



ムーンショット目標 1

2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から
解放された社会を実現

実施状況報告書

2025 年度版

身体的能力と知覚能力の拡張による

身体の制約からの解放



金井 良太

株式会社国際電気通信基礎技術研究所
経営企画・イノベーション協創部



【目 次】

身体的能力と知覚能力の拡張による身体の制約からの解放	1
PM：金井良太（㈱国際電気通信基礎技術研究所 担当部長）	
非侵襲 BMI による精神・身体状態の推定	3
課題推進者：牛場潤一（慶應義塾大学 教授）	
非侵襲 BMI による精神・身体状態の調節	5
課題推進者：古屋晋一（株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所 リサーチディレクター）	
脳状態遷移コストの定量化と最適制御のための数理基盤技術の開発	7
課題推進者：大泉匡史（東京大学 大学院総合文化研究科 准教授）	
脳情報を用いたコミュニケーション技術の開発	9
課題推進者：暦本純一（東京大学 教授）	
侵襲 BMI の臨床応用に向けた開発	11
課題推進者：柳澤琢史（大阪大学 大学院医学系研究科 神経情報学 教授）	
バーチャルアバターの全身制御を実現する BMI 技術	13
課題推進者：Edward F. Chang (University of California, San Francisco Professor)	
ホログラフィック刺激による神経回路時系列情報の意義解明と情報伝送技術の構築	15
課題推進者：和氣弘明（自然科学研究機構 生理学研究所 教授）	
プロジェクト共通課題の検討と社会実装に向けた研究開発	17
課題推進者：金井良太（株式会社アラヤ 代表取締役 CEO）	
Trusted BMI の社会基盤整備	19
課題推進者：武見充晃（広島大学 准教授）	
BMI-CA 活用における法学的検討	21
課題推進者：駒村圭吾（慶應義塾大学 法学部 教授）	
OpenCA 実現に向けた BMI の研究開発と国際的実証実験の推進	23
課題推進者：阿久津完（株式会社アラヤ チームリーダー）	

極低侵襲 BMI の研究開発	25
課題推進者：関谷毅（大阪大学産業科学研究所 教授）	
ヒトへの長期留置を目指した極低侵襲 BMI システムの開発	27
課題推進者：中村元（大阪大学大学院医学系研究科 脳神経外科学 講師）	
脳インターフェース技術	29
課題推進者：David B. Grayden（メルボルン大学 教授）	
長期計測が可能なウェアラブルデバイスの開発	31
課題推進者：植村隆文（大阪大学産業科学研究所 教授）	

2025 年度研究開発プロジェクト実施報告書

研究開発プログラム

「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」

研究開発プロジェクト名：

「身体的能力と知覚能力の拡張による身体の制約からの解放」

PM：金井 良太（㈱国際電気通信基礎技術研究所、担当部長）

1. 研究進捗状況と成果

本年度は、AI 支援型 BMI-CA の社会実装に向けて、脳情報を高精度に読み取り、CA・ロボット・社会基盤へ接続するための中核技術を重点的に発展させた。特に、血管内脳波計測では、皮質静脈および深部血管から低侵襲に高精度な神経信号を取得できることを実証し、ヒト応用を見据えた極低侵襲 BMI の基盤を大きく前進させた。また、非侵襲 EEG では、発話時脳波データベース「JapanEEG」の構築とスケーリング則の発見により、AI を用いた脳情報解読の性能向上に向けた道筋を示した。さらに、複数人・複数ロボット・複数入力デバイスに対応した、人とロボットの協調操作（HRI：Human-Robot Interaction）を定量評価するための共通ベンチマーク「M4Bench」を開発し、BMI-CA の操作性能を定量的に評価する共通基盤を整備した。これらの技術成果に加え、Trusted Neurotechnology Initiative を通じて、BMI・ニューロテクノロジーの信頼性評価、ELSI、国際発信を進め、研究成果を社会実装へ接続する体制を強化した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

本年度の主要な成果としては、血管内脳波による低侵襲・高精度な神経信号取得の成功、非侵襲 EEG の大規模データ化とスケーリング則の発見、複数人・複数ロボット操作を評価する M4Bench の発表、ならびに国際ルールメイキングを主導する Trusted Neurotechnology Initiative の設立が上げられる。また、本プロジェクトの極低侵襲 BMI 開発は、スピンオフ企業「livec 社」の設立に至っている。

2) 代表的な論文

・Iwata T, et al. A microendovascular system can record precise neural signals from cortical and deep vessels with minimal invasiveness. *Advanced Intelligent Systems*, 2025. DOI: 10.1002/aisy.202500487 (記事番号: e2500487)

微小血管内電極を用いて、皮質静脈および深部血管から低侵襲に高精度な神経信号を取得できることを示した研究である。従来の侵襲的手法と比較して高い信号品質を示し、血管内 EEG が将来の低侵襲 BMI、神経疾患治療、脳機能マッピングに応用可能であることを実証した。

・Yoshida A, et al. A multi-user multi-robot multi-goal multi-device human-robot interaction manipulation benchmark. *Frontiers in Robotics and AI*, 2025. 12: 1528754. DOI: 10.3389/frobt.2025.1528754

複数ユーザ、複数ロボット、複数ゴール、複数入力デバイスを組み合わせた HRI ベンチマーク M4Bench を開発した研究である。脳波や筋電を含む多様な入力に対応し、50 名規模の実験により操作性能を定量評価した点で、BMI-CA の社会実装に必要な評価基盤を提供した。

3) 代表的な特許

・特許第 7814695 号「情報処理装置、脳情報通信装置、情報処理方法および情報処理プログラム」
脳情報通信および脳内情報表現の変換に関する特許であり、脳情報を AI を介して解読・変換し、コミュニケーションや CA 操作へ接続する基盤技術として位置づけられる。

・特許第 7824711 号「機能デバイス、ガイディングカテーテル、生体インタフェイスシステム、および機能デバイスの留置方法」

極細径の血管内デバイスを安全に輸送・留置するための技術に関する特許であり、血管内 BMI の長期利用、低侵襲化、医療応用に向けた中核的な基盤技術である。

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会
を実現・身体的能力と知覚能力の拡張による身体の制約からの解放

非侵襲 BMI による精神・身体状態の推定

課題推進者：牛場 潤一（慶應義塾大学 教授）

1. 研究進捗状況と成果

（テーマ1）脳情報オミックス解析による精神・身体状態推定アルゴリズムの開発

脳波・筋電図・眼球運動等の多様な生体信号を同期収録する「脳情報シーケンサー」を構築し、キャリブレーション不要・100ms 以下の即応性を持つ精神・身体状態推定アルゴリズムを開発した。2025 年度は当該アルゴリズム（ドラフト 2）を脳状態管理アプリ・脳コンディショニングアプリに組み込み、約 30 秒で利用開始できる「プラグ・アンド・プレイ」を実現。健常成人 30 名での運動意図推定精度 90%以上を確認し、アバターへの自己投影指標の有意な向上も確認した（査読中）。AI 画像認識を活用した視線情報との組み合わせにより移動意図の高精度読み出し技術も確立し、運動障害ユーザーによるヴァーチャル環境での散策・購買の原理実証を完了した。

