

軽負荷運動による全身持久力の評価法の研究

京 都 大 学 井 街 悠

(共同研究者) 同 笹 山 哲

同 山 下 謙 智

Evaluation of Simple Estimating Method for Cardiovascular Endurance

— Analysis of the Figure Drawn by the Changes in Blood Pressure and Heart Rates during Short-period and Light-loaded Exercise —

by

Yu Imachi, Satoshi Sasayama, Kanetomo Yamashita

Kyoto University

ABSTRACT

Maximum oxygen uptake ($\dot{V}_{O_{2max}}$) is generally considered the most accurate measure of cardiovascular endurance. The most precise evaluation of $\dot{V}_{O_{2max}}$ is performed setting with a subject involving a maximal graded exercise either on treadmill or bicycle ergometer until exhaustion while applying analysis of expired gas. This requires special equipments and technical skill, and is not only troublesome but also dangerous for some types of subjects. To overcome the problems, numerous devices and techniques have been devised for evaluation of physical working capacity under submaximal exercise such as application of nomograms, PWC₁₇₀, etc.. Basing on the idea stating that certain kinds of physiological outputs during submaximal exercise at fixed work load should reflect cardiovascular endurance, authors confirmed through preliminary experiments that figures drawn by the combination of changes in systolic blood pressure and heart rates during short-period (2 minutes) and light-loaded (600 kpm

/min) exercise showed clear distinction between trained and untrained subjects. This figure was named BP-HR Lissajous' figure.

The purpose of this study was to develop a simpler and easier method for evaluation of cardiovascular endurance by analyzing BP-HR Lissajous' figure. This time a newly developed blood pressure monitoring apparatus, Finapres, which had been proved to be accurate and reliable by many investigators was utilized for drawing BP-HR Lissajous' figure during and after 2 minutes exercises on a bicycle ergometer work loads of which were 300, 450 and 600 kpm/min respectively. The data were fed into a personal computer, and the figure was drawn by feeding heart rate into X-axis and systolic blood pressure into Y-axis. The estimated values of $\dot{V}_{O_{2max}}$ obtained from multiple regression analysis of the parameters calculated from the figures on 12 healthy male subjects (19.8 ± 1.4 years old) were compared with their actual values of $\dot{V}_{O_{2max}}$, and the results suggested that this simple and easy testing method might be useful and effective, at work load of 600 kpm/min, $r = 0.921$ ($P < 0.02$) with standard error of estimate 2.75 ml/kg · min, in evaluation of cardiovascular endurance.

要 旨

全身持久力の最も有力な指標は、最大酸素摂取能力 ($\dot{V}_{O_{2max}}$) とされているが、これを直接測定するためには、被験者を漸増負荷運動によって疲労困憊に至るまで追い込まねばならず、測定手段が煩雑なうえに、危険がつきまとう欠点がある。そのために、これまでも最大下運動時の生体情報から全身持久力を判定したり、あるいは $\dot{V}_{O_{2max}}$ を予測する方法がいく通りか考えられている。当研究は、自転車エルゴメータによる短時間の軽負荷運動下で、動脈圧波形を非侵襲的に連続測定し、データをパーソナルコンピュータへオンライン入力して、最高血圧と心拍数の経時変化をもとに図形を描画させ、この図形をパターン解析することにより、安全かつ簡便な全身持久力の

判定法を開発しようとしたものである。

結論として、2分間の負荷強度 600 kpm/min でのペダリング運動時に描画させた血圧・心拍図形を解析して得た $\dot{V}_{O_{2max}}$ の推定値は、実測値との間で有意な相関 ($r = 0.921$, $P < 0.02$, 推定値の標準誤差 2.75 ml/kg · min) を示し、この方法が間接的な全身持久力の判定法として有効なものとなり得ることが示唆された。

緒 言

全身持久力は、循環機能や持久性運動能力を知ろううえで最も有力な指標とされており、主に最大酸素摂取能力 ($\dot{V}_{O_{2max}}$) を以て評価されてきた。ところが、 $\dot{V}_{O_{2max}}$ はその測定に当たって、被験者をトレッドミルやエルゴメータを用いた漸増負荷運動によって疲労困憊状態にまで追い込み、その際

