

自転車エルゴメーターによる
Ergometry に関する研究

財団法人 日本体育協会
スポーツ科学委員会

自転車エルゴメータによる Ergometry に関する研究

日本体育協会スポーツ科学委員会

体力トレーニング研究小委員会

石河利寛

〔・〕 緒 言

人間の有する諸能力のうち直接生命に関係が深いために最も重要と考えられているのは心臓機能である。換言すれば、心臓が大きい予備能力を持っていることが生命維持の上からも必要であり、かつ日常作業において高い活動力を保持しうることになる。

心臓機能を直接的に表わすものは心搏出量であるが、最大心搏出量を測定することは事実上種々の困難が伴なう。もし、動静脈較差を一定と考えれば最大心搏出量は最大酸素摂取量と比例する。この点から通常、作業を規定する心臓機能の示標として最大酸素摂取量が用いられる。すなわち、最大酸素摂取量の大きい者は心臓機能がすぐれていて予備能力が高く、激しい作業に耐えられると考えられる。最大酸素摂取能力はまた有機性能力 Aerobic capacity とも呼ばれている。

最大酸素摂取量の測定に際しては、なされた作業量もしくは作業条件を規定する必要がある。この目的のためにエルゴメータを用いて酸素摂取量を測定する方法がとられ、これにはトレッドミルテスト、自転車エルゴメータテスト及びステップテストが含まれる。これらのテストによって実際に発現した最大酸素摂取量を測定する直接法と最大以下の作業時の呼吸、循環系の反応から最大酸素摂取量を計算して求める間接法とがある。従来我国では作業負荷としてトレッドミルが屢々用いられているが、実用的見地からみれば、自転車エルゴメータの方が次の諸点からみてよりすぐれている。

- 1) 経費が安価である。
- 2) 装置を持ち運びできる。
- 3) 仕事量、仕事率、効率が測定できる。

4) 女子や運動に不馴れな者にも利用できる。

5) 間接法が利用できる。

この意味で我国における自転車エルゴメータの利用が今後ますます拡大されることが予想される。この研究は自転車エルゴメータテストに関する青少年の基礎資料を得る目的を以て行なったものである。すなわち、標準的な発育を示す青少年の最大酸素摂取量を自転車労作時について測定し、同時に測定した他の Physiological parameter 及び呼吸・循環機能評価のための field test として実用されている step test と最大酸素摂取量とが如何なる関係にあるかをしらべ、更に Åstrand-Ryhming nomogram による間接法による最大酸素摂取量を実測値との関係について検討した。

〔・〕 被検者及び実験方法

この研究では標準的な発育を示す青少年を対象としているため、被検者の選定は次の方法によった。即ち、実験の協力を依頼した中学校及び高等学校の学校健康診断表より身長及び体重が全国平均値（昭和42年度学校保健統計報告書による）にできるだけ近似するものを各学年より男女おのおの約5名選び、男子30名、女子26名について行なった。

実験は2回に分けて行ない、第1回には身長、体重の測定、Step test の実施及び1分間50回転の自転車労作をメトロノームに合わせて行なう練習と共に負荷の与え方の適否をしらべた。第2回の実験は原則として第1回実験日より1週間以内に行ない、自転車エルゴメータテストのみを行なった。この場合の実験手順は Balke⁽⁴⁾ らによって I. C. S. P. F. T. (体力テスト標準化のための国際委員会) に提出された試案に基づいたも

ので次の通りである。

1. テスト前20分以上の坐位安静。
2. 5分間 warm-up : 4 Met (Metabolic rate) となる負荷を用いる。
3. 5分間自転車で休息。
4. テスト : 4 Met となる負荷で始め, 2分毎に1~2 Met の負荷を増して行き all out まで継続させる。
5. 運動後3分迄の経過を追う。

測定はマスクの一端に固定した thermistor による呼吸数及び \dot{V}_E 誘導の心電図による心搏数の連続記録を行なった。また, 採気は Douglas bag で行ない, 呼気の分析には労研式ガス分析装置を用いた。

〔・〕 実験結果

最大酸素摂取量を年齢別にみると, 男子では年齢の増加と共に最大酸素摂取量が著明な増大傾向を示す。これに対して女子ではこの傾向がみられず, 増減は著明でない。また, 単位体重当りの最大酸素摂取量についてみると, 男子では12才~14才にかけて増加の傾向がみられるが女子では年齢の増加に従って明らかな漸減傾向が認められる(表1)。

