

下肢骨格筋量から最大有酸素性および 最大無酸素性パワーを評価する

Evaluate Maximal Aerobic and Anaerobic Power from Leg Muscle Volume in Active Female Students

キーワード：最大酸素消費量，最大ペダリングパワー，最大身体作業能
Keywords: $\dot{V}O_2\text{max}$, maximal pedaling power, PWCmax

若山 章信

WAKAYAMA Akinobu

Abstract

The purpose of this study was to evaluate maximal aerobic power and maximal anaerobic power from legs muscle volume (LV) by using the bioelectrical impedance analysis method. Subjects were 56 female physical education college students (about 20 years). Their average (SD) height and body mass were 159.1(4.4) cm and 55.4 (6.1) kg. The index of maximal aerobic power was maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_2\text{max}$) and it was converted to PWCmax. The index of maximal anaerobic power was instantaneous maximal pedaling power (PPmax).

The average of LV, $\dot{V}O_2\text{max}$, PWCmax and PPmax were 13.4 (1.5) kg, 2.296 (0.271) l/min, 224 (31) W and 587 (113) W, respectively. Relative index (PWCmax/LV and PPmax/LV) were 16.7 (1.9) W/kg and 43.5 (5.8) W/kg.

The relationship between LV and $\dot{V}O_2\text{max}$ was significant ($r = 0.644$, $p < 0.001$). 56 subjects were divided into 3 groups from the ratio of actual $\dot{V}O_2\text{max}$ per predicted $\dot{V}O_2\text{max}$ based on the relation between LV, which were higher group (HG: more than +5 %), lower group (LG: less than -5 %) and average group (AG: among $\pm 5\%$), respectively. A hypothesis of this study was, HG shows lower PPmax/LV than LG, because of their differences of the muscle fiber composition. However, HG showed significantly higher PPmax/LV ($p < 0.001$) than LG. It was concluded that HG was highly trained in both aerobic and anaerobic energy supply from the view point of legs muscle volume.

1. はじめに

最大有酸素性パワー(maximal aerobic power: MaeroP)や最大無酸素性パワー(maximal anaerobic power: ManaP)の評価指標として、入力パワーであ

る最大酸素摂取量($\dot{V}O_2\text{max}$)や出力パワーである Wingate anaerobic testによる最大ペダリングパワー(Jacobsら1983)等を体重で除した値が用いられる。体重で除すことは、自身の体重を移動させる仕事の時間効率(速度)を意味し、「身体運動のperformance

の評価」を意図している。ところで、筋の最大張力は筋断面積（並列筋線維数）に比例し（Fukunaga 1976）、筋の収縮速度は筋長（直列筋節数）に比例する（Close 1967）。ゆえに、力×速度で算出されるパワーは筋断面積×筋長に比例し、面積×長さは体積であるため筋パワーはおおよそ筋体積（筋容積）に比例する。また、萩田（2008）は、活動筋量は $\dot{V}O_2\max$ の大きさを決定する重要な要因であると述べている。したがって、 $\dot{V}O_2\max$ や最大ペダリングパワーをその活動に動員される筋量で除すことで、「筋のpotentialの評価」が可能となる。

さて、MaeroPとManaPの関係については、これまでもいくつかの報告がある。Boulayら（1985）およびJonesとMcCartney（1986）は、非トレーニング者あるいは日常的に運動をしていない被検者において、MaeroPとManaPの間に正の相関関係が認められたと報告している。また、Baron（2000）は、自転車オフロード選手において同様の結果であったと報告している。一方、Tanakaら（1993）は一流自転車ロード選手において、Bentleyら（1998）はトライアスリートにおいて、有意な相関関係は認められなかったと報告している。また、Di Pramperoら（1970）は、除脂肪体重あたりのMaeroP（ $\dot{V}O_2\max$ ）が有意に高い長距離走者において、除脂肪体重あたりのManaPは他のアスリートと差がなかったことを報告している。さらにCrielaardとPirnay（1981）は、一般学生では有意な相関関係は認められなかったものの、一流短距離走選手と長距離走選手では、有意な負の相関関係が認められたことを報告している。同様に、KatchとWeltman（1979）は、自転車エルゴメータ全力駆動時の開始6秒間のパワーとトレッドミル走での $\dot{V}O_2\max$ の間に有意な負の相関関係が認められたことを報告している。以上のように、非トレーニング者では正の、競技者では無あるいは負の相関関係が認められる傾向にある。非トレーニング者では日頃の身体活動の程度により「正」の、競技者では筋線維組成の違いにより「負」の相関関係を示したものと推察される。そして、FT線維は解糖系、ST線維は酸化系によるATP再合成に優れていることから、競技者や日常的に運動している被検者ならば、筋のpotentialとして、

