

## 論文

# 最大酸素摂取量と自転車エルゴメーター全力駆動時における下肢パワーおよび膝関節筋力との関連性

岡野亮介\*1

キーワード：最大酸素摂取量、自転車エルゴメーター、下肢パワー、膝関節筋力

## 1. 目的

自転車エルゴメーターによる短時間（数秒から数十秒）の全力駆動時に発揮された下肢パワーは無酸素性パワーと呼ばれてきたが、近年身体運動において無酸素運動というのはいり得ないということが強調されてきている<sup>1)</sup>。短距離ダッシュを行っている時でさえもエネルギー供給機構としてATP-PCr系、解糖系（乳酸系）および有酸素系（酸化系）のいずれもが相互に関係しながら機能しているらしいのである<sup>2)</sup>。従ってすべての身体運動が一種の有酸素運動でもあるとも主張されているのである<sup>1)</sup>。また一方で、短期間（2週間）のスプリント・インターバル・トレーニング（以下SIT）が、ミトコンドリア内の酵素活性を高め、持久的パフォーマンスを大きく改善したことや、持久的トレーニング群の比較においても、酸化系能力や持久的パフォーマンスの向上に差がみられなかったことも報告されている<sup>3)</sup>。さらに、一流中距離ランナーは経験的にSITが酸化系能力も改善させることを認識していると言われている<sup>4)</sup>。これらのことが真ならば、有酸素的作業能力の指標である最大酸素摂取量と自転車エルゴメーターによる短時間の全力駆動時における下肢パワーとの間にもある程度の関連性が存在することが予想される。本研究は両パラメーターの関連性を明らかにすることと、これまであまり検討されることのなかった最大酸素摂取量に対する膝関節筋力の関与を明らかにし、これらのことによりスプリント種目における身体トレーニング上の留意点を得ることを目的としている。

## 2. 方法

### A. 対象者

13～26歳の男子スポーツ選手74名を対象とした。彼らの年齢、身長、体重および体脂肪率の平均値±標準偏差は17.5±2.3歳、171.6±5.4cm、64.6±8.3kgおよび12.1±4.1%であった。彼らのスポーツ種目は陸上競技中距離種目、レスリング、水泳、カヌー、スケート短距離種目、スケート長距離種目、自転車短距離種目、自転車長距離種目および人力飛行機であった。彼らはいずれも県大会入賞以上の競技成績を有し、国体候補選手に指定された者もいた。またトレーニングは1日2時間以上を週5～6日行っていた。

### B. 測定項目

身長、体重、体脂肪率（皮下脂肪厚法による）の測定後、膝関節伸展筋力と膝関節屈曲筋力の測定を行った（いずれも70度屈曲位の等尺性筋力を、竹井機器工業株式会社製多用途筋力測定計にて測定）。

次にMonark社製の自転車エルゴメーター（Ergomedic 828E）を使用して7秒間で2度の全力駆動（第1回目の駆動では体重の12.5%の負荷、第2回目の駆動では体重の10.0%の負荷を使用）と40秒間で1度の全力駆動（体重の7.5%の負荷を使用）を行わせた。この時試行間の休息時間は3分間であり、被検者には最初から全力で駆動しなければならないことと駆動中には腰を浮かせないことに留意させた。3度の試行における7秒間（40秒の全力駆動においては最初の7秒間）においてフライホイール半回転毎の速度を磁気センサー（オムロン社製直流3線式近接スイッチ）、

\*1 山口福祉文化大学 ライフデザイン学部

AD 変換器およびパーソナルコンピューターを用いて 1000 分の 1 秒単位で連続的に求めてそれぞれをパワーに換算し、各 3 度の試行におけるピークパワー値の中の最大値を便宜上最大ペダリングパワーとした。40 秒間における全力駆動時では駆動開始から 10 秒間の平均パワー（以下 10 秒平均パワー）、20 秒間の平均パワー（以下 20 秒平均パワー）、30 秒間の平均パワー（以下 30 秒平均パワー）、40 秒間の平均パワー（以下 40 秒平均パワー）、30～40 秒目の 10 秒間の平均パワー（以下 40 秒パワー<sup>5)</sup>）、ピークパワー（駆動開始から 30 秒目までの各 5 秒間の平均パワーのピーク値）および疲労指数<sup>6)</sup>（前記ピークパワーと最小パワーとの差を両者が発揮された時の時間差で除した値、平均パワー減少量に相当）を算出した。これらの指標のうちピークパワーと疲労指数は Wingate anaerobic test（自転車エルゴメーターによる 30 秒間の全力駆動）における方法<sup>6,7)</sup>を参考にしたものである。

