

ブレイン-マシン・インタフェースがしめす脳の情報表現と可塑性

櫻井 芳雄

京都大学大学院文学研究科心理学研究室

Neuronal codes in working brains remain unclear. Brain-machine interfaces (BMIs) have a possibility to actually detect them in experiments. This paper introduces some backgrounds of BMI researches in neuroscience and our recent study elucidating hippocampal neuronal codes and their dynamics with a high-performance BMI system.

Keywords: brain-machine interface, neuronal code, neuronal dynamics, plasticity

はじめに

従来、脳が表現（コード）する情報を検出することは、神経活動の意味を行動と対応させ「解釈」することであった。この方法は長年にわたり研究者に安住の地を与え、単一ニューロンの活動を解析するだけで「～をコードするニューロンが見つかった」と報告し、あるいはイメージングの画像からやや強い賦活部位を見つけるだけで「～は頭頂葉で処理されている」などと結論づけてきた。しかし、そこで示された個々のニューロン活動や相対的な賦活部位に特定の情報が内在しているという証拠はない。そもそも脳の情報がどのようなかたちで実在しているのかさえ、誰も示していない。そこで、脳に内在しているはずの情報を神経活動として実際に取り出し、実験的に操作し得るかどうかが検証することで、脳が表現する情報を明示し、その特性を捉えるようとする革新的方法が登場した。それがブレイン-マシン・インタフェース (Brain-Machine Interface, BMI) である。心が脳の情報表現であるとするならば、BMIこそが心を実体として顕示する唯一の方法であると言っても過言ではない（少し過言かもしれない）。

BMIとは何か

BMIとは、脳と機械を直接つなぎ相互作用させるシステムであり、大きく3種類に分けることが出来る（櫻井他, 2007）。脳の信号でロボットや周辺の機器を操作する運動出力型 BMI、機械の信号を脳に送り込み失われた感覚を再構築する感覚入力型 BMI（人工内耳や人工視覚など）、そして脳を刺激してその働きを補正する直接操作型 BMI（脳深部刺激療法など）である。その中でも特に運動出力型 BMIは、最近登場した新しい研究分野であり、脳の神経活動でロボットなど第二の身体や周辺の機器を直接操作することを目指している。また、脊髄を介さず脳の神経活動で身体の筋肉を直接刺激し制御することも試みられており、それはブレイン-マッスル・インタフェース (Brain-Muscle Interface、略すとやはり BMI となる)

と呼ぶこともできる。現在単に BMI と称する時、運動出力型 BMI を指すことがほとんどであるが、その進展は急速であり、特に 2007 年以降は多くの書籍が国内外で出版されている。

BMIと神経科学

BMI は神経科学の発展に伴い登場した。しかし、けっして脳の構造や働きが解明されたから登場したわけではない。この事実は、BMI 全般を理解する上で非常に重要である。たしかに長年にわたる脳の基礎的な研究があったからこそ BMI は現実化したのであり、それを可能とした神経科学の研究成果、例えば運動野や感覚野の機能地図の解明などは重要であった。しかしそれでも、運動出力型 BMI でロボットや機械を操作する際の脳内の信号の流れや、人工視覚システムにより視覚像が見えるメカニズム、あるいは脳深部刺激により運動麻痺や振戦が消失するメカニズムなどが完全にわかっているわけではない。すなわち先に述べたように、BMI は脳を解明するための方法でもある。BMI の研究が進展することで脳がわかり、脳がわかることでさらに BMI が進展するという、双方向のプロセスが必然となる。

BMIがしめす情報表現の問題

運動出力型 BMI の研究論文が学術誌に掲載され始めた 2000 年頃から、センセーショナルな新聞記事やテレビ番組が多数登場してきた。また 2003 年頃、米国の Cyberkinetics 社（当時）がそのウェブサイトで、運動野に電極を埋め込まれケーブルを接続された四肢麻痺の男性が、脳の信号でコンピュータのカーソルを動かしている臨床試験の映像を公開し、それが複数のテレビ番組でも紹介されたことから、今にも BMI が実用化されるかのような誤解が広がった。しかし 2006 年になってようやく出版されたこの臨床試験に関する論文 (Hochberg et al., 2006) を読めば、BMI はまだ基礎研究の段階であることがわかる。脳の信号で制御しているカーソルの動作はきわめて不安定であり、精度もかなり低かったのである。そしてそのような安定性

