

競泳におけるスイム,プル及びキックにおける Critical velocity の決定とトレーニングへの応用

—全身,上肢及び下肢運動でのトレーニングの有効性の検討—

若吉 浩二

目次

.緒言	2
.方法	4
.結果	7
.考察	11
.摘要	15
.参考資料	17

競泳におけるスイム,プル及びキックにおける Critical velocity の決定とトレーニングへの応用

—全身,上肢及び下肢運動でのトレーニングの有効性の検討—

若吉 浩二

要約

本研究の目的は、1)全身泳(Swim)においてトレーニング強度設定の際の簡便かつ有効な指標として指導現場で広く利用されている critical swimming velocity(V_{cri})を上肢の主運動(Pull)及び下肢の主運動(Kick)それぞれの運動様式においても決定し、それが最大乳酸定常レベルの泳速度、つまり理論的に疲労困憊に至ることなく泳ぎ続けられる最大の泳速度として、持続的な運動能力を示す指標になりうることの妥当性について検証すること 2)Swim, Pull 及び Kick それぞれの運動様式における V_{cri} をトレーニング現場で有効的に活用するために、それらの V_{cri} の相互関係及びそれらの強度での運動が身体に与える影響を被験者の日頃から専門としている距離(type)の相違を考慮して調査すること 3)インターバルトレーニングにおいて疲労困憊に至る又は至らないといった閾値を表す 4 要素全ての組み合わせ(critical combination)を決定するとともに、type の相違によって生じる結果を考察することによって、個人に応じたトレーニング処方を行う際の 1 つの指針として期待されるモデルを作成することであった。

本研究の結果、 V_{cri} を求めた際の泳時間と泳距離の関係を表す相関係数が有意に高い値を示した。また V_{cri} での運動時の生理学的反応を観察した結果、血中乳酸濃度は Swim, Pull 及び Kick 全てにおいて、第 1 試行から第 4 試行にかけて有意な差は認められなかったことから血中乳酸濃度がほぼ定常状態であると判断できた。これらのことから Swim, Pull 及び Kick 全てにおいて V_{cri} の決定ができ、持続的な運動能力を示す指標になりうることの妥当性が示せたと言えよう。

次に、 V_{cri} の強度での運動が、血中乳酸濃度、酸素摂取量及び心拍数に与える影響について type 間で比較を行った結果、有意な差が認められなかった。これらの結果は V_{cri} が個人に応じた運動強度であったためと考えられ、 V_{cri} の運動強度でトレーニングを行った人の大部分に同様の効果が得られることが示唆された。

一方、本研究によってある泳速度において疲労困憊に至ることなくインターバルトレーニングを繰り返すことができる最大限の反復回数は、合計休息時間に比例することが示唆されたことから閾値を表す反復回数と休息時間の関係を得ることができた。更にその結果において反復回数を固定することで、任意の反復回数における、閾値を表す泳速度と休息時間との関係を得ることができた。これらのことからインターバルトレーニングにおいて疲労困憊に至る又は至らないといった閾値を表す 4 要素全ての組み合わせ(critical combination)を決定することができたと結論づけられた。

．緒言

競泳は水中での上肢筋活動及び下肢筋活動が主体となる全身運動であるが、トレーニングを行う際は、全身泳(以下「Swim」とする)のみに限らず上肢の主運動(以下「Pull」とする)及び下肢の主運動(以下「Kick」とする)といったいわゆる局所泳が組み合わされ実施されることが一般的である。また競泳のトレーニングにおいては、運動と休息を交互に繰り返し行うインターバルトレーニングが広く活用されているおり、Counsilman⁶⁾は、そのインターバルトレーニングを、泳速度・単位距離・反復回数・休息時間の4要素から成り立つと規定した。

現在、競泳のトレーニング現場においては、インターバルトレーニングを、主に泳速度の観点からそれぞれの単位距離においてEN-1(ベーシック持久)・EN-2(スレッシュールド持久)・EN-3(オーバーロード持久)・SP-1(耐乳酸)・SP-2(乳酸生成)・SP-3(パワー)などといった、いくつかのトレーニングカテゴリーに分類することで、目的に応じたトレーニングが行われている¹³⁾。特にSwimに関しては、持久力を高めるための方法として無酸素性作業閾値レベルの泳速度を基準にし、それよりも遅い泳速度、それと同程度の泳速度、それよりも速い泳速度といったようにトレーニング中の泳速度をいくつかの運動強度に分けることによってトレーニングカテゴリーの設定がなされている。

しかしながら、Pull及びKickにおいては基準となる泳速度を設けてトレーニングを行っている例は少ないように思われる。また実際のトレーニング現場においては、一般的にPull及びKickの局所的なトレーニングを行うことにより効果的にSwimの記録向上につながると考えられており²¹⁾、局所泳の重要性が認識されていることからPull及びKickにおいてもSwimと同様にトレーニングを行う際の基準となる泳速度を決定し、それをトレーニングに活かすことは極めて重要であると考えられる。

Monod and Schreier¹⁷⁾は、局部筋の運動持続時間とその際の総仕事量との間に直線関係があることを明らかにし、その直線の傾きをcritical power(以下「P_{cri}」と略す)と称して、理論的に疲労困憊に至ることなく運動が継続できる最大の運動強度として定義した。そしてこの概念は自転車エルゴメーターを用いた全身運動に応用され、Moritani et al.¹⁸⁾はP_{cri}と呼吸ガス法によって決定された無酸素性作業閾値との間に有意な正の相関があることを示し、De Vries et al.⁷⁾やNagata et al.¹⁹⁾は、P_{cri}と筋電図学的データから評価された筋疲労性作業閾値との間に高い正の相関があることを示した。またJenkins and Quigley¹⁰⁾は、自転車エルゴメーターを用いて決定されるP_{cri}は、換気性閾値及び乳酸性作業閾値を測定する方法論的困難さを避けることができ、簡便かつ安価な方法であると述べた。そこでWakayoshi et al.²⁵⁾は、P_{cri}の概念を全身運動である競泳に応用し、最大努力泳時の泳時間と泳距離の関係が直線関係にあることから、その回帰直線の傾きを、critical swimming velocity(以下「V_{cri}」と略す)と定義し、それが持続的な運動能力を示す指標として妥当であるかを検討した。その結果V_{cri}は、最大乳酸定常レベルの泳速度、つまり理論的に疲労困憊に至ることなく泳ぎ続けられる最大の泳速度として、持続的な運動能力を示す指標になりうることが示された。そして現在V_{cri}は、Swimに関して、自身の基準となる泳速度を知る上で非常に簡便かつ非観血的な方法として広く現場での活用が期待されている²³⁾。また、松村¹⁵⁾や田中²⁴⁾およびCapodaglio et al.⁴⁾はP_{cri}の概念を上肢筋活動であるcranking運動に応用することが可能であるという報告をしており、P_{cri}がもともとは局部筋に関して定義された運動強度の指標であることを考慮すると、競泳においても、V_{cri}を全身運動であるSwimに限らず、局所的な運動であるPull及びKickに応用することが可能であると思われる。

一方、Belts et al.³⁾はインターバルトレーニングにおける4要素を組み合わせることによってATP-CP系、

解糖系及び有酸素系のエネルギー供給機構へ適切な刺激を与えることができると述べ、インターバルトレーニングによって目的に応じた多様なトレーニングが可能であることを示唆した。また運動中の有酸素性エネルギー供給及び無酸素性エネルギー供給の相対的貢献度は運動時間に依存するといった報告や^{8,22)}、間欠的運動の運動期に使用されたATP-CP系のエネルギーは休息期に有酸素系のエネルギーを用いて再合成され次の運動期に再利用されるといったメカニズムによって、連続的に運動すれば血中乳酸濃度が上昇してしまうような運動強度であっても休息を挟めば運動を継続させることが可能であるといった報告がなされている^{1,2,5,11,12,14,32,33,34)}。これらのことから、インターバルトレーニングを行う際には、泳速度に加えて反復回数及び休息時間を適切に処方することもトレーニングの目的を達成するためには必要不可欠な要素であると言えよう。

