

運動トレーニングが骨格筋の 酸素利用能力に及ぼす影響

金沢大学 増田 和実
(共同研究者) 名古屋大学 秋間 広
武蔵野大学 衣笠 竜太

Effect of Exercise Training on Oxygen Utilization in Muscle Tissue at Onset of Muscle Contraction

by

Kazumi Masuda

Faculty of Education, Kanazawa University

Hiroshi Akima

Research Center of Health, Physical Fitness & Sports,

Nagoya University

Ryuta Kinugasa

Research Center of Sports Sciences, Musashino University

ABSTRACT

Near-infrared spectroscopy (NIRS) has provided insights into the dynamics of oxidative metabolism during muscle contraction. The present study examines how a short period of resistance exercise training (sRT) affects muscle oxygen utilization at the onset of contraction using NIRS. Twelve healthy male adults were separated into trained (Tr: n=6, 27.7 ± 5.0 yrs) and untrained (Con: n=6, 24.5 ± 4.5 yrs) groups. Tr-group participated in sRT consisting of 4-sessions of 7-sets of 10-repetitions of isokinetic knee extensions at 120 degree sec⁻¹. All participants performed isometric knee extensions at workloads reaching 30% and 50% of their maximal voluntary contraction force (MVC) for 1-minute before and after the training period. The NIRS Δ [deoxy-Mb/Hb] signal

recorded from vastus lateralis muscle was fitted as an exponential equation to determine time constant (τ), time delay (TD) and amplitude (AP). The isometric MVC significantly increased in Tr-group, but not in Con-group. The τ of Δ [deoxy Mb/Hb] kinetics tended to reduce in Tr-group after sRT, but the TD and AP did not significantly change. On the other hand, Δ [deoxy Mb/Hb] kinetics parameters in Con-group did not significantly change at all. These results suggested that the sRT facilitated oxygen utilization in mitochondria although the level of muscle activation was reduced at the same workload due to improved MVC.

要 旨

近赤外線分光法 (NIRS) は筋収縮中の酸素 (O_2) 代謝動態に関する情報を提供してくれる。本研究は短期間のレジスタンストレーニング (sRT) が筋収縮開始後のNIRS筋内 O_2 動態に及ぼす影響を検討した。12名の健康な男性は、トレーニング群 (Tr群: $n=6$, 27.7 ± 5.0 歳) と非トレーニング群 (Con群: $n=6$, 24.5 ± 4.5 歳) に分けられた。Tr群は、毎秒 120° の等速性膝関節伸展動作 (収縮10回 \times 7セット) が4回で構成されるsRTに参加した。全ての参加者は、sRT前後に最大随意筋力 (MVC: sRT前に測定した値) の30%と50%のレベルによる1分間の等尺性膝伸展テストを行った。その運動テスト時に外側広筋から記録したNIRSの Δ [deoxy Mb/Hb]動態を指数関数に当てはめることによって、筋内 O_2 動態の時定数 (τ) と遅れ時間 (TD)、振幅 (AP) を計算した。結果として、sRT後にTr群のみにおいてMVCが有意に上昇し、最大下等尺性運動テスト時の Δ [deoxy Mb/Hb]動態の τ が低下傾向を示した。 Δ [deoxy Mb/Hb]動態のTDとAPは両群において変化しなかった。以上の結果から、短期間の運動トレーニングによって筋の O_2 代謝能力が向上し、筋収縮時における筋内の O_2 動態が変化する可能性が示唆された。

緒 言

定期的な運動トレーニングは、その強度や様式の設定に応じて、骨格の筋肉で多くの生理学的、生化学的適応を促す。レジスタンストレーニング (RT) も運動様式や負荷強度、セット数、回復間の長さに応じて、様々にそのプロトコルを変えることができる⁶⁾。また、RTは主に骨格筋の収縮能力や筋肥大を亢進させる目的で行い、神経系因子はRT開始初期の筋力向上において主役を演ずると示唆されている⁹⁾。近年の磁気共鳴映像法 (mfMRI) を用いた研究においても、RT開始2週間後に顕著な筋肥大を誘発することなく、筋の収縮活動レベルの上昇が確認されている¹⁾。また、この現象は、非常に急性的 (2, 3日以内) に生じることが示唆されている²⁾。

