最大酸素摂取量と左心室および大動脈形態との関係

高橋 康輝¹⁾ 宮地 元彦²⁾ 藤本 広平¹⁾ 高本 健彦¹⁾
山崎 健¹⁾ 松枝 秀二³⁾ 山元 健太⁴⁾ 柚木 脩²⁾

Maximal oxygen uptake is associated with dimensions in left ventricle and aorta

Kouki Takahashi¹, Motohiko Miyachi², Kouhei Fujimoto¹, Takehiko Takamoto¹,
Ken Yamazaki¹, Shuji Matsueda³, Kenta Yamamoto⁴ and Osamu Yuzuki²

Abstract

Endurance-trained athletes with higher aerobic power ($\dot{V}O_2\text{max}$) have a large-sized left ventricle (LV) and aorta (Ao). We therefore hypothesized that the individual variability of $\dot{V}O_2\text{max}$ can be estimated using resting LV and Ao dimensions. In looking at this question we performed a laboratory-based cross-sectional study to determine the relationship between $\dot{V}O_2\text{max}$, LV dimensions, and Ao dimensions in young subjects with wide ranges of physical activity status. One hundred forty-two healthy young men (20–35 years), who were either sedentary, recreationally active or endurance-trained, participated in the cross-sectional study. Subsequently, a meta-analysis approach was used to collect 28 studies involving 58 groups and 816 subjects. LV and Ao dimensions were determined by echocardiography at supine rest. In the cross-sectional study and meta-analysis, LV end-diastolic diameter (LVEDD) and end-systolic diameter (LVESD), posterior wall thickness (PWT) and inter-ventricular septum thickness (IVST), and Ao diameter (AoD) were positively and significantly correlated with $\dot{V}O_2\text{max}$. When we performed a stepwise regression analysis in the cross-sectional study to determine independent predictors of $\dot{V}O_2\text{max}$, the variables entered were LVEDD, AoD, and PWT, which together explained 60–70% of the variability. Furthermore, we attempted to develop equations for predicting $\dot{V}O_2\text{max}$. Multiple regression analyses using LVEDD, AoD, and PWT as the ex-

1) 川崎医療福祉大学大学院医療技術学研究科健康科学専攻

〒701-0193 岡山県倉敷市松島288

2) 川崎医療福祉大学医療技術学部健康体育学科

〒701-0193 岡山県倉敷市松島288

3) 川崎医療福祉大学医療技術学部臨床栄養学科

〒701-0193 岡山県倉敷市松島288

4) 国立循環器病センター研究

〒565-8565 大阪府吹田市藤白台5-7-1

連絡先 宮地元彦

(独) 国立健康・栄養研究所

〒162-8636 東京都新宿区戸山1-23-1

1. Kawasaki University of Medical Welfare Graduate School, Department of Health Science

288 Matsushima, Kurashiki, Okayama 710-0193

2. Kawasaki University Medical Welfare, Department of Health & Sports Science

288 Matsushima, Kurashiki, Okayama 710-0193

3. Kawasaki University Medical Welfare, Department of Clinical Nutrition

288 Matsushima, Kurashiki, Okayama 710-0193

4. Department of Cardiovascular Dynamics, National Cardiovascular Center Research Institute

5-7-1 Fujishirodai, Suita, Osaka 565-8565

Corresponding author miyachi@nih.go.jp

planatory variables for predicting $\dot{V}O_{2\max}$ yielded the following equations.

$$\dot{V}O_{2\max} (\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}) = 49.2 \text{ LVEDD (mm/kg)} + 27.2 \text{ AoD (mm/kg)} + 43.9 \text{ IVST (mm/kg)} - 2.6$$

These results suggest that the variability of $\dot{V}O_{2\max}$ can be accounted for by differences in both left ventricular and aortic structure. Furthermore, echocardiography at supine-rest was useful for evaluating maximal aerobic power, specifically for young healthy men, who demonstrated a wide range of trained states.

Key words : aerobic power, artery, echocardiography, heart, meta-analysis

(Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 48: 691-703, November, 2003)

キーワード：有酸素性作業能力，動脈，超音波心臓検査法，心臓，メタ解析

I 緒 言

持久的競技者の最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2\max}$) は非活動的な生活習慣を有する人より大きい。また $\dot{V}O_{2\max}$ は持久的なトレーニングによって増加する。これらの生理学的機序として、中枢性と末梢性の要因が関与するとされており、中枢性の要因として心臓（左心室）の機能の向上や形態の変化があげられる（山地，2001）。激しい全身性のトレーニングを行ってきた持久的競技者の心臓は左心室内腔拡大や左心室心筋重量の増大に代表される、いわゆるスポーツ心臓の様相を呈することはよく知られている（Morganroth et al., 1975 ; Adams et al., 1981 ; Rost and Hollmann, 1983 ; Shapiro and Smith, 1983 ; Fagard, 1992）。

