

<原 著>

MR 画像から求めた大腿四頭筋の筋形態と 等運動性最大膝伸展筋トルクとの関係について

齋藤 昭彦* 丸山 仁司* 新井 正一**
橋本 光康** 金場 敏憲** 岩谷 力***

要 旨

この研究の目的は、MR 画像から 1) 生体の大腿四頭筋全体あるいは個々の筋の各高位における筋断面積および筋容積を求め、臨床応用のための基礎データを供給すること、2) 最大筋断面積や筋容積と、等運動性筋トルクとの関係を検討し、最大断面積、筋容積といった筋形態学的情報から等運動性筋トルクの推定の可能性を探究することであった。

健常大学生20名の MR 画像から右大腿四頭筋の筋断面積および筋容積を求めた結果、大腿四頭筋の最大筋断面積は $43 \pm 12.7 \text{ cm}^2$ 、筋容積は $1055 \pm 353 \text{ cm}^3$ であり、最大筋断面積と筋容積との間には相関係数0.981の高い相関が認められた。また、最大筋断面積、筋容積と、等運動性筋トルクの間にも高い相関が認められ、MR 画像からの形態学的情報である大腿四頭筋の最大筋断面積および筋容積から等運動性筋トルクの推定が可能であった。

キーワード：大腿四頭筋，MRI，等運動性筋トルク

I. はじめに

大腿四頭筋の筋力や筋肥大および筋萎縮の評価は、徒手筋力検査法、ハンドヘルドダイナモメータ、トルクマシンなどの測定機器による筋力測定や大腿周径測定のような形態測定により行われている。筋力測定では患者の努力が不可欠であり、小児や高齢者など検査の意味を解せない場合や意識障害やモチベーション低下により患者の協力が得られない場合、あるいは片麻痺患者の共同運動にみられるように分離運動が不可能な場合には正確な筋力測定を行えない。また、測定可能であった場合でも、筋力測定の結果から大腿四頭筋を構成する各筋の変化は評価できない。

一方、大腿四頭筋の筋肥大や筋萎縮を大腿周径の測定によって評価する方法は、その簡便さから広く用いられているが、大腿周径による体表面上からの形態学的评价では、測定値に皮下脂肪、深部に蓄積する脂肪、大腿骨、神経なども含まれるため、大腿四頭筋の筋肥大や筋萎縮のみを評価することは不可能であり、大腿四頭筋を構成する大腿直筋、内側広筋、外側広筋、中間広筋を個別に評価することもできない。人体の個々

の筋の形態学的研究は、当初剖検例で行われた。^{1) 2)} 剖検例では標本固定処置等に関連したアーチファクト混入の可能性があるが、また、高齢である場合が多く、すでに筋萎縮がみられているものと考えられ³⁾、必ずしも生体の筋の形態学的情報を捉えていなかった。その後、超音波^{4) 5)}やCT scan^{6) 7) 8)}を用いた筋の形態学的评价が行われたが、分解能に限界があり、個々の筋の断面積や筋容積を正確に評価するに至ってはいなかった。

これに対してMRIは放射線被曝がない上に軟部組織分解能にすぐれているため、個々の筋の断面積や筋容積の定量的評価を正確かつ安全に行うことができ、個人内や個人間の分析が可能となった。MR 画像から大腿の筋断面積や筋容積を測定した研究は散在するが、スライス数や被験者数が少なく、大腿四頭筋を構成する筋の生体における形態的特徴の解明は十分とは言えない。

一般に筋の最大筋力は筋断面積と密接に関係することが知られており³⁾、筋の最大断面積を求めることにより潜在的な筋力が推定されることが考えられる。MR

所 属： *国際医療福祉大学 保健学部（理学療法学科）

**国際医療福祉大学 保健学部（放射線・情報科学科）

***東北大学医学部肢体不自由学教室

受 付： 1998年1月12日

表1 被験者の身体的特性

例数	年齢(歳)	身長(cm)	体重(kg)	体容量指数(BMI)
男性 8	21.2±2.4(19~26)	170.4±5.5(164~181)	65.1±8.2(55~79)	22.4±2.0(20~26)
女性 12	21.2±2.3(19~26)	159.9±4.3(154~166)	51.8±6.2(42~61)	20.3±2.6(18~26)
全体 20	21.3±2.6(19~26)	165.1±7.3(154~181)	58.9±9.7(42~79)	21.1±2.5(18~26)

平均±標準偏差 (最小~最大)

画像からの形態学的情報から筋萎縮や筋肥大を評価し、これらの情報からその筋が出力できる筋トルクを推定することは筋力測定を直接的に行えない患者の潜在的筋力を評価する上で有意義であるが、MR 画像からの形態学的情報と等運動性筋トルクとの関連性を包括的に論じた報告はない。

本研究では、MR 画像から大腿四頭筋全体および大腿四頭筋を構成する4筋の各高位における筋断面積の変化および筋容積を求め、さらに最大筋断面積や筋容積と等運動性筋トルクとの関係を検討し、MR 画像から求めた筋形態学的情報から等運動性筋トルクの推定の可能性を探究することを目的とした。

