く使うには、毎回同じデータが出てくることが大前提だと思う。例えば、ガスセンサの場合、ガスの量が変わってくるとパターンは変わってしまう。しかしながら、エッジが効いた画像は薄くなっていくが、その形や分布は変わらないようなことが起る。そのような画像の場合には、絶対値を使わずに相対値だけを見ていくことでクリアに対応できると期待している。バラツキが時間経過で逆転するようであれば使えないが、時間に関して、あるいは環境温度や湿度に関しても、動かし始めてからのセンサチップの劣化度合いをテーブルとして持っていれば、そこから逆算できると考えている。
- C：物理センサであれば、ある程度それができるが、化学センサは難しい。どういうところに曝されるかが分からないので、重要なポイントだと思う。
- A：そのような意味では、強固で変わらないセンサというものがあれば、一気に解決していくように思われる。
- C：化学センサで重要なのは用途だと思う。例えば、正解が分かっているデータを元にパターンを学習できる場合であれば、パターン認識がやりやすいが、未知の情報が来ると分かりづらく、認識が難しい。その点、生体材料の中でも酵素は構造認識しながら触媒能があるので連続計測が可能である。

4. 話題提供 3 重要基盤技術（回路・実装）

4.1 低電力アナログフロントエンド

石黒仁揮（慶應義塾大学）

低電力アナログフロントエンドはセンサデバイスとユーザーの間を取り持つ重要な部分と考えている。ここでは、回路関係の研究紹介と、今後どのような技術が必要になるか私が考えていることを紹介する。

私の専門は集積回路の中でもアナログ、ミックスドシグナル系の開発であり、特に AD 変換器の低電力化に関して研究をしてきた。図 4.1.1 にこれまで実際に試作したチップの例を示す。例えば、560pW で動作する AD 変換器（図の右下）を開発した。これは非常に低電力なので驚かれるとともに、センサデバイスがミリワットを消費しているのにアナログ回路だけを低電力化することに何か意味があるのか、なぜこれだけの低電力化が必要なのか、といった意見を伺うこともある。例えて言えば、これはオリンピックで 100 メートルをいかに速く走るかという挑戦に近い。しかし、最近ではユーザーやセンサデバイスを開発している人が実際に必要としている技術にも取り組んでおり、ここ数年は九大の柳田先生、東大の内田先生と一緒にセンサシステムの開発を進めてきた。柳田先生と内田先生はセンサデバイスの開発、私はこのデバイス用のアナログインターフェースの開発をしている。

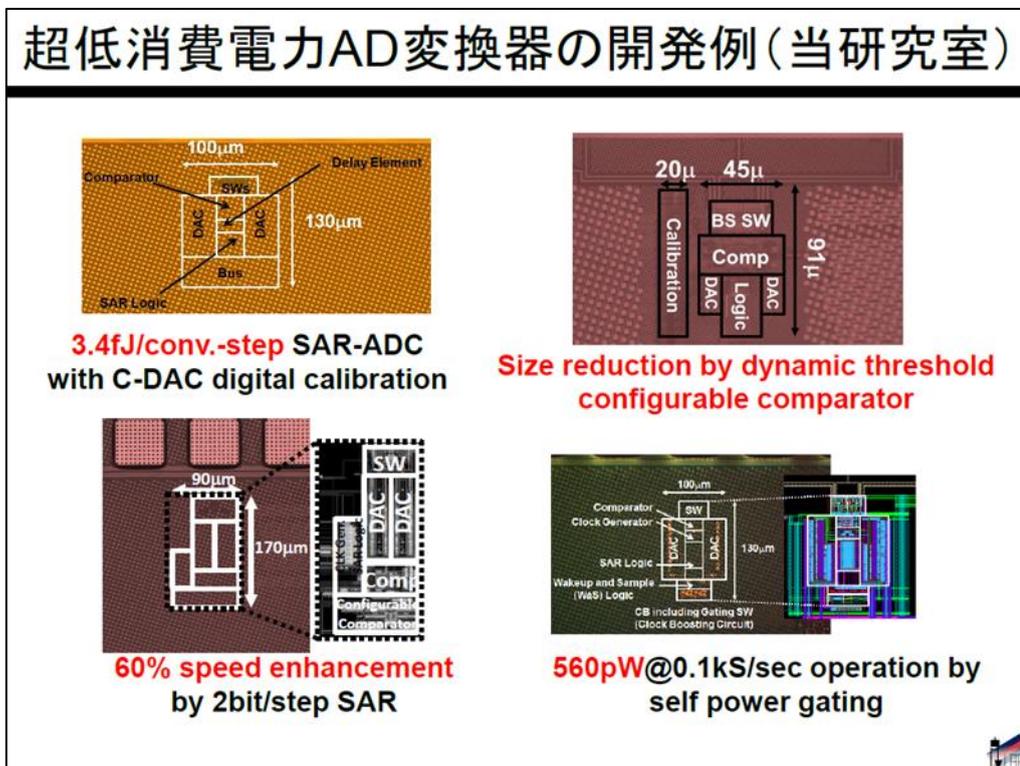


図 4.1.1 超低消費電力 AD 変換器の開発例

プラットフォームの理想としては、センサデバイスと回路のインターフェースを明確に規定(標

準化)して、それぞれが独立に開発できることである。概念的には、センサデバイス、回路の上位にシステム、ユーザーがあり、それぞれのインターフェースが標準化されていて、それぞれを入れかえても簡単にシステムが構成できるというものである。しかし、実際に柳田先生のユニークなセンサデバイスを使いこなそうとすると、それにある程度特化した回路が必要になり、すり合わせの技術が重要になる。場合によっては、回路とシステムのすり合わせが必要になることもある。私は標準化とすり合わせの二つの視点で研究開発を進めており、以下でその実際の研究例を紹介する。

最近の集積回路のプロセス技術はかなり進歩しており、例えば iPhone では 7nm の CMOS プロセスを使ったプロセッサが使われており、10mm 角のチップに 70 億個のトランジスタが載っている。トランジスタは使い放題である。このように微細化されたトランジスタを用いる回路の特徴としては、トランジスタの耐圧を確保するために電源電圧が下がってくることで、トランジスタのスピードが非常に速くなりピコ秒 (ps) 未満の遅延が実現できることである。簡単に言うと、電圧が下がってきて時間精度が高くなっていく。そうすると、図 4.1.2 に示すように、これまで電圧ドメインで処理をしていたアナログ信号処理を時間ドメインでやる方が良くなる。これがこの分野の最近のトレンドになっており、私もこのアプローチで様々な回路開発を進めている。

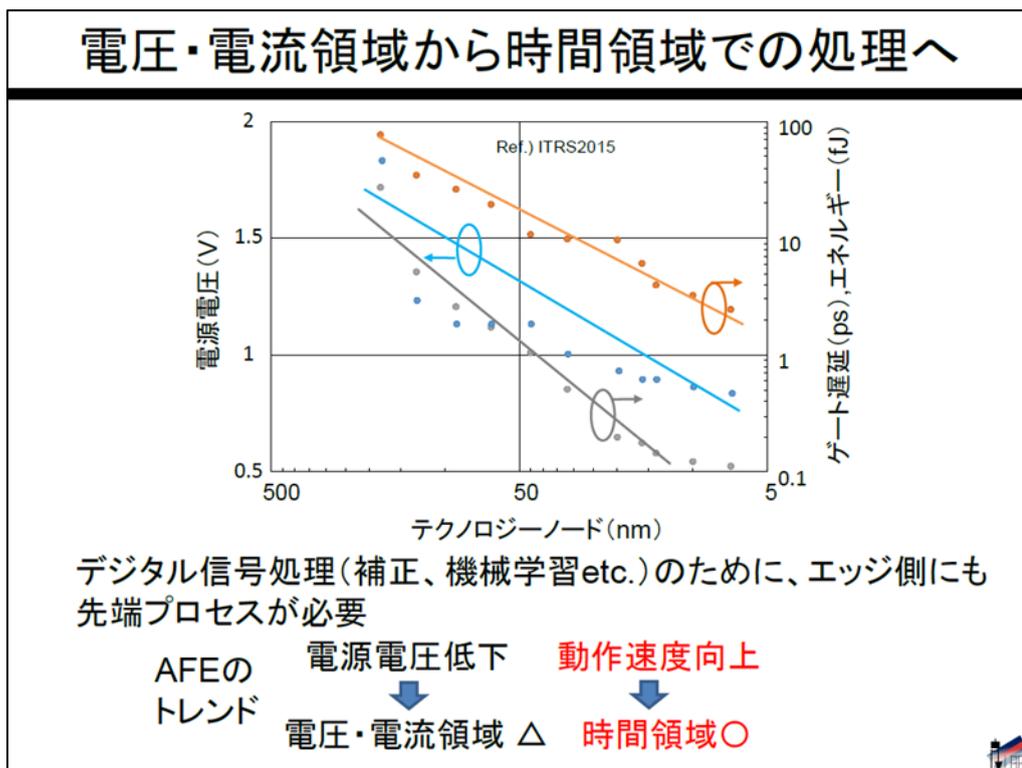


図 4.1.2 電圧・電流領域から時間領域での処理へ

図 4.1.3 は抵抗変化型のセンサの抵抗値を計る従来の典型的な回路システムである。ここでは、ホイートストンブリッジと呼ばれる抵抗を 4 つ並べた形の回路を構成し、その抵抗の一つにセンサを配置する。もう一方の抵抗部分はリファレンスの電圧をつくる部分である。左右にある 2 つの抵抗間の電圧の差を増幅して AD 変換をする。場合によっては、センサの抵抗値に合わせて、

4.
話題提供 3
重要基盤技術
(回路・実装)

上の抵抗値をデジタルでコントロールできるようにしている。ここではアンプと AD 変換器が使われており、これを汎用のセンサデバイスに適用するのは難しい。特にプロセスが微細化されると、先ほど述べたようにトランジスタの耐圧の問題から電源電圧が下がってくるので、高い S/N 比を得るのが難しくなる問題がある。このため、できるだけアンプや AD 変換をなくし、時間領域の信号処理によって抵抗値を求めるアプローチとなる。

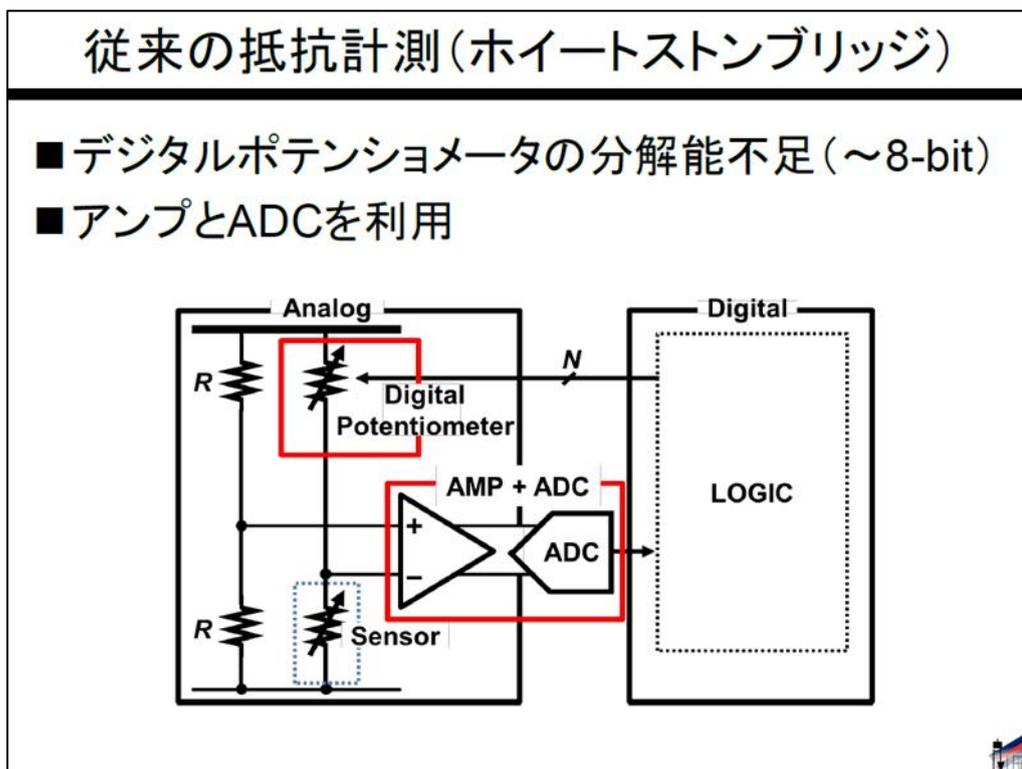


図 4.1.3 従来の抵抗計測（ホイートストンブリッジ）

1つのアプローチを図 4.1.4 に示す。高精度な AD/DA 変換の手法の一つにオーディオ分野でよく知られている $\Delta \Sigma$ 変調というものがある。アナログ信号を特殊なアルゴリズムを使って、0 と 1 のパターンに変換するものである。アナログの電圧が高いときはハイの時間が長く、逆に低いときはローの時間が長くなる。ローパスフィルタをかけると、この 0 と 1 のパターンの中にアナログの情報が埋め込まれていることがわかる。これを抵抗値の読み取りに応用する。 $\Delta \Sigma$ 変調を用いて、単一の抵抗とスイッチで等価的に高精度に抵抗値を設定できるデジタル可変抵抗を構成する。最終的にはセンサの抵抗とデジタル可変抵抗の値を一致させれば、そのときのデジタル設定値がまさにこのセンサの抵抗になるという考え方である。この一致の判別は、単純な電圧比較器（コンパレータ）を使っておこなう。片方がハイだったら 1、ローだったら 0 が出るようにしてそれを判別し、最終的に一致するまでデジタル可変抵抗を調整するものであり、デジタル的なアプローチになっている。この 1 ビットのハイ/ロー信号でこの抵抗値をスイッチングすると、ハイの時間が長い場合には電流が多く流れるので抵抗値が等価的に低くなり、逆にローの時間が長いと電流が流れる時間が短いので抵抗値が上がったように見える。このため、1 ビットのスイッチと抵抗 1 個だけで連続的に高分解能のデジタル可変抵抗ができる。このアプローチを使うとほぼ全てデジタルで高精度にセンサの抵抗が読み取れる。