つまり、インターバルトレーニングにおいて、広く用いられている泳速度に基づくトレーニングカテゴリーをより進化させるためには、個人の能力及びトレーニング目的に応じた泳速度・単位距離・反復回数・休息時間の4要素の最適な組み合わせを可能とする、より発展的なトレーニング方法論が望まれる^{29,31)}。またインターバルトレーニングにおいても、疲労困憊に至る又は至らないといった閾値を探ることがトレーニングを行う際のガイドラインに成りうるということは、安全面や相対的運動強度の設定の面からしても明らかであろう^{9,20)}。

以上のことから本研究の目的は、1)Swim、Pull及びKickそれぞれの運動様式におけるVcriを決定し、それが最大乳酸定常レベルの泳速度、つまり理論的に疲労困憊に至ることなく泳ぎ続けられる最大の泳速度として、持続的な運動能力を示す指標になりうることの妥当性について検証すること2)Swim、Pull及びKickそれぞれの運動様式におけるVcriをトレーニング現場で有効的に活用するために、それらのVcriの相互関係及びそれらの強度での運動が身体に与える影響を被験者が日頃から専門としている距離(以下「type」と略す)の相違を考慮して調査すること3)より発展的なトレーニング方法として、インターバルトレーニングにおける疲労困憊に至る又は至らないといった閾値を表す4要素全ての組み合わせ(以下「critical combination」とする)を決定するとともにtypeの相違によって生じる結果を考察することで、個人に応じたトレーニング処方を行う際の1つの指針として期待されるモデルを作成することとした。

方法

[実験1] Swim, Pull及びKickそれぞれの運動様式におけるVcriに関する実験

1-1 被験者

大学水泳部に所属する男子競泳選手14名であった。そのうち7名は長距離を専門とする者、残りの7名は短距離を専門するものであった。いずれも6年以上の競技歴があり全国大会出場経験のある者であった。各被験者の年齢、身長及び体重の平均値と標準偏差はそれぞれ、年齢 19.8 ± 0.8 歳、身長 176.0 ± 5.8 cm及び体重 67.6 ± 6.9 kgであった。各被験者には、あらかじめ本研究の目的、方法及びそれに伴う危険性について説明し、実験参加の承諾を得た。

1-2 測定方法

全ての測定は、被験者に一定の負荷が与えられるように垂直循環型回流水槽(AQUA GYM, 石川島播磨重工業社製)にて行い、Pullに関してはトレーニング用ブイ(ARN-100, アリーナ社製)を股に挟むことで下肢筋活動を制限し、Kickに関してはトレーニング用ビート板(83PE-40, スピード社製)の上に両腕を置くことで上肢筋活動を制限して行った。

Wakayoshi et al.²⁵⁾によると、Vcriは疲労困憊に至ることなく泳ぎ続けられる最大の泳速度と定義され、最大努力泳時の泳時間と泳距離との回帰直線における傾きで表される(図1)。そこで被験者にSwim, Pull及びKickそれぞれの運動様式において、個人に応じた5つの泳速度(Swim及びPullは $1.2 \sim 1.7$ m/s, Kickは $0.8 \sim 1.25$ m/sの範囲)で疲労困憊に至るまで泳ぎ続けるように指示をした。合計15回の測定は順不同で行った。被験者が疲労困憊に至り、身体が開始時から1m後方に下がった時点で実験を終了し、その際の泳時間と算出される泳距離の回帰直線を求めることによりVcriを決定した。なお、回流水槽の水温は、 28.2 ± 1.1 であった。

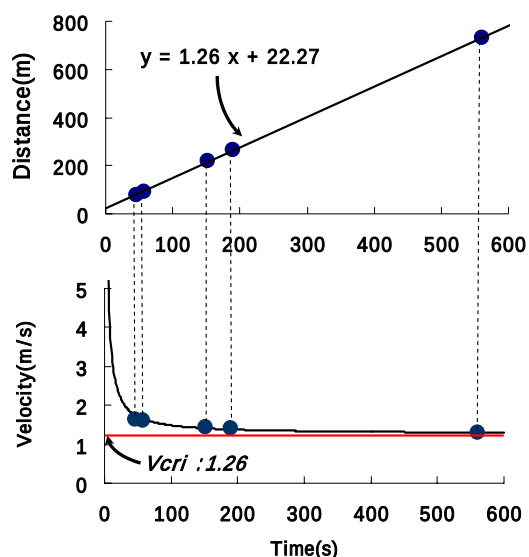


Figure.1 How to determine the Vcri.

次にVcriの生理学的反応を観察するためにSwim,

Pull及びKickそれぞれにおいてVcriの泳速度のもと20分間泳テスト(5分間泳×4回、各試行間に1分間の短期休息)を行い、血中乳酸濃度、酸素摂取量及び心拍数を測定した。血中乳酸濃度の測定は、テスト

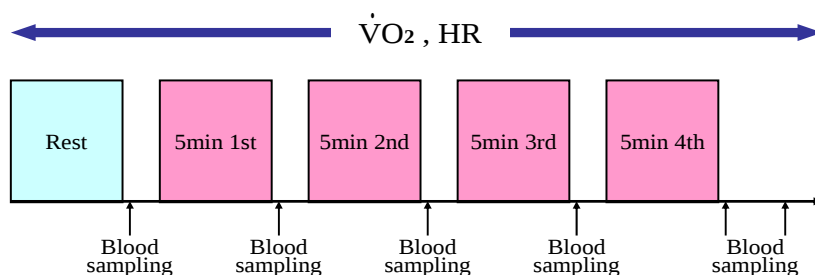


Figure.2 The protocol of 20min Swimming Test.

前、各試行終了直後及びテスト終了3分後の合計6回行った。酸素摂取量及び心拍数の測定は、5分間の各試行における最終1分間の平均値をその試行の代表値として採用した。なお、回流水槽の水温は、 27.3 ± 1.7 であった(図2)。

血中乳酸濃度は、動脈血を毛細管によって採取し乳酸分析器(BIOSEN5030, EKF-DIAGNOSTIC社製)を用いて測定した。酸素摂取量は、マウスピース型マスクを装着させ、ダグラスバッグにて呼気ガスを採取し、呼気ガス分析装置(AE-300S, ミナト医科学社製)を用いて呼気ガス中の酸素濃度及び二酸化炭素濃度を求めた。また換気量は流量計(DC-5, 品川精機社製)を用いて測定し、それらの値から酸素摂取量を求めた。心拍数は、簡易型心拍数記録装置(ACCUREX PLUS, POLAR社製)を用いて測定した。

1-3 統計処理

最大努力泳時の泳時間と泳距離における相関係数の有意性の検定にはt検定を用いた。また20分間泳テストにおける血中乳酸濃度について各試行間を比較する検定には一元配置の分散分析を用いた。

次に、Vcri についての比較を運動様式間及び type 間に対して行った。また血中乳酸濃度、酸素摂取量及び心拍数についての比較を各運動様式の Vcri 間及び type 間に対して行った。その際、全試行の平均値を代表値として採用した。これらの統計処理には、繰り返しのある二元配置分散分析を用い、有意差が認められた場合は Tukey の多重比較を用いて検定を行った。これらは、いずれも危険率 5%未満を以って統計上の有意差と評価した。

[実験2]インターバルトレーニングにおけるcritical combinationに関する実験

2-1 被験者

大学の水泳部に所属する健康な男性12名で、長距離を専門とする者6名及び短距離を専門とする者6名であった。各被験者の年齢、身長及び体重の平均値と標準偏差はそれぞれ、年齢 19.8 ± 1.4 歳、身長 173.1 ± 5.3 cm及び体重 69.5 ± 5.8 kgであった。各被験者には、あらかじめ本研究の目的、方法及びそれに伴う危険性について説明し、実験参加の承諾を得た。尚、表1に各被験者の身体的特徴を示した。

Table.1 The physical characteristics for each subjects.

