

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21700651

研究課題名（和文）筋電気刺激によるヒト運動単位動員特性の非侵襲的解析

研究課題名（英文）Non-invasive analysis of recruitment properties of human motor units using electrical muscle stimulation

研究代表者

佐々木 一茂（SASAKI KAZUSHIGE）

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：00451849

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、筋電気刺激によるヒト運動単位動員特性の非侵襲的解析法を確立し、その妥当性について検討することであった。具体的には、6秒間の随意的な筋力発揮前後で筋に単一の刺激を与え、筋力発揮後における収縮応答の増強程度が速筋線維動員の指標となるかどうかを検討した。一連の研究結果より、この指標は「サイズの原理」から予想される随意的筋力発揮時における速筋線維動員特性をよく説明できることが示唆された。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to test whether recruitment properties of human motor units can be non-invasively determined by using electrical muscle stimulation. Specifically, a single electrical pulse was applied to the resting muscle before and after a 6-s voluntary force production and then the “potentiation” of electrically evoked contractile response due to the voluntary force production was determined. The results suggest that the magnitude of potentiation represents the recruitment properties of fast-twitch muscle fibers during voluntary muscle contraction predicted from the “size principle”.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学、スポーツ科学

キーワード：生理学、骨格筋、単収縮、サイズの原理、筋電図

1. 研究開始当初の背景

単一の神経・筋電気刺激により誘発される人工的な筋収縮を「単収縮」と呼ぶ。単収縮時に発揮される筋張力は、数秒程度の持続的な筋活動により著しく増強されることが以前から知られている（単収縮の活動後増強）。この現象の主要メカニズムは収縮タンパク質であるミオシン（軽鎖）のリン酸化、およびその結果として生じるカルシウム感受性の向上（あるカルシウム濃度において発揮される筋張力が増すこと）であると考えられて

いる（Sweeney et al. *Am J Physiol*, 1993）。したがって、活動後増強の程度がミオシンのアイソフォーム、あるいは筋線維のタイプに依存することは容易に想像がつく。実際、数秒間の筋電気刺激や随意収縮の直後におけるミオシン軽鎖のリン酸化や単収縮張力の増強の程度は、遅筋線維よりも速筋線維において顕著に大きいとするいくつかの報告がある（e.g. Moore and Stull, *Am J Physiol*, 1984）。

活動後増強が筋線維タイプに依存した現象であるということから、遅筋線維のみが活

動するような状況においてはこの現象がほとんど認められないことが予想される。一方、遅筋線維と速筋線維が同時に活動するような状況においても、速筋線維の活動量（活動している速筋線維の数や発火頻度）が活動後増強の程度を決めると考えられる。そこで、本研究では「筋力発揮後の活動後増強の程度が筋力発揮中の速筋線維の活動量の指標となる」という仮説を立てた。これまで、運動単位や筋線維の活動を遅筋型と速筋型に区別して評価するためには筋バイオプシーのような侵襲的方法を用いるしかなかったため、活動後増強という現象を利用することで速筋線維の活動量を非侵襲的に評価することが可能となれば極めて有用である。

2. 研究の目的

本研究では、単収縮の活動後増強を利用して非侵襲的に速筋型運動単位（速筋線維）の動員特性を知ることが可能かどうかを検証することとした。より具体的には、以下の3点を目的とした。

(1) 様々な筋力発揮レベルでの短時間の随意収縮直後における単収縮張力の増強程度が、サイズの原理から予想される速筋線維の活動量と一致するかどうかについて検討すること。

(2) 様々な筋力発揮レベルでの短時間の随意収縮直後における単収縮張力の増強程度について、セッション内およびセッション間再現性を評価すること。

(3) 短時間の随意収縮中における筋活動電位（表面筋電図法）の中央周波数値（非侵襲的な運動単位動員特性の指標として用いられている）を算出し、その収縮強度依存性を単収縮張力の増強程度と比較すること。

3. 研究の方法

(1) 被検者は健康な成人男性8名（年齢：24～35歳）、ただし後述するセッション内再現性の評価はそのうち6名を対象とした。全ての被検者に対し、あらかじめ本研究の目的、実験内容、注意事項等について十分に説明し、実験参加同意書を取得した後に実験を実施した。また、本研究への参加以前に筋力測定や筋電気刺激の経験がなかった者については、実験日より前にも少なくとも1回の事前練習を実施した。本研究を実施するにあたり、東京大学大学院総合文化研究科・教養学部「ヒトを対象とした実験研究に関する倫理審査委員会」の承認を得た。

