

# 最大運動後の休息時間と無酸素性エネルギーの回復過程

伊藤 智式<sup>1</sup>、安田 好文<sup>2</sup>  
愛知学泉短期大学<sup>1</sup>、豊橋技術科学大学<sup>2</sup>

## The recovery process with anaerobic energy which accompanies in rest time after maximum exercise.

Tomonori Ito, Yoshifumi Yasuda

キーワード：酸素需要量 oxygen demand、酸素借 oxygen deficit、ランプ負荷運動 ramp exercise、

### 1. 緒言

筋肉は短時間であれば酸素がなくても収縮することができる。これは筋肉を収縮させるために直接必要なエネルギーがアデノシン三リン酸(ATP)の分解によって供給されるからである。しかし、ATPは筋肉に少量しか蓄えられておらず、これを再合成して、ふたたび分解できるようにしなければならない。この再合成に必要なエネルギーを最初にあたえるのはクレアチンリン酸(PCr)の分解であるが、これだけでは筋収縮が数秒間しか続かない。そこで酸素が無くてもグリコーゲン及びグルコースが乳酸にまで分解する過程で得られるエネルギーを利用してATPを再合成する。これが解糖系及び乳酸系であり、ATP-PCr系と共に無酸素性のエネルギー供給過程である。尚、乳酸の過度な蓄積は筋疲労を招き、運動継続の制限因子となる。そして、この無酸素性エネルギーの容量を元の状態に回復させるには酸素が必要となり、運動後に補充することになる。

一方、有酸素性エネルギーの供給は、糖や脂肪、タンパク質から酸素を用いてATPを再合成する。エネルギーの供給速度は他の系に比べ最も遅いが、エネルギー源が無くならない限り、酸素があれば運動を継続できる。よって、その制限因子は酸素の供給量である。

したがって、低強度の運動ではエネルギー出力に必要な酸素需要量( $O_2$  demand)に対して酸素摂取量( $\dot{V}O_2$ )が等しく、有酸素性エネルギーの供給だけで運動が可能となり、定常状態が継続できる。

また、高強度の運動では、この酸素需要量に対して酸素摂取量が不足し有酸素性エネルギーの供給だけでは補えず、無酸素性エネルギーが供給される。この不足した酸素の量である酸素借( $O_2$  deficit)は運動後に酸素負債( $O_2$  debt)として返済することになる。運動後の酸素摂取量が安静時よりも高い状態が続くのはこの為であり、運動後の酸素負債量の値から無酸素性作業能力を評価することもできる。しかし、酸素負債と酸素借は必ずしも等しくない。酸素負債は酸素借返済の他に、代謝亢進などの要因が含まれており運動後の過剰な酸素摂取量となっている。そこで、運動中の酸素不足の指標を酸素借で評価する方法が用いられるようになった。

酸素借は無酸素性能力の指標として、また酸素摂取量是有酸素性能力の指標として、共に運動能力と密接な関係がある。これらの最大値である最大酸素借や最大酸素摂取量が高いということはエネルギー論的にパフォーマンスへ直接

影響する。但し、通常この両者の指標には異なる単位を用いる。有酸素性能力は、単位時間当たりの出力値である。疲労条件を除けばエネルギー次第で何度も最高に近い値を発揮できる。それに対して無酸素性能力は一度の運動中に積算されていく値であり、次の運動でまた最高値を発揮するためにはそれを回復させるための休息が必要となる。したがって、1日に何度もレースを行う競技では、この無酸素性エネルギーの回復が重要な要素となる。水泳の競技会では、選手が複数種目にエントリーし、数十分後にまた全力で泳ぐ姿を目にするが、短い休息時間で最大限のパフォーマンスが発揮できるであろうか。

この最大運動後の無酸素性エネルギーの回復過程については、これまで高リン酸化合物あるいは血中乳酸値の回復過程から論じられてきた。近年無酸素性エネルギー容量 (Anaerobic capacity) がステップ運動時の酸素借から定量的かつ非観血的に評価できることが明らかになった<sup>1)</sup>。また、我々は数分で疲労困憊にいたるようなランプ負荷運動時においても、その酸素借から Anaerobic capacity を評価できることを報告した<sup>3)</sup>。

そこで本研究では、異なる休息時間を挟んで2回の最大ランプ負荷運動を行わせ、各試技における酸素借に及ぼす休息時間の影響から、無酸素性エネルギーの回復過程について検討した。

## 2. 方法

### (1) 被験者

被験者は健康な男子6名とし、その身体的特徴を Table 1 に示した。被験者には事前に本研究の目的と測定内容及びその危険性についての説明を行い、本人の意思によりいつでも測定を中止できることの確認をし、本実験参加の同意を得た。

Table 1. 被験者の身体的特徴. (n=6)

Age	(yr)	26.5 ± 10.2
Height	(cm)	168.8 ± 5.3
Weight	(kg)	60.6 ± 6.9

Values are means ± SD.

### (2) 測定方法

実験は電磁ブレーキ型自転車エルゴメーター (Combi, Aerobike・300) を改良し、そのトルク及

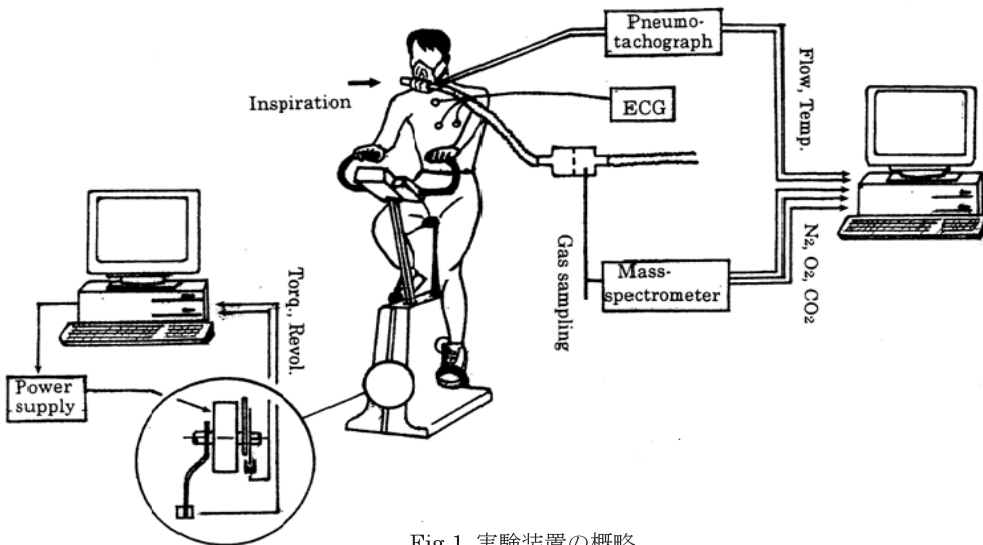


Fig.1 実験装置の概略

びパワーをマイクロコンピューターから自動制御できるような装置を用いた<sup>4)</sup>。尚、エルゴメーターでの運動は、回転数が変化してもそれに応じてトルクを変化させ、常に一定のパワーが負荷されるように制御したが、それでも被験者にはペダル回転数を常に 60rpm に保つことを要求した。また、運動中の酸素摂取量はミキシングチャンバー法により、20 秒間隔で連続的に測定した。(Fig. 1)

最初に 5 分間のステップ負荷運動を被験者に応じて 25~40Watt ずつ負荷を増やし、5~7 段階の多段階ステップ負荷運動を行わせた。各ステップにおいて定常状態に達していると思われる最後の 2 分間の酸素摂取量を酸素需要量と仮定した。そして、この時の負荷量から回帰直線を求め、作業量に対する酸素需要量の推定式を求めた。

次に 0watt で 5 分間の運動後に、1 分間に 100watt の割合で増加するランプ負荷運動を疲労困憊に至るまで、休息を挟んで 2 度行った。休息時間は 3.5 分、7.5 分、15 分、30 分、60 分の 5 条件とし、無作為に日を替えて実施した。このランプ負荷運動中の酸素需要量と酸素摂取量の差分から酸素借(O<sub>2</sub> deficit)を算出した。

この実験装置では、酸素摂取量は 20 秒間毎に値が算出される。運動終了時の数秒間の酸素摂取量の算出には、20 秒間隔の出力値をもとにその前後の 20 秒間の積算値と終了時の時間占有率とのそれぞれの割合から推定した。(Fig. 2)

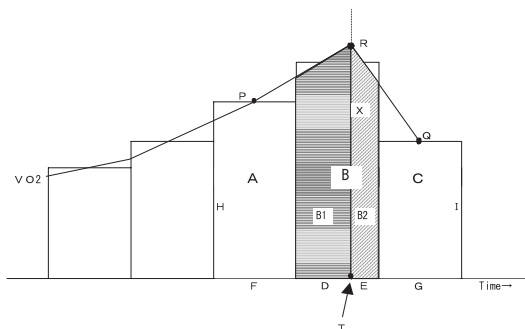


Fig. 2 酸素摂取量(B)における時間Tまでの摂取量(B1)の推定. (B=B1+B2を満足するように(Bは長方形の面積)点Tの鉛直線上に、点P、Qからの交点Rを取り、B1を求め).

### 3. 結果

ランプ負荷運動中の酸素摂取量と積算されていく酸素借の代表的な一例を Fig. 3 に示した。100watt/min のランプ負荷運動では、上昇していく負荷量に値する酸素需要量に対して、酸素摂取量は常に遅れをとっていき、それに見合った酸素が供給できない。そこで、酸素借が蓄積していき、疲労困憊に至る。また、運動後の休息時間はこの酸素借を返済していくため、酸素摂取量の高い状態がしばらく続く。

3.5 分の休息では、2 回目の酸素摂取量は運動開始前の時点でもまだ十分に低下しておらず、結果的に運動時間も酸素借も共に 1 回目に比べ低い値を示した。そして、休息時間の延長に比例して、2 回目の運動時間及び酸素借は 1 回目の値に近づいていく傾向を示した。

1 回目と休息後 2 回目の運動時間から求められる総仕事量とその回復率を Fig. 4 に示した。15 分の休息では 2 回目の仕事量は有意に低下した。また、30 分以上の休息では仕事量に有意な差は認められなかった。

酸素借とその回復率を Fig. 5 に示した。運動 1 回目の最大酸素借は  $2.52 \pm 0.38(1)$ 、体重当たり  $41.6 \pm 5.2(\text{ml/kg})$  であった。3.5 分の休息で酸素借の回復率は  $53.0 \pm 12.2\%$  であった。その後休息時間に伴い指数関数的に回復し、30 分では  $92.1 \pm 4.5\%$  となり有意な差が認められた。しかし、60 分の休息では有意な差は認められなかった。

運動中の酸素需要量に対する酸素摂取量の比率を Fig. 6 に示した。1 回目の負荷では運動中の総酸素摂取量は総酸素需要量に対して  $67.4 \pm 4.1\%$  であった。尚、1 回目の運動時間は  $3.35 \pm 0.37$  分であった。したがって、このような時間で終了するランプ負荷運動においては、総酸素需要量に対しおおよそ 2/3 の酸素摂取量と 1/3 の酸素借が配分されたことになった。また、休息後の酸素摂取量は 30 分以下の休息では 1 回目に比べ有意に高い値をとった。

