

平成 22 年 6 月 7 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2007～2008

課題番号：19800010

研究課題名（和文） ヒト生体における骨格筋無負荷最大短縮速度とその加齢変化

研究課題名（英文） Maximal unloaded shortening velocity of human skeletal muscle in vivo and its age-related changes

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）：本研究では、筋肉の質を反映する指標である無負荷最大短縮速度をヒト生体内で測定する方法を確立し、その加齢変化について検討することを目的とした。その結果、1)筋に電気刺激を与え、その際に生じる筋振動と筋力発揮の時間遅れを測定することにより、無負荷最大短縮速度の測定が可能なこと、2)無負荷最大短縮速度は、随意運動から推定された最大短縮速度よりも高い値を示すこと、などが示唆された。ただし、無負荷最大短縮速度を高精度に測定し、その加齢変化を観察するためには、アーチファクトの除去方法についてのさらなる検討が必要であることもわかった。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to develop a new method determining in vivo maximal unloaded shortening velocity ( $V_0$ ), which represents an intrinsic property of human skeletal muscle, and to investigate its age-related changes. The results suggest that 1)  $V_0$  can be measured in vivo, from the time lag between the onset of muscle contraction and the beginning of joint torque development, and 2)  $V_0$  is well above the maximal shortening velocity estimated from the voluntary human movement. However, further methodological improvement especially in artifact removal is necessary for studying age-related changes in  $V_0$ .

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,320,000	0	1,320,000
2008 年度	1,260,000	378,000	1,638,000
総計	2,580,000	378,000	2,958,000

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、老化、骨格筋、筋収縮、電気刺激、筋音図、直列弾性要素

## 1. 研究開始当初の背景

近年の長寿化・高齢化社会において、脳血管疾患や転倒などの原因により、寝たきりになる高齢者の存在がクローズアップされてきている。このような現象の直接的背景としては、加齢による筋機能の低下と、それに伴

う身体活動量の低下が考えられる。加齢による筋機能の低下については、これまでの多くの研究から、1)加齢により、筋肉は細くなり（筋萎縮）、筋力が低下すること、2)加齢により、速筋線維やそれを支配する運動ニューロン数が減少すること、3)こうした加齢性変化

は適切なトレーニングにより、防止もしくは軽減されること、などが明らかにされてきた。これらの知見は、加齢による筋機能の低下を、筋萎縮や筋線維数減少など、主に筋の量的要因から説明している。その一方で、筋線維やその集合体である筋組織の質的要素に変化が起こるかどうかにについては、一致した見解が得られていない。

ところで、モーターをはじめとする人工的な動力装置の性能を評価する場合、「トルク—回転速度関係」が最も重要であるのと同様に、我々のモーターである骨格筋の機能は「力—速度関係」として評価される。この関係において、短縮速度ゼロにおける筋力を等尺性最大筋力と呼ぶのに対し、負荷ゼロにおける短縮速度を無負荷最大短縮速度と呼ぶ。両者は互いに独立した値であり、等尺性最大筋力が筋の太さ（横断面積）にほぼ比例する一方で、無負荷最大短縮速度は筋線維組成や筋節（サルコメア）短縮速度など、筋の質的要素によって決まると考えられる。

ヒト生体において等尺性最大筋力の測定がごく一般的に行なわれているのに対し、無負荷最大短縮速度を正確に評価することは容易ではない。しかし、研究代表者は、従来行なわれてきた最大動作速度の測定とは全く異なったアプローチで、ヒト生体における骨格筋無負荷短縮速度の測定を行なうことに成功した(Sasaki & Ishii, 2005)。これは、筋内に生じた構造的な弛み(slack)を筋収縮が取り除くまでの時間の計測から無負荷短縮速度を測定する方法、スラックテスト(Edman, 1979)を応用したものである。この測定法は加齢に伴う筋の質的変化をとらえるための有力なアプローチであるが、一方で、この方法を中高齢者を含めた比較的多数の集団に適用するためには、方法論を工夫し検証を加える必要があると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は以下の2つであった。

