

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23700688

研究課題名（和文）収縮時のヒト骨格筋および腱組織全体の形態計測

研究課題名（英文）Measurement of in vivo human skeletal muscle and tendon architecture during contraction

研究代表者

栗原 俊之（KURIHARA TOSHIYUKI）

立命館大学・スポーツ健康科学部・助手

研究者番号：10454076

研究成果の概要（和文）：

本研究では、ヒトの力発揮メカニズムを解明するために、収縮時の筋・腱組織全体の形態を計測することを目的として行われた。従来、骨格筋の測定に用いられている超音波 B モード法に加え、MR 拡散テンソル画像法や Tagging snapshot 法（MRI の高速撮像法の一つで、画像上の一部分の移動を観測する方法）という新しい手法を骨格筋測定に応用した。主たる結果として、拡散テンソル画像法では、血流還流、筋線維組成、事前運動の量などの影響が誤差要因として無視できないことが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this study was to clarify the force generating mechanism of human skeletal muscle. For this purpose, the architecture of the entire muscle and tendon structure in vivo was measured during contraction. In this study, two newly developed methods, magnetic resonance diffusion tensor imaging and tagging snapshot imaging methods, were used and were compared with the conventional method of the B-mode ultrasonography. One of the main results was that there were several error factors in magnetic resonance diffusion tensor imaging methods; such as the blood perfusion, type of muscle fibers, and the previous activation of the muscle. These factors should not be ignored in the determination of the diffusion parameters.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：健康・スポーツ科学

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学、身体教育学

キーワード：骨格筋、筋収縮、筋束動態、生体計測、拡散係数

1. 研究開始当初の背景

骨格筋は力発揮時に収縮により大きな変形をするという特徴を持ち、腱組織は発揮された力を関節に伝達する際、粘弾性体として振る舞い、腱組織自体の変形も伴う。しかしながら、これまでの筋・腱組織に関する研究では、MRI 法においては静止画を、超音波 B モード法においては部分的な形態（平面内）を計測するのが主であり、“収縮時”の“三

次元”な骨格筋形状を計測した例はなかった。

従来のヒト骨格筋の生体内計測には、超音波 B モード法がよく用いられてきた。この方法は、時間分解能に優れており、収縮時の測定に適している。先行研究においても、筋と腱の相互作用が関節トルク発揮に影響を与えることが示されている（Fukunaga ら、1997；Ichinose ら、1997）。一方、近年、

脳白質の神経線維などの描出に使用されていた MR 拡散テンソル画像の線維追跡法を骨格筋に応用することによって、筋線維の三次元的な走行方向が描出できるようになった (青木ら、2010; 柳澤ら、2009; Lansdownら、2007; Damonら、2002)。この方法の利点は広い撮像領域の中で、三次元筋線維構造を推定することができることである。しかしながら、撮像時間が数分~数十分にわたることから、随意収縮時の骨格筋形状を計測するには適さず、主に安静状態における計測にのみ用いられている (青木ら、2010; 柳澤ら、2009; Hatakenakaら、2008)。そこで、収縮時の骨格筋形状を計測する方法として、心筋の運動計測に用いられる Tagging snapshot 法 (MRI の高速撮像法を用い、画像の断層面に垂直に飽和パルスを与えて細い帯状の無信号領域を作成し、その移動を観測する方法) が考えられる (Huら、2003; Hiokiら、2003)。この Tagging snapshot 法を骨格筋計測に用いることで、短時間 (1 秒以内) の筋・腱組織の移動が計測可能となる (日置ら、2000)。

2. 研究の目的

本研究では、収縮時の筋・腱組織全体の形態を計測することを目的とし、ヒトの力発揮メカニズムを解明するために、以下の3つの測定法を用いた実験を行う。

(1) MR 拡散テンソル画像を用いた筋線維追跡法の測定

(2) MR Tagging snapshot 法による組織移動量の定量

(3) 超音波法による筋腱動態の部位差の実測

なお、各実験において、測定法の妥当性の検討と精度向上に努め、各測定法を実用可能なレベルまで高めることを目標とし、妥当性が検証された方法を用いて等負荷伸張性・短縮性収縮時の骨格筋および腱組織の形態の計測を行うこととした。

3. 研究の方法

(1) MR 拡散テンソル画像による筋線維追跡法の妥当性確認: 拡散テンソル法で得られる拡散係数 (Apparent diffusion coefficient: ADC) には骨格筋の筋内水分量が影響する。そこで、まず、血液灌流の影響を除外するため、大腿部をカフで巻いて、200mmHg まで加圧して動脈を圧迫し阻血状態を保持した状態 (2~3 分) で、大腿部および下腿上部の ADC 値の測定を行った。次に、骨格筋の水分量を反映するとされる骨格筋 T2 値の測定を行う。しかしながら、骨格筋 T2 値は水分量に加えて、筋線維組成や筋細胞内脂肪

