

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月25日現在

機関番号：32301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03074

研究課題名(和文) 運動学習速度を規定する脳解剖学的・神経生理学的要因

研究課題名(英文) Anatomical and neurophysiological factors of the human brain that define the speed of motor learning

研究代表者

関口 浩文 (Sekiguchi, Hirofumi)

上武大学・ビジネス情報学部・教授

研究者番号：20392201

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,500,000円

研究成果の概要(和文)：初めての運動でもすぐできるようにな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。しかしながら、実際、両者にどのような違いがあるのかはわかっていない。したがって、新奇な運動学習に関して早く上手くなるヒトとそうでないヒトで、脳の解剖学的、神経生理学的特徴に違いが無いかを検討した。

その結果、早く上手くなるヒトは脳の運動関連領域において興奮性が高いこと、更に両手協調運動の場合には両手の皮質脊髄路興奮性に左右差が無いほど、早く上手くなる可能性が示唆された。

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前の脳の解剖学的状態や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を実施することで、運動に対する苦手意識を減らし、生涯スポーツ人口増大に寄与できるかもしれない。その意味で社会的意義も大きい。

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 need a long time to reach even an enjoyable level.

However, it is not known what kind of differences exists between them. Therefore, we investigated whether there were differences in anatomical and neurophysiological characteristics of the human brain between fast learners and slow learners.

As a result, it was suggested that excitability in the motor-related regions of the brain was relatively high in fast learners, and furthermore, in the case of bimanual coordination tasks, the bilateral difference in the corticospinal excitability in fast learners was smaller than that of slow learners.

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 片手運動 両手協調運動

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

なぜ、未経験の運動でもすぐできるヒトと、そうでないヒトがいるのか！一般にこの違いに対するもっともらしい答えは“遺伝”かもしれない。双子の研究から、筋線維タイプに関しては遺伝によって説明できるとされている。しかしながら、スキルはどうか？日々の経験や練習の積み重ねに依存するところが大きいと考えられている。しかしながら、日々の経験・練習の積み重ねによりどのような発達を遂げたヒトが新奇な運動課題を早く獲得できるのか、具体的、科学的に分かっていない。本研究では、何の違いが両者の違いをもたらすのか、解剖学的または神経生理学的視点からこれを明らかにしようとした。これまでの解剖学的または神経生理学的手法を用いた研究では、「トレーニングに伴う変化」や「熟練 vs 非熟練」などの観点で研究されたものが多く、そもそもどのような人が「すぐできるヒト」なのかという観点がなかった。しかしながら、この観点は本来初めに押さえておくべき事項であり、実はこの観点が運動の好き嫌いを決定する重要な要素となっているかもしれない。一般に運動学習は、以下の2つの学習局面によって特徴づけられる(Karni et al. 1998, Proc Natl Acad Sci; Landi et al. 2011, J Neurosci)。

(1). トレーニングの単一セッション内、もしくは初めの数セッションで見られるパフォーマンスの急速な改善。

(2). トレーニングを繰り返すことによって見られる緩やかなパフォーマンスの改善。

上記1は線条体、小脳の活動と、上記2は運動野の活動と関連している(Ungerleider et al. 2002, Neurobiol Learn Mem)。ラットの研究では、運動地図の再構成やシナプス形成は学習後期に起こることが報告されており、上記2は運動野での reorganization と関連していると考えられる(Kleim et al. 2004, J Neurosci)。このように学習の2局面とその時の脳活動に関してはかなり明らかとなってきているが、そもそも「すぐできるヒト」がどのような特徴を持っているかは明らかとなっていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、以下を明らかにすることであった。

(1). 学習速度の違いによって、トレーニング前から既に潜在的な脳の解剖学的違いや神経生理学的違いが存在するのかが否か。

(2). 脳の解剖学的変化における速度の個人差、すなわち変化の生じやすいヒトとそうでないヒトがいるのかが否か。

3. 研究の方法

(1)

早くできるヒトとそうでないヒトに関して、脳の解剖学的発達部位に特徴的な違いがないか、VBM (Voxel Based Morphometry) 手法を用いて検討した。初めに脳の解剖画像をMRI (核磁気共鳴画像診断装置) にて撮像し、その後、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。被験者はレバーを持ってスタート位置からターゲットまで10cmの到達運動を実施し、外乱となる力場に適応して真っ直ぐ到達運動ができるよう練習した。その学習度合と相関のある脳部位があるか否か検討した。

