

博士論文

能力を規定する一要因としての筋の形態的特徴

中野 誠

東京大学大学院理学系研究科

出版部

博士論文

筋力を規定する一要因としての筋の形態的特性

筑波大学大学院 体育科学研究科
(平成5年度編入学)

秋間 広

指導教官

勝田 茂 教授

寄	贈
秋	平
間	成
広	年
氏	月
	日

96004954

目次

略語と記号

I. 緒言	1
II. 文献研究	4
1. 筋線維組成と筋力との関係	4
2. 解剖学的断面積と生理学的断面積	7
3. Specific tension	10
4. 様々なタイプのトレーニングが筋力と筋の形態的 特性に及ぼす影響	12
A. 筋力トレーニング	12
a. 筋力と筋断面積および神経性因子	12
b. 筋の形態的变化	14
B. スプリントトレーニング	17
C. 持久性トレーニング	17
5. 活動量の減少が筋力と筋の形態的特性に及ぼす影響	18
6. スポーツ科学におけるMRIの応用	21
III. 検討すべき問題点および本研究の目的	26
IV. 大腿部の3部位における大腿四頭筋の筋断面積および 筋線維組成が等速性筋力に及ぼす影響（実験I）	30
1. 目的	30

2.	方法	．．．	32
	A. 被検者	．．．	32
	B. 筋線維組成	．．．	32
	C. 筋断面積	．．．	33
	D. 等速性膝伸展力	．．．	33
	E. 統計処理	．．．	36
3.	結果	．．．	36
	A. 筋線維組成	．．．	36
	B. 筋断面積	．．．	37
	C. 等速性膝伸展力	．．．	40
	D. 等速性膝伸展力の絶対値および単位面積 当たりの筋力と筋線維組成との関係	．．．	40
	E. 等速性膝伸展力と筋断面積の関係	．．．	40
	F. 大腿四頭筋を構成する各筋頭の筋断面積と 等速性膝伸展力との関係	．．．	44
4.	考察	．．．	44
5.	要約	．．．	50
V.	膝伸筋・屈筋における形態的特性と specific tension (実験II)	．．．	52
	1. 目的	．．．	52
	2. 方法	．．．	54
	A. 被検者	．．．	54
	B. 解剖学的断面積および筋容積	．．．	54
	C. 生理学的断面積の算出	．．．	56

D. 等速性筋力および腱張力	．．．	57
E. 統計処理	．．．	58
3. 結果	．．．	58
A. 膝伸筋および膝屈筋の形態的特徴	．．．	58
B. ピークトルク-角速度関係および腱速度- 腱張力関係	．．．	62
C. Specific tension-筋線維速度関係	．．．	62
D. Specific tension-筋線維速度／筋線維長関係	．．．	67
4. 考察	．．．	67
A. 膝伸筋および膝屈筋の形態的特徴	．．．	67
B. 膝伸筋および膝屈筋のspecific tension	．．．	71
5. 要約	．．．	74
VI. 足関節の角度変化が生理学的断面積に及ぼす影響 (実験III)	．．．	76
1. 目的	．．．	76
2. 方法	．．．	77
A. 被検者	．．．	77
B. 解剖学的断面積および筋容積	．．．	77
C. 生理学的断面積の算出	．．．	78
D. 統計処理	．．．	78
3. 結果	．．．	78
A. 足関節の角度変化	．．．	78
B. 筋長および筋線維長	．．．	78
C. 解剖学的断面積	．．．	80

D. 筋容積	．．．	80
E. 生理学的断面積	．．．	80
4. 考察	．．．	85
5. 要約	．．．	87
VII. 筋力トレーニング初期の筋力増加に影響する因子		
(実験IV)	．．．	88
1. 目的	．．．	88
2. 方法	．．．	89
A. 被検者	．．．	89
B. トレーニングプロトコール	．．．	89
C. 筋断面積	．．．	89
D. 等速性膝伸展力	．．．	90
E. 筋線維組成および筋線維横断面積	．．．	90
F. 解糖系酵素活性	．．．	90
G. 筋電図積分値	．．．	90
H. 緩和時間	．．．	91
I. 統計処理	．．．	92
3. 結果	．．．	92
A. 筋断面積	．．．	92
B. 等速性膝伸展力	．．．	92
C. 組織化学的および生化学的分析	．．．	96
D. 筋電図積分値	．．．	96
E. 緩和時間	．．．	96
F. 単位面積当たりの筋力	．．．	101

4. 考察	・・・	104
5. 要約	・・・	108
VIII. スプリントトレーニングにともなう等速性筋力 と筋の形態的特性の変化（実験V）	・・・	110
1. 目的	・・・	110
2. 方法	・・・	111
A. 被検者	・・・	111
B. トレーニング	・・・	111
C. 解剖学的断面積，筋容積および 生理学的断面積	・・・	112
D. 等速性膝伸展力および屈曲力	・・・	112
E. 統計処理	・・・	112
3. 結果	・・・	112
A. 筋の形態的特性	・・・	112
B. 筋線維組成および筋線維横断面積	・・・	115
C. 全力ペダリングパワー	・・・	115
D. 等速性膝伸展力および屈曲力	・・・	115
E. Specific tension	・・・	119
4. 考察	・・・	119
5. 要約	・・・	123
IX. 中強度の持久性トレーニングにともなう 等速性筋力と筋の形態的特性の変化（実験VI）	・・・	125
1. 目的	・・・	125

2.	方法	・・・	127
	A. 被検者およびトレーニング	・・・	127
	B. 最大酸素摂取量	・・・	127
	C. 筋断面積	・・・	127
	D. 等速性膝伸展力・屈曲力	・・・	128
	E. 統計処理	・・・	128
3.	結果	・・・	129
	A. 身体特性および最大酸素摂取量	・・・	129
	B. 筋断面積	・・・	129
	C. 筋容積	・・・	129
	D. 等速性膝伸展力・屈曲力	・・・	135
4.	考察	・・・	135
5.	要約	・・・	140
X.	20日間のベッドレストがヒトの下肢骨格筋の筋力 および形態的特性に及ぼす影響（実験VII）	・・・	142
1.	目的	・・・	142
2.	方法	・・・	143
	A. 被検者	・・・	143
	B. ベッドレストの方法	・・・	143
	C. 解剖学的断面積および筋容積	・・・	143
	D. 生理学的断面積	・・・	144
	E. 等尺性最大膝伸展力	・・・	144
	F. 統計処理	・・・	144
3.	結果	・・・	145

A. 解剖学的断面積	．．．	145
B. 筋容積	．．．	145
C. 生理学的断面積	．．．	151
D. 等尺性最大膝伸展力	．．．	151
E. 単位面積当たりの筋力	．．．	151
4. 考察	．．．	157
5. 要約	．．．	161
XI. 討論	．．．	162
XII. 総括	．．．	166
謝辞	．．．	170
参考文献	．．．	171
参考論文	．．．	186

略語と記号

本研究で用いる主な略語と記号は以下の通りである。

ACSA	: anatomical cross-sectional area 解剖学的断面積 筋の長軸方向に垂直な筋断面積
AD	: adductor muscles 股関節内転筋群
ATP	: adenosinetriphosphate アデノシン三リン酸
iEMG	: integrated electromyogram 筋電図積分値
in vivo	: 生体内で
KE	: knee extensors 膝伸筋
KF	: knee flexors 膝屈筋
MRI	: magnetic resonance imaging 磁気共鳴映像法
MVC	: maximum voluntary contraction 最大随意筋力
PCSA	: physiological cross-sectional area 生理学的断面積
SPT	: specific tension 筋線維張力 生理学的断面積当たりの筋張力。絶対筋力に同じ。 単位；N/cm ²
T2	: 緩和時間の一つで横緩和時間とも呼ばれる。 MR装置の静磁場内における磁気モーメントの平衡状態が なんらかの手段で崩された時、再び平衡状態に戻るのに 必要な時定数を示す。骨格筋ではおよそ30 msecであるこ とが報告されている。
TS	: triceps surae 下腿三頭筋
Type I線維	: 遅筋線維

Type II線維：速筋線維

$\dot{V}O_2\text{max}$: maximum oxygen uptake (ml/kg/min)

最大酸素摂取量

% area FT線維：fast-twitch fibers（速筋線維）の面積占有率

%FT線維：fast-twitch fibers（速筋線維）の筋線維数の占有率

% area ST線維：slow-twitch fibers（遅筋線維）の面積占有率

%ST線維：slow-twitch fibers（遅筋線維）の筋線維数の占有率

この論文は次の原著論文に、未発表の実験結果を加えてまとめられている。

1) 秋間 広, 久野譜也, 福永哲夫, 勝田 茂: MRIによるヒトの膝伸筋・膝屈筋における形態的特性および生理学的断面積当りの筋張力. 体力科学 44: 267-278, 1995.

2) 秋間 広, 久野譜也, 渡辺 登, 中嶋英彦, 板井悠二, 勝田 茂: 中強度 (60% $\dot{V}O_2\text{max}$)の持久性トレーニングにともなうヒトの大腿部における筋の形態的特性および脚筋力の変化. 体力科学 44: 365-374, 1995.

3) 秋間 広, 久野譜也, 高橋英幸, 下條仁士, 勝田 茂: 異なる部位における大腿四頭筋の各筋頭の筋断面積と筋線維組成が等速性膝伸展力に及ぼす影響. 体育学研究 39: 426-436, 1995.

4) Akima, H., Kuno, S., Katsuta, S., Suzuki, Y., Gunji, A. and Fukunaga, T.: Effects of 20 days of bed rest on physiological cross-sectional area of human thigh and leg muscles evaluated by magnetic resonance imaging. *Acta Physiol. Scand.* 150, Suppl. 616: 23-30, 1995 (in press).

5) Funato, K., Matsuo, A., Yata, H., Akima, H., Suzuki, Y., Gunji, A. and Fukunaga, T.: Changes in force-velocity characteristics and power output of upper and lower body musculature following 20 days bed rest in young subjects. *Acta Physiol. Scand.* 150, Suppl. 616: 71-81, 1995 (in press).

I. 緒言

ヒトの発揮した筋力に関する研究は、運動生理学の分野では古くからの重要なテーマの一つであった。これまでの研究では、筋力は筋の形態的特性に強く影響されることが示されてきている。例えば、筋断面積は筋力と比例関係にあり (Ikai and Fukunaga, 1968; Maughan et al., 1983a; Maughan and Nimmo, 1984), 一方、筋線維長は筋の収縮速度と密接な関係にあることが報告されている (Spector et al., 1983; Wickiewicz et al., 1984)。したがって、筋の形態的特性を正確に把握することは、ヒトが発揮した筋力を検討する上で重要である。

筋の形態的特性の評価法の一つとして、屍体の筋を用いる方法が挙げられる。それは屍体の筋の筋重量や筋断面積を実測し、生体に適用する方法である (Alexander and Vernon, 1975; Edgerton et al., 1986; Friedrich and Brand, 1990; Haxton, 1944; Wickiewicz et al., 1983, 1984)。しかしながら、屍体の筋では生前が高齢の場合や筋の固定にともない筋萎縮が生じているという問題点が指摘されている (Edgerton et al., 1986; Fukunaga et al., 1992; Kawakami et al., 1994)ため、この方法では生体の筋特性を正確に把握することは困難である。また、他の評価法としては超音波法やX線-CT法を用いた四肢の横断像から非侵襲的に筋断面積を検討する方法がある (Alway et al., 1990; Häkkinen and Keskinen, 1989; Ikai and Fukunaga, 1968, 1970; Maughan et al., 1983a, 1983b; Maughan and Nimmo, 1984; Nygaard et al., 1983; Schantz et al., 1983; Young et al., 1984, 1985)。しかしながら、これらの方法から得られた画像の解像度は低く、また一回の測定で一枚の横断像しか得ることができない測定上の限界がある。

近年、非侵襲的にヒトの大腿部あるいは上腕部などの横断像を測定する装置として、MRI (magnetic resonance imaging; MRI)法がスポーツ科学の分野においても利用されてきている (秋間ら, 1990, 1992; Fukunaga et al., 1992; 服部と鈴木, 1992; Housh et al., 1992; Katsuta and Kuno, 1990; 松垣ら, 1993). MRIは被検者を移動させることなく、一度に多くの横断像、縦断像を得ることが可能であるばかりでなく、緩和時間のように筋の代謝情報も得ることができる (Takahashi et al. 1994; Adams et al., 1992, 1993; Yue et al., 1994). また、超音波法あるいはX線-CT法 (Alway et al., 1990; Häkkinen and Keskinen, 1989; Kawakami et al., 1993; Maughan et al., 1983a, 1983b; Maughan and Nimmo, 1984; Nygaard et al., 1983; Schantz et al., 1983; Young et al., 1984, 1985)と比較して、はるかに鮮明な画像を得ることができるため、骨格筋のような軟組織の測定には非常に適している。

MRIを用いて筋の形態的特性について検討した最近の研究 (Narici et al., 1989)では、筋の筋腹部位が一つの共働筋内でも異なっているため、これまでの多くの先行研究 (Alway et al., 1990; Häkkinen and Keskinen, 1989; Maughan et al., 1983a, 1983b; Maughan and Nimmo, 1984; Nygaard et al., 1983; Schantz et al., 1983; Young et al., 1984, 1985)で検討されてきたような、一枚の横断像では筋の形態的特性を正確に捉えることが困難であることが示唆されている (Fukunaga et al., 1992). さらに、筋力トレーニングにともなうヒトの大腿四頭筋の筋断面積の変化について検討した研究では、大腿四頭筋の長軸方向で筋肥大の程度が異なることが報告されている (Narici et al., 1989). これらの研究は筋力と筋の形態的特性との関係について検討する場合やトレーニングにともなう筋の形態的特性の変化について検討する場合、少なくとも数枚から数十枚の横断像について検討する必要性があることを示している。

複数の横断像から筋の形態的特性を評価することによっては、これまで多くの研究において捉えることができなかった筋形態の変化を部位別および筋別に検討することができる。したがって、MRI法を用いて筋の形態的特性と筋力についてより詳細に検討することは、今後、トレーニングやタレント発掘などの基礎資料を得る上で非常に意義のあることと思われる。

II. 文献研究

1. 筋線維組成と筋力との関係

等尺性筋力および等速性筋力と%FT線維(%fast-twitch fibers)との間に有意な相関関係が認められた研究がこれまでに報告されている。TeschとKarlsson (1978)は、等尺性筋力と%FT線維 ($r=0.55$, $p<0.001$)との間、および等尺性筋力と% area FT線維(%FT線維の面積占有率)との間にそれぞれ有意な相関関係 ($r=0.58$, $p<0.01$)が認められたことを報告している。Thorstenssonら (1976)は、角速度180 deg/secの等速性脚伸展力と%FT線維との間に有意な相関関係 ($r=0.69$, $p<0.05$)を認め、他の研究 (1977)においても180 deg/secの等速性脚伸展力と%FT線維および% area FT線維との間にそれぞれ有意な相関関係 ($r=0.50$, $p<0.01$; $r=0.46$, $p<0.05$)を認めている。さらにThorstenssonら (1977)は、一流の陸上競技短距離、跳躍、ダウンヒルスキー、競歩、オリエンテーリング選手、非鍛練者を用いて、等速性脚伸展力と外側広筋の筋線維組成との関係を検討したところ、FT線維の割合が高い短距離選手と跳躍選手は、最もFT線維の割合が低いオリエンテーリング選手より角速度180 deg/secの等速性膝伸展力が有意に高値を示したことを報告している。Coyleら (1979)は被検者をFT群 (>50%FT線維)とST群 (<50%FT線維)に分類し、等速性のレッグプレスマシンを用いて、角速度57 deg/secの筋力に対する115, 200, 287, 400 deg/secの筋力の割合と%FT線維との関係について検討した。その結果、彼らは全ての角速度で筋力の割合は、ST群よりFT群において有意に高いことを認めた。さらに、%FT線維と等速性筋力との相関係数は高速になるほど高値を示した

(図1). Nygaardら (1983)は、筋線維組成およびX線-CT法から得られた上腕二頭筋の筋断面積と等速性肘屈曲力との関係について検討し、%areaFT線維と等速性筋力($r=0.86$, $p<0.01$)および筋断面積と等速性筋力($r=0.75$, $p<0.05$)との間に有意な正の相関関係が観察されたことを報告している。筋線維のサブタイプ別に筋線維組成と等速性筋力との関係について検討した研究も見られる。RyushiとFukunaga (1986)は、外側広筋の%FTa線維、% area FTa線維と角速度30, 60, 120, 180 deg/secの等速性膝伸展力と大腿部の筋断面積で除した単位面積あたりの筋力との間に、それぞれ有意な正の相関関係を認めている。

一方、等尺性筋力および等速性筋力と%FT線維との間に有意な相関関係が認められないとする研究も報告されている。Nygaardら (1983)は、肘屈筋群の筋断面積、等尺性最大筋力および筋線維組成を測定し、等尺性最大筋力と筋線維組成との関係について検討したところ、その両者には有意な関係が観察されなかったことを報告している。また、琉子と福永 (1982)およびMaughanとNimmo (1984)は、等尺性筋力と筋断面積および外側広筋から得られた筋線維組成との関係について検討した結果、等尺性筋力と筋線維組成との間には有意な相関関係が認められなかったとしている。同一被検者の上肢と下肢の筋について検討した研究もみられる。Schantzら (1983)は、大腿四頭筋および上腕三頭筋の筋断面積および筋線維組成を算出し、等速性筋力と筋線維組成との関係を検討したところ、等速性膝伸展力および等速性肘伸展力と外側広筋および上腕三頭筋の筋線維組成との間にはいずれも有意な関係はみられなかったことを報告している。

%FT線維ではなく、%ST線維 (%slow-twitch fibers)と筋力との間に有意な相関関係を認めた研究もみられる。Clarksonら (1980)は、持久性競技者お

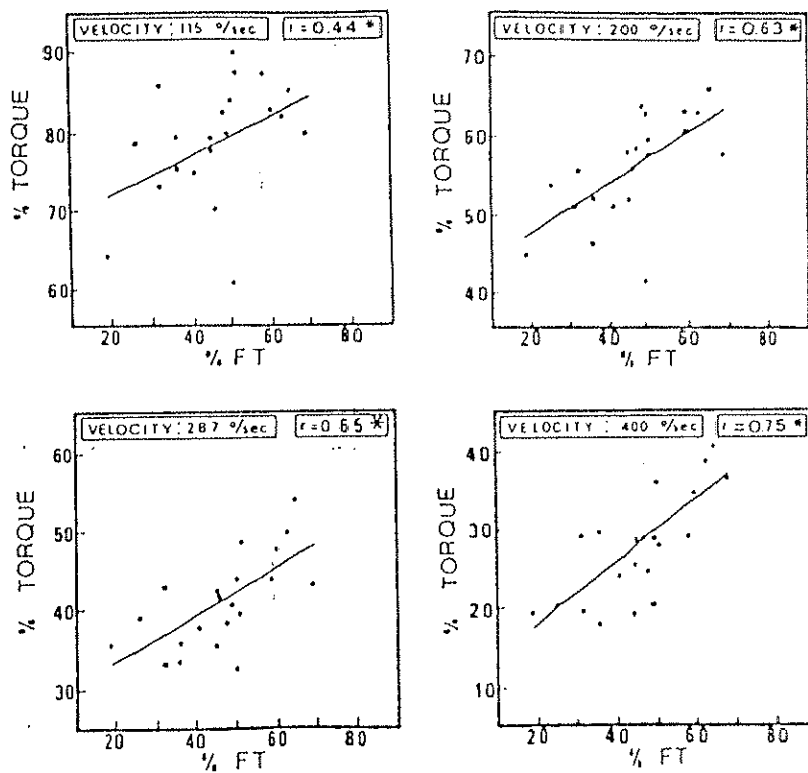


Fig. 1 Relationships between %torque (relative value to peak torque at 57 deg/sec) and %FT fibers at velocities of 115, 200, 287, 400 deg/sec. (Coyle et al., 1979)

よびパワー競技者を用いて検討したところ、パワー競技者では等尺性膝伸展力と外側広筋の%ST線維との間に有意な正の相関関係 ($r=0.80$, $p<0.05$)が認められ、一方、足関節では等尺性足底屈力と腓腹筋の%ST線維との間に負の相関関係 ($r=-0.94$, $p<0.01$)が認められたことを示している。しかしながら、持久性競技者では等尺性脚伸展力および等尺性足底屈力においても%ST線維との間に有意な相関関係は認められなかった。さらにClarksonら (1982)はオリンピックに出場した9名のカヤックおよびカヌー選手を用いて、肘屈曲および膝伸展による等尺性筋力および等速性筋力 (60, 180 deg/sec)と筋線維組成との関係について検討した。等尺性および等速性肘屈曲力は%ST線維, %FTa線維, %FTb線維および% area ST線維, % area FTa線維, % area FTb線維のいずれとも有意な相関関係を示さなかった。

このように、筋線維組成と等尺性筋力および等速性筋力との間に相関関係が認められるとする報告と認められないとする報告があり、一致した見解は得られていない。

2. 解剖学的断面積と生理学的断面積

解剖学的断面積 (Anatomical cross-sectional area: ACSA)とは、筋の長軸方向に対して直角な横断面を意味しており (福永と金久, 1990; Lieber, 1992), 超音波法, X線-CT法, MRI法から得られた横断像から直接測定された筋断面積がそれである。一方、生理学的断面積 (Physiological cross-sectional area: PCSA)は、理論的には筋に含まれる全ての筋線維横断面積の合計を示している (福永, 1978; Lieber, 1992)。筋の起始部と停止部を結んだ長軸方

向と筋線維の走行方向が一致している紡錘筋では、その筋腹部位におけるACSAとPCSAは等しいと考えることもできるが(福永と金久, 1990), それらが一致しない羽状筋では、PCSAはACSAより数倍大きくなる(Fukunaga et al., 1992). したがって、最大筋力の発揮時に筋に含まれる全ての筋線維が収縮していると仮定すると、ACSAと比較してPCSAのほうが筋力との関係について検討する指標として適切である(Edgerton et al., 1986; Fukunaga et al., 1992; Lieber, 1992). しかしながら、ヒトの筋においては非侵襲的にPCSAを直接測定することは不可能であるので、以下の式からPCSAを算出することができる(Lieber, 1992; Wickiewicz et al., 1984).

$$PCSA (\text{cm}^2) = MV \cdot FL^{-1} \cdot \cos \theta$$

MV: 筋容積 (cm^3), FL: 筋線維長 (cm), θ : 筋線維の走行角度

例えば、筋が容積 $V \text{ cm}^3$ の円柱であると仮定する。円柱の容積は底面積に円柱の高さを乗じて算出できる。PCSAの算出モデルではPCSAが底面積を示し、筋線維長が高さを示している。したがって、筋容積が一定であれば筋線維が長い筋では、PCSAは低値を示し、一方、筋線維の短い筋ではPCSAは高値を示す。しかしながら、羽状筋は筋線維の収縮方向と筋の起始部と停止部を結ぶ長軸方向とが異なっている。したがって、筋線維の走行方向と筋の長軸方向がつくりだす角度を θ とした場合、筋線維の収縮した張力の $\cos \theta$ 倍が筋の長軸方向の収縮力として有効である。

Haxton (1944)は屍体から得られたヒトの腓腹筋およびヒラメ筋のPCSAを算出した。その方法は筋線維に沿って筋束単位に筋を分離し、それらの筋束における横断面積の合計をPCSAとするものであった(図2)。さらに、屍体の下腿部の筋腹部位における周径囲よりACSAを得た後、上記の方法から得られたPCSAとACSAの比を算出した。一方、生体において6名の被検者の足関節屈曲力を測定し、さらに下腿部の筋腹部位における周径囲

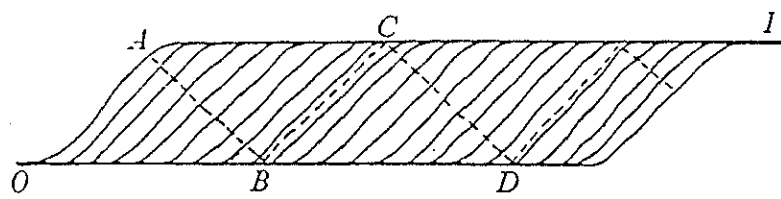


Fig. 2 Method of sectioning a unipennate muscle to obtain the physiological cross-section.
OBD is the tendon of origin and ACL is the tendon of insertion of muscle fibers (Haxton, 1944)

から、屍体と同様な方法を用いてACSAを算出した。また、屍体で得られたPCSAとACSAの比を生体に適用することにより、生体におけるPCSAの算出を行い、得られた足関節屈曲力より足関節のテコ比を考慮して筋の発揮した張力、さらに筋の発揮張力をPCSAで除した絶対筋力を算出している。IkaiとFukunaga (1968)は超音波法を用いて、in vivoでヒトの上腕部におけるPCSAの算出を行った結果、PCSAと筋の発揮した張力との間に有意な正の相関関係があることを示している。

3. Specific tension

Specific tension (SPT)は筋が発揮した張力をその筋に含まれる全ての筋線維の断面積で除したものを示している。すなわち、PCSAの単位面積当りに発揮した筋線維の張力と定義できる。動物あるいはヒトを用いたSPTに関する研究がこれまでいくつか報告されている。

Faulknerら (1982)はカエルの縫工筋におけるSPTをin situで測定したところ、 24.6 N/cm^2 であったことを報告している。Spectorら (1980)はネコのヒラメ筋および腓腹筋内側頭のSPTを測定したところ、ともに 22.5 N/cm^2 であったことを示している。その他のいくつかの報告では哺乳類の骨格筋のSPTは $15.7\text{-}29.4 \text{ N/cm}^2$ であることが示されている (Powell et al., 1984)。

ヒトの骨格筋におけるSPTは、膝伸筋、肘屈筋および足底屈筋に関する研究が多い。図3にはこれまで報告されてきたSPTの値についてまとめた。初期のものとしてHaxton (1944)の研究が挙げられる。彼は足関節底屈筋のSPTが 38.2 N/cm^2 であることを報告している。IkaiとFukunaga (1968)は超音波法を用いて肘関節屈筋におけるSPTを求めており、その値は 46.1 N/cm^2

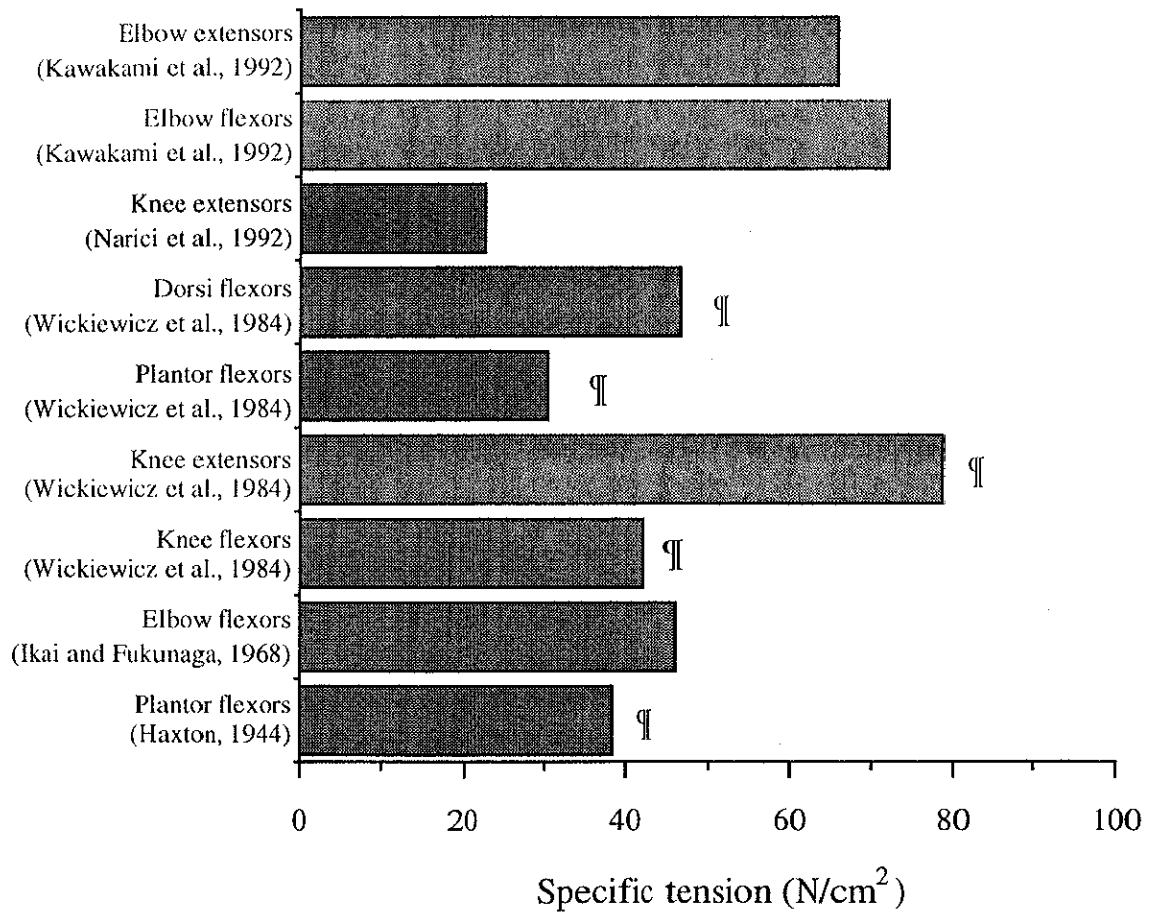


Fig. 3 Specific tension of human muscles reported in the literatures.
 ¶; Derived from cadaver tissue.

であったとしている。さらに、Wickiewiczら (1984)は膝伸筋・屈筋および足底屈筋・背屈筋のSPTがそれぞれ42.2, 78.9, 30.1, 46.6 N/cm²であったと報告している。最近では、MRIを用いて、in vivoでヒトの膝伸展筋のSPTについて検討がなされている。Nariciら (1992)はMRIから得られたヒトの大腿四頭筋における筋容積、筋線維長を用いてPCSAを算出した。また、等尺性膝伸展力とPCSAからSPTを算出しており、その値は22.7 N/cm²であったと報告している。Kawakamiら (1992)もMRIを用いて、肘屈筋・伸筋のSPTを求めている。その値は肘屈筋で72 N/cm²、肘伸筋では66 N/cm²であったとしている。さらに、Fukunagaら (1995)はヒトの足背屈筋群のSPTは足底屈筋群のそれより高値を示すことを報告した。このように、MRIのような方法を用いてin vivoでヒトのSPTを測定した研究は現在のところIkaiとFukunaga (1968), Nariciら (1992), Kawakamiら (1994)およびFukunagaら (1995)の研究のみであり、SPTに関する情報が少ないのが現状である。

4. 様々なタイプのトレーニングが筋力と筋の形態的特性に及ぼす影響

A. 筋力トレーニング

a. 筋力と筋断面積および神経性因子

筋力トレーニングにともない筋断面積が増加することが多くの研究において報告されている (福永, 1978, 1990; Garfinkel and Cafarelli, 1992; Housh et al., 1992; Ikai and Fukunaga, 1970; Kawakami et al., 1994; Moritani and deVries, 1979; Narici et al., 1989; Roman et al., 1993). IkaiとFukunaga (1970)は肘屈筋

における100日間の等尺性筋力トレーニングを6名の男性に行わせたところ、トレーニングを開始して20日目では、筋力の有意な増加(約20%)が認められたが、その時点において筋断面積の有意な増加は認められなかった。その後さらにトレーニングを継続したところ、トレーニング開始100日目には筋力、筋断面積および絶対筋力の有意な増加が認められた。彼らは、トレーニング初期における筋力の有意な増加は神経系の改善によるものであることを示唆した。また、MoritaniとdeVries(1979)は若年群および老年群の2群に対して筋力トレーニングを行わせた。その結果、若年群の筋力トレーニング初期における筋力増加は、神経系の割合がそのほとんどを占め、その後の筋力増加に対しては筋肥大の貢献度が大きくなる。一方、老年群では筋力増加に対してトレーニング全般にわたり神経系の影響がその大部分を占めていることを示している。これらの研究は、筋力トレーニングの初期に生じる筋力の増加が主に神経系の改善によるものであることを示唆している。

一方、筋力トレーニングが筋電図(EMG)に影響を及ぼさないとする報告もみられる。Häkkinenら(1985)は24週間の筋力トレーニングを11名の男性に行わせた。その結果、トレーニング後には等尺性膝伸展力の有意な増加がみられたが、大腿直筋、外側広筋および内側広筋から得られたiEMGには変化がみられなかった。GarfinkelとCafarelli(1992)は等尺性膝伸展運動による筋力トレーニングを15人の女性に8週間実施させた。その結果、膝伸展力および大腿部の中央部における大腿四頭筋の筋断面積が有意に増加したが、外側広筋のEMG活性および単位面積当たりの筋力には変化がみられなかったことを報告している。これらの結果は筋力トレーニングにともない神経系の改善がなされなかったことを示唆する結果である。

b. 筋の形態的变化

Nariciら (1989)は角速度120 deg/secの等速性膝伸展動作による60日間の筋力トレーニング後において、MRIから得られた大腿四頭筋7カ所の筋断面積について検討した。その結果、筋断面積の増加率は7カ所において異なり、近位部が最も大きく(約13%)、一方遠位部では最も低値(約6%)を示した(図4)。さらに、大腿四頭筋を構成する各筋頭の筋断面積もその増加率は測定部位によって異なっていた。Houshら (1992)は角速度120 deg/secの等速性肘伸展・屈曲および膝伸展・屈曲動作の8週間の筋力トレーニングを行わせ、MRIから得られた上腕および大腿の3部位(近位部、中央部、遠位部)の筋断面積について検討した。その結果、肘伸筋では近位部および中央部の筋断面積が有意に増加し、一方、肘屈筋では全ての部位の筋断面積において有意な増加がみられた。大腿部の膝伸筋では中央部の筋断面積の増加が顕著で、中でも大腿直筋の筋断面積の増加率が他の筋頭と比較して最も高値を示した。大腿部の膝屈筋においても、中央部における半腱様筋の筋断面積の増加率が最も高値(26%)を示した。さらに、Romanら (1993)は高齢男性5名を被検者として、肘屈曲による筋力トレーニングを行わせ、MRIから得られた肘屈筋の起始部-停止部間の連続横断像から筋量の変化について検討した。その結果、トレーニング後の筋断面積の増加は筋腹部位において顕著であり、また肘屈筋の筋容積も有意に増加した(図5)。彼らは、筋力と筋断面積の相関関係より筋容積との相関関係がより密接であること、および筋力トレーニング後の筋断面積の増加率(13.6%)と筋容積の増加率(22.6%)が異なっていたことから、トレーニングにともなう筋量の変化の指標として筋容積がより適切であることを示唆している。

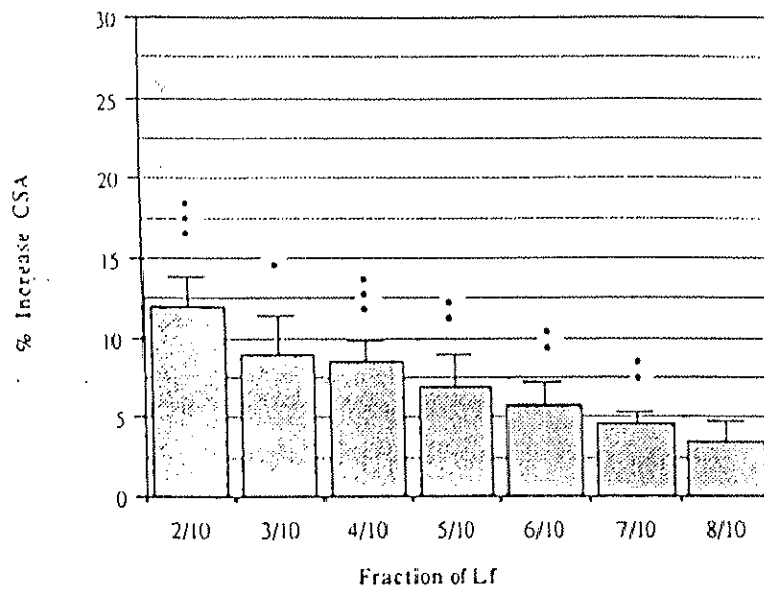


Fig. 4 Percentage increase in quadriceps cross-sectional area (CSA) at the seven fractions of femur length (Lf). *; $p < 0.05$, **; $p < 0.02$, ***; $p < 0.001$ (Narici et al., 1989)

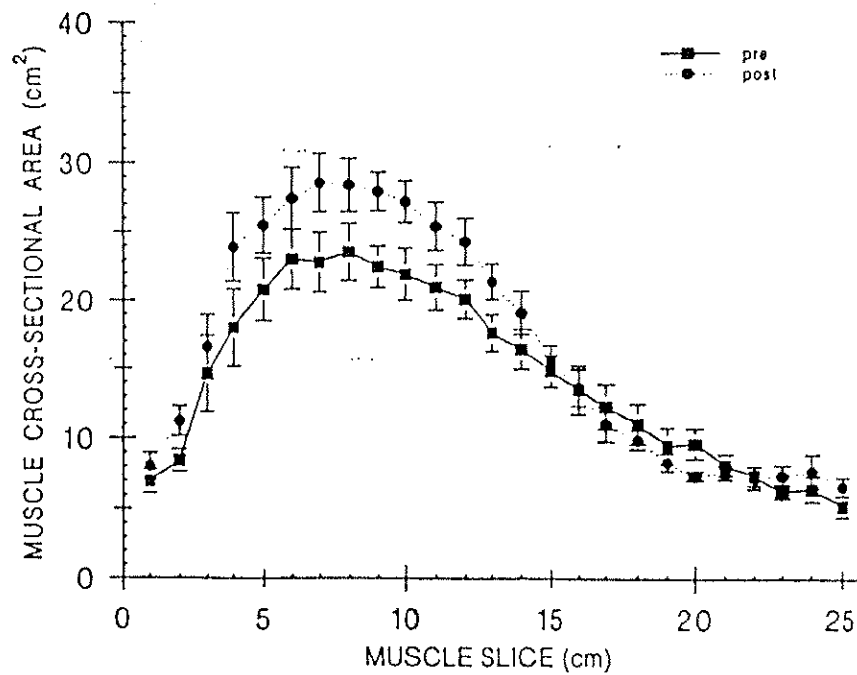


Fig. 5 Plot of flexor cross-sectional area (CSA) digitized from serial magnetic resonance imaging scans (right-proximal to left-distal) before (pre) and after (post) 12 wk of heavy-resistance training in 5 elder males. Area under curve, muscle volume of elbow flexors (biceps brachii and brachialis). (Roman et al., 1993)

B. スプリントトレーニング

スプリントトレーニングがヒトの筋の形態的特性に及ぼす影響に関する研究報告は非常に少ない。その中でも、Linossierら (1993)は自転車エルゴメーターを用いたスプリントトレーニングを週4回の頻度で7週間行わせた。1回のトレーニングでは8回の間欠的スプリント (5秒間の全力ペダリング, 55秒間の休息)を2セット行った。その結果、トレーニング後にはX線-CT法から得られた大腿中央部における外側広筋の筋断面積には変化が認められなかったことを報告している。

一方、スプリントトレーニングが筋力に及ぼす影響に関する研究もまた非常に少ない。Shealyら (1992)はランニングによるスプリントトレーニング後に等速性膝伸展力では低速から高速の角速度において有意な増加が認められたが、等速性膝屈曲力では、低速の角速度において有意な低下が認められたことを報告している。また、Thorstenssonら (1975)はランニングによるスプリントトレーニング後における等尺性最大膝伸展力が有意に増加したことを報告している。最近、Lynchら (1994)は自転車エルゴメーターによるスプリントトレーニングを6名の健康な男性に8週間行わせたところ、Type II線維の単一筋線維の張力が有意に低下したことを報告している。しかしながら、この原因については明らかにされていない。以上のように、スプリントトレーニングにともない、筋力の低下が生じることを示す研究がこれまでにいくつか報告されている。

C. 持久性トレーニング

持久性トレーニングがヒトの筋の形態的特性に及ぼす影響に関する研究は、主に筋生検法を用いて行われてきた。Gollnickら (1973)は75% $\dot{V}O_{2max}$ の強度、60分/日、4日/週、5カ月間の自転車エルゴメーターを用いた

トレーニング後にST線維の筋線維横断面積に有意な増加が認められたことを報告している。また、AndersenとHenriksson (1977)は5名の男性被検者を用いて、80% $\dot{V}O_2\max$ の強度、40分/日、4日/週、8週間の自転車エルゴメーターを用いたトレーニング後にType IIa線維、Type IIb線維の筋線維横断面積が有意に増加したことを報告している。

一方、持久性トレーニングが下肢の筋断面積に及ぼす影響について検討したものは非常に少ない。Saleら (1990)は、自転車エルゴメーターによる90-100% $\dot{V}O_2\max$ という非常に高強度の負荷で3分×5セット/日、3日/週、11週間の持久性トレーニング後に大腿部の筋断面積の有意な増加が認められたことを報告している。

一般的に持久性トレーニングにより筋力の増加は生じないとされている(勝田と田中, 1983; Dudley and Fleck, 1987)。しかしながら、Saleら (1990)は自転車エルゴメーターによる高強度の持久性トレーニングによってレッグプレスによる1RMの最大筋力が有意に増加した(約20%)ことを示している。

5. 活動量の減少が筋力と筋の形態的特性に及ぼす影響

ヒトの骨格筋に対する活動量の減少モデルとして、ベッドレストと下肢宙吊り法がよく用いられている。LeBlancら (1988)は5週間のベッドレスト後、足底屈筋では筋断面積および等速性足底屈力が有意に低下し、一方、足背屈筋では筋断面積および等速性足背屈力のいずれにおいても有意な変化がみられなかったことを報告している。さらに、LeBlancら (1992)は17週間のベッドレストにともない膝伸筋・屈筋の筋容積がそれぞれ16%、

9%低下し、足底屈筋・背屈筋の筋容積においてもそれぞれ30%、21%低下したことを示している。また、筋力に関しては低速度の角速度 (60 deg/sec)では膝伸展力および足底屈力において有意な低下が認められたが、膝屈曲力、肘伸展・屈曲力では有意な低下は認められなかったことを報告している。一方、高速の角速度 (120 deg/secあるいは180 deg/sec)では膝伸展力のみにおいて有意な低下が認められ、膝屈曲力、足底屈・背屈力、肘伸展・屈曲力ではベッドレスト16週間後でさえも有意な低下はみられなかったと報告している。また、ベッドレストにともなう筋線維あるいは筋原線維の変化について検討した研究も報告されている。Hikidaら (1989)は30日間のベッドレスト前後に外側広筋およびヒラメ筋から筋生検を行った。その結果、組織化学的分析からFT線維およびST線維ともに有意な筋線維横断面積の低下が認められた。また、電子顕微鏡を用いて筋の微細構造を調べた結果、ほとんどの筋原線維は正常であったが、通常の筋では見られないような異常な筋原線維もいくつか観察された。彼らはこのような筋原線維の異常が筋の収縮力を低下させる原因の一つであると示唆している。

ベッドレストよりも身体に対する負担を軽減させるため、下肢の筋の不活動を引き起こす下肢宙吊りモデルが開発され (図6)、いくつかの研究結果が報告されている。Hatherら (1992)は、3名の女性と5名の男性に対して下肢宙吊りを6週間行わせた結果、膝伸筋・屈筋、ヒラメ筋および腓腹筋の筋断面積が有意に減少したことを示した。また、膝伸筋では筋別の検討も行っており、大腿直筋を除く他の筋頭 (外側広筋、内側広筋、中間広筋)において有意な筋断面積の減少がみられたとしている。同時に外側広筋における筋生検から得られたサンプルより、筋線維レベルの検討も行っており、Type I線維とType II線維の筋線維横断面積はそれぞれ12%、15%

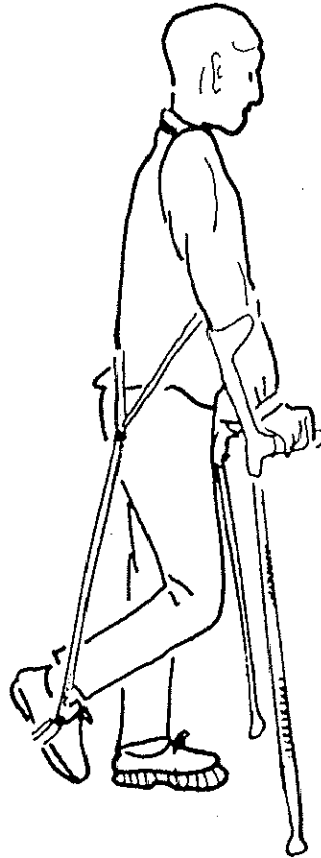


Fig. 6 Unilateral lower limb unloading model. (Berg et al., 1991)