Subject	Type	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)
1	Long	21	171.1	63.6
2	Long	21	178.8	72.5
3	Long	21	180.4	71.5
4	Long	19	175.7	76.2
5	Long	18	178.6	81.8
6	Long	22	175.2	64.6
7	Short	21	174.4	72.0
8	Short	19	166.9	63.9
9	Short	19	172.7	70.1
10	Short	18	174.3	70.2
11	Short	19	164.2	63.8
12	Short	19	165.3	64.2
Mean	Long	20.3	176.6	71.7
S.D.	Long	1.5	3.4	6.9
Mean	Short	19.2	169.6	67.4
S.D.	Short	1.0	4.7	3.8
Mean	Total	19.8	173.1	69.5
S.D.	Total	1.4	5.3	5.8

2-2測定項目と測定方法

測定は全て室内の短水路プールにおいて行い、泳ぎ始める際はプールの中から壁を蹴ってスタートした。また測定は1日につき1回を原則とした。

2-2-1 Time Trial Test

50m, 100m, 200m及び400mの最大努力泳を行い、それぞれの距離におけるタイムの測定を行った。またそれらの結果から算出される平均泳速度をそれぞれV50max, V100max, V200max及びV400maxと定義した。

2-2-2 Interval Test

単位距離を50mに限り、異なる3段階の泳速度V100max, V200max及びV400maxにおいて、それぞれ長さの異なる休息時間を設定し、反復回数80回を限度に疲労困憊に至るまで繰り返し運動を行った時の反復回数を測定した。この際、設定した泳速度から算出される50mあたりのタイムより1秒以上遅

れた時点で測定を終了した。また測定時，泳速度の一定化を図るため，スイミングペースメーカー (DOLPHIN，高木綱業社製)を使用し，被験者には可能な限りペースメーカーを参考にして一定速度で泳ぐよう指示をした(図3,4)。

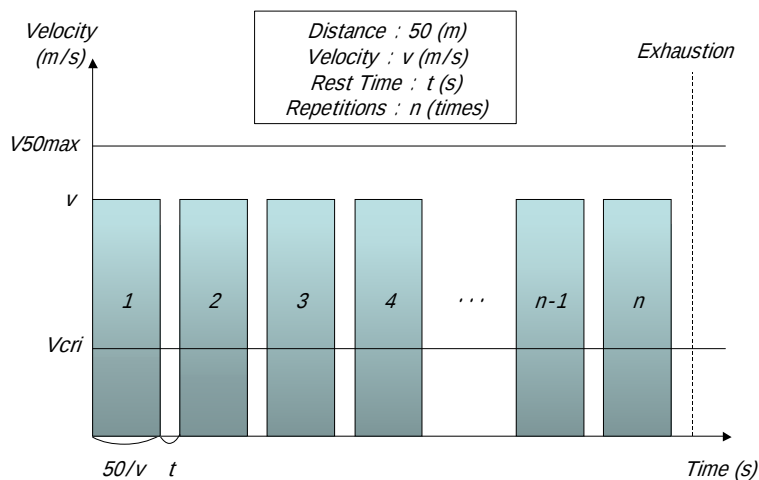


Figure.3 The protocol of Interval Test.

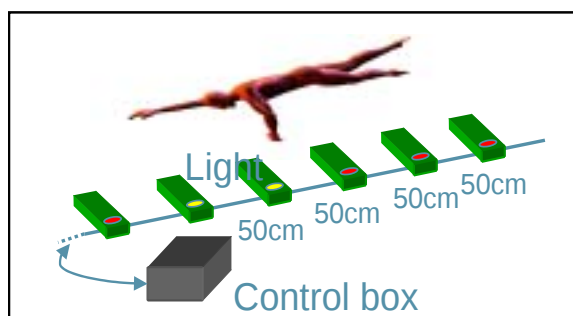


Figure.4 The conception diagram of "swimming pace maker" in Interval Test.

2-3 Vcriの決定

本研究におけるVcriは，200m及び400mのTime Trial Testの結果から，Two-Trial Test法²⁸⁾によって決定した。Two-Trial Test法とは，200mと400mの泳距離とそれぞれの泳時間との関係からプロットされた2点を通る直線の傾きをVcriとする方法であり，この方法によって決定されたVcriは最大乳酸定常レベルを維持する最大泳速度とほぼ等しい関係にあることが先行研究により判明している(図5)。

2-4 統計処理

Interval Testの結果について，type間の比較検討を行った。平均値の差の検定には対応のないデータのt検定を用い，危険率5%未満を以って統計上の有意差と評価した。

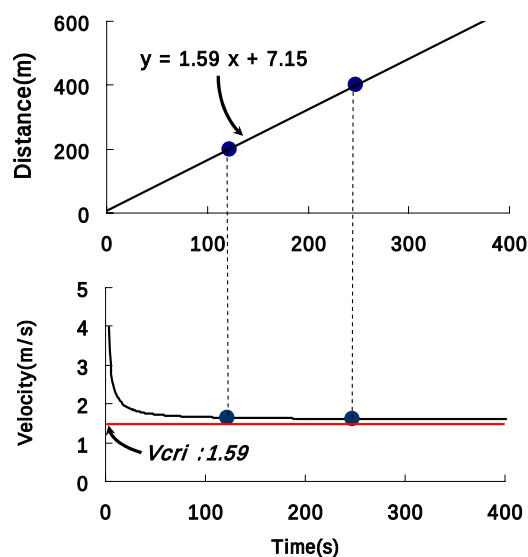


Figure.5 How to determine the Vcri by Two-Trial Test.

結果

[実験1]

表 2 に各被験者の身体的特徴とそれぞれの運動様式における Vcri 及び泳時間と泳距離の相関係数を示した。Vcri-S, Vcri-P 及び Vcri-K 決定時の泳時間と泳距離の相関係数は全被験者において有意に高い値を示した($p<0.01$)。

図6に血中乳酸濃度の全被験者の平均値の変化をそれぞれの運動様式ごとに示した。その結果、血中乳酸濃度に関しては、Swim, Pull及びKick全てにおいて、第1試行から第4試行にかけて有意な差は認められなかった。また多くの被験者において第1試行から第4試行にかけて血中乳酸濃度の単調な増加又は減少傾向は見られなかった。