40 秒間の自転車エルゴメーター全力駆動終了後 1 時間以上経過して、負荷漸増法により最大酸素摂取量を実測した（ガス分析装置は Medical Graphic 社製 CPX/D を使用）。この時スポーツ種目の特異性を考慮して、自転車競技種目、スケート競技種目および人力飛行機の選手の負荷装置は自転車エルゴメーターを使用し、その他の種目の選手にはトレッドミルを使用した。

なお、本測定は財団法人北陸体力科学研究所（石川県小松市）で行った。

### C. 統計処理

相関係数は Pearson の積率相関係数を用いた。重回帰分析において独立変数の従属変数に対する相対的貢献度は、標準偏回帰係数と相関係数の積の決定係数に対する比率から評価した。いずれの場合も危険率 5% 未満をもって有意とした。

## 3. 結果

体重と最大酸素摂取量、自転車エルゴメーター全力駆動時の各種機械的出力パワー値、膝関節伸展筋力お

よび膝関節屈曲筋力との間にはそれぞれ有意な相関係数（前から  $r=0.516$ 、 $r=0.594\sim 0.789$ 、 $r=0.515$ 、 $r=0.464$ ）が認められたことから主要なパラメーターは体重で除した値で検討することにした。

体重当たりの自転車エルゴメーター全力駆動時における各種機械的出力パワー値、膝関節伸展筋力、膝関節屈曲筋力、および最大酸素摂取量の平均値±標準偏差を表 1 に示した。

対象者の年齢幅が大きかったため、年齢の影響を排除した最大酸素摂取量と各パラメーター（いずれも体重で除した値を使用）との偏相関係数を表 2 に示した。最大酸素摂取量と 10 秒平均パワー、20 秒平均パワー、30 秒平均パワーおよび 40 秒平均パワーとの間にも有意な正の偏相関係数が認められ、時間間隔が長くなるほど偏相関係数は高くなる特徴を示した。最も高い偏相関係数は 40 秒パワーとの間においてであった。ピークパワー（全被検者が駆動開始から 6～10 秒の 5 秒間の平均パワーがピークパワーであった）にも有意な正の偏相関係数が認められたが、最大ペダリングパワーとの間には有意な偏相関係数は認められなかった。疲労指数との間には有意な負の偏相関係数が認められた。一方、最大酸素摂取量と膝関節伸展筋力および膝関節屈曲筋力との間にも低いながら有意な正の偏相関係数が認められた。

40 秒平均パワーを従属変数、膝関節伸展筋力と最大酸素摂取量を独立変数とした重回帰分析の結果は表 3 に示した。重相関係数はあまり高い値ではなかったが、有意な水準は保たれていた。40 秒平均パワーに対する膝関節伸展筋力の相対的貢献度は 11.9% に対し最大酸素摂取量の相対的貢献度は 88.1% であり後者の顕著さが目立った。膝関節屈曲筋力と最大酸素摂取量を独立変数とした場合には多重共線性が認められ、40 秒平均パワーに対する相対的貢献度を検討するには至らなかった。

表1 各種測定値の平均値と標準偏差

項目	平均値	標準偏差
10秒平均パワー/体重(W/kg)	11.06	1.12
20秒平均パワー/体重(W/kg)	10.63	1.02
30秒平均パワー/体重(W/kg)	9.73	0.96
40秒平均パワー/体重(W/kg)	8.86	0.93
40秒パワー/体重(W/kg)	6.26	1.00
ピークパワー/体重(W/kg)	12.13	1.11
最大無酸素性パワー/体重(W/kg)	14.93	2.09
疲労指標(W/sec)	15.18	4.02
膝関節伸展筋力/体重(kg/kg)	1.193	0.21
膝関節屈曲筋力/体重(kg/kg)	0.602	0.10
最大酸素摂取量/体重(ml/kg/min)	61.1	8.2

表2 最大酸素摂取量と各パラメーターとの間の偏相関係数

項目	偏相関係数	
10秒平均パワー/体重	0.259	*
20秒平均パワー/体重	0.333	*
30秒平均パワー/体重	0.413	*
40秒平均パワー/体重	0.455	*
40秒パワー/体重	0.504	*
ピークパワー/体重	0.258	*
最大無酸素性パワー/体重	0.225	
疲労指標	-0.353	*
膝関節伸展筋力/体重	0.291	*
膝関節屈曲筋力/体重	0.267	*

