

トレッドミルランブ負荷プロ  
トコール作成装置の開発

Development of com-  
puter software in ramp  
slope controller for  
treadmill ergometer

山本 雅庸  
田辺 一彦  
大宮 一人  
岩崎 達弥  
伊東 春樹  
村山 正博  
須階 二郎  
豊福 則明\*

Masanobu YAMAMOTO  
Kazuhiko TANABE  
Kazuto OHMIYA  
Tatsuya IWASAKI  
Haruki ITO  
Masahiro MURAYAMA  
Jiro SUGAI  
Noriaki TOYOFUKU\*

Summary

We developed computer software to produce a treadmill ramp protocol through which oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ ) is increased in a linear fashion, thus enabling subjects to walk until the end of exercise. The developed software simulates the increases in speed and grade of the treadmill displayed on a personal computer screen, and produces the ramp protocol by arbitrarily determining the variables of the following formula:

- 1) Increments of  $\dot{V}O_2 = a_1 t + a_2$  (ml/min/kg) [t=exercise time (min)]
- 2) Predicted  $\dot{V}O_2$  by speed (S) and grade (G) =  $a_3 S^2 + a_4 G^2 + a_5 SG + a_6 S + a_7 G + a_8$  (ml/min/kg) [S= speed (km/hr); G=grade (%)]
- 3) Speed suitable for desired exercise time (S or  $S^2$ ) =  $a_9 t^2 + a_{10} t + a_{11}$  (km/hr)
- 4) Grade suitable for desired exercise time (G or  $G^2$ ) =  $a_{12} t^2 + a_{13} t + a_{14}$  (%)

In this study, the increment of  $\dot{V}O_2$  was determined by considering the subject's exercise capacity ( $\dot{V}O_2 = 4t + 7$  ml/min/kg), using the Ito's formula ( $\dot{V}O_2 = 0.067S^2 + 0.289SG + 7.73$  ml/min/kg). The formula of grade was determined following the formula arbitrarily ( $G^2 = 25t + 5\%$ ). The formula of speed for exercise time was calculated automatically. The new ramp protocol, which was applied to 10 healthy subjects (mean age:  $24.8 \pm 4.8$  years old), disclosed a similar linear relationship between the predicted  $\dot{V}O_2$  and the measured  $\dot{V}O_2$ .

Key words

Ramp protocol      Treadmill      Oxygen uptake

聖マリアンナ医科大学 第二内科  
川崎市宮前区菅生 2-16-1 (〒213)  
\*フクダ電子株式会社  
東京都文京区本郷 3-39-4 (〒113)

The Second Department of Internal Medicine, St.  
Marianna University School of Medicine, Sugao 2-  
16-1, Miyamae-ku, Kawasaki 213  
\*Fukuda Denshi Co. Ltd., Hongo 3-39-4, Bunkyo-ku,  
Tokyo 113

Received for publication July 25, 1991; accepted February 10, 1992 (Ref. No. 38-105)

## はじめに

運動強度を直線的に増加させるランプ (ramp) 負荷法は, 呼気ガス分析を併用した心肺運動負荷試験において, 最大酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2 \text{ max}$ ) や嫌気性代謝閾値 (AT) を測定する際に極めて有用である. 従来, ランプ負荷法は運動強度の定量が可能な自転車エルゴメーターにおいて用いられてきた. 一方, トレッドミルにおいても, ランプ負荷法の開発が試みられているが<sup>1,2)</sup>, 酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2$ ) が, スピード, 傾斜, 体重など, 複数の因子により規定されることや, ソフトウェアの問題により, ステージ進行に伴って  $\dot{V}O_2$  のスムーズな増加を得るのは困難であった. この点を解決するため, トレッドミルのスピードと傾斜の設定を連続的に増加させるトレッドミルランプ負荷プログラム作成装置の開発を試みた.

## 対象と方法

### 対象

20歳代健常男性10例(平均  $24.8 \pm 4.8$  歳)を対象とした.

### 方法

以下の装置を用い, 20歳代の健常男性がほぼ10分前後で最大負荷に到達できるランプ負荷プログラムを作成した.

### 本装置の概要

本装置の概要を Fig. 1 に示す. 本装置はパーソナルコンピュータ(NEC製 PC-9800)を使用し, 画面上でトレッドミルランプ負荷法における予測  $\dot{V}O_2$ , 予測運動時間設定の後, スピード(S)と傾斜(G)をシュミレーションより算出し, プロトコルを作成するものである. 本装置は作成したプロトコルを3.5インチフロッピーディスク経由で, フクダ電子製ストレステストシステム ML-5000 に読み込ませ, 同社のトレッドミル MAT-2500 を0.2秒ごとにコントロールするものである.

