

## MRIによる緩和時間と筋線維組成との関係に及ぼす筋力トレーニングの影響

久野 譜也 (筑波大学・臨床医学系・放射線医学)  
勝田 茂 (筑波大学・体育科学系)  
秋貞 雅祥 (筑波大学・臨床医学系・放射線医学)

井上 多門 (筑波大学・物理工学系)  
阿武 泉 (筑波大学・臨床医学系・放射線医学)  
松本 邦彦 (筑波大学・臨床医学系・放射線医学)

### キーワード

MRI, relaxation time, strength training, FT/ST area ratio, sports medicine

### 緒 言

スポーツ医学の分野において、スポーツの適性を判断する指標の一つとして筋線維組成（速筋線維と遅筋線維の割合）の重要性が認められている<sup>1),2),3)</sup>。

しかしながら、筋線維組成を知るためには筋バイオプシーが必要なため、方法上の制約が伴い広範な対象への適用はなされていない。そのため、非侵襲的にこれを知る方法が確立されれば、スポーツの適性を探す上で筋線維組成はより実際的な指標になると思われる。

この課題に対し我々はこれまでにMRIを用いて検討を試み、このMRIから得られる緩和時間と筋線維組成の間に非常に高い相関関係を認めている<sup>4)</sup>。<sup>31</sup>P-MRSから得られるPi/PCrが速筋と遅筋では異なるという報告<sup>5)</sup>があるものの、緩和時間を用いて筋線維組成との関係について検討した研究は他にみられない。しかしながら、緩和時間と筋線維組成との間に得られた高い相関関係の理由についてはまだ不明な点が多い。

速筋線維の面積の占める割合(% area FT線維)は、どちらか一方の筋線維が選択的に肥大あるいは萎縮すれば変化する。したがって、筋線維の面積を意図的に変化させた前後の緩和時間を測定すれば、緩和時間に寄与している因子を明らかにすることができるかもしれない。なぜならば、筋線維面積に変化が生じた時の内部構造の変化<sup>6),7)</sup>については既に報告されているためである。

そこで本研究では、速筋(fast-twitch; FT)線維を選択的に肥大させるような筋力トレーニングを行い、トレーニング前後の緩和時間について検討を試みた。

### 方 法

#### 1) 被検者

被検者には、男子学生9名(トレーニング群5名, コントロール群4名)を用い、表1にその身体的特性を示した。また、本研究を実施するに当たって全被検者より本人の承諾を得た。

Table 1 Characteristics of subjects

	Age (yrs)	Height (cm)	Weight (kg)
Tr. (n=5)	24.6 (2.2)	168.9 (4.4)	66.8 (6.1)
Cont. (n=4)	25.0 (2.2)	171.5 (2.2)	63.3 (4.2)

2) 組織化学的分析

被検者には外側広筋を用い、筋バイオプシーは、トレーニングの前後2回整形外科医によって行われた。バイオプシー実施部位は、膝蓋骨上端から6~7cmの位置であり、ニードルバイオプシー法<sup>9)</sup>によって約20mgの筋を採取した。

採取された筋は、直ちに液体窒素で冷却されたイソペンタン中で瞬間凍結後、クリオスタットによって厚さ10 $\mu$ mの連続凍結切片を作成し、これに組織化学的染色を施した。組織化学的染色としては、筋線維を分類するためにMyosin ATPase染色(pre-incubation pH 10.3)<sup>9)</sup>を、筋線維横断面積を得るためにNADH-t染色<sup>10)</sup>を用いた。

