

スポーツ選手にみられる最大酸素摂取量の アロメトリック・スケーリング

山地啓司*

Allometric Scaling of Maximal Oxygen Intake in Sports

Keiji YAMAJI *

Summary

The metabolic rate does not increase linearly in proportion to the body weight. Therefore, $\dot{V}O_{2\text{rest}}$, $\dot{V}O_{2\text{max}}$, and $\dot{V}O_{2\text{submax}}$ should be expressed by the allometric scaling law of $y = ax^b$. In animal studies (single species), Rubner (1873) and Heusner (1982) identified an exponent of $2/3$, and Kleiber (1932) emphasized $3/4$ for multiple species. An expression relating $\dot{V}O_{2\text{max}}$ to the body mass and exponent of $2/3$ was first suggested in humans (single species) by Krogh (1916). Since then, exponents during various exercises and sports for athletes have been verified by many researchers, but a consensus has not been reached. This is because the results differed according to the age, gender, percent body fat, body height, and characteristics of the movement style during exercise. Therefore, this short review verified the kind of exponent preferable to estimate the $\dot{V}O_{2\text{max}}$ and $\dot{V}O_{2\text{submax}}$ during running, cycling, rowing, and cross-country skiing after controlling for age and gender. The resulting body mass exponent was roughly $2/3$ or $3/4$ for running, $2/3$ for cycling, cross-country skiing, and rowing

Key words: Allometric Scaling, $\dot{V}O_{2\text{max}}$, Sports, Body Weight

I. はじめに

絶対値で測定される最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2\text{max}}$) は、それを体重 1 kg 当たり ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) の単位で表わし、全身持久性の指標として使われる。 $\dot{V}O_{2\text{max}}$ を体重 1 kg 当たりで表示するのは、第 1 は、 $\dot{V}O_{2\text{max}}$ は体重に比例して高まること、第 2 はヒトのからだは均質であること、の仮説に基づいている。しかし、厳密には両仮説とも真理ではない。

第 1 の仮説に関しては、古くは 1883 年ドイツの Rubner³⁰⁾ が犬の代謝率が体重の $2/3$ 乗に比例するこ

とを明らかにした。この研究で用いた犬の体重は 3～30kg と 10 倍の相違がある。ヒトの場合には、 $\dot{V}O_{2\text{max}}$ の測定が可能な範囲である幼児から成人の違いは、極端な例を除けば約 4～5 倍である。成人に限定すると約 2 倍である。それでも体重にこの上・下限の差があれば、 $\dot{V}O_{2\text{max}}$ を体重の $2/3$ 乗と考えるか $1/1$ 乗と考えるかで違いが生まれる。Jensen²²⁾ によると、1916 年に Krogh は $\dot{V}O_{2\text{max}}$ の単位を体重の $2/3$ 乗であらわすべきであると指摘している。その後も多くの研究者が、 $\dot{V}O_{2\text{max}}$ の相対値をべき

* 立正大学法学部 (〒360-0194 埼玉県熊谷市万吉1700)
Rissho University, Faculty of Law

指数で表わすべきであると指摘した (Jensen ら²⁰; Swain⁴⁵).

第2の仮説に関しては、ヒトのからだは筋肉、骨、脂肪、各種の内臓器官等の組織によって構成されているので均質ではない。そこで、より全身持久性の指標としての精度を高めるために、徐脂肪体重 (LBM) 当たりの $\dot{V}O_2\max$ ($\text{ml} \cdot \text{kgLBM}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) が広く用いられている。

第2の仮説である“からだは均質である”として、第1の仮説である“ $\dot{V}O_2\max$ は体重に比例して高まる”か否かがこれまで多くの研究者によって明らかにされてきた。そこで本稿では、これまでの報告をレビューすることによって、スポーツのパフォーマンスを予測する場合の最も適切なべき指数がいくらであるか検証することを目的とした。

II. スケーリングの小史

1. 動物の代謝率のスケーリング

Meeh²⁶は、「からだの密度が均等だと仮定すると、からだ全体 (体積) で生成される熱は、体表面から失われる熱に等しくなる」こと、すなわち、代謝率が体表面積に比例して高まる (体表面積の法則) ことを発表した。その4年後、ドイツの Rubner³⁶は、犬の代謝率が体重 (3~30kg) の大きさにどこまでも比例して高まるのではなく、むしろ体表面積の大きさに比例することを実証した。そして、

$$\text{代謝率} = \text{定数} \times \text{体重}^{2/3}$$

のアロメトリー式を導き出した。それから約40年後に、アメリカの Kleiber²³は動物の代謝率と体重との間に、

$$\text{代謝率} = \text{定数} \times \text{体重}^{3/4}$$

の関係式が成り立つことを公表した。しかし、この式の科学的根拠が曖昧なことから、以後この式の信憑性と理論的根拠が、多くの研究者によって生物の種類を限定したり、体重の範囲を広げて追究された。例えば、Brody⁵は重さが16gから203kgまでの大小の動物の安静代謝率 (resting metabolic rate) が体重の0.71~0.74乗則の間にあり、もっとも望ましいべき指数が0.73乗則であるとみなした (Brody's law)。その結果は、Kleiber²³が提唱したアロメトリー式が経験則として追認されたものの、理論的背景を導き出すまでに至らなかった。しかし、その50年後に Heusner^{16,17}は、Kleiber²³の“アロメト

