

筋群間にみられる筋厚と筋線維角度の相互関係

川上泰雄・福永哲夫

東京大学教養学部

Comparison of the Relationships between Muscle Layer Thicknesses and Muscle Fiber Angles among Different Muscles

Yasuo Kawakami and Tetsuo Fukunaga

Dept. of Sports Sciences, College of Arts and Sciences,
The University of Tokyo

Abstract

Architectural parameters were investigated *in vivo* using ultrasound and a comparison was made for various muscles. For fifty - three women and men (including untrained individuals and bodybuilders) with mean age of 26 years, muscle layer thicknesses (MT) and muscle fiber angles (FA) were measured for three muscles, i.e., triceps brachii (TB), vastus lateralis (VL), and medial gastrocnemius (MG). The MT and FA were defined as the distance between the fat / muscle and muscle / muscle (or muscle / bone) interfaces, and the angles between the interspaces of fascicles and the deep aponeurosis, respectively. Significant positive correlations were observed between MT and FA in all muscles, demonstrating the occurrence of changes in muscle architectures in hypertrophied muscles. Muscle fiber length (FL), estimated by MT and FA, were 10.0 ± 1.8 μ (TB), 8.4 ± 1.2 μ (VL), and 6.2 ± 0.9 μ (MG), which were similar to those previously reported on human cadavers. In TB, the increase in MT tended to be smaller than that of FA, which suggest the existence of the upper limit of muscle enlargement, possibly by architectural factors that limit fiber hypertrophy.

緒言

骨格筋中の羽状筋の場合、筋の長軸方向に対して筋線維が一定の角度(羽状角)をもって配列している。筋線維が発揮する力のうち、筋の長軸方向の成分のみが有効に腱にはたらく。つまり、羽状角は筋の力発揮特性に影響を及ぼす重要な因子である⁶⁾。

これまで、人間の筋の羽状角を報告したものは屍体の実測結果に基づいている^{2, 3, 4, 9, 10)}が、多くの場合屍体は高齢者であり、加齢による筋萎縮が生じているうえ、薬品による筋固定にもなってさらに萎縮が生じることから、生体内の状態と等しいという保証はない。これに対して、筆者らは超音波法を用いて、羽状角を *in vivo* に測定する手法を開発し、測定方法の精度および妥当性について報告した^{6, 7)}。Bモード超音波法により、骨や腱、さらには、筋中に存在する筋束を画像化することができる。図1に、人間の外側広筋の超音波縦断画像の一例を示すが、大腿骨や腱膜の縦断面や筋束のエコーが明瞭に画像化されていることがわかる。

本研究では、羽状角と筋厚との相互関係をいく

つかの筋で比較することを目的とした。また、これらのパラメータから筋線維長を推定することも試みた。得られた結果より、筋による形態的特性の違いや筋肥大の影響について考察を加えた。

方法

被験者

被験者は健康な男女53名(平均年齢26歳)であり、定期的に身体運動を行っていない者から高度に鍛錬されたボディビルダーまでを含んでいた。表1に被験者の身体的特徴を示す。各被験者には実験前に実験参加についての同意を得た。

筋厚および羽状角の測定

Bモード超音波装置(アロカ社製SSD-500)を用い、上腕三頭筋長頭(TB)、外側広筋(VL)、腓腹筋内側頭(MG)について、筋厚(Muscle layer thickness)と羽状角(Pennation angle)を測定した。TBの筋厚は、組織横断像において皮下脂肪とTBの境界とTBと上腕骨の境界との間の距離とし、VL、MGについてはそれぞれが接する筋(中間広筋、ヒラメ筋)までの距離とした(図2)。測定部位はそれぞれ上腕長の遠位60%、大腿長の50%、下腿長の遠位30%であ