（テーマ2）非侵襲 BMI による脳疾患予防・社会復帰者向け社会実験

装着着が簡便な非侵襲 BMI デバイスに精神・身体状態推定アルゴリズムを組み込んだアプリ（Brain Assistant / Think Communication）を商用レベルの UI/UX で構築し、有病社会復帰者・一般市民コミュニティを対象に大規模社会実験を実施。継続利用によるヘルスコンディション改善実感を実証した。具体的には、esports 選手実験では射撃反応時間が中央値-30.3ms（約 4.3 フレーム）短縮し、インパクトファクター8.9のQ1 誌に掲載。またジストニア患者 30 名中約 70%に、臨床的有意差のある症状緩和効果を認めた。プロジェクト間連携課題（CP 課題）では、ヘッドフォン型脳波計とリアルタイム AI 解析を活用し、脳波変化とマルチオミクスデータの統合解析により生体影響性の客観的評価を実施した。

2. 代表的な成果事例

（1）目標達成に最も寄与する成果

非侵襲 AI 支援型 BMI-CA 技術基盤の完成と、多様なユーザーへの実証が最大の成果である。健常者・運動障害者・疾患患者・esports 選手など幅広い対象に対し、30 秒以内のセットアップで脳状態管理と能力拡張を実現。esports 選手の射撃パフォーマンス向上とジストニア患者の症状緩和という異なる領域で臨床・実践的有効性を立証し、「身体の制約からの解放」というムーンショット目標達成に向けた重要な里程碑となった。

（2）代表的な論文

・ Biofeedback training can enhance esports players' shooting performance in an aiming task: focusing on cortical activity and gaze movement, Jeong I, Kaneko N, Kim D, Takahashi R, Iwama S, Dohata M, Ushiba J, Nakazawa K.. Computers in Human Behavior, Vol. 175, 論文番号 108836 (2026 年 2 月) DOI: 10.1016/j.chb.2025.108836

脳波（EEG）ニューロフィードバック訓練により esports 選手の射撃パフォーマンスが向上することを科学的に立証した。中心部頭頂付近のシータ波・アルファ波パワーを自己調節する訓練を行った結果、射撃反応時間が中央値-30.3ms（144Hz モニター換算で約 4.3 フレーム）短縮した。熟練選手でも短時間訓練で従来の限界を超えた向上が可能であることを示した。インパクトファクター8.9、心理学・人間工学分野 Q1 論文。

（3）代表的な特許 特になし。

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会
を実現・身体的能力と知覚能力の拡張による身体の制約からの解放

非侵襲 BMI による精神・身体状態の調節

課題推進者：古屋 晋一（株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所 リサーチディレクター）

1. 研究進捗状況と成果

2025 年度は、非接触マルチモーダル情報と深層学習を統合し、身体・知覚能力を拡張するための BMI 技術基盤の構築および実証を行った。

技術開発において、座圧センサアレイ、カメラ画像、マイク音を統合し、演奏中の 3 次元姿勢や筋活動を動的に推定するシステムを開発した。本システムを用いて、練習支援を目的として、マルチモーダルな生体センシング情報に基づき、適切な身体の動き・姿勢を推薦するシステムを設計・開発し、属人的なトレーニングの効果を上回る技能熟達効果をもたらすプロトタイプを構築した。弱教師付き学習を用いて連続動作内の改善箇所を自動特定する手法や、熟練者の視線パターンを非熟練者へ提示し模倣を促す技能転写システムを構築した。心拍と打鍵の相関に基づくバイオフィードバックや、振動・音刺激を組み合わせたマルチモーダル知覚訓練により、心身のコンディショニングと知覚学習の促進を可能にした。

社会実証実験では、ピアノアカデミー等の実環境において、のべ 500 名の音楽演奏家を対象とした大規模な技能評価実験を実施した。外骨格ロボットや開発アプリを用いた介入により、生体データから運動エラーを事前に予測・回避する手法や、技能の天井効果を打破するトレーニングの効果を実証した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

独自開発の高精度非接触センシングと AI 技術を融合し、身体・脳の制約を生み出す機序の解明とその突破のための介入手法を確立したことである。特に、打鍵加速度による音色操作の運動原理の同定 (Kuromiya et al. 2025 PNAS) や、記憶の境界 (チャンク境界) における脆弱性の克服と認知負荷低減を実現する訓練法の開発 (Shih et al. 2026 iScience) は、共にトップジャーナルに掲載された成果であり、卓越した技能を効率的に転写・拡張可能にする BMI 技術の基盤である。

2) 代表的な論文

・Kaori Kuromiya, Yuya Kobayashi, Masato Hirano, and Shinichi Furuya. "Motor origins of timbre in piano performance", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 122(39), e2425073122, 2025.

ピアニストが打鍵時の微細な動きで音色を変化させられるかという 100 年来の論争に対し、運動学と実験心理学を組み合わせることで実証した成果である。独自開発の高精度センサを用いた解析により、音色という知覚に関わる 5 つの運動特徴量を同定した。介入研究により両者の因果関係を証明した。本成果はフォーブスジャパンや海外の新聞記事など各種メディアで取り上げられた。

・Pei-Cheng Shih, Masato Hirano, and Shinichi Furuya. "Bridging chunks during complex movement sequence execution", *iScience*, 29(2), 114562, 2026.

複雑な系列運動の想起において、記憶のまとまり (チャンク) の境界が記憶想起上の脆弱な点であることを解明した。プロピアニストを対象とした実験により、チャンク境界での感覚摂動が顕著なミスと認知負荷 (瞳孔径および前頭葉シータ波) の増大を招くことを示した。この境界に特化した訓練を行うことで、認知負荷が低減し、運動の安定性が向上することを実証した。本成果は、長大な系列運動の安定した実行を支える神経基盤を特定し、身体や脳の制約を解放する効率的な練習戦略の提案に寄与するものである。

3) 代表的な特許 特になし

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会
を実現・身体的能力と知覚能力の拡張による身体の制約からの解放

