

簡易有酸素性作業能力テストからみた 中高年マラソン走者の特徴

鹿屋体育大学 芝山 秀太郎
(共同研究者) 同 深代 泰子
同 深代 千之

**Physiological Characteristics of
Middle-Aged Runners**
by a Tentative Aerobic Work Capacity Test
by
Hidetaro Shibayama,
Taiko Fukashiro and Senshi Fukashiro
National Institute of Fitness and Sports in Kanoya

ABSTRACT

The purposes of this study were to observe physiological responses of the middle-aged to exercise by a tentative aerobic work capacity test and to elucidate physiological characteristics of a middle-aged marathoner.

A tentative method of aerobic work capacity test was developed from the viewpoint of safety. The procedure was to exercise at two given sub-maximal loads (100W and 150W for four minutes, respectively) on a electric bicycle ergometer which could keep workloads constant even if pedalling rates changed. Three healthy middle-aged males (one marathoner, one jogger and one control) performed this exercise. During the exercise, oxygen and carbon dioxide concentration was continuously analyzed. Heart rate (HR) and brachial artery blood pressure were monitored every minute, and oxygen uptake ($\dot{V}O_2$), pulmonary ventilation ($\dot{V}E$), oxygen pulse, respiratory rate, tidal volume and oxygen removal were obtained. This tentative aerobic work capacity test followed Margaria's two-step load method. Estimation of $\dot{V}O_2$ was based upon Balke's formula. $\dot{V}O_{2\max}$ estimated from the HR and $\dot{V}O_2$ values at the two workloads showed small

standard error (5.74%) and a high correlation coefficient ($r=0.957$, $p<0.001$) was found between measured $\dot{V}O_2$ max and estimated $\dot{V}O_2$ max. Consequently, it could be concluded that this test method was reliable.

There was little difference in performance time between Marathoner and Jogger, but differences were found in $\dot{V}O_2$ max, O_2 pulse and O_2 removal. Particularly, Marathoner showed greater value of O_2 pulse at exhaustion, compared with Jogger and Control (18.4 vs. 15.5 and 11.6ml/beat). These results indicated that Marathoner's great performance was based upon efficient oxygen transportation system.

緒 言

酸素需要量が最大酸素摂取量より小さい運動時においては、糖質あるいは脂質というエネルギー源の分解速度とこれらの再合成速度とのあいだに一種の動的平衡の維持されることが知られている。当然、エネルギー源の分解速度は運動の負荷強度により規定されるが、回復の再合成速度は活動筋への酸素供給能力、すなわち酸素摂取量により規定される^{5,20)}。身体作業能力を定義した猪飼は、呼吸循環機能の動員量と組織での酸化過程を反映する最大酸素摂取量がそれに相当するとしている¹¹⁾。

しかしこの有酸素性作業能力の測定は、鍛練されたスポーツマンは別として、一般人に適用するには多くの困難が存在する。とくに中高年者においては、呼吸循環器系の機能に個人差が著しく、最大努力の運動負荷を課することに潜在的危険の誘発をみることもさへしばしばである^{4,9,16,23)}。

運動時の心拍数、血圧、心拍出量等の変化をしらべた増田らによれば、負荷強度が小さければ、中高年者の生理機能の応答は若年者のそれとほとんど年齢差を認めないが、負荷強度が大きくなればなるほど、若年者では、増加した心拍出量の充足に心拍数増加をもって対処し、血圧の上昇率の少ない状態で応答しているのに対し、中高年者で

は、若年者の場合とは逆に心拍数増加が小さく、血圧の著しい増高をもって対処していることを明らかにしている¹⁵⁾。すなわち成人病発現誘因をもつ中高年者の有酸素性作業能力テストは、血圧上昇を及ぶ限り小さくする安全性を重視した最大酸素摂取量測定でなければならない^{8,18)}。

そこで本研究では、有酸素性作業能力テストとしての運動負荷に自転車エルゴメーターを活用した、簡易有酸素性作業能力測定法を考案し、この方法により中高年者の生理的機能容量を観察するとともに、トレーニング効果とくに鍛練されたマラソン走者の特徴を明らかにしようとした。

実験方法

被検者には、日常、健康に留意している3名の男子中高年者をえらんだ。すなわち、1日およそ20kmのランニング・トレーニングを週3回以上実施して、しばしばフルマラソンに出場し、3時間53分0秒の公認記録を有する者、1日およそ4~5kmのジョギング・トレーニングを週6回程度実施する運動習慣を10年以上も継続している者、そして健康生活に十分配慮をしているが運動習慣のない座業従事者である。これら中高年者の身体特性は表1に示した。