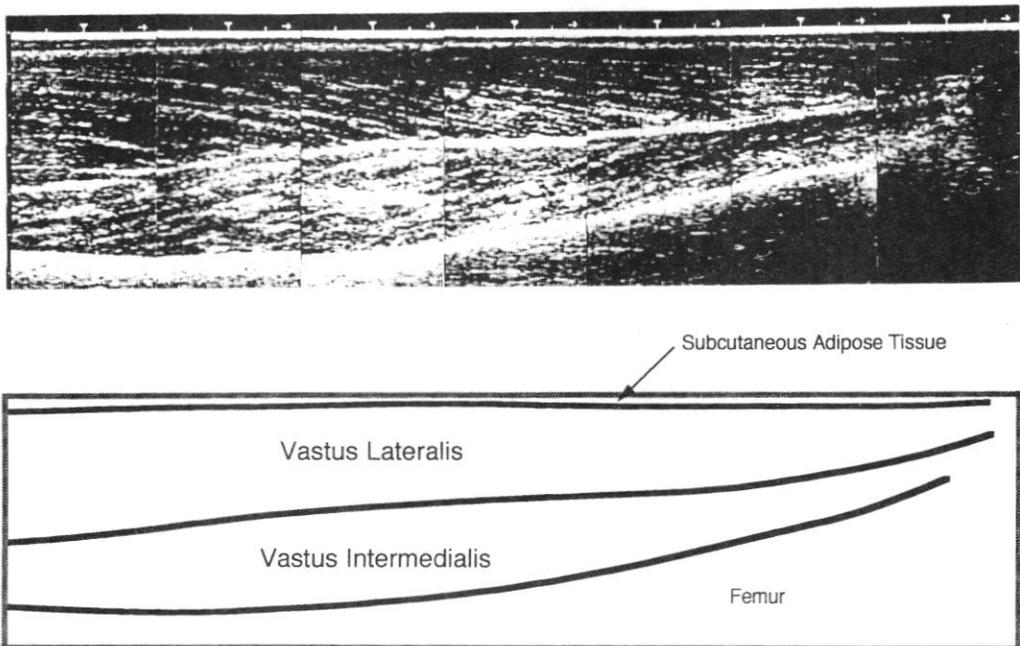


Fig. 1 A longitudinal section of the anterior thigh. The knee is at the right end.

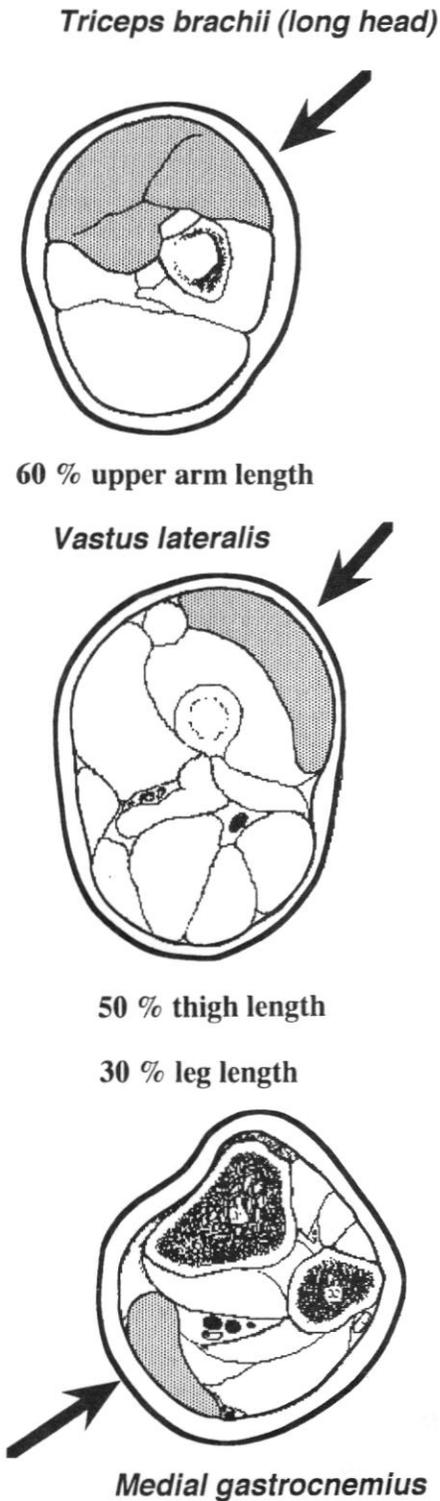


Fig. 2 Measurement positions of three muscles.

	Mean±SD	Range
Age (years)	26±9	15~51
Height (cm)	168.1±7.3	150.8~183.3
Mass (kg)	72.6±12.9	46.0~98.9
Circumference (cm)		
Upperarm	33.0±4.9	23.8~44.5
Thigh	56.0±5.2	45.7~67.5
Leg	38.0±3.3	31.4~45.0

Table 1. Physical characteristics of subjects.

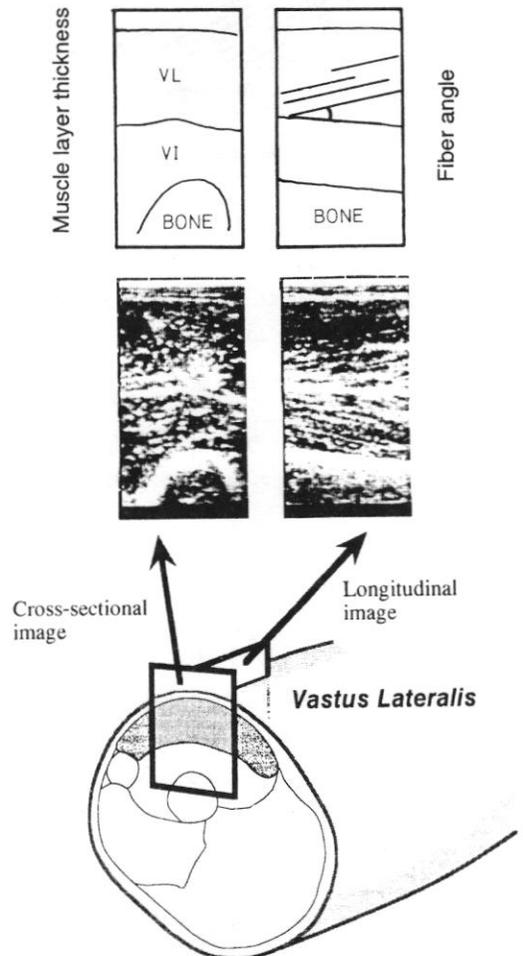


Fig. 3 Determination of muscle layer thickness and pennation (fiber) angles for m. vastus lateralis.

り、その部位で最も筋厚が大きくなる部位（筋腹付近）を測定した。羽状角については、縦断像を用い、それぞれの筋（上腕三頭筋については長頭）の深部腱膜と筋束とのなす角とした。図3に外側広筋について超音波画像からの測定例を示す。測定の再現性については別途確認した⁶⁾。

筋線維長の推定

図4に示したモデルに基づき、各筋について筋厚(MT)と羽状角(θ)から以下の式を用いて筋線維長(MT)を推定した。

$$FL = MT / \sin(\theta)$$

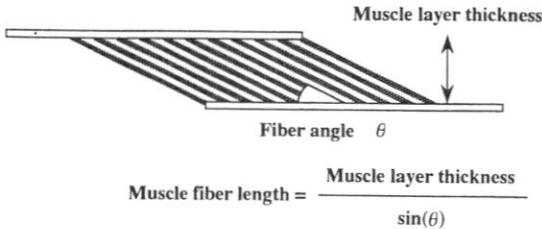


Fig. 4 A model of a pennate muscle. Muscle fiber length was estimated by muscle layer thickness divided by the sine of fiber angles.

結果

筋厚と筋線維角度との間には有意な正の相関が認められ、これは筋厚を体肢長当たりで正規化しても同様であった。相関係数は、TBが $r=0.87$ 、VLが $r=0.68$ 、MGが $r=0.58$ となり、すべて1%水準で有意であった。TBは羽状角、筋厚の分布がともに他の2筋よりも大きな範囲にわたっていた。

筋線維長は、TBが $10.0 \pm 1.8\text{cm}$ 、VLが $8.4 \pm 1.2\text{cm}$ 、MGが $6.2 \pm 0.9\text{cm}$ となった。屍体のデータをみても、TBが 10.2cm ³⁾、VLが $7.5 \sim 8.4\text{cm}$ ^{4, 10)}、MGが $3.2 \sim 4.8\text{cm}$ ^{4, 9, 10)} であり、TBとVLについては屍体の筋の実測による先行研究とほぼ等しい値が得られ、MGについては本研究の方が若干大きいという結果であった。図5にこれらのデータを平均値と標準偏差で示した。

図6に筋厚に対する筋線維長と羽状角を3筋群について平均値と標準偏差で示した。筋厚と筋線維長の間には比例関係が認められるが、筋厚、筋線

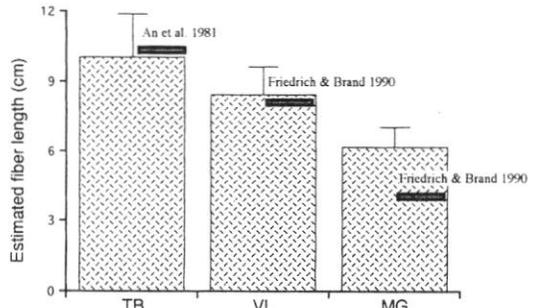


Fig. 5 Estimated fiber length of three muscles. Data on human cadavers reported previously are also shown.

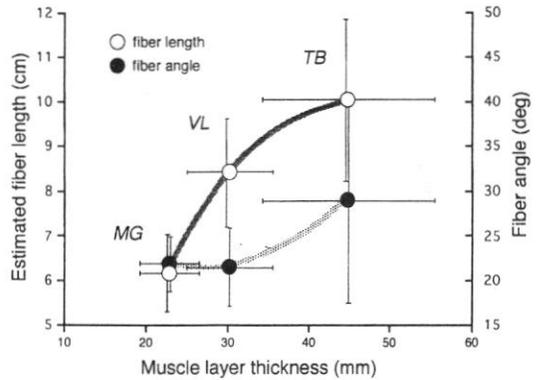


Fig. 6 Relationships between muscle layer thickness and estimated fiber length, and muscle layer thickness and fiber angles.

維長ともに最も大きいTBでは筋厚の増加に対する筋線維長の増加が少ない傾向であった。また、羽状角については、TBにおいて急激な増加がみられた。羽状角と筋厚（体肢長当たり）について個々のデータを図7に示すが、TBにおいて、著しい肥大筋では羽状角の増加に対して筋厚が比例して増加しないという、いわゆる頭打ち現象が認められた。

論議

本研究の被験者の大部分は青年期にある者であった（標準偏差は9歳）が、こども（15歳～）や壮年者（～50歳）も含まれていた。ただし、発育期にある被験者は身長伸びからみた発育期スバ

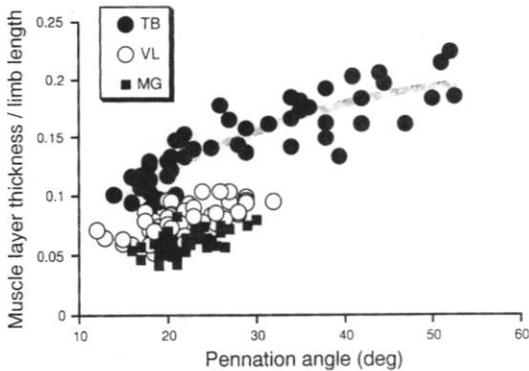


Fig. 7 A relationship between fiber angles and muscle thickness.

Muscle thickness was normalized by the length of the limb (upper arm, thigh, and leg for TB, VL, and MG, respectively).

ートをすでに過ぎた者であり、また、壮年被験者は全て高度に鍛錬されボディビルダーであった。したがって、発育や加齢の影響はそれほど大きくはないのではないかと考えられる。発育や加齢が筋のアーキテクチャに及ぼす影響も興味深いテーマであり、今後の検討課題である。

本研究で測定した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ことは、肥大した筋では筋線維角度の増加（筋アーキテクチャの変化）が生じていることを示している。これは上腕三頭筋について同様の比例関係を報告したKawakamiら⁶⁾と同様の結果であり、羽状筋における一般的な傾向のようである。羽状角の増加は、はじめに述べたように筋線維の力の伝達効率という観点からみると不利であるが、限られた面積により多くのcontractile materialを配置できる¹⁾ので、結果的には大きな生理学的断面積を得ることができ、力の損失は起こらないと考えられる。

本研究の方法で推定した筋線維長は、TBとVLについては屍体を用いた先行研究と同様の値が得られたことから、実際の筋線維長を反映したものであると思われる。MGについては本研究の方が若干大きい結果であったが、これは、測定時の関節角度の影響ではないかと考えられる。すなわ