リー式”がマウス (21g) から牛 (600kg) までの26種類の異種間 (heterogeneous) から導き出されたもので、もし各動物の同種間 (homogeneous) でみるならば体重の2/3乗則に比例して代謝率が高まることを指摘した。この指摘は、Rubner³⁶が導き出したアロメトリー式の妥当性を支持するものであった。生物学の分野では今日も2/3 (0.67) 乗則か3/4 (0.75) 乗則かが、論争的となっている。

これらの生物学の分野でのスケーリングの研究の特徴は第1に対象となった動物が異種の混合が多かったこと、そして、第2に、小動物を用いて体重と $\dot{V}O_2\max$ との間に3/4 (0.75) 乗則の法則が成り立つことを明らかにした Pasquis ら³¹の報告を除くと、その他の報告 (Heusner^{16,17}, Kreiber²³) では体重と安静時の代謝率 ($\dot{V}O_2$) との関係が求められたこと、である。

2. ヒトの $\dot{V}O_2\max$ のスケーリング

では同種のヒトに限定した時の体重と $\dot{V}O_2\max$ のアロメトリー式はどのような歴史を歩んできたのであろうか。Jensen ら²⁰によると、1916年にすでに Krogh は $\dot{V}O_2\max$ の単位として体表面積当たり (体重の2/3乗則) で表わすべきであることを指摘している。1925年には、Henderson と Haggard¹⁵はその意図はよくわからないが、 $\dot{V}O_2\max$ を体重の2/3乗則で表している。1945年には Tanner⁴⁶が体重と $\dot{V}O_2\max$ との間にみせかけの関係 (spurious correlation) があることを、また、1956年にはスウェーデンの Döbeln¹²が体重の2/3乗則にすべきだと指摘し、Åstrand と Rodahl¹¹はその考えを支持した。それ以後多くの研究者によってアロメトリー式が、体重と $\dot{V}O_2\max$ の相互の関係に生じる誤差を最小にする^{30,49}、とかパフォーマンスをより正確に推定することが可能であることなどが明らかにされた⁴⁷。

しかしその一方で、 $\dot{V}O_2\max$ の測定のパioneerである Hill と Lupton¹⁸, Robinson ら³⁴が、全身持久性の指標として $\dot{V}O_2\max$ を、絶対値では $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ 、相対値では体重1.0kg 当たり ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) で表して以来、アロメトリー式を用いることの妥当性が指摘されたにもかかわらず、相対値の単位として $\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ が国際的に広く用いられてきたことも事実である。

はたして、全身持久性の指標として $\dot{V}O_2\max$ を用いる際の望ましい単位 (べき指数) はいくらである

うか。

Ⅲ. アロメトリー式の基本的考え方

これまで使われてきた $\dot{V}O_2\text{max}$ の相対値は、ヒトのからだ均質だと考え単純に体重1.0kg 当たりで評価するか、それともからだの成分を脂肪や、筋肉、骨等のように種々の組織できていると考えるか、によって区別されている。例えば後者のように考えると、不活性の脂肪を除いた除脂肪体重当たり ($\text{ml} \cdot \text{kgLBM}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) でみる方法と、ヒトのエネルギーの出力の大きさが筋肉量に比例することから、筋肉量で見える方法がある。しかしそれは、性差や加齢によって異なる。特に、加齢による脂肪量の増加、筋肉量や骨のミネラルの密度などの減少は体重1.0kg 当たりの $\dot{V}O_2\text{max}$ を約15%低下させる。これを $\dot{V}O_2\text{max}$ ($\text{ml} \cdot \text{kgLBM}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) で示すと有意な差が認められなくなる²⁷⁾。このような観点から、Döbeln¹²⁾は $\dot{V}O_2\text{max}$ を LBM 当たりで示すことを推奨した。Vanderburgh と Katch⁴⁷⁾は女性95人 (27.4 ± 6.7 歳)を対象にした体重と $\dot{V}O_2\text{max}$ との関係では、 $\dot{V}O_2\text{max}$ のべき指数は0.61、それはLBM 当たりでは1.04に相当するとした。Davies ら¹⁴⁾は73人の高年者を対象にした際、 $\dot{V}O_2\text{max}$ のべき指数は0.43であり、LBM でみると1.05のべき指数に相当するとした。一般に筋肉量当たりの $\dot{V}O_2\text{max}$ を求める場合には K ⁴⁰⁾などの放射線を用いなければならず、測定が容易ではない。そこで、一般には除脂肪体重当たりの $\dot{V}O_2\text{max}$ を採用する。例えば、1964年に発足した国際科学連合委員会 (International Council of Scientific Unions) の事業である、国際生物学事業計画 (International Biological Program; IBP) の Human Adaptability 班における研究では具体的な協議内容はわからないが、結果的にみると、 $\dot{V}O_2\text{max}$ の国際比較で用いたのは除脂肪体重当たり ($\text{ml} \cdot \text{kgLBM}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) の $\dot{V}O_2\text{max}$ であった⁴¹⁾。

一方、アロメトリック・スケーリング (allometric scaling) は、“からだは均質な組織で構築されている”，と仮定している。しかも、体重1 kg 当たりの $\dot{V}O_2\text{max}$ を用いる場合には、 $\dot{V}O_2\text{max}$ が体重の大きさに比例して高まることを前提としている。しかし、実際には $\dot{V}O_2\text{max}$ は体重の高まりに対して増加率が徐々に低下する。従って、体重の1.0 kg 当たりでみると $\dot{V}O_2\text{max}$ が小さくなるので^{22, 40)}、体重の重い者の $\dot{V}O_2\text{max}$ を低く見積もることにな

る。ただし、今日まで広く1/1乗則が用いられて来たのは、体重の狭い範囲内では、体重に対する $\dot{V}O_2\text{max}$ の高まりが曲線でなく直線と考えることが可能とみなしたからである。はたしてこの考えは妥当であろうか。例えば、長期にわたる全身持久性のトレーニングによって $\dot{V}O_2\text{max}$ ($l \cdot \text{min}^{-1}$) が増加しても、加齢に伴う体重増によって体重当たりの $\dot{V}O_2\text{max}$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) が、有意な低下をするという、矛盾が生じる場合がある⁹⁾。第2に、発育・発達による体重の増加に比例して $\dot{V}O_2\text{max}$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) が高まるとは限らない、という問題もある。確かに、発育に伴って体重は高まるが、 $\dot{V}O_2\text{max}$ ($l \cdot \text{min}^{-1}$) は必ずしもそれに比例して高まらない。そのため $\dot{V}O_2\text{max}$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) に変化が認められないだけでなく、有意な低下さえ生じることもある³⁷⁾。これらの矛盾をなくすために、従来の体重1.0kg 当たりでなくアロメトリー式を用いた $\dot{V}O_2\text{max}$ によって、パフォーマンスとの間により密接な関係を導き出すことが可能になる。

Ⅳ. 競技パフォーマンスとアロメトリー式

スポーツの世界では競技者の体重が成績に大きく影響するスポーツ種目、例えばボクシング、レスリング、柔道、ウエイトリフティングなどではウエイト制が採用されている。しかし、その他の競技、例えば陸上や水泳、体操等の競技、サッカーやバレーのようなボールゲーム、卓球やテニスのようなラケットゲーム、あるいは冬季競技種目等では、ウエイト制が用いられていない。同じ持久性能力を競うスポーツでも、競技の特性によってからだの大きさが競技成績に与える影響が異なる。例えば、陸上の中・長距離走は、決められた距離を選手自身のからだを如何に速く平行移動させるかの競技であり、自転車競技は自転車に乗って体重を移動させ、ボートは水上に浮かんだボートに乗って手でオールを漕ぎながら、体重を移動させる競技である。さらに、クロスカントリースキーは両手に持ったストックを使って雪上を走る競技である。当然これらの競技では体重の大小によってパフォーマンスへの影響が異なる。これまで多くの研究者によって、競技者の $\dot{V}O_2\text{max}$ のべき指数が報告されている (表1)。次に、全身持久性の能力を競う競技スポーツにみられる $\dot{V}O_2\text{max}$ のべき指数を探ってみよう。

1. 陸上競技 (ランニング)

ランニングのエネルギー消費量 (aerobic demand) は体重とどこまでも比例しながら増加するとは限らない^{4,42)}. Morganら²⁸⁾は, ランニング中の $\dot{V}O_{2submax}$ が体重の2/3乗則に比例して高まることから, $\dot{V}O_{2submax}$ や $\dot{V}O_{2max}$ の単位として $ml \cdot kg^{-2/3} \cdot min^{-1}$ を用いるべきであるとした. また, Morganら²⁸⁾は, ランナーと非ランナーの $\dot{V}O_{2max}$ は体重の1.0kg 当たりで評価するか, それとも体重の

0.67乗則で評価するかによって, 両者の差が47%と39%になり, さらに, $\dot{V}O_{2submax}$ (経済性) でみると, その差が10%と15%になる. さらに, エリートランナーがマラソンを走ると仮定すると, 経済性の1%差が1分として現われることから, 体重1.0kg 当たりでみるか0.67乗則でみるかによって, 合計5分の差として現われることになるとした. Svedenhag と Sjödin⁴³⁾はスウェーデンのエリートランナーの $\dot{V}O_{2max}$ や $\dot{V}O_{2submax}$ が体重の3/4乗則に

表1 これまで報告されている“べき指数”

Authors(yrs)	Characteristics of Subject				Exponent b
	No	Age(yrs)	Sex	Character	
Cooper et al ⁷⁾		11-18	M + F	boys and girls	$\dot{V}O_{2max} = aX^{1.01}$
Åstrand et al ¹⁾					$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.67}$
Paterson et al ³²⁾		11-15	M	trained boys	$\dot{V}O_{2max} = aX^{1.02}$
Bergh et al ⁴⁾	141	17-44	M	untrained men	$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.5}$ $\dot{V}O_{2submax} = aX^{0.60}$
			M	runners	$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.47}$ $\dot{V}O_{2submax} = aX^{0.75}$
			F	runners	$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.74}$ $\dot{V}O_{2submax} = aX^{0.83}$
Ingjer ²⁰⁾			cross-country skiers	$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.67}$	
Bergh et al ³⁾			cross-country skiers	$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.67}$	
Nevill et al ³⁰⁾			M		$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.63}$
			F		$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.72}$
Sjödin et al ⁴²⁾	8	11-15	M	untrained men	$\dot{V}O_{2max} = aX^{1.01}$
		4	8-15	M	untrained men
Swain ⁴⁵⁾	10		M	cyclists (levelling)	$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.32}$
				cyclists (climbing)	$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.69}$
Svedenhag et al ⁴³⁾		19-35	M	elite runners	$\dot{V}O_2 = aX^{0.75}$
Davies et al ¹¹⁾	63	10-23	M	elderly men	$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.43}$ $\dot{V}O_2$ during running
Morgan et al ²⁸⁾	22	26.5±2.2	M	elite runners	$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.75}$ $\dot{V}O_{2max} = aLBM^{1.05}$
	41	27.6±7.2	M	sub-elite runners	$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.75}$ $\dot{V}O_{2submax} = aX^{0.75}$
	16	36.9±5.0	M	good runners	$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.75}$ $\dot{V}O_{2submax} = aX^{0.75}$
	10	26.3±3.6	M	untrained subjects	$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.75}$ $\dot{V}O_{2submax} = aX^{0.75}$
Welsman et al ⁴⁸⁾	63	10-25	M		$\dot{V}O_{2peak} = aX^{0.80}$ $\dot{V}O_{2submax} = aX^{0.75}$
	83	10-23	F		$\dot{V}O_{2peak} = aX^{0.71}$
Vanderburgh et al ⁴⁷⁾	94	27.4±6.7	W	young women	$\dot{V}O_{2max} = aLBM^{0.61}$
					$\dot{V}O_{2max} = aLBM^{1.04}$
Heil ¹⁴⁾	440	20-79	M + F		$\dot{V}O_{2peak} = aX^{0.653}$
Wisloff et al ⁵⁰⁾	8	22.6±3.8	M	cross-country skiers	$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.67}$
Wisloff et al ⁵¹⁾	29	23.8±3.8	M	soccer players	$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.75}$
Rowland et al ³⁵⁾	24	x = 11.7	F	girls	$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.52}$
		x = 27.4	F	young adult women	
Jensen et al ²¹⁾	655	15-56	M	22 different sports	$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.73}$
			F	18 different sports	
Markovic et al ²³⁾	270		M	athletes	$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.67}$
			M	untrained men	$\dot{V}O_{2max} = aX^{0.89}$
Chir et al ⁶⁾	158	21.7+4.9	M	athletes	$\dot{V}O_{2peak} = 2.23X^{0.67}$
	28	21.9+7.0	F	athletes	$\dot{V}O_{2peak} = 2.23X^{0.24}$
Ratel et al ³³⁾	30	12-22	M + F	swimmers	$\dot{V}O_{2peak} = aX^{0.40}$

アロメトリック・スケーリング

従うことを、また Bergh ら⁴⁾は女子ランナーのべき指数が0.74とみなした。Doherty ら¹³⁾は、イギリスの800m からマラソンまでのオリンピック候補選手の男・女を対象に $\dot{V}O_2\max$ を2/3乗則を用いてあらわし、男子が $319.5 \pm 3.1 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-0.67} \cdot \text{min}^{-1}$ 、女子が $248.4 \pm 4.4 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-0.67} \cdot \text{min}^{-1}$ であった。このように男女によるべき指数も今後検討しなければならない。

クロスカントリースキー選手の体重は長距離ランナーに比べて大きい²⁾。これは、スキーは体重が摩擦抵抗と反比例するのに対して、ランニングの際の重心の移動のエネルギー量は体重に比例するためである。そのときの、摩擦抵抗に対抗するためのパワーの合計は体重に比例し、それは体重1.0kg 当り(1.0乗則) から2/3乗則の間にある。そのため、体重1.0kg 当りでランニング中の $\dot{V}O_2$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) を表すと、体重の重いランナーの $\dot{V}O_2$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) を実際の値よりも低く見積もる、すなわちランニングの経済性を高く見積もる誤りを犯すことになる。これはまた、同じスピードで走る場合、なぜ子供のランニング中の $\dot{V}O_2$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) が大人に比べて大きいのか、すなわち、体重1.0kg 当りで $\dot{V}O_2\max$ を比べると子どものランニングの経済性が大人に比べてなぜ高いかを説明することになる²⁾。また、Bergh ら⁴⁾は、ランニング中の $\dot{V}O_2$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) が体重の0.75乗則で、 $\dot{V}O_2\max$ が0.50乗則で示されることが望ましい、としている。以上のようにみえてくると、ランニング中のべき指数は概ね0.50~0.75にあるといえる。

2. 自転車競技

自転車競技は他の競技に比べるとレースが高速で行われるため、空気抵抗の影響を強く受け、それはまたからだの大きさに左右される。例えば、ロードレースをフラットのコースで行う際、空気抵抗(エネルギー消費量)はからだの前面の面積に比例して高まるが、それは2/3乗則よりも小さくなるので、からだの大きい者が有利になる。また下りのコースでは、エネルギー消費量は体重の1/3(0.32)乗則に従うため、体重の軽い選手は体重の重い選手に比べ不利である。しかし、上りになると、エネルギー消費量が体重の0.79乗則に従うようになるので、軽い選手の方が逆に有利になる⁴⁵⁾。さらにもう1つのSwain ら⁴⁵⁾の研究は、自転車エルゴメーターでの作業では体重の大小(53~89 kg)の影響を認めてい

ない。そこで、Swain⁴⁵⁾は、 $\dot{V}O_2\max$ から自転車競技選手の能力を判断するためには、フラットコースでは体重の2/3(0.67)乗則($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-0.67} \cdot \text{min}^{-1}$)を、下りのコースでは0.32乗則($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-0.32} \cdot \text{min}^{-1}$)を、また上り坂のコースでは体重の0.79乗則($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-0.79} \cdot \text{min}^{-1}$)を推奨した。Coyle ら⁸⁾はエリートの自転車競技者の $\dot{V}O_2\max$ ($l \cdot \text{min}^{-1}$) が体重に比例して高まるものの、体重1.0kg 当たりの $\dot{V}O_2\max$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) で表すと体重の増加に伴って逆に低下する(図1)。体重の0.73乗則($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-0.73} \cdot \text{min}^{-1}$)にすると体重の大小が消去されることから、自転車競技選手の競

