

高強度の運動を持続する能力に関する研究

山本正嘉

高強度の運動を持続する能力に関する研究

山本正嘉

目 次

I. 緒言	1
1. 高強度の運動を持続する能力に関する研究の必要性	2
2. 研究小史	8
3. 本研究の目的	31
4. 本研究で用いた用語の説明	33
II. 連続的運動	37
1. 連続的な運動を最大努力で行った際のエネルギー供給	39
2. 連続的な運動を最大努力で行った際の運動成績とエネルギー供給 能力との関係	53
3. 連続的な運動を最大努力で行った際の運動成績の競技種目特性	62
III. 間欠的運動	69
1. 間欠的な運動を最大努力で行った際のエネルギー供給	72
2. 間欠的な運動を最大努力で行った際の運動成績とエネルギー供給 能力との関係	83
3. 間欠的な運動を最大努力で行った際の運動成績の競技種目特性	96
IV. 総括論議	103
1. 連続的運動	104
2. 間欠的運動	110
3. 身体作業能力テストとしての最大努力運動の利用価値	113
4. 無酸素・有酸素混合運動の位置づけ	114
V. 結論	116
謝辞	122
引用文献	123

I. 緒 言

I-1. 高強度の運動を持続する能力に関する研究の必要性

1) 身体運動と筋活動

体育やスポーツで行われる身体運動は、すべて骨格筋（以下、筋と呼ぶ）の活動によって生み出される。筋は、その内部に存在するエネルギー物質を分解してエネルギーを生み出し、そのエネルギーによって骨格を動かし、身体運動を起こさせる器官である。

筋の活動により身体運動が生み出されるまでの道すじを図1に示した。身体運動は、筋で生み出される能動的な力が、重力、抵抗、摩擦といった受動的な力に打ち勝って（あるいは利用して）身体を動かすことによって生まれる。また、筋が発揮する力の大きさやタイミングは、運動の目的にかなったものとなるよう、脳・神経系の働きによって随意的（意識的）および不随意的（無意識的）に常に調節されている。

体育・スポーツにおいては、「力強い運動」「すばやい運動」「ねばり強い運動」あるいは「正確な運動」といったさまざまなタイプの身体運動を行うことが要求される。これらの運動のうち、力強い運動、すばやい運動、ねばり強い運動を行うためには、いずれも多量のエネルギーを必要とする。すなわち、力強い運動やすばやい運動を行うためには、短時間のうちに筋が多量のエネルギーを生み出すことが必要である。また、ねばり強い運動を行うためには、長時間にわたって筋が多量のエネルギーを生み出し続けることが必要となる。

体育・スポーツの目的の1つは、このような身体運動の能力を向上させることにある。この目的を達成するためには、能動的な力を生み出す器官である筋の活動能力を向上させることが必要であり、その基盤として筋活動を起こさせているエネルギーの供給能力を向上させることが不可欠な条件であるといえよう。

2) 筋活動と2種類のエネルギー供給系

人間の場合、筋活動のためのエネルギーを供給する代謝経路（以下、エネルギー系と呼ぶ）は1種類ではなく、性質の異なる複数のエネルギー系を備えている。それらは、大別して有酸素系および無酸素系と呼ばれている（表1）。

有酸素系は、筋中のエネルギー物質を、大気中から取り入れた酸素によって酸化させてエネルギーを生み出す。有酸素系がエネルギーを生み出す仕組みは、自動車のエンジンが、エネルギー物質であるガソリンを大気中の酸素を用いて燃焼させてエネルギーを生み出すのとよく似ている。

一方、無酸素系は、筋中のエネルギー物質を、酸素なしで分解してエネルギーを

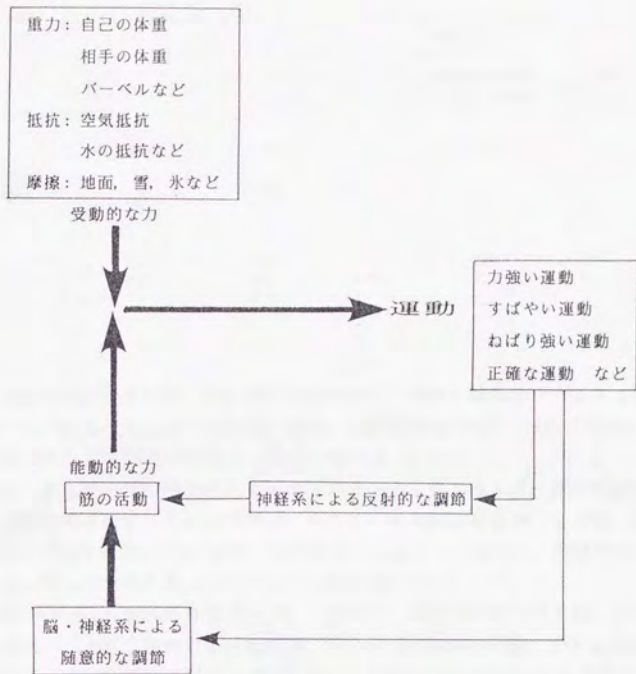


図1. 身体運動が生み出されるまでの道すじ. すべての身体運動は, エネルギーの働きによって筋が活動し, そこから生み出される能動的な力によって起こる (宮下: 1993, およびLamb: 1995をもとに作成)

表1. 人間の筋が備えているエネルギー系の種類と特性. CPはクレアチン燐酸, O₂は酸素, CO₂は二酸化炭素, H₂Oは水を表す. (Sahlin: 1986より作成)

エネルギー系	パワー特性		容量特性		
	最大パワー (mmol ATP/kgd. m/秒)	最大パワー到達 への所要時間	エネルギー容量 (mol ATP)	中強度運動時の持続 時間 (70% V _{O₂ max})	O ₂ 需要量 (mmol O ₂ /ATP)
<無酸素系>					
CP→C+P (ATP-CP系)	8.6	<1秒	0.34	30秒	0
炭水化物→乳酸 (乳酸系)	5.2	<5秒	0.7-5.2	1-7分	0
<有酸素系>					
炭水化物→CO ₂ +H ₂ O	2.7	3分	70	1.5時間	0.167
脂 肪→CO ₂ +H ₂ O	1.4	30分	8000	7.4日	0.177

生み出す。無酸素系がエネルギーを生み出す仕組みは、電池が酸素なしでエネルギーを生み出すのにととえることができる。なお、無酸素系はさらに、ATP-CP系および乳酸系と呼ばれる2種類のエネルギー系から成り立っている。

表1は、各エネルギー系の特性をまとめたものである。各エネルギー系の特性を、パワー（単位時間当りに最大でどれだけのエネルギーを供給できるか）と容量（どれだけのエネルギーを貯蔵しているか）とに注目して比較してみると、無酸素系と有酸素系とは正反対の特性をもっていることがわかる。

無酸素系はパワーは大きい容量は小さい。反対に、有酸素系はパワーは小さいが容量は大きい。つまり、無酸素系は短時間で行われる高強度の運動、いいかえれば力強い運動やすばやい運動を遂行するのに適したエネルギー系といえる（なお、無酸素系の中でもATP-CP系は相対的にパワーに優れ、乳酸系は容量に優れている）。一方、有酸素系は長時間持続するような低強度の運動、すなわちねばり強い運動を行うのに適したエネルギー系といえる。

3) 無酸素性運動と有酸素性運動

人間の行う身体運動をみると、短距離走のように短時間のうちに行われる高強度の運動から、長距離走のように長時間持続する低強度の運動にいたるまで、さまざまな種類がある。人間の筋は、無酸素系と有酸素系とを合目的的に使い分けることによって、これらの運動にうまく対応することが知られている。1960年にWilkieは、人間がさまざまな運動時間で最大の運動を行ったときに発揮されるパワーと、その

際に利用されるエネルギー系の関係を、図2のように表した。

この図は、運動の強度と持続時間との間には反比例の関係があることを示している。つまり、高強度の運動は長続きさせることができないこと、また運動を長続きさせようとするとき低強度で運動を行わざるをえないことを意味している。いいかえれば、力強さやすばやさ、ねばり強さの両立は困難であるということを表している。エネルギー系の関わりをみると、高強度で持続しない運動では無酸素系が、また低強度で持続する運動では有酸素系が主として関わっていることがわかる。

前者のような運動は「無酸素性運動」、後者のような運動は「有酸素性運動」と呼ばれている。スポーツ種目でいえば、投てき、跳躍、重量挙げや、走、泳、スピードスケートなどの各短距離種目などが無酸素性運動に該当する。また、マラソン、クロスカントリースキーや、走、泳、スピードスケートなどの各長距離種目などが

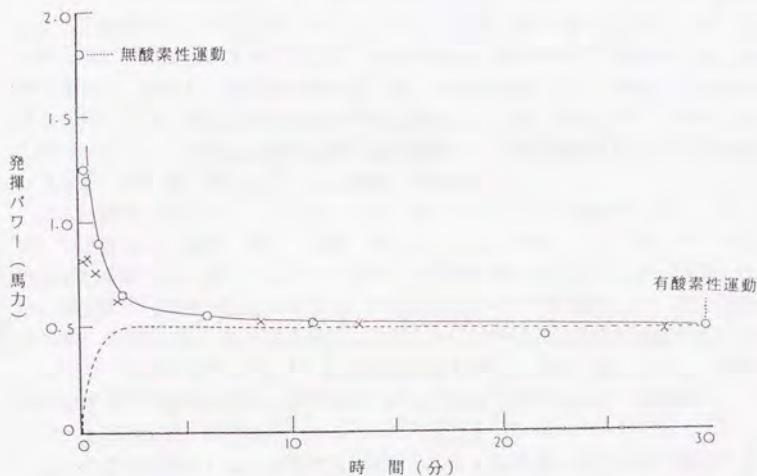


図2. 人間がさまざまな運動時間で最大の運動を行ったときに発揮される機械的パワー。破線は有酸素系のエネルギーの貢献度を表す。横軸の時間は運動開始からの経過時間 (time) ではなく、トータルの運動時間 (duration) を表している。また縦軸はその運動時間の中で発揮された平均の機械的パワーを表す。(Wilkie: 1960に加筆)

有酸素性運動に該当する。

無酸素性運動と有酸素性運動は、運動強度、持続時間、そして利用されるエネルギー系のいずれをみても、相反する性質をもった運動である。そのため、この二つの運動はこれまで対立的に捉えられ、研究も別個に行われてきた。

4) 無酸素・有酸素混合運動

ところが、体育・スポーツにおいて行われる身体運動をみると、高強度の運動の持続、すなわち力強さとねばり強さの両方が要求される運動も多い。このような運動に対する名称は特にないが、無酸素系、有酸素系のエネルギーの両方が混合して利用されるので、本研究では以下、「無酸素・有酸素混合運動」と呼ぶことにする。スポーツ種目でいえば、次のようなものが無酸素・有酸素混合運動に該当する。

走競技、競泳、スピードスケートなどのように、規則的な運動を休息なしに持続するようなタイプの運動（以下、連続的運動と呼ぶ）においては、特に中距離種目において無酸素系、有酸素系のエネルギーがいずれも重要な働きをするであろう。また、単に中距離種目だけではなく、短距離種目や長距離種目も含めてかなり広範囲の種目が、無酸素・有酸素混合運動に該当する可能性も考えられる。たとえば清水ら（1968）は、長距離種目においても無酸素エネルギーが最大限まで利用されると報告している。またHermansenとMedbø（1984）は、短距離種目においても有酸素エネルギーがかなり寄与していると指摘している。

また、球技（サッカー、テニス、バレーボールなど）、格闘技（レスリング、ボクシングなど）、格技（剣道、柔道、空手など）、採点競技（フィギュアスケート、体操の床運動など）においては、競技中、短時間の高強度運動が何度も反復され、その持続時間は数分～数時間に及ぶ。このようなタイプの運動（以下、間欠的運動と呼ぶ）においては、部分的な運動に注目すれば短時間の高強度の運動が行われているので、無酸素系のエネルギーが重要であると考えられる。しかしその一方で、運動全体に注目すれば数分～数時間にわたって行われることから、有酸素系のエネルギーも不可欠であると考えられる。

以上のことを考えると、人間の身体運動において無酸素・有酸素混合運動の占める割合は大きく、むしろ典型的な無酸素性運動や有酸素性運動の占める割合は小さいという見方も成り立ちうる。それに関わらず、無酸素・有酸素混合運動の研究は、無酸素性運動や有酸素性運動に関する研究に比べて、これまであまり行われてこなかった。

5) 無酸素・有酸素混合運動に関する研究の必要性

体育・スポーツで行われるさまざまな身体運動において、無酸素系、有酸素系の

エネルギーがそれぞれどのように関わっているかを知ることは、身体運動の能力を向上させるための教育、すなわち身体のトレーニングを実施する際に欠くことのできない条件である。

すなわち、ある運動種目の能力を向上させるためには、その種目において主として利用されるエネルギー系の能力をトレーニングによって増加させる必要がある。ところが、無酸素系と有酸素系のエネルギー供給能力を向上させるためのトレーニング方法は、トレーニングの基本条件である運動強度、運動時間、休息時間の組合せ方が大きく異なっている (Fox: 1979, McArdleら: 1981, 金久: 1989, 宮下: 1993)。したがって、その種目において無酸素系と有酸素系がそれぞれどのような関わりをもつのが明らかにならなければ、適切なトレーニングプログラム (処方) を作成することはできないことになる。

エネルギー系の関わりが単純な種目の場合にはこのような問題は少ない。たとえば、投てき、跳躍といった典型的な無酸素性運動に携わる選手の場合には、無酸素系の能力を中心にトレーニングをすればよい。また、マラソンのような典型的な有酸素性運動に携わる選手の場合には、有酸素系の能力を中心にトレーニングすればよいからである。

しかし、無酸素・有酸素混合運動の種目に携わる選手の場合には、その種目において、無酸素系と有酸素系のエネルギーがそれぞれどのように関わっているかを明らかにしなければ、効率のよいトレーニング処方の作成はできない。そればかりか、必要度の高いエネルギー系の能力を身につけず、必要度の低いエネルギー系の能力を身につけてしまうといった誤ったトレーニング処方を作成してしまうことにもなりかねない。

先にも述べたように、体育・スポーツにおいては、典型的な無酸素性運動や有酸素性運動よりも、むしろ無酸素系、有酸素系の両方のエネルギーがいずれも関わる無酸素・有酸素混合運動の方が多く考えられる。このような見方に立てば、これまで研究されることの少なかった無酸素・有酸素混合運動に関する研究、すなわち高強度の運動を持続する能力に関する研究を行うことは、体育学やスポーツ科学の分野において重要であると考えられる。

I-2. 研究小史

ここでは、高強度の運動を持続したときに、無酸素系および有酸素系がどのような関わりをもつかということについて検討した先行研究を概観する。なお、このことについて言及する前に、運動の持続に関する研究を行う際に用いられる負荷法に関する研究小史と、無酸素系および有酸素系によるエネルギー供給を捉える指標に関する研究小史にも簡単にふれることとする。

- 1) 運動の持続を研究する際に用いられる負荷法についての研究小史
- 2) 無酸素系と有酸素系のエネルギー供給を捉える指標についての研究小史
- 3) 高強度の運動の持続時におけるエネルギー系の関わりについての研究小史

1) 運動の持続を研究する際に用いられる負荷法についての研究小史

運動の持続に関する研究は、被検者にある強度の運動を持続して行わせ、その際の生理的応答を時間経過と関連づけて捉えることにより行われる。

被検者に対して、検者の意図する強度の運動を負荷するためには、運動強度を規定できる労作計（エルゴメーター）が必要となる。19世紀後半から20世紀初頭にかけて、トレッドミル、自転車エルゴメーター、脚あるいは腕を使って回転させる回旋盤、はしご登り、踏み車など、さまざまなエルゴメーターが開発された（猪飼ら、1973）。その中でも、現在でも広く利用されているのがトレッドミルと自転車エルゴメーターである。

トレッドミルは、実験室内で歩行や走行ができる装置である。人間が行う最も基本的な運動である歩行や走行に関する研究を行うことができるという長所があるが、その反面、被検者が運動中に行った機械的な仕事量を定量することが難しいという短所もある。

自転車エルゴメーターは、その場で自転車をこぐ運動のできる装置である。トレッドミルでの運動と比べると、運動に参画する筋が下肢中心となるものの、被検者が運動中に行った機械的な仕事量を定量できるという長所がある。

これらの労作計を用いて被検者に持続的な運動を負荷するとき、運動の開始から終了まで、終始一定強度の運動を持続させる負荷法（固定負荷運動）を用いるのが最も一般的な方法である。しかし、時間経過にともない運動強度を次第に増加させていく負荷法（漸増負荷運動）や、反対に運動強度を低下させていく負荷法（漸減負荷運動）も用いられることがある。これら3種類の負荷法にはそれぞれ長所と短

所があり、研究の目的によって使い分けられている。それらを整理すると以下のようになる。

A. 固定負荷運動

図3は、固定負荷運動を持続した際の無酸素系、有酸素系のエネルギー供給を概念的に示したものである。これらの図は、1920年代にKroghとLindhard (1919/1920) やHillら (1924) によって描かれて以来、今日の運動生理学の教科書には必ず記載されているといっても過言ではない。

図3-aは、低強度の運動を持続した場合である。運動の開始直後には、エネルギー供給の立ち上がりの速い無酸素系のエネルギーが使われる。しかししばらくすると、有酸素系のエネルギー供給量が増加してエネルギーの需要量に追いつき、無酸素系のエネルギーは利用されなくなる。

図3-bは、高強度の運動を持続した場合である。低強度の運動の場合と同じく、運動の開始直後には無酸素系が全てのエネルギーを供給するが、時間経過にともない次第に有酸素系のエネルギーも使われるようになる。しかし高強度の運動の場合には、エネルギーの需要量が大きいため、パワーの低い有酸素系だけでは全てのエネルギーをまかないきれない。そのため、運動の後半になっても無酸素系のエネルギーは利用され続ける。

固定負荷運動の運動様式は、体育やスポーツにおいて行われる持久運動（たとえば中・長距離走など）の様式とよく似ている。したがって、固定負荷運動を用いて実験を行うことは、人間が実際に行う持久運動に近いシミュレーションができるという点で意義がある。しかし、図3をみてもわかるように、運動強度の大小によって、エネルギー系の関わり方は大きく異なっている。したがって、この違いを固定負荷運動を用いて明らかにしようとする、何とおりもの強度で運動を行わなければならないという不便さもある。

B. 漸増負荷運動

図4は、漸増負荷運動を行った際の無酸素系、有酸素系のエネルギー供給を概念的に示したものである。運動の初期、つまり運動強度が低い時には、有酸素系のエネルギーが利用される。しかし、時間経過にともない運動強度が徐々に増加していくと、あるところから無酸素系のエネルギーも利用されるようになる（このポイントを無酸素性作業閾値（AT）という）。さらに運動強度が増加すると、やがて有酸素系のエネルギー供給は頭打ちとなる（このときに観察される1分間当りの酸素摂取量を最大酸素摂取量（ $\dot{V}O_{2max}$ ）という）。 $\dot{V}O_{2max}$ の出現以降は、運動強度が増加しても有酸素系のエネルギー供給はそれ以上増加せず、無酸素系のエネルギーの

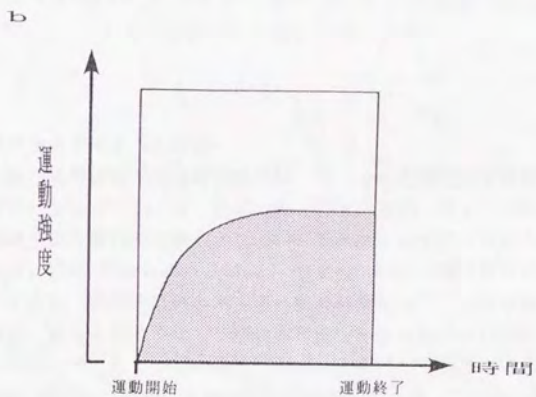
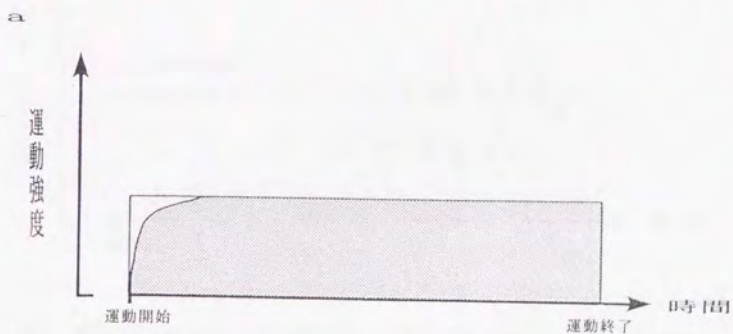


図3. 低強度 (a), および高強度 (b) の固定負荷運動を持続した際の, 無酸素系と有酸素系のエネルギー供給. 長方形で囲んだ部分が運動を表す. 白い部分は無酸素系によるエネルギー供給, 影の部分は有酸素系によるエネルギー供給を表す. (Hillら, 1924の概念図に基づき作成)

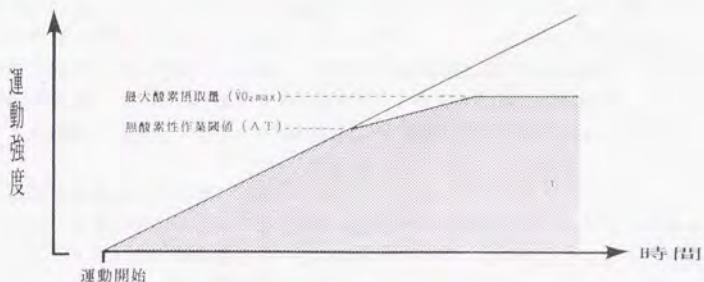


図4. 漸増負荷運動を行った際の無酸素系と有酸素系のエネルギー供給。白い部分が無酸素系によるエネルギー供給、影の部分が有酸素系によるエネルギー供給を表す。(Sahlin, 1986の示した概念図を基に作成)

みが増加するようになる。

漸増負荷運動が考案されたのは、 $\dot{V}O_2\max$ を簡便に測定するための方法を模索する過程においてであった。 $\dot{V}O_2\max$ は、全身持久力、すなわちねばり強さに関する体力を表す最も優れた指標とされ、1930年代から測定が行われるようになった(Robinsonら: 1937, Robinson: 1938)。しかし、固定負荷法を用いて $\dot{V}O_2\max$ を測定しようとすると、有酸素系のエネルギー供給が頭打ちになっているかどうかを確認するために、異なる負荷で2~3回の運動を行わなければならない。これに対して、漸増負荷法を用いると1回の運動で $\dot{V}O_2\max$ の測定が可能になる。漸増負荷法による $\dot{V}O_2\max$ の測定は、1955年にTaylorらが行っている。また1967年には猪飼が、固定負荷法と漸増負荷法で得られた $\dot{V}O_2\max$ との間に有意差がないことを示している(猪飼ら, 1973)。

漸増負荷運動はその後、ATの測定にも利用されるようになった。ATも近年、 $\dot{V}O_2\max$ とならねばり強さに関する体力を表す優れた指標として認められるようになった。ATも、固定負荷運動を用いて測定しようとすると、異なる負荷で何回もの運動を行わなければならない。しかし漸増負荷運動を用いると、1回の運動で測定が可能となる。ATの現象自体は、1930年にDwilesが固定負荷運動を用いて発見していたが、この現象にATという名称を与え、また漸増負荷運動を用いてその測定を行ったのは、1964年のWassermanとMcIlroy、および1973年のWassermanらである。

漸増負荷運動は、人間の行う持久運動としては不自然な運動様式である。しかしこの運動様式を用いることによって、 $\dot{V}O_2\max$ やATといった有用な体力指標を1回の運動で簡便に測定できる。また、さまざまな運動強度に対する人体の生理的応答（酸素摂取量、心拍数、呼吸数など）を知りたいときに、運動強度を変えて何度も固定負荷運動を行うことなく、1回の運動である程度捉えられるという利点がある。

C. 漸減負荷運動（最大努力運動）

図5は、運動の開始から終了まで終始最大努力で運動を継続したとき、発揮される筋出力とエネルギー系の動きが、運動時間の経過にともなってどのように変化するかを示したものである。最大努力で運動を行うと、発揮される筋出力は運動の開始直後に最大となり、以後時間の経過にともない次第に低下していく。筋出力は意図的に低下させていくわけではないが、固定負荷運動や漸増負荷運動という名称との対比でいえば、漸減負荷運動といえることができる。

図5に示したように、最大努力運動を継続して行うと、運動の開始直後にはほとんど無酸素系のエネルギーが利用される。しかし、時間経過にともなって無酸素系によるエネルギーの供給量は減少し、かわって有酸素系によるエネルギーの供給量

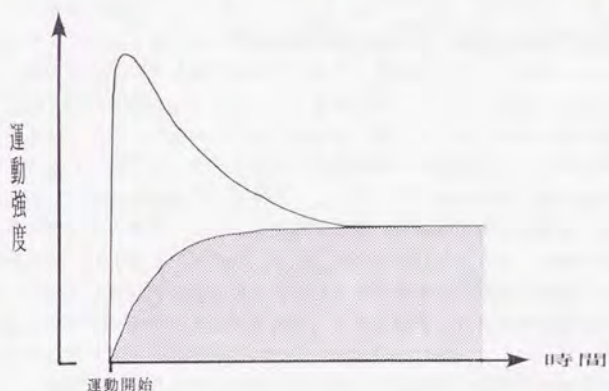


図5. 最大努力運動（漸減負荷運動）を行った際の無酸素系と有酸素系のエネルギー供給。白い部分が無酸素系によるエネルギー供給、影の部分が有酸素系によるエネルギー供給を表す。（Vandewalleら、1987の示した概念図に基づき作成）

が増加する。そして、最終的には有酸素系のみエネルギー供給が行われるようになる。

最大努力運動が考案される契機となったのは、高強度の運動を持続した際に無酸素系によるエネルギー供給がどのように行われているかを調べるためであった。この点、低強度の運動を持続した際に有酸素系によるエネルギー供給がどのように行われているかを調べるために漸増負荷運動が用いられたのとは対照的といえる。最大努力運動の持続に関する研究を初めて行ったのは、Katch (1973) および生田と猪飼 (1973) である。

この運動様式はその後、無酸素系のエネルギー供給能力を測定するテストとしても利用されるようになった。その中でも今日特に普及しているものが、イスラエルのWingate研究所の研究者たちによって提案されたWingateテストである (Ayalonら: 1974, Bar-Or: 1987)。これは、自転車エルゴメーターを用いて30秒間の最大努力ペダリングを行ったとき、運動初期に発揮された機械的パワーのピーク値を無酸素系のパワー、30秒間の総仕事量を無酸素系の容量の指標とするというものである。

最大努力運動を持続するという運動様式は、漸増負荷運動と同様、人間が体育・スポーツの場面で行う持久運動からみれば不自然である。しかし、上に述べたように、無酸素系のエネルギー供給能力を簡便に評価するテストとして利用できる他、次のような意義もある。

図2をみるとわかるように、高強度の運動の場合は、運動強度の大小によってエネルギー系の関わり方や持続可能時間は大きく異なる。したがって、この違いを固定負荷運動を用いて明らかにしようとする、何とおりの強度で運動を行わなければならない。一方、山本ら (1988) は、同じ時間内に固定負荷運動と最大努力運動を行った場合、遂行できる作業量や、無酸素系、有酸素系によるエネルギー供給量はほぼ同じとなることを示している。したがって、ある時間 (たとえば2分間) の最大努力運動を行わせ、その際の筋出力と両エネルギー系の貢献度とを運動時間の経過と関連づけて捉えておけば、それ以内の時間 (たとえば、10秒、20秒、30秒、・・・、2分間) で疲労困憊に達するさまざまな強度の固定負荷運動における筋出力の大きさや両エネルギー系の貢献度を、1回の運動からある程度推察することが可能となる (図6)。

つまり、最大努力運動という運動様式を用いて高強度の運動の持続を研究することは、漸増負荷運動を用いて低強度の運動の持続を研究するのと同様、研究をより効率よく進める上で意義をもつものと考えられる。

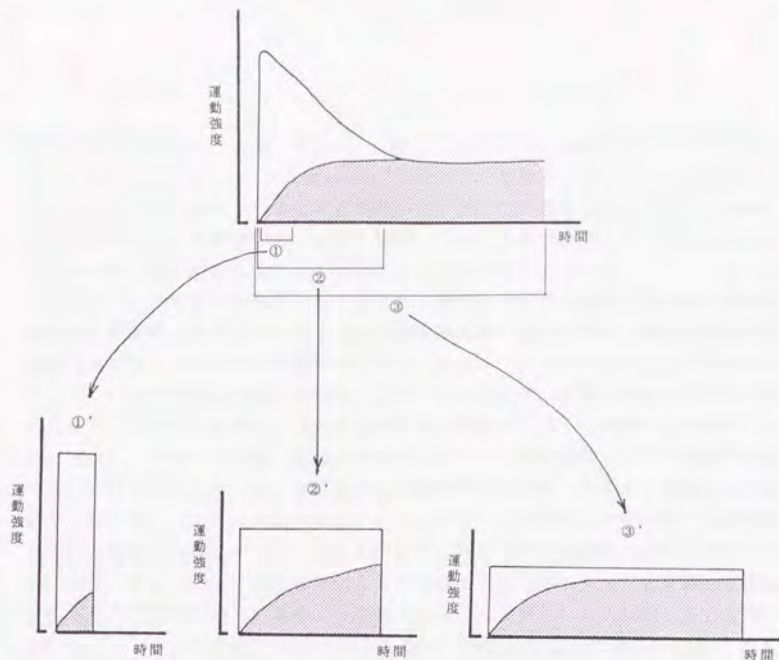


図6. 最大努力運動と固定負荷運動の互換性. 最大努力運動を持続したときの発揮パワーと各エネルギー系の貢献度の推移を, 運動時間の経過 (time) と関連づけて捉えることによって, さまざまな強度で高強度の固定負荷運動を行った際の各エネルギー系の貢献度 (ただし, timeとしてではなくdurationとしての貢献度) を推察することができる.

2) 無酸素系と有酸素系のエネルギー供給を捉える指標についての研究小史

人間の筋の内部で行われている無酸素系, 有酸素系によるエネルギー供給の状況を正確に捉えることは困難なことである. 中でも無酸素系のエネルギー供給を的確に捉える方法は, 現在でも十分に確立されていない. ここでは, 両エネルギー系の働きを捉えるためにこれまでに考案されたさまざまな指標について, その有効性と限界にふれて概観する.

A. 有酸素系のエネルギーを捉える指標

このエネルギー系は, 表1に示したように, 炭水化物および脂肪という2種類の

食物栄養素を主なエネルギー源とし、これらを酸素によって酸化させてエネルギーを生み出している。ZuntzとSchumburg (1901) は、酸素1 lの利用につき、ほぼ5 kcalのエネルギーが発生することを明らかにした。この性質を利用すれば、運動中に活動筋が消費した酸素の量(酸素消費量)を測定することにより、有酸素系によるエネルギー供給量を捉えることができることになる。

活動筋における酸素消費量を捉えるための最も直接的な方法は、運動筋へ酸素を供給する動脈血と運動筋から戻って来る静脈血の酸素飽和度の差(動静脈酸素較差)に血流量を乗じて求めるものである。この方法は、1870年にFickによって発見されたので、Fickの原理と呼ばれている。しかしこの方法は、動脈と静脈に血液採取用のカテーテルを挿入しなければならないので(侵襲的方法)、簡便に測定することはできない。またこの状態で高強度の運動を行うことは安全性の面から問題がある。

そこで通常は、以下のような間接的な方法が用いられる。すなわち運動中に口と鼻から吐き出される呼気ガスを分析することによって外界から体内に取り入れた酸素の量(酸素摂取量)を求め、これを運動中に筋が消費した酸素消費量とみなす方法である。この方法は、被検者の口と鼻に呼気ガス採取用のマスクを装着して運動を行うだけで測定が可能であり(非侵襲的方法)、侵襲的な方法に比べると非常に容易である。この方法は、AtwaterとBenedict (1905) によって確立された。

ただし、この方法には以下のような限界もある。

a. 筋中や血中には、小量ではあるが酸素ストアと呼ばれる酸素の蓄えがあり、これが運動中(特に運動の開始時)に利用される。したがって、外界から体内に取り入れた酸素の量を測定するだけでは、酸素ストアを用いて産生されたエネルギー量を過小評価することになる。

b. ある運動における酸素摂取量を測定する際、通常は運動の開始時から終了時までの呼気ガスを採取して分析する。しかしこの場合、運動を行っている筋のレベルでの酸素摂取量が呼吸循環系を介して呼気ガスのレベルでの酸素摂取量に反映するまでに時間的なずれが生じる。

c. 運動中に測定された酸素摂取量は、運動に直接携わっている筋の酸素消費量以外に、筋出力の発揮という意味では直接運動に関係していない心筋や呼吸筋の活動による酸素消費量も含むことになる。したがって運動を遂行した筋で使われたエネルギー量を過大評価することになる。

ただし一般的には、この3つの要素の影響はそれほど大きくないとみなされ、補正は行われないことが多い。

B. 無酸素系のエネルギーを捉える指標

無酸素系にはATP-CP系と乳酸系という2つの構成成分がある(表1)。それらを

区別せず無酸素系として一括して捉える方法と、区別して捉える方法とに分けて紹介する。

a. 無酸素系として一括して捉える場合

図7は、高強度の固定負荷運動を行った際の、運動中および運動後の酸素摂取量の動態を示したものである。無酸素系のエネルギー供給量を捉えるためには、図の1の部分（酸素借： O_2 deficit）を捉えることが必要である。そのために、これまで下記の2種類の方法が用いられてきた。

①酸素負債量

1924年にHillらによって提唱された指標である。運動を行うと、その強度に応じて酸素摂取量が増加するが、運動を終了した後もしばらくの間、安静時のレベルよりも高い酸素摂取量が観察される（図7の3の部分）。Hillらは、これが運動中に用いられた無酸素系のエネルギー（1の部分）を運動前の状態に修復するためのエネルギーとして使われると考え、この過剰な酸素摂取量を酸素負債量（ O_2 debt）と名付けた。そして酸素負債量を測定することにより、運動中に用いられた無酸素系のエネルギー量を評価できると考えた。また、運動中の酸素摂取量と運動後の酸素負債量の和は、その運動に要した総エネルギー量（酸素需要量：1と2の和）に等

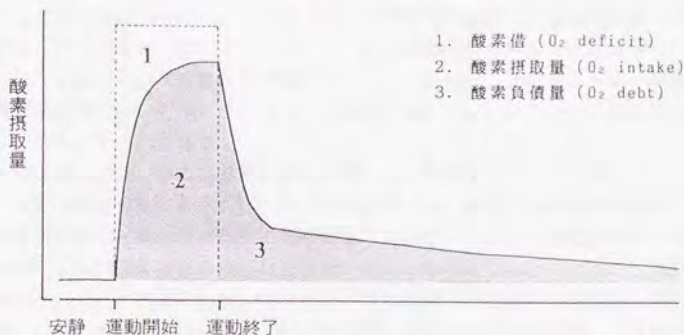


図7. 高強度の固定負荷運動を行った際の、運動中と運動後の酸素摂取の動態（影の部分）。破線で囲まれた長方形の部分が運動を表す。1と2の和を酸素需要量と呼ぶ（Hillら、1924の概念図に基づき作成）

しいと考えた。

酸素負債量は酸素摂取量と同じく、運動後の呼気ガスを分析することにより容易に測定できる。しかし、以下のような問題点が指摘されている。すなわち、酸素負債の構成成分には、運動で使われた無酸素系のエネルギーの回復に用いる酸素以外に、運動によって活発となった心筋や呼吸筋の活動のために必要な酸素や、体温の上昇、ホルモンの分泌などによって生じた代謝の高進による酸素消費量の増加分など、さまざまな要素が含まれるため、実際に用いられた無酸素系のエネルギー供給量をかなり(1.5~2倍程度)過大評価してしまうと指摘されている(AstrandとRodahl: 1970, Keulら: 1972, GaesserとBrooks: 1984, Saltin: 1990, GreenとDawson: 1993)。その過大評価の程度は、高強度の運動の場合、特に著しいとされている。

②酸素借

1980年代になって、HermansenとMedbø(1984)、およびMedbøら(1988)によって提唱された指標である。これは図7の1の部分、すなわち酸素借(O₂deficit)そのものを直接求めようという意図のもとに考案されたもので、原理は以下のようなのである。

有酸素系のエネルギーが主体となる低強度の運動においては、運動強度(=機械的な仕事率)と酸素摂取量(=エネルギー供給量)との間に比例関係がみられる。そこで、この比例関係が無酸素系のエネルギーも混入してくる高強度の運動においてもそのまま成立すると仮定する(つまり有酸素性運動と無酸素性運動の機械的効率が一定であると仮定する)。そして、高強度の運動を行った際の機械的な仕事率から、それに対応する酸素需要量を算出し、この値から運動中に実際に摂取された酸素摂取量を引いた値を、酸素借、すなわち運動中に用いられた無酸素系のエネルギーとみなすものである。

