

武道及びスポーツ競技選手における骨格筋の形態と機能的特性を探る

Structural and functional properties of thigh and leg muscles in collegiate athletes

角田直也*, 亀山歩**, 秋葉茂季*, 平塚和也*
横沢翔平*, 畑島一翔**, 岩城翔平**, 田中理沙***
今若太郎*, 熊川大介**

Naoya TSUNODA*, Ayumi KAMEYAMA**, Shigeki AKIBA*, Kazuya HIRATSUKA*
Shohei YOKOZAWA*, Kazuto HATASHIMA**, Shohei IWAKI**, Risa TANAKA***
Taro IMAWAKA* and Daisuke KUMAGAWA**

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、武道・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) 武道及びスポーツ競技選手における骨格筋の収縮特性を探る

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、等尺性足関節底屈筋力発揮中におけるアキレス腱の形状変化について、従来用いられている超音波Bモード法及びMCセンサー法から検討することを目的とした。

被検者は健康な成人男性7名(年齢: 24.1 ± 1.7 歳、身長: 176.9 ± 9.0 cm、体重: 74.1 ± 9.7 kg、体脂肪率: 13.8 ± 4.0 %)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。

等尺性足関節底屈トルクは、総合筋力測定装置(Biodex System-III: Biodex社製)を用いて測定した。測定姿勢は、膝関節完全伸展位、足関節角度0度(解剖学的中間位)で伏臥位の姿勢とした。被検者には十分なウォーミングアップを行わせた後、脱力状態から5秒間で最大随意収縮(Maximal voluntary contraction: MVC)に達するランブ試行を用いて、等尺性足関節トルクの測定を2回実施した。その後、先行研究⁸⁾を参考に10% - 70%MVCまで10%ずつそれぞれ2回の力発揮を行わせた。

Muraoka et al.⁷⁾を参考に筋力発揮中における腓腹筋内側頭(Medial gastrocnemius: MG)の筋腱接合部の移動量(Δ MTJ)を超音波Bモード法にて撮影し、画像処理ソフト(Image J)を用いて解析を行った(Fig.1)。また、Ishizaki et al.⁸⁾を参考に足関節外果と同じ高さのアキレス腱上にMCセンサー(Fig.2)を貼付し、アキレス

* 国士館大学大学院スポーツ・システム研究科 (Graduate School of Sport System, Kokushikan University)

** 国士館大学体育学部 (Faculty of Physical Education, Kokushikan University)

*** 国士館大学特別研究員 (Institute of Health, Physical Education and Sport Science, Kokushikan University)

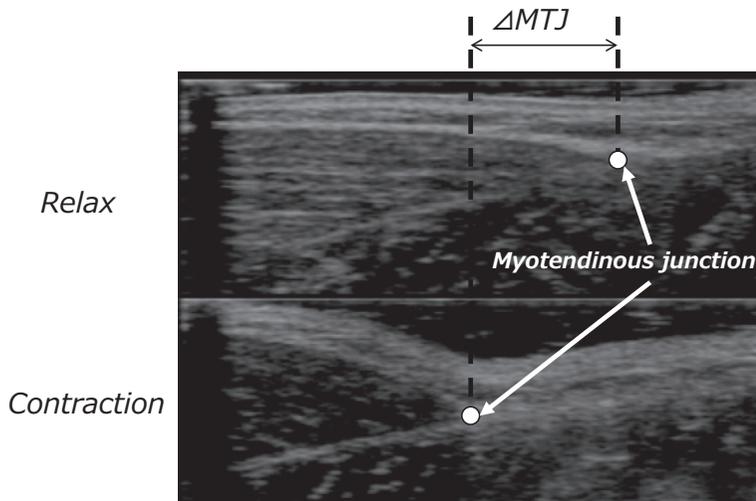


Fig.1. The example of sagittal plane ultrasound images in the myotendinous junction of medial gastrocnemius during rest and isometric planter flexion contraction.

