THE ANNUAL REPORTS OF
HEALTH, PHYSICAL EDUCATION
AND SPORT SCIENCE
VOL.35, 57-62, 2016

報告書（体育研究所プロジェクト研究）

骨格筋の形態と機能的動態特性を探る

Structural and mechanical properties of human skeletal muscle

角　田　直　也*，伊　原　佑　樹*，秋　葉　茂　季*
平　塚　和　也*，岩　城　翔　平**，田　中　重　陽***

Naoya TSUNODA*, Yuki IHARA*, Shigeki AKIBA*
Kazuya HIRATSUKA*, Shouhei IWAKI** and Shigeharu TANAKA***

プロジェクト研究の概要

これまでに、本プロジェクトでは、スポーツ選手を対象に骨格筋の形態と機能的動態特性がスポーツパフォーマンスに及ぼす影響を明らかにするために次の課題に取り組んできた。

1）筋と腱の形状変化特性

2）Tensiomyography（TMG）法による骨格筋の形態と収縮特性との関係を探る

本年度に実施した課題に関する研究成果についてテーマごとに報告する。

Ⅰ．筋と腱の形状変化特性

本研究では、MCセンサー法を用いて、筋力発揮中の膝伸展筋群及び膝蓋腱の活動動態を評価した。

被検者は健康な成人男性14名とした。各被検者には測定に先立ち、研究の目的、測定方法及びその安全性について十分説明し、参加の同意を得た。被検者の身体的特性は、年齢が25.5±5.5歳、身長が173.1±7.1cm、体重69.2±11.8kg、体脂肪率が16.6±5.2％であった。

等尺性膝伸展トルクは、総合筋力測定装置（Biodex System-Ⅲ：Biodex社製）を用いて測定した。膝関節角度を70度（完全伸展位を0度）に設定し、測定開始から約3秒で徐々に最大トルクに達する漸増的な力発揮を行わせた。分析範囲は力発揮開始から最大トルク発揮時までとし、最大トルクに対する10％毎の相対トルク値を算出した。

筋及び腱の形状変化量は、Sardjan. D.et. al, [1, 2, 3] の手法を参考にMCセンサー（TMG-BMC社製）を用いて総合筋力測定装置と同期して測定した。被験筋は、右脚大腿部の内側広筋斜頭（VM）、大腿直筋（RF）、外側広筋（VL）及び膝蓋腱（Pt）とした。センサーの貼付位置は、超音波Bモード法（SSD-900、ALOKA社製）を用いて各筋の筋腹を確認した後に貼付した。MCセンサーは、サポートパッドに舌状突起型のチップを筋は5mm、腱は2mm突出した状態で取り付け、対象とする部位の皮膚に貼付することで、形状変化によって生じた張力を、センサーに内蔵されたストレインゲージによって計測することができる。MCセンサーの測定原理は、Fig.1に示した。MCセンサーによって得られるデータは、脂肪厚の影

* 国士舘大学大学院スポーツ・システム研究科（Graduate School of Sport System, Kokushikan University）
** 国士舘大学体育学部（Faculty of Physical Education, Kokushikan University）
*** 国士舘大学政経学部（Faculty of Political Science and Economics, Kokushikan University）

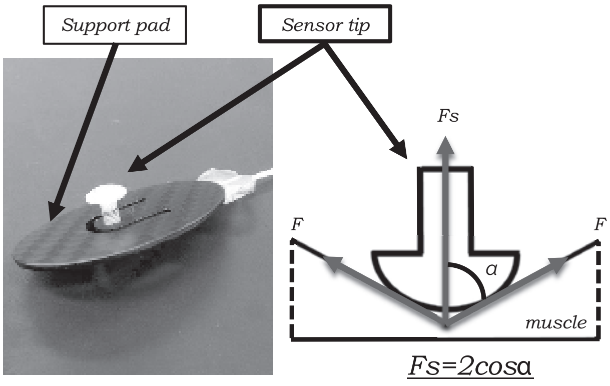


Fig.1. Definition of MC sensor method.