このような中高年者の生理機能の運動にともなう変化の測定は、負荷として自転車エルゴメータ

表1 Physical characteristics and activity level of the subjects

subject	age (yrs)	height (cm)	weight (kg)	chest circumference (cm)	activity level
I. U.	48	169.5	60.8	85.0	long distance running
H. S.	48	166.1	57.6	86.0	jogging
K. S.	47	171.4	56.5	84.4	sedentary

一を用い、呼気ガス中の酸素および二酸化炭素濃度を質量分析計 (Perkin-Elmer 社製) により分析し、胸部双極誘導による心電図を連続記録して運動時心拍数を計測したほか、上腕動脈血圧、酸素摂取量、酸素脈、呼吸数、呼吸量、一回換気量、酸素摂取率などを経時的変化として記録した。

実験成績

1. 簡易有酸素性作業能力テスト

最大酸素摂取量は、一般には exhaustion に達するまでの最大運動を負荷して、そのときの呼気ガス分析から求める直接法により測定されるが¹²⁾、被検者の身体的状況を把握していない場合や医学的観察の不可能な場合を考慮すれば、とくに中高年者では安全性の面から、間接法のほうが適していると考えられる。

なかでも最大下の運動では同一の負荷にたいするエネルギー需要はほとんど等しく、したがって酸素摂取量も同一水準にあることが知られている^{1,8,22)}。かりに体力レベルの異なる場合であっても、酸素摂取量を最大酸素摂取量の百分比で表わすと個人差のなくなることが知られており、酸素摂取量と直線的関係を有する運動時心拍数から、その負荷強度が最大酸素摂取量の何%に相当するかが推定される^{3,13,21)}。

多段階負荷法による最大酸素摂取量推定は、すでに Åstrand ら²⁾をはじめ、多く3段階負荷によるものが用いられているが、主としてテストの所要時間を小さくして集団測定を容易にする目的

から、著者らは、Margaria ら¹⁴⁾ にならい2段階負荷法による最大酸素摂取量推定法を採用した。すなわち、運動負荷装置として、ペダルの回転数にかかわらず一定の物理的仕事量を保証する電気ブレーキ式自転車エルゴメーター (竹井機器製, Isopower ergometer) を用い、漸増的に2段階の最大下負荷を課したときの運動時心拍数を記録するものである⁶⁾。

負荷の設定は自動制御され、はじめ 100watt という軽い負荷 (女子ではこれを 60watt とした) で4分間のペダリングを行わせ、つづく30秒間で直線的な負荷漸増をはかり、4分30秒より 150 watt という重い負荷 (女子ではこれを 90watt とした) でさらに4分間のペダリングを行わせるものである。

自転車エルゴメーター運動時の酸素摂取量 $\dot{V}O_2$ の推定は、Balke にならい次式

$\dot{V}O_2(\text{ml}/\text{min}) = [\text{Watt} \times 6 \times 1.78] + 1.5 \text{Mets}$ を用いた⁷⁾。ここで 1Mets = 3.5ml/O₂/kg である。

2段階の最大下負荷を課したときのそれぞれの酸素摂取量推定値をもとに、次式により、最大酸素摂取量を推定した。

$$\dot{V}O_{2\text{max}} = \frac{f_{\text{max}}(\dot{V}''O_2 - \dot{V}'O_2) + f'' \cdot \dot{V}'O_2 - f' \cdot \dot{V}''O_2}{f'' - f'}$$

ここで

f' : 第1段階の負荷終了直前の心拍数

f'' : 第2段階の負荷終了直前の心拍数

f_{max} : 最高心拍数 (180 beats/min)

$\dot{V}'O_2$: 第1段階における推定酸素摂取量

$\dot{V}''O_2$: 第2段階における推定酸素摂取量

この推定値による誤差変動は, Margaria ら¹⁴⁾によれば7%であるが, 著者らが中高年者についてしらべたところでは5.74%を示し, 再現性も高く, きわめて信頼度の大きい成績を示した.