\* : p<0.05

表3 重回帰分析の結果

重相関係数	0.449 *	
	膝関節伸展筋力/体重	最大酸素摂取量/体重
標準偏回帰係数	0.1117	0.4076
相関係数	0.2148	0.4358
貢献量	0.0240	0.1776
相対的貢献度(%)	11.9	88.1

\*: p&lt;0.05

#### 4. 考察

身体運動時におけるエネルギー供給の概念が変わりつつある。以前は乳酸の生成については、酸素がなくてミトコンドリアの反応が進まないため、分解された糖が乳酸になると考えられていたが、現在では糖の分解量がミトコンドリアでの処理量よりも多いがために生成されるのだと概念がシフトしてきている<sup>8)</sup>。この概念に基づきそして呼吸運動をしていなくても体内には必ず酸素が貯留すると考えれば無酸素運動というのはあり得ないと考えられている。実際、近赤外線分光法によりダッシュ時に筋の酸素摂取量は大きく増加することがわかりつつある<sup>9,10)</sup>。

田畑<sup>11)</sup>によれば10秒程度で疲労困憊になる運動でも有酸素性のエネルギー供給量が全体のエネルギー供給量の10~20%くらいになるらしい。Spencerら<sup>12)</sup>は30秒間程度の高強度運動における有酸素性エネルギーの貢献度は30~40%であることを報告している。同様にWithersら<sup>13)</sup>は28%であることを、田畑<sup>14)</sup>は31%であることを報告している。川本<sup>15)</sup>は400m疾走中の有酸素エネルギーの利用率は、従来考えられていた値の倍以上である約43%であることを報告している。

本研究においても最大酸素摂取量と10秒平均パワーとの間には低いながらも年齢の影響を除いた有意な正の偏相関係数が認められ、しかも秒数が長くなるほど有意な水準を持った偏相関係数も高くなっていった。これらの結果は最大酸素摂取量とWingate anaerobic

testを行ったKozirisら<sup>16)</sup>の結果とほぼ同じであった。したがって、10秒間という短時間の激運動中全般において、酸素摂取能力は若干ながら関与することが推察された。また秒数が長くなるほど有意な水準を持った偏相関係数も高くなっていったことより激運動の継続時間が長くなるほど酸素摂取能力の関与が強くなるものと思われた。これは全力ペダリング等の激運動時間が長くなるほどエネルギー供給における貢献度は有酸素系の方が相対的に高まっていくことを報告した研究<sup>13,14)</sup>からも支持されるものと思われる。また、ハイパワーの持久能力を示す指標である40秒パワー<sup>5)</sup>についてもさらに高い有意な正の偏相関係数が認められたことや筋線維の相対的割合(平均速筋面積/平均遅筋面積)と関連する<sup>6)</sup>疲労指数と最大酸素摂取量とも有意な負の偏相関係数が認められたことから前述の考察を裏付けるものと思われる。ただし、最大ペダリングパワーと最大酸素摂取量とは山本ら<sup>17)</sup>の結果と同じで有意な相関係数は認められなかった。これは最大ペダリングパワーが7秒以内に発揮されるフライホイール半回転当たりの瞬時パワーであるためと考えられる。Crielaardら<sup>18)</sup>や石井ら<sup>19)</sup>は逆に最大ペダリングパワーと最大酸素摂取量の間には有意な負の相関係数があることを報告している。しかし、Crielaardら<sup>18)</sup>の研究では対象者が100m競技の選手からマラソンの選手までとあまりにも競技種目の幅が広すぎる(換言すれば競技

の特異性の幅が広すぎる)。また、石井ら<sup>19)</sup>の研究では最大ペダリングパワーの値を体重当たりの相対値ではなく絶対値で使用している。これらの理由で当然のこととして有意な負の相関係数が導かれているのであると思われる。体重と年齢の影響を除き、対象者の競技特性に偏りの比較的少ない本研究結果の方が最大酸素摂取量と短時間の自転車ペダリングパワーの関係を論述する上でより妥当性があると思われる。

さらに最大酸素摂取量と体重当たりの膝関節の伸展筋力および屈曲筋力との間にも低いながら有意な正の偏相関係数が認められた。このことは最大酸素摂取量を高める上で脚筋力の強化がある程度重要であることを意味しているわけである。複数のオリンピックメダリストや世界記録保持者を育て上げているオーストラリアのパーシー・セルッティは、経験則として中距離ランナーのトレーニング方法の一つとして筋力トレーニングの必要性を1960年代から説いてきたが<sup>20)</sup>、上記結果より理論的にもセルッティの主張は強調できるとと思われる。一方、40秒平均パワーに対しては最大酸素摂取量の方が膝関節伸展筋力より相対的貢献度は圧倒的に高かった。40秒平均パワーは陸上競技800m走の記録と密接な関係が認められている<sup>21)</sup>ことから論理を飛躍させれば、陸上競技800m走の記録を向上させるには最大酸素摂取量と膝関節伸展筋力を高めるトレーニングが必要であるが、最大酸素摂取量を高めるトレーニングをより優先すべきであることが推察される。

