

## 運動負荷テストの条件としての運動強度と Pressure Rate Product

小林 淳子\*・石井 喜八\*

(平成 8 年 5 月 23 日受付, 平成 8 年 7 月 30 日受理)

### Kinetics of Pressure Rate Product Related to Exercise Intensity and Selection on Optimum Level for Health-related Exercise

Junko KOBAYASHI and Kihachi ISHII

A program for a health-related exercise has been mainly designed from three components; exercise intensity, its duration and rate of doing frequency. This report focuses on an intensity of the health-related exercises most of which have been designed with a criterion of maximum oxygen uptake ( $\dot{V}O_2 \text{ max}$ ). But, for general persons, it turns to assume that the directly determining  $\dot{V}O_2 \text{ max}$  is difficult because of possibility of fate. The authors assume that the possibility of fate is caused by a failure of cardiac function, so it enable us to use a product of heart rate and blood pressure (PRP index) which means work-doing of a heart. The purpose of the present study is to examine relationship between exercise intensities and PRP indexes and then to select an optimum level of exercise intensity for health-related exercise program. Ten female students served as subjects to the experiment which consist of two kinds of loading for variable intensity; a stepwisely increment and a ramp increment. The subjects performed the two loading methods on a high power ergometer (TAKEI, Inc.). In the ramp method applied, work intensity was added to 20 watts every minute to their exhaustion stage after three minutes to warm up at 30 watts. On the other hand, in stepwisely method applied, the work intensity was added 25 watts every two minutes after the same w-up. Both heart rate and blood pressure were recorded with an automatized determining system (NIHON COLIN, Inc., STBP-680), including systolic (SBP), diastolic blood pressure (DBP) values. Oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ ) and expired gas volume ( $\dot{V}E$ ) were observed with an automatic metabolism system (SENSORMEDICS, Inc., MMC4400tc). All the obtained variables were directly proportional to the work intensities except a variable of ventilatory equivalent for oxygen ( $\dot{V}E \cdot \dot{V}O_2^{-1}$ ) which demonstrated the least value about at 130 bpm in heart rate. The intensity level of 130 bpm in heart rate is equivalent to, in average, their 50%  $\dot{V}O_2 \text{ max}$  and 65% HR max in case of our subject. The lowest level of  $\dot{V}E \cdot \dot{V}O_2^{-1}$  was shown to close to  $20 \times 10^3$  in PRP index. Judging from the obtained results, it is recommended that for general persons intended to gain a well fit condition, the intensity level of exercise should be observed for the cardiac work test and initiated for the program at  $20 \times 10^3$  PRP index because it could be expected safely and effectively to improve.

#### I. はじめに

からだを活発に動かす運動はスポーツマンのものという扱われ方から、いまや多くの一般の人々に取り込まれるようになった<sup>1, 12, 13</sup>。その目的は“健康状態を維持するため”と集約されているけれども“からだを活発”に動かすという運動学的観点から“適切に”動かすという生理学的観点に変わった。そのために、内科的・外科的運動療法として、あるいは俗にいう予後のリハビリテー

ションとして、また、活発な日常生活を送るために身体運動の効果が具体的に求められている。

適切に運動を行う条件として運動の強度、その持続時間、さらに行う週あたりの頻度が指摘されているが、その前提は運動を実践していく人の運動能力、例えばエネルギー発現の能力の見極めである。

理論的なその推定項目は最大酸素摂取量であるとされてきたが、この決定には装置・手順も改善されながら被

\* 身体動作学研究室

測定者を最大活動水準に至らせるという条件が含まれるために、生命の危険性が問われるままに間接測定法が利用されるようになった。その中でも最も簡便である生体反応として心拍数が利用されている。運動中の心拍数の記録法が改善されていることに加えて血圧測定法が自動化できるようになった<sup>15)</sup>。

収縮期血圧と心拍数の相乗積 (Pressure Rate Product, 以下 PRP) は心臓の仕事量をあらわすといわれてきた<sup>4, 11, 14, 18)</sup>。