3) MRIによる緩和時間の測定

緩和時間の測定は、トレーニングの前後2回常電導MRI装置(TOSHIBA, MRT-22A:0.22T)を用いて行った。

まず右大腿部の縦断映像を撮影し、横断像を撮影する位置を定めた(図1-A)。この横断像の

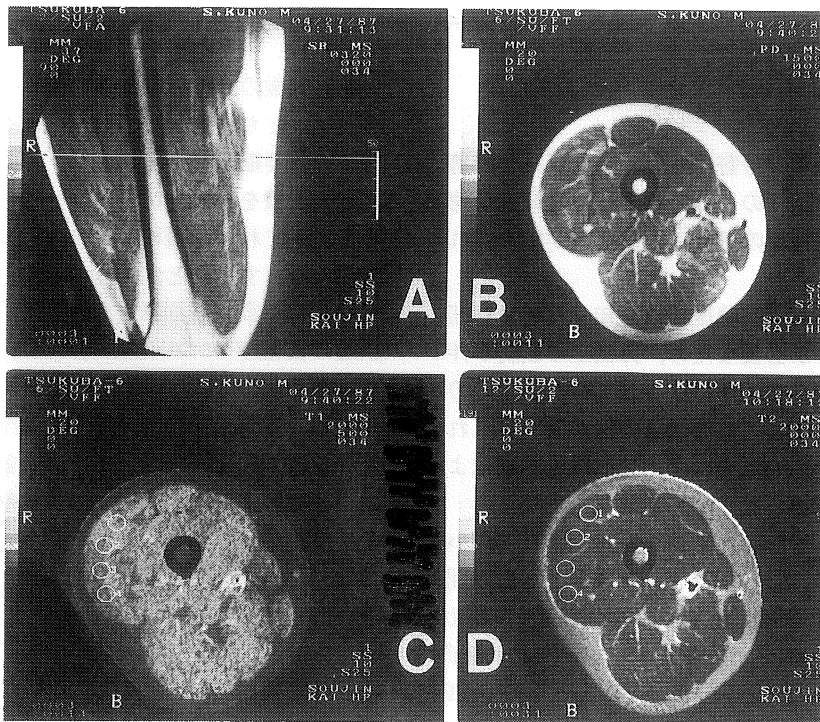


Fig. 1 Sagittal and transverse sections of the thigh by MRI.

受付年月日 昭和63年6月9日

別刷請求先 (〒305) つくば市天王台1-1-1 筑波大学・臨床医学系・放射線医学 久野譜也

Table 2 Muscle fiber areas, FT/ST area ratio in M. vastus lateralis before and after heavy-resistance training

Subject	FT area ( $\mu\text{m}^2$ )		ST area ( $\mu\text{m}^2$ )		FT/ST area ratio	
	before	after	before	after	before	after
S. S.	3963	6256	4524	5490	0.88	1.14
T. S.	3873	6181	4851	4788	0.80	1.29
T. N.	3211	5565	3107	5119	1.03	1.09
S. K.	5271	6573	5028	6141	1.05	1.07
S. M.	3744	6276	3606	4246	1.05	1.45
Mean	4012	6170***	4223	5157	0.96	1.21
S. D.	761	370	831	715	0.12	0.16

before vs. after \*\*\*  $p < 0.001$ 

スライス位置は、バイオプシー実施場所の上方1 cmとした。なお、スライス幅は10 mmを用いた。

パルス系列はInversion Recovery (IR) が2000(TR)/500(TI)34(TE), Spin Echo (SE) が2000(TR)/34(TE1)65(TE2), 1500(TR)/34(TE)を用いた。

T1およびT2をそれぞれの計算画像より測定するために、SE法より得られた画像(図1-B)において外側広筋を同定後、両計算画像において外側広筋内の4カ所のT1(図1-C)およびT2(図1-D)をそれぞれ測定しその平均値を求めた。

#### 4) トレーニング内容

筋力トレーニングは、等張性の筋収縮が行われる膝関節伸展運動を用いた。トレーニングは、週3回の頻度で20週間実施した。また、トレーニング強度は、トレーニング前に測定した最大筋力の80%の負荷であり、1日のトレーニングは膝伸展運動15回を1セットとして5セット行った。セット間の休息時間は約2分とした。なお、週の最初のトレーニング時に最大筋力を測定し、その週のトレーニング負荷を決定した。

Table 3 Proportion of fast-twitch fibers area before and after strength training

Subj.	% area FT fibers	
	before	after
S. S.	41.5	50.0
T. S.	42.7	55.4
T. N.	47.8	57.6
S. K.	57.7	59.0
S. M.	57.7	65.5
Mean	49.8	57.5*
S. D.	7.9	5.6

before vs. after \*  $p < 0.05$ 

## 結 果

表2に筋力トレーニング前後のFTおよびST (slow-twitch) 線維の平均筋線維横断面積を示した。筋線維横断面積は、FT線維では有意な増加( $p < 0.001$ )がみられたのに対し、ST線維では増加傾向はみられたものの統計的には有意な差は認められなかった。

