

科学の始まり《謎と仮説》

第 7 回

脳と環境の新しいインターフェースに潜む謎

花川 隆 はなかわ たかし

(国立精神・神経センター神経研究所, 科学技術振興機構さきがけ)

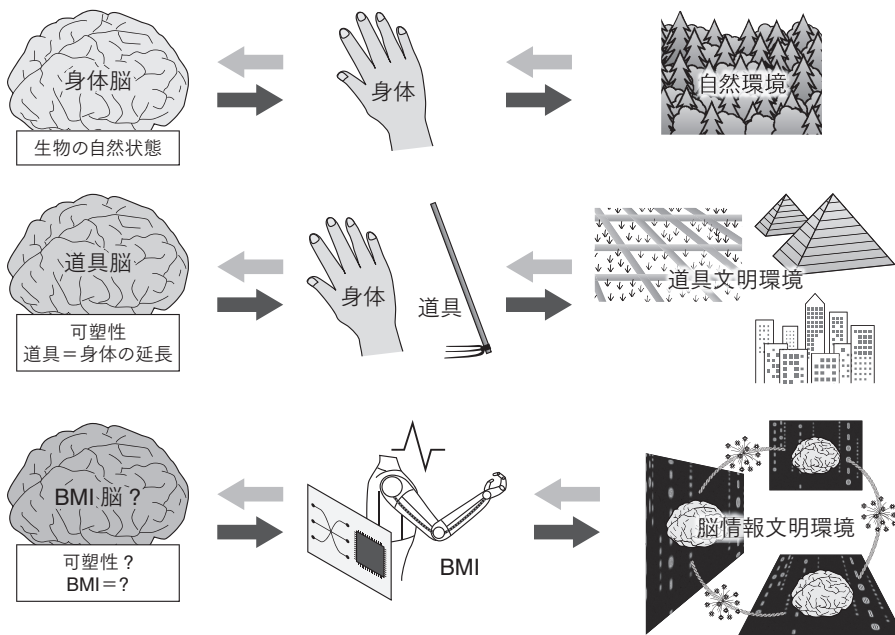
謎と仮説の発端

—ブレイン・マシン・インターフェースの誕生

「21世紀の初頭に急激に進歩した神経科学の技術は?」という問いに対して、「ブレイン・マシン・インターフェース」と答える神経科学者は少なくないだろう。ブレイン・マシン・インターフェース(brain-machine interface, BMI)は、脳とコンピューターなどの情報機器を直接結ぶシステムの総称として、10年ほど前から使われ始めた新しい言葉である⁽¹⁾⁽²⁾。BMIは神経科学の新興研究領域として注目されているだけでなく、事故や疾病による肢体不自由者に役立つ神経補綴(意図に応じて動く義手や車いすなど)として応用できる可能性から、神経科学、工学、医学の研究者が数多く参入し活発に研究が行われ始めた。さらに遠い将来には、脳と脳がインターネットを介して直接情報をやり取りするなど、一般社会でのコミュニケーション手段を劇的に変える可能性を秘めた技術である。

新しい技術は新しい謎を提起する。生物の脳はそれまで地球上に存在しなかった新しい道具や技術を産み出し、自らに都合のよいように環境を改変してきた。それだけではない。脳が産んだ新しい道具や技術は、脳がもつ可塑性により、脳自身をも改変してきた(図)。そしてBMI技術の出現は、脳と身体と環境の関係について私たちが長年抱いてきた常識に変革を迫りつつある。

まず、脳と情報機器を直接結ぶとはどういうことか? たとえば私は今、液晶モニターを出力装置、キーボードとマウスを入力装置として、コンピューターと情報交換をしている。これらの入出力装置は、目などの身体感覚受容器(センサー)を用いて情報を読み取り、手指などの運動効果器(エフェクター)を用いて操作することを前提として設計されている。身体センサーを用いて情報を読み取り、エフェクターを用いて操作するという原理は、人類が石器時代以前から伝統的に培ってきた道具使用のそれと同じである。つまり情報処理がいかに高度であろうとも、インターフェース



図—脳は新しい道具や技術を生み出し、自らに都合のよいように環境を改変してきたが、実は脳自身も道具や環境に合わせて変化する。脳と環境の新しいインターフェースであるBMIは、私たちの脳と環境をどのように改変していくのか？ 答を出すためのキーワードは脳の可塑性にある。

の視点からは、現在の情報機器は石器の延長線上にある。一方、BMIは身体上のセンサーとエフェクターのいずれか、またはその両方を神経工学的システムで置換し、身体をバイパスして脳と情報機器の間で直接情報を伝達することを目標としている。つまり直接とは身体を介さないという意味であり、この点でBMIは従来の道具とは一線を画している。