被験者は24名(男性18名、女性6名)であった。到達運動は、ベースライン50試行(null-force field)、力場学習250試行(force field)、ウォッシュアウト100試行(null-force field)からなる。そのうち、ベースライン試行中10回、力場学習中36回、ウォッシュアウト中14回、エラーランプ試行(レバーが真っすぐにしか動かず、被験者が発揮した力を測定)がランダムに含まれている。10試行毎のbinに区切ってその平均エラーを算出し、以下の各指標を計算した。

到達運動の力場学習に関して、以下の指標を算出した。FF_score: 力場学習の各binにおけるエラー(スタート位置からターゲットまでの直線に対するズレの最大値)に関して、ベースラインの平均エラー+2SD以上のbin数と定義、Skill index: 力場学習の最後の5binの平均エラーと初めの5binの平均エラーから改善率を出し、FF_scoreで除した値。%BL: 力場学習の最後の5binにおける平均エラーのベースライン平均エラーに対する割合。FFall/BL: 力場学習全binの平均エラーをベースラインの平均エラーで除した値。

早くできるヒトに特異的な安静時の自発性脳活動(Resting state brain activity)があるか否か検討した。まず、10分間の安静仰臥位における脳活動をMRI(MAGNETOM, Verio 3T, SIEMENS製)にて撮像し、その後、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。その学習度合と相関のある脳部位があるか検討した。被験者は24名(男性18名、女性6名)であった。到達運動課題は、上記に準ずる。

早くできるヒトとそうでないヒトに関して、経頭蓋磁気刺激(TMS)に対する皮質脊髄路入出力特性に何らかの傾向が無いか検討した。最大随意収縮の20%レベルの筋活動中、三角筋前部より皮質脊髄路入出力特性を導出し、その後、力覚インターフェースデバイス(PHANToM

Premium 1.5HF)を用いて、片手到達運動による力場学習を実施した。入出力特性とパフォーマンスの指標に何らかの関係性が見られないか検討した。被験者は20名(男性19名,女性1名)であった。到達運動課題は、上記に準ずる。

エラーランプ試行を除く力場学習の初めの30試行を初期値,最後の30試行を最終値として平均エラーを算出した。エラーランプ試行は、初期値範囲および最終値範囲に各4回ずつあった。

早くできるヒトとそうでないヒトに関して、経頭蓋磁気刺激(TMS)に対する皮質脊髄路入出力特性に何らかの傾向が無いか検討した。左右の上腕二頭筋より3段階の刺激強度に対する応答を記録し、3点回帰した傾きを算出した。その後、両手協調運動である3ボールカスケードジャグリングを練習させた。左右の生理学的指標とパフォーマンスの指標に何らかの関係性が見られないか検討した。被験者は32名(男性29名,女性3名)であった。運動課題である3ボールカスケードジャグリングの評価は、250回の試行中に本ジャグリング課題の順番でキャッチできた総キャッチ数により行った。

(2). 両手協調運動である3ボールカスケードジャグリングの練習に伴う脳の解剖学的変化が検出できないか、短期間で高頻度のMRI撮像により検討した。被験者は男性8名であった。1日15分のジャグリング練習を11日間実施し、平均キャッチ回数,最大キャッチ回数を算出した。MRI撮像はおよそ2日に1回記録し、1名につき計6回撮像した。VBMにおける縦断解析を行い、有意な継時的変化が起きる部位を同定した。VBM解析において有意な増加が見られた部位を関心領域とし、局所灰白質容量の数値を抽出して相関解析および分散分析にてパフォーマンスデータとの関連を検討した。

4. 研究成果

得られた成果は、今後投稿を予定しているため、現時点で図表等の詳細は伏す。

(1)

すべての指標に関して、相関解析を実施したが、有意な相関を示す脳部位は検出されなかった。本研究において課した運動は比較的単純な力制御課題であったことが検出力に影響した可能性がある。今後、複雑なスキル学習を課して検討する必要があるかもしれない。

FF_scoreと右角回(BA39)の活動に有意な負の相関が検出された。すなわち、角回の活動が低いヒトほど、ベースラインエラーの平均+2SDレベル以下に早く到達する。これは早くエラーが小さくなることを意味している。

%BLと左右下半月小葉,左二腹小葉の活動に有意な負の相関が検出された。すなわち、これら小脳の活動が高いヒトほど、ベースラインの平均エラーに対する最終平均エラーの割合が低い。FFall/BLと左下半月小葉,左二腹小葉,左薄小葉の活動に有意な負の相関が検出された。すなわち、これら小脳の活動が高いヒトほど、力場学習の全体的なエラー小さいことを意味している。

