

## 他動的荷重負荷運動における筋酸素消費量の変化

白石 聖<sup>1</sup> 浜岡 隆文<sup>1,2</sup> 木目良太郎<sup>1</sup> 市村 志朗<sup>1</sup> 村瀬 訓生<sup>1</sup>  
長田 卓也<sup>1</sup> 小澤 尚久<sup>3</sup> 四宮 葉一<sup>3</sup> 勝村 俊仁<sup>1</sup>

**要 旨**：生活習慣病の予防や治療を目的として、ウォーキングやジョギング等の有酸素運動を行うことが推奨されている。しかし生活習慣病とともに変形性膝関節症に罹患している患者も多く、運動を実行することが困難なケースも報告されている。そこでわれわれは膝関節の疼痛を抑制しながら運動が行えるように、半荷重状態で膝関節の動きを伴うことなく下肢の等尺性収縮運動を誘発する機器を試作し、その使用が下肢の筋有酸素代謝におよぼす影響について検討した。この機器による他動的荷重運動を15分間(5分×3回)行わせたと、大腿四頭筋の筋酸素消費量は大腿直筋と外側広筋において安静時の約2倍に増加した。この結果から膝関節痛を有する患者でも簡易に運動を実施でき、大腿四頭筋の筋有酸素代謝を増加させる可能性が示された。

(J Jpn Coll Angiol, 2005, 45: 93-96)

Key words: passive weight-bearing exercise, isometric exercise, exercise therapy, near-infrared spectroscopy

### 背 景

生活習慣病の改善においては、食事療法とともに身体活動量の増加が重要とされている。具体的には、ウォーキングやジョギングまたは自転車エルゴメータなどのような持続的運動が推奨されている。しかし、時間的要因や、動機づけの低下などにより、運動の実行や継続が困難なのが現状である。とりわけ中高年層では、生活習慣病の罹患率が高いにもかかわらず身体的運動制限要因も多くなり、同年齢層の女性ではその半数以上が変形性膝関節症に罹患しているとの報告<sup>1)</sup>がある。

変形性膝関節症などの有痛性疾患では、日常の運動量の低下から、体重の増加や関節の支持機構である筋の萎縮と筋力の低下を引き起こし、関節の安定性が低下し、さらには運動量が低下するという悪循環に陥ると考えられる。

四宮ら<sup>2)</sup>は、これまで運動制限要因を可能な限り排除して運動を行うことを目的として、下肢への荷重を伴わずにシートにまたがってバランスをとるだけで腰背部を中心とした筋収縮を誘発させる機器を開発してきた。また、その機器の使用によりインスリン抵抗性や下肢筋における糖取り込み能<sup>3)</sup>が改善することをすでに報告している。生活習慣病の予防や改善のための運動として歩行やウォーキングが推奨されているが、このような有酸素運動が困難な患者に対しても、疼痛を伴わない方法で運動を実施できれば、日常の身体活動量を増加させることが可能となる。

そこで、膝関節痛によりウォーキングやジョギング等の運動が困難な患者に対しても身体活動量を増加させるために、下肢への他動的荷重負荷と膝関節の可動運動を制限することで運動に伴う膝関節痛を伴わずに筋収縮を誘発できる機器を試作した<sup>3)</sup>。本研究では、この機器を利用した他動的誘発運動時における大腿四頭筋群の筋酸素消費量( $\text{muscle } \dot{V}O_2$ )変化について検討することを目的とした。

