

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

Evaluate Maximal Aerobic and Anaerobic Power from Body Fluid Volume
Estimated by Bioelectrical Impedance Analysis in Active Female

若山 章信

WAKAYAMA Akinobu

Abstract

The purpose of this study was to confirm a utilization of body fluid volume measured by the bioelectrical impedance analysis method for evaluate a maximal aerobic power and a maximal anaerobic power. Subjects were 65 female physical education college students (about 20 years). Their height, body weight and %Fat were 159.3 ± 5.1 cm, 56.5 ± 7.1 kg and 25.1 ± 4.3 % (mean \pm S.D.), respectively.

The index of the maximal aerobic power was a maximal oxygen intake ($\dot{V}O_{2max}$) and that of the maximal anaerobic power was an instantaneous maximal isokinetic leg extension power (P_{max}).

The relationship between total body fluid volume and $\dot{V}O_{2max}$ was significant ($r = 0.758$, $p < 0.001$). 65 subjects were divided into 3 groups from the ratio of actual $\dot{V}O_{2max}$ by predicted $\dot{V}O_{2max}$ based on the relation between total body fluid volume, which were higher group (HG: more than +5 %), lower group (LG: less than -5 %) and average group (AG: among $\pm 5\%$), respectively.

As the results, LG showed significantly lower $\dot{V}E_{max}$ ($p < 0.001$) and significantly higher respiratory exchange ratio (RER: $p < 0.001$) than HG. P_{max} was not significantly different when compared with HG and LG. A hypothesis of this study was, HG shows lower P_{max} divided by leg fluid volume than LG, because of their differences of the muscle fiber composition. Thus, that tendency was not observed.

Leg fluid volume indicated higher correlation with P_{max} ($r = 0.650$, $p < 0.001$) than the maximal leg extension strength ($r = 0.510$, $p < 0.001$). Therefore, body fluid volume is useful for the evaluation for maximal aerobic power and maximal anaerobic power from the view point of a muscle potential despite the muscle fiber composition.

Keywords: $\dot{V}O_{2max}$, $\dot{V}E_{max}$, RER, force-velocity curve, leg extension power

1. はじめに

身体組成を分析する方法として、「アルキメデスの原理」によって体重と水中体重との差分から体積を算出

し (Behnke et al. 1942), 体重÷体積により算出された身体密度から体脂肪率 (%Fat) を推定する方法が, 1960年代に開発された。

$$\%Fat = \left(\frac{4.570}{\text{身体密度}} - 4.142 \right) \times 100$$

… (Brozek et al. 1963)

この推定法は、身体を体脂肪量と除脂肪量（主に骨・筋）の2成分に分けることが可能となるが、大がかりな装置と水に潜る身体的負担から、主に研究目的や一流アスリートの身体組成計測などにしか用いられなかった。しかし、2000年以降、生体電気抵抗法（Bioelectrical impedance analysis: BIA法）の普及により、%Fatの測定は一般的な健康診断や体力診断においても用いられるようになっていく。BIA法は、水分を多く含む除脂肪組織（水分73.2%: Pasa and Rathbun 1945）は電気を通しやすく、脂肪組織は電気を通しづらい（水分18%: Heymsfield et al. 1999）ことから、BI値が低いほど体水分量が多い、すなわち除脂肪量（LBM）が多いという理論からなっている。なお、BIA法によるいわゆる体脂肪率計には、単に電気抵抗値から%Fatを推定する簡易なもの（性別、身長、体重、BI値を独立変数として%Fatを推定）、BI値が伝導体の長さに比例し断面積に反比例することから、伝導体である体節を円柱に見立て、身長から推定される体節の長さからBI値から、円柱の容積（=水分量）を求め、LBMや%Fatを算出するものがある。より精度の高い測定器では、体を四肢と体幹に分け、さらに低周波電流（5 kHz～50 kHz程度）により細胞外液を、高周波電流（250 kHz～500 kHz程度）により細胞内液を含めた各分節の水分量（頭部・頸部は除く）を推定する。いずれにしても推定法であるため、身長、体重や体脂肪量が平均値から外れるほど推定精度は下がり、また体温や発汗、皮膚の乾燥具合などで値が変動するため、測定条件を一定にすることが求められる。