さらに近年、我々を含むいくつかのグループが、持久的競技者は非鍛錬者と比較してより太い上行大動脈あるいは大腿動脈を有していること（Wijnen et al., 1991 ; Zeppilli et al., 1995）、持久的トレーニングにより大動脈や大腿動脈の内径が拡大することを報告している（Miyachi et al., 1998 ; Dinunno et al., 2001 ; Miyachi et al., 2001）。大動脈の内径が大きいということは血管コンダクタンスが大きいことを意味しており、運動中における中枢から末梢への血液運搬に好ましい影響を及ぼすと考えられる。

以上の先行研究から、従来から提唱されている左心室の形態に加えて、大動脈の形態も $\dot{V}O_{2\max}$ の個人差に関連していると推測される。そこで本研究では、様々な身体活動・トレーニング水準にある100名を越える健康な青年男性の $\dot{V}O_{2\max}$ と超音波エコー装置で測定された左心室および上行大動脈の形態との関係を横断的実験研究で明らかにし、左心室および上行大動脈の形態から $\dot{V}O_{2\max}$ を推定することが可能か否かを検討することを第一の目的とした。さらに、すでに出版された論文に記述された、 $\dot{V}O_{2\max}$ と超音波エコー装置を用いて測定された心臓及び大動脈形態のパラメーターの平均値を利用してメタ解析を行い、我々の横断的実験の妥当性を確認することを第二の目的とした。

II 方 法

1. 横断的実験研究

1) 被験者

被験者は様々な身体活動レベルを有する健康な青年男子142名とした。被験者の身体的特徴は、年齢：21 ± 2（平均値 ± 標準偏差）歳，身長：173.3 ± 5.7cm，体重：66.6 ± 8.9kgであった。

すべての被験者は肺疾患，心疾患の既往歴がなく，また投薬を受けていないものであった。川崎医療福祉大学倫理委員会の承認のもと，被験者には本研究の目的，方法，危険性を十分に説明し，研究に参加することの同意を得た。

2) 実験手順

胸骨左縁長軸断面Bモード画像

左心室Mモード画像

上行大動脈Mモード画像

図1 超音波エコー画像

すべての被験者の仰臥位安静状態における左心室と上行大動脈の形態を超音波エコー装置で測定した (3) 心臓血管形態の測定を参照)。超音波エ

コー検査の後、 $\dot{V}O_2\text{max}$ を自転車エルゴメーターを用いた負荷漸増法 (4) $\dot{V}O_2\text{max}$ の測定を参照) により測定した。これらの測定で得られた値を回

帰分析等で多変量解析した(5)統計処理を参照)。

3) 心臓血管形態の測定

(1) 左心室形態の測定

左心室の内腔および心室壁の形態を超音波エコー装置(Aloka Color Doppler SSD-870)を使用し、仰臥位安静状態にて測定した。2.5MHzあるいは3.5MHzの探触子を第3—4肋間胸骨左縁にあて、胸骨左縁長軸断面Bモード画像(図1上)を描出し、僧帽弁の拍動が認められ、かつ心室中隔と左心室後壁が明瞭に描出されるようにBモード画像を設定し、左心室内径が最も大きい部分における連続5—10拍のMモード画像を高密度モノクロプリンターを用いて記録した(図1下左)。拡張末期と収縮末期の左室内腔直径と中隔・後壁の厚さを測定し、それぞれの平均値より左心室拡張末期径、左心室収縮末期径、心室中隔厚、左心室後壁厚を求めた。これらの得られた値を体重で補正した(単位, mm/kg)。

(2) 上行大動脈形態の測定

2.5MHzあるいは3.5MHzの探触子を第3—4肋間胸骨左縁にあてて上行大動脈の内壁が明瞭に描出されるよう上行大動脈の胸骨左縁長軸断面Bモード画像を設定し、大動脈弁前尖がわずかに認められる位置で連続5—10拍のMモード画像を記録した(図1下右)。それぞれの拍動の左心室の拡張末期と収縮末期における大動脈内径を測定し、平均値より上行大動脈径を求めた。上行大動脈径も左心室形態と同様に体重で補正した(単位, mm/kg)。

4) $\dot{V}_{O_2\max}$ の測定

$\dot{V}_{O_2\max}$ の測定には自転車エルゴメーター(Monark 818 E)を使用し、プロトコルは120Wから開始し、1分毎に15Wずつ強度を高めていく多段階負荷漸増法で行った。自転車エルゴメーターの回転数は60回転/分とし、測定時間は疲労困憊に至るまでとした。心拍数が170拍以上、もしくは主観的運動強度(RPE; Rating of Perceived Exertion)が18以上となつてから、採気を各負荷強度1分間の後半30秒間行つた。運動強度の増加に対する酸素摂取量の増加と、そのレベリングオフ発現を明確にするため最低でも3