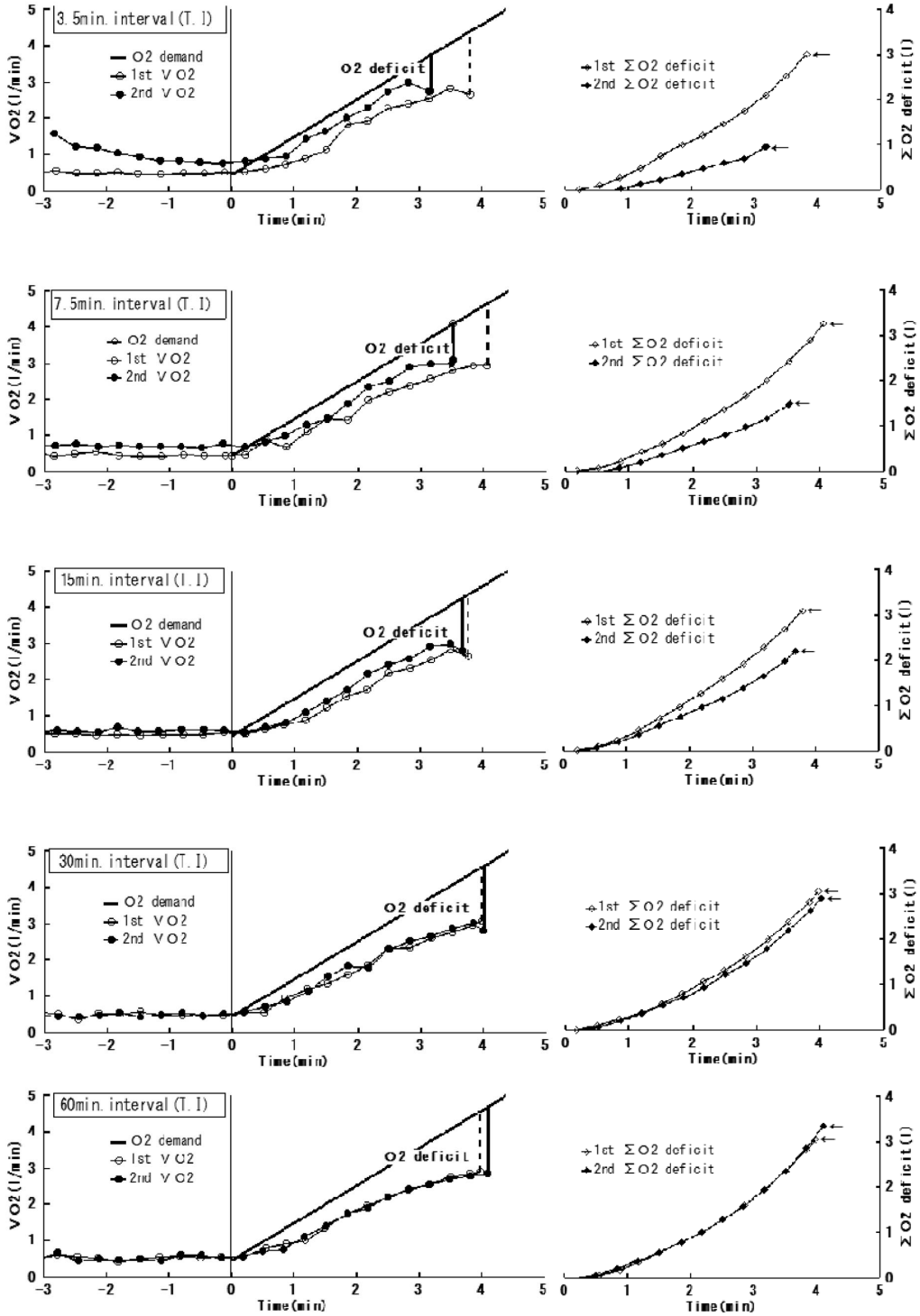


Fig.3 ランプ負荷運動中の酸素摂取量( $\dot{V}O_2$ )と積算されていく酸素借( $O_2$  deficit)の1例  
(上段から休息時間は3.5分,7.5分,15分,30分,60分である)

最大運動後の休息時間と無酸素性エネルギーの回復過程

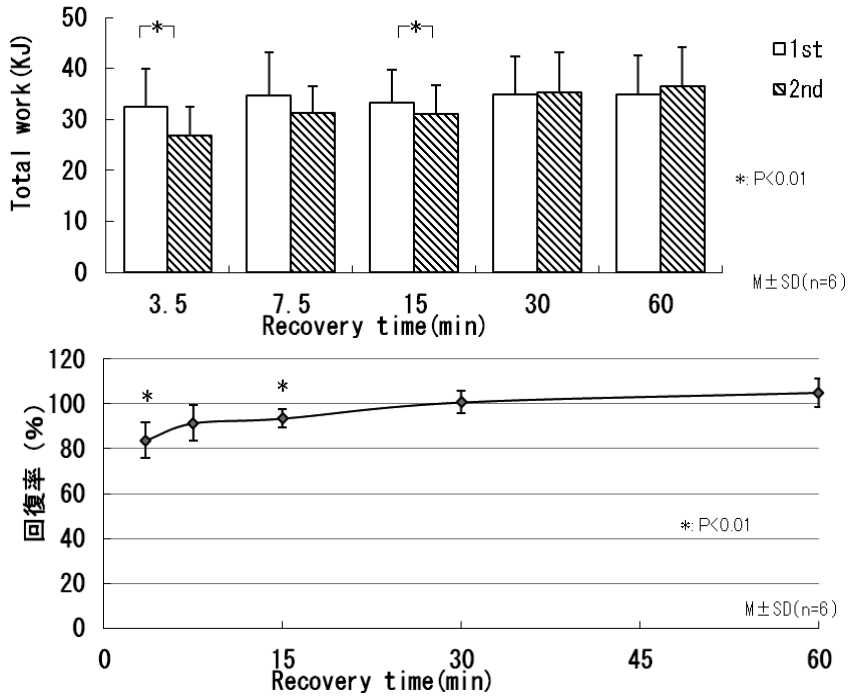


Fig.4 休息時間に伴う総仕事量とその回復率

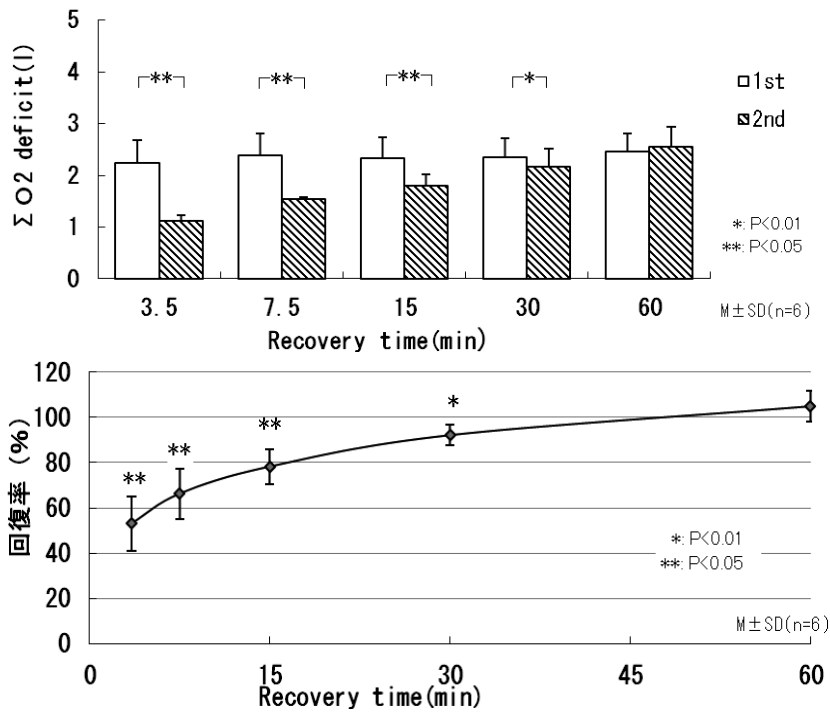


Fig.5 休息時間に伴う総酸素借とその回復率

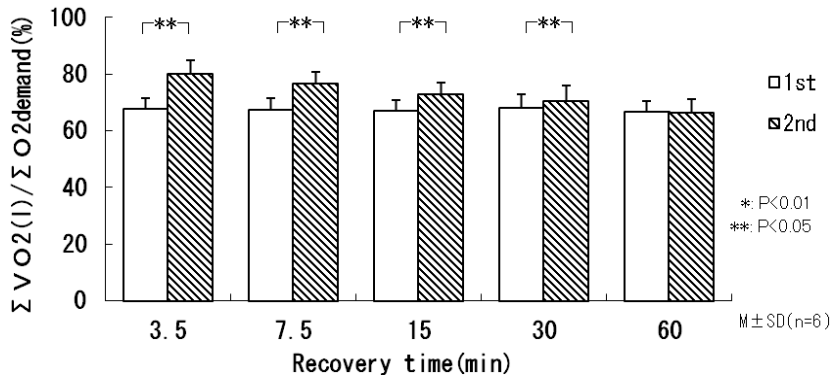


Fig.6 運動中の酸素需要量(O<sub>2</sub> demand)に対する酸素摂取量( $\dot{V}O_2$ )の割合

#### 4. 考察

運動開始時は急激なエネルギー需要に対し、生体での呼吸循環応答は遅れを生じる。すなわち、運動開始時には有酸素的なエネルギー供給は間に合わず、無酸素的なエネルギーを使うことになる。中強度のステップ負荷運動では、運動開始後数分で酸素摂取量が酸素需要量に等しくなり定常状態が維持される。そして、運動開始時に生じた無酸素エネルギーに使われた酸素借は、運動後に酸素負債として返済する。

高強度の負荷運動では、定常状態が維持できず常に酸素借が蓄積していく。これは有酸素エネルギーと無酸素エネルギーの両方を使い運動を行っていることになる。そして、酸素借が最大値に達したところで無酸素エネルギーの供給が停止してしまい、その強度の運動が維持できなくなる。

陸上の中距離走や長距離走のラストスパートのゴール前で、急にスピードが減速してしまう事がおきるのはこのためである。

球技のような間欠的な運動では無酸素的なエネルギー出力と回復とを繰り返しながら運動を行っているが、その回復を担うのは有酸素性の酸素摂取能力である。したがって、多くの競技では有酸素性能力と無酸素性能力が相互に貢献し運動エネルギーを発揮していることになる。

そして、本研究の無酸素性エネルギーの回復過程についてであるが、最大運動後の酸素借は時間とともに指数関数的に回復した。30分で92%の回復を示し、60分で殆ど1回目の値になった。これは、運動中に蓄積された最大酸素借の返済には、運動後60分ほどかかることを意味している。酸素負債の測定方法には、最大運動後45又は60分間の酸素摂取量と安静値との差から求められているが、このことから意味のある値と思われる。

