

各種間接法による最大酸素摂取量推定値の妥当性

大倉 三洋, 中屋 久長, 山本 双一, 小嶋 裕,
酒井 寿美, 坂上 昇
高知リハビリテーション学院

要 旨

一般健常者を対象に体力づくりを行うとき、最もその基盤となる最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2\max$) を推定することが極めて重要である。そこで健常男子学生 (平均年齢 21 ± 1 歳) 10名を対象に、自転車エルゴメータを用いて $\dot{V}O_2\max$ を実測するとともに、 $\dot{V}O_2\max$ 推定のための既存の各種間接法の妥当性について検討した。

1) 今回測定した被験者の $\dot{V}O_2\max$ は $32.81 \sim 44.72 \text{ ml/kg/min}$ (平均 $38.90 \pm 4.7 \text{ ml/kg/min}$)、最大運動時の HR は $182 \sim 196 \text{ beats/min}$ (平均 $188 \pm 1 \text{ beats/min}$) であり、同年齢の平均的値であった。

2) 自転車エルゴメータを用いた、単一の作業負荷における HR 値から $\dot{V}O_2\max$ を推定する Astrand と Fox の方法では Astrand の方法が実測値との相関が高く、推定誤差率、標準偏差も小さく推定精度が高かった。

3) 2～3つの複数の作業負荷における HR 値から $\dot{V}O_2\max$ を推定する Margaria とエルゴサイザーの方法ではエルゴサイザーの方法が実測値との相関が高く、推定誤差率、標準偏差も小さく推定精度が高かった。

4) 単一の作業負荷と複数の作業負荷では簡便さという点では問題があるが、複数の作業負荷から $\dot{V}O_2\max$ を推定する方法が推定誤差率、標準偏差が小さく、より妥当性が高いことが示唆された。

キーワード：全身持久力、最大酸素摂取量、間接測定法

The Validity of the Estimated Maximal Oxygen up take by Different Indirect Methods

Mitsuhiro Okura, Hisanaga Nakaya, Soichi Yamamoto,
Yutaka Ojima, Sumi Sakai, Noboru Sakanoue

Department of Physical Therapy, Kochi Rehabilitation Institute.

Abstract

Although maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_2\max$) is considered the single best determinant of one's cardio-respiratory endurance or aerobic capacity, the direct measurement of these attributes requires elaborate equipment, trained personnel, special knowledge, and/or a maximal effort on the part of the subject who is tested. In addition, the measurement is time consuming.

The current investigation was designed to examine the validity of aerobic capacity estimated from submaximal cycling exercise and step tests.

The subjects tested were 10 physically active men aged 19 to 24 years (21 ± 1).

Indirect $\dot{V}O_2\max$ tests were selected from those proposed by Astrand and Ryhming, Fox, and Siconolfi et al., and elgosaizar methods, and Margaria et al. (step test). The $\dot{V}O_2\max$ values estimated by these methods, with the exception of the Fox method, were found to have small errors when compared to the direct measurement of $\dot{V}O_2\max$.

The $\dot{V}O_2\max$ values estimated by the submaximal work at one work rate were found to have large errors when compared to the submaximal work at two or three rates of work.

Our findings suggest that elgosaizar methods be a better aerobic capacity test than other indirect $\dot{V}O_2\max$ tests.

Key words: Cardio-respiratory endurance, $\dot{V}O_2\max$, Indirect $\dot{V}O_2\max$

1. はじめに

近年、医療技術の進歩により、わが国の平均寿命は80歳を越え世界の最長寿国となった。

このような状況下で理学療法の職域も、病院から地域へ、治療から予防へと拡大してきており、われわれ理学療法士も地域住民をはじめ一般健常者の健康づくり、体力づくりにかかわる機会も多くなってきている。

これらの健康・体力づくりの中で最も重要視されている体力要素の一つが、全身持久力（呼吸・循環機能）である。

全身持久力の指標としては、最大酸素摂取量（以下 $\dot{V}O_2\text{max}$ と略す）が国際的にも広く用いられており、個人の体力レベルの把握、運動処方の際のトレーニング強度の決定、トレーニング効果判定などのよりどころとなっていることは周知の事実である。

