

氏名	徳永由太		
学位の種類	博士(保健学)		
学位記番号	甲第83号		
学位授与の日付	2022年3月17日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
学位論文題目	ハムストリングスが膝関節伸展作用を発揮できる股・膝関節角度条件の同定		
論文審査員	主査	新潟医療福祉大学	教授 久保雅義
	副査	新潟医療福祉大学	教授 江原義弘
	副査	新潟医療福祉大学	教授 相馬俊雄

論文内容の要旨

ハムストリングス (HAM) は他の筋にはないユニークな機能を発揮できる可能性がある。その機能とは、HAM は解剖学的には膝関節屈曲筋に分類されるにもかかわらず、膝関節伸展作用を発揮できるというものである。もし HAM が膝関節伸展作用を発揮できることが事実ならば、理学療法士・トレーナーに甚大な影響がある。なぜならば、多くの理学療法士・トレーナーは「HAM は膝関節屈曲作用を発揮する筋である」と考えており、この考えに基づき患者・アスリートの動作分析や治療・トレーニング計画の立案を行っているからである。しかし、先行研究では HAM は膝関節伸展作用を発揮できると報告したものと、HAM は膝関節伸展作用を発揮しないと報告したものが混在しており、いまだに一致した見解が得られていない。膝関節運動における HAM の機能は股・膝関節角度の変化に応じて変化する可能性が報告されているが、HAM 機能の変化と股・膝関節角度の変化を系統的に検証した報告は存在しない。そこで本研究では、股・膝関節角度の変化とそれに伴う膝関節運動における HAM 機能の変化の関係を数値シミュレーションによって明らかにすることを目的とした。

筋骨格モデル解析用ソフトウェア OpenSim を用いて股・膝関節角度の変化に伴う HAM 機能の変化を検証した。解析対象は HAM を構成する半膜様筋 (SM)・半腱様筋 (ST)・大腿二頭筋長頭 (BFLH)・大腿二頭筋短頭 (BFSH) の4筋とした。膝関節運動における SM・ST・BFLH・BFSH の機能を同定するために、筋が発揮した張力に由来する関節角加速度を推定することができる Induced acceleration analysis (IAA) を使用した。IAA では解析対象として SM・ST・BFLH・BFSH のうちの1つの筋を選定し、その筋の張力のみが身体に作用した場合に発生する膝関節角加速度を推定する。すなわち、IAA では解析対象となる筋張力以外の力(重力、速度依存力、解析対象以外の筋

張力)の影響は無視されており、解析対象とした筋の作用によって生じた膝関節角加速度のみが推定される。そのため、IAAで推定された筋由来の膝関節加速度が伸展方向に生じている場合には「当該の筋は膝関節伸展作用を發揮している」と判定することが可能となる。股・膝関節角度条件を規定する各関節角度の可動範囲は股関節屈曲角度 $[-30^{\circ}$ 、 $90^{\circ}]$ 、膝関節屈曲角度 $[-10^{\circ}$ 、 $90^{\circ}]$ とし、設定した可動範囲を 1° 刻みで変位させた全ての組み合わせ 13231 条件 (101 の膝関節屈曲角度条件 \times 131 の膝関節屈曲角度条件)を解析対象の股・膝関節角度条件とした。上記の全ての股・膝関節角度条件において IAA を実行し、SM・ST・BFLH・BFSH が発生させる膝関節伸展角加速度を推定した。

シミュレーションの結果、1) 膝関節運動における SM・ST・BFLH・BFSH の機能は股・膝関節角度に応じて動的に変化すること、2) SM・ST・BFLH は特定の股・膝関節角度では膝関節伸展作用を發揮すること、3) BFSH はいかなる股・膝関節角度条件でも膝関節伸展作用を發揮しないこと、の3点が明らかとなった。SM が膝関節伸展作用を發揮したのは、股関節屈曲角度 $[-6^{\circ}$ 、 $59^{\circ}]$ かつ膝関節屈曲角度 $[-10^{\circ}$ 、 $5^{\circ}]$ 、または股関節屈曲角度 $[-13^{\circ}$ 、 $45^{\circ}]$ かつ膝関節屈曲角度 $[65^{\circ}$ 、 $90^{\circ}]$ のいずれかの股・膝関節角度条件であった。ST が膝関節伸展作用を發揮したのは、股関節屈曲角度 $[-2^{\circ}$ 、 $55^{\circ}]$ かつ膝関節屈曲角度 $[-10^{\circ}$ 、 $8^{\circ}]$ 、または股関節屈曲角度 $[-13^{\circ}$ 、 $51^{\circ}]$ かつ膝関節屈曲角度 $[59^{\circ}$ 、 $90^{\circ}]$ のいずれかの股・膝関節角度条件であった。BFLH が膝関節伸展作用を發揮したのは、股関節屈曲角度 $[-21^{\circ}$ 、 $79^{\circ}]$ かつ膝関節屈曲角度 $[-10^{\circ}$ 、 $90^{\circ}]$ の股・膝関節角度条件であった。

