

原 著

**筋休息時間の異なる高強度等尺性反復運動が
活動筋の脱酸素化と乳酸代謝に及ぼす影響**

宅間 豊，岡部孝生，宮本謙三，井上佳和，宮本祥子，竹林秀晃，東川 裕

土佐リハビリテーションジャーナル

第2号 別刷

2003年12月29日発行

土佐リハビリテーションカレッジ

原著

筋休息時間の異なる高強度等尺性反復運動が 活動筋の脱酸素化と乳酸代謝に及ぼす影響

宅間 豊¹⁾, 岡部孝生¹⁾, 宮本謙三¹⁾, 井上佳和¹⁾, 宮本祥子¹⁾, 竹林秀晃¹⁾, 東川 裕²⁾

1) 土佐リハビリテーションカレッジ 理学療法学科

2) 東川整形外科

Effects of Repeated Isometric Knee Extension Exercise at Different Muscular Rest Intervals on Deoxygenation and Metabolism of Lactic Acid in the Quadriceps Femoris Muscle

Yutaka TAKUMA¹⁾, Takao OKABE¹⁾, Kenzo MIYAMOTO¹⁾, Yoshikazu INOUE¹⁾,
Shoko MIYAMOTO¹⁾, Hideaki TAKEBAYASHI¹⁾, Yutaka HIGASHIGAWA²⁾

1) Department of Physical Therapy Tosa Rehabilitation College

2) Higashigawa Orthopedic Clinic

Key Words : 等尺性運動 脱酸素化 乳酸代謝

要 旨

筋休息時間の異なる高強度等尺性反復運動を行い、活動筋の脱酸素化と乳酸代謝の状態を比較した。被験者は健康人男性13名であった。等尺性運動の方法は被験者を等速性運動機器に坐らせ、右膝関節60度屈曲位にて膝伸展の等尺性運動を最大努力により連続10セット反復させた。1セットあたりの筋活動時間は一定の6秒とし、セット間の休息時間は6秒と12秒の2条件（それぞれ条件1と条件2）を設定した。このような条件による等尺性運動の間、右内側広筋の脱酸素化の指標として近赤外線分光装置を用い酸素化ヘモグロビン量と脱酸素化ヘモグロビン量を測定した。また、大腿四頭筋における乳酸代謝の指標として運動前および運動後1分・3分・6分の時点において指尖部で静脈血を採取し、簡易血中乳酸測定器を用いて血中乳酸濃度を測定した。筋活動時には両条件で有意な脱酸素化を認めた。条件2では条件1に比べ筋酸素化レベルを約10～15%有意に高く維持することができた。また、筋休息時でも条件間で筋酸素化レベルに有意差を認め、条件1では安静時の筋酸素化レベルを約20%も有意に下回っていたのに対して、条件2では安静時レベルと同程度の筋酸素化の回復を得ることができた。一方、両条件による運動後の血中乳酸濃度はいずれの時点においても運動前に対して有意に増加したことから、大腿四頭筋には乳酸が蓄積されたと推測された。ただし、運動後の血中乳酸濃度はいずれも条件2の方が有意に低値であったことから、この条件では乳酸の産生とその酸化的リン酸化による除去のバランスが条件1に比べて均衡状態に近かったものと推察され、この結果には筋活動時と休息時での酸素化レベルの顕著な差異が密接に関係していたと考えられた。よって、等尺性筋力増強運動によって引き起こされる活動筋の乳酸蓄積とそれによる筋疲労を軽減するには、筋への酸素供給をできるだけ維持し、乳酸産生の増加とその酸化的除去にかかわる代謝能の低下を抑制することが重要であると思われる。そのためには運動処方において適切な長さの筋休息時間の設定が必要であり、今後は適用する筋収縮の強度、持続時間、反復回数の設定に応じたモデルケースの検討が必要である。

