

Physical Performance の Limiting Factors

をさぐる試み**

—O₂ Intake と O₂ Debt の面から—

高 本 登*

(昭和53年 9月30日受理)

Tests on Limiting Factors of Physical Performance

—from the Aspect of Oxygen Intake and Oxygen Debt—

Noboru TAKAMOTO

(Received Sept. 30, 1978)

The author made three healthy male subjects do relatively aerobic work and relatively anaerobic work up to exhaustion with the Monark's Bicycle Ergometer and investigated the process of this test from both the sides of oxygen intake and oxygen debt. The results were as follows:

- 1) Though the load is constant, H.R. in relatively aerobic work ends in a smaller numerical value than that of relatively anaerobic work, when the former begins from a low level and reaches the state of exhaustion.
- 2) In the case of relatively aerobic work, oxygen intake begins with 50% of maximal oxygen intake and ends with 66-73%.

On the other hand, in the case of relatively anaerobic work, oxygen intake begins with 60-69% of maximal oxygen intake and reaches the state of exhaustion with about 80%.

- 3) In case of the work where the state of exhaustion is reached in 9 minutes, oxygen debt reached 65% of maximal oxygen debt, and in the case where exhaustion was reached in 4 minutes it reached 78%.

緒 言

猪飼は、全身持久力 (general endurance) を構成する因子として、精神(意欲)・心臓・筋の三つをあげ、どの要素のレベルが低下しても performance は低下すると述べている。すなわち、我々の身体活動におい

ても、Liebig の最小律(図-1)は適用されるようである。この limiting factor のレベルを向上させることは、よりよい performance をめざすトレーニングの目的であると考えられる。

Physical performance の limiting factor をさぐる方法として、energetics からのアプローチがあり、作

** 昭和52年10月14日日本体育学会第28回大会(山梨大学)にて発表

* 保健体育学教室

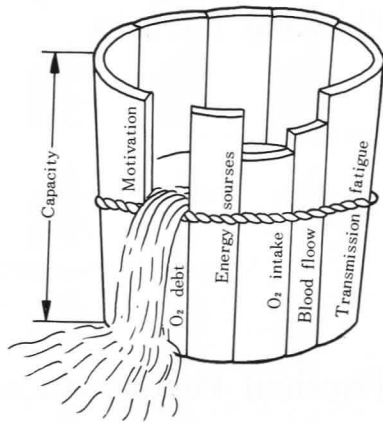


Fig. 1 Liebig の最小律より作図 (星川)

業や運動遂行のためのエネルギー産生に必要な酸素量からみる方法もそのひとつである。

一般に、運動に必要な酸素量 (Y) = $mt + d/t$ とあらわすことができるといわれている。

m は最大酸素摂取量, d は最大酸素負債量, t は運動時間である。

しかし、最大酸素摂取量は極値であり、 $100\% \dot{V}O_2 \text{ max.}$ の状態で運動を継続することはできない。Williams ら¹²⁾によれば、 $50\% \dot{V}O_2 \text{ max.}$ 水準の運動で、非鍛練者では乳酸の蓄積が始まるとし、Costill ら³⁴⁾は、マラソンの一流選手である Clayton を被験者として、トレッドミル走から推定したマラソンレース中の酸素摂取水準は、 $86\% \dot{V}O_2 \text{ max.}$ であったと報告している。

なお、Clayton の最大酸素摂取量は 69.7 ml/kg/min. で驚くほど大きな値ではない。

また、酸素負債量は最大値まで蓄積されることはなく、それ以前に all-out の状態に達するのが一般的である。

一方、人間の仕事や運動には代謝機構上、aerobic な性質のもと、anaerobic な性質をもつものがあり、運動の性質によって limiting factor も異なるはずである。

本研究では、比較的 aerobic な作業 (50 rpm. のペダリング 9 分間) と比較的 anaerobic な作業 (100 rpm. のペダリング 4 分間) について、作業放棄に至るまでの経過を、酸素摂取量 (O_2 intake) と酸素負債量 (O_2 debt) の両面から検討したので報告する。

