

# 医療応用の実現に向け 産学で加速するBCI研究

●執筆  
東京大学医学部附属病院老年病科  
紺野 大地  
大阪大学高等共創研究院 教授  
柳澤 琢史

米国の実業家イーロン・マスク氏が率いる Neuralink は 2021 年 4 月に、同社が開発したデバイスを脳に埋め込まれたサルが脳活動だけでピンポンゲームをするデモを公開した (YouTube, <https://bit.ly/3GrZsLR>)。同社は 2016 年に創業後、数百億円の資金を調達し、驚異的な速さで Brain-Computer Interface (BCI) の開発を進め、数千チャンネルで脳活動を計測・刺激できるコイン程度の大きさのデバイスを実現した。

これらの技術は 1990 年代から着実に開発が進んできた BCI 技術の延長ではあった。しかし、脳に自動で大量の電極を植え付ける手術ロボットや、省電力で高性能な埋め込み型装置、実用化への明確なプランなどが、Tesla や SpaceX など経営する同氏に対して抱くブランドイメージや、「人が AI と一体化する」という未来予想とも合わさり、大きな話題となった。

2021 年には、臨床応用をめざす侵襲型 BCI の研究開発でも大きな進展が報告された。特に深層学習 (Deep Learning) などの AI 技術を用いて、人が頭の中で思い浮かべた言葉を脳から高精度かつ高速に読み出す技術の進展は、重度麻痺患者の意思伝達を BCI によって実用的なレベルで再建できるターニングポイントとも言え、BCI の臨床応用の現実性を高めている。

本稿では侵襲型 BCI を中心に過去のマイルストーンとなる研究を振り返るとともに、近年進歩が目覚ましい侵襲型 BCI の最新研究を解説する。そ

して、BCI に関する日本の現在のプロジェクトを紹介したい。

## 侵襲型/非侵襲型 BCI それぞれの特徴は

BCI とは、脳と機械を直接つなぎ、脳情報の読み取りや書き込みを通じて脳機能を補填・増進させる技術の総称である (図 1)。例えば重度の運動麻痺がある患者でも、念じるだけでロボットアームや車椅子を動かしたり、コンピュータを制御して意思を伝えたりできる技術として臨床応用が期待されている。

BCI は脳情報を読み取る手段により、①侵襲型 BCI と②非侵襲型 BCI の大きく 2 つに分類される (図 2)。侵襲型 BCI とは、脳信号の記録に手術を必要とするタイプであり、微小な剣山状電極を脳に刺入するタイプと皿状電極を脳表や硬膜外に置く低侵襲のタイプ (皮質脳波, Electrocorticography: ECoG) が一般的である。侵襲型 BCI は手術を必要とする代わりに記録できる脳信号の質が良く、また近年の AI 技術や体内埋め込み型デバイスの発展により、高い精度の脳情報を得られるようになったことから、医療応用が現実的な段階となっている。

一方、手術を必要としない非侵襲型 BCI は、頭皮脳波 (Electroencephalography: EEG) や磁気共鳴機能画像法 (functional Magnetic Resonance Imaging: fMRI)、脳磁図 (Magnetoencephalography: MEG) などが用いら

れる。非侵襲型 BCI は既にリハビリテーションなどに用いられ、本邦の「脳卒中治療ガイドライン」でも紹介されるようになった。

## 歴史に見る BCI 研究 2つのブレークスルー

侵襲型 BCI の研究は、運動に関連する基礎的神経科学の研究から発展した研究と、医療応用を見据えて Neural Decoding を基盤として発展した研究の 2 つに大別できる。図 3 の通り、1986 年に Georgopoulos らは運動野の神経発火頻度と上肢の運動方向との関係を明らかにし、神経発火頻度に応じたベクトルの集合で上肢の運動方向を推定できると示した<sup>1)</sup>。BCI 研究の幕開けとなるブレークスルーである。さらに Chapin らは、ラットが運動野の神経活動を制御して、自らが体を動かさずに機械を動かす学習ができると示した<sup>2)</sup>。これらの基盤的研究を受けて、2000 年にはサルが念じるだけでロボットアームを操作してジュースを飲むことに成功し<sup>3)</sup>、2006 年には脊髄損傷患者が BCI を利用してコンピュータを操作できたと報告された<sup>4)</sup>。

