

60秒間全力ペダリングによる乳酸性無酸素 エネルギー容量の測定について —その1—

徳山郁夫¹、村松成司¹、日高哲朗¹、片岡幸雄¹

¹千葉大学教養部

I 緒 言

ヒトの筋収縮エネルギーの供給過程は、糖原質系、解糖系、有酸素系に分類される。運動の初期あるいは激しい運動では、運動に要するエネルギー需要と生成される有酸素系エネルギー供給過程との間に不均衡が生じる。この場合には、無酸素系エネルギー供給過程によるエネルギーの補充が必要になってくる。無酸素系過程は糖原質系過程と解糖系過程に分けられているが、糖原質系過程によるエネルギーは全力運動では約8～10秒で枯渇することが分かっている。したがって、1～2分間の運動では解糖系過程が量的に最も重要なものとなる。爆発的な全力運動においては糖原質系のエネルギーが約8～10秒という僅かな時間で枯渇するのに対して、解糖系のエネルギーは、ATPの合成エネルギーを多量に供給できるが、その過程において筋収縮の疲労物質となる乳酸の生成を伴うために全力運動では40～60秒で筋収縮の停止を余儀なくされてしまう。

従来、有酸素系のエネルギー供給過程の能力の測定方法が確立されているのに対して、多くの競技が無酸素過程の能力という要因に大いに依存しているにもかかわらず、無酸素系エネルギー供給過程の測定の研究は少ない。

無酸素系エネルギー供給過程の能力は最大酸素負荷量として測定がなされてきた。しかし、その測定には非常に長時間を要することや、特殊な設備を要するために実験室等での実施に限られていた。さらに Margaria⁽⁶⁾は、この中を非乳酸性(糖原質系)酸素負債と乳酸性(解糖系)酸素負債に分けられることを指摘している。また、

Åstrand⁽¹⁾は、酸素負債とされるものの中には、乳酸を処理するためとは別に2.0～2.5ℓの酸素摂取が起こること、さらに糖原質系のエネルギー分解によって1～1.5ℓの酸素に相当するエネルギーを生成していることを指摘し、これらを考慮に入れると酸素負債のうち4ℓまでは乳酸処理に関与しないものであり乳酸性の酸素負債ではないとしている。

糖原質系のエネルギー供給過程によるパワーについては、Margaria⁽⁷⁾、生田⁽²⁾が、いわゆる最大無酸素パワーとしてそれぞれ階段駆け上がり、自転車エルゴメータを用いた非乳酸性パワーの測定方法を提言している。しかし、乳酸性パワーもしくは乳酸性容量についての測定法は少ない。

本研究は解糖系のエネルギー供給能力の測定方法について、自転車エルゴメータを用いた方法の検討を行うものである。特に、パフォーマンス・テストとして作業量を中心にその分析を行うこととする。

II 方 法

① 被検者

被検者は日頃から規則的に鍛錬を行っている健康な男子学生10名である。被検者らのプロフィールは表-1に示した通りである。

② 方法

自転車エルゴメータによる60秒間の全力ペダリングを実施し、この間の作業量と運動終了後の血中乳酸量を測定した。

60秒間全力ペダリングに先立ち、被検者らの最

表-1 被検者のプロフィール

Subj.	年齢	身長	体重	Max. Anaerobic power	Max. $\dot{V}O_2$	Max. $\dot{V}O_2$ /weight
T.M.	21	170.4	61.0	98.3	3.09	50.6
Y.Y.	19	169.4	64.8	101.2	3.36	51.8
I.K.	20	178.3	66.0	104.9	3.39	51.3
T.K.	21	175.0	62.5	104.2	3.13	50.0
Y.T.	19	168.8	60.5	69.7	2.99	49.4
A.K.	20	171.8	65.6	110.8	3.53	53.8
I.M.	20	183.6	73.0	87.4	4.10	56.2
K.K.	20	186.2	84.0	114.9	3.67	43.7
S.O.	19	176.0	73.6	106.5	3.17	43.1
H.M.	18	177.0	67.0	89.9	3.24	48.4
\bar{x}	20	175.7	67.8	98.8	3.37	49.8
σ	1.0	5.89	7.21	13.30	0.331	4.06