脳状態遷移コストの定量化と最適制御のための数理基盤技術の開発

課題推進者：大泉匡史（東京大学 大学院総合文化研究科 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

異なる脳の間での X-Communication を実現するには、大きく分けて 3 つの要素技術が重要となる。(1) 高次元の非線形な神経ダイナミクスのモデル化、(2) 神経ダイナミクスの間の翻訳(アラインメント)、(3) 神経ダイナミクスの制御性の推定である。今年度はこれらの 3 つの要素技術の方法論の発展に取り組むとともに、実際の脳活動データを用いて妥当性を検証した。(1)に関しては、Dynamic Mode Decomposition (DMD)の方法の一つである、時間遅れ座標を活用した Hankel DMD を用いることで、非線形システムの Koopman 作用素の固有値を求める方法の有効性を検証した。Hankel DMD を活用することで、熱力学的な散逸を振動モードの寄与に分解する方法を提案し、プレプリントとして公表した(Sekizawa et al., arXiv, 2025)。(2)に関しては、異なる脳の活動データに対して、同一の外部刺激などを用いてデータを揃えられない状況においても適用できる手法として、教師なしのアラインメント手法である Gromov-Wasserstein 最適輸送の有効性を検証した。この方法論を行動データや神経活動データなどに適用して本手法の有効性を示し(Kawakita et al., 2025; iScience; Takeda et al., 2025, iScience; Takahashi et al., 2026, Neural Networks)、ツールボックスとしても公開した(Takeda et al., 2025, J Neurosci Methods)。(3)に関しては、TMS(経頭蓋磁気刺激)刺激に対する EEG(脳波)の応答データを用いて神経ダイナミクスの制御性を求める手法を提案し、制御性によって脳状態を弁別できることを示した(Shikauchi et al., 2025, J Neurosci)。また、制御性の推定に必要なシステム同定を行うための摂動入力最適化を行うための理論的なフレームワークを提案した(Ogino et al., 2026, eLife)。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

2) で述べる研究により、制御性の推定の理論的なフレームワークを構築し、提案したフレームワークの有効性の実験的な検証が行うことができた。

2) 代表的な論文

・Shikauchi, Y., Takemi, M., Tomasevic, L., Kitazono, J., Siebner, H. R., & Oizumi, M. (2026). Quantifying state-dependent control properties of brain dynamics from perturbation responses. *Journal of Neuroscience*, 46(5), e0364252025. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0364-25.2025

インパルス的な脳刺激(TMS)に対する EEG 応答から、脳活動ダイナミクスの制御性(制御性グラミアン)をシステムパラメータを推定せずに直接計算する手法を提案した。制御性グラミアンの固有値(制御可能な大きさ)と固有ベクトル(制御可能な方向)を用いて、運動実行・運動イメージ・安静時など 6 条件間の脳状態を弁別できることを示した。

・Ogino, M., Sekizawa, D., Kitazono, J., Oizumi, M. (2026). Designing optimal perturbation inputs for system identification in neuroscience *eLife* 15:RP110030, DOI: 10.7554/eLife.110030
神経ダイナミクスのシステム同定における最適な外部摂動入力の設計に関する理論的枠組みを提案した。この理論は、定常状態で見えなくなっている動的モードを摂動によって再励起することで、隠れてしまった情報を観測可能にするという発想に基づいたものである。神経状態の分類や最適制御への応用シミュレーションにより、本枠組みの有効性を実証した。

3) 代表的な特許：該当する項目なし。

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会
を実現・身体的能力と知覚能力の拡張による身体の制約からの解放

脳情報を用いたコミュニケーション技術の開発

課題推進者： 暦本純一（東京大学 教授）

1. 研究進捗状況と成果

1. 本研究開発課題の当該年度実施概要

発話意図のデコードを目的として、発話（有声・無声）時の脳身体活動から意図を推定するミドルウェアを開発した。今年度は以下2課題を重点的に推進した。

（1）非接触発話認識ミドルウェアの高精度化：鼻梁部での骨伝導・皮膚伝導・空気伝導の融合計測により、環境騒音に頑強な極低音量発話（囁き声）認識モデルを確立した。スマートグラス組み込みによるウェアラブル TC (Think Communication) 基盤への展開を想定。本研究は ACM CHI 2026 にフルペーパー採択（発表：2026 年 4 月）。また、液体レンズを用いた老眼シミュレーション眼鏡を開発し、Augmented Humans 2026 にてフルペーパー採択・Best Paper Honorable Mention 受賞。

（2）MLLM 活用による技能獲得支援システムの開発：一人称ビジョン・視線情報・音声指導を MLLM (Multimodal Large Language Model) で解析し、技能内容をデータフロー図式（中間表現）に変換する技術を確立した。さらに、この中間表現を入力として学習者の状況を察知し音声ガイダンスを行う実世界エージェントを構築。熟練者が AI 専門知識なしに技能表現を検証・修正できる explainable な仕組みを実現した。本成果は ACM UIST 2025 Adjunct にポスター採択。

2. 当該年度の研究開発実施内容

1) 目標達成に最も寄与する成果

- ・鼻梁の骨・皮膚伝導と音響計測の融合により、環境騒音に頑強な低音量発話認識センシング・深層学習モデルを確立した。

- ・液体レンズ眼鏡による老眼・遠視シミュレーション技術を構築し、ユニバーサルデザイン等への応用を可能とした。

2) 代表的な論文

- ・Jun Rekimoto, Yu Nishimura, Bojian Yang, "NasoVoce: A Nose-Mounted Low-Audibility Speech Interface for Always-Available Speech Interaction", Proc. CHI '26, Article No. 1664, pp. 1-11. 鼻梁部センサーで骨伝導・皮膚伝導・音響を融合計測し、自己教師型深層学習により騒音環境下でも高精度な囁き声認識を実現。スマートグラス組み込みによる常時利用可能な音声インタフェースの基盤技術となる。HCI 分野トップカンファレンス ACM CHI 2026 にフルペーパー採択。

- ・Qing Zhang et al. (incl. Jun Rekimoto), "OpticalAging: Real-time Presbyopia Simulation for Inclusive Design via Tunable Lenses, Proc. AHs '26, pp.101-114, **Best Paper Honorable Mention**. 液体レンズ眼鏡「OpticalAging」により老眼・遠視等の視力変化をリアルタイムで再現する手法を提案。若年デザイナーが高齢者の視覚世界を体験することでインクルーシブデザインへの貢献を示し、国際学会にて Best Paper Honorable Mention 賞を受賞した。

- ・Sotaro Yokoi, Jun Rekimoto, "MermaidLLM: Dataflow Diagrams for Explainable Skill Formalization and Real-time Support with Multimodal LLMs", UIST 2025 Poster (Proc. UIST Adjunct '25, Article No.103, pp.1-3)

一人称映像・視線・音声を MLLM で解析しデータフロー図として技能を自動形式化する「MermaidLLM」を提案。生成図を熟練者が直接編集でき、AI の専門知識なしに技能表現の検証・修正が可能な explainable な技能伝達システムを実現した。

3) 代表的な特許 該当なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会
を実現・身体的能力と知覚能力の拡張による身体の制約からの解放

侵襲 BMI の臨床応用に向けた開発

課題推進者：柳澤 琢史（大阪大学 大学院医学系研究科 神経情報学 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題は、侵襲型 BMI のヒトでの実用化を目標として、そのために必要な、脳信号の計測と解読技術を開発している。特に頭蓋内から高精度な脳信号を極低侵襲に計測するため、血管内脳波計測技術を開発し、動物実験にて PoC を示した（代表的な論文 1、代表的な特許 1）。さらに、同技術を社会実装するために、株式会社 ivec を 2025 年 10 月に設立した。また、血管内脳波 BMI を長期間安定して安全に計測するため、ヒトへ適用可能な体内埋込型脳波計測装置を用いた BMI システムを開発している。既に、2 頭のサルに同装置を長期留置し、1 年以上にわたる長期安定性・有効性を示し、データを一般公開した（代表的な論文 2）。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

