

Dimri の外挿法と実測法による 最大酸素負債量の比較検討

中塘二三生¹⁾, 田中喜代次²⁾, 渡辺 一志²⁾, 福田 隆³⁾, 稲川 孝司⁴⁾

1) 大阪府立看護短期大学運動生理学研究室

2) 大阪市立大学教養部運動生理学研究室

3) 愛媛大学教養部運動生理学研究室

4) 大阪府立泉北高等学校

A Comparison of Maximal Oxygen Debt Determined by Dimri's Extrapolation and Actual Methods

Fumio NAKADOMO¹⁾, Kiyoji TANAKA²⁾, Hitoshi WATANABE²⁾, Takashi FUKUDA³⁾ and Takashi INAGAWA⁴⁾

1) *Division of Exercise Physiology, Osaka Prefectural College of Nursing, Tezukayamahigashi, Sumiyoshi, Osaka 558, Japan*

2) *Division of Exercise Physiology, Department of Health Science and Physical Education, School of Liberal Arts, Osaka City University, Sugimoto, Sumiyoshi, Osaka 558, Japan*

3) *Division of Exercise Physiology, Department of Health Science and Physical Education, School of Liberal Arts, Ehime University, Bunkyo, Matsuyama, Ehime 790, Japan*

4) *Osaka Prefectural High School of Senboku, Wakamatsudai, Sakai, Osaka 590-01, Japan*

We examined whether indirect maximal oxygen debt (YmA or YmB) derived by a mathematical equation (Dimri et al., 1980) would accurately approximate the directly measured maximal oxygen debt. The subjects for this study were 17 healthy male volunteers (8 athletes and 9 untrained college students) 18-26 years of age. An exhaustive 60-s cycling, as an exercise stimulus for determining maximal oxygen debt, was administered to each subject on a Monark bicycle ergometer with toe-stirrups. Criteria for the resting condition were a heart rate approximately equal to his usual rate and time of his lying (more than 30 min). The maximal oxygen debt (l) was calculated as the difference between the total oxygen uptake of recovery period (60 min) and the product of the pre-exercise resting oxygen uptake (l/min) and equivalent time in minutes required for the post-exercise gas collection. The pre- and post-exercise gas collection were made each minute during the respective entire testing periods. YmA and YmB were extrapolated from the measurements of excess oxygen uptake over the pre-exercise resting value at the end of 9 min and 15 min of the post-exercise period respectively; and both were assumed to represent maximal oxygen debt over a 60 min period. YmA (6.73 ± 2.60 l) and YmB (6.24 ± 2.10 l) calculated from the extrapolation procedure were highly correlated ($r=0.950$ and $r=0.940$, respectively) with observed maximal oxygen debt. Absolute oxygen debt determined by the extrapolation procedure, however, differed significantly ($P < 0.001$) from the directly measured maximal oxygen debt (7.31 ± 2.00 l), i.e., YmA and YmB were 0.58 l (or 7.9%) and 0.89 l (12.2%) lower than the directly measured maximal oxygen debt. It is suggested that the extrapolation procedure proposed by Dimri et al. needs to be investigated in further studies.

Key words: Maximal oxygen debt, Extrapolation procedure, Exhaustive 60-s bicycle work

研究目的

身体作業能は、大気中の酸素を摂取しながらエネルギーを発揮する有酸素性作業能と酸素を必要としないで身体に貯蔵された資源(ATP, CP やグリコーゲン)によりエネルギーを発揮する無酸素性作業能に大別される。中でも最大酸素負債量は無酸素性作業能の一指標とされてきたが(Astrand and Rodahl, 1970; Hill, 1924; Katch and Henry, 1972), その測定方法については、有酸素性作業能の代表的指標である最大酸素摂取量(Astrand, 1960; Astrand and Rodahl, 1970; Hermansen, 1969; Ikai et al., 1970; Saltin and Astrand, 1967)や anaerobic threshold (Davis et al., 1976; Tanaka, 1985; Wasserman, 1984; Yoshida et al., 1981) ほどには広範囲に検討されていない。その主な理由としては、performance との関係において必ずしも一致した見解が得られていない(Hermansen, 1969; Katch and Henry, 1972; 斎藤たち, 1981; 山崎と青木, 1977), 最大酸素負債量の個人内変動が約8-24%と大きい(Fujitsuka et al., 1986; Graham and Andrew, 1973; 黒田たち, 1974; 中塘と生田, 1982; 斎藤と藤墳, 1981)などの他に、被検者一人に要する測定時間が長いことがあげられる。

