

# MR 装置内における大腿四頭筋の漸増負荷運動装置の 開発と筋エネルギー代謝測定におけるその有用性

高橋英幸<sup>1</sup>, 阿武 泉<sup>1</sup>, 新津 守<sup>1</sup>, 吉岡 大<sup>1</sup>,  
久野譜也<sup>2</sup>, 勝田 茂<sup>3</sup>, 板井悠二<sup>1</sup>

<sup>1</sup>筑波大学臨床医学系放射線科  
<sup>3</sup>筑波大学体育科学系

<sup>2</sup>東京大学教養部保健体育科

## はじめに

これまで多くの研究において、<sup>31</sup>P NMR を用いた運動中の骨格筋エネルギー代謝の測定が行われてきているが、MR 装置のボア径の狭さに制限され、ほとんどの研究の被検筋としては前腕<sup>1),2)</sup>や下腿<sup>1),3),4)</sup>の筋が用いられている。しかしながら、スポーツ医学の立場に立った場合、すべての運動の基礎となる走動作の主働筋である大腿四頭筋の特性を知ることは興味深い。また、侵襲的に筋の特性を調べる方法としてニードルバイオプシー法が用いられてきているが、この方法は一般的に大筋群を対象とするため、前腕の筋などに対して施行するのは困難であり、事実、外側広筋を対象とした研究が多い。したがって、これらの侵襲的な手法によって得られたデータと<sup>31</sup>P NMR によるデータとの比較を行うためにも、MR 装置内での大腿四頭筋のエネルギー代謝測定を可能にする必要性が提起される。

そこで今回我々は、簡便でありながらも、MR 装置内で大腿四頭筋の局所的な運動を可能とする装置を開発し、その装置を用いて運動中の筋

エネルギー代謝の変化を捉えることができたのでその結果を報告する。

## 実験方法

### 1) 運動負荷装置

負荷装置はすべて木材、アクリル、鉛、ステンレスなどの非磁性体により構成されている。Fig.1 にその全体像を示した。被検者はベッドの上に取り付けた木製の台上に膝を屈曲した状態（伸展位より約 60 度）で仰臥位となり、負荷をかけるためのロープを接続したサポーターを足首に装着する。難伸長性の素材でできたロープは、台の下に作られた溝を通り、ボア外に設置された負荷装置へ達する。負荷となる重りは鉛製であり、その数を増やすことにより漸増負荷運動が可能である。被検者が下腿部を挙上する、すなわち、膝の伸展運動を行うことにより、大腿四頭筋の収縮が引き起こされる。重りの移動距離は 10 cm である。以上のように、本装置は負荷量とその移動距離を規定できるので、定量的運動を行わせることが可能である。

### 2) 被検者

キーワード <sup>31</sup>P NMR, quadriceps muscle, exercise

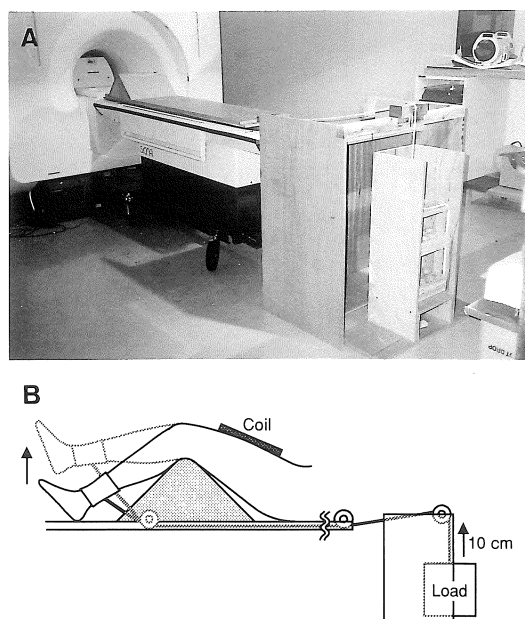


Fig.1. View of the incremental load exercise device (A) and scheme of the exercise form (B) used for study.

被検者は健康な成人男性5名〔平均年齢 $31.8 \pm 7.4$  (SD) 歳〕である。実験前に本実験の主旨を文書において説明し、実験参加の同意を得た。

### 3) 運動方法および $^{31}\text{P}$ NMR 測定

運動は上述した装置を用いた MR 装置内での漸増負荷運動であった。負荷は最初の3分間は4 kg とし、以後1分毎に2 kg の割合で漸増させ、与えられた負荷で運動を1分間継続できなくなるまで行わせた。膝伸展の頻度は40回/分であった。使用したMR装置はSIGNA Advantage(1.5T, General Electric 社製) である。 $^{31}\text{P}$  NMR の測定は3.5インチのサーフェイスコイルを用いた。まず、プロトン ( $^1\text{H}$ ) 用のコイルを大腿直筋を中心として大腿四頭筋上に装着してシミングを行い、磁場均一性を最適状態へと調節した。次に、リン ( $^{31}\text{P}$ ) 用のコイルを同部位に装着し、スペクトル幅4,000 Hz、データ

