

30秒から5分程度で疲労困憊にいたる水泳中の ストローク指標とエネルギー消費量の関係

小野寺丈晴 (Onodera Takeharu) 岩手県立岩谷堂高等学校
荻田 太 (Ogita Futoshi) 鹿屋体育大学体育学部
田中 孝夫 (Tanaka Takao) 鹿屋体育大学体育学部

〔要旨〕

本実験の目的は、30秒から5分程度で疲労困憊にいたる水泳中のストローク指標の変化を明らかにすると同時に、その変化とエネルギー消費量との関係を検討することであった。よく鍛錬された男子大学競泳選手6名(20±1歳)を被検者とし、30秒、1分、2～3分、4～5分で疲労困憊にいたる水泳中のストローク頻度、ストローク長、エネルギー消費量を測定した。その結果、ストローク頻度は流速が増大するにつれて有意に増加した。一方、ストローク長は、2分より長い時間で疲労困憊にいたる流速では有意な変化を示さなかったが、それより速い流速では有意に低下した。1ストロークあたりのエネルギー消費量は、30秒で $2.71 \pm 0.39 \text{kJ} \cdot \text{stroke}^{-1}$ 、1分で $2.44 \pm 0.27 \text{kJ} \cdot \text{stroke}^{-1}$ 、2～3分で $2.24 \pm 0.20 \text{kJ} \cdot \text{stroke}^{-1}$ 、4～5分で $2.11 \pm 0.18 \text{kJ} \cdot \text{stroke}^{-1}$ となり、運動時間が短くなるほど有意に増加した。また、ストロークあたりのエネルギー消費量は泳速に対して直線的比例関係を示した。以上の結果より、2分より短い時間で疲労困憊にいたる全力泳において泳速が増大されるとき、主としてそれはストローク頻度の増大によってもたらされていることが明らかとなり、また、泳速の増大には1ストロークあたりのエネルギー産生量の増大が密接に関係していることが示唆された。これらの結果は、泳速が増大されるとき、ストローク頻度とストローク長は必ずしも同調して変化するわけではないことを示し、また、泳速を上げるためには、1ストロークあたりのエネルギー産生量を増大させることが必要であるということを示唆するものであった。

◆キーワード：ストローク頻度、ストローク長、1ストロークあたりのエネルギー消費量、運動強度、有酸素性・無酸素性エネルギー供給機構、推進効率

1. 目的

泳速はストローク頻度とストローク長の関数である。そのため、泳速を高めるには、これらストローク指標の片方、または双方を増大させねばならない。競泳競技は50mから1500mまでの距離種目によって行われるが、それぞれの距離種目、または泳速に対するストローク指標の変化特性を明らかにすることは、各距離種目に応じたストローク指標の指導を行う上で有効な手段となり得る。そのため、一流選手を用いたレース中のストローク指標の研究は数多く行われてきた^{2)-11,28)}。

一方、エネルギー供給能力も競技成績を決する重要な要因の1つであることから、水泳中のエネルギー消費量に関する研究は古くよりなされてきた^{7,12,13)}。その中で、ストローク指標、代謝能力と泳速

の関係については数例検討されているが、それらは最大下運動におけるストローク指標と代謝の関係について見ているにすぎない^{10),15),19)}。実際の競泳の200m以下の距離種目は超最大強度で行われている¹⁹⁾ことを考慮すると、超最大運動強度でのストローク指標と代謝の関係について明らかにすることはより実践的な試みといえよう。

そこで本研究は、50mから400mをシミュレートした、30秒から5分程度で疲労困憊にいたる水泳中のストローク指標、すなわち、ストローク頻度、ストローク長の変化を明らかにすると同時に、そのときのエネルギー消費量との関係を検討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 \pm SD)歳、身長 176.8 ± 5.0 cm、体重 67.8 ± 1.9 kg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、健康な男子大学競泳選手6名であった。実験に先立って、被検者は測定手順、実験の意義、およびそれらにともなう危険性などについての説明を受け、それらを理解した上で被検者になることに同意し、自主的に実験に参加した。