また、デジタルなので、例えばインターフェース回路を微細化するときにもポーティング（移植）が簡単にできる。少しこの構成を変えれば様々なセンサにも対応でき、センサとインターフェースを切り分けてそれぞれを標準化するという事に向いたアプローチになっている。これは1つ目のモジュール化、プラットフォーム化のときに適用できるアプローチと考えている。

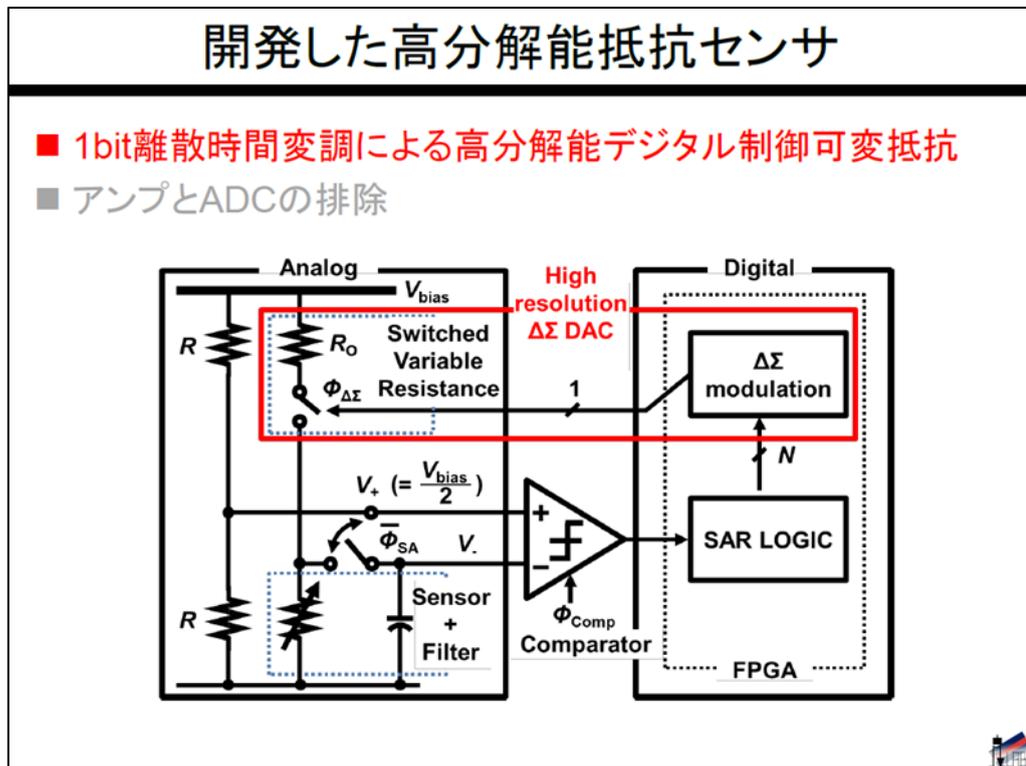


図 4.1.4 開発した高分解能抵抗センサ

実際にこのプロトタイプシステムを作製し、センサ抵抗を計ると、現状では 12 ビット程度の精度が簡単に得られている。これは市販のスイッチと FPGA、コンパレータで構成した非常に簡単な回路であり、それでもこの程度の精度が得られている。これを集積化すると、さらに分解能が上がり、アンプレスで 16 ビット程度の分解能で低電力・高速に変換できると考えている。

例えばオペアンプなどをあらかじめ標準化しておき、アナログフロントエンドを誰もが簡単に設計できるようにするという事のも一つのアプローチで概念的にはできそうだと思うが、実際にはできていない。その一つの理由はアナログ解析・設計の難しさがある。それに対し、ここで紹介したアンプを用いずデジタル的な手法を使うと、アナログの知識がない人でも比較的容易に使いこなせるのではないかと考えている。

次に尖った性能、ユニークな性能のセンサデバイスを使いこなすという視点での取り組みを紹介する。このような用途の場合には、デバイス屋と回路屋が一緒にやって様々な情報を交換し、全体として非常に性能の高いシステムを実現する必要がある。現在、東大の内田先生、九大の柳田先生と一緒に、まさにこのような研究をおこなっている。内田先生が開発されているナノ構造のチャンネルを使った分子センサ（ガスセンサ、グラフェン型のナノセンサ）は表面と体積との比が非常に大きいので、わずかな分子が吸着しても大きな抵抗変化が得られ、センサの感度が高くなると考えている。この分子センサのもう一つの特徴は、電流を流すと自己加熱するという点に

4.
話題提供 3
重要基盤技術
(回路・実装)

ある。通常の高感度ガスセンサでは、ヒーターを載せて加熱して感度を上げているが、このために多くの電力を使い、応答が遅くなっている。ナノ構造のセンサを使うと、極めて高速に加熱や冷却ができるので、すぐに起動して高感度に測定して電源を切るということも可能であり、その結果、低電力かつ高感度な測定ができるといった特徴がある。

このようなセンサデバイスを使いこなす回路が必要ということで、昨年度まで CREST で内田先生と一緒に、図 4.1.5 に示すようなプロトタイプシステムを開発した。これは 2cm 角のセンサモジュールで、東大の桜井先生が規格を策定されたトリリオンノード・エンジン（リーフプラットフォーム）の上に、私の研究室で開発したアナログフロントエンドと、内田先生と柳田先生が開発したナノセンサデバイスを載せている。このセンサモジュールに水素ガスあるいはアンモニアガスを吹きつけ、検出結果（データ）を無線でタブレットに送るシステムになっている。ナノセンサのバイアス条件を変えると、センサの温度が変わって異なる分子に反応しやすくなる。うまくバイアス条件を制御すれば異なる分子を検出でき、分子の識別ができるといった非常に面白い特徴もある。ちなみに、アナログフロントエンドとセンサの消費電力は 2mW で、従来のガスセンサに比べると 2 桁程度の低電力で動いている。ここで紹介した研究は、センサを駆動する回路、アナログフロントエンド、センサデバイスの研究者が一緒になって開発する必要があるという一例になっている。

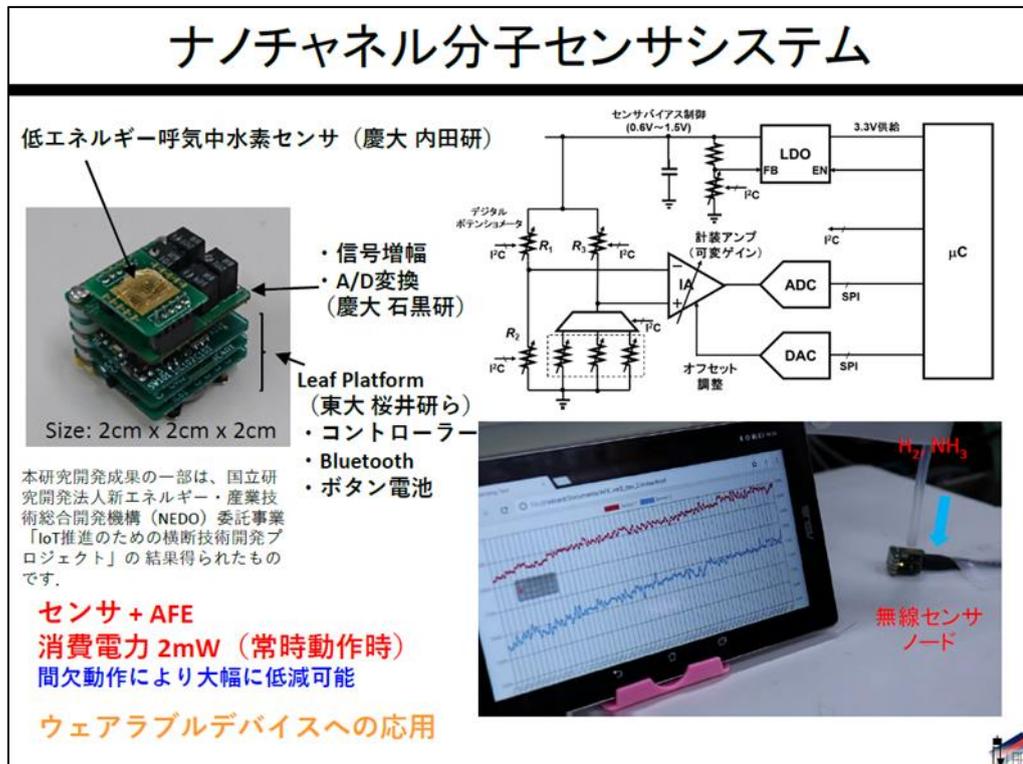


図 4.1.5 ナノチャネル分子センサシステム

最近力を入れているのは、柳田先生が開発されている大規模の集積分子センサを高速に読み取る回路であり、最終的には人工の嗅覚や味覚の実現を目指して、実用化に向けたシステム開発をおこなっている。柳田研で作製した集積分子センサ (1,024 個の分子センサ) を私の研究室で開

発した回路により 10ms 程度で全ての抵抗値を読み取り、抵抗マップに表示し、これを画像のパターンデータとして機械学習で分子の識別をするといったことを考えている。柳田研究室で実際に集積分子センサを用いて通常時と飲酒時で 3 人の呼気のセンサのパターンの変化をリアルタイムでモニタした結果も得られている。人によって当然アルコールの代謝が違っているので、呼気に含まれるアルコール量なども変わり、パターンの違いがでてくる。これを上手く使うと、例えば人物の識別にも使える。もちろんアルコール以外の分子も検出できるので、ヘルスケアにも使えると考えている。

尖ったセンサを使いこなすというアナログフロントエンドの役割を考えたときに、思い浮かぶのは図 4.1.6 に示すような NAND フラッシュメモリを使った SSD (Solid State Drive) である。NAND フラッシュは大容量化が進んでいるが、うまく使いこなすためにコントローラが非常に重要になっている。NAND フラッシュもセルが小さくなってくると、1 を記憶したはずが 0 になってしまうといったエラーを起こしやすくなり、信頼性の問題がある。それをユーザーから見えないようにするのがコントローラの役割で、中にはエラー訂正や、どのセルを使うか切り替える回路が載っている。逆に言えば、これがないといかに大容量のフラッシュチップを作っても使いこなせないことになる。このアナロジーで考えると、様々なセンサがあると様々な癖があるので、それらをうまく使いこなすためにはアナログフロントエンドを変えるのが非常に重要と考えている。一種のすり合わせである。標準化が難しいところは、すり合わせでつくり込む必要があると考えている。

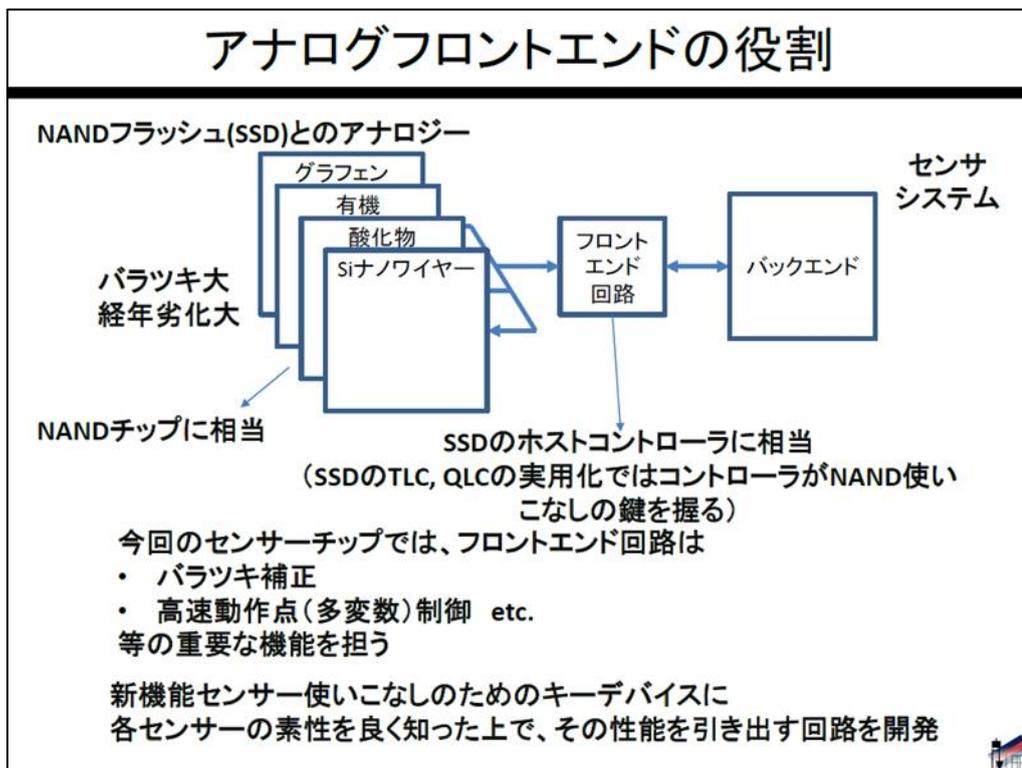


図 4.1.6 アナログフロントエンドの役割

デバイスのドリフトや特性変化に対する対処を一つ紹介したい。回路の分野では、特性のばら

4.
話題提供3
重要基盤技術
(回路・実装)

つきや性能の劣化などを自動的に補正する技術がいろいろ考えられており、それをうまく使うと、センサデバイスの理想特性からのずれなどを一括して補正することができる。一つの例として、AD 変換器とセンサデバイスがある場合を考えると、センサデバイスは非線形な特性を持ち、場合によってはドリフトで特性が変わってしまい、AD 変換器も非線形な特性を持っている。従来であれば別々に測定をして、その特性を補正していたが、自動的に補正する回路技術をうまく使うと、センサとアナログ回路の特性を一括して補正することができる。やっていることは、様々な信号を入れたときに変換されるコードのヒストグラムをとって、それがどのように変化するかをモニタし、最終的にそれぞれのブロックの特性の変化を推定することになる。推定前は曲がっていた特性をリニアな特性に変えることができると、オフセットやドリフトがあってもそれを検出することができる。電子センサの場合（入力が普通の電気信号の場合）は個々の入力の変化に対応して、高速にヒストグラムにすることができる。一方、分子センサの場合は入力を様々に変えることはなかなか難しく、そのあたりに課題があると考えている。

図 4.1.7 にまとめの図を示す。センサデバイスとアナログのインターフェースを一緒にして密接に開発を進めて、尖った特性（例えば非常に感度は高いけれども、ばらつきが大きいなど）を持つデバイスを使いこなすための回路技術が必要になると考えている。