II. 方法

1. 対象

整形外科的疾患ならびに神経疾患の既往のない健常大学生20名(男性8名, 女性12名)を対象とした。対象者はボランティアとして参加し、研究の参加に際してはインフォームドコンセントを得た。20名の被験者の年齢, 身長, 体重, 体容量指数 (body mass index, BMI) は、それぞれ21.3±2.6 (19~26) 歳, 165.1±7.3 (154~181) cm, 58.9±9.7 (42~79) kg, 21.1±2.5 (18~26) であった(表1)。

2. MR 画像の撮像および画像解析

被験者は背臥位とし、下肢伸展位に固定し撮像中の自動運動を禁止した。MRI 装置(日立MRP7000, 0.3T, 永久磁石型)を用いて右大腿四頭筋が撮像されるよう膝関節部から下前腸骨棘の範囲で大腿骨体長軸に対して垂直な連続した1 cm間隔(スライス幅10mm, スライス厚5 mm)の断面像を得た(図1)。撮像はスピンエコー (Spin echo) 法 (TR1800msec, TE25 msec) とし、受信コイルは腹部用 QD コイルとした。

得られたMR 画像はイメージスキャナー (EPSON GT-9500) によりA/D変換しパーソナルコンピュータ (Macintosh Performa 6420) 上に取り込み、画像解析ソフト (NIH Image ver.1.61, U.S. National Institutes of Healthが開発。インターネット <http://rsb.info.nih.gov/nih/> を介して入手可能) を用いて



図1 右大腿部の横断面の位置を示す。右大腿四頭筋が撮像されるように大腿骨体長軸に対して垂直な連続した1 cm間隔(スライス幅10mm, スライス厚5 mm)の断面像を得た。

表2 解析ソフト (NIH image) を用いた筋断面積測定の検者内信頼性

筋名	1回目(cm ²)	2回目(cm ²)	r ₂
大腿直筋	4.3 ± 2.9	4.1 ± 2.6	0.996
内側広筋	6.5 ± 2.1	6.8 ± 2.2	0.995
外側広筋	12.0 ± 3.5	12.0 ± 3.5	0.998
中間広筋	11.4 ± 2.2	11.6 ± 2.1	0.991

(平均±標準偏差)

r₂: 5名の被験者の50%レベル(大腿骨外側顆遠位端のレベルを0%, 大転子頂点のレベルを100%としたとき)における各筋の断面積を同一検者が2回測定したときの級内相関係数を示す。

各筋の輪郭をデジタイズし、大腿直筋, 内側広筋, 外側広筋, 中間広筋の4筋の各高位における解剖学的筋断面積 (anatomical cross-sectional area, 以下, 単に「筋断面積」あるいは「断面積」と記載する) をそれぞれ測定した。筋容積はそれぞれのイメージにおける各筋の筋断面積とスライス厚 (1 cm) の積の和として求めた。

なお、各筋の断面積測定は同一検者が行った。筋断面積測定の再現性(信頼性)を検討するために、同一の検査者が5名の被験者について右大腿骨外側顆遠位端のレベルを0%, 大転子の頂点のレベルを100%としたときの50%高位における断面積を1週間以上の間隔をおいて2回測定した。2回の測定の級内相関係数 (r₂) は大腿直筋0.996, 内側広筋0.995, 外側広筋0.998, 中間広筋0.991であり、各筋の断面積測定の級内相関(検査者内信頼性)はいずれも高く測定の信頼性が確認された(表2)。

3. 大腿四頭筋の筋トルク測定

等運動性トルクマシン (Hydromusculatur GT

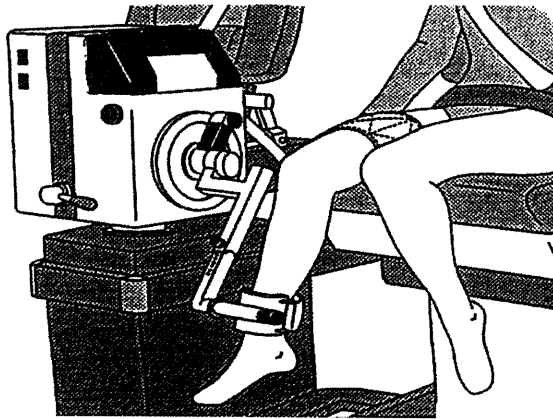


図2 Hydromusculator GT500を用いた等運動性筋トルクおよび等尺性筋トルクの測定姿勢

500, OG技研)を用いて角速度30°/secおよび180°/secの等運動性伸展筋トルクを測定した。測定はバックレスト角度100°の椅子座位で左右のグリップを握った状態で行い、付属のストラップで体幹および測定側右大腿部を固定し、膝関節軸と機器の回転軸を一致させるように調節した(図2)。被験者に測定の目的を十分に説明し、ウォーミングアップを行った後に測定を開始した。測定中は激励を与え最大努力をさせた。等運動性最大筋トルクの測定は、右膝関節90°屈曲位から伸展0°までの連続5往復運動を角速度30°/secおよび180°/secにて行わせ、それぞれのピークトルクの最大値を等運動性最大筋トルクとした。測定順序は、最初に角速度30°/secの等運動性筋トルクの測定を行い、次に十分な休息を与えた後に角速度180°/secの等運動性筋トルクの測定を行った。

