

エネルギー産生機構に基づく体力測定

—有酸素性作業能力，無酸素性作業能力，脚筋力テストの検討—

深代 泰子*，芝山秀太郎**

A Study of Physical Fitness Test based on Human Energy Production :

— Aerobic work capacity, anaerobic work capacity and leg strength test —

Taiko FUKASHIRO* and Hidetaro SHIBAYAMA*

Abstract

Human energy production is a very important concept when considering movements and sports activities performed. It is well-known that there are two energy systems in human energy production, i. e. aerobic and anaerobic metabolism. The authors devised and examined a new physical fitness test based on the concept of human energy production, which consisted of aerobic work capacity, anaerobic work capacity and leg strength tests.

Aerobic work capacity test consisted of two submaximal loads (100 and 150 watt) and subjects performed each load for 4 min continuously on an electric bicycle ergometer. HR was monitored during the test, and $\dot{V}O_2$ max was estimated from HR response to workload, according to Margaria's formula. In the anaerobic work capacity test, an electric bicycle ergometer was used. Subjects pedaled 11 sec at a load of 7 kp with all power, and the peak value of mechanical power was obtained as anaerobic power. In the leg strength test, maximal isometric leg extension strength was measured for both legs and average of both leg strength was obtained.

Subjects were 91 healthy male students (19–23 yrs) who majored in physical education. $\dot{V}O_2$ max was 3.43 ± 0.51 l/min and 50.1 ± 5.6 ml/min per body weight (mean \pm SD). Anaerobic power was 1042 ± 116 watt and 15.3 ± 1.6 watt per body weight. And the leg strength was 71.4 ± 14.4 kg. Significant correlation was found between $\dot{V}O_2$ max, anaerobic power and leg strength, and body weight and lean body mass (LBM) ($r = 0.391 \sim 0.682$, $p < 0.001$), suggesting that bigger subjects tend to have better performance. When expressed in absolute value, significant correlation was found between $\dot{V}O_2$ max, anaerobic power and leg strength ($r = 0.351 \sim 0.550$, $p < 0.001$), but expressed per body weight or LBM, $\dot{V}O_2$ max was found to be independent of the rest, while correlation between anaerobic power and leg strength was still significant ($r = 0.434, 0.401$, $p < 0.001$).

Consequently, considering body mass, $\dot{V}O_2$ max and anaerobic power could represent two independent factors of human energy production, while anaerobic power and leg strength might reflect one factor of energy system, but because of the different form of motion, i.e. dynamic and static, different aspects of anaerobic work capacity could be reflected.

Key words : Human energy production, Physical fitness test, VO_2 max, Anaerobic power, Leg strength

緒言

体力テストについて考えるとき，まず体力の定義が明確にされなければならない。猪飼⁵⁾は，体

力を生物的な生活能力のたくましさであるとし，ストレスに耐えて生を維持していく身体の防衛力と，積極的に仕事をしていく身体の行動力の二つに分類している。また，エネルギーという観点か

*鹿屋体育大学 National Institute of Fitness and Sports in Kanoya

ら後者の行動体力を考えると、身体にはエネルギーの発生体とエネルギーの活用体の二つの側面が存在するという。エネルギーの発生体とは、化学的なエネルギーをより多く、かつ長く、そして速やかに力学的なエネルギーに転換する能力をいい、身体資源 (physical resource) に相当する。また、後者のエネルギーの活用体は目的に合わせて四肢を動かし、全体として統一された行動を作り上げる能力をいい、運動の成果、いわゆる physical performance と関連している。

身体運動はすべて筋の収縮によって作り出されるが、筋の収縮に必要なエネルギーは身体にたくわえられた化学的エネルギーによってもたらされ、エネルギー産生機構には、無酸素的、有酸素的の二つの過程のあることが知られている⁹⁾。ヒトの運動能力は、この二つの過程によって得られるエネルギーを元に遂行される。つまり、このエネルギー量が小さければ、いかに秀れたエネルギー活用能力があっても、大きな運動能力を発揮することはできないということである。

そこで、運動能力発揮の基礎となる身体資源を評価するために、無酸素性作業能力テスト、有酸素性作業能力テスト、そしてエネルギー利用の出力の指標として脚筋力テスト、の三つを選び、測定を実施し、検討を試みた。

方法

無酸素性作業能力テスト：電気ブレーキ式の自転車エルゴメータ (ハイパワーエルゴメータ、竹

井機器工業製) を用い、7 kpの一定トルクで、11秒間の全力ペダリングを課した。ペダルの回転速度からパワーを算出し⁶⁾、そのピーク値をもって無酸素パワーとした。

有酸素性作業能力テスト：電気ブレーキ式の自転車エルゴメータ (アイソパワーエルゴメータ、竹井機器工業製)、パワーコントロールユニット、パルスフィードバックユニット (竹井機器工業製) を用い、ペダルの回転数が変動しても仕事量が一定に保たれるよう、パワーをコントロールした。被検者の耳に光電脈波計を装着し、作業中の心拍数を監視した。

作業は図1に示したように、二段階漸増負荷とし、100Wと150Wの負荷をそれぞれ4分間課した。なお、第一段階と第二段階の間に負荷を上昇させる時間として30秒をおいた。各段階4分間のうち最後の10秒間の心拍数を測定した。

酸素摂取量の推定は Balke の式⁵⁾を用いた。

$$\dot{V}O_2 \text{ (ml/min)} = (\text{watt} \times 6 \times 1.78) + 1.5 \text{ Mets}$$

最大酸素摂取量の推定は Margaria の式⁹⁾を用いた。

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

f_{max}：最高心拍数 (190拍/分)

f'：第一段階における心拍数 (拍/分)