しかし、 $\dot{V}O_2\text{max}$ を直接測定（ $\dot{V}O_2\text{max}$ 直接法）

するためには高価な実験設備や高度な測定技術が必要であり、限られた場所でしか測定できないことや、被験者を疲労困憊（all-out）まで追い込むため精神的・肉体的負担が大きく、不特定多数の人々を対象とした体力測定や動機づけの弱い若年者、心疾患等に対する潜在的な危険因子が多い中高年者および疾病者の測定にはおのずと限界がある。そこで、最大下運動では、心拍数（以下HRと略す）と酸素摂取量（以下 $\dot{V}O_2$ と略す）の間に直線関係が認められることを利用し、最大下運動時のHRから $\dot{V}O_2\text{max}$ を推定（ $\dot{V}O_2\text{max}$ 間接法）しようとするÅstrandとRhymingの方法、Margaria, Fox, Siconolfi, エルゴサイザー法など多くの間接法による $\dot{V}O_2\text{max}$ の測定が試みられている。また手軽さ、安全性という面から、これらの間接法が実際によく用いられている。

今回、これら $\dot{V}O_2\text{max}$ の間接測定法の妥当性、問題点について比較検討したので報告する。

表1 被検者の身体的特性

	age (years)	body height (cm)	body weight (kg)
mean ± SD	20 ± 1	170 ± 5	78 ± 12
range	19 ~ 24	164 ~ 180	53 ~ 90

n=10

表2 $\dot{V}O_2\text{max}$ 測定時における呼吸循環応答の最大値

被検者	$\dot{V}O_2\text{max}$ 実測値 ml/kg/min	換気量 l/min	心拍数 beats/min	呼吸 交換比	運動時間
K.O	36.83	115.9	183	1.20	10' 30"
H.N	39.34	134.1	186	1.22	13' 28"
Y.S	32.81	126.1	189	1.33	12' 39"
M.T	44.53	125.3	182	1.24	12' 46"
S.Y	34.71	134.5	184	1.25	13' 03"
H.S	44.72	129.3	184	1.23	11' 04"
N.N	30.99	101.8	196	1.25	10' 59"
M.I	44.33	139.1	186	1.29	13' 13"
Y.A	41.04	117.1	191	1.16	13' 06"
A.N	39.66	120.4	190	1.28	13' 13"
平均	38.90	124.4	188	1.25	12' 36"
SD	4.71	10.4	4	0.05	1' 01"

n=10

2. 方法

1) 被検者

被検者は、19～24歳（平均20±1歳）の健常男子学生10名を対象に行った（表1）。

2) 直接法による $\dot{V}O_2\max$ の測定

運動負荷は電気制動式自転車エルゴメータ（コンビ製232C-XL）を用いて、25Wの負荷で5分間のウォーミング・アップを行わせ後、25Wで2分間、以後毎分25Wの漸増負荷法により疲労困憊（all-out）まで行なわせた。

運動中の酸素摂取量、換気量、呼吸交換比は、自動呼吸代謝装置（ミナト医科学製RM300）を用いて、breath-by-breath法により測定した。

心拍数の測定はテレメータ心電計（日本電気三栄製カルディオスーパー2E31A）を用いて双極誘導により導出し、心電波形の同期信号を自動呼吸代謝装

置に入力し1呼吸間の平均心拍数を測定した。

また、測定したデータはパーソナルコンピュータにより各測定項目を30秒間隔で平均しプリント・アウトさせ、つぎの3つのクライテリアの内2つ以上が満たされていることを条件として $\dot{V}O_2\max$ を決定した。

- ①酸素摂取量のlevelling off
- ②呼吸交換比が1.1以上
- ③心拍数が180拍/分以上

3) 間接法による $\dot{V}O_2\max$ の測定法

- ①Astrand-Rymingの方法（1954）¹⁾

Astrand法は、 $\dot{V}O_2\max$ の間接測定法の先駆的な試みであり、極めてポピュラーな間接法として今日でも高く評価されている。この方法は、最大下作業時の心拍数が男子では128～154拍/分、女子では138～164拍/分となる負荷を設定し、6分間の固定負荷で自転車エルゴメータを50rpmで駆動させ、5分～6分