しかしながら、パフォーマンスを示す仕事量ではそれよりも短い時間である30分の休息で有意な差が認められなかった。とても興味深い結果である。これは短い時間の休息では1回目の運動のウォーミングアップ効果の影響があると思われる。運動開始時の呼吸循環器の応答が速いのではないかと。Fig.6の運動中の酸素摂取量は30分以内の休息では2回目の方が有意に高い値を示している。2回目の酸素摂取量が高いのは1回目の酸素借をまだ酸素負債として返しているためということも考えられるが、運動はすでに開始され新たな酸素借が蓄積されている。いずれにしても酸素が供給されておりエネルギーに換算される。30分の休息では酸素借は少なくともパフォーマンスは同じであった。その間の酸素摂取量が高ければ有酸素性エネルギーの貢献度は増し、無酸素性エネルギーが少な

くても同じ作業量が発揮できることになる。

したがって、運動開始時の酸素摂取量の応答をできる限り速くしてやれば、その分の酸素借の蓄積を少なくできる。そして、準備運動はその効果があるわけだが、運動開始前の準備運動を過剰にすると、無酸素エネルギー容量の一部を運動前に使ってしまうことになる。長距離選手がスタート前にダッシュをして、心拍数や換気量を一時的に上げている光景と目にするが、このことと深い関係があると思われる。事前運動による呼吸循環器応答の立ち上がりと酸素借との関係については今後の課題である。

## 5. まとめ

- 本研究では、休息時間を変えて2回の最大ランプ負荷運動を行い、無酸素性エネルギーの回復過程を検討した。
- 総仕事量は、30分以上の休息では変化なく、それ未満の休息では2回目の値が有意に低下した。
- 酸素需要量と酸素摂取量の差から求めた総酸素借は、60分の休息では変化なく、それ未満の休息では2回目の値が有意に低下した。
- 休息時間の延長により総酸素借はほぼ指数関数的に回復した。
- 休息時間が短い程、2回目の運動中の酸素摂取量は高い値を示し、その効果は60分の休息ではほぼ消失した。

