

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03154

研究課題名（和文）運動学習速度を規定する神経生理学的要因

研究課題名（英文）Neurophysiological traits related to the motor learning rate

研究代表者

関口 浩文（Sekiguchi, Hirofumi）

山梨大学・大学院総合研究部・教授

研究者番号：20392201

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：初めての運動でもすぐできるヒトとそうでないヒトがいることは経験的に明らかである。しかし、両者にどのような違いがあるのか不明である。したがって、両者に関して神経生理学的特徴の違いが無いかを検討した。その結果、ボール系スキルを速く獲得できるヒトはボール系スポーツを長く継続してきたヒトであり、特に1つのスポーツに熟練することが新奇なボール系スキル獲得に重要であることが示唆された。更に、皮質脊髄路の利得はボール系スポーツと非ボール系スポーツの経験によって反対の可塑的变化を示した。また経頭蓋磁気刺激によるマッピングは、スキルに関連する筋間の重複する面積が広いヒトほど、スキル獲得が速いことが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は未経験の運動をする実施する前の神経生理学的指標を予め記録し、その後のトレーニングによる達成速度と照らし合わせ、潜在的に存在する「すぐできるヒト」と「そうでないヒト」の違いを明らかにするものである。これまでセンスの有無や運動神経の良し悪し、遺伝と言う表現で理解されていた事象に、科学的視点を与える点で学術的に重要である。

また、現代社会において健康寿命の延伸は社会的コスト削減のため、急務の課題である。すぐできるヒトの特徴が明らかとなれば、そうなるための介入により、運動に対する苦手意識を減らすことで生涯スポーツ人口の増大やリハビリの促進にも寄与できるだろう。その意味で社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：In novel motor skill acquisition, it is empirically clear that some can quickly reach a high level, while others require a longer time to reach even an enjoyable level. However, it is unclear what kinds of differences exist between them. Therefore, we investigated the possibility of differences between fast and slow learners' neurophysiological characteristics. The results suggested that individuals who acquire ball skills quickly have been playing ball sports for a long time, and that proficiency of a single sport, in particular, is crucial to the acquisition of novel ball skills. Furthermore, the gain of the corticospinal tract showed the opposite plastic change in the experiences of ball sports and non-ball sports. In addition, data from cortical mapping by transcranial magnetic stimulation suggested that the greater the area of overlap between skill-related muscles, the faster the acquisition of novel motor skill.

研究分野：神経科学，神経生理学，運動制御

キーワード：運動学習速度 fast learner 神経生理学的要因 経頭蓋磁気刺激 皮質運動表象

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

初めての運動でもすぐできてしまうヒトもいれば、なかなかできるようにならないヒトもいる。一般にこの違いは「センスの有無」、「運動神経の良し悪し」、「遺伝」と言う言葉で表現されるが、科学的に何が異なるのか明らかとされていない。経頭蓋磁気刺激による脳機能マッピング手法を用いた先行研究では、バレーボールのナショナルレベルのアタッカーでは三角筋中部線維と橈側手根伸筋に対する脳機能マップのオーバーラップ面積が、ランニング選手よりも有意に広いことが報告されている (Tyč et al. 2005, Eur J Neurosci)。このことから、日ごろより日常的な活動によって培われてきた脳の皮質表象の可塑的变化において、ある筋間の皮質表象同士のオーバーラップする面積が広いヒトほど、その筋群が参画する初めての運動でも速く上手くなるかもしれないという仮説と立てた。

また、皮質 - 筋コヒーレンスでは、15-35Hz の帯域に最も顕著なピークが現れ、収縮筋の支配脳領域近傍に最大値を示すこと (Conway et al. 1995 J Physiol)、そのピーク値が大きいヒトほど等尺性の力発揮は不安定になることが報告されている (Ushiyama et al. 2017 Clin Neurophysiol)。このことから、ピーク値が低いヒトほど、力が安定して制御でき、初めての運動でも速く上手くなるのではないかという仮説を立てた。

さらに、多関節の運動は、筋シナジーパターンで効率的に運動が制御されていることが報告されており (Hagio et al. 2015 Front Hum Neurosci)、初めての運動でも速く上手くなるヒトとそうでないヒトでは、筋シナジーパターンの数の違いや特異的なパターンを持っている可能性はないかという仮説を立てた。そして、水泳に長く従事していた選手の伸張反射が大きくなること (Ogawa, Kim, Sekiguchi et al. 2009, Eur J Appl Physiol)、バレエダンサーは高齢者でも伸張反射応答が小さく維持されている (Kim, Ogawa, Sekiguchi et al. 2020, Physiol Rep) ことなど、経験してきたスポーツに伴い神経系が変化することが分かっており、スポーツ歴と神経系の変化だけではなく、スキル獲得速度にも何らかの関係性が見られないかという仮説を立てた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、以下を明らかにする事であった。