酸素借は最近、酸素負債量にかわって用いられるようになってきた。しかし以下のような問題点も指摘されている。すなわち、この指標に妥当性があるかどうかは、無酸素性運動と有酸素性運動の効率が等しいかどうかという点にかかっているが、実際には無酸素性運動の効率は有酸素性運動の効率よりも低く、しかもどの程度低いかということはいくわかっていない(Vandewalleら: 1987, Saltin: 1990)。したがってこの指標を用いると、酸素負債量を用いたときとは反対に、実際の無酸素系のエネルギー供給量を過小評価してしまう可能性が高いといえる。

b. ATP-CP系と乳酸系の2要素に分けて捉える場合

①ATP-CP系

このエネルギー系は、筋中に含まれている高エネルギー磷酸(主としてクレアチ

ン磷酸：CP)を分解し、エネルギーを生み出している(表1)。したがって筋中におけるCPの濃度の低下を捉えることができれば、エネルギーの供給状態がわかる。CPの濃度を測定するためには、筋を直接採取して調べる必要があるため、従来は実験動物を対象として研究が行われていた。しかし1962年にBergströmが、人間の筋の一部を手術によって摘出し、代謝物質の変化を観察する筋バイオプシー法を開発したことによって、人間の運動においても検討が可能となった。

筋バイオプシー法は筋中の代謝情報を直接得ることができるという大きな利点がある。この方法は特に北欧の研究者たちによって積極的に利用され、筋の代謝の研究は大きな発展を遂げた。しかしこの方法は、手術によって筋の一部を切り取るという、侵襲的な方法の中でも最も過酷な手段が要求されるため、その実施は容易ではない。また筋バイオプシー法により得られた筋内部の情報は、1本の筋の、しかもごく一部分の情報でしかないため、局所的な筋運動の研究には有効であるが、多数の筋が参加する全身運動に適用することには限界がある(山本, 1989)。

②乳酸系

このエネルギー系は、筋中で食物栄養素の一つである炭水化物を乳酸(La)に分解し、エネルギーを生み出している(表1)。そこでATP-CP系の場合と同様、筋バイオプシー法(Bergström, 1962)を用いて、運動直後に筋中におけるLaの濃度の増加を測定すれば、この系によるエネルギーの供給量を捉えることができる。

またLaは、CPとは異なり、筋中から血中に容易に拡散するという性質がある。そこで、運動終了後に筋中のLaが血中に拡散し終わった時刻を見計らって血液を採取し、血中のLa濃度の増加を測定することにより、筋中で行われた乳酸系のエネルギー供給量を間接的に捉えることもできる。しかしこれらの方法にはいずれも、以下のような一長一短がある。

筋中のLa濃度の測定についての長・短所：ATP-CP系の項で述べたような、筋バイオプシー法がもつ長、短所がそのままあてはまる。その他の短所として、次のことがあげられる。LaはCPとは異なり、運動中にも絶えず筋中から血中に拡散していくので、拡散した分が過小評価される。また、Laは筋中で発生すると同時に同じ筋の中で酸化によって除去もされているので(八田, 1991)、この分が過小評価される。

血中のLa濃度の測定についての長・短所：運動中に発生した全ての筋のLaが血中のLa濃度に反映するので、特に多数の筋が参加する全身運動における乳酸系のエネルギー供給を捉える場合には優れた方法であるといえる。また血中のLa濃度の測定は、手の指先や耳朶から数滴の血液を採取するだけで分析が可能なので、筋バイオプシー法に比べればはるかに実施が容易である。しかし、筋中で発生したLaが全て血中へ均等に拡散しているかどうかという疑問や、運動中に骨格筋、心筋、腎臓、肝臓などで一部の乳酸が酸化あるいは糖新生によって除去されるので、その分が過

小評価されるといった欠点も指摘されている (Jacobs: 1986, Vandewalleら: 1987, Saltin: 1990)。

C. 最近の新しい方法について

近年、核磁気共鳴法 (NMR)、近赤外分光法 (NRS) といった方法が開発され、筋中のエネルギー物質の変化を非侵襲的に、しかも連続的に捉える試みが始められている。これらの方法は、現在主としてATP-CP系を対象として行われているが (Wilkieら: 1981, 久野ら: 1990, Bangsbo: 1994)、乳酸系や有酸素系のエネルギー供給状態を捉えることもできる可能性をもっている (垣平と岩根, 1993)。

この方法は、将来筋バイオプシー法に代わる手段として発展が期待されている。しかし現在のところ、次のような問題点がある; 適用できる運動が局所的な運動に限られている、強度の非常に強い運動には適用できない、エネルギー供給量を定量することはできず、エネルギー供給量を相対的に表す指標あるいはエネルギー供給が行われているかどうかをみる定性的な指標としての利用にとどまっている。

D. まとめ

以上のことをまとめると、筋の内部で行われているエネルギーの供給量を正確に捉えることは、現時点では無酸素系、有酸素系いずれについても難しいとすることができる。ただし有酸素系に関しては、呼気ガス分析から求めた酸素摂取量からエネルギー供給量を捉えることの妥当性が、これまでも研究者の間で了解されてきた。これに対して、無酸素系のエネルギーについては、現在、それを捉えることができる妥当性の高い方法はないと考えられている (Saltin, 1990)。

このことは、有酸素系のエネルギーが主として関わる低強度の運動の持続について研究することは比較的容易だが、無酸素系、有酸素系のエネルギーがいずれも関わる高強度の運動の持続について研究することは困難であることを意味する。

O_2 debt, O_2 deficit, CP, Laの値から、無酸素系のエネルギー供給量を定量することには限界がある。ただしこれらを、無酸素系のエネルギー供給量の大きさを相対的に捉える指標として用いる、あるいはエネルギー供給が行われているかどうかを判定するための指標として用いることについては、その妥当性を認めている研究者は多い (Di-Prampero: 1981, Vandewalleら: 1987, 山本: 1989, Saltin: 1990)。

I-1. で述べたように、体育・スポーツにおいて行われる身体運動においては、高強度の運動の持続が要求される種目は多く、研究の必要性は高い。したがって、今後この分野の研究を進めていくためには、これらの指標の有効性とその限界を正しく認識した上で、活用していくことが必要であると考えられる。

3) 高強度の運動の持続時におけるエネルギー系の関わりについての研究小史

ここでは、人間が高強度の運動を持続した際に、無酸素系および有酸素系のエネルギーがどのように関わるかということを検討した先行研究を概観する。1-1. で述べたように、高強度の運動の持続には連続的運動と間欠的運動の2つのタイプがある。そこで、この2つの場合に分けて紹介する。

A. 連続的運動に関する研究

a. エネルギー供給の状況を捉えようとした研究

高強度の運動の持続をエネルギー系との関わりから検討する場合、無酸素系と有酸素系によるエネルギー供給の貢献度がそれぞれどの程度かを明らかにすることがまず必要である。しかし2)において述べたように、現在の所、無酸素系のエネルギー供給量を正確に定量する方法が存在しないため、このことは明らかにできないのが現状である。以下に紹介する先行研究の中には、ある運動における無酸素系と有酸素系の貢献度について具体的な数値を示しているものもあるが、いずれも試算の域を出ていないと考える必要がある。

これまでの研究を整理してみると、2つのタイプに分類できる。1つは、ある運動を行ったとき、運動時間の経過にもなって両エネルギー系の貢献度がどのように変化していくかを明らかにしようとした研究である。もう1つは、ある運動の開始から終了までに使われた全エネルギーに対して、両エネルギー系の貢献度がそれぞれどの程度であったかを明らかにしようとした研究（時間経過にもなる貢献度の変化は問わない）である。

前者を時刻 (time) と関連づけた研究 (①)、後者を時間 (duration) と関連づけた研究 (②) と呼ぶことにする。②は①の時間積分値として位置づけられ、①のエネルギー供給状況がわかれば、②のエネルギー供給状況もわかるという関係にある。なお、日本語においては、時刻 (time) も時間 (duration) もいずれも「時間」という言葉で表される場合がある。また英語においても、timeもdurationもいずれもtimeという言葉で表される場合がある。したがって、①と②の研究は混同され易い。事実、これらが混同されている場合も見受けられるので、本稿では以後この点を区別することとする。以下、①と②に分けて、先行研究を概観する。

①時刻 (time) と関連づけた研究

図3に示したように、高強度の運動を持続したとき、運動の開始時には無酸素系のエネルギーの貢献度がほとんど100%を占めているが、時間経過にもなって次第

に有酸素系のエネルギーの貢献度が増加する。このような概念図は、古く1920年代にHillら(1924)やKroghとLindhard(1919/1920)によってつくられた。それ以来、このような現象が存在すること自体は明白と考えられている。

ところが、無酸素系と有酸素系(あるいはATP-CP系、乳酸系、有酸素系)のエネルギーの貢献度が、運動時間の経過にもなるとどのように変化していくかを具体的な数値で示すことは、2)で述べたような理由から現時点では困難である。

Morton(1985)によれば、高強度の運動を持続した際に、各エネルギー系の貢献度が経時的にどのように変化するかを、人間を対象として実験的に究明しようとした研究は、1964年に行われたMargariaらの研究があるのみだという。Margariaらはトレッドミルを用いて、疲労困憊(オールアウト)に達するまでの時間が5~30秒程度となるような強度の異なる4種類の固定負荷でのスプリント走を行った。そして3種類のエネルギー系の貢献度が、運動時間の経過にもなるとどのように変化するかを観察した。その結果、主たるエネルギーを供給する系が、ATP-CP系、乳酸系、有酸素系の順で、重複してエネルギーを供給する時間帯をもちながら推移して行くことを示唆した。また、最も強度の高い運動においては、無酸素系のエネルギーが約40秒で枯渇し、それ以後は有酸素系のエネルギーの貢献度が100%となることも予測している。しかし彼らの研究では、無酸素系のエネルギーを定量するに当たって、血中の乳酸濃度(La)や酸素負債量(O_2 debt)を用いているため、定量的な観点からみた妥当性は低いと考えられる。

Margariaらの研究以後、人間が行う全身運動を対象として、高強度の運動を持続した際の各エネルギー系の貢献度を実験的に究明しようとした研究は、ほとんど行われていない。Serresseら(1988)やSmithとHill(1991)のように、自転車エルゴメーターを用いて最大努力のペダリングを行った際の3種類のエネルギー系の貢献度の推移を、具体的な数字で示している研究もある。しかしこれらの研究では、実測しているのは酸素摂取量と機械的パワーだけであって、ATP-CP系や乳酸系のエネルギー供給については、幾つもの仮定を設けた上で計算により求めている。その中には恣意的な仮定も含まれているため、実際のエネルギー供給の状況を正確に反映しているかという点では疑問である。

局所的な運動を対象とした研究をみると、最近Bangsboら(1990)が次のような研究を行っている。彼らは2.2~4.9分でオールアウトとなるような固定負荷での片脚伸展運動を対象として、無酸素系と有酸素系のエネルギー供給量の経時的な変化を、筋バイオプシー法と血液採取法とを併用して求めた。その結果、有酸素系のエネルギーの貢献度は、初めの30秒間の区間では約20%、30~60秒の区間では約50%、120秒以後の区間では約70%となることを示している。またこれらの全区間で平均すると、有酸素系のエネルギーの貢献度は約60%となることも示している。

以上のように、高強度の運動を持続した時の無酸素系と有酸素系のエネルギー供給を同時に測定し、それぞれの貢献度が運動時間の経過にともないどのように変化するかを観察した研究は非常に少ない。しかし、無酸素系もしくは有酸素系のいずれか一方のみのエネルギー系に注目して、エネルギー供給の経時的な変化を観察した研究は次のようにいくつかある。

無酸素系のエネルギー供給に注目した研究としては、以下のようなものがある。生田と猪飼(1973)は、自転車エルゴメーターを用いて5, 10, 30, 40, 60, 90秒間の最大努力運動を行い(ただし全被検者が全ての運動時間で運動を行っているわけではない)、60秒間以下の運動では O_2 debtや血中のLaが増加するが、60秒間以上の運動になるとそれらの増加は頭打ちとなることを報告した。この結果は、無酸素系のエネルギー供給は、運動開始から60秒程度で終了することを示唆している。

Withersら(1991)は、自転車エルゴメーターを用いて30, 60, 90秒間の最大努力運動を行ったときの酸素借(O_2 deficit)、筋中のLa、クレアチン燐酸(CP)を測定した。その結果、CPは30秒間以上の運動になるとそれ以上低下しなくなること、 O_2 deficitとLaは60秒間以上の運動になるとそれ以上増加しなくなることを示した。これらの結果は、ATP-CP系のエネルギー供給は運動の開始から30秒以内、乳酸系のエネルギー供給は60秒以内、したがって両方を合わせた無酸素系のエネルギー供給も60秒以内に終了することを示唆している。

ATP-CP系と乳酸系の活動の時間的な前後関係に注目した研究には次のようなものがある。人間を対象とした研究ではないが、Danforth(1965)やJones(1973)は、動物の摘出筋に電気刺激を与えて収縮させたとき、運動の開始直後にはまずATP-CP系のエネルギーが先に利用され、それよりも時間的にやや遅れて乳酸系のエネルギーが利用され始めることを示している。またPiiperら(1968)は、犬の脚筋に電気刺激を加えて筋収縮を行わせたとき、運動の初期に利用される無酸素系のエネルギーのうちの大部分はATP-CP系のエネルギーであることを示唆している。これと同様のことは、人間を対象とした研究でも報告されている(HultmanとSjoholm: 1983, Hirvonenら: 1987)。

有酸素系のエネルギー供給に注目した研究としては次のようなものがある。ÅstrandとRodahl(1970)は、自転車エルゴメーターを用いてさまざまな強度で固定負荷運動を持続したときの酸素摂取量($\dot{V}O_2$)の動態を観察している。そして、 $\dot{V}O_2$ は運動強度によらず、運動の開始とともに安静時のレベルから上に凸のカーブを描いて増加し、2~3分で定常状態に達することを示している。また、運動強度が高くなるほど $\dot{V}O_2$ の増加は急速で、その到達レベルも高くなること、さらに、到達レベルが最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)に達した場合には、到達レベルはもはや変化しないが、そこに到達するまでの立ち上がりの方がより速くなることを示している。また非常

に強度の高い運動の場合は、運動の開始から1分程度で $\dot{V}O_{2max}$ に到達する場合もあることを指摘している。

最大努力運動を持続した際の $\dot{V}O_2$ を観察した研究としては次のようなものがある。KatchとWeltman (1979), Seresseら (1988) は、自転車エルゴメーターの最大努力ペダリング中の $\dot{V}O_2$ の動態を調べ、 $\dot{V}O_2$ は運動の開始とともに急速に増加し、およそ30~60秒で $\dot{V}O_{2max}$ の80~100%に達し、それ以後は定常状態を呈することを示している。

以上のような先行研究の結果を総合すれば、高強度の運動を持続した際、運動時間の経過にともなって、主たるエネルギーを供給するエネルギー系が、(1)無酸素系から有酸素系、より詳しくいえば(2)ATP-CP系、乳酸系、有酸素系の順で、重複してエネルギーを供給する区間をもちながら推移していくことが予想される。

(1)の現象を表した概念図は、現在ほとんどの運動生理学のテキストに掲載されている(AstrandとRodahl: 1970, 猪飼ら: 1973, Margaria: 1976, Dal Monte: 1977, McArdleら: 1986)。また(2)の現象を表した概念図も、いくつかのテキストに描かれている(Keulら: 1972, Dal Monte: 1977, SaleとNorman: 1982, Molé: 1983)。しかしこれらの図は、上に紹介したような先行研究、すなわち被検者(人間だけではなく動物も含まれている)も運動内容も大きく異なる研究から得られた結果を継ぎ合わせて描かれたものである。したがって、これらの図は概念的な強い図であると考えべきであり、これらの図をもとに実際のエネルギー供給の状況を論ずることには限界があるといえよう。

②時間(duration)と関連づけた研究

①において概観したように、高強度の運動を持続すると、運動の開始直後では無酸素系がほとんどのエネルギーを供給するが、運動時間の経過にともない有酸素系のエネルギーの貢献度が増加する。したがって、高強度の運動をさまざまな時間で行ったとき、運動の開始から終了までに利用された全エネルギーに対する無酸素系と有酸素系のエネルギーの貢献度は、運動時間が短いときには無酸素系の貢献度が大きくなり、また運動時間が長くなると有酸素系のエネルギーの貢献度が大きくなることは容易に予想される。このような観点で、トータルの運動時間と両エネルギー系の貢献度の関係を究明しようとした先行研究には以下のようなものがある。

清水ら(1968)は男子、加賀谷ら(1983)は女子の陸上競技選手を対象として、さまざまな距離の全力走を行わせ(前者では100m~10000m, 後者では400m~3000m)、 O_2debt と酸素摂取量($O_2intake$)とを測定し、それらの比率を求めている。その結果、 O_2debt の占める割合は走距離(運動時間)が短くなるほど大きくなり、 $O_2intake$ の占める割合は走距離が長くなるほど大きくなることを示している。また、両

者の比がほぼ50%となるのは、800m走(130秒~150秒)の付近であることを示している。 O_2debt と $O_2intake$ がそれぞれ無酸素系と有酸素系のエネルギー供給量を正確に表すのであれば、両エネルギーの貢献度が50%づつとなる運動時間は130~150秒であるということになる。しかし実際には、 O_2debt は無酸素系のエネルギーを1.5~2倍程度過大評価すると見積られている(AstrandとRodahl: 1970, GreenとDawson: 1993)。したがって、無酸素系と有酸素系のエネルギー供給の貢献度が50%づつとなる運動時間は、これよりもさらに短いところにあると考えられる。

最近、MedbøとTabata(1989)は、自転車エルゴメーターを用いて30秒間、60秒間、および120秒間程度でオールアウトとなるような固定負荷運動を行い、 $O_2deficit$ と $O_2intake$ の比率から無酸素系と有酸素系のエネルギーの貢献度を求めている。その結果、全エネルギーに対する有酸素系のエネルギーの貢献度は、30秒間の運動で40%、60秒間の運動で50%、120秒間の運動で65%であったと報告している。また平井ら(1993)も同様の方法を用いて、30秒間、60秒間、120秒間程度でオールアウトとなるようなクロール泳を行い、有酸素系のエネルギーの貢献度を求めた結果、有酸素系のエネルギーの貢献度は、それぞれ30%、48%、64%であったと報告している。

理論的な計算によって、無酸素系と有酸素系のエネルギーの貢献度を求めた研究としては、次のようなものがある。AstrandとRodahl(1970)は、10秒間、60秒間、120秒間、240秒間でオールアウトとなるような運動における有酸素系のエネルギーの貢献度が、それぞれ15%、30~35%、50%、70%程度であると予想している。しかし彼ら自身、この計算値には、個人差も含めてかなりの幅があることを認めている。GollnickとHermansen(1973)は、同様の計算により10秒間、60秒間、120秒間、300秒間でオールアウトとなるような運動における有酸素系のエネルギーの貢献度が、それぞれ17%、40%、60%、80%であると予想している。

この他、Wilkie(1960)やKeul(1973)も、さまざまな時間で最大の運動を行ったときに利用された全エネルギーに対する無酸素系と有酸素系のエネルギーの貢献度を示した概念図を提示している。しかしいずれの研究においても、試算の根拠は示されていない。

以上の先行研究を比較検討するとわかるように、無酸素系のエネルギーを正確に定量するための計算方法が存在しないこと、そのため無酸素系のエネルギー供給量を求める際に研究者によって異なる計算方法が用いられていること、また被検者や運動内容も異なること、などの理由により、たとえ同じ運動時間であっても、無酸素系と有酸素系のエネルギーの貢献度の値には研究によって大きな幅がみられる。HillとSmith(1992)はこのような点について検討し、30秒間の最大努力の自転車エルゴメーター運動における有酸素エネルギーの貢献度が、試算方法の違いによって14~29%と2倍程度も変わることを指摘している。

エネルギー系をATP-CP系、乳酸系、有酸素系の3つに分けて考えた場合には、運動時間が短ければATP-CP系、長いときには有酸素系、またそれらの中間の場合には乳酸系の貢献度が大きくなるのが、①に示した検討結果から予想される。しかしこのような点を究明した先行研究はみられない。いくつかの運動生理学のテキストには、運動時間に対する3種類のエネルギー系の貢献度を示した概念図が描かれている (EdingtonとEdgerton: 1976, Howaldら: 1978, Fox: 1979, McArdleら: 1981)。しかしこれらの図が描かれる基となった具体的な資料は示されておらず、概念性の強い図であると考えられる。

b. 運動成績とエネルギー供給能力との関わりをみた研究

ある運動を行ったときの運動成績は、その時に主として利用されているエネルギー系のエネルギー供給能力の影響を受けると考えられる。a. で紹介した研究結果を考慮すると、運動時間が短い場合には無酸素系のエネルギー供給能力が、また、長い場合には有酸素系のエネルギー供給能力が運動成績に関連することが予想される。ここでは、高強度の運動を持続した時の運動成績に対して、両エネルギー系の能力がそれぞれどのように関わるかということを検討した先行研究を概観する。

このような研究においても、a. と同様、①運動時間の経過にともなう筋出力の変化に注目し、何秒目までは無酸素系、また何秒目以後になると有酸素系のエネルギー供給能力が筋出力の大きさに関連するかをみた研究 (時刻 (time) と関連づけた研究)、②運動の開始から終了までになされた総仕事量に注目し、何秒間以内の運動ならば無酸素系、また何秒間以上になると有酸素系のエネルギー供給能力が総仕事量の大きさに関連するかをみた研究 (時間 (duration) と関連づけた研究)、の2つのタイプがある。以下、①と②に分けて紹介する。

①時刻 (time) と関連づけた研究

Royce (1958) は、前腕を阻血し、酸素の供給を停止させた状態で最大努力の把握運動を行うと、50秒目以後の筋出力が対照条件に比べて低値を示すようになると報告している。

またWilesら (1981) は、各種の筋病患者を対象とし、阻血した状態で母指内転筋に電気刺激を加えて筋収縮を持続させたときの筋出力の低下様相を、正常人のものと比較している。その結果、無酸素系のエネルギー代謝経路の酵素 (フォスホリラーゼ、フォスホフルクトキナーゼ) の活性に欠陥のある患者では、正常人に比べて作業の開始直後から筋出力が顕著に低下し続けることを示している。また有酸素系のエネルギー代謝が行われる場であるミトコンドリアに欠陥がある患者では、正常人のものに比べ、作業開始から約60秒目まではほぼ同じ筋出力を發揮できるが、そ

れ以後は作業を持続できず疲労困憊に達することを示している。

RoyceやWilesらの研究は、作業開始から約50~60秒目までの運動成績には主として無酸素系のエネルギー供給能力が関わり、それ以後では有酸素系のエネルギー供給が関わることを示唆している。

また、KomiとTesch (1979), Thorstenssonら (1976) は、最大努力で片脚の膝関節伸展運動を行った時の、筋出力と脚の筋線維組成との関係について調べている。その結果、速筋線維 (FT線維) の割合の多いものでは、作業初期の筋出力は相対的に高値を示すが後期の筋出力は相対的に低値を示すこと、また遅筋線維 (ST線維) の多いものではこれと正反対の筋出力特性を示すことを報告している。両者の筋出力の低下曲線が交差する時刻は、運動の開始からおよそ30秒後としている。FT線維は無酸素系、ST線維は有酸素系のエネルギー供給能力に優れていることが報告されているので (Essénら: 1975, SaltinとGollnick: 1983, Thorstenssonら: 1977), この結果は、運動の開始から30秒までの運動成績には無酸素系のエネルギー供給能力との関わりが強く、それ以後になると有酸素系のエネルギー供給能力との関わりが強くなると解釈してよいかもしれない。

根本ら (1988) は、最大努力で片脚の膝関節伸展運動を50回行ったとき、 $\dot{V}O_2\max$ が高い被検者群では30回 (60秒) 以後、筋出力が有意に高値を示したことを報告している。

Ivyら (1982) は、最大努力で片脚の膝関節伸展運動を45秒間行ったときの筋出力の発揮を、運動初期に出現するピーク値を100%として5秒ごとにパーセンテージで表し、この値に対して $\dot{V}O_2\max$ や筋の酸化能力 ($\dot{Q}O_2\max$) といった有酸素系のエネルギー供給能力が示す相関を観察している。その結果、運動の開始から40~45秒後の時点になると、筋出力に対して $\dot{V}O_2\max$ や $\dot{Q}O_2\max$ が有意な正の相関関係を示すようになることを報告している。

また、McArtneyら (1983) は、自転車エルゴメーターの最大努力運動を30秒間行ったとき、筋出力の低下率 (初期値に対する終末値の低下率) が、 $\dot{V}O_2\max$ の大きな被検者ほど小さいことを示している。

根本ら、Ivyら、McArtneyらの研究結果は、有酸素系のエネルギー供給能力に優れるものほど、高強度の運動の持続時に高い運動成績を発揮できることを示唆している。ただし、IvyらとMcArtneyらの研究に関しては、初期値も終末値も高い被検者 (運動成績に優れる者) と、初期値も終末値も低い被検者 (運動成績に劣る者) とに同一の評価を与えてしまう可能性があるという欠点がある。この方法は、筋出力の初期値に被検者間で差がない場合にのみ有効であって、初期値が異なる被検者を対象とする場合には適切な方法とはいえなくなることに注意する必要がある。

②時間 (duration) と関連づけた研究

RibislとKachadorian (1969), およびBergとKeul (1984) は, 400m以下の全力走の成績には $\dot{V}O_2\max$ は有意な相関を示さず, 800m以上になると有意な相関を示すことを報告している. また, 高地 (低酸素環境) で走競技を行うと, 400m走以下の種目では記録の低下は起こらないが, 800m走以上の種目では低下が起こると報告されている (Wardら, 1995). これらのことは, 400m走 (1分間以内の運動) の運動成績には有酸素系のエネルギー供給能力はあまり関連しないが, 800m走 (2分間程度の運動) になると関連するようになることを示唆している.

小林と天野 (1985) は, 自転車エルゴメーターを用いてさまざまな運動強度で固定負荷運動を行ったとき, 運動時間が2分間以下のときには短距離走選手, 2分以上のときには長距離走選手が, それぞれより大きな総仕事量を発揮できたことを示している. 短距離走選手は無酸素系, 長距離走選手は有酸素系のエネルギー供給能力に優れていることを考えると (Fox, 1979), この結果は2分間以内の運動の成績は無酸素系の能力との関わりが強く, 2分以上の運動の成績は有酸素系の能力との関わりが強くなることを示唆すると考えられる.

短時間の高強度の運動を行った際の運動成績について, 有酸素系のエネルギー供給能力との関連をみた研究には以下のようなものがある.

Kaczkowskiら (1982) は, 自転車エルゴメーターを用いて30秒間の最大努力運動を行ったとき, 総仕事量と $\dot{V}O_2\max$ とは有意な相関を示さなかったことを報告している. 藤瀬ら (1990) は, 自転車エルゴメーターを用いて45秒間の最大努力運動を行ったとき, 運動中の酸素摂取量の大きい者の方が, 総仕事量も大きくなる傾向があると報告している. ただし, その傾向には被検者の特性によって差がみられ, 短距離走選手においてその傾向が最も顕著になるとしている. 山川 (1972) は, 1000mの自転車の全力走 (70~80秒間程度) の成績に, $\dot{V}O_2\max$ が有意な相関を示すことを報告している. 一方, KatchとWeltman (1979) は, 自転車エルゴメーターを用いて120秒間の最大努力運動を行ったとき, 仕事量と $\dot{V}O_2\max$ とが有意な相関を示さなかったことを報告している.

また, Heigenhauserら (1982) は, 被検者に高濃度の酸素を吸入させた状態で (すなわち有酸素系のエネルギー供給能力を増加させた状態で) 自転車エルゴメーターの最大努力運動を低速と高速の2条件で30秒間行わせたとき, 低速の運動においては総仕事量が対照条件に比べて大きくなる傾向がみられたと報告している. 一方, McLellanら (1990) によると, 被検者に低濃度の酸素を吸入させた状態で (すなわち有酸素系のエネルギー供給能力を低下させた状態で) 30秒間と45秒間の自転車エルゴメーターの最大努力運動を行わせたとき, 総仕事量は対照条件と変わらなかったと報告している.

これらの研究結果をみてもわかるように、30秒～120秒の最大努力運動時における運動成績が、有酸素系のエネルギーの供給能力と関連するかどうかということは、研究間で一致していない。

短時間の高強度の運動を行った際の運動成績と、無酸素系のエネルギー供給能力との関係をみた研究には以下のようなものがある。

生田と猪飼(1973)は、自転車エルゴメーターを用いた最大努力運動において、60秒間以下の運動の場合には O_2 debtや血中のLaが高値を示すものほど運動成績も大きくなるが、60秒間以上の運動になるとこのような関係はみられなくなことを指摘している。黒田ら(1969)は、100m～3000mまでの8種類の距離を全力で走ったときの成績に対する O_2 debtおよび血中のLaとの関係について検討し、400m以下の走成績に対して O_2 debtやLaが正の相関関係を示すことを報告している。Godikh(1980)は、 O_2 debtは400m走の成績とは高い相関関係($r=0.724$)を示すが、10000m走の成績とは低い相関関係($r=0.216$)しか示さないことを報告している。

青木ら(1974)は、100m走の成績は O_2 debtとは有意な相関関係を示すが、血中のLaとは有意な相関関係を示さないことを指摘している。一方、Fujitsukaら(1982)は、100～400m走の成績が血中のLaと有意な相関関係($r=-0.65\sim-0.79$)を示すこと、またその相関は400m走において最も高くなることを報告している。

SzögyとCherebetiu(1974)は、 O_2 deficitと1分間の最大運動時の仕事量との間に有意な相関関係がみられることを報告している。また、Inbarら(1981)は30秒間の自転車エルゴメーターの最大努力運動を行ったとき、KatchとWeltman(1979)は120秒間の自転車エルゴメーターの最大努力運動を行ったとき、それぞれ運動成績が最大無酸素性パワー(ATP-CP系の能力)と有意な相関関係を示したことを報告している。

以上のことをまとめると、①、②いずれの観点からみた研究においても、高強度の運動を持続する際の運動成績には、持続時間が短ければ無酸素系の能力、持続時間がある程度長くなると有酸素系の能力が関連するという点では一致している。しかし、運動成績に無酸素系や有酸素系の能力が関連する時刻や時間は、研究間で必ずしも一致していない。この理由は、運動の内容(運動に参加する筋の種類や数、筋の収縮・弛緩のスピードやピッチなど)や、被検者の特性(一般人かスポーツ選手か、またスポーツ選手の中でも種目による特性がある)などが研究間で大きく異なっているためと考えられる。

B. 間欠的運動に関する研究

a. エネルギー供給の状況を捉えようとした研究

間欠的運動に関する研究は、連続的運動に関する研究に比べると少ない。

間欠的運動に関する研究が始まったのは1960年代である (Christensenら: 1960, Åstrandら: 1960, Margariaら: 1969)。それら初期の一連の研究によって、休みなしに持続すれば短時間でオールアウトに至るような高強度の運動においても、適当な休息をはさんで間欠的に行えば、疲労せずに長時間の持続が可能になることが明らかにされた。その理由について、Christensenら (1960), Åstrandら (1960), Essénら (1979) は、休息期に酸素ストアが回復して次の運動期に有酸素系のエネルギー供給を大きくできるため、という説明を与えた。一方Margariaら (1969) は、休息期にATP-CP系のエネルギーを回復させ、次の運動期に再利用できるため、という説明を与えている。

間欠的運動のエネルギー供給について検討した先行研究 (Christensenら: 1960, Åstrandら: 1960, Margariaら: 1969, Foxら: 1969, Edwardsら: 1973, Essénら: 1977, Gaitanosら: 1993, Bangsbo: 1994) はいずれも、間欠的運動においては無酸素系、有酸素系の両方のエネルギーが利用されることを指摘している。ただし、両エネルギー系の貢献度が一樣に重要というわけではなく、相対的に重要なエネルギー系とそうでない系とがあることを指摘している。

Foxら (1969) は、高強度の連続的運動と間欠的運動とを比較し、間欠的運動においては、有酸素系の貢献度は連続的運動とほぼ同じだが、ATP-CP系の貢献度はより重要となること、反対に、乳酸系の貢献度はより重要でなくなることを指摘している。これと同様のことは、他の研究者によっても指摘されている。たとえばChristensenら (1960), Åstrandら (1960), Margariaら (1969) は、同じ強度で運動を行う場合、間欠的運動の方が連続的運動に比べて乳酸の蓄積が小さくなることを報告している。

Gaitanosら (1993) は、高強度の間欠的運動を行ったとき、運動の開始時にはATP-CP系と乳酸系が主たるエネルギー供給を行うが、運動が繰り返されるにつれて乳酸系の貢献度は小さくなり、最終的にはATP-CP系と有酸素系が主たるエネルギーを供給するようになることを指摘している。同様のことは、Sprietら (1989) によっても指摘されている。

Margariaら (1969) も、運動の初期には主としてATP-CP系のエネルギーの貢献度が大きい、運動が繰り返されるにつれ、ATP-CP系と有酸素系のエネルギーの貢献度が大きくなると指摘している。なおMargariaらは、ATP-CP系はエネルギー容量が非常に小さいにもかかわらず (表1参照)、間欠的運動においてその貢献度が大き

くなる理由について、休息期にATP-CP系のエネルギーの一部が有酸素系のエネルギーによって回復させられ、次の運動期に再利用されるからであると指摘している。なお、間欠的運動の休息期にATP-CP系のエネルギーが回復するという点については、バイオプシー法 (Saltinら, 1971) やNMR法 (Bangsbo, 1994) によって実際に確認されている。

以上の先行研究を総合すると、間欠的運動においては、無酸素系と有酸素系のエネルギーのいずれもが利用されるが、無酸素系の中ではATP-CP系のエネルギーの貢献度が大きく、乳酸系の貢献度は小さいといえることができる。

b. 運動成績とエネルギー供給能力との関わりをみた研究

a. で述べたことを考慮すると、間欠的運動における運動成績には、無酸素系（特にATP-CP系）と有酸素系の能力のいずれもが関与することが予想される。しかし、間欠的運動の運動成績に対して、無酸素系、有酸素系のエネルギー供給能力がどのように関わるかを検討した研究はほとんどない。

I-3. 本研究の目的

研究小史で概観してきたことをまとめると、高強度の運動を持続する際に、無酸素系、有酸素系のエネルギーがともに重要な関わりをもつことについては明らかである。しかしその具体的な関わり方については、現在でも不明な点が多く残されているといえる。

その理由として、以下のような多くの理由があげられる。すなわち、①無酸素系のエネルギーを定量的に捉える的確な指標が確立されていない、②無酸素系のエネルギーの働きを捉える指標が研究者によってまちまちである、③無酸素系と有酸素系のエネルギーの関わりを同時に捉えようとした研究が少ない、④扱っている運動時間が1種類もしくは断片的である、⑤被検者の特性が研究間で異なっている、⑥運動様式が研究間で異なっている、などである。

したがって、これまでに行われた研究を総合しても、そこから高強度の運動の持続時における無酸素系、有酸素系エネルギーの関わりを、統一的に把握することは難しいといえる。

今後、この分野の研究を進めていくためには、上記のような欠点を補った上で、少なくとも次の3つの観点から検討を行うことが必要と考えられる。

1) 高強度の運動を持続した際の無酸素系、有酸素系のエネルギー供給の状況を、現在用いられている指標の有効性の範囲内で捉える

無酸素系および有酸素系のエネルギー供給を捉えるために現在用いられている指標は、いずれもエネルギーを定量的に捉える指標としては欠点がある。特に無酸素系の指標に関してはその性格が強い、しかし、これらの指標を、エネルギー供給が行われているかどうかをみるための定性的な指標として用いることや、エネルギー供給量の大きさを相対的に評価する指標として用いることについては、可能である (Vandewalleら: 1987, Saltin: 1990, 山本: 1989)。したがって、これらの指標をその有効性の範囲内で活用すれば、エネルギー供給の状況を知るための手がかりが得られると考えられる。

2) 高強度の運動を持続した際の運動成績に対して、無酸素系、有酸素系のエネルギー供給能力がそれぞれどのような関連をもつかを明らかにする

ある作業を行ったときの運動成績は、そのときに主として利用されているエネルギー系のエネルギー供給能力の影響を受けると考えられる。したがって、高強度の運動を持続した際の運動成績に対して、無酸素系、有酸素系のエネルギー供給能力

がどのような関連を示すかを観察することによって、どのエネルギー系が利用されているかを間接的に捉えることができると考えられる。

3) 高強度の運動を持続した際の運動成績のスポーツ種目特性を明らかにする

スポーツの種目によって、無酸素系と有酸素系の必要度は異なる。したがって、あるスポーツ種目を専門に行っている選手では、そのスポーツ種目の特性に応じて、無酸素系あるいは有酸素系の能力が特異的に発達したり、場合によっては両方の能力がいずれも発達したりすると考えられる。これらのスポーツ選手が高強度の運動を持続したときの運動成績の特性を観察することにより、高強度の運動を持続した際に、両エネルギー系がどのように関わっているかを、間接的に捉えることができると考えられる。

本研究では、連続的運動と間欠的運動という2種類のタイプの運動を対象として、上記の1), 2), 3) について検討し、高強度の運動の持続時における無酸素系と有酸素系のエネルギーの関わりを明らかにすることを目的とするものである。

I-4. 本論文で用いた用語の説明

エネルギー系 (energy system)

筋が活動するためのエネルギーを供給する代謝経路。人間の筋は、複数のエネルギー系を備えている。それらは、酸素を利用してエネルギーを生み出す有酸素系と、酸素なしでエネルギーを生み出す無酸素系とに大別される。なお、無酸素系はATP-CP系と乳酸系の2種類の構成成分をもつ。したがって、人間の筋は全部で3種類のエネルギー系を備えていることになる。(表1参照)