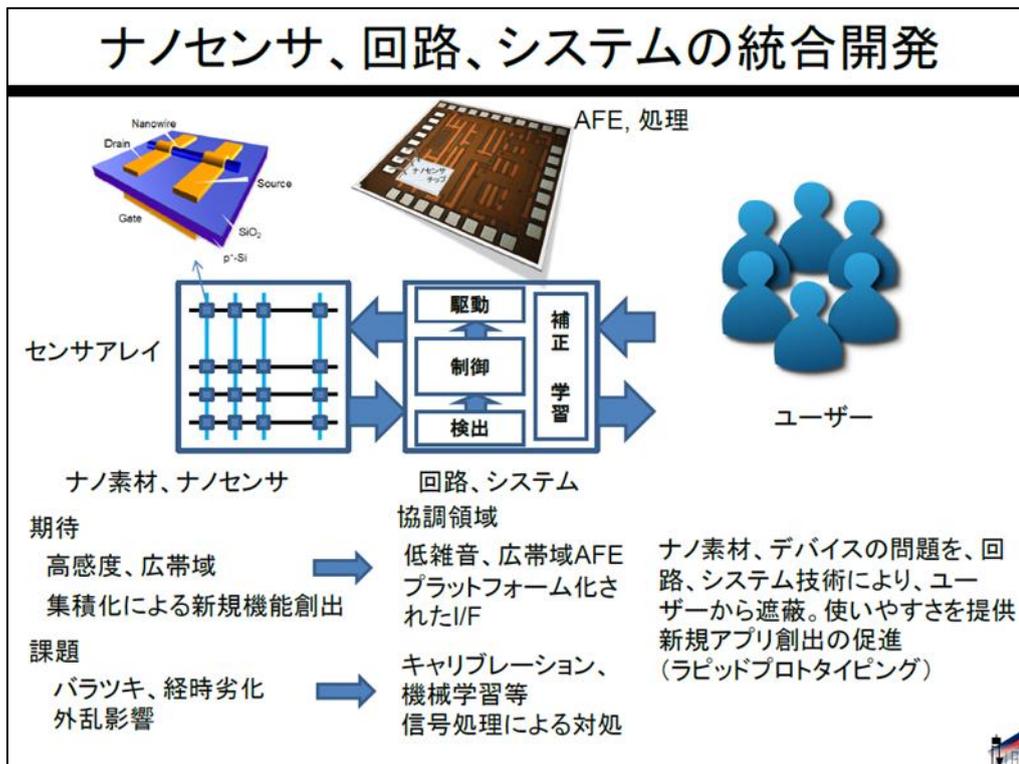


図 4.1.7 ナノセンサ、回路、システムの統合開発

【質疑応答】

Q：様々な企業から回路をつくって欲しい、設計して欲しいという要望が寄せられていると思うが、プロジェクトになっていないと多くのリソースが必要なため、要望に応えるのは難しいのではないか。そのようなときにどのように対応されているのか。

A： 答えにくい面もあるが、一つは研究としておもしろいかどうか大学としては重要である。もちろん市場も重要であるが、研究的要素がない単純な実装の要求では応えることはできない。多くの方に使いやすいアナログフロントエンドを使ってもらうためには、最初に紹介したようなモジュール化できる回路が開発できればよいと考えているが、そこまでは至ってない。

Q： すり合わせは石黒先生側からのアプローチだと思うが、柳田先生と一緒にやっているときに、石黒先生側からではないアプローチはあるのか。新しいセンサデバイスと新しいアナログ回路の両方があって、1+1が2以上になればよいが、そうならない場合のやり方について、問題の切り分けをどうするかも含めて教えて欲しい。

A： 学生レベルではテレビ会議や実際にお互いの大学に行ってディスカッションするなど密接に研究している。その中で、例えばセンサデバイスに対して、もう少し寄生抵抗が下がると読みやすいといった情報を渡すとか、逆にセンサ寄生抵抗がどうしても減らないときは、回路としてどうにかできないか考えて欲しいなど、お互いの要求を交換し合うということを頻繁にやっている。これはまさにすり合わせだと思う。

C： クロスバーのセンサアレーをやっている時に、ダイオードを入れないと迷走電流は除去できないと思い込んでいたが、学生レベルで話していくと、pn接合を入れなくても回路側で解決できることが分かり、非常に大きな進歩があった。

Q： アナログ回路は経験をベースにした職人芸的なものが必要な世界だと思うが、集積センサを実際に設計して物をつくる時にはどうするのか。センサチップの上に回路チップを実装するのか、それとも様々なコンポーネントを組み合わせるのか。

A： これはまだプロトタイプであり、柳田研で作った1,024個のセンサが載ったチップだけで、そこには回路は載っていない。回路は別のボードに実装し、電気信号を使ってやりとりをしている状況である。最終的には集積化して、5mm角の大規模センサシステムとして実現したいと思うが、まずは考えていることが正しいかどうか検証するために、プロトタイプをつくっている。

Q： アナログチップを試作する場はあるのか。

A： 我々の研究室はチップ試作を頻繁におこなっており、基本的には台湾のTSMCをファウンダリーとして使うことが多い。国内の代理店に設計データを渡してチップを作ってもらい、チップを受け取って評価システムに実装するという流れになっている。

Q： アナログ回路の場合には、低電力、小型、リニアリティなど様々なスペックの要求が多くあると思う。これらの要求を満足しようとする、必要なのは微細化だけではないとも思われるが、やはり微細化が鍵になるのか。

A： 例えば、最初に紹介した時間領域での信号処理をしようと思うと、高速に動いたほうが良いので、テクノロジーの進んだものを使いたくなる。しかし、従来のアナログ回路では、下手に微細化すると電源電圧が下がってしまってS/N比がとれないことがあるので、使用するセンサなどを考えながらプロセスを決める形になっている。

4.2 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）

ここでは、これまでの議論と趣向を変え COI プログラムである地球インクルーシブセンシング研究機構による「サイレントボイスとの共感」(<https://www.coi.titech.ac.jp>) をテーマに目指すべき将来像からのバックキャスト、それに必要とされる技術、さらにコンソーシアム運営スキームについて報告し議論したい。

本機構には電子回路やデバイスあるいはテラヘルツセンシングや AI の研究者に加え社会問題が専門である文化系の研究者も参加している。参加機関としては東工大が中心になり信州大学、北陸先端大と連携し産業界からも多くの企業に参画いただいている。

活動の原点は、我々は経済発展し人口も増加してきたが、地球社会の声を聞いてきたらどうかというところから始まっている。SDGs を踏まえ地球全体の将来像を考える中で地球上の動植物、環境、構造物全てからの「声なき声（サイレントボイス）」を人間社会に伝えることが非常に重要である。

動物のサイレントボイスとの共感の例として図 4.2.1 に示す牛群管理システムがある。センサを超小型化することで自然な測定を実現しアニマルウェルフェアに配慮したセンシングが可能となる。さらに里地里山も考える事で食の安全性にも貢献できる。社会と自然の間では雷のサイレントボイスとの共感も検討しており、災害を未然に予測し避難行動の促進に結びつけることも考えている。アニマルウェルフェアに配慮するとコスト高が懸念されるが、社会科学的なアプローチで購買意図との相関についても人文系研究者を中心に検討いただいている。

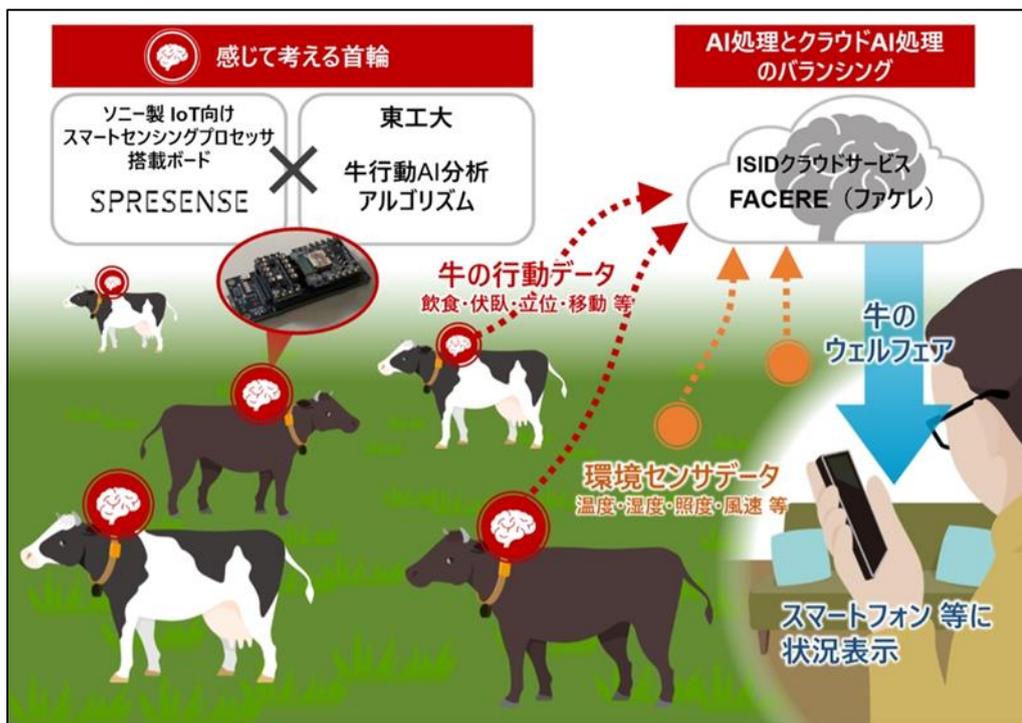


図 4.2.1 動物のサイレントボイスとの共感（牛群管理システムの例）

必要技術については図 4.2.2 に示すように今後もムーアの法則が続くことを前提としている。ただし微細化は非常に厳しい。よって本ワークショップの議論の対象となっているセンサをはじめ、色々な機能を融合させる実装技術が重要といえる。

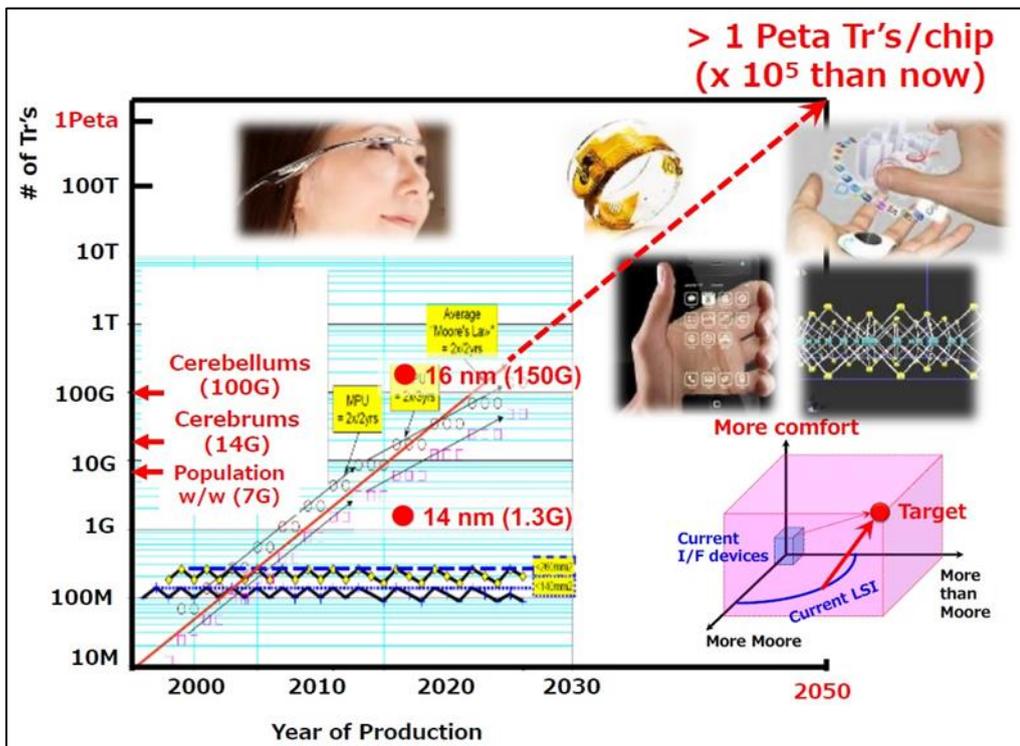


図 4.2.2 大規模集積回路の微細化トレンド

参加研究機関や参加企業からはカーボンナノチューブのテラヘルツセンサやダイヤモンド NV センサを用いたスピンセンサ、グラフェンの MEMS センサ、あるいは AI 処理するためのソフトウェアや不揮発性メモリやロジック、通信デバイスなどの提供をいただいている。インターネットを通じた遠隔リアルタイム計測というものが既にできており、信州大学の牛群の逐次データが東工大で確認可能な状況を実現している。

実装としては超低消費電力不揮発性メモリ・ロジックを開発し、待機時と動作時の電力を削減すること、IoT エッジ上で AI 処理を行う低消費電力スマートセンシングプロセッサの実現が重要であり、図 4.2.3 に示すゼロパワー IoT エッジデバイスの開発を推進している。技術的には実装が重要で、2019 年の IEDM でおこなわれた InGaAs イメージセンサとシリコンを三次元実装した発表は注目に値し、図 4.2.4 に示す低コスト 2.5D 実装から高自由度 3D 展開が現実味を帯びてきている。

4.
話題提供 3
重要基盤技術
(回路・実装)

