

筋エネルギー代謝系への 負荷を基準とした運動処方の開発

鹿屋体育大学 浜岡隆文
(共同研究者) 東京医科大学 勝村俊仁
同 長田卓也
同 木目良太郎
同 黒澤裕子

Development of Exercise Prescription Determined by Load to Muscle Energy Metabolism

by

Takafumi Hamaoka

National Institute of Fitness and Sports in Kanoya

Toshihito Katsumura, Takuya Osada, Ryotaro Kime, and Yuko Kurosawa

Tokyo Medical University

ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate the effects of exercise prescription determined by energetic stress elicited to working forearm muscle on endurance performance and oxidative metabolism.

Seven healthy male volunteers participated in the study performed two different types of dynamic grip training either right or left arm: one (INT-30) at 30% maximum voluntary contraction, one contraction every second, 5 times a week for 6 weeks and the other (INT-T) at the intensity determined by the change in muscle pH during incremental exercise test. INT-T and INT-30 improved endurance exercise performance by 22.2% and 23.9%, respectively. INT-T reduced the decrease in muscle

pH after training.

This result suggests that INT-T training may create greater improvement in endurance performance in submaximal exercise by reducing muscle acidosis.

要 旨

本研究では、漸増グリップ運動負荷中の筋エネルギー代謝の変化を基にした運動処方を考案し、そのトレーニング効果を、これまで行われてきた局所持久トレーニングの効果と比較した。健常男性7名を対象とし、片側前腕に対しては従来の最大随意収縮力の30%強度の動的運動トレーニング (INT-30) を、他側は、漸増グリップ運動負荷中の筋pHを基に決定した強度でのトレーニング (INT-T) を、週5回、6週間行わせた。その結果、INT-TおよびINT-30共に、トレーニング後に持久パフォーマンスの向上（それぞれ22.2%、23.9%）が観察された。また、INT-Tにおいては、漸増運動負荷中の筋pHの低下が抑制された。以上の結果から、INT-Tは筋内のアシドーシスを抑制することにより、最大下運動時の持久運動パフォーマンスを向上させる可能性が示唆された。

緒 言

これまで、局所持久運動トレーニングの強度は、筋力または筋持久力を基に決定されており、一般に、最大随意収縮力 (MVC) の30%程度の強度が用いられてきた^{1,2)}。しかし、トレーニング効果を得るためには、能力の高い者に対しては比較的高強度の負荷が必要であり、能力の低い者は低強度の負荷であってもその効果が期待できる。つまり、筋有酸素エネルギー系の能力が運動処方を行う際の強度に深く関連する。

全身運動においては、呼気ガス分析法などにより筋代謝を予想できるが、局所活動筋の代謝評価は呼気ガス分析では困難である。そこで本研究に

おいては、非侵襲的筋代謝測定法であるリン³¹-磁気共鳴分光法 (³¹P-MRS)、近赤外分光法 (NIRS)、超音波法 (US) を活用することとした。本研究では、前腕筋をモデルとして、「負荷に対する筋エネルギー代謝系の応答、とくに筋pHの違いが、筋有酸素能力の異なる各人のトレーニング強度の決定に役立つ」との仮説を立て、その検証を目的とした。

1. 研究方法

1. 1 被験者

倫理委員会での審査・承認の後に、被験者には実験の内容およびその危険性を十分に説明し、実験への自由意志による参加についての同意を得た。その後、7名の健常男性 (32.1±5.98, 170.3±7.53, 71.8±6.48 (±標準偏差)) を対象とし、片側 (左右いづれか) に対しては従来の30%MVCのトレーニング (INT-30) を、他側 (右か左) は、今回提案する筋エネルギー系応答に基づき強度を決定するトレーニング (INT-T) を行わせた。

1. 2 測定手順

身長、体重の測定の後に、左右前腕周囲径の測定を行った。次にグリップMVCの測定を十分な休息を挟んで3回行い、その最大値をMVCとして採用した。前腕筋エネルギー代謝の測定に³¹P-MRS、前腕筋酸素化レベルの測定にはNIRS、上腕動脈血流量の測定にはUSを用いた。³¹P-MRSとNIRSを用いた骨格筋の代謝測定は、グリップ運動の主働筋である前腕浅指屈筋群を対象として実施した。NIRS測定においては、運動負荷テス