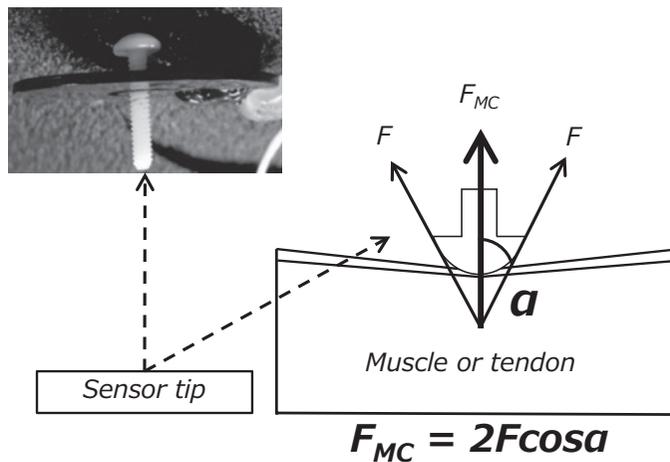


Fig.2. Simplified representation of MC sensor method.

腱における形状変化 (F_{MC-Ac}) を測定した。

本研究では ΔMTJ を筋力発揮に伴うアキレス腱の伸張量、 F_{MC-Ac} を短軸鉛直方向の形状変化と定義し、それぞれの値を比較した。

同時に MG の筋腹中央に表面筋電図及び MC センサーを貼付し、MG における生理学的活動量 (iEMG-MG) と形状変化量 (F_{MC-MG}) をそれぞれ測定し比較を行った。測定の様式図を Fig.3 に示した。

Fig.4 に筋力発揮中における ΔMTJ と F_{MC-Ac} を示した。60% MVC 及び 70% MVC において ΔMTJ と F_{MC-Ac} の間に有意な差が認められ、 ΔMTJ が高い値を示した ($p < 0.05$)。

Fig.5 に筋力発揮中における iEMG-MG と F_{MC-MG} を示した。いずれの力発揮度合においても有意な差は認められなかった。

これまで超音波 B モード法を用いて、足関節底屈筋力発揮中における腓腹筋内側頭の遠位筋腱接

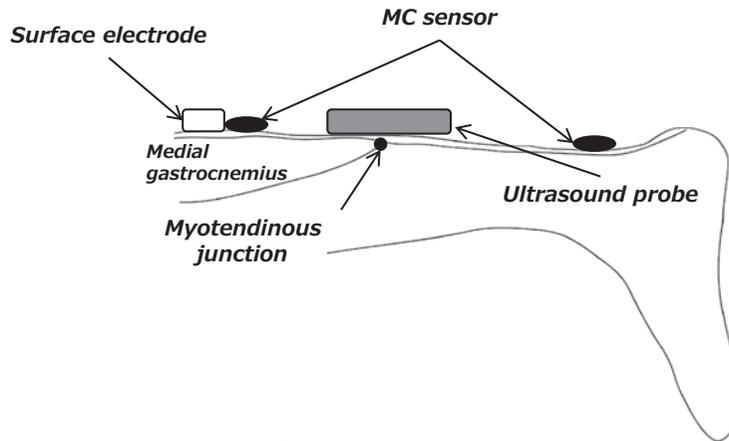


Fig.3. Experimental setup.

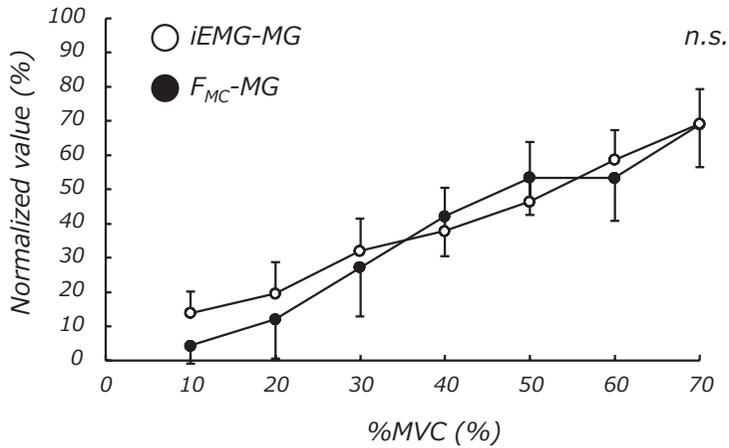


Fig.4. Comparison of iEMG-MG and F_{MC} -MG in contraction task.

