センター･オブ･イノベーション（ＣＯＩ）プログラム

終了報告書

研究開発期間：平成 25 年度～令和 3 年度

拠 点 名：　『サイレントボイスとの共感』地球インクルーシブセンシング研究拠点

中核機関：　東京工業大学

プロジェクトリーダー	**氏名**	廣井　聡幸
	所属機関	ソニーグループ株式会社
	部署	R&D センター
	役職	技監

公開版　令和 4 年 3 月 31 日

目次

エグゼクティブサマリー…… i

A　イノベーションの創出に向けた活動実績……1

1　目指すべき将来の姿の設定……1
2　目指すべき将来の姿からのバックキャスティング……3
3　アンダーワンルーフ……5
3.1　拠点体制……5
3.2　参画機関　　※一覧は別紙 3「参画機関一覧」参照……6
3.3　拠点のマネジメント体制と仕組み・実績……7
4　研究開発テーマの成果……9
4.1　『サイレントボイスとの共感』地球インクルーシブセンシング研究拠点……9
4.1.1　動物のサイレントボイスとの共感……9
4.1.2　『場』のサイレントボイスとの共感……14
4.1.3　大気のサイレントボイスとの共感……18
4.1.4　行動を誘引するフィードバック……23
4.1.5　超高感度センシンググループ……27
4.1.6　ゼロパワーIoT/AI プラットフォームグループ……36
4.1.7　研究開発全体の成果について（科学技術・学術上の新たな体系的知見等）……46
4.2　2013~2017 年度活動『以心電心』ハピネス共創社会構築拠点……499
4.2.1 目指すべき将来の姿とバックキャスティング……499
4.2.2 空気・行間を読むサービス……533
4.2.3 時空を超えるコミュニケーションサービス……60
4.2.4 つながり共創空間サービス……633
5　社会実装に向けた必要な対応……68
5.1　知的財産マネジメントの状況……688
5.2　社会実装に向けた課題（規格標準化、規制対応、社会規範・倫理等）の抽出と対応……69
5.3　マーケティング・試験的な取組の状況（必要に応じて記載）……70
5.4　研究開発成果の多様な展開の状況（必要に応じて記載）……733
B　イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた成果……74
1　自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について……74
1.1　自立的なプラットフォームの構築に向けた拠点の強み・資産の形成状況……74
1.2　産学連携を効果的にするルール・運営方法の工夫……78
1.3　自立的なプラットフォームの構想・設計・稼働の状況……80
2　若手を中心とする多様な人材の活躍促進について……85
2.1　次代を担う若手等の多様な人材の育成・活躍促進の状況……85
2.1.1　COI 若手連携研究ファンドによる調査研究……87
2.1.2　COI 若手連携研究ファンドによる連携研究……91
2.1.3　COI 若手連携研究ファンドによるデジタル連携研究……92
2.2　人材の育成・人材循環整理表……96

別紙 1　ロードマップ（FY2018～FY2021）および（FY2013～FY2017）
別紙 2　活動実績一覧（FY2018～FY2021）および（FY2013～FY2017）
別紙 3　参画機関一覧（FY2018～FY2021）および（FY2013～FY2017）
別紙 5　研究開発テーマと個別研究開発課題の関係一覧（FY2018～FY2021）
　　および（FY2013～FY2017）
別紙 6　用語集（FY2018～FY2021）および（FY2013～FY2017）

エグゼクティブサマリー

1　拠点の概要

本拠点が設定した目指すべき将来の姿は、地球上の様々な声なき声『サイレントボイス』に耳を傾けて共感（インクルーシブセンシング）し、人にフィードバックすることで行動変容を促し、千年続く豊かで寛容な共存社会の実現である。（図 E-1）

私たち人類は経済発展し、人口増加してきたが、地球社会の声をきいてきただろうか？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。情報のフィードバックは自動化せず、敢えて人にフィードバックし、自分事として捉え行動変容を促す。

このビジョンから実現のために必要となる研究開発テーマをバックキャスティングにより選定した。バックキャスティングにおいては、自然・社会・動物のつながりにおいて聞こえていなかった声をきくことにより地球と共存でき、また社会的経済的インパクトを持つテーマとして下記に記す 4 つのテーマを設定した。さらに、これら 4 つのテーマを支えかつそれぞれもが社会実装を狙う基盤実装技術として、超高感度センシングとゼロパワーIoT/AI プラットフォームの研究開発課題を設定した。（図 E-2）

図 E-1: 目指すべき将来の姿（ビジョン）.

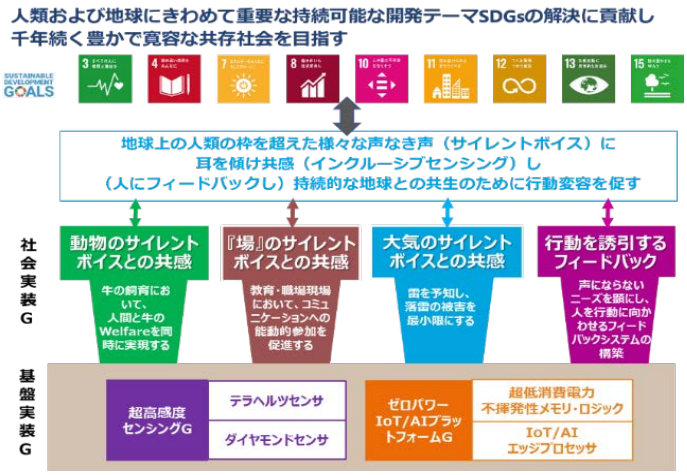


図 E-2: 研究開発テーマの位置づけ.

2　各テーマの研究開発期間終了時の実現目標と達成状況、特筆すべき研究成果の概要

【動物のサイレントボイスとの共感】

➢　研究開発期間終了時の実現目標と達成状況

動物が発するサイレントボイス、すなわち動物の健康状態やストレスの状況を、マルチモーダルセンシングと AI 処理によって理解し、飼育農家に伝えることによって、人間と動物の Welfare に配慮した飼育ができるようにする。

リアルタイムに牛の行動と位置データを取得できる首輪型デバイス(PETER)を開発し、牛の状態・気持ちを検出し飼育者に情報提示し、牛の状態監視に対する畜産農家の労力が軽減されることを目的にシステムの有効性を検証した。

➢　特筆すべき成果

PETER デバイスは、行動推定 4 種類、太陽電池実装で 2 年以上の連続動作、GPS による測位、LPWA 通信対応でき、牛の行動分類から牛の状態を評価するアルゴリズムを開発し、牛の状態を飼育者に提示した。（図 E-3）さらに、PETER システムの実証実験を行ない、放牧牛の動産担保融資に対する PETER システムの有効性を検証した。

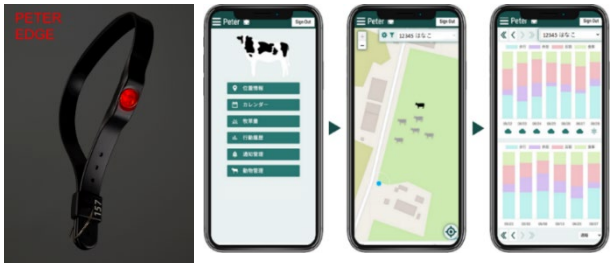


図 E-3: 首輪型デバイス PETER と牛状態の表示例.

また、アニマルウェルフェアの普及へ向け一般消費者等に AW を認知してもらう遠隔教育コンテンツを整備した。

➢　今後の課題と活動方針

実証実験の結果をもとに、PETER Edge と PETER システムの完成度を上げ、動産担保融資の社会実装を進める。また、生産者へのアプローチ AW 評価の労力軽減、消費者への認知度向上にむけて研究を進めて、AW 製品の普及を目指す。

エグゼクティブサマリー

『場』のサイレントボイスとの共感

➢　研究開発期間終了時の実現目標と達成状況

人と人のコミュニケーションの状況をサイレントボイスとして知り、自己にフィードバックすることにより、コミュニケーションの質を改善する。コミュニケーション『場』を可視化する SyncViewer システムを開発し、コミュニケーション質に関する情報を抽出し当事者にフィードバックするプロトタイプシステムを構築した。（図 E-4）さらに、コロナ禍への対応として、新たに遠隔コミュニケーションの評価・支援技術を開発し実験検証を行った、対面／遠隔コミュニケーションに適用できるリアルタイムフィードバック技術を開発した。

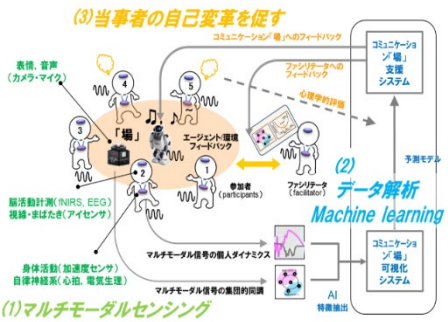


図 E-4:　「『場』のインクルーシブセンシング」の枠組み.

➢　特筆すべき成果

グループワークにおいて、音声ピッチ同調よりも発話ターンテイキングがグループの一体感を高めることを実験的に明らかにし、自然で主体的なターンテイキング促進システムを開発し、NAONA への移植を可能とした。NAONA を使って、学生や採用担当者にリーダーシップや議論への貢献度等の定量的なデータを提供し、コミュニケーションの状況や分析を出力するプロトタイプシステムを開発し、現在、数社とサービス連携を検討中である。

➢　今後の課題と活動方針

利用する環境に相応しいセンサの小型化、省電力化、装着感低減等の技術開発とともに、EdTech や HRTech の分野を対象に開発技術と社会実装サービスのパッケージ化を推進する。

【大気のサイレントボイスとの共感】

➢　研究開発期間終了時の実現目標と達成状況

人と自然のつながりにおいて、大気のサイレントボイスを知り、自然災害の予測につなげる。大気中の電界をグラフェンセンサにて計測し、襲雷の予測するシステムを構築する。

➢　特筆すべき成果

新しく提案した 3 層構造であるグラフェンチャネルを六方晶窒化ホウ素（h-BN）原子層薄膜で挟んだ電界グラフェンセンサを設計・作製し、感度従来比 2.3 倍の電界検出限界 67V/m に成功した。既存電界センサとの比較を行い、雷雲接近時や強い雨雲の接近時に、大気電界強度の変化と相関が見られ、雷放電の極性を判断できることも確認できた。（図 E-5）

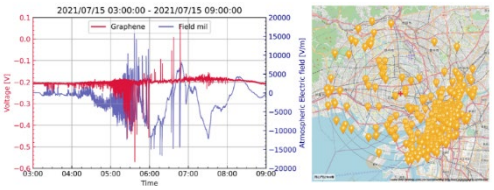


図 E-5:　雷雲の電界観測結果と同時刻の雷放電発生状況.

低消費電力かつ超小型電界センサの利点を活かし、多数のセンサを面的に配置する広域雷雲監視ネットワークと AI による襲雷判定アルゴリズムを組み合わせた襲雷情報提供サービスのビジネスモデルについて検討した。

➢　今後の課題と活動方針

フィールドテストの拡充と共にデバイス、システムの信頼性を確立し、並行して音羽電機工業によるモジュールシステムの製品化を進める。

【行動を誘引するフィードバック】

➢　研究開発期間終了時の実現目標と達成状況

通所型介護施設における潜在的なインシデント間の関係性を可視化し、その関係性の中で食事場面を中心に、危険回避行動・救助行動を促す効果のある警告システムを構築する。

➢　特筆すべき成果

居宅内高齢者の事故の予兆を検知して、即座に職員へ通知する高齢者の異常姿勢の自動検出とアラート発出システム（図 E-6）を開発した。

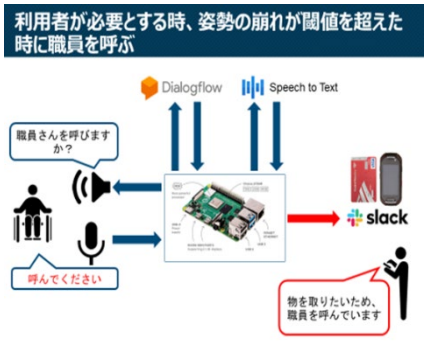


図 E-6:　高齢者の異常姿勢の自動検出とアラート発出システム.

➢　今後の課題と活動方針

高齢者施設における事故予防の実現で得られた知見を基に、

エグゼクティブサマリー

地球社会における様々な課題に対して声にならないニーズを顕にし、サイレントボイスを可視化し、機械と協調して危険回避行動に向かわせるフィードバック技術の体系化を目指す。

3 今後の課題と活動方針

『サイレントボイスとの共感』地球インクルーシブセンシング研究を推進するため、ビジョン型産学連携のプラットフォームを構築してきた。研究成果の継続と発展、社会実装を指向して、EISESiV コンソーシアムの設立を試行している。このコンソーシアムでは、COI にて作り上げてきた知財運営スキーム Keep-white を取り入れて、企業が他企業の知財権に捕らわれず、大学の知財権を活用できる運用を実施していく。(図 E-7)

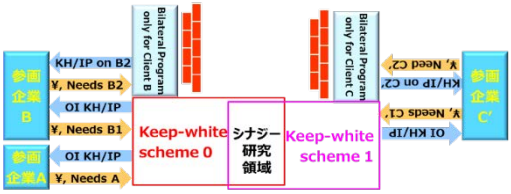


図 E-7: *Keep-white scheme* 同士の連携.

A　イノベーション創出に向けた活動実績

1　目指すべき将来の姿の設定

【目指すべき将来の姿】

2018 年度に、新しい PL、RL の下で、新しいビジョン・コンセプトを設定し、そこからバックキャスティングし研究開発テーマを設定した。その目指すべき将来の姿としては、

今人類は、人口増加と経済発展による、食料・エネルギー・環境・高齢化等の大きな問題に直面している。今までのように、病気や事故が起こってからの事後対応、農薬や肥料に見られる過度な予防を続ければ、高いコストや環境負荷により破たんする可能性がある。

従って、これからは不都合の事態を未然に予測検知しフィードバックすることにより、低いコストで事前に対処することが望ましい。具体的には、地球上のあらゆるものをセンシングし、AI 処理により低コストで必要なタイミングで必要な情報として知らせる。即ち今まで人が主に能動的に情報発信していたものに対し、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。

言い換えれば ICT を人類の枠から拡張し、これらのサイレントボイスに耳を傾け、声なき存在を身近に感じることにより、地球環境との共存共栄を促すことでもある。

尚、情報のフィードバックにおいては自動化に頼らず、敢えて人にフィードバックすることを我々は主眼としたい。これにより、助けを必要としている人への個々の行動を促し、結果、夫々の個人が常に誰かから必要とされている、という“明るく助け合う社会”を促す可能性がある。

従って“地球インクルーシブセンシング"は ICT による技術の開拓だけではなく、人々やコミュニティ等、社会へのフィードバックをどのように行うか、という課題にも取り組まなくてはならない。

すなわち、本拠点が設定した目指すべき将来の姿は、地球上の様々な声なき声『サイレントボイス』に耳を傾けて共感（インクルーシブセンシング）し、人にフィードバックすることで行動変容を促し、千年続く豊かで寛容な共存社会の実現である。

図 A1-1 に目指すべき将来の姿を示し、以下にそのキーワードの定義を説明する。

図 A1-1: 目指すべき将来の姿（ビジョン）.

A　イノベーション創出に向けた活動実績

1　目指すべき将来の姿の設定

“サイレントボイス”に声を与える

“サイレントボイス”とは、今まで測ることができなかった・気づかなかった現象を、新規のセンサ技術および既存のセンサ技術を用いて顕在化させた統合的データのことである。

私たちは、上記センサ技術により取得されるデータを AI 処理により、解釈可能あるいは私たちに関わりのある情報にすることを“サイレントボイス”に声を与えると表現している。

今まで感じてこなかった声を聴く“インクルーシブセンシング”（共感）

“インクルーシブセンシング”とは、地球上の自然、社会、人に存在する、今まで測ることができなかった・気づかなかった現象を、今までできなかった方法で、必要に応じて超高感度に測り、身近に感じる（共感）ことを言う。今まで私たちには関わりがあると思っていなかった現象も排除することなくセンシング対象を拡げる。

人々の自発的な行動を促す“フィードバック”

地球上の自然、社会、人に存在する今まで測ることができなかった・気づかなかった現象を含めてセンシングし、解釈可能あるいは私たちに関わりのある情報として人々に“フィードバック”し、人々の自発的な行動を促すことを“地球インクルーシブセンシング”と言う。

【拠点が創出するインパクトある経済的社会的価値】

上述のような地球インクルーシブセンシングを活用したサイレントボイスとの共感を通じて、限られた地球環境を維持しながらも経済発展による人類の QoL の向上を目指し、真のイノベーション創出に向けて邁進する。

本コンセプトは、持続可能でよりよい世界を目指す国際目標 SDGs (Sustainable Development Goals)が示している開発目標 3,4,7,8,10,11,12,13,15 とその方向が一致している。すなわち、GDP 偏重主義から脱却し、ICT を活用した地球環境との共生を掲げ、その解決策の一つを提供している。当拠点では、SDGs が目指す包摂的で持続可能な社会を実現する方法論を提案し続けている。

2020 年度からは、新型コロナ感染症の広がりとその対策により、人々の行動が制限され、世界の社会・経済に大きな影響を与えている。その対応として、新たに遠隔コミュニケーションの研究を立ち上げた。2021 年度には地球温暖化による気候変動や脱炭素への社会の要望が喫緊の課題となってきているが、本拠点ではその課題を先取りして、2018 年度より、自然環境のサイレントボイスを聞き人々に行動変容を促すこと、聴くためのセンシングデバイスの超低消費電力化技術開発など、地球との持続可能な共生のための技術開発を進めている。

2　目指すべき将来の姿からのバックキャスティング

【バックキャスティング】

図 A2-1「研究テーマをバックキャスティング」で示す通り、地球環境と人々との共存共栄を高度に実現するには、まず人々が自ら率先して解決に向けた行動をとることが求められ、それを促す地球環境情報を伝達する「人へのフィードバック」が重要である。次にその行動を促すには、人々に容易に共感をしてもらえるレベルへ地球環境情報を高度に解釈する必要がある。次に、地球上の様々なサイレントボイスを聴く・訊く必要がある。例えば、自然・環境・動物・人の危険・災害・病気等の不都合の予兆などのサイレントボイスを察知する必要がある。

図 A2-1: 目指すべき将来の姿からのバックキャスティング.

【研究開発テーマの設定】

上述のバックキャスティングに示したように、サイレントボイスの対象を定め、サイレントボイスを聴くセンシング、人にフィードバックする方法の研究開発を以下のように設定した。

(1)自然・環境・動物・人の見えなかった動き（サイレントボイス）をセンシングする。そのため、既存センサに加え、従来見えなかったものが見える新規センサを開発する。具体的には、テラヘルツセンサ、ダイヤモンドセンサ、グラフェンセンサを研究開発する。

(2)これらのセンサは、装着負担の低減（超軽量・超低消費電力、非侵襲・非接触）が求められ、また様々な場所にて使用できるように、センサは IoT エッジデバイスに実装される。この IoT エッジデバイスは低消費電力化が必要であり、また、クラウドとの通信量を極力抑えるようにデータ圧縮や認識処理を行う AI プロセッサが必要である。そのため、超低消費電力メモリ・ロジックの研究開発およびエッジ内で動作できるような低消費電力の AI プロセッサを研究開発する。

(3)想定するサイレントボイスとして、生き物のサイレントボイス、人に関連したサイレントボイス、環境のサイレントボイス、自然のサイレントボイスがある。

(4)サイレントボイスに共感し人の行動を促すために、有効なフィードバック方法を研究開発する。事故予防のためには、人に情報を単に伝えるだけではなく状況を踏まえたリスクコミュニケーションを考慮することが重要である。

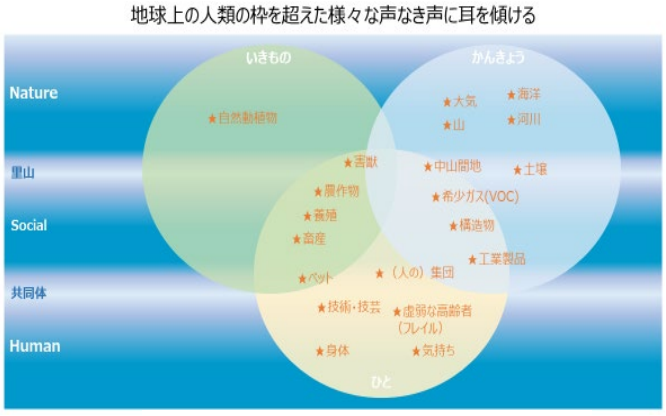


図 A2-2: サイレントボイスの例.

ここで、共感が必要なサイレントボイスの対象は、いわゆるリモートセンシングではなく、人を中心とした環境をセンシング対象としていることが特徴である。それらは図 A2-2 に示すように生体、環境、動物、人と多種多様であるが、本拠点ではそれぞれの境界に注目すべきサイレント　ボイスがあると考え、以下を対象として取り上げた。

「社会と自然のつながり」では、動物を対象とし、牛の行動をセンサに計測し、牛の状態（サイレントボイス）を推定することで、アニマルウェルフェアに配慮した飼養管理を低コストで提供するシステムを研究開発する。

豊かな共存社会実現のために自然からの恵みである食の倫理的生産･消費が必須であり、たんぱく質の供給源として重要な畜産においてはアニマルウェルフェアの推進が急務である。経済面や

2　目指すべき将来の姿からのバックキャスティング

資源循環面で大きなインパクトを有する牛と、生産者・消費者・里山との「つながり」を深め、倫理的生産・消費を推進する仕組みを構築する。

「人と社会のつながり」では、人のサイレントボイスとして、コミュニケーションの状態「場」を取り上げ、コミュニケーションにおける共感やフラストレーションを可視化し、その情報をリアルタイムにフィードバックする研究開発を行う。

ICT 技術の急拡大とグローバル化の一方、コミュニケーションの脆弱化が問題となっており、寛容な共存社会実現のために、多様な人々の共感・共創を醸成することが重要な課題である。集団におけるコミュニケーションの特徴を可視化することで、「つながり」への気づきと学びを促し、多様な人々の相互理解を支援する仕組みを構築する。

2020 年度からは、「人と自然のつながり」としてのサイレントボイスを加えた。それまで技術開発を進めてきたグラフェンセンサを参加企業と組んで、「大気のサイレントボイスとの共感」として社会実装に向け研究開発を進めた。雷・地吹雪等の被害の防止が不十分であり、持続的な地球と共生していくために、大気の中にある電界をグラフェンセンサによりセンシングし、落雷・地吹雪等を事前に予測しその被害を最小限に留め、安心安全な共存社会を実現する。

また、2020 年度からは、サイレントボイスを人にフィードバックし行動を促す研究開発を開始した。「行動を誘引するフィードバック技術」として、参加企業と組んで具体的な対象として「社会弱者のサイレントボイスとの共感：居宅内高齢者の障害防止」を取り上げた。そして、2021 年度には社会実装 G に位置付けて研究開発を加速した。

一方、サイレントボイスを聴くためには、従来見えなかったものが見える新規センサ・超高感度センサが必要であり、非破壊・非侵襲の検査が可能なテラヘルツセンサ、ダイヤモンドセンサおよびグラフェンセンサを研究開発する。これにより、インフラ構造物のトラブル発生前の検査、異物検出（異常検知）や人体の疾病や脳活動の計測が可能となる。

次にそれらのセンシングを支える技術として、地球上のあらゆるものを IoT センサによりセンシングし、IoT デバイスにおける AI 処理により瞬時に低コストで状況を理解し、人に伝える基盤を構築する。そのため、IoT エッジデバイスに搭載できるスマートプロセッサと超低消費電力メモリ・ロジックを研究開発する。

これらの研究開発テーマは、具体的な参加企業と組んで社会実装を目指す社会実装グループと地球インクルーシブセンシングの基盤技術を研究開発し社会実装する企業を求める基盤実装グループに位置付けた。（図 A2-3 を参照）

図 A2-3: 研究開発テーマの位置づけ.

【異分野融合・異業種融合拠点】

上述のように本拠点の研究開発には、材料、デバイス、回路、センサ、AI 等の広い工学分野と農学の研究者を集め、また、社会実装する企業も製造業、商社系企業、大企業、中小企業ベンチャー企業を集めている。更に社会の変化を先読みする未来開拓センタを社会科学系教員に主導して開催してテーマ設定の深堀り、見直しを進めている。

3　アンダーワンルーフ

3.1　拠点体制（FY2021）

2018 年度に、新 PL、新 RL の下で新しく体制を構築し、最終的に構築した体制を以下に示す。東京工業大学を中核大学とし、3 つのサテライト大学の下、ソニーグループ株式会社を中心企業とし 12 企業、2 病院、2 自治体関連が終結した拠点となっている。

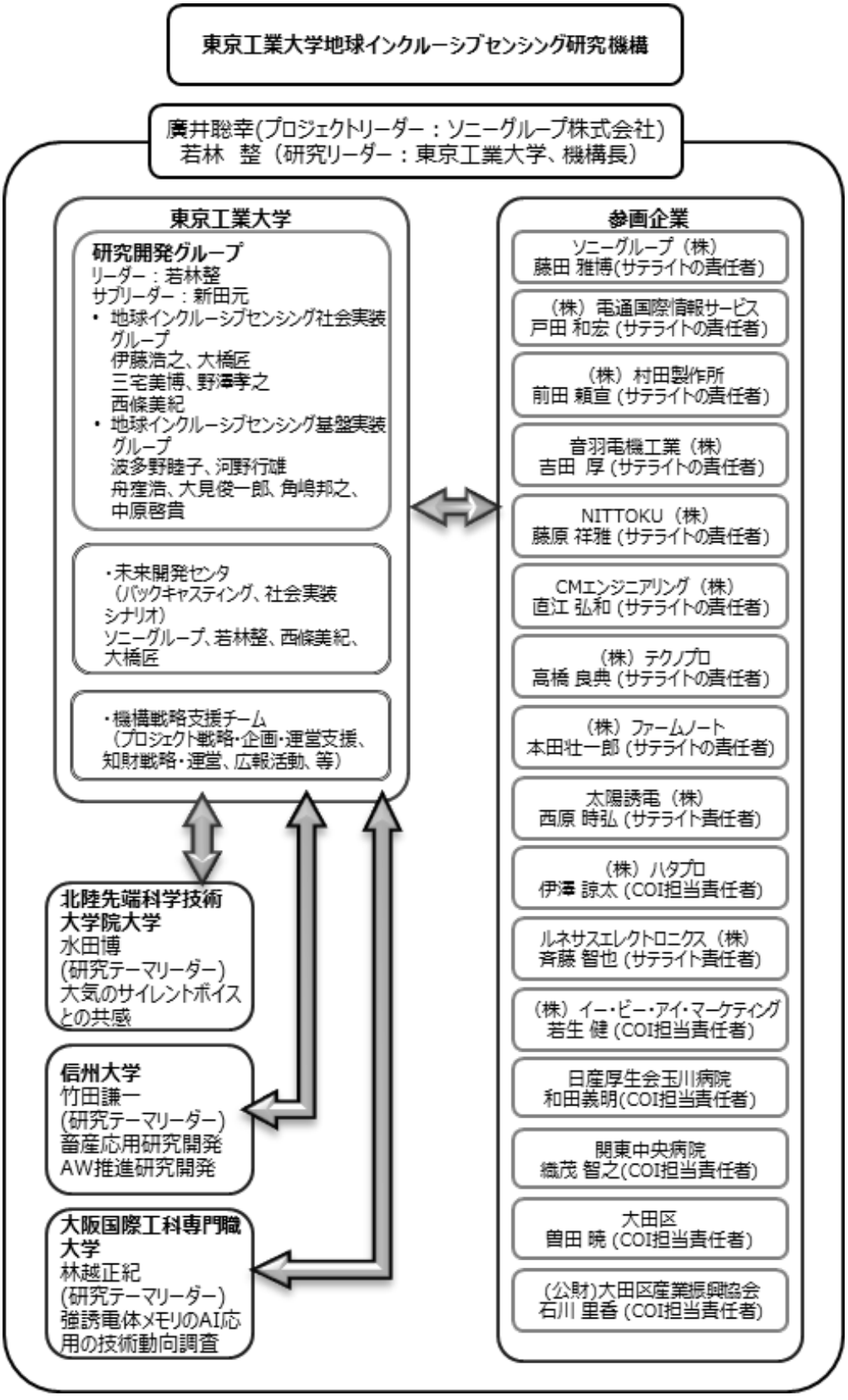


図 A3.1-1: 地球インクルーシブセンシング研究拠点体制（2021 年度版）.

A　イノベーション創出に向けた活動実績

3　アンダーワンルーフ

3.2　参画機関　　※一覧は別紙 3「参画機関一覧」参照

3　アンダーワンルーフ
3.3　拠点のマネジメント体制と仕組み・実績

（1）拠点マネジメント体制

拠点マネジメント体制図を図 A3.3-1 に示す。拠点のマネジメント体制としては、学長のリーダーシップの下に、理事・副学長（研究担当）の直下の組織として地球インクルーシブセンシング研究機構を設置し、全学の教員 15 名（教授及び准教授）が参加し、大学執行部、研究・産学連携推進本部、事務部局等との連携したマネジメント体制を築いている。

具体的には、プロジェクトリーダーおよび研究リーダー（機構長）の下に、機構戦略支援チーム、研究開発グループ、未来開拓センタを置いている。機構戦略支援チームには、チームリーダー、知財戦略統括、及び支援スタッフを置き、プロジェクトを推進するための支援業務を行う。その機構戦略支援チームの活動を全学組織である研究・産学連携本部の研究戦略部門、産学連携部門、知的財産部門および事務局研究推進部が全面的に支援する。また、学内に学長裁量スペースによる研究スペースの提供を受けて、COI の活動拠点としている。

研究開発グループとして、地球インクルーシブセンシング社会実装グループ及び地球インクルーシブセンシング基盤実装グループを構成し、機構戦略支援チームが活動推進の支援を行っている。

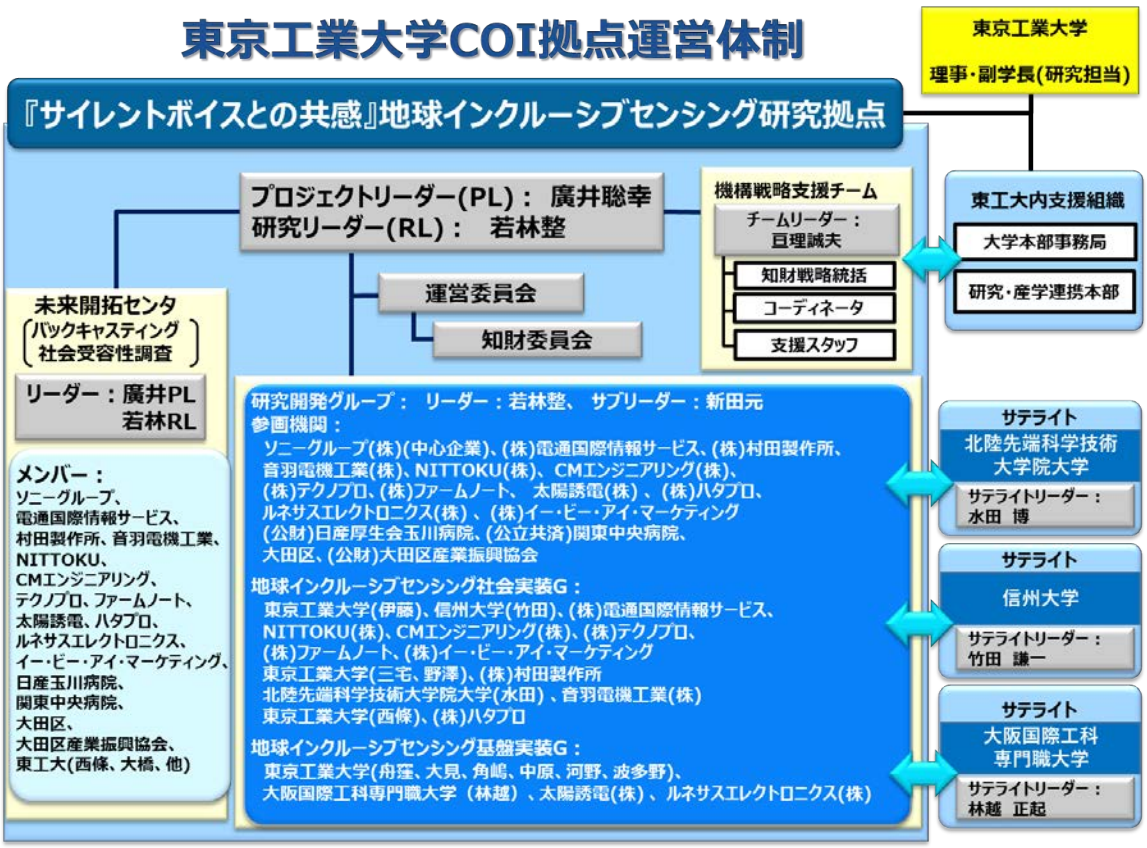


図 A3.3-1: 拠点マネジメント体制図(2021 年度版).

本拠点の参加機関としては、東工大メンバー教員、北陸先端科学技術大学院大学メンバー教員、信州大学メンバー教員及び大阪国際工科専門職大学メンバー教員と連携しつつ、研究開発を実施している企業のほかに、将来本拠点において社会実装の役割を担うことを視野に参加している企業、実証実験や社会実験の場を提供する病院、自治体、協会がある。

（2）PL、RL による拠点マネジメントの仕組み・手法と実績等

当該拠点の中心企業から PL に就任して頂き、教員のリーダーである RL とともに、図 A3.3-1 に示した拠点運営体制を構築してきた。

3　アンダーワンルーフ

【拠点のマネジメント活動】

前述の拠点マネジメント体制の下で、図 A3.3-1 に示した拠点マネジメント体制図にもある通り、拠点内に運営委員会を設け、プロジェクトリーダー・研究リーダーが委員長・副委員長となり、拠点の重要事項を審議し、参画機関の新規参加や退会などを審議している。また運営委員会の下に知財委員会を設け、プロジェクトリーダー・研究リーダーが委員長・副委員長となり、拠点内にて創出された知的財産、すなわち発明やノウハウの取扱いを審議している。さらに拠点内には、未来開拓センタを設けている。社会科学を研究している西條美紀教授を中心に、拠点がイノベーションを連続的に創出できるように、社会要請を常に取り込み、それを生かした社会実装への課題と対応を検討している。

日々の活動のマネジメントとしては、毎週開催されるコア会議に、プロジェクトリーダーおよび研究リーダーが出席し、方針等を議論している。また、毎月開催される全体会議には、メンバー全員が参加し、研究の進捗等を議論している。これら日々の活動の情報は、共通のデータベース（DocuShare を使用）に格納し、スピーディに共有している。またこのデータベースの内容を成果物と位置付けて管理している。

新拠点発足時の参加企業に加えて、社会実装に向けて、参加企業の勧誘を行った。

・「動物のサイレントボイスとの共感」では、2019 年度に牛管理を手掛けている株式会社ファームノートおよび研究開発人材支援している株式会社テクノプロに拠点に参加いただいた。
・地球インクルーシブセンシング基盤実装グループの研究開発では、研究成果を社会実装に繋げるため、2019 年度から太陽誘電株式会社、ルネサスエレクトロニクス株式会社に拠点参加いただいた。

更に、拠点に参加いただいている企業ニーズと研究シーズのマッチングを進め、社会実装に向けた共同研究を開始させた。

・グラフェンセンサを電界センサとして落雷予測に応用できる可能性を見出し、「大気のサイレントボイスとの共感」研究開発課題を 2020 年度より開始させた。
・手のひらロボットの活用可能性の検討を行い、「行動を誘引するフィードバック」研究開発の対象として、参加企業と連携して高齢者の障害予防の研究を開始させた。

【自立化に向けた拠点のマネジメント活動】

自立化に向けた活動として、組織としてどのようなビジネスモデルにすべきかの議論としてビジネスモデルキャンバスを用いた検討を行った。(図 A3.3-2) この中でステークホルダーや顧客の定義を明確にするとともに、自立できるための Value Propositions を明確にする作業を行っている。そこで構築したモデルをベースに、現時点で取り組むべき活動を定義し、優先度を定めてこの拠点を運営する体制を築いた。本学として取組むべきビジョン型の産学連携の在り方の先例として、今までの大学の仕組みにはなかった新たな産学連携の組織運営の好事例となるよう取り組んだ。

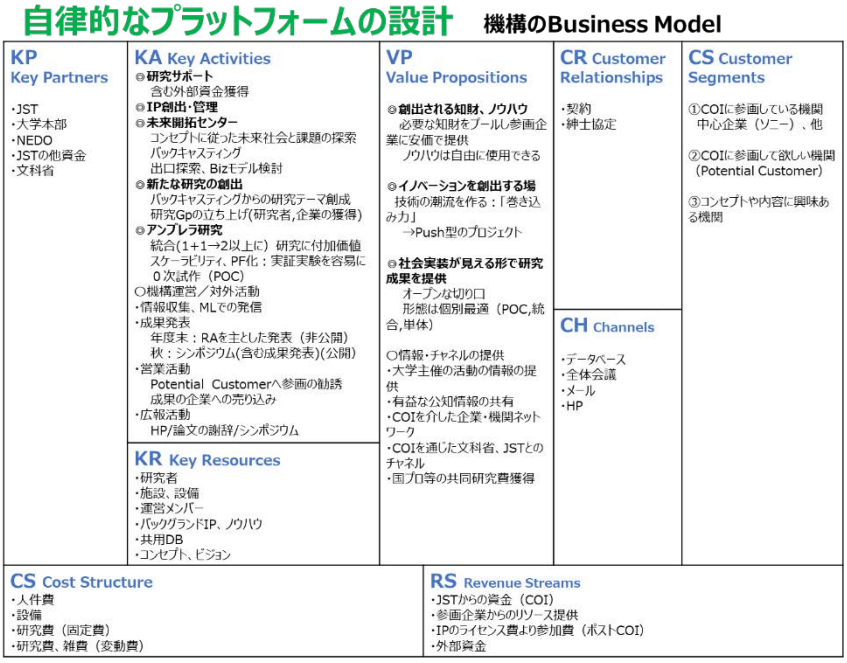


図 A3.3-2: 自立的なプラットフォームのビジネスモデル.

4　研究開発テーマの成果

4.1　『サイレントボイスとの共感』地球インクルーシブセンシング研究拠点

4.1.1　動物のサイレントボイスとの共感

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	伊藤　浩之、東京工業大学、准教授
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	竹田　謙一、信州大学、准教授
研究開発実施期間：	2018 年 4 月～2022 年 3 月
参画機関：	株式会社電通国際情報サービス、NITTOKU 株式会社、CM エンジニアリング株式会社、株式会社テクノプロ、株式会社ファームノート、株式会社イー・ビー・アイ・マーケティング、株式会社 MOTOTECA、ラピスセミコンダクタ株式会社、ソニーグループ株式会社

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

目指すべき将来の姿：

【テーマの概要】

国連は、世界の人口が 2050 年には 97 億人に達し、更に 2050 年には人口の 70%が都市部に住むと予測している。都市住民は一般により多くの動物性食品を摂取するため、FAO(世界食糧機関)の予測では、2050 年には穀類によるカロリー摂取は低下し、乳肉類等への依存度が 29%に上昇する。急騰する需要に伴い食肉生産は 2050 年までに 4.7 億トン増えると予測されており、現在の生産レベルの 2 倍に相当する。これまで畜産業は、集約的な飼養方式への傾倒によって生産量を拡大してきたが、環境被害や疾病のリスクが増大することが問題となっている。豊かな共存社会実現のために自然からの恵みである食の倫理的生産・消費が必須であり、たんぱく質の供給源として重要な畜産においてはアニマルウェルフェア（以下 AW）の推進が急務と考える。

当拠点では、貴重なタンパク供給源として牛乳と肉を供給し、かつ経済面や資源循環面で大きなインパクトを有する牛に着目し、放牧を取り入れた最高ランクの AW の実現を最終目標として、牛のサイレントボイスに耳を傾けることで、「牛」の飼養管理にイノベーションを起こし、生産者・消費者・里山との「つながり」を深め、倫理的生産・消費を推進する仕組みの構築を目指す（図 4.1.1-1）。

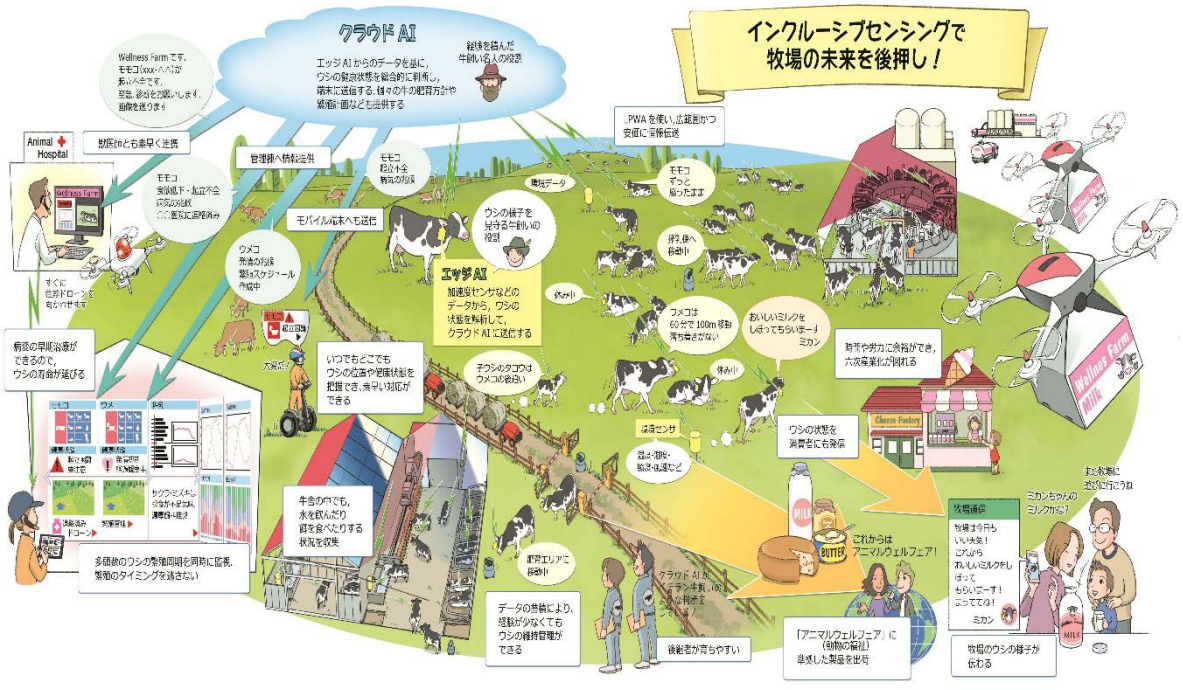


図 4.1.1-1: 本プロジェクトで目指す社会的価値.

【地球インクルーシブセンシングにおける位置づけ】

4　研究開発テーマの成果

本テーマのビジョンにおける位置づけは、動物が発する声なき声（サイレントボイス）、すなわち動物の健康状態やストレスの状況を、マルチモーダルセンシングと AI 処理によって理解し、飼育農家に伝えるという本拠点のコンセプトと方法論によって、人間と動物の Welfare に配慮した飼育ができるようにすることを目指している。

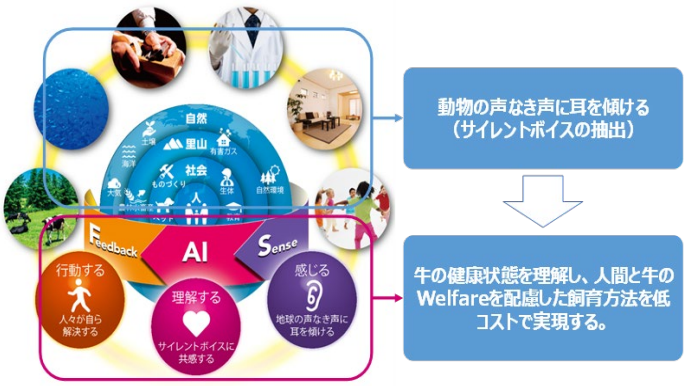


図 4.1.1-2：動物のサイレントボイスの位置づけ.

