

流水プールを用いた水泳疲労性閾値としての Critical Swimming Velocity の簡便的決定法の検討

高橋繁浩*, 若吉浩二**

A Simple Method for Determination of Critical Swimming Velocity in Swimming Flume

Shigehiro TAKAHASHI and Kohji WAKAYOSHI

Abstract

The purpose of this study was to investigate a simple method for determination of critical swimming velocity (V_{cri}). V_{cri} is defined by Wakayoshi et al. (1992) as the swimming speed which could theoretically be maintained forever without exhaustion, and is expressed as the slope of a regression line between swimming distance (D) and swimming time (T) obtained at various swimming speeds. To determine V_{cri} , 20 well-trained swimmers were measured at several swimming speeds ranging from 1.25 m/sec to 1.8 m/sec until exhaustion in a swimming flume. A regression analysis of D on T calculated for each swimmer showed highly linear relationships ($r=0.999$, $p<0.001$), and the slope coefficient signifying V_{cri} had a mean of 1.336 (SD 0.056) m/second. Mean velocity in the 1500 m free style at maximal effort (V_{1500}) was measured in a normal pool. Significant correlations were obtained between V_{cri} and V_{1500} . This result showed that V_{cri} corresponded to maximal lactate steady state. Investigation of the relationship between V_{cri} and estimated maximal effort swimming velocity (30, 60, 120, 180, 240 and 300 seconds), calculated from the regression equations of V_{cri} , revealed a significant relationship in swimming periods which were longer than 120 seconds. This result was similar to the maximal swimming periods exceeding about 65 ~ 75% of the aerobic contribution of total energy yield found by Ogita et al.

These data suggest that V_{cri} could be calculated by performing one maximal effort swimming test for approximately 2 ~ 3 minutes.

緒言

最大酸素摂取量 (VO_{2max}) は、運動中に体内に摂取することのできる酸素量の単位時間あたりの最高値を意味することから、全身持久性能力の指標として広く用いられている。しかし

ながら、一方では必ずしもその指標とはならないとする報告もある。吉田ら¹⁵⁾ はマラソンのエリート選手においてマラソンスピードと VO_{2max} との間に有意な関係はみられなかったとしている。また、Costillら²⁾ および Ribeiroら¹²⁾ は、競泳の400m記録と VO_{2max} との間に

*講師, **奈良教育大学教育学部

においても同様の結果を示している。この理由として、両者とも運動の効率、すなわち技術が競技成績に及ぼす影響が大きいことをあげている。

無酸素性作業閾値(AT; anaerobic threshold)と持久性競技成績に関する多くの先行研究³⁾⁶⁾¹¹⁾¹⁶⁾では、血中乳酸や呼吸パラメーターから求めたATと持久性競技成績との間に有意な相関が認められていることから、最大酸素摂取量と同様に有酸素性パワーの有力な指標とされている。しかしながら、酸素摂取量の測定や血液分析には、高価な実験機器が必要であること、また学識的な知識が要求されるなど一般の施設や指導現場においては測定は容易ではない。

MonodとScherrer⁸⁾は、局部筋の最大仕事量とその時の持続時間との間に成立する直線関係の傾きをクリティカルパワー(Pcri)と称し、疲労することなく運動の継続が可能な最大レベルの運動強度であると定義した。Moritaniら⁹⁾は、この概念を自転車エルゴメーターを用いた全身運動に応用し、Pcriと無酸素性代謝閾値との間に有意な正の相関関係があることを示した。さらに、Wakayoshiら¹⁷⁾は、このPcriの概念を、流水プールを利用した水泳において、各泳速度における泳距離と疲労困憊に至るまでの時間との回帰直線の傾きが、疲労困憊に至ることなく長時間泳ぎ続けられる最大乳酸定常レベルの泳速度とほぼ等しい関係にあることを証明した。そして、この泳速度をCritical Swimming Velocity (Vcri)として定義づけた。同様に、一般プールにて200mと400mの全力泳の記録と泳距離との関係の回帰直線の傾きかがVcriとほぼ一致することを証明した¹⁸⁾。この方法によって、高価な測定機器を利用することなく簡易的に最大乳酸定常レベルの泳速度を求められる上に、水泳競技において持久的運動能力を示す有効な指標として応用できるとしている。

