下肢筋疲労と運動負荷強度との関係

The Relationship between Lower Leg Muscle Fatigue and Exercise Intensity

池田 由美 竹井 仁 富田 浩
岩崎 健次 池田 誠 柳澤 健

YUMI IKEDA, RPT, HITOSHI TAKEI, RPT, MS, HIROSHI TOMITA, RPT, KENJI IWASAKI, RPT,
MAKOTO IEKDA, RPT, PhD, KEN YANAGISAWA, RPT, PhD

*Tokyo Metropolitan college of Allied Medical Sciences, Department of Physical Therapy:
7-2-10 Higashioku, Arakawa-ku, Tokyo 116-0012, Japan. TEL +81 3-3819-1211*

Rigakuryoho Kagaku 13(1): 29-32, 1998. Submitted May 14, 1997. Accepted Oct. 20, 1997.

ABSTRACT: We designed a 6-min motor stress test on bicycle ergometer at three different exercise intensities of 50, 100 and 150 W, and examined the relation between muscle fatigue of vastus lateralis muscle and the exercise intensity from the results of integrated EMG (IEMG) and median power frequency (MdPF) of 8 healthy males. At the exercise intensities of 50 and 100 W, there was no change both in IEMG and MdPF throughout the experimental period. At the exercise intensity of 150 W, there was no change in IEMG and MdPF until 3 min, but an increase in IEMG and a transfer of MdPF to the low frequency range were observed in 5 subjects from 4 min. This suggests that muscle fatigue of vastus lateralis muscle is induced at the exercise intensity from 100 to 150 W.

Key words: muscle fatigue, surface EMG power spectrum, integrated EMG

要旨: 3種類 (50W, 100W, 150W) の負荷強度で下肢自転車エルゴメータによる6分間の一段階運動負荷試験を行い、筋電図積分値 (IEMG) と周波数パワースペクトル中央値 (MdPF) の変化から外側広筋の筋疲労と運動負荷強度との関係を健康男性8名で検討した。IEMGとMdPFは、50Wおよび100W負荷強度では1~6分の間では変化が見られなかった。しかし、150Wでは初めの3分間は8例とも変化がないが、4分目でIEMGの上昇とMdPFの低周波帯域への移行が5例で見られた。100Wから150W間の負荷強度で外側広筋の疲労が生じていることが示唆された。

キーワード: 筋疲労, 周波数分析, 筋電図積分値

東京都立医療技術短期大学理学療法学科: 東京都荒川区東尾久 7-2-10 (〒116-0012) TEL 03-3819-1211

受付日 1997年5月14日 受理日 1997年10月20日

I. はじめに

運動耐容能は単に心肺機能だけではなく、末梢の活動筋組織での代謝効率を含めた能力である。運動耐容能を表す指標の一つとして筋疲労があげられる。筋疲労は、1) 発生張力の低下、2) 一定張力保持（負荷）に対する筋電図活動（振幅と頻度）の増加、3) 筋電図周波数パワースペクトルの低周波帯域への移行（徐波化）として定義される¹⁾。この筋疲労の評価としては、筋電図積分値やRMS (root mean square)、周波数解析などの指標が広く用いられている。松本ら²⁾は下肢自転車エルゴメータを用いて異なる負荷強度（200, 250, 300, 350W）の運動を最高1分間行ったときの外側広筋の筋電図積分値から、時間が経過しても疲労しない疲労性作業閾値を算出している。また、心不全患者に運動療法を行うことで、活動筋血流量の増加や動静脈酸素較差の増大といった末梢効果による運動耐容能の改善が認められている³⁾。一般中高年齢者の最大酸素摂取量（maximal oxygen up-take; $\dot{V}O_2\text{max}$ ）の低下は加齢に伴う筋量の減少によるためであるとし、エアロビクトレーニングとレジスタンストレーニング施行後、速筋線維面積や最大酸素摂取量（ $\dot{V}O_2\text{max}$ ）などの有意な増加を見たという報告もある⁴⁾。

このように運動処方を行うにあたっては、筋疲労を伴わない効果的なトレーニング強度を知る必要がある。そこで本研究では運動負荷中の筋活動を周波数分析することで、筋疲労と運動負荷の関係を検討することを目的とした。

II. 対象と方法

対象は健康成人男性8名で、平均年齢22.1歳（19～26歳）、平均身長 170.8 ± 6.5 cm、平均体重 65.4 ± 7.6 kgであった。

運動負荷様式は下肢自転車エルゴメータ（モナーク社製 Model 868）を用い、5分間の安静後6分間の一段階負荷試験を行った。サドルの高さは膝関節が軽く屈曲する程度とし、回転数は60 rpm、運動負荷強度は50 W, 100 W, 150 Wの3種類とした。各試行による疲労の影響を避けるために、各々の運動負荷は1日以上の間隔をあけて行った。

運動負荷中の酸素摂取量はエアロモニタ（ミナト医科学製 AE-280S）を用い、プレス・バイ・プレス法により測定した。心拍数は CM_5 誘導により運動負荷用血圧監視装置（日本コーリン社製 ATBP-780）を用いて測定し、エア

ロモニタに同期させた。外側広筋・大腿直筋・大腿二頭筋・ヒラメ筋の表面筋電図（EMG）を導出し、多用途計測記録装置（日本光電社製 RM-6000）を介してデータレコーダ（TEAC XR-710）に入力すると同時に、ペンレコーダに記録した。電極間距離は約2 cmとし、電極位置はDelagiら⁵⁾の方法に従った。収録したEMGをA/D変換し、サンプリング周波数1 kHzでパーソナルコンピュータ（NEC PC-9801RA）に取り込み、多用途生体情報解析プログラム（KISSEI COMTEC社製 BIMUTAS Ver. 3.0）を用い、周波数解析を行った。運動開始から1分毎に10秒間、すなわち自転車エルゴメータ約10回転分のEMGについて、積分値（integrated EMG: IEMG）と周波数パワースペクトル中央値（median power frequency: MdPF）を求めた。MdPFはEMG波形の自己相関関数を求めフーリエ変換を行い算出した。運動開始から1分目のMdPF, IEMGの値を1として2分目から6分目までの値を相対値として標準化し筋疲労の指標とした。

また、被験者の心肺機能を評価するために、亜最大下運動負荷試験を行った。下肢自転車エルゴメータ上で安静の後、20 W 4分間のウォーミングアップに続き、1分間に10 W増のランブ負荷を実施した。運動負荷中の酸素摂取量、心拍数、血圧の測定は一段階運動負荷試験時と同様の装置を使用した。得られた結果より、peak $\dot{V}O_2$ を求め、さらに予測 $\dot{V}O_2\text{max}$ を算出した。各被験者について50 W, 100 W, 150 Wの各負荷強度を $\dot{V}O_2\text{max}$ 当たり（% $\dot{V}O_2\text{max}$ ）の比率で表した。統計処理としては、各負荷強度の運動終了時における体重当たりの酸素摂取量と心拍数、1分毎のIEMGとMdPFについて一元配置分散分析と多重比較検定（LSD法）を行った。統計ソフトはSPSS（Ver. 6.1）を用いた。

III. 結果

一段階運動負荷終了時の酸素摂取量（ $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）と、心拍数は運動負荷強度の増加に伴い上昇した（ $p < 0.05$ ）（図1）。50 W, 100 W負荷強度では全被験者において定常状態が確認された。150 W負荷強度では6分間運動を持続できた2名以外は3～5分間でend pointに達し運動を持続できなかった。また、ランブ負荷による亜最大下試験から求めたpeak $\dot{V}O_2$ と予測 $\dot{V}O_2\text{max}$ の平均値と標準偏差を表1に示す。50 W, 100 W, 150 Wの各負荷強度を $\dot{V}O_2\text{max}$ 当たり（% $\dot{V}O_2\text{max}$ ）の比率で表したときの平均値と標準偏差を表2に示す。

下肢自転車エルゴメータ駆動時、大腿直筋、大腿二頭筋、ヒラメ筋はいずれも運動周期に同調した筋活動が得

図1 運動負荷強度と体重当たりの酸素摂取量と心拍数の変化 (n=8, *: p<0.05, mean ± SD)