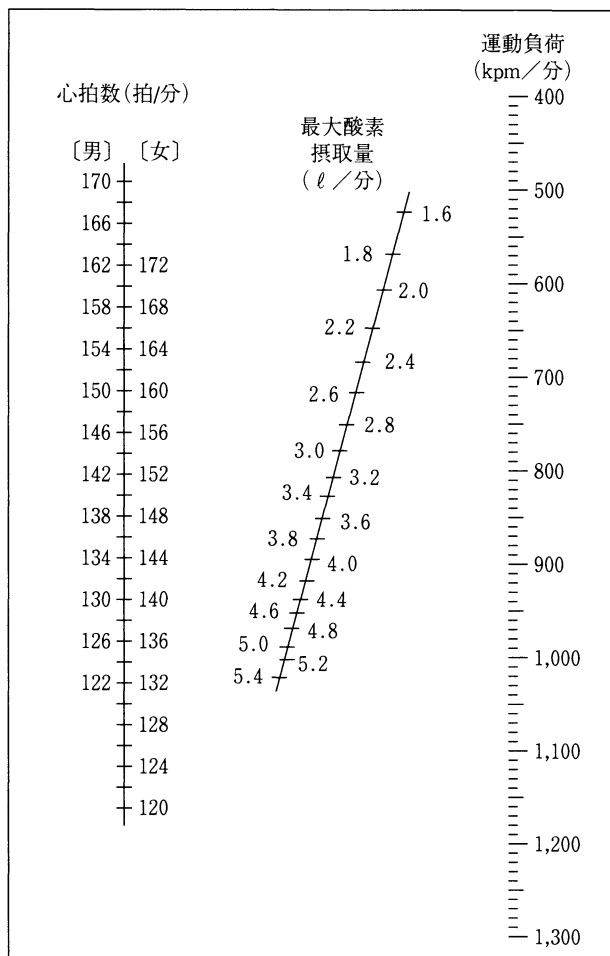


図1 Astrand-Rymingのノモグラム

目の1分間の仕事量とHRからノモグラムを用いて、 $\dot{V}O_{2max}$ を推定する方法である(図1)。

②Margariaらの方法(1965)

Margaria²⁾らは $\dot{V}O_{2max}$ の推定値の信頼性を高めるためには、HRと $\dot{V}O_2$ との関係を最大下の2つの作業強度について求めるのがよいと考え、40cmの踏み台を用い昇降運動を1分間15回と25回のテンポで行ったときのHRと $\dot{V}O_2$ の関係から $\dot{V}O_{2max}$ を推定する方法を考案した。すなわち、2つの作業テンポにおけるHRと $\dot{V}O_2$ をそれぞれ f' 、 f'' および $\dot{V}'O_2$ 、 $\dot{V}''O_2$ 、最高心拍数を f_{max} とし、次式より $\dot{V}O_{2max}$ を算出する方法である。

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

③Foxの方法(1973)³⁾

Astrand法が発表されて以来種々の推定方法が公表されたが、それらは方法論的にやや簡便性に欠けるくらいがあった。Foxはより簡便な方法として、自転車エルゴメータを用い5分間150W、60rpmの負荷で駆動させ4分目から5分目の1分間のHRから次式より $\dot{V}O_{2max}$ を算出する方法を考案した。

$$\dot{V}O_{2max} = 6300 - 19.26 * HR$$

④Siconolfiの方法(1982)⁴⁾

Astrand法の最大の欠点は、被験者が大学生という限られた年齢層であることからSiconolfiらは、Astrand法で求めた $\dot{V}O_{2max}$ に年齢補正を加える式として、次式を考案した。

$$\text{男子: } \dot{V}O_{2max} = 0.348(X1) - 0.035(X2) + 3.011$$

$$\text{女子: } \dot{V}O_{2max} = 0.302(X1) - 0.019(X2) + 1.593$$

$$X1: \text{Astrand法より求めた } \dot{V}O_2$$

$$X2: \text{年齢}$$

⑤エルゴサイザー法

マイクロコンピュータ内臓の電気制動製の自転車エルゴメータ(津山金属製エルゴサイザー)により25W、

50W、75Wの各負荷で3分間駆動させ、得られたHRと仕事量の関係からコンピュータにより自動的に $\dot{V}O_{2max}$ を算出する方法である。

また、各間接法における負荷がどの程度の運動強度であるかを検討する目的で各測定時の $\dot{V}O_2$ を測定した。

4) データー処理

平均値の差の検定は、一元配置の分散分析により行い、有意差の認められる場合はTukey post hoc testを適用した。

$\dot{V}O_{2max}$ の実測値と各間接法により得られた $\dot{V}O_{2max}$ 値の関係については、ピアソンの積率相関係数により検討した。また、(推定値-実測値)÷実測値×100により推定誤差率を算出し、間接法による $\dot{V}O_{2max}$ の推定精度を比較検討した。統計的有意水準は1%および5%未満とした。