- (1). 主動筋 - 協働筋間の経頭蓋磁気刺激による皮質表象 (脳機能マップ) において、どのようなヒトが初めての運動でも速く上手くなるのかを明らかにすること。
- (2). 皮質 - 筋コヒーレンスにおいて、どのようなヒトが初めての運動でも速く上手くなるのかを明らかにすること。
- (3). 筋シナジーパターンにおいて、どのようなパターンを持つヒトが初めての運動でも速く上手くなるのかを明らかにすること。
- (4). どのようなスポーツ歴を有するヒトが初めての運動でも速く上手くなるのか、また皮質脊髄路興奮性にスポーツ歴との関係が見られるのかを明らかにすること (Sekiguchi et al. 2021, Scientific Reports)。

### 3. 研究の方法

(1). 脳機能マッピングと運動学習：被験者は、頭頂 (Cz) を基準に左右にまたがるグリッドを TMS ナビゲーションシステムである Brainsight (Rogue Research Inc., Canada) 上で作成し、各グリッドを 4 回ずつ刺激して、各筋の脳機能マップを同定した。グリッド間隔は 15mm とした。被検筋は三角筋前部線維 (DL) および橈側手根屈筋 (FCR) の組み合わせと、上腕二頭筋 (BB) および長掌筋 (PL) の組み合わせの 2 種類を異なる被験者群で実施した。刺激強度は、前者の組み合わせで運動時閾値の 1.3 倍、後者で安静時閾値の 1.2 倍とした。前者の組み合わせにおいて、近位筋である DL は安静時に閾値強度が非常に高くなるため、DL 及び FCR それぞれにおいて最大随意収縮 (MVC) の 5% に相当する等尺性の筋活動発揮時に閾値を決定し、またマップ記録時も 5% MVC の等尺性筋活動を発揮させた。いずれの実験も運動課題は、2 つボールの片手ジャグリング内回しとし、磁気刺激によるマップ記録後、少なくとも 1 日以上空けて実施した。ボールを落とすか、動作が止まったら 1 試行終了とし、10 試行を 1 セッションとして 15 セッション (150 試行) 実施した。

各グリッドで 4 回記録された運動誘発電位 (MEP) の平均振幅からマップを描き、筋毎に MEP の最大値で標準化して、その 10% から 80% までの 8 段階のマップ面積を算出するとともに、2 筋の組み合わせで重複する面積を算出した。ジャグリングは総キャッチ数を指標とし、重複する面積を独立変数、総キャッチ数を従属変数として回帰分析を行った。有意水準は  $p < 0.05$  とした。

(2). 皮質 - 筋コヒーレンスと運動学習：被験者はリクライニングシートに座り、右手を机上に設置された示指による等尺性外転力測定装置まで伸ばして、前方約 50cm に設置されたオシロス

コープ画面を見た。示指による最大外転力を測定後、その 20%強度の力を発揮した。被検筋は、第一背側骨間筋とし、筋電図を記録した。脳波は、5ch (FC3, C1, C3, C5, CP3) から記録し、グラウンド電極とリファレンス電極はそれぞれ額と右耳朶に設置した。各電極の入力抵抗は 5kΩ 以下とした。脳波計は V-Amp (Brain Products, Germany) を使用し、帯域フィルタは 0.5-200Hz で、サンプリング周波数は 2kHz とした。実験中、被験者にはヘッドホンを装着し、ホワイトノイズを聞かせた。

運動課題は、日を変えて、シーケンシャル・フィンガー・タッピング課題を実施した。示指を 1、中指を 2、環指を 3、小指を 4 とし、1-2-4-3-1 の順に、可能な限り、速く、正確に実施することを指示した。30 秒間のタッピングと 30 秒間の休憩を 1 セットとして、12 セット繰り返した。運動課題は、タッピングの成功率を 1 シーケンスの平均時間で除すことにより、Skill Index を算出した。脳波データから、帯域 (15-35Hz) に関して皮質筋コヒーレンスを算出し、Skill Index との関係性を回帰分析にて検討した。有意水準は  $p < 0.05$  とした。

