



2026年4月13日

慶應義塾大学
科学技術振興機構 (JST)

ブレイン・コンピューター・インターフェースを活用して イメトレ中の脳状態を可視化することで運動能力を向上 — 健常者のパフォーマンス向上やスポーツ、人間拡張分野への応用に道 —

慶應義塾大学理工学部生命情報学科の岩間清太朗専任講師（有期）、牛場潤一教授、および松岡敦也（修士2年、研究当時）らの研究チームは、ブレイン・コンピューター・インターフェース（Brain-Computer Interface; BCI）を活用し、実際の体の動きを伴わない「運動イメージ訓練（いわゆるイメトレ）」中に、自分の脳状態を可視化し、思念を操る練習を行うことで、脳状態の切り替え能力が向上し、実際の運動パフォーマンスが改善することを明らかにしました。

発表のポイント

ポイント1: イメトレ中の脳内状態を、AIを使って可視化して訓練

- これまでは本人もトレーナーも、実際の脳状態を知ることができませんでしたが、BCIを利用することでリアルタイムに可視化できました。
- 脳内に電極を埋め込むことなく、ウェアラブルセンサ（脳波計）とAIだけで実現できた点が画期的です。

ポイント2: 実際に運動せず、イメトレだけで運動能力が向上

- これまでは、ジムや競技場、楽器やキーボードなど、実際にトレーニングするための「場所」や「道具」が必要で、訓練環境を整備する必要がありました。
- 時間や場所にとらわれず、好きなときに、好きな場所で、BCIを使って脳の能力を拡張できるようになりました。

ポイント3: 体の動きを司るコントローラーである脳を直接鍛えることに成功

- これまでのテクノロジーを活用したトレーニングでは、電極を体に貼って計測する心電図・心拍計測あるいは筋電図を利用したものがありませんでしたが、今回は「脳」を対象にしたトレーニングを提案しました。
- 全身の筋肉に司令を送る脳そのものの活動を訓練すると、実際のパフォーマンスが向上することを示した点が画期的です。

BCIは、本人には自覚できない「脳状態」を可視化し、それをリアルタイムにユーザーへフィードバックすることで脳活動の自己調節を可能にする技術です。同研究チームはこれまでに、脳卒中後の重度まひの機能回復を実現し、大学発スタートアップ「(株) LIFESCAPES」を通じてBCIを医療機器化して、全国60の医療機関への導入を進めてきました。本研究は、病気やけがをしていない健常成人の運動能力をもBCIによって向上させることができることを示し、脳の内部で起きている神経回路の切り替わりの様子を可視化し、詳細な分析をした画期的な成果です。

今後は、対象者や課題を広げた検証、効果の持続性や個人差の評価、実際の運動支援場面での有効性の確認を進め、医療・ヘルスケア・人間拡張・スポーツ分野での応用を目指します。

本成果は2026年4月10日付で『Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America（米国科学アカデミー紀要）』に掲載されました。

< 詳細な解説 >

頭皮脳波などの脳シグナルに基づいて外部機器を操作するブレイン・コンピューター・インターフェース (Brain-Computer Interface; BCI) (※1) を利用すると、脳状態の自己調節を訓練することができます。こうしたニューロフィードバック (※2) は 1960 年代から研究されており、運動・認知・知覚に関わる行動成績の向上に役立つ可能性や、運動障害を持った患者の運動機能を回復できることが知られていました。しかし、訓練によって獲得された脳状態の自己調節能力が、訓練後にどのように利用されるのかは明らかではありませんでした。

本研究では、非侵襲脳記録方法である頭皮脳波の時間変化をリアルタイムにフィードバックする BCI 訓練を実施し、他者の脳波を提示する偽フィードバック対照群との比較を行いました。その結果、自身の脳活動を提示する真のフィードバックを受けた参加者は、BCI がいない状況でも運動関連脳波である感覚運動リズム (※3) を調節できることが分かりました。さらに、データ駆動型の脳状態遷移解析により、脳状態の切り替えに伴う神経ダイナミクスの変化が明らかになり、その再編成は運動課題にも一般化して、筋収縮および弛緩 (しかん) の反応時間短縮と関連することが示されました。

