

膝伸展運動にともなう大腿四頭筋の 活性部位のマッピング

秋 間 広*・高橋 英幸・久野 譜也
阿 武 泉**・板井 悠二**・勝田 茂

Mapping of Muscle Activation Patterns in the M. Quadriceps Femoris after Knee Extension Exercise

AKIMA Hiroshi*, TAKAHASHI Hideyuki, KUNO Shinya,
ANNO Izumi**, ITAI Yuji** and KATSUTA Shigeru

The purpose of the present study was to investigate the patterns of muscle activity in the m. quadriceps femoris at three levels along the right-thigh. Seven male volunteers were participated in this study. Exercise-induced contrast shift in MR imaging was determined based on T2-weighted axial images (TR/TE 2000/20, 40, 60, 80 ms) at three levels at rest and immediately after 100 repetitions of isokinetic knee extension (10 sets of 10 repetitions with 0.5 min rest at 120 deg/sec between sets). The middle level of image was corresponded to the center of femur length, and the other two images were located at 4 cm proximal or distal. T2 values of m. rectus femoris (RF), m. vastus lateralis (VL), m. vastus intermedius (VI), and m. vastus medialis (VM) were measured from two or three regions of interest (ROI), and then averaged to be representative value for each muscle. There was no difference among resting T2 values for each muscle, while T2 values after exercise of RF were significantly higher than that of other three muscles at each level of the thigh. We found no significant difference among three levels for each muscle and among two or three ROIs within each muscle. The results suggest that 1) muscle activations during knee extension of individual muscles in the m. quadriceps femoris were different, i.e. recruitment of RF was greater, 2) m. quadriceps femoris were similarly activated at three levels along the thigh, and 3) muscle activations were similar in the single muscle.

Key words: Activation pattern, Mapping, Skeletal muscle, Muscle function, Magnetic resonance imaging

1. 緒言

我々が行なう身体運動は身体の様々な関節における骨格筋が収縮あるいは弛緩することによって成り立っている。ある一つの関節を動かすためには機能的に同一の働きをする筋群がある。その筋群は関節を取り巻いており、関節の回転運動を生

じさせる源となっている。例えば、肘関節の屈曲には上腕二頭筋の短頭・長頭、上腕筋および腕橈骨筋が主に作用し、また膝関節の伸展には大腿四頭筋が働く。しかしながら、これらの筋が主働筋となって関節を動かす場合、その筋群を構成する個々の各筋頭が、関節トルクとして発揮された力

* 東京大学大学院総合文化研究科生命環境科学系 Department of Life Sciences, University of Tokyo

** 筑波大学臨床医学系 Department of Clinical Sciences

に対してどの程度貢献しているのかについては明らかにされていない。これを明らかにするためには定量的に筋活動を評価する必要があると思われる。

生体の筋の活動を非侵襲的に評価する方法として、古くから用いられてきている表面筋電図法が挙げられる。この方法は比較的簡便であるため、これまでにこの方法を用いた研究成果が報告されている^{9-13,17)}。最近では筋電図法と同様に筋の活動様相を評価する方法として、磁気共鳴映像法(Magnetic Resonance Imaging; MRI)の横緩和時間(T2)という指標を用いて、運動にともなう筋の活性化の程度を評価する手法が確立されてきた^{1-3,6-8,14,15,18,19)}。T2は生体内の細胞内あるいは細胞外にある水の状態を反映する指標であると考えられており¹⁵⁾、この値は運動により安静値と比較して増加する。この増加率は運動に用いた仕事量と比例関係にあり⁶⁾、また表面筋電図法から得られた積分値との間にも有意な正の相関関係があることが示されてきている¹⁾。したがって、運動にともなうT2の変化は筋の活性化の程度を反映する指標として用いることができる^{1-3,14,15)}。さらにMRIの利点として表面筋電図法では測定することが不可能な深層部の筋の情報、さらに一つの筋に対しても複数の横断像から筋の活性化の程度を評価することが可能である。このような評価によって筋力発揮において、どの筋がどの程度活性化しているのかなどという情報が得られ、さらに一つの筋においても、どの部分が最も活性化しているのかについて評価することができる。しかしながら、これまでの研究^{1,2,6,7,14,15,18)}において運動にともなうT2値の変化は、単一の横断像あるいは異なる部位の複数の横断像の平均値から評価されており、複数の横断像の活性化の違いについては十分に明らかになっていない。なぜなら、測定する部位によってはもちろん、一つの筋内においても運動後のT2値の増加率が異なる可能性があるが、これについては明らかにされていないからである。