(1) 研究代表者がこれまでに開発した測定系をさらに改良することで、ヒト生体における骨格筋無負荷最大短縮速度の新たな測定法を確立すること。

(2) 新たに確立された方法を用いて、骨格筋無負荷最大短縮速度の加齢変化について検討すること。

## 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) 測定方法を確立するための第一歩として、どの筋が測定に適しているかについて検討する必要がある。そこで、実験1として足関節底屈の主働筋であるヒラメ筋・腓腹筋内側頭や足関節背屈の主働筋である前脛骨筋に電気刺激を与え、刺激開始から足関節トルクが発揮されるまでの時間（Electromechanical delay, EMD）を足関節角度を様々に変化させながら測定した。同時に、電気刺激を与えた筋の筋腹に一軸加速度計を貼り付け、刺激開始から筋振動開始（筋収縮の開始を反映）までの時間についても測定した。本実験は、被検筋を決定するための予備的実験という意味合いが強いことから、被検者は健康な成人男性2~6名であった。

(2) 腓腹筋は足関節と膝関節をまたぐ二関節筋であり、足底屈と同時に膝屈曲の作用を持つ。そこで、実験2として膝関節角度を様々に変えながら足関節底屈トルクを測定する装置を新たに開発し、これを利用して腓腹筋内側頭のEMDを測定した。また、実験1と同様に、腓腹筋内側頭およびヒラメ筋の筋腹に一軸加速度計を貼り付け、刺激開始から筋振動開始までの時間についても測定した。被検者は健康な成人男女80名（中高齢者を含む）であった。

(3) 実験3として様々な肘関節角度における上腕二頭筋のEMDを測定した。また、実験1・実験2と同様に、上腕二頭筋の筋腹に一軸加速度計を貼り付け、刺激開始から筋振動開始までの時間についても測定した（図1）。さらに、EMDの測定とは異なる日において、最大努力の肘屈曲動作に様々な荷重負荷をかけた際の肘関節角速度を腕エルゴメータにより測定し、トルク—角速度曲線を得た。被検者は健康な成人男性22名であった。

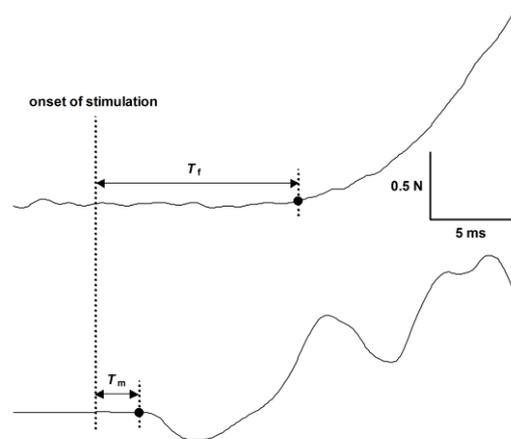


図1. 上腕二頭筋の電気刺激から筋振動の開始 ( $T_m$ ) および肘関節トルク発揮 ( $T_f$ ) までの時間

#### 4. 研究成果

本研究により得られた主な知見は以下の通りである。

(1) 前脛骨筋の EMD は足関節角度にほとんど依存しないことがわかった。この結果は先行研究(小田ら、2004)と異なるものである。結果の相違を説明する一つの要因として考えられるのは、電気刺激条件の違いである。本研究では前脛骨筋を単独で刺激するため、その筋腹に刺激電極を貼り付けたが、小田ら(2004)は総腓骨神経を刺激していた。総腓骨神経は足関節背屈の主働筋である前脛骨筋のみならず、足底屈筋として作用する長腓骨筋・短腓骨筋なども支配しているため、これらの筋が足背屈トルク発揮に拮抗していた可能性がある。

(2) ヒラメ筋・腓腹筋内側頭の EMD は足関節角度 0 度(足底と下腿のなす角が 90 度)～底屈 30 度の範囲では大きな変化が認められなかったが、さらなる底屈位では EMD が底屈角度に比例するように増大することがわかった。一方、電気刺激から一軸加速度計によって測定した筋振動開始までの時間については、ヒラメ筋では底屈位になるほどやや短縮する傾向が認められ、腓腹筋内側頭では関節角度によらずほぼ一定値であった。