低下したことを報告している。Bergら (1991)は4週間のヒトの下肢宙吊り後、大腿部の筋断面積の有意な低下を示した。さらに、下肢宙吊り1日後および4日後において、エキセントリック収縮およびコンセントリック収縮の等速性膝伸展力が有意に低下したことを報告している。

ベッドレストあるいは下肢宙吊りは下肢に対する重力負荷が減少することからスペースフライトのシミュレーションとして考えられているが、スペースフライトにともなう宇宙飛行士の骨格筋の変化について組織化学的観点から検討した研究もみられる。Edgertonら (1995)は8名(男性5名, 女性3名; 平均年齢39.9歳)の宇宙飛行士の5日および11日間のスペースフライト前後に外側広筋からの筋生検を実施した。その結果、筋線維組成では11日間のスペースフライト後に%Type I線維が有意に低下し、反対に%Type II線維は有意に増加した。また、筋線維横断面積はいずれの筋線維タイプ(Type I線維, Type IIa線維, Type IIb線維)においても16-36%の割合で有意に減少した。5日間のスペースフライトでは筋線維組成および筋線維横断面積に有意な変化は認められなかったが11日間のそれと同様な傾向を示した。酵素活性ではスペースフライト後(5日および11日間のスペースフライトを合わせて検討)のType II線維のATPase活性が有意に増加した。しかしながら、この論文の中ではスペースフライト期間の相違、スペースフライト前における宇宙飛行士の体力レベルの相違などのいくつかの問題点についても指摘されている。

6. スポーツ科学におけるMRIの応用

1983年より臨床医学で実用化されているMRIは、現在では脳神経系、脊

髓，筋関節系などの診断のために欠くことのできない検査法となっている。MRIの利点として，1) 軟部組織の視覚的な分離において明らかにX線-CT法より優れる。2) 放射線の被爆がない。3) 形態的情報ばかりでなく，代謝的情報を得ることができる，などの点が挙げられる。また，Benekeら(1991)はMRIから得られた屍体の大腿部における横断面積を超音波法およびX線-CT法から得られたそれを比較しており，MRIは他の2つの方法と比較して，筋組織における横断面積をより正確に測定できることを示した。また最近では，スポーツ科学の分野においてもMRIを用いた研究が増えつつある。

Nariciら(1989)およびHoushら(1992)はMRIから得られた上腕部あるいは大腿部における複数の横断像から筋力トレーニングが筋断面積に及ぼす影響について検討した。その結果，トレーニングにともなう肥大の程度が筋により異なることを示した。KatsutaとKuno(1990)は男女59名の国内一流選手を用いて，大腿部における筋の形態を種目別に検討し，筋の形態的特性が種目により異なることを示した。その例として，サッカー選手と陸上競技短距離選手を比較すると，両群とも大腿の上部では同様な筋断面積を示すが，下部では前者と比較して後方で筋量が少ないことが示されている。秋間ら(1990, 1992)および久野ら(1990)は国内一流サッカー選手の筋特性の評価にMRIを用いて検討しており，日本代表選手群はオリンピック・ユース代表選手あるいは日本リーグ選手と比較して筋量の多いことを報告している。また，MRIは一度に複数の横断像を得ることが可能なことから，ヒトの骨格筋における筋量(筋容積)の測定がなされている。Fukunagaら(1992)はヒトのPCSAの測定をMRIを用いて非侵襲的に測定することを試みている。彼らはヒトの下腿において起始部から停止部まで10 mm毎にACSAを測定し，得られた横断像から筋容積およびPCSAの

算出を行った。また、Gianniniら(1990)およびNariciら(1992)も大腿部における横断像より筋容積を算出し、さらに筋の走行角度あるいは筋線維長についての測定も可能とした。

また、MRIは形態的情報ばかりでなく筋の代謝的情報も得ることができ、Adamsら(1992)は4種類の異なる運動強度(40%、60%、80%、100%1ORM)による肘屈曲運動後のT2(横緩和時間)とiEMG(筋電図積分値)との関係についてコンセントリックおよびエキセントリック収縮別に検討している。その結果、コンセントリックおよびエキセントリック収縮ともにT2と運動強度との間には有意な正の相関関係が認められたことから、MRIから得られるT2を用いて、筋収縮の有無あるいは筋の活動レベルのような筋活動の評価が可能であることを示唆している。コンセントリック収縮とエキセントリック収縮を比較すると、前者は後者より同一負荷時のT2およびiEMGが高値を示した。さらにAdamsら(1993)はヒトの大腿四頭筋に対して、MVCの25、50、75%の筋力発揮を誘発するように電気刺激した直後にMRIによりT2を測定した。また、得られた横断像に画像処理を施し、筋の活性化部位の可視化を試みた。その結果、25、50、75%MVCの順に大腿四頭筋の横断面積に占める筋の活性化部分の面積が増加した(図7)。さらに、MVCにおいても大腿四頭筋の横断面積に占める筋の活性化部位の面積の割合は約70%であり、最大筋力発揮時においても全ての筋線維が動員されていない可能性を示唆している。

筋力トレーニングにともなうT2の変化と筋線維の動員様相に関する研究も行われている。Ploutzら(1994)は9人の男性の被検者に対して、等速性膝伸展運動による筋力トレーニングを2日/週の頻度で9週間行わせた。トレーニング後には膝伸展による最大挙上重量と大腿四頭筋の筋断面積が有意に増加した。またトレーニング後には、大腿四頭筋の活性部位の

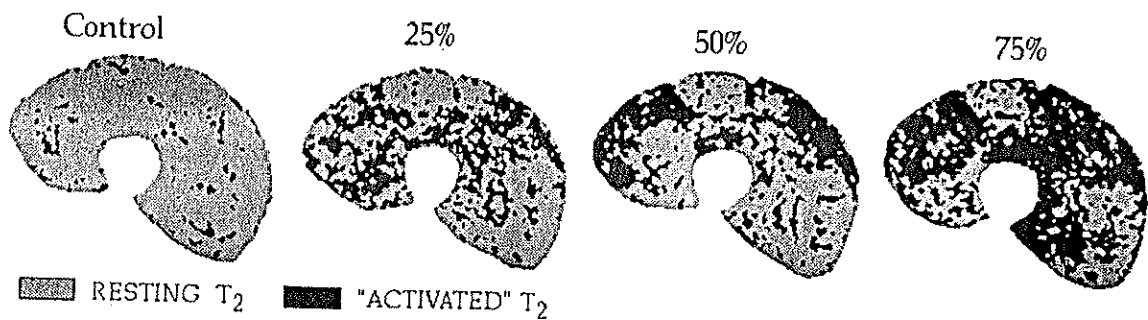


Fig. 7 Representative single slice T₂ maps of m. quadriceps femoris from one subject at rest (control) and after electrical muscle stimulation at a level that elicited an initial torque equal to 25, 50, or 75% of maximal voluntary isometric torque. Dark regions represent data set elements with T₂ value considered to be in stimulated range. (Adams et al., 1993)

面積がトレーニング前と同一の負荷を挙上したのかかわらず減少し、これは筋力トレーニングによる単位面積当たりの筋力の増加に起因すると結論している。

III. 検討すべき問題点および本研究の目的

以上の文献研究により本研究では次の問題点について検討することを目的とした。

1. 筋断面積と筋力との間には有意な正の相関関係が認められているが、それらの先行研究では筋断面積を1カ所の横断像でしか評価しておらず、その他の横断部位、さらには共働筋内の筋別の検討はなされていないため、それらがどのように影響するのかについては十分に明らかになっていない。

2. 筋線維組成(%FT線維あるいは% area FT線維)と等速性筋力との間に有意な相関関係を認めた研究と認めていない研究があり、一致した見解が得られていない。

3. これまで報告されてきたヒトの骨格筋におけるspecific tensionの値は、同一の筋群にもかかわらず、各研究間で一致した値が報告されていない。その原因の一つとして筋の量的指標を示すパラメーターである筋容積において筋萎縮が生じていると考えられる屍体の値を用いていたことが挙げられるが、生体を用いて検討した研究は非常に少なく、明らかになっていない点が多い。

4. ヒトの筋におけるspecific tensionの値が研究間で一致していない原因として生理学的断面積を測定する際の関節角度の影響が考えられる。生理学的断面積(=筋容積/筋線維長)は筋容積と比例し、筋線維長と反比例する関係にある。生理学的断面積を測定する場合の関節角度の変化は、これら2つのパラメーターに影響を及ぼすことが考えられ、その結果、生理学的断面積に対してのみならずspecific tension(=筋の張力/生理学的断

面積)にも影響する可能性が考えられる。しかしながら、これらについては全く明らかにされていない。

5. 筋力トレーニングの初期には筋肥大をともなうことなく筋力の増加が生じることが電気生理学的手法を用いた多くの研究において観察されている。この筋力の増加は動員される運動単位数の増加にともない、筋力発揮時に新たな筋線維が動員されたためであることが示唆されてきているが、これを実際に明らかにした研究は見当たらない。

6. スプリントトレーニングにともなう筋力および筋の形態的特性の変化に関する研究は非常に少なく、明らかになっていない。

7. 持久性トレーニングにともなう筋力および筋の形態的特性の変化に関する研究は非常に少なく、明らかになっていない点が多い。

8. ベッドレストのような不活動にともないヒトの骨格筋の形態的特性および筋力がどのように変化するのかに関する研究は非常に少なく、明らかになっていない。

以上の問題点を検討するために以下の7つの研究課題を設定し、実験を行った。

1. 大腿の3部位における大腿四頭筋の筋断面積および筋線維組成が等速性筋力に及ぼす影響

大腿部の異なる3部位(上部, 中央部および下部)における大腿四頭筋およびその各筋頭の筋断面積と筋線維組成が, 様々な角速度(30, 60, 180, 300, 450 deg/sec)における等速性筋力に及ぼす影響について検討する(実験D)。

2. 膝伸筋・屈筋における形態的特性と specific tension
ヒトの膝伸筋および屈筋におけるSPTに差があるのか否かについて、MRIにより得られた形態的特性を考慮し検討する (実験II).

3. 足関節の角度変化が生理学的断面積に及ぼす影響
足関節の角度変化がPCSAに及ぼす影響について検討するため、2つの足関節角度より算出したPCSAについて比較検討する (実験III).

4. 筋力トレーニング初期の筋力増加に影響する因子
筋力トレーニングの初期に生じる筋力増加に影響する因子について検討するため、等速性筋力、筋の形態的特性、緩和時間、筋電図積分値、組織化学的・生化学的分析結果から検討する (実験IV).

5. スプリントトレーニングにともなう等速性筋力と筋の形態的特性の変化
スプリントトレーニングがヒトの大腿部における筋の形態的特性、筋線維組成および等速性筋力に及ぼす影響について検討する (実験V).

6. 中強度の持久性トレーニングにともなう等速性筋力と筋の形態的特性の変化
中強度 ($60\% \dot{V}O_{2max}$)の持久性トレーニングがヒトの大腿部における筋の形態的特性および等速性筋力に及ぼす影響について検討する (実験VI).

7. 20日間のベッドレストが下肢骨格筋の筋力および形態的特性に及ぼす影響

20日間のベッドレストがヒトの下肢骨格筋の筋力および形態的特性に及ぼす影響について検討するため、PCSAあるいは筋容積をMRIを用いて測定し、筋力との関係について検討する(実験VII).

IV. 大腿の3部位における大腿四頭筋の筋断面積および筋線維組成が等速性筋力に及ぼす影響 (実験I)

1. 目的

これまでヒトの発揮する筋力に影響を与える因子として、筋線維組成および筋断面積などが示されている。筋線維組成と等尺性筋力および等速性筋力との関係では、それらの間に有意な正の相関関係が認められるとする報告 (Campbell et al., 1979; Clarkson et al., 1980; Coyle et al., 1979; Gregor et al., 1979; Grindrod et al., 1987, Ivy et al., 1981; Johansson et al., 1987; 琉子と福永, 1986; Ryushi and Fukunaga, 1986; Schantz et al., 1983; Suter et al., 1993; Tesch and Karlsson, 1978; Thorstensson et al., 1976; Thorstensson et al., 1977; Young et al., 1984)と認められないとする報告 (Froese and Houston, 1985; Grindrod et al., 1987; Maughan and Nimmo, 1984; Nygaard et al., 1983)がある。一方、等速性筋力と筋線維組成および筋断面積の両面より検討された研究は少ない (Johansson et al., 1987; Ryushi and Fukunaga, 1986)。それらの報告のうち、等速性筋力と筋断面積との関係について検討している研究では、その両者に有意な相関関係が認められている (Johansson et al., 1987; Schantz et al., 1983)。また、Schantzら (1983)は等速性膝伸展力と外側広筋における筋線維組成との間、等速性肘伸展力と上腕三頭筋における筋線維組成との間には有意な相関関係が認められないことを報告している。一方、Johanssonら (1987)はType II線維の筋線維横断面積と等速性膝伸展力との間に有意な相関関係が認められることを示している。さらに、Type IIa線維の筋線維横断面積と等速性膝伸展

力を筋断面積で除した単位面積当たりの筋力との間においても有意な相関関係が認められることを示している。

一方、IkaiとFukunaga (1968)は超音波法を用いて、非侵襲的に筋断面積を測定し、等尺性筋力が筋断面積と比例関係にあることを認めた。それ以後、多くの研究において筋断面積と筋力との間には正の相関関係が認められている (Alway et al., 1990; Häkkinen and Keskinen, 1989; Kawakami et al., 1993; Maughan et al., 1983a, 1983b; Maughan and Nimmo, 1984; Nygaard et al., 1983; Schantz et al., 1983; Young et al., 1984, 1985)。しかしながら、それらの研究は大腿長あるいは上肢長などの中央部における一つの横断面積のみと筋力との関係をみたものであった。それに対し、KatsutaとKuno (1992)はMRIから得られた十数枚の大腿部の横断像を用いて、異なる競技ごとに十数カ所の筋断面積を検討したところ、種目によりその形態が大きく異なり、特に大腿の下部において顕著であったことを報告している。大腿部全体で筋力を発揮していることを考えると、この研究はこれまで多くの研究で検討されてきたような大腿の中央部のみの筋断面積によって大腿部全体の筋形態を反映することが困難であることを示唆している。したがって、このような形態的差異が筋力に影響を及ぼすことは十分に予想されるため、中央部以外の数カ所の筋断面積と筋力との関係についても検討する必要性が考えられる。

そこで本研究では、筋線維組成および異なる3カ所の大腿四頭筋とそれを構成する各筋頭の筋断面積と等速性筋力との関係について検討することを目的とした。

2. 方法

A. 被検者

被検者には男子の体育専攻学生35名を用いた(年齢 21.9 ± 2.4 歳, 身長 172.8 ± 6.1 cm, 体重 66.1 ± 7.4 kg). 被検者が行っていた競技種目は, 陸上短距離 (n=2)・長距離 (n=7), サッカー (n=18)であり, 他の被検者 (n=8)は定期的なトレーニングを行っていなかった. また, 全ての被検者に実験の主旨, 内容および危険性についてあらかじめ説明し, 参加の同意を得た.

B. 筋線維組成

被検者には事前に実験内容の説明および筋生検における安全性・問題点を記述した文書を配り, 同意の得られた被検者のみを測定に用いた. 筋生検は整形外科の医師により実施され, 膝蓋骨上端の近位6~8 cm, 深さ3~4cmの右大腿部外側広筋より約20 mgの筋サンプルを摘出した. 得られた筋サンプルは, 直ちに液体窒素にて冷却されたイソペンタン中で瞬間凍結した後に -80°C で保存され, クリオスタット (OT/FAS 5030, Bright社製)を用いて, 厚さ $10\ \mu\text{m}$ の連続切片を作成し, これを組織化学的染色に用いた. 組織化学的染色として, 筋線維をFT線維およびST線維に分類するためmyosin ATPase染色 (preincubation pH 10.3)を行った (Padykula and Herman, 1955). また, NADH-TR染色を施した連続横断切片に対して, myosin ATPase染色から分類されたFT線維およびST線維をランダムにそれぞれ50本ずつトレースし, コンピューター (PC-9801ns; NEC)に接続されたデジタイザー (KD4030; Graphtec社製)を用いて, 筋線維別に平均の横断面積を算出した.

C. 筋断面積

MRI (Signa, 1.5T; GE社製)を用いて得られた右大腿部の縦断像より大転子および外側顆間結節を同定した後、大転子-外側顆間結節間の大転子から遠位30%の位置より、スライス厚10mm、スライス間隔12mmで遠位方向に15枚の横断像を連続的に撮影した(図8)。得られた横断像をフィルムに現像した後、大転子-外側顆間結節間の大転子より遠位30, 50, 70%に相当する部位(それぞれ上部, 中央部, 下部とする)の横断像(図9)の大腿四頭筋部分をトレースし、筋線維横断面積の算出の際と同一のコンピューターおよびデジタイザーを用いて筋断面積を求めた。なお、MRIの測定は仰臥位で行われ、膝関節は完全伸展させた状態であった。

MRIの測定精度について検討するため、大きさの異なる容器(n=7)に水を満たし、本実験と全く同様の測定条件でMRIの測定を行った。その結果、異なる容器を実測して得られた断面積の平均値(Q_0)は $55.8 \pm 45.1 \text{ cm}^2$ を示し、また、MRIより得られた断面積の平均値(Q_1)は $57.3 \pm 46.2 \text{ cm}^2$ であり、MRIによる測定誤差 $[(Q_1 - Q_0)/Q_0 \cdot 100]$ は2.7%であった。さらに実測より得られた断面積をx、MRIより得られたものをyとして得られた回帰直線は $y = 1.02x + 0.16$ ($r = 1.0, p < 0.01$)であった。以上のことから、MRIによる筋断面積の測定誤差は非常に小さく、無視できるほどのものであると判断した。

D. 等速性膝伸展力

等速性筋力測定器であるバイオデックス (Biodex社製)を用いて、等速性膝伸展力を測定した。用いた角速度は30, 60, 180, 300, 450 deg/secであった。ほとんどの被検者は等速性膝伸展力の測定経験があり、測定経験がない者に対しては測定前に疲労しない程度に十分な練習を行った。

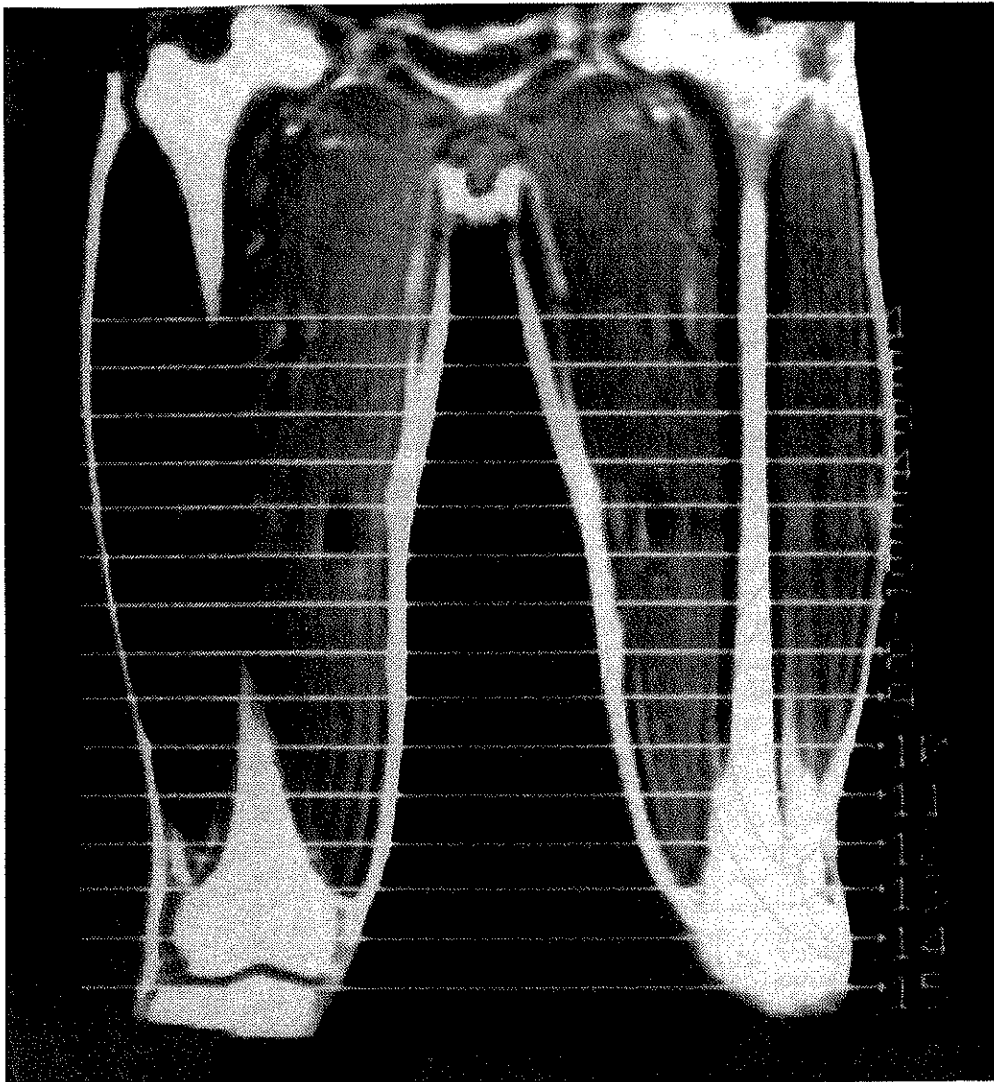
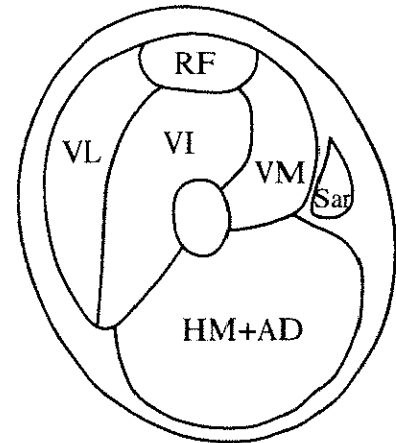
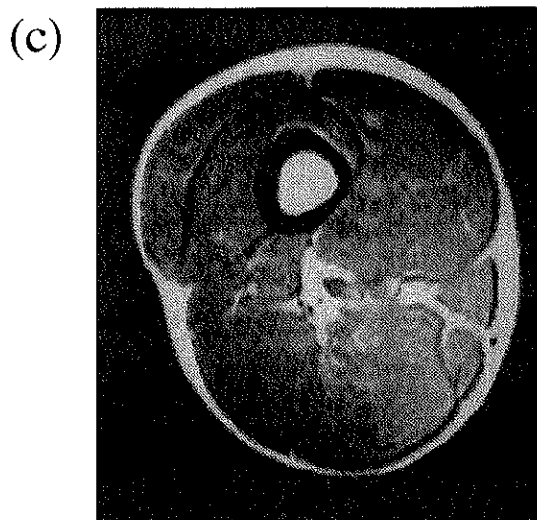
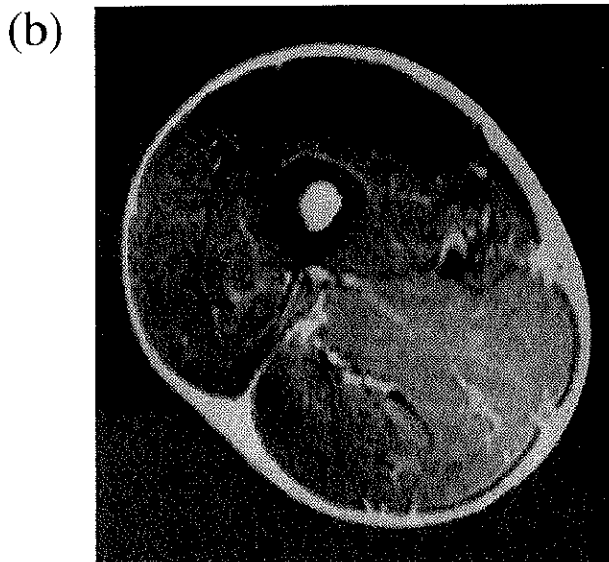
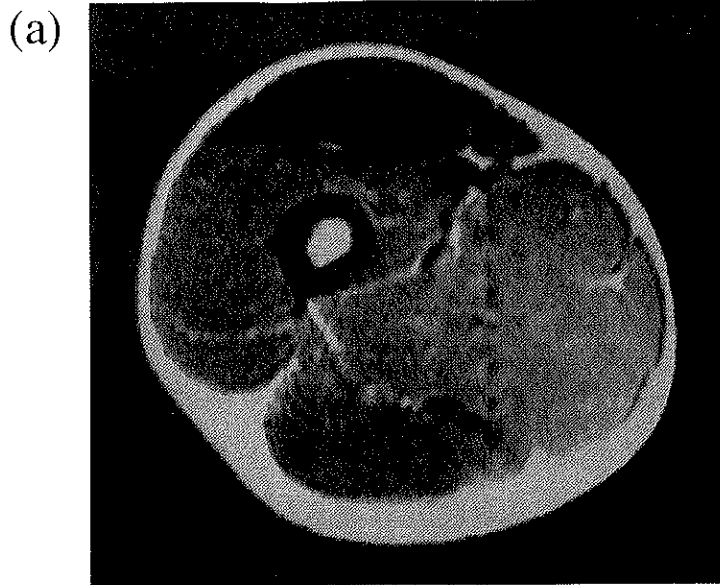


Fig. 8 Magnetic resonance imaging scans of coronal planes of right-leg thigh. The numbers at right side of the image shows the axial scan position.



RF; rectus femoris
VL; vastus lateralis
VI; vastus intermedius
VM; vastus medialis
Sar; sartorius
HM+AD; hamstring and adductors

Fig. 9 The axial images of right-leg thigh at upper (a), middle (b), and lower (c) level from *great trochanter* to *lateral intercondoylar tuberculum*.

被検者を測定用の椅子に座らせ、肩、腹、大腿部を専用ベルトにて固定した。また、測定時における姿勢は、筋力発揮に最も適した姿勢とし、1つの角速度に対して3回ずつ(ただし、300、450 deg/secにおいては5回の試行を行った)最大努力で連続して測定し、そのピークトルクを算出した。筋力測定の前にはキャリブレーションを行っているため、得られたピークトルクは重力補償がなされた値である。なお、疲労の影響を除くため、各測定間には十分な休息時間を設けた。

高速の角速度である300、450 deg/secではピークトルク算出における測定誤差が生じることが予想されるため、異なる日に再現性のテストを本実験と同様な条件で、3人の被検者の左右脚について測定したところ、300 deg/secでは $r=0.99$ ($y=1.07x-10.15$, $p<0.01$), 450 deg/secでは $r=0.98$ ($y=0.97x+3.68$, $p<0.001$)の関係が得られ(ただし、 x ; 1回目の値, y ; 2回目の値), 角速度300および450 deg/secともに2回の測定間に有意な差は認められなかった。

E. 統計処理

大腿部の筋断面積における差の検定には一元配置の分散分析を用い、また等速性膝伸展力と筋線維組成および筋断面積との関係については、ピアソンの相関係数を用いた。危険率5%をもって有意とした。

3. 結果

A. 筋線維組成

被検者の外側広筋における%FT線維および% area FT線維はそれぞれ

52.9±13.9および54.5±11.2%であった。

B. 筋断面積

図10には大腿四頭筋の3部位(上部, 中央部, 下部)における筋断面積を示した。3部位において最も高値を示したのは大腿中央部の82.2±12.4 cm²であり, 大腿下部における筋断面積(60.0±10.8cm²)と比較して有意に高値を示した(p<0.01)。また, 大腿上部の筋断面積(77.4±12.1cm²)においても大腿下部のそれと比較して有意に高値を示した(p<0.01)。一方, 大腿上部と中央部との間に有意な差は認められなかった。

図11には大腿上部, 中央部および下部における大腿直筋, 外側広筋, 中間広筋, 内側広筋の筋断面積について示した。大腿上部では外側広筋が他の3つの筋頭より有意に高値を示した(p<0.05)。また, 中間広筋は大腿直筋および内側広筋と比較して有意に高値を示し(p<0.05), さらに大腿直筋は内側広筋と比較して有意に高値を示した(p<0.05)。

大腿中央部においても, 外側広筋は他の3つの筋頭と比較して, また中間広筋は大腿直筋および内側広筋と比較して有意に高値を示した(それぞれ, p<0.05)。さらに, 内側広筋は大腿直筋より有意に高値を示した(p<0.05)。

大腿下部では, 内側広筋が他の3つの筋頭より有意に高値を示した(p<0.05)。また, 中間広筋は大腿直筋および外側広筋と比較して有意に高値を示し(p<0.05), さらに外側広筋は大腿直筋より有意に高値を示した(p<0.05)。

また, 大腿四頭筋を構成する4つの筋の筋腹部位は, 大腿直筋および外側広筋では大腿の上部, 中間広筋は大腿の中央部, 内側広筋は大腿の下部にみられた。

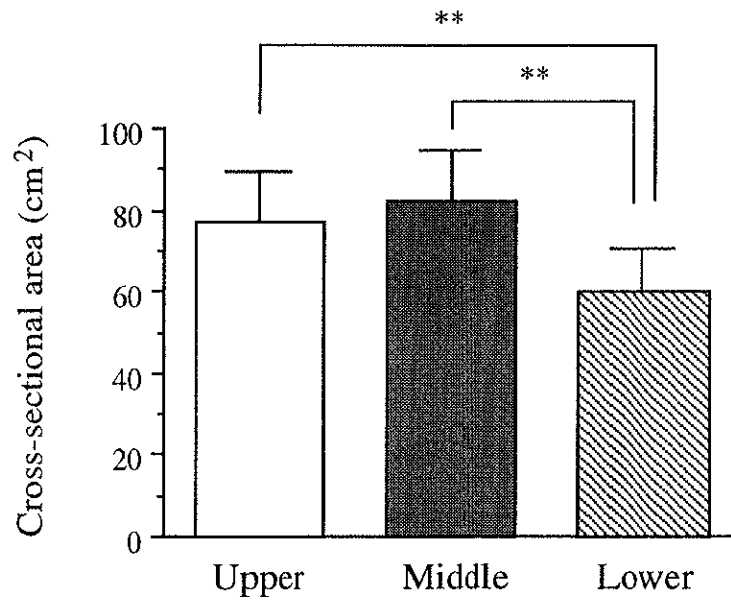


Fig. 10 Cross-sectional area of quadriceps femoris at upper, middle, and lower level of thigh.

**; $p < 0.01$.

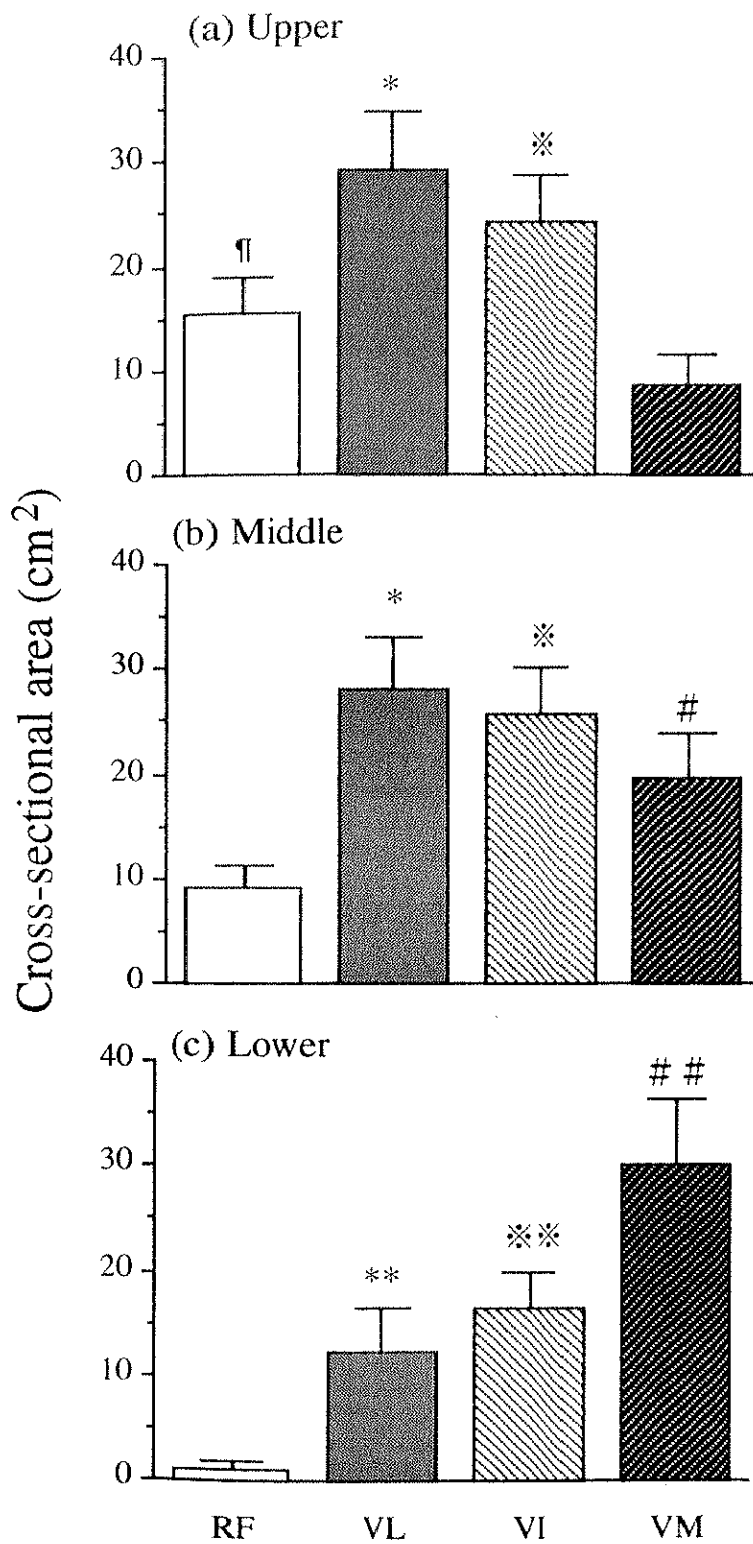


Fig. 11 Cross-sectional areas of rectus femoris (RF), vastus lateralis (VL), vastus intermedius (VI), and vastus medialis (VM) at upper, middle, and lower level of thigh.
 *; $p < 0.05$ vs RF, VI and VM: ※; $p < 0.05$ vs RF and VM: †; $p < 0.05$ vs VM: #; $p < 0.05$ vs RF; **; $p < 0.01$ vs RF; ※※; $p < 0.05$ vs RF and VL: ##; $p < 0.05$ vs RF, VL, and VI.

C. 等速性膝伸展力

角速度30, 60, 180, 300, 450 deg/secにおける等速性膝伸展力の値はそれぞれ 232.6 ± 50.6 , 206.2 ± 43.6 , 142.5 ± 29.0 , 110.2 ± 21.3 , 92.8 ± 17.8 Nmであり, 角速度の増加にともない等速性膝伸展力は低下した。

D. 等速性膝伸展力の絶対値および単位面積当たりの筋力と筋線維組成との関係

表1には, %FT線維および% area FT線維と角速度30, 60, 180, 300, 450 deg/secにおける等速性膝伸展力の絶対値との相関関係について示した。%FT線維および% area FT線維ともに, いずれの角速度の等速性膝伸展力の絶対値との間に有意な相関関係は認められなかった。

表2には等速性膝伸展力を大腿下部の筋断面積で除した単位面積当たりの筋力と%FT線維および% area FT線維との関係について検討した。本研究では膝蓋骨頭より近位6~8 cmの外側広筋より筋生検を実施しており, これは大腿下部の横断部位とほぼ一致しているため, 大腿下部の単位面積当たりの筋力を算出した。角速度60 deg/secにおける単位面積当たりの筋力と%FT線維および全ての角速度における単位面積当たりの筋力と% area FT線維との間に有意な正の相関関係が認められた。

E. 等速性膝伸展力と筋断面積の関係

表3には等速性膝伸展力と大腿の上部, 中央部および下部の横断面積との相関関係について示した。等速性膝伸展力と大腿の上部, 中央部および下部における筋断面積との間には全ての角速度において有意な正の相関関係が認められた。大腿上部および中央部の相関係数は, それぞれの角速度において非常に類似した値であった。

Table 1 Correlation coefficients between the isokinetic strength and muscle fiber composition.

deg/sec	%FT fibers	% area FT fibers
30	0.06	0.22
60	0.08	0.21
180	0.02	0.13
300	0.02	0.16
450	0.10	0.22

Table 2 Correlation coefficients between muscle fiber composition and isokinetic strength per unit of lower level of cross-sectional area.

deg/sec	%FT fibers	%area FT fibers
30	0.31	0.47 **
60	0.36 *	0.50 **
180	0.23	0.39 *
300	0.29	0.44 **
450	0.29	0.39 **

*; p<0.05. **; p<0.01

Table 3 Correlation coefficients between the upper, middle and lower level of cross-sectional area of quadriceps femoris and isokinetic strength.

deg/sec	Upper	Middle	Lower
30	0.67 **	0.66 **	0.54 **
60	0.65 **	0.68 **	0.55 **
180	0.67 **	0.68 **	0.56 **
300	0.66 **	0.67 **	0.58 **
450	0.42 *	0.42 *	0.35 *

*; p<0.05. **; p<0.01

F. 大腿四頭筋を構成する各筋頭の筋断面積と等速性膝伸展力との関係

表4には大腿四頭筋を構成する各筋頭の筋断面積と等速性膝伸展力との関係について示した。大腿上部では外側広筋の筋断面積と全ての角速度の等速性膝伸展力との間に有意な相関関係が認められた。また、中間広筋および内側広筋の筋断面積と角速度30~300 deg/secにおける等速性膝伸展力との間に有意な相関関係が認められたが、角速度450 deg/secでは有意な相関関係は認められなかった。大腿直筋では角速度30, 60, 300 deg/secの等速性膝伸展力との間にのみ有意な相関関係が認められた。

大腿中央部では外側広筋および中間広筋の筋断面積とすべての角速度の等速性膝伸展力との間に有意な相関関係が認められた。また、内側広筋では450 deg/secを除くすべての角速度において有意な相関関係が認められた。

大腿下部では全ての角速度の等速性膝伸展力と内側広筋の筋断面積との間に最も高い相関関係が認められた。また角速度30~300 deg/secの等速性膝伸展力と中間広筋の筋断面積との間に有意な相関関係が認められた。大腿上部および中央部で高い相関関係が認められた外側広筋ではいずれの角速度においても有意な相関関係は認められなかった。

4. 考察

これまで等速性筋力と筋線維組成あるいは筋断面積との関係について、多くの研究が行われてきている。しかしながら、等速性筋力と筋線維組成との関係をみた研究の結果は一致していない。また同一の被検者につ

Table 4 Correlation coefficients between three different parts of quadriceps femoris cross-sectional areas and peak torque.

deg/sec	Upper				Middle				Lower					
	RF	VL	VI	VM	RF	VL	VI	VM	VL	VI	VM	VL	VI	VM
30	0.46**	0.66**	0.48**	0.39*	0.38*	0.54**	0.57**	0.51**	0.17	0.46**	0.51**	0.17	0.46**	0.51**
60	0.41*	0.69**	0.43**	0.34*	0.36*	0.53**	0.59**	0.57**	0.17	0.47**	0.56**	0.17	0.47**	0.56**
180	0.33	0.77**	0.45**	0.37*	0.31	0.56**	0.62**	0.53**	0.15	0.45**	0.61**	0.15	0.45**	0.61**
300	0.35*	0.75**	0.43*	0.37*	0.31	0.53**	0.61**	0.54**	0.20	0.46**	0.62**	0.20	0.46**	0.62**
450	0.23	0.61**	0.19	0.12	0.16	0.36*	0.37*	0.33	0.10	0.24	0.38*	0.10	0.24	0.38*

*; p<0.05, **; p<0.01.