(3). 筋シナジーパターンと運動学習：被験者は右上肢周りの 15 筋 (尺側手根屈筋、橈側手根屈筋、尺側手根伸筋、長橈側手根伸筋、腕橈骨筋、上腕二頭筋、上腕三頭筋外側頭、上腕三頭筋長頭、三角筋前部、中部、後部、大胸筋、棘下筋、広背筋、僧帽筋) から筋電図を記録し、力覚インターフェースデバイス (PHANTOM Premium 1.5HF) を用いて、到達運動による力場学習を実施した。到達運動のターゲットは、スタート位置から 10cm 離れた 5 方向 (右から 0 度、45 度、90 度、135 度、180 度) とし、疑似ランダムに 10 回ずつ計 50 回練習 (練習課題) して、規定の速度範囲内で実施できるようにした。その後、ベースライン課題として、初めの 20 回は各方向に 4 回ずつ null フィールドで実施し、その後 150 回はエラークランプ試技 (レバーがターゲットに対してまっすぐにしか進まない) とした。最後に力場学習として、ターゲットは 90 度方向一つとし、時計回りの力場に対してまっすぐ到達運動を行うことを指示した。初回から 170 回は力場がかかり (ランダムに挿入されたエラークランプ 50 回を含む)、最後の 30 回は null フィールド (ランダムに挿入されたエラークランプ 10 回を含む) で実施し、計 200 回行った。筋電図データからシナジーパターンを抽出し、パフォーマンスとの関連性を検討した。

(4). スポーツ経験と運動学習：被験者は、右の上腕二頭筋から筋電図を記録し、最大随意収縮 (MVC) の 10% に相当する筋活動を発揮しているときに、一次運動野に経頭蓋磁気刺激を与え、運動時間閾値の 10% から 5% 刻みで刺激強度を上げ、皮質脊髄路の入出力特性を算出した。運動課題は日を変えて、2 ボールの右手によるジャグリング内回しを 250 回実施した。その後、幼児期以降に年単位で定期的な実施してきたスポーツ歴に関して聞き取りをした。スポーツ履歴と運動課題および神経系の指標との関係性を検討した。

#### 4. 研究成果

得られた成果は、今後論文投稿を予定しているため、現時点で図表等の詳細は伏す (項目 4 は既に publish された内容のため、これを除く)。

(1). 脳機能マッピングと運動学習：DL-FCR の組み合わせと、BB-PL の組み合わせで、いずれも単純なマップ面積の重複面積とジャグリングの総キャッチ数との関係に有意な関係性は見られなかった。しかしながら、各筋の MEP の最大値 (MEPmax) でそれぞれ筋の応答を標準化し、さらに各筋のマップ面積の合計に対する重複面積の割合とジャグリングの総キャッチ数の関係を見たところ、いずれの組み合わせでも有意な関係性が検出された。したがって、2 筋の総面積に対する相対値としての重複面積が広いほど、初めて実施するジャグリングの総キャッチ数が多く、速く上手くなることが示唆された。

(2). 皮質 - 筋コヒーレンスと運動学習：皮質活動と筋活動の間に有意なコヒーレンスを示す被験者が少なく、統計に耐えうるデータを取得できなかった。有意なコヒーレンスを示した被験者においては、振幅とシーケンシャル・フィンガー・タッピング課題における Skill Index との間に右下がりの傾向を見て取れた。すなわち、コヒーレンスの帯域における最大振幅値が低いほど Skill Index が高い傾向にあった。このことから、皮質と筋において同期的な活動が無いヒトの方がスキルの獲得が早い可能性が考えられた。今後、解析方法の再考や被験者数を増やすことでさらに詳細に検討する必要がある。

(3). 筋シナジーパターンと運動学習：パフォーマンスの上位群と下位群に分け、検討した。上位群と下位群で筋シナジーの数において、上位群の方が少ない傾向は見られたが、統計的な差はなかった。そこで、筋シナジーの数は等しいものとして、寄与率 (筋シナジーから元の筋活動をどれだけ再現できるか) が約 80% となるものを筋シナジーの個数としてその後の分析を行った。被験者毎に 3 つの筋シナジーを算出し、k-means クラスタリングにより分類した結果、すべての筋シナジーは 4 種類のクラスターに分類できた。詳細に比較すると、2 番目の筋シナジーの運動開始直後の活動度が、上位群と下位群で大きく異なった。すなわち、上位群の方が、手首の筋と肩の屈筋を協調させる筋シナジーを運動開始時に大きく貢献させており、そのことが力場学習を促進させる要因になっていることが示唆された。

