自転車エルゴメーター駆動時のパワーについて

渋谷 侃 二* 高 松 薫*
 斉 藤 慎 一* 小 川 新 吉*

(昭和46年12月31日受付)

Human Power in Pedalling a Bicycle Ergometre

Kanji Shibukawa, Kaoru Takamatsu,
 Shinichi Saito and Shinkichi Ogawa
 (Tokyo University of Education)

運動中、外部の抵抗に打ちかつのに必要な出力パワーは、からだの中で発生するエネルギーの発生率の一部にしか過ぎない。

モナークの自転車エルゴメーターを駆動するとき、摩擦抵抗 F (kg), スピード V (m/s) および酸素消費量 (l/min) を測定した。酸素消費量 (l/min) は普通の方法で熱エネルギーの発生率 ($kcal/min$) に換算され、さらに、運動中にからだの中で発生するパワー P ($kg \cdot m/s$) に換算される。

測定に含まれるランダムな誤差を消去し、少数の測定結果から全体の傾向を推察するために、全ての実験データから1つの実験式を作った。すなわち、

$$P = P_0 + KFV + (A + BF + CF^2)V^2$$

ここに、 F , V および P は測定値で、 P_0 , K , A , B および C は最小2乗法によって求めた。

出力パワーは F と V との積である。したがって、パワー伝達の効率 η が得られ、

$$\eta = \frac{FV}{P_0 + KFV + (A + BF + CF^2)V^2}$$

となる。被検者は2名に過ぎなかったが、自転車エルゴメーターを駆動するときの最大効率は約21%であった。

The human output power which is required to overcome any external resistance in motion is only a fraction of the rate of the internally produced energy.

In pedalling the bicycle ergometre (MONARK), the frictional resistance F (kg), the speed V (m/s), and the oxygen consumption (l/min) were measured. The oxygen consumption (l/min) can be converted by conventional method into the rate of heat energy production ($kcal/min$) and, furthermore, into the power P ($kg \cdot m/s$) which produced in human body in motion.

In order to eliminate the random errors involved in measurements and to derive an overall tendency from a small number of test data, the investigators set up an empirical formula for P from the whole experimental data, that was,

$$P = P_0 + K \cdot F \cdot V + (A + B \cdot F + C \cdot F^2)V^2$$

in which F , V and P were measured and P_0 , K , A , B and C were calculated by the least square method.

The output power is the product of F and V . Therefore, the efficiency η of power transfer may be deduced as following;

$$\eta = \frac{F \cdot V}{P_0 + K \cdot F \cdot V + (A + B \cdot F + C \cdot F^2)V^2}$$

Although the number of our subjects was only two, the maximum efficiency in pedalling a bicycle ergometre was about 21%.

(Shibukawa, Kanji, Takamatsu, Kaoru, Saito, Shinichi and Ogawa, Shinkichi: Human Power in Pedalling a Bicycle Ergometre, *Research Journal of Physical Education*, Vol. 16, No.4, January, 1972, pp. 233~239)

* 東京教育大学

一般に、身体運動は身体内で生ずる生化学的エネルギーを原動力とするものであるが、発生したエネルギーの全てが有効な機械の仕事として身体の運動となつて現われるものではない。

からだは、エネルギーの発生器であると同時に、外部へエネルギーを伝達する伝達器、あるいは、エネルギーを外部への機械の仕事に変える変換器でもある。エネルギー発生器としての能力はエネルギーの発生率（発生パワー）をしらべ、伝達器・変換器としての能力は外部への仕事率（出力パワー）を求めて、発生パワーとの比として変換効率を考えればよいであろう。

発生パワーも出力パワーも、からだの運動部位と動作様式、運動時間、意志、外部負荷条件、環境条件などによつて当然異なるであろう。

ここでは、摩擦力を負荷とする自転車エルゴメーターのペダリング動作におけるパワーについて実験し、若干の考察を行なつた。発生パワーは酸素摂取量から求め、出力パワーは摩擦負荷とスピードの積として求められる。なお、自転車走行時の効率については、服部らの研究¹⁾があるが、自転車の定常走行時の負荷は空気抵抗が主であり、ここで扱つた摩擦負荷式の自転車エルゴメーターとは負荷条件が異なる。

1. 実験および測定結果

この実験の被検者は、健康な成人男子2名で、その身体的特徴を表1に示す。

基礎代謝量は、高比良の式によつて求めた体表面積に、被検者 M.S. では 1m^2 あたり 0.62kcal/min を、被検者 D.O. では 0.61kcal/min を、それぞれ乗じて算出した。

