

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01618

研究課題名（和文）脳活動の変調に伴う運動記憶の獲得

研究課題名（英文）Acquisition of motor memory with modulation of brain activity

研究代表者

門田 宏（Kadota, Hiroshi）

高知工科大学・情報学群・准教授

研究者番号：00415366

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：我々が日常生活を営むうえで運動は欠かせないものであり、その多くは学習によって獲得されたものである。本研究では、実験参加者の脳の活動状態と運動学習との関係を明らかにしていくことを目的とした。実験参加者は視覚的に提示される脳活動情報に基づいて、自己の脳活動状態を変化するようにトレーニングを行った。また、トレーニング後に2種類の相対する環境を学習する課題を行った。その結果、トレーニングによって自己の脳活動を変調させることができるようになること、しかし異なる運動記憶を獲得するには今回の脳活動の変調では不十分であることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、fMRIで計測した脳活動状態をリアルタイム解析し、視覚的にフィードバックするトレーニングによって脳活動の変調をもたらすことができることが明らかとなった。このようなリアルタイムfMRIニューロフィードバックのトレーニングを用いた研究では、脳の活動を増加させるものや特定のパターンになるようにトレーニングするものがあるが、本研究で用いた特定の脳部位の増減や2領域を対象としても脳活動の変調をもたらすことができることがわかった。このようなトレーニング効果は事故や障害によって体が動かない患者に対するリハビリテーションへの応用や疾患の改善等に応用できる可能性が考えられる。

研究成果の概要（英文）：Human movements are crucial for our daily life. Many of them are acquired by motor learning. The aim of this study was to investigate the relationship between brain activity and motor learning. Participants trained to modulate their brain activity based on the information presented visually. Then, after training, they tried to adapt to two conflicting environments. The results suggest that participants became able to modulate their brain activity through the training and this modulation was not enough to simultaneously acquire distinct motor memories.

研究分野：システム神経科学

キーワード：fMRI 運動記憶

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

我々は日々の生活の中で状況に応じた合目的な運動を行うことができる。この合目的な運動を生み出すことができる運動学習能力は生きていく上で欠かせない能力の一つであり、その神経基盤を解明することは重要課題である。

運動学習において、複数の運動を同時に学習することは当初不可能とされてきた。しかし、運動コンテキストにより運動の記憶を切り替えることができ、複数の運動を学習することが可能であることが報告された。さらに、tDCS を用いて外部から脳の活動を変調すると、それぞれの活動状態に応じて脳活動に対応づけられた運動記憶が想起されることが明らかとなった。これらの研究成果に基づくと、運動コンテキストや外部刺激を用いずに自らの意思でも脳活動を変調させることができれば、これまで運動コンテキストや外部刺激の無い環境下では学習することが難しいとされている複数の運動記憶の形成ができるようになるのではないかと考えた。また、自己の脳活動の変調をもたらす手法として、リアルタイム fMRI ニューロフィードバックを用いることを考えた。リアルタイム fMRI ニューロフィードバックとは、脳活動を fMRI により計測し、計測したデータをリアルタイムに解釈し、その時の脳の状態を実験参加者にフィードバックするシステムである。このシステムを用いることによって、実験参加者の脳活動を目的とする状態にトレーニングすることができ、その脳活動に関わる機能の変化をもたらすことができることが報告されている。

### 2. 研究の目的

本研究では、リアルタイム fMRI ニューロフィードバックを用いることで実験参加者自らが自己の脳の状態を操作できるようにトレーニングを行う。そして、実験参加者に自らの意思で脳の活動を变調できるようになるかを検証した。脳部位としては運動野を対象とした。まず左運動野の活動を対象とし、脳活動を増加・減少できるかの検証を行った(1)。また、先行研究では運動コンテキストとして片手だけを動かすまたは両手を動かすことが用いられていたことを踏まえ、左右の運動野を対象とし、活動を变調できるかの検証を行った(2)。さらに、自己の脳活動状態を変化させるトレーニングを行った後に、実験参加者に2種類の相対する環境を学習する課題を行わせることで、自己による脳活動の変調に伴って複数の運動記憶を形成することが可能であるかを検証した(3)。

### 3. 研究の方法

#### (1) 左運動野を対象とした脳活動の変調の検証

まず個々人の運動野の場所を決めるために実験参加者の構造画像の撮影を行った。そして標準脳から作成した運動野に対して、標準脳と個人の構造画像との変換行列を用いることで個人ごとの運動野の関心領域 (VOI) を作成した。

