

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K20067

研究課題名(和文) 骨格筋電流刺激を用いた単一筋ダイナミクスの変化に対する運動適応の解明

研究課題名(英文) Motor adaptation to change in single muscle dynamics using electrical muscle stimulation

研究代表者

萩生 翔大 (Hagio, Shota)

京都大学・人間・環境学研究科・准教授

研究者番号：90793810

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)：本研究では、高周波の筋電気刺激によって単一筋の疲労を引き起こし、その後の運動誤差に対して筋の活動がどのように修正されるかを調査した。実験結果から、筋疲労後の運動修正には協働筋の活動が関与していることが明らかとなった。また、次に実施した研究では、最大努力下での垂直跳び動作中、前脛骨筋への電気刺激を与え足関節背屈トルクを印加した。刺激直後、跳躍高の減少が見られたが、跳躍高を上昇させるような運動の修正が見られた。このような筋電気刺激による修正は、骨格筋自体や身体運動のダイナミクスを変化させる有効な方法であり、複数の筋の活動を調整して適応的な運動が実現されていることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、筋疲労後の運動修正過程の解明にある。また本研究で用いた単一筋の電気刺激が、筋疲労を誘発させるだけでなく、全身運動中に強制的に関節トルクを印加し、身体ダイナミクスを変調させる方法として有効であること、さらにこうして作り出された新奇な環境に対して全身運動が修正される過程を示した点である。

社会的には、本研究の成果は、スポーツ中などに生じる筋疲労への理解や怪我の防止、さらには、筋電気刺激を活用して強制的に運動を修正することで、動作の獲得を促したり、スポーツ動作のフォームを矯正したりといっ

研究成果の概要(英文)：I investigated how the muscle activity is modified in response to the fatigue of a single muscle induced by high-frequency electrical muscle stimulation. The experimental results revealed synergistic muscle activity was modified to reduce motor errors following muscle fatigue. Furthermore, in a subsequent study, during maximal effort vertical jumping, electrical stimulation was applied to the anterior tibialis muscle to induce dorsiflexion torque at the ankle joint. Immediately after the stimulation, a decrease in jump height was observed, but subsequent corrective movements that increased the jump height were observed. Taken together, these studies demonstrated that electrical muscle stimulation is an effective method for altering the dynamics of skeletal muscles and movements, which make it possible to investigate the coordinated adjustment of multiple muscle activities during motor adaptation.

研究分野：運動制御学

キーワード：運動学習 筋電図 筋電気刺激

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) ヒトは置かれた環境に応じて、運動を適応させる能力を有している (Shadmehr et al., 2010)。これまで特殊な力場などを用いて外部環境を変化させることで、運動の適応性について調べられてきた (Shadmehr and Mussa-Ivaldi, 1994)。一方で、筋損傷・筋疲労といった単一筋の内的な変化に対しても運動を適応させる必要がある。ではこうした単一筋の変化に対して個々の筋活動がどのように修正され、目的となる運動が生み出されているのか。

本研究では、筋の内的環境の変化として、筋疲労による筋の収縮ダイナミクスの変化に着目した。筋疲労を生じさせる方法として、高強度で持続的な随意収縮運動を実施するという方法もあるが (Ortega-Auriol et al., 2018)、随意運動中の疲労では中枢神経系と末梢神経系のダイナミクス両方の変化が生じるため、内的環境のどの要素の変化に対して脳がどのように運動を適応させたのかを明らかにできない。一方で、骨格筋に持続的に高周波の電流刺激を与えると、急激に筋が疲労することが知られている (Doucet et al., 2012)。そこで本研究では、高周波の筋電気刺激により、短時間で特定の筋の急激な疲労を誘発させるという方法を試みた。

(2) 筋電気刺激を活用した実験手法は、筋疲労を誘発させるだけではなく、筋を収縮させて強制的に関節トルクを発揮させ、身体運動のダイナミクスを変調させる方法としても有用であると考えられる。これまでロボットなどを介して関節に摂動を与える手法が用いられてきたが、全身の運動では、ロボットを用いたトルク印加は非常に大掛かりな実験系となり、またロボットと身体運動との干渉も避けられない (Shadmehr and Mussa-Ivaldi, 1994; Cajigas et al., 2017)。そこで、筋電気刺激を用いて、全身運動中の身体ダイナミクスを変化させ、全身運動の適応過程を明らかにすることが可能であるのかについて検討した。

