

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：82609

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13378

研究課題名（和文）運動技能学習における競争の効用

研究課題名（英文）The utility of competition on motor skill learning

研究代表者

菅原 翔（SUGAWARA, Sho）

公益財団法人東京都医学総合研究所・脳・神経科学研究分野・主任研究員

研究者番号：80723428

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：異動および感染症蔓延による当初計画を変更し、系列運動技能の記憶表象の神経基盤と、動機づけと運動を繋ぐ神経機構を明らかにすることを目的とした。系列運動技能の記憶表象を検討するために機能的MRIを用いた2つの実験を実施し、学習形式に応じて異なる記憶表象が左頭頂間溝前方部と両側背側運動前野に形成され、実行する際には一次運動野で記憶の統合が生じることを明らかにした。動機づけと運動を繋ぐ神経基盤についても機能的MRI実験を実施し、腹側中脳と一次運動野を結ぶ神経経路が動機づけに応じた運動出力増強を媒介するという知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

発話やタイピングに限らず系列運動技能は我々の生活に不可欠であり、運動技能学習の性質を明らかにする上で非常に重要な技能形態である。これまで困難であった運動技能に関する記憶の動態を、学習に伴う機能的結合変化を利用して立証したことは、本研究分野への貢献が非常に大きい。系列運動技能の記憶基盤が絞り込まれたことで、今後は記憶表象の子細な分析や介入による変容を意図した研究の発展が期待される。また、これまで明らかでなかった動機づけによるパフォーマンス促進を規定する神経基盤を同定したことは、運動パフォーマンス向上を目指すスポーツやリハビリテーション研究へ大きな示唆を与えることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：Changed from the original plans, this study aimed to investigate the neural substrates of the motor engram related to sequential motor skills and the neural mechanism linking motivation to motor performances. To clarify the brain regions holding the motor engram related to sequential motor skills, two functional MRI experiments were conducted using 3T and 7T MRI. Consequently, distinct motor memories formed through two different training types were stored in the left anterior intraparietal sulcus and bilateral dorsal premotor areas. They were integrated in the contralateral primary motor cortex at the execution phase. Another functional MRI experiment investigated the neural substrates transforming motivation into motor performance. This experiment demonstrated that the neural pathway from the ventral midbrain to the primary motor cortex mediates motivation-level dependent force generation.

研究分野：システム神経科学

キーワード：運動学習 機能的MRI 動機づけ 一次運動野 中脳

1. 研究開始当初の背景

競争はヒトの人生で避けることができない社会活動である。スポーツ・学生生活・企業・研究などいかなる領域でも、我々は常に他者と競い合っている。競合相手の存在は、自らのパフォーマンスを向上させる方向へと我々を強く動機づける (Kilduff et al., 2010)。そのため、パフォーマンス向上を目的とし、競い合わせる仕組みを導入することは一般的戦略である。これらの戦略は、もちろん動機づけによる一過性の向上ではなく、基盤能力の増強を介した長期的向上を意図している。しかし、競争は本当に基盤能力の増強に貢献しているのか？研究開始当初の「核心的問い」は、「他者との競争は長期的なパフォーマンス向上をもたらすか？」ということにあった。

代表者が研究してきた系列運動技能は、練習終了後に運動技能の記憶が定着することで、長期間安定的に利用することができるようになる (Robertson et al., 2004)。複数の研究が、金銭的報酬による動機づけの増大が運動技能定着を促進することを報告している (Fischer & Born, 2009; Abe et al., 2012; Galea et al., 2015)。代表者は教師から生徒に与えられるような社会的評価が、系列運動技能の定着を促進することを立証した (Sugawara et al., 2012)。しかし、社会的評価を効果的に使用するには制約が多く (Henderlong & Leeper, 2002) 日常的に使用するには困難な点も多い。そこで本研究では、日常的に存在する社会的状況である競争を、運動技能定着を促進する社会的要因の候補とし、その効果に着目した。