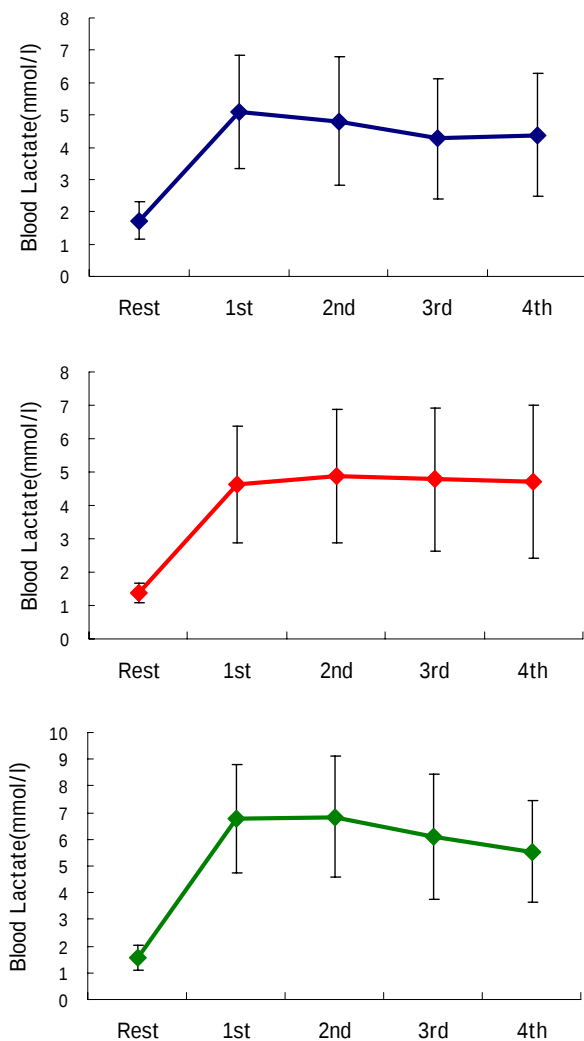


Figure.6 The changes of blood lactate in 20min Swimming Test

Table.2 The physical characteristics, Vcri and correlation coefficient

Subject	Type	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)	Vcri-S (m/s)	r	Vcri-P (m/s)	r	Vcri-K (m/s)	r
1	Short	21	185.2	78.8	1.26	0.999	1.29	0.999	0.94	1.000
2	Short	20	175.2	63.7	1.31	0.999	1.30	0.999	0.93	0.999
3	Short	19	172.4	68.0	1.19	0.999	1.15	0.999	0.93	1.000
4	Short	19	174.7	67.9	1.24	0.999	1.32	0.999	0.81	0.999
5	Short	19	173.6	66.5	1.25	0.999	1.29	0.999	0.91	0.999
6	Short	19	166.7	58.2	1.27	0.999	1.30	0.999	1.02	1.000
7	Short	20	187.5	78.5	1.24	0.999	1.23	0.999	0.83	0.999
8	Long	21	172.5	60.0	1.25	0.999	1.29	0.999	0.85	0.999
9	Long	21	176.8	73.7	1.26	0.999	1.33	0.999	0.91	0.999
10	Long	20	180.7	74.5	1.38	1.000	1.36	0.999	0.98	0.999
11	Long	20	180.0	71.2	1.40	0.999	1.47	1.000	0.86	1.000
12	Long	20	171.7	61.6	1.36	0.999	1.36	0.999	1.04	1.000
13	Long	19	177.5	60.5	1.36	0.999	1.41	0.999	0.91	1.000
14	Long	19	170.0	62.8	1.38	0.999	1.44	0.999	0.97	0.999
Mean	Short	19.6	176.5	68.8	1.25	0.999	1.27	0.999	0.91	1.000
S.D.	Short	0.8	7.3	7.5	0.04	0.000	0.06	0.000	0.07	0.000
Mean	Long	20.0	175.6	66.3	1.34	1.000	1.38	1.000	0.93	1.000
S.D.	Long	0.8	4.2	6.5	0.06	0.000	0.06	0.000	0.07	0.000
Mean	Total	19.8	176.0	67.6	1.30	0.999	1.32	1.000	0.92	1.000
S.D.	Total	0.8	5.8	6.9	0.07	0.000	0.08	0.000	0.07	0.000

Vcri-S, Vcri-P, Vcri-K: Vcri of Swim, Pull and Kick
r: correlation coefficient

図7に各運動様式におけるVcriの比較をtype別に示した。決定されたSwim, Pull及びKickそれぞれのVcriにおいて、SwimとKick間及びPullとKick間で有意な差が認められた($p<0.01$)。またPullにおいてはtype間で有意な差が認められた($p<0.05$)。更にSwimがPull及びKickによって成り立っていることから、Vcri-P及びVcri-Kを独立変数とし、Vcri-Sを従属変数として重回帰分析をtype別に行った。その結果、短距離選手では $(Vcri-S)=0.77(Vcri-P)+0.31(Vcri-K)$ 、長距離選手では $(Vcri-S)=0.76(Vcri-P)+0.31(Vcri-K)$ であった(補正決定係数は、短距離選手: $r^2=0.80$ 、長距離選手: $r^2=0.80$)。

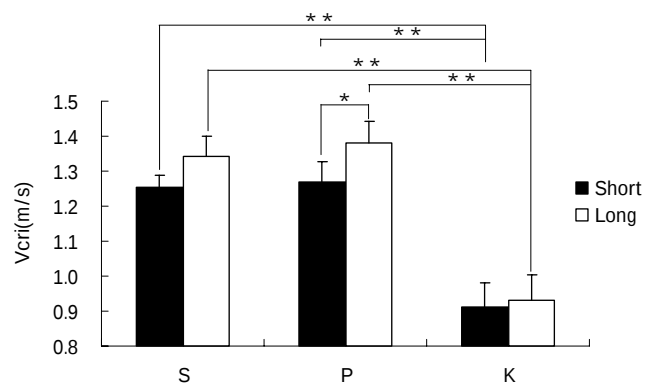


Figure.7 The comparison of the Vcri every type and exercise

図8に各運動様式のVcriでの運動中における血中乳酸濃度，酸素摂取量及び心拍数の比較をtype別に示した．酸素摂取量に関しては短距離選手でSwimとPull間に，長距離選手でSwimとPull間及びSwimとKick間で有意な差が認められた($p<0.01$)もののtype間では有意な差は認められなかった．また血中乳酸濃度及び心拍数に関してはtype間及び運動様式間で有意な差は認められなかった．