の酸素摂取量の最大値から算出するため、手段や手順が煩雑であり、それに何よりも危険がつきまとう¹⁾欠点がある。この欠点を補うために、ノモグラム法式²⁾、 $PWC_{170}^{10,15,16)}$ 、 $PWC_{75\%HR_{max}}^{12)}$ 、 $\dot{V}O_{2@75\%HR_{max}}^{8)}$ 等の最大下の運動時に得られた仕事量、心拍数、酸素摂取量等から $\dot{V}O_{2max}$ を推定しようとする試みがこれまでに多く行われている。

一方筆者らは、一定負荷の下で運動する際の各被験者の生体負担度は、全身持久力に反映されるであろうとの考えのもとに、つぎのような先行的な研究を行った。すなわち、独自に開発した非侵襲式最高血圧・心拍連続測定装置 (SCS-501) を用いて、自転車エルゴメータによる短時間 (2 分間) の軽負荷運動 (600 kpm/min) 中および運動後の回復期の心拍数と最高血圧の変化を連続的に測定し、それぞれの値を X 軸と Y 軸に入力して、X-Y プロットにより図形を描画させると、**図 1** に示すような 2 次元図形 (BP-HR Lissajous' figure と命名) が得られる。このようにして得られた図形は、その形や特徴のうえで鍛錬者と非鍛錬者の間で際だった差異が認められた^{7,9)}。

ところで、近年手指動脈法¹⁴⁾を利用した高精度の非侵襲式動脈波形連続測定装置 (Finapres)^{5,13)}

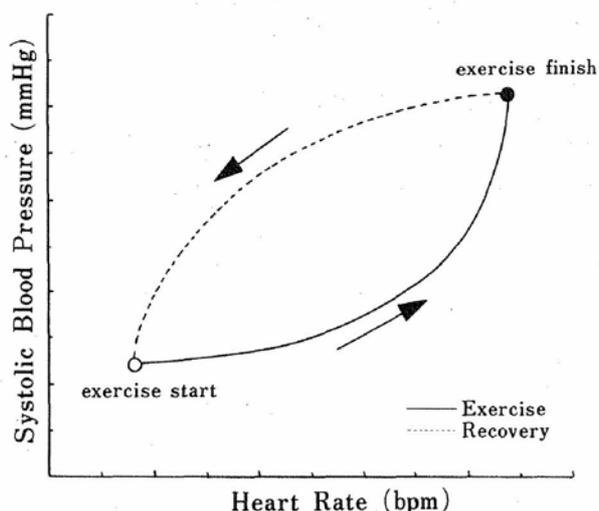


図 1 BP-HR Lissajous' figure drawn by feeding heart rate to X-axis and systolic blood pressure to Y-axis during exercise and recovery

が開発、市販されるに至ったので、今回この装置とパーソナルコンピュータとを組み合わせることにより、上述の先行研究をさらに発展させ、簡便に全身持久力を判定する方法を開発するための実験を行った。実験は、自転車エルゴメータにより軽負荷のもとで短時間の運動を行い、運動中および運動後の回復期に得られた血圧・心拍データをコンピュータにオンライン入力して BP-HR Lissajous' figure を描画させ、つぎにこの図形をパターン解析して得る複数個のパラメータをもとに重回帰分析を行って、 $\dot{V}O_{2max}$ の推定値を算出し、実測値との比較から有意性を検討しようとしたものである。

本研究の最終的な目的は、以上のような実験から、短時間の軽負荷運動テストにより簡単に全身持久力を判定するための方法を確立することである。

1. 実験方法

1.1 被験者

被験者は健康な男子大学生ボランティア 12 名である。実験に先だって、研究目的、内容を説明し、実験に対する同意を得た。被験者の年齢、身体的特性を表 1 に示す。

1.2 実験手順

被験者の左手中指に動脈波形連続測定装置 (米国 Ohmeda 社製, Finapres 2300) 用の検出器と、口鼻部に呼気分析装置 (東レエンジニアリング社製, A-S 600) 用の採気マスクをそれぞれ取り付け、自転車エルゴメータ (スウェーデン Monark 社製, Ergonomic 800 E) に跨乗した状態で 5 分間の安静を保たせた。この際、左手は高さが常に心臓の高さに保たれるように、エルゴメータわきの台上に固定した。