4. 統計処理

統計処理には統計ソフト(StatView J4.5, Abacus Concepts Inc. 1992-1995)を用い、最大断面積と筋容積および等運動性筋トルク(角速度30°/sec, 180°/sec)との間の相関はそれぞれピアソン(Pearson)の相関係数を求めた。相関係数の検定はフィッシャー(Fisher)のZ変換により有意水準0.01で検定した。

Ⅲ. 結果

1. 筋断面積

大腿骨外側顆遠位端のレベルを0%, 大転子頂点のレベルを100%としたときの大腿四頭筋および大腿四頭筋を構成する各筋(収縮要素である筋腹の部分とし、腱の部分は除く)の20名の平均断面積と標準偏差を図3に示した。大腿四頭筋の筋腹は5%高位から始めて110%高位で終わり、50%高位を最大膨隆部として

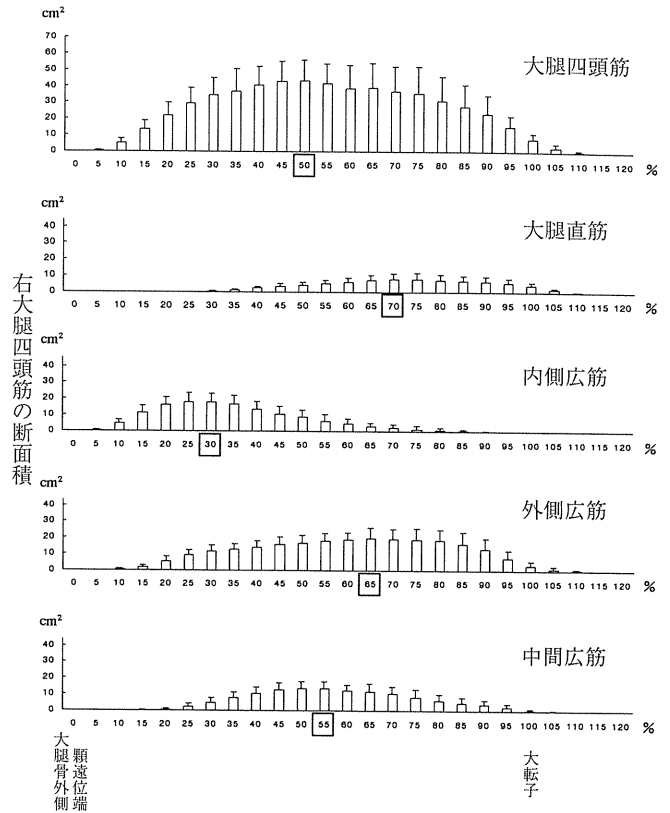


図3 右大腿四頭筋および各構成筋の断面積(平均±標準偏差)

注: 横軸は大腿骨外側顆遠位端と大転子頂点までの距離を100%としたときの%で表し、大腿骨外側顆遠位端のレベルを0%, 大転子の頂点のレベルを100%とする。□は断面積が最大となったレベルを示す。

筋名	最大筋横断面積 (cm ²)	高位レベル (%)
大腿四頭筋	43.1±12.7 (30.6~80.0)	50
外側広筋	19.8±6.4 (13.3~34.2)	65
内側広筋	18.1±5.3 (9.7~31.1)	30
中間広筋	13.4±4.3 (10.6~27.0)	55
大腿直筋	8.0±3.6 (4.2~14.9)	70

平均±標準偏差 (最小~最大)

ほぼ対称的な形状を示した。大腿直筋の筋腹部分は25%~120%の範囲にあり、70%部位で最大断面積8.0±3.6cm²を示した。内側広筋は5%~95%の範囲にあり、30%部位で最大断面積18.1±5.3cm²を示した。外側広筋は10%~110%の範囲であり、65%部位で最大断面積19.8±6.4cm²を示した。中間広筋は15%~105%の範囲であり、55%部位で最大断面積13.4±4.3cm²を示した。4筋のなかで最大断面積が最も大きかったのは外側広筋であり、以下、内側広筋、中間広筋、大腿直筋の順であった(表3)。男女間の比較では、断面積の大きさに男女差は認められたものの各筋の分布パターンには差は認められなかった(図4)。

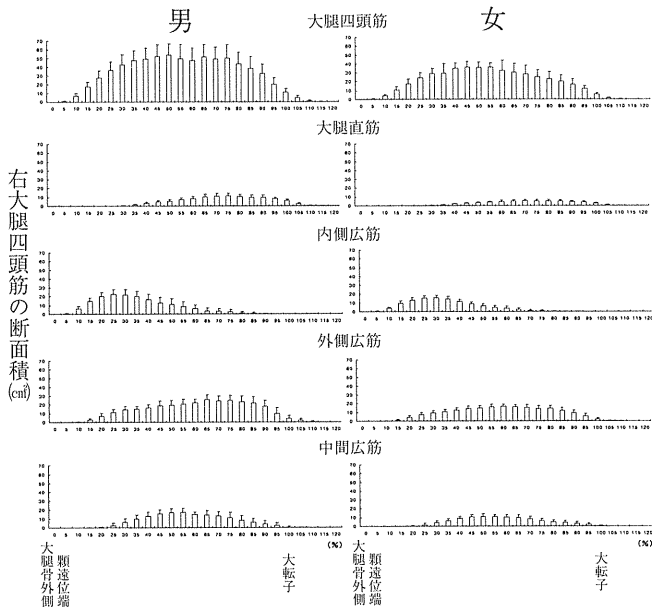


図4 右大腿四頭筋断面積の男女比較 (平均±標準偏差)
 注: 横軸は大腿骨外側顆遠位端と大転子頂点までの距離を100%としたときの%で表し, 大腿骨外側顆遠位端のレベルを0%, 大転子の頂点のレベルを100%とする。