(歳) (cm) (kg) (kg•m/sec) (l/min) (ml/min•kg)

大酸素摂取量と最大無酸素パワーの測定を行った。最大酸素摂取量の測定は、自転車エルゴメータを用いた負荷漸増法により、運動強度について行けなくなるまでペダリングを行わせた。このとき負荷を増加しても心拍数が増加しないことを確かめ運動を終了し、exhaustionに至る直前の3~4分の呼気ガスを分析し、このうちの最大値を最大酸素摂取量とした。呼気ガスの分析には瞬時ガス分析器（三栄測器社製）を用いた。

また最大無酸素パワーの測定では、ハイパワー・エルゴメータ（竹井機器製）を用い、各被検者に5~6種類の負荷による約8秒間の全力ペダリングを行わせた。各負荷によって得られたパワーのうち、最も大きな値を最大無酸素パワーとした。

最大無酸素パワーの測定によって得られたパワー曲線から70%最大無酸素パワーを出現するトルクを算出し、この負荷を60秒間全力ペダリングの負荷とした。（図-1参照）

被検者にはサドルから腰を離さないように指示して、「始め」の合図でスタート直後より全力ペダリングを行わせた。この間に0.2秒毎の回転数、トルク、パワーをパーソナル・コンピュータ（日本電気製PC-9801VF）に転送し、

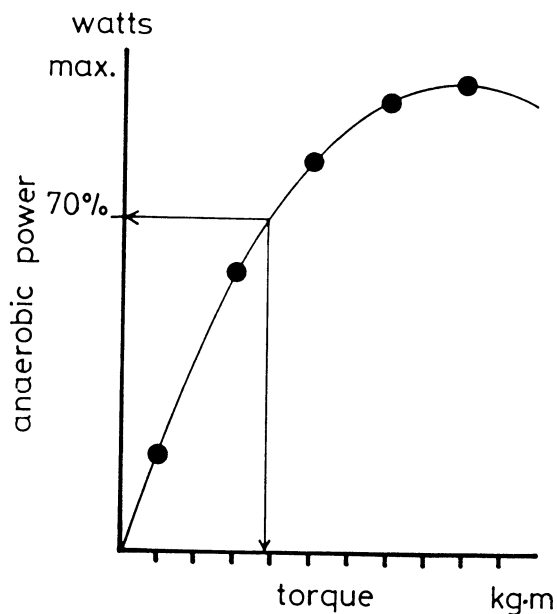


図-1 70% Max Anaerobic Power の算出

これを記録し、これをもとに60秒間の総仕事量を求めた。被検者には日を改めて4回の運動を行わせた。そして、この間の最大の仕事量を示したものを分析した。

この間の運動による乳酸生成量を見るために、安静時と運動終了5分後に5ccの採血を行い、ベ

ーリンガーマンハイム社製乳酸測定キットにより
血中乳酸濃度の定量を行った。

III 結 果

60秒間ペダリングの結果は表-2に示した通り
である。各被検者の行ったペダリング運動の負荷
(トルク)の平均値は $4.0 \pm 0.57 \text{ kg} \cdot \text{m}$ であった。
60秒間全力ペダリングの結果を0.2秒毎に記録し、
その総和を求めたものを総仕事量とした。総仕事
量の平均値は $26953 \pm 3018.3 \text{ jule}$ であった。また、
総仕事量を体重で除した体重当り総仕事量は

$400.5 \pm 54.18 \text{ j/kg}$ であった。60秒間に発揮した
最大パワーの平均値は $72.1 \pm 11.38 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{sec}$
であり、これを%最大無酸素パワーで示すと $73.4 \pm$
 10.30% であった。また、運動終了5分後の採血に
よる血中乳酸濃度は $114.8 \pm 24.97 \text{ mg/dl}$ であった。
さらにMorehouse⁽⁹⁾の式に従って血中乳酸濃度と
体重から、運動による乳酸の総生成量を求めた。
総乳酸量の平均は $54.8 \pm 10.13 \text{ g}$ であった。