回以上の採気と呼気ガス分析を行つた。被験者は採気開始15秒前にマウスピース(model 2100, HANS Rudolph)とノーズクリップを装着し、呼気ガスが漏れないことを確認してダグラスバッグに集めた。マウスピースとノーズクリップによる採気に慣れていない被験者に対しては一部採気マスクを使用した。呼気ガスの酸素と二酸化炭素の濃度分析は、質量分析器(model WSMR-140, ウェストロン)により行つた。質量分析器は標準ガスで酸素と二酸化炭素の濃度を校正した後に使用した。ガス量とガス温は乾式ガスメーター(model DC-5, 品川製作所)で測定した。心拍数は胸部双極誘導法により心電図テレメーター(日本光電, WEP-7404)で測定した。実験中、心電図と心拍数は常に測定し、心拍数の記録は運動開始から運動終了まで1分毎に行つた。測定時の気圧はフォルタン型水銀指示気圧計(いすず製作所)で測定した。気圧とガス温からSTPD(Standard Temperature Pressure Dry)係数を求め酸素摂取量を標準状態での値に補正した。各負荷強度で得られた酸素摂取量の最大値を体重で補正し $\dot{V}_{O_2\max}$ ($\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)とした。 $\dot{V}_{O_2\max}$ の評価基準は、1) レベリングオフが確認されること、2) 年齢から推定される最高心拍数($220 - \text{年齢} \pm 5$ 拍/分以内)にほぼ達していること、3) 呼吸交換比 $> 1.0 - 1.5$ であること、4) RPEが19あるいは20であること、この4つの指標のうち2つ以上を満たすものを $\dot{V}_{O_2\max}$ とした(山地, 2001)。尚、本実験では全ての被験者がこの条件を満たしていた。

5) 統計処理

すべての測定値は平均値 $\pm$ 標準偏差で表した。統計解析ソフトStatview(HULINKS社)を用いて、 $\dot{V}_{O_2\max}$ と超音波心臓検査装置で計測した各測定値との間で回帰分析を行つた。 $\dot{V}_{O_2\max}$ を従属変数とし、その他の左心室拡張末期径、左心室収縮末期径、心室中隔厚、左心室後壁厚、上行大動脈径を独立変数として単回帰分析を行い、その相関係数の高い変数から順に独立変数に加えて行く増加法によるステップワイズ回帰分析を行つた。ステップワイズ回帰分析で採用となった独立

変数（段階的に変数を加えて行く際に重回帰相関係数を増加させる変数）のみで重回帰分析を行い、 $\dot{V}O_2\text{max}$ の予測式を導いた。全ての検定において、危険率（ p ）5%未満を有意とした。

2. メタ解析（meta-analysis）

1) 文献の選定

メタ解析は先行研究の知見を系統的に統合・解析するための定量的手法とされている。本研究のメタ解析において、最初に、 $\dot{V}O_2\text{max}$ と左心室および動脈の形態を超音波法を用いて測定している先行研究を文献検索システム Medline を用いて検索した。key words は「maximal oxygen consumption あるいは $\dot{V}O_2\text{max}$ あるいは aerobic fitness あるいは endurance」と「echocardiography あるいは aorta あるいは aortic あるいは aortal」とした。さらにそこから以下に示す基準を満たした文献を手作業で選択した。1) 被験者は成人であること（20—69歳）、2) $\dot{V}O_2\text{max}$ を測定していること、3) 超音波法より求めた左心室あるいは大動脈のいずれかの形態に関するデータを含んでいること、4) 被験者は健常者であること、5) 体重を測定していること、とした。本メタ解析は、上記の条件を満たした文献総数28、群数58、被験者数816人のデータに基づいて行った。

2) 超音波法による測定データ

左心室拡張末期径、左心室収縮末期径、心室中隔厚、左心室後壁厚、上行大動脈径の群ごとの平均値を各文献から抽出した値を体重で補正した（単位、mm/kg）。

3) 統計処理

統計処理には統計解析ソフト StatView を利用し、各文献から抽出された各変数の平均値の関係を単回帰分析で解析した。各平均値を算出するための被験者数は各文献で異なるが、各平均値に重み付けをせず、単純に回帰分析を行った。危険率（ p ）5%未満を有意とした。

III 結 果

1. 横断的実験研究

$\dot{V}O_2\text{max}$ を従属変数とし、左心室拡張末期径、左心室収縮末期径、心室中隔厚、左心室後壁厚、上行大動脈径を独立変数とした単回帰分析による結果を図2に示した。すべての独立変数において $\dot{V}O_2\text{max}$ と有意な単相関関係がみられた。

$\dot{V}O_2\text{max}$ と左心室拡張末期径、左心室収縮末期径、心室中隔厚、左心室後壁厚、上行大動脈径との間で変数増加法によるステップワイズ回帰分析を行った結果、左心室拡張末期径、上行大動脈径、心室中隔厚が重回帰相関係数を増加させたため独立変数として採用となり、左心室収縮末期径、左心室後壁厚が重回帰相関係数を増加させなかったため独立変数から棄却された。採用された独立変数を用いた重回帰分析結果から、以下の $\dot{V}O_2\text{max}$ 推定式を導いた。

$$\dot{V}O_2\text{max} \text{ (ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)} = 49.2 \times \text{左心室拡張末期径 (mm/kg)} + 27.2 \times \text{上行大動脈径 (mm/kg)} + 43.9 \times \text{心室中隔厚 (mm/kg)} - 2.6$$

