

2010年1月7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 光川 眞壽  
学位の種類 博士（スポーツ科学）  
論文題目 協働筋の筋腱動態および神経-筋活動の筋疲労による変化  
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）  
副査 東京大学教授 金久 博昭 博士（教育学）（東京大学）

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。

身体運動によって骨格筋の力あるいはパワー発揮能力が減退することを筋疲労という（Gandevia, 2001）。人間の関節運動は、筋線維組成（Johnson ら, 1973 など）が異なる複数の筋（協働筋）の筋張力によって発現する。筋疲労の程度は筋線維組成の影響を受けるため、筋疲労をともなう関節運動時の神経-筋活動の変化には、協働筋間差が生じると考えられている（Ochs ら, 1973 など）。しかし、その際の協働筋各筋の筋張力の変化については明らかにされていない。競技スポーツやスポーツ活動において、どの筋の筋張力がどの程度低下したかを知ることは、筋機能を回復させるコンディショニングを適切に実施するために必要不可欠なことである。

1990年代より、Brightness (B) モード超音波法を用いた研究によって、等尺性トルク発揮時には、発揮トルクの増加に伴い筋線維が短縮し腱が伸長されることが報告されている（Ito ら, 1998 など）。この報告は、筋線維および腱の長さ変化（筋腱動態）が筋張力の変化を反映することを示すものである。それゆえ、協働筋の筋腱動態の筋疲労による変化を定量することによって、協働筋の筋張力の変化を捉えられる可能性がある。しかし、協働筋の筋腱動態の筋疲労による変化や、筋疲労時の筋腱動態と筋張力との関連は不明である。そこで本論文は、腓腹筋内側頭（MG）およびヒラメ筋（SOL）を対象に、筋疲労をともなう異なる強度の足関節底屈トルク発揮課題における協働筋の筋腱動態を明らかにし、筋電図の観察もあわせて協働筋各筋の筋張力や神経-筋活動の筋疲労による変化について検討することを目的とした。

本研究では、まず、随意最大収縮（MVC）による足関節底屈トルク反復課題（第2章：

MVC 課題)、5%MVC と 40%MVC の足関節底屈トルクの持続課題(第3章)における MG および SOL の筋腱動態と筋電図をそれぞれ観察した。これにより、異なる強度によって生じる筋疲労時の協働筋各筋の筋腱動態および神経-筋活動を明らかにした。次に、電気刺激法を用いて MG のみを疲労させた状態で足関節底屈トルク発揮する課題(第4章:MG 刺激課題)を行った際の MG および SOL の筋腱動態および神経-筋活動を観察した。第4章の結果から、筋疲労時の筋腱動態と筋張力変化の関係について検討した。以上の実験において得られた結果に基づき、「協働筋の筋腱動態および神経-筋活動の筋疲労による変化」、「協働筋間に生じる筋腱動態の相互作用」について総括論議にて考察した。

第2章では、被検者は MVC 足関節底屈トルク発揮を 60 回反復した。トルク発揮を重ねるにつれて、ある一定の足関節底屈トルクに対する MG の筋束は長くなったが、SOL の筋束長は一定のままであった。一方、筋電図は、ある一定の足関節底屈トルクに対する振幅が SOL において増加し、MG では一定であった。これらの結果は、MVC 課題の MG の筋張力の低下が大きく、ある一定の関節トルクに対する SOL の神経-筋活動を増加させていたことを示唆している。

この研究は下記の学術論文として国際誌に掲載されている。

Mitsukawa, N., Sugisaki, N., Kanehisa, H., Fukunaga, T., Kawakami, Y. Fatigue-related changes in fascicle-tendon geometry over repeated contractions: difference between synergist muscles. *Muscle and Nerve*, 40: 395-401, 2009.

第3章第1節では、被検者は 5%MVC の足関節底屈トルクを 1 時間持続した。5%MVC トルクに対して、MG の筋電図の振幅が増加し SOL の振幅が減少する区間(MG 活動区間)において MG の筋束が短縮し、SOL の筋束は一定であった。逆の筋電図パターンがみられる区間(SOL 活動区間)では、SOL の筋束が短縮し、MG の筋束は長くなった。これらの結果から、MG 活動区間における MG および SOL 活動区間の MG および SOL の筋腱動態の変化は、両筋の筋張力の変化と関連していると結論された。

第2節においては、被検者は 40%MVC の足関節底屈トルクをできる限り維持した。40%MVC トルク発揮中、SOL の筋電図振幅が課題終盤に有意に増加し、MG の振幅に有意な変化はみられなかった。一方、40%MVC 持続中の MG および SOL の腱伸長に有意な変化は観察されなかった。また、課題開始時の相対的な振幅が最も低い筋ほど、課題中に神経-筋活動を増加させることが確認された。これらの結果から、40%MVC 課題開始時に相対的な神経-筋活動が最も低い筋がその活動を増加させながら、各筋で一定の筋張力を維持することが示された。

