

別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目	膝伸展動作時における中間広筋を含む大腿四頭筋の筋形状と筋機能
氏 名	安藤 良介

論 文 内 容 の 要 旨

第 1 章では、先行研究で示唆された膝伸展運動時における中間広筋の機能的役割の原因と意義を解明することに筋形状からのアプローチが有用であることについて概説し、本博士論文における目的を設定した。

ヒトの骨格筋の中で最も大きな筋群の 1 つである大腿四頭筋は、膝関節の伸展動作に貢献し、立位での姿勢保持、歩行や跳躍といった地球上で行われる非常に多くの身体動作に貢献する重要な筋群である。大腿四頭筋は、大腿部前面の表層部に位置する外側広筋、内側広筋と大腿直筋および深層部に位置する中間広筋から構成されている。近年、深層部に位置する中間広筋の特異的な機能的役割を示唆する報告がなされている。低強度の膝伸展筋力発揮時において、膝伸展トルクに対する中間広筋の貢献度は最大で 50%に達することが示されている (Zhang ら 2003)。関節トルクに影響する主要な因子は筋体積であるが (Fukunaga ら 2001)、中間広筋が大腿四頭筋の中で占める筋体積の割合は約 30%である (秋間ら 1995, Akima ら 2007)。したがって、Zhang ら (2003) が示した結果を筋体積だけで説明することは困難である。また、等尺性あるいは動的な膝伸展運動時において、膝関節屈曲位における表面筋電図の振幅値は、中間広筋が他の大腿四頭筋の構成筋と比較して、高値を示すことが明らかにされている (Akima と Saito 2013, Saito と Akima 2013, Watanabe と Akima 2011)。以上のように、中間広筋は、膝伸展運動に対して筋体積だけでは説明することが困難な機能を有していること、また膝関節屈曲位において重要な機能的役割を担っていることが示唆されている。

しかしながら、中間広筋の特異的な機能的役割の原因と意義については不明である。それを明らかにするアプローチの 1 つとして、筋束の長さ (筋束長) や腱組織に対する挿入角 (羽状角) を意味する筋形状を測定することが挙げられる。筋形状は、筋量、張力の伝達効率、長さ-力関係、筋の収縮速度、筋内圧や筋内の血流動態などの機能特性と関係する (Burkholder ら 1994, Ichinose ら 1997, Kawakami ら 1993, Miura ら 2004, Muramatsu ら 2002, Wickiewicz ら 1984)。この中でも、張力の伝達効率と長さ-力関係は、上述の中間広筋の特異的な機能的役割の原因と意義を考察する上で有用な知見となり得る。しかしながら、筆者の知る限り、中間広筋の筋形状に関するほとんどの報告が 1 つの膝関節角度における測定であり (Blazevich ら 2006, Ema ら 2013, Erskine ら 2009, O'Brien ら 2010)、筋収縮に伴う筋形状の変化に関しては、1 つの膝関節角度で等尺性収縮時の羽状

角の変化を示した研究 (Rutherford と Jones 1992) 1 件のみが報告されている。また、他の問題点としては大腿四頭筋の筋形状を測定している研究では、外側広筋のみを測定の対象とする場合が非常に多いことである (Austin ら 2010, Csapo ら 2011, Guilhem ら 2011, Hicks ら 2013)。筋形状の観点から考えれば、大腿四頭筋の一部にしか焦点が当てられていないことになり、誤った結論を導きかねない問題点の 1 つであると考えられる。

以上の背景から、本博士論文の目的は、様々な膝関節角度における安静時あるいは筋収縮時の中間広筋の筋形状を測定し、大腿四頭筋における中間広筋の機能的役割について考察することであると述べた。

第 2 章では、(1) 骨格筋の形態的特徴と筋機能の関係、(2) 中間広筋の形態的特徴、(3) 超音波断層装置による大腿四頭筋の筋束長の測定、(4) 筋の長さとの機能の関係、(5) 大腿四頭筋の筋疲労特性と膝関節角度 (筋長) の関係について、先行研究の結果を概説し、文献研究を行った。