2. 研究の目的

本研究の開始当初の目的は、他者との競争が系列運動技能の定着を促進することを明らかとし、競争による定着促進を支える心理学的・神経科学的基盤を解明することであった。具体的には、(1) 競争を伴う練習によって系列運動技能の定着が促進されるという現象を立証すること、(2) 実力が拮抗した接戦ほど定着促進が大きいことを示すことで、競争時の動機づけ状態が定着促進を規定する主要因であると立証すること、(3) 競争による定着促進の神経科学的機序として、競争時に引き起こされる中脳ドーパミン系と運動回路の相互作用により定着促進が引き起こされると立証することであった。

しかし、本研究の開始後の異動と感染症蔓延により、複数人を対象として競い合わせる実験を実施することが困難になった。そこで、系列運動技能の記憶表象の解明と、中脳ドーパミン系と運動回路の相互作用が意欲と運動を繋ぐことを立証する計画へ変更した。

3. 研究の方法

(1) 系列運動技能の記憶表象

系列運動技能についての記憶が脳内のどこに形成され、どのようにしてパフォーマンスとして主力されるのかを明らかにするため、機能的 MRI 装置を用いて 2 つの実験を実施した。実験参加者は全員右利きで、利き手ではない左手を使って決められた順序のボタン押しを、2 つの異なる実行形式で練習する系列手指運動課題を、MRI 装置の中で実施した。最大速度条件ではできるだけ早く正確に系列運動を実施することを求め、定速度条件では外部刺激で支持されるペースに合わせて正確に系列運動を実施するように求めた。実験 1 は 3 テスラ MRI 装置を使用し、60 名の参加者からデータを取得し、学習に伴う課題関連活動と機能的結合の変化について解析を実施した (Hamano et al., 2020)。実験 2 では 30 名の参加者を対象に 7 テスラ MRI 装置を用いた計測を行い、学習に伴う課題関連活動を解析した (Hamano et al., 2021)。

(2) 中脳辺縁系と運動系の相互作用

動機づけに関連する中脳辺縁系と運動実行を支える運動系が、どのように繋がることでパフォーマンスを向上させるのかを明らかにするため、機能的 MRI を用いた実験を実施した。30 名の参加者が 3 テスラ MRI 装置の中で、運動準備を知らせる合図を見て、その後に実行を知らせる合図が表示されると出来るだけ素早く握力計測器を握る課題を実行した。参加者の動機づけを操作するために、基準より速く反応した場合に得られる報酬を変化させた。高報酬・低報酬・無報酬という 3 条件を設定し、運動準備合図の種類を変えることで参加者に現在の条件を伝えた。反応時間や最大握力といった行動指標に加えて、機能的 MRI 計測データに基づき課題関連活動を解析した。

4. 研究成果

(1) 系列運動技能の記憶表象

実験 1 (Hamano et al., 2020)

反応時間と打鍵間隔が練習を繰り返すことで有意に短縮することから、最大速度と定速度のいずれの条件でも系列運動学習が成立したことを確認した。いずれの実行条件でも、右一次運動野 (M1) の課題関連活動は学習の進行に伴って増大した。記憶痕跡は経験に応じた変化が想起していない間にも潜在的に保存されており、想起時には顕在的に賦活すると考えられている。

(Josselyn et al., 2015)。潜在的変化と想起時賦活という2つの特性を示す脳領域を同定するため、神経活動の領域間相関に基づく機能的結合解析に着目した。練習と練習の間の休憩中の機能的結合が学習の進行に伴って増加することを潜在的変化の指標とし、実行時の機能的結合が休憩中よりも強いことを想起時賦活の指標とした。最大速度条件での学習では左頭頂間溝前方部(aIPS)で2つの特性に応じた機能的結合変化が観察され、定速度条件では両側背側運動前野(PMd)で2つの機能的結合変化が示された。これらの知見に基づき、系列運動技能の記憶表象は、学習形態に応じて異なる領域(aIPSとPMd)に分散して構築され、運動実行時にM1で統合されるという見解を得た。直接観察することが困難な記憶表象について、課題実行中のデータに含まれる機能的結合変化を利用することで可視化することは、本研究独自の新たな手法である。本実験による成果は、既に国際誌に掲載されている(Hamano et al., 2020)。