ところで、筋の最大張力は筋断面積に比例し（Fukunaga 1976）、筋の収縮速度は筋長に比例する（Close 1967）。したがって、力×速度で算出される筋パワーは、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に比例することとなる。そして、ここに速筋・遅筋の筋線維割合が関わることになる（Costill et al. 1976, Coyle et

al. 1979, 琉子ら 1982）。

そこで本研究ではBIA法により、1) 女子体育大学生における四肢・体幹の水分量の標準値の提示、2) 体水分量と最大有酸素性パワーおよび最大無酸素性パワーとの関連、さらには、3) 筋線維組成（ST線維・FT線維）に相当すると考えられる最大有酸素性パワーと最大無酸素性パワーのパワーバランスの評価等について検討した。3) の仮説は、体水分量からみた最大有酸素性パワーおよび最大無酸素性パワーは、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、である。

2. 方法

1) 被検者

2016年・2017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81人とし、後述の最大有酸素性パワーおよび最大無酸素性パワーにおけるcriteriaを満たした65人のデータを使用した。測定は両年とも4月下旬から6月下旬に行い、被検者の年齢は概ね20歳であった。運動部所属者は51人（78%）であったが、非所属者にあっても大学2年次までの必修実技授業により、1日1時間・週3日程度の運動を継続していたとみなせる。

なお、履修者からは、4月頭初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実習内容（安全性等）や、データ公開（個人情報保護）について説明し、同意を得た（データ公表に掛かる研究倫理審査承認番号：研倫審・平29-23号）。

2) 形態・身体組成計測

身長、体重、右大腿最大囲、右大腿前部皮下脂肪厚（Bモード: SSD-3500SV, ALOKA社製）およびBIA法による%fat、除脂肪体重（LBM）、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（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。

また、右大腿最大囲および右大腿前部皮下脂肪厚から、以下の式により大腿最大除脂肪面積 (Maximal Fat Free Area of Thigh: FFAT) を算出した (大腿断面は真円で、皮下脂肪は均等に分布と仮定)。

$$FFAT = \pi \times (\text{大腿最大囲} \div 2\pi - \text{大腿前部皮下脂肪厚})^2$$

3) 最大有酸素性パワーの計測

最大有酸素性パワーの指標として、トレッドミル走での漸増速度法により最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2\text{max}$) を測定した。また、 $\dot{V}O_2\text{max}$ 出現時の二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$) および呼吸交換比 ($RER: \dot{V}CO_2 / \dot{V}O_2$)、最大換気量 ($\dot{V}E\text{max}$)、最高心拍数 ($HR\text{max}$) を検討に用いた。被検者は、2分間の座位安静の後、3分間の歩行 (80 m/min から1分ごとに20 m/min ずつ速度漸増)、次いで all-out までの走行 (140 m/min から1分ごとに10 m/min ずつ速度漸増) を行った。呼吸ガス分析は、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。走行中は1分毎に自覚的運動強度 (RPE: Borg スケール, 小野寺と宮下 1976) を聴取した。

最大酸素摂取量判定の criteria は、以下の4つの内、3つ以上とした。

- ① RER が、全体平均値の90%信頼区間 (下位5%) 以上であること
(mean \pm S.D. = 1.18 \pm 0.10; 1.02 以上)
- ② 最高心拍数が、全体平均値の90%信頼区間 (下位5%) 以上であること
(mean \pm S.D. = 195 \pm 12; 176 以上)
- ③ RPE が19 以上であること
- ④ $\dot{V}O_2$ がプラトーまたはレベリングオフに達していること

なお、サイズの原理 (Henneman et al. 1965) により、次節の最大無酸素性パワーにもST線維が動員される。そこで、主にST線維による出力パワー値を推定

するため、次式により $\dot{V}O_2\text{max}$ (ℓ/min) をパワー (W) に換算した。

$$\text{Maero}P \text{ (W)} = \dot{V}O_2\text{max} (\ell/\text{min}) \times 87.25$$

$$\begin{aligned} \text{※ } \dot{V}O_2: 1 \ell/\text{min} &= 5 \text{ kcal/min} = 20,920 \text{ J/min} = \\ &= 349 \text{ J/sec (W)} \rightarrow 349 \times 0.25 = 87.25 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} O_2: 1 \ell &= 5 \text{ kcal}, 1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J}, \text{ エネルギー変換} \\ \text{効率} &= 25.0 \% \text{ (金子 1988)} \end{aligned}$$

4) 最大無酸素性パワーの計測

最大無酸素性パワーの指標として、座位スクワット型の等速性脚伸展筋力測定器 (キックフォース: 竹井機器社製) を用い、3つの速度による脚伸展筋力を測定した。次に、自転車エルゴメータを用いた中村ら (1984) の方法を参考に、速度と力との一次回帰直線から最大筋力 ($F\text{max}$) およびその体重あたり ($F\text{max}/BW$)、最大速度 ($V\text{max}$)、そして、 $F\text{max}$ の1/2と $V\text{max}$ の1/2を乗ずることで算出される最大パワー ($P\text{max}$) およびその体重あたり ($P\text{max}/BW$) を推定した (図1: データは本被検者の平均値を使用)。また、 $P\text{max}$ と $\text{Maero}P$ の差をFT線維によるパワー発揮と仮定した。