3. 結果

1) 直接法による $\dot{V}O_{2max}$ 測定

自転車エルゴメータによる最大運動テスト時に得られた主要な呼吸循環応答の最大値を表2に示した。

$\dot{V}O_{2max}$ は32.81~44.72ml/kg/minの範囲であり平均38.90±4.71ml/kg/minであった。最大運動時のHRは182~196beats/min平均188±4beats/minであった。また呼吸交換比は1.16~1.33の範囲であり平均1.25±0.05と全員が1.1を上回っていた。これらの値は、いずれも $\dot{V}O_{2max}$ 判定のためのクライテリアを満足するものであった。また、10名中6名の被験者に $\dot{V}O_2$ のlevelling offが認められた。

2) 間接法による $\dot{V}O_{2max}$ の測定

①Astrandの方法

Astrand法における自転車エルゴメータの運動強度は600~1200kpm/minであり、測定時HRは134~160beats/min平均151±12beats/minであった。また測定時の $\dot{V}O_2$ は13.24~31.40ml/kg/min平均25.68±5.03ml/kg/minであり、これは $\dot{V}O_{2max}$ の相対的な割合からみると約66%の負荷であった。

Astrand法による $\dot{V}O_2\max$ 推定値は平均 44.60 ± 7.87 ml/kg/minであり、実測値との差は平均 5.70 ± 4.60 ml/kg/minで、有意差は認められなかった。実測

値との推定誤差率は $-1.6 \sim 32.4\%$ 平均 $14.2 \pm 10.8\%$ であった。また実測値とAstrand法の間には $r=0.849$ と高い相関関係が認められた(表3, 図2)。

表3 $\dot{V}O_2\max$ 実測値と各種間接法における推定値との比較

$\dot{V}O_2\max$ 間接法	$\dot{V}O_2\max$ 推定値 ml/kg/min	実測値との差 ml/kg/min	推定誤差率 %	実測値との 相関
Astrand	44.60 ± 7.87	5.70 ± 4.60	14.2 ± 10.8	0.849**
Margaria	43.01 ± 6.97	4.11 ± 4.57	10.5 ± 10.9	0.821**
Fox	49.90 ± 7.10	$11.01 \pm 4.64^{**}$	28.5 ± 12.6	0.763*
Siconolfi	48.67 ± 6.83	$9.78 \pm 4.27^{**}$	25.3 ± 11.6	0.786**
エルゴサイザー	41.96 ± 7.53	3.70 ± 4.41	9.2 ± 10.4	0.847**

n=10

*p < 0.05 **p < 0.01

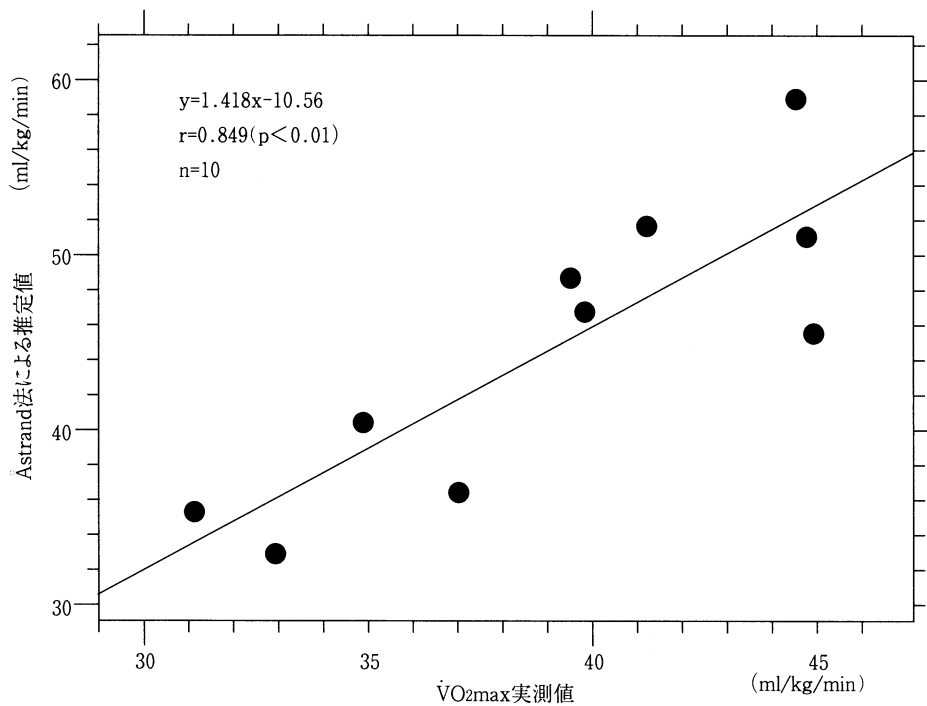


図2 $\dot{V}O_2\max$ 実測値と推定値の相関 (Astrand法)