ところで、上述した筋の活性化について検討する場合の条件として、用いる運動負荷の主働筋が容易に限定できることが挙げられよう。このためには多関節動作よりも単関節動作が適していると思われる。また、多くのスポーツ種目において主働筋の一つとなるような筋を用いるほうが、ス

ポーツ科学への応用を考えた場合、より適していると思われる。これらのことを考慮して、我々は膝関節の伸展を筋の活性化の程度を評価する運動として用いることとした。

そこで本研究では、1)膝伸展運動直後のT2値を指標として、大腿四頭筋を構成する各筋頭のT2値の増加率が同一であるのか否かという点、2)膝伸展運動後の異なる部位の3枚の横断像から算出されたT2値が同一であるのか否かという点、3)同一の筋内の異なる部位においてT2値が同一であるのか否かという点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。なお、被検脚は全て右脚とした。

B. 緩和時間(T2)

T2の測定は筑波大学附属病院に設置されてある超電導MR装置(Signa, 1.5-T, GE社製)を用いた。まず、被検者の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関節を同定した。運動前の安静時および運動直後には大転子—外側顆間関節間の中央部を起点として、スライス厚10mm、スライス間隔40mmで近位および遠位方向にそれぞれ1枚づつ一人につき3部位の横断像を撮影した。運動負荷には等速性筋力測定器(Cybex 340, Lumex社製)を用い、被検者は角速度120deg/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、セット間には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MRIの測定の開始までに要した時間は 52.0 ± 3.1 秒であった。

MRIのデータはパーソナルコンピューター(Power Macintosh 8100/80AV, Apple社製)に転送し、画像分析は全てコンピューターを用いて行った。得られた画像から大腿四頭筋を同定し、大腿四頭筋を構成する筋別にT2の測定を行った。T2の測定は一つの筋について2~3カ所のregions of interest (ROI)を設定した(図1)。T2

値はROI内に含まれる全ての画素の平均値として算出される。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。

C. 統計処理

各項目の値は、すべて平均値と標準偏差で示し

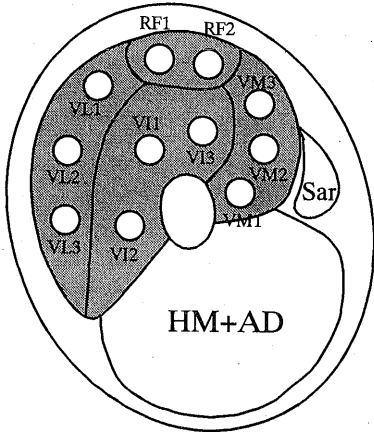


Fig. 1 Schematic illustration of axial images of thigh at middle level. The circles at quadriceps muscles represented regions of interest to measure T2 values of individual muscles.

RF: m. rectus femoris, VL: m. vastus lateralis, VI: m. vastus intermedius, VM: m. vastus medialis, HM+AD: hamstrings and adductors, Sar: m. sartorius.