測定では、軽運動での warm-up の後、測定器に深く腰掛けさせ、測定開始時の膝関節角度が90度 (立位を0度として、足関節20度背屈位、股関節120度屈曲位程度) になるようフットプレート位置を調節した。

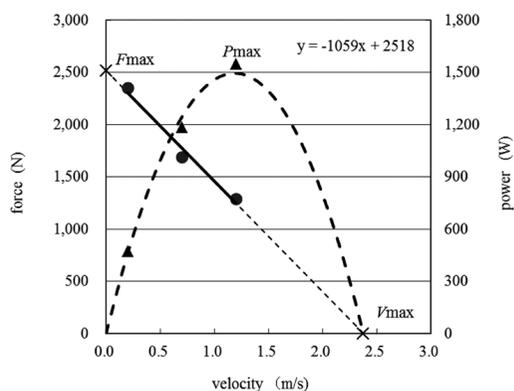


Figure 1. Force-velocity relationship and predict maximal power for leg extension.

被検者には両手でレバーを握らせ、腰部と椅子はベルトで固定した。脚伸展の速度は、機器への慣れと疲労を考慮し、中速 (0.7 m/s)、高速 (1.2 m/s)、低速 (0.2 m/s) の順とした。3速度それぞれについて、3回目まで徐々に発揮筋力を高め、後の3回～5回を全力でキックするよう指示した。3速度の測定間には5分以上の休息を挟んだ。

最大脚伸展パワーのcriteriaとして、速度-力関係の回帰直線の相関係数(絶対値)が0.950以下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、まず総水分量と $\dot{V}O_2\max$ との回帰分析を行った。次に、その回帰式により、総水分量から予測される $\dot{V}O_2\max$ を算出し、実測値が予測値の $\pm 5\%$ 区間内の群 (AG)、実測値が予測値の $+5\%$ よりも上位の群 (HG) および実測値が予測値の -5% よりも下位の群 (LG) の3群に分けた。

3群間において、体格・身体組成、有酸素性パワーに関わる指標 ($\dot{V}O_2\max$, $\dot{V}O_2\max/BW$, $\dot{V}CO_2$, RER, $\dot{V}E\max$, HRmax) および無酸素性パワーに関わる指標 ($F\max$, $F\max/BW$, $V\max$, $P\max$, $P\max/BW$) 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、脚水分量およびFFATと、無酸素性パワーに関わる指標である $F\max$, $V\max$ および $P\max$ について回帰分析を行った。危険率の有意水準は5%未満とした。

結果は平均値と標準偏差で示した。

3. 結果

結果は平均値と標準偏差で示した。

1) 形態・身体組成

表1に、被検者65人の体格・身体組成の測定結果を示した。身長は 159.3 ± 5.1 cm、体重は 56.5 ± 7.1 kg、%Fatは 25.1 ± 4.3 %であった。表2に、水分量の測定結果を示した。総水分量は 25.7 ± 2.9 lであった。

2) 最大有酸素性パワー

表3に、最大有酸素性パワーの測定結果を示した。 $\dot{V}O_2\max$ は 2.467 ± 0.404 l/min、 $\dot{V}O_2\max/BW$ は 44.1 ± 4.9 ml/min/kgであった。出力効率を25%と仮定したMaeroPは 215 ± 35 Wであった。

Table 1. Physique characteristics of subjects.

	height	weight	% fat	LBM	right thigh		
					girth	thickness	FF Area
mean	159.3	56.5	25.1	42.2	53.1	9.3	179.6
S.D.	5.1	7.1	4.3	4.5	4.6	3.7	33.7
	(cm)	(kg)	(%)	(kg)	(cm)	(mm)	(cm ²)

Table 2. Means and S.D. of fluid volume.

	right arm	left arm	(both arm)	trunk	right leg	left leg	(both leg)	total
mean	1.5	1.4	(2.9)	13.3	4.8	4.7	(9.5)	25.7
S.D.	0.2	0.2	(0.5)	1.4	0.6	0.6	(1.1)	2.9

(1)

Table 3. Measured parameters of the aerobic power.

	$\dot{V}O_2\max$	$\dot{V}O_2\max/BW$	$\dot{V}CO_2$	RER	$\dot{V}E\max$	HRmax
mean	2.467	44.1	2.905	1.18	97.7	197
S.D.	0.404	4.9	0.472	0.10	18.6	10
	(l/min)	(ml/min/kg)	(l/min)		(l/min)	(bpm)

3) 最大無酸素性パワー

表4に、最大無酸素性パワーの測定結果を示した。 F_{max} は 2516 ± 522 N, F_{max}/BW は 44.7 ± 8.2 N/kgであった。 P_{max} は 1552 ± 273 W, P_{max}/BW は 27.5 ± 3.8 W/kgであった。

4) 総水分量と最大酸素摂取量との関係

被検者全体での総水分量と $\dot{V}O_{2max}$ との間には高い相関関係が認められ、回帰式は $y = 0.106x - 0.266$

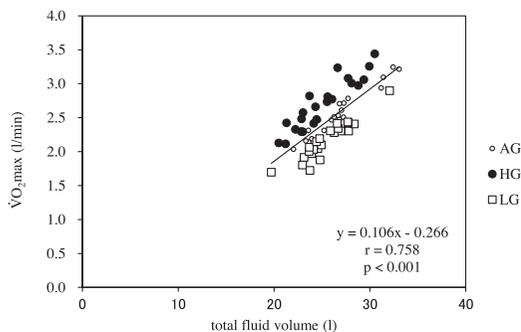


Figure 2. Relationship between total fluid volume and $\dot{V}O_{2max}$

で示された($r = 0.758$, $p < 0.001$). この式に被検者個々の総水分量を代入し、 $\dot{V}O_{2max}$ の予測値を算出した。そして、実測値が予測値の $\pm 5\%$ 以内の群 (AG: 20人), 上位群 (HG: 22人) および下位群 (LG: 23人) の3群に分けた。図2に、AG, HG, LGについて、総水分量と $\dot{V}O_{2max}$ 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。

5) 総水分量からみた最大酸素摂取量実測値の上位群・下位群の比較

表5に、LG・AG・HGの3群それぞれの形態・身体組成と、分散分析およびFisher's LSDの結果を示した。HGはLGに比べ、有意に身長が低く($p < 0.01$), %fatが高い($p < 0.001$) 結果となった。しかし、LBMや脚水分量、総水分量に差はみられなかった。同様に、FFATに差はみられなかった (HG: 179.0 ± 30.3 cm², LG: 178.2 ± 35.0 cm²)。

Table 4. Measured parameters of the anaerobic power.

	force			F_{max}	F_{max}/BW	V_{max}	P_{max}	P_{max}/BW
	0.2m/s	0.7m/s	1.2m/s					
mean	2350	1688	1291	2516	44.7	2.53	1552	27.5
S.D.	485	276	215	522	8.2	0.52	273	3.8
	(N)			(N)	(N/kg)	(m/s)	(W)	(W/kg)

Table 5. Characteristics of body composition parameters in 3 groups.

group	height	weight	% fat	LBM	fluid volume	
					both legs	total
lower group (LG)	160.3	54.2	23.0	41.7	9.4	25.4
	4.7	5.1	4.5	3.8	1.0	2.4
average group (AG)	161.4	59.1	25.4	43.8	10.0	26.8
	5.0	9.2	4.1	5.1	1.1	3.1
higher group (HG)	156.3	56.5	27.2	41.2	9.2	25.1
	4.5	6.2	3.4	4.6	1.2	3.0
	(cm)	(kg)	(%)	(kg)	(l)	
results of one way ANOVA	6.714**	2.636ns	6.289**	1.944ns	2.742ns	2.180ns
post hoc test (LG:HG)	2.851**	-	3.534***	-	-	-

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

表6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Fisher's LSDの結果を示した。総水分量からの $\dot{V}O_{2max}$ 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、 $\dot{V}O_{2max}$ 実測値においてHGはLGに比べ有意に高かった($p < 0.001$)。 $\dot{V}O_{2max}/BW$ および $\dot{V}E_{max}$ においても同様の結果であった。 $\dot{V}CO_2$ においても、HGはLGに比べ有意に高かった($p < 0.001$)。しかし、RERにおいては、LGがHGに比べ有意に高い値を示した($p < 0.001$)。HRmaxに差はみられなかった。

表7に、3群それぞれの無酸素性パワーの測定結果と、分散分析の結果を示した。HGとLGの間に、 F_{max} 、 F_{max}/BW 、 V_{max} 、 P_{max} および P_{max}/BW のすべてにおいて、有意な差は認められなかった。有酸素性パワーの出力効率を25%と仮定