Fig. 2 にランプ負荷プログラム作成中の実

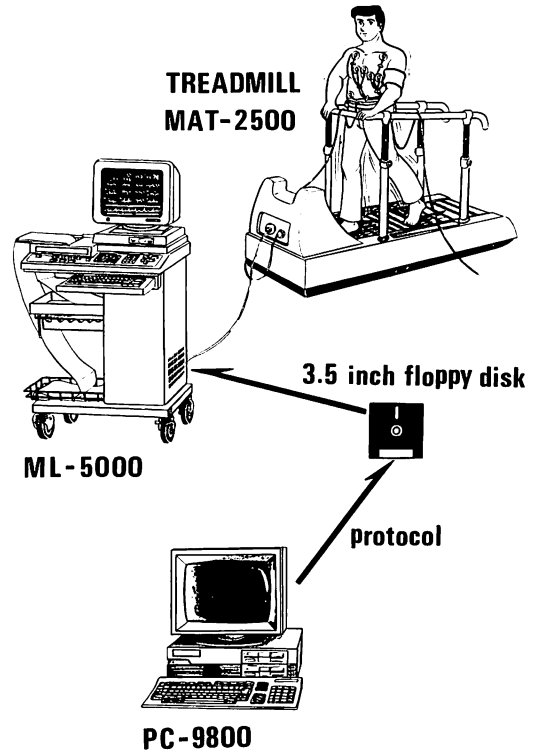


Fig. 1. Computer software connected to treadmill used in this study.

Ramp protocol developed by personal computer is memorized on 3.5 inch floppy disk of treadmill controller.

際のパソコン画面を示す. パソコン画面下段には

- 1) 負荷時間に対する予測  $\dot{V}O_2$  増加度:  $\dot{V}O_2 = a_1 t + a_2$  ml/min/kg (t は負荷時間: 分)
- 2) S と G の二次式からなる  $\dot{V}O_2$  予測式:  $\dot{V}O_2 = a_3 S^2 + a_4 G^2 + a_5 SG + a_6 S + a_7 G + a_8$  ml/min/kg (S はスピード: km/hr, G は傾斜: %)
- 3) スピード設定式: S または  $S^2 = a_9 t^2 + a_{10} t + a_{11}$  km/hr
- 4) 傾斜設定式: G または  $G^2 = a_{12} t^2 + a_{13} t + a_{14}$  % が表示される.

$a_1$  から  $a_{14}$  までの各係数を入力するとプログラムが完成するが, 1) 式と 2) 式が設定された上で, S の 3) 式あるいは G の 4) 式のどちらか一方をシュミレーションにより設定すると, 他方

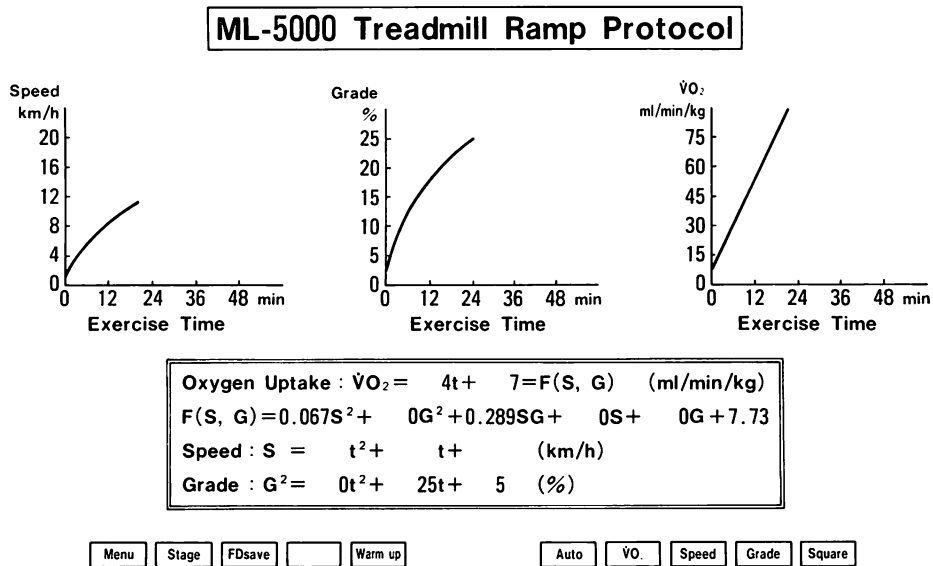


Fig. 2. Treadmill ramp protocol displayed on the computer screen.