表3に、筋力トレーニング前後の筋線維の平均横断面積比(% area FT線維)を示した。% area FT線維はトレーニング後有意に増加し、

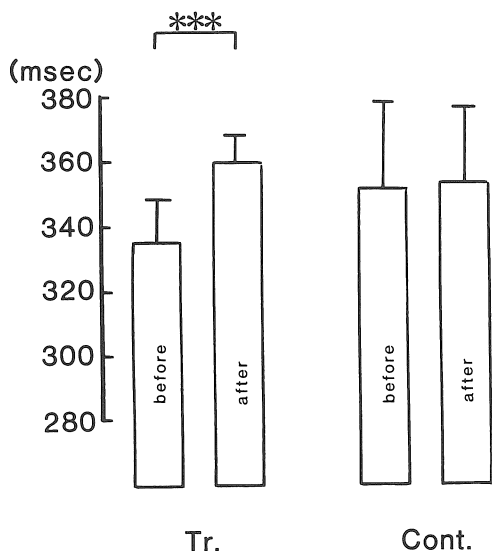


Fig. 2 Longitudinal relaxation time (T1) before and after strength training. \*\*\*  $p < 0.001$

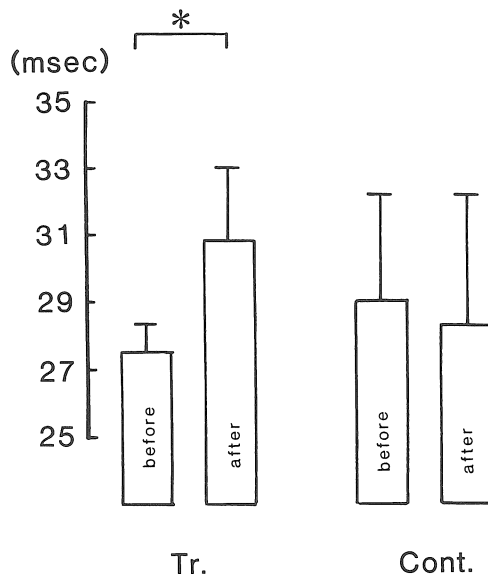


Fig. 3 Transverse relaxation time (T2) before and after strength training. \*  $p < 0.05$

その増加率は18.9%であった。この結果、トレーニング群全被検者の% area FT 線維はより速筋型へシフトした。

図2には、筋力トレーニング前後のT1およびT2を示した。トレーニング群では平均で334.9 msecからトレーニング後359.0 msecに増加し( $p < 0.001$ )、その増加率は平均で7.2%であった。一方、T2においても有意な増加( $p < 0.05$ )が認められた(図3)。一方、コントロール群ではトレーニング群と同様な期間において2回緩和時間を測定したが、その値はT1およびT2においてそれぞれ同様であった。

図4に、既に我々が報告<sup>4)</sup>した16名のT1と% area FT 線維のデータにトレーニング後の5名の値を加えて緩和時間と筋線維組成の関係を示した。両者の間にはトレーニング前と同様な高い相関関係が認められた。

表4には、重回帰分析を用いて% area FT 線維に対する緩和時間の関係( $n = 16$ )<sup>4)</sup>について、ト

レーニング後の値( $n = 5$ )を含めて検討した( $n = 21$ )。% area FT 線維に対する寄与率は、T1とT2を組み合わせた場合が80.1%、T1を単独変数とした場合には79.9%であった。さらに、T1とT2を組み合わせた場合は1%水準で、T1を単独に用いた場合は5%水準で% area FT 線維を説明できることが認められた。しかし、T2

Table 4 Results of multiple regression analysis by relaxation time. Criterion variable is % area FT fibers. ( $n = 21$ )

Explanatory variable	R <sup>2</sup>	R	F-Value
X1	X2	(%)	
T1	T2	80.1	0.895 36.31**
T1		79.9	0.894 12.87*
T2		65.8	0.812 0.18

R<sup>2</sup> : Squared multiple correlation coefficient multiplied by 100

R : Multiple correlation coefficient

\*  $p < 0.05$     \*\*  $p < 0.01$

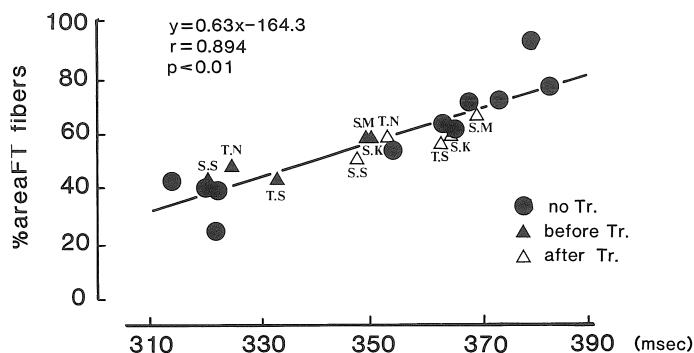


Fig. 4 Relationship longitudinal relaxation time (T1) and muscle fiber composition after strength training.