本重回帰式から算出された $\dot{V}O_2\text{max}$ の推定値と $\dot{V}O_2\text{max}$ の実測値との相関係数は0.83、決定係数は0.68を示した（図3）。それぞれのプロットは回帰直線を中心としてある範囲内ではばらついて存在している。この回帰直線からのばらつきの程度は回帰直線からの各データの残差の標準偏差（回帰残差の標準偏差）で推測できる。それぞれの回帰残差の標準偏差が $\pm 4.6 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。

2. メタ解析

メタ解析に用いた28編の文献リストと抽出したデータを表1に示した。 $\dot{V}O_2\text{max}$ の測定法は、トレッドミルテストが33%、自転車エルゴメーターが67%であった。被験者はアスリートが608人、非鍛練者が208人であった。

メタ解析の単回帰分析結果を図4に示した。メタ解析から得た平均値だけのデータは●で、平均値に加え標準偏差が得られたデータは▲で、平均

図2 最大酸素摂取量と超音波エコー装置から得られた各測定値間の相関関係

図3 最大酸素摂取量の実測値と推定値との関係 (上) と回帰直線からの残差 (下)

値に加え標準誤差が得られたデータは■でプロットした。標準偏差あるいは標準誤差が文献から得られたものに対してはエラーバーを示した。 $\dot{V}O_2\text{max}$ と左心室拡張末期径、心室中隔厚、左心室後壁厚、上行大動脈径との間には有意な相関関係が観察された。しかし、左心室収縮末期径との間には有意な相関関係は観察されなかった。

IV 考 察

本研究で得られた主な知見は以下の通りである。(1) 超音波エコー法で観察した左心室と大動脈形態から $\dot{V}O_2\text{max}$ を以下の式から推定することが可能である。

$$\dot{V}O_2\text{max} (\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}) = 49.2 \times \text{左心室}$$

$$\text{拡張末期径 (mm/kg)} + 27.2 \times \text{上行大動脈径 (mm/kg)} + 43.9 \times \text{心室中隔厚 (mm/kg)} - 2.6$$

(2) この推定式で採用された変数は、メタ解析においても $\dot{V}O_2\text{max}$ と有意な正の単相関関係にあることから、上記の推定式の妥当性が確認された。

1. 横断的研究

全身性の持久的トレーニングを長期にわたり継続すると心臓は肥大する (Adams et al., 1981; Rost and Hollmann, 1983; Shapiro, 1984; Huston et al., 1985)。心肥大のうち、持久的トレーニングに伴う容量負荷による左心室の内腔の拡大を特徴とする遠心性肥大が大きな一回拍出量や $\dot{V}O_2\text{max}$ と関係している (Grossman et al., 1975; Traill et al., 1978; Stein et al., 1980)。本横断的実験研究のステップワイズ回帰分析の結果、 $\dot{V}O_2\text{max}$ を決定づける因子として、上述の生理学的知見と一致して、左心室拡張末期径、心室中隔厚といった左心室の形態が独立変数として採用された。さらに、左心室の2つの変数の他に、上行大動脈の直径がステップワイズ解析において独立変数として採用された。このことは、従来からよく知られている左心室の内腔や壁の形態だけではなく、上行大動脈の形態的特徴も考慮することで、 $\dot{V}O_2\text{max}$ の推定精度をより高めることができることを示唆している。この統計学的結果は、持久的競技者は非鍛錬者と比較してより太い上行大動脈あるいは大腿動脈を有していること (Wijnen et al., 1991; Zeppilli et al., 1995)、持久的トレーニングにより大動脈や大腿動脈の内径が拡大すること (Miyachi et al., 1998; Dinunno et al., 2001; Miyachi et al., 2001) といったいくつかの生理学的知見をよく反映している。

本重回帰式から算出された $\dot{V}O_2\text{max}$ の推定値と $\dot{V}O_2\text{max}$ の実測値との相関係数は0.83で、決定係数は0.68を示した (図3)。それぞれのプロットは回帰直線を中心としてある範囲内ではばらついて存在している。この回帰直線からのばらつきの程度は被験者毎に異なるが、集団としての推定式からの誤差は回帰直線からの各データの残差の標準