トの前に筋酸素化レベルの標準化のために、6～7分間の安静時動脈血流遮断を行った。

運動負荷テストは1秒に1回の動的グリップ運動とし、MVCの2.5%から30秒（運動期24秒間、休止期6秒間）ごとに2.5%ずつ強度を増加させる漸増負荷法（Ex-inc）にて、疲労困憊まで行い、その際の筋エネルギー代謝、筋酸素化レベル、および血流量を測定した。なお、 ^{31}P -MRSによる筋エネルギー代謝の測定は、強力な磁場と狭いマグネットボアの中で行うために、他の2つの測定と同時に行うことができない。したがって、まずは、筋エネルギー代謝の測定を行い、その後3時間以上の休息を挟み、筋酸素化レベルと血流量との同時測定を行った。

1. 3 各測定方法

1. 3. 1 ^{31}P -MRS測定

磁気共鳴分光装置は、大塚電子社製横型NMRスペクトロメーター（BEM250/80、磁場強度2テスラ、ボア径26cm）を使用した。送受信コイルには直径30mmのサーフェイスコイルを使用し、プロトンの共鳴周波数85.44MHz、リンの共鳴周波数34.58MHz、パルス幅60 μ secとした。sweep widthは5000Hzとし、data point数は1024とした。被検者は肩関節90度外転位の姿勢で、前腕屈筋が測定台に埋め込まれたサーフェイスコイル上に固定できるように座った³⁾。

安静時のデータは、2分間安静状態を保持し、2秒に1回採取したシグナルを60積算することにより得た。Ex-incでは、運動期において2秒に1回シグナルを採取し、3シグナルを積算することにより1スペクトルを得た。細胞内pHは、クレアチンリン酸と無機リン酸の化学シフトから算出した⁴⁾。

1. 3. 2 NIRS測定

NIRSによる測定には、近赤外分光酸素モニター

（HEO-200、オムロン）を使用し、プローブの光源と受光部の間隔は30mmとした。これにより測定深度は皮膚表面より約15mm程度となる。被験者は ^{31}P -MRS測定と同様の姿勢で座り、Ex-inc中の各測定を行った。NIRSプローブは右前腕屈筋群の筋腹上に装着し、その上から弾性包帯で固定した。

Ex-inc中の酸素化ヘモグロビン（ミオグロビン）量（Oxy-Hb）、脱酸素化ヘモグロビン（ミオグロビン）量（Deoxy-Hb）、および総ヘモグロビン量（Total-Hb）の変化をモニターした⁵⁾。なお、NIRS測定のサンプリング周波数は10Hzとした。また、運動時の筋酸素化レベル（Oxy-Hb）は安静時を100%、動脈血流遮断時の最低値を0%とし、それに対する相対値で表した。筋酸素化レベルのデータは各運動強度の運動期の最後の5秒間を平均しデータ分析に用いた。今回用いた指標は、筋酸素化レベル、安静動脈血流遮断時の筋酸素化レベル低下率、安静動脈血流遮断時の筋酸素化レベル最低値に至るまでの時間とした。

1. 3. 3 US測定

血流量の測定には、超音波診断装置（Hewlett-Packard,SONOS1500, Ultrasound imaging system, HP 77035A）を使用した。まず、超音波断層法（2-D echography）により、7.5MHzの探触子を上腕動脈皮膚上に接触させ、血管断層図を記録した⁵⁾。その際、サンプル部位が血管の中心に位置するように超音波断層法にて確認した。血管径に対するドプラ入射角度は、血流速度計測に誤差を生じさせないように60度以下を保った。

次いで、パルスドップラー法により、血流速度波形を連続的にVTR録画した。実験後、VTRに録画した記録を解析し、安静時血管径と1心周期に対応する血流速度波形から血流速度波形積分値とを求めた。血流速度波形積分値と安静時血管径の積から1心周期に流入する血流量を算出した。

