

良質な教育環境創出のための神経科学の理解

安本 史恵¹

The Understanding of Neuroscience for Creating the Pedagogically Sound Environment

Fumie YASUMOTO

Email: yasumoto@edu.u-toyama.ac.jp

【要旨】

教育によって脳はどのような機序で生命科学的に変化するのだろうか。個体差を超えて生じる生体反応を理解することは教育実践や教育政策の立案においても必要であると考えられる。本総説においては、①幅広い分野の教育系研究者に有用であると考えられ②神経科学の基礎により多くの接点を持つエビデンスであることを基準として話題を選別し、脳が環境を知るメカニズム、大人と子どもの脳の違い、主体的な学びの重要性の根拠、現代の新しい技術によって脳が変化する可能性、などについて概説する。神経科学においては、「学習」は「環境からの外部刺激によって神経回路が構築される過程」、「教育」は「外部刺激を制御・補完する過程」として捉えられる。このことは、どのような脳を創出したいかを考えながら教育の起点である環境を構築していく必要があることを示している。

キーワード：神経科学 脳 教育 学習 環境

Keywords：Neuroscience Brain Education Learning Environment

1. はじめに

近年、NCLB (No Child Left Behind Act) 法に代表されるように、根拠によって裏付けられた教育実践や教育政策が重要視される場面、すなわち、「エビデンスに基づく教育 (Evidence-Based Education, EBE)」が標榜される場面が増えた [Hargreaves H, 1996]。

このEBE提唱の経緯としては、研究対象をランダム化して得たデータを比較する医学研究の「科学的根拠に基づいた医療 (Evidence-Based Medicine, EBM)」に続いたということがある。しかしながらEBEに対しては、教育を受ける側のそれまでの学習・経験をランダム化した上で得られたデータがどれほど教育の質の向上に寄与するエビデンスとなり得るのかという議論が残されている [今井康雄, 2015]。

神経科学研究はEBMが立脚点とする医学研究同様、より均質な実験動物を用いてデータを得ること

などにより再現性を確保することを重要視する学問分野であり、データ採取以前の学習・経験の多様性を考慮する必要性が生じるメソッドとは、その点親和性が低い。しかしながら神経科学研究で得られた様々な、動物種内において共通した、もしくは動物種を横断して共通すると考えられる生体反応は、その普遍性のために人間教育の様々な局面において呈される。さらにより積極的な視点から論じると、教育実践の実施や教育政策の立案に際して、実際に扱う内容が細分化されていたとしても、常に、例えば科目横断的であったり学年横断的であったりするような大局的な視点が必要であり、その背後には生物としての人間の脳の発達をいかに支援するかという観点がある。そこでこの総説では、教育を受ける側の脳がどのような機序で生命科学的に変化するかという差分について取り上げることとした。

教育実践や教育政策の実行に伴い、さまざまな教育分野の研究者に対して、個体差を超えて生じると考えられる生体反応である神経科学の知見がより分かりやすく整理され伝わることは重要だと考えられる。一般の読者に分かりやすく神経科学研究を伝え

¹ 富山大学学術研究部教育学系

る試みは、例えば池谷裕二などにより、今日精力的になされている。また、神経科学の知見の啓蒙活動として、「Brain Awareness Week」といった国際活動や、理化学研究所に関係する研究者らによる「脳の世紀推進会議」が主体になって進める活動などがある。しかしながらそれらの想定読者・オーディエンスは必ずしも教育系研究者に限られていないという点で、新たな視点で分類・整理を行う余地は残されていると考えられ、本総説はそれを趣旨とする。

そこで本総説においては、①幅広い分野の教育系研究者に有用であると考えられ②神経科学の基礎により多くの接点を持つエビデンスであることを基準として話題を選別し、その中でも特に脳がダイナミックに変化する時期の教育に携わる教育系研究者に資することを目指して概説を試みることにする。

2. 脳は環境をどのように知なのか —位置と情報—

脳はどのようにして外界の複雑怪奇な態様を認識しているのだろうか。

科学技術振興機構主催の「脳を育む：学習と教育の科学」という国際会議（2000年）においては、「学習」は「環境からの外部刺激によって神経回路が構築される過程」、「教育」は「外部刺激を制御・補完する過程」と定義されている [小泉英明, 2005]。そこで、教育によって人間が変化する起点および終点を、本総説ではそれぞれ、環境・脳とする。生命科学の領域では、体の内部についても内的環境という用語を使用するが、本総説内では環境をもっぱら体外のものに限定して定義する。そして、体外の（実のところ内的環境の認識のメカニズムも包含し得る理論であるが）環境を認識する器官は、最終的には脳であることを確認する。視覚・嗅覚・味覚・聴覚・触覚といった種々の感覚によって環境のあり様を計測した後、それを情報として送る器官は、脳である。