目 的

等尺性運動は静的運動とも呼ばれ、関節角度を変化させずに筋収縮を行えるため、理学療法の臨床においては関節炎などの原因によって関節運動に疼痛を伴い筋収縮を生じさせにくい場合や、ギブス固定などの治療上の理由で関節運動を行えない場合などに筋力の増強や維持を目的として用いられている。また、等尺性運動とともに臨床で多用されている等張性運動（求心性運動）に比べ最大張力を得やすいため、筋力増強効果が高く短期間での効果¹⁾を期待できる点でも有用である。等尺性運動はこのような長所を有する反面、短所として、運動角度以外での筋力増強効果が少ないこと、固有感覚障害により位置覚や運動覚を喪失している場合に運動を自覚することが困難なこと、末梢血管抵抗を増大させて血圧の上昇を招くことなどが指摘されている^{1), 2)}。したがって、このような特徴をよく踏まえた上で臨床に適用することが求められるが、加えて等尺性運動を高強度の負荷により一定の筋収縮時間で反復させる際には、活動筋代謝の顕著な変化にも留意しなければならない。筋力増強効果を効率よく最大に得るための等尺性運動では、Hettinger³⁾やMüller⁴⁾によるアイソメトリックトレーニングの理論を基に筋収縮の強度・時間・回数が処方され、理学療法では一般的に最大筋力または最大筋力の60%以上の収縮強度で、数秒から10秒以内の収縮時間によって、数回から多くの反復回数を設定している。しかしながら、このような方法で等尺性運動を行わせると、高強度の持続的収縮による筋内圧の増加⁵⁾や筋交感神経活動の亢進⁶⁾により活動筋内の血流は著しく阻害され、筋への酸素供給が断続的に一定の時間制限されることになり、そのため活動筋には脱酸素化が生じてしまう。よって、活動筋のエネルギー産生機構は解糖系代謝への依存を大きくし、乳酸の産生量増加⁷⁾を引き起こすとともに、その酸化的除去にも影響を及ぼし、結果として乳酸が活動筋に蓄積することになる。活動筋への乳酸蓄積は筋線維伝導速度の低下⁸⁾や興奮収縮連関の機能不全^{9), 10)}を招き、また、グループ・求心性神経のインパルスを増加させ、活動筋を支配する脊髄運動ニューロンの興奮性を抑制する¹¹⁾ため、筋疲労発現の要因に成り得る。

そこで、本研究では等尺性筋力増強運動に伴う活動筋の脱酸素化と乳酸蓄積をできる限り抑制し、それにより筋疲労を軽減するための方法として筋休息時間の設定に着目した。今回はこれを検討するための基礎データを集積することを目的として、健常者を対象に筋休息時間の長さが異なる高強度の等尺性運動を反復させ、これらの間において活動筋の脱酸素化と乳酸代謝の状態を比較した。

方 法

被験者は事前に研究の目的と方法などの説明を行い同意を得た健康人男性13名であった。年齢、身長、体重、BMIはそれぞれ20.9±3.7歳、171.3±4.8cm、63.2±6.2Kg、21.5±1.6Kg/m²であった。

等尺性運動の方法は被験者を等速性運動機器(CYBEX770-NORM)に坐らせ、股関節80度屈曲位・右膝関節60度屈曲位にて膝伸展の等尺性運動を最大努力により連続10セット反復させた。1セットあたりの筋活動時間は一定の6秒とし、セット間の休息時間は6秒と12秒、すなわち筋の活動時間と休息時間の比率が1対1と1対2(以下、それぞれ条件1と条件2)になるよう2条件の運動を設定した。なお、両条件の対象者は同一であるため、等尺性運動を行わせる順序は無作為とし、実施間には2日間の休息日を設けた。

このような条件による等尺性運動の間、右内側広筋の脱酸素化の指標として、酸素化ヘモグロビン量(以下、oxy-Hb)と脱酸素化ヘモグロビン量(以下、deoxy-Hb)を測定した。測定機器には近赤外線分光装置(無侵襲酸素モニタOM-220:島津製作所)を用い、プローブは被験筋の筋腹中央付近の皮膚上に専用の弾性バンドを用いて固定し、サンプリング周波数1Hzで測定した。各セットにおける両ヘモグロビンの代表値として、oxy-Hbでは筋活動時の最低値と筋休息時の最高値を、deoxy-Hbでは筋活動時の最高値と筋休息時の最低値を決定し、それらは各ヘモグロビンの運動直前30秒間の平均値(以下、安静値)を基準として変化率に換算した。そして、それらの変化率を用い等尺性運動の前後半各5セットの平均値をそれぞれ算出し解析に用いた。ヘモグロビンの動態解析は筋活動時と筋休息時に分けて行い、それぞれについてまず等尺性運動の両条件にて安静値に