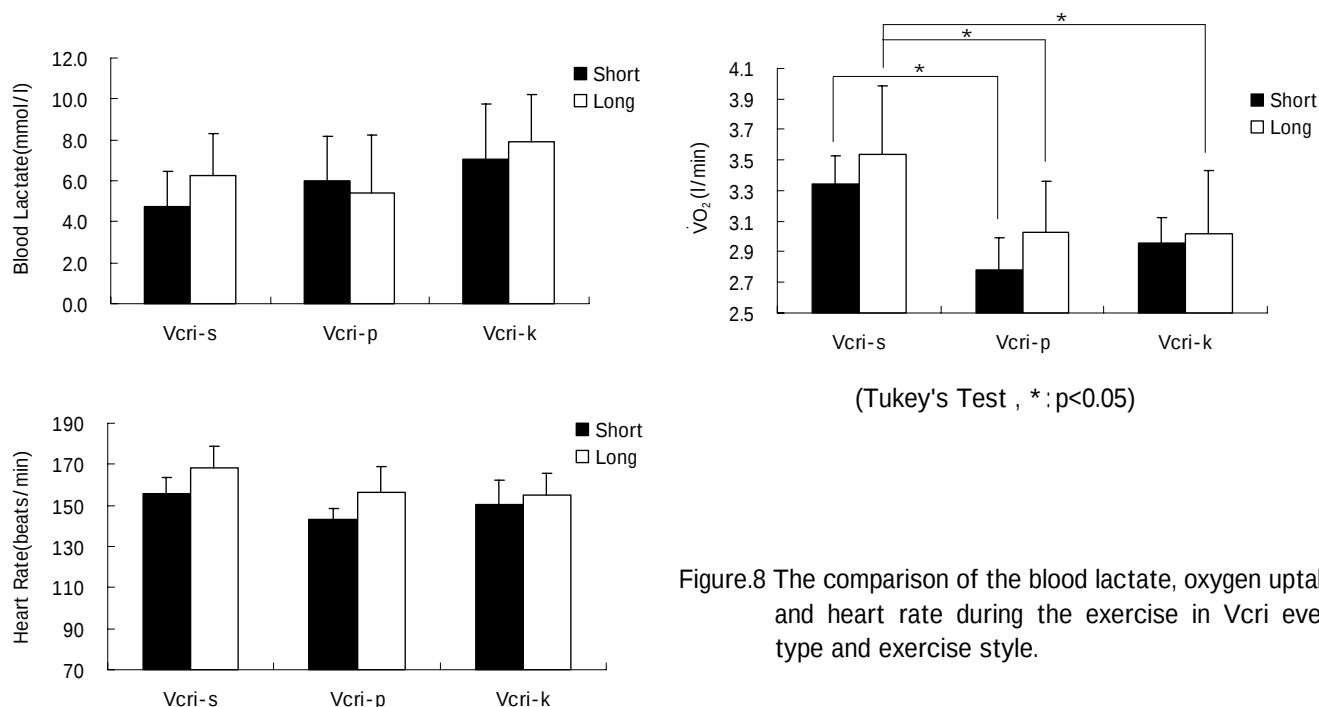


Figure.8 The comparison of the blood lactate, oxygen uptake and heart rate during the exercise in Vcri every type and exercise style.

[実験2]

表3に各被験者のTime Trial Testの結果を示し，表4にその結果から決定された泳速度及びVcriを示した．また図9に全被験者の平均値を示した．Interval Testの結果について，type間の比較を行ったところ，統計上有意な差は認められなかった．

Table.3 The results of Time Trial Test.

Subject	Type	50m	100m	200m	400m
1	Long	26.2	56.3	121.6	247.7
2	Long	26.9	56.3	122.7	248.7
3	Long	27.1	55.6	118.4	249.9
4	Long	26.0	55.0	116.2	245.3
5	Long	27.3	60.2	123.5	265.2
6	Long	26.2	57.9	121.3	248.0
7	Short	27.2	58.5	122.0	260.0
8	Short	26.9	58.7	120.6	252.2
9	Short	26.5	55.5	117.0	249.0
10	Short	27.4	58.5	122.2	255.0
11	Short	26.0	55.3	117.5	249.7
12	Short	27.1	55.8	117.4	247.3
Mean	Long	26.6	56.9	120.6	250.8
S.D.	Long	0.6	1.9	2.8	7.2
Mean	Short	26.9	57.0	119.4	252.2
S.D.	Short	0.5	1.7	2.4	4.7
Mean	Total	26.7	57.0	120.0	251.5
S.D.	Total	0.5	1.8	2.6	6.1

Table.4 The swimming velocity determined by results of Time Trial Test.

Subject	Type	V50max (m/s)	V100max (m/s)	V200max (m/s)	V400max (m/s)	Vcri (m/s)
1	Long	1.91	1.77	1.65	1.62	1.59
2	Long	1.86	1.78	1.63	1.61	1.59
3	Long	1.84	1.80	1.69	1.60	1.52
4	Long	1.93	1.82	1.72	1.63	1.55
5	Long	1.83	1.66	1.62	1.51	1.41
6	Long	1.91	1.73	1.65	1.61	1.58
7	Short	1.84	1.71	1.64	1.54	1.45
8	Short	1.86	1.70	1.66	1.59	1.52
9	Short	1.89	1.80	1.71	1.61	1.52
10	Short	1.82	1.71	1.64	1.57	1.51
11	Short	1.92	1.81	1.70	1.60	1.51
12	Short	1.85	1.79	1.70	1.62	1.54
Mean	Long	1.88	1.76	1.66	1.60	1.54
S.D.	Long	0.04	0.06	0.04	0.04	0.07
Mean	Short	1.86	1.75	1.67	1.59	1.51
S.D.	Short	0.04	0.05	0.03	0.03	0.03
Mean	Total	1.87	1.76	1.67	1.59	1.52
S.D.	Total	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05

V50max,V100max,V200max,V400max: The mean velocity of 50m,100m,200m,400m
Vcri: The maximal velocity which could theoretically be maintained without exhaustion during swimming

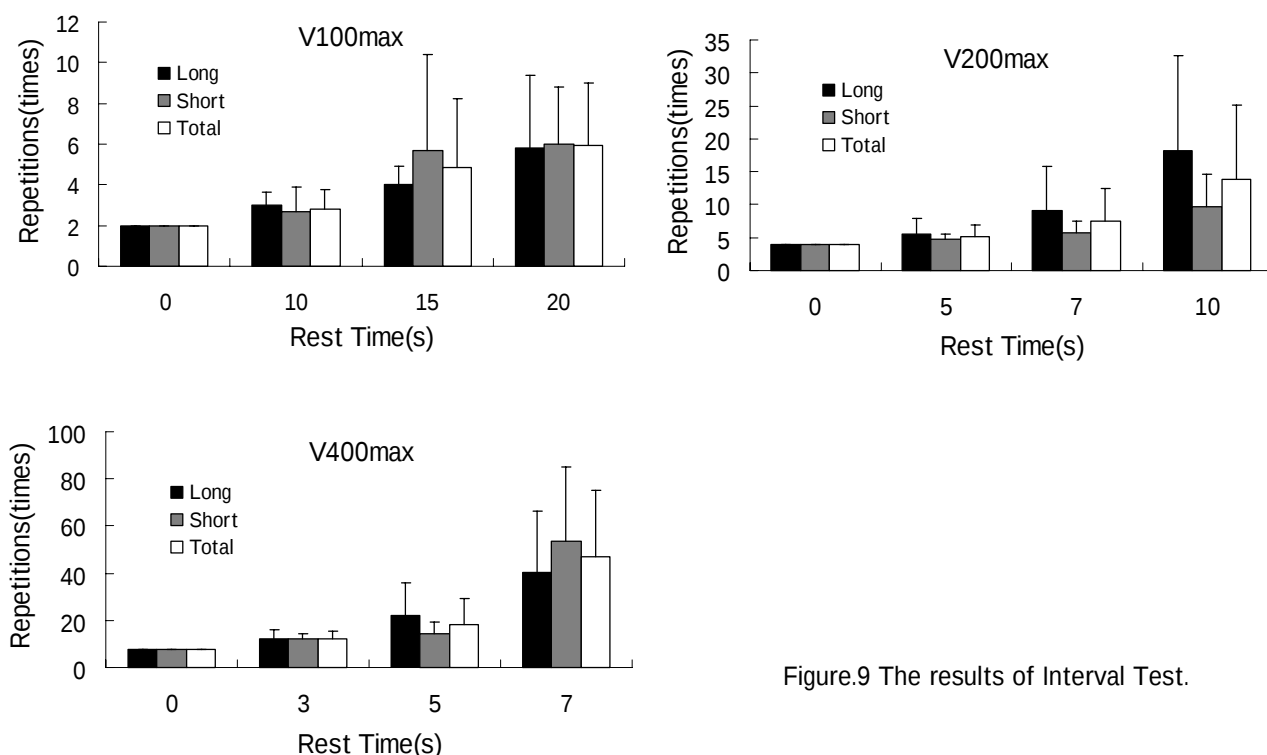


Figure.9 The results of Interval Test.