いて筋線維組成および筋断面積の両面から検討した報告は少なく (Johansson et al., 1987; Ryushi and Fukunaga, 1986), それぞれの要因がどの程度筋力発揮に影響しているのかについては明らかにされていない。

最初に外側広筋における筋線維組成が大腿四頭筋全体のそれを反映しているか否かについて検討する。先行研究では大腿四頭筋を構成する4つの筋において同一個人内では各筋頭の筋線維組成には大きな違いは認められておらず (Johnson et al., 1973), また大腿四頭筋を構成する4つの筋は, 収縮時には均等に張力を発揮することが示されている (Alexander and Vernon, 1975). したがって, 本研究で得られた外側広筋の筋線維組成は大腿四頭筋全体の筋線維組成を反映する指標であると判断した。

本研究では同一の被検者に対して筋線維組成と筋断面積を測定し, 等速性膝伸展力との関係について検討した。その結果, 等速性膝伸展力と%FT線維および% area FT線維との間にはいずれの角速度においても有意な相関関係は認められなかった。しかしながら, 角速度60 deg/secにおける単位面積当たりの筋力と%FT線維との間, および全ての角速度における単位面積当たりの筋力と% area FT線維との間に有意な正の相関関係が認められた。これらの結果は% area FT線維が単位面積当たりの筋力に影響していることを示しており, Johanssonら (1987)および Ryushiと Fukunaga (1986)の結果を支持するものであった。%FT線維はFT線維の数の割合を表す指標であり, 一方, % area FT線維はFT線維の面積占有率を示す指標であることから, 単位面積当たりの筋力発揮には, 当然のことながらFT線維の数ではなくFT線維の占める量的要因が重要であることが示唆される。% area FT線維と単位面積当たりの筋力との間に有意な相関関係が認められた原因として, 被検者がこれまで行ってきたトレーニングの影響が考えられる。筋力トレーニングは筋力の増加にともない筋の

FT線維を選択的に肥大させることが報告されてきている (Roman et al., 1993; Saltin and Gollnick, 1983). また、筋力トレーニングのような瞬発的な筋力発揮中心のトレーニングを行っていたと思われるスプリンターは、持久的なトレーニングを中心に行っていたと思われるマラソンランナーより単位面積当たりの筋力が高値を示すことが報告されてきている (Häkkinen and Keskinen, 1989; Maughan et al., 1983b). 本研究には様々な身体レベルの被検者が参加しており、専門的な筋力トレーニングあるいは持久的トレーニングを行ってきた者から現在ではほとんど身体活動を行わない者までいた。このような被検者のトレーニング状況の違いが % area FT線維と単位面積当たりの筋力との間に有意な相関関係が認められた原因の一つと考えられる。また、この両者の相関係数を角速度別に比較しても、一定の傾向はみられなかった。これは本研究で用いた角速度の範囲において、% area FT線維は単位面積当たりの筋力に影響を及ぼしているが、角速度の違いによる% area FT線維の貢献度には差がないことを示唆している。

これまで多くの研究において筋力と筋断面積の間には有意な正の相関関係が認められることが示されている (Alway et al., 1990; Häkkinen and Keskinen, 1989; Kawakami et al., 1993; Maughan et al., 1983a, 1983b; Maughan and Nimmo, 1984; Nygaard et al., 1983; Schantz et al., 1983; Young et al., 1984, 1985). しかしながら、それらのほとんどの研究では、ある特定の一部位 (主に中央部) の筋断面積と筋力の関係について検討されたものであった。大腿部を構成する筋は筋量、筋腹の位置あるいは筋長などの筋の形態的特性が異なるため (Katsuta and Kuno, 1990; 松垣ら, 1993), 大腿部のどこに多くの筋量があるのかというような形態的な違いが等速性筋力に影響を及ぼす可能性が考えられる。したがって、このような形態的

な差異を考慮するためには、複数の筋断面積と筋力との関係について検討する必要性が考えられる。そこで、本研究では大腿部の上部、中央部および下部における筋断面積と等速性膝伸展力との関係について検討した。

大腿の3部位における筋断面積と等速性膝伸展力との間には、それぞれ有意な正の相関関係が認められた。さらに、その相関係数は上部および中央部が下部と比較して高値を示した。これは大腿上部および中央部における筋断面積が下部と比較して有意に高値を示したことに起因するもので、大腿の上部から中央部における筋量が筋力発揮により大きく影響することを示唆している。この結果は先行研究で示されている大腿の中央部における筋断面積と等速性筋力との間に有意な相関関係が認められるとする報告 (Alway et al., 1990; Häkkinen and Keskinen, 1989; Maughan et al., 1983a, 1983b; Maughan and Nimmo, 1984; Nygaard et al., 1983; Schantz et al., 1983; Young et al., 1984, 1985)と一致しており、これまで行われてきたように筋の中央部の筋断面積を代表値として用いることが妥当であることを示しているものと思われる。しかしながら、これまでに大腿部のどの部位が等速性膝伸展力に貢献しているのかについては、全く明らかにされておらず、この点に関しては本研究のオリジナリティーの一つであると考えられる。また、KatsutaとKuno (1992)は、国内の一流スポーツ選手において大腿部の筋形態は大腿下部において顕著に異なるという結果を示している。特に、内側広筋では本研究で用いた大腿下部の付近が筋腹部位となっており (実験II参照)、これが筋力発揮に影響することが十分予想されるが、大腿の1カ所からの検討ではこの点を見逃す可能性が考えられる。本研究では大腿下部の筋断面積は他の2つの部位と比較して、等速性膝伸展力との相関係数は低いが、いずれの角速度においても有意

な相関関係が認められており、これはこの部分の筋断面積が筋力発揮に影響を及ぼすことを示している。したがって、今後は大腿部の数カ所から得られた筋断面積、あるいは各筋頭の筋断面積が筋力に対してどのような影響を及ぼすのかについてスポーツ種目別に検討し、スポーツ種目により一定の関係が認められるのか否かというような観点から検討する必要性が示唆される。

一方、等尺性筋力あるいは等速性筋力と筋断面積との関係について検討した研究では、筋断面積を伸筋群あるいは屈筋群のような機能的に同一の筋群を合わせて評価してきており、さらに詳細に筋群を識別した研究は非常に少ない(福永と金久, 1990, Kawakami et al., 1993)。そこで本研究ではMRIを用いることにより、さらに詳細な筋群の識別を行った。前述のように、これまで筋断面積と等尺性筋力あるいは等速性筋力との間には有意な正の相関関係があることが示されている。つまり、これは筋断面積が大きい者は大きな筋力発揮ができることを示している。この関係は大腿四頭筋を構成する各筋頭の断面積と等速性筋力との間においても成立するようである。例えば、大腿上部では外側広筋の筋断面積が最も高値を示し、等速性膝伸展力との相関係数も他の筋と比較して全ての角速度において高値を示した。また、大腿下部において筋断面積が最も高値を示した内側広筋では、等速性膝伸展力との相関係数が全ての角速度において最も高値を示し、特にそれは180, 300 deg/secにおいて顕著であった。しかしながら、大腿中央部ではそのような明らかな関係は認められなかった。さらに、大腿の3部位において大腿四頭筋を構成するそれぞれの筋について検討してみると、筋断面積と等速性膝伸展力との相関関係は筋腹がみられた部位において他の2つの部位と比較して高値を示す傾向がみられた(図11, 表4)。これは一つの筋において、その筋腹部位の

筋断面積が等速性膝伸展力に大きく影響していることを示唆している。また大腿下部における筋断面積と等速性膝伸展力の相関係数および大腿下部における内側広筋の筋断面積と等速性膝伸展力との相関係数の値は類似していた。大腿下部は約半数の被検者において大腿直筋が消失しており、さらに外側広筋および中間広筋の筋断面積もそれぞれの筋の停止部に近いため小さい(図11)。そして、大腿下部における内側広筋は筋腹に近い部分で、その部位の筋断面積の50%を占める。したがって両者の相関係数が類似していたことは大腿下部の筋断面積が内側広筋の筋断面積に大きく左右されることに起因しているものと思われる。このように等速性膝伸展力とその主働筋を構成する各筋頭との関係について異なるいくつかの横断面から検討することは、各横断面における大腿四頭筋の各筋頭が筋力発揮に及ぼす影響を推定できる可能性を示唆している。

5. 要約

筋線維組成および大腿部の上部、中央部、下部における筋断面積と等速性膝伸展力(角速度30, 60, 180, 300, 450 deg/sec)との関係について検討した。結果の要約を以下に示した。

1) 大腿上部および中央部の筋断面積は下部と比較して有意に高値を示した。

2) 等速性膝伸展力の絶対値と筋線維組成(%FT線維, % area FT線維)の間にはいずれも有意な相関関係は認められなかった。しかしながら、等速性膝伸展力を大腿下部の筋断面積で除した単位面積当たりの筋力と% area FT線維の間には、全ての角速度において有意な正の相関関係が

認められた。

3) 等速性膝伸展力の絶対値と大腿3部位の筋断面積との間には測定に用いた全ての角速度において、それぞれ有意な正の相関関係が認められた。また、その相関係数は筋断面積が高値を示した大腿上部および中央部が下部と比較して高い相関係数を示した。

4) 等速性膝伸展力の絶対値と大腿四頭筋を構成する各筋頭の筋断面積との関係において、大腿上部では外側広筋、中央部では外側広筋、中間広筋および内側広筋が、また大腿下部では内側広筋において高い相関関係が認められた。

以上のことより、単位面積当たりの筋力には% area FT線維が、また等速性膝伸展力の絶対値には大腿上部から中央部における外側広筋および大腿の中央部における中間広筋および内側広筋の筋断面積が影響を及ぼしていることが示唆された。

V. 膝伸筋・屈筋における形態的特性と specific tension (実験II)

1. 目的

これまでヒトの膝伸筋 (KE) および膝屈筋 (KF) の specific tension (SPT) に関していくつかの研究結果が報告されている。Maughanら(1983)はX線-CT法を用いて大腿中央部における1カ所のACSAと等尺性膝伸展力よりSPTを算出しており、その値は 10 N/cm^2 であったとしている。また、Nariciら(1988)はMRIから得られたKEのACSAと等尺性最大膝伸展力から算出されたSPTは 80 N/cm^2 であったと報告している。さらにWickiewiczら(1984)は屍体のKEにおけるPCSAと成人男性から得られた最大膝伸展力よりSPTを算出しており、その値は 42 N/cm^2 であったことを報告している。最近では、Nariciら(1992)およびGianniniら(1990)はMRIを用いて、ヒトのKEにおけるPCSAを非侵襲的に測定し、SPTを算出したところ、それぞれ 23 N/cm^2 、 29 N/cm^2 であったことを報告している。一方、KFのSPTについて報告されたものはKEと比較すると少ない(Narici et al., 1988; Wickiewicz et al., 1984)。その中でも、Wickiewiczら(1984)はKEと同様な方法によりKFのSPTを算出しており、その値は 79 N/cm^2 であるとしている。また、Nariciら(1988)はKFのSPTをMRIを用いた研究より 71 N/cm^2 であると報告している。このように、これまで報告されたKEおよびKFのSPTの値は非常に広範囲(KE; $10 \sim 80 \text{ N/cm}^2$, KF; $71 \sim 79 \text{ N/cm}^2$)に及んでいる。SPTが広範囲に及ぶ原因に関して2つの可能性を考慮し実験を行った。

第一として、SPTの算出にPCSAではなくACSAを用いたことが挙げられ

る。KEあるいはKFのような羽状筋では通常、PCSAとACSAの大きさは異なり、PCSAがACSAの数倍になることが示されてきている (Fukunaga et al., 1992)。実際には、SPTは筋張力をACSAではなく、PCSAで除した値であるので、PCSAの代わりにACSAを用いていたことが、SPTの値の不一致をもたらした原因の一つと考えられる。第二として、PCSAの算出に屍体のデータを用いていたことが挙げられる。屍体では薬品処理による筋の水分状態の変化、筋萎縮および生前の身体活動レベルの違いなどが問題点として指摘されてきている (Cutts, 1988; Friedrich and Brand, 1990, Fukunaga et al., 1992)ため、屍体の筋では生体のそれを反映していないことが考えられる。これらのことを考慮し、本研究ではMRIを用いて非侵襲的にヒトのKEおよびKFのPCSAを算出した。さらに、これまでのSPTに関するほとんどの研究では静的な筋力発揮に関するものだけが検討されてきた (Haxton, 1944; Ikai and Fukunaga, 1968; Edgerton et al., 1986)。しかしながら、実際の運動場面においては、静的な筋力発揮より動的な筋力発揮が多いことを考えると、後者についても検討する必要性があると考えられる。したがって、本研究では動的な筋力発揮におけるSPTを筋線維速度／筋線維長 (筋節当りの収縮速度を意味する)を用いて、KEとKFのSPTを筋節レベルで検討を行った。

ところで、これまでに拮抗筋であるKEおよびKFのSPTを比較した研究は非常に少ない (Narici et al., 1988; Wickiewicz et al., 1984)。動物の骨格筋を用いた研究では筋に関係なくSPTはほぼ一定 (22.4 N/cm^2)であることが報告されている (Powell et al., 1984)。したがって、in vivoで得られたヒトの骨格筋におけるSPTも拮抗筋間では同一の値になることが予想される。さらに、KEとKFのSPTを比較した先行研究 (Narici et al, 1988; Wickiewicz et al., 1984)では、SPTの算出に屍体の筋サンプルを用いたり (Wickiewicz et

al., 1984), PCSAではなくACSAを用いていたりしている (Narici et al., 1988)ので, それらの2つの筋群のSPTを単純に比較することには問題が残るものと思われる.

そこで, 本研究ではMRIを用いて, 健康な成人男性のKEおよびKFにおけるPCSAを算出し, ヒトのKEおよびKFにおけるSPTについて比較検討することを目的とした.

2. 方法

A. 被検者

被検者には鍛錬された成人男性22名を用いた (年齢 23.3 ± 2.8 歳, 身長 175.3 ± 6.9 cm, 体重 68.6 ± 7.8 kg). 全ての被検者に実験の主旨, 内容および危険性についてあらかじめ説明し, 参加の同意を得た.

B. 解剖学的断面積および筋容積

筋の長軸方向に垂直な筋断面積を表わすACSAの測定には, 筑波大学附属病院に設置されている超電導MR装置 (Signa : GE社製, 1.5T)を用いた. 測定は仰臥位で行われ, 膝関節は完全伸展させた状態であった. ACSAの測定部位を決定するために被検者の右脚大腿部における縦断像を撮影した (図12). 得られた縦断像より大転子の最上端部を同定し, それより近位および遠位方向へそれぞれスライス厚10 mm, スライス間隔0 mmで連続的に横断像の撮影を行った. 近位方向では上前腸骨棘, また遠位方向へは脛骨骨頭まで横断像の撮影を行った. 得られた横断像をフィルムに現像した後, KEでは大腿直筋, 外側広筋, 中間広筋および内側広筋, KFで

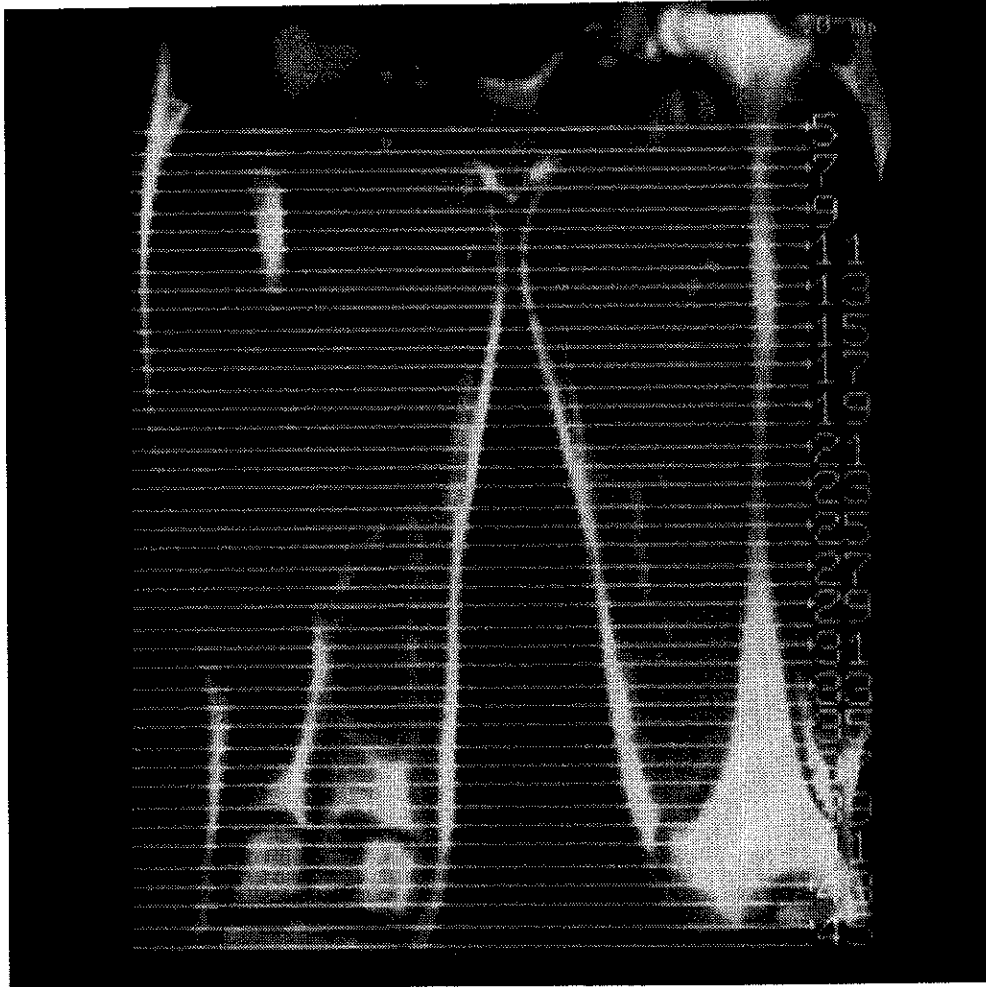


Fig. 12 Magnetic resonance imaging scans of colonal planes of right-leg thigh. The numbers at right side of the image shows the axial scan position.

は大腿二頭筋の長頭および短頭，半腱様筋，半膜様筋，薄筋，縫工筋の部分进行トレースし，実験Iと同一のコンピューターおよびデジタイザーを用いて，それぞれの筋の起始部から停止部までACSAを算出した。

各筋についての筋容積(MV)は起始部から停止部までのACSAとスライス厚(10 mm)を用いて，以下の式より算出した。

$$MV=10 \cdot \sum_{k=1}^n ACSAk$$

[ACSA_k；起始部よりk番目のACSA，nは最大で51]

また筋容積の計測精度を検定するために，あらかじめ容積の確認を行ったアクリル容器(500 ml)に水を満し，これを筋肉ファントムとした。そして，このファントムに対して生体の場合と全く同一の条件で算出された水の容積(V_1)と実際の水の容積(V_0)との誤差率 $[(V_1-V_0)/V_0 \cdot 100]$ は2.6%であった。したがって，MRIから算出された筋容積は生体のそれを反映する指標であると判断した。

C. 生理学的断面積の算出

PCSAの算出にあたって，まず最初に筋長を求めた。各筋の筋長はMRIにより得られた連続横断像において，識別可能な最も近位と最も遠位の横断像間の距離とした。筋線維長と筋長の比(fiber length/muscle length ratio; FL/ML ratio)がそれぞれの筋および個人間で差がないことから(Brand et al., 1986; Friedrich and Brand, 1990; Wickiewicz et al., 1983)，屍体におけるFL/ML ratio(Wickiewicz et al., 1983)を筋長に乘じ筋線維長を算出した。また，筋線維の走行角度(θ)はWickiewiczら(1983)の屍体のデータを用いた。各筋のPCSAは次式により算出した(Edgerton et al., 1986; Wickiewicz et al., 1983)。

$$PCSA = MV / FL \cdot \cos \theta$$

[MV ; 筋容積, FL ; 筋線維長, θ ; 筋線維の走行角度]

D. 等速性筋力および腱張力

等速性筋力は実験Iと同様な方法で測定した。

脚伸筋および屈筋の腱張力 (F) はピークトルク (PT), 膝関節の回転軸から膝蓋腱およびハムストリングの腱までのモーメントアーム長 (r) (Wickiewicz et al., 1984) を用いて, 以下の式から求めた (Narici et al., 1988; Smidt 1973).

$$F = PT / r$$

角速度 0 deg/sec (等尺性最大張力) における張力を求めるため, 角速度 30, 60, 180, 300, 450 deg/sec において得られた張力を用いて, KE では $y = 2001.7 + 4849.2 \cdot \exp(-x/189.4)$ [r=0.99], KF では $y = 2056.0 + 1642.1 \cdot \exp(-x/189.4)$ [r=0.99] の曲線に近似させ算出した。なお, y は張力, x は角速度を示す。

SPT は以下の式から求めた。

$$\text{Specific tension} = F / PCSA$$

膝伸展および屈曲動作中の腱の移動速度 (腱速度; V_t) を角速度 (v) とモーメントアーム長をもとに以下の式より算出した (Kawakami et al., 1993)。

$$V_t = v \cdot r$$

また, 上式で得られた腱速度および筋線維の走行角度 (θ) をもとに筋線維の収縮速度 (筋線維速度; V_f) を以下の式から算出した (Kawakami et al., 1993)。

$$V_f = V_t \cdot \cos \theta$$

E. 統計処理

各項目の値は、すべて平均値と標準偏差で示した。差の検定にはpaired t-testを用いて検討した。

3. 結果

A. 膝伸筋および膝屈筋の形態的特徴

表5にはKEおよびKFの形態的特徴について示した。KEにおける筋線維長は、その範囲がおよそ7~8 cmと狭かったのに対して、KFではおよそ6~42 cmと非常に広く、両筋群間で大きく異なっていた。筋別に検討すると、縫工筋ではKEおよびKFを合わせて最も高値を示した。また、2つの筋頭からなる大腿二頭筋において、筋長では長頭が高値を示したが、筋線維長では筋長の短い短頭が高値を示した。

筋容積において、KEはKFの1.9倍であった。KEにおいて最も高値を示したのは外側広筋 ($686.6 \pm 127.6 \text{ cm}^3$)であり、一方、KFにおいて最も高値を示したのは半膜様筋 ($291.9 \pm 71.6 \text{ cm}^3$)であった。また、KEにおいて最も低値を示したのは大腿直筋 ($339.7 \pm 78.7 \text{ cm}^3$)であり、一方、KFにおいて最も低値を示したのは薄筋 ($117.8 \pm 29.6 \text{ cm}^3$)であった。

PCSAでは外側広筋 (約 99 cm^2)が最も高値を示し、中間広筋、内側広筋、大腿直筋の順に高値を示した。一方、KFでは半膜様筋 ($44.0 \pm 8.7 \text{ cm}^2$)が最も高値を示し、縫工筋 ($4.1 \pm 0.8 \text{ cm}^2$)は最も低値を示した。また、PCSAにおけるKEとKFの比(KE/KF)は2.6であった。

図13, 14にはKE, KFおよびそれらを構成する各筋の起始部-停止部間におけるACSAについて示した。KEの最大ACSAは筋長の近位から48%の位

Table 5 Mean anatomical features of knee extensors (KE) and flexors (KF) in human.

Muscle	ML (cm)	FL (cm)	MV (cm ³)	MV %	Maximum ACSA (cm ²)	Mean ACSA (cm ²)	PCSA (cm ²)	PCSA %	PCSA/maximum ACSA
RF	37.1 ± 2.4	7.8 ± 0.5	339.7 ± 78.7	15.5 ± 2.1	17.3 ± 4.1	9.1 ± 2.0	43.5 ± 9.4	14.8 ± 2.1	2.53 ± 0.17
VL	33.8 ± 1.8	6.9 ± 0.4	686.6 ± 127.6	31.4 ± 2.1	31.2 ± 5.3	20.2 ± 3.2	99.2 ± 15.5	33.9 ± 1.7	3.20 ± 0.18
VI	38.9 ± 2.8	8.1 ± 0.6	606.2 ± 93.1	28.0 ± 2.2	27.3 ± 3.1	15.5 ± 1.7	74.5 ± 8.2	25.7 ± 2.1	2.74 ± 0.16
VM	34.7 ± 2.8	7.3 ± 0.6	546.3 ± 96.5	25.1 ± 1.7	29.8 ± 4.0	15.7 ± 2.1	74.4 ± 9.8	25.5 ± 1.3	2.50 ± 0.12
KE	-	-	2178.3 ± 357.5	-	102.3 ± 13.7	-	291.7 ± 37.8	-	2.87 ± 0.29
BFs	24.1 ± 1.8	12.4 ± 0.9	118.1 ± 29.8	9.8 ± 1.2	8.4 ± 2.0	4.9 ± 1.1	8.7 ± 2.0	7.9 ± 1.0	1.05 ± 0.06
BFI	29.0 ± 1.8	7.3 ± 0.5	241.4 ± 54.6	20.0 ± 1.7	15.7 ± 3.0	8.3 ± 1.7	33.0 ± 6.7	29.8 ± 2.1	2.11 ± 0.12
ST	32.1 ± 2.0	16.0 ± 1.0	260.1 ± 45.5	21.9 ± 2.4	13.9 ± 2.5	8.1 ± 1.2	16.2 ± 2.5	14.8 ± 1.7	1.17 ± 0.07
SM	26.7 ± 2.9	6.4 ± 0.7	291.9 ± 71.6	24.1 ± 2.7	17.9 ± 3.4	10.9 ± 2.2	44.0 ± 8.7	39.7 ± 2.9	2.46 ± 0.16
Sar	46.6 ± 2.6	42.2 ± 2.4	172.5 ± 38.7	14.4 ± 1.7	5.1 ± 1.1	3.7 ± 0.7	4.1 ± 0.8	3.7 ± 0.5	0.81 ± 0.07
Gr	30.1 ± 2.1	24.9 ± 1.8	117.8 ± 29.6	9.7 ± 1.0	5.8 ± 1.4	3.9 ± 0.9	4.7 ± 1.0	4.2 ± 0.6	0.81 ± 0.06
KF	-	-	1140.8 ± 350.4	-	66.7 ± 11.7	-	110.6 ± 19.3	-	1.66 ± 0.08
KE/KF			1.9		1.5		2.6		1.7

Values are means and SD. ML; muscle length, FL; fiber length, MV; muscle volume, MV (%) = MV of each muscle/MV of KE or KF, maximum ACSA; maximum anatomical cross-sectional area, mean ACSA; MV/ML, PCSA; physiological cross-sectional area = $MV/FL \cdot \cos\theta$, where θ is the angle of pennation, PCSA (%); PCSA of each muscle/PCSA of KE or KF. RF; rectus femoris, VL; vastus lateralis, VI; vastus intermedius, VM; vastus medialis, BF; biceps femoris, short head, BFI; biceps femoris, long head, ST; semitendinosus, SM; semimembranosus, Sar; sartorius, Gr; gracilis.

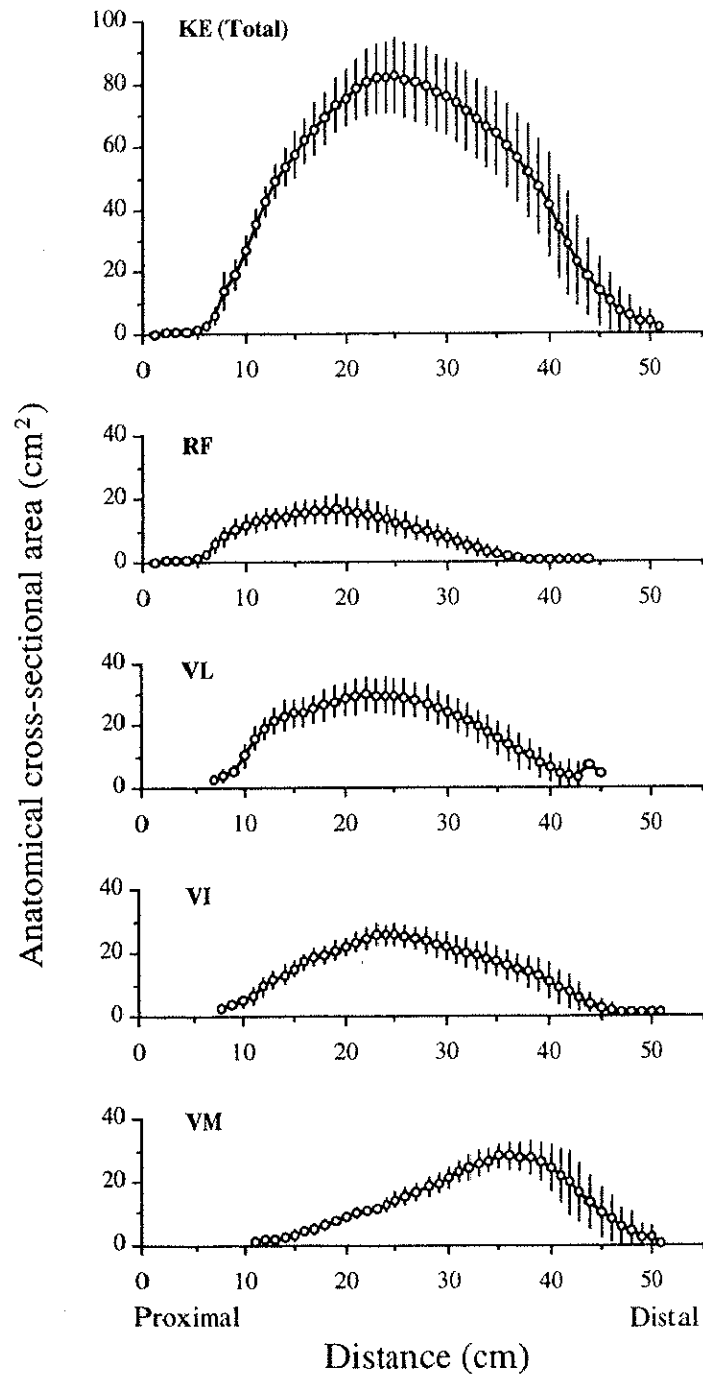


Fig. 13 Anatomical cross-sectional area of the knee extensors (KE) and of the each muscle of KE at each slice along the thigh. RF; rectus femoris, VL; vastus lateralis, VI; vastus intermedius, VM; vastus medialis.

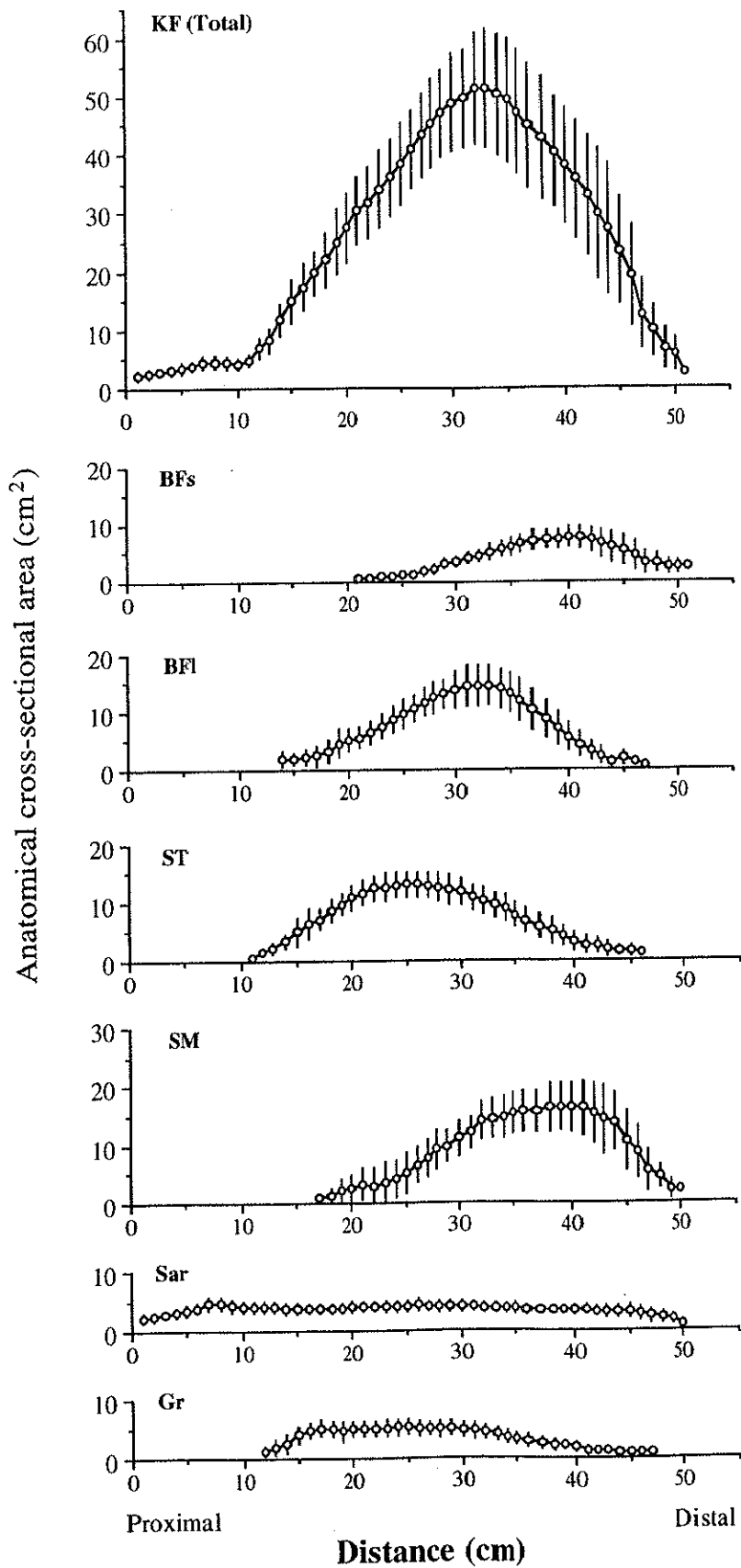


Fig. 14 Anatomical cross-sectional area of the knee flexors (KF) and of the each muscle of KF at each slice along the thigh. BF_s; biceps femoris, short head, BF_l; biceps femoris, long head, ST; semitendinosus, SM; semimembranosus, Sar; sartorius, Gr; gracilis.

置にあり、それとほぼ同位置に最大ACSAがあったのは外側広筋および中間広筋であった。また、内側広筋ではKEを構成する他の筋とは異なり、膝に近い部位において最大ACSAが認められた。一方、KFの最大ACSAは筋長の近位から64%の位置にあった。これとほぼ同一の部位に最大ACSAがみられたのは大腿二頭筋長頭と半膜様筋であった。

B. ピークトルク-角速度関係および腱速度-腱張力関係

表6にはKEおよびKFにおけるピークトルク-角速度関係について示した。角速度30~450 deg/secにおいて、KEのピークトルクはKFのそれより有意に高値を示した ($p<0.01$)。また、角速度が高速になるにしたがい両者のピークトルクの差が小さくなった。

図15にはKEおよびKFにおける腱張力-腱速度関係について示した。いずれの角速度においてもKEの腱張力がKFのそれより高値を示した。また、高速になるほどKEとKFの腱張力の差は小さくなった。

C. Specific tension-筋線維速度関係

図16にはKEおよびKFにおけるSPT-筋線維速度関係について示した。角速度0 deg/secにおけるSPTはKEでは23.5 N/cm²、KFでは33.4 N/cm²であり、KFがKEより高値を示した。また、速度の増加とともにKEとKFのSPTはほぼ平行に低下した。

図16および表7にはPCSAおよび腱張力を算出する際に用いた屍体のデータ (FL/ML ratio, モーメントアーム)の違いがSPTの値に及ぼす影響について示した。これらの因子によるSPTの値のバラツキはKEよりもKFにおいて大きい。しかしながら、KEとKFのSPTの範囲において、オーバーラップはみられなかった。さらに表7には本研究で実際に測定に用いた最も低

Table 6 Peak torque during isokinetic knee extension and flexion.

	Angular velocity (deg/sec)				
	30	60	180	300	450
KE	245.5** (55.1)	221.6** (45.4)	154.7** (28.8)	120.3** (21.4)	97.9** (15.3)
KF	120.3 (27.3)	118.8 (25.4)	97.5 (15.6)	86.1 (11.9)	80.5 (24.0)
KE/KF	2.0	1.9	1.6	1.4	1.2

Values are means and SD. **: p<0.01

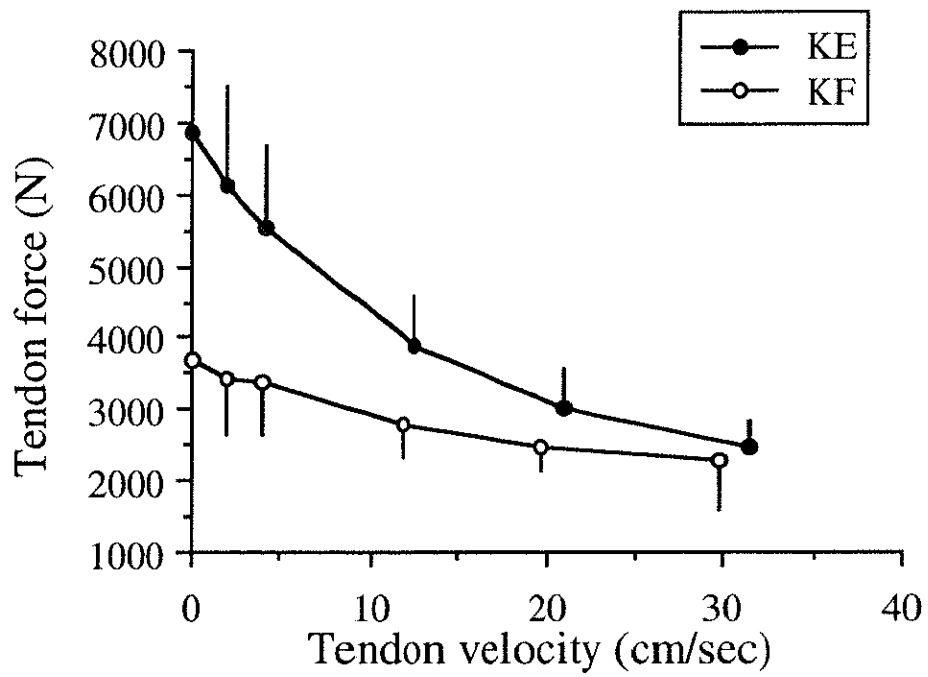


Fig. 15 Relationships between tendon velocity and tendon force. The velocity at 0 deg/sec represents estimated isometric condition. KE; knee extensors, KF; knee flexors.

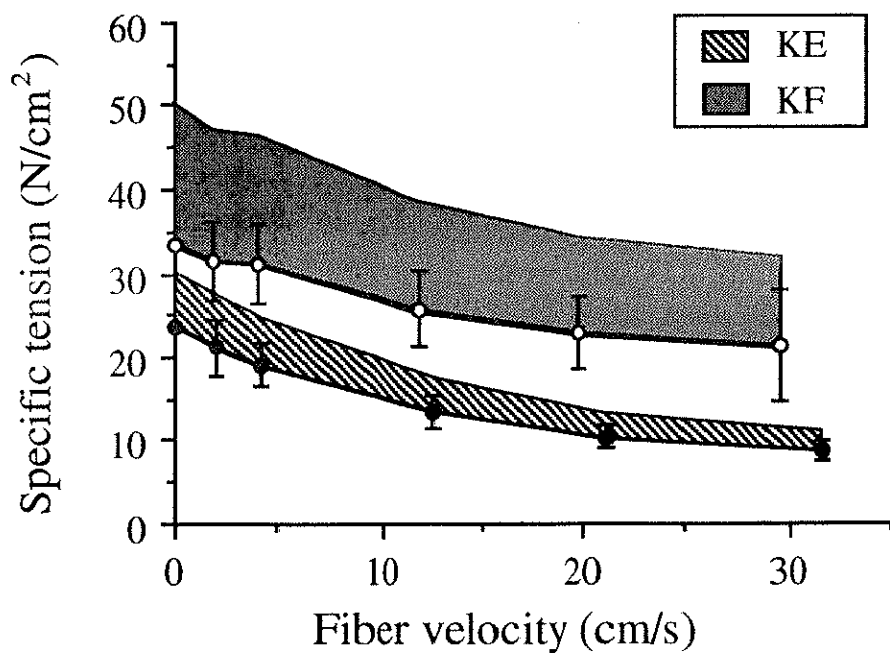


Fig. 16 Relationships between specific tension of knee extensors (KE) and knee flexors (KF) and the fiber velocity, and the range of specific tension of KE and KF, calculated from the data (i.e. ML/FL ratio, pennation angle, and moment arm) of three different previous studies.

Table 7 Comparison of specific tension of human knee extensors (KE) and flexors (KF).

Muscle	Muscle volume (cm ³)	PCSA (cm ²)	Moment arm (cm)	Force (N)	Specific tension (N/cm ²)
KE	2178.3	291.7 ^a	4.0 ^a	6137.9	21.0
		291.7 ^a	3.8 ^c	6461.0	22.1
		238.3 ^b	4.0 ^a	6137.9	25.7
		238.3 ^b	3.8 ^c	6461.0	27.0
KF	1140.8	110.6 ^a	3.5 ^a	3437.1	31.3
		110.6 ^a	2.5 ^c	4811.9	43.9
		102.3 ^b	3.5 ^a	3437.1	33.6
		102.3 ^b	2.5 ^c	4811.9	47.4

PCSA; physiological cross-sectional area. To calculate PCSA, cadaver data was derived from a; Wikiewicz et al. (1983), b; Friederich and Brand (1992), c; Smidt (1973)
Tendon force=(peak torque at 30 deg/sec)/moment arm, PCSA=Muscle volume/fiber length•cos θ . Specific tension=Tendon force/PCSA.

速度の等速性筋力である30 deg/secの時のSPTについて示した。KEでは2つの先行研究で報告されているFL/ML ratioを用いて、それぞれの場合のPCSAを算出したところ、その差が53.4 cm²であり、KFでは8.3 cm²であった。また、モーメントアームの違いによる腱張力のバラツキはKEでは323.1 Nであり、KFでは1374.8 Nであった。これら2つの値から算出されたSPTはKEで21.0~27.0 N/cm²、また、KFでは31.3~47.4 N/cm²の範囲であった。KEにおいてPCSAの違いによるSPTのバラツキは4.7, 4.9 N/cm²であり、モーメントアームによるものは1.1, 1.3 N/cm²であった。一方、KFではPCSAの違いによるSPTのバラツキは2.3, 3.5 N/cm²であり、モーメントアームによるものは12.6, 13.8 N/cm²であった。

D. Specific tension-筋線維速度／筋線維長関係

図17にはKEおよびKFにおけるSPT-筋線維速度／筋線維長関係について示した。同一の角速度による運動であるにもかかわらずKEとKFの腱速度は異なり、伸展の角速度が180 deg/secの場合と屈曲の角速度が450 deg/secの場合において、筋線維速度／筋線維長の値はほぼ同値を示す。SPT-筋線維速度／筋線維長関係では、いずれの速度においてもKFがKEより高値を示した。

4. 考察

A. 膝伸筋および膝屈筋の形態的特徴

これまでに筋の最大張力とPCSAとの間には密接な関係があることが報告されてきている (Ikai and Fukunaga, 1968)。しかしながら、PCSAを算出

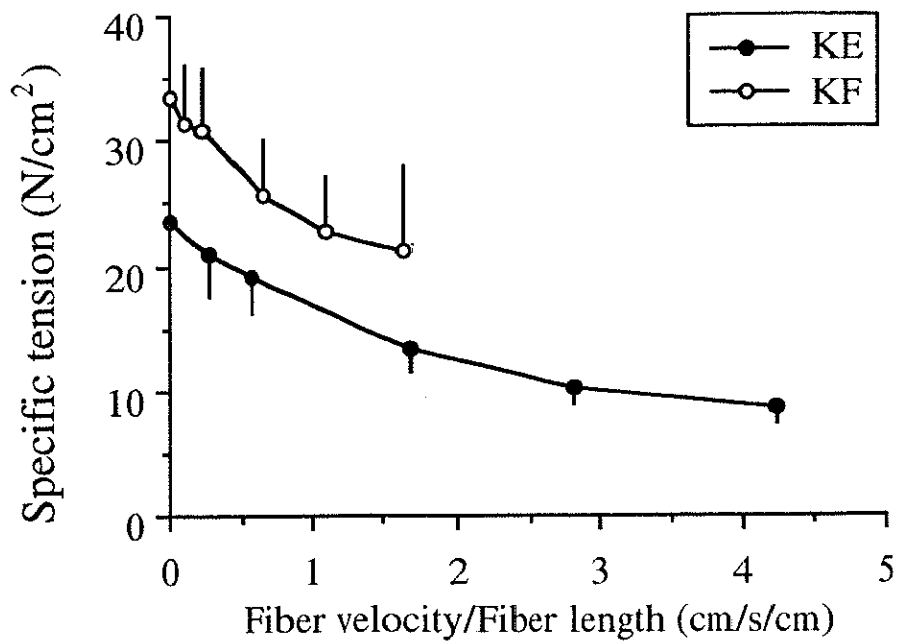


Fig. 17 Relationships between specific tension and the fiber velocity/fiber length in the knee extensors (KE) and flexors (KF).

する場合、筋萎縮が生じているような屍体の筋標本を用いていたことが問題点の一つとして先行研究において指摘されている (Edgerton et al., 1986; Friedrich and Brand, 1990; Fukunaga et al., 1992; Wickiewicz et al., 1983). したがって、本研究において非侵襲的に得られた筋容積から算出された PCSA は、屍体のデータから算出された値とは異なり、より生体の特性を反映しているものと思われる。実際に、MRIを用いて非侵襲的に得られた本研究の筋容積の値 (KE; 2178.3 cm³) は、屍体の筋を実測した先行研究 (Wickiewicz et al., 1983) の値 (KE; 675.1 cm³) の約3倍であった。屍体では筋の固定による筋萎縮に加え、生前が高齢の場合があり (例えば, Friedrich and Brand (1990) の研究では37と63歳), そのためによると思われる筋萎縮が生じていた可能性が示されてきている (Friedrich and Brand, 1990; Fukunaga et al., 1992; Wickiewicz et al., 1983). したがって、MRIを用いてヒトの筋のPCSAを求めることによって、生体における筋の張力発揮能をより正確に推定することが可能である。

本研究と同様にMRIを用いて、KEの筋容積について検討している Narici ら (1992) の値と比較してみると、彼らの報告した筋容積の値は我々の値の83%であった。筋容積に差がみられた原因の一つとしてACSAの測定法の差異が考えられる。本研究ではACSAの測定間隔を10 mmごとに一人につき41~51枚の画像を撮影し、筋容積を求めた。一方、彼らはわずか12枚のMRIの横断像からそれを求めている。MRIの撮影枚数が少ないということはスライス間隔が大きいことを示している。測定されたACSAの間隔が大きく、少数であるほど筋容積を算出する誤差が大きくなることが考えられる。実際、Nariciらが用いた4~5 cmのスライス間隔では本研究で用いた10 mm間隔の測定法と比較して0.3~1.8%の誤差が生じる (未発表資料)。大腿部を構成する各筋はその形状が起伏に富んでいる (図13, 14) ので、

ACSAの計測間隔を長くする方法は筋容積を算出する際の誤差を大きくする。また、Scottら(1993)は大腿部の筋に関してACSAの間隔の設定の違いが筋容積に及ぼす影響について検討した結果、Nariciらが用いた4~5 cmのスライス間隔では筋により2.0~31.4%の誤差が生じることを示している。したがって、このようなACSAの測定条件の違いが本研究とNariciらの筋容積の値に差をもたらした可能性が考えられる。したがって、より正確に筋の容積を求めるためにはACSAの測定間隔をより小さくすることが必要と思われる。

これまでPCSAと筋の発揮する張力との間には密接な関係があり、一方、筋線維長は筋の最大収縮速度と関係があることが示されてきている(Bodin et al., 1982; Spector et al., 1980; Wickiewicz et al., 1984)。PCSAに関して、KEはKFと比較して2.6倍の高値を示し、一方、筋線維長ではKFが高値を示した。このような傾向は屍体を用いた先行研究(Wickiewicz et al., 1983)と同様な結果であった。これより、KEは張力発揮特性に優れた筋であり、KFは速度特性に優れた筋であることが示唆される。実際に、腱張力-腱速度関係において、低速度ではKEの腱張力はKFのそれより約2倍の高値を示すが、高速度になるとその差が小さくなった。KEとKFの力-速度関係はそれらの筋の構造的特徴に大きく左右される(Spector et al., 1980; Wickiewicz et al., 1984)。

MRIから得られた起始部-停止部間における10 mm間隔の連続ACSAより、KEおよびKFの形態的特性を示すことが可能となった(図13, 14)。最大ACSAの位置はKEとKFでは異なり、KEがより近位にあることが示され、さらにKEあるいはKFを構成するそれぞれの筋の最大ACSAの位置も筋により様々である。この結果は、本研究で行ったような筋の形態的特性あるいは筋肥大などを検討するためには、これまでの研究(Alway et al.,

1990; Häkkinen and Keskinen, 1989; Maughan et al., 1983a, 1983b; Narici et al., 1988; Young et al., 1984, 1985)で行われてきたような一枚のACSAからの評価が不十分であることを示唆している。

B. 膝伸筋および膝屈筋のspecific tension

これまでヒトのSPTについて報告されたものは、膝伸筋、肘屈筋あるいは足底屈筋などの伸筋あるいは屈筋のみに関するものが多く (Edgerton et al., 1986; Giannini et al., 1990; Haxton, 1944; Ikai and Fukunaga, 1968), 拮抗筋を同時に検討したものは少ない (Kawakami et al., 1993; Wickiewicz et al., 1984). さらにそれらの研究では等尺性筋力発揮時のSPTについて報告されたものがほとんどである。したがって、本研究において様々な運動速度のKEおよびKFのSPTについて検討したことは、本研究のオリジナリティーの一つである。本研究ではMRIを基に算出されたPCSAを用い、KEおよびKFにおけるSPTを算出した。そこで、MRIを用いて健康な成人男性におけるKEのSPTを算出している先行研究 (Giannini et al., 1990; Narici et al., 1992)と比較するため、角速度0 deg/secの値 (23.5 N/cm^2)について検討してみる。本研究で得られた値はNariciら (1992)がMRIを用いて非侵襲的に算出した 22.7 N/cm^2 と類似していた。また、Gianniniら (1990)の報告では 29.4 N/cm^2 であり、本研究の値の1.3倍であった。一方、健康な成人の筋力および屍体より得られたPCSAよりSPTを算出したWickiewiczら (1984)の値は 42.2 N/cm^2 であった。これは前述したような屍体の筋における萎縮がPCSAを過小評価したため、筋の発揮した張力をPCSAで除すことにより算出するSPTに関しては過大評価となったものと思われる。さらに、本研究におけるPCSAは、従来報告されている筋容積を筋線維長で除し、筋線維の走行角度の余弦成分を乗じるというモデル (Edgerton et al., 1986;

Fukunaga et al., 1992, Wickiewicz et al., 1984)を用いて算出した。一方, Nariciら (1992)およびGianniniら (1990)は本研究とは異なったモデルを用いてPCSAを算出している。例えば, Nariciら (1992)はKEにおけるPCSAを筋容積を筋厚で除し, 筋線維の走行角度の正弦成分を乗じて算出している。このようにPCSAを算出するためのモデルは異なるものの, 健康な成人のKEにおけるSPTのバラツキは屍体より得られたものと比較すると非常に少ないことが示された。以上のことから, 本研究をはじめ他の研究において報告されている健康な成人の等尺性筋力発揮時のKEのSPTはおよそ23~30 N/cm²の範囲とすることができる。

本研究では, KFのSPTがKEのそれより低速-高速域全体にわたる筋線維速度において高値を示した(図16)。さらに, 本研究においてSPTを算出する際に用いた屍体のデータ(FL/ML ratio, モーメントアーム)をWickiewiczら(1983, 1984)の研究より引用したが, その他の研究において報告されている値の組み合わせによりSPTを算出し, その値にどの程度のバラツキがみられるのかについて検討した(表7, 図16)。このようにして得られたKEとKFの範囲にはいずれの速度においてもオーバーラップがみられなかった。もし, 図16におけるKEとKFのSPTにオーバーラップがみられたとしたら, KEとKFのSPTが等しくなる可能性を示していると思われる。図16の結果はこれらの因子(FL/ML ratio, モーメントアーム)がKEとKFのSPTの違いを説明するには困難であることを示唆している。

次に先行研究において報告されているFL/ML ratioおよびモーメントアームのどちらの要因がSPTにどの程度影響するのかについて検討した。その結果, 得られたSPTは非常に広範囲に及んでおり, 特にそれはKFにおいて顕著であった。SPTは筋の発揮した張力をPCSAで除することにより算出できる。FL/ML ratioはPCSAを算出する際に必要であり, 一方, モーメ

ントアームは腱張力を算出する際に用いる (方法参照). したがって, これらの因子はSPTに影響している. KEにおいて, PCSAがSPTのバラツキに及ぼす影響は4.7と4.9 N/cm²であり, また, モーメントアームによるバラツキは1.1と1.3 N/cm²であった. 一方, KFではPCSAによるバラツキは2.3と3.5 N/cm²であり, モーメントアームによるそれは12.6と13.8 N/cm²であった. これらの結果はSPTのバラツキにKEではPCSAを算出する際のFL/ML ratioの影響が大きく, 一方, KFではモーメントアームの影響が大きい可能性があることを示唆している.