両筋線維を含む筋量あたりのMaeroPおよびManaPは、ST線維が優位であれば前者に高く、FT線維が優位であれば後者に高いと仮説づけられる。そこで筆者は、女子体育大学生65人に対し生体電気抵抗法（BIA法：body impedance analysis method）による体水分量（除脂肪量の指標）、トレッドミル走による $\dot{V}O_2\max$ および座位スクワットによる最大脚伸展パワーの測定を行い、これを検討した（若山2018）。すなわち、体水分量からの $\dot{V}O_2\max$ 予測値に対する $\dot{V}O_2\max$ 実測値の上位群（+5%以上）と下位群（-5%以下）について、有酸素性パワー関連の生理学的指標の比較を行ったところ、上位群では最大換気量（ $\dot{V}E\max$ ）が有意に高く、下位群では呼吸交換比（RER: respiratory exchange ratio = $\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$ ）が有意に高かった。下位群は、all-outに達する運動終盤での解糖系によるエネルギー供給の貢献が高かったといえる。しかし、上位群と下位群において無酸素性パワー関連の指標を比較したところ、最大筋力や最大速度、そして両者の1/2を乗じた最大脚伸展パワーそれぞれに有意な差は認められなかった。結論として、「脚水分量あたりの最大脚伸展パワーは最大酸素摂取量下位群において高い」という筋線維組成に由来する傾向はみられず、仮説は立証できなかった。ただし、この研究ではKatchとWeltman（1979）と異なり、単発運動である最大脚伸展パワーの瞬時値を用いており、最大パワーが発揮される至適速度（平均値：1.26 m/s）では筋中ATPのみが動員されるであろう0.5秒程度の運動時間としかならない。7秒から30秒程度の連続運動によるManaPを指標とすれば、ATP-CP系や解糖系の動員から、その結果は異なったかも知れない。

そこで、本研究では「下肢骨格筋量あたりのMaeroPが高い群は、ManaPが低い」という仮説の再検証を目的に、先行研究（若山2018）の追従測定を行った。

2. 方法

1) 被検者

2018年・2019年度に、大学3年次の授業「体力

評価の理論と実習」を履修した東京女子体育大学学生64人を被検者とし、後述のMaeroPおよびManaPにおけるcriteriaを満たした56人分のデータを使用した。測定は両年とも5月下旬から6月下旬に行った。各測定は被検者個々に1週間程度の間隔をあげ、MaeroPおよびManaPの相対値算出に用いる体重および下肢骨格筋量は予め測定した値で統一した。被検者の年齢は概ね20歳であった。

なお、履修者からは4月の授業ガイダンスにおいて、形態測定、有酸素性パワーおよび無酸素性パワー等の測定内容(安全性等)やデータ公表(個人情報保護)について説明し、同意を得た(研究倫理審査承認番号:研倫審・2019-24号)。

2) 体格・身体組成計測

身長、体重(BW: body weight)、およびBIA法による体脂肪率(% fat)、除脂肪体重(LBM: lean body mass)、体水分量(左右上肢・左右下肢・体幹)を測定した。BIA法では、左右の手掌・足底の各2点、計8点の電通プレート配するInBody3.2(周波数5 kHz・50 kHz・250 kHz・500 kHz: Biospace社製)を用い、排尿・排便後に生理食塩水により手掌・足底を洗浄・加湿した後にできるだけ軽装で測定した。哺乳類の除脂肪組織の73.2%が水分(PaceとRathbun 1945)であり筋の比重が1.06であることから、下記により下肢骨格筋量に換算した。

下肢骨格筋量(LV)=両下肢水分量÷0.732×1.06(kg)

3) 最大有酸素性パワーの計測

MaeroPの指標として、電磁ブレーキ式自転車エルゴメータ(Combi社製: PowermaxVII)での漸増負荷法により $\dot{V}O_2\max$ を測定した。また、 $\dot{V}O_2\max$ 出現時のRER、 $\dot{V}E\max$ 、最高心拍数(HRmax)を検討に用いた。

被検者は、軽いストレッチ、自転車エルゴメータ上での2分間の座位安静の後、0.5 kp×60 rpm = 29.4 Wの運動強度からペダリングを開始した。負荷は、運動開始後10分までは2分ごとに0.5 kpずつ漸増し、次いでall-outまで1分ごとに0.5 kpずつ漸増

した。サドル高は下死点で膝が軽く曲がる程度に設定し、トゥクリップにより足部をペダルに固定した。被検者がペダル回転速度60 rpmを維持できなくなった場合に、いわゆる「立ち漕ぎ」を指示しall-outまで追い込んだ。all-outステージのペダル回転速度は60 rpmを下回っている被検者が多く、そのステージの運動強度は定かではない。そこで、座位にて60 rpmが1分間維持できた最終ステージをMSS(maximal steady state)とし、主に有酸素運動による最大身体作業能(PWCmax)を次式により算出した。なお、netEは自転車エルゴメータでの被検者個々の正味の機械効率(安静時代謝を除いた運動中の酸素消費量の内、自転車漕ぎの機械的仕事へ変換される効率: 金子と福永 2004)である。

$$PWC\max (W) = (\dot{V}O_2\max - \dot{V}O_2\text{rest}) \times 348.5 \times \text{net}E$$

$$\text{※ net}E = \text{MSS強度} \div ((\dot{V}O_2\text{MSS} - \dot{V}O_2\text{rest}) \times 348.5)$$

$$\dot{V}O_2: 1 \ell/\text{min} = 5 \text{ kcal}/\text{min}$$

$$= 5 \times 10^3 \times 4.184 \text{ J}/\text{min}$$

$$= 348.5 \text{ J}/\text{sec} (W)$$

$$O_2: 1 \ell = 5 \text{ kcal}, 1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J}$$