BMIが従来の道具と異なる点は他にもある。単純な道具であっても使いこなすには慣れ、すなわち学習が必要である。一方、「理想のBMI」では特別な訓練や苦勞なしに情報機器を操作できることが期待されている。理想のBMIの実現には多くの先端技術を必要とする。神経活動の計測手法の進歩により、従来と比べて正確かつ豊富な脳情報が得られるようになってきたが、それでも神経活動のすべてを計測することは難しい。そこで、機械学習アルゴリズムを用いて、神経活動から機器を操作するために必要な情報を解読あるいは復号化(デコーディング)する。将来、さらに精度の高い脳情報解読・復号化のアルゴリズム(デコーダー)を開発し、神経活動から自然な意図を読み

取ることが、訓練の必要のない理想のBMI実現のキーポイントになると考えられている。

BMIと脳の可塑性がもたらす光と影

地球上でもっともすぐれた情報処理能力をもつとされるヒトの「脳」と、ある面ではヒトの脳をはるかに凌ぐ計算能力を備えるようになったコンピューターとの間で、直接情報をやり取りできれば想像を超える「知」の世界が開けるかもしれない。そしてこの壮大なBMIの発想は、サイエンスフィクション作家⁽³⁾や神経科学者の「脳」から生まれた。これは、あたかも「脳」が「身体の牢獄から脳を解放」し、身体と独立した「魂」として存在することを希求しているかのようである。しかしBMIは、もはやサイエンスフィクションではなく、科学的・技術的な裏付けをもち、現実世界に誕生し確実に発展しつつある技術となった。取りも直さずBMIは人為の業であり、環境における長年の時間の検証を経た進化の業ではないことを心に留めておく必要がある。BMI技術は、脳を身体性の制約から解き放ち、脳がもつ未知の

ポテンシャルを開花させるかもしれない。しかし、科学技術的興味から一歩身を引いて考えれば、身体性から解き放たれた脳が、新しい環境で「自滅」や「暴走」してしまう危険性がないとは言い切れない。BMIの誕生が、わたしたちの環境と脳をどのように改変するのか、まだ誰も理解していないのである。

脳は意図のままに情報を発信すれば、あとの処理は機械に任せて自らは学習したり変化したりすることはないというのが典型的なBMIのイメージである。ところが、少なくとも現在のBMI技術においては、脳の側にも多かれ少なかれ学習が生じ、適応的に変化している事実を示す証拠が集まりつつある。すなわちBMIの学習や使用は脳を「改変」することがわかってきた。

まず、訓練なしに意図を完全に読み取ることのできる理想のBMIはまだ開発されておらず、現在のデコーディング手法では少なくとも個人における機械学習条件設定のための試行過程が必要である。そのため、多くの現行BMIシステムは訓練過程を必要とする。たとえば、ヒト用の非侵襲的BMIとして最も有名な米国のWadsworthセンターのシステムは、頭表上脳波による神経活動計測と、適応的フィルターによる機械学習を用いているが、機械学習用の試行によりパラメータを決定した後、8方向のカーソル移動ができるようになるまで数週間の訓練を要する⁽⁴⁾。被験者の内省によれば、最初は手の運動を想像することでカーソル移動させようと試みていたが、徐々に特定の運動を想像することはなくなったという。

BMIを操作している間に、動物の行動と神経活動が動的に変化していくことも明らかになっている。本格的なBMI研究の先駆者であるChapinら⁽⁵⁾は、まずラットに運動課題を学習させた。ラットがレバーを押すと、運動したロボットアームが動いて報酬の水を飲むことができるという課題である。ラット運動野からレバー押しに関わる神経活動電位から運動を予測する信号を計算したところ、予測信号によってロボットアームを操作することができた。ところが、脳活動によるロボッ

トアーム操作で水を飲む条件で実験を行っているうちに、ラットはレバーを押すことをやめてしまった。つまりラットは、神経活動を変えて直接ロボットアームを制御する術を学習したことになる。Lebedevら⁽⁶⁾の実験では、サルはジョイスティックを動かして、ロボットアームを三次元的に操作することを学習した。次いで複数の皮質領域から、サルがロボットアームを操作する際の腕運動に関連する神経活動を記録した。腕運動のパラメータを表現する神経細胞集団の活動から、ジョイスティックの動きを予測する信号を計算することで、BMIによるロボットアーム操作を実現した。BMIによるロボットアーム操作条件を続けていると、サルは先のラットと同様に運動をやめてしまい、神経活動だけで直接ロボットアームを操作し報酬を得る行動を学習、あるいは選択した。この過程において、記録された神経活動の集合が表現する情報は腕運動のパラメータに対する最適性を失い、むしろロボットアームの動作を直接反映するように変化した。