脳は一千億以上もの神経細胞の協調を基盤とした情報処理システムである [von Bartheld CS, 2016]。ところが情報処理の司令塔である脳という軟部組織は、脊椎動物において堅牢な頭骨によって守られており、いわば頭骨内に閉じ込められている器官でもある。すなわち、脳は直接外部を感覚することはできない。そしてこの閉鎖的な脳という器官に対して入力される情報は、光や音などがデジタル変換され

た電気信号に過ぎない。

神経細胞は、グルタミン酸や Gamma-aminobutyric acid (GABA) といった興奮性および抑制性神経伝達物質の放出と受容によりコントロールされているものの、発火の本体は活動電位とよばれる膜電位の上昇である [Siegel G., 1989]。入力されたデジタル信号から脳は、外界の環境において、何が「見えて」「匂って」「聞こえて」・・・いるのかを、いわば外界の態様を再構築・再現するように認識することができる。しかし複雑な環境を認識するためには、脳が受け取る情報も、そこから生じる神経細胞の活動も、あまりに簡素なものに集約されているのではなかろうか。これらの最小限の入力と反応から外界の態様を再現するために、何が行われているのであろうか。

その巧緻な認識の仕組みを支えるものの一つとして、脳のどの部位の神経細胞が発火したのかという位置情報が手掛かりになっている。このことは、脳機能マッピングという、古くはブロードマンの脳地図 [Brodmann K, 1909] に始まり、近年の機能的磁気共鳴画像法 (Functional magnetic resonance imaging : fMRI) といった手法へと続く記述によって裏付けられてきた [Smith K 2012]。進化上人間を含めたサル類において急速な拡大を遂げた大脳皮質においては、額側に位置する前頭葉、その反対に位置する後頭葉、脳の頂点近くを占める頭頂葉、その下部左右に位置する側頭葉といった解剖学的な部位があり、それぞれが独自の機能を担っていることが古くから知られている [Brodmann K, 1909]。

例えば、後頭葉を細分化する形でより詳細な部位が同定され、視覚に携わる脳領域に対しては「一次視覚野」といった機能部位が命名されてきた。解剖学的な位置と機能を結びつけてきたのは、古典的には、怪我や手術などで脳の一部が欠損した患者や動物の観察であり、その患者や動物において失われた脳機能から逆算することによって欠損した脳部位がどのような働きを担っていたのかが解明されてきた。それが近年は、健康な被験者に対して覚醒したまま脳を働かせるタスクを行わせ、脳内のどの部位が活性化しているかを非侵襲的に測定する研究が隆盛である。例えば fMRI は、脳内の水の量や状態の変化を磁気を用いて画像化する [Ogawa S, 1992]。また、Near Infrared Spectroscopy (NIRS) によっては、近赤外光を用いて酸素と結合したヘ

モグロビン量の変化を計測することが可能である [Taga G, 2003]。これらは、見えない神経活動の情報を描画する脳機能イメージングと呼ばれ、例えば Owen らによる以下の研究成果がもたらされている [Owen AM, 2006]。

fMRI 装置下において「散歩をしていると想像してください」「テニスをしていると想像してください」と要求された健常な被験者は、それぞれ、散歩・テニスに特有の脳の活性化パターン（それぞれ、海馬傍回・大脳運動皮質補足運動野の活性化）を示すことが分かっている。そこで次に、神経科医によって意思疎通が取れない植物状態だと診断されていた患者に対して、fMRI 装置下において同様に散歩・テニスの想像を促す要求を行った。すると、従来の観察方法では患者の外見からは何の反応も見出せないものの、患者の脳からの情報を描出すると、健常者と同等の脳の活性化パターンを示すことが分かった。これは植物状態の患者とはじめて情報交換が可能となった事例だとされている。

ところで近年の研究によって、乳幼児は周囲の大人が想定するよりもはるかに多くのことを理解している可能性があることが分かってきた [Paterson SJ, 2006]。すなわち、乳幼児は多くを理解していてもそれを大人に向けて表現する力が未熟であるために、乳幼児の理解が実際よりも拙いものだと誤解されている、という指摘である。上記のような、意思疎通が取れないとされてきた相手に対する脳機能イメージングの手法を応用することで、今後、乳幼児の真の理解力を測定し得る可能性もあるのではないかと考えられる。