【動物のサイレントボイスの特徴・優位性】

牛の飼養管理をサポートする取り組みは各機関で行われている。当拠点は、最高ランクの AW に有効な放牧に対応し、かつ廉価型を狙っていること、首輪型のデバイスだけで家畜のサイレントボイス（状態や気持ちなど）を検知し人が理解しやすい形でフィードバックすることを特徴としている。放牧は動物本来の自然な行動形態を誘発し、土―草―家畜の有機的な結合による土地利用の姿であり、配合飼料利用の削減効果などもあるが、牛の状態監視にかかる労力が高いことが課題となっている。首輪型デバイスに限定する理由は、1 年以上のフィージビリティスタディから得られた知見によるものであり、首輪以外のセンサ装着は家畜が怪我をする事故が多発していること、インプランタブルデバイスは食用目的の家畜では結局のところ受け入れられないことが分かったためである。首輪型デバイスは非侵襲的であり、畜産農家にとっても受け入れ易い牛体管理機器である。さらに本研究では、より詳細な状態・気持ち検知を目指し、低消費電力な測位技術の導入や、センサノードの AI 化という本 COI 参画機関の強みをシステムに逐次導入した。放牧中でも牛の動きから行動を推定し、さらに行動データの蓄積から牛の状態（AW）を評価することで、AW 対応の飼養方式の普及ならびに消費者への AW 製品の普及を目指した総合的取り組みであることが特徴である。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）
【具体的内容と実現時期（COI プログラム終了後も含む）】

上記ビジョンを実現するために、生産者へのヒアリング、消費者アンケートを行ない、さらに COI メンバ企業も含めた議論を進め、本拠点にて目指す事業プラットフォーム（PETER システム）とそのサービスイメージを図 4.1.1-3 のように設定した。

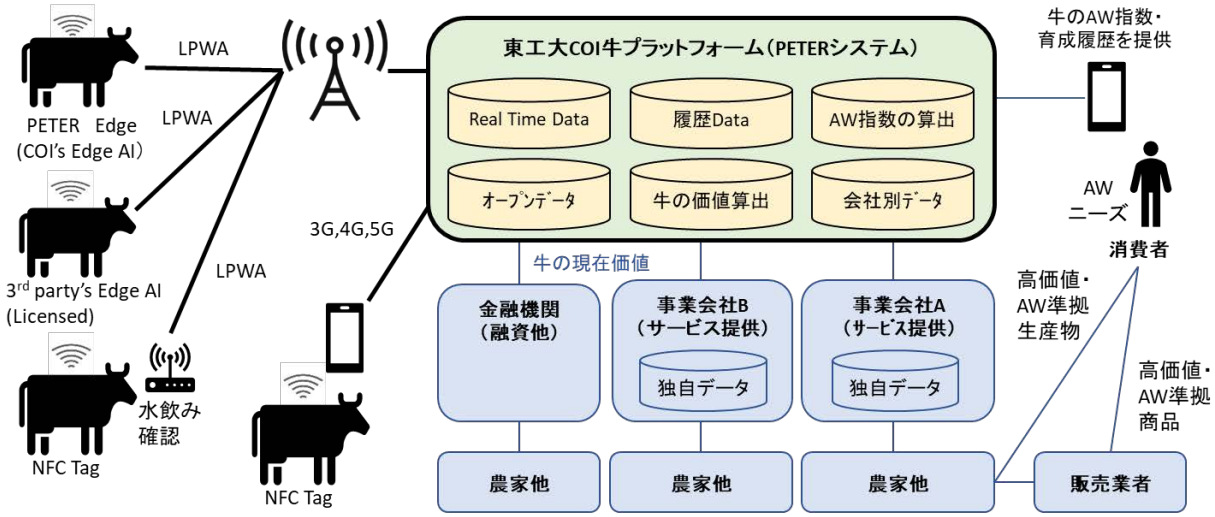


図 4.1.1-3:　サービス案.

4　研究開発テーマの成果

生産性や効率を高めながら、環境負荷と倫理性つまり AW に対応した生産を推進することが、持続可能な食生産に不可欠になっている。集約的飼養管理方式への傾倒により監視不足になっていることが悪循環の原因の一つであり、第一歩として取り組むべきことは、牛個体と、牛群の状態を、効率的かつ正確に把握することである。本プラットフォームは、牛個体の行動推定のため首輪型のデバイスで牛の行動を AI で推定し、推定結果を LPWA を用いてクラウドに集約するシステムで、クラウド上で更に AI 処理し、AW の自動評価の他、畜産業での各場面で活用できる情報を提供するものである。我々が目指すべき酪農・畜産は、飼育管理の大部分を IT 化することにより、AW や環境の状態を定量化しながら、これらと経済性・生産性・効率性を半自動的に向上させ、かつ生産者と消費者の繋がりを深めて畜産復興や倫理消費を推進できるようにすることである。この軸になるのは、牛舎飼いや放牧といった飼養方式を問わずに牛のサイレントボイスを傾聴するためのマルチモーダルなセンシングシステムであり、この実現とサイレントボイスの理解・活用に向けた取り組みを本プロジェクトで推進した。放牧対応をすることで、畜産の振興と里山の自然環境問題、畜産用飼料と人の食料との競合問題への対応も可能となる。

【提供の担い手となる企業・自治体等の実施主体】

本プラットフォームを利用した事業イメージについて、Edge AI 牛管理システム、サービス利用イメージ、事業会社のケース、金融機関のケース、国内の農家に対するサービス料、デバイス代など詳細に検討した。ならびに運用構成要素として、クラウドサービスについてはクラウドサービス提供企業、農家向けの Edge AI 牛管理システムサービスは、農家の経営支援サービス企業が提供企業となり得る。また、消費者向けの AW 情報提供については、流通系企業が候補である。クラウドの利用単位としては個別の農家や地域やブランド化を推進する農協が考えられる。さらに、クラウドでの情報の活用として農家への動産担保融資については銀行が担い手となるが、当拠点では鹿児島銀行の協力を得て動産担保融資への PETER の適用可能性の実証実験を行なった。

【製品・サービスに対するベンチマーク（特徴・優位性）】

当拠点の提案する畜産プラットフォーム“PETER”の特徴は、PETER エッジ側で AI 処理し推定した結果を LPWA で送信できることである。LPWA はカバー範囲が広く（～100Km）、1 つの牧場での放牧対応だけでなく、複数の農場・牧場で同じ基地局を使えるため利用コストを抑えられる。当拠点では、世界 9 カ国（IL,NL,DE,GB,SW,FR,CH,ES,AU）の精密畜産のための IoT システムを提供する企業を調査したところ、17 社が各種製品を提供している（表 4.1.1-1 に抜粋を示す。読み取り距離はほとんどが畜舎近傍 100m-1000mの範囲で WiFi 等無線基地局経由で収集するものであり、一部 LPWA（Sigfox 等）を用いるものと、商用の携帯ネットワーク（GSM, 3G, 4G）等を用いるものがあった。また調査時点で製品化予定（2020 年）のもので、低軌道衛星を経由した通信を採用と謳っているものがあった。また、クラウドでのデータ蓄積・共有については、デンマークの酪農データベースが唯一の成功例として報告されている。これらの調査結果から、当拠点の畜産プラットフォーム PETER は、読み取り距離が 100Km レベルに対応できること、測定項目が多いことに加え、PETER クラウドで AW 自動評価や各種サービスの基盤となる情報を提供するというコンセプトが特徴であり、技術面とコンセプト面ともに優位性を持つと考える。

表 4.1.1-1　放牧対応可能な牛用 IoT システム（抜粋）

企業名(国)	製品名	測定項目	動作時間	読取距離
SCR/Allflex(IL)	Heatime HR LD	摂食、活動、反芻、発情間隔	8年	200～500m
Nedap(NL)	CowControl (Smarttag Neck)	食事時間・時刻、立ち時刻と時間、横臥時刻と時間、歩行時間、歩数、目覚め数	10年	<100m（室内） <1000m（屋外）
GEA(DE)	CowScout Neck	摂食時間	10年未満	<1000m
Lely(NL)	Qwes cow-recognition system	反芻、活動、放牧	8年	<500m
Afimilk(IL)	Silent Herdsman	摂食、活動、反芻、食パターン	5年	<～150m（室内） <1000m（見通し）
CowManager(NL)	CowManager	摂食時間、休憩時間、活動、反芻時間	10年	1000m(w/I router)
参考：EISESiV(JP)	PETER(Prototype)	摂食、歩行、反芻、休息、位置情報、（予定）発情、AW	2年	見通し<100Km (ELTRESの場合)

【社会的・経済的インパクト】

動物（牛）のサイレントボイスとの共感（傾聴・理解・活用）の仕組みを生産現場に実装することは、家畜生産性の向上だけでなく、設備投資、消費構造等の変化をもたらすことにもつながり、

4　研究開発テーマの成果

World Animal Protection による評価が E 評価と低い日本の畜産業を改革し、世界に伍して競争できる力強く、新たな日本の畜産業の実現が期待できる。さらに消費における AW 普及は食の安全・安心に繋がり、放牧の拡大は耕作放棄地の活用という国土保全への貢献に繋がる。また、放牧対応の AW 自動評価は他にないため、世界に 13 億頭いる乳肉牛畜産業への精密畜産対応システムの輸出が期待できる。海外展開については、次世代のセンシングデバイス・システム・データ分析技術の共同研究開発と社会実装を推進するために、イタリア並びに南ヨーロッパにおける主要な研究組織の一つである Fondazione Bruno Kessler (FBK)と東京工業大学科学技術創成研究院との間で部局間協定を締結した。今後イタリアのトレント地域における放牧牛のモニタリングや FBK との次世代センシング技術の共同研究を推進する予定である。

（3）研究開発期間終了時の達成目標

研究開発期間終了時の目標としては、1）牛のＡW向上と放牧の普及に向けた課題として、放牧時でもリアルタイムに牛の行動と位置データを取得し LPWA 通信できる首輪型デバイスと、行動データを蓄積して牛の状態を推定し、結果を表示する PETER プラットフォームのプロトタイプを開発する。PETER による牛の状態把握は、表 4.1.1-2 に示すように 5 段階あるが、レベル 2 の技術開発を目標とする。2）次に、PETER プラットフォームを利用して、放牧時の牛の状態をフィードバックすることで、農家の行動変容が起きるか、放牧時の課題である監視に対する畜産農家の労力が軽減されるかを確認すること、の 2 点である。

表 4.1.1-2:「PETER」による AW 把握レベルと活用

評価レベル	評価内容	一次利用	二次利用	達成目標時期
1	放牧地での個体の生死情報	飼養管理（農家）	動産担保融資（銀行）	ほぼ達成
2	放牧牛の傷病の有無			FY2021, post COI
3	放牧牛の体型（肥痩/正常）		ブランディング（生産者等）	post COI
4	放牧地の環境（快適/不適）			
5	自然らしさの有無			

（4）主な成果と達成状況

PETER プラットフォームのプロトタイプを開発し、2021 年 7 月から沖縄県黒島のさくら牧場で実証実験を開始した。2021 年度末には、PETER プラットフォームの有効性について、さくら牧場で報告会を開催した。プロトタイプ開発の具体的成果、AW 普及に関する活動成果を以下にまとめる。

(ア) サイレントボイス傾聴：リアルタイムに牛の行動と位置データを取得できる首輪型デバイス（PETER Edge）技術の実証。

① PETER Edge の開発（図 4.1.1-4）。行動推定4種類，太陽電池実装で2年以上の連続動作、GPS による測位、LPWA 通信対応。

② アノテーションプラットフォームの社会実装：ISID・テクノプロの協力により Google クラウド上に構築し，アノテーションの外部委託等を構築した環境内で効率的に実施した.

③ 牛の行動推定学習用の教師用データを収集、公開した。

(イ) サイレントボイス理解：PETER システムによる牛の状態・気持ち検出と人への情報提示

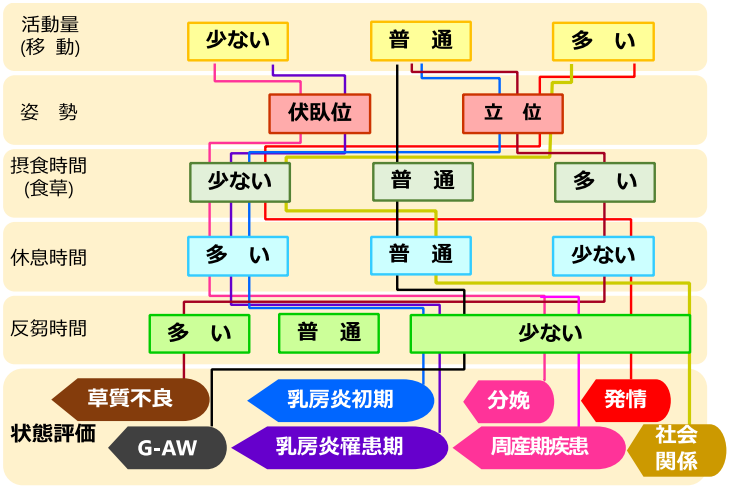
① 牛の行動分類から牛の状態を評価するアルゴリズムを明らかにし（図 4.1.1-5）、クラウド上に PETER Edge 情報を活用した状態評価プラットフォーム（PETER システム）を開発。

図 4.1.1-4: PETER Edge.

4　研究開発テーマの成果

② 鹿児島銀行の協力を得て、放牧牛の動産担保融資に対するPETERシステムの有効性を検証した。

③ 放牧牛の栄養健康状態評価：放牧牛の栄養健康状態を示すボディコンディションスコアを評価した。あわせて、放牧地と採草地の牧草成分分析と行動調査から、さくら牧場における牧養力を推定したとともに、持続的家畜生産に向けた経営改善項目について同牧場へ提案した。



＊行動分類時の閾値の設定は飼育方式によって大きく変わる。

図 4.1.1-5: 牛の行動分類と状態評価の関係.

(ウ) サイレントボイス活用:アニマルウェルフェアの普及に向けたサイレントボイス活用

① 共創デザインによるPETER Edgeの UI 開発(図 4.1.1-6)。COI 若手ファンドデジタル連携研究と連携し、小規模放牧農家向けのGUI を、大規模商用牧場向けに改良を行なった。具体的には、沖縄県さくら牧場の協力の下、経営者が飼養管理をするケースに適した UI を開発した。

② 一般消費者等に AW を認知してもらう遠隔教育コンテンツを作成した。

③ AW 畜産物の購買促進要因の探索
5000 人へのアンケートに基づき、AW に対する購買意識の高い消費者層の属性を明らかにした。

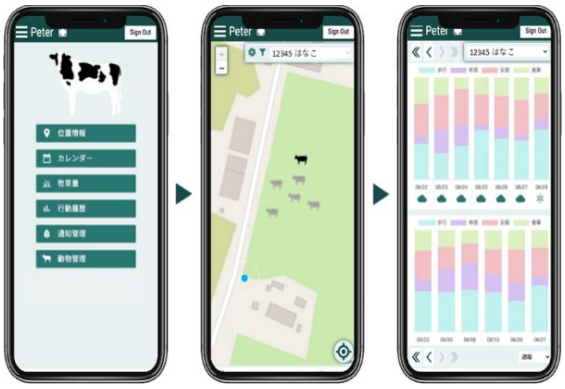


図 4.1.1-6: PETER システムの GUI（一部）.

（5）今後の課題と対応方針

今後の課題と対応方針としては、技術開発と社会実装を並行して取り組んでいく。技術開発では実証実験の結果をもとに、PETER の行動推定、発情発見の精度向上に加え、AW 自動評価技術の開発を継続する。社会実装では、動産担保融資の有効性検証の結果に基づく社会実装の検討を進めることに加え、農家への事業計画支援サービスの検討を始める。農家向けシステムでは牛群管理システムへの適用について検討を継続する。デバイスの設計・製造、アノテーションプラットフォーム、知財活用について具体化の検討を進める。AW の普及に向けては、消費者分析結果に基づくターゲット層への情報提示方法の検討、AW セミナーの継続開催を行なう。制度面では、竹田准教授が検討会の座長を務めた「やまなし AW 認証制度」が令和 3 年度より始まり、放牧利用している生産者をトップランナーとして捉え、それらの取り組みが消費者にも伝わるような畜産物販売が開始される見込みである。また、AW に配慮した牛の飼育管理技術開発を進めている「アニマルウェルフェア飼育技術（牛）コンソーシアム」（竹田准教授が研究リーダ）との連携も継続する。

（6）その他特記事項

本機構も参画している「次世代家畜生産の研究開発プラットフォーム」共催による「みんなで考える　アニマルウェルフェアを普及させるための第一歩」と題したシンポジウムとワークショップを 9 月 23 日、10 月 30 日、12 月 18 日に開催し、一般市民とともに我が国に AW を普及させるべく、イベントを開催した。

4　研究開発テーマの成果

4.1.2　『場』のサイレントボイスとの共感

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	三宅　美博、東京工業大学、教授
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	野澤　孝之、東京工業大学、特任准教授
研究開発実施期間：	2018 年度～2021 年度
参画機関：	株式会社村田製作所、ソニーグループ株式会社

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

【テーマの概要】

本テーマが実現を目指す「『場』のインクルーシブセンシング」の枠組みを図 A4.1.2-1 に示す。そこでは、(1)コミュニケーション参加者の脳活動、身体活動、発話、表情、眼球関連活動（視線・まばたき）などを、マルチモーダルセンシング技術を駆使して計測し、(2)個々人の活動および参加者間の同調など関係性特徴量から、当事者にも自覚や共有が難しいコミュニケーションの「質」を反映する情報を AI・機械学習技術により抽出・顕在化し、(3)コミュニケーション当事者にリアルタイムにフィードバックすることで能動的な自己変革を促す。このサイクルをまわすことにより、当事者間の共感が促進され各々が役割を見つけ多様性を活かせる共創コミュニケーションの実現を支援する。

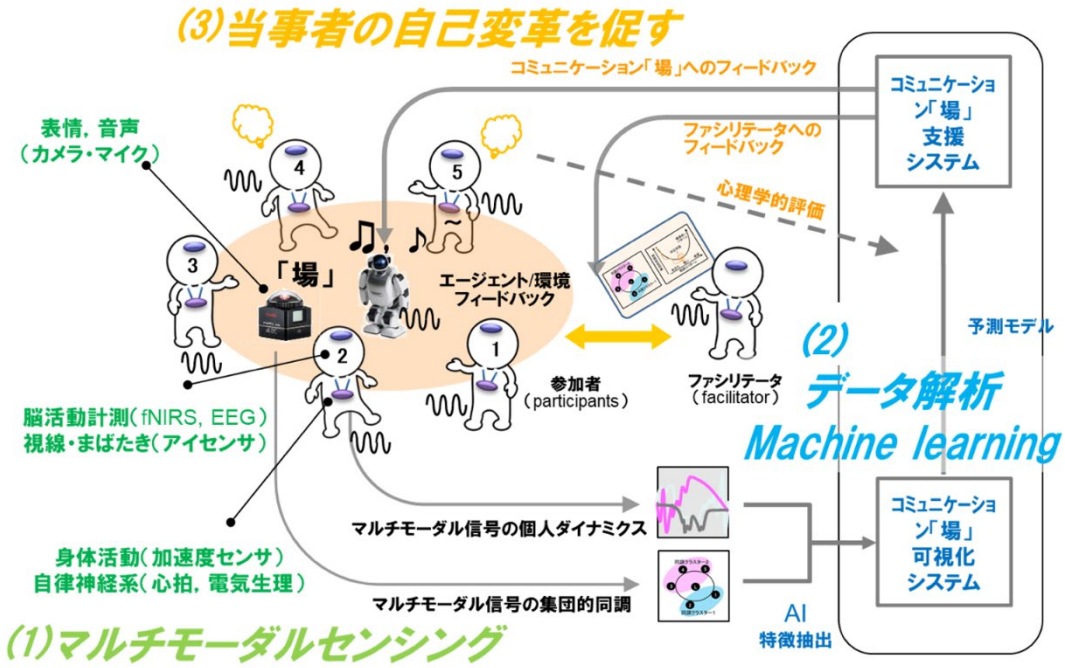


図 A4.1.2-1:　「『場』のインクルーシブセンシング」の枠組み.

【地球インクルーシブセンシングにおける位置づけ】

本拠点では、(1)自己をとりまく環境（他者、社会、自然）からのデータを、センサ技術を駆使して『サイレントボイス』として拾い上げ、(2)AI 技術を活用して自己と環境の関係にとって重要な情報を抽出・顕在化し、(3)自己にフィードバックすることで自発的行動を促すという『インクルーシブセンシング』による、自己と環境とのより良い関係実現の拠点ビジョン「地球インクルーシブセンシング」に沿って研究開発を行なっている。自己をとりまく複数のスケールの環境のなかで、本テーマは自己と他者とのコミュニケーションを対象に、両者を包含するコミュニケーション「場」の質を非言語センシング情報から定量的に評価・可視化し、当事者にフィードバックすることで、より望ましいコミュニケーションの実現を支援する技術の研究開発を行うものである(図 A4.1.2-2)。

4　研究開発テーマの成果

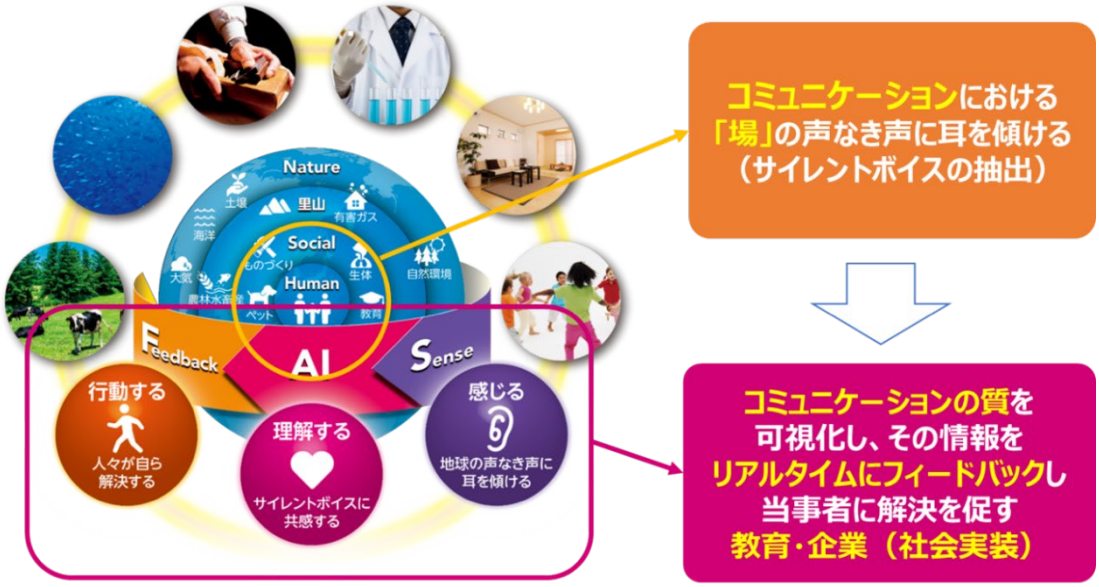


図 A4.1.2-2: 拠点ビジョンにおける「『場』のサイレントボイスとの共感」の位置付け.

【コミュニケーション『場』の可視化の特徴・優位性】

従来から認知科学におけるコミュニケーション研究は存在したが、そこではコミュニケーションに参加する各個人(自己)に焦点が当てられ自己と相手を包み込む『場』という概念は希薄だった。また、本研究はリアルタイムに身体動作を計測してそのコミュニケーションにおける『場』の状態を可視化する技術を確立した。この手法により『場』の概念を分析的に記述する方法を確立した。そして、創造的コミュニケーションにおいてこの『場』づくりが重要な役割を担っていることを明らかにした。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

【具体的内容と実現時期（COI プログラム終了後も含む）】

現在、具体的に想定している製品・サービスは、EdTech(Education Technology)とHRTech(Human Resource Technology)の分野で 2 つある。

①教育現場におけるコミュニケーション向上支援システム

大学教育への展開では、東工大リベラルアーツ研究教育院に在籍しファシリテーションの第一人者である中野民夫教授と共に、アクティブラーニングにおける『場』の可視化やその活性化に向けての支援方法の開発を進めている。授業を舞台としての実証実験で SyncViewer システムにより計測した身体活動と発話の同時センシングデータデータから抽出した関係性特徴量を組み合わせて、主観的評価により得た教育コミュニケーションの質の予測を進めた。また、音声と身体活動のクロスモーダルな関係性に注目し、複数人が動き回ったり、同時に発話するような現場でも、発話者を精度よく同定する AI 技術を開発した。これらのデータから特徴量の絞り込み、当事者に働きかけコミュニケーションを変革するためのフィードバック技術開発を進めている。

②企業内のコミュニケーション活性化支援

上司と部下の人間関係の改善や会議のイノベーション化につながる企業コミュニケーションへの活性化に向けて、システムの開発を進めている。企業内で有用性が高いと見込まれるウェアレスな非接触センシング(音声、360 度カメラ)により SyncViewer の機能拡張を行い、それを村田製作所のコミュニケーションセンシングデータプラットフォーム「NAONA」との統合を計画している。

【提供の担い手となる企業・自治体等の実施主体】

本技術の社会実装として、「NAONA」への実装については東京工業大学と(株)村田製作所

4　研究開発テーマの成果

が連携して進めている。そして、「NAONA」上に実装された技術の社会に向けたライセンス提供については、(株)村田製作所が主体となり進める。

【製品・サービスに対するベンチマーク（特徴・優位性）】

表 A4.1.2-1 に関連技術・研究とのベンチマークを示す。現状では、個人の生理／神経活動をモニタリングしフィードバックするバイオ／ニューロフィードバック技術が盛んに開発されているが、社会生活上重要な企業やコミュニティなどの『場』のサイレントボイスや、未病の段階で人が発するサイレントボイスを訊く取り組みは未だない。

我々の開発する SyncViewer システムでは、マルチモダリティセンシング、個人間の関係性特徴量の活用、リアルタイムフィードバックの可能性に特徴と優位性がある。

表 A4.1.2-1: 関連技術・研究との比較(ベンチマーク).

	Sensing						AI		Feedback	
	身体運動	脳	発話	視線・対面	表情	生理信号	個人	関係性	オフライン	リアルタイム
EISESIV SyncViewer	○ IMU, 画像	○ fNIRS	○	○ tracking, 画像	△ 画像	△ 脈拍，PD	○	○ 同調，因果	○	○
Hitachi Business Microscope	○ IMU	—	○	○ IR対面	—	—	○	△ 対面	○	△
MIT Sociometer, Funf	○ IMU	—	○	○ IR対面	—	—	○	△ 対面	○	△
東大/NeU SIPサイバーテーラーメイド教育(1-3)①	△ IMU	○ fNIRS	—	—	—	△ 脈拍	○	—	○	○
New York Univ, Max Planck Mutual Wave Machine	—	○ EEG	—	—	—	—	○	○ 同調	○	○
筑波大学CREST ソーシャル・イメージング	△ プレイウェア	—	—	○ tracking, 接触	○ 画像，筋電	△ 脈拍	○	△ 接触	○	○
Paul Ekman Group/iMotions FaceReader/iMotions PF	—	—	—	△ IF提供	○ 画像	△ IF提供	○	—	△	△
Stanford Multimodal learning analytics	△ Kinnect	—	○	○ tracking	○ 画像	○ EDA, PD	○	—	○	—

【社会的・経済的インパクト】

人と人とが関わる幅広い社会現場で、コミュニケーション『場』不全がもたらす問題が顕在化している。本研究が提供する『場』のインクルーシブセンシング技術をこれらの社会的現場に適用することで、「流動性・複雑性・相互依存性」の強まる世界でこれから求められる能動的コミュニケーション力の高い人材の育成、メンタルヘルス不調による社会損失の低減と生産性の向上など、広い社会的・経済的インパクトが見込まれる。

（3）研究開発期間終了時の達成目標

本研究開発経過を図 A4.1.2-3 に示す。2021 年度終了時には、多様なセンシング技術と評価技術を開発して、事業化を目的としたプロトタイプシステムの完成を目指す。

- 対面／遠隔コミュニケーションに適用できるリアルタイムフィードバック技術の開発。
- COVID-19 の影響による社会構造の変革・DX 加速とそれに伴うコミュニケーションの質低下に対する遠隔コミュニケーションの評価・支援技術の開発と実験検証。
- 開発した『場』の評価・支援システムの東京工業大学の教育現場での実証実験と、更に改善するサイクルを回せるような協力体制の確立。
- 「NAONA」プラットフォーム上に実装したウェアレス非接触センシング技術の HRTech 向けサービスプロバイダとなる外部企業にライセンス提供を目指す。
- 本 COI 拠点の基盤となるエッジ IoT/AI プラットフォーム(SPRESENSE™※1, Neural Network Console)を活用し、センシングモダリティを統合した評価システムへの道筋をつける。

（※1 SPRESENSE およびロゴは、ソニーグループ(株)またはその関連会社の登録商標または商標です。）

4　研究開発テーマの成果

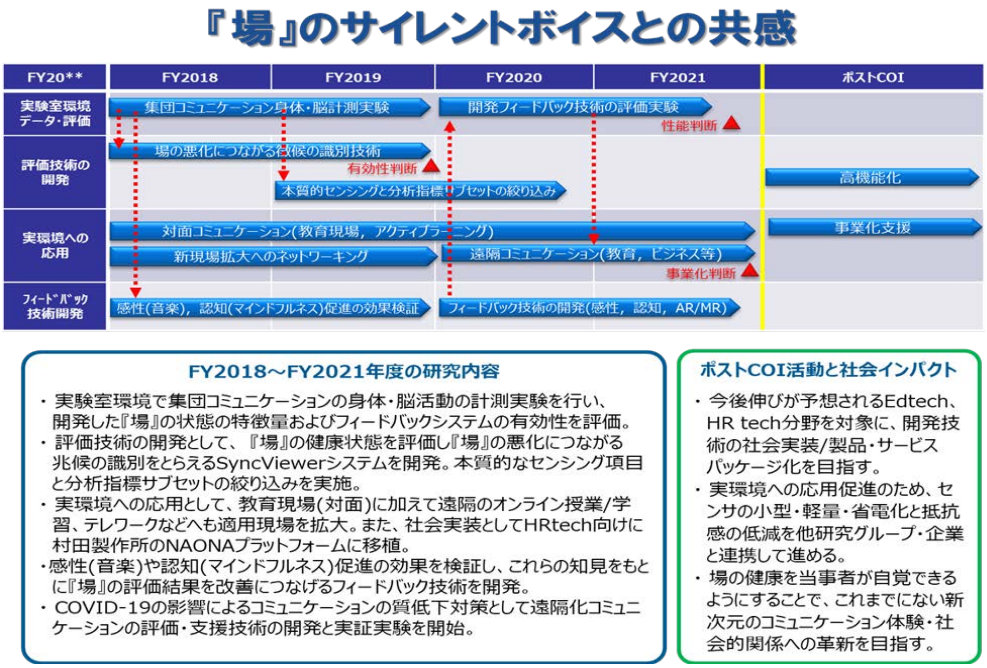


図 A4.1.2-3:『場』のサイレントボイスとの共感」の研究開発内容.

（4）主な成果と達成状況

①評価技術の強化(グループワーク対応)

コロナ禍により授業や会議が遠隔コミュニケーションとなってきた。このような議論を伴うグループワークは感情志向よりは認知志向であり、音声ピッチ同調よりも発話ターンテイキングがグループの一体感を高めることを実験的に明らかにした。これにより、自然で主体的なターンテイキング促進システムを開発し、NAONA への移植を可能とした。

②NAONA プラットフォームへの適用状況

社会実装の例として、採用におけるユースケースについて具体化した。採用の主戦場はインターンとなり、その評価はグループワーク・ディスカッションで実施する場合が多くなってきた。NAONA を使って、学生や採用担当者にリーダーシップや議論への貢献度等の定量的なデータを提供し、コミュニケーションの状況や分析を出力するプロトタイプシステムを開発した。現在、数社とサービス連携を検討中。

また、以前から開発を進めていた 1on1 の面談トレーニングアプリを 2022 年 1 月に商用版をリリース予定。本アプリでは 1on1 の際に重要とされる「承認力」「傾聴力」「質問力」を各種非言語コミュニケーションデータから取得、出力し、上司の面談スキル向上に役立てる機能を備えている。1on1 は傾聴が最も重要といわれているが、実際の面談データの解析を通して相手の発話への反応から取得する承認（存在承認）が上司・部下ともに多いときに部下のエンゲージメントが傾聴よりも高まる結果が得られており、1on1 の質向上のキーとなるコミュニケーション行動を特定、機能として実装することができた。

さらなる展開として、ファシリテーションを介する創造的課題解決ワークショップを取り上げ、コミュニケーションの質評価への適用可能性も検討した。NAONA を用いて会話における間(ま)の時間変動を計測し、「場」の可視化の観点から定量的に分析したところ、ファシリテーションの効果を明確に確認することができた。このことから NAONA プラットフォームによる「場」の評価技術への有効性が示された。

（5）今後の課題と対応方針

今後開発が求められる利用する環境に相応しいセンサの小型化、省電力化、装着感低減等の技術開発とともに、EdTech や HRTech の分野を対象に開発技術と社会実装サービスのパッケージ化を推進する。また、『場』の健康状態を当事者が自覚できるようにすることで、これまでにない新次元のコミュニケーション体験の革新を目指す。

（6）その他特記事項

なし

4　研究開発テーマの成果

4.1.3　大気のサイレントボイスとの共感

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	水田　博、北陸先端科学技術大学院大学、副学長・卓越教授
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	マノハラン ムルガナタン、北陸先端科学技術大学院大学、講師
研究開発実施期間：	2020 年度～2021 年度
参画機関：	北陸先端科学技術大学院大学、音羽電機工業株式会社、東京工業大学

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

【テーマの概要】

人と自然のつながりにおいて自然災害に対する対策が現行の技術では困難な場合が多く、特に落雷では毎年多くの人命が失われ、電子機器が破損しているという課題がある。本テーマ“大気のサイレントボイスとの共感”では、大気中の電界をセンシングし、情報を AI 処理することで、落雷や地吹雪等の自然災害を予測し、被害を最小限に食い止めることで、安全安心社会の実現を目的とする。

【地球インクルーシブセンシングにおける位置づけ】

グラフェンセンサの研究は 2018 年度には環境・生体のサイレントボイスとの共感、というテーマで主に気相センサの研究にフォーカスした。2019 年度には超高感度センサの 1 つとしてグラフェンによる電界センシングのさきがけとなる研究を行い、2020 年度からは動物、場に次ぐ 3 番目の社会実装テーマとして、大気のサイレントボイスとの共感、と位置付けている。図 4.2.3-1 に地球インクルーシブセンシングにおける大気のサイレントボイスの位置づけを示す。雷をサイレントボイスとしてとらえ、グラフェンセンサにより大気の電界をセンシングすることによりリアルタイムに予測するシステム構築を目指す。

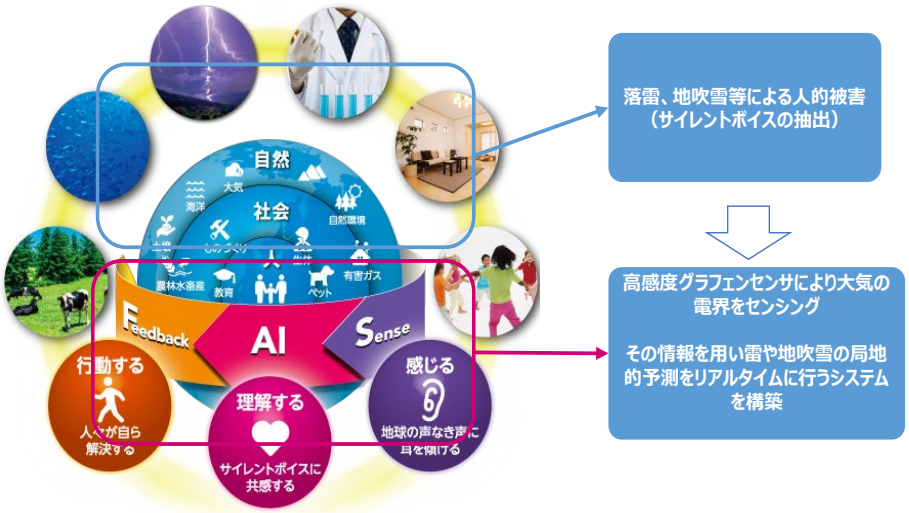


図 A4.1.3-1: 拠点ビジョンにおける大気のサイレントボイスの位置づけ.

【グラフェンセンサの特徴・優位性】

代表的な層状物質であるグラフェンをチャネルに用いたデバイスでは極微小なガスのセンシングができることが知られている。一方、最近になってグラフェンデバイスで微小電界のセンシングができるという報告があるが、雷センサとしては、感度が低い。北陸先端科学技術大学院大学（JAIST）で、新構造のグラフェンセンサを考案し、試作したところ、感度を向上できることが判明した。グラフェンセンサは単一の半導体デバイスであるため超小型にすることが容易、かつ超低消費電力動作であるため電池での長時間駆動ができるというメリットがある。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

【具体的内容と実現時期（COI プログラム終了後も含む）】

4　研究開発テーマの成果

雷の発生メカニズムから、地表における微小電界を正確に測定すれば雷の予測が可能である。現行の電界検知器は大型で AC 電源が必要であるため雷頻発地域に多数配置することが困難であり、小型軽量安価なセンサが望まれる。グラフェンで電界をセンスできることは確かめられており、感度を 20V/m にまで高めれば雷の予測に利用できるため、企業と共同でグラフェンセンサの研究とその応用に取組んでいる。2021 年からフィールドテストを実施し、その後音羽電機工業（株）がマーケティングによりユースケースを確立し、数年後の社会実装を目指す。

【提供の担い手となる企業・自治体等の実施主体】

本プロジェクトの社会実装は、JAIST、東工大に加えて音羽電機工業が主体的に遂行する。音羽電機工業は日本を代表する雷対策の専門メーカーであり落雷に関する多くの知見と製品化の実績を持つ。

【製品・サービスに対するベンチマーク（特徴・優位性）】

現存する雷センサ技術は、雷の放電に伴って発生する微弱な電磁波をアンテナで検出するものであり（図 4..2.3-2 参照）、装置が大掛かりである（受信部：164 x 110 x 224 mm、アンテナ：1200 x 4000 mm）上、原理上、あくまで雷が発生してからの検知となる。雷雲の接近を予知するためには、地上付近での大気中電界強度の小さな変化を検出することが必要である。ごく最近、北京大学・中国科学院のグループなどから、半導体 MEMS 技術を用いた大気電界センサによって、微小電界～10 V/m の検出結果が報告されている。しかし、シリコン MEMS 型電界センサは、大電界が印加された際の信頼性・安定性に課題がある。これに対して JAIST のグループで研究しているグラフェン電界センサは素子構造が簡単であるため作製が容易であり、また MEMS 構造を用いていないため信頼性・安定性に優れると考えられる。

図 A4.2.3-2: 現在の雷センサシステム：音羽電機工業製 TA-1S.

【社会的・経済的インパクト】

雷の事故による世界の死者数は年間 6,000-24,000 人である。この自然災害に対して現在は落雷後の分析と警報しかなされておらず、対策が急務となっている。日本では特に人的被害の死亡率が高く 1994 年～2010 年の落雷による人的被害は平均約 20 人／年、死亡率は 70%に上る。一方、物的被害の要因である雷サージ（雷による異常電圧・電流）は情報システムや生産ラインなどに甚大な影響を与える。本テーマでは電界センシングによる落雷の事前予測システムを研究開発し、企業により社会実装することで、これらの被害を大幅に低減することを目的とする。

（3）研究開発期間終了時の達成目標

新しく提案した 3 層構造のグラフェンセンサにより、電界の測定感度を 10V/m にまで向上させることを第 1 の目的とする。また、屋外で使用できるケースと機械学習のプログラムを組合せて、複数のセンサによるネットワークを構築することが目標である。

（4）主な成果と達成状況

グラフェンチャネルのキャリア移動度改善により電界感度を向上させるため、グラフェンチャネルを、六方晶窒化ホウ素（h-BN）原子層薄膜で挟んだ新型ヘテロ構造チャネルの新型電界センサを設計・作製した。

この新規 3 層デバイスを用いた、電界センシングメカ

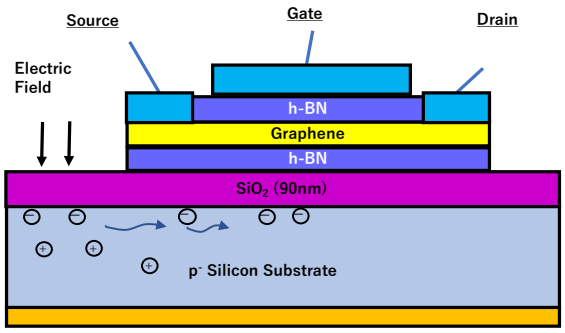


図 A4.2.3-3: 新規 3 層構造グラフェン電界センサ素子の原理図.

4　研究開発テーマの成果

ニズムを図 A4.2.3-3 に示す。この構造によりグラフェンチャネルのキャリア移動度は約 5 倍向上した。また、正確な電界測定のためのプローバー試験装置の要求仕様を、北陸先端科学技術大学院大学と音羽電機工業が共同で決定し、発注、納品を完了した。図 A4.2.3-4 に電界センシング測定装置とチャンバー内の写真を示す。

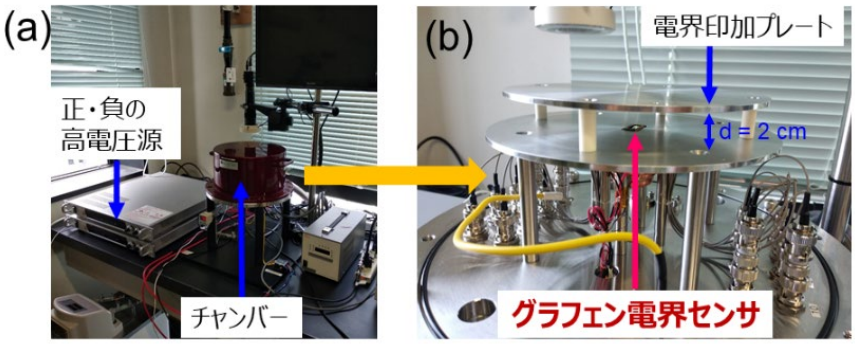
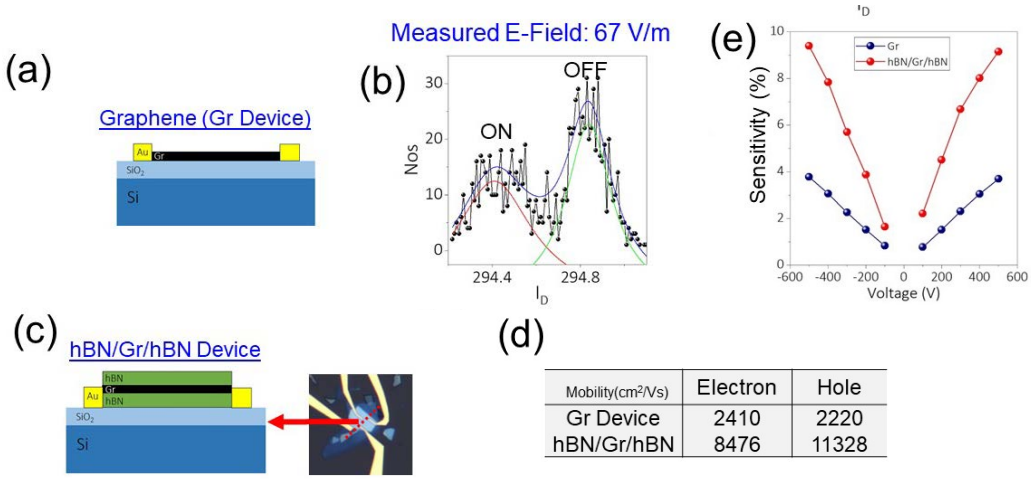


図 A4.2.3-4: (a)電界印加用平行板及び各種ケーブル接続部. 電界センシング測定装置の写真(b)チャンバー(内側)写真.