呼気ガス分析は、breath by breath方式(AEROMONITOR300ES: MINATO医科学社製)により1分毎に積算を行い、all-out時に1分に満たないデータは除外した。ペダリング中は1分毎に自覚的運動強度(RPE: rate of perceived exertion, Borg scale. 小野寺と宮下 1976)を聴取した。

$\dot{V}O_2\max$ 判定のcriteriaは、以下の4つの内、3つ以上とした。

- ①RERが全体平均値の90%信頼区間(下位5%)以上(mean ± S.D. = 1.24 ± 0.08; 1.08以上)
- ②最高心拍数が全体平均値の90%信頼区間(下位5%)以上(mean ± S.D. = 189 ± 9; 171以上)
- ③RPEが19以上
- ④ $\dot{V}O_2$ がplateauまたはleveling offに達していること

4) 最大無酸素性パワーの計測

ManaPの指標として、電磁ブレーキ式自転車エルゴメータ(Combi wellness社製: PowermaxVIII)による最大ペダリングパワー(PPmax)を測定した(中村ら1984)。サドル高は下死点で膝が軽く曲がる程度に設定し、トゥクリップにより足部をペダルに固定した。加速期のサドルへの着座は自由とした。

被検者は十分なウォーミングアップおよび1kpの全力ペダリングの後、3, 5, 7 kpの順に10秒程度(最大速度出現まで)の全力駆動を各測定間の休息3分にて行った。PPmaxは、3, 5, 7 kpの3負荷とペダル最高回転速度との関係(最小自乗法による直線回帰)から両者を乗じて推定されるパワーの最大値とし、回帰定数を最大ペダル回転速度(PVmax)、最大パワー発揮時の負荷を至適負荷(OL)とした。PPmax絶対値をgrossPPmax、grossPPmax - PWCmaxをnetPPmaxとした。netPPmaxは、grossPPmaxに有酸素性パワーであるPWCmaxも包含されると仮定した正味のManaPである。

PPmax判定のcriteriaとして、負荷-ペダル回転速度関係の相関係数が-0.950以上のデータは除外した。

5) データ処理・統計処理

データ処理では、まずLVと $\dot{V}O_2\max$ との最小自乗法による回帰分析を行った。次に、その回帰式により、

LVから予測される $\dot{V}O_2\max$ を算出し、実測値が予測値の $\pm 5\%$ 区間内の群(AG)、予測値の $+5\%$ 以上の上位の群(HG)および予測値の -5% 以下の下位の群(LG)の3群に分けた。3群間において、体格・身体組成、有酸素性パワーおよび無酸素性パワーに関わる指標について、一元配置分散分析を行った。有意差の認められた項目については、post hoc testとしてFisherのprotected LSDを、HGとLGの比較に用いた。また、各変数間の回帰分析を行った。危険率の有意水準はすべて 5% 未満とした。結果は平均値と標準偏差(mean \pm S.D.)で示した。

3. 結果

1) 体格・身体組成

Table 1に、被検者56人の体格・身体組成の測定結果を示した。身長は 159.1 ± 4.4 cm、体重は 55.4 ± 6.1 kg、% fatは $25.6 \pm 4.6\%$ であった。そして、LVは 13.4 ± 1.5 kgであった。

2) 最大有酸素性パワーと最大無酸素性パワー

Table 2に、MaeroPの測定結果を示した。 $\dot{V}O_2\max$ は 2.296 ± 0.271 l/min、体重あたり 41.6 ± 4.3 ml/min/kgであった。netEは $32.2 \pm 2.4\%$ であり、PWCmaxは 224 ± 31 W、体重あたり 4.0 ± 0.5 W/kg、LVあたり 16.7 ± 1.9 W/kgであった。

Table 1. Physique characteristics of subjects.

(n=56)	height (cm)	weight (kg)	% fat (%)	LV (kg)
mean	159.1	55.4	25.6	13.4
S.D.	4.4	6.1	4.6	1.5

LV: leg muscle volume

Table 2. Results of measured aerobic power index.

(n=56)	$\dot{V}O_2\max$ (l/min)	$\dot{V}O_2\max/BW$ (ml/min/kg)	net E (%)	PWCmax (W)	PWCmax		$\dot{V}E_{\max}$ (l/min)	HRmax (bpm)	RER
					/BW (W/kg)	/LV (W/kg)			
mean	2.296	41.6	32.2	224	4.0	16.7	94.6	189	1.24
S.D.	0.271	4.3	2.4	31	0.5	1.9	15.6	9	0.08

Table 3に, ManaPの測定結果を示した. PPmaxは 587 ± 113 W, 体重あたり 10.6 ± 1.6 W/kg, LVあたり 43.5 ± 5.8 W/kgであった.

3) 下肢骨格筋量と最大酸素摂取量との関係

被検者全体でのLVと $\dot{V}O_2\max$ の間には高い相関関係が認められ, 回帰式は $y = 0.120x + 0.691$ で示された($r = 0.644$, $p < 0.001$). この式に被検者個々のLVを代入し, $\dot{V}O_2\max$ の予測値を算出した. そして, 実測値が予測値の $\pm 5\%$ 区間内のAGは14人,

+5%以上のHGは19人, および-5%以下のLGは14人となった. Figure 1に, AG, HG, LGについて, LVと $\dot{V}O_2\max$ の関係を示した. なお, 回帰直線は被検者全体での結果である.

