

運動処方新しいクライテリアとしてのダブル プロダクト自動測定法の開発と応用

筑波大学 池上晴夫
(共同研究者) 同 松田光生
同 松本光弘

Development and Application of a Device for Calculation of Double Product as a New Criterion in Exercise Prescription

by

Haruo Ikegami,
Mitsuo Matsuda and Mitsuhiro Matsumoto
*Institute of Health and Sports Science,
University of Tsukuba*

ABSTRACT

Cardiac load should be taken into consideration as an exercise intensity in case of exercise prescription from the stand point of safety. Double product (product of systolic blood pressure and heart rate) was studied and evaluated for the index of cardiac load.

- (1) Double product is a valid index of cardiac load, because it has a high positive correlation between myocardial oxygen consumption.
- (2) Systolic blood pressure during exercise is a linear function of heart rate. This means double product can be expressed by the following equation;

$$y = ax^2 + bx$$

here, y : double product, x : heart rate

- (3) The constant a and b in this equation can be determined by an experimental procedure. Double product can be calculated from heart rate using the equation with predetermined a and b .
- (4) Possibility of the development of a compact watch-type instrument

which calculates and displays double product from heart rate in real time was discussed.

1. 緒 言

運動強度の正しい評価・表示は、運動生理学やバイオメカニクスなどの基礎的研究における実験条件の設定の際にも、またトレーニングや運動処方などの実際の場面においても、重要な要件である。運動強度のスケールとして現在よく用いられているものには次のようなものがある⁹⁾。

(1) 理学的スケール

- ① kpm/min ② kgm/min ③ Watt
- ④ Joule

(2) 生理学的スケール

- ① $\dot{V}O_2$ ② $\% \dot{V}O_2 \max$ ③ HR
- ④ $\%HR_{\max}$ ⑤ $\%HR_{\text{reserve}}$ ⑥ RMR
- ⑦ Mets ⑧ RPE ⑨ kcal/min

(1)の理学的スケールは、人が外に対して一定時間内に行った仕事量すなわち仕事率であるから、客観的運動強度として絶対であり、その意味において重要である。たとえば力学的考察や運動の効率を求める際などには欠かすことのできないものである。しかし同一仕事率であっても人体が消費するエネルギーは、効率によって異なるし、効率は個人間で異なるし、また同一個人内でも運動種目によって効率が違う。したがって理学的スケールは、生体側から見た運動強度ないしは生体負担度の指標としては必ずしも妥当でない。

これに対して生理学的スケールは、生体が単位時間内に消費したエネルギー量、運動強度に応じて出現する生体反応の強さ、あるいは自覚的な運動強度に基づくものであり、いずれも生体側から見た運動強度である。ある意味で生体負担度を表すと考えてよい。運動処方の際には生理学的スケールが繁用されている理由がここにある。とくに

心拍数(HR)は測定が容易であることもあって、実際の場面でよく使われている。

多くの場合、これら生理学的スケールは、理学的スケールである仕事率に比例する。例えば $\dot{V}O_2$ はkpm/minに比例し、HRはまた $\dot{V}O_2$ に比例する。したがってHRはkpm/minにも比例する。

ところで生体負担度といっても、それは身体全体としての負担度を考える場合もあるが、局所の負担度たとえば心臓の負担度(以下心負担度)とか活動筋の負担度とかを考えなければならない場合もある。HRはじめ上記の生理学的スケールは生体全体の消費エネルギーあるいはそれと1次関係にあるものであることから、概して言えば生体全体の負担度であり、局所の負担度とは必ずしも一致するとは限らない。

現在の運動強度の指標としては、このような全身的負担度に相当するものが用いられているが、トレーニングや運動処方に際しては局所的負担度、とくに心負担度という点にも多大の関心が払われなければならないのではないだろうか。なぜならば、全身運動に際して最も強い負担を負う部位の一つが心臓であると考えられるし、また致命的なスポーツ事故の多くは心臓の異常やその過負荷に起因すると考えられるからである。したがって安全上の見地から、心負担度を表す指標の設定が必要となる。