次に、我々は、グラフェンチャネル下側のhBN層を変えたデバイスの試作と測定をした結果、SiO_2/グラフェン界面のトラップが重要な役割を果たしていることを解明した。

この原理に基づき、グラフェン/SiO_2 デバイス（図 A4.2.3-5 (a)）の作製プロセスをさらに改善し、電界検出限界 67V/m に成功した。また、hBN/グラフェン/hBN 構造デバイス（図 A4.2.3-5 (c)）においては、グラフェン/SiO_2 デバイスに比べて、電子の移動度が 3 倍、正孔の移動度が 5 倍に向上した（図 A4.2.3-5 (d)）。これにより、電界感度を約 2.3 倍向上させることに成功した（図 A4.2.3-5 (e)）。この結果は、電界検出限界≲ 30V/m の実現に対応している。



Mobility(cm²/Vs)	Electron	Hole
Gr Device	2410	2220
hBN/Gr/hBN	8476	11328

図 A4.2.3-5:　(a)(b)グラフェンデバイスとその 67 V / m 電界測定分析の概略図。(c)hBN /グラフェン/ hBN デバイスの概略図とその光学顕微鏡画像。(d)グラフェンおよび hBN /グラフェン/ hBN デバイスの移動度比較。(e)グラフェンおよび hBN /グラフェン/ hBN デバイスの電界感度比較.

（担当：音羽電機工業）

グラフェン電界センサを屋外で使用するには、大気電界を透過するケースが必要である。2020 年度は樹脂素材の電界透過を確認し、2021 年度は屋外用防水樹脂ケースに外部から電界を印加し、内部に電界が透過できることを確認した。グラフェン電界センサデバイスの出力信号は、数 100 nA から数 10 μA 程度の微弱電流であるため，電圧に変換しデジタル記録できる計測回路を設計・試作した。単純構造のグラフェン電界センサデバイスを計測回路に接続し、模擬電界を印加したところ出力信号を記録できることを確認した。

屋外用防水樹脂ケースに計測回路と単層構造のグラフェン電界センサデバイスを収容したグラフェン電界センサを屋外に設置し、大気電界を連続的に観測するフィールドテストを 2021 年

4　研究開発テーマの成果

6 月 23 日より開始した。音羽電機工業製の既存の電界センサの直近で同時観測を行い、既存電界センサとの比較を行った。2021 年 9 月 4 日までの間に、観測サイトから 10 km 以内に雷が発生した日は 12 日で、そのほとんどのイベント発生時の観測データを取得できた。静穏時(晴れ)におけるグラフェン電界センサの出力電圧と既存の電界センサの大気電界変化を比べたところ、相関があまりみられなかった。これは単層構造のグラフェン電界センサの感度が低いことに起因していると考えられる。一方、雷雲接近時や強い雨雲の接近時には、大気電界強度の変化と相関が見られた。図 A4.2.3-6 は、2021 年 7 月 15 日に発生した雷雲の接近通過に伴う大気電界の観測結果である。グラフ中のパルス状の変化は雷放電に伴うもので、既存電界センサとグラフェン電界センサの両方で発生し、雷放電の極性を判断できることも確認することが出来た。感度が低い単層構造のグラフェン電界センサで直上・直近を通過する雷雲を検出できたことから、感度が高まる 3 層構造のグラフェン電界センサを用いれば、低い電界強度、つまり離れた雷雲を検出できると考えられる。

課題としては、温度変化によるグラフェン電界センサの出力が変化することが挙げられる。センサボックスの温度を計測し、温度補正をすることで、温度変化の影響をある程度抑制できることを確認した。

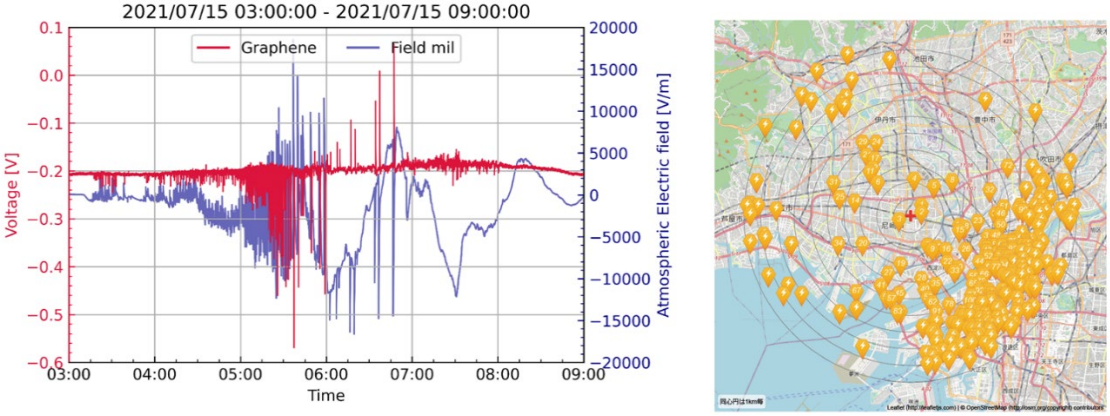


図 A4.2.3-6:(a)2021 年 7 月 15 日に発生した雷雲の電界観測結果. (b)観測サイトから 10km 以内の同時刻の雷放電発生状況.

（担当：東工大機械学習研究会）

東工大地球インクルーシブセンシング研究機構が主催し、アンブレラ研究の一環である機械学習研究会を開催している。メンバーは東工大の学生及び COI 参加企業の若手技術者で、原則毎週開催の講義と、音羽電機工業から提供された電界データの解析を行っている。

2020 年度は、1 秒毎に測定された電界のデータから特異スペクトル変換法(Singular Spectrum Transformation: SST)を用いて電界の異常度を算出し、異常度と雷発生時間帯の関係性について検証を行い、5 km 圏内の落雷を 32 分前に予測できることがわかった。SST をさらに発展させて RNN（Recurrent Neural Network）の手法を用いたより正確な解析を行い異常判定に大きな改善がみられた。このプログラムコードを今後のフィールドテストに活用する予定である。

【製品・サービスの実現に向けた取り組み】

社会実装の方法やビジネスプランについて検討を行った。低消費電力かつ超小型電界センサの利点を活かし、多数のセンサを面的に配置する広域雷雲監視ネットワークと、多数のセンサからのビッグデータを AI 解析し、襲雷判定アルゴリズムを組み合わせた襲雷情報提供サービスのビジネスモデルについて検討した。この実証実験の実現に向けて競争的資金等の獲得を進める。グラフェン電界センサが完成すれば、アジア・アフリカ地域など電源通信インフラが不安定な地域において、誰でも簡単に扱える超低消費電力の襲雷警報装置/システムが可能となる。

4　研究開発テーマの成果

（5）今後の課題と対応方針

図 4.2.3-7 に大気のサイレントボイスの線表を示す。今後の課題は、フィールドテストの実施と共にデバイス、システムの信頼性を確立し、製品化に備えることである。技術だけではなく実際のユースケースを想定して製品の寿命などを定義し信頼性基準を決めることが非常に重要なマイルストーンとなる。信頼性と並行して音羽電機工業によるモジュールシステムの製品化を進め、数年後には安全安心社会に貢献することが本プロジェクトの目的である。

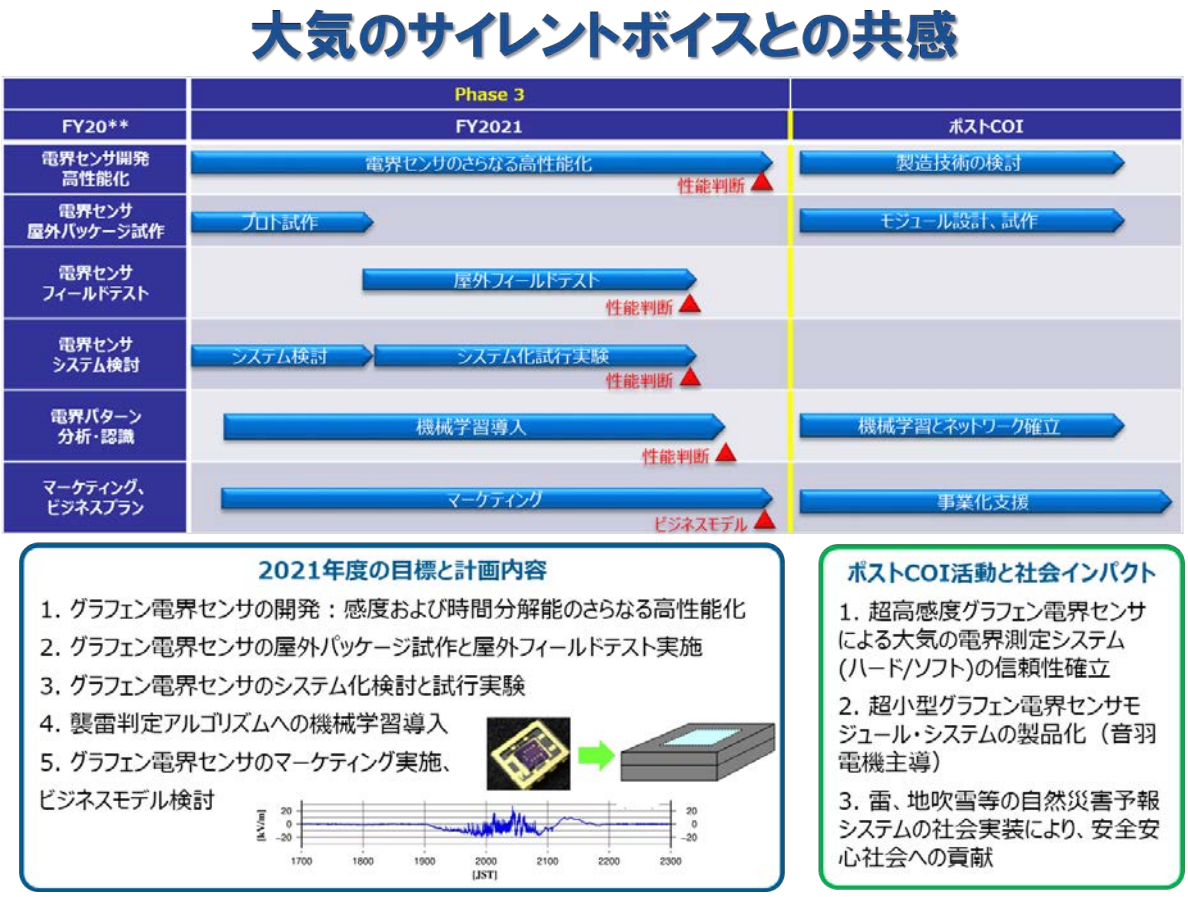


図 4.2.3-7: 大気のサイレントボイスとの共感の線表.

（6）その他特記事項

特になし。

4　研究開発テーマの成果

4.1.4　行動を誘引するフィードバック

テーマリーダー（氏名、所属、役職）:	
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）:	
研究開発実施期間：	**2020 年度～2021 年度**
参画機関：	**東京工業大学、株式会社ハタプロ**

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

【テーマ概要と拠点ビジョンとの関係】

声にならないニーズを顕にし、人を行動に向かわせるフィードバック技術を体系化し、地球社会における様々な課題に対し解決の糸口を見出すフィードバック技術の確立を目指す。その具体的事例として、高齢者の居宅内（自宅・施設等）における事故につながりかねない危険な行動の予兆のセンシングと介入のためのフィードバック方法の研究開発を行う。

【地球インクルーシブセンシングにおける位置づけ】

本拠点のビジョンでは、最先端のIoT/AI センシングを用いて、人･社会･自然の間にあるつながりに気づき、人にフィードバックすることにより、不都合・不適切な事象を未然に防止することで余計なコストをかけずに豊かで寛容な共存社会を目指すとしている。本研究開発課題では、人を行動に向かわせるフィードバック技術を体系化し構築することを目指す。

図 A4.1.4-1: 行動を誘引するフィードバックの位置づけ.

【特徴・優位性】

高齢者の介護見守りシステムにおいて、潜在的ニーズを可視化し、人を行動に向かわせる体系化したフィードバック技術を基に事故等を未然に防ぐシステムを開発することに特徴を有する。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

2025 年には、日本の高齢化率（65 歳以上の高齢者人口が総人口に占める割合）が 30%に到達し、同時に介護者が 32 万人不足すると予測され、今後ますます介護者の負担が深刻になると予想される。高齢者の方々へ行き届いたケアを実現することと、介護者の方々の負担をできる限り低減することは喫緊の課題であり、これらの両立には技術によるサポートが欠かせない。

高齢者の介護見守りシステムについては、表 A4.1.4-1 に示すようにすでに種々導入されているが、介護記録では日中やフロアの事故も多いのが実態であるが、既存製品は夜間や居室内で発生する事故を検知するものが多い。また市販品は転倒を検知するだけで、事故予防には間に合わないなど、事故等（以下、不適合案件）を未然に防ぐ行動を喚起するフィードバックまで考慮した製品やシステムは少ない。

表 A4.1.4-1: 既存製品・研究のベンチマーク.

製品・研究名	A 社	B 社	C 社	D 社

4　研究開発テーマの成果

目的	高齢者の危険な行動・転倒事故の検知	高齢者の転倒事故の速やかな検知	施設入居高齢者の体調不良やケガの発見	現場のケア品質の向上と業務負担の軽減
どこで	居室	屋内（半径 10m、約 120°の範囲で人の転倒を検知）	廊下	居室
いつ	一日中（主に就寝時）	一日中	一日中	一日中（主に夜間）
どうやって	赤外線カメラ	AI カメラ	定点カメラ	ルームセンサ（非接触・非映像）

（3）研究開発期間終了時の達成目標

通所型介護施設における潜在的なインシデント間の関係性を可視化し、その関係性の中で食事場面を中心に、危険回避行動・救助行動を促す効果のある警告システムを構築する。あわせて After/With コロナを見据えた、プロジェクトの新しい観点からの試みとして、遠隔の介護者と高齢者の危険な行動予兆についての情報共有を行うアプリケーションを開発する。

介護施設で抽出した上記システム構築に対する課題別に、以下のとおり研究内容を計画した。

① 食事時の危険をリアルタイムで検出し、近くと遠くにアラートする方法の開発
AI による異常姿勢の検出方法の開発は東工大で行い、アラート方法の開発については東工大と（株）ハタプロで検討を行う。

② 介護記録からの潜在的なインシデントの抽出
個人情報を捨象するなどした介護記録のデジタルデータから、アクシデント、インシデント間の関係性の分析、潜在的はインシデントを検出する方法を開発する。

③ 人々に適切な行動を促すフィードバックシステムの構築
アラートを受けた人（近く・遠く）の反応は情報を受け取るモーダル（音声、テキスト、警告音）による違いがあることが推測され、アラートを受けた後の役割も物理的な距離による違いがあることが予想され、どこにいる誰がどのように行動することが望ましいのか、アラートのレベル別にシステムのプロトタイプを作成して検証する。アラート発出のテストは東工大とハタプロで行い、アラートレベル別のフィードバックシステムの構築は共同で行う。

④ 転倒・転落につながる危険な行動の予兆を検知し適切な介入を促すシステムの設計
通所型の介護施設における高齢者のうち、「できると思ってやってしまう」ことに起因する転倒・転落を予防をするシステムの設計を行い、プロトタイプを作成する。

4　研究開発テーマの成果

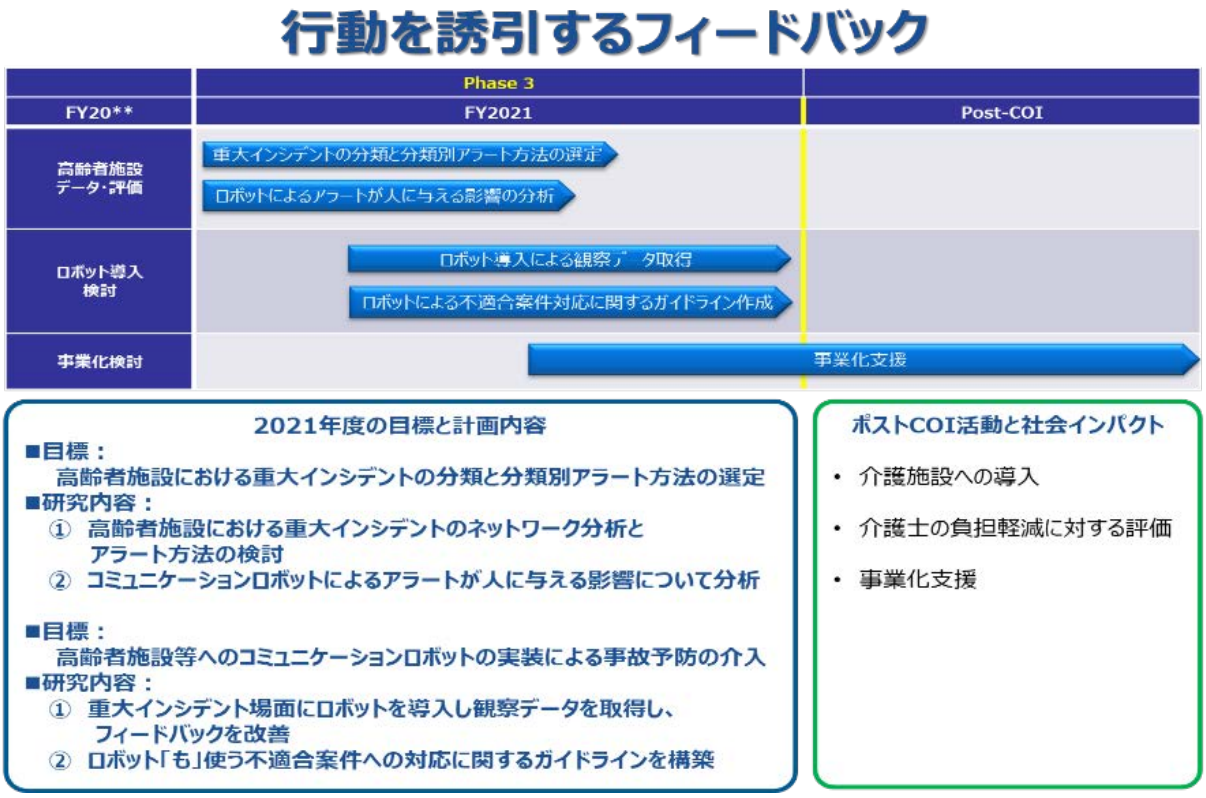


図 A4.1.4-2: 行動を誘引するフィードバックの研究開発.

（4）主な成果と達成状況

誤飲誤嚥につながる食事時の異常姿勢の探索のために健康な成人 10 名を対象にフードテスト（飲み込み実験）の際に、3 カテゴリーの体の傾き（1．体幹部右傾・左傾、2．体幹部前傾・後傾、3．頭頚部右傾・左傾、）につき角度を 10 度ずつ増加させる方法で行い、異常姿勢の定義を行った。嚥下に支障のある異常姿勢は先行研究で定義されていなく、本研究が初めて食事時の異常姿勢の自動検知の基礎となる基準を作成した。この基準に基づき、図 A4.1.4-3 に示すように、被験者の姿勢がその角度以上に崩れたら自動で警告を発するシステムのプロトタイプを構築した。現状では、参画機関である（株）ハタプロが販促等の商用に用いているコミュニケーションロボット ZUKKU の提供を受け、それを AI スピーカーとして用いて警告を発した。この成果は人工知能系の国際学会である FAIML2021 において発表した。

図 A4.1.4-3: 誤飲誤嚥につながる食事時の異常姿勢検知と通知.

4　研究開発テーマの成果

また居宅内高齢者の事故の原因として、意図せず突発的に起こってしまうこと（ずり落ちなど)があり、その予兆を検知して、即座に職員へ通知することが重要である。そこで、立ち上がろうとしている場面を検知し、対話から行動意図を推測するプロセスとして、以下に示す場面を想定した。

- 自力で達成できる → 安全に行えるようアドバイス
- サポートが必要 → 職員へ通知、到着するまで時間稼ぎをする

これに基づき、高齢者の異常姿勢の自動検出とアラート発出システムとして、図 A4.1.4-3 に示すシステムを開発した。ここでの開発の力点は、施設利用者の ADL（日常生活動作）の程度と生活場面の行動意図に応じた呼びかけによって、不用意な傷害を予防することである。施設利用者の行動抑制ではなく、行動を起こすことによって生じるかもしれない危険性に対する利用者のアウェアネスを高める会話を対話システムと利用者が行い、介護職員の目の届かないところで起こる利用者の傷害を予防する支援を行う。当初、事故予防は食事回りの誤嚥などの事故に限定し、with コロナの遠隔見守りとして、施設に立ち入れない家族と利用者との間をつなぐ食事記録等のアプリケーションの開発を計画していたが、施設職員へのヒアリングを重ねる中で、with コロナの喫緊の課題は、コロナ感染や激務からの職員の職場離脱にともなう人出不足に起因する「介護者の目の届かない場所」で起こる転倒・転落などの重大事故の予防であるとの指摘を受け、研究開発の力点を食事回りの事故予防と食事量の家族への通知から介護者が遠隔にいる（眼前にいない）ことを想定した事故予防支援にシフトした。

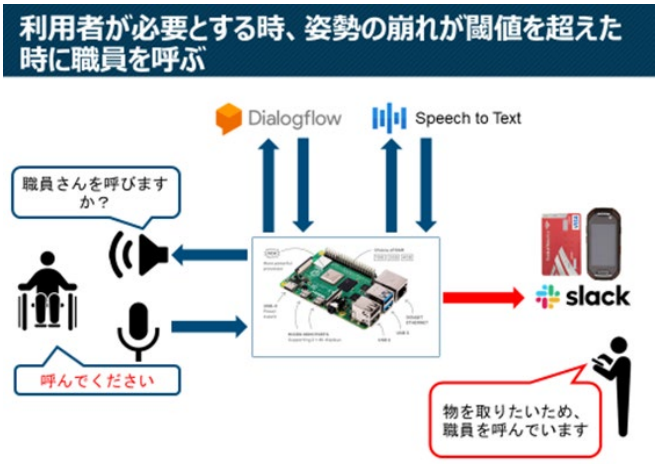


図 A4.1.4-4: 高齢者の異常姿勢の自動検出とアラート発出システム.

（5）今後の課題と対応方針

課題として、以下の項目が挙げられる。

- プライバシー保護のため、特定の利用者の名前は登録せず、Slack チャンネルと対応デバイスを現場で使い分けてもらう。
- 現場の声を入れて職員にも使いやすいシステムにする。
- ハイブリッド介護のガイドラインの整備もすすめる。

今後の対応として、高齢者施設等への異常姿勢の自動検出と対話システムの実装による事故予防支援の実現に向け、以下を項目に取り組む。

① 重大インシデント場面に対話システム（加圧センサ等による急な立ち上がりなどの自動検知と対話システムによる話しかけ）を導入し観察データを得、フィードバックを改善
② デバイスや対話システム「も」使う不適合案件（事故・ヒヤリハット）への対応に関するガイドラインを作成
③ 高齢者施設における事故予防の実現で得られた知見を基に、地球社会における様々な課題に対して声にならないニーズを顕にし、サイレントボイスを可視化し、機械と協調して危険回避行動に向かわせるフィードバック技術の体系化を目指す。

（6）その他特記事項

図 A4.1.4-4: 高齢者の異常姿勢の自動検出と安全行動誘導対話システムについては、開発した学生たちが自分たちでスタートアップを立ち上げ、自ら社会実装のアクターとなることを視野に「慶応義塾主催の健康ベンチャー大賞」というビジネスアイデアコンテストに出場し、本年 12 月に行われる決勝大会でライトニングトークに招待された。

4　研究開発テーマの成果

4.1.5　超高感度センシンググループ

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	河野 行雄　東京工業大学 特定教授 波多野 睦子　東京工業大学 教授 水田　博　北陸先端科学技術大学院大学（2018 年度～2019 年度のみ）
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	岩崎 孝之　東京工業大学 准教授
研究開発実施期間：	2018 年度～2021 年度
参画機関：	東京工業大学、北陸先端科学技術大学院大学、太陽誘電株式会社

地球インクルーシブセンシング基盤実装グループにおいて、サイレントボイスを検知するために必要となる超高感度センサとして次の３つのセンサを取り上げ、超高感度センシンググループとして研究開発を進めた。

(1) テラヘルツセンサ（東京工業大学）
(2) ダイヤモンドセンサ（東京工業大学）
(3) グラフェンセンサ（北陸先端科学技術大学院大学）

各センサの研究を進めるうちに、グラフェンセンサを電界センサとして雷検知に利用できる知見が得られたので、「大気のサイレントボイスの共感」として社会実装グループのテーマに独立させた。

4　研究開発テーマの成果

4.1.5.1 テラヘルツセンサテラヘルツセンサ

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

【テーマの概要】

カーボンナノチューブはテラヘルツ波を効率よく吸収することから、テラヘルツ波を光源とするカメラへの応用が考えれ、目では識別できない欠陥、あるいは異物への検出への応用に関する研究を進める。

【地球インクルーシブセンシングにおける位置づけ】

本テーマとの関係では、人工物が発している声なき声（サイレントボイス）、すなわち目視では識別できない欠陥、あるいは異物の検出するテラヘルツセンサにより、人工物の不具合、あるいは異物の混入等を検知し事故を未然に防ぐことに役立てる。

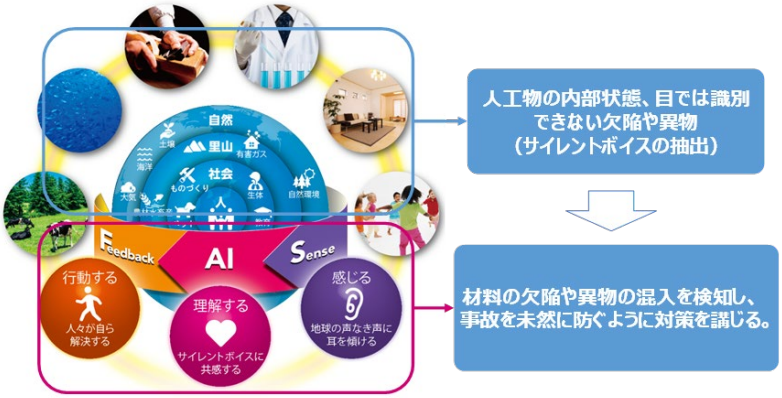


図 A4.1.5-1: テラヘルツセンサの位置づけ.

【テラヘルツセンサの特徴・優位性】

テラヘルツ帯は電波と光波の中間に位置しており、電波のように物質を透過する性質と共に光波のように空間を自在に導くことができる性質を有し、またミリ波に比べて波長が短いため、イメージング用途にとって必要十分な空間分解能を有する。

一方、カーボンナノチューブ（CNT）膜（図A4.1.5-2）を使ったテラヘルツイメージセンサは室温でテラヘルツ波に対して高い吸収率を有しており、また自由自在に折れ曲がる特徴を有している。このことから折れ曲がるカメラが作製可能であり、湾曲した物体を一度で計測したり包装材の欠陥や傷を内容物に入れたまま検査したりすることが可能となる。

図 A4.1.5-2: カーボンナノチューブ膜.

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

【具体的内容と実現時期】

テラヘルツセンサを用いたサイレントボイス（人工物の欠陥や異物混入）の検知として、具体的応用としては次の例が挙げられる。

- 製品やコンクリート等の異物や欠陥の検出、
- 薬剤の種類識別、薬剤の品質管理・信頼性向上

【提供の担い手となる企業・自治体等の実施主体】

前述のテラヘルツセンサの応用として、以下の担い手企業が考えられる。

- 製造業における生産現場における製品出荷検査など
- 製薬メーカー（品質管理工程）

【想定する製品・サービスに対するベンチマーク（特徴・優位性）】

X 線検査装置が深部まで検知可能であるが、テラヘルツ波はエネルギーが X 線と比べてけた違いに小さいことから物質への影響はなく安全な検査装置である。また X 線検査装置や近赤外線カメラ等と比べて安価である。

また目視や赤外線、X 線などでは識別できない薬剤の種別の識別が可能で、薬剤の種類を識別し、薬剤の間違い・混入を防ぐことにより、品質管理、信頼性向上を図れる。

【社会的・経済的インパクト（売上の規模や効用の金銭的インパクトを含む）とその根拠】

一般に各種センサを用いた非破壊検査の世界市場規模として、装置・機器及び受託業務，事

4　研究開発テーマの成果

業者売上高ベースでは 2 兆 8,356 億円（2017 年度）と推計されており、そのうち，装置・機器世界市場は 8,150 億円で、受託業務世界市場は 2 兆 206 億円とされている。非破壊検査業務及びその業務を支える装置・機器の需要はプラス成長しており，市場は需要増に伴って成長をしていくと考えられている。

（3）研究開発期間終了時の達成目標

- テラヘルツ計測システムのプロト機の製作を行う。
- 薬等の取り違え、異物混入、破損、ストレスなど、トラブルが発生する前の検知として利用可能であることを実証する。

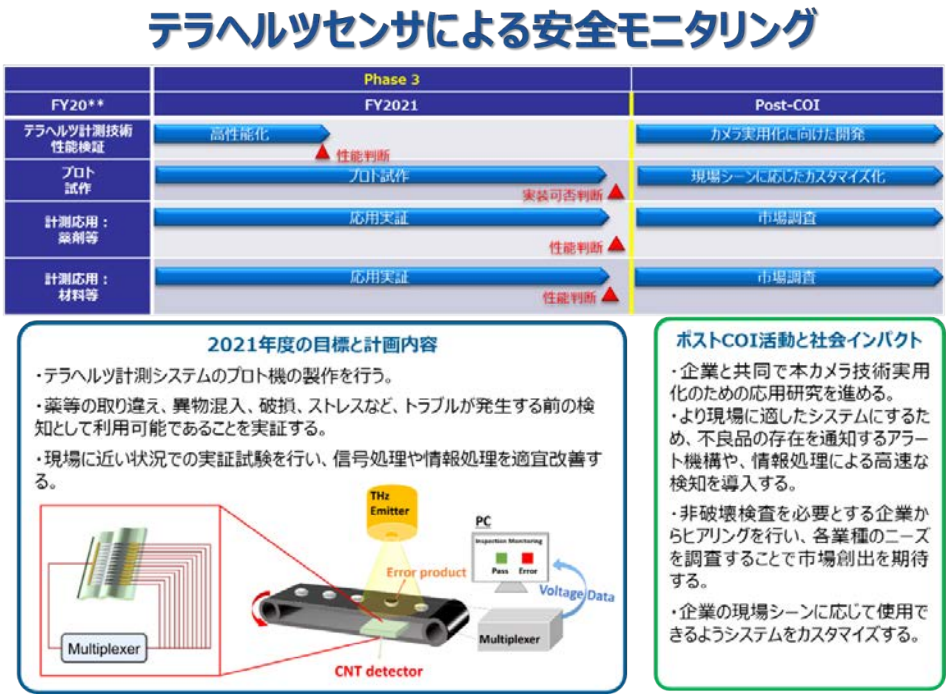


図 A4.1.5-3: テラヘルツセンサの研究開発.

（4）主な成果と達成状況

(A）テラヘルツ計測システム（検査ロボット）

フレキシブル CNT カメラをロボットに実装することで高所難所など人間の手が届きにくい、または危険な場所で検査を行うスマート計測システムとして、ロボットアーム装着型の光学検査ロボットを試作した。自在に動くロボットアームの動作に応じて難所での検査が可能となった。（図 A4.1.5-4）

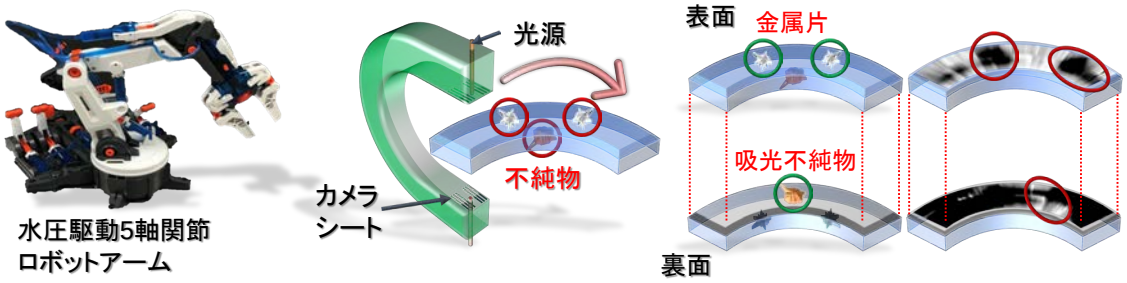


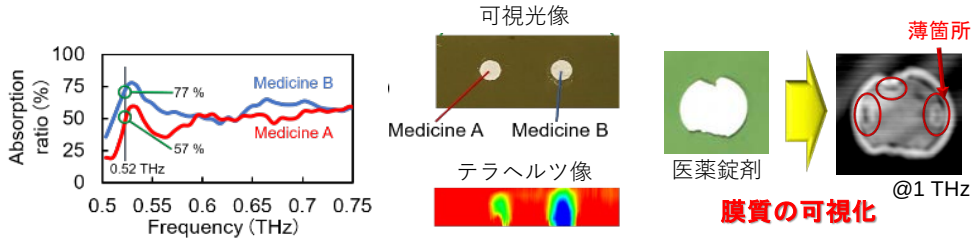
図 A4.1.5-4: CNT カメラ搭載ロボットアームと自動画像検査.

(B）医薬品の取り違え防止・異物混入検査

ベルトコンベア上での検査を想定して，移動中の薬に対して動的な識別を達成した。ここでは、THz 透過率の違いから、可視光では区別がつかない 2 種類の医薬品を判別した。ま

4　研究開発テーマの成果

た、錠剤の膜の厚みの分布可視化にも成功した。（図 A4.1.5-5）



(a)異種の医薬品の判別　　(b)医薬錠剤の膜質の可視化

図 A4.1.5-5: 医薬品への応用.

（5）今後の課題と対応方針

テラヘルツカメラは、インフラなどの検査応用にも展開可能であることから、現在、大手素材メーカーA 社とコンクリートや鉄の劣化・破損状況の非破壊モニタリングに応用する検討を共同で行っている。ここで得られた知見や技術はインフラ検査にも応用展開できることから、今後インフラ系メーカーとも連携し、企業側のニーズを踏まえて現場シーンに応じて使用できるようカスタマイズの検討を進める。

（6）その他特記事項

なし

4　研究開発テーマの成果

4.1.5.2 ダイヤモンドセンサ

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

【テーマの概要】

NV センタをもつダイヤモンドは、室温・大気中で、磁場や温度の高感度に検知することが出来るとともにベクトルイメージングできるという特徴も有する。この磁場や温度を高感度に検知できるダイヤモンドセンサを生体のサイレントボイスに適用し、人の健康への応用につながる。

【地球インクルーシブセンシングにおける位置づけ】

生体が発している声なき声（サイレントボイス）、すなわち生体のより深部の情報（磁場）とエネルギー（温度）を室温大気中でかつ低侵襲で計測するダイヤモンド量子センサにより、例えば癌の転移を簡便ですばやく検知することなど、病気の重症化を未然に防ぐのに役立てる。

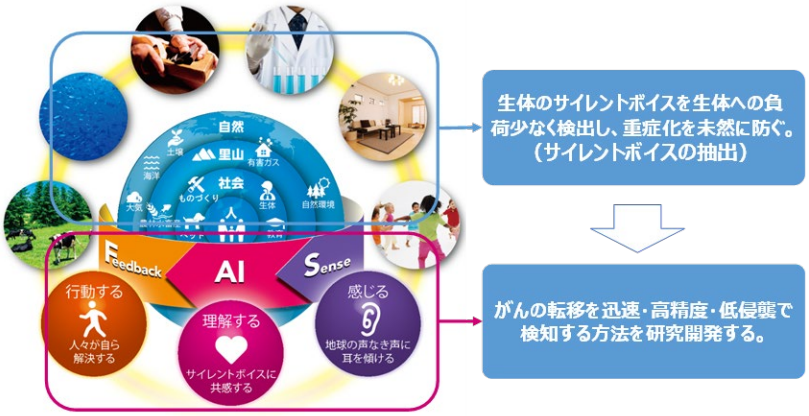


図 A4.1.5-6: ダイヤモンドセンサの地球インクルーシブセンシングにおける位置づけ.

【ダイヤモンドセンサの特徴・優位性】

磁気センサとしてのダイヤセンサは、超伝導を用いた SQUID とホール素子などと比較すると、生体の脳磁や心磁を検出するレベルに達しているのは SQUID であるが、極低温を必要とするため大掛かりな装置となる。その点、ダイヤモンドセンサは常温大気中動作で、理論的には数十 $f_T/(Hz)^{1/2}$ 感度の可能性がありダイナミックレンジが高いことも特長である。また、磁場ベクトルをイメージングできるという、ほかのセンサにない機能を有している。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

【具体的内容と実現時期（COI プログラム終了後も含む）】

ダイヤモンドセンサの応用例として、乳癌の転移診断が取り上げる。乳癌の場合、乳房から癌細胞が初めに到達するリンパ節を検査して切除の判断を行っている。この同定法としてラジオアイソトープ法が用いられているが、放射性物質を使用のため安全性の問題や設備が大型になる。これに対して、癌病巣からリンパ系へ導入した磁性流体を体外の小型のダイヤモンド磁気センサによって検出し、放射性物質フリーなリンパ節同定を確立し、術中でもリンパ節の診断でき迅速な判断が可能となる。（図 A4.1.5-7:）

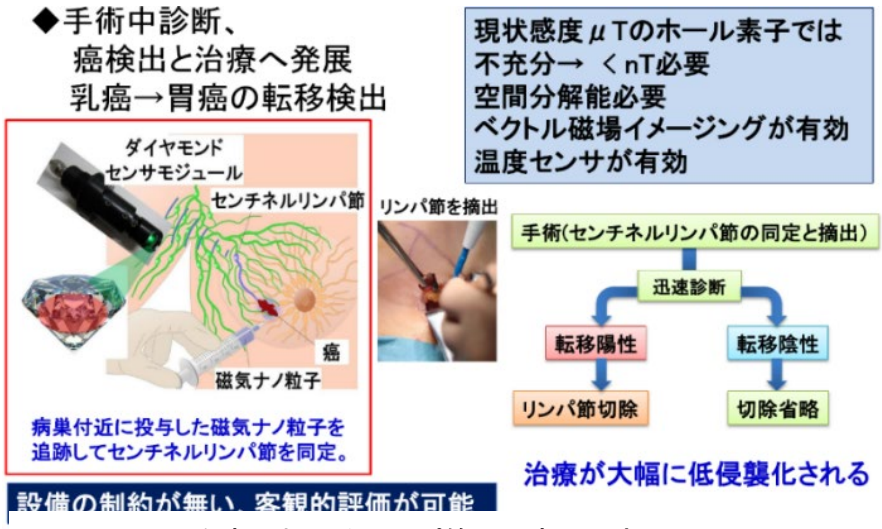


図 A4.1.5-7: 乳癌におけるリンパ節の同定への応用.

4　研究開発テーマの成果

【提供の担い手となる企業・自治体等の実施主体】

乳癌の手術を扱う病院。

【想定する製品・サービスに対するベンチマーク（特徴・優位性）】

上記乳癌のセンチネルリンパ節同定においては色素法、ラジオアイソトープ法などがある。色素法は侵襲を伴い患者へのダメージが大きい。またラジオアイソトープ法は、放射線を扱うことから特別な施設や放射線取扱技術者が必要なこと、また X 線撮影装置が必要で設備が大型で高価なものになる。その点、ダイヤモンドセンサは取扱が容易であるだけでなく、標識に用いた磁性微粒子による微弱磁場と、抗体反応による微弱な発熱をも検知可能となるため、非侵襲で癌の病変有無・範囲を高精度で特定可能となり、手術部位の最小化につながる。

【社会的・経済的インパクトとその根拠】

磁気ナノ粒子を用いたダイヤモンドセンサによるリンパ節同定が可能となれば、装置は小型となるため小規模病院においても導入され、近隣の病院でも信頼性の高い転移診断が可能となり最適な治療の提供につながる。

（3）研究開発期間終了時の達成目標

乳がんのリンパ節の同定など体外からより深い部位を検知するには、現状の DC 磁場感度よりもさらに２桁向上させることが必要となる。そのため次に示すコア技術をさらに向上させる。

- アンサンブル NV センタのスピンコヒーレンス時間の一桁伸張
- センサ構造による集光効率向上
- ダイヤモンド中のスピンノイズや歪の影響をデカップリングする量子操作の提案と検証

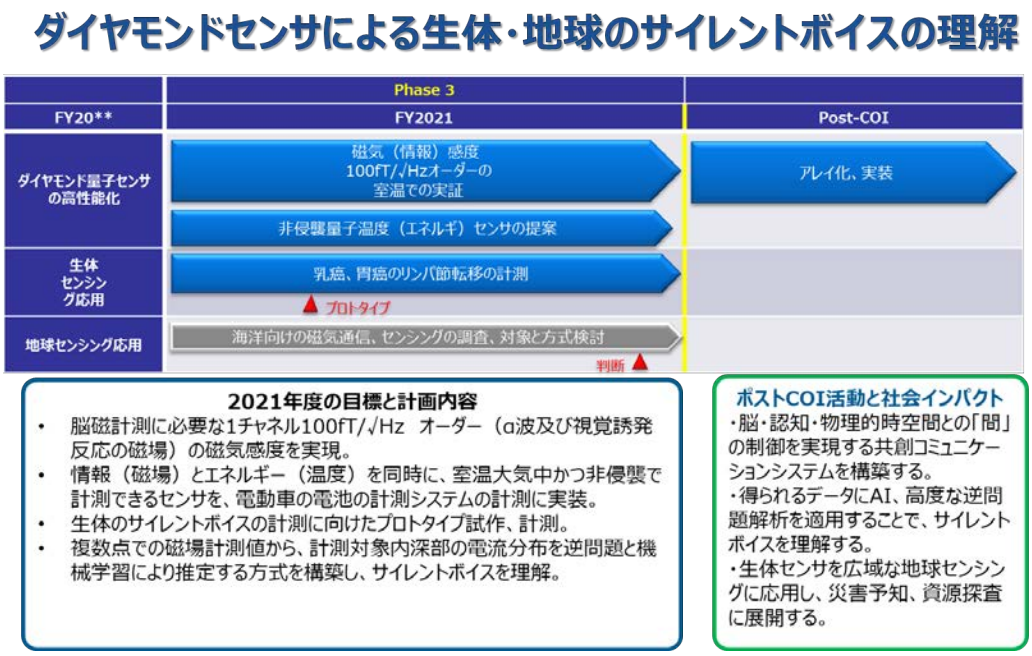


図 A4.1.5-8: ダイヤモンドセンサの研究開発.

