

加齢に伴う筋厚, 羽状角および筋束長の変化

久保啓太郎 東 香寿美 金久博昭
久野譜也 福永哲夫CHANGES IN MUSCLE THICKNESS, PENNATION ANGLE AND
FASCICLE LENGTH WITH AGING

KEITARO KUBO, KAZUMI AZUMA, HIROAKI KANEHISA, SHINYA KUNO and TETSUO FUKUNAGA

Abstract

The influences of age on muscle architectural characteristics, i. e., muscle thickness, pennation angle, fascicle length, were studied in 121 men and 229 women aged 17 to 85 yrs. The subjects were divided into three age groups (younger : 17-39 yrs, middle-aged : 40-59 yrs, elderly : 60-85 yrs) for both genders. Muscle thickness and pennation angle of the vastus lateralis (VL), medial gastrocnemius (MG), and long head of triceps brachii (TB) muscles were measured using B-mode ultrasonography, and fascicle length was estimated. In all age groups, men had significantly greater relative muscle thickness (to limb length) in VL and TB than women, but not in MG. Relative muscle thickness of VL was significantly lower in elderly than in younger and middle-aged subjects. However, the corresponding differences in MG and TB were insignificant. The pennation angle of VL was significantly lower in elderly than in younger and middle-aged subjects, although there were no significant differences in pennation angles of MG and TB among the three groups. These results suggest that the decrease in thickness of vastus lateralis muscle with aging is significant, but not significant for medial gastrocnemius and triceps brachii muscles.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 2003, 52 Suppl : 119~126)

key word : pennation, fascicle, muscle thickness, ultrasonograph

I. 緒 言

加齢に伴う筋の形態や機能の変化については多くの報告がある。その中で、筋の形態的な変化については、生理的な萎縮による筋の横断面積の減少、速筋線維の選択的な横断面積の減少、及び筋線維数の減少が報告されている¹⁻³⁾。さらに、Young et al.^{4,5)}は、筋横断面積あたりの筋力が男性では高齢者群が若年者群よりも低いものの、女性にはそのような年齢差がみられないことを示している。最近、Lynch et al.⁶⁾は、単位筋量あたりの筋力は、性及び年齢などの影響を受けることを示唆している。しかし、加齢に伴う筋横断面積あたりの筋力の低下及びその性差については、神経系、筋線維タイプ、筋形状の影響などが考えられるが^{7,8)}、その詳細なメカニズムについては不明

である。

一方、ヒト体肢筋の大部分は羽状筋であり、これらの筋においては筋線維(筋束)が筋の長軸方向(力発揮方向)に対してある角度(羽状角)をもって腱組織に付着している。Kawakami et al.^{9,10)}は、超音波Bモード法での測定結果から、肥大した筋は羽状角が大きく、また筋力トレーニングによる筋の肥大は羽状角の増加と筋横断面積あたりの筋力の低下をもたらすことを報告している。さらに、筋束長は筋の短縮速度を決定する重要な因子であると考えられるが^{11,12)}、筋肥大に伴い筋束長が増加することが横断的な研究から明らかにされている¹³⁾。しかしながら、逆の適応として、加齢による筋萎縮に伴い羽状角や筋束長に減少が生じるのかについては明らかにされていない。さらに、男性が女性に比して筋厚や筋横断面積において高

い値を示すことは周知の事実であるが, 羽状角や筋束長の性差に関する報告はごくわずかしみられない^{14,15)}.

そこで本研究では, 若年齢群, 中年年齢群及び高年齢群の男女における筋厚, 羽状角及び筋束長を比較することにより, これら筋形状に及ぼす年齢の影響について性差との関連から検討することを目的とした。

II. 方 法

A. 被検者

被検者は, 日常定期的な運動を行っていない健康な男女350名であった。本研究では性及び年齢を基準にして, 被検者を男女別々に若年齢群(17~39歳), 中年年齢群(40~59歳)及び高年齢群(60~85歳)の6群に分類した。各群の身体的特徴は表1に示した。各被検者にはあらかじめ研究の目的, 方法, 実験に伴う危険性を説明し, 書面によって実験前に実験参加についての同意を得た。なお, 本研究は東京大学大学院生命環境科学系倫理委員会の承認を得た。

B. 筋厚及び羽状角の測定

Bモード超音波診断装置(アロカ社製, SSD-500)を用いて, 先行研究^{9,14)}と同様な方法により, 外側広筋(VL), 腓腹筋内側頭(MG), 上腕三頭筋長頭(TB)の筋厚と羽状角を測定した。測定部位はそれぞれ大腿長(大転子から膝窩皺)の50%, 下腿長(膝窩から脛骨外果)の近位30%, 上腕長(肩峰から上腕骨外側上顆)の近位60%であ

り, その部位で最も筋厚が厚くなる部位(筋腹付近)を測定した。測定に先立ち, 皮膚面にペンでマーキングを施した。皮膚に接触する超音波探触子(7.5 MHz)面には超音波用ゼリーを塗布し, 超音波の伝導性を高めるとともに, 皮膚を圧迫することによる筋の変形が生じないように配慮した。測定に際し, 被検者は立位姿勢で, リラックスした状態を保ち上肢及び下肢に力を入れないようにした。得られた組織横断像において, 皮下脂肪と各筋の境界と各筋が接する筋(中間広筋, ヒラメ筋, 上腕三頭筋内側頭)までの距離を筋厚として計測した。羽状角は, 縦断像を用い, それぞれの筋の深部腱膜と筋束とのなす角として分析した。筋厚及び羽状角の測定値の再現性については別途確認した¹⁶⁾。

C. 筋束長の推定

先行研究^{11,14)}に基づき, 各筋について筋厚と羽状角から以下の式を用いて筋束長を推定した。

$$\text{筋束長} = \text{筋厚} \cdot \sin(\text{羽状角})^{-1}$$

D. 統計

各測定項目の値はすべて平均±標準偏差で示した。各測定項目間の関係は相関分析により検討し, ピアソンの相関係数を求めた。各群間の比較には, 一元配置の分散分析を行い, 要因に有意な効果が認められた場合には, Scheffe's post hoc test を用いて各群間の有意性の検定を行った。いずれも危険率は5%未満($p < 0.05$)を有意水準とした。

Table 1. Physical characteristics of subjects. Mean(SD)

	Younger (17-39 yr)		Middle (40-59 yr)		Older (60-85 yr)	
	Men (N = 71)	Women (N = 47)	Men (N = 35)	Women (N = 38)	Men (N = 54)	Women (N = 144)
Age (yr)	28.9 (5.9)	30.0 (5.8)	49.1 (6.6) #	50.2 (5.0) #	69.5 (4.2) #	68.0 (5.3) #
Height (cm)	172 (5.6)	160 (5.7) *	168 (5.1)	155 (4.9) **	161 (5.0) #	150 (5.6) **
Body mass (kg)	63.7 (9.3)	52.2 (5.7) *	64.8 (7.8)	53.2 (7.1) *	60.4 (6.1) #	54.0 (7.5) *
Upper arm length (cm)	31.6 (1.6)	29.0 (1.5) *	30.9 (1.1)	28.9 (1.3) *	30.4 (1.4) #	28.8 (1.3) *
Thigh length (cm)	39.9 (2.0)	37.0 (2.1) *	38.5 (2.2) #	35.0 (1.6) **	36.4 (1.9) #	33.9 (2.0) **
Lower leg length (cm)	39.3 (1.8)	35.9 (1.6) *	37.4 (1.8) #	34.3 (1.7) **	35.4 (1.7) #	33.1 (1.6) **

* significant different from men

significant different from younger

\$ significant different from middle

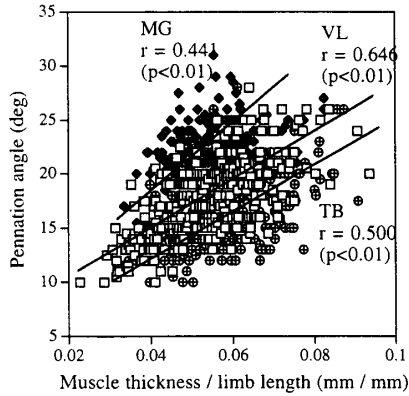


Figure 1. Relationships between relative muscle thickness (to limb length) and pennation angle. □; vastus lateralis (VL), ◆; medial gastrocnemius (MG), ◎; triceps brachii (TB)

III. 結 果

筋厚と羽状角の間には有意な正の相関関係が認められ(VL; $r=0.757$, MG; $r=0.513$, TB; $r=0.589$), これは筋厚を体肢長当たり正規化しても同様であった(図1).

図2は, 各群における筋厚を示したものである。すべての年齢群で男性が女性よりも有意に高い値を示した。VL及びMGについては, 男女ともに高年齢群が他の2群よりも有意に低い値を示した。TBについては, 男女ともに加齢による低下はみられなかった。

図3は, 各群における体肢長あたりの筋厚を示したものである。VLについては, 若年齢群及び

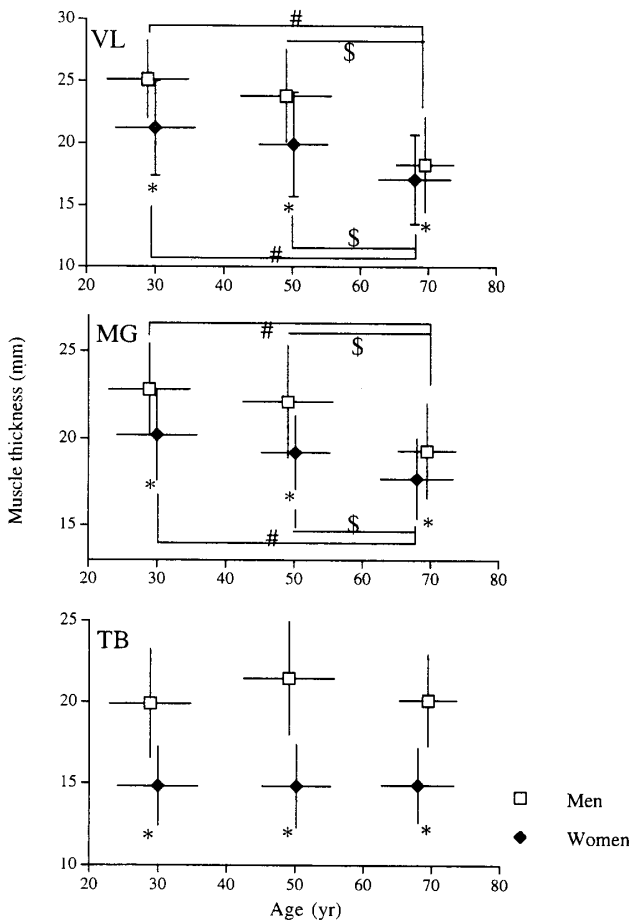


Figure 2. Relationships between age and muscle thickness in vastus lateralis (VL), medial gastrocnemius (MG) and triceps brachii (TB) muscles. *significant different from men #significant different from younger \$significant different from middle

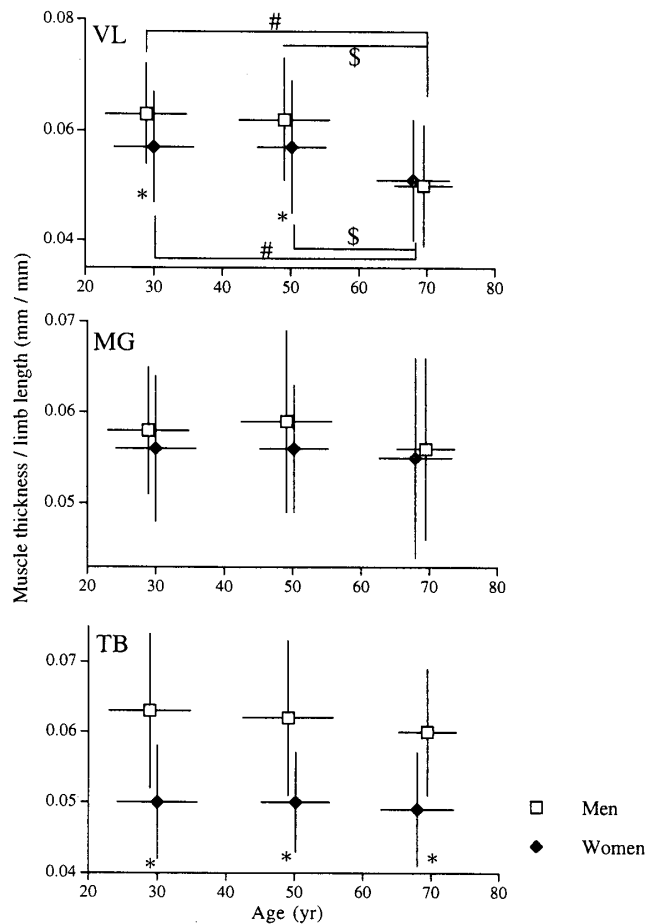


Figure 3. Relationships between age and relative muscle thickness (to limb length) in vastus lateralis (VL), medial gastrocnemius (MG) and triceps brachii (TB) muscles. *significant different from men #significant different from younger \$significant different from middle

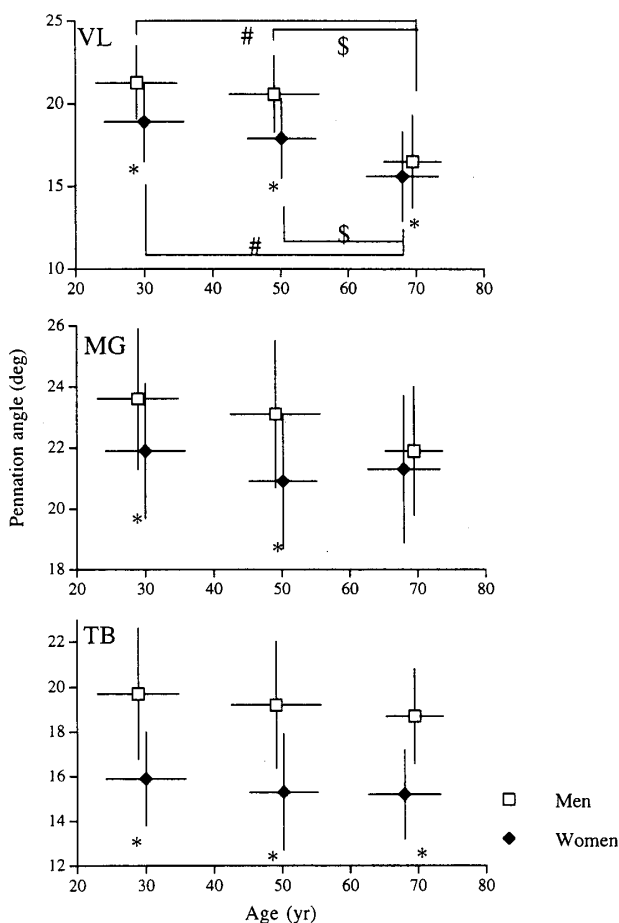


Figure 4. Relationships between age and pennation angle in vastus lateralis (VL), medial gastrocnemius (MG) and triceps brachii (TB) muscles.
 * significant different from men
 # significant different from younger
 \$ significant different from middle

中年齢群で男性が女性よりも高い値を示した。さらに、男女ともに高齢群が他の2群よりも有意に低い値を示した。MGについては、性及び年齢による有意な差は認められなかった。TBについては、加齢に伴う筋厚の低下は認められなかったものの、すべての年齢群で男性が女性よりも有意に高い値を示した。

図4は、各群における羽状角を示したものである。VLについては、すべての年齢群で男性が女性よりも有意に高い値を示した。さらに、男女ともに高齢群が他の2群よりも有意に低い値を示した。MGについては、若年齢群及び中年齢群において、男性が女性よりも有意に高い値を示した。しかし、加齢に伴う低下はみられなかった。TB

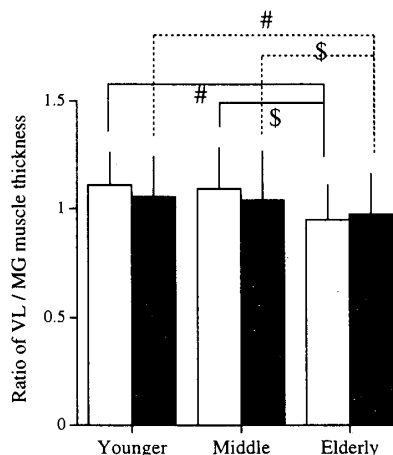


Figure 5. Ratio of muscle thickness of vastus lateralis (VL) to that of medial gastrocnemius (MG) in men (open) and women (closed).
 # significant different from younger
 \$ significant different from middle

については、加齢による低下は認められなかったものの、すべての年齢群で男性が女性よりも有意に高い値を示した。

図5は、MG筋厚に対するVL筋厚の比を各群について示したものである。すべての年齢群で性差は認められなかった。しかし、男女ともに高齢年齢群が他の2群よりも有意に低い値を示した。

表2は、各群における筋束長及び体肢長あたりの筋束長を示したものである。筋束長については、若年齢群では男性が女性よりも有意に大きな値を示した。中年齢群ではTBのみ、高齢年齢群ではMGとTBでのみ男性が女性よりも有意に大きな値を示した。体肢長あたりの筋束長は、VLにおいて女性が男性よりも長い傾向が認められ、若年齢群および高齢年齢群で有意であった(若年齢群; $p=0.048$, 中年齢群; $p=0.109$, 高齢年齢群; $p=0.028$)。MGについても同様の傾向が認められたが、統計的に有意な差にまでは至らなかった(若年齢群; $p=0.108$, 中年齢群; $p=0.121$, 高齢年齢群; $p=0.098$)。TBについては、すべての年齢群で体肢長あたりの筋束長に性差は認められなかった。また、3つの筋で体肢長あたりの筋束長には、年齢による差も認められなかった。

IV. 考 察

本研究では、筋厚、羽状角および筋束長におけ

Table 2. Fascicle length of six groups. Mean (SD)

	Younger (17-39 yr)		Middle (40-59 yr)		Older (60-85 yr)		
	Men (N = 71)	Women (N = 47)	Men (N = 35)	Women (N = 38)	Men (N = 54)	Women (N = 144)	
Fascicle length (mm)	VL	69.3 (7.7)	66.9 (10.9) *	67.3 (10.1)	68.5 (11.9)	64.7 (10.5) #§	63.6 (10.0)
	MG	57.5 (8.6)	54.3 (6.8) *	56.8 (9.1)	54.6 (8.2)	52.0 (7.1) #§	48.9 (6.0) *#§
	TB	59.4 (9.2)	52.4 (6.6) *	59.1 (9.0)	52.6 (8.2) *	57.5 (8.8)	52.1 (9.5) *
Fascicle length / limb length (mm/mm)	VL	0.174 (0.021)	0.183 (0.030) *	0.176 (0.031)	0.186 (0.034)	0.179 (0.033)	0.188 (0.033) *
	MG	0.147 (0.022)	0.151 (0.019)	0.153 (0.027)	0.160 (0.027)	0.147 (0.020)	0.153 (0.020)
	TB	0.188 (0.030)	0.184 (0.026)	0.191 (0.031)	0.185 (0.030)	0.190 (0.029)	0.182 (0.034)

* significant different from men

significant different from younger

§ significant different from middle

る年齢の影響を性差との関連で検討した。その結果、筋厚及び羽状角における加齢に伴う低下は外側広筋において顕著であること、外側広筋と腓腹筋内側頭の体肢長あたりの筋束長は、いずれの年齢群においても女性が男性よりも長い傾向を示すことが明らかとなった。

筋横断面積や筋厚が加齢に伴い減少することはよく知られた事実である¹⁻³⁾。本研究でも同様に、VL と MG の筋厚には加齢に伴う低下が認められ、これまでの先行研究の結果を支持した(図2)。しかし、体肢長あたりの筋厚では、VL が加齢に伴い低下する傾向を示すものの、MG のそれには年齢による差がみられなかった。先行研究では、多くの場合に筋横断面積や筋厚については「絶対値」が用いられている¹⁻³⁾。しかし、高年齢群の筋横断面積や筋厚が若年齢群よりも低い値を示す原因として、身長、体重及び体肢長などの影響が考えられる。実際に、本研究の3つの年齢群においても、大腿長と下腿長には有意な差が認められた(表1)。同様に、多くの先行研究においても、身長や体肢長の身体的特徴で高年齢群が若年齢群よりも有意に低いことが示されている¹⁻³⁾。さらに本研究では、筋厚と体肢長との間に有意な正の相関関係が認められた(VL ; $r=0.442$, MG ; $r=0.467$, TB ; $r=0.337$)。従って、筋横断面積や筋厚における加齢に伴う変化を検討する際、身長や体肢長などの影響を考慮する必要があると考えられる。

一方、VL の体肢長あたりの筋厚は、高年齢群が他の2群よりも有意に低い値を示したものの、若年齢群と中年年齢群との間には有意な差は認めら

れなかった。福永と金久¹⁷⁾は加齢による筋横断面積の変化に関して、20歳代から50歳代までの間では筋横断面積の明らかな年齢差は存在せず、それ以降に減少が顕著になったことを報告している。Laesson¹⁸⁾は、11~70歳の男性114名を対象に大腿四頭筋の最大筋力を測定し、筋力は30歳までは増大し、その後50歳までは変化がなく一定で、50歳を越えると低下がみられたと報告している。この他にも、筋横断面積及び最大筋力の加齢に伴う低下は60歳代から顕著であるとする報告は多く、本研究で得られたVLにおける筋厚の加齢低下の様相は、これまでの先行研究の結果と一致するものと言える。

また、TB 筋厚には年齢による差がみられなかった。船渡と福永¹⁹⁾は、身体各部位における加齢に伴う筋厚の変化について、上肢に比して下肢における筋厚の低下が著しいことを示している。筋力についても、下肢に比して上肢における加齢低下が非常に小さいことが示されている²⁰⁾。このような部位差の要因については明らかにされていないが、加齢に伴う日常生活における体重支持運動(歩行、走行、階段昇降など)の減少、すなわち下肢の使用頻度の低下が一因ではないかと考えられる²¹⁾。この点に関しては、今後の検討課題としたい。

さらに、MG 筋厚に対するVL 筋厚の比が、高年齢群が他の2群よりも有意に低い値を示した(図5)。この結果は、下腿三頭筋における加齢低下は大腿四頭筋に比して小さいことを示している。すなわち、上述のように上肢に比して下肢の筋群における加齢低下が著しく、さらに下肢筋群

の中でも膝伸筋群において顕著であると言える。この原因としては、以下の2つのことが考えられる。1つ目の理由として、日常生活における活動レベルが大腿と下腿で異なることが挙げられる。特に、移動手段としての歩行中において、大腿四頭筋における相対的な活動レベルが下腿三頭筋よりも低い可能性が考えられる^{22,23)}。実際に、Ericson et al.²²⁾は、歩行中の筋電図積分値を等尺性最大筋力(MVC)発揮時の値で正規化して、下肢筋群の相対的な筋活動レベルを比較したところ、下腿三頭筋の活動レベル(40%MVC)が大腿四頭筋(5~15%MVC)よりも高いことを報告している。2つ目の理由としては、大腿四頭筋と下腿三頭筋におけるトレーナビリティの相違が考えられる。幾つかの先行研究により、筋力トレーニングによる筋力及び筋量の増加の程度が大腿四頭筋に比して下腿三頭筋は小さいことが示唆されている^{24,25)}。Weiss et al.²⁵⁾は、8週間の高強度トレーニングにより、下腿三頭筋の筋力が約13%増加したものの筋量の増加はみられなかったことを示している。同様に我々は、12週間の筋力トレーニングにより、最大筋力及び筋体積の増加率が、大腿四頭筋では33%と7.5%であったのに対し、下腿三頭筋では18%と3%であったことを報告している^{24,26)}。このようなトレーニングに対する両筋群の適応の差が、仮に加齢に伴う萎縮という過程についてもあてはまるとすれば、VLとMGの筋厚における加齢変化の違いを説明する要因の一つとして、両筋群間のトレーナビリティの違いが含まれることになろう。

羽状筋においては、筋束は筋の長軸方向(力の発揮方向)に対してある角度(羽状角)をもって腱組織に付着している。筋束が発揮した力のうち、筋の長軸方向に対する成分が関節の回転モーメントの大きさを決定する。それゆえ、この羽状角は羽状筋の力発揮特性に影響を及ぼす因子として重要な役割を果たすと考えられる。本研究では、測定した3筋すべてにおいて筋厚と羽状角の間に有意な正の相関関係が認められた(図1)。Kawakami et al.⁹⁾及びAbe et al.¹⁴⁾は、それぞれTB及びMGを対象にした研究において、筋厚と羽状角の

間に有意な相関関係がみられたことを報告している。これらの結果は、筋量(筋厚)の増加は羽状角の増加を伴うことを示唆するものである。本研究では、高年齢群と他の2群との間に、VLの羽状角についてのみ有意な差が認められ、MGとTBには認められなかった。この結果は、上述した体肢長で正規化した筋厚と同様の結果であった。すなわち、体肢長に対する相対的な筋量(筋厚)が同程度であれば、羽状角には年齢差が存在しないと考えられる。一方、羽状角における性差については、体肢長あたりの筋厚とは異なる結果が得られた。すなわち、男女における筋の形状は必ずしも相似形ではなく、構造的に差異を伴うことが示唆された。この点に関しては、筋束長の性差として後述する。

横断的な研究結果¹³⁾によると、筋肥大に伴い筋束長が増加することが示されている。従って、その逆の現象として、加齢による筋萎縮は筋束長の低下を伴うことが予想された。しかし、本研究の結果において、体肢長あたりの筋束長には、年齢群による差が認められなかった。筋束長/体肢長比は筋線維長/筋長比を反映していると考えられ²⁷⁾、筋群間及び個人間で差がないと考えられてきた^{28,29)}。一方、我々は先行研究³⁰⁾において、発育期児童における筋束長/体肢長比が成人よりも低いことから、発育期には筋の量的な増加のみならず、筋の構造も変化していることを示す結果を得ている。それに対し、本研究の結果は、筋束長/体肢長比が成人以降の年代においてはほぼ一定であることを示している。しかしながら、筋束長と体肢長との間には有意な相関関係は認められず(VL; $r=0.098$, MG; $r=0.107$, TB; $r=0.020$)、個人差の大きいことが窺えた。

一方、VLとMGの体肢長あたりの筋束長において、女性が男性よりも長い傾向を示した。同様に、Chow et al.¹⁵⁾は女性の下腿三頭筋の筋束長が男性よりも長いことを報告している。その原因については明らかではないが、下肢筋群(VLとMG)の体肢長あたりの筋束長が長い女性では、筋束長に対する腱長の比が低いことが考えられる。筋束長は筋の収縮速度を決定する構造的因子

である²⁷⁾。さらに, 筋束長に対する腱長の比はサルコメアの短縮量の指標と考えられている³¹⁾。すなわち, この比が高ければ高いほど, 筋・腱複合体のコンプライアンスが高く, サルコメアの短縮量が大きいことになる。つまり, 腱長/筋束長比が低いと予想される女性は弾性エネルギーの再利用が行われる伸張-短縮サイクル運動において, 不利な筋の形状を有しているのかもしれない。しかしながら, この点に関しては被検者数を増やし, 今後詳細に検討していきたい。

以上の結果, 外側広筋については, 高年齢群における体肢長あたりの筋厚及び羽状角ともに若年齢群及び中年年齢群よりも有意に低く, 腓腹筋内側頭と上腕三頭筋については年齢による差はみられなかった。このような加齢に伴う筋形状の変化の部位差は, 日常生活における使用頻度およびトレーナビリテイの相違を反映していることが示唆された。さらに, いずれの年齢群においても外側広筋と腓腹筋内側頭の筋束長において女性が男性よりも長い傾向がみられた。

V. 要 約

本研究では, 筋厚, 羽状角, 筋線維長に及ぼす年齢の影響を性差との関連で検討することを目的とした。外側広筋(VL), 腓腹筋内側頭(MG)及び上腕三頭筋長頭(TB)の筋束と羽状角を超音波Bモード法により測定し, 筋線維長を推定した。VLについては, 体肢長あたりの筋厚及び羽状角について高年齢群が他の2群よりも有意に低い値を示した。MG及びTBについては, 体肢長あたりの筋厚及び羽状角ともに年齢による差はみられなかった。体肢長あたりの筋線維長については, 年齢による差は認められなかったものの, VLとMGにおいて女性が男性よりも長い傾向がみられた。このような加齢に伴う筋形状の変化の部位差は, 日常生活における使用頻度やトレーナビリテイの相違を反映していることが示唆された。

謝 辞

本研究は平成11年度科学技術庁・科学技術振興調整費による研究の一部である。

(受理日 平成15年3月20日)

引 用 文 献

- 1) Hakkinen, K. and Hakkinen, A. Muscle cross-sectional area, force production and relaxation characteristics in women at different ages. *Eur. J. Appl. Physiol.* (1991), **62**, 410-414.
- 2) Lexell, J., Taylor, C. C. and Sjostrom, M. What is the cause of the aging atrophy? Total number, size and proportion of different fiber types studied in whole vastus lateralis muscle from 15- to 83 year-old men. *J. Neurol. Sci.* (1988), **84**, 275-294.
- 3) 佐藤広徳, 三浦 朗, 佐藤美紀子, 佐藤陽彦, 福場良之. 日本人成人男女259名における大腿部筋群横断面積と筋力の年齢変化について. *体力科学*, (1999), **48**, 353-364.
- 4) Young, A., Stokes, M. and Crowe, M. Size and strength of the quadriceps muscles of old and young women. *Eur. J. Clin. Invest.* (1984), **14**, 282-287.
- 5) Young, A., Stokes M. and Crowe, M. The size and strength of the quadriceps muscles of old and young men. *Clin. Physiol.* (1985), **5**, 145-154.
- 6) Lynch, N. A., Metter, E. J., Lindle, R. S., Fozard, J. L., Tobin, J. D., Roy, T. A., Fleg, J. L. and Hurley, B. F. Muscle quality. I. Age-associated differences between arm and leg muscle groups. *J. Appl. Physiol.* (1999), **86**, 188-194.
- 7) Brown WF (1988) Methods for estimating numbers of motor units in biceps-brachialis muscles and losses of motor units with aging. *Muscle Nerve* **11** : 423-432
- 8) Moritani, T. and deVries, H. A. Potential for gross muscle hypertrophy in older men. *J. Gerontol.* (1980), **35**, 672-682.
- 9) Kawakami, Y., Abe, T. and Fukunaga, T. Muscle-fiber pennation angles are greater in hypertrophied than in normal muscles. *J. Appl. Physiol.* (1993), **74**, 2740-2744.
- 10) Kawakami, Y., Abe, T., Kuno, S. and Fukunaga, T. Training-induced changes in muscle architecture and specific tension. *Eur. J. Appl. Physiol.* (1995), **72**, 37-43.
- 11) Kumagai, K., Abe, T., Brechue, W. F., Ryushi, T., Takano, S. and Mizuno, M. Sprint performance is related to muscle fascicle length in male 100-m sprinters. *J. Appl. Physiol.* (2000), **88**, 811-816.
- 12) Sacks, R. D. and Roy, R. R. Architecture of the hind limb muscles of cats: Functional significance. *J. Morphol.* (1982), **173**, 185-195.
- 13) Kearns, C. F., Abe, T. and Brechue, W. F. Muscle enlargement in sumo wrestlers includes increased muscle fascicle length. *Eur. J. Appl. Physiol.* (2001), **83**, 289-296.
- 14) Abe, T., Brechue, W. F., Fujita, S. and Brown, J. B. Gender differences in FFM accumulation and architectural characteristics of muscle. *Med. Sci. Sports Exerc.* (1998), **30**, 1066-1070.
- 15) Chow, R. S., Medri, M. K., Martin, D. C., Leekam, R.

- N., Agur, A. M. and McKee, N. H. Sonographic studies of human soleus and gastrocnemius muscle architecture: gender variability. *Eur. J. Appl. Physiol.* (2000), **82**, 236-244.
- 16) Kubo, K., Kanehisa, H., Azuma, K., Ishizu, M., Kuno, S., Okada, M. and Fukunaga, T. Muscle architectural characteristics in women aged 20-79 years. *Med. Sci. Sports Exerc.* (2003), **35**, 39-44.
- 17) 福永哲夫, 金久博昭. 日本人の体肢組成. 朝倉書店, 1990.
- 18) Laesson, L. Morphological and functional characteristics of the aging skeletal muscle in man. *Acta Physiol. Scand. Suppl* (1978), **457**, 1-36.
- 19) 船渡和男, 福永哲夫. 運動実践の筋力に及ぼす効果. *J. J. Sports Sci.* (1995), **14**, 61-65.
- 20) Bembien, M. G., Massey, B. H., Bembien, D. A., Misner, J. E. and Boileau, R. A. Isometric muscle force production as a function of age in healthy 20-74-yr-old men. *Med. Sci. Sports Exerc.* (1991), **11**, 1302-1310.
- 21) Janssen, I., Heymsfield, S. B., Wang, Z. and Ross, R. Skeletal muscle mass and distribution in 468 men and women aged 18-88 yr. *J. Appl. Physiol.* (2000), **89**, 81-88.
- 22) Ericson, M. O., Nisell, R. and Ekholm, J. Quantified electromyography of lower-limb muscles during level walking. *Scand. J. Rehab. Med.* (1986), **18**, 159-163.
- 23) Winter, D. A. and Yack, H. J. EMG profiles during normal human walking: stride-to-stride and inter-subject variability. *Elect. Clin. Neuro.* (1987), **67**, 402-411.
- 24) Kubo, K., Kanehisa, H. and Fukunaga, T. Effects of resistance and stretching training programs on the viscoelastic properties of tendon structures in vivo. *J. Physiol.* (2002), **538**, 219-226.
- 25) Weiss, L. W., Clark, F. C. and Howard, D. G. Effects of heavy-resistance triceps surae muscle training on strength and muscularity of men and women. *Physical Therapy* (1996), **68**, 208-213.
- 26) Kubo, K., Kanehisa, H., Fukunaga, T. Effects of different duration isometric contractions on tendon stiffness of human quadriceps muscles. *J. Physiol.* (2001), **536**, 649-655.
- 27) Lieber, R. L. *Skeletal muscle structure and function.* Williams & Wilkins, (1992), 111-157.
- 28) Friedrich, J. A. and Brand, R. A. Muscle fiber architecture in the human lower limb. *J. Biomech.* (1990), **23**, 91-95.
- 29) Wickiewicz, T. L., Roy, R. R., Powell, P. L. and Edgerton, V. R. Muscle architecture of human lower limb. *Clin. Orthop. Relat. Res.* (1983), **179**, 317-325.
- 30) Kubo, K., Kanehisa, H., Kawakami, Y. and Fukunaga, T. Growth changes in the elastic properties of human tendon structures. *Int.J.Sports Med* (2001), **22**, 138-143.
- 31) Zajac, F. E. Muscle and tendon : properties, models, scaling and application to biomechanics and motor control. *CRC Crit. Rev. Biomed. Eng.* (1989), **17**, 359-411.