

Brain-Computer Interface 操作の得手不得手に関わる脳回路を発見

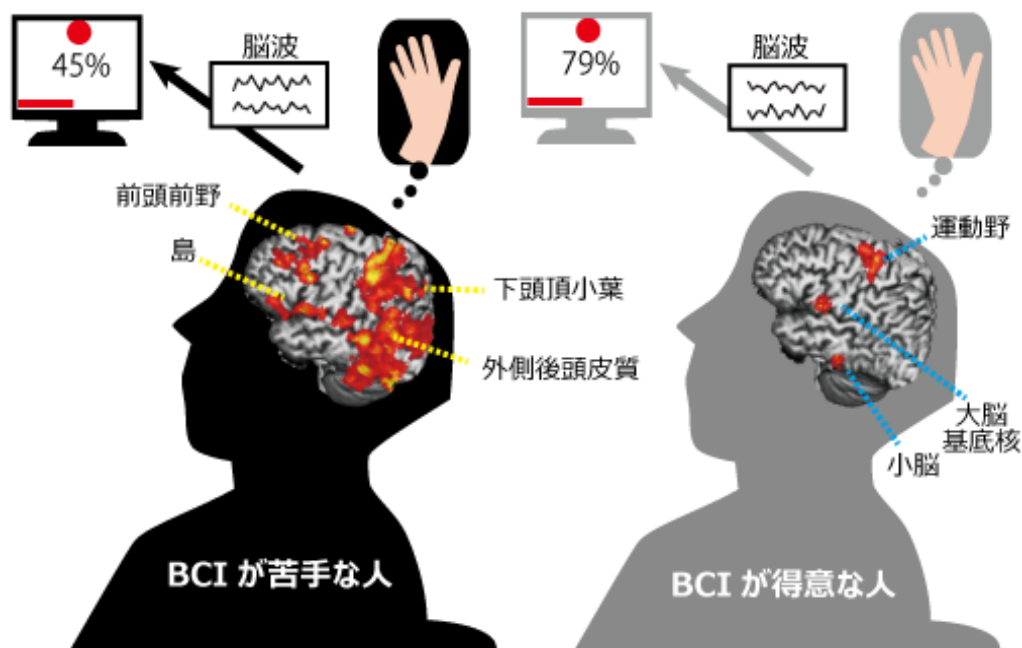
—操作を「考える」か「感じる」か、個人差に合わせた技術開発へ期待—

概要

京都大学大学院医学研究科の花川隆 教授（国立精神・神経医療研究センターIBIC 先進脳画像研究部特任部長）と産業技術総合研究所の笠原和美 研究者らの共同研究グループは、Brain-Computer Interface (BCI) ^{*1} の操作が得意な人と苦手な人では脳の神経回路の使い方が異なることを発見しました。BCI とは、身体を動かさずとも情報機器が使えるようになることを目指し、動作を想像する際などに脳が発する信号を解読して意図を判定する発展途上の医工学技術です。しかし、脳に電極を埋め込まない非侵襲脳信号測定^{*2}による BCI の操作能力には個人差が大きく、上手く使えない人も多いのが現状です。

本研究では、手の動きを想像する際に大脳表面の運動野が発する脳波信号を解読しパソコンのカーソルを操作する「脳波 BCI」と、脳全体の活動を深部まで可視化する「機能的 MRI^{*3}」計測を同時に実施し、BCI が上手く操作できるときには「大脳基底核^{*4}」と呼ばれる大脳深部にある神経核が活発に活動していることを発見しました。さらに操作が得意な人では「大脳基底核」が脳波 BCI の信号源である運動野と機能的に繋がっていたのに対し、苦手な人では「大脳基底核」が運動野だけでなく認知や情動に関わる複数の大脳領域と複雑な繋がりを持っていました。このことから BCI 操作に得手不得手のある理由の少なくとも一部は、BCI を操作する際の脳の神経回路の使い方の個人差によることが示唆されます。本研究成果は、将来、脳回路の使い方に合わせて訓練法の開発など、個人の特性に合わせたテーラーメイド BCI 技術開発への応用が期待できます。