表4 大腿四頭筋容積と各筋の構成割合

筋名	筋容積 (cm³)	構成割合 (%)
大腿四頭筋	1055±353	100.0
外側広筋	424±141	40.2
内側広筋	253±96	24.0
中間広筋	228±85	21.6
大腿直筋	150±65	14.2
平均±標準偏差		

2. 筋容積

大腿四頭筋の筋容積 (平均±標準偏差) は, 外側広筋が424±141cm³と最も大きく, 以下, 内側広筋 (253±96cm³), 中間広筋 (228±85cm³), 大腿直筋 (150±65cm³) の順であり, 大腿四頭筋全体としての筋容積は1055±353cm³であった. 各筋の全大腿四頭筋容積に対する割合は, 外側広筋40.2%, 内側広筋は24.0%, 中間広筋21.6%大腿直筋は14.2%であった (表4).

3. 最大断面積と筋容積との関係

大腿四頭筋の最大断面積と筋容積の関係を図5に示した. 大腿四頭筋の最大断面積と大腿四頭筋の筋容積は相関係数0.981の高い相関を示し, 回帰式は $y = 25.776x - 150.86$ ($R^2 = 0.9617$) であった. また, 大腿四頭筋を構成する各筋の最大断面積と大腿四頭筋容積との相関は, 外側広筋0.966, 中間広筋0.925, 内側広筋0.896, 大腿直筋0.885であり, 外側広筋ならびに中間広筋と大腿四頭筋容積の相関が高かった (表5).

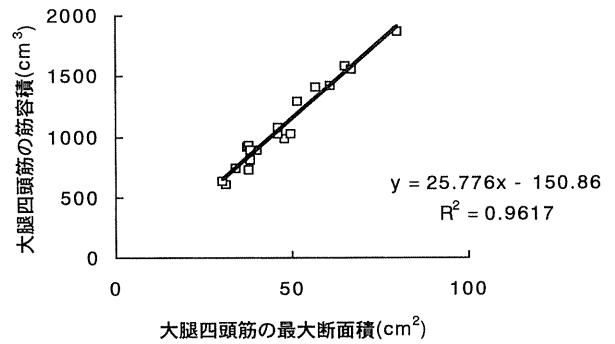


図5 大腿四頭筋の最大断面積と筋容積との関係

表5 大腿四頭筋の最大断面積と筋容積との相関係数

筋	相関係数
大腿四頭筋	0.981*
大腿直筋	0.885*
内側広筋	0.896*
外側広筋	0.966*
中間広筋	0.925*

* p < 0.01

表6 角速度30°/sec および180°/sec 等運動性伸展筋トルク等運動性最大伸展筋トルク (N・m)

	30°/sec	180°/sec
男性	32.2±6.3	19.6±4.4
女性	15.7±3.9	8.2±2.5
全体	23.0±9.8	13.3±6.7

表7 大腿四頭筋の最大断面積と最大伸展筋トルク間の相関係数等運動性最大伸展筋トルク

	30°/sec	180°/sec
大腿四頭筋	0.791*	0.915*
大腿直筋	0.823*	0.913*
内側広筋	0.789*	0.848*
外側広筋	0.842*	0.905*
中間広筋	0.727*	0.822*

* p < 0.01

4. 最大断面積・筋容積と, 筋トルクとの関係

角速度30°/secおよび角速度180°/secにおける等運動性最大伸展筋トルクはそれぞれ23.0±9.8kg・m, 13.3±6.7kg・mであり, (表6) 等運動性最大伸展トルクの出現角度は角速度30°/sec時が53.3±9.4° (30.0° ~ 67.3°), 角速度180°/sec時が41.5±9.1° (19.2° ~ 55.5°) であった. 各被験者における大腿四頭筋最大断面積と等運動性最大筋トルク (角速度30°/secおよび180°/sec) との関係を表7に示した. いずれも高い相関を示したが, 特に大腿四頭筋最大断面積と角速度180°/secにおける等運動性最大筋トルク

