



ムーンショット目標 9

2050 年までに、こころの安らぎや活力を増大することで、
精神的に豊かで躍動的な社会を実現

実施状況報告書

2024 年度版

多様なこころを脳と身体性機能に基づいて

つなぐ「自在ホンヤク機」の開発

筒井 健一郎

東北大学 大学院生命科学研究科



1. 当該年度における研究開発プロジェクトの実施概要

(1) 研究開発プロジェクトの概要

本研究開発プロジェクトでは、社会のさまざまな場面で、人々のコミュニケーションを支援する「自在ホンヤク機」のシステムを開発し、多様な人々を包摂する社会の建設を目指す。神経科学・分子生命科学と、VR/AR・ロボット工学の分野を融合し、脳波・自律神経系の計測や、体液のエクソソーム解析から、こころとからだの連関のしくみを解明し、それらを定量化する技術を研究する(こころの状態理解)とともに、VR/AR やロボティクスの技術を駆使した知覚・認知や運動機能への介入法を研究する(こころの状態遷移)。これらの成果を融合して開発する「自在ホンヤク機」は、個人、個人間、あるいは、数人から数十人程度の小グループを対象としてコミュニケーション支援する(社会実装)。発達障害の当事者・家族や、社会参加の現場を対象として開発を進め、GIGA 端末更新時には学校を現場とした実証を目指す。この展開のために必要な ELSI について、多様なステークホルダーと協働し、真に包摂的な社会を目指す。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

研究開発は概ね当初の計画通りで進捗しており、3 年目のマイルストーンは、すべて達成された。特に、脳波・自律神経およびエクソソームからのこころの状態の読み取りの研究開発について、特筆すべき成果が得られている。脳波・自律神経からのこころの状態の読み取り(研究開発項目 1)については、機械学習 Transformer アルゴリズムや、状態遷移モデルを用いて、快・不快状態のリアルタイムな読み取りを、従来手法に比べて高い精度で実現することができた。エクソソームからのこころの状態の読み取り(研究開発項目 2)については、ストレスなどの長期的なこころの状態や、ASD などのこころの特性が、エクソソームに反映されることを世界に先駆けて実証し、エクソソームがこころの状態や特性の指標として利用可能であることを示した。自在ホンヤク機のシステム開発(研究開発項目 3)においては、非言語機能を主な対象とした「解釈機」「表現機」と、それと別途研究開発されている言語機能の研究開発が、着実に進捗している。発達障害を対象とした社会実装への取り組み(研究開発項目 4)については、当事者のニーズ調査でまとまった成果が得られた一方で、自在ホンヤク機試作機のトライアルとその効果の評価のための実施体制を構築することができた。さらに、社会受容性をはじめとする ELSI の検討(研究開発項目 5, 6)にも積極的な取り組みを展開し、将来の広い社会実装、および、研究開発の途上でのトライアル利用における諸問題の検討がすすんだ。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

プロジェクトマネジメントは、代表機関(PM 所属機関)である東北大学に設置した「事務局」を中心に行っている。PI 間の連携について、PM 主導による体制作り(「電気生理学」「エクソソーム」「システム開発」「社会実装」「ELSI」の各作業部会の設置)をきっかけとして、ボトムアップで多方面におよぶ緊密な連携が形成されるに至り、参画 PI が一丸となってプロジェクトを強力に推進する体制が整った。さらに、各 PI のもとでは、有給者(研究室スタッフや当プロジェクト予算によって雇用されるポスドク)に加えて、学生の参画が進んだ。これにより、プロジェクト

全体を覆う one team の雰囲気形成された。

民間企業・行政機関との連携、国際連携(ドイツ・ライプニッツ・レジリエンス研究所)、専門家への情報発信と新たな研究コミュニティの形成(2024 年度東北大学「知のフォーラム」の共催)、一般市民へのアウトリーチ(プロジェクトホームページ jizai2050.org 運営)などに積極的に取り組み、十分な成果を上げている。

2. 当該年度の研究開発プロジェクトの実施内容

(1) 研究開発項目1:脳・自律神経活動からこころの状態を読み取る技術の開発

研究開発課題1:脳・自律神経活動からこころの状態を読み取るための基本原理の構築

当該年度実施内容:

確立したサルうつ病モデル(Exp Neurol, 2022)に基づいて、こころの状態の同定に重要な領域として内側前頭皮質に着目することを決定し、複数のサルを用いて、内側前頭皮質、外側前頭皮質、扁桃体、側坐核から、多点同時の電気生理学的計測を行った。その結果、周波数スペクトル分析、グレンジャー因果解析による機能結合性、トランスフォーマーのアルゴリズムを使ったデコーディングの、それぞれのデータ解析手法によって、正および負の情動(快・不快)を高い精度で読み取ることができることを示した。また、血液の採取によるエクソソーム分析(星野 PI との共同)、恐怖・不安の解消(安心の確立)にかかわる長期的神経シグナルの同定(Til Ole Bergmann PI との共同)について、計画通り、サルうつ病モデル血液の提供と、サルにおける恐怖条件付け・消去の行動パラダイムの確立を行った。

課題推進者: 筒井 健一郎(東北大学)

研究開発課題2:脳・自律神経活動の統合的解析技術の高度化によるこころの状態の読み取り

当該年度実施内容:

本研究では、マウスやラットを用いて、感情に関わる脳部位(側坐核・扁桃体・帯状回)の脳波や心拍数といった自律神経活動のデータを収集した。嫌悪反応を示すマウスの脳波データから、Transformer encoder に基づく機械学習モデルを構築し、前処理なしで脳波信号そのものから嫌悪状態を高精度に判別できることを示した。さらに、リアルタイムで心状態を読み取る技術の開発を進めており、頭皮上の電極にも深部脳活動の一部が反映されていることが確認された。今後は有用な電極位置の選定が課題である。また、社会的ストレスを与えたマウスから臓器や血液を採取し、エクソソーム分析を行った結果、血漿中のエクソソーム指標が有意に変化することが判明した。さらに、2 匹のマウスの同時脳波計測系を確立し、攻撃性の高い個体や自閉症モデルマウスとの相互作用時の脳波も取得した。その結果、自閉症様マウスでは特異な脳波パターンが見られ、今後は特徴量の抽出による解析の高度化が求め