響を考慮し、安静状態においてセンサーを貼付した際の値を初期値とし、筋力発揮中の値から初期値を差し引いた差を筋の形状変化量（F_{MC}）として算出した。Fig.2は分析のサンプルを示したものである。

Fig.3は、トルク相対値に対する膝伸展筋群のF_{MC}を示したものである。トルクの増大に伴い各筋のF_{MC}は増大する傾向を示した。一方、PtのF_{MC}は力発揮直後の20%トルクでピーク値を示した後、トルクの増大に伴い若干低下するものの30%トルク以降では有意な差は認められず、ほぼ一定の張力を示していた（Fig.4）。大腿伸展筋群は大腿直筋、外側広筋、内側広筋及び中間広筋によって構成され、膝蓋腱で集約され脛骨に付着している。従って、膝蓋腱は大腿伸展筋群の収縮力を脛骨に伝達する役目を担っている。本研究のPtのF_{MC}の変化様相から、漸増的な等尺性筋力発揮において強度が高まるにつれ、膝蓋腱が一定の張力を示し、大腿伸展筋群の収縮力を脛骨に伝達するための役割を担っていたことを力学的観点から確認することができたものと考えられる。

これまでの筋の収縮特性に関する研究では筋電図法を用いて生理学的観点で評価[5, 6]したものや、筋音図法による力学的観点から評価[4, 5, 6]したものがある。しかし、筋と腱を同時に評価したものやよりダイナミックな運動時の筋-腱の活動動態を評価したものはあまりみられない。MCセンサ

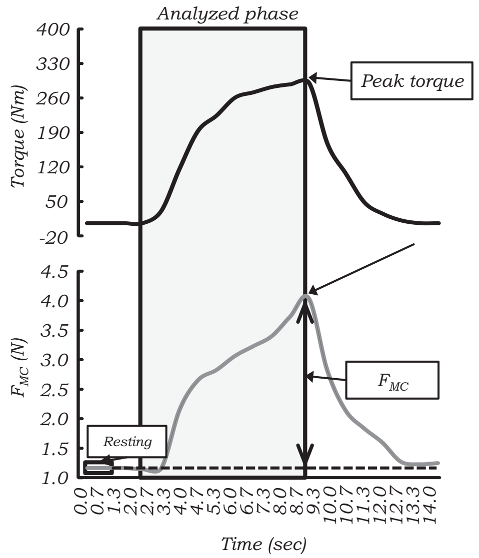
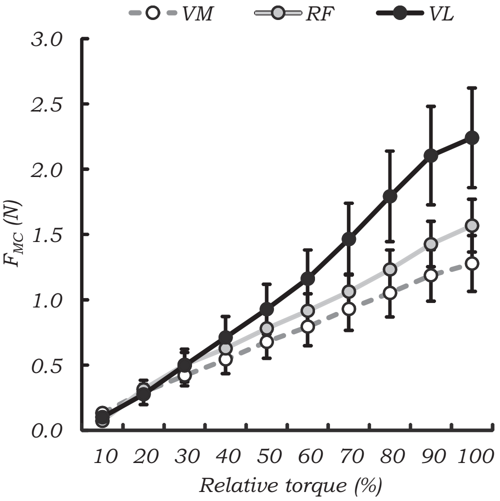


Fig.2. Methods of analysis in isometric contraction.



VM: Vastus medialis, RF: Rectus femoris, VL: Vastus lateralis.

Fig.3. Relationships between F_{MC} on muscles and relative torque.

ー法は、簡易的かつ非侵襲的な手法であること、選択的部位の筋や腱の活動動態を個別に評価できること、さらには動的運動時において対応できるというメリットを有している[1, 2, 3]。しかしながら、MCセンサー法による研究は上腕二頭筋を対象としたもの[1, 2]や比較的動作速度の遅いスクワ

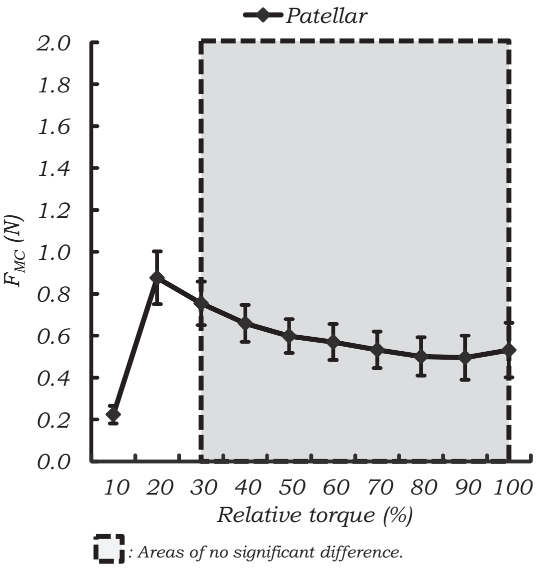


Fig.4. Relationship between F_{MC} on patellar and relative torque.

