

2.5.5 BMI・BCI

(1) 研究開発領域の定義

Brain Machine Interface (BMI、あるいはBrain-Computer Interface : BCIはほぼ同義で使用される) は、計算機科学やロボティクスなどの発展に伴って2000年前後から急成長した脳科学・神経科学の新しい研究分野である。脳の情報をリアルタイムに読み取って、伝達したり何らかの変換を加えることを基盤とした研究であり、心身機能の補綴や改善といった応用を志向したものが多い。理工学、医学、数理統計学、心理学などの多分野の知見と技術を結集する融合型分野であり、今後、人工知能やICT技術と結びつくことで新しい展開が期待される。教育・医療・経済等への応用にむけ、国内でも産業界を巻き込んだ研究開発体制が求められる。

(2) キーワード

脳情報通信、脳機能制御、人間拡張、サイバネティクス、ニューロインフォマティクス、可塑性、学習、ニューロリハビリテーション、ニューロマーケティング、人間理解

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

人間の脳には、五感を通じて絶えず外界から様々な入力を与えられる。脳はここから意味のある情報を取り出して、自身の行動規範に照合したり、過去の記憶と照合したりする。その結果を基に、最終的には自分自身や外界を認知したり、行動をとったりする。このようなinput-outputモデルと別に、脳自体が内因的に多様なダイナミクスを創発していて、これが意識や気分や性向を生み出している要素もある。いずれにせよ、脳は多次元、非線形、時変なダイナミカル・システムである。こうした一連の過程をモデル化して、その表現の一部を計算機に肩代わりさせる仕組みをBrain-Machine Interface (BMI、あるいはBrain-Computer Interface : BCIはほぼ同義で使用される) と呼ぶ。複雑な脳内情報処理過程をモデル化する部分においては、データサイエンス (人工知能分野) の活用が大きな成功を納めている。

脳の運動情報処理に媒介してロボットアームやロボットレッグを円滑に操作するサイボーグ技術、マイクロフォンやカメラなどの機械センサを脳の聴覚系や視覚系にインプットする感覚補綴、脳内の情報処理過程に仲介してその演算を効率化させるニューロモジュレーション技術 (の一部)、失われた神経ネットワークを再建する人工神経接続技術など、生物器官の機能不全や欠損に対する工学的なソリューションとして、一部は既に革新的な医療機器としての実用化が進んでいる。医療だけでなく、福祉、ヘルスケア、スポーツ領域への応用が期待されており、スタートアップ業界でBrainTechは大きな流行を見せている。

こうしたアプローチは一部で、生物が本来持っているスペック以上の能力を引き出すエンハンスメントに応用されたり、生物が本来備えていない器官の機能を機械的に付与する人間拡張技術として研究されたりしており、倫理的、法的、社会的な議論を呼んでいる。このような研究開発にともなって、人間の脳が持っている「適応能力」の高さが明らかになったり、その適応能力を操作する方法が明らかになりつつある。このようにBMI技術は、「脳とは何か」「人間とは何か」を知るための、新しい科学的方法としても注目を集めている。

[研究開発の動向]

BMIを構成する個々の要素技術の開発状況について概説する。

2.5

【脳活動のセンシング技術】

BMIで用いられているセンサ技術には、頭皮脳波 (Electroencephalogram: EEG)、硬膜電極 (Electrocorticogram: ECoG)、微小電極アレイ (Microelectrode Array: MEA)、近赤外分光法 (Near Infrared Spectroscopy: NIRS)、脳磁図 (Magnetoencephalogram: MEG)、機能的磁気共鳴画像法 (functional Magnetic Resonance Imaging: fMRI) がある。このほかに、光ポンピング磁力センサ (Optically Pumped Magnetometer: OPM) が近年、新しいコンセプトによる高感度センサ技術として注目を集めている。MEGとMRIはノイズシールドが施された特殊な室内閉鎖環境でのみ利用が可能だが、OPMは通常環境で利用でき、頭蓋骨による信号減衰を受けない磁場信号を利用できるため、その応用可能性は高いと目されているが、装置は依然大型で、信号特性や他のセンサ技術との排他的優位性に関する評価はこれからである。測定方法上の改良や新提案に関しては頭皮脳波とMRIで精力的に進められており、頭皮脳波に関しては、1024極にのぼる高密度化、fMRI (機能的磁気共鳴画像法) との同時計測、脳磁気刺激との併用、スポーツなどの粗大運動中での安定計測などが実現した。MRIについてもMRS (磁気共鳴スペクトロスコピー) を利用し、可塑性を制御する因子と考えられているE/Iバランスの測定や、DTI (拡散テンソル画像法) による構造ネットワーク解析をはじめとして、脳の機能や構造に関する様々な情報を読み出すことが可能になってきた。身体に電極を埋め込むタイプのセンサについては、無線給電とワイヤレス通信機能を搭載し、適正なエネルギー消費を実現させたデバイス (Neural Dust¹⁾)、超細密に多極の電極を集積化させた電極 (Neuropixels²⁾)、ステント状の電極を開頭手術せずに脳血管内に留置して脳情報を読み出すもの³⁾、埋植術式の標準化とユーザビリティ開発を進めた電極など、新しいコンセプトが誕生している。