さらに1分間あたりのR-R間隔数を掛け合わせる
ことにより、1分間あたりの血流量に換算した。

なお、血管径は、安静時心収縮期と拡張期にそ
れぞれ計測し、以下の式により算出した。

血管径=1/3×心収縮期血管径+2/3×心拡張期
血管径

血流量のデータは運動期および休止期それぞれ
最後の5心周期を平均し、データ解析に用いた。

1. 3. 4 トレーニング強度の決定法および 研究デザイン

今回用いたEx-incでは、運動強度の増加に伴い、
筋pHが安静(約7.0)から徐々に低下する。筋
pHは6.8以上であれば、長時間運動が継続でき
るとされているので、今回は筋pHが6.8になる強
度と疲労困憊に至る強度との中間の強度を、ト
レーニング運動強度(INT-T)とした。この強度は
有酸素代謝の恒常性が乱れる付近の強度であり、
今回、このINT-Tを新たに提案するトレーニング
強度とし、本強度の運動を1日1回疲労困憊まで、
週5回、6週間トレーニングさせた。また、コン
トロールとして、従来から行われているINT-30
を用い、強度以外はINT-Tと同様にトレーニング
させ、今回考案するINT-Tと比較した。また、ト
レーニング期間中のトレーニング時間をそれぞれ
の強度別に記録した。

1. 4 統計方法

各データについては、7名の平均および標準誤
差で表した。前腕周囲径、MVC、Ex-inc運動持
続時間、安静動脈血流遮断時の筋酸素化レベル低
下率、安静動脈血流遮断時の筋酸素化レベル最低
値に至るまでの時間のトレーニング前後における
差異は対応のあるt検定を用い比較した。また、
EX-inc時におけるMRS、NIRS、およびUS測定
指標変化のトレーニング前後での差異は一元配置
分散分析を用いた。両条件(INT-TとINT-30)間

におけるトレーニング前後での各指標の変化量の
差の検定は、対応のあるt検定を用い比較した。

2. 結果

6週間の総トレーニング時間は、INT-T(平均
強度18.7%MVC)平均5555秒、INT-30(強度
30%)平均2055秒であった。また、INT-Tの6週
間のトレーニング総量(時間×強度)はINT-30
の1.74倍であった。一方、トレーニング後の各ト
レーニング強度での運動パフォーマンス増加率は
INT-T104.7%、INT-30では39.5%であった。

前腕周囲径はINT-Tではトレーニング前に平均
26.6cm、後26.8cmであり、INT-30ではトレー
ニング前26.7cm、後26.8cmであり、共にトレー
ニング前後で統計的に有意な差がなかった(図1)。

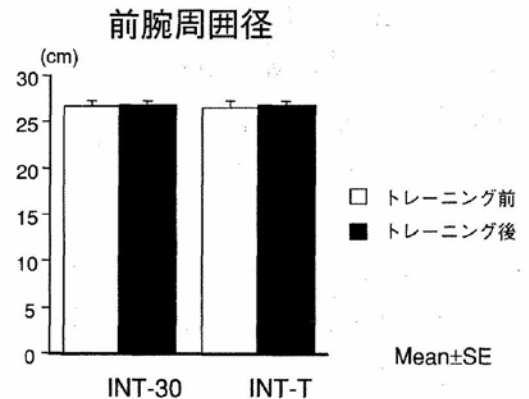


図1 トレーニング前後の前腕周囲径
INT-T, 筋pH低下を基準とした強度: INT30, 最大随
意収縮30%強度

握力はINT-Tではトレーニング前に平均47.9kg,
後47.7kgであり、INT-30ではトレーニング前
48.0kg、後50.8kgであり、INT-30においてト
レーニング前後で有意差が見られた(図2)。Ex-inc
パフォーマンス(US測定時)は、INT-Tではト
レーニング前に平均260.3秒、後318.1秒、INT-30
ではトレーニング前270.4秒、後335.1秒であり、
共にトレーニング後に有意な増加が見られたが、
増加の程度に両条件(INT-TとINT-30)間に差異
はなかった(図3)。安静動脈血流遮断時の筋酸
素化レベルの動態については、両条件ともにトレ