Increases speed, grade and predicted oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ ) with the increase in exercise level are simulated on the computer display. Increment of  $\dot{V}O_2$  was first determined by subject's exercise capacity ( $\dot{V}O_2 = 4t + 7$  ml/min/kg) as shown in the right panel. Predicted  $\dot{V}O_2$  was determined according to Ito's formula as shown in the lower panel ( $\dot{V}O_2 = 0.067S^2 + 0.289SG + 7.73$  ml/min/kg). Speed and grade were increased in the manner that subjects were able to walk until the end of exercise as shown in the middle and left panels.

t=exercise time (min); S=speed (km/hr); G=grade (%).

は自動計算により設定される。設定されたプロトコールと予測  $\dot{V}O_2$  は、上段の三つのグラフに表示される。

今回の検討では、S と G からの  $\dot{V}O_2$  予測式には伊東ら<sup>1)</sup>の

$$\dot{V}O_2 = 0.067S^2 + 0.289SG + 7.73$$

を用い、予測  $\dot{V}O_2$  増加度は、被験者の運動耐容能を考慮し、ランブ負荷開始 10 分で  $\dot{V}O_2$  が 47 ml/min/kg になるように設定した。G の設定式は、負荷終了間際に G が急激に増加しないよう、G に関する二次式とした。また、最終的に自動計算されるスピード設定が、ランブ負荷開始から最大負荷時まで、走行に至らず、歩行のまま完了できる速度の範囲内であるように考慮して係数を設定し、 $G^2 = 25t + 5$  とした。

4 分間の立位安静、4 分間のウォーミングアッ

プ(速度 1 km/hr, 傾斜角 0%)の後に、ランブ負荷を実施して、本プロトコールの妥当性について検討した。また 1 例については、本ランブ負荷と 1 分漸増負荷の  $\dot{V}O_2$  の増加度について比較検討した。

呼気ガス分析にはミナト医科学製 RM-300 および MG-360 を使用し、breath-by-breath 法にてサンプリングを行なった。負荷中は 1 分ごとに自動血圧計(日本コーリン製 STBP-780)による血圧測定、および心電図モニターによる心拍数測定を行なった。

## 結 果

### 1. 本ランブ負荷法による諸データ

1) 呼気ガスデータ (Table 1): ランブ負荷開始後の 10 例の運動時間の平均は  $8.87 \pm 0.95$  分で

**Table 1. Data of exercise testing in 10 healthy subjects**

	$\dot{V}E$ (l/min)	$\dot{V}O_2$ (ml/min/kg)	Time (min)
Rest	11.3 ± 1.8	4.2 ± 0.6	
Warming up	16.2 ± 1.8	7.3 ± 1.1	
AT	31.5 ± 6.0	19.5 ± 3.0	3.30 ± 0.52
Peak	78.9 ± 18.6	40.5 ± 7.3	8.96 ± 0.98

(mean ± SD)

$\dot{V}E$ =ventilation;  $\dot{V}O_2$ =oxygen uptake; Time=exercise time; AT=anaerobic threshold.

あった。そのうち  $\dot{V}O_2$  の leveling off を確認できたのは 5 例で、peak  $\dot{V}O_2$  の平均は 40.5 ± 7.3 ml/min/kg であった。AT の平均は 19.5 ± 3.0 ml/min/kg で、ランプ負荷開始からの AT 到達時間は 3.30 ± 0.52 分であった。

**Fig. 3** に本プロトコルの  $\dot{V}O_2$  の予測値と実測値の関係を示す。10 例全例が到達し得たランプ負荷開始後 7 分までは、 $\dot{V}O_2$  実測値は直線的に増加し、その増加率も予測  $\dot{V}O_2$  と同等であった。

