

TR 短縮 MR 画像による骨格筋運動負荷の評価

吉岡 大, 新津 守, 阿武 泉, 高橋英幸,
久野 譜也, 松本邦彦, 板井悠二

筑波大学臨床医学系放射線科

はじめに

骨格筋に運動負荷を加えると T_2 強調 MR 画像で信号強度が増加する現象は、Fleckenstein¹⁾をはじめ多くの報告がある。それらの撮像条件では TR (repetition time) を 1000ms から 2500ms と長く設定したものが主であり、spin echo 法では最低でも 1 分半近くの撮像時間を要している。しかも全例運動負荷後を追跡した報告である。一方、運動負荷中の撮像をした研究は、Cohen²⁾が ultra-fast scan で行なった例はあるが、一般の臨床機を用いた研究は報告されていない。

そこで我々は、筋肉の信号強度変化の識別が可能な範囲で TR を可及的に短く設定し、時間分解能を上げて、運動負荷中及び負荷後の安静時の筋肉の MR 画像の撮像を試みた。さらに信号強度と T_2 値を測定し、筋肉の運動負荷時変化の定量的指標となるかを検討した。

対象と方法

安静時の骨格筋の信号強度と T_2 値を TR を変化させて測定した。対象は健康な成人男子 7 人 (19 歳~34 歳) を用いた。撮像装置は SIGNA

Advantage (GE 社, 1.5T) で、四肢用コイルを用い下腿中央部横断面を撮像した。撮像条件は spin echo 法にて TR を 400~3000ms まで変化させ、TE (echo time) を 20, 40, 60, 80ms の 4 エコー、FOV を 20cm, マトリックスを 256×128, 積算回数 1 回, スライス厚を 15mm とした。得られたイメージより TE=80ms での前脛骨筋の信号強度を 8×8mm の ROI (region of interest) で一か所選び測定し、同じ領域における T_2 値を SIGNA に標準装備されているアプリケーションプログラムを使い計算した。

次に、健康な成人男子 8 人 (20 歳~32 歳) に対して運動負荷を行なった。撮像面は下腿中央部横断面とした。撮像条件は TR/TE=600/19, 38, 57, 76ms で積算回数 0.5 回とした以外は上記と同様である。スキャン時間は 51 秒である。

運動方法は、MR 装置ガントリー内にて足尖部に 2kg の砂袋を固定し、1 秒間に 1 回の周期で持続的背屈運動を行なった。運動は 30 秒間持続し、その直後より 51 秒間の撮像を行なった。第 1 回目の撮像終了後再び上記運動を開始し、その後同様に撮像を繰り返した。この運動+撮像を 1 サイクルとし、合計で 7 サイクル施行した。7 サイクル終了後ガントリー内で下肢を安静に保ち、運動負荷時と同じ撮像間隔で 7 回撮像を追加した。

キーワード TR (repetition time), skeletal muscle, T_2 value, signal intensity, MR imaging

結 果

SIGNA のアプリケーションプログラムを使用して計算した健康成人男子 7 人の前脛骨筋の T_2

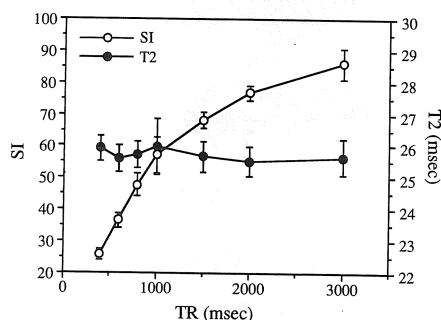


Fig. 1. Signal intensities (SI) & transverse relaxation time (T_2 value) of midcalf anterior compartments versus repetition time (TR). SI at an echo time (TE) of 80 ms increase as a function of TR, but T_2 values remain constant ($n=7$).

値は, TR を 400ms から 3000ms まで変化させたとき平均 25.5ms から 25.9ms であり, ほぼ一定であった (Fig.1).

