

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：32616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K11448

研究課題名(和文) スポーツ競技者の筋・腱の力学的活動動態が筋パワー発揮能力に及ぼす影響を探る

研究課題名(英文) Effects of mechanical activity of muscle and tendon on muscle power output in athletes.

研究代表者

田中 重陽 (Tanaka, Shigeharu)

国土舘大学・政経学部・教授

研究者番号：70541001

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、筋腱機能評価法としてのMuscle Contraction Sensor (MCセンサー)法の有効性と動的運動時の筋・腱の活動特性が筋パワーに及ぼす影響について検討した。MCセンサー法で測定した筋・腱の形状変化量は、筋収縮時における筋厚の変化量や筋力レベルを反映する力学的指標となりえることを明らかにした。また、動的運動時の筋・腱の力学的活動と筋パワーとの関係性を明らかにした。これらの結果から、あらゆる条件下での筋収縮時や動的運動時の筋・腱の機能評価法として、MCセンサー法の信頼性と有効性を示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の特色は、あらゆる条件下での筋収縮時や動的運動時における筋腱の機能評価法として、MCセンサー法の有効性を見出した点である。MCセンサー法で計測した筋及び腱の形状変化量は、生体内の情報を客観的に評価するものであり、筋力レベルを推定する力学的指標となる。よって、MCセンサー法による筋及び腱の機能評価は、スポーツ競技者の競技力向上のためのトレーニングやコンディションチェックのみならず、各筋の活動のタイミングや相互活動を評価することで、効率の良い動作の解明にも有益な情報を提供できるものと考えられる。さらには、障害予防やリハビリテーションなどの臨床現場にも活用できる可能性が期待される。

研究成果の概要(英文)：This study examined the validity of the muscle contraction sensor (MC sensor) method as a method for evaluating muscle-tendon function. And the mechanical activity of muscle and tendon during dynamic exercise were evaluated using the MC Sensor, and their effects on muscle force output were examined. The deformation amount of muscle and tendon measured by the MC sensor method was found to be an index that reflects the change in muscle thickness and muscle force level during muscle contraction. In addition, the mechanical activity of muscle and tendon during dynamic exercise and their effects on the force exerted were clarified. From these results, it was suggested that reliability and possibility of the MC sensor method for assessing muscle and tendon activity during muscle contraction and dynamic exercise.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：MCセンサー 筋・腱の活動動態 筋力 動的運動 筋パワー 筋腱のコンディション

## 1. 研究開始当初の背景

ヒトの身体運動は骨格筋の収縮によって生み出された張力が、腱を介して関節運動を引き起こすことで生じる。従って、身体運動のメカニズムを探る上で、筋の収縮特性と共に腱の活動動態を理解することが重要である。筋の収縮特性に関する先行研究<sup>1)</sup>では、主に筋電図法が用いられ、筋放電量は筋力と有意な相関関係にあることが報告されている。また、腱の力学的特性は超音波法によって評価され、粘弾性組織であることや、筋張力と有意な相関関係にあることが指摘されている。しかしながら、膝蓋腱の力学的特性は、関節角度、負荷強度及び筋収縮様式、さらには対象者や分析法によって異なることが指摘<sup>2)</sup>されており、膝関節の複雑な構造や機能を定量化することは難しいものと考えられる。