実験方法

健康な男子 3 名 (年齢 27, 34, 41 歳) について、モ

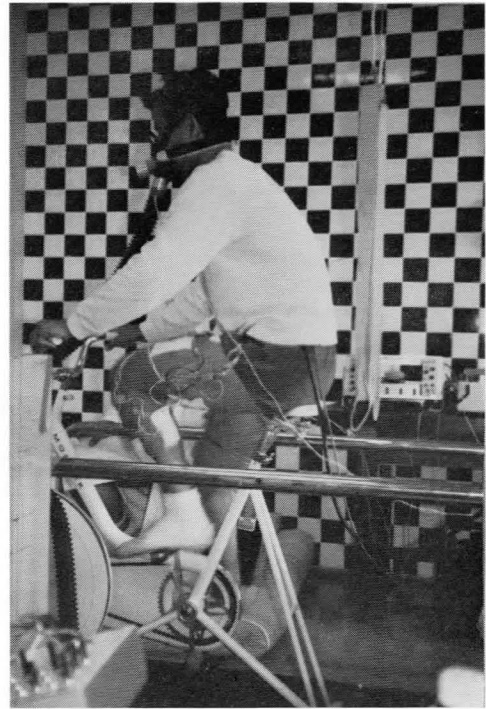


Photo-1 Apparatus for experiment (bicycle ergometer)

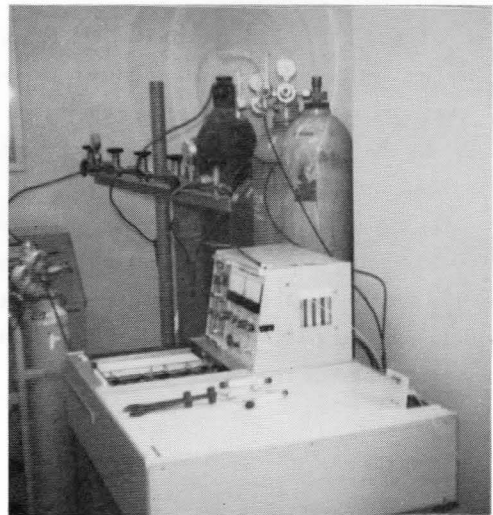


Photo-2 Apparatus for experiment (Expired gas analyzer)

ネーク自転車エルゴメーター (固定負荷法) を用い、各被験者は同一負荷 (3.0 と 1.5 kg, 3.5 と 1.75 kg) により、50 rpm と 100 rpm で作業をおこなわせた。

すなわち、被験者 T. T. および N. T. について、50

rpm の場合には 3.0 kp., 100 rpm の場合には 1.5 kp の負荷で、被験者 Y. T. には、50 rpm の場合には 3.5 kp, 100 rpm の場合には 1.75 kp の負荷でベダリング作業を行わせた。

また、作業時間は 50 rpm の場合、2 分間、4 分間、6 分間、9 分間の 4 種類で、9 分間の作業は all-out 作業であった。100 rpm の場合は、2 分間と 4 分間の 2 種類で、4 分間の作業は all-out 作業であった。

作業中および回復期の呼気ガスはダグラスバッグに採気し、O₂, CO₂ の分析には三栄測器製、呼気ガス瞬時分析装置を使用した。なお、標準ガスのキャリブレーションはショランダー微量ガス分析器 (Scholander micro gas analyzer) によって行った。

回復期間の採気は運動の強さにより 15 分間ないし 30 分間とした。

さらに、作業中の心拍数は胸部双極誘導による心電図から求めた。

表一 1 は、被験者 3 名の年齢・身長・体重・最大酸素摂取量・最大酸素負債量を示したものである。

写真一 1 は、モナーク自転車エルゴメーター作業時

Table 1 Characteristics of subjects

Subjects	Age yrs	Height cm	Weight kg	Max. O ₂ intake l/min	Max O ₂ /kg/min	Max O ₂ debt lit.
T. T.	41	163	68	2.77	43.2	7.04
Y. T.	34	171	64	3.05	47.7	8.64
N. T.	27	168	57	2.65	46.5	6.23