た。T2の部位間および筋間の比較には二元配置の分散分析を用いて検討し、有意水準は5%とした。

3. 結果

図2には同一被検者の安静時および運動後に撮影された大腿中央部のMRIについて示した。運動後の画像における膝伸筋群では安静時の画像と比較して運動時に活性化されたと考えられる部分の白色化が観察できる。特に大腿直筋の部分では白色化が顕著である。表1には安静時および膝伸展運動直後における大腿四頭筋のT2値について示した。いずれの筋においても運動後にT2値の有意な増加が認められた(全て $p < 0.01$)。一方、一つの筋内の異なる数カ所の測定部位間でT2値の有意な差は観察されなかった。さらに、筋の上部、中央部および下部のそれぞれの比較では、いずれの筋の部位間においても有意な差は認められなかった。

図3には安静時に対する運動後のT2値の増加率を大腿四頭筋の各筋頭別に示した。測定に用いた3つの部位(上部、中央部および下部)において大腿直筋が他の3つの筋(外側広筋、中間広筋、内側広筋)と比較して有意に高値を示した。また、いずれの部位においても外側広筋、中間広筋および内側広筋の間には運動後のT2値の増加率に有意な差は認められなかった。

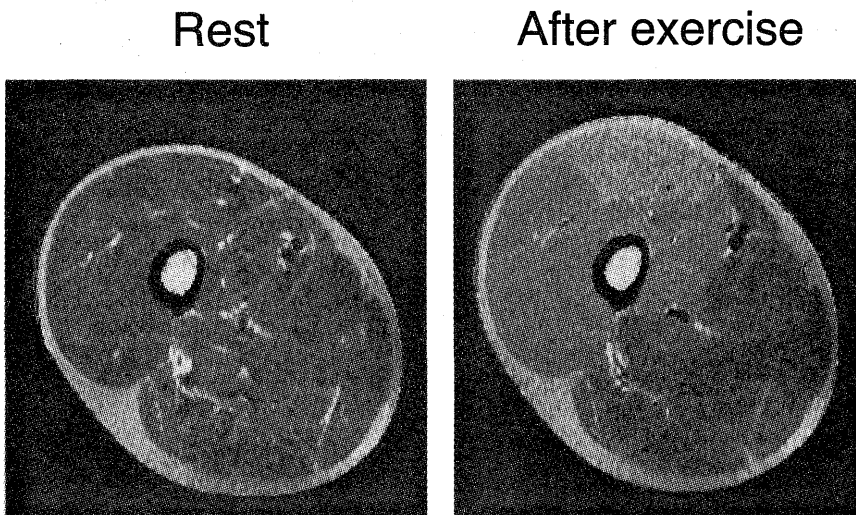


Fig. 2 Representative T2-weighted MR images of thigh at rest and after exercise.

Table 1 T2 values (msec) of m. quadriceps femoris at rest and immediately after knee extensions.

	Rest														
	RF1	RF2	RF	VL1	VL2	VL3	VL	VI1	VI2	VI3	VI	VM1	VM2	VM3	VM
Proximal	27.0 (0.3)	27.0 (0.8)	27.0 (0.5)	28.0 (0.5)	27.6 (0.7)	26.6 (1.5)	27.4 (0.7)	28.5 (1.1)	28.3 (0.6)	27.2 (0.8)	28.0 (0.5)	28.5 (0.5)	27.6 (1.1)	—	28.1 (0.7)
Middle	26.8 (0.8)	27.2 (1.2)	27.0 (0.8)	27.6 (0.7)	28.8 (0.6)	26.8 (1.4)	28.1 (0.7)	28.5 (1.3)	28.5 (1.3)	28.9 (0.6)	28.6 (0.9)	28.5 (0.8)	28.1 (0.9)	28.9 (0.6)	28.1 (0.9)
Distal	26.9 (0.8)	—	26.9 (0.8)	26.6 (1.5)	29.0 (1.2)	27.7 (0.7)	28.6 (0.9)	29.1 (1.1)	28.5 (1.0)	28.6 (0.9)	28.8 (0.8)	27.7 (1.0)	27.3 (1.4)	28.6 (0.9)	27.5 (0.8)
	After knee extension														
	RF1	RF2	RF	VL1	VL2	VL3	VL	VI1	VI2	VI3	VI	VM1	VM2	VM3	VM
Proximal	37.8 (1.4)	37.2 (2.6)	37.5 (1.8)	34.1 (1.9)	33.1 (2.3)	31.5 (1.7)	32.9 (1.9)	34.3 (2.1)	33.8 (2.7)	33.5 (2.5)	33.9 (2.2)	33.5 (1.8)	33.5 (2.6)	—	33.5 (1.9)
Middle	38.9 (1.1)	38.6 (2.2)	38.7 (1.4)	35.2 (2.3)	34.2 (2.5)	31.9 (2.4)	33.8 (2.2)	34.8 (2.5)	34.7 (2.0)	34.4 (1.8)	34.6 (1.8)	34.0 (2.9)	32.8 (3.6)	32.4 (3.3)	33.1 (3.0)
Distal	38.3 (1.6)	—	38.3 (1.6)	36.0 (2.3)	34.7 (3.0)	33.2 (3.3)	34.7 (2.7)	35.9 (2.7)	35.6 (1.0)	34.3 (2.6)	35.3 (2.4)	34.9 (2.7)	32.3 (3.3)	32.6 (2.5)	33.3 (2.6)