60秒間全力ペダリングの成績を総仕事量および
体重当り総仕事量とし、これらを最大無酸素パワ
ー、体重当り最大無酸素パワー、最大酸素摂取量、

表-2 60秒間ペダリングの結果

Subj.	負荷	総仕事量	総仕事量 /体重	peak power	%max power	血中 乳酸量	Δ乳酸量
T.M.	3.7	24943	408.9	65.3	66.4	94.8	40.6
Y.Y.	4.6	27599	425.9	85.5	84.5	133.6	64.1
I.K.	3.6	26167	396.5	65.3	62.2	122.0	59.5
T.K.	3.7	27589	441.4	65.1	62.1	140.3	61.1
Y.T.	3.5	22550	372.7	61.1	87.7	117.5	49.5
A.K.	4.7	33336	508.2	89.0	80.3	161.2	75.4
I.M.	3.1	23338	319.7	54.6	62.5	95.5	50.8
K.K.	4.0	28019	333.6	78.0	67.9	81.4	49.1
S.O.	4.8	28059	381.2	81.2	76.2	84.6	48.1
H.M.	4.1	27931	416.9	75.8	84.4	108.7	49.6
\bar{x}	4.0	26953	400.5	72.1	73.4	114.8	54.8
σ	.57	3018.3	24.97	11.38	10.30	24.97	10.13
	(kg·m)	(j)	(j/kg)	(kg·m/sec)	(%)	(mg/dl)	(g)

注1. peak power は60秒間に示した最高の出力。

注2. %max power はpeak power の最大無酸素パワーに対する比率。

体重当り最大酸素摂取量、血中乳酸量および総乳
酸量との間の相関関係を示したものが表-3であ
る。総仕事量との間に有意な相関関係が認めら
れたものは最大無酸素パワー ($r = .731, p < .05$)、
体重当り最大無酸素パワー ($r = .639, p < .05$)
および総乳酸量 ($r = .675, p < .05$)であった。
また、体重当り総仕事量との間に有意な相関関係が
認められたものは体重当り最大無酸素パワー (r

$= .756, p < .05$)、総乳酸量 ($r = .703, p < .$
 05)および血中乳酸量 ($r = .851, p < .01$)で
あった。

一方、総仕事量および体重当り総仕事量と有酸
素的作業能力の間には、有意な相関関係は認めら
れなかった。60秒間全力ペダリングの作業成績に
は有酸素的作業能力がほとんど影響を及ぼさない
ということが示された。

表-3 60秒全力ペダリングによる総仕事量と各作業能力との相関関係

	無酸素パワー	無酸素パワー /体重	総乳酸量	血中乳酸量	max $\dot{V}O_2$	max $\dot{V}O_2$ /体重
総仕事量	.731*	.639*	.675*	.518	.046	-.113
体重当り 総仕事量	.294	.756*	.703*	.851**	-.334	.252

** p<.01 * p<.05

IV 考 察

本研究は乳酸性エネルギーに基づく容量あるいはパワーのパフォーマンス・テストの方法を検討するために、60秒間の運動中に生成された乳酸と運動量の関係を見たものである。

60秒間全力ペダリング終了5分後の採血によって得られた血中乳酸量は $114.8 \pm 24.97 \text{ mg/dl}$ であり、安静時の血中乳酸量との比較から換算されたペダリング中の総乳酸生成量は $54.8 \pm 10.13 \text{ g}$ であ

った。Margaria⁽⁸⁾は、極めて強い筋運動で得られる血中乳酸の最大増加量をおよそ 1.5 g/l または 1.12 g/l としている。また、Åstrand⁽¹⁾は最大運動後の血中乳酸量を、20歳から40歳のトレーニングをしている人の場合には $11 \sim 14 \text{ mmol/l}$ の範囲内にあるとしている。本実験の結果はおよそこの範囲内に含まれるものと考えられるので、60秒間全力ペダリングによって生じた血中乳酸量は

