

+

戦略的創造研究推進事業 CREST

研究領域

「人間と調和した創造的協働を実現する  
知的情報処理システムの構築」

研究課題

「認知ミラーリング:認知過程の  
自己理解と社会的共有による発達障害者支援」

## 研究終了報告書

研究期間 2016年12月～2022年3月

研究代表者:長井 志江

(東京大学ニューロインテリジェンス  
国際研究機構 特任教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

小中学校を対象にした文科省の調査で、発達障害の可能性のある児童の急激な増加と支援策の不備が明らかになった。発達障害をもつ成人の就労率も身体障害者に比べて低く、社会参画の困難さが指摘されている。これらの原因として、発達障害者の困りごとが当事者や周囲に見えにくいことや、障害の帰属性があいまいであることが挙げられる。

一方、WHOは国際障害分類(1980)と国際生活機能分類(2001)を提案し、障害者が抱えるさまざまな困難さを帰属性に基づいて分類することの重要性を指摘した。そこでは、個人の身体的な構造や機能に帰属する機能障害(impairment)と、それが周囲の人や物などの環境要因と相互作用することで生じる、社会活動での能力障害(disability)が区別して定義された(図1)。この分類は、たとえ個人の機能障害が改善しなくても、環境を変化することで、能力障害を軽減できる可能性を示唆しており、ニューロダイバーシティの考え方を支持している。



図 1:WHO が提案した障害の分類

本 CREST では、上記の考えに基づき、発達障害者の機能障害と能力障害の機序を明らかにし、当事者の視点に立った支援を実現するため、認知ミラーリングシステムを提案・開発してきた。認知ミラーリングとは、人の感覚から運動に至る認知プロセスを鏡のように映し出し観測可能にする情報処理技術で、自己の認知過程の客観的理解と周囲による共有を可能にする。本 CREST では、計算論的研究と当事者研究を融合することで、機能障害と能力障害の機序を相補的なアプローチから探求してきた。具体的には、計算論的研究をとおして、人の脳を模した神経回路モデルを設計し、それに機能障害に対応するパラメータ変動を与えることで、どのような能力障害を生じるのかを構成的に検証した。当事者研究では、人の社会活動における能力障害を主観的体験や知覚運動データとして収集し、それをテーマ・因子分析や統計解析することで、背後にある機能障害を推定した。さらに、両者のアプローチをつなぐ共通の認知(障害)原理として、脳の本質的機能とされる「予測符号化」理論に注目し、予測情報処理の変調が自閉スペクトラム症(ASD)などの発達障害を生じるとの仮説を立てた。以下の3つの研究課題をとおして、仮説の検証と、それに基づく認知ミラーリングシステムの開発・評価を行い、教育・就労支援を実現した(<https://cognitive-mirroring.org>)。

#### (a) 予測符号化理論に基づく認知発達・発達障害の原理解明

認知ミラーリング・計算モデルグループによる神経回路モデル実験と、当事者研究グループによる ASD 者の主観的体験と知覚運動の解析を通して、予測情報処理の変調が ASD の多様な認知特性を生じることを見出した。従来の ASD 仮説では、感覚過敏などの認知特性の側面しか説明されていなかったが、予測情報処理の両極的な変調(過大/過小な予測精度)によるトップダウン・ボトムアップ処理の不均衡や、予測情報処理の階層性に応じた異なる感覚統合によって、ASD のさまざまな認知特性が統一的に説明できることを示した。これは、認知発達・発達障害研究において、今後、中心的仮説となりうる重要な成果である。

#### (b) 人の認知特性を定量的に評価する認知ミラーリングシステムの開発と評価

認知ミラーリング・計算モデル・当事者研究グループが中心となって、人の認知特性を定量的に評価する認知ミラーリングシステムを開発した。低次の感覚過敏・鈍麻だけでなく、高次の認知機能としての発話、描画、協調運動などから、予測符号化に基づく計算モデルを用いて、年齢や精神神経疾患スコアに対応する個人差が、予測情報処理の変調として定量的に評価できることを示した。本成果を応用することで、発達障害の新たな支援・診断法の設計が期待できる。

#### (c) 認知ミラーリングシステムを用いた教育・就労支援

認知ミラーリング・当事者研究・障害者支援グループが協働して、企業や教育機関を対象に、ASD 知覚体験ワークショップや当事者研究を開催・導入した。計 60 回の開催で 4,500 名超の参加者を集めた ASD 知覚体験ワークショップでは、VR 体験と講義・討論を組み合わせることで、参加者の ASD に対するスティグマが低減することを確認した。当事者研究も、障害者雇用を推進する

企業に数多く導入され、本 CREST の成果がさまざまな形で社会に貢献している。

## (2) 顕著な成果

### <優れた基礎研究としての成果>

#### 1. 認知発達の時間的動態と個人差を統一的に説明する予測符号化理論の提案

##### 概要:

従来の認知発達・発達障害研究では個々の認知機能が個別に検証され、発達という時間的変化や、定型発達と発達障害をつなぐスペクトラムにおける個人の多様性が、どのような共通の神経基盤に基づいて生じるのかは不明であった。本研究では、脳の一般原理とされる予測符号化理論に基づいて、認知発達の時間的・空間的動態が予測情報処理の変動として統一的に説明しうることを提案し、神経回路モデルを実装したロボット実験を通して、その有効性を示した。本成果は、人間の知能の創発原理、かつ、人工知能の設計原理として、さまざまな研究分野に貢献する。

#### 2. 予測精度の推定の変調に基づく ASD 病態仮説の検証

##### 概要:

予測符号化プロセスを具現化した神経回路モデルを用いた神経ロボティクス実験により、予測精度の推定の変調が行動に与える影響を検証した。適切なレベルの予測精度の推定のもとでは、予測誤差に基づくスムーズな行為の切り替えが可能で一方、予測精度を過大に推定しても、過小に推定しても、繰り返し行動・行動の停止などの ASD 類似の異常行動パターンを観察した。本研究は、予測符号化の計算理論に基づく ASD の病態仮説を、神経回路のダイナミクスレベル、認知・行動レベルを通じて実験的に検証した世界初の成果である。

#### 3. 当事者視点と社会モデルに基づく ASD 理論の構築

##### 概要:

当事者も批判してきたように、これまでの ASD 研究は、当事者の主観的経験ではなく、非当事者が観測する当事者の行動を被説明変数として記述する理論や、行動をエンドポイントとする臨床研究が主流派を占めてきた。そのため、本人のニーズよりも周囲のニーズ、多様性の尊重よりも定型発達者への過剰適応に傾きがちであった。本研究では、当事者研究を ASD 研究の出発点に据えることで、主観的経験を被説明変数とする理論を構築するとともに、社会モデルに基づき、多様性として承認すべき範囲である機能障害と、介入のエンドポイントである能力障害を明確に分離した新しいアプローチを切り拓いた。

### <科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

#### 1. ASD 知覚体験ワークショップを通じた発達障害の理解促進と学習・就労支援

##### 概要:

ASD 者の困りごとを見える化する ASD 視覚体験シミュレータを開発し、教育・医療機関や企業、行政機関などを対象にした ASD 知覚体験ワークショップを計 60 回開催して(4,500 名超参加)、発達障害の正しい理解とインクルーシブな社会の実現に貢献した。従来の発達障害者支援は、定型発達者行動への適応を目的としたものが主流であったが、当事者研究の理念に従い、多様性として承認すべき機能障害(視覚過敏・鈍麻)を共有可能にすることで、ASD 者に対するスティグマが低減することを明らかにした。本成果は発達障害者支援にパラダイムシフトを起こす成果として、数多くのメディアで取り上げられた。

#### 2. 当事者研究のプログラム化と共同創造プラットフォームの構築

##### 概要:

大学などの知の生産過程に参画する人材の多様性を増すことで、さまざまな当事者のニーズに沿った研究が実現するという「共同創造」の考え方は、サステナビリティ・サイエンスや行政学、医療など、人間や社会に深い影響を与える多くの学問分野でその重要性が高まりつつある。本研究では、東京大学における国内初の当事者研究者制度を実現し、当事者の経験を研究につなぐ当事者研究プログラムを通して、科学技術の共同創造の実現に具体的指針を与えた。また、当事者の範囲を一部の障害者ではなく万人へと普遍化することで、当事者研究の実装によってインクルーシブなアカデミアや社会が実現するビジョンを示した。

### 3. 深層ニューラルネットワークを用いた脳構造解析による臨床診断予測特微量の抽出

概要:

構造 MRI データに対して深層ニューラルネットワークを用いた解析により、脳構造の個人特性、統合失調症の症状・診断を含む臨床情報の予測に有用な特微量の抽出に成功した。これらの技術を用いることで、精神障害の症状評価・疾患予後・治療反応性予測などを患者さん一人一人に応じて総合的に評価する、「オーダーメイド精神医療」の実現に貢献することが期待される(Yamaguchi et al., 2021)。

<代表的な論文>

1. Nagai Y, “Predictive learning: its key role in early cognitive development,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 374(1771):20180030, 2019.

概要:

連続的で多様な認知発達を統一的に説明する原理として、予測符号化に基づく計算論的理論を提案した。予測符号化神経回路モデルを実装した認知ロボティクス実験をとおして、自己認知や目標指向動作、利他的行動などの認知機能が、予測誤差最小化という共通機序に基づいて獲得されることを示した。また、ASD の認知特性が、予測誤差に対する非定型な感度によって説明されうることを指摘した。本論文は、当該 CREST が認知(障害)原理として提案する予測符号化理論を、計算論的視点から総括的に議論した世界で初めての論文であり、認知ロボティクス研究者及び発達心理学研究者らから多くの反響を得ている。

2. Idei H, Murata S, Yamashita Y, and Ogata T, “Homogeneous Intrinsic Neuronal Excitability Induces Overfitting to Sensory Noise: A Robot Model of Neurodevelopmental Disorder,” *Frontiers in Psychiatry*, 11:762, 2020.

概要:

予測符号化プロセスを具現化した神経回路モデルを用いた神経ロボティクス実験により、ニューロン群の活動の多様性が損なわれたモデルにおいては、過敏なニューロン活動や、シナプス結合の過剰発達といった神経系における異常に加え、認知の柔軟性の低下や汎化能力の低下、運動のぎこちなさ、感覚過敏といったASDに特徴的な多様な認知行動の異常が示されることを確かめた。この結果は、ニューロン活動、シナプス発達、認知、行動、脳の計算過程といった様々なレベルで蓄積されてきたASDの知見と整合性のあるメカニズムを提示し、ASDの人々の認知特性について筋道立った理解を与え、自己理解と社会的な共有を促すことが期待される。

3. Wada M, Ikeda H, and Kumagaya S, “Atypical Effects of Visual Interference on Tactile Temporal Order Judgment in Individuals with Autism Spectrum Disorder,” *Multisensory Research*, 34:129–151, 2020.

概要:

視覚的妨害により、定型発達者は触覚の時間順序判断(TOJ)が影響を受ける。ラバーハンドを被験者の手に対して順方向に提示すると、この視覚による妨害効果が高まり、逆方向に提示すると効果は弱まる。本研究では、被験者に、視覚的妨害に惑わされず、触覚刺激の時間

的な順序を判断するよう求めた。触覚の時間順序と矛盾した時間順序の視覚刺激を与えた場合、ラバーハンドの向きにかかわらず、ASD 者では触覚の TOJ が著しく逆転した。以上の結果から、ASD 者の触覚 TOJ には、視覚的干渉の影響がかなり大きいことが示された。

## § 2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 認知ミラーリンググループ

研究代表者:長井 志江(東京大学ニューロインテリジェンス国際研究機構 特任教授)

研究項目

- ・予測符号化理論に基づく認知発達・発達障害原理の提案と実験的検証
- ・人の認知個性を定量化する認知ミラーリングシステムの開発と評価
- ・認知ミラーリングシステムを用いた教育・就労支援

#### ② 当事者研究及び障害者支援グループ

主たる共同研究者:熊谷 晋一郎(東京大学先端科学技術研究センター 准教授)

研究項目(当事者研究グループ)

- ・当事者の語りのデータの分析による認知ミラーリングの実現
- ・当事者研究を基盤とした認知ミラーリングによる自己理解と社会的共有の実現

研究項目(障害者支援グループ)

- ・発達障害の正しい理解を促進する ASD 知覚体験ワークショップの設計
- ・ASD 知覚体験ワークショップを通じたスティグマ低減効果の検証
- ・広報・啓発活動と ASD 知覚体験ワークショップのオンライン化

#### ③ 計算モデルグループ

主たる共同研究者:山下 祐一(国立精神・神経医療研究センター神経研究所 室長)

研究項目

- ・認知ミラーリングシステムの動作原理として機能する予測符号化理論を具現化した神経回路モデルの提供
- ・予測符号化理論に基づく発達障害の病態メカニズムの検証を目的とした神経ロボティクス実験
- ・当事者研究・認知実験から抽出された仮説の計算理論による検証

### (2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

#### 国内外研究者との連携

- Emre Ugur 氏 (Bogazici University) と Erhan Oztop 氏 (Ozyegin University) との内発的動機付けモデルの開発についての連携

ロボットの運動学習を牽引する内発的動機付けのメカニズムとして、予測誤差の最小化に従う計算モデルを共同で開発し、さまざまな複雑さをもった実験条件で、その有効性を検証した(2017-2019 年度国際強化支援予算)。研究成果は複数の学術雑誌と国際会議で発表し、現在も継続して共同研究を行っている。

- Alessandra Sciutti 氏と Giulio Sandini 氏 (Italian Institute of Technology) との社会的相互作用機序理解に関する連携

人とロボットの相互作用実験をとおして、社会的文脈における身体運動の同期や適応、知覚運動の変容を検証し、予測符号化理論に基づいてその機序を議論した。研究成果は、複数の学術雑誌と国際会議で発表し、現在も継続して共同研究を行っている。

- Pablo Lanillos 氏と Gordon Cheng 氏 (Technical University of Munich) との神経回路モデルを用いた発達と障害の機序理解に関する連携  
 予測符号化理論を具現化する神経回路モデルを協働で開発し、発達過程における予測符号化処理の動態を検証した。また、ASD や統合失調症などの精神神経疾患を検証する神経回路モデル研究を総括し、レビュー論文として発表した。
- Hanako Yoshida 氏 (The University of Houston) との乳幼児行動データの解析に関する連携  
 乳幼児期における視線運動の発達動態を理解するため、乳幼児の頭部に装着した第一人称視点カメラの映像を計算論的に解析し、予測符号化理論に基づく発達機序を議論した。現在も、継続して共同研究を行っている。
- 鈴木健嗣氏 (筑波大学) との ASD 児視覚体験シミュレータの開発に関する連携  
 当 CREST で開発した ASD 視覚体験シミュレータと、鈴木 CREST で開発した小児の身体性を再現するシミュレータ (CHILDHOOD) を統合して、小児の視線から ASD の視覚過敏・鈍麻を体験するシミュレータを開発した。
- 長井隆行氏と堀井隆斗氏 (大阪大学) との情動モデルの開発に関する連携  
 複数感覚信号の予測学習を通して、モデルの内部表象として情動を獲得し、他者との共有や、他者の情動状態の推定を行う神経回路モデルの開発を行った。現在も、継続して共同研究を行っている。
- 明和政子氏 (京都大学) との乳幼児-養育者相互作用データの解析に関する連携  
 乳幼児と養育者の相互作用の動態を理解するため、乳幼児と養育者から取得した外受容・内受容・固有感覚信号の特性について議論し、予測符号化理論に基づく機序理解に向けた解析手法を検討した。現在も、継続して共同研究を行っている (2021 年度基盤研究 (S) 採択)。
- 鈴木真介氏 (メルボルン大) との行動データの計算モデルベース解析についての連携  
 確率的に変動する多アームダンディッド課題における行動を、計算モデルベース解析を行うことで定量的に評価し、行動と精神疾患傾向との関係を明らかにした。
- 高橋雄太氏 (東北大学) との ASD の表情認知モデルについての連携  
 予測情報処理理論を実装した神経回路モデルを用いて、ASD における表情認知の偏りと、神経回路内の神経活動特性との関係を明らかにした。
- 小松三佐子氏 (理研・脳神経科学研究センター) との ASD の表情認知モデルについての連携  
 予測情報処理理論を実装した神経回路モデルを用いて、ASD における表情認知の偏りと、神経回路内の神経活動特性との関係を明らかにした。
- 谷淳氏 (OIST) との変分ベイズ再帰的神経回路モデルについての連携  
 谷氏が提案する予測情報処理プロセスを、より自由エネルギー原理に即した形で実装した神経回路モデルを用いて、ASD における発達の学習の偏りをモデル化する取り組みを開始している。
- 疋田貴俊氏 (阪大) との食塩欲求の神経基盤研究についての連携  
 浸透圧保持という内受容感覚に基づくホメオスタシス維持行動の制御について、予測と報酬学習の観点から、計算モデル化する取り組みを開始している。
- 高橋英彦氏 (東京医科歯科大) との予測情報処理理論に基づく他者認知のメカニズムについての連携  
 予測情報処理の理論に基づいて、精神障害の中核症状に関連する他者認知のメカニズムを計

算モデル化する取り組みを開始している。

- 国里愛彦氏(専修大)との精神障害症状の階層的構造に関する研究についての連携  
従来の疾患カテゴリーによらない、カテゴリー横断的精神障害の症状評価に関する大規模データを解析することで、症状の背後にある階層的因子構造を明らかにする取り組みを行っている。

#### 産業界との連携

- ASD 知覚体験ワークショップを通じた学習・就労支援  
教育・就労など各種現場に適した支援を実現するため、各種機関と協議・連携した。教育機関では、埼玉県戸田市教育委員会、吉川市こども障害福祉課、つくば市教育委員会、広島県教育委員会と協議し、小中高校・特別支援学校教職員や保育士・幼稚園教諭・学童指導員を対象としたワークショップを実施した。また、児童発達支援・放課後等デイサービスを提供している LITALICO ジュニアにて ASD 児の保護者を主な対象としたワークショップを実施し、障害者就労支援サービスを提供している LITALICO ワークスにて就労支援員を対象としたワークショップを実施した。㈱LITALICO のネットワークを活用し、埼玉県戸田市立喜沢小学校にてワークショップを実施したほか、宮川医療少年院(三重)及び茨城農芸学院(茨城)の少年院職員に対して研修を実施した。企業については、日本 IBM 株式会社、富士通株式会社、㈱日本保育サービス、㈱セールスフォース・ドットコム、損保ジャパン日本興亜株式会社でワークショップを実施した。