(2) 被検者の右足をダイナモメータに足関節角度90度、膝完全伸展位で固定し、足底屈

の等尺性随意最大筋力発揮（MVC）を行なわせた。15分以上の休憩の後、MVC時に発揮された足底屈トルクの10～100%に相当する強度で6秒間の随意筋力発揮を行なわせ、その直後に後脛骨神経に超最大強度の電気刺激を与えて足底屈筋群の単収縮を誘発した。単収縮を誘発させた際の足底屈ピークトルク（PT）、収縮時間、1/2弛緩時間、下腿三頭筋各筋の活動電位最大振幅（M波）について随意筋力発揮前の値に対する変化率を算出した。また、6秒間の随意筋力発揮中に下腿三頭筋各筋から記録した筋活動電位の中央周波数値を算出した。

(3) セッション内再現性については、強度の異なる7段階の随意筋力発揮およびその直後の電気刺激をそれぞれ3回反復することで評価した（セット間の休憩は数分程度）。セッション間再現性は、強度の異なる11段階の随意筋力発揮およびその直後の電気刺激という一連の測定を2回行なうことで評価した（2回の測定は7～12日の間隔を空けて実施した）。

4. 研究成果

(1) 随意筋力発揮の強度がMVCの30%以下の時には随意筋力発揮前と比較してPTの有意な変化は認められなかったが、MVCの40%に相当する筋力発揮では $6.1 \pm 3.7\%$ の増強が認められ、以後収縮強度の増大に伴い指数関数的な増大（MVCの50%に相当する筋力発揮で $11.9 \pm 4.0\%$ 、MVCと同等の筋力発揮で $68.3 \pm 19.8\%$ ）が認められた（図1）。

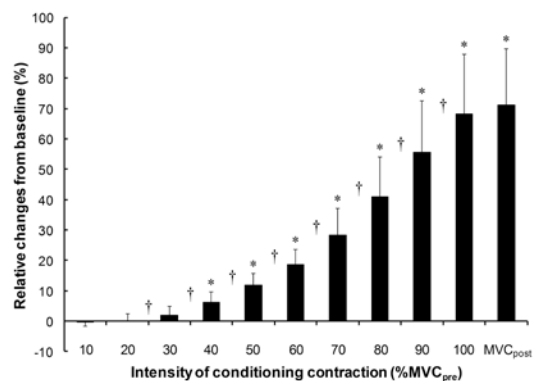


図1. 随意筋力発揮の強度（等尺性随意最大筋力MVC_{pre}に対する百分率）と単収縮張力の増強程度（随意筋力発揮前からの変化率）との関係（8名の平均±標準偏差、* 随意筋力発揮前との有意差、† 隣り合う値同士の有意差、いずれも $P < 0.05$ ）

この結果は、強度の低い収縮においては遅筋線維を支配するサイズの小さい運動単位が

優先的に活動し、強度が高まるにつれて速筋線維を支配するサイズの大きな運動単位も活動を開始するようになる、という「サイズの原理」(Henneman et al. *J Neurophysiol*, 1965)からよく説明できる。しかし、本研究で認められたPTの増強が筋収縮タンパク質のカルシウム感受性変化によるものではなく、神経的要因によるものという可能性も考えられた。そこで、下腿三頭筋各筋のM波の振幅についても評価した(図2)。その結果、随意筋力発揮による増強が認められたのは腓腹筋外側頭のみであり、その増強程度が小さいこと(MVCと同等の筋力発揮において11.2%)や下腿三頭筋に占める生理学的筋横断面積の割合が10%に満たないこと(Fukunaga et al. *J Appl Physiol*, 1996)などを考慮すると、M波の増強はPTを増強させた主要因ではないと考えられる。

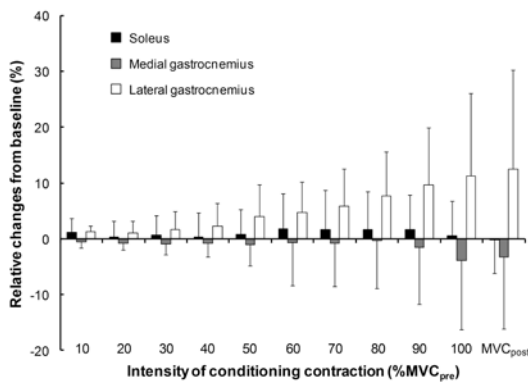


図2. 随意筋力発揮の強度(等尺性随意最大筋力MVC_{pre}に対する百分率)とヒラメ筋(黒)、腓腹筋内側頭(グレー)、腓腹筋外側頭(白)から記録したM波の変化率(随意筋力発揮前からの変化率)との関係(8名の平均±標準偏差)