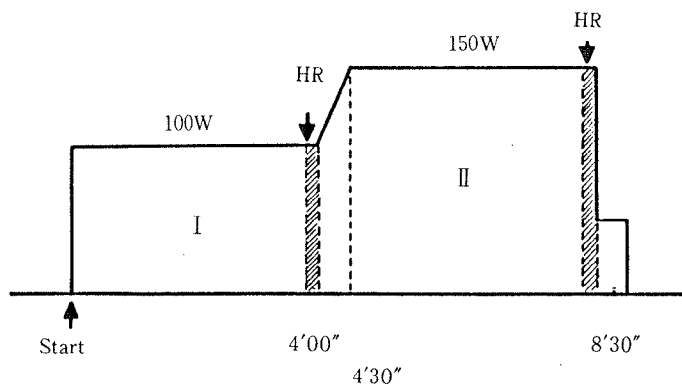


図1 有酸素性作業能力テストにおける負荷法

f'' : 第二段階における心拍数 (拍/分)

$\dot{V}O_2'$: 第一段階における推定酸素摂取量
(ml/min)

$\dot{V}O_2''$: 第二段階における推定酸素摂取量
(ml/min)

脚筋力: 仰臥位で膝関節伸展の最大筋力 (等尺性) を測定した。筋力の検出はストレンゲージを用いた。測定は左右両脚についてそれぞれ2回ずつ行ない, 左右それぞれ大きいほうの値をとり, その平均値をもって脚筋力とした。

以上三つのテストに用いられた測定機器はすべてコンピューターと結ばれ, 測定結果は直ちにコンピューターに送られ, 処理された。

被検者: 体育学を専攻する健康な男子学生91名

(19~23歳) が被検者となり, 無酸素性作業能力テスト, 有酸素性作業能力テスト, 脚筋力テスト, および身体計測として, 身長, 体重, 胸囲, 皮下脂肪厚 (肩甲骨下部および上腕背部) の測定を行った。皮下脂肪厚から, 身体密度を算出し²⁾, 体脂肪率を計算した¹¹⁾。

結 果

被検者の身体的特徴を表1に示した。身長, 体重ともにこの年代の全国平均値をやや上回っていた。一方, 皮下脂肪厚から推定した体脂肪率は平均値で14.7%, 最も少ない者で10.0%と, 一般人並であった。また, 体脂肪率44%と非常に肥満度の高い者もみられた。体重から体脂肪量を減じて求めた除脂肪体重 (Lean Body Mass : LBM) の

表1 被検者の身体的特徴 (N=91)

		Mean±SD	Range
Height	cm	172.3±5.4	156.6~185.0
Body Weight	kg	68.5±7.5	56.0~103.9
Chest Circumference	cm	90.5±5.4	81.8~113.8
% Body Fat	%	14.7±4.8	10.0~44.4
LBM	kg	58.3±5.0	47.6~71.1

表2 有酸素性作業能力, 無酸素性作業能力, 脚筋力テストの結果

		Mean±SD	Range
最大酸素摂取量	l/min	3.43±0.51	2.5~4.8
体重当り	℥ ml/kg min	50.1±5.6	40.7~71.3
LBM当り	℥ ml/kg min	58.9±7.4	44.9~83.0
無酸素パワー	watt	1042±116	694~1341
体重当り	℥ watt/kg	15.3±1.6	10.4~18.3
LBM当り	℥ watt/kg	17.9±1.6	14.3~21.2
脚筋力	kg	71.4±14.4	30.0~109.0
体重当り	℥	1.00±0.20	0.46~1.62
LBM当り	℥	1.23±0.23	0.52~1.88

平均値は58.3kgであった。

表2は、有酸素性作業能力、無酸素性作業能力、脚筋力の三つのテストの測定結果を示したものである。最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2\max$) は絶対値で3.43 l/分、体重当りで50.1ml/kg・分という平均値が得られた。この数値を直接法によって得られた値⁴⁾と比較すると、トレッドミルで測定した場合(3.3 l/分)より3.3%高く、自転車エルゴメーターで測定した場合(2.60 l/分)より32%高い数値となった。図2に $\dot{V}O_2\max$ の度数分布を图示したが、絶対値では3.6 l/分にピークがあり、体重当りでは小さなピークが3ヶ所(45, 50, 63ml/kg・分)見られたが、LBM当りにすると、48~68mlの範囲で度数はほぼ一定(7%前後)であった。無酸素パワーは絶対値で1042Wという平均値が得られたが、これはモナーク社製自転車エルゴメーターを用いて測定した報告^{12,13)}と比較すると30~35%程度高い値であった。図3は度数分布を示したものであるが、絶対値でみた場合、950~1150wattの範囲に60%が存在していた。また、体重当りの場合、平均値は15.3watt/kgとなり、10~16watt/kgにピークが見られ、LBM当りにすると、平均値は17.9watt/kg、ピークは17~19watt/kgとなった。一方、脚筋力の平均値は71.4kgであったが、これは川初と猪飼^{7,8)}の報告した膝伸筋の最大筋力67.8kgとほぼ同レベルであった。図4に度数分布を示したが、ピークは60~65kgと10%程度平均値より低いところに観察された。また、脚筋力を体重当り、LBM当りでみると平均値はそれぞれ1.04, 1.23となった。また、分布をみるとそれぞれ1.0付近, 1.1~1.2にピークが観察された。

表3は $\dot{V}O_2\max$ 、無酸素パワー、脚筋力と体重、LBMとの相関係数を示したものである。得られた相関係数はすべて0.1水準で有意であったが、なかでも体重と最も高い相関係数を示したのは $\dot{V}O_2\max$ であり、 $r=0.682$ であった。一方、LBMと最も高い相関係数を示したのは無酸素パワーであり、 $r=0.612$ であった。したがって、絶対値で表わしたとき三つのテストすべてにおいて、体格の優れた者のほうがよい成績を示す傾向が認めら