一方 Dimri たち(1980)は、回復期の酸素摂取量の動態が指数函数的パターンを示すことに着目し、簡易な方程式による外挿法から酸素負債量の算出が可能であることを提案した。この方法は、実測法と $r=0.994 \sim r=0.999$ の高い相関を示し、しかも回復期に要する時間が9-15分と短時間で済むことなどの妥当

性・簡易性を有する。しかし Dimri たち(1980)が外挿法の妥当性を検討した際に用いた作業強度と作業時間が被検者によって異なっていることから、最大酸素負債量を求める場合にも利用できるかどうか疑問である。

本研究は、60秒間の最大自転車作業後の回復期60分の総酸素摂取量(実測法)から算出した最大酸素負債量と、Dimri たち(1980)の方程式から求めた最大酸素負債量の間にどのような関係がみられるかについて検討した。

実験方法

被検者は、大学の男子陸上競技選手8名および一般男子学生9名の計17名である。被検者の年齢および身体的特徴の平均値と標準偏差は表1に示した。作業は、toe-stirrup (Lavoie and Dallaire, 1984; 中塘たち, 1985)を付けたモナーク製自転車エルゴメータを用いて、荷重負荷4.5kpによる60秒間の最大作業とした。

最大酸素負債量は、以下2つの方法から求めた。すなわち、①安静水準を超えた回復期60分間の総酸素摂取量(以下、実測法による最大酸素負債量)、および② Dimri たち(1980)の方程式 $Y_m = (Y_2^2 - Y_1 \cdot Y_3) / (2Y_2 - Y_1 - Y_3)$ より求めた(以下、外挿法)。ただし、 Y_1 , Y_2 , Y_3 は、それぞれ安静水準を超えた回復期0-3, 0-6, 0-9分の各酸素摂取量または0-3, 0-9, 0-15分の各酸素摂取量である(以下、前者の値から算出した最大酸素負債量を Y_{mA} 、後者の値から算出した最大酸素負債量を Y_{mB} とする)。また安静の

Table 1. Physical characteristics of subjects.

	N	Age yr	Height cm	Weight kg	Fat* %	100m run s
Trained	8					
Mean		19.8	169.3	60.3	13.6	11.7
SD		1.1	3.3	5.8	2.0	0.6
Untrained	9					
Mean		20.4	171.2	60.5	13.4	
SD		2.5	3.7	4.9	3.5	

SD: standard deviation, *Fat was estimated from skinfold method.

酸素摂取量は仰臥位姿勢にて30分間安静を保たせた後の10分間、回復期の酸素摂取量は作業直後から同姿勢において60分間安静を保たせて測定した。これらの酸素摂取量は換気量および呼気ガス中の O_2 、 CO_2 濃度をA/D変換器を付設したmicro-computer (NEC-PC 8801)の利用により1分ごとに自動的に求めた(Tanaka et al., 1987)。なお換気量をMetabo gas meter (クレハ製 KRM-55)、呼気ガス中の O_2 および CO_2 濃度

は、ショランダーガス分析器により校正したジリコニアセル方式(クレハ製 KRG-201)および赤外線方式(ゴダルト製 Capnograph mark III)による分析器を用いた。

血中乳酸濃度は、作業直後から約7.5分目(Fujitsuka et al., 1982)に肘正中静脈から採血した全血標本を用いて酵素電極法(東洋紡一オムロン製 Diaglca HEK-30L)によって分析した(中塘たち, 1985)。

結 果

図1は、Dimriたち(1980)の外挿法から求めた YmA と YmB の関係を示したものである。 YmA および YmB の平均値と標準値は、それぞれ $6.73 \pm 2.60l$ および $6.42 \pm 2.10l$ であった。平均値の差の検定では、両者間に有意な差は認められなかった。また両者の間には、 $r=0.961$ ($P<0.001$)の有意な相関関係が認められた。