これまで酸素摂取量が筋活動およびそれを支援する組織器官の総合活動能力といわれてきた中で、その活動が生命の停止に関わるころから心臓の仕事の能力に焦点をあて、課された運動とそれに対する PRP の反応を調べることにした。これによって運動プログラム作成時に役立てたいと考えた。これが本研究の目的である。

## II. 方 法

### (1) 運動負荷のかけ方

ハイパワーエルゴメーター (竹井機器社製) を用い、自転車漕ぎの漸増負荷運動を課した。負荷運動は ramp 負荷法と stepwised 負荷法の 2 種類であった。両負荷法とも 60 rpm の運動テンポとした。それぞれの運動開始前 5 分間はエルゴメーター上で椅座安静状態を保った。そのとき両足はこのエルゴメーターに付いている足掛けに置かせた。

ramp 負荷は 30 watts から開始したが、開始後 3 分間はその水準を持続し、その後 20 W/min. の速度で負荷強度を直線増加させ、被検者の主観的判断による疲労困憊まで課した。一方、stepwised 負荷は同一の運動から始め、その後 25 watts を 1 分ごとに連続漸増し、ramp 負荷法と同様に疲労困憊まで課した。

### (2) 測定項目

測定項目は、収縮期血圧 (SBP)、拡張期血圧 (DBP)、心拍数 (HR)、酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2$ )、換気量 ( $\dot{V}E$ ) で、PRP ( $SBP \times HR \times 10^3$ ) と換気当量 ( $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ ) であった。

SBP と HR の測定は自動血圧測定装置 (運動負荷用血圧監視装置 STBP-680 日本コーリン社製) を用いた。心臓の水準に合わせてマンシュートを巻いた右腕は、運動中でも極力力を入れないように被検者に指示をした<sup>10, 16)</sup>。

$\dot{V}O_2$  と  $\dot{V}E$  は自動代謝測定システム (MMC 4400 tc SENSORMEDICS 社製) で breath by breath 法により測定・印字記録した。測定値は運動前および運動中 1 分毎に測定または記録を読んだ。

### (3) 被検者

この実験に参加することを同意した被検者は、テスト前に質問紙法による簡単なメディカルチェックを行い、循環器系に疾患のない人を選んだ。その人たちの年齢は 20~21 歳で定期的に運動生活を行っている健康な大学生 (体育専攻) の女性 6 名で、平均身長  $163.7 \pm 2.7$  cm、平均体重  $60.9 \pm 4.3$  kg であった。

### (4) 統計処理

統計処理は t 検定を用いて有意性を検討し、有意水準を危険率 5% 以内とした。

### (5) 本実験の再現性の検討

本実験は各被検者に test, re-test を行い、その 2 つのデータの有意性を SBP, DBP, HR,  $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}E$  について比較検討したところ、両者の間に有意な差はみられなかった。

## III. 結果およびデータについての考察

図 1 は ramp 負荷法と stepwised 負荷法のそれぞれにおける自転車漕ぎ運動中の心拍数と酸素摂取量の関係を示している。本研究で ramp 負荷法と stepwised 負荷法の 2 つの漸増負荷法を選択した理由は、ramp 負荷法は wasserman ら<sup>7, 19, 22)</sup>により循環器系の反応を滑らかにさせる漸増方法として用いられているが、一方現在運動プログラムを作成する実践現場では多く stepwised 負荷法が用いられていることから、この 2 つの漸増方法での循環器系の生体反応を比較する必要があると考えたためである。自転車漕ぎ運動中の HR と  $\dot{V}O_2$  の相関関係は、20 w/min. 漸増の ramp 負荷法で  $r=0.950$  ( $p<0.001$ )、2 分毎 25 w 漸増での stepwised 負荷法でも  $r=0.985$  ( $p<0.001$ ) と高い相関を示した。運動中の HR では両群間に有意な差はみられず、peak  $\dot{V}O_2$  値でも両群間に有意差はなかった。これらのことから今回選択した 2 つの負荷方法における  $\dot{V}O_2$ -HR 関係は極めて直線的な関係を示していたといえる。