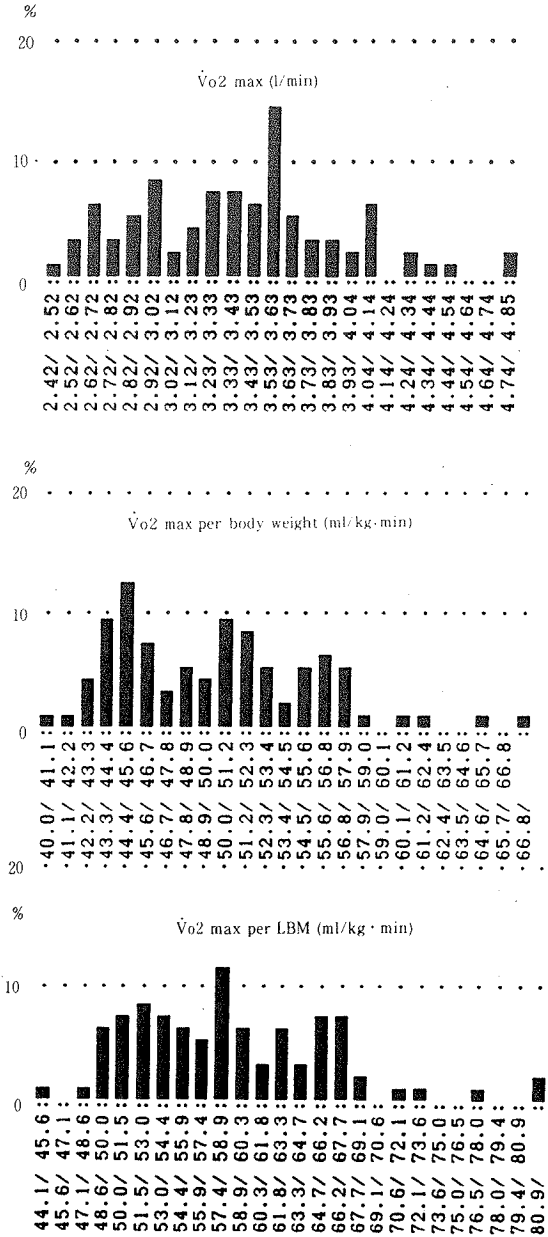


図2 最大酸素摂取量の度数分布図 (n=91)

れ、 $\dot{V}O_2\max$ は体重と、無酸素パワーはLBMと特に強い関係をもつことが示された。

図5に $\dot{V}O_2\max$ と無酸素パワー(a)、 $\dot{V}O_2\max$ と脚筋力(b)、無酸素パワーと脚筋力(c)と、三つの変数を絶対値で表わしたときの関係を示した。三つの変数の間の相関係数は0.351, 0.339, 0.550と

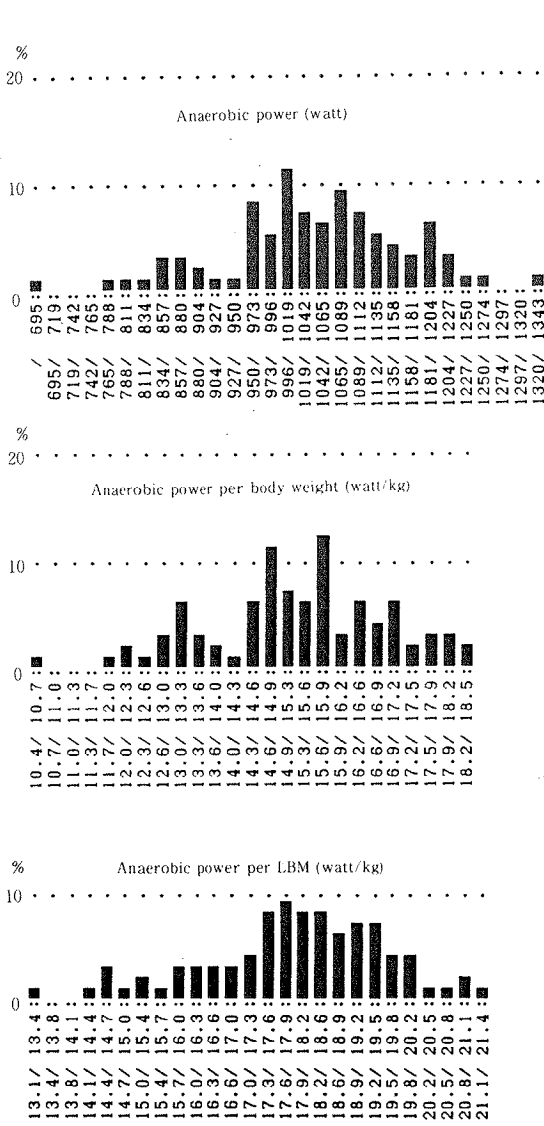


図3 無酸素パワーの度数分布図 (n=91)