次に、作成した VOI を対象に、リアルタイム fMRI ニューロフィードバック実験を行った。対象とする VOI の活動を fMRI (Verio 3T) によって計測し、Turbo BrainVoyager を用いてリアルタイムに解析を行った。そして、その活動量に応じた円の大きさを実験参加者にフィードバックとして与えた。すなわち VOI の活動量が大きい時は円が大きくなるように、VOI の活動量が小さい時は円が小さくなるように実験参加者に提示した。ニューロフィードバック条件としては提示される円を大きくする条件と円を小さくする条件の2条件とし、各条件は色(赤または緑)によって実験参加者に教示をした。また60秒間のニューロフィードバック条件の前後は30秒間の安静条件とした。1セッションは各ニューロフィードバック条件を交互に2回ずつ行うことで構成し、1日の実験ではそれを8セッション行った。またニューロフィードバック条件の順番についてはカウンターバランスをとった。

#### (2) 両側運動野を対象にした脳活動の変調の検証

まず実験参加者は個々人の運動野の位置を決めるために、手首の屈曲または伸展動作を20秒ごと交互にそれぞれ3回繰り返すことで構成されるセッションを4回行った。そして、屈曲伸展運動を行っているときの脳部位を同定した。このように実際に実験参加者が運動しているときの脳活動から VOI を同定することで(1)で行ったときの VOI よりも実際の被験者の運動野を反映した VOI になると考えられる。

次に、作成した VOI を対象に、リアルタイム fMRI ニューロフィードバック実験を行った。(1)と同様に、VOI の活動を fMRI (Prisma 3T) によって計測し、Turbo BrainVoyager を用いてリアルタイムに取り込み、解析を行った。フィードバック情報としては左右の運動野それぞれの活動量を x 方向、y 方向の2軸における値とした楕円で提示した。そして、実験参加者には横長の楕円(左運動野の活動を上げて右運動野の活動を下げる)または縦長の楕円(左運動野の活動を下げて右運動野の活動を上げる)にするように教示し、片方の活動量を上げると共にもう片方の活動量を下げるトレーニングを行った。各条件はマゼンタまたはシアンの色によって実験参加者に教示をした。実験デザインは(1)と同様に、ニューロフィードバック条件60秒、安静条件30秒のブロックデザインで1セッションにつき各条件2回ずつ行い、1日8セッションのトレーニングを行った。ニューロフィードバック条件の順番についてはカウンターバランスをとった。また、実験では実験参加者には運動野を対象としている等の情報は伝えていないが、1名の実験参加者には運動野を対象としており、左右の運動野の活動量に応じた楕円になっている情

報を明示的に伝え、実験参加者が明示的に実験条件を知っていることで学習効果が上がるかどうかの検証も行った。

### (3) 脳活動の変調に伴う運動学習の検証

両側運動野を対象としたニューロフィードバックトレーニングを行った実験参加者を対象に運動学習実験を行った。実験参加者は椅子に座ってロボットアームを操作することでアームと同期して動くカーソルをスタート位置から実験参加者の前方に提示されるターゲット位置まで動かすという到達運動課題を行った。そして、到達運動課題を行っている時に、時計回り方向または反時計回り方向に速度に比例した外力が印可されるという力場環境を学習するという運動学習を実験参加者は行った。そして外力が加わる時は外力の方向に対応して画面の背景色を変化させた。この時の背景色はニューロフィードバックトレーニングを行っているときと同じ色(マゼンタまたはシアン)にし、実験参加者の脳活動の変調を促した。力場学習は外力の各方向(時計回り方向または反時計回り方向)に対して20試行を1ブロックとして行い、それを交互に8ブロック行った。さらに仮想的な壁が生成されることで実験参加者の動きを一直線に拘束するエラーランプ試行を4ブロック行った。実験参加者の外力に対する運動記憶については、このエラーランプ試行における仮想的な壁にかかる外力の大きさを評価した。ニューロフィードバックトレーニングと同様に色(背景色)による教示によって脳活動の変調が起こっており、その変調に合わせて外力に対する運動記憶が形成されているのであれば、背景色の違いに応じて壁にかかる外力が変わると考えられる。

## 4. 研究成果

(1) 実験初日は条件に応じた変調はあまり見られなかったが、トレーニングを進めるにしたがって実験参加者は条件に応じて脳活動を上げる(信号強度を上げる)ことができるようになった。また、脳活動を下げる(信号強度を下げる)ことは上げるよりも難しい傾向が見られた。そして、実験参加者によってはトレーニング3日目には条件に応じて脳活動を上げるまたは下げるといふ変調ができるようになった。

これらのことからMRI信号をリアルタイムにフィードバックするトレーニングを行うことによって実験参加者は意識的に自己の運動野の脳活動を上げるまたは下げることができると示唆された。

