

令和4年度

戦略的イノベーション創造プログラム（S I P）第2期

S I P第2期 最終成果報告書

課題名：フィジカル空間デジタルデータ処理基盤

2023年 3月 27日

目次

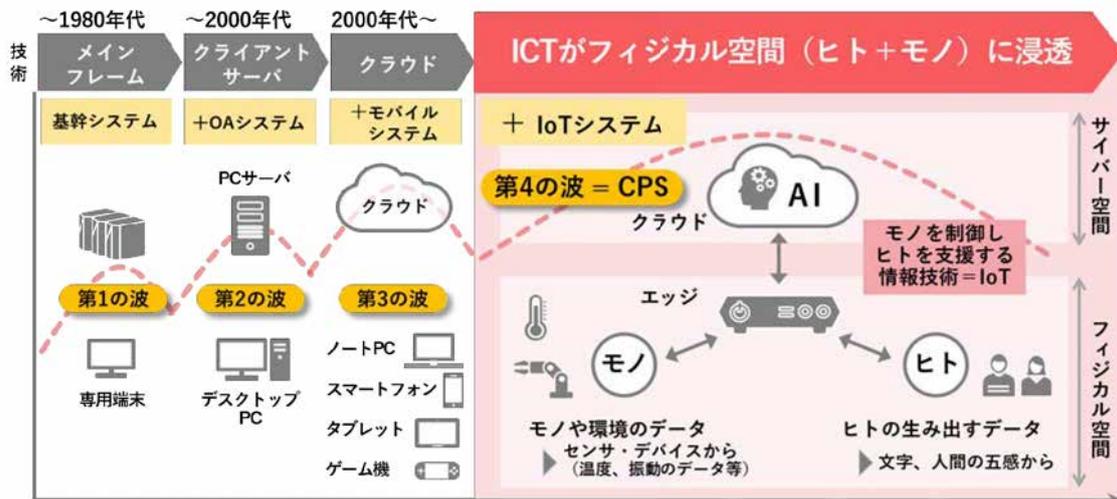
1	課題全体の概要と課題目標の達成度.....	3
	(1) 課題全体の概要・目標.....	3
	(2) 課題目標の達成度.....	6
2	各研究テーマの概要と課題目標の達成度.....	14
	(1) 研究テーマ：My-IoT 開発プラットフォームの研究開発.....	14
	(2) 研究テーマ：ヒューマンインタラクションセンサデバイスシステム技術 の開発	22
	(3) 研究テーマ：常温発電 IoT 環境センサの研究開発.....	29
	(4) 研究テーマ：超高感度センサシステムの研究開発.....	36
	(5) 研究テーマ：CPS 構築のための.....	46
	センサリッチ柔軟エンドエフェクタシステム開発と実用化.....	46
	(6) 研究テーマ：移動空間デジタルデータのエッジ処理とクラウド連携による安心・安 全・安価な複数台自動走行パーソナルモビリティの社会実装.....	66
3	課題マネジメント.....	83

1 課題全体の概要と課題目標の達成度

(1) 課題全体の概要・目標

1. (1). 1. 意義・目標等

科学技術の進展により人々の生活は便利で豊かになる一方、国際的に解決すべき社会課題は複雑化してきており、課題に対する国際的な取り組みがますます重要になっている。我が国は、課題先進国として経済発展と社会課題解決の両立を世界に先駆け実現できる立場にある。そこで、第5期科学技術基本計画にて、目指すべき未来社会の姿として Society 5.0 構想が提唱された。Society 5.0 の実現において、我が国の質の高い様々な現場（フィジカル空間）の情報を高度・高効率に収集・蓄積し、仮想空間（サイバー空間）と高度に融合させる連携技術（CPS : Cyber Physical Systems）の構築が必要とされる。



図表 1-1 ICTの潮流とSIPフィジカルの役割

求められる CPS 構築において、リアルタイム性、制御性、超低消費電力性等に重点を置いたハードウェア技術やシステム化等、日本の強みを活かした統合技術を開発した上で、新たな共通基盤として体系化が重要である。ところが、CPS を用いた Society 5.0 の実現においてはフィジカル空間処理の高コストや我が国の IT 人材不足が非常に深刻な問題である。そこで本研究課題では、容易にサイバー空間とフィジカル空間を連携させることが出来るエッジに重点をおいたプラットフォーム（以下「エッジ PF」という）を開発し社会実装することにより、フィジカル空間処理のコストを大幅に削減し、かつ我が国の中小・ベンチャー企業を含む産業界を活性化していく。高度な IT スキルを必要としないエッジ PF により、開発期間や人員といったコストを大幅に削減し、これにより新規企業の参入の促進や新しいビジネス機会を増やしていく。



図表 1-2 VOC 産業界、アカデミアからの声

あわせて、日本が強みを持つ材料・デバイス技術を活かした、超低消費電力 IoT デバイス・革新的センサ技術の実用化及びシステム化により、電源供給にかかる技術課題の解決を行い、従来設置できなかったフィジカル空間の環境を計測可能とするなど、CPS の適用範囲を広げることで高度な価値創出をはかる。

また、クラウドベースシステムでは実現不可能なリアルタイム性が不可欠な領域で、フィジカル空間の制御管理等のエッジに重点がおかれた CPS 構築が必須な社会課題実装技術開発を行い、課題の成功事例を広く社会へ示す。

エッジ PF を自立的に維持・更新できる仕組みを構築していくことで、我が国の CPS を用いたソリューションの国際競争力維持や持続的経済成長への貢献を目指す。

それぞれの研究サブテーマは下記を目標とし推進する。

- ・ Society 5.0 の中核基盤技術として、従来と比較して IoT ソリューションの開発期間または開発費用を 1/10 以下に削減するプラットフォームを他国に先駆けて開発する。
- ・ 革新的なセンサと超低消費電力 IoT チップ技術を実現し、小型・高感度化に加え、センサ近傍処理に必要な電力を 1/5 以下に削減するなど、従来設置できなかった環境での計測を可能にするための技術開発を行う。

- ・上記プラットフォームおよび IoT チップ・革新的センサ技術の有効性を生産分野などで実証するとともに、複数の実用化例を創出し、社会実装の目途をつける。

1. (1). 2. 研究内容

新たな共通基盤として、フィジカル空間のリアルタイムなデータ処理、専門的な IT 技術者でなくても利用可能であること、低コスト化、未開拓な領域へのデバイス適用、モノとモノの高度な協調・協働の 5 つをポイントに、様々な分野で利用できる「フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」を構築するとともに、国際標準化や国内外の団体・企業と連携した展開活動を進め、社会課題のフロントランナーとして社会実装する。

本プログラムは以下に記す 3 項目の研究サブテーマで進める。各研究サブテーマは有機的に連携して推進することで、目標の達成を促進する。

- I. IoT ソリューション開発のための共通プラットフォーム技術
- II. 革新的センサ・超低消費電力 IoT チップ技術
- III. Society 5.0 実現のための社会実装技術

1. (1). 3. 出口戦略

本プログラムは、我が国の良質なフィジカル空間の情報を、最先端のエッジ PF の標準化により容易かつ効果的に利活用できる環境を構築する。本プログラムの成果により、様々な業種による新しい産業創出の機会を増大させ、Society 5.0 の構想で掲げる経済発展と社会的課題解決を目指す。

そのために、エッジ PF の開発に加え、日本が競争力を有するセンサ近傍の超低消費電力デバイスや革新的センサシステム、社会課題を解決しうるロボット等の IoT 機器、それぞれについて具体的な社会実装の検証を行いながら戦略的に推進する。各研究サブテーマではそれぞれ実際に事業化を担う企業をパートナーとして選定した上で民間資金も投入しながら推進していくことで、産業界での速やかな事業化を推進していく。

フィジカル空間デジタルデータ処理基盤には、既存の PRISM や ImPACT、各府省 (AI3 センター等) の関連する成果、ならびに SIP プログラムの中で対となる「ビッグデータ・AI を活用したサイバー空間基盤技術」、「IoT 社会に対応したサイバー・フィジカルセキュリティ」の成果を組み合わせることで魅力ある基盤として成長させ、さらにコンソーシアム等による維持・更新する体制の構築により、プログラム終了後も持続的に新ビジネス機会や産業界の参入の促進を行い、我が国の国際競争力や経済成長の維持・拡大を狙う。

(2) 課題目標の達成度

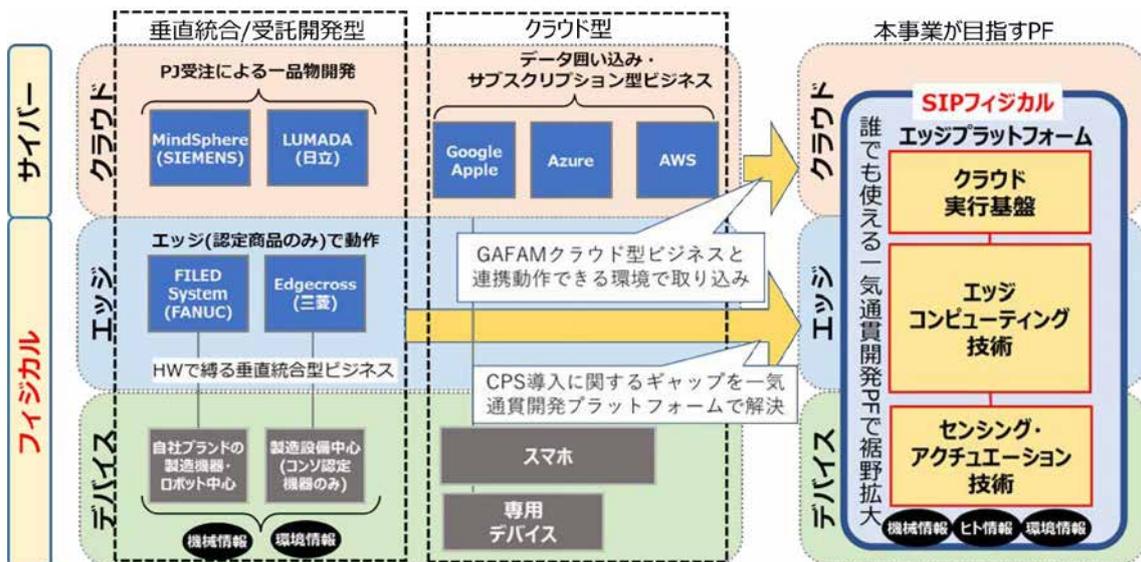
①国際競争力

ドイツのインダストリー4.0は、主として製造業の生産管理や在庫管理をIoTによって個別工場や企業の枠組みを超えた最適化により経済的発展を促進する試みであり、その動きは欧米や新興国に波及している。我が国は、Society 5.0のコンセプトを掲げ、社会システムにおける様々なモノを相互につなげること（モノとモノ、ヒトと機械・システム、ヒトと技術、異なる産業に属する企業と企業、世代を超えたヒトとヒト、製造者と消費者等）で、世界に先駆けて人口減少に伴う高齢化、労働人口の減少等の社会課題解決を目指している。

デジタルデータを産業活用するアプリケーションとしてのIoT分野において、米国 Microsoft 社等が展開しているサービスのように多様な領域を想定したデータを集約、分析する基盤が提供されている。しかしながら、クラウド側に軸足が置かれているため、実社会へのフィードバックに必要なIoT機器等の制御機能やフィジカル空間への展開技術はまだ十分には用意されていない。そこで、我が国はフィジカル空間に良質なデータ源泉を有し、エッジに重点をおいた最先端の技術を搭載したエッジPFを開発することで、国際的な競争力を有するCPSをいち早く実現する。

日本が強みをもつデバイス技術は、電子部品で38%の高いシェアを有しており(2016年)、研究レベルでは世界最先端の位置にいるが、近年は海外企業との競争激化によるシェア低下が著しい。また、中小・ベンチャー企業を始めとした産業界でデバイスの実用化やCPSへの取り込み等の産業応用には課題がある。小型・高感度バイオセンサ等の革新的センサの実用化開発や、新原理による最先端の低消費電力技術の実用化への考察と検証、低電力実装を支援するエネルギーハーベスト技術、様々なセンシングデータを一元的に、効率よくデータ収集が行えるマルチセンシングモジュール(MSM)開発等、超低消費電力IoTエッジデバイスをリードできる技術成果の産業貢献の時間軸を明確化し、成果最大化を目指して産業応用に取り組み、産業応用に取り組むことにより、エッジPFによる世界トップレベルのCPS実現に貢献する。

以下、本事業で構築するエッジPFにおける位置づけ、ベンチマークを示す。



図表 1-5. フィジカル空間デジタルデータ処理基盤の位置づけ

現在の国際的な標準化団体やコンソーシアム等においては、オープンかつ協動的な連携を推進していくことが、複雑なソリューションを整備する有益な手法となっており、相互接続、あるいはデータ連携の手段の一つとして、各団体において、参照アーキテクチャが構築されている。

エッジプラットフォームの特徴である、エッジ領域に焦点をあてた、開発環境を提供することは、日本独自の取り組みとして考えられ、日本の強みであるデバイスから、PF～サービス・アプリケーションまで一気通貫のアーキテクチャの構築により、ワンストップでのソリューション提供を可能としている。

特にコンソーシアムそのものが上記のような一気通貫のアセットを保有し、提供・販売可能な仕組み（IoTストア等）を有している点は、他のベンチマーク先にはない独自の優位的特徴である。そのため、国際的な標準化団体等との連携を普及チャネルとして活用することにより、成果を効率よく展開していくことが出来、グローバルに対する普及をコンソーシアムとして推進していくことが可能である。

SIP フィジカルにおける成果物の仕様のカタログ化によりオープンなプラットフォームとし整備しており、今後、地域軸・産業軸での代表的なユースケースや先進的な事例の創出を国際的先行実績のあるPFとの連携の場を通して展開することで、世界での競争優位な外部PFの力を活用した国際展開を推進していく。

また、エッジプラットフォームとしての強化策として、国内の他コンソーシアムと連携することにより、特に専門領域の知見（教育、セキュリティ、OSS等）や分野特化の取組内容などを共有し、補完関係・体制を創ることで、エッジ技術から応用までカバーできる我が国のエッジプラットフォームとして、国際競争力を持つ強固なコンソーシアム基盤を構築していく。