無酸素系 (anaerobic system)

筋中のエネルギー物質を酸素を使わずに分解し、筋活動のエネルギーを生み出す代謝経路。ATP-CP系と乳酸系の2種類の成分がある。有酸素系に比べて、相対的にパワーは高いが、容量は小さい。(表1参照)

ATP-CP系 (ATP-CP system)

無酸素系の構成成分の一つ。筋中に存在するクレアチン燐酸 (CP) と呼ばれる化学物質を分解して筋活動のエネルギーを生み出す。3種類のエネルギー系の中で、パワーは最も高いが、容量は最も小さい。(表1参照)

乳酸系 (lactic acid system)

無酸素系の構成成分の一つ。食物栄養素のうちの炭水化物を乳酸に分解して筋活動のエネルギーを生み出す。パワーも容量も、ATP-CP系と有酸素系の中間に位置する。(表1参照)

有酸素系 (aerobic system)

筋中で、食物栄養素のうちの炭水化物と脂肪を、酸素を用いて酸化させてエネルギーを生み出す代謝経路。3種類のエネルギー系の中で、パワーは最も小さいが、容量は最も大きい。(表1参照)

無酸素性運動 (anaerobic exercise)

運動で使われる全エネルギーに対して、無酸素系のエネルギー供給量の占める割合の大きな運動。短距離の競走、競泳など、短時間で行われる高強度の運動がこれに該当する。

有酸素性運動 (aerobic exercise)

運動で使われる全エネルギーに対して、有酸素系のエネルギー供給量の占める割合の大きな運動。長距離の競走、競泳など、長時間にわたって持続する低強度の運動がこれに該当する。

無酸素・有酸素混合運動 (anaerobic-aerobic combined exercise)

運動で使われる全エネルギーに対して、無酸素系、有酸素系のエネルギーのいずれもある程度の貢献度をもつような運動。高強度の運動を継続する運動がこれに該当する。連続的な運動様式をもつスポーツでは中距離の競走、競泳など、また、間欠的な運動様式をもつスポーツにおいてはほとんどの種目がこの運動に該当する。

高強度運動 (high intensity exercise)

強度の低い固定負荷運動を継続すると、運動の開始時には無酸素系のエネルギーが利用されるが、やがて有酸素系が全てのエネルギーを供給するようになる (図3-a 参照)。一方、強度の高い固定負荷運動を継続すると、運動の後半になっても無酸素系のエネルギーが利用され続ける (図3-b 参照)。この運動強度の境界となっているのが無酸素性作業閾値 (AT) である。本研究では、ATを超えるような強度の運動を高強度運動と呼ぶ。

連続的運動 (continuous exercise)

競走、競泳、スピードスケート競技などにみられるような、規則的な運動を休息なしに持続するようなタイプの運動をさす。(図23-a 参照)

間欠的運動 (intermittent exercise)

球技、格闘技、格技、採点競技などにみられるような、短時間の高強度の運動を休息あるいはそれに近い状態をはさんで反復するようなタイプの運動をさす。(図23-b 参照)

酸素摂取量 (O_2 intake, $\dot{V}O_2$)

運動中に身体の中に取り込まれた酸素の量 (図7 参照)。運動中、活動筋が利用した有酸素系のエネルギー量を表す指標として、現在広く利用されている。しかし厳密にいうと、運動中に身体の中に取り込まれた酸素の量と、運動中に活動筋が利用した酸素の量とはかならずしも一致しない。本研究では、原則として O_2 intake という記号を多く用いたが、単位時間当たり (主として1分間当たり) の酸素摂取量という意味を強調する場合には $\dot{V}O_2$ という記号も用いた。

酸素負債量 (O_2 debt)

運動中に増加した酸素摂取量は、運動の終了後に直ちに安静レベルには戻らず、しばらくの間、安静値に対して過剰な酸素摂取量が観察される。この酸素摂取量のことを酸素負債量と呼ぶ(図7参照)。酸素負債量は初め、運動中に用いられた無酸素系のエネルギーを運動前の状態に戻すためのエネルギーとして用いられると考えられ、無酸素系のエネルギーを定量する指標として用いられた。しかし、実際にはそれ以外のエネルギーも含んでいるため、運動中に用いられた無酸素系のエネルギーを過大評価してしまうことが指摘されている。ただし、運動中に用いられた無酸素系のエネルギー量を、絶対量としてではなく、相対量として捉えることについては可能であると考えられている。

酸素借 (O_2 deficit)

ある運動で使われた全エネルギーのうち、有酸素系のエネルギーでまかなえなかった分のエネルギー量(すなわち無酸素系によるエネルギー供給量)を、そのエネルギーを生み出すのに相当する酸素の量で表した値(図7参照)。有酸素性運動の効率と無酸素性運動の効率が同じであるという仮定のもとに運動中の酸素需要量を算出し、これから運動中の酸素摂取量を引いて求める。しかし実際には、無酸素性運動の効率は有酸素性運動の効率よりも低いため、酸素借を用いると無酸素系のエネルギー供給量を過小評価してしまう。酸素負債量と同じく、運動中に用いられた無酸素系のエネルギーの量を、絶対量としてではなく、相対量として捉える指標と考えるべきであるとされている。

酸素需要量 (O_2 requirement)

ある運動において必要な全エネルギー(無酸素系と有酸素系のエネルギーの和)を、そのエネルギーを生み出すのに相当する酸素の量で表した値、酸素借と酸素摂取量の和で表される。(図7参照)

ピーク血中乳酸濃度 (PeakLa)

運動中、乳酸系のエネルギーを利用すると筋で乳酸が発生し、それは次第に血中にも拡散する。筋で多量の乳酸が発生したときには、拡散に時間がかかるので、運動後に血中乳酸濃度を観察すると、直後ではなく数分後にピーク値が出現する。この値をピーク血中乳酸濃度と呼ぶ。この値は、運動中に用いられた乳酸系のエネルギーを、相対量として表す指標とされている。

最大無酸素性パワー (Pmax)

数秒間程度の運動を最大努力で行ったときに発揮された機械的パワーの最大値。このような運動では主としてATP-CP系のエネルギーが利用されるので、機械的なパワーの大きさから、ATP-CP系のエネルギー供給能力を間接的に評価できるとされている。

最大血中乳酸濃度 (Lamax)

1～2分間程度の激しい運動を行うと、運動後のピーク血中乳酸濃度の値は頭打ちとなり、それ以上増加しなくなる。この値を最大血中乳酸濃度と呼ぶ。この値は、乳酸系のエネルギー供給能力を表す指標として利用できるとされている。

最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$)

数分間程度の激しい運動を行ったとき、酸素摂取量の増加は頭打ちとなり、それ以上増加しなくなる。この時の酸素摂取量を1分間当りの値で表した値を最大酸素摂取量と呼ぶ。この値は、有酸素系のエネルギー供給能力を表す最も優れた指標とされている。

時間 (time, duration)

運動の「時間」という場合、運動の開始からある時刻までに経過した時間の長さ (duration) をさす場合と、瞬時としての時刻 (time) をさす場合とがある。本研究ではこの2つを区別する必要があるため、必要に応じて注記を加えることとした。

II . 連續的運動

連続的運動 (continuous exercise) とは、規則的な運動を休息なしに持続するような運動様式とする。スポーツの種目でいえば、走競技、競泳、スピードスケート競技、ボート競技、自転車競技などがこの運動に該当する。

連続的運動の場合、運動時間が十分に短かければ無酸素系が主たるエネルギーを供給し、反対に運動時間が十分に長ければ有酸素系が主たるエネルギーを供給するという点については、これまでの研究で明らかである (I-2. 参照)。

一方、運動時間が両者の中間である場合には、無酸素系と有酸素系のエネルギーがいずれも関与すると考えられる。しかし、運動時間の長短によって、両エネルギー系の貢献度がどのように違うのかということや、運動成績に対する両エネルギー系のエネルギー供給能力の関連がどのように変わるかということについては、不明な点が多い。

そこで本研究では、自転車エルゴメーターを用いて、最大努力で連続的な運動を行った際の各エネルギー系の関わりについて、以下の3つの実験により明らかにしようとした。

- II-1. 連続的な運動を最大努力で行った際のエネルギー供給
- II-2. 連続的な運動を最大努力で行った際の運動成績とエネルギー供給能力との関係
- II-3. 連続的な運動を最大努力で行った際の運動成績の競技種目特性

II-1. 連続的な運動を最大努力で行った際のエネルギー供給

1) 研究目的

自転車エルゴメーターを用いて120秒間連続の最大努力運動を行ったとき、無酸素系と有酸素系によるエネルギーの供給が、運動時間の経過にともなってどのように変化するかを検討することとした。

有酸素系によるエネルギー供給の状況は、運動中の酸素摂取量 (O_2 intake) を指標として捉えることとした。また無酸素系によるエネルギー供給の状況は、酸素負債量 (O_2 debt) および酸素借 (O_2 deficit) の2種類の指標を用いて捉えることとした。さらに、無酸素系の構成成分であるATP-CP系と乳酸系のうち、乳酸系によるエネルギー供給について、運動後のピーク血中乳酸濃度 (PeakLa) を指標として捉えることとした。

I-2. で述べたように、これらの指標から各エネルギー系によるエネルギー供給量を「定量的」に捉えることは難しい。しかし、エネルギー供給量の大きさを相対的に評価する指標、あるいはエネルギーが供給されているかどうかを判定する指標として利用することは可能と考えられる (Di-Prampo: 1981, Vandewalleら: 1987, 山本: 1989, Saltin: 1990)。本研究でも後者の立場に立って、これらの指標を利用することとした。なお、運動時間の経過にともなうエネルギー供給量の推移を O_2 debtおよびPeakLaを指標として観察する場合、1回の運動から連続的に観察することは不可能である。そこで、5秒間から120秒間までの7種類の異なる運動時間で最大努力の運動を行い、運動時間の増加にともなう各指標の値の増分を観察することによって、運動時間の経過にともなうエネルギー供給量の推移を推測することとした。

運動時間を120秒間とした理由は以下のとおりである。自転車エルゴメーターを用いた最大努力運動の場合、運動の開始からおよそ60秒を経過すると無酸素系によるエネルギーの供給が終了し、有酸素系のみがエネルギーの供給を行うようになることが先行研究により示唆されている (生田と猪飼: 1973, Withersら: 1991)。したがって、この時間に多少の余裕を見込んで120秒間とした。

2) 研究方法

a. 被検者

被検者は、体育学を専攻する男子大学生8名であった。彼らの年齢、身長、体重の平均値と標準偏差は、それぞれ 20.4 ± 0.8 歳、 171.9 ± 5.1 cm、 65.5 ± 4.5 kgであっ

た。被検者には、研究の目的、方法、測定にともなう苦痛、および危険について説明を行い、実験に参加することについて同意を得た。

b. 自転車エルゴメーターの最大努力ペダリング

自転車エルゴメーター (Type864, Monark社製, Sweden) を用い、5, 15, 30, 45, 60, 90, 120秒の7種類の運動時間で、最大努力のペダリング運動を行った (図8)。ペダリング時の負荷重量は、被検者の体重の7.5%の重量 (単位: kp) を用いた。この負荷は、Wingate anaerobic test (Ayalonら: 1974, Bar-Or: 1987) において用いられる負荷を踏襲したものである。7種類の運動は、1日に1回づつ、1~3日の間隔をあげ、ランダムな順序で行った。また、測定は各被検者とも午前中の同一時刻 (9時~12時) に行うようにした。

被検者は測定の前2時間以上に食事を済ませ、1時間以上に実験室に入室した。実験室内の温度は19~22度に調節した。被検者に呼気ガス採取用のマスクをつけ、椅子で30分間の安静を保った後、5分間、安静時の呼気ガスをダグラスバッグに採取した。その後、血中乳酸濃度 (La) の分析のために、45℃の恒温浴槽で暖めた手の指先から約70 μ lの血液を採取した。

その後、被検者は自転車エルゴメーターに乗り、指定された時間、最大努力でペ

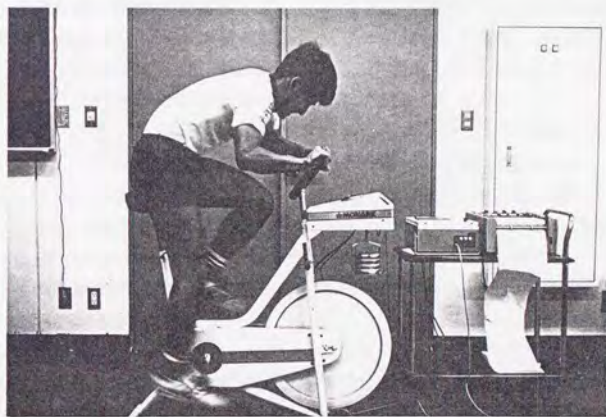


図8. 自転車エルゴメーターの最大努力ペダリング。

ダリング運動を行った。ペダリングを行う際、被検者には、ベース配分をせず、運動の開始から終了まで終始最大努力で行うよう指示した。また、自転車エルゴメーターのサドルの高さは、あらかじめ被検者の最もペダリングしやすい位置に合わせ、運動中はサドルから腰をあげないように指示した。

運動中に発揮された機械的パワーは、以下のように測定した。自転車エルゴメーターの車輪の軸に、車輪が1回転する毎に1回の電気信号が生ずるようなOn-Offスイッチを取り付け、この信号をコンピューター(ATAC-450、日本光電社製)に取り込んでペダリングの速度を算出し、これに負荷重量を掛けることによって機械的パワーを算出した。

O_2 intakeおよび O_2 debtは、ダグラスバッグ法を用いて測定した。 O_2 intakeは、検者による運動開始の合図から終了の合図までの時間内に得られた呼気ガスから分析した。120秒間の運動における呼気の採取は、0~5秒、5~15秒、15~30秒、30~45秒、45~60秒、60~90秒、90~120秒の各時間帯で区切って採取し、運動時間がそれより短い場合もこれと同じ区切り方で採取した。 O_2 debtは、検者による運動終了の合図から30分間、被検者を椅座位の姿勢で安静を保たせ、このときに得られた呼気ガスから分析した。

ダグラスバッグに採取された呼気ガス中の酸素(O_2)と二酸化炭素(CO_2)の濃度は、 O_2 、 CO_2 の標準ガスを用いて校正したガス分析器(1H21B、日本電気三栄社製)を用いて分析した。標準ガスの校正は、ショランダー微量ガス分析器を用いて行った。呼気ガスの体積は、気体体積の校正用シリンジを用いて校正した乾式ガス流量計(Max Planck Institute製、Germany)を用いて測定した。なお、 O_2 debt、 O_2 intakeともに、安静値からの増加分をデータとして用いた。

また、運動終了後、1分毎に La の測定のための採血を行った。採血方法は安静時と同じであった。採血の時刻は、運動時間が5秒間と15秒間の場合には1~9分後、30秒間と45秒間の場合には2~10分後、60秒間、90秒間、120秒間の場合には3~10分後に行った。 La の分析は、既成の分析キット(Lactate-UV-Test、Boehringer Mannheim社製、Germany)を用いて行った。そして、分析により得られた La の最高値をピーク血中乳酸濃度(Peak La)とした。Peak La は安静値からの増加分をデータとして用いた。

c. 自転車エルゴメーター運動における仕事率と酸素摂取量の対応関係

O_2 deficitを求めるためには、自転車エルゴメーター運動における仕事率(機械的発揮パワー)と、それに対応する単位時間当りの酸素摂取量($\dot{V}O_2$)との関係を、あらかじめ求めておく必要がある。これを以下の手順で求めた。

自転車エルゴメーター(Type868、Monark社製、Sweden)を用い、ペダリング速度

を50rpmに規定し、まず0.5kpの負荷重量で、5分間の運動を行った。その後1分間の休息をはさみ、次に負荷重量を1.0kpに増加させて同様の運動を行った。このような方法で、各段階毎に負荷を0.5kpずつ増加させ、負荷が4.0kpとなるまで8段階の運動を行った。各段階の運動時の4～5分目の呼気ガスをダグラスバッグに採取して $\dot{V}O_2$ を分析し、これをその時の機械的発揮パワーに対応する $\dot{V}O_2$ とした。そして両者の関係を1次回帰して、個人別に機械的発揮パワーと $\dot{V}O_2$ の関係式を求めた。

この関係式を用いて、HermansenとMedbø (1984) およびMedbøら (1988) の方法に従い、b. において行った自転車エルゴメーターの最大努力ペダリング時における O_2 deficitを求めた。その求め方の概要は以下のとおりである。すなわち、この関係式は、c. において行った最大下運動の領域で成立したものであるが、これがb. において行った超最大運動の領域においても成り立つと仮定する。その上で、この関係式を用いてb. の運動時の機械的発揮パワーからそれに対応する $\dot{V}O_2$ を求め、この $\dot{V}O_2$ に運動時間をかけた値を酸素需要量とした。そして、この酸素需要量から運動中の O_2 intakeを引いた値を O_2 deficitとみなした。

d. 最大酸素摂取量

各被検者の最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) を測定した。自転車エルゴメーター (Type 868, Monark社製, Sweden) を使い、ペダリング速度を60rpmに規定し、運動開始時の負荷を2.0kpとし、1分毎に0.5kpずつ負荷重量を漸増させるような運動を行った。なお、被検者が規定のペダリング速度に追従できなくなってからも、負荷を変えずにさらに1～2分間運動を持続させた。トータルの運動時間は7～10分間であった。

被検者の呼気ガスを1分間毎にダグラスバッグに採取して $\dot{V}O_2$ を分析し、その中の最高値を $\dot{V}O_{2max}$ とした。なお、Taylorら (1955) の示した基準に基づき、全ての被検者でオールアウト時に $\dot{V}O_2$ の増加が頭打ち (レベルオフ) の状態となっていることを確認した。

3) 結果

図9は、7種類の運動時間で自転車エルゴメーターの最大努力ペダリングを行った際に発揮された機械的パワーの推移を、横軸に運動の経過時間をとって5秒ごとに示したものである。運動時間の最も長い120秒間の運動時の発揮パワーに注目すると、はじめの5秒間の値が最も大きく、以後、時間経過にともない低下した。その低下様相は、初めは急速であったが、次第に緩やかとなり、60秒以後になるとほとんど低下しなくなった。また、これよりも運動時間の短い6種類の運動時 (5～90秒間) の発揮パワーについても、120秒間の運動時の発揮パワーの推移とほぼ同じ曲線

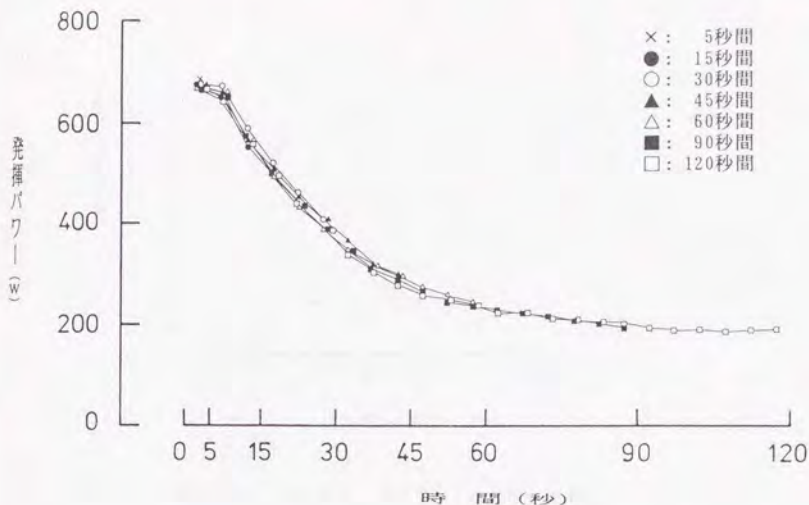


図9. 自転車エルゴメーターを用いて、7種類の異なる運動時間で最大努力のペダリング運動を行った際に発揮された機械的パワーの推移。横軸の時間は時刻 (time) を意味している。

上に重なった。したがって、被検者は検者の指示通り、ペース配分をせずに終始最大努力でペダリングを行ったと判断した。また、被検者の毎回の運動における身体的なコンディションもほぼ同じであったと判断した。

図10は、7種類の運動で得られた O_2 intakeを示したものである。 O_2 intakeは、運動時間が長くなるにしたがって増加した。増加の様相は、初めは緩やかであったが、運動時間が30秒間以上になるとほぼ直線的に増加した。

図11は、7種類の運動で得られた O_2 debtを示したものである。 O_2 debtは、運動時間の延長にともない、はじめは急速に増加したが、運動時間が60秒間以上になると頭打ちとなる傾向を示した。

図12は、 O_2 intakeと O_2 debtとが、120秒間の運動中、経時的にどのように変化するかを示したものである。運動時間の増加にともなうそれぞれの指標の値の増分、すなわち5秒値(-0秒値)、15秒値-5秒値、30秒値-15秒値、・・・、120秒値-90秒値、を順次求め、これらを0~5秒、5~15秒、・・・、90~120秒、の各時間帯における単位時間(1分間)当りの O_2 intakeおよび O_2 debtとして表した。

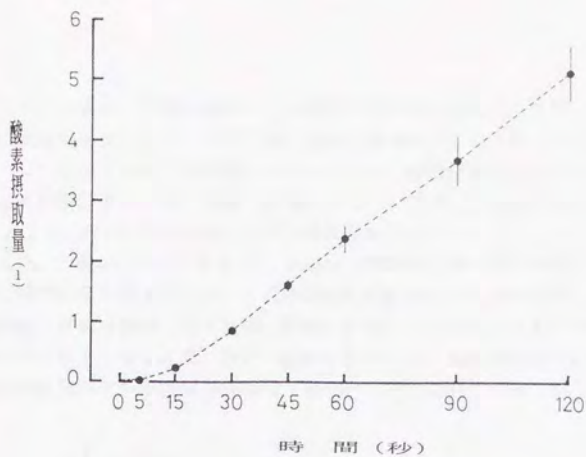


図10. 7種類の異なる運動時間で最大努力のベダリング運動を行った際の、運動時間と酸素摂取量 (O_2 intake) との関係。図中の縦線は標準偏差を表す (以下同様)。横軸の時間は時刻ではなく時間 (duration) を意味する。

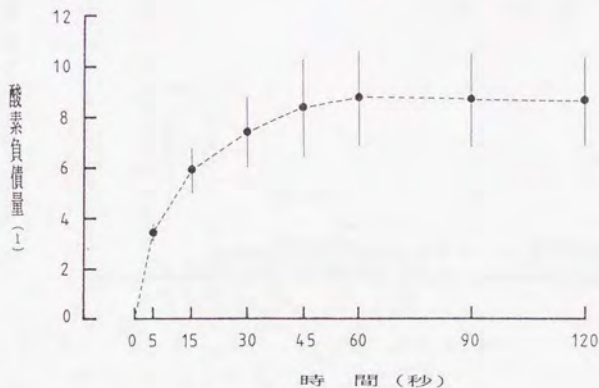


図11. 7種類の異なる運動時間で最大努力のベダリング運動を行った際の、運動時間と酸素負債量 (O_2 debt) との関係。横軸の時間は時刻ではなく時間 (duration) を意味する。

O_2 debtの値は、運動の開始から5秒間の値が最も大きかったが、時間経過にともない急速に小さくなり、60秒以後になるとほぼゼロになった。一方、 O_2 intakeの値は、はじめの5秒間では非常に小さかったが、時間経過にともなって大きくなり、およそ30秒以後になるとほぼ一定値を示した。このときの O_2 intakeは、被検者の $\dot{V}O_{2max}$ (3.69 ± 0.25 l / 分) の80~90%であった。

また、 O_2 debtと O_2 intakeの和、すなわち酸素需要量の値でみると、運動の開始から5秒間の値が最も大きく、その後は時間の経過にともない低下した。その低下の様相は、初めは急速であったが、次第にゆるやかとなり、およそ60秒以後になるとほとんど低下しなくなり、ほぼ一定値を維持した。酸素需要量の経時的な推移は、機械的発揮パワーの経時的な推移(図9)とほぼ同期した変化を示した。

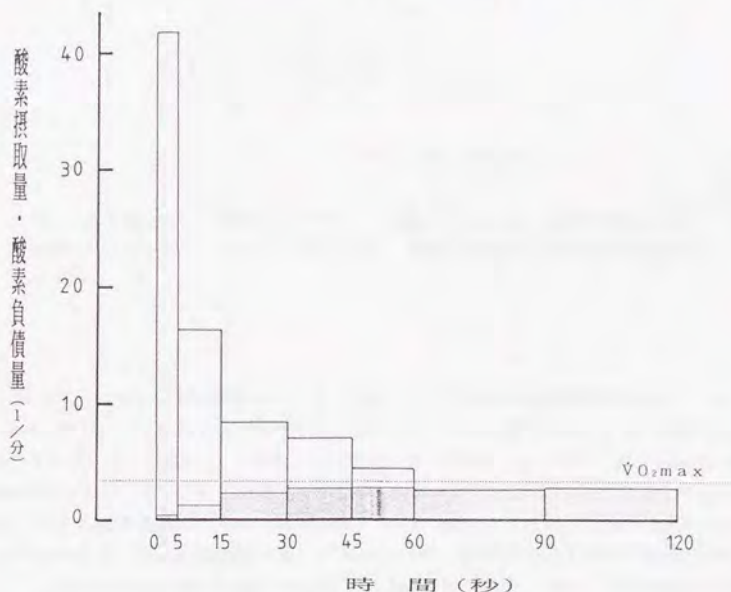


図12. 最大努力で120秒間連続のペダリング運動を行った際の、各時間帯の O_2 intake (影の部分)と O_2 debt (白い部分)。これらの値は、7種類の異なる運動時間で最大努力のペダリング運動を行った際の、運動時間の増加に対する O_2 intakeおよび O_2 debtの増分から求めた。横軸の時間は時刻 (time) を意味している。

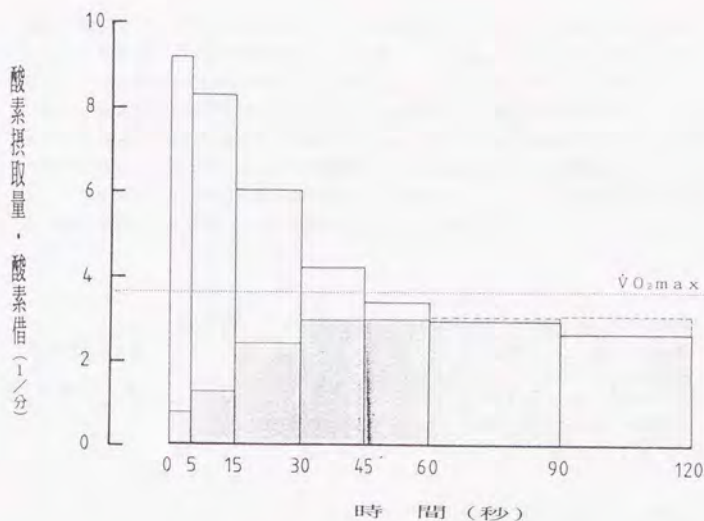


図13. 最大努力で120秒間連続のベダリング運動を行った際の、各時間帯の O_2 intake (影の部分)と O_2 deficit (白い部分). 横軸の時間は時刻 (time) を意味している.

図13は、120秒間の最大努力ベダリングの試行で得られた機械的発揮パワーと O_2 intakeのデータとを用いて、 O_2 deficitと O_2 intakeが経時的にどのように推移するかを、0~5秒、5~15秒、15~30秒、30~45秒、45~60秒、60~90秒、90~120秒の時間帯で区切って示したものである。 O_2 deficitの値は初めの5秒間で最も大きかったが、以後、時間経過にともなって減少し、60秒以後になるとゼロになった。一方 O_2 intakeの値は、初めの5秒間が最も小さかったが、時間経過にともない次第に増加し、30秒以後にはほぼ一定値 ($85\sim 88\% \dot{V}O_{2max}$) を示した。なお、90秒以後になると、計算によって求めた有酸素系のエネルギーによる機械的発揮パワーは、実際に発揮された機械的パワーよりも17%大きくなるという矛盾を生じた。

表2は、図12と図13に示したデータをもとに、120秒間の最大努力ベダリング時において、全エネルギー供給量に占める有酸素エネルギーの貢献度が、運動時間の経過にともなってどのように変化していくかを、2とおりの方法で求めたものである。

表2. 最大努力で120秒間連続のペダリング運動を行った際の、各時間帯におけるエネルギー供給量に占める有酸素系のエネルギーの貢献度。2通りの計算方法で求めた。Aは O_2 debtと O_2 intakeの比から求めた値、Bは O_2 deficitと O_2 intakeの比から求めた値を表す。60~90秒および90~120秒の時間帯では貢献度が100%を超えているが、貢献度が100%を超えることはありえないので、実験誤差と考えられる。特に、Bの計算方法で求めた90~120秒の時間帯における貢献度には大幅な誤差がみられるが、これは O_2 deficitという指標そのものもつ限界によって生じた誤差と考えられる。真の値は、Aの値とBの値の間に存在すると考えられる。

	算出方法	0-5秒	5-15秒	15-30秒	30-45秒	45-60秒	60-90秒	90-120秒
有酸素エネルギー	A	1	8	29	45	70	104	103
の貢献度 (%)	B	9	16	40	71	88	104	117

Aは O_2 debtと O_2 intakeの比から求めた値、Bは O_2 deficitと O_2 intakeの比から求めた値である。A、Bを比べてみると、運動時間の経過にともない有酸素系のエネルギーの貢献度が大きくなっていくという点では共通している。しかし、有酸素系のエネルギーの貢献度は、Bの方法で求めた値の方が、Aの方法で求めた値よりも常に高値を示した。

図14は、7種類の運動で得られたPeakLaの値を、横軸に運動時間をとって示したものである。各運動後のPeakLaは、5秒間、15秒間、30秒間、45秒間、60秒間、90秒間、120秒間の運動でそれぞれ2~6分後、3~7分後、6~8分後、4~7分後、5~8分後、5~10分後、4~10分後に出現し、運動時間が長くなるほど出現時刻が遅くなる傾向を示した。運動時間の増加にともなうPeakLaの増加は、 O_2 debtの増加（図11）と同様、初めは急速であったが、運動時間が60秒間以上になるとほぼ頭打ちとなった。

図15は、図12と同様の方法を用いて、運動時間の増加に伴うPeakLaの増分から、各時間帯における単位時間当りのPeakLaの増加量を求めたものである。PeakLaの増加は、5~15秒の時間帯が最も大きく、その後は、時間経過にともない急速に低下し、60秒以後ではほぼゼロに近くなった。

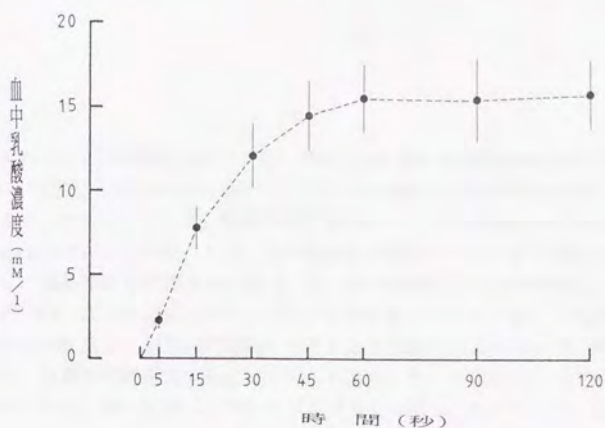


図14. 7種類の異なる運動時間で最大努力のベダリング運動を行った際の、運動時間とピーク血中乳酸濃度 (PeakLa) との関係. 横軸の時間は時刻ではなく時間 (duration) を意味する.

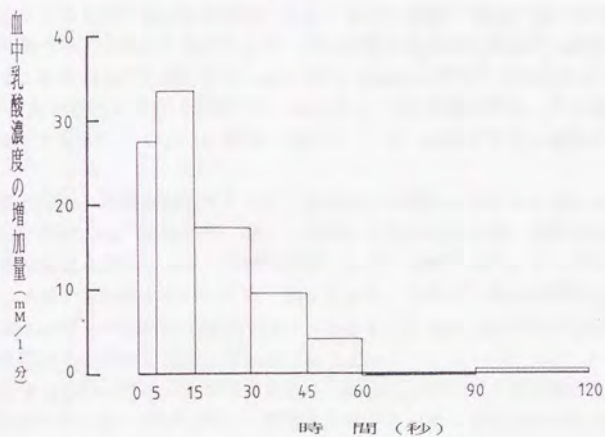


図15. 最大努力で120秒間連続のベダリング運動を行った際の、各時間帯でのピーク血中乳酸濃度 (PeakLa) の増加量. これらの値は、7種類の異なる運動時間で最大努力のベダリング運動を行った際の、運動時間の増加にともなうPeakLaの増分より求めた. 横軸の時間は時刻 (time) を意味する.