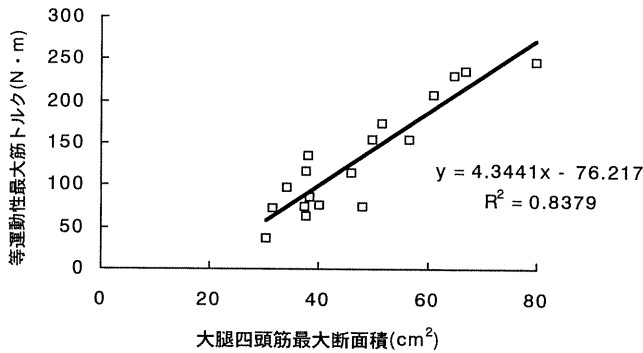


図6 大腿四頭筋の最大断面積と等運動性(180°/sec)最大筋トルクとの関係

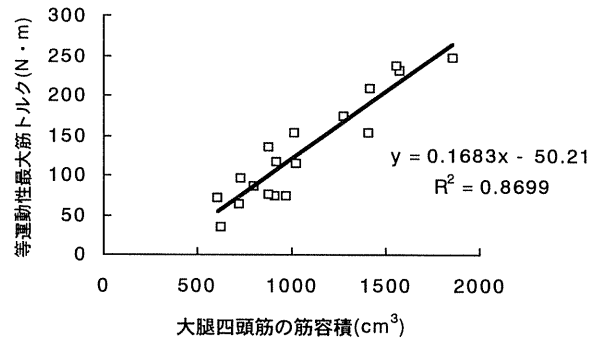


図7 大腿四頭筋の筋容積と等運動性(180°/sec)最大筋トルクとの関係

表8 大腿四頭筋の筋容積と最大伸展筋トルク間の相関係数

	等運動性最大伸展筋トルク	
	30° /sec	180° /sec
大腿四頭筋	0.811*	0.933*
大腿直筋	0.817*	0.903*
内側広筋	0.698*	0.879*
外側広筋	0.799*	0.820*
中間広筋	0.642*	0.846*

* p < 0.01

との相関係数は0.915と高かった(図6)。各被験者における大腿四頭筋容積と、等運動性最大筋トルク(角速度30°/secおよび180°/sec)との関係においても高い相関がみられ(表8)、特に、大腿四頭筋容積と角速度180°/secにおける等運動性最大筋トルクとの相関係数は0.933と高かった(図7)。

IV. 考察

人体の個々の筋の形態学的研究は、解剖学標本(屍体)を用いた直接的計測^{1) 2) 10)}のほか超音波診断画像^{4) 5)}、X線CT画像^{6) 7) 8)}、MRI画像^{11) 12) 13) 14) 15) 16) 17) 18)}を用いた方法が行われてきた。超音波やX線CT画像では筋、脂肪、骨組織の区別は可能であるが、隣接する筋を正確に区別することは難しかった。MRIを用いた方法は人体に与える影響がなく、CTが組織密度の違いを基礎にしているため同密度組織の分離が不可能であったのに対して、MRIはプロトン密度、リラクゼーションタイム(relaxation time)などの分子特性を基礎に撮像しているため組織を特定しやすく、結合組織や脂肪組織、隣接する各筋の識別能力にすぐれている¹³⁾。

MRIを用いて大腿の断面積を測定した研究としては、Nariciら¹¹⁾、岡ら¹²⁾、服部ら¹³⁾の報告がある。Nariciら¹¹⁾は6名の健常成人男性の大腿四頭筋断面積を測定したが、5cm間隔で5つの高位で断面積を測定

しているに過ぎず、各筋の断面積を大腿全長にわたり連続的に測定し、各筋を個別に検討するに至ってはいなかった。

岡ら¹²⁾は健常成人15名(男性7名、女性8名)を対象とした研究で、大腿四頭筋を構成する各筋の最大断面積を測定し、外側広筋26.1±5.9cm²、中間広筋20.2±4.5cm²、内側広筋19.7±5.0cm²、大腿直筋11.4±3.3cm²、大腿四頭筋全体としては60.2cm²であると報告した。

北ら¹⁸⁾は健常成人9名(男性5名、女性4名)の大腿四頭筋最大筋断面積、筋容積を求め、それぞれ61.1±12.7cm²、1483±340cm³と報告した。今回の研究における最大断面積は、外側広筋19.8±6.4cm²、中間広筋13.4±4.3cm²、内側広筋18.1±5.3cm²、大腿直筋8.0±3.6cm²であり、大腿四頭筋全体としての断面積および筋容積はそれぞれ43.1±12.7cm²、1054±353cm³であった。過去の報告よりも総体的に小値を示したのは、今回の研究の被験者に女性が多かったことが原因として考えられる。

岡ら¹²⁾は各筋の最大断面積の高位は、大腿長(大転子と膝関節裂隙間の距離)の遠位部からのパーセント表示で、外側広筋70%、中間広筋60%、内側広筋30%、大腿直筋70%、大腿四頭筋全体60%であったと報告したが、今回の結果では外側広筋65%、中間広筋55%、内側広筋30%、大腿直筋70%、大腿四頭筋50%であり、外側広筋で5%、大腿四頭筋全体で10%の差異がみられたものの最大断面積が得られた高位は概ね一致した。

北ら¹⁸⁾は角速度30°/secの等運動性筋トルクと筋容積および最大断面積との関係において、それぞれ相関係数0.830、0.833と、ほぼ同等の高い相関がみられたと報告したが、今回の結果では角速度30°/secの等運動性筋トルクと筋容積および最大断面積との相関係数はそれぞれ0.811、0.791であり、北らの報告よりもやや相関係数が小さかった。各筋ごとの筋容積と角速度30°/secの等運動性筋力との関係では、北らの報告では中間広筋(0.924)、内側広筋(0.786)、外側広筋(0.765)、大腿直筋(0.709)の順で相関係数が大きく、