EMD には、筋が電氣的に興奮してから実際に動き始めるまでの時間遅れ(興奮-収縮連関)と、筋組織や腱組織に含まれる直列弾性要素の伸張に要する時間遅れ(張力の伝達)が含まれることが知られている。電気刺激から一軸加速度計によって測定した筋振動開始までの時間は前者を反映し、筋振動開始から関節トルクが発揮されるまでの時間は後者を反映する。ヒラメ筋や腓腹筋内側頭の電気刺激において、足関節角度の底屈位への変化(筋長の短縮)とともに、筋振動開始から足底屈トルクが発揮されるまでの時間が増大したということは、筋組織や腱組織の弛みが筋長の短縮により増大し、その弛みを収縮要素を取り除くための時間が増大したということを示唆している。したがって、ヒラメ筋や腓腹筋内側頭では、足関節角度から推定した筋長と筋振動開始から関節トルクが発揮されるまでの時間の関係をプロットし、回帰直線を求めることで、無負荷最大短縮速度を測定可能であることがわかった。

無負荷最大短縮速度を導くための回帰直線の信頼性は、プロットの数が多いほど高くなる。しかし、ヒラメ筋や腓腹筋内側頭において、筋振動開始から関節トルクが発揮されるまでの時間に変化が認められるのは底屈角度が 30 度を超えてからであり、足関節の可動域がせいぜい底屈 45 度までであることを考えると、信頼性の高い回帰直線を求める

にはさらにアプローチを工夫する必要があることがわかった。

(3) 腓腹筋の筋長は膝屈曲角度の増大に伴い減少し、個人差はあるが膝関節角度が 43 度(完全伸展位:0 度)以上になると弛んだ(受動的張力を発揮しない)状態になると報告されている(Muraoka et al. 2005)。したがって、膝関節角度 0 度～100 度の範囲で腓腹筋内側頭に電気刺激を与え、足関節底屈トルク発揮までの EMD を測定すれば、ある関節角度までは EMD がほとんど変化せず、以降膝屈曲角度の増大とともに EMD が増大するという関係が得られることが予想された。しかし、この予想に反し、腓腹筋内側頭の EMD は膝関節角度にあまり依存しなかった。この理由として、電気刺激は腓腹筋内側頭に選択的に与えたものの、その収縮力が筋膜等の結合組織を介して膝関節角度変化の影響を受けないヒラメ筋に伝達された可能性が考えられる(Huijing, 2003)。したがって、膝関節角度変化により腓腹筋内側頭の筋長を変化させ、その無負荷最大短縮速度を測定するためには、こうしたアーチファクトの除去方法についてのさらなる検討が必要であることがわかった。

(4) 様々な肘関節角度における上腕二頭筋の EMD は、22 名中 16 名の被検者において、肘関節角度 90 度前後(完全伸展位:0 度)を境に、肘屈曲位への変化(筋長の短縮)とともに増大した。一方、電気刺激から一軸加速度計によって測定した筋振動開始までの時間は肘関節角度に依存しなかった(図 2)。

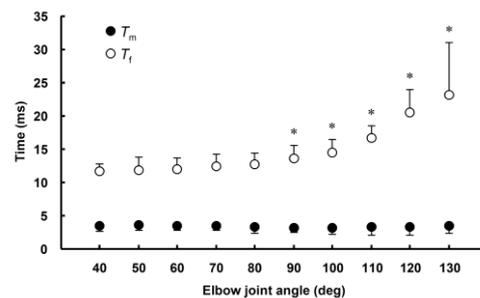


図2. 肘関節角度と上腕二頭筋の電気刺激から筋振動の開始( $T_m$ )および肘関節トルク発揮( $T_l$ )までの時間の関係(16名の平均±標準偏差、\* $P < 0.05$ )

