

運動記憶の保持や忘却を計画する運動メタ学習の脳内メカニズムを解明

自分の身体運動を客観的に監視・制御する「メタ学習」の機能が、脳内の背側運動前野に備わっていることを発見しました。背側運動前野は、これまで、運動の計画に関わっていると考えられてきましたが、学習した運動記憶の保持や忘却に関する計画も担っていることが示唆されました。

卓越したアスリートを見ると、優れた運動スキルを獲得する能力は生まれ持った素質だと考えがちです。しかしながら、練習の繰り返しや環境に応じて運動学習スピードが上昇する事例は、多く報告されています。そのメカニズムとして、本研究グループはこれまでに、運動学習スピードは、運動記憶の学習率と忘却率を調整するメタ学習機構によって上昇することを見いだしました。しかしながら、脳のどの部位に、このメタ学習の機能が備わっているのかは未解明でした。

本研究では、脳内で意思決定などの認知課題におけるメタ学習を担っているとされる背外側前頭前野と、運動の計画に関わっていると考えられている背側運動前野のそれぞれについて、運動メタ学習タスク中に微弱な磁気刺激を与え、これらの部位の機能を調べました。その結果、メタ学習効果は、背外側前頭前野を刺激した場合には阻害されませんでした。背側運動前野を刺激した場合には抑制されました。ただし、このとき運動学習能力そのものは阻害されず、忘却率のメタ学習のみが主に抑制されたことが明らかになりました。これは、目的指向性の運動計画を担うと考えられてきた背側運動前野が、タスクや環境に応じて、どの程度、運動学習の記憶を保持、もしくは忘却するべきかを、長期的な目標に基づいて計画する機能を有していることを示しています。

このような運動前野のメタ学習機能は、世界で初めての発見であり、効率的にスポーツ技能の獲得能力を高めるための技術開発に役立つと期待されます。

研究代表者

筑波大学システム情報系

井澤 淳 准教授

研究の背景

学習プロセスを客観的に監視し制御するようなメカニズムは「メタ学習^{注1)}」と呼ばれており、生徒の学習能力の涵養など、教育学における重要なテーマです。認知科学や神経生理学においては、メタ学習能力には前頭前野の機能が大きく関わっていることが明らかになっています。しかし、これらの知見は、単語リストの記憶など言語化できるような宣言的記憶課題や、複数の選択肢から最も良い選択を行う意思決定課題など高次認知機能のメタ学習を扱っており、運動学習^{注2)}のような非陳述的（暗黙的）記憶課題におけるメタ学習に関しては、その存在からして謎のまま残されていました。

本研究グループでは2023年に、世界で初めて、運動のメタ学習の計算論的モデルの提案と行動実験による実証に成功し、運動学習課題において、パフォーマンスを意識的に認識すること（メタ学習）により、記憶の更新スピードと保持率を能動的に変化させることが可能であることを示しています（Sugiyama et al., 2023）。そこで今回、運動学習のような暗黙的な記憶に関しても、これを監視し制御するようなメタ学習メカニズムが存在するとの仮説に基づき、その脳内メカニズムの解明を試みました。

研究内容と成果

本研究では、仮説として、①暗黙的記憶に関する代表的なタスクである運動学習タスクにおいても、意思決定課題と同様に前頭前野がメタ学習を担っている、②運動制御学習系の一部がメタ学習も担っている、の2つを設定しました。そして、前頭前野において運動系との結合が強い背外側前頭前野と、複雑な運動などに関わる高次運動野である背側運動前野に注目し、どちらが運動メタ学習に影響を与えているかを調べました。

運動メタ学習課題として、上述の先行研究で開発した最も基礎的な視覚運動変換課題を実施しました。実験参加者はスクリーンに提示されたターゲットに向かって直線的に手を伸ばします。しかし、実際の手はスクリーンで隠されており直接見ることはできません。その代わりに、手先の位置を示すカーソルが提示されます。この到達運動を繰り返しますが、途中からは、参加者に知らせることなく、実際の手的位置とカーソルの位置をわずかにずらします。この外乱によって、カーソルとターゲットとの間に誤差が生じ、到達運動のパフォーマンスが低下します。そうすると、脳は無意識的に手的位置とカーソル位置との関係性を学習し、カーソルがターゲットに到達するように手先運動方向を修正し始めます。この運動学習は施行毎に運動記憶を更新することによって達成されますが、個人によって更新スピードと記憶の保持率（時間が経過しても更新した運動が維持されている程度）が異なります。

今回の実験では、この課題中に、経頭蓋磁気刺激と呼ばれる非侵襲で微弱な磁気刺激を背外側前頭前野と背側運動前野のそれぞれに与えてその働きを一時的に阻害し、これが運動メタ学習に及ぼす影響を検証しました。その結果、背外側前頭前野に対する刺激は運動メタ学習効果に影響を与えませんでした。背側運動前野に対する刺激は運動メタ学習効果を抑制することが明らかになりました。ここで重要なのは、背側運動前野に対する刺激が運動学習能力自体には影響を与えなかったことです。つまり、背側運動前野は運動メタ学習の計算そのものを担っていることを意味しています。さらに詳細な解析により、背側運動前野が、運動メタ学習機能のうち、運動記憶の保持と忘却のスピードの調整に関わっていることも明らかになりました（参考図）。