【デコーディング技術】

脳情報の読み出し方のアプローチには、幾つかの異なる方式がある。1つめは古典的な生理学研究の積み上げによって明らかにされてきた知識に基づく信号分析方法である。科学的な裏付けは強固だが、実験室という特殊環境、人工的な実験課題、実験後に丁寧な解析パイプラインを適用した後のオフライン解析結果、均質でしかも人数が限られた被験者集団の集合データという限定的な条件の下で見出されたモデルであるため、BMIが要求する「自由環境で、個々人に適応し、オンラインでただちに脳情報を読み出す」という条件でも成立するかどうかは不透明であり、オンラインノイズ除去、適応フィルタなどの技術開発が進められている。また、読み出した脳情報のメディカルグレードでの検証も進められており、fMRIや経頭蓋磁気刺激法そのほかの電気生理学的手法によってその正しさが証明され始めている⁴⁻⁷⁾。

二つ目の方法は、データ駆動的に脳情報を読み出す方法である。大量の脳データを収集してこれを訓練データとし、データから脳情報を読み出すための計算式を機械学習によって組み立てるものである。大量のデータを、施設、技術者、装置などの差異 (サンプリングバイアス) なく統合して分析する必要があり、データの調和に必要な技術開発が進められている。これまでの生理学研究の積み上げではなし得えなかった発見の可能性を秘めている⁸⁾。

三つ目の方法は、前2者の混合方式である。生理学研究によって明らかにされた脳内情報処理プロセスを前提に置きつつも、大量の脳情報を収集、適用して、モデルパラメータの調節を施すものである。生理学的なモデルの信頼性が高い場合には、非常に効率良いデコーダが構築できる^{9), 10)}。

いずれのケースにしても、BMIによって実現しようとしているアプリケーションが、実用上問題ない程度にリアルタイムに動作したときに初めて、BMI内部に構築した脳情報デコーダのモデルの正しさが証明される。少なくともそのアプリケーションの範囲において、脳の情報処理過程をコンピュータで置き換えられたという

ことになる。その意味において、BMIは実証型の脳科学研究ツールといえる。

BMI・BCIについては、様々な分類がなされているが、ユーザーの視点から、active / reactive / passive という分類についてここでは言及しておく。Activeは、BMIのユーザーが、意図的に、脳活動をコントロールして、つなげられたデバイスを操作しようとするものである。例えば、右手の動きをイメージする、計算をイメージするといったことにより、ロボットアームや車椅子が、予め各脳活動パターンに（機械学習などで）対応づけられた方向に動く。Reactiveは、注意を向けている文字がフラッシュしたら脳が反応する、といったように、外部の刺激と連動して意図を汲み取るものであり、P300やSSVEPといった比較的安定的に検出される脳波の特徴を使用したBCIスペラーなどがその例である。Passiveは、脳の自然な活動を読み出すものであり、ユーザーが意図せずとも、その意図を脳活動から直接汲み取ることを目指す。これが理想的なBMIであり、これが実現できることはすなわち、脳の情報処理過程を正しく理解できていることを示すことでもある。

【刺激技術】

脳情報を解読した結果について、フィードバックする手法としては、視覚や聴覚、触覚といった人間が本来持つ感覚を介する方法もあるが、脳や神経を直接刺激する方法が考えられている。脳につながったロボットハンドの感じた触覚情報を、我々は直接知ることができないが、ロボットハンドに取り付けたセンサー情報に基づいて、感覚神経や脳の体性感覚野を刺激することで、感覚入力を代替することができる。これにより、出力と入力を繋いだクローズドループのBMIを構築することが可能になる。また、脳の状態に応じて脳を刺激するBrain-State Dependent Stimulationも、刺激による効果を促進する方法として注目を集めつつある。これらに使用される刺激技術についてもここ数年で大きく開発が進んでいる。