いずれの研究も微小な剣山状電極を用いて神経細胞一つひとつの活動を計測することで高精度な運動情報を抽出し、高性能な BCI を実現している。しかし、剣山状電極の大きな課題は侵襲度の高さにある。微小な電極であるが、感染症や血管損傷のリスクがある他、時間の経過とともに電極自体の劣化や電極周囲の炎症反応のために、信号が劣化しやすい問題点もある。実際、これまでにヒトを対象に利用された場合の多くで、電極の劣化を受けて数年で抜き取られており、臨床で安定して利用できないことが課題となっている。

そこで 2010 年代以降、侵襲型 BCI 研究のブレークスルーを後押ししたのが AI 技術の進化だ。侵襲度の高さによるデメリットを補うため、より侵襲度の低いシート型の皮質脳波に、AI

技術に基づく Neural Decoding を用いた手法が臨床応用を見据えて研究されてきた。皮質脳波は直径 1~3 mm ほどの電極をシート状に配置し、脳表に留置することで、神経活動を記録する。剣山状電極に比べると脳への損傷が少なく信号の安定性が高い<sup>5)</sup>。それに加え、広い範囲の脳活動を一度に計測できるメリットがある。剣山状電極に比べて得られる脳情報の質は低下するが、Neural Decoding を使うことで、より多くの情報を抽出できる<sup>6)</sup>。信号としては頭皮脳波に近く、重症 ALS 患者に対する頭皮脳波 BCI の知見を応用できるメリットもあった<sup>7)</sup>。

実際、2008 年から日本で行われ、現在は日本医療研究開発機構 (AMED) が事業を担う「脳科学研究戦略推進プログラム」では、皮質脳波に Neural Decoding を適用することで、麻痺患者がロボットを制御できると示された<sup>8)</sup>。これらの研究は、当初から臨床応用を強く意識した開発がなされた点の特徴である。2016 年には、脳深部刺激療法 (Deep Brain Stimulation: DBS) 用の埋め込み型デバイスを用い、運動野から記録した皮質脳波を介して、ALS 患者が念じるだけで文字入力ができたと報告されている<sup>9)</sup>。また、同装置は長期安定して利用できると報告された<sup>9)</sup>。さらに 2019 年には、脊髄損傷患者の硬膜外に留置する長期埋め込み型の皮質脳波計が開発され、長期間の訓練により外骨格ロボットを制御して 3 次元の腕運動や歩行機能などを再建したとの研究が発表された<sup>10)</sup>。

## 産業界を巻き込み 研究と開発が進展か

このように侵襲型 BCI の臨床応用に向けた研究は基礎と臨床の両面から着実に進んでいる。さらにこの 1~2 年で革新的な成果が立て続けに発表されている。2021 年 5 月に Willett らは、神経活動から高速・高精度に文字を推

図 1 脳と機械をつなぎ脳機能を補填・増進させる BCI

脳や脊髄などと BCI の接続には、①出力型、②入力型、③双方向型の 3 パターンがある。①の出力型では主に運動機能や言語機能の再建 (例: ロボット制御、文章翻訳など)、②の入力型では感覚機能の再建 (例: 人工内耳や人工網膜) がめざされる。③の双方向型は、てんかんやパーキンソン病など神経精神疾患の治療に応用が期待される。