られる。

課題推進者： 佐々木 拓哉(東北大学)

研究開発課題 3: 脳波の記録・解析技術の高度化によるこころの状態の読み取り

当該年度実施内容：

本研究では、脳波や自律神経活動などの生体信号を用いて、こころの状態を高精度に計測するシステムの構築を進めた。安静時と課題実施中の実験を通じて、高密度頭皮脳波、呼吸、心電図、脈波、眼球運動、胃腸電図など多様な信号を同時に記録した。また、静止画や動画で情動を喚起する実験パラダイムを整備し、主観的な感情のグラフィカルな記録にも成功した。23 年度には延べ 73 名、24 年度には 59 名の被験者からデータを収集し、計 132 名のデータを取得した。これらのデータに対しては、非線形動力学と統計的機械学習を組み合わせ、振動の位相同期、位相一振幅カップリング、準安定性、情報量などの定量解析手法を開発・適用した。さらに、多様体学習により内部状態を低次元空間で可視化し、脳と自律神経系のネットワークとの関連を探ることで、こころの状態の定量化とマッピングを可能にした。加えて、リアルタイムで信号を処理・出力できるシステムを構築し、その精度検証や、振動位相の時系列予測のためのモデルベースの手法開発も進行中である。

課題推進者： 北城 圭一(生理学研究所)

(2) 研究開発項目 2: エクソソームからこころの状態を読み取る技術の開発

研究開発課題 1: エクソソームの多角的解析からこころの状態を読み取る技術の研究開発

当該年度実施内容：

本研究では、ストレスや神経疾患モデル動物を用いてエクソソームの網羅的解析を進めた。社会的敗北ストレスを負荷したマウスでは、血漿・骨髄・脳・腸・肝臓・脾臓の各臓器からサンプルを採取し、腸由来エクソソームでは含有タンパク質量と粒子数の増加が確認された。プロテオーム解析により、エネルギー代謝やシナプス活動などに関わる分子が変化しており、ストレス応答や神経疾患への関与が示唆された。脳由来では量的変化はなかったものの、脂質代謝やミトコンドリア機能に関連するタンパク質の違いがみられた。これらの結果は、腸由来のエクソソームが脳機能に影響する「腸―脳相関(GBA)」の新たなメカニズムを示唆している。また、rTMS を受けたサル血漿サンプルからエクソソームを抽出し、タンパク質とコルチゾールの解析を進めている。大隅チームとの共同研究では、Pax6 変異マウスからのエクソソーム解析を開始し、オスの変異体ではタンパク質濃度の上昇が確認された。さらに、ASD モデルである PatDP/+マウスでは、臓器とエクソソームの miRNA 構成に違いがあり、エクソソーム特異的な miRNA パッケージングの可能性が示された。今後は、行動と関連する miRNA

解析を進める予定である。

課題推進者： 星野 歩子(東京大学)

研究開発課題 2: エクソソームのプロテオミクス解析からこころの状態を読み取る技術の研究開発

当該年度実施内容：

本年度は、ASD(自閉スペクトラム症)当事者および定型発達者の血漿から超遠心法でエクソソームを単離し、粒子数やサイズ、総タンパク質量を解析した上で、プロテオミクス解析を実施した。特に補体経路に着目し、ASD 診断に有用なマーカー探索を進めた結果、補体関連分子 24 種を用いた機械学習により高精度な ASD 診断が可能であることが示された。ELISA による検証では、特定の補体分子が男性 ASD の診断に有効である一方、女性では診断精度が低下することが判明し、性差の存在が示唆された。また、補体分子中のメチオニン残基の酸化状態の違いも明らかとなり、分子修飾という新たな観点からの発展が期待される。加えて、ASD 診断マーカーに関する特許出願の準備を開始した。解析対象は成人 ASD104 例、定型発達者 58 例、加えて小児の ASD および定型発達児各 10 例。機械学習により成人男性では AUC 0.86、女性では AUC 0.89 の診断精度が得られた。特に成人男性では 5 種類の補体分子による簡易パネルでも AUC 0.86 を維持できた一方、同パネルは女性では AUC 0.63 と診断精度が著しく低下した。男児では AUC 0.93 と極めて高い精度が得られ、性別や発達段階に応じたマーカーパネルの最適化の必要性が示された。さらに補体経路に限定せず、経路非依存的な最適マーカー抽出も進めており、来年度はその有用性検証を行う予定である。

課題推進者： ナシリ・ケナリ アミアモハメッド(東京大学)

研究開発課題 3: 神経発達症モデルマウスの開発とエクソソーム解析

当該年度実施内容：

本研究開発課題では、自然な集団飼育下における行動の自動記録・数理解析を可能とするシステム(インテリケージおよびインテリプロファイラ)を用いて、神経発達症モデルマウスの行動特性の抽出を試みた。特に、星野らの協力のもと、これらモデルマウスの血漿中エクソソームを対象とした比較解析を実施し、行動特性と高い相関を示す信頼性の高い分子指標の探索を開始した。令和 6 年度には、遺伝子変異に基づく神経発達症モデルマウスを用いて、集団飼育下における自動行動計測および解析アルゴリズムを確立し、社会性・不安・多動性などの特徴的行動の抽出に成功した。個体識別のため、マウス腹部に無線周波数識別(RFID)タグを埋め込み、赤外線センサーを設置したケージにて、昼夜連続 3 日間の行動データを取得し、活動量および社会近接性(close contact ratio: CCR)の解析系を構築した

(Ochi et al., bioRxiv, 2024; Lab Animal 誌に再投稿中)。さらに、野生型マウスを 4 匹、8 匹、16 匹で飼育した際の雌雄差の顕在化も確認された。加えて、Pax6 変異マウスおよび、加齢父マウス由来の仔マウス(エピゲノム要因による神経発達症モデル)を用いた行動データも取得した。これら行動データと連動して、星野および佐々木らの助言を得ながら、マウスの各種臓器および血漿からエクソソームを抽出する実験系を確立し、一部サンプルについては、エクソソームの量およびサイズの解析も実施した。行動解析において得られた CCR スコアとエクソソーム特性との相関解析を進めることで、行動特性と強く関連するエクソソーム指標の同定を目指している。