つぎに、電子メトロノーム (セイコー社製, SQM-359) のリズムに合わせて、50 rpm の回転速度で 2 分間のペダリング運動を一定負荷の下で

表1 The characteristics of the subjects

Subject	Age (year)	Weight (kg)	Height (cm)
A. T.	19	66	168
H. M.	21	76	186
M. H.	21	71	172
J. M.	20	76	177
S. M.	19	55	161
S. O.	18	79	171
S. U.	18	62	170
Y. S.	19	63	177
M. S.	23	57	176
T. W.	20	60	170
H. W.	20	71	177
Y. K.	19	98	183
mean	19.8	69.5	174.0
S. D.	1.4	11.4	6.5

行わせ、その後そのままの姿勢で血圧と心拍数が回復するまで3分間の安静を保たせた。運動時と運動後の回復期にわたって、動脈圧波形と酸素摂取量をそれぞれ連続測定し、データをRS-232Cインタフェイス経由でパーソナルコンピュータ(NEC社製、PC-9801UX、およびPC-9801M)にオンライン入力させた。運動強度は300 kpm/min、450 kpm/min、600 kpm/minの3通りに変化させ、それぞれの負荷の下で同様の測定を行った。その後、被験者の左手から動脈圧波形測定用の検出器を取りはずし、両手でエルゴメータのハンドルを握れる状態にして、IBP Handbook¹⁷⁾に準拠した負荷漸増方式により、被験者を疲労困憊状態に至るまで追い込んで $\dot{V}O_{2max}$ を測定した。

1.3 データ処理

Finapres 2300からの血圧および心拍のデータを、毎秒1回のレートでパーソナルコンピュータ(NEC社製、PC-9801UX)にオンライン入力した。つぎに、心拍数と最高血圧の29秒間の移動平均値をそれぞれX軸とY軸にとり、2分間の運動中および3分間の回復期間中の経時変化をもと

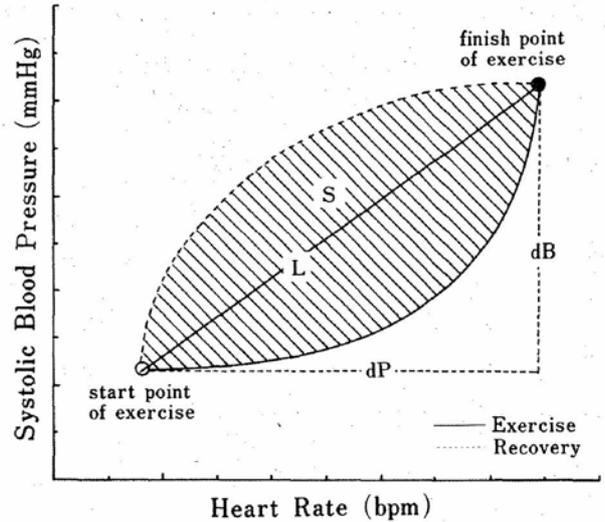


図2 Parameters for multiple regression analysis. dP : increment of heart rate, dB : increment of systolic blood pressure, L : length between start and finish points, S : area of the figure

に図形(BP-HR Rissajous' figure)を描画させた。この図形において、図2に示すように運動開始点と運動終了点とを結ぶ線分の長さをL、血圧と心拍数の運動による増加分をそれぞれdB、dP、線分の勾配をdB/dP、そして図形が囲む面積をSとし、それぞれの値を各測定から得た図形についてコンピュータにより算出した。ここで、線分LはdB、dPそれぞれの2乗の和の平方根であり、1 mmHg = 1 bpmを単位長さとして求めたものである。

一方、酸素摂取量測定装置(東レエンジニアリング社製、E-S 600)から出力されたデータは、別のパーソナルコンピュータ(NEC社製、PC-9801M)に一呼吸ごとにオンライン入力させ、それをもとに30秒間値を算出して最大酸素摂取量(ml/min · kg)を求めた。