実験2 (Hamano et al., 2021)

上記の実験を通じて、異なる脳領域に分散して構築される記憶は、運動実行時にM1で統合されるという知見を得た。しかし、M1での課題関連活動は実行時の運動強度に応じて容易に変化するため、M1での記憶統合についての強い証拠を提示することはできなかった。そこで、運動実施の直前に表示される実行合図に伴う課題関連活動に着目し、運動準備時にM1で生じる記憶統合を反映した活動変化を描出した。神経活動変化の検出力を向上させるため7テスラの超高磁場MRI装置を用いて、学習の進行に伴う運動準備活動の変化を検討した。結果として、最大速度と定速度のいずれの条件でも共通して、右M1の運動準備活動が学習進行に応じて増大することが明らかになった。運動準備段階でも実験1と同様の学習に応じた活動変化が再現されることから、M1での記憶統合を反映すると結論づけた。本実験による成果は、既に国際誌に掲載されている(Hamano et al., 2021)。

(2) 中脳辺縁系と運動系の相互作用

期待する報酬額が大きいくほど、直後に行う運動実行時の反応時間が短く、発揮される最大握力が強くなった。この事実から動機づけがパフォーマンスを向上させることを確認した。動機づけを媒介する脳領域を特定するため、運動準備段階で期待報酬額に応じた活動変化を示す領域を検討した。結果として、腹側の中脳(VM)や線条体といった中脳辺縁系だけでなく、一次運動野(M1)や補足運動野(SMA)を含む運動関連領域でも期待報酬額に応じた活動変化が示された。さらに、後に発揮される運動パフォーマンスを予測するような運動準備活動を検討した。M1とSMAの運動準備活動は後の反応時間と最大握力の両方と相関する一方、腹側中脳の準備活動は後の最大握力のみと相関することが明らかになった。近年の解剖学的研究から、腹側中脳はM1を介して脊髄へ投射し、腹側中脳刺激が上肢筋活動を誘発することが報告されている(Suzuki et al., 2022)。以上の知見から、VM-M1経路が動機づけに応じた運動出力増強を媒介すると結論づけた。本実験の成果は、国際誌へ投稿中である。

<引用文献>

- Abe M, Schambra H, Wassermann EM, Luckenbaugh D, Schweighofer N, Cohen LG (2011) Reward improves long-term retention of a motor memory through induction of offline memory gains. *Curr Biol* 21:557-562.
- Fischer S, Born J (2009) Anticipated Reward Enhances Offline Learning During Sleep. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn* 35:1586-1593.
- Galea JM, Mallia E, Rothwell J, Diedrichsen J (2015) The dissociable effects of punishment and reward on motor learning. *Nat Neurosci* 18:597-602.
- Hamano YH, Sugawara SK, Yoshimoto T, Sadato N (2020) The motor engram as a dynamic change of the cortical network during early sequence learning: An fMRI study. *Neurosci Res* 153.
- Hamano YH, Sugawara SK, Fukunaga M, Sadato N (2021) The integrative role of the M1 in motor sequence learning. *Neurosci Lett* 760:136081.
- Henderlong J, Lepper MR (2002) The Effects of Praise on Children's Intrinsic Motivation: A Review and Synthesis. *Psychol Bull* 128:774-795.
- Kilduff GJ, Staw BM, Bird L, Anderson C, Elfenbein D, Kenny D, Mehra A, Rider C (2010) The psychology of rivalry: A relationship dependent analysis of competition. *Acad*

Manag J 53:943-969.