課題推進者:大隅 典子(東北大学)

(3) 研究開発項目 3:「自在ホンヤク機」のシステム開発

研究開発課題 1:「自在ホンヤク機」における解釈機の研究開発

当該年度実施内容:

本研究では、個人の運動・生理信号から情動状態を推定・可視化する「自在ホンヤク機」のプロトタイプを開発した。従来の解釈機に加え、新たに表現機を統合することで、表情・発話(運動信号)および心拍・脳波(生理信号)から、情動状態を「覚醒-睡眠」「快-不快」の 2 次元でリアルタイムに推定可能とした。表情と発話には MorphCast と audEERING を、心拍と脳波には独自開発の深層学習モデルを用いた。その結果、表情・発話による情動推定は反応が早く、心拍・脳波は遅れるなど、感覚様式ごとの動態の違いが明らかになった。また、推定された情動値にも信号間で差異があり、個人ごとに情動反映のしやすさに違いが見られた。これらは、神経多様性のある人々の自己情動認識困難に関する新たな示唆を与える知見である。さらに、本システムによる情動フィードバックは、ユーザの自己認識や制御の促進にも寄与する可能性が示された。加えて、対面相互作用の動態理解を目的に、ADOS-2 インタビュー動画の解析を実施した。表情・動作・発話を自動抽出し、療法士との同期性を分析した結果、視線同期の時間や回数には差が見られなかったが、フラクタル性を示す DFA 解析では、自閉スペクトラム症群が他群と異なる特性を示し、ADOS スコアと逆 U 字型の関係が確認された。今後は、視線推定の精度向上や他感覚信号との協応解析を進め、「場の雰囲気」など社会的相互作用の可視化への応用を目指す。

課題推進者: 長井 志江(東京大学)

研究開発課題 2:「自在ホンヤク機」における表現機の研究開発

当該年度実施内容:

当該年度は、ASD 当事者のコミュニケーション支援に向けて、①「個人に最適化された会話環境」と②「コミュニケーションを取りやすい AI エージェント」の 2 つの基盤技術のプロトタイプを開発し、齊藤 PI・中村 PI と連携して当事者への体験評価を実施した。①では、ユーザーごとにアバターの見た目や表情、VR 環境のライティングなどを自由に調整できるシステムを構築し、昭和大学烏山病院で評価実験を行った。対面より話しやすい、心理的安全性が高いなどの肯定的な反応が得られた一方、快適な会話環境の条件は個人差が大きく、今後さらなるカスタマイズ機能の充実が必要である。②では、ユーザーの状態や設定パラメータに応じて会話内容やエージェントの振る舞いを変化させる対話システムを実装し、初期評価では就労支援への応用可能性が示唆された。さらに、顔表面温度変化を活用した感情推定と感覚介入のために、心拍に同期したロックインサーモグラフィと温冷感覚提示デバイスの開発を行い、AsiaHaptics 2024 で表彰された。これらの技術は、内部状態への非接触的介入を可能にする新たな手段となる。これまでの技術開発と体験評価を通じて、「自在ホンヤク機」の方向性として、使用者の選択の自由度と状況適応性を両立させる設計が重要であることが明らかとなった。今後は「会話の意味づけ」や「ターンテイキング」など、特定の支援目的に応じたプロトタイプ開発とその統合的フレームワークの確立を目指す。また、普及型実装として VRChat を用いた社会実験環境の整備も進めている。

課題推進者: 稲見 昌彦(東京大学)

研究開発課題 3:「自在ホンヤク機」の暗黙的インタラクションの研究開発

当該年度実施内容:

令和 6 年度の共同作業支援研究では、身体動作介入の気づきやすさの要因とマルチモーダル情報提示の効果を検証した。タコ腕型バーチャルアームの指関節マッピング方法の違いが操作体験に与える影響では、「外見的・構造的類似性」「運動学的適合性」「日常動作との対応性」の 3 要因が重要と示し、ACM CHI2024 で発表した。また、参加者の視点映像を切り替えて提示する「Lived Montage」システムは、映像の切り替えが心拍同期や注視対象の維持により適応しやすく、他者視点からの環境認識体験を促進することがわかった。現在、追加検証を進め、再投稿を目指している。

また、「Real-time Slow-motion」システムでは、映像を複数レイヤーに分割し並行提示 する手法を提案した。両眼統合型では、入出力間の遅延が低くても(200 ms)参加者には 0.8 倍速のスローモーションと認識されることが分かり、Augmented Humans 2024 で Best Paper Awardを受賞した。画面分割型や重畳型も展示され、細かな動作への気づきを促した。さらに、運動観察による暗黙的行動変容「運動伝染」が環境情報に依存することを明らかにし、Nature Scientific Reports に掲載された。

社会実装では、ASD 当事者向けにアジャイル開発で個別最適化会話環境や AI エージェ

ントのプロトタイプを制作し、デイケア施設やシンポジウムでフィードバックを得て、心理的安全性向上や会話練習の要望を確認した。2024 年 10 月の「みんなの脳世界 2024」では専門家らと議論を行った。今後はターンテイキングや会話の意味付け、感情理解を重点課題に据え、関連グループと連携しプロトタイプ開発を進める。

課題推進者： 齊藤 寛人(東京大学)

研究開発課題 4:「自在ホンヤク機」の言語的インタラクションの研究開発

当該年度実施内容：

令和 6 年度は「自在ホンヤク機」に搭載する言語機能の具体化を目指し、質問紙調査や音声・脳波データを活用した基礎的事項のリスト化を達成した。音声信号の振幅変調(AM)が話者の感情を反映する指標となることを、日本語データベース(UUDB)を用いて検証するとともに、感情の 4 象限に対応した AM のピーク周波数が異なることを明らかにし、話者感情推定の重要な基盤を示した。ASD 当事者の音声解析では、AM の極大が見られず、発話リズムが構造化されていないことが分かった。令和 7 年度は対象拡大と健常成人群との比較を計画している。また、聞き手の性別によって話者の性別情報処理が異なることを脳波計測で示した。女性聞き手は早期の陽性脳波成分で性別区別を行い、男性聞き手は遅い陰性成分で処理しており、個人特性に合わせたコミュニケーション支援の重要性を示唆する結果となった。さらに、音声データを機械学習(Light GBM)で解析し、性別推定は 90.5%、感情推定は 66.8%、両者 6 分類で 61.7%の精度を達成した。基本周波数の影響が大きく、人間の判断や AI 自動判定との比較を進め、オンライン指標としての開発を継続している。