したMacroP(215 ± 35 W)を引いた値においても、結果は同様であった。

6) 大腿最大除脂肪面積・脚水分量と最大無酸素性パワー関連指標との関係

図3にFFATと F_{max} の関係をLG・AG・HG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、0.1%水準の危険率($r = 0.469$)で有意な相関関係が認められた。同様に、脚水分量と F_{max} の関係においても0.1%水準の危険率($r = 0.510$)で有意な相関関係が認められた(図4)。脚水分量と V_{max} の間には有意な相関関係は認められなかった(図5)。しかし、脚水分量は P_{max} との間に最も高い相関関係を示し($r = 0.650$)、0.1%水準の危険率で有意であった(図6)。

Table 6. Measured and predicted parameters of the aerobic power in 3 groups.

group	predict $\dot{V}O_{2max}$	actual $\dot{V}O_{2max}$	percentage	$\dot{V}O_{2max}/BW$	$\dot{V}CO_2$	RER	$\dot{V}E_{max}$	HRmax
lower group (LG)	2.433	2.159	-11.4	39.9	2.642	1.23	88.8	196
	0.257	0.272	4.3	2.7	0.358	0.12	12.9	8
average group (AG)	2.583	2.568	-0.6	44.0	3.012	1.17	102.3	198
	0.330	0.350	3.2	2.4	0.486	0.07	24.2	11
higher group (HG)	2.398	2.698	12.5	48.6	3.083	1.14	102.7	196
	0.316	0.380	6.1	4.6	0.465	0.08	15.1	11
	(l/min)	(l/min)	(%)	(ml/min/kg)	(l/min)		(l/min)	(bpm)
results of one way ANOVA	2.180 ns	15.63 ***	140.8 ***	36.59 ***	6.515 **	4.693 *	4.404 *	0.176 ns
post hoc test (LG:HG)	-	5.446 ***	15.07 ***	7.718 ***	3.545 ***	2.793 **	3.304 **	-

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

Table 7. Measured parameters of the anaerobic power in 3 groups.

group	force			F_{max}	F_{max}/BW	V_{max}	P_{max}	P_{max}/B W
	0.2m/s	0.7m/s	1.2m/s					
lower group (LG)	2338	1657	1271	2503	46.0	2.45	1510	27.8
	507	292	257	530	7.5	0.44	301	4.4
average group (AG)	2441	1751	1348	2612	44.6	2.56	1620	27.7
	469	223	164	513	8.7	0.52	187	3.3
higher group (HG)	2279	1664	1259	2442	43.3	2.58	1532	27.0
	485	303	206	531	8.6	0.60	305	3.7
	(N)			(N)	(N/kg)	(m/s)	(W)	(W/kg)
results of one way ANOVA	0.576 ns	0.727 ns	1.029 ns	0.552 ns	0.628 ns	0.741 ns	0.397 ns	0.287 ns

The scores above were F value.