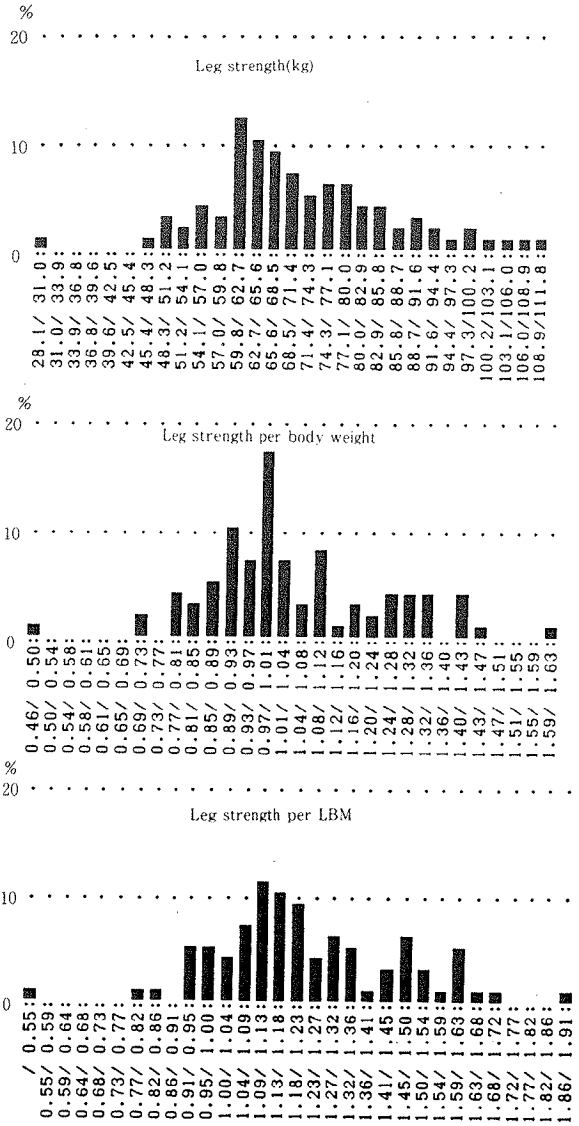


図4 脚筋力の度数分布図 (n=91)

表3 最大酸素摂取量、無酸素パワー、脚筋力と体重、LBMとの相関係数 (n=91)

	体重	LBM
最大酸素摂取量	0.682	0.567
無酸素パワー	0.461	0.612
脚筋力	0.417	0.391

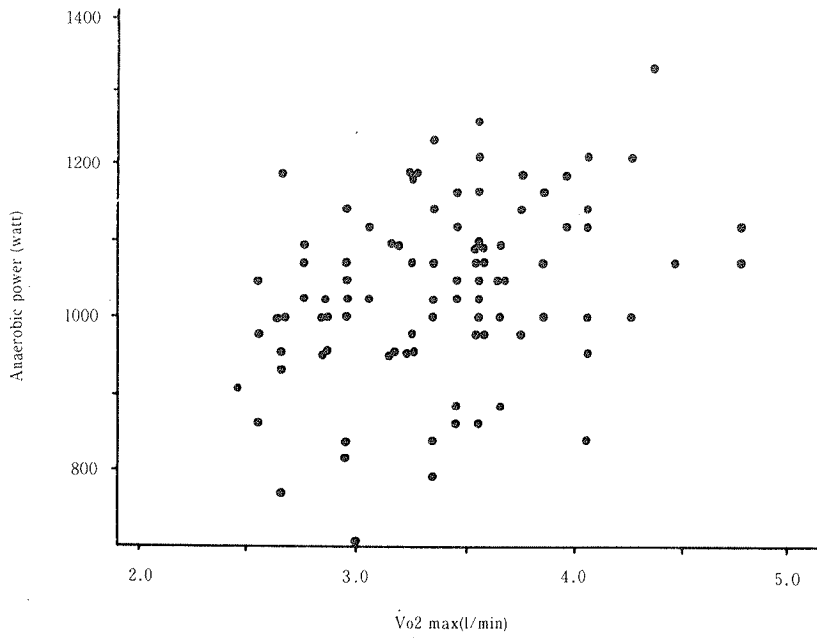


図5 絶対値で表わしたときの
(a) 最大酸素摂取量と無酸素パワーの関係
($r=0.351$, $p<0.001$)

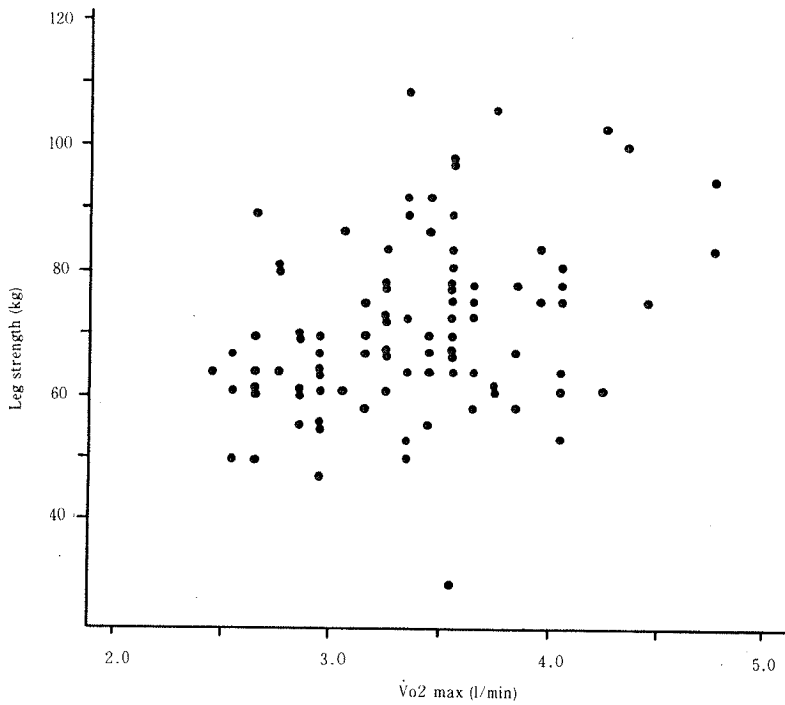


図5(b) 最大酸素摂取量と脚筋力の関係
($r=0.339$, $p<0.001$)

