

《資料》

自転車エルゴメーターを用いた運動強度の推定原理と簡便な推定法

谷 嶋 二三男 *

Estimation principle of exercise intensity
by bicycle ergometer and convenient estimation method

TANISHIMA Fumio

運動強度の設定方法は、最大能力（最大値）の測定を必要とする方法と、必要としない方法がある。また、高価な測定器具を用いる方法から、測定器具を用いず推定式に年齢や脈拍数を代入して求める方法まで多くある。最大能力を実測したり推定したりする場合は、最大能力を基準に、自分が行う運動処方に必要な運動強度を設定する。最大能力を必要としない場合は、その方法が求めるポイントが運動強度の基準になる。

今回は、いくつかの運動強度の基準値の実測あるいは推定方法を簡単に記載するが、一般的によく利用されている自転車エルゴメーターを用いた運動強度の最大能力については、実際の利用に役立つよう推定原理から説明しておく。

1. 測定器具を用いて最大能力を実測あるいは推定する方法**1) 最大酸素摂取量の実測（呼気ガス分析）**

呼気ガス分析器や心電計、そして自転車エルゴメーター等を使用して最大負荷まで運動を行い、最大酸素摂取量を測定する。最大酸素摂取量が出現した時の心拍数を最高心拍数、またその時の仕事量が最大仕事量となる。運動負荷方法として、一般的には漸増負荷を用いるが、ランプ負荷を用いる場合もある。ランプ負荷の場合定常状態に達しないため、最大酸素摂取量が高めになるので、換算式を用いて、補正が必要になる³⁾。

2) 最大酸素摂取量の推定（呼気ガス分析）

安全面から考え、最大下の負荷にとどめ、回帰直線を作成して最大値を推定する方法である。また、より正確な漸増負荷による最大酸素摂取量の実測でも、最大負荷時には定常状態になりにくいと考えられ、推定法を採用する場合もある¹⁾。最大下でもより高い負荷で行った方が正確に推定できる。器具は最大酸素摂取量の実測と同様である。

3) 最大酸素摂取量の推定（心拍数の測定）

酸素摂取量と仕事量と心拍数（脈拍数）は、それぞれ相関関係が高いことが知られている。このことから、呼気ガス分析は行わず、自転車エルゴメーターを用いた最大下の負荷で、脈拍数と仕事量の関係から最大酸素摂取量を推定する。トレーニング機器では、この方法から最大能力の推定を行っている。

2. 測定器具を用いないで最大酸素摂取量を推定（脈拍数で表示）**1) カルボーネンの式（%HRreserve）から求める。**

$$100\% [(220 - \text{年齢}) - \text{立位安静時脈拍数}]$$

$$+ \text{立位安静時脈拍数}$$

安静時脈拍数（心拍数）として、朝起きた時の立位安静時の値を測定し、記憶しておくことよ。

2) 最高心拍数から求める方法

“220拍/分-年齢”を最高心拍数と呼び、各年齢の人が最大に運動した時に到達する心拍数を推定する方法である。運動強度を算出する時、カルボーネンの式では運動強度の比率が最大酸素摂取

*横浜市立大学大学院総合理学研究科 運動・スポーツ科学教室 (236-0027金沢区瀬戸22-2)

Laboratory of Exercise & Sports Science, Graduate School of Science, Yokohama City University

量の比率と同率であるが、最高心拍数から求める場合は一致しない点に注意が必要である²⁾。

3) オストランドのノモグラフを用いる方法

定常状態の負荷時の負荷と脈拍から、ノモグラフを用いて、最大酸素摂取量を推定する方法である。しかし、ノモグラフから各自が必要な運動強度を脈拍数等で設定できない。

4) 自覚的運動強度 (RPE)

ボルグスケールといわれる自覚的運動強度から求める方法である。求める運動強度に応じたRPEの表もある。

3. 最大値が不要な方法 (器具を用いる)

1) 無酸素性作業閾値

連続的に一定の割合で、少しずつ負荷を増していくランプ負荷法を用いて、いわゆる有酸素的代謝と無酸素的代謝の境目を測定する方法により、運動強度を求める。指標にするものの違いにより、換気性作業閾値や乳酸性作業閾値と呼ばれている。

2) DPBPシステム (ダブルプロダクト・ブレイキングポイント)