4) 考察

最大努力で120秒間連続のペダリングを行った際の無酸素系のエネルギー供給は、 $O_2\text{debt}$ (図12), $O_2\text{deficit}$ (図13) いずれを指標としてみた場合にも、運動の初期で最も大きかった。そして、運動時間の経過とともに急速に小さくなり、60秒以後にはほぼゼロとなった。一方、 $O_2\text{intake}$ を指標としてみた有酸素系のエネルギー供給は、運動初期では最も小さかったが、時間経過とともに増加し、30秒以後になると $\dot{V}O_2\text{max}$ の80~90%のレベルでほぼ定常状態となった (図12, 図13)。

これらの結果は、運動の開始時には主として無酸素系のエネルギーが用いられているが、運動時間が経過するにしたがってエネルギーを供給する系が無酸素系から有酸素系へと次第に転換し、60秒以後になると無酸素系のエネルギー供給はほぼ終了し、有酸素系のみエネルギー供給によって運動が行われるようになることを示唆するものである。

自転車エルゴメーターの最大努力運動を用いて、無酸素系と有酸素系によるエネルギー供給の経時的な推移を観察した先行研究をみると、Withersら (1991) が、30, 60, 90秒間の最大努力運動を行わせたと、60秒以後、 $O_2\text{deficit}$ とLaの増加が頭打ちとなりCPの低下も停止すること、また30秒以降になると、 $\dot{V}O_2$ は $\dot{V}O_2\text{max}$ の90%以上のレベルに達することを示している。生田と猪飼 (1973) は、5秒間から90秒間までの最大努力運動を行わせたと、約60秒後になると $O_2\text{debt}$ やLaの増加が頭打ちとなることを示している。また、KatchとWeltman (1979), Seresseら (1988) は、 $\dot{V}O_2$ が運動の開始から30秒程度で $\dot{V}O_2\text{max}$ の80~100%程度に達し、その後は定常状態となることを示している。本研究の結果は、これらの先行研究の結果とよく一致した。

本研究では、無酸素系のエネルギー供給量の指標として $O_2\text{debt}$ と $O_2\text{deficit}$ の2つを用いて検討した。その結果 (図12, 図13) を比べてみると、運動開始から約60秒で無酸素系によるエネルギーの供給が終了して、有酸素系によるエネルギー供給が主体の運動となることについては一致していた。しかし、各時間帯における有酸素系のエネルギーの貢献度を数値で比べてみると、 $O_2\text{deficit}$ を用いた場合と $O_2\text{debt}$ を用いた場合とで大きく異なっていた (表2)。

この理由として次のことが考えられる。 $O_2\text{debt}$ はATP-CP系と乳酸系をあわせた無酸素系のエネルギーだけでなく、体温の上昇やホルモンの分泌などによる代謝量の増加によるエネルギーも含んでいるため、実際の無酸素系からのエネルギー供給量をかなり過大評価すると指摘されている (ÅstrandとRodahl: 1970, Keulら: 1972, GaesserとBrooks: 1984, GreenとDawson: 1993)。ÅstrandとRodahlはその過大評価の程度が2倍以上、GreenとDawson (1993) は1.5~2倍であると見積っている。したがって、 $O_2\text{debt}$ と $O_2\text{intake}$ の割合から求めた有酸素系のエネルギーの貢献度は、実

際の貢献度よりもかなり過小評価されていると考えられる。また、60~90秒および90~120秒の時間帯では貢献度が100%をわずかに超えているが、貢献度が100%を超えることはありえないので、実験誤差と考えられる。

一方、 O_2 deficitを用いた場合についても次のような問題点がある。すなわち、 O_2 deficitを求める際、最大下運動と超最大運動の機械的効率が同じであるという仮定をしているが、実際には後者の効率は前者に比べて低いと指摘されており、しかもどの程度低いかということは現時点では明らかではない (Vandewalleら: 1987, Saltin: 1990)。したがって、 O_2 deficitと O_2 intakeの比から求めた有酸素系のエネルギーの貢献度は、実際の貢献度よりも過大評価されていると考えられる。図13や表2をみると、90秒以降、計算によって求められた有酸素系のエネルギーによる機械的発揮パワーが、実際の機械的発揮パワーよりも17%も大きくなるという矛盾が生じているが、これは上記のような背景が一因となって起こったものと考えられる。

以上のことを考えると、真の有酸素系のエネルギーの貢献度は、 O_2 debtと O_2 intakeの割合から求めた値と O_2 deficitと O_2 intakeの割合から求めた値との間に位置すると考えられる。また、有酸素系の貢献度は、30~45秒の時間帯ではすでに50%を超えていることが予想される。

無酸素系にはATP-CP系と乳酸系の2つの成分がある。本研究では、このうちの乳酸系に注目し、PeakLaを指標としてエネルギー供給の動態を推定した。PeakLaを乳酸系のエネルギー供給量の指標とすることについては、筋中で発生したLaが血液中にも均一に拡散するかどうか、という疑問や、運動中に酸化などによって除去される分が過小評価される、などの問題があるため、運動中に筋で発生した乳酸の量を厳密に定量することは困難であることが指摘されている (Vandewalleら: 1987, Saltin: 1990)。しかし、PeakLaの大小からその運動で行われた乳酸系のエネルギー供給量の相対的な大小を評価することについては可能であると考えられている (Di-Prampo: 1981, 山本: 1989, Vandewalleら: 1993, GreenとDawson: 1993)。

図14をみると、PeakLaの増加がみられたのは、運動時間が60秒間以下の運動においてであり、それ以上の時間運動を行ってもPeakLaは増加しなかった。これと同様のことは、先行研究 (生田と猪飼: 1973, Withersら: 1991) においても指摘されている。このことは、乳酸系によるエネルギー供給が運動開始から60秒後には終了することを示唆している。

また本研究では、図15に示したように、Peakの増加がどの時間帯で大きいかということについても検討を行った。Peakの増加が最も大きかったのは0~15秒の時間帯であり、それ以後は急速に小さくなった。このことは一見、乳酸系によるエネルギー供給は0~15秒の時間帯で最大となることを示唆するように見える。しかし、Margaria (1976) は、次のような指摘をしている。

Margariaは、短時間の激運動後に観察される血中乳酸には、運動中に発生したものだけではなく、運動後に遅延産生した分が含まれると指摘している。彼はまた、乳酸の遅延産生の度合は、運動時間が短いほど大きくなることを指摘しており、10秒間程度でオールアウトとなるような運動ではおよそ3分の2が遅延産生分であるが、40秒間でオールアウトとなるような運動では遅延産生分はほぼゼロになると述べている。このことを考慮すれば、図15において0~5秒や5~15秒の時間帯（特に0~5秒の時間帯）における運動中の乳酸発生量はかなり低くなり、乳酸系のエネルギー供給のピークは、15~30秒の時間帯にあることが予想される。

ATP-CP系のエネルギー供給の状況を捉えるためには筋バイオプシー法を必要とするため、本研究では実験を行っていないが、先行研究をみるとWithersら（1991）が参考となる実験データを報告している。彼らは、30秒、60秒、90秒間の自転車エルゴメーターの最大努力ペダリングを行ったとき、CPの低下が運動開始から30秒後に

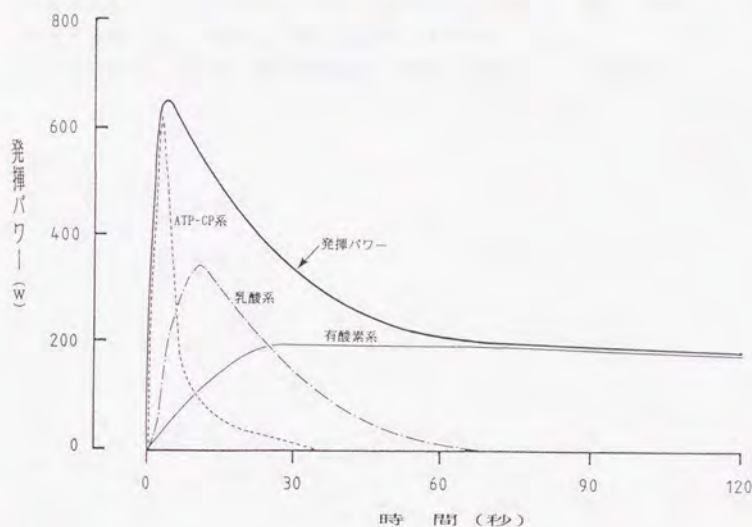


図16. 自転車エルゴメーターを用いて、最大努力で120秒間連続のペダリング運動を行った際に発揮された機械的パワーと、3種類のエネルギー系によるエネルギー供給の推移を示す概念図。図9, 12, 13, 15, および先行研究の結果をもとに作成した。

はずでに終了していることを報告している。このことは、ATP-CP系によるエネルギー供給が30秒目までには終了することを示唆している。

以上の検討結果を総合して、最大努力で120秒間連続のペダリングを行った際の、機械的発揮パワーとエネルギー供給の推移の状況を概念図化したものが図16である。ATP-CP系によるエネルギーの供給は、運動の開始直後から30秒以内に終了する。乳酸系によるエネルギー供給は、運動の開始直後から急激に増加し、15~30秒の付近をピークとしてそれ以後は低下し、およそ60秒後には終了する。つまりATP-CP系と乳酸系をあわせた無酸素系のエネルギー供給は、およそ60秒までで終了することになる。一方、有酸素系のエネルギー供給は、運動の開始後直ちに増加し、およそ30秒後には $\dot{V}O_{2max}$ の80~90%付近に達して定常状態となり、以後その状態が続く。

機械的な発揮パワーとエネルギー供給系の働きとを対応させてみると、運動の開始直後に出現するピークパワーは主としてATP-CP系のエネルギーによって出力されているといえる。また、60秒以後に出現するパワーの定常状態は、主として有酸素系のエネルギーによって出力されているといえる。そして、顕著なパワーの低下がおこる運動中期（5~60秒）では、乳酸系のエネルギーに加えて、ATP-CP系や有酸素系のエネルギー供給量の増加とが混在しながら出力されているといえよう。

II-2. 連続的な運動を最大努力で行った際の運動成績とエネルギー供給能力との関係

1) 研究目的

ある運動を最大努力で行った際の運動成績は、そのときに主として使われているエネルギー系のエネルギー供給能力の影響を受けると考えられる。

II-1. の研究結果から、自転車エルゴメーターを用いて最大努力で120秒間連続のペダリングを行うと、主たるエネルギーを供給するエネルギー系が、時間経過にともないATP-CP系、乳酸系、有酸素系へと、重複する時間帯をもちつつ推移していくことが示唆された(図16)。したがって、高強度の運動を持続する際、運動の初期ではATP-CP系、中期では乳酸系、後期では有酸素系のエネルギー供給能力が、それぞれ運動成績に影響を与えることが予想される。

そこで本研究では、自転車エルゴメーターを用いて最大努力運動を行い、その際に発揮された機械的パワーに対する3種類のエネルギー供給能力の関連が、運動時間の経過にともなってそれぞれどのように変化するかを観察することにした。

2) 方法

a. 被検者

被検者は、体育学を専攻する男子大学生46名であった。彼らの年齢、身長、体重の平均値と標準偏差は、それぞれ 20.3 ± 1.1 歳、 169.5 ± 5.2 cm、 67.2 ± 5.6 kgであった。なお、すべての被検者は、日常のトレーニングにおいて、自転車エルゴメーターの最大努力ペダリングを行っており、この運動には十分に習熟したものであった。被検者には、研究の目的、方法、測定にともなう苦痛、および危険について説明を行い、実験の参加に対する同意を得た。

b. 自転車エルゴメーターの最大努力ペダリング

自転車エルゴメーター (Type864, Monark社製, Sweden) を用い、最大努力で90秒間連続のペダリングを行った。ペダリングの方法は、運動時間を120秒間から90秒間へと短くした以外は、II-1. で行ったと同じ方法で行った。運動時間を90秒間とした理由は、II-1. の研究から、運動の開始から60秒を経過すると発揮パワーの低下が非常に緩やかになること、また無酸素系のエネルギー供給が終了して有酸素系による単一のエネルギー供給となることが示唆されたことによる(図16)。つまり、90秒目までの運動を行えば、120秒目あるいはそれ以降の発揮パワーおよびエネ

ルギー供給の状況も予想できると考えたからである。

運動中、各時点(x秒目)で発揮された機械的パワー(Px, 単位: W)を、II-1. と同じ方法を用いて5秒毎に算出した。

c. 3種類のエネルギー供給能力の測定

ATP-CP系, 乳酸系, 有酸素系のエネルギー供給能力の指標として, それぞれ最大無酸素性パワー(Pmax), 最大血中乳酸濃度(Lamax), 最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)を用いた。これらの能力の測定に当たっては, 運動様式を統一するために, いずれも自転車エルゴメーターを用いて測定することとした。測定方法は以下の通りである。

① Pmax

ごく短時間(数秒間)のうちにされる運動は, 主としてATP-CP系のエネルギーにより遂行される。したがって, その運動を最大努力で行った際に発揮された機械的パワーによって, ATP-CP系のエネルギー供給能力を間接的に評価できると考えられている(Thodenら: 1982, Simoneauら: 1983, Boulayら: 1985, 宮下ら: 1986, Bar-Or: 1987, Vandewalleら: 1987)。本研究では, 自転車エルゴメーターを用いて7秒間の最大努力運動を行った際に得られた最大パワーを, ATP-CP系のエネルギー供給能力の指標とすることにした。

自転車エルゴメーター(Type864, Monark社製, Sweden)を用い, 5, 7, 9kpの3種類の負荷で, それぞれ約7秒間の最大努力運動を行った。各運動の間には5分以上の休息をはさんだ。各試行において発揮されたピークパワー値(車輪1回転あたり)をII-1. と同じ方法で求めた。そして3種類の試行で得られたピークパワー値の中の最高値を, Pmax(単位: W)とした。

② Lamax

乳酸系のエネルギーを利用すると筋中には乳酸が発生し, それは血液中にも容易に拡散する。一般に45~120秒間程度の最大努力の運動を行ったとき, 血中乳酸濃度は最大値を示すが(Jacobs: 1986), この値(Lamax)から乳酸系のエネルギー供給能力を間接的に評価できると考えられている(Di-Prampetro: 1981, Jacobs: 1986, Cheathamら: 1986, Vandewalleら: 1987, GreenとDawson: 1993)。

自転車エルゴメーターの最大努力運動の場合には, 60~120秒間の運動を行った時にLamaxが得られると報告されている(生田と猪飼: 1973, Withersら: 1991, II-1. の実験結果)。そこでb. で行った90秒間の最大努力ベダリングの終了後に出現するピーク血中乳酸濃度をLamax(単位: mM/l)とみなすこととした。

被検者はb. の運動の終了後, 椅座位で安静を保った。そして, 運動が終了した時点から7, 8, 9, 10分後に, 手の指先から血液を採取し, II-1. と同じ方法

を用いてLaの分析を行った。そして4つの時点のLaの中のピーク値をLamaxとした。

③ $\dot{V}O_{2max}$

$\dot{V}O_{2max}$ は、有酸素系のエネルギー供給能力を表す最も妥当な指標として広く認められている (Taylorら: 1955, 山地: 1992)。そこで本研究でも、自転車エルゴメーター運動によって測定された $\dot{V}O_{2max}$ (単位: l/min) を、有酸素系のエネルギー供給能力の指標とみなすことにした。

$\dot{V}O_{2max}$ の測定は、自転車エルゴメーター (Type868, Monark社製, Sweden) を用い、漸増負荷法により行った。具体的な方法はII-1. と同じであった。

d. データの処理

Px, Pmax, $\dot{V}O_{2max}$ は、体重が重いものほど高値を示す (Katch: 1974, 宮下ら: 1986, 山地: 1992)。これは、Px, Pmax, $\dot{V}O_{2max}$ は筋量が多い者ほど高値を示し、また筋量は一般的に体重が重い者ほど多いという関係があるからである。

そこで、Pxに対してPmax, $\dot{V}O_{2max}$ の関わりを検討する際に、体重 (=筋量) の影響を除くために、体重あたりの相対値に直した上で検討することとした。なおLamaxについては、血液の量が被検者の体重とほぼ比例関係にあることから、濃度という単位で表した乳酸値はすでに体重当りの相対値となっているとみなせるので、そのまま用いた。

したがって、それぞれの指標の単位は、Px: W/kg, Pmax: W/kg, Lamax: mM/l, $\dot{V}O_{2max}$: ml/kg・minとなった。

3) 結果

図17は、90秒間の最大努力ペダリングにおいて発揮された機械的パワーを5秒毎に示したものである。発揮パワーは、運動の開始直後に最高値を示した後、時間経過にともない急速に低下した。しかし60秒を過ぎるとその低下は緩やかになった。

Pmax, Lamax, $\dot{V}O_{2max}$ の平均値と標準偏差はそれぞれ、 14.8 ± 1.1 W/kg, 14.8 ± 2.0 mM/l, 59.6 ± 4.6 ml/kg・minであった。PmaxとLamax, Pmaxと $\dot{V}O_{2max}$, Lamaxと $\dot{V}O_{2max}$ の相関係数は、それぞれ $r = 0.12$, $r = 0.11$, $r = 0.19$ であった。これらの相関はほぼ無相関に近く、またいずれも統計的に有意 (5%水準, 以下同様) ではなかった。したがって、これらの指標は互いに独立した関係にあると判断される。

Pmax, Lamax, $\dot{V}O_{2max}$ について、それぞれの平均値を基準として、平均値以上の値を示したものをその能力に優れるもの (H群), 平均値以下の値を示したものをその能力が低いもの (L群) とし、H群とL群の間でPxを比較したものが図18である。

図18-aは、Pmaxに優れるH群 (15.8 ± 0.8 W/kg, $n=19$) と劣るL群 (14.0 ± 0.6

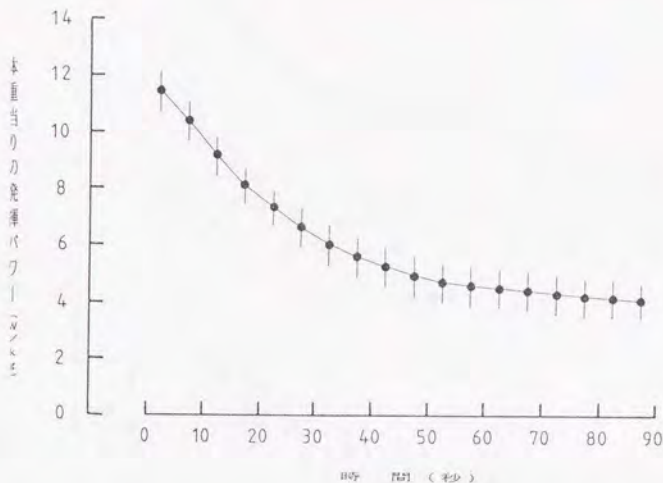


図17. 最大努力で90秒間連続のバダリング運動を行った際に発揮された機械的パワー (Px) の推移. 図中の縦線は標準偏差を表す (以下同様). 横軸の時間は時刻 (time) を意味する.

W/kg, n=27) との間でPxを比較したものである. H群はL群に対して, 運動の開始から15秒までのPxについては有意に優れていた. しかしそれ以後になると, 両群間で有意差はみられなくなった.

図18-bは, Lamaxに優れるH群 ($16.3 \pm 1.4 \text{ ml/l}$, n=21) と劣るL群 ($13.4 \pm 1.3 \text{ ml/l}$, n=25) との間でPxを比較したものである. H群はL群に対して, 61~65秒の時間帯を除く11秒~70秒の時間帯でPxが有意に優れていた. しかしそれ以外の時間帯においては, 両群間で有意な差は認められなかった.

図18-cは, $\dot{V}O_{2\text{max}}$ に優れるH群 ($63.1 \pm 2.5 \text{ ml/kg}\cdot\text{min}$, n=24) と劣るL群 ($55.6 \pm 2.7 \text{ ml/kg}\cdot\text{min}$, n=22) との間でPxを比較したものである. H群はL群に対して, 16秒以後の全ての時間帯でPxが有意に優れていた. しかしそれ以前の時間帯においては, 両群間で有意な差は認められなかった.

図19は, Pxに対するPmax, Lamax, $\dot{V}O_{2\text{max}}$ の関係を, 別の表現方法で表したものである. すなわち, 各時点のPxに対してPmax, Lamax, $\dot{V}O_{2\text{max}}$ が示す相関係数を求め, これが運動時間の経過にともなってそれぞれどのように変化するかを示した.

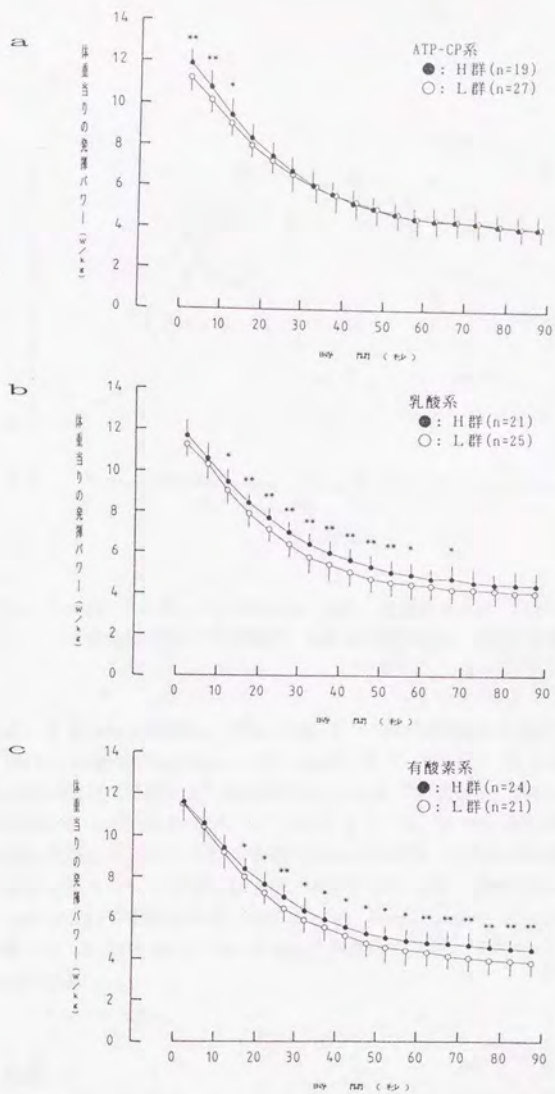


図18. ATP-CP系 (a), 乳酸系 (b), 有酸素系 (c) のエネルギー供給能力にそれぞれ優れる群 (H群: ●) と劣る群 (L群: ○) の間での P_x の比較. 横軸の時間は時刻 (time) を意味する. *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$

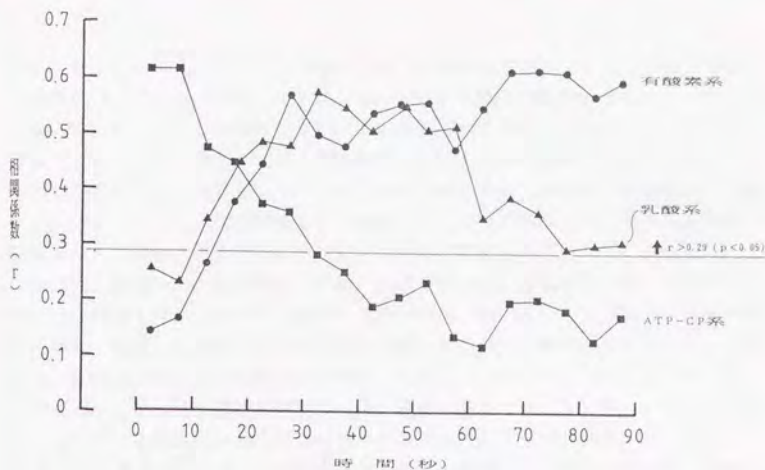


図19. 各時点の P_x に対して、ATP-CP系(■)、乳酸系(▲)、有酸素系(●)の各エネルギー供給能力が示す相関係数。横軸の時間は時刻(time)を意味する。

P_x に対する P_{max} の相関は、運動の開始から10秒目までが最も大きく($r = 0.62$, $p < 0.001$)、以後時間経過にともない急速に低下した。 P_x に対する L_{amax} の相関は、運動の開始直後では低いが、時間経過にともなって増加し、運動の中期(30~60秒)で最も高い値($r = 0.5 \sim 0.6$, $p < 0.001$)を示した。しかし運動の後期になると、相関係数は再び低下した。 P_x に対する $\dot{V}O_{2max}$ の相関は、運動の開始直後では低いが、時間経過にともなって急速に増加し、30秒以後になると比較的高い相関($r = 0.5 \sim 0.6$, $p < 0.001$)が維持された。 P_x に対して、 P_{max} 、 L_{amax} 、および $\dot{V}O_{2max}$ が有意な相関関係($r > 0.29$, $p < 0.05$)を示した時間帯は、それぞれ1~30秒、11~90秒、16~90秒であった。

4) 考察

本研究では、 P_x に対してあるエネルギー供給能力が影響を与えているかどうかということ、そのエネルギー供給能力に優れる群と劣る群の間で P_x の平均値に有意差がみられるかどうか(図18)ということや、 P_x とそのエネルギー供給能力との間に有意な相関がみられるかどうか(図19)ということによって観察しようとした。一

般的には、このような方法で有意差や有意な相関がみられたとしても、両者の間に因果関係（ここでは P_x に対してそのエネルギー供給能力が影響を与えるということ）があることを、必ずしも意味しない。しかし本研究の場合、 P_x はエネルギーの供給によって出力されており、また、 P_x の値はエネルギーの供給量が多いほど大きくなるという生理学的な背景がある。したがって、 P_x とあるエネルギー供給能力との間に上記のような方法で関連がみられた場合、 P_x に対してそのエネルギー供給能力が影響を与えていると解釈することは妥当であると考えられる。

本研究の結果から、運動初期、中期、後期での P_x は、それぞれ P_{max} 、 L_{max} 、 $\dot{V}O_{2max}$ と関連を示すことが明らかとなった（図18、図19）。したがって、運動の初期、中期、後期の P_x には、それぞれATP-CP系、乳酸系、有酸素系のエネルギー供給能力が影響を及ぼしていると考えられる。II-1.の研究から、自転車エルゴメーターを用いて最大努力運動を継続すると、運動の初期ではATP-CP系、中期では乳酸系、後期では有酸素系が主たるエネルギーを供給することが示唆された（図16）。このことも考え合わせると、運動の初期、中期、後期でそれぞれATP-CP系、乳酸系、有酸素系によるエネルギーの貢献度が大きいために、運動の初期、中期、後期の運動成績にそれぞれATP-CP系、乳酸系、有酸素系のエネルギー供給能力が影響を及ぼしたものと解釈することができる。

次に、 P_x に対して、3種類のエネルギー供給能力が、実質的にどこからどこまでの時間帯で影響を及ぼすのかについて考えてみる。本研究ではこのことを、各エネルギー供給能力に優れる群と劣る群の P_x の平均値の間に5%水準で有意差がみられる時間帯（図18）や、 P_x と各エネルギー供給能力との間に5%水準で有意な相関がみられる時間帯（図19）という2種類の尺度で便宜的に示した。しかし平均値の差、あるいは相関係数が統計的に有意であるか否かということが、直ちに関連のあるなしを示すものではない（永田と浅野：1972、柳井と岩坪：1976）。また5%の有意水準という基準も、体育学やスポーツ科学の分野ではしばしば用いられる基準ではあるが、人為的な基準にすぎない。図18と図19を対応させるとわかるように、図18において有意差がみられる時間帯と、図19において有意な相関がみられる時間帯とは多少の食い違いがみられる。また、図19をみるとわかるように、 P_x に対する各エネルギー供給能力の関連の強さは、連続的に変化しており、ある時点から急にあるエネルギー供給能力が P_x と関連をもち始めるということでもない。

このように、各エネルギー系の能力が実質的にどこからどこまでの時間帯で P_x と関連をもつかを示すことは難しいことである。しかしこれらの時間帯を、目安として具体的に示しておくこともまた有意義なことと考えられる。そこで、このことを次のような基準を用いて表わすこととした。

柳井と岩坪（1976）は、相関係数の大きさと関連の強さとの関係について、以下

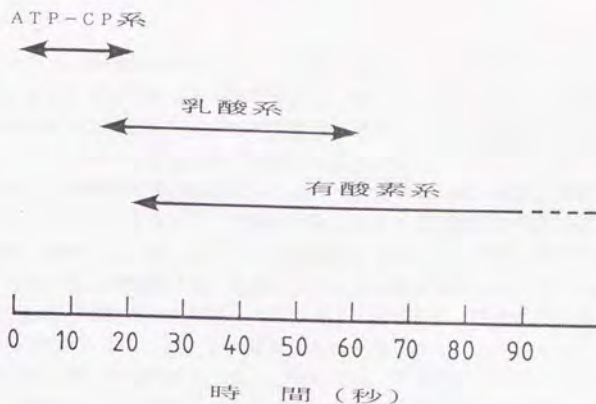


図20. Pxに対して、ATP-CP系、乳酸系、有酸素系の各エネルギー供給能力が「関連を示す」（相関係数が0.4以上となる）時間帯。有酸素系の能力については90秒以後もPxと関連を持ち続けることが予想される。横軸の時間は時刻（time）を意味する。

のような便宜的な基準を示している；相関係数が0～0.2の場合「ほとんど関連がない」、0.2～0.4の場合「やや関連がある」、0.4～0.7の場合「かなり関連がある」、0.7～1.0の場合「かなり強い関連がある」。またこの基準を用いる際に、少なくとも60以上、理想的には100のデータ数が必要であるとしている。

本研究の場合、被検者数が46名とやや少ないため、相関係数が0.29未満の場合、相関は5%水準で有意ではなくなる（図19）。そこで、Pxに対して各エネルギー供給能力が示す相関係数が0.2～0.4の時間帯を除いて、相関係数が0.4以上の時間帯を「関連がある」時間帯とみなすこととした。

図20は、この基準を用いて、Pxと各エネルギー供給能力との間に関連のみられる時間帯を表したものである。この図をみると、運動の初期（運動開始～20秒目）、中期（16～60秒目）、後期（21秒目以降）のPxに対して、ATP-CP系、乳酸系、有酸素系の能力がそれぞれ関連を示している（すなわちPxの大きさに影響を及ぼしている）ことがわかる。

なお、図20をみると、有酸素系の能力は運動のかなり早期（21秒目）から、乳酸系の能力（16秒目）とほぼ同時期にPxに対して影響を及ぼし始めていることが注目される。II-1.の実験から示されたように、自転車エルゴメーターを用いて最大努力運動を行うと、有酸素系によるエネルギーの供給は、運動開始から30秒を経過

するとすでに80~90% $\dot{V}O_{2max}$ に達し(図12, 図13), また全体のエネルギーに対する貢献度も50%を超えることが予想される(表2). このように, 最大努力運動を行うと有酸素系によるエネルギーの貢献度が運動の早期から大きくなるということが, このような結果をもたらした理由と考えられる.

本研究では運動時間を90秒間で打ち切っているので, 90秒以後も運動を続けたときに, Pxに対して各エネルギー供給能力がどのような影響を及ぼすのかということは, 推定に頼るしかない. しかし, 自転車エルゴメーターの最大努力ペダリングの場合, 60秒以後には発揮パワーがほとんど低下しなくなる(図9), また, 60秒以後には無酸素系のエネルギー供給は終了し有酸素系のみエネルギー供給となる(図16), がII-1.の実験結果から示唆された. このことを考えると, 90秒目以降も90秒目の時点でみられたと同じ関係, すなわちPxに対して有酸素系のエネルギー供給能力との関わりのみが強く, ATP-CP系や乳酸系のエネルギー供給能力との関わりは低いという関係が, そのまま維持されると予想される.

II-3. 連続的な運動を最大努力で行った際の運動成績の競技種目特性

連続的な運動においては、運動時間の長短によって利用されるエネルギー系が変わる。すなわち、ごく短時間の間でスピードを競う短距離種目の選手ではATP-CP系、長時間にわたり持久性を競う長距離種目選手では有酸素系、またその中間の性質をもつ中距離種目の選手では乳酸系のエネルギーが特に重要になるとされている

(Fox, 1979)。したがって、短、中、長距離走種目で優れた成績を示す選手は、それぞれATP-CP系、乳酸系、有酸素系のエネルギー供給能力が特に発達していることが予想される。

本研究では、陸上競技の短、中、長距離走種目に携わる高校生の選手を対象として、自転車エルゴメーターを用いて最大努力で90秒間連続のペダリング運動を行わせ、発揮パワーの特性にどのような違いがみられるかを観察した。なお実験は以下の2とおりの観点から行った。

実験1：短、中、長距離走選手の間での発揮パワー特性の比較

実験2：短、中、長距離走において競技力に優れる選手とそうでない選手の間での発揮パワー特性の比較

実験1：短、中、長距離走選手の間での発揮パワー特性の比較

1) 目的

100m走～5000m走までの6種類の走種目において比較的優秀な成績をもつ選手を対象として、90秒間の最大努力ペダリングを行わせ、発揮パワーの特性を比較することを目的とした。

2) 方法

a. 被検者

被検者は、100m、200m、400m、800m、1500m、5000m走の各走種目に携わっている高校生の男子陸上競技選手123名であった。被検者には実験の目的、方法、測定にもなう苦痛、および危険について説明を行い、実験に参加することについて同意を得た。

各被検者の専門種目と、その種目における過去1年間のベストタイムを調査し、そのベストタイムから走スピードを算出した。この走スピードが、実験を行った年

表3. 6種類の走種目における優秀選手の記録と人数.

種目	ベストタイム	被検者数
100m走	11.3 ± 0.1'	11
200m走	22.9 ± 0.4'	10
400m走	51.2 ± 0.8'	8
800m走	2'02"7 ± 0.6'	5
1500m走	4'09"4 ± 3.1'	11
5000m走	15'25"3 ± 14.7'	12

の高校生の日本記録(1984年1月1日当時)から算出した走スピードの90%以上に該当した選手を優秀選手とみなすこととした。ただし800m走については、上記の基準を満たす選手が2名と少なかったため、基準を1%下げて89%以上とした。

表3は、上記の規準で選出された各種目の優秀選手群の走タイムの平均値、標準偏差、および人数を示したものである。彼らの平均走スピードは、高校生の日本記録の走スピードに対して、100m走: 92.4%, 200m走: 91.7%, 400m走: 91.5%, 800m走: 89.7%, 1500m走: 91.2%, 5000m走: 92.2%であり、各群の競技力のレベルは、相対的にはほぼ同程度であるとみなした。

なお本研究においては、同じ選手が2種目以上に重複して選出された場合に、その重複を認めることとした。その結果、100m走と200m走で5名、200m走と400m走で5名、100m走と400m走で2名、800m走と1500m走で2名、1500m走と5000m走で7名の被検者が重複して選出された。

b. 実験手順

被検者は十分なウォーミングアップを行った後、自転車エルゴメーターで90秒間連続の最大努力ペダリングを行った。ペダリングはII-2.と同じ方法で行い、発揮パワーは10秒毎に算出した。また、運動初期に発揮されたピークパワー(PP)を1秒値で求めた。なお、II-2.で述べたと同じ理由から、発揮パワーは被検者の体重当りの相対値(単位: W/kg)で表すこととした。

3) 結果

図21は、各走種目における優秀選手のPPおよび90秒間の発揮パワーの特性を示したものである。いずれの種目の選手においても、運動初期の発揮パワーが最も高く、以後時間経過ともなって発揮パワーが低下するという点では共通していた。しか

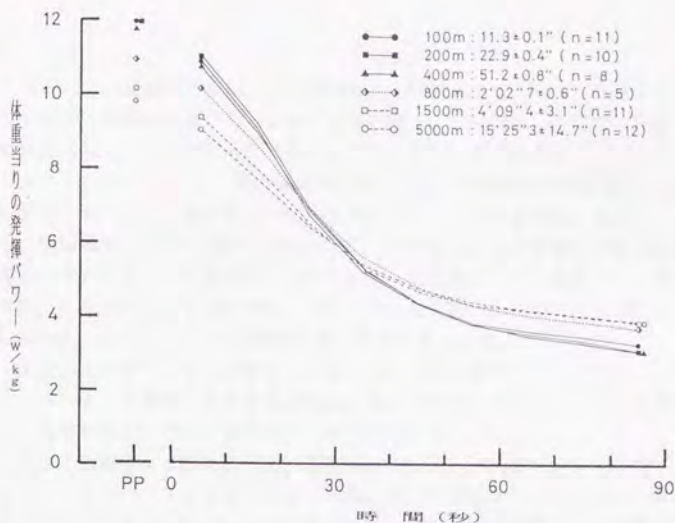


図21. 6種類の走種目の優秀選手が、最大努力で90秒間連続のベダリング運動を行った際に発揮された機械的パワーの特性。横軸の時間は時刻 (time) を意味する。

し、その低下の様相は、種目間で少しずつ異なっていた。また種目によってはよく似た低下特性を示すものもみられた。

100m走、200m走、400m走の優秀選手では、ほぼ同じ発揮パワー特性がみられた。これらの種目の選手では、PPを含む運動初期の発揮パワーは他種目の選手の値と比べて相対的に最も高い値を示したが、逆に終末値については最も低い値を示した。

1500m走と5000m走の優秀選手においても、ほぼ同じ発揮パワー特性がみられた。これらの種目の選手では、PPを含む運動初期の発揮パワーが他種目の選手の値と比べて相対的に最も低い値を示したが、逆に終末値については最も高い値を示した。

800m走の優秀選手の発揮パワー特性は、前二者とは異なる形を示した。すなわち、PPを含む運動初期の発揮パワーは前二者の中間であり、終末値は前二者の中間よりもやや持久走選手の発揮パワーに近い値であった。そして運動中期、すなわち100、200、400m走選手の発揮パワー曲線と1500、5000m走選手の発揮パワー曲線とが交差する31~40秒の時点においては、前二者よりも高い値を示した。

4) 考察

II-2. の研究結果から、90秒間連続で自転車エルゴメーターの最大努力ベダリングを行った際の発揮パワーには、運動初期ではATP-CP系、中期では乳酸系、後期では有酸素系のエネルギー供給能力が反映することが示唆された。

一方、Fox (1979) は、短距離走ではATP-CP系、中距離走では乳酸系、長距離走では有酸素系によるエネルギー供給の貢献度が大きいことを指摘している。したがって、短距離走に携わる選手ではATP-CP系、中距離走に携わる選手では乳酸系、長距離走に携わる選手では有酸素系のエネルギー供給能力が特に発達していると考えられる。この点については実際に、中村 (1987)、Komiら (1977)、SaltinとAstrand (1967) によって実験的に明らかにされている。

上記のことをあわせて考えると、短、中、長距離走選手が最大努力ベダリングを行ったとき、短距離走選手では運動の初期、中距離走選手では中期、長距離走選手では後期の発揮パワーに優れることが予想される。

本研究の結果、運動時間が相対的に短い100m走、200m走、400m走の選手では、運動初期の発揮パワーが他種目の選手の値に比べて高値を示した。また、運動時間が相対的に長い1500m走、5000m走の選手では、運動後期の発揮パワーが他種目の選手の値に比べて高値を示した。そして、運動時間が前二者の中間に位置する800m走の選手では、運動中期の発揮パワーが他種目の選手の値に比べて高値を示した。これらの結果は、上記の予想と一致するといえよう。

実験2：短、中、長距離走において競技力に優れる選手とそうでない選手の間での発揮パワー特性の比較

1) 目的

実験1の結果から、100m～5000m走の6種類の走種目に携わる選手は、①ATP-CP系の能力が特に発達し、最大努力ベダリングを行ったとき運動初期の発揮パワーに優れる100、200、400m走選手、②乳酸系の能力が特に発達し、運動中期の発揮パワーに優れる800m走選手、③有酸素系の能力が特に発達し、運動後期の発揮パワーに優れる1500、5000m走選手、の3種類のタイプに分けられることが示唆された。

ここでは、①、②、③それぞれのタイプの代表として100m走、800m走、1500m走の3種目を選び、それぞれの走能力に優れる者とそうでない者との間で、発揮パワーの特性を比較した。

2) 方法

a. 被検者

被検者は、100m～5000mまでの走種目に携わっている高校生の男子陸上競技選手41名であった。被検者には実験の目的、方法、測定にともなう苦痛、および危険について説明を行い、実験に参加することについて同意を得た。

b. 実験手順

被検者は、実験1と同じ方法により、90秒間連続の最大努力ペダリングを行った。データの処理も実験1と同じ方法で行った。

また被検者は、異なる日にそれぞれ100m走、800m走、1500m走の3種目の走能力テストを行い、タイムを記録した。それぞれのテストにおける走タイムの平均値(Mean)と標準偏差(SD)をもとに、各種目について、タイムがMean-1SD以下であった選手を優秀者群(H群)、Mean+1SD以上であった選手を非優秀者群(L群)とみなした。

表4は、各群の被検者数、走タイムの平均値、標準偏差を示したものである。

3) 結果

図22は、3種類の走能力テストによって選別されたH群とL群の発揮パワーの特性を示したものである。

図22-aは、100m走におけるH群とL群の発揮パワーを比較したものである。H

表4. 100m, 800m, 1500m走の走能力に優れる者(H群)と劣る者(L群)の記録と人数。

種目	H群	L群
100m走	11'2±0'1 (n=11)	13'8±0'5 (n=11)
800m走	2'04'2±1'7 (n=10)	2'33'0±4'5 (n=8)
1500m走	4'10'6±3'9 (n=14)	5'26'1±15'2 (n=12)

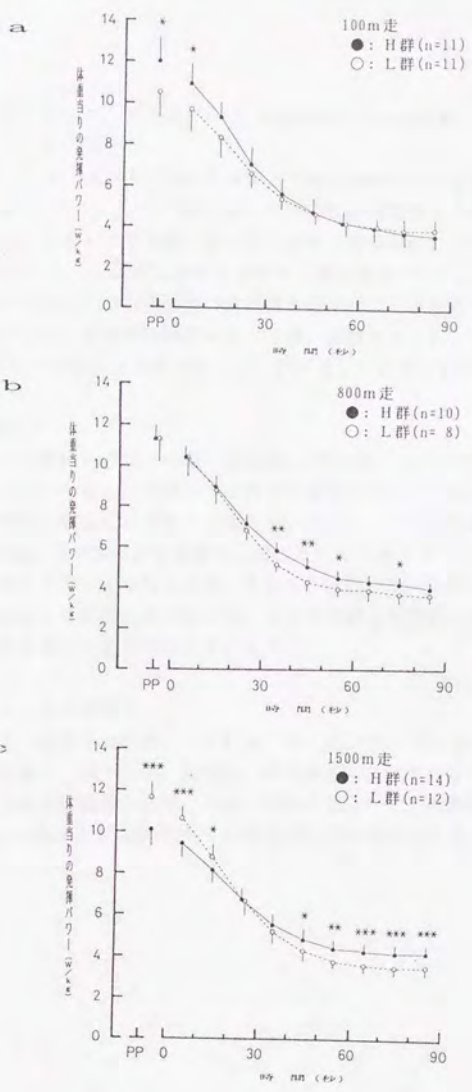


図22. 100m走 (a), 800m走 (b), 1500m走 (c) の走能力に優れる者 (H群: ●) と劣る者 (L群: ○) が, 最大努力で90秒間連続のベダリング運動を行った際に発揮された機械的パワーの特性. 図中の縦線は標準偏差を表す. 横軸の時間は時刻 (time) を意味している. *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$

群はL群に対して、PPおよび1~10秒の発揮パワーが有意（5%水準，以下同様）に高値を示した。

図22-bは、800m走におけるH群とL群の発揮パワーを比較したものである。H群はL群に対して、61~70秒を除く31~80秒の時間帯での発揮パワーが有意に高値を示した。またその傾向は、特に31~50秒の時間帯において顕著であった。

図22-cは、1500m走におけるH群とL群の発揮パワーを比較したものである。H群はL群に対して、41秒以後の時間帯で発揮パワーが有意に高値を示した。またその傾向は、61~90秒の時間帯において特に顕著であった。なおH群は、PPを含む運動初期（1~20秒）の発揮パワーがL群に対して有意に低値を示した。

4) 考察

実験1の結果から、100m走、800m走、1500m走の各優秀選手は、90秒間連続の最大努力ペダリングを行った際に、それぞれ運動の初期、中期、および後期の発揮パワーが相対的に高値を示すことが明らかとなった。一方、実験2の結果からは、100m走、800m走、1500m走の各走能力に優れるものはそうでないものに比べて、90秒間の最大努力ペダリングを行った時、それぞれ運動初期、中期、および後期の発揮パワーに優れることが明らかとなった。つまり実験1と実験2の結果は、同じ内容を別の観点から表した結果であるといえる。

<実験1, 2の総括>

実験1, 実験2の結果はいずれも、自転車エルゴメーターの最大努力ペダリングを行った際に、ATP-CP系、乳酸系、有酸素系の各エネルギー供給能力に優れるものでは、それぞれ運動の初期、中期、後期の発揮パワーに優れるということを示したII-2.の結果と実質的に同じ内容を表したものと位置づけることができよう。

III. 間欠的運動

間欠的運動 (intermittent exercise) とは、短時間の高強度の運動を、休息あるいはそれに近い状態をはさんで反復するような運動様式とする。II. で検討した連続的運動と対応させて概念図で示せば、図23のように表すことができよう。スポーツ種目でいえば、球技、格闘技、格技、採点競技など多くの種目が間欠的運動に該当する。またÅstrandとRodahl (1970) は、間欠的運動はスポーツ活動やレクリエーション活動ばかりではなく、産業や家庭での労働においても最も普通にみられる運動様式であり、むしろ連続的運動の方が特殊であると指摘している。このように、間欠的運動は連続的運動よりも一般的にみられる運動様式であるにも関わらず、その研究は少ない。

これまでの研究により、間欠的運動においては無酸素系、有酸素系のエネルギーのいずれもが関わることが示唆されている。しかし、従来の研究は労働生理学的な観点から行われたものが多い。それらは、同じ時間内に同じ仕事を行う場合、連続的に行うよりも間欠的に行う方が身体への負担は小さく、より楽に遂行できることを示し、その理由を検討している。そのため、運動は最大努力ではなく比較的余裕のある強度で行われている。また運動と休息のインターバルも、数十秒～数分と比較的長いものが多い。

一方、体育・スポーツ活動の中で行われる間欠的運動を念頭に置いた研究は少ない。このような間欠的運動の場合、運動は最大努力またはそれに近い強度で行われ、いかに身体に負担をかけないかということよりも、いかに高い運動成績を発揮するかということが問題となる。また運動と休息のインターバルも、数秒～数十秒と短い。

本研究では、後者のような間欠的運動を対象として、各エネルギー系がどのように関わるかについて検討するものである。運動は、II. で検討した連続的運動の場合と運動様式の統一を図るために、自転車エルゴメーターを用いて行うこととした。また間欠的運動は、図23-bに示したように、一定時間の運動を一定時間の休息をはさんで反復するという最も単純な運動様式で行うこととした(以下、この一定の運動時間のことを運動インターバル、休息時間のことを休息インターバルと呼ぶ)。そして、連続的運動の場合と同様、以下の3点に関して検討を行った。

III-1. 間欠的な運動を最大努力で行った際のエネルギー供給

III-2. 間欠的な運動を最大努力で行った際の運動成績とエネルギー供給能力との関係

III-3. 間欠的な運動を最大努力で行った際の運動成績の競技種目特性

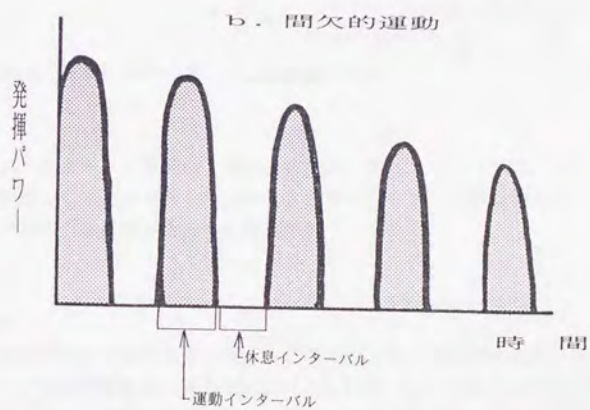
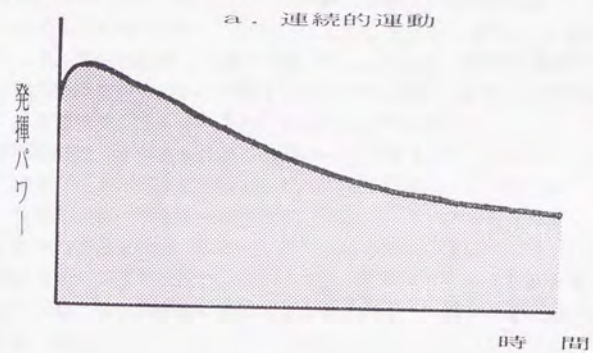


図23. 連続的運動 (a) と間欠的運動 (b) の運動様式を表す概念図.

III-1. 間欠的な運動を最大努力で行った際のエネルギー供給

間欠的運動が連続的運動と異なる点は、運動の合間に休息期が存在し、その結果、運動インターバルと休息インターバルが生じることである(図23)。したがって、運動成績やエネルギー供給が、連続的運動の場合とは大きく異なる可能性がある。また、同じ間欠的運動の中でも、運動インターバルと休息インターバルの組合せが変わると、運動成績やエネルギー供給が変わる可能性もある。

そこで本研究では、トータル運動時間が一定(100秒間)となるようにした上で、

実験1: 運動インターバルを一定にして、休息インターバルを変える

実験2: 休息インターバルを一定にして、運動インターバルを変える

という2とおりの実験を行い、休息インターバル、および運動インターバルの長さが、間欠的な運動時の運動成績およびエネルギー供給にどのような影響を及ぼすかを観察した。また、間欠的運動が連続的運動とどのように異なるかということについてもあわせて検討した。

実験1: 休息インターバルの長さによる影響

1) 目的

自転車エルゴメーターを用いて最大努力で間欠的な運動を行う際、運動インターバルを同じにして休息インターバルの長さを変えたとき、運動成績およびエネルギー供給にどのような影響があるかを観察した。

2) 方法

a. 被検者

被検者は体育学を専攻する男子大学生5名であった。被検者の年齢、身長、体重の平均値および標準偏差は、それぞれ 21.8 ± 1.5 歳、 169.0 ± 6.3 cm、 61.9 ± 6.6 kgであった。被検者には実験の目的、方法、測定にともなう苦痛、および危険について説明を行い、実験に参加することについて同意を得た。

b. 実験手順

自転車エルゴメーター(Type864, Monark社製, Sweden)を用い、10秒間の最大努力運動を一定の休息インターバルをはさんで10セット行うという運動を、休息イン

ターバルを変えて3種類行った。休息インターバルは、50秒間、20秒間、10秒間の3とおりとした（以下、それぞれR50、R20、R10と略記する）。またこの他に、100秒間連続の最大努力運動を行った（以下、R0と略記する）。これは上記の間欠的運動の休息インターバルが非常に短くなり、0秒間になった場合という想定で行ったものである。これら4種類の運動は、1日に1回づつ、1～4日の間隔をあけてランダムな順序で実施した。また、測定は各被検者とも、午前中の同一時刻（9時～12時）に行うようにした。

実験設定は連続的運動において用いた方法に準拠した（II-1. 参照）。すなわち、被検者は測定の前2時間以上に食事を済ませ、1時間以上に実験室に来室した。実験室の温度は19～22℃に調節した。被検者に呼気ガス採取用のマスクをつけ、椅座位で30分間の安静を保った後、5分間、安静時の呼気ガスをダグラスバッグに採取した。その後、血中乳酸濃度（La）の分析のために、45℃の恒温浴槽で暖めた手の指先から約70 μ lの血液を採取した。

その後、被検者は自転車エルゴメーターに乗り、指定された運動インターバルと休息インターバルで、最大努力での間欠的運動を行った。なお、運動中はペース配分をしないで常に最大努力で行うこと、また休息中はペダルは動かさず安静状態を保つよう指示した。負荷の重量やサドルの位置は、連続的運動の場合（II-1.）と同じ方法で決定した。

4種類の間欠的運動において発揮された機械的パワー（単位：W）を、各セット毎に算出した。算出方法は、II-1. と同じ方法で行った。また10セット分の発揮パワーを積算して、総仕事量（単位：kJ）も算出した。

ダグラスバッグ法により運動中の酸素摂取量（ O_2 intake, 単位：l）と運動後の酸素負債量（ O_2 debt, 単位：l）を測定した。なお O_2 intakeには、運動インターバルの間に摂取された成分と、休息インターバルの間に摂取された成分の2種類がある。この2つの成分を厳密に区分して測定することは、I-2. で述べたように、現時点では困難であるが、ここでは便宜的に、検者による運動開始の合図から終了の合図までの間にダグラスバッグに入った呼気ガスを運動インターバル中の酸素摂取量（ O_2 intake-1）、また検者による運動終了の合図から次の運動開始の合図までの間にダグラスバッグに入った呼気ガスを休息インターバル中の酸素摂取量（ O_2 intake-2）とみなした。

運動後（直後、2、4、6、8、10分後）に、安静時に行ったと同様の方法で手の指先から微量の血液を採取し、Laを分析した。分析方法はII-1. と同じ方法で行った。運動後のLaのピーク値を、ピーク血中乳酸濃度（PeakLa）とした。

3) 結果

図24には、4種類の運動条件で発揮された機械的パワーの経時的な推移を示した。各条件とも1セット目（R0の場合は0～10秒目）の発揮パワーはほぼ同じ値を示した。しかし、2セット目以降（R0の場合は11秒目以降）になると、発揮パワーの低下の度合に差がみられ、休息インターバルが長い運動条件ほどパワーの低下率は小さかった。

図25には、4種類の運動条件で得られた総仕事量と酸素需要量を示した。なお酸素需要量については、 O_2 intakeと O_2 debtに分け、また O_2 intakeについてはさらに、 O_2 intake-1と O_2 intake-2とに区分して示した。総仕事量は休息インターバルが長くなるほど大きくなり、酸素需要量もこれとほぼ同期した形で大きくなった。酸素需要量の構成成分をみると、 O_2 debtは各条件ともほぼ同じ値を示したのに対して、 O_2 intakeは休息インターバルが長くなるほど大きくなった。ただし、 O_2 intakeの2つの成分のうち、休息インターバルが長くなるほど大きくなったのは O_2 intake-2の方であった。一方、 O_2 intake-1の方は休息インターバルが長くなっても大きくはならず、R0、R10、R20ではほぼ同じ値、R50ではそれらよりもやや小さい値を示した。

PeakLaについては、R50、R20、R10、R0の各条件で、それぞれ 15.9 ± 4.1 mM/l、 17.0 ± 3.1 mM/l、 17.3 ± 3.7 mM/l、 17.7 ± 2.6 mM/lとなり、R50でやや小さい値を示した他は各条件ともほぼ同じ値を示した。

4) 考察

本研究では、いずれの運動条件においても正味100秒間の最大努力運動を行っている。しかしその運動成績は、休息インターバルの長さによって大きく異なり、休息インターバルの長い条件ほど運動成績は大きく、休息インターバルがゼロの条件、すなわち連続的運動においては最も小さくなった（図24、図25）。この現象は、休息をとらないよりもとった方が、また同じ休息をとるにしても休息インターバルが長いほど、次回の運動インターバルでより大きな仕事ができ、その結果総仕事量も大きくなることを表している。これは経験的には明らかな現象であるが、エネルギー供給と関連づけると、次のように説明することができる。

図25をみると、休息インターバルの増大による総仕事量の増加と酸素需要量の増加とはほぼ同期した変化を示していることがわかる。酸素需要量の大きさは、相対的な意味で、運動で利用された全エネルギー量の大きさを表す（I-2.）。したがって、休息インターバルが増加すると総仕事量が増加するのは、無酸素系と有酸素系とを合わせた総エネルギー供給量が増加することによるものと解釈できる。このエネルギーを無酸素系と有酸素系とに2分して捉えてみると、次のようなことがいえる。

O_2 debtはいずれの作業条件においてもほぼ同じ値を示した（図25）。またPeakLa

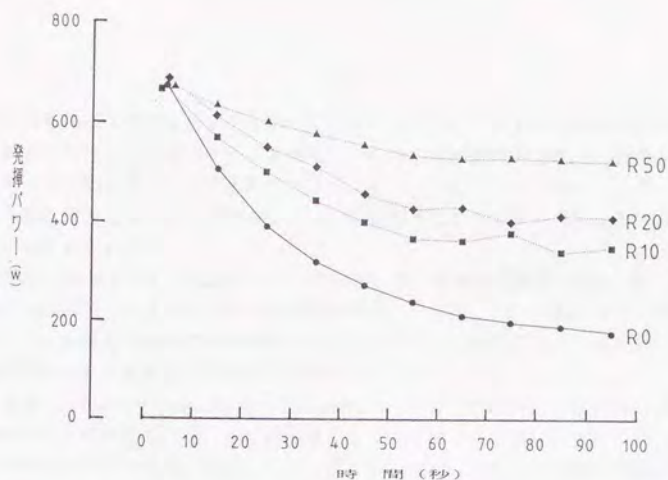


図24. 運動インターバルを同じにし、休息インターバルを変えて、トータル運動時間が100秒間となるような間欠的運動を最大努力で行った際に発揮された機械的パワーの推移（ただしR0は100秒間連続の運動を表す）。横軸の時間は休息インターバルの時間を除いた正味の運動時間（time）を表す。

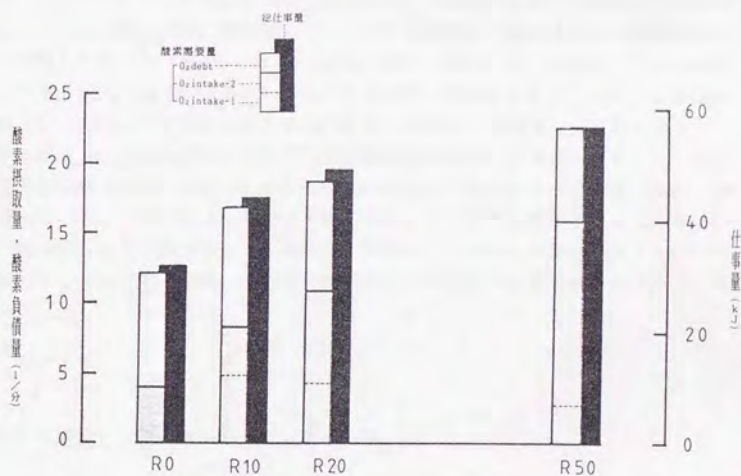


図25. 各種の間欠的運動（ただしR0は連続的運動）において得られた総仕事量と酸素需要量。酸素需要量はO₂debtとO₂intake（O₂intake-1, O₂intake-2）に区分して示した。なお、R0にはO₂intake-2の成分はない。

も作業条件による差は小さかった。O₂debtの大きさは、相対的な意味で無酸素系によるエネルギー供給量の大きさを表し、PeakLaの値は無酸素系のうち乳酸系によるエネルギー供給量の大きさを表す(I-2.)。したがって、休息インターバルが長くなるほど運動成績が増加するのは、無酸素系のエネルギー供給量が増加するからではないといえる。

一方、O₂intakeは、休息インターバルが大きくなるほど顕著に増大した。O₂intakeは有酸素系によるエネルギー供給量を表す(I-2.)。したがって、休息インターバルが長くなるほど運動成績が増大するのは、有酸素系によるエネルギー供給量が増加することによってもたらされたものと考えられる。

ただし、O₂intakeをO₂intake-1とO₂intake-2の2つの成分に分けてみると、O₂intake-1の方は休息インターバルが大きくなってもほとんど増加しないのに対して、O₂intake-2の方は顕著に増加していることがわかる。つまり、連続的運動よりも間欠的運動の方が運動成績が大きくなり、また間欠的運動の中でも休息インターバルが長い運動ほど運動成績がより大きくなるのは、O₂intake-2によって生み出されるエネルギーが増大するためと考えられる。

O₂intake-2は連続的運動には存在せず、間欠的運動だけに存在する成分である。O₂intake-2は主として次の2つの働きをしている；①有酸素的にエネルギーを生み出し、このエネルギーを用いて運動インターバルで消耗したATP-CP系のエネルギー物質(CP)を回復させる、②運動インターバルで消費した筋および血中の酸素ストアの補填を行う(Astrandら：1960, Margariaら：1969, Fox：1979)。①は次の運動インターバルで利用できるATP-CP系のエネルギーを増やすことになり、②も次の運動インターバルで有酸素系によるエネルギーの産生を増やす上で有利となる。

したがって、連続的運動よりも間欠的運動の仕事量の方が大きくなるのは、間欠的運動の休息インターバルにおいてO₂intake-2というエネルギーの働きにより、①と②のエネルギーが付加されるからであるといえる。また休息インターバルが長い間欠的運動ほど仕事量が大きくなるのは、休息インターバルが長い分だけO₂intake-2が大きくなり、その結果、①と②のエネルギーの増加がより大きくなるためと考えられる。

実験2：運動インターバルの長さによる影響

1) 目的

自転車エルゴメーターを用いて最大努力で間欠的な運動を行う際、休息インター

バルを同じにして運動インターバルの長さを変えたとき、運動成績およびエネルギー供給にどのような影響があるかを観察した。

2) 方法

a. 被検者

被検者は体育学を専攻する男子大学生6名であった。被検者の年齢、身長、体重の平均値と標準偏差は、それぞれ 21.6 ± 1.5 歳、 169.0 ± 7.1 cm、 63.1 ± 7.8 kgであった。被検者には実験の目的、方法、測定にともなう苦痛、および危険について説明を行い、実験に参加することについて同意を得た。

b. 実験手順

実験1と同じ自転車エルゴメーターを用い、一定時間の最大努力運動を20秒間の休息インターバルをはさんで反復するという運動を、運動インターバルを変えて3種類行った。運動インターバルは5秒、10秒、20秒の3とおりとした（以下、それぞれE5、E10、E20と略記する）。反復回数は、各条件ともトータルの運動時間が100秒間となるようにするために、E5では20セット、E10では10セット、E20では5セット行った。またこの他に、100秒間連続の最大努力運動も行った（以下、E100と略記する）。これは上記の間欠的運動の運動インターバルが非常に長くなった場合という想定で行ったものである。

自転車エルゴメーターのペダリング方法、発揮パワーや総仕事量の算出方法、呼吸ガスおよび血中乳酸濃度(La)の測定方法など、すべて実験1と同じ方法で行った。

3) 結果

図26には、4種類の運動条件で発揮された機械的パワーの経時的な推移を示した。各条件とも、運動開始直後の発揮パワーはほぼ同じ値を示した。しかし、運動の後期になると、運動インターバルが短い条件ほど高い発揮パワーが維持された。

図27には、4種類の運動条件で得られた総仕事量と、酸素需要量を示した。酸素需要量は、実験1と同じく、運動中の酸素摂取量(O_2 intake)と運動後の酸素負債量(O_2 debt)とに分け、 O_2 intakeについてはさらに、運動インターバル中の酸素摂取量(O_2 intake-1)と休息インターバル中の酸素摂取量(O_2 intake-2)とに区分した。

図27をみると、総仕事量は運動インターバルの短い条件ほど大きくなり、酸素需要量もこれと同期した形で大きくなった。酸素需要量の構成成分のうち、 O_2 debtについては、運動インターバルが短くなっても増加せず、E100、E20、E10ではほぼ

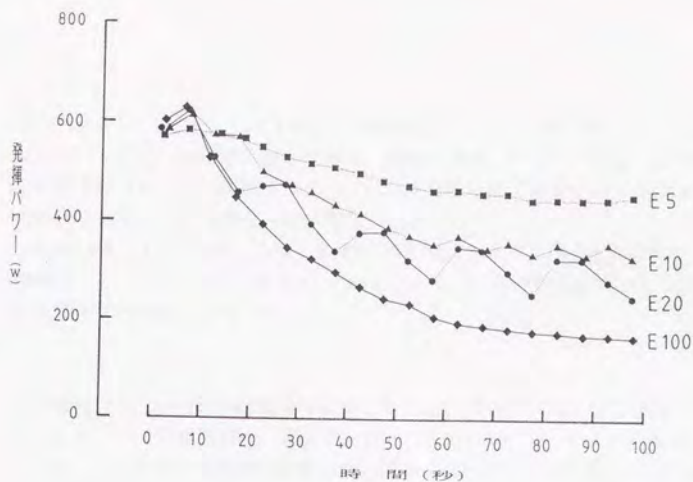


図26. 休息インターバルを同じにし、運動インターバルを変えて、トータル運動時間が100秒間となるような間欠的運動を最大努力で行った際に発揮された機械的パワーの推移（ただしE100は100秒間連続の運動を表す）。横軸の時間は休息インターバルの時間を除いた正味の運動時間（time）を表す。

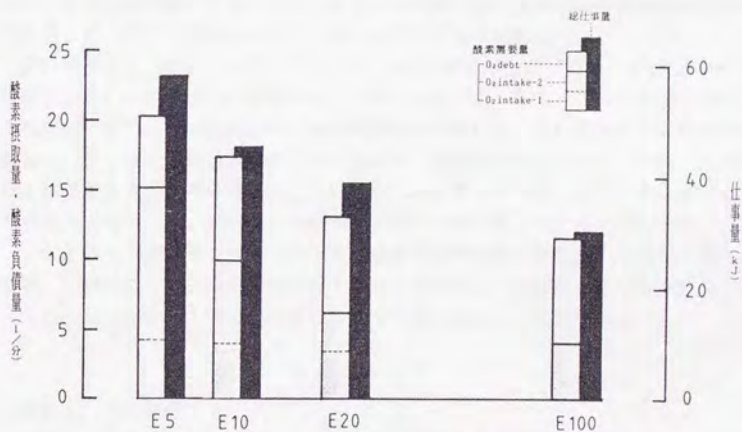


図27. 各種の間欠的運動（ただしE100は連続的運動）において得られた総仕事量と酸素需要量。酸素需要量はO₂debtとO₂intake（O₂intake-1, O₂intake-2）に区分して示した。なお、E100にはO₂intake-2の成分はない。

同じ値を示し、E5ではこれよりもやや低値を示した。これに対して、 O_2 intakeは運動インターバルが短い条件となるほど、顕著に大きくなった。ただし O_2 intakeの2つの構成成分のうち、運動インターバルが長くなるほど大きくなったのは O_2 intake-2の方であり、 O_2 intake-1の方は変化しなかった。

PeakLaは、E5、E10、E20、E100の条件で、それぞれ 14.0 ± 6.0 mM/l、 18.2 ± 2.9 mM/l、 18.5 ± 2.5 mM/l、 18.9 ± 2.7 mM/lとなり、E5でやや低値を示した他は各条件ともほぼ同じ値を示した。

4) 考察

本研究では、いずれの運動条件においても正味100秒間の最大努力運動を行っている。しかしその運動成績は、運動インターバルの長さによって大きく異なり、運動インターバルが短くなるほど運動成績は大きくなった。この現象は、正味の運動時間が同じならば、運動を短く区切って、休息の回数を増やした方が運動成績は大きくなるということを表している。これも実験1の結果と同様、経験的には明らかな現象といえるが、エネルギー供給と関連づけると、次のように説明できる。

図27をみると、運動インターバルの短縮による総仕事量の増加と酸素需要量の増加とはほぼ同期した変化を示していることがわかる。したがって、運動インターバルが短くなると総仕事量が増加するのは、無酸素系と有酸素系とを合わせた総エネルギー供給量が増加するからということが出来る。このエネルギーを無酸素系と有酸素系とに分けて捉えてみると、次のようなことがいえる。

図27をみると、 O_2 debtはE10秒、E20、E100ではほぼ同じだが、E5ではやや低値を示している。つまり、運動インターバルが短くなっても、これらの値は増加していない。また、PeakLaも O_2 debtと同様の傾向を示した。これに対して O_2 intakeは、運動インターバルが短い運動条件となるほど、顕著に増加している。また、 O_2 intakeを構成する2つの成分のうち、 O_2 intake-1はいずれの条件ともほぼ同じ値を示しているのに対して、 O_2 intake-2は運動インターバルが短い条件ほど増加している。

したがって、運動インターバルの短縮による運動成績の増加は、実験1の場合と同様、無酸素系のエネルギーが増加するからではなく、有酸素系のエネルギー、特に O_2 intake-2が増加することによってもたらされたものと考えられる。

<実験1, 2の総括>

実験1, 2の結果の共通点として、連続的運動に比べて間欠的運動の方が仕事量が大きくなることがあげられる。また、間欠的運動の中でも、相対的に運動インターバルが短く、あるいは休息インターバルが長くなるほど運動成績は大きくなると

いえる。

このような現象は経験的には自明のことであるため、これまでその理由について検討した研究はみられない。本研究ではこのような現象を生み出す理由について、エネルギー系との関連から検討を加えた。その結果、休息インターバル中に摂取される O_2 intake-2が生み出すエネルギーの働きによって、このような現象が生ずることが示唆された。

O_2 intake-2は、運動インターバルで消費したATP-CP系のエネルギーを回復させるという役割と、酸素ストアを回復させる役割という2つの働きをもっている (Åstrandら: 1960, Margariaら: 1969, Fox: 1979)。したがって、連続的運動よりも間欠的運動の方が運動成績が大きくなり、また同じ間欠的運動の中でも相対的に休息インターバルが長くなるほど運動成績が大きくなる理由は、ATP-CP系と有酸素系のエネルギーをより大きく利用できるからということになる。以下、乳酸系の働きも含めて、間欠的運動におけるATP-CP系と有酸素系の働きについて考察する。

a. 間欠的運動におけるATP-CP系と有酸素系の働き

ATP-CP系の主たるエネルギー源であるクレアチン燐酸 (CP) は、容量が非常に小さいため、運動をするわずかな時間で枯渇してしまう。しかし、運動をやめたときの回復もまた非常に速いという性質をもっている (Hultmanら: 1967, Bergströmら: 1971)。CPが運動によって枯渇した場合、それが安静時のレベルに対して50%まで回復するには運動の終了時点から約20~30秒間、100%回復するには約2~3分間を要するとされる (Hultmanら: 1967, Fox: 1979)。したがって、間欠的運動において、運動インターバル中に消費したCPの一部は、休息インターバル中に再合成され、次の運動インターバルで再利用することが可能となる。このような現象が実際に起こっているということは、筋バイオプシー法 (SaltinとEssén: 1971, Gaitanosら: 1993) やNMR法 (Bangsbo: 1994) を用いた実験によっても確認されている。

このように、間欠的運動においてATP-CP系は重要な働きをしているが、ここで以下のことに注意する必要がある。消費したATP-CP系のエネルギーを休息期に回復させているのは有酸素系のエネルギーである (Harrisら, 1975)。したがって、間欠的運動を続けたとき、消費したATP-CP系のエネルギーが有酸素系のエネルギーによって繰り返し再合成されるうちに、ATP-CP系のエネルギーは実質的には有酸素系のエネルギーに由来したエネルギーとなるであろう。ATP-CP系は、通常は無酸素系に位置づけられている (表1)。しかし、間欠的運動においては、ATP-CP系は有酸素系のエネルギーを貯蔵しては放出するという媒介役を果たすことになるため、無酸素系と有酸素系の二面性をもっているといえよう。

このようなことを考えると、有酸素系のエネルギーは、運動インターバル中に機

械的パワーを発揮するための直接のエネルギーとなる他に、休息中にATP-CP系のエネルギーを回復させて、次の運動インターバルにおけるATP-CP系のエネルギー供給量を増やすという間接的な寄与もしていることになる。したがって、間欠的運動において有酸素系のエネルギーは、非常に重要な役割を果たしているといえる。

b. 間欠的運動における乳酸系の働き

実験1, 2のいずれにおいても、最大努力で間欠的な運動を行った後のLaは、最大努力で連続的な運動を行ったときとほぼ同程度の値(14~18mM/l)を示した。この値はDi-Prampetro (1985)の基準によると、血中乳酸濃度としては最大値に近い値である。したがって、最大努力で間欠的運動を行った場合には、最大努力で連続的

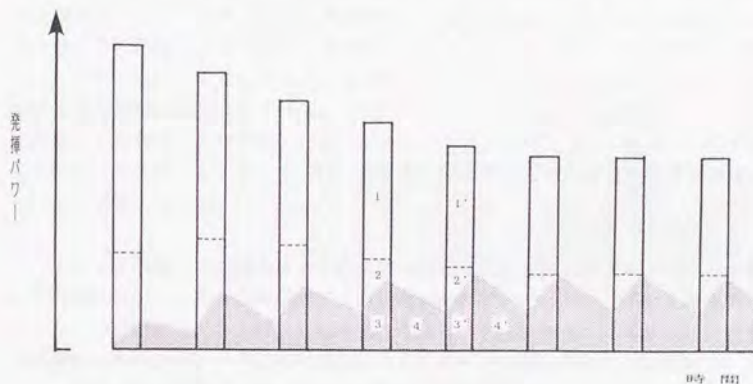


図28. 最大努力で間欠的な運動を行った際に発揮される機械的パワーとエネルギー系の働きを示す概念図。白い部分は無酸素系のエネルギーによる出力部分で、このうち1はATP-CP系からのエネルギー、2は乳酸系からのエネルギーを表す。影で示した部分は酸素摂取量(有酸素系からのエネルギー供給)を表し、このうちの3は運動インターバル中に機械的パワーの発揮に直接貢献し、4は前の運動インターバル中に使われたエネルギーを回復するために用いられる。1で使われたATP-CP系のエネルギーのうちの一部は、4の有酸素エネルギーを用いて回復させられ、次の運動インターバルの1'の部分で再び利用される。4のエネルギーの一部はまた、前の運動インターバルで使われた筋中と血中の酸素ストアを回復させ、3'において有酸素系によるエネルギー供給を増大させる働きもする。休息インターバルが長くなったとき、あるいは運動インターバルが短くなったときに運動成績が増大するのは、4のエネルギーが相対的に増加し、これらの回復がより大きく起こるためと考えられる。

運動を行った場合と同様、乳酸系のエネルギー供給は最大限まで行われているといえる。

ところが、乳酸系によるエネルギー供給量がどの運動条件でもほぼ同じとなるのに対して、運動成績の方は連続的運動よりも間欠的運動の方が、また同じ間欠的運動でも相対的に運動インターバルが短く、休息インターバルが長い運動ほど、顕著に大きくなっていく(図25, 図27)。このことは、連続的運動の場合に比べて間欠的運動における乳酸系の貢献度は、相対的に小さくなるということを意味している。この傾向は、相対的に運動インターバルが短く、また休息インターバルが長くなるほど、より顕著になるといえよう。

先行研究をみると、Gaitanosら(1993)は、間欠的運動の運動初期にはATP-CP系と乳酸系とが主たるエネルギーを供給するが、運動を反復するにつれて乳酸系のエネルギーの貢献度は小さくなり、運動の後半になるとATP-CP系と有酸素系とが主たるエネルギーを供給するようになる」と指摘している。また、乳酸系のエネルギーは運動後の回復時間が長いので(Fox, 1979)、ATP-CP系のように休息インターバル中に回復して再利用される可能性は低いと考えられる。このようなことから、間欠的運動において乳酸系のエネルギーは、運動の初期を除くとそれほど重要な貢献はしないものと考えられる。

以上の事を整理して、最大努力で間欠的な運動を行った際の各エネルギー系の働きを概念図にまとめたものが図28である。運動の開始時にはATP-CP系と乳酸系のエネルギーの貢献度が大きい。運動が進行するにつれて乳酸系のエネルギーの貢献度は小さくなり、ATP-CP系と有酸素系のエネルギーが重要になると考えられる。ただし、運動の中～後半にかけて利用されているATP-CP系のエネルギーは、有酸素系のエネルギーにより再合成されたものであるため、実質的には有酸素系のエネルギーから由来したものであるということができよう。

III-2. 間欠的な運動を最大努力で行った際の運動成績とエネルギー供給能力との関係

III-1. の研究結果から、最大努力で間欠的な運動を行ったとき、ATP-CP系、乳酸系、有酸素系のエネルギーが、その貢献度には差があると考えられるものの、いずれも利用されていることが示唆された。したがって、このような運動を行ったときの運動成績には、3種類のエネルギー系のエネルギー能力がいずれも影響を与える可能性がある。

そこで本研究では、自転車エルゴメーターを用いて最大努力で間欠的な運動を行った際の運動成績に対して、3種類のエネルギー供給能力がそれぞれどのような関連をもつかということを、以下の2つの観点から検討した。

実験1：運動成績と3種類のエネルギー供給能力との関係

実験2：運動成績と3種類のエネルギー供給能力との関係におよぼす
休息インターバル時間の影響

実験1：運動成績と3種類のエネルギー供給能力との関係

1) 目的

運動インターバルが10秒間、休息インターバルが20秒間の間欠的な運動を最大努力で10セット行ったときの運動成績に、ATP-CP系、乳酸系、有酸素系の各エネルギー供給能力がどのような関連を示すかということを検討した。

2) 方法

a. 被検者

被検者は体育学を専攻する男子大学生21名であった。彼らの年齢、身長、体重の平均値と標準偏差は、それぞれ 20.2 ± 1.4 歳、 168.6 ± 5.7 cm、 63.6 ± 6.3 kgであった。被検者には実験の目的、方法、測定にともなう苦痛、および危険について説明を行い、実験に参加することについて同意を得た。

b. 間欠的運動

被検者は十分なウォーミングアップを行った後、自転車エルゴメーター (Type 864, Monark社製, Sweden) を用いて、10秒間の最大努力運動を20秒間の休息をはさ

んで10セット行った。負荷値は、体重が55kg以下のものでは4.0kp、55~65kgのものでは4.5kp、65kg以上のものでは5.0kpとした。その他、運動方法の詳細については、III-1.の方法に準拠した。

各セット毎に発揮された機械的パワー (P_x : $x=1, 2, \dots, 10$, 単位: W) を、III-1.の方法に準拠して求めた。また、10セット分の P_x を積算して、総仕事量 (単位: J) も求めた。

c. 3種類のエネルギー供給能力の測定

ATP-CP系、乳酸系、有酸素系の各エネルギー供給能力の指標として、II-2. で用いたと同じく、それぞれ最大無酸素性パワー (P_{max})、最大血中乳酸濃度 (La_{max})、最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) を用いた。これらの指標の測定は、II-2. で用いた方法に基本的に準拠して行った。以下、異なる点のみ記す。

① P_{max}

b. の運動で用いたと同じ型の自転車エルゴメーターを用いて、5秒間の最大努力運動を行った。この運動で発揮された機械的パワーのピーク値を車輪1回転分当たりで算出し、これを P_{max} (単位: W) とした。負荷重量はb. の運動と同じ基準でかけた。運動は5分間以上の休息をはさんで2回行い、高い方の値を採用した。

② La_{max}

b. で行った間欠的運動の終了後 (直後, 2, 4, 6, 8, 10分後) に、手の指先から微量の血液を採取し、血中乳酸濃度 (La) を分析した。そしてそれらの中の最高値を La_{max} (単位: mM/l) とした。

③ $\dot{V}O_{2max}$

自転車エルゴメーター (Type868, Monark社製, Sweden) を用い、回転数を60rpmに規定して、3.0kpの負荷から運動を開始し、1分毎に負荷を0.5kpまたは0.25kpずつ漸増し、7~10分でオールアウトとなるような運動を行った。このときの酸素摂取量を1分毎にダグラスバッグ法により測定し、その最大値を $\dot{V}O_{2max}$ (単位: l/min) とした。

d. データの処理

P_x および総仕事量に対して、 P_{max} , La_{max} , $\dot{V}O_{2max}$ の関係を検討する際、II-2. で述べた考え方にに基づき、 La_{max} 以外の指標はいずれも体重当りの相対値を用いることとした。 La_{max} についてはそのままの値を用いた。したがって、それぞれの指標の単位は、 P_x : W/kg, 総仕事量: J/kg, P_{max} : W/kg, La_{max} : mM/l, $\dot{V}O_{2max}$: ml/kg·minとなった。

3) 結果

図29は、運動の反復にともなう P_x の推移を示したものである。 P_x は1セット目に最大値を示した後、セット数の増加にともない低下した。

P_{max} , L_{max} , $\dot{V}O_{2max}$ の平均値と標準偏差は、それぞれ 11.2 ± 0.9 W/kg, 18.1 ± 2.1 mM/l, 50.0 ± 5.9 ml/kg \cdot minであった。3つの指標間の相関は、 P_{max} と L_{max} が $r = 0.18$, L_{max} と $\dot{V}O_{2max}$ が $r = 0.28$, $\dot{V}O_{2max}$ と P_{max} が $r = 0.03$ となり、いずれの組合せにおいても統計的に有意な相関(5%水準, 以下同様)ではなかった。したがってこれらの指標は、それぞれ独立した関係にあると判断した。

これら3種類のエネルギー供給能力が、 P_x とどのような関連があるかをみるために、以下のような検討を行った。すなわち P_{max} , L_{max} , $\dot{V}O_{2max}$ それぞれについて、21名の被検者の平均値を基準として、平均値以上の値を示した被検者(H群)と平均値以下の値を示した被検者(L群)の2群に分け、両群間で P_x の平均値を比較した。

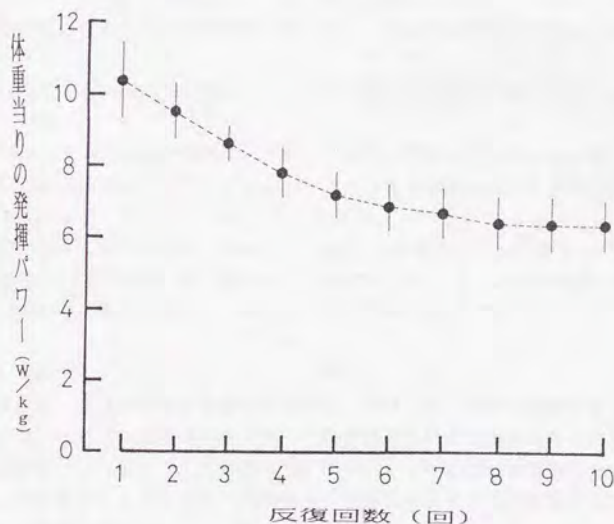


図29. 自転車エルゴメーターを用いて、10秒間の最大努力運動を20秒間の休息をはさんで10セット行った際に発揮された機械的パワー(P_x)の推移。図中の縦棒は標準偏差を表す(以下の図も同様)。

図30-aは、Pmaxに優れるH群(12名)と劣るL群(9名)との間で、Pxの平均値を比較したものである。P1~P3についてはH群が有意に高値を示したが、P4以後になると両群間で有意差はみられなくなった。総仕事量の平均値は、H群が770±43J/kg、L群が752±70J/kgであり、両群間で有意差はみられなかった。

図30-bは、Lamaxに優れるH群(10名)と劣るL群(11名)との間で、Pxの平均値を比較したものである。いずれのPxにおいても両群間で有意差はみられなかった。総仕事量の平均値についても、H群が766±68J/kg、L群が758±43J/kgであり、両群間で有意差はみられなかった。

図30-cは、 $\dot{V}O_{2max}$ に優れるH群(8名)と劣るL群(13名)との間でPxの平均値を比較したものである。P1には有意差はみられなかったが、P2以降になるとH群が有意に高値を示した。総仕事量の平均値についても、H群が816±33J/kg、L群が729±36J/kgとなり、両群間で有意差($p < 0.001$)がみられた。

図31は、II-2.の図19と同様、Pxに対してPmax、Lamax、 $\dot{V}O_{2max}$ の各指標が示す相関係数が、運動回数の増加にともないどのように変化するかを示したものである。

Pxに対するPmaxの相関は、1セット目では高かったが($r = 0.88$, $p < 0.001$)、反復回数の増加にともない急速に低下し、4セット目以後になると有意ではなくなった。

Pxに対するLamaxの相関は、全セットを通して有意ではなかった($r = 0.2 \sim -0.2$, $p > 0.05$)。

Pxに対する $\dot{V}O_{2max}$ の相関は、1セット目では低かったが($r = 0.22$, $p > 0.05$)、運動回数の増加にともなって増加し、3セット目以後になると有意な正の相関が維持された($r = 0.5 \sim 0.8$, $p < 0.05 \sim 0.001$)。

総仕事量に対するPmax、Lamax、 $\dot{V}O_{2max}$ の相関関係についてみると、PmaxおよびLamaxはいずれも有意な相関を示さず(それぞれ $r = 0.20$, $r = 0.34$, $p > 0.05$)、 $\dot{V}O_{2max}$ のみが有意な相関($r = 0.72$, $p < 0.05$)を示した。

4) 考察

II-2.の考察において述べたように、Pxはエネルギーの供給によって出力されており、また、Pxの値はエネルギーの供給量が多いほど大きくなるという生理的背景がある。したがって、Pxに対して各エネルギー供給能力が関連をもつということ、Pxに対して各エネルギー供給能力が影響を与えていると解釈することは妥当であると考えられる。

従来概念では、10秒間程度の短時間の最大努力運動は、主としてATP-CP系のエネルギーによって遂行され、したがって運動成績にはATP-CP系の能力が影響を与えると考えられてきた(Simoneauら:1983, Boulayら:1985, Bar-Or:1987)。実際

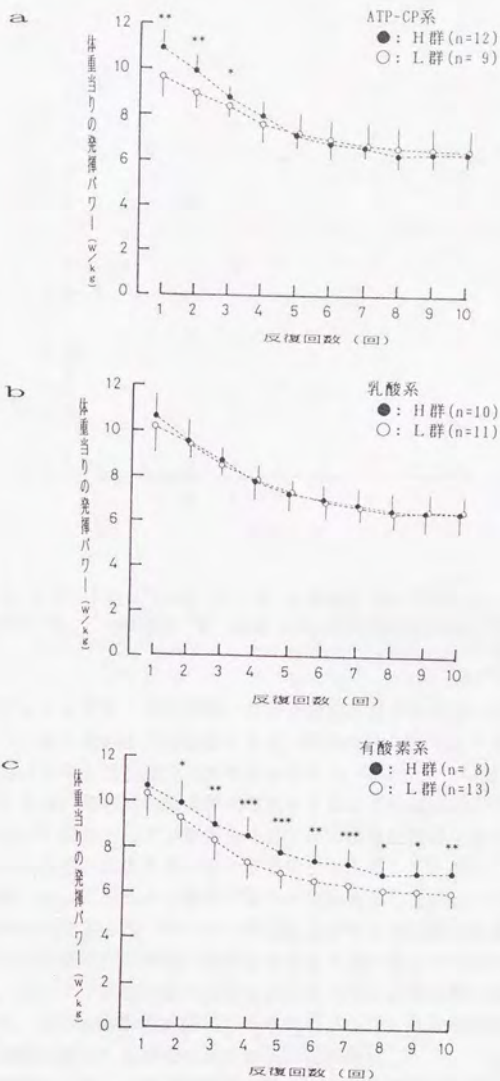


図30. ATP-CP系 (a), 乳酸系 (b), 有酸素系 (c) の各エネルギー供給能力に優れる者 (H群: ●) と劣る者 (L群: ○) の間でのPxの比較. *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$

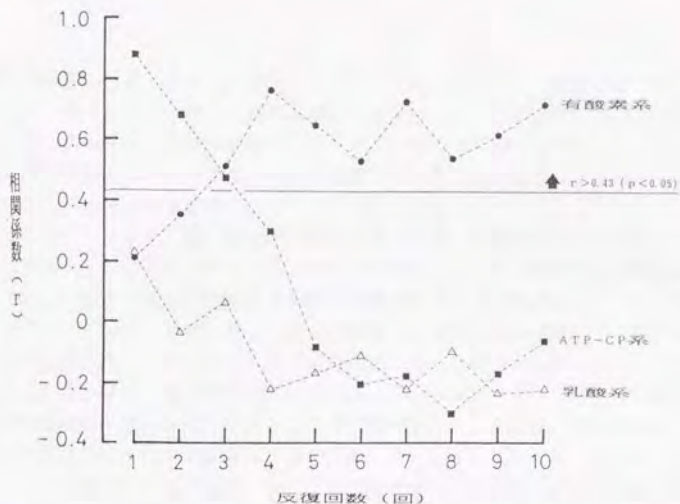


図31. 1セット目から10セット目までに発揮されたPxに対して、ATP-CP系(■)、乳酸系(△)、有酸素系(●)の各エネルギー供給能力が示した相関係数。

に本研究においても、ATP-CP系の能力の指標としたPmaxは、P1とは高い相関関係を示した。しかしその相関は運動の反復回数の増加にともなって急速に低下し、P4以後の発揮パワーとは有意な相関を示さなくなった。

このことは、短時間の最大努力運動を1回あるいは数回反復して行う場合の運動成績にはATP-CP系の能力が影響を与えるが、反復回数がそれよりも多くなると、ATP-CP系の能力は影響を与えなくなることを示唆している。

P3以後、Pmaxに代わって発揮パワーと関連を示したのは、有酸素系の能力の指標とした $\dot{V}O_{2max}$ であった。 $\dot{V}O_{2max}$ は長距離走をはじめ連続的な運動様式をもつ各種スポーツの長距離種目の成績に影響を与えることが古くから知られており(山地, 1992)、これまでは低強度の運動を持続する際の運動成績を規定する能力と考えられてきた。しかし本研究の結果にみられるように、短時間の最大努力運動を反復する際の運動成績にも影響を与えたことは興味深い。

先行研究によると、間欠的運動の場合、運動の初期にはATP-CP系や乳酸系のエネルギーが主として利用されるが、運動回数が重なるに連れてATP-CP系と有酸素系が主たるエネルギーを供給するようになることが示唆されている(Margariaら: 1969, Foxら: 1969, Sprietら: 1989, Gaitanosら: 1993, Bangsbo: 1994, および本研究

の図28参照)。またⅢ-1.の考察において検討したように、運動後期のATP-CP系のエネルギーについては、有酸素系のエネルギーによって繰り返し再合成されているので、実質的には有酸素系のエネルギーに由来したものと考えられる。本研究で、有酸素系の能力($\dot{V}O_{2max}$)が、P3以降の全てのPxおよび総仕事量と有意な相関を示したのは、このような理由によるものと考えられる。

上に述べたように、間欠的運動の後期においては、有酸素系だけではなくATP-CP系のエネルギーも利用されている。それにも関わらず、P4以降のPxとATP-CP系の能力(P_{max})とが有意な相関を示さなかった理由は次のように考えられる。先行研究によると、ATP-CP系の主たるエネルギー物質であるCPが運動によって枯渇した場合、それが安静時のレベルに対して50%まで回復するには約20~30秒、100%まで回復するには約2~3分を要するとされる(Hultmanら:1967, Fox:1979)。本研究で用いた運動条件では、休息インターバルが20秒間であることから、休息期におけるCPの完全な回復は不可能であると考えられる。

このような状況のもとでは、ATP-CP系の能力がいかに優れているかということよりも、不十分な休息時間の中で、有酸素系のエネルギーを用いてATP-CP系のエネルギーをどれだけ多く回復させられたかということが、次回の運動インターバルでより大きなパワーを発揮できるかどうかに関係すると考えられる。実際に最近の研究によると、有酸素系の能力に優れる者はそうでない者に比べて、運動後のCPの回復がより速いことが指摘されている(Janssonら:1990, 久野ら:1990)。本研究で、P4以降の運動成績に対して、ATP-CP系ではなく有酸素系の能力が密接な関連を示したのはこのような理由によるものと考えられる。

本研究では、 L_{max} は全てのPxおよび総仕事量に対して有意な相関を示さなかった。これは、先行研究(Foxら:1969, Essénら:1977, Bangsboら:1992, Gaitanosら:1993)、およびⅢ-1.の検討結果から示唆されるように、間欠的運動においては乳酸系のエネルギーの貢献度が、他の2つのエネルギー系の貢献度ほどは大きくないことによるものと考えられる。

実験2:運動成績と3種類のエネルギー供給能力との関係におよぼす 休息インターバル時間の影響

1) 目的

実験1の結果から、間欠的な運動を最大努力で行った際の運動成績には、主として有酸素系のエネルギー供給能力が関連することが示唆された。しかしこの結果は、

運動インターバルが10秒間、休息インターバルが20秒間というある1つの運動条件で得られた結果に過ぎない。しかし間欠的運動にはさまざまな運動インターバルと休息インターバルの組合せが考えられる。そして、Ⅲ-1. でも検討したように、この組合せが変わると、エネルギー系の貢献度も変わる。

そこで実験2では、運動インターバルと休息インターバルの比率を変えたときに、運動成績に対する3種類のエネルギー供給能力の関連がどのように変わるかを検討した。なお、運動インターバルと休息インターバルの比率を変えるとき、Ⅲ-1. の実験1で検討したように休息インターバルを変える方法と、実験2で検討したように運動インターバルを変える方法の2とおりが考えられるが、ここでは休息インターバルを変えて行うこととした。

また運動インターバルについては、実験1では10秒間としたが、間欠的な運動様式をもつスポーツをみると、最大努力あるいはそれに近い運動を10秒間続けることは少なく、長くても5秒間程度であると報告されている (Bangsbo: 1994, 石垣: 1994)。そこで本研究では、運動インターバルを5秒間とし、休息インターバルを10, 20, 40秒間の3通りに変え、最大努力で間欠的運動を行った。そして、その際の運動成績に対して、3種類のエネルギー供給能力の関わりがどのように変化するかを検討した。

2) 方法

a. 被検者

被検者は体育学を専攻する男子大学生23名であった。彼らの年齢、身長、体重の平均値と標準偏差は、それぞれ 20.3 ± 1.1 歳、 173.0 ± 6.0 cm、 68.3 ± 7.3 kgであった。被検者には、実験の目的、方法、測定にともなう苦痛、および危険について説明を行い、実験に参加することについて同意を得た。

b. 間欠的運動

電磁ブレーキ式の自転車エルゴメーター (パワーマックス-V, コンビ社製) を使い、5秒間の最大努力運動を一定の休息インターバルをはさんで20セット反復した。負荷値は、被検者の体重の7.5%とした。

休息インターバルは、10, 20, 40秒間の3種類とした (それぞれ以下R10, R20, R40と略記する)。これら3種類の運動はそれぞれ日を変えて実施した。

各セット毎に発揮された機械的パワー (P_x : $x=1, 2, \dots, 20$, 単位: W) を求めた。 P_x は、自転車エルゴメーターに内蔵されている計算器によって、各セット毎に発揮パワー (5秒間の平均パワー) が表示されるので、これをそのまま読み取り、データとした。また、20セット分の P_x を積算して総仕事量 (単位: J) も求めた。

また、20セットの運動が終了した後（直後、2、4、6、8分後）に、手の指先から微量の血液を採取し、血中乳酸濃度（La）を測定した。そしてそれらの中の最高値をピーク血中乳酸濃度（PeakLa、単位：mM/l）とした。

c. 3種類のエネルギー供給能力の測定

ATP-CP系、乳酸系、有酸素系の各エネルギー供給能力の指標として、実験1と同様、それぞれ最大無酸素性パワー（Pmax）、最大血中乳酸濃度（Lamax）、最大酸素摂取量（ $\dot{V}O_{2max}$ ）を用いた。測定方法は実験1の方法にほぼ準拠した。

① Pmax

b. の運動で用いたと同じ型の自転車エルゴメーターを用いて、5秒間の最大努力運動を行い、この運動で発揮された機械的パワー（5秒間の平均パワー）を読み取り、これをPmax（単位：W）とした。運動は5分以上の休息をはさんで3回以上行い、その中の最高値を採用した。負荷は被検者の体重の7.5%とした。

② Lamax

b. で行った3種類の間欠的運動で得られたPeakLaのうちの最高値をLamax（単位：mM/l）とした。

③ $\dot{V}O_{2max}$

自転車エルゴメーター（Type868、Monark社製、Sweden）を用い、回転数を60rpmに規定して、負荷を3.0kpから1分毎に0.5kpまたは0.25kpづつ漸増し、7～10分でオールアウトとなるような運動を行った。このときの酸素摂取量を、ダグラスバッグ法を用いて1分毎に測定し、その最大値を $\dot{V}O_{2max}$ （l/min）とした。

d. データの処理

Pxおよび総仕事量に対して、Pmax、Lamax、 $\dot{V}O_{2max}$ の関係を検討する際には、実験1と同様、Lamaxを除いていずれも体重当りの相対値を用いることとした。Lamaxについてはそのままの値を用いた。したがって、それぞれの指標の単位は、Px：W/kg、総仕事量：J/kg、Pmax：W/kg、Lamax：mM/l、 $\dot{V}O_{2max}$ ：ml/kg・minとなった。

3) 結果

図32は、運動の反復にともなうPxの値の推移を、横軸に運動の回数をとって示したものである。P1の値は休息インターバルの長短に関わらずほぼ同じであったが、P2以降の値は休息インターバルが長い運動条件ほど高値を示した。総仕事量の平均値と標準偏差は、R10では824±60J/kg、R20では932±70J/kg、R40では1059±60J/kgとなり、休息インターバルが長い条件ほど大きくなった。PeakLaの平均値と標準偏差は、R10では18.4±2.2mM/l、R20では17.1±1.6mM/l、R40では15.6±2.5

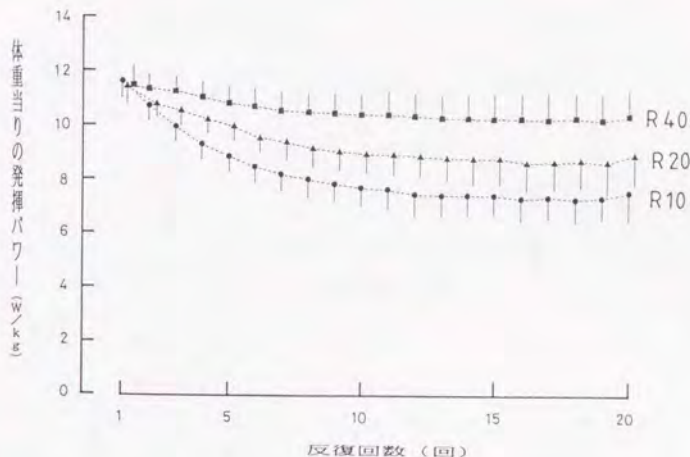


図32. 自転車エルゴメーターを用いて、5秒間の最大努力運動を10秒間（R10）、20秒間（R20）、40秒間（R40）の休息をはさんでそれぞれ20セット行った際に発揮された機械的パワー（ P_x ）の推移。

mM/1となり、休息インターバルが短い条件ほど高値を示す傾向がみられた。

P_{max} , L_{max} , $\dot{V}O_{2max}$ の平均値と標準偏差はそれぞれ、 12.3 ± 0.8 W/kg, 18.7 ± 2.0 mM/1, 53.1 ± 7.9 ml/kg·minであった。

図33は、R10、R20、R40の各条件において発揮された P_x に対して、 P_{max} , L_{max} , $\dot{V}O_{2max}$ が示す相関係数が、運動回数の増加にともないどのように変化するかを示したものである。

図33-aは、 P_x に対して P_{max} が示す相関係数の推移を、横軸に運動の反復回数をとって示したものである。 P_{max} は P_1 に対して、運動条件によらず $r = 0.75 \sim 0.83$ と、統計的に有意（5%水準、以下同様）な相関関係を示した。しかし、この相関は運動回数の増加にともない低くなった。そして、R10とR20の条件では6セット目以降、R40では10セット目以降になると、統計的に有意ではなくなった。

図33-bは、 P_x に対して L_{max} が示す相関係数の推移を、横軸に運動の反復回数をとって示したものである。 P_x に対して L_{max} が示す相関係数は、いずれの運動条件においても統計的に有意ではなかった（ $r = -0.34 \sim 0.32$ ）。

図33-cは、 P_x に対して $\dot{V}O_{2max}$ が示す相関係数の推移を、横軸に運動の反復回数をとって示したものである。 $\dot{V}O_{2max}$ は P_1 に対して、運動条件によらず $r = -0.10 \sim$

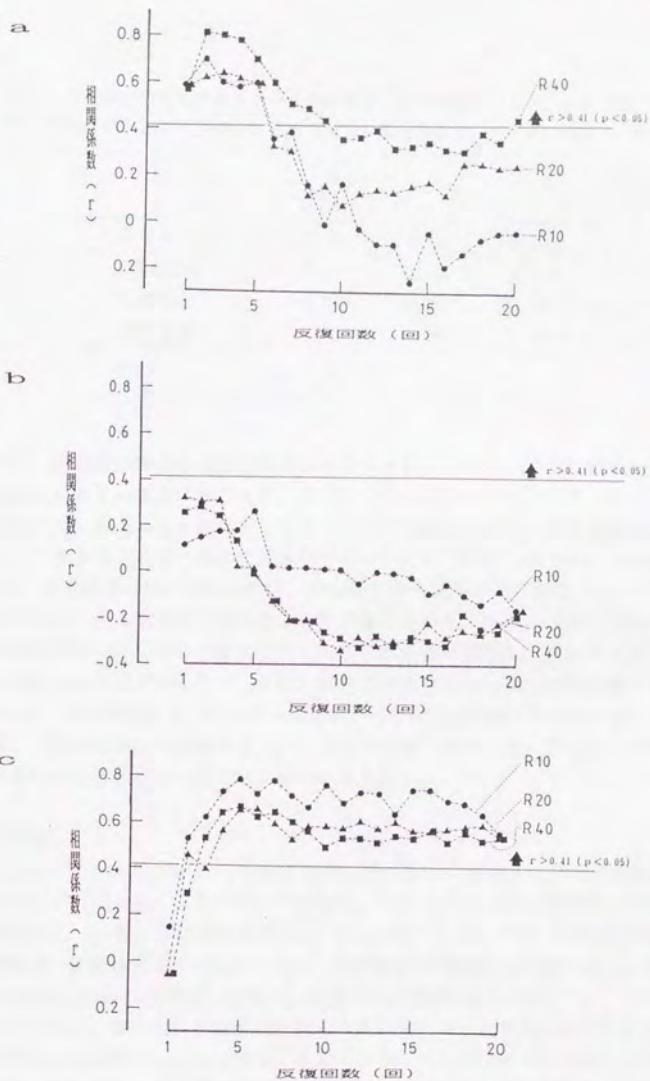


図33. R10 (●), R20 (▲), R40 (■)の運動で発揮された1セット目から20セット目までのPxに対して、ATP-CP系(a)、乳酸系(b)、有酸素系(c)の各エネルギー供給能力が示した相関係数。

表5. 3種類の間欠的運動において発揮された総仕事量に対して、ATP-CP系、乳酸系、有酸素系の各エネルギー供給能力が示した相関係数。* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$, *** : $p < 0.001$

エネルギー系	R10	R20	R40
ATP-CP系	0.20	0.28	0.52*
乳酸系	-0.02	-0.21	-0.19
有酸素系	0.74***	0.60**	0.58**

0.16と、統計的に有意な相関関係を示さなかった。しかし、この相関は、運動回数の増加にともない急速に高くなり、R10とR20では2セット目以降、R40では3セット目以降、有意となった。そして5セット目以降になると、相関係数はほぼ一定値を示すようになった。その値はR10では $r \approx 0.7$ 、R20では $r \approx 0.6$ 、R40では $r \approx 0.5$ と、休息時間が短い運動条件ほど高い値を保つ傾向がみられた。

表5には、各運動条件で得られた総仕事量に対して、 P_{max} 、 L_{max} 、 $\dot{V}O_{2max}$ が示す相関係数を示した。総仕事量に対して P_{max} が示す相関係数は、休息インターバルが長い条件となるほど高くなり、R40の条件では有意となった。総仕事量に対して L_{max} が示す相関係数は、いずれの運動条件においても有意ではなかった。総仕事量に対して $\dot{V}O_{2max}$ が示す相関係数は、いずれも有意であったが、その値は休息時間が短い条件となるほどより高くなる傾向がみられた。

4) 考察

P_x に対する P_{max} 、 L_{max} 、 $\dot{V}O_{2max}$ の関連(図33)は、実験1で得られた結果(図31)と基本的にはよく似ていた。すなわち、 P_x に対する P_{max} の相関は、運動の初期に最も高く、以後、反復回数の増加にともない低下した。一方、 P_x に対する $\dot{V}O_{2max}$ の相関は、運動の初期では低かったが、反復回数の増加にともない増加した。また、 P_x に対する L_{max} の相関は、全セットを通して有意ではなかった。

このように、基本的には実験1で得られた結果によく似た傾向がみられたものの、 P_x に対する P_{max} と $\dot{V}O_{2max}$ の相関は、休息インターバルが異なると変化する傾向がみられた。すなわち、 P_x に対する P_{max} の相関は休息インターバルが長くなるほど強まる傾向を示し、反対に、 P_x に対する $\dot{V}O_{2max}$ の相関は休息インターバルが短くなるほど強まる傾向を示した。つまり、間欠的運動の運動成績には、ATP-CP系と有酸素系の2つの能力が主として影響を与えるが、それらの影響の強さは休息インターバル

の長短によって相対的に変わるといえる。

実験1で行った運動条件（運動インターバルが10秒間、休息インターバルが20秒間）においては、総仕事量に対して有酸素系の能力のみが有意な相関を示し、ATP-CP系の能力は有意な相関を示さなかった。本研究においても、休息インターバルの短いR10やR20の条件では、総仕事量に対して有酸素系の能力のみが有意な相関を示し、ATP-CP系の能力は有意な相関を示さなかった。しかしR40の条件になると、有酸素系の能力もATP-CP系の能力もともに総仕事量と有意な相関を示した。このように、休息インターバルが長くなると、有酸素系の能力に加えてATP-CP系の能力も関連を示すようになってくる理由として、以下のようなことが考えられる。

III-1. の検討結果から示唆されたように、間欠的運動においてはATP-CP系と有酸素系とが主たるエネルギーを供給する。また、このうちATP-CP系のエネルギーについては、有酸素系のエネルギーによって繰り返し再合成されながら利用されているという関係がある。

ここで、休息インターバルが短い運動条件においては、不十分な休息時間の中で、有酸素系のエネルギーを用いてATP-CP系のエネルギーをより多く回復させることのできる者が、次の運動インターバルでより大きなパワーを発揮できると考えられる。したがって、実験1の考察で述べたように、ATP-CP系の能力が優れていることよりも、有酸素系の能力に優れていることの方が、運動成績を高める上でより重要になると考えられる。実験2（本研究）の結果をみても、休息インターバルが短い運動条件となるほど、運動の中～後期におけるPxや総仕事量に対する有酸素系の能力との相関は高くなり、ATP-CP系の能力との相関は低くなっていることがわかる。

一方、休息インターバルが長くなって、消耗したATP-CP系のエネルギーのかなりの部分を回復させられるような条件になると、有酸素系の能力だけではなく、ATP-CP系の能力そのものがいかに優れているかということも、運動成績を決める上で重要な要素になると考えられる。

<実験1, 2の総括>

実験1, 2の結果を総合すると、最大努力で間欠的運動を行ったときの運動成績に対しては、基本的にATP-CP系と有酸素系の能力が影響を与えるが、運動インターバルに対する休息インターバルの割合が変化すると、その影響の強さは相対的に変化するといえよう。

III-3. 間欠的な運動を最大努力で行った際の運動成績の競技種目特性

III-1. と III-2. の実験結果から、間欠的な運動においては、主としてATP-CP系と有酸素系のエネルギーが関わりをもつことが示唆された。またそれらのエネルギーの関わり方は、運動インターバルと休息インターバルの割合が変化することによって変わることも示唆された。

これらの結果を間欠的な運動様式をもつスポーツに当てはめると、次のようなことが考えられる。すなわち、間欠的な運動様式をもつスポーツにおいては、基本的にはATP-CP系と有酸素系のエネルギー供給能力のいずれにも優れることが重要と考えられる。しかし、種目によって運動インターバルと休息インターバルの割合は異なっているので、両者の重要度は種目によって異なったものになると考えられる。その結果、それらの種目に携わる選手のATP-CP系と有酸素系のエネルギー供給能力の発達度も、種目によって異なっていることが予想される。

そこで本研究では、間欠的な運動様式をもつ球技スポーツの中でも、相対的に運動インターバルの割合が大きいサッカーと、休息インターバルの割合が大きいアメリカンフットボールの選手を対象として、自転車エルゴメーターを用いて間欠的な最大努力運動を行わせた。そして、発揮パワー特性にどのような違いがみられるかを、以下の2つの観点から検討した。

実験1：サッカー選手とアメリカンフットボール選手の発揮パワー特性の比較

実験2：サッカーとアメリカンフットボールにおいて、競技力の優秀な

選手とそうでない選手の間での発揮パワー特性の比較

実験1：サッカー選手とアメリカンフットボール選手の発揮パワー特性の比較

1) 目的

サッカーおよびアメリカンフットボールの選手を対象として、自転車エルゴメーターを用いて最大努力で間欠的な運動を行わせ、発揮パワーの特性を比較することを目的とした。

2) 方法

a. 被検者

サッカー選手：プロサッカーリーグ（Jリーグ）に所属するあるチームの選手27

名を対象とした。被検者の年齢、身長、体重の平均値と標準偏差は、それぞれ24.0 ± 4.0歳、175.5 ± 5.3cm、70.5 ± 5.5kgであった。

アメリカンフットボール選手：社会人の1部リーグに所属するあるアメリカンフットボールチームの選手45名を対象とした。被検者の年齢、身長、体重の平均値と標準偏差は、それぞれ24.9 ± 2.0歳、175.8 ± 6.2cm、81.1 ± 8.9kgであった。

これらのチームの競技力のレベルは、いずれも日本においてはトップクラスに位置しているという意味で、相対的にはほぼ同じであるとみなした。

これらの被検者には実験の趣旨を説明し、参加への同意を得た。また、これらの被検者はいずれも過去にこの方法によって自転車エルゴメーターの間欠的な最大努力運動を1回以上経験しており、この運動にはある程度馴れたものであった。

b. 実験手順

自転車エルゴメーター（パワーマックス-V、コンビ社製）を用いて、5秒間の最大努力運動を20秒間の休息をはさんで10セット行い、その際に発揮された機械的パワーを測定した（ P_x ： $x=1, 2, \dots, 10$ ，単位：W）。ペダリングの方法は、セット数を20セットから10セットに変更した以外は、Ⅲ-2. と全く同じであった。セット数を10セットとした理由は、Ⅲ-2. の研究結果から、10セットを過ぎると発揮パワーの低下がほぼ停止して定常状態を呈すること（図32）、また発揮パワーに対する3種類のエネルギー供給能力の相関もほぼ同じ値が維持されること（図33）が示されたことに基づいた。データの処理方法についてもⅢ-2. と全く同じ方法で行った。

3) 結果

図34は、サッカーおよびアメリカンフットボール選手が発揮したパワー（体重当り）を示したものである。いずれも発揮パワーはP1で最大となり、以後セット数の増加にともない低下した。しかし、その低下の度合には種目間で差がみられ、サッカーよりもアメリカンフットボールの選手の方が低下率が大きかった。

両群間で有意差検定を行ったところ、P1には有意差（5%水準、以下同様）はみられなかったが、P2以降の発揮パワーについては、サッカー選手の方が有意に高値を示した（ $p < 0.001$ ）。

4) 考察

サッカーとアメリカンフットボールは戸外の比較的大きなフィールドで行われる球技スポーツであり、競技中にダッシュなどの瞬発的な運動を何度も繰り返すという点ではよく似た運動である。しかしその運動特性を細かくみると、次のような違

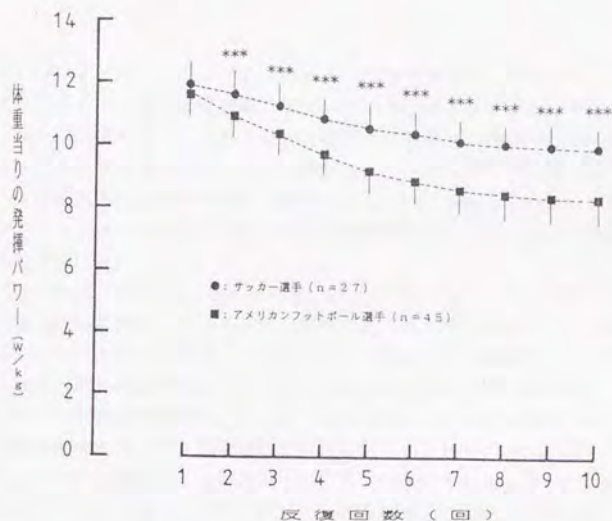


図34. サッカーとアメリカンフットボールの選手が、自転車エルゴメーターを用いて最大努力で10セットの間欠的運動を行った際に発揮された機械的パワーの推移。

***: $p < 0.001$

いがある。

サッカーでは、きわめて頻繁なダッシュの繰り返しが要求される。またダッシュのような高強度の運動以外にも、中～低強度の走運動が頻繁に行われるため、完全な運動の休止時間は短い。これに対してアメリカンフットボールでは、攻撃と防御でメンバーの入れ替えを行うことができ、また攻撃、防御のいずれの場面においても、作戦を打ち合わせるための運動の休止時間（ハドル）が頻繁にある。したがって、サッカーとアメリカンフットボールを比べた場合、前者は相対的に運動インターバルの割合が大きく、後者は休息インターバルの割合が大きい種目といえる。

本研究の結果をみると、P1についてはサッカー選手もアメリカンフットボール選手もほぼ同程度の値を示し、有意差はみられなかった。P1は、ATP-CP系のエネルギー供給能力と高い相関がある（図31、図33-a）。したがって、ATP-CP系の能力に関しては、両種目の選手とも同程度の能力が発達しているといえよう。

中村（1987）は、自転車エルゴメーターを用いて各種スポーツの一流選手の P_{max} を測定している。この報告にはアメリカンフットボール選手のデータは含まれてい

ないが、サッカー、バスケットボール、バレーボール、アイスホッケーといった球技系のスポーツ選手の発揮パワーは、ほぼ同じ値を示すこと、またこれらの球技系スポーツ選手の値は、それ以外のさまざまなスポーツ種目の選手に比べて最も高値を示すことを指摘している。中村の報告は、球技スポーツの選手は、種目によらずほぼ同程度の高いATP-CP系能力が発達することを示唆している。したがってアメリカンフットボールにおいても、それと同程度のATP-CP系の能力が発達していることが予想される。

P2～P10については、サッカー選手の方がアメリカンフットボール選手よりも有意に高い値を示した。Ⅲ-2. で検討したように、運動インターバルを5秒間、休息インターバルを20秒間として、最大努力で間欠的な運動を行ったときの運動の中～後半の Px は、有酸素系のエネルギー供給能力と高い相関関係を示す(図33-c)。したがって本実験の結果は、サッカー選手の方がアメリカンフットボール選手よりも有酸素系のエネルギー供給能力が発達しているということを示唆している。実際に、さまざまな研究者によって発表された各種スポーツ選手の $\dot{V}O_2 \max$ の値(有酸素系のエネルギー供給能力)を種目別にまとめた山地(1992)は、サッカー選手では $\dot{V}O_2 \max$ が60～70ml/kg·minであるのに対して、アメリカンフットボールでは40ml/kg·min程度と、サッカー選手の方が有酸素系のエネルギー供給能力が発達していることを報告している。

サッカーとアメリカンフットボールの競技特性を比較すると、すでに述べたように、休息インターバルの時間は相対的にサッカーの方が短い。したがってサッカーにおいては、短い休息インターバルの中でATP-CP系のエネルギーを十分に回復させるために、有酸素系のエネルギー供給能力に優れることが要求されると考えられる。一方、アメリカンフットボールにおいては、休息インターバルが長いので、サッカー選手ほど有酸素系のエネルギー供給能力は要求されないと考えられ、このような競技特性の違いによってP2以降の値に両群間で差が生じたものと考えられる。

実験2：サッカーとアメリカンフットボールにおいて、競技力に優れる選手とそうでない選手の間での発揮パワー特性の比較

1) 研究目的

実験1では、競技力の比較的優秀なサッカー選手とアメリカンフットボール選手との間で、最大努力で間欠的な運動を行った際の発揮パワーの特性を比較した。その結果、サッカー選手では、運動の初期～後期の全区間で発揮パワーに優れていた。

一方、アメリカンフットボール選手では、運動の初期の発揮パワーには優れるが、中～後期のパワーはサッカー選手と比べると低かった。

そこで実験2として、それぞれの種目内で相対的に競技力に優れるチームの選手とそうでないチームの選手を対象として、自転車エルゴメーターを用いて最大努力で間欠的な運動を行わせ、発揮パワーの特性を比較した。

2) 方法

a. 被検者

サッカー選手：競技力に優れるチーム（H群）として、実験1に参加したプロリーグの選手27名のデータを用いた。また、競技力の劣るチーム（L群）として、ある体育大学のサッカー部の選手22名を被検者とした。L群の選手の年齢、身長、体重の平均値および標準偏差は、それぞれ 19.8 ± 0.9 歳、 171.8 ± 4.5 cm、 66.5 ± 6.3 kgであった。

アメリカンフットボール選手：競技力に優れるチーム（H群）として、実験1に参加した社会人1部リーグの選手45名を被検者とした。また、競技力の劣るチーム（L群）として、社会人4部リーグに所属するあるチームの選手17名を被検者とした。L群の選手の年齢、身長、体重の平均値および標準偏差は、それぞれ 22.4 ± 0.8 歳、 171.9 ± 5.2 cm、 74.6 ± 7.7 kgであった。

これらの被検者には実験の趣旨を説明し、実験に参加することへの同意を得た。また、これらの被検者はいずれも過去にこの方法によって自転車エルゴメーターのペダリングを1回以上経験しており、自転車エルゴメーターのペダリングにはある程度馴れたものであった。

b. 実験手順

実験1とすべて同じであった。

3) 結果

図35には、サッカーにおけるH群とL群の発揮パワーを示した。H群はL群に対して、P1～P10までの全ての発揮パワーが有意に高値を示した。

図36には、アメリカンフットボールにおけるH群とL群の発揮パワーを示した。H群はL群に対して、P1～P4までの発揮パワーは有意に高値を示したが、それ以後になると有意差はみられなくなった。

4) 考察

実験1の結果は、間欠的な最大努力運動を行ったとき、サッカーの優秀選手は初

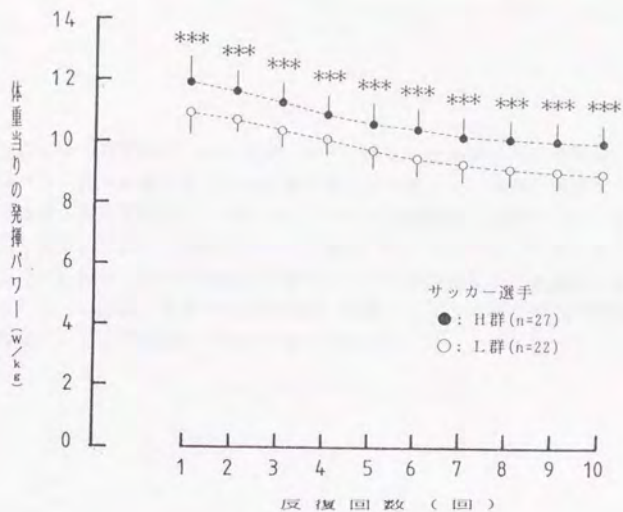


図35. サッカーにおいて相対的に競技力が優れる選手 (H群) と劣る選手 (L群) が、自転車エルゴメーターを用いて最大努力で10セットの間欠の運動を行った際に発揮された機械的パワーの特性. ***: $p < 0.001$

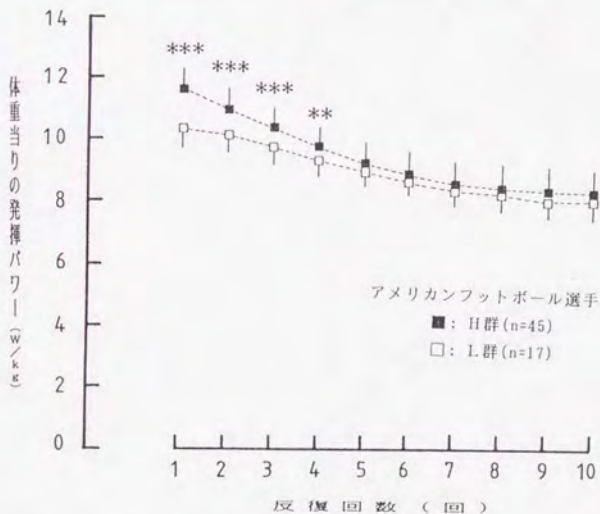


図36. アメリカンフットボールにおいて相対的に競技力が優れる選手 (H群) と劣る選手 (L群) が、自転車エルゴメーターを用いて最大努力で10セットの間欠の運動を行った際に発揮された機械的パワーの特性. **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$

期～後期の全ての発揮パワーに優れ、アメリカンフットボールの優秀選手では初期の発揮パワーのみが優れることを示唆するものであった。一方、実験2の結果は、間欠的な最大努力運動を行ったとき、サッカーの優秀選手はそうでない選手に比べて初期～後期までの全ての発揮パワーに優れ、アメリカンフットボールの優秀選手はそうでない選手に比べて初期の発揮パワーのみが優れることを示唆するものである。したがって実験2で得られた結果は、実験1で得られた結果と同様の内容を、別の観点から示したものとみなすことができよう。

IV. 総括論議

本研究では、高強度の運動を持続した際に、無酸素系（ATP-CP系、乳酸系）と有酸素系のエネルギーがどのように関わるかということについて、連続的運動と間欠的運動に分けて検討してきた。ここではその結果について総合的な考察を加える。

1. 連続的運動

1) エネルギー供給の状況

自転車エルゴメーターを用い、最大努力で120秒間連続のペダリングを続けるという運動を対象として、運動時間の経過にともない、各エネルギー系の貢献度がどのように変化するかを検討した（II-1.）。

まず、エネルギー系を無酸素系と有酸素系とに分けて、両エネルギー系の貢献度を観察した。両エネルギー系の貢献度は、A：酸素負債量と酸素摂取量の比、およびB：酸素借と酸素摂取量の比、という2とおりの方法により求めた（図12、図13）。AとBいずれの結果とも、運動開始直後には無酸素系が主たるエネルギーを供給するが、時間経過にともない有酸素系のエネルギー供給の貢献度が急速に増加し、約60秒後には有酸素系のエネルギーの貢献度が100%となるという点については共通していた。しかし、運動開始から60秒目までの間の、無酸素系から有酸素系へのエネルギー供給の転換が行われている時間帯における両エネルギー系の貢献度は、AとBとで大きく異なっていた。AとBいずれの方法とも、エネルギー供給量を厳密に定量する上では問題点があるので、真の値を示すことは現時点では不可能である（I-2.）。しかし、真の値はAとBで求めた値の間に存在することから、真の値が存在する範囲は本研究の結果によって限定することができたといえよう（表2）。

次に、無酸素系を構成する2つの成分のうち、乳酸系によるエネルギー供給の状況について、血中乳酸濃度を手がかりとして観察した（図15）。ATP-CP系によるエネルギー供給の状況については、筋バイオブシー法の実施が必要であるため、本研究では検討を行うことができなかったが、本研究と同様の運動様式を対象として行われた先行研究（Withersら、1991）を参考として推察した。

これらの検討結果を総合して、120秒間連続の最大努力運動を行った際の、3種類のエネルギー系によるエネルギー供給の状況をまとめたものが図16である。この図は、各エネルギー系によるエネルギー供給の貢献度を定量的に表したものではない。しかし、各エネルギー系がエネルギーの供給を行っている時間帯や、エネルギー供給量の相対的な大きさ、エネルギー供給量がピークに達する時間帯については、実験データに基づいて示してある。

従来、運動生理学のテキスト等に描かれてきたこの種の図（Keulら：1972, Dal

Monte: 1977, SaleとNorman: 1982, Molé: 1983) は, 1-2. でも検討したように, きわめて概念的な強いものが多い. たとえば図37は, その中でも従来よく引用されてきたKeulら(1972)の図である. 図37と図16とを比べてみると, 運動時間の経過にともない, 主たるエネルギーを供給する系が, ATP-CP系, 乳酸系, 有酸素系の順で, 重複する時間帯をもちつつ推移するという点では共通している. しかし, その推移を細かく比べてみると, 多くの相違がみられる.

たとえばKeulらは, 乳酸系のエネルギー供給に関して, それがピークに達するのは運動の開始から30~40秒後であること, またエネルギー供給が終了するのは2~3分後であると述べている. また有酸素系のエネルギー供給に関して, その貢献度が50%に達するのは, 運動の開始から1分以上経過した後であること, また貢献度が100%となるのは2~3分後であるとしている(図37).

これに対して本研究の結果からは, 乳酸系によるエネルギー供給がピークに達するのは15~30秒後であり, エネルギー供給が終了するのは約1分後であることが示唆された. また, 有酸素系によるエネルギー供給の貢献度は, 運動の開始から30~45秒後には50%を超え, 1分後にはほぼ100%となることが示唆された(表2, 図16).

つまり本研究の結果は, 高強度の運動を持続した際の3種類のエネルギー系によ

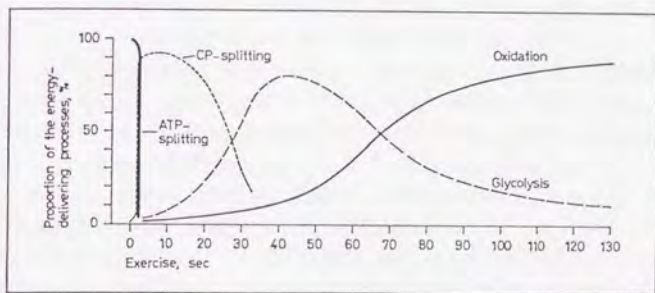


図37. 高強度の運動を持続した際に, 主たるエネルギーを供給するエネルギー系が時間経過にともなって移り変わることを示した従来の代表的な概念図. ATP-splittingとCP-splittingはATP-CP系, Glycolysisは乳酸系, Oxidationは有酸素系によるエネルギー供給を意味する. 横軸の時間は時刻(time)を表す. (Keulら, 1972)

るエネルギー供給の経時的な推移は、従来考えられてきたよりもより早く進行することを示唆している。特に明確な区切りがなされていたわけではないが、従来、1分以下の時間で行われる高強度の運動は無酸素系のエネルギーの貢献度の大きな運動と考えられ、「無酸素性運動」と呼ばれることが多かった。しかし本研究の結果は、このような運動における有酸素系のエネルギーの貢献度は従来考えられてきたよりも大きく、「無酸素・有酸素混合運動」と呼んだ方が適切であるということを示唆しているといえよう。

2) 運動成績に対する3種類のエネルギー供給能力の関与

II-2. では、II-1. と同じ運動を、最大努力で90秒間持続した際に発揮された運動成績(機械的パワー)に対して、3種類のエネルギー系のエネルギー供給能力がそれぞれどのような関連を示すかを検討した。

その結果、ATP-CP系、乳酸系、有酸素系の各エネルギー供給能力は、それぞれ運動の初期、中期、後期の発揮パワーと関連を示すことが明らかとなった(図18、図19)。この関連は、単なる関連ではなく、発揮パワーに対して各エネルギー系のエネルギー供給能力が影響を与えているとみなすことができる。各エネルギー系の能力が発揮パワーに対して、相関係数が0.4以上の正の相関を示す時間帯を「関連を示す」時間帯とみなすという規準を用いたところ、ATP-CP系、乳酸系、有酸素系の各能力はそれぞれ、運動開始直後~20秒目、15~60秒目、20秒目以降の各時間帯で発揮パワーと関連を示すという結果が得られた(図20)。この時間帯は、図16に示した、各エネルギー系の貢献度が大きくなる時間帯とほぼ一致していた。

なお、有酸素系の能力が、運動の開始から20秒後という早い時期から運動成績と関連を示したことは、注目すべきことと考えられる。高強度の運動を持続した際に、運動開始から何秒後になると運動成績に対して有酸素系のエネルギー供給能力が関連するかを調べた先行研究をみると、I-2. で紹介したように、Royce(1958)は50秒後、Wilesら(1981)は60秒後、根本ら(1988)は60秒後、Ivyら(1982)は45秒後から関連がみられたと報告している。本研究の結果では、これらの先行研究に比べて、有酸素系の能力がより早期から運動成績と関連を始めていることがわかる。この理由については明らかではないが、先行研究では片腕あるいは片脚といった局所的な運動を対象としているのに対して、本研究では自転車エルゴメーターのペダリングという全身運動に近い運動を用いているという違いがある。全身運動では局所的な運動に比べて、有酸素系の貢献度がより早くから増大するのかもしれない。

従来、1分以下の時間で行われる高強度の運動は無酸素性運動と呼ばれ、無酸素系のエネルギーの貢献度の大きな運動と考えられてきた。しかし、本研究の結果は、このような運動において高い運動成績を得るためには、無酸素系のエネルギー供給

能力だけではなく、有酸素系のエネルギー供給能力にも優れることが必要なことを示唆するものである。

本研究ではⅡ-2. で示した内容を、さらに別の角度から確認するために、Ⅱ-3. の研究を行った。Ⅱ-3. では、ATP-CP系、乳酸系、有酸素系の各エネルギー供給能力がそれぞれ発達しているとされる短、中、長距離走選手が、自転車エルゴメーターの最大努力ペダリングを行った際の発揮パワーの特性を観察した。

その結果、ATP-CP系の能力に優れる100m~400m走選手では運動初期、乳酸系の能力に優れる800m走選手では運動中期、有酸素系の能力に優れる1500m~5000m走選手では運動後期の発揮パワーに優れることが明らかとなった(図21)。この結果は、Ⅱ-2. で示したことと同じ内容を、別の角度から表したものと位置づけることができる。

3) 体育・スポーツへの応用

本研究で得られた結果を、体育・スポーツにおいて行われる連続的な運動様式をもつ種目に役立たせるためには、次のようなことを考える必要がある。

すなわち本研究では、最大努力運動を持続したときの運動成績やエネルギー供給を、運動の開始からの経過時間(time)と関連づけて捉えてきた。しかし体育・スポーツで行われる連続的な運動種目においては、運動の開始から何秒目にどれくらいのパワーが発揮され、またどのエネルギー系がどの程度の貢献をしているかということよりも、運動の開始から終了までのトータルの時間(duration)の中での運動成績や、エネルギー系の貢献度が問題となる。

表6. 自転車エルゴメーターを用いて、最大努力で連続的なペダリング運動を行った際に、運動開始からある時点までに供給された全エネルギーに対する有酸素エネルギーの貢献度。2とおりの計算方法で求めた。Aは O_2 debtと O_2 intakeの比から求めた値、Bは O_2 deficitと O_2 intakeの比から求めた値を示す。表2とよく似ているが、意味は異なる(表2は時刻(time)と関連づけており、表6は時間(duration)と関連づけている)。

算出方法		0-5秒	0-15秒	0-30秒	0-45秒	0-60秒	0-90秒	0-120秒
有酸素エネルギー	A	1	4	11	17	23	31	38
の貢献度(%)	B	9	13	24	35	43	56	65

このような問題について考えるために、II-1. で得られた実験データ(図12, 図13)を用いて、運動の開始からある時刻までに供給されたトータルのエネルギーに対する有酸素系のエネルギーの貢献度を計算し直した。その結果を示したものが表6である。両エネルギー系の貢献度は、表2と同様、A: 酸素負債量と酸素摂取量の比、およびB: 酸素借と酸素摂取量の比、という2とおりの方で求めている。AとBとで得られた値は、表2と同様の理由で食い違いがみられるが、真の値はAとBの間に存在すると考えられる。

またII-2. の実験データを用いて、運動の開始から各時点までになされた仕事量に対して、3種類のエネルギー供給能力が示す相関係数を計算し直した。その結果を示したものが図38である。仕事量に対するATP-CP系の能力の相関は、運動時間が短いほど高値を示し、運動時間が長くなるほど低くなった。仕事量に対する乳酸系の能力の相関は、運動時間が短い時には低かったが、運動時間が長くなるにつれ

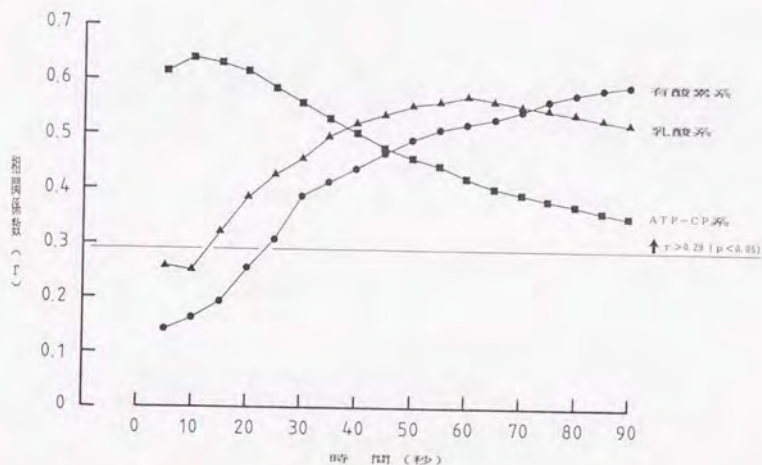


図38. 自転車エルゴメーターを用いて、最大努力で連続的なペダリング運動を行った際に、運動開始からある時点までになされた仕事量に対して、ATP-CP系(■)、乳酸系(▲)、有酸素系(●)の各エネルギー供給能力が示した相関係数。横軸の時間は、運動の開始からその時刻までの所要時間(duration)を意味している。図19とよく似ているが、意味は異なる(図19の時間は時刻(time)を意味している)。

て高くなり、60秒間の運動の時にピーク値を示した。しかし、その後再び低くなる傾向を示した。仕事量に対する有酸素系の能力の相関は、運動時間が短い時ほど低く、運動時間が長くなるほど高くなった。

図20にならって、仕事量に対して3種類のエネルギー系の能力が示す相関係数が0.4以上となる（「関連がある」）運動時間の範囲を示したものが図39である。なお、本研究では運動を90秒までで打ち切っているが、それ以上運動を持続した場合、仕事量に対する乳酸系の能力の関連は次第に低下し、やがては相関係数が0.4以下となることが図38から予想される。そこで、運動を90秒間以上続けたとき、90秒目の時点の発揮パワーがそのまま維持されると仮定して（この点については予備実験において、90秒目の時点とほぼ同じパワーが少なくとも4分目までは維持されることを確認している）、仕事量に対する乳酸系の能力の相関係数が0.4以下となる運動時間を求めた。その結果、240秒（4分）という値が得られた（図39）。

したがって、25秒間以内の運動であればATP-CP系のみ、4分間以上の運動であれば有酸素系のみが単独で運動成績に影響を与えることになると考えられる。また、

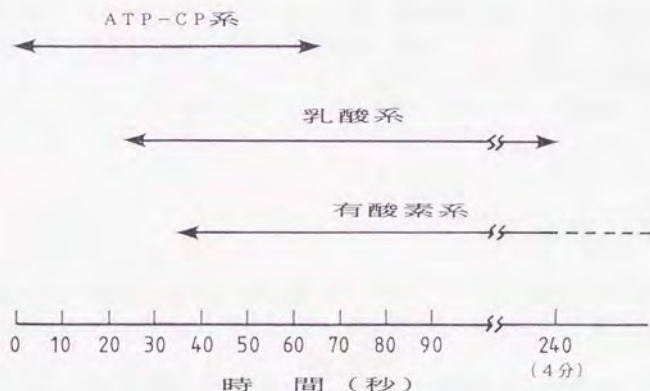


図39. 自転車エルゴメーターを用いて、最大努力で連続的なペダリング運動を行った際に、運動開始からある時点までになされた仕事量に対して、ATP-CP系、乳酸系、有酸素系の各エネルギー供給能力が「関連を示す」（相関係数が0.4以上となる）運動時間の範囲。横軸の時間は、運動の開始からその時刻までの所要時間（duration）を表している。図20とよく似ているが、意味は異なる（図20の時間は時刻（time）を表している）。

25秒間～4分間の運動では、乳酸系を含めて2種類あるいは3種類のエネルギー系が重複して運動成績に影響を与えると見える(図39)。

本研究では運動の開始時から最大努力で運動を持続するという運動様式を対象として研究を進めてきた。しかし、体育・スポーツにおいて行われる連続的運動は、一定のペースを保って行われるものが多い、したがって、表6や図38、図39に示した関係が、実際の体育・スポーツにおいて行われる連続的な運動にそのままあてはめてよいかという疑問が生じる。しかしこの点については、以下のような理由により、支障はないと考えられる。

山本ら(1988)は、2分間の運動を行う際、最大努力運動で行ったときと固定負荷運動で行ったときとで、発揮される運動成績には有意差がみられないことを示している。またエネルギー供給量については、無酸素系、有酸素系ともに最大努力運動の方がやや大きくなるが、運動の効率は最大努力運動の方が低くなるため、実効エネルギーは最大努力運動も固定負荷運動もほぼ同じとなることを指摘している。したがって、表6や図38、図39が示す内容は、体育・スポーツで行われる一定のペースを保って行うような運動にも当てはめられることができると考えられる(図6参照)。

体育・スポーツにおいて、一般人あるいはスポーツ選手が連続的な運動様式をもつ運動種目のための体力トレーニングを行う際、運動時間の違いによって重点的にトレーニングすべきエネルギー系は変わることが示唆されている(Fox: 1979, 金久: 1989, 宮下: 1993)。しかし、その時間的な区分については、従来、実証的な研究は行われてこなかった。図38と図39は、この問題についての1つの解答を与えるものといえる。

2. 間欠的運動

1) エネルギー供給の状況

連続的な運動の場合と同じく、自転車エルゴメーターを用いて最大努力で間欠的な運動を行うという運動様式を対象として、各エネルギー系の関わりを検討した(III-1.)。

まず、間欠的運動が連続的運動に対して、どのような特徴をもっているかを検討した。その結果、間欠的運動では連続的運動に比べて運動成績が大きくなること、またその傾向は、休息インターバルが長くなるほど(図24, 図25)、あるいは運動インターバルが短くなるほど(図26, 図27)より顕著になることが明らかとなった。このような現象は経験的には明らかであるため、それが起こる理由についてはこれまで検討されてこなかった。本研究ではその理由を検討した結果、休息インターバル中に摂取される酸素(O_2 intake-2)によって生み出されるエネルギーが、運動成

績を大きくする役割を担っていることが示唆された。

O_2 intake-2は、前回の運動インターバルにおいて消耗したクレアチン燐酸 (CP) と酸素ストアを回復させる、という2つの働きをもっている (Åstrandら: 1960, Margariaら: 1969, Fox: 1979)。CPの回復は、次回の運動インターバルにおいてATP-CP系のエネルギーを増大させることにつながる。また酸素ストアの回復は、次回の運動インターバルにおいて有酸素系のエネルギーを増大させることにつながる。したがって、間欠的運動においては連続的運動に比べて、ATP-CP系と有酸素系のエネルギーの貢献度がより大きくなることになる。ただし、ATP-CP系のエネルギーは、休息インターバルにおいて有酸素系のエネルギーによって繰り返し再合成されるため、実質的には有酸素系のエネルギーに由来していることになる。したがって間欠的運動においては、有酸素系のエネルギーがきわめて重要な働きをしているということになる。

本研究で用いた間欠的運動の運動インターバルは5~20秒間であった。5~20秒間の最大努力運動は、それを1回だけ行う場合には、II-1. およびII-2. の実験結果からも示唆されるように、典型的な無酸素性運動といえる。しかしそれを何度も反復すると、有酸素系のエネルギーの関わりが重要になるということであり、興味深い現象といえる。

間欠的運動においてATP-CP系は、単に有酸素系のエネルギーの媒介役を果たしているようにみえるが、実際には次のような意義があると考えられる。間欠的運動の特長は、連続的運動では発揮できないような高いパワーを、繰り返し発揮できることにある。表1から示唆されるように、このような高いパワーは、パワーの低い有酸素系だけでは発揮できない。また、ATP-CP系は高いパワーを発揮することはできるが、容量が小さいため、何度も高いパワーを発揮することはできない。

しかし、運動インターバル中に消耗したATP-CP系のエネルギーを、休息インターバル中に有酸素系のエネルギーを用いて再合成しておくことにより、高いパワーを繰り返し発揮することが可能となる。つまり、間欠的運動においては、パワーは大きい容量の小さいATP-CP系と、パワーは小さい容量の大きい有酸素系とが、互いに短所を補い長所を活かす形で、高強度の運動の持続という両立の難しい課題を達成しているといえよう。

なお乳酸系については、間欠的運動においても連続的運動とほぼ同程度、すなわち最大限のエネルギー供給が行われていることが示唆された。しかし、ATP-CP系や有酸素系のエネルギーの貢献度が顕著に増大するため、相対的にみた乳酸系の貢献度は小さくなるものと考えられる。

2) 運動成績に対する3種類のエネルギー供給能力の関与

間欠的運動を最大努力で行ったときの運動成績に、3種類のエネルギー供給能力がどのような影響を及ぼすかということについて検討した(Ⅲ-2.)。

その結果、運動成績には主としてATP-CP系と有酸素系のエネルギー供給能力が影響を及ぼし、乳酸系のエネルギー供給能力は影響を及ぼさないことが明らかとなった。運動成績に対してATP-CP系と有酸素系の能力が影響を及ぼすことについては、Ⅲ-1.の結果から示唆されたように、間欠的運動においてはこの2つのエネルギー系の貢献度が大きいことを考えれば理解できる。また乳酸系の能力が影響を及ぼさないということについても、間欠的運動においては乳酸系のエネルギーの貢献度は相対的に小さいことを考えると理解できよう。

なお、運動成績に対するATP-CP系と有酸素系の能力の影響の大きさは、休息インターバルの長短によって相対的に変化し、休息インターバルが短くなるほど有酸素系、長くなるほどATP-CP系の能力の影響が強くなることが示唆された(図33)。

本研究では運動インターバルを5秒間に固定し、休息インターバルを10、20、40秒間の3通りに変えて間欠的運動を行うにとどまった。しかし、休息インターバルをさらに長くしていけば、次のような現象が起こると考えられる。図32をみるとわかるように、休息インターバルが長くなるほど発揮パワー(Px)の低下は小さくなる。したがって、休息インターバルをさらに長くしていけば、最終的にはPxが低下しなくなることが予想される。実際に、山本(1989)やBalsomら(1992a, 1992b)は、間欠的運動において運動インターバルを変えずに休息インターバルを延長した場合、あるいは休息インターバルを変えずに運動インターバルを短縮した場合に、このような現象が起こることを示している。

このような条件のもとでは、1セット目から20セット目まで、同じPxが発揮され続けることになる。したがって、1セット目のPxに対して各エネルギー供給能力が示したのと同じ関連が、20セット目まで維持されることになる。つまり、Pxに対してATP-CP系の能力のみが終始高い関連を維持し、有酸素系の能力は終始関連を示さなくなると考えられる。

このように考えると、最大努力で間欠的運動を行った際に発揮されるパワーに対するATP-CP系と有酸素系のエネルギー供給能力の影響は、休息インターバルの長さ(より普遍的な言葉でいえば、運動インターバルと休息インターバルの割合)によって相対的に変化するといえよう。すなわち、

- ①休息インターバルの割合が非常に長い運動の場合は主としてATP-CP系の能力、
 - ②運動インターバルの割合が非常に長い運動の場合は主として有酸素系の能力、
 - ③両者の中間的な特性をもつ運動の場合はATP-CP系と有酸素系の能力の両方、
- が運動成績に影響を与えることになると考えられる。

3) 体育・スポーツへの応用

上に述べたことを考えると、実験室的なレベルで間欠的運動を行った場合、高い運動成績を得る上で、ATP-CP系と有酸素系のどちらの能力が重要かということは一概にはいえないことになる。しかし、体育・スポーツにおいて行われる間欠的運動を考えたときには、以下のような別の条件が加わってくる。

Ⅲ-3. の実験結果およびその考察から示唆されるように、間欠的なスポーツにおいては、運動インターバル中にできるだけ高いパワーを発揮することは第一義的に重要な条件といえる。したがってATP-CP系の能力は、サッカーのように休息インターバルが相対的に短い種目であっても、またアメリカンフットボールのように長い種目であっても、ともに同程度の高い値を要求されると考えられる(図34, 図35, 図36)。

一方、有酸素系の能力については、種目の特性によって必要度が変わると考えられる。すなわち、サッカーのように相対的に休息インターバルの短い種目では、少ない休息時間の間にATP-CP系のエネルギーを回復させなければならないため、高い有酸素系の能力が要求されるであろう。しかし、アメリカンフットボールのように休息インターバルの長い種目では、それほど高い有酸素系の能力は要求されないであろう(図34, 図35, 図36)。前者のような運動特性をもつ種目をサッカー型、後者のような運動特性をもつ種目をアメリカンフットボール型と呼ぶことにすると、サッカー型のスポーツ種目としてはテニス、バスケットボールなど、アメリカンフットボール型のスポーツとしては野球、バレーボールなどが考えられる。

このように、体育・スポーツで行われる間欠的運動を考えた場合、ATP-CP系の能力については、種目によらずある一定の高い能力が要求されると考えられる。また有酸素系の能力については、その種目をもつ運動インターバルと休息インターバルの特性に応じて、異なったレベルの能力が要求されるといえる。

3. 身体作業能力テストとしての最大努力運動の利用価値

自転車エルゴメーターを用いて最大努力運動を行うと、連続的運動、間欠的運動いずれの場合とも、発揮パワーは運動の初期に最大値を示し、以後、時間の経過あるいは反復回数の増加にともない低下する。Ⅱ-3. やⅢ-3. の実験結果から、このときの低下の様相は、スポーツ種目の特性に応じて特有の「形」がみられることが明らかとなった(図21, 図34)。

このような筋出力の低下曲線は「疲労曲線」と呼ばれている(矢部, 1977)。疲労曲線が個人個人で特有の形を示すということは、古く19世紀末にMosso(1892)が指摘している。疲労曲線の形に影響を及ぼす要因については、これまで中樞性(脳

・神経系)の疲労と末梢性(筋)の疲労との関連(Mosso: 1892, Merton: 1954, 矢部: 1977)や、筋線維タイプによる疲労特性の違いとの関連(EdingtonとEdgerton: 1976, ThorstenssonとKarlsson: 1976, Krollら: 1980)から言及されてきた。しかし本研究の結果を考慮すると、上記の要因の他に、3種類のエネルギー供給能力の発達の度合も、疲労曲線の形に影響を及ぼす要因の1つになっていると考えられる。

すなわち、連続的運動の場合は、ATP-CP系、乳酸系、有酸素系がそれぞれ運動の初期、中期、後期で主たるエネルギーを供給しているため(図16)、ATP-CP系、乳酸系、有酸素系の能力に優れるものは、それぞれ運動の初期、中期、後期の発揮パワーが高くなるという現象がみられる(図18)。

また、間欠的運動の場合は、運動の初期ではATP-CP系が主たるエネルギーを供給し(図28)、運動成績にもATP-CP系の能力が高い関連を示す(図30)。一方、中～後期では、有酸素系とATP-CP系とが主たるエネルギーを供給しているが(図28)、ATP-CP系については有酸素系のエネルギーによって再合成されているため、休息インターバルが短い条件の場合には、運動成績は有酸素系の能力の方と高い関連を示す(図30, 図31, 図33)。

このような性質を利用すると、自転車エルゴメーターを用いて最大努力で連続的な運動、あるいは間欠的な運動を行ったときの疲労曲線の形を観察することにより、その人がもつ3種類のエネルギー系の能力を、間接的に評価することも可能と考えられる。

従来、3種類のエネルギー系の能力を測定する場合、そのテストは別々に行われてきた。各エネルギー供給能力を表す代表的な指標として、II-2、やIII-2、で用いたように、ATP-CP系については最大無酸素性パワー、乳酸系については最大血中乳酸濃度、有酸素系については最大酸素摂取量が、これまで多く測定されてきた。

しかし、これら3つの能力を全て測定するためには、それぞれ別個の測定を3回行う必要があり、多くの時間を必要とする。また、最大血中乳酸濃度のように血液の分析を必要とする測定や、最大酸素摂取量のように呼気ガスの分析を必要とする測定に際しては、高価な測定器械と専門のスタッフが必要となる。

自転車エルゴメーターを用いて最大努力で連続的、あるいは間欠的な運動を行い、その際の運動成績からエネルギー供給能力を間接評価する方法を用いれば、3種類(間欠的運動の場合は2種類)のエネルギー系の能力を、短時間で、高額な分析器や専門のスタッフを必要とせず、非侵襲的に知ることができるといえる。

4. 無酸素・有酸素混合運動の位置づけ

これまで「無酸素性運動」、「有酸素性運動」という名称はあったが、「無酸素・有酸素混合運動」という名称はなかった。いいかえれば、従来の研究は、高強度で持続しない無酸素性運動と、低強度で持続する有酸素性運動という両極端の運動を中心に行われ、その間に位置する無酸素・有酸素混合運動についての研究は少なかった。

しかし、人間の行う運動を無酸素性運動と有酸素性運動とに2分して考えようとすると、あるところで無酸素性運動と有酸素性運動との境界をつくって、対立的に捉えてしまうことになる。そして、その中間に位置する無酸素・有酸素混合運動に関する研究への取り組みは、消極的にならざるをえなくなると考えられる。

一方、本研究の結果から、連続的運動(Ⅱ.)、間欠的運動(Ⅲ.)いずれの場合においても、無酸素系と有酸素系のエネルギー供給が混合して行われる運動は決して少なくはなく、むしろ普通にみられることが示唆された。

このようなことを考えると、人間の行う運動を無酸素性運動と有酸素性運動とに2分して考えるよりも、無酸素・有酸素混合運動を人間の行う最も基本的な運動であると位置づけ、典型的な無酸素性運動や有酸素性運動はいずれか一方のエネルギーの貢献度が非常に大きくなった特殊なケースであると考えた方が、より普遍的な捉え方ができると考えられる。

このような考え方を採用すれば、無酸素性運動対有酸素性運動といった、不連続なしきりを設け、対立的な捉え方をする必要はなくなる。そして、人間の行うさまざまな運動を、無酸素系と有酸素系(あるいはATP-CP系、乳酸系、有酸素系)という複数のエネルギー系の貢献度の度合を基準として、連続的に把握することが可能となる。そして、これまで無酸素性運動や有酸素性運動に比べて扱われることの少なかった無酸素・有酸素混合運動に関する研究も、より進展していくものと考えられる。

V. 結 論

本研究では、体育・スポーツ活動の場面で多く行われているにも関わらず、これまで研究の少なかった「高強度の運動を持続する能力」について、運動中に筋活動によって発揮される機械的パワーと、筋を動かすためのエネルギーを供給するエネルギー系（無酸素系（ATP-CP系、乳酸系）と有酸素系）の働きとを関連づけて、実験的に検討した。

体育・スポーツにおいて高強度の運動を持続する種目には、連続的運動と間欠的運動という2つのタイプがあるので、両方の場合について検討した。高強度の運動の持続は、自転車エルゴメーターを用いて、最大努力で連続的あるいは間欠的に運動を行うという運動様式を用いた。

その結果、連続的運動、間欠的運動のいずれにおいても、1種類ではなく、複数のエネルギー系が複合して機械的パワーの発揮に関わっていることが示唆された。また、各エネルギー系の関わり方は、連続的運動の場合には運動時間の長短により、また間欠的運動の場合には運動インターバルと休息インターバルの割合によって変わることが示唆された。それらの結果は以下のようにまとめられる。

1. 連続的運動

1) エネルギー供給 (II-1.)

最大努力で連続的な運動を持続したとき、運動の開始直後には無酸素系によるエネルギー供給が主体となる。しかし、運動時間の経過にともない急速に有酸素系によるエネルギー供給の貢献度が増加し、60秒以降になると有酸素系のみエネルギー供給が行われるようになる。

また、無酸素系をATP-CP系と乳酸系の2つの成分に分けて考えてみると、運動時間の経過にともない、主たるエネルギーを供給するエネルギー系が、ATP-CP系、乳酸系、有酸素系の順で、重複する時間帯をもちながら交代していく。すなわち、ATP-CP系によるエネルギー供給は、運動の開始直後をピークとして急速に減少し、30秒以内に終了する。乳酸系によるエネルギー供給は、15~30秒付近をピークとして、運動の開始直後から60秒付近まで行われる。有酸素系によるエネルギー供給は、運動開始直後から始まり、約30秒を経過すると定常状態に達し、以後ほぼ同程度のエネルギーが供給され続ける。

なお、有酸素系によるエネルギー供給は、従来考えられてきたよりも早期から大きな貢献度をもつ（たとえば、30~45秒目の時間帯ですでに貢献度が50%を超えている）ことが示唆された。

2) 運動成績に対する3種類のエネルギー供給能力の関与(II-2.)

最大努力で連続的な運動を続けたとき、運動の初期、中期、後期の運動成績にはそれぞれ、ATP-CP系、乳酸系、有酸素系のエネルギー供給能力が影響を及ぼす。それぞれの影響力の大きさは、運動時間の経過にともなって連続的に変化していくため、どこからどこまでの時間帯で実質的な影響を与えているかということをも具体的に示すことは困難である。そこで一つの目安として、運動成績に対して各系のエネルギー供給能力が示す相関係数の大きさが0.40以上となる時間帯を、影響を及ぼす時間帯とみなすこととすると、ATP-CP系は運動の開始直後～20秒目、乳酸系は15～60秒目、有酸素系は20秒目以降の各時間帯で、それぞれ影響を及ぼしているという結果が得られた。これらの時間帯は、II-1.において示された各エネルギー系によるエネルギー供給の貢献度が大きくなる時間帯とほぼ一致した。

なお、運動成績に対して有酸素系の能力が影響を及ぼし始める時刻(20秒目)は、従来考えられてきた時刻(40～60秒目以降)よりも早期であることが示された。

2. 間欠的運動

1) エネルギー供給(III-1.)

最大努力で間欠的な運動を行うと、連続的な運動を行ったときよりも大きな運動成績を発揮することができる。また、同じ間欠的運動の中でも、休息インターバルが長くなるほど、あるいは運動インターバルが短くなるほど、運動成績は大きくなる。この現象は、休息インターバル中に摂取される酸素によって生み出されるエネルギーが、次の運動インターバルで利用するATP-CP系と有酸素系のエネルギーを増加させることによって起こっている。

つまり、間欠的運動は連続的運動に比べて、3種類のエネルギー系のうちで、ATP-CP系と有酸素系によるエネルギーの貢献度が大きくなる。乳酸系のエネルギー供給については、連続的な運動と同様、最大限のエネルギーが供給されてはいるが、ATP-CP系や有酸素系によるエネルギー供給量の貢献度が顕著に大きくなるため、相対的な貢献度は低くなる。

2) 運動成績に対する3種類のエネルギー供給能力の関与(III-2.)

間欠的運動の運動成績には、ATP-CP系と有酸素系のエネルギー供給能力が影響を及ぼし、乳酸系のエネルギー供給能力は影響を及ぼさない。なお、運動成績に及ぼすATP-CP系と有酸素系のエネルギー供給能力の影響力の強さは、休息インターバルと運動インターバルの割合により相対的に変化する。すなわち、運動インターバル

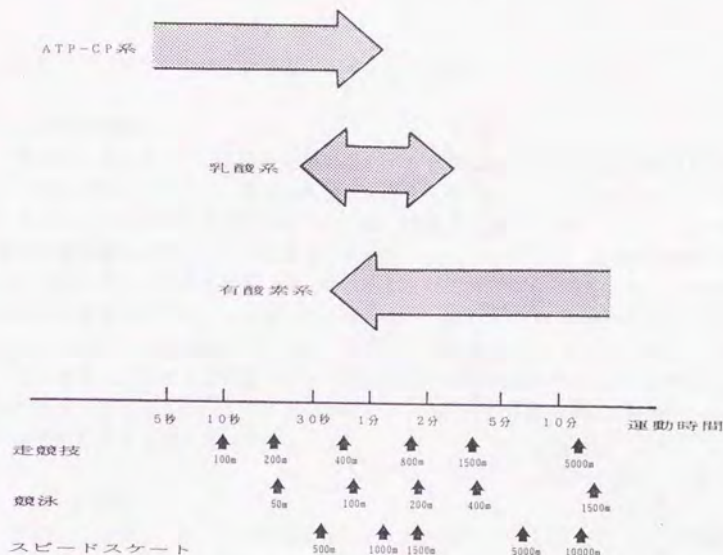


図40. 連続的な運動様式をもつ各種スポーツ種目の運動成績に、どのエネルギー系の能力が関与するかを示す概念図。図39に、走競技、競泳、スピードスケートの各種目の競技時間（現在の世界記録）を書き加えた。横軸の時間は、運動時間（duration）を意味し、対数目盛りで表した。連続的な運動様式をもつスポーツ種目においては、運動時間の長短によって運動成績に関与するエネルギー系が変化する。ATP-CP系の能力は運動時間が短いとき（およそ65秒間以下）に関与する。有酸素系の能力は運動時間が長くなると（およそ35秒間以上）関与する。乳酸系の能力は、運動時間が中程度の場合（およそ25秒間から4分間まで）に関与する。なお、乳酸系の能力が関与する領域では、乳酸系の能力以外にATP-CP系あるいは有酸素系の能力のいずれか（あるいはいずれも）が同時に関与する。

の割合が大きくなるほど有酸素系の能力の影響が強くなり、反対に、休息インターバルの割合が大きくなるほどATP-CP系の能力の影響が強くなる。

3. 本研究で得られた結果の体育・スポーツへの応用

1) 連続的運動

図40は、II-2. で得られた結果を基に、さまざまな時間で最大の運動を行う場合、運動時間の違いによって運動成績に影響を及ぼすエネルギー系がどのように変わるかを示したものである。参考のために、走競技、競泳、スピードスケートの各種目の競技時間がどのあたりに位置するかも示した。この図は、運動時間が25秒間以内であればATP-CP系の能力、4分以上であれば有酸素系の能力が主として運動成績に影響を及ぼすことを示唆している。また、運動時間が25秒間～4分間の場合には、乳酸系を含む複数のエネルギー系の能力が影響を及ぼすことを示唆している。

この図は、連続的な運動様式をもつ運動種目の運動成績を向上させたいときに、種目によってどのエネルギー系を重点的にトレーニングすればよいかを判断するための参考になると考えられる。

2) 間欠的運動

実験室的な条件では、間欠的運動を行った際の運動成績には、ATP-CP系と有酸素系の2種類のエネルギー供給能力が影響を及ぼし、その影響力の割合は休息インターバルと運動インターバルの割合によって全く相対的に変化する(III-2.)。

しかし、体育・スポーツにおいて行われている間欠的な運動様式をもつ種目の場合には、休息インターバル、運動インターバルの長短に関係なく、ATP-CP系については高いエネルギー供給能力が必要となる(III-3.)。そして、有酸素系のエネルギー供給能力については、休息インターバルと運動インターバルの割合によって、要求される水準が変化する。すなわち、相対的に休息インターバルが短く、あるいは相対的に運動インターバルが長くなるほど、要求される水準は高くなる。

図41はこのことをまとめたものである。

3) 身体作業能力テストとしての最大努力運動の利用

最大努力で連続的な運動を行うと、運動の初期、中期、後期の発揮パワーに、それぞれATP-CP系、乳酸系、有酸素系の各エネルギー供給能力の大きさが反映する(II-2.)。また、最大努力で間欠的な運動を行うと、運動初期の発揮パワーにはATP-CP系、中～後期の発揮パワーには有酸素系のエネルギー供給能力が反映する

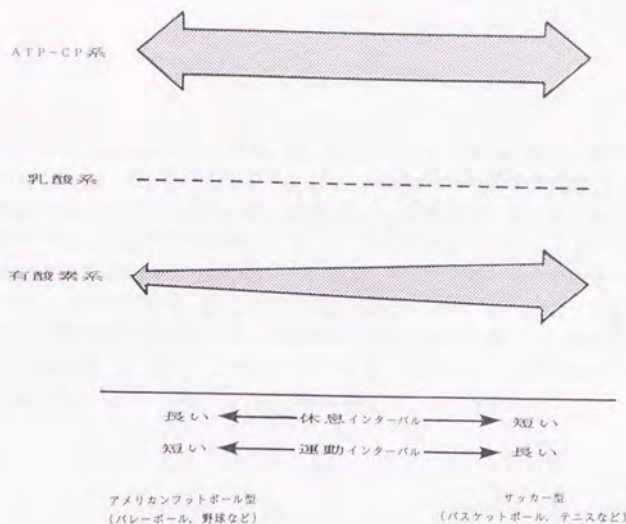


図41. 間欠的な運動様式をもつスポーツ種目の競技成績に、どのエネルギー系の能力が関与するかを示す概念図。間欠的な運動様式をもつスポーツ種目においては、休息インターバルと運動インターバルの割合によって、運動成績に関与するエネルギー系が変化する。ATP-CP系の能力はいずれの種目においても関与する。乳酸系の能力はいずれの種目においても関与しない。有酸素系の能力は、休息インターバルの割合が短く、また運動インターバルの割合が長くなるほど、関与の度合が強くなる。

(III-2.)

したがって、最大努力での連続的運動は3種類(ATP-CP系、乳酸系、有酸素系)のエネルギー供給能力を、また最大努力での間欠的運動は2種類(ATP-CP系、有酸素系)のエネルギー供給能力を、それぞれ短時間で同時に間接評価できる身体作業能力テストとして利用することが可能である。

謝 辞

本研究を行うにあたって、非常に多くの方々のご協力を頂いた。中でも特にお世話になった方々は以下のとおりである。本研究のテーマを与えて下さった東京大学教育学部の宮下充正教授には、本論文をまとめるまで、15年以上もの長い年月にわたってたえず多大なご指導とはげましの言葉を頂いた。また、富山大学教育学部の金久博昭助教授には、本研究で行ったほとんどの実験の共同研究者として、実験データの収集から論文の作成にいたるまで貴重なアドバイスを頂いた。最後に、高強度の運動を持続するという、人間の行う運動の中でも最もつらい運動に関する実験に、被検者として快く参加して下さいました多くの方々のご協力がなければ、本研究は成立しなかった。これらの方々には深く感謝いたします。

引用文献

青木純一郎, 清水達雄, 形本静夫: 短距離走と酸素負債. 順天堂大学保健体育紀要 17:1-12, 1974.

Åstrand, I., P.-O. Åstrand, E. H. Christensen and R. Hedman: Intermittent muscular work. *Acta physiol. scand.*, 48: 448-453, 1960.

Åstrand, P.-O. and K. Rodahl: *Textbook of Work Physiology*. McGraw Hill, New York, 1970.

Atwater, W. O. and F. G. Benedict: A respiration calorimeter with appliances for the direct determination of oxygen. Carnegie Institution of Washington Publication, No. 42, 1905.

Ayalon, A., O. Inbar and O. Bar-Or: Relationships among measurements of explosive strength and anaerobic power. In: *Biomechanics IV*, R. C. Nelson and C. A. Morehouse (Eds.), MacMillan, New York, 1974, pp. 572-577.

Balsom, P. D., J. Y. Seger, B. Sjødin and B. Ekblom: Maximal-intensity intermittent exercise: effect of recovery duration. *Int. J. Sports Med.*, 13:528-533, 1992a.

Balsom, P. D., J. Y. Seger, B. Sjødin and B. Ekblom: Physiological responses to maximal intensity intermittent exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 65: 144-149, 1992b.

Bangsbo, J., P. D. Gollnick, T. E. Graham, C. Juel, B. Kiens, M. Mizuno and B. Saltin: Anaerobic energy production and O₂ deficit-debt relationship during exhaustive exercise in humans. *J. Physiol.*, 422:539-559, 1990.

Bangsbo, J., T. Graham, L. Johansen, S. Strange, C. Christensen and B. Saltin: Elevated muscle acidity and energy production during exhaustive exercise in humans. *Am. J. Physiol.* 263 (Regulatory Integrative Comp. Physiol. 32): R891-R899, 1992.

Bangsbo, J.: The physiology of soccer; with special reference to intense intermittent exercise. *Acta Physiol. Scand.* 151 (Suppl. 619): 1-155, 1994.

Bar-Or, O.: The Wingate anaerobic test; an update on methodology, reliability and validity. *Sports Med.*, 4:381-394, 1987.

Berg, A. and J. Keul: Validity of predictable effects in metabolic changes. In: *Physiological Chemistry of Training and Detraining*, P. Marconnet, J. Poortmans and L. Hermansen (Eds.), S. Karger, 1984, pp. 238-249.

Bergström, J.: Muscle electrolytes in man. *Scand. J. Clin. Lab. Invest.*, 14 (suppl. 68): 1-110, 1962.

Bergström, J., R. C. Harris, E. Hultman and L. -O. Nordesjö: Energy rich phosphagens in dynamic and static work. In: *Muscle Metabolism during exercise*, B. Pernow and B. Saltin (Eds.), Plenum Press, New York-London, 1971, pp. 341-355.

Boulay, M. R., G. Lortie, J. A. Simoneau, P. Hamel, C. Leblanc and C. Bouchard: Specificity of aerobic and anaerobic work capacities and powers. *Int. J. Sports Med.*, 6:325-328, 1985.

Cheatham, M. E., L. H. Boobis, S. Brooks and C. Williams: Human muscle metabolism during sprint running. *J. Appl. Physiol.*, 61:54-60, 1986.

Christensen, E. H., R. Hedman and B. Saltin: Intermittent and continuous running (A further contribution to the physiology of intermittent work). *Acta physiol. scand.*, 50: 269-286, 1960.

Danforth, W. H.: Activation of glycolytic pathway in muscle. In: *Control of Energy Metabolism*, B. Chance, R. W. Estabrook and J. R. Williamson (Eds.), Academic Press, New York-London, 1965, pp. 287-297.

Dal Monte, A.: *Fisiologia E Medicina Dello Sport*. Sansoni Editore, Firenze, 1977.

Di-Prampo, P. E.: Energetics of muscular exercise. *Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol.* 89:143-222, 1981.

Di-Prampo, P. E.: *La locomozione umana su terra, in acqua, in aria; fatti e teorie*. Edi Ermes, Milano, 1985. (スポーツとエネルギー; パワーの限界と記録, 宮村実晴, 池上康男訳, 真興交易医書出版部, 1991.)

Edington, D. W. and V. R. Edgerton: *The Biology of Physical Activity*. Houghton Mifflin Company, Boston, 1976.

Edwards, R. H. T., L. -G. Ekelund, R. C. Harris, C. M. Hesser, E. Hultman, A. Melcher and O. Wigertz: Cardiorespiratory and metabolic costs of continuous and intermittent exercise in man. *J. Physiol.* 234:481-497, 1973.

- Ekblom, B. : Applied physiology of soccer. *Sports Med.* 3: 50-60, 1986.
- Essén, B., E. Jansson, J. Henriksson, A.W. Taylor and B. Saltin: Metabolic characteristics of fibre types in human skeletal muscle. *Acta physiol. scand.*, 95:153-165, 1975.
- Essén, B., L. Hagenfeldt and L. Kaijser: Utilization of blood-borne and intramuscular substrates during continuous and intermittent exercise in man. *J. Physiol.*, 265:489-506, 1977.
- Fick, A. : Über die Messung des Blutquantums in den Herzventrikeln. *Sit. der Physika-Med. ges. Würzburg*, 1870, p.16.
- Fox, E.L., S. Robinson and D.L. Wiegman: Metabolic energy sources during continuous and interval running. *J. Appl. Physiol.*, 27: 174-178, 1969.
- Fox, E.L. : *Sports Physiology*. Saunders College Publishing, Philadelphia, 1979.
- 藤瀬武彦, 玉木哲朗, 寺尾 保, 永見邦篤, 中野昭一: 短時間最大運動時の酸素摂取が作業成績に及ぼす影響. *体育学研究*, 35:133-142, 1990.
- Fujitsuka, N., T. Yamamoto, T. Ohkuwa, M. Saito and M. Miyamura: Peak blood lactate after short periods of maximal treadmill running. *Eur. J. Appl. Physiol.* 48:289-296, 1982.
- Gaesser, G. A. and G. A. Brooks: Metabolic bases of excess post-exercise oxygen consumption: a review. *Med. Sci. Sports Exer.*, 16:29-43, 1984.
- Gaitanos, G. C., C. Williams, L. H. Boobis and S. Brooks: Human muscle metabolism during intermittent maximal exercise. *J. Appl. Physiol.* 75: 712-719, 1993.
- Godikh, M. A. : Control of training and contest loads. *Fiscultura i Sport, Moscow*, 1980. (Vandewalleら, 1987より引用)
- Gollnick, P. D. and L. Hermansen: Biochemical adaptations to exercise; anaerobic metabolism. In: *Exercise and Sports Science Reviews*, 1, 1973, pp.1-43.
- Green, S. and B. Dawson: Measurement of anaerobic capacities in humans: definitions, limitations and unsolved problems. *Sports Med.*, 15:312-327, 1993.

Harris, R. C., E. Hultman, L. Kaijser and L. O. Nordesjö: The effect of circulatory occlusion on isometric exercise capacity and energy metabolism of the quadriceps muscle in man. *Scand. J. Clin. Lab. Invest.*, 35:87-95, 1975.

八田秀雄: 運動中および運動後における乳酸の代謝とそのトレーニング効果. *体育の科学* 41:305-310, 1991.

Heigenhauser, G. J. F., N. McCartney and N. L. Jones: Effects of hypoxia on short-term power output and fatigue in human muscle. *Med. Sci. Sports Exer.*, 14:135-136, 1982.

Hermansen, L.: Anaerobic energy release. *Med. Sci. Sports Exer.*, 1:32-38, 1969.

Hermansen, L.: Muscular fatigue during maximal exercise of short duration. In: *Physiological Chemistry of Exercise and Training*, P. E. DiPrampo and J. Poortmans (Eds.), S. Karger, 1981, pp. 45-52.

Hermansen, L. and J. I. Medbo: The relative significance of aerobic and anaerobic processes during maximal exercise of short duration. In: *Physiological Chemistry of Training and Detraining*, P. Marconnet, J. Poortmans and L. Hermansen (Eds.), Karger-Basel, 1984, pp. 56-67.

Hill, A. V., C. N. H. Long and H. Lupton: Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilization of oxygen: Part VII-VIII. *Proc. Roy. Soc. Lond.* 97:155-176, 1924.

Hill, D. W. and J. C. Smith: Calculation of aerobic contribution during high intensity exercise. *Res. Quart. Exer. Sport*, 63:85-88, 1992.

平井雄介, 小笠原悦子, 田畑 泉: 超最大強度の水泳運動における無酸素性及び有酸素性エネルギー供給機構の貢献度. *Jpn. J. Sports Sci.*, 12:124-129, 1993.

Hirvonen, J., S. Rehunen, H. Rusko and M. Harkonen: Breakdown of high-energy phosphate compounds and lactate accumulation during short supramaximal exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 56:253-259, 1987.

Hirvonen, J., A. Nummela, H. Rusko, S. Rehunen and M. Harkonen: Fatigue and changes of ATP, creatine phosphate, and lactate during the 400-m sprint. *Can. J. Spt. Sci.*, 17:141-144, 1992.

Howald, H., G. von Glutz and R. Billeter: Energy stores and substrates utilization in muscle during exercise. *3rd. International Symposium on*

Biochemistry of Exercise, vol. 3, Symposia Specialists, USA, 1978, pp. 75-86.

Hultman, E., J. Bergström and N. McLennan Anderson: Breakdown and resynthesis of phosphorylcreatine and adenosine triphosphate in connection with muscular work in man. *Scand. J. Clin. Lab. Invest.* 19:56-66, 1967.

Hultman, E. and H. Sjöholm: Energy metabolism and contraction force of human skeletal muscle in situ during electrical stimulation. *J. Physiol.* 345:525-532, 1983.

猪飼道夫編著: 身体運動の生理学. 杏林書院, 1973.

生田香明, 猪飼道夫: Mechanical power, 血液乳酸量, 酸素負債量による Anaerobic workの研究. *体力科学*, 22:1-8, 1973.

石垣 享: アメリカンフットボール. トレーニング科学研究会編, エンデュランス・トレーニング, 朝倉書店, 1994, pp. 97-103.

Ivy, J. L., W. M. Sherman, J. M. Miller, B. D. Maxwell and D. L. Costill: Relationship between muscle QO_2 and fatigue during repeated isokinetic contractions. *J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, 53:470-474, 1982.

Jacobs, I.: Blood lactate; implications for training and sports performance. *Sports Med.*, 3:10-25, 1986.

Jansson, E., G. A. Dudley, B. Norman and P. A. Tesch: Relationship of recovery from intense exercise to the oxidative potential of skeletal muscle. *Acta physiol. scand.* 139: 147-152, 1990.

Jones, N. L. and R. E. Ehsam: The anaerobic threshold. *Exercise and Sports Science Reviews* 10:49-83, 1982.

Jones, D. A.: Combined techniques for studying the physiology and biochemistry of fatigue in the isolated soleus of the mouse. *J. Physiol. (Lond.)*, 231:68P-69P, 1973.

Kaczkowski, W., D. L. Montgomery, A. W. Taylor and V. Klissouras: The relationship between muscle fiber composition and maximal anaerobic power and capacity. *J. Sports Med. Physical Fitness*, 22:407-413, 1982.

加賀谷淳子, 横関利子, 加藤 昭, 三沢光男. 女子陸上競技の走種目におけるエ

エネルギー需給関係. 日本女子体育大学紀要, 13: 151-161, 1983.

垣平博臣, 岩根久夫: ヒトの骨格筋における運動時の³¹P-MRS. 運動生化学 5:41-48, 1993.

金久博昭: 筋のトレーニング科学. 宮下充正監修, 高文堂, 1989.

Katch, V.L.: Kinetics of oxygen uptake and recovery for supramaximal work of short duration. *Int. Z. angew. Physiol.*, 31:197-207, 1973.

Katch, V.: Body weight, leg volume, leg weight and leg density as determiners of short duration work performance on the bicycle ergometer. *Med. Sci. Sports Exer.*, 6: 267-270, 1974.

Katch, V.L. and A. Weltman: Interralationship between anaerobic power output, anaerobic capacity and aerobic power. *Ergonomics* 22:325-332, 1979.

Keul, J., E. Doll and D. Keppler: *Energy Metabolism of Human Muscle*, S. Karger-basel, 1972.

Keul, J.: Muscle metabolism during long lasting exercise. In: *Metabolic Adaptation to Prolonged Physical Exercise*. H. Howald and J. R. Poortmans (Eds.), Birkhauser Verlag Basel, 1973, pp. 31-42.

Komi, P. V., H. Rusko, J. Vos and V. Bihko: Anaerobic performance capacity in athletes. *Acta physiol. Scand.*, 100: 107-114, 1977.

Krogh, A. and J. Lindhard: The changes in respiration at the transition from work to rest. *J. Physiol. (Lond)*. 53:431-437, 1919/1920.

Kroll, W., P. M. Clarkson, G. Kamen and J. Lambert: Muscle fiber type composition and knee extension isometric strength fatigue patterns in power- and endurance-trained males. *Res. Quart. Exer. Sport*, 51:323-333, 1980.

久野謙也, 秋貞雅祥, 勝田 茂, 新津 守, 阿武 泉, 松本邦彦, 大森 肇, 七五三木聡, 高橋英幸: ³¹P NMRによる高年齢者の筋エネルギー代謝能; 長距離競技者と非鍛錬者の比較. バイオメカニクス研究 1990, 日本バイオメカニクス学会編, メデイカルプレス, 1990, pp. 76-81.

黒田善雄, 加賀谷 彦, 塚越克巳, 太田裕造, 雨宮輝也, 成沢三雄: トレッドミルによる最大酸素負荷量の測定法 第2報; 測定結果と競技成績との関係について. 日本体育協会スポーツ科学研究報告, 1969, pp. 1-13.

小林寛道, 天野義裕: 無酸素性および有酸素性パワー発揮能力の相互作用に関する研究. 昭和60年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告, No.VII 無酸素的パワートレーニングと有酸素的パワートレーニングの相互作用に関する研究; 第1報, 1985, pp.21-30.

Komi, P.V. and P.Tesch: EMG frequency spectrum, muscle structure, and fatigue during dynamic contraction in man. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 42: 41-50, 1979.

Lamb, D.R.: Basic principles for improving sport performance. *Sports Science Exchange* 8(2), Chicago, Gatorade Sports Science Institute, 1995.

Margaria, R., H.T.Edwards and D.B.Dill: The possible mechanisms of contracting and paying the oxygen debt and the role of lactic acid in muscular contraction. *Am. J. Physiol.*, 106:689-715, 1933.

Margaria, R., P.Cerretelli and F.Mangili: Balance and kinetics of anaerobic energy release during strenuous exercise in man. *J. Appl. Physiol.*, 19: 623-628, 1964.

Margaria, R., R.D.Oliva, P.E.Di-Prampiero and P.Cerretelli: Energy utilization in intermittent exercise of supramaximal intensity. *J. Appl. Physiol.*, 26:752-756, 1969.

Margaria, R.: *Biomechanics and Energetics of Muscular Exercise*. Oxford University Press, 1976.

McArdle, W.D., F.I.Katch and V.L.Katch: *Exercise Physiology; Energy, Nutrition, and Human Performance* (2nd Ed.). Lea & Febiger, Philadelphia, 1986.

McCartney, N., G.J.F.Heigenhauser and N.L.Jones: Power output and fatigue of human muscle in maximal cycling exercise. *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, 55:218-224, 1983.

McCartney, N., L.L.Spriet, G.J.F.Heigenhauser, J.M.Kowalchuk, J.R.Sutton and N.L.Jones: Muscle power and metabolism in maximal intermittent exercise. *J. Appl. Physiol.* 60:1164-1169, 1986.

McGilvery, R.W.: The use of fuels for muscular work. In: *Metabolic Adaptation to Prolonged Physical Exercise*. H.Howald and J.R.Poortmans (Eds.), Birkhauser Verlag Basel, 1975, pp.12-30.

McLellan, T.M., M.F.Kavagnagh and I.Jacobs: The effect of hypoxia on performance during 30s or 45s of supramaximal exercise. *Eur. J. Appl.*

Physiol., 60:155-161, 1990.

Medbø, J. I., A.-C. Mohn, I. Tabata, R. Bahr, O. Vaage and O. M. Sejersted: Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *J. Appl. Physiol.*, 64:50-60, 1988.

Medbø, J. I. and I. Tabata: Relative importance of aerobic and anaerobic energy release during short-lasting exhausting bicycle exercise. *J. Appl. Physiol.*, 67:1881-1886, 1989.

Merton, P. A.: Voluntary strength and fatigue. *J. Physiol.*, 123:553-564, 1954.

宮下充正編著: 一般人・スポーツ選手のための体力診断システム. ソニー企業, 1986.

宮下充正: トレーニングの科学的基礎. ブックハウスHD, 1993.

Molé, P. A.: Exercise Metabolism. In: Exercise Medicine; Physiological Principles and Clinical Applications, A. A. Bove and D. T. Lowenthal (Eds.), Academic Press, New York-London, 1983, pp. 43-88.

Morton, R. H.: On a model of human bioenergetics. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 54:285-290, 1985.

Mosso, A.: Die Ermüdung. Hirzel, Leipzig, 1892. (Asmussen, E.: Muscle fatigue. *Med. Sci. Sports Exer.*, 11:313-321, 1979. より引用)

永田久紀, 浅野弘明: 医学・公衆衛生学のための統計学入門 (第2版). 南江堂, 1988.

中村好男: アネロビックパワーからみたスポーツ選手の体力. *Jpn. J. Sports Sci.*, 6:697-702, 1987.

根本 勇, 下敷領光一, 金久博昭, 福永哲夫, 角田直也, 吉岡伸彦, 宮下充正: . 最大有酸素性パワーと等速性筋出力の持続能力との関係. *体力科学*, 37: 77-84, 1988.

Owles, W. H.: Alterations in the lactic acid content of the blood as a result of light exercise and associated changes in the CO₂ combining power of the blood and in the alveolar CO₂ pressure. *J. Physiol.*, 69:214-237, 1930.

Piiper, J., P. E. Di Prampero and P. Cerretelli: Oxygen debt and high energy phosphates in gastrocnemius muscle of the dog. *Am. J. Physiol.*,

215:523-531, 1968.

Ribisl, P.M. and W.A. Kachadorian: Maximal oxygen intake prediction in young and middle-aged males. *J. Sports Med. Physical Fitness.*, 9:17-22, 1969.

Robinson, S., H.T. Edwards and D.E. Dill: New records in human power. *Science*, 85:409-410, 1937.

Robinson, S.: Experimental studies of physical fitness in relation to age. *Int. Z. angew. Physiol.*, 10:251-323, 1938.

Royce, J.: Isometric fatigue curves in human muscle with normal and occluded circulation. *Res. Quart.*, 29: 204-212, 1958.

Sahlin, K.: Metabolic changes limiting muscle performance. In: *Biochemistry of Exercise VI*, B. Saltin (Ed.), Human Kinetics Publishers, Champaign, Illinois, 1986, pp. 323-343.

Sale, D.G. and R.W. Norman: Testing strength and power. In: *Physiological Testing of the Elite Athlete*, J.D. MacDougall, H.A. Wenger and H.J. Green (Eds.), Mutual Press Limited, 1982, pp. 7-37.

Saltin, B. and P.-O. Åstrand: Maximal oxygen uptake in athletes. *J. Appl. Physiol.*, 23:353-358, 1967.

Saltin, B. and B. Essén: Muscle glycogen, lactate, ATP, and CP in intermittent exercise. In: *Muscle Metabolism During Exercise*, B. Pernow and B. Saltin (Eds.), Plenum Press, New York-London, 1971, pp. 419-424.

Saltin, B., B. Essén and P.K. Pedersen: Intermittent exercise; its physiology and some practical applications. In: *Advances in Exercise Physiology*, Karger-Basel, 1976, pp. 23-51.

Saltin, B. and P.D. Gollnick: Skeletal muscle adaptability: significance for metabolism and performance. In: *Handbook of Physiology 10, Skeletal Muscle*. Williams & Wilkins, 1983, pp. 555-631.

Saltin, B.: Anaerobic capacity: past, present, and prospective. In: *Biochemistry of Exercise*, vol. VII, A.W. Taylor, P.D. Gollnick, H.J. Green, C.D. Ianuzzo, E.G. Noble, G. Metivier and J.R. Sutton (Eds), Human Kinetics Publishers, Champaign, Illinois, 1990, pp. 387-412.

Serresse, O., G. Lortie, C. Bouchard and M.R. Boulay: Estimation of the contribution of the various energy systems during maximal work of

short duration. *Int. J. Sports Med.*, 9:456-460, 1988.

清水達雄, 帖佐寛章, 青木純一郎, 前嶋 孝, 沢木啓祐. 種々の距離走における酸素摂取量と酸素負債量との割合について; 長距離走選手の場合. *順天堂大学保健体育紀要*, 11: 107-110, 1968.

Simoneau, J. A., G. Lortie, M. R. Boulay and C. Bouchard: Tests of anaerobic alactacid and lactacid capacities; description and reliability. *Can. J. Appl. Spt. Sci.*, 8:266-270, 1983.

Smith, J. C. and D. W. Hill: Contribution of energy systems during a Wingate power test. *Br. J. Sp. Med.* 25:196-199, 1991.

Spriet, L. L., K. Soderlund, M. Bergström and E. Hultman: Anaerobic energy release in skeletal muscle during electrical stimulation in men. *J. Appl. Physiol.*, 62:611-615, 1987.

Spriet, L. L., M. I. Lindinger, R. S. McKelvie, G. J. F. Heigenhauser and N. L. Jones: Muscle glycogenolysis and H⁺ concentration during maximal intermittent cycling. *J. Appl. Physiol.*, 66:8-13, 1989.

Szögy, A. und G. Cherebetiu: Minutentest auf dem Fahrradergometer zur Bestimmung der anaeroben Kapazität. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 33:171-176, 1974.

Taylor, H. L., E. Buskirk and A. Henschel: Maximal oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratory performance. *J. Appl. Physiol.*, 8:73-80, 1955.

Thoden, J. S., B. A. Wilson and J. D. MacDougall: Testing anaerobic power. In: *Physiological Testing of the Elite Athlete*, J. D. MacDougall, H. A. Wenger and H. J. Green (Eds.), Mutual Press Limited, 1982, pp. 7-37.

Thorstensson, A. and J. Karlsson: Fatiguability and fibre composition of human skeletal muscle. *Acta physiol. scand.*, 98:318-322, 1976.

Thorstensson, A., B. Sjødin, P. Tesch and J. Karlsson: Actomyosin ATPase, myokinase, CPK and LDH in human fast and slow twitch muscle fibres. *Acta physiol. scand.*, 99:225-229, 1977.

Vandewalle, H., G. Peres and H. Monod: Standard anaerobic exercise tests. *Sports Med.*, 4:268-289, 1987.

Ward, M. P., J. S. Milledge and J. B. West: *High Altitude Medicine and Physiology* (2nd. Ed.). Chapman & Hall Medical, London, 1995.

Wasserman, K. and M.B. McIlroy: Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise. *Am. J. Cardiol.*, 14:844-852, 1964.

Wasserman, K., B. J. Whipp, S. N. Koyal and W. L. Beaver: Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J. Appl. Physiol.*, 35:236-243, 1973.

Wiles, C. M., D. A. Jones and R. H. T. Edwards: Fatigue in human metabolic myopathy. In: *Human muscle fatigue: physiological mechanisms*, Pitman Medical, London, 1981, pp. 264-282.

Wilkie, D. R.: Man as a source of mechanical power. *Ergonomics*, 3:1-8, 1960.

Wilkie, D.: Shortage of chemical fuel as a cause of fatigue: studies by nuclear magnetic resonance and bicycle ergometry. In: *Human Muscle Fatigue; Physiological Mechanisms*, Pitman Medical, London, 1981, pp. 102-119.

Withers, R. T., W. M. Sherman, D. G. Clark, P. C. Esselbach, S. R. Nolan, M. H. Mackay and M. Brinkman: Muscle metabolism during 30, 60 and 90s of maximal cycling on an air-braked ergometer. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 63: 354-362, 1991.

山地啓司: 最大酸素摂取量の科学. 杏林書院, 東京, 1992.

矢部京之助: 人体筋出力の生理的限界と心理的限界. 杏林書院, 1977.

山川 純: 自転車競技における1000m走のスピードの推移からみたハイスピードの維持能力について. 昭和47年度日本体育協会スポーツ科学研究報告, No. V ハイスピード持続能力解明; 第2次研究報告, 1972, pp. 21-29.

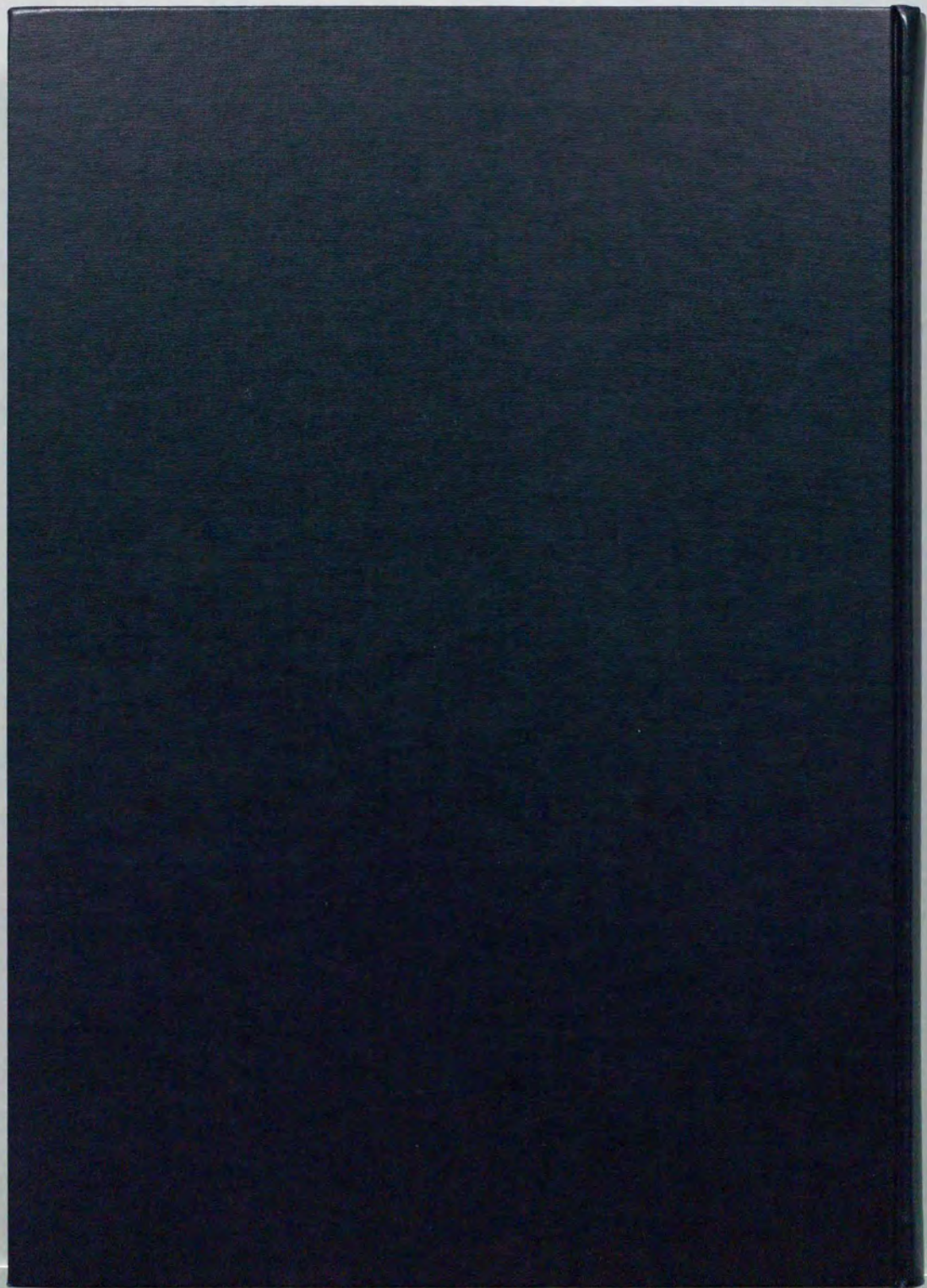
山本正嘉: 疲労曲線の筋出力に関する研究; 筋線維組成, 筋のエネルギー供給能力, および競技種目特性との関連から. *疲労と休養の科学*, 2: 57-68, 1987.

山本正嘉, 前河洋一, 山本利春, 金久博昭: 2分間の運動におけるペース配分の影響; エネルギー代謝の観点から. *国際武道大学研究紀要* 4:49-54, 1988.

山本正嘉: 筋のエネルギー出力. 田畑 泉, 山本正嘉共著, 宮下充正監修, *身体運動のエンジェティクス*, 高文堂, 1989, pp. 113-205.

柳井晴夫, 岩坪秀一: 複雑さに挑む科学; 多変量解析入門. 講談社, 1976.

Zuntz, N. und Schumburg: Studien zu einer Physiologie des Marsches.
Berlin, Hirschwald, 1901.



inches 1 2 3 4 5 6 7 8
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 **M** 8 9 10 11 12 13 14 15 **B** 17 18 19