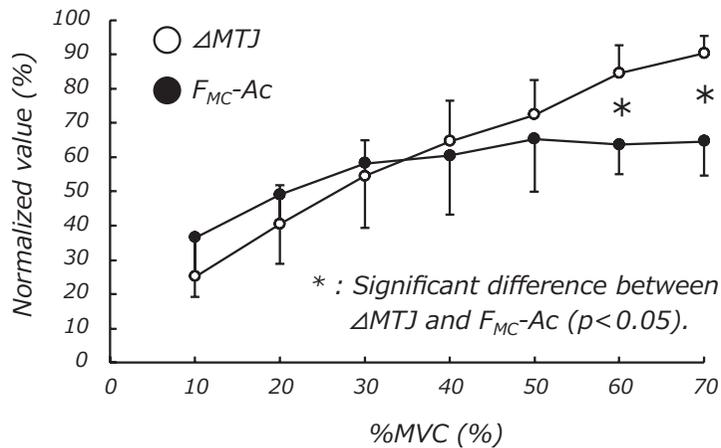


Fig.5. Comparison of Δ MTJ and F_{MC} -Ac in contraction task.

合部の移動量をアキレス腱の伸張量として計測し、アキレス腱の力学的特性を明らかにした研究が多く見られる¹⁾。

一方で、近年ではMRI法²⁾や3次元超音波法⁶⁾を用いてアキレス腱の形状変化について3次元的に捉える試みも行われている。3次元超音波法を用いて等尺性足関節筋力発揮中におけるアキレス腱の形状変化について明らかにしたSteven et al.⁵⁾は、脱力状態と70%MVC発揮中のアキレス腱の形状を比較したところ、有意に伸張するとともに直径も有意に増加していたことを報告している。本研究において、手法は異なるものの先行研究と同様の結果であった (Δ MTJ: 10%MVC<70%MVC ($p<0.05$), F_{MC-Ac} : 10%MVC<70%MVC ($p<0.05$)) 為、先行研究を支持できるものと示唆された。更に本研究では、収縮強度によってアキレス腱の伸張量 (Δ MTJ) と短軸鉛直方向の形状変化 (F_{MC-Ac}) が異なるかを検討した。その結果、 Δ MTJは収縮強度に伴い増加していくが、 F_{MC-Ac} は中程度の筋力発揮以降で頭打ちになる傾向がみられ、60-70%MVCで両者の間に有意な差が認められた。従って、等尺性足関節底屈筋力発揮中におけるアキレス腱の伸張量及び短軸鉛直方向の形状変化量は、筋力発揮度合によって異なる可能性が考えられた。

また、MGにおける生理学的活動量 (iEMG-MG) と力学的活動量 (F_{MC-MG}) の間にはいずれの筋力発揮度合においても有意な差は認められなかった。このことから、骨格筋においては生理学的活動と力学的活動は同程度の活動動態であると推察された。Srdjan et al.^{3) 4)}は表面筋電図とMCセンサーを用い、上腕二頭筋 (肘関節等尺性屈曲筋力発揮) を対象に両者の関係を検討している。その結果、両者の間には強い相関関係が存在することを報告しており、本研究と同様の結果であると考えられた。

以上のことから、筋力発揮中のアキレス腱の形状変化については、従来の超音波法のみでなく、3次元的に形状を捉えることの重要性が考えられ、

その手段の1つとしてMCセンサーが有効活用できる可能性が示唆された。

本研究は、平成29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

- 1) 茂木康嘉・鳥居俊・川上泰雄・矢内利政 (2013) 思春期男子におけるアキレス腱の形態学的・力学的特性. 体力科学, 62 (4) : 303-313.
- 2) Soichiro, Iwanuma., Ryota, Akagi., Toshi-yuki, Kurihara., Shigeki, Ikegawa., Hiroaki, Kanehisa., Tetsuo, Fukunaga., and Yasuo, Kawakami. (2011) Longitudinal and transverse deformation of human achilles tendon induced by isometric planter flexion at different intensities., J Appl Physiol, 110 : 1615-1621.
- 3) Srdan, Đorđević., Sara, Stančin., Andrej, Meglič., Veljko, Milutinović., and Sašo, Tomažič. (2011) MC sensor —A Novel Method for Measurement of Muscle tension., Sensor., 11 : 9411-9425.
- 4) Srdan, Đorđević., Sašo, Tomažič., Marco, Narici., Rado, Pišot., and Andrej, Meglič. (2014) IN-Vivo Measurement of Muscle Tension : Dynamic Properties of the MC sensor during Isometric Muscle contraction., Sensor., 14 : 17848-17863.
- 5) Steven J. Obet., Jean B. Renault., Richard N. West., and Rod S. Barrett. (2014) Three-dimensional deformation and transverse rotation of the human free achilles tendon in vivo during isometric planterflexion contraction., J Appl Physiol., 116 : 376-384.
- 6) Steven J. Obst., Richard N. West., and Rod S. Barrett. (2015) Three-dimensional morphology and strain of the human achilles free tendon immediately following eccentric heel drop exercise., Journal of experimental biology., 218 : 3894-3900.
- 7) Tetsuro, Muraoka., Tadashi, Muramatsu., Tetsuo, Fukunaga., and Hiroaki, Kanehisa. (2005) Elastic properties of human achille tendon are correlated to muscle strength., J Appl Physiol., 99 : 665-669.
- 8) Tomonobu, Ishizaki., Masahiro, Kouno., Toshihiro, Ikebukuro., and keitaro, Kubo. (2016) Quantification of collagen fiber orientation in human tendons with the coefficient of variation of echogenicity., Jounal of Biomechanics., 49 : 3923-3927.