図表 1-6 国内コンソーシアムとの連携・補完関係

評価軸	エッジ コンソーシアム	連携先候補の国内コンソーシアム			
	エッジ プラットフォーム (SIPフィジカル)	インダストリアル バリューチェーン イニシアティブ	MCPC	セキュアIoT プラットフォーム 協議会	日本OSS 推進フォーラム
エッジ領域の 参照アーキテクチャの構築	◎ デバイス～PF～アプリケーションまで一気通貫のシステムアーキテクチャの構築	◎ (IVRA) 製造業システム中心	-	◎ (セキュリティ観点での連携)	-
エッジ領域の 開発環境の提供	◎ エッジ領域に特化した、アプリケーション・サービスの開発環境提供 ※日本独自の機能	-	-	-	-
OSS	○ オープンかつ安価なコストでの開発を可能とする	-	-	-	◎ (オープンソース活用のノウハウ連携)
PFの提供方法 (相互接続可能な形態でのPFの提供)	△⇒○⇒◎ SIPサイバーや国内コンソとの連携による相互補完的なPFの提供	○	-	○ (セキュリティ観点での連携)	-
地域(国内)、 国際連携	○⇒◎ エッジコンソーシアムによる国内外への普及展開	○	◎ (教育観点での連携)	-	-
権利関係の提供等の仕組み の整備 (IPの提供等)	◎ 研究開発成果を提供・販売可能なIoTストアの構築	-	-	-	◎ (ライセンス戦略)



②研究成果で期待される波及効果

GPS システム構築易化を実現するプラットフォームを完成させることでゲームチェンジをもたらす。

本研究成果がもたらす効果は、システム構築が、特別な開発スキル保有者だけの者でない、技術開発の民主化を起こすことにより、従来この技術を適用していた ICT を駆使するハイスpekクな産業のみならず、裾野の広い産業への適用が可能になることである。民間からの強い課題認識であり、本事業の中心的課題である「GPS 化が進まない」現状の解決を飛躍的に進める効果を期待している。図表 1-7 には研究成果で整備される環境と本 PJ の波及効果を示す。

このゲームチェンジを確実に起こす為には、上述したエッジプラットフォームの普及が必須であり、本事業では、エッジプラットフォームの研究開発に並走して、各事業者の普及活動と相乗効果を上げるために、コンソーシアムを設置して、各研究成果を一気通貫で束ねるエッジプラットフォーム技術の普及を推進し、研究成果の波及効果の最大化を図る。

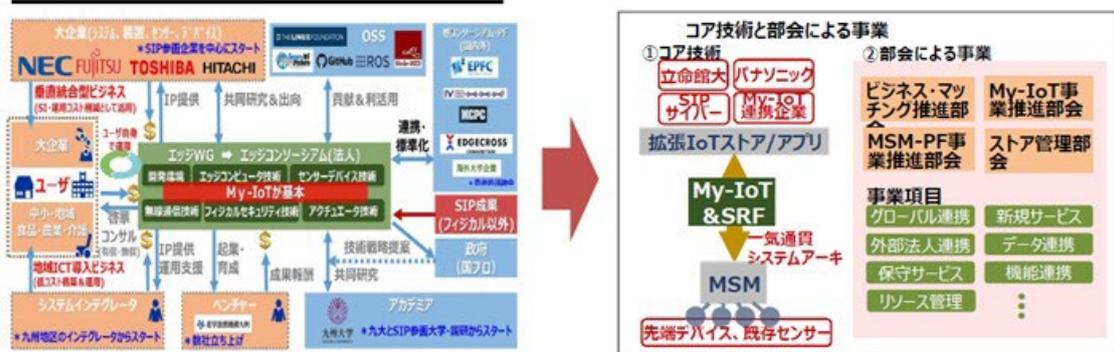


図表 1-7 本プロジェクトの目標と波及効果

SIP 2 期終了後の社会実装・取組状況として図表 1-8 に示す通り、今後エッジプラットフォームを国内外に普及していくコンソーシアムについては、2021 年 3 月に設立準備協議会を設立し、SIP フィジカル関係者及びその利活用の立場であるメーカーや世界標準化に向けた戦略的活動を実施する組織に係る有識者で議論を進めた。コンソーシアムの運営母体や検討 WG（技術開発、標準化、PF 連携、国際連携等）や活動・予算計画等を具体的に議論し、本事業終了後も継続するエッジプラットフォーム普及活動を担う運営組織を設立すること合意した。本コンソーシアムを単なる情報共有のコンソーシアムとせず、実ビジネスの展開にも対応できる一般社団法人として 2022 年 4 月に発足させた。こうして発足した「一般社団法人エッジプラットフォームコンソーシアム」（以下 EPFC）では、2022 年 12 月時点で会員数 56 に達し、課題研究を行うワーキンググループ等への参加会員総数 70 名に達している。中小企業含めた課題解決のためのエッジプラットフォーム利活用を、本事業で開発した開発プラットフォームである My-IoT、MSM-PF および POC を経たフードサービス等の成果を基に実現したエッジデバイスからネットワーク経由でクラウドサービスに至るまでの一気通貫システムでより具体的に進め、IoT 市場への着実な普及効果を狙っている。

エッジコンソーシアムの設立（2021年度中）

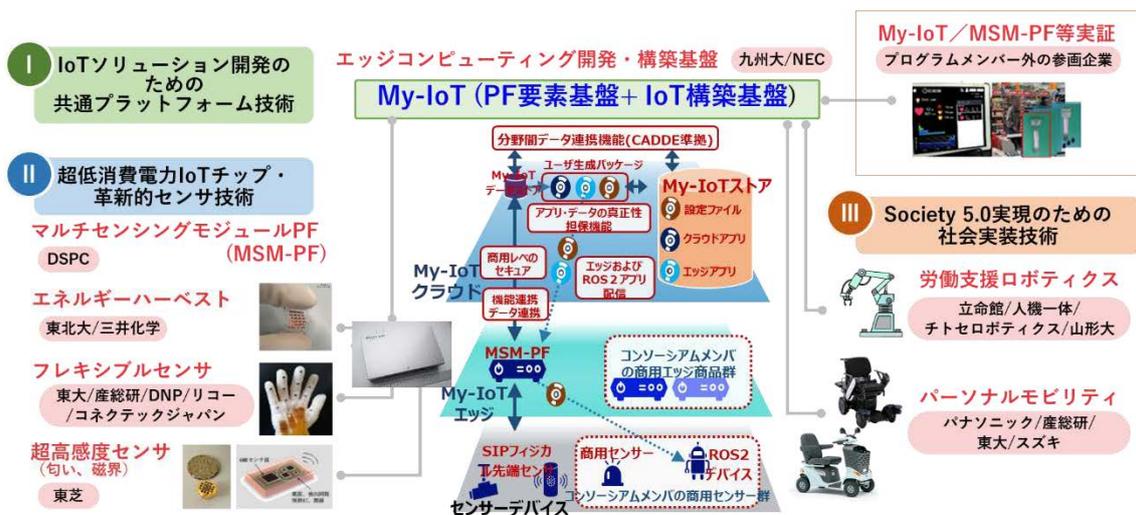
エッジコンソーシアムの活動（2022年度～）



図表 1-8 SIP 2 期終了後の社会実装・取組状況

③達成度（1）

本事業のゴールである日本のIoT普及率を90%（2028年）まで上げるべく、オープンで協調でき、開発参入の障壁を低くできるエッジプラットフォーム開発を完了した。図表 1-9 に示す通り、各サブテーマ I、II、III の技術統合を図り、センサデバイスから My-IoT エッジと My-IoT クラウドの My-IoT 基盤とロボット等のアプリケーション動作までの一気通貫動作検証を完了。エッジプラットフォームの構築は検証済の要素技術として整備された。アプリケーションによる動作検証により目標に掲げたユースケースの蓄積のみならず、利用者の参入障壁を下げる効果を発揮できるレベルに到達している。研究開発の成果内容は、第 2 章を参照されたい。これで、当初目指した民生分野の今後のIoTエッジ領域の開発プラットフォームの基盤が出来上がったことになる。



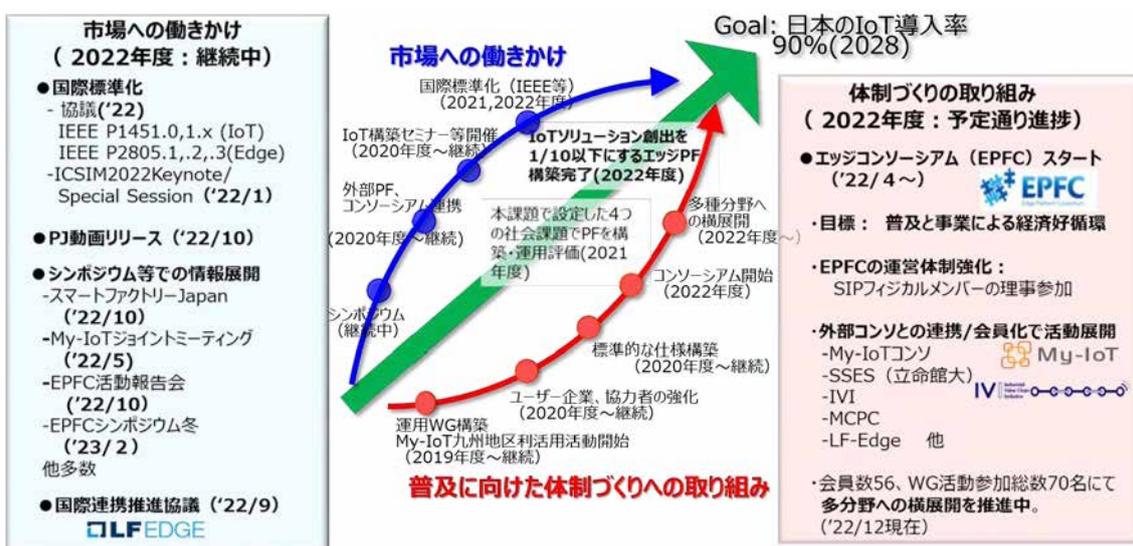
図表 1-9 本PJに於けるエッジプラットフォーム整備の全体像

④達成度（2）

本技術開発と共に、図表 1-10 に示す通り、最終ゴールに向かい普及率を上げていく社会実装の取組みを推進した。

2022 年 4 月に設立した EPFC は、SIP フィジカル事業と伴走する形で中小企業を含む業界に対する普及活動を開始した。運営体制では SIP フィジカルの普及ポリシーを確実に継承するため、SIP フィジカル事業の事業者、PD、サブ PD 及び戦略コーディネーターを EPFC の理事に迎え強化した。

また、広く今後の活動をプロモーションするため、Web やシンポジウム等での活動内容紹介、紹介ビデオの公開、ホワイトペーパー類の整備と共に会員募集活動を推進した。会員が持つ課題を共有し、ワーキンググループ（WG）にて実装の研究、試行の活動を開始している。

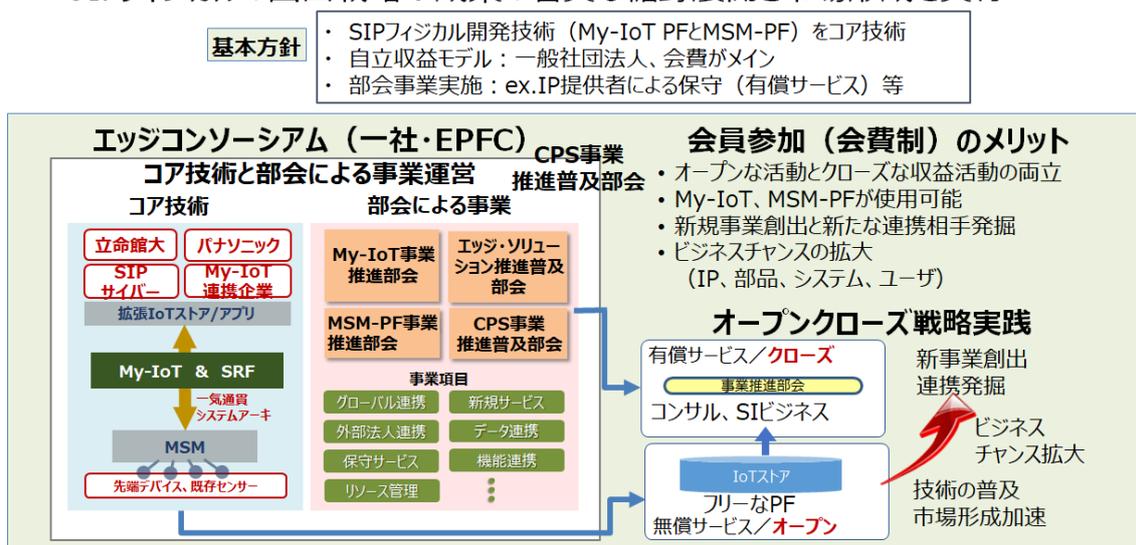


図表 1-10 SIP 2 期終了後を見据えた社会実装・取組状況

EPFC は、参加会員からのコンソーシアム会費での運営を行っている。一方で、エッジプラットフォームを活用した本格的ビジネスについては、事案ごとに WG で議論できるように、WG 参加費を別建て事業費として運営を開始した。WG 発の具体的なビジネスプランを立て垂れる様にルール化した。また、2022 年度は、「IoT パーク」と呼ぶエッジプラットフォームの全てのツールを配し、誰でも自由に試行活用できる環境の提供整備を開始。基本的な使い方からアプリケーションノートに至るまでの情報提供で、サービス事業者の事業開発の短期化を進めている。既に、複数の利用社が試作実施を開始しており、開発投資コストの低減から、確立しつつあるサービス事業の収益性向上には大きく貢献しているとの評価を得ている。当初の目標である IP の利用提供を行い、サービスビジネスモデルに沿って、利用者の実装サービス等による収益を得て、自立的に運営を達

成する確度を上げるレベルに到達している。更に、そのような収益性のあるビジネスの拡大による運営効果から目標である、CPS システムの裾野の広い展開を達成できると考えている。

SIPフィジカルの出口戦略：成果の着実な裾野展開と市場形成を実行



図表 1-11 SIP2 期終了後の社会実装取組状況： EPFC 設立（2022 年 4 月）

⑤知財戦略、国際標準化戦略、規制改革等の制度面の出口戦略

上述のエッジプラットフォームの普及戦略は、本事業の社会実装を国際競争の場への展開を念頭に置いているが、我が国発のプラットフォームが、堅牢な地位を獲得する為に必須である知財戦略、国際標準化戦略についても、EPFC で実行する重要な戦略として、外部環境の変化に合わせて、設定していくことになる。EPFC での普及戦略は、体制の中に、その機能を担う組織を設置し、適切に立案、実行を担っている

2022 年度は、EPFC 設立前より SIP フィジカル事業での戦略委員会との共同戦略整合したプラットフォームを活用する企業の IP の取り扱いについて、ライセンスビジネスの戦略の方式と組み合わせ、知財のオープン/クローズ戦略による収益化モデルへの展開を EPFC が推進した。