（4）主な成果と達成状況

量子プロトコルを用い高感度計測を構築し、AC 磁場 3.6 pT Hz^{-1} 従来より 1000 倍の高感度）を達成した。これにより、乳がんのリンパ節の同定を想定した小型磁気プローブを試作した。（図 A4.1.5-9）

また生体計測にとって重要な、情報（磁場）とエネルギー（温度）を室温大気中かつ非侵襲で計測できるダイヤモンド量子センサとして、以下のコア技術を向上させた。

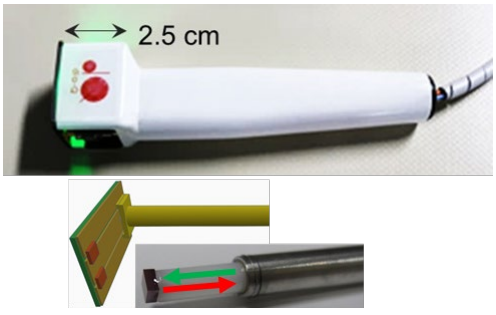


図 A4.1.5-9: ダイヤモンド磁気プローブ.

4　研究開発テーマの成果

- 生体計測が可能な磁気感度を実現：磁気感度向上を抑制する主要因であった、レーザーノイズの低減を目的とし、バランス検出方式の 2 つの方法を構築し、350 倍以上の高感度化を実現した。
- 生体計測にとって重要な、情報（磁場）とエネルギー（温度）を室温大気中かつ非侵襲で計測できるダイヤモンド量子センサの原理検証：一対の共鳴点に 2 つのマイクロ波周波数を追従させることにより 1 kHz の帯域での電流・温度の同時計測を可能とした。
- 上記のバランス検出方式、及び磁場と温度の同時計測機能を実装した小型プロトタイプを試作した。DC 磁場計測を行った結果、環境ノイズの抑制により長時間にわたる安定した動作を確認し、到達磁場 5pT を検証した。

（5）今後の課題と対応方針

ダイヤモンド磁気センサをさらに高感度化、またイメージング機能を高めることにより、癌転移の検出のみならず、生体の脳磁や心磁の計測、また小型の MRI へ開発につなげる。

（6）その他特記事項

なし

4　研究開発テーマの成果

4.1.5.3 グラフェンセンサ

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

【テーマの概要】

呼気や皮膚から発散される微量の生体ガスを検出することで、病気の予兆（未病）に診断を実現する研究が注目されている。特に、皮膚から放散されるアンモニアは身体的・精神的ストレスの指標になると考えられ、人間の健康と密接に関係していることが徐々に明らかになっている。しかし、このような生体ガスは ppb レベルと非常に希薄であり、高速で検知することは現在のセンサ技術では極めて困難である。

一方、シックハウス症候群に代表される生活環境汚染に伴う健康被害は、近代住宅の高気密化・高断熱化に伴って益々深刻になっており、世界保健機関（WHO）は、生活環境汚染ガスとして 100 種類にも上る VOC ガスを認定しているが、それらが人体に影響を及ぼす濃度として定められた数字は、いずれもシングル ppb（< 10 ppb）レベルであり、やはり従来のガスセンサで検出することはできない。

このような極低濃度ガスを検知する技術として、グラフェンを用いた超高感度センサ技術を研究開発し、これまで把握することができなかった微量のガスを検知する技術の確立を目指す。

【地球インクルーシブセンシングにおける位置づけ】

これまで把握することができなかった生体と生活環境が発している声なき声（サイレントボイス）を抽出し、不健康を検知する。すなわち、呼気や皮膚から放散されている生体ガスと、室内の VOC ガスをサイレントボイスとしてグラフェンセンサでセンシングし、病気の予防と生活環境モニタリングに役立てる。

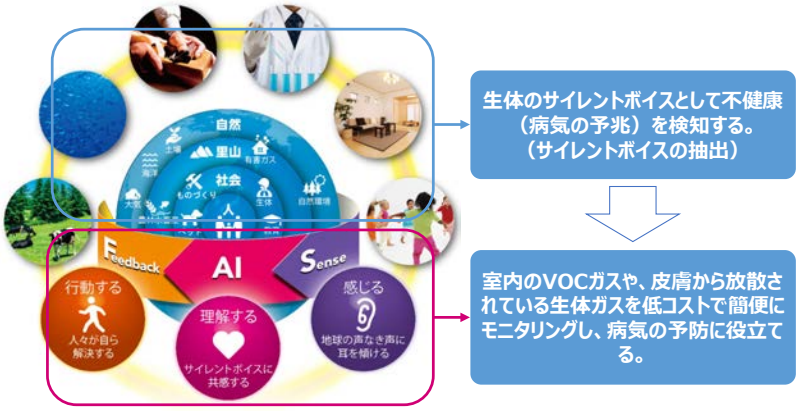


図 A4.1.5-10: グラフェンセンサの位置づけ.

【グラフェンセンサの特徴・優位性】

現在のトランジスタ型半導体ガスセンサでは、検出濃度限界が数 ppm レベルであり、シックハウス症候群をはじめとする現代の生活環境汚染や微量の生体ガスセンシングで必須となる ppb レベルのガス検出は極めて困難である。これに対して、グラフェンセンサではグラフェン表面に物理吸着した少数ガス分子による微小な電気抵抗変化を、室温で 1 分～数分程度の高速で検出することが可能である。また、この抵抗検出型グラフェンセンサは化学反応を用いないため、電界を切れば、吸着分子は自然に脱離するので、センサのリフレッシュ動作が不要であるなど多くの点で技術的に優位である。

さらに第二の検出方式として、RF グラフェン振動子を用いた質量検出型グラフェンセンサの基盤技術を開発しており、吸着分子の質量を室温で 100 ゼプトグラム（1 zg = 10^{-21} g）レベルで検出することに成功している。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

【具体的内容と実現時期（COI プログラム終了後も含む）】

シングル ppb レベルの混合生体ガスおよび生活環境ガスの構成スペクトル高速検出が実現できれば、メンタルストレス、胃がん、肺がん、肝炎や糖尿病などの疾病患者の生体ガスを測定することが出来、シックハウス症候群などの原因となる種々の VOC ガスに対する検出性能を評価することにより、これまで不可能であった病気の予兆や個人個人の生活環境のリアルタイムモニタリングが可能となる。

【提供の担い手となる企業・自治体等の実施主体】

生体ガスモニタリング技術に関心のあるライフサイエンスビジネス企業や病院への導入。

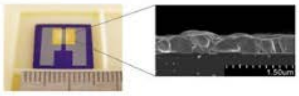
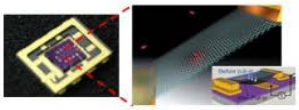
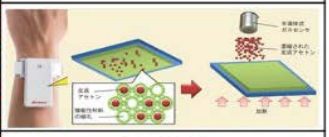
4　研究開発テーマの成果

【想定する製品・サービスに対するベンチマーク（特徴・優位性）】

生体ガスセンサに関する比較表を表 A4.1.5-1 に示す。他と比べてグラフェンセンサ（表中の EISESiV※グラフェンセンサ）は、検出性能（検出方式複合化による高機能化も含む）、高速検出、室温検出、他のガスへの展開、など多くの点で優位性が高い。

（※EISESiV は当拠点英語名称の略称）

表 A4.1.5-1：生体ガスセンサ技術の比較.

	富士通（呼気アンモニアセンサ）	EISESiVグラフェンセンサ	NTT (皮膚アセトンセンサ)
検出方式 （検出限界）	**抵抗検出型**（CuBr薄膜上NH_3分子吸着によるCuイオン伝導度変化検出：検出限界不明） △	● **抵抗検出型**（単分子レベル）（現在濃度5pppbまで成功） ● **質量検出型**(検出限界: 100ｾﾞﾌﾟﾄｸﾞﾗﾑ（100×10^{-21}g) ◎	**質量検出型**：水晶振動子マイクロバランス（QCM）法 (推定検出限界: 3ピコグラム △
センサーイメージ			
検出時間	＜1分 ◎	＜1 分 ◎	2～5 分 △
検出温度	室温　◎	室温　◎	200 ～ 400 ℃ ×
リフレッシュ方式	不明:ヒーター加熱式？ △	ジュール熱方式　○	ヒーター加熱式 △
デバイス実装形式	スマートフォン内臓	ウェアラブル狙い	ウェアラブル
技術の汎用性	アンモニアガスのみに適用可 ×	他のガス種にも対応可能（ガス種によっては表面修飾が必要） ○	ガス種に応じて異なる捕集材（ゼオライトなど）が必要 △

（3）研究開発期間終了時の達成目標

抵抗検出型グラフェン気相センサ素子による生体・環境ガスの高速検出を目指す。

（4）主な成果と達成状況

- 抵抗検出型グラフェンセンサを用いて、メンタルストレスとの関連が重要視されている生体ガス・アンモニアの検出実験を行い、大気中・室温で濃度 5 ppb の高速(～数秒)の検出に成功した。
- グラフェン振動子による質量検出型センサを用いて、水素分子吸着による質量の増加を室温で～100 ゼプトグラムレベルの精度で検出することに成功した。

（5）2020 年度からの対応

グラフェンを用いるセンサデバイスは、極微小ガスのセンシングが可能であるほかに、極微小電量のセンシング可能なことから、電界センサを研究開発することとした。

2020 年度から参加企業からのニーズである襲雷予測のためのグラフェン電界センサの研究開発を進め、A4.1.3「大気のサイレントボイスとの共感」に記載した成果を得ている。.

一方、極微小ガスセンサに関しては、ニーズを持つ企業を探索中である。

4　研究開発テーマの成果

4.1.6　ゼロパワーIoT/AI プラットフォームグループ

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	舟窪　浩　東京工業大学　教授
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	大見　俊一郎　東京工業大学　准教授 角嶋　邦之　東京工業大学　准教授 中原　啓貴　東京工業大学　准教授
研究開発実施期間：	2018 年度～2021 年度
参画機関：	東京工業大学、大阪国際工科専門職大学、ルネサス エレクトロニクス株式会社、ソニーグループ株式会社

4.1.6.1 超低消費電力不揮発性メモリ・ロジック

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

【テーマの概要】

IoT/AI 機器が大きなエネルギーを消費している現状があり、エッジデバイスのハード、ソフトの両面からの超低消費電力化が将来の大きな課題となっている。「地球との共生」という東工大 COI のビジョン達成のためにはゼロパワーIoT/AI プラットフォームの構築は共通の基盤技術として必須である。このため基盤実装 Gp の位置づけでそのキーデバイスである超消費電力 IoT/AI エッジデバイスの研究開発を進めた。それに必要な機能、性能は装着、設置負担が少ないこと、すなわち小型軽量で充電不要であることが求められる。その技術要件として、超低消費電力技術、クラウドではなくエッジでのデータ処理技術、自ら発電、蓄電するエナジーハーベスト技術があり、東工大 COI では特に超低消費電力技術に注力して研究開発を進めた。

超低消費電力技術の重要課題は動作電力の削減、待機電力の削減、データ処理量の削減である。それぞれの課題の解決策として、トランジスタの低電圧化による動作電力の削減、記憶素子に使用されている既存揮発性メモリの強誘電体材料を用いた不揮発性メモリ（NVM）への置き換えによる待機電力の削減、積和演算処理回数の削減を目指すアーキテクチャの研究開発を進めた。

【ゼロパワーIoT/AI プラットフォーム用エッジデバイスの特徴・優位性】

図 A4.1.6-1 に IoT/AI エッジデバイスの概念図を示す。IoT/AI プラットフォーム用エッジデバイスの超低消費電力化を実現するため東工大 COI では強みを持つ HfO_2 系強誘電体材料技術(FE-HfO_2 系材料)をベースにした電圧駆動の超低消費電力不揮発性メモリと低電圧動作 SOTB トランジスタをロジック適用した超低消費電力 IoT/AI エッジデバイスの実現を目指すことが特徴である。特に、この FE-HfO_2 系材料は 2011 年に見いだされ、現在世界的に注目を集めている材料である。図 A4.1.6-2 にこの材料系の位置づけに示したが、東工大ではこの材料系にいち早く注目し、既存の PZT,SBT 等の強誘電体材料と同等の特性を持つこと及び FE-HfO_2 系材料の強誘電性を示すメカニズムと設計指針を世界に先駆けて明らかにしてきたことに特徴と優位性を有する。

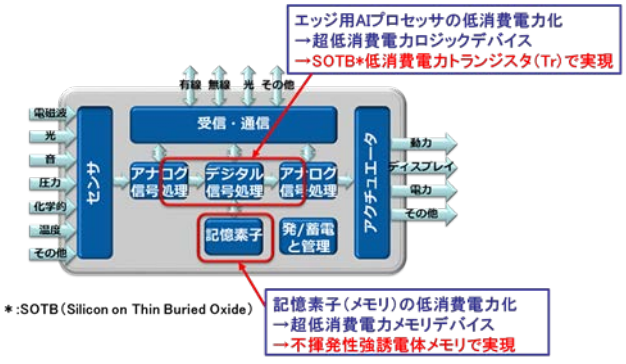


図 A4.1.6-1: IoT/AI エッジデバイスの概念図.

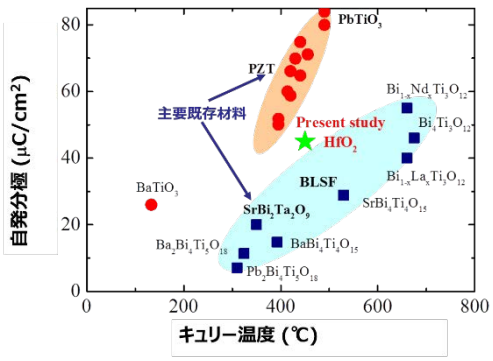


図 A4.1.6-2: HfO_2 系強誘電体材料の位置づけ.

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

【具体的内容と実現時期、想定する企業（COI プログラム終了後も含む）】

COI 終了時は FE-HfO_2 系材料を用いた強誘電体メモリ単体セルの要素技術の構築を目指す。

4　研究開発テーマの成果

その後良好な単体セル特性が得られた場合、ポスト COI で参画企業であるルネサスエレクトロニクスの協力を得て、2022 年以降に低消費電力マイコンへの混載を目指したメモリセルアレイの数量評価を行い、POC,製品化を目指した社会実装を進めることを想定している。

【製品・サービスに対するベンチマーク（特徴・優位性）】

社会実装のための製品化で想定する製品は第一に混載用低消費電力 HfO_2 系強誘電体メモリ、具体的には低消費電力強誘電体メモリ混載マイコンであり、そのターゲットアプリを図 A4.1.6-3 に示す。エナジーハーベストでも動作可能な超低消費電力 IoT 製品群である。従来の NVM 混載マイコンには NOR フラッシュメモリが採用されていたが、動作原理上で最も低消費電力な特徴、優位性を有する FeRAM/FeFET(データ書き換え回数 10^5 回)で置き換えることを目指す。コードストレージ用 NOR フラッシュ市場規模は 3500 億円程度(2016 年)であるが、NOR フラッシュ搭載のマイコンの市場規模は 2,2 兆円(2019 年)と規模が大きい。第二に、書き換え回数が 10^{11} 回以上の FeRAM/FeFET の開発を行い、現在製品化されているエッジ AI チップの主要な記憶素子とし使用されている揮発性メモリの SRAM の一部を置き換えることを目指す。なお、低消費電力混載用途エマージング NVM に関する技術ベンチマークを表 A4.1.6-1 に示した。

図 A4.1.6-3: 想定するターゲットアプリ.

	東工大	東北大 ファウンダリ 電流駆動	AIST 東北大 電圧駆動	Stanford大	IBM	imec	Fraunhofer NaMLab Leti	東大
デバイス	FeFET FeRAM FTJRAM	STTMRAM SOTMRAM	電圧駆動 MRAM	ReRAM PCM	PCM ReRAM	ReRAM STTMRAM	FeFET FeRAM	FeRAM
駆動方法	電圧	電流	電圧	電流	電流	電流	電圧	電圧
消費電力	◎	△	○	○	△	○	◎	◎
書込速度	△	○	○	△	△	△	△	△
データ書き換え回数	○	○	不明	△	△	△	○	○
セル方式	1T 1T1C	1T1MTJ	1T1MTJ	1T1R 1D1R	1T1R 1D1R	1T1R 1D1R	1T 1T1C	1T1C
CMOS 親和性	○	△	△	△	△	△	○	○
CMOS バックエンド混載	○	○	不明	△	○	○	○	△
ロジック低電力化	○	○	不明	△	△	△	△	△

表 A4.1.6-1: 低消費電力混載 NVM ベンチマーク.

【社会的・経済的インパクト】

社会的・経済的インパクトとして、SDG7 関連のカーボンニュートラル CO_2 排出量削減の観点より試算した。全世界の IT 機器の消費電力は年率 7%上昇しており、2025 年以降に予想される IT 機器の消費電力 28,000 億 kWh のうち半導体による電力が 33%、その 1/4 が低消費電力アプリ向けと仮定すると、2,300 億 kWh が削減対象となる。動作時消費電力 1,725 億 kWh は現在 0.7V である電源電圧を 0.35 V へ低減することにより 1/4 に削減することが可能である。待機時消費電力 575 億 kWh は揮発性メモリの一部を NVM に置き換えることで 1/2 にすることが可能である。削減量の合計は 1,600 億 kWh であり、これは CO_2 排出量に換算して約 830 億 kg/年である。

（3）研究開発期間終了時の達成目標

＜超低消費電力不揮発性メモリ・ロジック終了時達成目標と数値目標＞

●材料技術

- 強誘電体材料の低温形成：400℃以下
- 抗電界等材料設計手法の確立
- ALD 成膜技術の開発

●強誘電体メモリデバイス単体素子技術

- データ書き換え回数：10^{11} 回以上
- データ保持：10 年（@RT)
- 書込み動作電力: 50 fJ/bit 以下、待機電力；ゼロ
- 動作速度: 50 ns

4　研究開発テーマの成果

●単体のアレイ化に向けたセルアレイ動作条件の検討
●差異化 IP の創出；
　重要特許出願、作製技術等ノウハウ創出

（4）主な成果と達成状況

＜超低消費電力不揮発性メモリ・ロジック重要成果トピックス＞

●先端 CMOS ロジックプロセスへの混載に必要なデバイス作製プロセスの低温化検討において、イットイウム（Y）ドープ酸化ハウニウム系強誘電体材料とスパッタリング法を用いて室温形成酸化ハフニウム強誘電体薄膜（RT-YHO）を世界で初めて実現した。
●高信頼性を目的として、バッファ層/RT-YHO 強誘電体層/界面層からなる３層構造酸化ハウニウム系強誘電体素子を提案し、キャパシタ素子においてその有効性を実験的に実証した。特に、10^{12} 回のデータ書き換え回数を世界で初めて実現した。
●3x3 個の強誘電性ノンドープ HfO_2 薄膜を用いた MFSFET を用いたセルアレイを試作した。その結果、MFSFET を集積化したメモリアレイにおいても、ヒステリシスのない良好なデバイス特性が得られることが分かった。
●高信頼性３層構造強誘電体デバイスの発明を考案し、日本出願と PCT 国際出願を行った。
　PCT 番号；PCT/JP2020/045325
　出願日；2020 年 12 月 4 日
　名称；不揮発性記憶装置、不揮発性記憶装置及びその製造方法
　筆頭発明者；角嶋邦之

材料、メモリ、デバイスの個別成果サマリーは以下である。

(4-1)　強誘電体メモリ用材料

得られた成果は下記にまとめられる。

1) Y_2O_3 を固溶した HfO_2 薄膜の高い安定性の確認

広く検討されている ZrO_2-HfO_2 組成と比較し、Y_2O_3 添加 HfO_2 薄膜がより広い膜厚範囲に渡って強誘電相（直方晶）が安定であることを見出した。理由として、広く検討されている HfO_2-ZrO_2 の組成と異なり、状態図に種々の組成が存在することが考えられた。

2) 高い温度安定性の確認

膜の配向や膜厚に依存せず、キュリー点温度(強誘電性が消失する温度)が、350℃以上と高いことを明らかにした。従来の強誘電体は薄膜化によってキュリー温度が低下するのに対し、Y_2O_3 添加 HfO_2 強誘電体薄膜では薄膜化しても高い温度安定性が確保できることを明らかにした。

3)　薄膜化での定電圧動作の確認

HfO_2 基強誘電体薄膜は *Ec* の膜厚依存性が他の強誘電体物質と比較して小さいことを見出した。このことは他の強誘電体と比較して、薄膜化による動作電圧の上昇が少ないことを意味しており、HfO_2 基強誘電体薄膜が、低電圧駆動に有利なことを示唆している。

4) 電界誘起相転移による強誘電性の発現

正方晶と斜方晶の境界領域の正方晶膜では、電界の印可によって、正方晶相が斜方晶相に相転移し、強誘電性を示すことを明らかにした。(図 A4.1.6-5 参照)

5)　室温合成の成功

強誘電相が高い安定性を示す Y_2O_3 を固溶した HfO_2 薄膜では、室温合成でも YSZ 単結晶上基板上にエピタキシャル成長した膜が作成可能なことを見出した。さらに *P-E* 特性から、良好な強誘電性も観察された。

さらに、Y_2O_3 を固溶した(Hf,Zr)O_2 薄膜でも広い組成範囲で、室温合成した膜で強誘電性が得られることが確認でき(図 A4.1.6-2 参照)、その特性も組成により変化している。このことから、反応層の少ない良好な界面を有するデバイスが作成可能なだけでなく、強誘電体を用いたフレキシブルデバイスという新しい応用分野の開拓が期待できる。さらに製膜条件を最適化することで、$((Zr_{0.5}Hf_{0.5})O_2$ 膜でも強誘電性を発現することに成功した。

4　研究開発テーマの成果

6)　動作電圧の低電圧化

図 A4.1.6-5 から、正方晶と斜方晶の境界領域の正方晶膜では、抗電界が低下することが明らかになった。また、室温合成でも同様な結果が得られており、低温製膜可能で、低電圧動作可能な組成が明らかになった。

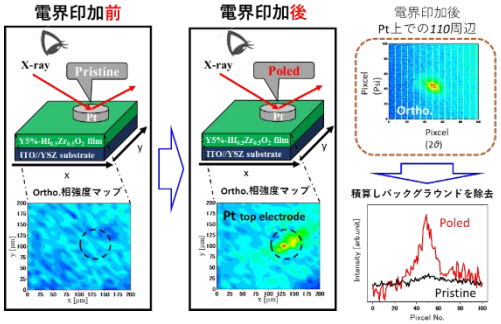


図 A4.1.6-4:　正方晶と斜方晶の境界領域の正方晶膜の電界印可前後の結晶構造変化.

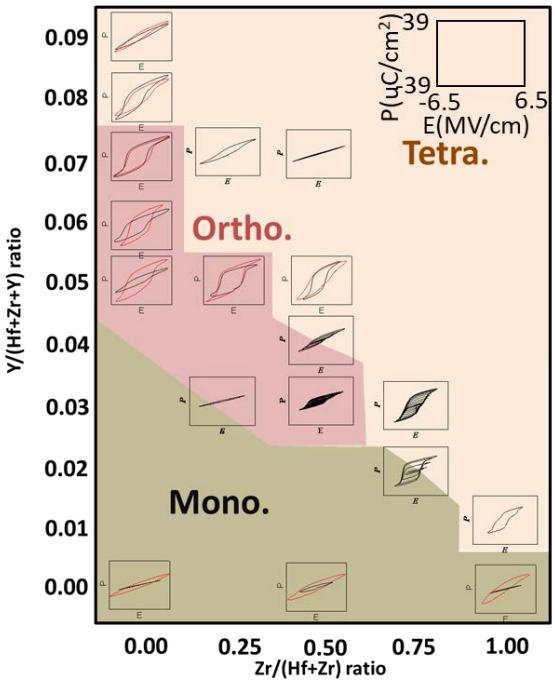


図 A4.1.6-5: (111)ITO//(111)YSZ 基板上に様々な Y/(Hf+Zr+Y)比および Zr/(Zr+Hf)比の Y-(Hf, Zr)O_2 膜を室温合成した場合(赤線)とその後 1000℃で熱処理した場合（黒線）の強誘電性.

(4-2)　ハフニウム系強誘電体メモリ

本研究では、強誘電体メモリの微細化・高集積化に必須である、強誘電体ゲートトランジスタ(MFSFET)の実現に向けて、強誘電性ノンドープ HfO_2 薄膜の Si(100)基板上への直接形成とデバイス作製プロセスに関する検討を行った。反応性スパッタ法による HfO_2 薄膜堆積時の酸素流量比の制御と、Pt ゲート電極形成後の熱処理プロセス(PMA)を検討し、600°C 以下の熱処理により強誘電性ノンドープ HfO_2 薄膜の Si(100)基板上への直接形成を実現した。さらに、Hf 界面層を用いた低誘電率 SiO2 界面層の形成を抑制するプロセスと、Kr/O_2 プラズマを用いることによる HfO_2 薄膜の 5 nm への薄膜化と MFSFET の動作実証を行い、強誘電性ノンドープ HfO_2 薄膜を用いた MFSFET の優位性を示した。

[Hf 界面層による低誘電率 SiO_2 界面層形成の抑制]

RF マグネトロンスパッタ法を用いて、1 nm の Hf 界面層を Si(100)基板上に形成した後に、Ar/O_2 流量比を制御して 10 nm のノンドープ HfO_2 を堆積した。次に、堆積出力 80 W で Pt 上部電極を形成した後に窒素中で 600°C/30 s の PMA を行い、MFS ダイオードを作製した。P-V 特性において残留分極値($2P_r$)が 1.6 μC/cm^2 から 4.0 μC/cm^2 に増大することが分かった。さらに、Hf 界面層を導入した場合、パルス入力 6 V/5ms で疲労特性を評価した結果、10^8 回まで分極値が低下せずウェイクアップ現象も見られない良好な特性が得られることが分かった。

4　研究開発テーマの成果

次に、MFSFET の作製プロセスを構築し、デバイス特性の評価を行った。図 A4.2.6-6 に、Pt/HfO_2(10 nm)/p-Si(100)構造を用いた、ゲート長(L)/ゲート幅(W)が L/W:10/90 μm の MFSFET の、I_D-V_G 特性に対する Hf 界面層の効果を示す。電源電圧 2 V での動作を実証し、Hf 界面層を導入することにより飽和移動度が 70 cm^2/(Vs)から 140 cm^2/(Vs)に向上し、S 値は 240 mV/dec.から 120 mV/dec.に低減することが分かった。さらに、-1~2 V のゲート電圧スイープにおいて、メモリウィンドウ(MW)が 0.09 V から 0.13 V に増加することが分かった。以上の結果から、Hf 界面層の導入により SiO_2 界面層の形成を抑制することが MFSFET の特性向上に有効であることが分かった。

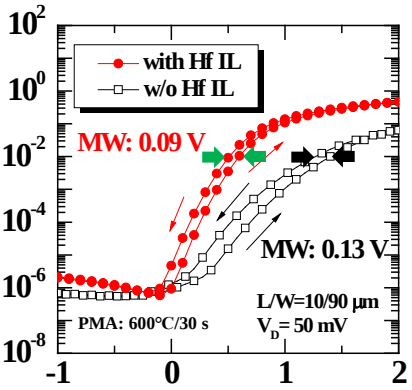


図 A4.1.6-6:　I_D-V_G 特性における Hf 界面層の効果.

[強誘電性ノンドープ HfO_2 薄膜の極薄膜化に関する検討]

強誘電性ノンドープ HfO_2 薄膜の 5 nm への薄膜化に関する検討を行った。まず、ノンドープ HfO_2 薄膜堆積時のスパッタガスを従来の Ar/O_2 から Kr/O_2 とすることにより、結晶化温度を 500°C に低減した場合においても、薄膜化した際の強誘電性を向上できることが分かった。そこで次に、5 nm の強誘電性ノンドープ HfO_2 薄膜を用いた MFSFET の作製に関する検討を行った。その結果、図 A4.2.6-7 の I_D-V_G 特性に示すように、Pt ゲート電極を従来の堆積条件である出力 80 W で堆積した場合、MFSFET のオフリーク電流が増大し良好なデバイス特性が得られないことが分かった。そこで、Pt ゲート電極の堆積条件を検討した結果、堆積出力を 40 W とすることにより、オフリーク電流を低減でき、書き込み/消去パルス入力電圧を-5 V/6 V、パルス幅 100 ms において MW0.41 V の良好なメモリ特性を実現した。以上の結果から、HfO_2 堆積後のゲート電極形成条件を制御することが HfO_2 の極薄膜化に重要であることを明らかにした。

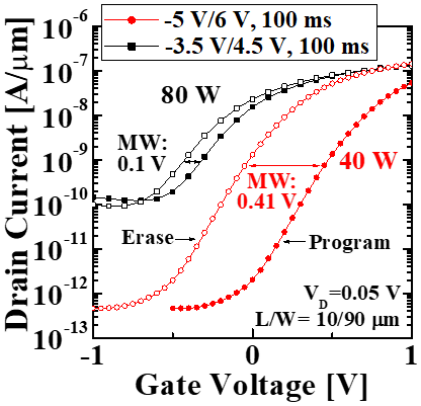


図 A4.1.6-7: I_D-V_G 特性における Pt ゲート電極堆積出力依存性.

[アレイ動作条件検討]

３ｘ３個の強誘電性ノンドープ HfO_2 薄膜を用いた MFSFET を用いた NAND 型メモリアレイを作製し、その動作特性を評価した。その結果、MFSFET を集積化したメモリアレイにおいても、初期化パルス入力後にソース（S）/ドレイン（D）間のドレイン電流の制御が可能であり、ヒステリシスのない良好なデバイス特性が得られることが分かった。

(4-3)　超低消費電力回路用デバイス

[Y:HfO_2 膜の堆積技術]

原子層堆積法(atomic layer deposition: ALD)で一様な 5%Y-doped HfO_2(Y:HfO_2)を成膜するためには、一原子層(1ML)以下の Y_2O_3 の堆積量を精緻に制御し、HfO_2 膜と交互に堆積することが要求される。しかし、Y_2O_3 の堆積は蒸気圧が低い原料から行うため装置間で条件が大きくことなる懸念がある。本研究では 1ML に近い Y_2O_3 を HfO_2 の間に複数回挿入する手法をとることで、強誘電 Y:HfO_2 膜を得る手法を考案した。その結果、600°C の熱処理で残留分極(P_r)は 22 uC/cm^2 から 15 uC/cm^2 に低下するものの、漏れ電流の 1 桁の抑制と 100 倍のスイッチング回数の改善効果が可能であることを示した。再現性や普遍性の高い成膜法である意義を示すことができた。

[強誘電ドメインの配向性の抽出]

Y:HfO_2 膜中の強誘電ドメインは自発分極方向に分散があるため外部電界によるスイッチングする電界にも分散が現れる。強誘電体はスイッチングする前と後で誘電率が異なるため、この性質を利用することで配向の分散を推定した。低電圧で充電したキャパシタからの放電量を計測し、充電電圧を少しずつ上昇すると、ある電圧以上で放電量が少しずつ減少することを確認し

4　研究開発テーマの成果

た。解析の結果 1.2MV/cm から 1.4MV/cm の間に複数の抗電界が存在することがわかり、電極に対して 30° の角度の範囲内で配向が分散していることが分かった。配向性を評価する簡便な方法を構築することができた。

[Y:HfO_2 膜の強誘電性向上技術]

強誘電相の結晶を形成するためには HfO_2 膜の酸素分圧制御が必須であるが、装置毎によって大きく条件が異なる。一方価数揺動酸化物を capping すると付随する HfO_2 膜の酸素分圧を制御することができ、装置毎のバラつきを抑制することができる。本研究では適切な酸素分圧に設定可能な CeO_x 膜を適切な膜厚で capping することで P_r を 30%向上することを示した。また同一の P_r を得るための熱処理時間の 40%程度の短時間化も確認した。CeO_x 膜の capping により 400°C の熱処理温度で強誘電性を確認した。一方、Sc_2O_3 膜、Y_2O_3 膜、PrO_x 膜、TbO_x 膜の capping を行った場合は P_r の向上は確認できなかった。Capping する材料の酸素分圧が Y:HfO_2 膜の強誘電性に大きく影響を与えていることがわかる。

[Y:HfO_2 膜デバイスの消費エネルギーの見積もり]

得られた 7.5nm の CeO_x-cap/Y:HfO_2 膜特性から FeFET を構成した場合の消費エネルギーに試算を行った。ゲート長/幅=100nm/200nm で 2V 動作を想定し、分極および漏れ電流を考慮すると 1 回のスイッチングあたり 10fJ であると見積もられ、超低消費電力回路用のデバイスとして適していることが分かった。

[絶縁破壊と強誘電性の回復]

Y:HfO_2 膜はスイッチングにより膜中の酸素欠損の再配列が起こり、10^7～10^8 回程度で伝導フィラメントが形成され、ジュール熱で絶縁破壊が起こる。CeO_x 膜の capping(図 A4.1.6-8)を行うと CeO_x 膜中の酸素イオンが欠陥を修復するため 10^9 回以上のスイッチング回数を得ることができる。しかし、過剰な酸素イオンの供給によって強誘電ドメインがピニングされるため、P_r がスイッチング回数と共に減少する fatigue が引き起こされる。そのため FTJ として 0.5V の読み出しを行った場合、オン/オフ比は初回の 4 から 10^9 回スイッチングで 1.7 まで低下した。この課題を克服するために低い電圧バイアスを印加することで強誘電ドメインをピニングする酸素を引き戻すことで強誘電性の回復を行うことに成功した。なお、どの Sc_2O_3 膜、Y_2O_3 膜、PrO_x 膜、TbO_x 膜の capping でも絶縁破壊までのスイッチング回数を 1~2 桁向上することができる。

[スイッチング回数の改善技術]

Y:HfO_2 膜と電極界面に酸素イオン電導の低い Y-silicate を挿入することで、酸素欠損の再配列による伝導フィラメントを抑制することができる。Y-silicate の比誘電率が 8 程度であるためキャパシタの P_r は小さく見える課題はあるものの、10^{12} 回のスイッチング回数を実現することができた。Y:HfO_2 膜が実用上必要なスイッチングの回数に耐えられることを実験的に示すことができた。（図 A4.1.6-9 参照）

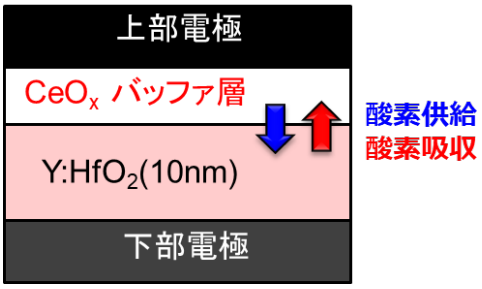


図 A4.1.6-8:CeO_2 バッファ層構造.

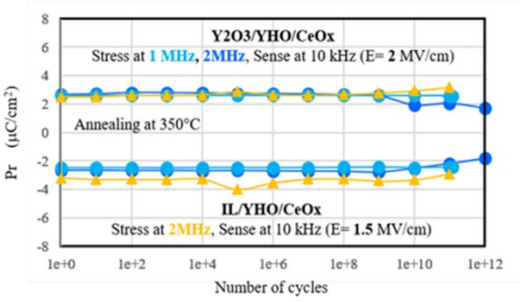


図 A4.1.6-9: データ書換特性.

（5）今後の課題と対応方針

今後の課題としては、第一にハフニウム系強誘電性メモリ素子単体の動作検証をベースとしたメモリセルアレイ化に向けた課題の把握と解決策検討、第二に信頼性モデルの確立、第三に社会実装アプリケーションの明確化が想定される。

それら課題の対応方針としては、第一の課題に対しては良好なセル単体特性が得られた場合、国

4　研究開発テーマの成果

プロ他の研究開発資金の獲得を前提し、ルネサスのニーズと意向を踏まえて、POC 計画を検討立案する。その上で試作ラインに必要な TEG 等の設計資産は既存のものを活用してミニセルアレイの試作評価を進める。その後、メガビット級の TEG の設計、試作評価を行い、強誘電体メモリの数量評価を行う。第二の課題に対しては、セルアレイの試作評価結果を踏まえて、信頼性のメカニズムを解析して明確し、その信頼性物理モデルを構築する。第三の課題に対しては、想定しているアプリケーションより具体的な特性スペックを抽出し、セルアレイ評価結果を踏まえてアプリケーション候補を絞り込む。

4　研究開発テーマの成果

4.1.6.2 IoT/AI エッジプロセッサ

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

【テーマの概要】

IoT エッジ AI 用スマートセンシングプロセッサの特徴を充分に引き出すには、それに適した機械学習アルゴリズムばかりでなく、低消費電力かつリアルタイムな処理速度が要求される。既存の深層学習としては CNN(Convolutional Neural Network)があるが、多数のパラメータを入力データと積和演算する必要があり、大量の電力消費とメモリアクセスのため、リアルタイム性が失われ、また大量の積和演算器を持つ GPU(Graphics Processing Unit)による電力量の増加が問題であった。

この様な背景から、AI の主要技術である深層学習の一種である画像処理に適した畳み込み CNN の 90%以上を占める畳み込み演算は、軽量な演算であるチャネルシフト演算と 1x1 畳み込み演算(Point-wise 演算)と等価であることを証明した。また、多くの重みがゼロ近辺に存在することを明らかにし、枝刈りを用いることでシフト演算を上下座右方向に均一に行う Uniform Shift 演算を導出した。このように少量のデータから特徴を抽出し、学習と推論を行う自動スパース化設計法により画像認識と物体検出の高速化を CPU のみで達成する。

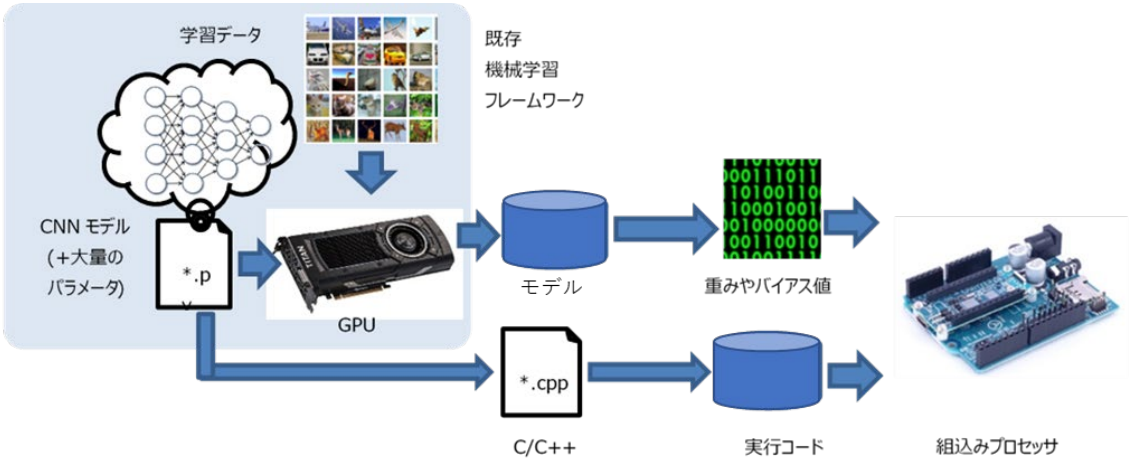


図 A4.1.6.2-1:　開発するエッジ型 AI 処理フレームワーク.

【地球インクルーシブセンシングにおける位置づけと、本研究の特徴・優位性】

地球インクルーシブセンシングにおける IoT/AI エッジプロセッサの役割は、多数のセンサからの情報を、エッジ処理の段階で必要な情報のみを取り出し、それをクラウド上の処理に繋げることである。地球上に配置されたセンサは電源環境が良くない場合も多く、低消費電力が重要である。このため、従来の逐次処理手法と異なり、本研究では比較的小規模なプロセッサで、機械学習によって動作ステップ数を減らすアルゴリズムを開発して、リアルタイムのエッジ処理を可能とした。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

【具体的内容と実現時期（COI プログラム終了後も含む）】

本プロジェクト完了時までに、図 4.1.6.2-2 に示す研究を行う。

4　研究開発テーマの成果

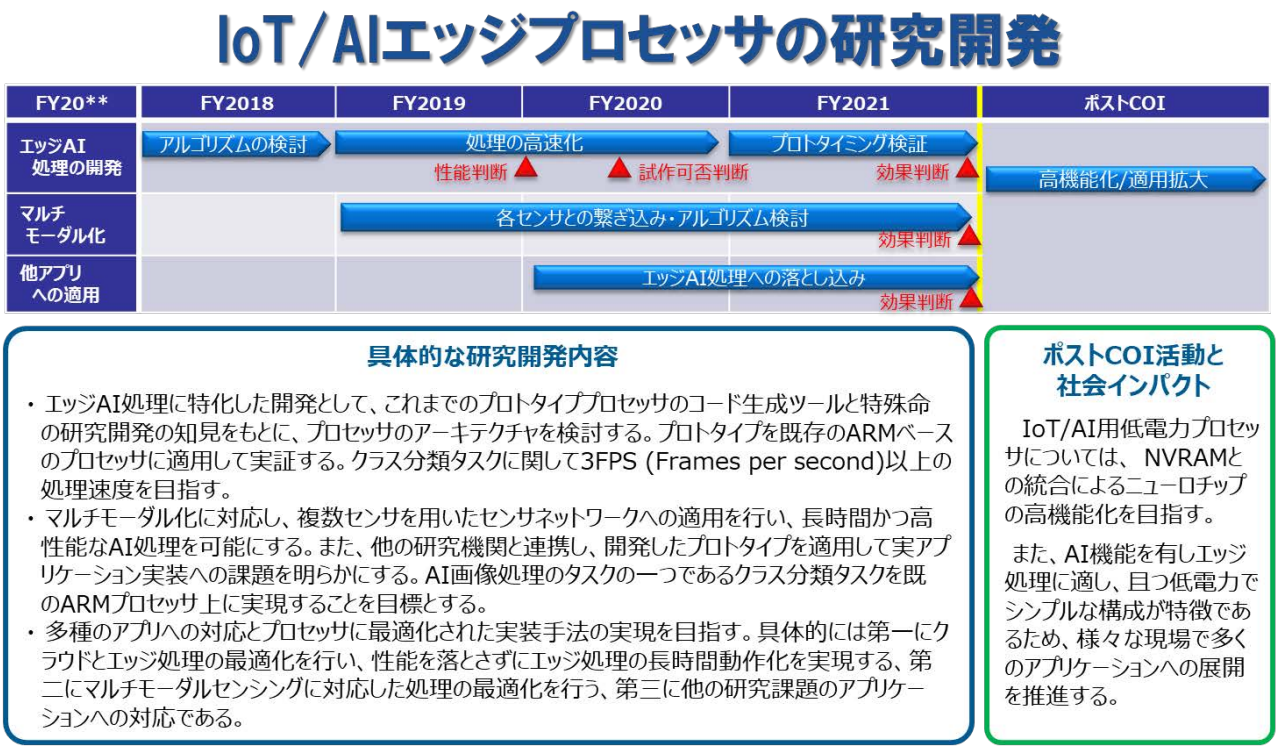


図 A4.1.6.2-2:　IoT/AI エッジプロセッサの研究開発経過.