よりミクロなレベルにおいても、神経細胞の位置情報と機能の関わりに関する研究成果があがっている。例えば、組織透明化という新規技術を用いて、ネズミの脳を丸ごと細胞レベルで三次元解析することが可能となった [Maruoka H, 2017]。従来、透明な脳を持つゼブラフィッシュを利用して脳全体の活動を計測する研究 [Kramer A, 2019] も行われていたが、より進化的にヒトに近い哺乳類の実験動物の脳を透明化することが可能となったわけである。脳組織を透明化すると、光を利用した顕微鏡観察などにおいてより詳細な結果が得られる。この技術を用いて、例えばマイクロカラム構造という六方格子状の規則的な配置を取る、同一の情報を処理する機能単位があることも分かった [Maruoka H, 2017]。

この機能単位内では類似した発火パターンが生じ、感覚処理、運動制御、言語処理など、入力のみならず出力にも関わるということが明らかになった。また、神経回路の出来上がった成マウスにおいては、マイクロカラム構造は同じ神経細胞からの入力を受けているため同期活動がもたされている一方、神経回路が形成途上の段階においては、マイクロカラム構造は、ギャップ結合という成マウスとは異なる仕組みによって結び付けられていることも判明した。

大人の脳においても、神経細胞の発火から外界を読み解くメカニズムはまだ解明の余地を多分に含んでいるが、乳幼児期の環境認識はさらに難解である。発達期の子どもの脳にとっては、発火中のマイクロカラムが、視覚・嗅覚・味覚・聴覚・触覚の何に由来して変化を生じさせているのか、経験が少ない。乳児が、例えば自分自身の体がどんな形をしているのか分かっていない、とされる一つの理由はこのようなマイクロカラムと感覚の結び付けの乏しさに起因すると考えられる。今後新規技術を用いて、発達途上の脳に対しても、神経細胞・マイクロカラム・脳全体の神経回路のつながり・脳領野などと脳機能を結びつける研究が成果をあげ、大人・子どもそれぞれ特有の環境の認識について解明が進んでいくことが期待される。

3. 大人の脳と子どもの脳を比較する —時期と情報—

前項で論じた子どもの脳の特徴のほかに、大人と子どもの脳にはどのような違いがあるのだろうか。ここでは子どもの脳特有の性質として、

- ・いくつかの脳機能に関する臨界期成立のメカニズム
 - ・認識についての厳密性
- などの知見を取り上げて考察する。

子どもの脳の特徴としていくつかの脳機能に関する臨界期というものがある [Baharloo S, 1998]。この問題に対しては臨界期の存在そのものを含め、幼児教育などの分野からも多くの議論があり、まだ研究の余地が多分に残っていると言える。しかしながら、両眼視や絶対音感などのいくつかの臨界期を有すると考えられる生理現象 [Baharloo S, 1998] について、その個別の能力の成立についてではなく、異なる複数の能力における臨界期のメカニズムを共通して説明し得る仮説を紹介したい。

仮説の説明の前に、1949年にドナルド・ヘブが提唱した「ヘブ則」および長期増強（Long-term potentiation, LTP）と呼ばれる現象に簡単に触れる。大腦においては、一つの神経細胞が約数万個のシナプス（情報伝達の出力側と入力側の間の結合）を形成して他の神経細胞と情報をやり取りしている[甘利俊一・古市貞一, 2008]。これが神経回路とよばれる構造であるが、ヘブ則においては、シナプスを形成している神経細胞同士が一緒に発火するとその間のシナプス強度が強くなり（信号の伝達強度が変化し）これによって「学習」が成立するとされた[Hebb DO, 1949]。

その後、ブリスとレモによってシナプス伝達強度の変化についての詳細な分子基盤が解明され、伝達強度増大は、シナプスの後部において伝達物質（グルタミン酸）を受け取る受容体の数が増加することによってもたらされることが証明された（LTP）[Bliss TV, 1973]。受容体数増加は数時間～数日間にわたって維持される。これが神経科学的な「学習」の代表的な説明である。

では神経可塑性が、脳の発達の一時期にのみ限定される臨界期という現象はなぜ生じるのか。豊泉太郎は、例えば一次視覚野の神経細胞では臨界期前の段階において、発火を抑制させる抑制性神経細胞の影響がまだ小さいとして以下の仮説を提唱している。抑制の影響が弱い一次視覚野の神経細胞は、両方の目からの経路に沿って常に生じている自発的活動（網膜由来の外的な入力ではないもの）に、臨界期後に比較して相対的に大きく影響されることになる。その後、脳の発達に応じて抑制性の入力が強くなることによって、自発的な発火から外的な入力による発火への依存の割合が大きくなるという変化を遂げ、学習を進める。この抑制性の入力と興奮性の入力とのバランスが、臨界期を形成するのではないかという仮説である[Toyoizumi T, 2013]。