図10に「ある泳速度において疲労困憊に至ることなくインターバルトレーニングを繰り返すことができる最大限の反復回数は、合計休息時間に比例する」という仮説のもと、実際に関係を探った結果を例として被験者1について示した。また回帰直線の決定係数が、3段階の泳速度V100max、V200max及びV400maxにおいて、全被験者ともに極めて高かった($r^2 = 0.772$, 各泳速度における平均値は、V100max: $r^2=0.941$, V200max: $r^2=0.926$, V400max: $r^2=0.975$)。このことから、上記の仮説は妥当であると考えられる。

すなわち反復回数を n 、休息時間を t とおくとき、合計休息時間は nt と表せることに注意すると反復回数 n は合計休息時間 nt の一次関数 $n=a(nt)+b$ で説明できることになる。この式を変形することにより、 $t=p/n+q$ (ただし、 $p=-b/a$, $q=1/a$)となり、休息時間は反復回数の分数関数で表せる。この概念を用いて3段階の泳速度における反復回数と休息時間の関係を表したものを例として被験者1について図11に示した。また図12には全被験者の平均値について示した。

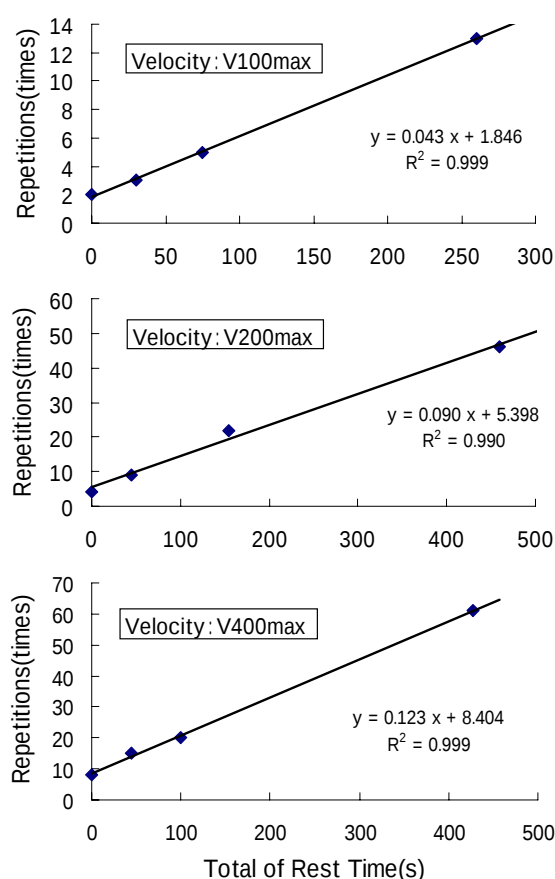


Figure.10 The relationship between the total of rest time and the repetitions (Sub.1).

次に、図12において反復回数を固定することで、任意の反復回数における、疲労困憊に至る又は至らないといった閾値を表す泳速度と休息时间との関係を得ることができる。例として反復回数が4回、8回、20回及び無限回としたときの休息时间と泳速度との関係を、 V_{cri} が疲労困憊に至ることなく泳ぎ続けられる泳速度と定義されることがTime Trial Testから V_{50max} が得られたことを考慮することによって描いたものを図13に示した。

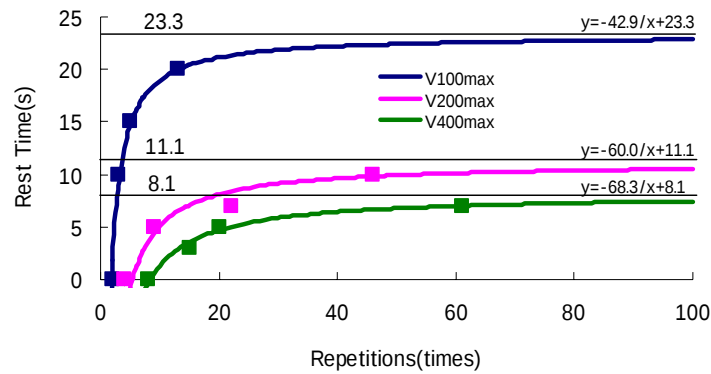


Figure.11 The relationship between the repetitions and the rest time in three phases of different swimming velocity (Sub.1).

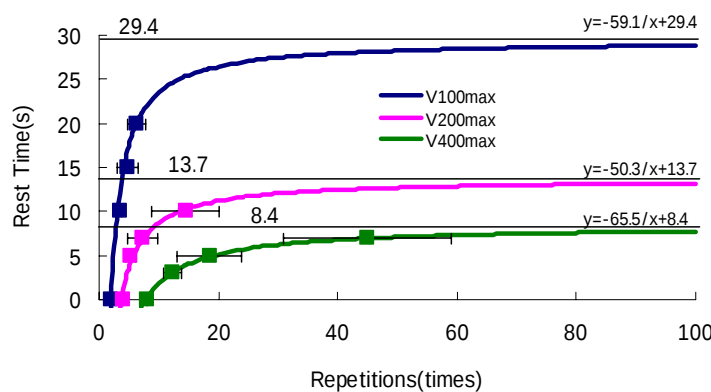


Figure.12 The relationship between the repetitions and the rest time in three phases of different swimming velocity (average).

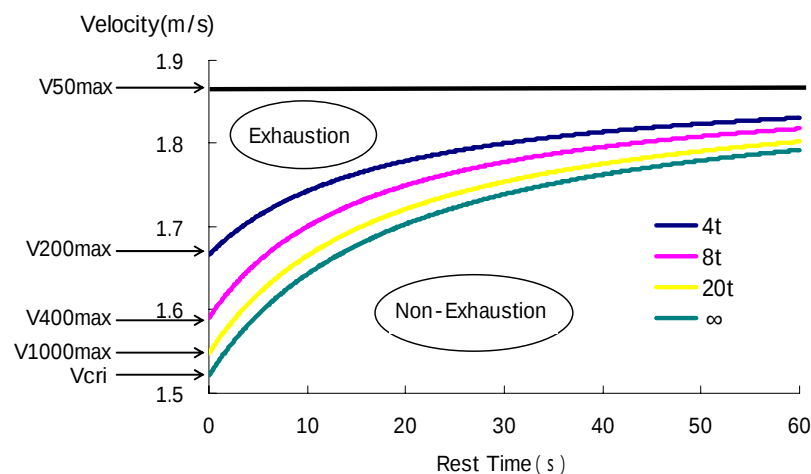


Figure.13 The relationship between the rest time and the swimming velocity in a certain repetitions.

考察

Monod and Schreer¹⁷⁾は、局部筋の運動持続時間とその際の総仕事量との間に直線関係があることを明らかにし、その直線の傾きをcritical powerと称して、理論的に疲労困憊に至ることなく運動が継続できる最大の運動強度として定義した。そしてこの概念は自転車エルゴメーターを用いた全身運動に応用され、Moritani et al.¹⁸⁾はPcriと呼気ガス法によって決定された無酸素性作業閾値との間に有意な正の相関があることを示し、De Vries et al.⁷⁾やNagata et al.¹⁹⁾は、Pcriと筋電図学的データから評価された筋疲労性作業閾値との間に高い正の相関があることを示した。またJenkins and Quigley¹⁰⁾は、自転車エルゴメーターを用いて決定されるPcriは、換気性閾値及び乳酸性作業閾値を測定する方法論的困難さを避けることができ、簡便かつ安価な方法であると述べた。そこでWakayoshi et al.²⁵⁾は、Pcriの概念を全身運動である競泳に応用し、最大努力泳時の泳時間と泳距離の関係が直線関係にあることから、その回帰直線の傾きを、critical swimming velocityと定義し、それが持続的な運動能力を示す指標として妥当であるかを検討した。その結果Vcriは、最大乳酸定常レベルの泳速度、つまり理論的に疲労困憊に至ることなく泳ぎ続けられる最大の泳速度として、持続的な運動能力を示す指標になりうることが示された。そして現在Vcriは、Swimに関して、自身の基準となる泳速度を知る上で非常に簡便でかつ非観血的な方法として広く現場での活用が期待されている²³⁾。また、松村¹⁵⁾や田中²⁴⁾およびCapodaglio et al.⁴⁾はPcriの概念を上肢筋活動であるcranking運動に応用することが可能であるという報告をしており、Pcriがもともとは局部筋に関して定義された運動強度の指標であることを考慮すると、競泳においても、Vcriを全身運動であるSwimに限らず、局部的な運動であるPull及びKickに応用することが可能であると思われる。

一方、Counsilman⁶⁾は、インターバルトレーニングを、泳速度・単位距離・反復回数・休息時間の4要素から成り立つと規定し、Belts et al.³⁾はこれら4要素を組み合わせることによってATP-CP系、解糖系及び有酸素系のエネルギー供給機構へ適切な刺激を与えることができると述べ、インターバルトレーニングによって目的に応じた多様なトレーニングが可能であることを示唆した。このことから、インターバルトレーニングにおいて、広く用いられている泳速度に基づくトレーニングカテゴリーをより進化させるためには、個人の能力及びトレーニング目的に応じた泳速度・単位距離・反復回数・休息時間の4要素の最適な組み合わせを可能とする、より発展的なトレーニング方法論が望まれる^{29,31)}。またインターバルトレーニングにおいても、疲労困憊に至る又は至らないといった閾値を探ることがトレーニングを行う際のガイドラインに成りうるということは、安全面や相対的運動強度の設定の面からしても明らかである^{9,20)}。

これらのことから本研究の目的は、1)VcriをSwimの他にもPull及びKickそれぞれの運動様式において決定し、それがSwim同様に最大乳酸定常レベルの泳速度、つまり理論的に疲労困憊に至ることなく泳ぎ続けられる最大の泳速度として、持続的な運動能力を示す指標になりうることの妥当性について検証すること2)Swim、Pull及びKickそれぞれの運動様式におけるVcriをトレーニング現場で有効的に活用するために、それらのVcriの相互関係及びそれらの強度での運動が身体に与える影響を被験者のtypeの相違を考慮して調査すること3)インターバルトレーニングにおいて疲労困憊に至る又は至らないといった閾値を表す4要素全ての組み合わせ(critical combination)を決定するとともに、typeの相違によって生じる結果を考察することによって、個人に応じたトレーニング処方を行う際の1つの指針として期待されるモデルを作成することであった。

本研究ではまず、被験者にSwim、Pull及びKickそれぞれの運動様式において、5つの様々な泳速度(Swim及びPullは1.2～1.7m/s、Kickは0.8～1.25m/sの範囲)で疲労困憊に至るまで泳ぎ続けてもらい、

その際の泳時間と泳距離における回帰直線の傾きを求めた。その際、泳時間と泳距離の関係を表す相関係数が有意に高い値を示したことから、これは従来のVcriの概念に合致するものであり、Swim、Pull及びKick全てにおいてVcriの決定ができたと言えよう。次に、Vcriでの運動時の生理学的反応を観察するためにSwim、Pull及びKickそれぞれにおいてVcriの泳速度のもと20分間泳テスト(5分間泳×4回、各試行間に1分間の短期休息)を行い、血中乳酸濃度を測定した。その結果、血中乳酸濃度は、Swim、Pull及びKick全てにおいて、第1試行から第4試行にかけて有意な差は認められなかった。また多くの被験者において第1試行から第4試行にかけて血中乳酸濃度の単調な増加又は減少傾向は見られなかった。これらの結果から、Pull及びKickにおけるVcriでのそれぞれの運動もSwimと同様に血中乳酸濃度がほぼ定常状態であると判断できる。つまり、いかなる運動様式においてもVcriでの運動中は乳酸の産生と除去及び利用による動的な平衡状態が保持されていると言うことができ、Vcriは最大乳酸定常レベルの泳速度として妥当であることが示されたと言えよう。以上のことから、Vcriが理論的に疲労困憊に至ることなく泳ぎ続けられる最大の泳速度として、持続的な運動能力を示す指標になりうることを示された。

若吉ら³⁰⁾は、一般プールにおいてPull及びKickのVcriの決定を試みた結果、回帰直線の相関係数が極めて高かったことからVcriの概念をPull及びKickにも応用可能であることを示唆している。またWakayoshi et al.^{26,27)}は、Swimに関してのみではあるが、一般プールで求められるVcriでの運動は血中乳酸濃度が定常状態であることを明らかにすると共に、一般プールで求められるVcriと回流水槽で求められるVcriとの間に高い相関($p<0.05$)があることを示した。これらのことからPull及びKickにおいても、一般プールで求められたVcriも最大乳酸定常レベルの泳速度として妥当であると推測することができよう。

次に、決定されたSwim、Pull及びKickにおけるそれぞれのVcriについて、type間及び運動様式間で比較を行った。その結果、SwimとKick間及びPullとKick間で有意な差が認められた($p<0.01$)。これはSwim、Pull及びKickそれぞれの全力泳の速度から考えても当然のことのように思われる。またPullにおいてはtype間で有意な差があった($p<0.05$)。このことからジュニアの選手においてはPullにおけるVcriがtypeを決定する際の1つの指針になると考えられる。更にtype別に重回帰分析を行った結果、短距離選手では $(Vcri-s)=0.77(Vcri-p)+0.31(Vcri-k)$ 、長距離選手では $(Vcri-s)=0.76(Vcri-p)+0.31(Vcri-k)$ であった。このことから長距離泳におけるSwimの泳速度はPullの泳速度に大きく依存することが示唆された。またこれは、「Swim中における下肢筋活動は、推進力を生む役割よりも浮力をつくることによって抵抗の少ない姿勢を保持する役割の方が大きい」という宮下ら¹⁶⁾の報告に同調するものであったと考えられる。次に、20分間泳テストにおいて、血中乳酸濃度、酸素摂取量及び心拍数を測定した結果、酸素摂取量に関しては短距離選手でSwimとPullに、長距離選手でSwimとPull及びSwimとKickで有意な差が認められた($p<0.01$)もののtype間では有意な差が認められなかった。また血中乳酸濃度及び心拍数に関してはtype間及び運動様式間で有意な差が認められなかった。これらの結果はVcriが個人に応じた運動強度であるため、酸素摂取量、血中乳酸濃度及び心拍数ともにtypeに依存しなかったものと思われる。よってVcriの運動強度でトレーニングを行った人の大部分に同様の効果が得られることを示唆しているものと考えられる。

実際のトレーニング現場における指導者や選手は血液採取を拒む傾向があるが、Vcriは非観血的な方法によって決定することができることから、今後は、本研究で妥当性が示されたVcriが実践的及び簡便的に持続的な能力を評価することができる手法としてトレーニング現場で活用されることが強く望まれる。

一方、本研究では、3段階の泳速度V100max、V200max及びV400maxにおいて、それぞれ長さの異なる休息時間を設定し、反復回数80回を限度に疲労困憊に至るまで繰り返し運動を行った際の反復回数

を測定した。そしてtype間で比較検討を行ったところ、統計上有意な差は認められなかった。この結果は、Interval Testにおいて設定した3段階の泳速度がそれぞれ個人の能力に応じた相対的運動強度であったために生じたものと考えられる。しかしながら本研究においては、typeに関する規定が厳格ではなかったために以上のような結果が得られたという可能性も拭いきれないことからその点に関しては今後の課題であると考ええる。

次に反復回数を合計休息時間で説明しようと回帰分析を試みた結果、回帰直線の決定係数が、3段階の泳速度V100max、V200max及びV400maxにおいて、全被験者ともに極めて高い値を示したことは、回帰方程式の有効性を意味しており、それ以降の反復回数と休息時間の関係及び休息時間と泳速度の関係を表すモデルが妥当であることを示していると言えよう。

またcritical combinationを決定する際、本研究の実験が疲労困憊に至るまで繰り返し泳ぎ続けるといった過酷な内容であるがゆえに短期間において測定することは困難であり、毎測定時に高い集中力の持続が必要とされた。このことからInterval Testの結果において被験者間でデータのばらつきが生じたと思われる。この点を考慮すると、選手それぞれがInterval Testを実施するのではなく、むしろ最も良いコンディションを想定した上でInterval Testの推定結果をアンケート調査することによってcritical combinationを決定する方法も有用ではないかと考えられる。また本研究の結果より、そのアンケート調査の結果を事前に入力しておけば、選手個人に応じたcritical combinationを即座に推定し、現場の指導者に提供できるシステムを構築することが可能であると考えられる。更に、トップアスリートとされる選手を育成してきた指導者のトレーニングカテゴリーの分類法を上記のシステムに組み込むことで、トレーニングメニューを作成する際の1つの指針として参考になると考えられる(図14)。

名前:

50mを 秒で泳ぐとき

100mのベストタイムは?