一方、収縮特性の変化と同様に、代謝的側面もまた、RTによって変化することが考えられる。Teschら¹²⁾が報告したボディービルダーとパワーリフターを対象にした毛細血管数やミトコンドリア酵素活性の比較結果は興味深い。また、比較的高い強度の持久的トレーニングを行うと、5日後には筋内のミトコンドリアのATP再合成率が高まることも報告されている¹¹⁾。一般に代謝特性の変化は、関連酵素タンパクの生化学的分析によって行われてきたものの、筋収縮中の代謝動態 (ダイナミクス) を検出し、そこからの代謝情報

からその能力の優劣を評価しようとする研究は少ない。

近赤外線分光装置 (NIRS) は、生体に近赤外光を照射し、組織内に含まれるヘモグロビン (Hb) とミオグロビン (Mb) ならびにサイトクロームなどのヘムタンパクの O₂ 結合型/非結合型を非侵襲的かつ連続的に検出できる装置として開発された。われわれは、筋収縮中の O₂ 消費動態 (NIRS 動態) をモデル化しながら、収縮中の O₂ 摂取に及ぼす収縮条件や血流状態の影響について検討し、収縮開始直後の NIRS 動態のプロフィールが筋の収縮レベルに応じて変化することを確認してきた⁷⁾。また、NIRS を用いた研究報告は国内外において数多くあるものの、トレーニングなどに伴う筋の収縮特性や代謝特性の変化が NIRS 動態にどのような影響を与えるのかについては、十分に検討が及んでいない。

そこで本研究では、NIRS kinetics から推定される O₂ 代謝能力に対する RT の影響を検討することを目的とした。

1. 方法

1.1 被験者

被験者には実験内容の説明と危険性についての説明を行い、それらの理解と実験参加の同意を表す署名を得た。

本研究への参加の同意が得られた 12 名の健康な成人男性はトレーニング群 (Tr 群: n=6, 27.7 ± 5.0 歳) と、非トレーニング群 (Con 群: n=6, 24.5 ± 4.5 歳) に分けられた。被験者の身体特性は表 1 に示した。

表 1 被験者の身体特性

Group	n	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)	BMI (kg m ⁻²)	MVC@pre (Nm)	MVC@post (Nm)
Tr	6	27.7 ± 5.0 (23 ~ 37)	170.2 ± 6.3 (165 ~ 180)	63.2 ± 3.0 (58 ~ 75)	21.7 ± 1.0 (20.5 ~ 23.1)	263.9 ± 44.3 (182.0 ~ 305.4)	307.5 ± 51.2** (218.1 ~ 366.5)
Con	6	24.5 ± 4.5 (20 ~ 33)	171.7 ± 6.6 (164 ~ 182)	67.7 ± 8.2 (55 ~ 79)	22.9 ± 2.0 (19.0 ~ 24.9)	308.9 ± 56.9 (206.3 ~ 364.6)	303.6 ± 67.3 (205.6 ~ 388.9)

means ± SD. n=6.括弧内はレンジを表示。Tr: Tr 群, Con: Con 群, BMI: body mass index, *: vs. pre condition (**: p<0.01).

1.2 運動テストプロトコール

本研究の運動テストは室温約 25℃ の実験室内において行った。準備運動後に、被験者は等速性ダイナモメータ (Biodex System-3, Biodex Medical Systems, USA) の上にて、等尺性最大随意筋力 (MVC) を測定した (膝関節角度=90°)。休憩後、MVC の 30% と 50% の収縮レベルで、持続的な等尺性収縮を行った。なお、1 試技の収縮時間は 50 ~ 90 秒とし、30%MVC と 50%MVC のテスト間隔は約 10 分とした。

1.3 トレーニング方法

Tr 群は、5 日間で 4 回のトレーニングを実施した。1 回のトレーニングは、1 分間のインターバルを挟みながら、10 回の等速性膝伸展運動を 7 セット行うものとした。なお、膝関節の移動角速度は毎秒 120° であり、関節移動範囲は 80° から 170° とした (180° = full extension)。ちなみに、4 回のセッションで被験者が努力した延べ時間はおよそ 3.5 分であった。