物質的な知見としても、一般的に抑制性の神経伝達物質の代表とされるGABA [Krnjević K, 1967]は、胎生期においては興奮性を示すという研究報告もある[Ben-Ari Y, 2012]。子どもの脳と大人の脳においては、同一物質であってもその作用が正反対となること、また神経回路内での興奮性／抑制性伝達の割合が変化することなどが、脳発達のダイナミクスを支えていることがうかがえる。

脳は、経験や学習によってよく使用するシナプス

結合を強化する一方、使用頻度の低いシナプス結合の除去を行う[Hashimoto K, 2009]。また、脳の神経細胞の数は、誕生時より減り始め、3歳になるまでに30パーセントほどしか残らないとされる[Klempner J, 1991]。いわば、新生児・乳幼児期の脳は過剰な脳であり、そこから大人の脳が彫像されていくと言える。このそぎ落としの間、脳による環境の認識はどのように変化していくのであろうか。

一般的な常識に反するようではあるが、乳幼児期の脳が大人の脳に近づいていく際には、物理的な「精緻さ」「正確さ」のベクトルとは逆に進行する面があることも分かってきた。例えば殴り書きをした「あ」という文字を、教科書体の「あ」と同一の文字だと判別する能力は、大人に比べて子どもは低いという[池谷裕二, 2017]。子どもの脳は写真のように精緻に情報を峻別するために、少しの違いをも、違いとして区別してしまう。そのために、複数の手書きの「あ」や様々な字体の「あ」は、別物だという認識になる。それらはバリエーションであり本質的には同一の物事を意味する、という柔軟性を持つのは脳が発達して初めて生じる反応である。

このように、大人と子どもの認識の大きな相違点として、厳密性、というものがあることを理解して環境を創出することが必要である。例えば、大人には理解可能な、同一の意味を持つ二つの環境を構成した際に、子どもにとって同一であるという前提が通用していない可能性がある。「昨日の状態を再現した引き続きの環境」ということを養育する側が想定していても、子どもの解釈は異なる場合もある。環境構成において連続性が担保できない可能性を想定する必要があることを、教育関係者が理解することが重要である。

4. 主体的な学びとは

学習指導要領に「主体的」な学びという言葉が頻出するように、能動的な学習の必要性が近年、よりクローズアップされている[Hirsh-Pasek K, 2007]。この、主体的・能動的な学習が重要であるという根拠を神経科学的に求めることは可能であろうか。能動的な学習が、同様の内容を学習する受動的な学習よりも強化されることを示せば、一つの角度からのエビデンスと成り得るのではないだろうか。

結論から言うとこの点における学習の強化は、人

間に限らず、より進化的に下等な動物であるラットにおいても観測が可能である [Krupa DJ, 2004]。この Krupa らの論文においては、ラットのひげによる触覚を、スライドするドアの開口部の幅の触知という指標を用いながら、能動的に触れた場合（ラットが自らドアの開口部に鼻を突っ込むことによりひげが触れる）と受動的に触れた場合（開口部がラットに向かって動いてくることによってひげが触れる）とにおいて比較した。その結果、受動的にひげが触れた場合に比べて能動的な場合において、神経細胞の反応の持続性・強度が数倍～数十倍、高まることが分かった。能動的な活動と受動的な活動において、最終的には同様の身体活動が起きているように見える場面であっても、脳内における神経活動には大きな差が生じることが分かる。

近年の就学前教育における研究においては、子どもにもプログラムを与えて習得させる方法と、環境をエンリッチした上で子どもの内発的な試みにゆだねる方法においては、後者のほうが認知能力（例えば運動能力）・非認知能力（例えば他者とのコミュニケーション能力）が共に高まるという研究成果が得られている [ベネッセコーポレーション, 2016]。これらの知見は、2020 年度の学習指導要領の改訂に、よりアクティブラーニングが重視されていることにも通じる（文部科学省）。

ただし、主体的な活動、と銘打つと、どんなことにも挑戦しようとするポジティブな活動、という文脈に読み取られがちであり、不安を感じて行動しないといったネガティブな活動は減らすべきものであるかのような印象を与える懸念がある。果たしてそうであろうか。

本来動物は、食物連鎖の中にあり、「失敗を恐れず危険があることが推定されていても積極的に報酬を獲得しに行く」という行動よりは「敵を早く察知し危険からはできるだけ遠ざかる」という罰を回避する行動が優位であるはずである。食物連鎖の中から抜け、捕食者に食べられる可能性がほぼなくなったのは脳の進化のほんの最後の時期に過ぎず、人間という動物も生来の脳の反応としては罰回避の機能が強い [雨森賢一, 2020]。

