

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K13155

研究課題名（和文）筋シナジーと多関節運動トレーニングによる効果の関係

研究課題名（英文）Relationship between muscle synergies and the effect of multi-joint exercise

研究代表者

鈴木 崇人（Suzuki, Takahito）

立命館大学・スポーツ健康科学部・助教

研究者番号：20638960

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：トレーニングにおいて複数の関節周りの筋を協調させる能力の向上が重要であるが、複数の関節周りの筋を制御する仕組みについては未だ明らかではない。本研究は、足底屈筋群の単独収縮の場合と、膝関節伸展筋群や股関節伸展筋群との同時収縮の場合で、下腿三頭筋の活動を解析し、足関節と膝関節のように対象となる全ての関節を物理的に跨ぐ筋が存在する場合の筋制御と、足関節と股関節のようには跨ぐ筋が存在しない場合の筋制御を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、足底屈筋群と物理的な繋がりのない股関節伸展筋群の活動によって、足底屈筋群の活動が影響を受けることを明らかにした。この結果は、足関節と股関節のように対象となる全ての関節を物理的に跨ぐ筋が存在しない場合にも、これらの関節周りの筋の活動が総合的に考慮されて、活動の量が決定されていることを示唆している。この知見は、一つの関節周りの筋を鍛えるトレーニングと、複数の関節が関わるトレーニングの効果の違いを明らかにすることに繋がる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：It is important to improve coordination between muscles around various joints through training. This study aimed to reveal the muscle control for adjacent joints and non-adjacent joints and investigated the activity of the triceps surae muscles with or without activation of hip or knee extensor muscles. During isometric plantar flexor contraction, the activity of the medial gastrocnemius muscle decreased with isometric hip extensor contraction. This result suggests that the muscle activity is determined with activation of muscles at non-adjacent joints.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：筋シナジー 多関節運動 表面筋電図 下腿三頭筋 大臀筋 外側広筋

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

トレーニングやリハビリテーションにおいては筋肥大だけでなく、全身の筋を協調させる能力を上げることも重要である。例えば、単関節運動を組み合わせたトレーニングと多関節運動では実動作のパフォーマンスへの効果が異なることが示唆されているが()、様々な関節の複数の筋をどのように協調させているのかは未だ十分に明らかになっていない。複数の筋を協調させながら制御する一つの方法として、一定の割合で活動するグループ(筋シナジー)として複数の筋をまとめて制御しているのではないかと、という仮説が提唱されている()。この筋シナジー仮説では一つの筋は複数の筋シナジーに属することがあり、動員される筋シナジーが替われば、それに合わせて筋活動も変化するとされている。筋シナジーが存在するとすれば、トレーニングとして最終的な目的となる運動と共通の筋シナジーが動員される運動を行うことが、目的の運動とトレーニングの双方で同じ筋の使い方をすることになり、協調の点から効果的である可能性がある。

筋シナジー仮説は、筋電図を用いたヒトの随意運動の研究によって支持されてきたが、この仮説を証明または否定することは難しい()。ヒトの随意運動において筋シナジーが使用されていることを確認するためには非侵襲的な実験が不可欠であり、表面筋電図法により筋活動データを取得し、それに対して非負値行列分解などを用いることによって、筋活動の背後にある筋シナジーを数学的に抜き出すことが試みられてきた。しかし、ある物理的な拘束条件の下で筋シナジー以外の筋の動員規則に基づいて筋活動が決定されていた場合にも、筋シナジーと誤解されるように複数の筋が一定の割合で活動する可能性が指摘されている()。例えば、歩行時の複数の筋の活動から少数の筋シナジーが数学的に抜き出せると報告されているが、筋シナジーを仮定しなくても「筋活性度の 2 乗和」などの目的関数の最適化に従っていた場合にも筋シナジーのような一定の割合でのまとまった筋活動がある程度予測されることを歩行のシミュレーションなどは示している()。筋シナジーがヒトの随意運動において用いられていることを明らかにするためには、筋シナジー仮説と他の仮説の説明能力を比較し、捉えられた現象に対して筋シナジー仮説が他の仮説より上手く説明できることを示さなければならない。