そこで、この 16 名の被検者を対象に、関節角度から推定された上腕二頭筋長と、張力の伝達に要する(筋振動の開始から関節トルク発揮までの)時間の関係を一次回帰することにより、上腕二頭筋の無負荷最大短縮速度( $V_0$ )を算出した(平均±標準偏差:  $10.8 \pm 3.6$ )

Lo/s、Loは肘関節 90 度における推定筋束長)。また、その値は随意的な肘屈曲動作におけるトルク—角速度曲線から推定した最大短縮速度 ( $V_{max}$ ) を大きく上回るものであった ( $P < 0.01$ )。

本研究において測定している筋の  $V_0$  は、電気刺激後の関節トルクの立ち上がりを基準にして算出していることから、短縮速度の最も速い（したがって、筋組織や腱組織の弛みを最初に取り除き、関節トルク発揮に貢献した）数本の筋線維の活動によって決定される。一方、肘屈曲動作のトルク—角速度曲線から  $V_{max}$  を推定する場合には、筋が負荷に抗する形で発揮した短縮速度を元としているため、より短縮速度の遅い筋線維の影響も含まれているものと考えられる。同様の考察はいくつかの先行研究 (Clafin & Faulkner, 1985; Josephson & Edman, 1988) でもなされており、摘出筋において  $V_0/V_{max}$  は筋に含まれる筋線維の異質性を反映する指標と考えられている。すなわち、同じ収縮特性の筋線維の割合が高いほど全筋レベルでの  $V_0/V_{max}$  は 1 に近づく。ラットから摘出したヒラメ筋を用いた研究では  $V_0/V_{max}$  は  $1.6 \pm 0.1$  と報告されている (Clafin & Faulkner, 1985)。一方、本研究で得られた  $V_0/V_{max}$  は  $2.23 \pm 0.95$  と先行研究に比べて高く、また個人差の大きい値となった。これはラットのヒラメ筋よりもヒトの上腕二頭筋の異質性が高いことを示唆するというよりは、随意収縮において低負荷・高速度のバリスティックな筋力発揮が難しいことや上腕二頭筋以外の筋の影響が混入していることにより、 $V_{max}$  を過小評価しているためと考えられる。実際、肘関節 90 度における推定筋束長あたりの  $V_0$  は  $10.8 \pm 3.6$  Lo/s であり、ラットの長指伸筋 (速筋線維のみを含む) の  $7.71$  Lo/s (35 °C : Ranatunga, 1982) と比べても極端に高い値ではなかった。

以上の知見から、上腕二頭筋においては信頼性の高い無負荷最大短縮速度の測定が可能であることが示唆された。しかし、22 名中 6 名の被検者においては予想していたような関係が認められず、 $V_0$  を求めることができなかった。この原因は定かではないが、今後さらにこの方法を発展させ、多くの被検者に適用するためには、実験プロトコルや分析方法のさらなる改良と同時に、妥当性・再現性についての詳細な検討が必要である。

## 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)

[学会発表] (計 7 件)

① 佐々木卓、佐々木一茂、石井直方 スラ

ックテスト法を応用したヒト肘屈筋無負荷短縮速度の評価：等張力性後負荷法との比較 第 17 回日本運動生理学会大会 2009 年 7 月 26 日 (東京)

② 佐々木一茂、佐々木卓、石井直方 スラックテスト法を応用したヒト肘屈筋無負荷短縮速度の評価：静的測定法の開発 第 17 回日本運動生理学会大会 2009 年 7 月 25 日 (東京)

③ 佐々木一茂 力から神経・筋の機能を探る 第 16 回身体運動科学公開シンポジウム 2008 年 11 月 8 日 (東京)

④ Sasaki K, Matsubayashi T, and Ishii N. Relationship between torque and angular velocity of human dorsiflexors in vivo. The 55<sup>th</sup> annual meeting, American College of Sports Medicine, Indianapolis, USA (May 31, 2008).

## 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

( )

研究者番号：

### (3)連携研究者

( )

研究者番号：