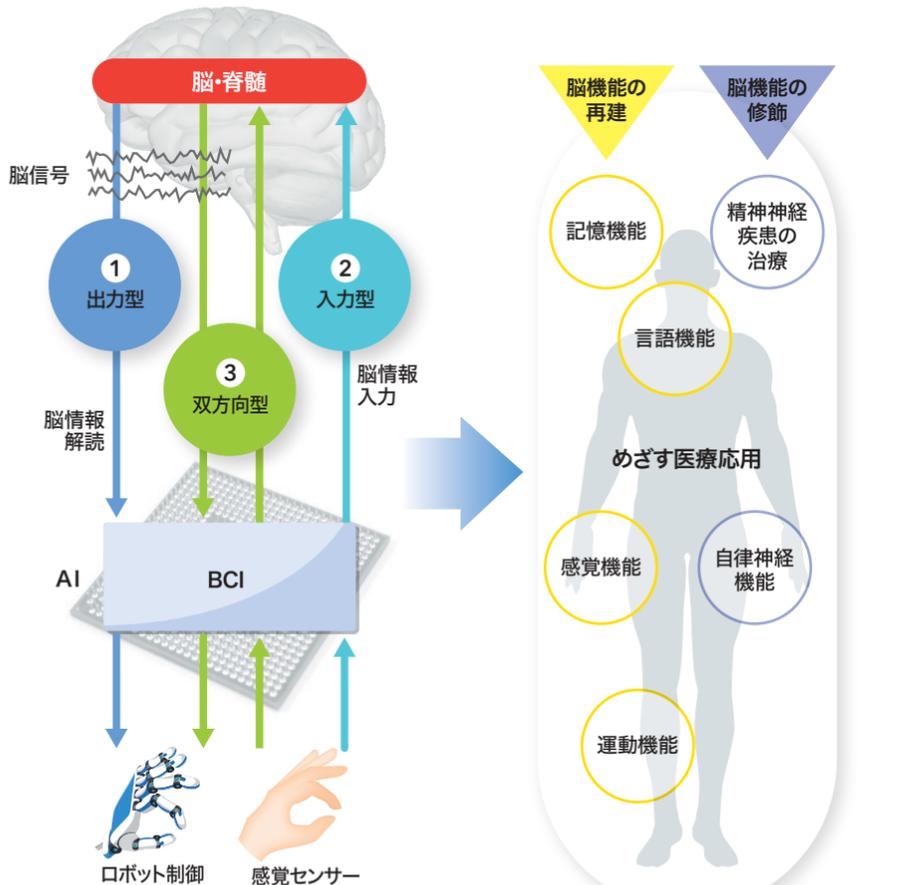


図 2 BCI の主な分類

侵襲型と非侵襲型の 2 つに大別される。脳への書き込みでは、脳への適切な刺激によって狙った運動や感覚を生じさせる。一方、脳情報の読み取りは近年、AI の利用により高精度に行えるようになってきている。読み取りと書き込みを同時に行う閉回路型双方向 BCI の研究も進む。

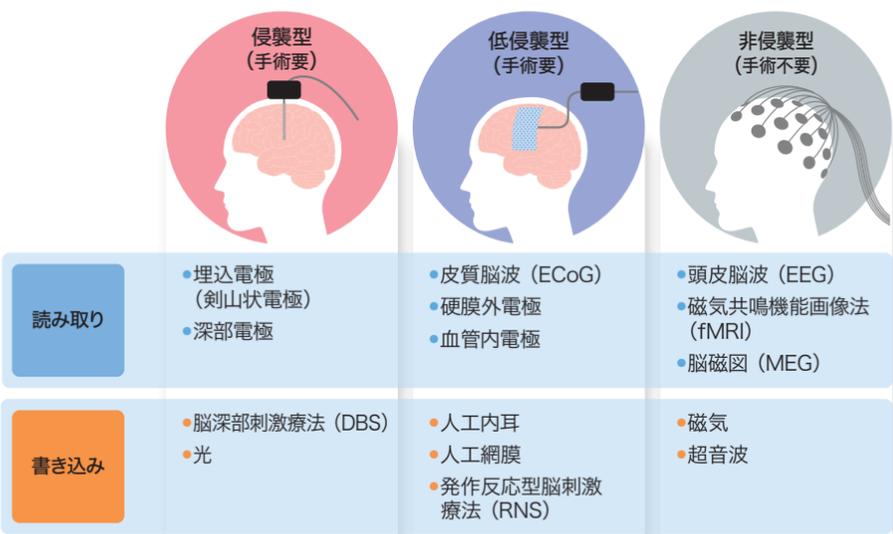


図3 侵襲型BCI研究の歴史

1980年代の神経発火原理の解明に始まったBCI研究は、AIが登場した2010年代以降、解読の精度が飛躍的に向上。深層学習 (Deep Learning) の発展による高精度で高速な意思伝達や、感覚再建の臨床応用に向けた研究が加速している。



定し単語を出力できることを報告した<sup>11)</sup>。その内容は、脊髄損傷による四肢麻痺患者の脳に192本の針型電極を埋め込み、被験者が頭の中で想像している文字を神経活動から推定するものである。リアルタイムの推定精度は94%に到達し、速度は毎分90文字を達成した。これは従来の針型電極における最高速度 (毎分40文字) を大幅に上回っており、一般人におけるスマートフォンの入力速度が毎分115文字程度であることを考えても、大きなブレークスルーと言える。

皮質脳波においても、2021年7月に目をみはる成果が報告された (図4)<sup>12)</sup>。この研究では、脳幹梗塞により重度の構音障害と四肢麻痺がある患者の運動野にシート状脳表電極を埋め込み、患者が発声しようとしている単語を皮質脳波からAIで翻訳した。翻訳速度は毎分15.2単語 (文字数ではなく単語数である点に注意) であり、皮質脳波を用いた研究では本稿執筆時点で最高の性能である。