長谷川寿一 [長谷川寿一・梨本恵理子, 2010] は、脳を含めた人間の身体は石器時代に現在の形と同程度に完成されており、不安をより強く感じる脳が本来適応的だったものの、現代環境と古環境とのずれ

が、本来適応的だった身体活動に不都合を生じさせていると論じている。これは何も脳に限らず、椎間板ヘルニアや難産も人間の直立二足歩行に伴う身体変化の結果生じた不都合であり、また脂肪・砂糖・塩などの採り過ぎによって生じる生活習慣病も、古環境においてはそれらの乏しい資源に対しては貪欲であることが適応的だったため、現代において齟齬をきたしているもののだとする。身近な生活においても、ポジティブな脳機能が「未来の予測を新しく作るのに向いている」のに対し、ネガティブな脳機能は「決められたことを間違いなく実行するのに向いている」という重要な役割がある [雨森賢一, 2020]。

これらのポジティブ／ネガティブな脳機能の意義を理解した上で、精神保健上健康な脳というものが、やや「ポジティブ錯覚」に傾いていることを理解しておくことは有用だと考えられる。例えば、ポジティブ錯覚の代表である楽観主義バイアスは、未来の出来事に対して、自分には他人よりも良いことが起こる確率が高く不幸なことが起こる確率は低いと見積りがちであるという錯覚である。「他人よりも自分のほうが宝くじに当たる確率が高い」などという錯覚であるが、この楽観主義バイアスを健康な脳はより強く持ち、うつ病に近づいた脳はより現実的なものの見方をするという指摘がある [Strunk DR, 2006]。このポジティブ錯覚は、分子基盤に報酬・期待・快楽などに関わる神経伝達物質ドーパミンの産出能力や前頭葉前部帯状回の神経回路などが関与し、人間という生物が他の生物とは異なり、出アフリカを経て全世界に進出したことに寄与した可能性も指摘されている [山田真希子, 2017]。

ポジティブ／ネガティブな行動の必要性、ポジティブ錯覚を有するという脳の特性、これらに絶妙なバランスがあることを理解しておくことは、環境創出を考える上で、またそこから生じた言動を解釈する上で有用であると考えられる。

5. 一人の脳と他者の脳との関わり

我々は他者とのコミュニケーションの中で生活している。このことはすなわち我々の脳は他者の脳と相互作用していると捉えることができる。この、一人の脳と他者の脳との関係性について取り上げたい。

発達期に、養育者の不適切な言動などが繰り返されると、正常な脳領野の体積から逸脱した、萎縮（前頭前野など）や肥大（聴覚野など）が見られることが分かってきた [Tomoda A, 2011] [Fujisawa TX, 2018]。マルトリートメントや虐待による脳への影響を調べる研究も隆盛であるが、一方で、良好な養育のコミュニケーションの指標として、子どもから養育者への「好意」の示し方の高さを挙げることに危険が伴うことも分かってきた。虐待された子どもはかえってその養育者に好意を示すという例があるためである [Rincón-Cortés M, 2015]。この一見矛盾に思える行動は、望ましくない養育であればあるほど無力な子どもは危機感を覚え、自分の生存確率を少しでも高めるために養育者に好かれようとする態度から来ると考えられている。

では養育者は自らが望ましい養育を行っているかどうかについてどのようにして自己点検を行えばよいのであろうか。残念ながら著者は簡便で客観的な指標というものをここに挙げることはできない。しかしながらこの件に関して有用と思われるいくつかの知見について以下に示す。

・アタッチメントの重要性

養育者と子どものアタッチメントの重要性は近年広く知られるところとなった。その根拠の一つとして、就学前の時期に親子が濃密に接し丁寧な世話がなされた子どもは、そうではない子どもと比較して海馬における神経回路が2倍以上発達するというものがある [Luby JL, 2016]。この変化は、その後、子どもが思春期になった後もセルフコントロールに長けるなど、持続した好影響を及ぼすことが知られている。

・報酬と罰、強化と弱化について

前項で記述した虐待とは対極に感じられる「褒めて育てる」という方法はどうであろうか。前章で論じた「内発的動機から生じる能動的な行動」に対して養育者が「強化する」「報酬を与える」対応を行うような場合である。養育者がそのように対応すると、子どもが自らの内発的動機を疑い、自分は養育者の望みを満たすために行動したのだと自らの動機をすり替える場合があることが分かってきた [Ryan RM, 2000]。その結果、場合によっては、子どもがせっかくの内発的動機からの行動をやめてしまうという事態が生じる。子どもの行動に対して養育者が評価を下すことは、報酬・強化、罰・弱化のどちら

に振れるにせよ、慎重に吟味する必要がある。ただし、この理論の基となった Festinger [Festinger L, 1957] に対して様々な議論があることにも注意する必要がある。