課題推進者： 保前 文高(東京都立大学)

研究開発課題 5: データ駆動アプローチによる「自在ホンヤク機」の研究開発

当該年度実施内容：

令和 6 年度は、ASD 当事者の発話や非言語情報解析のための AI・システム開発に注力した。まず、ADOS2 の発話スクリプトに対し大規模言語モデル(LLM)を用いて、発話量や品詞頻度、文脈類似度の定量的特徴を抽出、これらを入力とした 2 クラス(ASD/非 ASD)および 4 クラス分類モデルを構築し、説明可能 AI の SHAP 解析により重要な特徴を特定した。次に、ADOS2 の動画データから身体各部位の動きを抽出し、統計的な特徴を算出した。これを用いて ASD 者と健常者(TD)を識別する AI モデルを作成し、SHAP で解析した結果、頭部の動きが重要な指標であることが示唆された。

さらに、複数の ASD 当事者の談話を同時録画するため、4K 対応複数カメラを 1 台の PC で制御するシステムを開発した。JavaScript による Web ブラウザ操作で録画同期を実現した

が、USB 帯域の制約で現在は HD 画質(1280×720)が最大となっている。今後は C++など高速処理可能な言語でのシステム改良を計画している。これらの成果により、ASD の診断支援に向けた音声・動作の多角的 AI 解析基盤が整いつつある。

課題推進者： 張山 昌論(東北大学)

(4) 研究開発項目 4:「自在ホンヤク機」の社会実装(発達障害)

研究開発課題 1:当事者視点での「自在ホンヤク機」の性能評価と効果検証

当該年度実施内容：

令和 6 年度には、自在ホンヤク機の優先的要素機能の特定と関係者間での合意形成を進めた。過去に収集した ASD 当事者や家族、支援者、同僚からのフィードバック分析により、「相手の考えや感情を知りたい」というニーズよりも、「自分の感情や内受容感覚を知り伝えたい」というニーズの重要性が明確になった。これを踏まえ、内受容感覚支援機能と、マイノリティ同士の対話・協働支援機能の開発に向けて、複数の PI 間で連携を開始した。試用実験参加者のリクルートも完了し、ASD 当事者やその家族、同僚、医療・福祉職各 5 名ずつからフィードバックを収集開始、効率的な合意形成のため、独自のデルファイシステムを構築した。さらに、社会実装・効果検証のため、就労・教育関連の複数チームと連携し、多面的なフィードバックを得て製品改良を推進した。杉並区社会教育センターでは多様な障害者が講師を務める連続講座を開催し、動画教材の作成・公開、受講者の障害観変化に関する質的分析を行い学会発表も実施した。

現時点で試用が見込まれる試作機は、ASD の知覚体験シミュレータ(視覚・聴覚)、多感覚情動推定システム、言語・非言語情報からの状態推定システム、裸眼立体ディスプレイを用いた異文化間コミュニケーション支援、会話内容の可視化・支援システムの 6 種類で、これらは竹中工務店やコッポルト、杉並区など複数フィールドでの試用が期待されている。

課題推進者： 熊谷 晋一郎(東京大学)

研究開発課題 2:生体情報を使った「自在ホンヤク機」の性能評価と効果検証

当該年度実施内容：

令和 6 年度は成人期発達障害者を対象に生理データとビデオデータの収集・解析を継続し、脳波の前頭部ガンマパワーが ADOS-2 重症度と相関し、側頭頭頂部のガンマ帯域規則性が感覚過敏と関連するなど、こころの定量指標の候補を同定した。20 名分の生理データおよびビデオデータを取得し、目標を達成している。脳波データは安全な方法で北城 PI と共有し、メタスタビリティ解析が進行中である。

また、「自在ホンヤク機」の社会実装に向けた環境整備を完了し、専門ダイケアにて心理

指標の取得や試作機のデモンストレーションを実施した。5名の発達障害当事者から予備的データを得るとともに、ELSI(倫理・法的・社会的課題)に関する議論も展開し、開発の意義や発展性を検討した。倫理審査も完了し、当事者からのフィードバックを複数回にわたり取得した。

さらに、新規研究開発としてドイツのライプニッツ・レジリエンス研究所(LIR)との国際共同研究を開始した。既存の安静時fMRIデータと令和6年度取得の生理データを連携解析し、神経基盤の解析を進めた。LIRとの交流では、表情や音声の動画解析も開始し、共同研究体制を構築している。安静時fMRIの神経時間尺度と感覚過敏の関連については論文文化準備中で、マイルストーンはすべて達成された。

課題推進者: 中村 元昭(昭和大学)

(5) 研究開発項目 5:「自在ホンヤク機」の社会実装(GIGA 端末)

研究開発課題 1: 初等中等教育の現場での「自在ホンヤク機」の性能評価と効果検証

当該年度実施内容:

初等中等教育の現場の GIGA 端末に搭載すべき「自在ホンヤク機」機能について、そのメリット・デメリットの検討、ニーズの調査などを行った。世界的には、教育へのAIの利用について慎重であるべきという議論が優勢であり、本開発プロジェクトにおいても、教育現場での自在ホンヤク機の利用は慎重であるべき、との議論が行われた。

課題推進者: 筒井 健一郎(東北大学)

(6) 研究開発項目 6:「自在ホンヤク機」にかかわる ELSI の検討

研究開発課題 1:「自在ホンヤク機」の利用と受容に関わる ELSI の検討

当該年度実施内容:

第2回 ELSI 検討会を開催し、理化学研究所の橋田浩一博士を講師に迎え「パーソナルデータの分散管理による人権保障と価値創造」について講演を実施した。自在ホンヤク機研究チームからは北城 PI と中村 PI が、研究データ管理の現状について報告した。生命医療倫理の専門家である中澤栄輔氏(東京大学)および弁護士の明谷早映子氏(東京大学)からは、データ管理の慎重さや PPI(Patient and Public Involvement)の意義、社会的に弱い立場の当事者への倫理的配慮、双方向的な研究体制構築の必要性などについて専門的なコメントが寄せられた。分散管理手法の今後の可能性も議論された。

また、冬のプロジェクト会議における ELSI セッションでは、ELSI 部会のロードマップを提示し、一般向け啓発書の出版も視野に入れた「自在ホンヤク機」の社会実装までの道筋を共有した。PI や有識者である中澤氏、明谷氏も交え、ムーンショット目標 9 の ELSI ガイドライン要

約版の説明とチェック項目の確認を行った。議論では、アジャイル型開発と倫理審査の新枠組み、双方向的な情報収集の重要性、外部専門家参画の必要性、PPI の先進性と課題、マスタープロトコルリサーチの提案、学際的研究における倫理基準の所在、ガイドライン文言の改善案など多岐にわたった。これらを通じて、自在ホンヤク機の倫理審査における新規性と課題が共有され、今後の計画書策定に向け関係者が具体的行動に移る段階に入ったことが確認された。

課題推進者： 大隅 典子(東北大学)

研究開発課題 2:「自在ホンヤク機」における個人情報の取り扱いおよび使用によるユーザー生活への影響に関わる ELSI の検討

当該年度実施内容：

令和 6 年度は、自在ホンヤク機の開発担当者との意見交換会に複数回参加し、研究開発の現状把握と分析を行った。夏のプロジェクト会議(7 月 18 日)、冬のプロジェクト会議(12 月 13～15 日)、春のプロジェクト会議(翌年 3 月 27 日)に出席し、自在ホンヤク機の内部構造や収集・処理されるパーソナルデータの概要について開発者と意見交換を重ね、得られた知見を文章化した。また、ユーザーである ASD 当事者との意見交換については、熊谷 PI と中村 PI が窓口となり、令和 6 年夏および冬のプロジェクト会議で ASD 当事者からのニーズや要望の報告を受けた。これにより、当事者の視点を研究開発に反映するための基礎的情報が収集されている。

自在ホンヤク機の利用ガイドライン作成に向けては、ELSI(倫理的・法的・社会的課題)の洗い出しと明確化を進めた。特にプライバシー影響評価(PIA)などのリスク評価の必要性が認識され、令和 7 年度に予定されているプロトタイプの実装に合わせてリスク評価を実施する計画である。パーソナルデータの管理が最大の課題とされ、対応策の一つとして、令和 6 年 4 月に開催されたムーンショット目標 9 リトリートにて橋田浩一 PM よりパーソナルデータの分散管理手法について講演を受けた。さらに令和 6 年 6 月末には第二回 ELSI 検討会を開催し、分散管理の詳細について検討を深めた。これらの成果は筒井 PJ のウェブサイトで公開されている。加えて、令和 7 年 3 月に仙台で開催された国際シンポジウム「Towards the Future of Communication」において、“Ethical Legal and Social Issues concerning the At-will Translator (Jizai-Hon-yaku-ki)”というタイトルで ELSI に関する研究成果を発表し、知見の共有と議論を行った。

以上により、自在ホンヤク機の開発における倫理的・法的・社会的課題への対応と、当事者参画を重視した研究体制の強化が着実に進展している。

課題推進者： 原 壱(東北大学)

(7) 研究開発項目 7:次世代磁気センシングによるこころの状態の読み取り技術の高度化

研究開発課題 1: 光ポンピング磁気センサ式脳磁図 (OPM-MEG) のデータ解析プロトコルの確立と高度化

当該年度実施内容:

OPM-MEG の設置と導入(2024 年 8 月～2026 年 9 月)に関しては、生理学研究所への OPM-MEG 装置の導入準備を進めている。ムーンショット目標 9 での利用を念頭に置きつつ、装置の仕様検討と入札手続きを進行させた。さらに設置予定の建屋内における環境磁場の測定を継続的に実施し、磁場の安定化に向けた対策を講じている。

データ解析手法に関する情報収集と解析パイプラインの確立(2024 年 8 月～2027 年 3 月)では、OPM-MEG の実験計測に必要な技術情報を国内外で幅広く収集した。特にイギリスの UCL およびオックスフォード大学を視察し、最先端の OPM-MEG システムやセンシング技術に関する知見を得た。また、生理学研究所には国内外の研究者を招き、情報交換や技術的な意見交換を活発に行った。これらの活動を通じて、OPM-MEG データの解析パイプラインの構築を目指している。

以上の取り組みにより、最先端の OPM-MEG 技術の導入と活用に向けた準備が着実に進んでいる。

課題推進者: 北城 圭一(生理学研究所)

(8) 加速研究開発項目 1: こころの well-being につながる長期的神経指標の研究開発

加速研究開発課題 1: 恐怖・不安の解消(安心の確立)にかかわる長期的神経シグナルの同定と利用

当該年度実施内容:

定型発達および発達障害者の消去学習に関わる神経予測因子を同定するため、既存の消去学習時における安静時 fMRI データ(756 データセット・108 被験者)と ASD、ADHD、定型発達者の安静時 fMRI データ(330 被験者分)を再解析した。Shirer アトラスに基づく新たな機能的結合解析によって、消去記憶の成功予測因子である唾液中のアルファアミラーゼレベルの予測に成功し、消去記憶との相関も確認された。現在は他データへの一般化を検証中である。消去学習中の fMRI 解析では、消去速度の速い群は腹側線条体の消去予測誤差信号が早期に現れ、遅い群は後半に現れることが分かった。vmPFC との結合が消去記憶の安定化に関与すると予測され、論文準備中である。

サルにおける恐怖消去の神経信号の同定のために、サルを対象とした消去プロトコルの確立を目指した。

人における恐怖消去記憶の EEG 特性の同定とモニタリングのために、高度な同時 EEG-fMRI 記録システムを確立した。これにより将来的に脳の状態に依存した介入が可能となる。技術的課題を克服し、高品質なデータ取得が可能になった。さらに、sAA の消去学習予測