Values are means and SD. RF: m. rectus femoris, VL: m. vastus lateralis, VI: m. vastus intermedius, and VM: m. vastus medialis. T2 values of RF, VL, VI, and VM were averaged for each region of interest.

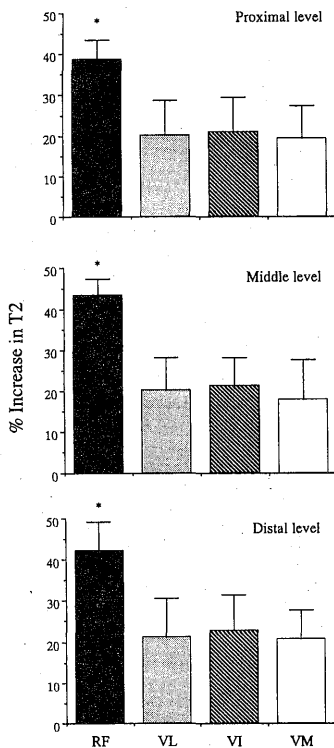


Fig. 3 Percent increase in T2 value of quadriceps femoris muscles immediately after knee extension exercise.

RF: m. rectus femoris, VL: m. vastus lateralis, VI: m. vastus intermedius, VM: m. vastus medialis.

* : $p < 0.05$ vs VL, VI and VM.

Table 2 Cross-sectional area (cm^2) of individual muscles of the m. quadriceps femoris at three levels of the thigh.

	Proximal	Middle	Distal
RF	12.6 (2.4)	8.1 (2.1)	2.8 (1.0)
VL	27.6* [†] (4.5)	25.3* (4.7)	18.2* (3.4)
VI	26.0* [†] (3.7)	22.9* (4.0)	16.9* (1.7)
VM	11.2 (2.7)	20.2* (3.3)	26.5* [‡] (4.2)

Values are means and SD. RF: m. rectus femoris, VL: m. vastus lateralis, VI: m. vastus intermedius, VM: m. vastus medialis.

* : $p < 0.01$ vs RF, [†] : $p < 0.01$ vs VM, [‡] : $p < 0.01$ vs VL and VI.

表2には安静時における大腿四頭筋の各筋頭の筋断面積について示した。大腿の上部の外側広筋および中間広筋は、大腿直筋および内側広筋と比較して有意に低値を示した。大腿の中央部では外側・内側・中間広筋が大腿直筋と比較して有意に高値を示した。大腿の下部では外側・内側・中間広筋が大腿直筋と比較して有意に高値を示し、また、内側広筋は外側・中間広筋と比較しても有意に高値を示した。

