

静的および動的筋力発揮中の腱組織の動態

身体運動科学研究領域

5007A032-8 清水美奈

研究指導教員： 川上泰雄教授

緒言

身体運動は筋の発揮した張力が腱組織を介し骨に伝達することで生じる。腱組織は弾性体であるため、筋の発揮した張力により長さが変化する(Fukashiro et al.1995, Ito et al.1998)。この腱組織の長さ変化は筋束(筋線維の束)の長さや収縮速度に影響を及ぼし、筋束の発揮可能な張力を変化させる(Kawakami et al.2006)。そのため筋力発揮中の腱組織の長さ変化を検討することは、筋束の発揮した張力が関節トルクとして発現するまでの過程を理解する上で重要である。

これまで、人間生体の腱組織の力学的特性は、静的筋力発揮中の腱組織の長さ変化と腱張力との関係から調べられてきた(Fukashiro et al.1995;Kubo et al.1999)。しかし、人間生体を対象に動的筋力発揮中の腱組織の長さ変化と腱張力との関係について検討した Sugisaki et al.(2005)によると、動的筋力発揮中の腱組織の長さ変化は腱張力だけでなく筋収縮様式や筋腱複合体長の影響を受けることが確認されている。このことは静的筋力発揮中に求めた腱組織が実際の身体運動中の腱組織の動態を反映しないことを示唆する。

そこで本研究は、静的筋力発揮中と動的筋力発揮中の腱組織の長さ-力関係の差を明らかにすることを目的とした。

方法

被検者は健康な成人男性 8 名とした。測定姿勢は股関節角度 80 度(完全伸展位:0 度)の座位とし、最大努力による静的筋力発揮と動的筋力発揮を行わせた。静的筋力発揮は、膝関節角度 70 度にて、安静から 5 秒かけて最大随意筋力に達するランプ状の筋力発揮とした。動的発揮は膝関節 110 度から 20 度までの等速性筋力発揮とし、膝関節伸展角速度は 30 度/秒, 60 度/秒, 120 度/秒, 180 度/秒の 4 速度に設定した。筋力計が動き出す閾値は膝関節 110 度における受動トルクに 5Nm を加えた値とした。取得した膝関

節トルクを膝関節モーメントアーム(Van Leeuwen and Spoor 1992)で除し、腱張力(F)に変換した(Ichinose et al.2000)。動的筋力発揮中の筋腱複合体の長さ変化は膝関節角度変化と膝関節モーメントアームの積から算出した(Kawakami et al.2002)。超音波装置を用いて筋力発揮中の外側広筋(VL)の深部腱膜と筋束の交点の移動(ΔD_{ip})を観察した。静的筋力発揮中は、最大腱張力を 100%として 10%毎に分析を行った。動的筋力発揮中の ΔD_{ip} は、動作開始からピークトルクに至るまでの区間を 96Hz で分析し、動作中の腱組織長変化(ΔL_t)を減じることで腱組織の長さ変化を算出した。さらに、腱組織の長さ変化を時間微分し、腱組織速度を求めた。腱組織長変化、腱組織速度の力学的パラメータについて動作開始からピークトルクに至るまでの時間を 100%としてスプライン補間を行い 1%ごとの値を算出した。

筋力発揮中の大腿直筋(RF)、内側広筋(VM)、大腿二頭筋(BF)および VL の EMG を双極誘導により導出した。EMG 振幅は全波整流の後、動的筋力発揮中の動作開始から超音波の分析対象区間の 70 度までの平均振幅(mEMG)を求め静的筋力発揮中の mEMG で正規化した。

結果

本研究で得られた主要な結果は以下の 2 点であった。(1)静的筋力発揮と動的筋力発揮における腱組織の長さ-力関係は一致せず、同一腱張力に対する腱組織の長さ変化は、動的筋力発揮が静的筋力発揮よりも有意に小さかった(図.1)。(2)動的筋力発揮における腱組織の長さ-力関係は、角速度により異なった(図.1)。いずれの筋についても角速度による平均筋電位の差は認められなかった。