- ・皮質への電気刺激：皮質に刺入した針電極や、硬膜下に留置した電極などで、皮質を電気刺激する手法である。それにより直下の神経細胞を興奮させ、例えば一次感覚野の手の領域を刺激すれば、手を触られた感覚を誘発することができる。ECoGデータに基づいて刺激するといったclosed loopのECoG-BCIsも考案されつつある¹¹⁾。
- ・DBS（脳深部刺激）：視床や基底核などの脳の深部に電極を入れて刺激するもので、パーキンソン病や振戦の改善に使われてきた。外部から人が刺激のオンオフをしてきたが、筋電図などの神経信号を検出して刺激がオンオフされるようなオンデマンド型の開発が進んでおり、BMI/BCIといってもよい。
- ・TMS・rTMS（経頭蓋磁気刺激）：頭皮上に置いたコイルで磁場を発生させ、脳内に電流を誘導させ脳内のニューロンを刺激する非侵襲刺激方法である。ニューロンを一過的に興奮させる単発刺激に加え、反復して刺激することでその周辺のニューロンの興奮性を数十分から数時間の間変化させることができ、また、それが可塑性を誘導することが知られている。これまでは、事前に決めたタイミングで刺激する手法が主であったが、最近では、脳波など、脳活動を計測しながら脳波のタイミングや振幅に合わせてクローズドループで刺激する技術が開発され、より効率的に可塑性や行動変容を誘導できることが示されつつある¹²⁾。
- ・tES（経頭蓋電気刺激）：頭皮上に電極パッドを配置し、微弱な電流を流すことで、その間にある脳部位にモジュレーションを加える手法である。経頭蓋直流電気刺激に始まり、ランダム刺激、交流刺激、交流刺激をAM変調させた刺激など、様々なバリエーションが試されている。電気刺激はEEGのアーチファクトとなるが、最近ではアーチファクトに対処することでEEG-tACSのクローズドループ刺激も試みられつつある。

2.5

【BMIのアプリケーション】

次に、BMIのアプリケーション開発について概説する。

- ・ BMIを用いたリハビリ研究が進んでおり、手指の運動をアシストするロボティクスをBMIによって駆動する研究については、10報前後のランダム化比較試験（RCT, 患者例を介入群と対照群に無作為に配置して治療効果を検証する臨床研究）が世界で実施され、3報のメタアナリシスで、麻痺上肢の機能改善に対する有効性が示された。
 - ・ 脊髄損傷後の歩行再建として、脳からのシグナルを脊髄への電気刺激に変換して送達する研究も進展しており¹³⁻¹⁵⁾、薬剤や細胞移植による組織復元との併用が視野に入っている。
 - ・ BMIによってロボットハンドを操作し、ロボットハンド側のタッチセンサ信号を皮膚や大脳皮質感覚野への刺激としてフィードバックすることで、脳による精密なハンドのクローズドループ制御が可能にする研究が進められている¹⁶⁾。
 - ・ 精神疾患治療：精神疾患や発達障害の治療には、1960年ごろから脳波によるニューロフィードバックが試みられており米国ではADHDの治療として承認されているが、効果に個人差がある、導入に時間と手間がかかるといった理由から、日本では一般的な治療法とはなっていなかった。しかし、最近、より空間解像度の高いfMRIとデコーディング技術を応用したdecoded neurofeedback（DecNef）によって、ASDやPTSD、強迫神経症などの精神疾患に効果があることが示されている。原理としては、脳がたまたま望ましい状態になった時に報酬を与えることでその脳の状態を取るように仕向けるという脳の強化学習のメカニズムを活用したもので、脳の状態を判別する点、それをフィードバックする点でクローズドのBCI的な手法といってよいだろう。この技術は日本発であり、現在AMEDのサポートなどを受け精力的に開発が進められている。これらは、非侵襲的な計測方法と脳の学習メカニズムを利用するものであるが、デコーディングと脳深部刺激を利用する方法も検討されている。具体的には、前頭前野から感情状態（affective state）を読み取って、辺縁系に埋め込んだ深部電極の刺激を制御することで、精神疾患でうまくいかなかった前頭前野の感情制御を補助しようという試みである（affective BCI / emotional prosthesis）¹⁷⁾。心の状態を正確に読み出し、それを様々な手段と組み合わせてクローズドループを形成することで、精神疾患の治療に新しい流れが産み出されるのは確実であろう。一方で、我が国では1975年に日本精神神経学会が「精神外科を否定する決議」を可決しており、約半世紀の時を経た現在の社会がこの研究潮流をどのように受容するか、慎重な倫理的検討が必要である。
- これらの高度な技術や装置と並行して、簡便で低価格な脳波計やそれによるニューロフィードバックアプリが、マインドフルネス瞑想のブームにも影響され、市場に出回りつつある。しかし、プラセボ効果でないことが厳密に検証されているとは言い難いものが多い。
- ・ 疼痛治療：幻肢痛や慢性疼痛などの、脳に起因する痛みに対する治療への応用が試みられている。柳澤らは、MEGを使ったBCIによって、運動野の活動から幻肢をコントロールすることで幻肢痛が軽減されることを示した¹⁸⁾。また、慢性疼痛については、DecNefを用いた治療に向けての研究が進められている。
 - ・ マーケティング：人が商品を選ぶ時、言葉で説明できるような気持ちより無意識な印象で決めていることが多い。このような無意識な過程を知るには脳から直接情報を取り出すしか方法がないため、BMI/BCIの技術が盛んに用いられるようになっている。ニューロマーケティングには、コストの面から脳波を利用するケースが多いが、脳情報通信融合研究センター（CiNet）とNTTは共同でfMRIとデコーディング技術を利用しTVコマーシャル視聴時に感じている印象を読み取ることに成功している。
 - ・ 意識状態の確認：運動出力ができない状態になってしまった意識障害者の意識状態について、植物状態