と精度の問題は、単なる実験技術の問題ではなく、神経回路網の動作や特性を解明することでしか解決出来ないと思われる。例えばその臨床試験では、BMIによりカーソルがうまく制御できる日もあれば出来ない日もあったという。電極は同じ場所に埋め込まれたままであるから、毎日同じニューロン集団から信号を検出しているにもかかわらず、総体として得られる情報の質が毎日変容するということである。この事実は、神経回路網の情報表現に関する全体論と局在論という神経科学史上の大問題と関わっており、あるいはポピュレーション・コーディング、アンサンブル・コーディング、セル・アセンブリという重要な仮説の検証とも深く関わっている。それらの解明や検証なしに安定したBMIは不可能であり、またBMIを安定させることが、それらの解明や検証に繋がるのである。

BMIがしめす可塑性の問題

運動出力型BMIについて考える時、どうしても脳から機械という一方向の作用に注目しがちである。しかし脳は機械と繋がることにより、それをより効率的に操作するため必然的に脳自身を変えていく。そのような機械との相互作用で生じる脳の変化こそBMIの本質であり、それは脳の情報表現の可塑性と、その背景にある神経回路網の可塑性を明示することでもある。また、もしそのような可塑的变化を積極的に誘導することができれば、BMIは脳の働きや構造を変えていくツールにもなり、脳を修復する神経リハビリテーションにも貢献できる。もちろんそのためには、BMIがもたらす神経可塑性に関する基礎研究が不可欠である。しかし現状では全く不十分と言わざるを得ない。特に動物を用いた侵襲式BMIの基礎研究、すなわち脳に電極を刺入し神経回路網の活動を直接検出し、そこで生じる機能的・構造的な可塑性を解析する研究の重要性は、BMIを進展させ真に実用化するためにも、いくら強調してもしすぎることはない。

BMIによるニューロン活動の変化

最近の研究から、脳の神経回路網は、BMIに繋がり外部機器を直接制御するようになると、その活動を急速に変化させることがわかってきた。筆者らは、学習による可塑的变化が生じやすい海馬を対象とし、身体の代わりに海馬のニューロン活動で外部機器を制御するBMIを構築し、そこで生じるニューロン活動の変化を解析している。

まず神経回路網の可塑的变化を詳細に検出するため、近接した多数のニューロンの活動を行動している動物から長期間安定して同時記録する方法を開発した。それらは、極細のタングステンワイヤー12本から成る特殊電極（ドデカロード）、それを自由行動時に脳

内で上下させる軽量の専用マイクロドライブ、及び、ラットの頭蓋骨に長期間固定できるポリカーボネイト製の極小ボルトなどによる方法である。また、そのようにして記録した神経回路網の活動、すなわちニューロン集団を構成する個々の近接したニューロンの活動を正確かつリアルタイムに分離するスパイク・ソーティング法を、独立成分分析（Independent Component Analysis, ICA）を応用し開発した。これらは共同研究者の高橋晋博士（現在は京都産業大学コンピュータ理工学部教員）による画期的なBMI用システムである（特許出願済み）。

このシステムを用いたBMI実験により、ラットの海馬ニューロンの発火頻度や同期発火が短時間で劇的に変化することがわかった。まずラットに、壁の穴に鼻先を入れると報酬のペレットが出るノーズポーク反応課題を訓練した。次に、海馬から同時記録したマルチニューロン活動をBMIシステムに入れ、2種類の神経コードを検出した。一つは一定時間内の発火頻度であり（発火頻度コード）、もう1つは一定時間幅でのニューロン間の同期発火である（同期発火コード）。そしてノーズポーク反応ではなく、特定の発火頻度コードあるいは同期発火コードで報酬提示装置を動かしてラットにペレットを与えた（ニューラルオペラント課題）。その結果、発火頻度コードでペレットを与えると発火頻度が急速に上昇し、同期発火コードでペレットを与えると同期発火が急速に増大することがわかった。同期発火を含むこれらの変化は、BMIに繋がった海馬の神経回路網が短時間のうちに可塑的に変化し、そこに機能的再編成が生じていることを示唆している。

おわりに

BMIが明らかにするはずの脳の情報表現と可塑性は、まだその姿をほとんど現していない。今後も基礎研究に立脚し、長期的な展望に立ち着実にその姿を明らかにしていかなければならない。荒唐無稽なサイエンス・フィクションと考えられていたBMIが神経科学の対象となってから、たった10年ほどしか経っていない。私達はまだ脳とBMIという難問の入口に立っているに過ぎない。

引用文献

Hochberg, L.R., Serruya, M.D., Friehs, G.M., Mukand, J.A., Abraham, M.S., Caplan, H., Branner, A., Chen, D., Penn, R.D., & Donoghue, J.P. (2006) Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia. *Nature*, 442, 163-169.

櫻井芳雄・八木透・小池康晴・鈴木隆文（2007）ブレインマシン・インタフェース最前線。東京，工業調査会。