II. 武道・スポーツ選手における骨格筋の収縮特性を探る

本研究では、空手道の構えにおける前足と後足の筋収縮特性の違いについて明らかにすること目的とした。

被験者は、日常的に空手道の稽古を実施している男女大学空手道選手23名（男子：18名、女子：5名）とした。被験者の年齢、競技年数、身長及び体重はそれぞれ20.9±1.2歳、13.6±2.6年、165.3±6.9cm及び65.6±9.2kgであった。被験者には、あらかじめ左構え及び右構えを申告させた。その結果、全ての被験者は右構え（左足＝前足 front side foot of KARATEKAMAE：FSF、右足＝後足 Back side foot of KARATEKAMAE：BSF）であった。なお、各被験者には研究目的、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。

身長は身長計を用いて測定し、体重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、FSF及びBSFの大腿直筋（RF：上前腸骨棘と膝蓋骨上部を結ぶ50%の位置）、内側広筋（VM：上前腸骨棘と内側側副靭帯前縁の関節隙を結ぶ80%の位置）、外側広筋（VL：上前腸骨棘と膝蓋骨外側を結ぶ2/3の位置）及び大腿二頭筋（BF：坐骨結節と脛骨外側上顆を結ぶ50%の位置）の8部位とした。

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.6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。RF、VL及びVLの測定姿勢は、仰臥位で実施した。その際、膝屈曲角度が30度となるように三角パットを使用した。さらに、測定中に測定位置が動かないようにするため、脛骨粗面上と足首をベルトで軽く固定した。一方、BFは伏臥位とし、膝蓋骨上部をベルトで軽く固定した状態で測定を実施した。なお、被験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。筋の変位を測定するために、センサーを筋に対して垂直にあて、センサーを挟むように5cm間隔で電極を貼付した。また、電極を接触させる体表は、電極へ

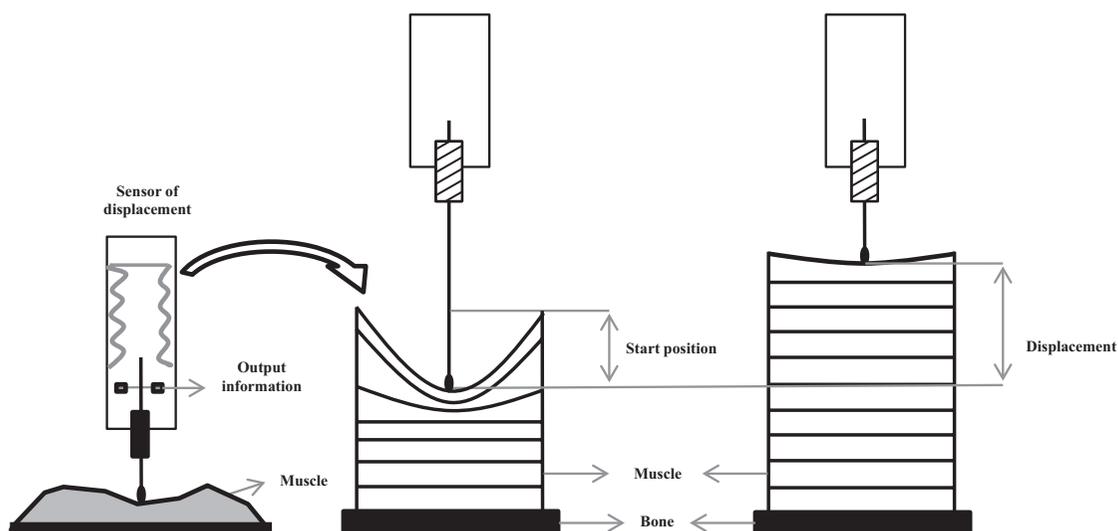


Fig 6. Principle of TMG measurement.