SPT-筋線維速度/筋線維長関係においてもKFがKEより高値を示した. 筋の収縮速度, すなわち筋線維速度は筋線維長に比例するので, 筋線維速度/筋線維長は筋節当たりの速度を意味する指標と考えられる (福永, 1993). したがって, これは筋節当たりの速度が等しい場合でも, KFはKEより高いSPTを発揮することができることを示している.

この原因についてはいくつかの可能性が考えられる. 一つの可能性としてKEとKFの筋線維組成の違いが挙げられる. Johnssonら (1973)が大腿二頭筋の%FT線維は33.1%, 外側広筋の表層部および深層部ではそれぞれ67.3, 53.1%であったことを報告していること, FT線維がST線維と比較して大きな張力を発揮することができる (Coyle et al., 1979; Ryushi and Fukunaga, 1986; Thorstensson et al., 1976; Young, 1984)ことを考慮すると, 筋線維組成がSPTの違いを生じさせた可能性は少ないものと思われる.

他の可能性として, モーメントアームによるものが考えられる. 前述のように先行研究において報告されているどの値を用いるかによって, KEおよびKFのSPTは変化する. しかしながら, これらのモーメントアームは膝関節角度90°において得られたものであった. モーメントアームは膝関節の伸展および屈曲動作にともない変化するため (Smidt, 1973), ピー

クトルクが得られた時のモーメントアームを用いる必要性が考えられる。したがって、モーメントアームの影響がKEとKFのSPTの違いに影響を及ぼす一つの原因である可能性が考えられる。

本研究ではヒトのKFにおけるSPTはKEのそれより高値を示した。FL/ML ratioあるいはモーメントアームはSPTのバラツキを生じさせる原因の一つであると考えられるが、これらの因子からKEとKFのSPTの違いを全て説明することは困難である。例えば、肘屈筋と肘伸筋のSPTには差はないことが示されている (Kawakami et al., 1994)。なぜ、上腕の拮抗筋間のSPTには差がなく、大腿の拮抗筋間のそれには差があるのか、またその差は上述の因子の他にどのようなものが影響しているのかについては、筋だけの問題ではなく神経あるいはさらに上位の脳を含む神経系の因子が関係しているのかも知れないが、それについては本研究では明らかにすることは困難であり、さらなる研究が必要と思われる。

最後に、本研究の限界として、いくつかのパラメータは屍体より得られたものであった。今後、それらのパラメータのin vivoな測定が可能になることにより、KEとKFのSPTの違いに及ぼすいくつかの因子について明らかにすることができるものと思われる。

5. 要約

本研究ではMRIを用いて非侵襲的に測定した筋容積および筋長をもとに、ヒトの膝伸筋および膝屈筋における筋の形態的・構造的な特性について検討した。さらに、等速性膝伸展力および屈曲力および生理学的断面積から、膝伸筋および膝屈筋のspecific tensionの比較を行った。その結果の要

約を以下に示す。

1) 膝伸筋および膝屈筋の筋容積はそれぞれ2178, 1140 cm³であり, 膝伸筋が膝屈筋の1.9倍を示した。また, 生理学的断面積ではそれぞれ292, 111 cm²であり, 膝伸筋は膝屈筋の2.6倍であった。膝伸筋において生理学的断面積が最も高値を示したのは外側広筋(99 cm²)で, 最も低値を示したのは大腿直筋(44 cm²)であった。一方, 膝屈筋において最も高値を示したのは半膜様筋(44 cm²)であり, 最も低値を示したのは縫工筋(4 cm²)であった。

2) 膝伸筋の筋線維長は7~8 cmの範囲にあったのに対して, 膝屈筋では6~42 cmの範囲であった。膝伸筋において最も高値を示したのは中間広筋であり, 膝屈筋では縫工筋であった。

3) 角速度30, 60, 180, 300, 450 deg/secにおける膝伸展力は屈曲力のそれより有意に高値を示した。角速度の増加にともない膝伸筋と膝屈筋の比(膝伸筋/膝屈筋)は低下した。腱張力-腱速度関係においても同様の結果であった。

4) Specific tension-筋線維速度関係ではいずれの速度においても膝屈筋のspecific tensionが膝伸筋のそれより高値を示した。

5) Specific tension-筋線維速度/筋線維長関係においても膝屈筋は膝伸筋より高値を示した。

以上の結果より, 筋節レベルでの収縮速度が同一の条件下においても, 膝屈筋のspecific tensionは膝伸筋のそれより高値を示すことが示唆された。

VI. 足関節の角度変化が生理学的断面積に及ぼす影響 (実験III)

1. 目的

これまでヒトの筋のSPTに関して、多くの研究が行われてきているが、上肢あるいは下肢の筋ではもちろん、同一の筋群においてもその値は非常に広範囲に及んでいる。しかしながら、動物の摘出筋では約 22 N/cm^2 であることが報告されている (Powell et al., 1984)。SPTは筋の発揮した張力をその筋のPCSAで除すことにより算出できる。したがって、SPTは筋張力とPCSAの2つの因子によって決定される。PCSAの算出は、これまで屍体から筋を取り出し、実際に筋重量、筋長、筋線維長などを計測していたが、最近では非侵襲的にヒトの筋容積を求めることが可能となってきた (Fukunaga et al., 1992; Kawakami et al., 1994; Narici et al., 1992)。しかしながら、実際にはPCSAを測定した関節角度と筋力を測定する際の関節角度は異なっていることがほとんどである。PCSAは筋容積を筋線維長で除すことにより算出されるので、関節角度の変化により、これらのパラメーターが変化する可能性が考えられるが、このような観点からの研究は非常に少ない (Ikai and Fukunaga, 1968; 福永, 1978)。このようにPCSAが関節角度により変化する可能性があれば、PCSAの単位面積当たりの発揮張力を示すSPTについても関節角度の影響を受けることが予想される。したがって、この関節角度の影響はヒトのSPTの値が広範囲に及んでいる原因の一つである可能性が考えられる。

そこで本研究では、MRIを用いてヒトの足関節の角度変化が下腿の筋

の筋長，筋線維長および筋容積に対し，さらにPCSAおよびSPTにどのような影響を及ぼすのかについて検討した。

2. 方法

A. 被検者

被検者は健康な成人男性5名を用いた(年齢 30.8 ± 11.0 歳，身長 172.2 ± 5.8 cm，体重 68.8 ± 6.1 kg)。全ての被検者に実験の主旨，内容および危険性についてあらかじめ説明し，参加の同意を得た。

B. 解剖学的断面積および筋容積

MRIの測定は実験と同様な装置を用いた。全て被検者の右脚を用いて，仰臥位により膝関節角度 180° に保持した状態で，足関節に関してのみ以下の2つの条件下で実施した。1) 足関節角度が 90° になるような垂直な台に足関節を固定した状態での測定，2) 被検者の自然位(横たわった状態で足関節の筋を弛緩させ，リラックスさせた状態)での測定。これら2つの条件による測定はランダムに行ない，両測定条件とも下腿部は全て脱力した状態で実施した。さらに測定の際には，被検者の下腿部がMRIの測定用のベッドに接しないように留意した。MRIの測定は最初に被検者の縦断像の撮影を行った。得られた縦断像より膝蓋骨骨頭-脛骨遠位端における連続横断像をパルスシークエンス $900/20$ msec，スライス厚 10 mm，スライス間隔 0 mmで測定した。1人につき40-44枚の横断像より，腓腹筋内側頭，腓腹筋外側頭，ヒラメ筋および前脛骨筋を同定し，それらの筋の起始部から停止部までを各筋別にトレースした。ACSAの算出法は実

験Iと同様な方法を用い、また、筋容積は実験Iと同様な方法を用いて算出した。

C. 生理学的断面積の算出

PCSAの算出は実験IIと同様な方法を用いた。

D. 統計処理

各項目の値は、すべて平均値と標準偏差で示した。差の検定にはpaired-t-testを用い、危険率5%をもって有意とした。

3. 結果

A. 足関節の角度変化

自然位における足関節角度は $119.4 \pm 8.8^\circ$ であった。したがって、関節角度 90° の場合と比較して、 29.4° の差であった。

B. 筋長および筋線維長

図18には筋長および筋線維長について示した。自然位の場合と比較して関節角度 90° では、腓腹筋内側頭、腓腹筋外側頭およびヒラメ筋ではそれぞれ1.6, 1.4, 1.4 cmの有意な筋長の延長が、一方、前脛骨筋では2.2 cmの有意な筋長の短縮が認められた(全て、 $p < 0.01$)。

自然位の場合と比較して関節角度 90° において腓腹筋内側頭、腓腹筋外側頭およびヒラメ筋ではそれぞれ0.2, 0.4, 0.1 cmの有意な筋線維長の延長が、一方、前脛骨筋では0.6 cmの有意な筋線維長の短縮が認められた

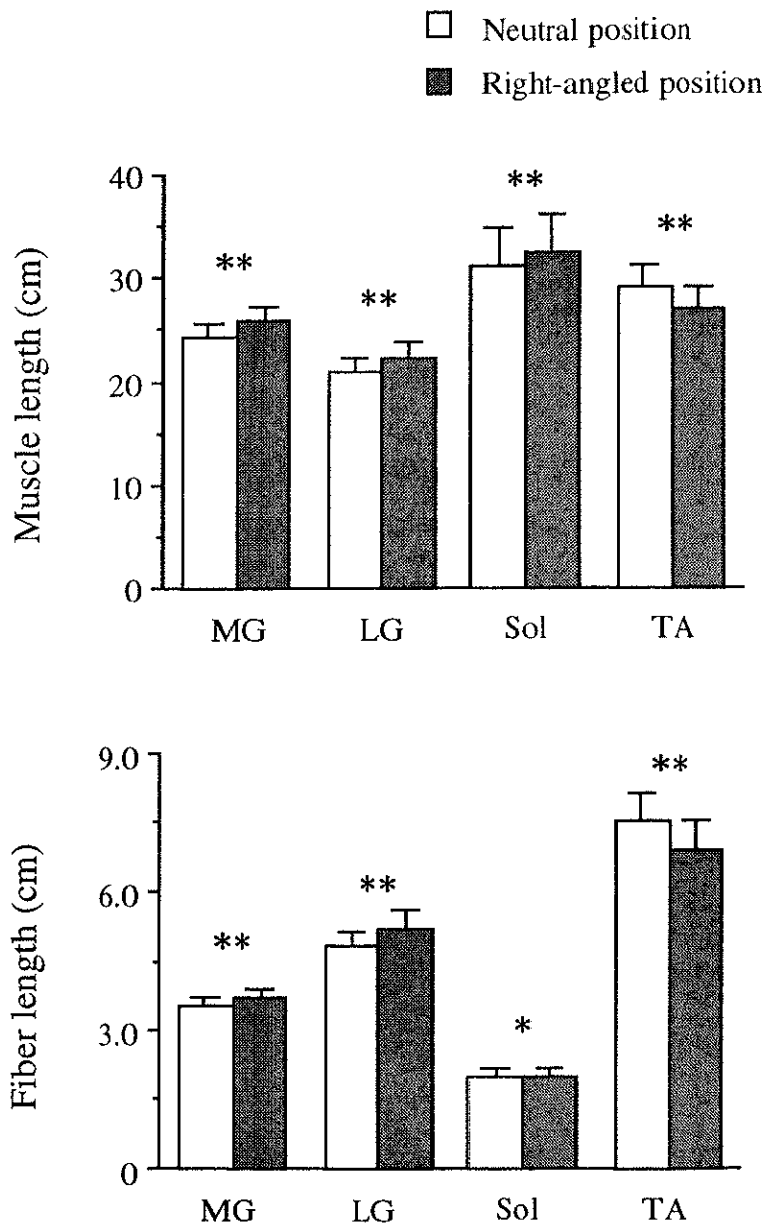


Fig. 18 The muscle length and muscle fiber length at neutral and right-angled position. *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$. MG; medial gastrocnemius, LG; lateral gastrocnemius, Sol; soleus, TA, tibialis anterior.

(ヒラメ筋は $p<0.05$ ，その他は $p<0.01$).

C. 解剖学的断面積

図19には関節角度の変化にともなう腓腹筋内側頭，腓腹筋外側頭，ヒラメ筋および前脛骨筋の起始部-停止部間におけるACSAの変化について示した．腓腹筋内側頭，腓腹筋外側頭およびヒラメ筋では自然位と比較して，関節角度90°ではACSAのピークが遠位へシフトしている．

図20には筋容積を筋長で除したMean ACSAおよびMaximum ACSAについて示した．Mean ACSAでは自然位の場合と比較して，関節角度90°において腓腹筋内側頭およびヒラメ筋が有意に低値を示した ($p<0.05$)．一方，Maximum ACSAはいずれの筋においても両測定条件間において有意な差は認められなかった．

D. 筋容積

図21には自然位および関節角度90°における筋容積について示した．筋容積はいずれの筋においても両測定条件間に有意な差は認められなかった．

E. 生理学的断面積

図22には自然位および関節角度90°におけるPCSAについて示した．自然位における腓腹筋内側頭，腓腹筋外側頭，ヒラメ筋および前脛骨筋のPCSAはそれぞれ83.0，26.9，272.2，17.3 cm²であった．また，関節角度90°ではそれぞれ76.3，24.6，255.5，19.1 cm²であった．自然位の場合と比較して関節角度90°では，腓腹筋内側頭は有意に低値を示し ($p<0.05$)，一方，前脛骨筋では有意に高値を示した ($p<0.05$)．

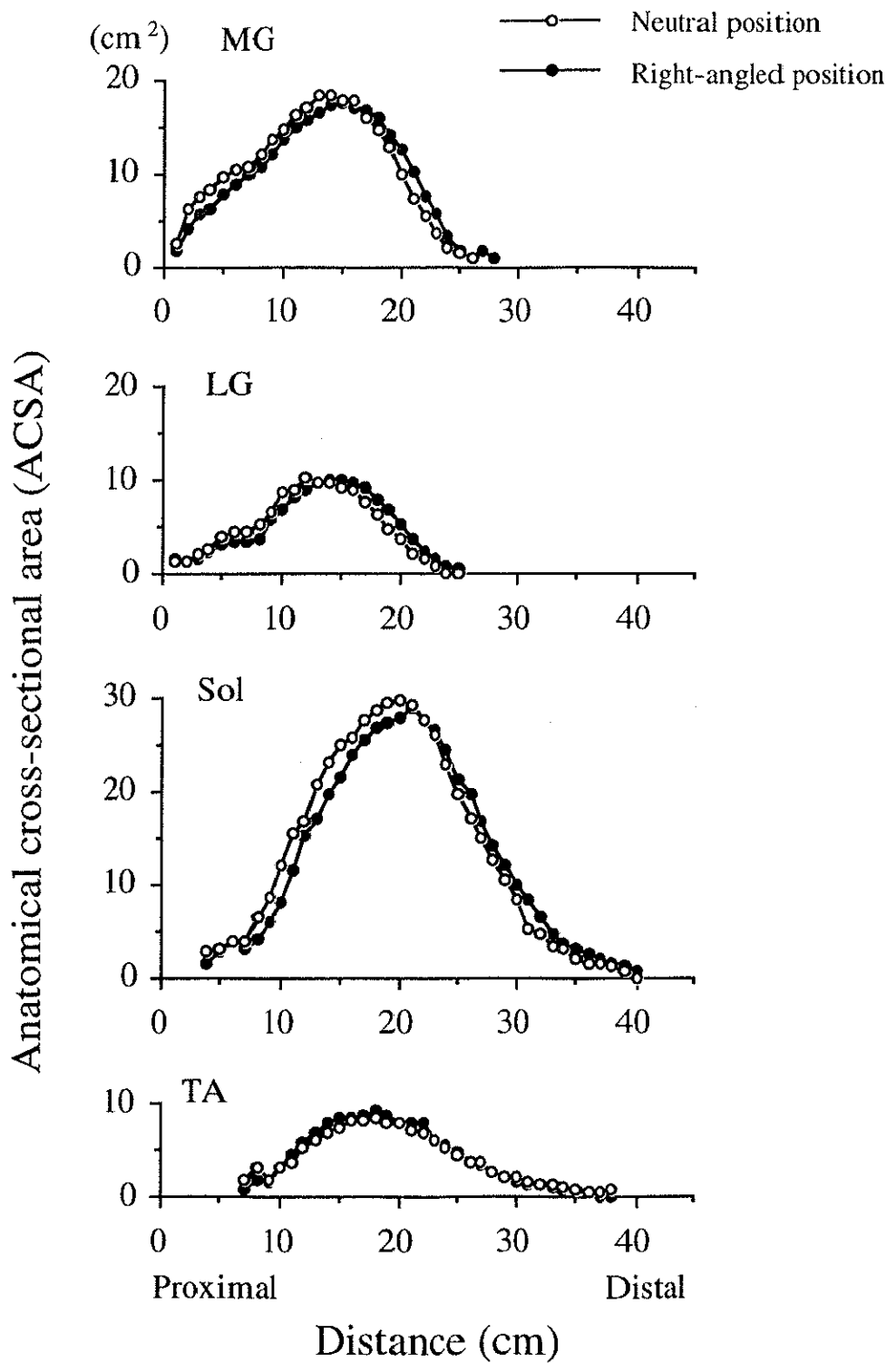


Fig. 19 Anatomical cross-sectional area (ACSA) of each muscle at each slice along the length of the leg. MG; medial gastrocnemius, LG; lateral gastrocnemius, Sol; soleus, TA; tibialis anterior.

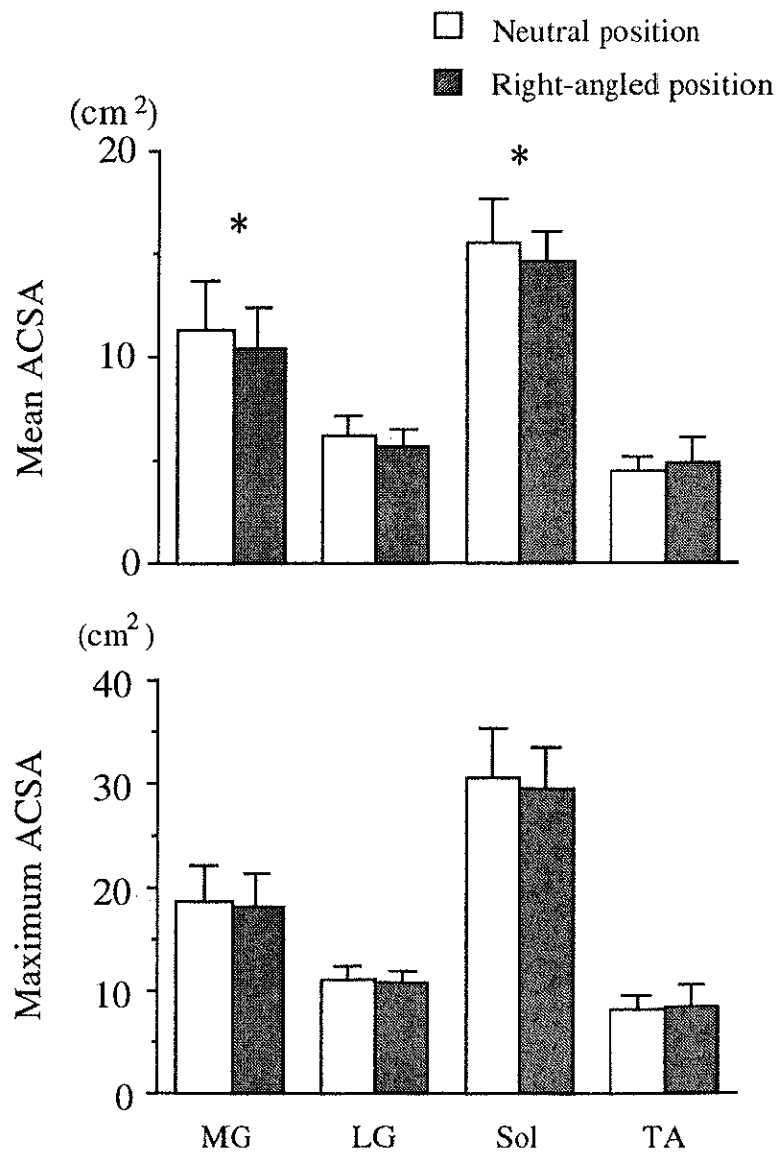


Fig. 20 Mean anatomical cross-sectional area (ACSA) and maximum ACSA of each muscle at neutral and right-angled position. Mean ACSA=muscle volume/muscle length. *; $p < 0.05$. MG; medial gastrocnemius, LG; lateral gastrocnemius, Sol; soleus, TA, tibialis anterior.

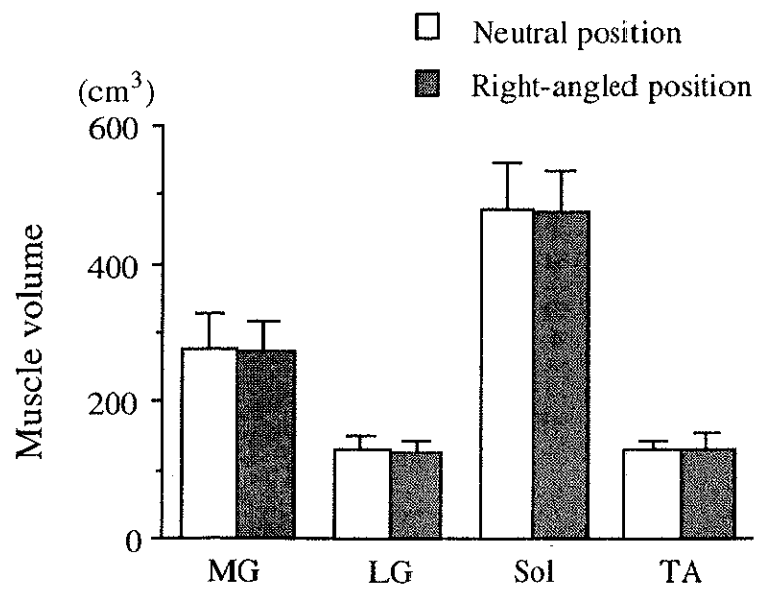


Fig. 21 Muscle volume of each muscle at neutral and right-angled position. MG; medial gastrocnemius, LG; lateral gastrocnemius, Sol; soleus, TA, tibialis anterior.

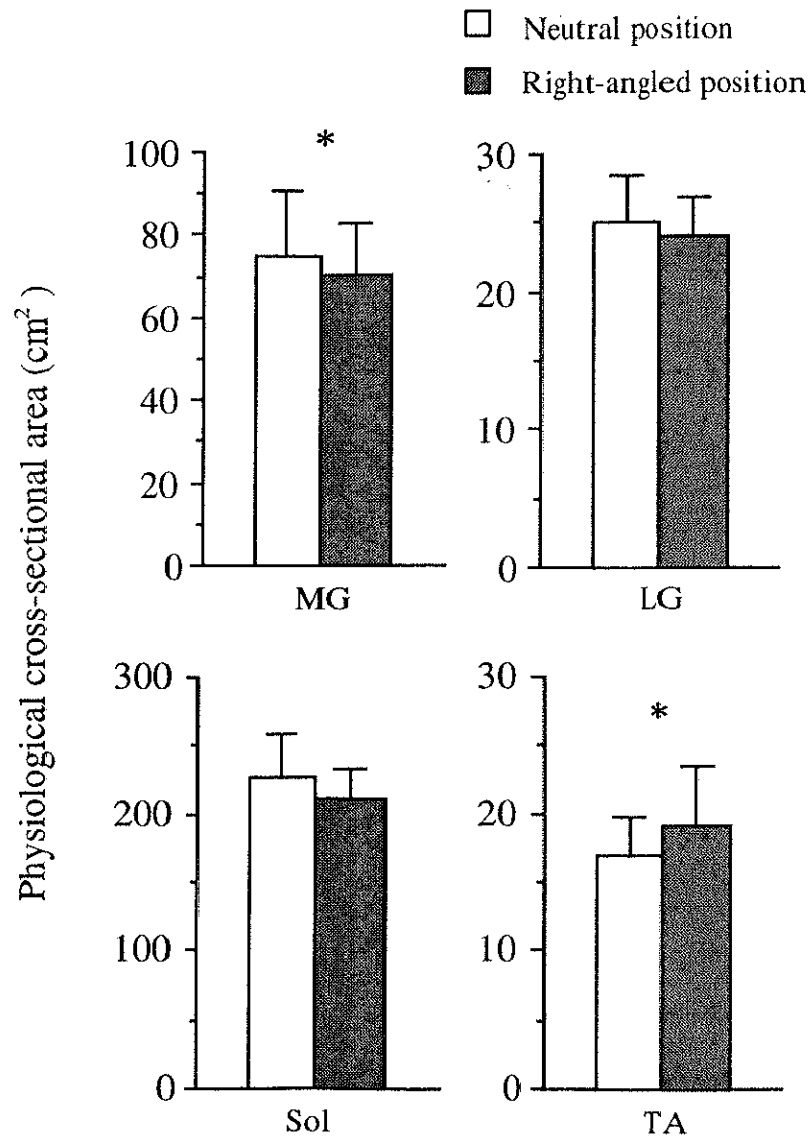


Fig. 22 Physiological cross-sectional area of each muscle at neutral and right-angled position. *, $p < 0.05$. MG; medial gastrocnemius, LG; lateral gastrocnemius, Sol; soleus, TA, tibialis anterior.

4. 考察

SPTは筋量や筋長あるいは筋線維長など形態の異なる筋の張力発揮能力を比較することができる指標であり (Close, 1972), この値が生体のいずれの筋においても同様な値を示すのかについては様々な研究において議論されてきている. これまでのほとんどの研究において報告されているPCSAの値に関節の角度は考慮されていなかった. 関節角度の変化にともない筋長, 筋容積, 筋線維長が変化するため, PCSAも変化する可能性が考えられるが, そのような観点から検討されたものは非常に少なく (Ikai and Fukunaga, 1968; 福永, 1978), これがPCSAおよびSPTに対してどの程度影響するのかについてはほとんど明らかになっていない. そこで, 本研究では足関節の角度変化が下腿の筋における筋長, 筋線維長, 筋容積, PCSAおよびSPTに対してどのような影響を与えるのかについて検討した.

本研究ではMRIを用いて, 関節角度の変化にともなう筋長の変化について非侵襲的に測定し, その結果, 自然位と比較して関節角度90°では, 腓腹筋内側頭, 腓腹筋外側頭およびヒラメ筋では筋長が有意に増加し, 前脛骨筋では筋長は有意に短縮した. また, 関節角度の変化にともなう筋の形態的变化の結果より, 自然位から関節角度90°に変化させた場合, 腓腹筋内側頭, 腓腹筋外側頭およびヒラメ筋ではACSAのピークが遠位方向にシフトし, 前脛骨筋では近位方向にシフトしているのが観察できる (図19). 一方, 関節角度の変化にともない筋容積は全ての筋において変化しなかった. これらの結果は関節角度の変化にともない, 筋はその容積を変化させずに, 筋長あるいは形態を変化させていることを示している. また, PCSAは筋容積を筋線維長で除すことにより算出されること

から、PCSAの変化は関節角度の変化にともなう筋線維長の変化に起因していることが明らかとなった。したがって、PCSAおよびSPTを算出する際にどの関節角度において得られたのかという点が非常に重要となるものと思われる。

実験IIでは、角速度0 deg/secにおけるKEのSPTが23.5 N/cm²であったことを示した。例えば、本研究で用いた4つの筋の自然位におけるSPTが、同一で、23.5 N/cm²であるとする。関節角度の変化にともなうSPTの変化を考慮せずに、これを関節角度90°の場合に単純にあてはめてみると、腓腹筋内側頭、腓腹筋外側頭、ヒラメ筋、前脛骨筋のSPTはそれぞれ、21.5, 21.2, 22.0, 25.4 N/cm²となる。したがって、これらの筋のSPTは同一なはずであるのに関節角度の影響を考慮しないと、腓腹筋内側頭と前脛骨筋との間では約4 N/cm²の誤差が生じる計算となる。Wickiewiczら(1984)は屍体の筋より得られたPCSAと生体で測定した足関節の底屈および背屈の筋力より、足関節の底屈筋群および背屈筋群のSPTについて報告している。その値はそれぞれ30.1 N/cm², 46.6 N/cm²であり、背屈筋群が1.5倍の高値を示した。しかしながら、Wickiewiczらが用いた屍体の足関節は最大に底屈された状態のものであった。本研究の結果を考慮すると、このような足関節の角度では背屈筋群では筋長および筋線維長の伸長によりPCSAが自然位のものより低値を示し、一方、足底屈筋群では筋長および筋線維長は短縮され、PCSAが高値を示すことが考えられる。本研究の結果より、これまで先行研究において報告されているSPTの値が広範囲に及んでいる原因および実験IIに示したように拮抗筋においてもSPTが異なる原因の一つとして関節角度の影響があることが示唆された。したがって、SPTを算出する場合には、どの関節角度において得られたPCSAであるのかという点を考慮しなければならないことが示唆された。

5. 要約

本研究は成人男性5名を用いて、足関節の角度変化が腓腹筋内側頭・外側頭、ヒラメ筋および前脛骨筋の筋長、筋線維長、筋容積、生理学的断面積に及ぼす影響について検討することを目的とした。その結果の要約を以下に示す。

1) 自然位と比較して関節角度90°では腓腹筋内側頭、腓腹筋外側頭およびヒラメ筋の筋長は有意に増加した。一方、前脛骨筋では有意に低下した。

2) 自然位と比較して関節角度90°では腓腹筋内側頭およびヒラメ筋の解剖学的断面積の平均値 (Mean ACSA)が有意に低値を示した、一方、解剖学的断面積の最大値 (Maximum ACSA)では両測定条件間において、いずれも有意な差は認められなかった。

3) 筋容積はいずれの筋においても関節角度の変化にともなう有意な変化を示さなかった。

4) 生理学的断面積については自然位と比較して、関節角度90°において腓腹筋内側頭で有意に低値を示し、また前脛骨筋では有意に高値を示した。また、腓腹筋外側頭およびヒラメ筋では有意な差を認められなかったが、いずれも低下傾向であった。

これらの結果より、本研究で用いた下腿の筋、特に腓腹筋内側頭および前脛骨筋ではそのPCSAが足関節角度の変化により有意に変化することが明らかとなり、したがって、生理学的断面積およびspecific tensionの算出にはその関節角度を規定する必要性が示唆された。

VII. 筋力トレーニング初期の筋力増加に影響する因子 (実験IV)

1. 目的

これまでの研究において、筋力トレーニングの初期には筋肥大が生じることなく筋力の増加が認められることが示されている (Ikai and Fukunaga, 1970; Moritani and deVries, 1980). このような筋力の増加は中枢では脳の興奮水準の増加, また末梢では筋力発揮時に参加する運動単位の増加のため, 筋力発揮時に収縮できる筋線維数が増加することに起因するということが筋電図 (EMG) を用いた研究結果から示唆されてきている. しかしながら, EMGでは筋の表層部の情報しか得ることができないという方法論的な問題点が先行研究において指摘されている (Adams et al., 1992). したがって, トレーニングにともなうEMGの変化が実際に筋全体の変化を反映しており, さらに実際に筋線維の動員が増加したのか否かについて十分には明らかにされていない.

最近, MRIから得られるT2 (横緩和時間) を指標として, 運動にともなう筋の活性化の程度を評価することが可能となってきている (Adams et al., 1992, 1993; Ploutz et al., 1994; Ploutz-Snyder et al., 1995). T2はMRI特有のパラメーターであり, これは筋のpHや無機リン酸とクレアチンリン酸の比と相関関係にあることから, 筋内の代謝的变化を反映する指標であることが示唆されている (Weidman et al., 1991). さらに, 運動誘発性のT2値の延長はその運動強度に比例することも示されている (Adams et al., 1992). したがって, 運動誘発性のT2値を指標として, 短期間の筋力トレーニング

グが新たなる筋の活性化を促すのか否かに関する情報を得ることが可能と思われる。

そこで本研究では、2週間という短期間の筋力トレーニングにともなう筋力の増加と筋の活性化の変化について検討することを目的とした。

2. 方法

A. 被検者

被検者には体育専攻男子学生7名を用いた(年齢 24.1 ± 2.0 歳, 身長 175.6 ± 3.7 cm, 体重 71.1 ± 6.8 kg). 全ての被検者に実験の主旨, 内容および危険性についてあらかじめ説明し, 参加の同意を得た。

B. トレーニングプロトコール

トレーニングは等速性筋力測定器(Biodex, Biodex社製)を用いて, 角速度 120 deg/sec の等速性膝伸展運動を1日に5回 \times 10セットを行い, 2週間に計9回のトレーニングを実施した。ただし, セット間には1分間の休憩を設けた。

C. 筋断面積

大腿四頭筋の筋断面積の測定法は実験IIと同様であった。また, 本実験の筋断面積はトレーニング前に最も高値を示した部位を用い, トレーニング後も同一部位とした。

D. 等速性膝伸展力

等速性膝伸展力の測定は実験IIと同様であった。ただし、用いた角速度は0, 60, 90, 120, 180, 240, 300 deg/secであった。

E. 筋線維組成および筋線維横断面積

筋線維組成および筋線維横断面積の測定および算出は実験Iと同様であった。

F. 解糖系酵素活性(フォスフォフルクトキナーゼ活性)

解糖系の律速酵素の一つであるフォスフォフルクトキナーゼ (PFK)活性の測定はShonkとBoxer (1964)の方法に従って測定した。

G. 筋電図積分値 (iEMG)

EMGの測定は等尺性、等速性筋力の測定と同時に実施した。EMGは直径10mmの電極を大腿直筋、外側広筋、内側広筋の筋腹にそれぞれ装着し、表面双極誘導法により導出した。電極間距離は20 mmで、筋線維の走行方向と同一となるように電極を装着した。トレーニング前後の測定において電極を同一の部位に装着できるように、トレーニング前の測定における電極の位置を油性マジックを用いて印しを付けた。トレーニングの際には常に電極位置の印しの確認を行い、薄くなっている場合は油性マジックで印しを付けた。電極との皮膚抵抗は10 k Ω 以下とした。なお、トレーニング前後におけるEMGデータの信頼性、すなわち電極の着脱と異なる日に測定を行う影響について検討するため、被検者1名を用いて上記の3つの筋のEMGの測定を行った。第一日目には等尺性膝伸展運動 (3秒間)を10回 \times 5セット (計50試行)、第二日目には10回 \times 3セット (計30試行)を実施

した。セット毎および測定日毎に全ての電極を着脱した。その結果、セット間および測定日間におけるEMGデータには、いずれにおいても有意な差は認められなかった。したがって、トレーニング前後においてEMGに違いが生じた場合、それは神経-筋系の生理学的な変化を反映していると判断した。

得られたEMG信号はデータレコーダーに収録するとともに、パーソナルコンピュータ (Power Macintosh 8100/80AV, Apple社製)からオンラインでAD変換した後、ピークトルクが出現した時点の積分値 (iEMG)を運動開始と同時に記録したトリガーをもとに算出した。

H. 緩和時間 (T2)

T2の測定は実験Iと同一のMR装置を用いた。まず、被検者の右大腿部の縦断像を撮影した。得られた縦断像より大転子と外側顆間結節を同定した。運動前の安静時および運動直後には大転子-外側顆間結節間の中央部位より、近位および遠位方向にスライス厚10 mm, スライス間隔20 mmで一人につき7枚の横断像を撮影した。運動は等速性筋力測定器 (Cybex 340, Lumex社製)を用いて、角速度120 deg/secの等速性膝伸展動作を最大努力で10回×10セット行った。ただし、セット間は30秒の休息を設けた。運動はMR装置の外で行い、運動の終了と同時にMR装置内にできるだけ速く移動し、MRIの測定を行った。なお、運動終了直後から測定の開始までに要した時間はトレーニング前では52.0±3.1秒、トレーニング後では52.1±2.9秒であった。

トレーニング前後のMRIのデータはパーソナルコンピュータ (Power Macintosh 8100/80AV, Apple社製)に転送し、画像分析は全てコンピュータを用いて行なった。平均のT2値は大腿四頭筋に含まれる全ての画素の

平均値から算出した。トレーニング前後ともに、安静時および等速性膝伸展運動後の大腿四頭筋のT2の平均値および標準偏差を求めた。等速性膝伸展運動後のT2に関して、安静時のT2+1SDより高値を示す画素を本研究では運動により活性化された部位とみなし(Adams et al., 1993), その面積が大腿四頭筋の筋断面積に占める割合として表した(%activated CSA)。

I. 統計処理

各項目の値は、すべて平均値と標準偏差で示した。トレーニング前後の差の検定にはpaired-t-testを用い、有意水準は5%とした。T2の部位間の比較には二元配置の分散分析を用いて検討した。

3. 結果

A. 筋断面積

図23にはトレーニング前後における筋断面積について示した。トレーニングにともなう大腿四頭筋の筋断面積に有意な変化は認められなかった。

B. 等速性膝伸展力

図24にはトレーニング期間中の等速性膝伸展力の変化について示した。トレーニング3日目以降にトレーニング1日目と比較して、等速性膝伸展力の有意な増加が認められた。

図25にはトレーニング前後における等速性膝伸展力について示した。トレーニングにともない、等速性膝伸展力は角速度300 deg/secを除く他の全ての角速度(0~240 deg/sec)において有意に増加した。

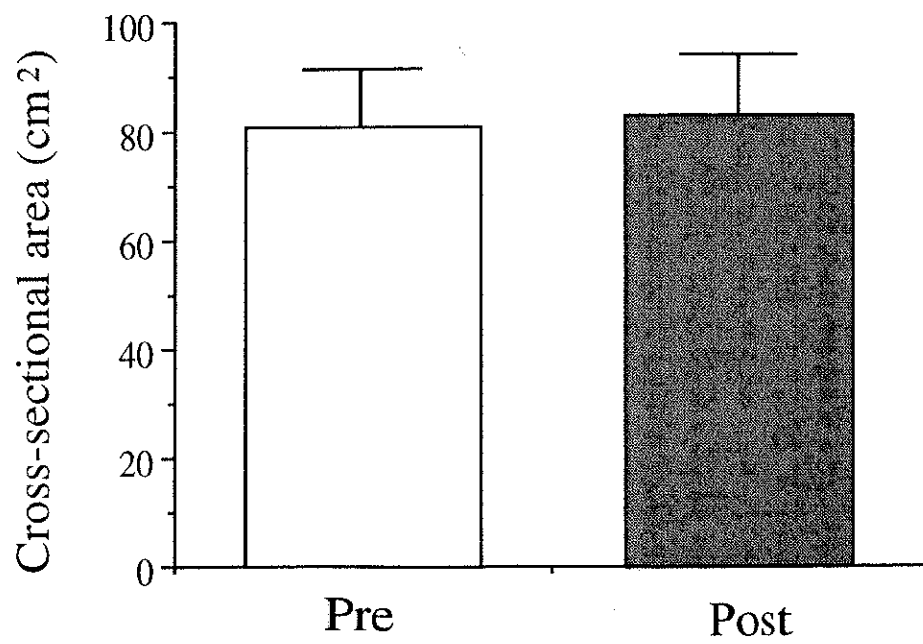


Fig. 23 Cross-sectional area of quadriceps femoris before and after resistance training.

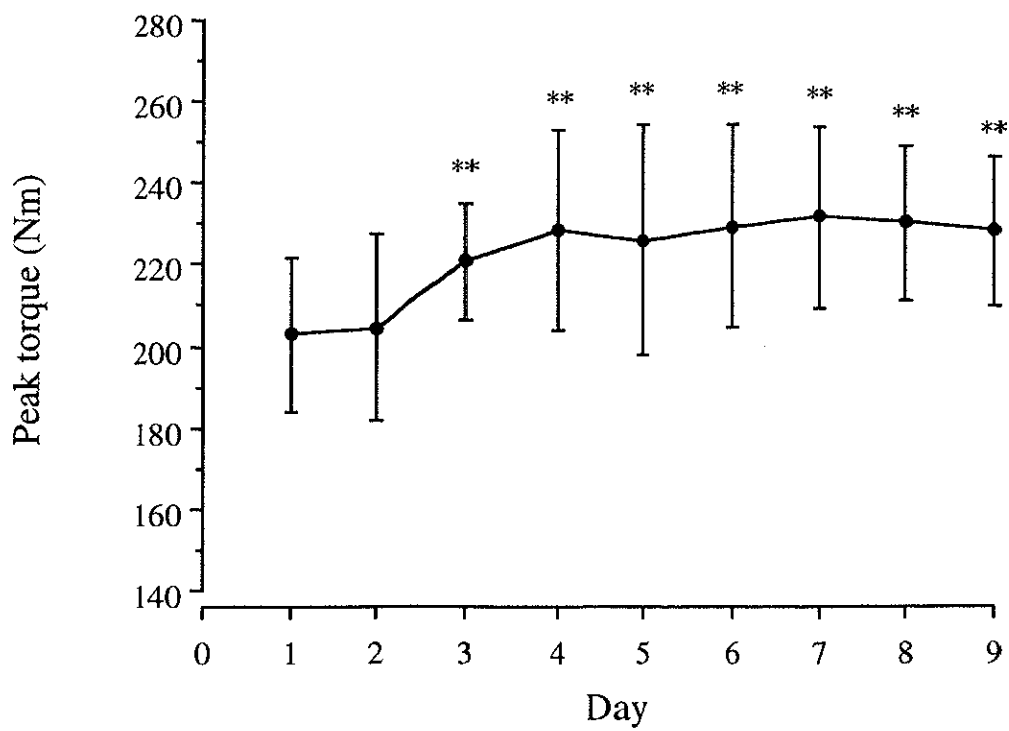


Fig. 24 Changes of isokinetic knee extension torque during resistance training. **: $p < 0.01$ vs 1st day.

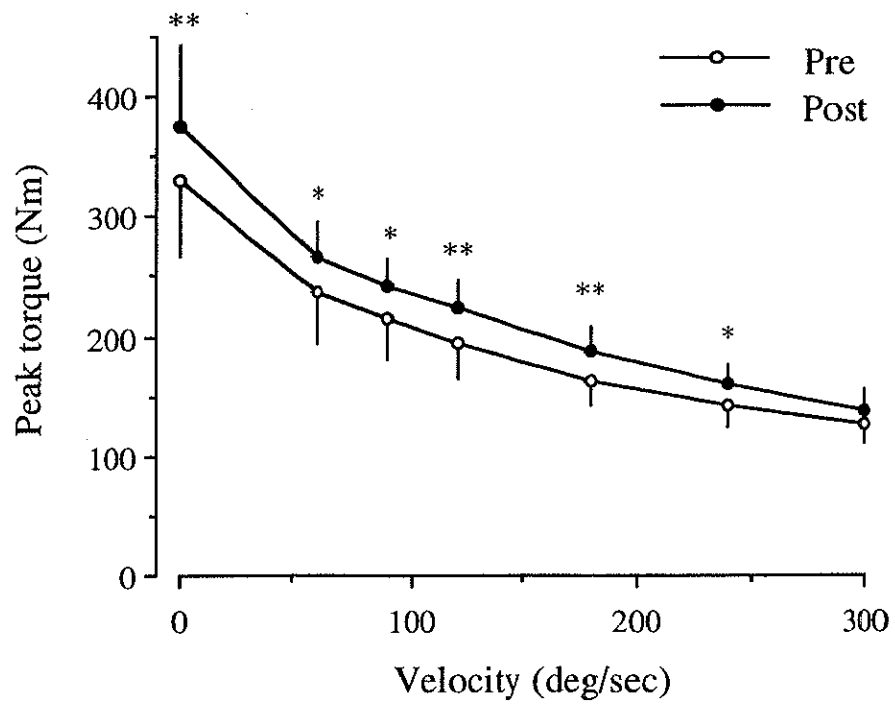


Fig. 25 Torque-velocity relationships during isokinetic knee extension and flexion before and after resistance training. *, $p < 0.05$, **, $p < 0.01$ vs pre.

C. 組織化学的および生化学的分析

表8にはトレーニング前後における組織化学的および生化学的パラメータについて示した。トレーニングにともなう筋線維組成および筋線維横断面積の有意な変化は認められなかった。また、PFK活性においてもトレーニングにともなう変化はみられなかった。

D. 筋電図積分値 (iEMG)

図26にはトレーニング前後の大腿直筋、外側広筋および内側広筋におけるiEMGについて示した。トレーニング後には測定に用いた全ての角速度の全ての筋において有意な増加が認められた。

E. 緩和時間 (T2)

図27には同一被検者のトレーニング前後における画像処理後(二値化処理)の横断像について示した。大腿四頭筋部分においては、白い部分は大腿四頭筋の安静時のT2値+1SDを超えた部分で、黒い部分は超えなかった部分を示している。つまり、本研究の評価法では前者が運動により筋が活性化された部分を示し、後者は活性化されなかった部分を示している。トレーニング前と比較してトレーニング後の大腿四頭筋では白い部分が増加し、特に大腿直筋およびその周辺が白くなっていた。

表9にはトレーニングにともなう安静時および運動後のT2の変化について示した。トレーニング後では、7部位中3部位において運動後のT2値の有意な増加が認められ(全て $p<0.05$)、さらに7部位の全ての横断像で比較しても運動後のT2値の有意な増加が認められた($p<0.05$, トレーニング前; 34.7 msec, トレーニング後; 35.5 msec)。一方、安静時のT2値については7部位中の2部位において有意な低下が認められ($p<0.05$ と $p<0.01$)、7部位

Table 8 Histochemical and biochemical properties of vastus lateralis muscle before and after resistance training.

	Pre-training	Post-training
Fiber type (%)		
ST	33.6±7.3	34.4±13.0
FTa	50.3±3.5	51.2±8.3
FTb	16.1±5.2	14.4±5.3
Fiber CSA (μm^2)		
ST	3448±717	3252±471
FTa	3510±726	3752±800
FTb	3353±738	3387±1024
PFK activity [§] ($\mu\text{moles/g/min}$)	24.9±5.8	26.5±2.2

Values are means and SD. §; n=6. CSA; cross-sectional area.

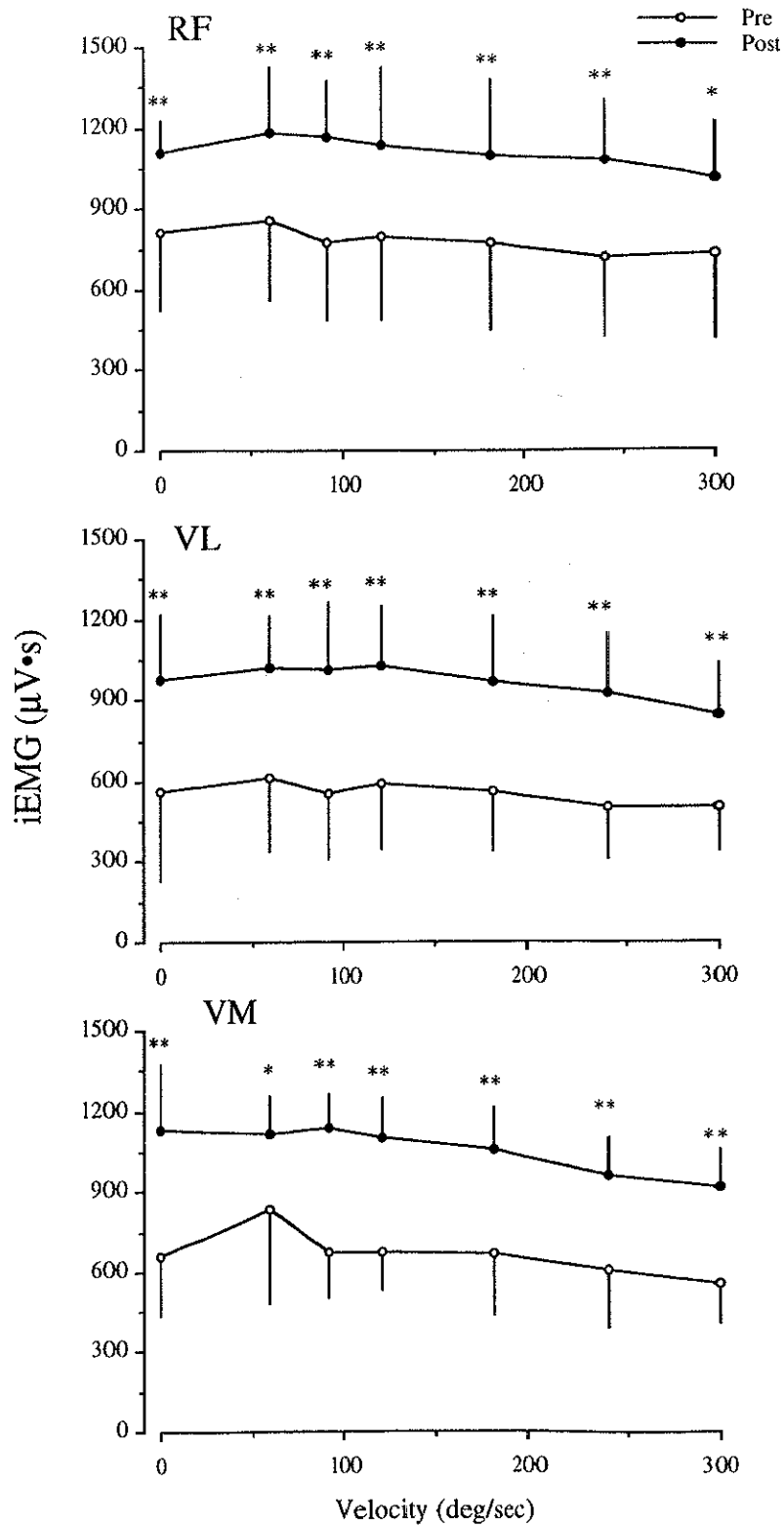
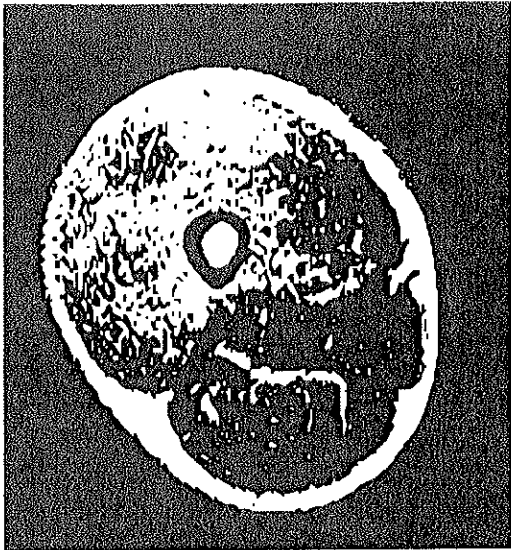
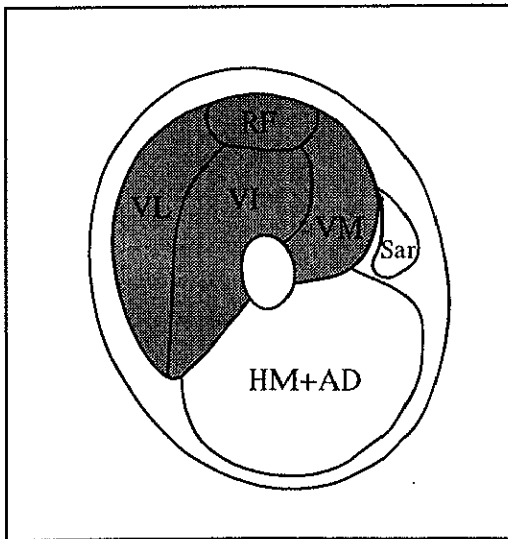
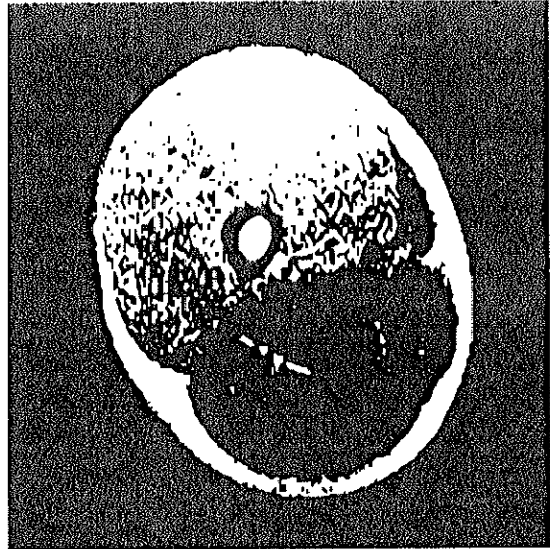


Fig. 26 iEMG activities of rectus femoris (RF), vastus lateralis (VL), and vastus medialis (VM) during isokinetic knee extension at various velocities before and after resistance training. *, $p < 0.05$, **, $p < 0.01$ vs pre.

Pre



Post



RF; rectus femoris
VL; vastus lateralis
VI; vastus intermedius
VM; vastus medialis
Sar; sartorius
HM+AD; hamstring and adductors

Fig. 27 Representative T2 map of MR image at the middle level of thigh after isokinetic knee extensions before and after resistance training. In the knee extensors, white portion is considered to be activated due to muscle contractions.

Table 9 T2 values at rest and after knee extension exercise and activated muscle cross-sectional area pre- and post-training at seven levels of along the length of thigh.

	Pre-training			Post-training		
	Rest (msec)	After Exercise (msec)	% Change	Rest (msec)	After Exercise (msec)	% Change
1 (Proximal)	28.3 (0.3)	34.4 (1.2)	21.6 (4.6)	27.6 ^{**} (0.5)	35.0 (1.5)	26.9 ^{**} (5.2)
2	28.3 (0.5)	34.4 (1.4)	21.8 (5.0)	27.9 [*] (0.6)	35.3 [*] (1.4)	26.5 ^{**} (5.9)
3	28.6 (0.5)	34.6 (1.5)	21.1 (4.9)	28.0 (0.6)	35.2 (1.7)	26.0 [*] (7.3)
4 (Middle)	28.6 (0.5)	34.6 (1.8)	20.9 (6.3)	28.2 (0.6)	35.5 (2.0) [*]	25.8 [*] (8.3)
5	28.7 (0.6)	34.7 (1.8)	20.7 (5.7)	28.1 (0.6)	35.7 (2.1) [*]	27.0 ^{**} (8.2)
6	29.0 (0.8)	34.7 (1.9)	19.8 (5.8)	28.5 (0.9)	35.9 (2.3)	26.0 [*] (8.1)
7 (Distal)	29.7 (0.6)	35.3 (2.0)	18.7 (4.9)	29.2 (0.8)	36.1 (2.4)	23.6 (7.1)
Total	28.7 (0.4)	34.7 (1.6)	20.6 (5.1)	28.2 [*] (0.5)	35.5 [*] (1.9)	26.0 ^{**} (7.0)

Values are means and SD. *, p<0.05, **, p<0.01 vs pre. % Muscle CSA represents relative area of quadriceps femoris with a T2+ 1 SD>the mean T2 of resting muscle. Center, middle part of the femur length of each subject.

全ての横断像の平均値で比較しても同様であった ($p < 0.05$, トレーニング前; 28.7 msec, トレーニング後; 28.2 msec). また, 安静値に対する運動後の変化率では, トレーニング前と比較してトレーニング後ではほとんど全ての部位において有意な増加が認められた ($p < 0.05$ あるいは $p < 0.01$).

測定に用いた7部位において, 安静値に対する運動後のT2値の増加率の部位間の比較では, トレーニング前および後とも, いずれの部位においても有意な差は認められなかった.

図28には安静値のT2値+1SDを超えた面積の大腿四頭筋に占める相対的な割合 (%activated CSA)について示した. 本実験で用いた運動負荷により大腿四頭筋のおよそ80%程度が活性化された. トレーニング前では遠位の部分ほど%activated CSAは低い傾向にあった. トレーニング前と比較してトレーニング後では測定に用いた7部位中4部位において%activated CSAが有意に増加した. また, 7部位全ての横断像の平均値で比較しても有意な増加が認められた.

測定に用いた7部位において, 安静値に対する運動後のT2値の増加率の部位間の比較では, トレーニング前および後とも, いずれの部位においても有意な差は認められなかった.

F. 単位面積当たりの筋力

図29-(a)にはピークトルクをactivated CSAで除して算出した単位面積当たりの筋力および(b)大腿四頭筋の筋断面積で除した単位面積当たりの筋力について示した. 図29-(a)ではトレーニング前後のいずれの角速度においても, 単位面積当たりの筋力に有意な差は認められなかった. 一方, 図29-(b)では角速度0, 90, 120, 180 deg/secの単位面積当たりの筋力がトレ

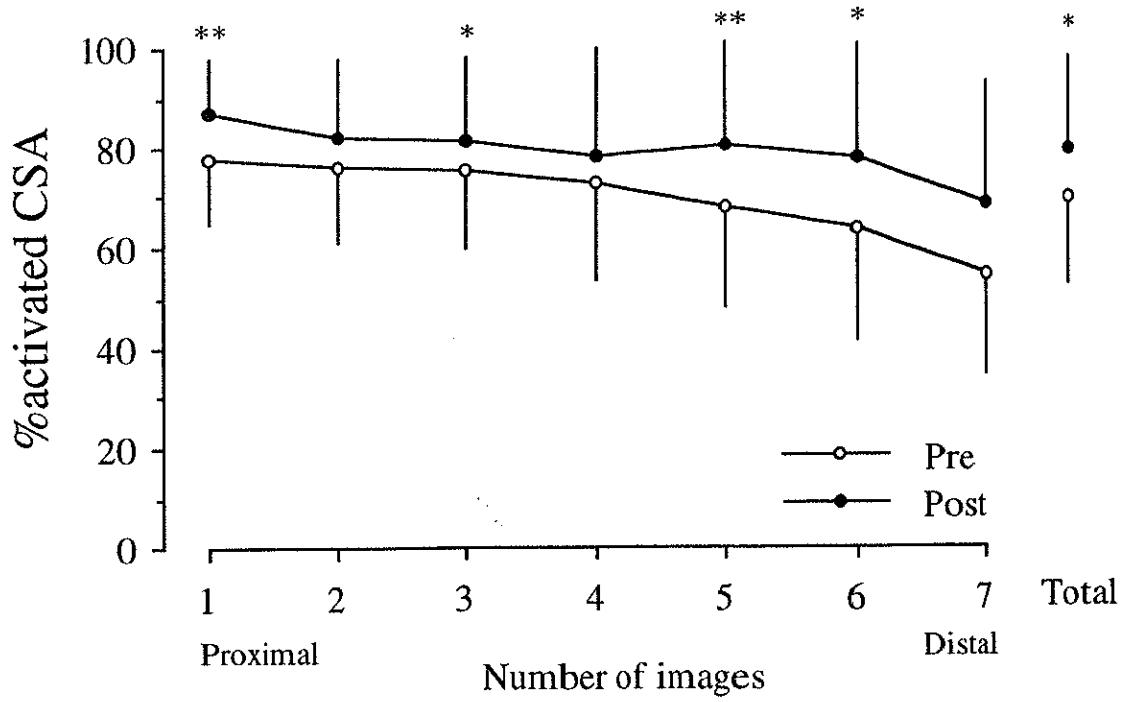


Fig. 28 Relative cross-sectional area of quadriceps femoris showing MR image contrast shift and thereby use in exercise test before and after resistance training. *; $p < 0.05$, **; $p < 0.01$ vs pre.

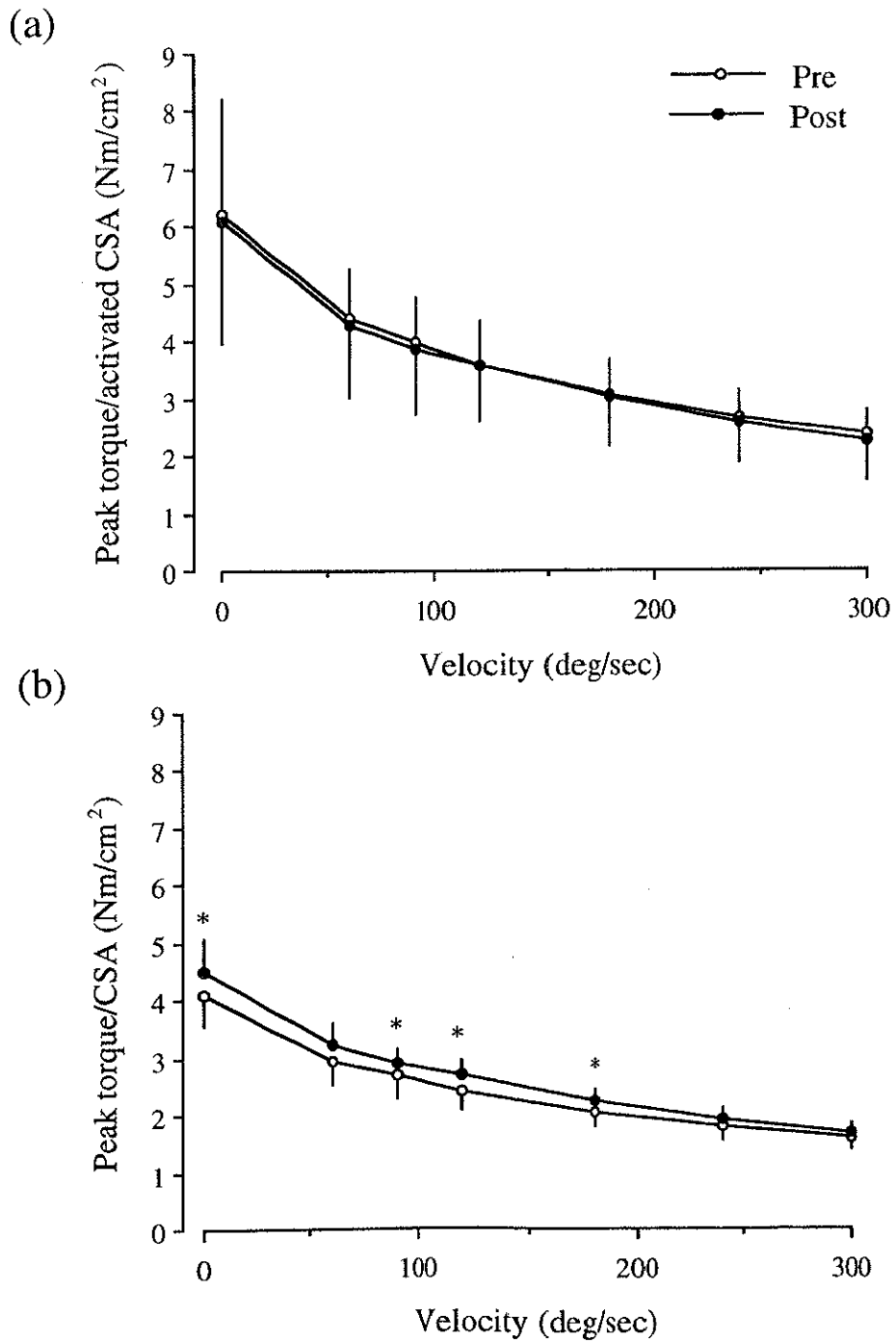


Fig. 29 (a) Peak torque per unit of activated cross-sectional area (CSA), (b) peak torque per unit of CSA after isokinetic knee extension at various velocities before and after resistance training. *; $p < 0.05$ vs pre.

ーニング後に有意に増加した (全て $p<0.05$).

4. 考察

筋力トレーニングの初期には筋肥大をともなうことなく、筋力の増加がみられる (Ikai and Fukunaga, 1970; Moritani and de Vries, 1980). この筋力増加は筋力発揮に参加する運動単位数の増加にともなう新たな筋線維の動員に起因していることが、EMGを用いた研究などから示唆されている (Cannon and Cafarelli, 1987; Moritani and deVries, 1979; Moritani, 1991). しかしながら、EMGだけからではこのような適応が実際に筋の中で生じているのか否かについて明らかにすることは困難と思われる.

1988年、Fleckensteinらは運動に使われた筋では非活動筋に比べMRIの画像上で白くなるコントラスト変化が生じることを示した. このコントラスト変化は骨格筋のT2値に依存しており、MRI画像上で筋が白くなることはT2が延長したことを示し、これは運動において筋が動員されたことを示している (Adams et al., 1992, 1993; Ploutz et al., 1994; Ploutz-Snyder et al., 1995). この方法を用いると運動で活性化された筋と活性化されなかった筋を区別することが可能である (Fleckenstein et al., 1992). さらに、このコントラスト変化の程度 (T2値に依存する)がEMGおよび最大筋力に対する相対値 (%MVC)との間に有意な相関関係がある (Adams et al., 1992)ことから、トレーニングにともなう筋の活性化の変化を捉えることも可能と思われる. そこで、実験IVではMRIを用いて、運動誘発性のT2の変化を捉えることによって、筋の活性化の程度が筋力トレーニング初期の筋力増加にどのような影響を及ぼすのかについて検討した.

本実験では角速度120 deg/secの等速性膝伸展運動を2週間行わせた結果、トレーニング開始3回目以降に有意な筋力の増加が認められ、トレーニング後の測定では、ほとんど全ての角速度における筋力に有意な増加が認められた。角速度120 deg/secの等速性膝伸展力のピークトルクは等尺性最大筋力の59%に相当しており、この速度を用いた筋力トレーニングは低速から高速の角速度における筋力を増加させることが報告されている(金久, 1983)。また、Nariciら(1989)は本研究と同一の角速度における等速性膝伸展のトレーニングを60日間行わせた結果、大腿四頭筋では最大で13%の筋断面積の増加が認められている。本実験ではトレーニング後にMRIから得られた筋断面積および各筋線維タイプ別の筋線維横断面積においても有意な変化は認められなかった。また、大腿直筋、外側広筋、内側広筋から得られたトレーニング後のiEMGでは、測定に用いた全ての角速度において有意な増加が認められた。これらのことは、本実験で用いた2週間のトレーニングが、筋力トレーニングの期間としては短期間ではあったものの、筋力を増加させるには十分なトレーニングであったことを示しており、筋力トレーニング開始後2週間における筋力増加は、その約90%が神経性因子によるものであるというMoritani(1991)の研究結果を支持している。

本研究で用いたようなMRIのコントラスト変化を用いて、筋力トレーニングにともなう神経-筋系の変化について検討した研究はこれまでのところPloutzら(1994)の研究だけである。Ploutzらは2回/週、9週間の膝伸展による筋力トレーニングを9名の男性に行わせたところ、トレーニング後にはトレーニング前と比較して同一負荷で活性化(動員)される部分が少なくなることを認め、これは単位面積当たりに筋が発揮できる張力が増加したことに起因すると結論している。本実験ではトレーニング前と比較し

てトレーニング後では運動終了後のT2の絶対値および%activated CSAが、測定に用いた7部位中の3部位、また7部位全体の平均値で比較しても有意に増加した。運動誘発性のT2値の変化はEMGと比例関係にあり (Adams et al., 1992), また運動強度 (%MVC)とも有意な正の相関関係にあることが示されている (Adams et al., 1993)。したがって、T2値が増加したことは筋が行う仕事量が増加したことを示すものと思われ、実際にT2の測定の直前に行った運動負荷の仕事量はトレーニング前と比較してトレーニング後では5%水準で有意に増加した。さらに、%activated CSAがトレーニング後に有意に増加したことは運動により活性化できる筋線維の数が増加したことを示すものと思われる。このようなトレーニングにともなう筋の適応が、ほとんど全ての角速度における等速性筋力の増加となって現われた。

膝伸展運動後のT2値および%activated CSAでは、部位間にいずれも有意な差は認められなかった。このことは大腿四頭筋全体において、同様に筋の動員がなされたことを示している。しかしながら、大腿四頭筋を構成する各筋においては、その動員の様相が異なることが示され、特にそれはトレーニング後において顕著に認められた(図27)。トレーニング後では大腿直筋のほとんどの部分が活性化されており、さらに、他の3つの筋(外側広筋、中間広筋、内側広筋)においても大腿直筋に近い部分が活性化されていた。しかしながら、それらの筋では大腿直筋から離れるほど活性化されていない部分が多くなっていた。この結果は、大腿四頭筋でも、膝の伸展に対してそれを構成する各筋ではその貢献度が異なり、さらに、一つの筋であっても筋収縮に関与する貢献度が部位によって異なる可能性を示している。

これまでの研究では筋力トレーニングの初期には単位面積当たりの筋力

が増加することが示されている (Ikai and Fukunaga, 1970). 本研究においても先行研究と同様な評価法によると, 2週間のトレーニング後には単位面積当たりの筋力の有意な増加が認められた (図29-b). しかしながら, ピークトルクを運動中に活性化されたと考えられる筋断面積を示す activated CSAで除した場合では, いずれの角速度においても有意な差は認められなかった. しかも, 同一の角速度における単位面積当たりの筋力の値は, トレーニング前後できわめて一致している. したがって, 本研究ではトレーニング後の筋力の増加は神経性因子が改善されたことにより, 新たな筋線維を動員することが可能となり, それによって筋力の増加が生じたことを示している. さらに, これは本研究で用いた短期間のトレーニング後において, 機能的に活性化されている筋断面積当たりの筋力は変化しないことも示している.

いくつかの先行研究および本実験でも観察された運動後の骨格筋におけるT2の増加には様々な因子が関係していることが示唆されてきているが, 現在のところそのメカニズムについては十分には明らかになっていない. 最も可能性の高いものとして, 血流量の増加にともなう水分量の増加があり, 特にそれは細胞外の水によるものであることが示唆されている (Fleckenstein et al., 1988). また, 他の可能性としては, 乳酸の増加が挙げられる. Fleckensteinら (1991)は運動中の解糖による生成物 (主に乳酸)が運動誘発性のT2時間の延長に影響していることを示唆している. 彼らは解糖能力がなく乳酸を生成することができない患者 (McArdle症候群)では, 健康な成人と異なり運動後のT2の延長が認められないことを示している. 本実験ではその可能性を検討するため解糖系の律速酵素であるPFK活性の測定を行った. その結果, トレーニング後ではPFK活性に有意な変化が認められなかった. これはT2の測定に用いた等速性膝伸展運動に参与する

解糖系の影響が、トレーニング前後で変化しなかったことを示している。したがって、トレーニング後で等速性膝伸展運動にともなうT2値の延長が生じたことに、乳酸などの生成物が影響した可能性は少ないと思われる。

最後に、本実験の限界として、運動誘発性のコントラスト変化は計100回の膝伸展運動後に測定されたものであった。したがって、この運動負荷は一回の筋力発揮においてみられる筋の動員様相をどの程度反映しているのかという点については疑問が残る。Yueら(1994)はT2を変化させるのに必要な最小限の反復回数について肘屈筋を用いて検討しており、安静時と比較して80%MVCでは2回、25%MVCでは5回で有意な変化が認められることを報告している。この研究は高強度の運動であれば比較的少ない反復回数でもT2の変化が生じることを示唆する結果であると思われる。最大筋力の発揮が数回の試技から評価されることを考えると、できるだけ少ない反復回数でT2を変化させることができれば、さらに詳細な筋の活性化と筋力発揮との関係について評価できることが予想され、これについては実験プロトコルの改善あるいはMRIの技術的進歩などともない可能となるものと思われる。

5. 要約

本実験は筋力トレーニング初期に生じる筋力の増加に影響する因子について検討することを目的とした。結果の要約を以下に示す。

1) MRIから得られた大腿四頭筋の筋断面積にはトレーニングによる有意な変化は認められなかった。

2) 等速性膝伸展力では角速度0~240 deg/secにおいて、トレーニングにより有意な増加が認められた。

3) 筋線維組成、筋線維横断面積、PFK活性にはトレーニングによる有意な変化は認められなかった。

4) 大腿直筋、外側広筋および内側広筋から得られたiEMGは測定に用いた全ての角速度において有意な増加が認められた。

5) 運動後のT2はトレーニング後では、7部位中の3部位において、また7部位全ての平均値と比較しても有意な増加が認められた。%activated CSAにおいても7部位中の4部位において、また7部位全ての平均値と比較しても有意な増加が認められた。

6) 筋力をactivated CSAで除した単位面積当たりの筋力はいずれの角速度においてもトレーニング前後で有意な変化は見られなかった。

以上の結果から、筋力トレーニングの初期に生じる筋力増加の原因の一つとして、トレーニング前には活性化されていなかった筋線維がトレーニング後には活性化されるようになったことによるものであり、さらに、短期間の筋力トレーニング後において、活性化された部分の単位面積当たりの筋力は変化しないことが示唆された。

VIII. スプリントトレーニングにともなう等速性筋力と筋の形態的特性の変化(実験V)

1. 目的

これまでに、スプリントトレーニングにともない骨格筋の解糖系 (Jacobs et al., 1987; Linossier et al., 1993) および酸化系酵素活性の増加 (Jacobs et al., 1987), 筋の緩衝能力の増加 (Sharp et al., 1986) などが生じることが示されてきている。最近では自転車エルゴメーターを用いたスプリントトレーニング後にST線維からFT線維への筋線維タイプの移行が生じるという報告もなされてきている (Jansson et al., 1990; Esbjomsson et al., 1993)。しかしながら、スプリントトレーニングにともなう筋力あるいは筋の形態的特性の変化に関する研究は非常に少なく (Thorstensson et al., 1975; Shealy et al., 1992), 明らかになっていない点が多い。その中でも、Thorstenssonら (1976) はスプリントトレーニング後に等尺性最大筋力の増加が生じたことを示しており、一方、Shealyら (1992) はランニングによるスプリントトレーニング後、等速性膝伸展力では低速から高速の角速度において有意に増加したものの、等速性膝屈曲力では低速の角速度において有意な低下が認められたことを報告している。筋力と筋断面積は密接な関係にあることから (Alway et al., 1991; Ikai and Fukunaga, 1968; Maughan et al., 1983a; Young et al., 1984, 1985), スプリントトレーニングが筋の機能的・形態的特性に及ぼす影響について検討するためにはそれらの両者の観点より評価する必要性が考えられるが、そのような観点から検討されたものはみられない。さらに、筋力トレーニングのように筋に

大きな負荷のかかるトレーニング後には、筋断面積の増加が生じることが多くの研究において示されているが (Narici et al., 1989; Housh et al., 1992; Roman et al., 1993), その増加は同一の筋においても部位により異なることが報告されている。スプリントトレーニングが短時間に大きなパワー発揮をするトレーニング形態であることから、トレーニング後には筋肥大が生じることが予想されるが、筋の形態的特性にどのような変化が生じるのかは全く明らかになっていない。

そこで本研究では、スプリントトレーニングにともなう大腿部の筋断面積および膝伸展力・屈曲力、筋線維組成、筋線維横断面積の変化について検討することを目的とした。

2. 方法

A. 被検者

被検者には体育専攻男子学生6名を用いた (年齢 23.3 ± 2.8 歳, 身長 175.3 ± 6.9 cm, 体重 68.6 ± 7.8 kg). 全ての被検者に実験の主旨, 内容および危険性についてあらかじめ説明し, 参加の同意を得た。

B. トレーニング

トレーニングは電磁ブレーキ式自転車エルゴメーター (パワーマックス V; コンビ社製)を用いて, 体重の7.5%を負荷とする30秒間の全力ペダリングを, 1日に3セット (セット間には20分の休息), 週に3回, 6週間行った。

C. 解剖学的断面積，筋容積および生理学的断面積

解剖学的断面積，筋容積，筋線維長および生理学的断面積の測定法および算出法は実験IIと同様であった。なお，分析に用いた筋も実験IIと同様であった。

D. 等速性膝伸展力および屈曲力

等速性膝伸展力および屈曲力の測定は実験IIと同様の方法で行った。

E. 統計処理

各項目の値は，すべて平均値と標準偏差で示した。差の検定にはpaired-t-testを用い，有意水準は5%とした。

3. 結果

A. 筋の形態的特性

表10にはトレーニングにともなう筋の形態的变化について示した。筋長および筋線維長に関しては，トレーニング前後に有意な変化は認められなかった。筋容積では外側広筋および大腿二頭筋(短頭)において有意な増加が認められたが，KEおよびKFにおいては有意な変化は認められなかった。PCSAについては外側広筋，内側広筋，大腿二頭筋(短頭)およびKEにおいて有意な増加がみられた。Maximum ACSAでは大腿直筋，外側広筋，内側広筋，KEおよび大腿二頭筋(短頭)において有意な増加が認められた。

図30には外側広筋の起始部-停止部間において得られたACSAについて示した。ACSAの有意な増加は筋腹部位において顕著であった。

Table 10 The anatomical features of human thigh muscles pre and post sprint training.

	ML (cm)			FL (cm)			MV (cm ³)			PCSA (cm ²)			Maximum ACSA (cm ²)		
	Pre	Post	% Change	Pre	Post	% Change	Pre	Post	% Change	Pre	Post	% Change	Pre	Post	% Change
RF	35.5 (3.4)	35.8 (2.5)	0.8	7.4 (0.7)	7.5 (0.5)	1.4	295.0 (65.4)	301.1 (63.0)	2.1	39.3 (6.4)	39.9 (6.4)	1.5	14.2 (2.8)	15.3 (3.0)	7.7
VL	32.7 (2.3)	32.2 (1.8)	-1.2	6.6 (0.5)	6.5 (0.4)	-1.5	700.9 (170.5)	735.3* (164.9)	4.9	104.5 (20.5)	111.8** (22.3)	7.0	34.0 (6.5)	36.7** (7.1)	7.9
VI	36.3 (4.0)	36.5 (3.2)	0.5	7.6 (0.8)	7.6 (0.7)	0	613.4 (147.6)	619.1 (154.6)	0.9	80.1 (11.6)	80.5 (13.4)	0.5	27.4 (4.5)	27.7 (4.8)	1.1
VM	33.7 (4.0)	33.3 (4.4)	-1.2	7.1 (0.8)	7.0 (0.9)	-1.4	539.7 (133.6)	555.7 (137.2)	3.0	75.3 (11.4)	78.4* (11.6)	4.1	30.1 (5.1)	31.5* (5.1)	4.7
Total (KE)	-	-	-	-	-	-	2149.0 (505.0)	2211.2 (503.5)	2.9	299.2 (47.8)	310.6* (51.8)	3.8	84.2 (15.5)	87.3* (14.8)	3.7
BFs	23.7 (1.9)	23.3 (1.8)	-1.7	12.2 (1.0)	12.1 (0.9)	-0.8	95.6 (22.6)	100.4** (23.5)	5.0	7.2 (1.4)	7.6** (1.5)	5.6	6.8 (1.5)	7.5* (1.4)	10.3
BFI	27.5 (3.6)	28.0 (3.2)	1.8	6.9 (0.9)	7.0 (0.8)	1.4	193.6 (53.8)	185.5 (44.1)	-4.2	27.6 (4.3)	26.2 (4.1)	-5.1	12.7 (2.4)	13.3 (2.3)	4.7
ST	30.8 (3.0)	30.8 (3.2)	0	15.4 (1.5)	15.4 (1.6)	0	215.1 (39.0)	218.5 (39.6)	1.6	13.9 (1.8)	14.1 (1.8)	1.4	11.8 (1.7)	12.6 (1.7)	6.8
SM	25.7 (4.4)	24.7 (3.9)	-3.9	6.1 (1.0)	5.9 (0.9)	-3.3	250.7 (90.0)	244.3 (94.5)	-2.6	38.9 (9.6)	39.4 (11.3)	1.3	15.4 (3.6)	15.3 (4.2)	-0.6
Sar	44.7 (3.6)	44.0 (3.1)	-1.6	40.5 (3.3)	39.9 (2.8)	-1.5	146.8 (35.6)	154.0 (29.6)	4.9	3.6 (0.7)	3.8 (0.5)	5.6	4.0 (0.8)	4.3 (1.0)	1.9
Gr	28.5 (2.2)	28.7 (2.4)	0.7	23.6 (1.8)	23.7 (2.0)	0.4	90.3 (17.6)	90.9 (20.9)	0.7	3.8 (0.7)	3.8 (0.7)	0	4.6 (0.8)	4.6 (0.7)	0
Total (KF)	-	-	-	-	-	-	991.7 (228.4)	993.6 (225.6)	0.2	95.0 (15.7)	95.0 (17.1)	0	44.5 (8.5)	46.0 (8.9)	3.4

Values are means and SD. ML; muscle length, FL; fiber length, PCSA; physiological cross-sectional area, Maximum ACSA; maximum anatomical cross-sectional area. RF; rectus femoris, VL; vastus lateralis, VI; vastus intermedius, VM; vastus medialis, KE; knee extensors, BFs; biceps femoris (short head), BFI; biceps femoris (long head), ST; semitendinosus, SM; semimembranosus, Sar; sartorius, Gr; gracilis, KF; knee flexors. *, p<0.05, **, p<0.01.

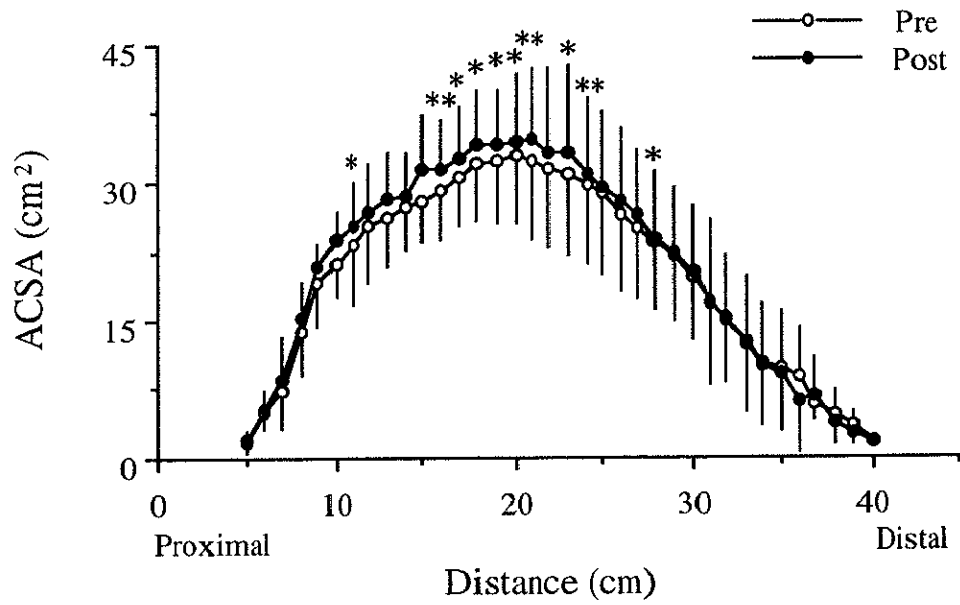


Fig. 30 Series of anatomical cross-sectional area (ACSA) of vastus lateralis along the length of the thigh before and after sprint training. *, $p < 0.05$, **, $p < 0.01$ vs pre.

B. 筋線維組成および筋線維横断面積

表11には筋線維組成および筋線維横断面積について示した。トレーニング前における%FT線維は58.8%で、トレーニング後は57.3%であり、有意な変化は認められなかった。一方、FT線維の筋線維横断面積はトレーニング前 ($3909.3 \pm 1940.4 \mu\text{m}^2$)と比較して、トレーニング後 ($5494.0 \pm 1719.9 \mu\text{m}^2$)が有意に高値を示した ($p < 0.05$)。ST線維の筋線維横断面積はトレーニングにともない変化しなかった (トレーニング前; $4225.8 \pm 1836.2 \mu\text{m}^2$, トレーニング後; $4221.8 \pm 1235.4 \mu\text{m}^2$)。その結果、FT/ST ratioがトレーニング後に有意に増加した ($p < 0.05$)。

C. 全力ペダリングパワー

図31にはトレーニング前後の自転車エルゴメーターによる30秒間の平均パワーおよびピークパワーについて示した。平均パワーはトレーニング前と比較してトレーニング後に有意に増加した ($593 \text{ W} \rightarrow 631 \text{ W}$; $p < 0.01$)。一方、ピークパワーにおいてはトレーニングによる変化は認められなかった。平均パワーを大腿部のKEおよびKFの筋容積で除した単位体積当たりのパワーにおいても、平均パワーでは有意な増加が認められたが ($0.18 \text{ W/cm}^3 \rightarrow 0.20 \text{ W/cm}^3$; $p < 0.05$)、ピークパワーでは有意な変化はみられなかった。

D. 等速性膝伸展力および屈曲力

図32にはトレーニング前後における等速性膝伸展力および屈曲力について示した。等速性膝伸展力はトレーニング前と比較してトレーニング後に低下する傾向にあり、角速度180deg/secではトレーニング後が有意に低値を示した ($p < 0.01$)。

Table 11 Characteristics of muscle fiber type before and after sprint training.

	Pre	Post
%FT fibers	58.8 (18.3)	57.3 (14.3)
%ST fibers	41.2 (18.3)	42.7 (14.3)
FT area (μm^2)	3909.3 (1940.4)	5494.0* (1719.9)
ST area (μm^2)	4225.8 (1836.2)	4221.8 (1235.4)
% area FT fibers	56.5 (18.2)	63.2 (11.2)
% area ST fibers	43.5 (18.2)	36.8 (11.2)
FT/ST area ratio	0.95 (0.24)	1.30* (0.24)

Values are means and SD. *; $p < 0.05$ vs pre.