図4には大腿四頭筋の各筋頭の筋断面積と運動

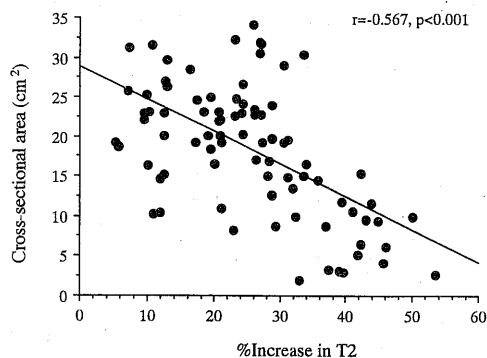


Fig. 4 Relationships between cross-sectional area of individual muscle of m. quadriceps femoris and percent increase in exercise-induced T2 values.

後のT2の増加率との関係について示した。これら両者の間には有意な負の相関関係が認められた($r = -0.567$, $p < 0.001$)。

4. 考察

本研究は、1) 膝伸展運動直後のT2値を指標として大腿四頭筋を構成する各筋頭のT2値の増加率について検討すること、2) 膝伸展運動後の異なる3部位におけるT2値の変化率について検討すること、3) 同一の筋内の異なる部位におけるT2値の変化率について検討することを目的としている。本研究においても示されたように運動後の骨格筋のT2値は増加する。この増加の程度は運動の仕事量と比例関係にあり⁶⁾、また表面筋電図法から得られた積分値との間にも有意な正の相関関係があることが示されてきている¹⁾。したがって、運動誘発性のT2値の変化を評価することによって、筋の活性化の程度を捉えることが可能である^{1-3, 6-8, 14, 15, 18, 19)}。

本研究では大腿直筋が他の筋と比較して運動後のT2値の増加率が有意に高値を示した。この結果はWeidmanら¹⁸⁾の報告を支持している。彼らは最大随意膝伸展力の50%の強度の運動後、大腿四頭筋における各筋頭のT2値の増加率が筋により異なっていることを報告している。前述のように運動誘発性のT2値の変化を指標として筋の活性の程度を調べることができるので、その増加率が大きいことはその筋が膝伸展運動において活性化されたことを示している。したがって、本研究およびWeidmanら¹⁸⁾の研究を考慮すると、大腿

直筋は大腿四頭筋の他の筋頭と比較して、膝伸展運動中には最も活性化されている筋であることができる。大腿直筋は膝の伸展に作用する筋であると同時に大腿四頭筋の他の3つの筋頭と異なり股関節の屈曲にも作用する二関節筋である。このような筋の機能的な役割の違いが、運動後のT2値の顕著な増加に起因している可能性が考えられる。しかしながら、本研究で用いた膝関節運動中には股関節が屈曲しないように体幹を固定していたため、動作としては膝の伸展のみが行なわれた。したがって、前述の原因として股関節の屈曲による影響は非常に少ないものと思われる。他の原因として大腿直筋が他の筋と比較して、筋量(筋断面積)が相対的に少ないことに起因している可能性が考えられる。大腿直筋の筋断面積が膝伸筋群の筋断面積に占める割合は上部、中央部および下部において、それぞれ16%、11%、4%であった。そこで、運動にともなうT2値の増加率と筋断面積との関係について検討したところ、有意な負の相関関係が認められた(図4)。この結果は筋断面積の小さな筋ほど運動誘発性のT2値の変化が大きいことを示している。

本研究ではT2値を変化させる運動として膝伸展動作を用いたがPloutz-Snyderら¹⁵⁾は本研究で用いた膝伸展運動と同様に大腿四頭筋が主働筋となるようなパラレルスクワットを用いてT2値の変化について観察している。その結果、外側・中間・内側広筋および内転筋群において最も顕著な変化が認められ、大腿直筋においては変化が認められなかった。本研究およびPloutz-Snyderら¹⁵⁾の研究結果は、機能的に同一の筋群であっても、その動作様式によっては筋群を構成する各筋の機能的な貢献度が異なることを示唆している。したがって、トレーニングの場面においても、ターゲットとなる筋が最も効果的にトレーニングできるような動作様式を用いる必要があると思われる。