ALS など重症の麻痺がある患者には全身麻酔下の開頭手術を行う旧来の頭蓋内脳波計測法は負担が大きく、局所麻酔下で留置でき高精度な脳信号を得られる方法が求められる。我々は、局所麻酔下に留置できる血管内脳波が旧来の方法と比較しても高い精度があり、BMI の信号源として優位性があることを示した。本成果は侵襲型 BMI のヒトでの実用化において重要な成果である。

2) 代表的な論文

・T. Iwata, H. Nakamura, T. Uemura, T. Araki, T. Matsumura, T. Abe, T. Nezu, M. Takagaki, T. Ozaki, S. Miura, R. Fukuma, S. E. John, D.B. Grayden, H. Kishima, T. Sekitani, T. Yanagisawa, Microendovascular Neural Recording from Cortical and Deep Vessels with High Precision and Minimal Invasiveness, Advanced Intelligent Systems, 2500487 (2025). DOI: 10.1002/aisy.202500487

本研究では、細径柔軟電極を豚の細静脈血管内に留置することで、皮質および深部血管から頭蓋内脳波を計測し、従来の侵襲的手法と比較した。豚の体性感覚野に近い皮質静脈に血管内電極を留置し、脳表においた電極で計測した脳表脳波（旧来の頭蓋内脳波）と比較して、より高い S/N で体性感覚誘発反応（SEP、動物の足を電気刺激した際に、脳の体性感覚野で計測される反応）が得られることを確認した。また、電気刺激による運動誘発も示し、BMI や神経疾患治療への応用基盤を提示した。

・H. Yang, R. Fukuma, T. Namima, K. Okuda, A. Nishi, T. Iwata, A. Reza, K. S Sasaki, T. Kaiju, G. Gill, H. Kishima, S. Nishimoto, T. Yanagisawa, Longitudinal multitask wireless electrocorticography data from two fully implanted nonhuman primates, Scientific Data, 12 (2025). DOI: 10.1038/s41597-025-06359-w

本研究では、完全埋め込み型無線脳波計測システムを用いて、非ヒト霊長類 2 例から長期間にわたり多課題下の脳表脳波データを取得した。運動課題や聴覚課題など複数の行動条件における神経信号を安定的に記録し、高い時空間分解能と長期安定性を実証した点が特徴である。取得データは公開され、脳情報解読や BMI 研究、脳機能解析の基盤としての利用が期待される。

3) 代表的な特許

・特許第 7824711 号「機能デバイス、ガイディングカテーテル、生体インタフェースブックシステム、および機能デバイスの留置方法」

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会
を実現・身体的能力と知覚能力の拡張による身体の制約からの解放

バーチャルアバターの全身制御を実現する BMI 技術

課題推進者：Edward F. Chang (University of California, San Francisco Professor)

1. 研究進捗状況と成果目標

本年度は、目標 3.1 および 3.2 に対応するため、慢性インプラントを有する 2 名の臨床試験参加者 (ClinicalTrials.gov; NCT03698149) を対象に、感覚運動皮質・側頭葉に埋め込まれた 253 チャンネルの高密度 ECoG アレイを用い、発話とジェスチャーの同時デコーディングの実現可能性を検証した。発話のみ・ジェスチャーのみ・同時実行の各条件でデータを収集し、ディープラーニングにより各モダリティを分類する 2 モデルを構築、並列処理するリアルタイムデコーディング基盤を開発した。デコードされた発話はテキスト表示、ジェスチャーは全身アバターに反映され、マルチモーダルリアルタイムコミュニケーションを実現。ジェスチャーセットは 30 種類以上 (頭部・手の動作含む) に拡張し、別参加者では ASL アルファベット 26 文字のデコーディングも実証した。単独・同時データを統合した学習により全条件で性能が向上し、文脈依存の神経表現が BCI 設計において重要であることを確認。「休息」クラスの導入によるアイドル状態からの自発的発話・ジェスチャー予測の概念実証、および Unreal Engine・MetaHuman Animator への GUI 統合も完了した。【目標 3.1】会話コンテキストに基づくジェスチャー確率調整モデルを実装し、文脈依存制御の可能性を確認した。【目標 3.2】実験者操作による第 2 アバターを導入し、共有仮想空間内でのアバター間コミュニケーションの概念実証環境を構築した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

本年度の主要な成果は、発話およびジェスチャーの単独データに加えて同時実行データを統合してデコーディングモデルを学習した点にある。このアプローチにより、単独条件および複合条件の双方においてデコーディング性能が向上し、従来の単一モダリティまたは単独学習に依存した手法の制約を克服した。また、発話テキスト出力とアバタージェスチャーを統合したリアルタイムマルチモーダルコミュニケーション基盤を構築し、さらに ASL (アメリカ手話) のデコーディングやジェスチャー拡張により非言語コミュニケーションの幅を拡張した。現在、目標 2.1 から 3.2 に関連するマルチモーダルデコーディング、アバター制御、および文脈依存モデリングを含む研究成果について、査読付き学術誌への投稿に向けた論文原稿を準備中である。なお、本年度における新規特許出願はなく、既報以外の新たな公開論文はない。

2) 代表的な論文：該当なし

3) 代表的な特許：該当なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会
を実現・身体的能力と知覚能力の拡張による身体の制約からの解放

ホログラフィック刺激による神経回路時系列情報の意義解明と情報伝送技術の構築

課題推進者：和氣 弘明（自然科学研究機構 生理学研究所 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究では、ホログラフィック光刺激を用いて神経活動を精密に操作し、知覚に必要な最小活動単位の間定と人工的時系列パターンの弁別能力の定量化を目指している。神経活動パターンを情報の担体として読み出し、別個体へ書き込むことで情報を伝送する枠組みの実現は、学習内容や知覚体験といった内的情報を個体間で共有する新たな基盤となりうる。しかし、神経活動のどの要素が情報として機能するか、また時系列構造のどの要素（活動量・順序・時間配置）が行動出力に寄与するかは未解明であり、本研究はその解明を目指す。本年度は、マウス視野内の約 100 神経細胞をホログラフィック光刺激で同時に活性化し、古典的条件づけにより光刺激と報酬の対応関係を学習させた。数百試行を経て、光刺激提示直後に安定した報酬期待行動（リッキング）が出現し、人工的に誘導された神経活動が行動的意味を持つ知覚として成立することが確認された。次に、刺激細胞数を段階的に減少させ（50→30→20→10→5 細胞）、心理物理曲線を構築した結果、約 20 細胞の同時活動が知覚閾値であることが示唆された。30 細胞から 20 細胞付近で応答確率が急峻に変化する非線形な遷移が観察され、神経活動の「空間的最小単位」を定量的に示すことができた。さらに、異なる細胞群を 500 ms 単位で順次刺激して全長 3 秒の時系列パターンを人工的に構築し、空間的要素を一定に保ちながら時間構造のみを変えた 2 条件（報酬あり・なし）で行動解析を行った。その結果、マウスが人工的な神経時系列パターンを弁別可能であることが示された。現在、複数パターンを組み合わせ、どの特徴量が行動出力を規定するか系統的に解析している。また、個体間の神経活動パターン伝送の実現に向けて、マウス一次感覚野の応答を対象とした多階層 RNN モデルを開発し、スパイク活動の個体間伝送手法の構築を進めている。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