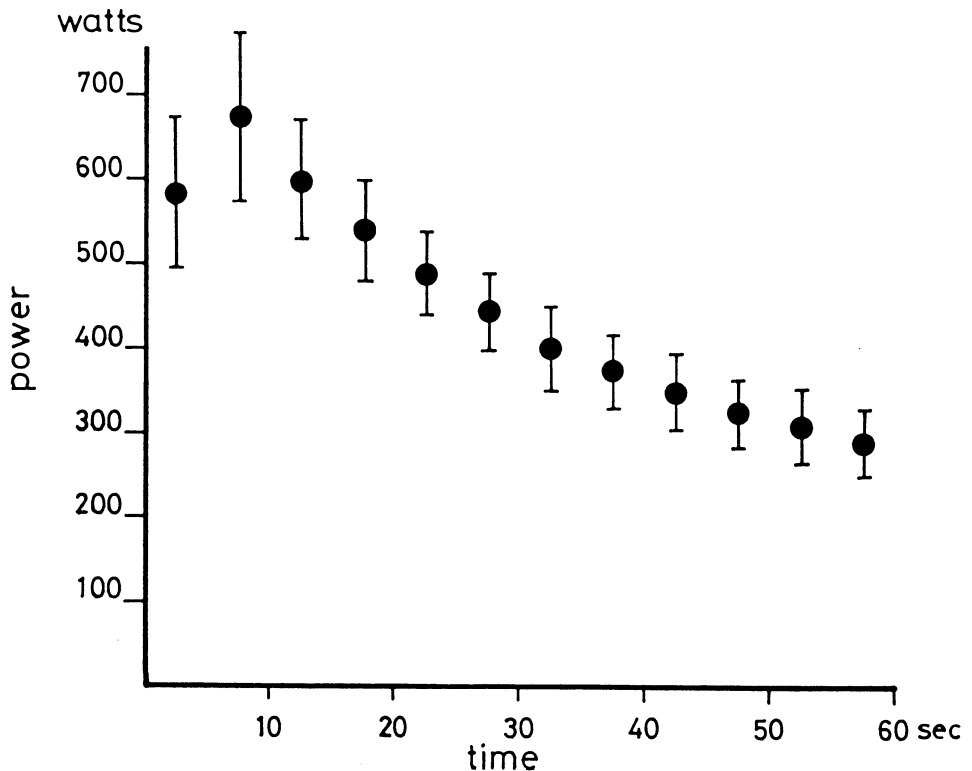


図-2 60秒間全力ペダリングにおける5秒毎の出力の変化

最大増加量に達したものと考えられる。

図-2は60秒間全力ペダリングについて5秒毎の平均パワーを求めて図示したものである。総仕事量は0.2毎のパワーから算出したが、図-2では各経過時間までの面積がこれに相当することになる。

本実験で示された60秒間全力ペダリングの成績は、総仕事量と体重当り総仕事量のいずれにおいても有酸素的能力との間には有意な相関関係を示さず、有酸素的能力と関わりないものであることを示唆している。このことは60秒間ペダリングが最大級の運動であるにもかかわらず、この間の酸素摂取量の増加が $2.18 \pm 0.22 \text{ l/min}$ であり循環器系が十分に適応せず、有酸素系過程のエネルギー供給の影響は僅かなものであったことから示唆されている。

一方、60秒間全力ペダリングの成績は燐原質系の能力の指標である最大無酸素パワーとの間には有意な相関関係が認められた。60秒間全力ペダリングの成績が最大無酸素パワーの能力の影響を受けていることを示すものである。本実験の運動強度は最大無酸素パワーに対する相対的負荷で決定したものである。したがって、絶対的仕事量にも最大無酸素パワーの大きさが反映し、最大無酸素パワーにおいて優れた値を示した者が総仕事量においても大きな値を示している。最大無酸素パワーが筋量をも反映するのに対して、体重当り最大無酸素パワーは単位あたりの筋の活動水準、あるいは質を示すものと考えられる。したがって、ペダリングの負荷を最大無酸素パワーから算出して決定したものであるが、これは筋の出力水準を規定するものではない。このために、最大無酸素パワーと体重当り総仕事量との間には有意な相関関係が認められなかったが、体重当り最大無酸素パワーは、総仕事量だけでなく体重に対する相対的な体重当り総仕事量との間にも有意な相関関係を示したものと考えられる。Katchら⁽⁴⁾は、無酸素的作業能力測定の至適負荷の検討に際