近年、研究代表者らの研究によって、下腿三頭筋の活動は膝伸展筋群の活動の影響を受け()、その時の筋活動の変化が筋シナジー仮説で上手く説明できることが明らかになってきた。例えば、足底屈筋群の等尺性収縮時の筋活動に対する回帰分析によって腓腹筋内側頭とヒラメ筋の間に二つの筋シナジーが存在することが示唆され、それらの筋シナジーが膝伸展筋群と同時に動かすかどうかによって切替えられていることを明らかにしている。等尺性収縮時に回帰分析が行えるほど明らかに筋活動が変化することは盲点であったが、この方法ならば筋活動を定常状態でより正確に評価できる上に発揮トルクとの関係から筋シナジー仮説と他の仮説の説明能力を比較することが可能である。本研究は全体として、他の運動制御に関する説と比較しながら、足底屈筋群の等尺性・等速性収縮時の筋活動を詳細に検討し、それと垂直跳び時の筋活動の解析を合わせることで共通の筋シナジーを抜き出し、筋シナジーとトレーニング効果の関係を明らかにすることを当初の目的としていた。

2. 研究の目的

(1) 足底屈筋群の単独等尺性収縮時の下腿三頭筋の活動と、足底屈筋群と膝関節伸展筋群の同時等尺性収縮時の下腿三頭筋の活動を解析し、膝関節と足関節という対象となる全ての関節を跨ぐ筋が存在する場合の筋制御について、筋シナジー仮説と他の運動制御仮説による説明力を比較しながら、筋シナジー仮説の妥当性を検証することを目的とした(研究 1)。

(2) 足底屈筋群の単独等尺性収縮時の下腿三頭筋の活動と、足底屈筋群と股関節伸展筋群の同時等尺性収縮時の下腿三頭筋の活動を解析し、股関節と足関節のように対象となる全ての関節を物理的に跨ぐ筋が存在しない場合の筋制御を明らかにすることを目的とした(研究 2)。

3. 研究の方法

(1) 研究代表者の以前の科研費採択課題(研究課題番号: 25560330)のデータを解析した(研究 1)。解析に用いたデータは、健康な成人男性 12 名に足底屈筋群の単独等尺性収縮と、足底屈筋群と膝関節伸展筋群の同時等尺性収縮を行わせた時のデータであった。

測定姿勢は腹臥位とし、足関節を筋力計に固定した。外側広筋、大腿直筋、大臀筋、大腿二頭筋、前脛骨筋、腓腹筋内側頭、腓腹筋外側頭、ヒラメ筋から表面筋電図法により活動を記録した。下腿三頭筋以外の各筋を最大努力で等尺性収縮させ、最大随意収縮(Maximal Voluntary Contraction: MVC)時の活動水準として測定した。また、足底屈筋群を最大努力で等尺性収縮させ、その際の足底屈トルクを MVC 時のトルクとし、腓腹筋内側頭と外側頭およびヒラメ筋の活動水準も併せて測定した。

MVC 時の足底屈トルクと膝関節伸展筋群の属する外側広筋の活動を、それぞれ足底屈強度と膝関節伸展強度の基準にし、足底屈強度は 10% から 100% までの 10 段階を、膝関節伸展強度は 0%・

50%・100%の3段階を用意し、これらを組み合わせた30条件を行った。足底屈強度をランダムに並べ、さらに膝関節伸展強度もランダムに並べて、順番に行った。力発揮中の足底屈トルクと外側広筋の表面筋電図データ、そして、それぞれの目標値を研究対象者の前のモニターに表示した。

測定した3秒間の内、足底屈強度(足底屈トルク)と膝関節伸展強度(外側広筋の表面筋電図データ)が条件に最も近かった1秒間を解析区間として、各筋の表面筋電図データの平均振幅(Average Rectified Value: ARV)と平均トルクを計算した。足底屈強度10%から50%までを低強度帯、60%から100%を高強度帯として、各足底屈強度帯において、下腿三頭筋の全ての組合せについてARVに対する回帰分析を行った。また各足底屈強度帯において、足底屈強度と下腿三頭筋の各筋のARVの回帰分析を行った。そして、各足底屈強度帯において回帰分析から計算した傾きを比較した。

(2) 健常な成人男性7名に足底屈筋群の単独等尺性収縮と、足底屈筋群と股関節伸展筋群の同時等尺性収縮を行わせた(研究2)。実験は研究1に準じて行い、MVC時の足底屈トルクと股関節伸展筋群に属する大臀筋の筋活動を、それぞれ足底屈強度と股関節伸展強度の基準にし、足底屈強度は10%から100%までの10段階を、股関節伸展強度は0%・50%・100%の3段階を用意し、これらを組み合わせた30条件をそれぞれ3秒以上行った。

測定した3秒間の内、足底屈強度(足底屈トルク)と股関節伸展強度(大臀筋の表面筋電図データ)が条件に最も近かった0.25秒間を解析区間として、平均トルクと各筋のARVを計算した。下腿三頭筋の活動に対する足底屈強度と股関節伸展強度の影響を検討した。