しかしながら、200mと400mの2回のパフォーマンステストを課すことは、一般水泳愛好者やジュニア選手を対象とした場合に、相当のストレスを与えることは否定できない。そこで本研究は、流水プールにおいてVcriを求め、泳時間ごとの泳速度との関係を比較することで、

Vcriのさらなる簡易的決定法を見出すことを目的とした。

1. 方法

1) 被験者

被験者は、大学水泳部に所属する男子部員20名(平均年齢20.2歳)であった。被験者の身体的特徴および測定結果を表1に示した。

2) 流水プールによるCritical Swimming Velocity (Vcri)の決定

被験者には、流水プールにおいて1.25m/sec~1.80m/secの範囲で、5~8段階の一定の流速で、疲労困憊に至るまで泳ぎ続けるよう指示した。疲労困憊の判定は、設定された流速で泳

表1 被験者の身体的特徴および測定結果

被験者	年齢(歳)	身長(cm)	体重(kg)	Vcri		V1500m(m/sec)
				(m/sec)	(r)	
M.K	22	184.5	69.3	1.292	0.999	1.441
T.N	22	179.6	72.2	1.254	0.999	1.369
Y.U	24	181.2	79.4	1.310	0.999	1.456
S.H	20	173.3	67.8	1.366	0.999	1.508
Y.I	20	179.1	71.5	1.366	1.000	1.502
I.N	21	180.2	74.8	1.319	0.999	1.442
W.T	19	177.8	73.5	1.287	0.999	1.387
K.T	18	165.3	56.1	1.220	0.999	1.302
S.I	18	175.4	68.5	1.270	0.999	1.411
H.A	18	179.4	71.3	1.304	1.000	1.421
T.S	21	169.1	65.1	1.354	0.999	1.514
T.T	21	169.8	67.9	1.327	0.999	1.467
K.M	20	173.8	68.8	1.405	0.999	1.571
M.I	20	171.5	70.9	1.408	0.999	1.554
M.T	20	176.4	73.4	1.430	0.999	1.554
A.M	21	185.9	76.8	1.389	0.999	1.526
T.M	22	182.1	75.9	1.375	0.999	1.541
S.H	18	172.7	64.3	1.349	1.000	1.497
T.U	19	178.5	68.7	1.380	0.999	1.506
D.A	19	176.7	67.8	1.319	0.999	1.450
平均値	20.2	176.6	70.2	1.336		1.471
標準偏差	1.6	5.3	5.1	0.056		0.070

Vcri: Critical Swimming Velocity, V1500m: 1500m最大努力泳時の泳速、r: 相関係数

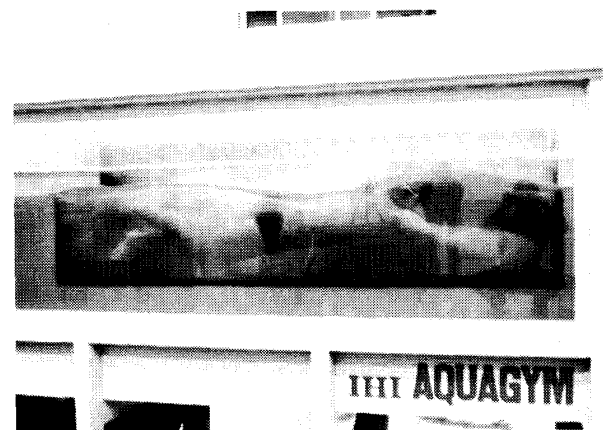


図1 流水プールでの測定風景

ぎきれなくなり、被験者の身体の位置が開始時よりも1m後方に下がったときとし、疲労困憊に至るまでの持続時間を計測した。

泳速度と持続時間（図上）および泳距離と持続時間（図下）の関係を図2に示す。

被験者が与えられた流速で、泳ぎきれなくなるまでの時間とその時の泳速度を乗ずることによって泳距離が求められる。

泳距離 (Dlim), 泳速度 (V), 持続時間 (Tlim)

$$Dlim = V \times Tlim \quad (1)$$

泳距離と持続時間の関係は、図2および表1に示されるように全被験者においてはほぼ直線の関係を示した。この回帰直線の式は、下記のように示すことができる。

$$Dlim = a + b \times Tlim \quad (2)$$

(2)の式を(1)に代入する。

$$V \times Tlim = a + b \times Tlim$$

$$V = a / Tlim + b$$

Vcri は、理論的に永遠に泳ぎ続けることのできる泳速度であるから、Tを無限大 ($T \rightarrow \infty$) であると仮定すると、 $a / Tlim$ は限りなく0に近づき、そしてVはbになる。