HRは運動強度に応じて起こる心臓の反応であるから、ある意味では心負担度を表すと考えられるかもしれない。しかし心負担度は心臓の仕事率で表されると考えた方が合理的であろう。その心臓の仕事率はHRだけで決まるものではなく、血圧や1回拍出量なども関係してくる。したがって心負担度としては心臓の仕事率あるいはその仕事

を遂行するのに必要な酸素摂取量などに関連づける方が妥当であると考えられる。

本研究はこのような見地から、心負担度の指標としてのダブルプロダクト (以下 DP) を取り上げ、その妥当性を検討するとともに、その簡易な測定法の実用化について検討しようとするものである。

2. DPとHRの関係に関する理論的検討

心室の1回の収縮によってなされる仕事量は次式で表される¹³⁾。

$$w = P_m \cdot V + \frac{1}{2}mv^2 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 w = 仕事量

P_m = 平均血圧

V = 1回拍出量

m = V の質量

v = 拍出される血液の流速

したがって1分間の仕事量すなわち分時仕事率は次のようになる。

$$W = w \cdot HR \\ = (P_m \cdot V + \frac{1}{2}mv^2) \cdot HR \quad \dots\dots\dots(2)$$

式(1)における右辺の第1項は、血圧に抗して V なる血液を押し出すのに必要な仕事であり、いわば圧・量仕事である。そして第2項はその血液に運動エネルギーを与えるための仕事、つまり動的仕事である。

文献的に得られている値をこれらの変数に代入してみると、第2項の値は第1項のそれに比して極めて小さく、したがって省略してもよいことがわかる。したがって式(2)は次式で近似させることができる。

$$W = P_m \cdot V \cdot HR \quad \dots\dots\dots(3)$$

この式を用いれば、平均血圧、1回拍出量およびHRを測定することによって左心室の仕事率を求めることができる。右心室についても同様に仕事率を求めることができるが、右心室の仕事は肺動脈圧が低いために左心室の仕事に比して極めて

小さい。したがってここではこれも無視して左心室についてのみ考察をすすめる。

しかし実際の場面では、各人についてこれらのパラメーターを実測することは不可能に近く、可能であったとしても実用的ではない。

心臓の酸素摂取量 ($c\dot{V}O_2$) は心臓の仕事率に比例すると考えられる。この予測に基づけば $c\dot{V}O_2$ が心負担度の指標として適している。しかし $c\dot{V}O_2$ の測定には心臓カテーテル法が必要であり、高度な技術と相当のリスクを伴うことを考えるまでもなく、実用的価値には欠ける。しかしながら $c\dot{V}O_2$ と相関の高いパラメーターがあれば、それを心負担度の指標として用いてもよいことになる。

収縮期血圧(SBP)とHRの積はDPあるいはプレッシャー・レート・プロダクト (PRP) と呼ばれ、 $c\dot{V}O_2$ と相関の高いことが知られている⁴⁻⁶⁾。たとえば Nelson¹⁰⁾ によると、DPと $c\dot{V}O_2$ の相関係数は0.86であるという。

これらのことからDPは心負担度の指標としての意義が大きく、妥当性も高いと考えられる^{1,2)}。

運動を漸増させるとSBPはHRに比例して増大することが知られている。これを次式で表す。

$$SBP = a \cdot HR + b \quad \dots\dots\dots(4)$$

またDPは次式で定義される。

$$DP = SBP \cdot HR \quad \dots\dots\dots(5)$$

したがって

$$DP = (a \cdot HR + b) \cdot HR \\ = a \cdot HR^2 + b \cdot HR \quad \dots\dots\dots(6)$$

