ロボティクスによる神経多様性の理解と支援

長井志江 ながい　ゆきえ
東京大学ニューロインテリジェンス国際研究機構

人間の知能を理解する上で重要な特徴の一つに，多様性がある。人間は個人や年齢によって異なる特性をもつ知能を獲得することで，集団や社会において相補的な役割を果たしたり，環境変動に対しての頑健性を向上させたりする。そこには，発達障害や知的障害などの特異な知能も含まれるが，なぜどのように多様性が生まれるのかは謎である。本稿では，多様性の理解に迫るロボティクス研究を紹介する。

1　発達障害から神経多様性へ

発達障害者数の急激な増加が社会問題となる一方で，1990年代後半に提案された神経多様性（ニューロダイバーシティ）の概念が注目を集めている[1]。神経多様性とは，発達障害を脳や神経の正常な変異の結果と捉える概念であり，すべての人の脳には違いがあり，その違いは優劣ではなく個性と見なされるべきだと考える。このような考えをいち早く導入した海外の企業では，発達障害を抱えた人を積極的に雇用し，彼らが得意とする緻密で反復的な作業を任せることで，売上を10倍に伸ばすAIベンチャーも現れた。しかし，個性を活かす社会づくりは，単なる就労率の上昇や教育環境の変化だけで実現できるほど，容易なものではない。特に，身体障害と比べて，発達障害は当事者の困りごとが周囲に見えにくい障害であると言われており，多様性を活かすには，認知機能における個人の差異を正しく理解し評価することが必要である。

筆者は認知発達ロボティクス[2,3]を専門とし，人間のように知的な人工システムを開発する過程を通して，いかにして人間が知能を獲得するのか，また，なぜそこに多様性が生まれるのかを研究してきた。特に，発達障害を第一人称視点から探求する発達障害当事者研究[4,5]との協働で，神経多様性の理解と支援を目指す研究プロジェクトを推進してきた。以降の節では，ロボティクスと発達障害当事者研究の共同研究を通して見えてきた，神経多様性の発生原理と，それにもとづくリカバリー支援に関する最新の研究を紹介する。

2　予測情報処理理論にもとづく神経多様性の発生原理

筆者は，神経多様性の発生機序として，脳の一般原理である予測情報処理理論に注目している。本節では，まず予測情報処理理論を概説し，本理論にもとづいて認知発達の連続性と多様性がどのようにどこまで説明できるのかを議論する。

2.1　脳の一般原理としての予測情報処理理論

予測情報処理（または，予測符号化）は脳のさまざまな機能を統一的に説明する理論として，神経科学者らによって提唱された[6~8]。予測情報処理理論によると，人間の脳は環境や身体から感覚器を通して入力されるボトムアップな感覚信号と，過去の経験や知識にもとづいて内部モデルからトップダウンに生成する予測信号の間の誤差，いわゆる予測誤差を最小化するように機能すると考えられている（図1(a)）。人間はさまざまな感覚運動経験を通して環境や身体のモデル（内部モデル）を獲得し，そのモデルにもとづいて環境を認識したり行動を生成したりする。従来の認知神経科学では，知覚や運動といった機能は脳の異なる仕組みにもとづいて説明されていたが，予測情報処理はこれらの機能を統一的に説明する原理として注目を集めて

