2 種類 の 超 最 大 運 動 後 の 酸 素 消 費 量 の 比 較

田 中 純 也¹⁾ 渋谷 顕 一²⁾ 大 柿 哲 朗³⁾

THE COMPARISON OF POST EXERCISE OXYGEN CONSUMPTION BETWEEN TWO DIFFERENCE SUPRAMAXIMAL EXERCISES

JUNYA TANAKA, KEN-ICHI SHIBUYA and TETSURO OGAKI

Abstract

Exercise intensity has been identified as a major determinant of the excess post-exercise oxygen consumption (EPOC). However, no studies have compared the prolonged EPOC after supramaximal intermittent exercise and supramaximal continuous exercise. Six young healthy male [age = 26 ± 3 (mean $\pm$ SD) yr; stature = 175.4 ± 5.7 cm; body weight = 66.8 ± 6.7 kg; maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2\max}$) = 44.1 ± 8.5 ml/kg/min] exercised on separate days on a cycle ergometer at two equated total energy expenditures (intermittent exercise: 7×30 -second intervals at $150\% \dot{V}O_{2\max}$ with intervening 15-seconds rest periods; continuous exercise: 5 min at $105\% \dot{V}O_{2\max}$) and then sat quietly in an armchair for 3 h. A control trial without any exercise was also performed in a counterbalanced research design. The $\dot{V}O_2$, carbon dioxide output ($\dot{V}CO_2$), pulmonary ventilation ($\dot{V}E$), respiratory exchange ratio (RER), heart rate (HR) and blood lactate concentration (LA) were measured before exercise, during exercise and during the 3-h recovery period. The mean $\dot{V}O_2$ after intermittent trial at $150\% \dot{V}O_{2\max}$ were higher than these of the control trial and the continuous trials at $105\% \dot{V}O_{2\max}$ for 3-h recovery periods ($p < 0.05$). The 3-h EPOC value for intermittent exercise trial (10.5 ± 2.4 L) was significantly greater than that of continuous exercise trial (4.8 ± 2.7 L) ($p < 0.05$). The mean RER values for intermittent exercise trial were significantly lower than those of the control trial during 60-180 min post-exercise ($p < 0.05$). We examined the effect of supramaximal exercise intensity on the magnitude of 3-h EPOC after 12-fasting. In the present study, 3-h EPOC was significantly greater for supramaximal intermittent exercise compared with the supramaximal continuous exercise when the amounts of work output performed are same. Therefore, our results indicate that exercise intensity may be a primary factor of 3-h EPOC even in a supramaximal exercise and that one of mechanisms for the 3-h EPOC would be related to the promoted lipid metabolism.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 2005, 54: 133~142)

key word: Intermittent exercise, Continuous exercise, Lipid metabolism,
Respiratory exchange ratio

I . 緒 言

運動後の酸素摂取量($\dot{V}O_2$)は、伝統的に酸素負債と呼ばれてきた。その酸素負債は運動後60分間程度で消失し、60分間以上にわたる安静時より大きい $\dot{V}O_2$ は測定誤差と考えられてきた。ところが、運

動後の $\dot{V}O_2$ についてレビューをした Gaesser and Brooks¹⁾は、運動後 $\dot{V}O_2$ は60分間以上持続して亢進するとして、それを EPOC (Excess Post-exercise Oxygen Consumption) と呼んだ。また、同時期に Hermansen et al.²⁾は、運動後の $\dot{V}O_2$ の亢進は、数時間持続することを実験的に証明した。それ以来、

¹⁾九州大学大学院人間環境学府行動システム
専攻健康科学コース
(現在:大阪ハイテクノロジー専門学校スポーツ科学科)
〒816-8580 福岡県春日市 6 丁目-1

Graduate school of Human-Environment Studies, Kyushu
University, 6-1 Kasuga Park Kasuga City Fukuoka
(816-8580)
(Osaka college of high technology, Sport Science)

²⁾九州大学大学院人間環境学研究科
〒816-8580 福岡県春日市 6 丁目-1

Graduate school of Human-Environment Studies, Kyushu
University, 6-1 Kasuga Park Kasuga City Fukuoka
(816-8580)

³⁾九州大学健康科学センター
〒816-8580 福岡県春日市 6 丁目-1

Institute of Health Science, Kyushu University, 6-1
Kasuga-koen Kasuga City Fukuoka (816-8580)

回復時 $\dot{V}O_2$ の亢進について再検討が行われた。回復時 $\dot{V}O_2$ の大きさと運動強度の間には、指数関数的な関係がある^{3~8)}。数時間に及ぶ持続的な回復時 $\dot{V}O_2$ を発現させるためには、最大酸素摂取量の50~55%以上の強度が必要である^{3~8)}。これ以上の運動強度においては、回復時 $\dot{V}O_2$ の大きさと運動時間の間に直線関係が存在することなどが明らかになった^{2,4,5,7~9)}。また、いくつかの研究^{10~13)}で回復時 $\dot{V}O_2$ の亢進が認められていないが、それは運動強度が低いか、運動時間が短いか、あるいはその双方によると考えられる。したがって、回復時 $\dot{V}O_2$ は、最大酸素摂取量の50%以上の強度において、運動中の総仕事量と関係するのではないかということが推測される。なぜなら、回復時 $\dot{V}O_2$ が運動強度の増加に関して指数関数的に増加するにしろ、運動時間の増加に関して直線的に増加するにしろ、それらは、総仕事量の増加を意味するからである。これまでの回復時 $\dot{V}O_2$ に関する研究では、総仕事量を一定にした研究も数多く報告されてきている¹⁴⁾。それらのいずれもが、最大下強度での長時間運動による研究であった。

一方、回復時 $\dot{V}O_2$ あるいは EPOC に関して、超最大強度運動を扱った研究は、著者らの知る限り2例しかない。Bahr et al.¹⁶⁾は、超最大強度運動による回復時 $\dot{V}O_2$ を最初に研究した。彼らは、短時間の間欠的な超最大強度運動においても、運動後240分間におよぶ $\dot{V}O_2$ の亢進を確認した。さらに、Laforgia et al.¹⁴⁾は、総仕事量を一定にした間欠的な超最大強度運動と持続的な最大下強度運動について回復時 $\dot{V}O_2$ を比較した。彼らは、間欠的な超最大強度運動の方が、持続的な最大下強度運動に比べて回復時 $\dot{V}O_2$ が大きかったことを報告した。しかしながら、超最大強度運動を扱った研究はこれら以外にはみられず、超最大運動の強度は108% $\dot{V}O_{2max}$ 強度であり、さらに高い運動強度を用いた研究は認められない。また、これまでに総仕事量を一定とした超最大運動同士を比較検討した研究はない。さら

には、高強度の運動が、短時間であっても運動後の過剰な酸素摂取を起こし、エネルギー消費の増加をもたらす。その積み重ねが、ダイエット(減量)効果を生む可能性がある。

そこで本研究では、総仕事量を一定として、従来の報告よりさらに高強度の超最大運動を用い、回復時 $\dot{V}O_2$ の動態を検討した。

Ⅱ．方 法

A．被験者

被験者は、健康成人男性6名であった。被験者の年齢、身長、体重および最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)は、表1に示した。これらの被験者は、過去にスポーツ活動に積極的に参加していたが、本研究の3ヶ月前は、定期的な運動習慣を有していなかった。また、いずれの被験者も、健康者であり、常用薬を服用しておらず、心臓血管系および呼吸器系の疾病歴を有していなかった。これらの被験者には、本研究の目的、方法、危険性などを十分に説明し、被験者全員から実験に参加することの同意を得た。さらには、本研究は、九州大学健康科学センター倫理委員会による承認を得た。

B．実験手順

本研究に先立ち、1) $\dot{V}O_{2max}$ の測定、2) $\dot{V}O_2$ -運動強度における一次回帰直線を求める先行実験を行った。各人の超最大運動強度は、一次回帰直線から外挿して求めた。その後、本実験として、

- 1) 150% $\dot{V}O_{2max}$ 強度で30秒間の運動を15秒間の休息を挟んだ5分間の間欠的運動
 - 2) 105% $\dot{V}O_{2max}$ 強度で5分間の持続的運動
 - 3) 運動を行わないコントロール実験
- を行った。

各被験者は、12時間以上の絶食・空腹状態で午前8時までに実験室に来た。被験者は、実験当日の運動の影響を避けるために、自家用車あるいは自動二輪車で実験室に来た。また、実験前日は、激しい運

Table 1. Physical characteristics of subjects (n=6)

Age (yr)	Height (cm)	Weight (kg)	$\dot{V}O_{2max}$ (ml/kg/min)
26±3	175.4±5.7	66.8±6.7	44.08±8.46

(Values are mean±SD)

動を行わないように求められた。さらに、3つの本実験は、順位効果を除去するためにランダムに行わせた。

被験者は、実験室に到着後30分間以上にわたって背もたれ付きの椅子で座位安静状態を保った。その後、自転車エルゴメーター上で座位安静状態を3分間保ち、運動を午前9時に開始した。運動終了後は、30秒以内に背もたれ付きの椅子で回復状態をとり、運動後180分間にわたって安静状態を保った。この回復期間中、被験者はできるだけ安静を保ち、移動や摂水は許されなかった。全ての被験者が、それぞれの実験を約2～3週間で行った。それぞれの実験の間隔は、3日以上空けて実施した。2つの超最大運動試行およびコントロール実験は、生理的な日内変動の影響を除くため、各測定日の同じ時刻に行った。運動は、全て自転車エルゴメーター(818E: Monark社)で行い、ペダルの回転数は、毎分90回転とした。

これらの実験は、全て空調設備のある実験室で実施した。実験室の室温および相対湿度は、それぞれ $24.1 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$ 、 $50.1 \pm 6.9\%$ に維持され、180分間の回復期間中、被験者は、タオルケットで被われていた。

C. 測定項目および測定方法

全ての呼気ガス関連の指標($\dot{V}\text{O}_2$, $\dot{V}\text{CO}_2$, $\dot{V}\text{E}$, RER)は、質量呼気ガス分析器(WSMR-1400: ウェストロン社)とレスピロモニター(RM-300I: ミナト医科学社)を組み合わせた自動呼気ガス分析装置を用いて測定した。また、心拍数(HR)は、心電図テレメータシステム(DS-3140: フクダ電子社)によって無線送信し、上記の自動呼気ガス分析装置にオンライン入力して、30秒毎に記録した。さらに、血中乳酸濃度は、2種類の超最大運動の運動開始前、運動終了直後、運動終了3, 5, 7, 10, 30, 60, 120, 180分後に、前もってお湯($48.4 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$)に浸して温められた指尖より採血を行い、乳酸分析器(LT-1710: ARKRAY)を用いて血中乳酸濃度を測定した。

D. 本実験

1. 150% $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ 強度での間欠的な運動

被験者は、150% $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ の強度で、30秒間の運動を15秒間の休息を挟んで間欠的に7セット行った

(以下、150% $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ 試行とする)。

150% $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ 強度での間欠的な運動中の無酸素性エネルギー供給量の指標は、運動中の酸素借の総和からセット間の回復時 $\dot{V}\text{O}_2$ を引いたものを総酸素借とした。運動中の $\dot{V}\text{O}_2$ は、15秒間隔で測定した。運動中の酸素需要量は、最大下強度の $\dot{V}\text{O}_2$ と運動強度との一次回帰直線により外挿法で求め、その酸素需要量と運動時間との積を、この運動における総酸素需要量とした。運動中の総酸素借は、総酸素需要量から運動中の総 $\dot{V}\text{O}_2$ および回復時 $\dot{V}\text{O}_2$ を差し引いて求めた。

2. 105% $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ 強度での持続的な運動

被験者は、105% $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ の強度で、5分間の運動を持続的に行った(以下、105% $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ 試行とする)。

運動中の無酸素性エネルギー供給量の指標は、運動中の総酸素借とした。運動中の $\dot{V}\text{O}_2$ は、30秒間隔で測定した。運動中の酸素需要量は、最大下強度の $\dot{V}\text{O}_2$ と運動強度との一次回帰直線により外挿法で求め、その酸素需要量と運動時間との積をこの運動における総酸素需要量とした。運動中の総酸素借は、総酸素需要量から、運動中の総 $\dot{V}\text{O}_2$ を差し引いて求めた。

3. コントロール実験による測定

運動実験と同じ時刻に運動を行わないコントロール実験において、運動時間に相当する時間帯には、呼気ガスの採気は30秒間隔とした(以下、コントロール試行とする)。また、運動後の回復期間に相当する時間帯には、はじめの60分間は30分毎に、残りの120分間は、60分毎に後半の10分間ずつ呼気ガスの採気を行った。

4. 運動後の過剰酸素摂取量(EPOC)の算出

まず、運動後の回復時 $\dot{V}\text{O}_2$ の値から安静時 $\dot{V}\text{O}_2$ の値を差し引いた値を求めた。次に、長時間の回復時 $\dot{V}\text{O}_2$ に注目するために、さらにその値から、無酸素性エネルギー供給量の指標である運動中の総酸素借の値を差し引いた値を運動後の過剰酸素摂取量として求めた(図1)。

5. 統計処理

結果は、全て平均値±標準偏差で示した。差の検定には、対応のあるStudent's t-testを用いた。検定においては、危険率5%未満を有意とした。

[Continuous exercise: 5 min at 105% $\dot{V}O_{2max}$]

[Intermittent exercise: 7×30 seconds interval at

Figure 1. The exercise and recovery protocol of subjects in 150% $\dot{V}O_{2max}$ and 105% $\dot{V}O_{2max}$.

Ⅲ. 結 果

A. 運動中および運動後の総酸素摂取量, 総酸素借ならびに EPOC

150% $\dot{V}O_{2max}$ 強度での間欠的な運動中と 105% $\dot{V}O_{2max}$ 強度での持続的な運動中の総酸素借, 総 $\dot{V}O_2$, EPOC を表 2 に示した. 総酸素借と総 $\dot{V}O_2$ は, 両試行間に有意な差が認められなかった. 回復時の総 $\dot{V}O_2$ および EPOC とともに, 150% $\dot{V}O_{2max}$ 試行が, 105% $\dot{V}O_{2max}$ 試行より有意に大きかった.

B. 回復期間中の $\dot{V}O_2$

150% $\dot{V}O_{2max}$ 試行と 105% $\dot{V}O_{2max}$ 試行後 180 分間およびコントロール実験の $\dot{V}O_2$ 動態を図 3 に示した.

150% $\dot{V}O_{2max}$ 試行の回復時 $\dot{V}O_2$ は, コントロール実験の $\dot{V}O_2$ と比べ, 運動後 180 分間にわたって有

意に高く, 105% $\dot{V}O_{2max}$ 試行の回復時 $\dot{V}O_2$ と比べても, 運動後 180 分間にわたって有意に高い値であった.

105% $\dot{V}O_{2max}$ 試行の回復時 $\dot{V}O_2$ は, コントロール試行の $\dot{V}O_2$ と比べ, 運動後 60 分間にわたって有意に高い値であった. しかし, 運動後 120, 180 分間の回復時 $\dot{V}O_2$ は, コントロール試行の $\dot{V}O_2$ と比べ, 有意な差が認められなかった.

C. 回復時の $\dot{V}CO_2$, V_E , RER

図 3 には, 150% $\dot{V}O_{2max}$ 試行, 105% $\dot{V}O_{2max}$ 試行後 180 分間およびコントロール試行の $\dot{V}CO_2$, V_E , RER 動態を示した. 150% $\dot{V}O_{2max}$ 試行と 105% $\dot{V}O_{2max}$ 試行後の回復時 $\dot{V}CO_2$ は, コントロール試行の $\dot{V}CO_2$ に比べ, 運動後 30 分間にわたって有意に高い値であった. また, 150% $\dot{V}O_{2max}$ 試行後の回復時 $\dot{V}CO_2$ は, 105% $\dot{V}O_{2max}$ 試行後の回復時

Table 2. A comparison of 150% $\dot{V}O_{2max}$ and 105% $\dot{V}O_{2max}$ for several variables. (mean $\pm$ SD)

	accumulated oxygen uptake (during exercise) (ml)	accumulated oxygen deficit (ml)	accumulated oxygen uptake (post exercise) (ml)	EPOC (ml)
150% $\dot{V}O_{2max}$	10526 $\pm$ 1187	4799 $\pm$ 1189	15375 $\pm$ 2866	10575 $\pm$ 2398
			*	*
105% $\dot{V}O_{2max}$	10934 $\pm$ 1196	4381 $\pm$ 1243	9194 $\pm$ 2252	4813 $\pm$ 2745

* $P < 0.05$, Significant difference between 150% $\dot{V}O_{2max}$ and 105% $\dot{V}O_{2max}$.

(Intermittent exercise)

Accumulated O_2 uptake during rest = O_2 uptake during rest - O_2 demand at rest

( ) ( )

Accumulated O_2 deficit (L) = Accumulated oxygen demand (L) - Accumulated oxygen uptake (L) - Accumulated O_2 uptake during rest

(Continuous exercise)

Accumulated oxygen demand (L) = Oxygen demand (L) $\times$ Time (min)

= Accumulated O_2 deficit (L) + Accumulated oxygen uptake (L)

Accumulated O_2 deficit (L) = Accumulated oxygen demand (L) - Accumulated oxygen uptake (L)

( ) ( )

Figure 2. Principle of calculating the accumulated oxygen deficit for intermittent exercise and continuous exercise.

$\dot{V}CO_2$ と比べ、運動後30分間にわたって有意に高い値であった。しかし、両運動の運動後60分間以降の回復時 $\dot{V}CO_2$ は、コントロール試行の $\dot{V}CO_2$ に比べ有意な差が認められなかった。

150% $\dot{V}O_{2max}$ 試行後の回復時 V_E は、コントロール試行の V_E に比べ、運動直後、回復30、60分において、有意に高い値であった。しかし、その後は有意な差が認められなかった。両運動試行後と比較すると、150% $\dot{V}O_{2max}$ 試行の回復時換気量は、105% $\dot{V}O_{2max}$ 試行と比べ、運動直後、回復5、10、15、30分において有意に高い値であった。105% $\dot{V}O_{2max}$ 試行後の回復時 V_E は、コントロール試行の V_E に比べ、運動直後、回復30分において、有意に高い値であった。しかし、その後は有意な差が認められなかった。

150% $\dot{V}O_{2max}$ 試行直後および105% $\dot{V}O_{2max}$ 試行直後のRは運動中より高くなり、その後、急激に低下を示した。150% $\dot{V}O_{2max}$ 試行後の回復時Rは、コントロール試行のRに比べ、運動後60、120、180分において、有意に低い値であった。150% $\dot{V}O_{2max}$ 試行後の回復時Rは、105% $\dot{V}O_{2max}$ 試行後のRに比べ、運動後15、30分で有意に高く、運動後60、120、180分で有意に低い値であった。105% $\dot{V}O_{2max}$

試行後の回復時Rは、コントロール試行のRに比べ、運動後30、60分において、有意に低い値であったが、運動後120、180分においては、コントロール試行と有意な差が認められなかった。

D. 回復時の血中乳酸値

150% $\dot{V}O_{2max}$ 試行と105% $\dot{V}O_{2max}$ 試行後180分間の回復時血中乳酸値動態を図3に示した。運動終了直後の血中乳酸値は、両運動試行とも運動終了時より高くなり、その後、時間経過とともに減少した。

150% $\dot{V}O_{2max}$ 試行の回復時血中乳酸値は、105% $\dot{V}O_{2max}$ 試行と比べ、運動後5、10、30、60分で有意に高い値であった。しかし、両試行後120、180分では、有意な差が認められなかった。

E. 回復時のHR

150% $\dot{V}O_{2max}$ 試行と105% $\dot{V}O_{2max}$ 試行後180分間およびコントロール試行のHR動態を図3に示した。150% $\dot{V}O_{2max}$ 試行後の回復時HRは、コントロール試行のHRに比べ、回復180分間にわたって有意に高い値であった。これは、105% $\dot{V}O_{2max}$ 試行後も同様であった。また、150% $\dot{V}O_{2max}$ 試行後の回復時HRは、105% $\dot{V}O_{2max}$ 試行後の回復時HR

Figure 3. (a) blood lactate after two exercise, (b) O_2 uptake, (c) respiratory exchange ratio, (d) heart rate, (e) ventilation, (f) CO_2 output after three conditions.

Values are mean $\pm$ SD.

* $P < 0.05$ 150% $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ vs 105% $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$
 150% $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ vs Control
 105% $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ vs Control

に比べ、運動後 5 分～180 分にわたって有意に高い値であった。

Ⅳ．考 察

本研究では、先行研究よりさらに高強度の超最大運動を用い総仕事量を一定にした強度の異なる 2 種類の超最大・短時間運動後の回復期 $\dot{V}\text{O}_2$ を 180 分間にわたって比較検討した。本研究においては、EPOC の値に対する運動直後の初期部分による影響

を小さくするために、長時間にわたる EPOC の定義は、安静時 $\dot{V}\text{O}_2$ を差し引いた運動後総 $\dot{V}\text{O}_2$ から運動後の回復期の初期部分で回復すると考えられている運動中の総酸素借を差し引いた値とした。なぜなら従来から運動後の $\dot{V}\text{O}_2$ の亢進は、 O_2 負債説によって説明されてきた。Hill and Lupton¹⁸⁾は、運動後の $\dot{V}\text{O}_2$ の増加が運動中に負った酸素借の返済に必要であると仮定し、そして、酸素借を乳酸の酸化的除去のためとした。Margaria¹⁹⁾らは、その概

念を修正し、運動直後の急峻な $\dot{V}O_2$ の回復を ATP-PC の補充に必要な部分、すなわち非乳酸性成分と乳酸の酸化のための乳酸性成分から成り立つことを提案した。また、その後、酸素借と酸素負債が量的に一致しないことが報告された²⁰⁾。さらに、血中および筋中の乳酸濃度の消長と $\dot{V}O_2$ との変化が必ずしも一致しないことも報告された²¹⁾。したがって、現在では、運動中の総酸素借が無酸素性エネルギー供給量を反映している²⁴⁾と考えられる。その結果、本研究から 150% $\dot{V}O_{2max}$ 強度・間欠的運動においては運動後180分間、105% $\dot{V}O_{2max}$ 強度・持続的運動においては運動後60分間に及ぶ回復時 $\dot{V}O_2$ の亢進が認められた。

Laforgia et al.¹⁴⁾は、長時間にわたる回復時 $\dot{V}O_2$ に関する総仕事量を一定にした超最大強度運動と最大下強度運動を比較した研究を行った。105% $\dot{V}O_{2max}$ 強度で1分間×20回の運動を2分間の休息を挟んで行った時の540分間にわたる回復時 $\dot{V}O_2$ の総量は 15.0 L であった。これは本研究における 105% $\dot{V}O_{2max}$ 強度での持続的な運動後の180分間にわたる回復時 $\dot{V}O_2$ の総量 9.1 L に比べて大きい回復時 $\dot{V}O_2$ であった。この回復時 $\dot{V}O_2$ の総量の違いは、運動強度は同等であるので、運動時間の違いによる総仕事量の違いが影響していると思われる。また、彼らの研究は、回復期間中に食事をとることが許されていた。運動後の食事の摂取は、回復時 $\dot{V}O_2$ を増加させることが報告されている²³⁾。本研究では、食事の影響を避けるために、回復期間を180分間と限定した。したがって、運動時間の違いによる総仕事量の他にも、この食事の影響があった可能性も考えられる。事実、本研究の 105% $\dot{V}O_{2max}$ 強度運動後には、60分間までしか有意な $\dot{V}O_2$ の亢進が認められなかったのに対し、Laforgia et al.¹⁴⁾の研究では、480分間まで $\dot{V}O_2$ の亢進が認められている。一方、本研究における 150% $\dot{V}O_{2max}$ 強度での間欠的な運動後の180分間にわたる回復時 $\dot{V}O_2$ の総量は 15.3 L であった。Laforgia et al.¹⁴⁾の値に比べれば本研究の値は、3時間の回復で彼らの9時間の回復で得られたものと同程度の回復時 $\dot{V}O_2$ が発現したことになる。本研究の回復時 $\dot{V}O_2$ の総量が Laforgia et al.¹⁴⁾の値より大きかったことに関しては、総仕事量は大きく異なるものの、本研究で用いた運動強度は、長時間にわたる回復時 $\dot{V}O_2$ に関す

