

リラックスを習得するトレーニングの開発

早稲田大学 加藤孝基
(共同研究者) 同 堤幸治

Development of Training for Muscle Relaxation

by

Kouki Kato, Koji Tsutsumi
Faculty of Sport Sciences, Waseda University

ABSTRACT

It is known that muscle relaxation of one muscle induces temporal reduction in force level of the other muscle. Furthermore, many previous study investigated that transcranial direct current stimulation (tDCS) induced increase in training efficiency for motor learning. In the present study, we investigated the effect of tDCS on the primary motor cortex during 3 days' training including muscle relaxation. Thirty healthy participants were divided into 3 groups (without stimulation, with anodal stimulation and with cathodal stimulation), and they sustained isometric contraction of their right finger. Then participants simultaneously performed muscle relaxation of shoulder adduction immediately after audio cue from 50% MVC of isometric contraction for 30 times in each day. Participants performed the task for three days with 2 -10 days interval. As a result, sustained force level of finger contraction was temporally decreased by muscle relaxation of shoulder. However, changes in its effect due to the 3 days' training without stimulation was not observed. Likewise, no changes in its effect were observed in both anodal and cathodal groups. Present study revealed

that different mechanism might be involved in motor learning process for muscle relaxation compared to that of muscle contraction.

要 旨

ある筋をリラックス（弛緩）すると、同時に持続収縮を行う他筋の力が一時的に弱まること知られている。また、経頭蓋直流電気刺激法（transcranial direct current stimulation；以下、tDCS）を用いてトレーニングを行うと、その学習効果が促進することも知られている。本研究では、リラックス動作の学習が、tDCSを用いた一次運動野への刺激により促進するか否かを検討した。健常な成人30名は、陽極刺激群（10名）、陰極刺激群（10名）、刺激なし群（10名）に分けられた。右手指筋を50 maximal voluntary contraction（MVC）にて持続収縮した状態で、同時に右肩内転筋を50% MVCにて持続収縮し、音合図をもとに右肩内転筋のみを弛緩する課題を30回行った。この課題を各群ともに連続しない3日にわたって行い、刺激あり群では、課題中に一次運動野上にtDCS刺激した。解析では、肩関節筋の弛緩が指関節筋の持続収縮に及ぼす影響の変化を検証した。その結果、各群ともに、肩関節筋の弛緩により、維持していた指関節屈曲力は有意に低下した。しかしながら、3日間のトレーニングによるその影響の変化は認められなかった。また、陽極刺激および陰極刺激群においても同様に影響の変化は認められなかった。一次運動野へのtDCSを行っても、筋弛緩に関わるトレーニングに影響を及ぼさなかったことから、筋弛緩の学習メカニズムは収縮とは異なる可能性が示唆された。

緒 言

我々は、日常生活からスポーツにおけるあらゆる

る動作を行う際に、複数の筋の収縮及びリラックス（以下弛緩）を同時に行う。特に、スポーツや楽器演奏などの複雑な動作を行う際には、筋の弛緩が容易ではないことも知られている（Sakurai and Ohtsuki, 2000¹⁾；Furuya et al., 2008²⁾；Fujii et al., 2009³⁾；Yoshie et al., 2009⁴⁾）。その要因の一つとして、複数の筋を同時に制御する際には、互いの動作が阻害し合い、単関節同士の動作を組み合わせた単純な足し算にはならないことが関係すると考えられる（Baldissera et al., 2002⁵⁾；Borroni et al., 2006⁶⁾）。我々は近年、ある筋の弛緩も他部位に影響を及ぼすことを明らかにした（Kato et al., 2015; 2016^{6,7)}）。例えば、足関節筋を弛緩すると、一定の力で同時に持続収縮を行う手関節筋の力が一時的に低下すること（Kato et al., 2014⁸⁾）や、足関節筋の弛緩が安静状態の手関節筋を支配する皮質脊髄路の興奮性を低下させ、大脳皮質内の抑制機構が関与すること（Kato et al., 2016⁹⁾）を報告した。同様の現象は、同肢内の肘関節および指関節筋を対象としても見られ、その持続収縮力の低下はより顕著になることが明らかになった（国分ら, 2017¹⁰⁾）。