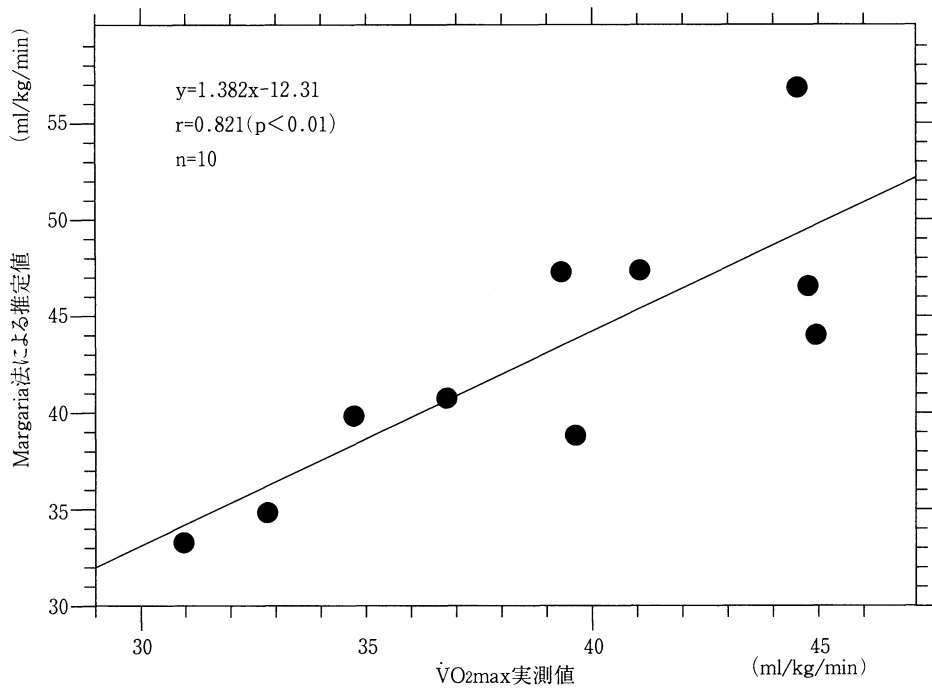


図3 $\dot{V}O_{2max}$ 実測値と推定値の相関 (Margaria法)

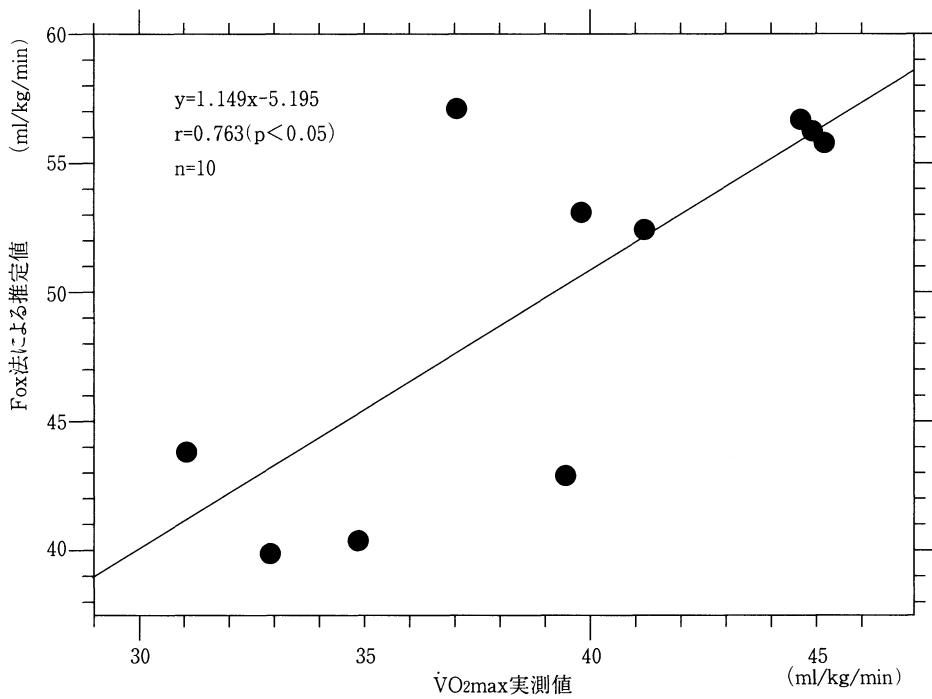


図4 $\dot{V}O_{2max}$ 実測値と推定値の相関 (Fox法)