る先行研究と比較して最も高い運動強度であった。したがって、Laforgia et al.¹⁴⁾の研究より総仕事量が少ないものの、この高い運動強度が、回復時の $\dot{V}O_2$ に影響したと考えるのが妥当であろう。また、被験者の体力レベルも関係していよう。すなわち Laforgia et al.¹⁴⁾の研究における被験者 ($\dot{V}O_{2max} = 69.2 \pm 4.0$ ml/kg/min) は、本研究の被験者 ($\dot{V}O_{2max} = 44.1 \pm 8.5$ ml/kg/min) に比べ高度に鍛錬された被験者であった。運動鍛錬者は、運動後の回復時 $\dot{V}O_2$ の低下が早い²¹⁾ことが報告されており、運動強度の他に、被験者の体力レベルの影響によって、総仕事量の大きく異なる彼らの研究と同等の回復時 $\dot{V}O_2$ を本研究において発現させた可能性も考えられる。

ところで、150% $\dot{V}O_{2max}$ 試行における換気量は、コントロール実験に対して運動後60分目まで有意に高い値であった。しかし、それ以降は、コントロール実験に対して有意な差を認めなかった。105% $\dot{V}O_{2max}$ 試行においては、運動後30分目まで有意に高い値であった。そして、それ以降は、コントロール実験に対して有意な差を認めなかった。従来から回復時 $\dot{V}O_2$ は、急峻な回復時 $\dot{V}O_2$ 部分(60分間未満)と長時間の回復時 $\dot{V}O_2$ 部分(60分間以上)にわけられて考えられてきた。その急峻な回復時 $\dot{V}O_2$ 部分の根幹をなしているメカニズムは、いくらも明白にされてきた。その1つに換気の亢進があげられている。それぞれ運動後60分目または30分目までの換気量の有意な増加は、呼吸筋の仕事量の増加を意味する。安静時の呼吸筋の $\dot{V}O_2$ は、基礎代謝量の1?2%である²⁵⁾。したがって、呼吸筋の $\dot{V}O_2$ が、初期の回復時 $\dot{V}O_2$ を部分的に説明するかもしれない。

本研究で用いた運動は、解糖系を主にした無酸素性エネルギー供給機構に強く依存する運動であり、多くの乳酸を産生するような運動であった。事実、本研究における血中乳酸値を比較すると、150% $\dot{V}O_{2max}$ 強度での間欠的な運動直後と 105% $\dot{V}O_{2max}$ 強度での持続的な運動直後においてそれぞれ 10.6 ± 2.6 mmol/l と 9.1 ± 1.9 mmol/l であり、さらに回復時には、150% $\dot{V}O_{2max}$ 強度での間欠的な運動では、運動後3~10分まで平均値が 14 mmol/l を超え、最大値は 14.7 ± 1.2 mmol/l (回復5分目)であった。また、105% $\dot{V}O_{2max}$ 強度での持続的な運動では、運動後3~10分まで平均値が 12

mmol/l を超え, 最大値は, 13.7 ± 1.7 mmol/l (回復3分目)であった。血中乳酸値は, 運動後7分を除いて運動後5分～運動後60分まで $150\% \dot{V}O_{2\max}$ 強度での運動の方が有意に高い値であった。これは, 運動強度の違いが, 筋貯蔵グリコーゲンに対する利用度の違いを生み^{23,25)}, それが, 乳酸の産生量の違いをもたらしたと考えられる。大量に産生された乳酸を酸化するためには大量の O_2 が必要となるので, $\dot{V}CO_2$ と $\dot{V}O_2$ の比である RER に違いを示した可能性がある。したがって, $105\% \dot{V}O_{2\max}$ 強度での運動後30分まで, $150\% \dot{V}O_{2\max}$ 強度での運動後60分までの RER の低下は, 乳酸に対する酸化作用が関与している可能性が考えられる。さらには, 運動後60分までの回復時 $\dot{V}O_2$ の亢進もこの乳酸の緩衝作用によって部分的に説明できるかもしれない。乳酸に対する酸化作用による $\dot{V}O_2$ の亢進は, 先行研究においても認められており¹⁾, 今回の結果は, それを支持することになる。しかし, $150\% \dot{V}O_{2\max}$ 試行の血中乳酸値は, 運動後60分間で $105\% \dot{V}O_{2\max}$ 試行と差が認められなくなったが, $150\% \dot{V}O_{2\max}$ 試行後の $\dot{V}O_2$ は, 回復180分目にも $105\% \dot{V}O_{2\max}$ 試行より有意に大きかった。したがって, 乳酸の酸化のみでは, 長時間にわたる回復時 $\dot{V}O_2$ の亢進を説明することはできないと思われる。