ット動作を対象[3]としたものしかみられない。今後、MCセンサー法により、あらゆる運動条件下における筋-腱の活動動態を捉えることによって、筋-腱複合体の力学的特性を探ることが可能となる。また、リハビリテーションなどのスポーツ臨床の場においても活用できるものと考えられる。

参考文献

1）Djordjevic, S., Stancin, S., Meglic, A., Milutinovic, V. & Tomazic, S.（2011）. MC sensor –a novel method for measurement of muscle tension. Sensors., 11, 9411-9425.

2）Djordjevic, S., Tomazic, S., Narici, M., Pisot, R. & Meglic, A.（2014）. In-vivo measurement of muscle tension：Dynamic properties of the MC sensor during isometric muscle contraction. Sensors., 14, 1-16.

3）Djordjevic, S., Berdajs, M., Modic, Z., Gerbec, C., M., Stancin, S., Sodnik, J., Tomazic, S.（2014）. Preliminary force load analysis of the knee muscle-tendon complex between squatting with MC sensor. ISOT, Rome, TMG：Today and future., 23-27.

4）Garcia, M. A. C., Vargas, C. D., Souza, M. N., Imbiriba, L. A. & Oliveira, L. F.（2008）. Evaluation of arm dominance by using the mechanomyographic signal. J. Motor Behav., 40,（2）, 83-89.

5）長谷川雅志，平塚和也，田中重陽，手島貴範，角田直也：筋電図及び筋音図からみた上腕屈筋群及び大腿四頭筋群における漸増的筋力発揮，東京体育学研究，6：23-29，2015.

6）甲斐義浩，村田 伸，古後晴基，池田 望，大田尾浩，山田道廣：筋音図を用いた大腿四頭筋の筋機能評価―筋電図と筋音図の比較―，ヘルスプロモーション理学療法研究，1（1）：61-65，2012.

Ⅱ．Tensiomyography（TMG）法による骨格筋の形態と収縮特性との関係を探る

本研究では、短距離選手における大腿二頭筋の筋厚と筋収縮速度の関係について検討することを目的とした。

被検者は、大学陸上部に所属する男子短距離選手17名（SP：100M自己ベスト記録10.57秒～10.99秒）及び定期的な運動習慣を有しない一般成人23名（CON）とした。被検者の年齢及び身体的特性をTable 1に示した。体重及び除脂肪体重（FFM）はインピーダンス法によるマルチ周波数体組成計BODY FAT ANALYZER、TBF-110、TANITA社製）を用いて測定した。測定部位は、右脚の大腿二頭筋（BF：坐骨決結節と脛骨外側上顆を結ぶ50％の位置）とした。筋厚の測定は、超音波診断装置（Echo Camera SSD-900L，ALOKA社製）を用いて実施した。被検者の測定姿勢は、両足の内縁間を20cmに開いた安静立位とし、両脚にかかる体重が均等になるよう注意して立位を保持するよう指示した。超音波診断装置の超音波発振周波数は皮下脂肪と筋の境界が明確に判別できる[10] 7.5MHzを用いて計測した。また、表層部の筋組織を圧迫せずに明瞭な超音波画像を得るため、プローブに超音波用ジェルを塗布して超音波画像の撮像を行った。さらに、筋厚の測定は、習熟した1名の測定者が行った。

骨格筋の収縮特性は、筋収縮測定装置（TMG-100、TMG社製）を用いて測定した。TMGの原理はFig.5に示した。TMGは、電気刺激装置を用いて外部刺激を与え、筋腹中央の形状変化をセンサーで計測し、変位量を時間曲線にしたものである。BFの測定姿勢は、伏臥位で実施した。なお、被検者には身体を安静にした状態で測定を行うよう指示した。電気刺激における電流の大きさは、30mAから110mAの範囲までとし、最大変位が発現するまで5mA毎に電流を漸増する方法を用

Table 1. Age and physical characteristics of subjects.