すなわちDPはHRの2次関数である。ここで定数 a および b は、個人の年齢やその他の身体条件によって異なるであろうと考えられるし、また運動の種類によっても違ってくることが予想される。

この式において、定数 a および b をあらかじめ決定しておけば、あとはHRを測るだけでDPを算出することができ、またそれによって心負担度を評価することができる。上記のように a と b も

個人条件や運動種目によって異なると思われるのでこれらは個人毎に、そして運動種目毎に実験的に求めるのが望ましい。しかし多くの例について適用しうる a および b の値がもし存在するならば、それをもって一般式とすることも可能である。

そこでここでは若干の例について実験的に a および b を決定し、DP の推定式を求めてみることにする。

3. 実験式の作成

1. 実験の目的

二、三の運動種類について種々の強度の運動を負荷した際の HR と SBP を測定し、DP と HR の関係式 (式 6) における定数 a および b を決定することを目的とする。

2. 実験の方法

(1) 被検者

2名の健康成人男子を被検者とした。各被検者は大学の運動部に所属し、ほぼ毎日数時間の運動を行っている学生である。彼らの身体特性は表 1 に示したとおりであった。

表 1 Physical characteristics of the subjects

Subject	A	B
Age	21	20
Height (cm)	173.2	169.8
Weight (kg)	62.4	64.3
$\dot{V}O_2\max$ (ml/kg·min)	51.2	56.7

(2) 運動の条件

a. 全身運動

トレッドミル (Space lab. 社製ウイスパーマル 4450型) を用いて、90m/min のスピードで、水平位から始めて 3分毎に勾配を 2.5% ずつ上昇させた。

b. 脚運動

立体型自転車エルゴメーター (モナーク社製) を用いて、60rpm で、0.5kp (180kpm/min) から始めて、3分毎に 0.5kp (180kpm/min) ずつ増加させた。

c. 上肢運動

自動車エルゴメーター (Jonas 社製, 990型) を机上に固定し、手で握りやすいように棒状の形態に工夫したペダルを右手で握り、座位姿勢で体幹や下肢を動かないようにして、クランク運動を行った。回転数は 60rpm とし、0.25kp (90kpm/min) から始めて 3分毎に 0.25kp (90kpm/min) ずつ増加させた。

(3) 測定項目

心拍数を胸部誘導の心図電法によって、また血圧を自動血圧計 (アムコ社製 D-4000型) で測定した。

3. 結果

3種類の運動について、HR と SBP の関係を個人毎にプロットしたものが図 1 および図 2 である。いずれの場合にも SBP は HR に比例的に増加した。その回帰直線および回帰式は表 2 に示されている。図から明らかなように、直線の勾配には個人差があり、かつ運動種類によっても大きな違いがある。この 2例の結果から一般的結論は言えないが、今回の結果は、勾配はトレッドミル走の場合が最も緩やかであり (A : 0.60, B : 0.72)。腕クランクの場合が最も急峻であり (A : 1.08, B : 1.13)、そして自転車エルゴメーターの場合はその中間にある (A : 0.75, B : 0.78) ことを

表 2 Relationship between heart rate (x) and systolic blood pressure (y)

Exercise	Subject	Equation
Treadmill	A	$y=0.60x+77.3$
Treadmill	B	$y=0.72x+71.8$
Bicycle	A	$y=0.75x+71.0$
Bicycle	B	$y=0.78x+71.9$
Arm crank	A	$y=1.08x+54.5$
Arm crank	B	$y=1.13x+48.3$