ランプ負荷法を用いて、高血圧の人などの運動強度を設定する時に用いる。最高血圧と心拍数の積からいわゆる有酸素的代謝と無酸素的代謝の境目の運動強度を求める。

以上の方法から目的や器具の有無により運動強度を設定していくことができるが、一般の人が用いる方法は自転車エルゴメーターを用いて推定する方法である。

そこで、その推定原理と実際の利用に当たっての工夫を考えたので紹介しておく。原理を理解することにより、測定時間の短縮等の応用ができ、より利用されるようになって考えている。

4. 自転車エルゴメーターを用いて最大酸素摂取量を推定する原理

市販の自転車エルゴメーターは、自動的に最大酸素摂取量の推定ができるモードがついている。測定方法は、1分間の安静後、3分毎に漸増される3段階の負荷を与え、各負荷の最後の脈拍数と仕事量の数値から以下のようにして最大酸素摂取量を推定している。

測定の際、仕事量 (watt) は自転車エルゴメー

ターにかかる負荷 (kp) とペダルの回転数 (rpm) の積で表されているので、一定の回転数で自転車エルゴメーターをこぐことが必要になる。

① 最大下の異なる3つの出力された仕事量 (watt) と脈拍数から回帰直線式を求める。

② 最高心拍数を求める。

③ 最高心拍数を回帰直線式に代入して、最大仕事量 (PWCmax) を算出する。

④ 最大仕事量の単位を酸素摂取量に換算する。

1 watt = 0.014kcal、0.005kcal/min は1ml/minの酸素摂取量に値する。

1 watt = 0.014kcal = 2.8 ml/min

⑤ 人の効率を23% (人に100%分のエネルギーを供給しても、23%分の仕事しかできない) として、最大酸素摂取量を求めると、
“2.8 ml/min × 100 / 23 = 12.17 ml/min”。

⑥ 以上の結果から、最大仕事量のwatt数に12.17 mlを乗じて最大酸素摂取量を算出することになる (1 watt = 12.17 ml/min)。

例) 男性A氏35歳の最大下の運動負荷の記録をもとに最大酸素摂取量を推定する。

仕事量 (watt)	50	100	150
脈拍数 (拍/分)	112	132	162

上の表の3箇所の脈拍数 (X) と仕事量 (Y) から回帰直線を求める。回帰直線 $Y = a + bX$ を求める最小二乗法の公式は

$$b = \frac{\sum x_1 y_1 - (\sum x_1 \times \sum y_1) / n}{\sum x_1^2 - (\sum x_1)^2 / n}$$

$$a = (\sum y_1 - b \sum x_1) / n$$

すなわち

y (watt)	x (脈拍数)	x ²	xy
50	112	12544	5600
100	132	17424	13200
150	162	26244	24300
$\sum y_1$	$\sum x_1$	$\sum x_1^2$	$\sum x_1 y_1$
300	406	56212	43100

したがって

$$b = \frac{43100 - (406 \times 300) / 3}{56212 - (406)^2 / 3} \doteq \frac{2500}{1267} \doteq 2$$

$$a = (300 - 2 \times 406) / 3 \doteq -171$$

よって $Y = -171 + 2X$ …………… (1)

次に、仮にA氏が最大酸素摂取量出現するまで運動した時の心拍数（最高心拍数）を推定する。一般的には“220-年齢”が最高心拍数の求め方であるが、市販の自転車エルゴメーターは安全性を考え少し低く、最高心拍数は“204-0.69×年齢”の式を用いている。

よってA氏の最高心拍数は“204-0.69×35≒180(拍/分)”となる。

そして、最高心拍数を式(1)のXに代入すると、最大仕事量189.4 wattを得る。

① 1 watt = 0.014 kcalより189.4 wattは2.6516 kcalとなる。

② 0.005 kcal/minは1 ml/minの酸素摂取量に相当するので、“2.6516 ÷ 0.005 = 530.32 ml/min”。

③ 人の効率を23%として計算すると

$$530.32 \times 100\% \div 23\% \doteq 2305.7 \text{ ml/min}$$

よってA氏の最大酸素摂取量は2305.7 ml/minとなる。体重あたりの値で表すと

$$“2305.7 \div 63 \doteq 36.6 \text{ ml/min/kg}” \text{ となる。}$$

また、先に述べたように①②③の換算をまとめると“1 watt ≒ 12.17 ml/min”となるので、“189.4 watt × 12.17 ml/min ≒ 2305 ml/min”から最大仕事量189.4 wattは 2305 ml/minの酸素摂取量に相当する。