知覚成立に必要な最小神経活動量（約 20 細胞）の定量化、および人工的に構築した神経時系列パターンの行動的弁別学習に成功した。

2) 代表的な論文

・Tsuji T, Hirose H, Sugiyama D, Shindo M, Hartantyo RY, Saito Y, Tatematsu T, Sugio S, Sanbo M, Hirabayashi M, Kojima Y, Koseki J, Hosoya K, Yoshida H, Ogimoto T, Yasuda Y, Hashimoto K, Ajimizu H, Sakamori Y, Yoshida H, Sano N, Tanji M, Ito H, Terada K, Hamaji M, Menju T, Konishi H, Kumagai S, Ghajar CM, Kato D, Date H, Yoshizawa A, Arakawa Y, Ozasa H, Moorhouse AJ, Shimamura T, Nishikawa H, Hirai T, Wake H. Microglia Display Heterogeneous Initial Responses to Disseminated Tumor Cells. *Cancer Res.* 2025 Dec 10. doi: 10.1158/0008-5472.CAN-25-3425. PMID: 41369553

本論文では、ホログラフィック顕微鏡技術を活用し、脳内における画像情報とトランスクリプトーム情報を統合する新手法「opto-omics」の開発に成功した。本手法により、個々の神経細胞の活動を光学的に記録・操作しながら、同一細胞の遺伝子発現プロファイルを同時に取得することが可能となった。これにより、神経回路の機能的特性と分子基盤を単一細胞レベルで対応づけることができ、脳情報処理の理解に向けた基盤技術として広く応用が期待される。現在、さらなる汎用化・普及に向けた開発を進めている。

3) 代表的な特許 なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会
を実現・身体的能力と知覚能力の拡張による身体の制約からの解放

プロジェクト共通課題の検討と社会実装に向けた研究開発

課題推進者：金井 良太（株式会社アラヤ 代表取締役 CEO）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題では、①社会対話コミュニケーション基盤の構築（『Neu World』）、②産業界でのデジタルツインと CA 活用の予備的検討（建設現場）、③複数 CA 制御の性能評価プラットフォーム構築の 3 領域を推進した。R7 年度計画について、概ね計画に沿った進展を得た。

①『Neu World』では、IoB(Internet-of-Brains)や BMI-CA がもたらす未来社会について SF プロトタイプリング型の対話基盤を発展させた。新規 SF 作品 4 作品を制作し計 8 作品を公開。大阪・関西万博等で国内外 11 件の双方向対話イベントを実施、中学校・大学での出前授業も開始した。IoB が実現しうる未来社会への期待・懸念・価値観を収集し研究開発へフィードバックする社会対話基盤を形成した。

②産業界でのデジタルツインと CA 活用では、建設現場において約 1 か月間隔で空間データを取得し工事進捗の時系列差分を確認した。遠隔地からバーチャル現場上で進捗確認・巡回点検等を実施するための中核アプローチの実現可能性を示した。また、Gaussian Splatting・SLAM・画像認識 AI 等の検証を通じて空間再現・認識技術の基盤を整備した。

③複数 CA 制御の性能評価プラットフォームでは、リアルタイム解析・複数デバイス同時接続・生体信号入力基盤を追加し実用性を向上させた。Dubai Future Labs との国際ワークショップ（約 150 名参加）にて BMI-CA 操作デモを実施し、OpenCA 基盤の国際的受容性と今後の発展可能性を確認した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

『Neu World』プロジェクト：

教育機関と連携した出前授業を開始し、2050 年に社会の中心となる 10 代の層へアプローチする好例となった。SF 作品の世界を深掘りして課題解決を話し合うことで、テクノロジーの社会実装に伴う社会変容や可能性を自分と他者の視点から考える、探究学習やキャリア学習の機会として機能している。

産業界でのデジタルツインと CA の活用に向けた予備的検討：建設中の大規模ビルにおいて実現場データを約 1 ヶ月間隔で 2 回取得し、工事進捗の時系列差分を確認できたことで、現場データからバーチャル現場を構築するという中核アプローチが実証された。さらに、Gaussian Splatting 手法による高精度な環境構築や SLAM 技術の比較検討などにより、建設現場の利用に耐えうる技術基盤を強化した。

複数 CA 制御の性能評価プラットフォーム構築：R7 年 11 月にドバイでワークショップを実施し、約 150 名の一般参加者に BMI-CA プラットフォームを用いた体験デモを提供した。筋電や脳波などの生体信号を用いたリアルタイムのロボット制御等を通じて、プラットフォームの安定動作と実用性を確認できたことが大きな成果である。

2) 代表的な論文

・Yoshida A, Dossa RFJ, Di Vincenzo M, Sujit S, Douglas H and Arulkumaran K (2025) A multi-user multi-robot multi-goal multi-device human-robot interaction manipulation benchmark. Front. Robot. AI 12:1528754. doi: 10.3389/frobt.2025.1528754

ヒューマンロボットインタラクション (HRI) 研究における再現可能なベンチマークの不足を課題とし、複数ユーザが複数のロボットを多様な入力デバイス（マウスやキーボードから筋電、脳波まで）で同時操作できるベンチマーク環境 (M4Bench) を開発した。被験者 50 名による実験を行い、入力デバイス間の操作性能の差異や、単一ユーザと複数ユーザでの制御の比較を定量的に評価している。

3) 代表的な特許：なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現・身体的能力と知覚能力の拡張による身体の制約からの解放

Trusted BMI の社会基盤整備

課題推進者：武見充晃（広島大学 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

- A. 信頼獲得の基盤整備：BMI・ニューロテクノロジーをめぐる国際機関の倫理勧告と、日本および韓国における制度・規制の現状を整理した国際会議論文を発表した（Jeong et al., Int. BCI Conf., 2026）。
- B. エビデンスの整備（SR・エビデンスブック）：BMI／ブレインテック製品・サービスが主張する効果や安全性に関するシステマティックレビュー（SR）を10項目完了し、「ブレイン・テック エビデンスブック」として日本語と英語で公開した。7項目の結果はプレプリントとして公開済みで、3項目は査読付き英文誌に掲載された。
- C. 情報発信基盤の構築：上記の活動を基盤として、Trusted Neurotechnology Initiative のウェブサイトを開示した。エビデンスブックおよび「ブレイン・テック ガイドブック」Vol.1・Vol.2をブラウザ上で閲覧可能とし、責任あるニューロテクノロジーの取組を国内外に向けて継続的に発信できる体制を整えた。
- D. SR 効率化 AI の開発：SR 作業における文献スクリーニング（論文タイトル・要旨に基づく適否判定）を支援する AI の開発を進めている。生成 AI を活用したニューロフィードバック関連論文の分類では現時点で約 90%の精度を達成しており、SR 自動化に向けた技術的見通しが得られている。
- E. 生体影響評価の自律駆動化：BMI 利用にともなう生体影響評価を効率的・広範に実施するため、ロボット経頭蓋磁気刺激（TMS）の開発を進めている。深度カメラで取得した頭部形状データを用いることで、MRI を用いた場合と同程度の精度で脳構造情報および刺激位置の機能評価が可能であることを示した（Takemi et al., IEEE TNSRE, 2026）。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

