

大学スポーツ選手におけるインターバル運動中の 発揮パワーおよび酸素摂取量に関する研究

The Power Output and Oxygen Uptake during Intermittent Exercise
among University Competitive Athletes

小 川 剛 司

分野：スポーツ科学、運動生理学

キーワード：インターバル運動・大学スポーツ選手、酸素摂取量

はじめに

ヒトが運動を行うときには多量のエネルギーが必要となる。ヒトはアデノシン三リン酸 (ATP) を分解することでエネルギーを得ている。そのATPは体内においてエネルギー代謝系によって再合成され、利用される。エネルギー代謝系は2つに大別される。一つは、酸素とエネルギー基質を用いてATPを再合成する有酸素代謝系であり、もう一つは酸素を用いずにエネルギー基質を分解することでATPを再合成する無酸素代謝系である。それぞれの代謝系には特徴があり、有酸素代謝系はATPの供給速度が無酸素代謝系と比較して低いながらも、長時間ATPを再合成することができる。一方で、無酸素代謝系は短時間に素早くATPを供給することができるが、長時間供給できない。運動・スポーツの場面においては、長距離走のような長時間運動では有酸素代謝系が主に用いられる一方で、短距離走のような短時間で終了するような運動では無酸素代謝系が主に用いられる。これら有酸素および無酸素代謝の最大能力をそれぞれ有酸素能力および無酸素能力と呼び、スポーツ競技パフォーマンスの高さと関係が深いことが知られている。

有酸素代謝量の測定は呼気ガス分析によって体内に摂取した酸素量を測定することで行われる。特に、酸素摂取量の最大値である最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) は有酸素能力の指標として用いられ、 $\dot{V}O_{2max}$ は持久的運動パフォーマンスと関

係が深く、持久的運動種目の選手では $\dot{V}O_{2max}$ が高いことが知られている (Houmard et al. 1991; Tanaka et al. 1983). 一方で、短時間に大きな力を発揮する運動は主に無酸素代謝を用いて行うことから、無酸素運動能力の測定には、30秒間の all-out 運動 (Medbø et al. 1993) や CMJ (counter movement jump) (Margaria et al.1966) などが用いられることが多く、これらの測定においては、被験者の競技特性によりそのパフォーマンスに違いが観察されている (Medbø et al.1993, Margaria et al.1966). また、運動後の血中および筋内乳酸値を無酸素代謝量の指標として用いることもある。乳酸はATPを作り出す過程で生成される代謝産物であり、種目特性の違いにより、高強度運動後の乳酸値に差が見られ、短距離選手では他の種目の選手に比べ、運動後の血中乳酸が高いことが報告されている (Schnable&Kindermann1983). しかしながら、これら無酸素代謝の指標は、有酸素代謝量との比較には用いることができない。そこで、呼気ガスから無酸素代謝を評価する酸素借が提唱された (Krogh&Lindehard1920). 酸素借は、運動中の全エネルギー必要量を酸素需要量として推定した量と運動における実際の酸素摂取量との差分で計算される。Medbø et al. (1988) は超最大短時間トレッドミル運動を用いて、最大下から最大強度までの酸素摂取を40回にわたり測定することによって、厳密な酸素需要量を推定し、その結果を元に酸素借を計量して、その信頼性を検討した。彼らが行ったような個人における精密な酸素需要量の算出には、大変な時間と労力がかかるため、Medbø et al. (1988) は酸素需要量推定のための測定回数を減らしての酸素借算出方法を検討した結果、上記の厳密な測定で行われた結果と有意な差はなかったことを報告している。

1 本研究の目的

多くのスポーツ種目では、一定の運動を継続して行うのではなく、運動を短時間の休息を挟んで繰り返しながら競技が進む。例えば、サッカーやバスケットボールなどの球技のゲーム中では、選手は長時間にわたりダッシュやジャンプ、シュートなどの激運動を断続的に行う。このような激運動と短時間の休息