2. 中高年マラソン走者の生理的特徴

各中高年被検者にたいする自転車エルゴメーター負荷は図1のようにセットした. すなわち, 簡易有酸素性作業能力テストにより, 最大酸素摂取量の50%および70%と推定される100W および150W の仕事を各4分間ずつ課したのち, 1分ごとに強度を漸増させて exhaustion に至るまでの負荷とした. このとき鍛練されたランナーの exhaustion に至るまでの最大 performance は13分36秒で, 同じくジョガーの exhaustion time も13分30秒を示したが, 平素運動習慣を有しない sedentary のそれは6分35秒にとどまっていた.

有酸素能力の指標のうち, 外呼吸にかかわる呼吸量の変化を図2に示した. 運動にともなう呼吸量の増加はランナー, ジョガー, 非鍛練者とも図のようにほぼ同一の傾向を示し, 非鍛練者では72.3l/min, 一回換気量にして2.01l で exhaustion に達したが, ランナーでは exhaustion 時に

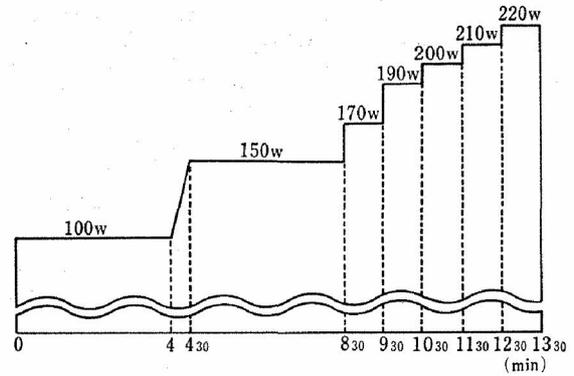


図1 Experimental design of workload.

118.2l/min, 一回換気量 2.55l を示した. ジョガーの呼吸量は exhaustion 時に急上昇して 144.3l/min に達し, 一回換気量も最大 2.91l を示していた. 呼吸数の変化は図3に示した. 運動にともなう呼吸数の増加も, ランナー, ジョガー, 非鍛練者とほぼ同様の变化を示し, exhaustion 時に非鍛練者 36times/min, ジョガー 55times/min, ランナー 46times/min に達していることが認められた.

肺における酸素の取りこみは図4に示した. 運動にともなう酸素摂取量の増加は, ランナー, ジョガー, 非鍛練者の順に推移し, その最大値はいずれも exhaustion 時に得られ, それぞれ 3247 ml/min, 2796ml/min および 1950ml/min であっ

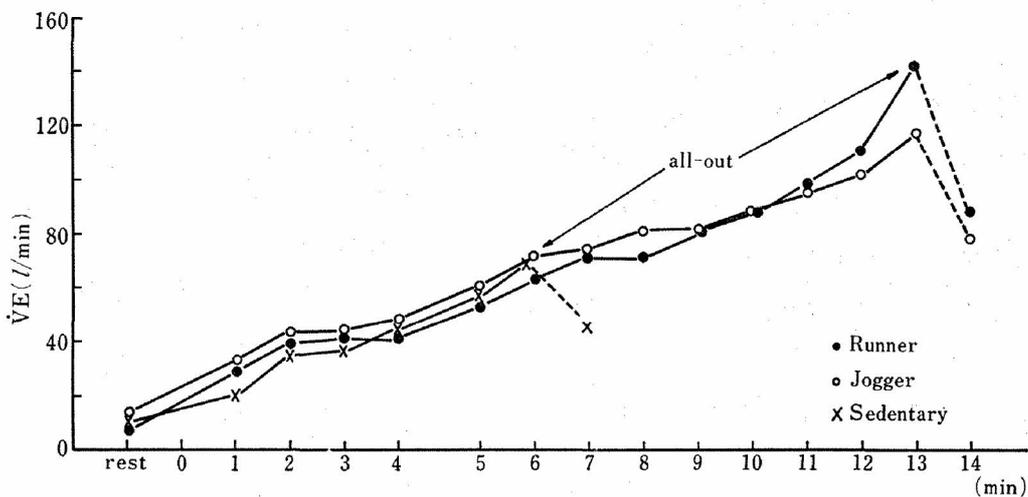


図2 Changes in pulmonary ventilation due to physical exercise in the persons of middle age.