また、国際標準化に関しても、サブ PD の慶應大学西 宏章教授のリードの基、IEEEp1451. 1. 6、p28051. 1, 2, 3 等への提案活動を継続推進。国際標準化の領域に於いても、認知度を上げる活動を推進した。

一方で、経年通り、実証は法令遵守で、特区有効活用により実施。事業化加速

に向けパーソナルモビリティ：安全基準、エンドエフェクタ：品質準拠を実証推進。超小型モビリティの扱いについては、基準制定や改正法律案の議論に積極的に参画し、「特定自動配送ロボット」としての定義、道路交通法の一部を改正する法律案の可決により「遠隔操作型小型車」などの新しい分類が制定されるとともに、歩行者と同様の交通ルールが適用されるところまで法制度が進められた。また、労働支援ロボティクスはLinux FoundationのLF Edgeでユースケースを提案、議論している。この活動で「Akraïno Annual Awards 2021-2022 Blueprint of the year」を受賞した。

⑦成果の対外的発信、⑧国際的な取組・情報発信

2021年度も積極的に成果等の対外発信を行った。主な発表としては、スマートファクトリーJapan2022、My-IoT シンポジウム、立命館公開シンポジウムである。また、事業最終年度にあたり、これまで広く戦略を第三者の立場での指導支援を得ていた戦略委員会外部招聘委員を一同に集め、今後のエッジプラットフォーム展開の総括とEPFCの活動情報リリースを行うこととしている。その他プレスリリース、研究発表・講演 305 件等推進した。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(1) 研究テーマ：My-IoT 開発プラットフォームの研究開発

代表事業者：九州大学、日本電気

1) 研究内容

製造業といった一部の分野においては IoT 技術の導入により大幅な生産性向上を達成した事例が見られるものの、業界全体や地域の視点で俯瞰すれば、依然として IoT やデジタル化の普及率は低く、デジタル化やデータ利活用による地方創生を引き起こすまでの大きなブレークスルーを実現できていないのが実情である。

本研究では、特に IoT システムで顕著な「利用者の多様性」と「提供者の画一性」は常に存在し、この相反する状況を「ニーズ/シーズ間ギャップ（これを「IoT ギャップ」と呼ぶ）の存在」として定義した。

この「IoT ギャップ」の埋め方には2つのアプローチがあり、「提供者」の視点で SI 事業として埋めるという従来のアプローチに対して、「利用者」の視点でギャップを埋めていくための手法や取り組みが我が国においては不十分にあると考え、この解決のための取り組みとして、IoT システム構築の DIY (Do It Yourself) 化を実現可能とする IoT 開発プラットフォームの研究開発に加えて、普及・啓蒙などのインキュベーションや教育プログラムなどの IoT リテラシー向上のための体制づくりとしての My-IoT コンソーシアムの設立と運営を行っていく。

前者の研究技術開発における取り組みとしては「My-IoT プラットフォーム構想」を提案し研究開発を行う。IoT 開発者に発注せずとも利用者自ら習熟容易で簡易に導入可能な IoT システム設計・開発・運用を可能とすることで、開発コストの大幅な削減と IoT 導入の障壁を取り除く。また、プラットフォーム提供者だけでなく、プラットフォーム利用者自ら作った IoT システム構築に関するプログラム資産を登録できる「IoT ストア」整備を行う。

後者の体制づくりの点では、My-IoT コンソーシアムを 2021 年 4 月から活動開始しており、利用者が IoT システム開発上必要となるエッジアプリやクラウドアプリなどを再利用可能な形で利用できるだけでなく、エッジやセンサなどの商材やソフトウェアを有する企業が My-IoT 対応することで、自身のビジネスチャンスを広げられるとともに、現場のニーズ探索や将来の製品開発の参考となるだけでなく、従来の「売り手」と「買い手」という固定的な枠組みを超えた利用者・開発者共同参画型のシェアリングエコノミー構築の推進が可能となる。

これらの構想を実現すべく、仮想化システムアーキテクチャ（実施項目①）、次世代エッジコンピューティング（実施項目②）、環境適応型エッジアクチュエーション（実施項目③）、エッジプラットフォーム自動構築・開発環境（実施項目④）、容易に IoT の実証を可能とする実証先行型 DevOps IoT 構築技術（実施項目⑦）、SRF 無線 PF との相互技術補完による IoT 共通プラットフォーム化の加速（実施項目⑧）、分野間データ連携基盤との連携による IoT システムの高度化（実施項目⑨）、IoT プラットフォームにおけるトラスト機能強化（⑩）に関する研究開発を行う。また、ユースケースを想定した実証実験（実施項目⑤）を行うとともに、九州地方の企業を中心としたコミュニティを形成（実施項目⑥）し、研究成果の普及に努める。

2) 技術的目標

「My-IoT プラットフォーム構想」により IoT ギャップを解消し真の社会実装として IoT エコシステムを形成するため、利用者と開発者が繋がり、自律的に IoT システムが生成・深耕・定着していく技術と仕組みの研究開発を行う。本研究開発における事業終了時（2022 年度）時点での技術的目標それぞれ以下のとおりである。

2022 年度：2021 年度までの成果である My-IoT 開発 PF の将来の商用利用を目指し、ユーザ管理機能や各種異常系での対応実装、トラスト性、オープンデータ連携の機能を装備し、My-IoT ストアライブラリ拡充に加えて、MSM-PF と連携したエッジ PF の実現と事例化を目指す
また、各実施項目における目標は以下のとおりである。

図表 2-(1)-1 各実施項目における目標

	事業終了時点
実施項目①	社会実装（NEC での事業化）
実施項目②	実証実験でのフィードバックによる機能拡充完了
実施項目③	開発方式の自動走行ロボットへの適用・社会実装
実施項目④	実証実験でのフィードバックによる機能拡充完了
実施項目⑤	My-IoT 環境での第三者法人によるユースケース実証ならびに事業化
実施項目⑥	My-IoT コンソーシアムと EPFC 両輪でのインキュベーションと社会実装の分担と実施
実施項目⑦	商用手前レベルのプラットフォーム化を実現
実施項目⑧	SRF サービスマネージャの My-IoT 実装
実施項目⑨	実証ベースでの分野間データ連携確認
実施項目⑩	実証ベースでのトラスト性有効性確認

業でも IoT の恩恵が受けられるようになり、特に中小企業での IoT 普及により生産性向上、安心安全等の対策導入の障壁を下げる効果が期待でき、大きな社会貢献が期待できる。また、要素技術開発の観点では、世界初の仮想化ソフトウェアの開発や業界初の ROS 環境の拡張などで貢献が期待できる。そして、新製品・新機能の展開、市場創出の観点では、ユーザ・ワークグループメンバによる製品への応用や業界向けソリューション開発による同業他社へのソリューション展開など、新製品や市場創出に貢献が期待できる。実際、実用化を見据えた複数の実証実験が進行しており、その一部に関しては My-IoT コンソーシアムのホームページにて事例として公開している (<https://www.my-iot.jp>)。さらに、海外展開については PaaS 事業者とも連携可能な技術となっており、世界的 PaaS 事業者経由での海外普及が期待できる。

③達成度 (1)

研究開発計画および実施計画書で設定した目標および最終年度の実績は以下のとおりである。

<終了時の目標>

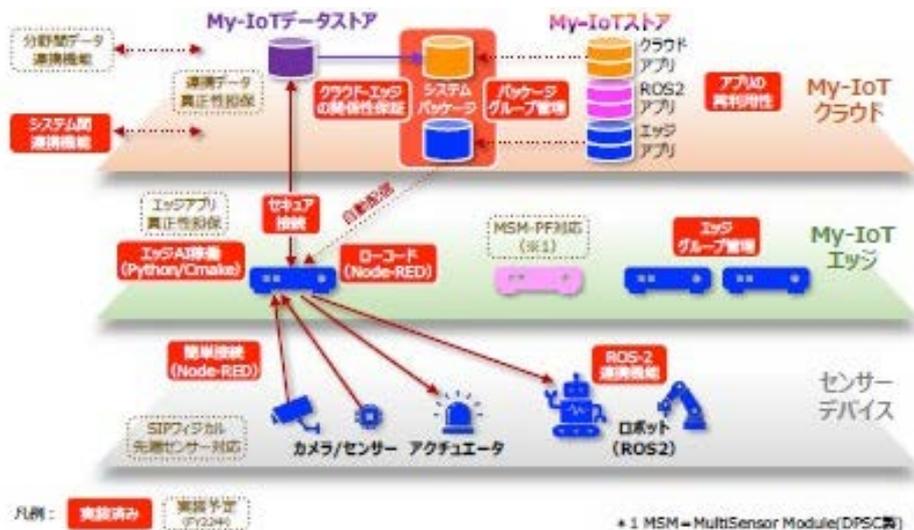
IoT システムの導入期間・費用を 1/10、開発期間・費用を 1/2 に削減する。

<最終年度の実績>

IoT システムの導入期間・費用を約 1/10、開発期間・費用を 1/5 に削減。

導入期間・費用に関しては 2021 年度に達成済み。開発期間・費用についても 2020 年度から開始した実施項目 7 DevOps 技術により達成。具体的には実施項目 7 で、利用者向けに物理的なデバイスの位置登録と設置と移動のみをすれば必要なシステムを選んでインストールが可能な仕組みを完成させる。開発者には敷居を下げるために通常のコーディングに加え各種部品をビジュアルプログラミング可能な環境を提供した。

以下に My-IoT 開発プラットフォームのシステム概要を示す。My-IoT 開発環境はクラウド上に構築し、ユーザや開発者はいずれも同じ環境にログインを行い、クラウドやエッジのアプリケーションの開発・利用・デリバリーと管理が同一環境で行うことが可能としている。My-IoT の基本的なアーキテクチャとしては、エッジアプリ、クラウドアプリ、My-IoT データストアの 3 つから構成される。エッジアプリでデータを My-IoT データストアに送信して蓄積し、クラウドアプリで My-IoT データストアに蓄積されたデータを利用して解析や各種処理を行うアーキテクチャとなる。作成したアプリは IoT ストアで管理が可能である。



図表 2-(1)-3 My-IoT 開発 PF の研究開発 システム概要

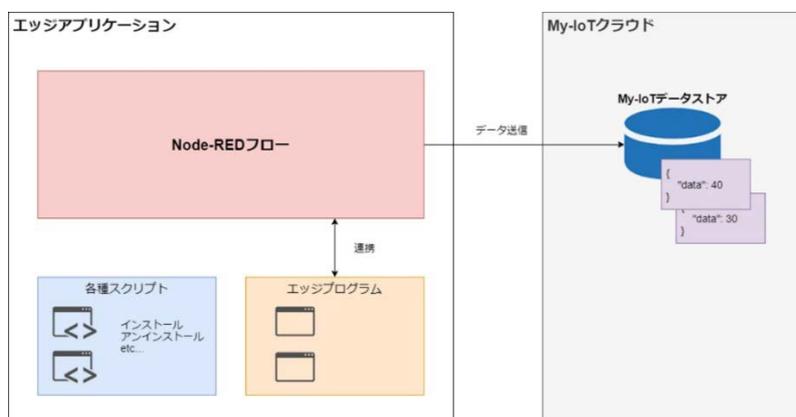
- IoT ストア

IoT ストアは、My-IoT で利用するアプリを格納した Web アプリケーションである。ブラウザでアクセスすることで、利用者は My-IoT エッジの管理や IoT システムの構築を行うことができる。開発者は、IoT ストアに公開されるアプリの登録や管理が実施する。

- エッジアプリケーション

エッジアプリケーション(エッジアプリ)とは、My-IoT エッジ上にインストールされ動作するアプリケーションである。エッジアプリは、Node-RED で構築された Node-RED フローと呼ばれるアプリケーションと、その他スクリプトなどのコンポーネントから構成される。

図表 2-(1)-4 エッジアプリケーションの内部構造



- エッジプログラム

Node-RED フローと同時にインストールすることのできるフロー以外のプログラムを示す。下記のプログラムをインストールして動作させられる。

- npm で配布されていない Node-RED のノード
- wheel 形式の Python プログラム
- CMake でビルド可能なプログラム

エッジプログラムと Node-RED フローを連携させて動作させることで、複雑な処理や既存のアプリケーションを利用することが可能となる。

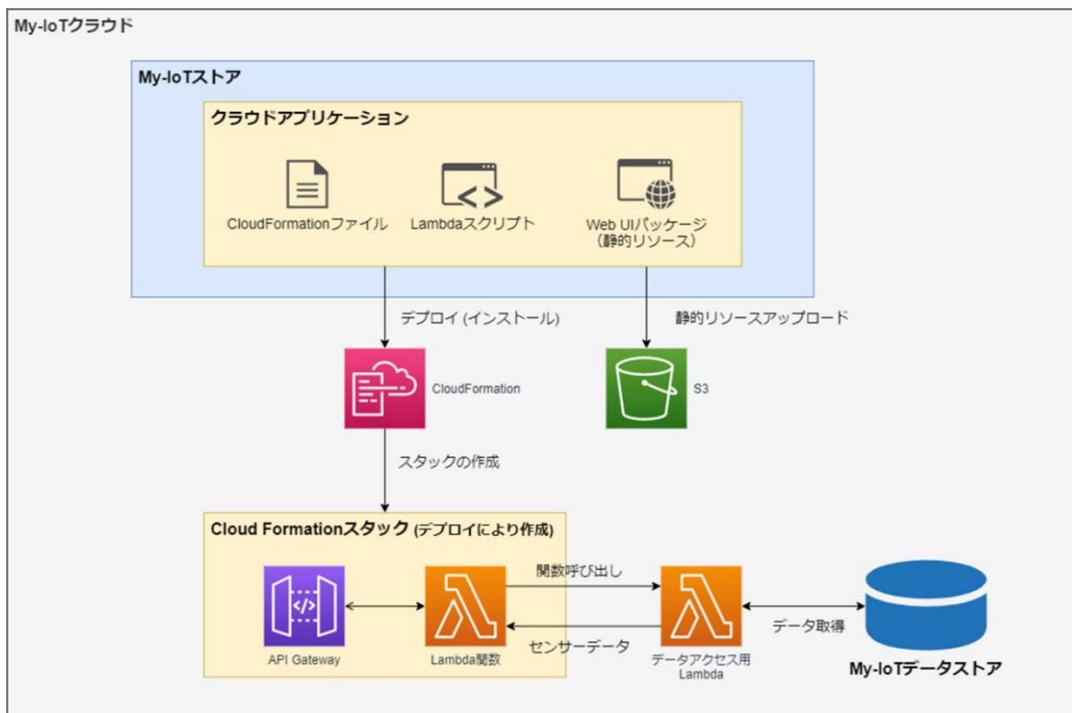
- クラウドアプリケーション

クラウドアプリケーション(クラウドアプリ)とは、My-IoT クラウド上にインストールされ動作するアプリケーションである。クラウドアプリは、My-IoT クラウドのバックエンドになっている AWS 上で動作し、CloudFormation ファイルと Lambda 関数スクリプトによって構成されている。クラウドアプリで利用できる AWS のサービスは下記の通りである。