PWC₁₇₀ (Physical work Capacity 170) は Steady state の心搏数が170の時の1分間当りの仕事量で表わされる指標であるが, この実験では同一負荷に対する作業継続時間が2分間という方法を用いているため steady state の心搏数が得られない。そこで各負荷の終り15秒間に測定した搏動数から換算した心搏数-仕事量曲線を描き, これより心搏数170の時の仕事量を求めて, これを PWC₁₇₀ の値として示すことにする。PWC₁₇₀ の値は男子では12才~15才にかけて漸増傾向がみられるが, 女子ではこの増加が14才で終わっている。また, 単位体重当りのPWC₁₇₀ の値は男子では14才までは増加して, 以後減少するが, 女子ではこの漸減傾向が男子より早く12才より始まっている(表2)。

最大酸素脈は男子では年齢の増加に伴って増大する傾向を示すのに対して, 女子では殆んど増

表1 年齢別最大酸素摂取量

	max $\dot{V}O_2$ ml/min	
	男 子	女 子
12(才)	1473.2±159.6	1384.0±69.1
13	1758.6±237.1	1490.0±178.5
14	2051.2±297.6	1359.0±128.6
15	2128.8±318.6	1411.8±100.6
16	1910.6±127.0	1346.8±181.8
17	2365.0±281.4	1429.0±11.3

	max $\dot{V}O_2$ ml/min/kg	
	男 子	女 子
12(才)	40.2±3.5	35.8±2.4
13	40.9±4.9	35.1±5.9
14	44.2±6.6	30.2±4.8
15	39.9±6.1	28.8±2.0
16	33.5±3.0	25.9±4.0
17	41.9±3.7	27.5±1.6

表2 年齢別 PWC₁₇₀ の値

	PWC ₁₇₀ kpm/min		PWC ₁₇₀ kpm/min/kg	
	男 子	女 子	男 子	女 子
12(才)	531±113.2	470±24.5	14.4±2.7	12.2±0.8
13	677±93.7	526±59.3	15.8±1.8	11.9±1.3
14	688±72.6	530±151.6	15.6±2.3	11.3±3.4
15	881±151.4	501±105.2	16.1±3.4	10.2±2.6
16	881±117.9	564±72.8	15.3±2.6	10.9±0.2
17	829±104.7	597±88.4	14.7±1.5	11.7±1.1

加傾向は認められない。また, 単位体重当りの最大酸素脈についてみると男子では年齢に伴う増減はあまり顕著ではないが, 女子では年齢の増加に従って減少する傾向がある(表3)。

Step test 判定指数は男女とも極めて個人差が大きく, 概して男子は女子より高い指数を示すが, その他の傾向は見出せない(表4)。

単位体重当り最大酸素摂取量と他の測定値との

表3 年齢別最大酸素脈

	最大酸素脈		単位体重当り最大酸素脈	
	男子	女子	男子	女子
12 (才)	(ml) 7.74±1.08	(ml) 7.20±0.32	(ml) 0.211±0.047	(ml) 0.187±0.011
13	9.08±0.85	7.82±0.83	0.213±0.017	0.178±0.018
14	10.42±1.75	7.10±0.88	0.204±0.039	0.125±0.022
15	11.38±1.98	7.48±0.48	0.213±0.037	0.153±0.062
16	10.18±0.72	7.05±0.96	0.178±0.017	0.139±0.019
17	12.08±1.75	7.80±0.28	0.215±0.026	0.151±0.007

表4 年齢別 Step Test 判定指数

	男子	女子
12 (才)	55.8±5.73	48.0±4.95
13	57.7±3.51	57.5±11.41
14	56.4±3.55	49.3±4.42
15	62.5±5.11	49.5±4.09
16	52.9±6.81	51.3±4.27
17	51.0±5.53	49.9±0.10

相関関係をみると、最大酸素脈は男女ともに1%水準で有意の相関が認められ、最大仕事率とは男子とも5%水準で有意であった。一方、単位体重当り最大酸素摂取量と PWC 170/kg 及び Step test 判定指数との間にはいずれも有意の相関はみられなかった(表5)。

心搏数170の時の負荷量から Åstrand-Ryhming nomogram を用いて correction factor を年齢別として単位体重当り最大酸素摂取量を求めた。その結果表6の如く男子では平均49.6±7.28 ml/女子で42.2±5.68 ml でこれらは実測値より有意