して、体重を考慮に入れるべきであることを指摘しているが、このことと一致するものと言えよう。このことから、今後ペダリングの負荷決定に際して、体重当り最大無酸素パワーという点からも検討する必要があるものとする。

また、最大無酸素パワーは燐原質系エネルギー供給過程による単位時間当りの出力であり容量を示すものではない。燐原質系過程によるエネルギーは全力運動で8~10秒で枯渇するものであるとされているが、図-2に示す通りペダリング開始直後の10秒間のパワーはかなり高く、仕事量としても大きなものとなり、60秒間の仕事量の中で占める割合は大きなものであることが分かる。このために60秒間全力ペダリングの成績と最大無酸素パワーの成績との間に有意な相関関係が示されたものと考えられる。

60秒間全力ペダリングの絶対量としての総仕事量は、体重とくに筋量の影響を受けるが、相対量としての体重あたり総仕事量は筋の活動水準を反映しているものと言えよう。このために総仕事量では総乳酸量との間に有意な相関関係を示しながら、血中乳酸量との間に相関関係を認められなかったものと考えられる。このように体重に対する絶対的な仕事量と相対的な仕事量について比べると、体重当りの相対的な仕事量の方が血中乳酸濃度との相関が高いことが示されている。このことは、作業成績に対しても体重との相対的關係から見ることによって、乳酸性無酸素エネルギー容量を評価する指標と見ることができると考える。すなわち、60秒間全力ペダリングの成績を総仕事量で示したものでは最大無酸素パワーの影響を強く反映していること、血中乳酸濃度との間に相関関係が認められないのに対して、体重当り総仕事量では最大無酸素パワーの影響を受けないこと、血中乳酸濃度との相関が非常に高いことが示されており、体重当り総仕事量を指標として用いる方が適切であるとする。

本実験は60秒という作業時間で行われたが、こ

これは被検者らにとっては非常に過酷な運動であった。この点から作業成績と血中乳酸濃度の関係を時間経過に従って分析し、血中乳酸濃度と十分な対応の得られる時点を見ることは有用なことであったと考えた。そこで5秒毎に体重当り仕事量を加算したものと血中乳酸濃度との相関関係を示したものが表-4である。これを見ると5秒毎の仕事量と血中乳酸濃度は、どの時点においても各々有意な相関関係を示しているが、時間経過を追って高いものになっており、30秒を経過してさらに高い相関関係を示していることが認められている。しかし、60秒に至るまで相関関係は高くなる傾向に在り、どの時点で運動を打ち切るかという見解は得られず、今後さらに強い運動強度で短時間のテストを行う必要があると考えられる。しかし、運動開始直後の約10秒間の仕事量は血中乳酸濃度と有意な相関関係を示すものの、明らかに燐原質系過程のエネルギーである。したがって、その後の5秒毎の仕事量を積算したものと相関係数に比して低いものであることが示されている。すなわち、60秒間全力ペダリングによって示される体重当り総仕事量は、燐原質系過程の影響をも受けるものであり、この影響が緩和されるためには30秒以上の作業時間は最低必要であろうことは示唆される。あまりに短い時間による測定は燐原質系のエネルギーの影響が強く反映される懸念も考えられる。Katchら⁽⁵⁾は、無酸素作業能力テストの至適運動強度の検討について、4~5kpの負荷強度と40秒以上の時間が必要であることを指摘している。また、ウィングート無酸素パワー・テスト⁽²⁾は30秒間である。本実験で用いた負荷は $4.0 \pm 0.57 \text{ kg} \cdot \text{m}$ であり、Katchらの指摘した4~5kpよりも幾分低いものであり、運動時間は長いものであった。

本実験では負荷を70%最大無酸素パワーを出現したトルクに設定して行ったが、これは60秒間のペダリングが可能な負荷を予備実験の中で求めたものである。60秒間全力ペダリングは非常に激し