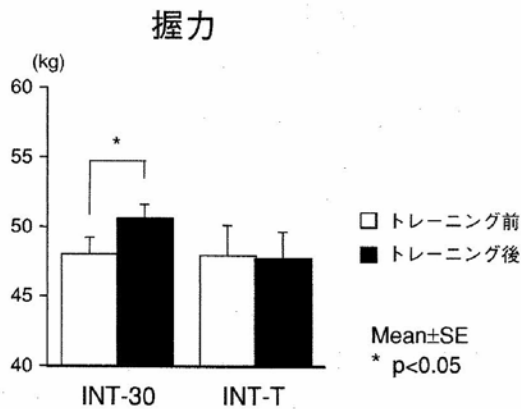


図2 トレーニング前後の握力
INT-T, 筋pH低下を基準とした強度: INT30, 最大随意収縮30%強度

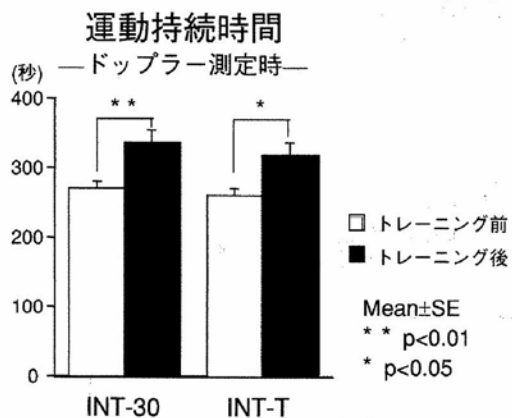


図3 トレーニング前後の運動持続時間 (パフォーマンス)
INT-T, 筋pH低下を基準とした強度: INT30, 最大随意収縮30%強度

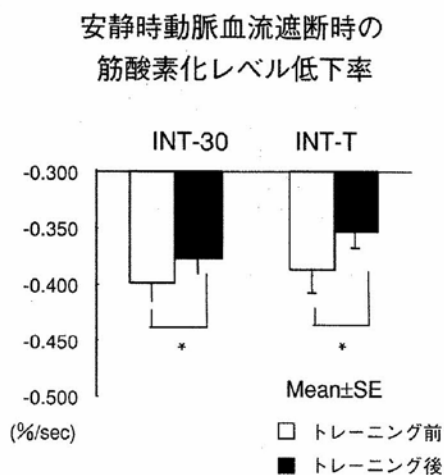


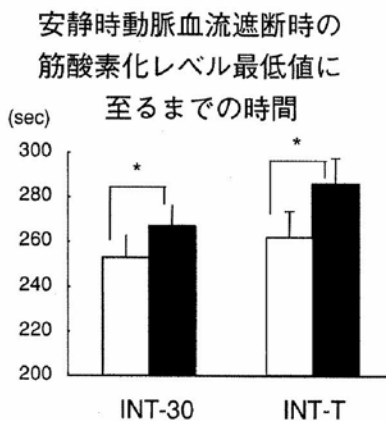
図4 トレーニング前後の安静時動脈血流遮断時の筋酸素化レベル低下率と安静時動脈血流遮断時の筋酸素化レベル最低値に至るまでの時間
INT-T, 筋pH低下を基準とした強度: INT30, 最大随意収縮30%強度

ーニング後に低下率が小さくなり、最低値になるまでの時間は延長した (図4)。

筋pHは安静時において、INT-Tではトレーニング前に平均7.03, 後7.02であり、INT-30ではトレーニング前7.02, 後7.02であり、共にトレーニング前後で差がなかった (図5)。運動中には強度の増加に伴いpHは低下し、各人のINT-Tに相当する強度は14.4~20.6%MVCの範囲であった。INT-Tではトレーニング後においてpHの低下が抑制された (図5)。