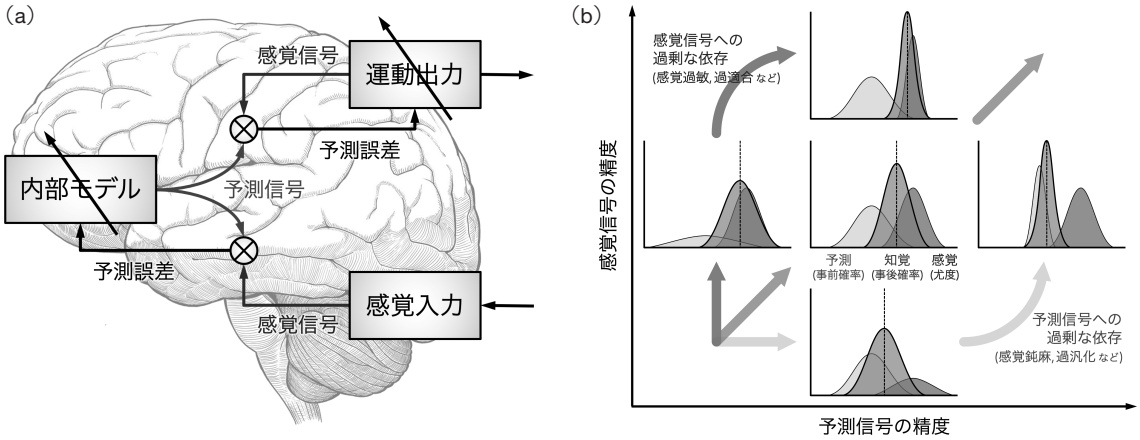

図 1―脳の一般原理とされる予測情報処理とそれにもとづく認知発達の連続性と多様性
(a)脳は感覚信号と予測信号の間の誤差，予測誤差を最小化するように知覚と運動を生成，(b)予測情報処理の変調による認知発達の連続性と多様性。

いる。

たとえば，視覚や聴覚などの知覚は，ボトムアップな感覚信号と内部モデルからのトップダウンな予測信号を，ベイズ推論にもとづいて統合することで生成されると考えられている(図 1(b)中央)。予測を事前確率，感覚を尤度とすると，知覚は事後確率に相当する。ここで，各信号には精度があるため，どのような知覚が生成されるかは各信号の精度に依存する。内部モデルが未熟で予測信号の精度が低ければ，知覚は感覚信号に依存し，反対に，感覚信号にノイズが多く含まれていれば，知覚は予測信号に依存する。このとき検出される予測誤差が，内部モデルの学習に使用され，より正確で精度の高い予測信号を生成するように内部モデルが更新される。同様に，運動も予測誤差の最小化を目的として生成されると考えられる。内部モデルは，視覚や聴覚などと同様に，身体の姿勢や運動に関する信号，つまり固有感覚信号も予測する。意図や目標にもとづいて予測した固有感覚信号と，実際の固有感覚信号を比較し，両信号間の予測誤差を最小化するように姿勢や運動を生成することで，環境に働きかける。

2.2　予測情報処理理論にもとづく認知発達

予測情報処理は，本来，成人の脳を説明する理論として提案された。これに対して，筆者は，本理論を発展させることで，乳幼児の知覚運動機能から社会的機能に至る認知発達の連続性と，そこに生じる個人の多様性が，統一的に説明できると提案した(図 1(b))[9~11]。

まず，知覚運動機能の発達は，予測誤差最小化を通して内部モデルを精緻化する過程と捉えることができる。たとえば，自己認知能力や物体操作能力は，乳幼児が身体を動かしたときの固有感覚とそれを観察した外受容感覚の，多感覚信号の予測誤差を最小化することで獲得される。また情動は，環境刺激としての外受容感覚とそれによって誘発される身体内部の内受容感覚を，内部モデルで矛盾なく統合することで知覚される。これらの能力はいずれも発達初期は非常に未熟であるが，生後の知覚運動経験を通して予測誤差を最小化することで，内部モデルとして獲得される(図 1(b)左下から右上)。そして，獲得された内部モデルにもとづき，他者との相互作用の中で予測誤差を最小化することで，社会的能力が創発すると考えられる。他者は自己と異なる内部モデルをもつため，自己の知覚運動経験を通して獲得した内部モデルでは，他者の運動を正確に予測することは難しい。また，他者の感覚入力を共有することもできないため，限られた感覚信号から他者の運動を予測することも困難である。これに対して，他者運動の模倣や意図の推定は，それと類似した自己運動を

生成したときの多感覚信号の想起を通して実現されると考えられる。内部モデルが十分に獲得されると，他者運動を観察したときの一部の感覚信号から，それと連関した多感覚信号を予測することが可能になり，想起した感覚信号を用いて予測誤差を最小化することで，社会的行動が生まれる。この段階での運動は社会的な意図をもたないが，後に環境や他者から報酬を受けることで，真に社会的な機能へと発達する。

