●原　著●

短時間等尺性膝関節伸展運動時における筋酸素動態と疲労耐性との関連

光岡かおり[1]　木目良太郎[2]　長田　卓也[2]　村瀬　訓生[2]　勝村　俊仁[2]

要　旨：持久系トレーニングを行っている健常者を対象に，最大短時間等尺性膝関節伸展運動時における筋酸素動態と疲労耐性（Fr）との関連について検討した。運動初期の組織酸素化指標（TOI）低下率と Fr との間に有意な負の相関（r=–0.76，p<0.05）が，TOI の運動後再酸素化時間と Fr との間に正の相関傾向がそれぞれみられた。以上から，局所の疲労耐性が高い者は，運動初期の脱酸素化が大きく，運動後の再酸素化も速いことが示された。（J Jpn Coll Angiol 2013; **53**: 93–98）

Key words: NIRS, isometric, fatigue rate, Tissue Oxygenation Index, reoxygenation

序　言

近赤外分光法装置（NIRS; near-infrared spectroscopy）を用いた運動時の筋酸素動態に関して，これまでに多くの報告がなされている。NIRS で測定された酸素化レベルは組織での酸素消費と酸素供給のバランスを反映し，運動初期においては酸素消費（ミトコンドリアの呼吸）が酸素供給（筋血流）を上回るため，筋酸素化レベルは低下（脱酸素化；Deoxygenation）する[1)]。Hamaoka ら[2)]は運動初期の筋酸素動態と筋有酸素能との関連について検討し，最大随意収縮力の 40％強度による間欠的等尺性運動において，運動初期の脱酸素化率（Deoxy-rate）と遅筋線維割合との間に有意な正の相関がみられたことから，運動初期の脱酸素化率は筋有酸素能の指標になることが示唆されている。また，Bae ら[3)]により，高強度自転車運動（Wingate anaerobic test）時の運動初期脱酸素化率と最大酸素摂取量の間に有意な正の相関が認められている。

一方，運動終了後の筋酸素化レベルの回復動態から，筋の有酸素能を評価する研究も行われている。運動終了直後において，血流量が十分増加している場合では，筋有酸素能の高い方が再酸素化速度は高くなる[4, 5)]が，血流量の増加が十分でない場合，筋有酸素能の高い方が再酸素化速度は低くなる[6, 7)]ことから，運動形態や運動強度の相違による運動終了時の血流量によって両者の関係は異なる[6, 7)]と考えられている。

筋疲労の要因は「中枢性」と「末梢性」に分けられるが，短時間での持続的最大随意収縮時において，鍛錬者やよく動機付けされた者では，張力低下は大半が末梢での代謝的要因によることが示唆されている[8, 9)]。最大努力による 30 秒から 60 秒の等尺性膝関節伸展運動では張力は直線的に低下する[8)]ことから，開始時の張力に対する終了時の張力の減少率[8–10)]，あるいは臨床ではトルク波形の面積から算出される疲労指数（Fatigue Index）[11, 12)]が疲労の評価に用いられている。

われわれはこれまでに，高い筋内圧により筋の酸素供給が阻害される[13)]最大努力による短時間等尺性膝関節伸展運動を用いて，筋酸素動態と疲労耐性との関連について検討している[14)]。持久力強化のためのトレーニングをとくに行っていない健常者を対象に，運動中の張力の低下をトルク減少率（Fr; Fatigue rate）として算出し，酸素化ヘモグロビン・ミオグロビン（Oxy Hb･Mb）の運動後再酸素化時間（Tr）との関係を検討したところ，有意な負の相関が認められ，Fr が小さく疲労耐性の高い者ほど運動後の再酸素化は遅延する，という結果であった。Kime ら[7)]の研究においても，最大等尺性運動時の筋酸素消費が大きい者ほど運動後の再酸素化速度は低く，短時間での最

[1] 至学館大学健康科学部健康スポーツ科学科
[2] 東京医科大学健康増進スポーツ医学講座
第 18 回医用近赤外線分光法研究会（2011 年 10 月，岐阜）にて発表
doi: 10.7133/jca.12-00014