これらのことからスプリント種目{800m走は中距離走種目であるが、男子の世界記録が1分41秒11(1997年デンマークのウィルソン・キプテケルが樹立)であることから、かなりスプリント種目に近いと思われる}における有酸素的トレーニングの重要性が示唆される。つまり、多くのスポーツ場面において、たとえ1回の全力運動が数秒以内であってもそれを繰り返し行うことが多いため、スプリント運動でも解糖系能力の向上のみでなく酸化系能力の向上も必要であ

ることが強く求められるものと思われる。また、800m走と1500m走が専門のピーター・スネル(ニュージーランド、1960年のローマ五輪で800m走優勝、1964年の東京五輪では800m走と1500m走で優勝)に対して、週160kmの有酸素ランニング(マラソントレーニング、時には1日45km以上)を実施させていたアーサー・リディアードのトレーニング理論<sup>22)</sup>には深い合理性があったものと再認識させられる。従って本研究結果は陸上100m走のトレーニングプログラムにおいてにさえ、有酸素性パワーの強化をコンディショニングづくりの土台としているという考え方<sup>23)</sup>に強い支持を与えるものと思われる。ただしスプリント種目のための有酸素的トレーニングは陸上長距離選手やマラソン選手の内容に匹敵するものではなくて、種目特性を失うことのない軽レベルの内容(LSD: Long Slow Distance走<sup>24)</sup>等)が適しているであろうと思われる。

## 5. まとめ

13~26歳の男子スポーツ選手74名を対象として、彼らの発揮した最大酸素摂取量と自転車エルゴメーターによる下肢のペダリングパワーおよび膝関節筋力との関連性(いずれも体重当たりの値)を検討した。その結果は以下の通りであった。

- ① 最大酸素摂取量と10秒平均パワー、20秒平均パワー、30秒平均パワーおよび40秒平均パワーの間にはいずれも年齢の影響を除いた有意な正の偏相関係数が認められた。10秒平均パワーにおける偏相関係数は低い値であったが、ペダリングの時間間隔が長くなるほど偏相関係数は高くなる特徴を示した。
- ② 最大酸素摂取量と疲労指標との間には年齢の影響を除いた有意な負の偏相関係数、40秒パワーの間には最も高い正の偏相関係数が認められたが、最大ペダリングパワーの間には有意な偏相関係数は認められなかった。
- ③ 最大酸素摂取量と膝関節伸展筋力および膝関節屈

曲筋力との間には低くはあったが年齢の影響を除いた有意な正の偏相関係数が認められた。

- ④ 40 秒平均パワーの変動に対する相対的貢献度は、最大酸素摂取量は 88.1%、膝関節伸展筋力は 11.9% であった。

以上より短時間の激運動に対しても有酸素能力がある程度関与していることが推察され、スプリント種目のトレーニングにおいても軽度の有酸素的トレーニングを取り入れることの必要性が認識された。また、有酸素的作業能力の向上のために膝関節伸展筋力を高めることが重要であることと、有酸素的作業能力の向上が 40 秒間の全力ペダリング作業能力の向上に非常に大きく貢献していることも示唆された。