このようにいくつかの事例を挙げたものの、複数の脳（子どもと養育者、というような）を並列して計測する研究は残念ながら神経科学の領域ではまだ活発とは言えないように思われる。上記以外にも、二者間の瞬きの同期性からコミュニケーションの成否を判定するというような技術 [Nakano T, 2010]、母子間のアイコンタクトと両者の脳神経活動についての研究 [Kuboshita R, 2020]、話がはずんでいる二人の脳の反応を同時に記録した実験 [Stephens GJ, 2010] など、いろいろな角度からこの問題へのアプローチが行われてはいる。しかし一つの脳の中にまだ解決すべき多くの疑問が残っていることが複数の脳を並列させた研究の集積を難しくしている大きな要因となっていると思われる。また、人間においては認知や親密さの指標と成り得るアイコンタクトが、動物においては威嚇に発展するものであるというような、生物種間で意味付けが異なることへの難しさもある。しかしながら、脳は他者の脳とのコミュニケーションを大きな機能の一つとしていることから、この分野の研究が今後大きく発展することが望まれる。

6. 環境によって創られる脳 —新たな環境と新たな脳—

人間の脳は、道具や都市といった人工物を作り出し、地球における環境を改変してきた。そして反対に、環境によって人間の脳も形作られる。

3章において触れた両眼視の形成と関連する一次視覚野の発達においても、臨界期にその個体が置かれた環境に応じて正常な神経回路が形成されるか否か決定されてしまう [Ishikawa AW, 2018]。成ラットの脳に比べて眼がひらく前の幼若ラットの脳の一次視覚野においては、相互にシナプス形成をしている神経細胞が半数以下しか存在しない。そして瞼を閉じた状態や暗闇の中で飼育された幼若ラットがそのまま成ラットに成長した場合、互いに正しくつながり合う神経細胞が半数以下のままであることが分かった。このことから適切な時期に適切な環境が必要であるということが分かる。

人間や他の生物にとって、それぞれの時代における環境は以前の環境とは異なる新規性を帯びている。そして現代の人間社会を取り巻く環境もかつて経験したことのない大きな変化の中にある。人工知能（Artificial Intelligence: AI）をはじめとしたデジタル技術の革新などは、身近でありながら今後どのような発展を遂げるか想像するのが難しい変化である。歴史的に農耕の発達や産業革命によって労働エネルギーの分配が変化した事実と類似の変革が起きる可能性もある。

人間の人間らしさの一つに道具の作成（および道具を作るための道具の作成）がよく取り上げられるが、人間は道具によって身体機能を拡張してきたと言える。例えば一本の棒を手にしたとき、自分の腕の長さで棒の長さの和に身体機能を拡張したと言え、その拡張された身体から得た情報を脳は新たに処理する必要が生じる。そのような意味で、我々の生活を取り巻いている、衣類・文具・乗用車・医療品・・・といったほとんどすべての人工物が広義には身体拡張性を持ち、脳に影響を与えていると言える。

しかし現在、デジタル技術などを利用することでさらに積極的・直接的に脳内の情報伝達に介入を行うという研究が活発化している。具体的には、五感以外の新たな感覚を、五感のような感覚器からの入力はない状態で、エンドポイントの脳を直接刺激することにより獲得し得るのではないかというような近未来的な研究が実際に行われている。

例えば乗本裕明らは、人間と同様本来地磁気を感じないラットに対して、方位磁石を含むセンサーを移植することによって地磁気を「感覚」させることに成功した [Norimoto H, 2015]。視覚を無くしたラットの頭部に、ラットが北から 20 度以内を向くと左側の一次視覚野を刺激し、南から 20 度以内を向くと右側の一次視覚野を刺激する装置を移植したところ、ラットの脳は失われた視覚の代わりに磁気情報を処理し、ラットはその情報を利用した行動を示したという。つまり技術の発展によっては、我々人間も五感以外の感覚を身に付け得る可能性があるということになる。

このような科学技術の発展に対しては、新規の身体機能拡張の獲得によって社会に何が起きるのかといった問題が発生し、技術的には可能となったものを実際に実社会において利用するのか否かを含めて

広い議論が必要となる。上記の地磁気の感覚の獲得は、例えば将来的に視覚障がい者の行動を助ける技術に発展する可能性もあり、また、この感覚の獲得を望んだ健常者において利用され得る可能性もある。

身体機能拡張は脳・神経に限らず全身の器官に対して適用可能な概念である。しかしながら脳・神経や生殖に関する技術革新には、特に慎重な倫理上の議論が必要となることが想定される。