【提供の担い手となる企業・自治体等の実施主体】

IoT/AI 用低消費電力プロセッサに関して、研究成果を活用した大学発ベンチャー(Tokyo Artisan Intelligence)を 2020 年 3 月に起業し、研究成果を社会実装する取り組みを開始した(設立から 1.5 年で約 1.5 億円の資金調達を達成)。成果の一部は複数の企業との共同開発が進んでおり、本研究開発で得られた成果が活用されつつある。また、北九州市・今治市などの地方自治体との AI 開発拠点としての協業が始まりつつある。

【社会的・経済的インパクト】

エッジ処理能力向上と低消費電力化によりセンサネットワークが容易に構築できるようになり、多様な社会のニーズに対応した観察対象の正確な状況把握や予測が可能となる。

エッジ AI の社会実装が普及することで、コスト削減・安心安全な社会への実現が進む。

（3）研究開発期間終了時の達成目標

達成目標：IoT エッジ AI 処理に適したプロセッサを用いたアプリケーションへの最適化

① 深層学習に適した CNN 演算において、1x1 畳み込み演算と Uniform Shift 演算により演算量を大幅に抑制する自動スパース化設計法を確立する。これにより、低コスト(1000 円程度/ユニット)、低電力(消費電力 2W 未満)、高速処理(検出スピード 10FPS)達成を目指す。

② AI 処理に特化したプロセッサのアーキテクチャを検討する。プロトタイプを既存の ARM ベースのプロセッサに適用して実証する。クラス分類タスクに関して 3FPS 以上の処理速度を目指す。

③多種のアプリへの対応とプロセッサに最適化された実装手法の実現を目指す。

（4）主な成果と達成状況

- AI の主要技術である深層学習の一種である画像処理に適した畳み込みニューラルネットワーク(CNN: Convolutional neural network)の 90%以上を占める畳み込み演算は、軽量な演算であるチャネルシフト演算と 1x1 畳み込み演算　(Point-wise 演算)と等価であることを証

4 研究開発テーマの成果

明した。また、多くの重みがゼロ近辺に存在することを明らかにし、枝刈りを用いることでシフト演算を上下座右方向に均一に行う Uniform Shift 演算を導出した。Intel 社が公開している Intel MKL (Math Kernel Library)を用いて 1x1 畳み込み演算を高速化しつつ、Uniform Shift 演算を既存の numpy ライブラリで実現することで画像認識と物体検出の高速化を CPU のみで達成した。

- 組み込み IoT/AI 用途プロセッサとして代表的な Intel, ARM 両者のプロセッサで準拠している MKL や NNPack といったライブラリとこれまで開発してきた軽量化手法（スパース化、シフト演算、シャッフル演算）を組み合わせた人検出 AI や人カウント AI を実装した。実装した AI モデルは 15FPS(Frames Per Second)の処理能力を持つため、人の動きに対してリアルタイムに追従可能な性能を達成できた。
- 自動スパース化設計法による IoT/AI エッジプロセッサ活用技術確立は達成の見込み。現在、本手法で電球に設置したカメラで室内の人の密検知システムを試作（図 A4.1.6.2-3）し、実証実験を進めている。国産オープンソースプロセッサ RISC-V への移植を行い、顔検出 AI 処理を 10FPS で処理でき、1.5W 消費電力で実現できた。
- 開発したシステムは安価なプロセッサで動作するものであるため、コロナ時代に感染を防ぐシステムとして期待できる。

図 A4.1.6.2-3: 密検出システム.

- 研究成果を活用した大学発ベンチャー(Tokyo Artisan Intelligence)を 2020 年 3 月に起業し、研究成果を社会実装する取り組みとして、複数の企業との共同開発、自治体と協業を始めている。

（5）今後の課題と対応方針

今回開発した自動スパース化設計手法は、深層学習において計算量を大幅に減らせ現実的な解を与えることが出来た。この手法がどの様なアプリケーションに適しているのか幾つかの例でガイドすると同時に、小規模な FPGA システムとの協調で一貫した設計ツールとして提供し、普及を図っていく。また、RISC-V プロセッサ等の組込みデバイスへのポーティング・社会実装を進めていく。

（6）その他特記事項

なし

4　研究開発テーマの成果

4.1.7　研究開発全体の成果について（科学技術・学術上の新たな体系的知見等）

前記研究開発課題の研究を進める中で、学術上の新たな体系的知見につながった例を以下に述べる。

(1) コミュニケーション『場』の可視化

過去の知見と未解決であった知見

従来より認知科学におけるコミュニケーション研究は存在したが、そこではコミュニケーションに参加する各個人(自己)に焦点が当てられ自己と相手を包み込む『場』という概念は希薄だった。また、創造におけるコミュニケーションの位置づけが不明確であった。

新たに得られた学術的成果

コミュニケーションの状態を評価する研究として、非言語的な手段である身体動作をはじめ、音声や画像、脳活動等を含めたマルチモーダルな手段でリアルタイムにコミュニケーション『場』の状態を可視化する技術を確立した(図 A4.1.2 を参照)。さらに、コロナ禍において注目された遠隔コミュニケーションにおける『場』の可視化を進め、オンラインでは困難と考えられていた創造的コミュニケーションの課題に取り組んだ。

新たな体系的知見

先ず『場』と言う概念を導入し、自己と他者を分離したコミュニケーション研究から『場』のコミュニケーションへのパラダイムシフトを提唱した。人々のコミュニケーションのセンシング情報から『場』の状態を可視化し評価する手法を確立した。そこから導かれるポジティブなフィードバックにより、創造的コミュニケーションに対して『場』の可視化技術が重要な役割を担っていることが明確となった。

これ等の体系的知見は、計測自動制御学会の「計測と制御」誌の特集号「コミュニケーション場の可視化と創造性支援」(2021 年 Vol.60,No.06)にて公表した。本学三宅教授が総論を担当し、大学や企業の研究者が各分野の解説と事例紹介を行っている。

(2)高感度グラフェン電界センサ

過去の知見と未解決であった知見

現在フィールドミルと呼ばれる電界センサが使用されているが、高さ 1.5　m と大型であり、AC 電源が必要であるため、実用化に必要な多数配置が困難である。またグラフェンを用いた電界センサの研究結果が一例報告されており、本プロジェクトに必要な感度 20V/m には程遠い性能である。

新たに得られた学術的成果

グラフェン膜の上下を BN（窒化ホウ素）でサンドイッチした新規三層構造のデバイスを考案し（図 A4.1.7-1）、試作・評価した結果、グラフェン膜だけを用いた従来構造よりもキャリアの移動度が 5 倍向上し、電界検出限界≲30 V/m の高感度センシングの見通しを得た。

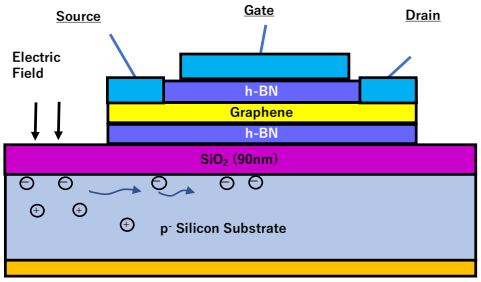


図 A4.1.7-1: 新規構造グラフェン電界センサの断面模式図.

新たな体系的知見

BN の膜厚を変化させて試作を重ねた結果、電子が SiO_2 とグラフェンの界面にトラップされることで電界のセンシング機能が発現することを明らかにした。過去の研究では SiO_2 と Si の界面に電荷がトラップされると報告されており、今回の新たな知見によりグラフェンセンサの性能向上と小面積化が加速することが期待できる。

JAIST 水田研では以上の知見をまとめて、2021 年に国際学会発表 3 件（うち招待講演 2 件）、国内学会 3 件、の成果発表を行っている。

4　研究開発テーマの成果

(3)コミュニケーションデザイン

過去の知見と未解決であった知見

危機管理が必要とされる状況におけるコミュニケーションでは、話し手と聞き手とが意識的に努力して共同で構築する理解が必要となる。そこで、問題解決に向けて行動を起こすコミュニケーションデザインとして、G（目的）P（計画）I（実践）O（観察）サイクルが、特に危機管理が必要とされる状況下で必要となることを提唱した。ここでの P は行動計画ではなく、「誰と一緒にどうなりたいか」という自他の行動変容を促す計画のことである。目的と行動変容の計画から始めるところが PDCA サイクルとの違いである。

新たに得られた学術的成果

危機管理において上記 GPIO サイクルとともに、行動変容を促すために図 A4.1.7-2 で示したフィードバックに当てはめることにより、具体的な施策を検討することが出来る。

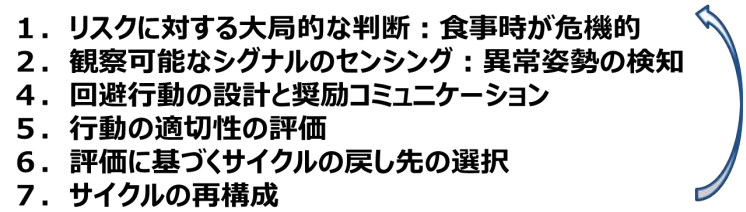


図 A4.1.7-2　行動変容を促すフィードバックループ（デザイナー側）

危機管理におけるコミュニケーションに関して、有効な手段を提唱した。この考え方の概要を日本政策金融公庫「調査月報」１０月号の依頼論文「危機管理のコミュニケーションデザイン」にまとめ、中小企業経営者に向け啓発を行っている。

4　研究開発テーマの成果

(4)酸化ハフニウム系強誘電体材料

過去の知見と未解決であった知見

強誘電体メモリ(FeRAM)は低消費電力な不揮発性メモリとして現在 Suica 等に広く使用されている。しかしながら PZT 等の既存材料では本質的に 100nm 以下の薄膜化が困難であるため、先端 CMOS の微細スケーリングに対応することが困難であり、微細スケーリング可能な新規強誘電体材料の実現が望まれていた。2011 年にドイツのフラウンホーファー研により膜厚 10nm まで薄膜化可能な酸化ハフニウム系新規強誘電体材料が報告されたが、そのメカニズム等の材料科学な詳細知見は未解決であった。

新たに得られた学術的成果

酸化ハフニウム系新規強誘電体材料に関して、材料科学的及び工学的な視点で、その強誘電性発現の系統的なメカニズム他を初期の段階より先駆的に明らかにしてきた。代表例としては、強誘電体膜の室温形成技術とそのメカニズム解明、抗電界(Ec)制御技術とそのメカニズム解明等の成果があり（図 4.1.7-3）、現在でも当該研究開発分野をリードしている。

新たな体系的知見

酸化ハフニウム系強誘電体メモリの材料科学的なメカニズムに関する数々の知見をベースに低消費電力強誘電体メモリを実現するための酸化ハフニウム系強誘電体材料の設計指針を体系的に明らかにした学術的なインパクトは大きい。また、この分野で体系化された初めての専門書である”FERROELECTRICITY IN DOPED HAFNIUMU OXIDE: MATERIALS, PROPERTIES AND DEVICES”の３名の編集者の１人になっている。（図 A4.1.7-4）

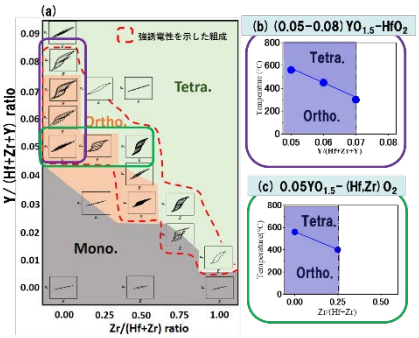


図 A4.1.7-3: 強誘電体材料設計データ例.

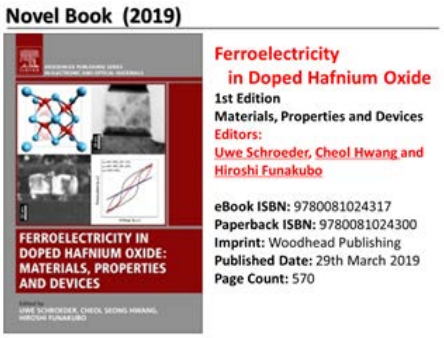


図 A4.1.7-4: 酸化ハフニウム材料・メモリの体系的な専門書.

4　研究開発テーマの成果

4.2　2013~2017 年度活動『以心電心』ハピネス共創社会構築拠点

当拠点は、2017 年度後半に PL,RL の変更を含む研究テーマ替えの見直しを行っている。本章は、見直し前の 2013~2017 年度の活動について、記載する。

4.2.1 目指すべき将来の姿とバックキャスティング

当拠点発足時に目指すべき将来の姿として「ハピネス共創社会」を掲げ、そのビジョンとビジョンからのバックキャスティングの検討を続け、以下のように設定した。

【目指すべき将来の姿】

目指すべき 10 年後の社会像を『以心電心』ハピネス共創社会を設定した。このハピネス共創社会とは、皆が多様な絆でこころが結ばれ、共感と思いやりのこころで感性を高め、いきいきと暮らせる社会である。図 A4.2.1-1 に示すように、この社会では、人々は、世代・文化・言語の壁を越えて真意が伝わるコミュニケーションが行われており、感情を共有でき、たえず共感・連帯感が醸成されている。また、ワークライフバランスを保ちながら、いきいきと働くことができ、高齢者も活躍でき世代を超えて分かり合える関係ができ、外国人が日本で、日本人がグローバルにそれぞれ活躍している社会に変わる。

図 A4.2.1-1: 将来のあるべき姿『以心電心』ハピネス共創社会.

今日のデジタル社会は生活を便利にするが、以下に示すような課題が顕在化している。

- 最近多く利用されている SNS などのコミュニケーションでは、真意が伝わらず、人と人の絆を築くことが困難になっている。
- こころとこころがつながる機会が減少し、意思疎通が欠如し、ストレスが増大している。
- 人間関係の希薄化や個人化が深刻になり、社会から疎外される人が増加している。
- グローバル化が加速する中で外国人との円滑なコミュニケーションができていない。
- 異なる言語や文化を持つ人々とのコミュニケーションの溝が深い。
- 少子・高齢化に加えて、働きたくても場所や時間の制約により働く機会が失われ、労働人口が減少の一途をたどっている。
- コミュニケーションが不全で、創造的な価値創出の多くの機会が失われている。

【バックキャスティング】

ハピネス共創社会を実現するためには、上述のような社会の状況における課題・壁を、すなわち、意思疎通の壁、空間の壁、世代組織間の壁を取り除くことが必要であり、革新的な　『以心電心』コミュニケーションサービスを研究開発し社会実装することとした。

この『以心電心』コミュニケーションサービスとして、

4　研究開発テーマの成果

- 空気・行間を読むサービスは、困っている状況を察知しその情報を予測して利用者に知らせる。
  コミュニケーションの場の空気を読み、真意を伝え、感情を共有する。これにより、こころとこころがつながり、意思疎通の壁を乗り越えることができる。人間関係が深くなり、世代間の交流が活発となり、高齢者も活躍できる社会が実現される。また、いじめの解消や自殺者が減少する。
- 時空を超えるコミュニケーションサービスは、離れていても真意や感情が伝わるコミュニケーションを実現する。
  空間や時間の壁を超えてコミュニケーションができることにより、働きが効率化され、余暇の時間、仲間や家族との時間が増加し、ワークライフバランスが改善される。離れていても仕事ができることから、高齢者や子育て世代の社会での活動が増加する。
- つながり共創空間サービスは、人と人、人と場の共感を高める仕掛けを提供し、コミュニケーションの活性化を促す環境と場を提供する。
  新しい仲間つくり、グループ活動、創造活動が盛んとなり、新しい働き方、ワークライフバランスを保ち、地域主体のいきいきと暮らせる社会が実現する。

上述のバックキャスティングは、拠点発足時から継続的に検討され、社会課題と将来の姿の実現のために乗り越えるべき壁を図 A4.2.1-2 に示す設定し、これらのコミュニケーションサービスを実現する技術を図 A4.2.1-3 のように定めた。

図 A4.2.1-2: バックキャスティングによるサービスの設定.

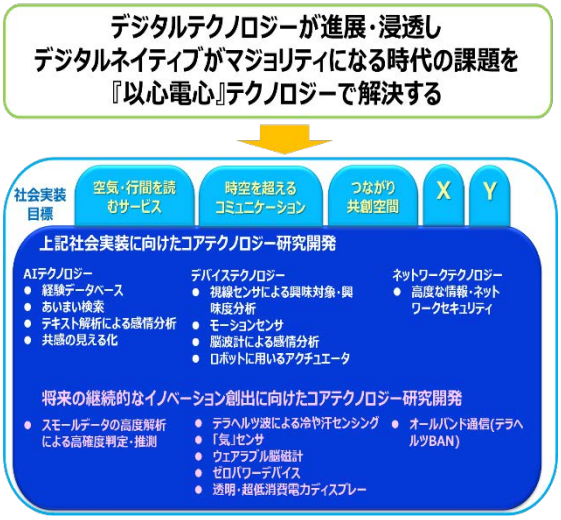


図 A4.2.1-3: 取り組むべき研究開発技術.

【社会的なインパクト】

現在の社会では、コミュニケーションが浅く、気持ち・真意が伝わらず、コミュニケーションが継続・展開せず、価値創造の機会を損失してしまっていることが課題であり、コミュニケーションのきっかけ作りや活性化の仕掛けを作り、多様な絆で結び、異なる技能・価値を認め、高め合い、共感を促し、新たな価値を創発することができると考えられる。

コミュニケーションの量的側面では、図 A4.2.1-4 に示すように、通信システム・ネットワークの情報伝達能力（帯域やカバー領域）は日々向上しているが、量による質の向上は早晩限界に達する。これを打破するためには『以心電心』コミュニケーションによるコミュニケーション革命が必須である。コミュニケーションの質の向上を目指し、感情や

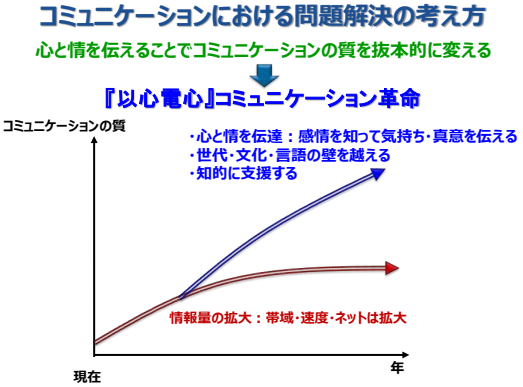


図 A4.2.1-4: コミュニケーション問題の解決の考え方.

4　研究開発テーマの成果

気持ち・真意を伝え合えるコミュニケーションを実現する。そのため、ハピネスの検出だけではなくアンハッピーな状態を緩和・軽減するためにアンハピネスを検知することが重要である。心と情をつなぐコミュニケーションに関して、ハピネスセンサで個人の生体・行動の情報を取得し、空気(環境、アンハッピー)を読むことや、経験データベースを用いた AI 分析で、感覚や記憶・認知機能の不足(対話の相手の名前、過去の交遊録、趣味、嗜好など) を自動的に分析することで行間を読み、単なる情報だけでなく、感情・志向も伝わる円滑なコミュニケーションを実現することが挙げられる。

【研究開発テーマの設定】

前記『以心電心』コミュニケーションサービスとしての、空気・行間を読むサービス、時空を超えるコミュニケーションサービス、つながり共創空間サービスの社会実装に必要となる研究開発課題を以下のように設定した。

① **研究開発課題：空気・行間を読む及び多言語意訳サービス**（旧名称：情報想起・多言語意訳サービス）

AI テクノロジーである経験データベース、あいまい検索、共感の見える化により、情報想起を支援する。

空気や行間を読むため、デバイステクノロジーであるハピネスセンサを用い、共感・共創を起こさせるため、ハピネスアクチュエータを用いる。これらのデバイスは身に着けてどこでも使用できるように、充電フリーのゼロパワーデバイスが必要である。

このハピネスセンサの情報や情報想起支援の情報の伝達には、BAN による高速かつ高度なセキュリティネットワークテクノロジーが必要である。

② **研究開発課題：時空を超えるコミュニケーションサービス**（旧名称：存在感通信サービス）

空気・行間を読むサービスにおける AI テクノロジーやハピネスセンサ・アクチュエータ、ネットワークテクノロジーは同様に必要であるが、対話の場所が固定されているため、デバイスはゼロパワーである必要はない。

③ **研究開発課題：つながり共創空間サービス**

コミュニケーションの計測技術、コミュニケーション活性化技術、共創的コミュニケーションの環境の設計技術が必要となる。

これらのサービスと必要とするコアテクノロジーの関係を図 A4.2.1-4 に示す。

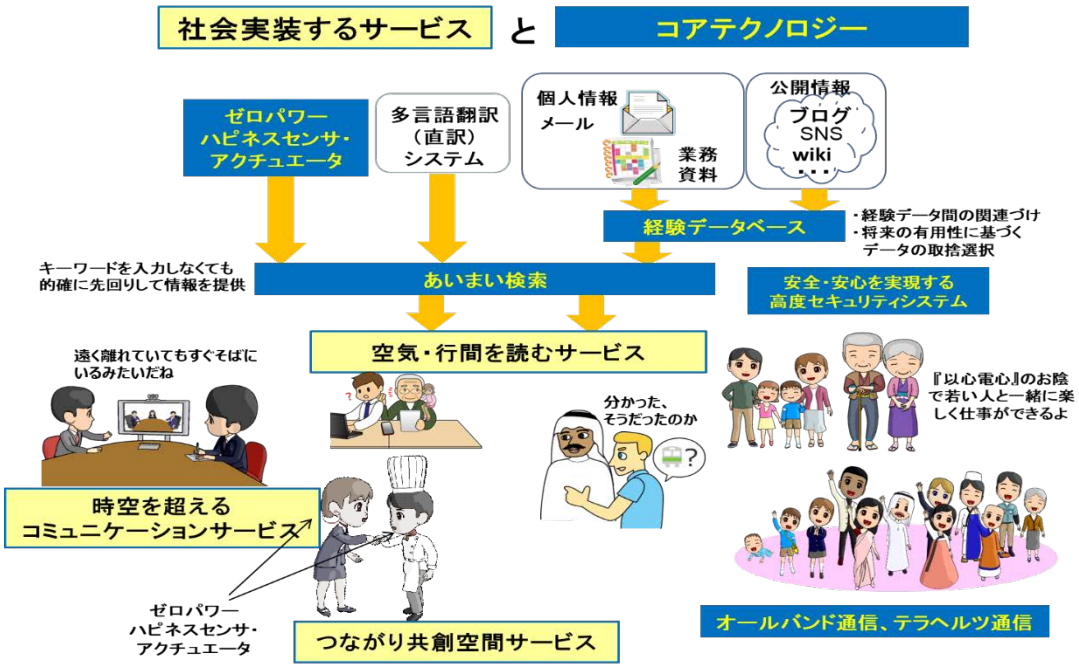


図 A4.2.1-4: 社会実装するサービスとそれに使用するコアテクノロジー.

【拠点体制】

4　研究開発テーマの成果

2013 年度に COI トライアル拠点として採択され、2015 年度より本格拠点として体制を順次拡張し 2017 年度までに右図の拠点体制を構築した。

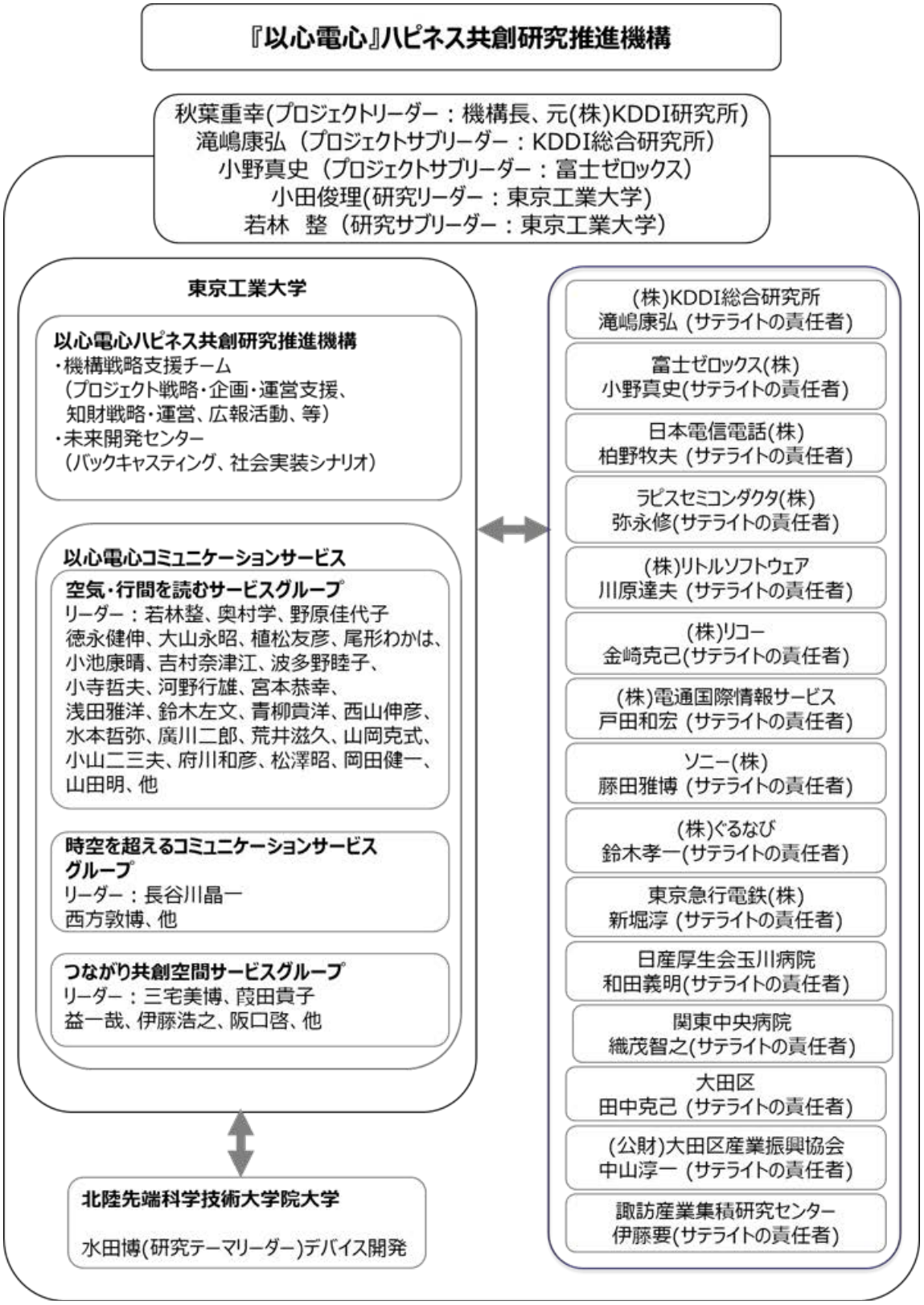


図 A4.2.1-5 『以心電心』ハピネス共創社会構築拠点の体制（2017 年度）.

以下 4.2.2～4.2.4 章において、３つの以心電心コミュニケーションサービスの研究成果を記載する。

4　研究開発テーマの成果

4.2.2 空気・行間を読むサービス

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	秋葉　重幸、東京工業大学
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	滝嶋　康弘、KDDI 総合研究所
研究開発実施期間：	2013 年 11 月～2018 年 3 月
参画機関：	東京工業大学、北陸先端科学技術大学院大学、株式会社 KDDI 総合研究所、株式会社リトルソフトウェア、株式会社電通国際情報サービス

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

「空気・行間を読むサービス」は、困っている状況を察知し、その場に必要な情報を予測して利用者に知らせるサービスである。コミュニケーションの場の空気を読み、直接的な情報だけでなく、真意と感情を伝えることを実現する。さらに、経験情報を学習・蓄積し、日々深化させることにより、真意や意訳の精度を向上していく。言わば、痒い所に手が届くコンシェルジュサービスである。記憶の不足（対話相手の名前、過去の交遊録、趣味、嗜好など）を自動的に分析・補うことで、円滑なコミュニケーションや、サイバー秘書、あるいは仮想的相棒と呼べるようなサービスを提供する。

次に、具合的なイメージを以下に示す。

例として示す図 A4.2.2-1 は、パーティー会場におけるシーンを想定している。ユーザ（パーティ参加者）は耳元にウェアラブルセンサ・アクチュエータ、ポケットに携帯サーバを有している。話しかけられた人の名前がすぐに思い出せない状況をウェアラブルセンサが瞬時に把握し、携帯サーバを介して、クラウド上などにある個人経験データベースにアクセスし、あいまい検索技術を用いて相手の名前と関連情報をそっと知らせてくれる。（記憶想起支援）

図 A4.2.2-1: 空気・行間を読むサービスのパーティー会場における社会実装例.

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

ビジネスモデルを考慮したサービスシナリオを図 A4.2.2-2 に示す。サービスシーンはさまざまなケースが想定され、対象をコンシューマー層としたケースを(左)に、ビジネスに層のケースを(右)に示した。

コンシューマー層を対象としたビジネスモデルでは、音声、電子メール、SNS 投稿、過去のアルバム・日記などアナログ・デジタルのいろいろなデータを収集し、データベース化する。この経験データベースは、図のようなクラウドシステムの中だけでなく個人のパソコンにも構築することができる。しかしながら、高度なセキュリティを保つには、個人のパソコンよりもクラウドシステムのほうが便利であろう。

センサやアクチュエータは超小型化され、サービス利用者の置かれている状況やその場の雰囲気（空気）を読んで、あいまい検索を通して得られた有用なアドバイス、情報提供などを適宜行う。

ビジネス層を対象としたケースでは、仕事に関するさまざまな有用な情報をデータベース化し、クラウドシステムに経験データベースを構築する。ビジネスシーンをセンサ情報から把握し、あいまい検索やビジネスに関連するデータの分析を行う。同時に、それに基づく提案などをそっと教えてくれる頼れるビジネスパートナーとも言える。

4　研究開発テーマの成果

図 A4.2.2-2：ビジネスモデルのケース(左)コンシューマー層を対象　(右)ビジネス層を対象.

（3）研究開発期間終了時の達成目標

空気・行間を読むサービスについて、社会実装に向けた要素技術の開発を進めると同時に、各要素技術を組み合わせたプロトタイプを組みみ上げ、動作の確認を行う。

① 思っただけで先読みする「あいまい」検索（担当：(株)KDDI 総合研究所）

空気・行間を読むため、会話を行うユーザーの経験等のデータベースを構築し、その経験データベースをあいまい検索することで、先読みの情報を情報想起支援としてユーザーに提供する。

経験データベースには、メール、ブログ、ライフログに加えて、拡張経験情報として、写真やニュース、Wikipedia など多種の情報源を収集・構築する。

一般的な PC、タブレットまたはスマートフォン上で動作可能なプロトタイプを開発し、東工大、KDDI 総合研究所でのトライアルを実施する。実際の対話シーンにおいてユーザーに情報を提示する情報想起支援のコミュニケーション満足度向上の効果を評価する。

脳波センサ等の情報を活用し、情報提示タイミングの推定精度向上を図る。

ユーザーの状態や環境条件等を考慮した意訳導出の枠組みとして、直訳では不足な補足情報を検討する。

② 高度情報セキュリティシステム

経験データベースは過去から現在に至るまでの個人情報の集大成であり、経験データベースへの不正アクセス、情報漏洩、改ざん、棄損を防止する必要がある。そこで、データの暗号化、情報の分散管理、ならびにデータベースへのアクセス制御等の高度情報セキュリティ技術として、本人のみがアクセス可能なデータとして安全に記憶データを保管する手法や、記憶データを呼び起こす手法の改良、また記憶データであることを保証する技術の開発し評価を行う。

③ ハピネスセンサ・アクチュエータ

【脳波からの感情推定】

空気・行間を読むサービス実現の重要なステップであるヒューマンインターフェース装置を操作中の脳活動をモニタし、操作が思い通りにならない状態に対する負の感情から、操作が思い通りになる正の感情に移行している兆候を検出する。

【ウェアラブル脳磁計】

空気・行間を読むサービスに用いるハピネスセンサの一候補であるウェアラブル脳磁計を開発する。ダイヤモンドを用いた磁気センサに関わる検出技術・システの概念設計および試作を進める。

【簡易脳波計を用いた感情センサ】（担当：(株)リトルソフトウェア）

困惑アルゴリズム研究として、簡易脳波計を用いて、使用者がサービス側に対して支援を要求するタイミングとその種類（困惑や集中等）を検出する。

4　研究開発テーマの成果

④ ゼロパワーデバイスとオールバンド通信

【ゼロパワーデバイス】

✧　超低消費電力デバイス技術

　ウェアラブル端末低消費電力回路に向け、センサ信号処理や無線信号処理に適した超低消費電力 A/D 変換器の仕様を決定し，集積回路チップを試作する。

✧　透明・フレキシブルなデバイス

　各サービスに貢献する透明・フレキシブルな高性能ディスプレイデバイスを研究開発する。

✧　グラフェンデバイス技術

　GTFET (Graphene Tunneling Field Effect Transistors)高性能化を目的に、ゲート絶縁膜の薄層化と、世界で唯一の収束ナノイオンビーム加工技術によるチャネル端ダメージ低減構造・プロセスを採用した３重近接ゲート GTFET を開発し、その素子特性向上を評価する。

【オールバンド通信】

　オールバンド知性通信プラットフォームは、10 年後の社会の動向を想定し、ICT インフラとして利用可能な無線周波数の範囲を広げたオールバンド(マイクロ波、ミリ波、テラヘルツ波、光波)を対象に、それぞれのバンドに対するネットワークや無線アクセス技術、端末技術における高速化と低消費電力化を実現し、多様なニーズに応える通信技術を目指してきた。しかし、フェーズ 2 では、研究テーマの選択と集中を行い、センサやアクチュエータをウェアラブル機器に組み込むケースを想定し、BAN(Body Area Network)に適した近距離超高速かつ低消費電力のテラヘルツ無線通信技術を中心に研究を進める方針とした。

✧　テラヘルツ BAN

・THz-BAN の設計・開発に利用可能な、人体周辺での THz 帯近距離ダイナミック電波伝搬チャンネルモデルを開発する。

・最終的な THzBAN 実現に向け、伝送容量向上のため、アンテナとのマッチングを改善した高出力 RTD 発振器の開発、送受信器の姿勢によらない円偏波通信、および、さらなる周波数多重を目指し伝送実験の行われていない 1THz 帯において通信実験を行う。

（4）主な成果と達成状況

① 思っただけで先読みする「あいまい」検索

【経験データベースによるあいまい検索】（担当：(株)KDDI 総合研究所）

　空気・行間を読むサービス提供に向け、経験データベースとして、ライフログやブログに加え、自己の電子メールに基づいた経験データベースを構築した。蓄積可能なメールは１０万件を設計目標とした。また、構築した電子メールの経験データベースから手助けが必要な事項を自動的に検索し提示する「あいまい」検索ソフトウェアを試作した。

　さらに、メール分析ソフトの高度化と、経験データベースの拡張とクラウド化を進めた。

　メール分析ソフトの高度化については、検索アルゴリズムの改善、概念検索辞書の充実、複数会話からの検索クエリ生成の開発を実施し、検索アルゴリズムの改善に関して、被験者を対象とした評価実験に基づいた改善を行うことで、検索精度の向上を確認した。

　経験データベースの拡張については、拡張情報として、新たに Wikipedia、Web ニュース、Twitter 等の公開情報から知識や個人のプロフィール、話題を収集するクローラを開発した。

【情報想起支援アプリケーション試作】（担当：(株)KDDI 総合研究所）

　会話シーンにおいてユーザーに情報に対する支援情報提示を可能とするため、ユーザー間の会話をリアルタイムに認識し、音声認識結果や脳波センサを用いて情報提示タイミングを推定すると共に、平成 28 年度に構築した拡張経験情報 DB から、会話内容に即して支援に必要な情報を検索し、画面表示および音声合成で支援情報をユーザに提示するタブレット用アプリケーションを開発した。本アプリケーションのシステム構成を図 A4.2.2-3 に、また実現例を図 A4.2.2-4 に示す。本タブレット用アプリケーションは、Android アプリケーションであり、図右に示すようにスマートフォンでも動作する。上記アプリケーション構築に際して、

4　研究開発テーマの成果

発話内容、発話の間、脳波センサをなど複数の手段を用いて対話の状況を推定し、ユーザーに対して支援情報提示を行うタイミングを決定する機能を開発し導入した。
発話内容に基づくタイミング推定に関しては、情報要支援者と会話相手両方の発話を支援情報提示タイミング推定の対象とし、且つ命令でない発話でも情報提示のタイミングとして推定可能としている。

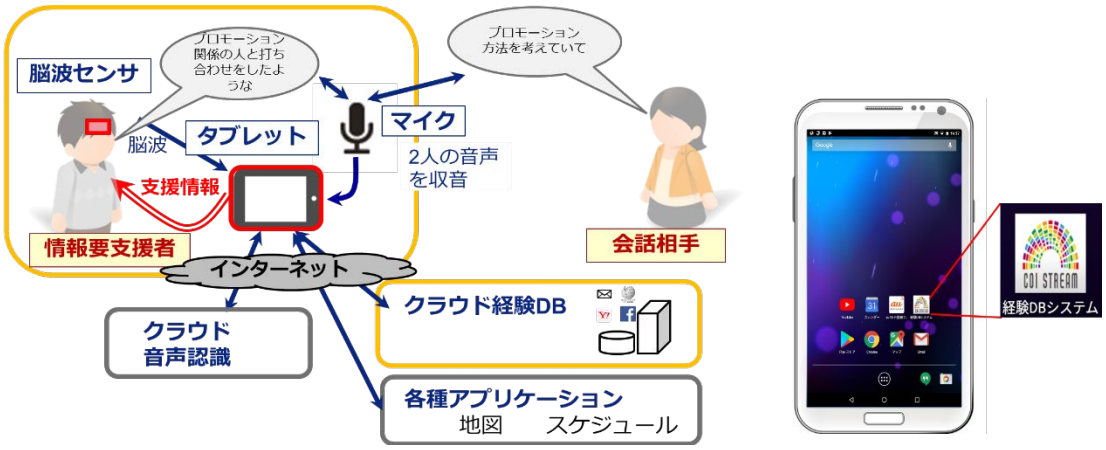


図 A4.2.2-3：支援情報表示アプリケーションの構成.

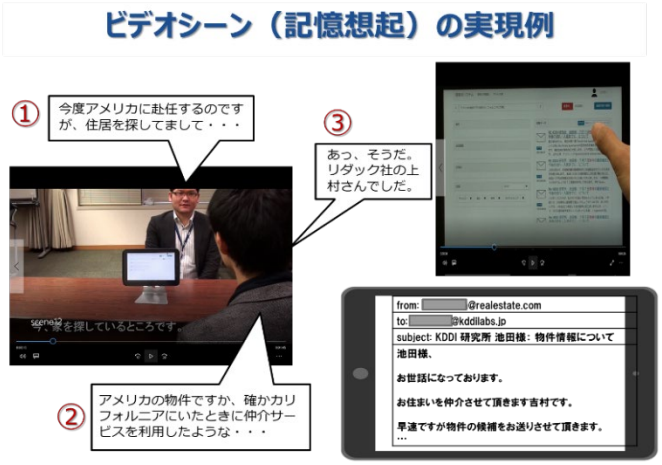


図 A4.2.2-4：記憶想起の実現例.

【多言語意訳】

・直訳では不足な補足情報の提供として、ユーザーの状態や環境条件等を考慮した意訳導出の枠組みを検討した。英語による日本食レストランでの外国人対応を想定したデータ収集の作成結果に基づき、どのような条件で補足情報を追加提供すべきかを検討した。
・日本語を教えるボランティアと日本語を学習する外国人、また社会的弱者である患者と医療従事者などがどのようにコミュニケーションをはかっているのかに焦点を当てて調査観察を行い、会話分析により話し手の感情が表出している会話部分にタグ付けを行うとともに、コミュニケーションが円滑に行われる言い方の表現技法（レトリック）を抽出した。

② 高度情報セキュリティシステム

分散管理された個人情報を含むデータに対するデータマイニングを、プライバシーを保護したまま実施する方法について検討を行い、秘密計算を応用することにより、従来手法より漏洩情報の少ない方式の提案を行った。

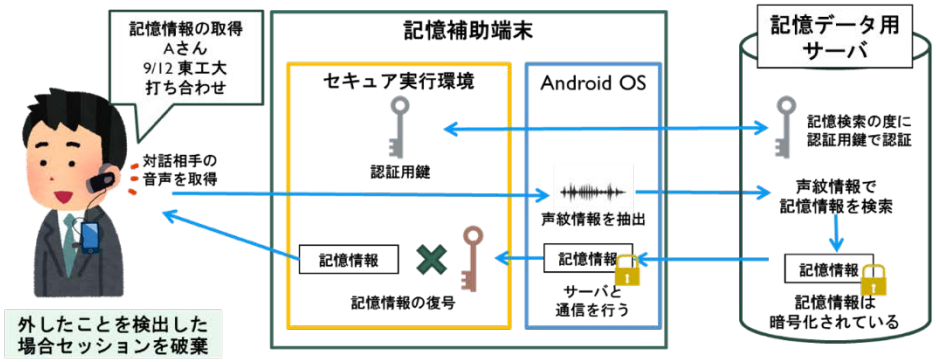
記憶データを利活用するユースケースとして、ユーザーは、音声情報を入力および出力することが可能なイヤホン型装置及びセキュアな実行環境を有するポータブル端末（記憶補助

4　研究開発テーマの成果

端末）を利用することとし、これらとインターネット上に設置された記憶データ管理用サーバを利用したシステムを設計した。

本システムでは、本人以外のユーザーが記憶データにアクセス不可能であることを確実に保証するために、感圧センサによるイヤホン型端末の利用状態の確認と耳音響認証による本人確認を組み合わせたイヤホン型端末及び記憶データと本人との厳格な対応付けを実施し、また、記憶補助端末のセキュアな実行環境（Trusted Execution Environment：TEE）内での暗号鍵管理を及び通信データの暗号化・復号を行うことで、記憶補助端末と記憶データ DB サーバ間の安全な通信を実現した。

図 A4.2.2-5 に提案システムの装着時と記憶想起時のシステム構成及び処理フローを示す。構築したデモシステムによる動作実験を行い、耳音響認証および装着確認により本人のみがシステムを利用可能なこと、また対面話者の発話音声情報を検索することで、対面話者に関する記憶情報が正しく提示されることを確認した。



※通信はセッション鍵で秘匿化されている

図 A4.2.2-5: 提案システムの構成図及び処理フロー.

③ ハピネスセンサ・アクチュエータ

【脳波からの感情推定】

感情を識別するために、脳波から信号源推定を実時間で行うためのアルゴリズムの構築を行った。信号源推定を行うための情報から変換行列を実時間で作成するのが困難なため、事前に作成した変換行列を用いて計算を行った。(図 5.1.1-8)

また、視線と脳波を同時計測し、感情の識別を行ったが、感情の識別には、瞬きや視線の動きが関係していることが識別器の重みを解析することで分かった。

・イライラの原因を複数設定したタスクにおいて、fMRI による脳活動解析により、「イライラ」と表現される感情にも異なる感情表現が脳内で行われていることが示唆された。

・音声の想像を行うタスクにおいて、その識別率は、脳波から信号源を推定することにより、高くなることが判明した。

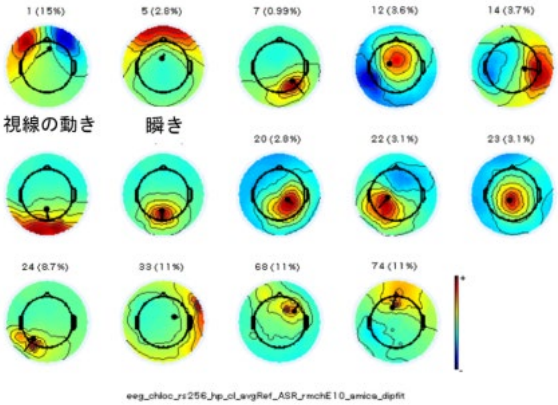


図 5.1.1-8: 実験脳波から感情推定を実時間で行うためのノイズ低減検討.