<sup>1</sup>東京医科大学衛生学公衆衛生学教室

<sup>2</sup>鹿屋体育大学総合健康運動科学系

<sup>3</sup>松下電工株式会社先行・融合技術研究所

2004年4月2日受付 2005年1月21日受理

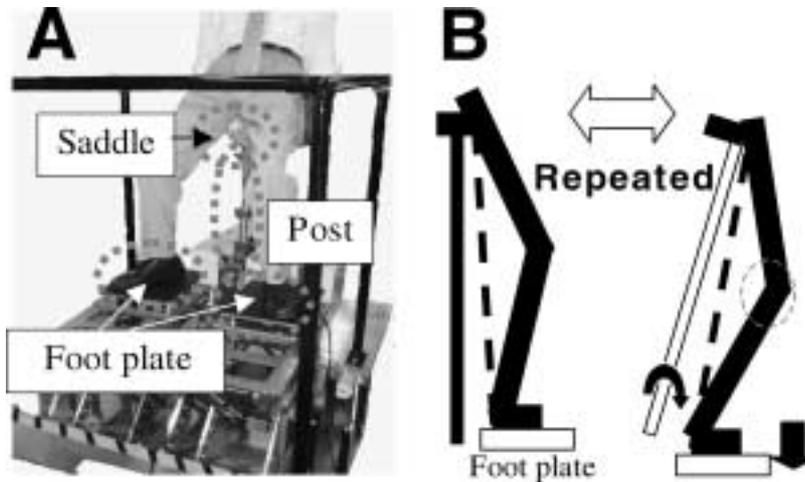


Figure 1 Components and movement of the passive weight-bearing exercise.

## 対象と方法

### 1. 対象

被験者は健康で下肢に障害のない成人男性 5 名で、年齢、身長、体重はそれぞれ  $34 \pm 4$  歳 (平均値  $\pm$  標準偏差),  $170.4 \pm 6$  cm,  $71.4 \pm 9.2$  kg であった。被験者には研究の内容について十分に説明を行い、実験への参加の同意を得た。

### 2. 運動プロトコール

Fig. 1 は本機器の外観 (A) と側方から見たサドルと下肢の模式図 (B) である。本機器は被験者が腰掛けるサドル、それを支える支柱および左右それぞれの下肢を支えるために支柱の斜め前方に配置された 2 つのフットプレートから構成されている。被験者に半荷重の状態での運動を行わせるために、膝関節の屈曲角度を  $40^\circ$  に保つようにサドルの高さを調節して腰掛けさせた。このことにより、被験者の体重はサドルと左右の足の 3 点で支持されることになる。

本機器の動作は、被験者を支えるサドルの支柱が被験者の斜め前方 (被験者正面から左右にそれぞれ  $30^\circ$ ) に向かって  $5^\circ$  傾倒するように設定されている。さらに、本機器は運動中の膝関節の動きに伴う疼痛を抑制することを目的として試作されているので、支柱の傾倒と同時にフットプレートが下降するように制御されている。これにより、サドルからフットプレートまでの距離が一定となり、膝関節角度を保持したまま運動する

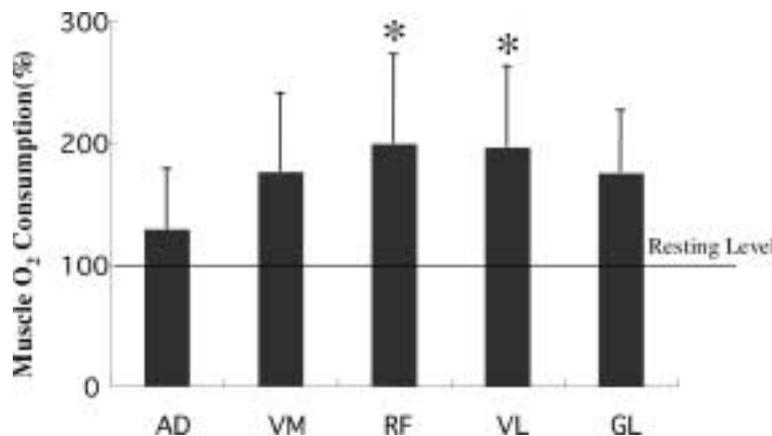
ことを可能にしている (Fig. 1B)。

被験者は左右交互に繰り返される支柱の傾倒によって重心の移動に対して、バランスを保つために支柱の傾倒側の下肢により大きな荷重がかかる。このときの足底にかかる荷重をフットプレートに装着した圧トランスデューサーを介して被験者に視覚的にフィードバックして、荷重が体重の 40% になるよう指示した。なお、傾倒の周期は左右交互にそれぞれ 1 秒間に 1 回とし、この運動を合計 15 分間 3 回にわけて行った。

### 3. muscle $\dot{V}O_2$ の評価

近赤外線分光法 (NIRS) (OMRON 社製 HEO-200) を用いて、右脚の内転筋 (AD)、内側広筋 (VM)、大腿直筋 (RF)、外側広筋 (VL) および腓腹筋外側頭 (LG) の筋酸素動態を測定した。プローブの送受光間距離は 3 cm とし、被験筋の走行に沿ってそれぞれの筋腹中央部に固定した。

