

心拍数からみたエネルギー 消費量の推定に関する研究

長崎大学 菅原正志

I. はじめに

心拍数からエネルギー消費量を推定する試みは多く知られている。Malhotra らや Ford らは、換気量や心拍数から酸素消費量を推定する試みをしたが、予測値と実測値とがまだ一致しないとしている。

本研究は、心拍数からエネルギー消費量を推定し、生理的仕事量を評価するための基礎的研究である。労作のエネルギー消費量は、酸素消費量を

実測することによって算出できる。しかし、複雑な労作に対しては、実測不可能な場合が生じる。そこで、あらかじめ個人の心拍数と酸素消費量とを実測し、その関係により、心拍数から間接的に酸素消費量を推定しようとするものである。

II. 計画と方法

A) 被験者；18才から22才の男子10名を対象に以下の測定を実施した。彼らの体格等を表1に示した。

表1 年齢と体格諸値

	Age	Body height (cm)	Body weight (kg)	Skinfold thickness Triceps+Scapula (mm)	Body fat (%)	Lean Body Mass (kg)
N	10	10	10	10	10	10
$\bar{X}$	20.5	170.40	61.53	17.80	11.30	54.52
S.D	1.09	5.08	6.36	5.31	2.10	5.25

彼らは平均年齢20.5歳で、体格は日本人平均値より大きい。彼らの体脂肪率は11.3%であり、肥満ではない。

B) 方法：心拍数から酸素消費量を推定する算定式のために、次のような測定を10名の被験者に実施した。まず、彼らは30分の座安静の後、10分間の呼気ガス採気と同時に心拍数を測定した。次に、以下に示す実験1から実験5までの踏台昇降運動を負荷した。

実験 1 は、踏台の高さ 25cm で毎分10回の昇降（これは心拍数 75～90beats/min）。

実験 2 は、同じく毎分12回の昇降（これは心拍数 90～110beats/min）。

実験 3 は、同じく毎分25回の昇降（これは心拍数 115～130beats/min）。

実験 4 は、同じく毎分28回の昇降（これは心拍数 135～150beats/min）。

実験 5 は、踏台の高さ 35cm で毎分30回の昇

降（これは心拍数 150～180beats/min）.

以上について運動時間 6 分のうち，開始後 3 分から 6 分までの心拍数と酸素消費量を測定した．そして，安静値を含めた 6 サンプルについて心拍数と酸素消費量の関係を，個人別と全員の回帰方程式によって検討した．

心拍数は日本光電テレメータシステムを使い，採気はダグラスバッグで行い，ガス量は Fukuda-Respirometer CR-50，ガス分析は，労研式ガス分析器で検定した三栄測器 Expired Gas Analyser で測定した．

また，推定回帰方程式の有効性を知るためにフィールドで調査を実施した．その際，日常生活の動作から運動までを取り入れ，労作強度の異なった 4 種の労作の心拍数と酸素消費量を実測し，これと回帰式からの推定値とを比較した．各労作の測定は約 30～60 分間実施した．そして，フィール

ドでの心拍数測定は，NALCO 社製 FM-100 テレメータを用い，Data はカセットテープに録音し，日本光電ポリグラフ RM-45 で再生した．また，採気は Max-Plank Respiration Gasmeter で測定し，ガス分析は三栄測器 Expired Gas Analyser で測定した．

なお，本実験で実施する予定の労作環境温度の影響については，先づは回帰式のフィールドでの妥当性をみることに重点をおいたため，これを後日追試することとし，本研究からは除外した．ちなみに，本実験での測定時の平均外気温は 16°C 前後であった．

III. 研究 成 果

安静そして実験 1 から 5 における換気量，心拍数そして酸素消費量の平均値と標準偏差を表 2 に示した．

表 2 換気量，心拍数，酸素消費量の比較

Work level	$\dot{V}E$ l/min		Heart rate beats/min		$\dot{V}O_2$					
					l/min		ml/Wkg/min		ml/LBMkg/min	
	$\bar{X}$	S. D	$\bar{X}$	S. D	$\bar{X}$	S. D	$\bar{X}$	S. D	$\bar{X}$	S. D
Rest	8.13	1.72	74.5	6.6	0.26	0.04	4.2	0.44	4.7	0.47
Test 1	12.97	2.62	82.7	6.6	0.52	0.08	8.5	1.36	9.5	1.45
Test 2	20.69	1.96	103.8	7.1	1.04	0.09	17.1	1.89	19.3	2.01
Test 3	26.49	3.42	118.6	9.5	1.34	0.13	21.9	2.44	24.7	2.65
Test 4	31.12	3.89	129.1	9.9	1.53	0.12	25.0	2.14	28.2	2.15
Test 5	47.53	5.08	169.7	6.0	2.27	0.19	37.6	4.29	41.7	2.92