これまで、背側運動前野は、運動実行前に目標となる理想的な運動軌道を準備する運動計画を担っていると考えられてきました。今回の発見は、これ以外にも背側運動前野の機能が存在することを示しています。つまり、運動前野は運動の計画だけではなく、環境やタスクに応じてどの程度長く記憶を保持するか、忘却するべきかを計画する機能を有している可能性が示唆されています。

今後の展開

これまで、優れた運動学習能力を獲得するためのコツは、一部の卓越した技能を持つ者のみが知りうるものとされてきました。しかし、そのメカニズムが計算機構と脳内機構の両方のレベルで明らかになれば、誰もが容易に獲得できるようになります。本研究成果は、人々が本来有する学習能力を向上させる新しい技術開発に貢献する可能性があります。

参考図

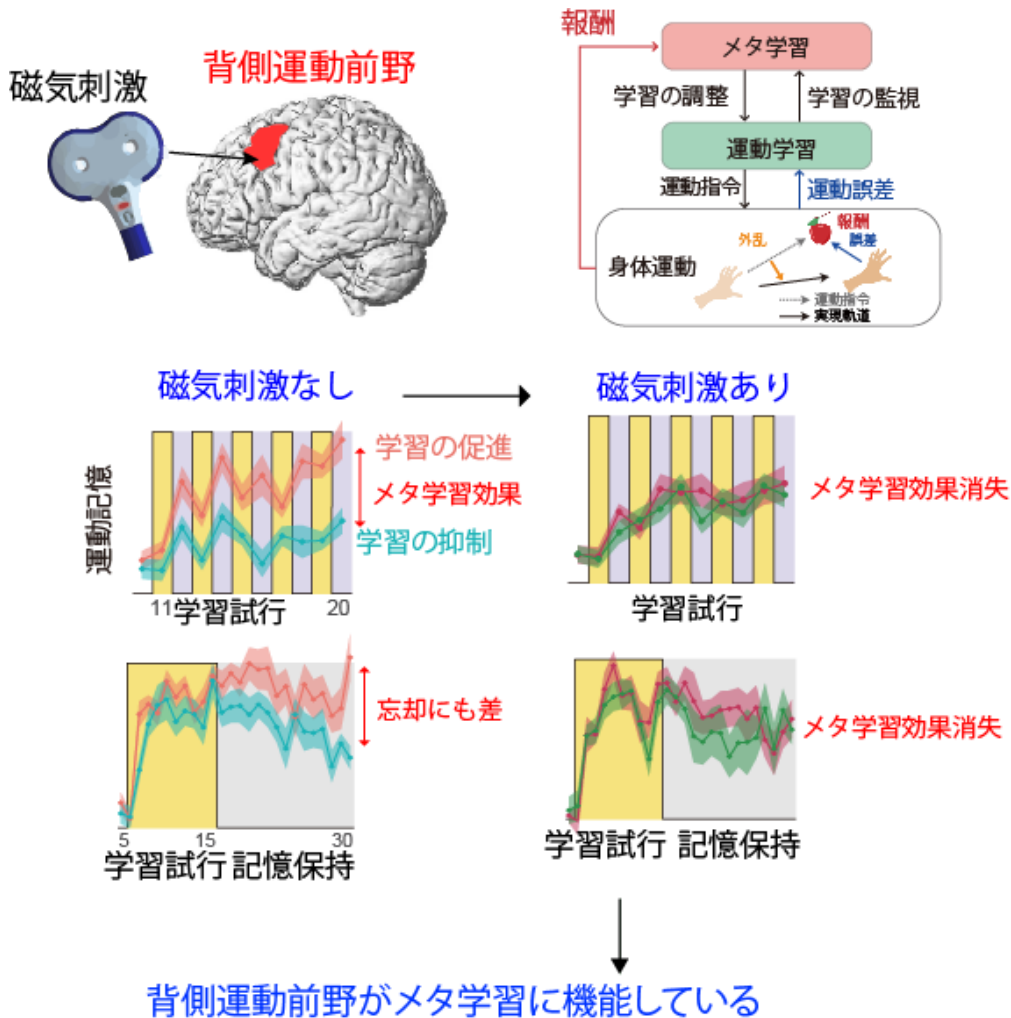


図 本研究の概要

タスクや環境に応じて適切に学習スピードと忘却スピードを柔軟に調整する「メタ学習」メカニズムが、脳内の背側運動前野に備わっていることが明らかになった。

用語解説

注1) メタ学習

上位の認知機能が下位の学習機能を監視・制御するような、階層性によって特徴付けられる高次認知機能のこと。これにより、効率良く学習するための戦略作りや調整が行われている。

注2) 運動学習

運動スキル上達のために、練習を通じて身体の特徴を把握し、その特徴を活用した最も良い動作のパターンを生成するように、逐次的に体の動かし方を更新するプロセス。

研究資金

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(JP22H00498)の一環として実施されました。

掲載論文

- 【題名】 Meta-learning of human motor adaptation via the dorsal premotor cortex.
(背側運動前野による運動メタ学習の実現)
- 【著者名】 杉山太成、上原信太郎、井澤淳
- 【掲載誌】 Proceedings of the National Academy of Sciences (米国科学アカデミー紀要)
- 【掲載日】 2024年10月23日
- 【DOI】 10.1073/pnas.2417543121

問い合わせ先

【研究に関すること】

井澤 淳 (いざわ じゅん)

システム情報系 准教授

URL: <https://hebbs.emp.tsukuba.ac.jp/>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp