

超最大強度におけるプル、キック、 スイム中の代謝特性

荻田 太 (Futoshi Ogita) 鹿屋体育大学体育学部
小野寺丈晴 (Takeharu Onodera) 鹿屋体育大学大学院体育学研究科
若吉 浩二 (Kohji Wakayoshi) 奈良教育大学教育学部

〔要旨〕

本実験は、超最大強度におけるプル、キック、スイム中の代謝特性を明らかにすることを目的とし、よく鍛錬された男子大学水泳選手6名(20±1歳)を被検者として、30秒、1分、および2～3分で疲労困憊に至る超最大泳中の総酸素摂取量および総酸素借を測定した。その結果、総酸素摂取量はどの運動においても運動時間にともなって直線的に増加した。一方、総酸素借も2～3分の運動で最大値を示したが、その増加は直線的ではなく、かつキックにおける酸素借は、他の運動よりも短時間内に最高値に達する傾向が見られた。総酸素需要量に対する総酸素借の割合を見ると、1分の運動では約50%、2～3分の運動では約30%とどの運動も類似した結果であったが、30秒運動では64～72%と運動間に差が見られた。このことから、特に50mのような30秒程度の運動においては、プル、キック、スイム間の代謝特性に違いがあることを考慮し、トレーニング強度の設定に配慮する必要があることが示唆された。

◆キーワード：有酸素性・無酸素性エネルギー供給機構、代謝特性、超最大運動、トレーニング強度、競泳成績の改善

1. 目的

競泳競技は、50m、100m、200m、400m、800m、1500mの距離種目で構成され、競技時間は、世界的レベルの選手でおよそ22秒から15分程度である。これらの運動に必要なエネルギーは、有酸素性、および無酸素性エネルギー供給機構から供給されており、これらのエネルギー供給機構の重要性は、運動強度や運動時間、運動の種類などによって異なることが報告されている^{3),6),8)}。したがって、専門種目の記録を向上させるためには、その種目に対して重要なエネルギー供給系に適切な刺激を与え、改善を促すことが効果的と考えられ、そのためにも各距離種目の代謝特性について把握することは必須である。そこで本研究は、競泳トレーニングで用いられるプル、キック、スイムを用い、50mから200mの全力泳をシミュレートした30秒から2～3分程度で疲労困憊に達する超最大泳中の有酸素性、無酸素性エネルギー供給量を定量し、それぞれの代謝特性を比較検討すると同時に、これらのデータからエネルギー供給能力の改善が競泳成績の改善にどの程度影響するのか明らかにすることを目的とした。

2. 方法

・被検者：被検者は、年齢20±1(平均±SD)歳、身長176.8±5.0cm、体重67.8±1.9kgで、100m自由形のベストタイムが55.3±1.3秒の、全国大会出場経験のある健康な男子大学水泳選手6名であった。実験に先立って、被検者は実験の手順、意義などについての説明を受け、それらを十分理解した上で自主的に参加した。

・運動：本実験の運動には、クロールのプル、キック、スイムを用いた。プルの際にはブルブイ(浮力33.4N)を大腿部にはさみ、さらにキック動作を行えないように両足首をベルトで縛った。また、キックの際には、ビート板(浮力39.2N)を手にした。本実験では、すべての被検者において、同じブルブイとビート板が用いられた。

・プレテスト：測定はすべて加減圧調整可能流水プールにおいて行われた。流水プールの流速は、0.00m・s⁻¹から2.00m・s⁻¹まで、0.01m・s⁻¹の間隔で調節可能であった。また、その精度は±2%未満であり、再現性も高いことが確認されている^{4),5)}。

各被検者のプル、キック、スイムにおける最大ド

運動強度と酸素需要量の関係を求めるために、6分間の一定流速泳中の酸素摂取量を、異なる流速で少なくとも7回以上測定した。酸素摂取量の測定は、それぞれのステージの最後の2分間に行った。流速は、プルとスイムでは $0.80\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ から、またキックでは $0.60\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ から開始し、 $0.02\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ から $0.05\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ずつ増加した。なお、本実験では、水泳中の運動強度として流速の3乗を用いた^{7,9,11)}。

・**超最大強度における水泳中の代謝特性**：超最大泳中の代謝特性を明らかにするために、30秒、1分、2～3分程度で疲労困憊に達するプル、キック、スイム中の総酸素借と総酸素摂取量が測定された。したがって、1人の被検者が合計9回の測定を行ったことになる。各測定は10分間のウォーミングアップを行った後、10分間の休息をはさんで行われた。ウォーミングアップの強度は、プル、スイムではそれぞれの最高酸素摂取量の60%、キックでは50%に相

当する流速とした。それぞれの測定時の流速は、目標とした運動時間で疲労困憊に達するように予備実験で決定された。疲労困憊の判定は、設定した流速を維持できなくなり、流水プール内での身体の位置が開始時よりも1m後方に落ちたときとした。原則として、それぞれの測定は別日に行われた。

・**測定方法**：酸素摂取量は、すべてダグラスバッグ法によって測定された。採取された呼気ガスは、質量分析装置(Perkin-Elmer MGA-1100 USA)を用いて酸素及び二酸化炭素濃度を分析した後、乾式ガスマーター(品川製作所製)によってガス量を定量した。同時にガス温の計測も行った。

超最大運動中の酸素需要量は、プレテストで求めた最大下の運動強度と酸素摂取量の回帰式より、その強度に相当する酸素需要量を外挿法によって求めた¹³⁾。総酸素需要量は、外挿された酸素需要量と実際の運動時間との積から算出した。総酸素借は総酸素需要量から運動中連続して測定された総酸素摂取量を引いて求めた。

・**統計処理**：測定値はすべて平均値±標準偏差で表した。また、各条件間の差は、一元配置の分散分析および対応のあるt検定を用いて行い、危険率5%未満を有意とした。

3. 結果

・**超最大運動中の代謝特性**：本実験において、運動中の総エネルギー供給量を表す総酸素需要量は、どの運動においても運動時間に対して直線的に増加した(図1-a)。また、同じ時間の総酸素需要量を運動間で比較すると、スイムにおける値が最も高く、次いでキック、プルの順となり、プル、キックのエネルギー消費量は、スイムのそれぞれ約70%、約85～90%であった(表1)。有酸素性エネルギー供給量を表す総酸素摂取量も、総酸素需要量と同様、運動時間に対して直線的に増加し(図1-b)、同じ時間の運動におけるプルとキックの値は、それぞれスイムの約65～70%、80～95%であった。無酸素性エネルギー供給量を表す総酸素借も運動時間にもなって増加する傾向にあり、プルとスイムにおいては2～3分の運動でほとんどの被検者が最高値を示した(図1-c)。一方、キックにおいては他の運動より短時間内に最高値に達する傾向が見られ、6人中2人にお

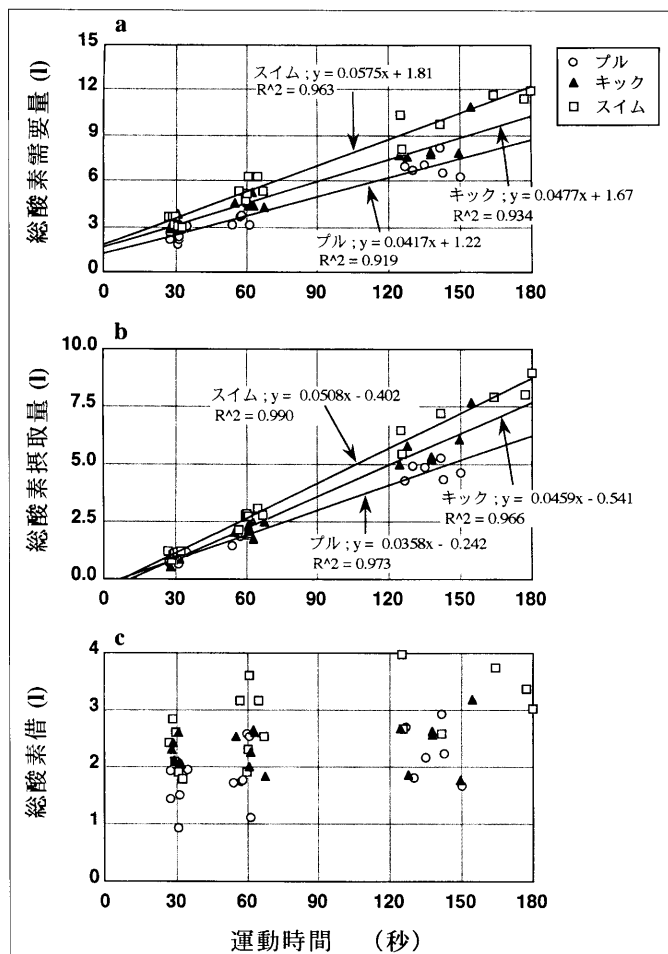


図1 プル、キック、スイムにおける運動時間と総酸素需要量、総酸素摂取量、および総酸素借の関係

表1 プル、キック、スイムにおいて、30秒、1分、2～3分で疲労困憊に達する運動中の代謝特性と運動強度

	運動時間 (秒)	流速 (m·s ⁻¹)	総酸素需要量 (l)	総酸素摂取量 (l)	総酸素借 (l)	総酸素摂取量/ 総酸素需要量 (%)	総酸素借/ 総酸素需要量 (%)	相対的 運動強度 (% $\dot{V}O_{2max}$)
30秒								
プル	30.7±2.4	1.42±0.04 **##	2.38±0.39 **##	0.83±0.16 **	1.54±0.34 **##	35.6±7.9	64.4±7.9	166±17 #
キック	30.0±1.5	1.09±0.05 **	3.18±0.34	0.92±0.24	2.26±0.20	28.7±6.2	71.3±6.2	191±17
スイム	29.7±1.8	1.59±0.05	3.36±0.30	1.08±0.13	2.28±0.38	32.6±6.3	67.4±6.3	175±23
1分								
プル	58.3±2.4	1.33±0.04 **##	3.77±0.55 **#	1.85±0.19 **##	1.91±0.51 **#	50.0±8.2	50.0±8.2	138±12
キック	61.5±3.7	0.95±0.05 **	4.51±0.32 **	2.19±0.28 **	2.32±0.31	48.7±6.2	51.3±6.2	133±13
スイム	61.3±3.4	1.45±0.04	5.50±0.59	2.72±0.28	2.78±0.59	49.9±7.3	50.1±7.3	138±14
2～3分								
プル	137.8± 8.1	1.21±0.03 **##	6.96±0.61 **##	4.71±0.36 **#	2.25±0.44 **	67.8±4.9	32.2±4.9	109±6
キック	138.7±10.8	0.88±0.05 **	8.28±1.16 *	5.84±0.90	2.44±0.49 *	70.5±5.1	29.5±5.1	107±6
スイム	152.3±22.7	1.31±0.04	10.58±1.33	7.35±1.14	3.23±0.51	69.3±4.7	30.7±4.7	107±9

** P<0.01 vs スイム ## P<0.01 vs キック
* P<0.05 vs スイム # P<0.05 vs キック

いては30秒の運動において最高酸素借が得られた。平均しても、30秒の運動では最高値の90%以上の酸素借がすでに産生されていた（プル：68%、スイム：70%）。

・有酸素性および無酸素性エネルギー供給機構の貢献度：図2は、経時的な総酸素需要量に対する総酸素摂取量および総酸素借の割合の変化を示している。その結果、どの運動においても1分の運動ではほぼ50%：50%、2～3分の運動では約

70%：30%と類似した値を示したが、30秒の運動においては28～36%：72～64%と運動間に違いが認められ、キックはスイムよりも、またスイムはプルよりも無酸素性エネルギー供給機構の貢献度が5～10%高い傾向にあった。

・運動時間と流速および相対的運動強度：超最大運動中の流速は、すべての時間においてスイムが最も高く、ついでプル、キックの順であり、プル、キックの流速はスイムのそれぞれ88～92%、66～70%であった(表1)。また、相対的運動強度を比較すると、特に30秒の運動において、キックの強度が他の運動より高い傾向を示したが(プル166%、キック191%、スイム175%)、1分および2～3分の運動における強度に顕著な差は認められなかった。

4. 考察

本研究は、50mから200mをシミュレートした30秒から2～3分程度で疲労困憊に至るプル、キック、スイム中の代謝特性を明らかにすることを目的として行った。

・超最大強度におけるプル、キック、スイム中の代謝特性

本実験において、プルとスイムにおける総酸素借は、先行研究におけるランニングや自転車運動と同様^{2),3)}、2～3分の運動において最高値に達した。このことは、プルやスイムにおいては200mを

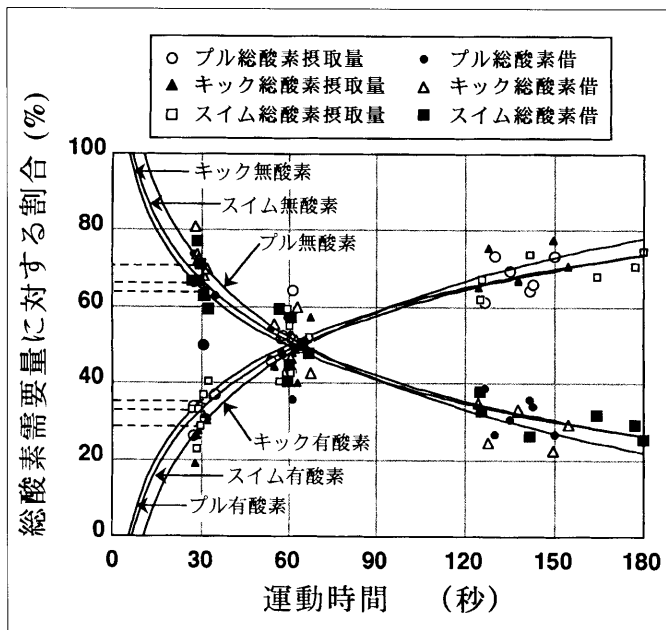


図2 総酸素需要量に対する総酸素摂取量、および総酸素借の割合の経時的変化

全力で泳いだときに、無酸素性エネルギー供給系が最大限に動員されることを示唆している。したがって、この種目に対するトレーニングは、この最大無酸素性エネルギー供給能力を高めることが一つの大きな目的といえよう。一方、キックにおいては、30秒程度の運動においてすでに最高総酸素借の90%もの値が観察されており(プル68%、スイム70%)、比較的短時間の運動で最高酸素借が得られた。したがって、キックの場合は、自転車運動やスイムなどとは異なり、50m全力キックなどでも脚の無酸素性エネルギー供給系に最大、またはそれに近い刺激を与えられると考えられる。

一方、有酸素性エネルギー供給量を表す総酸素摂取量は、プル、キック、スイムのすべてにおいて運動時間に比例して直線的に増加した。また、総エネルギー供給量を表す総酸素需要量(総酸素摂取量+総酸素借)も、運動時間に比例して直線的に増加した。このことは、有酸素性および総エネルギー供給量は、泳ぐ距離に比例して増大することを意味している。先述したように、無酸素性エネルギー供給は2~3分の運動で頭打ちとなり、それ以降はプラトーを示すか、またはより長時間低強度運動となると低下することが予測される。そのため、運動時間がより長くなる場合、総エネルギー供給量の増加は有酸素性エネルギー供給の増大に依存することになる。したがって、無酸素性エネルギー供給量がそれ以上期待できない3分より長い競技種目、すなわち400m以上の距離種目では、最大有酸素性エネルギー供給能力である最大酸素摂取量や、乳酸蓄積によって筋疲労を招来しないようなOBLAなどの改善が競技能力の向上により重要となるであろう。

自転車運動を用いた先行研究によれば、超最大運動中の総エネルギー供給量に対する無酸素性エネルギー供給量の貢献度は、30秒の運動で約65%、1分の運動で約50%、そして2~3分の運動で約35%であったと報告されている³⁾。本実験のプル、キック、スイムにおける結果もこれらの値に類似した結果であった。ただし、30秒の運動においては運動間にやや差があり、スイムはプルよりも、さらにキックはスイムよりも5-10%程、無酸素性エネルギー供給機構の貢献度が高い傾向となった。したがって、25mや50mなど短い距離でトレーニングを行なう場合に

は、プル、キック、スイムそれぞれの代謝特性が異なることに留意しながら、トレーニング強度(タイム)を設定する必要があるだろう。また、無酸素運動と考えられがちな30秒の運動ですら、30~40%ものエネルギーが有酸素性に供給されているという結果は、無酸素性エネルギー供給能力を高めることに重点をおくべきスプリンターのトレーニングにおいても、有酸素性トレーニングは無視できないことを示唆している。さらに、1分の運動となると有酸素性エネルギー供給量の割合は50%を占め、2~3分の運動では60~70%に増加した。この結果は、100mより長い距離種目では、有酸素性エネルギー供給の貢献度の方が大きくなることを意味している。しかしながら、先述したように、無酸素性エネルギー供給量は2~3分の運動で最高に達し、1分の運動でも最高値の80~95%ものエネルギーが供給されていることも併せて考慮すると、100mや200mを専門種目とする選手は、有酸素性・無酸素性両エネルギー供給機構から短時間内により高いエネルギーの供給が可能となるように、両方の最大エネルギー供給能力を改善させるトレーニング内容が要求されるべきである。

また、相対的運動強度においても、30秒運動の場合、運動間に25~30%(166~191% $\dot{V}O_{2peak}$)もの違いがみられた。トレーニング効果を高めるには、適切な運動強度の設定が重要であるから、特に短距離のトレーニングを行う際には、代謝特性とともに強度にも違いがあることを考慮に入れる必要があるだろう。

・有酸素性および無酸素性エネルギー供給能の改善から期待される泳タイムの向上

水泳中の経時的エネルギー供給と競技成績に関するモデルを作成し、エネルギー供給の改善が泳記録に与える影響を明らかにすることは、トレーニングに対する指針を明確にする意味でも、トレーニングへの意欲を高める上でも役立つと思われる。そこで、以下にこのモデルの作成を試みてみた。

水泳中のエネルギー消費率(単位時間内に消費されるエネルギー量;以下 \dot{E})は、抵抗に打ち勝つためのパワー(以下 P_d)と推進効率(以下 e_p)、および機械的効率(以下 e_g)の相互関係によって決定される(式1)(この式の詳細については文献13参照)。

$$\text{式 1} \quad \dot{E} = \frac{Pd}{(ep \cdot eg)}$$

ここで、Pdは各泳者固有の抵抗係数(以下A)と速度(以下v)の3乗に比例することから、式1は次式のように書き換えられる。

$$\text{式 2} \quad \dot{E} = \frac{Av^3}{(ep \cdot eg)}$$

また、vはある時間(以下t)あたりに進んだ距離(以下d)として表されるので、式2はさらに次のように変換できる。

$$\text{式 3} \quad \dot{E} = \frac{Ad^3}{(ep \cdot eg)t^3}$$

この式を積分するとある距離(d)を、ある決まった速度(v)、または時間(t)で泳ぐために必要なエネルギー消費量(以下E)を算出できる式となる。

$$\text{式 4} \quad E = \frac{Ad^3}{(ep \cdot eg)t^2}$$

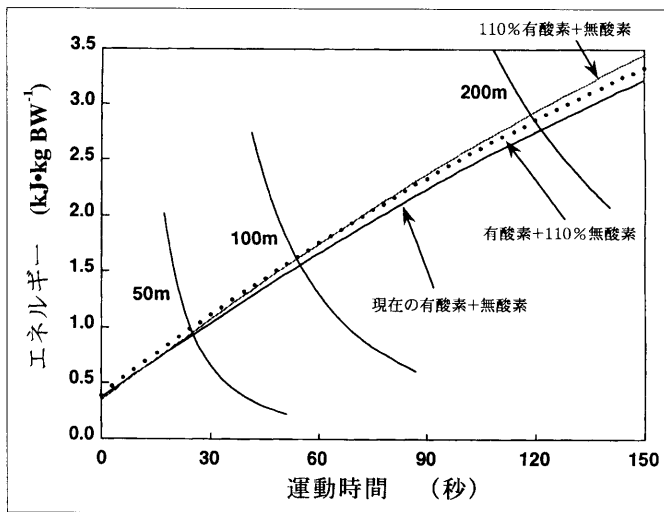


図3 有酸素性または無酸素性エネルギー供給量が10%改善されたときの総エネルギー供給量(体重あたり)の経時的变化とそれが50m、100m、200mの記録の改善に及ぼす影響

各距離の曲線はその距離をあるタイムで泳いだときに必要とされるエネルギー量(体重あたり)。エネルギー量は、酸素を1リットル消費したときの熱量を5kcalとし、さらに1kcal=4.19kJとして換算した

表2 現在の最高記録と有酸素性または無酸素性エネルギー供給機構が10%改善されたときの予測記録

泳距離	有酸素100% 無酸素100% (現在の最高記録)	有酸素110% 無酸素100% (予測される記録)	有酸素100% 無酸素110% (予測される記録)
50m	25.0	24.8	24.3
100m	54.5	53.6	53.4
200m	121.1	118.5	119.6

ある時間を全力で泳いだ場合、それに必要なエネルギー量(E)は、本結果の運動時間と総酸素需要量の関係式から算出できる。したがって、このEを式4の左辺に、そしてそのときの距離をdに、かかった時間をtに代入すれば、その距離に対するA/(ep·eg)という定数が導き出せ、ある距離をある決まった時間で泳ぐために必要なエネルギー消費量が算出可能となる(ただし、A、eg、epは各泳者によって異なるため^{11),13)}、この値は本実験の被検者、または同レベルの体格(Aを決定する要因)と技術(ep)を持ち合わせた被検者にしか適用できない)。図3は、50mを25.0秒、100mを54.5秒、200mを2分1秒1で泳ぐ本被検者を例にとり、上述した方法で計算された経時的なエネルギー供給量と、ある距離をある記録で泳ぐときに必要なエネルギー量のモデルを表したものである。さらに、無酸素性および有酸素性エネルギー供給速度の時定数が変わらないと仮定して、それぞれの最大エネルギー供給能力、すなわち最大酸素借および最大酸素摂取量が10%増加した場合の経時的なエネルギー供給量も合わせて図示した。尚、表2には、エネルギー供給系が改善されたときに予測された記録(エネルギー供給量とその距離を泳ぐために必要なエネルギー量のグラフの交点)も合わせて示した(この算出はその距離を一定の速度で泳いでいると仮定しており、スタートやターンの影響も考慮されていない)。その結果、有酸素性または無酸素性エネルギー供給量が10%増加することで、50mでは0.2~0.7秒、100mでは0.9~1.1秒、200mでは1.5~2.6秒の記録の向上が予測された。また、無酸素性エネルギー供給系はより短い時間の運動に、そして有酸素性エネルギー供給系は運動時間が長くなるほど記録の向上に影響しており、100mでは両供給系の記録への影響は同程度であることが予測された。その種目に対して重要なエネルギー供給系に適切な刺激を与え、改善を促すことが記録の向上に効果的といえる。そういう意味で、どの距離種目にどのエネルギー供給機構がどれだけ重要か、またどのエネルギー供給系を改善すれば競泳成績を向上させやすいかという疑問に対して、このモデルは少なからず回答を与えてくれると思われる。

以上本実験をまとめると、30秒から2~3分程度で疲労困憊に至るプル、キック、スイム中の代謝特

性は、1分以上の運動ではどの運動も類似した結果を示したが、30秒程度の運動では運動間に差が見られた。したがって、特に50mのような30秒程度の運動においては、プル、キック、スイムのトレーニングタイムの設定に配慮する必要があることが示唆された。また、これらのデータから、エネルギー供給系の改善が競泳成績の向上に及ぼす影響を推測することが可能となった。

5. 謝辞

本研究を行なうにあたり、田畑泉先生（国立健康栄養研究所）には、多大なる御指導、御意見をいただいた。また、実験を推進するに当たって田中孝夫先生（鹿屋体育大学）に多大なるご協力をいただいた。ここで改めて両先生に深謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) Hermansen, L., J. I. Medb ϕ , A. -C. Mohn, I. Tabata and R.Bahr(1984) Oxygen deficit during maximal exercise of short duration(abstract), *Acta Physiol. Scand.* 121:39A.
- 2) Medb ϕ , J. I., A-C. Morn, I. Tabata, R. Bahr, O.Vaage and O. M. Sejersted(1988) Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit, *J. Appl. Physiol.* 64:50-60.
- 3) Medb ϕ , J. I. and I. Tabata(1989) Relative importance of aerobic and anaerobic energy release during short-lasting exhausting bicycle exercise. *J. Appl. Physiol.* 67:1881-1886.
- 4) Ogita, F. and I. Tabata(1992) Oxygen uptake during swimming in a hypobaric hypoxic environment, *Eur. J. Appl. Physiol.* 65:192-196.
- 5) Ogita, F. and I. Tabata(1993) Effect of hand paddle aids on oxygen uptake during arm-stroke- only swimming. *Eur. J. Appl. Physiol.* 66:489-493.
- 6) 荻田太, 田畑泉, 平井雄介, 山奥慎一, 田口信教(1995) スイムベンチ運動およびアームストロークにおける酸素借の最大値, 日本体育学会第44回号: 354.
- 7) Ogita, F., M. Hara and I. Tabata(1996) Anaerobic capacity and maximal oxygen uptake during arm stroke, leg kicking and whole body swimming, *Acta Physiol. Scand.* 157:435-441.
- 8) 荻田太, 田畑泉, 芝山秀太郎(1997) 片脚膝伸展運動と両脚自転車運動における超最大運動中の代謝特性の体力科学: 726.
- 9) Ogita, F., T. Onodera and I. Tabata Effect of hand paddles on anaerobic energy release during supramaximal swimming, *Med. Sci. Sports Exerc.* in press.
- 10) Toussaint, H. M., A. Beelen, A. Rodenburg, A. J. Sargeant, G.de Groot, A.P.Hollander and G.J.van IngenSchenau (1988) Propelling efficiency of front-crawl swimming., *J. Appl. Physiol.* 65:2506-2512.
- 11) Toussaint, H. M., G. de Groot, H. H. C. M. Savelberg, K. Vervoorn, A.P.Hollander and G. J.van IngenSchenau (1988) Active drag related to velocity in male and female swimmers, *J. Biomech.* 21:435-438.
- 12) Toussaint, H.M.(1990) Difference in propelling efficiency between competitive and triathlon swimmers, *Med.Sci. Sports Exerc.* 22:409-415.
- 13) Toussaint, H. M., and A. P. Hollander (1994) Energetics of Competitive swimming. Implications for training programmes, *Sports Med.* 18:384-405.