それゆえ、Vcri は、直線の傾きで表すことができる。

3) 1500m最大努力泳テスト

被験者は、25m屋内プールにおいて1500m最大努力泳テストを行った。スタートはプール側壁を蹴りだす方法でスタートし、できる限り同じペースを維持しながら全力で泳ぐように指示をシタイムを測定した。

4) 統計処理

測定値はすべて平均値±標準偏差とし、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。

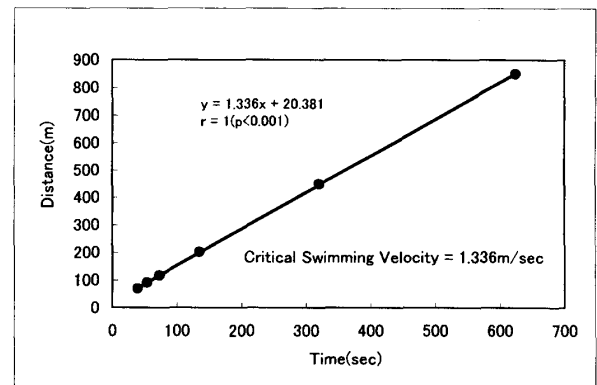
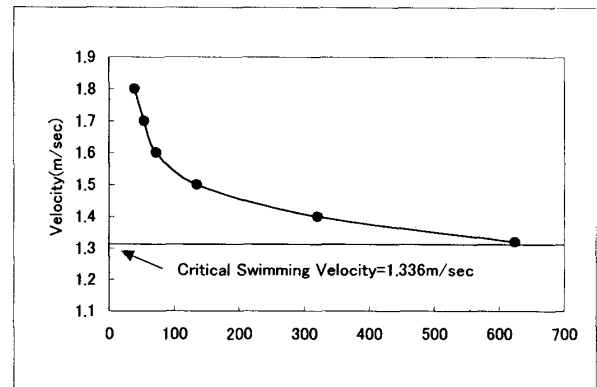


図2 各泳速度と各レベルでの最大持続泳時間 (上)および各泳距離と最大持続泳時間 (下)との関係

2. 結果

表1は、被験者の身体的特徴と本研究の測定結果を示す。本研究に参加した被験者の平均年齢は 20.2 ± 1.6 歳であり、身長および体重の平均値はそれぞれ 176.6 ± 5.3 cm, 70.2 ± 5.1 kgであった。

Vcriの決定において、流水プールにおける泳距離と泳時間との関係の回帰直線の傾きはほぼ一直線となり、全ての被験者において有意に高い相関関係を示した。Vcriの泳速は 1.220 m/sec ~ 1.430 m/secであり、平均で 1.336 ± 0.056 m/secであった。

1500m最大努力泳では、最高タイムが955秒であり、最低タイムが1152.4秒、平均タイムは 1020 ± 50.2 秒であった。また、泳速は 1.302 m/secから 1.571 m/secの範囲であり、平均 1.470 ± 0.070 m/secであった。1500m最大努力泳時の泳