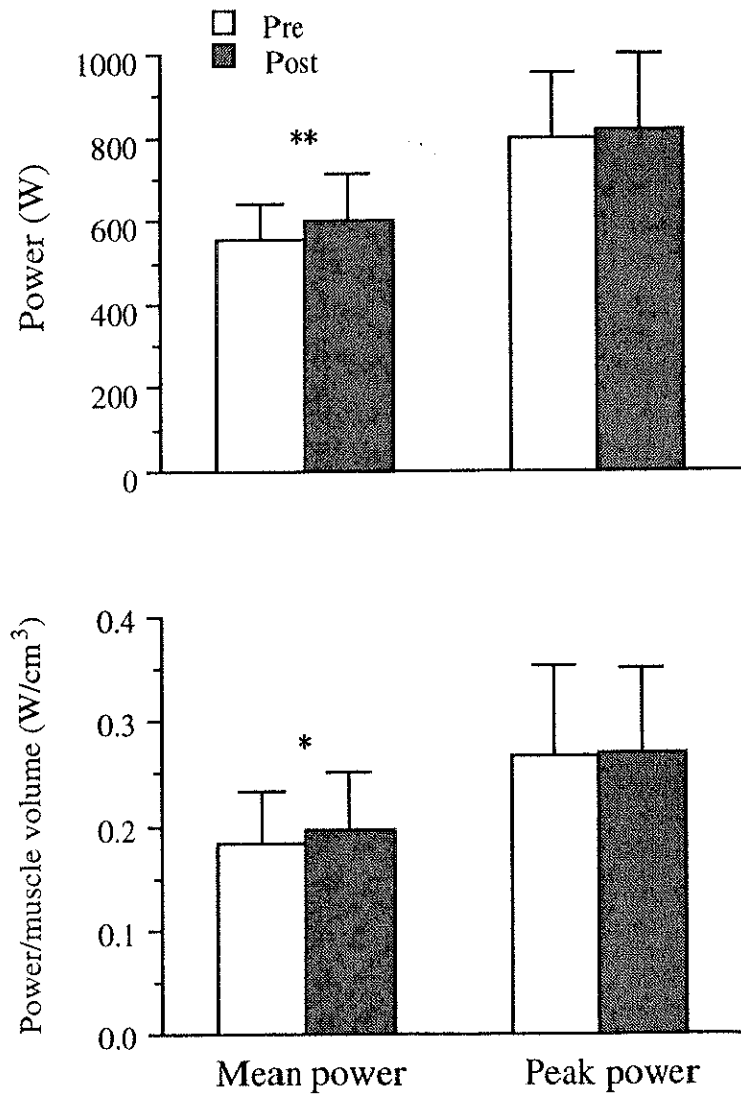


Fig. 31 Peak and mean power output during 30-s maximal sprinting by bicycle ergometer. *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$.

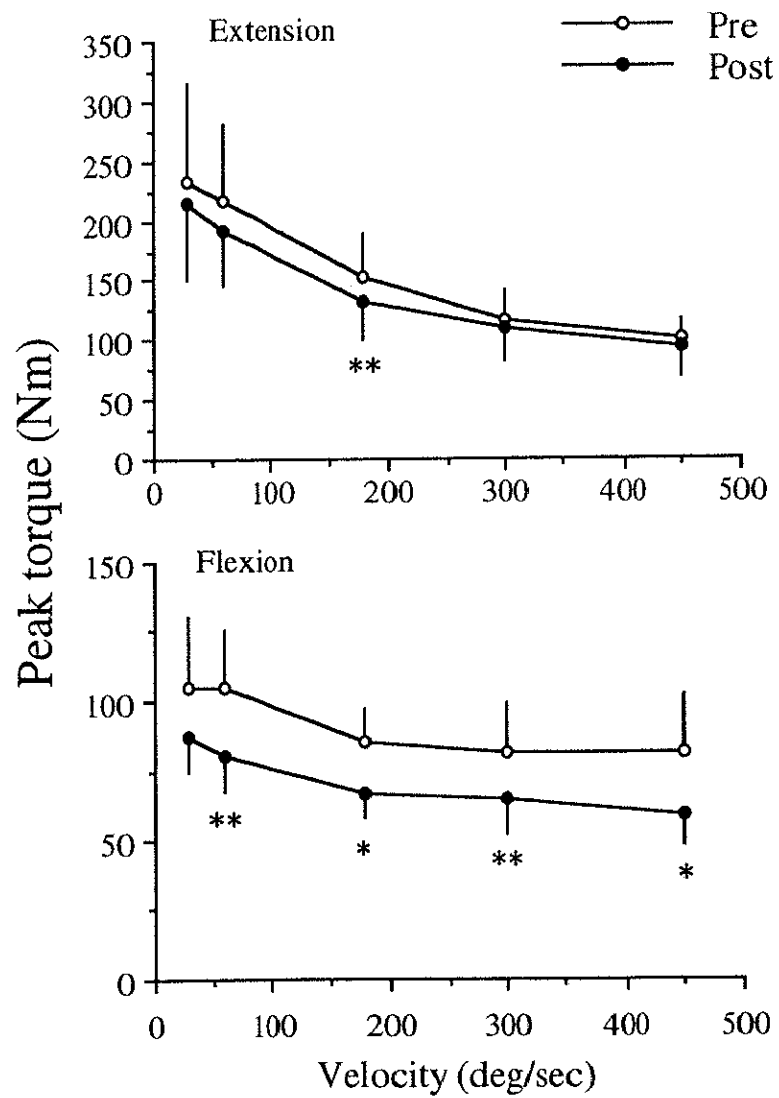


Fig. 32 Torque-velocity relationships during isokinetic knee extension and flexion. *, $p < 0.05$, **, $p < 0.01$.

一方、トレーニング後の等速性膝屈曲力では角速度60~450 deg/secにおいてトレーニング前と比較して有意に低値を示した ($p<0.01$ または $p<0.05$).

E. Specific tension

図33にはトレーニング前後におけるKEおよびKFのSPTについて示した。KEでは角速度30, 60, 180, 450 deg/secにおいてトレーニング後に有意な低下が認められた ($p<0.01$, $p<0.05$). 一方, KFでは角速度30, 60, 300, 450 deg/secにおいてトレーニング後に有意な低下が認められた ($p<0.01$, $p<0.05$).

4. 考察

これまでスプリントトレーニングにともなう骨格筋の変化に関する研究は、筋の酸化系および解糖系酵素活性、筋の緩衝能力などに焦点が当てられていた (Jacobs et al., 1987; Linossier et al., 1993). また、その他の研究では主に筋生検による筋線維組成 (数占有率および面積占有率など)に関するものがほとんどであった (Jansson et al., 1990; Esbjornsson et al., 1993; Thorstensson et al., 1975). 筋力トレーニングでは筋の違いあるいは一つの筋でも部位により筋断面積の変化率が異なることが示されているが (Narici et al., 1989; Roman et al., 1993), スプリントトレーニングに関して、このような観点から検討された研究はみられない。本研究では自転車エルゴメーターを用いた6週間のスプリントトレーニングが筋の形態的および機能的特性に及ぼす影響について検討した。

スプリントトレーニング後にKEでは外側広筋において、またKFでは大

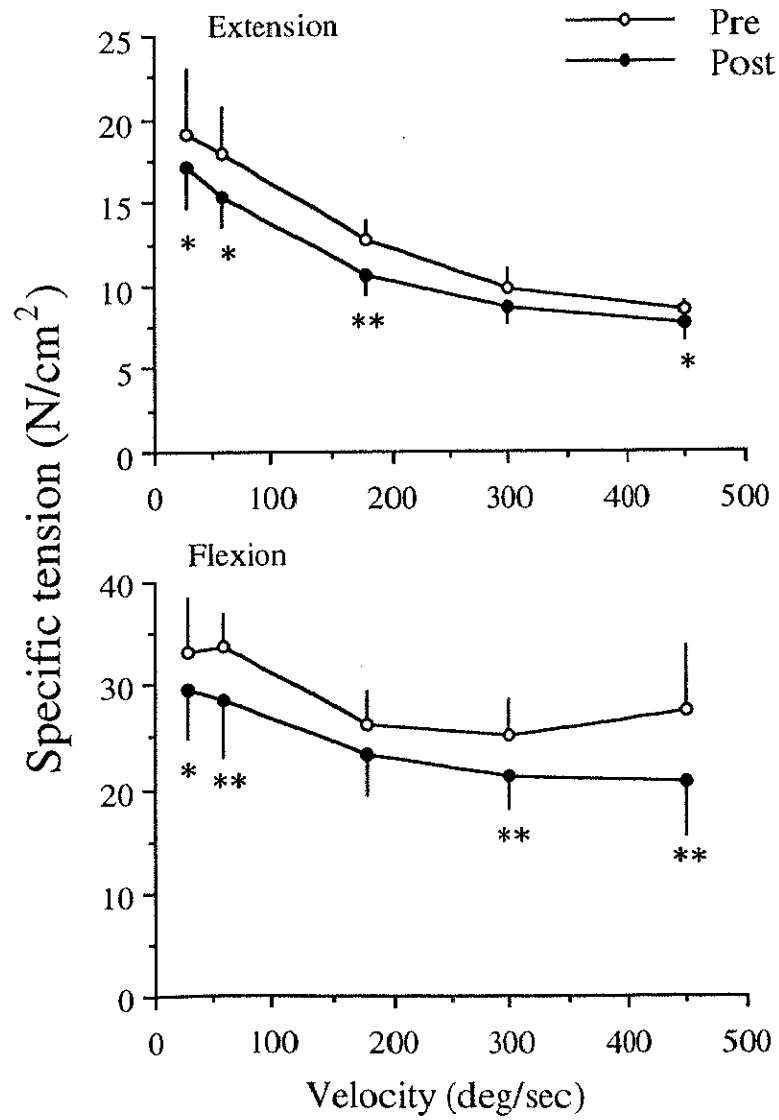


Fig. 33 Specific tension-velocity relationships during isokinetic knee extension and flexion. *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$.

腿二頭筋の短頭に有意な筋容積およびPCSAの増加が観察された。また、KEにおいてもPCSAの有意な増加がトレーニング後に認められた。図30に示したように、外側広筋のACSAはその最大ACSA付近における筋肥大が顕著であった。このような傾向は筋力トレーニング後の上腕の筋においてみられた筋肥大の結果と非常に類似している(Roman et al., 1992)。本実験、実験IVおよび先行研究から得られた筋肥大の結果を考慮すると、筋に対して肥大を生じさせるような負荷が生じた場合、骨格筋はそのトレーニングの負荷様式、強度あるいは形態にかかわらず筋腹付近、すなわち筋量が最も多くあるところに顕著な筋肥大が認められるようである。さらに、スプリントトレーニング前後に外側広筋に対して実施された筋生検から、FT線維のみに有意な筋線維横断面積の増加が認められた。このFT線維の選択的な肥大はスプリントトレーニングでは主にFT線維が動員されていたことを示唆する結果であると思われる。

KEのPCSAが有意に増加し、KFのPCSAは変化が認められなかったにもかかわらず、等速性筋力は特に屈曲力においてトレーニング後に有意に低下した。さらに、PCSAの単位面積当たりに発揮された張力を示すSPTでは、ほとんどの角速度の伸展力・屈曲力において有意な低下が観察された。スプリントトレーニングにともなう等速性膝屈曲力の有意な低下は、Shealyら(1992)の研究と同様な結果であった。また、Saleら(1992)は8人の男性被検者を用いて、7-20 RMの負荷で5セットのレッグプレスを3日/週、19週間行わせた。その結果、大腿四頭筋の筋断面積およびレッグプレスの1 RM重量が有意に増加したが、等尺性膝伸展力、電気刺激による単収縮力、大腿四頭筋の運動単位の活性には変化がみられなかった。さらに、ラットを用いた研究において、腓腹筋を切除し、ヒラメ筋に代償性負荷を30日間施した結果、筋重量、筋線維横断面積の有意な増加が

みられたが、SPTは有意に低下したことが示されている (Kandarian and White, 1989). これらの知見はトレーニングあるいは過負荷にともない、筋の肥大は生じたが、SPTは低下したことを示している。さらに、筋に対する刺激と種の違いはあるものの、本研究と同様な知見を示すものである。スプリントトレーニング後に等速性筋力の有意な低下が認められた原因については明らかではないが、最も可能性の高い要因として、トレーニングにおける運動の継続時間が影響した可能性が考えられる。すなわち、スプリントトレーニングは30秒間連続的に最大パワーを維持する能力を向上させるものであり、一方、等速性筋力は0.2(角速度450 deg/sec)~3秒間(角速度30 deg/sec)の非常に短時間に発揮される最大筋力を示している。エネルギー供給系から考えると、等速性膝伸展動作ではATP-PC系からのエネルギーが大部分を占めるものと思われ、一方、本研究で用いた30秒間の全力自転車ペダリング中のエネルギーは、主に乳酸系から得られたものと考えられる。つまり、運動時間に依存したエネルギー供給系の違いがスプリントトレーニング後の筋力低下に起因していた可能性が考えられる。また最近、Lynchら(1994)は本研究と同様なスプリントトレーニング前後に得られた筋サンプルから、単一筋線維の収縮特性を筋線維別に検討している。その結果、Type II線維の収縮特性を示す筋線維(論文中ではPopulation II)において、強縮張力を筋線維横断面積で除した単位面積当たりの張力がトレーニング後に有意に低下した(-36%)ことを示しており、本研究と類似した結果であった。これまでの研究ではスプリントトレーニング後に筋力の増加が認められるものもあるが(Thorstensson et al., 1975), 本研究をはじめとしたその他のいくつかの研究では筋力の有意な低下も認められている(Shealy et al., 1992; Lynch et al., 1994). したがって、これらの研究結果を考え合わせるとスプリントトレーニングは筋力

低下を引き起こす可能性のあることが示唆される。

5. 要約

本研究の目的は自転車エルゴメーターによるスプリントトレーニングがヒトの大腿部の筋の形態的特性、筋線維組成および等速性膝伸展力・屈曲力に及ぼす影響について検討することであった。被検者には体育専攻学生6名を用いて、MRIから得られた大腿部の連続横断像、筋生検から得られた筋線維組成、30秒間の全力ペダリングパワーおよび等速性膝伸展力・屈曲力の測定を行った。結果の要約を以下に示す。

1) 外側広筋、大腿二頭筋(短頭)において、筋容積の有意な増加が認められた。膝伸筋、膝屈筋の筋容積に有意な変化はみられなかった。外側広筋、内側広筋、大腿二頭筋(短頭)、膝伸筋の生理学的断面積において有意な増加が認められた。

2) 起始部-停止部間において連続横断像の検討より、外側広筋の筋腹部付近に有意な筋断面積の増加が認められた。

3) トレーニング前後において、%FT線維は変化しなかった。一方、% area FT線維はトレーニング前と比較して、トレーニング後が有意に高値を示した。

4) 30秒間の自転車エルゴメーターによる平均パワーには有意な増加が認められたが、ピークパワーには有意な増加は認められなかった。また、平均パワーを大腿部の膝伸筋および膝屈筋の筋容積で除した単位体積当りのパワーにおいても有意な増加が認められた。

5) 等速性膝伸展力では角速度180deg/secにおいてトレーニング後に有

意な低値を示した。等速性膝屈曲力では60-450 deg/secにおいてトレーニング後に有意に低値を示した。

6) 膝伸筋のspecific tensionは角速度30, 60, 180, 450 deg/secにおいてトレーニング後に有意に低下した。また膝屈筋では角速度30, 60, 300, 450 deg/secにおいて有意に低値を示した。

以上の結果から、自転車エルゴメーターを用いたスプリントトレーニングは外側広筋および大腿二頭筋の短頭の生理学的断面積を増加させるが、等速性膝伸展力・屈曲力は低下することから、膝伸筋および膝屈筋のspecific tensionの低下が生じることが示された。したがって、成人男性ではスプリントトレーニングにともない筋力にマイナスの影響を及ぼす可能性のあることが示唆された。

IX. 中強度の持久性トレーニングにともなう等速性筋力と筋の形態的特性の変化 (実験VI)

1. 目的

持久性トレーニングが骨格筋に及ぼす一般的な影響として、毛細血管密度あるいは酸化系酵素活性の増加 (Andersen and Henriksson, 1977; Gollnick et al., 1973; Holloszy and Booth, 1976; Inger, 1979; 勝田と田中, 1983)などが挙げられる。また、筋力トレーニングとは異なり、FT線維およびST線維のいずれの筋線維タイプにおいても筋線維横断面積はほとんど増加しないと報告されている (Booth and Thomason, 1991; Inger, 1979; 勝田と田中, 1983; Saltin and Gollnick, 1983)。この現象における解釈としては持久性トレーニング後に筋線維の毛細血管の新生が認められ、筋線維内の酸素の拡散距離が短いほど持久的な能力には有利であるため、筋線維横断面積は増加しないほうがより効果的であるというものである (Saltin and Gollnick, 1983)。しかしながら、全ての報告が一致しているわけではなく、持久性トレーニングにともない筋線維の肥大がみられるとする研究も報告されている (Andersen and Henriksson, 1977; Gollnick et al., 1973)。AndersenとHenriksson (1977)は5人の男性被検者を用いて80% $\dot{V}O_2$ max強度で、40分/日、4日/週、8週間の自転車エルゴメーターによるトレーニング後にType IIa線維、Type IIb線維の筋線維横断面積が有意に増加したことを報告している。また、Gollnickら (1973)の研究においては、75% $\dot{V}O_2$ max強度で、60分/日、4日/週、5ヵ月間の自転車エルゴメーターを用いたトレーニング後にST線維の筋線維横断面積に有意な増加が認められている。

これらの報告は持久性トレーニングとしては他の研究と比べて、比較的高い強度を用いているので、筋線維横断面積が増加した可能性が考えられる。しかしながら、通常、一般人の持久性トレーニングとして多く用いられている60% $\dot{V}O_2\text{max}$ 前後の強度によって、筋断面積がどのように変化するのかについては明らかにされていない。

持久性トレーニングによる筋力の変化については、トレーニングにより変化しないという報告 (Dudley and Fleck, 1987; Hickson, 1980) もあれば、増加する (Sale et al., 1990) という報告もなされている。しかしながら、Sale ら (1990) は、自転車エルゴメーターを用いた95% $\dot{V}O_2\text{max}$ という非常に高強度の持久性トレーニング後に大腿部の筋断面積の増加とともにレッグプレスによる最大挙上重量の有意な増加を報告している。この結果は、高強度であれば持久性トレーニングにより筋力が増加するという点では興味深い結果である。ただし、これまでの多くの持久性トレーニングの研究では、筋力について検討されていない。

前述のように、これまで持久性トレーニングにより筋のサイズがどのように変化するのかという研究は、筋生検による筋線維レベルの検討がほとんどであり (Andersen and Henriksson, 1977; Gollnick et al., 1973; 勝田と田中, 1983, Saltin and Gollnick, 1983), よりマクロな筋断面積について検討したものは少ない (Sale et al., 1990)。さらに、実験ⅡあるいはMRIを用いた他の先行研究 (秋間ら, 1992; Katsuta and Kuno, 1992; 松垣ら, 1993; Narici et al., 1989) の結果から、筋断面積の最大部位はそれぞれの筋において異なるので、トレーニングにともなう変化を観察する場合には、数カ所の部位について検討する必要性が考えられる。

そこで本研究では、MRIを用いて、一般的によく行われている中強度 (60% $\dot{V}O_2\text{max}$) の持久性トレーニングが、大腿部の筋断面積および筋力に影

響を及ぼすのか否かについて検討した。

2. 方法

A. 被検者およびトレーニング

被検者には、継続的な運動経験のない女子大学生5名(年齢 21.0 ± 0.3 歳)を用いて、自転車エルゴメーター(スペースサイクル MS; TS Health Systems社製)による持久性トレーニングを実施し、その前後で最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)、筋断面積および脚筋力の測定を行った。トレーニングは $60\% \dot{V}O_{2max}$ の強度、60 RPMで、1日30分、週3回の頻度で10週間行った。また、運動強度の調整を行うために運動中に心拍数を連続的に測定した。なお、全ての被検者に実験の主旨、内容および危険性についてあらかじめ説明し、参加の同意を得た。

B. 最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)

$\dot{V}O_{2max}$ の測定は、電磁式エルゴメーター(コルバリ 400; ロード社製)による3分間のウォーミングアップの後、1分間に25 Wの割合で運動強度を漸増させるランプ負荷法を用いて行った。呼気ガスは一呼吸毎に測定可能な呼気ガス分析器(レスピロモニターRM300; ミナト医科学社製)によって採取し、10秒毎に酸素摂取量を分析した。また、運動中には心拍数も同時に測定した。

C. 筋断面積

筋断面積の測定は実験Iと同様のプロトコールを用いた。得られた15枚

のうち、分析に用いた横断像は10枚であった。10枚の横断像から、全断面積(皮下脂肪、筋および骨を含んだ面積)、KE、KF、AD(内転筋群)、大臀筋(近位1および2枚目のみ)および大腿骨の断面積を測定した。さらに、KEでは大腿直筋、外側広筋、中間広筋および内側広筋、また、KFでは大腿二頭筋(長頭・短頭)、半腱様筋、半膜様筋、薄筋および縫工筋の各筋別に筋断面積を測定した。筋、脂肪および骨の断面積はMRIのフィルムをトレースし、実験Iと同様のコンピューターおよびデジタイザーを用いて測定した。皮下脂肪は全断面積より筋断面積および大腿骨断面積の和を差し引いたものとした。

筋容積(MV)は筋別に算出された筋断面積(CSA)にスライス厚とスライス間隔の和(つまり、22 mm)を用いて、以下の式より算出した。

$$MV(\text{cm}^3) = 2.2 \cdot \sum_{k=1}^n \text{CSA}_k$$

[CSA_k; k枚目のCSA, nは1から10まで]

D. 等速性膝伸展力・屈曲力

等速性筋力の測定法は実験Iと同様であった。ただし、用いた角速度は60, 180, 300 deg/secであった。

E. 統計処理

各項目の値は全て平均値と標準偏差で示した。差の検定にはpaired t-testを用いて、有意水準は5%とした。

3. 結果

A. 身体特性および最大酸素摂取量

表12には、トレーニング前後における被検者の身体特性および $\dot{V}O_{2max}$ について示した。トレーニング後において体重の変化は観察されなかった。また $\dot{V}O_{2max}$ は 39.1 ± 4.7 から 44.8 ± 4.8 ml/kg/minに有意に増加した($p < 0.01$)。

B. 筋断面積

図34にはKEおよびKEを構成する各筋頭の筋断面積について示した。KEの筋断面積は全ての部位においてトレーニング後に有意な増加が認められた。大腿直筋および外側広筋では、ほぼ全域において有意な筋断面積の増加が認められた。また、中間広筋および内側広筋では主に筋腹付近に有意な筋断面積の増加が認められた。

図35にはKFおよびKFを構成する各筋頭の筋断面積について示した。KFの筋断面積は筋腹付近において有意な増加が認められた。同様の傾向は大腿二頭筋(長頭)、半腱様筋および半膜様筋においても認められた。

図36にはKEおよびKFの筋断面積の増加率について示した。KEにおける増加率の範囲は11-17%で、KFのそれは8-16%であった。

C. 筋容積

図37には大腿部の筋群、各筋頭および皮下脂肪の容積について示した。KE、KFおよびADはトレーニング後に有意に筋容積が増加した。また、KEを構成する各筋の筋容積はいずれも有意な増加を示した。一方、KFの筋では大腿二頭筋(長頭・短頭)、半腱様筋および半膜様筋において有意な筋容積の増加が認められた。皮下脂肪については有意な変化は認められ

Table 12 Physical characteristics and maximal aerobic power of subjects pre and post endurance training.

	pre	post
Height (cm)	157.6 ± 3.5	157.7 ± 3.3
Weight (kg)	49.7 ± 4.3	49.6 ± 4.2
$\dot{V}O_{2max}$ (ml/kg/min)	39.1 ± 4.7	44.8 ± 4.8 **

Values are means and SD. **; $p < 0.01$ vs pre

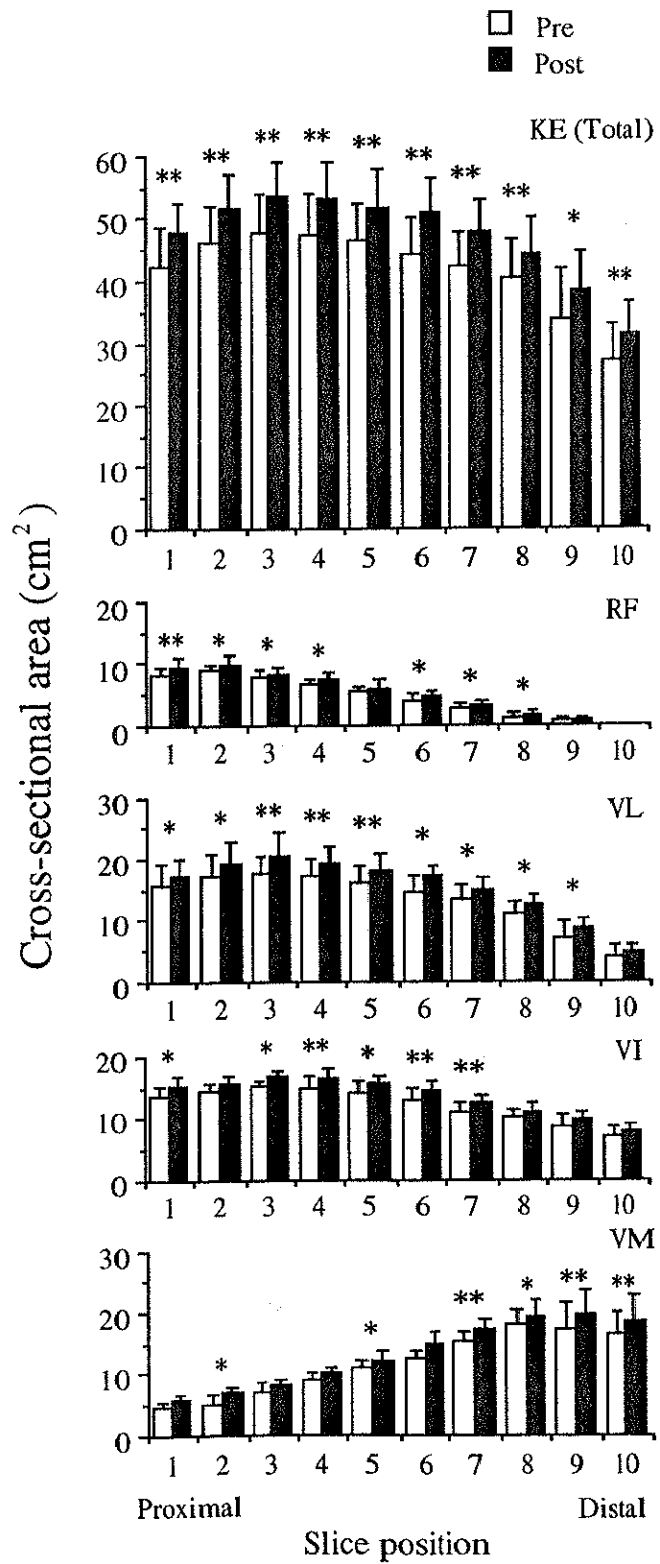


Fig. 34 Cross-sectional area of knee extensors (KE) at the ten fractions of femur length before and after endurance training. RF; rectus femoris, VL; vastus lateralis, VI; vastus intermedius, VM; vastus medialis.

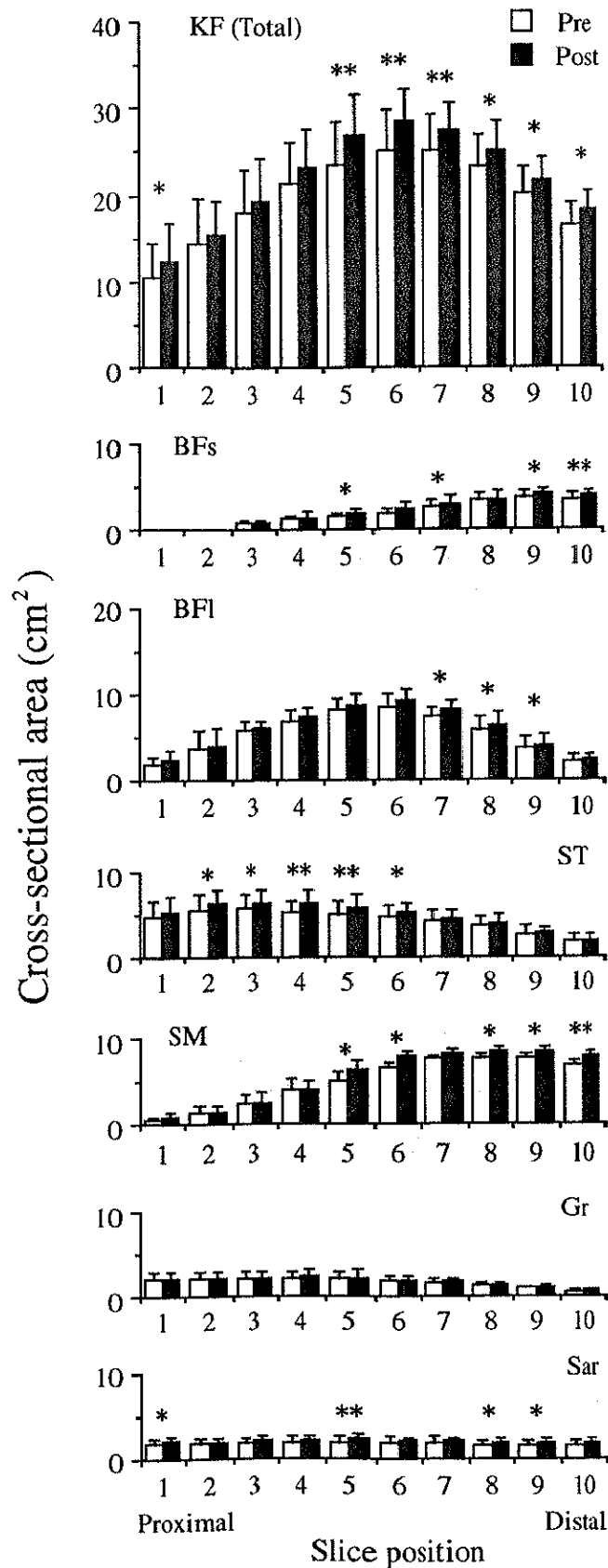


Fig. 35 Cross-sectional area of knee flexors (KF) at the ten fractions of femur length before and after endurance training. BF_s; biceps femoris, short head, BF_l; biceps femoris, long head, ST; semitendinosus, SM; semimembranosus, Gr; gracilis, Sar; sartorius.

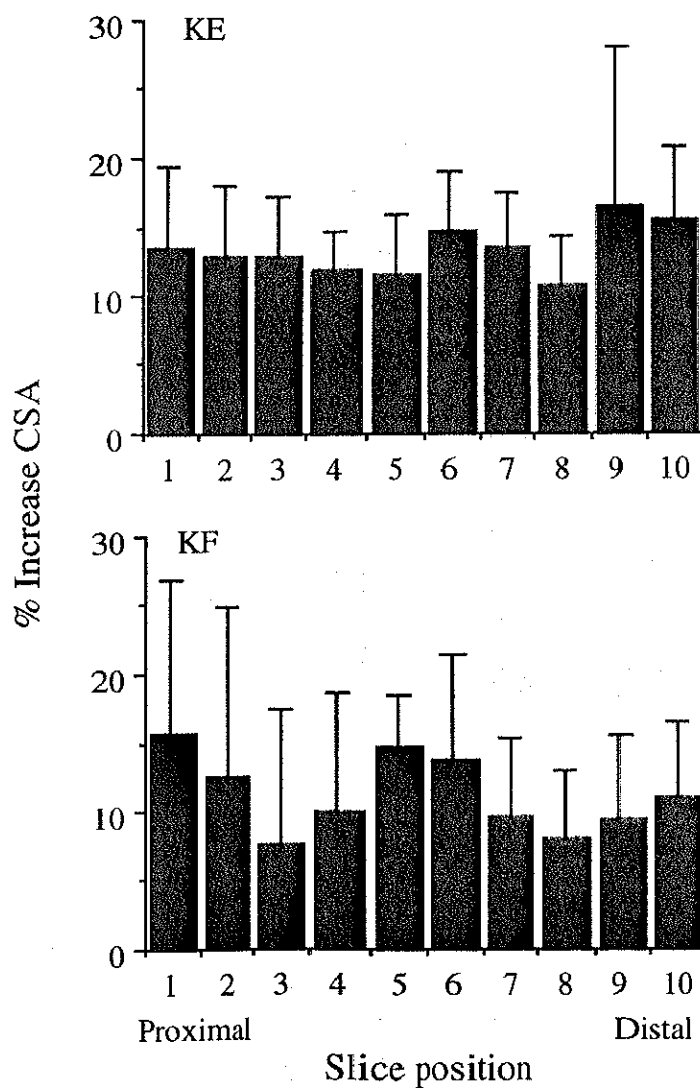


Fig. 36 Percentage of increase in knee extensors (KE) and flexors (KF) at the ten fractions of femur length before and after endurance training. CSA; cross-sectional area.

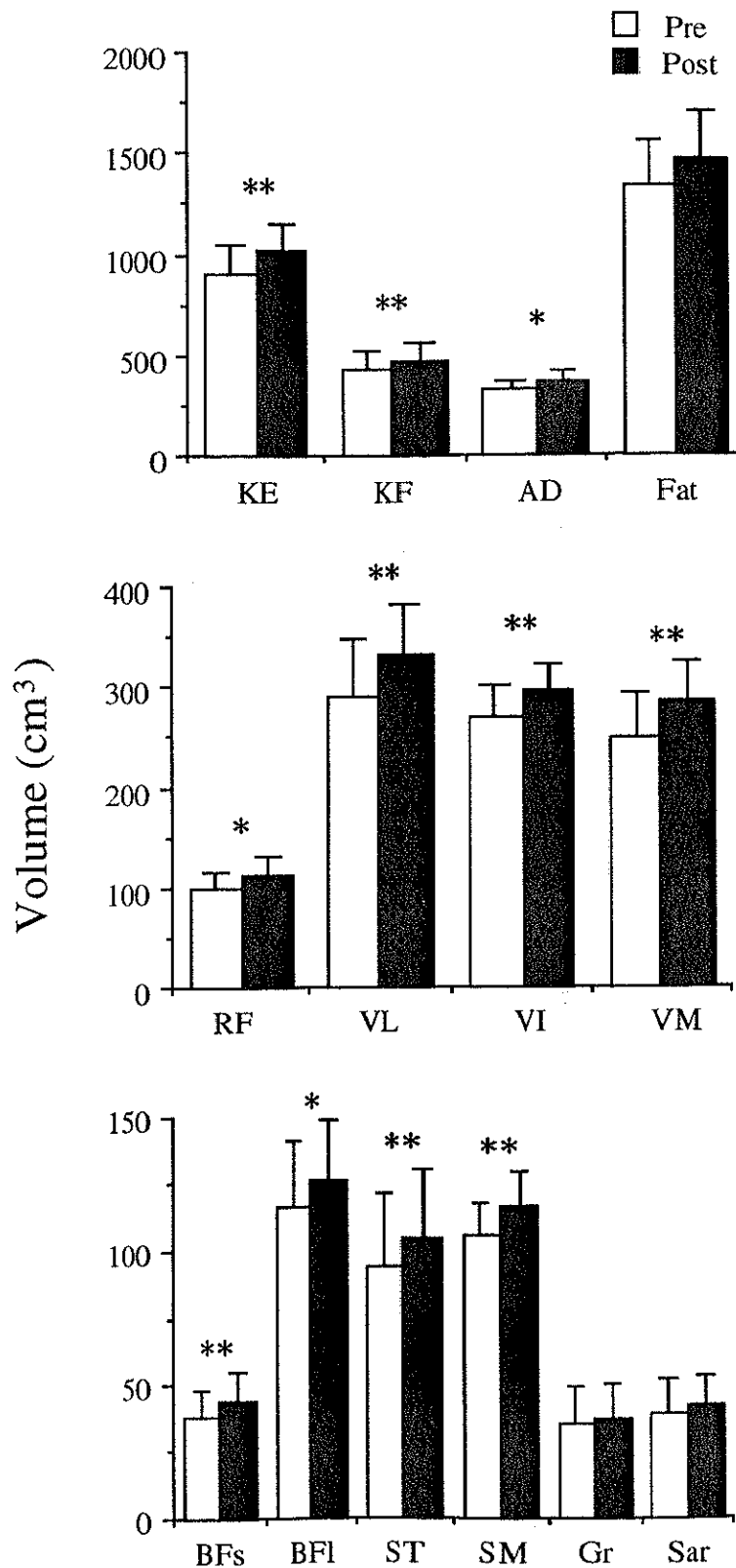


Fig. 37 Muscle and fat volume of thigh before and after endurance training. *; $p < 0.05$, **; $p < 0.01$. KE; knee extensors, KF; knee flexors, AD; adductor muscles, RF; rectus femoris, VL; vastus lateralis, VI; vastus intermedius, VM; vastus medialis, BF_s; biceps femoris, short head, BF_l; biceps femoris, long head, ST; semitendinosus, SM; semimembranosus, Gr; gracilis, Sar; sartorius.

なかった。

D. 等速性膝伸展力・屈曲力

図38には角速度30, 180, 300 deg/secの等速性膝伸展・屈曲によるピークトルクについて示した。角速度の増加にともないピークトルクは低下した。いずれの角速度での伸展力, 屈曲力においてもトレーニング後に有意な変化は認められなかった。

図39には等速性膝伸展力および屈曲力をそれぞれKEおよびKFの筋断面積の最大値で除した単位面積あたりに発揮された筋力について示した。いずれの角速度においてもトレーニング後に膝伸展力, 屈曲力ともに有意な変化は認められなかった。

4. 考察

一般的に、持久性トレーニングは骨格筋を肥大させないと報告されている (Booth and Thomason, 1991; Inger, 1979; 勝田と田中, 1983)。しかしながら、持久性トレーニングとしては比較的高強度 (例えば, 90% $\dot{V}O_{2max}$) の運動強度を用いると筋の肥大が認められるという報告がなされている (Andersen and Henriksson, 1977, Gollnick et al., 1973; Sale et al., 1990)。これまでにヒトを用いて、中強度の持久性トレーニング後に筋肥大が認められた報告はみられない。本研究の結果はトレーニング強度がたとえ中程度 (60% $\dot{V}O_{2max}$) の持久性トレーニングであっても、筋断面積の増大が生じることを示している。

Nariciら (1989)は筋力トレーニング後に大腿長の複数の部位におけるKE

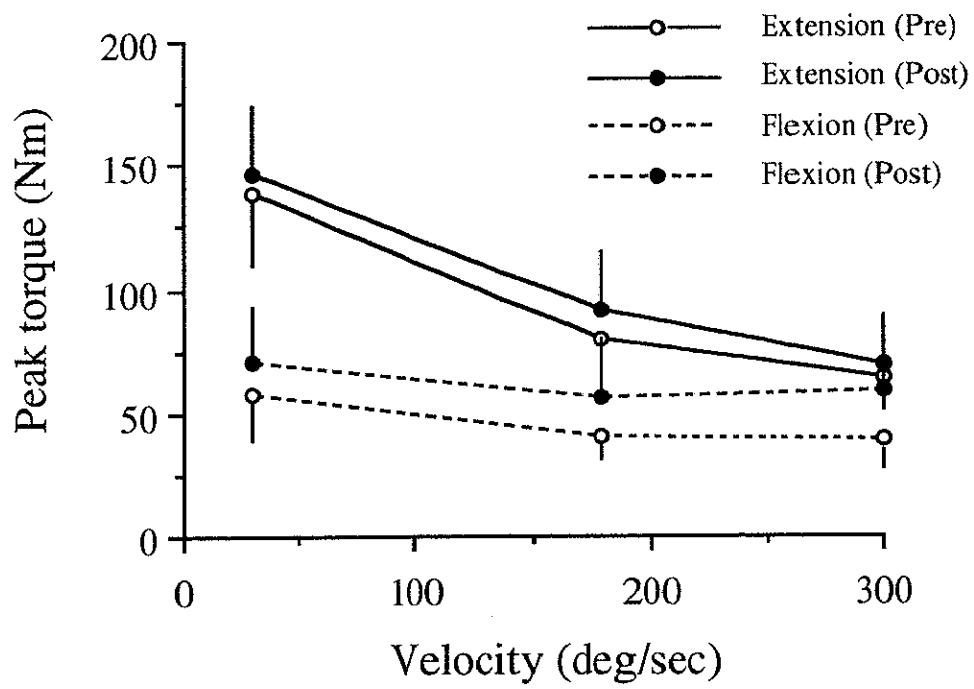


Fig. 38 Peak torque during knee extension and flexion before and after endurance training.

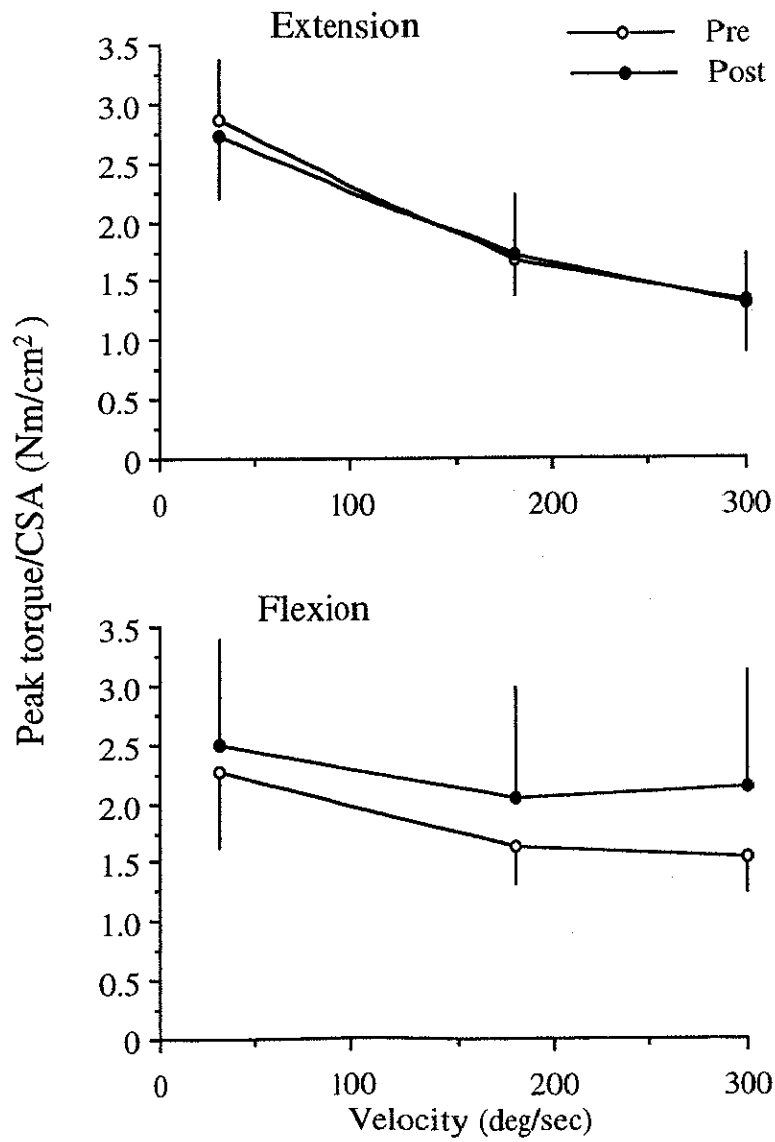


Fig. 39 Peak torque/cross-sectional area (CSA) during isokinetic knee extension and flexion before and after endurance training.

の筋断面積が有意に増加したことを示し、部位の差による増大率を比較すると近位部 (約12%)の方が遠位部 (約3%)より高値を示した。しかしながら、本研究の結果ではKEの筋断面積の増加率は10カ所においてほぼ一定で、さらにその増加率は11-17%と筋力トレーニングによるもの (Narici et al., 1989)と同等あるいはそれより高値を示した (図36)。この相違の理由は明らかではないが、本研究の被検者が継続的な運動経験のない女性であったことが影響していると考えられる。つまり、被検者が全くの非鍛練者であったため、運動に対する反応性が非常に著しかったことが予想される。一方、KFの筋断面積の増加はKEのそれより低値を示した。このような反応性の違いは自転車のペダリング動作において、KEはKFと比較してより動員されることを示唆している。また、KEおよびKFを構成する筋別に検討してみると、本研究のトレーニング刺激により引き起こされた筋断面積の増加は主に筋腹付近においてみられた (図34, 35)。Romanら (1993)はヒトの上腕二頭筋では筋力トレーニング後に筋断面積の増加が筋腹部位において顕著に認められたことを報告している。したがって、本研究およびRomanら (1993)の結果から、何らかの刺激による筋のサイズの変化は、筋腹部位において顕著にみられる傾向があることを示唆している。

本研究では筋断面積の増加が大腿部全体に生じたのにもかかわらず、 $\dot{V}O_{2max}$ の有意な増加が認められた。一般的には、持久性トレーニングを行うと毛細血管の新生が生じることが示されている (Holloszy and Booth, 1976; 勝田と田中, 1983; Saltin and Gollnick, 1983)。本研究のように持久性トレーニング後に筋肥大が生じたとしても、それに見合うだけの毛細血管が新生されれば、パフォーマンスにはマイナスの影響を及ぼさないものと思われる。また、持久性トレーニングは酸化系酵素活性を増加させ

ることも報告されている (Gollnick et al., 1973; Holloszy and Booth, 1976; 勝田と田中, 1983). したがって, 本研究では毛細血管および酸化系酵素活性については検討していないものの, 末梢ではトレーニングに対して毛細血管あるいは酸化系酵素活性の適応が生じ, それらが $\dot{V}O_2\text{max}$ の有意な増加を生じさせた原因の一つと思われる. また, トレーニング後に $\dot{V}O_2\text{max}$ の有意な増加がみられた他の因子として心拍出量の増加や呼吸器系の影響も考えられる.