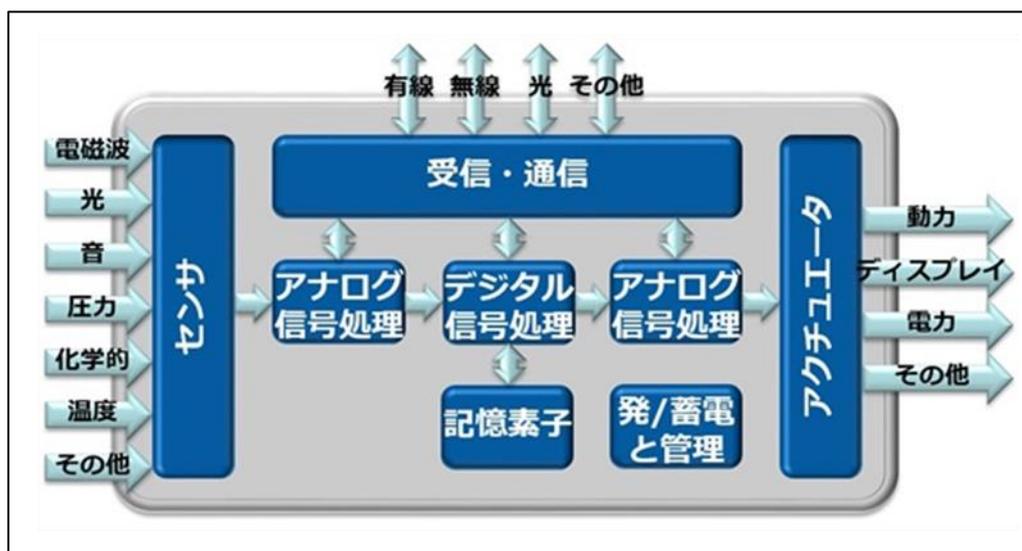


図 4.2.3 ゼロパワーIoT エッジデバイス

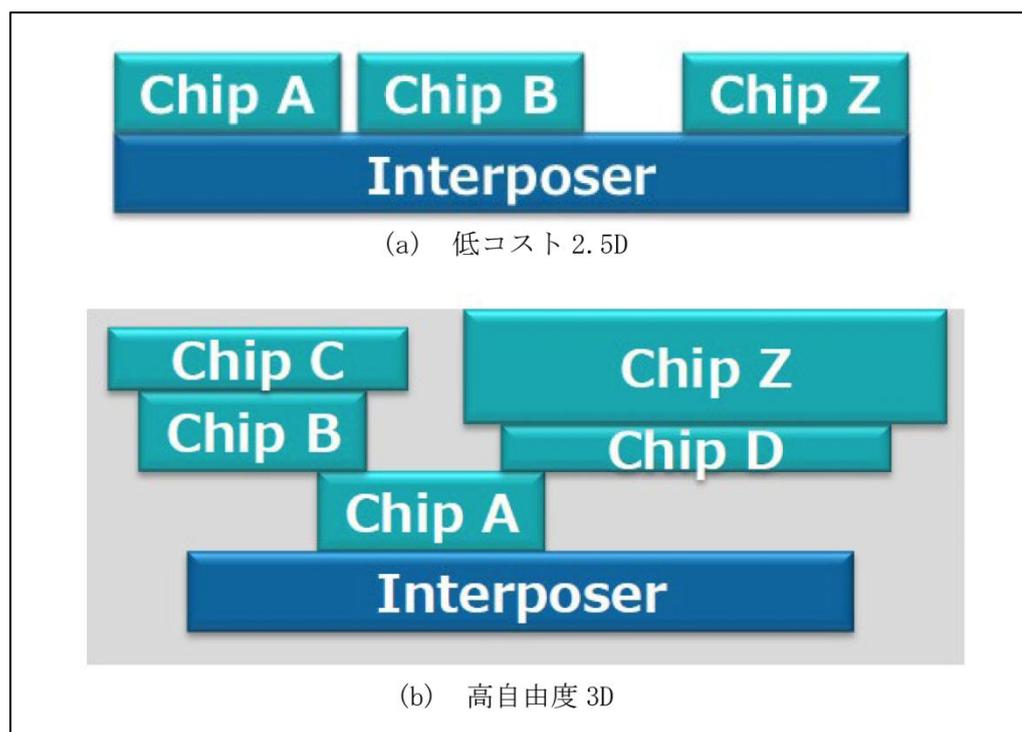


図 4.2.4 先端実装技術

このようにセンシングを中心に実装で融合させるとき、複数の大学および企業をどのようにハンドリングするかが極めて重要になる。現在の東工大 COI の運営スキームを図 4.2.5 に示す。大学ごとに、もともと有していたバックグラウンド知財とノウハウ、これに COI 活動によるフォアグラウンド知財とノウハウがある。企業の参加にあたっては各社ごとに契約し、当然ファイアウォールを設けた中で各社は独自のカスタマイズした結果を持ち帰るというスキームになっている。

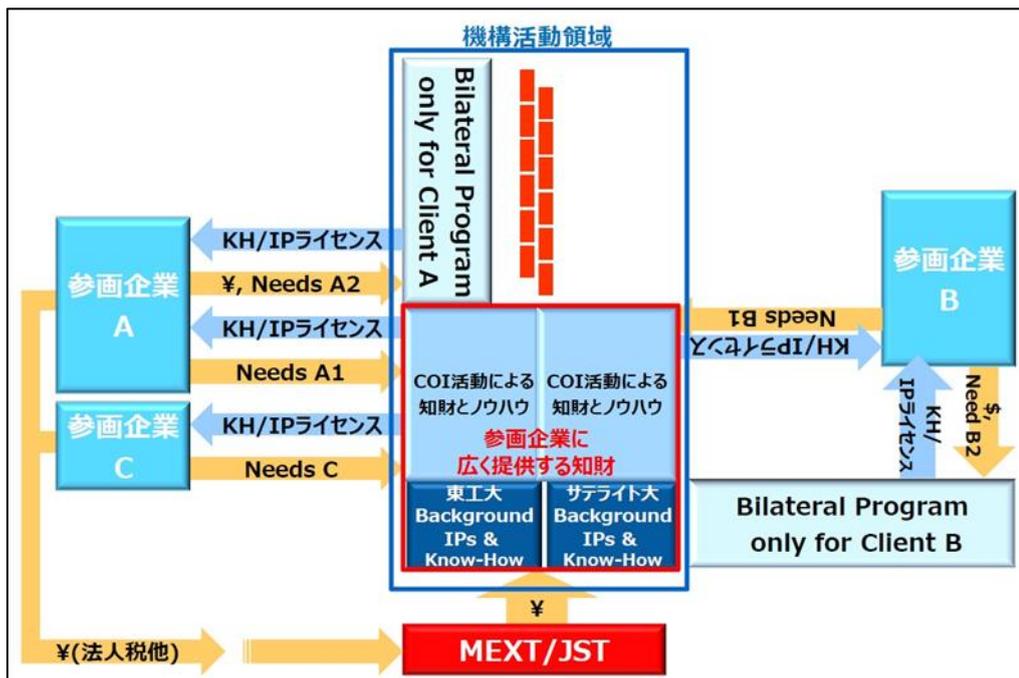


図 4.2.5 地球インクルーシブセンシング研究拠点の COI 運営スキーム

一方、運営にあたって重要なポイントの一つは、論文を書く必要のない人材の確保であることも強調しておきたい。すり合わせ作業というのが重要な意味を持つが、その資金を確保する必要がある。

また、企業が製品化するのには研究期間が終わった後がほとんどであるため、研究開発期間終了後のケアも重要である。基本的には競争的資金 50%、参画機関年会費 50%と考えている。一つのグラントだけで維持するのは無理なので、そこにさまざまなファンディング機関のグラントを載せていきたい。

今回のワークショップの議題でもあるプラットフォーム化においては、後継プロジェクトとのシナジーを認めるという社会的な共通認識が形成され、資産の継承がなされなければならない。最後に人材育成も重要であることを付け加えたい。

【質疑応答】

- Q：参加企業との間での取り決め、特に知財での工夫はあるか。
- A：当然ながら規定はあるが、基本はあるべき論を議論することに尽きる。
- Q：例えば東工大プロジェクトに他プロジェクトが後から入ってきたとすると、両方のエンドのようなルールになっていくということか。つまり共通領域のところだけが最後まで残っていくというような仕組みか。
- A：ここのオーバーラップの設定はケースバイケースでやるしかない。重要なのはオープンにきちんとした議論をすることである。
- Q：後継プロジェクトにつなぐというのはとても大事だが、なかなか難しい。先のプロジェクト

4. 話題提供 3
重要基盤技術
(回路・実装)

でできた IP、基盤技術をどう生かしていくのか。終了して参加したチームがばらばらにもとのところへ返るとき、どう資産をつないでいくのか。

A：1円パーチャスだと思う。極論だが1円で売りましたというパーチャスオーダーを1回切るという処理が非常に重要だと思う。

Q：論文を書く必要のない開発人材は重要だが、その確保は非常に難しい。どのような資金を充てるべきかという問題もあるが、そもそもそのような人材は探してもなかなか見つからない。東京にいないければ地方はもっといない。どういう工夫をされているか教えていただきたい。

A：私は企業出身だが、実は人的なつながりが一番重要である。会社もいろいろなカラーがあり、人をつなごう、技術をつなごうという会社にはそういった人材が多い。とにかく足で稼いでいるのが現状である。

Q：そのような方は企業に戻るのか、あるいはプロジェクトが終わったら別のところに異動か。

A：ほぼ定年の方に来ていただく。

Q：最初に SDGs を踏まえるとの話があった。非常に大切で人類にかかわる大問題だが、SDGs のためと言って収益を上げるのは難しく、税金を投入するのか、起業家はどう関わるかといった問題が出ると思う。SDGs に対する技術の実用化に関して、何か考えはあるか。

A：直接 SDGs ではないが、アニマルウエルフェアがビジネスになるかどうかということに通じると思う。アニマルウエルフェアと言いながら牛を食すこと自体がそれに反しているともいえるが、信州大学で見学すると、例えば乳牛だと全くの屋外の放牧、牛舎内の放牧、そしてつながれているタイプがある。つながれているタイプは搾乳や排泄物の管理がしやすい。一方で、外の放牧がいいかという、外の生活というのは実は牛にとって大変な面もある。となると何が良いのかさえも分かりづらい。そのような状況にあって、アニマルウエルフェアに配慮したことで10%値段の高い牛乳をどう飲んでいただくか。それ自体を研究しているというのが現状である。

Q：牛をセンシングし、解析としては平均化した値で、最終的な情報にリンクさせていると思われる。しかし、牛の個性によって、実はそれぞれに介入する仕方が違ってしかるべきではないか。そういうアプローチはされているか。

A：それには教師データが必要になる。最初は牛を見ながら、座った、食べたとかとやる。次は牛ごとにセグメンテーションして学習すればカスタマイズされる。ソフトウェア的には可能である。

Q：そのときに、異なる牛をどのような手法で分けるのか。時系列の情報と、肉の質などの最終的な特性とを、どのように関連づけるのか。現状では、すべて同じ牛と見なしてやられていると理解しているが。

A：できるだけセパレートしようとしている。牛から得られる牛乳の質、そしてお肉の質、さまざまなものをできるだけフィードバックしていきたい。牛は全部違うし、全部違う教師データでやっているという例もある。

4.3 センサ端末

前中一介（兵庫県立大学）

センサ融合のためのハードウェアプラットフォームについて、2007～2012 年度に実施した ERATO 前中センシング融合プロジェクトで超小型センサシステムについて研究を進めた経験を踏まえ、どういう指針でスタートしどのような知見があったか、また今後どう発展させていくべきかについて私見を述べる。

現在、スマートフォンにより歩行数などの活動量などがある程度モニタリングできるようになってきているが、さらにウェアラブルや体に貼るタイプ、生体へのインプラントなど、医療、介護、スポーツ等の実ビジネスでのニーズが高まっている。上記プロジェクトではこれらのニーズに先んじて、体に密着しほとんど無拘束で常時生体活動を計測する、貼り付け型センシングシステムを構築することを目的とした。

このようなセンシングシステムの実現においては、多種類のセンシングを同時におこない、体に貼るという方針に向けて格段の小型化、低消費電力化、低価格化などを進めることが第一のキーポイントとなる。また、システム全体を俯瞰して、材料、MEMS センサ、信号処理、ソフト、無線、アンテナ、電源と、全ての領域にわたって最適設計すべきである。このため、図 4.3.1 に示すように上記プロジェクトでは幅広い研究内容と技術ベースをカバーした。



図 4.3.1 研究内容と技術ベース

例えばひずみゲージを使った加速度センサシステムの設計を考える。加速度によってひずみゲージが曲がり、その出力を増幅し、データとして取り込んで無線で飛ばすというシステムである。この場合、例えば感度を増加させる方法として、ゲージ材料を探索する、ゲージを含む機械構造や材料を検討する、高 S/N のアンプを導入するなど、様々な解が存在する。また、アンテナを

4. 話題提供 3
重要基盤技術
(回路・実装)

例にとっても、システムの小型化を目指してアンテナを小さくすると効率が落ちるが、効率を上げようとして無線周波数を上げると電力が増えてバッテリーサイズが大きくなるなど、単純な解は存在しない。どの様な設計値とするのか、どの部分の研究開発を重視するのか、ということには様々なトレードオフがあり、システム全体からの俯瞰、現状の技術のレベル、いつ実用化させるのかなどの観点から決定すべきである。このために我々は、プロジェクトに参加する各分野の研究者間で総合的に検討しあえる環境を構築し、それぞれの研究者がシステム全体をしっかりと俯瞰しながら自らの研究をおこなう方針を取ることにした。

たとえば、複数のセンサそれぞれに対して異なるインタフェース回路を付加するのは非効率である。そこで、多重化して同じ回路でインタフェースする、そのために静電容量型で統一しさらに出力信号レベルが各センサで同一になるよう構造設計するなど、複数センサをシステム全体で最適になるように整理し、各領域の研究者がこれに基づいて各デバイスについての研究をおこなった。また、センサ端末の試作・製造についても、ウェハから切り出せばそのままシステムになるような、すなわちモノリシック融合を目指した。作製プロセスが多少複雑であっても、モノリシックで大量に作る事ができれば必ず単価は低減する。このような考え方を基本方針として、使用するセンサの方式、電子回路、ソフト、RF モジュール、アンテナ等も全体最適を意識して検討した。

デバイス構造については、SOI (Silicon on Insulator) の基板に集積回路や MEMS センサを作り込んだ。センサ性能を上げるために特殊な SOI を考案したり裏表両面にセンサを搭載するなど、ERATO プロジェクトはアカデミックな研究プロジェクトなので、さまざまな新しい技術を盛りこんだが、実用的にはここまでしなくても基本的にはモノリシックで、ウェハ1枚に全てのセンサ及び回路を形成する形が良いと考えている。