1.4 NIRS 信号の記録と線形分析

NIRS (NIRO-300, (株) 浜松ホトニクス, 日本) を用いて、外側広筋 (VL) 遠位部 (膝上約 10cm の位置) の O₂ 動態を計測した。NIRS のプローブを VL の遠位部皮膚上に粘着テープによって貼付し、さらにその上に遮光用の弾性包帯を巻いた。プローブの送受光部間隔は 4cm とした。なお、sRT 前後で同じ位置で計測できるように、プローブの位置にペンマークを記した。

NIRS は、酸素化 Mb/Hb 濃度変化 (Δ [oxy

Mb/Hb)], 脱酸素化 Mb/Hb 濃度変化 ($\Delta[\text{deoxy Mb/Hb}]$), 加えて, 前者2つの合計として総 Mb/Hb 濃度変化 ($\Delta[\text{total Mb/Hb}]$) の情報を提供する. NIRS の値は運動開始前の安静状態を基準 (ゼロ) としながら, そこからの変化値として表された. NIRS 信号の振幅変化を評価するために, 大腿部近位部と足首部位にカフを巻き, 動脈阻血 (250mmHg 以上で加圧) を 10-15 分間行った. なお, NIRS 信号は A/D 変換器 (PowerLab/16SP, AD Instruments, Australia) を介して, パソコン (PowerBook G4, Apple Computer, USA) へ転送された.

筋収縮開始後の $\Delta[\text{deoxy Mb/Hb}]$ 動態を <1> の指数関数に残差平方和が最小となるように当てはめることによって, ベースライン (BL), 遅れ時間 (TD), 時定数 (τ), 振幅 (AP) の各構成要素を算出した (図 1).

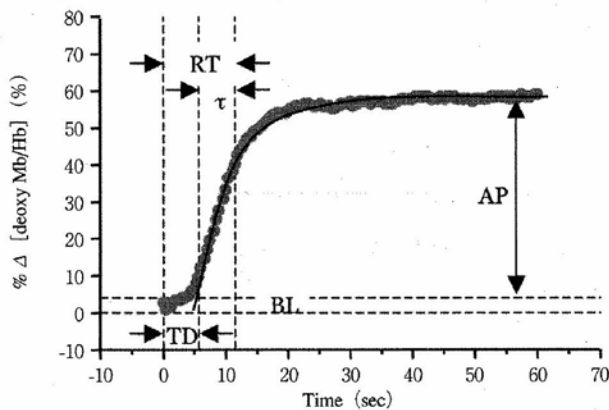


図1 % $\Delta[\text{deoxy Mb/Hb}]$ 動態の線形解析の一例.
AP: 振幅, BL: ベースライン, τ : 時定数, TD: 遅れ時間, RT: 反応時間.

$$y = BL + AP \cdot [1 - \exp^{-(T-TD)/\tau}] \quad <1>$$

なお, NIRS の解析対象ポイント (筋収縮中) の同定は, EMG 信号をトリガーとした.

1. 5 EMG 信号の記録

プリアンプ内臓の表面 EMG 用電極 (The Bagnoli-2 EMG System & DE-2.1, DelSys, USA) を用いて VL の皮膚上から活動電位を検出した. EMG 信号は, ゲイン: 1000, アナログ帯域フィ

ルター: 20~450Hz, サンプリング周波数: 1kHz として, A/D コンバータ (PowerLab/16SP, AD Instruments, Australia) を介してパソコン (PowerBook G4, Apple Computer, USA) へ転送した.

1. 6 筋の形態計測 (筋横断面積: CSA)

磁気共鳴画像 (MRI) の撮影には, 0.3T の MRI 装置 (AIRIS, Hitachi Medical, 日本) を使用した. 大腿部の長軸方向に 10mm 厚, 5mm 間隔で 7 枚の横断画像を得た. 4 枚目の画像は, 大腿部の中央画像となるように調整した. 全ての MRI から各筋の CSA を算出する際には, public domain imaging software package (NIH image, NIH, USA) を使用した¹⁾.