そして、被験者の身長をH、体重をWとして、重回帰分析により、L、dB/dP、S、H、Wを独立変数とし、最大酸素摂取量の実測値との比較から推定値および重相関係数を求め、それらの有意性を検討した。

2. 実験結果

2.1 BP-HR Rissajous' figure

600 kpm/min の実験から得られた BP-HR Rissajous' figure のうちの異なった特徴を有する 3 例を図 3 に示す。

図 3 中の (1) は、運動開始とともに心拍数は速やかに上昇したのに対し、血圧は反射的にいったん下降してから遅れて上昇、運動終了後も心拍数は速やかに下降したのに対し、血圧は遅れて下降した例、(2) は運動開始とともに、心拍数と血圧がほぼ平行して上昇し、運動終了後も両者が平行して回復した例、そして (3) は、運動開始とともに心拍数、血圧の両者がほぼ平行して上昇するが、運動終了後は血圧が先に下降し、心拍数が遅れて回復した例である。このような図形において、図 3 (1) に見られるように回復期の曲線が運動中の曲線より位置的に上方に来るような場合にはその面積 S を正、逆に図 3 (3) のように下方に来るような場合にはその面積 S を負として算出した。

2.2 パターン解析

運動強度別に得られた BP-HR Rissajous' figure から S , L , dB/dP を求め、 $\dot{V}_{O_{2max}}$ とともに被験者別に並べたのが表 2 である。

2.3 統計処理

図形のパターン解析から算出した S , L , dB/dP と身体的特質 H および W を独立変数とし、実測値 $\dot{V}_{O_{2max}}$ を従属変数として重回帰分析を行い、実測値と推定値 (EV) 間の散布図および重相関係数 (r) を運動強度別に求めると、それぞれ図 4 および表 3 のようになる。

有意な相関が確認された運動強度 600 kpm/min 時の重回帰式は以下のようであった。

$$EV = 0.009 S - 0.401 L + 3.834 dB/dP + 0.365 H - 0.767 W + 49.39$$

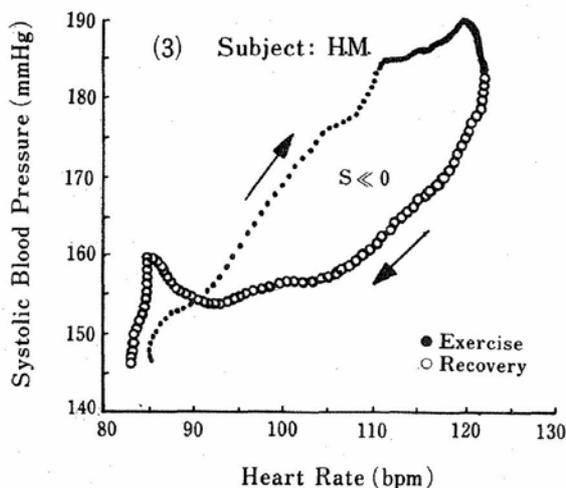
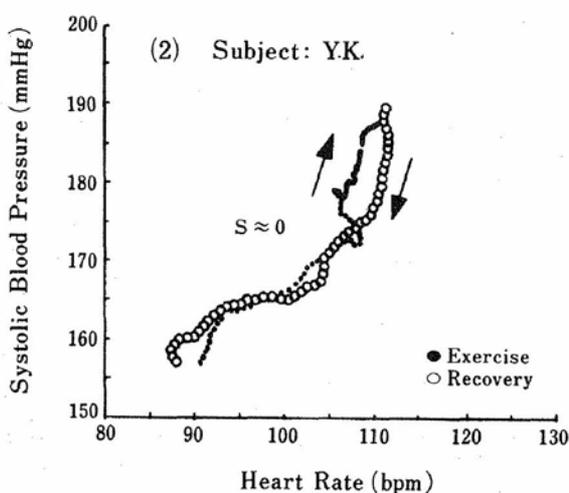
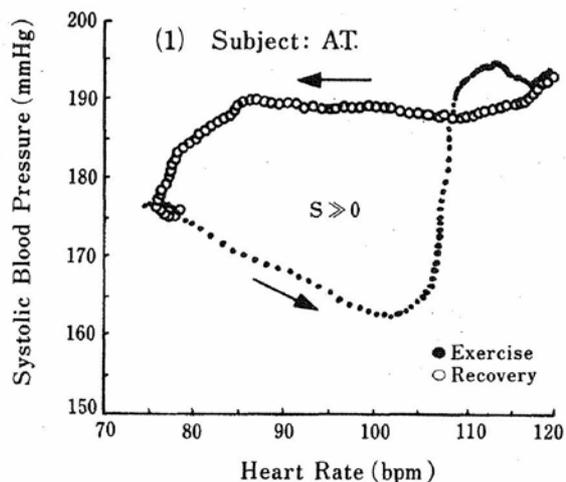