本成果は、2022 年 7 月 16 日に、国際学術誌の「Communications Biology」にオンライン掲載されました。



大脳基底核を起点とした BCI 操作中のネットワーク

1. 背景

Brain-Computer Interface (BCI) 技術は脳機能を代替する技術として期待が高まっています。BCI 技術が完成すれば、病気や怪我によって手足の動作が不自由になった人が、身体を動かさなくても頭のなかで想像するだけでパソコンなどの情報機器を使えるようになるかもしれません。また、BCI で駆動するロボットアーム等で脳卒中患者のリハビリテーションを補助し、効果を高めることを目指す研究も盛んに行われています。ただし解決すべき問題も多く残っています。脳に電極を埋め込まない非侵襲的脳信号計測による BCI の操作能力には個人差が大きく、上手く使いこなせない方も多いのが現状です。このような個人差が生まれる原因はよくわかっていません。

2. 研究手法・成果

われわれは、身体の動きを想像した際に脳表面の運動野に出現する脳波信号を解読する非侵襲「脳波 BCI」と、「機能的 MRI」計測を同時に実施する技術を開発しました。MRI 撮像に伴い脳波に生じるアーチファクト^{*5}をオンライン除去しつつ、脳波信号処理と状態判別を行います。今回は BCI 操作能力の個人差に関する神経回路を調べることを目的として、様々な程度の BCI 操作能力を持つ 24 名の健康な成人男女が BCI を操作する際の脳回路活動を、空間解像度と部位同定能に優れた非侵襲脳信号測定法である「機能的 MRI」を用いて測定しました。なお、どの参加者も同じ程度 BCI の練習をしており、BCI 操作能力の差は練習の差によるものではありません。

「機能的 MRI」により BCI 操作が成功した時と失敗した時の脳活動を比較すると、成功した時には「大脳基底核」の一部である「被殻」の活動が活発でした。次に BCI 操作が成功した時に「被殻」との機能的な繋がりが上昇している神経回路を調べると、「視床」及び「運動野」と「被殻」の間に機能的繋がりの増加が見出されました。さらに BCI の操作が得意な人と苦手な人の間で「被殻」とそれ以外の脳領域の機能的繋がりを比較すると、BCI の操作が得意な人の「被殻」は BCI 中に「運動野」と繋がっていたのに対し、BCI の操作が苦手な人の「被殻」は運動野だけでなく認知や情動に関わる広範な大脳領域と繋がっていました。

「脳波 BCI」は運動野に発する信号により駆動されていますから、BCI の操作が得意な人の「大脳基底核（被殻）」が BCI の成否を直接左右する「運動野」と集中的に繋がっていたことは合理的です。一方で、BCI の操作が苦手な人の「大脳基底核（被殻）」が繋がりを示した「運動野」以外の広範な大脳領域の活動は BCI の操作に寄与しません。BCI の操作が得意な人は練習なしに最初から適切な神経回路を選択できていたこととなります。大脳基底核は、試行錯誤から学んだ運動の選択など経験に基づく直感的な行動や思考を支える領域です。BCI をうまく操作するには、脳認知領域を駆動する「考える」戦略よりも、「大脳基底核」と「運動野」の神経回路を駆動する直感的に「感じる」戦略が有利なのかもしれません。

3. 波及効果、今後の予定

本研究によって、BCI 操作の秘訣が脳深部の大脳基底核にあり、BCI の得意な人と苦手な人の中では大脳基底核と大脳の機能的繋がりが異なることが示されました。すなわち BCI 操作の得手不得手の理由の少なくとも一部は脳の神経回路の使い方（あるいはその背景にあると想定される「感じる」か「考える」かの戦略の違い）の個人差によることが示唆されます。今後、BCI を練習することで、BCI の操作成績とともに脳の神経回路がどの様に変化するかを調べる予定です。本研究成果は、将来、個人の脳の神経回路の使い方に合わせたテーラーメイド BCI 開発への応用が期待できます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、著者らが国立精神・神経医療研究センター神経研究所に在籍していた当時に開始されたものです。本研究は、国立精神・神経医療研究センターのほか、京都大学大学院医学研究科、産業技術総合研究所 人間情報インタラクション研究部門の共同研究として実施されました。