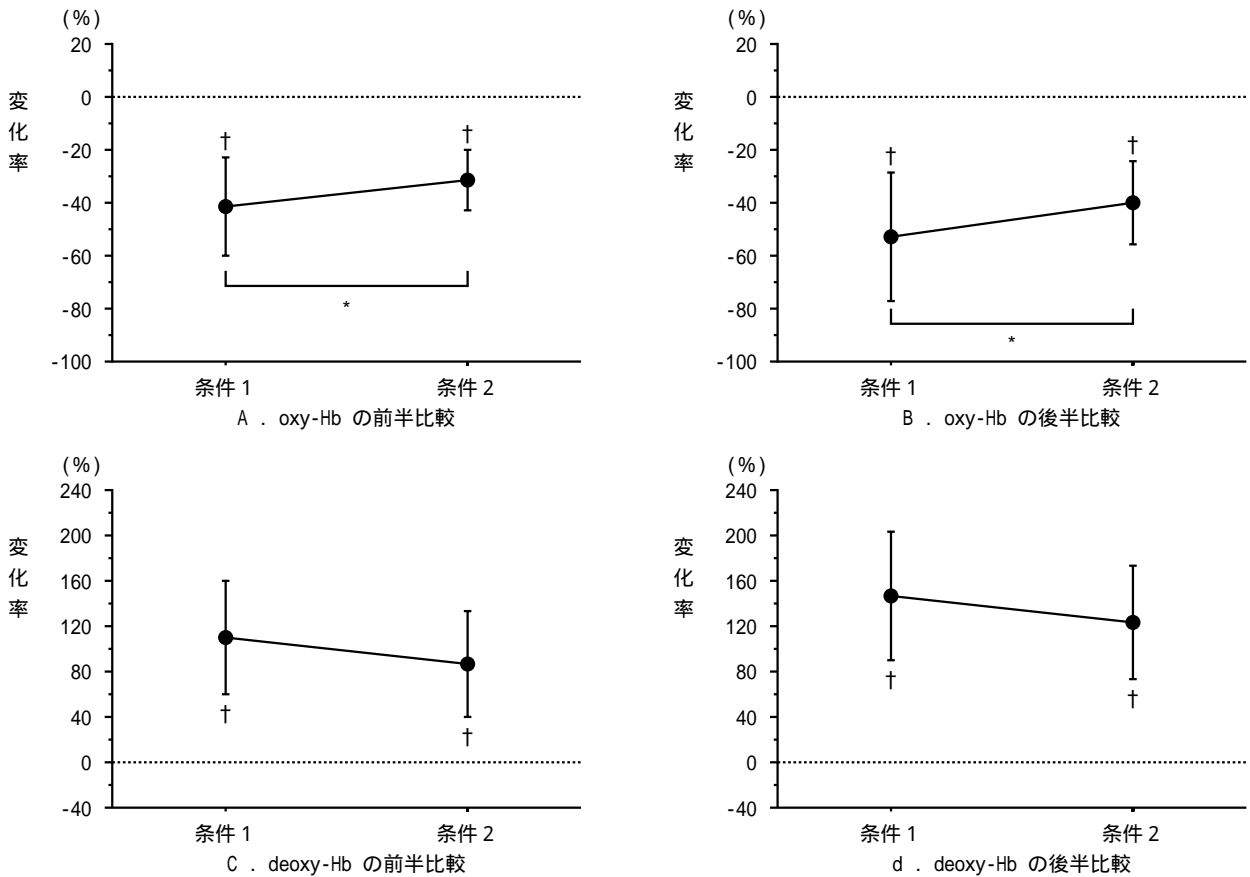


図1 筋活動時の脱酸素化の比較 (平均値 ± 標準偏差)

† p < 0.01, Schefféの方法による安静値との比較

* p < 0.05, 対応のある t 検定による条件間の比較

対し前後半の平均値を比較し、次に条件間で前半および後半の平均値の比較をそれぞれ行った。統計処理は前者には多重比較検定であるSchefféの方法を、後者には対応のある t 検定を用いた。

大腿四頭筋における乳酸代謝の指標として、運動前および運動後 1 分・3 分・6 分の時点において指尖部で静脈血を採取し、簡易血中乳酸測定器 (ラクテート・プロLT-1710: アークレイ社) を用いて血中乳酸濃度を測定した。採血の手順は牧田ら¹²⁾ が推奨する方法を参考に、穿刺部のアルコール消毒の後、専用の採血穿刺器具 (マルチランセットTM : アークレイ社) を用いて穿刺し、最初の血液を拭き取った後に、再度出血させた血液を採取した。血中乳酸濃度の動態解析は、両条件において運動前と運動後の各時点と比較し、次に条件間で運動前および運動後の各時点の比較をそれぞれ行った。統計処理はヘモグロビンの動態解析の場合と同様、前者には