図 3 Different types of BP-HR Lissajous' figures drawn during 600 kpm/min work load

3. 考 察

これまでに Åstrand らにより、自転車エルゴメータを用いた定負荷運動時の心拍数の変化が

表2 Maximum oxygen uptake and parameters obtained from BP-HR Lissajous' figure according to different work loads

Subject	\dot{V}_{O_2max} (ml/min·kg)	300kpm/min			450kpm/min			600kpm/min		
		S (mmHg·bpm)	L *	dB/dP (mmHg/bpm)	S (mmHg·bpm)	L *	dB/dP (mmHg/bpm)	S (mmHg/bpm)	L *	dB/dP (mmHg/bpm)
A. T.	47.8	648.9	32.67	0.80	744.7	40.49	0.47	579.0	47.51	0.37
H. M.	39.9	-15.9	19.62	0.29	124.2	29.53	0.11	-399.1	51.57	0.99
M. H.	43.6	830.5	39.55	2.89	792.5	46.45	1.89	285.3	40.61	0.79
J. M.	47.3	677.4	34.73	0.78	799.2	52.76	0.83	755.4	48.58	0.79
S. M.	50.8	205.1	11.73	0.02	139.2	45.73	0.83	58.6	51.82	0.72
S. O.	33.3	621.4	32.17	1.29	-261.3	49.14	1.21	109.9	52.61	1.22
S. U.	48.6	454.8	47.27	1.79	148.9	58.88	1.51	51.8	66.04	1.35
Y. S.	51.5	-58.6	27.91	1.14	-269.0	23.29	0.03	355.0	49.32	0.73
M. S.	49.5	926.2	41.34	0.88	1332.9	63.47	0.95	1076.0	78.68	1.04
T. W.	35.7	-151.2	45.54	1.44	837.6	47.21	1.32	-421.3	67.45	1.36
H. W.	48.1	1737.6	47.62	1.67	29.8	50.21	1.03	1234.3	70.08	1.03
Y. K.	31.8	523.2	36.06	2.16	89.4	33.65	1.31	-21.7	37.99	1.53
mean	44.0	533.3	34.7	1.3	375.7	45.1	1.0	305.3	55.2	1.0
S. D.	6.7	497.4	10.5	0.8	484.1	11.2	0.5	502.6	12.0	0.3

表3 Multiple correlation coefficients according to different work loads

Work load (kpm/min)	r
300	0.876
450	0.839
600	0.921*

* P < 0.02

ら、持久能力を判定する試み³⁾が行われている。この報告では、一流競技選手が対象であり、負荷強度も 1,200 kpm/min とやや高い設定であった。本試験のように、600 kpm/min 以下の強度での運動負荷中の血圧と心拍数の変化を連続測定し、それによって描かれる図形をパターン解析することから、持久能力を判定しようとする試みは他には見られない。

重回帰分析から得られた運動強度 300 kpm/min、および 450 kpm/min 時の最大酸素摂取量の実測値と推定値間の相関係数は、それぞれ r = 0.876 および 0.839 と高い値を示したが、それらの

値の有意性を確認することはできなかった。これは今回の実験における被験者の数が 12 名と比較的少数であったことに原因があると思われる。一方、運動強度 600 kpm/min 時では被験者数が同様に 12 名であったにもかかわらず、有意な相関 (r = 0.921, P < 0.02) が得られ、この時の \dot{V}_{O_2max} の推定値の標準誤差は 2.75 ml/kg · min と小さな値であった。図 4 の散布図にも見られるように、実測値と推定値間の分布の 75% 以上が ± 10% 以内の誤差範囲に収まった。

重回帰分析において独立変数である体重 (L) の推定値 (EV) に対する関連性が大きい (P < 0.05) のは、最大酸素摂取量が単位として ml/min · kg で表すように体重の要素を含んでいるからである。

BP-HR Rissajous' figure を描画するに当たって、この実験では最高血圧のみを考慮したが、これは軽負荷運動時には最低血圧にはほとんど変動が見られないとの、これまでの研究結果^{6, 11, 18)}を考慮したためである。

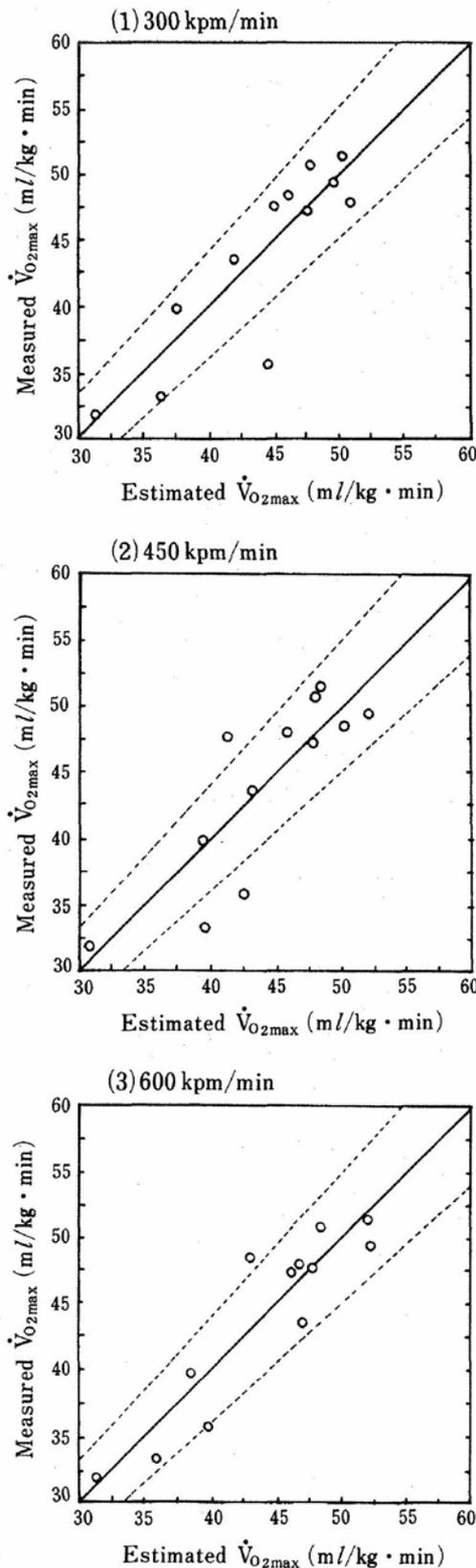


図4 Scattergrams and identity lines for measured and estimated $\dot{V}O_{2max}$ according to different work loads. Broken lines denote deviations of $\pm 10\%$ from the identity lines

持久能力を判定するための推定値 (EV) を算出する際に、今回の実験で採択された運動時間 (2 分間) や運動強度 (600 kpm/min) さらに S, L, dB/dP, H, W といった独立変数を適用すると、統計的に有意であることが確認されたが、この運動時間や独立変数の選定の妥当性については、今後さらに被験者の数を増して検討を加えることが必要であろう。

4. まとめ

自転車エルゴメータを用いて、軽度の定負荷下 (600 kpm/min) で短時間 (2 分間) の運動を行う被験者の最高血圧と心拍数を非観血的に連続測定し、それらの経時変化をもとにコンピュータにより 2 次元図形を描画させ、この図形のパターン分析をもとに得られた $\dot{V}O_{2max}$ の推定値と実測値との間に有意な相関 ($r=0.921$, $P<0.02$, 推定値の標準誤差 $2.75 \text{ ml/kg} \cdot \text{min}$) のあることが確かめられ、この方法により短時間かつ簡便に全身持久能力を判定し得ることが示唆された。