(intramyocellular lipid: IMCL) 含有量などの筋機能的要因も影響すると考えられる。

そこで、プロトン磁気共鳴スペクトル法

(¹H-MRS 法) により、筋内脂肪 (IMCL) の定量を同時に行い、IMCL 含有量が骨格筋の T2 値計測にもたらす影響を検討した。最後に、安静状態で関節角度を変えたときおよび等尺性収縮中の腓腹筋内側頭およびヒラメ筋の筋線維方向を描出し、筋線維長と羽状角 (筋線維の走行角度) などの筋形状パラメータを計測する。

(2) MR Tagging snapshot 法による組織移動量の定量: 高速グラジエントエコー法を使用し、画像の断層面に垂直に飽和パルスを与えて無信号領域を作成し、1 秒後に画像を撮像する。次に、被験者が脱力した状態で受動的短縮・収縮時における計測を行う。受動収縮は機械的に足関節角度を動かすもので、撮影の際、膝関節角度を 180 度 (完全に進展した状態) とし、足関節をプレートに固定する。下肢は動かないように伸縮性テープで固定具に縛り付け、プレートの速度は比較的ゆっくりの速度 (~5deg/s) で行う。

(3) 超音波法による筋腱動態の部位差の実測: 超音波画像法によって骨格筋・腱組織全体の形態を計測するため、複数個所における筋・腱動態を計測する。

4. 研究成果

拡散テンソル画像による筋線維追跡法の測定精度の向上および妥当性の確認に関する実験を行った。大腿部カフ締め時の拡散画像内では、動脈血管の信号値の低下が確認されたが、それに伴い筋内の ADC 値が低下した。また、安静時の外側広筋の T2 値は 39.1 ± 4.5ms であり、従来の報告の範囲内であった。T2 値と IMCL との間に正の相関 ($r = 0.52$, $P < 0.01$) が認められた。長距離選手においては IMCL 含有量が多いことが知られており、このことから T2 値が筋の有酸素能や筋線維組成との関連している可能性が示唆される。さらに、自重負荷によるカーフレイズ課題前後の T2 値変化および ADC 値の測定を行った。その結果、運動課題直後に T2 値が有意に増加した (ヒラメ筋 13 ± 5%、腓腹筋 23 ± 7% 増加)。以上のことから、拡散テンソル画像による FiberTracking 法では、血流還流、筋線維組成、事前運動の量などを考慮する必要があることが分かった。

以上のことを加味したうえで、健常成人男性 7 名に対し、MR 装置内で使用できる非磁性体筋力測定装置を使用し、等尺性足背屈収縮時の ADC 値を求めた。強度 20%MVC (Maximal Voluntary Contraction: 随意最大収縮) 時には ADC 値は変化せず、強度 50%MVC 時には ADC 値が有意に増加した。ADC 値の増加には収縮熱の発生による影響もあるが、収縮に伴う筋束の羽状角 (腱膜と筋束のなす角度) の変化にも対応していると考えられる。超音波

法による収縮時の前脛骨筋の筋束動態の観測によって、力発揮強度の増加に伴い、筋束は短縮し羽状角が増大するとともに、腱膜の長軸方向へ筋束が移動することが分かっている。そこで、前脛骨筋の腱膜に対する平行方向と垂直方向に拡散係数を分けて計算したところ、水平方向に比べ垂直方向の拡散係数の変化が大きいことが明らかとなった。このことは、収縮に伴う筋束の移動方向と一致し、拡散画像から収縮時の筋束動態を定量出来る可能性が示唆された。一方で、血液流による影響も無視できないため、追加実験としてMR 室外にて等尺性足背屈収縮時の近赤外分光法による運動前後の筋血流量を計測した。50%MVC 時には筋内圧の上昇に伴う筋血流の減少が認められ、力発揮中の拡散係数に影響を及ぼさなかったと考えられる。

得られた結果から、拡散テンソル画像法で大きな問題となっていた誤差要因が特定された。今後は、測定値の中に、それらの影響を考慮する事でより正確でより包括的な筋形状パラメータの計測が可能となる事が期待される。

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6件)

①二連木晋輔、栗原俊之、藤岡正子、佐伯武士、浜岡隆文、筋血管機能低下時における近赤外線分光法と磁気共鳴分光法の評価指標の関連、脈管学、査読：有、2013、53、1-7。
DOI : <http://dx.doi.org/10.7133/jca.53.1>

②佐々木竜一、栗原俊之、伊坂忠夫、陸上競技短距離走選手における下腿三頭筋の筋サイズとアキレス腱断面積の関係、体育学研究、査読：有、2012、57(2)、631-639。DOI : <http://dx.doi.org/10.5432/jjpehss.11113>

③高島弘幸、栗原俊之、MR スペクトロスコピー (MRS) がもたらす情報 -1H-MRS による筋内脂肪量の半定量的評価を中心に-、月刊インナービジョン、査読：無、2012、27(3)、34-36。
http://www.innervision.co.jp/01inner/2012/pdf/iv201203_034.pdf

④ Yanagisawa O, Kurihara T, Kobayashi N, Fukubayashi T, Strenuous resistance exercise effects on magnetic resonance diffusion parameters and muscle-tendon function in human skeletal muscle. Journal of Magnetic Resonance Imaging、査読：有、2011、34、887-894。DOI: 10.1002/jmri.22668