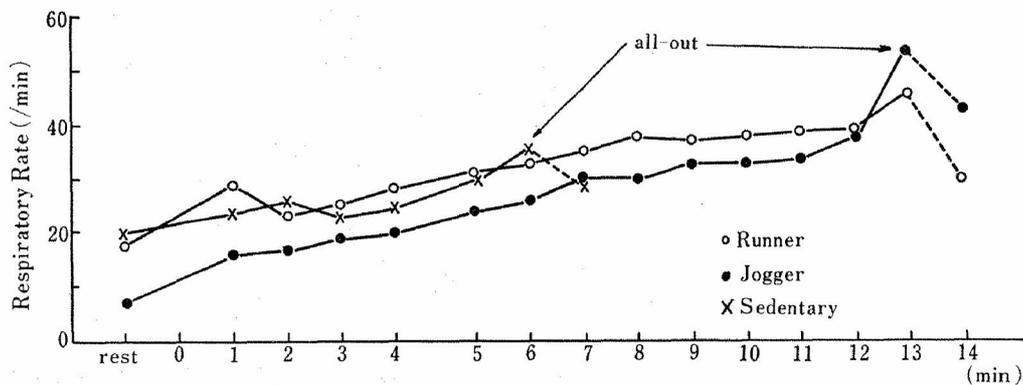


図3 Changes in respiratory rate due to physical exercise in the persons of middle age.

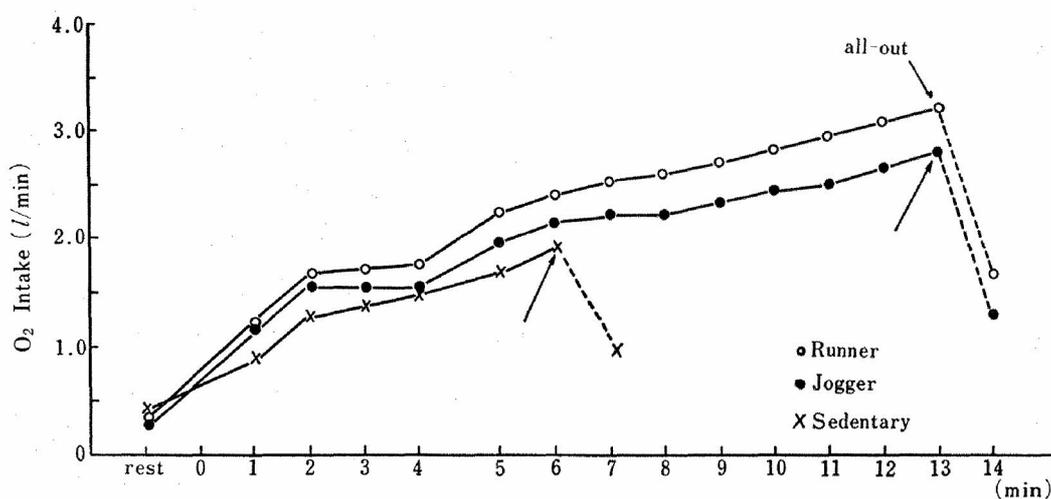


図4 Changes in oxygen intake due to physical exercise in the persons of middle age.

た。このときの酸素摂取率は図5のような経過をたどり、exhaustion時にはランナー、ジョガー、非鍛練者とも著しく低下して、それぞれ 27.3ml/l, 19.3ml/l および 26.9ml/l を示していた。

心臓における拍出と酸素運搬の効率は種々の角度から検討されるが、ここではまず動脈血圧、とくに平均血圧の運動にともなう推移を観察の手がかりとした。図6がそれで、鍛練、非鍛練の別なく収縮期血圧は運動により上昇し、exhaustion時にランナーでは 222mmHg, 非鍛練者では 184 mmHg に達したが、平均血圧の運動にともなう推移は鍛練、非鍛練による差がみられ、前者では exhaustion 時に 11.6% の増加にとどまったが、後者では 41.4% という大きな増加を示した。図7

に運動にともなう心拍数の変化を示した。運動時の心拍数増加はランナー、ジョガー、非鍛練者のいずれもほぼ同様の経過を示し、exhaustion時にそれぞれ 176beats/min, 181beats/min, 168beats/min に達した。しかしこれは酸素脈の運動にともなう変化から観察すると、図8のように鍛練の別による差が認められ、運動により増加した酸素脈はランナーが最も大きく exhaustion 時に 18.4ml/beat を示し、次いでジョガーの 15.5ml/beat, 非鍛練者では 11.6ml/beat を示すにとどまった。

考 察

安静状態から運動状態に移行すると、一般に生

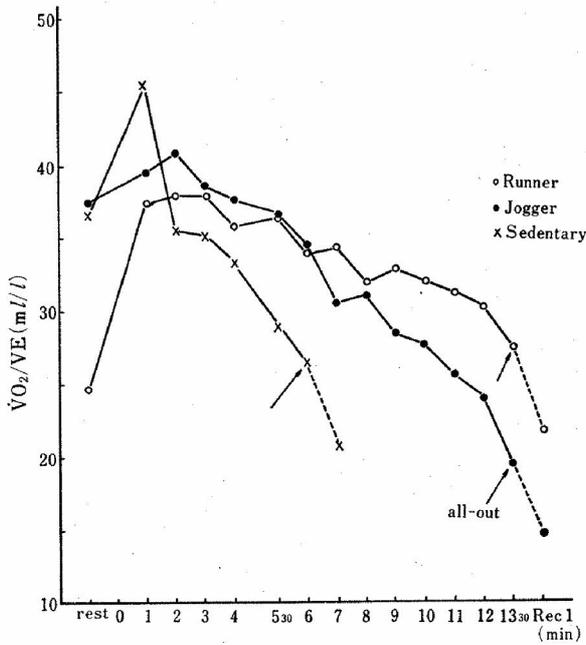


図5 Changes in oxygen removal due to physical exercise in the persons of middle age.

体は、呼吸循環機能の動員により酸素摂取量を高め、その酸化作用を利用して増大するエネルギー需要をまかなう。運動に要するエネルギー量が最大酸素摂取量の範囲内であれば steady state が成立して生体は運動に適応する。すなわち運動への

適応は酸素需要量と最大酸素摂取量との関係で決定されている^{5,10,19)}。中高年者の有酸素性作業能力測定が重視されるのは、負荷への適応能がしばしば問題とされるからである^{2,17)}。

著者らの採用した簡易有酸素性作業能力テストは、適応性が低下した中高年者の生理的機能容量を越えることのないよう運動時最高心拍数を 180 beats/min と上限界を設けている点に特色がある。すなわち心拍数が 180beats/min を越えると自動的に自転車エルゴメーターの負荷が軽減されるようプログラムされている。中高年者に許される運動条件は、前述したように処方自由度が小さく、したがって強度はある程度限られたものとならざるを得ないと考えられる^{1,16)}。このテストによるランナー、ジョガーおよび非鍛練者の、運動にともなう酸素摂取量変化を表2に示した。中高年者の最大酸素摂取量推定値は、このテストによる場合、その実測値にたいして $r=0.958$ ($p<0.001$, $n=12$)、平均偏差は $1.87\text{ml/kg}\cdot\text{min}$ を示し、十分に信頼しうる測定法と考えてよいと思われる⁷⁾。

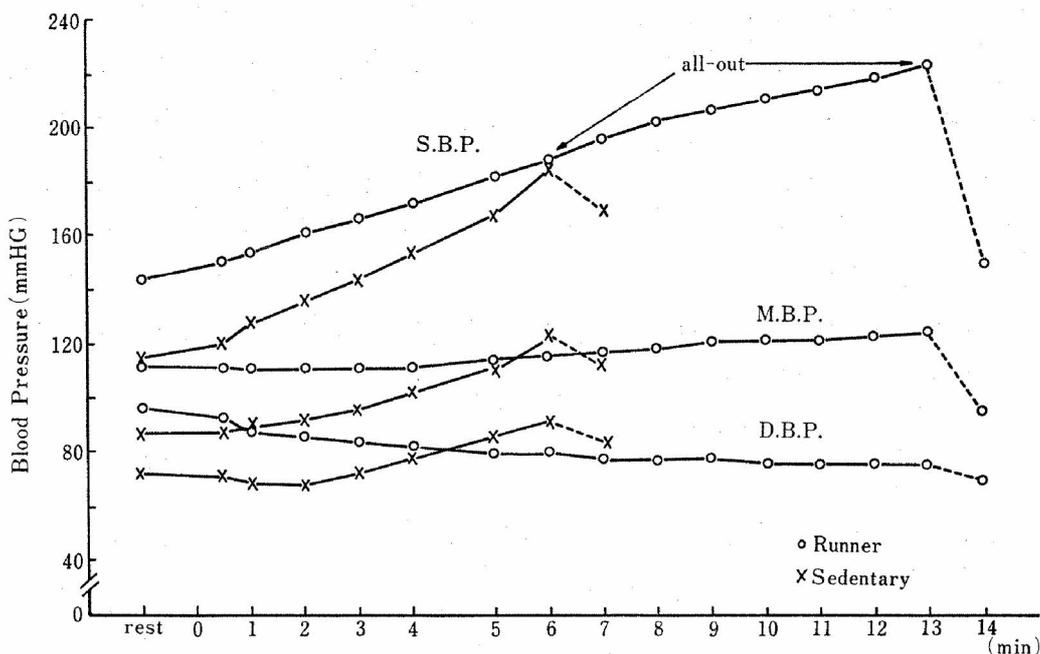


図6 Changes in blood pressure due to physical exercise in the persons of middle age.