考察

Sugisaki et al.(2005)は動的足関節底屈筋力発揮中の腓腹筋内側頭の腱組織について、最大努力の

短縮性収縮で外部腱は発揮張力に応じて長さが変化するのに対し、腱膜の長さ変化はわずかであることを報告している。一方、Pearson et al.(2007)は静的筋力発揮中の膝蓋腱(外部腱)の長さ-力関係が、安静から最大まで3秒間でトルクを増加させるFast試行と10秒間で増加させるSlow試行で異なり、Fast試行はSlow試行に比べ有意に膝蓋腱のスティフネスが高いことを示した。その要因として彼らは粘性の影響を挙げている。これら2つの先行研究と動的筋力発揮における腱組織の伸長速度が静的筋力発揮におけるそれよりも有意に高かったという本研究の結果をふまえると、動作開始時(腱張力 0N～約 4000Nの区間における)動的筋力発揮と静的筋力発揮の腱組織の長さ-力関係の差は、主として腱組織の伸長速度の差、すなわち、トルクの立ち上げ方の違いによりもたらされていたものと考えられる。

本研究における動作開始の関節角度は静的筋力発揮が70度、動的筋力発揮が110度であり、関節角度の違いにより腱組織の長さ-力関係が異なった可能性がある。先行研究において、Fukashiro et al.(1995)は足関節90, 105, 120度で静的筋力発揮を行わせ、動作開始の関節角度の違いで腱組織の初期長が変化すること、一方、腱張力と腱組織の長さ変化は類似の線形を示すことを報告している。従って、計測対象とした部位の違いはあるものの、本研究の腱組織の長さ-力関係の差異は動作開始の関節角度の違いによって生じたものではないと考えられる。

以上の結果と動物を用いた先行研究の腱組織の長さ変化は筋収縮様式の影響を受ける(Huijing and Ettema 1988/1989)といった報告をあわせて考えると、腱組織は運動課題(関節運動を伴うか否か、筋活動の有無、トルクの立ち上がり速度、筋腱複合体長)に応じて長さ変化のパターンを変えるため、静的筋力発揮により得られた力学的特性を必ずしも反映しないことが予想される。

Maganaris et al(2001)は、静的足関節背屈筋力発揮中の人間の前脛骨筋の中間腱膜の幅の変化を観察し、腱膜の末端部よりも中央部の方がその広がり

大きいことを報告している。同様に、Muraoka et al(2003)も人間の前脛骨筋を対象として、静的筋力発揮や筋長の変化に伴う腱膜の幅と筋束長の変化を計測し、腱膜の幅と筋束長との間に負の相関関係があることを報告している。以上のように筋活動や筋長変化に伴い腱膜の幅が変化することが人間生体においても確認されており、これは腱組織の長軸方向の長さ変化を制限する要因になるものと考えられる。

本研究において腱張力 0～4000Nの区間、関節角度変化の影響がほとんどなかった区間については、腱組織が筋束の配置や腱膜の形状の変化よりも、トルクの立ち上がりによる腱組織の粘性の影響が大きく、角速度による腱組織の長さ-力関係の差は生じなかったものと考えられた。一方、膝関節角度約 107 度～ピークトルク発現角度の区間においては、関節角度の変化による筋長の変化や筋力発揮に伴う筋束の短縮に伴い腱膜の単軸方向の幅が増加し、長軸方向の腱組織の長さ変化を制限されたことが、腱組織の長さ-力関係の差を生じさせた要因であると考えられた。しかし、上記のみで角速度の差による腱組織の長さ-力関係の違いを説明しきれず、今後さらなる検討が必要である。

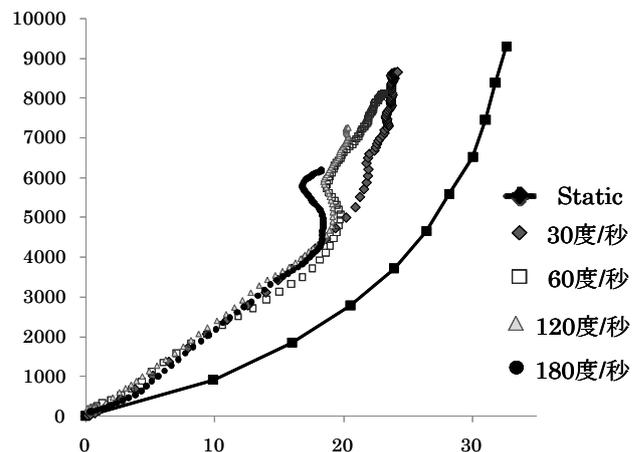


図 1. 静的筋力発揮と動的筋力発揮の腱組織の長さ-力関係