認知発達の連続性と同様に，発達障害などを含む個人の多様性も，予測情報処理を拡張することで統一的に説明することができる。たとえば，発達障害の一特徴である感覚過敏・鈍麻は，予測・感覚信号の精度が過剰に変調した結果と捉えられる。まず，何らかの神経科学的要因によって内部モデルが適切に形成されないと，予測信号の精度が過剰に低くなる。この結果，知覚は感覚信号に強く依存し，結果として感覚過敏を生じる(図1(b)左上)。また，内部モデルが適切に獲得されないと，過去の経験や知識を利用することも困難なため，新しい環境への適応も難しくなる。反対に，内部モデルが過度に学習に影響し，予測信号の精度が過剰に高くなると，知覚は予測信号に強くバイアスされ感覚鈍麻を生じる(図1(b)右下)。そして，過汎化した内部モデルは限られた文脈しか説明できなくなるため，前者と同様に新しい環境への適応困難さを生じる。このことは，一見，類似した能力障害(社会活動における困難さ)を示す発達障害が，異なる機能障害(身体的な機能における困難さ)によって引き起こされる可能性を示唆している。

3　神経回路モデルを用いた認知発達原理仮説の検証

3.1　予測情報処理にもとづく神経回路モデル

予測情報処理理論にもとづいて認知発達の連続性と多様性が統一的に説明できることを検証するため，神経回路モデルを用いた実験を行った[12~14]。描画を課題として，子供に見られる発達的な変化と個人の多様性が，予測情報処理の変調によって説明できるかを検証した。

図2(a)(b)に，実験に用いたロボットと神経回路モデルを示す。神経回路モデルは回帰型の構造をもち，描画を2次元平面の軌道と捉え，現時刻の描画位置(入力)から次時刻の描画位置(出力)を予測するように学習する。本実験では，6種類の描画パターン(顔，家，車，花，人，ロケット)を学習データとして与え，学習後に描画の一部(最初の1/3の軌道)を神経回路モデルに呈示して，モデルが意図した描画パターンを推論できるか，また，足りない特徴(残りの2/3の軌道)を予測できるかを検証した。さらに，モデルにパラメータ H_s, H_p を導入し，学習を通して感覚信号と予測信号の精度が変調するように操作した。一般的に，発達初期では感覚・予測信号はどちらも精度が低いのに対して，発達後期では感覚器の精緻化と内部モデルの学習が進み，両信号の精度は高くなると考えられる。本実験では，発達的な変化に加えて，両信号の精度のバランスが崩れることで，個人の多様性が現れるかを検証した(図1(b)参照)。

3.2　感覚信号と予測信号の変調による描画の発達と多様性

感覚信号と予測信号の精度を変調させて，神経回路モデルを学習した結果を図2(c)に示す[14]。まず，グラフの左下と右上を比較すると，感覚・予測信号の精度がどちらも低い場合はなぐり描きが現れ，どちらも高い場合は補完が現れていることが確認できる。これらはそれぞれ，低年齢と高年齢の子供に多く見られる描画であり，感覚・予測信号の精度の上昇が発達の時間的な変化を再現していることが確認できる。

次に，感覚・予測信号の精度のバランスが崩れることで，どのような多様性が現れるかを検証した。感覚信号の精度が過剰に高い場合は(図2(c)右下)，なぐり描きだけではなくなぞり描き(呈示された1/3の軌道をなぞる運動)が現れた。これは，モデルが過学習を起こすことで，感覚信号に過剰に適合したことを示している。つまり，感覚信号が示されているところでは感覚信号を高い精度で再現するが，描画パターンに対応する内部モデルが獲得