SM・ST・BFLH が膝関節伸展作用を發揮できることは臨床的にも意義がある。従来、HAM は膝関節屈曲モーメントアームを持つことから膝関節屈曲作用を發揮する筋であると考えられており、この解釈は理学療法士やトレーナーといった生体力学の知識を活用する専門家たちの中で常識レベルの知識として定着している。しかし、本研究の結果は「HAM は膝関節屈曲作用を發揮する筋である」という解釈は常に成立するとは限らないことを示した。このことは、理学療法士やトレーナーは股・膝関節角度の変化に応じて動的に変化する HAM 機能の変化を考慮して患者・アスリートの動作分析や治療・トレーニング計画の立案を行う必要があることを示唆している。本研究の知見は股・膝関節角度と膝関節運動における HAM 機能の関係性を考える上での基盤となるデータとなり得ることが考えられる。

キーワード：ハムストリングス、筋機能、筋骨格モデル、数値シミュレーション

論文審査結果の要旨

一般的に大腿部背面の筋（ハムストリングス）は膝屈曲・股関節伸展筋として機能しているとみなされているが、ある条件下では膝の伸展に作用するという報告もある。一つの関節をまたぐだけのいわゆる単関節筋では、筋収縮と関節運動の方向には一対一の関係があるが、ハムストリングスのような二つの関節をまたぐ筋肉の収縮が関節運動におよぼす作用はいまだ完全に理解されているとは言い難く、さまざまな議論が存在する。本論文は、ハムストリングスが膝伸展機能を発揮できる関節空間の同定を試みる研究である。

本研究では、直感に反するハムストリングの膝伸展機能を発揮できる可能性のある関節空間をシミュレーションを用いることで定量的に把握している点に優位性がある。理論的に関節空間が同定されることにより、そこから実際の運動と、この関節空間の関係について研究をすすめていくことにより、二関節筋全体の機能の理解を深める研究の一つの端緒となると考えられる。

今回の研究では、シミュレーション手法をとり入れることにより、*in vivo* では検証不可能な個別の筋の収縮と膝関節に発生する加速度の関係を探索するところからスタートしている。シミュレーション手法は、生理学的あるいは倫理面への配慮から、生体では実現できない条件などでもヴァーチャルに検証することができ、疾病・傷害などによる病的状態、あるいはトップアスリートのパフォーマンスの解析など、さまざまな応用範囲を秘めている。

論文の構成については特段の指摘事項はなかった。審査会では、特に難解となりがちなシミュレーションそのものについての説明に工夫がこらされ、わかりやすさを最大限にすることに力がいれられており高評価であった。方法について審査会での質疑応答でもっとも頻回にあらわれたのは、シミュレーションモデルのパラメーターの妥当性についてであった。1つ目は、実際の生体との比較で、たとえば筋肉のボリュームである。シミュレーションに用いられたモデルでは筋肉は基本的には収縮力をもつストリングとして表されているが、生体内では筋ボリュームの変化により力の作用するベクトルなどが変化する可能性がある。

次は「重力項のとりあつかい」である。いうまでもなく、実際の身体運動のほとんどは重力下で行われ、運動軌道の計算から重力を取り除くことは結果の解釈の妥当性に大きく影響する可能性がある。今回のシミュレーションでは重力項はゼロとしているが、観察の対象は、股関節・膝関節角度の特定の Configuration において Twitch のようなパルスタイプの筋収縮が引き起こす関節の「角加速度」にのみである。そのため発生する加速度そのものには重力項の影響はない。しかし時系列で関節運動軌道変化を観察するような研究では、重力項が強い影響を持つことは想像に難くない。

結果については、ややその解釈に注意を要する。先に述べたように、今回の研究の対象は、筋収縮により関節に発生する「加速度」であって、運動軌道そのものを捉えてい

るわけではない。結果で述べられているものは膝伸展方向への加速度であって、たとえ「膝伸展機能」とあっても、実際に膝が伸展していることとはほぼ無関係である。これと全く同じことが考察についても同じように言える。

本論文への大きなチャレンジは、現実的な動き・姿勢とシミュレートされた関節空間の間のつながりが必ずしも視覚的に理解できるかたちで提示されていないところにある。臨床的な応用を考えると、本研究で示された「股関節 XXX 度、膝関節 XXX 度で」膝伸展加速度があるという形よりは、どのような「姿勢で」を伝えたほうが、遙かに理解度は高まりやすく、また臨床からのフィードバックも得られやすい。今回の研究の知見をアスレチックな動作中での理解するときにも同様の難しさがある。

さらに、今回の解析対象とした運動は、遠位端である足部が固定されていない Open Loop での運動である。しかし実際の運動、たとえば歩行・ランニング・スクワットなどはすべて足が地面についた状態での Closed Loop での運動であり重力・床反力および摩擦力の運動軌道への影響は大きい。Closed Loop 運動での実際の運動軌道を推定することができれば、さらにこの研究の応用範囲がひろがり、その有用性の訴求力が増すと考えられる。これらがまさに今後の研究展開の中で取り組まれるべき課題である。

シミュレーション手法を用いた身体運動の研究は、それにつづく Validation の研究とペアになることで、ますますその有用性を増すことが考えられ、本研究はその口火を切るものとして評価できる。

以上のことから、審査委員会は本論文を博士論文に相応しいと認める。