

羽状筋のアーキテクチャモデル—第2報—

川上泰雄・市之瀬慈歩・久野譜也・福永哲夫

東京大学教養学部体育科

An architectural model of a pennate muscle
Yasuo Kawakami, Yoshiho Ichinose,
Shin-ya Kuno and Tetsuo Fukunaga

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

Abstract

Ultrasound and MRI techniques were used to analyse three-dimensional arrangement of fascicles in m. medial gastrocnemius (MG) in vivo. For one male subject, images of both transverse and longitudinal sections were obtained using ultrasound at various sites in MG. In each cross-sectional image, muscle thickness was measured as the distance between the subcutaneous adipose tissue-muscle interface and the deep aponeurosis. From the serial cross-sectional images of the lower leg, outlines of MG were traced and the muscle was reconstructed three-dimensionally. Based on this three-dimensional information, longitudinal ultrasonic images along the length of the muscle were also reconstructed and the lengths of fascicles were measured. From these parameters, physiological cross-sectional areas (PCSA) of MG were determined. The arrangement of fascicles were not parallel and fascicle angles against the aponeurosis were greater in the middle belly with larger muscle thickness. The fascicle lengths were almost identical throughout the muscle.

研究目的

第1報（東京大学教養学部体育学紀要27: 9-13）では、超音波法を用いて羽状筋（外側広筋）の筋束配置について検討したが、これはあくまで2次元的な画像に基づくものであり、筋の中央部の縦断面上に配列する筋束のみをとらえたものである。測定部位の筋束に限ってみればこの結果は正しいと考えられるが、実際には、筋は3次元的な外形を有するので、その内部では筋束も3次元的に（単に2次元的な面を平行に重ねただけではなく）配列しているはずである。それ故、筋の形状についてより正確に検討するためには、筋束の3次元配列についての理解を得る必要がある。

先行研究（Wickiewiczら、1983）は筋束長や羽状角が筋内で比較的一定であることを示しているが、厳密に一定の値をとるとは結論しておらず、多少の変動は認めている。筋の形状やその機能的意義は、筋の近位から遠位までの様々な箇所における筋束配列を求めることによって推測することができる。筋内における筋束配列の不均一性に関してはこれまでも報告されている（LiebとPerry、1968; Nariciら、1992; Scottら、1993）。Nariciら（1992）やScottら（1993）は、ヒトの生体筋（大腿の筋群）の形状をMRIを用いて検討し、筋束の方向などを調べている。しかし、筋束の3次元的な配列については、ヒトの生体筋はもちろん、動物の摘出筋においてもまだ明らかになっていない点が多い。本研究では、超音波法とMRI法を用いて腓腹筋の筋束配列をin vivoで調べた。それに加えて、その機能的意義について考察し、より精度の高い生理学的筋横断面積の計算を試みた。

方法

被検者

1名の健常な男性が被検者としての参加に同意した。身体的特徴は年齢が27歳、身長180cm、体重75kgであった。

超音波測定部位の決定

右下腿を測定対象とした。下腿長を測定後、

この30%のレベルをマーキングし、このレベルに平行に、Bモード超音波装置（SSD-500、Aloka、超音波の発振周波数5MHz）を用いて横断画像を確認しながら腓腹筋内側頭の幅（内側頭と外側頭の境界から内側頭の内側端までの距離）を皮膚上から測定した。その幅の中央の部位を通り、腓腹筋内側頭の長軸（近位-遠位）に沿った方向を超音波画像から確認しながらマーキングした。その線を中心線として、その線の内側、外側に平行に2本ずつ、お互いに 2.0×10^{-2} mずつ離して計4本の線をマーキングした。最終的に平行な線が5本引かれたことになる。これらを「列」と表現し、外側から内側に向かって第1列～第5列とした。それぞれの列上に、 2.0×10^{-2} m毎に測定点を8点設定した。このとき、下腿長の30%のレベルが最近位の点から数えて4点目となるようにした。図1にマーキングの概要を示す。総計40点の点がマークされたが、第5列の7番目と8番目の点の下には腓腹筋内側頭が存在しなかったため、測定点は計38点となった。