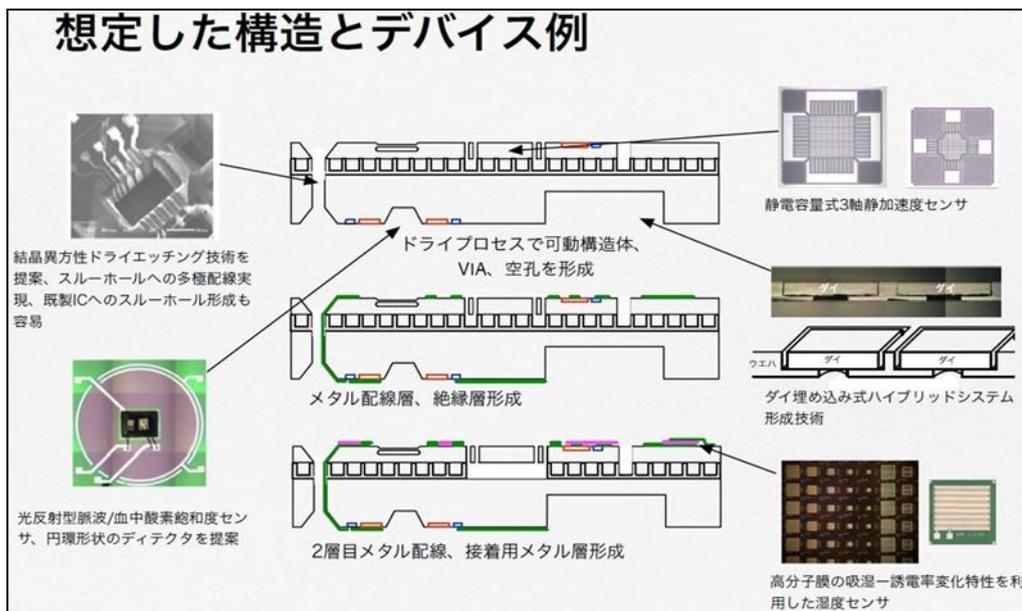


図 4.3.2 想定した構造とデバイス例

システム設計において、消費電力は必要なバッテリーの大きさに直結するので、ウェアラブルデバイスでは低消費電力化が特に重要である（実際、貼り付け型デバイスプロトタイプでもっとも

容積と重量を占めるのがバッテリーである)。単に静的に回路の消費電力を小さく設計するだけでなく、間欠動作可能なものと、連続動作が必要なものを分離し、間欠動作を併用して全体の平均消費電力を削減する工夫も重要である。また、エッジコンピューティングの考え方で、ある程度の処理を端末側で行うことによってデータ通信量や消費電力が削減できる。たとえば、日常生活の中で不整脈や脈拍変動を検出する場合、心電波形の生データを扱うのではなく、心拍に置き換える信号処理を行うと 100 分の 1 程度にデータ量が落ち、これを無線伝送するときの消費エネルギーも同様に削減できる。また、この信号処理を適切に ASIC 化するとアナログ回路の専用設計の効果を含めて、図 4.3.4 のように大幅な低消費電力化が実現できる。図 4.3.4 の中央の例では VDEC (VLSI Design and Education Center) による学術シャトルサービスを利用した。商業用のより低消費電力なスタンダードセルを利用すれば図の右端の例のようにさらに低電力になると予想できる。このようにシステム全体を通して最適化を進めることにより、大幅な低消費電力効果が得られる。

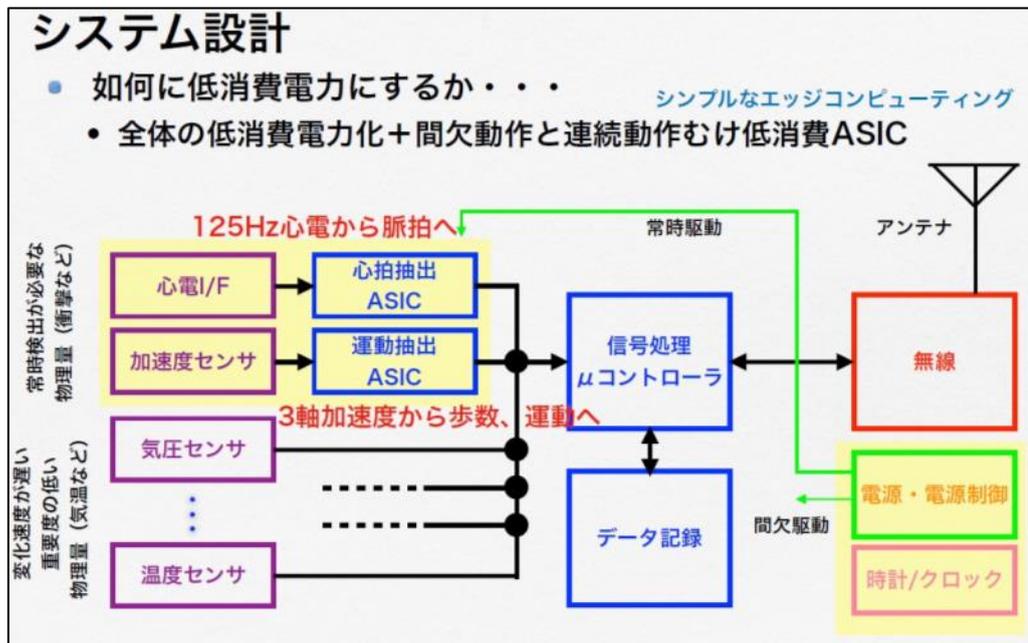


図 4.3.3 システム設計（如何に低消費電力にするか）

4. 話題提供 3
重要基盤技術
(回路・実装)

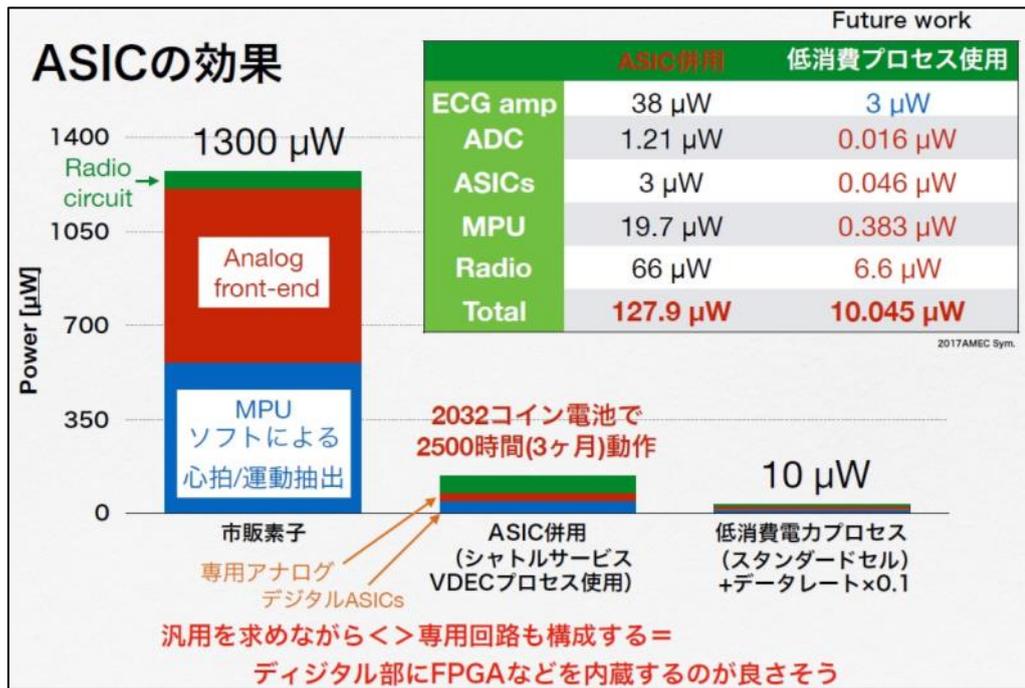


図 4.3.4 ASIC の効果

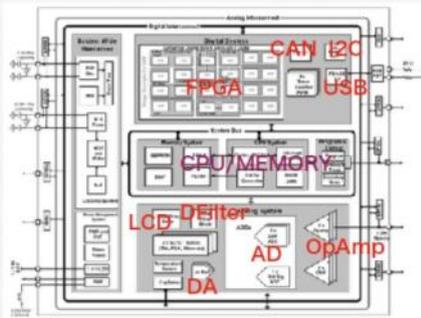
センサ端末の一つとして、ハードウェアの汎用センサプラットフォームを提案したい。現在市販されているマイクロコントローラでは、汎用的で最大機能を集積した同じチップを、使う用途に合わせて異なる実装・異なるピン数の、異なる型番の IC として販売されていることがある。つまり、そのチップの最大機能を使う場合にはチップのすべての端子をパッケージ外に引き出す。一方、小型を優先する場合には、チップの一部の端子しかパッケージ外に引き出さない（かわりにパッケージサイズが小さくできる）。後者の場合、チップの機能をあえて低下させていることになるが、生産量の効果で、別チップを新たに設計・製造するよりも費用対効果が大きい場合が多い。センサプラットフォームについても同様で、応用によっては使用しないセンサも含めてできる限り多種類の汎用センサをチップに集積して汎用インタフェースを搭載し、使いたいセンサだけを選択して使うというやり方が存在する。全部のセンサを使わない場合にはチップ面積は無駄になるが、トリリオンセンサ時代に対応するやり方として、このような考え方も価格や量産性の点で重要であると考えられる。これにより利用者は多様なセンシング機能をハード IP (Intellectual Property) として利用できる。Cypress 社の PSoC (Programmable System-on-Chip) プロセッサと呼ばれるものはアナログとデジタル（および無線を含むものもある）の SoC であるが、上に提案するセンサプラットフォームは、アナログ、デジタル、センサ、無線へ拡張した SoC である。

ハードウェアとしての汎用プラットフォーム

- 昨今のマイコンのように多数の汎用センサ、汎用回路・無線を結合したチップを数種類だけ形成、それぞれ大量生産
- 使わない機能は使わずそのままに



マイクロコントローラの例
"同一のチップ"が大きさ（ピン数）の異なるパッケージに搭載される
少ピンパッケージには端子を出さないだけ



PSoCプロセッサの例、AD、DA、シリアル、USB、オペアンプ、多数のカウンタ、FPGAなど過剰な機能を搭載、必要が無ければ使わなくてよい

● **価格 \propto 機能、価格 \propto サイズ \propto 1/生産量**

図 4.3.5 ハードウェアとしての汎用プラットフォーム

例えば物理センサバージョン

IPO

この部分をIP化しチップで供給

SPI
I2C
Para

↔

IP1

こちらは一部市販済み
既存IPの使用はできるか？国産化は？

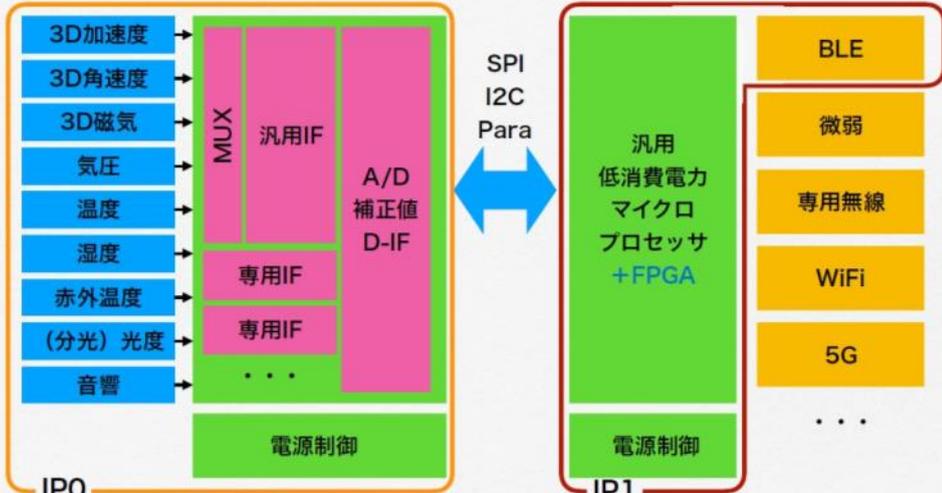


図 4.3.6 ハードウェアとしての汎用プラットフォーム（例えば物理センサバージョン）

また、センサ用の電源は残された課題である。太陽電池は容易に大出力を供給してくれるが、夜間や衣服内では動作しないため、我々はエレクトレット、電磁、圧電の各タイプの振動発電デバイスについても研究を行っている。将来的にも、IoT やセンサ端末にとって電源は重要な課題であると思われる。

実装に関しては、人体に接する部分では柔軟なエレクトロニクスが必要であり、様々な柔軟基板やセンサ、配線などについても検討した。例えば磁性粉末を導電路として、100%の伸び縮み

4. 話題提供 3 重要基盤技術 (回路・実装)

を 1000 回繰り返しても、電氣的・機械的性能が変化しない柔軟配線なども開発している。システムを組み上げるとき、現状の技術ではどうしても電池や無線 IC のような硬いエレクトロニクスの箇所が残るが、それらと柔軟なデバイスとの結合点（柔と剛とのインターフェイス）が問題である。たとえば導電性の柔軟な接着剤や硬めのゴムによって、応力を分散させるような仕掛けが重要である。しかし、そのような実用的検討に割くための時間を、論文になりにくいという理由で研究者が十分に取れないことも問題である。一方で、Bluetooth の無線モジュールなどは、時間の経過と共に市販デバイスが小型になっており、柔と剛のインターフェイスも行いやすくなってきたようにも見受けられる。

最後に私見として、今後のセンサ端末の発展の方向性を示す（図 4.3.7）。小型、多機能、低価格を追求すると、現在の MEMS センサの内部構造サイズはまだまだ大きいですが、例えば各物理量センサが 10 μm 角程度に一体化されれば超小型マルチセンシング端末が 100 円で実現できる時代が来ることが期待される。また、トリリオンセンサの時代には、構造物ヘルスなどへの応用のため、100 年の寿命を持つセンサ、そのための電源や無線なども検討すべきである。さらに、人間の 5 感は、アクチュエータが隣接することによってセンシングを高機能にまた長寿命にしている。将来のセンサシステムはこれに学ぶ必要があるだろう。

今後のセンサ端末

- より小型、多機能（汎用性向上）、低価格
 - 例えば 10 μm 角の中に 3 軸加速度センサなどが入れば・・・
 - 注射器で生体内に打ち込めるシステム
 - 既存小型ボルトに埋め込むシステムなどが実現可能？
- 100円センサ、100年センサ
 - 一方ではトリリオンセンサに対応できる安価なシステム
 - 他方、構造物ヘルスに対応できる長寿命システム
- アクチュエータの取り込み
 - 人のセンサには機能向上のためすべてにアクチュエータが付随
 - 自己校正、自己修復のためにも必要か