を単独に用いた場合にはその関係は認められなかった。

## 考 察

我々はこれまでに緩和時間と筋線維組成との間に高い相関関係が認められた理由について2つの仮説を示した<sup>4)</sup>。①緩和時間と含水量は相関する。さらに含水量が多いほど緩和時間が長くなる<sup>11)</sup>、という報告よりFT線維とST線維の含水量は異なり、またその量はFT線維の方が多いであろう。②FT線維とST線維ではATPase活性が異なるため、それぞれの筋線維におけるタンパク質のコンホメーションは異なる。一方、タンパク質のコンホメーションが異なると周りの水の状態(自由水と結合水の割合)も異なる<sup>12),13)</sup>。これらの報告よりATPaseの活性が違うFT線維とST線維では、緩和時間は異なるであろう。

しかしながら、現時点ではこれを確かめることは、筋線維を単離した時点で水の状態が壊れるため不可能である。そこで本研究では、筋力トレーニングによりFT線維を選択的に肥大させ、緩和時間への影響について検討した。

20週間に及ぶ筋力トレーニングによりFT線維面積及び% area FT線維が有意に増加したことは、本研究の狙いどおりFT線維において選択的肥大が起きたことを示している。さらに、筋力トレーニング後のトレーニング群のT1, T2は有意に増加したのに対し、コントロール群では変化が認められなかった。これらの結果より、トレーニング群のT1, T2に有意な延長がみられたのは、主にFT線維肥大による結果であると推察することができる。また、これまで癌組織の緩和時間が延長するという報告<sup>14)</sup>はみられるが、本研究のように正常な組織でしかも安静時の緩和時間が長期間のトレーニングによって変化したという結果は初めてである。

筋力トレーニングによる筋線維の肥大は、主に筋原線維の増加によることが確かめられている<sup>15)</sup>。さらに、5カ月間の筋力トレーニングによる筋への影響について生化学的に検討した報告<sup>16)</sup>によると、トレーニング後安静時のCP(22%)、ATP(18%)、グリコーゲン(66%)レベルの上昇が認められた。これらの報告は、筋力トレーニングによって筋内のタンパク質のコンホメーションに変化がもたらされたことを示唆するものであるため、本研究においてトレーニン

グ前後の緩和時間に変化がみられたのは妥当な結果であると考えられる。

一方, Hazlewood ら<sup>17)</sup> は, カエルの腓腹筋と縫工筋を用いて T2 を測定した結果, 筋内の水の存在状態を次の 3 つに分類している。①タンパク質に束縛されている水 (20%), ②筋原線維や筋小胞体 (65%), ③細胞外液 (15%)。この結果は, 筋原線維および筋小胞体に水が最も多く存在していることを示している。したがって, 本研究において緩和時間が有意に延長したのは, 筋力トレーニングにより筋原線維が増加したため筋原線維内の水の絶対値も増大した可能性が推察される。

16 名の緩和時間と % area FT 線維の関係<sup>4)</sup>に, 筋力トレーニング後の 5 名の値をそれぞれ加えて重回帰分析を行ったところ, T2 単独の変数を除いて % area FT 線維と緩和時間の間に有意な関係が得られた (表 4)。これは, % area FT 線維の変化と緩和時間の変化が対応していることを意味しているものと思われる。

これらの結果は, MRI による緩和時間によって筋線維組成を高い精度で推定できることを示唆している。また, 重回帰分析において, T2 単独変数では筋線維組成を推定するには適さなかったこと, T1, T2 の組合せの変数と T1 単独の変数の寄与率がほぼ同じであったこと, および推定法として実際場面での適用を考慮すると, 筋線維組成を推定する変数としては T1 を単独で用いるのが望ましいと考えられる。

## 結 語

筋力トレーニングによる筋肥大が, 緩和時間と筋線維組成との関係についてどのような影響を及ぼすかについて検討するために, 5 名の被検者に 20 週間の筋力トレーニングを負荷し, トレーニング前後の緩和時間と筋線維組成を測定した。また, 緩和時間の再現性を検討するために,

4 名の被検者に対してトレーニング群と同様な期間をとって 2 回測定した。結果の要約は以下の通りである。

1) 20 週間の筋力トレーニングにより, 筋線維の平均横断面積は有意に増加した。

2) 筋力トレーニング後安静時の T1, T2 は, 有意に延長した。

3) 筋力トレーニングによる速筋線維面積比の変化と緩和時間の変化には一定の傾向が認められた。

MRI による緩和時間は, 筋線維組成を非侵襲的に推定できることが示唆された。したがって, 今後この方法が確立されればスポーツ適性を占う上で有効な方法の一つになると思われる。