- Lambda 関数のデプロイ
- Lambda から My-IoT データストアへのアクセス
- Lambda から IoT Core を利用した My-IoT エッジへのメッセージ送信
- API Gateway のデプロイ
- WebUI パッケージ (静的リソースファイル) のアップロード

クラウドアプリをインストールすると AWS CloudFormation によってデプロイが行われ、スタックとして API Gateway や Lambda 関数などのリソースが作成される。Web UI パッケージと呼ばれる Web アプリに必要な静的リソースがクラウドアプリに設定されていた場合は、同時に S3 へアップロードが行われ、外部からアクセスすることが可能となる。

デプロイした Lambda 関数からは、My-IoT データストアへのアクセス用 Lambda を介して蓄積されたデータへのアクセスや、My-IoT エッジへメッセージ送信される。イベント連携という仕組みを利用することで、クラウドアプリ間での連携もできる。



図表 2-(1)-5 クラウドアプリケーションの内部構造

④達成度（２）

社会実装の体制構築に関し、My-IoT PF ユーザワークグループの創設および活動を実行。2020年10月にはMy-IoT PF コンソーシアムを設立し活動を開始し、2022年10月時点では、参画法人が64法人に達するまでに活動が活性化している。また、本プロジェクト終了後の継続運用体制としてエッジプラットフォームコンソーシアム(EPFC)の設立および運営体制の構築を行い、2022年4月に計画通りEPFCの設立を完了させた。そしてユーザ・ワークグループメンバーを中心に18社によるPoCを含めた実際の評価により有効性を確認した。この有効性検証を通し、本プロジェクト終了後のEPFCでの継続運用に向けたフィードバック改善を行い、My-IoT 開発PFバージョン2を2022年10月にリリースした。

本研究開発ではさらに、従来の地域や中小企業主体の社会実装にとどまらず、大学における活用や社会人中心の教育プログラム開発など多岐にわたり実施した。コンソーシアムおよび大学講義などで実際に教育プログラムを実施し効果を確認でき、インキュベーションならびにビジネス創出視点でのIoTエコシステム確立・社会実装への可能性について確認できた。

⑤知財戦略、国際標準化戦略、規制改革等の制度面の出口戦略

知財戦略としては基本方針として OSS として GitHub 公開を行う予定。ただし、公開範囲としては「実行基盤」部分のソースとし、各事業者の基幹部分および My-IoT 開発 PF のコア部分となる「IoT ストア」「共通基盤」のソースコードは非公開とする予定。したがって、知財は主張しない予定だが、著作権は放棄しない。つまり、OSS の扱いと同じようにソースコードの改変などを実施する場合はライセンス条項に従って、その旨ソースコードに記載するなどの通常の権利を設定する予定である。

国際標準化戦略としては H/W 版 ExpEther についてはすでに PCI-SIG での認定を受けており、今後 SoftExpEther での国際標準化を進める。

規制改革については、2022 年 4 月に個人情報保護法が改正され、ヒト情報に関するデータの取り扱いとサービス創出にハードルがあがった。また欧州で GAIA-X と呼ばれる自動車業界におけるデータ連携と権利の取り組みが始まり、IoT 領域における影響が予想され、データ利活用における影響を注視していく必要がある。特区の設定や規制緩和などの整備と社会的認知への取り組みが必要であり、SIP 活動の取り組みの広報・国の支援をベースに、社会的な機運醸成を戦略委員会等で検討していく。ドローンなどアクチュエータに関しては複雑な飛行に関する規制があり、特例・特区・緩和などの規制改革が必要であると考えている。

⑥成果の対外的発信

My-IoT ジョイントミーティング&総会、CEATEC「My-IoT プロジェクト：IoT 版エコシステムを構築しよう!」、エコー電子フェアなどでの My-IoT コンソーシアム幹事長(井上教授)等の講演や My-IoT コンソーシアムによるビデオ制作、Web サイトやニュースレターによる通知を実施した。さらにスタートアップガイドと啓蒙書籍の発刊を予定している。

⑦国際的な取組・情報発信

海外での研究発表・国際論文など 23 件（2022 年 6 月時点）を実施した。さらにグローバル PaaS ベンダーとの連携等の海外普及に向け My-IoT コンソーシアムへの参加を打診し議論を継続している。

(2) 研究テーマ：ヒューマンインタラクションセンサデバイスシステム技術の開発

代表事業者：東京大学

1) 研究内容

本事業では、革新的センサとして、対象の認識識別と状態情報が同時一括入手できる3次元曲面シートセンサを開発し、それにより接触情報を活用した、モノ・ヒト管理、見守りのために情報取得システムを提供する。このための技術として、いかなる設置シーンにおいても接触情報の取得が可能となるよう、任意形状への変形性を有するシートセンサを開発する。この変形性のあるセンサシートを成形加工することによって3次元自由形状曲面センサを工業的に大量生産化できる技術を開発する。これらと同時に、データから低消費電力で無線伝送する駆動回路等、実用化するための技術を開発する。3次元センサをシステム化し、そこから取得した大量のデータを解析する手法を確立し、センサの実証実験を行って有用性を実証し、ビジネスに向けた実用化を目指す。

2) 技術的目標

【最終目標】 (2022年度末時点)

100kPaの荷重下で10kPaを検出するずり応力センサ等のセンサの高度化を実現し、24時間連続稼働する低消費電力回路、1万回の伸縮繰り返しに耐える伸縮電極の量産化製造技術、歩留まり90%以上の低温実装技術等の量産化技術を確立し、部材・デバイスの事業化を検討する。さらにマルチモーダルセンサで収集されたデータを利活用しサービスに繋げるための解析技術を完了させ、サービスの事業化検討を開始する。

3) 課題目標の達成度

要素技術の目標の達成度としては全てクリアし、一部目標値を大幅に超える成果を達成した。伸縮配線の耐久性は世界一であり、低消費電力周辺回路や低温実装は世界でも初めての試みであった。またフレキシブルな多点ずり応力センサは世界初であり、高IFの雑誌掲載や国際会議での基調講演、招待講演に招かれる等、学術的・技術的価値、国際的に高い評価を受けている。

①国際競争力

国内外では企業や研究機関が個別に伸縮配線技術やセンサ等のプロトタイプを作製している段階であり、センサ、部材、回路等が一体となった開発例が少ない。個別の課題をセンシングデバイス技術として統合し、それを用いたサービ

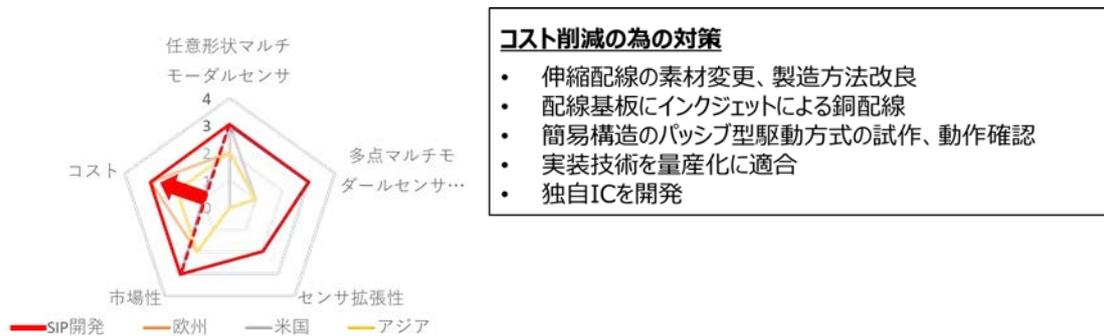
ス実証等を実施している機関はない。

本プロジェクトでは、1000 万回以上の高い耐久性を有する伸縮配線基板の製造技術と高精細性等、他者と比較して高いレベルの技術を開発済みである。日本を含む世界各国で伸縮性配線・センサ技術の開発は行われているものの、実用性に重要な耐久性、生産性を担保しているところはなく、本プロジェクトではそこを解決したところが強みである。さらに多点計測を行うための低消費電力な周辺回路や、それを実装するための高密度な低温実装技術は当チームのみ有していることから、これらの優位性の技術レベルの技術を垂直統合し、任意形状の多点マルチモーダルセンサとして、デバイス事業のみでなく、新しいサービスビジネスの市場を開拓、先導する。

グローバルベンチマークの結果として、欧米を中心とした取り組みは、高性能なデバイスは実現できないものの、既存の技術の延長線上の技術であることから本プロジェクトと比較してコスト的な強みがある。そこで2021年度からその弱みを克服すべく、製造プロセスの改良等、生産性向上や材料の低コスト化等の課題に取り組んだ結果、既存のFPC等の配線部材と同レベルのコストまで削減することに成功した。

図表 2-(2)-1

評価軸	研究開発			
	SIP開発内容	欧州	米国	アジア (日本含む)
任意形状多点マルチモーダルセンサ	◎ (高精細伸縮センサ)	○ (低精細、低伸縮)	◎	○ (低精細)
多点マルチモーダルセンサシステム	◎ (低消費電力多点センサ計測専用チップ)	△	△	△
センサ拡張性	○ (有：センサ種、部材)	× (無)	× (無)	× (無)
市場性	◎ (デバイス、部材、サービス市場：ソフトロボット、医療・介護、ヘルスケア)	○ (デバイス市場：ヘルスケア)	△ (デバイス、部材市場：バイオ、軍等)	○ (部材市場：ヘルスケア)
コスト(導入)	○ (本年度コスト削減検討)	◎ (既存技術の延長線)	× (製造技術検討無し)	○ (既存技術の改良)



図表 2-(2)-2

②研究成果で期待される波及効果

当事業にて開発している任意形状多点・マルチモーダルセンサは、従来の技術の代替ではなく、現行のセンシングシステムに新たに導入される新しい市場を創出できる。任意形状多点・マルチモーダルセンサを用いたサービスビジネスへの波及効果としては下記のような市場への参入が見込める。

- これまで人でしか実施できなかった食品（野菜、果物）などのピッキング動作による省人化
- 市場規模：柔軟物かつ不定形な対象物を把持する国内の食品ハンドリング用ロボット市場は1,432億円（2025年）
- 医療や介護業界における把持力のリアルタイム性向上や視覚化、数値化により、ストレスフリーでリハビリが可能な社会の実現
市場規模：製造、サービス分野のロボット市場予測は人口減少や高齢化などの期待感から約5.3兆円（2025年）であり、本プロジェクト成果を活用する事で様々な業界にタイムリーな技術提供が可能
- 触覚情報を基に、オフィスを含む多くのワークプレイスにおける業務の効率化・省力化のサポート及びサービスの実現
市場規模：スマートオフィスに関する市場は\$461億（2023年世界）
- 5Gやデジタル化に伴う入出力デバイスを用いた遠隔操作やAR/VRサービスの実現
市場規模：テレプレゼンスロボット市場は約220億円（2023年世界）
AR/VR市場は約10兆円（2025年世界）

デバイスの開発における各要素技術は、下記のような波及効果が期待される。

- 伸縮配線基板
当事業で開発するセンサ以外のウェアラブルデバイスへの適応

市場規模：ウェアラブルストレッチャブルデバイス国内市場 596 億円（2025 億円）

- 低温接合技術

5G、5G+の高速通信用途として、ミリ波、サブミリ波領域での誘電率や誘電損失が少ない有機基板材料上に従来のはんだ実装では困難であった低ひずみ精密実装を実現し、高速通信分野での市場を拡大

市場規模：ミリ波（24GHz 以上）の有機基板市場は 1,400 億円（2025 年）

- 低消費電源回路技術

CPS/IoT センサは年平均 10%増であり、これらセンサ用電源としての応用展開を図る。

市場規模：国内の CPS/IoT センサ市場として 3.8 兆円（2025 年）

③達成度（1）

ずり応力センサ及び様々なセンサに関する数値目標は全て達成した。具体的にはフレキシブルなずり応力としては、歩行中に足底にかかる圧力下(100kPa)で発生するずり応力 10kPa の計測を世界で初めて実現した。また圧力分布センサとしては、人の触感（痛点の分解能）の 0.1 mm 間隔以下を実現し、生活環境でかかる圧力範囲（虫などの表面接触異物の検出から車両等の生活重量物の重量）の範囲である 0.01N~10kN まで計測することに成功した。さらに電位計測としては、多点計測代表的な表面電位である心電の最小成分の 0.1mV の検出を実現し、温度分布計測としては、日常社会における生活温度範囲での温度検出である 20~80°Cで分解能 1°C 以下を達成した。発汗量としては、微量発汗として現れる精神性発汗量である 0.01mg/min/cm を達成した。また、複数のセンサを同一シート上に形成する技術を開発に成功した。

周辺回路の低消費電力化に関しては、当初の研究実施計画では、従来比で5分の1を目標としていたところを、最大で15分の1まで消費電力を削減することに成功した。さらに伸縮配線に関しては130%の伸長率で1万回以上の伸縮耐久性を目標としていたところを1000万回という大幅に目標値を超える成果を上げた。

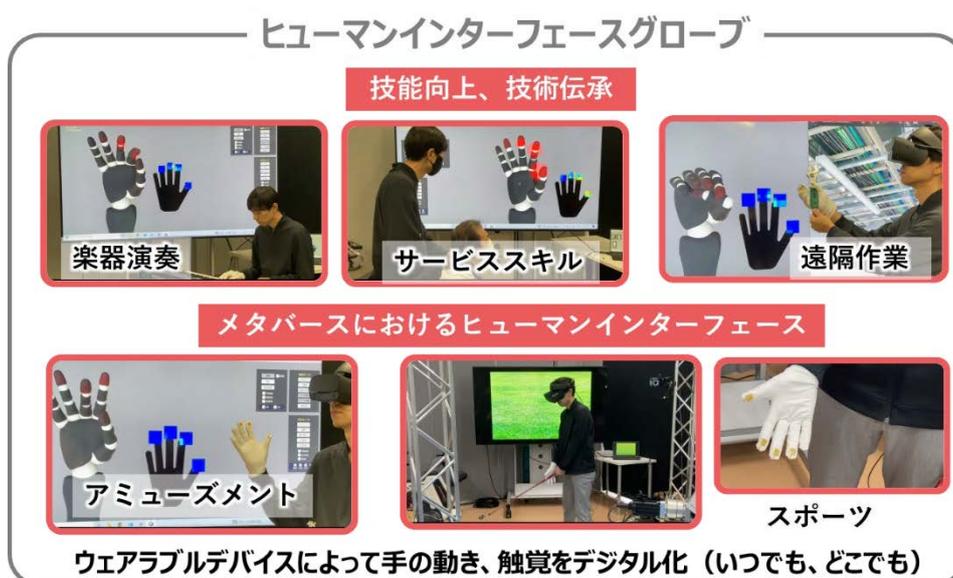
図表 2-(2)-3

2022年度目標の技術的数値目標と達成度		
ずり応力	100kPa下10kPaのずり応力分布 歩行中に足底にかかる圧力下で発生するずり応力	達成
圧力分布	分解能0.1mm以下の圧力分布 人の触感の最小分解能は、最小0.5mm～ 1.4mmmm間隔で配置される痛点	達成 (0.8mmくらいまでが ニーズに対して現実的)
	0.01N～10kN圧力分布 虫などの表面接触異物の検出から車両等の生活 重量物の重量検出可	達成
電位(筋電等)	電位0.1mV多点計測 代表的な表面電位である心電の最小成分P波が 検出	達成
温度	20～80℃分解能1℃以下 日常生活における生活温度範囲での温度検出	達成
発汗	0.01mg/min/cm ² 以下 微量発汗として現れる精神性発汗が検出	達成