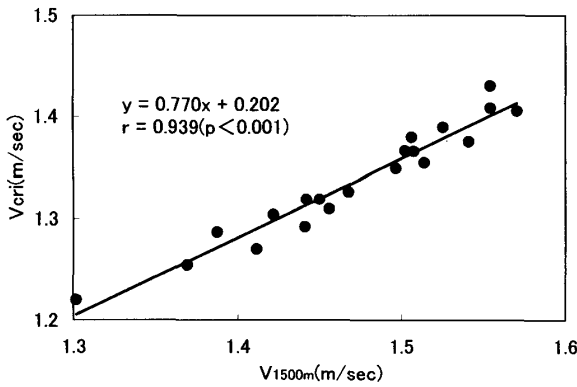


図3 V₁₅₀₀とV_{cri}との関係

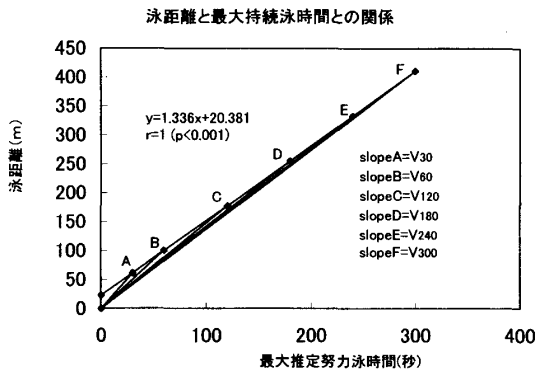


図4 泳距離と最大推定努力泳時間との関係

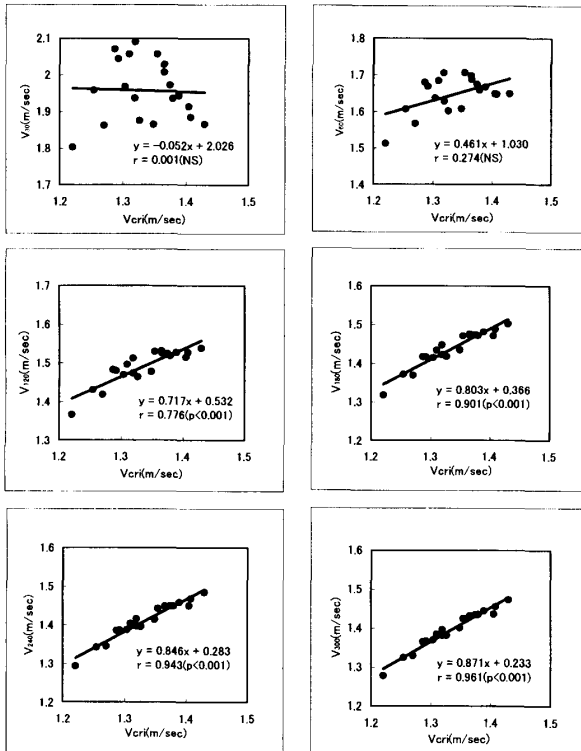


図5 各最大推定努力泳時の泳速とV_{cri}との関係

速とV_{cri}の間には、相関係数0.939 (p < 0.001) の高い関係が得られた (図3)。

図4は、求められたV_{cri}より、30秒(V₃₀), 60秒(V₆₀), 120秒(V₁₂₀), 180秒(V₁₈₀), 240秒(V₂₄₀)そして300秒(V₃₀₀)間の最大努力泳時の泳距離を推定し、その泳速と泳距離との関係を示したものである。泳距離と最大推定努力泳時間との間には、一直線のスロープが成立し、高い相関関係が得られた。そして泳時間が長くなるにつれ、直線の傾きはV_{cri}に近くなる傾向を示した。図5は、V_{cri}と各最大推定努力泳時の泳速との関係を示したものである。V₃₀とV₆₀では、両者間の相関係数は、0.001 (N. S)と0.273 (N. S)となり関係はみられなかった。しかしV₁₂₀で0.776 (p < 0.001) の高い相関を示すと、V₁₈₀, V₂₄₀そしてV₃₀₀では、0.901 (p < 0.001), 0.942 (p < 0.001)そして0.961 (p < 0.001)とそれぞれ有意に高い関係を示した。1500m最大努力泳時の泳速 (V_{1500m})と各最大推定努力泳時の泳速との関係においても、V₃₀ (r = 0.0004, N. S)とV₆₀