Robertson EM, Pascual-Leone A, Miall RC, Miall CC, Miall RC (2004) Current Concepts in procedural consolidation. *Nat Rev Neurosci* 5:1-7.

Sugawara SK, Tanaka S, Okazaki S, Watanabe K, Sadato N (2012) Social Rewards Enhance Offline Improvements in Motor Skill Taffe M, ed. *PLoS One* 7:e48174.

Suzuki Mi, Inoue K, Nakagawa H, Ishida H, Kobayashi K, Isa T, Takada M, Nishimura Y (2022) A multisynaptic pathway from the ventral midbrain toward spinal motoneurons in monkeys. *J Physiol* 600:1731-1752.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 菅原翔・鈴木迪諒・西村幸男	4. 巻 38
2. 論文標題 意欲は身体運動に影響を与えるのか	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Clinical Neuroscience別冊	6. 最初と最後の頁 740-742
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hamano Yuki H., Sugawara Sho K., Yoshimoto Takaaki, Sadato Norihiro	4. 巻 153
2. 論文標題 The motor engram as a dynamic change of the cortical network during early sequence learning: An fMRI study	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Neuroscience Research	6. 最初と最後の頁 27 ~ 39
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.neures.2019.03.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hamano Yuki H., Sugawara Sho K., Fukunaga Masaki, Sadato Norihiro	4. 巻 760
2. 論文標題 The integrative role of the M1 in motor sequence learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Neuroscience Letters	6. 最初と最後の頁 136081 ~ 136081
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.neulet.2021.136081	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 3件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Sho K. Sugawara, Yoshihisa Nakayama, Tetsuya Yamamoto, Yuki H. Hamno, Norihiro Sadato, Yukio Nishimura
2. 発表標題 The functional role of ventral midbrain for motivated motor outputs in humans
3. 学会等名 第43回日本神経科学大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sho K. Sugawara, Yoshihisa Nakayama, Tetsuya Yamamoto, Yuki H. Hamno, Norihiro Sadato, Yukio Nishimura
2. 発表標題 VTA is involved in both preparation and execution of motivated motor output
3. 学会等名 NCM2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sho K. Sugawara, Yoshihisa Nakayama, Tetsuya Yamamoto, Yuki H. Hamno, Norihiro Sadato, Yukio Nishimura
2. 発表標題 VTA-M1 contributes to human motivated motor outputs
3. 学会等名 OHBM 25th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki H. Hamano, Sho K. Sugawara, Masaki Fukunaga, Norihiro Sadato
2. 発表標題 The integrative role of the M1 for the motor sequence learning
3. 学会等名 Society for Social Neuroscience 2019 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sho K. Sugawara
2. 発表標題 Motor Skills and its interaction with a reward
3. 学会等名 Institut du Cerveau et de la Moelle Epiniere (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sho K. Sugawara, Masaki Fukunaga, Yuki H. Hamano, Takaaki Yoshimoto, Norihiro Sadato
2. 発表標題 Motor engram is encoded in dormant neuronal network
3. 学会等名 3rd Annual meeting of ISMRM Japanese Chapter (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sho K. Sugawara, Masaki Fukunaga, Yuki H. Hamano, Takaaki Yoshimoto, Norihiro Sadato
2. 発表標題 Motor engram is encoded in dormant neuronal network
3. 学会等名 FENS2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sho K. Sugawara, Yoshihisa Nakayama, Masaki Fukunaga, Tetsuya Yamamoto, Norihiro Sadato, Yukio Nishimura
2. 発表標題 VTA-M1 pathway contributes to human motivated motor output
3. 学会等名 次世代脳プロジェクト冬のシンポジウム2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

脳機能再建プロジェクト・ホームページ
<https://www.igakuken.or.jp/neuroprosth/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	濱野 友希 (HAMANO Yuki) (00823254)	早稲田大学・理工学術院・特別研究員 (32689)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関