を繰り返す運動は、いわゆるインターバル運動として捉えることができる。インターバル運動では長時間の運動を行う要素と短時間の運動を行う要素が含まれるものと考えられることから、有酸素代謝および無酸素代謝双方からのエネルギー供給が重要と考えられる。インターバル運動中の代謝応答に関する研究では Tabata et al. (1997) は $170\% \dot{V}O_{2max}$ 強度で 20 秒間の運動を 10 秒間の休息を挟みながら、疲労困憊に至るまでおよそ 6 から 7 回繰り返した時、インターバル運動中の総酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) は $\dot{V}O_{2max}$ と同程度であったこと、なおかつ酸素借はその最大値と同程度であったことを報告している。したがって、このようなインターバル運動では有酸素および無酸素能力双方を最大限利用して運動を行っているものと考えられる。しかしながら、Tabata et al. (1997) の研究では、一定の強度と発揮パワーで高強度運動が行われており、実際のスポーツの場面でみられるような、ゲーム後半にパフォーマンス低下が起こるようなインターバル運動時の代謝応答は十分に明らかでない。

そこで、本研究では、スポーツにおいてみられるようなセッション後半にパフォーマンスが低下するようなインターバル運動時の代謝応答を明らかにすることを目的として、10 秒間の最大努力自転車運動を 30 秒間の休息を挟んで 10 回繰り返した時の有酸素代謝および無酸素代謝応答を調べた。これにより、各スポーツ競技パフォーマンス向上のための効果的なトレーニング法開発に有益な情報をもたらすことできるものと考えられる。また、本研究は徳山大学の学生を被験者として行われており、結果を授業で紹介するなど、学生のスポーツ科学の理解に貢献するものである。

Ⅱ 方 法

被験者

本研究の被験者は大学バスケットボール部に所属する男子 10 名と陸上競技部に所属する 3 名であった。被験者は全員専門的トレーニングを継続的に行っており、高強度運動に馴れている。また、実験に先立ち、実験の目的・方法、実験実施上に起こりうる危険性を十分に説明し、実験参加の同意を得たうえで

実験を行った。

インターバル運動テストプロトコール

インターバル運動テストは電磁式自転車エルゴメーター (PowerMaxV- II, コンビ社製, 日本) を用いて行った。被験者は任意のウォーミングアップの後, 実験室に入室し安静を保った後, 実験を開始した。自転車インターバル運動は 10 秒間の全力自転車運動を休息を挟み, 10 回繰り返した。1 回の運動間の休息は 30 秒とした。ペダル負荷は被験者の体重を基準とした相対負荷を用い, 体重 $\times 0.1\text{kp}$ とした。また, 運動を行う前には被験者に対して, 運動の発揮パワーについてペース配分せず, 各運動とも最大努力で運動するよう指示した。被験者は自転車ペダルに前足部を固定し, サドルは最もペダリングしやすい位置に調整し, 運動時には腰をサドルから離さないよう指示した。

運動時中, ペダル回転数をモニターし続け, パーソナルコンピューターに回転数および発揮パワーを 10Hz で保存した。得られたデータから各運動セッション 10 秒間のパワーを平均し, 各セッションのパワーとした。呼気ガス分析を, 自動呼気ガス分析器 (AE310s, ミナト医科学社製, 日本) を用いて行った。実験中には被験者は呼気マスクを装着し, 呼気を一呼吸ごとに分析した。これにより, 換気量 ($\dot{V}E$), 酸素濃度および二酸化炭素濃度を測定した。得られたデータから $\dot{V}E$, 酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$), 二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$) を算出した。呼気ガスデータは 10 秒ごとに平均され, 各運動セッションの運動中および休息中の $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ として評価した。

無酸素代謝からのエネルギー供給量の算出は酸素借 ($\dot{D}O_2$) の算出によって行った。 $\dot{D}O_2$ の算出のためには運動時の酸素需要量の推定が必要である。本研究では酸素需要量を ACSM (American College of Sports Medicine) のガイドラインをもとに自転車エルゴメーター運動時の酸素需要量推定式を用いて, 被験者の体重および仕事量から以下の式によって算出した。

$$\text{酸素需要量 (ml/kg/min)} = 1.8 \times \text{仕事量} \div \text{体重} + 7.0$$

この酸素需要量から, 実際のインターバル運動時の $\dot{V}O_2$ を減算することに

2010年12月 小川剛司：大学スポーツ選手におけるインターバル運動中発揮パワーおよび酸素摂取量に関する研究
よって $\dot{V}O_2$ を算出した。また、心拍数(HR)をHRモニター(RS-800, POLAR, Finland)を用いて測定し、10秒ごとに平均した値で評価した。