4) 下肢骨格筋量からみた最大酸素摂取量上位群と下位群の比較

Table 4に, LG・AG・HGの3群それぞれの体格・身体組成と分散分析の結果を示した. いずれの項目にも有意な差はみられなかった.

Table 3. Results of measured anaerobic power index.

(n=56)	gross			PVmax (rpm)	OL (kp)
	PPmax (W)	PPmax/BW (W/kg)	PPmax/LV (W/kg)		
mean	587	10.6	43.5	202	5.9
S.D.	113	1.6	5.8	16	1.0

OL: optimal load

Table 4. Comparison of physique characteristics in 3 groups.

group	height (cm)	weight (kg)	% fat (%)	LBM (kg)	LV (kg)
LG (n=14)	160.3	53.7	24.0	40.7	13.4
	5.0	7.6	4.2	4.9	1.6
AG (n=23)	159.1	55.6	26.5	40.7	13.4
	4.7	5.6	4.8	3.5	1.5
HG (n=19)	158.2	56.4	25.6	41.9	13.5
	3.7	5.7	4.7	4.0	1.5
results of one way ANOVA	0.863 ns	0.792 ns	1.322 ns	0.539 ns	0.009 ns

The scores above were F value.

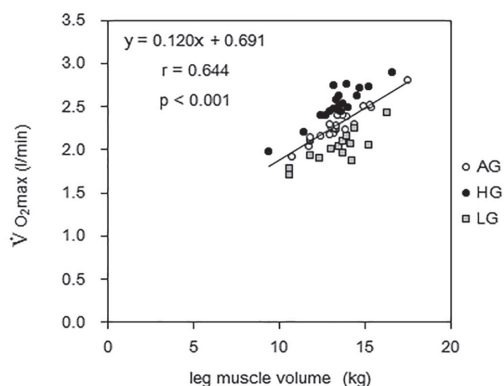


Figure 1. Relationship between LV and $\dot{V}O_2\max$

Table 5に、3群それぞれの有酸素性パワーの測定結果と分散分析およびpost hoc testの結果を示した。本研究は、LVからの $\dot{V}O_2\text{max}$ 予測値に対する実測値の割合で群分けを施した。したがって、その割合において、HG (9.7±4.1 %)はLG (-12.0±4.3 %)に比べ有意に高かった(p < 0.001)。そして、 $\dot{V}O_2\text{max}$ 予測値において、HGとLGの間に有意な差は認められなかったものの、 $\dot{V}O_2\text{max}$ 実測値において絶対値・体重あたりともHGはLGに比べ有意に高かった(p <

0.001)。netEにはHGとLGの間に有意な差はみられなかった。したがって、実測 $\dot{V}O_2\text{max}$ にnetEを乗じて算出されるPWCmax絶対値・体重あたり、およびLVあたりにおいても同様にHGはLGに比べ有意に高い値を示した(p < 0.001)。また、 $\dot{V}E\text{max}$ においてもHGはLGに比べ有意に高かった(p < 0.05)。しかし、RERではLGがやや高い値を示したものの、HGとの間に有意な差はみられなかった。

Table 5. Comparison of measured and estimated parameters of aerobic power in 3 groups.

group	$\dot{V}O_2\text{max}$			measured $\dot{V}O_2\text{max}/\text{BW}$ (ml/min/kg)	$\dot{V}E\text{max}$ (l/min)	HRmax (bpm)	RER
	measured (l/min)	estimaed (l/min)	ratio (%)				
LG (n=14)	2.017	2.294	-12.0	37.9	92.5	191	1.29
	0.186	0.193	4.3	3.5	13.8	7	0.08
AG (n=23)	2.278	2.294	-0.8	41.1	88.3	189	1.22
	0.188	0.174	2.4	3.1	14.2	11	0.08
HG (n=19)	2.524	2.301	9.7	44.9	103.7	189	1.25
	0.212	0.176	4.1	3.7	15.2	9	0.06
results of one way ANOVA	27.14 ***	0.009 ns	150.1 ***	17.60 ***	6.173 **	0.365 ns	3.992 *
post hoc test (LG:HG)	7.219 ***	-	13.33 ***	5.507 ***	2.211 *	-	1.624 ns

group	net E (%)	PWCmax (W)	PWCmax	
			/BW (W/kg)	/LV (W/kg)
LG (n=14)	31.7	191	3.6	14.3
	2.3	28	0.4	1.3
AG (n=23)	33.4	229	4.1	17.1
	2.6	23	0.3	1.4
HG (n=19)	31.2	241	4.3	18.0
	1.6	23	0.4	1.2
results of one way ANOVA	5.696 **	17.80 ***	15.30 ***	29.16 ***
post hoc test (LG:HG)	0.682 ns	5.249 ***	4.958 ***	7.877 ***

The scores were F value and t value. significant level; *p < 0.05, **p < 0.01, *** p < 0.001

Table 6に、3群それぞれの無酸素性パワーの測定結果を示した。HGとLGの間に、grossPPmaxの実測値、予測値に有意な差はみられなかった(表には示していないが、netPPmaxにも有意差なし)。しかし、grossPPmax予測値に対する実測値の割合は、PWCmax同様にHGはLGに比べ有意に高い値を示した($p < 0.001$)。また、grossPPmax実測値の体重あたりにおいて差はみられなかったものの、LVあたりではHGはLGに比べ有意に高かった($p < 0.001$)。また、OLに差はみられなかったものの、PVmaxにおいてHGはLGに比べ有意に高かった($p < 0.05$)。