④達成度（2）

最終年度において、これまでに開発した技術の産業展開を目指し、量産化技術
を確立し、センサデバイスを用いたサービス実証の検討を行ってきた。

本事業で開発している伸縮配線技術、多点・マルチモーダルセンサ技術、多点
センサ駆動用走査・信号一体型 IC、低ダメージ技術は、デバイス・部材のビジ
ネスとして個別に様々な製品形態や用途展開が見込めるため、各社において社
内事業部等との体制を構築し、各要素技術の事業化に向けて準備を進めている。



図表 2-(2)-4

一方で、市場及び周辺技術に関する動向調査を行った結果、それらの技術を統合した新しい任意形状の多点・マルチモーダルセンサに関しては、まだサービス事業が立ち上がっていないことが明白となった。そのため、本プロジェクト最終年度においては、そのようなサービスビジネスをゴールに設定している国家プロジェクトと連携し、そこに新規のセンサを提供しサービス実証を行うことで、新たなサービス市場の創出をサポートする取り組みを行った。また、これまで13回の展示会出展や、30社以上の個別の企業ヒアリング等を実施し、グローブ型のセンサがテレプレゼンスやメタバース等のヒューマンインターフェースとして潜在的なニーズと大きな市場があることが明らかとなったため、最終年度においては、触覚と指の動きを可視化できるグローブ型のデバイスのプロトタイプ試作を行い、ビジネスパートナーとの協業の準備を進めている。

⑤知財戦略、国際標準化戦略、規制改革等の制度面の出口戦略

知財戦略としては、個社のサービスに特化した知財に関してはクローズ戦略として秘匿し、デバイス製造に関する知財に関しては、バックグラウンド IP はオープン戦略としてコンソーシアムなどを通じて広く社会普及する。フォアグラウンド IP に関しては実施機関の製造事業や共同開発にて活用する。

国際標準化戦略に関しては、本研究開発における先進的な成果と、技術レベルの低いものとの差別化するために、ストレッチャブル配線の評価手法等についての ISO/IEC 国際規格発行まで導いた。

⑥成果の対外的発信

開発したデバイスの新規ユースケースと事業化パートナーを探索するために、本プロジェクト期間中に計14回の展示会出展と2回のプレスリリースを実施した。(今年度中にさらに1回の展示会出展とプレスリリースを予定)

図表 2-(2)-5

発表年月	プレスリリース	発表機関
R1年8月	幅広い温度分布を高精度に計測できるフレキシブルセンサーシートを開発	産総研
R2年10月	ソフトロボットハンドへ触覚付与	DNP、産総研、立命館大学
	展示会	
R1年6月	「伸縮耐久性を有するウェアラブル湿度センサ」、JASIS	産総研
R1年6月	「風速分布を可視化するフィルム状センサ」、JASIS	産総研
R2年1月	「任意形状触覚センサの開発と社会実装への取組み」他4件、interOpto/MEMS展	産総研
R2年10月	ソフトロボットハンドへ触覚付与、CEATEC (オンライン)	DNP、産総研
R2年12月	ソフトロボットハンドへ触覚付与、InterOpto展	リコー、産総研
R3年7月	大面積圧力センサによる人流計測、Society5.0 科学博	産総研
R3年10月	ソフトロボットハンドへ触覚付与、Smart Sensing展	リコー、産総研
R4年1月	コグニティブグローブ、ソフトロボットハンドへ触覚付与、MEMSセンシング&ネットワークシステム展	DNP、リコー、産総研
R4年5月	Smart Grove、Display week 2022	DNP
R4年6月	コグニティブグローブ、ソフトロボットハンドへ触覚付与、Smart Sensing2022	DNP、リコー、産総研
R4年10月	感圧・指角度検出スマートグローブ、ソフトロボットハンドへ触覚付与、スマートファクトリー-JAPAN2022 (予定)	DNP、リコー、産総研
R5年2月	感圧・指角度検出スマートグローブ、ソフトロボットハンドへ触覚付与、MEMSセンシング&ネットワークシステム展 (予定)	DNP、リコー、産総研

⑦ 国際的な取組・情報発信

本事業で開発したセンサに関して、2報 ADVANCED MATERIAL (I.F. 27.398) への報掲載や、国際会議にて13回の基調講演、招待講演を行うなど、国際的な成果の発信を実施した。

図表 2-(2)-6

発表年月	国際学会、ワークショップ	発表機関	備考
R1年8月	Skin Electronics Connecting Cyberspace to Human Body, IMID2019	東京大学	キーノート
R1年11月	Ultra-Flexible Organic Imager and Sensors, IDW '19	東京大学	招待講演
R1年11月	Smart Skins with Stretchable Electronics, ROBOTAC2019	東京大学	招待講演
R2年1月	ELECTRONIC SKINS FOR ROBOTICS AND WEARABLES, IEEE MEMS 2020	東京大学	基調講演
R2年1月	Skin Electronics for Continuous Health Monitoring, ASP-DAC 2020	東京大学	キーノート
R2年2月	Conformal Thin-Film Electronics, 2020 International Solid-State Circuits Conference	東京大学	招待講演
R2年9月	A PDMS-TiO ₂ Composite Anti-Reflection Film for Enhanced Efficiency in Organic Photovoltaic, SSDM	東京大学	
R3年4月	Electronic Skins for Robotics and Wearables, VLSI 2021	東京大学	キーノート
R3年4月	Conformable imager for biometric data measurement", 2021 KPS Spring Meeting	東京大学	招待講演
R3年5月	Electronic skins for medical and sports applications, Distinguished Medical Engineering Seminar	東京大学	
R3年5月	Sheet-Type Image Sensor with Near Infrared Sensitive Organic Photodiode, 2021 SID (The Society for Information Display)	東京大学	招待講演
R3年9月	Current trend and Activity of Japanese FPE industry (OE-A FIoT Joint Meeting)	産総研	招待講演
R3年9月	Novel 3D Forming Method to Shape Electrical Circuits by Post-process without Corruption(The International Conference on Flexible and Printed Electronics 2021)	産総研	招待講演
R3年9月	Feasibility Study on Vocal Command Recognition using a Face-Mask with Printed Strain Gauge toward Silent Speech Interaction(The International Conference on Flexible and Printed Electronics 2021)	産総研	招待講演
R3年9月	Hand grip detection trial based on skin deformation measuring by flexible strain sensors(The International Conference on Flexible and Printed Electronics 2021)	産総研	招待講演
R3年9月	Electronic skins for robotics and wearables, The International Conference on Flexible & Printed Optoelectronic Materials and Devices (ICFPE) 2021	東京大学	

論文		
R1年7月	Polymeric thermal actuator with a screen-printed heating element embedded in a bilayer structure, JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 58, 088002, pp.1-4	産総研 IF: 1.480
R1年10月	Stretchable, Printable, and Tunable PDMS-CaCl ₂ Microcomposite for Capacitive Humidity Sensors on Textiles, SENSORS AND ACTUATORS B-CHEMICAL, 297-15, pp.126711	産総研 IF: 7.29
R2年2月	Development of a Strain Sensor Matrix on Mobilized Flexible Substrate for the Imaging of Wind Pressure Distribution, Micromachines, 11, 232, pp.1-8	産総研 IF: 2.891
R1年10月	A Highly Responsive Organic Image Sensor Based on a Two-Terminal Organic Photodetector with Photomultiplication, Advanced Materials 31, 1903687	東京大学 IF: 27.398
R3年5月	Recent Progress of Flexible Image Sensors for Biomedical Applications, Advanced Materials 33, 2004416	東京大学 IF: 27.398
R3年10月	DATSURYOKU sensor: a capacitive-sensor-based belt for predicting muscle tension, Sensors,21(19), pp.6669-1-15.	産総研 IF: 3.576

(3) 研究テーマ：常温発電 IoT 環境センサの研究開発

代表事業者：東北大学、三井化学

1) 研究内容

本研究では、環境の温度変化を利用して発電する新しい常温環境発電を実現し、低消費電力 IoT センサとの組み合わせで無給電・自立センサシステムを実証し、常温発電システムの実用化に向けた研究開発を行う。また、スマート IoT 環境センサを新たに開発し、自立センサ技術とのハイブリッド化によりスマート運輸への応用を実証する。

本研究で開発する常温発電は、マイクロ熱電素子と蓄熱材を組み合わせた構造を持つ。蓄熱材は周囲から熱を吸熱、あるいは放熱して相変化温度近傍の温度を維持しようとするので、環境の温度変化により蓄熱材と周囲の雰囲気との間に温度差が生じ、これを高性能のマイクロ熱電素子を用いて熱電発電する。蓄熱材は既存の相変化材料にナノ材料を混合し、所望の動作温度や蓄熱量、熱の取り込み速度を制御する。発電した電気エネルギーはマイクロ蓄電器に蓄えて必要な時だけ利用する。本素子は、原理的に熱源を必要とせず、センサの無給電化を可能とし、自立センシングシステムを実現する。温度変化を与えたときの発電量は、蓄熱材料の体積に比例するため、各種の体積をもつパームトップサイズの常温発電システムを開発した。

熱電素子の出力電圧はごくわずかであり、マイクロ蓄電器に効率よく蓄えるためには電圧を増幅する必要がある。このため、低電圧の熱電出力を高効率に増幅する DC-DC コンバーターを開発した。また、蓄電池にエネルギーを蓄えたり、マイクロ蓄電器のエネルギーをセンサに供給したりするのを制御する、パワーマネジメント回路を開発した。また、マイクロ蓄電器としては、大きな容量をもつスーパーキャパシタを開発した。

本研究では、機能性ポリマーがガスを吸着した際にその応力が変化することを利用し、超低消費電力・高感度に微量ガスを検出するナノメカニカル式のスマート IoT 環境センサを開発した。このセンサでは複数の機能性ポリマーを用い、それぞれの出力パターンから対象ガスや溶液の成分を推定する。

また、各種のセンサが取り付けられる低消費電力の遠距離通信システム、同様に各種のセンサが取り付け可能な BLE (Bluetooth Low Energy) センサシステムを開発した。

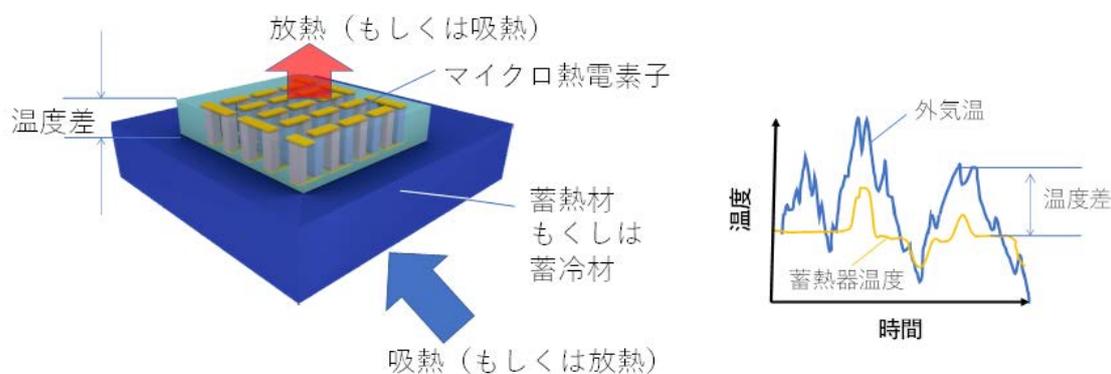
スマート IoT 環境センサを用いて、各種の実証試験を行った。実証のフィールドとしてはスマート物流をターゲットとし、物流における CO₂ 削減のため冷凍機を用いずに、長時間低温に維持できる保冷材で個々の生鮮食品を低温に維持する方法をターゲットとした。常温発電システムを利用し、外気温度の変化を発

電してコールドチェーンにおいても動作できるスマート IoT 環境センサを開発し、ビジネスモデルに適応した動作を検証した。生鮮食品の温度、湿度、鮮度をスマート IoT 環境センサでモニタリングできることを示した。また、漏水検知や、モータの異常検知などのインフラモニタリングにおいて実証を行った。

2) 技術的目標

まず、はじめに、技術について概説する。開発した常温発電システムは全く新しい環境発電の一種であり、世界に先駆けて実用化に目途が立った。

常温発電システムはマイクロ熱電素子と蓄熱材（もしくは蓄冷材）からなる蓄熱素子を組み合わせた構造を持つ（図 1）。蓄熱材は周囲の熱を蓄熱（もしくは周囲に熱を放熱）して一定温度を維持しようとするので、蓄熱材と周辺の雰囲気との間に温度差が生じ、この温度差を利用して高性能のマイクロ熱電素子を用いて熱電発電する。蓄熱材は独自の物質設計により配合し、所望の動作温度や蓄熱量、熱の取り込み速度を制御する。熱伝導が低すぎると、熱が素子の内部まで伝達せずに、蓄熱性能が低下する。このため、熱の取り込み速度は、高熱伝導度材料を添加して制御した。高熱伝導材料の添加により、蓄熱材へと外界との熱応答性を変化させて最適化することで、発電性能を向上させる。



図表 2-(3)-1 常温発電素子の概念図

常温発電システムを用いても、全く環境の温度変化が無い場合などがあれば、発電できない。つまり、常時発電することは困難なので、小型のマイクロ蓄電器（MSC: マイクロスーパーキャパシター）に電気エネルギーを蓄えて必要な時だけ利用する。このためのマイクロ蓄電器の開発も同時に行った。常温発電システムは、原理的に熱源を必要とせず、センサの無給電化を可能とすることができる。