られなかったため分析不能とし、外側広筋のみの IEMG と MdPF を分析した。まず全被験者において定常状態後の 50 W, 100 W 負荷強度では、IEMG と MdPF の各時間経過に有意差はなく経時的変化は認められなかった (表 3, 4)。

150W 負荷強度の IEMG と MdPF の経時的変化を表5に示す。IEMG は運動負荷開始後 4 分目までは増大しその後一定の値をとった。MdPF は運動負荷開始後 1, 2 分は変化せず、その後 3, 4 分目まで低周波帯域へ移行した。さらに 5, 6 分目は上昇していく傾向が認められた。しかしこの負荷強度を最後まで遂行できたものは 2 名であった。

IV. 考 察

1. 被験者の心肺機能について

本実験の被験者の心肺機能については、20 代男性の peakVO₂ の平均値が 33.5 ± 6.7 ml·min⁻¹·kg⁻¹ ⁶⁾, VO₂max の平均値が 49.6 ± 7.2 ml·min⁻¹·kg⁻¹ ⁷⁾ という報告から、標準的な心肺機能の対象であったといえる。

2. 各負荷強度における IEMG と MdPF の変化について

6 分間における 50 W (30% VO₂max), 100 W (約 60% VO₂max) 負荷強度では、IEMG と MdPF が一定レベルを維持していたことや、酸素摂取量や心拍数の定常状態が確認されたことから、これらの負荷強度では筋組織

表1 亜最大下負荷試験 (ランブ負荷) から求めた peakVO₂ と予測 VO₂max (n=8)

peakVO ₂	(mlO ₂ ·min ⁻¹ ·kg ⁻¹)	38.4 ± 4.49
VO ₂ max	(mlO ₂ ·min ⁻¹ ·kg ⁻¹)	47.7 ± 3.61

表2 各負荷強度の予測最大酸素摂取量に対する比率

	50W	100 W	150W
% VO ₂ max	30.1 ± 4.71	58.2 ± 6.01	74.7 ± 7.49

表3 50 W 負荷時における外側広筋の IEMG と MdPF 経時の変化 (n=8)

Time (min)	IEMG mean ± SD	MdPF mean ± SD
1	1.00	1.00
2	1.00 ± 0.09	0.94 ± 0.28
3	0.97 ± 0.10	0.98 ± 0.49
4	1.03 ± 0.17	1.04 ± 0.42
5	0.98 ± 0.13	0.96 ± 0.34
6	1.01 ± 0.15	0.98 ± 0.31

注) 2 分目から 6 分目までの値は 1 分目の値を 1 としたときの相対値

表4 100 W 負荷時における外側広筋の IEMG と MdPF 経時の変化 (n=8)

Time (min)	IEMG mean ± SD	MdPF mean ± SD
1	1.00	1.00
2	0.97 ± 0.07	1.01 ± 0.34
3	1.01 ± 0.09	1.02 ± 0.31
4	0.99 ± 0.15	0.91 ± 0.23
5	1.02 ± 0.13	0.92 ± 0.21
6	1.04 ± 0.15	1.01 ± 0.22

注) 2 分目から 6 分目までの値は 1 分目の値を 1 としたときの相対値

表5 150 W 負荷時における外側広筋の IEMG と MdPF 経時の変化 (3 min まで n=8, 4 min まで n=3, 5 min まで n=3, 6 min まで n=2)

Time (min)	IEMG mean ± SD	MdPF mean ± SD
1	1.00	1.00
2	0.97 ± 0.06	1.10 ± 0.14
3	1.04 ± 0.09	0.92 ± 0.22
4	1.16 ± 0.09	0.70 ± 0.20
5	1.12 ± 0.10	0.89 ± 0.25
6	1.17 ± 0.15	1.00 ± 0.24