大腿四頭筋を構成する各筋頭では、部位の異なる3枚の横断像から得られた運動後のT2値の変化率に差は認められなかった(表1、図3)。同様に一つの筋内における異なる2から3ポイントのROI間においても有意な差は認められなかった(表1)。これらの結果は随意的な筋力発揮をする場合には筋全体で収縮活動がなされ、さらに一つの筋内においても同程度の筋の活性化がされることを示唆している。これは我々の仮説に反するも

のであった。なぜなら、最近の研究¹⁶⁾および我々の研究⁴⁾では筋肥大は腱に近い筋の端でなく、筋量の多い筋腹付近で顕著に起こることが示されているからである。もし、この部位特異的な筋肥大の差が筋収縮時によく動員される部分が肥大することを反映していると仮定すると、本研究の結果で示されたように部位によって筋の活性化の程度に違いがないとする結果と矛盾することになる。これに関してはさらなる検討が必要と思われる。

我々は先に大腿部の異なる3部位(近位部、中央部および遠位部)の大腿四頭筋の筋断面積と等速性膝伸展力との関係について検討したところ、筋断面積のより大きい近位部および中央部が等速性膝伸展力と高い相関関係にあったことを報告している⁵⁾。また、大腿四頭筋の各筋頭の筋断面積と等速性膝伸展力との関係について検討したところ、外側広筋あるいは中間広筋において高い相関関係が認められた。これらの結果は、本研究で観察された結果、すなわち、筋力発揮時には大腿部全体が同様に活性化されており、特に大腿直筋の貢献が大きいとする結果と異なるものである。我々の先行研究では筋の形態面と筋の機能との関係について評価しており、一方、本研究は筋の機能面をより反映した指標について検討している。どちらの研究がより正確な生体の情報を提供しているのかについては、これらの研究から結論することは困難であるが、筋の形態面だけでは筋の機能面を十分に評価することが難しいのかもしれない。これらの問題についてはさらに研究が必要であると思われる。

本研究では運動後のT2値の増加率と運動で行なわれた仕事量との間に正の相関関係にあると仮定して論を展開してきた。しかしながら、運動にともなうT2値の変化率は仕事量が小さい場合には比例関係にあるが仕事量が大きくなる場合にはT2値は頭打ちになるという報告もみられる⁷⁾。したがって、T2値の増加が仕事量を十分に反映していない場合があることも考慮する必要があると思われる。

5. 結論

本研究はMRIの緩和時間という指標を用いて膝伸展運動後の筋の活性化について検討した。その結果を以下に要約する。

1) 大腿四頭筋を構成する各筋の筋の活性化の程

度を評価した結果、大腿直筋が他の3つの筋と比較してより活性化されていることが示された。これは測定に用いた3部位の全てにおいて同様な結果であった。

- 2) 大腿四頭筋における異なる3部位の横断像から算出した活性化の程度の筋別比較では、いずれの筋においても部位の違いによる差はみられなかった。
- 3) 大腿四頭筋の各筋頭において、一つの筋内の異なる部位のT2値について比較したところ、いずれの部位においても有意な差は認められなかった。

以上の結果から、機能的に同一の筋群でもそれを構成する各筋では、ある運動負荷をさせた場合に筋の活性化の程度が異なるが、一つの筋内においては同様な筋の活性化がなされていることが示唆された。

謝辞

稿を終えるにあたり、MRIの画像処理に御協力頂いた筑波大学物理工学系・巨瀬勝美助教授に深厚なる謝意を表します。また、本研究の一部は水野スポーツ振興会助成金によってなされたものであり、(財)水野スポーツ振興会に対して衷心より感謝の意を表します。