断面積と角速度 $30^\circ/\text{sec}$ の等運動性筋力との関係では、中間広筋(0.857)、外側広筋(0.830)、内側広筋(0.742)、大腿直筋(0.655)の順に相関係数が大きかったが、今回の結果では角速度 $30^\circ/\text{sec}$ の等運動性筋力と筋容積との関係では、大腿直筋(0.817)、外側広筋(0.799)、内側広筋(0.698)、中間広筋(0.642)の順に相関係数が大きく、角速度 $30^\circ/\text{sec}$ の等運動性筋トルクと最大断面積との関係では、外側広筋(0.842)、大腿直筋(0.823)、内側広筋(0.789)、中間広筋(0.727)の順に相関係数が大きかった。

北らの報告との相関係数の違いは、被験者数や被験者の特性に関連した違いのほか、断面積決定時のスライス面の方向の違いが原因として考えられる。筋の最大断面積は個々の筋により必ずしも明確ではなく、スライス方向によっても変化し、同一個体であっても異なる。これに対して、筋容積の測定ではスライス面に左右されないため断面積測定にみられるような個体間のばらつきを無視でき、最大断面積よりも筋容積での測定の方が検査-再検査信頼性(test-retest reliability)が高いことが指摘されている¹⁹⁾。しかし、筋容積は各高位における筋断面積の和として求められることから、筋容積測定値には、各高位での断面積測定における測定誤差が蓄積した形で含まれることになる。したがって、筋容積測定の信頼性は、各高位での断面積測定の信頼性に大きく影響される。

断面積測定の信頼性を左右するものとしては、MR画像を肉眼的に大腿直筋、内側広筋、中間広筋、外側広筋に識別する際の誤差が考えられる。大腿直筋の輪郭の識別は容易であるが、外側広筋、中間広筋、内側広筋の境界は近位部においては不明瞭である場合があり、識別にはかなりの熟練を要することから検者間信頼性は低いと考えられる。本研究では、同一検者が測定した場合の50%高位レベルでの検査内信頼性は各筋ともに高いことが証明されたが、より近位部においては信頼性が低下する可能性がある。

今回の結果では筋断面積、筋容積と等運動性筋トルクとの間には高い相関関係が認められ、しかも角速度 $30^\circ/\text{sec}$ よりも角速度 $180^\circ/\text{sec}$ における等運動性最大トルクとの相関が高かった。これまでの研究^{22) 23)}で単位筋断面積当たりの筋力にはかなりの個人差のあることが指摘され、個人差をもたらす要因の一つとして筋線維組成の影響が検討されている。一般に筋線維タイプの組成比は先天性あるいは後天性に個人差があることが知られている²⁴⁾。Duev²⁵⁾らやIngier²⁶⁾の報告を考慮すると、平均的な大学生の大腿四頭筋の筋線維タイプ組成は、タイプIが40%、タイプIIが60%であり、速筋線維の割合が大きいと考えられる。Ivyら²⁷⁾は外

側広筋におけるfast-twitch線維の比率をもとに3群に分け、等運動性(60, 120, 180, 240, $300^\circ/\text{sec}$)および 65° での等尺性最大トルクを検討しており、 $60^\circ/\text{sec}$ を除いてfast-twitch線維の多い群はslow-twitch線維が多い群と比較して、ピークトルクが大きかったとしている。また、速筋タイプの筋線維比率が高い者ほど単位筋断面積当たりの等運動性筋力が高く、遅筋タイプの筋線維の比率が高い者ほど最大努力の動的な筋収縮を連続して実施した際に発揮されるパワーの維持能力が高いという結果が得られている²¹⁾。以上のことから、大腿四頭筋には遅筋線維よりも速筋線維の占める割合が大きく、より速いタイプの収縮を必要とする $180^\circ/\text{sec}$ の等運動性トルクにおいて、筋形態学的情報との相関が高かったと考えられる。

また、筋断面積・筋容積と $30^\circ/\text{sec}$ と $180^\circ/\text{sec}$ の各筋トルクとの間の相関に違いがみられた原因として、それぞれの筋収縮様式における最大トルク出現関節角度が異なることも一因として考えられる。最大トルクの出現角度は、角速度 $30^\circ/\text{sec}$ 等運動性トルクでは $53.3 \pm 9.4^\circ$ ($30.0^\circ \sim 67.3^\circ$)、角速度 $180^\circ/\text{sec}$ 時が $41.5 \pm 9.1^\circ$ ($19.2^\circ \sim 55.5^\circ$)であり、最大トルクを記録した関節角度が角速度 $30^\circ/\text{sec}$ の等運動性よりも角速度 $180^\circ/\text{sec}$ の等運動性で小さい。臨床的に、extensor lagにみられるように膝関節最終伸展に近づくにつれて筋トルクに差が出やすく、また、年齢とともにタイプII線維の直径が小さくなる^{28) 29)}ことから角速度 $180^\circ/\text{sec}$ の等運動性収縮の方が角速度 $30^\circ/\text{sec}$ の等運動性収縮よりも個人の筋力差をより敏感に反映する運動であるため大腿四頭筋の断面積、筋容積といった筋形態学的特徴と筋トルクとの相関がより強かったと考えられる。