以上のように、換算式を利用して最大酸素摂取量を推定する方法は煩雑である。しかし、原理を知れば、パソコンで容易に算出し、作図もできる。しかし今回は、パソコンなどを使用せず、簡単に推定できる方法を次に提示する。

5. 自転車エルゴメーターを用いて最大酸素摂取量を推定する簡便法

1) 最大酸素摂取量の推定方法 (図から求める)

回帰直線をきちんと計算して求める方法と3点をグラフ上にプロットした後、目分量で回帰直線を引く方法とを比較してみたが、あまり大差がないことがわかった。最小二乗法に基づいて目分量で回帰直線を引くコツは、3点の場合、直線に対して各点からの垂線の距離が等しくなるように引くことである (図1)。

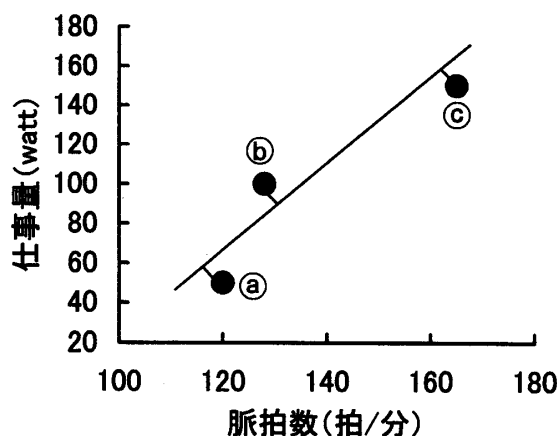


図1. 最小二乗法の回帰直線

また、wattから酸素摂取量への単位の換算は、結局“1 watt ≒ 12.17 ml/min”の酸素摂取量ということになるから、縦軸に酸素摂取量と仕事量をこの割合で引いておくことにより、計算をする必要がなくなる (P13の図参照)。

すなわち、まず3点をプロットし、回帰直線を目分量で引く。そして最高心拍数との交点を求め、その交点からX軸に平行に線を引きY軸と交わった交点が最大仕事量になる (図2)。

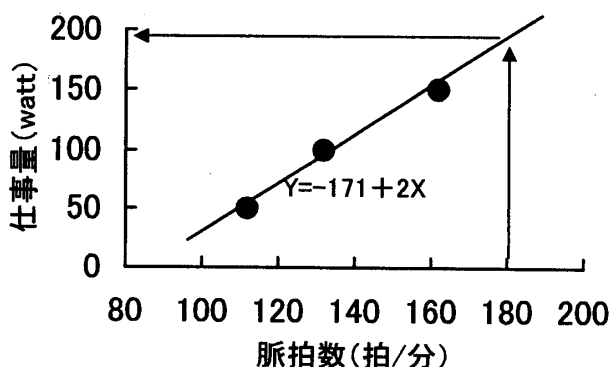


図2. 最大仕事量の推定

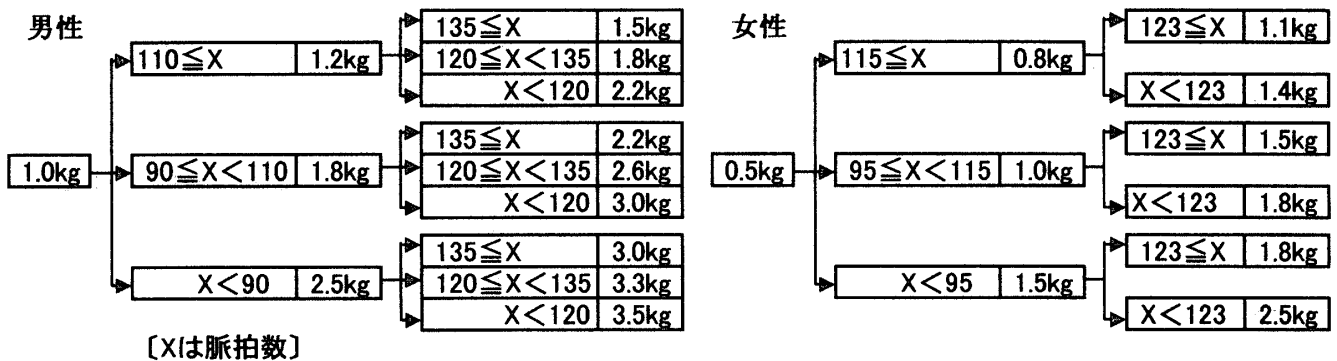


図3. 自転車エルゴメーターの運転負荷の設定 (自動: 50歳以下)