常温発電システムは、汎用的な仕様にして、広く多くの企業に利用してもらえようようなモジュール構造とした。エッジプラットフォームと連携して常温発電

システムの社会実装の検証を進めた。

本研究では、IoT 環境センサ等を同時に開発した。各種センサを常温発電システムで動作させ、実証試験を進めた。実証のフィールドとしてはスマート物流をターゲットとし、前述した生鮮食品の温度、湿度、鮮度、成分変化を IoT 環境センサでモニタリングし、これらの情報を顧客に提供できるようなシステムとしての実証を行った。

課題の技術的目標を表 2-1 にまとめた。なお、技術的な目標に関してはすべてクリアしている。

図表 2-(3)-2

No	実施項目	担当	事業終了時目標（2022年度末）
1	常温発電システム	東北大学	(モジュール仕様) ・出力：20mW (MAX) ・電圧：1～3V ・熱電デバイス：素子サイズ1.5×1.5cm ² 、出力電力：90 μW/K ・キャパシタ：容量500mF/cm ² 以上 ・発電目標：温度変化幅11度で出力電圧2.5～3.3V/平均出力50 μWを実現するパームトップサイズ
2	スマートIoT環境センサ	三井化学	(センサ仕様) ・環境分子認識感度：ppm以下 ・新アルゴリズムにより環境判定 ・センサ消費電力：10mW以下 ・複数センサ数による多成分分析
3	スマート物流への応用	東北大学、アイ・ティ・イー	社会実装のためのビジネスモデルを構築
4	漏水検知センサデバイスの開発	東北大学	(センサ仕様) ・通信仕様：LoRa ・待機電力：2～4μW ・センサ方式：マイクロフォン ・センシング時消費電力：100 μW (マイクロフォン) ・データ送信頻度：1日1回 10mW×0.25s

3) 課題目標の達成度

①国際競争力

■常温発電技術の国際競争力

「常温での熱発電」及び「温度変化でも発電」という2つの特徴をもつ常温発電システムについて研究開発を進めている。常温発電システムは本研究のオリジナルな研究であり、比較対象がないため、常温発電システムのために開発した熱電デバイスの性能について他社製品との比較をおこなった。他社より提供さ

れている熱電デバイスに上記の特徴を示すような類似品がないが、その中で比較可能と思われる K 社（国内）と KT 社（ロシア）から提供されている熱電デバイスを選択した。

K 社の製品については、発電用として市販されている熱電デバイスの常温付近でのデータは公表されていないことから、実際のデバイス进行评估し、同じ大きさ 15mm 角相当に換算して比較した。また KT 社の製品については、HP で公表されている値から、室温近傍での値を外挿して比較を行った。また、中国 X 社の製品については HP による資料を参考にし、実際に実測して評価した。

評価軸として①低温（常温付近）での発電性能、②低温での出力電圧、③温度揺らぎ発電対応、④量産性、⑤コストの 5 項目である。低温での発電性能として、開発した熱電デバイスは $110\mu\text{W}/\text{cm}^2\text{K}$ を達成しており、世界最高性能を得ているほか、量産性・スケラビリティもあり、コストの観点からも有利である。また、温度揺らぎで発電できる熱電デバイスは世界で他に例がない。

一方、キャパシタに効率よく蓄電するためには、電圧出力も大きい必要があり、本研究の試作品の方が優れている。温度揺らぎで発電できる発電量は、本研究成果によるものが、他社より 2 倍の発電量を示した。量産性については、他社製品はバルク焼結とバルク材切り出し、組み立てにより作製されており、本研究のめっきの方が大量生産には適していると判断した。また、コストについても、原材料コストだけを考えると、本研究で開発した熱電デバイスの競争力は高い。

■スマート環境センサの国際競争力

多項目ガス群の検知および MEMS（いわゆる E-nose）の観点から、現状および将来目標値と他社製品の比較を行った。多項目ガス群の検知方式が異なっても、目的が類似している技術を中心にまとめた。比較する際には、検知対象物質や感度だけではなく、ガス分離精度やデータ解析のための計算量、消費電力および解析フィードバックまでに要する時間など、センサモジュールトータルで考える必要がある。ベンチマーク対象の公開情報の最新状況の確認とともに、展示会・セミナーにも参加して開発ステージを確認するよう努めた。

本研究のスマート IoT 環境センサは、ベンチマーク対象と比べると後発である。しかし、調査を進めると、特に E-nose に位置づけられる対象の殆どが開発品販売であったり、実験用モジュール・センサ販売であったりすることが判明した。それらは実証実験の域から出ておらず、社会実装における課題があると予想される。この課題は、現場において計測対象が拡散する環境においても精度良く定性定量する『フリーハンド測定*』が困難であることに由来すると考えられる。上記課題も踏まえ、検知ガス種・ガス分離性は「開放環境における」という要件を追加した。実使用環境でセンサが設計通りの性能を発揮する

かは社会実装において重要であるが、それらについて言及している競合技術は殆どないのが現状である。感応膜設計技術を有する本研究は、開発が進むにつれて性能（検知ガス種・耐湿度・ガス分離性・感度）が向上すると考えられる。また、消費電力については、センサ自身の消費電力のほか、センシングデータの解析・演算・通信に使われる電力等、モジュールとして総合的に判断する必要があるが、電力は常温発電技術で補うほか、ガス応答ライブラリを使用することで解析データポイントが絞られ計算量が小さくできている。したがって、本研究のスマート IoT 環境センサは他社製品と同様に実証試験段階であるが、開発が進むにつれて、上述した性能および消費電力の観点から優位に立つと考えている。

(*Imamura G, et al. Scientific Reports (2019))

②研究成果で期待される波及効果

IoT センサは物理空間と情報空間を結ぶ、末端のデバイスであり、今後様々なシーンで、膨大な数のセンサが利用されるトリリオン社会が到来すると言われている。IoT センサは、Society 5.0 の中でも中核をなすコア技術であり、少子・高齢社会、労働生産性の向上、インフラ老朽化、福祉医療費削減問題など、様々な社会課題の解決のためにより先進的な末端デバイスが必要とされている。一方、様々なシーンで大量のセンサが使われる社会では、個々のセンサの電源が大きな問題となる。理想的には電池の交換が不要で、自己発電してセンサを動作し、情報空間との連結が可能なシステムが必要とされる。本研究の成果は上記センサの電源問題を解決し、フィジカルセキュリティ、インフラモニタ、物流などの広い分野において波及効果がある。

③達成度（1） 設定目標に対する達成度について

本年度（2022 年度）末に設定した達成目標に対して、技術的、応用展開に関する達成度は、以下の4項目に分類した。すべての項目で目標を達成した。

- 1) 常温熱発電素子・・・すべての技術項目で達成度 100%
- 2) スマート IoT 環境センサ・・・すべての技術項目で達成度 100%
ビジネスモデルを構築し、実用化に向けた取り組みを進めている。
- 3) スマート物流への応用・・・すべての技術項目で達成度 100%
さらに、ビジネスモデルを構築し、実用化に向けた取り組みも進んである。
- 4) 漏水検知センサデバイスの開発・・・すべての技術項目で達成度 100%

④達成度（2） 社会実装の実現可能性について

本研究で行うコールドチェーンにおける実証試験についてはアイ・ティ・イー（株）がコールドチェーン事業への展開を進めている。また三井化学が進めている環境識別センサの事業化についても、参加メンバーが連携し、それぞれの領域で事業検討している。東北大学も技術ライセンス、技術開発支援等の領域で参加する。

コールドチェーン向け環境センサ事業の SWOT 分析を行い、対応すべき脅威や弱みを明確にした（表 2）。エレキ技術や実装技術及び信頼性技術の取り込みと本研究の成果を活かした新分野への展開が対応すべき事項である。三井化学は自社材料を用いたセンサシステム事業で他社との事業コラボの実績があり、本事業の検討においても参考にする。

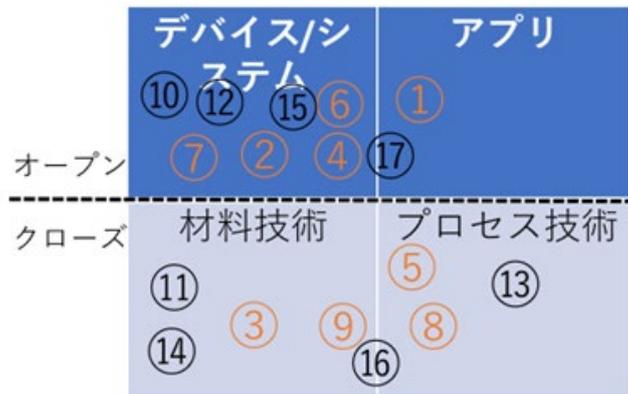
図表 2-(3)-3 事業の SWOT 分析

	プラス面	マイナス面
内部要因	強み(Strengths)	弱み(Weaknesses)
	<ul style="list-style-type: none"> ・ユニークな動作原理による常温発電システム ->材料技術、プロセス技術 感応膜創製技術を応用 ->高湿度に耐えるセンサ材料 MEMS、センサのネットワーク 	<ul style="list-style-type: none"> ・コア技術以外の技術開発 ->エレキ、実装、信頼性技術が不足 ・事業計画 ->新分野での事業開発が未着手
外部要因	機会(Opportunities)	脅威(Threats)
	<ul style="list-style-type: none"> ・フードロス低減、省エネ、労働力不足 ->多温度・混載コールドチェーン化 安全・安心の提供 ->「温度管理」から「温度・鮮度管理」へ ・コールドチェーンシステムの海外展開 ->電気の無い環境でのコールドチェーン 	<ul style="list-style-type: none"> ・長寿命バッテリーや他のエナジーハーベスタ技術 ・他のセンサによる代替可能性

⑤ 知財戦略、国際標準化戦略、規制改革等の制度面の出口戦略

本研究の知財（特許）として、17 件出願（一部権利化済み）している。図 4 に示すように、これらの知財は、1) デバイス/システム（6 件）、2) アプリケーション（2 件）、3) 材料技術（5 件）、4) プロセス技術（4 件）の分野にわたっているので、パテントポートフォリオを形成している。

知財戦略として、これらパテントポートフォリオの内、1) デバイス/システムと 2) アプリケーションの知財は研究成果の普及の促進やデファクトの獲得のために積極的にライセンス供与を行っていく（オープン）。一方で 3) 材料、4) プロセス技術に係る特許は、基本特許として他の分野への展開の可能性があるので、他にライセンスしない選択（クローズ）もある。上記を「オープンクローズ戦略」として進めていく。



図表 2-(3)-4 パテントポートフォリオ

⑥ 成果の対外的発信

2018～2021年10月末までに以下のような成果の対外的発信を行った。

- ・ 論文発表（査読付き学術雑誌） 38 件
- ・ 国内・国際会議発表 37 件
- ・ 招待講演 19 件（国内外）
- ・ 展示会発表 10 件
- ・ プレスリリース 2 件（ナノチャンネル発電、常温発電）
- ・ 新聞掲載 4 件（日経産業新聞、電気新聞、電子デバイス産業新聞）
- ・ メディア掲載 10 件（EE times Japan、日本経済新聞、Yahoo ニュース、オプトロニクスオンライン、PC watch 等）

⑦ 国際的な取組・情報発信

2018～2022年11月末までに以下のような国際的な取組・情報発信を行った。

- ・ 海外の学術論文発表 38 件
- ・ 国際会議発表 27 件（IEEE MEMS 2020、Transducers 2021、IEEE MEMS 2022 など、内 6 件が招待講演）
- ・ 国際ワークショップ 5 件
 1. 2nd Joint Workshop on Sensor Network between Tohoku Univ. and NCTU (2019. 8. 23 東北大学)
 2. 1st workshop on Micro/Nano Systems and Their applications (2019. 11. 5 VNUHCM–University ベトナム ホーチミン)
 3. 3rd workshop on Micro/Nano Systems and Their applications (2022. 11. 25 VNUHCM–University ベトナム ホーチミン)、他
- ・ 国際会議の招待講演 15 件
- ・ 海外展示会 2 件

(4) 研究テーマ：超高感度センサシステムの研究開発

代表事業者：東芝、デバイス&システム・プラットフォーム開発センター

1) 研究内容

Society5.0の実現に向けたIoTシステムを構築するためには、AIを使用したセンサフュージョンにより高信頼(セキュア)かつ高度な認識・判断が不可欠である。しかし、多種多様なセンサを搭載したマルチセンシングモジュール(MSM)はカスタム開発のコストや労力が大きく、普及の妨げとなっている。そのため、複数センサと制御回路とを一体化したMSMを容易に実現可能なプラットフォーム(MSM-PF)を構築する。本プラットフォーム化により開発コスト1/5と開発期間1/10を達成し、中小企業やベンチャー企業でもセンサフュージョンに基づくIoTシステムを容易に活用できるようになる。センサ端末開発者やIoTシステム構築者へのヒアリングを通して得た、センサフュージョンやエッジAI処理、エネルギーハーベスタ駆動、超高感度センサといった機能搭載の需要を元に、各機能に対する研究開発を推進する。超高感度センサはIoTシステムを設置する種々のフィジカル空間から良質なデータを収集・加工・分析できることを目指し、本テーマにて革新的な検出原理を利用した、リアルタイム性、制御性、低消費電力を両立できるシステムを開発し検証を行う。また、構築したMSM-PFを用いて本プログラムの他事業者との連携を進め、本プログラムが推進するエッジプラットフォーム像の実証を進める。さらに、エッジプラットフォームコンソーシアム(EPFCS)を母体とした新しいコンソーシアム(名称は引き続き「エッジプラットフォームコンソーシアム」)を設立し、MSM-PFの普及推進と事業化体制の構築を進める。

2) 技術的目標

複数センサと制御回路を一体化したマルチセンシングモジュール(MSM)を容易に実現可能なプラットフォームを構築する。リファレンスモデルとして松、竹、梅モデルを開発、これをベースに事業化、実用化を意識したMSM-PFを完成させ、エッジ端末企業と事業化戦略を策定する。必要に応じて、それぞれのユースケースに向けたエッジAIモデルやクラウドシステムの開発を実施する。エッジAI処理ではオートエンコーダやニューラルネットワークなどのような高度なAIアルゴリズムを用いたマルチパラメータのセンサフュージョンを構築する。これらを備えたプロトタイプMSM-PFを活用し、回転機器、輪転機、分電盤などいくつかのユースケースを想定した社会実証実験を実施し、MSM-PFの有用性を確認する。また、MSM-PFリファレンスモデルを使用し、ユースケースを想定した社会実証実験を実施し、リアルタイム性、制御性、低消費電力を両立できるシステ

ムを構築、本プログラムの他事業者とも連携を進める。その他事業者との連携では、My-IoT/MSMなどのクラウドシステムと連携したエッジプラットフォームとしてのエコシステムを事業・商用向けに構築すると共に、テーマ間連携、SIP間連携の中でロボティクス、モビリティ、ヒューマンインタラクション等社会実装事業でのMSM-PFを普及させエナジーハーベスタ、フレキシブルセンサ等とMSM-PFの接続、モジュールの完成度を向上する。さらに、普及促進するこのエッジプラットフォームがあらゆる物理現象をセンシングするプラットフォームとするための超高感度センサを開発する。センサの開発では当初の開発目標の素子性能の達成と共にシステムとしての性能実証を行う。磁界センサでは市販小型磁界センサに対し、感度100倍、素子サイズ1/10の素子性能を達成し、磁場顕微鏡システムを用いた充電電流磁界像検出で市販センサと比較し高性能であることを実証する。匂いセンサでも、市販匂いセンサに対し、感度10倍と選択比10倍、素子消費電力1/10の素子性能を達成し、検疫検査装置を組み立てて性能を実証する。

3) 課題目標の達成度

MSM-PF開発における設定した終了時成果に対する達成度を図2-(4)-1に示す。MSM松、MSM竹、MSM梅のリファレンスモデルの開発を完了するとともに、各プラットフォーム仕様を整備し、SIPフィジカル事業終了後の商用化に向けてエッジ端末企業との協議を開始した。社会実装実験は目標通り10例以上を完了し、高度なマルチモーダルAI解析による予知保全システムの有用性を実証した。またMSM内エッジAI処理開発ではエッジAI処理による実証実験に成功し、各種AIモデルのラインアップを揃えた。また最終目標とする開発コスト1/5、開発期間1/10の目標は社会実証実験を通して達成可能であることを確認した。

図表 2-(4)-1 MSM-PF の設定目標に対する達成度

	研究開発目標(最終ゴール)	成果	達成度
1	MSM-PFの開発と整備 複数センサを誰でも簡単に取り扱え社会実装が可能なマルチセンシングモジュールプラットフォーム(MSM-PF)として3リファレンスモデル松、竹、梅を開発し、各エッジ端末企業と事業化戦略を策定	<ul style="list-style-type: none"> 商用レベルのリファレンスモデル松竹梅が完成し各種実証実験へ適用 代表事例に関するアプリケーションノートを作成し公開した 各モデルの仕様、マニュアルなどドキュメンテーションを整備し公開 23年度以降の事業化に向けてエッジ端末企業との協議を開始 	100%
2	実証実験によるMSM-PFの有用性確認 MSM-PFを活用し、様々なユースケースを想定した社会実証実験を実施することによりMSM-PFの有用性を確認	<ul style="list-style-type: none"> MSM-PFエッジ端末とクラウド機能がシームレスに連携したシステムを使った社会実証実験を10例以上実施 新規開発の高性能センサ(磁界、におい)利用の実証実験を実施し有用性確認 MSM-PFの普及促進を図るため、実証実験の説明、導入メリットを解説したプロモーションビデオを作成し、展示会での放映およびホームページに公開 	100%
3	MSM内エッジAI処理の開発 オートエンコーダー、ニューラルネットワークなど高度なアルゴリズムによるマルチモーダル・エッジAI処理をMSM-PFに実装し、実証実験で有用性確認	<ul style="list-style-type: none"> エッジ端末にAI推論プログラムをクラウドから配信、およびエッジ端末でAI推論した結果をクラウドへ転送し可視化、判断できる機能を開発し実装 変分オートエンコーダー法(VAE)、畳込みニューラルネットワーク法(CNN)によるマルチモーダルAI解析アルゴリズムを実証実験5事例に適用し有用性確認 	100%
4	開発コスト1/5、開発期間1/10 ITリテラシーが乏しい企業でも高度なIoTシステムを容易に導入できるための仕組みを確立し、あらゆる産業の裾野までDXを広げる体制を整備	<ul style="list-style-type: none"> 実証実験協力企業様から「目的のシステムを短期間で構築できた」等の評価 ユーザー作業が基本不要なCPSを備えたプラットフォームを提供することで、ユーザーによるシステム構築期間を大幅に短縮 高機能だが簡単に使えるマルチセンシングモジュールを開発したことにより、これまで1年以上かけても解析できなかった事例を1回の実験で解析 	100%

① 国際競争力

MSM-PF 上で動作する超高感度センサの開発では、あらゆる物理現象をセンシングするプラットフォームとするため、超高感度センサシステムの開発を実施した。感度、サイズ、測定時間等の要素技術の仕様を満たし、協力会社においてリチウムイオン電池の充電電流磁界像検出および検疫検査の模擬検査を実施し、社会実装の実現可能性を確認した。また、MSM-PF との接続性も確認し、My-IoTパークへのノード提供、アプリケーションノート作成も今年度中に完成する見込みである。具体的には、超高感度磁界センサは当初の開発目標である市販小型磁界センサに対し、感度 100 倍、素子サイズ 1/10 を達成した。磁界センサ素子において、要素技術仕様として 8pT の感度を実現し、社会実装として磁場顕微鏡システムに実装し充電電流分布観察性能を実証した。超高感度匂いセンサについても当初目標である市販匂いセンサに対し、感度 10 倍と選択比 10 倍、素子消費電力 1/10 を達成した。要素技術仕様として希薄な匂い分子の検出 (ppb レベル) を確認し、社会実装として検疫検査システムを組み立て、性能を実証した。これら成果について、設定目標に対する達成度を図 2-(4)-2 に示す。

図表 2-(4)-2 超高感度センサの設定目標に対する達成度

	項目	達成度	
1	市販小型磁界センサに対し、感度100倍、素子サイズ 1/10	感度・サイズ積で、市販小型ホール素子の 1/1000以下(0.93/1000)	100%
3	磁場顕微鏡システム向けユニットを試作	実際の電池を用いたPoCにて性能を実証	100%
4	市販匂いセンサに対し、感度10倍と選択比10倍、素子消費電力1/10	市販匂いセンサに対して感度、選択比、素子消費電力の目標値を達成	100%
6	バッグ内に格納された検体を感知する匂いセンサシステムの試作	バッグ内に格納された検体を感知可能な匂いセンサシステムの作製を完了	100%
7	超高感度センサのノードをMy-IoTパークに提供する	協調領域として提供予定の超高感度センサのノードを作成中、年度内に提供完了	100%
8	アプリケーションノート6件をEPFCウェブページに掲載	掲載完了	100%

MSM-PF のベンチマークとしてエッジ端末の比較を行った結果を図 2-(4)-3 に示す。顧客ヒアリングを通して重要項目として挙げられた、複数のセンサ情報の収集、マルチモーダル処理、時刻同期、エッジ AI 処理、コスト・パフォーマンスの多様化といった要求事項を比較項目とした。MSM-PF は総合的に見て、顧客要求の多様性に最も適合したエッジ端末であると言える。

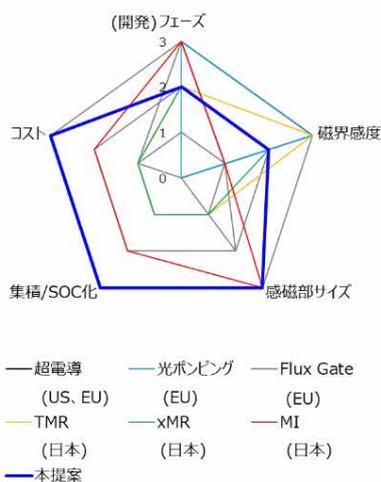
図表 2-(4)-3 MSM-PF のグローバルベンチマーク

		北米			日本		
		ST Microelectronics	Raspberry Pi	Texas Instruments	(株)アイ・ティ・トラ Tibbo-Pi	SONY SPRESENSE	SIPフィジカル MSM-PF
プラットフォーム		 市販	 市販	 市販	 市販	 市販	
センサ種数		6	0	6	4	0	最大16(松1)
マルチモーダル					(最大4ch時分割)		○
MCU	Core	ARM Cortex-M4	BCM2711 ARM Cortex-A72 x4	ARM Cortex-M3	Raspberry-Pi	CXD5602 ARM Cortex-M4F x6	FPGA, ARM Cortex-M4 x1 ARM Cortex-A7 x2 (松)
	OS	RTOS	Raspberry Pi OS	RTOS	Raspberry-Pi OS	RTOS	Linux/RTOS
バッテリー	組み込みAI 時刻同期	○	-	-	-	-	○
	電池	Li-ion battery	USB-C(5V)	Li coin battery	12V	Li-ion battery	USB-C or Li-ion battery
	エネハベ	-	-	-	-	-	○
I/O	アナログ	-	-	-	-	2ch(拡張6ch)	6(松2)-4(竹)-2(梅2)
	デジタル	○	I2C,SPI,Serial各1ch GPIO40+Serial5	○	I2C,SPI 各x10	GPIO,SPI,I2C,UART, I2S	4(松2)-4(竹)-2(梅2)
ソフト クラウド			Linux		Node-Red Try!		My-IoTクラウド+MSMクラウド
その他			入力は1chなのでセンサーはひとつしか接続できない				
製品保証			趣味や試作・開発用		6ヶ月間保証 代替品の無償提供		一般に産業用仕様の場合は1-3年保証 代替だけでなく、原因と対策の報告義務
製造責任					間接的、直接的な損害、事故等は一切責任を負わない		限度額を決めた賠償を支払う

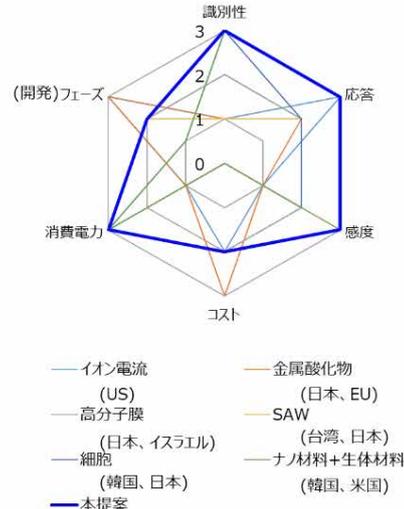
※各社公開情報より作成

また、超高感度センサに関し、検出方式ごとに要素技術項目や開発フェーズの観点でベンチマークを実施した。その結果を図 2-(4)-4 に示す。超高感度磁界センサについては、競合する磁界検出系の検出方式と比較すると、本提案の

超高感度磁界センサ



超高感度匂いセンサ



図表 2-(4)-4 超高感度センサのグローバルベンチマーク

技術はサイズや集積化可能性、コストといった観点で優位性がある。一方、光ポンピングや TMR といった検出方式は感度や開発フェーズで先行するが、素子サイズや空間分解能が劣るため応用先が異なり、本提案の技術と競合しない。

一方、超高感度匂いセンサについては、識別性や感度、消費電力などで優位性を有する。匂い成分を検出する他の競合する方式と比較すると、コストや開発フェーズで先行する金属酸化物方式があるが、識別性で劣ることから空気質検知に適用され応用先が異なることから本提案の技術と競合しない。これらの結果から、本提案の超高感度センサは優位性があると結論づけた。

② 研究成果で期待される波及効果

MSM-PF をスマートファクトリーへ適用したときの波及効果を図 2-(4)-5 に示す。

センサデータの収集、蓄積、分析、分析結果の活用に役立つ機能をトータルに揃えており、アジャイル開発、コンセプト検証から社会実装までの取り組みをサポートすることでスマートファクトリーの実現に寄与していく。特に MSM-PF が優位性としてもつマルチモーダル AI 解析により、予知保全システムの構築、生産性向上、省力化、効率化に寄与することが期待される。



- **ステップ1：センサーデータの収集、蓄積、可視化による設備状態の監視**
フィジカル空間とサイバー空間をシームレスに連携したエッジプラットフォームには、多種多様なセンサーを自由に扱うことができるデータ収集機能と、収集したデータをクラウドへ転送しリアルタイムに可視化および蓄積する機能が準備されており、いずれも簡単に扱うことができますので、例えば工場内設備の状態監視への応用が簡単に実現できます。
- **ステップ2：エッジ端末におけるAI判定、予知、推定(予知保全)を実現**
クラウドからエッジ端末へソフトウェアやファイルを遠隔配信、管理する機能が用意されていますので、センサーで収集、蓄積したデータから目的とする判断、予測をするためのアルゴリズムやAI学習、推論プログラムを準備すれば、エッジ端末におけるAI判定、予知、推定が可能になります。例えば生産工程における異常発生時の自動判定や、工場設備の予知保全業務の高度化が実現できます。
- **ステップ3：真のスマートファクトリーの実現へ(最終目標)**
クラウドへ転送蓄積されたデータを、工場内の別設備によって得られたデータ、設計データ、ビッグデータとともにAI処理し、工場内の設備、機器がAIによって自律的に意思判断できるようにすれば、継続的な最適稼働や製品品質の向上が得られる「真のスマートファクトリー」が実現できます。まずエッジプラットフォームで第一歩を踏み出しましょう。

図 2-(4)-5 MSM-PF の社会への波及効果

MSM-PF に超高感度センサを接続した仕様において、超高感度磁界センサでは電池欠陥検査市場を開拓し、その素子技術やモジュール技術をインフラ構造物の欠陥検査や異物センサなどへと展開する。また、超高感度匂いセンサでは検疫検査市場を開拓し、その素子技術やモジュール技術を税関検査やテロ対策、食品検査などへと展開する。これらの普及を通して安全安心な社会への貢献を進める。

③ 達成度（1）

MSM-PFの開発におけるExecutive Summaryを図2-(4)-6に示す。リファレンスモデルとして図2-(4)-7に示した松、竹、梅の3タイプの仕様を決定し、試作品を用いて10例以上の社会実装実験を実施しその有用性を確認した。その中でマルチモーダルAI解析を用いた予知保全システムの構築、本テーマで開発する超高感度センサを利用した実証実験も実施した。SIPフィジカル事業者間連携の中では、九州大学およびNECと共に、My-IoT/MSMクラウドとMSM-PFを連携したエッジプラットフォームを構築し、EPFCのウェブページからログインすることで事業化、商用化することができる体制を整えた。また、立命館大学や東北大と共同で、MSM竹を用いた水産養殖関連の実証実験、MSM梅を用いた常温発電駆動実証や自立発電温度センサを組み込んだアイスバッテリーの冷凍・放冷状態監視の動作検証を完了した。

社会への波及効果の観点では、松と梅は製品販売事業者による具体的な製品販売計画があり、目標としては1年以内に製品化する事業者を2-3社、3年後には10社程度としたい。また実証実験をした企業の中から、早速自社工場への展開を計画する企業が出てくるなど中小企業のDX化を推進する動きが出てきた。