(4). スポーツ経験と運動学習：すべての競技歴の総種目数，総経験年数，およびボール系競技歴と非ボール系競技歴に分けた際のそれぞれの総経験年数，総種目数とジャグリングの総キャッチ数の関係を各々検討したところ，ボール系競技歴の総経験年数との間に有意な関係が検出された (Cohen's  $f^2 = 0.441$ ,  $p=0.003$ )。また皮質脊髄路興奮性の入出力特性が示す S 字曲線の最大傾斜である gain とジャグリング総キャッチ数の関係を検討したが，関係性は見られなかった。ボール系競技歴の総経験年数とジャグリング総キャッチ数の間に有意な関係が見られたことから，さらに各被験者内で最も長く経験したボール系競技歴の経験年数および最も長く経験した非ボール系競技歴の経験年数と総キャッチ数の関係を検討したところ，さらに強い関係 (Cohen's  $f^2 = 0.704$ ,  $p=0.0004$ ) が前者で見られた (図 1)。また，図 1 から手を使わないサッカー経験者でもその経験年数が長いほど総キャッチ数が多いこと，バスケットボールやバレーボールのようにボールのサイズが非常に大きなスポーツでも長く経験しているほど総キャッチ数が多いことが分かった。また，その開始年齢と総キャッチ数の関係を検討したところ，関係性は検出されなかった。

これらのことから，初めてのボール系スキルを速く獲得するためには，単に多くのスポーツ経験があれば良いということではなく，一つのボール系競技歴を長く継続することが重要であることが明らかとなった。これは，熟練に関係しているものと考えられる。

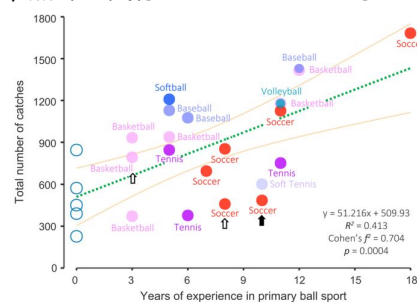


図 1. 最も長く実施したボール系競技歴の経験年数と総キャッチ数の関係

図 2 は，最も長く実施したボール系，非ボール系競技歴の経験年数と皮質脊髄路 gain の関係を示している。ボール系競技歴が長いほど gain が低く，逆に非ボール系競技歴が長いほど gain が高いことが分かった。すなわち，1 つのスポーツを長く継続すると皮質脊髄路興奮性において可塑的な変化が生じ，それはボール系か非ボール系かで真逆の方向に変化することが示唆された。経頭蓋磁気刺激は脳からの運動指令を模しているとも言える。したがって，運動指令を少し変えた時，gain が低いと言うことは，筋からの出力が少ししか変わらないことを意味し，gain が高いと言うことは，筋出力が大きく変わることを意味する。ボールスキルなどは，微妙な調節が必要なため，gain を低くし，小さな筋出力による微細な制御を可能にしているかもしれない。逆に非ボール系競技，例えば跳躍などは地面に短時間に大きな力を加え，高く跳ぶことが求められる。したがって，gain が高いと言うことは少し運動指令を変えるだけでも大きな筋出力につながることから非常に合理的とも言える。そのようなスポーツ特性の需要に見合った変化が神経系にも生じているものと考えられた。