近年、簡便かつ安全に脳機能を修飾する手法として、経頭蓋直流電気刺激（transcranial direct current stimulation；以下、tDCS）が注目されている。tDCSとは、頭蓋上に微弱な直流電流を与えることで、大脳皮質の興奮性を変化させる手法であり、リハビリテーションや運動学習の場での臨床応用が期待されている。これまで様々な研究より、一次運動野（Primary Motor Cortex; M1）にtDCSの刺激を行うと、運動学習のパフォーマンスが向上することが報告されている（Nitsche et al., 2003¹¹⁾；Reis et al., 2011¹²⁾）。しかしながら、

これまでの tDCS を用いた運動学習の研究は、収縮動作を対象としており、弛緩に関わる研究はされていない。大脳皮質の抑制機構が関与する筋弛緩の運動学習を行う際には、筋の収縮とは異なるメカニズムが働く可能性がある。

複数の筋を用いる複雑な動作を行う際の、ある部位の弛緩による他部位への影響は、より円滑な動作を阻害するであろう。したがって、様々なスポーツの熟練者は、繰り返しのトレーニングによりこの影響を極力低下させていることが考えられる。そこで本研究では、これまでの研究で影響が強く出ると考えられている同肢内の複数筋を用いて、肩関節筋の弛緩が手関節筋の持続収縮力に及ぼす影響が3日のトレーニングにより変化するか否かを明らかにし、さらにトレーニング中の一次運動野に対する tDCS がトレーニング効果に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

1. 研究方法

1. 1 被験者

被験者は神経学的疾患のない健康な成人男女30名（右利き； 25.2 ± 3.5 歳）とした。実験に先立ち、被験者には本研究の趣旨および考えられるリスクを十分に説明した後、同意を得た。この実験は、早稲田大学の人を対象とした倫理委員会の承認を得て行われた。

1. 2 計測機器および実験課題

被験者は、刺激なし群（10名）、陽極刺激群（10名）および陰極刺激群（10名）の3群に分けられた。被験者は椅子に座り、肘関節部を固定した（図1）。また、右手の母指と示指でフォースセンサーをつまんだ状態でテープを用いて固定した。第一背側骨間筋（first dorsal interosseus: FDI）、短母指屈筋（flexor pollicis brevis: FPB）、総指伸筋（extensor digitorum: ED）、三角筋中部（deltoid muscle: DM）、大胸筋上部（pectoralis major

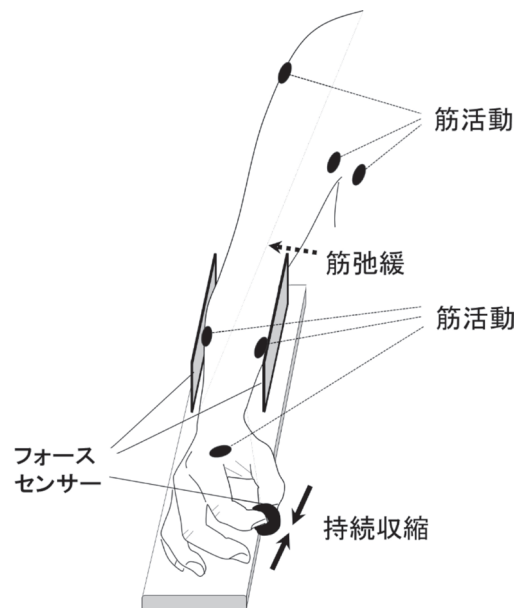


図1 実験の模式図

muscle: PMM)、上腕三頭筋（triceps brachii: TB）の表面筋電図（Electromyography: EMG）を筋電計（MEB-2216 Neuropack, NIHON KOHDEN, Tokyo）により測定した（図1）。やすりで皮膚表面を削り、アルコール綿でふき取ることで皮膚抵抗を軽減した。その後、電極を各筋の筋腹に貼付した。実験を始める前にインピーダンスレベルをチェックし、抵抗が大きい箇所は新たにセンサーを張り替えた。指関節屈曲力は、フォースセンサー（PH-462, DKH）を用いて計測した。EMG およびフォースセンサーの信号は、A/D 変換装置を介してサンプリング周波数は 1kHz で取得した。

被験者はまず、指関節屈曲力および肩関節内転力の最大随意収縮力（maximal voluntary contraction : MVC）をそれぞれ1回ずつ測定した。それぞれ、3秒以上の最大随意収縮を行い、最大値をその被験者の MVC とした。その後、験者の合図をもとに右手指を 50% MVC にて持続収縮した状態で肩関節内転筋を 50% MVC にて持続収縮した。被験者はリアルタイムで PC モニターから両関節屈曲力の視覚的なフィードバックを与