表 1

被 検 者	M. S.	D. O.
年 令 (yr)	29	35
身 長 (cm)	175.0	163.0
体 重 (kg)	71.0	55.0
体 表 面 積 (m^2)	1.876	1.599
基礎代謝量 (kcal/min)	1.163	0.975
安静代謝量 (kcal/min)	1.396	1.170
安静時の発生パワー P_R ($\text{kg} \cdot \text{m/s}$)	9.94	8.33

安静代謝量は、基礎代謝量の約 1.2 倍といわれているので²⁾、各被検者の基礎代謝量に 1.2 を乗じて算出した。この安静代謝量は、安静時に身体内で発生するエネルギーの発生率（発生パワー） P_R に相当するので、単位の換算 ($1\text{kcal}=427\text{kg} \cdot \text{m}$) を行ない、表に示した。

実験に使用した自転車エルゴメーターは、モナーク社製で摩擦負荷式のものである。クランク長 175mm、負荷輪の直径 516mm、歯車比 52:14 であつた。

摩擦負荷を与えるベルトの緊張度を調節して得られる、1, 1.5, 2, 2.5 および 3kg の各負荷に対し、被検者に、4~5 種で各 6 分間等速のペダリングを行なわせ、そのときの、速度、心拍数、酸素摂取量および呼吸商を測定した。

速度は、負荷輪に付した小片が、車輪の 1 回転ごとに、固定したフォトランジスタと光源ランプの間を横切るときのフォトランジスタ出力をペン書きオシログラフレコーダに記録して、摩擦負荷部の周速度として求めた（エルゴメーター付属の速度指示計は、被検者のスピードモニターとしてのみ用いた）。

動作開始後 4 分から 6 分の 2 分間にわたつて、ダグラスバッグに呼気を探り、労研式ガス分析器とレスピライザー（フクダイリカ製）を用いて分析した。

2 人の被検者についての測定結果を表 2 および 3 に示す。

運動代謝量は、呼吸商が 1.0 前後であることから、酸素 1l 当り 5kcal の熱量が発生するものとして、酸素摂取量より算出した。さらに、この運動代謝量 (kcal/min) は、運動中に身体内で発生するエネルギーの発生率（発生パワー） P に相当するから、 $\text{kg} \cdot \text{m/s}$ の単位に換算して同表に示した。

また、摩擦負荷 F に打ち勝つて V の速度を維持するときの仕事率（出力パワー）は $F \cdot V$ であり、発生パワーに対する効率 η は、 $F \cdot V / P$ で表わされる。これらの値も表 2 および 3 に示した。

2. 解析および考察

測定値には何等かの誤差が含まれているので、少なくともランダムな誤差を消去するためと、少

表 2 測 定 結 果 (被検者 M.S.)

負 荷 F (kg)	速 度 V (m/s)	心 拍 数 (beats/min)	酸素摂取量 (l/min)	呼 吸 商	運動代謝量, (kcal/min)	発生パワー P (kg·m/s)	出力パワー $F \cdot V$ (kg·m/s)	効 率 η (%)
1	3.01	78.3	0.631	0.91	3.155	22.45	3.01	13.4
	5.14	88.3	0.956	0.95	4.790	34.02	5.14	15.1
	7.32	104.1	1.351	0.97	6.755	48.07	7.32	15.2
	9.49	125.9	1.803	0.98	9.015	64.16	9.49	14.9
	11.60	154.6	2.425	1.02	12.125	86.29	11.60	13.4
1.5	2.90	94.7	0.768	0.97	3.840	27.33	4.35	15.9
	4.92	112.7	1.171	0.95	5.855	41.67	7.38	17.7
	6.12	120.7	1.399	0.98	6.995	49.78	9.18	18.4
	7.22	137.1	1.643	1.02	8.215	58.46	10.83	18.5
	9.40	160.4	2.272	1.05	11.360	80.85	14.10	17.4
2	3.13	98.6	0.943	0.94	4.715	33.56	6.26	18.7
	5.02	114.7	1.513	0.99	7.565	53.84	10.04	18.7
	6.22	144.0	1.717	0.99	8.585	61.10	12.44	20.4
	7.43	148.2	2.106	1.01	10.530	74.94	14.86	19.8
	8.57	171.5	2.451	1.04	12.255	87.21	17.14	19.7
2.5	3.12	95.7	1.133	0.95	5.665	40.32	7.80	19.4
	4.33	103.2	1.370	0.98	6.850	48.75	10.83	22.2
	5.35	121.0	1.754	1.03	8.770	62.41	13.38	21.4
	6.21	150.1	2.046	1.03	10.230	72.80	15.53	21.3
	7.57	173.4	2.499	1.05	12.495	88.92	18.93	21.3
3	3.06	105.7	1.384	0.92	6.920	49.25	9.18	18.6
	4.11	111.9	1.677	0.98	8.385	59.67	12.33	20.7
	5.29	152.0	2.084	1.00	10.420	74.16	15.87	21.4
	6.20	169.4	2.534	1.02	12.670	90.17	18.60	20.6
	7.33	183.0	3.138	1.07	15.690	111.66	21.99	19.7