表1 メタ解析に用いた文献リスト

著者	出版年	延べ 人数	種目他	人 数	測定方法	最大酸素摂取量 ($\text{ml}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)	測定項目			
							大動脈径	左心室拡張 末期径	左心室収縮 末期径 (mm/kg)	心室中隔 壁厚
Gilbert, C.A. et al.	1977	46	長距離ランナー 一般	20	トレッドミル	70.9 ± 1.8 ※	0.456	0.733	0.154	0.158
Wolfe, L.A. et al.	1979	36	トレエニング前 トレエニング3カ月 トレエニング6カ月	26	トレッドミル	42.6 ± 1.1 ※	0.409	0.62	0.133	0.125
				12	エルゴメーター	42.4 ± 2.4 ※		0.686	0.109	0.102
				12	エルゴメーター	48.7 ± 2.7 ※		0.680	0.111	0.104
				12	エルゴメーター	50.0 ± 2.5 ※		0.696	0.111	0.104
Bekaert, I. et al.	1981	25	一般 自転車競技	11	エルゴメーター	43.0 ± 7.0 ★		0.747	0.146	0.146
				14	エルゴメーター	67.0 ± 6.0 ★		0.820	0.170	0.163
Maud, P.J. et al.	1981	1	マラソン	1	トレッドミル	56.8		0.812		0.192
Hauser, A.M. et al.	1985	24	一般 長距離ランナー	12	トレッドミル	43.6 ± 5.1 ★		0.694	0.125	0.110
				12	トレッドミル	67.4 ± 5.6 ★		0.766	0.155	0.132
Cox, M.L. et al.	1986	32	トレエニング前 トレエニング後	16	トレッドミル	40.8 ± 2.1 ※		0.691	0.145	0.152
				16	トレッドミル	53.4 ± 2.9 ※		0.715	0.160	0.160
Dickhuth, H.H. et al.	1987	14	長距離ランナー 一般	7	トレッドミル	66.0 ± 3.7 ★		0.779	0.559	
				7	トレッドミル	54.4 ± 3.6 ★		0.717	0.498	
Urhausen, A. and Kindermann, W.	1989	14	長距離ランナー ボデュービルダー	7	エルゴメーター	65.9 ± 4.6 ★		0.787	0.169	0.173
				7	エルゴメーター	38.7 ± 3.1 ★		0.637	0.129	0.114
Vollmer-Larsen, A. et al.	1989	24	一般 ベテランサイクリスト サイクリスト	8	エルゴメーター	32.0		0.684	0.118	0.118
				8	エルゴメーター	56.0		0.750	0.138	0.138
				8	エルゴメーター	35.0		0.731	0.128	0.115
Krzeminski, K. et al.	1989	18	競技者	18	エルゴメーター	56.6 ± 4.0 ※		0.726	0.474	
MacFarlane, N. et al.	1991	30	一般 ウエイトリフター ランナー	10	トレッドミル	44.5 ± 2.1 ※		0.678	0.131	0.115
				10	トレッドミル	45.3 ± 2.0 ※		0.676	0.147	0.135
Vanhees, L. et al.	1992	27	一般 ウエイトリフター	10	トレッドミル	74.7 ± 1.4 ※		0.877	0.181	0.161
				27	エルゴメーター	38.3	0.377	0.637	0.448	0.130
Sachtleben, T.R. et al.	1993	13	自転車競技	13	トレッドミル	50.2 ± 6.4 ★		0.626	0.104	0.107
Di Bello, V. et al.	1995	10	自転車競技	10	エルゴメーター	78.0 ± 7.7 ★		0.811	0.182	0.176
Urhausen, A. et al.	1996	64	ボート	64	エルゴメーター	54.4 ± 5.6 ★		0.659	0.485	0.131
Hopkins, M.G. et al.	1996	16	一般 競技者	8	トレッドミル	43.1 ± 1.7 ※		0.611	0.423	
				8	トレッドミル	60.0 ± 0.9 ※		0.789	0.552	

Huonker, M. et al.	1996	104	一般	23	エルゴメーター	44.8 ± 5.1	★	0.438	0.698		0.133	0.134
			ボディービルダー	20	エルゴメーター	47.5 ± 4.8	★	0.354	0.566		0.126	0.125
			ウエイトリフター	14	エルゴメーター	42.6 ± 4.1	★	0.327	0.547		0.114	0.114
			トライアスロン	26	エルゴメーター	69.6 ± 5.3	★	0.504	0.858		0.165	0.162
			自転車競技	21	エルゴメーター	72.7 ± 5.8	★	0.482	0.838		0.164	0.162
Di Bello, V. et al.	1996	20	ランナー	10	エルゴメーター	68.3			0.849		0.183	0.165
			一般	10	エルゴメーター	42.9			0.656		0.144	0.148
			競技者	22	エルゴメーター	58.4 ± 5.1	★	0.440	0.897	0.604		
Ben-Sira, D. and Sagiv, M.	1997	22	競技者	32	エルゴメーター	76.0 ± 5.0	★		0.806		0.178	0.165
Kariainen, J. et al.	1997	32	一般	5	エルゴメーター	52.1 ± 2.6	※	0.447				
Miyachi, M. et al.	1998	24	トレニング	7	エルゴメーター	50.3 ± 2.3	※	0.395				
			一般	5	エルゴメーター	52.0 ± 2.9	※	0.456				
			トレニング	7	エルゴメーター	58.9 ± 2.6	※	0.429				
Lucia, A. et al.	1999	21	自転車競技	14	エルゴメーター	70.0 ± 2.0	★		0.852		0.127	0.126
			自転車競技	7	エルゴメーター	71.1 ± 6.7	★		0.866		0.116	0.117
Whyte, G. et al.	1999	42	近代五種	11	エルゴメーター	64.3 ± 3.2	★	0.459	0.718	0.479	0.151	0.138
			トライアスロン	18	エルゴメーター	67.2 ± 4.9	★	0.464	0.732	0.464	0.142	0.138
			一般	13	エルゴメーター	54.0 ± 6.7	★	0.399	0.647	0.427	0.109	0.099
Takala, T.O. et al.	1999	20	長距離ランナー	9	エルゴメーター	67.0 ± 5.0	★		0.764	0.458	0.144	0.135
			一般	11	エルゴメーター	48.0 ± 9.0	★		0.703	0.419	0.124	0.120
Lucia, A. et al.	2000	13	ランナー	9	トレッドミル	49.4 ± 2.9	※		0.756		0.146	0.136
			ランナー	4	トレッドミル	50.1 ± 4.0	※		0.792		0.142	0.129
Claessens, M. et al.	2000	74	トライアスロン	52	トレッドミル	65.8 ± 9.4	★		0.747		0.146	0.135
			一般	22	トレッドミル	45.8 ± 8.6	★		0.658		0.119	0.112
Whyte, G. et al.	2000	20	一般	10	エルゴメーター	54.0 ± 6.7	★		0.647	0.427	0.109	0.099
			トライアスロン	10	エルゴメーター	68.9 ± 6.1	★		0.749	0.456	0.135	0.136
Miyachi, M. et al.	2001	30	トレニング前	10	エルゴメーター	47.8		0.418				
			トレニング後	10	エルゴメーター	53.6		0.441				
			脱トレニング	10	エルゴメーター	50.7		0.433				