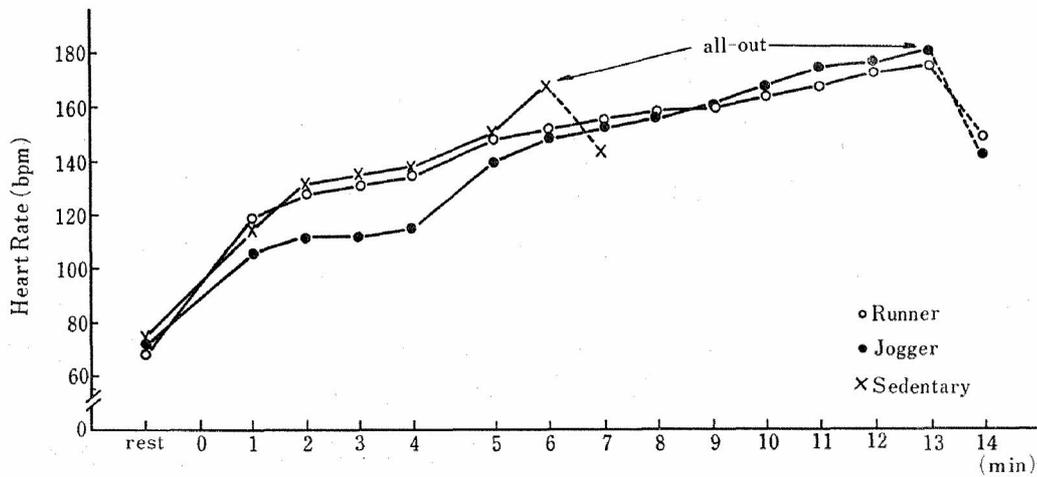


図7 Changes in heart rate due to physical exercise in the persons of middle age.

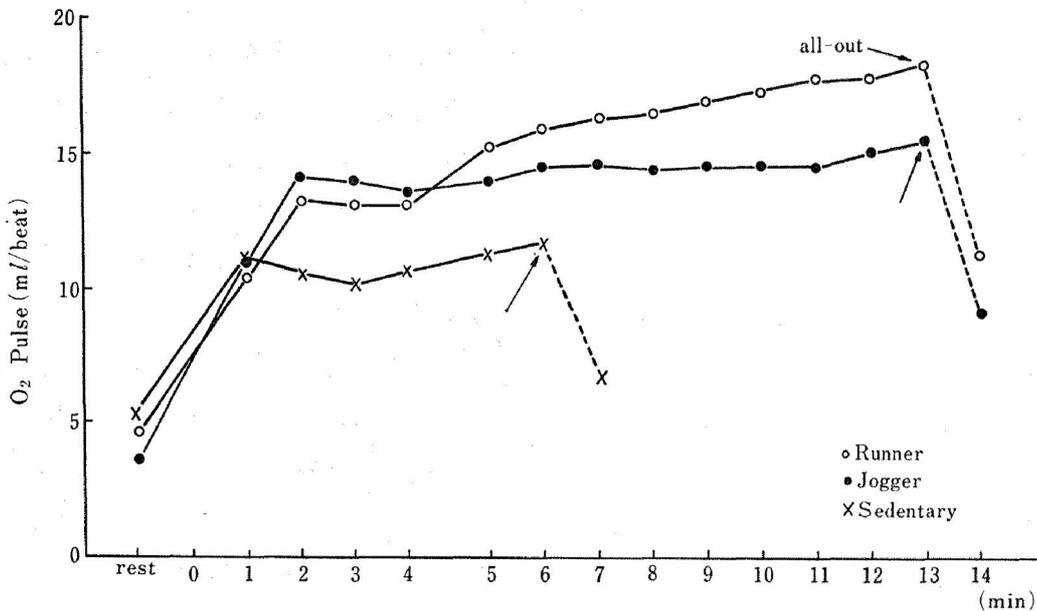


図8 Changes in oxygen pulse due to physical exercise in the persons of middle age.