【ウェアラブル脳磁計】

・ＮＭＲのコイルを高感度なダイヤセンサに置換えたことでゼプトリットル（10^{-21} L）オーダー（～10 nm^3）中の水素とフッ素の NMR 信号を同時検出することに成功した。

・高感度な計測システム構築に取り組み、感度の下限は空間分解能約 1 mm において約 30 pT/√Hz であることを明らかにした。

4　研究開発テーマの成果

・イメージセンサと LED の一体化、光学系の集積化を行い、モバイル性を向上させたプロタイプシステムを試作し、デモを行った。

【テラヘルツ波による汗センサ】

・テラヘルツ波によるバイタル情報計測の検出デバイスとして、等価雑音パワー155pW/Hz$^{1/2}$ の性能が得られた。

・検出素子と多チャンネル信号読み出し回路と結合し、画像計測に必須となる複数のテラヘルツ検出信号の表示を可能にした。

・検出器用基板として熱が局在化する材料を用いることで約 2.6 倍感度を向上した。

・熱抵抗を用いた回路から理論的に現象を説明できることを示した。

【簡易脳波計を用いた感情センサ】（担当：(株)リトルソフトウェア）

・困惑アルゴリズム：困惑の状態を検出し、その度合いを「あいまい」検索システムに提供することにより、検索開始のトリガとして使用するためのアルゴリズムを実装した。

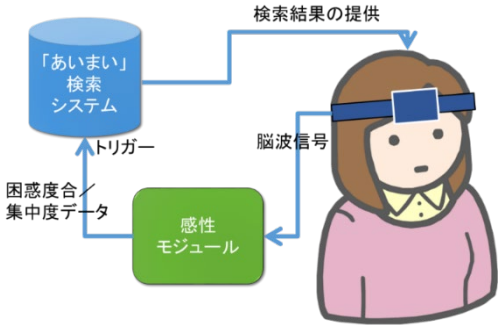


図 5.1.1-10: 感性モジュール内のアルゴリズムとあいまい検索システムとの通信の実装.

④ ゼロパワーデバイスとオールバンド通信

【ゼロパワーデバイス】

✧　超低消費電力デバイス技術

・センサ用 A/D 変換器を設計試作し，世界最小の変換エネルギーを実現した。

✧　透明・フレキシブルなデバイス

・nFET の高性能化に向けて、遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)である MoS_2 膜について TiN/Ti/MoS_2 構造によるコンタクト抵抗低減を検討し、1.0 x 10^{-2} Ohm-cm^2 を達成した。

✧　グラフェンデバイス技術

・GNR 幅 20 nm 以下のチャネルを用いた GTFET 素子を世界で初めて作製し、S 係数について実験的に解析することに初めて成功した

・GNR バンド間トンネリングの物理を考慮した半解析的(Semi-Analytical; SA)モデルを構築し、GTFET のデバイス寸法パラメータ依存性を考慮した GTFET 回路モデルの基盤技術を立ち上げた。

【オールバンド通信】

✧　テラヘルツ BAN

・RTD および SBD を利用した THz-BAN 無線通信システム設計開発のための電波伝搬チャネルモデルを開発した。

・1THz 無線通信に向け、1THz の RTD 発振器を作製しパッケージ化した。パッケージからの放射出力は 26μW が得られ、この出力を元に 1THz におけるリンクバジェットを計算したところ、単純な ASK 通信方式を用いても Gbps 以上の無線通信が可能であることが明らかになった。

✧　テラヘルツ BAN のモデル作成

・人体上の近距離通信を模擬したプラットフォームにより、500GHz での THz 電波伝搬測定を行い、通信システム開発に必要となる基本的なチャネルモデル作成を行った。

・THz-BAN 通信システムの実現に向けて、500GHz の RTD と Pyro 検出器を利用して信号処理ボード上に無線通信システムを実装するためのシミュレーション構築を行った。

✧　テラヘルツ帯の近距離低消費電力通信

・500GHz の THz 発振器を用いて 34Gbps の無線通信を達成した。

・RTD 発振器の信号を非線形光学素子によりアップコンバージョンして、検出する新手法

4 研究開発テーマの成果

を提案し実験により検証した。

・HEMT を用いた THz 受信器により 5A/W の高感度を達成した。

✧ テラヘルツ通信用光源

・テラヘルツ無線通信用光源として、RTD 発振器を作製し、室温半導体電子デバイスでは最高の 1.92THz の発振を達成した。

・高出力発振素子構造を提案･作製し、1THz において室温半導体電子デバイスの発振では最高出力の 60μW を達成した。

・RTD 発振器の高速直接変調により、490GHz において伝送レート 30Gbit/s の高速無線伝送に成功した。

✧ テラヘルツ通信用アンテナ

・16x16 素子アレーアンテナを 350GHz 帯で試作し、アンテナ効率約 35%，比帯域 10%を実現した。

・2 次元ビーム切替一体化バトラーマトリックス回路を提案し，設計した。

・60GHz におけるホトダイオード・アンテナー体集積型 8 素子アレーアンテナと RoF 技術を用いてビームフォーミングの有効性を確認した。

（5）その他特記事項

本研究開発テーマは、当拠点の PL,RL の交代を含む見直しにより、2017 年度にて研究開発は終了している。

4　研究開発テーマの成果

4.2.3 時空を超えるコミュニケーションサービス

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	長谷川　晶一　東京工業大学　准教授
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	
研究開発実施期間：	2013 年 11 月～2018 年 3 月
参画機関：	東京工業大学、株式会社リコー、ラピスセミコンダクタ株式会社

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

時空を超えるコミュニケーションサービスでは、お互いは離れた場所にいるが、互いの存在感を感じこころがつながるコミュニケーションを実現する。

図 A4.2.3-1 は、お互いが離れた場所にいる状態での会話・討論のシーンである。この場合は、室内を想定しているため、センサやアクチュエータはウェアラブルである必要がなく、音声の入出力には通常のスピーカーやマイクを使用できる。また、高解像度の大きなスクリーンを用いることを想定しているので、等身大の相手が目の前に映し出され、あたかも場を共有しているかのような感覚で打ち合わせや会話ができる。文字や映像情報はそのスクリーンに映すことができ、画像や映像の入出力も比較的簡単である。その分実現される時期が早まると考えられる。図 A4.2.3-1 では記憶想起支援と表現しているが、これらのシーンから想像できるように、『以心電心』コミュニケーションサービスは利用者の第 2 の脳（セカンドブレーン）の役割を担うという見方ができるのではないかと考えられる。

図 A4.2.3-1: 互いが離れた場所にいる状態での会話・討論のシーン.

さらに、離れていても傍に居るような感じを提示し、自然な対話が実現できることを目指している。具体的には、遠隔地から会議室等での対面の会議に参加する際に、本人が会議室に存在するかのような自然な対話を実現するサービス、また、グループホーム等で生活する高齢者の家族が直接会いに行けず、遠隔地から電話等を通じて会話をする際にも、自然な会話の実現とふれあいを取り入れることで、あたかも隣にいる存在と対話しているかような感覚を与えるサービスを考えている。

図 A4.2.3-2: 時空を超えるコミュニケーション.

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

ヒューマンインタフェースロボット＝アバターロボットにて、遠隔利用者の存在感の自然な提示と、ふれあいを実現するための、身体性と触覚を提示する。遠隔参加者の視線とジェスチャーを計測し、会議室での他の会議参加者の視線や仕草に対する反応と合わせて対話動作を生成し、アバターロボットにより会議参加者に伝える。例えば、遠隔会議にて離れている人の存在を忘れて議論が進行することがよくある。離れている人の存在感はディスプレイを通してのみであると、伝わりにくいものである。

また、グループホームの例では、通常のビデオ電話に加えてアバターロボットを双方で用い、ロボットを介したふれあいを取り入れる。グループホーム等で生活する高齢者の家族が直接会い

4　研究開発テーマの成果

に行けず、遠隔地から電話等を通じて会話をする際にも、自然な会話の実現とふれあいを取り入れることで、あたかも隣にいる存在と対話しているかような感覚を与えるサービスを考えている。

（3）研究開発期間終了時の達成目標

【存在感を伝えるアバターロボット】

量産型アバターロボットを用いて、遠隔利用者の存在感を伝えるとともに、遠隔利用者に会議室の様子を伝え、遠隔利用者の視線と運動を取得し、ロボットの会話行動を生成するコミュニケーションソフトウェアを開発する。

また、静粛アクチュエータを実用化し、アバターロボットへの適用を目指す。

さらに、動作行動生成の成果を統合し、会議室での対話の視線や仕草を生成し、遠隔利用者の動作には現れない会話行動を自動生成するソフトウェアを開発する。

図 4.2.3-3: 遠隔利用者の存在感をアバターロボットによる提示

【遠隔対話ロボット】（担当：(株)リコー）

働く場において、人間と協調し人間を支援するロボットのあるべき姿を研究する。そのロボットに期待される機能を示すとともに、ロボットが周囲の人間にとって不自然でないように、ロボットとの一体感を持つことができるために必要となる特性を見極める。
とくにアバター型のロボットを中心に検討する。

【音源位置推定】

ユーザーの両耳に置いたマイクロホンによる発話者の音源位置推定法として、同時発話者が２人から３人に増えても対応できるよう、t-ω 平面上での信号処理アルゴリズムを改良し、同時発話者２人での性能（SNR=10dB での正解率 63%）の８割を同時発話者３人に対して実現を目指す。

話者の音声分離技術を改良し、マイクロホン数２を超える３話者の音声分離を実現する。また、骨伝導を用いた音源定位の研究に着手する。

【ウェアラブルセンサシステム】（担当：ラピスセミコンダクタ(株)）

開発したセンサノードを用い、長谷川晶一研究室の「アバターロボットを用いた存在感通信サービス」において、人間の“頭の動き”、“両腕の動き”のセンシングを行い、存在感を示すための動きの情報として伝えることにより、サービスを具体化していく。

4　研究開発テーマの成果

（4）主な成果と達成状況

【存在感を伝えるアバターロボット】

・アバターロボットについて、繊維素材を用いたアバターロボット及びそのための静粛アクチュエータと、円筒プロジェクションを用いたアバターロボットの開発を進めた。

・繊維素材アバターロボットについては、アクチュエータを切り替えて、実用化に向けたプロトタイプを開発した。

・静粛アクチュエータは性能向上を実現したものの年度内の実用化には至らなかった。

・円筒プロジェクションについては、平面映像にくらべて視線を正しく表現できることを確認できた。また、静粛性、コストとも良好である。さらに、遠隔利用者がだれであるかを表現できるなどの利点も見られたため、(株)リコーとの共同研究を見据えて研究を進めた。

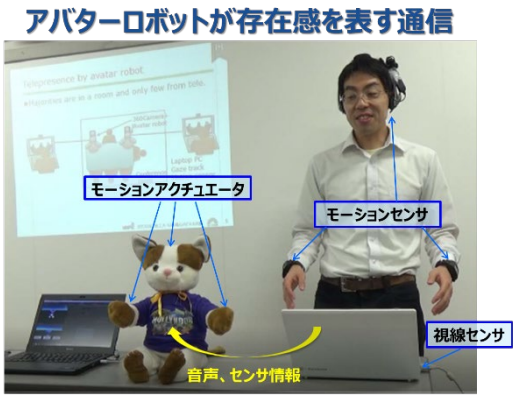


図 A4.2.3-4: アバターロボットを使用した時空を超えるコミュニケーション.

・会話動作の自動生成については、聞き手の視線について、再現することができた。また話し手のビートジェスチャについて研究を進めた。

【遠隔対話ロボット】（担当：(株)リコー）

・時空を超えるコミュニケーションサービスにおいて検討されているコミュニケーションロボットのオフィスへの適用シーンを検討した。

・このシーンでの要求として、ロボットに憑依している遠隔の人間が識別できることと、視線が周囲の複数の視点から感じられることを抽出した。

・この要求が円筒ディスプレイにより満足できると考えられることを検証した。

【音源位置推定】

・室内反射音のもとでも機械音源定位が良好にできる信号処理方法を検討し、従来よりも高い音源定位成功率(S/N に依存して 100%～40%)を達成した。

【ウェアラブルセンサシステム】（担当：ラピスセミコンダクタ(株)）

・アバターロボットを用いた「時空を超えたコミュニケーションサービス」において、人間の“頭の動き”、“両腕の動き”のセンシングするウェアラブルセンサシステムを作成した。

・センサノードを用い、連続データ受信を行い、クラウドサーバにデータ収集する仕組みの構築を実施しデータ収集を進めた。

図 4.2.3-5: ウェアラウルセンサシステム.

（5）その他特記事項

本研究開発テーマは、当拠点の PL,RL の交代を含む見直しにより、2017 年度にて研究開発は終了している。

4　研究開発テーマの成果

4.2.4 つながり共創空間サービス

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	三宅　美博、東京工業大学、教授
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	小野　真史、富士ゼロックス株式会社
研究開発実施期間：	2013 年 11 月～2018 年 3 月
参画機関：	東京工業大学、富士ゼロックス株式会社、ラピスセミコンダクタ株式会社、株式会社電通国際情報サービス、日本電信電話株式会社

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

つながり共創空間サービスのコンセプトは、人が人に興味を持つプロセスを革新するための「人と空間のインターフェース」である。空間利用者は、本インターフェースを通して、空間内の全てのものと関係を結ぶことが可能となり、さらに、自分の意思で誰とつながるのか、また、そのつながり方を選択できるようになる。人がつながるプロセスを、①共感度を用いて可視化し、②リアルな空間内における自然な出会いを科学することで、本節冒頭に述べた空間内で活動する地域住民の「つながり」を促進し、新たな「はたらく」を創出することの達成を目指した。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

つながり共創空間サービスでは、その空間内で活動する人々の「つながり」を促進し、新たな「はたらく」を創出することで、地域の経済活動を活性化し、人々のハピネスを高めることを目的としている。

近年「働き方改革」が叫ばれているが、今後社会の変化とともに働き方が変わっていくものと考えている（図 A4.2.4-1）。これまで会社は単一生産型の組織体であり、会社間の競争が主であり、会社内の人の能力は会社内で維持されていた。それが最近では、会社の事業はベンチャーとのコラボレーション、クラウドソーシングやクラウドファンディングなどが導入されるといったオープンイノベーション型に変化している。さらに、将来は一人一人が自分の能力を有効に発揮するためプロジェクトに参加して成果を出すというようなプロジェクト型に変化していくものと考えられる。

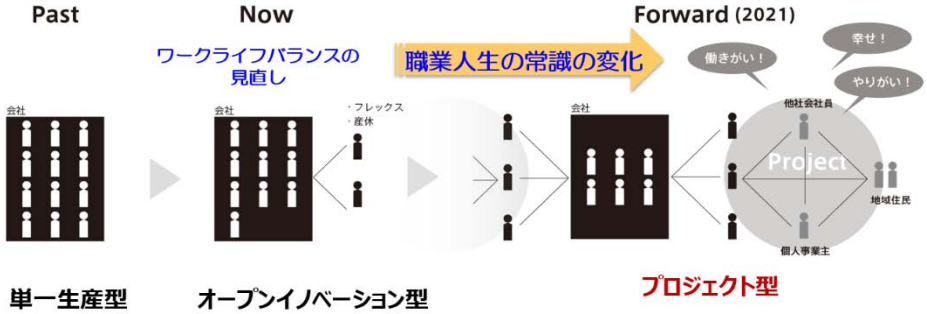


図 A4.2.4-1: 変化する働き方.

（3）研究開発期間終了時の達成目標

つながり共創空間サービスの実現に必要な技術として、以下の 3 つを研究開発する。

人の共感、感性を知る技術としては、人の身体動作や脳活動を観測して人の共感状態を知る【「場」の可視化システム】 、対話者の視線行動からの【感性の計測】、微小な跳躍性眼球運動から分かる【眼球計測による感情・認知の解読】である。

人をセンシングする技術としては、人の気配をも検知出来るような超高感度慣性センサモジュール【気のセンシング】、これをウェアラブルセンサに組み上げた【センサノード】、その測定データをクラウドサーバで処理する【センシングデータの収集と解析】、更に、ワイヤレス給電と組合せて人の位置を推定する【無線給電によるウェアラブルゼロパワーセンサ】である。

つながり共創空間サービスの実現に向け、実際の社会実装を想定し空間や支援ツールを含めたプロトタイプ【つながり共創空間】を試作している。

【「場」の可視化システム】

集団的コミュニケーションにおける共感状態のパターン分類の成果に基づいて、「場」の可視化システムの構築とその実組織への応用を進めるため、

- 身体運動及び脳活動から、共感状態を定量的に特徴づける方法を開発する。
- 上記の特徴量に基づいて共感状態のパターン分類による「場」の可視化システムの開発を行

4　研究開発テーマの成果

う。

・　本手法の神経科学的基盤として fMRI(functional Magnetic Resonance Imaging) と NIRS(Near-InfraRed Spectroscopy)を用いて脳活動から共感状態をデコードする。

【感性の計測】

・相手が間違いなく実在する人間で(Social Presence)自分を見ているという臨場感や実感がある時の特異的な眼球運動や瞬き、アイコンタクトなどの視線行動を抽出する。

・ AR(Augmented Reality)グラス等のバーチャルな映像と実空間の映像が重畳して見える場合、着用者が不注意に見落しする可能性を計測・可視化する。

【気のセンシング】（担当：東工大、ラピスセミコンダクタ(株)、(株)電通国際情報サービス））

人の気配さえも検出可能な高感度センサとして、1mG の感度を有する慣性センサモジュールの開発を進める。モジュールとしての雑音性能は 100μG/√Hz を目標とする。

この【気のセンシング】に向けたセンサノードの試験・評価を実施する。また、それと共にセンサノードの多軸化・低消費電力化を目指す。【センサノード】の評価システムのデータをベースとし、情報処理の観点からクラウドシステムも活用して、【気のセンシング】に関するデータの分析方法を確立する。

【無線給電によるウェアラブルゼロパワーセンサ】

プロトタイプとして開発したウェアラブルゼロパワーセンサネットワークを活用して、人の位置推定システムを構築する。

【つながり共創空間】（担当：富士ゼロックス(株)）

本テーマでは、図 A4.2.4-2 で示すような未来のはたらき方を支援するつながり共創空間サービスを提供することを目的にしている。具体的には、

・ 利用者に情報を伝えるセルフボールや興味度測定デジタルサイネージ等のツールの試作
・ つながり共創空間を提供するためのサービス提供プラットフォームの構築
・ 利用者の興味度や共感度を測定し、それを分析・フィードバックするツールの開発
・ 実証実験/事業化検証として、東工大拠点内に設置した「つながる以心電心ラボ」により実証実験前の仮説の検証を確かめ、その後実際のコワーキングスペースを使って SWS (Shared Work Space)運用検証実験を推進

（4）主な成果と達成状況

【つながり共創空間】（担当：富士ゼロックス(株)）

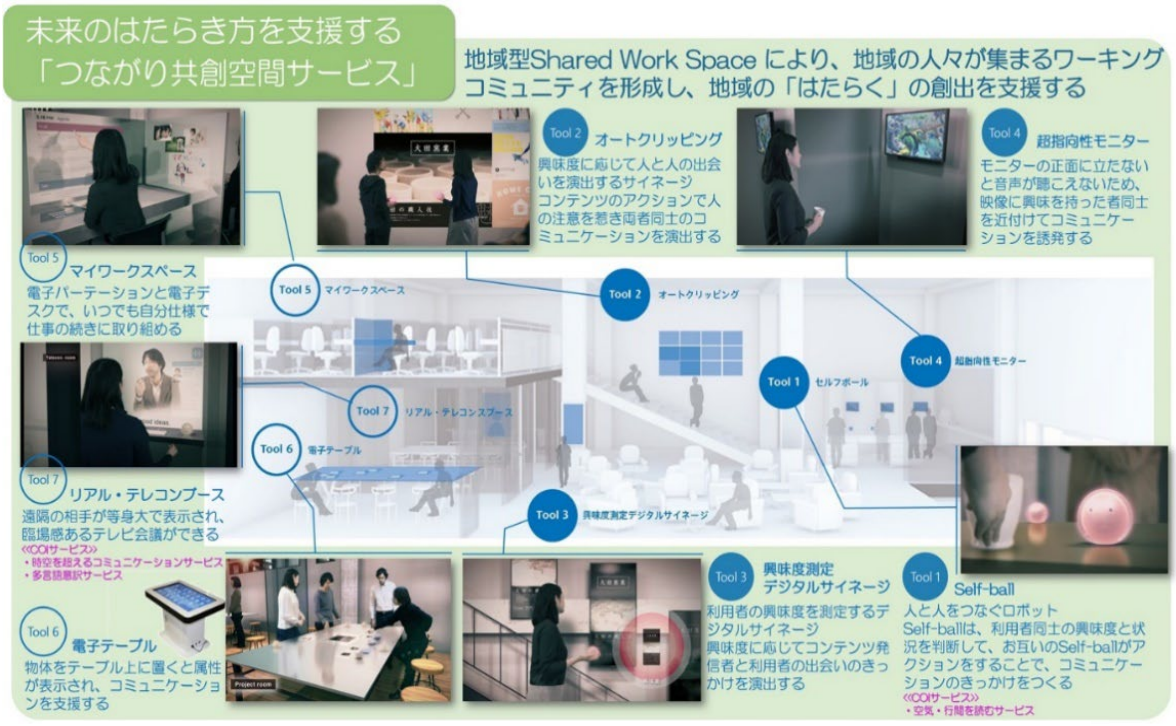


図 4.2.4-2: 未来のはたらき方を支援するつながり共創空間サービス.

4　研究開発テーマの成果

・ 興味度・共感度を利用したコミュニケーション促進するため、フィードバックを基本とするコラボレーション支援ツールとして、セルフボール及び興味度測定デジタルサイネージのプロトタイプを試作した。
・ 共感度測定のためのセルフボールを使ったデモ、興味度向上のためのサイネージの透明化機能を追加後、セルフボールを中心としたサービス提供プラットフォームのイメージを具体化し(図 A4.2.4-3)、プロモーションビデオを完成した。
・ 共感測定のためのセルフボールの Android 用アプリケーションを開発し、市販脳波計測装置と連動して興味度の見える化の拡張開発し、JST フェア、ロボデックスで展示。
・ 実証実験として学外の実際の SWS を東京都大田区の施設を中心に検討中。その後、ビジネスモデルのケーススタディやベンチマークを経て、事業化の検証を進める。

図 4.2.4-3：　サービス提供プラットフォームのイメージ

【「場」の可視化システム】
「場」の可視化システムの構築とその適用現場を想定した応用に取り組み、下記成果を得た。
・ マインドフルネス(心身の集中)がもたらす共感状態の変化を取り上げ、それと相関するインターパーソナルな同調状態を身体運動(慣性センサ)及び脳活動(NIRS)の計測に成功した(図 A4.2.4-4)。更に、そのような状態の時間的側面(ダイナミクス)と空間的側面(ネットワーク)を分析するための実験系の準備にも着手した。これによって共感状態を定量的に特徴づける方法の基盤が完成した(図 A4.2.4-5)。

【感性の計測】
・ 2 名の被験者がビデオチャットなど互いに顔を見ながらコミュニケーションする場合の 2

図 A4.2.4-4: 教師/生徒間での
身体運動同調評価実験.

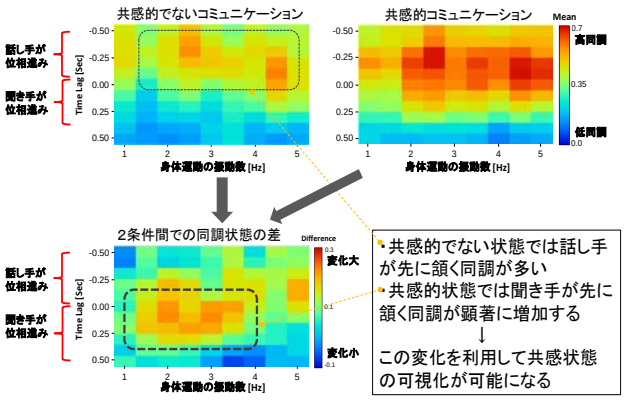


図 A4.2.4-5: インターパーソナルな頷き運動の
同調強度、位相関係と共感状態の定量的評価.

4 研究開発テーマの成果

名同時アイトラッキングを 2000Hz の高機能なアイトラッカ 2 台で実施することに世界で初めて成功した。現実にそこにいる(Social Presence)人間だと感じられる臨場感が得られる時のみ、相手と互いに視線を避ける傾向から、アイコンタクトを通じて間接的にヒトの映像の臨場感が計測できる可能性が示唆された。

・ AR グラスなどウェアラブル視覚情報デバイス着用者の前方不注意の測定に成功した。ウェアラブルデバイス使用者の周辺視野における情報見落としが、AR デバイス内の中心視野に提示された映像に注意を奪われ周辺視野が不注意になっていることで説明できることを示し、ウェアラブルデバイスの屋外利用における視覚情報提示時の問題を認知科学的な観点から指摘した。

【気のセンシング・センサノード・センシングデータの収集と解析】（担当：東工大、ラピスセミコンダクタ(株)、(株)電通国際情報サービス））

・ 1mG の感度を有する慣性センサモジュールの開発を行った。図 A4.2.4-6 のように、内部回路(オペアンプ)の雑音をキャンセル可能な新技術を用いた発振器型センサ回路(a)と、金を用いた高感度 MEMS 加速度センサ(b)を統合して、加速度センサモジュール(c)を試作した。加振器を用いて±10mG かつ 10Hz の正弦波状の加速度を印加して測定を行ったところ、図 A4.2.4-7 のように 1mG 以下の加速度変化が検出できた。

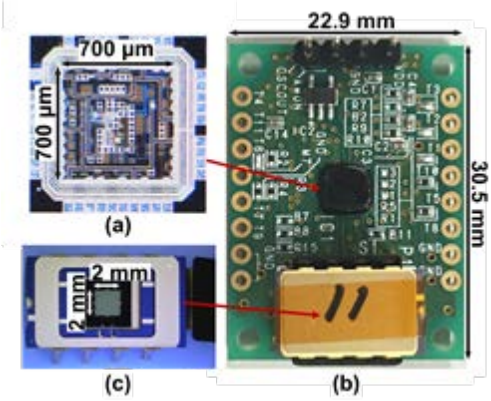


図 A4.2.4-6: 開発したモジュール.

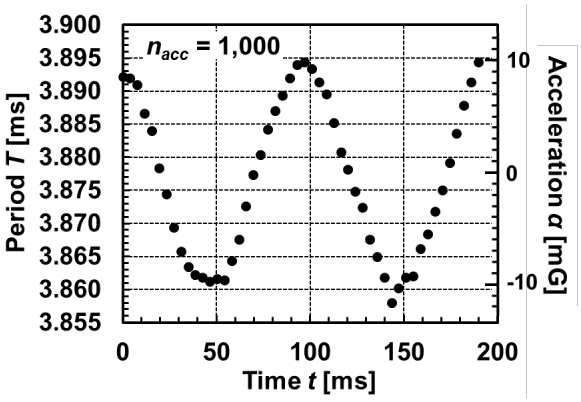


図 A4.2.4-7: 加振器を用いた測定の結果.

・ 多軸化したセンサノードにて、連続データ受信を行い、クラウドサーバにデータ収集する仕組みの構築を実施しデータ収集を進めている。これまで試作したセンサノードより、ハード、ソフトの改良により、30%の低消費電力化を実現した。

・ ラピスセミコンダクタ社作成のセンサノードのデータをクラウドサーバにデータ収集・分析するサービスを提供し、本取り組みにおける試験・評価をできるようにした。

【無線給電によるウェアラブルゼロパワーセンサ】

・ 東工大学内の以心電心ラボにワイヤレス給電システムを設置(図 4.2.3-6)し、図 A4.2.4-8 の様なゼロパワー加速度センサ、及びゼロパワー駆動測定用ロボットを試作して実験を行った。(図 4.2.4-9 に示す)

・ 位置推定には、加速度センサを用いた自律航法と、加速度センサの位置指紋からデータベースを逆引きする位置指紋法の両方を組み合わせて行った。平均位置推定誤差は 1.36m となることを明らかとした。

4　研究開発テーマの成果

図 4.2.3-6：　ワイヤレス給電システム
(以心電心ラボに設置).

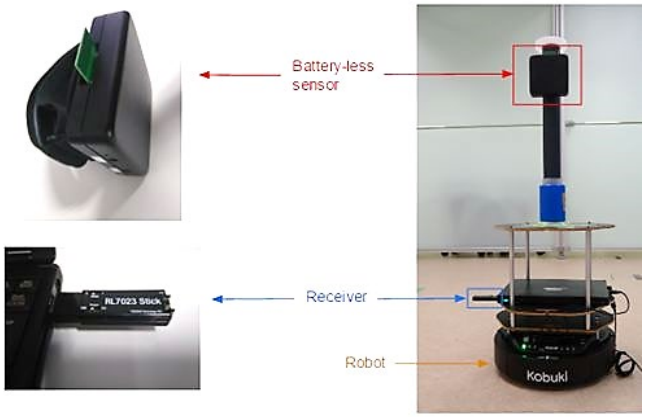


図 4.2.3-7：　ゼロパワー加速度センサ及び
ゼロパワー駆動測定用ロボット.

（5）その他特記事項

本研究開発テーマは、当拠点の PL,RL の交代を含む見直しにより、2017 年度にて研究開発は終了している。

5　社会実装に向けた必要な対応

5.1　知的財産マネジメントの状況

COI 参画企業のモチベーションを高めることができるように、独自のルール・運営（知的財産権、成果の公表を含めた情報管理のルール等）の方法を定めており、以下に説明する。

まず、図 A5.1-1 に共同研究体制及び知的財産権の概念図を示す。COI プロジェクト活動にて創出された知財は、プロジェクト開始前に保有していたバックグランド知財と共に COI プロジェクト知財として蓄積される。COI 中核機関は、この赤線枠内の蓄積された知財群を参画機関に広く提供する。さらに、COI プロジェクトを基礎とし COI 中核機関と参画している一機関とだけによるバイラテラル案件(個別共同研究開発)を想定しており、本 COI 拠点の活動領域はこれらを包含する。図 A5.1-1 では、参画企業 C は当 COI に参画している研究開発実施企業を示し、参画企業 A はそれに加えてバイラテラル(個別共同研究開発)案件を有する企業を示している。さらに参画企業 B は、同様の形態で活動する外国企業(想定)を表している。

本 COI において社会実装を実現するために必要なことは、参画企業所有の知的財産の混入を避けることであると考えており、確実に定義した、参画機関が元々保有し提供する知財とノウハウを基礎に当該 COI が活動し、COI 活動の成果として創出されるフォアグラウンド IP を形成・蓄積することが重要である。参画企業は、これら透明性のある知財を基にビジネスを構成してもらうことにより、安心して社会実装を目指すことが可能となる。このような仕組みを実現することを目的として、「東京工業大学 COI 拠点に係る知的財産権取扱い方針」を、参画全機関との間にて度重なる協議を行い、合意の上定めている。

この知的財産権取扱い方針に従い、具体的な案件ごとに拠点内の知財委員会にて、その取扱いを審議している。その際、大学は特許実施機関ではないので、特許のフロー最大化を重視している。

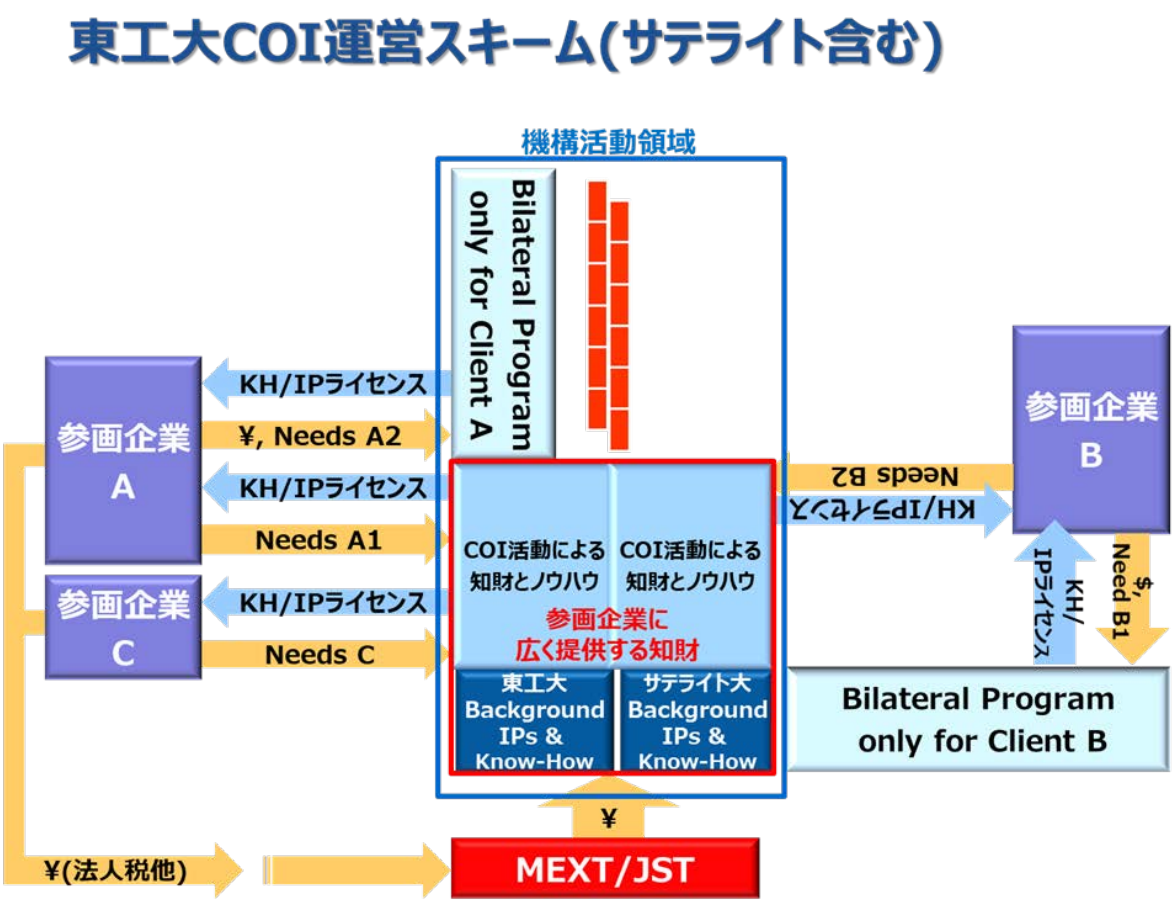


図 A5.1-1: 共同研究体制および知的財産権の概念図（サテライト大学を含むスキーム）.

5　社会実装に向けた必要な対応

5.2　社会実装に向けた課題（規格標準化、規制対応、社会規範・倫理等）の抽出と対応

【畜産におけるアニマルウェルフェアの普及と社会的課題】

動物のサイレントボイスとの共感では、家畜（牛）の状態をセンサにより把握し、疾病など不都合な状況を回避し、家畜のアニマルウェルフェアを踏まえた飼養管理の実現を目指している。

アニマルウェルフェア（AW）とは、動物が健康で、快適で、栄養状態がよく、安全で、内的に動機付けられた行動を発現できる良好な状態のことで、国際獣疫事務局（OIE: Office International des Epizooties）の勧告として、アニマルウェルフェアを踏まえた飼養管理の普及が欧州を中心に進められている。

わが国では、2011 年に AW の考え方に対応した飼養管理指針が定められたものの、AW に対する生産者、消費者等の理解は必ずしも十分ではない。そこで農林水産省では、2017 年と 2020 年に「AW に配慮した家畜の飼養管理の基本的な考え方について」とする課長通知が全国に発出し、その普及に努めているが、生産コストの上昇を懸念している生産者の取り組みは十分でない。また、そのコスト上昇分を対価として支払う消費者の理解は不十分である。本拠点では、世界標準となっている畜産物の AW 対応を国内に普及し、かつ、AW 畜産物を海外へ輸出できるよう、家畜の飼養管理の低コスト化や AW の自動評価システムの開発を進めている。一方、生産者自身が AW の考え方を十分理解するよう努めるとともに、消費者や食品流通業者等に対しては、畜産の実態を含めて正しい情報提供に努め、理解の醸成を図る取り組みも重要である。2012 年には、消費者教育の推進に関する法律が施行され、消費者それぞれが社会的課題の解決を考慮し、その課題に対する取り組みを応援する倫理的消費活動の重要性が示されているところである。

生産者と消費者の理解が進んだ後には、倫理的消費活動をバックアップする AW 認証制度が必要となる。AW の一定の教育を受けた者が、畜産業界に配置され（例えば、各都道府県の畜産部局に１名とか、食肉処理等を行う施設に１名配置する）、AW 実践農場で生産された畜産物を認証するというようなシステムの構築が望まれる。2021 には、全国初の試みとして、山梨県で「やまなし AW 認証制度」（同検討委員会座長を信州大学の竹田謙一が務める）が始まり、全国への AW 畜産の展開が期待されている。

【高齢者施設における DX 化の課題】

介護事業者が作成する事故レポートは、現状、複数の職員によるその場の状況を筆記で記述したものであり、職員の手間がかかること、客観的な状況把握が困難なことが課題となっている。

厚生労働省令などでは、指定介護保険事業者は、介護サービスの提供中などに事故が発生した場合、保険者(市町村)、利用者の家族などに連絡を行うとともに、必要な措置を講じなければならないと規定されており、各自治体において事故報告書のフォーマットを HP 等で公開している。R3 年 3 月に厚生労働省老健局の「介護保険最新情報 : 介護保険施設等における事故の報告様式等について」で各都道府県と市町村の介護保険担当課に向け、事故報告書の統一フォーマットが周知された。これにより、標準となる事故報告書のフォーマットはできが、このフォーマットによる報告の分析や報告の DX 化のためのガイドラインや支援は示されず、事故報告書の活用の部分は自治体に丸投げの状況である。

事故報告書を客観的な事実のみを記録するデジタル化されたフォーマットで統一することは事故予防に資する事実のデータベース構築のための第一歩ではあるが、それだけでは傷害予防にも、事業者にとって効率的で施設利用者にとって安全で快適な介護につながらない。コロナ禍をきっかけとして、日本の行政のデジタル化の遅れが指摘されているが、厚生労働省、総務省、デジタル庁などが連携して介護記録の DX 化推進の取り組みが望まれる。

5　社会実装に向けた必要な対応

5.3　マーケティング・試験的な取組の状況（必要に応じて記載）

【社会実装に向けた戦略の検討】

未来開拓センタにおいて、各研究テーマの社会実装に向けた戦略を検討した。その検討のフレームワークとして、個々のユースケース（アプリケーション）ごとに、リーンキャンバスを改変した独自のフレームワーク（COI キャンバス）を導入した。それを図 A5.3-1 に示す。

すなわち、顧客セグメントの特定と顧客に対する価値提案（Value Proposition）、それを実現するためのソリューション・主要指標、優位性・ベンチマークを明確にするとともに、根本的に解決すべき課題と、解決したときの社会インパクトを、定義する作業を行った。これにより社会実装における課題や実装する先（企業）を明確にして、研究開発として行うべき内容にフィードバックした。

プロジェクト全体COIキャンバス

目的

牛の飼育において、人間と牛のWelfareを同時に実現する
お互いに理解しあい満足のいくコミュニケーションを促進する
人工物、工業製品の異物を検出し、重大な事故や危険を未然に防ぐ。また、植物の水分を検出し、植物の健康を管理する
不健康（病気の予兆）を非侵襲・簡便に検知する
乳がんのリンパ節への転移を低侵襲で検出する
革新的デバイス及びメモリー技術で低消費電力を推進、CO2排出量を削減し機器の小型軽量化を実現

課題

IT機器の利便性と地球環境保全を両立させるためには低消費電力技術が必須。ウエラブル機器も低消費化が必要。
・乳がんの転移率が高く、その低コストな早期発見が必要
・検査時の患者への負担・リスク・検査装置の高額化
・インフラの老朽化
・異物混入による包装物の信頼性低下
・薬剤の管理・信頼性向上
・植物の育成管理
・非破壊検査の高コスト化
・シックハウス症候群の潜在的患者数100万人
・ガスクロマトフィーによるVOCガス測定時間8時間～1日、生体ガス計測時間30分～1時間：リアルタイムモニタリングできない
・メンタルストレスの簡便な客観的評価法がない
・酪農経営における労働時間は長く、特に小規模酪農家では人手不足
・世界的にアニマルウェルフェアの必要性
・耕作放棄地が増加、害獣被害が増大
・病院における医師と患者のコミュニケーションは極めて重要、双方の認識にギャップ
・企業において1on1ミーティングなどのコミュニケーション活性化の施策が導入、上司・部下間のコミュニケーションにはギャップ

ソリューション

・電源電圧を低減できるデバイスの研究
・不揮発性RAMの導入
・乳がんの転移を早期に検知
・病気の兆候の把握
・包装内の異物、包装欠陥および植物の水分モニタリングを、容易に低コストで検知する。
・希薄ガス成分を低コストでモニタリングできるセンサを開発
・ppbレベル環境ガスの室温・高速検出
・メンタルストレスを皮膚ガス放散量にて評価
・IoTによる省力化
・里山での放牧
・生産者と消費者を繋ぐコミュニティ形成
・コミュニケーションにおけるフラストレーションを可視化し、その場で改善を促す。

主要指標

独自の価値提案

・HfOに独自の不純物を導入かつ結晶構造を最適化
・この新規材料によりFETの構造がよりシンプルになりバラツキを低減、10nmレベルへの微細化が可能、しきい値を0.1V、電圧を0.35Vに設定
・FeFET（強誘電体メモリー）にも応用し、微細化と高速低消費書き換えを実現
・カーボンナノチューブによる低コスト化・フレキシブル化
・曲げられるカメラ
・抵抗検知型グラフェンNEMS技術
・アニマルウェルフェアを導入しながら、労働生産性を向上（労働時間の改善、生産効率の向上、品質の向上、飼育費削減、など）させる。
・耕作放棄地の解消による景観保全、害獣被害削減
・非言語情報の可視化からコミュニケーションにおける共感やフラストレーションを計測

圧倒的な優位性

・他の研究機関にはない独自材料により微細化とバラツキ低減が可能
・新規デバイス構造も考案
・乳がんリンパ節転移の同定手法ベンチマーク：色素法、ラジオアイソトープ法に対する優位性
・磁気ナノ粒子法により、低侵襲化を実現
・従来、計測できなかった微量な異物、同色の薬剤を低コストで計測できる
・非破壊検査が可能
・短い検査時間、室温計測
・最新技術を用いた圧倒的高精度な行動把握を低コストで実現
・大学と地方自治体を中心としたオープンイノベーションによる取り組み
・非言語情報の可視化によるコミュニケーションにおける知覚の拡張。

チャネル

顧客セグメント

・半導体設計、製造会社。・セット機器設計、製造会社
・がん検査メーカー。・病院・検査診療所
・非破壊検査メーカー。・薬剤製造における検査
・希薄ガス検出装置メーカー
・建物環境検査機関、ストレス検査機関
・中小規模酪農家
・1on1導入企業。・病院

研究開発テーマ

【サイレントボイス】
【地球インクルーシブセンシング】

社会インパクト

・2025年以降に予想されるIT機器の消費電力削減量の合計は990+220KWH=1,210KWhであり、これはCO_2排出量に換算して約750億Kg／年である。
・乳がん転移の早期発見により、転移患者数を減少。がん患者死亡率の低減。がん恐怖の解消
・重大な事故や危険を未然に防ぎ、安心・安全な社会を実現。テロ、異物混入を防ぎ、安心・安全な社会を実現
・シックハウス症候群患者の低減、住環境の向上、メンタルストレスの軽減
・中小酪農家の労働時間、年収。改善効果。耕作放棄地の実体とその経済損失。地方活性化による試算
・企業の生産性向上。病院における

図 A5.3-1: COI キャンバス.