等速性膝伸展力および屈曲力においては, 十数パーセントの筋断面積の増加が大腿長の全体に生じたにもかかわらず, いずれの角速度においても有意な増加は認められなかった. 一方, Saleら (1990)は自転車エルゴメーターを用いた持久性トレーニングを行った後, レッグプレスによる随意最大筋力が有意に増加したことを報告している. 彼らの研究におけるトレーニングプロトコールは自転車エルゴメーターを用いて, 90-100% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度で3分×5セット行うものであった. 彼らの用いた運動強度は非常に高く, それゆえ大腿部にかかる負荷も本研究の場合と比較して大きくなるため, 本研究との相違が生じた可能性が考えられる.

本研究では筋断面積の増加(最大で17%)が認められたにもかかわらず, 筋力の有意な増加はみられなかった. また, 膝伸展力および屈曲力の単位面積当りの筋力においても有意な変化は認められなかった. 単位面積当りの筋力は筋断面積, 大脳の興奮水準, 収縮に参加する運動単位数あるいは筋線維組成などの要因に影響されるパラメーターであることが報告されている (福永と金久, 1990; Moritani, 1991). しかしながら, 筋線維組成は本研究で用いたような持久性トレーニングでは筋力に影響を及ぼすほど大きく変化しないこと (Holloszy and Booth, 1976; 勝田と田中, 1983; Saltin and Gollnick, 1983), 筋断面積あるいは筋容積がトレーニング後に有

意に増加したことから，本研究で行った持久性トレーニングでは前述の4つの因子のうち，筋線維組成および筋断面積以外の要因に主に影響されることが考えられる．一方，筋力トレーニングにともなう単位面積当りの筋力の増加は，神経系の活性の増加を反映していることが示唆されている(福永, 1978; Moritani, 1991)．これは中枢では大脳の興奮水準の高まりによるものであり，末梢では筋力発揮に参加する運動単位の増加にともない収縮する筋線維数が増加することに起因していると考えられている．これらのことを考え合わせると，単位面積当りの筋力に変化がみられなかった原因は，おそらく神経系の因子が等速性筋力に何らかの影響を及ぼした可能性が考えられる．したがって，本研究で用いたような中程度の持久性トレーニングによる筋力の変化は，神経性因子に起因していたことを間接的に示唆する結果であるのかもしれない．

5. 要約

自転車エルゴメーターを用いた中強度(60% $\dot{V}O_{2max}$)の持久性トレーニングが成人女性の大腿部の筋の形態的特性および等速性膝伸展力および屈曲力に及ぼす影響について検討した．結果の要約を以下に示す．

1) 最大酸素摂取量は 39.1 ± 4.7 から 44.8 ± 4.8 ml/kg/min (+14.6%)に有意に増加した($p < 0.01$)．

2) MRIから得られた膝伸筋の筋断面積は大腿部の10カ所の全ての部位において有意な増加が認められ，その増加率は11-17%であった．また，大腿直筋，外側広筋，中間広筋および内側広筋の筋断面積においても10カ所のうち6-9カ所で有意な増加が認められた．

3) 膝屈筋の筋断面積は大腿部の10カ所のうち7カ所において有意な増加が認められ、その増加率は8-16%であった。また、大腿二頭筋(短頭・長頭)、半腱様筋、半膜様筋および縫工筋の筋断面積は3-5カ所において有意な増加が認められた。

4) 大腿部の筋群(膝伸展筋・屈曲筋、内転筋)の筋容積は有意な増加を示したが、皮下脂肪において有意な変化は認められなかった。

5) 等速性膝伸展力・屈曲力およびピークトルクを膝伸筋・屈筋の筋断面積で除した単位面積当たりの筋力に有意な変化は認められなかった。

以上の結果より、非鍛練者の女性では中強度(60% $\dot{V}O_{2max}$)の持久性トレーニングであっても筋断面積の増加は生じるが、筋力トレーニングと異なり、必ずしもその筋断面積の増加に見合った筋力の増加があるとは限らないことが示唆された。

X. 20日間のベッドレストがヒトの下肢骨格筋の筋力および形態的特性に及ぼす影響(実験VII)

1. 目的

ベッドレストのように下肢に対する負荷が減少するような条件下では、抗重力筋のサイズの変化が生じることは一般的によく知られている。LeBlancら(1992)は17週間のベッドレストにともない足底屈筋・背屈筋の筋容積がそれぞれ30, 21%低下し、また、膝伸筋・屈筋のそれも有意に低下したことを報告している。ヒトの下肢宙吊りでは、膝伸筋および屈筋でそれぞれ16, 7%の筋断面積の低下が認められたことが報告されている(Hather et al., 1992)。しかしながら、このような不活動にともなうヒトの骨格筋の筋断面積あるいは筋容積のような形態的特性の変化に関する研究は非常に少なく、明らかになっていない点が多い。

一方、ベッドレスト後には筋のサイズの変化とともに筋力も低下することが報告されている(Dudley et al., 1989; LeBlanc et al., 1992)。このような筋力の低下が筋のサイズの低下に起因したものか、あるいはその他の要因に起因したものかについては十分に明らかになっていない。これまでに最大筋力とPCSAとの間には正の相関関係が成り立つことが報告されている(Ikai and Fukunaga, 1968; Edgerton et al., 1986; Wickiewicz et al., 1984)。したがって、PCSAは筋の張力発揮能を示す重要な因子であると考えられる。しかしながら、微小重力環境下におけるPCSAの変化と筋力の変化およびそれらの両者の関係について示した研究はみられず、この点に関しては明らかになっていない。そこで本研究では、20日間のベッドレスト

がヒトの下肢の筋におけるPCSAおよび筋力に及ぼす影響について検討することを目的とした。

2. 方法

A. 被検者

被検者には健康な成人男性5名，女性5名を用いた（年齢 20.4 ± 1.7 歳，身長 163.0 ± 8.8 cm，体重 62.8 ± 9.2 kg）。全ての被検者に実験の主旨，内容および危険性についてあらかじめ説明し，参加の同意を得た。また，本実験は東京大学医学部倫理委員会の承諾を得て実施された。

B. ベッドレストの方法

ベッドレストは20日間行われ，その間被検者は水平仰臥位を維持し，ベッド上での活動をできるだけ制限された。また，トイレや個人衛生においてのみベッドから離れることが許可されたが，その際には車椅子を用いて移動を行った。また，室温は 25°C に設定された (Suzuki et al., 1994)。

C. 解剖学的断面積および筋容積

MRIの測定には常電導MR装置 (MRH-500, 0.5T, 日立製)を用いた。MRIの測定はベッドレスト直前，ベッドレスト10日目，直後 (24時間後)，1か月後の計4回行った。被検者の大腿部および下腿部の横断像を得るために，まず，縦断像の撮影を行った。得られた縦断像より上前腸骨棘-脛骨遠位端間を以下の測定条件で連続横断像を撮影した；TR 450 ms, TE 20 ms, マトリクス 256×172 , FOV 300 mm, スライス厚10 mm, スライス間隔7 mm。

得られた横断像の枚数は43-48枚であった。分析に用いた筋は以下に示す14筋であった；大腿直筋，外側広筋，中間広筋，内側広筋，大腿二頭筋(短頭・長頭)，半腱様筋，半膜様筋，薄筋，縫工筋，腓腹筋(内側頭・外側頭)，ヒラメ筋，前脛骨筋。得られた連続横断像をトレースし，それぞれの筋の解剖学的断面積を算出した。筋容積の算出は実験IVと同様の方法で行った。

筋容積の再現性を検討するため，成人男性1名の大腿に対して上述と同一の測定条件により，MRIの測定を2度行った(ただし，各測定間には2カ月の期間を設けた)。その際の誤差率は1.6%であった。したがって，MRIの測定誤差は無視できるほど小さいので，各測定間における筋量の変化はベッドレストにともなう筋量の変化であるとみなすことができる。

D. 生理学的断面積

PCSAの算出は実験IIと同様の方法で行った。

E. 等尺性最大膝伸展力

等尺性最大膝伸展力の測定は実験Iと同様の方法で行った。ただし，測定装置には福永ら(1993)が独自に開発したパワープロセッサーを用いた。

F. 統計処理

各項目の値は，すべて平均値と標準偏差で示した。差の検定には繰り返しのある一元配置の分散分析を行った。分散分析により有意なF値が認められたとき，Schefféの方法により有意差を検討した。なお，有意水準は5%未満とした。

3. 結果

A. 解剖学的断面積

図40-42にはベッドレスト直前および直後の大腿および下腿の各筋の起始部-停止部間におけるACSAについて示した。大腿および下腿の各筋では有意なACSAの低下が認められ、それは筋腹部位において顕著であった。特に変化が著しかったのはKE, KF, 腓腹筋内側頭・外側頭およびヒラメ筋であった。

B. 筋容積

図43にはベッドレスト直前, 10日目, 直後, 1カ月後の大腿および下腿部の筋の筋容積について示した。KEおよびKFの筋容積は10日目 (KE; -5.8%, KF; -6.1%), 直後 (KE; -7.0%, KF; -6.6%)において有意に低下した。KEとKFの筋容積の低下率は類似していた。10日目および直後における筋容積の有意な低下は以下の筋に認められた; 大腿直筋, 外側広筋, 中間広筋, 内側広筋, 大腿二頭筋(長頭), 半膜様筋, 縫工筋。ベッドレスト直後のKEにおいて筋容積の低下が最も顕著であったのは中間広筋で, その割合は8.0%であった。一方, KFでは半膜様筋であり, その割合は9.7%であった。ベッドレスト後における腓腹筋(内側頭・外側頭)の筋容積は, それぞれ10.3, 9.4%有意に低下し, ヒラメ筋の筋容積では10日目および直後においてそれぞれ7.1, 9.8%の有意な低下が認められた。

図44にはベッドレスト直前, 10日目, 直後, 1カ月後におけるKE, KFおよびTSの筋容積について示した。これらの筋群の筋容積は直前と比較して10日目, 直後において有意に低下した。

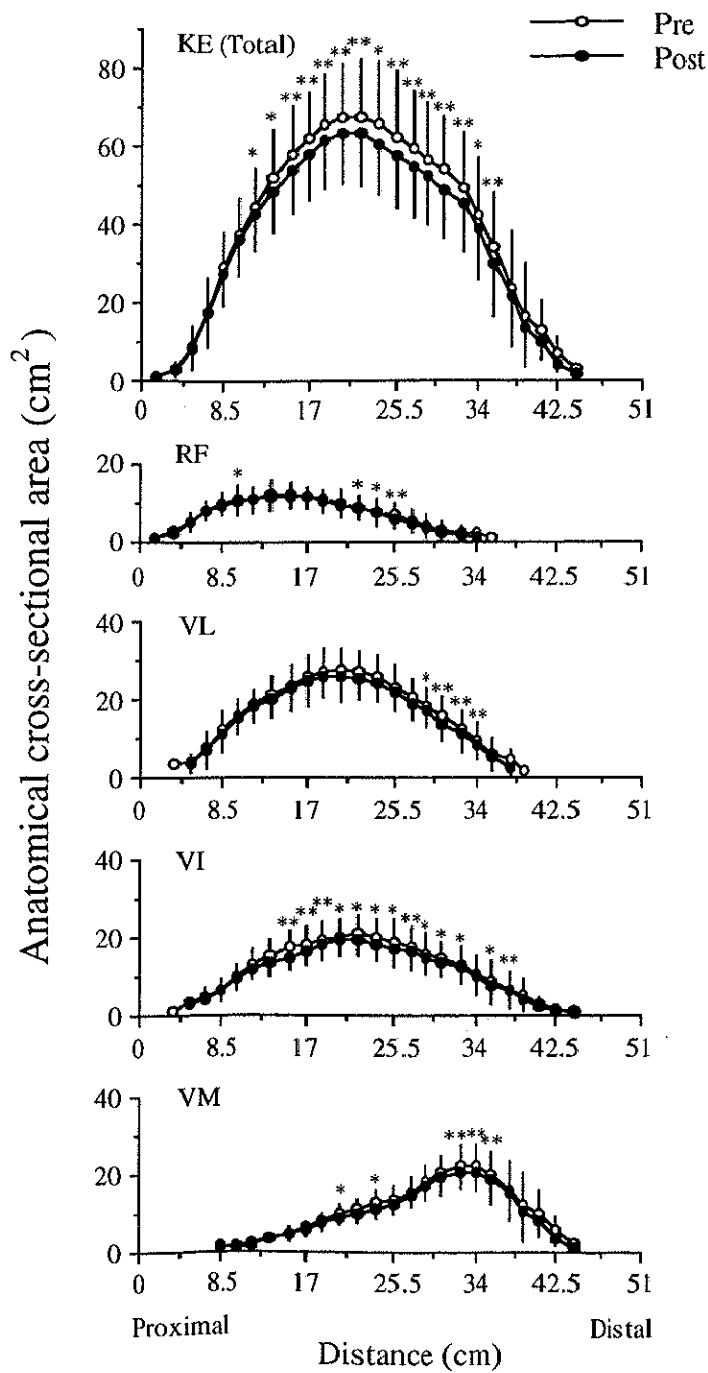


Fig. 40 Serial anatomical cross-sectional areas (ACSAs) of the knee extensors (KE) along the length of the thigh. *, $p < 0.05$, **, $p < 0.01$. RF; rectus femoris, VL; vastus lateralis, VI; vastus intermedius, VM; vastus medialis.

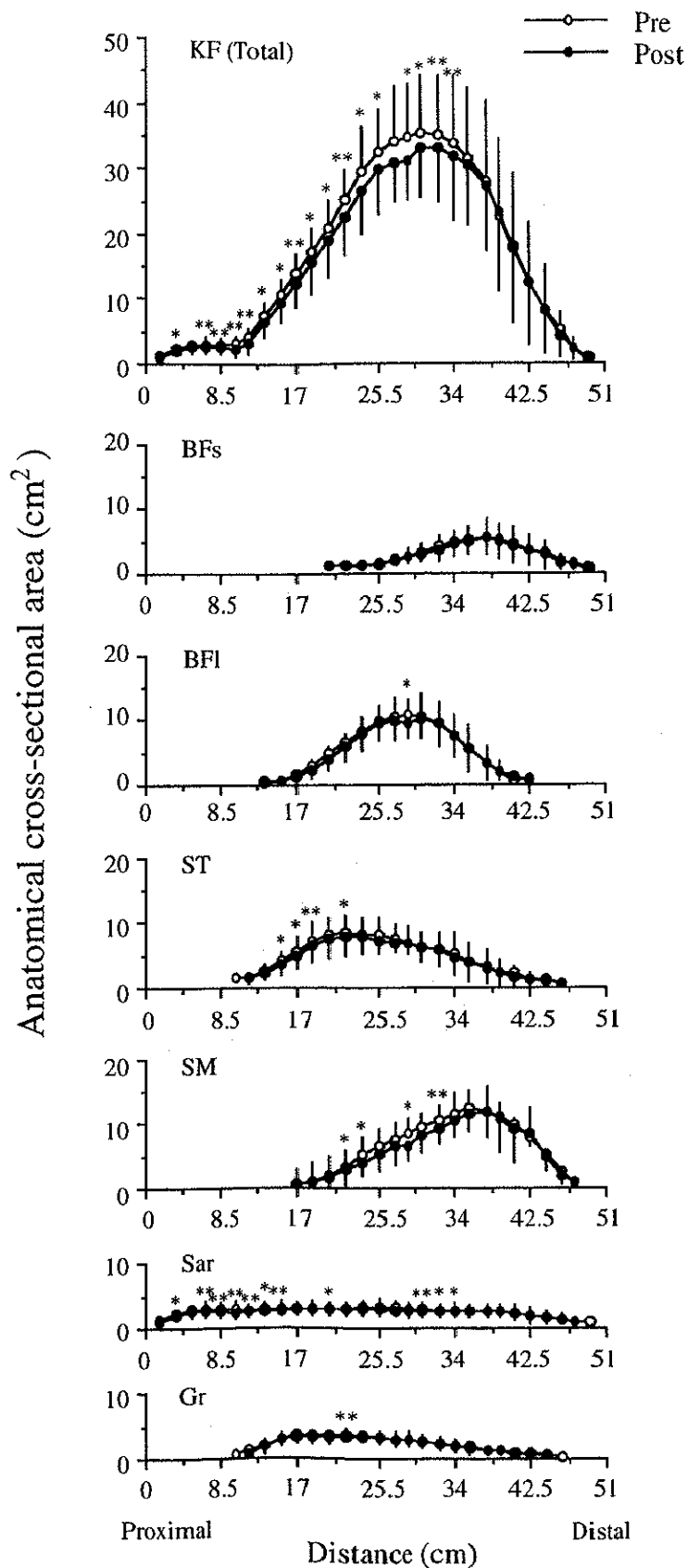


Fig. 41 Serial anatomical cross-sectional areas (ACSAs) of knee flexors (KF) along the length of the thigh. *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$. BF_s; biceps femoris, short head, BFl; biceps femoris, long head, ST; semitendinosus, SM; semimembranosus, Gr; gracilis, Sar; sartorius.

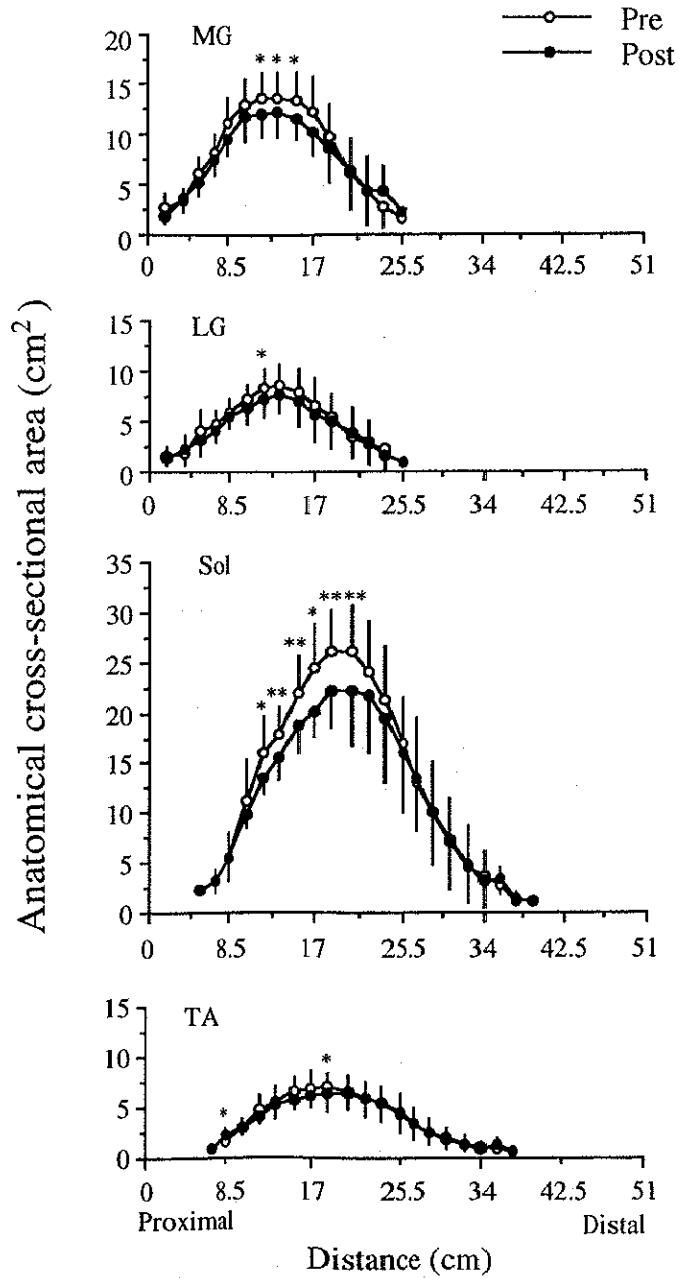


Fig. 42 Serial anatomical cross-sectional areas (ACSAs) along the length of the leg. *, $p < 0.05$, **, $p < 0.01$. MG; medial gastrocnemius, LG; lateral gastrocnemius, Sol; soleus, TA; tibialis anterior.

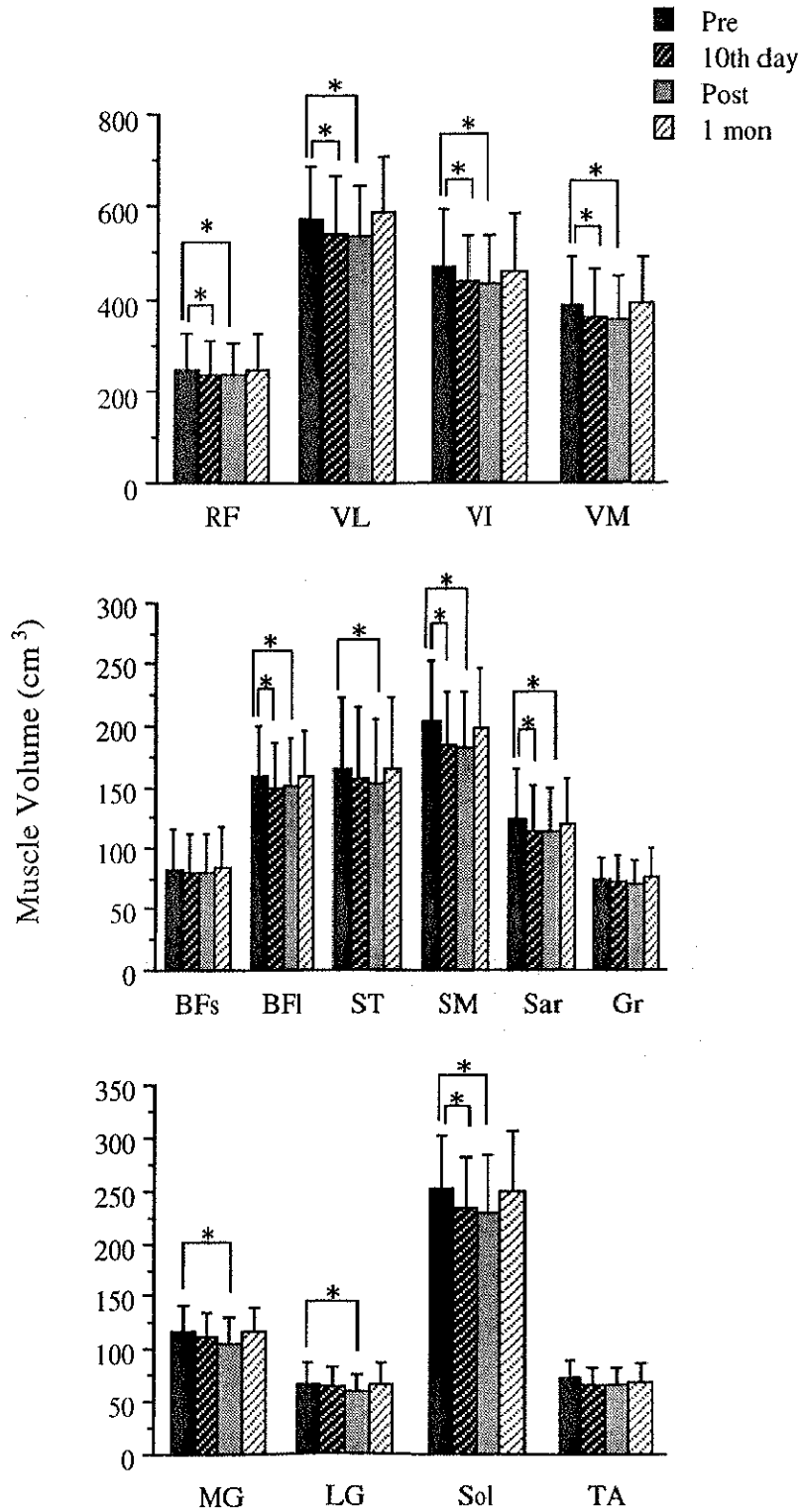


Fig. 43 Muscle volume of thigh and leg muscles pre-, 10th day, post-bed rest, and 1 month after bed rest. *: $p < 0.05$.

RF; rectus femoris, VL; vastus lateralis, VI; vastus intermedius, VM; vastus medialis, BF_s; biceps femoris, short head, BF_l; biceps femoris, long head, ST; semitendinosus, SM; semimembranosus, Gr; gracilis, Sar; sartorius, MG; medial gastrocnemius, LG; lateral gastrocnemius, Sol; soleus, TA; tibialis anterior.

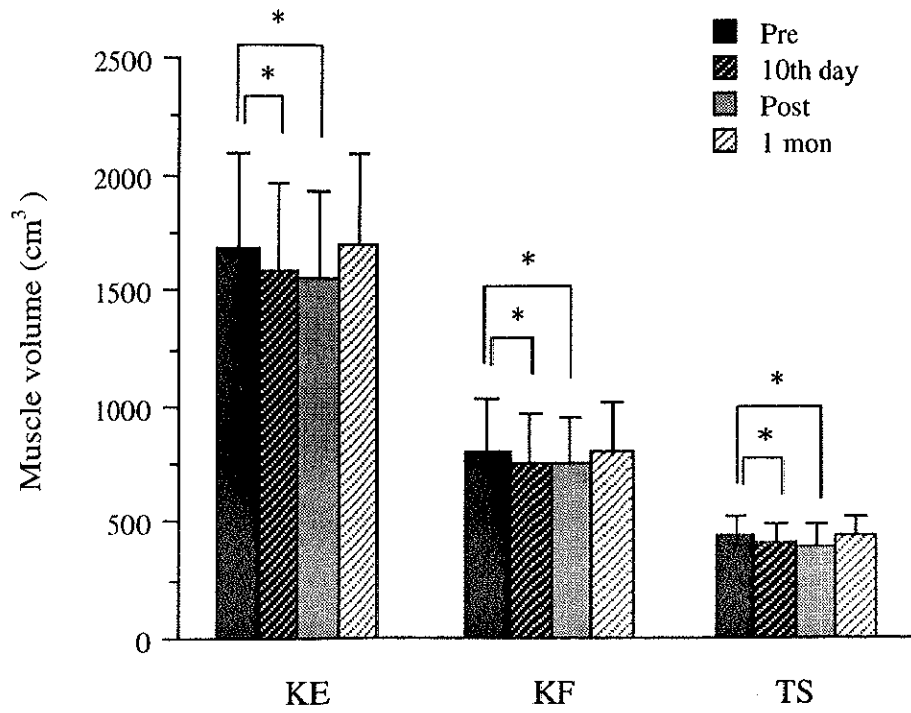


Fig. 44 Muscle volume of knee extensors (KE), knee flexors (KF), and triceps surae (TS) pre-, 10th day, post-bed rest, and 1 month after bed rest. *; $p < 0.05$.

C. 生理学的断面積

図45にはベッドレスト直前, 10日目, 直後, 1カ月後の大腿および下腿部の筋におけるPCSAについて示し, また, 図46には直前の値に対するPCSAの変化率について示した. KEおよびKFのPCSAは10日目, 直後に有意に低下した. また, KEとKFの直後における低下率は等しく, ともに7.0%であった. 下肢の8つの筋(大腿直筋, 外側広筋, 中間広筋, 内側広筋, 大腿二頭筋(長頭), 半膜様筋, 縫工筋, ヒラメ筋)は10日目および直後においてPCSAが有意に低下した. また, 半腱様筋, 腓腹筋(内側頭・外側頭)のPCSAは直後においてのみ有意に低下した.

図47にはベッドレスト直前, 10日目, 直後, 1カ月後におけるKE, KFおよびTSのPCSAについて示した. これらの筋群のPCSAは10日目, 直後において有意に低下した.

D. 等尺性最大膝伸展力

図48にはベッドレスト直前, 1週間後, 2週間後, 直後, 1カ月後の等尺性最大膝伸展力について示した. ベッドレストにともない等尺性最大膝伸展力は21.4%の低下する傾向にあったが, 統計的な有意差は認められなかった. また, 1カ月後には筋力はベッドレスト前の値に回復していた.

E. 単位面積当たりの筋力

図49にはベッドレスト直前, 直後, 1カ月後の単位面積当たりの筋力について示した. 単位面積当たりの筋力はベッドレスト前後で有意な変化は認められなかった.

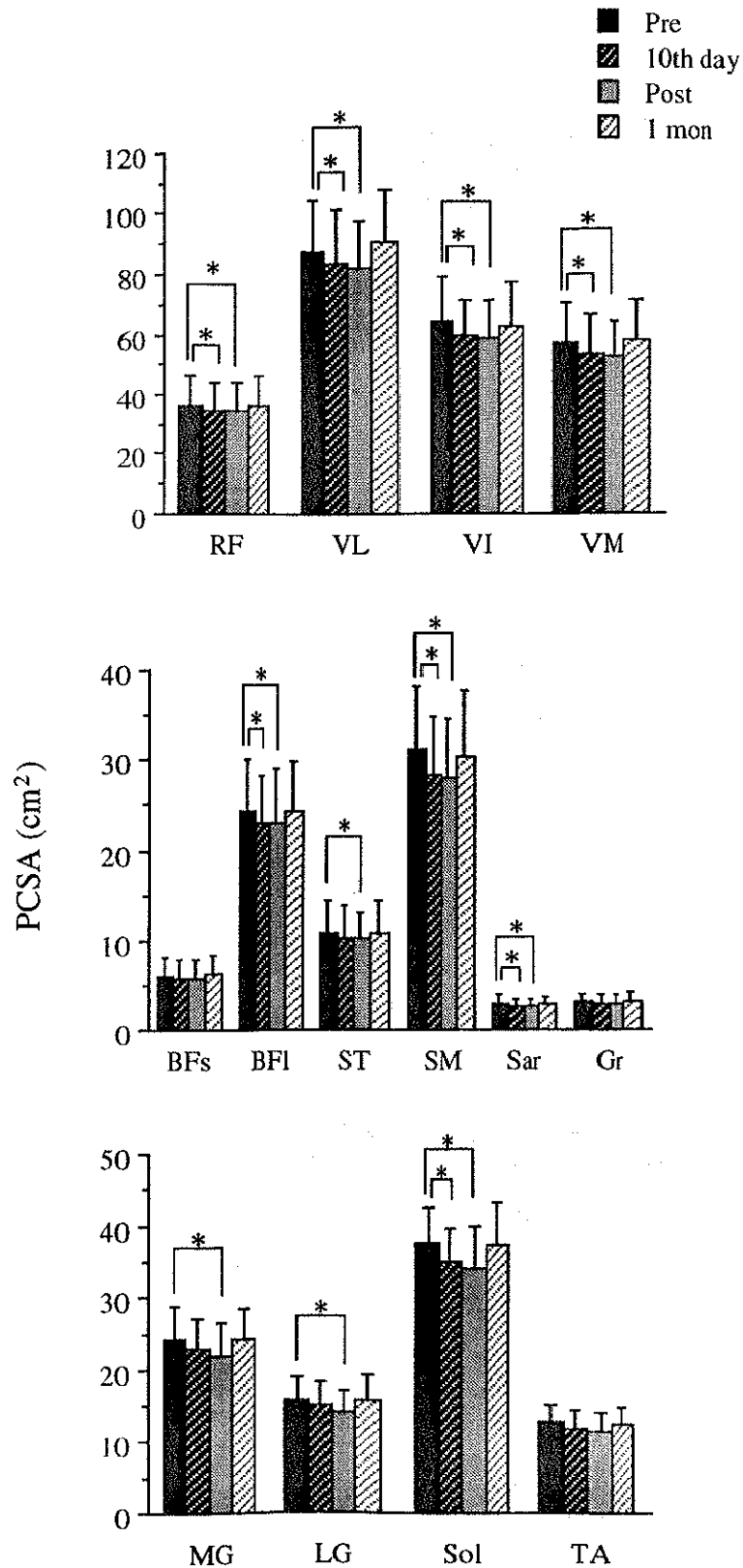


Fig. 45 Physiological cross-sectional area (PCSA) of thigh and leg muscles pre-, 10th day, post-bed rest, and 1 month after bed rest. *, $p < 0.05$.
 RF; rectus femoris, VL; vastus lateralis, VI; vastus intermedius, VM; vastus medialis, BFs; biceps femoris, short head, BFl; biceps femoris, long head, ST; semitendinosus, SM; semimembranosus, Gr; gracilis, Sar; sartorius, MG; medial gastrocnemius, LG; lateral gastrocnemius, Sol; soleus, TA; tibialis anterior.

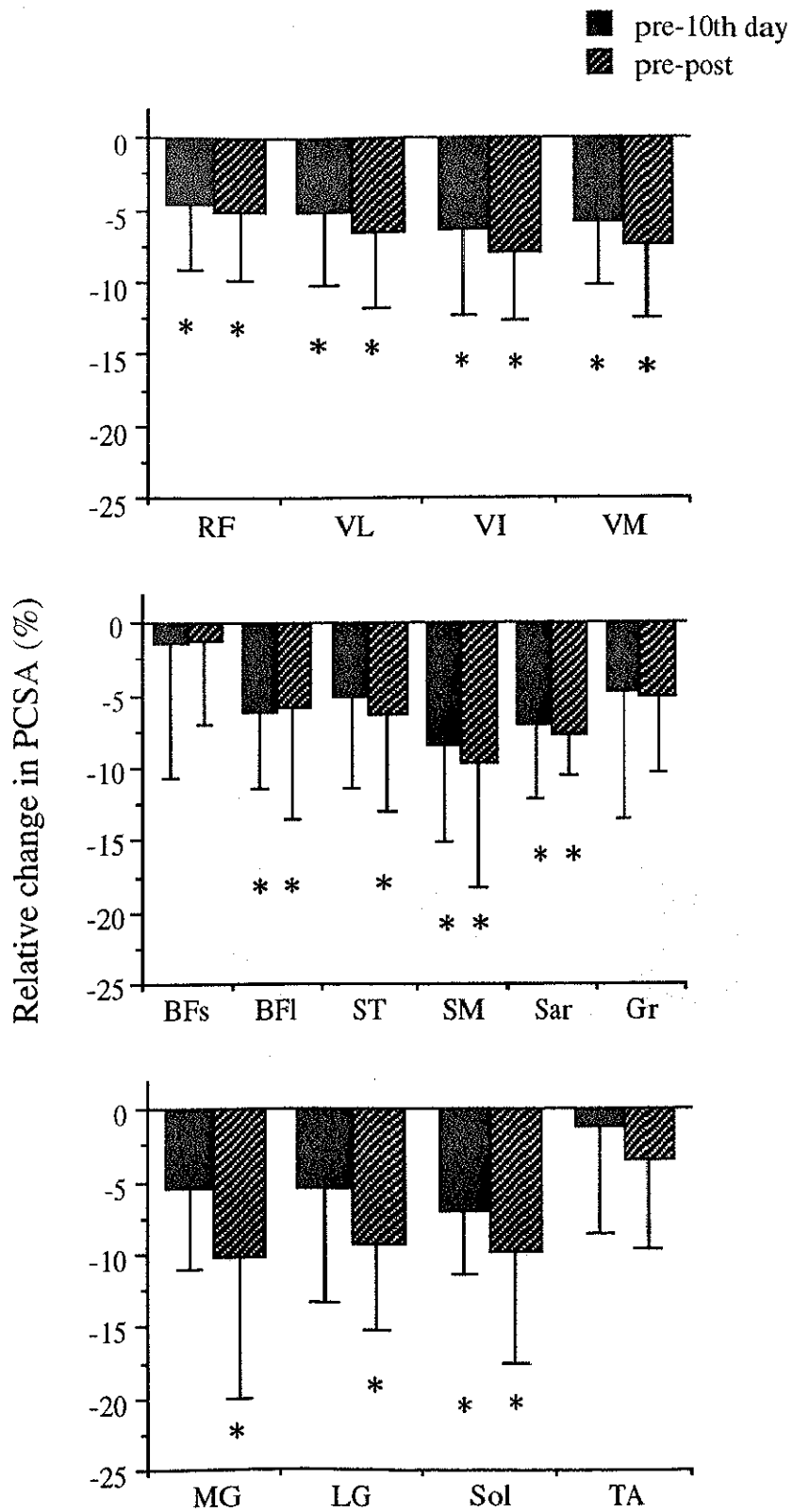


Fig. 46 Relative changes of physiological cross-sectional area (PCSA) of the thigh and leg muscles pre-, 10th day, and post-bed rest. *: $p < 0.05$. RF; rectus femoris, VL; vastus lateralis, VI; vastus intermedius, VM; vastus medialis, BFs; biceps femoris, short head, BFl; biceps femoris, long head, ST; semitendinosus, SM; semimembranosus, Gr; gracilis, Sar; sartorius, MG; medial gastrocnemius, LG; lateral gastrocnemius, Sol; soleus, TA; tibialis anterior.

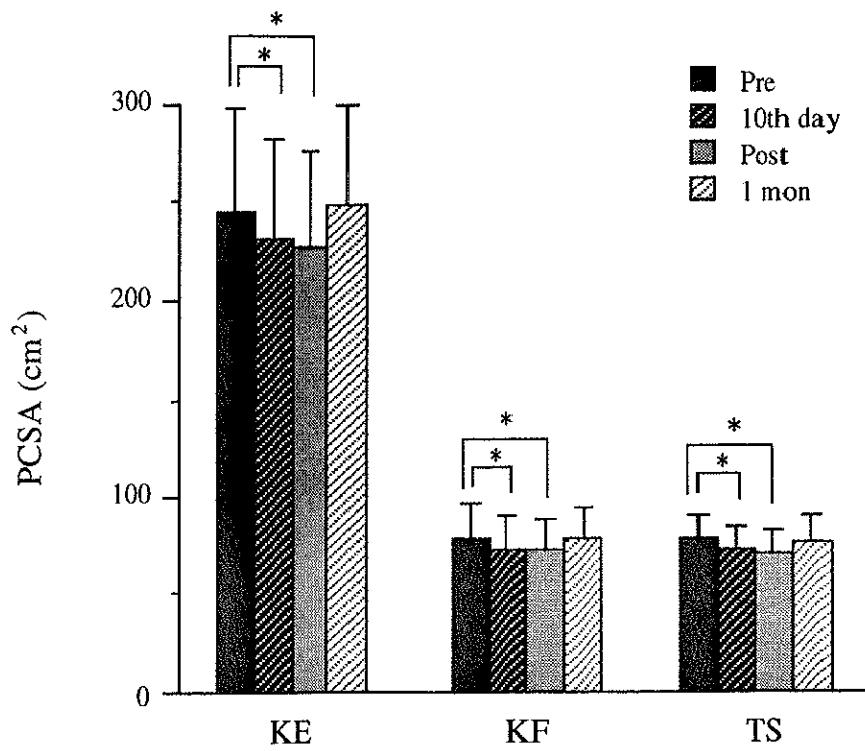


Fig. 47 Physiological cross-sectional area (PCSA) of knee extensors (KE), knee flexors (KF), and triceps surae (TS) pre-, 10th day, post-bed rest, and 1 month after bed rest. *; $p < 0.05$.

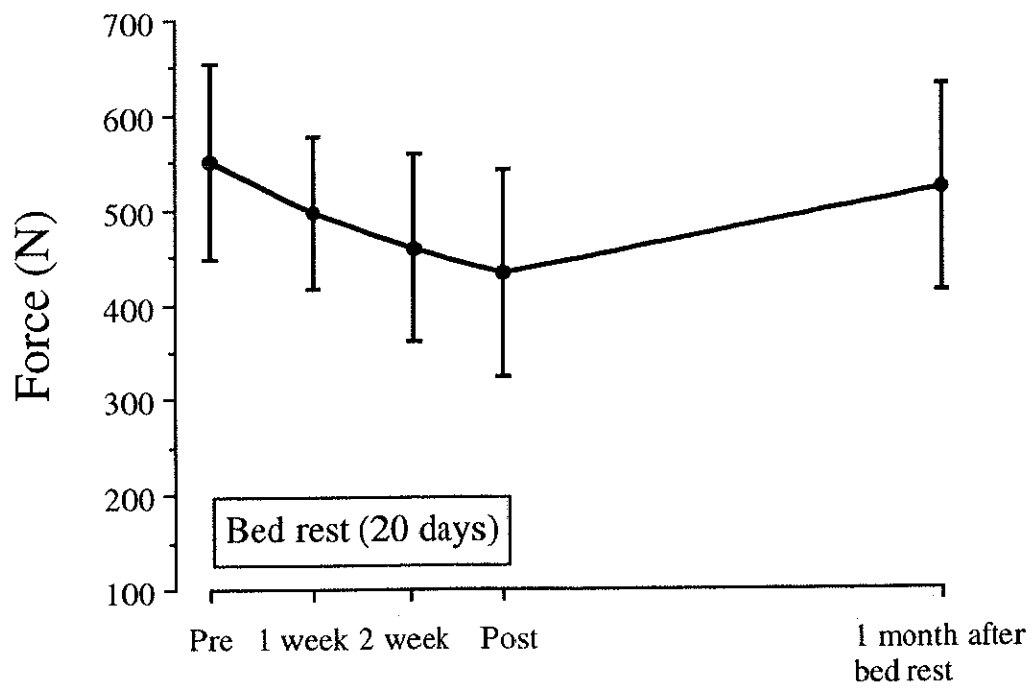


Fig. 48 Maximum knee extension force pre-, 1 week-, 2 week-, post bed rest, and 1 month after bed rest.

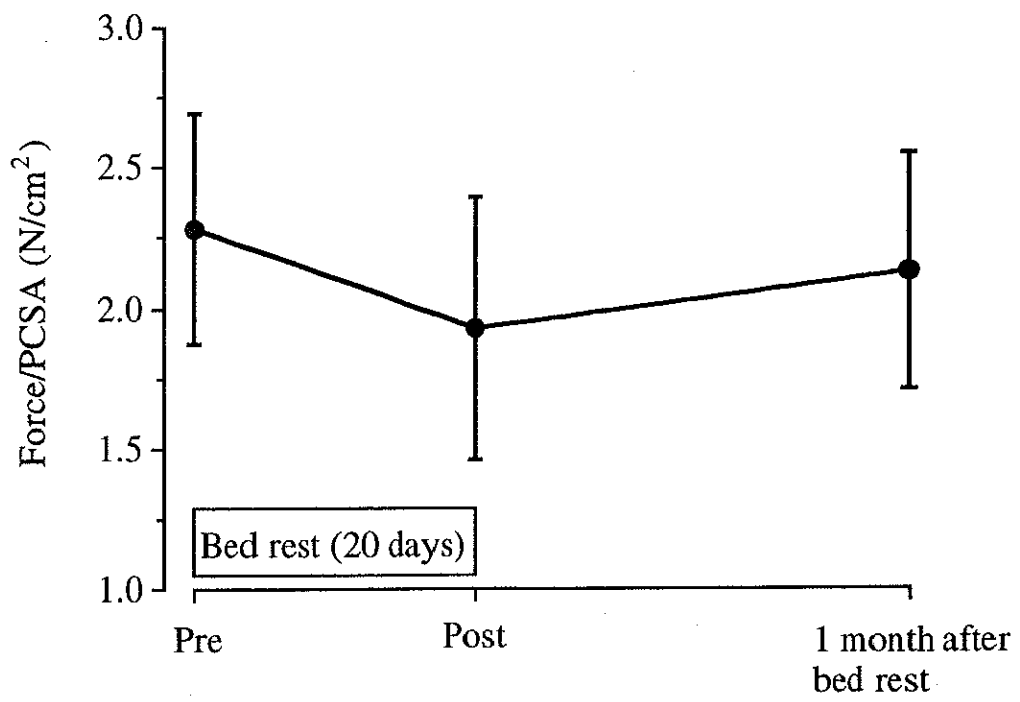


Fig. 49 Maximum knee extension force per unit of PCSA pre-, post bed rest, and 1 month after bed rest.