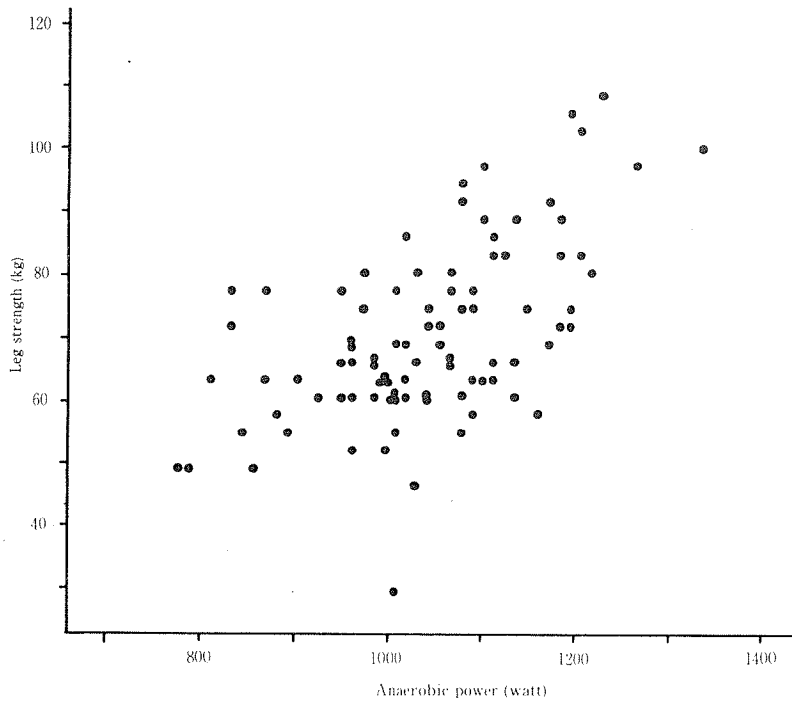


図 5(c) 無酸素パワーと脚筋力の関係
($r=0.550$, $p<0.001$)

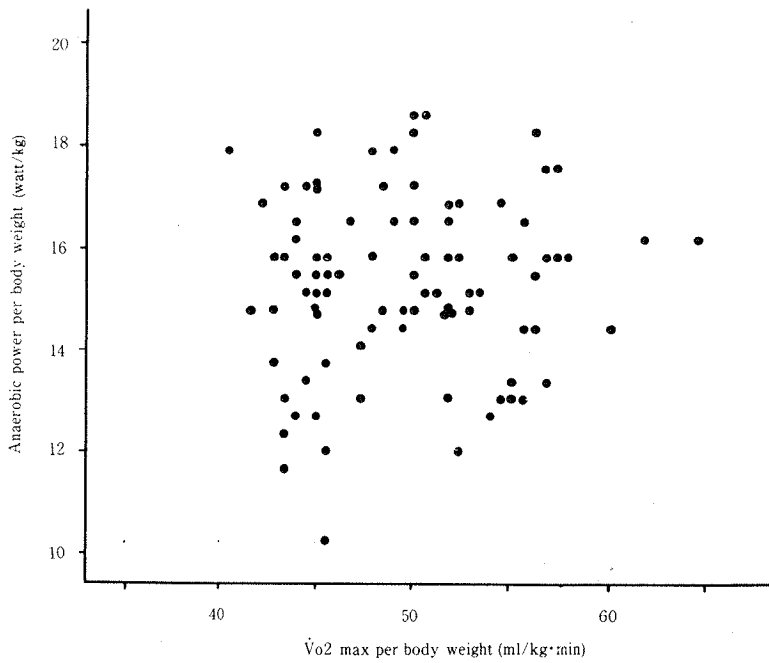


図 6 体重当りで表わしたときの
(a) 最大酸素摂取量と無酸素パワーの関係
($r=0.037$)

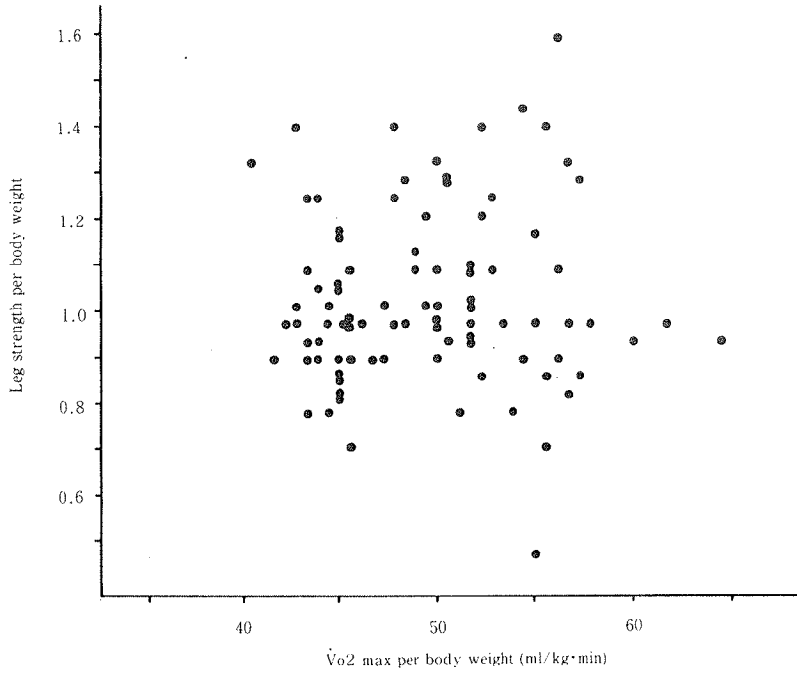


図6(b) 最大酸素摂取量と脚筋力の関係 ($r=0.099$)