表2 Maximum oxygen intake, $\dot{V}O_2$ and $\% \dot{V}O_{2max}$ of the subjects

Subj.	Max.		Submax. (100W)		Submax. (150W)	
	l/min	ml/kg·min	l/min	%	l/min	%
Runner	3.25	53.2	1.76	54.2	2.62	80.6
Jogger	2.80	48.2	1.55	60.1	2.23	86.4
Sedentary	1.95	34.5	1.50	76.9	1.95	100.0

鍛練された中高年者の体力特性を明らかにするためにこのテストを用い、さらに加えて図1のように漸増負荷を付加したものが図2ないし図8である。体力に個人差の大きい一般の中高年者のな

かから、上限界に近い例としてジョガーを、また下限界に近い例として座業従事者をえらび、マラソンランナーと対比させてみた。外呼吸にかかわる側面では、呼吸量、呼吸数の変動に大きな差は

みられなかったにもかかわらず、酸素摂取量についてはランナーがすぐれて大きい値を示し、ジョガーは、performance では近似する値を示しても酸素摂取水準は明らかに低く、performance の著しく劣る非鍛練者では、さらに低い水準を示していた。これを内呼吸にかかわる指標とした酸素摂取率でみても、ランナーは exhaustion に近い状態でありながら、なおかつ高い効率を維持しつつ運動時の大きな酸素需要をまかなっていることが理解される。組織への酸素運搬の効率は、組織呼吸の量的変化を反映すると考えられるが、非鍛練者では心拍数増加は小さいにもかかわらず平均血圧の増加率は鍛練者のその3.6倍にも達し、しかも酸素脈の変動は著しく低いレベルに終始して、exhaustion 時で比較した場合、鍛練者のその6割程度に匹敵するに過ぎない。

これらの実験成績を勘案すると、鍛練されたマラソン走者では、運動負荷によるエネルギー需要の増大を、大きな酸素摂取量で直接まかなっていること、それを支えるものは、高い酸素摂取率と大きな酸素脈であること、一方、非鍛練者ではジョガーから座業従事者まで個人差も拡大されるが performance を小さくする要因にこれら酸素摂取率や酸素脈のレベル低下があげられ、加えて、平均血圧の著しい増高がみられて血圧調節機構への影響が大きくなることなどがうかがわれる。すなわち、有酸素性作業能力テストからみた中高年マラソン走者の特徴は、その大きな performance がすぐれた酸素運搬系能力による効率のよい生理的背景に支えられていると推察された。

総 括

中高年者では呼吸循環器系の機能に個人差が著しいため最大努力の運動負荷を課するには多くの困難がある。しかし運動に要するエネルギー量を反映する酸素摂取水準の解明は重要な関心事であり、これを明らかにするために簡易有酸素性作業

能力テストを作成した。またこれにより中高年マラソン走者の生理的特徴を検討した。被検者には日常、健康に留意している男子中高年者をえらんだ。すなわち、1日およそ20kmのランニング・トレーニングを週3回以上実施しているマラソンランナー、1日およそ4-5kmのジョギング・トレーニングを週6回程度実施して10年以上を経過したジョガー、および運動習慣をもたない座業従事者である。運動負荷には自転車エルゴメーターを用い、呼吸量、呼吸数、酸素摂取量、心拍数、血圧、酸素脈などを経時的変化として記録した。

簡易有酸素性作業能力テストは、2段階負荷法による運動時心拍数から酸素摂取量を求める間接法とした。運動負荷の設定は、常に一定の物理的仕事量を保証する電気ブレーキにより、自動制御とした。最大酸素摂取量の推定式により得られた値の誤差変動は5.74%と小さく、再現性が高かった。

これをもとに中高年マラソン走者の運動にともなう呼吸循環機能の変化を観察した。最大酸素摂取量は exhaustion 時に得られ、ランナー 3247 ml/min、ジョガー 2796 ml/min および非鍛練者 1950 ml/min であった。運動とともに増加した心拍数は、exhaustion 時にランナー 176 beats/min、ジョガー 181 beats/min および非鍛練者、168 beats/min に達した。平均血圧の増加は鍛練、非鍛練による差が認められ、前者では11.6%の増加であったが後者では41.4%という大きな増加を示した。