2. 研究の目的

(1) 本研究ではまず、高周波の筋電気刺激を用いて、受動的に単一筋の疲労を誘発させ、その結果生じた運動誤差に対して、協働筋の活動がどのように修正されるのかを明らかにすることを目的とした。

(2) 次の実験では、できるだけ高く跳躍することを目指した垂直跳び動作が、前脛骨筋への電気刺激による足関節背屈トルクの印加に対して、どのように修正されるのかを明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 実験参加者は椅子に座り (膝関節 90 度・股関節 100 度)、力測定器を内在した固定具で足首を固定された。実験課題は、足首周りで等尺性の力を発揮し、目の前のモニターに表示された力に対応したカーソルをターゲットに向かって操作するものとした。ターゲットは、股関節屈曲と膝関節伸展を組み合わせる発揮される力の方向とし、力の大きさは膝関節伸展方向への 10% MVC (最大等尺性随意収縮力) に対応するものとした。ベースライン試行 (84 回) の後、静止状態で外側広筋へ高周波電気刺激 (二相性パルス波、70Hz、パルス幅 200 μ s) を 5 分間与えた。その後の適応試行 (108 試行) 中、筋疲労によって生じた運動誤差が修正される過程を測定した。適応試行中の筋疲労の影響を持続させるため、試行間に毎回 10 秒間の高周波電気刺激を与えた。また、筋疲労の大きさは、単発刺激によって誘発された力の大きさとして定量した。試行中、大腿部に表面筋電図を貼付し、外側広筋・内側広筋・中間広筋・大腿直筋の活動が、電気刺激後にどのように変化するかを測定した。

(2) まず、実験で使用する電気刺激の強度を決定するために、前脛骨筋への電気刺激の強度と、誘発される足関節背屈トルクとの関係を定量した。実験参加者は椅座位で膝関節を最大伸展させた状態で、力測定器を内在した固定具で足部を固定された。両脚の前脛骨筋へ様々な強度で電気刺激を与え、力測定器により、足関節背屈トルクを計測した。筋電気刺激は、二相性のパルス波 (20Hz) とした。計測結果に基づき、約 0.2Nm の足関節背屈トルクが印加される、刺激強度を参加者ごとに決定した。

次に実験参加者は、床反力計の上で最大高を目指してスクワットジャンプを繰り返し実施した。モーションキャプチャーシステムにより、仙骨に貼付した反射マーカークの位置を跳躍前に参加者にリアルタイムでフィードバックし、毎試行、同じ初期姿勢から跳躍動作を開始するように指示した。また、毎試行後、直前の跳躍高を参加者にフィードバックした。試行の途中で両脚の前脛骨筋に筋電気刺激を与え、足関節背屈トルクを印加した (図 1)。スクワット

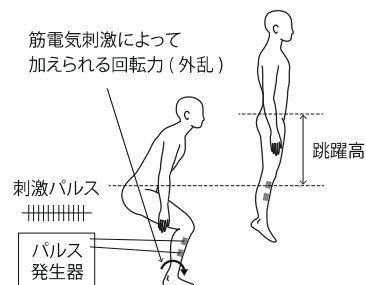


図 1) 跳躍課題と筋電気刺激による外乱

トジャンプは、電気刺激前のベースライン試行、電気刺激試行、ウォッシュアウト試行の計 60 試行実施した。試行中、モーションキャプチャシステムを用いて身体位置と跳躍高を測定し、また、無線筋電図を用いて下肢の筋活動を測定した。

4. 研究成果

(1) 5 分間の筋電気刺激後、外側広筋の単収縮力が最大で約 60%減少し、筋疲労が確認された。また、電気刺激直後、膝関節の伸展方向の力が減少し、カーソルの動きに誤差が生じたが、試行を重ねるにつれ誤差が減少した。この時、大腿四頭筋の活動の変化を定量したところ、刺激筋である外側広筋の活動ではなく、協働筋である内側広筋や大腿直筋の活動を増加させることにより、運動を修正していることが示された。一方で、電気刺激による筋疲労の効果には個人差が見られたため、刺激後の誤差の大きさや、内側広筋・大腿直筋の活動の修正量にも個人差が生じた。本研究から、疲労に伴う単一筋の変化に対して、協働筋の活動を調整することによって運動が修正されることが明らかとなった。