上述の各測定点において組織横断画像および縦断画像を得た。測定中被検者は立位にて、足関節は底屈・背屈の中間位を維持した。

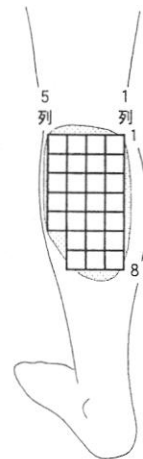


図1 下腿のマーキングの概要

腓腹筋内側頭全体にわたるように、合計38点のポイントを設定した。ポイントは 2.0×10^{-2} mの間隔をとった。

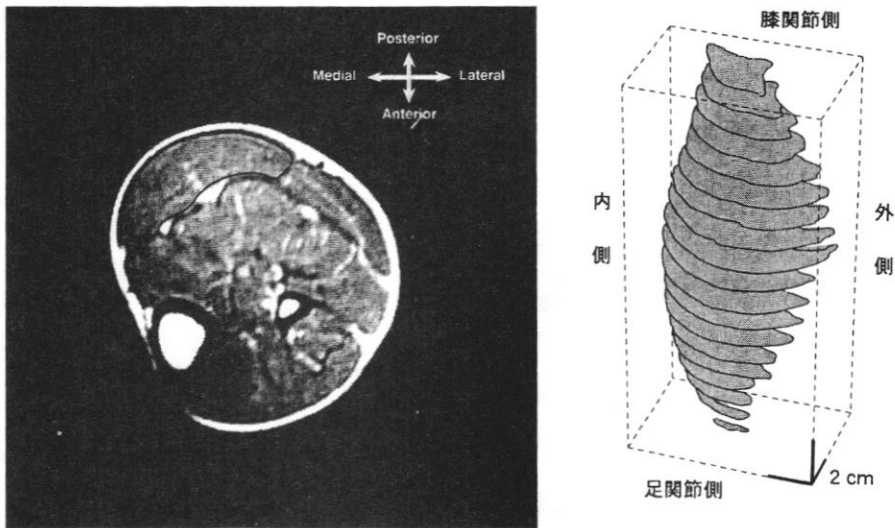


図2 MR画像の1例

左は1部位における下腿の横断面像である。連続横断面像において腓腹筋内側頭をトレースし、3次元構築した(右)。

MR Iによる測定

下腿の連続組織横断面像をMR I (Signal, 5T, GE)を用いて求めた。スライス厚は 1.0×10^{-2} m、スライス間隔は 1.0×10^{-2} m、反復時間は900ミリ秒、エコー時間は20ミリ秒に設定した。撮像は1画面について2回行い、その平均画像を得た。ボディコイル内で被検者は腹臥位をとり、安静状態を保った。足関節は樹脂製の箱とストラップを用いて中間位に固定された。被検者の下腿の下にはスポンジを敷き、圧迫によって筋に変形が生じないように極力配慮した。図2左にMR画像の1部を示す。MR画像はいったんフィルムに焼き付けたのち、スキャナ(GT-3000, エプソン)を用いてパーソナルコンピュータ(Macintosh Centris 660 AV, Apple Computer)に取り込んだ。以下の分析はパーソナルコンピュータ上でソフトウェア(NIH Image, W. Rasbandによるフリーウェア)を用いて行った。

MR画像より、腓腹筋内側頭をMöllerとReif (1993)に従ってトレースし、解剖学的筋横断面積(ACSA)を求めた。皮下脂肪組織と腱組織はトレースの際に除外した。トレースと面積計算は1つの画像について5回ずつ行い、最

大値と最小値を捨て、残る3つの測定値の平均値を各画像におけるACSAとして用いた。3回の測定値の変動係数は全スライス面で0.2~5.1%の範囲であった。筋長は腓腹筋内側頭が描出されている最も近位の画像と最も遠位の画像の間の距離とした。筋体積は全ての連続解剖学的筋横断面積の総和にスライス厚を乗じて求めた。図2右にMR画像より3次元構築した腓腹筋内側頭の外形を示す。

次に、連続MR画像の位置と超音波測定の際のマーキングのレベルを腓骨外顆からの距離を手がかりとして対応させた。さらに、MR画像中の腓腹筋内側頭において、超音波による測定の際の各測定列の位置を同定し、それぞれの列における腓腹筋内側頭の深部腱膜の2次元座標を画像から求めた。各スライスについて同様の測定を行って、スライスの垂直位置を加えた各測定点の深部腱膜の3次元座標を得た。

超音波画像の再構築

各列の各測定点において得られた超音波縦断画像をつなげて、列全体の縦断像を再構築した。このときに、MR画像から求めた各測定点における深部腱膜の3次元座標を用いた。各列につ