近年、筋や腱の力学的活動を評価することが可能な Muscle Contraction Sensor (MC センサー)法が開発<sup>3,4)</sup>された。MC センサー法は、対象とする筋や腱上の皮膚表面に、凸状のチップを取り付けたセンサーを貼付することで、筋収縮によってチップに生じた圧力をセンサーに内蔵されたストレインゲージで計測するものであり、計測された圧力は筋や腱の形状変化量として評価されてきた。先行研究<sup>3,4)</sup>では、上腕二頭筋の形状変化量と肘関節屈曲筋力は有意な相関関係にあることが報告されている。これまでに、MC センサー法を用いて異なる関節角度における等尺性収縮時の膝伸展筋群及び膝蓋腱の形状変化特性について検討した結果、筋及び腱の形状変化量は、関節角度の変化、すなわち筋長条件に強く影響を受けることを明らかにした<sup>5,6)</sup>。この手法は先行研究<sup>3,4)</sup>で指摘されているように、非侵襲的かつ簡便な手法であり、特定の筋や腱の活動動態をダイレクトに評価できるメリットがある。しかしながら、MC センサー法を用いた実験データが極めて少ない上に、多関節運動のような動的運動時における筋・腱の活動動態については検討されていない。MC センサー法による筋・腱の活動動態の評価の妥当性や信頼性が確保されれば、スポーツトレーニング、コンディショニング、リハビリテーション等の臨床現場に有益な情報を提供できる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、MC センサー法を用いて動的運動時の筋・腱の力学的な活動動態を評価し、それらが筋パワー発揮に及ぼす影響について検討することであった。具体的な研究内容は、MC センサー法による筋及び腱の機能評価の妥当性と信頼性を確保すること、また、動的運動中の筋・腱の形状変化特性が筋パワーに及ぼす影響について検討することであり、得られた研究成果から、MC センサー法による筋・腱の機能評価法の確立と、スポーツトレーニングや臨床現場に役立つ情報を提供することを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、上記 ~ の課題について以下の方法により測定を適宜実施した。被験者は専門的なスポーツ競技のトレーニングを実施している男子スポーツ競技者及び健康な成人男性とした。

### (1) 等尺性による筋力測定

等尺性膝関節伸展筋力及び足関節底屈筋力は、総合筋力測定装置 (Biodex System- : Biodex 社製) のダイナモメーターを用いて測定した。膝関節伸展筋力の測定は、股関節角度及び膝関節角度の変化させることで筋長条件を変化させた複数の条件で行わせた。足関節底屈筋力は、伏臥位で足関節角度 90 度に設定した。筋力の発揮方法は、測定開始から 10 秒間で漸増的に筋力を増加させるように指示し、その後 3 秒間は最大努力での筋力発揮を維持させた。あらゆる姿勢条件下による筋力測定の順番は、被験者によってランダムとし、疲労の影響を考慮して十分な休息を挟んで実施した。なお、各条件での測定中は、モニターによって漸増的な筋力発揮がなされているかを確認した。最大下における瞬発的な筋力発揮の測定姿勢は、座位姿勢において膝関節角度を 15 度及び 65 度屈曲位 (完全伸展位 0 度) でそれぞれ 5 回行わせた。

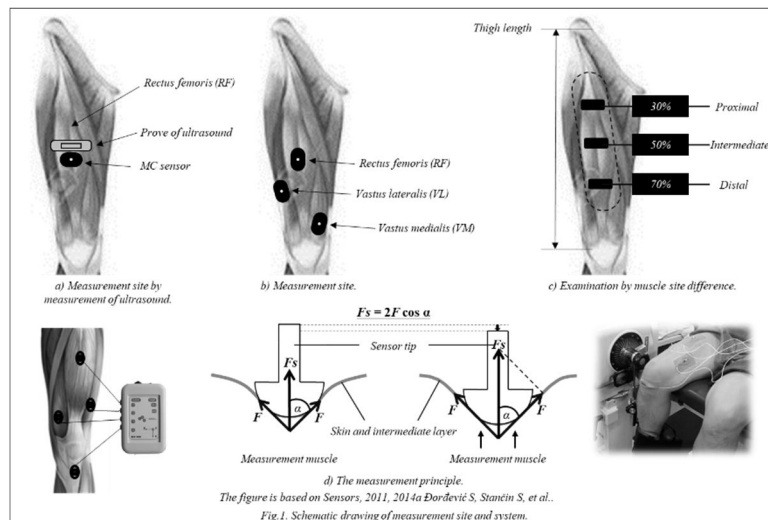
### (2) 筋力発揮中の筋厚変化の測定

等尺性膝伸展筋力の測定は総合筋力測定装置 (Biodex System ) により股関節角度 90 度、膝関節角度 90 度 (完全伸展位 0 度) で実施し、同時に筋力発揮中の筋厚の変化量を、大腿直筋の筋腹を対象として、超音波診断装置 (SONIMAGE MX1 : コニカミノルタ株式会社) の LINEAR PROBEL11-3 を用いて映像で撮影した (Fig.1-a)。得られた映像より、0.5 秒毎の筋厚の変化量を映像処理ソフト (Dartfish : 株式会社ダートフィッシュ・ジャパン) を用いて分析した。