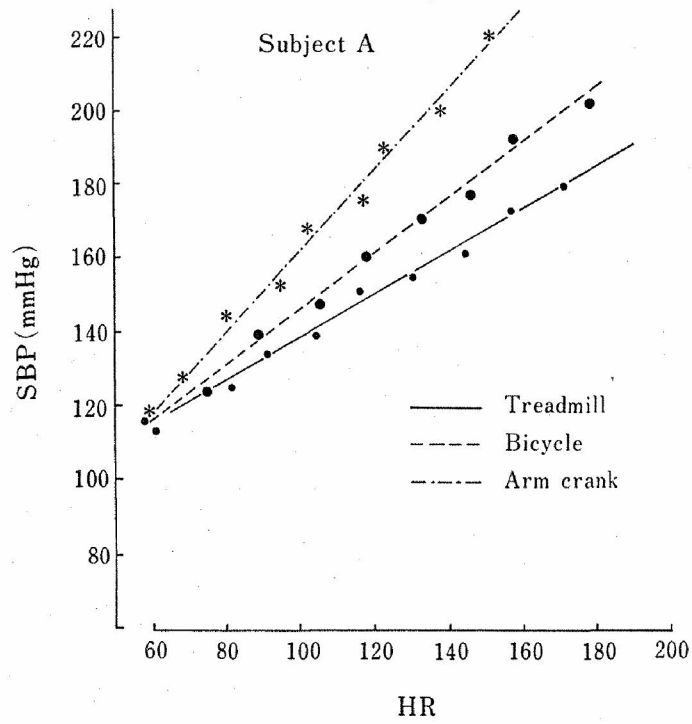


图 1 Relationship between heart rate and systolic blood pressure in the three different exercises

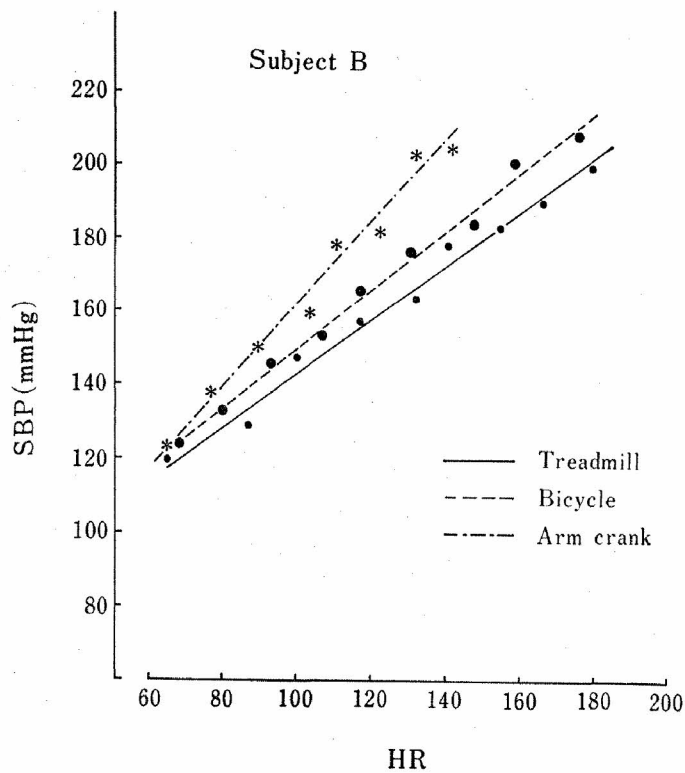


图 2 Relationship between heart rate and systolic blood pressure in the three different exercises