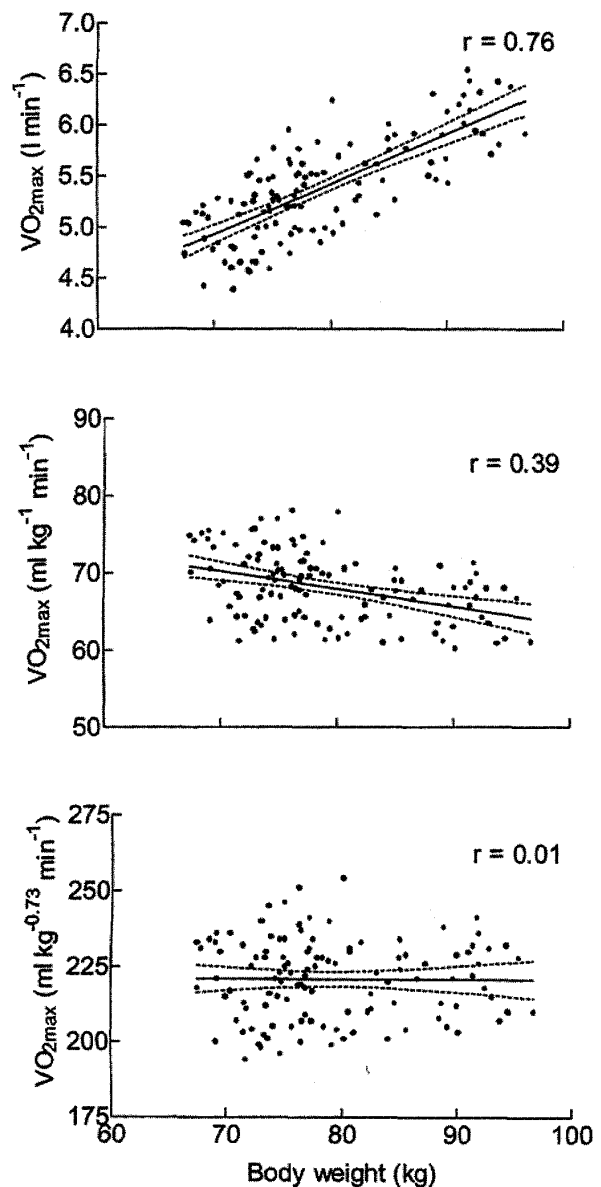


図1 体重に対する $VO_2\max$ との関係 (Jensen et al²²⁾)

技能力は $\dot{V}O_2\max$ の相対値を0.73乗則が望ましいとしている。これはエリート自転車競技選手を対象にした Åstrand と Rodhal¹⁾ の指摘とほぼ一致する。

3. ボート競技

Secher ら⁴⁰⁾ は、国際大会（ヨーロッパ選手権、世界選手権、オリンピック）の勝者14名と、敗者11名のボート競技選手の体重と $\dot{V}O_2\max$ ($l \cdot \min^{-1}$) を比較した結果、いずれにおいても勝者は敗者よりも有意に優れていた。しかし、体重の1 kg 当たりでみると両者の $\dot{V}O_2\max$ に差がなくなった。この結果は、ボート競技選手の $\dot{V}O_2\max$ の大小を評価する際には、 $1/l$ 乗則 ($ml \cdot kg^{-1} \cdot \min^{-1}$) ではからだが大い者の $\dot{V}O_2\max$ を低く見積もるという Jensen ら²⁰⁾ や Secher と Vaage³⁰⁾ の見解や、 $2/3$ 乗則 ($ml \cdot kg^{-2/3} \cdot \min^{-1}$) を採用すべきだという Åstrand と Rodhal¹⁾ の見解を支持するものであった。

McMahon²⁵⁾ は、重量級のボート競技選手は軽量級の競技選手に比べ1~4%速く漕ぐことが出来ることを報告している。また、Secher と Vaage³⁰⁾ は重量級のグループ（平均93kg）が軽量級のグループ（平均70kg）よりも約2.6%速く漕ぐことが可能と推定し、実際のタイムも2.5%速くなり、ほぼ推定値に等しくなった。これらは Secher³⁸⁾ や Hirata¹⁹⁾ の、からだの大きい選手が記録に有利になるという報告を追認するものである。

4. クロスカントリースキー

Ingjer²⁰⁾ はワールドクラスのクロスカントリースキー選手の競技パフォーマンスを推定した際、標準誤差が最も小さくなるのは体重の0.67乗則の時であることから、 $\dot{V}O_2\max$ の相対値は0.67乗則に従うべきだとみなした。ただし、男女混合の場合には、生物学的な違いを考慮すると、むしろ体重の0.73乗則 (Brody's law) が好ましいとしている。Wisløff と Helgerud⁵⁰⁾ も0.67乗則を推奨している。Bergh と Forsberg³⁾ は、統計的には有意な差が認められないが、体重の重い選手は軽い選手に比べ平地と下りのコースで優位に作用し、逆に上りでは不利になる。相対的には重い選手が有利に作用する。それは、運動変換エネルギー、運動回転エネルギー、空気抵抗がほぼ体重の $2/3$ 乗則に従うからである。フラットなコースでは動力的摩擦抵抗が位置エネルギーを上まわり、重い選手が有利に、上り坂では重心を上