いて同様の再構築を行い、腓腹筋内側頭全体としての筋束の3次元配置を調べた。図3に再構築した各列の縦断像(2次元)を示す。

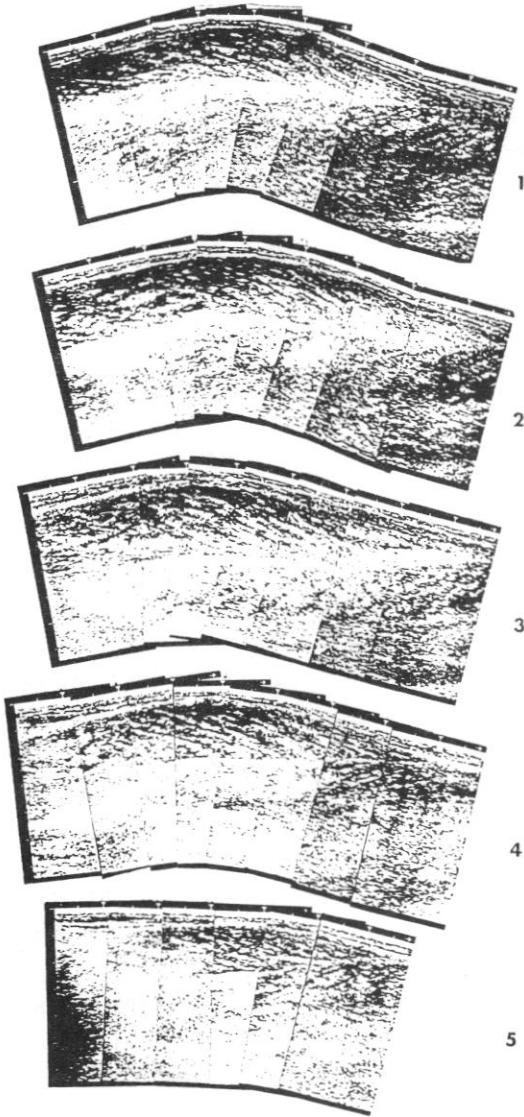


図3 超音波縦断画像
上より第1列～第5列(外側～内側)を示す。左側が近位。各画像中央付近に腓腹筋の深部腱膜が観察される。

計測点の設定および筋束長と羽状角の測定

各列の縦断超音波画像より、腓腹筋内側頭の近位端から遠位端までの間の4箇所計測点を

設定した。4箇所の部位は、下腿長の30%のレベルが2番目となるように、また、隣り合う点が 4.0×10^{-2} mの間隔をもつようにして決定したが、縦断面像において筋束に平行したエコーが識別しにくい場合には若干位置を変更した。これらの点を各列近位より第1～4点としたが、第5列の第4点は腓腹筋内側頭が存在しないため、この列は計測点が3点のみとなった。それぞれの計測点において、腓腹筋内側頭の筋厚を皮下脂肪層と筋層の境界面と深部腱膜までの距離として測定した。また、縦断面像を用いて、深部腱膜と筋束のなす角度を羽状角として測定した。さらに、各計測点の深部腱膜に結合している筋束の結合点とそれが表層腱膜に結合している点の座標、および両点にまたがる筋束長を求めた。

生理学的筋横断面積の計算

腓腹筋内側頭の生理学的筋横断面積(PCSA)を、MRIによって求めた筋体積(VM)と超音波から求めた筋束長(l_F)および羽状角(α)を用いて、以下の2通りの方法で計算した。

$$PCSA_1 = v_M \cdot l_{Fcad} \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

$$PCSA_2 = v_M \cdot l_F \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

ここで、 l と α はそれぞれ、Wickiewiczら(1983)によって報告された筋線維長/筋長比(0.14)に本研究で求めた筋長を乗じて求めた筋線維長と、羽状角の値(15°、筋線維長/筋長比と羽状角はそれぞれ屍体3体の平均値を用いた)を示す。 l_F と α は本研究で求めた全ての測定点の筋束長と羽状角の平均値である。なお、(1)の計算はこれまでの方法(Fukunagaら、1992)に準ずるものであった。

