

筋腱複合体長および筋収縮レベルの変化によるアキレス腱の変形

身体運動科学研究領域

5006A008-9 岩沼聡一郎

研究指導教員： 川上泰雄教授

《第 1 章》緒言

アキレス腱は、下腿三頭筋とともに筋腱複合体 (muscle-tendon unit: MTU) を構成する。下腿三頭筋が力の発生源として働く一方で、アキレス腱は弾性エネルギーの貯蔵と放出に深く関わる (Gottschall と Kram, 2003; 川上と福永, 2006)。アキレス腱は、外力により変形をする。この力と変形の関係から、アキレス腱の力学的特性や振る舞いが議論されてきた。その際、アキレス腱の変形は主として腱伸長が注目されてきた。しかし、アキレス腱が 3 次元外形を有していることや、付着するヒラメ筋の筋束が 3 次元的に配列していること (Agur ら, 2003) を踏まえると、腱伸長のみでは変形を表しきれないと推察される。

本研究では、MTU 長および筋収縮レベルの変化に伴うアキレス腱の外形 (腱長、腱幅、腱横断面積、腱体積) の変化を明らかにし、その変形が MTU の機能におよぼす影響について考察する。

なお、本研究で対象とするアキレス腱は、腓腹筋内側頭遠位端から踵骨隆起までとした。腓腹筋内側頭遠位端からヒラメ筋遠位端までを近位部とし、ヒラメ筋遠位端から踵骨隆起までを遠位部と定義した。

《第 2 章》筋腱複合体長の変化がアキレス腱の外形におよぼす影響

【目的】

MTU 長は、関節角度により変化する (Grieve ら, 1978)。受動的に MTU 長を伸長させた際、腱組織は長軸方向のみならず短軸方向へも伸展する (Scott と Loeb, 1995; van Bavel ら, 1996; Muraoka ら, 2003)。一方、アキレス腱では、長軸方向の伸長について実測されているが、短軸方向の伸展について検討がなされていない。そこで、異なる足関節角度におけるアキレス腱の外形を定量し、長軸方向および短軸方向への伸展性を明らかにすることを目的とする。

【方法】

成人男性 8 名を対象とした。測定姿勢は仰臥位、膝関節完全伸展位とし、足関節は底屈 30 度 (PF)、解剖学的正位 (AP)、背屈 15 度 (DF) の 3 条件で固定した。アキレス腱の連続組織断層画像を Magnetic

Resonance Imaging (MRI) 法により撮像した。腓腹筋内側頭遠位端から踵骨隆起までの連続矢状面 MRI 画像および連続水平面 MRI 画像を、スライス厚 3mm、ギャップ 0mm で取得した。得られた MRI 画像から、アキレス腱の腱長、腱幅、腱横断面積、腱体積を測定した。また、長軸方向と短軸方向のストレインを算出した。

【結果および考察】

PF 試行では、AP 試行と比較して、いずれの項目も有意差が認められなかった。足関節底屈 23 度より底屈位では受動張力が発生しない (Muraoka ら, 2002) ことから、PF 試行では外形に顕著な変化が見られなかったと考えられる。一方、DF 試行では、AP 試行と比べ、長軸方向に 1.3%、短軸方向に 3.3~7.6% の伸展が観察された。足関節背屈により、MTU は長軸方向へ伸長し、それに伴ってアキレス腱も長軸方向へ伸長したと考えられる。短軸方向へ有意な伸展が見られた近位部には、ヒラメ筋の筋束が放射状に付着している (Agur, 2003)。その筋束が DF 試行時に近位部の内側端および外側端を牽引して短軸方向へ伸展させたと考えられる。

《第 3 章》筋収縮レベルの変化がアキレス腱の外形におよぼす影響

【目的】

第 2 章において、アキレス腱は、受動的な足関節背屈により長軸方向および短軸方向へ伸展することが明らかとなった。下腿三頭筋収縮時は、受動的な足関節背屈時より大きな力がアキレス腱にかかるため、伸展の様相が異なる可能性がある。そこで、異なる収縮レベルにおいて下腿三頭筋が収縮した際のアキレス腱の外形を定量し、長軸方向および短軸方向への伸展性を明らかにすることを目的とする。

【方法】

一般成人 7 名を対象とした。測定姿勢は仰臥位、膝関節完全伸展位、足関節解剖学的正位とし、MR 用筋力計に足関節を固定した。力発揮レベルは随意最大収縮 (Maximum Voluntary Contraction; MVC) の 40% と 80% とし、筋収縮中のアキレス腱の連続組

織断層画像を MRI 法により撮像した。腓腹筋内側頭遠位端から踵骨隆起までの連続矢状面 MRI 画像、ヒラメ筋遠位端から踵骨隆起までの連続水平面 MRI 画像および腓腹筋内側頭遠位端周辺の連続水平面 MRI 画像を、スライス厚 3mm、ギャップ 0mm で取得した。測定項目は、第 2 章と同様であった。

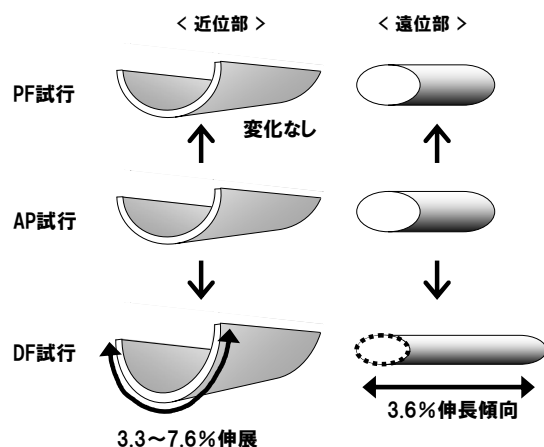
【結果および考察】

筋収縮により、アキレス腱は長軸方向および短軸方向へ有意な伸展が認められた。安静時と比較して 40%MVC 発揮時には、長軸方向へ 1.0%、短軸方向へ 4.6%伸展した。また、80%MVC 発揮時には、長軸方向へ 1.5%、短軸方向へ 6.4%伸展したが、40%MVC 発揮時のストレインと有意差が認められなかった。安静から 40%MVC まではトゥーリージョンにあり、40%MVC から 80%MVC まではリニアリージョンにあったと考えられる(Butler ら, 1978)。リニアリージョンでは、腱組織の力-長さ関係の傾きをスティフネスで表し、弾性体の指標としている。本研究で、40%MVC 発揮時と 80%MVC 発揮時で伸展性に差が少なかった理由として、アキレス腱が随意収縮程度の張力では伸長されにくいスティフな材質であることが考えられる。

《第 4 章》総括論議

【腱伸長評価法の差異】

本研究で観察された筋収縮時の腱伸長(3mm)は、



受動的な足関節底背屈時

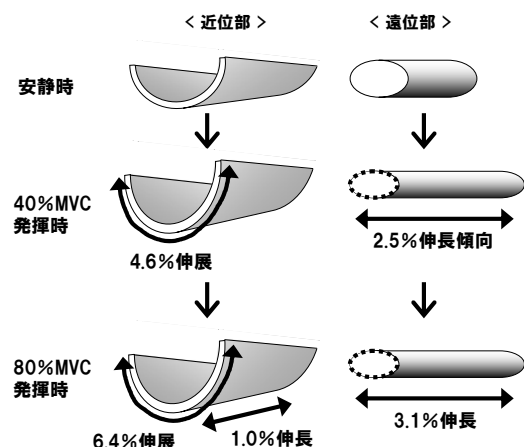
先行研究(Muramatsu ら, 2001; Maganaris ら, 2002; Muraoka ら, 2005)の腱伸長(9~11mm)と比べて、格段に小さかった。これらの先行研究は、超音波法を用いている。超音波法は、6~12cm 程度の撮像範囲内にある標識点の変位から、腱組織全体の変形を推定している。そのため、いくつかの仮定を必要としており、それが誤差を生んだ原因と考えられる。特に、プローブの向き、アキレス腱の湾曲程度、踵骨の変位による影響が大きかったものと考えられる。

【伸展性の部位差】

受動的な足関節背屈時および下腿三頭筋収縮時において、いずれも近位部で短軸方向へ、遠位部で長軸方向へ顕著に伸展した。部位により伸展する方向が異なった理由として、1)各部位に付着する組織(筋、骨)が腱組織を牽引する方向、2)腱組織内の構造(コラーゲンネットワーク、anchor)の 2 点の影響が挙げられる。

【MTU の機能に及ぼす影響】

本研究で得られてデータから、ヤング率を算出した。その結果、人間生体を対象にした先行研究のヤング率よりも 5~8 倍高く、アキレス腱はこれまで報告されているよりもスティフな材質であることが示された。また、近位部で短軸方向への伸展性が示されたこと、および足アーチが変形する様子が観察されたことは、それらが足関節全体の弾性エネルギーの貯蔵と放出に貢献していることを示唆する。



下腿三頭筋収縮時