5) 下肢骨格筋量と無酸素性パワー関連指標との関係

Figure 2にLVとPPmax (gross, net) との関係はAG・HG・LGに分けて示した。回帰直線は被検者全体での両者の関係を示しており(以下の散布図すべて)、gross ($r = 0.742$)、net ($r = 0.691$)とも0.1%水準の危険率で有意な相関関係が認められた。先に示したように、grossPPmaxのLVあたりにおいてHGはLGに比べ有意に高かった(Table 6)。したがって、Figure 2LにおいてHGは回帰直線よりも上側にLGは下側に位置する傾向となる。

Table 6. Comparison of measured and estimated parameters of anaerobic power in 3 groups.

group	grossPPmax		ratio (%)	measuredPPmax		PVmax (rpm)	OL (kp)
	measured (W)	estimaed (W)		/BW (W/kg)	/LV (W/kg)		
LG (n=14)	540	586	-7.9	10.0	40.1	197	5.6
	110	93	10.6	1.3	5.0	20	0.9
AG (n=23)	582	586	-1.0	10.4	43.1	199	6.0
	118	84	11.7	1.6	5.5	12	1.2
HG (n=19)	627	589	7.1	11.2	46.6	210	6.1
	103	85	13.1	1.7	5.4	13	0.9
results of one way ANOVA	2.536	0.009	6.460	2.198	6.129	4.398	1.061
	ns	ns	**	ns	**	*	ns
post hoc test (LG:HG)	-	-	3.621	-	3.581	2.176	-
			***		***	*	

The scores were F value and t value. significant level; * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

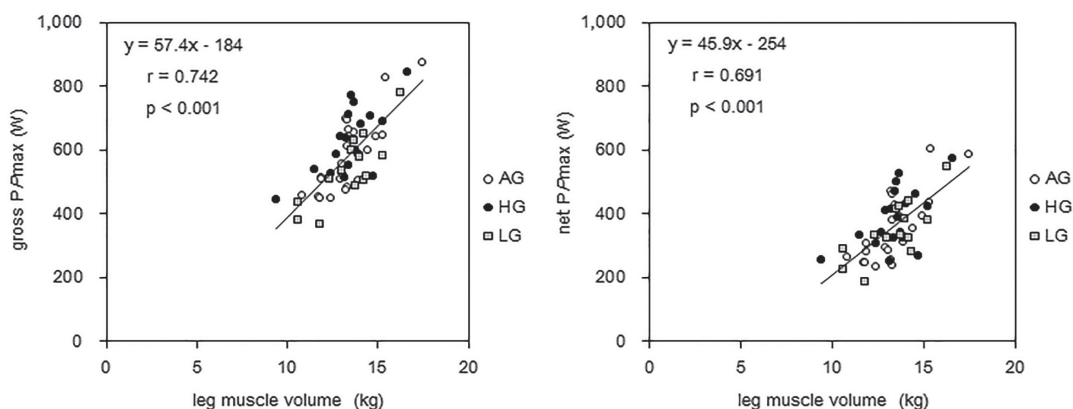


Figure 2. Relationship between LV and PPmax

Figure 3にPWCmaxとPPmax (gross, net) との関係を示した。いずれの間にも有意な相関関係が認められた (gross: $r = 0.621$, $p < 0.001$, net: $r = 0.420$, $p < 0.01$)。それぞれのLVあたりでの関係をFigure 4に示した。grossPPmax/LVでは $r = 0.303$ の有意な相関関係 ($p < 0.05$) が認められたが, netPPmax/LVでは $r = -0.096$ の極めて低い相関係数となった。なお, PWCmaxおよびPWCmax/LVにおいてHGはLGに比べ有意に高かった (Table 5)。したがって, Figure 3からFigure 4の散布図においてHGは右側にLGは左側に位置する傾向となる。

4. 考察

本研究では, LVとMacroPおよびManaPの関係等について検討した。まず被検者を, LVとの回帰式から予測される $\dot{V}O_2\max$ に対し, 実測値が $\pm 5\%$ 区間内の群 (AG), 実測値が $+5\%$ よりも上位の群 (HG) および -5% よりも下位の群 (LG) の3群に分けた。3群の比較において, 体格に差はみられなかった。そして, LVからの $\dot{V}O_2\max$ 予測値において, HGとLGの間に有意な差は認められなかったものの (LVが同程度), $\dot{V}O_2\max$ 実測値および $\dot{V}O_2\max/BW$ において, HGはLGに比べ有意に高かった。LVからの $\dot{V}O_2\max$ 予