図2は、実測法での最大酸素負債量に対する YmA (左図)および YmB (右図)の関係を示したものである。 YmA および YmB は、実測法での最大酸素負債量に対して、 $r=0.950$ ($P<0.001$)、 $r=0.940$ ($P<0.001$)の有意な相関関係が認められた。しかし、 YmA と YmB の絶対値は、実測法の $7.31 \pm 2.00l$ に対してそれぞれ平均で $0.58l$ (7.9%)、 $0.89l$ (12.2%)低い値を示した。 YmB と実測値のあいだには、有意な差 ($P<0.001$)が認められた。また実測値に対する YmA および YmB での推定の標準誤差は、それぞれ $0.62l$ およ

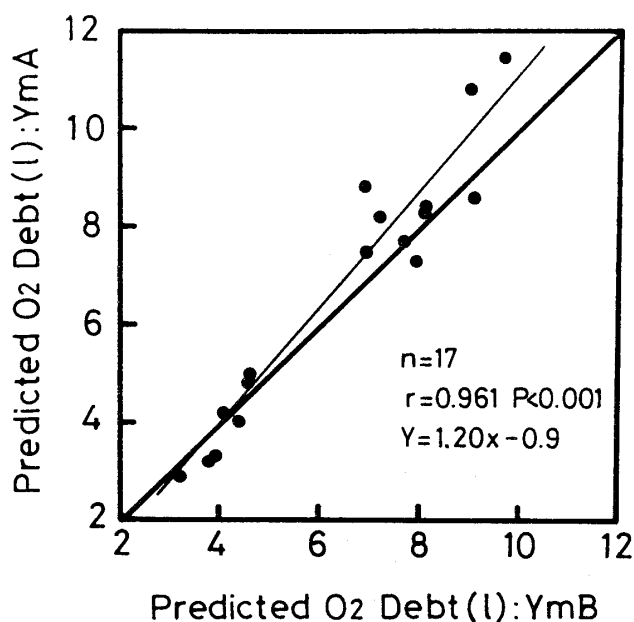


Fig. 1. Relationship between YmA and YmB . YmA and YmB were calculated from 0-9 min and 0-15 min oxygen uptake over rest during recovery, respectively.

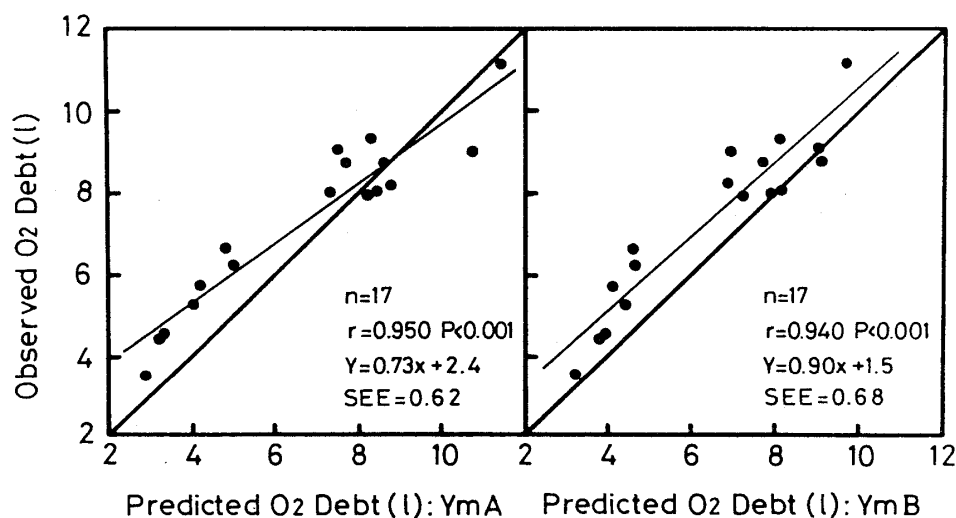


Fig. 2. Relationship between observed oxygen debt and predicted oxygen debt.

び0.68lであった。

作業後の血中乳酸濃度は、7.2から12.3mMの範囲にあり、全体で 9.6 ± 1.3 mMとなった。

考 察

60秒間の最大自転車作業から求めた最大酸素負債量の個人内変動は、約60秒間のトレドミル走に比べて小さい。例えばトレドミル走について Graham and Andrew(1973)は24.3%，黒田たち(1974)は10.8%，斉藤たち(1981)は17.7%，Fujitsuka たち(1982)は8.2%を報告しているが、自転車作業の場合は9.3%と比較的小さい個人内変動が観察されている(中塘と生田, 1982)。またトレドミルの場合、作業時間の個人内変動が約8% (Fujitsuka et al., 1986; Graham and Andrew, 1973; 黒田たち, 1974; 斉藤と藤埴, 1981) もあり、さらに作業時間の延長に伴い最大酸素負債量の個人内変動も増加するのに対して、自転車作業では、作業時間が一定でありかつ作業量の個人内変動も1.4%と小さい(中塘と生田, 1982)。このような理由から、本研究では60秒間の最大自転車作業から Dimri たち(1980)の外挿法の検討を行った。その結果、Dimri たち(1980)の方程式を利用して求めた YmA および YmB は、図1に示したごとく両者間に $r=0.961$ ($P<0.001$) の有意に高い相関がみられ、かつ実測値に対しても高い相関を示した(図2)。しかしながら両者の絶対値に関しては、実測値に比べて、平均値で YmA: 0.58l (7.9%) から YmB: 0.89l (12.2%, $P<0.001$) 低い結果を得た。これらのことから、Dimri たち(1980)が考案した外挿法は、60秒間の最大自転車作業から最大酸素負債量を推定する簡易な測定法として必ずしも利用できず、さらに検討すべき点があることが示唆された。

Dimri たち(1980)の外挿法による値が実測法の値と比べて比較的大きな誤差がみられた要因としては、方程式を作成するにあたりいくつかを仮定したことが影響しているように思われる。すなわち Dimri たち(1980)は、回復期における酸素摂取量の動態が速く回復する成分と遅く回復する成分から成り、かつ両者とも指数函数的パターンを示すと仮定した。そして回復期の t_1 , t_2 , t_3 なる3つのインターバル(ただし $t_1 \geq 3$ 分)における回復に伴う酸素摂取量の速さの各成分を実際に計算しないでも、 $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$ の関係から消去法を利用することによって、簡易な方程式を作成した。

しかしながら、回復期における酸素摂取量の動態に関しては、速い成分と遅い成分の二者のみの要素とすることに対して疑問視する報告がある (Brooks たち, 1971; Di Prampero たち, 1973)。すなわち、Brooks たち(1971)は、回復期の酸素負債量を非乳酸性の酸素負債量と乳酸性の酸素負債量のみの要素から考えることに矛盾があることを指摘している。また、回復期における酸素摂取量の動態は、超最大作業の場合、15-35秒後から低下することが観察されている (Di Prampero たち, 1973)。ちなみに本作業後の血中乳酸濃度は、Di Prampero たち(1973)の値とほぼ同程度であった。したがって、本作業後においても酸素摂取量の動態は、Di Prampero たち(1973)と同様の傾向を示したものと予想される。これらのことから、最大作業に用いる外挿法においては、作業直後から指数函数的パターンを前提とした方程式だけでなく、回復に至るまでの酸素摂取量の動態も考慮に入れる必要があるように思われる。さらに Dimri たち(1980)の外挿法による値と実測法による値との間に差がみられた他の要因としては、乳酸性の酸素負債量に対して、約1.3倍から約2.9倍 (Ikegami et al., 1980; 斉藤たち, 1981; 山岡たち, 1967) とかなりの量を占める非乳酸性の酸素負債量の変動にも影響があるように思われる。すなわち、非乳酸性の酸素負債量の個人内変動は、乳酸性のそれに比べて大きく(斉藤と藤埴, 1981)、しかも回復期の延長に伴って大きくなる(斉藤たち, 1978)と報告されている。

以上のことから、外挿法を利用した60秒間の最大作業から最大酸素負債量を推定する方法としては、作業直後から回復に至るまでの酸素負債量や回復期における酸素摂取量の変動を考慮した簡易方程式の作成、および外挿法に関するより詳細な妥当性の検討が今後の重要な課題となろう。

要 約

無酸素性作業能の一指標とされている最大酸素負債量の測定には、安静期—作業—回復期と3種の測定時間(少なくとも1人につき1時間)を要する欠点がある。一方、Dimri たち(1980)は、回復期のインターバルでの酸素摂取量から、外挿法を用いた $Y_m = (Y_2^2 - Y_1 \cdot Y_3) / (2Y_2 - Y_1 - Y_3)$ の方程式によって酸素負債量を求める方法を提唱している。この方法は、回復期

の9分,あるいは15分までの酸素摂取量から酸素負債量を求めることができる簡易性を有する。本研究は,安静水準を超えた回復期60分間の総酸素摂取量から求めた最大酸素負債量(以下,実測法による最大酸素負債量)と,Dimriたち(1980)の方程式を用いて安静水準を超えた回復期9分までの酸素摂取量から求めた最大酸素負債量(以下, YmA),および回復期15分までの酸素摂取量から求めた最大酸素負債量(以下, YmB)の間にどのような関係があるかについて検討した。安静水準は,30分間仰臥姿勢による安静を保たせた後の10分間の酸素摂取量から求めた。作業は, toe-stirrup を付けたモナーク製自転車エルゴメータによる60秒間の最大作業(負荷:4.5kp)とした。被検者は,大学の男子陸上競技選手8名と一般男子学生9名である。

結果は,次のごとくとなった。

1) YmA および YmB は,それぞれ 6.73 ± 2.60 l および 6.42 ± 2.10 l であった。また両者の間には, $r = 0.961$ ($P < 0.001$) の関係がみられた。

2) YmA および YmB は, 実測法による最大酸素負債量 (7.31 ± 2.00 l) に対して, それぞれ $r = 0.950$ ($P < 0.001$) および $r = 0.940$ ($P < 0.001$) の関係がみられた。しかしながら, 両者の絶対値は, 実測法による最大酸素負債量に比べてそれぞれ 0.58 l (7.9%) および 0.89 l (12.2%, $P < 0.001$) 低い値を示した。YmB と実測値の間には, 有意な差 ($P < 0.001$) が認められた。

3) これらのことから, Dimri たちの外挿法は, 60秒間の最大作業から酸素負債量を推定する方法としてさらに検討すべき点があることが示唆された。また, 外挿法と実測法の間には差がみられた要因は, Dimri たち(1980)が方程式を作成するにあたり, いくつかを仮定したことが影響しているものと思われた。

4) 今後, 60秒間の最大作業から最大酸素負債量を推定する方法については, 作業直後から回復に至るまでの酸素負債量や回復期における酸素摂取量の変動を考慮した簡易方程式の作成が必要となろう。

本研究は, 文部省科学研究補助金によって行われた。

文 献

- Astrand, I., 1960: Aerobic work capacity in man and woman with special reference to age. *Acta Physiol. Scand.*, 169: 1-9.
- Astrand, P.O. and Rodahl, K., 1970: Textbook of work physiology. McGraw-Hill, Inc, pp.279-286.
- Brooks, G.A., Hitterman, K.J., Faulkner, J.A. and Beyer, R.E., 1971: Temperature, skeletal muscle mitochondrial functions, and oxygen debt. *Amer. J. Physiol.*, 220: 1053-1059.
- Davis, J.A., Vodak, P., Wilmore, J., Vodak, J. and Kurts, P., 1976: Anaerobic threshold and maximal aerobic power for three modes of exercise. *J. Appl. Physiol.*, 41: 554-550.
- Dimri, G.P., Gupta, J.S. and Majumdar, N.C., 1980: An extrapolation procedure for determination of oxygen debt repayment. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 44: 153-159.
- Di Prampero, P.E., Peeters, L. and Margaria, R., 1973: Alactic O_2 debt and lactic acid production after exhausting exercise in man. *J. Appl. Physiol.*, 34: 628-632.
- Fujitsuka, N., Yamamoto, T., Ohkuwa, T., Saito, M. and Miyamura, M., 1982: Peak blood lactate after short periods of maximal treadmill running. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 48: 289-296.
- Fujitsuka, N., Yoshimura, A. and Fujitsuka, C., 1986: A simple method for measuring maximal oxygen debt in man. *Kyoiku Igaku*, 32: 95-104.
- Graham, T.E. and Andrew, G.E., 1973: The variability of repeated measurement of oxygen debt in man following a maximal treadmill exercise. *Med. Sci. Sports*, 5: 73-78.
- Hermansen, L., 1969: Anaerobic energy release. *Med. Sci. Sports*, 1: 32-38.
- Hermansen, L. and Saltin, B., 1969: Oxygen uptake during maximal treadmill and bicycle exercise. *J. Appl. Physiol.*, 26: 31-37.
- Hill, A.V., Long, C.N.H. and Lupton, H., 1924: Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen. *Proc. Roy. Soc.*, 97: 84-138.
- Ikai, M., Shindo, M. and Miyamura, M., 1970: Aerobic work capacity of Japanese people. *Res. J. Phys. Educ.*, 14: 137-142.
- Ikegami, Y., Fujitsuka, N., Saito, M., Shimaoka, K. and Miyamura, M., 1980: A mathematical analysis of the oxygen uptake after strenuous exercise.