1. 本研究のポイント

- ・ 感覚運動皮質の活動を反映する頭皮脳波成分 (感覚運動リズム) をリアルタイムにフィードバックと結びつけた BCI の操作により、ヒトが自らの皮質状態の切り替えを意図的に学習・制御できることを実証
- ・ 二重盲検ランダム化比較試験デザインを用い、偽フィードバック対照群との比較の結果、BCI がいない状況でも感覚運動リズムを自己調節できることを発見
- ・ BCI による訓練で変化した神経ダイナミクスは実際の運動課題にもあらわれ、筋収縮・弛緩の反応時間短縮を誘導することから、脳内での迅速な皮質の状態遷移が行動の柔軟性を高める可能性を示唆

2. 研究背景

ヒトは目的や環境の変化に応じて、運動を柔軟に切り替える能力を持っています。この能力は、脳状態が時々刻々と遷移することによって実現されると考えられています。これまで、脳活動の信号に基づいて外部機器を制御する「ブレイン・コンピューター・インターフェース」や、自身の目標とする状態に自身の脳活動信号を近づける「ニューロフィードバック訓練」を用いることで、ヒトが脳活動を意図的に調節する能力を持つこと、そして訓練によってそれを強化できることが示されてきました。特に BCI の操作やニューロフィードバック訓練を通じて、感覚運動活動を自己調節する研究や、これらの技術を利用して運動機能の回復を促すアプローチの社会実装が進んでいます。

しかし、ヒトが脳の状態遷移を意図的に学習・制御できるのか、また、訓練で獲得した神経ダイナミクスが訓練以外の場面でも一般化して発揮されるのかは未解明でした。従来の研究では、特定の脳活動の自己調整や運動機能の改善は示されていたものの、短時間での脳状態の切り替えを随意的に制御することや、その神経機序と行動的な影響を直接検証した研究は十分ではありませんでした。

3. 研究内容・成果

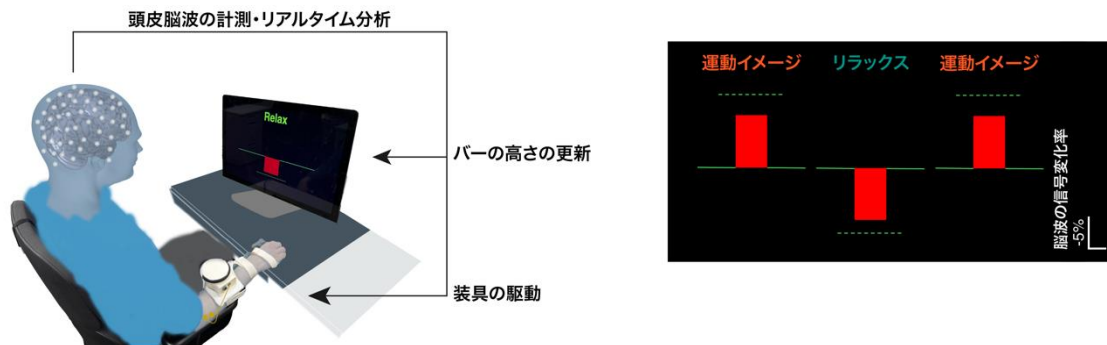


図 1. ブレイン・コンピューター・インターフェースの操作訓練

本研究では、高密度頭皮脳波計と右手に電動装具を装着した被験者を対象に、脳波の感覚運動リズムの時間変化をリアルタイムにフィードバックする BCI 訓練 (図 1 左) を実施し、偽フィードバック対照群との比較を行いました。

被験者は画面上の指示に従って運動イメージと積極安静 (リラックス) を繰り返し、感覚運動リズムの信号強度に応じて変化する赤いバー (図 1 右) が目標位置 (緑破線) に到達するように、右手を運動するイメージを試みました。目標位置に到達するたびに被験者への指示と目標位置が入れ替わり、制限時間内に目標位置に到達できた回数をポイントとして評価しました。その結果、真のフィードバックを受けた参加者では、2 日間の訓練を通じて、目標位置への到達回数が有意に増加しました (図 2)。