4. 考察

本研究の目的は20日間のベッドレストがヒトの大腿部と下腿部の骨格筋の形態的特性に及ぼす影響について検討することである。本研究で用いたPCSAは筋に含まれる全ての筋線維の横断面積の総和を示しており、概念的には筋が発揮できる張力と比例関係にあると考えられている (Haxton, 1944; Ikai and Fukunaga, 1968; Lieber, 1992)。したがって、微小重力環境下におけるPCSAの変化は、筋の機能的特性の変化を理解する上で重要なパラメーターとなるものと思われる。しかしながら、ベッドレストにより、ヒトの下肢骨格筋のPCSAあるいは筋容積といった筋の形態的特性がどのように変化するのかについては十分に明らかになっていない。本研究ではこのような筋の形態的变化に加え、等尺性最大膝伸展力についても検討した。

筋の形態的観点からみた本研究の主な知見は、20日間のベッドレスト後に測定に用いたほとんど全ての筋において、筋容積およびPCSAの顕著な低下が認められたことである。それらの低下は大腿直筋、外側広筋、中間広筋、内側広筋、大腿二頭筋(長頭)、半膜様筋およびヒラメ筋において認められた。KEおよびKFを構成するそれぞれの筋におけるPCSAの低下率は一様ではなく、特にKFではPCSAの低下率は筋により異なっていた。KEでは中間広筋および内側広筋、KFでは半膜様筋において最も大きな筋容積の低下が認められた。これらの筋はそれぞれの共働筋において比較的大きな筋容積を占める筋群である。これは共働筋の中では筋量の多い筋において筋萎縮が起こることを示唆している。さらに一つの筋においても筋萎縮の程度が筋の長軸方向で異なっていた(図40-42)。特にその傾向はベッドレストのKE、KFおよびヒラメ筋において顕著であり、ACSA

の低下は起始部あるいは停止部よりも筋腹部位において顕著であった。これらの結果はベッドレストのような活動量の減少にともない、共働筋内では筋量の多い筋から、また一つの筋では筋量の多い部分から筋萎縮が生じることを示している。

本研究において、ベッドレストでは腓腹筋内側頭・外側頭およびヒラメ筋のPCSAの低下が最も高値を示した(～10.3%)。一方、ベッドレストでは下腿の筋である前脛骨筋では有意な変化はみれなかった。ラットやマウスの後肢宙吊りによってST線維の占める割合が高いヒラメ筋において選択的な萎縮が生じることが多くの研究において報告されており、一方、FT線維を多く含む足底筋、長指伸筋あるいは腓腹筋では萎縮が認められないことが示されている(Thomason et al., 1990; Elder et al., 1987; Fitts et al., 1986; Martin et al., 1988)。しかしながら、Musacchiaら(1990)は7日間のスペースフライト後にラットの長指伸筋のFT線維においても、筋線維横断面積の有意な低下が示されたことを報告している。さらにヒトの下肢宙吊り後には、Type I線維ばかりでなくType II線維においても筋萎縮が生じていたことが示されている(Hather et al., 1992)。これまでの研究において、ヒトの腓腹筋内側頭、外側頭、ヒラメ筋および前脛骨筋の%ST線維の平均はそれぞれ、50.8, 50.3, 89.0, 72.7%であることが報告されている(Johnson et al., 1973)。これはヒトの前脛骨筋ではST線維の占有率が高いのに対して、ラットやマウスではFT線維の占有率が高く、ヒトと実験動物では同一の筋であっても筋線維組成が全く異なっていることを示している。また、ヒトの前脛骨筋はST線維の割合が高いにもかかわらず、ベッドレストでは筋萎縮が認められなかった。この結果は微少重力負荷後のヒトの骨格筋ではST線維ばかりでなく、FT線維においても筋萎縮が認められている(Hikida et al., 1989; Hather et al., 1992)ことを示す結果であ

と思われる。

等尺性最大膝伸展力はベッドレストにともない低下する傾向を示したものの、統計的に有意ではなかった。LeBlancら (1992)は17週間のベッドレストにともなう等速性膝伸展力 (角速度60 deg/sec)の変化について報告している。彼らはベッドレストを開始して35日目の等速性膝伸展力の低下率は25.2%であったことを報告している。一方、本研究では20日間のベッドレスト後に21.4%の等尺性膝伸展力の低下が認められたことから、ベッドレスト後の筋力の低下は有意な変化ではなかったものの、他の先行研究 (鈴木, 1994)と比較しても小さな変化ではなかった。ベッドレスト後の値を個人別に検討しても、最も低下率の大きな被検者では39.5%であり、また最も低下率の小さな被検者は8.4%を示した。さらに、Convertinoら (1986)によると2週間以上続くベッドレストでは平均最大筋力は1日当たり約0.7%の筋力の低下がみられることを示しており、本研究では20日間で平均21.4%の等尺性膝伸展力の低下が認められたことから、1日当たりでは1.1%となる。これらのことから、ベッドレスト後には有意な筋力の低下は認められなかったが、この低下は他の先行研究と比較しても妥当な値であるものと考えられる。

単位面積当たりの筋力では有意な変化は認められなかった。ベッドレストにともなうヒトの骨格筋の単位面積当たりの筋力に関してはこれまでに報告されていない。しかしながら、動物を用いた研究結果はいくつか報告されている。21日間のラットの後肢宙吊りによりヒラメ筋の単位面積当たりの張力は55-57%低下することが認められており (Simard et al., 1987)、別の研究においては28日間の後肢宙吊り後に変化がみられなかったことが報告されている (Elder et al., 1987)。最近では、Kandarianら (1991)は後肢宙吊り後のラットのヒラメ筋において、単位面積当たりの筋力は

変化しなかったことを報告している。単位面積当たりの筋力において、統計的には有意な変化は認められなかったが、筋力の低下率はPCSAの低下率よりも高値を示した。Convertino (1990)のレビューにおいて、長期間の活動量の減少(ベッドレストあるいはスペースフライト)にともない安静時および運動時の神経-筋機能の低下が生じることが示されている。また、Ploutz-Snyderら(1995)は5週間のヒトの下肢宙吊り後において、宙吊り前と同一の負荷を挙上するのにより多くの筋線維の動員が必要であることを明らかにしており、これには神経性因子の影響が大きいことを示唆している。一方、30日間のベッドレスト後に得られた外側広筋およびヒラメ筋の微細構造において、通常の筋では見られない筋原線維が認められており、このような筋が筋力発揮にマイナスの影響を及ぼすことが示唆されている(Hikida et al., 1989)。これらの結果を考慮すると、PCSAの変化だけでは説明できない筋力低下の原因として、神経性因子の変化と筋の微細構造上の変化が考えられる。

筋容積およびPCSAの低下の程度は筋により異なっていたにもかかわらず、ベッドレスト終了1カ月には全ての筋でベッドレスト前の値に回復していた。LeBlancら(1992)は17週間のベッドレストにより低下した筋量は、8週間で回復したことを報告している。また、等尺性最大膝伸展力もベッドレスト終了1カ月後にはベッドレスト前の値に回復していた。Suzukiら(1994)の研究においても、20日間のベッドレスト後に低下した膝伸筋の筋断面積は、1カ月後の回復期間でベッドレスト前の値に回復していたことを報告している。本研究および他の先行研究から、本研究で用いたような比較的短期間のベッドレスト後に低下した筋量は、ベッドレスト終了後1カ月以内には回復することが示された。

5. 要約

本研究は20日間のベッドレストがヒトの下肢骨格筋の形態的特性に及ぼす影響について検討することを目的とした。結果の要約を以下に示す。

1) ベッドレスト10日目および直後には膝伸筋、膝屈筋および下腿三頭筋の筋容積および生理学的断面積は有意に低下した。また、最も低下率が大きかったのは、膝伸筋では中間広筋、膝屈筋では半腱様筋、下腿三頭筋ではヒラメ筋であった。

2) ベッドレスト直後における膝伸筋と膝屈筋の生理学的断面積の低下率は、ともに7.0%、下腿三頭筋では10%であった。前脛骨筋の筋容積および生理学的断面積はベッドレストにより有意な変化は認められなかった。

3) 起始部-停止部間の解剖学的断面積の低下は筋腹部位において顕著に認められた。

4) ベッドレスト終了1カ月後では全てのパラメーターがベッドレスト前の値に回復していた。

5) 等尺性最大膝伸展力および単位面積当たりの筋力ではベッドレストにともない低下傾向を示したが統計的な有意な変化ではなかった。

以上のことより、20日間のベッドレストにともないヒトの下肢骨格筋の生理学的断面積および筋容積の低下が認められ、特に下腿三頭筋において顕著であった。また、筋萎縮の程度は共働筋内および一つの筋の長軸方向でも異なり、筋量の多い筋あるいは筋腹で選択的に生じることが示唆された。

XI. 討 論

多くの競技スポーツにおいて、パフォーマンスを左右する因子の一つとして筋力が挙げられる。筋力は形態的特性に大きく影響されることが、いくつかの先行研究において示されてきている (Ikai and Fukunaga, 1968; Maughan and Nimmo, 1984, Spector et al., 1983; Wickiewicz et al., 1984)。これまでの報告では、この形態的特性を評価する場合、大腿部のある一部位の横断像を用いたり (Alway et al., 1990; Häkkinen and Keskinen, 1989; Maughan et al., 1983a, 1983b; Maughan and Nimmo, 1984; Nygaard et al., 1983; Schantz et al., 1983; Young et al., 1984, 1985), あるいは筋萎縮が生じていると考えられるような屍体の筋サンプルを用いた研究 (Edgerton et al., 1986; Haxton, 1944; Wickiewicz et al., 1984)がその多くを占めていた。

最近、トレーニングにともなう筋断面積の増加率が一つの筋でもその長軸方向で異なっていること (Narici et al., 1989; Roman et al., 1992), また、専門的なトレーニングを長期間行ってきた国内一流競技選手の大腿部の筋形態には、その下部において種目特異性が顕著に認められる傾向があること (Katsuta and Kuno, 1992)などが報告されている。これらの研究は、これまで多くの研究 (Alway et al., 1990; Häkkinen and Keskinen, 1989; Maughan et al., 1983a, 1983b; Maughan and Nimmo, 1984; Nygaard et al., 1983; Schantz et al., 1983; Young et al., 1984, 1985)において示されてきたある特定の一カ所の横断像では筋の形態的特性を正確に把握することができないことを示している。以上のような問題点を考慮し、本研究では筋の形態的特性を数枚から数十枚の横断像によって評価して、筋力との関係について検討した。

その結果、異なる3部位の筋断面積と等速性筋力との関係において、両者の関係が最も密接であったのは大腿の上部から中央部における筋量の多い部分であり、また一つの筋においても筋量の多い筋腹であった(実験I)。様々なタイプのトレーニングによる活動量の増加および不活動による活動量の減少にともない、筋に形態的变化が生じた。このとき活動量の増加(実験VおよびVI)と減少(実験VII)のいずれの場合においても、筋の形態的变化が顕著に観察された部位は、起始部や停止部に近い部分ではなく筋腹部であった。これらの結果は筋に対して何らかの刺激が加わり筋の量的な変化が生じる場合には、筋腹部位での適応性が大きいことを示唆している。さらに、これまでほとんどの研究で行われてきたように、一部位の横断像から筋肥大や筋萎縮を評価した場合、筋全体の形態的变化を正確に評価することができないことも、これらの結果は示している。なぜなら、実験I, II, V~VIIで示したように大腿部の筋ではそれぞれの筋腹の位置が異なっているため、ある特定の一筋の横断像から、そこに含まれる全ての筋の筋腹部位を評価することはできないからである。このような結果から、筋腹部位の筋断面積は筋力と密接に関係していることが考えられ、また、筋腹部位は活動量の増加や減少においても適応性が高い部分であると考えられる。また、活動量の増加あるいは減少にともなう筋の形態的变化は、一つの筋であっても長軸方向においてその変化の程度が異なることから、本研究のように複数の横断像を用いることによって、各筋の形態的特性をより正確に捉えることができると考えられる。

つぎに、筋の形態的特性は筋力に影響する一つの要因ではあるが、それを考慮しても筋力を十分に説明することができない場合がいくつか認められた。まず第一に、実験IIのケースである。この実験ではMRIから求め

たヒトの膝屈筋のspecific tensionが膝伸筋のそれより高値を示すことが示された。膝伸筋と膝屈筋の筋の形態的特性が全く異なっていることは実験IIで示した通りであり、そのような形態的特性が筋力発揮に影響することが予想されるため、筋の発揮した張力を生理学的断面積で除し、また、筋の収縮速度を筋線維長で除すことで、膝伸筋と膝屈筋の張力発揮能を相対的に等しい状態の下で比較しても、依然として差異が認められた。そこで実験IIIでは、大腿部の拮抗筋のspecific tensionに差をもたらす原因の一つとして、足関節を用いて、この関節の拮抗筋のspecific tensionに対する関節角度の影響について検討した。その結果、異なる2つの関節角度から得られた生理学的断面積には有意な差が認められた。このことは関節角度に依存して生理学的断面積およびspecific tensionも変化することを示しているが、このような方法論的な影響のみで膝伸筋と屈筋のspecific tensionの違いの全てを説明することは難しい。したがって、これら2つの実験結果は、筋の張力発揮能を表すspecific tensionには筋の形態的特性では説明することが困難な他の因子が影響していることを示唆している。

第二のケースとして、中強度の持久性トレーニング(実験V)およびスプリントトレーニング(実験VI)後に筋断面積の有意な増加が生じたにもかかわらず筋力は変化しなかった、あるいは筋力の低下が認められたことが挙げられる。これは複数の横断像から筋断面積を詳細に検討しても、トレーニングにともなう筋断面積と筋力の変化を十分に説明することができない。しかしながら、2つの実験において前述のような結果となった原因として、別のもう一つの可能性が考えられる。それは実験IVにおいて短期間の筋力トレーニングにともない筋の肥大が生じることなく、筋力の増加が認められたことである。この筋力増加はトレーニング前には活性化されていなかった筋線維がトレーニングにより活性化されたため

あることを示している。Adamsら(1993)はMRIを用いて、運動誘発性のT2のコントラスト変化から、大腿四頭筋を電気刺激することによって随意最大筋力と同様な力を発揮させても、この筋の断面積の約70%しか活性化されていないことを示している。このような結果は本研究においても認められており、実験IVの等速性膝伸展運動直後に測定したT2の結果から、トレーニング前では大腿四頭筋の筋断面積に占める約70%の部分が運動により活性化され、残りの30%の部分は活性化されなかった(収縮に関与していない)ことを示している。このような傾向は大腿部の測定した7部位すべてにおいて認められた。したがって、これらの結果は実験IVで行ったような評価を用いれば、筋力発揮において活性化されている部分だけを識別することができ、これまで行われてきた筋の形態的特性よりさらに機能面を反映した形態面のデータを得ることができることを示している。このような評価法は複数の横断像を用いても説明することができなかった筋力と筋の形態的特性の矛盾を明らかにする手段の一つであると考えられる。

これらのことから、筋の形態的特性は筋力に影響する一つの因子ではあるが、それだけでは十分に筋力を説明することができない場合があるため、より筋の機能面を反映した筋の形態的パラメーターと筋力について検討する必要性が示唆された。

XII. 総括

本研究では、MRIで得られたヒトの大腿部の複数の横断像から筋の形態的特性と筋力との関係および活動量の増減にともなう筋の形態的特性と筋力の変化について検討することを目的とした。

得られた主な知見は次の通りである。

1. 大腿部の3部位における大腿四頭筋の筋断面積および筋線維組成が等速性筋力に及ぼす影響

等速性筋力の絶対値には大腿上部から中央部における外側広筋および大腿中央部における中間広筋および内側広筋の筋断面積が、また、単位面積当たりの筋力には% area FT線維が影響を及ぼしていることが示唆された(実験I)。

2. 膝伸筋・屈筋における形態的特性とspecific tension

膝伸筋は膝屈筋と比較して生理学的断面積がより大きいことから筋張力の発揮特性に優れた筋群であり、一方、膝屈筋は膝伸筋より筋線維長が長いことから、筋の収縮速度に優れた筋群であることが示された。また、膝屈筋のspecific tensionは膝伸筋のそれと比較して、筋線維速度あるいは筋節当たりの収縮速度を表す筋線維速度/筋線維長で検討した場合にお

いても高値を示した(実験II).

3. 足関節の角度変化が生理学的断面積に及ぼす影響

下腿の筋, 特に腓腹筋内側頭および前脛骨筋では足関節の角度変化により, それらの生理学的断面積が有意に変化することが明らかとなった. これは生理学的断面積およびspecific tensionの算出にはその関節角度を規定する必要があるとともに, これまで報告されてきているspecific tensionの値の不一致には関節角度の影響も含まれていることが示唆された(実験III).

4. 筋力トレーニング初期の筋力増加に影響する因子

筋力トレーニング初期にはこれまでの研究において報告されてきたように, 筋の肥大は生じないが低速から高速における等速性膝伸展力, 筋電図積分値, 大腿四頭筋の筋線維を活性化できる能力が増加した. これは筋力トレーニングの初期の筋力増加は, 新たなる筋線維の動員に起因している可能性が示唆され, MRIによって得られた画像によっても証明された(実験IV).

5. スプリントトレーニングにともなう等速性筋力と筋の形態的特性の変化

自転車エルゴメーターによるスプリントトレーニングは外側広筋および大腿二頭筋短頭の生理学的断面積を増大させるが、それにともなう等速性膝伸展力・屈曲力の増加、膝伸筋および膝屈筋のspecific tensionの増加を生じさせないことが示された(実験V).

6. 中強度の持久性トレーニングにともなう等速性筋力と筋の形態的特性の変化

継続的な運動経験のない女性においては、中強度の持久性トレーニングであっても筋断面積の増加は生じるが、筋力トレーニングとは異なり、必ずしもその筋断面積の増加に見合った筋力の増大は生じないことが示唆された(実験VI).

7. 20日間のベッドレストがヒトの下肢骨格筋の筋力および形態的特性に及ぼす影響

20日間のベッドレストにより、ヒトの下肢骨格筋の筋腹付近において筋萎縮が認められるが、筋によりその程度は異なり、特に下腿三頭筋において顕著であることが示された(実験VII).

以上の結果から、(1) 筋腹部位の筋断面積は、筋力と密接な関係があり、また、その部位は活動量の増加あるいは減少の刺激に対する形態的变化が顕著に現われる部分であることが明らかとなった。(2) 複数の横断像から得られた大腿部の筋の形態的特性と筋力との関係について検討しても、筋の形態的特性のみから説明することができない場合があった。これら2つのことから、筋の形態的特性は筋力に影響を及ぼす因子の一つではあるが、それによって筋力を全て説明することができないので、筋の機能面をより反映した形態的特性について評価する必要性が示唆された。

謝 辞

本論文の作成にあたり，終始懇切丁寧な御指導，御校閲を賜りました勝田茂教授に心から感謝の意を表します。また，筑波大学体育科学系・高松薫教授，西平賀昭助教授，稲木光晴助手，東京大学生命環境科学系・福永哲夫教授，久野譜也助手をはじめ諸先生方から多くの御指導，御助言を賜りました。さらに，MR装置の測定の間を提供して下さった筑波大学臨床医学系放射線医学・板井悠二教授，高橋英幸氏ならびに同教室の先生方に深厚なる謝意を表します。

本論文の被検者ならびに検者として御協力頂いた勝田研究室をはじめとする多くの方々に，改めて感謝の意を表します。

参考文献

- Adams, R.A., Duvoisin, M.R. and Dudley, G.A.: Magnetic resonance imaging and electromyography as indexes of muscle function. *J.Appl.Physiol.* 73: 1578-1583, 1992.
- Adams, R.A., Harris, R.T., Woodard, D. and Dudley, G.A.: Mapping of electrical muscle stimulation using MRI. *J.Appl.Physiol.* 74: 532-537, 1993.
- 秋間 広, 久野譜也, 西嶋尚彦, 山中邦夫, 松本光弘, 勝田 茂: シーズンを通じてのハイパワーおよび筋力トレーニングが大学サッカー選手の筋機能に対してどのような影響を及ぼすか -NMRによる非侵襲的検討-. *トレーニング科学* 2: 78-83, 1990.
- 秋間 広, 久野譜也, 西嶋尚彦, 丸山剛生, 松本光弘, 板井悠二, 下條仁士, 勝田 茂: NMRによる国内一流サッカー選手の筋エネルギー代謝および筋横断面積の検討. *体力科学* 41: 368-375, 1992.
- Alexander, R.M. and Vernon, A.: The dimensions of knee and ankle muscles and the forces they exert. *J.Hum.Mov.Stud.* 1: 115-123, 1975.
- Alway, S.E., Stray-Gundersen, J., Grumbt, W.H. and Gonyea, W.: Muscle cross-sectional area and torque in resistance-trained subjects. *Eur.J.Appl.Physiol.* 60: 86-90, 1990.
- Andersen, P. and Henriksson, J.: Capillary supply of the quadriceps femoris muscle of man: Adaptive response to exercise. *J.Physiol.* 270: 677-690, 1977.
- Beneke, R., Neuerburg, J. and Bohndorf, K.: Muscle cross-section measurement by magnetic resonance imaging. *Eur.J.Appl.Physiol.* 63: 424-429, 1991.

Berg, H.E., Dudley, G.A., Häggmark, T., Ohlsén, H. and Tesch, P.A.: Effects of lower limb unloading on skeletal muscle mass and function in humans.

J.Appl.Physiol. 70: 1882-1885, 1991.

Bodine, S.C., Roy, R.R., Meadows, D.A., Zernicke, R.F., Sacks, R.D., Fournier, M. and Edgerton, V.R.: Architectural, histochemical, and contractile characteristics of a unique biarticular muscle: the cat semitendinosus.

J.Neurophysiol. 48: 192-201, 1982.

Booth, F.W. and Thomason, D.B.: Molecular and cellular adaptation of muscle in response to exercise: perspectives of various models. *Physiol. Rev.* 71: 541-585, 1991.

Brand, R.A., Pedersen, D.R. and Friederich, J.A.: The sensitivity of muscle force predictions to change in physiologic cross-sectional area. *J.Biomech.* 19: 589-596, 1986.

Campbell, C.J., Bonen, A., Kirby, R.L. and Belcastro, A.N.: Muscle fiber composition and performance capacities of women. *Med.Sci.Sports* 11: 260-265, 1979.

Cannon, R.J. and Cafarelli, E.: Neuromuscular adaptations to training.

J.Appl.Physiol. 63: 2396-2402, 1987.

Clarkson, P.M., Kroll, W. and Melchionda, A.M.: Maximal isometric strength and fibre type composition in power and endurance athletes. *Eur.J.Appl.Physiol.* 44: 35-42, 1980.

Clarkson, P.M., Kroll, W. and Melchionda, A.M.: Isokinetic strength, endurance, and fiber type composition in elite American paddlers. *Eur.J.Appl.Physiol.* 48: 67-76, 1982.

Close, R.I.: Dynamic properties of mammalian skeletal muscles. *Physiol.Rev.* 52: 129-197, 1972.

Convertino, V.A.: Exercise responses after inactivity. In: Sandler, H. and Vernikos-Danellis, J. (eds) *Inactivity: Physiological effects*. New York, Academic Press, 1986, pp. 149-191.

Convertino, V.A.: Physiological adaptations to weightlessness: effects on exercise and work performance. In: Pandolf, K.B., and Holloszy, J.O. (eds) *Exerc.Sports Sci.Rev.* 18, Williams & Wilkins, 1990, pp. 119-166.

Coyle, E.F., Costill, D.L. and Lesmes, G.R.: Leg extension power and muscle fiber composition. *Med.Sci.Sports* 11: 12-15, 1979.

Cutts, A.: Shrinkage of muscle fibers during the fixation of cadaveric tissue. *J.Anat.* 160: 75-78, 1988.

Dudley, G.A., Duvoisin, M.R., Convertino, V.A. and Buchanan, P.: Alterations of the in vivo torque-velocity relationships of human skeletal muscle following 30 days exposure to simulated microgravity. *Aviat.Space Environ.Med.* 60: 659-663, 1989.

Dudley, G.A. and Fleck, S.J.: Strength and endurance training. Are they mutually exclusive? *Sports Med.* 4: 79-85, 1987.

Edgerton, V.R., Roy, R.R. and Apor, P.: Specific tension of human elbow flexor muscles. In: Saltin, B. (ed) *Biochemistry of exercise VI. Human Kinetics Publishers, Illinois*, 1986, pp. 487-500.

Edgerton, V.R., Zhou, M.-Y., Ohira, Y., Klitgaard, H., Jiang, B., Bell, G., Harris, B., Saltin, B., Gollnick, P.D., Roy, R.R., Day, M.K. and Greenisen, M.: Human fiber size and enzymatic properties after 5 and 11 days of spaceflight. *J.Appl.Physiol.* 78: 1733-1739, 1995.

Elder, G.C.B. and McComas, A.J.: Development of rat muscle during short- and long-term hindlimb suspension. *J.Appl.Physiol.* 62: 1947-1923, 1987.

Esnbjörnsson, M., Hellsten-Westing, Y., Balsom, P.D., Sjodin, B. and Jansson, E.: Muscle fibre type changes with sprint training: effect of training pattern. *Acta Physiol.Scand.* 149: 245-246, 1993.

Faulkner, J.A., Claflin, D.R., McCully, K.K. and Jones, D.A.: Contractile properties of bundles of fiber segments from skeletal muscles. *Am.J.Physiol.* 243: C66-C73, 1982.

Fisher, M.J., Meyer, R.A., Adams, G.R., Foley, J.M. and Potchen, E.J.: Direct relationships between proton T₂ and exercise intensity in skeletal muscle MR images. *Invest. Radiol.* 25: 480-485, 1990.

Fitts, R.H., Metzger, J.M., Riley, D.A. and Unsworth, B.R.: Models of disuse: a comparison of hindlimb suspension and immobilization. *J.Appl.Physiol.* 60: 1946-1953, 1986.

Fleckenstein, J.L., Canby, R.C., Parkey, R.W. and Peshock, R.M.: Acute effects of exercise on MR imaging of skeletal muscle in normal volunteers. *Am.J.Roentgenol.* 151: 231-237, 1988.

Fleckenstein, J.L., Bertocci, L.A., Nunnally, R.L., Parkey, R.W. and Peshock, R.M.: Exercise-induced MR imaging of variations in forearm muscle anatomy and use: importance in MR spectroscopy. *Am.J.Roentgenol.* 153: 693-698, 1989.

Fleckenstein, J.L., Watumull, L.D., Bertocci, L.A., Parkey, R.W. and Pershock, R.M.: Finger-specific flexor recruitment in humans: depiction by exercise enhances MRI. *J.Appl.Physiol.* 72: 1974-1977, 1992.

Friedrich, J.A. and Brand, R.A.: Muscle fiber architecture in the human lower limb. *J.Biomech.* 23: 91-95, 1990.

Froese, E.A. and Houston, M.E.: Torque-velocity characteristics and muscle fiber type in human vastus lateralis. *J.Appl.Physiol.* 59: 309-314, 1985.

福永哲夫: ヒトの絶対筋力-超音波による体肢組成・筋力の分析-. 杏林書院, 1978, pp. 182-227.

福永哲夫, 金久博昭: 日本人の体肢組成, 初版. 東京, 朝倉書店, 1990, pp.119-137.

Fukunaga, T., Roy, R.R., Shellock, F.G., Hodgston, J.A., Lee, P.L., Kwong-Fu, H. and Edgerton, V.R.: Physiological cross-sectional area of human leg muscles based on magnetic resonance imaging. *J. Orthop. Res.* 10: 926-934, 1992.

福永哲夫, 杉山充宏: 絶対筋力におよぼす静的および動的筋力トレーニングの影響. *体育学研究* 22: 343-349, 1978.

福永哲夫: 筋の形態的变化と筋力アップ. *Jpn.J.Sports Sci.*12: 152-159, 1993.

福永哲夫, 船渡和男, 松尾彰文, 石毛勇介, 金久博昭: 筋力・筋パワー. 平成4年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告 No. II ジュニア期の体力トレーニングに関する研究-第1報- :22-25, 1993.

Fukunaga, T., Roy, R.R., Shellock, F.G., Hodgston, J.A. and Edgerton, V.R.: Specific tension of human plantarflexors and dorsiflexors. *J.Appl.Physiol.* (in press)

Garfinkel, S. and Cafarelli, E.: Relative changes in maximal force, EMG, and muscle cross-sectional area after isometric training. *Med.Sci.Sports Exerc.* 24: 1220-1227, 1992.

Giannini, F., Landoni, L. Merella, N., Minetti, A.E. and Narici, M.V.: Estimation of specific tension of human knee extensor muscles from in vivo physiological CSA and strength measurements. *J.Physiol.* 423: 86P, 1990.

Gollnick, P.D., Armstrong, R.B., Saubert IV, C.W., Piehl, K. and Saltin, B.: Effect of training on enzyme activity and fiber composition of human skeletal muscle. *J.Appl.Physiol.* 34: 107-111, 1973.

Gregor, R.J., Edgerton, V.R., Perrine, J.J., Champion, D.S. and DeBus, C.: Torque-velocity relationships in elite female athletes. *J.Appl.Physiol.* 47: 388-392, 1979.

Grindrod, S., Round, J.M. and Rutherford, O.M.: Type 2 fiber composition and force per cross-sectional area in human quadriceps. *J.Physiol.* 390: 154P, 1987.

Häkkinen, K., Alén, M. and Komi, P.V.: Changes in isometric force- and relaxation-time, electromyographic and muscle fibre characteristics of human skeletal muscle during strength training and detraining. *Acta Physiol.Scand.* 125: 573-585, 1985.

Häkkinen, K. and Keskinen, L.: Muscle cross-sectional area and voluntary force production characteristics in elite strength- and endurance-trained athletes and sprinter. *Eur.J.Appl.Physiol.* 59: 215-220, 1989.

Hather, B.M., Adams, G.R., Tesch, P.A. and Dudley, G.A.: Skeletal muscle responses to lower limb suspension in humans. *J.Appl.Physiol.* 72: 1493-1498, 1992.

服部正明, 鈴木直樹: MRIを基にした三次元構築像より得られた大腿部筋群の形態的差異. *体力科学* 41: 273-275, 1992.

Haxton, H.A.: Absolute muscle force in the ankle flexors of man. *J.Physiol.* 144: 267-273, 1944.

Hickson, R.C.: Interference of strength development by simultaneously training for strength and endurance. *Eur.J.Appl.Physiol.* 45: 255-263, 1980.

Hikida, R.S., Gollnick, P.D., Dudley, G.A., Convertino, V.A. and Buchanan, P.: Structural and metabolic characteristics of human skeletal muscle following 30 days of simulated microgravity. *Aviat.Space Environ.Med.* 60: 664-670, 1989.

Holloszy, J.O. and Booth, F.W.: Biochemical adaptations to endurance exercise in muscle. *Ann.Rev.Physiol.* 38: 273-295, 1976.

Housh, D.J., Housh, T.J., Johnson, G.O. and Chu, W.-K.: Hypertrophic response to unilateral concentric isokinetic resistance training. *J.Appl.Physiol.* 73: 65-70, 1992.

Ikai, M. and Fukunaga, T.: Calculation of muscle strength per unit cross-sectional area of human muscle by means of ultrasonic measurement. *Int.Z.angew.Physiol.Arbeitsphysiol.* 26: 26-32, 1968.

Ikai, M. and Fukunaga, T.: A study on training effect on strength per unit cross-sectional area of muscle by means of ultrasonic measurements. *Int.Z.angew.Physiol.Arbeitsphysiol.* 28: 173-180, 1970.

Ingjer, F.: Effects of endurance training on muscle fibre ATP-ase activity, capillary supply and mitochondrial content in man. *J.Physiol.* 294: 419-432, 1979.

Ivy, J.L., Brose, W.G., Maxwell, B.D. and Costill, D.L.: Isokinetic contractile properties of the quadriceps with relation to fiber type. *Eur J.Appl.Physiol.* 47: 247-255, 1981.

Jacobs, I., Esbjörnsson, M., Sylvén, C., Holm, I. and Jansson, E.: Sprint training effects on muscle myoglobin, enzyme, fiber types, and blood lactate. *Med.Sci.Sports Exerc.* 19: 368-374, 1987.

Jansson, E., Esbjörnsson, M., Hom, I. and Jacobs, I.: Increase in the proportion of fast-twitch muscle fibres by sprint training in males. *Acta Physiol.Scand.* 140: 359-363, 1990.

Johansson, C., Lorentzon, R., Sjöstrom, M., Fagerlund, M. and Fugl-Meyer, A.R.: Sprinters and marathon runners. Does isokinetic knee extensor performance reflect muscle size. *Acta Physiol.Scand.* 130: 663-669, 1987.

Johnson, M.A., Polgar, J., Weightman, D. and Appleton, D.: Data on the distribution of fiber types in thirty-six human muscles. An autopsy study. *J.Nuerol.Sci.* 18: 111-129, 1973.

Kandarian, S.C., White, T.P.: Force deficit during the onset of hypertrophy. *J.Appl.Physiol.* 67: 2600-2607, 1989.

Kandarian, S.C., Boushel, R.C. and Schulte, L.M.: Elevated interstitial fluid volume in rat soleus muscles by hindlimb unweighting. *J.Appl.Physiol.* 71: 910-914, 1991.

金久博昭：筋の出力特性とトレーニング. *Jpn.J.Sports Sci.* 2: 23-34, 1983.

Katsuta, S. and Kuno, S.: Muscle composition of various elite athletes by MRI. *Physiologist* 35: 197, 1992.

勝田 茂, 田中 守: トレーニングによる筋の組織化学的变化. *Jpn.J.Sports Sci.* 2: 2-11, 1983.

Kawakami, Y., Hirano, Y., Miyashita, M. and Fukunaga, T.: Effect of leg extension training on concentric and eccentric strength of quadriceps femoris muscles. *Scand.J.Med.Sci.Sports* 3: 22-27, 1993.

Kawakami, Y., Nakazawa, K., Fujimoto, T., Nozaki, D., Miyashita, M. and Fukunaga, T.: Specific tension of elbow flexor and extensor muscles based on magnetic resonance imaging. *Eur.J.Appl.Physiol.* 68: 139-147, 1994.

久野譜也, 秋間 広, 秋貞雅祥, 勝田 茂, 西嶋尚彦, 山中邦夫, 新津 守, 阿武 泉: サッカー・ワールドカップ予選前後における日本代表選手の筋エネルギー代謝, 筋断面積および脚筋力の変化-³¹P NMR, MRIによる検討-. *Jpn.J.Sports Sci.* 9: 310-314, 1990.

LeBlanc, A., Gogia, P., Schneider, V., Krebs, J., Schonfeld, E. and Evans, H.: Calf muscle area and strength changes after five weeks of horizontal bed rest. *Am.J.Sports Med.* 16: 624-629, 1988.

LeBlanc, A., Schonfeld, E., Evans, H.J., Pientok, C., Rowe, R. and Spector, E.: Regional changes in muscle mass following 17 weeks of bed rest. *J.Appl.Physiol.* 73: 2172-2178, 1992.

Lieber, R.L.: Skeletal muscle structure and function. Maryland, Williams & Wilkins, 1992, pp. 1-158.

Linossier, M.-T., Denis, C., Dormois, D., Geysant, A. and Lacour, J.R.:
Ergometric and metabolic adaptation to a 5-s sprint training programme.
Eur.J.Appl.Physiol. 67: 408-414, 1993.

Lynch, G.S., Mckenna, M.J. and Williams, D.A.: Sprint-training effects on some
contractile properties of single skinned human muscle fibres. *Acta Physiol.Scand.*
152: 295-306, 1994.

Martin, T.P., Edgerton, V.R. and Grindeland, R.E.: Influence of spaceflight on rat
skeletal muscle. *J.Appl.Physiol.* 65: 2318-2325, 1988.

Mather, B.M., Adams, G.R., Tesch, P.A and Dudley, G.A.: Skeletal muscle
responses to lower limb suspension in humans. *J.Appl.Physiol.* 72: 1493-1498,
1992.

松垣紀子, 久野譜也, 秋間 広, 高橋英幸, 板井悠二, 村木征人, 竹村
夫美子, 中嶋寛之, 勝田 茂: MRIによる国内一流スキージャンプ選手に
おける筋の形態的特性と筋出力特性. *Jpn.J.Sports Sci.* 12: 797-804, 1993.

Maughan, R.J., Watson, J. and Weir, J.: Strength and cross-sectional area of
human skeletal muscle. *J.Physiol.* 338: 37-49, 1983a.

Maughan, R.J., Watson, J. and Weir, J.: Relationships between muscle strength
and muscle cross-sectional area in male sprinters and endurance runners.
Eur.J.Appl.Physiol. 50: 309-318, 1983b.

Maughan, R.J. and Nimmo, M.A.: The influence of variations in muscle fibre
composition on muscle strength and cross-sectional area in untrained males.
J.Physiol. 351: 299-311, 1984.

Moritani, T. and deVries, H.: Potential for gross muscle hypertrophy in older men.
J.Gerontol. 35: 672-682, 1980.

Moritani, T.: Time course of adaptations during strength and power training. In: Komi, P.V. (ed) Strength and power in sport, Blackwell Scientific Publications, London, 266-278, 1991.

Musacchia, X.J., Steffen, J.M., Fell, R.D. and Dombrowski, M.J.: Skeletal muscle response to spaceflight, whole body suspension, and recovery in rats. *J.Appl.Physiol.* 69: 2248-2253, 1990.

Narici, M.V., Roi, G.S. and 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.

Narici, M.V., Roi, G.S., Landoni, L., Minetti, A.E. and Cerretelli, P.: Changes in force, cross-sectional area and neural activation during strength training and detraining of the human quadriceps. *Eur.J.Appl.Physiol.* 59: 310-319, 1989.

Narici, M.V., Landoni, L. and Minetti, A.E.: Assessment of human extensor muscles stress from in vivo physiological cross-sectional area and strength measurements. *Eur.J.Appl.Physiol.* 65: 438-444, 1992.

Nygaard, E., Houston, M., Suzuki, Y. Jorgensen, K. and Saltin, B.: Morphology of the brachial biceps muscle and elbow flexion in man. *Acta Physiol.Scand.* 117: 287-292, 1983.

Padykula, H.A. and Herman, E.: The specificity of the histochemical method for adenosinetriphosphatase. *J.Histochem.Cytochem.* 3: 170-195, 1955.

Ploutz, L.L., Tesch, P.A., Biro, R.L. and Dudley, G.A.: Effect of resistance training on muscle use during exercise. *J.Appl.Physiol.* 76: 1675-1681, 1994.

Ploutz-Snyder, L.L., Tesch, P.A., Crittenden, D.J. and Dudley, G.A.: Effect of unweighting on skeletal muscle use during exercise. *J.Appl.Physiol.* 79: 168-175, 1995.

Powell, P.L., Roy, R.R., Kanim, P., Bello, M.A. and Edgerton, V.R.: Predictability of skeletal muscle tension from architectural determinations in guinea pig hindlimbs. *J.Appl.Physiol.* 57: 1715-1721, 1984.

Roman, W.J., Fleckenstein, J., Stray-Gundersen, J., Alway, S.E., Peshock, R. and Gonyea, W.J.: Adaptations in the elbow flexors of elderly males after heavy-resistance training. *J.Appl.Physiol.* 74: 750-754, 1993.

琉子友男, 福永哲夫: Isokinetic作業時のpeak torqueに及ばず筋線維比率および筋断面積の影響. *体育学研究* 27: 135-142, 1982.

Ryushi, T. and Fukunaga, T.: Influence of subtypes of fast-twitch fibers on isokinetic strength in untrained men. *Int.J.Sports Med.* 7: 250-253, 1986.

Sale, D.G., Martin, J.E., Moroz, D.E.: Hypertrophy without increased isometric strength after weight training. *Eur.J.Appl.Physiol.* 64: 51-55, 1992.

Sale, D.G., MacDougall, J.D., Jacobs, I. and Garner, S.: Interaction between concurrent strength and endurance training. *J.Appl.Physiol.* 68: 260-270, 1990.

Saltin, B. and Gollnick, P.D.: Skeletal muscle adaptability: significance for metabolism and performance. In: Peachey, L.D., Adrian, R.H., Geiger, S.R. (eds) *Handbook of Physiology-Skeletal Muscle*. Am. Physiol. Soc., Baltimore, 1983, pp. 555-631.

Schantz, P., Randall-Fox, E., Hutchison, W., Tyden, A. and Åstrand, P.-O.: Muscle fiber type distribution, muscle cross-sectional area and maximal voluntary strength in human. *Acta Physiol.Scand.* 117: 219-226, 1983.

- 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.
- Sharp, R.L., Costill, D.L., Fink, W.J. and King, D.S.: Effects of eight weeks of bicycle ergometer sprint training on human muscle buffer capacity. *Int.J.Sports Med.* 7: 13-17, 1986.
- Shealy, M.J., Callister, R., Dudley, G.A. and Fleck, S.J.: Human torque velocity adaptations to sprint, endurance, or combined modes of training. *Am.J.Sports Med.* 20: 581-586, 1992.
- Shonk, C.E. and Boxer, G.E.: Enzyme patterns in human tissue. I. Methods for the determination of glycolytic enzymes. *Cancer Res.* 24: 709-724, 1964.
- Simard, C.M., Lacaille, M. and Vallieres, J.: Effects of hypokinesia/hypodynamia on contractile and histochemical properties of young and old rat soleus muscle. *Exp.Neurol.* 97: 106-114, 1987.
- Smidt, G.L.: Biomechanical analysis of knee flexion and extension. *J.Biomech.* 6: 79-92, 1973.
- Spector, S.A., Gardiner, P.F., Zernicke, R.F., Roy, R.R. and Edgerton, V.R.: Muscle architecture and force-velocity characteristics of cat soleus and medial gastrocnemius: Implications for motor control. *J.Neurophysiol.* 44: 951-960, 1980.
- Suter, E., Herzog, W., Sokolosky, J., Wiley, J.P. and Macintosh, R.B.: Muscle fiber type distribution as estimated by cybex testing and by muscle biopsy. *Med.Sci.Sports Exerc.* 25: 363-370, 1993.

Suzuki, Y., Murakami, T., Haruna, Y., Kawakubo, K., Goto, S., Makita, Y., Ikawa, S. and Gunji, A.: Effects of 10 and 20 days bed rest on leg muscle mass and strength in young subjects. *Acta Physiol.Scand.* 150, Suppl. 616, 5-18, 1994.

鈴木洋児：ベッドレストと筋の可塑性. *体育の科学* 44: 840-845, 1994.

Takahashi, H., Kuno, S., Miyamoto, T., Yoshioka, H., Inaki, M., Akima, H., Katsuta, S., Anno, I. and Yuji, I.: Changes in magnetic resonance images in human skeletal muscle after eccentric exercise. *Eur.J.Appl.Physiol.* 69: 408-413, 1995.

Tesch, P. and Karlsson, J.: Isokinetic strength performance and muscle fibre type distribution in man. *Acta Physiol.Scand.* 103: 47-51, 1978.

Thomason, D.B. and Booth, F.W.: Atrophy of the soleus muscle by hindlimb unweighting. *J.Appl.Physiol.* 68 1-12, 1990.

Thorstensson, A., Sjödin, A. and Karlsson, J.: Enzyme activities and muscle strength after "sprint training" in man. *Acta Physiol.Scand.* 94: 313-318, 1975.

Thorstensson, A., Grimby, G. and Karlsson, J.: Force-velocity relations and fiber composition in human knee extensor muscles. *J.Appl.Physiol.* 40: 12-16, 1976.

Thorstensson, A.: Muscle strength, fiber types and enzyme activities in man. *Acta Physiol.Scand.* Suppl. 443: 1-45, 1976.

Thorstensson, A., Larsson, L, Tesch, P. and Karlsson, J.: Muscle strength and fiber composition in athletes and sedentary men. *Med.Sci.Sports* 9: 26-30, 1977.

Weidman, E.R., Charles, H.C., Negro-Vilar, R., Sullivan, M.J. and Macfall, J.R.: Muscle activity localization with ^{31}P spectroscopy and calculated T_2 -weighted ^1H images. *Invest. Radiol.* 26: 309-316, 1991.

Wickiewicz, T.L., Roy, R.R., Powell, P.L. and Edgerton, V.R.: Muscle architecture of human lower limb. *Clin.Orthop.Relat.Res.* 179: 317-325, 1983.

Wickiewicz, T.L., Roy, R.R., Powell, P.L., Perrine, J.J. and Edgerton, V.R.: Muscle architecture and force-velocity relationships in humans. *J.Appl.Physiol.* 57: 435-443, 1984.

Young, A., Stokes, M. and Crowe, M.: The size and strength of quadriceps muscles of old and young men. *Clin.Physiol.* 5: 145-154, 1985.

Young, A. : The relative isometric strength of type I and type II muscle fibres in the human quadriceps. *Clin.Physiol.* 4: 23-32, 1984.

Young, A., Storke, M. and Crowe, M.: Size and strength of the quadriceps muscles of old and young women. *Eur.J.Clin.Invest.* 14: 282-287, 1984.

Yue, G., Alexander, A.L., Laidlaw, D.W., Gmitro, A.F., Unger, E.C. and Enoka, R.M.: Sensitivity of muscle proton spin-spin relaxation time as an index of muscle activation. *J.Appl.Physiol.* 77: 84-92, 1994.

筑波大学附属図書館



1 00960 04954 2

本学関係