30 秒間の持続的背屈運動により, 前脛骨筋及び長指伸筋の信号強度のサイクルごとの増加が MR 画像で観察された (Fig.2a). 運動負荷終了後の安静時には, サイクルごとに上記筋群の信号強度は減少したが, 測定終了時でも運動前に比較し信号強度の増加が存在した (Fig.2b). また, 同じ ROI で測定した信号強度 (TR/TE=600/76) と T_2 値の増減は相関を示した (Fig. 2c).

健康成人男子 8 人の安静時 (サイクル 0) の前脛骨筋の T_2 値は 25.6 ± 2.24 ms で, 7 サイクル運動直後 (サイクル 7) は 34.5 ± 1.99 ms となった. 両者の T_2 値には統計的有意差 ($p < 0.005$) が認められた. 運動後安静サイクル後 (サイクル 14) の前脛骨筋の T_2 値は 30.8 ± 1.82 ms

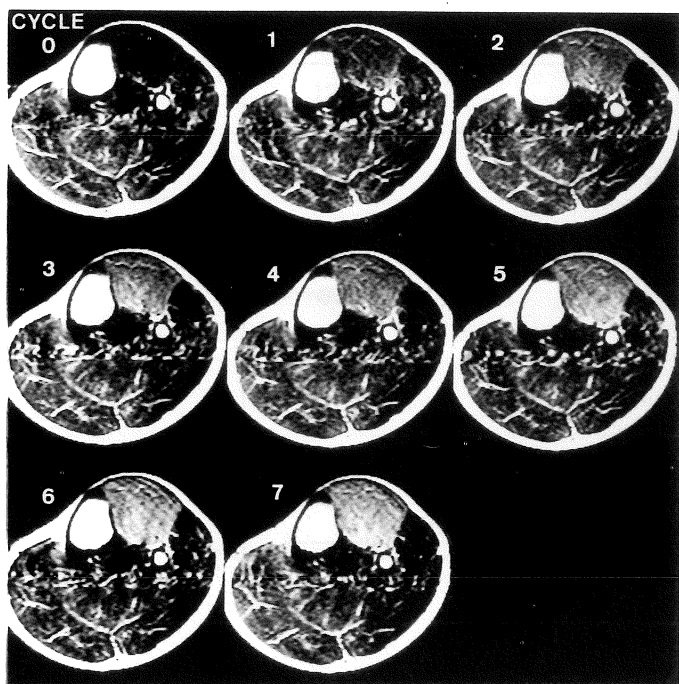


Fig. 2. (a), (b) : Axial MR images of the midcalf before (cycle: $c=0$), during ($c=1\sim7$), and after ($c=8\sim14$) dorsiflexion exercises (TR/TE=600/76) (a) Representative images are shown here of a midcalf muscle before and during dorsiflexion exercises. Seven cycles are performed (starting from top left to bottom right). SI of the tibialis anterior m. and extensor digitorum longus m. increase with prolonged exercises, (b) SI gradually decrease after seven cycles of exercise as shown by the changes in the image (starting from top left to bottom right). (c) Graph of 2a, b versus the number of cycles, SI and T_2 values change in accordance after each cycle.