Ex-inc中の筋酸素動態については、INT-Tにおいてトレーニング後の漸増運動負荷中の酸素化レベルが低下傾向を示した (p=0.05) (図6)。

血流については、安静時において、INT-Tではトレーニング前に平均144.2ml/min, 後139.0ml/min, INT-30ではトレーニング前145.1ml/min, 後123.1ml/minであり、共にトレーニング前後で差がなかった。Ex-inc中、強度の増加に伴い、各運動強度の運動期には血流量は有意な増加がみられないが、休止期 (6秒間) においては増加が見られた。最大血流量は、INT-Tではトレーニング前に平均1,214.1 ml/min, 後997.5 ml/min, INT-30ではトレーニング前1,028.9 ml/min, 後1,196.2 ml/minであり、両条件とも前後で差が見られなかった (図7)。



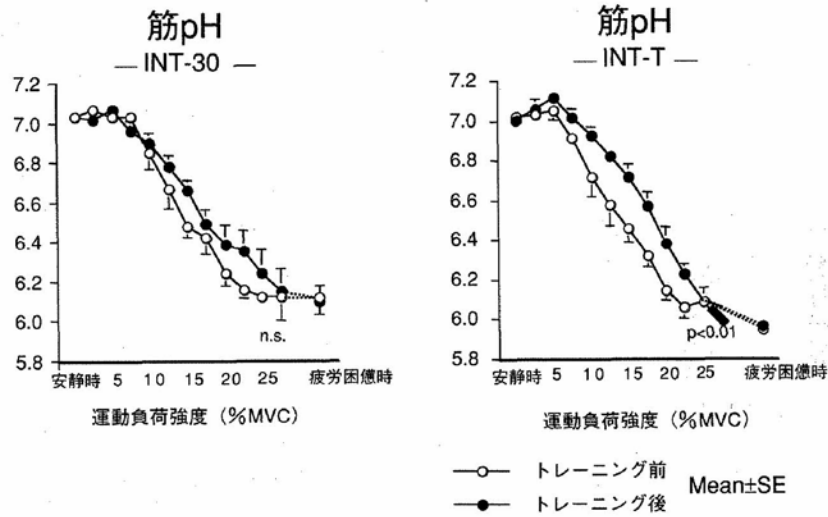


図5 トレーニング前後の筋pH変化
INT-T, 筋pH低下を基準とした強度: INT30, 最大随意収縮30%強度

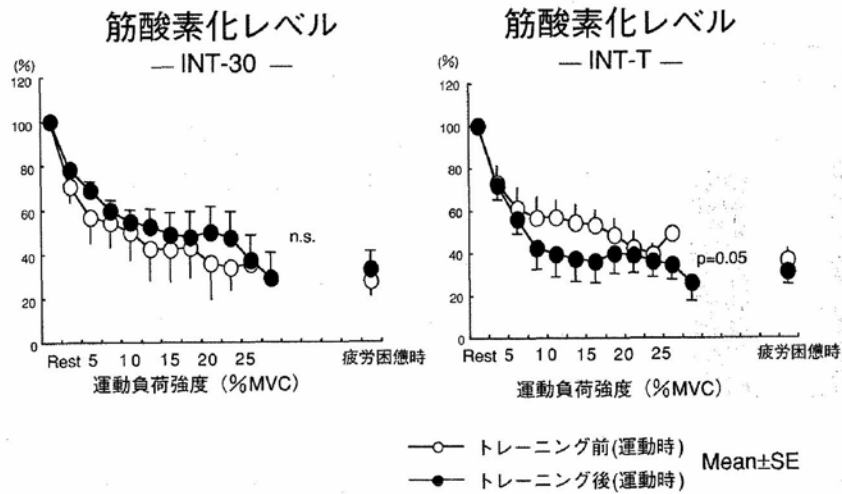


図6 トレーニング前後の筋酸素化レベル変化
INT-T, 筋pH低下を基準とした強度: INT30, 最大随意収縮30%強度

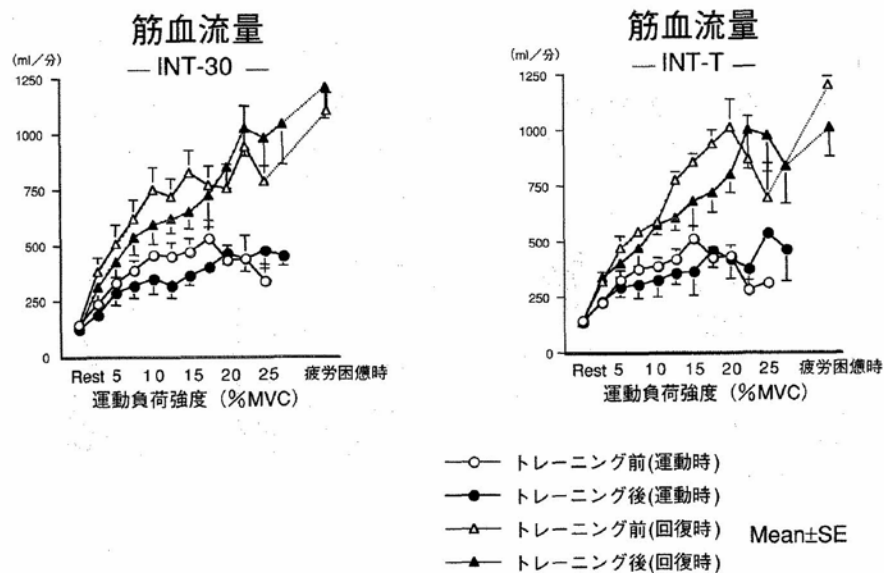


図7 トレーニング前後の筋血流量変化
INT-T, 筋pH低下を基準とした強度: INT30, 最大随意収縮30%強度

3. 考 察