⑤ Iwanuma S, Akagi R, Kurihara T, Ikegawa S, Kanehisa H, Fukunaga T, Kawakami Y, Longitudinal and transverse deformation of human Achilles tendon induced by isometric plantar flexion at different intensities. Journal of Applied Physiology、査読：有、2011、110、1615-1621。DOI: 10.1152/jappphysiol.00776.2010

⑥ Yanagisawa O, Kurihara T, Fukubayashi T, Alterations in intramuscular water movement associated with mechanical changes in human skeletal muscle fibers: An evaluation using magnetic resonance diffusion-weighted imaging and B-mode ultrasonography. Acta Radiologica、査読：有、2011、52、1003-1008。DOI: 10.1258/ar.2011.110153

[学会発表] (計18件)

① 吉川万紀ほか3名、MRI法とBI法による四肢の体組成測定の見直し、日本トレーニング科学学会大会、2012年12月1日、立命館大学(滋賀県)

② 栗原俊之ほか4名、足趾把持筋力と内在筋と外在筋の筋サイズの関係、スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス2012、2012年11月16日、愛知大学(愛知県)

③ 栗原俊之、MRを用いた骨格筋評価手法の紹介、LD4.org セミナー(招待講演)、2012年9月23日、藍野大学(大阪府)

④ Kurihara Toshiyukiほか4名、The relationship between force and muscle size on plantar flexor and plantar intrinsic foot muscles、日本生体生理工学シンポジウム、2012年9月21日、北海道大学学術交流会館(北海道)

⑤ 鳥取伸彬ほか3名、足指筋力と足底部筋断面積との関係、日本体力医学会、2012年9月16日、長良川国際会議場・岐阜都ホテル(岐阜県)

⑥ 榊原康政ほか3名、局所的な低強度肘進展運動が血中グルコースおよび乳酸濃度に与える影響と男女差の見直し、日本体力医学会、2012年9月14日、長良川国際会議場・岐阜都ホテル(岐阜県)

⑦ 栗原俊之ほか1名、大学男子陸上競技選手における下腿三頭筋の筋サイズとアキレス腱断面積の関係、日本体育学会、2012年8

月 22 日、東海大学 (神奈川県)

⑧ Kurihara Toshiyuki ほか 2 名、Mechanical properties of Achilles tendon in relation to various sport activities of collegiate athletes、Conference of the International Society of Biomechanics in Sports、2012 年 7 月 3 日、Melbourne (Australia)

⑨ Kurihara Toshiyuki ほか 3 名、Effects of normobaric hypoxia training on changes in whole body adiposity and regional lipid accumulation、Annual meeting American College of Sports Medicine、2012 年 6 月 1 日、San Francisco (USA)

⑩ Kurihara Toshiyuki ほか 3 名、Relationship between intramuscular lipid and muscle size within human vastus lateralis muscle、Societe Francaise de resonance magnetique en biologie and Medecine、2012 年 3 月 22 日、Marseille (France)

⑪ Kurihara Toshiyuki ほか 3 名、Intramyocellular and extramyocellular lipids quantifications of human vastus lateralis muscle: effect of age、whole body adiposity、and muscle size、The Biomedical Basis of Elite Performance、2012 年 3 月 21 日、London (England)

⑫ 栗原俊之 ほか 1 名、身体情報に関するフィードバックのあり方 ~データの質と受け手の態度変化~、トレーニングカンファレンス、2011 年 12 月 3 日、立命館大学 (滋賀県)

⑬ 栗原俊之、1H-MRS を用いた筋内脂肪量の評価、日本磁気共鳴医学会 (招待講演)、2011 年 9 月 30 日、リーガロイヤルホテル小倉 (福岡県)

⑭ 前原淳 ほか 5 名、MR 信号変化に基づいた高強度レジスタンストレーニングによる筋損傷の局所分布の検討、日本体育学会、2011 年 9 月 27 日、鹿屋体育大学 (鹿児島県)

⑮ Sasaki Ryuichi ほか 2 名、Morphological and mechanical characteristics of Achilles tendon in college athletes、日本生体生理工学シンポジウム、2011 年 9 月 20 日、立命館大学 (滋賀県)

⑯ Kurihara Toshiyuki ほか 2 名、Inter- and intraday variability and repeatability of

intramyocellular lipid measurement by proton magnetic resonance spectroscopy (1H-MRS)、日本生体生理工学シンポジウム、2011 年 9 月 20 日、立命館大学 (滋賀県)

⑰ 栗原俊之 ほか 3 名、ボート競技における持久的トレーニングに伴う筋内外脂肪の変化、日本体力医学会、2011 年 9 月 18 日、海峽メッセ下関 (山口県)

⑱ Kurihara Toshiyuki ほか 4 名、Relationship between whole body adiposity and intramyocellular and extramyocellular lipid contents in sedentary healthy men、Annual meeting American College of Sports Medicine、2011 年 6 月 1 日、Denver (USA)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栗原 俊之 (KURIHARA TOSHIYUKI)

立命館大学・スポーツ健康科学部・助手

研究者番号: 10454076