(2)(1)の実験同様に、実験初日は条件に応じた変調は見られなかったが、トレーニングを進めるにしたがって実験参加者は条件に応じた脳活動の変調を行うことができるようになった。実験参加者によっては7日間程度のトレーニングを行うことで自ら脳活動を変調できることが示唆された。しかし一方で、運動野の活動量に応じて楕円が表示されていることを知っている実験参加者は10日間のトレーニングを行っても自らの脳活動を条件に応じて変調することはできなかった。また、実験後のインタビューによると、フィードバックの内容を知っている実験参加者以外の実験参加者は運動野の活動を対象としていることに気づいていなかった。これらのことから実験の内容を知っていることが学習効果の促進に直接的にはつながらず、場合によっては悪影響を及ぼす可能性が示唆された。

さらに(1)の単一領域では3日程度で条件に応じた変調がみられたのに対して、2領域を対象とした今回では7日程度が必要だったことから2領域での変調は単一領域の増減よりも難しいことが示唆される。しかしながら2領域を対象としてもトレーニングを行うことで実験参加者は意識的に自己の脳活動を変調できることが示唆された。

(3) エラーランプ試行における壁にかかる外力の大きさからパフォーマンスを評価したところ、背景色の違いによる条件間での有意な違いは見られなかった。このことから背景画面の色に応じた運動記憶の切り替えは起こっていないことが示唆された。今回のニューロフィードバックトレーニングでは7日間以上のトレーニングによって脳活動の変調がみられるようになったが、この変調はセッション全体で評価すると有意な差がみられる程度の弱い変調であったため、複数の運動記憶の形成に関与しパフォーマンスを変えるほどの強い効果がなかった可能性が考えられる。また、ニューロフィードバックトレーニングでは実際に動作をしておらず到達運動課題と実験状況の乖離があるため、ニューロフィードバックトレーニングと運動学習課題との間に一貫した結果がみられなかった可能性がある。これらの点に関しては今後の課題であると考えられる。

以上の研究結果から、MRI信号をリアルタイムに計測、解析した結果を視覚的にフィードバックし、色の教示に基づいて脳活動状態を変えるトレーニングをすることによって、特定の脳部位の脳活動を増減させたり、2領域の活動を自ら変調させたりすることができることが明らかとなった。しかし、複数の運動記憶の獲得においては今回行った脳活動の変調では不十分であることが示唆された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 門田宏	4. 巻 51
2. 論文標題 運動記憶をもたらす脳活動の変調	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 細胞	6. 最初と最後の頁 35-39
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 門田宏	4. 巻 21
2. 論文標題 新たな運動記憶の獲得に関わる脳の変調	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地域ケアリング	6. 最初と最後の頁 80-87
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 澤田悟, 門田宏	4. 巻 118
2. 論文標題 視点変換に伴うリーチング課題時の脳活動の相違に関するfMRI研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 1-4
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 Kanayama Noriaki, Asai Tomohisa, Nakao Takashi, Makita Kai, Kozuma Ryutaro, Uyama Takuto, Yamane Toshiyuki, Kadota Hiroshi, Yamawaki Shigeto	4. 巻 11
2. 論文標題 Subjectivity of the Anomalous Sense of Self Is Represented in Gray Matter Volume in the Brain	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Frontiers in Human Neuroscience	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnhum.2017.00232	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 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kadota, H. and Sawada, S.
2. 発表標題 Effect of a viewpoint on long-term retention of motor memory
3. 学会等名 Society for the Neural Control of Movement (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 門田宏
2. 発表標題 脳機能と運動行動の制御
3. 学会等名 第13回臨床精神科リハビリテーション研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kadota, H. and Sawada, S.
2. 発表標題 Effect of the viewpoint on motor learning and brain activity
3. 学会等名 Society for Neuroscience (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sawada, S., Kadota, H.
2. 発表標題 The effect of viewpoint conversion on motor memory
3. 学会等名 International Workshop on Human-Engaged Computing (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山崎雛子, 田中真理, 風間美咲, 平上慎之介, 二橋元紀, 門田宏, 関口浩文
2. 発表標題 皮質脊髄路興奮性調節の左右差が小さいほど両手協調運動の学習速度が速い
3. 学会等名 第72回日本体力医学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 関口浩文, 二橋元紀, 門田宏
2. 発表標題 皮質脊髄路入手出力特性のgainが高いほど運動学習は早い
3. 学会等名 第72回日本体力医学会大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担者	木村 岳裕  (Kimura Takahiro)  (50632254)	金沢大学・国際基幹教育院・准教授    (13301)	