★ = 平均値 ± 標準偏差 ※ = 平均値 ± 標準誤差

図4 メタ解析で用いた文献より抽出したデータから得られた各測定値間の相関関係

偏差（回帰残差の標準偏差）で推測できる。本研究では、それぞれの回帰残差の標準偏差が $\pm 4.6 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。このような誤差を考慮に入れた上で、安静仰臥位における超音波エコー法を用いることによって、被験者に時間的あるいは身体的ストレスを与えることなく全身持久力の推定が可能であると考えられる。

2. メタ解析

本メタ解析では、すでに出版された複数の文献に示された $\dot{V}O_2\text{max}$ と大動脈と左心室形態との関係を統計学的手法を用いて検討した。 $\dot{V}O_2\text{max}$ と大動脈径や左心室形態の両方との関係を見たメタ解析は我々の文献渉猟の範囲ではない。メタ解析の問題点として、解析のために採用した文献の間で測定方法や測定条件が異なることがあげられる。具体的には被験者の民族的差異や $\dot{V}O_2\text{max}$ 測定の際の運動負荷方法の違いなどである。その一方で、メタ解析では複数の研究施設によって多くの被験者から得られたデータを統合的に検討することができるという長所がある。

本メタ解析において $\dot{V}O_2\text{max}$ と、左心室拡張末期径は相関係数0.72の正の相関が見られた。これに対して、左心室収縮末期径には有意な相関関係は観察されなかった。それに加え、 $\dot{V}O_2\text{max}$ と心室中隔厚では相関係数0.62、左心室後壁厚で相関係数0.56の正相関が見られた。これらの相関関係は、左心室収縮末期径を除いて、横断的研究で見られた同じ変数の相関とほぼ一致していた。我々の検索した範囲では、 $\dot{V}O_2\text{max}$ と大動脈形態の両方について記述した論文は7編しか抽出することができなかった。Pluimらによって行われたスポーツ心臓に関するメタ解析 (Pluim et al., 2000) においても大動脈のパラメーターに関しては全く言及されていない。しかし、本メタ解析結果においてプロット数は少ないながらも、 $\dot{V}O_2\text{max}$ と上行大動脈径との間には相関係数0.77という有意な正の相関関係が見られ、横断的研究と同様の結果を得た。以上の結果を考え合わせると、我々の横断的研究で得られた、左心室収縮末期径、心室中隔厚、上行大動脈径の3つの独立変数で説明され

る推定式が単なる統計学的結果ではなく、従来から報告されている多数の生理学的知見をよく反映した式であると言える。

V 要 約

本研究では第一に、様々な身体活動・トレーニング水準にある142名の健康な青年男性の $\dot{V}O_2\text{max}$ を超音波装置で測定した左心室および上行大動脈の形態から推定することが可能か否かを横断的研究で検討した。第二に、すでに出版された論文に記述された $\dot{V}O_2\text{max}$ と心臓及び大動脈形態の超音波形態計測値を利用してメタ解析を行い、横断的実験の妥当性を確認した。その結果、超音波エコー法で観察した左心室と大動脈の形態から以下の $\dot{V}O_2\text{max}$ 推定式が得られた。

$$\dot{V}O_2\text{max} (\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}) = 49.2 \times \text{左心室拡張末期径} (\text{mm/kg}) + 27.2 \times \text{上行大動脈径} (\text{mm/kg}) + 43.9 \times \text{心室中隔厚} (\text{mm/kg}) - 2.6$$

さらに、この推定式で採用された変数は、メタ解析においても $\dot{V}O_2\text{max}$ と有意な正の単相関関係にあることから、本推定式の妥当性を確認することができた。以上の知見から、健康な日本人青年男性の $\dot{V}O_2\text{max}$ を、最大運動負荷試験を行うことなく、安静仰臥位での超音波エコー法による左心室および大動脈の形態計測によって簡便に推測できることが示唆された。

謝 辞

本研究は平成14年度日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究A14208005）、（若手研究B13780041）および平成14年度川崎医療福祉大学プロジェクト研究費の補助を得て遂行された。記して謝意を表する。

