

自転車エルゴメータを用いた 無酸素パワーの経時変化

笹原英夫
田中啓之
川村毅

1. はじめに

筋が収縮するためのエネルギーは、アデノシン3 磷酸 (ATP) の分解によって得られる。ATP はわずかしか筋中に含まれないため、ただちに再合成される。すなわち、ヒトが運動を遂行する際、ATP を分解するエネルギー利用代謝と ATP を合成するエネルギー獲得代謝とが筋中で平行して行なわれている。

ヒトが高い強度の運動を持続する際、第1のエネルギー獲得代謝はクレアチン・磷酸の分解による非乳酸性機構 (または無酸素性機構ともいう) であり、第2のエネルギー獲得代謝は筋グリコーゲンを乳酸にまで分解する乳酸性機構であり、第3のエネルギー獲得代謝は血中のヘモグロビンによって、筋に運ばれる酸素を用いる有酸素性機構である (Fox, 1984)⁽³⁾。

Margaria (1964)⁽⁷⁾ の理論値によれば、最大限の運動をした場合のエネルギー供給時間は非乳酸性機構、乳酸性機構で各々約8秒、33秒であり、41秒を過ぎてからの唯一のエネルギー源は有酸素性機構である、とされている。

また生田ら (1973)⁽⁴⁾ は自転車エルゴメータを用いた全力駆動の場合、60秒を過ぎると有酸素性機構が増大すると報告している。

有酸素パワーの評価に関しては最大酸素摂取量、無酸素性作業閾値⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、PWC 170、およびPWC 75% HR⁽⁸⁾ maxなどの測定があり、数多くの報告がなされている。無酸素パワーに関しては、非乳酸性機構が主体となる短時間の運動において、脚伸展パワーや最大無酸素パワーの測定⁽⁹⁾がある。一方、乳酸性機構が主体となる運動では Wingate Test⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ や40秒パワーの測定などが提唱されているが、持続時間、負荷量に関しては、現在までさまざまな報告があり、それらの至適値は未だに議論のあるところである。さらに、その評価方法に関しては総仕事量または平均パワーによるもののみで、パワーの変動、すなわち時間情報は考慮されていない。

したがって、パワーの時系列を検討することは、無酸素パワーの評価方法の検討のみならず、3種類のエネルギー獲得機構の関連性を考察するためにも、極めて重要であるといえよう。

2. 研究目的

本研究の目的は自転車エルゴメータの全力駆動時における経時変化に対して、数学モデルを適用することにより、含まれる情報をパラメータ化し、それらのパラメータと生体内部のエネルギー獲得機構との関連性を考察することである。

3. 研究方法

測定に先立ち、被検者に対して研究の目的および方法を説明した。測定に伴う危険性ならびに苦痛について理解し、同意した者のみを本研究の被検者とした。測定条件は以下の通りである。

3.1 被検者

男子体育学専攻学生3名(21~26 yrs)

3.2 除脂肪体重

測定の直前に、Nagamine⁽¹⁰⁾らの方法により、除脂肪体重(LBM)を推定した。

3.3 運動

モナーク社製自転車エルゴメータを用い、100秒間を目標に全力駆動した。その際、ペース配分をしないこと、嘔吐感などの自覚症状が表れたときは、ただちに測定を中止することを指示した。

3.4 負荷

2.0~3.0 kgw (30.77~61.54 gw/ LBMkg)。

測定は4.0 kgw まで行なったが、90秒以上持続できたもののみをデータとして採用した。

3.5 測定

自転車エルゴメータの車両付近にマイクロスイッチを取り付け、直流電流を流し、慣性車輪が1回転する毎にスイッチを切るようにした。その際の、on-off pulse をデータ・レコーダ (TEAC; R-40) に記録した後、ADコンバータ (コンテック; AD 12-16S (98)) を介して電算機 (NEC; PC-9801) が扱える数値データにした。

3.6 数値処理体系

MS-DOS 3.1 (Microsoft) のもとで、ADコンバータの制御には MASM Ver. 3.0, 数値演算には Lattice-C Compiler Ver. 3.1J (Life Boat), グラフィックスとコンソール入出力には、日本語 N 88-Basic MS - DOS 版 Compiler Ver. 3.0 (NEC) を使用した。