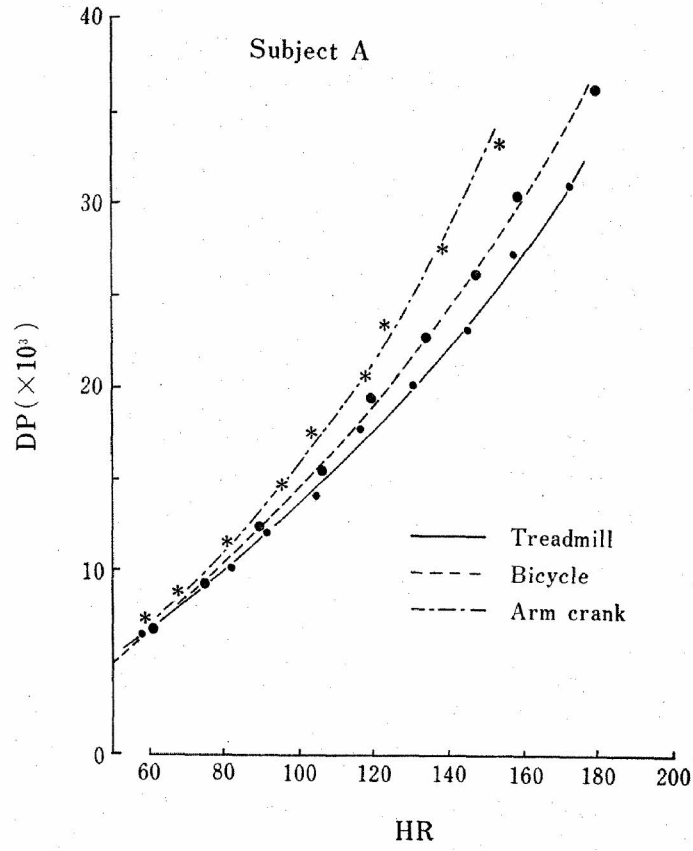


图 3 Relationship between heart rate and double product in the three different exercises

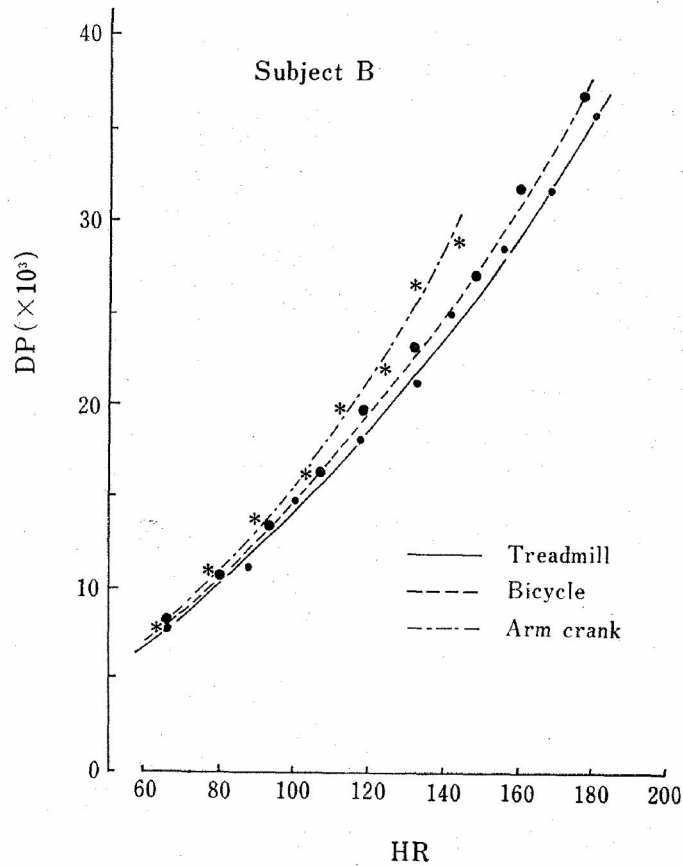


图 4 Relationship between heart rate and double product in the three different exercises

示唆している。これらの a および b の値を式 (6) に代入して得られた DP を HR に対してプロットしたものが図 3 および図 4 である。

4. 考 察

HR が運動強度 (kpm/min など) に比例的に増大することや、SBP が HR に比例的に増大することに関しては、文献的にも多くの人によって報告されている^{7,8)}。今回の結果においても、少数例ではあったが、その事実を確認することができた。したがって式 (6) における第 1 項の HR のべきは 2 でよいと考えられる。しかし、定数 a および b の値には個人差や運動種類による差が大きく、今回の結果でも a は 6.0~1.13 の範囲にあり、b は 48.3~77.3 の範囲にあった。したがって a および b については個人毎、運動種類毎に決定するのが妥当であろうと考えられる。

