

# 冷却，温熱およびマッサージ刺激が 筋・腱の力学的特性に及ぼす影響

東京大学大学院 久保 啓太郎  
(共同研究者) 同 金久 博昭  
同 神崎 素樹  
同 村岡 哲郎

## Effects of Cooling, Heating and Massage on the Mechanical Properties of Muscle and Tendon

by

Keitaro Kubo, Hiroaki Kanehisa,  
Motoki Kouzaki, Tetsuro Muraoka  
*Department of Life Science, University of Tokyo*

### ABSTRACT

The present study aimed to quantify the mechanical properties of tendon and aponeurosis during passive stretch and active contraction and to investigate the effects of cooling (5° water), heating (42° water) and massage on the mechanical properties of muscle and tendon in vivo. Before and after these conditions, the elongation of the muscle fiber, tendon and aponeurosis of medial gastrocnemius muscle was directly measured by ultrasonography, while the ankle joint was passively moved at 5°/s within the joint range of +15° to -30° (0° = neutral anatomic position; positive values for plantar-flexion) and subjects performed ramp isometric plantar flexion up to the voluntary maximum. The strain was calculated as the length change relative to the reference length of tendon aponeurosis when the ankle joint was 0°. While the muscle fiber and tendon structures (tendon and aponeurosis) stretched during passive dorsi-flexion, the elongation and strain of tendon (21.8 ± 3.2 mm, 11.6 ± 1.2 %) was significantly greater than that of aponeurosis (5.2 ± 2.2 mm, 5.2 ± 1.8 %).

During isometric contraction, the maximal elongation and strain of tendon ( $10.3 \pm 2.3$  mm,  $5.6 \pm 1.4$  %) were significantly greater than that of aponeurosis ( $3.2 \pm 1.6$  mm,  $3.2 \pm 1.5$  %). Furthermore, no significant changes in the elongation of muscle fiber and tendon structures were found after cooling, heating and massage, although the maximal isometric strength decreased significantly after cooling and massage. The present result suggested that the general icing, hot pack and massage did not change the mechanical properties of muscle and tendon.

## 要 旨

本研究の目的は、受動伸張中および等尺性収縮中における外部腱および腱膜の力学的特性を比較し、冷却、温熱およびマッサージ刺激が筋・腱の力学的特性に及ぼす影響を検討することである。13名の被検者を対象に、受動伸張中および等尺性収縮中の筋線維、外部腱および腱膜の伸張量を超音波診断装置を用いて測定した。受動的足背屈に伴い筋・腱ともに伸張したが、腱膜に比べて外部腱の伸張量が大きいことが示された。等尺性収縮中における外部腱の伸張量は、腱膜に比べて有意に大きかった。等尺性最大筋力は、冷却およびマッサージ後に減少したが、温熱刺激後には変化が認められなかった。しかし、冷却、温熱およびマッサージ刺激ともに筋・腱の力学的特性には有意な変化を示さなかった。これらの結果より、実際のスポーツ現場で実施されているアイシング、ホットパックによる温熱および疲労回復を目的としたマッサージでは、筋・腱の力学的特性を変化させないことが示唆された。

## 緒 言

実際のスポーツ現場では、パフォーマンスの向上およびリハビリを目的として、アイシング、ホットパックによる温熱、マッサージなどが実施されている。これらを行うことにより、外部刺激や筋内の血流量の変化などから、筋・腱内部の温度

に変化が生じることが考えられる。筋温の変化に伴い、最大筋力、力発揮速度、Electromechanical delay (EMD) などの筋機能が変化することが報告されている<sup>1,3)</sup>。これら筋温に伴う筋機能の変化については、クロスブリッジ形成速度、筋小胞体からのカリシウムイオン放出速度の変化などの筋内の化学的エネルギー反応速度変化によるものとされてきた<sup>4)</sup>。一方、筋は腱を介して骨に連結しているため、力発揮速度やEMDの決定因子の1つとして腱の特性が挙げられる<sup>21)</sup>。従って、温度変化によって腱の特性に変化が生じ、それが筋機能に影響を及ぼしている可能性が考えられる。さらに、筋・腱内部の温度変化に伴うパフォーマンス向上、および障害予防のメカニズムを知るためには、ヒト生体における温度変化(マッサージ刺激による変化も含む)が筋・腱の力学的特性に及ぼす影響を把握する必要がある。

近年、超音波法を用いることにより、ヒト生体の腱組織の特性が測定可能になってきた<sup>11-14)</sup>。我々は、ヒト生体の腱組織は従来の摘出腱データよりもかなりコンプライアントであり、特に腱膜の特性が主要因であると報告している<sup>11,12)</sup>。しかし、外部腱と腱膜の特性に相違があるとする報告と、同一であるとする報告があり、一致した見解が得られていない<sup>13,14)</sup>。さらに、多くの研究では、筋収縮中の腱組織の伸張量を計測したものが大部分で、受動伸張中の特性についての報告は非常に少ない。そこで本研究では、超音波法を用

いて、受動伸張中および筋収縮中における外部腱および腱膜の力学的特性を比較し、冷却、温熱およびマッサージ刺激がヒト生体の筋・腱の力学的特性に及ぼす影響を検討することを目的とする。

## 1. 方法

### 1. 1 被検者

被検者は、習慣的にレジスタンストレーニングを行っていない健康な成人男性13名（年齢 25 ± 2歳，身長 173 ± 5 cm，体重 66 ± 6 kg）を用いた。被検者には、あらかじめ実験の趣旨を説明したうえで了承を得た。なおスケジュールの都合のため、冷却および温熱刺激条件では8名，マッサージ刺激条件では5名が実験に参加した。

### 1. 2 冷却、温熱およびマッサージ刺激

冷却および温熱条件では、8名の被検者が冷水（5°）、温水（42°）の入った水槽に下腿をそれぞれ30分間浸した。水温をなるべく一定に保つために氷や湯を適宜追加した。マッサージ条件では、5名の被検者が15分間の専門家（有資格者）によるマッサージを受けた。

### 1. 3 筋・腱の力学的特性

冷却、温熱およびマッサージ条件の前後で、下記の受動伸張中および等尺性収縮中における筋・腱の力学的特性の測定を行った。

#### 1. 3. 1 受動伸張中の特性

被検者は筋力測定器（Myolet, Asics）を用いて伏臥位姿勢にてストラップを用いて体幹部を固定された。足関節底屈15°から背屈30°（解剖学的位置を0°）の範囲を5°/秒の角速度で受動的に足背屈させた際の腓腹筋内側頭（MG）の縦断画像を超音波診断装置（SSD-2000）を用いて30Hzにて撮影し、トルク信号と同期させるためにタイマーを入れてビデオ録画した。測定箇所は、筋・腱移行部（P1）とMG筋腹中央部（P2）とした。得

られた画像から筋線維、腱膜（筋内の腱）、外部腱（アキレス腱）の伸張量を測定した。筋線維長は、深部腱膜から浅部腱膜までの距離として計測した。MGの筋・腱全体長は、足関節角度変化からGrieveら<sup>6)</sup>の式を用いて算出した。外部腱の伸張量は、筋・腱全体長変化から、P1の移動量を減ずることにより算出した。腱膜の伸張量は、P1の移動量からP2の移動量を減ずることにより算出した。なお、ストレインは足角度0°位置での値を初期長として算出した。

#### 1. 3. 2 等尺性収縮中の特性

被検者の姿勢は上述の受動伸張中の測定時と同様である。運動課題は足角度0°の位置での等尺性足底屈運動を安静から最大筋力発揮（MVC）まで約5秒間で達するようなランプ状の力発揮であった。力発揮を行わせている際のMGの縦断画像を超音波診断装置を用いて撮像した。測定箇所、測定方法については、上述の受動伸張中の測定と同様である。得られた画像から、P1およびP2の移動距離（伸張量）を計測した。

発揮トルク（TQ）は以下の式により、筋張力（Ff）に変換した<sup>11)</sup>。

$$Ff = k \cdot TQ \cdot MA^{-1}$$

kは下腿三頭筋群におけるMGの生理学的横断面積の相対比であり、下腿三頭筋の発揮張力に占めるMGの貢献度とした。MAは足角度0°におけるアキレス腱のモーメントアームである（上記の受動伸張中の腱移動量より算出）。

#### 1. 3. 4 統計

各測定項目の値はすべて平均±標準偏差で示した。刺激前後の比較については対応のあるt検定を用いた。有意水準は5%未満とした。

## 2. 結果

図1に受動伸張中における筋線維、外部腱および腱膜の伸張量（A）および外部腱および腱膜のストレイン（B）を示した。足背屈に従い、筋線

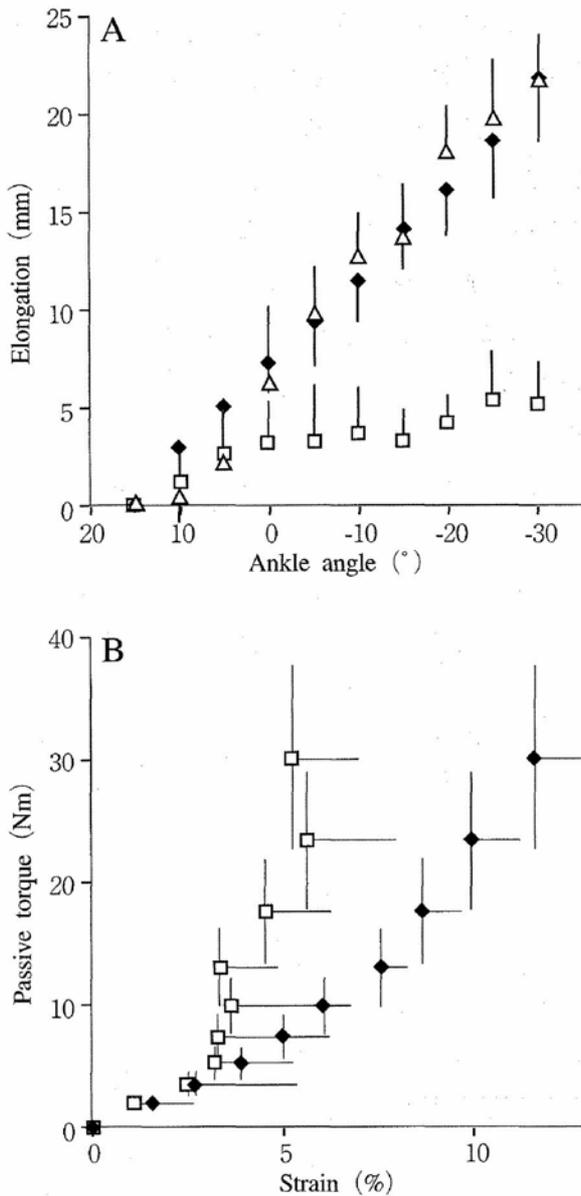


図1 受動伸張中における筋線維 (△), 外部腱 (◆) および腱膜 (□) の伸張量 (A) と受動トルクと外部腱 (◆) および腱膜 (□) のストレインとの関係 (B)

筋線維, 外部腱および腱膜ともに伸張し, 底屈15度から背屈30度までにそれぞれ  $21.5 \pm 2.5$  mm,  $21.8 \pm 3.2$  mm,  $5.2 \pm 2.2$  mm 伸張した。腱膜に比して外部腱の伸張量が有意に大きかった。それは, 初期長を考慮したストレインでも同様で, 外部腱が  $11.6 \pm 1.2\%$ , 腱膜が  $5.2 \pm 1.8\%$  であった。30度背屈位での受動トルクは,  $30.2 \pm 7.5$  Nm であった。

図2に等尺性収縮中における筋張力と腱組織の伸張量 (A) およびストレイン (B) との関係を示した。最大伸張量およびストレインは, 腱組織

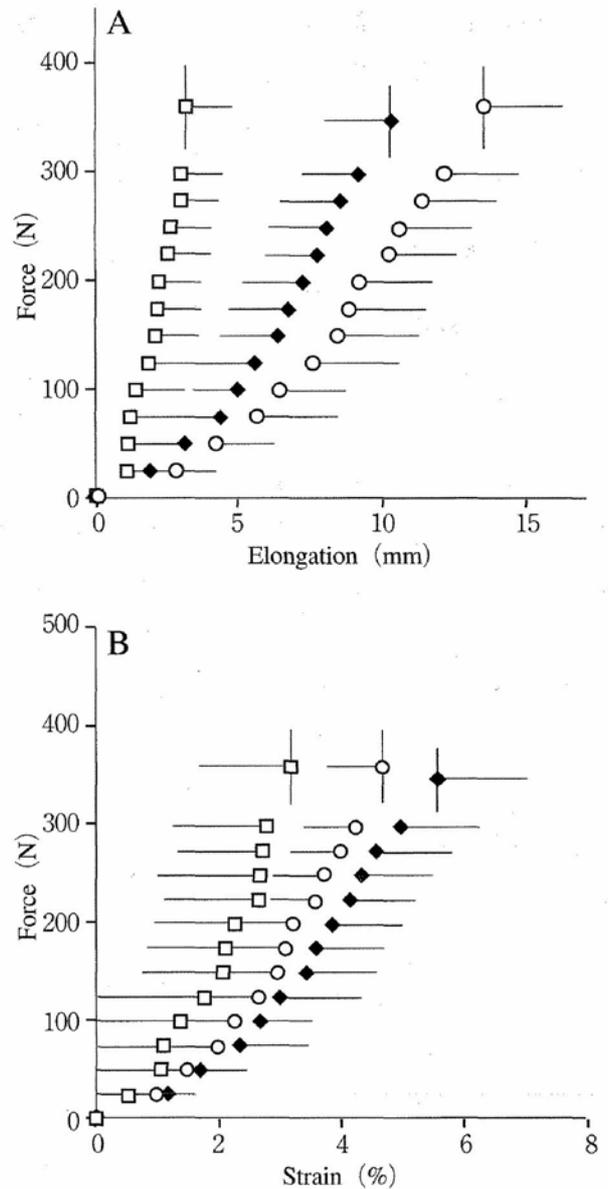


図2 等尺性収縮中における張力と腱組織全体 (○), 外部腱 (◆) および腱膜 (□) の伸張量 (A) およびストレイン (B) との関係

全体 (外部腱と腱膜) で  $13.5 \pm 2.7$  mm,  $4.7 \pm 0.9\%$ , 外部腱で  $10.3 \pm 2.3$  mm,  $5.6 \pm 1.4\%$ , 腱膜で  $3.2 \pm 1.6$  mm,  $3.2 \pm 1.5\%$  であった。

図3に冷却刺激前後における受動伸張中の足角度と筋線維, 外部腱および腱膜の伸張量との関係 (A), 等尺性収縮中の筋張力と外部腱および腱組織全体の伸張量との関係 (B) を示した。受動伸張中の受動トルク, 筋線維, 外部腱および腱膜の伸張量には有意な変化は認められなかった。冷却後に MVC は  $103.1 \pm 11.9$  Nm から  $93.8 \pm 16.9$  Nm へと有意に減少したが ( $p=0.04$ ), 筋張力と外部

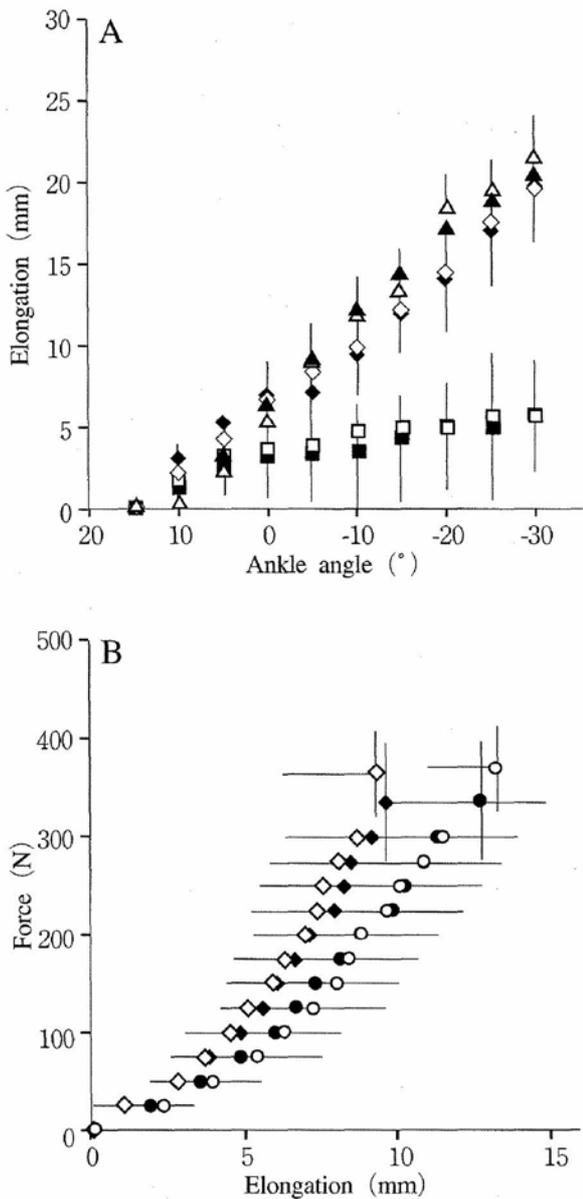


図3 冷却前後（前; open, 後; closed）における受動伸張中（A）および等尺性収縮中（B）の筋線維（△）、外部腱（◇）、腱膜（□）および腱組織全体（○）の力学的特性

腱および腱組織全体の伸張量との関係には有意な変化は認められなかった。

図4に温熱刺激前後における受動伸張中の足角度と筋線維，外部腱および腱膜の伸張量との関係（A），等尺性収縮中の筋張力と外部腱および腱組織全体の伸張量との関係（B）を示した。受動伸張中の受動トルクは、 $26.7 \pm 3.6$  Nmから $24.5 \pm 3.2$  Nmへと有意に減少したが（ $p=0.03$ ），筋線維，外部腱および腱膜の伸張量には有意な変化は認められなかった。温熱刺激後にMVC，筋張力と外部腱および腱組織全体の伸張量との関係にも有意

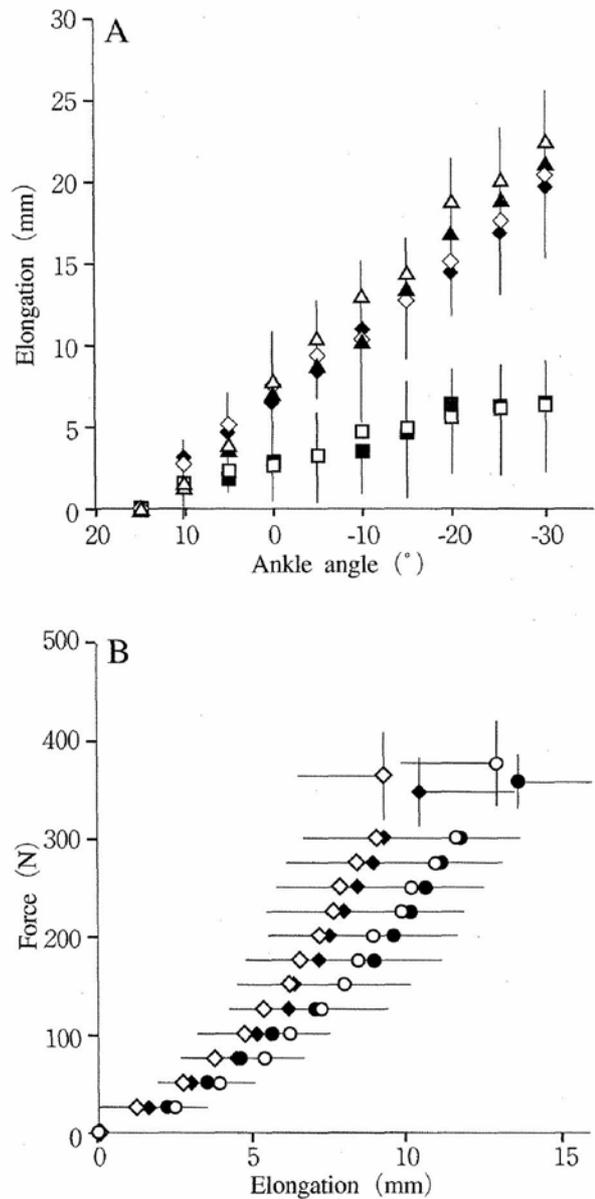


図4 温熱前後（前; open, 後; closed）における受動伸張中（A）および等尺性収縮中（B）の筋線維（△）、外部腱（◇）、腱膜（□）および腱組織全体（○）の力学的特性

な変化は認められなかった。

図5にマッサージ前後における受動伸張中の足角度と筋線維，外部腱および腱膜の伸張量との関係（A），等尺性収縮中の筋張力と外部腱および腱組織全体の伸張量との関係（B）を示した。受動伸張中の受動トルク，筋線維，外部腱および腱膜の伸張量には有意な変化は認められなかった。マッサージ後にMVCは $123.0 \pm 8.0$  Nmから $108.3 \pm 12.8$  Nmへと有意に減少した（ $p=0.03$ ）。収縮中の張力と外部腱および腱組織全体の伸張量との関係には有意な変化は認められなかった。

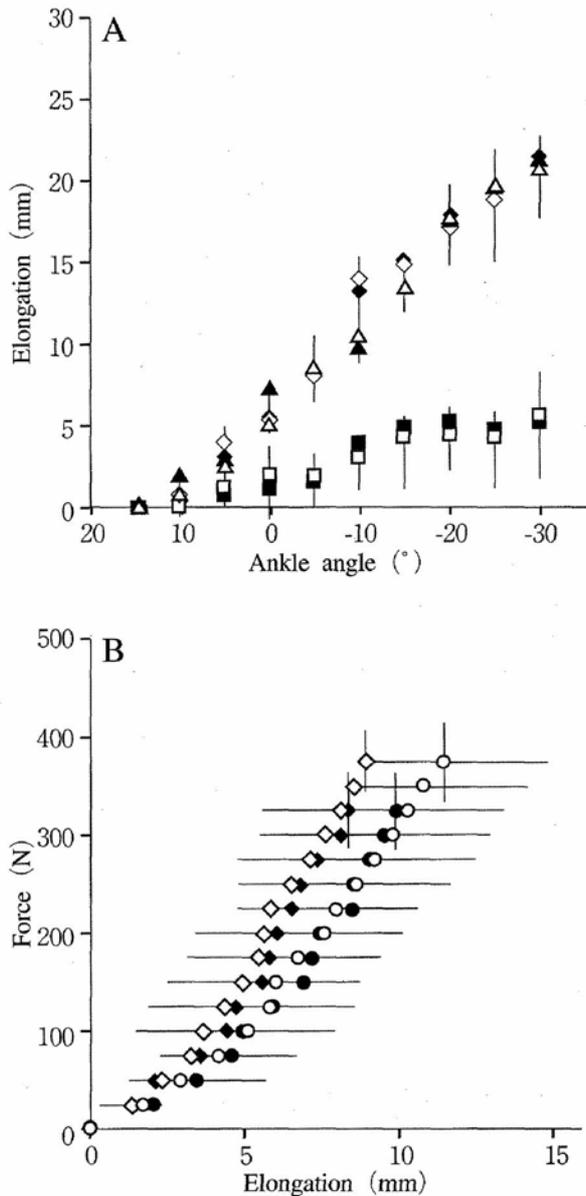


図5 マッサージ前後(前; open, 後; closed)における受動伸張中(A)および等尺性収縮中(B)の筋線維(△), 外部腱(◇), 腱膜(□)および腱組織全体(○)の力学的特性

### 3. 考 察

腱組織の力学的特性に関する研究は動物やヒト屍体からの摘出腱により行われてきた<sup>2)</sup>。しかし、その大部分は破断までの比較的高いストレスが課せられた状態での特性の評価が大部分であり、低い強度での特性に関する研究は意外に少ないのが現状であった。さらに、生体では腱の「カー長さ」関係における toe 相を使用しているため<sup>11,12)</sup>、このような低いストレスレベルでの特性は非常に重要であると考えられる。本研究では、受動伸張中

に筋線維、腱組織がそれぞれ伸張することが示された。さらに、受動伸張の初期においては外部腱と腱膜がともに伸張したものの途中から腱膜の伸張がみられなくなり、逆に外部腱は受動伸張中に伸張を続けた。従って、腱組織の伸張の大部分は外部腱によるものであることが明らかになった。

最近、等尺性収縮中の伸張量からヒト生体の腱特性に関する報告が多くなっている<sup>11-14)</sup>。その大部分の報告では、これまでの摘出腱データよりもステIFFネスやヤング率がヒト生体では低く、その原因として腱膜の特性が挙げられている<sup>11,12)</sup>。実際に、MaganarisとPaul<sup>14)</sup>は、腱膜(7%)は外部腱(2.5%)に比してストレインが大きいことを報告している。一方、Magnussonら<sup>14)</sup>は、外部腱のストレイン(8%)は腱膜のストレイン(1.4%)よりも大きいことを報告している。従って、外部腱と腱膜の特性については、一致した見解が得られていない。本研究の結果は、Magnussonら<sup>14)</sup>の結果を支持するものとなった。Finniら<sup>5)</sup>は、MRIを用いて、最大下収縮レベルでのヒラメ筋腱膜とアキレス腱のストレインについて調べ、40% MVCでアキレス腱のストレインが4.7%、腱膜のストレインが2.8%と報告している。本研究の結果はMVC発揮時の最大ストレインであることを考慮すると、本研究で得られたデータは妥当であると思われる。本研究の結果と最近のヒトを対象にした先行研究の結果を併せて考慮すると、ヒト生体では外部腱は摘出腱で報告されてきたデータ<sup>2)</sup>よりもかなりコンプライアントであり、逆に腱膜はそれほど伸展性を有していない可能性が示唆された。

冷却刺激により、最大筋力および力発揮速度が低下することが報告されている<sup>3,17)</sup>。これらの要因としては、クロスブリッジ形成速度および筋小胞体からのカルシウムイオン放出速度の低下などの筋内の化学的変化によるものとされてきた<sup>4)</sup>。実際に、BerghとEkblom<sup>1)</sup>は冷却刺激によって、

等尺性最大筋力では変化がみられないものの等速性筋力では有意な低下がみられ、前述の考えを支持する結果を報告している。さらに、力発揮速度、弛緩時間の減少、ジャンプ高の低下も示されている<sup>3,16)</sup>。これらの冷却による変化の原因としては、上述の筋内の化学的变化に加えて、腱組織の力学的特性の変化が予想される。摘出腱を用いた実験により、冷却による特性変化に関する知見が幾つか存在する。例えば、Noonanら<sup>15)</sup>は冷却によって、ステイフネスが増加することを報告している。Walkerら<sup>18)</sup>も同様に、23～49°の範囲で、温度低下とともにヤング率の増加を示している。しかし、本研究では冷却刺激が受動伸張中および等尺性収縮中における腱組織の特性に及ぼす影響は認められなかった。この原因としては、実際の筋内の温度が摘出腱を用いた先行研究での筋温まで低下していなかったことが考えられる。木目ら<sup>10)</sup>は本研究と同様のプロトコールで筋温を測定した結果、約3.7°の低下を示したことを報告している。従って、本研究で用いた30分間の冷水(5°)による冷却刺激は、摘出腱を用いた先行研究のような筋温の低下をもたらさなかったことが示唆された。しかし、実際の現場でアイシングなどを用いた場合の温度変化は本研究と同程度であると考えられるため、このような処置を施しても筋・腱の力学的特性には変化をもたらさないことが示唆された。

実際の現場では、関節各組織の柔軟性を高めるためにホットパックを用いた温熱刺激が行われている。本研究でも30分の温熱刺激後に、受動トルクが有意に減少したことから、足関節における柔軟性が高まったものと考えられる。柔軟性を高めるその他の手法として、ストレッチングが多用される。我々の先行研究によると<sup>11)</sup>、10分間のスタティックストレッチにより、本研究と同様の手法により測定された足底屈筋群の受動トルクは、約24%の低下を示した。Henricsonら<sup>7)</sup>は、温熱

刺激とストレッチによる股関節の柔軟性に対する効果を比較し、温熱刺激では柔軟性に変化がみられないものの、ストレッチのみでは柔軟性の改善がみられたことを報告している。したがって、柔軟性の改善という観点からは、温熱刺激よりも物理的な刺激が加わるストレッチの方が有効であることが示唆された。

先行研究では、環境温度(もしくは筋温)の変化にしたがい、最大筋力、力発揮速度、EMDなどが変化することが示されている<sup>8)</sup>。特に、力発揮速度やEMDの決定因子の1つとして、腱の特性が挙げられる<sup>21)</sup>。すなわち、筋・腱内部の温度上昇により、腱の伸展性が高まることが予想された。しかし、本研究では、受動伸張中および等尺性収縮中の腱組織の特性には温熱刺激の影響がみられなかった。摘出腱を用いた実験によると、温度上昇(39°～45°までの範囲)に伴い腱の伸展性が増加することが示されている<sup>19)</sup>。本研究と同様のプロトコールによる筋温の結果<sup>10)</sup>を参考にすると、30分間の温熱で約4度の筋温の上昇が予想され、摘出腱を用いた実験の温度変化に比べてかなり範囲が狭いことが考えられる。しかし、実際のホットパックなどによる温熱刺激も本研究と同程度のものと考えられることから、実際の現場での温熱刺激では腱組織の伸展性を変化させるまでには至らないことが示唆された。

本研究では、マッサージ後にMVCが低下し、これまでの先行研究と一致した<sup>20)</sup>。一方、柔軟性への効果については、マッサージの影響は認められなかった。同様に、Wiktorsson-Mollerら<sup>20)</sup>も関節可動域の増大に効果的なのはマッサージよりもストレッチであることを報告している。さらに、上述の冷却、温熱条件と同様に、マッサージでも筋線維および腱組織の力学的特性には有意な変化をもたらさないことが示唆された。つまり、マッサージによって血流の増加が生じるものの<sup>9)</sup>、それによる筋温の上昇が本研究で用いた温熱刺激

と同程度 (もしくはそれ以下) のため, 筋・腱の力学的特性に変化を及ぼすまでには至らなかったことが考えられた。

#### 4. まとめ

本研究では, 受動伸張中に筋線維および腱組織がそれぞれ伸張するが, 腱組織伸張の大部分は外部腱によるものであることが示された。さらに収縮中の外部腱と腱膜の特性を比較すると, 外部腱の伸展性は腱膜よりも高いことが明らかになった。しかし, 冷却, 温熱, およびマッサージ刺激前後で外部腱および腱膜の力学的特性に変化が生じないことが示された。