・プレテスト

本実験の運動にはクロール泳を用いた。測定は全て加減圧調整可能流水プールにおいて行われた。各被検者の最大下運動強度と酸素需要量の関係を求めるために、6分間の最大下の一定流速泳中の最後の2分間の酸素摂取量を、異なる流速で少なくとも7回以上測定した。流速は $0.80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ から開始され、 $0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ から $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ずつ増加された。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^{6),16)}。

・実験手順

30秒から5分程度で疲労困憊にいたる水泳中のストローク指標の変化を明らかにするため、被検者は、30秒、1分、2~3分、および4~5分で疲労困憊にいたる全力泳を、それぞれ別日に行った。これらの運動時間は、それぞれ50m、100m、200m、400mを想定したものである。各測定は、10分間のウォーミングアップをした後に、10分間の休息をはさんで行った。ウォーミングアップの強度はプレテストで測定された最高酸素摂取量の60%の強度とした。それぞれの流速は、目標とした運動時間で疲労困憊にいたるように、あらかじめ予備実験において設定された。疲労困憊の判定は、設定した流速を維持できなくなり、身体の位置が開始時よりも1m後方に落ちたときとした。運動中を通して8ミリビデオカメラ(CCD-TR3, SONY)を用いて録画しストローク数を数えた。この際、左右の腕が1回転した時1ストロークとし、片腕だけの時は0.5ストロークとした。

・ストローク頻度、ストローク長の算出

ストローク頻度はストローク数をその時の運動時間で除して求め、ストローク長は運動中の流速をストローク頻度で除して求めた。

ストローク頻度 = ストローク数 ÷ 運動時間

ストローク長 = 流速 ÷ ストローク頻度

・総エネルギー消費量の算出

各運動中の総酸素需要量、すなわち総エネルギー消費量は、プレテストで求めた最大下の運動強度と酸素需要量の一次回帰直線より外挿して推定された各泳速の酸素需要量と実際の運動時間の積より算出した¹¹⁾。

・統計処理

測定値はすべて平均値 \pm 標準偏差で表した。また、各条件間の有意差の検定は対応のあるt検定を用いて行い、危険率5%未満を有意とした

3. 結果

・各運動時間におけるストローク頻度、ストローク長

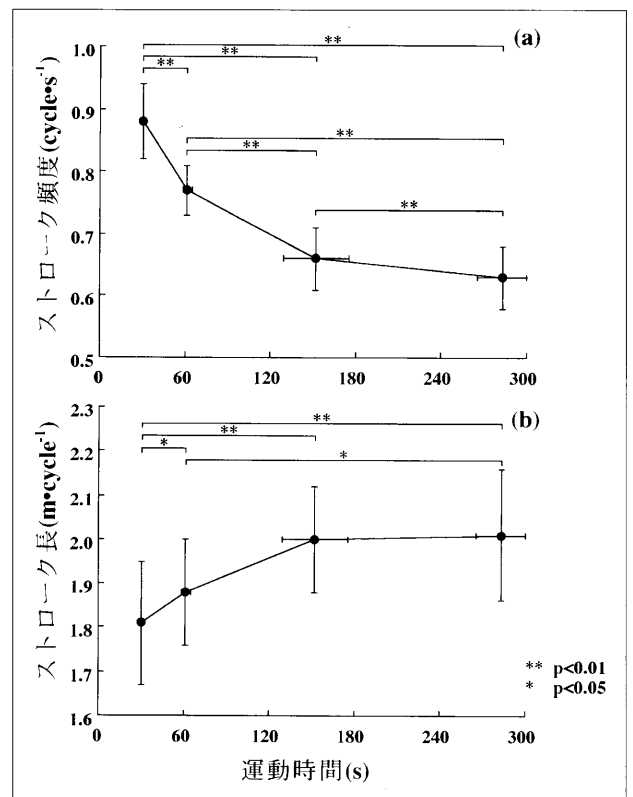


図1 異なる運動時間で疲労困憊にいたる運動中のストローク頻度 (a) ならびにストローク長 (b)