今回の結果では筋断面積や筋容積といった筋形態と筋トルクとの相関は強く、筋形態から筋トルクを推定することが可能であることが示された。筋力トレーニングによる筋力の増大と筋肥大の変化を実際に捉えた研究は少ないが、23~24歳の4名の健常男性を60日間にわたり等運動性筋力トレーニングを実施し、筋力と筋断面積の変化を検討したNariciらの報告¹⁶⁾では、筋断面積は1日あたり0.14%の割合で増加し60日目に $8.5 \pm 1.4\%$ 増加し、等尺性筋力は1日平均0.32%の増加を示し60日目には $20.8 \pm 5.4\%$ 増加した。60日間のトレーニングでの等尺性筋力が20.8%増加したのに対して断面積の増加はわずかに8.5%(すなわち、40%)に過ぎず、他の60%は神経系や筋構築の変化の関与が考えられるとしている。また、Nariciら³⁰⁾は、7名の男性健常者で1日おきに6か月間、1RM(one repetition maximum)の80%で1日6回のウエイト

トレーニングを実施したときの筋トルクと筋断面積を検討した。トレーニングにより大腿四頭筋の断面積は $18.2 \pm 7.2\%$ 増加し、最大等尺性トルクは $29.6 \pm 7.9\%$ 増加したが、大腿中央部での外側広筋の生検において平均筋線維断面積には増加がみられず、積分筋電図にも変化がみられなかったことから筋トルクの増加は筋構築 (muscle architecture) の変化によりもたらされるものとした。Jubriasら³¹⁾は23~80歳の男女57名において膝伸展ピークトルクおよびMRIによる断面積測定において、65~80歳の年齢層におけるピークトルクの低下を説明するには、断面積の低下にみられる筋の量的な変化のみでは加齢に伴う筋力低下を説明するには不十分であるとした。また、老人の筋力強化に関しては老人では断面積の増加が若年者に比べて少なく、神経系の関与が大きいとの報告³⁰⁾があり、筋力強化の影響を断面積の変化のみで評価することは難しい。以上のように筋形態学的変化と筋トルクの変化は完全には一致しないが、筋形態学的情報から潜在的な筋トルクをある程度推定することは可能であると考えられる。

IV. 結語

健康成人20名に対してMR画像から右大腿四頭筋の筋断面積および筋容積を求めた結果、大腿四頭筋の最大筋断面積は $43 \pm 12.7\text{cm}^2$ であり、筋容積は $1055 \pm 353\text{cm}^3$ であった。最大筋断面積と筋容積との間には高い相関が認められ、また、最大筋断面積・筋容積と筋トルクとの間には高い相関が認められた。このことからMR画像からの形態学的情報である大腿四頭筋の最大筋断面積および筋容積から角速度 $30^\circ/\text{sec}$ 、 $180^\circ/\text{sec}$ の等運動性筋トルクの推定が可能であると考えられた。

【文献】

- 1) Haxton, H.A. Absolute muscle force in the ankle flexors of man. *J. Physiol.*, 103, 267-273 (1944).
- 2) Alexander, R.Mc.N., Vernon, A. The dimensions of knee and ankle muscles and the forces they exert. *J. Mov. Stud.*, 1, 115-123 (1975).
- 3) Fukunaga, T., Roy, R.R., Shellock, F.G., et al. Physiological cross-sectional area of human leg muscles based on magnetic resonance imaging. *J. Orthop. Res.*, 10, 926-934 (1992).
- 4) Ikai, M., Fukunaga, T. Calculation of muscle strength per unit cross-sectional area of human muscle by means of ultrasonic measurement. *Int Z Angrew Physiol. einsch. Arbeitsphysiol.*, 26, 26-32 (1968).
- 5) Young, A., et al The size and strength of the quadriceps muscles of old and young men. *Clin. Physiol.*, 5, 145-154 (1985).
- 6) Maughan, R.J., Watson, J.S., Wier, J. Strength and cross-sectional area of human skeletal muscle. *J. Physiol.*, 338, 37-49 (1983).
- 7) Ingemann-Hansen, T., Halkjar-Kristensen, J. Computerized tomographic determination of human thigh components - The effects of immobilization in plaster and subsequent physical training. *Scand. J. Rehab. Med.*, 12, 27-31 (1980).
- 8) Gerber, C., Hoppeler, H., Claassen, H., et al. The lower extremity musculature in chronic symptomatic instability of the anterior cruciate ligament. *J. Bone Joint Surg.(Am)*, 67, 1034-1043 (1985).
- 9) Nicklin, J., Karni, Y., Wiles, C.M. Shoulder abduction fatiguability. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiat.*, 50, 423-427 (1987).
- 10) 石崎忠利, 波木貞夫, 間藤方雄 大腿筋筋腹の位置に関する解剖学的, 計測学的研究. *体力科学*, 33, 27-39 (1984).
- 11) Narici, M.V., Roi, G.S., Landoni, L. Force of knee extensor and flexor muscles and cross-sectional area determined by nuclear magnetic resonance imaging. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 57, 39-44 (1988).
- 12) 岡 英世, 市橋則明, 吉田正樹ほか MRIによる大腿部における筋の断面積特性—断面積と周径との関連性—. *理学診療*, 6, 125-129 (1995).
- 13) 服部正明ほか MRIを基にした三次元構築像より得られた大腿筋群の形態的差異. *体力科学*, 41, 273-275 (1992).
- 15) 岡 英世, 市橋則明, 三浦 元ほか 大腿部における筋の形状特性の検討. *理学療法学*, 21, 195-201 (1994).
- 16) Narici, M.V., et al. Changes in force, cross-sectional area neural activation during strength training and detraining of the human. *Eur. J. Appl. Physiol.* 59: 310-319 (1989).
- 17) 服部正明, 池田道明, 鈴木直樹 コンピュータ