また、本研究は、日本学術振興会（JSPS）科研費（JP19H05726、JP19H03536、JP20H04236）、日本医療研究開発機構（AMED）（JP19dm0207070s0001、JP19dm0307003h0002）、科学技術研究振興機構（JST）創発的研究支援事業（JPMJFR206G）、JST CREST（JPMJFR206G）の助成を受けたものです。

<用語解説>

***1 脳波 Brain-Computer Interface (BCI)：**運動想像による脳波律動の低下は事象関連脱同期と呼ばれ脳波 BCI に広く利用されている。本研究では、運動野の α 帯域（10Hz 程度）の事象関連脱同期の左右差を利用して、パソコン上のカーソルを左右に制御した。

***2 非侵襲的脳信号測定：**脳波、磁気共鳴画像、脳磁図など脳を傷つけずに脳信号を計測する技術。本研究では、BCI 操作に脳波、神経回路の解明には MRI を利用した。侵襲的脳信号測定の例として、外科手術により脳内に埋め込んだ電極による BCI がある。

***3 機能的 MRI：**MRI は強い磁石のなかで弱い電磁波を生体に照射することで生じる核磁気共鳴現象を用いた生体画像技術。機能的 MRI では、脳の活動に必要な酸素を供給する赤血球ヘモグロビンの酸素化の程度の差による局所磁化率の変化を神経活動の代用マーカーとして画像化している。

***4 大脳基底核：**脳のほぼ中心に位置し、大脳皮質と視床、脳幹を結ぶ神経核の集まり。運動制御、学習、動機付けなど、しばしば行動を制御する司令塔のような役割をもつ。本研究では、大脳基底核のなかでも運動制御に関わる「被殻」が BCI 成功時に特異的に活動した。

***5 アーチファクト：**BCI 操作に必要な脳波は微弱な電気信号（ μ ボルト単位）である。MRI は強い磁石と弱い電磁波を照射し、その信号の大きさは脳波の数十倍である。そのため、脳波と機能的 MRI の同時計測を行うと、脳波の計測システムでは、大きな MRI 信号のなかに微弱な脳波信号が埋もれてしまう。本研究では、脳波計測システム上に現れた MRI 信号をオンラインで除去する手法を BCI オンライン処理と連続的に行うことで、MRI 内で BCI を行うことができた。

<研究者のコメント>

BCI 開発が進めば、運動麻痺で動けない患者さんが「考える」だけでロボットや車椅子を操作することが可能になると言われています。一方、現在の非侵襲 BCI の操作は容易ではなく、操作能力の個人差が医工学技術としても治療技術としても応用への壁となっています。今回、脳波と機能的 MRI の同時計測によって、BCI 操作能力の個人差の一部を神経回路の違いとして明らかにすることが出来ました。BCI の操作は一生懸命「考える」よりも直感的に「感じる」のが良いのかもしれませんが、本研究成果が、BCI 発展の一助となり、将来的には治療技術として広く利用されることを期待しています。（京都大学大学院医学研究科・花川隆、産業技術総合研究所・笠原和美）

<論文タイトルと著者>

タイトル：Basal ganglia-cortical connectivity underlies self-regulation of brain oscillations in humans. (大
脳基底核皮質神経回路はヒト脳律動の自己制御に関わる)

著者：Kazumi Kasahara, Charles Sayo DaSalla, Manabu Honda, Takashi Hanakawa

掲載誌：Communications Biology DOI：10.1038/s42003-022-03665-6

<お問い合わせ先> ※Eメールは上記アドレス(a)の部分を@に変えてご使用ください。

花川 隆 (はなかわ たかし)

京都大学大学院医学研究科 脳統合イメージング分野・教授

TEL：075-753-4432

E-mail：hanakawa-office(a)mail2.adm.kyoto-u.ac.jp

<報道・取材に関するお問い合わせ先>

京都大学 総務部広報課国際広報室

TEL：075-753-5729 FAX：075-753-2094

E-mail：comms(a)mail2.adm.kyoto-u.ac.jp

国立精神・神経医療研究センター 総務課広報室

TEL：042-341-2711 (代表) FAX：042-344-6745

E-mail：ncnp-kouhou(a)ncnp.go.jp