初見の楽譜を演奏できるピアニストは、右角回が良く賦活されるとの報告がある(鈴木ら2009)。また、橋小脳と呼ばれる下半月小葉,二腹小葉,薄小葉は、大脳皮質運動野から運動指令を受け、運動の円滑化に寄与すると考えられている。これらのことから、安静時に右角回の活動が高いヒトほど、初見の運動でも早く上達し、さらに上記小脳部位が強く活動しているヒトほど、練習全体を通して、上手く、最終的なパフォーマンスも高いことが示唆された。(坂谷大輔, 関口浩文, 宮崎真, 平島雅也, 門田宏, 電子情報通信学会 2019, 高知)

TMSの刺激強度を数段階設定し、刺激強度と運動誘発電位振幅の入出力特性をシグモイド曲線回帰し、最大傾斜を皮質脊髄路興奮性のgain(利得)として、算出した。gainを独立変数,最終平均エラーを従属変数に回帰分析した結果,gainが高いヒトほどエラーが小さいと言う結果が得られた($R^2=0.201$, $p<0.05$)。また、同様にgainを独立変数,エラーランプ時に測定された力の初期値と最終値から改善率を算出し、従属変数として回帰分析した結果,gainが高いヒトほど、改善率が大きいことが分かった($R^2=0.320$, $p<0.01$)。

これらの結果から、片手運動に関して,gainが高いヒトほど早く上手くなる可能性が示唆された。gainが低いヒトは少し入力(運動指令)を変えても出力が変わらず、同じことを癖のように何度も繰り返してしまうが,gainが高いヒトは少しの入力の違いで出力を大きく変えることができ、そのばらつきの中から最善の運動指令を早く導き出せる可能性が考えられる。(関口浩文, 二橋元紀, 門田宏, 第72回日本体力医学会 2017, 松山)

総キャッチ数は、500回未満が9名,500以上1000回未満が15名,1000回以上が8名であった。左右のgainの和を独立変数,総キャッチ数を従属変数として回帰分析をした結果,有意な関係は見られなかった($R^2=0.0312$, $p=0.329$)。左のgainから右のgainを差し引いたgainの左右差を独立変数,総キャッチ数を従属変数として回帰分析をした結果(正負それぞれで回帰),左のgainが右より高い被験者群($R^2=0.333$, $p<0.05$),右のgainが左より高い被験者群($R^2=0.312$, $p<0.05$)それぞれ,有意な関係性が見られた。さらに,gainの左右差の絶対

値を左右の gain の和で除した値を独立変数に総キャッチ数を従属変数に回帰分析を実施した結果、有意な関係性が見られた ($R^2=0.308$, $p<0.001$)。

これらの結果から、両手協調運動に関して、両腕の皮質脊髄路興奮性の gain に左右差が無く、且つ高いほど、早く上手くなる可能性が示唆された。(山崎雛子, 田中真理, 平上慎之介, 二橋元紀, 門田宏, 関口浩文, 第 72 回日本体力医学会 2017, 松山)

(2). VBM において、多重比較補正後 (クラスターレベル), 有意水準 5% で全脳解析をした結果、補足運動野, 中心後回, 上前頭回, 弁蓋部の灰白質密度が継時的に有意な増加を示した。VBM における縦断解析を行った結果、多くのジャグリングの先行研究において灰白質容量の増加が見られた頭頂 - 後頭領域ではなく、補足運動野や前頭葉における灰白質容量の増加が確認された。また、被験者間で見ると増加率に大きな差が見られた。すなわち、灰白質容量の増加しやすい人とそうでない人がいる可能性が示唆された。

3 ポールカスケードジャグリングは、左右の異なる動作を同時に、そして断続的に協調させる運動である。補足運動野は、両手協調や複数の順序動作の制御などに関わっている部位であり、上前頭回は運動の企画や注意記憶など関わる部位である。本研究は、15 分という低強度のトレーニングであったため、運動が自動化される前段階の運動学習初期における灰白質容量の増加が確認できたと考えられる。