- ラフィックスを用いた大腿部筋群の三次元構築.
 体力科学, 39, 331-340 (1990).
- 18) 北 潔, 市橋則明, 吉田正樹ほか 大腿四頭筋MRI画像の三次元表示と筋力の相関について. 理学診療, 4, 144-146 (1993).
- 19) Roman, W.J., Fleckenstein, J., Stray-Gundersen, J., et al. Adaptations in the elbow flexors of elderly males following resistance training. *Spine*, 18, 582-586 (1993).
- 20) Moritani, T. & deVries, H.K.. Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. *Am J Phys Med*, 58, 115-130 (1979).
- 21) 金久博昭 筋力トレーニングの科学. 理学療法学, 17, 229~235 (1990).
- 22) Thorstensson, A., Grimby, G., Karlsson, J. Force-velocity relations and fiber composition in human knee extensor muscles. *J. Appl. Physiol.*, 40, 12-16 (1976).
- 23) Maughan, R.J., Nimmo, M.A. The influence of variations in muscle fiber composition on muscle strength and cross-sectional area in untrained males. *J. Physiol.*, 351, 229-311 (1984).
- 24) 宮村実晴 編 最新運動生理学, 真興交易出版部, 東京, p 4 (1996).
- 25) Duev, W.J., Bassett, D.R., Torok, D.J., et al. Skeletal muscle fibre type and capillary density in college-aged blacks and whites. *Annals of Human Biology.*, 24, 323-331 (1997).
- 26) Ingier, F. Capillary supply and mitochondrial content of different skeletal muscle fiber types in untrained and endurance-trained men. *Europ. J. Appl. Phys. & Occ. Phys.*, 40, 197-209 (1979).
- 27) Ixy, J.L., Withers, R.T., Brose, G., et al. Isokinetic contractile properties of the quadriceps with relation to fiber type. *Europ. J. Appl. Phys. & Occ. Phys.*, 47, 247-255 (1981).
- 28) Manta, P., Kalfakis, N., Kararizou, E., et al. Size and proportion of fiber types in human muscle fascicles. *Clin. Neuropathol.* 15, 116-118 (1996).
- 29) Manta, P., Kalfakis, N., Kararizou, E., et al. Distribution of muscle fiber type in human skeletal muscle fascicles: an autopsy study of three human muscles. *Func. Neurol.*, 10, 137-141 (1995).
- 30) Narici, M.V., Hoppeler, H., Kayser, B., et al. Human quadriceps cross-sectional area, torque and neural activation during 6 months strength training. *Acta Phys. Scand.*, 157, 175-186 (1996).
- 31) Jubrias, S.A., Odderson, I.R., Esselman, P.C., et al. Decline in isokinetic force with age: muscle cross-sectional area and specific force. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 434: 246-253 (1997).

Relationship between Morphology of the Quadriceps Femoris Muscle and Isokinetic Knee Extensor Torque.

SAITO, Akihiko*, MARUYAMA, Hitoshi*, ARAI, Shoichi**,
HASHIMOTO, Mitsuyasu**, KOMBA, Toshinori**, IWAYA Tsutomu***

*International University of Health and Welfare, Department of Physical Therapy

**International University of Health and Welfare, Department of radiological sciences

***Tohoku University, Faculty of Medicine

ABSTRACT

The purpose of this study was to determine the morphological characteristics of the quadriceps femoris muscle and to clarify the relationships between the anatomical cross-sectional areas(ACSA), the muscle volume, and the knee extension torque. Magnetic resonance imaging technique was used to determine the ACSA of quadriceps muscle in normal subjects. Twenty healthy university students volunteered for the present study. After informed consent was gained, the right thigh of subjects was imaged in supine position with the hip and knee held in full extension. The muscles investigated were rectus femoris(RF), vastus medialis(VM), vastus laterals(VL) and vastus intermidius(VI). The boundaries of each muscle were digitized from images taken at 1 cm intervals. The ACSA was determined by NIH image, and the muscle volume was calculated by summing the ACSA of each image between the most proximal and distal images in which the muscle was visible. Isokinetic muscle torque were measured by Hydromusculator GT500. The mean ACSA of the quadriceps was $43.1 \pm 12.7 \text{ cm}^2$, and these of each muscle were $8.0 \pm 3.6 \text{ cm}^2$, $18.1 \pm 5.3 \text{ cm}^2$, 19.8 ± 6.4 and $13.4 \pm 4.3 \text{ cm}^2$ for the RF, VM, VL and VI. The mean volume of the quadriceps was $1054 \pm 353 \text{ cm}^3$, and these of each muscle were $150 \pm 65 \text{ cm}^3$, $253 \pm 96 \text{ cm}^3$ and $228 \pm 85 \text{ cm}^3$ for the RF, VM, VL and VI. The maximum ACSA of quadriceps femoris was closely correlated with the muscle volume of that muscle. The isokinetic extension torque was correlated with the ACSA and the muscle volume. It was concluded that isokinetic knee extension torque can be estimated by the morphological characteristics of quadriceps femoris muscle.

Key Words : quadriceps femoris muscle, magnetic resonance imaging, muscle morphology