図 2 は自転車漕ぎ運動中の HR と収縮期血圧 (SBP)、平均血圧 (MBP)、拡張期血圧 (DBP) のそれぞれとの相関関係を表したものである。3 つの血圧の中で SBP が自転車漕ぎ運動中の HR と一番相関が高い ( $r=0.790$ ,  $p<0.001$ )。この研究のねらいは安全でしかも効果が期待できる運動強度の水準における循環器系の応答水準から運動プログラム作成の手がかりを得ることにあったので、求められた 3 種類の血圧値の中で運動強度に伴う相関関係が最も大きく、傾斜が一番小さい SBP を用いることにした。

図 3 は自転車漕ぎ運動中にみられた SBP と HR の関

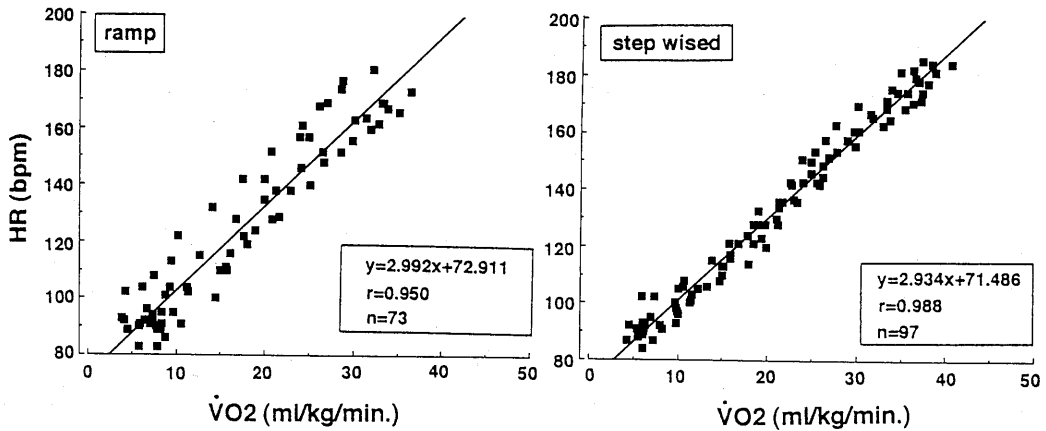


図1 自転車漕ぎ運動中の HR と酸素摂取量の関係

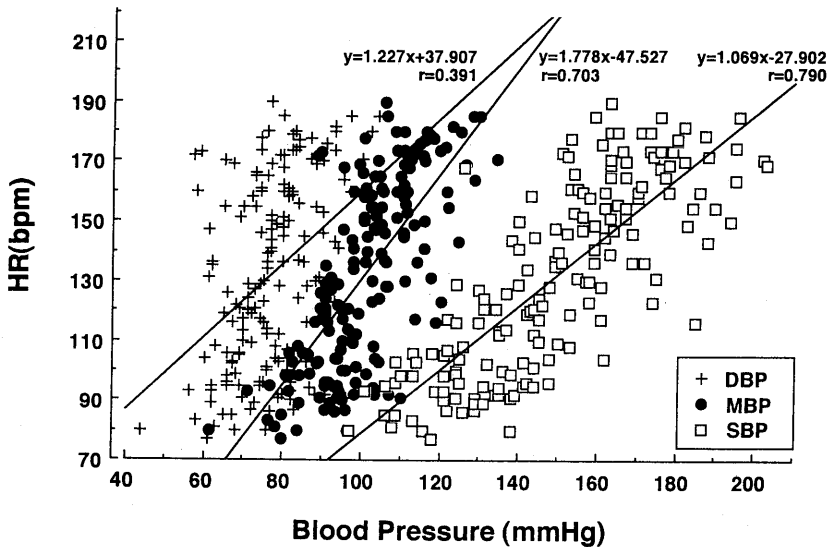


図2 自転車漕ぎ運動中の HR と血圧の関係

係に加えて、PRP 値を斜線で加えた図である。PRP は心臓の仕事量の指標でもあり心筋の酸素摂取量と正の相関関係にあるといわれている<sup>20, 21)</sup>。PRP 値は HR および SBP それぞれが増加することからみて相乗積となるので当然上昇する。そこで PRP 値に対する HR 値が約 80 bpm のときに PRP は  $10 \times 10^3$  以下にある。180 bpm に達するとその値は  $30 \times 10^3$  以上に上昇する。Brouha と Radford<sup>5)</sup> は HR が 100~120 bpm で一回拍出量が一定になるといふ。Åstrand ら<sup>2, 3)</sup> も一回拍出量は  $\dot{V}O_2$  max の 40% のときに最大値になり、そのときの HR は 110 bpm であるといふ。そこで、図中に X 軸に平行に破線を加えてみた。これにより HR が 110 bpm の水準のおよその PRP 値をみると  $15 \times 10^3$  の値を示してい

る。この水準の HR は  $\dot{V}O_2$  が一次的に関係するので PRP にも直線関係があらわれたと思われる。

図4では自転車漕ぎ運動中の呼吸器系の反応として換気当量 ( $\dot{V}E \cdot \dot{V}O_2^{-1}$ ) をとり上げ HR との関係を見た。循環器系を中心に考察するにしても呼吸器系の運動反応も無視できないと考えたからである。一般人の健康維持、成人病予防のためには呼吸循環器系のトレーニングを行なうことが効果的であり<sup>6, 8, 9)</sup>、運動指導の現場ではそれに対するプログラム作成が盛んに行なわれている。運動強度と換気当量またはその逆数である酸素摂取率からみると酸素摂取量と換気量の関係は直線ではなく極小または極大の曲線を示す。その極大値・極小値からわかる強度水準は 50~60%  $\dot{V}O_2$  max に相当するという<sup>17)</sup>。こ

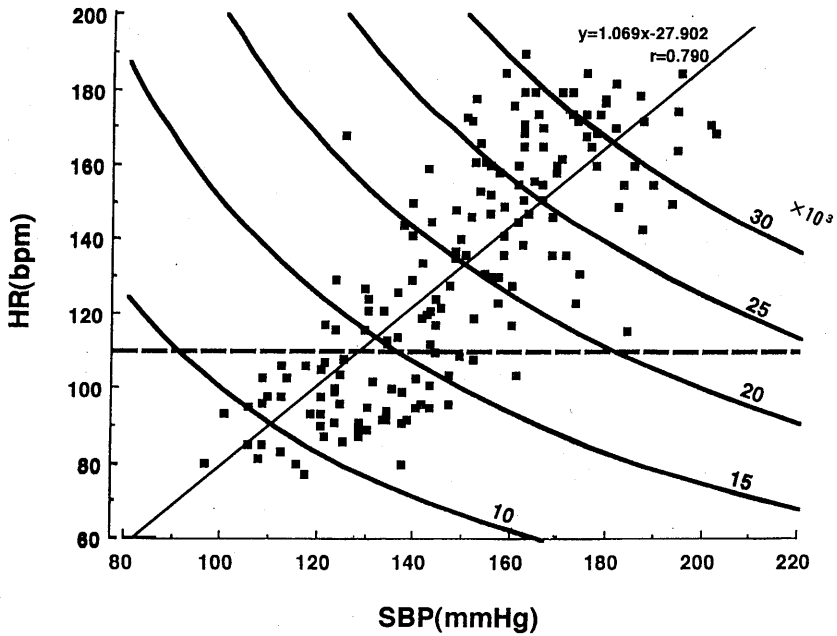


図3 自転車漕ぎ運動中の HR と SBP の関係

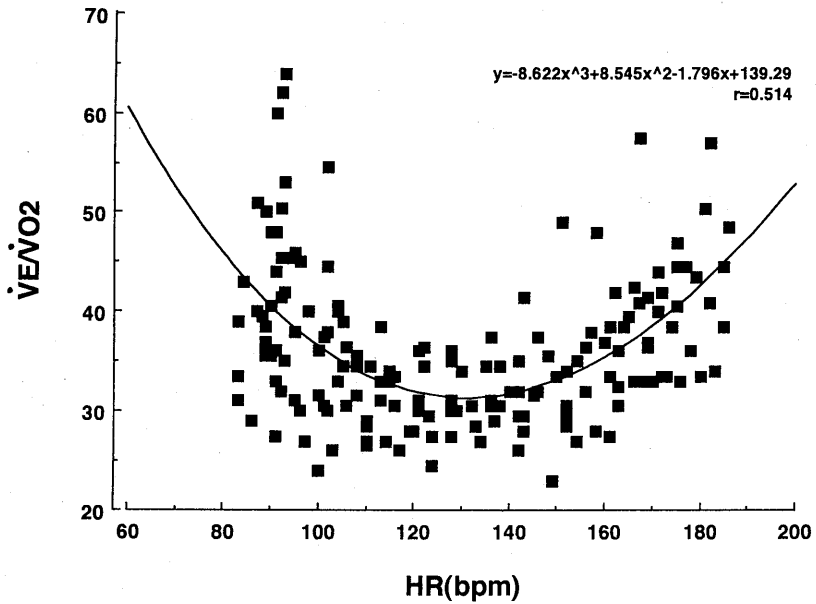


図4 自転車漕ぎ運動中の HR と換気当量の関係

の点は最適な呼吸効率を示すことになり最適作業強度であるといえる。また、Reinhard ら<sup>15)</sup>も  $\dot{V}E \cdot \dot{V}O_2^{-1}$  の最小点を AT の決定方法として用いていることから換気当量の最小値を示す点に注目した。この水準における HR はおよそ 130 bpm と認められる。この心拍数は被検者群が約 20 歳であるので推定最高心拍数の 65% と

いう水準になる。

図5 は自転車漕ぎ運動中の HR と PRP の関係を表した。両者は  $r=0.964$  ( $p<0.001$ ) という高い相関を示す。