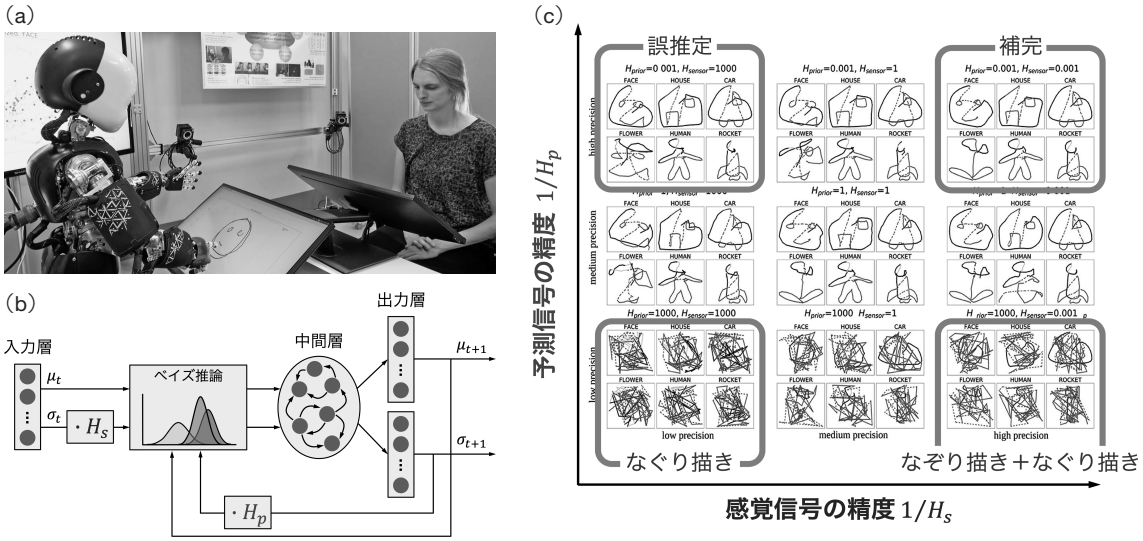

図 2―予測情報処理の変調が描画の発達と多様性に与える影響
(a)ロボットによる描画実験，(b)描画の学習に用いた神経回路モデル，(c)感覚・予測信号の精度を変調させたときの描画の学習。

されていないため，感覚信号がなくなると対応するパターンを想起することができない。これが，グラフ左下のなぐり描きのみとは異なる運動を生成したと考えられる。一方，予測信号の精度が過剰に高い場合は(図 2(c)左上)，誤推定が多く現れることが確認された。花を顔と混同したり，輪郭が似ている家と車を顔と混同したりする傾向である。これは，モデルの予測信号精度が高いことで，モデル自身がもつダイナミクスが過剰に学習に影響し，類似したパターンを混同して内部モデルに表現したためと考えられる。

興味深いことに，なぞり描きや誤推定も，なぐり描きや補完と同様に，子供の描画に観察することができた[15]。ロボットと同様の描画課題を用いて，2〜8 歳の子供 104 名を対象に実験を行ったところ，年齢とともになぐり描きが補完に変化するだけではなく，呈示された線を常になぞる子供や，呈示された線にかかわらず特定のパターンばかり(幾何学図形やジグザグの線など)を描画する子供が観察された。実際に子供が何を意図して描いていたかは不明であるが，感覚信号に強く影響を受ける子供(感覚信号精度の過剰な上昇)や，反対に，予測信号に強く依存しやすい子供(予測信号精度の過剰な上昇)がいたと推測される。個人の多様性は行動レベルだけではその機序を推定することは困難であるが，本実験のように予測情報処理理論にもとづいた神経回路モデルを構築することで，感覚・予測信号の精度の変調として統一的に説明できる可能性が示された。

4　神経多様性の見える化とリカバリー支援

神経回路モデル実験を通して，認知発達の複雑な動態が，脳の予測情報処理における比較的単純な変調(感覚・予測信号精度の変調)によって発生しうることが明らかになった。ここで紹介した実験は描画のみであるが，他の認知課題でも同様の結果が示されている[16, 17]。本節では，これらの神経回路モデル研究を推進・発展してきた 2 つの研究プロジェクトを紹介する。

4.1　神経多様性の見える化を目指す「認知ミラーリング」

筆者は，神経回路モデル研究と発達障害当事者研究[4, 5]を融合することで，発達障害者の主観的で定性的な困りごとを客観的かつ定量的に評価する技術の開発を試みてきた。2016 年に始動した戦略的創造研究推進事業(CREST)「認知ミラーリン

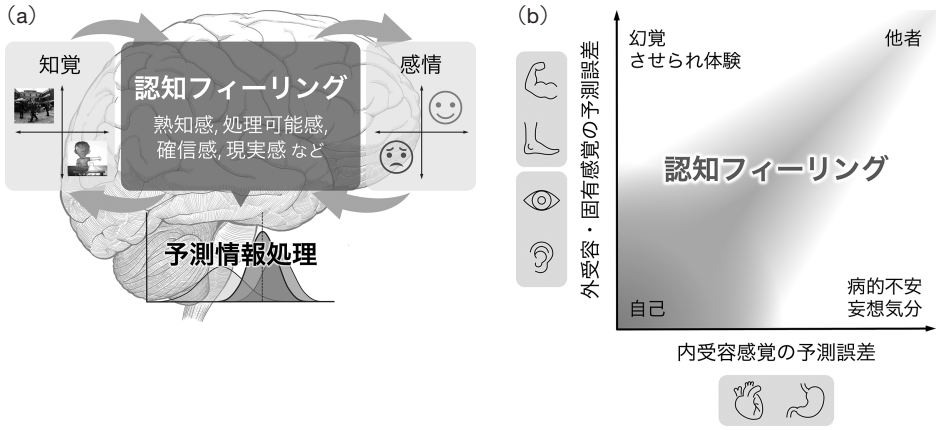

図 3―知覚と感情を媒介する認知フィーリングとその動作原理仮説
(a)予測情報処理にもとづいて知覚と感情を媒介する認知フィーリング，(b)多感覚信号の予測誤差の不均衡による認知フィーリングの動作原理。

グ」(期間：2016–2021 年度，代表：長井志江)では，神経回路モデルやロボティクス技術を用いて，認知機能における多様性を鏡のように見える化(ミラーリング)する情報処理技術の開発に取り組んだ[18]。見えにくい障害と呼ばれる発達障害を見える化することで，周囲の人が当事者の困りごとを正しく理解することが可能になる。

本プロジェクトの成果の一つが，自閉スペクトラム症(ASD: autism spectrum disorder)視覚体験シミュレータ[19,20]である。本シミュレータは ASD 者の多くが抱える視覚過敏・鈍麻を再現するもので，定型発達者が ASD 者の困りごとを第一人称視点から体験することができる。のべ 4500 名以上を対象にした一般参加のワークショップでは，シミュレータの体験を通して，ASD 者に対するスティグマ(差別や偏見)が低減することが示された[21]。さらに，本シミュレータの開発を通して，視覚過敏・鈍麻における多様性や，それによって生じる社会的能力の障害，さらには予測情報処理にもとづく知覚変容の機序仮説も得られている。

4.2 「認知フィーリング」にもとづく神経多様性のリカバリー支援

そして，2021 年に新たに始動した CREST「認知フィーリング」(期間：2021–2026 年度，代表：長井志江)では，CREST「認知ミラーリング」の成果を発展させることで，当事者のリカバリー支援を目指している[22]。認知フィーリングとは，知覚や運動が生成される情報処理過程に向けられた認知的感覚のことを指し，知覚運動体験をどのくらい知っているのかという熟知感や，それが確からしいのかという確信感，流暢に処理できるかという処理可能感などを含む[23,24]。

筆者らは，知覚や運動，特に，発達障害者や精神疾患者が体験するそれらの変容(幻覚，妄想，させられ体験など)に対する快／不快の感情は，認知フィーリングを媒介として生じると考えている(図 3(a))。さらに，認知フィーリングは知覚や感情と同様に予測情報処理にもとづいて説明され，内受容・外受容・固有感覚といった多感覚信号の予測誤差の不均衡性によって変動するという仮説を立てている(図 3(b))。たとえば，幻覚は脳の内部モデルからの予測信号が過剰に働くことで，実際には環境に存在しない対象が知覚される現象と考えられる。このとき，外受容感覚の予測誤差は過大となり，他の感覚信号の予測誤差との間に不均衡を生じることで，認知フィーリングが低下する。この認知フィーリングの低下が恐怖などの負の感情を生み，当事者にとっての困りごととして体験される。逆に捉えると，幻覚そのものは変化しなくても，認知フィーリングを改善することで，発達障害者や精神疾患者の負の感情，つまり困りご