統計分析

各計測点の筋厚と羽状角の間の関係を直線回帰し、相関係数を求めた。相関の有意水準は $P < 0.05$ とした。

結果

図4左に、腓腹筋内側頭における筋厚と羽状角の分布を示した。この図で、右側が外側、手前が遠位である。筋厚は筋腹中央部が厚く、周

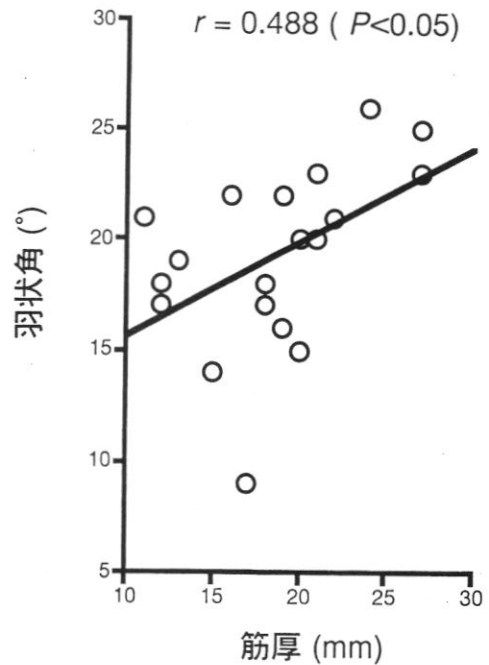
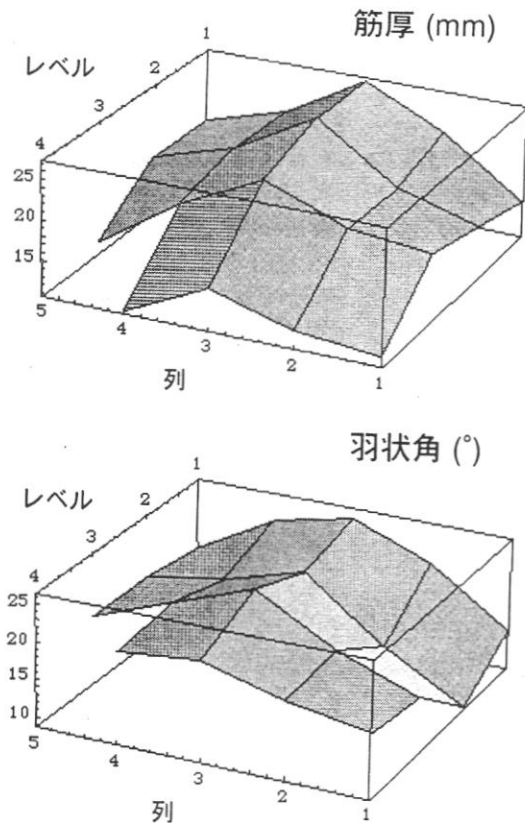


図4 筋厚と羽状角

筋腹中央付近の筋厚が大きく、羽状角も高かった（左）。筋厚と羽状角の間には有意な正の相関関係が認められた（右）。

辺部にいくにしたがって薄くなった。羽状角も筋厚と同様の傾向を示し、各計測点の筋厚と羽状角の間には有意な正の相関関係 ($r = 0.488$, $p < 0.05$) が認められた (図4右)。

図5に示したように、筋束の配置は各列平行ではなく、また、各列においても近位から遠位まで同じ羽状角で筋束は配列していなかった。各計測点で求めた筋束長は $5.1 \pm 0.4 \times 10^{-2} \text{ m}$ であり、変動は少なかった。これは筋厚や羽状角の変動の大きさ(それぞれ $1.9 \pm 0.5 \times 10^{-2} \text{ m}$, $19 \pm 4^\circ$)とは対照的であった。筋長は $2.5 \times 10^{-2} \text{ m}$ であったので、筋束長/筋長比は0.2となった。なお、Wickiewicz (1983) によって報告された筋線維長/筋長比を用いると、筋線維長は $3.5 \times 10^{-2} \text{ m}$ と推定された。

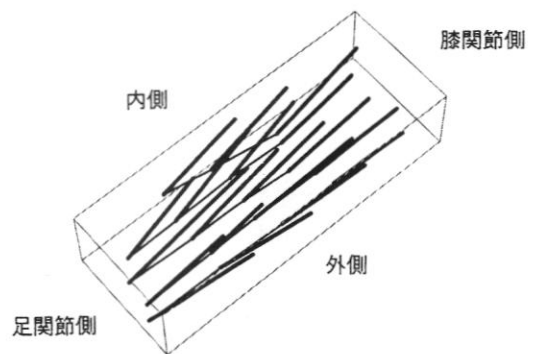


図5 腓腹筋内側頭の筋束配置の模式図
筋束長は全ての部位でほぼ等しかったが、羽状角は異なっていた。

表1に、腓腹筋内側頭の筋体積、最大解剖学的筋横断面積 (ACSA_{max})、PCSAを示す。P

CSAは(1)式と(2)式で大きな違いがみられた。先行研究のうち、屍体を用いたもの(Wickiewiczら、1983)と、生体と屍体のデータを用いたもの(Fukunagaら、1992)についても示したが、屍体のデータのみによるものが筋体積、ACSAmax、PCSAともに小さな値であった。