引用文献

- 1) Adams GR, Duvoisin M, and Dudley GA (1992): MRI and EMG as indexes of muscle function. *J Appl Physiol* 73: 1578-1583.
- 2) Adams GR, Harris RT, Woodard D, and Dudley GA (1993): Mapping of electrical muscle stimulation using MRI. *J Appl Physiol* 74: 532-537.
- 3) Akima H, Takahashi H, Kuno S, Masuda K, Masuda T, Shimojo H, Anno I, Itai Y, and Katsuta S (1996): Early phase adaptations of muscle use and strength to isokinetic training. *Med Sci Sports Exerc* (Submitted)
- 4) Akima H, Kuno S, Inaki M, and Katsuta S (1996): Effects of sprint cycle training on architectural characteristics, torque-velocity relationships, and power output in human skeletal muscles. *Adv Exerc Sports Physiol* (Submitted)
- 5) 秋間 広, 久野譜也, 高橋英幸, 下條仁士, 勝田茂(1995): 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.
- 6) Fisher MJ, Meyer RA, Adams GR, Foley JM, and Potchen EJ (1990): Direct relationships between

- proton T2 and exercise intensity in skeletal muscle MR images. *Invest Radiol* 25 : 480-485.
- 7) Fleckenstein JL, Watumull D, Bertocci LA, Parkey RW, and Peshock RM (1992): Finger-specific flexor recruitment in humans: depiction by exercise-enhanced MRI. *J Appl Physiol* 72 : 1974-1977.
 - 8) Fleckenstein JL, Watumull D, McIntire DD, Bertocci LA, Chason DP, and Peshock RM (1993): Muscle proton T2 relaxation times and work during repetitive maximal voluntary exercise. *J Appl Physiol* 74 : 2855-2859.
 - 9) Garfinkel S and Cafarelli E (1992): Relative changes in maximal force, EMG, and muscle cross-sectional area after isometric training. *Med Sci Sports Exerc* 24 : 1220-1227.
 - 10) Häkkinen K, Alén M, and Komi PV (1985): Changes in isometric force and relaxation time, electromyographic and muscle fiber characteristics of human skeletal muscle during strength training and detraining. *Acta Physiol Scand* 125 : 573-585.
 - 11) Moritani T, and deVries HA (1979): Neural factors vs hypertrophy in time course of muscle strength gain. *Am J Phys Med Rehabil* 58 : 115-130.
 - 12) Narici MV, Roi GS, Landoni L, Minetti AE, and Cerretelli P (1989): 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.
 - 13) Narici MV, Hoppeler H, Kayser B, Landoni L, Claassen H, Gaverdi C, Conti M, and Cerretelli P (1996): Human quadriceps cross-sectional area, torque and neural activation during 6 months strength training. *Acta Physiol Scand* 157 : 175-186.
 - 14) Ploutz LL, Tesch PA, Biro RL, and Dudley GA (1993): Effect of resistance training on muscle use during exercise. *J Appl Physiol* 76 : 1675-1681.
 - 15) Ploutz-Snyder LL, Convertino VA, and Dudley GA (1995): Resistance exercise-induced fluid shifts change in active muscle size and plasma volume. *Am J Physiol* 269 : R536-R543.
 - 16) Roman WJ, Fleckenstein J, Stray-Gundersen J, Alway SE, Peshock R, and Gonyea WJ (1993): Adaptations in the elbow flexors of elderly males after heavy-resistance training. *J Appl Physiol* 74 : 750-754.
 - 17) Thorstensson A, Karlsson J, Viitasalo JHT, Luhtanen P, and Komi PV (1976): Effect of strength training on EMG of human skeletal muscle. *Acta Physiol Scand* 98 : 232-236.
 - 18) Weidman ER, Charles HC, Negro-Vilar R, Sullivan MJ, and Macfall JR (1991): Muscle activity localization with ³¹P spectroscopy and calculated T2-weighted ¹H images. *Invest Radiol* 26 : 309-316.
 - 19) Yue G, Alexander AL, Laidlaw DH, Gmitro F, Unger EC, and Enoka RM (1994): Sensitivity of muscle proton spin-spin relaxation time as an index of muscle activation. *J Appl Physiol* 77 : 84-92.