へ運ぶエネルギーが体重の重い選手ほど大きくなり、体重の軽い選手が有利になる。さらに下り坂では、重力によるプラス作用が摩擦抵抗や空気抵抗によるマイナスの影響を上回るため、体重の重い選手ほど有利になる。全体的には、からだの重い選手が有利になるとしている。

5. その他のスポーツ

Jensen ら²⁰⁾ はその他のスポーツの男女のべき指数を明らかにしている（表2）。この表でも明らかのように、スポーツ特性によって $\dot{V}O_2\max$ のべき指数が異なる。Wisløff ら⁵¹⁾ は、ノルウェーのエリートサッカー選手を対象にディフェンス、ミッドフィルダー、アタッカーの $\dot{V}O_2\max$ を体重の1.0kg 当たりで比較すると、からだの小さいミッドフィルダーが最も大きくなるが、べき指数0.75でみると体重の大きさの違いが消去された。これは Davies ら¹⁰⁾ の報告を追認するものであった。また、Ratel と Poujade³³⁾ は、トレーニングされたスイマー（12~22歳）の男女を対象に200mのクロール中の $\dot{V}O_2$ を測定した結果、年齢や性に関係なく、体重の0.40、身長1.30、体表面積の0.61のべき指数で表した時、クロール中の $\dot{V}O_2$ に差がなくなることを明らかにした。

しかし、これらの報告の例は少なく、結論を導くためには今後さらに研究が続けられなければならない。

V. まとめ

$\dot{V}O_2\max$ の相対値には、1つに、からだの成分が均質であると仮定してアロメトリー式（べき指数）を用いたもの、もう1つは、不活性の体脂肪を除いた除脂肪体重 (LBM) や、エネルギーを主に消費する筋肉当たりでみる試みがある。本稿は、体重の大小による誤差を取り除き、生理的機能の働きの大きさを正当に評価するエネルギーの出力の大きさ ($\dot{V}O_2\max$ や $\dot{V}O_2\text{submax}$) の相対値についてレビューした。

その結果、平地のランニングのパフォーマンスを占う際の $\dot{V}O_2\max$ のべき指数は0.50~0.75、自転車競技やクロスカントリースキー競技では、コースの上り・下りや平地によって大きく異なるが、全体的にみると、自転車競技では0.73乗則、クロスカントリースキーでは0.67~0.73乗則、さらにボート競技ではほぼ0.67乗則となった。ただし、このべき指数

アロメトリック・スケーリング

表2 運動種目と最大酸素摂取量 ($l \cdot \text{min}^{-1}$ & $\text{ml} \cdot \text{kg}^{-0.73} \cdot \text{min}^{-1}$) 及び体重のべき指数 (Jensen et al²²⁾)

Specialty (n)	$\dot{V}O_{2\text{max}}$ $l \text{ min}^{-1} \text{ ml kg}^{-0.73} \cdot \text{min}^{-1}$	b	Specialty (n)	$\dot{V}O_{2\text{max}}$ $l \text{ min}^{-1} \text{ ml kg}^{-0.73} \cdot \text{min}^{-1}$	b
Males			Females		
Cycling (157)	5.23(0.50)	234(16) 0.74	Running (10)	3.51(0.38)	189(14) 0.91
Running (20)	5.20(0.38)	234(12) 0.59	Triathlon (7)	3.89(0.42)	187(21) -0.14
Orienteering (19)	5.07(0.38)	228(11) 0.73	Cycling (20)	3.53(0.31)	181(15) 0.41
Triathlon (16)	4.93(0.39)	222(19) 0.24	Rowing (32)	3.94(0.31)	179(9) 0.63
Walking (6)	5.21(0.20)	221(11) 0.19	Military pentathlon (6)	3.54(0.15)	172(13) 0.09
Rowing (117)	5.38(0.49)	221(13) 0.73	Soccer (80)	3.49(0.37)	171(14) 0.71
Military pentathlon (13)	5.22(0.38)	217(9) 0.68	Swimming (10)	3.40(0.42)	170(14) 1.24
Badminton (15)	4.91(0.56)	215(12) 0.75	Orienteering (11)	3.19(0.39)	165(16) 0.60
Swimming (11)	5.00(0.33)	213(14) 0.31	Team handball (61)	3.55(0.33)	164(14) 0.52
Kayaking (26)	4.87(0.54)	203(19) 0.80	Badminton (13)	3.34(0.38)	163(13) 0.80
Squash (28)	4.72(0.53)	201(16) 0.86	400-m running (10)	3.34(0.38)	161(16) 0.91
Team handball (142)	4.97(0.48)	194(13) 0.72	Kayaking (12)	3.33(0.38)	160(14) 0.63
Ballroom dancing (4)	4.36(0.68)	190(24) 0.92	Squash (17)	3.18(0.46)	156(21) 0.75
Motorcross (17)	4.45(0.43)	190(10) 0.90	Karate (3)	3.29(0.30)	153(2) 0.81
Bicycle motorcross (13)	4.61(0.49)	186(16) 0.75	Rhythmic gymnastics (7)	2.64(0.28)	153(14) 0.51
Speedway (11)	3.83(0.37)	178(15) 0.71	Ballroom dancing (5)	2.88(0.49)	148(20) 2.58
Karate (6)	4.12(0.19)	177(6) 0.57	Archery (2)	2.51(0.16)	123(1)
Road race (11)	3.91(0.47)	177(17) 0.73	Riding (show jumping) (6)	2.56(0.33)	121(10) 0.99
Yachting (4)	4.62(0.48)	177(10) 0.78			
Archery (5)	4.05(0.45)	167(9) 0.71			
Show jumping (5)	3.71(0.37)	162(16) 0.34			
Rally (9)	3.73(0.64)	148(26) 0.37			

