

## 中・高齢者における足関節可動域の規定因子

川上 泰雄<sup>1)</sup> 小田 俊明<sup>2)</sup> 栗原 俊之<sup>2)</sup> 千野 謙太郎<sup>2)</sup>  
 永吉 俊彦<sup>1)</sup> 金久 博昭<sup>2)</sup> 福永 哲夫<sup>1)</sup> 久野 譜也<sup>3)</sup>

## MUSCULOSKELETAL FACTORS INFLUENCING ANKLE JOINT RANGE OF MOTION IN THE MIDDLE-AGED AND ELDERLY INDIVIDUALS

YASUO KAWAKAMI, TOSHIKI ODA, TOSHIYUKI KURIHARA, KENTARO CHINO,  
 TOSHIHIKO NAGAYOSHI, HIROAKI KANEHISA, TETSUO FUKUNAGA and SHINYA KUNO

## Abstract

The factors influencing ankle range of motion were investigated for 185 middle-aged and elderly subjects (116 women and 69 men, aged 48-86 years). Each subject was seated with the right knee extended, and the ankle joint was passively dorsiflexed by a dynamometer with torque just tolerable for each subject, to measure the maximal dorsiflexion angle. During passive loading, elongation of muscle fibers in the gastrocnemius and Achilles tendon was determined in vivo by ultrasonography. There was a difference between women and men for the passive dorsiflexion angle (men smaller than women), which negatively correlated with muscle thickness of the posterior portion of the leg determined by ultrasonography. Both in women and men, the passive dorsiflexion angle negatively correlated with age, even after normalizing for maximal voluntary plantar flexion torque. Both elongation of muscle fibers and tendon was related to the passive dorsiflexion angle, and the ratio of tendon elongation to muscle fiber elongation positively correlated with the passive dorsiflexion angle. The active dorsiflexion angle, measured separately with the subject maximally dorsiflexing the ankle with no load, correlated with the passive dorsiflexion angle but not with age, and there was no gender difference. From the results it was suggested 1) that the mobility of the ankle joint is affected by elongation of both muscle fibers and tendon, but with the effect of the tendon being greater than that of muscle fibers, and 2) that muscle mass negatively affects passively-induced joint range of motion. Actively performed joint range of motion would be affected by elongation of the muscle-tendon complex and force-generating capability of the ankle. Gender difference in joint range of motion and the aging effect are related to these factors.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 2003, 52 Suppl : 149~156)

**key word** : flexibility, range of motion, ankle joint, muscle-tendon complex, gender difference, aging

## I. 目 的

人間の体力は多面的な要素から構成されるが、身体の機能的特性がその基盤となる。このうち、力強さやねばり強さといった行動体力の要素についてはこれまでに多くの研究が行われ、その規定因子や加齢に伴う変化などが明らかにされてきた<sup>1)</sup>。柔軟性は行動体力の要素として定義され、上

記の体力要素と同様にその重要性が認識されており、一般人やスポーツ選手の体力測定においては、関節の可動域を通じて柔軟性が評価される。身体が十分にその機能を発揮するためには、動きのしなやかさが必要であり、この意味で柔軟性は行動体力の基本的要素であるといえる。柔軟性は特に高齢者にとって重要であり、大きな関節可動域でしなやかに動くことのできる能力が日常生活の遂

<sup>1)</sup>早稲田大学スポーツ科学部

〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島2-579-15

<sup>2)</sup>東京大学大学院生命環境科学系身体運動科学

〒153-8902 東京都目黒区駒場3-8-1

<sup>3)</sup>筑波大学先端学際領域研究センター

〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1

School of Sport Sciences, Waseda University

Department of Life Sciences (Sports Sciences), The University of Tokyo

Tsukuba Advanced Research Alliance, Tsukuba University

行能力と深い関係をもっている。しかし、他の体力要素とは異なり、柔軟性に対する科学的アプローチは少なく、そのメカニズムや加齢変化については不明な点が多い。

近年の生体計測技術の進歩にともない、人間生体において筋腱複合体の形状や機能の定量化が進み、筋量や筋力のみならず、筋腱複合体の形状や力学的特性にも個人差が存在することが明らかになってきた<sup>2)</sup>。関節可動域には関節をまたぐ筋腱複合体の伸長の程度が直接的な影響を及ぼすため、関節可動域の個人差には筋腱複合体の特性が影響すると考えられる<sup>3)</sup>。また、関節を随意的に動かす筋力の大小も関節の能動的な可動域を左右するものと予想される。しかし、筋腱複合体のどのような特性が関節可動域の規定因子となるかについての知見はこれまでのところ得られていない。

本研究では、柔軟性という幅広い概念のうち、関節可動域に的を絞って、中・高年齢者を対象に、関節可動域の規定因子について検討を行った。対象としたのは、日常生活において頻繁に用いられ、関節運動に関わる筋腱複合体の計測が容易な足背屈動作であった。可動域は他動的に達成されるものと能動的に達成されるものとに分け、それぞれに筋腱複合体の伸長性や筋力、性差、年齢が影響を及ぼすという仮説を立て、測定および分析を行った。

## II. 方 法

### A. 被検者

被検者は事前に研究の目的と方法について説明し、実験参加に対する同意が得られた185名の健康な中・高年齢者(女性116名, 男性69名)であった。被検者の年齢は48歳~86歳にわたっていた。以下の実験に先立ち、超音波法により下腿前部および後部の筋厚(膝窩から腓骨外顆までの距離の近位30%の部位)を計測した<sup>4)</sup>。

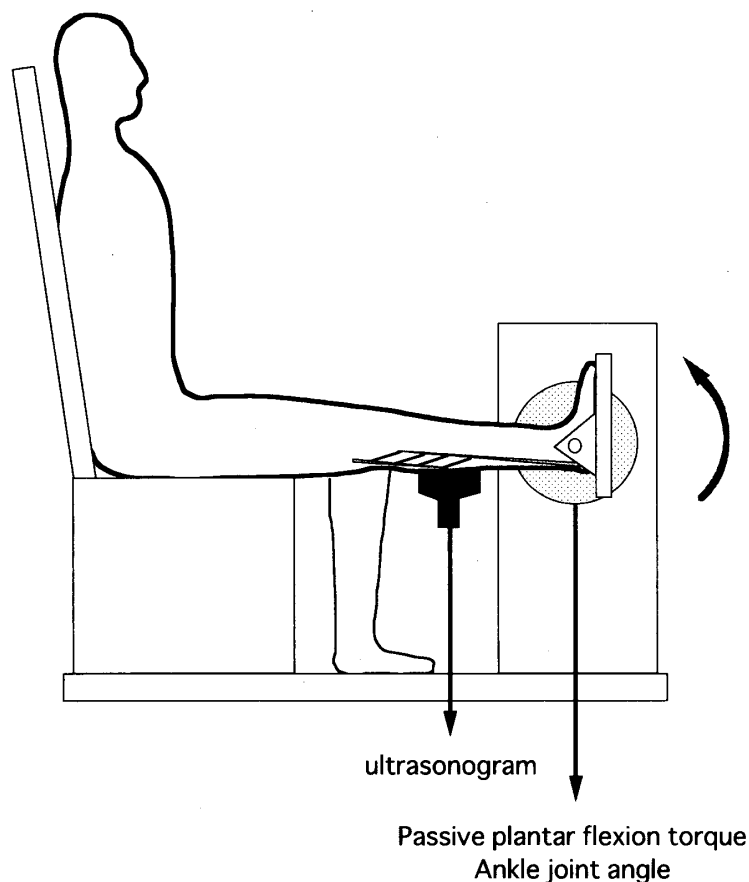


Fig. 1. Experimental set-up.

**B. 受動足関節可動域および筋腱伸長性の測定**  
測定には特別に作製した筋力計(VINE社製, 日本)を用いた(図1)。この筋力計は座席と足関節固定装置および足関節回転用モーター及びトルク計測装置からなっていた。被検者は座位(右膝関節は完全伸展位)をとり、右足部を筋力計のフットプレートに固定した。フットプレートは等速(100°/秒)で受動トルクがゼロとなる底屈30°の位置を始点として足背屈方向に回転し、一定の受動トルク(可変)が生じたときに回転を停止(パウダークラッチを滑らせて等トルクを維持)し、その時の足関節角度を計測するように設計されていた。被検者の身体固定後、ウォームアップを兼ねて負荷トルクを少しずつ増加し、アナログスケール法により尋ねた被検者の主観的なストレッチ感が「適度なストレッチ感」~「ややつばる感じ」を覚える程度の負荷を決定した。負荷トルクは被検者によって異なり、13~38 Nmの範囲にわたっていた。測定は、この負荷で回転したモーターが

受動背屈により発生する受動トルクと等しくなり、回転を停止したときから30秒間行い、10秒目のトルクおよび足関節角度(受動背屈角度)を記録した。モーターの回転停止後10秒目のトルクおよび足関節角度を記録した理由は、下腿底屈筋群の受動的伸長による反射応答の影響<sup>5)</sup>を除外するためであった。また、10秒目から30秒目に至る過程で関節角度に変化が生じるかどうかを調べる目的で、モーター停止後30秒目までの計測を行ったが、個人差の評価が煩雑になる理由から、本研究ではこの点に関する検討は行わなかった。被検者には、底屈筋群を緊張させず、受動背屈に抗する動きを行わないように指示した。測定に先行する予備実験において、「ややつっぱる感じ」という被検者の内省の強度までの受動的背屈においては足底屈筋群に筋放電が生じないことを確認した。

Bモード超音波装置を用いて、腓腹筋内側頭の遠位筋腱移行部を確認し、この部分で皮膚上に超音波装置の探触子を固定した。足関節を底屈 30° の位置から背屈方向に回転させて固定すると、腓腹筋が伸長されるために、筋腱移行部が遠位方向に移動した(図2)。この移動量を、底屈 30° の位置からの変位として計測した(30秒固定中の10秒目の値を採用)。この筋腱移行部の移動量は腓腹筋筋線維の伸長に等しいものと考え、筋線維伸長とした。次に、関節角度を変化させたときの筋腱複合体の全長の変化を屍体において実測した先行研究の推定式<sup>6)</sup>および被検者の下腿長(膝窩部から腓骨外顆中央までの距離として計測)をもとに推定した。さらに、[筋腱複合体長の変化-筋線維長の変化]によって腱組織(アキレス腱、腓腹筋の外部腱)の伸長を推定した。また、安静時の筋腱移行部の位置とアキレス腱遠位端(踵骨付着部位)との間の距離をアキレス腱長として計測した。

### C. 足関節トルクおよび能動足関節可動域の測定

上記の計測後、数分の休息をはさんで、足関節角度 0° の位置での最大随意等尺性足底屈動作時の最大トルクを計測した。計測は2回行い、大き

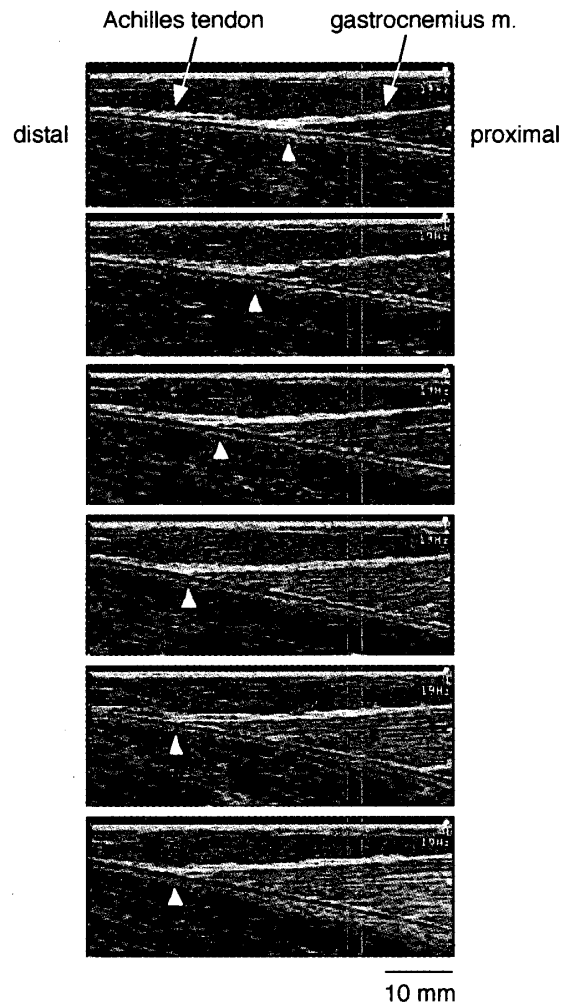


Fig. 2. Ultrasonic images of the distal musculotendon junction of the gastrocnemius muscle (white triangle) as the ankle was passively dorsiflexed (from top to bottom). The excursion of the junction in the distal direction was defined as elongation of muscle fibers.

い方のトルクを底屈筋力として採用した。2回の測定値に大きな隔たり(10%以上)があった場合は3回目の計測を行った。また、30°底屈位にて最大随意等尺性足背屈動作時の最大トルクを同様の手順で計測し、背屈筋力とした。

特別に作製した角度計(VINE社製、日本)を用いて、被検者が最大努力で背屈動作を行ったときの足関節角度(能動背屈角度)を計測した。角度計は下腿および足部に固定され、自由に足関節背屈運動を行うことができるように設計されていた。能動背屈角度の計測と上記受動背屈角度の計測の順序はランダムになるように配慮した。

#### D. 統計処理

足関節可動域(受動背屈角度および能動背屈角度)と筋厚, 筋線維・腱伸長との関係を求めるにあたっては, 回帰分析および分析対象とする変数以外の影響を除いた偏相関分析を用いた。また, 背屈角度と被検者の年齢の間の偏相関分析を通じて, 可動域に及ぼす加齢の影響について検討した。男女差については対のないt検定を用いた。いずれの場合も, 危険率5%未満をもって統計的に有意と判断した。

### Ⅲ. 結 果

#### A. 形態的特徴および筋力

被検者の形態的特徴を表1に示す。男性は女性よりも体格および筋厚が大きかった。アキレス腱長も男性が女性を上回っていたが, 下腿長当たりになると両群に有意差はみられなかった。筋厚と筋力は男女ともに年齢と負の相関関係を有していた( $r=0.41\sim 0.47$ ; 底屈, 背屈とも)。また, 筋厚当たりの筋力にも年齢との間に負相関が認められた(底屈筋力/下腿後部筋厚: 女性  $r=-0.40$ , 男性  $r=-0.49$ , 背屈筋力/下腿前部筋厚: 女性  $r=-0.36$ , 男性  $r=-0.44$ )。筋厚当たりの筋力は底屈, 背屈ともに女性が男性を有意に下回っていた。

#### B. 受動背屈角度と計測パラメタとの関係

受動背屈角度計測時の負荷トルクは女性が  $29.0\pm 5.2\text{Nm}$ , 男性が  $31.1\pm 3.8\text{Nm}$  であり, 両群に有意差が認められた。表1には両群の受動背屈角度を示したが, 女性が有意に男性よりも大きい値であった。両群ともに受動背屈角度には大きな個人差がみられた(女性  $8\sim 44^\circ$ , 男性  $4\sim 34^\circ$ )。男女とも, 受動背屈角度は下腿後部の筋厚との間に有意な相関関係が認められた(図3; 年齢の影響を除いた偏相関も有意: 女性  $r=-0.25$ , 男性  $r=-0.25$ )が, 下腿前部の筋厚との間には有意な関係はみられなかった。男性において, 受動背屈

Table 1. Physical characteristics of the subjects and measured variables.

	Women	Men
Age (years)	66.4 ± 7.1	70.5 ± 6.1 *
Height (cm)	150.5 ± 6.0	162.9 ± 6.1 *
Weight (kg)	54.3 ± 7.8	61.5 ± 7.4 *
Leg length (cm)	33.6 ± 2.1	35.6 ± 2.1 *
Leg circumference (cm)	33.7 ± 2.6	34.4 ± 2.1 *
Achilles tendon length (cm)	18.1 ± 1.9	19.9 ± 1.9 *
Achilles tendon length / leg length	0.54 ± 0.05	0.55 ± 0.09
Muscle thickness of posterior leg (mm)	60.5 ± 5.1	64.8 ± 4.8 *
Muscle thickness of anterior leg (mm)	25.7 ± 2.9	28.3 ± 3.2 *
Passive dorsiflexion angle (°)	25.0 ± 6.4	20.7 ± 6.6 *
Active dorsiflexion angle (°)	17.7 ± 5.5	18.0 ± 5.4
Maximal plantar flexion torque (Nm)	92.4 ± 26.9	130.5 ± 44.8 *
Maximal dorsiflexion torque (Nm)	20.3 ± 4.7	30.2 ± 8.3 *

Mean ± SD, \*significantly different between women and men

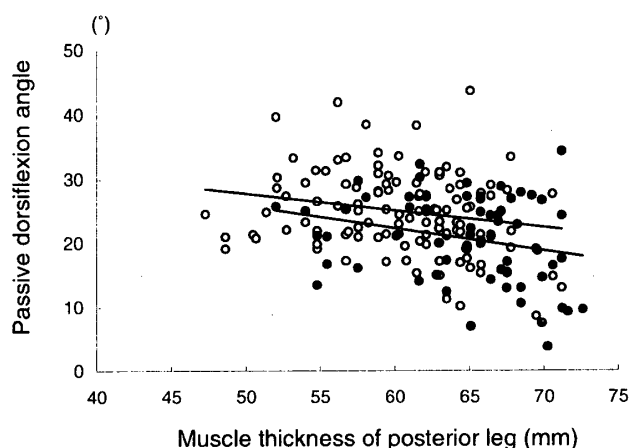


Fig. 3. Relationship between muscle thickness of posterior leg and passive dorsiflexion angle (open circle, women; filled circle, men). Linear regression lines are also indicated.

角度と最大底屈・背屈トルクの間には有意な負の相関(年齢の影響を排除)がみられた(それぞれ  $r=-0.32$ ,  $-0.23$ )が, 女性では有意な関係は存在しなかった。

受動背屈時の筋線維伸長と受動背屈角度には比例傾向がみられたが, この関係は女性のみで有意であった( $r=0.39$ ; 年齢の影響を排除)ものの, 男性は有意ではなかった(図4上)。一方, 推定アキレス腱伸長と受動背屈角度との間の相関関係は両群ともに有意であった(女性  $r=0.25$ , 男性  $r$

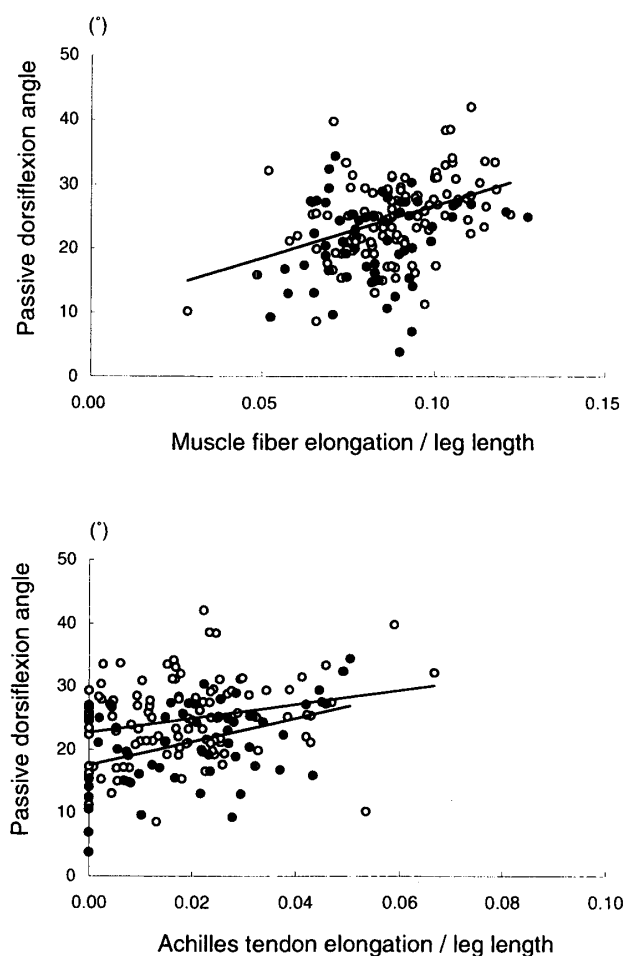


Fig. 4. Top: Relationship between muscle fiber elongation and passive dorsiflexion angle. Muscle fiber elongation is normalized by leg length; Bottom: Relationship between Achilles tendon elongation and passive dorsiflexion angle. Achilles tendon elongation is normalized by leg length (open circle, women; filled circle, men). Linear regression lines (only for women in the top panel) are also indicated.

$r=0.43$ ; 年齢の影響を排除)(図4下). アキレス腱伸長/筋線維伸長比と受動背屈角度との間には女性( $r=0.22$ ), 男性( $r=0.29$ )ともに有意な正の相関関係が観察された. 下腿長当たりの受動背屈時の筋線維伸長は男性( $8.2 \pm 1.6\%$ )が女性( $8.8 \pm 1.6\%$ )よりも少なかったが, アキレス腱伸長は下腿長当たりにしても, アキレス腱長当たりにしても男女差は認められなかった.

受動背屈角度と年齢との間の偏相関(筋厚, 筋力, 最大背屈トルクの影響を除外)は男女とも有意であった(女性  $r=-0.30$ , 男性  $r=-0.49$ ).

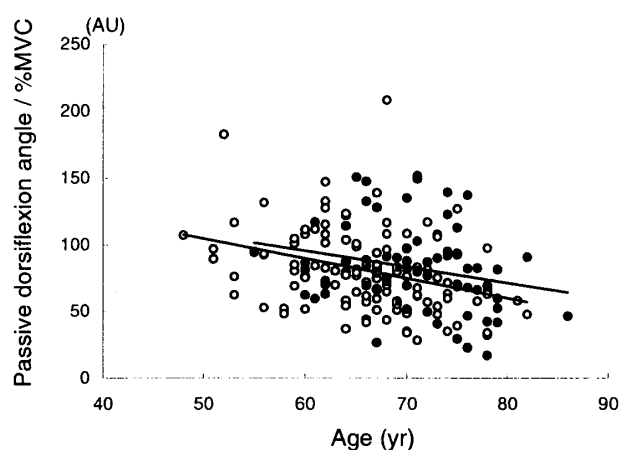


Fig. 5. Relationship between age and passive dorsiflexion angle. Passive dorsiflexion angle is normalized by the percentage of applied load as a fraction of maximal voluntary torque (open circle, women; filled circle, men). Linear regression lines are also indicated.

受動背屈時の負荷トルクを各被検者の底屈筋力当たりにしたもので受動背屈角度を除いた値を求めた(相対受動背屈角度; 負荷トルクの筋力に対する比率あたりの受動背屈角度)ところ, 男女差はみられず, 男女ともに年齢と負の相関関係が認められた(図5).

### C. 能動背屈角度と計測パラメタの関係

能動背屈角度も受動背屈角度同様に大きな個人差が存在したが, 男女差は認められず(表1), 年齢との間にも有意な関係はみられなかった. 能動

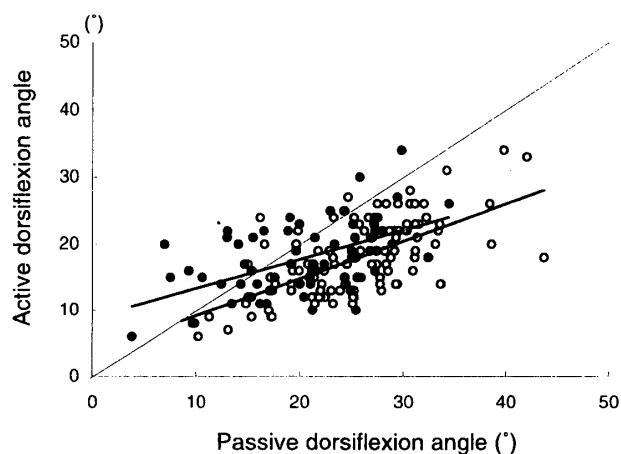


Fig. 6. Relationship between passive dorsiflexion angle and active dorsiflexion angle. Linear regression lines and an identical line ( $y=x$ ) are also indicated.

背屈角度と受動背屈角度との間には男女ともに有意な正の相関関係がみられた(女性  $r=0.64$ , 男性  $r=0.54$ ; 図6)が, 受動背屈角度の大きい被検者の能動背屈角度が大きくなる割合は小さかった. 能動背屈角度/受動背屈角度比を算出したところ, 受動背屈角度と負の相関関係が認められ(女性  $r=-0.20$ , 男性  $r=-0.59$ ), 女性が男性よりも有意に低くなった(女性  $0.71 \pm 18$ , 男性  $0.92 \pm 0.32$ ). 男性において, 能動背屈角度は底屈筋力との間に負の( $r=-0.30$ ), 背屈筋力/底屈筋力比との間に正の( $r=0.29$ )相関関係が存在した(年齢の影響を排除)が, 女性においてはいずれの関係も有意ではなかった.

#### IV. 考 察

本研究は, 関節可動域に筋腱複合体の量的・機能的特性や性差, 年齢が影響を及ぼすという仮説を検証することを目的として行われた. その結果, それぞれの因子の影響は可動域の測定方法によって異なっており, 因子間の相互作用の存在が示唆された. 以下, 可動域の測定方法別に仮説の検証の過程についてまとめる.

##### A. 受動背屈角度と筋量の関係

受動背屈角度と下腿後部の筋厚との間に認められた負相関は, 背屈時に伸長される下腿三頭筋を中心とした下腿後部の筋群の伸長抵抗性によるものと考えられる. 受動背屈の場合, モーターにより他動的に足関節が背屈されるので, 受動組織としての筋腱複合体の量の多寡が背屈角度に影響を及ぼす, すなわち, 伸長される筋量が多いほど関節可動域が低下することが示唆される. 先行研究<sup>7)</sup>において, 受動背屈角度と最大底屈筋力との間に負相関が報告されているが, この結果は伸長抵抗性の所在としての下腿後部の筋量が影響を及ぼしたものであろう. 男性の受動背屈角度が女性よりも小さかった結果はこのことと関係していると考えられる. 女性の柔軟性が男性よりも高いという報告<sup>3)</sup>は男女の筋量の違いを反映したものであると推察される.

##### B. 受動背屈角度と筋腱複合体伸長性の関係

筋腱複合体の受動的伸長は筋線維, 腱組織の双方を伸長させる<sup>8)</sup>. 受動背屈中に筋線維は伸長され, 受動背屈角度と筋線維伸長には比例傾向が存在したが, 相関はそれほど高くはなく, 男性では有意ではなかった. 一方, アキレス腱の伸長と受動背屈角度との間には男女ともに正の相関関係が認められたことから, 後者が受動背屈角度により強く関係していることが示唆される. 生体において腱組織はその受動的長さ-力関係のうち低負荷での伸長性の高い「toe-region」を専ら用いる<sup>9)</sup>. このことが受動背屈のような低負荷での腱の伸展性の高さの背景となっているのであろう. 女性の腱組織のコンプライアンスは男性よりも高い<sup>10)</sup>と考えられているが, 本研究ではアキレス腱の相対伸長に男女差は認められなかった. 下腿長当たりの筋線維伸長は女性が有意に男性を上回っていたことから, 受動的背屈の場合, 腱の伸長性よりも筋線維の伸長性が男女差の原因となるようである. これは, 筋量の男女差に基づく結果であろう. なお, 本研究では筋腱移行部の移動量を筋線維伸長とした. しかし, 厳密に言えば, 羽状筋である腓腹筋筋線維の羽状角が筋長に依存して変化するため, 得られた値は筋腹部の伸長であって筋線維の伸長と等価ではない. ただし, 先行研究<sup>11)</sup>(筋束長と羽状角と関節角度との関係)を元にこの影響を試算してみると, 筋線維伸長(筋腹部分)の見積誤差は10%未満であった. また, この影響は全ての被検者において同様に生じるため, 柔軟性の影響因子の個人差を検討した本研究の結果を左右するものではないと考えられる.

##### C. 受動背屈角度と年齢の関係

相対受動背屈角度は男女とも年齢と負相関を有し, 加齢によって関節可動域が低下するという先行研究<sup>3, 12)</sup>と同様の結果となった. この相関関係は筋厚の影響を統計的に除いても存在したことから, 筋腱複合体の材質特性としての伸長性が加齢にともなって減少する可能性が示唆される. 結合組織を構成するコラーゲンの組成変化<sup>13)</sup>やコラーゲン線維の配列の変化<sup>14)</sup>などがその原因と

して考えられる。また、靭帯や関節包、皮膚などの組織の伸展性や弾性の変化、筋線維内の結合組織の増加<sup>15-17)</sup>などの関与も予想されるが、詳細なメカニズムについては今後の研究が待たれる。

#### D. 能動背屈角度の規定因子

能動背屈角度は受動背屈角度との間に正の相関関係を有していたが、男女差はみられず、年齢の影響も認められなかった。男性の場合、能動背屈角度は背屈/底屈筋力比と正相関を有していたが、女性では無相関であった。これらの結果を総合して考えると、能動背屈角度は足関節を随意的に背屈させる筋力と受動的に伸長される筋腱複合体(底屈筋群)の組織の伸長抵抗性の複合的な影響を受けるものと推察される。伸長される筋の量が多いと受動的伸長性が低くなるという機序と、筋力が高いと能動的な関節可動性が高いという機序がお互いの効果を相殺し合った結果、受動背屈角度に認められた測定パラメタとの間の相関関係がみられなかったと考えることができる。受動背屈角度と能動背屈角度/受動背屈角度比との間に認められた負の相関関係は、筋量増加による受動的伸長性の低下の影響の方が大きいことを示唆するものであり、このことが加齢に起因する筋力低下による関節可動性の低下の影響を少なくしたのであろう。女性の場合、筋力/筋厚比が有意に男性よりも低いことや、能動背屈角度と背屈筋力/底屈筋力比に男性のような正相関がみられなかった結果からも明らかのように、筋力発揮能力が低いために、筋の受動伸長抵抗性の影響が相対的に大きく、このことが男性よりも低い能動背屈角度/受動背屈角度比をもたらしたものと推測される。

#### E. 本研究の結果の応用性

本研究の結果に基づけば、ストレッチングなどの筋腱複合体伸長性改善トレーニングを通じて受動背屈角度を、筋力トレーニングを通じて能動背屈角度を増加させることができると考えられる。筋力レベルの低い女性や高齢者においては後者を、筋量の多いスポーツ選手などでは前者を主眼とした運動処方が薦められるべきであろう。今後

はさらに大規模な集団を対象とした測定や、関節可動域の改善方法の縦断的な検討が必要である。

### V. 要 約

本研究では、足関節可動域に筋腱複合体の伸長性や筋力、性差、年齢が影響を及ぼすという仮説を立て、測定を行った。被検者は185名の健常な中・高齢者(女性116名,男性69名;48歳~86歳)であった。足関節を一定のトルクで背屈方向に回転したときの受動背屈角度を計測した。超音波法により腓腹筋内側頭の遠位筋腱移行部の移動から筋線維伸長を計測し、関節角度変化から推定した全筋長変化からアキレス腱伸長を推定した。また、最大随意等尺性足底屈・背屈トルク、被検者が最大努力で背屈動作を行ったときの足関節角度(能動背屈角度)、下腿前部・後部の筋厚を計測した。

男女とも、受動背屈角度と下腿後部の筋厚との間には有意な負の相関関係が認められた。受動背屈角度と受動背屈時の筋線維伸長およびアキレス腱伸長との間に比例傾向がみられた。筋厚、筋力、筋厚当たりの筋力は男女とも年齢と負の相関関係が存在した。受動背屈角度は女性が男性よりも有意に大きく、また高齢の被検者ほど小さくなる傾向であったが、能動背屈角度は男女差および年齢との間に有意な相関関係はみられなかった。

以上の結果から、仮説は検証され、以下の結論が導かれた。すなわち、

- 1) 受動背屈角度には伸長される筋群の伸長抵抗性が影響を及ぼし、これには筋量や筋腱複合体(特に腱組織)の力学的性質が影響する。女性は男性よりも受動背屈角度が大きく、男女とも加齢によって低下する。
- 2) 能動背屈角度は伸長される筋群の伸長抵抗性に加えて、それを伸長する筋群の筋力が影響を及ぼす。女性の場合、筋力発揮能力が低い、受動伸長組織が少ないために男性と同様の能動背屈角度を達成できる。同様の機序を通じて、能動背屈角度には加齢の影響が少ない。

本原著に用いた研究成果の一部は、平成11~16年度に実施される文部科学省科学技術振興調整費(代表

村上和雄)により実施されたものである。ここに記して感謝する。

(受理日 平成15年1月15日)

### 参 考 文 献

- 1) 宮下充正編著. 一般人・スポーツ選手のための体力診断システム. ソニー企業, 東京, 1986.
- 2) Kawakami, Y., Ichinose, Y., Kubo, K., Ito, M., Fukunaga, T. Architecture of contracting human muscles and its functional significance. *J. Appl. Biomech.*, (2000), **16**, 88-97.
- 3) Alter, M. J. Science of flexibility. Champaign, Human Kinetics, (1996).
- 4) 安部 孝, 福永哲夫. 日本人の体脂肪と筋肉分布. 杏林書院, 東京, (1995), pp. 94-108
- 5) Nicol, C., Komi, P. V. Significance of passively induced stretch reflexes on Achilles tendon force enhancement. *Muscle Nerve*, (1998), **21**, 1546-1548.
- 6) Grieve, D. W., Pheasant, S., Cavanagh, P. R. Prediction of gastrocnemius length from knee and ankle joint posture. In: *Biomechanics VI-A*, edited by Asmussen, E. and Jorgensen, K. Baltimore, University Park Press, (1978), pp. 405-413.
- 7) 小田俊明, 千野謙太郎, 栗原俊之, 川上泰雄, 金久博昭, 福永哲夫. 足関節における柔軟性と下腿三頭筋の機能的・形態的特性との関係. *トレーニング科学*, (2002), **13**, 157-166.
- 8) Muraoka, T., Muramatsu, T., Takeshita, D., Kawakami, Y., Fukunaga, T. Length change of human gastrocnemius aponeurosis and tendon during passive joint motion. *Cells Tissues Organs*, (2002), **171**, 260-268.
- 9) Ito, M., Kawakami, Y., Ichinose, Y., Fukashiro, S., Fukunaga T. Nonisometric behavior of fascicles during isometric contractions of a human muscle. *J. Appl. Physiol.*, (1998), **85**, 1230-1235.
- 10) Winter, E. M., Brookes, F. B. C. Electromechanical response times and muscle elasticity in men and women. *Eur. J. Appl. Physiol.*, (1991), **63**, 124-128.
- 11) Kawakami, Y., Ichinose, Y., and Fukunaga, T. Architectural and functional features of human triceps surae muscles during contraction. *J. Appl. Physiol.*, (1998), **85**, 398-404.
- 12) Gajdosik, R. L., Vander Linden, D. W., Williams, A. K. Influence of age on length and passive elastic stiffness characteristics of the calf muscle-tendon unit in women. *Phys. Ther.*, (1999), **79**, 827-838.
- 13) Nakagawa, Y., Majima, T., Nagashima, K. Effect of ageing on ultrastructure of slow and fast skeletal muscle tendon in rabbit Achilles tendons. *Acta Physiol. Scand.*, (1994), **152**, 307-313.
- 14) Zimmerman, S. D., McCormick, R. J., Vadlamudi, R. K., Thomas, D. P. Age and training alter collagen characteristics in fast- and slow-twitch rat limb muscle. *J. Appl. Physiol.*, (1993), **75**, 1670-1674.
- 15) Blough, E. R., Linderman, J. K. Lack of skeletal muscle hypertrophy in very aged male Fischer 344 × Brown Norway rats. *J. Appl. Physiol.*, (2000), **88**: 1265-1270.
- 16) Kent-Braun, J. A., Ng, A. V., Young, K. Skeletal muscle contractile and noncontractile components in young and older women and men. *J. Appl. Physiol.*, (2000), **88**, 662-668.
- 17) Sipila, S., Suominen, H. Ultrasound imaging of the quadriceps muscle in elderly athletes and untrained men. *Muscle Nerve*, (1991) **14**, 527-533.