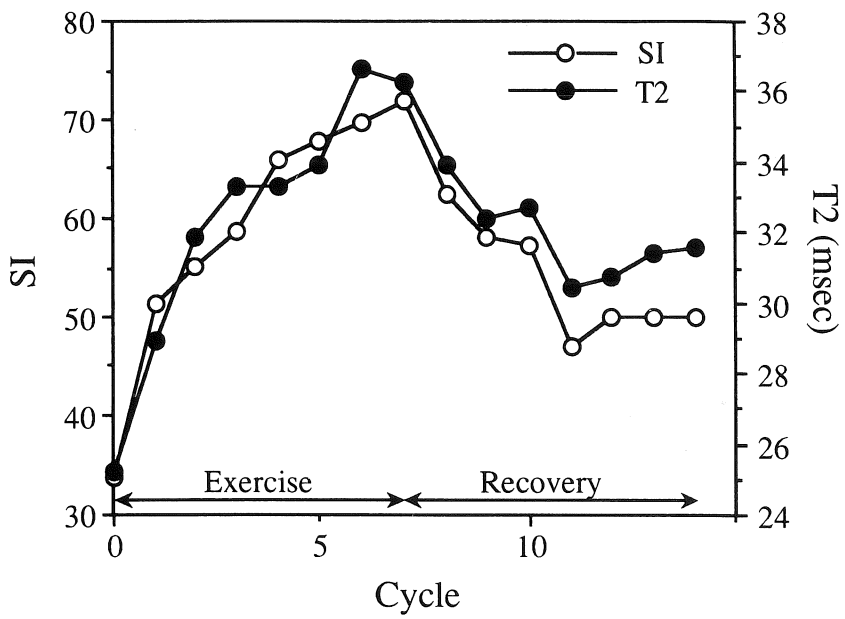
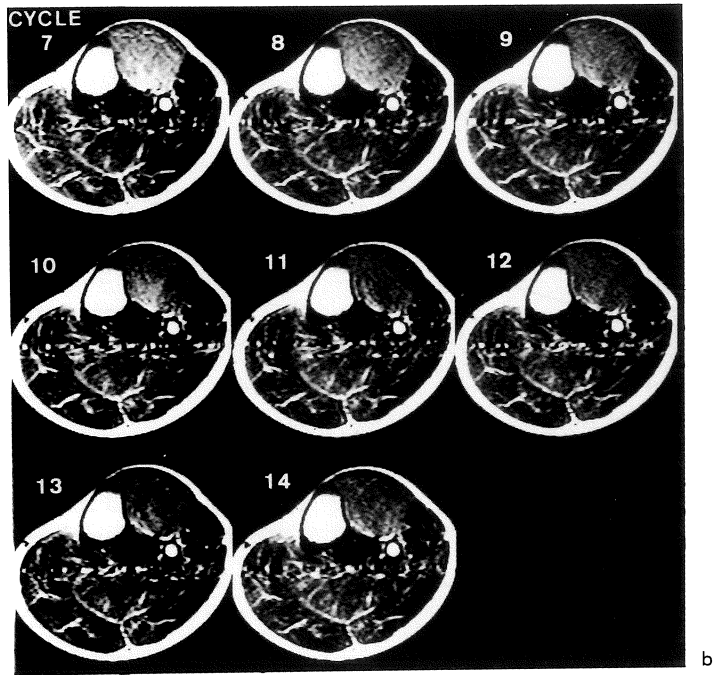


Fig. 2

であった (Fig.3).

また T_2 値測定と同じ ROI を用いての信号強度 (SI) と TE の関係を、縦軸に信号強度の自然対数 ($\ln(SI)$), 横軸に TE をとってグラフにした (Fig.4). 各測定値からの安静時, 7サイクル

運動直後および運動後安静 7 サイクル後のグラフはそれぞれ縦軸切片の値が 6.42, 6.39, 6.36 とほぼ同一の値を示し傾きが異なる直線となった。

考 察

上肢, 下肢を用いた様々な運動により筋肉の信号強度と T_2 値の上昇する現象が多数報告されているが, その原因として筋肉の細胞外液の変化によるという説^{1),3)}が有力である。一方, 運動強度が軽度から中等度の時は細胞外液の増加が最高 100%まで増加するが, 運動強度が最大の時は細胞内液の増加が著しいとの報告⁴⁾もある。Fisher ら⁵⁾は筋細胞内自由水の増加が主な原因であると報告しており, 依然未解決の問題である。

T_2 強調 MR 画像で観察されるこれらの現象は, 信号強度, T_1 値, T_2 値を定量的指標としている。信号強度を指標とする研究は Fleckenstein ら¹⁾がハンドグリップ運動で報告している。彼ら

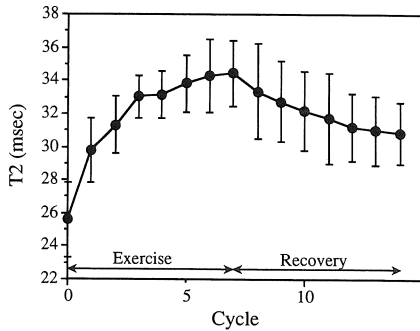


Fig.3. Mean and SD of T_2 values before, during, and after exercises ($n=8$). The mean T_2 values increase with cycles of exercise ($c=1\sim7$) and decrease with rest ($c=8\sim14$). T_2 values don't recover at the same rate as reflected by the curve during rest.