Parameters	SP	CON
Number of subjects	17	23
Age (yrs)	20.8±2.2	20.4±1.8
Body height (cm)	172.9±4.7	173.4±6.1
Body weight (kg)	63.8±5.5	69.8±7.8
FFM (kg)	58.3±3.9	60.4±5.3
Fat (kg)	5.5±2.3	9.3±3.5

SP: sprinter group, CON: control group.　Values are mean ± S.D.
FFM: fat free mass.

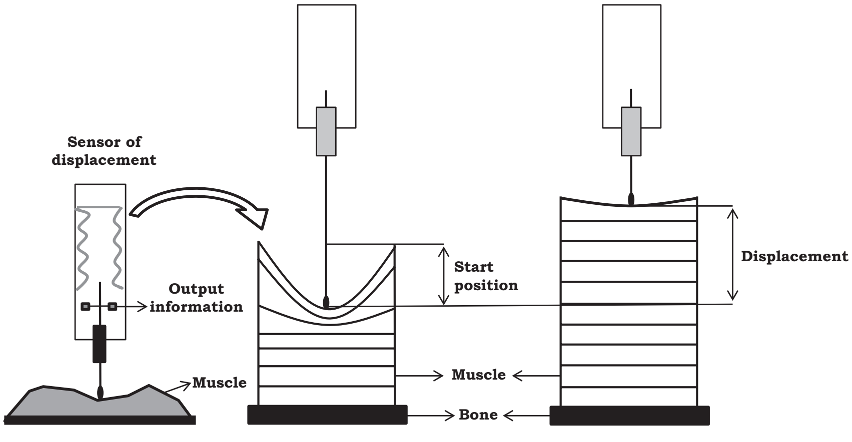


Fig.5. Principle of TMG measurement.

いた。TMGによる筋収縮特性の測定項目は、最大変位（Dm)、遅延時間（Td)、収縮時間（Tc）及び収縮速度（Vrn）の4項目とした。

本研究における各項目の値は、全て平均値±標準偏差で示した。得られた値の関係性については、ピアソンの単純相関によって相関係数を算出した。各項目における有意差の検定には，対応のないT-testを用い，有意水準は5%未満をもって有意とした。

本研究は、短距離選手における大腿二頭筋の筋厚が一般成人と異なることから、短距離選手と一般成人を比較対象とし、筋形態の異なる被検者群での筋収縮特性の差異、さらに筋厚と筋収縮速度の関係について検討した。

筋厚は本研究においても、短距離選手（SP：46.3±3.4mm）と一般成人（CON：42.9±3.4mm）の筋形態は先行研究[11]と同程度であった（Table 2)。即ち、短距離選手における大腿二頭筋の筋厚は一般成人よりも大きいことが明らかとなった。

TMGを用いた最大変位量は、短距離選手（SP：4.2±2.9mm）が一般成人（CON：6.1±3.0mm）よりも少なかったものの有意な差は確認されなかった。また、遅延時間及び収縮時間は、短距離選手が一般成人よりも有意に優れ（Td SP：20.8±2.3ms CON：23.0±2.6ms、Tc SP：20.8±5.0ms CON：34.8±8.3ms)、収縮速度についても、短距離選手が一般成人よりも優れていた。(Table 3、Fig.6)。

Table 2. Comparisons of muscle thickness between Sprinter group and Control group.

Muscle thickness	SP		CON
BF (mm)	46.3±3.4	*	42.9±3.4

SP: sprinter group, CON: control group. Values are mean ± S.D.
BF: biceps femoris. *:p<0.05

Table 3. Comparisons of TMG parameters between Sprinter group and Control group.

TMG parameters	SP		CON
Td (ms)	20.8±2.3	*	23.0±2.6
Tc (ms)	20.8±5.0	*	34.8±8.3
Dm (mm)	4.2±2.9		6.1±3.0

SP: Sprinter group, CON: Control group. Values are mean ± S.D.
Td: delay time, Tc: contraction time, *:p<0.05
Dm: maximal radial displacement.