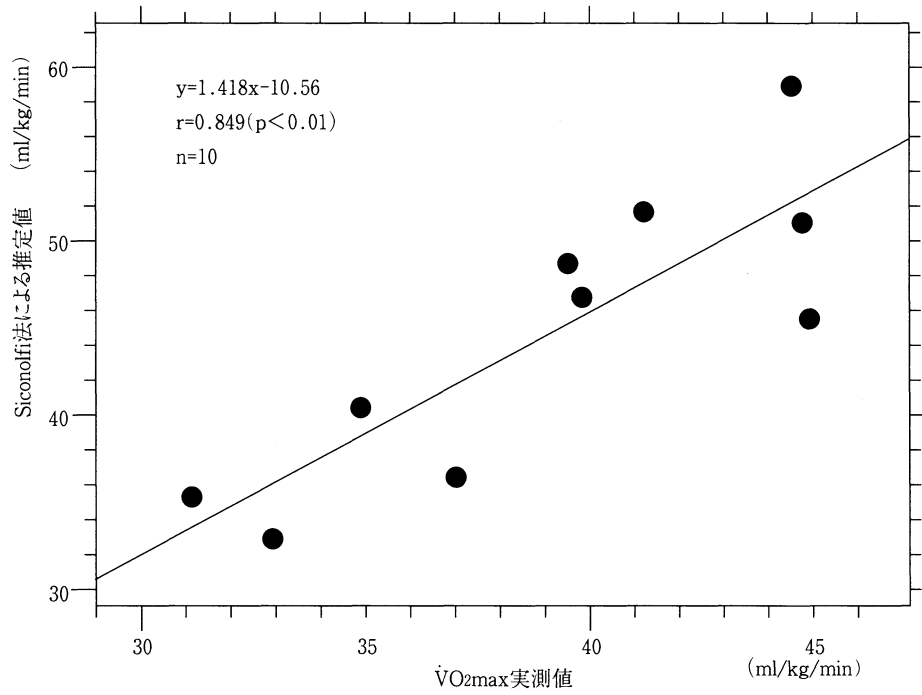


図5 $\dot{V}O_2\text{max}$ 実測値と推定値の相関 (Siconolfi法)

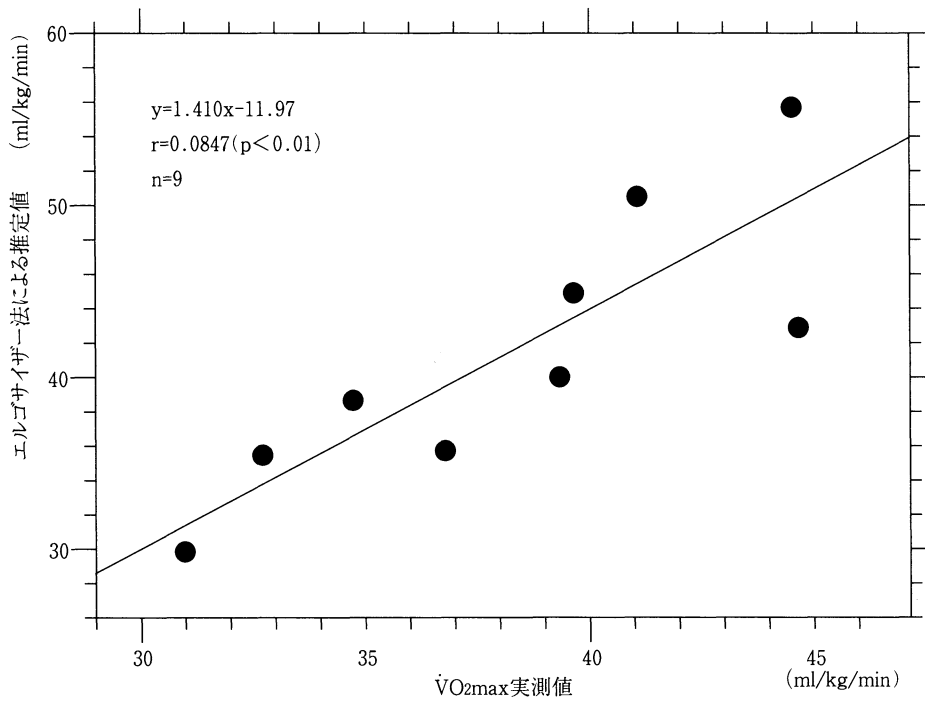


図6 $\dot{V}O_2\text{max}$ 実測値と推定値の相関 (エルゴサイザー法)