ポイント1,024、そして、データ収集の時間分解能を上げるために繰り返し時間2秒、積算4回の条件で測定を行い、1つのスペクトルを得るための時間は約30秒であった。スペクトル収集は、運動時は各負荷の1分間の後半30秒間に行い、回復中は最初の5分間は連続的に、その後5分間は1分ごとに行った。得られたスペクトルより、クレアチンリン酸 (PCr)、無機リン酸 (Pi) のピークの面積を算出し、さらに PCr に対する Pi のケミカルシフト値より筋細胞内 pH を算出した<sup>2)</sup>。また、運動中および回復中に指尖より脈拍数を測定し、血中乳酸濃度を測定するために正中静脈より採血を行った。さらに、運動中には10を最大とした大腿部の主観的運動強度 (rate of perceived exertion: RPE) の記録も行った。

### 実験結果および考察

Fig.2 に1人の被検者の安静時、運動中および回復中のスペクトルを示した。運動中の PCr が徐々に減少するとともに Pi が増加する変化、そして運動後には素速く逆の変化が生じていることがノイズの少ないスペクトルとして捉えられていることがわかる。今回開発された装置では、大腿部が固定されているのでコイルの移動が少なく、また、水平 (z 軸) 方向に対するコイルの傾きも20度以内に抑えられているため、十分な信号を得ることができていると考えられる。

疲労困憊までの運動時間の平均は $11.8 \pm 1.3$  分であり、運動終了時の負荷は $21.6 \pm 2.6$  kg であった。Table 1 に安静時と運動終了時のそれぞれの測定項目の平均値を示した。脈拍数は有意 ( $P < 0.01$ ) な増加を示したが、運動終了時の値の範囲は102~156 beats/min と個人差が大きかった。RPE も徐々に上昇し、運動終了時には5人中3人が最大の10を示した。PCr/(PCr + Pi) および細胞内 pH は有意 ( $P < 0.01$ ) な低

1993年12月6日受理 1994年4月25日改訂

別刷請求先 〒305 茨城県つくば市天王台1-1-1 筑波大学臨床医学系放射線科 高橋英幸

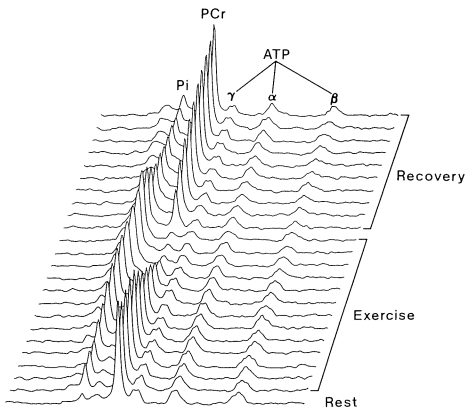


Fig.2. <sup>31</sup>P NMR spectra at rest, during incremental load exercise (13min) and recovery (5 min) in one subject. Pi, inorganic phosphate ; PCr, phosphocreatine ; ATP, adenosine triphosphate.

下を示した。血中乳酸濃度は、有意ではなかったが運動終了時に増加する傾向が認められ、運動終了後にさらに増加した。局所的な運動であり、正中静脈から採血しているのにもかかわらず、回復期にみられた各個人の最大値の平均は  $3.1 \pm 1.1$  mmol/l という高値を示した。以上のことから、本研究で行われた運動により、多量の乳酸の産生と蓄積を伴う大腿四頭筋の局所的な疲労がもたらされたことが示唆された。

今回開発した装置は負荷量と運動頻度を任意に変えられる点の一つの特徴である。子供や高齢者と20歳代や30歳代の一般成人の筋エネルギー代謝を比較しようとした場合、前者は後者と比べて絶対的な筋量が少ないため、同じ絶対負荷を与えたのでは相対的に大きな負荷となり、運動時間や負荷量を基準とした単純な比較を行うことが困難となる。さらに、循環障害などに起因する筋疾患を持った患者などを対象とする場合にも同様なことがあてはまる。したがって、自発的的最大筋力や筋横断面積に対する相対的な負荷を与えることが必要となり、時には、非常に低強度の負荷を与えなければならない場合も

Table 1. Mean Value of Each Parameter at Rest and the End of Exercise

	rest	end-exercise
Heart rate (beats/min)	74.8±4.4	124.6±22.1**
RPE	—	9.6±0.5
PCr/(PCr+Pi)	0.90±0.02	0.16±0.07**
Intracellular pH	7.02±0.07	6.44±0.14**
Blood lactate (mmol/l)	0.9±0.3	1.7±0.8

RPE, rate of perceived exertion (max=10) ;  
PCr, phosphocreatine ; Pi, inorganic phosphate.  
Values are means±SD. \*\*P<0.01