表5 単位体重当り最大酸素摂取量と他の測定値との相関表

		最大酸素脈	最大仕事率	PWC ₁₇₀ kpm/min/kg	Step Test Index
max $\dot{V}O_2$ ml/min/kg	男	※※ 0.49	※ 0.41	0.32	0.21
	女	※※ 0.58	※ 0.39	0.18	-0.06

※※ 1%水準で有意。
※ 5%水準で有意。

に大であった。また、実測値との相関は男子では5%水準で有意であったが、女子では有意の相関は認められなかった。

[・] 考 察

最大酸素摂取量は運動の種類によってその値に差のあることが認められている。即ち、猪飼ら(1)は成人男子10名を対象とした実験で自転車労作による最大酸素摂取量はトレッドミル走より約12%低くなることと報告しており Glasfordら(5)も17才〜

表6 実測値と nomogram による max $\dot{V}O_2$ /min/kg の比較

	max $\dot{V}O_2$ /min/kg		t の 値 (差の検定) ($t > p = 0.01$)	nomogram 値と 実測値との相関係数
	nomogram 値	実 測 値		
男	49.6±7.28	40.1±5.65	7.198	0.400
女	42.2±5.68	30.7±4.62	8.553	0.236

33才の男子24名を被検者として2種の Treadmill test, 自転車エルゴメーターテスト及び Åstrand predicted test の4種のテストを行なって最大酸素摂取量を測定したところ, 自転車エルゴメーターテストによる成績は他の3種のそれに比して有意に低い結果を得ている(表7)。

表7 運動の種類による最大酸素摂取量の相違
(単位 l/min)

報 告 者	自 転 車 労 作	トレッドミル走
猪 飼 ¹¹⁾	3.084±0.520	3.512±0.894
Glasford, et al ¹²⁾	3.485±0.402	3.758±0.327

最大酸素摂取量の年令的推移, 即ち男子では年令の増加と共に最大酸素摂取量が増大するのに対して, 女子で単位体重当りの最大酸素摂取量が年令の増加に伴って著しく減少する傾向を示すことについては Knuttgen¹⁵⁾ も思春期の男女の最大酸素摂取量を測定して同様のことを報告している。この現象は男子では13~17才の時期において有酸素的作業能力が体重の増加にほぼ対応して発達するのに対して, 女子は体重の増加が有酸素的作業能力の発達を凌駕していることを示すものと思われる。

PWC 170 の値は体力を物理的な量で表わす一つの指標である。これは steady state における心搏数が170の時になうする1分間当りの仕事量を kpm 又は kg-m で表わすものである。steady state の心搏数170は人体が最も経済的に作業をなす最高状態であり, 成人について測定した結果では最大酸素消費量の約80%に当る状態²⁰⁾であるとされている。

この実験で得た PWC 170/kg は Howell⁹⁾ らの成績に比して大となったが, これは主として実験方法の相違に基づくものと思われる。

単位体重当り最大酸素摂取量と最大酸素脈及び最大仕事率とは有意の相関が認められ, PWC 170/kg の値及び step test 判定指数とは相関が見出せなかった。即ち単位体重当り最大酸素摂取量と心搏反応を指標とした測定値との相関が低い。

最大仕事率と単位体重当り最大酸素摂取量との相関係数は男子 0.41 女子 0.39 であったが Green⁶⁾ はカナダの中学生を対象とした実験で男子 0.69, 女子 0.68 の相関係数を得ている。自転車労作時の機械的効率率は約 22~23%¹⁾ とされ, 300 kpm/min から 900 kpm/min の間ではほぼ一定であるので, この範囲では酸素摂取量と仕事率とはほぼ 1.0 に近い相関を示すものと考えられるが, 最大仕事率においては酸素需要量は酸素摂取量と酸素負債によって充たされ, 酸素負債がある限度に達すると all out となるのであるからこの酸素負債の存在によって相関係数は引き下げられるものと考えられる。

酸素脈は心臓の一搏動当りの血液に取り入れられる酸素の量を表わすが, この指標は心搏出量と完全に比例はしないが認容できる誤差をもって搏出量の変化を知ることができるものである。猪飼ら¹²⁾ は体重当りの酸素摂取量と心搏量との間に高い相関関係を認めており, Holmgren⁸⁾ は最大心搏出量が酸素輸送能と高い相関を示すと報告している。もし肺を通過する静脈血の或量に必ず一定量の酸素が摂取されるとすれば, 酸素脈は心搏出量と完全に一致する筈であるが, 動静脈血の酸素飽和度の差は運動その他の状態に応じて変化することが知られており, この事から酸素脈は搏出量と完全には一致しない。これらのことから酸素脈と酸素摂取量の相関係数は心搏出量と酸素摂取量との相関係数よりは当然低くなると考えらる。