1. 7 統計処理

全てのデータは, means \pm SD として表示した. sRT 前後の NIRS kinetics パラメータの比較には, 二元配置の分散分析を行い (sRT 前後, 群間), 分散に有意差が認められた場合には, Scheffe の post-hoc test を行った. なお, 有意水準は $p < 0.05$ とした.

2. 結果

2. 1 最大等尺性膝伸展筋力 (MVC)

最大等尺性膝伸展筋力 (MVC) は, Tr 群において約 16.9% ($p < 0.01$) 上昇し, Con 群では変化しなかった (表 1). 本研究では sRT 前後での運動テスト (30%&50%MVC テスト) は sRT 開始前の値を固定基準としたので, Tr 群の相対的作業負担 (%MVC) は, sRT 後に減少した (表 2).

2. 2 筋の形態的变化 (CSA)

sRT の前後における膝関節伸筋群の CSA は, Tr 群において $52.8 \pm 4.0\text{cm}^2$ (前) と $52.9 \pm 3.9\text{cm}^2$ (後) であり, Con 群では, $56.6 \pm 7.9\text{cm}^2$

表2 sRT 前後における最大下等尺性収縮時のNIRS - % Δ [deoxy Mb/Hb]動態の各パラメータ

Group	n		Workload (kg)	Workload (%MVC)	TD (sec)	AP (%)	τ (sec)	AP/ τ (% sec ⁻¹)
Tr	6	pre	79.2 ± 13.3	30.0 ± 0.0	3.12 ± 3.79	74.39 ± 14.81	13.53 ± 3.00	5.71 ± 1.65
		post		25.8 ± 1.9**	5.58 ± 1.71	70.16 ± 16.09	9.20 ± 2.11*	7.85 ± 2.00
		pre	131.9 ± 22.1	50.0 ± 0.0	4.95 ± 1.68	88.05 ± 23.79	7.35 ± 2.93	12.89 ± 4.47
		post		43.0 ± 3.1**	5.32 ± 2.26	79.24 ± 18.46	5.67 ± 1.46	14.57 ± 4.44
Con	6	pre	92.7 ± 17.1	30.0 ± 0.0	5.58 ± 4.23	76.72 ± 00	10.89 ± 2.16	7.08 ± 1.93
		post		30.8 ± 2.5	4.97 ± 3.53	73.31 ± 12.11	9.44 ± 2.63	8.10 ± 2.14
		pre	154.4 ± 28.4	50.0 ± 0.0	4.04 ± 3.13	89.22 ± 25.65	7.55 ± 2.26	12.38 ± 3.88
		post		51.3 ± 4.2	4.40 ± 2.27	86.66 ± 12.63	6.35 ± 1.77	14.28 ± 3.29

means ± SD. n=6. Tr: Tr群, Con: Con群, MVC: 等尺性最大随意筋力, TD: 遅れ時間, τ : 時定数, AP: 振幅. *: vs. pre condition (*: p<0.05, **: p<0.01).

(前)と56.9 ± 8.2cm²(後)であった。両群ともに、伸筋群のCSAに関して有意な変化は認められなかった。

2. 3 NIRS 動態の線形パラメータ

図2には、30%MVCの等尺性膝伸展運動時のトルクとEMG, NIRSの一例を示した。収縮開始後わずかな時間を経て、% Δ [oxy Mb/Hb]は減少し、% Δ [deoxy Mb/Hb]は上昇し、一定時間後にはプラトーに達した。

表2には、30%と50%MVC収縮時の% Δ [deoxy Mb/Hb]動態の線形パラメータをまとめた。 τ を除いて、sRT前後での値は、両グループにおいて有意に変化しなかった。基本的に、 τ は負荷レベルの上昇に伴って短縮する傾向にあり、特にTr群の30%MVC時の τ はsRT後に有意に短縮した(p<0.05)。

図3には τ とMVCの関係を示した。Con群ではsRT前後における τ とMVCの関係がほとんど変化しなかったが、Tr群ではsRT後、回帰線が左方移行する傾向があった(低い%MVCでも τ が短縮する傾向)。