文 献

- Adams, T.D., Yanowitz, F.G., Fisher, A.G., Ridges, J.D., Lovell, K., and Pryor, T.A. (1981) Noninvasive evaluation of exercise training in college-age men. *Circulation* 64: 958-965.
- Bekaert, I., Pannier, J.L., Van de Weghe, C., Van

- Durme, J.P., Clement, D.L., and Pannier, R. (1981) Non-invasive evaluation of cardiac function in professional cyclists. *Br Heart J* 45: 213–218.
- Ben-Sira, D. and Sagiv, M. (1997) The effect of gender on left ventricular function immediately after the wingate test. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 75: 549–553.
- Claessens, M., Claessens, C., Claessens, P., Henderieckx, J., and Claessens, J. (2000) Importance of determining the percentage body fat in endurance-trained athletes. *Indian Heart J* 52: 307–314.
- Cox, M.L., Bennett, J.B., 3rd, and Dudley, G.A. (1986) Exercise training-induced alterations of cardiac morphology. *J Appl Physiol* 61: 926–931.
- Di Bello, V., Santoro, G., Talarico, L., Di Muro, C., Caputo, M.T., Giorgi, D., Bertini, A., Bianchi, M., and Giusti, C. (1996) Left ventricular function during exercise in athletes and in sedentary men. *Med Sci Sports Exerc* 28: 190–196.
- Di Bello, V., Talarico, L., Di Muro, C., Santoro, G., Bertini, A., Giorgi, D., Caputo, M.T., Bianchi, M., Cecchini, L., and Giusti, C. (1995) Evaluation of maximal left ventricular performance in elite bicyclists. *Int J Sports Med* 16: 498–506.
- Dickhuth, H.H., Theissen, M., Lehmann, M., Auch-Schwelk, W., and Keul, J. (1987) Sensitivity of the physiologically hypertrophied heart to isoproterenol. *Int J Sports Med* 8: 392–396.
- Dinenno, F.A., Tanaka, H., Monahan, K.D., Clevenger, C.M., Eskurza, I., DeSouza, C.A., and Seals, D.R. (2001) Regular endurance exercise induces expansive arterial remodelling in the trained limbs of healthy men. *J Physiol* 534: 287–295.
- Fagard, R.H. (1992) Impact of different sports and training on cardiac structure and function. *Cardiol Clin* 10: 241–256.
- Gilbert, C.A., Nutter, D.O., Felner, J.M., Perkins, J.V., Heymsfield, S.B., and Schlant, R.C. (1977) Echocardiographic study of cardiac dimensions and function in the endurance-trained athlete. *Am J Cardiol* 40: 528–533.
- Grossman, W., Jones, D., and McLaurin, L.P. (1975) Wall stress and patterns of hypertrophy in the human left ventricle. *J Clin Invest* 56: 56–64.
- Hauser, A.M., Dressendorfer, R.H., Vos, M., Hashimoto, T., Gordon, S., and Timmis, G.C. (1985) Symmetric cardiac enlargement in highly trained endurance athletes: a two-dimensional echocardiographic study. *Am Heart J* 109: 1038–1044.
- Hopkins, M.G., Spina, R.J. and Ehsani, A.A. (1996) Enhanced beta-adrenergic-mediated cardiovascular responses in endurance athletes. *J Appl Physiol* 80: 516–521.
- Huonker, M., Konig, D., and Keul, J. (1996) Assessment of left ventricular dimensions and functions in athletes and sedentary subjects at rest and during exercise using echocardiography, Doppler sonography and radionuclide ventriculography. *Int J Sports Med* 17 Suppl 3: S173–S179.
- Huston, T.P., Puffer, J.C., and Rodney, W.M. (1985) The athletic heart syndrome. *N Engl J Med* 313: 24–32.
- Karjalainen, J., Mantysaari, M., Viitasalo, M., and Kujala, U. (1997) Left ventricular mass, geometry, and filling in endurance athletes: association with exercise blood pressure. *J Appl Physiol* 82: 531–537.
- Krzeminski, K., Miskiewicz, Z., Niewiadomski, W., Nazar, K., and Kozłowski, S. (1989) Effect of endurance training on cardiovascular response to static exercise performed with untrained muscles. *Int J Sports Med* 10: 363–367.
- Lucia, A., Carvajal, A., Boraita, A., Serratos, L., Hoyos, J., and Chicharro, J.L. (1999) Heart dimensions may influence the occurrence of the heart rate deflection point in highly trained cyclists. *Br J Sports Med* 33: 387–392.
- Lucia, A., Carvajal, A., Perez, M., and Boraita, A. (2000) Heart rate response during incremental exercise in master runners. *Jpn J Physiol* 50: 155–158.
- MacFarlane, N., Northridge, D.B., Wright, A.R., Grant, S., and Dargie, H.J. (1991) A comparative study of left ventricular structure and function in elite athletes. *Br J Sports Med* 25: 45–48.
- Maud, P.J., Pollock, M.L., Foster, C., Anholm, J.D., Guten, G., Al-Nouri, M., Hellman, C., and Schmidt, D.H. (1981) Fifty years of training and competition