3.7 数学モデル

無酸素パワー (AnP) と考えられる区間。

$$\text{Power} = \exp(a \cdot \text{time} + b)$$

有酸素パワー (AeP) と考えられる区間。

$$\text{Power} = c \cdot \text{time} + \text{AO}$$

ただし、a, b は係数、AO は定数、 $c \neq 0$

3.8 数値処理

数学モデルと測定より得られたデータとの誤差分散を以下の種々の区間で演算した。

3.8.1 演算区間

AnP と考えられる区間については10秒を演算開始点とし、演算終了点を30秒より1秒毎にインクリメントさせて80秒まで行なった。

また、AeP と考えられる区間については30秒から1秒毎にインクリメントさせた80秒までを演算開始点とし、90秒を終了点とした。

4. 結果ならびに考察

図1に誤差分散が最小となるところの a, b, c, AO を用いたモデル

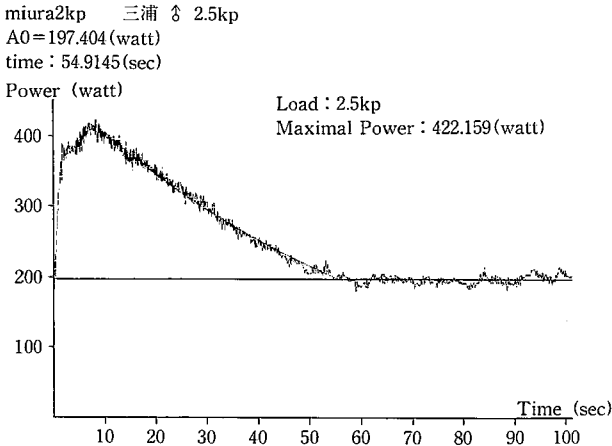


fig. 1 Relationships Between Power & Time

と実データとの1例を(2.5 kgw)を示す。また、得られた誤差分散の変動の3例を図2(a)~(c)に示す。負荷が2.5~3.0 kgw では50~60秒の間にAnP, AePそれぞれの誤差がボトムになる区間終了点および区間開始点があるのに対して、2.0 kgw ではどの区間においても誤差分散は他の試行に比べて高いレベルで一定であった。これは負荷が低いとペダルの回転数が頭打ちになるために、エネルギー源の温存が行なわれ、90秒まで無酸素性の代謝が持続したことを示唆している。一方、2.5~3.0 kgw では50~60

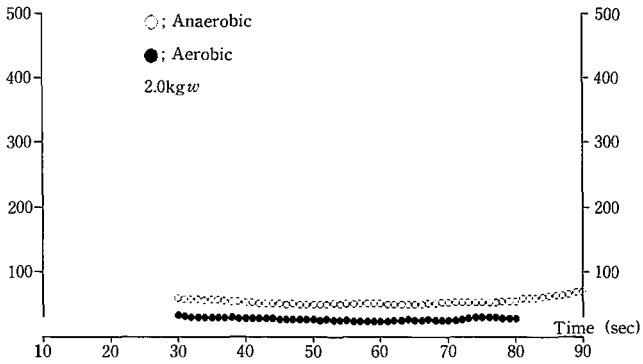


fig. 2 (a) Mean Square of Error

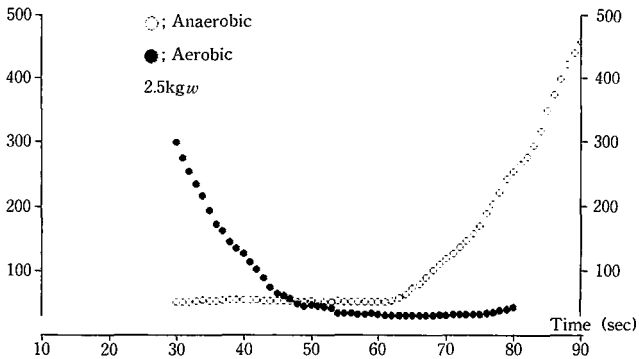


fig. 2 (b) Mean Square of Error

秒以降はパワーは一定となり、この出力が Aerobic Power のそれぞれの条件下における Base Line であると考えられる。この Base Line のパワーおよび、無酸素モデルとの交点を表 1 に示す。

LBM 1 kg 当りの負荷と最大パワーとの間には高い相関関係 ($p < 0.01$) が認められた (図 3)。最大無酸素パワーに関する過去の報告において、負荷は本研究よりもいずれの場合も高く報告されており、本条件下が遂行

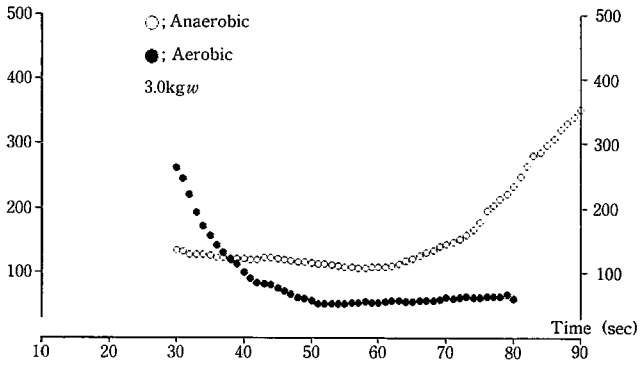


fig. 2 (c) Mean Square of Error

Table 1 Aerobic Base Line and Intersection

Load (kgw)	Intersection (sec)	Base Line (watt)
2.0	64.87	200.9
2.5	54.91	197.4
3.0	58.22	252.5

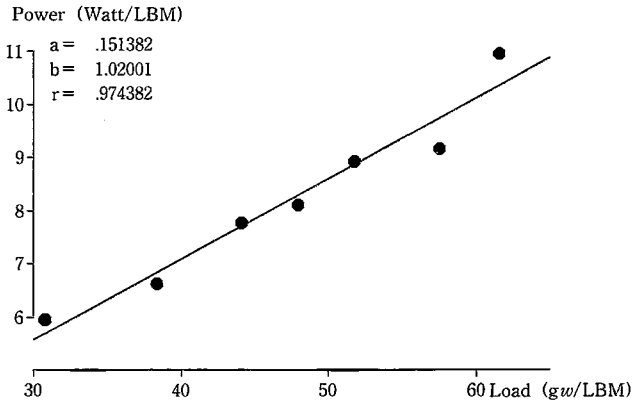


fig. 3 Relationships Between Load and Maximal Power

できない場合、すなわち100秒間の連続ができずに終わった試行はいずれも、負荷が高く、その際の最大パワーは条件を満たした場合に比べ、高い値を示していた。したがって、本条件下では最大無酸素パワーを出す負荷は得られないと推定でき、このことは過去の報告に一致するものと思われる。

また、負荷と平均パワーとの間にも有意な相関 ($p < 0.05$) が認められた (図4)。これは真の最大パワーが出ないためにエネルギー源が枯渇せ

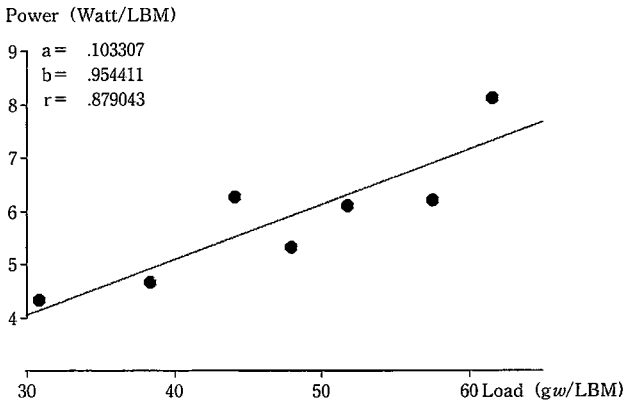


fig. 4 Relationships Between Load and Average Power

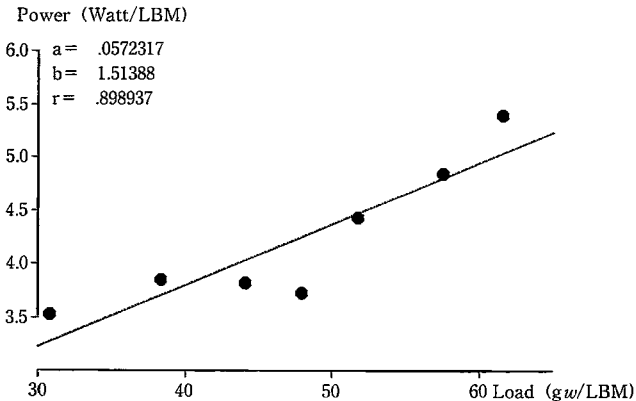


fig. 5 Relationships Between Load and Aerobic Base

ず、平均値をも引き上げたものと推定される。さらに、負荷と Aerobic Base Line との間 (図5) にも高い相関 ($p < 0.01$) が認められ、本条件下では、負荷が高くなるほど Aerobic Power Output の効率が良くなることを示していると考えられる。一方、AO を除いた、Mean AnP (推定された無酸素パワーだけによる仕事) と負荷との間には相関の有意性は認められなかった (図6)。すなわち、負荷が変化しても AnP のみで行なう全

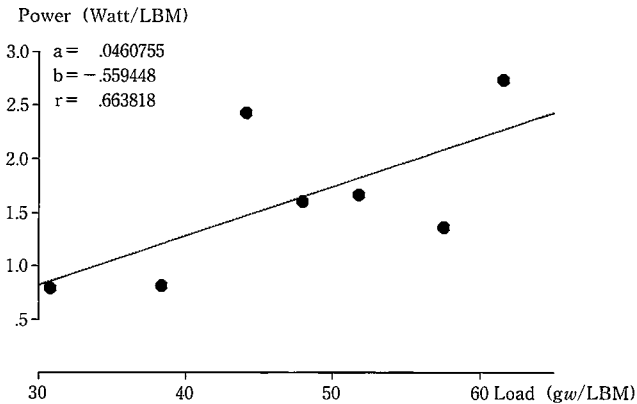


fig. 6 Relationships Between Load and Average Power Except Aerobic Base

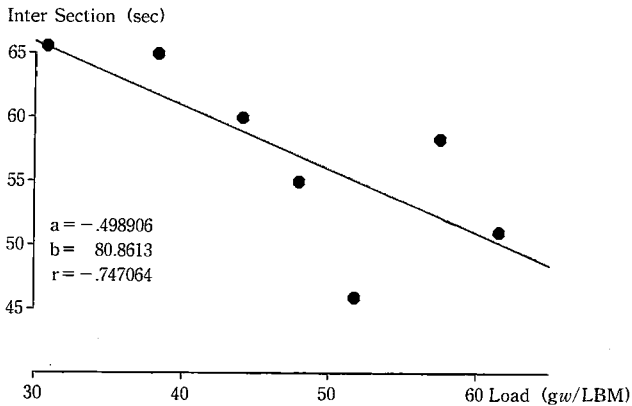


fig. 7 Relationships Between Load and Intersection

仕事量は変化しないものと考えられる。

さらに、負荷と推定された AnP と AeP の交点の間には (図 7) 負の相関が認められ ($p < 0.05$), 負荷とペダルの最大回転数 (図 8), および、負荷とペダルの平均回転数 (図 9) との間にはそれぞれ相関の有意性は認められなかった。このことは先にも述べた、回転数の頭打ちによるエネルギー源の温存を示しているものといえよう。加えて、AO におけるペダル

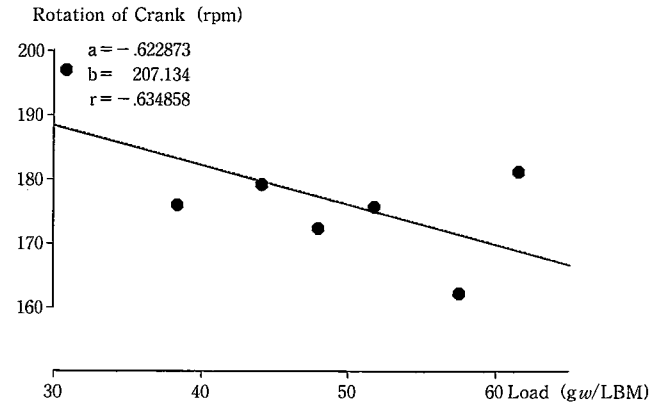


fig. 8 Relationships Between Load and Maximal Rotation of Crank

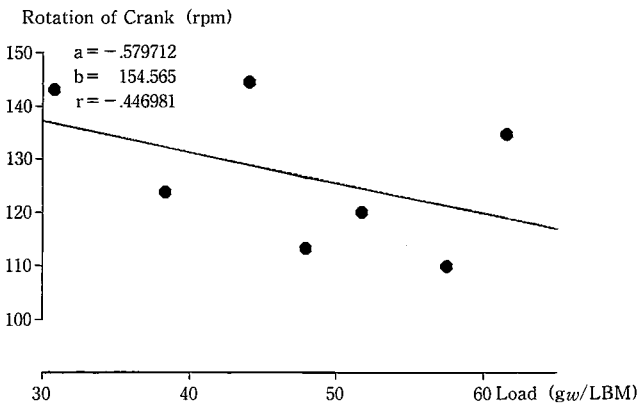


fig. 9 Relationships Between Load and Average Rotation of Crank

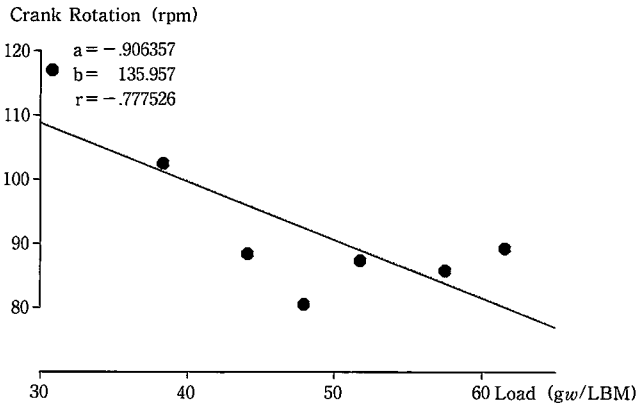


fig. 10 Relationships Between Load and Crank Rotation at Aerobic Base

回転数は（図10）負荷が高くなるほど低下する傾向を示した。

以上のことから、本研究の条件下においてはペダルの最大回転数には上限があり、恐らく、これは被検者の筋組成（First Twitch Fiber の収縮速度）に依存するものと考えられ、低負荷のもとでは非乳酸性、乳酸性機構がフル動員されることなしに運動が遂行されるものと考えられる。また、そのことにより、AnP と AeP との交点は後退し、全力運動であるにもかかわらず、60秒を過ぎてからもエネルギー獲得乳酸性機構が働くものと考えられる。しかしながら、Anaerobic な総仕事量は変わらないものと推定できた。

5. ま と め

全力で行なう自転車駆動におけるパワーの経時変化より、数学モデルを用い、生体内のエネルギー供給機構を検討することを目的とした。

男子体育学専攻学生3名が自転車エルゴメータを種々の負荷のもとで100秒間を目標に全力駆動した。その際車軸付近に取り付けたマイクロスイッチの On-off パルスをデータレコーダに記録し、AD 変換した後、電

算処理した。得られた結果は以下の通りである。

5.1 多くの試行において、50～60秒の間に実データとモデルとの誤差分散が最小となる無酸素パワーと有酸素パワーの両区間の終点、起点があった。

5.2 除脂肪体重当りの負荷と最大パワー、平均パワー、Aerobic Base Line との間には有意な相関関係が認められた($p < 0.01$, $p < 0.05$, $p < 0.01$)。一方、負荷と Aerobic Base を除いた仕事量との間には相関が認められなかった。

5.3 負荷とペダルの最大回転数、平均回転数との間にも相関は認められなかった。しかしながら、有酸素性代謝における作業下ではペダルの回転数は負荷が高くなるほど低下する傾向を ($p < 0.01$) 示した。

以上より、ペダルの回転数には限界があり、低負荷ほどエネルギー源の温存が行なわれ、60秒を過ぎても無酸素性の代謝が続くことが推定された。

〔文献〕

- (1) Bar Or, O., et al.: Anaerobic capacity and muscle fiber distribution in mwn. *Int. Sports Med.*, 1:82-85, 1980.
- (2) Dotan, R., et al.: Load optimization for the Wingate anaerobic test. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 51:409-417. 1983.
- (3) Fox, E. L., : *Sports Physiology*. 2nd Ed. CBS College Pub. 1984.
- (4) 生田香明, 猪飼道夫: Mechanical Power, 血中乳酸量, 酸素負債量による Anaerobic Work の研究. *体力科学*22 : 1-8, 1973.
- (5) Indar, O., et al.: Aerobic and anaerobic components of thirty-second supramaximal cycling task. *Med-Sci. Sports Exer.*, 8:51, 1976.
- (6) Jacobs, I., et al. : The effects of thermal dehydration on performance of the wingate anaerobic test. *Int. J. Sports Med.*, 1:21-24, 1980.
- (7) Margaria, R., et al.: Balance and kinetics of anaerobic energy release during strenuous exercise in man. *J. Appl. Physiol.*, 19:623-628, 1964.
- (8) Miyashits M., et al.: PWC 75 %HRmax : A measure of aerobic work capacity. *Sports Med.*, 2:159-164, 1985.
- (9) Nakamura, Y., et al.: Determination of the peak power output during maximal brief pedalling bouts. *J. Sports Sci.*, 3:181-187, 1985.