印象的なのは、運動課題を行っていた動物が、BMIが有効に機能し始めると、苦勞して獲得した運動をやめてしまい、BMIによるロボットアームの直接操作を学習あるいは選択することである。神経科学的視点からは、当初運動を表現していた神経活動が、BMIを使用している間に直接ロボットアームの動きを表現するようになったことから、脳がBMI操作に伴って適応的に変化し、その結果として行動が変わった可能性が高い。

BMIにつながることで脳の可塑性が誘導されるとすれば、それはBMIの開発あるいはBMIを使用するヒトの心身の健康にどのような影響を与えるだろうか。まず神経可塑性はBMI開発にとって有利である。たとえば、デコーダーが多少不完全であっても、神経活動がデコーダーに最適化される方向に可塑性が働くことで実用化が容易になることが期待される。しかしながら、脳に損傷や異常をもつ患者では、健常者と同じようには可塑性が誘導されず、実用化が困難になる可能性について対策を考える必要がでてくるかもしれな

い、また BMI を日常的に使用することを考えた場合、BMI に長期間つながることで脳にどのような可塑的变化が生じるかは重要な問題である。まずポジティブな側面として、BMI をうまく使うことにより、脳に望ましい変化を誘導できる可能性がある。たとえば、BMI をリハビリテーションに応用して脳損傷後の機能回復を促進する医学的手法が提案されている(慶應義塾大学などのグループ)。他方で、神経可塑性は心身に常に有利に働くわけではないことに留意する必要がある。ネガティブな神経長期可塑性の例として、長年の道具使用に伴う可塑性の誘導により、運動・体性感覚の神経表象に変化が生じ、うまく道具が使えなくなる局所ジストニアといわれる神経疾患がある。この疾患はピアニストやバイオリニストを苦しめることで知られている。肢体切断後に生じる幻肢痛も生体にネガティブな神経可塑性とよいてよいであろう。さらには、BMI とつながった脳において「こころ」がどのように変化するかはまったくの未知である。

BMI 学習を可能にする脳可塑性仮説

BMI につながることで誘導される脳の可塑的变化への興味や重要性は、櫻井⁽²⁾や Lebedev と Nicolelis⁽¹⁾ によっても指摘されている。しかし、BMI につながることでどのように脳可塑性が誘導されるのか、そして BMI の直接操作行動がどのように獲得されるかのメカニズムは謎であり、仮説レベルでの説明も提出されていない。

脳はその誕生以来、身体センサーを介して間接的に環境から情報を受け取り、エフェクターを用いて間接的に環境に働きかけてきた。Chapin ら⁽⁵⁾や Lebedev ら⁽⁶⁾の動物実験で、身体運動と切り離されたロボットアームはどのような存在として脳に認識され、脳はそれをどのように操作しようとしたのだろうか？ この問いに答えるための具体的な実験データは存在しないが、運動学習と神経可塑性についての知識にもとづき、以下のような仮説を提出することは可能である。

BMI による直接制御条件では、レバー押しやジョイスティック運動とロボットアーム動作が切り離されている。もし、脳情報から運動を完璧に模倣できる BMI で実験していれば、動物は自分の運動とロボットアームの動作が乖離していることに気づかないまま運動を続けるはずである。しかし残念ながら現在の BMI は完全ではない。そのため運動プログラムから予測されるロボットアームの動作と、BMI によるロボットアームの動作との間には常に時空間的な解離があり、その誤差は運動プログラムの調整では縮めることができない。誤差のためにロボットアームの動作が不完全に終わり、期待した報酬が得られない場合もあるだろう。この場合、学習した運動が弱まる方向に脳の可塑性が働くと予想される。すなわち動物は学習した運動パターンを忘れていく。そして時には逆に、運動が的確ではなかったにもかかわらず、極端な場合はほとんど動かなかったにもかかわらず、偶然デコーダーにとって適切な神経活動が発生し、ロボットアームが予想外に動作して期待していなかった報酬が得られる場合があるだろう。予期せず得られた報酬は、大脳基底核による学習を強力に促進すると考えられている。まとめると、不完全な BMI 直接制御条件における神経細胞活動の可塑的变化は、運動とは無関係に、デコーダーにとって適切な神経活動が発生する方向に誘導されると考えられる。手がかりはロボットアームから得られる視覚情報と報酬の履歴である。この仮説は侵襲的 BMI 研究の実験結果をうまく説明できる。