統計分析

値はすべて平均値±標準偏差で表した。データの解析には一元配置分散分析を用い、有意差の判定は、危険率を5%未満に設定した。

Ⅲ 結果

インターバル運動各運動セッションの発揮パワーをFig.1に示す。発揮パワーは第1セッションで最高値を示し(799±232W)、セッションが進むにつれて低下していった。

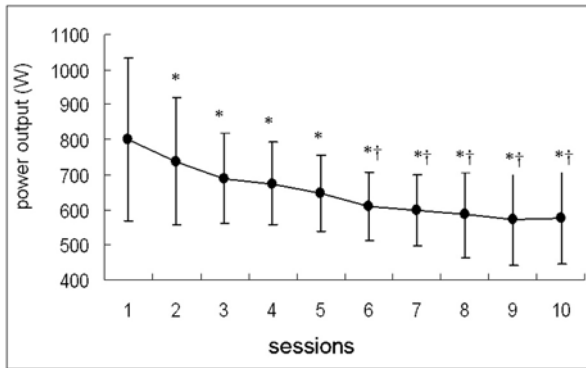


Figure 1. mean power output at each session.
The data are the mean ± SD. *, $p < 0.05$ vs. 1st session, †; $p < 0.05$ vs. 5th session.

各セッションの $\dot{V}O_2$ をFig.2およびFig.3に示す。運動時の $\dot{V}O_2$ は第1セッションよりもそれ以降のセッションにおいて有意に高く($p < 0.05$)、セッションが進むにつれて増加する傾向にあった。しかしながら第4セッション以降の $\dot{V}O_2$ は一定であった。休息時の $\dot{V}O_2$ は第1セッションよりもそれ以降のセッションで有意に高く($p < 0.05$)、セッションが進むにつれて増加する傾向にあった。しかしながら第5セッション以降の $\dot{V}O_2$ は一定であった。各セッショ

ンの $\dot{V}E$ をFig4に示す. 運動時の $\dot{V}E$ は第1セッションよりもそれ以降のセッションにおいて有意に高く ($p < 0.05$), セッションが進むにつれて増加する傾向にあった. しかしながら第5セッション以降の $\dot{V}E$ は一定であった.

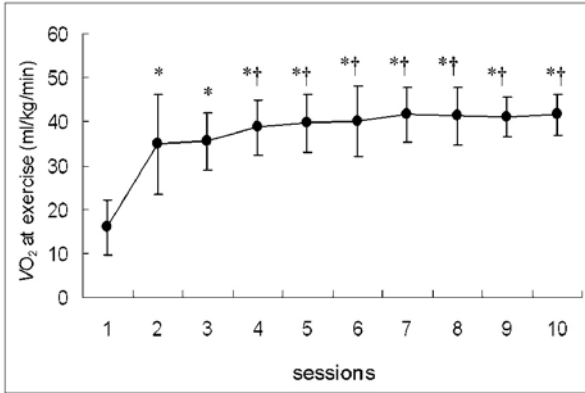


Figure 2. VO_2 at exercise in each session.

The data are the mean \pm SD. *, $p < 0.05$ vs. 1st session, †; $p < 0.05$ vs. 3rd session.

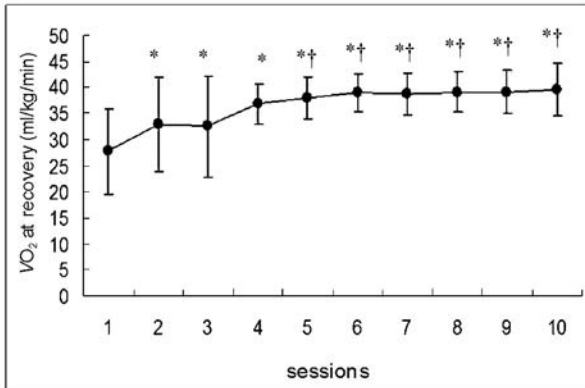


Figure 3. VO_2 at recovery in each session.

The data are the mean \pm SD. *, $p < 0.05$ vs. 1st session, †; $p < 0.05$ vs. 4th session.

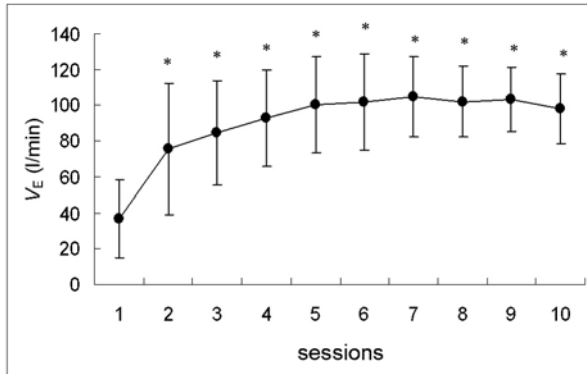


Figure 4. V_E in each session.
The data are the mean \pm SD. *: $p < 0.05$ vs. 1st session.

