

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：32670

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24700696

研究課題名(和文)電気力学的遅延による筋機能評価とコンディショニングへの応用

研究課題名(英文)Electromechanical delay as an assessment tool for muscle function and conditioning

研究代表者

佐々木 一茂 (Sasaki, Kazushige)

日本女子大学・家政学部・講師

研究者番号：00451849

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、骨格筋が電気的活動を開始してから実際に運動が起こるまでのわずかな時間遅れ(Electromechanical delay, EMD)を精密・詳細にとらえる実験系を確立し、基礎データを蓄積することを目的とした。また、EMDが筋の機能やコンディショニングをどのように反映するのかについても検討した。一連の研究結果より、EMDを測定することで従来の指標(最大筋力など)とは異なる側面から筋の機能・コンディショニングを評価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 is to collect basic data for inter-muscle and inter-individual differences in "electromechanical delay (EMD)", a time lag between the muscle electrical activity and the onset of motion, using an experimental system that precisely and closely determines EMD. The association of EMD with muscle function and conditioning was also examined. The results suggest that EMD represents muscle function and conditioning properly but differently from existing measures such as maximal muscle strength.

研究分野：健康・スポーツ科学、筋生理学

キーワード：骨格筋 生理学 筋収縮 電気刺激 運動

1. 研究開始当初の背景

身体運動に不可欠な骨格筋の収縮は、筋を支配する運動神経細胞 (α 運動ニューロン) の興奮が神経-筋接合部を介して筋細胞膜に伝達されることで生じる。筋細胞膜上に電気的信号 (活動電位) が発生してから実際に身体運動が発現するまでにはわずかながら時間遅れがあり、これは「電気力学的遅延」または electromechanical delay (EMD) として知られている。EMD は神経生理学やスポーツバイオメカニクス分野において、活動電位と身体運動 (各関節のトルクや角度の変化) を同時に記録し、その対応から運動制御や動作生成のメカニズムを考察する際の重要な変数として扱われてきた。

EMD という現象自体は、比較的容易に観察することが可能である。従来から行なわれている EMD の標準的な測定方法は、随意的な筋力発揮時に生じる活動電位を表面筋電図法で記録しながら、筋力あるいは関節トルクについて筋力計などを用いて記録するというものである。しかし、こうした標準的な方法により測定された EMD 値は研究報告ごとに著しい相違が認められ、10 ms (0.01 秒) に満たないものから 100 ms (0.1 秒) を超えるものまで様々である。こうした相違は対象とした筋の違いや個人差、分析方法・アルゴリズムの差異などが原因と考えられてきた。ところが、随意的な筋力発揮時の活動電位を多点電極で記録した研究 (Hug et al., 2011) により、活動電位の発生および検出タイミングは部位によって異なり、その差は最大で 20 ms にも及ぶことが明らかとなった。したがって、随意筋力発揮時の活動電位の発生を EMD の基準とする従来の測定方法は、見直しが必要な状況にあった。

我々は、上記の問題点を克服するために電気刺激を用いて筋活動の開始時点を精密に調節しながら、高感度加速度計により皮膚表面の微細振動を記録する実験系を構築した (図 1)。これにより、EMD は筋収縮前 (活動電位の発生と興奮-収縮連関) と筋収縮後 (直列弾性要素を介した筋張力の伝達) の二つの過程に分離できること、両過程はそれぞれ独立した生理学的メカニズムを反映していることが明らかとなった (Sasaki et al., 2011)。

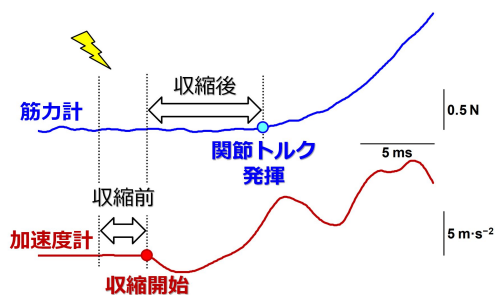


図 1 電気刺激 (稲妻マーク) と加速度計を用いた EMD の分析

2. 研究の目的

本研究では、上述した実験系を用いて測定した EMD がヒト生体筋の機能やコンディションを表す有用な指標になるとの仮説を立て、これを検証することを目的とした。より具体的には、以下を目的とした実験を計画した。