図 4.3.7 今後のセンサ端末

【質疑応答】

Q：ワンチップ化には同意だが、お金がかかるので、どのように実現すれば良いだろうか。乗り合いのチップを作るのかも知れないが、アナログ部分はどのようにするのか、どのような設備や機関を利用すれば良いか。現在の日本ではこのあたりが手薄になっていて、心もとない状況にある。

A：国内に使える施設があると良い。ファウンドリサービスを提供する国内企業も複数あり、また海外には大きな実績があるところもある。まずは産総研、東北大のコインランドリやナノテクノロジープラットフォーム、また我々のところにも使える設備があるので、これらでエ

ン지니어リングサンプルを作り、そのあとファウンドリサービスを使って製品化するやり方が良いと思う。

Q：これまで色々なセンサを含んだ集積回路のプラットフォームを検討してこられた中で、集積回路の設計も自前でおこなってきたのか。回路等に関して全てオープンソースにできるのか。

A：CPU コア以外は自前で設計してきた。オープンソース化はした方が良いと考える。ただ、アナログ回路の場合は、回路図やゲート長 L 、ゲート幅 W などはオープンソースで出せるが、これらと回路特性は製造プロセスに依存するため、それが他のプロセスで使える保証はない。製造プロセスを TSMC 等に決めてしまえば、アナログも含め IP コア (Intellectual Property Core) をどんどん出していけるし、そうするべきと考える。

Q：論文等はポイントだけなので、詳細設計レベルのデータがないが、それがあれば他の人達もそのまま活用することができる。その場合の IP 化の問題についてはどう考えるか。

A：アカデミアは積極的に IP 化、公開して欲しいが、プロジェクトに企業の資金が入っている場合は難しいことがある。その場合、例えば VDEC では、メモリなどで中身をブラックボックスにしてパターン外形と接続情報だけを公開した IP もある。このように IP の中身に触れない扱い方を考えてみるのはどうか。

Q：VDEC では、IP を再利用するような仕組みはあるのか。

A：ボランティア的に、このような回路を設計しましたので自由に使ってください、というような投稿はあった。ただ、オフィシャルな仕組みにはなっていないと思う。

C：確かにないと思う。しかし可能性はあるし、そういう仕組みをやっていく必要がある。研究開発人口は少ないので重要である。

Q：100 円センサというキーワードに興味を持ったが、その意味は、安く作るためには多機能にしなければいけないということなのか。あるいは、大量生産を想定して 100 円センサと呼んでいるのか。

A：多機能＝汎用＝大量生産＝低価格化を想定している。持論として、CPU やメモリが極めて高性能でありながら非常に低価格になるのと同様に、複雑な構造の MEMS であっても小型で大量に作る事ができれば必ず安価になると信じている。

Q：ハードウェアの汎用プラットフォームに関して、ある大型プロジェクトで関連する取り組みがあったという話だったが、それについてはどうなったか。

A：超低消費電力のセンサチップを作るプロジェクトに関わっていたが、試作設備の購入が方針変更のため認められなくなり、新しいデバイスの研究としては当方の関与は中断した。ハード面、ものづくりについて評価されにくいことは問題である。

4.4 MEMS と LSI をコアとしたエッジヘビーセンシング

室山真徳（東北大学）

MEMS と LSI を使ったセンシングで、触覚センサの開発に取り組んでいる。不定形物のハンドリングには触覚が必須であり、これからの感覚センサ革命として、視覚、聴覚に次ぐ第3の軸に触覚がくると考えている(図4.4.1)。最初カメラ、すなわち視覚が実現され大きく発展した。その次は聴覚、これはマイクであり、例えばアマゾンエコーやグーグルホームが登場している。そして、第3の軸として触覚が付与されることで、今後新しい世界が開けていくと考えている。



図 4.4.1 第3の感覚センサとしての触覚センサ

ヘルスケア系では、例えば介護支援や生活支援、皮膚感覚を扱う美容など多様な用途がある(図4.4.2)。リハビリ支援はマーケットが大きいと言われており、手足にセンサを付けて治り具合を可視化して楽しみながら取り組んだりできる。また、遠隔動作による手術、診断、旅行であったり、人工器具である義手義足、スポーツトレーニングなどの用途もある。

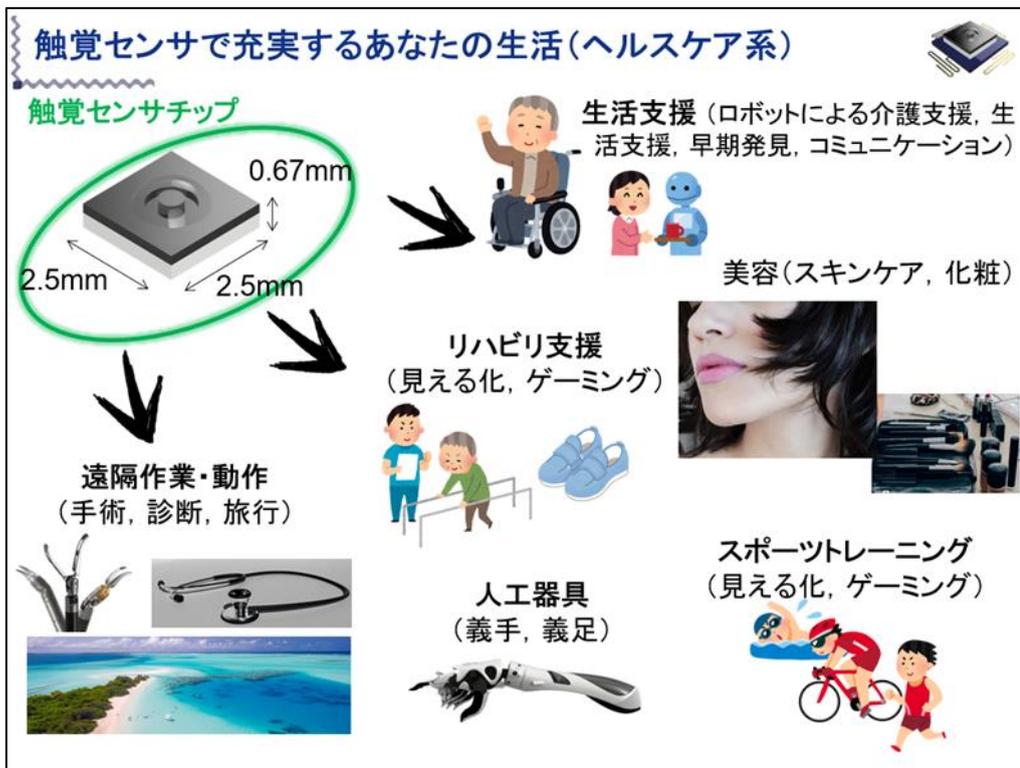


図 4.4.2 触覚センサのヘルスケア系用途

触覚センサはロボットなどに実装されるが、その付け方でデータが変わってくるため、最初からセンサを取り付けた状態で提供して欲しいという声がある。また、VC の人と話をすると、データビジネスとして、サブスクリプション型にして欲しいとの要望もある。センサ+API+クラウドで、プラットフォームとして押さえておくというやり方があるのではないかと考えている。

サービスとしては、例えば触り心地を数値化したデータベースの提供があり、具体的には肌、日用品、車のレザーシートの触り心地などがある。また、病気の前兆の検出、スポーツのプロの動作の疑似体験など、色々なものが考えられている。その他にも、アクチュエーションとセットの感覚に関する疑似体験など、こういったところでビジネス化というのを考えていく必要がある。

我々の触覚センサは MEMS+LSI の集積センサチップで構成され、大きさ 2.7 mm 角、3 軸の力センサが入っており、力の大きさと向きを測ることができる (図 4.4.3)。また、温度を検出する温度センサも入れてある。他の触覚センサと我々のセンサの大きな違いは、我々のものは一度にたくさんつけられるという点にある。多数のセンサを分布型で付けると配線とデータ量に問題が生じるが、我々のセンサは LSI が入っているため、配線についてはシリアルバス通信で、データ量についてはイベントドリブンという考え方で問題を解決できる。イベントドリブンにおいては、力や温度の閾値を自由に設定することでイベントの定義ができ、それによってエッジでデータを圧縮して送る。機能ブロックとしては、MEMS センサ、センサ読取り回路、信号処理回路、さらに通信インターフェースを提供している。通信部分にはオリジナルの非同期通信クロックデータリカバリーアルゴリズムおよび衝突回避の通信機構などがある。また、コントローラ、内蔵クロック、内蔵リセットに加え、メモリは不揮発の OTP メモリを入れてあり、デバイス個体間の補正や設置場所を考えた個別調整ができるようになっている。ロボットのユーザが実際に使いな

から設定を変えることを想定している。ネットワークとして効率よくデータを取得する構成になっており、末端センサとトップの間にリレーノードを設けた3層のネットワーク構造となっている。集積化チップの構造は図 4.4.3 に示す通りで、LTCC を用いたウェハレベル集積化でデバイス背面での配線取り出しになっている。力測定は垂直、水平ともに 5N まで計測可能であり、ヒステリシスは小さい。

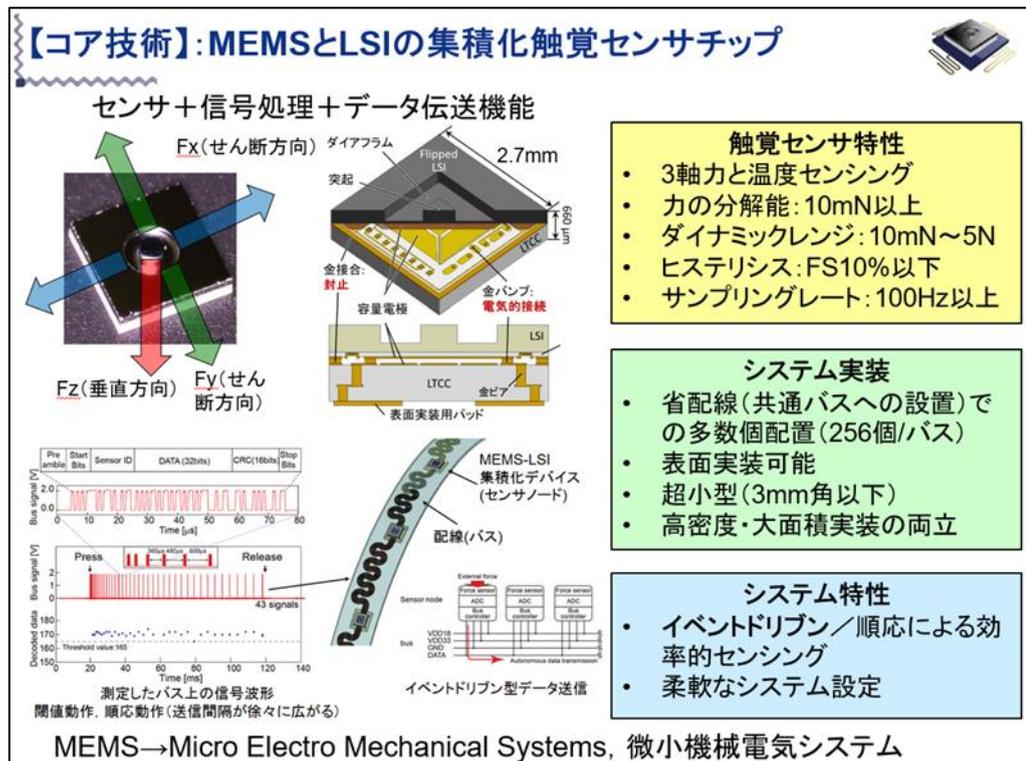


図 4.4.3 集積化触覚センサチップ

センサ・プラットフォーム LSI は、初期バージョンの簡易型は自分で全ての設計をおこなっていたが、プラットフォームとして多様な機能を追加する際に、専門の企業設計者の力を借りるようにしている(図 4.4.4)。本 LSI は3つのプラットフォームを提供するもので、その一つはマルチチャンネルに対応するセンサインターフェースである。静電容量型インターフェースと、アナログ電圧型出力センサに対応できるアンプと AD コンバータを入れてある。容量型とアナログ電圧型は、それぞれ8チャンネル対応で、複数のセンサを同時に扱える。プラットフォームの二つ目は通信で、一つのバス上に256個のセンサを配置でき、前述の独自のクロックデータリカバリアルゴリズムを搭載している。また、三つ目として、MEMS との集積のために、集積化領域、ノイズ対策シールド、貫通配線電極取出し用パッド等の構造上の種々の仕組みがある。3軸の力センサと同時にその他のセンサ、市販のセンサ等も配置でき、センサインターフェースと同時に通信インターフェースも吸収できる設計になっている。なお、用途を決めて ASIC 化すれば、この LSI を小さく、かつ低消費電力化できる。

利用を考えると、機械学習や組み込み系のユーザはハードに詳しくないので、利用しやすい API (Application Programming Interface)、制御系のプログラム、シミュレータを提供することが重要である。シミュレーションはセンサのモデル化が難しいが、デジタルツインの考え方で、モデル上で最適化をおこなうことを考えると重要度は高い。

【コア技術】:センサ・プラットフォームLSI

・ 集積化触覚センサに利用したLSIを、より洗練化・拡張化したセンサ・プラットフォームLSI

プラットフォームとしての3つの機能を提供

- 1. 多種原理/マルチチャネルセンシングに対応**
 - 容量型, アナログ電圧出力型センサ
 - 温度センサ
 - 8個のマルチチャネル
- 2. 高効率の省配線・高速通信**
 - 256個/バス設置可能
 - イベントドリブン応答
 - 差動高速通信
 - 独自開発の非同期通信方式
- 3. 集積化を考慮した仕組み**
 - 接合領域
 - センサシールド
 - TSVアクセス用パッド

AI時代, 次世代ロボット向けのセンサ・プラットフォームLSI

容量型3軸力センサ 抵抗型1軸力センサ 加速度センサ 集積化容量型3軸力センサ, 温度センサ 集積化加速度センサ

センサ・プラットフォームLSIと市販センサの接続

センサ・プラットフォームLSIとMEMS集積化

リフローノード バス センサ・プラットフォームLSI

近くASSPとして市販化計画

ASSP→Application Specific Standard Product, 特定用途向け標準品

図 4.4.4 センサ・プラットフォーム LSI

2019年の年末に開催されていた国際ロボット展で、集積化した触覚センサのデモンストレーションを行った。一個一個のチップでそれぞれ3軸の力を測定できる。温度センサからも情報が取れるので、温度補正、キャリブレーションを行うことができる。ひとつのバス配線上に20個並べたモジュール、さらに100個並べたバージョンでも問題なく動作する。また、センサを押したときだけバス上に信号波形が現れるイベントドリブンのデモもおこなった。次に、ロボットハンドに集積化触覚センサを取付け、触れているときのハンドの移動量と、センサからの力の変化から物の硬さ、いわゆるヤング率が分かるデモを行った。そのほか、近接センサを載せたロボットハンドでは把持の際の位置調整を行うことで、対象物体を優しくかつ素早く把持することもでき、そのデモも行った。