	本研究	Wickiewiczら	Fukunagaら
		1983	1992
筋体積 ($\times 10^{-4} \text{m}^3$)	2.67	1.42	2.44
ACSAmax ($\times 10^{-5} \text{m}^2$)	2.20	-	1.65
PCSA ₁ ($\times 10^{-5} \text{m}^2$)	7.36	3.24	6.83
PCSA ₂ ($\times 10^{-5} \text{m}^2$)	4.94	-	-

表1 本研究と先行研究における筋形状パラメータ

論議

筋厚と羽状角の間の有意な正の相関関係は、筋厚の厚い部位では羽状角も大きいことを示している。これは、上腕三頭筋における横断的なデータ(Kawakamiら、1993)と類似した傾向であり、筋の内部においても筋厚が厚い部分は羽状角が高く、したがって、多くの収縮要素が配列可能なことを示している。

筋内において筋束がすべて平行に配置しているわけではないという結果は、羽状角が筋内で一定であるという報告(Wickiewiczら、1983)とは異なる。先行研究がどの部位から筋線維を取り出したかについての記述がないので明確ではないが、筋全体にわたって調べていない可能性があり、そのために羽状角の変動が少なかったのではないかと考えられる。また、死体の筋の固定作業にともなう変形の影響も無視できない。

筋束長の均一性は先行研究(Wickiewiczら、1983; FriedrichとBrand, 1990)を指示するものである。したがって、生理学的筋横断面積の計算における同一の筋束長の仮定は妥当であると考えられる。筋束長が一定であるのに対して筋厚に変動が認められるために、羽状角にも変動が観察された。このことは、羽状角は筋線維の配置(packaging)の決定因子であるとするBurkholderら(1994)の結論を追証するものである。筋厚の薄い周辺部羽状角が低いということは、腱膜に対して筋線維の発揮した力の伝達

効率という点では有利である。筋の周縁部で構造上筋厚を厚くできない部分はこのような筋束配置を取ることで少ない筋量をカバーしているのではないかと考えられる。

$5.1 \times 10^{-2} \text{m}$ という筋束長は死体における筋線維長($3.2 \sim 3.9 \times 10^{-2}$: Wickiewiczら、1983; $3.6 \sim 4.2 \times 10^{-2}$: FriedrichとBrand, 1990)よりも大きい。これは、前述のように測定時の関節角度の影響が大きいものと思われる。Wickiewiczら(1983)の求めたように、至適サルコメア長のときの筋束長を求めることができれば彼らの値との比較が可能であるが、本研究からは明らかにはできない。筋線維が筋束内で終わり、筋束長より筋線維長が明らかになっている(RoyとEdgerton, 1992)が、本研究の結果はこのことを反映しているとも考えることもできる。しかし、近位・遠位の腱膜をつないでいるのは筋束であること、また、筋束内で終わり、重なり合っている複数の筋線維は同一運動単位に属すること(土方、1993)を考慮すると、生理学的筋横断面積の計算には筋線維長よりも筋束長を用いる(Burkholderら、1994)べきであると結論できる。

表1に示されたように、死体の測定値に基づいた計算では筋体積を低く見積もる結果となることがわかる。本研究の筋体積は死体の2倍近い値を示している。屍体の筋では加齢や固定作業による萎縮が生じている可能性があり、このことが生体筋との差を生み出したものと考えられる。筋体積測定を生体において行う必要性が指摘される。生理学的筋横断面積は、必要なデータを全て同一被検者のin vivoの値を用いて計算した(2)式の求め方が現在のところ最も正確な値であると考えられる。(1)式の結果との差は筋束長の差に基づくものであるが、これらの結果は生理学的筋横断面積の計算における筋束長の重要性を示している。

筋束長は筋内で比較的一定であったが、羽状角や筋厚が筋内で均一ではないので、筋活動中に全ての筋線維が等しく活動したとしても、腱膜に対して及ぼされる力は場所によって異なると考えられる。本研究の結果を用いて、筋内の力分布について考察する。各測定点の羽状角の