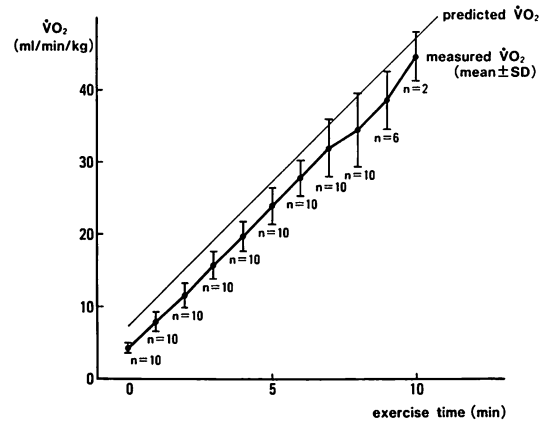
2) 心拍, 血圧動態: **Fig. 4** に本ランプ負荷の心拍数, 収縮期血圧の変化を示す。心拍数の上昇はほぼ直線的であり, 収縮期血圧は多少の動揺はあるものの, 負荷中の急激な増加は認められなかった。

2. 本ランプ負荷法と 1 分漸増負荷法による  $\dot{V}O_2$  増加度の比較

**Fig. 5** に本ランプ負荷法と 1 分漸増負荷法による  $\dot{V}O_2$  の推移の 1 例を示す。左図が本ランプ負荷法で, 右図は 1 分漸増負荷法の  $\dot{V}O_2$  を示す。後者では 1 分ごとに  $\dot{V}O_2$  の動揺が認められるが, 本ランプ負荷法では  $\dot{V}O_2$  の動揺は少なく, 特にランプ負荷開始直後の低強度運動レベルにおいて  $\dot{V}O_2$  のスムーズな上昇が認められた。

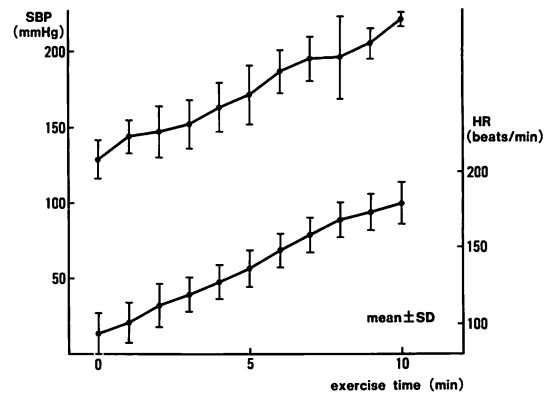
考 按

ランプ負荷法は Whipp<sup>3)</sup> らによって提唱され, 負荷量を直線的に増加させる運動負荷法である



**Fig. 3. Comparison of predicted and measured oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ ) during exercise.**

A linear relation was observed between the 2 lines.



**Fig. 4. Changes in heart rate and systolic blood pressure during exercise.**

Changes in heart rate and systolic blood pressure during exercise are expressed as mean ± SD each one min. Linear increases were obtained coincident with increase in exercise level.

SBP=systolic blood pressure; HR=heart rate.

が, 一般的な多段階漸増負荷法に比べ, 負荷量の急激な増加がなく, 安全であり, 心拍数と血圧の上昇もスムーズで直線的である。AT や  $\dot{V}O_2$  max の測定を目的とした心肺運動負荷試験では,  $\dot{V}O_2$  がより直線的に増加し, 心拍数, 血圧のみならず, AT や  $\dot{V}O_2$  max の再現性にも優れており<sup>2)</sup>,

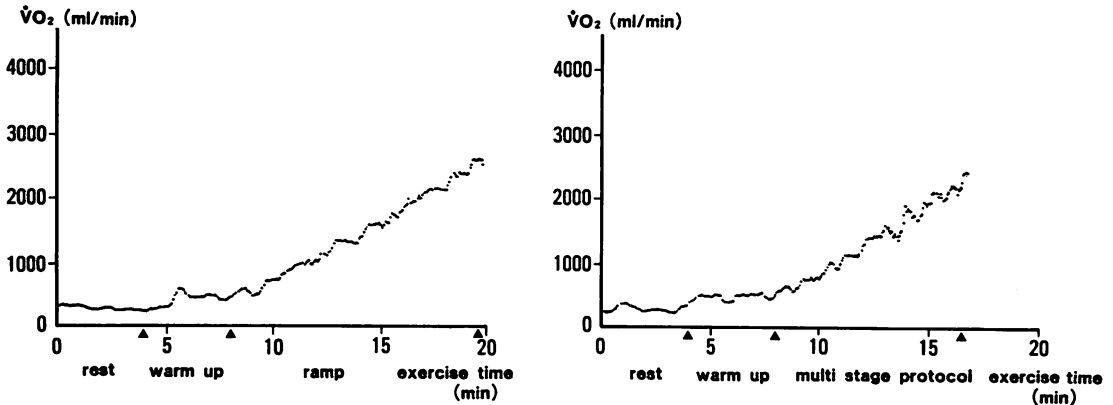


Fig. 5. Comparison of oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ ) in our ramp protocol and that in conventional multistage protocol.