30秒から5分程度で疲労困憊にいたる運動中、ストローク頻度は運動時間が短くなるにつれて、有意に増加した(図1-a)。一方、ストローク長を見ると、2分以上の運動では有意な変化が認められなかった(図1-b)が、それより短い運動時間においては短くなる傾向を示し、特に30秒と1分の運動の間の差は有意であった。

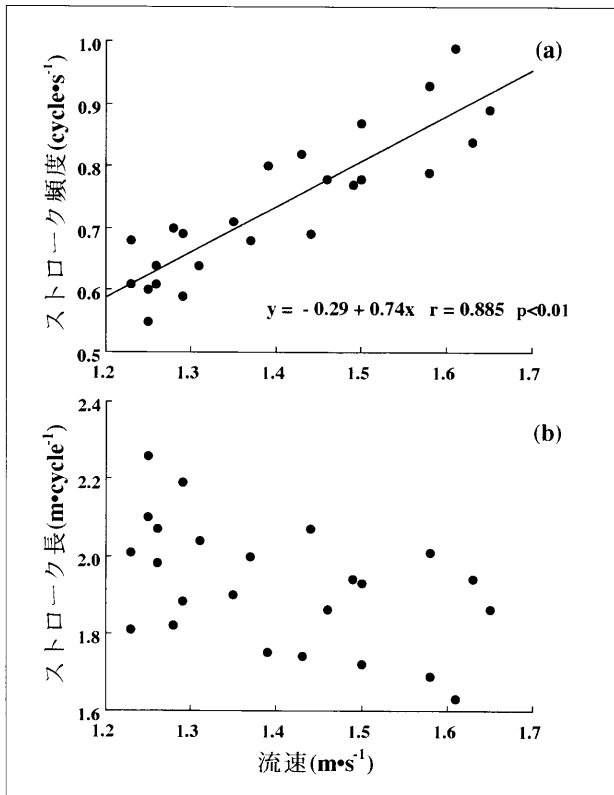


図2 各被検者の流速とストローク頻度 (a) ならびにストローク長 (b) の関係

図2は、流速の変化に対するストローク頻度、およびストローク長の変化を表している。ストローク頻度は流速に比例して直線的に増加していたが、ストローク長は流速が増加するにつれて低下傾向を示したが、個人差が大きく、明らかな傾向は示されなかった。

・1ストロークあたりのエネルギー消費量

各運動における総エネルギー消費量は、運動時間が長くなるにつれ直線的に増加した。また、総エネルギー消費量をストローク数で除して1ストローク

あたりのエネルギー消費量を換算すると、運動時間が長くなるにつれて有意な低下を示した(表1)

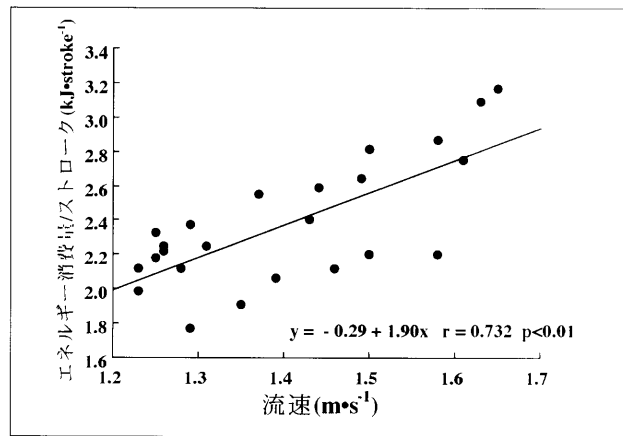


図3 各被検者の流速と1ストロークあたりのエネルギー消費量の関係

図3には、流速と1ストロークあたりのエネルギー消費量の関係を示した。その結果、1ストロークあたりのエネルギー消費量は流速に対して直線的な比例関係を示した。

【考察】

本研究は、異なる運動時間で疲労困憊に至る全身泳中のストローク頻度、ストローク長の変化を明らかにし、そのときの運動中のエネルギー消費量との関連性を明らかにすることを目的として行った

・各運動時間におけるストローク頻度、ストローク長

泳者が発揮する泳速は、ストローク頻度とストローク長の関数として決定される。したがって、泳速を上昇させるためには、それら一方の、または双方の増加をとまなうはずである。先行研究によると、Wakayoshi et al¹⁹⁾は、最大下の運動強度とストローク頻度の間に相関関係があることを報告している

表1 30秒、1分、2～3分、4～5分で疲労困憊にいたる運動の実際の運動時間、流速、相対的運動強度、ストローク頻度、ストローク長、総エネルギー消費量、1ストロークあたりのエネルギー消費量

実際の運動時間	流速	相対的運動強度	ストローク頻度	ストローク長	総エネルギー消費量	エネルギー消費量 / ストローク	
(s)	(m·s ⁻¹)	(% $\dot{V}O_{2max}$)	(cycle·s ⁻¹)	(m·cycle ⁻¹)	(kJ)	(kJ·stroke ⁻¹)	
30秒	29.7± 1.8	1.59± 0.05	175± 23	0.88± 0.06	1.81± 0.14	70.46± 6.34	2.71± 0.39
1分	61.3± 3.4	1.45± 0.04	138± 14	0.77± 0.04 **	1.88± 0.12 *	115.25± 12.38 **	2.44± 0.27 **
2～3分	152.3± 22.7	1.31± 0.04	107± 9	0.66± 0.05 **##	2.00± 0.12 **	221.58± 27.76 **##	2.24± 0.20 **##
4～5分	282.7± 17.7	1.25± 0.02	96± 4	0.63± 0.05 **##\$\$	2.01± 0.15 **#	371.06± 27.23 **##\$\$	2.11± 0.18 **##\$\$

** vs30秒 p<0.01 ## vs1分 p<0.01 \$\$ vs2～3分 p<0.01
* vs30秒 p<0.05 # vs1分 p<0.05 \$ vs2～3分 p<0.05

また、最大努力によるスプリント泳においても、泳速とストローク頻度に有意な相関関係があることが報告されている⁹⁾。超最大強度で行われた本実験の結果もこれらの結果に同意できるものであり、泳速に比例してストローク頻度は増大した。したがって、運動強度の程度を問わず泳速を増大させるには、ストローク頻度をそれに見合うだけ増加させるということが重要な要因であるということを示唆している。

一方、ストローク長についてみると、2分以上の運動の場合、平均値はほとんど変化は認められなかった。この結果は、2分以上、つまり200m以上の距離種目における泳速の増加は、ストローク長を維持しながらストローク頻度を増加させることによって達成されていることを示唆している。また、速い選手は遅い選手よりもストローク長が大きいことが報告されており¹⁰⁾、ストローク長がプラトーに達するような強度で競われるレースでは、より長いストローク長で泳ぐようなテクニックが勝負の鍵となるのかもしれない。これに対し、2分より短い運動においては、泳速の増加にともないストローク長は減少する傾向を示した。この結果は、2分よりも短い運動、つまり、50mや100mでは、ストローク長を減少させながらもそれ以上のストローク頻度の増大によって泳速を増大させていることを示している。これと類似した結果は、Keskinen and Komi¹¹⁾によっても報告されており、距離が短くなるにつれて、いかにピッチを上げるかが重要な鍵と思われる。以上の本結果より、200m以上の距離種目の場合、できる限り長いストローク長を維持するストロークテクニックを有してピッチをあげることに重点を置き、50mや100mなどの距離種目では、できる限り高いピッチで泳ぐためのパワートレーニングなどに重点をおくことが、1つのトレーニングの指針として考えられる。