a と運動種類との関係についてみると、トレッドミル運動のときが最も小さく、次いで自転車運動であり、腕クランク運動のときが最も大きかった。文献的にも、上肢の運動では血圧上昇が比較的大きいことが知られている⁹⁾。また今回は実験しなかったが、等尺性運動の場合には等張力性運動の場合より血圧上昇が著しいことも報告されている^{14,15)}。結局今回の結果は a の値は全身運動のときに最も小さく、次いで下肢運動であり、上肢運動の場合が最も大きいことを示唆しているといえてさしつかえないと考えられる。

運動時の心負担度が $c\dot{V}O_2$ に比例し、かつ DP が $c\dot{V}O_2$ と高い相関を有するという考え方に立てば、今回の実験結果は HR を心負担度の指標とするのは問題であることを示している。すなわち心負担度の指標である DP は HR の 2 次関数であり、HR の増大に伴って幾何級数的に増大するものである。

たとえば今回得られた被検者 A のトレッドミル走の場合についてみると、HR が 80 のときと 100

のときの DP はそれぞれ 10.2×10^3 と 13.8×10^3 であり、20 拍の HR 増加に対して DP は 3.6×10^3 増大する。これに対して HR が 150 から 170 に増大すると DP は 24.9×10^3 から 30.5×10^3 に増大することになるから、同一心拍増に対する DP の増加は後者の方がはるかに高い。すなわち、同一の心拍増加に対する DP の増加は、心拍水準の高いほど大となる。

この関係は図示することによって一層明らかにされる。図 5 は横軸を HR^2 目盛にした HR-DP の関係である。これで見ると両者の関係は直線となる。この図から HR の低い領域では HR が多少変わっても心負担度には大きな変化はないが、高心拍領域では少しの HR の変化が心負担度に大きく影響することが理解できる。またこの図は a および b の決定にも利用できる。すなわち数段階の強度の運動を行わせたときの HR と SBP を測定し、この図を用いて回帰直線を求めれば、a および b の値をその直線から読み取ることができる。

以上のことから、運動強度の指標として HR を採用した場合には、心臓には 2 次関数的に負担が増加し、したがって過大な負担となりかねないことを指摘することができる^{10,11)}。

注意すべきことは、RPE は自覚的運動強度を基準にした運動強度の指標であるが、これが HR に比例して増大することである。つまり自覚的判断というものは、全身負担度の指標としては有用であるとしても、心負担度を表すものではない。したがって HR の場合と同様に、RPE を指標にして運動強度を考えていると、心臓には過大な負担が加わる危険性がある。同様なことは緒言の(1) および(2)であげたすべての運動強度の指標についても言えることである。これに対して DP は心負担度の 1 次関数であると考えられるから、心臓に対する運動強度の指標としての意義は大きいといえよう。