なのか、最小意識状態（部分的に自己または周囲を認識していると考えられる状態であり、そうでない植物状態より改善の可能性が高い）なのかを判別することは、その後の医療の方針を決めるのに重要である。しかし、その判断は難しく、間違えることも多いと言われており、その一つの手段として、外部入力（音声入力など）に対する脳活動の変化の有無を検出する試みが始まっている。fMRIや脳波のBCIを利用することで、植物状態であると思われていた人が最小意識状態であることが確認され、yes-noの意思が伝達できたといった結果も報告されている。

- ・BCIスペラー、スピーチ生成：ALSや筋ジストロフィーなどの疾患により運動出力が全くできなくなってしまった状態をLocked in（閉じ込め症候群）というが、BCIスペラーは、このような人々のコミュニケーションツールとしてBCI研究の当初から研究テーマの中心的存在であった。その精度とスピードを向上させるために、世界の研究者たちがしのぎを削ってきた。現在、BCIはスペラー以外にも様々な応用が進んでいるが、スペラーの臨床応用についても、継続的に進められている。BCIの当初からスペラーに関わってきたWolpawらは、Wadsworth BCIというシステムを構築し、ALS患者に18ヶ月、脳波のP300を利用したスペラーを自宅で使ってもらいその有効性を検証している¹⁹⁾。また、日本では理研のRutkowskiのグループが、様々な手法でスペラーの精度とスピードアップを試みている。BCIスペラーは、実用性から脳波を、また精度の良さからP300やSSVEPを使用するものが多い²⁰⁾。一方で、Changらのグループは、ニューラルネット（LSTM）を利用して運動性言語野のECoG記録からスピーチを再構成し、注目を集め²¹⁾、またFacebookはこのグループと共同で、高速スペラーの開発プロジェクトを発表している²¹⁾。インプラントでの臨床研究も、欧州（オランダ²²⁾）や米国（ピッツバーグ²³⁾）で進んでいる。とくにピッツバーグでは、埋め込み型の電極でロボットを操作したり、ロボットの触覚を電気刺激でフィードバックするなどの試みがLocked in患者を対象に試験的に実施されている。
- ・BMIは欧州でBNCI（brain/neuronal computer interaction）と概念を若干拡張させて考えられている。すなわち、脳から発出されたシグナルを筋電図などで下流で検波したものも脳情報をふんだんに含んだものである（だから筋電制御タイプのデバイスも広義の意味でBMIである）、という捉え方である²⁴⁾。生体電気信号に応答して動作するロボティクスであるサイバーダイン社HALやメルティンの研究開発プロジェクトはその範疇であり、成長性や市場性が期待されている。海外では依然としてg.tec（オーストリア）とBrain Products（ドイツ）がアカデミア市場で一定のBMIマーケットを確保している。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