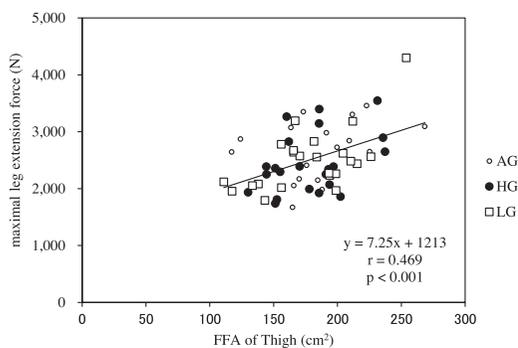


Figure 3. Relationship between maximal fat free thigh area and F_{max}

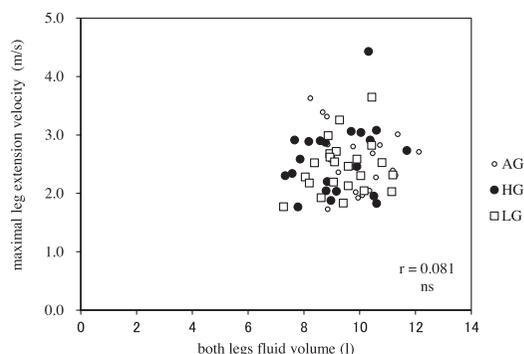


Figure 5. Relationship between both legs fluid volume and V_{max}

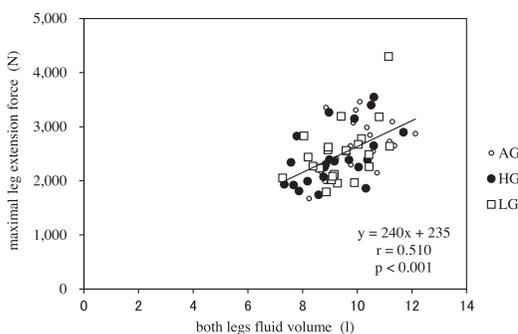


Figure 4. Relationship between both legs fluid volume and F_{max}

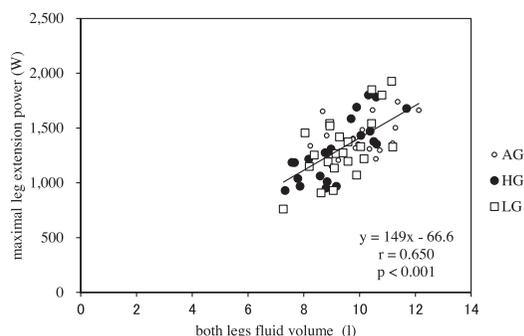


Figure 6. Relationship between both legs fluid volume and P_{max}

4. 考察

一般に、有酸素性パワーや無酸素性パワーの評価指標として、入力パワー ($\dot{V}O_2max$) や出力パワー (P_{max}) を体重で除した値が用いられる。体重で除すことについて山地と橋爪 (2010) は、 $\dot{V}O_2max$ を体重の3/4乗や2/3乗で除した方が、より中距離走の記録と決定係数 (r^2) が高いと報告している。いずれにしても、体重やそのべき乗で除すことは、自身の体重を移動させる仕事の時間効率 (速度) を意味し、performanceの評価を意図している。その一方、 $\dot{V}O_2max$ や P_{max} をその活動に動員される筋量で除すことは、筋のpotentialを評価することといえる。近年、MRIや超音波の断層映像から身体各部位の筋量を計測することが可能となったが、それらの利用は容易

ではなく、一般的な体力評価には適用しがたい。しかし、BIA法の普及により、筋量 (除脂肪量) の指標として利用できる四肢・体幹の体水分量の測定が簡便にできるようになった。そこで、本研究では、体水分量と最大有酸素性パワーおよび最大無酸素性パワーとの関連、さらに筋線維組成に相当する最大有酸素性パワーおよび最大無酸素性パワーのパワーバランスの評価等について検討した。

本研究では、 $\dot{V}O_2max$ との回帰式により総水分量から予測される $\dot{V}O_2max$ 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) および実測値が -5% よりも下位の群 (LG) の3群に分けた。HGとLGの比較では、HGはLGに比べ有意に身長が低く、%fatが高かった。しかし、FFAT、LBMや水分量に差はみられなかった。すなわち、体脂肪

を除いて両群間に量育の差はなかったといえる。そして、総水分量からの $\dot{V}O_2\text{max}$ 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、実測値である $\dot{V}O_2\text{max}$ および $\dot{V}O_2\text{max}/\text{BW}$ において、HGはLGに比べ有意に高かった。HGとLGの区分は、総水分量当たりの $\dot{V}O_2\text{max}$ の高低で分けることと、ほぼ同義である。そして、本被検者の体脂肪率の平均値は25%であり、残り75%は除脂肪組織である。このため、除脂肪量の73.2%をしめる水分(Pase and Rathbun 1945)と体重との相関は極めて高く($r = 0.879$, $p < 0.001$)、HGとLGの区分は体重当たりの $\dot{V}O_2\text{max}$ の高低に近似される。したがって、 $\dot{V}O_2\text{max}/\text{BW}$ に有意な差が認められたことは当然である。しかし、身長で平均4 cm上回るLGの $\dot{V}E\text{max}$ が有意に低い結果となり、また、RERにおいてはLGがHGに比べ有意に高い値を示した。

$\dot{V}O_2\text{max}$ の制限因子として宮村(1986)は、大きさの因子として、肺活量・死腔量・ヘモグロビン量・心臓容積・毛細血管数、機能的な因子として、最大毎分換気量・肺拡散容量・毎分心拍出量・筋血流量をあげている。しかし、宮村(1994)は、安静状態において意図的に最大努力で行わせた分時最大換気量に対し $\dot{V}E\text{max}$ が約60~70%であったことから、 $\dot{V}E\text{max}$ は余力を残しており制限因子とはならないとも示唆している。同様にWagner(1988)は、その制限因子として、動脈血の酸素分圧、ヘモグロビン量、筋血流量と、筋での酸素拡散容量をあげている。すなわち、LGは呼吸器系でなく運動器系の末梢疲労によってall-outを迎えたと考えられる。