- Nagoya J. Health, Physical Fitness Sports, 3: 1-8.
- 生田香明, 猪飼道夫, 1973: Mechanical power, 血液乳酸量, 酸素負債量による Anaerobic work の研究. 体力科学, 22: 1-8.
- Katch, V. and Henry, F.M., 1972: Prediction of running performance from maximal oxygen debt and intake. Med. Sci. Sports, 4: 187-191.
- 河合正光, 1955: 運動選手の最大酸素摂取量並びに最大酸素負債量について. 体力科学, 5: 67-72.
- 黒田善雄, 塚越克巳, 雨宮輝也, 鈴木洋児, 伊東静夫, 1974: 最大酸素負債量の測定法に関する研究—最大酸素負債量の個人内変動について—. 日本体育協会スポーツ科学研究報告, pp. 1-9.
- Lavoie, N., Dallaire, J., Brayne, S. and Barrett, D., 1984: Anaerobic testing using the Wingate and Evans-Quinney protocols with and without toe-stirrups. Physiol., 9: 1-5.
- 中塘二三生, 生田香明, 1982: 自転車エルゴメータを用いた60秒間の最大努力作業による酸素負債量の個人内変動. 体力科学, 31: 355-362.
- 中塘二三生, 稲川孝司, 久米秀作, 福田隆, 生田香明, 1985: トウクリップの付いたペダルを用いた短時間の最大自転車作業による無酸素パワー. 大阪府立看護短期大学紀要, 7: 71-76.
- 中塘二三生, 田中喜代次, 渡辺一志, 福田隆, 1985: 酵素電極法による血中乳酸濃度の測定. J.J. Sports Sci., 4: 980-982.
- 斉藤満, 藤墳規明, 1981: 回復期酸素摂取動態からみた超最大運動の酸素負債量変動要因の分析. 名古屋大学総合保健体育科学, 4: 53-61.
- 斉藤満, 藤墳規明, 宮村実晴, 松井秀治, 1981: 個人内変動からみた酸素負債量. 体育の科学, 28: 290-295.
- 斉藤満, 宮村実晴, 池上康男, 大桑哲男, 1981: 無酸素的作業の生理学的研究—400m 疾走能力の制限因子に関する研究—. デサントスポーツ科学, 1: 143-148.
- Saltin, B. and Åstrand, P.O., 1967: Maximal oxygen uptake in athlete. J. Appl. Physiol., 23: 353-358.
- Tanaka, K., 1985: Noninvasive indices capable of detecting the treadmill anaerobic threshold for well-trained men. Jpn. J. Appl. Physiol., 15: 333-338.
- Tanaka, K., Nakadomo, F. and Moritani, T., 1987: Effects of standing cycling and the use of toe stirrups on maximal oxygen uptake. Eur. J. Appl. Physiol., 56: 699-703.
- Wasserman, K., 1984: The anaerobic threshold measurement to evaluate exercise performance. Am. Rev. Respir. Dis. 129: Suppl. S36-S40.
- 山岡誠一, 蜂須賀弘文, 榊岡義明, 1967: 呼吸ガス代謝よりみた子供と成人の比較 第一報 身体運動時の酸素摂取量, 酸素負債量. 体育学研究, 11: 203-212.
- 山崎省一, 青木純一郎, 1977: 長距離走者の競技記録と無酸素的能力. 体力科学, 26: 87-95.
- Yoshida, T., Nagata, A., Muro, M., Takeuchi, N. and Suda, Y., 1981: The validity of anaerobic threshold determination by a Douglas bag method with arterial blood lactate concentration. Eur. J. Appl. Physiol., 46: 423-430.

(1987年11月4日受付)