Schefféの方法を、後者には対応のある t 検定を用いた。なお、いずれの検定も有意水準を 5 % とした。

結果

1. 筋脱酸素化の比較

筋活動時における脱酸素化の比較を図 1 に示す。oxy-Hbの筋活動時最低値は、安静値に対して前半には条件 1 で $44.2 \pm 20.3\%$ 、条件 2 で $33.3 \pm 11.9\%$ の減少を、後半には条件 1 で $55.7 \pm 25.3\%$ 、条件 2 で $41.6 \pm 15.9\%$ の減少をそれぞれ示し、それらの減少がいずれも有意 (全て $p < 0.01$) であったことから、両条件の前後半で筋活動時の有意な脱酸素化を認めた。ただし、条件 1 と 2 の筋活動時最低値の差は、前後半とも有意 (共に $p < 0.05$) であったため、脱酸素化の程度は条件 2 の方が有意に小さい結果となった (図 1 A・B)。

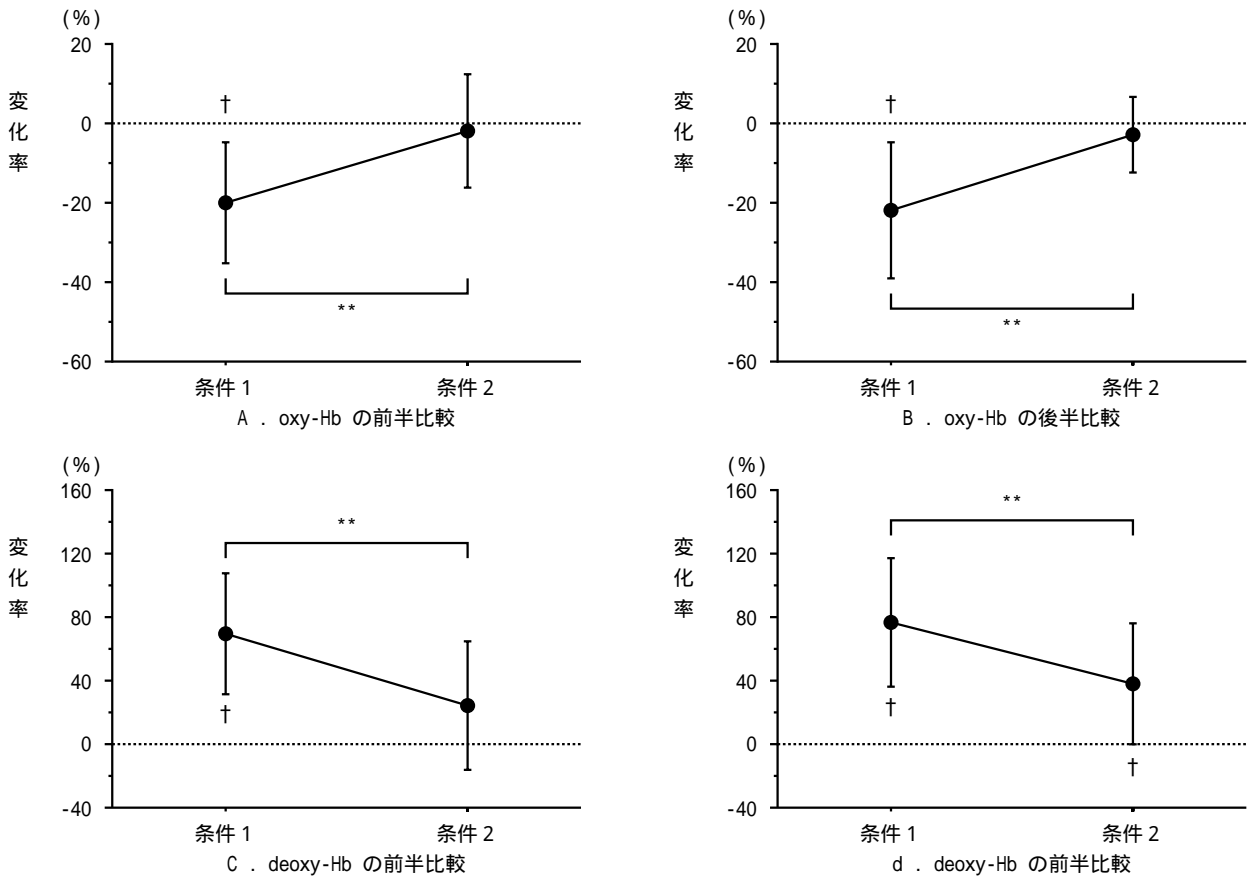


図2 筋休息時の脱酸素化の比較 (平均値 ± 標準偏差)

† p < 0.01, Schefféの方法による安静値との比較

** p < 0.01, 対応のある t 検定による条件間の比較

一方, deoxy-Hbの筋活動時最高値は, 安静値に対して前半には条件 1 で $116.4 \pm 51.4\%$, 条件 2 で $94.2 \pm 47.8\%$, 後半には条件 1 で $159.1 \pm 60.4\%$, 条件 2 で $132.8 \pm 52.5\%$ と, いずれも有意な増加 (全て $p < 0.01$) を示し, oxy-Hbの場合と同様に両条件の前後半において筋活動時の有意な脱酸素化を認めた。ただし, 条件 1 と 2 の筋活動時最高値の差は, 前後半とも有意ではなく, oxy-Hbを指標にした場合とは異なり, 筋活動時の脱酸素化の程度は条件間で差異を認めない結果となった (図 1 C・D)。

次に, 筋休息時における脱酸素化の比較を図 2 に示す。oxy-Hbの筋休息時最高値は, 安静値に対して前半には条件 1 で $21.2 \pm 15.9\%$, 条件 2 で $2.1 \pm 14.7\%$ の減少を, 後半には条件 1 で $23.3 \pm 17.3\%$, 条件 2 で $3.0 \pm 9.8\%$ の減少をそれぞれ示し, 安静値に対し有意差を認めたのは条件 1 の前後半だけ (共に $p < 0.01$) であった。よって, 条件 1 と 2 の筋休