そこで、RERに着目してみると、LGはHGに比して有意に高い値を示した。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 $\dot{V}CO_2/\dot{V}CO_2$ (呼吸交換比: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)の緩衝によるという仮定により成り立っている(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(次式)。



これにしたがえば、LGでは漸増速度法での走運動終盤により高い乳酸産生(解糖系の動員)があり、解糖系でのエネルギー(アデノシン3リン酸:ATP)産生速度の限界により走速度について行けなくなったか、緩衝しきれなかった水素イオンによってpHの低下(運動誘発性アシドーシス:中本ら 2007)をまねきall-outを迎えたと考えることができよう。そして、LGは本研究で用いた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がある。

ST線維が酸化系、FT線維が解糖系のATP再合成に優れていることから、体水分量からみた最大有酸素性パワーおよび最大無酸素性パワーは、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はずである。そこで、無酸素性パワー関連の測定結果をみても、HGとLGの間に、 $F\text{max}$ 、 $F\text{max}/\text{BW}$ 、 $V\text{max}$ 、 $F\text{max}$ 、 $P\text{max}$ および $P\text{max}/\text{BW}$ のすべてにおいて、有意な差は認められなかった。サイズの原理(Henneman et al. 1965)により、最大努力での筋力発揮ではType I線維も動員されるため、有酸素性パワーの出力効率を25%と仮定して、それを引いた $P\text{max} \cdot P\text{max}/\text{BW}$ においても、結果は同様であった。最大有酸素性パワー(平均値215 W)が最大無酸素性パワー(平均値1552 W)に対して14%程度しかないと、影響を及ぼさなかったものと考えられる。同様に、脚水分量と $P\text{max}$ との散布図(図6)において、LGが回帰直線より上位にHGが下位に位置すると仮説を立てたが、その傾向はみられなかった。また、クラブ所属については、HGではクラブ所属者18人(陸上短距離1人、スケート短距離系1人、トライアスロン2人、球技系7人、格技系2人、体操・ダンス系5人)と無所属4人、AGではクラブ所属者15人(陸上短距離1人、水泳短距離1人、カヌー1人、球技系7人、格技系1人、ダンス系4人)と無所属5人、LGではクラブ所属者15人(陸上跳躍2人、陸上短距離1人、陸上投擲1人、スキーアルペン1人、ライフセービング1人、球技系7人、格技系2人)と無所属8人、という結果であった。総水分量当たりの

$\dot{V}O_2\max$ が高いHGにクラブ所属者が、それが低いLGに無所属者が集まるような傾向はなく、また、トライアスロン2人がHGに入っているが、陸上短距離や球技系が3群にほぼ同数含まれており、種目特性もみられなかった。また、最大有酸素性パワー・無酸素性パワーともに回帰直線より上位に位置した被検者のクラブ所属についても、特徴的な傾向はみられなかった。この理由として、次の2点が考えられる。まず1つは、marathon-runnerとsprinterの比較、あるいは被検者を遅筋型と速筋型に分けたとしても、その筋線維比率(ST線維:FT線維)は6:4程度であり(Thorstensoon et al. 1976, Coyle et al. 1979, Gregor et al. 1979)、魚類や鳥類のそれのように明確に分かれるものではないこと。そして2つめは、今回は最大無酸素性パワーの代表値として、単発の脚伸展運動の瞬時値を用いたことである。脚伸展の測定運動域は0.6m程度であり、 P_{\max} が発揮される至適速度(平均値: $V_{\max} \times 1/2 = 1.26 \text{ m/s}$)では、0.5秒程度の運動となる。本研究では、総仕事量(平均伸展筋力 $\times 0.6\text{m}$)を経過時間(約0.5s)で除した平均パワーの最大値ではなく、平均1.26 m/sの速度において予測される瞬時最大筋力($F_{\max} \times 1/2$)を乗じた、瞬時パワーの最大値を採用した。10秒から30秒程度の連続運動によるパワーを検討に加えれば、解糖系の貢献からその結果は異なるものとなったかも知れない。

ところで、FFATおよび脚水分量と、 F_{\max} との関係はともに有意($r = 0.469$ および $r = 0.510$)であった。しかし、最も高い相関を示したのは、脚水分量と P_{\max} であった($r = 0.650$)。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)。したがって、力 \times 速度で算出される筋パワーは、筋断面積 \times 筋長に比例し、面積 \times 長さは体積であるため、筋パワーはおおよそ筋体積(ATPを貯蔵する筋容積)に比例することとなる。今回の結果は、脚水分量から最大無酸素性パワー(瞬時値)を筋のpotentialとして評価することの有用性を示したといえる。