V_E , $\dot{V}CO_2$ および血中乳酸値は, $150\% \dot{V}O_{2\max}$ 強度での運動後でも, 運動後60分間以降では, 運動を行わないコントロール実験とは差異が認められなかった。それにもかかわらず, 回復時 $\dot{V}O_2$ は, 運動後180分間まで高いままであった。一方, 回復期の RER は, $150\% \dot{V}O_{2\max}$ 強度での間欠的な運動において, コントロール実験の RER と比べ運動後60～180分にわたって有意に低下したままであった。 $150\% \dot{V}O_{2\max}$ 強度での間欠的な運動が, $105\% \dot{V}O_{2\max}$ 強度での持続的な運動と比べ, 運動中に貯蔵筋グリコーゲンを多量に利用するような運動である。なぜなら, 筋貯蔵グリコーゲンの消費速度は, 運動強度に依存するからである²⁴⁾。したがって, 運動後には, 生体の防御機構の働きから利用された貯蔵筋グリコーゲンの再合成のために酸素が用いられ, それにより運動後60分～180分において $\dot{V}O_2$ がコントロール試行と比較して高値を示した。この時期(運動後60～180分)にグリコーゲンの再合成のためのエネルギーとしてグリコーゲンが多く利用され

るとは考えにくい。一方, 運動後には, RER が低下したままである。脂質の代謝には, 糖質の代謝より多くの O_2 を必要とする。このような回復時の $\dot{V}O_2$, R, $\dot{V}CO_2$ の動態から, この回復時(運動後60～180分)に脂質代謝の亢進も起っている可能性がある。すなわち, 運動後による $\dot{V}O_2$ と RER の関係から脂質代謝の亢進によって, 運動に利用した筋貯蔵グリコーゲンを再補充している可能性がある。さらには, 運動後の60～180分の $\dot{V}O_2$ 動態と RER 動態が, コントロール試行時に対して対称的な動態を示すことから, 回復時 $\dot{V}O_2$ は, RER の低下と関係があると思われる。したがって, 本研究の結果から, 長時間の EPOC の発現メカニズムには, 運動後の脂質代謝の亢進が関与していること示唆される。つまり, 長時間にわたる回復時 $\dot{V}O_2$ が, Hermansen et al.²⁾の報告している運動後の TG-FA サイクルの速度増加と筋貯蔵グリコーゲンの減少に対する過剰なエネルギー供給に関与していることを支持するだろう。

さらに, 本研究において長時間にわたる有意な変化を示したのが HR であった。 $150\% \dot{V}O_{2\max}$ 強度での運動において, 回復60分間以降の HR は, 10～20拍/分安静時より高かった。本研究では測定していないが, 体温の上昇が, $\dot{V}O_2$ や HR を増加させることは知られている。しかし, いくつかの先行研究は, 長時間運動後の深部体温は, 運動後60分以内に安静時と差がなく, 運動後60分以降の $\dot{V}O_2$ の亢進は説明できないことを報告している^{21,24)}。 $150\% \dot{V}O_{2\max}$ 試行後の HR が, $105\% \dot{V}O_{2\max}$ 試行およびコントロール実験に対して回復180分間にわたり有意に亢進していることから, 長時間にわたる回復時 $\dot{V}O_2$ の亢進を部分的に説明できるかもしれない。また, Ogaki et al.²⁶⁾は, 運動後の HR 動態と血漿抱合型ノルアドレナリン濃度動態とよく一致していたことを報告している。つまり, 彼らは, 運動中に遊離されたアドレナリンとノルアドレナリンが, 運動後の HR に影響しているかもしれないとしている。現時点では, HR の増加が, 回復時 $\dot{V}O_2$ にどの程度影響を及ぼすかは明らかではない。しかし, 回復時 $\dot{V}O_2$ の亢進が, 運動後の長時間にわたる HR の増加の影響である可能性も考えられる。

本研究において, 総仕事量が一定である場合, $150\% \dot{V}O_{2\max}$ 強度での間欠的な超最大強度運動は,

105% $\dot{V}O_{2\max}$ 強度での持続的な超最大強度運動より運動後180分間にわたる回復時 $\dot{V}O_2$ に及ぼす影響が大きいたことが明らかになった。本研究で用いた運動時間は、運動後180分間にわたる回復時 $\dot{V}O_2$ の発現を確認した超最大強度運動を扱った先行研究の中で、最も短い運動時間であった。一方、本研究で用いた運動強度は、先行研究と比べ最も高い運動強度であった。本研究における運動後180分間にわたる回復時 $\dot{V}O_2$ が発現したのは、短い運動時間を高い運動強度で補充した結果であると予測できる。したがって、超最大・短時間運動の場合も、運動強度が運動後180分間にわたる回復時 $\dot{V}O_2$ に及ぼす重要な要因であることが示唆された。さらには、運動後180分間にわたる回復時 $\dot{V}O_2$ の亢進時には、RERが安静時より低下していることから、脂質代謝の亢進も関与していることが示唆された。

(受理日 平成17年1月18日)