2) 運動負荷の設定方法

もう一つの問題点は負荷の設定方法である。3段階の負荷が低すぎると、回帰直線の傾きが大きくなり、最大酸素摂取量を非常に高く見積もる。逆に負荷が高すぎると、運動強度が高くなりすぎる。市販のエルゴメーターでは、自動的に現在の運動時の脈拍数の高低により、次の負荷が決定される仕組みになっている。その関係を図3に示す。

自動的に行う場合は問題ないが、手動で負荷を設定したり、時間を短縮したり、途中で負荷に耐えられなくなった時などについては、応用が利かない。一方、手動の場合、年齢補正が必要になっていることから、個々の年齢を考慮して負荷の設定を算出することが不便である。実際の使用に当たっては、換算表(表1)を参考に20歳から50歳までは、幅をもたせ大まかに範囲を設定する方法

表1. 年齢補正係数表

《年齢補正係数 = (204 - 0.69 × 年齢) ÷ 190.2》

脈拍数 \ 年齢	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
90	90	89	89	89	88	88	88	87	87	87
95	95	94	94	94	93	93	93	92	92	92
110	110	109	109	108	108	108	107	107	106	106
115	115	114	114	113	113	112	112	112	111	111
120	120	119	119	118	118	117	117	117	116	116
123	123	122	122	121	121	120	120	119	119	119
135	135	134	134	133	133	132	132	131	131	130

脈拍数 \ 年齢	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
90	86	86	86	85	85	85	84	84	84	83
95	91	91	91	90	90	89	89	89	88	88
110	106	105	105	104	104	104	103	103	102	102
115	110	110	110	109	109	108	108	107	107	107
120	115	115	114	114	113	113	113	112	112	111
123	118	118	117	117	116	116	115	115	115	114
135	130	129	129	128	128	127	127	126	126	125

脈拍数 \ 年齢	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
90	83	83	82	82	82	82	81	81	81	80
95	88	87	87	87	86	86	86	85	85	85
110	102	101	101	100	100	100	99	99	98	98
115	106	106	105	105	105	104	104	103	103	102
120	111	110	110	110	109	109	108	108	107	107
123	114	113	113	112	112	111	111	111	110	110
135	125	124	124	123	123	122	122	121	121	120

がよい。50歳以上については、今回は触れないことにする。

今後の検討も必要であるが、男性は1段階目の負荷を1kpとし、2段階目の脈拍数が115拍/分から135拍/分、3段階目の脈拍数が140拍/分以上になる負荷を用いればよい。女性では1段階目の負荷を0.5kpとし、2段階目の脈拍数が110拍/分から130拍/分、3段階目の脈拍数が130拍/分以上になる負荷を用いればよい。

脈拍の目安は年齢も関係するが体力の影響も大きいので、この数値にとらわれず体力に合わせて調整してよい。

3) 必要とする運動強度の求め方

最大酸素摂取量が求められると、各自が必要とする運動強度を脈拍数や仕事量で設定することができる。たとえば最大酸素摂取量の60%の運動強度を脈拍数で求める場合

- ① 最大仕事量（最大酸素摂取量）に0.6をかける。
- ② 算出した値に対応する図の縦軸からX軸に平行線をひき回帰直線との交点を求める。
- ③ 交点からX軸に降ろした垂線とX軸の交点が求める脈拍数になる（図4）。

この方法の場合単純に最高心拍数に0.6を乗じた値と異なることに注意すること。

単純に最高心拍数に乗じる場合は、最大酸素摂取量の60%の場合0.7が近似値になる²⁾。

最高心拍数は一般的な“220-年齢”を用いても良いと考える。

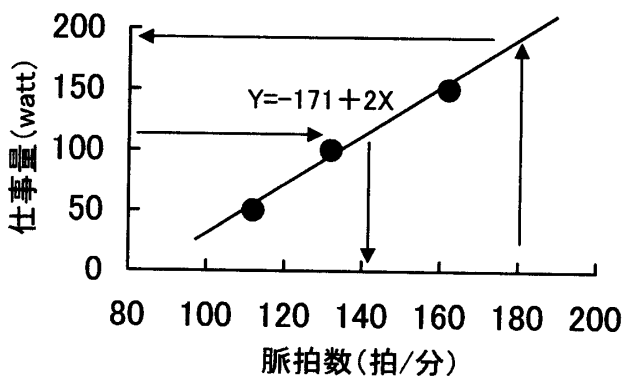


図4. 運動強度を脈拍数で求める方法

時間を節約する場合は各負荷の時間を2分にして測定するとよいが、それ以上短くすると、各負荷の定常状態に達しないため、より不正確になるので避けたほうがよい。

市販の自転車エルゴメーターの操作の自動化が進み、2分毎の漸増負荷法を手動（マニュアルモード）で行ってもウォーミングアップの時間が3分入ってしまうので、自動測定と時間的に大差がなくなってしまう。この場合、運動開始時に表示切替ボタンと作動ボタンを同時に押すことによりウォーミングアップ時間を省略できる。機種により操作が異なるので、説明書をよく読むことも必要になる。