・1ストロークあたりのエネルギー消費量

1ストロークあたりのエネルギー消費量は、運動時間が短くなるにつれ有意に増大し、また、流速と1ストロークあたりのエネルギー消費量の間には直線的比例関係が見られた。Klentrou and Montpetit¹²⁾も、最大下泳において、泳速の増加に対しストロークあたりのエネルギー消費量が増大することを報告

しており、本実験の結果とあわせると、最大下から超最大強度にいたるまで、泳速を増加させるには1回のストロークあたりのエネルギー量を増大させることが必要ということが明らかとなった。

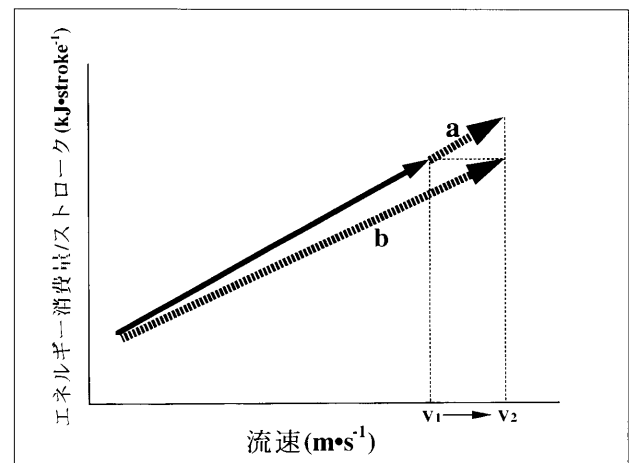


図4 1ストロークあたりのエネルギー消費量の変化にともなう泳速の向上

- ・エネルギー供給能力の向上による泳速の増加(a)
- ・スイミングエコノミーの向上による泳速の増加(b)

図4は、本実験の結果を踏まえ、泳速を向上させるにはどうすべきかをスキマティックに示したものである。図に示したように、1ストロークあたりのエネルギー消費量は泳速と直線的に比例するので、泳速の向上は、まず、図4-aに示したように、1ストロークあたりのエネルギー産生量そのものを向上させることによって達成できる。身体活動を行う上でのエネルギーは、有酸素性および無酸素性に産生されるので、1ストロークあたりのエネルギー産生量を増大させるには両エネルギーの供給能力の改善が要求される。その際には、運動時間(泳距離)によって重要となるエネルギー供給系が異なる¹³⁾ことに留意し、それぞれの専門距離種目にとってより重要なエネルギー供給系を特異的に改善させることがより効果的となる。

またもう1つには、図4-bで示したように、泳速と1ストロークあたりのエネルギー消費量の直線的比例関係の傾きを小さくする、すなわちスイミングエコノミーを向上させることによって、泳速は増大させられる¹⁴⁾。すなわち、エネルギー供給能力が同じでも、1ストロークあたりのエネルギー消費量が小さくできるならば、より高い泳速で泳ぐことが可能となる。水泳中に発揮される全機械的パワーは、水

を後ろに押し出すために費やすパワーと抵抗に打ち勝つためのパワーの和として考えられている^{15),17),18)}。したがって、より経済的に泳ぐためには、水を後ろに押し出すために浪費するパワーを小さくして、推進効率の高いストロークテクニクを習得するか、抵抗に打ち勝つためのパワーを低下させるように水泳中の姿勢を改善するなどして、その泳者の抵抗係数を減少させることなどが上げられる。先行研究によると、推進効率の高さと長いストローク長は密接に関連することが示唆されており¹⁸⁾、この経済的な泳ぎを目指す場合には、ストローク長の改善がよい指標となるかもしれない。