因子としての役割を検証するため、当初予定の 30 名より大幅に増加させ 88 名規模の登録型個人差研究を計画し、既に 7 名分のデータ取得を完了した。2025 年度中に 30 名以上のデータ収集を目指す。

課題推進者: Til Ole Bergmann (LIR)

加速研究開発課題 2: 情動的外乱に対する堅牢性(動揺しないところ)にかかわる長期的神経シグナルの同定と利用

当該年度実施内容:

定型発達 of 若年成人を対象に、高解像度 EEG データ(109 件)を用いて感情的外乱に対する神経活動の安定性とレジリエンス(S/R スコア)の関係を脳内ソースレベルで検証した。その結果、右下前頭回が視覚皮質へのトップダウン調節に重要な役割を果たし、この神経機構がレジリエンスと関連することを示した。さらに、マウスモデルのデータと照合し、レジリエンスに関連する神経活動の特徴として「バースト性」の違いを再現した。評価尺度の違いにより一部結果が異なるが、縦断的に収集された LORA コホート(500 名)でも同様の関連を確認した。

また、ADHD の有無による神経ネットワーク状態の違いを明らかにするため、ADHD 群と非 ADHD 群に対して同時 EEG-fMRI 解析を実施し、ADHD 群ではタスクに関連した特定の脳状態における神経活動のタイミングが遅延し減少することを見出した。さらに、シミュレーションデータを用いて短時間の振動イベント(バースト)内での情報伝達を検出する新たな手法を開発し、心拍数と脳活動間の情報伝達解析も開始している。

課題推進者: Oliver Tuescher (LIR)

3. 当該年度のプロジェクトマネジメント実施内容

(1) 研究開発プロジェクトのガバナンス

進捗状況の把握

○ 代表機関の PM 支援体制チーム

- ・ 課題推進者のうち佐々木、大隅、稲見(学外)、北城(学外)を PM 補佐に指名して、プロジェクトの運営において PM を支援する体制を確立した。
- ・ 大学本部の研究担当理事および研究推進課と適宜情報交換を行った。
- ・ 学内の他のムーンショット PM と、連絡会議等において適宜情報交換を行った。

○ 重要事項の連絡・調整の方法(運営会議の設置等)

- ・ PM 研究室内に「事務局」を設置し、事務局会議を適宜開催した。
- ・ PM 業務を補佐する特任准教授・特任講師・事務補佐員を採用した。

- ・ メールやメッセージングアプリを通して、PM と課題推進者等の関係者が常に連絡できる環境を整えた。
- ・ 電気生理学、エクソソーム、システム開発、社会実装、ELSI の「作業部会」を設置して、研究開発テーマ毎に、情報交換や議論を行う場として、課題推進者間の連携を促進する体制を構築した。
- 研究開発機関における研究の進捗状況の把握(サイトビジット、課題推進者会議等)
- ・ R6 年度は、プロジェクト会議(対面)を夏(2024/7/18、東京)、冬(2024/12/13-15、東京)および春(2024/3/27、仙台)に開催し、各 PI による研究開発状況について、進捗の報告・検討を行うとともに、ELSI に関わる議論や課題推進者間の連携、「自在ホンヤク機」の試作機と社会実装について協議した。
- ・ 電気生理学、エクソソーム、システム開発、社会実装、ELSI の作業部会を設置し、対面およびチームコミュニケーションツール Slack を用いて適宜開催し、研究テーマ毎の課題推進者間の連携を図った。
- ・ PM によるサイトビジットを順次行った。(北城研 (2024/12/3-4)、熊谷研 (2025/3/16))

○ 代表機関のマネジメント体制整備状況

プロジェクトマネジメントは、代表機関(PM 所属機関)である東北大学に設置した「事務局」を中心に行っている。プロジェクト内での PI 間の連携について、PM 主導による体制作り(「電気生理学」「エクソソーム」「システム開発」「社会実装」「ELSI」の各作業部会の設置)をきっかけとして、ボトムアップで多方面におよぶ緊密な連携が形成されており、参画 PI が一丸となってプロジェクトを強力に推進する体制が整っている。さらに、各 PI のもとでは、有給者(研究室スタッフや当プロジェクト予算によって雇用されるポスドク)に加えて、学生の参画が進んでいるが、これら若手も含めたプロジェクト参画メンバーの交流・連携を、会議・ワークショップや、SNS(Slack)などによって積極的に進めることにより、若手を含めた新たな研究コミュニティが形成されている。

運営会議等の実施状況

プロジェクト全体会議

2024 年 7 月 18 日、東京(東北大学東京分室)

2024 年 12 月 13 日～15 日、東京(東京大学)

2025 年 3 月 27 日、仙台

若手会議

2024 年 4 月 1 日～2 日、東京(東京大学)

2025 年 3 月 24 日～25 日、仙台(東北大学)

PM サイトビジット

2024 年 12 月 3 日～4 日、岡崎(生理学研究所)

2025 年 3 月 16 日、東京(東京大学)

電気生理学作業部会

2024 年 4 月 25 日、オンライン

2024 年 9 月 10 日、オンライン
2024 年 11 月 26 日、オンライン
2024 年 11 月 30 日、オンライン
2024 年 12 月 16 日、オンライン
2025 年 2 月 7 日、オンライン

エクソソーム作業部会

2024 年 9 月 12 日、オンライン

システム開発作業部会

2024 年 6 月 4 日、オンライン(言語機能小部会)
2024 年 7 月 9 日、オンライン(言語機能小部会)
2024 年 7 月 23 日、オンライン(言語機能小部会)
2024 年 8 月 16 日、オンライン(非言語表現機能小部会)
2024 年 9 月 10 日、オンライン(言語機能小部会)
2024 年 9 月 12 日、オンライン(表現機作業小部会)
2024 年 11 月 27 日、オンライン(非言語表現機能小部会)
2024 年 12 月 3 日、オンライン(非言語表現機能小部会)
2024 年 12 月 5 日、オンライン(非言語表現機能小部会)
2024 年 12 月 10 日、オンライン