以上のことから、有酸素性作業能力テストによれば鍛練者では、大きな performance を支えるエネルギー需要の増大を、高い酸素摂取水準でまかなっていることがあげられる。それは高い酸素摂取率と大きな酸素脈に由来し、こうしたすぐれた酸素運搬系能力が中高年マラソン走者の特徴となっていることが推察された。

参考文献

- 1) American College of Sports Medicine; Guidelines for graded exercise testing and exercise prescription, Lea & Febiger, Philadelphia. (1975)
- 2) Åstrand, P.O. and K. Rodahl; Textbook of work physiology, McGraw-Hill Inc. N.Y. (1970)
(浅野勝巳訳「オストランド運動生理学」大修館書店. 東京. 1982)
- 3) Bailey, D.A., R.J. Shephard and R.L. Mirwald; Validation of a self-administered home test of cardio-respiratory fitness, *Can. J. Appl. Sports Sci.*, **1**, 67—78 (1976)
- 4) Coleman, A.E., C.L. Burford and P. Kreuzer; Aerobic capacity of relatively sedentary males, *J. Occup. Med.*, **15**, 628—632. (1973)
- 5) Edington, D.W. and V.R. Edgerton; The biology of physical activity, Houghton Mifflin Co. Boston (1976). (大平充宣訳「運動生理学の基礎」ベースボール・マガジン社. 東京 1983)
- 6) 深代泰子, 芝山秀太郎; 酸素摂取水準からみた中学生の血圧および心拍応答, *体力科学*, **32**, (6) 449 (1983)
- 7) 深代泰子, 芝山秀太郎; 中高年マラソン走者における運動時の酸素運搬系の特徴, 第35回日本体育学会大会号, 264 (1984)
- 8) Hickson, R.C., J.M. Hagberg, A.A. Ehsani and J.O. Holloszy; Time course of the adaptive responses of aerobic power and heart rate to training, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **13**(1), 17—20 (1981)
- 9) Holloszy, J.O.; Exercise, health and aging; a need for more information, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **15**(1), 1—5 (1983)
- 10) Ichikawa, T. and M. Miyashita; Aerobic power of Japanese in relation to age and sex, *Hung. Rev. Sports Med.*, **1**, 243—253 (1980)
- 11) Ikai, M.; Physiology of exercise test. *Jap. Circulat. J.*, **35**(1), 23—26 (1971)
- 12) 井川幸雄, 鈴木政登; 呼吸機能検査, 井川幸雄「生理検査マニュアル」106—133, 広川書店, 東京 (1983)
- 13) Lamb, D.R.; The sports medicine umbrella, *Sports Med. Bull.*, **19**(4), 8—9 (1984)
- 14) Margaria, R., P. Aghemo and E. Rovelli; Indirect estimation of maximal oxygen consumption in man, *J. Appl. Physiol.*, **20**(5), 1070—1073 (1965)
- 15) 増田 允, 井川幸雄, 伊藤 朗; 中高年者とスポーツ, 石河利寛, 松井秀治編「スポーツ医学」207—233, 杏林書院, 東京 (1983)
- 16) Shephard, R.J. and T. Kavanagh; Characteristics of the master athlete, *Physician & Sports Med.*, **6**(2), 58—65 (1978)
- 17) 芝山秀太郎, 江橋博, 西島洋子, 松沢真知子; 有酸素作業能の活動水準を高める中高年者の歩行運動, *体力科学*, **28**(1), 25—33 (1979)
- 18) 芝山秀太郎, 江橋博; 中高年者の体力特性, 一条書店, 東京 (1982)
- 19) 芝山秀太郎, 江橋博; 長期間の運動によるからだの変化, *体育科教育*, **32**(2), 31—36 (1984)
- 20) 芝山秀太郎, 江橋博, 西島洋子; 運動時の酸素供給と呼吸機能の変動, *体力研究*, **56**, 58—68 (1984)
- 21) Washburn, R.A. and H.J. Montoye; The validity of predicting $\dot{V}O_2$ max in males age 10—39, *J. Sports Med.*, **24**(1), 41—48 (1984)
- 22) Wasserman, K., B.J. Whipp, S.N. Koyal and W.L. Beaver; Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise, *J. Appl. Physiol.*, **35**, 236—243 (1973)
- 23) Zohman, L.R. and R.E. Phillips; Medical aspects of exercise testing and training, Intercontinental Medical Book Co. N.Y. (1973)