Trusted Neurotechnology Initiative の公開：本課題の目的である「社会において信頼されるための基盤整備」に直接関係する成果である。これまで電子書籍として作成してきたガイドブックやエビデンスブックをウェブブラウザ上で閲覧できる形式で公開し、ニューロテクノロジーに関する評価の考え方とエビデンスを誰でも参照できるようにした。ブラウザ版とすることで内容の更新が容易となり、変化の速い分野の知見を迅速に反映できる体制を整えた。

2) 代表的な論文

・Takemi M, Hayashida K, Ushiba J. RGBD-Based Head Models Enable Precise MRI-Free Robotic Transcranial Magnetic Stimulation. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng. 2026, Vol.34, pp.1584-1592. (PMID: 41805503)

ロボット経頭蓋磁気刺激（TMS）において、MRI を使用せずに高精度な脳機能評価を実施するための新しい手法を開発した研究である。深度カメラ（RGB-D）で取得した三次元頭部形状データから脳の構造モデルを構築し、刺激目標部位の特定と機能的評価を行った結果、MRI を用いた従来法と同等の精度が得られることを示した。本成果は、MRI 設備のない環境でも生体影響評価を実施可能にするものであり、BMI 研究・臨床の裾野を広げる重要な技術的貢献である。

・Sugimoto K, Kurashiki H, Xu Y, Takemi M, Amano K. Electroencephalographic Biomarkers of Relaxation: A Systematic Review and Meta-analysis. J Cogn Neurosci. 2026, Vol.38(3), pp.598-628.

リラックス状態を反映する脳波バイオマーカーについて、既存研究を網羅的に収集・統合したシステマティックレビューおよびメタ解析を行った。その結果、頭頂・中心部の α 帯域脳波強度は自律神経系に由来するリラックス指標と関連し、後頭部の α 帯域は内観的なリラックス感と関連することが示された。本研究は脳波を用いたリラックス状態推定における指標の妥当性と限界を整理したものであり、信頼性の高いニューロテクノロジー製品の開発・評価基準の確立に資する成果である。

3) 代表的な特許：該当なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会
を実現・身体的能力と知覚能力の拡張による身体の制約からの解放

BMI-CA 活用における法学的検討

課題推進者：駒村圭吾（慶應義塾大学 法学部 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本年度は、金井PJにおける研究開発の中核技術である Brain-Machine Interface にまつわる ELSI 課題の探索と概括的な検討を行った研究の集大成として、日本でも類を見ない BMI の法学的検討にかかる書籍を刊行した。また、国際連携を大幅に強化し、主要な国際学会である International Neuroethics Society におけるプレナリーセッションに登壇したほか、主要な神経倫理・神経法学研究者を招聘した神経法学にかかる IoB-S (Internet-of-Brains Society) 主催の国際シンポジウム「Neurolaw in Action: Neurotech and ELSI in the Global/Asian Contexts」を主催した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

IoB-S 国際シンポジウム「Neurolaw in Action: Neurotech and ELSI in the Global/Asian Contexts」を主催した。Neurorights の提唱者の1人である Marcello Ienca 教授や、神経法学初のケースブックの編者である Francis X. Shen 教授、Christoph Bublitz 博士、Jenifer Chandler 教授のような欧米を代表する主要研究者に加え、台湾・韓国の研究者を招聘し、神経法学の今後について議論を深めるとともに、MS 目標1における ELSI の取り組みを広く国外に発信した。

2) 代表的な論文

・“Cognitive Liberty” from the Perspective of Japanese Constitutional Law, in Silvia Salardi, Neurotechnology in the Age of Human Rights: Ethical Challenges and Legal Approaches (Trivent Publishing, 2025) pp.231-251

本論文は、神経法学の名のもとに議論されてきたさまざまな課題・事項を体系的に整理するとともに、近時 neurorights や cognitive liberty といった新規な自由概念が国際機関の勧告やガイドラインにおいて参照されることに注目し、特に、cognitive liberty について、日本国憲法の観点からその実効性と裁判規範としての有効性を批判的に検討し、今後必要となる研究課題を明らかにしたものである。

イタリアで開催された国際研究会をベースに発行された論文集として国外で出版されている。

・IoB-S/駒村圭吾編『インターネット・オブ・ブレインズの法 神経法学の基礎と事例研究』（2025 年、日本評論社）IoB-S で行ってきた法学セミナー連載（2カ年）の内容を補正・補綴し、1冊の本にまとめて刊行したもの。2年間の研究会の内容について、科学者・技術者との対話の第1部と、対話を元に作成したユースケースを検討する第2部から構成される。

・Ana Maria D'Ávila Lopes (Brazil), Sebastian Smart (England), Keigo Komamura (Japan), eds, Neurolaw: Legal Impacts of Neurotechnology (Porto Alegre : Livraria do Advogado, 2025)

これは、2024 年 10 月 28 日から 30 日にかけてブラジルで開催された III SEMINÁRIO INTERNACIONAL DA REDE INTERNACIONAL DE NEURODIREITO EDIREITOS HUMANOS O FUTURO DA HUMANIDADE というコンファレンスの成果をまとめたオンライン出版である。ブラジルの神経法学者たちとの連携活動の一部で、コンファレンスに参加した駒村と福士がそれぞれ寄稿し、駒村が本書の編者として参加した。ブラジルは神経法学を標榜する研究者たちが活発な活動を見せており、今後の研究連携相手として緊密に連絡を取っていきたいと考えている。

3) 代表的な特許 特に無し。

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会
を実現・身体的能力と知覚能力の拡張による身体の制約からの解放

OpenCA 実現に向けた BMI の研究開発と国際的実証実験の推進

課題推進者：阿久津完（株式会社アラヤ チームリーダー）

1. 研究進捗状況と成果

2025 年度は、前年度に構築した BMI-CA 基盤プロトタイプを安全性・再利用性の観点から強化し、国内外の複数のショーケースを通じた実環境での実証と ELSI 面の検証、およびオープンソース化に向けた準備を推進した。