えた。その後、音合図に素早く反応して肩関節内転筋のみを弛緩する課題を行った。指関節筋の持続収縮力は出来る限り 50% MVC を維持するよう教示した。また、弛緩する際は、拮抗筋の活動がないことを毎回確認した。この課題は 30 回行い、連続しない 3 日に渡って行った。

tDCS は、neuroConn 社製 (Ilmenau, Germany) DC-Stimulator-Pulse を用いた。tDCS の刺激部位は Transcranial Magnetic Stimulation (TMS) によって特定した M1 の指関節支配領域とした。tDCS の電極は、刺激側を 25cm^2 ($5\text{cm} \times 5\text{cm}$)、反対側を 35cm^2 ($7\text{cm} \times 5\text{cm}$) とし、貼付位置は刺激側は左 M1 指関節支配領域直上、反対側を前額部とした。tDCS の刺激強度は 2mA とし、30 回の試行最中に刺激した。刺激後は頭皮状態を確認し、皮膚の赤みやかぶれがないかをチェックした。

1. 3 解析項目

音合図前 500ms から音合図後 2500ms までの 3000ms 間の指関節筋および肩関節内転筋のフォースおよび EMG を記録した。音合図から合図前 500ms の区間の指関節筋収縮力の平均値を Baseline (=1) として標準化した。さらに、3 日間 (インターバル: 2~10 日) にわたるトレーニングの効果を明らかにするために、0ms から 500ms および 500ms から 1000ms において値を比較した。肩関節内転筋 (PMM および TB) 弛緩時に拮抗筋 (DM) に筋活動が認められた試行を解析から除外した。

1. 4 統計処理

-500ms から 2000ms まで 500ms ごとの平均値を算出し、Wilcoxon の符号付順位検定を用いて、Baseline と比較した。3 日間分のデータを上記方法にて比較し、トレーニングの効果を検証するために、3 日間それぞれの 0ms から 500ms および 500ms から 1000ms のデータを、一元配置分散分

析を用いて比較した。また、tDCS の効果については、条件 (刺激なし、陽極刺激、陰極刺激) およびトレーニング時間を 2 要因とする対応のある 2 元配置分散分析 (ANOVA) を用いて検定した。ANOVA の結果、条件の主効果あるいは条件 × トレーニング時間の交互作用が有意であった場合には、Wilcoxon の符号付順位検定を用いて条件間の平均値間の差を検定した。統計処理には、SPSS (IBM SPSS Statistics Version 24, SPSS Inc., Chicago, USA) を用い、有意水準は $p < 0.05$ とした。

2. 研究結果

Force Level の変化を図 2A に、500ms ごとの平均値を図 2B 示した。指関節筋の持続収縮力は、Day 1 ~ Day 3 の全てにおいて、0~500ms、500~1000ms、1000~1500ms、1500~2000ms で Baseline より有意に減少した (図 3, $p < 0.05$)。しかしながら、0~500ms および 500~1000ms の日ご