本研究では、Ex-inc中の筋pHの変化を基にした運動処方 (INT-T) を考案し、そのトレーニング効果をこれまで行われてきた局所持久トレーニング (INT-30) の効果と比較した。その結果、両条件とも6週間のトレーニング後に持久パフォーマンスが向上したが、INT-TのみにEx-inc中の筋pH低下の抑制が見られた。血流については、両条件ともトレーニング後に、同一強度における血流上昇が抑制される傾向が見られたが、最大血流量はトレーニング前後で差異は見られなかった。筋酸素化レベルについては、INT-Tにおいてトレーニング後のEx-inc中の酸素化レベルが低下傾向を示した ($p < 0.05$)。

今回の結果から、INT-TとINT-30のEx-inc中の持久パフォーマンスに対するトレーニング効果は、ほぼ同等であると判断できる。しかし、INT-Tの筋pHの低下がINT-30に比べて抑制されたことは、INT-Tにおいては最大下のパフォーマンス増加がINT-30よりも大きい可能性が考えられる。このことを検証するためには今後、INT-TやINT-30運動中を含め、各種運動強度での持久パフォーマンスおよび筋エネルギー代謝、筋酸素化レベル、並びに筋血流の測定も行う必要がある。また、今回は、両条件とも疲労困憊にいたるまでトレーニングさせることとしたために、INT-Tの総トレーニング量が、INT-30の1.74倍となり、トレーニング量の差が、筋pHの変化の差に関連している可能性も否定できない。この点については、今後トレーニング量を同等にして両条件の効果を検討する必要がある。

今回の持久トレーニングにおいて、トレーニング後にINT-30のMVCが、変化量としては小さい(約6%)ものの、有意に増加したことは、先行研究の結果^{1,2)}と異なり予想外であった。この原因については不明であるが、被験者の特性、たとえ

ば性差、年齢等が関連している可能性が考えられる。また、トレーニング前後で前腕周囲径の変化がなかったことは、筋肥大がないことの間接的な証拠と考えられるが、詳細については、MRI等による検討が必要である。