2012 年 4 月 30 日受付　2013 年 6 月 4 日受理

大等尺性運動直後では酸素供給の増加が不十分であることから，運動後の再酸素化は酸素消費の影響を強く受けることが示唆されている。しかしながら，最大下運動後の Tr は持久系アスリートの方が一般人より短い[15]との報告があり，最大運動後の Tr も，酸素供給が高い者では酸素消費よりも酸素供給の影響が強まることが考えられる。また，運動初期に関して，中強度間欠的等尺性運動の初期脱酸素化率が筋有酸素能の指標になり[2]，高強度自転車運動初期の筋酸素消費量は有酸素能と関連する[3]ことに加え，持続的最大随意収縮時には，開始後 1 分程度までは張力低下パターンは筋線維組成に依存する[16]ことから，短時間最大等尺性運動において，疲労耐性と初期脱酸素化率には関連のあることが考えられる。以上から，持久系トレーニング者については，疲労耐性が高いほど，最大運動における初期脱酸素化率も大きくなり，また運動後再酸素化も速くなる，との仮説を立てた。本研究では，持久系トレーニングを高頻度で行っている健常者を対象に，最大努力による短時間等尺性膝関節伸展運動における筋酸素動態と疲労耐性との関連について検討することを目的とした。

対象と方法

1. 対象

被験者は健康な女性 7 名(年齢：21±1 歳，身長：158.4±5.6 cm，体重：52.6±4.8 kg，体脂肪率：20.9±4.1％)で，定期的(週 4〜6 日，1 日あたり約 3 時間以上)に球技系スポーツの練習を行っており，かつ持久力強化のためのトレーニングを週 4 回以上実施している者とした。なお，球技系種目の内訳は，バレーボール 2 名，ハンドボール 2 名，サッカー，硬式テニス，ソフトボール各 1 名であった。持久トレーニングの形態としては，ランニング系(インターバル走，シャトルランニング，12 分間走)，またはサーキット系(サーキットトレーニング，フットワーク)を 1 回あたり 15 分〜30 分程度，週 4 回以上行っていた。なお，本研究では全身持久力の指標である最大酸素摂取量あるいは他の持久力テストの測定は行わず，最大努力による持続的等尺性運動を用いて，局所の疲労耐性を評価した。実験に先立ち，本研究内容に関して至学館大学倫理審査委員会の承認(承認番号 15)を得たうえで，すべての被験者に本研究の趣旨および実験内容について十分説明し，自由意志による参加の同意を文書で得た。

2. 測定項目および方法

筋力測定装置(Isoforce GT-360，OG 技研)を用い，椅子座位姿勢にて，体幹部を専用ストラップで椅子に固定した。右膝関節伸展位 70°(完全伸展位 =0°)で最大努力による等尺性膝関節伸展運動を 30 秒間行わせ，伸展トルクを 100 Hz で測定した。なお，試技前には中強度の等尺性伸展運動による数回のウォーミングアップを行わせた。すべての測定には重力補正を行った。運動開始時から終了時までを 10 秒ごとに初期・中期・後期に分け，得られた試技のトルク波形から Fr を以下の式により算出した(**Fig. 1**)。

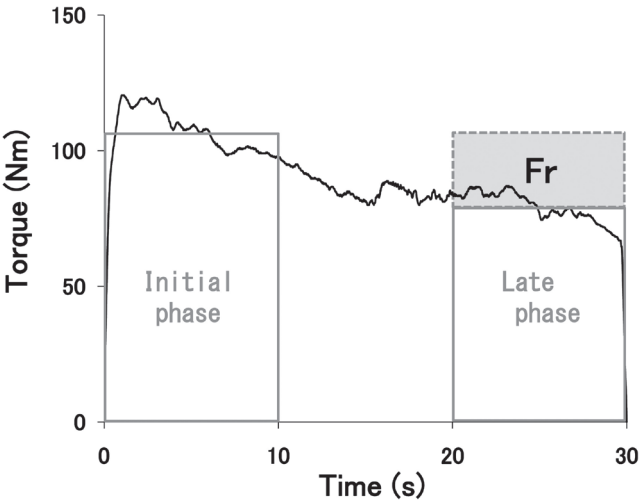


Figure 1　Typical changes in torque during maximal isometric knee extension exercise and Fatigue rate which was calculated from average torque difference between the first 1/3 and the last 1/3.