②Margariaらの方法

Margaria²⁾らは、運動様式に踏み台昇降を用い、2つの運動強度が100~150 beats/minの範囲になるように選択するのが望ましく、便宜的には高さ40cmの踏み台運動を15回/分(負荷1)および25回/分(負荷2)の頻度で行えばよいとし、このときの運動強度は22ml/kg/minおよび32ml/kg/minの酸素摂取量に相当すると述べている。今回の測定において負荷1での $\dot{V}O_2$ 、HRの平均値は20.55±1.07ml/kg/min, 123±14beats/min, 負荷2では30.12±1.67ml/kg/min, 158±15beats/minであり、Margariaらの負荷強度と同程度の運動強度であった。これらは $\dot{V}O_{2max}$ の相対的な割合で見ると負荷1では54% $\dot{V}O_{2max}$, 負荷2では79% $\dot{V}O_{2max}$ の運動強度であり、今回測定した間接法の負荷としては最も高い値を示した。

$\dot{V}O_{2max}$ の推定値は33.33~53.55ml/kg/min平均43.59±7.97ml/kg/minであった。また実測値との差は平均4.69±5.62ml/kg/minで実測値との間に有意差は認められなかった。実測値との推定誤差率は、-3.4~31.1%平均10.5±10.9%であった。また実測値とMargaria法の間には $r=0.821$ と高い相関関係が認められた(表3, 図3)。

③Foxの方法

Fox法における運動負荷時4~5分目の1分間の $\dot{V}O_2$ は平均25.54±3.56ml/kg/min, HRは平均146.1±11.9beats/minであり、66% $\dot{V}O_{2max}$ の運動強度であった。

$\dot{V}O_{2max}$ 推定値は39.69~57.45 ml/kg/min平均49.90±7.10ml/kg/minであり、実測値との差は平均11.01±4.64ml/kg/minで実測値との間に有意差($p<0.01$)が認められた。実測値との推定誤差率は、8.3~56.0%平均28.5±12.6%であった。また実測値とFox法の間には $r=0.763$ と比較的高い相関関係が認められた(表3, 図4)。

④Siconolfiの方法

Astrand法により得られた $\dot{V}O_{2max}$ の推定値を

Siconolfiの式を用いて補正すると平均48.67±6.83ml/kg/minであった。実測値との差は平均9.78±4.27ml/kg/minで実測値との間に有意差($p<0.01$)が認められた。推定誤差率は8.1~52.6%, 平均25.3±11.6%であった。また、実測値と $\dot{V}O_{2max}$ の推定値の間には $r=0.786$ と比較的高い相関関係が認められた(表3, 図5)。

⑤エルゴサイザー法

負荷1(25W)における $\dot{V}O_2$ は平均9.15±1.53ml/kg/minであり、HRは平均93±9beats/minであった。負荷2(50W)では $\dot{V}O_2$ は12.63±1.56ml/kg/min, HRは103±10beats/min, 負荷3(75W)では $\dot{V}O_2$ は16.86±2.18ml/kg/min, HRは119±13beats/minであり、 $\dot{V}O_{2max}$ の相対的な割合はそれぞれ25%, 33%, 45% $\dot{V}O_{2max}$ であり $\dot{V}O_{2max}$ の間接的測定法の中では最も軽い負荷であった。

$\dot{V}O_{2max}$ 推定値は35.8~60.9ml/kg/min平均42.74±8.89ml/kg/minであった。また実測値との差は平均4.49±5.81ml/kg/minであり有意差は認められなかった。推定誤差率は-2.3~26.3%, 平均9.2±10.4%であり、今回の測定では推定誤差率、標準偏差とも最も小さい値を示した。また実測値とエルゴサイザー法の間には $r=0.817$ と高い相関関係が認められた(表3, 図6)。

4. 考察

1) $\dot{V}O_{2max}$ 推定値と実測値との比較

間接法による $\dot{V}O_{2max}$ 推定は①HRと $\dot{V}O_2$ は最大作業まで直線関係を示す、②最高心拍数の個人差が小さい、③作業強度と $\dot{V}O_2$ の変化に個人差が小さいことなどが前提条件とされる。したがって、間接法の妥当性は、これらの条件がどの程度満たされるかによって決定される。Davies⁵⁾らは、HRと $\dot{V}O_2$ との関係は最大作業付近ではHRの増加率よりも $\dot{V}O_2$ の増加率が高くなる傾向がみられ、HRから $\dot{V}O_{2max}$ を推定する場合、15~20%の推定誤差が生じることを述べている。