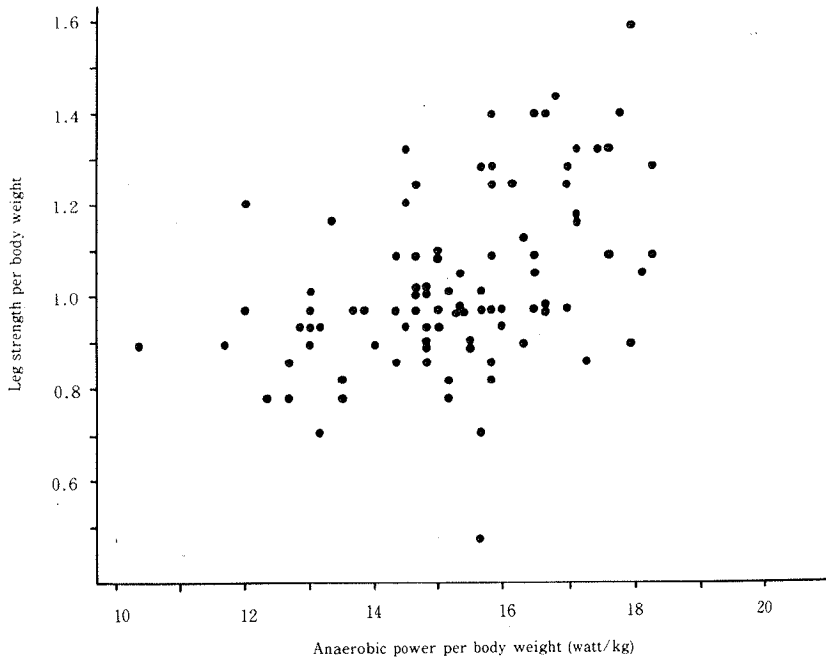


図6(c) 無酸素パワーと脚筋力の関係
($r=0.434$, $p<0.001$)

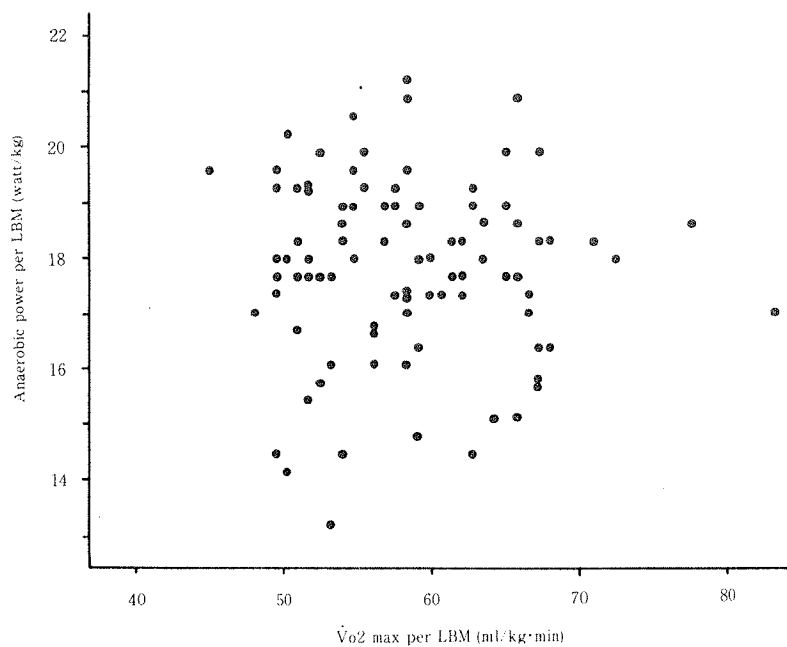


図7 LBM 当りで表わしたときの
(a) 最大酸素摂取量と無酸素パワーの関係
($r = -0.014$)

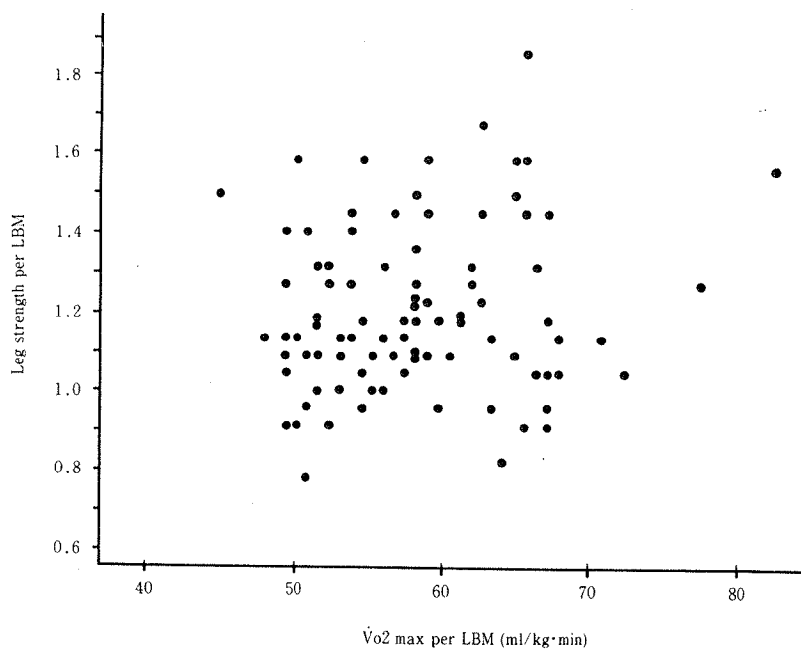


図 7(b) 最大酸素摂取量と脚筋力の関係 ($r = 0.176$)