道具学習研究からの教え

BMI につながることで誘導される神経可塑性を理解するために、今後どのような具体的アプローチが可能だろうか。BMI の学習メカニズムに迫るためのヒントは、BMI の祖である「道具」学習の研究が与えてくれるかもしれない。実験動物による BMI 研究では、動物はまず運動とロボットアームの動作の連合学習を行う。運動とロボ

ットアームの動作が連動している限り、ロボットアームは「道具」とみなすことができるだろう。そして、道具使用を学習した霊長類における一連の研究により、脳にとって「道具」は「身体」の延長と認識されることが示されている⁽⁷⁾。すなわち、手の周囲の空間を表現する頭頂間溝(上頭頂小葉と下頭頂小葉を隔てる溝)の神経細胞の活動は、手で熊手を使って報酬のエサを取る訓練の後では、熊手が届く範囲の空間を表現するように変化する。そして、この機能的変化の実態として、2週間の徹底的な道具使用訓練の後では頭頂間溝に脳灰白質の増加がみられることが示された⁽⁸⁾。この事実は、神経細胞が表現する空間が拡大するという機能的変化の背景として、道具を使用することで誘導される脳の構造的変化があることを示唆する。BMI学習に伴い、大脳皮質のどの部位にどのような機能解剖の変化が生じるかは興味深い疑問である。

また、新しい道具を使いこなす技能の獲得には大脳皮質だけでなく、小脳の働きが重要であることも示されている⁽⁹⁾。小脳では、運動プログラム情報と身体センサー信号から得られる運動誤差の情報にもとづく学習が生じ、道具を使うための運動プログラムが構築されると考えられる。また、とくに動物における学習実験では、課題の成功に伴って必ず具体的な報酬(水やエサ)が与えられ、動物は報酬を目的として行動していることも考慮に入れておく必要がある。このような報酬を手がかりとする学習には、大脳基底核の働きが大事であることがわかってきた⁽¹⁰⁾。小脳と大脳基底核は大脳皮質と神経回路を形成していることを考えると、おそらく大脳皮質、小脳と大脳基底核は、それぞれ学習の異なる側面に関わりながら、協調して道具使用の技能獲得に必要な神経可塑性を誘導していると考えられている。よく似たメカニズムがBMI学習にも関わっているかもしれない。

* *

今後、BMIと脳の可塑性の相互作用が拓く新しい未来の可能性と潜在的ダークサイドとの両方

を冷静に見つめながら、BMI研究を進めることが望ましい。まずはBMI学習のメカニズムを理解するための研究を、道具学習とのアナロジーを端緒として開始することが妥当だろう。すなわち、BMIの学習あるいは長期使用に際して、ユーザーの心身の状態を十分モニターするとともに、大脳皮質、小脳、大脳基底核の機能や構造がどのように変化するのを知ることが、BMIが私たちの脳と環境をどのように改変していくのかを予想する第一歩になるだろう。もっとも、身体性をもたない生の情報あるいは「非身体表象」を外界と交換することは脳にとって初めての経験であり、BMIには未知の学習メカニズムが関与する可能性も大いにある。このようなBMI操作のメカニズムと、非身体表象を心内で操作する過程である「思考」のメカニズムの関係も興味深い。思考が心内で「閉じた」認知過程であるのに対し、BMIは外界に対して「開いた」認知過程であるという見方も可能かもしれない。いずれにせよ、BMIが誘導する神経可塑性についての研究を進め、そのメカニズムを十分理解することが、安心・安全に使用できるBMIの開発、生体と機械が調和しながら進化・進歩する未来につながると信ずる。

謝辞 本稿の執筆に際し、貴重なコメントをいただいた国立精神・神経センターの本田学部長に謝意を表す。

文献

- (1) M. A. Lebedev & M. A. Nicolelis: Trends Neurosci., **29**, 536(2006)
- (2) 櫻井芳雄・他: プレイン・マシン・インターフェース最前線, 工業調査会(2007)
- (3) W. Gibson: Neuromancer, Ace Science Fiction (1984)
- (4) J. R. Wolpaw et al.: Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **101**, 17849(2004)
- (5) J. K. Chapin et al.: Nat. Neurosci., **2**, 664(1999)
- (6) M. A. Lebedev et al.: J. Neurosci., **25**, 4681(2005)
- (7) A. Maravita et al.: Trends Cogn. Sci., **8**, 79(2004)
- (8) M. M. Quallo et al.: Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **106**, 18379(2009)
- (9) H. Imamizu et al.: Nature, **403**, 192(2000)
- (10) K. Doya: Nat. Neurosci., **11**, 410(2008)