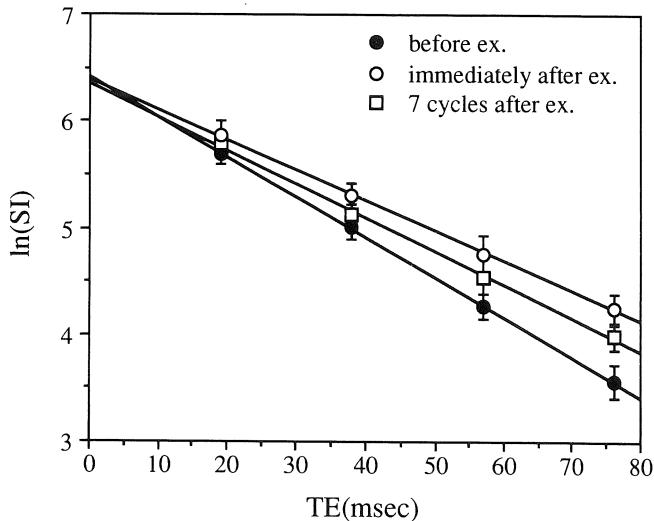


Fig.4

Fig.4. Relationship between $\ln(SI)$ and TE. Intercept and slope values are determined by straight line graphs. The intercept at $TE=0$ is almost the same for before exercise ($c=0$), immediately after exercise ($c=7$), and seven cycles after exercise ($c=14$). There is a significant difference in the slope of the three cycles.

は運動前後で深指屈筋の信号強度増加率を $TR/TE=1000/60ms$ で測定し、50%の増加があったとした。しかし信号強度で筋肉の運動前後を比較する場合、常に TR 、 TE を考慮せねばならない。さらに同一のパルスシーケンスでも磁場の中心からの距離によって信号強度に変動があると言われている。このため骨格筋運動負荷の定量的指標として信号強度を用いることは困難であると思われる。

T_1 値を測定した研究は同様に Fleckenstein¹⁾ が上記ハンドグリップ運動前後で行なっており、深指屈筋の T_1 値増加率は約 100%であると報告している。しかし片山⁶⁾ は運動負荷による T_1 値の変化は少ないとしており、Cohen²⁾ も運動負荷により骨格筋の T_1 値は変化しないと報告している。 T_1 値に関しては運動負荷の定量的指標として統一された見解は得られていない。

これまでに信号強度や T_1 値に比べ骨格筋運動負荷の定量的指標として T_2 値が最も多く用いられている^{1)-3), 5), 7)}。撮像法は、片山⁶⁾ が TR を 766ms に短縮して運動負荷後の浅指屈筋の T_2 値を測定した以外は、 TR を 1000ms から 2000ms と長く設定した T_2 強調 MR 画像である。しかし骨格筋運動負荷の MR 画像の研究では、経時的変化が観察可能な撮像法が望ましく、そのためには短い TR での撮像が必要とされる。

そこで本研究では T_2 値が TR の長さに依存せず、MR 画像から計算される骨格筋の定量的指標となるかを検討した。我々は TR を 400ms から 3000ms まで変化させて前脛骨筋の T_2 値を測定し、 T_2 値の TR 依存性を調べた。結果は T_2 値はほぼ一定の値を示した。したがって、 TR を 600ms に短縮した撮像でも T_2 値の評価が可能と考え、時間分解能に重きをおき運動中、運動後の測定を行なった。

一般に spin echo 法では信号強度 (SI) は $SI=N(H) \exp(-TE/T_2)$ ($N(H)$: プロトン密度及び T_1 値を含む) の式で表される。両辺の自然対数をとると $\ln(SI)$ は TE を変数として傾き $-1/T_2$ の直線となる。我々の測定した 8