- ・BMIは、生物器官の機能不全や欠損に対する工学的なソリューションとして医療展開が進められているが、福祉（補装具）、ヘルスケア（脳状態のコンディショニング、トリートメント）、スポーツ領域（パフォーマンスが最大化される「ゾーン」状態への誘導や、状態を好調期に誘導する「ピーキング」）への応用が期待されている。これらのアプローチの一部では、生物が本来持っているスペック以上の能力を引き出すエンハンスメントに応用されたり、生物が本来備えていない器官の機能を機械的に付与する人間拡張技術としての展開が始まっている。このような研究開発にともなって、人間の脳が持っている「適応能力」の高さが明らかになったり、その適応能力を操作する方法が明らかになったりしつつある。脳は、容れ物である身体構造に拘束されて、本来持っている能力に制限がかかっている可能性がある。たとえば先天性奇形である6本指（多指症）を脳は滑らかに制御する例²⁵⁾、腕神経叢損傷に対する副神経や肋間神経移植（すなわち生物学的には不自然な神経再配線）では劇的な運動機能回復がもたらされる例²⁶⁾、

2.5

俯瞰区分と研究開発領域
基礎・計測技術
基礎・計測技術

若年期にてんかん発作で脳を半分切除しても遜色ない脳機能を回復する例²⁷⁾ など、驚異的な脳の可塑性を示した事例は豊富に存在する。身体制約のみならず、脳そのものの配線特性も脳機能の特徴づけていることが知られており²⁸⁾、頭部外傷後に脳内の機能結合が変化して後天性のサヴァン症が発症する可能性があることを考えると、このような非定型機能結合が高い創造性を生んでいる可能性がある。このような視点から、BMIによる脳機能配線の改変と人間拡張は情報系 (human-computer interaction, HCI) を中心に関心が高まっている。HCIは、これまでは人と機械が接触する境界を対象とし、心理学や認知科学の応用という側面があり、分野を横断しながら相互発展してきた歴史がある。今後は、BMIも含めたHCI技術が脳にどのような作用をもたらすかに焦点があたるようになり、脳科学との相互発展という側面が期待される。

- ・最近では情報数理や情報幾何を取り入れ、脳の特徴である「多次元、非線形、時変」な性質を捉え、視覚化し、制御することができるようになってきた (Neural Manifold)。BMIの中の脳情報解読器 (デコーダ) の構成によって脳への影響が変わることが分かってきたため、その基本的な性質を理解しようという動きがある。こうした基盤研究は、脳の特性理解やBMIアプリケーションの設計原理の確立に貢献する。
- ・埋込み型電極を利用したBMIのヒトへの応用は、2006年に米国ブラウン大学のグループにより実現した²⁹⁾。その後も、感覚信号のフィードバックや発声内容の再構成など進展はあった。こうした潮流を受けて2019年、米国の起業家イーロン・マスクが率いるベンチャー企業、Neuralink社が、手術ロボットを用いて細い糸のような柔らかい電極を脳に埋め込み、外部のコンピュータとワイヤレスに接続する統合BMIシステムを公表し、注目を浴びた³⁰⁾。ウェアラブル型BMIの研究開発型ベンチャーとしては前述OPMやNIRSの事業化を目指す米国Kernel社や、EEGやECoGを使ったBMI研究機器の開発や世界展開を進めているオーストリアg.tec社などが目覚ましい成長を見せている。こうした民間企業の参入が相次ぎ、BMIの研究開発は近年新しいフェーズに入ったといえよう。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- ・「人工知能 (AI) 研究との連携によるニューロフィードバック等の技術開発とその応用等」 AMED戦略的国際脳科学研究推進プログラムは、AIとBMI技術による精神・神経疾患の治療を目指している。
- ・2019年にアナウンスされ、2020年に事業が開始したムーンショット型研究開発事業の目標1 (身体、脳、空間、時間の制約からの解放) は、BMI技術も視野にいたれた技術開発プロジェクトである。
- ・Neural Engineering System Design (NESD) プログラム 米国DARPA³¹⁾
- ・イーロン・マスクが率いるNeuralinkが、多電極埋め込み技術を含む統合BMIシステムを公表し、ヒトでのテストを計画している³²⁾。
- ・The Next-Generation Nonsurgical Neurotechnology (N3) program これまで侵襲的な技術の開発を進めていたDARPAが、非侵襲脳技術の開発として6つの組織を認定し、支援している。

(5) 科学技術的課題

- ・EEGやNIRSを使った非侵襲的な脳活動計測は、その空間分解能を飛躍的に高めることができていない。EEGでは多チャンネル計測や電流源推定の研究が続けられているが、脳機能の小区画 (機能地図) が読み分けられるほどの空間分解能は実現できていない。また、脳深部にある領域の活動は読み出せない。
- ・加速度センサ、心拍センサなどを搭載したウェアラブルデバイスがヘルスケア市場を創生、牽引している