ELSI 作業部会

2024 年 9 月 12 日、オンライン

プロジェクト間連携(山田 PJ)、MS9-LIR 合同会議

2025 年 2 月 27 日～28 日、岡崎(生理研)、ハイブリッド

ELSI 検討会

2024 年 6 月 30 日、仙台(東北大学)/オンライン

社会実装ミーティング

2024 年 9 月 6 日、オンライン
2024 年 9 月 11 日、オンライン
2024 年 10 月 8 日、東京(昭和大学烏山病院)
2024 年 12 月 26 日、オンライン
2025 年 3 月 11 日、オンライン

研究開発プロジェクトの展開

- プロジェクト内の多角的な連携を促進するため、課題推進者間でのデータやデータ分析ツールの共有を奨励・実践した。
- プロジェクト会議・課題推進者会議に合わせて、各課題推進者による研究紹介をおこない、若手を中心とする参画研究者等の科学的関心を刺激するとともに、本プロジェクト

への参画のモチベーション向上につなげた。

- MS9における、OPM-MEGの設置・導入と共同利用運営の責任プロジェクトとして、設置機関の生理学研究所における OPM-MEG の調達や準備作業に協力するとともに、プロジェクト内、および、MS9 内外における OPM-MEG を使った研究コミュニティの形成、情報・技術共有のための情報収集を行った。具体的には、ノッティンガム大 Brookes 教授・トロント大 Taylor 教授・UCL Bestmann 教授との技術相談、UCL (Bestmann 教授、Barnes 教授)とオックスフォード大 (Jensen 教授) への訪問・見学を行った。また、Bestmann 教授を招聘し、OPM-MEG を用いた最新の研究成果について発表していただいた。
- R6 年度より、加速研究課題としてドイツのライプニッツ・レジリエンス研究所 (LIR) の Til Ole Bergmann 教授、Oliver Tuescher 教授を、本プロジェクトの PI として迎え入れた。また、山田 PJ と協働して、LIR とのワークショップ (2024/9/23-24 (マインツ)、2025/2/27-28 (岡崎)) を開催するとともに、同研究所主催のレジリエンス・シンポジウム (2024/9/25-27) にも参加した。
- ELSI の取り組みについては、研究開発項目 6 において、担当 PI (大隅 PI・原 PI) を設けている。また、事務局が中心となって、自在ホンヤク機にかかわる ELSI の検討結果をまとめた「自在ホンヤク機のトリセツ」を編纂し、プロジェクト内にて共有した。今後、適宜「自在ホンヤク機のトリセツ」を改訂し、ELSI 検討の内容をわかりやすくまとめ、一般への公開を目指していきたい。
- 数理科学 (データ解析) にかかわる取り組みとしては、ニューラルネットワークの Transformer アーキテクチャーの有効性を検証するため、作業小部会を立ち上げ、北城 PI、佐々木 PI の主導の下、取り組みをすすめている。また、行動・生理データのリアルタイム処理について、プロジェクト内で作業小部会を立ち上げ、北城 PI、佐々木 PI の主導の下、取り組みを進めているほか、プロジェクト間連携課題「脳・身体とこころの状態の遷移ダイナミクスの高精度・高リアルタイム推定指標の開発」にて、山田 PJ および今水 PJ との共働を進めている。
- プロジェクト間連携については、上記「脳・身体とこころの状態の遷移ダイナミクスの高精度・高リアルタイム推定指標の開発」のとりまとめを行っている。
- 自閉スペクトラム障害をはじめとする動物モデル研究を加速させるため、R6 年度より、大隅 PI に新たに研究開発項目・課題 2-3 を担当いただいた。

(2) 研究成果の展開

- ELSI 担当の課題推進者による社会調査を行うとともに、PM 事務局によって情報の集約と分析をすすめた。
- PM 事務局に情報を集約しながら、課題推進者それぞれの企業との共同を促進した。企業の研究グループとの開発における共同の協議を PM 主導で進めた。発達障害者をターゲットとした社会実装については、業界大手との協力体制が熊谷 PI を中心として構築されている。
- 産業界との連携・橋渡し (民間資金の獲得状況 (マッチング)、スピンアウトを含む) については、事務局が主導して産業界との橋渡しを戦略的に行っていくほか、稲見、長井、熊谷、大隅などの各 PI は、それぞれ、産業界とのネットワークを有しているので、それら

の既存のつながりも活用しながら、連携・橋渡しを進めている。熊谷 PI は、竹中工務店やコルポート、杉並区をはじめとして、複数の民間企業、行政との共働を始めるに至っている(詳細は、熊谷 PI の成果欄に記載)。これらのつながりをパイロットケースとして、今後、産業界との連携・橋渡しを幅広く、効果的に行っていききたい。

- 本「自在ホンヤク機」開発プロジェクトは、システム設計をはじめとするソフトウェア開発の色合いが濃く、実際に機能を搭載すべきデバイス — スマートフォン、ゴーグル型映像装置、軽量小型の生体情報測定装置など — の高性能化については、産業界や他の研究開発分野に期待している。したがって、プロジェクト自体がターゲットを絞った効率的な設計になっている一方で、将来めざしている広い社会実装においては、これらの分野との連携が必要不可欠となっていて、産業界との連携・橋渡しについて、効果的なマネジメントが求められる。

(3) 広報、アウトリーチ

- ホームページの運営・管理を行った。
- プレスリリース(3 件)
- 学術情報の発信と世界的研究ネットワークの形成を目的として、1 年間にわたりシンポジウムやワークショップをシリーズで開催する、東北大学「知のフォーラム」の令和 6 年度テーマプログラム(支援総額 10 百万円)に、本プロジェクトの研究開発をベースとした提案”Spinning the Future of Communication” が採択され、以下の 3 つのシンポジウムを開催した。
(<https://www.tfc.tohoku.ac.jp/program/2169.html>)。

知のフォーラム “Spinning the Future of Communication”

・2024 年 9 月 5～6 日

“Social Memory: Neural Basis of Communication, Part 1”

・2024 年 10 月 13～14 日

“Reward, Motivation, and Beyond: Neural Basis of Communication. Part 2”

・2025 年 3 月 26～28 日

“Towards the Future of Communication: Creating an Inclusive World with Neruo/Bioscience and Engineering Technologies”