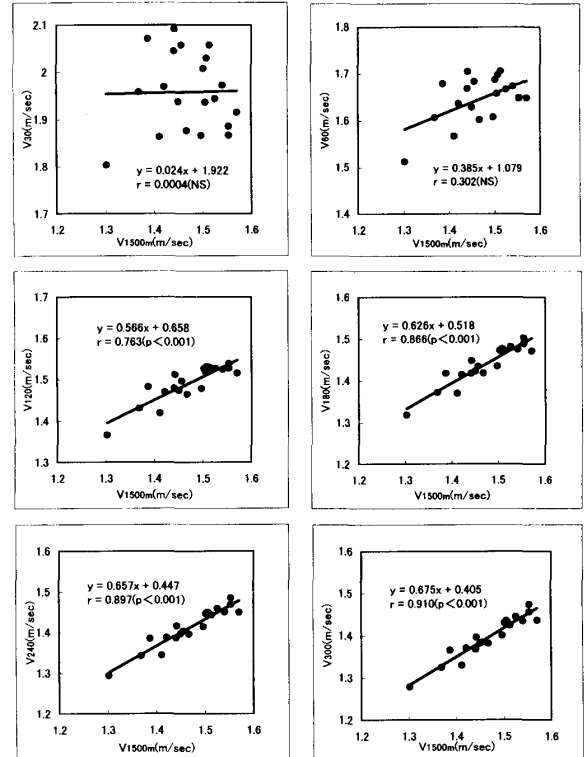


図6 各最大推定努力泳時の泳速とV_{1500m}との関係

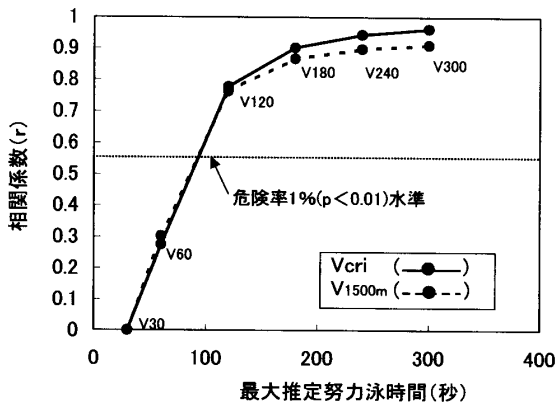


図7 各最大推定努力泳における泳速とVcriおよびV_{1500m}との相関係数

($r=0.302$, N. S) では相関はみられなかったものの、 V_{120} ($r=0.763$, $p<0.001$) 以上の泳時間では、高い相関関係を示す同様の結果が得られた(図7)。図7に、Vcriと各最大推定努力泳より得られた相関係数およびV_{1500m}と各最大推定努力泳より得られた相関係数と泳時間との関係を示した。

3. 考察

Wakayoshiら¹⁷⁾は、流水プールを用いて、Pcriの概念をCritical Swimming Velocity (Vcri)として競泳競技に応用した。Vcriは理論的に疲労困憊に至ることなく、長時間泳ぎ続けられる泳速度と定義され、各泳速度における泳距離と疲労困憊に至るまでの時間との回帰直線の傾きとして表される。また、Wakayoshiら¹⁸⁾は、流水プールと同様に一般のプールを用いてVcriを決定した。さらに、200mと400mの最大努力泳時の泳時間と距離の関係から求めた回帰直線の傾きが、最大乳酸定常レベルの泳速度とほぼ等しい関係にあることを証明した。その結果、Vcriは採血をする必要もなく、また、高価な実験機材を使用することなく簡易的に求められることができるとしている。

本研究では流水プールにおいて、被験者は1.25m/secから1.80m/secの流速範囲で、最大努力泳を5～8回実施した。それぞれの流速と疲労困憊に至るまでの泳時間から泳距離を求め、

泳時間との関係から回帰直線を求めたところ、全ての被験者において高い相関関係($r=0.999$ 以上, $p<0.001$)を示した。これは、Wakayoshiら¹⁷⁾の報告と一致するものであった。

一般プールにおける1500m最大努力泳テストでは、平均持続泳時間は 1020.0 ± 50.2 秒であった。1500m最大努力泳では、エネルギー供給の90%以上を有酸素的過程に委ねているとされ^{5) 10)}、この運動強度は血中乳酸濃度の継続的な上昇がみられない最高の運動強度、つまり最大乳酸定常の負荷レベルであると推察される。このことから、Vcriとの間に有意な相関関係($r=0.939$, $p<0.001$)が得られたことを裏付ける。1500m最大努力泳時の泳速(V_{1500m})とVcriを比較すると、V_{1500m}がVcriよりも平均0.135m/sec速い結果であった。ThayerとHay¹³⁾は、自由形では25mプールにおける50m～1500mのレースで、ターンにおよそ20～38%の時間を費やすとしている。また、ターンの回数の違いから、25mプールと50mプールとでは、15%のエネルギー消費量の差がみられたとの報告がある¹⁴⁾。事実、流水プールの測定では、被験者は常に設定された流速で泳ぎ続けることになり、一般プールのようにターン動作を行うことはない。このような理由から、V_{1500m}がVcriよりも速かったことを説明できるであろう。