息時最高値の差は前後半で有意 (共に $p < 0.01$) となり, 条件間での筋酸素化レベルには大きな差異を認めた。このように筋休息時においても条件 1 では顕著な脱酸素化の残存が認められたが, 条件 2 では安静時の筋酸素化レベルに等しい程度の回復を得ることができていた (図 2 A・B)。

一方, deoxy-Hbの筋休息時最低値は, 安静値に対して前半には条件 1 で $60.9 \pm 40.3\%$, 条件 2 で $21.3 \pm 40.9\%$ の増加を, 後半には条件 1 で $83.3 \pm 42.7\%$, 条件 2 で $38.8 \pm 39.8\%$ の増加を示した。それらは条件 2 の前半を除いていずれも有意な増加 (全て $p < 0.01$) であったことから, 筋休息時において脱酸素化が有意に回復したのは条件 2 の前半だけとなった。ただし, 条件 1 と 2 の筋休息時最低値の差は, 前後半で有意 (共に $p < 0.01$) であったため, 条件 2 の後半における脱酸素化の程度は条件 1 に比べ有意に小さい結果となった。よって, deoxy-Hbを指

表 血中乳酸濃度の比較 (平均値 ± 標準偏差)

	運動前	運動後		
		1分	3分	6分
条件1	1.6 ± 0.5	4.0 ± 1.5	3.9 ± 1.4	3.3 ± 1.0
条件2	1.2 ± 0.4	2.8 ± 1.0	2.9 ± 1.3	2.3 ± 1.1

比較記号: ** (p < 0.01), * (p < 0.05)

単位 : mmol/l, * p < 0.05, ** p < 0.01

標とした場合においても、条件2の方が筋酸素化レベルの良好な回復を得ることができた (図2C・D)。

2. 血中乳酸濃度の比較

運動前の血中乳酸濃度は条件間で有意差を認めなかった。運動後血中乳酸濃度は両条件のいずれの時点においても運動前に対して有意な上昇 (全て p < 0.01) を示したが、条件間の比較では運動後のいずれの時点でも条件2の方が有意に低濃度 (運動後1分と6分では p < 0.01, 運動後3分では p < 0.05) であった (表)。