### (3) 筋及び腱の形状変化量の測定

筋及び腱の形状変化量は、MC センサー法 (TMG-BMC 社製) により測定した (Fig.1-b)。被験者が座位姿勢 (股関節角度 90 度、膝関節角度 90 度) で安静を保持した状態で、超音波 B モード法を用いて各筋の形状を確認しながらセンサーを貼付した。測定の対象部位は、膝伸展運動時は、大腿直筋 (RF)、内側広筋 (VM) 及び外側広筋 (VL) とし、足関節底屈運動時は、腓腹筋内側頭 (GM)、腓腹筋外側頭 (GL) 及びアキレス腱 (AC) とした。また、筋収縮中における形状変化量の測定時は、RF の筋腹を対象として、超音波診断装置のプロープと接触しないようセンサーを貼

付した。部位差の検証では、被験筋を右脚の大腿直筋 (RF) とし、大腿長の近位部 (大腿長 30% 部位) 筋腹 (大腿長 50% 部位) 及び遠位部 (大腿長 70% 部位) にそれぞれセンサーを貼付した (Fig.1-c)。測定原理は、Fig.1-d に示した。測定後、ロガー内に記録されたデータを、Sensmotion ソフトウェア (TMG-BMC 社製) を用いて PC に取り込み、各センサーの較正式によって電圧から力 (N) へと換算した。形状変化量は、被験者それぞれの皮下脂肪厚や筋厚の大小による影響が考えられる。そのため測定条件によって皮下脂肪厚や筋形状が変化することによる影響を考慮し、本研究では、センサーを貼付した筋の弛緩状態の値を初期値とし、筋収縮中の値から初期値を差し引いた差を形状変化量と定義し分析の対象とした。



(4) 筋電図法による筋放電量の測定

筋放電量の測定は、無線型筋電計 (多チャンネルテレメーターシステム WEB1000 : 日本光電社製) により、総合筋力測定装置と同期して実施した。測定対象の筋は、右脚の大腿直筋、内側広筋及び外側広筋とし、部位別の検討では、大腿長の近位部、筋腹及び遠位部とした。電極を貼布する際は、超音波 B モード法 (SSD-900 : ALOKA 社製) を用いて筋の形状を確認し、皮膚と電極間の抵抗を最小にするために剃毛処理を施すとともに、他の筋からのクロストークの影響が無いよう十分配慮した。

#### (5) データ分析

筋力及び筋放電量の測定データは、A/D 変換解析プログラム (DASY-lab, AP-office 社製) を用いて PC に取り込んだ。その後 MC センサーのデータと同期シグナルによって全てのデータを統合した。これらのデータサンプリング周波数は 1,000 Hz であった。筋力と形状変化量のデータは、ローパスフィルター (2Hz カットオフ) 及び 6 次ゼロラグバターワースフィルター処理を行った。筋放電量データは 10~400 Hz のバンドパスフィルター処理を行った後、全波整流した。筋力は、最大値に対する相対値を求め、その後 5% 毎の平均値を算出した。また、筋放電量及び形状変化量についてもそれぞれ最大値に対する相対値を算出し、その後、筋放電量は整流した筋電位の振幅値を強度の算出区間に基づいて 5% 間隔区間毎に平均値として算出し、形状変化量も同様に平均値を算出した。