人の被験者の運動前後の $\ln(SI)$ と TE をプロットすると、プロトン密度及び T_1 値を反映する縦軸切片値には変化が少なく、 T_2 値の逆数である傾きが変化した直線となった (Fig.4)。これは運動前後で変化する筋肉のパラメータは主に T_2 値であることを示唆する。この結果は Cohen²⁾ が ultra-fast scan で測定した研究結果と一致している。したがって MR 画像上の信号強度の強弱を T_2 値の増減に置き換えて指標とすることができ、筋肉の運動負荷の定量的指標として T_2 値が有用であると言える。

今回の運動様式では撮像時間は 51 秒と短縮されたが、運動を休止している撮像時間中に筋肉の信号強度及び T_2 値の変動が予測され、真の運動中を測定したとは言えない。しかし、信号強度及び T_2 値が運動負荷サイクルごとに増加する過程は、運動による疲労の蓄積と信号強度及び T_2 値との相関を示唆すると思われる。骨格筋の信号強度及び T_2 値の増減の理由には、血流量や筋細胞の代謝能力などの関与の可能性があるが、本研究ではその理由を明らかにするには至っておらず、解明は今後の課題である。

ま と め

筋肉の運動負荷時の MR 画像を TR を短縮 ($TR=600ms$) して撮像した。同手法で従来の T_2 強調 MR 画像で得られた信号強度変化と同様の変化が観察できたとともに、運動中の信号強度の増加過程も観察できた。信号強度の変化は主に T_2 値によるものであり、 T_2 値を筋肉の運動負荷の指標とすることは有用であると言える。

文 献

- 1) Fleckenstein JL, Candy RC, Parkey RW, et al. : Acute effect of exercise on MR imaging of skeletal muscle in normal volunteers. *AJR*, 151 : 231-237, 1988.
- 2) Cohen MS, Shellock F, Kim A, et al. : Acute muscle T_2 changes during exercise. *Society of magnetic resonance in medicine abstr*, Voll : 107,

- 1991.
- 3) de Kerviler E, Leroy-Willing A, Jehenson P, et al. : Exercise-induced muscle modifications : study of healthy subjects and patients with metabolic myopathies with MR imaging and P-31 spectroscopy. Radiology, 181 : 259-264, 1991.
 - 4) Sjøgaard G, Saltin B et al. : Extra-and intracellular water spaces in muscles of man at rest and dynamic exercise. Am. J. Physiol, 243 : R271-R280, 1982.
 - 5) Fisher MJ, Meyer RA, Adams GR et al. : Direct relationship between proton T₂ and exercise intensity in skeletal muscle MR images. Invest. Radiol, 25 : 480-485, 1990.
 - 6) 片山憲史, 越智秀樹, 池内隆治, 他 : 運動負荷における³¹P-MRS と¹H-MRI の関係—特に運動後の筋硬結と¹H-MRI—. 全日本鍼灸学会誌, 41 巻 2 号 : 254-257, 1991.
 - 7) Shellock FG, Fukunaga T, Mink JH et al. : Acute effect of exercise on MR imaging of skeletal muscle : concentric vs eccentric actions. AJR, 156: 765-768, 1991.

Evaluation of Skeletal Muscle during Exercise on Short Repetition Time MR Imaging

Hiroshi YOSHIOKA, Mamoru NIITSU, Izumi ANNO,
Hideyuki TAKAHASHI, Shin-ya KUNO, Kunihiko MATSUMOTO,
Yuji ITAI

*Department of Radiology, Institute of Clinical Medicine,
University of Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki 305*

There have been many reports on the effects of exercise on skeletal muscle signal intensities based on Magnetic resonance (MR) imaging. These images were obtained using T₂-weighted MR images. The purpose of this study was to observe muscles during exercise while shortening the repetition time (TR) on spin echo images. In addition, inactive and active muscles were differentiated in the same manner.

T₂ values of the tibialis anterior m. were calculated from TR=400ms to TR=3000ms. These values were mostly constant and didn't depend upon TR. Increases in signal intensities of the exercise muscles could be observed on the short TR (600ms) MR images since the changes of the signal intensities mainly depend upon T₂ values. Thus, the T₂ value is useful as a quantitative index to assess the exercise muscle even on the short TR MR images.