## 参考文献

- 1) 八田秀雄 ; 乳酸をどう活かすか, 杏林書院, 2008, pp.1-12
- 2) 八田秀雄 ; 乳酸を活かしたスポーツトレーニング, 談社サイエンティフィック, 2001, pp.134-135
- 3) 森丘保典 ; 乳酸をどう活かすか, 杏林書院, 2008, pp.79-91
- 4) Coyle, E. F. ; Very intense exercise-training is extremely potent and time efficient : a reminder. *J. Appl. Physiol.*, 98, : pp.1983-1984, 2005
- 5) 山本正嘉, 中村好男 ; 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, pp.77-80
- 6) Bar-Or, O., Dotan, R., Inbar, O., Rothstein, A., Karlson, J., & Tesch, P. ; Anaerobic capacity and muscle fiber type distribution in man. *Int. J. Sports Medicine*, 1 (2) : pp.82-85, 1980
- 7) Bar-Or, O. ; The Wingate anaerobic test : an update on methodology, reliability and validity. *Sports Medicine*, 4 : pp.381-394, 1987
- 8) 前掲 2), pp.31-52
- 9) 前掲 2), pp.87-109
- 10) 伊藤穰, 川原貴 ; 低酸素トレーニングの新たな可能性～無酸素性パワーの向上に関する取り組み～, *トレーニング科学*, 17 (3) : pp.167-173, 2005
- 11) 田畑泉 ; 無酸素性エネルギーの定量法, *J.J.Sports Sci*, 13 (5), pp.559-566, 1994
- 12) Spencer, M. R., & Gastin, P. B. ; Energy system contribution during 200-to 1500-m running in highly trained athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.* , 33 (1) : pp.157-162, 2001
- 13) Withers, R. I., Sherman, W. E., Clark, D. G., Esselbach, P. C., Nolan, S.R., Mackay, M.H., & Brinkman, M. ; Muscle metabolism during 30, 60, and 90s of maximal cycling on an air-braked ergometer. *Eur. J. Appl. Physiol.* , 63 : pp.354-362, 1991
- 14) 田畑泉 ; 身体運動のエナジェティックス, 高文堂, 1989, pp.9-112
- 15) 川本和久 ; ジュニアからシニアへのトレーニング—陸上競技・短距離—, *トレーニング科学*, 18 (1) : pp.9-12, 2006
- 16) Koziris, L. P., Kraemer, W. J., Patton, J. F., Triplett, N. T., Fry, A. C., Gordon, S. E., & Knuttgen, H. G. ; Relationship of aerobic power to anaerobic performance indices. *J. Strength and Cond. Res.* , 10 (1) : pp.35-39, 1996
- 17) 山本正嘉, 中村好男, 宮下充正 ; 90 秒間連続の最大努力作業時に発揮されるパワーに関する研究—最大無酸素性パワーおよび最大有酸素性パワーとの関連から—, *J. J. Sports Sci.* , 4 (4) : pp.309-313, 1985
- 18) Crielaard, J. M., & Pinary, F. ; Anaerobic and aerobic power of top athletes. *Eur. J. Appl. Physiol.* , 47 : pp.295-300, 1981
- 19) 石井喜八 ; 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—, 昭和 60 年度 日本体育協会スポーツ科学研究報告, 1985, pp.3-12
- 20) パーシー・セルッティ ; 陸上競技チャンピオンへの道, ベースボール・マガジン社, 1970, pp.109-116

- 21) 藤原寛康, 禰屋光男, 杉田正明, 松垣紀子, 林寛道 ; 90 秒間ウイングートテスト中の酸素摂取量, 体力科学, 46 (6) : p.897, 1997
- 22) Lydiard, A ; リディアードのランニング・バイブル, 大修館書店, 1993, pp.18-33
- 23) William, C., & Gandy, G ; Physiology and nutrition for sprinting. In : Physiology and Nutrition for Competitive Sport. D.R. Lamb, H.G. Knuttgen, and R. Murray, eds. Carmel, IN : Cooper, 1994, pp.55-98
- 24) 江橋博 ; トレーニング科学ハンドブック, 朝倉書店, 1996, pp.62-76

## Relationship between maximum oxygen intake, leg power output by maximum pedaling of a bicycle ergometer, and leg strength

Ryosuke OKANO

The purpose of this study is to examine the relationship between maximum oxygen intake, leg power output by maximum pedaling of a bicycle ergometer, and leg strength. Seventy-four male athletes aged from 13 to 26 years old served as a subject. The results were as follows:

① There were significant and positive partial coefficients of correlation adjusting for age between maximum oxygen intake, 10s mean power output, 20s mean power output, 30s mean power output, and 40s mean power output. Although the partial coefficient of correlation of 10s mean power output was weak, it was characterized that the longer the pedaling time of period over 10s came to be, the stronger the partial coefficient of correlation revealed to be.

② There was significant and negative partial coefficient of correlation adjusting for age between maximum oxygen intake and fatigue index, and the most strongest positive it between maximum oxygen intake and 40s power output, however, no significant it between maximum oxygen intake and maximum pedaling power output.

③ There were weak but significant and positive partial coefficients of correlation adjusting for age between maximum oxygen intake, leg extension strength, and leg flexion strength.

④ The relative contribution to the variation of 40s mean power output was 88.1% for maximum oxygen intake, and 11.9% for leg extension strength.

From these results, it was inferred that aerobic capacity was associated even with the short-term strenuous exercise to some extent, which indicated that mild aerobic training should be adopted for the training of sprint event. Furthermore it was suggested that the increased leg extension strength was very available for the increased aerobic capacity, and the increased aerobic capacity would have huge contribution to the increased mean power output by maximum pedaling for 40s time period.