本研究は、「体力評価の理論と実習」の授業において取得した、非観血的なデータのみから検討している。このため、特に今回の被検者である女性に多い

貧血などは確認しておらず、月経中であった被検者もいたであろう。また、RERのみからLGにおける解糖系の動員割合の高さを推察したが、血中乳酸値の測定も実施していない。今後、本研究を発展させるために、毎年4月に実施される健康診断(血液検査)の結果を活用し、血流量や動脈血酸素飽和度などの非観血的な検査項目を増やすことが考えられる。

5. まとめ

本研究では、女子体育大学生65人の生体電気抵抗法(BI法)による体水分量、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(最大脚伸展パワー)などを測定し、以下の知見を得た。

総水分量は、最大酸素摂取量と高い相関関係を示した。そこで、総水分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、下位群では最大換気量が低く、呼吸交換比が高かった。

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、有意な差は認められなかった。また、その上位群において脚水分量当たりの最大脚伸展パワーが低い、下位群において脚水分量当たりの最大脚伸展パワーが高い、という筋線維組成に由来する傾向はみられず、仮説は証明できなかった。

脚水分量は、最大脚伸展筋力よりも最大脚伸展パワーと高い相関関係を示し、筋のpotentialを評価する意味において、体水分量から最大有酸素性パワーや最大無酸素性パワーを評価することの有用性が示された。

付記

本研究は、平成27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) Behnke Jr A. R., Feen B. G. and Welham W. C. (1942): The Specific gravity of healthy men. body weight \div volume as an index of obesity. J Am Med Asso 118(7): 495-498.

- 2) Brozek J., Grande F., Anderson J. T. and Keys A. (1963): Densitometric analysis of body composition: Revision of some quantitative assumptions. *Ann NY Aca Sci* 110: 113-140.
- 3) Close R. (1967): The relation between intrinsic speed of shortening and duration of the active state of muscle. *J Physiol* 192: 815-822.
- 4) 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.
- 5) Coyle E. F., Costill D. L., and Lesmes G. R. (1979): Leg extension power and fiber composition. *Med Sci Sports* 11(1), 12-15.
- 6) Fukunaga T (1976): Die absolute muskelfraft und das muskelfrafttraining. *Sportarzt und Sportmed* 27: 255-265.
- 7) Gregor R. J., Edgerton V. R., Perrine J. J., Champion D. S. and DeBus C. (1979): Torque-velocity relationships and muscle fiber composition in elite female athletes. *J Appl Physiol, Respirat Environ Exercise Physiol* 47(2), 388-392.
- 8) Henneman E., Somjen G. and Carpenter D. C. (1965): Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *J Neurophysiol* 28: 560-580.
- 9) Heymsfield S. B., Tighe A. and Wang Z. M. (1999): Nutritional assessment by anthropometric and biochemical methods. In *modern nutrition in health and disease*. 9th ed. Edited by Shils M. E., Olson J. A., Shike M. and Ross A. C.: Williams and Wilkins. Baltimore.
- 10) 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.
- 11) 金子公宥 (1988): パワーアップの科学. P179, 朝倉書院, 東京.
- 12) 宮村実晴 (1986): 最大酸素摂取量測定の再検討. *体育の科学* 35(5), 358-364.
- 13) 宮村実晴 (1994): 呼吸と持久力 (石河利寛, 竹宮隆編: 持久力の科学), P107, 杏林書院, 東京.
- 14) 中本哲, 井澤鉄也, 若山章信 (2007): からだを動かすしくみ—運動生理学の基礎からトレーニングまで—第2版, 杏林書院, 東京, pp. 72-73.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 琉子友男, 福永哲夫, 近藤正勝, 塩野潔, 森本哲郎 (1982): Isokinetic作業時のpeak torqueに及ぼす筋線維比率および筋断面積の影響. *体育学研究* 27(2): 135-142.
- 19) Thorstensson A., Grimby G. and Karlsson J. (1976): Force-velocity relations and fiber composition in human knee extensor muscles. *J Appl Physiol* 40(1): 12-16.
- 20) 山地啓司, 橋爪和夫 (2010): 全身持久性の指標としての最大酸素摂取量—全身持久性の指標としてVO₂max—. *体力科学* 59(1): p. 49.
- 21) Wagner P. D. (1988): The determinants of VO₂max. *Ann Sports Med* 4(4), 196-202.
- 22) 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.