また、図中の X 軸に平行な 2 本の点線は一回拍出量の一定になるといわれている HR 110 bpm のレベルと本実験での換気当量の最小値を示した HR 130 bpm のレ

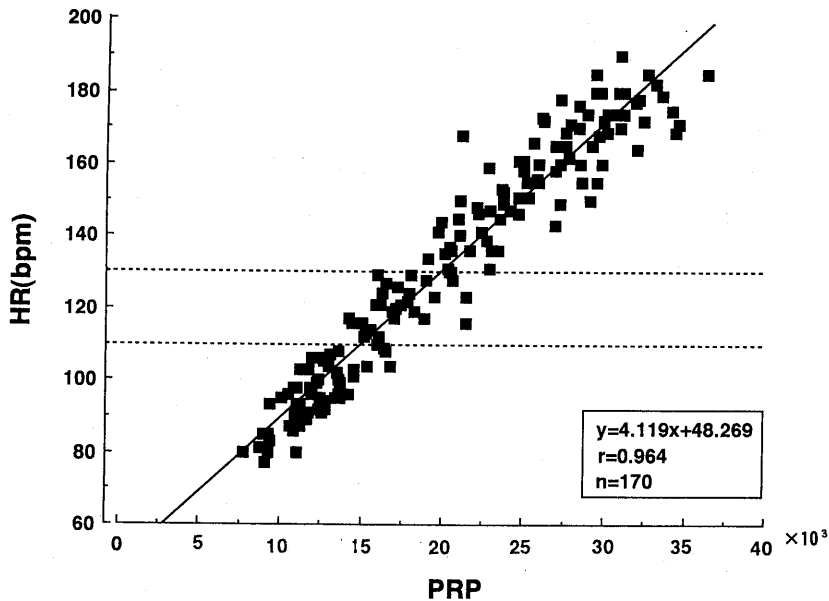


図5 自転車漕ぎ運動中のHRとPRPの関係

ベルを示した。この範囲に相当するPRP値はほぼ $15 \sim 20 \times 10^3$ の範囲であることがわかる。

#### IV. 論 議

これまで体力の指標として最大酸素摂取量が広く用いられてきた。身体運動の出力エネルギー産生能力推定のために、あるいはそのエネルギー推定の間接能力として酸素運搬系の総合能力として扱われてきたといえる。それが近年、先進国においては運動不足症あるいは老人病の危険因子を取り除くために身体運動の有効性が認められるようになった。換言すれば、日常的にあまり運動をしていない人々の健康生活を促すために運動実践が呼び掛けられるようになった。