この他にも、神経活動をもとに操作したロボットアームの動きを一次感覚野に電気刺激としてフィードバックする双方向型BCIにより、操作性能を向上させたとする報告<sup>13)</sup>や、電気活動ではなく超音波で記録した脳活動データを用いたBCI<sup>14)</sup>など、全く新

しいタイプのBCIも生まれつつある。

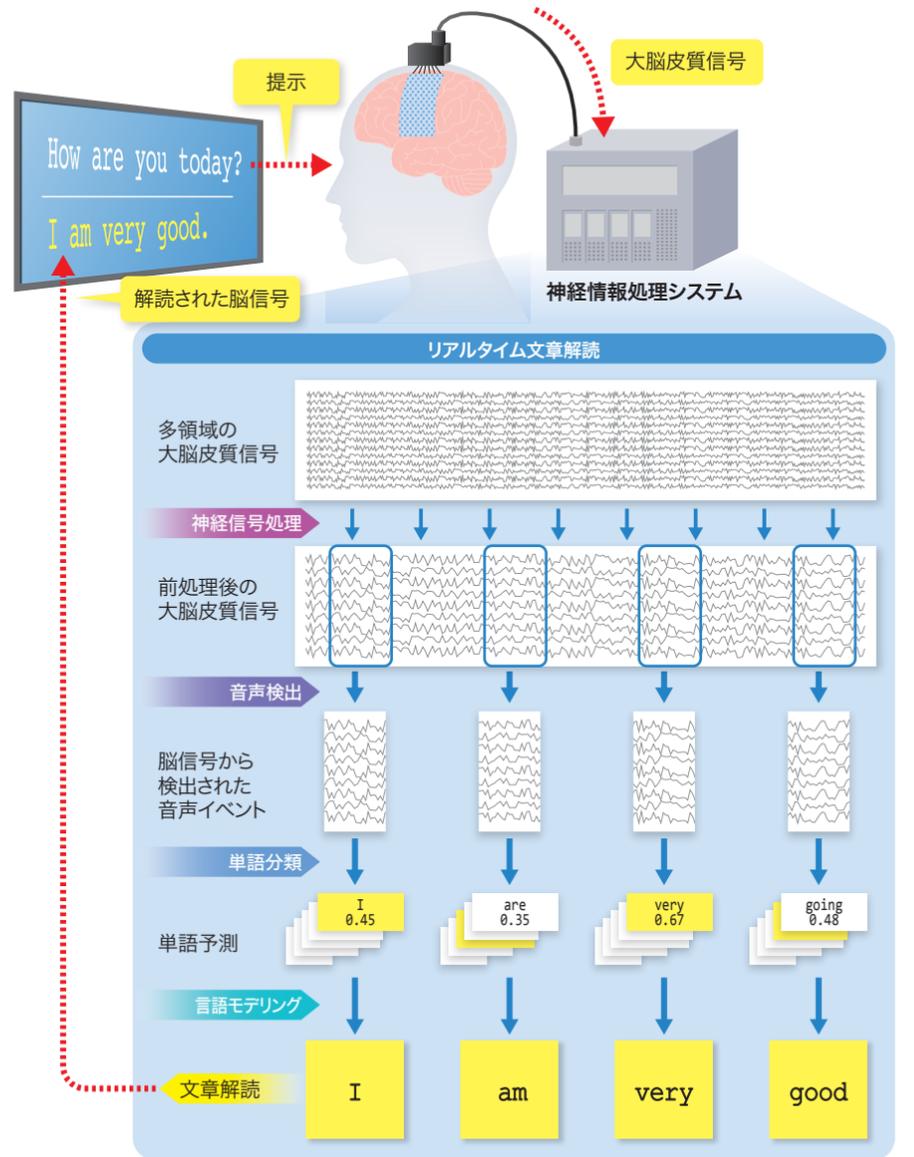
さらに近年は、アカデミアのみならず産業界の進歩も目覚ましい。産業界におけるBCI研究の中心にいる企業が、冒頭に紹介したイーロン・マスク氏設立のNeuralinkである。彼らは従来よりもはるかに質の高い針型電極を作り上げ、さらにはその電極を自動で埋め込む手術ロボットまでも開発している。これまでのBCI研究で用いられていた針型電極の数は100本前後であったが、Neuralinkは1つのチップに数千個の電極を含むデバイスを作り上げ、さらにそれを複数個埋め込むことで合計1万以上の電極から神経活動を記録することを技術的に可能にした。