また、Wyndham⁶⁾は最高心拍数には多少の個人

差が認められ、この個人差によって生ずる推定誤差は4～7%に相当すると述べている。

その他、HRが気温などの環境条件や身体的・精神的コンディションによっても変化することを考慮すると、HRから $\dot{V}O_2\max$ を間接的に推定する場合は10～20%程度の推定誤差は避けられないと思われる。今回の測定結果においても実測値と推定値の差、推定誤差率についてみると最も小さかったのはエルゴサイザー法で、実測値との差は平均 $3.70 \pm 4.41\text{ml/kg/min}$ 、推定誤差率は平均 $9.2 \pm 10.4\%$ であり、最も大きかったのはFox法で実測値との差は平均 $11.01 \pm 4.64\text{ml/kg/min}$ 、推定誤差率は平均 $28.5 \pm 12.6\%$ と約10～30%の推定誤差が認められた。

2) $\dot{V}O_2\max$ 推定方法の妥当性

$\dot{V}O_2\max$ の間接法の妥当性は①推定誤差率の平均値が小さく、その標準偏差も小さいこと。②実測値と推定値の相関係数が高いこと。③安全性および精神的・肉体的負担などを考慮すると作業強度あるいはHRともなるべく低いレベルで推定することが望ましい。今回の測定結果を推定誤差率の平均値、標準偏差、相関係数、作業強度面からみると、エルゴサイザー法が推定誤差率、標準偏差とも10%程度であり、実測値との相関も $r=0.821$ と高く、また作業強度も $44.5\% \dot{V}O_2\max$ と低く、今回行った間接法による $\dot{V}O_2\max$ の推定方法の中では最も妥当性が高かった。

3) 作業負荷方法の比較

今回用いた推定方法は単一の作業負荷におけるHR値から $\dot{V}O_2\max$ を推定する方法（Astrand, Siconolfi, Fox法）と2～3つの複数の作業負荷におけるHR値から $\dot{V}O_2\max$ を推定する方法（Margaria法, エルゴサイザー法）である。負荷方法から検討すると、Astrand, Fox法のような単一作業負荷法よりも、Margariaやエルゴサイザー法のような複数の負荷から $\dot{V}O_2\max$ を推定する方法が、推定誤差率が小さく、また用いる作業強度も低いレベルで推定できるように思われた。

また自転車エルゴメータを用いた同じ単一作業負荷であっても、Astrand法では誤差率が $14.2 \pm 10.8\%$ であったのに対し、Fox法では $28.5 \pm 12.5\%$ と今回の推定方法の中で最も大きな誤差率を示したのは、Astrand法では、被験者の体力に応じて $400 \sim 1300\text{kpm/min}$ の範囲で作業強度を決定するのに対し、Fox法では体力に関係なく 150W の固定負荷を用いている。すなわち、Astrand法では作業強度とHRの2変量から $\dot{V}O_2\max$ を推定するのに対し、Fox法ではHRの1変量から $\dot{V}O_2\max$ を推定しているために誤差率が大きくなると考えられる。このことは、単一作業負荷であっても $\dot{V}O_2\max$ に関連する変数を多くすることによって、 $\dot{V}O_2\max$ の推定精度を高めることが可能であることを示唆するものである。

しかし、間接法による $\dot{V}O_2\max$ の測定法は測定が容易に行えることや安全性という点から集団テスト法としては極めて有用であるが10～20%程度の推定誤差は避けられない。したがって $\dot{V}O_2\max$ の推定値から $\dot{V}O_2\max$ の評価やトレーニング効果の判定に用いる場合は推定誤差を十分考慮する必要がある。

引用文献

- 1) Astrand, P-O. and I. Rhyning: A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during submaximal work, J. Appl. Physiol, 7, 218-221, 1954.
- 2) Margaria, R., P. Aghemo, and E. Rovelli: Indirect determination of maximal O_2 consumption in man, J. Appl. Physiol, 20, 1070-1073, 1965.
- 3) Fox, E.L.: A simple accurate technique for predicting maximal aerobic power, J. Appl. Physiol, 35, 914-916, 1973.
- 4) Siconolfi, S.F., Cullimane, E.M., Carleton, R.A. and Thompson, P.D.: Assessing $\dot{V}O_2\max$ in epidemiologic studies: modification of the Astrand-Ryhming test, Med. Sci. Sports Exerc, 14, 335-338, 1982.
- 5) Davies, C.T.M.: Limitations to the prediction of maximum oxygen intake from cardiac frequency

measurements, J. Appl. Physiol, 24,700-706, 1968.

6) Wyndham, C.H.: Submaximal tests for estimating maximum oxygen intake, Can. Med. Asso, J. 96, 736-742, 1967.