(1) EMD の性差および筋間差について検討すること。

(2) EMD と他の筋機能指標 (随意最大筋力、筋力発揮速度、瞬間的な電気刺激による発揮張力など) との関連性について検討すること。

(3) 運動やそれに伴う疲労が EMD に及ぼす影響について縦断的に検討すること。

3. 研究の方法

本研究では以下のような 3 つの実験を実施した。

(1) 腓腹筋内側頭の収縮を電気刺激 (表面電極) により誘発した。足関節を中間位で筋力計に固定し、腓腹筋の長さ変化の影響を観察するため様々な膝関節角度において電気刺激を与えた。皮膚表面 (腓腹筋内側頭の筋腹) に貼り付けた高感度加速度計により刺激から筋収縮が開始するまでの時間 (T_{cc}) を測定し、筋力計により刺激から足底屈トルクが発揮されるまでの時間 (EMD) を測定した。また、これらの値の差から筋収縮力の伝達に要する時間 (T_m) を算出した。対象者は健康な 23 ~ 37 歳の男女 22 名 (男性 11 名、女性 11 名) であった。

(2) 膝伸展筋群および足底屈筋群の収縮を電気刺激 (表面電極) により誘発した。皮膚表面に貼り付けた高感度加速度計により T_{cc} を測定し、筋力計により EMD を測定した。また、これらの値の差から T_m を算出した。加速度計は、膝伸展筋群については外側広筋と大腿直筋の筋腹に貼り付け、足底屈筋群については腓腹筋内側頭とヒラメ筋の筋腹に貼り付けた。測定時の関節角度は、膝伸展筋群については屈曲 70 度、足底屈筋群については 0 度 (中間位) とした。対象者は健康な 18 ~ 35 歳の女性 65 名であった。

(3) 肘屈曲筋群を対象に一回の高強度運動 (重量負荷を利用した伸張性収縮) が EMD に及ぼす影響を検討した。高強度運動の実施直後、2 日後、4 日後において、上腕二頭筋の収縮を電気刺激 (表面電極) により誘発した。皮膚表面 (上腕二頭筋の筋腹) に貼り付けた高感度加速度計により T_{cc} を測定し、筋力計により EMD を測定した。また、これらの値の差から T_m を算出した。対象者は健康な成人男性 6 名であった。

4. 研究成果

(1) 膝完全伸展位における腓腹筋内側頭の T_{ec} 、 T_m 、EMD はそれぞれ 7.3 ± 1.5 、 6.2 ± 2.4 、 13.5 ± 2.2 ms (いずれも平均 \pm 標準偏差) であり、我々が以前に測定した上腕二頭筋の結果と比較すると T_{ec} は長いが、 T_m と EMD は同程度であった。また、いずれの指標についても性差は認められなかった。一方、膝屈曲 90 度における T_{ec} 、 T_m 、EMD はそれぞれ 7.3 ± 1.3 、 8.0 ± 2.5 、 15.4 ± 2.6 ms であり、いずれの指標についても性差は認められなかったが、 T_m と EMD は膝完全伸展位よりも有意に高値であった。以上の結果から、若齢者の腓腹筋において EMD の性差は存在しないこと、膝屈曲位での T_m および EMD の増大メカニズムは筋腱の弛み (slack) がもたらす張力伝達効率の低下であることが示唆された。

(2) 足底屈筋群と比較して、膝伸展筋群の T_{ec} は有意に短く、 T_m は有意に長かった (図 2)。両値の合計である EMD は膝伸展筋群において有意に長かった。また、これらの値について足底屈筋群と膝伸展筋群の間で有意な相関関係は認められなかった。さらに、 T_{ec} 、 T_m 、EMD のいずれについても、同時に測定した他の筋機能指標 (随意最大筋力、筋力発揮速度、瞬間的な電気刺激による発揮張力など) との間で有意な相関関係は認められなかった。以上の結果から、EMD やその構成要素 (T_{ec} 、 T_m) は筋間差を有すること、従来の方法とは異なる側面から筋機能を評価していることが示唆された。