との軽減につながると期待できる。筆者らは，これを当事者にとっての新たなリカバリーと捉え，知覚や運動の変容を個性として尊重する支援設計を試みている。本プロジェクトはまだ始動したばかりであり，今後，神経回路モデル研究と発達障害当事者研究，さらに，感覚運動信号の変容を可能にする仮想現実(VR: virtual reality)技術を用いた研究を融合することで，認知フィーリングにもとづく神経多様性のリカバリー支援を目指す。

5　今後の展開

本稿では，神経多様性の理解と支援を目指すロボティクス研究を紹介した。神経回路モデル研究と発達障害当事者研究を融合することで，発達障害の発生原理の解明に迫ることができる。特に，脳の一般原理として提案された予測情報処理理論は，認知発達の連続性だけではなく多様性も説明しうる可能性を示している。一方で，本稿で紹介したアプローチはまだ発展途上であり，本アプローチが従来の神経科学や認知科学の知見を超えて，神経多様性の理解に新たな発見をもたらすのか，また，当事者にとって真に役立つ支援設計を生み出すのかは未知数である。本稿で挙げた以外にも，筆者は，神経科学者や認知科学者，心理学者らと協働した複数のプロジェクトを推進しており，さまざまな研究分野の技術と知見を統合していくことが，本アプローチのさらなる発展の鍵となる。今後のプロジェクトの進展に期待していただきたい。

謝辞　CREST「認知ミラーリング」およびCREST「認知フィーリング」の遂行にあたり，多くの議論を重ねた，東京大学熊谷晋一郎准教授，国立精神・神経医療研究センター山下祐一室長，北海道大学鈴木啓介特任講師，他メンバーに感謝の意を表する。

文献

1—P. Jaarsma & S. Welin: Health Care Analysis, **20**, 20(2012)
2—M. Asada et al.: IEEE Transactions on Autonomous Mental Development, **1**(1), 12(2009)
3—A. Cangelosi & M. Asada: Cognitive Robotics, The MIT Press (2022)
4—S. Kumagaya: Advanced Robotics, **29**(1), 25(2015)
5—綾屋紗月・熊谷晋一郎: 発達障害当事者研究，医学書院(2008)
6—K. Friston et al.: Journal of Physiology-Paris, **100**, 70(2006)
7—K. Friston & S. Kiebel: Philosophical Transactions of the Royal Society B, **364**, 1211(2009)
8—A. Clark: Behavioral and Brain Sciences, **36**(3), 181(2013)
9—Y. Nagai: Philosophical Transactions of the Royal Society B, **374**(1771), 20180030(2019)
10—Y. Nagai: "Predictive coding for cognitive development," in *Encyclopedia of Robotics*, M. H. Ang et al.(eds.), Springer (2021)
11—K. Friston et al.: Neural Networks, **144**, 573(2021)
12—A. Philippsen & Y. Nagai: Frontiers in Psychiatry, **11**, 564415(2020)
13—A. Philippsen & Y. Nagai: IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, in press.
14—A. Philippsen et al.: Frontiers in Neurorobotics, **16**, 856184 (2022)
15—A. Philippsen et al.: Frontiers in Psychology, **13**, 783446 (2022)
16—H. Idei et al.: Computational Psychiatry, **2**, 164(2018)
17—H. Idei et al.: Frontiers in Psychiatry, **11**, 762(2020)
18—長井志江: 生体の科学，**69**(1), 63(2018)
19—S. Qin et al.: in *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Development and Learning and on Epigenetic Robotics*(2014) pp. 123–124
20—長井志江・他:『日本認知科学会第 32 回大会発表論文集』所収(2015) pp. 32–40
21—M. Tsujita et al.: "Comprehensive Intervention for Reducing Stigma of Autism Spectrum Disorders: Incorporating the Experience of Simulated Autistic Perception and Social Contact," under review.
22—戦略的創造研究推進事業(CREST)「知覚と感情を媒介する認知フィーリングの原理解明」(2021) https://cognitive-feeling.jp
23—N. Schwarz & G. L. Clore: in *Social Psychology: Handbook of basic principles*. The Guilford Press(1996) pp. 433–465
24—S. Arango-Muñoz & K. Michaelian: Philosophical Inquiries, **2** (1), 97(2014)