### 4. 研究成果

#### (1) MC センサー法による筋及び腱の機能評価の妥当性と信頼性について

MC センサー法による筋及び腱の機能評価の妥当性と信頼性について検証するために、以下の実験を実施した。

まず、等尺性による筋収縮中の筋厚の変化を超音波法で観察し、MC センサー法で計測した形状変化量との関係について検討した。その結果、形状変化量と筋力の間には、有意な相関関係が確認され、得られた相関係数は  $r=0.997$  と、極めて高い値を示し、先行研究の結果を支持するものであった。次に、筋収縮中の筋厚の変化を観察したところ、筋力の増加に伴い筋厚の変化量は高値を示した。また、筋厚の変化と形状変化量の関係について検討したところ、両者の間には有意な相関関係 ( $r=0.978$ ) が認められた (Fig.2)。

これらの結果から、MC センサー法によって計測した形状変化量は、ヒト生体内の生理学的情報 (筋厚の変化) を反映する指標となり得るものと推察された。

次に、MC センサー法及び筋電図法を用いて等尺性収縮時における大腿直筋の活動動態と筋力の関係の部位差について検討した。対象部位は、大腿直筋の近位部、筋腹及び遠位部の 3 部位とし、股関節角度 90 度及び膝関節角度 60 度の姿勢とした。その結果、大腿直筋の形状変化量は両姿勢において近位部、筋腹、遠位部といった部位によって異なり、特に、筋力の中強度から高強度区間において近位部と遠位部で有意な差が認められた (Fig.3)。

一方、筋放電量では、部位の違いによる有意な差は確認されなかった。形状変化量の相対値と筋力の相対値の間には、いずれの部位においても有意な相関関係が認められた (Fig.4)。これらの

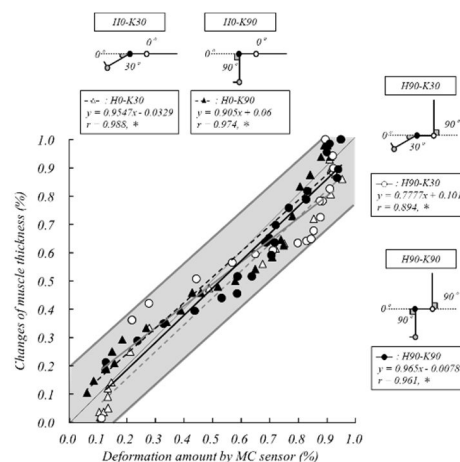


Fig.2. Relationships between deformation amount by MC sensor and change of muscle thickness.

結果から、同一筋内でも部位によって形状変化量が異なり、従来から筋機能評価に用いられてきた筋電図法とは異なる筋の活動動態を評価できる可能性が示唆された。また、いずれの部位も、形状変化量が、筋力レベルを反映する指標となり得ることが明らかとなった。

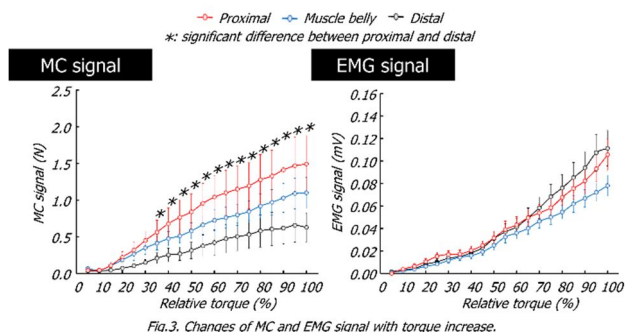


Fig.3. Changes of MC and EMG signal with torque increase.

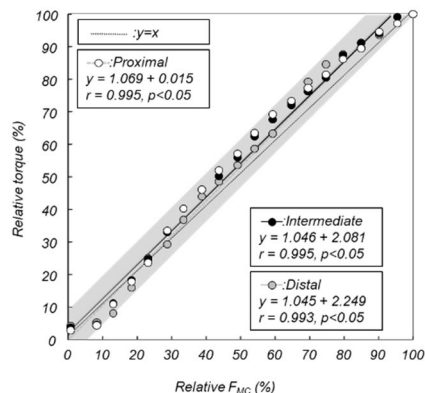


Fig.4. Relationship between relative torque and relative  $F_{MC}$ .