【BMI-CA 基盤の再設計・強化】EEG・EMG・視線追跡を同時収集・リアルタイム解析可能なプラットフォームとしてシステムを再設計し、コードフリーGUI 操作でインターフェースを構築できる環境を実現した。ROS2 ベースの Docker アーキテクチャを採用することでクロスプラットフォーム対応を実現し、センサ間のデータ形式・キャリブレーションを統一した。解析結果を仮想環境・物理ロボットの制御コマンドへ変換する機構を整備し、再利用性を大幅に向上させた。

【BMI-CA 基盤の利用体験と国際ショーケース実施】BMI-CA 基盤を活用した CA 操作体験及び BMI 関連技術のショーケースイベントを実施。ドバイ未来財団内の Dubai Future Labs (DFL) との共同研究のもと、Emirate Tower 隣接施設において MS・DFL を含む 21 名の運営体制で国際体験型ショーケース（2025 年 11 月 26～27 日）を実施した。政府関係者、ドバイ日本総領事、複数大学のニューロサイエンス・ゲーム開発教授、学生、ゲーム開発者、クリエイター等、約 150 名が来場し、平均滞在時間約 45 分、多くの参加者が全体験を完遂するなど極めて高い関心が示された。多様な文化的・専門的背景を持つ参加者から BMI-CA 技術への高い受容性を確認し、実環境での ELSI 面・安全面の知見を収集してプロトタイプ改善に反映した。

【オープンソース化準備】公式情報サイト (<https://japaneeg.araya.org>) において紹介ページを整備し、アップデート情報の発信体制を構築した。社内テストを完了し、技術ドキュメント・開発ガイドの整備を進め、招待制公開に向けた準備を整えた。

【国内外アウトリーチ】Osaka Expo 2025 パネルディスカッション（2025 年 7 月 17 日、"Brain Resilience in a Changing World"）への参加を実施した。また、AIRJ 1st Kansai Research Day（2025 年 7 月 18 日、京都大学）および ATR Open House 2025（2025 年 10 月 1 日）においてポスター発表を実施。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

マルチモーダル生体信号（EEG・EMG・視線追跡）を統合処理可能な BMI-CA 基盤プラットフォームの構築と、国際体験型ショーケースにおける実環境実証。ドバイ未来財団との共同研究のもとドバイで実施した体験型ショーケースでは、約 150 名の多様な参加者（政府関係者・研究者・学生・開発者等）が来場し、平均滞在時間約 45 分という高い関与度のもと BMI-CA 技術の実用性と国際的な受容性を確認した。この実証を通じ、OpenCA の国際的な認知向上と ELSI 面の知見蓄積に貢献した。

2) 代表的な論文 なし

3) 代表的な特許 該当する項目なし。

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会
を実現・身体的能力と知覚能力の拡張による身体の制約からの解放

極低侵襲 BMI の研究開発

課題推進者：関谷 毅（大阪大学産業科学研究所 教授）

1. 研究進捗状況と成果

2025 年度は Phase1 最終年度として、皮質静脈に留置する極細径ヘリカル電極、輸送用ガイドワイヤ／ガイディングカテーテル、体内外通信・給電系を統合した極低侵襲 BMI システムの完成度を高めた。高度な動物実験により、皮質静脈および深部静脈での高品質脳波取得、長期留置に向けた材料・構造最適化、抗血栓性・生体適合性評価の準備を進め、ヒト適用へ向けた安全性・実装性の基盤を整えた。あわせて、極細径カメラや微細 LSI、体表・血液オミクスとの連携を通じ、血管内 BMI を中核とする血管内プラットフォーム／体内 CA への展開可能性を具体化した。また、社会実装体制として大阪大学発スタートアップ株式会社 ivec を創業し、医療機器化と事業化への出口戦略を明確化した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

極細径血管内 BMI システムについて、長期留置下でも高品質脳波が取得可能な構造・材料・通信系の一体最適化を進めたことが、目標達成に最も寄与した。これにより、血管内 BMI の技術的成立性を「要素技術」から「医療応用可能なシステム」へ引き上げ、今後、ヒト適用および血管内プラットフォーム化に直結する基盤を整備した。

2) 代表的な論文

・Iwata, T., Nakamura, H., Uemura, T., Araki, T., Matsumura, T., Abe, T., Nezu, T., Takagaki, M., Ozaki, T., Miura, S., Fukuma, R., John, S. E., Grayden, D. B., Kishima, H., Sekitani, T., Yanagisawa, T., “A microendovascular system can record precise neural signals from cortical and deep vessels with minimal invasiveness.”, Advanced Intelligent Systems, Vol. 8, e202500487 (2026).

皮質静脈および深部静脈に留置した微小血管内電極により、低侵襲に高精度な脳波信号を取得できることを示した。血管内 EEG が従来法に比べて高い信号品質と広い適用可能性を有することを実証し、本研究課題が目指す極低侵襲 BMI の技術的妥当性を国際的に示した。

3) 代表的な特許

・特許第 7824711 号「機能デバイス、ガイディングカテーテル、生体インタフェースシステム、および機能デバイスの留置方法」

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会
を実現・身体的能力と知覚能力の拡張による身体の制約からの解放

ヒトへの長期留置を目指した極低侵襲 BMI システムの開発

課題推進者：中村 元（大阪大学大学院医学系研究科 脳神経外科学 講師）

1. 研究進捗状況と成果

1) 極細径血管内 BMI システムの開発

前年度までの実験結果から作成した脳静脈用血管内電極である Helicarode を用いた大型動物実験を継続した。2025 年 10 月には、JST のご支援により大阪大学医学部中大動物実験施設に設置された最新鋭バイプレーン脳血管造影装置 (ARTIS icono, Siemens 社製) を用いて急性実験 2 回、慢性実験 1 回を行った。急性実験では、上矢状静脈洞 (直径 2mm) および内大脳静脈 (直径 1.5mm) の血管から脳波計測が可能であることを明らかにした。慢性実験では、Helicarode 留置後 63 日の時点でブタに異変はなく、長期留置の安全性が示唆された。

2) ヒト脳表静脈モデルを用いた極細径血管内 BMI システムの検証

ヒトの脳血管造影検査データを用いて脳表静脈の 3D モデルを作成した。従来の 3D プリンターでは静脈の柔軟性を再現しにくかったため、Blue Practice 社に依頼し、ヒトの脳静脈に類似した血管モデルを作成した。本モデルを用いて、Helicarode の送達安全性を検証した。

3) 社会実装目的のスタートアップ設立

金井良太先生 (当プロジェクト PM)、柳澤琢史先生 (課題番号: 3-2-2)、関谷毅先生 (課題番号: 5-1-1) と共に、2025 年 10 月 30 日に極低侵襲血管内 BMI の社会実装を担う「株式会社 ivec (アイベック)」を設立した。フェーズ 1 での成果を基盤とし、フェーズ 2 でのヒトへの臨床研究実施を目指す予定である。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

- ・大阪大学医学部に最新鋭バイプレーン脳血管造影装置 (ARTIS icono, Siemens 社製) が設置された。これにより、大阪大学医学部における慢性実験基盤が整い、研究開発が加速した。
- ・極低侵襲血管内電極である Helicarode の長期留置 (63 日) を実施し、安全性を評価できた。
- ・社会実装を担う目的で「株式会社 ivec (アイベック)」を設立した。

2) 代表的な論文

・ Microendovascular Neural Recording from Cortical and Deep Vessels with High Precision and Minimal Invasiveness. Iwata T, Nakamura H, Uemura T, et al. Adv. Intell. Syst. 2026;8:e202500487.