流れから考えると、非侵襲的な脳活動計測を使った一般向けヘルスケアサービスは今後、積極的な検討が進められるものと思われる。これら先行民生デバイスはこれまでに、装着容易性、計測安定性、被験者間一般性、生体動作由来のノイズ対策など、様々な工夫と開発によって一般市場を開拓し、浸透してきた。一方で現時点のウェアラブル型BMIは、これらの課題を解決できておらず、今後は本格的な民生化技術開発が必要である。

- ・埋め込み型デバイスの真の技術的課題は電池と通信である。電極素材自体は医療現場で数年オーダーの長期安定的な生体親和性電極が既に存在している（脳ペースメーカー、てんかんや疼痛治療電極）。その一方で、感染症リスクを低減するために装置全部の体内埋植が求められるものの、バッテリーの持続時間や安全性、通信帯域の確保などが課題になっている。効率よく脳情報を縮約して体外へ送信するための工学的な工夫としては、電極配置とスパースネスを考慮した情報復元を可能にする圧縮センシングなどのアプローチが有効かもしれない。
- ・適切な脳機能部位を同定する方法と、そこへ電極を正確にガイドする術式の確立も、BMIの応用には欠かせない。
- ・BMIによる脳機能の再構築は、再生医療との親和性が高い。細胞移植や薬剤介入によって復元された脳組織に対して、BMIが作用して機能成熟化を誘導する治療戦略は、「診断できても治療はできず」の各種神経疾患に対する集学的な根本治療の誕生を可能にするだろう。

（6）その他の課題

BMIは、これまでの他の技術ではアクセスが困難だった脳機能に対して直接介入する技術であり、新しい社会変革技術になりうる可能性を秘めている。またBMIの科学的な側面として、人間（脳）の理解の変革を促す性質を有しており、したがって市民一般に動揺をもたらす可能性がある。ELSIの着実な実施が必要である。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	・文化的な特性から、非侵襲的なBMI技術の研究開発が主流である。BMIそのものというよりも、ニューロフィードバック、AIとの連携といった周辺技術との連携に重点がある。 ・脳機能を解明するツールとして活用されている。 ・理工系においては、AIブームに押されがちであり、若手の参画が望まれる。
	応用研究・開発	○	↗	・DecNefをはじめとした非侵襲デコーディング技術の医療応用（精神・神経疾患）が進展している。 ・ウェアラブルロボット、神経筋電気刺激、脳刺激、VR/AR等と組み合わせ、神経原性運動障害に対するリハビリテーション応用が進められている。 ・VRやAR、身体拡張などのIT技術と連携した応用が進められている。

2.5

俯瞰区分と研究開発領域
基礎・計測技術
基礎・計測技術

米国	基礎研究	○	↗	- DARPAが、侵襲BMIの研究開発に多額の投資を行ってきたが、2019年より、非侵襲BMIに力点をうつし、6つの研究機関を認定している。これらの組織が今後の米国における非侵襲BMI研究開発の中心になると考えられる。 - 侵襲BMIについては、Neuralink、Facebookなどの企業が積極的に投資し、電極開発をはじめとした基礎研究も実施している。
	応用研究・開発	○	→	- Locked in 患者を対象とした侵襲型BMIの臨床研究は、ピッツバーグ大学やブラウン大学で進められており、世界をリードしている。ただし、ブラウン大学発で事業化を目指していたBrainGate社はFDA承認取得を断念し、知財を大学へ譲渡するなど、数年前までの実用化トレンド通りには応用が進んでいない。 - Neuralink、Kernel、IpsiHand、Iota Biosciencesなど、多くのベンチャー企業がコンピューターインターフェイスへの応用を目指して研究開発を進めている。
欧州	基礎研究	○	→	- g.tecなどの企業を中心となって脳波を利用したBCI技術をリードしている。 - Human Brain Projectをベースに、BNCI Horizon 2020として、筋電図などの末梢神経信号を利用したインターフェースも含んだプロジェクトを展開している。
	応用研究・開発	○	→	- オランダでは、locked in を対象とした侵襲型BMIの臨床研究が進められている。また高精細な視覚再建BMIもオランダを中心に応用が進められている。 - スイスEPFLを中心に、ロボットとの組み合わせも含めたりハビリや機能補綴を目指した応用研究が精力的に進められている。 - フランスClnatecでは、硬膜電極型BMI（WIMAGINE）とウェアラブルロボットを使って脳卒中後の運動障害を治療する研究が精力的に進められている。
中国	基礎研究	△	↗	- 中国人民代表大会で承認されたChina Brain Projectが2016年から15年の予定で実施されており、BMIもその一環として研究が推進されている。 - BCIスペアラーで世界一になるなど、精力的に研究を進めている。
	応用研究・開発	△	↗	Locked in を対象とした侵襲BMIにも積極的に取り組んでいる。
韓国	基礎研究	△	→	2016年にKorea Brain Initiativeをアナウンスし、韓国脳科学研究所（KBRI）を中心に、脳研究に力を入れている。ただし、BMI・BCIについてはまだそれほどウェイトが置かれていないと思われる。
	応用研究・開発	△	↗	応用研究は医療面、インターフェース面いずれについても現時点ではそれほど進んでいるわけではないが、サムスンが脳波でテレビをコントロールする技術を開発しているといった民間企業の参画が進んでいる。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ 計算脳科学 (システム・情報分野 2.1.7)
- ・ インタラクション (システム・情報分野 2.2.3)