数の測定点から全体的な傾向をよりよく把握するために、つぎのような手順で、発生パワー P に対する実験式を求めた。

- 1) 表 2 から、 $P - P_R$ を求め V に対して図示すれば図 1 が得られる。ただし、 P_R は表 1 に示した安静時の発生パワーである。

- 2) 図 1 から、 $P - P_R$ は、各負荷 F についてそれぞれ V の関数と考えられる。この函数形を $P - P_R = a \cdot V + b \cdot V^2$ (1)

とおき、係数 a および b は測定値から最小 2 乗法によつて求める。図 1 の各曲線は、このようにして求めた式(1)を図示したもので測定値をよく近似している。

- 3) 式(1)の係数 a および b は、図 2 および 3 のように、それぞれ F の関数と考えられ、その

図 1

表3 測定結果 (被検者 D.O.)

負荷 F (kg)	速 V (m/s)	心拍数 (beats/min)	酸素摂取量 (l/min)	呼吸商	運動代謝量, 発生パワー (kcal/min)	発生パワー P (kg·m/s)	出力パワー $F \cdot V$ (kg·m/s)	効 率 η (%)
1	3.31	98.7	0.651	0.95	3.255	23.16	3.31	14.3
	5.17	110.9	0.965	0.97	4.825	34.34	5.17	15.1
	7.36	124.0	1.359	1.01	6.795	48.36	7.36	15.2
	9.44	138.8	1.601	1.00	8.005	56.97	9.44	16.6
	11.56	172.5	2.431	1.09	12.155	86.50	11.56	13.4
1.5	3.06	106.0	0.758	0.99	3.790	26.97	4.59	17.0
	5.05	122.9	1.179	1.04	5.895	41.95	7.58	18.1
	6.11	135.0	1.399	1.04	6.995	49.78	9.17	18.4
	7.30	145.9	1.668	1.03	8.340	59.35	10.95	18.4
	8.44	160.4	1.983	1.07	9.915	70.56	12.66	17.9
2	3.11	118.9	0.900	0.92	4.500	32.03	6.22	19.4
	5.12	136.0	1.417	1.00	7.085	50.42	10.24	20.3
	6.05	151.2	1.701	1.02	8.505	60.53	12.10	20.0
	7.53	176.9	2.151	1.07	10.755	76.54	15.06	19.7
2.5	3.25	117.1	1.096	0.95	5.480	39.00	8.13	20.8
	4.31	130.8	1.372	1.01	6.860	48.82	10.78	22.1
	5.27	153.5	1.807	1.04	9.035	64.30	13.18	20.5
	6.21	166.3	2.044	1.10	10.220	72.73	15.53	21.4
3	3.08	129.1	1.394	0.97	6.970	49.60	9.24	18.6
	4.23	146.7	1.831	1.02	9.155	65.15	12.69	19.5
	5.20	162.5	2.099	1.05	10.495	74.69	15.60	20.9
	5.80	193.6	2.403	1.12	12.015	85.51	17.40	20.4

図 2

函数形は

$$\begin{cases} a = K \cdot F \\ b = A + B \cdot F + C \cdot F^2 \end{cases} \quad (2)$$

図 3

とおくことができる。

4) したがって、最終的に、発生パワー P は次式の形をとるといえる。

表 4

被 検 者		M. S.	D. O.
P_0	($\text{kg}\cdot\text{m/s}$)	11.814	8.332
K		3.020	3.579
A	($\text{kg}\cdot\text{s/m}$)	0.476	0.456
B	(s/m)	- 0.301	- 0.310
C	(s/m/kg)	0.111	0.100
F_*	(kg)	3.16	2.94
V_*	(m/s)	4.36	4.51
$\eta_{\max}$	(%)	21.0	20.7

$P = P_0 + K \cdot F \cdot V + (A + B \cdot F + C \cdot F^2) V^2$ (3)
発生パワー P に関する実験式(3)の係数, P_0 , K,

A, B および C の値は, 各被検者ごとに, 測定した全てのデータ (P, F および V) から, 最小 2 乗法によつて求められ, それらを表 4 に示す.