3. 考察

3. 1 短期間のRTの生理学的意義

本研究の4回のRTの結果、大腿部CSAの肥大を伴わなくてもMVCが約16.9%上昇した。RT初

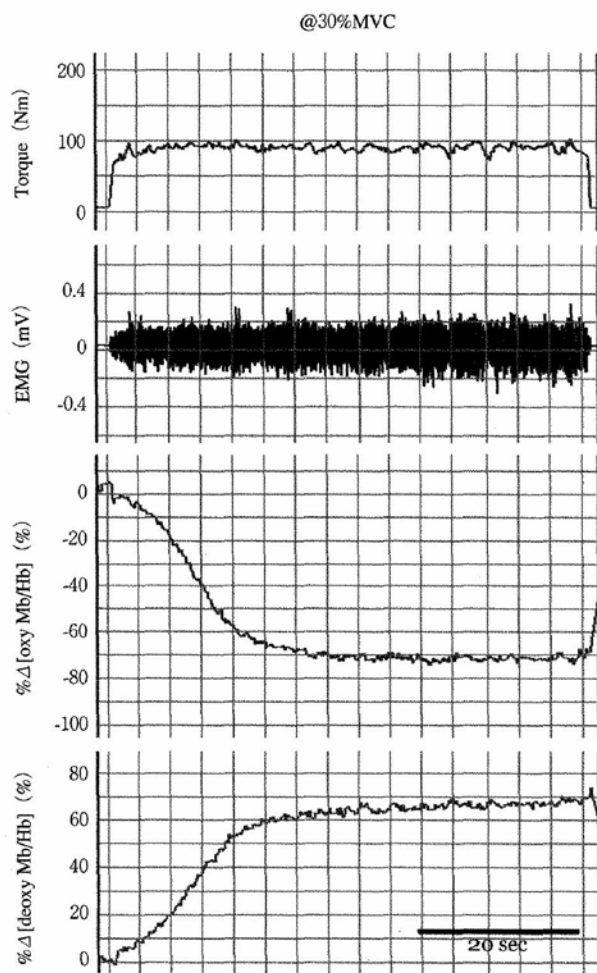


図2 等尺性膝伸展運動時(30%MVC, 50%MVC)のトルク, EMG, NIRS (Δ [oxy Mb/Hb] & Δ [deoxy Mb/Hb])の一例。収縮開始後、 Δ [oxy Mb/Hb]は徐々に低下し、一方、 Δ [deoxy Mb/Hb]は徐々に上昇し、一定時間後、プラトーに達した。

期の筋力向上は、運動単位の付加的な動員に起因すると示唆されている^{1,9)}。本研究の結果は、sRTプログラムが筋肥大を伴わずに筋力を向上させるというわれわれや他の先行研究^{1,9)}を支持した。

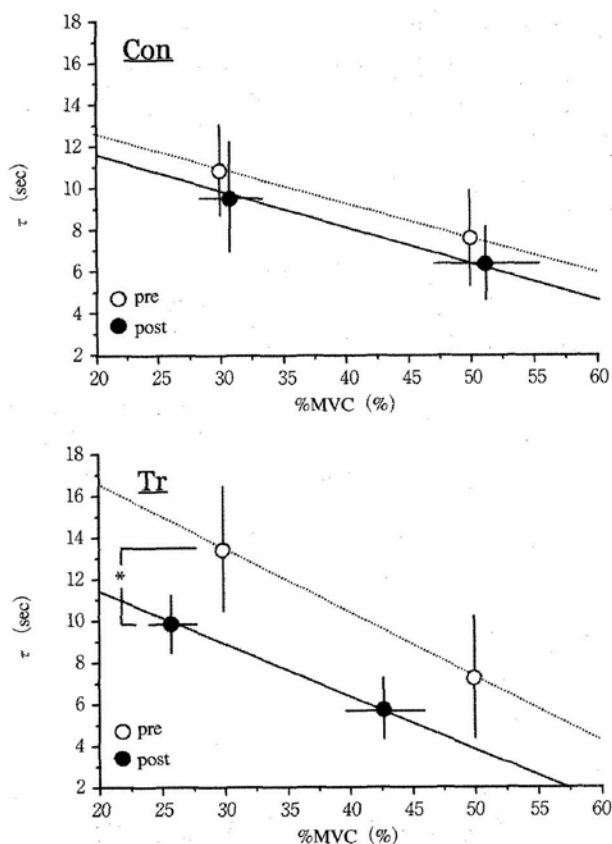


図3 sRT前後におけるMVCと Δ [deoxy Mb/Hb]の τ の関係(白丸:sRT前,黒丸:sRT後)
Con群におけるsRT前後の回帰線はあまり変化しなかったが, Tr群の回帰線は左方移行する傾向にあった。