考 察

筋活動時の脱酸素化は両運動条件の前後半において有意であった。近赤外線分光法による筋脱酸素化の評価は、筋内の細動脈、毛細血管、細静脈といった微小血管でのoxy-Hbとdeoxy-Hbの動態を測定することによって行われる¹³⁾。これらのヘモグロビンの動態は、筋の動脈血流、静脈血還流、酸素抽出の要因によって決定され⁷⁾、そして、それらの要因は筋の活動と休息に応じて変化する筋内圧、筋交感神経活動、灌流圧、乳酸などの筋血流量調節因子¹⁴⁾やミトコンドリアでの酸素消費などの影響を受けて顕著に変動する。これらの中でも筋内圧は等尺性運動によって起こる脱酸素化の原因として最たるもの

であり、高強度の持続的収縮による筋内圧の顕著な増加は筋内の微小血管を閉塞して動静脈系の血液灌流を著しく阻害する。そして、これにミトコンドリアでの酸素消費の増大も相俟ってoxy-Hbの減少とdeoxy-Hbの増加を招来し、脱酸素化を生じさせる。

運動条件間での脱酸素化の比較では、筋活動時と筋休息時とも有意差を確認できた。筋活動時ではdeoxy-Hbを指標とした場合に有意差を認めることはできなかったが、oxy-Hbでは条件2の方が前半で約10%、後半で約15%も筋酸素化レベルを有意に高く維持することができた。一方、筋休息時では両ヘモグロビンの動態で有意差を確認できた。筋酸素化の回復状態をoxy-Hbの動態でみると、条件1では前後半を通して安静値を約20%も有意に下回っていたのに対して、条件2では前後半とも安静時の筋酸素化レベルと同程度までの回復を得ることができた。よって、前者では筋休息時の酸素化の回復が十分でないままに高強度の等尺性運動を繰り返したことが筋活動時の脱酸素化を一層強め、更にはそれが後の筋休息時の不十分な回復へと連鎖し悪循環を形成していったものと考えられる。一方、後者では筋休息時における酸素化の良好な回復が筋活動時の脱酸素化の抑止と、後の筋休息時の酸素化の回復に好影響をもたらしたものと思われる。

運動後の血中乳酸濃度はいずれの時点においても運動前に対して有意に上昇したことから、両運動条

件によって大腿四頭筋には乳酸が蓄積されたと推測される。活動筋における乳酸蓄積の機序については、Lactate shuttleという概念¹⁵⁾が提唱されている。この概念では、type 線維の解糖系代謝により産生された乳酸はエネルギー基質としてtype 線維のミトコンドリアで酸化的リン酸化により代謝され除去されると説明されている。また、等尺性運動時のエネルギー産生について、活動筋が酸素欠乏に陥るような状態では主に解糖系代謝に依存する⁷⁾ことも指摘されている。したがって、大腿四頭筋の乳酸蓄積はこの筋の脱酸素化が誘因となって引き起こされた乳酸の産生と除去の不均衡によるものと考えられる。ただし、運動後の血中乳酸はいずれも条件2の方が有意に低濃度であった。この結果は、筋活動時および休息時の脱酸素化をできるだけ抑止することで乳酸の産生と除去のバランスを均衡状態に近づけ、それにより乳酸の蓄積を抑制できることを示唆しているものと思われる。

ゆえに、等尺性筋力増強運動に伴う活動筋の乳酸蓄積とそれによる筋疲労を軽減するには、筋の活動時と休息時の両時期で酸素供給をできるだけ維持し、乳酸産生の増加とその酸化的除去にかかわる代謝能の低下を抑制することが重要であると思われる。そのためには運動処方において適切な長さの筋休息時間の設定が必要であり、今後は適用する筋収縮の強度、持続時間、反復回数の設定に応じたモデルケースの検討が必要である