Fr = (初期トルク平均値 – 後期トルク平均値)/ 初期トルク平均値 ×100

同時に，異なる 3 波長(775，810，850 nm)の光源を持つ近赤外分光法装置(NIRO-200，浜松ホトニクス)を用いて，右大腿直筋中央筋腹部にプローブを粘着テープおよび弾性包帯で固定し，TOI(Tissue Oxygenation Index；組織酸素化指標)の変化を 6 Hz にて測定した。なお，プローブの送受光間距離は 4 cm とした。TOI については安静時から運動終了 30 秒後までを 10 秒ごとに分け，平均値を算出した。また，運動初期 10 秒間の TOI の値から回帰直線の傾きにより TOI 低下率を算出した(**Fig. 2**)。さらに，運動終了後の TOI の最低値と最高値の半分に至るまでの時間を Tr(再酸素化時間)として算出した。

3. 統計処理

各測定結果は 7 名の平均値 ± 標準偏差で示した。安静

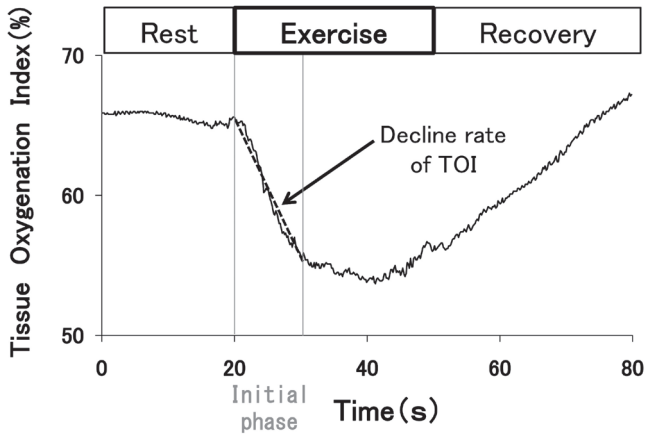


Figure 2 Typical changes in Tissue Oxygenation Index during maximal isometric knee extension exercise and initial decline rate (1–10s) of TOI at the onset of exercise.

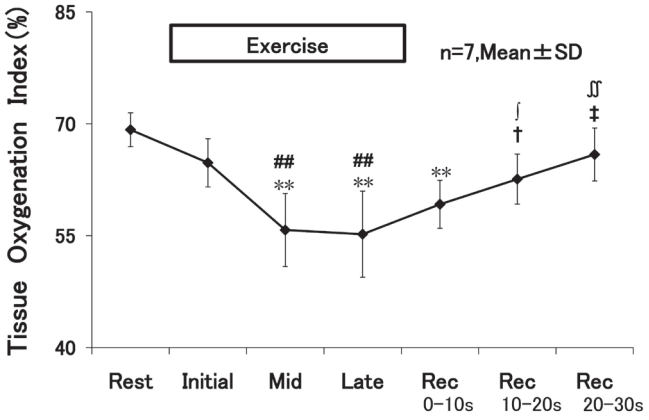


Figure 3 Changes in Tissue Oxygenation Index during rest, maximal isometric knee extension exercise, and recovery. Difference from Rest (**: p<0.01), difference from Initial phase (##: p<0.01), difference from Mid-phase (†: p<0.05, ‡: p<0.01), difference from Late-phase (∫: p<0.05, ∫∫: p<0.01).

時から運動後回復期までの TOI の変化については一元配置分散分析を行い，有意差が認められた場合，多重比較検定として Bonferroni 法を用いた。Fr，TOI 減少率，Tr の各関連には Pearson の相関分析を用いた。いずれも危険率 5%未満を有意とした。

結　果

TOI は安静時，運動中，回復期の各平均値間に有意な差(p<0.01)が認められた。安静時との比較では，運動中期，後期および運動後の回復 0～10 秒に有意(p<0.01)な低下がみられ，また，運動初期との比較では，中期，後期に有意(p<0.01)な低下がみられた(**Fig. 3**)。

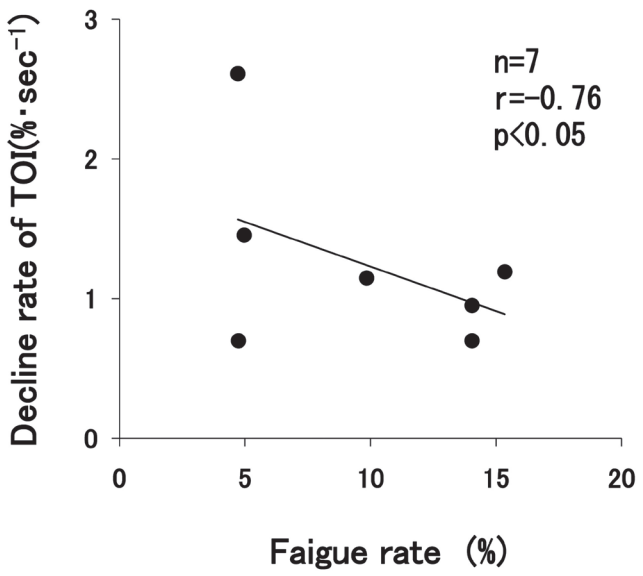


Figure 4 Correlation between Decline rate of TOI and Fatigue rate on maximal isometric knee extension exercise.

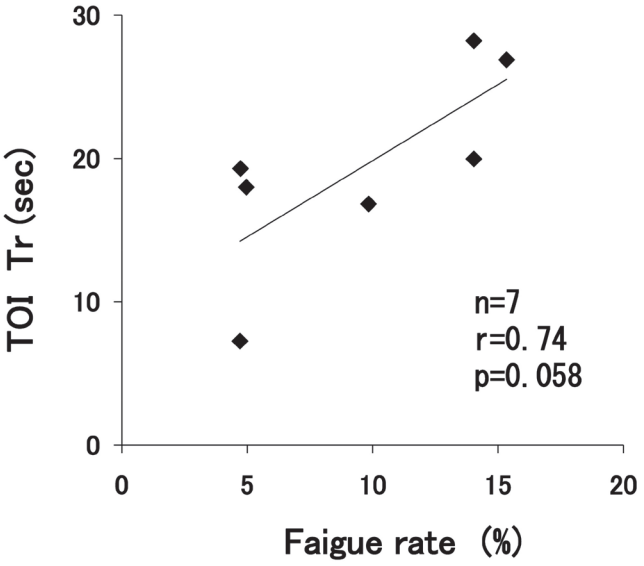


Figure 5 Correlation between TOI recovery time and Fatigue rate on maximal isometric knee extension exercise.

平均トルク値は初期 121.1±24.01(Nm)，中期 114.1±23.45(Nm)，後期 109.3±21.43(Nm)であった。

Fr は 9.7±4.9(%)，TOI 低下率は 1.3±0.7(% ·sec^{-1})，Tr は 19.5±7.0(sec)，であった。TOI 低下率と Fr の間には有意な負の相関(r=–0.76，p<0.05)が認められた(**Fig. 4**)。また，Tr と Fr の間には正の相関傾向(r=0.74，p=0.056)がみられた(**Fig. 5**)。さらに，TOI 低下率と Tr の間には有意な負の相関(r=–0.79，p<0.05)が認められた。

考　察

本研究では，持久系トレーニングを高頻度で行っている健常者7名(われわれの先行研究との比較のためEndurance Training群；ET群とする)を対象に，最大努力による短時間等尺性膝関節伸展運動を用いて筋の酸素動態と疲労耐性との関連について検討した。その結果，運動中では，初期TOI低下率とFrの間に有意な負の相関(r=–0.76，p<0.05)が認められ，また運動後では，TrとFrの間に正の相関傾向(r=0.74，p=0.056)がみられた。

本運動において，60秒以内の張力低下率は約1%・sec^{-1}とされ[8-10]，Frに換算すると約20%になる。本被験者では全員が20%を下回っており，局所の疲労耐性は一般的な平均よりも高いと評価される。持久系アスリートのFrを測定した研究はみられないが，最大努力での等速性低速(90 deg・sec^{-1})運動を用いた研究[17]によれば，膝関節伸展運動の6回目から25回目までの各仕事量(トルク波形面積；J)がスプリンター群では有意に減少し，マラソンランナー群では各仕事量は一定に保たれていた。NIRSによる観察[18]では，最大等速性運動でも初期から脱酸素化がみられたことから，持久系アスリートでは筋内圧による血流阻害が起こる運動での最大トルク値や仕事量の減少の程度はきわめて小さいため，Frが約5%と小さかった本3名の値は妥当な範囲内にあると考えられる。