このように運動実践の対象が一般化されることに伴って最大酸素摂取量の決定条件には生命への危険性があるという蓋然性をもって直接測定は行われず、間接推定法が一般的になった。課される物理的運動強度とそれに対する生理的反応を最大下の運動強度のある範囲で決定し、これを手がかりに運動プログラムを作成しようとする。その生理的反応の指標が酸素摂取量であり、心拍数反応であった。

われわれは運動負荷テスト時の運動強度はもちろんのこと、長期間にわたって実践していく運動の強度に対する生体反応も重要だと考えている。酸素摂取量の最大水準が危険だというだけでなく、長期間にわたって実践していく運動も安全に行われることが望ましいと考えてい

る。そこで、酸素運搬系の中で生命に直接影響がある心臓の仕事量について焦点をあてた。その指標がPRP指数である。

この報告の結果の項では個々に測定した各項目間の関係について触れた。そこで、この項では得られた個々の関係を全体的な観点から関連性を述べる。

その手順としてこれまで多くの研究で報告されてきた運動強度に対する $\dot{V}O_2$ およびHRの関係のみた。本研究の結果(図1)は運動強度が漸増するに伴って $\dot{V}O_2$ -HRが極めて高い相関係数をもって直線的に増大することによって被検者たちが正常な生体反応を示す人たちであることを示した。さらに本研究の焦点であるPRPの一要素である血圧指数にSBPが最適であることを示した(図2)。これらの条件をもとにSBP-HR関係を求め、これらが高い相関係数( $r=0.790$ )を示すことから、両者の相乗積であるPRP値を図中に斜線をもって示し(図3)、 $\dot{V}O_2$ とHRとの関係はより強くなるということから、110 bpmが信頼できる最低水準としてPRP相当値のみた(図3)。その結果 $15 \times 10^3$ のやや下側にその交点が見出されることを知った。

一方循環器系反応ばかりでなく呼吸器系の反応が考慮されなければならないとして換気当量( $\dot{V}E \cdot \dot{V}O_2^{-1}$ )のみたところ、およそ130 bpmのところ最低値があらわれることを明らかにした(図4)。この意味は換気からもたらされる効率が一番良い水準を示す。いいかえれば一番楽に呼吸ができることになる。そのときのHRが130

bpm であることは推定最高心拍数 (220-年齢) の約 65% に相当することを明らかにした。

そこで, PRP と HR の関係図 (図 5) を求め, 一般人における初期運動プログラムの水準として HR 110~130 bpm に相当する PRP は  $15 \times 10^3$  から  $20 \times 10^3$  の範囲であることを見出した (図 5)。

運動プログラム作成の要素は, 実践される運動強度, その実施時間, および週あたりの頻度である。この報告で扱った要素は運動強度である。

既に述べたように酸素運搬系の中で, 生命に危険性が高い心臓の仕事量指数である PRP 指数を用い, 呼吸器系がもっとも効率の良い状態で, 約 50% 最大酸素摂取量相当の心拍数あるいは % HR max の運動強度を至適水準と決めてみた<sup>13)</sup>。

以上のことから運動プログラム作成のための負荷テストは HR でいえば 75% HR max 近く, 本被検者でいえば 150 bpm 近くまでの負荷テストを課することで目的を達成できる。その結果から判定される運動プログラムは初心者に対する運動強度を約 60~65% HR max とすると PRP 値はおおよそ  $20 \times 10^3$  とすることが本研究結果から示唆された。

## V. 結 論

PRP 値は一般人の運動プログラム作成時の運動強度設定のための運動負荷中の循環器系反応を監視することができ, さらに目的とする運動強度が設定できることが明らかになった。