また、近年、運動中のNIRS動態を数学的モデルに当てはめ、活動筋での O_2 利用(代謝)動態を検証しようとする研究動向がある⁵⁾。本研究でも Δ [deoxy Mb/Hb]の動態をモデル化し、その線形特性から筋の代謝能力や酸素代謝機構を検討しようとした。その中で、sRTの結果、線形パラメータが変化したことは重要な知見の一つであると考えられる。

3.2 NIRS動態に対するトレーニングの影響

sRTの結果、最大下レベルの収縮中における Δ [deoxy Mb/Hb]の τ が低下した(表2と図2)。NIRS信号は O_2 供給と利用の相互作用によって変化すると考えられているものの、正確な情報源が特定されていない⁸⁾。そこで本研究では、NIRSに対する O_2 供給(血流)の影響を少なくし、筋細胞の O_2 利用動態をより反映させるために等尺

性収縮様式を選択した。静的収縮の間の筋内圧は、血流を抑制することが言われている。また、血流の変化は Δ [deoxy Mb/Hb]よりも Δ [oxy Mb/Hb]に対してより大きな影響を及ぼすと示唆されているため⁴⁾、 Δ [deoxy Mb/Hb]を分析対象とした。このように仮定の下ではあるものの、 Δ [deoxy Mb/Hb]動態の τ の変化は活動筋での O_2 利用状態の変化に起因するものと考えられる。

また、われわれは Δ [deoxy Mb/Hb]動態の τ が筋張力(負荷)レベルに応じて短縮することを確認した⁷⁾。本研究のsRTはTr群のMVCを上昇させた。本研究では最大下等尺性運動テスト時の絶対的負荷をsRT前後で等しくしたので、Tr群のsRT後の相対的負荷は減少した(表2)。筋張力レベルと Δ [deoxy Mb/Hb]の τ の関係から判断すると、相対的に低い負荷レベルは τ を延長させることを予想させる(しかしながら、 τ は短縮した)。したがって、本研究で観察された τ の変化は何らかの生理学的・生化学的要因によって引き起こされていることを強調する。

Δ [deoxy Mb/Hb]動態の τ の短縮を引き起こした要因として、活動筋内のミトコンドリア酸化能力の変化が挙げられる。定期的な運動(特に持久的トレーニング)がミトコンドリアの酸化能力を増やすことはよく知られている¹³⁾。比較的高強度のサイクリング運動も、ヒト骨格筋のミトコンドリアATP再合成率を向上させる¹¹⁾。

一方、ミトコンドリアの酸化能力に対するRTの影響については、議論の余地があるかもしれない。ただし、RTのトレーニング設定には様々なバリエーションがあり、それに依って刺激される活動筋の適応が左右される⁶⁾。パワーリフターよりもボディビルダーの筋において、毛細血管数やミトコンドリア酵素活性が高かったというTeschらの事実¹²⁾は、RTプログラムと筋の適応の典型例として考えられる。また、われわれのグループもRT実験の結果、低中強度・多くの収縮

回数・短い回復時間で構成されるRTプログラムほど筋の酸化系メカニズムを刺激することを観察した³⁾。本研究でのRTプログラムは、等速性ダイナモメータを使ったトレーニングであるけれども、被験者はセット間隔1分を挟みながら7セットの比較的反復性の高い最大努力運動を行った。したがって、本研究のRTでもミトコンドリア酸化能力が向上しているかもしれない。また、Starrittら¹¹⁾によって報告されるように、トレーニングの2, 3日以内でミトコンドリアに適応が生じるとするならば、筋肥大の顕在化してこないRT初期では、筋細胞内のミトコンドリア密度が上昇し、筋のO₂摂取率が促進する可能性がある。この点については、今後、筋生検等によって検討していかなければならないが、NIRSの脱酸素化の速度がミトコンドリアでのO₂代謝速度を反映する¹⁰⁾ことから、本研究のRTの結果、ミトコンドリアでのATP再合成率の増加とともに活動筋のO₂利用率が増し、結果的に Δ [deoxy Mb/Hb]動態の τ の短縮を引き起こしたのかもしれない。