第 3 章では、第 2 章の文献研究から明らかになった検討すべき問題点について記述した。(1) 超音波画像による筋束長の推定値の妥当性が不明である。(2) 膝伸展筋力と大腿四頭筋の筋形状の関係が明らかではない。(3) 膝伸展筋力発揮時の中間広筋のサルコメア長と膝関節角度の関係について一致した見解が得られていない。(4) 等尺性、短縮性および伸張性収縮時における中間広筋の筋形状の変化が明らかではない。(5) 持続的な大腿四頭筋の筋収縮時における各構成筋の筋疲労応答と膝関節角度の関係が明らかではない。以上の問題点を解決するため、本博士論文では、筋形状測定と表面筋電図記録による計 6 つの実験を行い、第 4 章から第 9 章に研究成果を述べた。

第 4 章では、中間広筋と外側広筋の筋束長の超音波画像からの推定値の妥当性を検証した。屍体 5 体の両脚を対象とし、超音波画像からの推定値と解剖後の実測値を比較した。超音波画像内に描写された筋束の実測と描写されなかった筋束の推定による筋束長の推定値が統計学的に妥当であることが示された。しかしながら、推定値と実測値の相対的な誤差が平均で 6%以上であることから、レジスタンストレーニングやベッドレストによる筋束長の変化を検討する際には、超音波画像からの推定の際に生じる測定誤差を考慮する必要があることが示唆された。

第 5 章では、大腿四頭筋の全ての構成筋の筋形状を測定し、等尺性最大膝伸展筋力 (MVC) を統計学的に最も説明できる筋とその筋形状パラメータ (筋厚、羽状角、筋束長) を検討した。MVC を従属変数、各筋の筋形状パラメータを独立変数としたステップワイズ法による重回帰分析の結果、大腿長のおよそ中央で測定された中間広筋の筋厚と羽状角が MVC を説明できる因子として抽出された ($P < 0.05$, 決定係数 0.91)。この結果から、中間広筋の筋厚と羽状角は他の構成筋のそれらと比較して、膝関節屈曲 90° における MVC との関係がより密接であることが明らかとなった。

第 6 章では、MVC 時における中間広筋のサルコメア長と膝関節角度の関係を検討した。屍体においてサルコメア長を実測し、生体において安静-MVC の筋束長の短縮率を算出した。安静-MVC のサルコメア長と筋束長の短縮率が同一であると仮定し、MVC 時のサルコメア長を算出した。その結果、膝関節屈曲 15°と 90°におけるサルコメア長は、長さ-力関係の上行脚と至適長にそれぞれ位置した。したがって、中間広筋は比較的膝関節屈曲位において高い張力を発揮できると考えられた。

第 7 章では、異なる 2 つの膝関節角度における等尺性膝伸展運動時の中間広筋の筋束長と羽状角の変化を検討した。膝関節屈曲 60°（伸展位）と 110°（屈曲位）における 50%MVC での筋力発揮時において、中間広筋と外側広筋のパノラマ超音波画像を撮影し、筋束長と羽状角を測定した。その結果、1) 屈曲位において、中間広筋は外側広筋と比較して筋束長の短縮率が大きい、2) 中間広筋の筋束長の短縮率は膝関節角度間で類似するが、外側広筋のそれは屈曲位より伸展位において大きい、3) 伸展位では、筋力発揮に伴い外側広筋の羽状角が増加したが、どちらの膝関節角度においても中間広筋の羽状角は変化しない、という新たな知見が得られた。これらの知見から、中間広筋は外側広筋と比較して膝関節屈曲位における発揮張力が高いこと、および効率的に張力を骨へ伝達できることなどが示唆された。