TOIの酸素化レベルは組織での酸素消費と酸素供給のバランスを反映する。運動初期における筋の酸素摂取動態の規定要因は酸素供給よりも酸素消費が主となり[19]，Baeら[3]の高強度自転車運動でも初期から筋酸素消費量が高かったことが示されている。Hamaokaら[2]の研究では，弛緩期よりも収縮期の方が長い中強度間欠的等尺性運動が用いられているため，筋内圧による血流阻害が起こりやすく，また，この強度の運動では遅筋と速筋の両線維が動員される。こうした条件下での脱酸素化は活動筋のoxygen extractionを反映し，運動初期の脱酸素化率は筋有酸素能の指標になることが示唆されている[2]。Hamaokaら[2]やBaeら[3]の運動とは強度あるいは様式が異なるものの，本研究において，TOIは運動初期から中期まで急激に低下しており，このTOIの変動は高い筋内圧による酸素供給の阻害[13]と酸素消費の急激な増大[6, 7]によると思われる。そのため，初期の酸素化レベルの低下率は酸素消費を強く反映し，局所の疲労耐性の高い者ほど初期のTOI低下率が高かったことから，運動初期における筋酸素消費量の立ち上がりが疲労耐性に影響を及ぼしていると示唆される。

筋疲労の要因は「中枢性」と「末梢性」に分けられるが，通常運動時の筋疲労は「末梢性」が主となる。電気刺激による実験および筋電図から，鍛錬者やよく動機付けされた者では，短時間での最大随意収縮時における張力低下は大半が末梢での代謝的要因による[8, 9]ことが示されている。最大等尺性運動時では筋内のPCrの減少に伴うPiの増加，およびH^+の蓄積が張力の低下を引き起こし，筋疲労を惹起する[20]。以前は，最大運動の初期10秒間ではATP-PCr系および解糖系が主たるエネルギー供給系であり，酸化的リン酸化系はほとんど動員されないと報告されていた[21]が，^{31}P-MRSにより，最大運動開始後9秒以内に最大有酸素ATP合成率(maximal oxidative ATP synthesis rate)の85%程度まで増加することが明らかになってきた[22]。これらから，本運動様式において，運動初期より酸化的リン酸化系の動員が大きければTOI低下率は大きくなり，Piの増加およびH^+の蓄積は少なくなるため，Frも小さくなり疲労耐性が高まると考えられる。

一方，運動終了後の筋酸素動態と疲労耐性との関係について，本研究ではTrとFrの間に正の相関傾向(r=0.74，p=0.058)がみられた。最大下運動後のTrは持久系アスリートの方が一般人よりも短かったことが報告され[15]，運動終了後における筋酸素化レベルの回復動態の違いから筋有酸素能を評価する研究[4-7]が行われている。われわれの先行研究[14]で，柔道の技術練習のみ週1〜2日，1日あたり約1時間行っており，持久系トレーニングはとくに行っていない者(本研究との比較のためnon-Endurance Training群；nET群とする，男性6名，年齢：27±4歳，身長：170.0±6.6 cm，体重67.2±4.9 kg，体脂肪率：20.8±7.5%)を対象に，本研究と同様の運動を行った際のFrは平均で約22%であった。それに対して，本ET群のFrはnET群のほぼ半分の平均約10%であり，両者の疲労耐性には大きな差があると考えられる。また，nET群ではOxy Hb・Mb値から算出したTrが平均25.9 secであったが，ET群ではTOI値から算出したTrが平均19.5 secであり，両者の比較からET群では回復が速い傾向にあると思われる。nET群ではTrとFrの間に負の相関関係が認められ，これはKimeら[6, 7]の報告と同様であり，疲労耐性が高い者ほどTrは延長することが示された。一方，本ET群については，TrとFrの間に正の相関傾向がみられ，Kimeら[6, 7]とは異なる結果であった。

McCullyら[5]によれば，最大下運動後の筋酸素化レベルには筋血流量が強く反映され，血流量の高い筋ほど筋酸素化レベルの回復速度が高いと報告している。一方Kime

ら[6]は，10秒間の短時間高強度等尺性運動後における筋酸素化レベルの回復速度はOxidative Capacityの高い筋ほど低いとしている。両者の相違についてKimeら[6, 7]は，運動後の筋血流量の違いを挙げ，10秒間の高強度運動終了直後には筋への酸素供給量がまだ十分ではなく，筋酸素消費量の影響が大きかったと考察している。