各セッションの $\dot{D}O_2$ をFig.5に示す。 $\dot{D}O_2$ は第1セッションにおいて最も高く、それ以降のセッションが進むにつれて低下する傾向にあった。しかしながら第7セッション以降の $\dot{D}O_2$ は一定であった。また、エネルギー代謝寄与率においてセットが進むにつれて $\dot{D}O_2$ の割合が徐々に低下していったが、第6セッション以降はほぼ一定の割合となった (Fig.6)。

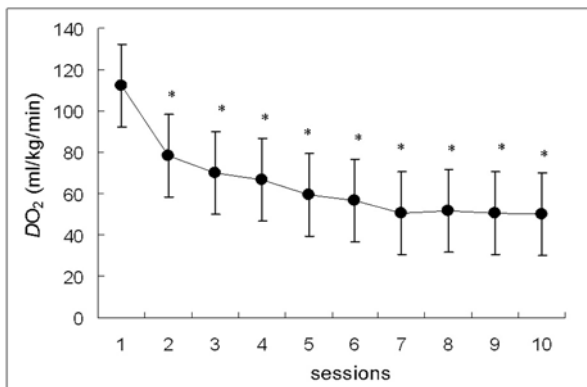


Figure 5. $\dot{D}O_2$ in each session.
The data are the mean \pm SD. *: $p < 0.05$ vs. 1st session.

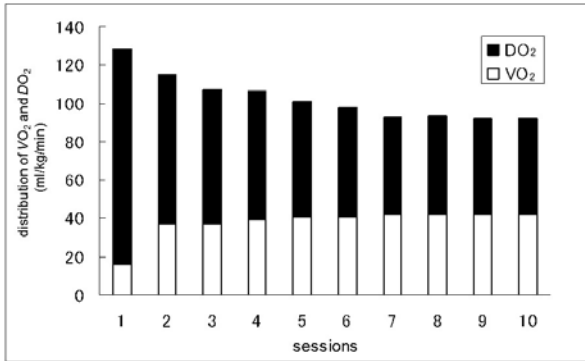


Figure 6. Distribution of $\dot{V}O_2$ and $\dot{D}O_2$ in each session. Black bar shows $\dot{D}O_2$, white bar shows $\dot{V}O_2$.

考 察

本研究では大学スポーツ選手において高強度インターバル運動時の代謝応答について調べるために、10秒間の全力自転車運動を30秒間の休息挟んで10回繰り返したときの発揮パワーおよび代謝応答を測定した。その結果、1) 発揮パワーはセッションが進むにつれて低下した。2) 運動セッションが進むにつれて酸素借 ($\dot{D}O_2$) が低下するのに対して酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) は増加した。3) $\dot{D}O_2$ と $\dot{V}O_2$ の割合はセッションが進むにつれて変化した。これらの結果から、本研究で行ったような10秒間の全力自転車運動を30秒の休息を挟んで繰り返すインターバル運動では、無酸素代謝量の低下によって、有酸素代謝量が増加しても運動パフォーマンスは徐々に低下していくことが示唆された。第1セッションでの無酸素代謝の割合は90%程度と無酸素的な運動であるのに対して、運動を繰り返すことで、有酸素代謝量が増加していった。すなわち持続的な運動と捉えることもでき、本研究で用いたようなインターバル運動は有酸素無酸素双方の代謝系寄与が重要であることが示唆された。

$\dot{V}O_2$ が運動を繰り返すにつれて高くなっていったことは、本研究で用いたようなインターバル運動時では運動を繰り返すことで、有酸素代謝の寄与が高くなっていくことを示すものである。しかしながら、第4セッション以降では運動時の $\dot{V}O_2$ には有意な変化が見られなかった。このことについては、運動初期

の $\dot{V}O_2$ の立ち上がりと関係していると考えられる。持続的な運動において運動開始直後の $\dot{V}O_2$ 動態は、素早く増加する第1相、その後緩やかに増加していく第2相、ほぼ定常状態に達する第3相に区別できる（古賀ら2001）。第3相に至るまでの時間はおよそ6から8分と報告されている。本研究のインターバル運動においては、運動を繰り返していくうちに $\dot{V}O_2$ が増加しづらい第2～3相に至っていたことが考えられる。

休息時の $\dot{V}O_2$ について、高強度運動終了後の $\dot{V}O_2$ はある程度の時間高いままであることがよく知られている。これは運動中に利用した無酸素代謝による代謝産物の除去（クレアチンリン酸の再合成および解糖系の利用による代謝産物の除去）に有酸素代謝が用いられるために生じる現象であり、酸素負債と呼ばれている。したがって、休息時の $\dot{V}O_2$ はいわゆる酸素負債として考えることができ、インターバル運動時に利用した無酸素代謝量を反映しているものと考えられる。一方で、筋組織で利用された代謝応答が呼吸応答として反映されるまでには遅れ時間が存在することが報告されている。Bangsbo（2000）は筋組織の酸素利用が呼吸応答に反映されるまでには約1分、強い運動時でも20秒程度要することを報告しており、休息時の30秒間の $\dot{V}O_2$ の中には運動時の代謝応答が反映されている可能性があることから、非常に短時間の間に運動と休息を繰り返す本研究においては、運動に用いた $\dot{V}O_2$ が酸素負債としての $\dot{V}O_2$ かを明確に区別することはできない。

運動時の換気増大メカニズムは、1) セントラルコマンド、2) 化学受容器反射、3) 機械受容器反射などがあげられる。特に高強度運動時には CO_2 、水素イオンなど代謝産物が生じ、換気が増大する（West 2000）。運動を繰り返すことにより、代謝産物が蓄積し、換気を刺激するため、インターバル運動を繰り返していくことで換気量が増大したものと考えられる。しかしながら、 V_E はセッション途中から一定であった。これについて、インターバル運動の後半では1) $\dot{V}O_2$ （換気要求）が一定になったこと、2) 発揮パワーの低下自体が換気亢進刺激を低くしたこと、3) 発揮パワーの低下および有酸素代謝の寄与の増大により、代謝産物の発生が少なくなったことにより、 V_E は一定になった可能

性が考えられる。 V_E 動態は発揮パワーや $\dot{D}O_2$ （無酸素代謝）ではなく、 $\dot{V}O_2$ 動態とほぼ一致し、 $\dot{V}O_2$ と関係が高いことが考えられる。

$\dot{D}O_2$ はセッションが進むにつれて減少したことから、インターバル運動時の無酸素代謝によるエネルギー供給はセッションが進むにつれて低下したことが考えられる。このことが、後半セッションのパフォーマンス低下の原因となったものと考えられる。無酸素代謝を多く使うような高強度運動では、1) 神経性疲労によるインパルス発射低下すること、2) 運動後半においては代謝産物が蓄積するためpHが低下し、筋収縮が阻害されること (Bogdanis et al. 1996)、3) 筋繊維内カルシウムイオン濃度の低下 (Wedterblad et al. 2000) などによって筋収縮力が低下し、結果として無酸素代謝量が低下したのと考えられる。本研究における運動セッション後半において $\dot{D}O_2$ がある程度一定となったのは、30秒の休息時間中に、わずかながら回復する余地があったため、無酸素代謝が供給し続けることができたことが考えられる。本研究の $\dot{D}O_2$ 算出の限界として、酸素重要量の推定は実測値を用いていないため、個人ごとに異なるであろう機械効率が考慮されないことがあげられ、実際の運動時のエネルギー需要を正確には反映していない可能性が考えられる。しかしながら、Medbø et al. (1988) の研究において、推定式によって算出された酸素借であってもある程度の高い信頼性が示唆されている。

先行研究では一定の高強度運動を繰り返した時、無酸素代謝の低下に対して、有酸素代謝の寄与の割合が増加していくことが報告されている (Tabata et al. 1997)。一方で、短時間のインターバル運動を漸増負荷によって行った場合、20秒間の走行を100秒間の休息を挟んで行った時、疲労困憊に至るまでその無酸素代謝と有酸素代謝のエネルギー寄与率はどの運動セッションでもおよそ2:1であり、一定であったことが報告されている (Ogawa et al. 2005)。本研究の運動パフォーマンスがセッション後半で低下するような、インターバル運動時の代謝寄与率は、セッション初期では有酸素代謝の寄与率が高まっていくが、運動セッション後半（第5セッション以降）はほぼ一定であり、インターバル運動はその運動時間と休息時間さらには運動強度によって代謝寄与が異なる