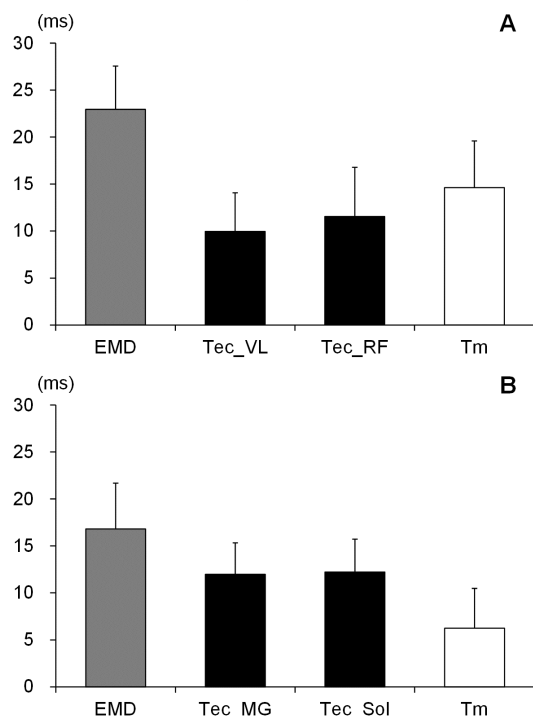


図 2 膝伸展筋群(A)および足底屈筋群(B)の EMD とその構成要素

値は平均 + 標準偏差 ($n = 65$)

VL: 外側広筋、RF: 大腿直筋

MG: 腓腹筋内側頭、Sol: ヒラメ筋

(3) 一回の高強度運動は、運動直後および 2 日後における上腕二頭筋の EMD とその構成要素の変化をもたらさなかった。しかし、運動 4 日後の EMD および T_m は、運動前と比較して増大する傾向が観察された。高強度運動の 4 日後における上腕二頭筋 EMD の増大は、従来の方法により (随意的に) EMD を測定した研究 (Howatson, 2010) の結果と一致していた。 T_m は筋が発揮した収縮力が筋膜、腱膜、腱などの結合組織を介して関節トルクに変換される過程における力学的効率の指標と考えられることから、高強度運動は一過的に運動効率を低下させることが示唆された。

以上の研究成果より、EMD とその構成要素は筋の機能やコンディションを反映する指標となること、従来の指標 (随意最大筋力など) とは異なる側面から筋を評価していることが示唆された。したがって、従来の測定と組み合わせることで、より詳細に筋の機能やコンディションを評価できるものと考えられる。また、測定の身体的負担度が小さいことや結果に神経的要因が混入しないことは、運動負荷や運動強度に制限のあるリハビリテーション期 / 試合期のスポーツ競技者や高齢者・障害者においても客観的な筋機能評価ができるというメリットがある。

一方で、本研究で認められた筋間差が純粋に筋特性の違いによるものかどうかについては、今後さらに検討する必要がある。また、筋収縮および関節トルク発揮の開始を同定するための分析方法・アルゴリズムについてさらに改良を重ね、よりエラーの出にくい方法を開発することも今後の課題である。

<引用文献>

Hug F, Lacourpaille L, Nordez A. Electromechanical delay measured during a voluntary contraction should be interpreted with caution. *Muscle Nerve* 44: 838-839, 2011.

Sasaki K, Sasaki T, Ishii N. Acceleration and force reveal different mechanisms of electromechanical delay. *Med Sci Sports Exerc* 43: 1200-1206, 2011.

Howatson G. The impact of damaging exercise on electromechanical delay in biceps brachii. *J Electromyogr Kinesiol* 20: 477-481, 2010.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

佐々木一茂 若齢やせ女性における下肢筋群の形態的・機能的特徴とその背景要因 健康医科学 (研究助成論文集) 29: 77-87, 2014. [査読有]

〔学会発表〕(計 5 件)

佐々木一茂、富岡由紀絵、石井直方 腓腹筋の張力伝達効率における性差の検

討 第 70 回日本体力医学会大会 2015
年 9 月 18 日 (和歌山県民文化会館、和
歌山)

佐々木一茂、前川貴郊、谷口祥平、中野
紀夫 低負荷筋力トレーニングによる
膝伸展筋群の筋力増強・筋肥大効果：メ
タアナリシス NSCA ジャパンストレン
グス&コンディショニングカンファレ
ンス 2014 2014 年 12 月 7 日 (国土館大
学、東京)

佐々木一茂、江崎由梨、水野彩、佐古隆
之 若齢やせ女性における下肢筋群の
形態的・機能的特徴 第 69 回日本体力
医学会大会 2014 年 9 月 20 日 (長崎大
学、長崎)

〔その他〕

研究室 Web ページ

<https://sites.google.com/site/eeplab/>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 一茂 (SASAKI KAZUSHIGE)
日本女子大学・家政学部・講師
研究者番号：00451849

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし