

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1報—

川上泰雄・安部 孝\*・福永哲夫

東京大学教養学部  
\* 東京都立大学

Architectural model of pennate muscle based on muscle  
thickness and fiber angle

Yasuo Kawakami, Takashi Abe\* and Tetsuo Fukunaga

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

Abstract

Muscle thicknesses and muscle-fiber pennation angles were measured using ultrasonography to investigate *in vivo* muscle architecture of m. vastus lateralis. From the image of a B-mode ultrasonography, muscle thickness (MT) and fiber angles (ANG) were determined, the former as the distance between the fat/muscle and muscle/bone interfaces and the latter as the angles between the interspaces of fascicles of vastus lateralis and the deep aponeurosis. Both MTs and ANGs varied with longitudinal positions of the vastus lateralis, ranging from 12 to 23 mm for MTs and from 6 to 12° for ANGs, and were proportional to each other. Based on these observations, a tentative model was proposed for the of muscle architecture of vastus lateralis.

## はじめに

羽状筋においては、筋線維は筋の長軸方向（力発揮方向）に対してある角度をもって腱に付着している。筋線維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ので、この筋線維の角度（pennation angle）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。これまで、いくつかの筋について、筋線維角度が報告されている<sup>1, 10)</sup>が、これらの報告は屍体の筋を解剖した実測結果に基づいている。しかし、屍体は加齢や筋固定作業に伴って萎縮しており<sup>3)</sup>、生体における筋の構造を完全に再現しているかどうか確かであるとはいえない。また、屍体筋における筋線維角度は図1に示したような幾何学モデルに基づいて測定されており<sup>1)</sup>、このモデルの妥当性も不明である。

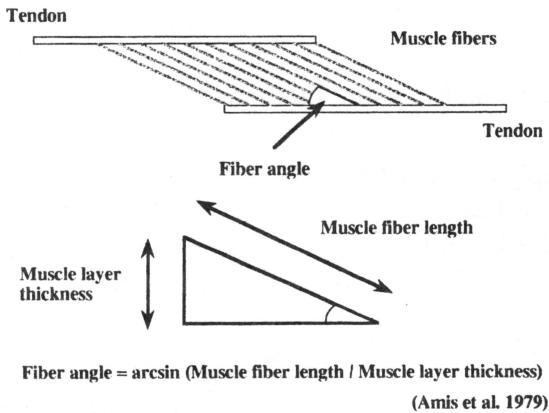


Fig.1 Determination of fiber angle in human cadavers. (Amis et al. 1979)<sup>1)</sup>

近年、超音波やMRIなどを利用した組織断層撮影から筋横断面積や筋厚を測定しようという試みがなされているが、最近になって、さらに筋線維の角度を超音波法によって求めようとする試みが始められており<sup>4, 6, 9)</sup>、筋の *in vivo* な形態的特性が明らかになりつつある。本研究では、超音波法によって筋厚と筋線維角度を筋の様々な部位で測定し、羽状筋内の筋線維の *in vivo* なアーキテクチャ（配列様相）について考察することを目的とした。

## 方法

被験者は健常な成人男子1名（年齢35歳、身長172cm、体重64kg）であった。被験者の同意を得た後、大腿部の組織断層像をBモード超音波診断装置（アロカ社製SSD-500）を用いて撮影した。測定部位は、大腿長の50%の部位で、大腿の周径に沿って超音波装置のプロープを大腿骨に対して直角になるように横向きに当て、組織の横断面像を得た。画像から大腿直筋と外側広筋の境界および外側広筋とハムストリングスの境界を確認し、その中間点を基準として、図2に示したような測定部位を決定した。外側広筋の周径に沿って3列、それぞれの列につき筋の長軸方向に沿って5点、合計15点となった。列はハムストリングス側からRow1, Row2, Row3とした。基準点はRow2の3番目、すなわち測定部位の中心であった。なお、外側広筋はこれらの15点を完全に含んでいることを画像から確認した。

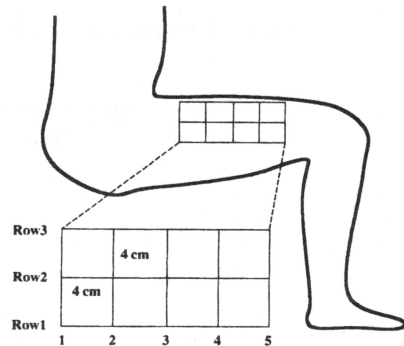


Fig.2 Positions for the measurement of muscle thickness and fiber angle of m. vastus lateralis.

15の部位の横断面像から、外側広筋の筋厚を測定した。また、各部位について、プロープを外側広筋の長軸方向に沿って当てることで、組織の縦断面像を得た。外側広筋と考えられるエコーの中に平行した縦縞が観察されたが（図3）、これは筋束に平行した組合組織のエコーであることをあらかじめ屍体の体肢における実測から確認した<sup>6)</sup>。この縦縞と大腿直筋の深部腱膜とのなす角度を求め、筋線維角度とした。なお、測定の再現性についても確認済みである<sup>6)</sup>。また、プロープが結合

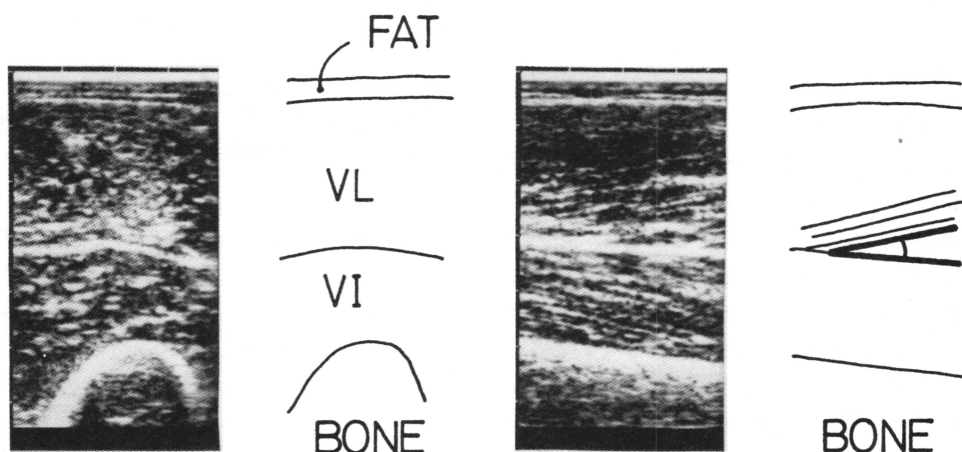


Fig. 3 Ultrasonic images of m. vastus lateralis (left, cross - section ; right, sagittal section). Muscle thickness was determined from the cross - sectional image as the distance between fat/muscle interface and deep aponeurosis. Fiber angle was determined from the sagittally sectioned image as the angle between fascicles and the deep aponeurosis as indicated in the right drawing. Fat ; subcutaneous fat ; VL : m. vastus lateralis, VI : m. vastus intermedius; BONE : femur.

組織の水平方向と平行になっていないとエコーを得ることができないことから、筋線維の走行に対して斜めにプローブを当てることによって生ずる角度のずれは起こりえないと考えられた。

15の部位それぞれについて、筋厚および筋線維角度を測定した。得られたデータから、両者の関係および筋内における分布状態について検討した。

### 結果

表1に、各測定部位における筋厚および筋線維角度の測定値を示した。3列とも、筋厚および筋線維角度は一定ではなく、筋厚は12~23mm、筋線維角度は6~12度の範囲で変動しており、中央部で筋厚および筋線維角度が最も高くなる傾向がみられた。

筋厚と筋線維角度との関係を図4に示す。両者の間には $r=0.788$  ( $p<0.01$ ) の高い相関関係が認められた。

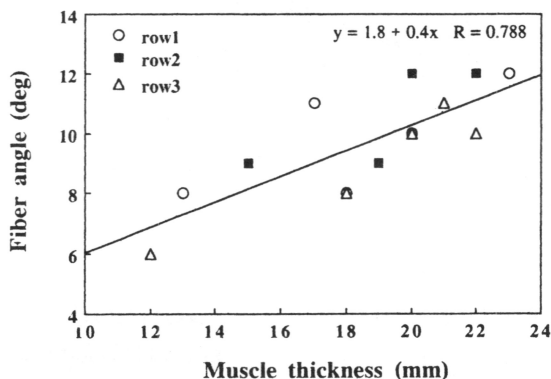
筋厚、筋線維角度それぞれの測定値を部位に対してプロットしたのが図5である。両者とも類似した分布傾向を示し、遠位部(各列の4~5の部位)に行くに従って減少した。

Table.1 Muscle thickness and fiber angle at the measurement positions. See fig.2 for the positions.

Longitudinal position	Row1		Row2		Row3	
	MT	ANG	MT	ANG	MT	ANG
1	18	8	19	9	20	10
2	20	10	20	12	21	11
3	23	12	22	12	22	10
4	17	11	20	10	18	8
5	13	8	15	9	12	6

MT: Muscle thickness (mm)  
ANG: Fiber angle (deg)

Fig.4 Relationship between muscle thickness and fiber angle.



## 論 議

本研究の結果、筋厚同様、筋線維角度も筋内で均一ではなく、部位によっては2倍近くの変動を示すことが明らかになった。このことは、図1に示したようなモデル<sup>1)</sup>は筋のアーキテクチャを表わすものとして適当ではないことを示している。

筋厚が遠位になるほど減少することは、筋腹付近で筋厚が最大になることを示しており、羽状筋も紡錘筋と同様な形状になっていることがわかる。筋線維角度もこれに呼応した変化をしていることから、筋腹維は筋の全長で平行に並んでいるというこれまでの報告<sup>1, 3, 10)</sup>は再考の余地があると思われる。

筋線維長は筋内で比較的一定しているという先行研究<sup>3)</sup>を考慮にいれて、本研究の結果に基づいて羽状筋のアーキテクチャのモデルを構築すると、図6のようになると考えられる。筋線維長が一定であり、直線的に配列しているとすれば、筋厚の大きな筋腹付近で筋線維角度は図のように大きくならなければならないが、本研究の結果はこのモデル

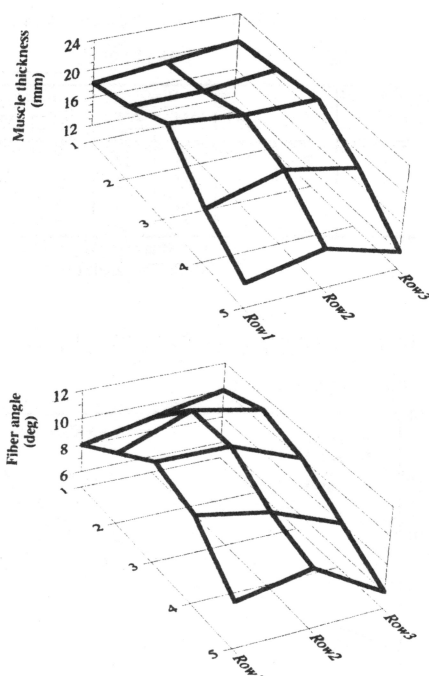


Fig. 5 3-D presentation of muscle thickness (upper) and fiber angles (lower) at the measurement positions.

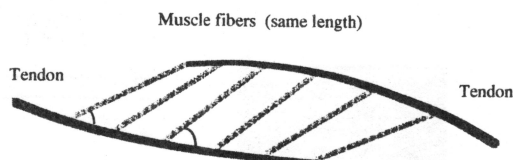


Fig. 6 A tentative model for the architecture of m. vastus lateralis. The model is based on the assumption that muscle fibers of the same length run from tendon to tendon throughout the length of the muscle.

を支持している。ただし、これはあくまで1断面のみの2次元的なモデルであり、測定部位の列によって筋厚と筋線維角度の分布が変化していることから、3次元的にみると筋のアーキテクチャはこのモデルよりもさらに複雑なものとなるであろう。

筋の生理的横断面積 (PCSA) は次式によって計算される。<sup>10)</sup>

$PCSA = \text{筋線維の横断面積の合計} \times \cos \alpha$   
ここで、 $\alpha$  は筋線維角度である。 $\cos \alpha$  は、筋線維の横断面積が筋の長軸方向の成分として筋力発揮に貢献する分を考慮している項であるが、本研究で示されたモデルのように筋線維が配列しているとする、上式の右辺は筋の部位に応じて変化するものであり、単一の角度を用いてしまうと誤差の原因となる。筋腹付近の角度を用いるとPCSAを過小評価してしまうことになる。ただし、筋線維角度は上式では余弦項としてはたらいている。例えば外側広筋の場合に本研究で得られた角度を用いるとすると、6~12度の範囲で2倍近くの変動を示したとしても、余弦をとるとそれぞれ0.995, 0.978となりPCSAの計算におよぼす変化はそれほど大きくはないと考えられる。

最近になって、筋線維は腱から腱へとつながっているだけでなく、途中で終わっているものも存在することがわかってきており<sup>8)</sup>、筋のアーキテクチャはこれまでに示されてきたほど単純ではないようである。また、筋の力発揮特性にはこのほかにも、筋線維組成や神経系などの因子が影響を及ぼしており<sup>7)</sup>、これらを含めた筋モデルを構築することが今後の課題である。