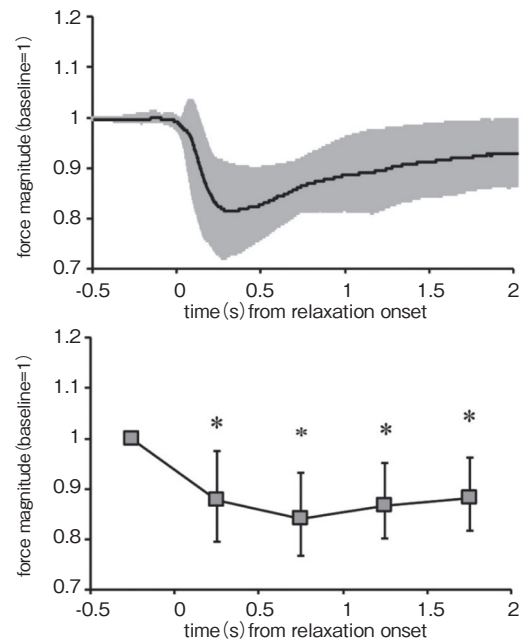


図2 刺激なし群の、肩関節筋を弛緩した際の指関節筋持続屈曲力の変化 (一日目)
下図は 500ms ごとの変化を表す

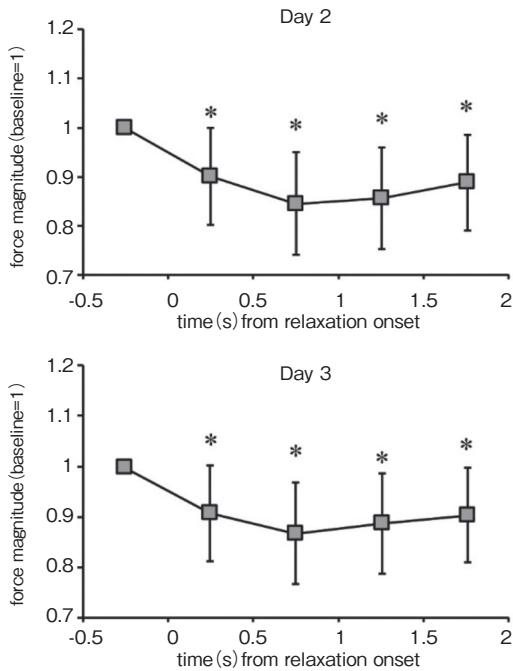


図3 刺激なし群の、肩関節筋を弛緩した際の指関節筋持続屈曲力の500msごとの変化（2日目および3日目）

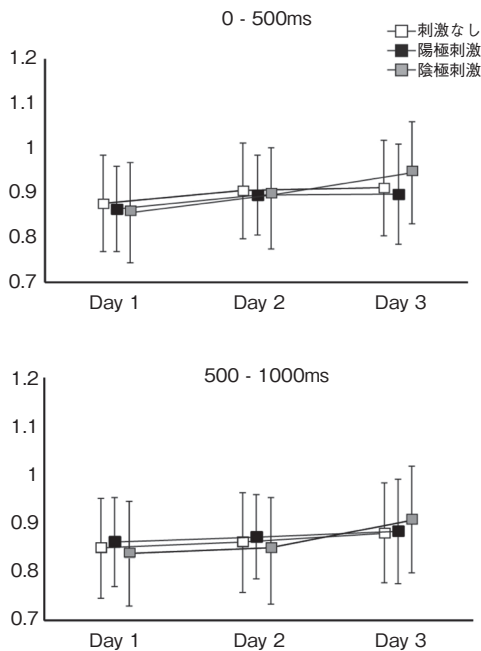


図4 0-500msおよび500-1000msの、1日目から3日目の各群変化に対するtDCSの影響

との変化に有意な差は認められなかった（図4）。また、tDCSの効果については、すべてにおいて主効果が認められなかった（図4）。

3. 考察

本研究の目的は、同肢内の複数筋を用いて、指関節筋の持続収縮時に肩関節筋の弛緩を行い、そのトレーニングによる影響の変化を明らかにすることである。肩関節内転筋の弛緩により、指関節筋の持続収縮力の低下が認められた。しかしながら、これらを3日に渡って繰り返し行っても、トレーニングの影響は認められなかった。さらに、tDCSによる刺激を行っても、その影響の強さは変化しないことが明らかになった。

これまでに、複数筋を対象にした研究では、下腿の筋を弛緩すると、同時に行う前腕の持続収縮力が減少することが明らかとなっている（Kato et al., 2014; 2015^{7,8)}）。また、同肢内の複数筋を対象にした研究では、肘関節筋の弛緩が指関節筋の持続収縮力を低下させることも明らかになっている（国分ら, 2017⁹⁾）。本研究により、肩関節内転筋においても、弛緩を行うと指関節屈曲筋の持続収縮力が減少することが明らかとなった。したがって、組み合わせに関わらず、ある筋の弛緩は同肢内他筋に影響を及ぼすことが示唆された。しかしながら、これらの課題を3日に渡って行ったが、その変化は認められなかった。さらに、tDCSによる陽極刺激および陰極刺激を行っても影響の強さは変化しないことが明らかになった。本研究は筋弛緩に関わる動作を対象としたため、大脳皮質の抑制機構が関与すると考えられる。NitscheとPauls（2000¹²⁾）は、tDCSを一次運動野に行うと、経頭蓋磁気刺激（Transcranial magnetic stimulation, 以下TMS）による運動誘発電位（motor evoked potential, 以下MEP）の振幅値が増加することを報告している。したがって、tDCS刺激に伴う皮質脊髄路の興奮性変化がこれ

までの先行研究のパフォーマンス向上に関わる要因の一つと推測されるが、本研究で用いた（抑制機構が関与すると考えられる）弛緩課題においては、皮質脊髄路興奮性が変化してもそのパフォーマンスに影響を及ぼさないことが明らかになった。本研究では、パフォーマンスのみを計測したが、今後 MEP も同時に計測することで、影響の変化がみられなかった要因を探ることが出来るだろう。