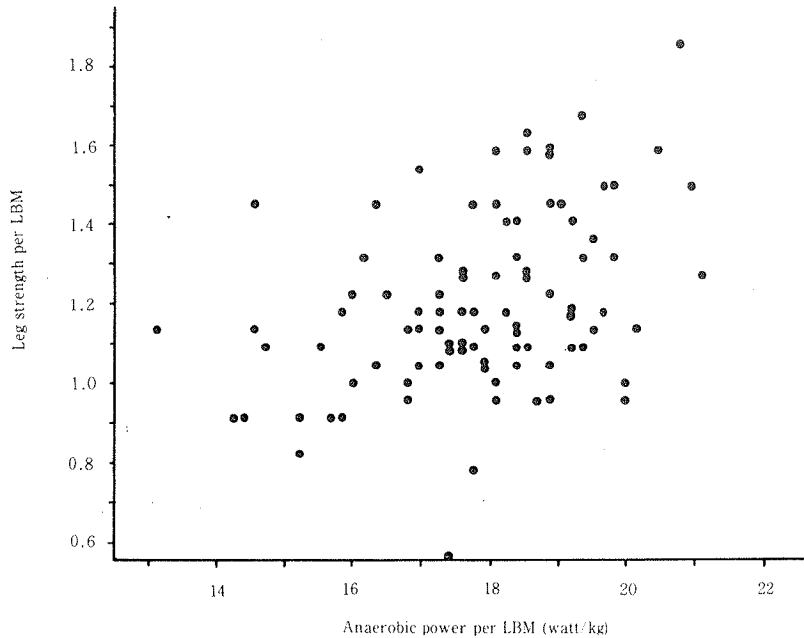


図 7(c) 無酸素パワーと脚筋力の関係
($r=0.401$, $p<0.001$)

すべて0.1%水準で有意であったが、無酸素パワーと脚筋力の間には特に強い関係が認められた ($r=0.550$)。次に、三つの変数を体重当りで表わしたときの関係を図 6(a), (b), (c)に示した。体重当りで表わすと、絶対値のときには有意な相関係数が認められた $\dot{V}O_2\max$ と無酸素パワー、 $\dot{V}O_2\max$ と脚筋力との相関係数がそれぞれ0.037, 0.099と零に近くなり、相関関係がみられなくなったが、無酸素パワーと脚筋力の間には絶対値の場合と同様に0.1%水準で有意な相関係数 ($r=0.434$) が得られた。また、LBM 当りで表わしたときも、三つの変数の間の関係は体重当りのときと同様であった (図 7(a), (b), (c))。

考 察

行動体力の測定の歴史は比較的長く、走、跳、投、懸垂の能力を中心とした基礎的な運動の型を取り入れた検査はすでに大正末期から全国的規模で行なわれていた。その後、東京オリンピックを前にした国際的な体力科学の発展を背景に、体力は筋力、パワー、敏捷性、柔軟性、平衡性、持久

性あるいは調整力という要因に分類されるようになり、握力、背筋力、垂直跳、肺活量、体前屈、サイドステップという測定法が定着し、現在に至っている。これらの測定法のもつ簡便性が普及につながったが、このような要因に分けることの意義が明確にされないままになっているようである。

一方、研究の場においては、有酸素性作業能力、無酸素性作業能力の測定が一般化しており、研究の成果をフィールドで応用するために、本研究の有酸素性作業能力テスト、無酸素性作業能力テスト、脚筋力テストが考え出されたのである。

有酸素性作業能力検査は二段階漸増負荷方式とし、第一段階をおよそ45~60% $\dot{V}O_2\max$ 、第二段階はおよそ60~65% $\dot{V}O_2\max$ に相当する負荷となっている¹⁶⁾。このように最大下作業を課し、このときの $\dot{V}O_2$ -HR関係から $\dot{V}O_2\max$ と推定する方法は、すでにRyhming¹⁴⁾、Åstrand¹⁾、Margaria⁹⁾がノモグラムを開発しているが、本法の特徴は電気ブレーキ式の自転車エルゴメータを使用することにより、負荷が正確に設定できるようになって、

仕事量の規定が厳密になったこと, および, 心拍数の監視により, 運動能力の劣る者や中高年者に対しても安全な測定を行えるということである。本検査による最大酸素摂取量の再現性については, 日内変動の場合, 標準偏差は平均値の約5%¹⁶⁾であり, 信頼度の高いことが示されている。また, トレッドミル走によって得た最大酸素摂取量との間には $r=0.667$ と5%水準で有意な相関係数が認められている³⁾。

無酸素性作業能力については Margaria らの階段駆け上がりによる報告¹⁰⁾では, 男子競技者で体重当り $2.0\text{kg}\cdot\text{m}/\text{秒}$ 前後, 非競技者で $1.5\text{kg}\cdot\text{m}/\text{秒}$ 前後となっているが, これらはそれぞれ $19.6\text{watt}/\text{kg}$ と $14.7\text{watt}/\text{kg}$ に相当し, 非競技者の値は本研究において得られた値(平均値 $15.3\text{W}/\text{kg}$)とほぼ一致していた。日内変動については標準偏差は平均値の3%と報告されており¹⁵⁾, 信頼性の高い検査であることが示唆される。また, 運動時間が11秒間と短かいため乳酸産生やそれによる筋肉痛などを起こすことがなく, 数分を経ないで回復するという点で, 非常に安全性の高いテストであるといえる。

脚筋力テストは, 大腿四頭筋を主とした脚伸筋群の等尺性筋力を仰臥位で測定するものである。姿勢が厳密に規定され, またロードセル型の筋力計を用いているために, 筋長の変化がおこらず等尺性収縮の状態での筋力を測定できるという点で, 握力や背筋力テストより精密な測定方法であると考えられる。

有酸素性作業能力テスト, 無酸素性作業能力テスト, 脚筋力テストによって得られた最大酸素摂取量, 無酸素パワー, 脚筋力をそれぞれ絶対値でみた場合, 三つの変数の間には互いに有意な相関係数が見出され, また, これらの変数と体重, LBM の間にやはり有意な相関係数が見出された。しかし, 体重当たり, あるいはLBM 当りで表わしたとき, 最大酸素摂取量と脚筋力, 最大酸素摂取量と無酸素パワーの間の有意な相関関係は見られなくなったが, 脚筋力と無酸素パワーの間の有意な関係は変わらなかった。