表-4 運動開始より5秒毎に積算した仕事量と血中乳酸濃度との相関関係

運動開始からの時間 (sec)	相関係数 r	
start ~ 5	.666	*
start ~ 10	.668	*
start ~ 15	.702	*
start ~ 20	.731	*
start ~ 25	.753	*
start ~ 30	.772	**
start ~ 35	.783	**
start ~ 40	.797	**
start ~ 45	.806	**
start ~ 50	.817	**
start ~ 55	.826	**
start ~ 60	.834	**

* p<.05 ** p<.01

い運動であり、かつ70%最大無酸素パワーが至適強度であるかという検討も進めなければならない。しかし、パフォーマンス・テストとして60秒間全力ペダリングによる体重当り総仕事量は、この間に生成された血中乳酸濃度との間に有意な相関関係を示し、乳酸性無酸素エネルギー容量の指標となりうることを示唆された。

今後は適正負荷、運動時間さらに絶対的負荷による測定について検討し、乳酸性無酸素エネルギー容量のパフォーマンス・テストの方法の検討を進める。

V 総括

日頃から規則的に鍛錬している男子学生10名を対象として、70%最大無酸素パワーを出現する負荷によって、60秒間全力ペダリングを行わせた。その結果は次の通りであった。

- (1) 運動終了後の血中乳酸濃度は $114.8 \pm 24.97 \text{ mg/dl}$ であった。
- (2) 60秒間全力ペダリングの成績をこの間の総仕事量と体重当り総仕事量で示した。総仕事量の

平均値は 26953 ± 3018.3 jules、体重当り総仕事量は 400.5 ± 54.18 j/kgであった。

(3) 総仕事量および体重当り総仕事量は、有酸素的作業能力との間に有意な相関関係を示さなかった。

(4) 総仕事量は最大無酸素パワーとの間に有意な ($p < .05$) 相関関係を示したが、体重当り総仕事量との間には有意な相関関係を認められなかった。

(5) 総仕事量及び体重当り総仕事量は、いずれも血中乳酸量との間に有意な相関関係があることを示した。とくに体重当り総仕事量でみると非常に高い相関関係 ($p < .01$) が認められた。

これらのことから70%最大無酸素性パワーの負荷による60秒間全力ペダリングによる体重当り総仕事量は、解糖系エネルギー容量の指標となるものと考えられた。今後はさらに適正負荷および運動時間について検討を進めることとする。

参 考 文 献

- (1) Åstrand, P.O., and K.Rodahl: "Textbook of Work Physiology", McGraw Hill, New York, (1970)
- (2) Dotan, R., and O.Bar-Or: Load optimization for the Wingate anaerobic test. Eur. J. Appl. Physiol., 51, 409-417 (1983)
- (3) 生田香明, 猪飼道夫: 自転車エルゴメーターによるMaximamu Anaerobic Powerの発達の研究. 体育学研究, 17(3), 151-157 (1972)

- (4) Katch, V.L.: Body weight, leg volume, leg weight and leg density as determiners of short duration work performance on the bicycle ergometer. Med. Sci. Sports, 6, 267-270 (1974)
- (5) Katch, V.L., A.Weltman, R.Martin, and L.Gray: Optimal test characteristics for maximal anaerobic work on the bicycle ergometer. Res. Quat., 48-2, 319-327 (1977)
- (6) Margaria, R., H.T.Edwards, and D.B.Dill: The possible mechanism of lactic acid in muscular contraction. Am. J. Physiol. 106, 689-715 (1933)
- (7) Margaria, R., P.Aghemo, and E.Rovelli: Measurement of muscular power (anaerobic) in man. J. Appl. Physiol. 21, 1662-1664 (1966)
- (8) Margaria, R. (金子公有 訳): 身体運動のエネルギー, p.37, ベースボール・マガジン社 (1978)
- (9) Morehouse, L. (石井喜八、宮下充正 訳): 運動生理学実験法, p.169, 杏林書院 (1979)

(昭和62年4月30日受付)