文 献

- 1) 浦辺幸夫：筋力増強運動（筋トレ）の医学的基礎，運動療法ガイド-正しい運動処方を求めて-3版，井上一，武藤芳照，福田潤（編），日本医事新報社，61-73，2000.
- 2) 大井淑雄：筋力増強の生理学，リハビリテーション基礎医学第2版，上田敏，千野直一，大川嗣雄（編），医学書院，331-342，1994.
- 3) Hettinger T：アイソメトリックトレーニング（猪飼道夫・松井秀治訳），大修館書店，79-139，1970.
- 4) Muller EA：Influence of training and of inactivity on muscle strength.Arch Phys Med Rehabil 51:449-462,2000.
- 5) Sadamoto T,Bonde-Petersen F,Suzuki Y:Skeletal muscle tension,flow,pressure,EMG during sustained isometric contractions in humans. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 51:395-408,1983.
- 6) Saitou M,Mano T,Abe H,Iwase S: Responses in muscle sympathetic nerve activity to sustained hand-grips of different tensions in humans.Eur J Appl Physiol Occup Physiol 55:493-498, 1986.
- 7) Katz A, Sahlin K, Henriksson J: Muscle ATP turnover rate during isometric contraction in humans. J Appl Physiol 60:1839-1842,1986.
- 8) Eberstein A,Beattie B:Simultaneous measurement of muscle conduction velocity and EMG power spectrum changes during fatigue. Muscle Nerve 8:768-773, 1985.
- 9) Miura H,Araki H,Matoba H,Kitagawa K: Relationship among oxygenation,myoelectric activity, and lactic acid accumulation in vastus lateralis muscle during exercise with constant work rate.Int J sports Med21:180-184, 2000.
- 10) Duchateau J,Montigny LD,Hainaut K: Electro-mechanical failures and lactate production during fatigue.Eur J Appl 56:287-291,1987.
- 11) 間瀬教史：筋疲労，計測法入門，内山靖，小林武，間瀬教史（編），協同医書，pp83-94，2001.
- 12) 牧田茂，里見潤：簡易血中乳酸測定器（ラクトレート・プロTM）の信頼性について，臨床スポーツ医学14：815-819，1997.
- 13) Quaresima V,Homma S,Azuma K, Shimizu S, Chiarotti F,Ferrari M,Kagaya A:Calf and shin muscle oxygenation patterns and femoral artery blood flow during dynamic plantar flexion exercise in humans. Eur J Appl Physiol 84：387-394，2001.
- 14) 加賀谷淳子，中村好男編：運動と循環，研究の現状と課題，有限会社ナップ，2001.
- 15) Brooks,G.A.: mammalian fuel utilization during sustained exercise.Comp.Biochem. Physiol. Part B,120:89-107, 1998.

Abstract

Changes in deoxygenation and metabolism of lactic acid in the quadriceps femoris muscle were induced by repeated isometric knee extension exercise at different muscular rest intervals. Thirteen healthy male subjects continuously performed 10 sets of isometric extension exercise of the right knee joint at a flexion angle of 60 degrees with maximal voluntary contraction in the sitting position on isokinetic dynamometer. The time of contraction per set of exercise was 6 sec, and two conditions were used for the rest time, 6 sec (condition 1) and 12 sec (condition 2). As a parameter of deoxygenation in the right vastus medialis muscle during the isometric exercise under these conditions, the amounts of oxygenated and deoxygenated hemoglobin were measured using a near-infrared spectrometer. As a parameter of the metabolism of lactic acid in the quadriceps femoris muscles, venous blood was collected from the finger tip before exercise and 1, 3 and 6 min after exercise, and the blood concentration of lactic acid was determined using a blood lactate analyzer.

Significant deoxygenation was noted during the period of the exercise under both conditions, but the oxygenation level remained 10%-15% higher under condition 2 than under condition 1. During the rest period of the exercise, there was a significant difference in the oxygenation level of the muscles between the two conditions. The oxygenation level of the muscles under condition 1 was as much as 20% lower than that during the rest period, while under condition 2, the oxygenation level of the muscles recovered to a level comparable with that during the rest period. On the other hand, the blood concentration of lactic acid increased significantly under both conditions, indicating that lactic acid accumulated in the quadriceps femoris muscle. However, the blood concentration of lactic acid after exercise was significantly lower under condition 2 than that under condition 1, suggesting that the balance between the generation of lactic acid and its removal by oxidative phosphorylation was closer to equilibrium under condition 2 than under condition 1, which was probably closely related to the considerable difference in the oxygenation level between the exercise and rest periods.

To reduce the accumulation of lactic acid induced by isometric strengthening exercise and the resultant fatigue, it was considered important to maintain as much oxygen supply to the muscles as possible and to suppress the decrease in the metabolism involved in the increase in lactic acid production and its oxidative removal. Therefore, an appropriate rest period must be included in isometric strengthening exercise, and further studies using models with various intensities, durations, and repetition times of muscular contraction will be necessary.