N=10

5 つの労作実験での換気量は 12.97 l/min から 47.57 l/min，心拍数は 82.7beats/min から 169.7 beats/min，酸素消費量は 0.52 l/min から 2.27 l/min，そして，その体重当り値は 8.5 ml/kg/min から 37.6 ml/kg/min，また，活性組織（LBM）当り値は 9.5 ml/kg/min から 41.7 ml/kg/min であった．

ここで，実験 5 の労作は心拍数 169.7beats/min，酸素消費量 2.27 l/min であり，Submaxim-

al の労作強度であるといえる．

表 3 に換気量と酸素消費量，心拍数と酸素消費量の相関係数と回帰方程式を，安静と実験 1 から実験 5 までを一括して示した．

相関係数はともに高く有意であり，中でも，換気量と酸素消費量 l/min との相関係数は 0.970 と高かった．また，表に示さなかったが，各実験ごとの換気量と酸素消費量との相関も高くなっていた．そして，回帰方程式の傾きも，労作強度が増

表3 換気量と酸素消費量, 心拍数と酸素消費量の相関と回帰

	N	r	Slope	Intercept
$\dot{V}E$ l/min versus $\dot{V}O_2$ l/min	60	0.970	0.049	-0.044
$\dot{V}E$ l/min versus $\dot{V}O_2$ ml/Wkg/min	60	0.956	0.799	-0.497
$\dot{V}E$ l/min versus $\dot{V}O_2$ ml/LBMkg/min	60	0.963	0.904	-0.631
Heart rate beats/min versus $\dot{V}O_2$ l/min	60	0.952	0.020	-1.085
beats/min versus $\dot{V}O_2$ ml/Wkg/min	60	0.955	0.327	-17.966
beats/min versus $\dot{V}O_2$ ml/LBMkg/min	60	0.959	0.369	-20.250

すごとに徐々に増加していた。

心拍数と酸素消費量との関係は、相関係数 0.952 であった。そして、各実験 (1~5) ごとの相関係数は、労作強度の弱い実験 1, 2, 3 では高かったが、労作強度が強い実験 4, 5 では低かった。また、心拍数と体重当りおよび活性組織当り酸素消費量との間での同様の検討では、実験 1, 2, 3, 4 で高い相関関係にあったが、Submaximal の労作強度であった実験 5 ではやはり低かった。

た。

心拍数は個人差があり、ことに安静状態ではそれがはっきりしている。また、労作中には安静時の値によって左右される。そこで、安静値に対する増加率として表わしてみた。すなわち、{(労作時における値-安静時における値)÷安静値}を、換気量と心拍数そして酸素消費量について各実験ごとに算出し、表3 同様に相関係数と回帰方程式を表4 に示した。

表4 換気量と酸素消費量, 心拍数と酸素消費量の相関と回帰
— いづれも安静値からの増加率でみた —

	N	r	Slope	Intercept
$\dot{V}E$ l/min versus $\dot{V}O_2$ l/min	50	0.948	1.3863	0.8177
$\dot{V}E$ l/min versus $\dot{V}O_2$ ml/Wkg/min	50	0.946	1.3848	0.8300
$\dot{V}E$ l/min versus $\dot{V}O_2$ ml/LBMkg/min	50	0.945	1.3879	0.8358
Heart rate nbeats/min versus $\dot{V}O_2$ l/min	50	0.876	4.9954	1.1582
beats/min versus $\dot{V}O_2$ ml/Wkg/min	50	0.874	4.9858	1.1726
beats/min versus $\dot{V}O_2$ ml/LBMkg/min	50	0.877	5.0244	1.1620

相関は表3 に比べ低くなっている。しかし、各実験 (1~5) における相関係数は、絶対値の場合よりも高くなっていた。

Booyens らは、心拍数と代謝との間に一貫した相関関係があり、そして代謝を予想しうる可能性を示している。また Dill は、心拍数と酸素消費

量との間に強い相関があることを認めている。これらの関係は、普通労作から強労作にいたる種々の労作間における時のみに直線関係が認められると、指摘している。

表5 に心拍数と酸素消費量, 体重当り酸素消費量との相関係数と回帰方程式の個人値を示した。

表5 換気量と酸素消費量, 心拍数と酸素消費量の相関と回帰 (個人値)