参考・引用文献

- 1) R. M. Neely et al., "Recent advances in neural dust : towards a neural interface platform", *Curr. Opin. Neurobiol.* 50 (2018) : 64-71. doi : 10.1016/j.conb.2017.12.010
- 2) J. Putzeys et al., "Neuropixels Data-Acquisition System : A Scalable Platform for Parallel Recording of 10 000+ Electrophysiological Signals", *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.* 13, no. 6 (2019) : 1635-1644. doi : 10.1109/tbcas.2019.2943077
- 3) T. J. Oxley et al., "Motor neuroprosthesis implanted with neurointerventional surgery improves capacity for activities of daily living tasks in severe paralysis : first in-human experience", *J. Neurointerv. Surg.* 13, no. 2 (2020) : 102-108. doi : 10.1136/neurintsurg-2020-016862
- 4) R. Guggenberger, M. Heringhaus and A. Gharabaghi, "Brain-Machine Neurofeedback : Robotics or Electrical Stimulation?", *Front. Bioeng. Biotechnol.* 8 (2020) : 639. doi : 10.3389/fbioe.2020.00639
- 5) D. Kraus et al., "Brain State-Dependent Transcranial Magnetic Closed-Loop Stimulation Controlled by Sensorimotor Desynchronization Induces Robust Increase of Corticospinal Excitability", *Brain Stimul.* 9, no. 3 (2016) : 415-424. doi : 10.1016/j.brs.2016.02.007
- 6) S. R. Soekadar et al., "Enhancing Hebbian Learning to Control Brain Oscillatory Activity", *Cereb. Cortex* 25, no. 9 (2015) : 2409-2415. doi : 10.1093/cercor/bhu043
- 7) M. Takemi et al., "Muscle-selective disinhibition of corticomotor representations using a motor imagery-based brain-computer interface", *Neuroimage* 183 (2018) : 597-605. doi : 10.1016/j.neuroimage.2018.08.070
- 8) K. Shibata et al., "Toward a comprehensive understanding of the neural mechanisms of decoded neurofeedback", *Neuroimage* 188 (2019) : 539-556. doi : 10.1016/j.neuroimage.2018.12.022
- 9) G. Shen et al., "Deep image reconstruction from human brain activity", *PLoS Comput. Biol.* 15 (2019) : e1006633. doi : 10.1371/journal.pcbi.1006633
- 10) S. Nishimoto and S. Nishida, "Lining Up Brains via a Common Representational Space", *Trends Cogn. Sci.* 20 (2016) : 565-567. doi : 10.1016/j.tics.2016.06.001
- 11) D. J. Caldwell, J. G. Ojemann and R. P. N. Rao, "Direct Electrical Stimulation in Electrographic Brain-Computer Interfaces : Enabling Technologies for Input to Cortex", *Front. Neurosci.* 13 (2019) : 804. doi : 10.3389/fnins.2019.00804
- 12) T. O. Bergmann, "Brain State-Dependent Brain Stimulation", *Front. Psychol.* 9 (2018) : 2108. doi : 10.3389/fpsyg.2018.02108
- 13) A. P. Yadav, D. Li and M. A. L. Nicolelis, "A Brain to Spine Interface for Transferring Artificial