Table 2

	Revolution of pedalling rpm	Load kg	Duration of exercise min	Final heart rate beats/min	Final oxygen intake l/min	Average oxygen intake l/min	% of max oxygen intake %	oxygen debt l	% of max oxygen debt %	Oxygen requirement	Efficiency
										l/min	%
T. T.	50	3.0	2	128	1.76	1.285	46.4	2.825	40.1	2.487	17.2
			4	151	2.20	1.705	61.6	3.485	49.5	2.365	17.7
			9	176	2.53	1.951	70.4	3.925	55.8	2.395	17.6
	100	1.5	2	152	2.21	1.755	63.3	3.295	46.8	3.128	13.5
			4	189	2.74	2.155	77.8	5.200	73.9	3.244	12.9
			9	183	2.77	1.891	68.3	4.150	58.9	2.141	19.6
Y. T.	50	3.5	2	126	2.02	1.540	50.5	2.015	23.3	2.335	21.3
			4	150	2.59	2.058	67.5	4.625	53.5	2.356	20.7
			9	168	3.04	2.333	76.5	4.655	54.0	2.900	16.8
	100	1.75	2	175	3.00	2.228	73.0	5.760	66.7	2.655	18.3
			4	146	2.43	1.805	59.1	4.345	50.3	3.764	13.6
			9	178	3.08	2.393	78.5	7.180	83.1	3.973	12.4
N. T.	50	3.0	2	152	1.77	1.390	52.5	2.490	40.0	2.435	18.0
			4	170	1.99	1.653	62.4	2.220	51.7	2.260	18.5
			9	178	2.19	1.808	68.5	3.610	57.9	2.210	19.6
	100	1.5	2	189	2.65	1.757	66.3	4.330	69.5	2.038	21.2
			4	172	2.27	1.835	69.2	3.670	58.9	3.470	14.2
			9	190	2.62	2.210	83.4	4.770	76.6	3.203	13.8

の様子を示したもので、被験者の呼気はマスク、蛇管を通してダグラスバッグへ採気される。

写真一 2 は、三栄測器製呼気ガス瞬時分析装置である。

結 果

表一 2 に本実験の結果を示した。

表の左から、被験者、エルゴメーターのベダリング回転数、負荷、運動時間、心拍数、酸素摂取量 (最終および平均), % of VO₂max., 酸素負債量, % of VO₂debt, 酸素需要量, 効率を示す。

1) 心拍数の検討

図一 2 は、運動強度、運動時間と心拍数の関係を示したもので、上から被験者 Y. T., T. T., N. T. のそれぞれの運動強度および運動時間における心拍数の変化を示している。

縦軸に 1 分間の心拍数、横軸には各運動時間と 15~30 分間の回復時間を示し、各被験者とも運動開始直後の急激な心拍数の増加と、運動終了後 2~3 分間の急激な心拍数の減少傾向がよくあらわれている。

さらに、4 分間作業で回転数 100 rpm の場合に各被験者とも最高心拍数を記録し、その値は、被験者 T. T. の場合、183, Y. T. は 178, N. T. は 190 である。すなわち、比較的 anaerobic な作業の方が、比較的 aerobic な作業よりも心拍数が多くなることを示している。これを 4 分間の作業について、運動性質 (比較的 aerobic な作業と比較的 anaerobic な作業) と心拍数の関係を示したのが、図一 3 である。

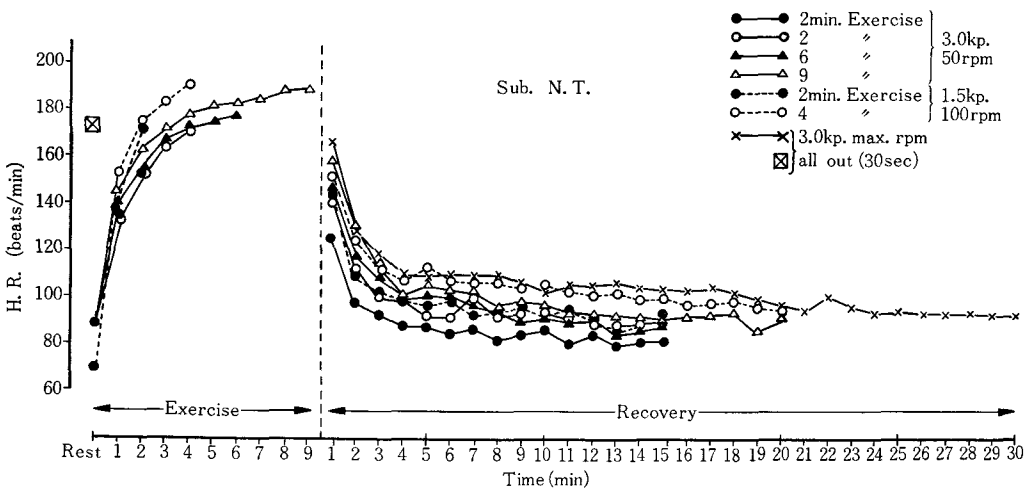
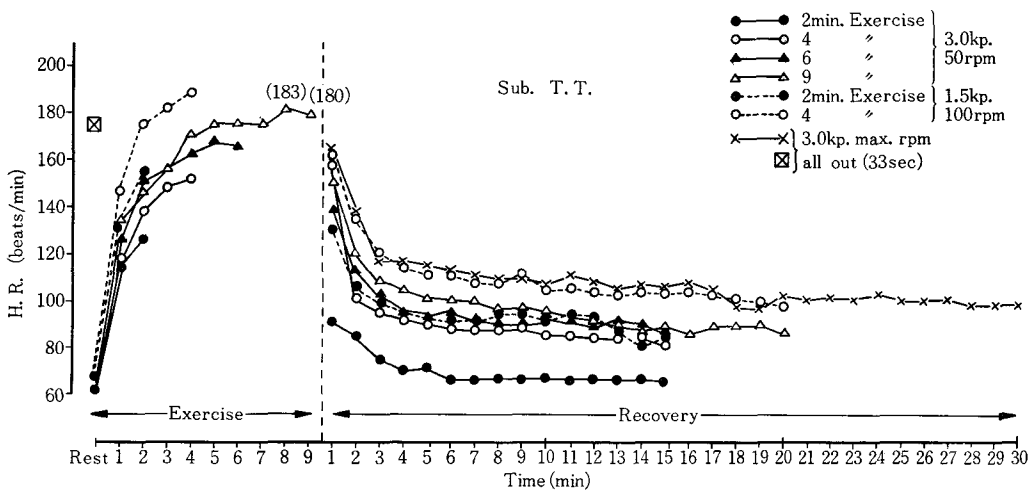
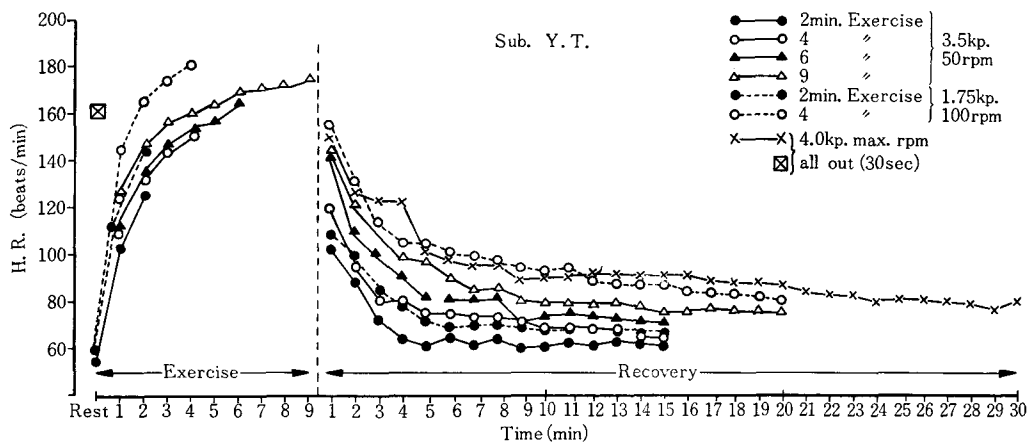


Fig. 2 運動強度・運動時間と心拍数の関係

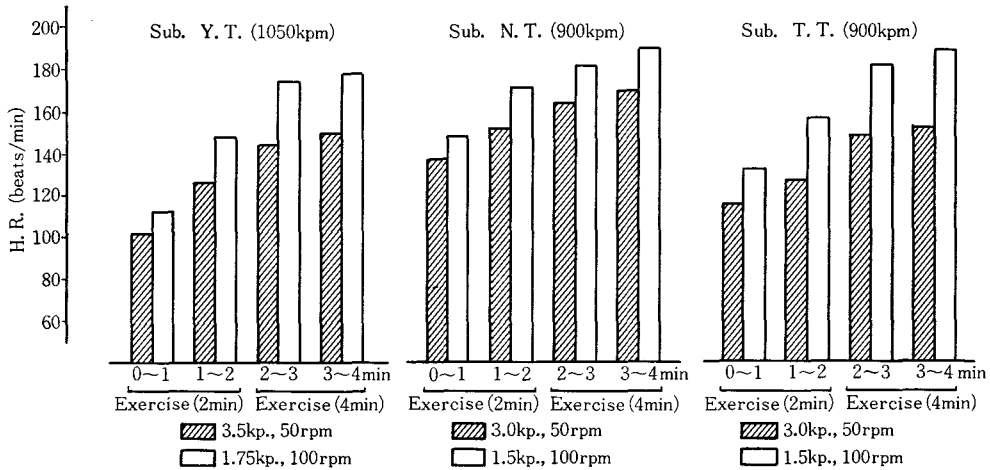


Fig. 3 運動性質と心拍数の関係

また、図一四は各作業時の心拍数から安静時心拍数を除いた値で、各被験者の最大心拍数を100とした場合の値をプロットしたものである。白で示した各値は比較的 aerobic な作業のもの、黒で示した各値は、比較的 anaerobic な作業時の値である。

○印は被験者 Y. T. で安静時脈拍数57。2分間作業では脈拍数126拍で、最大心拍数の57%、4分間のそれは150拍で76.9%、6分間では168拍で91.7%、9分間では175拍で97.5%の値を示した。また、この被験者の比較的 anaerobic な作業時の場合(●印)、2分間作業では脈拍数146で、最大必拍数の73.6%、4分間作業では100%の178拍であった。

□印は被験者 T. T.、△印は被験者 N. T. の各値を示し、安静時脈拍数は被験者 T. T. が63、被験者 N. T. が85であった。(表一2参照)

図からも明らかなように、同じ仕事をしているにもかかわらず、比較的 aerobic な作業の方が低いレベルから始まり、all-out 時も比較的 anaerobic な作業より少ない値で終わっている。

2) 酸素摂取量の検討

図一五は、運動性質と酸素摂取量の関係を示したもので、縦軸は1分間当りの酸素摂取量(ℓ)を、横軸は作業時間をあらわす。

図からも明らかなように、比較的 aerobic な作業より、比較的 anaerobic な作業の方が、酸素摂取量が多い傾向がわかる。さらに、各被験者の最大酸素摂取量を100とした場合の各作業時間内における酸素摂取量の平均値によって求めた値をプロットしたのが図一六

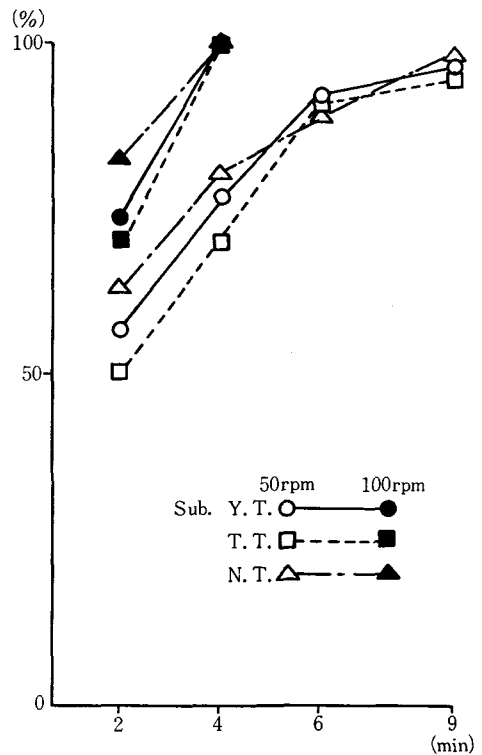


Fig. 4 % of max. heart rate

である。

○印の被験者 Y. T. についてみると、比較的 aerobic な作業の場合、2分間作業の平均酸素摂取量は1.54 ℓ /

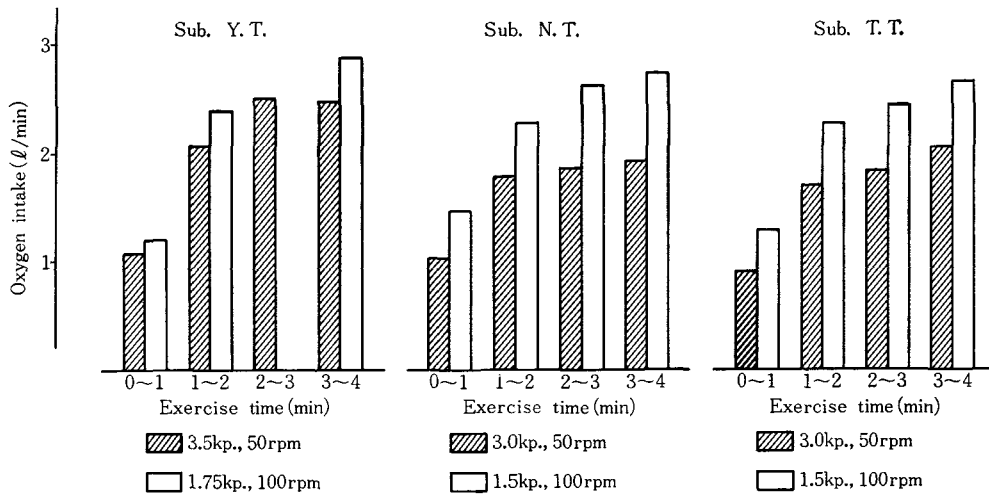


Fig. 5 運動性質と酸素摂取量の関係

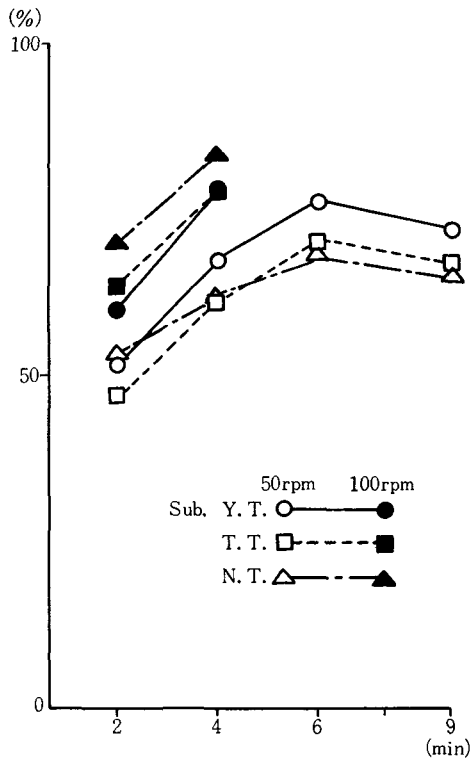


Fig. 6 % of max. oxygen intake

min. で、最大酸素摂取量の50.5%、4分間作業では、2,058l/min. で67.5%、6分間作業では、2,333l/min. で76.5%、9分間作業では、2,228l/min. で73.0%の

値を示し、比較的 anaerobic な作業の場合、2分間作業の平均酸素摂取量は、1,805l/min. で最大酸素摂取量の59.1%、4分間作業では、2,393l/min. で78.5%の値を示している。

他の被験者も同様な傾向で、比較的 aerobic な作業は最大酸素摂取量の50%前後の値で始まり、66から73%の値で終るのに対して、比較的 anaerobic な作業では最大酸素摂取量の63および69%の値で始まり、約80%の値で exhaustion に達している。

また、各被験者とも、比較的 aerobic な作業時で、6分間作業の酸素摂取量より9分間作業の酸素摂取量の方がわずかながら少ない傾向を示す。

3) 酸素負債量の検討

図-7は、運動性質と酸素負債量の関係を示したもので、縦軸に酸素負債量を、横軸に各被験者ごとの作業時間を示す。

図で明らかなように、比較的 anaerobic 作業が、比較的 aerobic な作業より、酸素負債量が多い傾向がみられる。また、図-8は、各被験者の最大酸素負債量を100とした場合の、各作業時の酸素負債の値をプロットしたものである。

○印の被験者 Y. T. についてみると、比較的 aerobic な作業では、2分間作業で最大酸素負債量の23.3%に相当する、2,015 l、4分間作業で53.3%にあたる 4,625 l、6分間作業では54%にあたる4,665l、9分間作業では66.7%に相当する5,760lであり、比較的 anaerobic な作業では、2分間作業で最大酸素負債量の50.3%にあたる4,345 l、4分間作業では83.1%にあたる7,181l

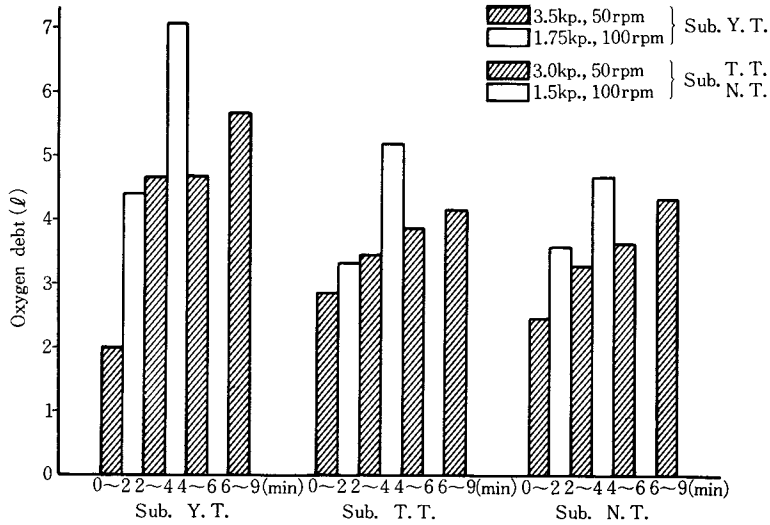


Fig. 7 運動性質と酸素負債量の関係

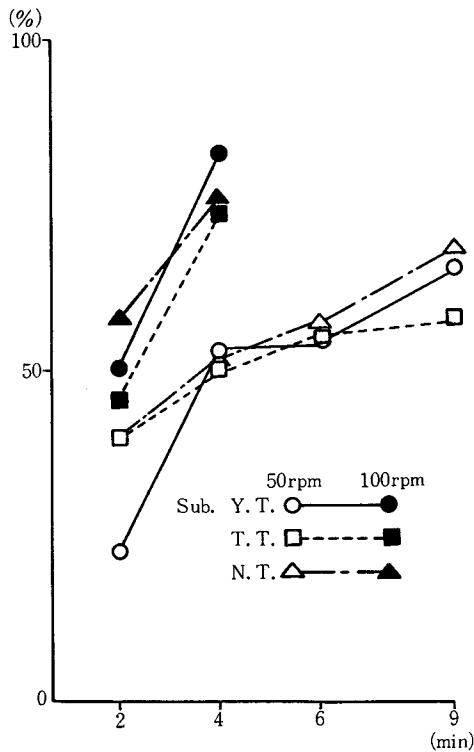


Fig. 8 % of max. oxygen debt

を示している。

他の被験者もほぼ同様の傾向を示し、作業時間の延長とともに、酸素負債量も増加している。(表-2参照)

論 議

先にも述べたが、本研究における比較的 aerobic な作業、比較的 anaerobic な作業とも仕事率は同じである。すなわち、被験者 T. T., N. T. については、

比較的 aerobic な作業

$$3.0 \text{ kp} \times 50 \text{ rpm} \rightarrow 900 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{min.}$$

比較的 anaerobic な作業

$$1.5 \text{ kp} \times 100 \text{ rpm} \rightarrow 900 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{min.}$$

Equivalent power

また、被験者 Y. T. については、

比較的 aerobic な作業

$$3.5 \text{ kp} \times 50 \text{ rpm} \rightarrow 1,050 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{min.}$$

比較的 anaerobic な作業

$$1.75 \text{ kp} \times 100 \text{ rpm} \rightarrow 1,050 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{min.}$$

Equivalent power

である。

さらに、熱の仕事当量およびモナーク自転車エルゴメーターのペダリングの効率が20%であることから、

900 kg·m の仕事には、2.1087ℓ、1050kg·m の仕事には2.4602ℓ の酸素が必要となる。

ここで、被験者 T. T. の比較的 aerobic な作業時における効率をみると(表-2参照)、その平均が 18.03%、これを O_2 requirement (酸素需要量) に換算すると、1.8960ℓ となり最大酸素摂取量の68.45%。

さらに、被験者 Y. T. の効率平均は 19.28%で O_2 requirement に換算すると 2,390/ℓ で最大酸素摂取量

の77.60%となる。また、被験者 N. T. の場合には効率平均19.43%、 O_2 requirement は2.0486ℓで最大酸素摂取量の77.31%であった。

すなわち、効率からみたペダリング時の酸素摂取量は、最大酸素摂取量の68~77%の値を示している。

次に、酸素1ℓは1.34gの乳酸を酸化するが、筋中において発生した乳酸中、その1分子が酸化されるエネルギーを利用して、約4分子が還元される。つまり約5分子がこの過程において処理される。

したがって、1ℓの酸素が消費された際には約7gの乳酸が処理されたことになる。

そこで、被験者 T. T. の all-out 時の酸素負債量、5.20ℓに換算すると、この時点で約36.4gの乳酸が存在したことになる。

さらに、0.3%の乳酸の蓄積で筋収縮が不能になる(カユルの筋)とされていることから、この被験者の体重64kgの約40%が筋肉とすると筋量約27kg、この筋が収縮不能になるには約81gの乳酸の蓄積が必要となる。

すなわち、本研究における実験では、乳酸蓄積の計算上の余裕が約44.6gあるということになる。

このように、Physical performance の limiting factor のひとつではないかと考えた、酸素摂取量も酸素負債量もともに、本実験においては単独では limiting factor にはなっていないと考えられる。

総 括

モナーク自転車エルゴメーターを用い、3名の男性被験者に仕事率は同じでペダリングの回転数の異なる作業を行わせた。すなわち、比較的 aerobic な作業として 50 rpm. で作業時間 2 min., 4 min., 6 min., 9 min., と、比較的 anaerobic な作業として 100 rpm. で作業時間 2 min., 4 min., を課し、その作業放棄に至るまでの経過を、酸素摂取量と酸素負債量の両面から検討した。

1) 負荷が一定、すなわち O_2 requirement が一定であっても、負荷の大きさによっては酸素摂取量、心拍数などの生理的反応は、運動時間の延長とともに増加しやがて exhaustion に達する。

2) 心拍数は、equivalent power であるにもかかわらず、比較的 aerobic な仕事の方が低いレベルから始まり、exhaustion に達しても比較的 anaerobic な作業より少ない値で終わっている。

3) 酸素摂取量は、比較的 aerobic な作業の場合、最大酸素摂取量の50%位の値で始まり、66から73%の

値で終るのに対して、比較的 anaerobic な作業では最大酸素摂取量の60から69%の値で始まり、約80%の値で exhaustion に達している。

4) 酸素負債量は、9分間の作業で最大酸素負債量の65%、4分間の作業で78%max Debt で all-out となった。

この研究は昭和51年度大学体育連合研修会で行われた。稿を終るに当り、御指導いただいた名古屋大学松井秀治先生・北村潔和先生、愛知県立大学星川保先生、御協力いただいた琉球大学平良勉先生、長崎大学田原靖治先生、愛媛大学杉山允宏先生(当時広島大)に深謝いたします。

文 献

- 1) Williams, C. G: The capacity for endurance work in highly trained men. *Int. z. angew. physiol.* 26 : 141-149, 1968.
- 2) Williams, C. G: Effect of training on maximum oxygen intake and on anaerobic metabolism in man. *Int. z. angew. physiol.* 24 : 18-23, 1967.
- 3) Costill, D. L: Metabolic responses during distance running. *J. Appl. physiol.* 28 : 251-255, 1970.
- 4) Costill, D. L: Determinants of marathon running success. *Int. z. angew. physiol.* 29 : 249-254, 1971.
- 5) Knuttgen, H. G: Oxygen debt after submaximal physical exercise. *J. Appl. physiol.* 29 : 651-657, 1970.
- 6) Schneider, E. G: Oxygen debt in aerobic work. *J. Appl. physiol.* 25 : 58-62, 1968.
- 7) Katch, V. L., Gilliam, T. and Weltman, A.: Active vs. passive recovery from short-term supramaximal exercise. *Research Quarterly.* 49 (2) : 153-161, 1978.
- 8) 生田香明, 猪飼道夫: 自転車エルゴメーターによる Maximum Anaerobic Power の発達の研究, *体育学研究*, 17(3) : 151-157, 1972.
- 9) 青木純一郎, 高岡郁夫, 前嶋 孝: 最大酸素摂取量の80%および65%トレーニングの performance, 最大酸素摂取量, 血中乳酸濃度および心拍数に及ぼす効果, *体育の科学*, 1 : 81-90, 1973.
- 10) 宮下充正, 芳賀脩光, 水田拓道, 福永哲夫: 青年にみられる有酸素的作業能の改善, *体育の科学*, 2 : 161-166, 1974.