この議論は、何もこれまでの神経科学研究の系譜と不連続なものではない。1 章で述べた植物状態の患者に対する fMRI の研究と類似した方向性を持つデコーディングとよばれる技術があり、fMRI 画像など脳機能イメージングの結果を解読するだけで、被験者が○や△といったどのような図形を見ていたかを再現し得ることも分かってきた [Shen G, 2019]。これらの、これまで読み解くことができなかった情報を解読すること、他者によって脳内情報の解読が可能になることなどが、社会に何をもたらすのかについても議論が必要とされる。

先の章において、乳児が、自分の身体がどのような形をしているのか分かっていない、という事例を挙げた。腕が何本あって、どのくらいの長さで、といったことを、乳児の脳は生後、脳に届くデジタル信号の同期性を通じて学習する。しかし新規技術による身体拡張性を前にすると、我々はあたかも皆が、身体性のあいまいな状態の乳児である。そして、例えば腕を一本増やすといった身体拡張技術が施された際に、我々の脳は地磁気を知覚したラットのように、その新規情報を処理することが可能である。このことは、もっとも鮮やかな形で環境が脳を創出していることを示す事例であり、だからこそ我々はこのような脳を創出したいかを考えながら環境構築を行う必要があると言えよう。

7. おわりに

神経科学研究は生命科学研究全体の中で大きな予算と人材が関与している領域であり、日進月歩の研究成果を挙げている。そのため研究が専門的に細分化され、その成果が教育現場に還元されにくい面もある。

しかし現代社会の変化は待ったなしであり、上記で取り上げたような新規技術への接触や、あるいは

こんにちの感染症の蔓延などといった社会そのもののあり方が、そこで生きる人間の脳を日々刻々創り変えている。その中にあっては、脳の基本的な作用機序や特性をとらえておくことがまず重要だと考えられる。新規技術の登場などが伴う未来の社会は誰にも分からないとされ、その不確定な将来においても「生きる力」を育むことが教育現場に求められている（文部科学省）。その未知の未来において、脳というものがどの程度の可塑性を有しているのか、それを大まかにであっても捉えているかどうかは、養育・教育の質を変化させるのではなかろうか。

文献

- Baharloo S, Johnston PA, Service SK, Gitschier J, Freimer NB. (1998). Absolute pitch: an approach for identification of genetic and nongenetic components. *Am J Hum Genet*.
- Ben-Ari Y, Khalilov I, Kahle KT, Cherubini E. (2012). The GABA excitatory/inhibitory shift in brain maturation and neurological disorders. *Neuroscientist*.
- Bliss TV, Lomo T. (1973). Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforant path. *J Physiol*.
- Brodmann K. (1909). *Vergleichende Lokalisationslehre der Grosshirnrinde in ihren Prinzipien dargestellt auf Grund des Zellenbaues*. Johann Ambrosius Barth.
- Festinger L. (1957). *A theory of cognitive dissonance*. Stanford University Press.
- Fujisawa TX, Shimada K, Takiguchi S, Mizushima S, Kosaka H, Teicher MH, Tomoda A. (2018). Type and timing of childhood maltreatment and reduced visual cortex volume in children and adolescents with reactive attachment disorder. *Neuroimage Clin*.
- Hargreaves David H. (1996). *Teaching as a Research-based Profession: Possibilities and Prospects*. Hargreaves H. David. Teacher Training Agency.
- Hashimoto K, Ichikawa R, Kitamura K, Watanabe M, Kano M. (2009). Translocation of a "winner" climbing fiber to the Purkinje cell dendrite and subsequent elimination of "losers" from the soma in developing cerebellum. *Neuron*.
- Hebb DO. (1949). *The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory*. New York, Wiley & Sons.
- Hirsh-Pasek K, Bruer JT. (2007). The brain/education barrier. *Science*.
- Ishikawa AW, Komatsu Y, Yoshimura Y. (2018). Experience-Dependent Development of Feature-Selective Synchronization in the Primary Visual Cortex. *J Neurosci*.
- Klempf J, Riedel A, Harper C, Kretschmann HJ. (1991). Quantitative changes during the postnatal maturation of the human visual cortex. *J Neurol Sci*.
- Kramer A, Wu Y, Baier H, Kubo F. (2019). Neuronal Architecture of a Visual Center that Processes Optic Flow. *Neuron*.
- Krnjević K, Schwartz S. (1967). The action of gamma-aminobutyric acid on cortical neurones. *Exp Brain Res*.
- Krupa DJ, Wiest MC, Shuler MG, Laubach M, Nicolelis MA. (2004). Layer-specific somatosensory cortical activation during active tactile discrimination. *Science*.
- Kuboshita R, Fujisawa TX, Makita K, Kasaba R, Okazawa H, Tomoda A. (2020). Intrinsic brain activity associated with eye gaze during mother-child interaction. *Sci Rep*.
- Luby JL, Belden A, Harms MP, Tillman R, Barch DM. (2016). Preschool is a sensitive period for the influence of maternal support on the trajectory of hippocampal development. *Proc Natl Acad Sci U S A*.
- Maruoka H, Nakagawa N, Tsuruno S, Sakai S, Yoneda T, Hosoya T. (2017). Lattice system of functionally distinct cell types in the neocortex. *Science*.
- Nakano T, Kitazawa S. (2010). Eyeblick entrainment at breakpoints of speech. *Exp Brain Res*.
- Norimoto H, Ikegaya Y. (2015). Visual cortical prosthesis with a geomagnetic compass restores spatial navigation in blind rats. *Curr Biol*.