あるであろう。本装置はこのような様々な状況に応じた負荷量の変化を可能にしている。また、これまでの前腕<sup>1),2)</sup>や下腿<sup>1),3),4)</sup>の筋を用いた運動では、筋の絶対量が少ないため、動員された筋の呼吸応答の変化を呼気レベルにおいて観察することはほとんど不可能であった。したがって、<sup>31</sup>P NMR のデータと筋組織における呼吸応答の変化との直接的比較ができず、別の機会に自転車エルゴメーターなどを用いて測定された酸素摂取量などとの比較に限定されていた<sup>5)</sup>。一方、大筋群である大腿四頭筋を対象とした我々の運動様式では、漸増負荷運動中の<sup>31</sup>P NMR の測定と呼気収集を同時に行うことにより、大腿四頭筋における呼吸応答と筋エネルギー代謝の変化との直接的な比較が可能となり（未発表データ）、さらに、バイオプシー法によって測定された筋線維組成や生化学的分析による酸化系および解糖系酵素活性との比較もより容易となった<sup>6)</sup>。

以上のように、本研究で開発された漸増負荷運動装置により大腿四頭筋のエネルギー代謝測定が可能であることが示された。本装置は簡便であり、なおかつ、子供から高齢者、さらに筋疾患患者などの幅広い対象者への応用が可能であり、スポーツ医学や臨床の場において有用であると考えられる。

文 献

- 1) Chance B, Sapega A, Sokolow D, et al. : Fatigue in retrospect and prospect :  $^{31}\text{P}$  NMR studies of exercise performance, in *Biochemistry of Exercise*, Vol. 13, ed. by Knuttgen HG, Vogel JA, Poortmans J. Human Kinetics, Champaign, IL, 1983. pp895-pp908.
- 2) Taylor DJ, Bore PJ, Styles P, Gadian DG, Radda GK : Bioenergetics of intact human muscle : A  $^{31}\text{P}$  nuclear magnetic resonance study. *Mol Biol Med*, 1 : 77-94, 1983.
- 3) Achten E, Van Cauteren M, Willem R, et al. :  $^{31}\text{P}$ -NMR spectroscopy and the metabolic properties of different muscle fibers. *J Appl Physiol*, 68 : 644-649, 1990.
- 4) Quistorff B, Nielsen S, Thomsen C, Jensen KE, Henriksen O : A simple calf muscle ergometer for use in a standard whole-body MR scanner. *Magn Reson Med*, 13 : 444-449, 1990.
- 5) McCully KK, Fielding RA, Evans EJ, Leigh JS Jr, Posner JD : Relationships between in vivo and in vitro measurements of metabolism in young and old human calf muscles. *J Appl Physiol*, 75 : 813-819, 1993.
- 6) 高橋英幸, 久野譜也, 吉岡 大, 他 :  $^{31}\text{P}$  NMR および MRI を用いた骨格筋線維組成の推定. *日磁医誌*, 13 (Suppl.) : 207, 1993.

**Development and Availability of an Incremental Load Exercise Device to Study Energy Metabolism in the Human Quadriceps Muscle inside a MR Magnet**

Hideyuki TAKAHASHI<sup>1</sup>, Izumi ANNO<sup>1</sup>, Mamoru NIITSU<sup>1</sup>,  
Hiroshi YOSHIOKA<sup>1</sup>, Shin-ya KUNO<sup>2</sup>, Shigeru KATSUTA<sup>3</sup>,  
Yuji ITAI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Department of Radiology, Institute of Clinical Medicine, University of Tsukuba  
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305*

<sup>2</sup>*Department of Sports Sciences, College of Arts and Sciences, University of Tokyo*

<sup>3</sup>*Institute of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba*

To measure the energetics of human quadriceps muscle during exercise by phosphorus nuclear magnetic resonance spectroscopy ( $^{31}\text{P}$  NMR), we developed a device which allows knee extension exercise to be performed with an incremental load inside a whole body MR magnet. All parts of this device were made from nonmagnetic materials. Using this, five male volunteers performed the exercise to exhaustion. Heart rate and rate of perceived exertion had markedly increased at the end-exercise compared to those at rest. Moreover, the ratio of phosphocreatine (PCr) to PCr + inorganic phosphate and intracellular pH decreased significantly ( $0.90 \pm 0.02$  to  $0.16 \pm 0.07$ ,  $P < 0.01$  and  $7.02 \pm 0.07$  to  $6.44 \pm 0.14$ ,  $P < 0.01$ , respectively). Although there was no difference between blood lactate concentration measured in samples from the median vein at end-exercise and those drawn at rest, the concentration increased significantly to  $3.1 \pm 1.1 \text{ mmol/l}$  during the recovery phase ( $P < 0.05$ ). Thus, the device in this study can induce local fatigue in the quadriceps muscle and allows comparative energetics measurement by  $^{31}\text{P}$  NMR and respiratory response, or analysis of fiber type composition and enzyme activity determined by biopsy technique.