上記における成果(1) では、運動学習速度に関係した潜在的な解剖学的違いは、検出されなかった。成果(1) は、安静時自発性脳活動を見るだけで新奇な運動スキルを獲得しやすいか否かを選別できる可能性を秘めている。成果(1) は、これまで熟練者の皮質脊髄路興奮性における gain が非熟練者に比べ、トレーニングに伴って高くなることが報告されてきたが、もともと高いほど、片手運動スキルの熟達に近い可能性を示唆したものである。成果(1) は、両手協調運動の新奇スキル獲得に関して、単に両腕の皮質脊髄路興奮性の gain 高いだけではスキル獲得に結び付かず、左右差が無いことが前提にあり、且つ gain が高いほど、早く新奇スキルを獲得できる可能性を示唆するものである。成果(2)は、運動学習初期の脳の解剖学的変化を検出できた可能性を示唆するものである。

これらを総合すると、運動学習初期から脳はダイナミックに可塑的变化を引き起こし得るといふこと、更に運動関連領域の活動や皮質脊髄路の興奮性において高いほど、新奇な運動スキルを早く獲得できる可能性が示唆される。しかしながら、この結果は課された運動課題の種類に依存する可能性もあることから、今後、多様な種類の運動課題に関して検討する必要があるかもしれない。

これらの結果から、新奇な運動スキルを早く獲得できる潜在的特徴は脳の解剖学的側面より神経生理学的側面において、顕著に導出できる可能性の高いことが分かった。したがって、仮説と計画を更新し、最終年度前申請を経て、現在、本研究は「運動学習速度を規定する神経生理学的要因 (基盤研究(B) 平成 30 年度 ~ 令和 3 年度, 18H03154)」として発展的に継続している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Sasaki, A., Milosevic, M., Sekiguchi, H., and Nakazawa, K.
Evidence for existence of trunk-limb neural interaction in the corticospinal pathway
Neuroscience Letters, 668(6) pp.31-36, 2018 (査読有)

Miyazaki, M., Kadota, H., Matsuzaki, K.S., Takeuchi, S., Sekiguchi, H., Aoyama, T., Kochiyama, T.
Dissociating the neural correlates of tactile temporal order and simultaneity judgements
Scientific Reports, 6 Article number 23323, 2016 (査読有)

〔学会発表〕(計 5 件)

関口浩文, 二橋元紀, 門田宏
皮質脊髄路入出力特性の gain が高いほど運動学習は早い
第 72 回日本体力医学会大会 (愛媛) 2017 年 9 月

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
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早い
第 72 回日本体力医学会大会 (愛媛) 2017 年 9 月

二橋元紀, 佐藤大志, 箕輪洗洋, 岡田卓也, 関口浩文, 小宮山伴与志
慢性的足関節不安定性における皮質脊髄路興奮性の特徴
第 72 回日本体力医学会大会 (愛媛) 2017 年 9 月

Sekiguchi, H., Takeuchi, S., Miyazaki, M., and Yamanaka, K.
Changes associated with motor learning of TMS-evoked EEG responses
The 46th annual meeting of the Society for Neuroscience, San Diego, USA, 2016, Nov.

竹内成生, 宮崎真, 岸太一, 関口浩文
健常者における抑うつ状態と視覚誘発反応の関係性
第46回 日本臨床神経生理学会(福島)臨床神経生理学, 2016年10月

〔図書〕(計 1件)

ニューロメカニクス - 身体運動の科学的基盤 - (Roger M. Enoka 著 Neuromechanics of Human Movement 5th edition, Human Kinetics, USA) 西村書店
総監訳/鈴木秀次, 監訳/関口浩文, 井上恒, 小川哲也, 植松梓, 小林裕央, 訳者/関口浩文, 佐藤広之, 垣花涉, 城内泰造, 金祉希, 倉持梨恵子, 井上恒, 小川哲也, 植松梓, 小林裕央

〔その他〕

ホームページ等

http://www.mcontrol.org/p/blog-page_52.html

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 門田 宏

ローマ字氏名: KADOTA Hiroshi

所属研究機関名: 高知工科大学

部局名: 情報学群

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 00415366

研究分担者氏名: 宮崎 真

ローマ字氏名: MIYAZAKI Makoto

所属研究機関名: 静岡大学

部局名: 情報学部

職名: 教授

研究者番号(8桁): 30392202

研究分担者氏名: 山中 健太郎

ローマ字氏名: YAMANAKA Kentaro

所属研究機関名: 昭和女子大学

部局名: 生活機構研究科

職名: 教授

研究者番号(8桁): 90359662

研究分担者氏名: 中澤 公孝

ローマ字氏名: NAKAZAWA Kimitaka

所属研究機関名: 東京大学

部局名: 大学院総合文化研究科

職名: 教授

研究者番号(8桁): 90360677