

2011年1月6日

## 博士学位申請論文審査報告書

大学名 早稲田大学  
研究科名 スポーツ科学研究科  
申請者氏名 佐久間 淳  
学位の種類 博士（スポーツ科学）  
論文題目 動的足関節底屈運動における下腿三頭筋の筋腱動態の動作依存性  
Movement dependency of the muscle-tendon behavior of the triceps surae  
muscles during dynamic ankle bending exercises  
論文審査員 主査 早稲田大学教授 川上 泰雄 博士（教育学）（東京大学）  
副査 早稲田大学教授 矢内 利政 Ph.D.（アイオワ大学）  
副査 早稲田大学教授 彼末 一之 工学博士（大阪大学）、  
医学博士（大阪大学）

本論文は第1章から第5章までの本論と文献から構成されている。

筋腱複合体が伸長された後に短縮する、ストレッチショートニングサイクル運動（SSC運動）とパフォーマンスに関する研究の多くは、主に、キネティクス、キネマティクスの観点から検討され、実際の筋腱動態は不明であった。2000年代より超音波法を用いることで、SSC運動中の筋腱動態が観察されるようになり、身体運動のパフォーマンス（関節パワー）を高める要因について筋腱動態の観点から検討され始めた。福永(2002)やKawakami & Fukunaga (2006)は、筋腱複合体のパワー（すなわち関節パワー）の増減に対して、筋が力を、腱が速度を担うと指摘している。こうした知見を通じて、スポーツや身体運動のパフォーマンスの鍵となる関節パワーにおいて、筋腱動態が極めて重要な役割を果たすことが認識されるようになってきた。しかしながら、先行研究の多くは、関節可動域すなわち筋腱複合体長変化が統一されていない、「力」と「速度」のどちらが筋腱動態の変化に対してより影響するかは検討されていないなどの問題点を有している。また、これまでの先行研究の多くは単一筋の筋腱動態の観察が多く、協働筋の筋腱動態を同時に観察した先行研究は限られ、関節パワーの増減に対する協働筋の筋および腱の機能的役割の差異についての知見は乏しい。そこで本研究は、動作を規定したSSC運動中の協働筋の筋腱動態を観察することで協働筋の筋および腱の動作依存性を明らかにし、筋と腱の機能的役割とその協働筋間差について検討することを目的とした。

本論文の内容と主な知見は以下の通りである。

第2章では、4つの異なる動作速度（1.33、1.67、1.84、2.00Hz）でのカーフレイズ運動（CR）中の腓腹筋内側頭およびヒラメ筋の筋腱動態を超音波法によって観察した。CR中の足関節可動域、両筋のEMG、足関節の機械的仕事は動作速度によらず一定であった。動作速度が高まるにつれて足関節パワーが増加し、同時に腓腹筋内側頭およびヒラメ筋の筋束長変化、腱長変化、収縮速度、筋腱複合体長変化に対する筋長変化および腱長変化の割合が変化した。しかしながら、その変化パターンに筋間差はみられなかった。以上の結果から、協働筋は筋形状や筋線維組成が異なるものの下腿三頭筋単体として足関節パワーの増減に関与し、主に筋・腱の振る舞いが関節パワー増減を担っているものと思われた。

上記の研究は、現在、国際誌に投稿し、査読後の訂正中である。

Sakuma, J., Tsuchie, H., Kanehisa, H., Yanai, T., Kawakami, Y. Fascicle-tendon behavior of the gastrocnemius and soleus muscles during ankle bending exercise at different movement frequencies. *European Journal of Applied Physiology* (under revision).

第3章では、異なる動作負荷（-30%自体重、自体重、+30%自体重）におけるカーフレイズ運動を2つの動作速度（低速：0.5Hz、高速：1.5Hz）で行った際の腓腹筋内側頭およびヒラメ筋の筋腱動態を観察した。低速および高速試行ともに、動作負荷の増加によって足関節パワー、足関節の機械的仕事、両筋の筋電図が増加した。各動作速度における足関節可動域、足関節角速度に有意差はみられず、同一であった。筋束長および腱長、収縮速度、筋腱複合体長変化に対する筋長変化および腱長変化の割合は動作負荷による違いがみられなかった。以上の結果から、いずれの動作速度においても動作負荷の増加に伴い筋腱動態は変化せず、筋活動の増減によって関節パワーあるいは機械的仕事を増加させることが明らかとなった。