余弦を求めてみると筋内で一定ではなく、筋腹中央部が周辺部に比べて小さかった(図6)。すなわち、各測定点の筋線維が等しく活動したとしても、腱に伝達される力は測定点によって異なり、筋腹中央部が最も少なくなる。このことは逆に、伸張性筋活動において外力で強制的に筋が引き伸ばされるような場合、筋の遠位端付近および周辺部にかかる負荷に比べて中央部の負荷が大きくなることを示しており、伸張性筋活動を原因とする筋損傷に部位差が存在する(KomiとBuskirk, 1972; Armstrong, 1984)のはこのためではないかとも考えられる。

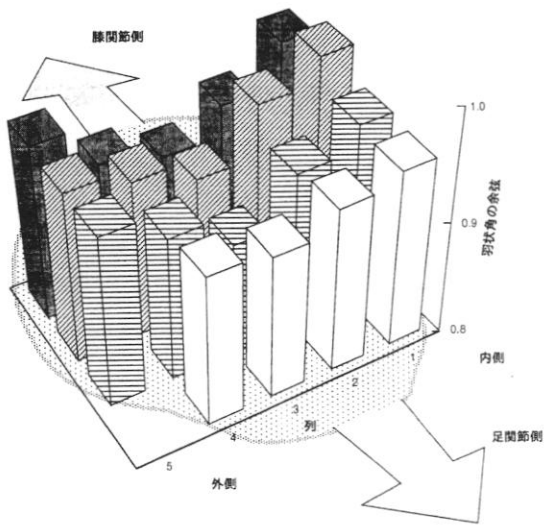


図6 腓腹筋内側頭の各点における腱膜に作用する筋束角法の全弦成分の大きさは筋腹中央部が最も小さく、これに比べると周辺は大きい。

本研究での測定は被検者が安静状態のときのものであり、筋は活動していない。筋活動中の筋束の状態は安静時とは異なっている可能性があり(川上と福永, 1994)、筋活動時の筋束配列に関する検討も今後必要である。

参考文献

1) Armstrong, R. B: Mechanics of exercise-induced delayed onset muscular soreness: a brief review. *Med. Sci. Sports Exerc.* 16: 529-538, 1984.

- 2) Burkholder, T. J., Fingado, B., Baron, S., Lieber, R. L.: Relationship between muscle fiber types and sizes and muscle architectural properties in the mouse hindlimb. *J. Morphol.* 221: 177-190, 1994.
- 3) Friedrich, J. A., and Brand, R. A.: Muscle architecture in the human lower limb. *J. Biomech.* 23:91-95, 1990.
- 4) Fukunaga, T., Roy, R. R., Schellock, F. G., Hodgson, J. A., Day, M. K., Lee, P. L., Kwong-Fu, H. and Edgerton, V. R.: Physiological cross-sectional area of human leg muscles based on magnetic resonance imaging. *Orthopaed. Res.* 10: 926-934, 1992.
- 5) 土方貴雄: 骨格筋における種々の筋線維間連結. *生体の科学*, 44: 59-65, 1993.
- 6) Kawakami, Y., Abe, T. and Fukunaga, T.: Muscle-fiber pennation angles are greater in hypertrophied than in normal muscles. *J. Appl. Physiol.* 74: 2740-2744, 1993.
- 7) 川上泰雄, 福永哲夫: 膝関節角度と外側広筋の筋線維長の関係. 第12回日本バイオメカニクス学会大会論集, 1994 (印刷中).
- 8) Komi, P. V. and Buskirk, E. R.: Effect of eccentric and concentric muscle conditioning on tension and electrical activity of human muscle. *Ergonomics* 15: 417-434, 1972.
- 9) Lieb, F. J. and Perry, J.: Quadriceps function. An anatomical and mechanical study using amputated limbs. *J. Bone Joint Surg.* 50: 1535-1548, 1968.
- 10) Möller, T. B. and Reif, E.: MRI atlas of the musculoskeletal system. Blackwell Scientific Publishers, Oxford, 1993.
- 11) Roy, R. R. and Edgerton, V. R.: Skeletal muscle architecture and performance. In: *Strength and power in sport*, Komi, P. V. (ed), Blackwell Scientific Publications, London, 1992, pp. 115-129.
- 12) Scott, S. H., Engstrom, C. M. and Loeb, G. E.: Morphometry of human thigh muscles. Determination of fascicle architecture by magnetic resonance imaging. *J. Anat.* 182: 249-257, 1993.
- 13) Wickiewicz, T. L., Roy, R. R., Powell, P. L. and Edgerton, V. R.: Muscle architecture of the human lower limb. *Clin. Orthopaed. Rel. Res.* 179: 275-283, 1983.