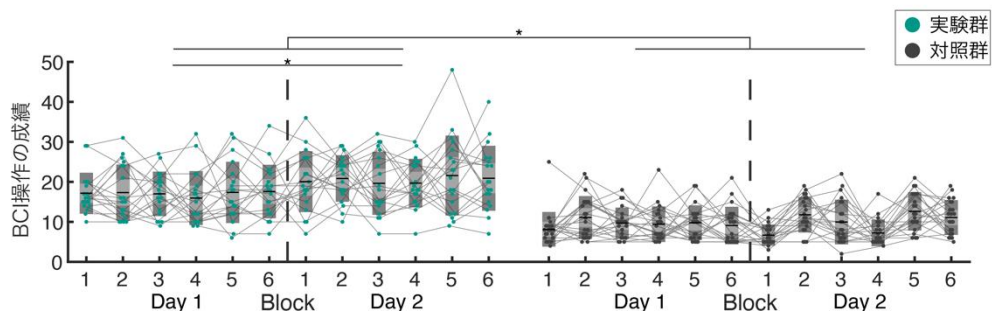


図 2. ブレイン・コンピューター・インターフェースの操作成績

さらに、訓練によって身についた脳活動の調節が、BCI によるフィードバックがない状況下でも保たれるかを評価しました。その結果、真のフィードバックを受けた参加者では、訓練後にフィードバックが提示されない条件でも、運動イメージとリラックスに応じて感覚運動リズムを切り替える傾向が強まりました。これは、被験者が画面上の表示に反応しただけでなく、自らの脳状態を意図的に切り替える技能を獲得したことを示しています。

また、脳全体の活動をデータ駆動的に解析したところ、状態切り替えの前後において、感覚運動領域を含む広域な脳領域で、特徴的な神経ダイナミクスの変化が観察されました。具体的には、脳領域間の結合の強化や、周期成分と非周期成分の両方を含むスペクトル構造の急速な変化が確認され、脳状態の切り替えが広域ネットワークの協調によって支えられている可能性が示されました (図 3 左)。

加えて、この訓練によって再編成された神経ダイナミクスが、実際の運動課題にも一般化するかを検証しました。その結果、真のフィードバックを受けた参加者では、筋肉をすばやく収縮させる際だけでなく、力を抜く際の反応時間も短縮しました。すなわち、BCI 訓練によって獲得された脳状態の切り替えの技能が、実際の運動場面にも応用され、行動の柔軟性の向上に関わる可能性が示されました (図 3 中央・右)。本成果は、ヒトが脳状態の切り替えそのものを学習し、その効果を訓練場面にとどまらず実際の行動へと広げうることを実証したものです。

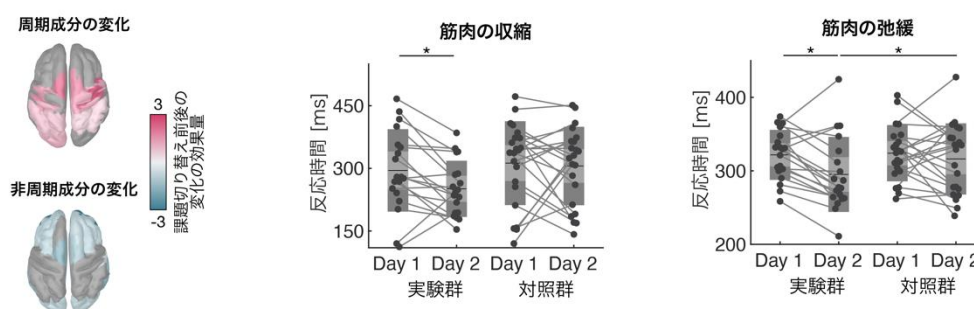


図 3. BCI 操作中の脳波応答と反応時間の変化

4. 今後の展開

本成果は、ヒトが脳状態の切り替えを意図的に学習し、その効果が訓練場面を超えて実際の行動へと一般化しうることを示すものです。今後は、対象者や課題をさらに広げた検証を進めるとともに、訓練効果の持続性や個人差、実際の運動支援場面における有効性を評価していきます。