さらに、連続的な等尺性底屈運動時の腓腹筋及びアキレス腱の活動動態を評価した。被験者には5秒間の最大努力による底屈筋力発揮を3秒間の休息を挟んで、50回行わせた。筋力発揮中の腓腹筋内側頭と腓腹筋外側頭の形状変化量とアキレス腱の形状変化量は、MCセンサー法を用いて測定した。その結果、全ての測定項目において、運動後半は運動開始時よりも有意に低い値を示し、連続的な運動に伴う形状変化量の低下が確認された。運動開始時に対する運動後半の低下率は、筋力が約25.7%、形状変化量は腓腹筋内側頭が約55.5%、腓腹筋外側頭が約51.2%、アキレス腱が約43.1%を示した。また、各測定項目の低下率の有意差は、筋力と腓腹筋内側頭及び腓腹筋外側頭の間でそれぞれ認められた。一方、アキレス腱の形状変化量の低下率は、筋力の低下率との間に有意な差は認められなかった。これらの結果から、連続的な底屈運動に伴う筋力の低下度合いと腓腹筋の形状変化量の低下度合いは一致しないことが明らかとなった。

## (2) 動的運動中の筋・腱の形状変化特性が筋パワーに及ぼす影響

MCセンサー法により動的運動中の筋・腱の活動特性を評価するために、以下の実験を実施した。

本研究では、最大下での瞬発的な等尺性膝伸展運動中における膝伸展筋群の活動動態を、筋電図法及びMCセンサー法により評価し、筋力との関係について検討した。被験者は健康な成人男性とした。等尺性膝伸展筋力は、Biodex Systemを用いて測定した。測定姿勢は、座位姿勢において膝関節角度を15度及び65度屈曲位(完全伸展位0度)に設定し、最大下での瞬発的な膝関節伸展による筋力発揮をそれぞれ5回行わせた。外側広筋及び内側広筋の形状変化量はMCセンサー法により計測し、同時にそれらの筋放電量を表面筋電図法により計測した。筋力の上昇局面と下降局面に分けそれぞれ分析した。その結果、両測定姿勢ともに、筋力発揮開始から最大値までの筋力上昇局面と下降局面において、外側広筋及び内側広筋の形状変化量は、筋力レベルと有意な相関関係が認められた(Fig.5)。先行研究<sup>3,4,5,6)</sup>では、漸増的な力発揮を対象として、上腕二頭筋の形状変化量と肘関節屈曲筋力の関係や、膝関節伸展筋群の形状変化量と膝関節伸展筋力の関係について検討されており、いずれも各筋の形状変化量は筋力レベルを反映する結果が得られている。本実験では、未だ検討されていない下腿筋群の形状変化量と底屈筋力との関係について評価したところ、腓腹筋及びアキレス腱の形状変化量は底屈筋力レベルを反映する指標となることが明らかとなった。また、形状変化量は、筋力上昇局面と下降局面で、ほぼ同様の变化様相を示したのに対して、筋放電量は筋力の上昇局面と下降局面で異なる様相を示した。よって、筋放電量よりもMCセンサー法で計測した形状変化量の方が筋力レベルをより推定する指標であるものと推察され、筋機能の評価法としてMCセンサー法の有効性が示唆された。

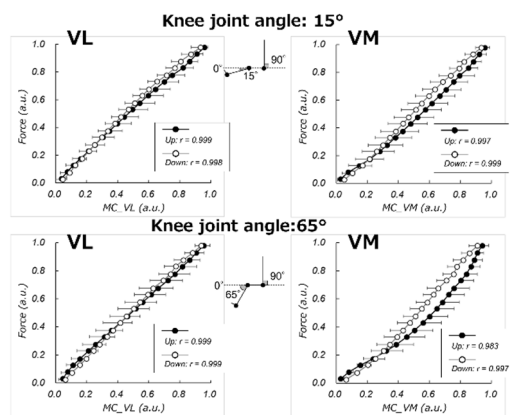


Fig.5. Relationships between relative MC signal and relative force.