安静動脈血流遮断時の酸素化レベルの低下率がトレーニング後に低下したことは、(NIRS測定指標が定量性に欠けるために)、トレーニングにより安静時代謝が低下したか、安静時代謝は変化しないが酸素貯蔵が増加した、と解釈できる。トレーニング後に安静時代謝が低下することは考えにくいので、後者の可能性が高いと思われる。INT-Tにおいてトレーニング後にEx-inc中の筋酸素化レベルが低下したが、先行研究においてもトレーニングによる酸素化レベルの変化についてはデータが少なく^{7,8)}、今後更に検討する必要がある。最大血流量については、今回のトレーニングにより増加しなかったが、先行研究においては最大血流量が増加しているものが多い^{9,10)}。この点については原因は不明であるが、測定プロトコルやトレーニング方法の違い、被験者の特定が関連していると考えられる。

まとめ

以上、本研究ではこれまで実施されていない、筋エネルギー代謝系の恒常性の乱れる強度 (INT-T) を基にした処方を行った。その結果、INT-Tにおいては従来用いられていたINT-30と比較して、持久パフォーマンスの面では差が見られなかったものの、筋pHの低下が抑制された。しかし、トレーニング量の差が、筋pHの変化の差に関連している可能性も否定できない。今後はトレーニング量を一定にし、INT-Tによる処方の妥当性を検証し、その他のトレーニング強度による効果についても検討する必要があると考えている。

謝 辞

本研究は、石本記念デサントスポーツ科学振興財団研究助成により行われた。また、研究を行うにあたり、多大な貢献をいただいた日本女子体育大学大森美美子、東京医科大学市村志朗氏、および被験者の方々に感謝いたします。

文 献

- 1) A. Kagaya. Reduced exercise hyperaemia in calf muscles working at high contraction frequencies. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 64. 298-303 (1992)
- 2) T. Hamaoka, T. Katsumura, N. Murase, Y. Kurosawa, T. Shimomitsu, M. Kuwamori, A. Kagaya, and B. Chance. Exercise induced improvement in muscle oxidative function in young females measured by ³¹P-magnetic resonance spectroscopy (³¹P-MRS). *Jpn. J. Appl. Physiol.* 28 (1) :359-367 (1998)
- 3) T. Hamaoka, T. Katsumura, T. Shimomitsu, N. Murase, S. Nishio, T. Osada, Y. Kurosawa, and B. Chance. Noninvasive measures of oxidative metabolism on working human muscles by near infrared spectroscopy. *J. Appl. Physiol.* 81 (3) :1410-1417 (1996)
- 4) M. J. Kushmerick and R. A. Meyer. Chemical changes in rat leg muscle by phosphorus nuclear magnetic resonance. *Am. J. Physiol.* 248: C542-C549 (1985)
- 5) B. Chance, M.T. Dait, C. Zhang, T. Hamaoka, F. Hagerman. Recovery from exercise-induced desaturation in the quadriceps muscles of elite competitive rowers *Am. J. Physiol.* 262 (Cell Physiol. 31) :C766-C775 (1992)
- 6) T. Osada, T. Katsumura, T. Hamaoka, S. Inoue, K. Esaki, A. Sakamoto, N. Murase, J. Kajiyama, T. Shimomitsu, H. Iwane. Reduced blood flow in the abdominal viscera during one-legged knee extension measured by Doppler ultrasound. *J. Appl. Physiol.* 86 (2) :709-719 (1999)
- 7) F. Costes, F. Prieur, L. Feasson, A. Geysant, J.C. Barthelemy, C. Denis. Influence of training on NIRS muscle oxygen saturation during submaximal exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 33:1485-1489 (2001)
- 8) J.P. Neary, D.C. McKenzie, Y.N. Bhambhani. Effects of short-term endurance training on muscle de-oxygenation trends using NIRS. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34:1725-1732 (2002)
- 9) M.A. Alomari, M.A. Welsch, R.D. Prisby, C.M. Lee, and R.H. Wood. Modification of forearm vascular function following short-term handgrip exercise training. *Int J Sports Med.* 22 (5) :361-365 (2001)
- 10) S.R. Copeland, M.C. Mills, J.L. Lerner, M.F. Crizer, C.W. Thompson, J.M. Sullivan. Hemodynamic effects of aerobic vs resistance exercise. *J. Hum. Hypertens.* 10 (11) :747-753 (1996)