単位体重当りの PWC 170 の値と単位体重当り最大酸素摂取量との間に有意の相関はみられなかったが, Holmgren⁸⁾ はこの両者の間に高い相関関係を認めている。これはこの実験における PWC 170 の値が前述のように steady state の心搏数によるものでないためと思われる。

step test は体重に比例した負荷を課した後の回復期の心搏数を指標として呼吸・循環系機能を評価しようとするもので field test として実用されている。この step test の判定指数と単位体重当り最大酸素摂取量との間に有意の相関は認められなかった。Macnab¹⁶⁾ にも Mitchel, Sproule and Chapman test と Progressive step test の Åstrand test と Progressive step test の

validity coefficient が共に低いことを報告している。一方、石河⁽¹⁴⁾ は運動選手を対象とした実験で単位体重当り最大酸素摂取量と Harvard step test の成績の間に高い相関を認めており、Hettinger とも同様の結果を得ている。これらのことから Harvard step test のような最大に近い負荷を課した場合には心搏数の回復状態によって呼吸・循環機能を評価することができるが、負荷の弱い step test では回復期の心搏反応が呼吸・循環機能を十分に反映しないものと考えられる。

Åstrand-Ryhming nomogram は最大以下作業時における心搏数が酸素摂取量とはほぼ直線関係を有し、かつ steady state の心搏数と作業負荷量との間にも直線関係が成り立つことを前提として作られている。

Åstrand-Ryhming nomogram によって求めた最大酸素摂取量と実測値との比較検討は多くの研究者が行なっている。Macnab⁽¹⁵⁾ らはカナダの中学10年生～12年生男女を対象としてこの比較を行ない、nomogram より求めた値は実測値より男子で10%、女子で5.5%低い結果を得ている。また、Teräslinna ら⁽¹⁶⁾ は23才～49才の男子で実測した最大酸素摂取量は平均 2.89 ± 0.383 l/min, nomogram より求めた値は 2.85 ± 0.414 l/min というよく一致した値を得ている。一方 Glassford ら⁽⁵⁾ は2種の Treadmill test と Åstrand の actual test 及び predicted test の4種のテストから得た最大酸素摂取量を比較したところ、Åstrand の actual test による値が他の3種のテストより得た最大酸素摂取量に比して有意に低く、2種の Treadmill test と Åstrand の predicted test より得た値の間に有意差はなかったことを報告しており Hettinger ら⁽⁷⁾ も実測値の平均値 2.38 l/min に対して nomogram より求めた値の平均値 2.26 l/min が有意に大であったという結果を得ている。また、Hyde⁽¹⁰⁾ はカナダの中学生女子では nomogram より得た最大酸素摂取量は実測値に殆んど一致したが、男子では前者が有意に小さかったという。

この実験では Åstrand-Ryhming nomogram より求めた単位体重当り最大酸素摂取量は実測値に比して有意に大なる値となったが、その原因の

1つとして考えられることは、ここで用いた実験方法では最大以下作業時における steady state の心搏数が得られず、そのために心搏数に対応する作業負荷量が過大評価されたことである。従ってこの方法を用いて nomogram よりの値を求めることは妥当でなく、実測によって最大酸素摂取量を得るべきであると考えられる。

[・] 総 括

標準的な発育を示す中学生及び高校生男子30名、女子26名について自転車エルゴメーターによる漸増負荷法で最大酸素摂取量を測定し、同時に測定した他の physiological parameter 及び Step test と最大酸素摂取量との相関関係をしらべ、更に Åstrand-Ryhming nomogram による間接法の値と実測値との関係を検討して次のような成績を得た。

1) 単位体重当り最大酸素摂取量は男子 40.1 ± 5.65 ml/min, 女子 30.7 ± 4.62 ml/min であった。最大酸素摂取量は絶対値では男子で年齢の増加に伴って増大し、単位体重当りでは女子で年齢の増加に従って著明な減少傾向がみられた。

2) 同時に測定した単位体重当り最大酸素脈は男子 0.206 ± 0.026 ml, 女子 0.162 ± 0.023 ml であり、PWC₁₇₀/kg は男子 15.3 ± 2.40 kpm/min, 女子 11.4 ± 1.91 kpm/min であった。Step test 判定指数は極めて個人差が著しく男子平均 56.1 ± 6.02 , 女子 51.0 ± 6.58 であった。