運動終了直後の反応性充血により測定された局所の血流量に関して，一般人よりも持久系鍛錬者の方が高く[23]，また4週間の局所トレーニング前後の比較から，トレーニング後の方がトレーニング前よりも高くなった[24]という報告がある。さらに，持久系アスリートの方が一般人よりも最大下運動後のTrが有意に短いこと[15]，およびET群とnET群によるTrの比較から，本対象者においては，持久系トレーニングにより酸素供給量が著しく高められており，運動中には筋内圧により阻害されていた血流が，運動終了直後の筋内圧の急激な低下に伴い短時間に回復し，酸素供給が酸素消費を上回ったため，運動後再酸素化時間の短縮を引き起こしたことが推測される。すなわち，運動終了直後からET群では酸素消費を上回る酸素供給がなされ，再酸素化時間とFrは正の相関傾向を示したが，nET群では酸素供給が少ないため酸素消費の影響が反映され，再酸素化時間とFrは負の相関を示した可能性が考えられる。

また，本研究ではTOI低下率とTrの間に有意な負の相関（$r=-0.79$，$p<0.05$）が認められた。本最大運動では初期の酸素消費が大きい者は運動終了後に酸素消費よりも酸素供給の方が相対的に大きかったと考えられるが，運動後の酸素消費量や酸素供給量を測定しておらず，また運動初期と運動後の酸素動態の関連については報告されていないため，今後さらに検討する必要がある。

以上から，中強度間欠的等尺性運動[2]や最大努力による高強度自転車運動[3]のみならず，持続的最大等尺性運動においても，運動初期の脱酸素化率が有酸素能あるいは局所における疲労耐性の指標となりうることが示唆される。一方，運動後に関しては，運動形態や運動強度の相違以外に，対象者の有酸素能あるいは局所の疲労耐性の程度により，再酸素化が促進または遅延する場合があると推測されるため，今後さらに対象者を増やすと同時に，持久系トレーニング者と非トレーニング者の比較により検討する必要があると考える。

結　論

持久系トレーニングを高頻度で行っている健常者7名を対象に，最大努力による短時間等尺性膝関節伸展運動における筋の酸素動態と疲労耐性との関連について検討した。その結果，運動初期のTOI低下率と疲労耐性の間に有意な負の相関が認められ，また運動後のTOI再酸素化時間と疲労耐性の間に正の相関傾向がみられた。以上から，局所の疲労耐性が高い者は，運動初期の脱酸素化が大きく，運動後の再酸素化も速いことが示された。

文　献

1）浜岡隆文，岩根久夫：近赤外光を用いた運動中の筋組織の酸素動態．BME 1994; **8**(11): 22–29

2）Hamaoka T, Mizuno M, Katsumura T, et al: Correlation between indicators determined by near infrared spectroscopy and muscle fiber types in humans. Jpn J Appl Physiol 1998; **28**: 243–248

3）Bae SY, Hamaoka T, Katsumura T, et al: Comparison of muscle oxygen consumption measured by near infrared continuous wave spectroscopy during supramaximal and intermittent pedalling exercise. Int J Sports Med 2000; **21**: 168–174

4）Chance B, Dait MT, Zhang C, et al: Recovery from exercise-induced desaturation in the quadriceps muscles of elite competitive rowers. Am J Physiol 1992; **262**: 766–775

5）McCully KK, Iotti S, Kendrick K, et al: Simultaneous in vivo measurements of HbO_2 saturation and PCr kinetics after exercise in normal humans. J Appl Physiol 1994; **77**: 5–10

6）Kime R, Katsumura T, Hamaoka T, et al: Reoxygenation rate immediately after static short-term high intensity exercise indicates muscle oxidative capacity. Appl Cardiopulmonal Pathophysiol 2000; **9**: 343–347

7）Kime R, Hamaoka T, Sako T, et al: Delayed reoxygenation after maximal isometric handgrip exercise in high oxidative capacity muscle. Eur J Appl Physiol 2003; **89**: 34–41

8）Bigland-Ritchie B, Jones DA, Hosking GP, et al: Central and peripheral fatigue in sustained maximum voluntary contractions of human quadriceps muscle. Clin Sci Mol Med 1978; **54**: 609–614