Measurements were performed in a 30-year-old man. A smoothly increased linear curve was obtained by ramp protocol (left panel), compared to a curve obtained by the conventional multistage protocol in which speed and grade were incremented each min (right panel).

使用される頻度が高い。従来、ランブ負荷は主に自転車エルゴメーターに用いられてきたが、最近、トレッドミルによるランブ負荷も試みられるようになった。自転車エルゴメーターでは負荷量を連続的に増加させることが可能であるが、トレッドミルではソフトウェアの制限から、30秒ごとにステージを設定するのが限界であった。なおかつトレッドミルでは、スピードや傾斜角、被験者の下肢長および歩幅<sup>4)</sup>、体重など、種々の組み合わせにより仕事量が決定されるため、仕事量自体も $\dot{V}O_2$ として二次的に表現せざるを得ない。これらの原因により、トレッドミルでは、仕事量を直線的に増加させるための各ステージごとのスピード、および傾斜の設定は非常に困難であり、また従来のトレッドミルランブ負荷プロトコールでは、低強度運動時にはステージ進行に伴う負荷量増加が相対的に急激となり、 $\dot{V}O_2$ や心拍数の直線的増加は得られ難かった。本装置のようにトレッドミルのスピードと傾斜を連続的に調節可能であれば、スムーズで直線的な $\dot{V}O_2$ の増加が期待でき、前述した問題を解決できる可能性があり、 $\dot{V}O_2$ 動態の理解のためにも、このような負荷方法が有利である。また従来のランブ負荷では、30

秒から1分ごとのステージ進行に伴うスピードと傾斜角の増加は、被験者に急激に負荷量が増加したという心理的動揺を与え、それが $\dot{V}O_2$ の動揺を引き起こす可能性があったが、本法ではステージ進行がスムーズであり、このような影響も少ない。

今回の検討で、 $\dot{V}O_2$ 実測値の増加度が予測値と同様となったことから、本装置を用いて作成したプロトコールの妥当性が証明されたが、安静時 $\dot{V}O_2$ の実測値と予測値の間には若干のずれが生じている。このずれは、伊東らは予測 $\dot{V}O_2$ を求めた時の呼気ガス分析にmixing chamber法を用いており<sup>1)</sup>、今回用いたbreath-by-breath法と方法が異なることに起因していると考えられた。また、スピードと傾斜を連続的に変化させた検討から、 $\dot{V}O_2$ 予測式を求めた研究は皆無であり、負荷強度に対する $\dot{V}O_2$ の時定数などを含め、 $\dot{V}O_2$ の反応動態が異なっていた可能性も推察された。

本装置では $\dot{V}O_2$ 予測式をSとGの2次関数と設定したが、 $\dot{V}O_2$ は主にスピードと傾斜角、体重の3者により決定され、スピードの2乗に比例し<sup>4-7)</sup>、傾斜角に比例する<sup>8)</sup>ことが明らかにされている。また平地歩行において、 $\dot{V}O_2$ がSの5次

関数に一致したという報告もある<sup>9)</sup>。体重に関しては  $\dot{V}O_2$  は体重に比例すると言われ<sup>9-12)</sup>, 体重を補正した  $\dot{V}O_2$  値にはほとんど影響を及ぼさないとされている。以上より,  $\dot{V}O_2$  の予測式として S と G の 2 次関数を用いることが, 式の複雑化を避ける意味でも妥当と考えられた。

最後に本装置の今後の臨床応用に関して述べる。本装置では, はじめに  $\dot{V}O_2$  予測式が決定されれば, その後は比較的簡単な操作でプロトコルが作成可能である。 $\dot{V}O_2$  予測増加率, スピード設定式, もしくは傾斜設定式を増減させれば, 健常者だけでなく, トップアスリートに適合したプロトコルや, 逆に, 心疾患患者のような低運動耐容能者にも, 安全に負荷を行なえるようなプロトコル作成も可能であると考えられた。