4. 研究成果

(1) 足底屈筋群の単独収縮の場合と膝関節伸展筋群との同時収縮の場合で、足底屈トルクと腓腹筋内側頭のARVについて回帰分析によって得られた傾きを比較すると、低い足底屈強度帯においては後者で傾きが小さくなり、高強度帯では後者で傾きが大きくなった(研究1)。筋活動の2乗和を最小にするようにトルクを発揮していた場合に筋活動はトルクの線形結合で表されることが指摘されているが()、この結果は筋活動に対する足底屈トルクの係数が足底屈強度に対して一定ではない、つまり、腓腹筋内側頭の活動が足底屈トルクと膝関節伸展トルクの線形結合では表せないことを示唆している。また、低い足底屈強度帯において、腓腹筋内側頭とヒラメ筋のARVに対する回帰分析によって得られた傾きが膝関節伸展筋群の活動の有無によって異っており、これは足底屈筋群の単独収縮の場合と膝関節伸展筋群との同時収縮の場合で動員される筋シナジーが異なっており、それによってARVの回帰直線の傾き(筋活動の割合)が変わった、と解釈することが可能である。以上より、特に腓腹筋内側頭の活動はトルクの線形結合よりも筋シナジー仮説によって説明する方が容易であることが示唆された。この結果は学術雑誌において発表した()。

(2) 反復測定二元配置分散分析(足底屈強度×股関節伸展強度)の結果、腓腹筋内側頭のARVに対して、股関節伸展強度に有意な主効果がみられた(研究2)。さらにシェイファーの多重比較を行った結果、股関節伸展強度0%と100%の条件間で腓腹筋内側頭のARVに有意な差があった。この結果は、股関節と足関節という対象となる全ての関節を物理的に跨ぐ筋が存在しない場合でも、股関節周りの筋活動の有無が測関節周りの筋活動に影響を与えることを表している。股関節と足関節だけでなく膝関節周りの筋活動も含めて最適化している場合に、各関節のトルクの線形結合で筋活動が表される可能性がある。ただし、研究代表者の他の研究()では、腓腹筋内側頭の活動が膝関節伸展筋群の活動の影響を受けるものの比例はしていなかったが、本研究でも腓腹筋内側頭と股関節伸展筋群の関係は同様であり、筋活動がトルクの線形結合で表せない可能性は残っている。これは研究対象者数が少ないために、股関節伸展強度50%と他の強度との検定が不十分であったことが一因であり、研究を継続している。

引用文献

Augustsson, J., Esko, A., Thomeé, R., & Svantesson, U. (1998). Weight training of the thigh muscles using closed versus open kinetic chain exercises: a comparison of performance enhancement. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 27(1), 3-8.

Tresch, M. C., Saltiel, P., & Bizzi, E. (1999). The construction of movement by the spinal cord. *Nature neuroscience*, 2(2), 162-167.

Kutch, J. J., & Valero-Cuevas, F. J. (2012). Challenges and new approaches to proving the existence of muscle synergies of neural origin. *PLoS Computational Biology*, 8(5), e1002434.

Buchanan, T. S., Almdale, D. P., Lewis, J. L., & Rymer, W. Z. (1986). Characteristics of synergic relations during isometric contractions of human elbow muscles. *Journal of Neurophysiology*, 56(5), 1225-1241.

De Groot, F., Jonkers, I., & Duysens, J. (2014). Task constraints and minimization

of muscle effort result in a small number of muscle synergies during gait. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 8, 115.

Suzuki, T., Chino, K., & Fukashiro, S. (2014). Gastrocnemius and soleus are selectively activated when adding knee extensor activity to plantar flexion. *Human Movement Science*, 36, 35-45.

Hirashima, M., & Oya, T. (2016). How does the brain solve muscle redundancy? Filling the gap between optimization and muscle synergy hypotheses. *Neuroscience research*, 104, 80-87.

Suzuki, T., Kinugasa, R., & Fukashiro, S. (2017). Activation of plantar flexor muscles is constrained by multiple muscle synergies rather than joint torques. *PloS One*, 12(11), e0187587.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Takahito Suzuki, Ryuta Kinugasa, Senshi Fukashiro	4. 巻 12(11)
2. 論文標題 Activation of plantar flexor muscles is constrained by multiple muscle synergies rather than joint torques	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 PLoS ONE	6. 最初と最後の頁 e0187587
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0187587	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0件

〔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
---------	---------