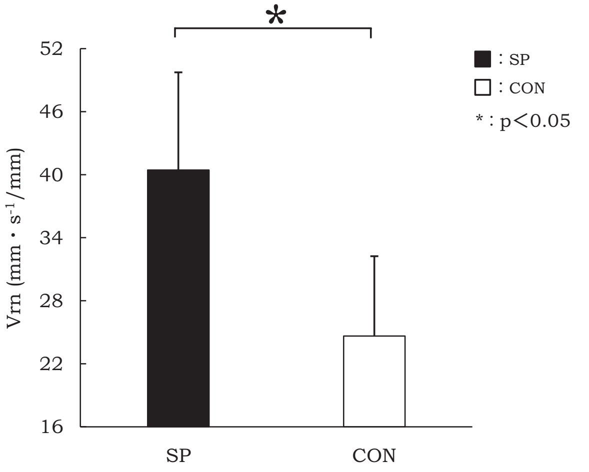


Fig.6. Comparisons of normalized response speed between Sprinter group and Control group.

本研究において注目すべき結果は、一般成人における大腿二頭筋の筋厚と筋収縮速度との間には有意な相関関係が認められなかったものの、短距離選手における大腿二頭筋の筋厚と筋収縮速度との間に有意な正の相関関係が認められたことである（Fig.7)。これまでに、短距離選手は素早い動作（筋収縮速度が大きい動作）で、強い力を発揮する能力が重要であると報告されている[12]。そのため、短距離選手は普段から素早い動作（高速度運動）を意識した練習やトレーニングを行っていることが推測される。高速運動及び低速運動トレーニングを8週間行った久枝ら[11]の研究では、高速運動トレーニングで、より大きな筋肥大が認められたことを報告している。また、高速度で繰り返し行うような運動では、FT運動単位が動員

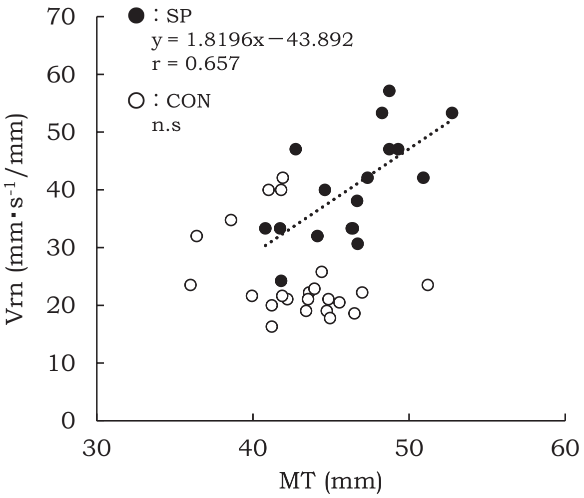


Fig.7. Relationship between muscle thickness and normalized response speed（Vrn）on the biceps femoris muscle in sprinter group and control group.

され[9]、FT線維に肥大が起こることが報告されている[13]。さらに、高速度のトレーニングは速度特異性によって、筋収縮速度の速さに影響を及ぼすことが報告されている[8]。これらの先行研究から、短距離選手の大腿二頭筋は高速運動トレーニングによって、FT運動単位が動員され、FT線維が肥大し、その影響によって筋収縮速度が増加したことにより、筋厚と筋収縮速度の関係性が成り立つことが推察される。これにより本研究の短距離選手における筋厚と筋収縮速度の関係は、筋厚値の増加に伴って筋収縮速度も増加する結果となった。従って、短距離選手の大腿二頭筋は、筋厚が筋収縮時間を予想できる因子である可能性が示唆された。

本研究は、平成27年度国士舘大学体育学部附属体育研究所研究助成により実施した。

参考文献

7）Abe T1, Kumagai K, Brechue WF. Fascicle length of leg muscles is greater in sprinters than distance runners. Med Sci Sports Exerc. Jun；32（6）：1125-9. 2000.

8）Behm DG, Sale DG. Intended rather than actual movement velocity determines velocity-specific training response. J Appl Physiol. Jan；74（1）：359-68. 1993.

9）Edström L, Grimby L. Effect of exercise on the motor unit. Muscle Nerve. Feb；9（2）：104-26. 1986.

10）福永哲夫．人の絶対筋力．杏林書店．1978.

11）久枝光、中村好男、久野譜也、福永哲夫、村岡功．レジスタンストレーニングにおける高速度運動が筋横断面積および運動速度に及ぼす影響.

12）宮下充正、小林寛道．走る科学．大修館書店．1990, p.188-192.

13）Sale D, MacDougall D. Specificity in strength training：a review for the coach and athlete. Can J Appl Sport Sci. Jun；6（2）：87-92. 1981.