#### 謝 辞

本研究に対して助成を賜った (財) 石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

#### 文 献

- 1) Bergh, U., Ekblom, B.: Influence of muscle temperature on maximal muscle strength and power output in human skeletal muscles. *Acta Physiol. Scand.* 107, 33-37 (1979)
- 2) Butler, D.L., Grood, E.S., Noyes, F.K., Zernicke, R.F.: Biomechanis of ligaments and tendons. In: R.S.Hutton (ed) *Exer.Sport Sci.Rev.* 6, 125-181 (1978)
- 3) Davies, C.T.M., Young, K.: Effect of temperature on the contractile properties and muscle power of triceps surae in humans. *J. Appl. Physiol.* 55, 191-195 (1983)
- 4) Ferretti, G.: Cold and muscle performance. *Int. J. Sports Med.* 13 (suppl 1), 185-187 (1992)
- 5) Finni, T., Hodgson, J.A., Lai, A.M., Edgerton, V.R., Sinha, S.: Nonuniform strain of human soleus aponeurosis-tendon complex during submaximal voluntary contractions in vivo. *J. Appl. Physiol.* 95, 829-837 (2003)
- 6) Greive, D.W., Pheasant, S., Cavagna, P.R.: Prediction of gastrocnemius length from knee and ankle joint posture. In Asmussen and K.Jorgensen (eds), *Biomechanics VI-A*, 405-412 (1978)
- 7) Henricson, A.S., Fredriksson, K., Persson, I., Pereira, R., Rostedt, T., Westlin, N.E.: The effect of heat and stretching on the range of hip motion. *J. Ortho.p Sports Phys. Ther.* 6, 110-115 (1984)
- 8) Holewijn, M., Heus, R.: Effects of temperature on electromyogram and muscle function. *Eur. J. Appl. Physiol.* 65, 541-545 (1992)
- 9) Hovind, H., Nielsen, S.L.: Effects of massage on blood flow in skeletal muscle. *Scand. J. Rehab. Med.* 6, 75-77 (1974)
- 10) 木目良太郎, 白澤葉月, 田巻弘之, 倉田博, 佐古隆之, 浜岡隆文, 勝村俊仁, 下村輝一: 等尺性持続収縮時の下腿三頭筋活動に及ぼす局所冷却および加温の効果. *体力科学*, 47, 103-118 (1998)
- 11) Kubo, K., Kanehisa, H., Kawakami, Y., Fukunaga, T.: Influence of static stretching on viscoelastic properties of human tendon structures in vivo. *J. Appl. Physiol.* 90, 511-519 (2001)
- 12) Kubo, K., Kawakami, Y., Fukunaga, T.: Influence of elastic properties of tendon structures on jump performance in humans. *J. Appl. Physiol.* 87, 2090-2096 (1999)
- 13) Maganaris, C.N., Paul, J.P.: Load-elongation characteristics of in vivo human tendon aponeurosis. *J. Exp. Biol.* 203, 751-756 (2000)
- 14) Magnusson, S.P., Hansen, P., Aagaard, P., Brond, J., Dyhre-Poulsen, P., Bojsen-Moller, J., Kjaer, M.: Differential train patterns of the human gastrocnemius aponeurosis and free tendon, in vivo. *Acta Physiol. Scand.* 177, 185-195 (2003)
- 15) Noonan, T.J., Best, T.M., Seaber, A.V., Garrett, W.E.: Thermal effects on skeletal muscle tensile behavior. *Am. J. Sports Med.* 21, 517-522 (1993)
- 16) Oksa, J., Rintamaki, H., Rissanen, S.: Muscle performance and electromyogram activity of the lower leg muscles with different levels of cold exposure. *Eur. J. Appl. Physiol.* 75, 484-490 (1997)
- 17) Sargeant, A.J.: Effect of muscle temperature on leg extension force and short-term power output in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.* 56, 693-698 (1987)
- 18) Walker, P.S., Amstutz, H.C., Rubinfeld, M.: Canine tendon studies II. Biomechanical evaluation of normal and regrown canine tendons. *J. Biomed. Mat. Res.* 10, 61-76 (1976)

- 19) Warren, C.G., Lehmann, J.F., Koblanski, J.N.: Heat and stretch procedures: an evaluation using rat tail tendon. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 57, 122-126 (1976)
- 20) Wiktorsson-Moller, M., Oberg, B., Ekstrand, J., Gillquist, J.: Effects of warming up, massage and stretching on the range of motion and muscle strength in the lower extremity. *Am. H. Sports Med.* 11, 249-252 (1983)
- 21) Zhou, S., Carey, M.F., Snow, R.J., Lawson, D.L., Morrison, W.E.: Effects of muscle fatigue and temperature on electromechanical delay. *Electromyog. Clin. Neurophysiol.* 38, 67-73 (1998)