脳に電極を埋め込んだサルが人工知能の力を借りて、念じるだけでピンポンゲームをプレイした結果自体は科学的に新しいものではない。しかし、将来の臨床応用を見越した上での各種デバイスの設計や、進捗のスピード感は産業界ならではの進歩と言えるだろう。

Neuralinkに限らず、近年では米Kernelや米豪に拠点を置くSynchronのようにBCI研究に力を入れる企業が増えている。BCI研究はこの先アカデミアの中だけでなく産業界をも積極的に巻き込み、ますます進展すると期待される。

図4 脳幹梗塞患者の皮質脳波から言葉を翻訳する研究 (文献12より作成)

脳幹梗塞により重度の構音障害と四肢麻痺がある患者にシート状の脳表電極を埋め込み、患者が発声しようとする単語を神経活動から翻訳することに成功した。翻訳速度は毎分15.2単語と、皮質脳波を用いた研究では最高を記録した。



### 日本のBCI研究の展望と熟考すべき倫理的課題

世界的なBCI研究の状況をここまで紹介してきた。翻って日本におけるBCI研究の現在地はどうか。

まず注目すべきは、科学技術振興機構 (JST) が推進し、2020年より始まったムーンショット型研究開発事業の一つ、「身体的能力と知覚能力の拡張による身体の制約からの解放」だろう。従来技術の延長ではない、より大胆な発想に基づく挑戦的な研究開発 (ムーンショット) を日本から生み出そうとする内閣府主導のプロジェクトであり、BCI研究におけるイノベーションを目標としている。同プロジェクトには、サルやマーモセットなどを用いた実験に始まり、BCIの数理的側面に主眼を置いた基礎研究や、人間における臨床応用を目標とした研究などさまざまな領域の研究者が参画している。特に、体内埋め込み型デバイスを用いた侵襲型BCIを日本の臨床で実際に利用することを目標としている点は特筆に値し、同プロジェクトから果たしてどのような成果が生まれるのか、数年後を期待して待ちたい。

また、より基礎研究に近い領域では、JSTの戦略的創造研究推進事業 (ERATO) 「脳AI融合プロジェクト」も進行中である。人工知能を用いて脳の新たな能力を開拓し、脳の潜在能力を見極めることを目的としたプロジェクトであり、将来的にBCI研究につながる成果が生まれることが期待される。プロジェクトでは、マウスやラットが自らの神経活動のみならず、血糖値や体温をコントロールできるかという野

心的な課題にも挑戦する。もしこれらが実現されれば、幅広い臨床応用の可能性が生まれ得る。

BCI研究はこのように大きな可能性を秘める分野ではあるが、将来的な医療応用を考えた場合には倫理面の熟考が不可欠である。先ほど紹介したムーンショット型研究開発事業では、BCIの有効性や安全性について科学的なエビデンスを取りまとめたガイドラインの策定に向け活動を開始している。BCIのメリットだけでなくその危険性も含めて議論を行うことは、BCIの将来を考える上で待ったなしの課題と言えるだろう。

#### 参考文献

- 1) Georgopoulos AP, et al. Science. 1986 [PMID: 3749885]
- 2) Chapin JK, et al. Nat Neurosci. 1999 [PMID: 10404201]
- 3) Wessberg J, et al. Nature. 2000 [PMID: 11099043]
- 4) Hochberg LR, et al. Nature. 2006 [PMID: 16838014]
- 5) Chao ZC, et al. Front Neuroeng. 2010 [PMID: 20407639]
- 6) Kamitani Y, et al. Nat Neurosci. 2005 [PMID: 15852014]
- 7) Vansteensel MJ, et al. N Engl J Med. 2016 [PMID: 27959736]
- 8) Yanagisawa T, et al. Ann Neurol. 2012 [PMID: 22052728]
- 9) Pels EGM, et al. Clin Neurophysiol. 2019 [PMID: 31401488]
- 10) Benabid AL, et al. Lancet Neurol. 2019 [PMID: 31587955]
- 11) Willett FR, et al. Nature. 2021 [PMID: 33981047]
- 12) Moses DA, et al. N Engl J Med. 2021 [PMID: 34260835]
- 13) Flesher SN, et al. Science. 2021 [PMID: 34016775]
- 14) Norman SL, et al. Neuron. 2021 [PMID: 33756104]