次に、本研究ではMCセンサー法を用いて、動的なペダリング運動中の膝伸展筋群の活動特性を評価するとともに、異なる運動強度によって各筋の活動とペダルに加えられる力との関わりについて検討した。ペダリング運動は、エルゴメーターLode Excalibur Sportを使用し、80rpmの一定速度で100W、200W、300W及び400Wの強度で30秒間ずつ連続的に行わせた。ペダル踏力(PF)は右ペダルに取り付けたストレインゲージで計測し、クランク角度は右クランクに取り付けたジャイロセンサーで計測した。また、外側広筋(VL)、大腿直筋(RF)、内側広筋(VM)の形状変化量は、MCセンサー法を用いて測定した。各運動強度の10回のペダリング運動を分析の対象とした。PF及び膝伸展筋群の形状変化量の最大値は、運動強度に伴い有意に高値を示した。



PF の最大値出現時間は運動強度によって異なり、100W に比べて 300W と 400W では早期に出現した (Fig.6)。膝伸筋群における形状変化量の最大値出現時間は、VL と VM では運動強度によって変化しなかったものの、RF では運動強度が高くなるにつれて有意に遅延した。VL と VM の形状変化量に対する PF の比率は、運動強度に伴い高くなる傾向を示したのに対して、RF では運動強度によって有意な変化は認められなかった。以上の結果から、異なる運動強度におけるペダリング運動中の膝伸筋群の活動特性と、ペダル踏力と形状変化量の比率は筋によって異なることが明らかとなった。

(3)MC センサー法による筋・腱の機能評価法の確立と、スポーツトレーニング及び臨床現場への応用の可能性

最後に、MC センサー法による筋・腱の機能評価法の確立と、スポーツトレーニング及び臨床現場への応用の可能性について検討した。MC センサー法で計測した形状変化量は筋収縮中の筋厚の変化量と有意な相関関係が認められた。また、同一筋でも部位によって形状変化量は異なるが、いずれの部位でも形状変化量が筋力レベルを推定する指標となることが明らかとなった。さらに、本研究ではこれまでに検討されていなかった下肢筋群やアキレス腱の活動動態を

評価し、MC センサー法で計測した形状変化量は、筋力レベルの推定や、あらゆる筋長条件や筋力低下条件でも、活動動態の評価が可能であることを明らかにした。腱の機能評価については、まだ十分な検討ができていないのが今後の課題である。いずれにしても、これまでに得られた知見と本研究の成果によって、MC センサー法による筋・腱の機能評価の妥当性については十分確保できたものと判断できる。また、これまでの MC センサー法による筋機能評価は、等尺性収縮による漸増的な筋力発揮時の評価しかされていなかった。本研究では、よりスポーツ活動に近い、瞬発的な力発揮や動的運動時 (ペダリング運動) の筋・腱の活動動態を評価した。その結果、従来の筋機能評価に用いられてきた筋電図法とは異なる活動動態を捉えることが可能となった。また、ペダリング運動時における各筋の形状変化量は、運動強度 (負荷) に影響を受けることや、ペダル力 (パワー) に及ぼす影響が筋によって異なることが明らかとなった。これらの結果は、下肢筋群の筋を対象としたスポーツトレーニングにも応用できるものと考えられる。具体的には、特定の筋を対象としたトレーニングやスポーツ競技者のコンディションチェックに応用することや、筋群の活動動態 (各筋の活動のタイミングや相互活動) を評価することで、効率の良い動作の解明にも有益な情報を提供できるものと考えられる。さらには、リハビリテーションなどの臨床現場にも活用できる可能性を見出した。