2.5

俯瞰区分と研究開発領域
基礎・計測技術
基礎・計測技術

- Sensory Information”, *Sci. Rep.* 10, no. 1 (2020) : 900. doi : 10.1038/s41598-020-57617-3
- 14) M. Bonizzato et al., “Brain-controlled modulation of spinal circuits improves recovery from spinal cord injury”, *Nat Communi* 9, no. 1 (2018) : 3015. doi : 10.1038/s41467-018-05282-6
- 15) K. Kato, M. Sawada and Y. Nishimura, “Bypassing stroke-damaged neural pathways via a neural interface induces targeted cortical adaptation”, *Nat Communi* 10, no. 1 (2019) : 4699. doi : 10.1038/s41467-019-12647-y
- 16) S. J. Bensmaia, D. J. Tyler and S. Micera, “Restoration of sensory information via bionic hands”, *Nat. Biomed. Eng.* (2020) : in print. doi : 10.1038/s41551-020-00630-8
- 17) A. S. Widge, D. D. Dougherty and C. T. Moritz, “Affective Brain-Computer Interfaces As Enabling Technology for Responsive Psychiatric Stimulation”, *Brain Comput. Interfaces (Abingdon)* 1, no. 2 (2014) : 126-136. doi : 10.1080/2326263x.2014.912885
- 18) T. Yanagisawa et al., “BCI training to move a virtual hand reduces phantom limb pain : A randomized crossover trial”, *Neurology* 95, no. 4 (2020) : e417-e426. doi : 10.1212/wnl.00000000000009858
- 19) J. R. Wolpaw et al., “Independent home use of a brain-computer interface by people with amyotrophic lateral sclerosis”, *Neurology* 91, no. 3 (2018) : e258-e267. doi : 10.1212/wnl.00000000000005812
- 20) <https://about.bci-lab.info/demos> (VISUAL MOTION ONSET BCIS (PROJECTS BY JAIR PEREIRA JUNIOR & CAIO TEIXEIRA)) (2021年2月1日アクセス)
- 21) C. K. Anumanchipalli, J. Chartier and E. F. Chang, “Speech synthesis from neural decoding of spoken sentences”, *Nature* 568, no. 7753 (2019) : 493-498. doi : 10.1038/s41586-019-1119-1
- 22) M. J. Vansteensel et al., “Fully Implanted Brain-Computer Interface in a Locked-In Patient with ALS”, *New Eng. J. Med.* 375, no. 21 (2016) : 2060-2066. doi : 10.1056/nejmoa1608085
- 23) <https://www.upmc.com/media/media-kit/bci> (Brain Computer Interface Media Kit) (2021年2月1日アクセス)
- 24) http://bnci-horizon-2020.eu/images/bncih2020/Roadmap_BNCl_Horizon_2020.pdf (Roadmap THE FUTURE IN BRAIN/NEURAL-COMPUTER INTERACTION : HORIZON 2020) (2021年2月1日アクセス)
- 25) C. Mehring et al., “Augmented manipulation ability in humans with six-fingered hands”, *Nat Communi* 10, no. 1 (2019) : 2401. doi : 10.1038/s41467-019-10306-w
- 26) M. Socolovsky et al., “Current concepts in plasticity and nerve transfers : relationship between surgical techniques and outcomes”, *Neurosurgical Focus* 42, no. 3 (2017) : E13. doi : 10.3171/2016.12.focus16431
- 27) D. Kliemann et al., “Intrinsic Functional Connectivity of the Brain in Adults with a Single Cerebral Hemisphere”, *Cell Rep.* 29, no. 8 (2019) : 2398-2407.e4. doi : 10.1016/j.celrep.2019.10.067
- 28) A. Riedel et al., “A case of co-occurring synesthesia, autism, prodigious talent and strong structural brain connectivity”, *BMC Psychiatry* 20 (2020) : 342. doi : 10.1186/s12888-020-

02722-w

- 29) L. R. Hochberg et al., “Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia”, *Nature* 442, no. 7099 (2006) : 164-171. doi : 10.1038/nature04970
- 30) E. Musk and Neuralink, “An integrated brain-machine interface platform with thousands of channels”, *bioRxiv*, August 02, 2019, doi : 10.1101/703801.
- 31) <https://jp.techcrunch.com/2017/07/11/20170710darpa-nesd-grants-paradromics/> (DARPA が小型で並列性の高い双方向脳コンピューターインターフェイスの開発に6500万ドルの研究資金を提供) (2021年2月1日アクセス)
- 32) E. Musk and Neuralink, “An Integrated Brain-Machine Interface Platform With Thousands of Channels”, *J. Med. Internet Res.* 21, no. 10 (2019) : e16194. doi : 10.2196/16194

2.5

俯瞰区分と研究開発領域
基礎基盤科学技術
分析・計測技術