運動前後の muscle  $\dot{V}O_2$  は、動脈血流遮断時に得られる酸素化ヘモグロビン/ミオグロビン (Hb/MbO<sub>2</sub>) の低下率の変化から算出した<sup>4)</sup>。15 分間の安静の後に 2 分間の動脈血流遮断を 3 回行い、その平均値を安静値として採用した。その後、他動的誘発運動を 5 分間行い、その運動直後に動脈血流遮断を行って muscle  $\dot{V}O_2$  を計測した。なお、この運動試技は 2 分間のインターバルを挟んで合計 3 回行い、運動後の muscle  $\dot{V}O_2$  はその平均値を採用した。運動後の muscle  $\dot{V}O_2$  の評価は、安静時に対する運動後の Hb/MbO<sub>2</sub> 低下率の比から相対的に行った。



**Figure 2** Muscle  $\dot{V}O_2$  after passive weight-bearing exercise. Values are mean  $\pm$  SD. AD: adductor, VM: vastus medialis, RF: rectus femoris, VL: vastus lateralis, GL: gastrocnemius (lateral). \* $p < 0.05$

#### 4. 統計処理

測定値はすべて平均 $\pm$ 標準偏差で示した。各筋における運動前後の差の検定には対応のあるt検定を用いた。危険率5%未満を有意とした。

### 結 果

おのおのの筋における他動的運動後のmuscle $\dot{V}O_2$ をFig. 2に示した。安静値と比較して運動後における大腿部のmuscle $\dot{V}O_2$ はAD 129.2 $\pm$ 49.6%, VM 176.3 $\pm$ 64.7%, RF 199.4 $\pm$ 73.4%, VL 196.6 $\pm$ 66.6%であり、RFおよびVLにおいて、muscle $\dot{V}O_2$ が運動後において有意( $p < 0.05$ )に増加を示した。また、下部のGLでは、安静値と比較して運動後が175.3 $\pm$ 51.3%であったが有意な差は認められなかった。

### 考 察

膝関節の動きを伴わずに大腿部の筋収縮を誘発させる他動的荷重運動負荷器を試作し、その運動による大腿筋群のmuscle $\dot{V}O_2$ は安静時の約1.3~2倍に増加した。今回使用した運動機器は、膝関節の動きを制限し、それに伴う疼痛を減少させること、さらに変形性膝関節症患者が本機器に着座するだけで他動的に下肢の筋収縮を誘発させ、身体活動を向上させることを目的に試作された。現在行われているウォーキングや自転車エルゴメータを用いた運動療法の多くは能動的な運動であり、運動の継続には患者の自発的な努力を必要とする。しかし本機器は他動的に行う運動であるため、運動を継続するための動機づけに欠ける患者が日常生活

の中で容易に利用し継続できることが考えられる。

運動強度に関して、今回の実験では脚への荷重負荷が左右それぞれ体重の40%程度かかるように規定し、サドルの傾倒頻度を1Hzに設定したが、予備実験において、40%の負荷で0.33Hzの傾倒頻度で運動を行った際のmuscle $\dot{V}O_2$ は有意な増加を認めなかった。一方、小澤ら<sup>5)</sup>は同様の装置を用いて、体重の48%負荷で1.6Hzの運動を行わせた結果、大腿四頭筋のmuscle $\dot{V}O_2$ が4倍程度まで増加したことを報告している。したがって、他動的に誘発された筋収縮においてもその負荷の強度や傾倒頻度を増加させることによりmuscle $\dot{V}O_2$ も増加すると考えられる。

四宮ら<sup>2)</sup>は、変形性膝関節症患者に対して、本機器による他動的運動と階段の下降および歩行などの能動的運動を行わせ、各運動直後の疼痛を主観的評価法であるFace Pain Scaleを用いて比較した。その結果、本機器による他動的運動に伴う主観的疼痛が最も低いことを示している。他動的運動による膝関節痛の発現レベルとmuscle $\dot{V}O_2$ の関係については今後の検討課題であるが、障害の程度などを考慮して負荷強度や傾倒頻度の設定を検討していく必要がある。

本機器による他動的運動は、膝関節を固定した状態での運動なので大腿部を中心とした筋の収縮様式は間欠的等尺性の収縮であったと考えられる。大腿四頭筋の等尺性収縮運動は膝関節周辺の疾病後のリハビリテーションとしてすでに広く応用されている<sup>6)</sup>。しかし、これらの運動は通常座位で行われ、下肢への荷重はかからない。一方、本機器での運動は半荷重の状態