## 謝 辞

本研究を遂行するに当たって, 茨城県宗仁会病院, および筑波大学物理学系巨瀬勝美講師より多大な御援助と御助言を頂きました。ここに謹んで感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) D.L. Costill, J. Daniels, W. Exans, et al.: Skeletal muscle enzymes and fiber composition in male and female track athletes. *J. Appl. Physiol.*, 40: 149-154, 1976.
- 2) D.L. Costill, W.J. Fink and M.L. Pollock: Muscle fiber composition and enzyme activities of elite distance runners. *Med. Sci. Sports*, 8: 96-100, 1976.
- 3) 久野譜也, 竹部益世, 勝田茂, 他: 大学サッカー選手の筋線維特性と有気的・無気的能力に関する研究. *Jpn. J. Sports Sci.*, 7: 62-68, 1988.
- 4) S. Kuno, S. Katsuta, T. Inouye et al.: Relationship between relaxation time determined by MRI and muscle fiber composition. *Radiology* 1988. (in press).
- 5) R.A. Meyer, T.R. Brown and M.J. Kushmerick: Phosphorus nuclear magnetic resonance of fast- and slow-twitch muscle. *Am. J. Physiol.*, 248: C 279-C 287, 1985.

- 6) J.D. MacDougall, G.R. Ward, D.G. Sale et al. : Biochemical adaptation of human skeletal muscle to heavy resistance training and immobilization. *J. Appl. Physiol.*, 43 : 700-703, 1977.
- 7) J.D. MacDougall, D.G. Sale, J.R. Moroz et al. : Mitochondrial volume density in human skeletal muscle following heavy resistance training. *Med. Sci. Sports*, 11 : 164-166, 1979.
- 8) J. Bergström : Muscle electrolytes in man. *Scand. J.T. Clin. Lab. Invest.* 14 Suppl. : 68, 11-13, 1962.
- 9) H.A. Padykula and E. Herman : The specificity of the histochemical method for adenosine triphosphatase. *J. Histochem. Cytochem.*, 3 : 170-195, 1955.
- 10) A.B. Novikoff, W. Shin and J. Drucker : Mitochondrial localization of oxidative enzymes ; Staining results with two tetrazolium salts. *J. Biophys. Biochem. Cytol.*, 9 : 47-61, 1961.
- 11) L.A. Saryan, D.P. Hollis, J.S. Economou et al. : Nuclear magnetic resonance studies of cancer. *J. Natl. Cancer Inst.*, 52 : 599-602, 1974.
- 12) 上平恒 : 生体中の水の構造と役割. *化学総説*, 11 : 191-206, 1976.
- 13) 上平恒 : 私信
- 14) R. Damadian : Tumor detection by nuclear magnetic resonance. *Science*, 171 : 1151-1153, 1971.
- 15) C.F. Hazlewood, D.C. Chang, B.L. Nichols et al. : Nuclear magnetic resonance transverse relaxation times of water protons in skeletal muscle. *Biophys. J.*, 14 : 583-606, 1974.

## Effect of Strength training on the relationship between relaxation time determined by MRI and muscle fiber composition

---

Shin-ya Kuno

(Department of Radiology, Institute of Clinical Medicine, University of Tsukuba)

Shigeru Katsuta

(Institute of Health and Sports Science, University of Tsukuba)

Masayoshi Akisada

(Department of Radiology, Institute of Clinical Medicine, University of Tsukuba)

Tamon Inouye

(Institute of Applied Physics, University of Tsukuba)

Izumi Anno

(Department of Radiology, Institute of Clinical Medicine, University of Tsukuba)

Kunihiko Matsumoto

(Department of Radiology, Institute of Clinical Medicine, University of Tsukuba)

---

The effect of muscle hypertrophy resulting from strength training on the relationship between relaxation time determined by MRI and muscle fiber composition was measured in five subjects before and after being subjected to a 20-week period of strength training. The results obtained were as follows :

- 1) Proportion of fast-twitch fibers area of all subjects exhibited a significant increase after 20-week strength training.
- 2) T1 and T2 of water proton at rest were prolonged significantly after strength training.
- 3) It was observed in same correlation between relaxation time and proportion of fast-twitch fibers area before and after strength training.

These results indicate that relaxation time determined by MRI can be used for non-invasive estimation of muscle fiber composition.