一方、PTの変化率と収縮時間および1/2弛緩時間の変化率との間には有意な負の相関関係が認められた。このことは、単収縮張力の増強に伴って収縮/弛緩時間の短い筋線維(速筋線維)の力学的貢献が増していることを示唆するものであり、単収縮の活動後増強が主として速筋線維で起こっていることを裏付ける結果である。

(2) 単収縮張力の増強程度を速筋線維の活動量の指標として確立するためには、妥当性の検証に加えて信頼性(再現性)を評価することが重要である。級内相関係数により評価したセッション内再現性(0.99)およびセッション間再現性(0.93)はいずれも非常に優れていた。加えて、反復測定による系統的な誤差(1度目の測定よりも2度目の測定で値が大きくなる、など)が認められるか否かにつ

いて二元配置分散分析により検討した。その結果、測定順序と収縮強度の交互作用は認められなかったことから、単収縮力の増強程度に影響を与えるのは随意筋力発揮の強度のみであることが確認された。

(3) 随意筋力発揮中に記録した筋活動電位の中央周波数値については、ヒラメ筋および腓腹筋内側頭で収縮強度依存的に増加する傾向が認められた。しかし、その増加の様相は筋間、被検者間で一貫性がなかった(図3)。

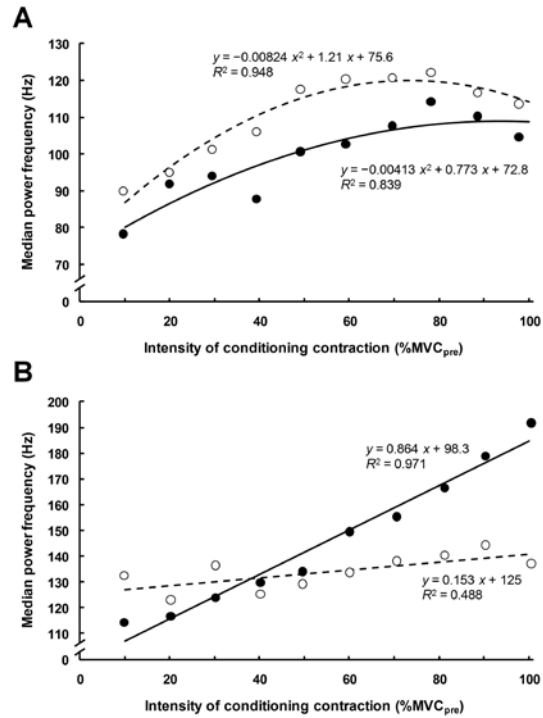


図3. 異なる2名の被検者(AとB)における随意筋力発揮の強度(等尺性随意最大筋力MVC_{pre}に対する百分率)とヒラメ筋(白)および腓腹筋内側頭(黒)から記録した活動電位中央周波数値との関係

また、単収縮張力の増強程度のように、ある収縮強度を境に急激に増加するという傾向は認められなかった。以上のことから、中央周波数値は活動している筋線維のタイプに依存するというよりも、活動電位伝導速度(動員されている筋線維の横断面積に依存)を反映することが示唆された。実際、収縮強度の増大に伴う筋活動電位周波数特性の変化が何を意味するかについては議論があり、活動している筋線維のタイプを反映しないとの見方も少なくない(e.g. Farina et al. *J Appl Physiol*, 2004)。いずれにせよ、単収縮張力の増強程度は筋活動電位の周波数解析では得ることができない情報を含んでいることが

示唆された。今後、さらなる妥当性の検証を重ねる必要があるが、非侵襲的かつ極めて短時間に速筋線維の活動量を評価できることは筋バイオブシー法やワイヤー筋電図法にはないメリットであり、運動処方のカスタマイズや有効性の予測などへの活用が期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① Sasaki K, Tomioka Y, and Ishii N. Activation of fast-twitch fibers assessed with twitch potentiation. *Muscle Nerve*、印刷中 (掲載確定)、査読有

[学会発表] (計3件)

- ① 佐々木一茂、富岡由紀絵、石井直方 速筋線維動員特性の性差と年齢差:筋電気刺激による非侵襲的解析 第65回日本体力医学会大会 2010年9月17日(千葉)
- ② 富岡由紀絵、佐々木一茂、石井直方 単収縮の強縮後増強に着目した速筋線維動員特性の解析 第64回日本体力医学会大会 2009年9月19日(新潟)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 一茂 (SASAKI KAZUSHIGE)
東京大学・大学院総合文化研究科・助教
研究者番号: 00451849

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし