

反復的な無酸素パワーの発見と有酸素作業能について

徳山 龍夫¹、 杉 和 哉 司¹、 日 高 哲 朗¹、 片 岡 幸 雄¹¹千葉大学教養部

はじめに

競技中に動員されるエネルギーは、糖原系、乳酸系、有酸素系の3つの代謝過程から得られる。スポーツ活動では爆発的なエネルギー発揮を必要とする場面が多い。わずかに数秒で終わる激しい運動は、その主要なエネルギー源を筋細胞に貯蔵された糖原質に頼っている。糖原質の筋内貯蔵量は非常に少ないとされ、数秒間の全力運動で消費するものである。したがって、激しい運動を断続的に繰り返す場面では、高いパワー水準の運動を維持するために糖原質系代謝過程の研究が重要である。

糖原質系の最大出力の研究としては、Margariaら⁵、生田ら⁴がそれぞれ最大無酸素パワーの測定方法を報告している。また、Di Pramperoら²は、さらにこの両者の方法に加え垂直跳びのような瞬発的な運動の糖原質代謝を考慮し、1秒以内のひとつの動作によるもの(instantaneous)と、3～7秒の反復動作によるもの(average)に分けてヒトの最大無酸素パワーの考察を進めている。Hultmanら³は最大下運動後の筋生検から糖原質の回復過程について3分後には完全に回復していることを報告している。Saltinら⁶は断続的運動(intermittent exercise)においてわずかな休息時間でもそこで回復する糖原質貯蔵が次の運動期の乳酸の蓄積による疲労を遅らせると報告し、断続的運動における糖原質系の重要性を指摘している。

瞬発的な運動によって枯渇した糖原質の回復は乳酸系によるエネルギー供給も考えられるとされ

るものの、主に炭水化物と脂肪の有酸素的分解のエネルギーによって補充されるとされている。したがって、糖原質系のエネルギー過程が断続的に動員される活動様式では、有酸素系あるいは乳酸系過程の能力が、枯渇した糖原質の補充に重要な働きを示しそのパフォーマンスに大きな関わりを持つものと考えられる。

本研究は反復的に発揮される無酸素パワーについて、その出力の変化の態様を有酸素的能力との関係から見ようとするものである。

方 法

(1) 対 象

被検者は千葉大学男子学生31名である。内16名は定期的に身体活動を継続している者である。

(2) 有酸素的作業能の測定

モナーク社製自転車エルゴメータによるペダリング運動によって行った。ペダリング速度を60rpmとして、負荷は1より3kpまでは4分ごとに1kpずつ、それ以降は2分間ごとに0.5kpずつ増加する漸増法とし、exhaustionに至るまで運動を続けさせた。Exhaustionにいたる直前の3～4分の呼気ガスをダグラスバッグに採気し、これを瞬時ガス分析器(三栄測器社製)を用いてO₂、CO₂の含有率を測定、毎分の酸素摂取量を算出した。この間の最大値を最大酸素摂取量とし、これを体重で除し体重当たり最大酸素摂取量とした。

(3) 無酸素的作業能の測定

無酸素的作業能の指標としては、生田ら⁴⁾の方法による自転車エルゴメータによる最大無酸素パワー、および体重当たり最大無酸素パワーを用いた。モナーク社製自転車エルゴメータを用い、約8秒間の全力ペダリングを行った。その間、被検者らにはサドルから腰を離さないよう指示した。5分以上の休息をはさみ、1kpより1kpずつ負荷を増加しながら6～8種類の負荷で運動を行わせた。エルゴメータの慣性車輪には16枚の反射板を貼り付け、これに光を投射しこの反射光を光電管セルで受ける装置を設置し、毎秒の反射板の通過数をタケダ理研製ユニバーサル・カウンター(TR-5104G)で計数し、これをタケダ理研製デジタル・レコーダ(TR-6198)で記録した。こうして求めた慣性車輪の速度と負荷との積をパワーとした。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。また、これを体重で除して体重当たり最大無酸素パワーとした。

(4) 実験条件

30秒間の休息をはさむ6秒間の全力ペダリング運動を20回繰り返した。このときの負荷は最大無酸素パワーの測定において最大値を示した負荷とした。

6秒間のペダリングを最大無酸素パワーの測定に使用した装置を用いて記録し、これからその間の最大パワー(peak power)と仕事量を算出した。なお、仕事量については6秒間のペダリングによって慣性車輪になされた実際の仕事量には、6秒後の回転も含まれるが、その間の負荷がばらつくこと、20回の仕事量の変化の動向には無視できることを考え、スタートから6秒間の車輪の回転数から仕事量を集計した。

結 果

表-1は被検者の無酸素的および有酸素的作業能、さらに実験時の6秒間のペダリングの負荷に

ついて示したものである。被検者は継続的に身体的活動を行っていない非鍛錬者群15名と、継続的に身体活動を行っている鍛錬者群16名である。鍛錬者群の身体活動の内容は、バスケットボール、ラグビーである。

非鍛錬者群の無酸素的作業能力についてみると、最大無酸素パワーは $85.1 \pm 7.19 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{sec}$ 、体重当たり最大無酸素パワーは $1.37 \pm 0.112 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{kg} \cdot \text{sec}$ であった。また、有酸素的作業能力についてみると、最大酸素摂取量は $2.75 \pm 0.282 \text{ l} / \text{min}$ 、体重当たり最大酸素摂取量は $44.4 \pm 4.73 \text{ ml} / \text{kg} \cdot \text{min}$ であった。一方、鍛錬者群の無酸素的作業能力についてみると、最大無酸素パワーは $96.5 \pm 12.44 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{sec}$ 、体重当たり最大無酸素パワーは $1.40 \pm 0.196 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{sec}$ であった。さらに、有酸素的作業能力についてみると、最大酸素摂取量は $3.68 \pm 0.364 \text{ l} / \text{min}$ 、体重当たり最大酸素摂取量は $53.8 \pm 5.00 \text{ ml} / \text{kg} \cdot \text{min}$ であった。

非鍛錬者群と鍛錬者群を比較すると、体重当たり最大無酸素パワーには有意な差が見られないが、最大無酸素パワー、最大酸素摂取量、体重当たり最大酸素摂取量においていずれも鍛錬者群は非鍛錬者群に対して有意に($P < .01$)大きな値を示しており、鍛錬者群が有酸素的ならびに有酸素的作業能の両面において非鍛錬者群よりも優れていることを示している。

休息をはさんで20回繰り返したペダリングの結果は、4つの区間(1～5, 6～10, 11～15, 16～20回)に分けて集計を行った。6秒間のピーク・パワーとこれが最大無酸素パワーに対する比率、および6秒間の仕事量とこれが最大仕事量に対する比率を5回のペダリング毎に集計した。この結果をまとめたものが表-2である。

ピーク・パワー、仕事量の絶対量についてみると、いずれも各区間において鍛錬者群は非鍛錬者群に対して有意に($P < .01$)大きな値を示している。無酸素的作業能において優れていた鍛錬者群が絶対量として大きな出力を発揮していることが示されている。

表-1 被検者の無酸素的および有酸素的作業能

Subj	Max. Anaerobic Power W/kg sec	Max. Aerobic Power W/kg sec	Work load(kg%)	Max. L/min	VO ₂ ml/kg·min	
非 鍛 錬 者 群 15 名	H.K.	84.1	1.81	7.0	3.19	49.8
	M.L.	85.1	1.47	6.5	2.70	42.6
	Y.L.	81.1	1.40	7.0	2.40	41.7
	A.M.	83.3	1.13	7.0	3.12	37.8
	T.M.	83.2	1.43	6.5	2.51	38.5
	N.Y.	89.7	1.52	8.0	2.76	46.8
	M.T.	95.3	1.44	8.0	2.95	44.4
	Y.T.	75.3	1.30	5.0	2.21	38.1
	S.U.	79.4	1.38	6.0	2.67	46.4
	A.T.	86.5	1.54	8.0	2.52	45.0
	M.O.	89.7	1.47	7.0	2.96	48.7
	A.I.	83.2	1.26	7.0	2.61	39.6
	T.K.	83.0	1.39	6.0	3.10	52.5
	Y.T.	71.9	1.25	7.0	2.86	50.6
	M.Y.	78.8	1.32	6.0	2.64	43.8
平均 σ	85.1 ±7.19	1.37 ±0.112	6.8 ±0.84	2.75 ±0.282	44.4 ±4.73	
鍛 錬 者 群 16 名	S.O.	109.1	1.88	9.0	3.48	60.1
	K.D.	109.6	1.75	7.0	4.01	64.7
	M.Y.	89.1	1.20	7.0	3.97	56.2
	M.Y.	127.3	1.61	10.0	4.27	54.6
	A.I.	94.5	1.45	8.0	3.73	57.5
	M.N.	82.4	1.34	6.0	3.56	57.4
	T.M.	92.1	1.30	8.0	3.59	52.4
	A.Y.	83.4	1.19	7.0	3.24	46.3
	D.S.	106.4	1.37	9.0	4.14	53.2
	H.T.	89.7	1.32	8.0	3.60	52.9
	K.K.	107.5	1.34	8.0	4.04	50.9
	M.N.	94.0	1.51	7.0	3.42	54.9
	Y.Y.	81.2	1.29	6.0	3.21	51.0
	T.M.	91.3	1.37	8.0	3.00	45.0
	H.T.	88.8	1.36	8.0	3.62	55.4
K.K.	96.9	1.19	8.0	3.97	48.7	
平均 σ	96.5 ±12.44	1.40 ±0.196	7.8 ±1.06	3.68 ±0.364	53.8 ±5.00	

つきにこれらの値が各被検者の最大値に対する相対量の推移をみるために、ピーク・パワーと仕事量を%最大無酸素パワーおよび%最大仕事量で表した。(図-1、2)

%最大無酸素パワーでは、初めの5回には両群の間に有意な差は認められないが、6回以降の3つの区間では有意に(P<.01)非鍛錬者群が鍛錬者群に対して大きな低下を示している。一方、%最大仕事量では全ての区間で有意に(1~5、P<.05;6~10, 11~15, 16~20、P<.01)非鍛

錬者群が鍛錬者群に比して大きく低下したことを示している。

各区間毎の推移を相対量で見ると、%最大無酸素パワーおよび%最大仕事量のいずれにおいても非鍛錬者群は4つの区間のうち1区間(1~5)と2区間(6~10)、2区間と3区間(11~15)とそれぞれ連続する区間の間で有意に(P<.01)低下したことを示しているのに対して、鍛錬者群は初めの1区間から2区間への移行では有意な(P<.01)低下を示しているが、その後の区間の移行には有

表-2 6秒間ペダリングの20回繰り返しのにおけるピーク・パワーと仕事量の5回毎の推移(平均と標準偏差)

回数	非鍛錬者群 (n=15)	鍛錬者群 (n=16)
(1) ピーク・パワー (kg·m/sec)		
1~5	78.9 ± 8.26	89.1 ± 9.95
6~10	68.2 ± 9.22	86.5 ± 9.74
11~15	63.4 ± 10.39	84.5 ± 10.47
16~20	65.2 ± 8.78	84.6 ± 10.41
(2) 仕事量 (kg·m)		
1~5	392.3 ± 45.71	442.7 ± 54.18
6~10	333.9 ± 44.40	424.3 ± 54.27
11~15	309.4 ± 49.80	415.5 ± 55.13
16~20	315.4 ± 42.87	414.6 ± 59.51
(3) %最大無酸素パワー (%)		
1~5	92.4 ± 5.16	92.2 ± 5.98
6~10	79.9 ± 8.47	89.7 ± 8.09
11~15	74.1 ± 9.36	87.5 ± 8.70
16~20	76.4 ± 7.76	87.6 ± 8.23
(4) %最大仕事量 (%)		
1~5	93.4 ± 5.43	95.3 ± 4.47
6~10	79.7 ± 8.19	91.4 ± 6.60
11~15	73.8 ± 10.12	89.5 ± 7.11
16~20	75.4 ± 9.09	89.2 ± 8.09

意な低下は認められなかった。すなわち、鍛錬者群が%最大無酸素パワーおよび%最大仕事量のいずれにおいても初めの5回以降に低下を示しながら、それ以後はその水準を維持しながら20回のペダリングを終了しているのに対して、非鍛錬者群はその後も低下し、3区間まで低下の傾向を続けていることがわかった。

5回毎のペダリング作業について、%最大無酸素パワーおよび%最大仕事量の低下率と、無酸素的および有酸素的作業能力の関係を示したものが表-3である。%最大無酸素パワーの低下率についてみると、6~10 (P<.05)、11~15、16~20回 (P<.01) において最大酸素摂取量および体重当たり最大酸素摂取量との間に有意な相関関係がみられる。すなわち、有酸素的作業能に優れているものほど、6回以降に見られる%最大無酸素パワーの低下率が小さいことが示唆されている。%最大仕事量の低下率は1~5、(P<.05)、6~10、

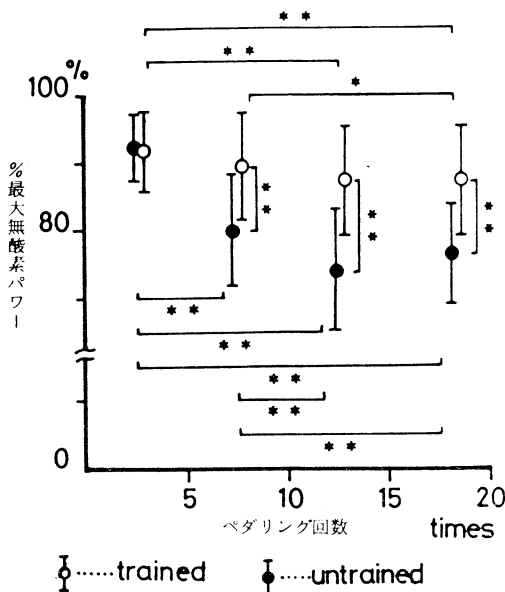


図-1 6秒間ペダリングの20回繰り返しのにおける5回毎の%最大無酸素パワーにみる非鍛錬者と鍛錬者の比較 (**...P<.01, *...P<.05)

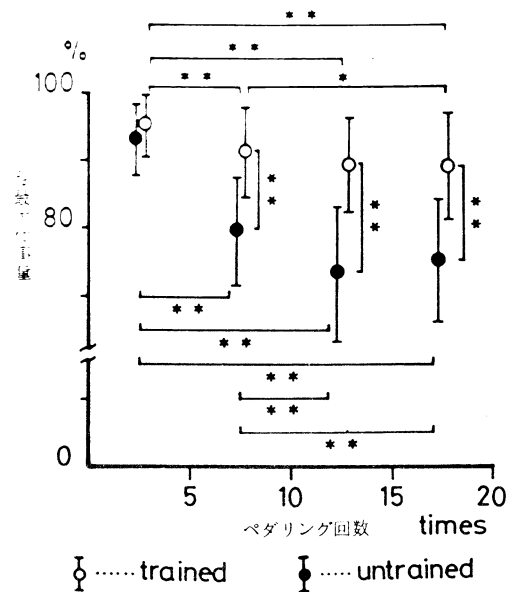


図-2 6秒間ペダリングの20回繰り返しのにおける5回毎の%最大仕事量にみる非鍛錬者と鍛錬者の比較 (**...P<.01, *...P<.05)

11~15、16~20回 ($P<.001$) に最大酸素摂取量との間に有意な相関関係を示した。また、1~5 ($P<.05$)、6~10 ($P<.001$)、11~15 ($P<.01$)、16~20回 ($P<.001$) に体重当たり最大酸素摂取量との間に有意な相関関係を示している。すなわち、%最大仕事量の低下率においても、有酸素的作業能に優位なものほど小さな低下率にとどめていることを示唆するものである。%最大仕事量の低下率については、11~15回のところで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。すなわち、最大無酸素パワーの大きいものほど%最大仕事量の低下率が少ないということであった。

表-3 6秒間ペダリングの20回繰り返しによるペダリング作業の低下率と無酸素的および有酸素的作業能力の相関関係

回数	Anaerobic		Aerobic	
	パワー	パワー/W	$\dot{V}O_2\max$	$\dot{V}O_2\max/W$
% 1~5	.1790	.2258	.0356	.0905
% 6~10	-.0451	.1579	-.4302*	-.3822*
% 11~15	-.2696	-.0595	-.5265**	-.4643**
% 16~20	-.2264	-.0864	-.5309**	-.5341**
% 仕事量 1~5	-.1924	-.0963	-.3841*	-.4015*
% 仕事量 6~10	-.2652	-.0600	-.6093***	-.5980***
% 仕事量 11~15	-.3716*	-.1184	-.5875***	-.4986**
% 仕事量 16~20	-.3440	-.1386	-.6097***	-.5780***

*... $P<.05$ **... $P<.01$ ***... $P<.001$

表-4は5回毎の休息時間中(30秒)の酸素摂取量について、非鍛錬者5名、鍛錬者9名の結果を示したものである。この非鍛錬者5名と鍛錬者9名のペダリング結果を%最大無酸素性パワーと%最大仕事量について比較すると、いずれも6~10、11~15、16~20回に有意な差 ($P<.01$) が認められ、非鍛錬者の低下が著しいものであった。これに対してこの間の酸素摂取量は、両群とも各区間(1~5、6~10、11~15、16~20回)の間に有意な増減は認められなかった。しかし、両群の比較では各10、15、20回直後の $\dot{V}O_2\max/W$ では鍛錬者群が非鍛錬者群に比して有意に ($P<.05$) 大きいものであった。また% $\dot{V}O_2\max/W$ においても

15回直後で有意に ($P<.05$) 鍛錬者群が非鍛錬者群に比して大きな値を示していることが認められた。

表-4 6秒間ペダリングの20回繰り返しにおける休息中の酸素摂取量

		5回直後	10回直後	15回直後	20回直後
		体重当たり最大酸素摂取量 ($ml/kg \cdot min$)	非鍛錬者群 (n=5)	24.9 ±6.29	25.3 ±4.12
	鍛錬者群 (n=9)	28.0 ±2.24	30.4 ±2.44	31.2 ±3.32	28.9 ±2.77
%最大酸素摂取量 (%)	非鍛錬者群 (n=5)	52.4 ±9.50	54.7 ±4.51	50.7 ±6.18	52.1 ±8.43
	鍛錬者群 (n=9)	55.2 ±5.14	59.9 ±5.80	61.2 ±5.54	56.9 ±5.66

考 察

本研究のねらいは、燐原質系による瞬発的なパワー(無酸素パワー)の発揮が繰り返して行われる際の出力の変化を有酸素的作業能との関係から解明しようというものである。6秒間全力ペダリングについては2つの側面が考慮される。すなわち、ひとつは単位時間当りの出力、すなわちピークパワーであり、もうひとつは一定時間内の総出力すなわち燐原質の貯蔵量あるいは容量の問題である。そこで、本研究では全力ペダリングによる6秒間の最大出力(ピーク・パワー)と6秒間の総仕事量について、各々の20回の変化をみた。

この結果、鍛錬者群と非鍛錬者群の間の出力の変化に大きな違いがあることがわかった。すなわち、非鍛錬者群は5回以降の%最大無酸素パワー、%最大仕事量の低下が著しいのに比して、鍛錬者群では大きな低下を示さずに一定の水準を維持できる傾向が示されている。そして、作業結果と無酸素的および有酸素的作業能の相関関係が示すように、%最大無酸素パワーあるいは%最大仕事量の低下は、無酸素的作業能よりも有酸素的作業能との間に深い関連があるのである。すなわち、ペダリング作業の絶対量では無酸素的能力に優れたものが大きな値を示すものの、最大無酸素パワーある

いは最大仕事量に対する相対的作業成績は、無酸素的作業能の優劣との間には深い関連は見られず、有酸素的作業能に優れているものが高いパワー水準を維持するのである。

本研究で用いた運動様式は30秒間の休息をはさんで6秒間の全力ペダリング運動を20回繰り返す運動である。筋内に貯蔵された燐原質は8秒から10秒の全力運動で枯渇すると言われており、6秒間のペダリング運動自体は燐原質系のエネルギー供給過程によって行われると考えられるのである。したがって、一回の運動では乳酸の蓄積は伴わないものと考えられる。しかし、次の運動までの30秒という時間は、消耗した燐原質の回復には十分な時間とはいえない。Hultmanら³⁾は、燐原質系の回復時間について運動中に使用された燐原質の $\frac{1}{2}$ を復元するとされるパーセントタイムを20~30秒とし、3分後には完全に回復していることを報告している。このことは、通常の運動条件では燐原質の回復は不十分なまま、次の運動のペダリングを実施していることを意味している。つまり、無酸素パワーが断続的に発揮される場合には、燐原質の回復能力の優劣が発揮されるパワー水準の維持に影響を及ぼすものと考えられるのである。

枯渇した燐原質を回復するエネルギーの大部分は炭水化物と脂肪の有酸素的分解によるエネルギーであるが、一部には乳酸系のエネルギーも考えられる。しかし、乳酸系のエネルギーによって燐原質が復元されたとすると疲労物質としての乳酸の産生を伴い筋収縮に対して抑制因子となり、ペダリング運動に対して成績の低下を招くことにつながると考えられる。すなわち、有酸素的作業能に優れ、これによって燐原質の復元がなされるならば、ペダリング回数を追う毎に出力が低下することはないと考えられるのである。有酸素的機能の応答による燐原質の復元が間に合わないとき、乳酸系のエネルギーが動員されるものと考えられる。

非鍛錬者群と鍛錬者群の間に見られた反復するペ

ダリングの回復時間中の酸素摂取量の有意な差はこれを裏付けるものと見ることが出来る。この間の酸素摂取量はペダリング中の仕事量に対応するものと考えられる。あるいは、これに産出された乳酸量から換算されるエネルギーを加えたものが仕事量と対応すると考えられる。絶対量としての仕事量が大きければ有酸素系、乳酸系からのエネルギー補充の総量は大きくならなければ、その後の仕事量は徐々に低下せざるを得ない。したがって、仕事量の絶対量が大きい鍛錬者群が酸素摂取量において有意に大きな値を示しているのである。つまり無酸素パワーにおいて優れているものは、瞬発的な運動による燐原質の消耗の絶対量も大きく、断続的にこれを繰り返す場合には、消耗した燐原質を復元するために有酸素的作業能においても良くトレーニングされていなければ、大きな無酸素パワーを生かすことができないことを示している。

非鍛錬者群の消費した燐原質の絶対量は少ないと考えられるにもかかわらず、両群の示したペダリングにおける最大出力と仕事量の差もほとんどないことは鍛錬者群に対して大きいものであった。ペダリング中の最大出力と出力を乳酸の蓄積と考えるとすると、最大出力の大きな非鍛錬者群における乳酸の蓄積は、鍛錬者群よりも多かったことになる。すなわち、非鍛錬者群においては燐原質の消耗が少なくにもかかわらず、この復元に乳酸系のエネルギーを動員する割合が鍛錬者よりも大きかったことを示している。休息中の $\% \dot{V}O_2 \max / W$ は鍛錬者群が高い水準を示しており、鍛錬者群では枯渇した燐原質の復元に有酸素系過程が高い水準まで対応して多くの有酸素系のエネルギーを動員し、乳酸の蓄積を少なくとどめていることが示されている。さらに、鍛錬者群と非鍛錬者群の無酸素性作業閾値の違いも、両群の乳酸の蓄積の差の要因になっていると考えられる。乳酸産生が開始するとされる無酸素性作業閾値は、トレーニングによって最大酸素摂取量よりも著しい向上を示し、鍛

参 考 文 献

- 1) 鍛錬者が非鍛錬者に対して高いことが知られている。つまり、有酸素的作業能においてトレーニングがなされていない非鍛錬者群には適量以上の $\dot{V}O_2\max$ の低い水準から試験中のエネルギーを動員したと考えられる。これはまたそのベダリング成績を著しく低下させることにもなり。
- これらのことより鍛錬者は試験中に $\dot{V}O_2\max$ の増大によるエネルギーの向上とともに、高い水準のベダリングを維持するためには有酸素的作業能の向上を必要とすると考えられる。
- ### ま と め
- モテック社製自転車エルゴメータを用いて、最大無酸素パワーの発揮された負荷による6秒間の全力ベダリングを30秒の休憩時間をはきんで20回繰り返した。6秒間の各ベダリング毎のピークパワーと仕事量を求め、各々の20回の変化を見た。その結果は次の通りである。
- (1) 非鍛錬者の%最大無酸素パワーおよび%最大仕事量の低下は鍛錬者に対して、有意に大きなものであった。
 - (2) %最大無酸素パワーおよび%最大仕事量の低下の大きさと有酸素的作業能の間には、有意な相関関係が認められた。すなわち、有酸素的作業能が優れている方がそれらの低下率は小さいものであった。そして後半にならほと、その傾向は強くなった。
 - (3) 30秒の回復時間中の酸素摂取水準について見ると、後半も大きな低下を示さず高いパワーを発揮した鍛錬者群は、後半に大きな低下を示した非鍛錬者に比して、有意に高い酸素摂取水準を示したことが認められた。
- これらの結果から、無酸素パワーの反復的発揮においては、絶対量としての増大のための最大無酸素パワーの向上とともに、高い水準の無酸素パワーの発揮を維持するためには、有酸素的作業能を向上させることが必要であることが示唆された。