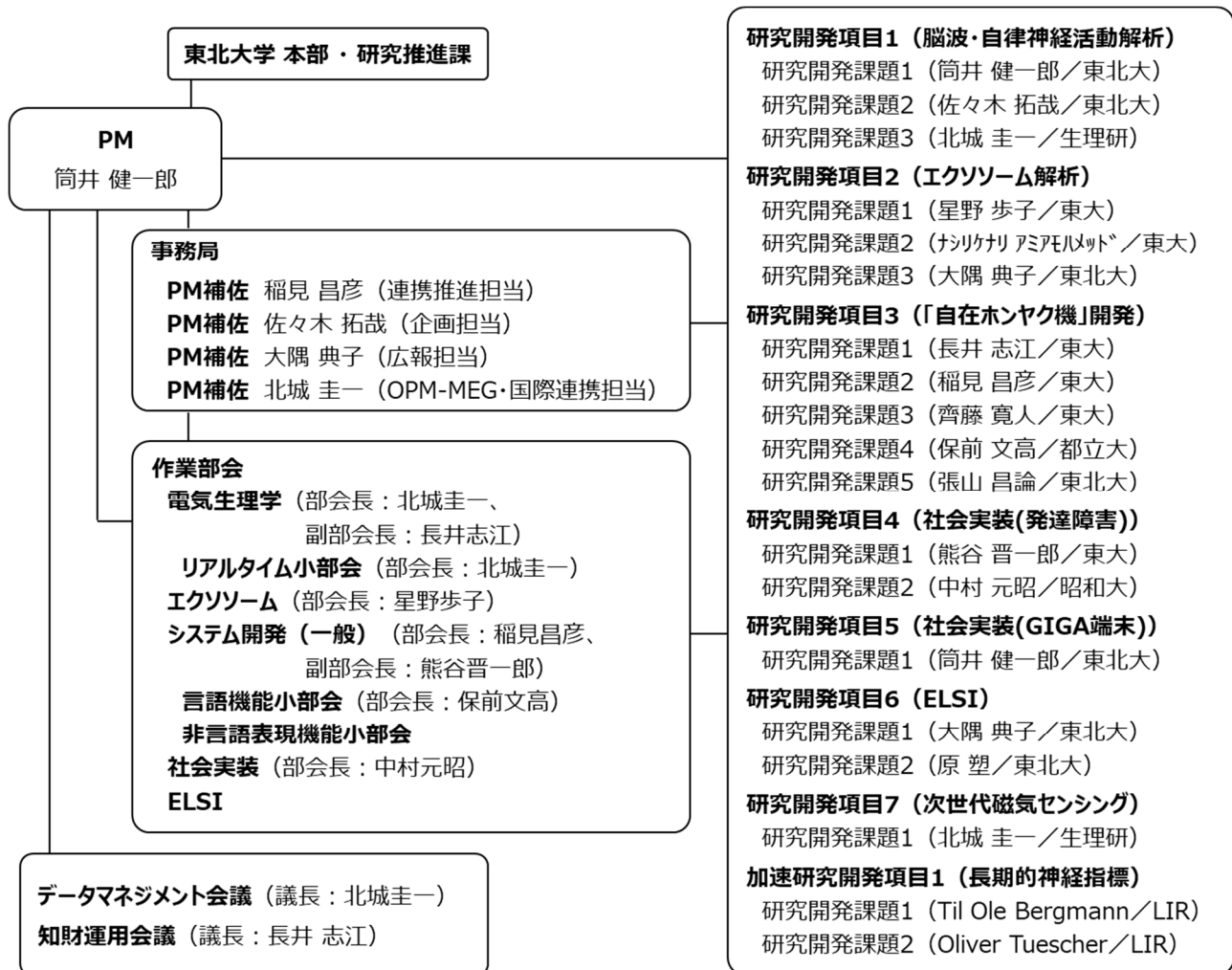
- 社会に広くプロジェクトの取り組みと成果を広報するため、領域ホームページ(jizai2050.org)の運用を開始し(2023/4/20)、プロジェクトにかかわる情報をタイムリーに発信する役割を担わせている。「自在ホンヤク機」のプロトタイプの展示・体験などを目的とした、パブリックアウトリーチ企画を、「知のフォーラム」と共催の形で、2025 年 11 月に開催することを予定しているほか、2025 年の大阪・関西万博にて、ムーンショット事業の展示に参加することとなっている。

(4) データマネジメントに関する取り組み

- データマネジメント会議(議長:北城 PI)では、ヒトや動物からのデータ収集プロトコルを標準化し、作業部会をまたいだデータの共有を図るべく取り組みを行っている。

- ELSI にかかわる研究開発項目(担当者:大隅 PI、原 PI)では、データの取り扱いについて本プロジェクトに特有の倫理的課題を明らかにする取り組みを行っている。
- ヒトや動物を対象とした実験において、行動課題のデザインや、取得するデータのフォーマットについては、データマネジメント委員長をつとめる北城 PI のもと、他のムーンショットプロジェクトなどとも連絡をとりながら、共通化を図っている。今後、取得したデータについて、データベースにて PI 間で共有し、効果的に研究を行うための体制を整えることを目標としている。
- 発達障害当事者にかかわるデータ取得については、中村 PI が主導して実験プロトコルやデータフォーマットについて共通化を図り、昭和大学を主軸とした共同研究の倫理申請(「生理指標とビデオ記録を用いた神経発達症のウェルビーイングの神経基盤」)を完成した。

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



5. 当該年度の成果データ集計

知的財産権件数				
	特許		その他産業財産権	
	国内	国際(PCT 含む)	国内	国際
未登録件数	0	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	0	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	61	31	92
口頭発表	13	10	23
ポスター発表	13	9	22
合計	87	50	137

原著論文数(※proceedings を含む)			
	国内	国際	総数
件数	3	6	9
(うち、査読有)	0	5	5

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	1	1	2
書籍	5	0	5
その他	0	0	0
合計	6	1	7

受賞件数		
国内	国際	総数
4	2	6

プレスリリース件数
3

報道件数
3

ワークショップ等、アウトリーチ件数
28