第2章および第3章の随意的な関節トルク発揮課題では、程度の差はあるものの協働筋すべてが疲労すると考えられるため、ある 1 つの筋が疲労した際の協働筋の筋腱動態は明らかにすることができなかった。そこで、第4章では、経皮的な電気刺激によって MG のみが疲労した状態で足関節底屈トルクを発揮した際の MG および SOL の筋腱動態と筋電図を観察した。これにより、筋疲労時の筋腱動態と筋張力変化の関係を検討した。その結果、

ある一定トルクに対する SOL の筋電図の振幅は有意に増加し、MG の振幅は有意に減少した。一方、MG および SOL の腱伸長は有意に減少した。このことは、MG の筋張力が発揮されない状態においても、SOL の筋張力によって伸長された外部腱の伸長によって MG の腱が伸長した可能性を示唆している。一方、SOL の筋張力が課題後に増加していると考えられたが、SOL の腱伸長は減少した。また、課題後のランブ試行において、1) 発揮トルクの増加にともない MG の筋厚が増加した、2) MG と SOL の腱伸長の減少に有意な相関がみられた。これらの結果から、MG が疲労した際には、両筋の筋張力とは関連しない筋腱動態が観察され、その要因として、トルク発揮にともなう筋形状変化パターンの変化や両筋の腱膜間にある力学的な結合が影響していることが示唆された。

各章のすべてのトルク発揮課題を通じて言えることは、筋電図振幅の経時変化に協働筋間差が観察され、ある一定の関節トルクに対して、どちらかの筋の神経-筋活動が高まった。一方、協働筋の筋腱動態の筋疲労による変化は、筋電図の振幅の結果とは異なるものであった。筋束の短縮および腱の伸長が協働筋各筋の筋張力と関連することが示されていることから (Bojsen-Møller ら, 2004; Maganaris ら, 2006)、第 2 章および第 3 章において観察された筋腱動態の筋疲労による変化が捉えているものは筋張力の変化に関する指標となると当初は考えた。すなわち、従来の筋張力と筋腱動態との関係に基づくと、筋疲労をともなうトルク発揮課題によってある一定の関節トルクに対する協働筋各筋の筋張力が変化した際、その筋張力の変化に応じた筋腱動態が観察されると予想した。しかしながら、第 4 章の結果、筋疲労時の筋腱動態の変化には筋疲労による筋張力の変化と関連しない動態が含まれていることが明らかとなった。MVC 課題と MG 刺激課題における SOL の筋腱動態の結果を従来の知見から解釈すると、MVC 課題ではある一定の足関節底屈トルクに対する SOL の筋張力が一定に保たれたことになる。また、MG 刺激課題においては、SOL の筋張力は減少したと解釈される。しかし、両課題では MG の筋張力の低下を補うために MG 以外の筋張力が増加する条件であり、SOL の筋張力と SOL の筋腱動態が一致しない。また、MG 刺激課題において、MG の筋張力が発揮されてない状態で、SOL と同様の腱伸長が観察された。これらの結果は、MG の筋張力と MG の筋腱動態が一致しないことを意味している。協働筋各筋の筋腱動態と筋張力の筋疲労による変化に不一致が生じる要因については、1) 腱の長さ-力関係の使用域の違い、2) 腱膜間の結合が強く、ある筋の動態が隣り合う筋の動態に影響した、3) トルク発揮にともなう筋形状の変化パターンが変化した、4) 筋内の筋腱動態に部位差が生じた、5) 拮抗筋、腓腹筋外側頭 (lateral gastrocnemius muscle: LG) および下腿三頭筋以外の協働筋の筋張力が変化したことがあげられる。本研究の結果からこれらの影響がどの程度であったか特定できないが、筋疲労時には、関節トルクと MG あるいは SOL の筋腱動態の関係が変化するため、両筋の筋張力の変化を判断することは困難であることが示された。

本論文において、筋腱相互作用という新たな観点から筋疲労に伴う筋力の変化を捉えようという試みがなされた。その結果、筋収縮時の腱伸長が筋力や神経-筋活動と必ずしも対

応しないこと、その原因として、筋間の力学的な結合やその収縮強度依存性といった全く新しい知見が得られ、人間の骨格筋のメカニクスに関する理解を大きく進めるとともに、今後の研究への展望が開かれた。これらの点において、本論文は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、光川 眞壽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