Subj. No.	H.R beats/min versus $\dot{V}O_2$ l/min			H.R beats/min versus $\dot{V}O_2$ ml/Wkg/min		
	r	Slope	Intercept	r	Slope	Intercept
1	0.990	0.023	-1.458	0.990	0.323	-20.445
2	0.992	0.017	-0.967	0.992	0.281	-16.021
3	0.994	0.017	-0.913	0.994	0.339	-17.914
4	0.989	0.021	-1.540	0.989	0.390	-28.512
5	0.982	0.022	-1.127	0.982	0.370	-19.115
6	0.983	0.020	-1.010	0.983	0.296	-14.791
7	0.986	0.022	-1.232	0.986	0.340	-19.431
8	0.996	0.022	-1.096	0.996	0.369	-18.440
9	0.987	0.023	-1.413	0.988	0.398	-24.212
10	0.981	0.023	-1.311	0.981	0.327	-18.907

(N=6)

表6 換気量と酸素消費量, 心拍数と酸素消費量の相関と回帰 (個人値)

— いづれも安静値からの増加率でみた —

Subj. No.	H.R beats/min versus $\dot{V}O_2$ l/min			H.R beats/min versus $\dot{V}O_2$ ml/Wkg/min		
	r	Slope	Intercept	r	Slope	Intercept
1	0.984	6.042	-0.063	0.984	6.115	-0.049
2	0.987	4.762	0.174	0.987	4.726	0.158
3	0.995	5.630	0.736	0.995	5.657	0.744
4	0.990	8.632	0.939	0.990	8.690	0.972
5	0.991	6.032	1.325	0.991	6.016	1.315
6	0.977	4.092	0.357	0.977	4.093	0.349
7	0.991	6.277	1.172	0.991	6.305	1.176
8	0.994	4.890	0.005	0.994	4.899	-0.001
9	0.994	6.302	1.121	0.993	6.084	1.158
10	0.988	6.378	1.182	0.988	6.458	1.209

(N=5)

また, 表6には, 同様に安静からの増加率で求めた相関係数と回帰方程式を示した. とともに高い相関関係にある.

次に, これら個人の回帰方程式と, 10名の平均回帰方程式に, フィールドで測定した労作1から労作4での各平均心拍数を代入し, 回帰から得られる推定酸素消費量と実測酸素消費量との比較検討を, 表5からの推定値を表7, 安静値からの増加率で示している表6からの推定値を表8に, それぞれ平均値で示した.

表7において, 労作1での平均心拍数は81.3 beats/minであり, これから得られた推定酸素消

費量値は実測値と近似している. 同様に, 労作2の平均心拍数 92.4beats/min, 労作3の平均心拍数 121.4beats/min で, 得られた推定値と実測値は近似しており, いずれも統計学的差異は認められなかった. しかし, 労作4においては平均心拍数 150.2beats/min で, 推定値と実測値との間に差が生じた. ことに, 10名の平均回帰線からの推定値の $\dot{V}O_2$ l/min は, 実測値との間に5%レベルで有意差が生じた. しかし, 体重当り $\dot{V}O_2$ ml/kg/min では有意差はなかった.

次に, 増加率でみた回帰線からの推定値は, 表8に示すように, 労作1から4ともに有意差

表 7 各労作実測値と個人回帰および平均回帰よりの推定酸素消費量との比較

	Work 1	Work 2	Work 3	Work 4
実 測 値	$\bar{X}$ S.D	$\bar{X}$ S.D	$\bar{X}$ S.D	$\bar{X}$ S.D
H.R beats/min	81.3 $\pm$ 5.3	92.4 $\pm$ 4.3	121.4 $\pm$ 6.8	150.2 $\pm$ 10.2
$\dot{V}O_2$ l/min	0.564 $\pm$ 0.135	0.786 $\pm$ 0.145	1.404 $\pm$ 0.181	2.140 $\pm$ 0.249
ml/Wkg/min	9.3 $\pm$ 1.82	12.8 $\pm$ 2.83	23.0 $\pm$ 3.96	34.8 $\pm$ 4.08
個人回帰よりの推定値				
$\dot{V}O_2$ l/min	0.521 $\pm$ 0.140	0.733 $\pm$ 0.152	1.340 $\pm$ 0.174	1.957 $\pm$ 0.230
ml/Wkg/min	8.6 $\pm$ 1.50	12.0 $\pm$ 1.90	22.0 $\pm$ 3.07	32.3 $\pm$ 4.51
平均回帰よりの推定値				
$\dot{V}O_2$ l/min	0.540 $\pm$ 0.085	0.764 $\pm$ 0.099	1.343 $\pm$ 0.135	1.920* $\pm$ 0.130
ml/Wkg/min	8.9 $\pm$ 1.43	12.5 $\pm$ 1.54	22.1 $\pm$ 2.26	31.3 $\pm$ 3.11

※ 有意差検定は実測値との比較

* $p < 0.05$ (N=10)