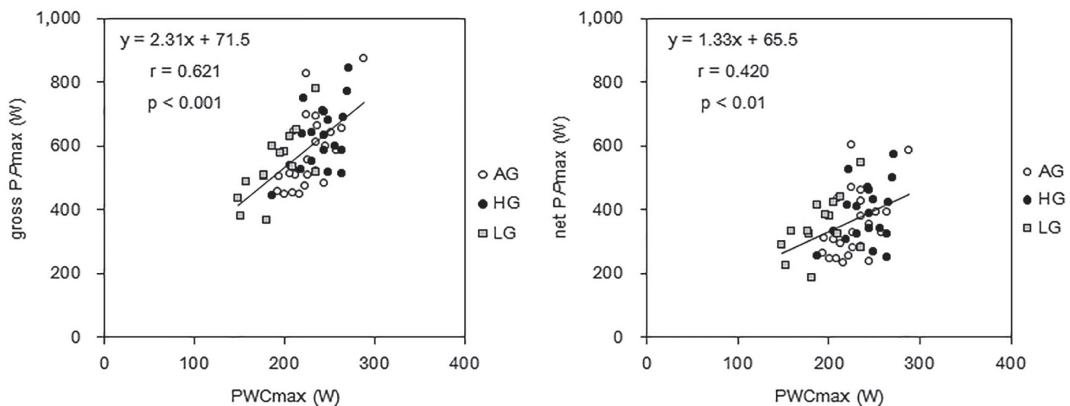


Figure 3. Relationship between PWCmax and PPmax

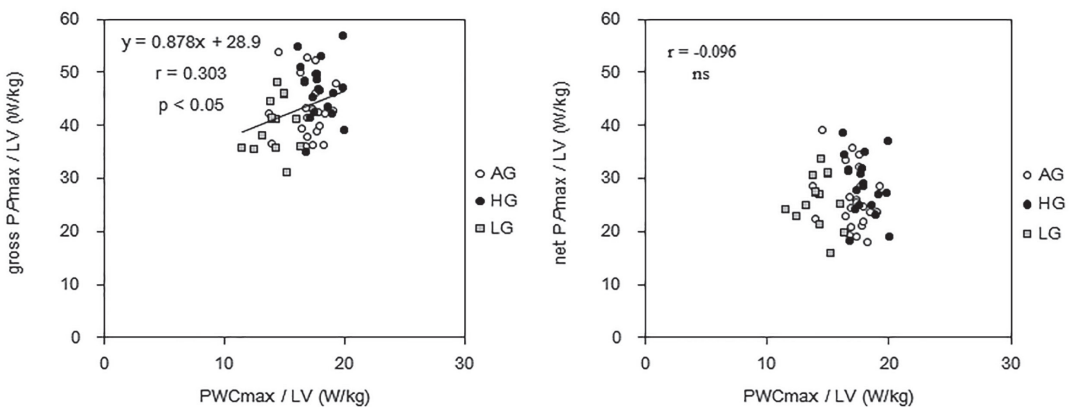


Figure 4. Relationship between PWCmax per LV and PPmax per LV

測値によるHGとLGの区分は、LVあたりの $\dot{V}O_2\max$ の高低と同義であり、体重あたりの $\dot{V}O_2\max$ の高低に近似される。したがって、 $\dot{V}O_2\max/BW$ に有意な差が認められたことは当然である。

トレッドミル走を運動課題とした先行研究(若山2018)では、HGの $\dot{V}E_{\max}$ が有意に高く、RERは有意に低い値を示した。Wasserman(1973)が提唱した無酸素性作業閾値(AT)の概念は、「肺における外呼吸での $\dot{V}CO_2/\dot{V}CO_2$ (RER)は組織における内呼吸での $\dot{V}CO_2/\dot{V}CO_2$ (呼吸商:RQ)が一定であり、過剰に排出される CO_2 は乳酸(La)の緩衝による」と仮定している(星川と山本1997)。Laは血中の重炭酸イオン(HCO_3^-)によって緩衝され、組織で産生された CO_2 に加えて、余分な CO_2 が体外に排出されるために $\dot{V}CO_2$ が $\dot{V}O_2$ を上回る。これにしたがえば、先行研究においてLGは漸増速度法での走運動終盤により多くの乳酸産生(解糖系でのATP産生)があったと考えることができる。そして、LGは走運動での主な活動筋である脚の筋線維組成においてFT線維が優位である可能性を示唆した。しかし、体水分量からみたMaeroPおよびManaPにおいて、「ST線維が優位であれば前者に高く、FT線維が優位であれば後者に高い」という仮説は立証されなかった。

自転車エルゴメータを運動課題とした本研究においても、 $\dot{V}E_{\max}$ はHGにおいて有意に高かった。しかし、RERにおいて有意な差は認められなかった。先行研究の問題点であった運動時間の短さ(脚伸展パワーは0.5 s程度)を修正した本研究(10 s程度)では、LVとPPmaxとの関係(Figure 2)においてLGが回帰直線より上位に位置すると予想した。しかし、結果はこれに反しHGが上位に位置した。そして、PWCmaxとgrossPPmaxの間(Figure 3L)だけでなく、体格の影響を除いたPWCmax/LVとgrossPPmax/LVの間(Figure 4L)にも有意な正の相関関係が認められた。そして、LVからのgrossPPmax予測値に対する実測値の割合は、PWCmax同様にHGは有意に高く、また、grossPPmax実測値のLVあたりにおいても同様であった。ここで、netEに両群間の差はなく、エネルギー出力の機械効率(金子と福永2004)の巧拙は否定される。したがって、ST線維が優位であれば前者に高く

