

# 腱組織の力学的特性の新たな計測方法の開発

黒川 貞生, 亀ヶ谷 純一, 佐久間 淳 (武蔵丘短期大学),  
edro Valadao, Avela Janne,

Taija Finni (Neuromuscular Research Center, Department of Biology of Physical Activity,  
University of Jyväskylä)

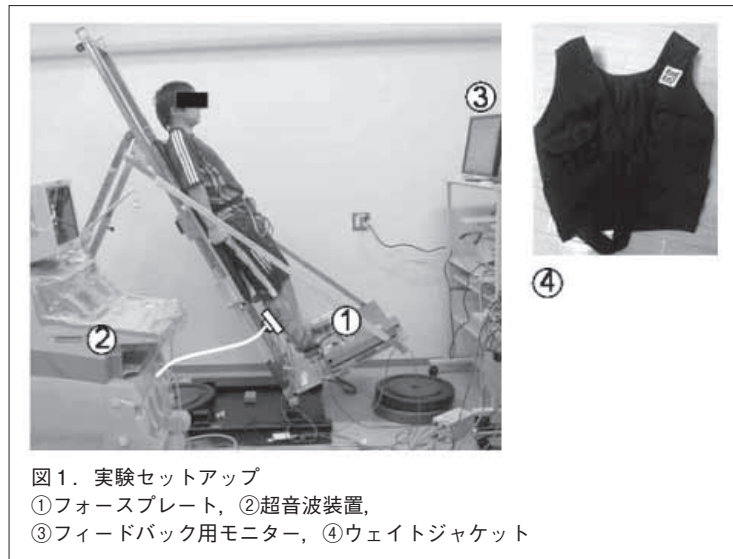
## 【目的】

腱組織は弾性を有しており、腱に張力が加えられたり、取り除かれたりするときに、弾性エネルギーが蓄積したり、リリースされたりする。この弾性エネルギーの大きさは、腱組織のstiffnessによって決定される。骨格筋では、筋線維は腱組織を介して骨に付着する。従って、これまで多くの研究で、腱組織は筋線維に直列に結合したバネとしてモデル化されてきた。近年、ジャンプ動作のような爆発的な運動の踏切局面の前半で腱組織に弾性エネルギーが蓄積され、後半のより短い時間でそれがリリースされること、そのエネルギーの大きさが筋・腱複合体の(MTU)が成した仕事の大部分であることが明らかにされた(Kurokawa, et al., 2001, 2003)。

一方、動物の摘出筋を用いた先行研究によると、任意の腱張力に対する腱組織(とりわけ腱膜)の伸張はかなり小さいことが報告されている。つまり、腱組織のstiffnessはpassive stretchに比べてactive stretchでより大きいことが報告されている(Ettema & Huijing, 1989, Lieber et al., 2000, Zuurbier et al., 1994)。これらの研究は、腱組織が筋線維に直列に繋がった単純なバネではないことを示唆している。近年, Azizi & Robert (2009) は、筋収縮中に腱膜が横方向にストレッチされることを明らかにし、筋収縮中に腱膜が縦・横両方向に伸張されることが縦方向のstiffnessを増加させ、このことがpassive stretchに比べてactive stretchで腱組織のstiffnessが大きいことを示唆した。このような現象はヒト腱膜でも観察されている(Maganaris et al., 2001, Muraoka et al., 2003, Finni et al., 2003)。また、腱膜の横方向の変形は筋線維の長さに依存し(Muraoka et al., 2003)、筋線維の長さは筋張力に依存する(Ito et al., 1998)ことが報告されている。

このような先行研究の結果からすると、ヒト腱組織において、passive stretchによって得られた力-伸張関係は腱膜の横方向の変形のない条件での腱組織の力学的特性を反映していると推測できる。また、active stretchによって得られた力-長さ関係は腱膜の縦・横方向の変形を含んだ条件での力学的特性を反映し、且つ、そのstiffnessは、力発揮レベルに依存すると考えられる。

Sugisaki ら(2011)は同様の観点から、ヒトのアキレス腱組織の力学的特性を、ダイナモメータを用いて、検討した。しかし、ヒトのより自然な運動を用いて、腱組織の力学的特性を検討した研究は我々の知る限り存在しない。そこで、本研究では、スレッジを用いて、active およびpassive な条件で、足関節背屈動作中のヒトのアキレス腱組織の力学的特性を検討することを目的とした。



### 【実験方法】

成人男性5名（年齢：26±3歳，身長：173±6cm，68±7kg）の下腿三頭筋腱を被験筋とした。用いる負荷を設定するために，まず，ダイナモメータにて足関節底屈の最大筋力を計測し，足長で除すことにより，その時のアキレス腱最大張力を算出した。算出した最大腱張力の20，40，60，80%に相当する負荷を算出した。それらの負荷は，ウェイトトレーニング用のプレートおよびウェイトジャケットを各々スレッジ装置（傾斜角45度）および被検者に付けることにより与えられた。これらの実験は，上下にスライドするスレッジ装置（傾斜角45度）を用い，被検者の膝関節を伸展させ，仰臥位にて行った。床面に設置されたフォースプレート上に固定された木製のブロックに被験脚の拇指球をのせ，足関節をpassiveおよびactiveに背屈させた。その際，床反力をフォースプレートより，腓腹筋およびヒラメ筋の筋活動を表面筋電図により計測した。同時に，超音波装置を用いて腓腹筋内側頭およびヒラメ筋の筋束を撮像した。また，足部の動きは側方よりビデオカメラにて被験脚を撮影し，下腿長変化を計測した。これらの全てのデータは同期して収録した。

### 【実験結果】

ダイナモメータで測定した最大筋力発揮時の足関節底屈トルクは181±13Nmであり，各被験者のモーメントアームで除したアキレス腱張力は1313±81Nであった。体重分を考慮すると，身体にかかるべき最大負荷は1390±103Nとなった。最大負荷では，被験者の足関節に痛みがあること等により，最大アキレス腱張力の20，60，80%の負荷で試行を実施することにした。各

条件におけるアキレス腱組織の伸張量については、超音波画像を分析することにより、算出中である。併せて、被検者数を2名追加し、同様の実験を計画中である。

## 【参考文献】

- Azizi, E & Roberts, T.J., 2009. Biaxial strain and variable stiffness in aponeuroses. *J Physiol* 587, 4309-4318.
- Ettema, G.J., & Huijing P.A., 1989. Properties of the tendinous structures and series elastic component of EDL muscle-tendon complex of the rat. *J Biomech* 22, 1209-1215.
- Finni, T., Hodgson, J.A., Lai, A.M., Edgerton, V.R., Sinha, S., 2003. Nonuniform strain of human soleus aponeurosis-tendon complex during submaximal voluntary contractions in vivo. *J Appl Physiol* 95, 829-837.
- Ito, M. Kawakami, Y., Ichinose, Y., Fukashiro, S. Fukunaga, T., 1998. Nonisometric behavior of fascicles during isometric contraction of a human muscle. *J Appl Physiol* 85, 1230-1235.
- Kurokawa, S., Fukunaga, T., Fukashiro, S., 2001. Behavior of fascicles and tendinous structures of human gastrocnemius during vertical jumping. *J Appl Physiol* 90, 1349-1358.
- Kurokawa, S., Fukunaga, T., Fukashiro, S., 2003. Interaction between fascicles and tendinous structures during counter movement jumping investigated in vivo. *J Appl Physiol* 95, 2306-2314.
- Lieber, R.L., Leonard, M.E., Brown-Maupin, C.G., 2000. Effects of muscle contraction on the load-strain properties of frog aponeurosis and tendon. *Cell Tissue Organs* 166, 48-54.
- Maganaris, C.N., Kawakami, Y., Fukunaga, T., 2001. Change in aponeurotic dimensions upon muscle shortening: in vivo observation in man. *J Anatomy* 199, 449-456.
- Muraoka, T., Muramatsu, T., Kanehisa, H., Fukunaga, T., 2003. Transverse strain of aponeurosis in human tibialis anterior muscle at rest and during contraction at different joint angles. *J Appl Biomech* 19, 39-48.
- Sugisaki, N., Kawakami, Y., Kanehisa, H., Fukunaga, T., 2011. Effects on muscle contraction levels in the force-length relationship of the human Achilles tendon during lengthening of the triceps surae muscle-tendon unit. 44, 2168-2171.
- Zuurbier, C.J., Everard, A.J., van der Wees, P., Huijing, P.A., 1994. Length-force characteristics of the aponeurosis in the passive and active muscle condition and in the isolated condition. *J Biomech* 27, 445-453.