【社会インパクトへのシナリオの検討】

上記 COI キャンバスを基に、社会インパクトへのシナリオを検討した。各テーマ（ユースケース）において、社会課題からその解決のためのアプローチをバックキャスティングし、研究開発のテーマを定め（実現するためにやること）、それが社会実装されたとき実現する社会像を描いた。３つのサイレントボイスとの共感におけるシナリオを図 A5.3-2,3,4 に示す。

5　社会実装に向けた必要な対応

動物のサイレントボイスとの共感

「社会と自然のつながり」では、豊かな共存社会実現のために自然からの恵みである食の倫理的生産·消費が必須であり、たんぱく質の供給源として重要な畜産においてはアニマルウェルフェアの推進が急務です。経済面や資源循環面で大きなインパクトを有する牛と、生産者・消費者・里山との「つながり」を深め、倫理的生産・消費を推進する仕組みを構築します。

図 A5.3-2: 動物のサイレントボイスとの共感のシナリオ.

場のサイレントボイスとの共感

「人と社会のつながり」ではICT技術の急拡大とグローバル化の一方、コミュニケーションの脆弱化が問題となっており、寛容な共存社会実現のために、多様な人々の共感・共創を醸成することが重要な課題です。集団におけるコミュニケーションの特徴を可視化することで、「つながり」への気づきと学びを促し、多様な人々の相互理解を支援する仕組みを構築します。

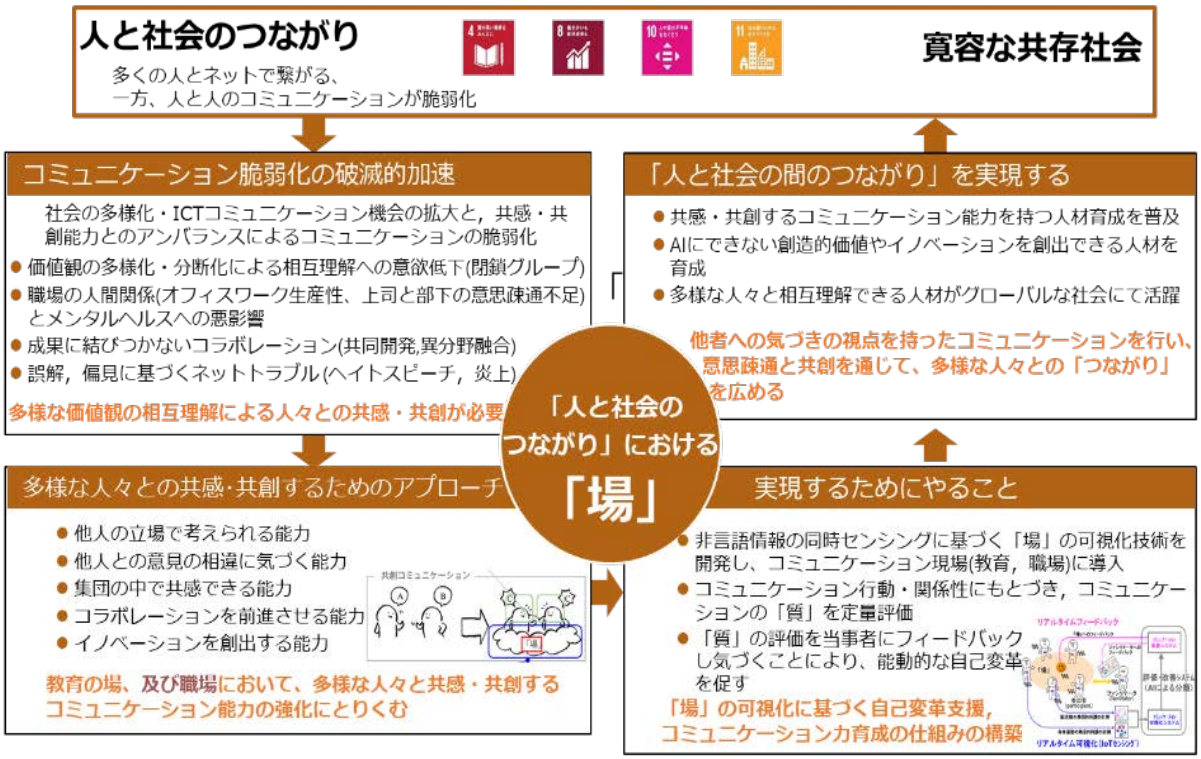


図 A5.3-3: 場のサイレントボイスとの共感のシナリオ.

5　社会実装に向けた必要な対応

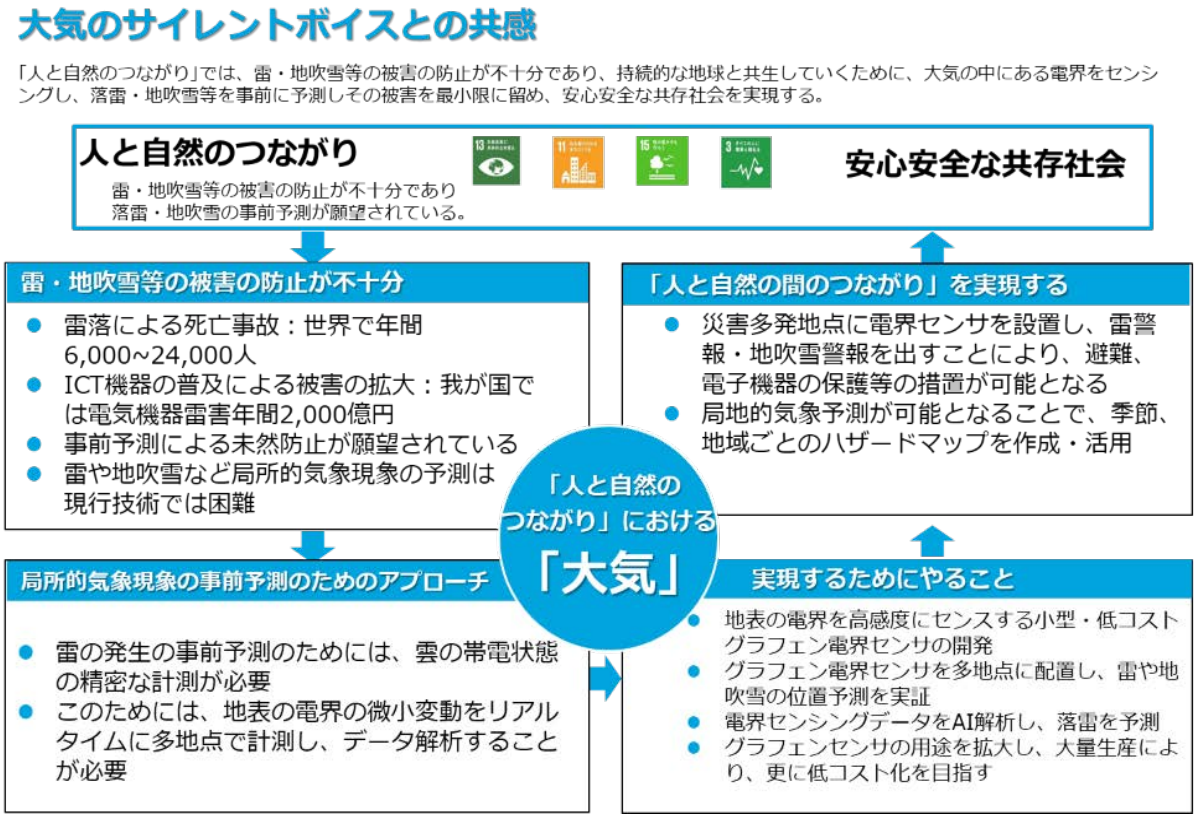


図 A5.3-2: 大気のサイレントボイスとの共感のシナリオ.

5　社会実装に向けた必要な対応

5.4　研究開発成果の多様な展開の状況（必要に応じて記載）

2020 年に、新型コロナ感染症によるパンデミックが起こり、社会的に大きな影響を与えている。これに対して、当拠点では、何ができるかを緊急に検討した。

当拠点のビジョンは「声なき声：サイレントボイスと共感する」であり、この重要性を再認識し、広く概念を発信し続けること、コロナ対応の新しい研究テーマを開始することとした。新しい研究テーマとしては、遠隔授業やリモートワークでの会議ミーティング等での遠隔コミュニケーションの質の評価と質の向上の方策の研究を行う。コロナ禍により対面コミュニケーションに変わって遠隔コミュニケーションが広く利用されるようになったが、それによりコミュニケーションの質の低下が顕著であり、伝達ではなく創造を生むコミュニケーションが十分でないことが課題となっている。この研究成果に関しては A4.1.2 の中に記載している。

2021 年度に藝大 COI との連携を検討し、拠点間の連携研究を開始した。藝大 COI のニーズとして、コロナ禍のオンライン・コンサートで感動が伝わっているか把握したい、があり、一方、東工大のシーズとして、COI 若手ファンド・デジタル分野の研究「聴衆を惹きつける音楽共同演奏のインクルーシブセンシングによる評価」にて、音楽演奏の共感を計測しており、藝大 COI と連携して、オンライン音楽演奏の感動計測・評価の研究を進めることとした（継続中）。

B　イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

1　自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

1.1　自立的なプラットフォームの構築に向けた拠点の強み・資産の形成状況

(a)本拠点ならではの新たな学理の形成、学術上の強み

本拠点の基盤となるセンサ技術、材料技術、デバイス技術、情報技術等について、東京工業大学は世界的に先端をいく研究開発を行っており、個々の研究については大きな強みと優位性を持っている。

この強い個の研究を、本拠点ではアンブレラ研究によって、研究の融合を加速し、死の谷を越える補完技術開発することを目指した。ここで、アンブレラ研究とは、本拠点が主導して強い個の研究を複数統合して新たな融合的研究テーマを創出して推進する、即ち、バックキャスティングにより見出された社会要請からのニーズを実現するためのシーズを探索する一方で、研究者のシーズや本学の強みの分析とを合わせて、新たな融合的な研究テーマを創出し、それに関わる複数の研究者の連携を積極的に支援することにより新たな研究を推進していく。

例えば、超低消費電力不揮発性メモリ・ロジックは、IoT 時代に待望されている次世代半導体デバイス回路を（ニーズから導かれる新たなシーズ）、東工大の強みである FeRAM 研究をベースにして（強みの分析）、材料＋デバイス＋回路の３研究者を中心に新たな研究テーマとして創出し（融合研究テーマの創出）、実現を図る好循環の例である。

(b)参画者・参画機関（総体としての意義・価値を説明）

まず、参加教員について、東京工業大学の理工系の研究者が研究開発を進める一方、環境・社会理工学院の融合理工学系の研究者がバックキャスティングや出口戦略を指向する「未来開拓センタ」に参画するのみならず、技術のユーザー視点からの評価を研究テーマと設定し、動物のサイレントボイスとの共感や行動を誘引するフィードバックの研究開発課題に取り組んでいる。また、『場』のサイレントボイスとの共感においてもリベラルアーツ教育研究院の研究者とコラボレーションし、授業の場での実証実験を行っている。これらは、東京工業大学が目指している「リベラルアーツとの連携による社会課題を意識した新研究分野の創成」のさきがけとなっている。

つぎに、参画研究機関については、基礎から応用までの研究を行う東京工業大学・北陸先端科学技術大学院大学の他に、最終実装の出口の分野の研究を担う信州大学農学部が参画しており、実装現場（牧場、畜産農家）との連携による研究開発を実施している。

また、参画機関の中心企業であるソニーグループ株式会社は、本拠点でも開発プラットフォームとして扱う IoT エッジデバイスならびにそのソフトウェア環境、AI 処理のための開発環境を、会社としてオープンプラットフォームとして公開・提供しており、それらを本拠点の各研究開発テーマにおいて活用している。

今まで、エレクトロニクス業界は同業種の企業が会する真の意味でのオープンイノベーションがなかなか難しい業界と言われてきたが、現在のように一企業では解決できず業界全体で取り組むべき IoT の時代に、世の中で必要とされている大きなコンセプト（地球インクルーシブセンシング）を打ち出し、また中心企業がオープンプラットフォームを提供することによって、設定された本拠点のオープンイノベーションの場に様々な機関が参画できている。階層で見てもデバイスからエンドユーザーと接点をもつ企業まで、分野としてもサービスを手掛ける企業から自治体や病院など幅広く参画いただいている。

(c)実験装置・機器等（それらを使用するためのノウハウや体制等を含む。総体としての意義・価値を説明）

本拠点において、開発・POC 用のプラットフォームとして、ソニー製の IoT デバイス「SPRESENSE」を用いている。このデバイスは高性能でありながら低消費電力を実現しているという本拠点で目指すエッジ AI/IoT の機能を実現するために現存する製品として最適であるとともに、ハードウェア、ソフトウェアなどがオープンソースとなっており、知の共有をするアカデミアにとっても最適な環境となっている。

このプラットフォームの構築によって、各研究者の出口や POC への障壁を下げるとともに、

1　自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

各シーズ間の流用を促し、多様な用途を産み出していくことが可能となる。

また本拠点ではデバイスを試験的に作製するためのクリーンルームと、その中に薄膜堆積装置、露光装置、エッチング装置などの加工機を保有し、メモリやトランジスタを試作することができる。さらに試作したデバイスを評価する表面及び断面解析装置とテスターを保有しており、デバイスの構造解析と電気的特性の評価が可能である。なお、このクリーンルームは単独の研究室ではなく、３研究室が共同で運営しており、教官と学生が保守点検を行っている。これらの製造装置と評価装置を活用することで、超低消費電力メモリ・ロジックのサンプル試作を行い、新規構造、製造方法、評価結果を示すことで社会実装に向けての研究を推進している。

(d)テストベッド・実証フィールド等（自治体等との連携によるフィールド等を含む）

(d-1) 機械学習研究会活動

(1) 目的

2018 年 4 月から、EISESiV※1 のアンブレラ研究の一環として、機械学習研究会を開催している。これは、機械学習をオープンイノベーションの場で研究することにより、EISESiV の先端デバイスのプロトタイプを広く提供することにある。

（※1 EISESiV は当拠点英語名称の略称）

(2) 運営

参加は、EISESiV に参画する企業の社員及び、東工大の学生であれば可能で、2020 年 4 月現在学生 14 名、COI に参加している会社の若手技術者 4 名、東工大の技術スタッフ 1 名である。開催は毎週火曜日で、1 回 60 分を基本としている。2019 年度前半は輪講のテキストを決めて、理解を深めることに注力し、後半からは、参加企業様から頂いた電界強度と落雷のデータを解析するフェーズに入った。

(3) 成果

EISESiV の研究の一端として、電界強度と落雷データの解析を始めた。まず緯度経度から 2 地点の距離を算出するモデルを構築し、電界と落雷のデータを関係づけた。次に特異スペクトル変換法により電界異常時に落雷を予想できるかを調べた結果、落雷の 30 分前に予測が可能であることがわかった。この結果を 2020 年秋の応用物理学会にて発表し、現在英文誌への投稿を進めている。

また、予測精度を高める目的で Recurrent Neural Network（RNN、再帰型ニューラルネットワーク）を用いたプログラムを開発した。解析は晴れの日の電界データを教師データとして行い、特異スペクトル変換法と比較してノイズが少なく精度の向上が見られた。

(4)今後の展開

RNN の解析結果をまとめて、英文誌への投稿を計画している。出来れば特異スペクトル変換の結果報告と同じ論文誌でシリーズでの発表とすることが望まれる。

RNN による解析プログラムを企業様に提供し、フィールドテストに使用して頂くことが社会実装への第一歩になると期待している。

(d-2) IoT プロセッサ共通基盤 SPRESENSE

(1) 目的

SPRESENSE はソニーが 2018 年に開発したシングルボードコンピュータで、マルチコア構成による高い演算性能、回路的及びプロセス的な工夫による超低消費電力を特長とする。また、同社は機械学習環境 Neural Network Libraries/Console も公開しており、これと SPRESENSE™ の組合せにより IoT/AI プラットフォーム環境で利用が可能となる。これらを COI で進行中のプロジェクトに適用し、研究開発を加速する。

(2) 研究開発への適用

(a)「動物のサイレントボイスとの共感」への適用

動物サイレントボイスを聴くために、標準型の SPRESENSE を用いた牛の行動測定装置を開発した。更に、2019 年度には小型軽量の SPRESENSE Cube への実装を、2020

1　自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

年度には農業・畜産をターゲットにした防塵・防水型の SPRESENSE TypeF を用いた実装を行ない、この分野での SPRESENSE の有用性を検証していく。

(b)「『場』のサイレントボイスとの共感」への適用

『場』の可視化システム SyncViewer では、教室や会場内で、被験者の首に吊るしたスマートフォンに内蔵された加速度計で身体の動きを測定し、そのデータを WiFi 通信機能でサーバに送信した。しかし、人の動きは複雑で、首周辺の動きのみならず、頭部や手足の動作まで測定出来ると、より的確な解析が可能になる。このため、スマートフォンを小型軽量の SPRESENSE Cube に置き換えた SyncViewer システムを開発することにした。

(3) 成果

上記の SPRESENSE を用いた牛の行動測定装置と『場』身体動作測定装置プロトタイプを開発中である。しかし、放牧場や教室での実証実験がこのコロナ禍でやや滞っている。ポスト COI も視野に入れつつ検証を進めていく。

(4) 今後の展開

SPRESENSE は低電力化設計と機械学習との連携で特徴のある新しいデバイスであり、本 COI においては動物と『場』の研究に適用することが出来た。最近は SPRESENSE に関連する開発環境、例えば LPWA(Low Power, Wide Area)通信や各種センサのバリエーションが充実してきた。先行するシングルボードコンピュータの Arduino や Raspberry Pi と比較しても、AI エッジプロセッサとして優位にあり、より一層の普及を目指す。

(5) その他特記事項

SPRESENSE 実験室

SPRESENSE は市販されたのが比較的最近の 2018 年であり、同様な目的で使われる Arduino や Raspberry Pi 程、未だ普及していない。このため、研究者が SPRESENSE™ を使った実験システムを検討する際に、実現可能性を確認できるような環境が充分ではない。この対策として、EISESiV 内に SPRESENSE 実験室を開設した。ここには、SPRESENSE 関連基板や部品、工具、測定器を準備し、研究者がオープンソース環境を利用しながら実験システムを組み上げていく環境を整えている。また、実験システム完成後は、報告書やノウハウを蓄積して後続の研究者に伝え、SPRESENSE 利用技術の普及を図るものである。

(d-3) LPWA（ELTRES™）とクラウドサービス FACERE

(1) 目的

EdgeAI で処理したデータを送信するために、衛星測位システムを標準搭載し、見通し 100km 以上の長距離伝送性能を持つソニー独自の LPWA 通信規格　ELTRES™の実験用利用環境を信州大学に構築。さらに LPWA で送信されたデータを収集し処理するクラウド基盤として ISID のクラウドサービス FACERE®※2 に ELTRES™ からのデータを取り込むインターフェース､データ収集･解析システムの構築と解析結果を可視化するアプリケーションを ISID

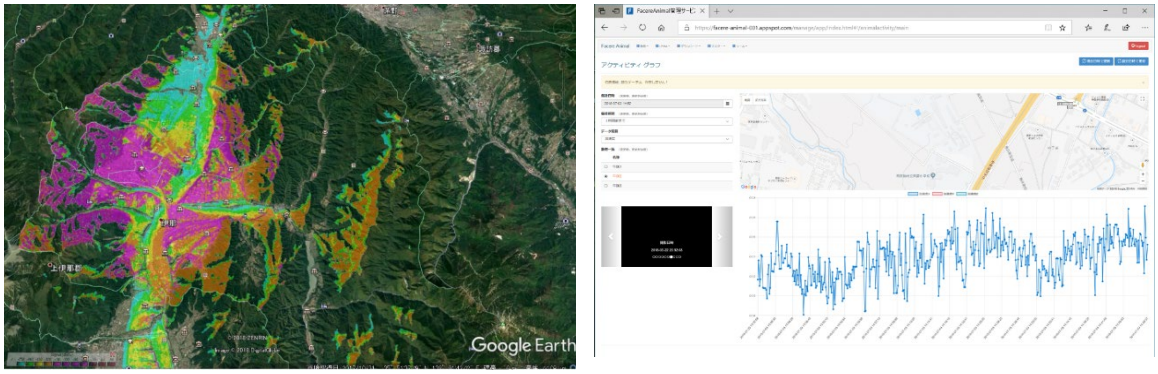


図 B1.2-1: 信州大内 LPWA 受信局のカバーエリアシミュレーション結果(左)※，センサ情報収集のためのクラウド環境(右)　※条件：2 波モデル、送信点地上 1.5 m、受信点地上 10 m、地図上の色は電界強度を表している.

1　自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

が開発し、Edge AI のテストベッドを構築し PETER の研究開発を加速する。

(2)研究開発への適用

「動物のサイレントボイスとの共感」への適用

動物サイレントボイスを聴くために、牛の動きの加速度データを Edge AI で解析する PETER Edge の開発するプロセスで、本テストベッドを活用して PETER Edge の性能評価を行なった。

(3) 成果

上記の環境の下、PETER Edge のプロトタイプが完成し、沖縄県黒島のさくら牧場での実証実験に進展した。さくら牧場での実証実験では、商用 ELTRES™ と FACERE®を利用している。また FACERE®での分析データを、放牧牛の動産担保融資に活用する実証実験にも発展している。

(4) 今後の展開

Edge AI のデータの長距離通信を可能とする LPWA(ELTRES™)は、牧場管理システムの低コスト化に必須の方式と考えている。またクラウドサービス FACERE®は、牧場管理の他動産担保融資やその他の牧場関連サービス事業のプラットフォームとなるものであり、ELTRES™ ならびに FACERE®のより一層の普及を目指す。

（※2 FACERE®は、株式会社電通国際情報サービスの商標です。）

(d-4) 自治体等との連携

動物とのサイレントボイスにおいては、信州大学農学部の参画により、信大が研究を進めるうえで培ってきた地方自治体（伊那市他）、農協、酪農家等との連携があり、POC としての酪農家の協力などを得ている。

また、大田区産業振興協会では、中小企業のネットワークを持っており、特に東工大との関係は長く、研究開発用ツール作成や試作を行える企業との仲介などを得ている。

(e)特許・データ等の知財プール

2018 年度から 2021 年度に関しては、2 件を出願し、うち 1 件は PCT 出願をしている。これらは拠点参加企業に情報を提供しライセンス等希望を調査中である。

一方、2013 年度から 2017 年度に関しては 2 件を出願し、1 件は特許登録、1 件は外国出願である。1 件ライセンスしている。

1　自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

1.2　産学連携を効果的にするルール・運営方法の工夫

（１）共同研究および知的財産権の基本ポリシー

A5.1 知的財産マネジメントにて説明した当該拠点の独自ルール・運営により、拠点の知財権を確保するとともに、参加企業にその知財を早期に提供している。

本知財運営スキームでは、図 A5.1-1 の赤線枠内すなわち図 B1.3-1 の赤線枠内に企業からの知財等を入れない ***Keep-white*** 知財スキームの運営を行っている。企業の知財が混じらず、大学のみ(keep-white)の知財を参画企業へ提供することができる。図 B1.3-1 に示すように、Keep-white 知財スキーム同士は、合従連衡が比較的容易であり、巨大化し、常に変化する社会課題に対して柔軟に対処することができる。またそれぞれ Keep-white スキーム研究活動を継続・維持することも可能となる。

この Keep-white スキームは、Post-COI の産学連携運営において引き継がれ重要なポリシーとして定着を図りたい。

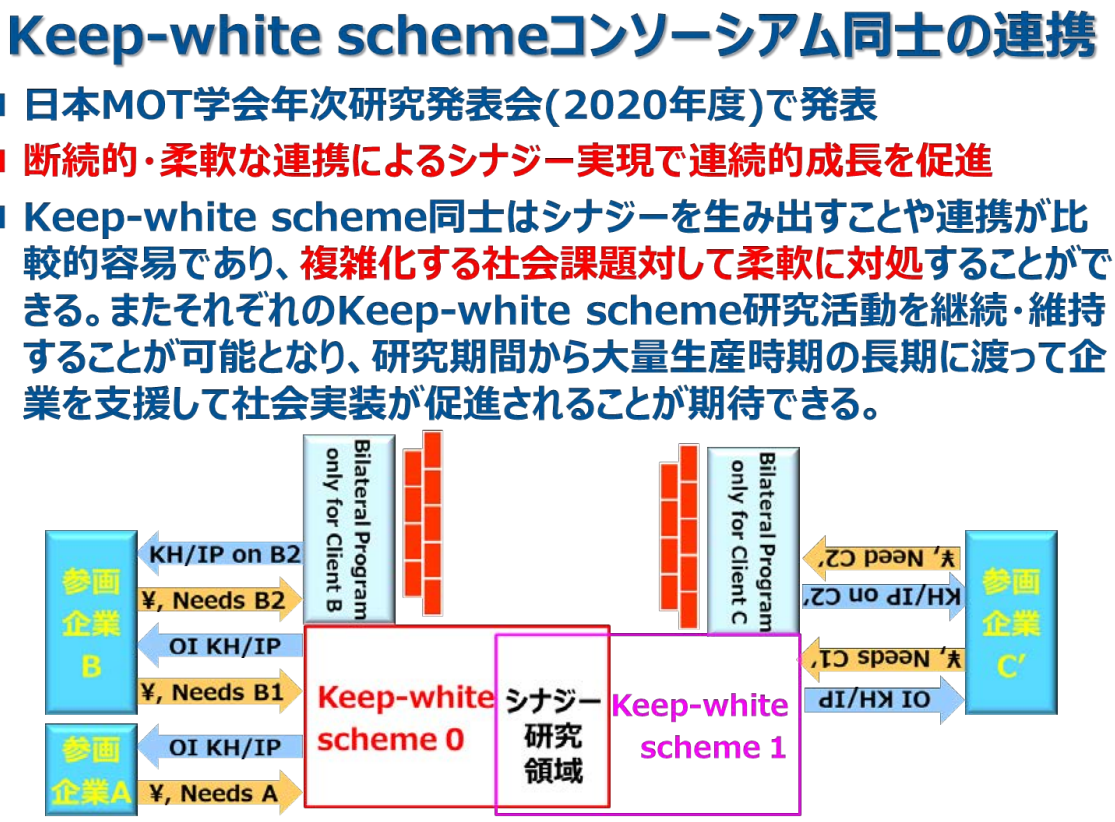


図 B1.3-1: Keep-white scheme 同士の連携.

（２）情報共有の仕組み

次に、拠点活動の見える化を促進するため、各参画機関を含めた全体会議を毎月開催することを継続に維持している。加えて、各グループの会議や各種技術会議を円滑に行うため、Web 会議システムを導入している。さらに、日々のデータの共有のため、東工大スーパーコンピュータ（TSUBAME2.5）に仮想サーバを構築し、800 GB のドキュメントマネジメント及びナレッジマネジメントソフトウェア（DocuShare）をインストールして、各研究機関からも自由にアクセスできるデータベースをこれまで通り維持している。さらに、Mailing list を常に管理し、情報漏洩に努めるとともに日々の情報共有を促進する。これらにより、活動や技術情報の見える化を維持・加速し、今後さらに ICT を最大限に活用したシステムを構築し、促進する予定である。図 B1.3-2

1　自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

は、各メンバー内で自由に情報交換できるデータベースサーバのサイト例である。

　さらに年度末には、実際に研究を行っている研究者や学生から直接参画企業メンバーへ情報を伝達するため、内部成果報告会を開催している。

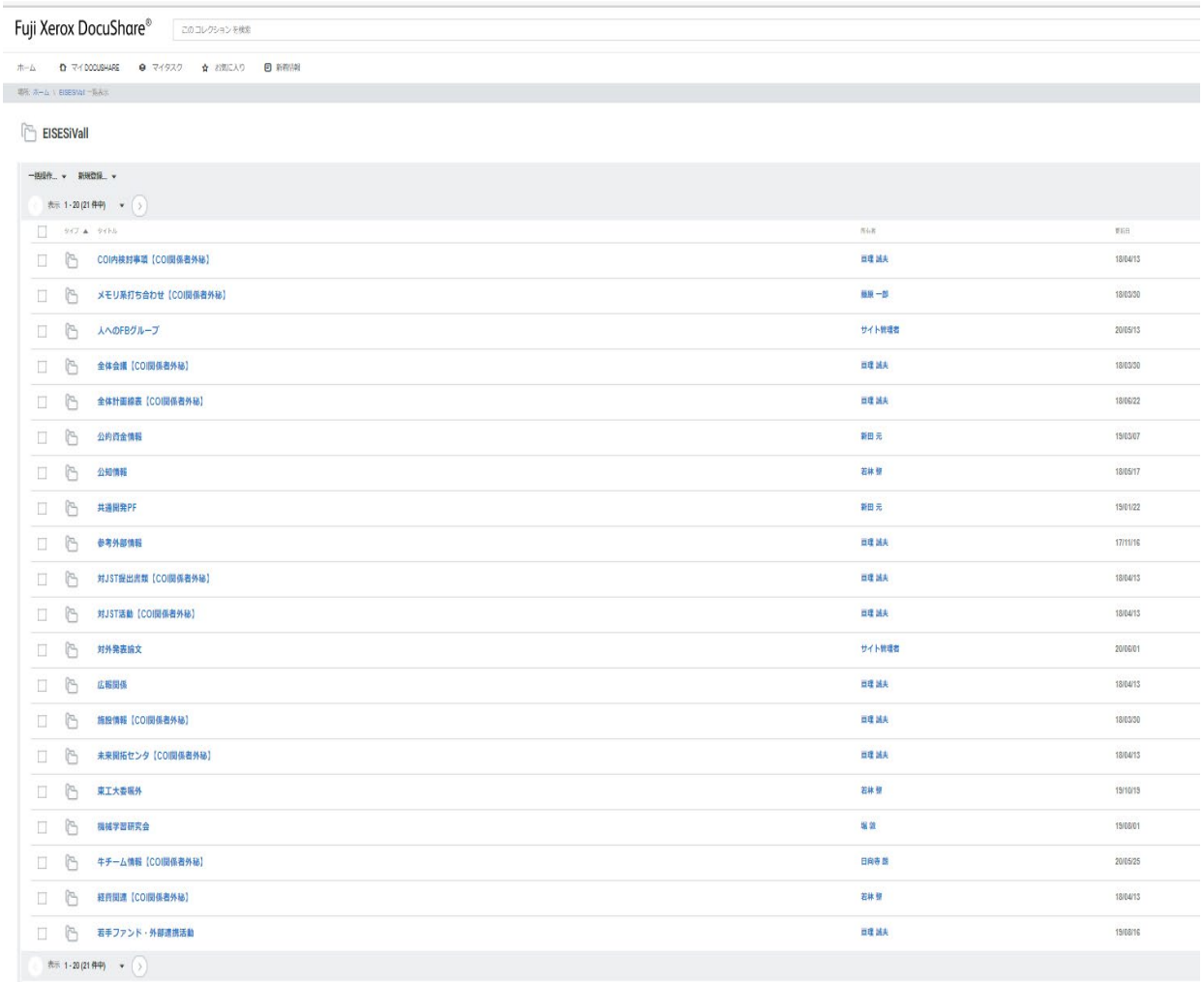


図 B1.3-2: 共有データベース(DocuShare)の Top 画面.

B　イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

1　自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

1.3　自立的なプラットフォームの構想・設計・稼働の状況

（1）組織構想

『サイレントボイスとの共感』地球インクルーシブセンシング研究を推進するため、機構の継続と発展、社会実装を志向している。そのためにまずは COI 研究活動に邁進することを考えており、それに加えて研究の魅力の向上とそれをサポートいただくための資金計画策定と実行を既に開始している。

まず COI 研究活動について、COI 予算では全てをカバーすることができず、特にディスプレイなどのアクチュエータや、IoT 実装技術などについて、研究テーマを立ち上げる必要があると考えている。そこで、知財取り扱い方針を堅持しつつ、COI 予算に加えて、科研費や JST の他予算の競争的資金への提案活動を本機構として進めている。例えば、詳細は差し控えるが、実装研究を立ち上げる準備を進めている。それに対応して、参画企業増大を想定している。

体制・組織の名称	地球インクルーシブセンシング研究機構
体制・組織の位置付け・種別	既に部局相当組織
体制・組織の長となる者の職位	既に部局長相当
運営資金（財源）	現状 COI 予算に加えて、Bilateral 契約を予定しており、さらに競争的資金を獲得して行く予定。 Post-COI 初年度での目標： 競争的資金 50%, 参画機関年会費 45%, ロイヤリティ 5%
概要	COI 期間中は、本機構において、COI 活動や関連活動が行われ、機構のスタッフがそのマネジメントに当たる。 ポスト COI では、それまでの活動の資産およびマネジメントを受け継ぎ、それを発展させ継続的にイノベーションを起こせるように、外部資金および参加企業から参加費等により、研究開発をすすめ、その成果を企業に渡していく。現状の COI 予算に加えて、現在 Bilateral 契約を予定しており、さらに競争的資金を獲得して行く予定であり、Post-COI 初年度に競争的資金 50%, 参画機関年会費 45%, ロイヤリティ 5%を目標としている。

次に Post-COI における機構の研究活動について、テーマ変更を通じて大学執行部とのコネクションが強固になったことから、IoT/AI 技術に関する研究・教育活動についてはまず本機構に相談が来る体制になっている。特に、東工大学内の様々なプロジェクトと関係を築いており、例えば、超スマート社会推進コンソーシアム(https://www.titech.ac.jp/news/2018/041424.html)や、バイオインターフェース研究ユニット(https://www.iir.titech.ac.jp/organization/unit/bi_list/), 情報理工学院の研究プロジェクトなどとの連携を検討中である。外にも加えて、業界団体や企業から、学生教育や社会人リカレント教育に関する御要望が多数あり、その運営を本機構が行っている。今後、『サイレントボイスとの共感』地球インクルーシブセンシング研究の基盤を強固にすることが期待できる教育から研究までのシナジー活動の立ち上げを主体的に推進することを志向している。

具体的な Post-COI 運営スキームを図 B1.4-1 に示す。COI の成果を Background IP/Know-How として、会員企業との研究を Foreground として Open Innovation Consortium を運営することを想定している。さらにそれを基礎として各企業との Bilateral program や、新しい研究テーマを立ち上げることを想定している。一方、COI 成果以外からも Background IP/Know-How を導入することにより、新規研究テーマを遂行することも想定している。またこれらを、東工大内では業務委嘱制度を用いて実現することを想定している。そこで、Post-COI 研究拠点推進体制の強化に向けて、競争的資金の獲得へ奔走するとともに、参画企業のご理解を得ることを進めている。

他方、相補的な関係となる別の研究活動を持つことで Post-COI 研究活動の安定化を図ることができると思われる。ここで 2020 年度より新規募集が始まった JST/さきがけ「情報担体」で本

B　イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

1　自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

COI RL の若林整が研究総括を務めることとなった。そこで本 COI PL 廣井聡幸が領域アドバイザを務める JST/CREST「情報担体」の協力を仰ぎ、JST「情報担体」研究活動に触発された、集積システム材料産学連携コンソーシアム (iSyMs) を 2020 年 12 月に設立した (https://www.coi.titech.ac.jp/ri-eis/index.html)。この活動は JST 様のご後援をいただく予定であることを付記しておく。ここで、この活動は、集積エレクトロニクス分野のシーズ研究という位置付けで、図 B1.4-1 中において New Pj Z に相当するが、Post-COI 研究活動の隣接技術領域に位置していると考えられ、Post-COI と補完的・協調的に活動し、シナジーが生まれる様な活動になることを願っている。

次に、同様に New Pj Z として、ソニーグループ(株)と東工大との共同研究講座「次世代デバイス技術共同研究講座」を東工大・地球インクルーシブセンシング研究機構に設置し、遂行いしている(https://www.titech.ac.jp/news/2019/044489.html および https://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/201906/19-0605/)。

これらの活動が COI および Post-COI と補完的・協調的に運営され、シナジーが生まれる様な活動になることを願っている。またこれらの活動への継続的な協力を得るため、大学執行部との調整を逐次進めている。

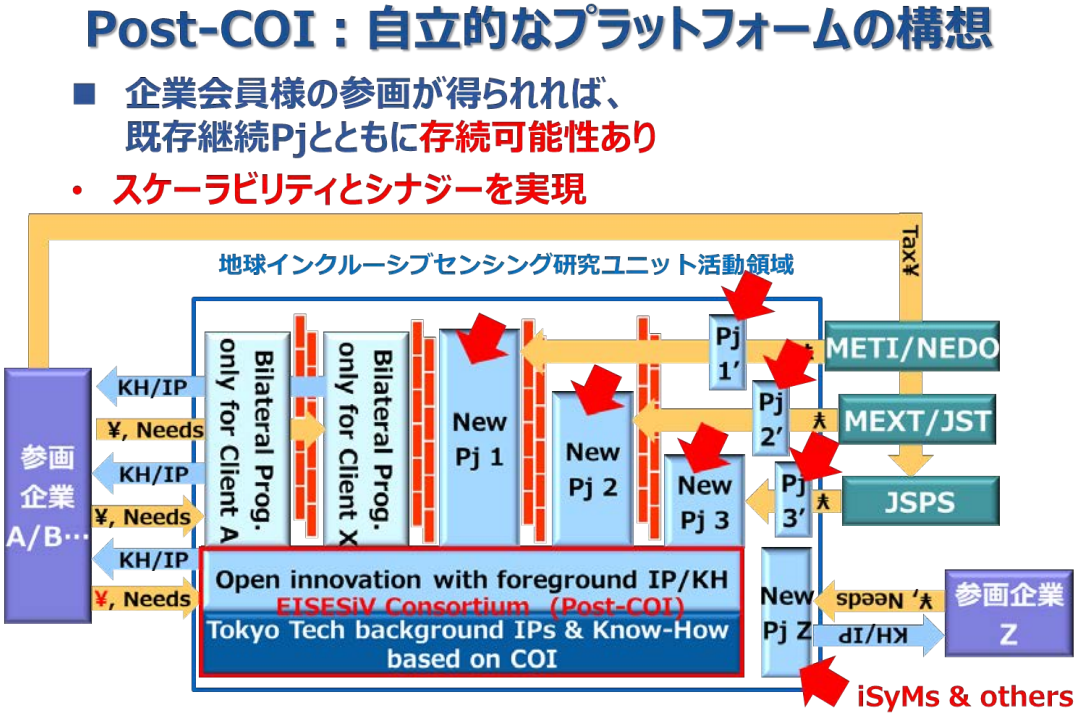


図 B1.4-1: スケーラブルに各研究テーマとのシナジーを実現する
地球インクルーシブセンシング研究の運営スキーム.

（２）先行事例として学内他の組織活動への波及効果

本拠点が COI で目指しているものは、東京工業大学において産学連携の先行事例として捉えている。すなわち、「学術的な叡智に立脚した社会や科学技術に対する客観的な分析と深い洞察により、未来社会をデザインし、社会からの要請に根ざした新研究分野を創成する」ことは、本 COI 拠点におけるバックキャスティングによる新研究テーマの創出そのものであり、本学の強みや研究者の探索と、その分析・支援体制も含め、本拠点でのコアな活動と合致している。

「未来社会 DESIGN 機構」においては、本機構における新研究創出のためのスキームを設計するうえで、本 COI 拠点での試行するプロセスや手法を参考にするなど、本 COI 拠点の活動をパイロット的な位置づけとして活用する試みもすでに始動している。

さらに、東京工業大学では、超スマート社会推進コンソーシアムを設立し、参加機関と連携し

B　イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

1　自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

て人材育成から研究開発までを統合した新たな次世代型社会連携教育研究プラットフォームを構築しており、本拠点の産学連携活動と連携を取りつつ運営している。

さらに、東工大、北陸先端科学技術大学院大学、信州大学の間では本スキームによる Post-COI の遂行について同意いただいており、各大学内での横展開が実現されることを期待している。また、東工大 Post-COI を大きく育てることを目的に、当該 3 大学に止まることなく本スキームの展開を目指しており、まずは COI 他拠点への展開を進めていきたいと考えている。

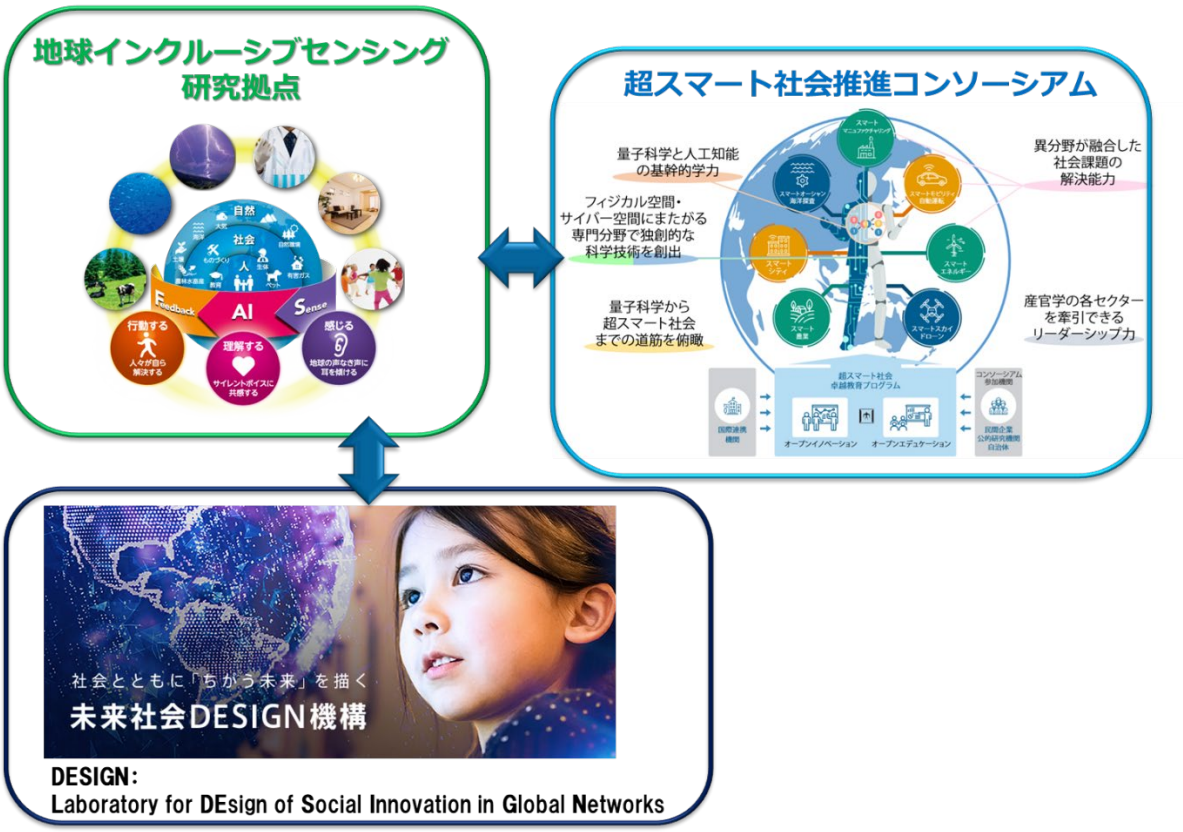


図 B1.4-2:　東京工業大学における本研究拠点と
未来社会 DESIGN 機構、超スマート社会推進コンソーシアムの連携.