上記の研究は、下記の学術論文として国内誌に掲載されている。

佐久間淳，栗原俊之，矢内利政，金久博昭，福永哲夫，川上泰雄．カーフレイズ運動中の腓腹筋およびヒラメ筋の筋腱動態の動作負荷依存性．東京体育学研究（印刷中）．

第4章では、200回のカーフレイズ運動を2つの異なる動作速度（0.5Hz、2.0Hz）で行い、異なる運動時間（0.5Hz：400秒、2.0Hz：100秒）における腓腹筋内側頭およびヒラメ筋の筋腱動態の変化を比較した。それぞれの試行におけるFirst setとFinal setにおける両筋の筋電図、筋束長、腱長、収縮速度、筋腱複合体長変化に対する筋長および腱長変化の割合を比較した。運動時間の長い試行のFirst set前における等尺性足関節最大底屈トルクは、Final set後に34%低下し、運動時間の短い試行では7%低下し、運動時間の長い試行が運動時間の短い試行より有意に低下した。First setの足関節トルク、足関節角速度はFinal setと有意

差はみられなかった。低速試行の筋電図は腓腹筋内側頭、ヒラメ筋ともに変わらなかった。運動時間の長い試行の両筋の筋束長は長くなり、腱長が短くなった。収縮速度においても低下がみられ、筋腱複合体長変化に対する筋長変化の割合が減少し、腱長変化の割合が増加した。一方、運動時間の短い試行においては足関節トルク、足関節角速度はFirst setとFinal setで変わらなかったが、両筋の筋電図が低下した。また、腓腹筋内側頭の筋束長が長くなり、ヒラメ筋の収縮速度が減少した。しかし、筋腱複合体長変化に対する筋長および腱長変化割合は変化しなかった。これらの結果から、筋疲労によって低下した発揮筋力補うように筋の力-長さ、力-速度関係を力発揮に有利な方にシフトさせることや筋腱相互作用の変化を通じて足関節パワーを維持したものと推察された。また、筋疲労の程度によって筋腱動態の変化が筋によって異なるものと考えられた。

上記の研究は、下記の学術論文として国内誌に掲載されている。

佐久間淳，栗原俊之，矢内利政，金久博昭，川上泰雄．筋疲労を伴う動的足関節底屈運動中の下腿三頭筋の筋腱動態の変化．スポーツ科学研究，6: 97-110, 2009.

第2章から第4章の知見は、足関節トルクの増加に対して筋の収縮速度の増加を抑えながら力を高めること、筋腱複合体長の伸長短縮速度を腱の伸長短縮速度が担うことを意味する。この知見は福永(2002)やKawakami & Fukunaga(2006)の指摘した「筋腱複合体のパワーの力を筋が担い、速度を腱が担う」という筋と腱の機能的役割を明確にするものである。また、最大下から最大努力でのSSC運動では筋と腱のSSCから腱のSSCにシフトするポイントが存在することが伺えた。さらに、筋疲労によって収縮できなくなった筋の役割を腱が担うようになることが示唆される。これらのことより、動作条件に依存して筋腱動態の変化と筋腱相互作用を通じて、合目的的に必要な関節パワーあるいは機械的仕事を達成しているものと考えられた。また、本研究では、顕著な筋間差はみられなかった。先行研究の知見を本論文の知見に照らして考察すると、報告間にみられた筋腱動態の変化の協働筋間差は、膝関節角度変化の影響であった可能性が高い。身体運動中、腓腹筋内側頭およびヒラメ筋は常に協調して、下腿三頭筋単体として関節パワーあるいは機械的仕事を調整していることが示唆された。

本論文は下腿三頭筋各筋の振る舞いや筋腱相互作用がどのようにして関節パワー発揮に貢献しているかを明らかにしたものであり、間接的な証拠から考察されてきた骨格筋による関節運動のコントロールに関する研究を大きく前進させるものである。この点において、スポーツ科学の発展に大いに寄与するものであると考えられる。本申請者の今後の研究上の活躍が大いに期待できる。

上記のような評価を得て、本審査委員会は、佐久間 淳氏の学位申請論文が博士（スポ

ーツ科学)の学位を授与するに十分値するものと認める。

以 上