トレーニング（学習）の影響がみられなかった要因として、その期間が短かったことや、連続しない3日間であったことが挙げられる。さらに、本研究では、「刺激なし群」を用いたが、疑似刺激を用いて対照群を設ける必要もあるだろう。これまでに、スポーツ動作などにおいて、熟練者と未熟練者には筋活動の違いが顕著にみられることが明らかとなっている（Sakurai and Ohtsuki, 2002¹⁾）。筋の弛緩が他筋に及ぼす影響は、円滑なパフォーマンスを阻害するものと考えられ、種々のスポーツ動作特異的な他肢への影響の仕方も、熟練度により異なることが推察される。本研究における3日間のトレーニングは、それら様々なスポーツの熟練者に到達するまでの期間と比べて、はるかに短いことは明白である。今後、より長いトレーニングの期間を設けて、他筋への影響が変化するか、検討する必要があるだろう。また、被験者の都合を考慮し、連続しない3日のトレーニングとなった。被験者の中には、一週間以上トレーニングの期間があいてしまう場合もあり、トレーニングの効果が減少したことも考えられる。今後、よりトレーニングの効果が発揮されると思われる方法を用いて検討することが求められる。

4. 結論

本研究より、肩関節内転筋の弛緩により、指関節筋の持続収縮力が低下した。本課題を3日に渡り繰り返し行い、さらに tDCS を用いても、その

影響の変化は認められなかった。

謝 辞

本研究に対し、助成賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) Sakurai S., Ohtsuki T., Muscle activity and accuracy of performance of the smash stroke in badminton with reference to skill and practice, *J. Sports Sci.*, 18:901-914(2000)
- 2) Furuya S., Kinoshita H., Organization of the upper limb movement for piano key-depression differs between expert pianists and novice players, *Exp. Brain Res.*, 185:581-593(2008)
- 3) Fujii S., Kudo K., Ohtsuki T., Oda S., Tapping performance and underlying wrist muscle activity of non-drummers, drummers, and the world's fastest drummer, *Neurosci. Lett.*, 459:769-739(2009)
- 4) Yoshie M., Kudo K., Murakoshi T., Ohtsuki T., Music performance anxiety in skilled pianists: effects of social-evaluative performance situation on subjective, autonomic, and electromyographic reactions, *Exp. Brain Res.*, 199:117-126(2009)
- 5) Baldissera F., Borroni P., Cavallari P., Cerri G., Excitability changes in human corticospinal projections to forearm muscles during voluntary movement of ipsilateral foot, *J. Physiol.*, 539:3, 903-911(2002)
- 6) Borroni P., Cerri G., Baldissera F., Excitability changes in resting forearm muscles during voluntary foot movements depend on hand position: a neural substrate for hand-foot isodirectional coupling, *Brain Res.*, 1022: 117-125(2006)
- 7) Kato K., Muraoka T., Higuchi T., Mizuguchi N., Kanosue K., Interaction between simultaneous contraction and relaxation in different limbs, *Exp. Brain Res.*, 232:181-189(2014)
- 8) Kato K., Watanabe T., Kanosue K., Effects of muscle relaxation on sustained contraction of ipsilateral remote muscle, *Physiol. Rep.*, 3: e12620 (2015)
- 9) Kato K., Muraoka T., Mizuguchi N., Nakagawa K., Nakata H., Kanosue K., Muscle Relaxation of the

- Foot Reduces Corticospinal Excitability of Hand Muscles and Enhances Intracortical Inhibition, *Front Hum. Neurosci.*, 10:218(2016)
- 10) 国分真秀, 加藤孝基, 彼末一之, 「筋の弛緩および収縮が同肢内他筋の活動に及ぼす影響」 東京体育学研究 第8巻(オンラインジャーナル) <http://tokyo-taiikugakkai.jp/wp-content/uploads/3573ff8704345f20e7fd591c3a37e660.pdf>(2017)
 - 11) Nitsche M.A., Nitsche M.S., Klein C.C., Tergau F., Rothwell J.C., Paulus W., Level of action of cathodal DC polarisation induced inhibition of the human motor cortex, *Clin. Neurophysiol.*, 114:600–604(2003)
 - 12) Reis J., Fritsch B., Modulation of motor performance and motor learning by transcranial direct current stimulation, *Curr. Opin. Neurol.*, 24:590–596(2011)
 - 13) Nitsche M.A., Paulus W., Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation, *J. Physiol.*, 527:633–639(2000)