FT線維が優位であれば後者に高いという仮説は否定された。

仮説と相反する結果となった理由として次のことが考えられる。まず、MaeroPとManaPの間に有意な負の相関関係を認めたKatchとWeltman(1979)の被検者(男性16名)は、 $\dot{V}O_2\max$ のrangeが44.9–80.7 ml/min/kgと、非鍛錬者から一流長距離走選手に至るほどかなり幅が広く(論文には被検者属性の明記なし)、同様に負の相関関係を認めたPirnay(1981)は、一流短距離走選手・長距離走選手を被検者としていた。このような、筋線維組成が極端に異なると予想される被検者であったのに対し、本研究の被検者は $\dot{V}O_2\max$ のrangeが31.0–52.2 ml/min/kg(50.0以上2人)と、全体に均質であった。このため、日常の身体活動の程度により正の相関関係を示したものと思われる。

KatchとWeltman(1979)は、負の相関関係が認められたことから、3つのエネルギー供給系(ATP-CP系・解糖系・酸化系)は独立で、FT線維とST線維はそれぞれ特定の筋活動に対して異なるふるまいをしているであろうと述べている。一方で、Baron(2000)は、正の相関関係が認められたことから、高い無酸素性パワーを発揮することに、高い有酸素性パワー発揮能力が関係しているだろうと述べている。本研究の結果は、後者を支持するものであった。また本研究では、「最大努力での筋力発揮ではType I線維も動員される」というサイズの原理(Hennemanら1965)から、PPmaxにおいてST線維も動員されると仮定し、grossPPmaxからPWCmaxを引いたnetPPmaxについても検討した。結果は、grossPPmax/LVはPWCmax/LVと有意な正の相関関係を示したものの(Figure 4L)、netPPmax/LVではその相関係数はほぼゼロであった(Figure 4R)。このことから、grossPPmaxにPWCmaxが関係している可能性が示唆された。ただし、10 s程度の時間で発揮されるPPmaxにおいて、呼吸循環器の応答は全く間に合わず(有酸素運動において、運動強度の増減への応答時間は17 s以上:藤澤ら2016)、有酸素性エネルギー供給機構の貢献は無に等しいと考えられる(ST線維の初期動員を否定するものではない)。したがって、grossPPmax値にPWCmax値が

含まれているのか、またどの程度含まれているのかは不明である。

さて、仮説に反しHGはMaeroP, ManaPともに高く、有酸素性や無酸素性のエネルギー供給系によるATP再合成に関わる(LVに反映されない)質的要素が、両面で優れていたと考えられる。例えば、前者はコハク酸脱水素酵素(AndersenとHenriksson 1977, Costillら1976)やクエン酸シンターゼの活性化(Keithら1992)、ミトコンドリアの増加とそれに伴うピルビン酸酸化能力の向上(寺田2008)など、後者は乳酸脱水素酵素やフォスホリラーゼの活性化(Costillら1976)などである。このことは、体重やLVに影響されないPVmaxにおいてHGが有意に高かった点からも窺える。したがって、LVあたりでみるMaeroPやManaPは、筋のpotentialの評価として有用であるといえる。

本研究の限界と課題として次のことが挙げられる。今回、両下肢水分量からLVを算出したが、骨も水分を含有しており、LVがどれほど正確に推定されたかは不明である。ただし、8点電通プレートによる四肢の身体組成推定の妥当性は確かめられており(Bedogniら2002)、LVあたりで除す相対値の比較に影響を及ぼすものではない。また、呼気ガスはbreath by breath方式にて1分ごとに積算したが、運動強度の漸増に対し生理的応答の時間遅れが17-28秒程度(藤澤ら2016)あることを考慮すると、運動強度に対する必要酸素量はやや低めに見積もられる(netEの過大評価)、しかし、PWCmax推定におけるMSS付近では $\dot{V}O_2$ はplateauかleveling offに達しており、時間遅れの影響は受けないと考えられる。なお、PWCmaxには解糖系によるパワー発揮も貢献するため、RER = 1.00時のPWC値を用いるべきとも考えられるが、ここでは先行研究に倣った。

5. まとめ

本研究は、先行研究(若山2018)の追従検証として、女子体育大学生56人の生体電気抵抗法による下肢骨格筋量、自転車エルゴメータによる最大有酸素性パワー(最大酸素摂取量)および最大無酸素性パワー

(最大ペダリングパワー)などを測定し、以下の知見を得た。

下肢骨格筋量は、最大酸素摂取量と高い相関関係を示した。そこで、下肢骨格筋量からの予測値に基づいて、実測最大酸素摂取量の上位群(+5%以上)と下位群(-5%以下)に分けた場合、上位群では最大換気量が高く、先行研究とも一致した。しかし、呼吸交換比については差がみられなかった(先行研究と相違)。

上位群と下位群の比較において、「下肢骨格筋量あたりの最大有酸素性パワーが高い群は最大無酸素性パワーが低い」、というような筋線維組成に由来する特性はみられず、逆に「最大有酸素性パワーが高い群は最大無酸素性パワーも高い」という結果となった。上位群は、有酸素性や無酸素性エネルギー供給機構によるATP再合成に関わる酵素活性など、LVに反映されない質的な部分で優れていたと考えられる。