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機構から供給されるが、それぞれのエネルギー供給機構の割合は運動強度や時間によって異なる。Holmér¹⁵⁾は、酸素負荷量より水泳中の有酸素性および無酸素性エネルギー消費の相対的貢献度を示している。これに対し、荻田ら¹⁰⁾は酸素借からエネルギー供給機構の割合を示している。両者のエネルギー供給機構の割合と本研究の結果を図8に示した。本研究で得られた最大推定努力泳時の泳速とVcriの間において相関関係が認められたV₁₂₀、V₁₈₀、V₂₄₀およびV₃₀₀に相当するエネルギー消費量の割合は、Holmérのデータでは、およそ40%、55%、65%そして70%の有酸素性エネルギー供給率であった。一方、荻田らのデータでは、およそ65%、75%、80%そして85%に相当した。

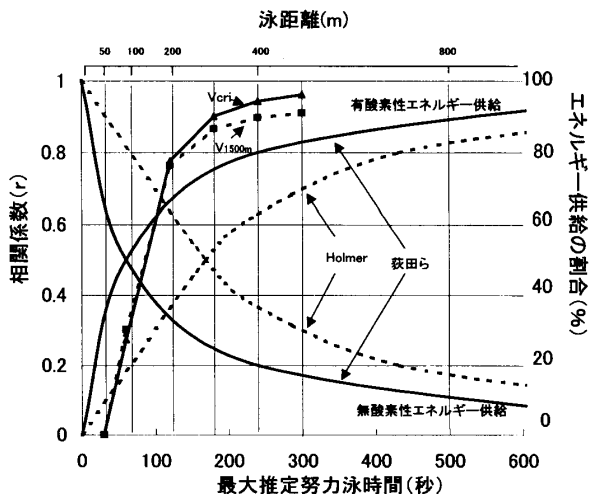


図8 Holmerと荻田の提唱する総エネルギー消費量に対する有酸素性と無酸素性エネルギー供給量の割合の変化と各最大推定努力泳時間と相関係数 (V_{cri} 、 V_{1500m})との関係

荻田ら¹⁰⁾は、Holmérの有酸素性エネルギー供給機構の割合が、荻田らのそれよりも低いことの理由として、酸素負債量を用いたデータであることを指摘している。酸素負債量は運動初期に不足した酸素量や乳酸を処理するために補われる酸素量以外に、酸素負債とは関係のない因子にも影響されることから、その値は実際の無酸素性エネルギー供給量より高くなることが報告されている⁴⁾。一方の酸素借は、最大下運動時の運動強度と酸素摂取量の関係から外挿法によって推定されるが、筋の無酸素性エネルギー量と等しいことが認められており信頼性も高いとされている¹¹⁷⁾。

本研究の結果では、最大推定努力泳時間の120秒から、運動時間の延長とともに、 V_{cri} との相関が高くなる傾向を示した。これは、2～3分の運動において65～75%の有酸素性エネルギーの供給率に依存するとする荻田ら¹⁰⁾のデータと同じような傾向を示した。したがって、本研究において120秒～180秒にかけて、最大推定努力泳時間と V_{cri} との間に高い相関が得られたことが裏付けられる。

Wakayoshiら¹⁸⁾は、一般プールにおいて200mと400mの全力泳の記録と泳距離との関係の

回帰直線の傾きが V_{cri} とほぼ一致することを証明した。これにより、さらに簡易的に最大乳酸定常レベルの泳速度を求められるとしている。しかしながら、いまだに200mと400mの最大努力泳を課すことは決して容易ではない。本研究結果から得られた V_{120} 、 V_{180} と V_{cri} とを比較すると、それぞれ89.6%と92.9%の泳速が V_{cri} に相当した。そして、その泳速は V_{cri} の最大3.3%と2.7%の誤差範囲内で推定することができた。このことは、およそ2～3分間の最大努力泳のみから V_{cri} が求められる可能性を示唆するものである。本実験で得られた V_{120} は1.366m/sec～1.539m/secであり、平均 1.491 ± 0.045 m/secであった。 V_{180} は1.318m/sec～1.503m/secであり、平均で 1.439 ± 0.047 m/secであった。泳時間と泳速度から泳距離を求めると、それぞれ平均 178.9 ± 5.4 mと 259.0 ± 8.4 mということになる。つまり、一般プールで行うなら、およそ200m～300mの泳距離となり、1回の全力泳のみで V_{cri} を求めることの可能性を示唆するものである。例えば、300mなどの泳距離は通常のレース距離とは異なるために、とくに200mや400mを専門種目とする選手にとっては、記録に対するストレスを減らすことができよう。