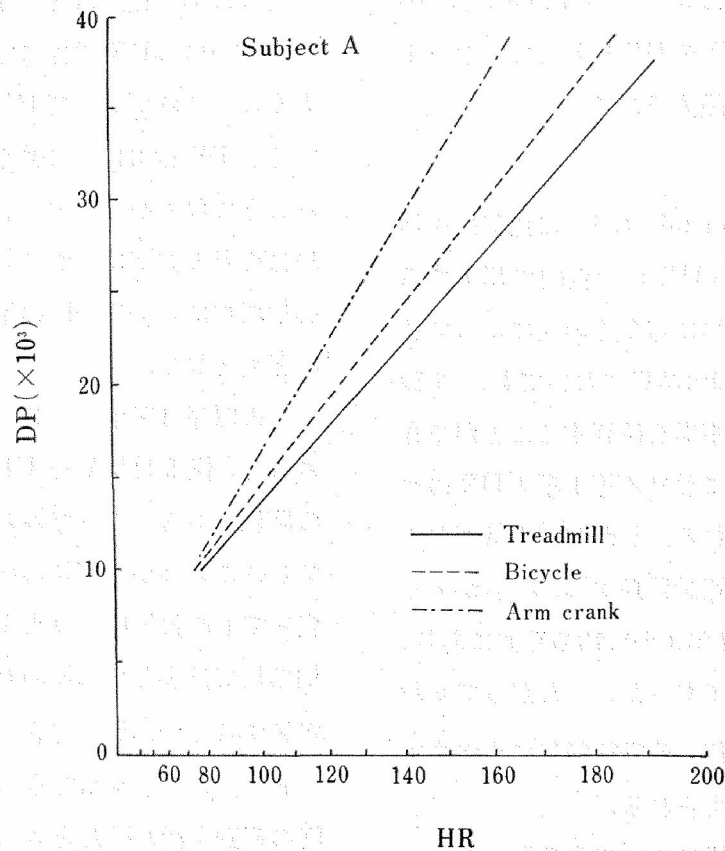


図5 Relationship between heart rate and double product in the three different exercises Abscissa expresses square of heart rate

以上のことから、心負担度という点からすると、運動強度の指標として DP を採用するのが妥当であるといえる。そして、あらかじめ a および b の値を個人毎・運動種類毎に決定しておけば、実際の運動場面においては HR を測定するだけで、式 (6) によって心負担度の指標である DP を求めることができるので、実用的な指標であると考えられる。

4. 腕時計型 DP 測定装置について

写真 1 はわれわれが S 社と共同で開発した腕時計型の心拍数測定器である。2 個の心電図用電極を胸部に装着し、そのコードを本器に接続しておけば、心電が増幅され、RR 間隔が計測され、その RR 間隔から換算された瞬時心拍数が液晶表示板にデジタルで表示される。

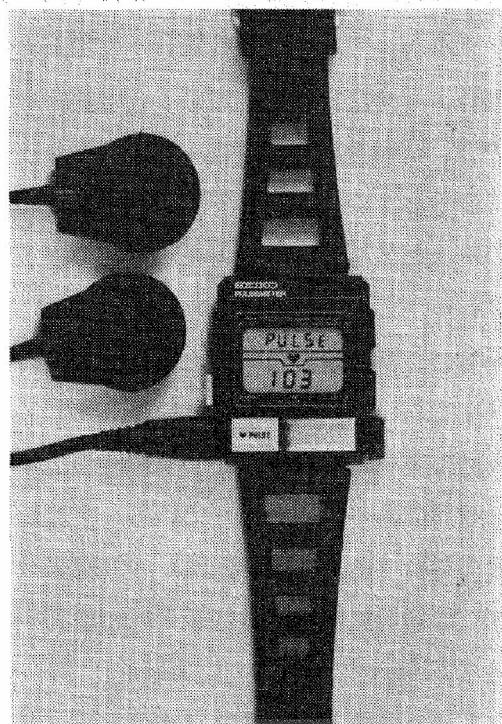


写真 1 Watch-type heart rate counter which displays real time heart rate during exercise and rest

この装置の回路に若干の修正を加えて、式 (6) によって HR から DP に換算し、その結果を表示板上に表示するようにすれば、この装置は直ちに DP 測定器として利用できる。さらにスイッチ回路を設けることによって、HR 表示と DP 表示を任意に切り替えることも可能となろう。この際定数 a および b の値は実験的に決定して入力させる必要があるため、そのためのキーボードの設置もなされなければならない。

このような目的のためには、より多数例について基礎的な実験を行うことが必要であるし、また予算的な問題もある。したがって現段階では製品化するまでにはいたっていない。

5. ま と め

運動処方を用いる運動強度としては、安全上の見地からしても心臓の負担度という面からの配慮が重要である。そのような意味における運動強度の指標としてのダブルプロダクト (DP) について検討し、次の結果を得た。