は被験者の性、年齢、身長によっても異なる。

アロメトリックの考えは19世紀後半にすでに始まっているが、 $\dot{V}O_{2\text{max}}$ のべき指数が十分検討されることなく、体重1.0kg当たりや除脂肪体重当たりの $\dot{V}O_{2\text{max}}$ や $\dot{V}O_{2\text{submax}}$ が国際的に広く用いられている。その理由は、第1に、べき指数が性、年齢、身長、運動特性等によって異なるため、母集団（被験者）ごとに適切なべき指数を求めなければならない。そのことはまた他の論文のデータとの比較を困難にする。さらに、コンピュータが発達した今日でもべき指数を求めるのはそう簡単ではない。しかも、算出された数は3桁で比較的なじみが薄い、などの汎用性、利便性、親しみ易さに問題がある。第2は、VanderburghとKatch⁴⁷⁾が指摘するように、 $\dot{V}O_{2\text{max}}$ はヒトの全身持久性のパフォーマンスの指標だけでなく、今日健康の尺度としても広く用いられている。後者の目的で用いる場合、からだ均質の成分で出来ていると仮定するべき指数は、体脂肪の多少を消去するため肥満者の $\dot{V}O_{2\text{max}}$ が低いことが潜在化するため、警告を発する機会を失う可能性

があるためである。

従って、 $\dot{V}O_{2\text{max}}$ の相対値を指標にして全身持久性のパフォーマンスを正確に評価する時に、精度を特に重視してべき指数をいくらにすべきかを考えるか、それとも健康の指標として用いるために従来の体重1 kg当たりでみるかは、その目的に応じて使い分ける必要があるだろう。

引用文献

- 1) Åstrand P-O, Rodahl K (1986) Textbook of Work Physiology. McGraw-Hill Book Company, New York. pp 399-405
- 2) Bergh U (1987) The influence of body mass in cross-country skiing. Med Sci Sports Exerc 19: 324-331
- 3) Bergh U, Forsberg A (1992) Influence of body mass on cross country ski racing performance. Med Sci Sports Exerc 24: 1033-1039
- 4) Bergh U, Sjödin B, Forsberg A, Svedenhag J (1991) The relationship between body mass and oxygen uptake during running in humans. Med

- Sci Sports Exerc 23: 205-211
- 5) Brody S (1945) Bioenergetics and growth. Reinhold, New York. Cited by Jensen et al (2001)
 - 6) Chir M, Aziz AR (2008) Modelling maximal oxygen uptake in athletes: Allometric scaling versus ratio-scaling in relation to body mass. *Ann Acad Med Singapore* 37: 300-306
 - 7) Cooper DM, Weiler-Ravell D, Whipp BJ, Wasserman K (1984) Aerobic parameters of exercise as a function of body size during growth in children. *J Appl Physiol* 56: 628-634
 - 8) Coyle E, Feltner ME, Kaytz SA, et al. (1991) Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 23: 93-107
 - 9) Daniels JT, Oldridge N (1971) Changes in oxygen consumption of young boys during growth and running training. *Med Sci Sports* 3: 161-165
 - 10) Davies JA, Brewer J, Atkin D (1992) Pre-season physiological characteristics of English first and second division soccer players. *J Sports Sci* 10: 541-547
 - 11) Davies M, Dalsky G, Vanderburgh P (1995) Allometric scaling of $\dot{V}O_{2max}$ by body mass in older men. *J Aging Phys Activ* 3: 324-331
 - 12) Döbeln WV (1956) Maximal oxygen uptake, body size and total hemoglobin in normal man. *Acta Physiol Scand* 38: 193-199
 - 13) Doherty M, Nobbs L, Noakes TD (2003) Low frequency of the "plateau phenomenon" during maximal exercise in elite British athletes. *Eur J Appl Physiol* 89: 619-623
 - 14) Heil DP (1997) Body mass scaling of peak oxygen uptake in 20-to 79-yr-old adults. *Med Sci Sports Exerc* 29: 1602-1608
 - 15) Henderson Y, Haggard H W (1925) The maximum of human power and its fuel. *Am J Physiol* 72: 264-282
 - 16) Heusner AA (1982) Energy metabolism and body size. I. Is the 0.75 mass exponent of Kleiber's equation a statistical artifact? *Res Physiol* 48: 1-12
 - 17) Heusner AA (1987) What does the power functional reveal about structure and function in animals of different size. *Ann Rev Physiol* 49: 121-133
 - 18) Hill AV, Lupton H (1923) Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilization of oxygen. *Quart J Med* 16: 135-171
 - 19) Hirata K(1979) Selection of Olympic champions. Karger Basel, pp 259-305
 - 20) Ingier F (1991) Maximal oxygen uptake as a prediction of performance ability in women and men elite cross-country skiers. *Scand J Med Sci Sports* 1: 25-30
 - 21) Jensen K, Nielsen TS, Fiskestrand Å, Lund JO, Christensen NJ, Secher NH (1993) High-altitude training does not increase maximal oxygen uptake or work capacity at sea level in rowers. *Scand J Med Sci Sports* 3: 256-262
 - 22) Jensen K, Johansen L, Secher NH (2001) Influence of body mass on maximal oxygen uptake: effect of sample size. *Eur J Appl Physiol* 84: 201-205
 - 23) Kleiber M (1932) Body size and metabolism. *Hirgardia* 6: 315-353
 - 24) Markovic G, Vucetic V, Nevill AM (2007) Scaling behavior of $\dot{V}O_2$ in athletes and untrained individuals. *Ann Hum Biol* 34: 315-328
 - 25) McMahan TA (1971) Rowing: A similarity analysis. *Science* 173: 349-351
 - 26) Meeh K (1879) Oberflächenmessungen des menschlichen Körperpers. *Z Biol* 15: 425-458. Cited by Heusner, AA (1987)
 - 27) Meredith CN, Zackin MJ, Frontera WR, Evans WJ (1987) Body composition and aerobic capacity in young and middle-aged endurance-trained men. *Med Sci Sports Exerc* 19: 557-563
 - 28) Morgan PW, Broansford DR, Costill DL, Daniels JT, Howley ET, Kranhenbuhl GS (1995) Variation in the aerobic demand of running among trained and untrained subjects. *Med Sci Sports Exerc* 27: 404-409
 - 29) Nevill AM, Brown D, Godfrey R, Johnson PJ, Romer L, Stewart AD, Winter EM (2003) Modeling maximum oxygen uptake of elite endurance athletes. *Med Sci Sports Exerc* 35: 488-494
 - 30) Nevill AM, Ramsbottom R, Williams C (1992) Scaling physiological measurements for individual different body size. *Eur J Appl Physiol* 65: 110-117
 - 31) Pasquis P, Lacaille A, Dejours P (1970) Maximal oxygen uptake in four species of small mammals. *Res Physiol* 9: 298-306
 - 32) Paterson DH, McLellan TM, Stella RS, Cunningham DA (1987) Longitudinal study of ventilation threshold and maximal O_2 uptake in athletic boys. *J Appl Physiol* 62: 2051-2057