(2) 垂直跳び動作では、足関節の底屈トルクが動作を作り出す主要なトルクとなる。そのため、筋電気刺激による足関節背屈トルク印加直後は、足関節で発揮された底屈トルクの影響が打ち消され跳躍高が大きく減少した。しかし、トルク印加試行中、跳躍を繰り返すと跳躍高が徐々に上昇した。興味深いことに、トルク印加試行後、再び電気刺激を与えずに跳躍動作を実施したところ、全実験参加者においてトルク印加前よりも跳躍高が大きく上昇しており、後効果が観察された(図2)。また、トルク印加試行前後での下肢の筋活動を比較したところ、足関節や股関節周りの筋の活動タイミングや振幅が大きく変化していることが明らかとなった。さらに跳躍高はトルク印加前の高さに戻ることなく維持されたことから、トルク印加に対して修正された運動は、新たな技能として獲得された可能性が示唆された。本研究で用いた電気刺激により身体ダイナミクスを変化させる手法を、ジャンプ動作以外の全身動作にも拡張させることで、ヒトの様々な全身運動に関する運動学習過程の理解につながると考えられる。

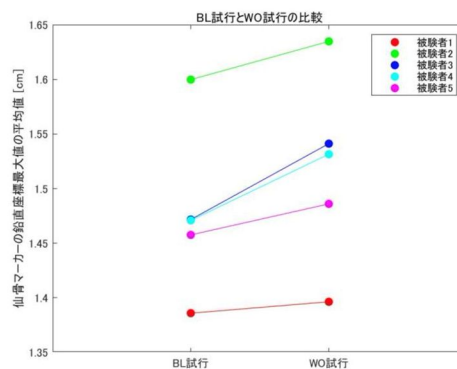


図2) ベースライン試行の平均跳躍高およびウォッシュアウト試行開始直後の跳躍高。全参加者において、電気刺激試行前後で、跳躍高の上昇が確認された。

本研究により、骨格筋への電気刺激が、骨格筋自体もしくは身体運動のダイナミクスを変化させる有効な方法であることが示された。また、脳はこうしたダイナミクスの変化に対して複数の筋の活動を修正し、運動を適応させていることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 Shota Hagio, Akihiko Ishihara, Masahiro Terada, Hiroko Tanabe, Benio Kibushi, Akira Higashibata, Shin Yamada, Satoshi Furukawa, Chiaki Mukai, Noriaki Ishioka, Motoki Kouzaki	4. 巻 127(5)
2. 論文標題 Muscle synergies of multidirectional postural control in astronauts on Earth after a long-term stay in space	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Neurophysiology	6. 最初と最後の頁 1230-1239
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1152/jn.00232.2021	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 -

1. 著者名 Shota Hagio, Motoki Kouzaki	4. 巻 14
2. 論文標題 Visuomotor transformation for the lead leg affects trail leg trajectories during visually guided crossing over a virtual obstacle in humans	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Neuroscience	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnins.2020.00357	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Shota Hagio, Anvar Azat, Daichi Nozaki
2. 発表標題 A New Approach using Electrical Muscle Stimulation to Elucidate Sensorimotor Adaptation in Human Postural Control System
3. 学会等名 International Society of Electrophysiology and Kinesiology（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shota Hagio, Anvar Azat, Daichi Nozaki
2. 発表標題 A new approach using electrical muscle stimulation to elucidate sensorimotor adaptation in human postural control system
3. 学会等名 International Society for Posture and Gait Research（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋生翔大、Anvar Azati、野崎大地
2. 発表標題 筋電気刺激による閉ループ型摂動印加システムを用いてヒト立位姿勢制御機構の適応性を解明する
3. 学会等名 第13回Motor Control研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 形木原奏音、秋生翔大、神崎素樹
2. 発表標題 新奇な環境における最大努力下での垂直跳び動作学習
3. 学会等名 京都滋賀体育学会 第 152 回大会
4. 発表年 2023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

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