第 8 章では、大腿四頭筋の短縮性および伸長性収縮時における中間広筋の筋束長の変化を検討した。膝関節屈曲 100°から 40°の短縮性収縮と屈曲 40°から 100°の伸長性収縮時に中間広筋と外側広筋の超音波動画を撮影し、筋束長を測定した。その結果、短縮性収縮時の筋束長の短縮量は筋間で類似したが、伸長性収縮時の筋束長の伸長量は中間広筋が外側広筋と比較して大きかった。筋収縮時における筋束長の変化量は腱の特性と密接に関係しており（Hicks ら 2013, Ichinose ら 2000, Wakahara ら 2009）、腱の特性は筋が発揮した張力の骨への伝達効率に影響する因子の 1 つである。したがって、短縮性収縮時には中間広筋と外側広筋の張力の伝達効率は同等であると推測される。伸長性収縮時には、外側広筋の腱膜が中間広筋のそれより伸長されていたと考えられ、外側広筋の張力は中間広筋のそれよりも減衰して遠位腱へ伝達されると推測される。つまり、伸長性収縮時には中間広筋が外側広筋と比較して張力の伝達効率が優れていると示唆された。以上のように、同じ関節可動域における動的な筋収縮であるが、筋収縮様式に依存して中間広筋と外側広筋の筋機能が異なる可能性が示された。

第 9 章では、大腿神経の電気刺激による大腿四頭筋の持続的な筋収縮時において、広筋群の筋疲労応答を膝関節屈曲 60°（伸展位）と 110°（屈曲位）で比較した。膝伸展筋力の低下は、伸展位より屈曲位において大きかった。また、中間広筋の表面筋電図の振幅値と潜時の変化は伸展位より屈曲位において大きかったが、外側広筋と内側広筋のそれらは膝関節角度間で類似していた。以上の結果より、中間広筋の筋疲労は屈曲位において大きい、外側広筋と内側広筋のそれは膝関節角度間で類似していると推測され、屈曲位における顕著な膝伸展筋力の低下は

中間広筋の筋疲労応答を反映している可能性が考えられた。

第 10 章では、第 1 章で取り上げられた 2 つの中間広筋の特異的な筋機能について、本博士論文の実験で得られた結果から総合的に討論した。第 7 章と第 8 章の結果より、中間広筋は外側広筋と比較して等尺性収縮および伸長性収縮時において、張力を効率的に伝達できると示唆された。この知見から、筋体積が関節トルクの主要な影響因子の 1 つであり (Fukunaga ら 2001)、中間広筋が大腿四頭筋において占める筋体積の割合が約 30%である (秋間ら 1995, Akima ら 2007) にもかかわらず、中間広筋が膝伸展トルクに対して貢献する割合が最大で 50%に達する (Zhang ら 2003) 原因の一部を説明できると考えられた。第 6 章では、サルコメアという解剖学的最小単位から検討した場合において、中間広筋は膝関節が屈曲した位置において張力の発揮ポテンシャルが高いことが示された。また、第 9 章では、大腿四頭筋の持続的な筋収縮時の膝伸展筋力の低下は膝関節伸展位より屈曲位において大きく、これには中間広筋の筋疲労応答が影響している可能性が示された。これらの結果、張力の発揮ポテンシャルという力学的な側面から考えた場合においても、中間広筋は他の大腿四頭筋の構成筋と比較して膝関節屈曲位における膝伸展運動に対して重要な機能的役割を担っていると推測された。この推測は、第 5 章において、中間広筋の筋厚と羽状角が他の構成筋のそれらと比較して膝関節屈曲 90°における等尺性最大膝伸展筋力を統計学的に説明できるという結果から支持された。

第 11 章では、本博士論文で実施した 6 つの実験結果より総括的議論を行った。中間広筋と外側広筋の筋束の動態は、等尺性収縮および伸張性収縮時には異なるが、短縮性収縮時には類似していることが明らかにされた。また、膝関節屈曲 90°において中間広筋は高い張力発揮が可能であり、屈曲位における大腿四頭筋の筋疲労応答は、中間広筋の筋疲労応答が他の構成筋のそれより影響している可能性が示された。以上のことから、中間広筋は他の大腿四頭筋と比較して張力を効率的に伝達することができること、および膝関節屈曲位における膝伸展運動に対して高い貢献度を有していると結論づけた。