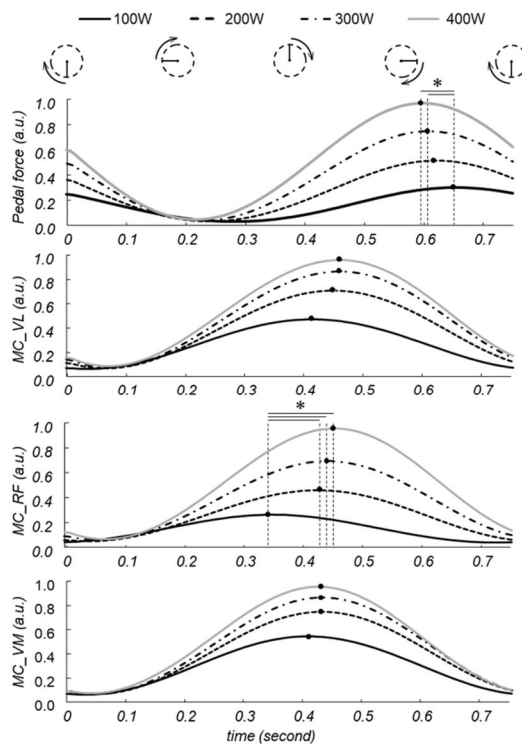


Fig.6. Changes of pedal force and deformation amount on thigh muscles during pedaling.

## 引用文献

- Pincivero, D. M., Salfetnikov, Y., Campy, R. M., and Coelho, A. J. Angle- and gender-specific quadriceps femoris muscle recruitment and knee extensor torque. *J Biomech*, 37. 2004. 1689-1697
- Seynnes, O. R., Bojsen-Møller, J., Albracht, K., Arndt, A., Cronin, N. J., Finni, T., and Magnusson, S. P. Ultrasound-based testing of tendon mechanical properties: a critical evaluation. *J Appl Physiol*, 118. 2015. 133-141
- Đorđević, S., Stančin, S., Meglič, A., Milutinović, V., and Tomažič, S. MC Sensor - A novel method for measurement of muscle tension. *Sensors*. 11. 2011. 9411-9425
- Đorđević, S., Tomažič, S., Narici, M., Pišot, R., and Meglič, A. In-vivo measurement of muscle tension: Dynamic properties of the MC sensor during isometric muscle contraction. *Sensors*. 14. 2014. 1-16
- 田中 重陽、今若 太郎、角田 直也、異なる関節角度における等尺性収縮時の膝伸筋群及び膝蓋腱の形状変化特性、理学療法科学、34 巻 1 号、2019、89-96
- 田中 重陽、今若 太郎、角田 直也、MC センサー法による等尺性収縮時の膝関節伸筋群の力学的活動評価、人間工学、55 (3) 2019、85-95

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 角田直也、船渡和男、熊川大介、秋葉茂季、横沢翔平、平野智也、畑島一翔、田中重陽	4. 巻 40
2. 論文標題 等尺性収縮時における大腿直筋の部位別形状変化～Muscle Contraction Sensor法による評価～	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 国土舘大学体育研究所報	6. 最初と最後の頁 127-132
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 角田直也、田中重陽、他6名	4. 巻 39
2. 論文標題 Muscle contraction sensor(MC sensor法)およびTensiomyography(TMG法)からみた下肢骨格筋群の力学的収縮特性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 国土舘大学体育研究所報	6. 最初と最後の頁 137-145
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 角田直也、熊川大介、飯田周平、亀山歩、田中理沙、秋葉茂季、平塚和也、横沢翔平、畑島一翔、遠藤太陽、田中重陽	4. 巻 38
2. 論文標題 筋収縮時における筋-腱の形状変化特性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 国土舘大学体育研究所報	6. 最初と最後の頁 127-130
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 田中重陽、横沢翔平、畑島一翔、今若太郎、平塚和也、熊川大介	4. 巻 23
2. 論文標題 筋電図法とMCセンサー法で評価した膝関節伸展筋群の活動	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 体育・スポーツ科学研究	6. 最初と最後の頁 45-52
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Tanaka S., Imawaka T., Yokozawa S., Srdjan D., Tsunoda N.
2. 発表標題 Intramuscular site difference of muscle tension on rectus femoris during isometric contraction with different muscle length.
3. 学会等名 24th EUROPEAN COLLEGE OF SPORT SCIENCE (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中重陽、横沢翔平、今若太郎、角田直也
2. 発表標題 最大下における等尺性膝伸展運動中の膝伸展筋群の活動動態
3. 学会等名 第70回日本体育学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	角田 直也  (Tsunoda Naoya)  (80119081)	国士舘大学・体育学部・教授    (32616)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	横沢 翔平  (Yokozawa Shohei)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	今若 太郎  (Imawaka Taro)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関