以上により、最大ランプ負荷運動後の無酸素性エネルギーの回復には、60分程度の休息が必要と考えられる。

## 引用文献

- 1) MEDBO, J. I., et al : Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O<sub>2</sub> deficit. J. Appl. Physiol. 64(1) :50-60 (1988)
- 2) MEDBO, J. I. and I. TABATA :Relative importance of aerobic and anerobic energy release during short-lasting exhausting bicycle exercise. J. Appl. Physiol. 67(5) :1881-1886 (1989)

- 3) 伊藤智式ほか：ランプ負荷運動を用いたアネロビックキャパシティー推定法の検討. 体力科学 Vol. 45 NO. 6, 688(1996)
- 4) 安田好文ほか：マイクロコンピュータを用いた自動制御型自転車エルゴメータの開発. 豊橋技術科学大学人文社会工学系紀要, 12:130-141 (1990)

## 参考文献

- BARSTOW, T. J. :Characterization of VO<sub>2</sub> kinetics during heavy exercise. Med. Sci. Sports Exerc. 26(11) :1327-1334(1994)
- GREEN, S. and B. T. DAWSON : Measurement of Anaerobic Capacities in Humans. Sports Medicine 15(5) :312-327(1993)
- GREEN, S. and B. T. DAWSON : The oxygen uptake-power regression in cyclists and untrained men implications for the accumulated oxygen deficit. Eur. J. Appl. Physiol. 70:351-359(1995)
- GREEN, S., D. BISHOP, and D. JENKINS : Effect of end-point cadence on the maximal work-time relationship. Eur. J. Appl. Physiol. 71:559-561 (1995)
- GREEN, S., B. T. DAWSON, C. GOODMAN, and M. F. CAREY : Anaerobic ATP production and accumulated O<sub>2</sub> deficit in cyclists. Med. Sci. Sports Exerc. 28(3) :315-321(1996)
- GREEN, S. and B. T. DAWSON : Methodological effects on the VO<sub>2</sub>-power regression and the accumulated O<sub>2</sub> deficit. Med. Sci. Sports Exerc. 28(3) :392-397(1996)
- JERZY, A. ZOLADZ, et al: Non-linear relationship between O<sub>2</sub> uptake and power output at high intensities of exercise in humans. J. Physiol. 488(1) :211-217(1995)
- MEDBO, J. I. and S. BURGERS : Effect of training on the anaerobic capacity. Med. Sci. Sports Exerc. 22(4) :501-507(1990)
- POOLE, D. C. : Role of exercising muscle in slow component of VO<sub>2</sub>. Med. Sci. Sports Exerc. 26(11) :1335-1340(1994)
- POOLE, D. C., T. J. BARSTOW, G. A. GAESSER, W. T. WILLIS, and B. J. WHIPP : VO<sub>2</sub> slow component physiological and function significance. Med. Sci. Sports Exerc. 26(11) :1354-1358(1994)

TABATA, I., et al : Effects of moderate-intensity endurance and high-intensity intermittent training on anaerobic capacity and  $\dot{V}O_{2max}$ . *Med.Sci.Sports Exerc.* 28(10):1327-1330(1996)

TAKAISHI, T., T. ONO, and Y. YASUDA: Relationship between muscle fatigue and oxygen uptake during cycle ergometer exercise with different ramp slope increments. *Eur. J. Appl. Physiol.* 65:335-339(1992)

WALSH M. L. and BANISTER E. W. : The influence of inspired oxygen on the oxygen uptake response to ramp exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 72:71-75(1995)

WHIPP, B. J. : The slow component of  $O_2$  uptake kinetics during heavy exercise. *Med.Sci.Sports Exerc.* 26(11):1319-1326(1994)

WILLIS, W. T. and M. R. JACKMAN : Mitochondrial function during heavy exercise. *Med.Sci.Sports Exerc.* 26(11):1347-1354(1994)

YAMAMOTO, M. and H. KANEHISA : Dynamics of anaerobic and aerobic energy supplies during sustained high intensity exercise on cycle ergometer. *Eur. J. Appl. Physiol.* 71:320-325(1995)