最後に、この方法は横浜市のスポーツセンターや横浜市大にある自転車エルゴメーターで利用できる。活用例として、自転車エルゴメーターにより自動的に算出された値と、簡便法により得られた値を比較する実習方法例を記載しておく（p12, p13）。

【参考文献】

- 1) アメリカスポーツ医学会編（2001）運動処方
の指針（第6版）、p301. 南江堂、東京。
- 2) Michael L. Pollock, Glenn A. Gaesser, Janus D. Butcher, Jean-Pierre Despres, Rod K. Dishman, Barry A. Franklin, Carol Ewing Garber (1998) The recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory and muscular fitness, and flexibility in healthy adults. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 30 (6) : 975-991.
- 3) Store TW, Davis JA, Caiozzo VJ. (1990) Accurate prediction of VO2 max in cycle ergometry. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 22(5) : 704-712.

【実習例】

1. 自転車エルゴメーターによる最大酸素摂取量の推定(オートモード)

TESTモードを使用して、最大酸素摂取量を測定すると同時に、4分目、7分目、10分目の脈拍数と負荷を記入し、図から最大酸素摂取量を求めてみる。

時間(分)	安静時	1	2	3	(3分50秒値)		(6分50秒値)		(9分50秒値)		
1					4	5	6	7	8	9	10
負荷 (watt)											
脈拍数 (拍/分)											

1) 運動終了後自転車エルゴメーターの画面に表示された次の値を記録する。

- ①MOU (ml/kg/min) : 最大酸素摂取量のこと、本来はVO₂maxと表記。
- ②PWCmax (watt) : 最大仕事量

2) 上の表より図(方眼紙)を用いて最大酸素摂取量を推定する。

- ①最高心拍数を求めておく: $220 - \text{年齢} = (\quad\quad\quad \text{拍/分})$
- ②方眼紙に3点をプロットして、回帰直線を引く。次に最高心拍数から垂線を上方に引き、回帰直線との交点を求める。交点からX軸と平行に線を引きY軸の酸素摂取量の値を読む。この値が最大酸素摂取量。自分の体重で割ってMOUと比較する。

最大酸素摂取量 (ml/kg/min)

注) 最高心拍数の求め方が異なるので、多少誤差がある。

3) 必要な運動強度を脈拍数あるいは仕事量で設定する

例) 最大酸素摂取量の60%の負荷と脈拍数を求める

最大仕事量に0.6を乗じた watt 数を Y 軸上に求めた watt 数が、最大酸素摂取量の60%の運動負荷になる。また、その時の脈拍数は、Y軸上の60%のwatt数からX軸に平行線を引き、回帰直線との交点を求める。次に交点からX軸に垂線を降ろすと脈拍数が求められる (拍/分)。

また、最高心拍数の70%と比較してみる ($\times 0.7 =$ 拍/分)

さらに、カルボネンの式から求めた値(60%)と比較してみる。

$0.6(\text{最高心拍数} - \text{安静時心拍数}) + \text{安静時心拍数} = (\quad\quad\quad \text{拍/分})$

2. 自転車エルゴメーターによる最大酸素摂取量の推定(マニュアルモード)

マニュアルモードを利用して最大酸素摂取量を測定する。

時間(分)	1	2	3	(2分50秒値)		(4分50秒値)		(6分50秒値)	
1				4	5	6			
負荷 (watt)									
脈拍数 (拍/分)									

	負荷	目標脈拍数	
	1段階	2段階	3段階
	1~2分	3~4分	5~6分
男性	1kp	115~135	140以上
女性	0.5kp	110~130	130以上

目標脈拍数を満たすよう負荷を調整

上の表より方眼紙を用いて最大酸素摂取量を推定する。

最高心拍数: $220 - \text{年齢} = (\quad\quad\quad \text{拍/分})$

最大酸素摂取量 (ml/kg/min)