9）Bigland-Ritchie B, Hosking GP, Jones DA: The site of fatigue in sustained maximal contractions of the quadriceps muscle. J Physiol 1975; **250**: 45P–46P

10）Grange RW, Houston ME: Simultaneous potentiation and fatigue in quadriceps after a 60-second maximal voluntary isometric contraction. J Appl Physiol 1991; **70**: 726–731

11）Schwid SR, Covington M, Segal BM, et al: Fatigue in multiple sclerosis: current understanding and future directions. J Rehabil Res Dev 2002; **39**: 211–224

12）Surakka J, Virtanen A, Aunola S, et al: Reliability of knee muscle strength and fatigue measurements. Biol Sport 2005; **22**: 301–313

13）Sadamoto T, B-Petersen F, Suzuki Y, et al: Skeletal muscle tension, flow, pressure, and EMG during sustained isometric

contraction in humans. Eur J Appl Physiol 1983; **51**: 395–408
14）光岡かおり，木目良太郎，長田卓也，他：等尺性運動時における共同筋間での筋酸素動態の比較．体力科学 2007; **56**: 605
15）Hamaoka T, Albani C, Chance B, et al: A new method for the evaluation of muscle aerobic capacity in relation to physical activity measured by near-infrared spectroscopy. Med Sport Sci 1992; **37**: 421–429
16）Caffier G, Rehfeldt H, Kramer H, et al: Fatigue during sustained maximal voluntary contraction of different muscles in humans: dependence on fibre type and body posture. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 1992; **64**: 237–243
17）Lorentzon R, Johansson C, Sjöström M, et al: Fatigue during dynamic muscle contractions in male sprinters and marathon runners: relationships between performance, electromyographic activity, muscle cross-sectional area and morphology. Acta Physiol Scand 1988; **132**: 531–536
18）Mitsuoka K, Kime R, Osada T, et al: Muscle oxygenation kinetics on isokinetic exercise—comparison with isometric exercise—. Journal of Clinical Welfare 2006; **3**: 40–45
19）Grassi B: Regulation of oxygen consumption at exercise onset: is it really controversial? Exerc Sport Sci Rev 2001; **29**: 134–138
20）Degroot M, Massie BM, Boska M, et al: Dissociation of [H+] from fatigue in human muscle detected by high time resolution 31P-NMR. Muscle Nerve 1993; **16**: 91–98
21）Serresse O, Lortie G, Bouchard C, et al: Estimation of the contribution of the various energy systems during maximal work of short duration. Int J Sports Med 1988; **9**: 456–460
22）Walter G, Vandenborne K, Elliott M, et al: In vivo ATP synthesis rates in single human muscles during high intensity exercise. J Physiol (Lond) 1999; **519** (Pt 3): 901–910
23）Snell PG, Martin WH, Buckey JC, et al: Maximal vascular leg conductance in trained and untrained men. J Appl Physiol 1987; **62**: 606–610
24）Sinoway LI, Shenberger J, Wilson J, et al: A 30-day forearm work protocol increases maximal forearm blood flow. J Appl Physiol 1987; **62**: 1063–1067

Relationship between Muscle Oxygenation Kinetics and Tolerance to Fatigue on Short-term Isometric Knee Extension Exercise

Kaori Mitsuoka,[1] Ryotaro Kime,[2] Takuya Osada,[2] Norio Murase,[2] and Toshihito Katsumura[2]

[1]Department of Sports and Fitness, Faculty of Wellness, Shigakkan University, Aichi, Japan
[2]Department of Sports Medicine for Health Promotion, Tokyo Medical University, Tokyo, Japan

Key words: NIRS, isometric, fatigue rate, Tissue Oxygenation Index, reoxygenation

The purpose of this study was to examine the relationship between muscle oxygenation kinetics and tolerance to fatigue (Fr) on short-term maximal isometric knee extension exercise for healthy endurance-trained women. The decline rate of Tissue Oxygenation Index (TOI) at the onset of exercise had a significant negative correlation to Fr ($r=-0.76$, $p<0.05$). The half-time of TOI recovery tended to have a positive correlation to Fr ($r=0.74$, $p=0.056$). The subjects with higher localized tolerance to fatigue showed greater deoxygenation at the onset of exercise and faster reoxygenation at recovery.

(J Jpn Coll Angiol 2013; **53**: 93–98)