ブタ 8 匹で皮質静脈および深部静脈から血管内脳波 (ivEEG) 記録し、従来法より高い信号強度と空間分解能で SEP を取得、さらに視覚誘発電位も明瞭に検出した。血管内電極を用いた ivEEG は、低侵襲マッピングおよび BCI への応用が見込まれる医療テクノロジーとして期待される。

3) 代表的な特許

- ・特許第 7824711 号「機能デバイス、ガイディングカテーテル、生体インタフェイスシステム、および機能デバイスの留置方法」

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会
を実現・身体的能力と知覚能力の拡張による身体の制約からの解放

脳インターフェース技術

課題推進者：David B. Grayden（メルボルン大学 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本年度は、①血管内 EEG(Electroencephalography)による視覚的意味デコード、②神経情報デコードのための機械学習、③血管内電気刺激の実現可能性検証、④光 BCI の開発という4課題において主要な進展を達成した。

(a) 視覚的意味デコード（血管内 EEG）：最大 12 週間の長期留置コホートを用いて意味的デコードを評価した。「犬」クラスはスクランブル画像との識別が可能であり、刺激後 150ms までの信号が有効で 500ms 以降は有効情報がほぼないことを確認した。

(b) 神経情報デコードのための機械学習

LLM のハルシネーション問題を解消するため、エンドツーエンド型の視覚意味カテゴリ（人物顔・テキスト・風景）デコード手法に改良した。mixup データ拡張が最優秀な手法と判明し、Transformer が最高性能（平均精度 67.1%、チャンスレベル 33.3%、推論遅延 0.1ms 未満）を達成。大阪大学の難治性てんかん患者 7 名での検証でも中央値 60.1%の精度を実証した。これは 3 カテゴリ分類における偶然一致水準（チャンスレベル）33.3%を大きく上回る（約 1.8 倍）ものであり、開発データにおける最高性能（平均精度 67.1%）に迫る水準を、臨床の患者データにおいても達成したことを意味する。低侵襲な血管内 EEG でありながら、視覚的意味カテゴリを安定して識別できる実用的なデコード精度を示した点に、本成果の意義がある。

(c) 血管内電気刺激の実現可能性検証

6 頭のヒツジに対しステント電極留置と硬膜外脳表脳波電極の設置を実施し、6 例中 3 例で目標部位への刺激と誘発応答を確認した。抗てんかん薬投与による脳興奮性変化の計測や小脳-運動皮質経路の活性化など、血管内神経調節の基礎的知見を得た。

(d) 光ブレイン・コンピュータ・インターフェース

マウス運動皮質の光学信号による前肢運動の 1 次元連続制御と、ミナスコープによる 100 神経細胞以上の記録技術を確立した。広視野（約 4×4mm）低侵襲光学イメージングデバイスを開発しマウス検証を開始、ヒツジでの慢性カルシウムイメージングにも成功した。また光遺伝学的手法による電極・光双方で記録・刺激可能な培養神経系を構築した。

2. 代表的な成果事例

(1) 目標達成に最も寄与する成果

血管内小脳刺激による皮質誘発電位の生成と体系的な特徴抽出を実施し、レベチラセタム (Keppra) による薬理学的変調を用いた比較解析により、誘発電位の振幅・波形の一貫した変化を確認した。3 頭の動物での再現検証を通じ、血管内小脳刺激が脳興奮性の信頼性の高いバイオマーカーとなり得ることを実証した。

(2) 代表的な論文 投稿中のため、記載を避ける

(3) 代表的な特許 該当なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会
を実現・身体的能力と知覚能力の拡張による身体の制約からの解放

長期計測が可能なウェアラブルデバイスの開発

課題推進者：植村隆文（大阪大学産業科学研究所 教授）

1. 研究進捗状況と成果

2025 年度の研究開発では、ウェアラブルセンサとして活用可能な化学量センサを作製し、その体外、体内での長期利用に向けての開発を実施した。以下に項目別に研究進捗状況と成果について示す。

・体内埋込に向けたバイオセンサの改良

生体試料中のNaイオンやKイオン濃度を計測可能なバイオセンサを開発するため、イオンセンサ応答劣化を抑制するためのセンサ改良を行った。今年度は抗血栓性材料をイオンセンサ表面に均質にコーティングする技術を開発した。その結果、血清中、または全血中への浸漬実験において比較的劣化の少ないセンサ応答を得ることが可能となった。

・外部連携を念頭に置いた小型動物埋込実験の計画策定

大阪大学・関谷 G との連携により、福島における動物実験においてイオンセンサの評価試験を実施した。上述の通り、生体試料中において長期的に利用可能とするためのイオンセンサ改良手段を構築した。また、小型動物の血管内デバイスとして実現するための計画策定を行った。

以上の成果により、2025 年度の達成目標「生体試料中のNaイオンやKイオン濃度を計測可能なバイオセンサを開発し、長期的に計測可能なウェアラブルデバイスのプロトタイプを完成させる。」は達成されたと判断される。

・CP 課題：健康モニタリングシステムの開発（巡る）/貼る型デバイスによる生体測定（貼る）

これらの CP 課題の取組では、河岡 G・関谷 G と連携することで課題推進のための具体的方針を固めた。今後、物理量と化学量を含む複数のウェアラブル生体センサの使用を伴う被験者マルチオミクス実験などを具体的に実施していくための体制を構築した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

生体試料中のイオン濃度を計測可能なセンサを開発し、全血中への浸漬実験においても劣化の少ないセンサ応答を得た。長期的に計測可能なデバイス実現に向けた重要な成果と位置付けられる。

2) 代表的な論文

・Microendovascular Neural Recording from Cortical and Deep Vessels with High Precision and Minimal Invasiveness, T. Iwata, H. Nakamura, T. Uemura et al., Advanced Intelligent Systems e2500487 (2026). (DOI: 10.1002/aisy.202500487)

本研究では、微小血管内電極を用いた血管内脳波 (Intravascular electroencephalography: ivEEG) により、皮質静脈および深部静脈から高精度かつ低侵襲に神経活動を計測する手法を実証した。従来の計測手法より高い信号強度と空間分解能を達成し、体性感覚・運動・視覚応答の取得および局所刺激も可能であることを示した。極低侵襲ブレインマシンインターフェースへの応用が期待される。

3) 代表的な特許

・特許第 7824711 号「機能デバイス、ガイディングカテーテル、生体インタフェースシステム、および機能デバイスの留置方法」