注) 2 分目から 6 分目までの値は 1 分目の値を 1 としたときの相対値。*p<0.05。

において酸素の供給が充分であり有酸素的代謝系が働き筋疲労を生じないと考える。Petrofsky⁸⁾は、3名の被験者に対し、20, 40, 60, 80, 100% $\dot{V}O_2\text{max}$ の5種類の負荷強度で、下肢自転車エルゴメータ駆動を行ったときの外側広筋におけるRMS, MPF (mean power frequency; MPF), 動脈血中乳酸濃度の変化を検討した。運動負荷時間は80分間であったが、80, 100% $\dot{V}O_2\text{max}$ での平均運動持続時間は、それぞれ39.2分, 7.3分であった。RMSは60% $\dot{V}O_2\text{max}$ 以上の負荷強度で時間経過とともに上昇した。MPFは60, 80% $\dot{V}O_2\text{max}$ 負荷強度では運動開始20分後から低周波帯域へ移行し始め、100% $\dot{V}O_2\text{max}$ 負荷強度では運動開始とともに低周波帯域へ移行した。また、動脈血中乳酸濃度は60% $\dot{V}O_2\text{max}$ 以上の負荷強度で上昇した。以上の結果から、Petrofskyは20, 40% $\dot{V}O_2\text{max}$ の負荷強度では外側広筋の筋疲労は生じないが、60% $\dot{V}O_2\text{max}$ 以上の負荷強度では筋疲労が生じると述べている。これらの結果と本実験の結果とを照らし合わせると、60% $\dot{V}O_2\text{max}$ の負荷強度に相当する100 W負荷時とは結果が一致しない。これはPetrofskyの実験では運動負荷時間が80分間と長時間であったためと考える。150 W (75% $\dot{V}O_2\text{max}$) 負荷強度では、IEMGの上昇とMdPFの低周波帯域への移行が運動開始3分後から認められたことや、酸素摂取量や心拍数の定常状態が認められなかったことから、組織への酸素の供給が不十分となり外側広筋の筋疲労が生じていると考えられる。Petrofskyの実験結果からも、負荷強度が強くなるにしたがい、IEMG, MdPFは短時間で大きく変化していくことが推測できる。

等速性運動時の外側広筋において、type II線維が占める割合が多い群で有意なIEMGの低下とMdPFの低周波帯域への移行を認めたという報告⁹⁾や、負荷強度によりグリコーゲンが動員される筋線維タイプが異なるという報告¹⁰⁾¹¹⁾がある。これらから150 W負荷強度の遂行にあたり個人差を生じた理由として、被験者間の筋組成の違

いが推測できる。

以上のことから、6分間の運動負荷では、100 Wから150 W間の負荷強度で外側広筋の筋疲労が生じることを示唆している。

引用文献

- 1) 永田 晟: 筋と筋力の科学—筋収縮のスペクトル分析—. 不味堂出版, 東京, 1984, p124.
- 2) 松本珠希・他: 疲労筋電図解析による身体作業能力評価の可能性. 体育学研究, 36: 245-253, 1991.
- 3) Sullivan MJ, et al.: Exercise training in patients with chronic heart failure delays ventilatory anaerobic threshold and improves submaximal exercise performance. *Circulation*, 79(2): 324-329, 1989.
- 4) トレーニング科学研究会編: シリーズ[トレーニングの科学] 1. レジスタンス・トレーニング, 朝倉書店, 東京, 1994, pp62-63.
- 5) Delagi EF, et al. 著, 田島達也監訳: 筋電図のための解剖ガイド—四肢—, 第1版. 西村書店, 新潟, 1985, pp156-193.
- 6) 源田朋夫・他: 運動負荷時の呼吸循環応答とその評価. 総合リハ, 23(3): 189-196, 1995.
- 7) 東京都立大学体育学研究室編: 日本人の体力標準値, 第4版. 不味堂出版, 東京, 1988, pp236-239.
- 8) Petrofsky JS: Frequency and amplitude analysis of the EMG during exercise on the bicycle ergometer. *Eur J Appl Physiol*, 41: 1-15, 1979.
- 9) Komi PV, et al.: EMG frequency spectrum, muscle structure, and fatigue dynamic contraction in man. *Eur J Appl Physiol*, 42: 41-50, 1979.
- 10) Gollnick PD, et al.: Selective glycogen depletion in skeletal muscle fibres of man following sustained contractions. *J Physiol*, 241: 59-67, 1974.
- 11) Vollestad NK, et al.: Muscle glycogen depletion patterns in type I and subgroups of type II fibres during prolonged severe exercise in man. *Acta Physiol Scand*, 122: 433-441, 1984.