この報告は小林の修士論文にさらに実験結果を追加し, それにもとづいて石井が論議を展開したものである。

## 参 考 文 献

- 1) ACSM: Guideline for Exercise Testing and Prescription, 5th edition, Williams & Wilkins, 1995.
- 2) Åstrand, P.-O., B. Ekblom, R. Messin, B. Saltin and J. Stenberg: Intra-arterial blood pressure during exercise with different muscle groups. *J. Appl. Physiol.*, **20**(2), 253-256, 1965.
- 3) Åstrand, P.-O., T.E. Cuddy, B. Saltin and J. Stenberg: Cardiac output during submaximal and maximal work. *J. Appl. Physiol.*, **19**, 268-274, 1964.
- 4) Baum, K., D. Ebfeld, D. Leyk and J. Stegemann: Blood pressure and heart rate during rest-exercise and exercise-rest transitions. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **64**, 134-138, 1992.
- 5) Brouha, L. and E. P. Radford: In Johnson, W. R., ed. Science and medicine of exercise and sports. pp. 178-206, Harper: New York, 1960.
- 6) Cononie, C. C., J. E. Graves, M. L. Pollock, M. L. Phillips, C. Sumners and J. M. Hagberg: Effect of exercise training on blood pressure in 70- to 79-yr-old-men and women. *Med. Sci. Sports Exerc.*, **3**(4), 505-511, 1991.
- 7) Davis, J. A., B. J. Whipp, *et al.*: Effect of aerobic parameters from the ramp exercise test. *Med. Sci. Sports Exerc.*, **14**, 339-343, 1982.
- 8) Duncan, J. J., E. James, S. Farr, U. R. Jill, H. Donald, M. E. Oglesby and N. B. Steven: The effect of aerobic exercise on Plasma Catecholamines and blood pressure in patients with mild essential Hypertention. *JAMA.*, **254**, 2609-2613, 1985.
- 9) Esler, L. N., L. Garry, P. Jennings and I. Korner: Effect of changing levels of physical activity on blood pressure and haemodynamics in essential hypertension. *The Lancet.*, **30**, 473-476, 1986.
- 10) Fallentin, N. and K. Jorgensen: Blood pressure response to low level static contractions. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **64**, 455-459, 1992.
- 11) Franz, L. W.: Blood pressure response to exercise in normotensives and hypertensives. *Can. J. Sports Sci.*, **16**(4), 296-301, 1991.
- 12) 伊坂忠夫, 上野優子, 石井喜八: 年代別にみた運動強度と心拍数の関係—運動指導の立場から—。日本体育大学紀要, **19**(2), 13-19, 1990.
- 13) 石井喜八, 西山哲成, 久木文子: 心拍数からの有酸素性能力推定法とその問題点。 *Jpn. J. Sports Sci.*, **12**(10), 621-629, 1993.
- 14) Kitamura, K., C. R. Jorgensen, F. L. Gobel, H. Taylor and Y. Wang: Hemodynamic correlates of myocardial oxygen consumption during upright exercise. *J. Appl. Physiol.*, **32**(4), 516-522, 1972.
- 15) Lighfood, J. T., S. A. Tankersley, A. Rowe, N. Freed and S. M. Fortney: Automated blood pressure measurements during exercise. *J. Appl. Physiol.*, **58**(3), 785-790, 1985.
- 16) MacDougall, J. D., D. Tuxen, D. G. Sale, J. R. Moros and J. R. Sutton: Arterial blood pressure response to heavy resistance exercise. *J. Appl. Physiol.*, **58**(3), 785-790, 1985.
- 17) 宮下充正, 石井喜八: 新訂運動生理学概論 (14 版)。大修館書店: pp. 119-120, 1993.
- 18) Peikert, D. and J. Smolander: The combined effect of the cold pressore test and isometric exercise on heart rate and blood pressure. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **62**, 445-449, 1991.
- 19) Reinhard, U., P. H. Miller, *et al.*: Determination

- of anaerobic threshold by the ventilation equivalent in normal individuals. *Respiration*, **38**, 36-42, 1979.
- 20) Robinson, B. F.: Relation of heart rate and systolic blood pressure to the onset of pain in angina pectoris. *Circulation*, **XXXV**, 1073-1083, 1967.
- 21) Smirnov, A. D. and S. K. Churina: "Double Product" in diagnosis of the state of the cardiovascular system. *Human Physiol.*, **17**(3), 64-66, 1991.
- 22) 谷口興一: Anaerobic Threshold. *呼吸と循環*, **36**(2), 157-165, 1988.