付記

本研究は、2017年度東京女子体育大学女子体育研究所、奨励個人研究費による助成を得た。

引用文献

- 1) Andersen P. and Henriksson J. (1977): Training induced changes in the subgroups of human type II skeletal muscle fibers. Acta Physiol Scand 99: 123-125.
- 2) Baron R. (2001): Aerobic and anaerobic power characteristics of off-road cyclists. Med Sci Sports Exer 33 (8): 1387-1393.
- 3) Bedogni G., Malavolti M., Severi S., Poli M., Mussi C., Fantuzzi A.L and Battistini N. (2002): Accuracy of an eight-point tactile-electrode impedance method in the assessment of total body water. Eur J Clin Nutr 56 (11): 1143-1148.
- 4) Bentley D. J., Wilson G. J., Davie A. J. and Zhou S. (1998): Correlations between peak power output, muscular strength and cycle

- time trial performance in triathletes. *J Sports Med Phys Fitness* 38: 201–207.
- 5) Boulay M. R., Lortie G., Simoneau J. A., Hamel P., Leblanc C. and Bouchard C. (1985): Specificity of aerobic and anaerobic work capacities and powers. *Int J Sports Med* 6: 325–328.
 - 6) Close R. (1967): The relation between intrinsic speed of shortening and duration of the active state of muscle. *J Physiol* 192: 815–822.
 - 7) Costill D. L., Daniels J., Evans W., Fink W., Krahenbuhl G. and Saltin B. (1976): Skeletal muscle enzymes and fiber composition in male and female track athletes. *J Appl Physiol* 40(2): 149–154.
 - 8) Coyle, E. F., Feltner M. E., and Kautz S. A. (1991): Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 23: 93–107, 1991.
 - 9) Crielaard J. M. and Pirnay F. (1981): Anaerobic and aerobic power of top athletes. *Eur J Appl Physiol* 47: 295–300.
 - 10) Di Prampero P. E., Pinalima P. and Sassilimas G. (1970): Maximal muscular power, Aerobic and anaerobic, in 116 athletes performing at the XIXth Olympic Games in Mexico. *Ergonomics* 13 (6): 665–674.
 - 11) 藤澤宏幸, 高橋一揮, 小野部純, 吉田忠義, 鈴木誠, 近藤和夫(2016): 正弦波運動負荷による呼吸循環応答評価のための短時間プロトコルの検討. *東北理学療法学* 28: 6–12.
 - 12) Fukunaga T. (1976): Die absolute muskelfraft und das muskelfrafttraining. *Sportarzt und Sportmed* 27: 255–265.
 - 13) Henneman E., Somjen G. and Carpenter D. C. (1965): Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *J Neurophysiol* 28: 560–580.
 - 14) 星川佳広, 山本義春(1997): 運動時の呼吸循環動態の解釈をめぐって. *BME11* (1): 47–55.
 - 15) Jacobs I., Tesch P. A., Bar-Or O., Karksson J. and Dotan R. (1983): Lactate in human skeletal muscle after 10 and 30 s of supramaximal exercise. *J. Appl. Physiol. Respirat. Environ. Exercise Physiol* 55 (2): 365–367.
 - 16) Jones N. L. and McCartney N. (1986): Influence of muscle power on aerobic performance and the effects of training. *Acta Med Scand Suppl* 711: 115–122.
 - 17) 金子公宥, 福永哲夫(2004): バイオメカニクス—身体運動の科学的基礎—. P. 208, 杏林書院, 東京.
 - 18) Katch V. L. and Weltman A. (1979): Interrelationship between anaerobic power output, anaerobic capacity and aerobic power. *Ergonomics* 22 (3): 325–332.
 - 19) Keith S. P., Jacobs I. and McLellan T. M. (1992): Adaptation to training at the individual anaerobic threshold. *Eur J Appl Physiol* 65: 316–323.
 - 20) 中村好男, 武藤芳照, 宮下充正(1984): 最大無酸素パワーの自転車エルゴメータによる推定法. *Jpn J Sports Sci* 3: 834–839.
 - 21) 荻田太(2008): エンデュランストレーニング研究のこれまでとこれから—最大酸素摂取量—. *トレーニング科学*, 21 (1): 109–123.
 - 22) 小野寺孝一, 宮下充正 (1976): 全身持久性運動における主観的強度と客観的強度の対応性—Rating of perceived exertionの観点から—. *体育学研究* 21: 191–203.
 - 23) Pace N. and Rathbun E. N. (1945): Studies on body composition: III. The body water and chemically combined nitrogen content in relation to fat content. *J Biol Chem* 158: 685–691.
 - 24) Tanaka H., Bassett D. R. Jr., Swensen R. T. C. and Sampedro R. M. (1993): Aerobic and

- anaerobic power characteristics of competitive cyclists in the United States Federation. *Int J Sports Med* 14: 334-338.
- 25) 寺田新 (2008) : エンデュランストレーニング研究のこれまでとこれから—エンデュランストレーニングに対する骨格筋の適応—. *トレーニング科学*, 20 (3) : 213-224.
- 26) 若山章信 (2018) : 生体電気抵抗法による推定体水分量から最大有酸素性パワーおよび最大無酸素性パワーを評価する. *東京女子体育大学・東京女子体育短期大学紀要* 53 : 95-104.
- 27) Wasserman K., Whipp B. J., Koyal S. N. and Beaver W. L. (1973): Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J Appl Physiol* 35: 236-243.