文 献

- 1) Gaesser GA and Brooks GA : Metabolic bases of excess post-exercise oxygen consumption. a review. *Med Sci Sports Exerc* **16** : 29-43, 1984
- 2) Hermansen L, Grandmontagne M, Maehlum S, Ingnes I : Postexercise elevation of resting oxygen uptake : Possible mechanisms and physiological significance. In : P Marconnet, J Poortmans, L Hermansen (Eds) *Physiological Chrmidtry of Training and Detraining*, pp. 119-129, Med Sports Sci, Krager, Basel, 1984
- 3) Bahr R and Sejersted OM : Effect of intensity of excess postexercise O_2 consumption. *Metabolism* **40** : 836-841, 1991a
- 4) Sedlock D, Fissinger JA, Melby CL : Effect of exercise intensity and duration on postexercise energy expenditure. *Med Sci Sports Exerc* **21** : 662-666, 1989
- 5) Gore CJ and Withers RT : Effect of exercise intensity and duration on postexercise metabolism. *J Appl Physiol* **68** : 2362-2368, 1990a
- 6) Bahr R : Excess postexercise oxygen consumption-magnitude, mechanisms and practical implications. *Acta Physiol Scand* **144**(Suppl. 605) : 1-70, 1992
- 7) Chad KE and Wenger HA : The effects of duration and intensity on the exercise and post-exercise metabolic rate. *Austr J Scu Med Sport* **17** : 14-18, 1985
- 8) Gore CJ and Withers RT : The effect of exercise intensity and duration on the oxygen deficit and excess post-exercise oxygen consumption. *Eur J Appl Physiol* **60** : 169-174, 1990b
- 9) Chad KE and Wenger HA : The effect of exercise duration on the exercise and post-exercise oxygen consumption. *Can J Spt Sci* **13** : 204-207, 1988
- 10) Freedman-Akabas S, Colt E, Kissileff HL, Pi-Sunyer FX : Lack of sustained increase in $\dot{V}O_2$ following exercise in fit and unfit subjects. *Am J Clin Nutr* **41** : 545-549, 1985
- 11) Pacy P, Barton N, Webster JD, Garrow JS : The energy cost of aerobic exercise in fed and fasted normal subjects. *Am J Clin Nutr* **42** : 761-768, 1985
- 12) Brehm BA and Gutin B : Recovery energy expenditure for steady state exercise in runners and nonexercisers. *Med Sci Sports Exerc* **18** : 205-210, 1986
- 13) Elliot DL, Goldberg L, Kuehl KS : Does aerobic conditioning cause a sustained increase in the metabolic rate ?. *Am J Med Sci* **296** : 249-251, 1988
- 14) Bahr R, Gronnerod O, Sejersted OM : Effect of supra-maximal exercise on excess postexercise O_2 consumption. *Med Sci Sports Exerc* **24** : 66-71, 1992
- 15) Laforgia JR, Withers NJ, Gore CJ : Comparison of energy expenditure elevations after submaximal and supramaximal running. *J Appl Physiol* **82** : 661-666, 1997
- 16) Bahr R, Ingness I, Vaage O, Sejersted OM, Newsholme EA : Effect of duration of exercise on excess postexercise O_2 consumption. *J Appl Physiol* **62** : 485-490, 1987
- 17) Hill AV and Lupton H : Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilization of oxygen. Pt.. IV-V. *Proc Roy Sco B*, **97** : 155-176, 1924
- 18) Margaria R, Edwards HT, Dill OB : The possible mechanisms of contracting and paying the oxygen debt and the role of lactic acid in muscular contraction. *Am J Physiol* **106** : 689-715, 1933
- 19) Alpert NR : Lactate production and removal and the regulation of metabolism. *Ann NY Acad Sci* **119** : 995-1012, 1965
- 20) Brooks GA, Hittelman KJ, Faulkner JA, Beyer RE : Temperature, skeletal muscle mitochondria functions, and oxygen dept. *Am J Physiol* **220** : 1053-1059, 1971
- 21) Scott CB, Roby FB, Lohman TG, Bunt JC : The maximal accumulated oxygen deficit as an indicator of anaerobic capacity. *Med Sci Sports Exerc* **23** : 618-624, 1991
- 22) Maehlum S, Grandmontagne M, Newshole EA, Sejersted OM : Magnitude and duration of excess postexercise oxygen consumption in healthy young subjects. *Metabolism* **35** : 425-429, 1986
- 23) Short KR and Sedlock DA : Excess postexercise oxygen consumption and recovery rate in trained and untrained subjects. *J Appl Physiol* **83** : 153-159, 1997
- 24) Roussos C and Campbell EJM : Respiratory muscle energetics. In : *Handbook of Physiology. The Respiratory system. Circulation and Nonrespiratory Functions*. Bethesda, MD. Am Physiol Soc. 1986, sect. 3, vol. III, chapt. **28**, p. 481-509

- 25) Saltin B and Karlsson J : Muscle glycogen utilization during work of different intensities. In : Muscle metabolism during exercise : edited by Pernow B, B Saltin. Plenum Press. New York, 1971, p. 289-299
- 26) Ogaki T, Saito A, Kanaya S, Fujino T : Plasma sulpho-conjugated catecholamine dynamics up to 8h after 60-min exercise at 50% and 70% maximal oxygen uptakes. *Eur J Appl Physiol* **72** : 6-11, 1995