の抵抗を除去するために剃毛処理を行った。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10mA毎に電流を漸増する方法を用いた。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) 及び収縮時間 (Tc) の3項目とした (Fig.7)。

本研究における各項目の値は、全て平均値及び標準偏差で示した。各項目における有意差の検定には、対応のある T-test を用い、有意水準は5%未満をもって有意とした。

Table 1は、空手道の構えにおける前足と後足

の Dm を示した。空手道の構えにおける前足の Dm は RF で 8.4 ± 2.7 mm、VM で 7.1 ± 1.7 mm、VL で 6.5 ± 2.1 mm、BF で 7.8 ± 3.4 mm であった。また後足の Dm は RF で 8.4 ± 2.7 mm、VM で 7.0 ± 2.0 mm、VL で 6.5 ± 1.9 mm、BF で 6.8 ± 3.0 mm であった。前足と後足における Dm の比較は、全ての部位で有意な差が認められなかった。

Table 2は、空手道の構えにおける前足と後足の Td を示した。空手道の構えにおける前足の Td は RF で 23.6 ± 1.4 ms、VM で 20.5 ± 1.1 ms、VL で 22.0 ± 1.8 ms、BF で 24.5 ± 2.5 ms であった。また後足の Td は RF で 23.6 ± 1.8 ms、VM で 20.6 ± 1.3 ms、

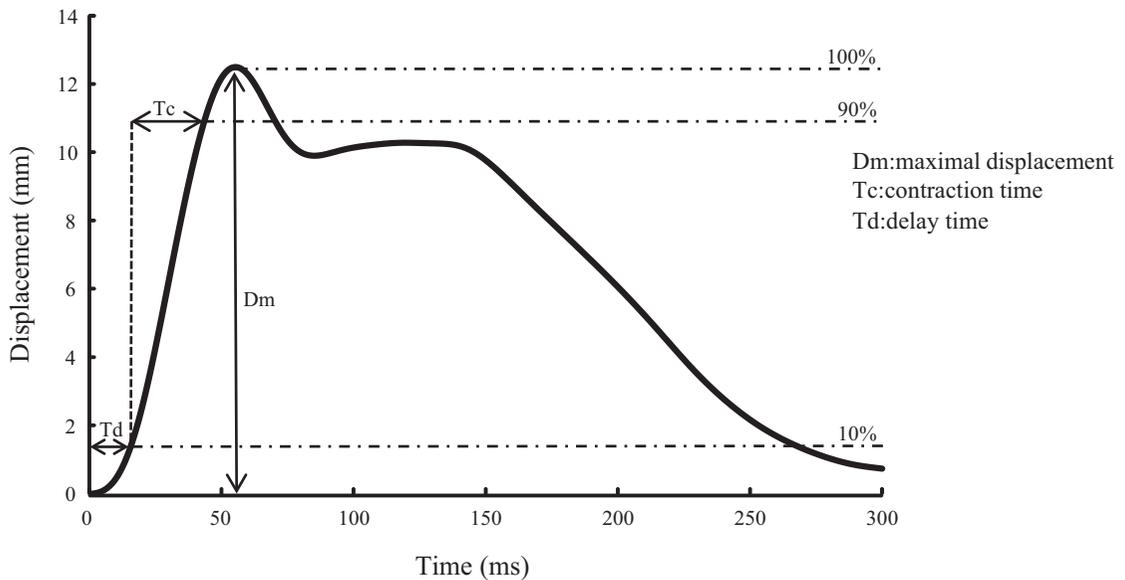


Fig 7. TMG parameters definition.

Table 1. Comparison of Dm between FSF and BSF.

Parameters	muscles	FSF	BSF
Dm (mm)	Rectus femoris	8.1 ± 2.4	8.4 ± 2.7
	Vastus medialis	7.1 ± 1.7	7.0 ± 2.0
	Vastus lateralis	6.5 ± 2.1	6.5 ± 1.9
	Biceps femoris	7.8 ± 3.4	6.8 ± 3.0

FSF: front side foot of KARATEKAMAE,
BSF: Back side foot of KARATEKAMAE.