(1) DP は心筋酸素摂取量と相関が高いことから、DP を心負担度の指標とすることは妥当なことである。

(2) 運動時の収縮期血圧は心拍数の 1 次関数である。したがって DP (y) は心拍数 (x) の 2 次関数であり、次式で表される。

$$y = ax^2 + bx$$

(3) 上式の a および b は実験的に容易に求められる。これらをあらかじめ求めておけば、以後は心拍数を測定するだけで DP を求めることができる。

(4) DP を即時に測定するための小型装置の開発が可能である。

文 献

1) Convertino, V.; Cardiovascular response to exercise in middle aged men after 10 days of

- bed rest, *Circulation*, **65** : 134—140 (1982)
- 2) Goldstein, R.E. and S.E. Epstein; The use of indirect indices of myocardial oxygen consumption in evaluating angina pectoris, *Chest*, **63** : 302—306 (1973)
- 3) 池上晴夫; 運動強度および運動量の表し方, 運動処方, 朝倉書店, pp.166—171 (1982)
- 4) Jorgensen, C.R., K. Kitamura, F.L. Gobel, H.L. Taylor, and Y. Wang; Long term precision of the N₂O method for coronary flow during heavy upright exercise, *J. Appl. Physiol.*, **30** : 338—344 (1971)
- 5) Jorgensen, C.R., K. Wang, Y. Wang, F.L. Gobel, R.R. Nelson and H.L. Taylor; Effect of propranolol on myocardial oxygen consumption and its hemodynamic correlates during upright exercise, *Circulation*, **48** : 1173—1181 (1973)
- 6) Kitamura, K., C.R. Jorgensen, F.L. Gobel, H.L. Taylor and Y. Wang; Hemodynamic correlates of myocardial oxygen consumption during upright exercise, *J. Appl. Physiol.*, **32** : 516—522 (1972)
- 7) 北村潔和; 自転車エルゴメーター運動中の血圧および心拍数の反応, 体育の科学, **36** : 40—44 (1986)
- 8) Maidorn, K.; Der arterielle Druck bei ergometrischer Leistung, in *Ergometrie*, Mellerowicz H., Urban and Schwarzenberg, pp.148—171, *München* (1979)
- 9) Mac Dougall, J.D., D. Tuxen, D.G. Sale, J.R. Moroz, and J.R. Sutton; Arterial blood pressure response to heavy resistance exercise, *J. Appl. Physiol.*, **58** : 785—790 (1985)
- 10) Nelson, R.R., L. Fredorick, and M.D. Gobel; Hemodynamic predictors of myocardial oxygen consumption during static and dynamic exercise, *Circulation*, **50** : 1179—1189 (1974)
- 11) Robinson, B.F.; Relation of heart rate and systolic blood Pressure to the onset of pain in angina pectoris, *Circulation*, **35** : 1073—1083 (1967)
- 12) Redwood, D.R., D.R. Rosing, R.E. Goldstein, G.D. Beiser and S.E. Epstein; Importance of design of an exercise protocol in the evaluation of patients with angina pectoris, *Circulation*, **43** : 618—628 (1971)

- 13) Sheffield, L.T. and D. Roitman; Systolic blood pressure, heart rate and treadmill work at anginal threshold, *Chest*, **63** : 327—335 (1973)
- 14) 竹内正, 東健彦; Pump 系, 循環, pp.31—66, 文光堂 (1980)
- 15) 高野成子, 端利志明; 重量挙げ競技者のバーベル
挙上運動に伴う心血管反応, 体力科学, **35** : 255—263 (1986)
- 16) Voldemer, A.V. Lindquist et al.; A comparison between the effects of dynamic and isometric exercise as evaluated by the systolic time intervals in normal man, *Am. Heart J.* **85** : 227—236 (1973)