以上まとめると、本研究は、50mから400mの全力泳をシミュレートした30秒から5分程度で疲労困憊にいたる水泳中のストローク指標の変化を明らかにし、エネルギー消費量との関係を検討した。その結果、ストローク頻度は流速が増大するにつれて有意に増加した。一方、ストローク長は、2分より長い時間で疲労困憊に至る流速では有意な変化を示さなかったが、それより速い流速では有意に低下した。また、1ストロークあたりに費やすエネルギー量は、泳速に対して直線的に増大することが明らかとなった。これらの結果をふまえ、競技力を向上させるためには、それぞれの距離種目に応じたストローク指標の改善に取り組むべきであること、また、泳速と1ストロークあたりに費やすエネルギー消費量が直線的比例関係にあることから、泳速を高めるためには1ストロークあたりに発揮する代謝的パワーを増大させるか、より経済的なストローク技術へと改善させる必要があることが示唆された。

【参考文献】

- 1) Costill, D.L., J.Kovaleski, D.Porter, L.Kirwan, R.Fielding and D.King (1985) Energy expenditure during front crawl swimming: Predicting success in middle distance events, *Int.J.Sports Med.* 6:266-270.
- 2) Craig, A.B., Jr., and D.R.Pendergast (1979) Relationships of stroke rate, distance per stroke, and velocity in competitive swimming, *Med.Sci.Sports* 11:278-283.
- 3) Craig, A.B., Jr., P.L.Skehan, J.A.Pawelczyk and W.L.Boomer (1985) Velocity, stroke rate, and distance per stroke during elite swimming competition, *Med.Sci.Sports Exerc.* 17:625-634.
- 4) East, D.J. (1970) Swimming an analysis of stroke frequency, stroke length and performance, New Zealand *J.Health.Phys.Educ. Recreation* 3:16-25.
- 5) 藤原寛康, 荻田太 (1996) 最大努力によるスプリントクロールの全身泳、アームストローク、キックにおける泳速、ストローク頻度、ストローク長の関係, *トレーニング科学* 8:33-38.
- 6) Hollander, A.P., G.de Groot, G.J.van IngenSchenau (1986) Measurement of active drag forces during swimming, *J.Sports Sci.* 4:21-30.
- 7) Holmé, I. (1972) Oxygen uptake during swimming in man, *J.Appl.Physiol.* 33:502-509.
- 8) Kenndy, P., P.Brown, S.N.Chengalur and R.C.Nelson (1990) Analysis of male and female Olympic swimmers in 100-meter events, *Int.J.Sports Biomech.* 6:187-197.
- 9) Keskinen, K.L., and P.V.Komi (1988) Interaction between aerobic /anaerobic loading and biomechanical performance in freestyle swimming. In :B.E.Ungerechts, K.Wilke, L.Reischle (eds.), *Swimming Science V, Human Kinetics, Champaign, Illinois*, 285-293.
- 10) Klentrou, P.P. and R.R.Montpetit (1992) Energetics of backstroke swimming in males and females, *Med.Sci.Sports Exerc.* 24:371-375.
- 11) Medbø, 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.
- 12) 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.
- 13) 荻田太, 小野寺丈晴, 若古浩二 (1998) 超最大強度におけるブル、キック、スイム中の代謝特性, *水泳水中運動科学* 1:13-18.
- 14) Ogita, F., T.Onodera and I.Tabata (1999) Effect of hand paddles on anaerobic energy release during supramaximal swimming, *Med.Sci.Sports Exerc.* 31:729-735.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) Toussaint, H.M. (1990) Difference in propelling efficiency between competitive and triathlon swimmers, *Med.Sci.Sports Exerc.* 22:409-415.
- 18) Toussaint, H.M., T.Janssen and K.Kluft (1991) Effect of propelling surface size on the mechanics and energetics of front crawl swimming, *J.Biomech.* 24:205-211.
- 19) Wakayoshi, K., L.J.D'Acquisto, J.M.Cappaert and J.Troup (1995) Relationship between oxygen uptake, stroke rate and swimming velocity in competitive swimming, *Int.J.Sports Med.* 16:19-23.