文 献

- 1) American College of Sports Medicine ; Guideline for graded exercise testing and exercise prescription, Lea and Febiger, Philadelphia (1975)
- 2) Åstrand, P-O., I. Ryhming ; A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during submaximal work, *J. Appl. Physiol.*, 7, pp 218-221 (1954)
- 3) Åstrand, P-O., K. Rodahl ; *Textbook of Work Physiology*, McGraw-Hill, N.Y. (1970)
- 4) Barnerd, R. J., G. W. Gardner, N. V. Diaco, R. N. McAlpin, A. A. Kattus ; Cardiovascular response to sudden strenuous exercise-heart rate, blood pressure and ECG, *J. Appl. Physiol.*, 34, pp 833-837 (1973)
- 5) Bohmer, R. D. ; Continuous, real-time, non-invasive monitor of blood pressure : Penaz methodology applied to the finger, *J. Clin. Monit.*, 3, pp 282-287 (1987)
- 6) deVries H. A. ; *Physiology of Exercise*, Wm.

- C. Brown Co. Publishers, *Dubuque* (1974)
- 7) Imachi, Y., M. Man-i ; Application of continuous measurements of systolic blood pressure and heart rate during exercise, *J. J. Phys. Fit. Spo. Med.*, **31**, No.1, pp 19-27 (1993)
 - 8) 石黒テルミ, 伊藤正男, 水野雅章, 中村好男, 村岡 巧, 加賀谷淳子; 性別・年齢別にみた推定最高心拍数の75%水準での酸素摂取量 ($\dot{V}_{O_2 @ 75\%HR_{max}}$), *体育の科学*, **43**, pp 377-383 (1993)
 - 9) Man-i M., Y. Imachi ; Effect of training on blood pressure and heart rate measured continuously during exercise, *J. Sp. Med. Phys. Fit.*, **21**, pp 97-112 (1981)
 - 10) Margaria, R., P. Aghemo, E. Rovelli ; Indirect determination of maximal O_2 consumption in man, *J. Appl. Physiol.*, **20**, No.5, pp 1070-1073 (1965)
 - 11) McDonald H. R., R. P. Sapru, S. H. Taylor, K. W. Donald ; Effects of intravenous propranolol (Inderal) on the systemic circulatory response to sustained handgrip, *Am. J. Cardio.*, **18**, pp 333-344 (1966)
 - 12) 宮下充正, 武藤芳照, 吉岡信彦, 定本朋子; 全身持久力の評価尺度としての $PWC_{75\%HR_{max}}$, *J. J. Spo. Sci.*, **2**, No.11, pp 912-916 (1983)
 - 13) Molhoek, G. P., K. H. Wesseling, A. C. Arntzenius, J. I. M. Settels, E. van Vollenhoven, H. W. H. Weeda, B. De Wit ; Initial results of non invasive measurement of finger blood pressure according to Penaz, *Automedica*, **4**, pp 241-246 (1983)
 - 14) Penaz, J. ; Photoelectric measurement of blood pressure, volume and flow in the finger, In : Digest of the 10 th International Conference on Medical and Biological Engineering, pp 104, *Dresden* (1973).
 - 15) Sjöstrand, T. ; Changes in Respiratory Organs of Workmen at an Ore Melting Works, *Acta. Med. Scand.*, Suppl. 196, pp 687-699 (1974)
 - 16) Wahlund, H. ; Determination of the physical working capacity, A physiological and clinical study with special reference to standardization of cardiopulmonary functional test, *Acta, Med. Scand.*, **132**, Suppl. 215, pp 1-78 (1948)
 - 17) Weiner J. S., J. A. Lourie ; Human biology, a guide to field methods (IBP Handbook 9), *Blackwell Scientific Publications* (1969)
 - 18) Wolthuis, R. A. ; Response of Healthy men to treadmill exercise, *Circulation*, **55**, pp 153-157 (1977)