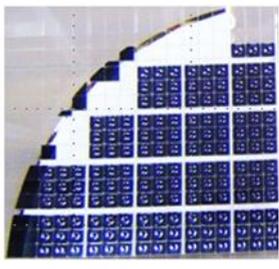
我々は今、量産化技術の開発に取り組んでおり、数百個単位のチップを一括で、4インチウェハで製造している(図4.4.5)。現時点での歩留まりは90%程度である。LSIはTSMCの0.13μmプロセスで、8インチウェハで製造している。フレキシブル基板を用いたロボットハンド等への実装も進めている。

現在開発済の技術 特許：国内12件、国外12件登録

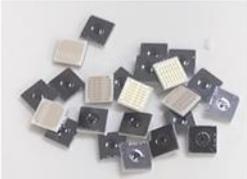


Platform LSI
Au fly-cut planarization
Gap LTCC
Wafer-level bonding to LTCC
LSI diaphragm process

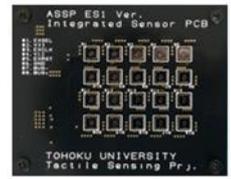
量産化技術の開発(数千個単位チップ一括製造)
4インチウエハでの製造、歩留り90%程度



2.7mm X 2.7mm LSI
(大手国内企業技術移転)



2.7mm X 2.7mm 集積化チップ



20チップ搭載モジュール



人の手型ロボットハンドへの触覚センサ実装

図 4.4.5 センサ・プラットフォーム LSI

現在、「エッジヘビーセンシング」を提唱している(図 4.4.6)。今、エッジへの要求というのが非常に大きい。例えば、人不足に起因する介護系、ピッキング、人間協調ロボット、食品の取り扱い作業等の自動化の課題や、アパレル系、スポーツ、例えばゴルフクラブのグリップの握り具合を見たいというような多様なニーズがある。また、R&D で多数のセンサを用いるにおいてセンサを小型化したいという事例もあり、画像データ以外のデータにも多くのニーズが存在している。それらに対応するために、エッジヘビーセンシングで、画像データだけでは取り得ない、あるいはそのままクラウドに上げるには多すぎるデータを効率よくプリプロセスしながら取得し、学習できるようなシステムを構築しようとしている。結局、何に使うかというのが重要であり、センサ開発側とアプリ開発側の技術ギャップを埋めるために、API とデータベースをつくり、機械学習の研究者および開発者が参加しやすいように進めている。その際に、重要だが難しいのがセキュリティの問題で、できる限り早期に考えておく必要がある。

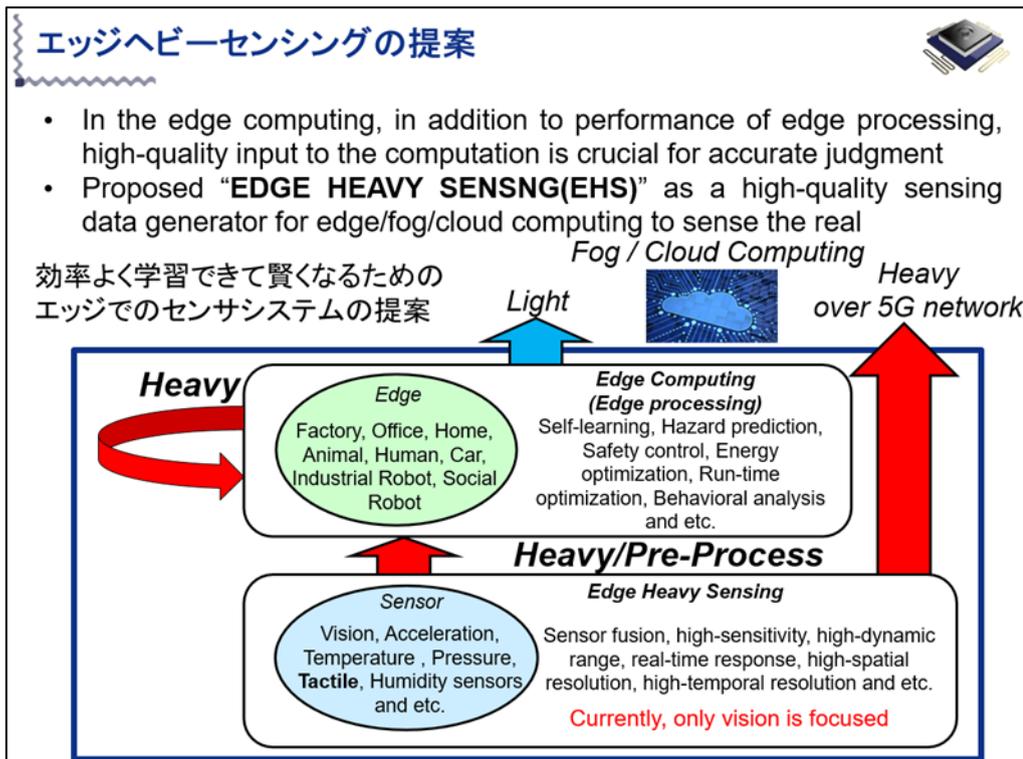


図 4.4.6 エッジヘビーセンシングの提案

最後に、センサはキラーアプリが極めて重要となる。我々は、多様なキラーアプリに対応できるようプラットフォーム化を見据えた技術開発をおこなっている。具体的には、様々なセンサをエッジにたくさん配置するというコンセプトの下、これをMEMS集積化とプラットフォームLSI、データの共通フォーマット化で実現している。また、我々はハードに加えてAPI、データベースを作っており、機械学習との連携も進めている。デファクトを取る戦略が難しいがデファクトを取るため、色々なところと連携して進める必要があると考えている。

【質疑応答】

- Q：データベースや機械学習をエッジでやることを想定しているのか。
- A：データを全てクラウドに送ると通信量が増えて大変なので、エッジでプリプロセッシングをおこなってデータの抽象度を上げることで、最終的な判断をその上の階層で効率よくおこなうことができる。データベースについても同様にエッジとクラウドの2通りあるが、学習フェーズ、推論フェーズともにエッジに置いたほうが早い。5Gになったときはクラウドのほうに学習用データベースを置いてもよいかも知れない。
- Q：クラウドで学習して、学習済みモデルをエッジに落とすのか。
- A：基本的にその通りで、学習はフォグ、クラウドでおこなうのが効率がよい。
- Q：エッジヘビーセンシングは大量のデータをネットワーキングせずに、リアルタイムで処理するという意図か。
- A：エッジヘビーというのは、いままで取れなかったデータを取るということである。例えばロ

4. 話題提供3
重要基盤技術
(回路・実装)

ボットのハンドリングはビジョンセンサでやろうとするものが多いが、データが膨大になってしまう。触ったかどうかはビジョンセンサを使わなくても、触覚センサを使えば一瞬で分かる。用途に応じて必要なセンサを選んで、質の良いデータをたくさん取るというのがエッジヘビーセンシングである。

Q：シリコンテクノロジーに軸足があると思うが、他材料を使ってより感度の良いものを作るという考え方もあると思う。どうインテグレートするか。

A：シリコンは精度良く、速く計算できるところにメリットがある。一方で、有機系材料を取り入れると伸びる配線、ウェアラブル等、幅が広がる。今後はハイブリッド実装と考えている。

Q：視覚や聴覚がパッシブなセンシングであるのに対して、触覚にはアクティブな面があると思う。アクティブセンシングについて今後の方向性はあるか。

A：ものを触ったときの熱の逃げを利用して、材料判別をおこなうことができる。また、表面のザラザラ感を測る感度を上げて、製品の鏡面仕上げ評価をおこなうことを考えている。

Q：10年先、どこを攻めるとどういう世界が開けると考えられるか。

A：難しい質問であるが、脳のセンシングや、漁港での魚の分別など、ユーザと議論しながら考えている。遠隔共存の実現、高齢者や子供が安心快適な生活を送る上でのギャップを埋める技術を目指したい。

Q：センサやデバイスレイヤに限ると、これから10年で何をやるべきか。

A：新材料を用いた新センサは重要。また実装も難しい課題であり、これは企業と一緒に、研究と併行してやっていく必要がある。現場で使うためのバックキャストも重要である。「何にでも使えるというのは、何にも使えない」とよく言われる。チームを組んで実装まで含めてやらないと使えるものにはならない。

Q：センサは視覚が王様、次が聴覚・音声認識で、3番目に来るのが触覚ということか。

A：その通りで、触覚も今後重要と考えている。例えば、視覚センサの問題点として、プライバシーの観点から見られるのが嫌だという声があり、視覚以外のセンサを使って快適かつ安全なサービスを提供するという考え方がある。

5. 総合討論

ファシリテータ：田中秀治（東北大）

話題提供 1～3 および招聘者による事前アンケートへの回答結果を踏まえ、ファシリテータがトーンセッティングをおこない、「1. 仮説について」「2. 重要な研究開発課題」、「3. 必要な研究環境・体制・人材育成」などに関する議論をおこなった。以下にその概要をまとめる。

トーンセッティング

Society 5.0 を実現するために、多くの応用領域でセンシングへの要求が高いということは、話題提供 1 の講演内容からも明らかである。しかし、そのための研究開発が十分おこなわれていないのではないかという問題意識が、今回のワークショップ開催の根底にある。事前アンケートの回答の中にも、最終ユーザはビッグデータや AI には興味があるが、データを生み出すセンサやセンサシステムの存在を忘れていないのではないか、といったコメントがあった。CRDS の仮説では、重要な研究開発課題として「課題 1：センシング情報の統合的処理・高度分析」、「課題 2：センサ端末の最適化・高機能化」、「課題 3：センサ性能の飛躍的向上」の 3 つが挙げられている（図 1.1）。このうち、課題 1 は AI やビッグデータに分野として近く、現時点でも幾つかのプロジェクトで研究開発が進められている。一方で、課題 2 と課題 3 についてはどうかというと、今年度に NEDO で「IoT 社会実現のための超微小量センシング技術開発」が開始したが、プロジェクトの目標に対して十分な規模とはいえない。また、JST の COI STREAM の枠組みで IoT・センシングに関連する幾つかの拠点が存在するが、応用・上位レイヤが重視される傾向にあり、センシングの研究開発が占める割合は高くない。

本ワークショップでの議論をもとに CRDS は研究開発戦略の提案をおこなうが、そのときには具体例として魅力的な研究課題を挙げる必要がある。本日の話題提供でも色々な課題が示されていたが、特にケミカルセンサは課題が多い。ケミカルセンサで本当に良いものができれば、世の中が変わると期待できるが、それば簡単ではなく、例えば再現性、バイアス安定性、感度安定性、堅牢性、リセット性に課題がある。材料と界面制御の問題が非常に重要である。多くの研究がおこなわれ、論文数も多いが、そのうち半分くらいは単に感度が上がったという内容にとどまっていて、センサとしての魅力はほとんどない。しかしながら、本日の柳田先生による話題提供では、触媒化学がケミカルセンサ界面の問題解決の糸口になる可能性が示されていた。ケミカルセンサは難しいが、それを解決するアイデアが出てきたらすばらしい。

話題提供で挙げられた他の例としては、アレイ化、マルチモーダルセンサ、イメージセンサの利用などがあった。また、低コスト化が重要であるとの指摘が、特にセンサを利用する立場の先生方からあった。低コスト化を、技術の言葉で表現すると、小型化と高歩留まり化になる。また、尖った性能をもつセンサに合わせた集積回路、実装、あるいはパッケージングが重要という話題があった。センサにはフレキシブルセンサと堅いセンサがあり、両者をつなぐところは難しい。このあたりは、今はあまり良い方法がないが、ブレイクスルーがあれば非常に良い。さらに、実はアクチュエータも非常に重要。これまで良いアクチュエータがなかったが、材料が良くなったことで、状況が少し変わってきている。良いアクチュエータができると、センサとアクチュエータの組み合わせによってできることが広がっていく。

実は、今回の CRDS による提言案には当初「IoT デバイスインテグレーション」というタイトルがついていた。元々の問題意識として、センサ研究は原理検証にとどまっていたデバイスインテグレーションが不十分なのではないか、センサ、回路、実装、ソフトウェアなどの各階層がばらばらになっているのではないかと、ということがあった。これは必ずしも正しくないが、そのような CRDS の仮説がプラットフォーム構築という提案につながっている。

必要なのは、ある程度完成度の高いハードウェアとソフトウェアを作り、それをユーザに配布してコミュニティを形成していくことであるが、今、それが十分おこなえる状況にないことが問題になっていると考えられる。その要因が何であるか、センサの開発者が困っていることを解決する手立てはないか、それがプラットフォームなのか別の名前のものであるかは分からないが、総合討論の中でアイデアを絞っていきたい。

事前アンケートを参照すると、例えば、デバイス、データ処理、サービスを産学官で一体的に進める研究機関が必要、あるいは、異なる階層の研究者が同じ場所で切磋琢磨できるような場所が必要、とのコメントがあった。また、ワンストップで試作化までおこなうことのできる場所が必要、基盤技術を共有して簡単に使えるようにしてほしい、といった要望もあった。その意味では、確かにプラットフォームが必要といえるかも知れない。

一方で、プラットフォームは重要だが、そこでの活動は研究成果として論文化しにくい、プラットフォームを維持することも簡単ではない、といったコメントもあった。また、製品化やサービス化には高度な技術が必要になるが、大学でおこなうのは主に新規性重視の研究に限られる、プロトタイプを製作することは重要だがお金がかかる、さらに、他人の技術を使いたいとそのハードルが高い、といったコメントがあった。技術の提供は、使う方にとっても、提供側にとっても難しい問題といえる。また、日本ではオープンイノベーションや企業による先行研究は簡単ではないので、国プロで進める必要がある、とのコメントもあった。