2010年12月 小川剛司：大学スポーツ選手におけるインターバル運動中発揮パワーおよび酸素摂取量に関する研究
ることが示唆された。

本研究の結果から、トレーニングへの応用について述べる。本研究の結果から短時間のうちに高強度の運動を何回も繰り返すような動作のある運動では、有酸素能力および無酸素能力双方が重要であり、トレーニング計画の中において、有酸素能力および無酸素能力を向上させる必要があると考えられる。有酸素能力は持続的な高強度運動を行うことで向上するのに対して、無酸素能力は60秒以下程度で疲労困憊する超高強度の運動、すなわち、スプリント運動を行うことで向上する。さらに、本研究で用いたようなインターバル運動では有酸素代謝無酸素代謝双方が動員されることが明らかとなり、激運動を休息をはさみながら行われるようなスポーツ種目では、本研究で用いたようなインターバル運動をトレーニングとして応用することで、効果的なトレーニングが可能となると考えられる。

本研究は、大学スポーツ選手においてセッション後半にパフォーマンスが低下するようなインターバル運動時の酸素摂取量について調べた。その結果、酸素摂取は運動を繰り返すことで高くなっていくのに対して、無酸素代謝量は低下していった。しかしながら、運動セッション後半ではそれぞれ一定となった。これらの結果は、スポーツ競技におけるエネルギー動態を明らかにするとともに、学生が行っているスポーツについて生理学的により深く理解するのに貢献する結果となった。

謝 辞

実験に参加してくれたバスケットボール部および陸上競技部の学生の皆さんに感謝します。本研究は、徳山大学経済学会・教育貢献研究助成によって行われた。

参考文献

- Bangsbo J (2000) Muscle oxygen uptake in humans at onset of and during intense exercise. *Acta. Physiol Scand* 168: 457-64
Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, Lakomy HK (1996) Contribution of phosphocreatine

- and aerobic metabolism to energy supply during repeated sprint exercise. *J Appl Physiol* 80: 876-884
- Houmard JA, Costill DL, Mitchell JB, Park SH, Chenier TC (1991) The role of anaerobic ability in middle-distance running performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 62: 40-43
- Krogh A, Lindehard J (1920) The changes in respiration at the transition from work to rest. *J Physiol Lond* 53: 431-437
- Margaria R, Aghemo P, Rovelli E (1966) Measurement of muscular power (anaerobic) in man. *J Appl Physiol* 21: 1662-1664
- Medbø JI, Mohn AC, Tabata I, Bahr RB, Vaage O, Sejersted OM (1988) Sejersted. Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *J Appl Physiol* 64: 50-60
- Medbø JI, Tabata I (1993) Anaerobic energy release in working muscle during 30 to 3 min exhausting bicycling. *J Appl Physiol* 75:1654-1660
- Ogawa T, Ohba K, Nabekura Y, Nagai J, Hayashi K, Wada H, Nishiyasu T (2005) Intermittent short-term graded running performance in middle-distance runners in hypobaric hypoxia. *Eur. J. Appl. Physiol.* 94: 254-261.
- Schnabel A, Kindermann W (1983) Assessment of anaerobic capacity in runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 52: 42-46
- Tabata I, Irisawa K, Kouzaki M, Nishimura K, Ogita F, Miyachi M. (1997) Metabolic profile of high intensity intermittent exercises. *Med Sci Sports Exerc* 29: 390-395
- Tanaka K, Matsuura Y, Kumagai S, Matsuzaka A, Hirakoba K, Asano K (1983) Relationships of anaerobic threshold and onset of blood lactate accumulation with endurance performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 52: 51-56
- West B J (2000) Chapter 8: Control of ventilation – How gas exchange is regulated- *Respiratory Physiology* 6th edition, Lippincott Williams & Wilkins, pp121-136
- Westerblad H, Bruton JD, Allen DG, Lannergren J (2001) Functional significance of Ca²⁺ in long-lasting fatigue of skeletal muscle *Eur J Appl Physiol* 83, 166-174
- 古賀俊策, 新関久一 (2001) 運動時の換気動態 呼吸 宮村実晴, 古賀俊策, 安田好文編集 NAP pp 122-137