表 8 各労作実測値と個人回帰および平均回帰よりの推定酸素消費量との比較

—安静値からの増加率—

	Work 1	Work 2	Work 3	Work 4
実 測 値	$\bar{X}$ S.D	$\bar{X}$ S.D	$\bar{X}$ S.D	$\bar{X}$ S.D
H.R beats/min	0.084 $\pm$ 0.062	0.232 $\pm$ 0.073	0.618 $\pm$ 0.037	1.003 $\pm$ 0.156
$\dot{V}O_2$ l/min	1.169 $\pm$ 0.330	2.023 $\pm$ 0.652	4.400 $\pm$ 0.527	7.230 $\pm$ 0.912
ml/Wkg/min	1.214 $\pm$ 0.331	2.048 $\pm$ 0.664	4.476 $\pm$ 0.516	7.275 $\pm$ 0.930
個人回帰よりの推定値				
$\dot{V}O_2$ l/min	1.191 $\pm$ 0.562	2.064 $\pm$ 0.687	4.343 $\pm$ 1.078	6.616 $\pm$ 1.502
ml/Wkg/min	1.200 $\pm$ 0.570	2.073 $\pm$ 0.697	4.352 $\pm$ 1.092	6.625 $\pm$ 1.522
平均回帰よりの推定値				
$\dot{V}O_2$ l/min	1.570 $\pm$ 0.631	2.320 $\pm$ 0.704	4.246 $\pm$ 1.123	6.469 $\pm$ 1.301
ml/Wkg/min	1.590 $\pm$ 0.711	2.330 $\pm$ 0.750	4.251 $\pm$ 1.146	6.482 $\pm$ 1.214

(N=10)

は認められなかった。

IV. 研究のまとめ

Bradfield ら, 沼尻, そして Consolazio らは, あらかじめ心拍数とエネルギー消費の回帰を求め, 心拍数を求めることによって間接的にエネルギー消費量を求め, それはかなりの信頼性があるとしている。

本実験でも同様にして, 日常生活および各種労作のエネルギー消費量を, 心拍数のみを実測し, あらかじめ求めた心拍数と酸素消費量との回帰方程式から酸素消費量を推定する試みを行った。そ

の結果, 次のような指摘をすることが出来た。

労作強度が心拍数で 121.4 ± 6.8 beats/min までの範囲内は, 酸素消費量の 実測値 と 推定値 との間に有意な差は認められなかった。しかし, 強労作である心拍数 150.2 ± 10.2 beats/min では, 実測値と推定値に有意な差が認められた ($p < 0.05$)。また, 体重当りの酸素消費量にすると, その差は認められなかった。

安静時の心拍数, 酸素消費量を基準として, それからの増加率で求めた回帰方程式では, 労作強度が増しても, 実測値と推定値には差が認められなかった。

なお、本測定の心拍数から酸素消費量を推定する回帰方程式を求めるための実験 1 から実験 5 までの労作は、ほとんど Steady State の成立するものであった。

フィールドでの調査は、静的作業や動的作業、時には激しい労作等を組み合わせて行ったのであるが、推定酸素消費量と実測値とは近似していた。これは、心拍数測定からエネルギー消費量を推定することの可能性の高いことを示唆した。

文 献

1. Booyen, J. and G.R. Hervey ; The pulse rate as a means of measuring metabolic rate in man, *Can. J. Biochem.* 38, 1300 (1960)
2. Bradfield R.B. ; A technique for determination of usual daily energy expenditure in the field, *Am J. Clin. Nutri.*, 24, 1148 (1971)
3. Bradfield R.B., J. Paulos, M.S. and L. Grossman, M.A. ; Energy expenditure and heart rate of obese high school girls, *Am. J. Clin. Nutri.*, 24, 1482 (1971)
4. Consolazio C.F., R.A. Nelson, T.A. Daws, H.J. Krzywicki, H.L. Johnson and R.A. Barnhart ; Body weight, heart rate, and ventilatory volume relationship to oxygen in the field, *Am. J. Clin. Nutri.*, 24, 1148 (1971)
5. Dill D.B. ; Effects of physical strain and high altitude on the heart rate and circulation *Am. Heart J.* 23, 441 (1942)
6. Ford A.B. and H.K. Hellerstein ; Estimation of energy expenditure from pulmonary ventilation, *J. Appl. Physiol.*, 14, 891 (1959)
7. Malhotra M.S., J.S. Gupta and R.M. Rai ; Pulse count as a measure of energy expenditure, *J. Appl. Physiol.*, 18, 994 (1963)
8. 沼尻幸吉 ; エネルギー代謝と心拍数との関係について, 労働科学, 50, 79 (1974)
9. 菅原正志 ; 心拍数と酸素摂取の関係, 第 1 報, 長崎大学教養部紀要, 自然科学, 15, 49 (1974)