ち、本研究では被験者は立位姿勢をとっており、膝関節は完全伸展、足関節は90度を維持していた。一方、屍体は多くの場合足関節底屈位で固定されているために、筋線維長が立位に比べて短い状態になっている。このことが結果の差異を生み出したのではないだろうか。これらの推測を確かめるためには、屍体筋について本研究の方法で筋線維長を推定し、実測結果と比べてみる必要がある、今後の検討課題である。また、TBについては、著しく肥大した筋では筋線維が湾曲して配列することが確認されている⁶⁾ので、本研究の方法で筋線維長を推定すると、肥大筋においては筋線維長を短く見積ってしまう可能性がある。このことが図5や図6で示されたような分布のばらつき（大きな標準偏差）を生み出したのかもしれない。

近年、筋線維は腱から腱へつながっているのではなく途中で終わっているものも存在することが明らかにされている^{5, 8)}ので、屍体の先行研究のデータを含めて、腱から腱までつながっているという仮定のもとに求められている筋線維長は、実際の値よりも大きい可能性があることから、これらは「筋束長」というような呼び方にしたほうが正確かもしれない。ただし、途中で終わっている筋線維も他の筋線維と直列につながっており、機能的には1本の筋線維と同様のふるまいをする⁵⁾ことから、本研究で求めたものは「機能的筋線維長; functional muscle-fiber length」という意味をもつと思われる。

筋厚と羽状角は正の相関を示すが、それぞれの分布の大きさは筋により異なり、TBが最も大きな分布を示していた。これは、筋線維長と筋の形態的特性に依存しているのではないかと考えられる。つまり、TBは最も筋線維長が長く、筋線維長/筋長比が高いことから、筋厚方向の変化幅を大きく変化させることができ、結果的に羽状角も大きくなり得るのではないだろうか。逆に、MGのように筋線維長が短い筋では、筋厚方向に変化が少なくなり、大きな構造変化をとる余裕がないのではないかと考えられる。ただし、TBの場合でも、図7に示したように筋厚の増加に頭打ちが認められたことは、筋長や筋線維長などの構造上の制限要因に基づく筋肥大の限界を示唆している。試みに図7の中でTBの分布を2次回帰し、上限

を求めると羽状角は65度、筋厚/体肢長比は0.22となる。筋厚でいうと61mmとなり、このあたりがTBにおける筋肥大の上限ではないかと思われる。

本研究の結果、羽状筋においては筋肥大によって筋厚と羽状角の双方が増加し、その増加の程度は筋によって異なることが明らかになった。これは筋長や筋線維長などの構造的な要因に基づくものと思われた。また、これらの要因によって筋の肥大の程度やその上限が決定されるのではないかと考えられた。さらに、超音波法を用いて筋線維長を推定可能であることが示された。

文 献

- 1) Alexander, R. M. and Vernon, A. : The dimensions of knee and ankle muscles and the forces they exert. *J. Human Mov. Studies*, 1:115-123, 1957.
- 2) Amis, A. A., et al. : Muscle strengths and musculo-skeletal geometry of the upper limb. *Engng. Med.*, 8: 41-48, 1979.
- 3) An, K. N., et al. : Muscles across the elbow joint: a biomechanical analysis. *J. Biomech.*, 14:659-669, 1981.
- 4) Friedrich, J. A. and Brand, R. A. : Muscle fiber architecture in the human lower limb. *J. Biomech.*, 23 :91-95, 1990.
- 5) Hijikata, T., et al. : Functional combination of tapering profiles and overlapping arrangements in nonspanning skeletal muscle fibers terminating intrafascicularly. *Anat. Rec.*, 236:602-610, 1993.
- 6) Kawakami, Y., et al. : Muscle-fiber pennation angles are greater in hypertrophied than in normal muscles. *J. Appl. Physiol.*, 74:2740-2744, 1993.
- 7) 川上泰雄ほか：筋厚と筋線維角度に基づいた羽状筋のアーキテクチャモデル—第一報—。東京大学教養学部体育学紀要, 27:9-13, 1993.
- 8) Loeb, G. E., et al. : Distribution and innervation of short, interdigitated muscle fibers in parallel-fibered muscles of the cat hindlimb. *J. Morphol.*, 191:1-15, 1987.
- 9) Wickiewicz, T. L., et al. : Muscle architecture of the human lower limb. *Clin. Orthopaed. Rel. Res.*, 179: 275-283, 1983.
- 10) Yamaguchi, G. T., et al. : A survey of human musculotendon actuator parameters. In : *Multiple muscle systems : Biomechanics and movement organization*, Winters, J. M. and Woo, S. L-Y. (eds.), Springer-Verlag, New York, 1990, pp.717-773.