- 33) Ratel S, Poujade B (2009) Comparative analysis of the energy cost during front crawl swimming in children and adults. *Eur J Appl Physiol* 105: 543-549
- 34) Robinson S, Edwards HT, Dill DB (1937) New records in human power. *Science* 85: 409-410
- 35) Rowland T, Miller K, Vanderburgh P, Goff D, Martel L, Ferrone L(2000) Cardiovascular fitness in premenarcheal girls and young women. *Int J Sports Med* 21: 117-121
- 36) Rubner M (1873) Ueber den Einfluss der Körpergröße auf Stoff- und Kraft-wechsel. *Z Biol* 19: 535-562. Cited by Heusner, AA (1987)
- 37) Rutenfranz J, Andersen KL, Seliger V, Ilmarinen J, Klimmer K, Kylian H, Rutenfranz M, Ruppel M (1982) Maximal aerobic power affected by maturation and body growth during childhood and adolescence. *Eur J Pendiatr* 139: 106-112
- 38) Secher NH (1984) The physiology of rowing. *J Sports Sci* 1: 23-53
- 39) Secher NH, Vaage O (1983) Rowing performance. A mathematical model based on analysis of body dimensions as exemplified by body weight. *Eur J Appl Physiol* 52: 88-93
- 40) Secher NH, Vaage O, Jensen K, Jackson RC (1983) Maximal aerobic power in oarsmen. *Eur J Appl Physiol* 51: 155-162
- 41) Shephard RJ (1978) Human physiological work capacity. International biological program No15. Cambridge University Press. Cambridge. pp.1-2
- 42) Sjödin B, Svedenhag J (1992) Oxygen uptake during running as related to body mass in circumpolar boys: a longitudinal study. *Eur J Appl Physiol* 65: 150-157
- 43) Svedenhag J, Sjödin B (1994) Body-mass-modified running economy and step length in elite male middle- and long-distance runners. *Int J Sports Med* 15: 305-310
- 44) Swain DP, Coast JR, Clieford PS, Milliken MC, Stray-Gundersen J (1987) Influence of body size on oxygen consumption during bicycling. *J Appl Physiol* 62: 668-672
- 45) Swain DP (1994) The influence of body mass in endurance bicycling. *Med Sci Sports Exerc* 26: 58-63
- 46) Tanner JM (1949) Fallacy of per-weight and per-surface area standards, and their relation to spurious correlation. *J Appl Physiol* 2: 1-15
- 47) Vanderburgh PM, I.Katch F (1996) Ratio scaling of $\dot{V}O_2$ max penalizes women with larger percent body fat, not lean body mass. *Med Sci Sports Exerc* 28: 1204-1208
- 48) Welsman JR, Armstrong N, Nevill AM, Winter EM, Kirby BJ (1996) Scaling peak $\dot{V}O_2$ for differences in body size. *Med Sci Sports Exerc* 28: 259-265
- 49) Winter EM (1992) Scaling: Partitioning out differences in size. *Pediatr Exerc Sci* 4: 296-301
- 50) Wisløff U, Helgerud J (1998) Methods for evaluating peak oxygen uptake and anaerobic threshold in upper body of cross-country skiers. *Med Sci Sports Exerc* 30: 963-970
- 51) Wisløff U, Helgerud J, Hoff J (1998) Strength and endurance of elite soccer players. *Med Sci Sports Exerc* 30: 462-467

(2009年9月28日受付, 2010年4月8日訂正,
2010年7月21日受理)