さらに, このようにして求めた式(3)を曲線にして測定値とともに図 4 および 5 に示す. これらから, 唯一の実験式(3)が全ての測定値を十分に近似していることがわかる.

なお, 式(3)の P_0 は安静時の発生パワーを表わし, 表 1 に示した P_R と全く同じ意味のものであり, ただその値の求め方が異なるだけといえる. 表 1 の P_R と表 4 の P_0 の値を比較すると, 被検者 M.S. では約 20% 異なるが, 被検者 D.O. ではほぼ一致している.

図 4 発生パワー P (被検者 M. S.)

図 6 パワーの変換効率 η (被検者 M. S.)

図 5 発生パワー P (被検者 D. O.)

図 7 パワーの変換効率 η (被検者 D. O.)

発生パワーを出力パワーに変換する効率 η は、発生パワーが式(3)で、出力パワーが F と V との積で、それぞれ表わされることから

$$\eta = \frac{F \cdot V}{P_0 + K \cdot F \cdot V + (A + B \cdot F + C \cdot F^2) V^2} \quad (4)$$

となる。式(4)の曲線を測定値とともに図6および7に図示する。

2人の被検者とも、測定値だけから見ると負荷が2.5kgのときに効率が最もよいようであるが、測定値には誤差が含まれているので、効率の最大値は式(4)から求めるべきであろう。

ある範囲内では、負荷の F に対して独立に速度 V を与え得るから、式(4)において η が最大値をとる F および V は、連立方程式

$$\frac{\partial \eta}{\partial F} = 0, \quad \frac{\partial \eta}{\partial V} = 0 \quad (5)$$

の解 F_* および V_* となる。すなわち、

$$\begin{cases} F_* = -2A/B \\ V_* = -B \sqrt{\frac{P_0}{(4AC - B^2)A}} \end{cases} \quad (6)$$

このとき、最大効率 $\eta_{\max}$ は次式となる。

$$\eta_{\max} = 1 / (K + \sqrt{(4AC - B^2)P_0} / A) \quad (7)$$

F_* 、 V_* および $\eta_{\max}$ の値は、式(3)の係数とともに表4に示した。 F_* および V_* の値は、ほぼ実験範囲内にあるので、式(7)から得られる最大効率 $\eta_{\max}$ の値も妥当なものである。この実験では、2名の被検者に過ぎないが、最大効率は約21%であった。

なお、服部ら¹⁾が求めた自転車定常走行時の最大効率は25~30%程度であるが、自転車定常走行時の負荷は空気抵抗を主としており、われわれの取り上げた自転車エルゴメーターでは固体摩擦が負荷となつているので、被検者の相違からだけでなく、この負荷条件の違いが効率の違いとなつて現われたものと思われる。

最後に、実験式(3)から P が一定のときの F と V を求め図示すると図8および9となる。これらの図には測定点も示してあるが、実験範囲を越えた部分について敢て考察すれば、発生パワー P の大小は努力の程度の大小に相当するから、努力の程度が大きいとき、負荷 F が0の場合より僅かに負荷があつた方がスピードが早い。しかし、努力の

図8 発生パワー P が一定のときの力とスピードの関係 (被検者 M. S.)

図9 発生パワー P が一定のときの力とスピードの関係 (被検者 D. O.)

程度が小さいときには、無負荷の場合にスピードが最も早い。このような傾向は体験とも一致しているので、今後さらに実験範囲を拡げた研究が必

要であろう。

本研究は、昭和46年度科学研究費補助金をうけた総合研究「身体運動におけるパワーの入出力特性に関する研究」の一部として行なったものである。

参 考 文 献

- 1) 服部 進, 服部四士主: 自転車走行における人間工学的研究, 人間工学, 5, 2, 1969.
- 2) 沼尻幸吉: エネルギー代謝計算の実際, 第1出版, 1966.