今後は一般プールにおいて、このような簡便的な方法が成立するのかどうか、また200m～300mの最大努力泳において求められた V_{cri} が、最大乳酸定常レベルに相当する泳速度であるのかどうかを検証する必要がある。

引用文献

1. Bongsbo J., Gollnick P. D., Graham T. E., Juel C., Kiens B., Mizuno M., Saltin B. : Anaerobic energy production and O₂ deficit-debt relationship during exhaustive exercise in humans. J. Physiol. (Lond.) 422 : 539-559, 1990.
2. Costill D., Kovaleski J., Porter D., Kirwan J., Fielding R., King D. : Energy expenditure during front crawl swimming : Predicting success in middle-distance events Int. J.

- Sports Med., 6 : 266-270, 1985.
3. Davis J. A., Vodak P., Wilmore J. H., Vodak J., Kurtz P. : Anaerobic threshold and maximal aerobic power for three modes of exercise. *J. Appl. Physiol.*, 41 : 544-550, 1976.
 4. Gaesser G., Brooks G. A. : Metabolic bases of excess post-exercise oxygen consumption : a review *Med. Sci. Sports Exerc.* 16 : 29-43, 1984.
 5. Holmer I.: Energetics and mechanical work in swimming. In: Holmer A.P., Huijing P.A., Groot G.D. (eds), *Biomechanics and medicine in swimming. Human Kinetics, Champaign, Ill.*, pp 154-164, 1983.
 6. Maglischo E. W., Maglischo C. W., Bishop R. A. : Lactate testing for training pace. *Swimming Technique.* 19 (1) : 31-37, 1982.
 7. Medbo J. I., Tabata I. : Anaerobic energy release in working muscle during 30 s to 3 min of exhaustive bicycling. *J. Appl. Physiol.* 75 : 1654-1660, 1993.
 8. Monod H., Scherrer J. : The work capacity of a synergic muscular group. *Ergonomics*, 8 : 329-337, 1987.
 9. Moritani T., Nagata A., deVries H.A., Muro M. : Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold. *Ergonomics*, 24 : 339-350, 1981.
 10. 萩田太, 小野寺丈晴, 若吉浩二 (1998) 超最大強度におけるプル, キック, スイム中の代謝特性. *水泳水中運動科学*1 : 13-18.
 11. Olbrecht J., Madsen O., Mader A., Liesen H., Hollmann W. : Relationship between swimming velocity and lactic concentration during continuous and intermittent training exercises. *Int. J. Sports Med.*, 6: 74-77, 1985.
 12. Ribeiro J. P., Cadavid E., Baena J., Monsalvete E., Barna A., DeRose E. H. : Metabolic predictors of middle-distance swimming performance. *Br J. Sports Med.*, 24 : 196-200, 1990.
 13. Thayer A. L., Hay J. G. : Motivating start and turn improvement. *Swimming Technique*, 20 (4) : 17-20, 1984.
 14. United States Swimming, International Center for Aquatic Research : *A Sports Medicine and Science Program Update.* 1989.
 15. 吉田敬義, 石河利寛, 村岡 功 : 呼吸循環機能からみた持久走 performance の高い幼児と低い幼児の比較. *体育の科学*, 31: 265-270, 1981.
 16. Yoshida T., Nagata A., Muro M., Takeuchi N., Suda Y. : The validity of anaerobic threshold determination by a Douglas bag method compared with arterial blood lactate concentration. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 46 : 423-430, 1981.
 17. Wakayoshi K., Ikuta K., Yoshida T., Udo M., Moritani T., Mutoh Y., Miyashita M. : The determination and validity of critical velocity as swimming performance index in the competitive swimmer. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 64 : 153-157, 1992.
 18. Wakayoshi K., Yoshida T., Udo M., Kasai T., Moritani T., Mutoh Y., Miyashita M. : A simple method for determining critical speed as swimming fatigue threshold in competitive swimming. *Int. J. Sports Med.*, 13 : 367-371, 1992.