で行うので、下肢へのメカニカルストレスを与えることができる。骨へのメカニカルストレスが骨芽細胞の形成にとって重要な因子であること<sup>7)</sup>を考慮すると、荷重と頻度を患者の症状に応じて負荷することが可能な本機器による運動は、筋や骨の萎縮を伴う骨粗鬆症や、長期臥床後のリハビリテーションに有効な手段であると考えられる。

本研究から全身の代謝がどの程度亢進したかを示すことはできなかったが、今後、生活習慣病や骨代謝疾患患者を対象とした実験を行い、本機器の使用がその改善に寄与するかを検討していく必要があると考えている。

## 文 献

- 1) 森下嗣威：高齢者の変形性膝関節症に関する有病率，増悪因子及び日常生活動作に対する影響に関する疫学的研究．中部日本整形外科災害外科学会雑誌，1997，40：11-19.
- 2) 四宮葉一，関根 修，中島了治他：乗馬療法機器の開発と筋力トレーニングの効果の検証．日本バーチャルリアリティー学会誌，2001，6：197-202.
- 3) 梶岡多恵子，長崎 大，北村伊都子他：乗馬運動器具を用いた軽運動の糖尿病患者に対する運動療法としての有用性についての検討．体力科学，2003，52：932.
- 4) Hamaoka T, Iwane H, Shimomitsu T et al: Noninvasive measures of oxidative metabolism on working human muscles by near-infrared spectroscopy. J Appl Physiol, 1996, 81: 1410-1417.
- 5) 小澤尚久，四宮葉一，越智和弘他：簡易型の他動的自動運動誘発機器の開発 - 膝を痛めずに糖代謝効果を簡単に誘発するシステム - . 生体医工学，2004( in Press )
- 6) 渡辺景太，入江一憲，戸松泰介：変形性膝関節症における膝伸展筋力の経時的変化とその意義．臨床スポーツ医学，2002，19：65-69.
- 7) Hughes-Fulford M: The role of signaling pathways in osteoblast gravity perception. J Gravit Physiol, 2002, 9: 257-260.

## Passive Weight-bearing Exercise Enhances Oxygen Consumption of the Quadriceps Femoris

Kiyoshi Shiroishi,<sup>1</sup> Takafumi Hamaoka,<sup>1,2</sup> Ryotaro Kime,<sup>1</sup> Shiro Ichimura,<sup>1</sup> Norio Murase,<sup>1</sup> Takuya Osada,<sup>1</sup> Takahisa Ozawa,<sup>3</sup> Youichi Shinomiya,<sup>3</sup> and Toshihito Katsumura<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Preventive Medicine and Public Health, Tokyo Medical University, Tokyo, Japan

<sup>2</sup>National Institute of Fitness and Sports in Kanoya, Kagoshima, Japan

<sup>3</sup>Advanced Technologies Fusion Laboratory, Matsushita Electric Works, Ltd., Osaka, Japan

**Key words:** passive weight-bearing exercise, isometric exercise, exercise therapy, near-infrared spectroscopy

We developed a passive exercise training device with which a person with knee joint pain could easily perform semi-weight bearing exercise. We examined leg muscle oxidative metabolism using near-infrared spectroscopy (NIRS) immediately after the exercise. With six subjects participating in this study, each subject sat on a saddle that was designed to alternately keep each knee joint stationary and bent. This allows the subject's center of gravity to repeatedly move from hip to foot and foot to hip at 2 Hz. The partial weight-bearing pressure on each foot was monitored by pressure sensors set onto foot plates. The exercise was performed at 40% of the subject's weight for 3 sets of 5 minutes each. Immediately after the exercise, muscle oxygen consumption in quadriceps muscles was measured using NIRS. Muscle  $\dot{V}O_2$  after the exercise was significantly higher than that at rest in the rectus femoris ( $199.4 \pm 73.4\%$  of the resting value) and the vastus lateralis ( $196.6 \pm 66.6\%$ ). These results suggest that leg muscle oxidative metabolism increased by using this weight-bearing passive exercise device, and that this device would be helpful for people with leg pain who need exercise, to control their weight and/or improve their quality of life. (J Jpn Coll Angiol, 2005, 45: 93-96)