（3）アウトリーチ活動

当拠点のビジョン、ならびに COI の研究成果を広く一般の方々に理解していただくために、継続的にアウトリーチ活動を実施してきた。2018 年度に、2021 年度までの主なアウトリーチ活動を以下に記す。

(3-1)シンポジウム開催および展示会への出展

- 東工大 COI シンポジウム

　『サイレントボイスとの共感』地球インクルーシブセンシング研究拠点におけるコンセプトや研究成果を伝えるため、一般の方々を対象に毎年シンポジウムを開催している。

・ 第 3 回東工大 COI シンポジウム（2018 年 11 月 20 日）

　「地球インクルーシブセンシングが目指す社会」をテーマとして、講演及びパネルディスカッション。

・ 第 4 回東工大 COI シンポジウム（2019 年 11 月 25 日）

　「地球の声、サイレントボイスを感じて、伝えて、行動する」をテーマとし、デジタルアートで有名なチームラボや農研機構などから講演及びパネルディスカッション。

・ 第 5 回東工大 COI シンポジウム、オンライン開催（2021 年 3 月 5 日）

B　イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

1　自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

当研究拠点のコンセプト「サイレントボイスとの共感」におけるフィードバックに焦点を当て、「これからの”かっこいい行動様式”を創るフィードバックループとは？」というテーマで講演及びパネルディスカッション。

・ 第６回東工大 COI シンポジウム、オンライン開催（2022 年 3 月 10 日）

当研究拠点の成果報告を行うとともに、当拠点コンセプト「サイレントボイスとの共感」の観点から、地球・社会を自分事として捉えて行動する大切さをテーマに講演及びパネルディスカッション

- JST フェア及びイノベーション・ジャパン

  JST が主催する JST フェア 2018 では会場出展、またイノベーション・ジャパン 2020～大学見本市 Online、イノベーション・ジャパン 2021～大学見本市 Online においては当拠点の研究内容を紹介する Web サイトを公開。

- おおた研究・開発フェア

  東工大 COI の参画団体である地元自治体(大田区、大田区産業振興協会)が主催する研究開発による産学連携を目的とした「おおた研究・開発フェア」に毎年出展参加した。

- アグリビジネス創出フェア

  農林水産・食品分野において全国で総勢 137 団体の産学機関が参加するアグリビジネス創出フェアに対し信州大学農学部より毎年参加し、牛群管理システムなどを紹介

- その他

  上記のほか、以下の学会、シンポジウム及びワークショップに協力した。

  ・2018 年 11 月 1 日　計測自動制御学会 共創システム部会研究会を共催

  ・2019 年 3 月 5 日　インテリジェント IoT プラットフォームシンポジウムを主催

  ・2019 年 3 月 24 日　中学生向け AI ワークショップ「実践！人工知能デバイス」（愛媛県松野町）

(3-2)COI ホームページ

活動の見える化としては、図 1.4-2 に示した東工大 COI ホームページにより、東工大 COI が目指す将来の姿や研究テーマ、組織等の他、全体会議や各種イベント等のレポートを随時掲載し情報発信に努めている。

図 B1.4-3: 地球インクルーシブセンシング研究拠点のホームページ.

B　イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

1　自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

(3-3)成果の発信として広報活動

- 記者発表・プレスリリース関連
  - 信州大学　農学部にて記者会見（2018 年 5 月 25 日）
    『サイレントボイスとの共感』地球インクルーシブセンシング研究拠点のサテライト設置について記者発表。信濃毎日 Web 版、長野日報に掲載。
  - 東京工業大学、信州大学、㈱電通国際情報サービス(iSiD) 3 者の共同プレスリリース（2019 年 3 月 20 日）最先端エッジ AI 技術を活用した牛の行動観察システムの共同開発
  - 東京工業大学ウェブサイト　スペシャルトピックス（2019 年 9 月 3 日掲載）
    当機構の廣井プロジェクトリーダー、若林研究リーダーとともに、東工大伊藤准教授、信州大竹田謙一准教授、東工大三宅教授らが取材を受け、「AI で牛の気持ちがわかる？！」と題して同ウェブサイトに掲載。
  - (株)ハタプロ　ホームサイト（2020 年 4 月 6 日）
    東京工業大学と高齢者の重大事故予防の共同研究
- テレビ放映等
  - TBS 番組　「未来の起源」　（放送日：2018 年 8 月 19 日）
    テラヘルツセンサに関して「指先につけるだけで非破壊検査が出来るデバイス」研究紹介。
  - テレビ東京　「モーニングサテライト」（放送日 2018 年 10 月 17 日）
    【ものづくりファンディング】のコーナーでテラヘルツ波の研究紹介。
  - ＮＨＫ　Ｅテレ番組「サイエンスゼロ」（放送日 2019 年 2 月 24 日）
    東工大 波多野教授と岩崎准教授が出演し、「超ミクロな磁場が測れる新技術 ダイヤモンドセンサ」として、ダイヤモンド高感度量子センサを紹介。
  - テレビ東京　「AI・DOL プロジェクト」（放送日 2020 年 3 月 9 日、16 日）
    東工大伊藤浩之准教授がテレビ東京より取材を受け、研究活動の様子が放映。
  - ＮＨＫ　Ｅテレ番組「人間ってナンだ？超 AI 入門」（放送日 2019 年 6 月 5 日）
    東工大・伊藤浩之准教授、信州大・竹田謙一准教授らの取材を受け実証実験など放映。
  - テレビ東京「ワールドビジネスサテライト」（放映 2021 年 2 月 18 日）
    トレンドたまごでテラヘルツセンサの研究紹介
- その他報道（新聞等に掲載された主な記事）
  - 科学新聞　「IoT と IoH 融合で新時代の社会基盤整備」（2019 年 3 月 22 日掲載）
  - 愛媛新聞　「中学生が最先端技術に触れる」（2019 年 3 月 31 日掲載）
  - 日経産業新聞「テラヘルツ波対応カメラ」（2021 年 2 月 16 日掲載）
  - 科学新聞（2021 年 2 月 19 日掲載）「ロボットやインフラ設備の即時診断に威力（自由度高い非破壊検査シート　東工大と理研が開発）」
  - Optics and Photonics News (アメリカ光学会) (2021 年 2 月 26 日掲載)“A Flexible Approach to Terahertz Imaging”

(3-4)その他

文部科学省が COI の Facebook を 2020 年 8 月から運用開始したことに伴い、当拠点から当拠点の研究開発テーマに関連する学会情報など提供した。

2　若手を中心とする多様な人材の活躍促進について

2.1　次代を担う若手等の多様な人材の育成・活躍促進の状況

(a)今後の拠点や自立的なプラットフォームの担い手となる次代の人材の育成・活躍の状況・方針について

【マネジメント人材】

A3.3(1)マネジメント体制に述べたように、PL,RL の下に研究をサポートする研究サブリーダーと運営をサポートする機構戦略支援チームを置いている。配置された人材は、COI プロジェクトの推進戦略と各研究チームにおける産学連携のコーディネートと研究推進の支援を行っている。今後のポスト COI における本研究機構の研究･運営の支援を行う必要不可欠な人材に育っている。ここで、現在配置されている人材である URA・コーディネータは、以下の役割を担い実行している。

・拠点運営として、全体の必要な活動の洗い出しとそれを実行する体制と仕組み（方法）の確立
・機構の産学連携の研究活動を円滑にすすめるための、研究者と企業間のシーズとニーズをどのように繋げるための提案と推進
・研究者のシーズを社会実装に繋げるための、企業の探索と勧誘、ならびに COI 参画と共同研究実施の支援
・研究者に必要な各シーズ研究の研究資金獲得のための、競争的資金の探索や申請のサポートによる拠点の活動を拡大する研究資金の拡大
・企業のニーズを研究者のシーズにどう繋がるかの検討と研究者への説明提案
・参加企業間の円滑なコミュニケーションや、コラボレーションの創出のための機会の提供
・未来開拓センタへの参画による、バックキャスティングや出口戦略の立案
・マーケティング手法を用いたビジネスモデルの企画と、研究者の出口との整合性や可能性の拡大、必要な開発項目の洗い出し
・論文・特許等の技術情報、マーケティング情報の収集などの調査分析活動
・研究成果や拠点活動の成果を伝えるアウトリーチ活動
・下記、若手人材に記している、研究会などの企画提案と運営

機構戦略支援チームの URA･コーディネータは、研究･産学連携本部を中心とした学内の 60 名余の URA やコーディネータともリンクして活動しており、各活動で連携して推進している。

【研究・イノベーション人材】

機構のミッションは、産学連携により大学の技術を社会実装すべく企業に渡すことであるが、大学と企業にはギャップがあり、それを乗り越えるための研究が必要である。しかしながら、この研究は学術的には評価されないことが多く、論文の書けない研究には通常の大学教官は参加しない。そこで、本研究機構では、「アンブレラ研究員」を雇用し大学と企業の橋渡し研究を行っている。ここで、アンブレラ研究員とは、研究者と研究者を繋いでインテグレーションする役割（企業でいう開発や設計に近い）をすることにより、研究全体の付加価値を大きくすることと、さらに新たな研究テーマを創出することを目指した活動を担っている。現在、本機構では 2 名雇用しているが、研究費が許す限り増員することを希望している。

(b)若手・女性等の多様な人材の活躍促進・育成・人材循環のための仕組み整備や実績・見通し

【若手人材】

COI 研究費を学生の RA(Research Assistant)経費としても用いており、各種成果報告会への積極的な参画を促している。毎年度、15～30 名の RA を COI 研究費にて雇用している。RA の方々は修了後企業・大学等にて活躍の幅を広げている。毎年 2 月ごろに企業メンバーを含めた拠点参加メンバー全員の前で、成果発表会を開催している。その場では優秀発表者表彰を行い RA の研究者としての育成を行っている。また B1.4(3)に記したアウトリーチ活動においても､TV 出演し、

2　若手を中心とする多様な人材の活躍促進について

学生の活躍を全力で支援している。

拠点には、様々な研究分野の若手研究者や RA が集まっているが、その中でのクロスボーダーな知識の習得による幅広い知識を持った人材育成を狙って、企業の研究者にも参加いただき機械学習研究会を定期的に開催して、研鑽を積んでいる。この活動は単なる知識習得のみならず、研究室を超えたメンバーの交流の場としても役立っている。

特筆すべきこととして、2017 年度の RA 学生研究員として活躍した大橋匠氏が工学博士とともにダブルディグリーとして人文系修士を取得し、現在 COI に参画している社会受容性研究の西條美紀教授の助教として採択され、本機構の未来開拓センタで活動をしている。さらに、「動物のサイレントボイスとの共感」の研究チームと共に畜産における地域の課題にも取り組んでいる。

【女性の研究者・学内協力者】

女性が参加し易い環境を整えることにも積極的に取り組んでいる。例えば、当機構のビジョンに対する社会受容性の調査研究として「未来開拓センタ」に西條美紀教授が参画し、積極的に活動をリードしている。また「生体のサイレントボイスとの共感」の研究では、波多野睦子教授がダイヤモンドセンサの研究を進めており、その成果は世界をリードしている。

さらに、RA 採用している女性学生 17 名が、COI 研究者として活躍している。

また、学内協力者として、桑田薫副学長は、産学連携担当として COI 活動を積極的に支援することに加えて、他の研究予算や教育予算についても共同で検討している。

【COI 若手ファンドによる連携研究の成果】

若手の人材育成の一環として、COI 若手ファンドに採択された調査研究 4 件、連携研究 1 件、デジタル分野連携研究 4 件の成果を、次ページ以降(2.1.1) (2.1.2) (2.1.3)に示す。

尚、若手ファンド連携研究は、当拠点活動の枠外であり、拠点メンバーには、情報管理方針に従い、開示しない。

2　若手を中心とする多様な人材の活躍促進について

2.1.1　COI 若手連携研究ファンドによる調査研究

H30WD10 スパッタ堆積 MoS2 薄膜チャネルを有する MOSFET による論理回路実証に向けた最新研究調査

課題名称	H30WD10 調査研究「スパッタ堆積 MoS_2 薄膜チャネルを有する MOSFET による回路実装に向けた最新研究調査」
課題代表者	松浦 賢太朗（東京工業大学　電気電子系電気電子コース　博士課程）
実施期間	平成 30 年 11 月～平成 31 年 3 月

(1)目的

東工大 COI 拠点では、"地球上のサイレントボイスと共感し、共存共栄する社会へ"を目標として、IoT/エッジデバイスとセンシングデータを AI 分析するモデルの構築を進めている。

現状では、そのデバイスにはシリコン材料による三次元チャネルデバイスで構成されているが、二次元層状半導体 MoS2 は柔軟性と光透過性を有し、シリコンでは移動度が劣化する極薄領域でも高移動度を示すため、次世代のデバイスとして注目されている。更なる微細化が進むと LSI 内部回路や外部駆動回路の高集積化が可能となり、4k ディスプレイ並の精細な AR(拡張現実)デバイス用透明フレキシブルディスプレイ等の新分野への応用も期待できる。

これまで東工大 COI 拠点ではデバイスの薄膜化のためスパッタ法による MOSFET 集積化プロセスを確立し、低電力化に必須な Normally-off 動作を確認した。今後の MOSFET 特性向上と回路実証に向けて、高性能 CVD 装置や MoS_2 回路実証のための測定システムに実績のある欧米の研究機関との連携が望まれる。そこで海外の複数の研究拠点を訪問し、研究環境調査と連携研究提案を行った。

(2)調査すべき項目

将来の AI エッジデバイスとして期待されている MoS_2 技術に関して、2 つのアプローチから調査を行った。

①スパッタ成膜による MoS_2 デバイスの回路実証は新規性、挑戦性が高い研究であるため、それに必要な設備や評価技術が必要なこと。

②AI エッジデバイスとして不揮発性メモリをアレイ上に構成することで人間の脳を模倣し、ニューラルネットワーク処理をより高速且つ低消費電力化するニューロモルフィックデバイスが将来の MoS_2 応用分野として相応しいこと。

(3)海外の研究拠点候補

上記観点に基づき、スイス連邦工科大学ローザンヌ校(EPFL)の Adrian Ionescu 研究室、Andras Kis 研究室、Leti の Thomas Ernst 研究グループ、IBM の安藤崇グループ、MIT の Tomas Palacios 研究室の 5 箇所を視察し、互いの研究紹介や研究設備の見学、デジタル連携研究でのテーマの議論を行った。

(4)連携先の探索結果

東工大 COI 拠点の研究目標や研究環境等から検討し、調査項目①には MIT、②には IBM が連携先として適切と判断した。

機関名（国名）	想定する連携内容
マサチューセッツ工科大学 (MIT) Tomas Palacios 研究室 （アメリカ合衆国）	二次元半導体の回路実証における十分な設備やノウハウを有する MIT の Tomas Palacios 研と連携研究を行うことで、スパッタ堆積 MoS_2 膜を用いた IoT デバイス実現に向けて回路動作実証を目指す
IBM T.J. Watson Research Center　安藤崇グループ	IBM はニューロモルフィックデバイスの先駆けとなった TrueNorth を開発し、この分野における世界最先端の研究開発施設である。そこで、東工大 COI 拠点での調査研究を活かしつつ、さらに高性能なニューロモルフィックデバイスの実現を目標に連携研究を行う

2　若手を中心とする多様な人材の活躍促進について

H30WD22　IoT/AI スマートセンシングプロセッサに向けた最適回路設計の調査研究

課題名称	H30WD22 調査研究「IoT/AI スマートセンシングプロセッサに向けた最適回路設計の調査研究」
課題代表者	佐藤 真平（東京工業大学 工学院情報通信系 助教）
実施期間	平成 30 年 11 月～平成 31 年 3 月

(1)目的

IoT/AI スマートセンシングプロセッサの実現のためには、高性能で低電力な回路構成が必要である。一般にデジタル集積回路の設計では、LSI の機能をハードウェア記述言語で定義し、それを論理合成して論理回路に置き換える。この過程で、冗長な論理ゲートを削減できるとチップ面積が減り電力消費を抑制できる。また、LSI の性能を決めるクリティカルパスを高速に設定して不必要な遅延時間の削減を出来れば集積回路の性能が向上する。

微細加工技術の限界が予想されている今後の集積回路においては、この論理合成技術の改善が必要不可欠である。また、最適化設計のためのパラメータも多くなり、最適な回路の生成が難しくなってきた。このため、調査研究として先ず一般的な設計ツールを用いた最適化に取り組み、更に海外の研究者との連携から研究の発展を目指す。

(2)取り組むべき課題

集積回路の論理合成時に、下記項目が新規の挑戦的課題となる。

①集積回路の動作における不必要な時間の削減。以前はあまり着目されていなかった部分であり、新規性および従来手法に対する優位性がある。

②性能を引き出すために考慮すべき最適なパラメータの自動設定。微細化技術の進展や、ユーザの要求に対応する新たなニーズである。

(3)連携先の探索結果

トロント大学の Jason Anderson 教授とは国際会議において議論を行い、教授のチームで開発している回路の論理合成ツールにおける知見により、本課題で目標としている集積回路の自動設計がより効率的に行えることを確認した。

バル・イラン大学の Shmuel Wimer 教授および国立清華大学の Ting-Chi Wang 教授とは、それぞれ本課題の目標である高スループットかつ低消費電力な集積回路設計について議論を行い、両教授の専門とする知見が本課題においてよりよい解決を見いだす可能性があることを確認した。

機関名（国名）	想定する連携内容
トロント大学，Jason Anderson 教授（カナダ）	Jason Anderson 先生のグループでの回路合成ツールの開発における知見により、本課題の目標とする回路の自動設計がより効率的に行える。
バル・イラン大学，Shmuel Wimer 教授（イスラエル）	Shmuel Wimer 先生の専門である回路設計および最適化問題の知見により、本課題の目標とする回路のより良い回路構成の構築が可能となる。
国立清華大学，Ting-Chi Wang 教授（台湾）	Ting-Chi Wang 先生の専門である回路の物理設計自動化および最適化問題の知見により、本課題の目標とする回路のより現実的な設計手法の確立が可能となる。

B　イノベーションが連続的に創出されるプラットフォーム構築に向けた活動実績

2　若手を中心とする多様な人材の活躍促進について

H30WD23 最先端 IoT/AI 技術を基盤としたデバイス/システムの継続利用を促す要因抽出とフィードバック方法確立

課題名称	H30WD23 調査研究「最先端 IoT/AI 技術を基盤としたデバイス/システムの継続利用を促す要因抽出とフィードバック方法確立」
課題代表者	大橋　匠　（東京工業大学　環境・社会理工学院　助教）
実施期間	平成 30 年 11 月～平成 31 年 3 月

(1)目的

「使われない技術には意味がない」― 技術の多様化・高度化が進むが、技術を利用するのは人間であるという本質は変わらない。本 COI 拠点に存在する潜在的な技術シーズを十分に活用し、社会実装を目指すには、技術と人間のインターフェースを如何にデザインするかが課題であるともいえる。

(2)目標・アプローチの斬新性と挑戦性の調査計画

ユーザー体験(UX)は「ユーザーの内的状態、デザインされたシステムの特性および相互作用が生じる文脈や環境の結果」だと言われる。本研究では、ユーザーに継続利用されるバイス/システムのデザインに向けて、行動変容理論を基軸に、各行動変容ステージ(無関心期→関心期→準備期→実行期→継続期)におけるデバイス/システムに対する利用意欲の変化抽出および適切な介入(フィードバック)方法開発を目指す(図 2.1-1)。このことは、技術・サービス・システムの開発側である本 COI 拠点に対しても有意義な情報をもたらすと考えられる。

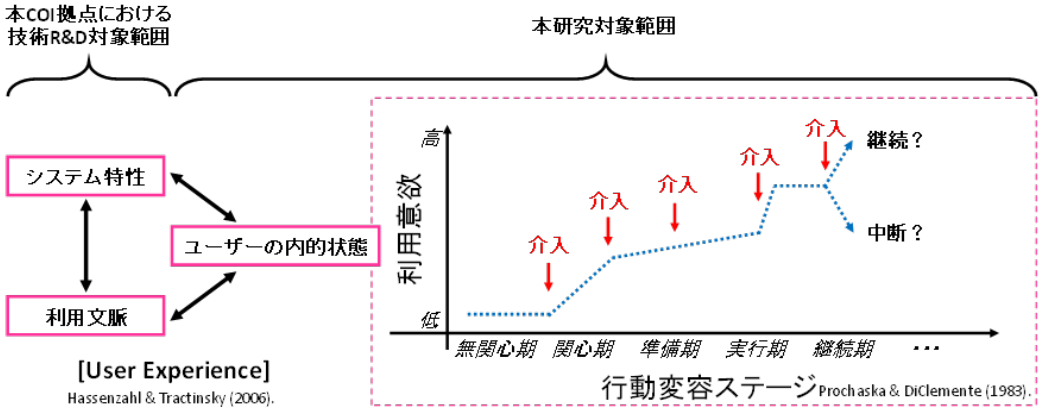


図 2.1-1:本研究のコンセプト.

(3)連携先の探索結果

東工大 COI 拠点のテーマ「動物のサイレントボイスとの共感」に関し、中小規模畜産農家へのスマート畜産普及の切り口として、国内外の連携先を探索した。

	想定する連携内容
Stanford University The Center for Design Research (CDR), 及び US-Asia Technology Management Center（米国）	CDR にて客員教員として **1 年間の滞在型共同研究**を推進(2019/8～)。また、US-Asia Technology Management Center との連携も模索し、技術経営視点でアジアの俯瞰分析及び制度設計の検討を行う。現場で実際に人々の行動を促す制度設計には、「俯瞰的な視点」と「現場への共感」の双方が欠かせず、技術経営とデザイン思考の融合を図る。
Chulalongkorn University, 及び [連携予定]　Dairy Promotion Organization of Thailand (DPO) 及び畜産局 （タイ王国）	フィールドワークや質問紙調査により、タイにおける畜産物に対する消費者行動のモデル化を目指す。また、チュラーロンコーン大学と連携してチェンマイ等でのフィールドワークを行い、中小規模畜産現場におけるニーズ抽出及び問題を解決するデバイスを使ったサービスのプロトタイプ作製を目指す。更に、政府系機関と連携し、技術を利用した農家の行動変容を促す制度設計について検討する。
（株）リバネス, 地域開発部, 尹 晃哲　（日本/東京） （海外ブランチ：シンガポール,マレーシア）	日本において獣医師資格を持つ担当者を主軸に、研究交流を推進する。特に、島根県益田市の放牧実験場を中心に据えたワークショップや実証実験を通して、現場課題の抽出や作製するプロトタイプの効果検証を行う。また、海外ブランチ協力の下、東南アジア諸国をケースとし、質問紙による調査研究を推進。

2 若手を中心とする多様な人材の活躍促進について

H30WD24 低消費かつ高性能な AI エッジ端末を指向する雑音情報を活用した軽量ディープニューラルネットワークの調査

課題名称	H30WD24 調査研究「低消費かつ高性能な AI エッジ端末を指向する雑音情報を活用した軽量ディープニューラルネットワークの調査」
課題代表者	中原 啓貴　（東京工業大学　工学院情報通信系　准教授）
実施期間	平成 30 年 11 月～平成 31 年 3 月

(1)目的

東工大 COI 拠点では、地球のあらゆるものをセンシングし AI 処理して有用な情報を取り出すことを目指している。AI によるリアルタリム且つ組込み可能な低消費電力・低コストな情報処理には、既存の機械学習よりも優れた認識精度を有する畳み込みニューラルネットワーク(CNN: Convolutional Neural Network)技術がある。しかし、これを実行するには内部パラメータ数が膨大であり、システムに搭載するにはメモリ量が不足するためパラメータの削減が求められている。先行する理論的研究では、学習済み CNN のパラメータの統計的解析に元づく雑音畳み込み手法の有用性が指摘されており、これによるとパラメータ数を約 90%削減できる可能性がある。この結果、メモリへのアクセス回数を減らせ高速処理が可能となるが、認識精度とはトレードオフとなる。本調査研究では雑音畳み込みに適したハードウェア雑音生成器の先行研究を実施している機関へ調査研究を行い、雑音情報を用いた CNN の有用性について目途を立てることを目標とする。

(2)具体的な目標

・最終的に雑音性を利用して既存の深層学習アクセラレータを電力性能効率で 10 倍以上向上させたい。また、今回目指す手法は統計的なアプローチにより認識精度を維持しつつ性能を大幅に向上させること。

・本研究のアウトプットとして、リコンフィギャラブルシステムである FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いて、データに応じた雑音等による統計的な性質を利用した

深層学習のアクセラレータの実現可能性を探る。

(3)連携先の探索結果

Sydney 大学 Philip Leong 教授を 2018 年 12 月に招聘し、深層ニューラルネットワークの統計的な性質に関する解析結果と雑音性による近似手法に関してディスカッションを行った。その結果、過去に関連する研究を紹介してもらい、提案手法が類似している点を指摘して頂いた。また、疑似乱数による雑音性の理論的な解析手法を照会し、提案手法が理論的に保証されることを確認した。

その議論の結果、理論的な保証とデータ構造は問題がないことが確認でき、アーキテクチャ実装による性能評価が必要であることが互いに認識できた。しかし、Leong 教授はアーキテクチャ実装の専門家ではないため、プロトタイプ実装に適した FPGA アーキテクチャと深層学習アクセラレータの実装に実績があるインペリアルカレッジロンドン校 Luk 教授を紹介してもらい、連携先として検討することになった。

2019 年 2 月に米国で開催された FPGA2019 に出張し、現地にて Luk 教授を紹介して頂き、Luk 教授と雑音性を利用した深層学習アクセラレータに関して議論を行った。その結果、現行のアーキテクチャとは異なる構造が必要であることを互いに確認し、近い将来に提案者である中原が実装・評価環境の整っているインペリアルカレッジロンドン校に滞在しつつ開発を進めることで意見が一致した。

機関名（国名）	想定する連携内容
インペリアルカレッジロンドン校 (イギリス) Wayne Luk 教授	リコンフィギャラブルシステムを用いた計算機アーキテクチャに強みがあるインペリアルカレッジロンドン校 Luk 教授研究グループと雑音を利用した深層学習に関する共同研究を行うことで、統計的ニューラルネットワークの実現を目指す。

2　若手を中心とする多様な人材の活躍促進について

2.1.2　COI 若手連携研究ファンドによる連携研究

H30W20 多角的バイオストレス評価にむけた超フレキシブル・ウェアラブルテラヘルツセンサの開発

課題名称	H30W20-2 連携研究テーマ「多角的バイオストレス評価にむけた超フレキシブル・ウェアラブルテラヘルツセンサの開発」
課題代表者	河野 行雄（東京工業大学 科学技術創成研究院未来産業技術研究所 准教授）
実施期間	平成 30 年 4 月～平成 31 年 3 月
連携研究機関	荒木　徹平　大阪大学産業科学研究所　助教

(1)目標

本研究は、H30W20 連携研究テーマ「多角的バイオストレス評価にむけた超フレキシブル・ウェアラブルテラヘルツセンサの開発」として、大阪大学 COI 拠点が「ウェアラブルテラヘルツセンサの機械的柔軟性向上にむけた材料探索および実装プロセスの構築」(H30W20-1)を、東京工業大学 COI 拠点が「多角的バイオストレス評価にむけた超フレキシブル・ウェアラブルテラヘルツセンサの開発」(H30W20-2)を担当した。阪大 COI 拠点でパッチ式脳波計として研究を進めているストレッチャブル電子デバイス技術に、東工大 COI 拠点のテラヘルツセンサの検出素子および計測技術を融合させ、“超フレキシブル・ウェアラブルテラヘルツセンサ”の開発を目標としている。

(2)達成状況と成果

①テラヘルツレーザーによるセンサの評価

屈曲時や伸長時においても動作可能な阪大作製の超フレキシブルテラヘルツセンサを評価し、検出感度 40.9 pW/(Hz)1/2 を得た。これは従来の室温動作 THz 検出器の 2 倍以上の性能である。

②検出素子・手法の改良

生体計測の可能性を調査し、超フレキシブルテラヘルツセンサとテラヘルツ波検出手法の改良を行い、曲げ変形下でも測定可能な環境を構築した。

③計測システムの構築

小型計測器と超フレキシブル・ウェアラブルテラヘルツセンサの接続時に使用する多チャネル計測システムの要素技術の構築を行った(図 2.1-2)。無線計測が可能であることに加えて、多チャネル素子による血管幅のイメージングが可能であることを確認した(図 2.1-3)。

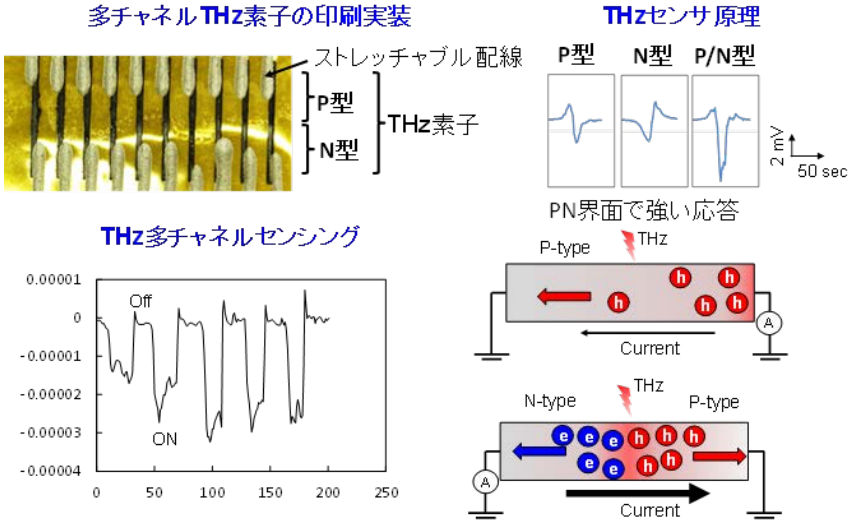


図 2.1-2: 印刷・塗布技術による THz 素子の形成.

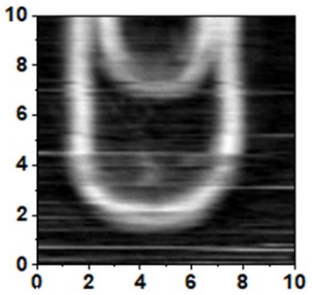


図 2.1-3:テラヘルツセンサによるイメージ像

(3)今後の課題と展開について

小型無線計測機への接続が可能な超フレキシブルテラヘルツセンサの実現をし、生体計測の可能性を見出した。イオンや赤外線を用いた検知器と比較しても本研究の開発品は有意性が多い。今後、これらの評価を詳細に行うことにより、多角的バイオストレス評価に向けた超フレキシブル・ウェアラブルテラヘルツセンサの高特性化を素子材料の観点から行う。

2　若手を中心とする多様な人材の活躍促進について

2.1.3　COI 若手連携研究ファンドによるデジタル連携研究

R1WD06　デジタル連携研究「高度な知能センサネットワークを目指した AI の開発」

課題名称	R1WD06「雑音畳み込みニューラルネットワークの研究開発」
課題代表者	中原　啓貴　（東京工業大学　工学院情報通信系　准教授）
実施期間	2019 年 5 月～2022 年 3 月
連携研究機関	英国　Imperial College London

(1)目的

・提案者が参加する東工大 COI 拠点の「地球インクルーシブセンシング」のアウトプットとして、センサネットワークに AI プロセッサを組み合わせることでより高度な認識ができるシステムを構築する(図 2.1-4)。

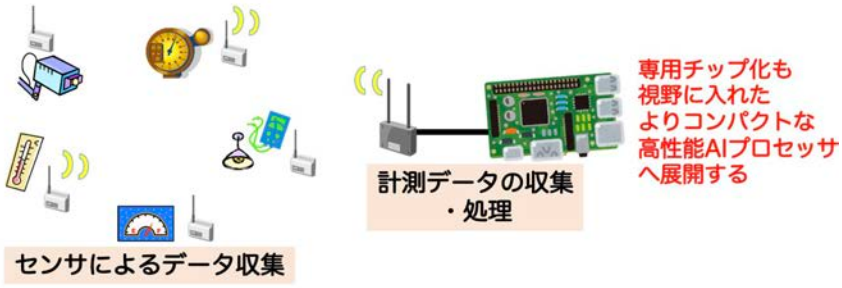


図 2.1-4: 高性能 AI プロセッサへの展開.

・FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いた AI 深層学習用アクセラレータを組み合わせ　た本システムの有用性確認と、適用分野の拡大。

・ムーアの法則終焉後に主流となる得る小規模・低電力で処理ステップ数も少ない次世代 AI プロセッサ方式の構築と、新たな AI アプリケーションの創生。

・新たな AI を通じた産業価値、特に我が国が強いとされる組み込みシステムに、新たな付加価値を与え産業力強化に寄与。

(2)主な研究実施項目

・雑音畳み込みニューラルネットワーク学習ツールを開発する。畳み込み計算の大部分を雑音加算で代用し、雑音により精度が落ちる部分を 1×1 畳み込み処理で補完する。エネルギー消費の大部分をしめるメモリアクセスを減らせるので低電力化が可能となる。

・GPU 上で画像認識データセットを用いた学習を行い、様々なハイパーパラメータの探索を施し、雑音ニューラルネットワークに適した学習法を開発した。

・上記学習ツールを発展させて FPGA の回路合成ツールを開発し、目標であるメモリアクセスパターン回路を開発する。これを FPGA に実装し、物体検出等への応用を検討する。

・本研究の応用例として、With コロナ/After コロナ時代に即し、「ソーシャルディスタンスを検出・予測する AI センサネットワークの開発」を実施。

(3)連携先との活動

連携先の Imperial College London とは、滞在、またはオンラインで下記連携研究を実施。

・雑音畳み込みニューラルネットワークに関するメモリアクセスパターンを高効率化するアーキテクチャの研究開発。

・再構成可能アーキテクチャである FPGA による深層学習向け開発基盤やノウハウの共有。

・ソーシャルディスタンス検出のための監視カメラネットワークの開発・運用手法の共有。

(4)特記事項

・研究成果を活用した大学発ベンチャー(Tokyo Artisan Intelligence)を 2020 年 3 月に起業し、研究成果を社会実装する取り組みを開始している。

・申請者は複数の企業から共同研究資金を受託して研究開発を進めている。これらの資金と本支援事業の技術的成果を活用し、日本発の高速且つ低消費電力な AI チップを、近年市場が形成されつつある AI チップ市場に展開したい。

B　イノベーションが連続的に創出されるプラットフォーム構築に向けた活動実績

2　若手を中心とする多様な人材の活躍促進について

R1WD10　デジタル連携研究「スマート畜産実践の知識移転を支援する IoT/AI デバイス活用手法開発と農家の行動変容を促す制度設計」

課題名称	R1WD10「スマート畜産実践の知識移転を支援する IoT/AI デバイス活用手法開発と農家の行動変容を促す制度設計」
課題代表者	大橋　匠（東京工業大学 環境・社会理工学院 助教）
実施期間	2019 年 6 月～2022 年 3 月
連携研究機関	スタンフォード大学 チュラーロンコーン大学、カセサート大学 (株)リバネス

(1)目的

大規模集約的な畜産方式が生み出した負の側面への反省から、欧州を中心に、アニマルウェルフェア(AW)に配慮した持続可能な畜産方式への転換が進んでいる。一方、我が国をはじめとするアジア諸国では、AW に対する文化醸成がなされておらず、また、それに対する経済的評価は定着していない。東工大 COI 拠点では「動物のサイレントボイスとの共感」をテーマに、IoT/AI デバイスの活用し、AW に配慮した畜産方式を現場へ普及させるべく研究開発活動を進めている。これらを背景に本連携研究では、畜産農家によるスマートな畜産実践を支援する IoT/AI デバイスの活用シナリオの構築と検証を目標とし、研究活動を推進した。

(2)研究実施項目と成果

・デザイン思考に基づく UX/UI 設計の方法論の習得

デザイン思考の源流の 1 つであるスタンフォード大学に長期滞在し、デザイン思考に基づく国際産学連携プロジェクトに携わることで、デザイン思考の実践者・教育者としての熟達を図った。

・日本/タイにおける牛個体管理システムのユースケース導出

東工大 COI 拠点が開発する牛個体管理システム「PETER」のユーザーインターフェースの機能的プロトタイプとして、牛の行動履歴、牧場カレンダー、牧草の推定量などを表示する Web アプリを開発し、島根県益田市の繁殖牛放牧農家において実証実験を行った。また、アジアの要所であるタイにおけるユースケース導出に向けてステークホルダー分析を行い、論点を纏めた。

図 2.1-5 機能的プロトタイプ

(3)連携先との活動

・スタンフォード大学では、課題代表者が客員助教として 1 年間の滞在型共同研究を実施(2019/8～)。上記ユースケース導出にデザイン思考を活用した。

・チュラロンコン大学・カセサート大学とは、タイにおけるフィールドワーク、ステークホルダー分析を実施し、新たな牛個体管理システムユースケース導出を目指し協働した。また、チュラロンコン大学とは消費者行動調査を共同で実施した。

・株式会社リバネスとは、日本の耕作放棄地における牛個体管理システムのユースケース導出に向けた実証実験で協業した。

(4)本研究の新規性、展開

スマート畜産を目指した IoT/AI 技術によるシステム開発は各国で行われているが、それらが関連する各アクター(生産者、消費者、獣医等)にどのような影響をもたらし得るのかという観点での議論は行われていない。本研究では、この点をクリアにし、新たなバリューチェーンを構築に資するものである。

また、東工大 COI 拠点と連携し、本研究の具体的な成果物（機能的プロトタイプ）を沖縄県黒島の商用牧場における実証実験および UI 開発を通じて、さらに発展させることに繋がった。

2　若手を中心とする多様な人材の活躍促進について

R1WD14　超低消費電力 AI エッジデバイスの実現に向けた不揮発性メモリで構成されたニューロモルフィックデバイスの海外連携研究

課題名称	R1WD14「不揮発性メモリによって構成されたニューロモルフィックデバイスの低消費電力化」
課題代表者	松浦 賢太朗（東京工業大学 工学院電気電子系電気電子コース 博士後期課程学生）
実施期間	2019 年 8 月～2020 年 1 月
連携研究機関	米国　IBM T. J. Watson Research Center

(1)目的

東工大 COI 拠点は、地球のサイレントボイスを IoT デバイスでセンシングし、そのデータを AI 分析して、不都合な事態を未然に予知する仕組みを構築している。AI 処理を超低消費電力で実行する IoT デバイスとして期待されているのが、不揮発性メモリをアレイ上に構成することで人間の脳を模倣して、ニューラルネットワーク処理を実行するニューロモルフィックデバイスである。課題提案者は、既に COI 若手ファンド連携研究ファンドによる調査研究(H30WD10)で、ニューロモルフィックデバイスの先駆けとなった IBM の TrueNorth を見聞し、その可能性に気づいた。今回は、IBM の T.J.Watson Research Center にて、ニューロモルフィックデバイスの低消費電力化に取り組んだ。

(2)研究実施項目と成果

課題代表者は 2019 年 10 月から 12 週間にわたり IBM 社の T.J.Watson 研究所に滞在して、新構造相変化メモリの特性がニューロモルフィックデバイス用の特性に相応しいか測定し、更にその電流機構解明に関する研究を行った。

- 相変化メモリに対して、矩形上に熱を印加した際に、メモリの伝導度が印加数に線形変化する特性を持たせたい。本連携研究では、この線形変化を実現することを目的の 1 つとした新構造の相変化メモリの測定と解析を行い、デバイスの特性を明らかにし、改善すべき点を纏めた。
- 更なる低消費電力化を進めるにあたって、相変化メモリにどのように電流が流れているのか、その電流機構を解明して数式モデルに落とし込むことは非常に重要である。なぜなら得られた数式モデルから、より低消費電力化を実現するには、どのパラメータをどう改善すべきかの方針が立てられるからである。本連携研究では、その電流機構の解明も行い結果として、既存の電流機構の中から、最も有効なケースの選定に成功した。
- IBM 滞在時の連携研究成果をまとめ、口頭にて発表。

(3)今後の展開について

- 本連携研究中に、当拠点と IBM 間で、今後も継続的な人材や技術交流を行うことで合意した。契約についても、今後はスムーズに連携研究が行える可能性が高いため、当拠点に所属する学生や若手研究員に IBM で滞在型研究を行うことを勧める。これにより、新たな活動資金の獲得や、今後の人材交流にもつなげて行きたい。

2　若手を中心とする多様な人材の活躍促進について

R1WD15　デジタル連携研究「聴衆を惹きつける音楽共同演奏のインクルーシブセンシングによる評価」

課題名称	R1WD15「即興的音楽コミュニケーション成否の集団脳身体活動センシングによる予測」
課題代表者	野澤 孝之（東京工業大学　地球インクルーシブセンシング研究機構　特任准教授）
実施期間	2019 年 6 月～2022 年 3 月
連携研究機関	英国　Imperial College London

(1)目的

東工大 COI 拠点では、自己をとりまく環境からセンサ技術を駆使して『サイレントボイス』として拾い上げ、AI 技術を活用して自己と環境の関係にとって重要な情報を抽出し、自己にフィードバックして自発的行動を促す研究開発を行なっている。また、人は社会的動物であり、他者と協調することで高度な文化や価値を創造してきた。ライブの音楽活動等では、単に共演者や観客との調和だけでなく、不測の揺らぎやひらめきに応じて即興的に動作を逸脱・アレンジしていくプロセスも必要になると言われている。この現象を科学的に捉え、解明する。

(2)研究実施項目

音楽の共同演奏の評価に関し、次の手順で研究を進めた。

(a)楽譜通りの演奏や成功した即興演奏、失敗した即興演奏を、その場に参加する者たちの集合的身体・脳活動から機械学習により同定

(b)共同演奏における知覚キューの重要性を検証

(c)データ駆動的解析と非線形複雑系解析を融合して脳と身体活動にあらわれる調和/逸脱の双方向的関係を明らかにする手法を開発

(3)連携先との共同研究

Imperial College London(ICL)の Department of Mathematics の Henrik Jensen 教授らのグループは、非線形力学モデルに基づく複雑系数理分析の手法を用いた即興的音楽コミュニケーションの研究について先駆的実績をあげており、本研究の連携先として相応しい。また、ICL と協力関係にあるロンドンの Guildhall School of Music & Drama において音楽専門家の知見やリソース活用させていただきながら、弦楽四重奏団と聴衆による実験を行った(図 2.1-6)。また、得られた結果と共同演奏体験との結び付きや音楽体験の質の向上に繋げる方法の可能性を、演奏者自身をまじえて議論した。

図 2.1-6: 演奏者と聴衆の同時計測.

(4)結論

演奏者-聴衆間の異なる時間スケールでの同調が演奏に対する聴衆の評価を異なる形で反映し、協調と逸脱の両プロセスが革新的な音楽体験に寄与することを明らかにした。この成果は国際会議(Conference on Complex Systems 2020)で発表し, 学会誌の解説記事（応用物理 Vol.89, No.12, pp.734-736, 2020; 計測と制御 Vol.60, No.6, pp.435-440, 2021）でも紹介している。さらに連携先とオンラインで協力して分析を深め、さらなる成果発表の準備を進めている。また、本課題の成果をシーズとして東京藝術大学 COI と「音楽感動体験の定量的評価と支援に向けた試み」の共同研究にも着手した(第 22 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会で発表)。実世界での集団協調活動を定量的に分析・理解しようとする研究はまだ黎明期にあり、集団音楽体験の主観的な良し悪しが客観的センシングデータから判別できる可能性を示す本研究の成果は画期的で，更に幅広い展開が期待できる。

2　若手を中心とする多様な人材の活躍促進について

2.2　人材の育成・人材循環整理表

〇人材の育成、人材循環整理表　　※大学等：大学・研究機関　単位：人

（人材の育成等の状況）		合計(H25-R3)
昇格	同一機関	9
	他機関	3
定年制の取得	同一機関	0
	他機関	4

（出向・クロスアポイントメント等の人事交流状況）	合計(H25-R3)
大学等→大学等	3
大学等→企業	0
企業→大学等	0

※転籍出向や兼業は含みません。

（転籍等の人材流動の状況）	合計(H25-R3)
大学等→大学等	10
大学等→企業	0
企業→大学等	1

（外国機関との滞在型研究交流の状況）		合計(H25-R3)
短期	派遣	4
	受入	0
2ヶ月以上	派遣	7
	受入	1