図表2-(4)-6 MSM-PF開発のExecutive Summary

	研究開発目標(最終ゴール)	成果(達成度)
1	MSM-PFの開発と整備 複数センサを誰でも簡単に取り扱え社会実装が可能なマルチセンシングモジュールプラットフォーム(MSM-PF)として3リファレンスモデル松、竹、梅を開発し、各エッジ端末企業と事業化戦略を策定する	<ul style="list-style-type: none"> 商用レベルのリファレンスモデル松竹梅完成、各種実証実験へ適用 代表事例に関するアプリケーションノートを作成、公開 各モデルの仕様、マニュアルなどドキュメンテーションを整備、公開 23年度以降の商用化に向けエッジ端末企業との協議を開始
2	エッジAI処理の開発 オートエンコーダー、ニューラルネットワークなど高度なアルゴリズムによるマルチモーダル・エッジAI処理をMSM-PFに実装し、実証実験によりその機能を確認	<ul style="list-style-type: none"> 条件付き変分オートエンコーダー法(C-VAE)、畳み込みニューラルネットワーク法(CNN)などによるマルチモーダルAI解析アルゴリズムを実証実験5事例に適用し有用性を確認 エッジ端末にAI推論プログラムをクラウドから配信、およびエッジ端末でAI推論した結果をクラウドへ転送する機能を開発し実装
3	エッジプラットフォームCPSの完成 My-IoTなどのクラウドシステムと連携し、エッジプラットフォームとしてのエコシステムを事業・商用向けに構築	<ul style="list-style-type: none"> My-IoT/MSMクラウド間をシームレスに利用できる連携クラウド完成、運用開始 EPFCホームページからログイン可能として商用化に対応
4	実証実験によるMSM-PFの有用性確認 MSM-PFを活用し、様々なユースケースを想定した社会実証実験を実施することによりMSM-PFの有用性を確認	<ul style="list-style-type: none"> MSM-PFエッジ端末とクラウド機能がシームレスに連携したシステムを使った社会実証実験を10例実施(テーマ間連携除く) 新規開発の高性能センサ(磁界、におい)利用の実証実験を実施し有用性を確認
5	SIPフィジカルテーマ間連携 ロボティクス、モビリティ、ヒューマンインタラクション等社会実装事業におけるMSM-PFを適用検証、エナジーハーベスタ、フレキシブルセンサとMSM-PFの接続、モジュール完成度を向上	<ul style="list-style-type: none"> 常温発電によるMSM梅駆動実証試験(東北大) 常温発電温度センサを組み込んだアイスバッテリーの冷凍・放冷状態監視(東北大) ソフトロボットの触覚監視システム(東大・産総研) R-MSMをMSM-PF竹2に組み入れ、エビ養殖場水中環境の最適化検証(立命館大)
6	MSM-PF普及戦略 部会活動を通してMSM-PFの社会実装に向けた普及活動、新EPFC会員並びに連携団体の会員にSIPフィジカルの成果の積極的な展開と利用者発掘や新規連携を推進	<ul style="list-style-type: none"> SIPフィジカル各事業者の活動をEPFC部会活動に移管 EPFCポータルサイトとしてIoTパークの立ち上げ 実証実験事例、導入メリットを解説したプロモーションビデオを展示会放映、ホームページ公開
7	開発コスト1/5、開発期間1/10 ITリテラシーが乏しい企業でも高度なIoTシステムを容易に導入できるための仕組みを確立し、あらゆる産業の裾野までDXを広げるための体制を整備する	<ul style="list-style-type: none"> 実証実験協力企業様から「目的のシステムを短期間で構築できた」等の評価 高機能だが簡単に使えるマルチセンシングモジュールにより、これまで1年以上かけても解析できなかった事例を1回の実験で解析できた ユーザー作業が基本不要なCPSを備えたプラットフォームを提供することで、ユーザーによるシステム構築期間を大幅に短縮

さらに普及推進の基幹として新EPFCの設立および立ち上げ推進に大きく貢献した。SIPフィジカル各事業者の活動をEPFC部会活動に移植する支援をはじめ、

EPFC ポータルサイトの立ち上げ、EPFC 用エッジプラットフォームの立ち上げに尽力した。本プログラムの最終目標である、本プラットフォームによる開発コスト 1/5 と開発期間 1/10 の目標については、社会実証実験を共同で実施した企業からは簡単で、短期間にシステム構築ができることへの高い評価を得ることができている。特にユーザ作業が不要で比較的高機能なサイバー／フィジカルプラットフォームの提供は評価が高い。また事例によってはこれまで 1 年かけても構築できなかったシステムを 1 回の実験で構築できたものもあり、開発コスト、期間に対する効果は大きいことを確認できた。

図表 2-(4)-7 MSM-PF のレファレンスモデル詳細

モデル	 松 ² MATSU ²	 竹 TAKE	 梅 ² UME ²
特徴	高性能 高サンプリングレート、高精度同期測定 AI学習、クラウド直接接続に対応	普及型 松の機能削減モデル 最大8chのセンサ接続ポート実装	超低消費電力 待機電流1μA未満を実現 環境発電による駆動が可能
マイコン	FPGA×1、Cortex®A53×4、Cortex®M7×1	Cortex®M4×1	Cortex®M4×1
OS	LinuxOS : Debian RTOS : Amazon FreeRTOS	RTOS : Amazon FreeRTOS	RTOS : Amazon FreeRTOS
接続センサー チャンネル数	アナログ×6ch、デジタル×4ch UARTシリアル接続 BLE・Zigbee無線通信接続など	アナログ×4ch、デジタル×4ch	アナログ×2ch、デジタル×2ch
電源	商用電源(USB-Cによる5V供給)	商用電源(USB-Cによる5V供給)	環境発電又はコイン電池(3.3V供給)
無線通信	市販Wi-Fi、BLE、Zigbeeモジュールを USB接続することにより接続可能	BLE、Private LoRaモジュール内蔵 ※IoTゲートウェイへの送受信機能のみ	BLE、Private LoRaモジュール内蔵 ※IoTゲートウェイへの送受信機能のみ
エッジ処理	python、CによるAIプログラム実装可能	豊富なフィルタ処理ライブラリを内蔵 軽量のAI推論プログラムを実装可能	軽量のAI推論プログラムを実装可能
クラウド接続	My-IoTエッジ機能内蔵 クラウドへ直接接続可能(LAN、Wi-Fi)	無線接続したIoTゲートウェイ経由で接続	無線接続したIoTゲートウェイ経由で接続

④ 達成度 (2)

MSM-PF を用いた社会実装実験の実績例を表 2-(4)-1 に示す。金型機械や輪転機、ポンプ、ミキサーといった製造現場の機械の監視・予知保全から、東北大学や立命館大学とのプログラム内連携を通じたエネルギーハーベスタ駆動等の実証、MSM-PF と超高感度センサを組み合わせた内部電流分布検出や検疫検査など様々な現場、機械類における性能実証を達成し、多種多様な現場での適用可能性を示唆する結果が得られた。これら実証実験を通して協力企業から頂いた声の一例を図 2-(4)-8 に示す。MSM-PF の実証実験を実施した企業からは簡単、短期間でシステムが構築できたことに対して高い評価を得た。

図表 2-(4)-1 MSM-PF を用いた社会実証実験の実績例

MSM-PFの効果確認を目的としたポテンシャルユーザーとの実証実験

	業種	工場	接続センサ	提供価値	概要	AI適用	開発期間短縮に関するコメント
1	精密金型製造 A社	松	AE、変位、荷重	金型の予知保全 プレス歩留まり改善	AIで金型の劣化傾向を推定	あり VAE	従来は1年かけてもできなかった解析を1回で解決
2	粉体機器製造 B社	竹	加速度、張力	粉体ミキサー内粉体混合度の数値化	ミキサー全体の振動変化から、粉体混合度をAIにより逐次推定(業界初)	あり CNN	PDCAサイクルの短期循環により約3ヶ月で現象解明
3	ビル設備管理 C社	梅	加速度、磁界	ポンプの予知保全	回転数による振動変化を考慮した高精度の予知保全AIを実現	あり C-VAE	複数センサデータの蓄積、解析が簡単にできたため、約3ヶ月で新AIアルゴリズムによる解析に成功
4	新聞印刷 D社	梅	加速度、磁界	輪転機の予知保全	回転数による振動変化を考慮した高精度の予知保全AIを実現	あり C-VAE	
5	精密部品製造 E社	松	加速度 磁界	古い製造設備の監視・予知保全	加速度×磁界センサーで古いモーターの状態監視、予知保全		
6	設備製造 F社	松	加速度	最終検査工程の官能検査の自動化	官能検査をAIoTで自動化	あり MT	約2ヶ月で実用レベルのシステム構築に成功
7	ビル設備管理 G社	松	ガス	配電盤等初期火災・ボヤの検知	高性能水素センサーでボヤ初期に発生する樹脂分解成分を早期検知		

MSM-PFと革新的センサの効果確認を目的とした実証実験

	業種	工場	接続センサ	提供価値	概要
8	検疫所	松	高性能におい	検疫対象物質の検出	対象物質を早期自動検出
9	税関	松	高性能におい	税関取り締まり対象物質の検出	対象物質を早期自動検出
10	検査装置製造 H社	松	高性能磁界	二次電池の欠陥部位の特定	二次電池の内部電流分布を磁界で検出

SIPフィジカルテーマ間連携による実証実験

	連携グループ	工場	接続センサ	連携実証実験の内容
11	東北大学	梅	加速度	東北大学が開発した常温発電デバイスを使い、MSM-PF梅の駆動検証を実施、ビル屋上設備に設置したとき昼夜の温度差で発電した電力で連続駆動を確認 常温発電によるMSM-PF梅の駆動に成功
12	東北大学 & システムI社	松	常温発電駆動無線温度センサ	アイスバッテリー(保冷剤)に内蔵した常温発電駆動電池レス無線温度センサにより、アイスバッテリーの逐次状態監視システムを構築 常温発電を使ったIoT事例の実証実験
13	東京大学 産総研	松	フレキシブル圧力面センサ	圧力面センサで測定したソフトロボットハンドの把持力分布と、ロボットの動きを把握する加速度センサ、ロボットの動きを撮影した動画を、1画面でリアルタイム・リモート監視できるシステムを構築
14	立命館大 & 水産養殖J社	竹 ²	温度、湿度、溶存酸素濃度	立命館開発のR-MSMとMSM-PFクラウドを接続し、MSM-PF竹 ² として組み入れ、水産養殖水中環境の最適化実証実験に適用

精密金型製造 A社

「各センサーの情報を時刻同期をとれたデータとして収集できた。これらシステム構築が簡単にできるという事から、非常に役にたった。」

「金型予知保全として独自のAIアルゴリズムを取り入れた異常発報システムを構築、生産性向上と品質管理の自動化に展開したい。」

粉体機器製造 B社

「これまで経験則で行っていた粉の混ざり具合をセンサーによりデータ化することで、混合度の指標となるデータを取得、ミキサー製品に付加価値をつけて提供できる。」

精密部品製造 E社

「一つの信号データだけでなく、いろいろな信号を拾えるものですから、分析がいろいろとでき、真の原因究明が可能になった。」

「用途に応じていかなるセンサーでも簡単に取り付けられたのはすばらしい。」

「取得したデータをクラウドと連携して解析することで、コストを抑え、製造ラインを安定的に維持するために必要な製造装置の予知保全が可能になった。」

図表 2-(4)-8 実証実験における利用者の声 (一例)

今後の普及に向け、新 EPFC の設立および立ち上げ推進に大きく貢献した。新 EPFC ではプラットフォームの維持管理から事業化支援、技術支援、コンサルテーション、ビジネス・マッチングを行う場として運用し、MSM-PF を含めた SIP フィジカル事業の事業化を推進する。また、EPFC ポータルサイトを (<https://www.epfc.jp/>) を構築し (図 2-(4)-9)、エッジプラットフォームの概要やドキュメンテーション、エッジプラットフォームのツールを集めた IoT パークを掲載し、IoT や DX に不慣れな中小企業をはじめとしたユーザのアクセシビリティの向上を目指す。前述の実証実験によるプロモーションビデオも本ポータルサイトに掲載 (図 2-(4)-10) し、ユーザが興味を引くコンテンツを準備した。



図表 2-(4)-9 EPFC ポータルサイト



図表 2-(4)-10 実証実験のプロモーションビデオ

⑤ 知財戦略、国際標準化戦略、規制改革等の制度面の出口戦略

超高感度センサにおいては素子構造、モジュール、アプリケーションを中心に 60 件以上の特許出願を実施し参入障壁を築いた (表 2-(4)-2)。

⑥ 成果の対外的発信

⑤の知財戦略に関する出願特許数、および学会、論文、講演会の実績、主な受賞を表 2-(4)-2 に示す。多くの対外的発信を行い、多数の受賞を得て技術力の高さをアピールすると共に本プログラムの認知度の向上に貢献した。

図表 2-(4)-2 国際的な情報発信、成果の対外発信

	出願特許 (件)			計	学会発表・論文誌*1 (件)				計	講演会	主な活動・受賞
	国内	米国	中国		A+	A	B	C			
2022年度	10	10	-	20	-	9	6	8	23	6	IVI*2つながるものづくりアワード2022 最優秀賞 MIPE*32022でMIPE AWARD
2021年度	10	14	1	21	-	5	3	3	11	3	ICEP*42021 Outstanding Technical Paper Award 生物工学若手研究者の集い 優秀発表賞 日本分析化学会 第70年会 奨励賞受賞
2020年度	15	9	1	25	-	5	1	-	6	4	EFPC, IVI*2, ICSIM*52020
2019年度	9	7	-	16	-	1	2	1	4	-	M&BE*610でのポスター賞 2019FNTG*7での若手奨励賞

*1 学会のランクは以下の通り定義

A+：世界的権威の学会、A：著名・トップクラスの学会、B：比較的著名な学会、C：簡単な査読のみ
(例：A+→Nature, A→JEMS, Biosensors, B→ FNTG, ICMEB, C→応用物理学会)

*2 一般社団法人インダストリアル・バリューチェーン・イニシアティブ

*3 Micromechatronics for Information and Precision Equipment

*4 International Conference on Electronics Packaging

*5 International Conference on Software Engineering and Information Management

*6 Molecular Electronics and Bioelectronics

*7 The Fullerenes, Nanotubes and Graphene Research Society

⑦ 国際的な取組・情報発信

新 EPFC の活動を今後海外展開していく。特に海外のコンソーシアムとの連携を検討すると共に、MSM-PF 準拠の製品の海外販売を推進していく。この普及推進の活動を通してデファクト・スタンダードとして認知されることから開始し、さらにその先として国際標準化を目指す。