- in the marathon: Wally Hayward, age 70—a physiological profile. *S Afr Med J* 59: 153–157.
- Miyachi, M., Iemitsu, M., Okutsu, M., and Onodera, S. (1998) Effects of endurance training on the size and blood flow of the arterial conductance vessels in humans. *Acta Physiol Scand* 163: 13–16.
- Miyachi, M., Tanaka, H., Yamamoto, K., Yoshioka, A., Takahashi, K., and Onodera, S. (2001) Effects of one-legged endurance training on femoral arterial and venous size in healthy humans. *J Appl Physiol* 90: 2439–2444.
- Morganroth, J., Maron, B.J., Henry, W.L., and Epstein, S.E. (1975) Comparative left ventricular dimensions in trained athletes. *Ann Intern Med* 82: 521–524.
- Pluim, B.M., Zwinderman, A.H., van der Laarse, A., and van der Wall, E.E. (2000) The athlete's heart. A meta-analysis of cardiac structure and function. *Circulation* 101: 336–344.
- Rost, R. and Hollmann, W. (1983) . Athlete's heart—a review of its historical assessment and new aspects. *Int J Sports Med* 4: 147–165.
- Sachtleben, T.R., Berg, K.E., Elias, B.A., Cheatham, J.P., Felix, G.L., and Hofschire, P.J. (1993) The effects of anabolic steroids on myocardial structure and cardiovascular fitness. *Med Sci Sports Exerc* 25: 1240–1245.
- Shapiro, L.M. (1984) Physiological left ventricular hypertrophy. *Br Heart J* 52: 130–135.
- Shapiro, L.M. and Smith, R.G. (1983) Effect of training on left ventricular structure and function. An echocardiographic study. *Br Heart J* 50: 534–539.
- Stein, R.A., Michielli, D., Diamond, J., Horwitz, B., and Krasnow, N. (1980) The cardiac response to exercise training: echocardiographic analysis at rest and during exercise. *Am J Cardiol* 46: 219–225.
- Takala, T.O., Nuutila, P., Katoh, C., Luotolahti, M., Bergman, J., Maki, M., Oikonen, V., Ruotsalainen, U., Gronroos, T., Haaparanta, M. et al. (1999) Myocardial blood flow, oxygen consumption, and fatty acid uptake in endurance athletes during insulin stimulation. *Am J Physiol* 277: E585–E590.
- Traill, T.A., Gibson, D.G., and Brown, D.J. (1978) Study of left ventricular wall thickness and dimension changes using echocardiography. *Br Heart J* 40: 162–169.
- Urhausen, A. and Kindermann, W. (1989) One- and two-dimensional echocardiography in body builders and endurance-trained subjects. *Int J Sports Med* 10: 139–144.
- Urhausen, A., Monz, T., and Kindermann, W. (1996) Sports-specific adaptation of left ventricular muscle mass in athlete's heart. I. An echocardiographic study with combined isometric and dynamic exercise trained athletes (male and female rowers). *Int J Sports Med* 17 Suppl 3: S145–151.
- Vanhees, L., Hespel, P., Van Hoof, R., Fagard, R., and Amery, A. (1992) Effect of physical training on systemic and brachial artery haemodynamics in normal men. *Int J Sports Med* 13: 145–151.
- Vollmer-Larsen, A., Vollmer-Larsen, B., Kelbaek, H., and Godtfredsen, J. (1989) The veteran athlete: an echocardiographic comparison of veteran cyclists, former cyclists and non-athletic subjects. *Acta Physiol Scand* 135: 393–398.
- Whyte, G., Lumley, S., George, K., Gates, P., Sharma, S., Prasad, K., and McKenna, W.J. (2000) Physiological profile and predictors of cycling performance in ultra- endurance triathletes. *J Sports Med Phys Fitness* 40: 103–109.
- Whyte, G., Sharma, S., George, K., and McKenna, W.J. (1999) Alterations in cardiac morphology and function in elite multi-disciplinary athletes. *Int J Sports Med* 20: 222–226.
- Wijnen, J.A., Kuipers, H., Kool, M.J., Hoeks, A.P., van Baak, M.A., Struyker Boudier, H.A., Verstappen, F.T., and Van Bortel, L.M. (1991) Vessel wall properties of large arteries in trained and sedentary subjects. *Basic Res Cardiol* 86: 25–29.
- Wolfe, L.A., Cunningham, D.A., Rechnitzer, P.A., and Nichol, P.M. (1979) Effects of endurance training on left ventricular dimensions in healthy men. *J Appl Physiol* 47: 207–212.
- 山地啓司 (2001) 最大酸素摂取量の科学 改訂第2版. 杏林書院：東京, pp. 3–18.
- Zeppilli, P., Vannicelli, R., Santini, C., Dello Russo, A., Picani, C., Palmieri, V., Cameli, S., Corsetti, R., and Pietrangeli, L. (1995) Echocardiographic size of conductance vessels in athletes and sedentary people. *Int J Sports Med* 16: 38–44.

(平成14年 8月30日受付)
(平成15年 4月26日受理)