- Ogawa S, Tank DW, Menon R, Ellermann JM, Kim SG, Merkle H, Ugurbil K. (1992). Intrinsic signal changes accompanying sensory stimulation: functional brain mapping with magnetic resonance imaging. *Proc Natl Acad Sci U S A*.
- Owen AM, Coleman MR, Boly M, Davis MH, Laureys S, Pickard JD. (2006). Detecting awareness in the vegetative state. *Science*.
- Paterson SJ, Heim S, Friedman JT, Choudhury N, Benasich AA. (2006). Development of structure and function in the infant brain: implications for cognition, language and social behaviour. *Neurosci Biobehav Rev*.
- Rincón-Cortés M, Barr GA, Mouly AM, Shionoya K, Nuñez BS, Sullivan RM. (2015). Enduring good memories of infant trauma: rescue of adult neurobehavioral deficits via amygdala serotonin and corticosterone interaction. *Proc Natl Acad Sci U S A*.
- Ryan RM, Deci EL. (2000). Intrinsic and Extrinsic Motivations: Classic Definitions and New Directions. *Contemp Educ Psychol*.
- Shen G, Horikawa T, Majima K, Kamitani Y. (2019). Deep image reconstruction from human brain activity. *PLoS Comput Biol*.
- Siegel G., Agranoff B., Albers R.W., Molinoff P. (1989). *Basic Neurochemistry* 4th Ed. Raven Press, New York.
- Smith K. (2012). Brain imaging: fMRI 2.0. *Nature*.
- Stephens GJ, Silbert LJ, Hasson U. (2010). Speaker-listener neural coupling underlies successful communication. *Proc Natl Acad Sci U S A*.
- Strunk DR, Lopez H, DeRubeis RJ. (2006). Depressive symptoms are associated with unrealistic negative predictions of future life events. *Behav Res Ther*.
- Taga G, Asakawa K, Maki A, Konishi Y, Koizumi H. (2003). Brain imaging in awake infants by near-infrared optical topography. *Proc Natl Acad Sci U S A*.
- Tomoda A, Sheu YS, Rabi K, Suzuki H, Navalta CP, Polcari A, Teicher MH (2011). Exposure to parental verbal abuse is associated with increased gray matter volume in superior temporal gyrus. *Neuroimage*.
- Toyoizumi T, Miyamoto H, Yazaki-Sugiyama Y, Atapour N, Hensch TK, Miller KD. (2013). A theory of the transition to critical period plasticity: inhibition selectively suppresses spontaneous activity. *Neuron*.
- von Bartheld CS, Bahney J, Herculano-Houzel S. (2016). The search for true numbers of neurons and glial cells in the human brain: A review of 150 years of cell counting. *J Comp Neurol*.
- ベネッセコーポレーション. (2016). 幼児期から小学1年生の家庭教育調査・縦断調査.
- 雨森賢一. (2020年10月10日). 2050年の脳科学と社会『「不安の源」は脳の中にある』. 第43回日本神経科学会.
- 甘利俊一・古市貞一. (2008). シリーズ脳科学5—分子・細胞・シナプスからみる脳. 東京大学出版会.
- 今井康雄. (2015). 教育にとってエビデンスとは何か—エビデンス批判をこえて—. *教育学研究* 82巻2号.
- 山田真希子. (2017年7月23日). ポジティブ思考の脳科学. 第40回日本神経科学大会.
- 小泉英明. (2005). 脳を育む：学習と教育の科学. OECD教育研究革新センター (CERI).
- 池谷裕二. (2017). パパは脳研究者 子どもを育てる脳科学. クレヨンハウス.
- 長谷川寿一・梨本恵理子. (2010). なぜ心の病になるのか—進化医学からの視点 (強迫 くもりのち晴れときどき雨). 長崎出版.

(2021年10月15日受付)