3) 単位体重当り最大酸素摂取量と有意の相関を示したのは最大酸素摂取量及び最大仕事率であった。なお、他の physiological parameter との相関が低かったことは同一負荷での継続時間が2分間という方法上の問題に基づく部分があると考えられる。

4) Åstrand-Ryhming nomogram によって求めた最大酸素摂取量は男女とも有意に大であった。このことから本方法を用いる限りにおいては Åstrand-Ryhming nomogram を用いることは妥当でなく、直接法によって最大酸素摂取量を測定すべきであると考えられる。

References

- 1) Åstrand, P. O. : Experimental studies of physical work capacity in relation to sex and age. Copenhagen, Munksgaard, 1952
- 2) Åstrand, P. O. and Ryhming, I. : A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during submaximal work. *J. Appl. Physiol.* 7 : 218-221, 1954
- 3) Astrand, I. : Aerobic work capacity in men and women with special reference to age. *Acta physiol. scand.* 49 Suppl. 169, 1960
- 4) Balke, B., et al : Physical fitness measurement standards. Section IV : Physiological measurement and indices. Draft on Actions at the Magglingen, Switzerland, August, 1967
- 5) Glassford, R. G., Baycroft, G.H. Y., Sedgwick, A. W. and Macnab, R. B. J. : Comparison of maximal oxygen intake values determined by predicted and actual method. *J. Appl. Physiol.* 20 (3) : 509-573, 1965
- 6) Green, H. J. : Urban and rural differences in the work capacity of Alberta secondary school students as measured by the Åstrand predicted maximal oxygen intake test. (Thesis) Faculty of Physical Education, The University of Alberta, 1967
- 7) Hettinger, T., Birkhead, N. C., Horvath, S. M., Issekutz, B. and Rodahl, K. : Assessment of physical work capacity. *J. Appl. Physiol.* 16 (1) : 153-156, 1961
- 8) Holmgren, A. : Cardiorespiratory determination of cardiovascular fitness. Proceedings of the International Symposium on Physical Activity and Cardiovascular Health. Nov., 1966
- 9) Howell, M. L. and Macnab, R. B. J. : Interest and attitudes toward physical activity, the strength, the fitness-performance and the work capacity of Canadian children. A paper presented at the Pan-American Sports Medicine Congress, Winnipeg, 1967
- 10) Hyde, R.C. : The Astrand Ryhming nomogram as a predictor of aerobic capacity for secondary school students. (Thesis) Faculty of Physical Education, The University of Alberta, 1967
- 11) 猪飼道夫 : エルゴメーターの比較検討, 日本体育協会 スポーツ科学委員会, 1967
- 12) 猪飼道夫, 宮村実晴 : 心搏出量からみた全身持久性-II 体育の科学 17 (6), 1967
- 13) Issekutz, B. Jr., Birkhead, N. C. and Rodahl, K. : Use of respiratory quotients in assessment of aerobic work capacity. *J. Appl. Physiol.* 17 (1) : 47-50, 1962
- 14) Ishiko, T. : Aerobic capacity and external criteria of performance. Proceedings of the International Symposium on Physical Activity and Cardiovascular Health. Nov., 1966
- 15) Knuttgen, H.G. : Aerobic capacity of adolescents. *J. Appl. Physiol.* 22 (4) : 655-658, 1967
- 16) Macnab, R. B., Howell, M. L., Norman R. W., Hyde, R. C. and Green, H. J. : The Åstrand maximal and submaximal bicycle ergometer test : Validity, reliability, intra and inter-individual differences. A paper presented at the 16th Biennial Convention of C. A. H. P. E. R., 1965
- 17) Margaria, R., Aghemo, P. and Rovelli, E. : Indirect determination of maximal O₂ consumption in man. *J. Appl. Physiol.* 20 (5) : 1070-1073, 1965
- 18) Shephard, R. J. : The predictions of 'maximal' oxygen consumption using a new progressive step test. *Ergonomics* 10 (1) : 1-15, 1967
- 19) Teräslinna, P., Ismail, A. H. and Maclead, D. F. : Nomogram by Åstrand Ryhming as a predictor of maximal oxygen intake. *J. Appl. Physiol.* 21 (2) : 513-515, 1966
- 20) Wahlund, H. : Determination of physical work capacity. *Acta med. scand.* 132 Suppl. 215, 1948

共同研究者 : 中川旭子