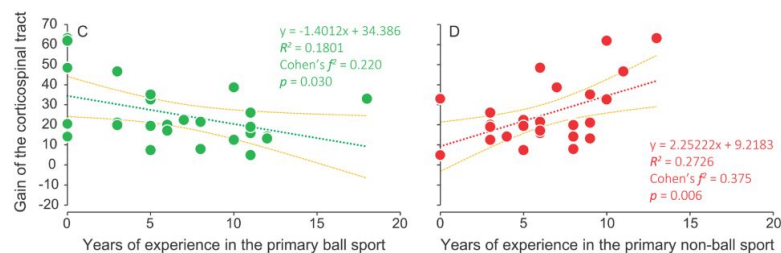


図 2. 最も長く実施したボール系，非ボール系競技歴の経験年数と皮質脊髄路 gain の関係

以上のことから，ボール系スポーツあるいは非ボール系スポーツを長く続けると，神経系もそれに見合った可塑的な変化を生じ，また熟練することで新たなスキル獲得の素地が形成される可能性が示唆された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Chiba Shintaro, Yagi Tomoko, Ozone Motohiro, Matsumura Mari, Sekiguchi Hirofumi, Ganeko Masashi, Uchida Sunao, Nishino Seiji	4. 巻 13
2. 論文標題 High rebound mattress toppers facilitate core body temperature drop and enhance deep sleep in the initial phase of nocturnal sleep	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0197521
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0197521	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 Kim GeeHee, Ogawa Tetsuya, Sekiguchi Hirofumi, Nakazawa Kimitaka	4. 巻 8
2. 論文標題 Acquisition and maintenance of motor memory through specific motor practice over the long term as revealed by stretch reflex responses in older ballet dancers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physiological Reports	6. 最初と最後の頁 e14335
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14814/phy2.14335	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 Sekiguchi Hirofumi, Yamanaka Kentaro, Takeuchi Shigeki, Futatsubashi Genki, Kadota Hiroshi, Miyazaki Makoto, Nakazawa Kimitaka	4. 巻 11
2. 論文標題 Acquisition of novel ball-related skills associated with sports experience	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 12379
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-91120-7	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 Obata Hiroki, Kim GeeHee, Ogawa Tetsuya, Sekiguchi Hirofumi, Nakazawa Kimitaka	4. 巻 26
2. 論文標題 Effect of Long-Term Classical Ballet Dance Training on Postactivation Depression of the Soleus Hoffmann-Reflex	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Motor Control	6. 最初と最後の頁 169 ~ 180
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1123/mc.2021-0079	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9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 星野元訓, 中西智也, 加藤辰弥, 関口浩文, 中澤公孝
2. 発表標題 下肢切断後の義足使用による皮質脊髄路興奮性の変調
3. 学会等名 第36回日本義肢装具学会学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹内成生, 関口浩文, 宮崎真
2. 発表標題 抑うつ程度とコントラスト判断の事象関連電位検討
3. 学会等名 第38回日本生理心理学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 関口浩文, 佐々木睦, 二橋元紀, 門田宏
2. 発表標題 左右脳機能マップと両手協調運動によるスキル学習との関連性
3. 学会等名 第50回日本臨床神経生理学会学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 関口浩文, 二橋元紀, 竹内成生, 山中健太郎, 門田宏, 宮崎真, 中澤公孝
2. 発表標題 新奇なボール関連スキルの獲得はスポーツ歴に依存する
3. 学会等名 第74回日本体力医学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東原綾子, 二橋元紀, 関口浩文, 中川剣人, 広瀬統一
2. 発表標題 ハムストリングスと大腿四頭筋における筋力比と皮質脊髄路入出力特性との関連
3. 学会等名 第74回日本体力医学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二橋元紀, 関口浩文, 小宮山伴与志
2. 発表標題 皮質脊髄路興奮性と足関節捻挫受傷リスクに関する前向き研究
3. 学会等名 第74回日本体力医学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮崎真, 竹内成生, 関口浩文
2. 発表標題 時間順序判断におけるベイズ推定の神経基盤 経頭蓋磁気刺激による研究
3. 学会等名 日本スポーツ心理学会第45回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坂谷大輔, 関口浩文, 宮崎真, 平島雅也, 門田宏
2. 発表標題 運動学習能力に関連した安静時脳活動の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井田博史, 関口浩文, 竹内成生
2. 発表標題 仮想現実における立位姿勢制御: 経頭蓋磁気刺激法による検討
3. 学会等名 第51回日本臨床神経生理学会学術大会
4. 発表年 2021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	門田 宏  (Kadota Hiroshi)  (00415366)	高知工科大学・情報学群・准教授   (26402)	
研究分担者	河野 豊  (Kohno Yutaka)  (10392200)	茨城県立医療大学・保健医療学部・教授   (22101)	
研究分担者	宮崎 真  (Miyazaki Makoto)  (30392202)	静岡大学・情報学部・教授   (13801)	
研究分担者	牛山 潤一  (Ushiyama Jun-ichi)  (60407137)	慶應義塾大学・環境情報学部(藤沢)・准教授   (32612)	
研究分担者	野崎 大地  (Nozaki Daichi)  (70360683)	東京大学・大学院教育学研究科(教育学部)・教授   (12601)	



6. 研究組織（つづき）

	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	山中 健太郎  (Yamanaka Kentaro)  (90359662)	昭和女子大学・生活機構研究科・教授    (32623)	
研究 分 担 者	中澤 公孝  (Nakazawa Kimitaka)  (90360677)	東京大学・大学院総合文化研究科・教授    (12601)	

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