### ま と め

健常男性を対象として, 10 分前後で, 走行まで至らずに終了するトレッドミルランプ負荷プロトコルを, 我々の開発したランプ負荷作成装置を使用して作成し, それを用いて  $\dot{V}O_2$  の実測値と予測値の比較や, 作成したプロトコルの実際の負荷状態について検討した。今回作成したランプ負荷プロトコルでの  $\dot{V}O_2$  の増加度は予測式とほぼ同様で, 心拍数の増加も直線的であり, 1 分漸増負荷との比較では,  $\dot{V}O_2$  の増加は本法の方がよりスムーズであった。以上の結果から, 本装置を用いることにより被験者の運動耐容能に合わせてランプ負荷法を作成でき, 安全かつ短時間に,  $\dot{V}O_2$  がより直線的に増加するランプ負荷法の作成が可能であると考えられた。

### 要 約

本研究は酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2$ ) が直線的に増加し, 被験者が歩行のまま終了可能なトレッドミルランプ負荷プロトコルを作成する装置の開発を目的とした。開発した装置はトレッドミルのスピードと傾斜の増加度をパーソナルコンピューターの画面上でシミュレートするものであり, プロトコ

ルは以下に示す各式の係数決定により作成された。

- 1) 負荷時間に対する予測  $\dot{V}O_2$  増加度:  $\dot{V}O_2 = a_1t + a_2$  ml/min/kg (t は負荷時間: 分)
- 2) S と G の二次式からなる  $\dot{V}O_2$  予測式:  $\dot{V}O_2 = a_3S^2 + a_4G^2 + a_5SG + a_6S + a_7G + a_8$  ml/min/kg (S はスピード: km/hr, G は傾斜: %)
- 3) スピード設定式: S または  $S^2 = a_9t^2 + a_{10}t + a_{11}$  km/hr
- 4) 傾斜設定式: G または  $G^2 = a_{12}t^2 + a_{13}t + a_{14}$  %

本研究では予測  $\dot{V}O_2$  増加度は対象の運動耐容能を考慮して決定し ( $\dot{V}O_2 = 4t + 7$  ml/min/kg),  $\dot{V}O_2$  予測式は伊東らの式を使用した ( $\dot{V}O_2 = 0.067S^2 + 0.289SG + 7.73$  ml/min/kg)<sup>1)</sup>。

次に, 傾斜設定式を  $G^2 = 25t + 5\%$  と規定し, スピード設定を自動計算により求めた。

作成したランプ負荷プロトコルを用いた健常男性 10 名 (平均年齢  $24.8 \pm 4.8$  歳) に対する負荷では, 対象の  $\dot{V}O_2$  の増加度は予測  $\dot{V}O_2$  増加度とほぼ同様の直線的増加を示した。

### 文 献

- 1) 伊東春樹, 谷口興一: 心不全患者のための ramp 負荷試験. *Coronary* 6: 41-49, 1989
- 2) 長谷川 昭, 羽鳥幹子, 今成哲朗, 福田丈子, 山口悦男, 山内康彦, 内藤滋人, 天野晶夫, 鈴木 忠, 村田和彦: トレッドミルを用いた ramp 負荷試験の再現性と有用性の検討. *日臨生理会誌* 21: 11-15, 1991
- 3) Whipp BJ, Davis JA, Torres F, Wasserman K: A test to determine parameters of aerobic function during exercise. *J Appl Physiol* 50: 217-221, 1981
- 4) Cotes JE, Meade F: The energy expenditure and mechanical energy demand in walking. *Ergonomics* 3: 97-119, 1960
- 5) Davis JA, Whipp BJ, Lamarra N, Huntsman DJ, Frank MH, Wasserman K: Effect of ramp slope on determination of aerobic parameters from the ramp exercise test. *Med Sci Sports Exercise* 14: 339-343, 1982
- 6) Ralston HJ: Energy speed relation and optimal speed during level walking. *Intern Ztschr Angew Physiol* 17: 277-283, 1958
- 7) Grimby G, Soderholm B: Energy expenditure

- of men in different age group during level walking and bicycle ergometry. *Scand J Clin Lab Invest* **14**: 321-328, 1962
- 8) Goldman RF, Iampietro PF: Energy cost of load carriage. *J Appl Physiol* **17**: 675-676, 1962
- 9) Workman JM, Armstrong BW: Oxygen cost of treadmill walking. *J Appl Physiol* **18**: 798-803, 1963
- 10) Bobbert AC: Energy expenditure in level and grade walking. *J Appl Physiol* **15**: 1015-1021, 1960
- 11) Hansen JE, Sue DY, Wasserman K: Predicted values for clinical exercise testing. *Am Rev Resp Dis* **129**: S49-S55, 1984
- 12) Wasserman K, Whipp BJ: Exercise physiology in health and disease. *Am Rev Resp Dis* **112**: 219-249, 1975