Values are mean \pm S.D.

Table 2. Comparison of Td between FSF and BSF.

Parameters	muscles	FSF	BSF
Td (ms)	Rectus femoris	23.6±1.4	23.6±1.8
	Vastus medialis	20.5±1.1	20.6±1.3
	Vastus lateralis	22.0±1.8	21.6±1.4
	Biceps femoris	24.5±2.5	—*— 23.7±2.9

FSF: front side foot of KARATEKAMAE,
BSF: Back side foot of KARATEKAMAE.

*:p<0.05 Values are mean ± S.D.

Table 3. Comparison of Tc between FSF and BSF.

Parameters	muscles	FSF	BSF
Tc (ms)	Rectus femoris	25.6±3.0	24.8±3.1
	Vastus medialis	21.9±1.7	22.0±2.6
	Vastus lateralis	21.5±2.3	21.2±2.1
	Biceps femoris	31.5±8.4	—*— 29.2±7.2

FSF: front side foot of KARATEKAMAE,
BSF: Back side foot of KARATEKAMAE.

*:p<0.05 Values are mean ± S.D.

VLで21.6±1.4ms、BFで23.7±2.9msであった。前足と後足におけるTdの比較は、BFで後ろが前足よりも有意に遅延時間が短いことが認められた。

Table 3は、空手道の構えにおける前足と後足のTcを示した。空手道の構えにおける前足のTcはRFで25.6±3.0ms、VMで21.9±1.7ms、VLで21.5±2.3ms、BFで31.5±8.4msであった。また後足のTcはRFで24.8±3.1ms、VMで22.0±2.6ms、VLで21.2±2.1ms、BFで29.2±7.2msであった。前足と後足におけるTcの比較は、BFで後足が前足よりも有意に収縮時間が短いことが認められた。

特定の種目を長期にわたり実施しているスポーツ選手は、種目の特徴を反映した筋機能を示すことが報告¹²⁾されている。例えば、競技特性上、左右の脚で動作が異なる剣道選手の下肢筋力パワーを調査した西谷ら¹¹⁾は、右脚が左脚よりも高い傾向を示し、下肢筋力パワーに左右差があるこ

とを報告している。このように、左右不均衡な競技を継続的に行っているスポーツ選手は、筋機能に左右差が生じることが考えられる。従って、左右不均衡な競技である空手道においても筋機能に左右差が生じることが予想される。そこで本研究は、大学空手道部に所属する右構え選手を対象に、前足と後足における筋収縮特性の違いについて明らかにすることとした。

本研究において注目すべき結果は、空手道の右構え選手において、大腿二頭筋の遅延時間及び収縮時間に前足と後足の違いが認められたことである。空手道において多用される突き技は、短時間で爆発的なパワーを発揮することにより身体重心を前方移動させることが要求され、後足の地面反力が重要¹⁰⁾と示されている。一般的に、地面を蹴って身体重心を前方移動させるためには、大腿二頭筋が主動筋として活動することが考えられる。したがって、空手道選手は練習及び試合中、

地面を蹴る動作（突き動作）に使用される後足の
大腿二頭筋を繰り返し活動させることにより速度
特異性⁹⁾が生じたため、後足の大腿二頭筋の遅延
時間及び収縮時間が速くなったと推察される。

以上のことから、空手道の構えにおける前足と
後足の筋収縮特性の違いは、大腿二頭筋の遅延時
間及び収縮時間において前足と後足の違いがある
ことが明らかとなった。

本研究は、平成29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

- 9) Behm DG, Sale DG. (1993) Intended rather than actual movement velocity determines velocity-specific training response. J Appl Physiol. Jan ; 74 (1) : 359-68.
- 10) 飯出一秀・林直樹・有賀誠司 (2001) 空手道組手選手における踏切脚の特性 (2). 武道学研究. 35-52
- 11) 西谷広大・政岡貴幸・國分国友・前阪茂樹・山本正嘉 (2005) 床反力、脚筋力、競技能力から見た剣道選手における打突動作の特性. スポーツトレーニング科学6、5-13.
- 12) 角田直也・金久博昭・福永哲夫・近藤正勝・池川繁樹 (1986) 大腿四頭筋断面積における各種競技選手の特性. 体力科学35, 192-199.