まとめ

本研究では、短期間の運動トレーニングによって筋のO₂代謝能力が向上し、筋収縮時における筋内O₂動態が変化する可能性が示唆された。NIRSの情報源が筋細胞内外のどちらから由来するかの論点は払拭できないものの、本研究のようなモデル解析によって、NIRSが非侵襲的に筋のO₂代謝能力の変化や優劣を判断する資料を提供してくれることは有用的であると考える。

謝辞

稿を終えるにあたり、本研究に対して多大な助成を賜りました(財)石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝申し上げます。

文献

- 1) Akima, H., H. Takahashi, S. Kuno, K. Masuda, T. Masuda, H. Shimojo, I. Anno, Y. Itai and S. Katsuta. Early phase adaptations of muscle use and strength to isokinetic training. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31, 588-594 (1999)
- 2) Brown, L. E., and M. Whitehurst. The effect of short-term isokinetic training on force and rate of velocity development. *J. Strength Cond. Res.* 17, 88-94 (2003)
- 3) Choi, J., K. Masuda, M. Muraoka, H. Shimojo, and K. Takamatsu. Difference in effects between "power-up type" and "bulk-up type" strength training exercise (2) - with special reference to muscle histochemical properties and capillary supply - (in Japanese with English abstract). *Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med.* 47, 189-198 (1998)
- 4) De Blasi, R. A., M. Ferrari, A. Natali, G. Conti, A. Mega, and A. Gasparetto. Noninvasive measurement of forearm blood flow and oxygen consumption by near-infrared spectroscopy. *J. Appl. Physiol.* 76, 1388-1393 (1994)
- 5) Grassi, B., S. Pogliaghi, S. Rampichini, V. Quaresima, M. Ferrari, C. Marconi, and P. Cerretelli. Muscle oxygenation and pulmonary gas exchange kinetics during cycling exercise on-transitions in humans. *J. Appl. Physiol.* 95, 149-158 (2003)
- 6) Kraemer, W. J., S. J. Fleck, and M. Deshenses. A review: factors in exercise prescription of resistance training. *Nat. Strength Cond. Assoc. J.* 10, 36-41 (1988)
- 7) Masuda, K., S. Nakano, K. Tanabe, and T. Jue. Comparative near-infrared spectroscopy kinetics at onset of different types of muscle contraction in human. *J. Sports Sci.* 23, 121 (2005)
- 8) McCully, K. K., and T. Hamaoka. Near-infrared spectroscopy: what can it tell us about oxygen saturation skeletal muscle? *Exerc. Sport Sci. Rev.* 28, 123-127 (2000)
- 9) Moritani, T., and H. deVries. Potential for gross muscle hypertrophy in older men. *J. Gerontol. B Psychol. Sci. Soc. Sci.* 35, 672-682 (1980)
- 10) Sako, T., T. Hamaoka, H. Higuchi, Y. Kurosawa, and T. Katsumura. Validity of NIR spectroscopy for quantitatively measuring muscle oxidative metabolic

- rate in exercise. *J. Appl. Physiol.* 90, 338-344 (2001)
- 11) Starritt, E. C., D. Angus, and M. Hargreaves. Effect of short-term training on mitochondrial ATP production rate in human skeletal muscle. *J. Appl. Physiol.* 86, 450-454 (1999)
- 12) Tesch, P. A., A. Thorsson, and P. Kaiser. Muscle capillary supply and fiber type characteristics in weight and power lifters. *J. Appl. Physiol.* 56, 35-38 (1984)
- 13) Tonkonogi, M., B. Harris, and K. Sahlin. Mitochondrial oxidative function in human saponin-skinned muscle fibres: effects of prolonged exercise. *J. Physiol.* 510, 279-286 (1998)