ハードウェアとソフトウェアを含むセンサ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などの開発基盤というのは、実はすでに世の中に多く存在している。いわゆるサプライチェーンというもので、例えば LSI ファウンドリ、MEMS ファウンドリ、パッケージサービス、プリント基板作成サービス、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、計測サービス企業などである。また、一部の研究室やセンターでは、ある程度一気通貫もできる。これらをつなぐコンサルタントも存在している。ただ、問題なのは、これらの基盤技術の開発・維持と、情報の取得・整理には極めて大きなリソースを要するため、提供側はそれに見合った値札を付けざるを得ない。研究者にとっては高過ぎて使えないということが起きてしまう。

一方、国費が入っているところは、安く利用することができる。例えば文科省のナノテクプラットフォーム。これは全国に 16 拠点あり、非常に成功しているプロジェクトとなっている。他にも東大の VDEC や、各大学に学内施設があり、これらは安く使うことができる。ただし、これらの施設には試作を丸投げすることはできない。研究者自らそこへ行き、自分でやる必要がある。このような状況を踏まえ、一体どのようなプラットフォームが有効なのかを考える必要がある。それは集中研や拠点のようなものなのか、それ以外のものか。

先に述べたナノテクプラットフォーム成功の鍵はどこにあるかという、ナノテクプラットフォームの拠点では研究をしないと決めたことにある。これは当初は摩擦が大きかったが、少なくとも微細加工のナノテクプラットフォームでは開始に当たって堅く決めた。なぜかという、研

究とサービス提供というのは、ある意味トレードオフの関係にある。自分で研究を始めると、他人にサービスするのが嫌になってしまう。これは当たり前のことであって、その切り分けができなかった拠点は、結局上手くいっていない。

その上で、国の資金をつけるのはプラットフォームが良いのか、個々の研究者が良いのかを考える必要がある。私自身は、プラットフォームよりも研究者の側に投資をおこない、研究者がプラットフォームへ支払う十分な利用料によって、プラットフォームをしっかりと運営していくことが重要と考えている。それによってプラットフォームはサービスを高めることができ、利用者が増えることで技術が蓄積されていく。すなわち、研究の最上流のところに資金を入れることで、サプライチェーンにお金流れ、全体のレベルアップにつながると期待できる。

要するに、我々が考えなければならないのは、仮に大きな予算があったとして、どのような研究開発課題と将来像を掲げ、どのようなやり方をすればインパクトの大きな成果を出せるのか、課題と同時にやり方を考える必要がある。上手く機能する体制、これはプラットフォームなのか、プロジェクトなのか、どのような形があり得るのか。プロジェクトと言っても、一貫通貫のプロジェクトという聞こえは良いが、例えばセンサを使う側の研究者と、MEMSのデバイスの開発とではフェーズが合わない。これは同床異夢のようなもので、使う側から今のセンサで特に困っていないと言われてしまうと、このようなプロジェクトは成り立たない。

また、今日はあまり議論がなかったが、ベンチャー企業の役割は極めて重要である。海外では成功例も多く、これらも含めて考えていく必要がある。

参加者の方々には、力強い提言を CRDS がおこなうことができるように、ぜひ良いアイデア、材料を出していただきたい。

総合討論

【研究開発課題の例】

(有機・無機ハイブリッド材料センサ)

・化学・バイオセンサは性能が向上しており、高感度・高選択性かつ湿度の影響を受けないガスセンサも実現されているが、寿命などの弱点が依然としてある。その克服には、バイオ・有機材料を用いたセンシングと、無機材料を用いたセンシングの融合が一つの解になるのではないかと。化学・バイオセンサの弱点が、堅牢な無機材料によって補完できると良い。

(高感度・リアルタイム)

・センサはリアルタイムに変化を測ることが重要。特にガスセンサの場合は、時間的・空間的な濃度変化が重要であり、今後はさらに ppt レベルの高感度で時間変化を追うことが求められる。生体ガス計測や環境、食品など、様々な分野にニーズがある。

(非接触応力センサ)

・構造物の安全性評価には応力レベルを知ることが重要で、非接触で離れたところから応力を測る技術が必要。大昔からあるひずみゲージを使えば応力を測ることはできるが、大型の土木構造物の場合、満遍なくひずみゲージを貼るとするのが難しい。

(センシングへの新原理適用)

・既存センサの検出対象以外にも、センシングの対象となり得る物理量は色々と存在している。例えばダイヤモンド NV センターを用いたスピンセンサのように、全く新しいものも登場している。これまでセンシングに使用されていなかった新しい現象や原理、新材料にまで視野を広げる

ことが重要。

【必要な視点】

(既存センサの競争力発揮)

・先端の原理を活用した次世代センサの開発だけでなく、既存のセンサで国際競争力を発揮する努力も必要。日本のメーカーのセンサは自社用、あるいは B to B 用が中心で、コンシューマのところに出てこない。コンシューマ向けを海外に押さえられていることは問題。

(ニーズドリブンの視点)

・研究開発課題の設定においては、ニーズドリブンの視点から、社会課題との関係性について示すことが重要。IoT 普及が期待される主な応用領域としてモビリティやインダストリー、社会インフラなどが趣旨説明で挙げられていたが、そのような社会課題からの要請に対して、センサの要素技術をどう組み合わせるかで応えていくか、センサのコミュニティ以外の人にも意義を示す必要がある。

・生産現場が新しい技術を導入・実証しようというときには、その新しい製品や技術がいかに問題解決に貢献するかという視点が極めて重要。農業の現場などにとって、テクノロジードリブンという概念はあり得ない。

・技術の価値を示さないとファンディングにはつながらないが、センサを見せなくても価値は伝わらないので、それが人々の暮らしにどう生きるかというのをきちんと示さないといけない。一方で、課題解決に向けて取り組む過程で、科学技術が進展していく面もある。そういった面も含めて意義を説明していく必要がある。

(データ収集と活用のサイクル構築)

・センサに関する研究には 2 種類の方向がある。一つは、これさえ測ることができれば絶対に売れるというセンサで、例えばがんの分かる生体ガスセンサのようなもの。もう一つは、データを大量に集めないと必要な情報が得られないというもので、これはセンサの技術だけではなく、データの集め方が重要。データ集めは GAF A が先行していて、分かりやすい例にスマートスピーカーによる音声データの収集がある。日本には GAF A に匹敵する IoT プラットフォーマーはないが、センサの技術はあるので、そこを活かしてデータの収集と活用のサイクルを回す仕組みを作ることで、対抗していくべきである。

・GAF A などの IT のプラットフォームのように、データを吸い上げてクラウドに載せるという仕組みを日本の企業でも作っているところがある。そのような企業が持つハードウェアからクラウドまでの包括的な仕組みに、アカデミアを巻き込むことができると良い。

・上位のところは GAF A に任せられることができるが、リアルな現象のセンシングからデジタルトランスフォーメーションにつなげることはプラットフォームにはできていない。その領域については、まだ日本が競争力を示していくポテンシャルが十分にある。

(シーズ側とニーズ側の連携)

・シーズとニーズのマッチングが多くプロジェクトで謳われているが、アプリケーション寄りの立場からすると、開発途中のセンサを使うことにはリスクが伴う。しかし、シーズ側で技術ができるのを待って、できあがったものを使えば満足できるかというのと、そうではない。シーズ側がニーズを理解していないと、例えば、上がってきたデータに時間同期性がない、位置情報が正しくないから使えない、といったことが起きてしまう。シーズに近い技術を開発する段階から、

アプリケーション側はシーズ側にニーズを伝えていくことが重要。

・デバイスができてからアプリケーション側とつなぐのではなく、平行して進めることが重要。たとえばセンサ材料の開発と並行して、アプリケーション側では既存のセンサと AI を使って診断法の開発を進めるなど、工夫すればうまくやることができる。

【求められる環境・体制】

(プラットフォーム構築・制度設計)

・センサのプラットフォームを考える上で、ナノテクプラットフォームで培われた仕組みを取り入れることは必須。それに加えてセンサ特有の技術、たとえばアナログフロントエンドなどをいかに用意するか、上手く設計することが重要。

・色々とところから出てきた技術がきちんとプラットフォームに載るような制度設計が必要。

・アカデミアで開発した基盤技術を他の研究者やプロジェクトが使いたいという場合に、それをサポートできる人材がいない。論文にできない仕事なので、学生や研究者ではなく、サポート専任のスタッフが必要。

・センサデバイス側と上位のソフトウェア側、両方からの歩み寄りが必要。プラットフォーム技術として提供するハードウェアを、上手く使うためのソフトウェアを周りに固めて提供することができれば、ソフトウェア側の技術者もそれを使うことが容易になる。

・アカデミアの成果を世の中に出していくための仕組みとして、プラットフォーム、あるいはベンチャーといった仕組みが必要。

・センサの研究開発は顧客の声ありきで考えるべきで、その上で、お金のこと、技術のことを考えなければならない。そのための様々なスキームを描く必要がある。

(産業界とアカデミアの連携)

・企業とアカデミアの間には距離があり、企業はアカデミアのやっていること、持っている技術をよく知らないことも多い。両者の間をオープンにして、つなぐ仕組みが必要。

・センサは高感度、堅牢、低消費電力など、デバイスとして様々な要素があり、新しい先進技術や面白いアイデアもアカデミアには多く存在する。そのようなシーズ研究を推進する仕組みをつくと同時に、それらを様々なニーズ側に示し、相互作用させることが重要。

(医療用デバイスの試作環境・人材育成)

・日本は医療機器メーカーが弱いため、医療用デバイス、特にセンサ関係の製品が少ない。日本には医療に特化したデバイスの試作ができる組織、プラットフォームがないという問題がある。

・医療のニーズは医師に聞けば分かるかという点、そうではなく、医師も実際にセンサを見るまで気づかないこともある。医療と理工学の両方がわかる人材、物理や工学の知識を持った医師などを育て、一緒に研究開発のできる医療機関、研究機関が求められる。

付録

付録1. 開催趣旨・プログラム

開催趣旨

JST 研究開発戦略センター（CRDS）では、科学技術に求められる社会的・経済的ニーズを踏まえて国として重点的に推進すべき研究領域や課題を俯瞰の視点から系統的に抽出し、その研究開発戦略を提言する公的シンクタンクとして活動しています。活動の過程において、研究開発動向の俯瞰を目的とした「俯瞰ワークショップ」や、重要テーマの研究開発戦略を議論する「科学技術未来戦略ワークショップ」などを開催してきました。本ワークショップ「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～」は、上記科学技術未来戦略ワークショップの一つとして開催するものです。

CO₂排出削減、省エネ化、安全な交通システム、効率的な社会インフラの維持・管理、介護・医療・健康管理など、我が国は安全・安心な社会を実現する上での課題が山積しています。これらの課題解決に向けた取り組みにおいては、情報の継続的な取得・蓄積と分析・解析が重要であり、様々なIoTシステムの構築と普及が必要です。特に、多様な情報を高効率かつ安定に取得するセンシング技術と、取得した多様なデータ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の高付加価値化が求められています。一方、ネットワークにかかる負荷やセキュリティ・プライバシー保護などの観点、リアルタイム情報処理の必要性などから、IoTにおいてはエッジ側での情報処理の重要性が認識されるようになりました。したがって、センサ端末、エッジ側情報処理機器、ネットワークで構成されるセンシングシステムの高度化が重要といえます。このような背景の下、CRDSでは事前調査を通じて重要な研究開発項目とそれを推進する方策に関して仮説を構築しました。

本ワークショップでは、CRDSで考えている仮説を紹介し、IoT・センシングの応用分野ごとの最近の研究や、重要基盤技術につながる研究・技術シーズに関して各領域の専門家からの話題提供の後、現状で不足している技術や今後注力すべき研究開発課題、研究開発を支える基盤技術開発プラットフォームのあり方などについて議論をおこないます。

なお、本ワークショップは非公開ですが、ワークショップ開催後にCRDSでは、ワークショップ報告書と、さらに研究開発戦略を提言書として取りまとめた戦略プロポーザルを発行する予定であり、いずれもCRDSのwebサイト上で公開する予定です。

プログラム

(敬称略)

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

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 ファシリテータ 田中秀治（東北大学）

論点

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）

付録2. 参加者一覧

(敬称略、所属・役職はワークショップ開催日時点のもの)

招聘者

(発表者)

- ・石黒仁揮 慶應義塾大学工学部 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

JST-CRDS センサ融合チームメンバー

- ・曾根純一 ナノテクノロジー・材料ユニット 上席フェロー
- ・荒岡礼 ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー・センサ融合チームリーダー
- ・河村誠一郎 ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
- ・馬場寿夫 ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
- ・高島洋典 システム・情報科学技術ユニット フェロー
- ・的場正憲 システム・情報科学技術ユニット フェロー
- ・島津博基 ライフサイエンス・臨床医学ユニット フェロー
- ・村川克二 科学技術イノベーション政策ユニット フェロー
- ・新井正伸 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 主任調査員
- ・久野範人 研究プロジェクト推進部 ICT/ライフイノベーショングループ 主任調査員
- ・鈴木信弘 研究プロジェクト推進部 ICT/ライフイノベーショングループ 主任調査員
- ・小島直人 プログラム戦略推進部 ICT 分野チーム 主任調査員
- ・勝又康弘 戦略研究推進部グリーンイノベーショングループ 主任調査員

JST-CRDS

- ・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
- ・永野智己 ナノテクノロジー・材料ユニット 総括ユニットリーダー・JST 研究監
- ・宮下哲 ナノテクノロジー・材料ユニット ユニットリーダー・フェロー
- ・眞子隆志 ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
- ・八巻徹也 ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー

関係府省・機関等

- ・菅野普 内閣府政策統括官（科学技術・イノベーション担当）付 上席政策調査員
- ・黒澤弘義 文部科学省研究振興局 参事官（ナノテクノロジー・物質・材料担当）
- ・高橋功 文部科学省研究振興局参事官（ナノテクノロジー・物質・材料担当）付 参事官補佐
- ・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
- ・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
- ・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
- ・太田啓 防衛装備庁先進技術推進センター 特別研究官（フェロー）

JST

- ・伊藤哲也 イノベーション拠点推進部 調査役
- ・松本秀一 イノベーション拠点推進部 主任調査員
- ・長谷川一途 未来創造研究開発推進部 係員

■ワークショップ企画・報告書編纂メンバー■

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-WR-09

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

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～

令和 2 年 3 月 March 2020

ISBN 978-4-88890-678-4

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.