したがって, 本研究において試行した, 有酸素

性作業能力テストと無酸素性作業能力テストを実施し, 体重あるいはLBM 当りで表わしてみると, 独立したエネルギー産生機構の過程を評価することであると考えられ, エネルギー産生機構に基づく体力テストとして意味のある方法であるといえよう。また, 脚筋力という指標は, エネルギー産生機構からみた場合, 無酸素パワーとかなり重複する要素をみるものといえてよいであろう。つまり, これらの二つのテストは, おおまかにいうと, いわゆる瞬発力をみるものであるということであるが, 静的・動的という運動形態の差を考慮すると, 遅い収縮速度での筋力発揮をみるのが, 脚筋力テストであり, 無酸素性作業能力テストを行うことによって, 速い収縮速度での筋力発揮を評価できると考えられる。

まとめ

体力科学の進歩によって明らかにされた, 行動体力の基礎となるエネルギー産生機構の概念に基いた体力テストとして, 次の三つの検査を考案した。

- 1) 有酸素性作業能力テスト——電気ブレーキ式自転車エルゴメータを用い, 100watt と 150watt の最大下作業を4分間ずつ課し, 心拍応答から最大酸素摂取量を推定する。
- 2) 無酸素性作業能力テスト——電気ブレーキ式自転車エルゴメータを用い, 一定トルク (7kp) で11秒間の全力ペダリングを行い, 機械的パワーのピーク値を測定し, 無酸素パワーを求める。
- 3) 脚筋力テスト——仰臥位での脚伸展の等尺性筋力を両脚について2回ずつ測定し, それぞれよいほうの値の平均値を算出して脚筋力を求める。

被検者として, 健康な男子学生 (19-23歳, 体育学専攻) 91名に対して, 上記の三つのテストおよび身体計測を行なった。その結果, 最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2\text{max}}$) は $3.43 \pm 0.51\text{ l}/\text{分}$, 体重当り $50.1 \pm 5.6\text{ ml}/\text{kg}\cdot\text{分}$, 無酸素パワーは $1042 \pm 116\text{ watt}$, 体重当り $15.3 \pm 1.6\text{ watt}/\text{kg}$, 脚筋力は $71.4 \pm 14.4\text{ kg}$ という平均値および標準偏差が得ら

れた。

有酸素性作業能力, 無酸素性作業能力および脚筋力の三つのテストの成績を絶対値で表わして関係をみると, それぞれ有意な相関係数が得られた ($r=0.351\sim 0.550$, $P<0.001$)。体重あるいはLBM 当りで表わした場合, $\dot{V}O_2\max$ と他の二つの変数の相関々係は見られなくなったが, 無酸素パワーと脚筋力の間には同様に有意な相関々係が認められた ($r=0.434$, 0.401 , $P<0.001$)。

その結果, 有酸素性作業能力テストと無酸素性作業能力テストは互いに独立したエネルギー産生因子を反映するものであり, 一方, 無酸素性作業能力テストと脚筋力テストはエネルギー産生機構の面からは同一の因子をみるものであるが, 同じ無酸素性のエネルギーであっても, 動的・静的という運動様式の違いから, 収縮速度の速い時と遅い時という異なった運動様式の無酸素性エネルギーの発現をみるものであるということが示唆された。

参考文献

- 1) Åstrand, I. : Aerobic work capacity in men and women with special reference to age. Acta Physiol. Scand. 49 (Suppl. 169), 1960.
- 2) Brožek, J., F. Grande, J. T. Anderson and A. Keys : Densitometric analysis of body composition : Review of some quantitative assumptions. Ann. N. Y. Acad. Sci. 110 : 113-140, 1963.
- 3) 深代泰子, 深代千之, 芝山秀太郎 : 2段階漸増負荷法による最大酸素摂取量の評価, 人類動態報 50号 印刷中.
- 4) Ichikawa, T. and M. Miyashita : Aerobic power of Japanese in relation to age and sex. Hung. Rev. Sports Med. 1 : 243-253, 1980.
- 5) 猪飼道夫 編著 : 身体運動の生理学. 第1版, 杏林書院, 1982, 281-354頁.
- 6) 生田香明, 猪飼道夫 : 自転車エルゴメーターによる Maximum Anaerobic Power の発達の研究. 体育学研究17(3) : 151-157, 1972.
- 7) 川初清典, 猪飼道夫 : ヒトの脚パワーと加速度要因(I). 体育学研究16(4) : 223-232, 1972.
- 8) 川初清典, 猪飼道夫 : ヒトの脚パワーと加速度要因(II). 体育学研究17(1) : 17-24, 1972.
- 9) Margaria, R. 著, 金子公有訳 : 身体運動のエネルギー. 第1版. ベースボールマガジン社. 1978. 57-63頁.
- 10) Margaria, R., P. Aghemo and E. Rovelli : Measurement of muscular power (anaerobic) in man. J. Appl. Physiol. 21 : 1662-1664, 1966.
- 11) Nagamine, S. and S. Suzuki : Anthropometry and body composition of Japanese young men and women. Human Biol. 36: 8-15, 1964.
- 12) 根本勇, 金久博昭, 船渡和男, 中村好男, 宮下充正 : 日本人一流スピード・スケート選手の体力. 体力科学31(2) : 139. 1982.
- 13) 小田伸午, 金久博昭, 宮下充正 : ラグビー選手の無酸素的作業能. 東京体育学研究 7 : 83-88, 1980.
- 14) Ryhming, I. : A modified Harvard Step Test for the evaluation of physical fitness. Arbeit Physiol. 15 : 235, 1953.
- 15) 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.
- 16) 芝山秀太郎 : 深代泰子 : 体力テストの現代的意義. 体育の科学 35(6) : 432-436, 1985.