この知見は、脳の状態を自ら制御する能力の獲得を通じて、身体パフォーマンスを向上できる可能性を示しています。これにより、医療・ヘルスケア・スポーツなどへの応用や、身体、空間、時間の制約に依存しにくい柔軟な身体運動学習の支援技術へと展開が期待されます。

<参考文献>

1. Buch, E. *et al.* Think to move: A neuromagnetic brain-computer interface (BCI) system for chronic stroke. *Stroke* **39**, 910–917 (2008).
2. Muraoka, Y., Iwama, S. & Ushiba, J. Neurofeedback-induced desynchronization of sensorimotor rhythm elicits pre-movement downregulation of intracortical inhibition that shortens simple reaction time in humans: A double-blind, sham-controlled randomized study. *Imaging Neuroscience* **2**, 1–15 (2024).
3. Onagawa, R., Muraoka, Y., Hagura, N. & Takemi, M. An investigation of the effectiveness of neurofeedback training on motor performance in healthy adults: A systematic review and meta-analysis. *NeuroImage* **270**, 120000 (2023).

<原論文情報>

【題名】 Brain-computer interface-based neurofeedback training enables transferable control of cortical state switching in humans (ブレイン・コンピュータ・インターフェースを用いたニューロフィードバック訓練は、ヒトにおける皮質状態切り替えの汎化可能な制御を可能にする)

【著者名】 Seitaro Iwama⁺, Atsuya Matsuoka⁺, Junichi Ushiba^{*}

⁺: 筆頭著者, ^{*}: 責任著者

【掲載誌】 *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*

【DOI】 <https://doi.org/10.1073/pnas.2525769123>

<用語説明>

※1 ブレイン・コンピューター・インターフェース (Brain-Computer Interface; BCI) : 脳由来の信号に基づいて外部機器を動かすシステム。ブレイン・マシン・インターフェース (Brain-Machine Interface; BMI) と呼ばれる。

※2 ニューロフィードバック: 脳由来の信号をリアルタイムに演算処理し、その結果を被験者に提示することで自己調節を促す手法。

※3 感覚運動リズム: 運動野の近くで計測される脳波に含まれる 8~30 Hz の成分。皮質-視床ループが生み出す律動的な神経活動を反映すると考えられている。安静時には、運動野の神経細胞集団が同期して活動するため振幅が大きくなる一方、運動の準備・企画・実行時には、神経細胞集団の活動が脱同期化するため小さくなる。

<研究資金>

本研究は、科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 さきがけ、JPMJPR23I1 (パフォーマンスを安定化する脳状態の自己調節訓練法の確立、研究代表者: 岩間清太郎)、JST ムーンショット型研究開発事業 ムーンショット目標 1 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、JPMJMS2012 (非侵襲 BMI による精神・身体状態の推定、課題推進者: 牛場潤一)、日本学術振興会 (JSPS) 科研費、JP20H05923 (脳卒中後の機能回復臨界期における神経回路操作、代表: 牛場潤一) の支援を受けて行われました。

<利益相反>

牛場潤一は、ブレイン・コンピューター・インターフェースを含むリハビリテーション機器の研究開発および販売を行う大学発スタートアップ企業である株式会社 LIFESCAPES の創業者兼代表取締役です。また、牛場潤一および岩間清太郎は、同社から報酬を受け取っており、牛場潤一は同社の株式を保有しています。なお、同社は本研究で使用した機器や実験セットアップとは一切関係ありません。その他の著者において、開示すべき競合的利益はありません。

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室 TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640

E-mail : m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>

科学技術振興機構 広報課 TEL : 03-5214-8404 FAX : 03-5214-8432

E-mail : jstkoho@jst.go.jp <https://www.jst.go.jp/>

・JST 事業に関するお問い合わせ先

科学技術振興機構 戦略研究推進部 ICT グループ 櫻間 宣行 (さくらまのりゆき)

TEL : 03-3512-3526 FAX : 03-3222-2066 E-mail : presto@jst.go.jp