200mのベストタイムは?

400mのベストタイムは?

5秒休息では何本繰り返すことができますか?

7秒休息では何本繰り返すことができますか?

10秒休息では何本繰り返すことができますか?

50mを 秒で泳ぐとき

10秒休息では何本繰り返すことができますか?

15秒休息では何本繰り返すことができますか?

20秒休息では何本繰り返すことができますか?

50mを 秒で泳ぐとき

3秒休息では何本繰り返すことができますか?

5秒休息では何本繰り返すことができますか?

7秒休息では何本繰り返すことができますか?

決定

Figure.14 The questionnaire form.

今後は、酸素摂取量や血中乳酸濃度などの生理学的な指標を調査することで、インターバルトレーニングにおける4要素全てを考慮したトレーニングカテゴリーの開発に繋がると考えられ、それをインターバルトレーニングの処方に活かすことで、選手個人に適した処方を行うことが期待される。また50m以外の単位距離や、Pull、Kickといった他のトレーニングスタイルにおいても同様にcritical combinationを決定することができると思われることから、様々なインターバルトレーニングにこのモデルが活用可能であると考えられる(図15)。

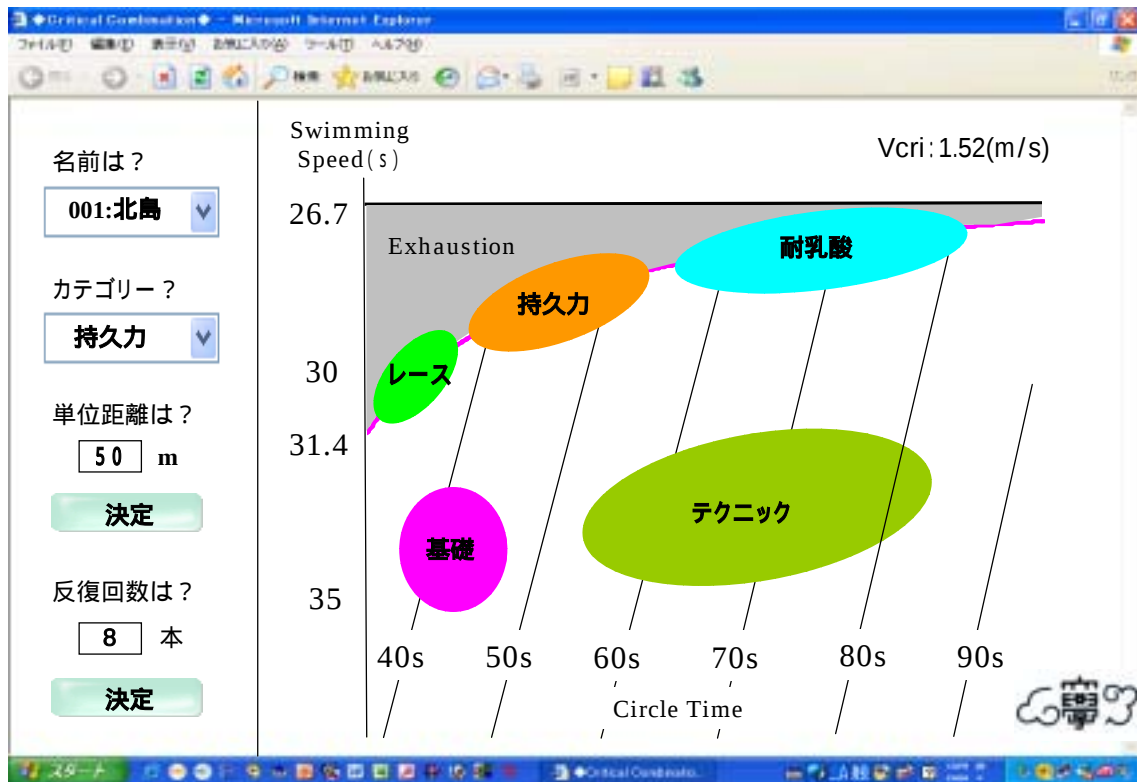


Figure.15 The model to prescribe the training menu in interval training by using critical combination.

摘要

本研究は、1)Swim, Pull及びKickそれぞれの運動様式におけるVcriを決定し、それが最大乳酸定常レベルの泳速度、つまり理論的に疲労困憊に至ることなく泳ぎ続けられる最大の泳速度として、持続的な運動能力を示す指標になりうることの妥当性について検証すること2)Swim, Pull及びKickそれぞれの運動様式におけるVcriをトレーニング現場で有効的に活用するために、それらのVcriの相互関係及びそれらの強度での運動が身体に与える影響を被験者のTypeの相違を考慮して調査すること3)インターバルトレーニングにおいて疲労困憊に至る又は至らないといった閾値を表す4要素全ての組み合わせ(critical combination)を決定するとともにtypeの相違によって生じる結果を考察することによって、個人に応じたトレーニング処方を行う際の1つの指針として期待されるモデルを作成することを目的として行われた。本研究は以下のように要約される。

1. 最大努力泳時における泳時間と泳距離の関係を表す相関係数は、統計上有意に高い値を示した。 $(p<0.01)$ またSwim, Pull及びKickそれぞれの運動様式においてVcriの泳速度のもと20分間泳テストを行い、血中乳酸濃度を測定した結果、Swim, Pull及びKick全てにおいて、第1試行から第4試行にかけて血中乳酸濃度に有意な差は認められなかった。そして多くの被験者においては第1試行から第4試行にかけて血中乳酸濃度の単調な増加又は減少傾向は見られなかった。これらのことから、Swim, Pull及びKickそれぞれの運動様式におけるVcriは最大乳酸定常レベルの泳速度として妥当であり、Vcriが理論的に疲労困憊に至ることなく泳ぎ続けられる最大の泳速度として、持続的な運動能力を示す指標になりうることが示唆された。
2. Swim, Pull及びKickにおけるそれぞれのVcriを決定し、運動様式間及びtype間に対してVcriの比較を行なった。その結果、Pullにおいてはtype間で有意な差があったことからジュニアの選手においてはPullにおけるVcriがtypeを決定する際の1つの指針になると考えられる。
3. Swim, Pull及びKickそれぞれにおいてVcriの泳速度のもと20分間泳テストを行い、血中乳酸濃度、酸素摂取量及び心拍数を測定した。その結果、いずれもtype間で有意な差が認められなかった。これはVcriが個人に応じた運動強度であるためtypeに依存しなかったものと考えられ、Vcriの運動強度でトレーニングを行った人の大部分に同様の効果が得られることを示唆しているものと考えられる。
4. Interval Testにおいて、type間で比較検討を行った結果、統計上有意な差は認められなかった。これは、Interval Testにおいて設定した3段階の泳速度がそれぞれ個人の能力に応じた相対的運動強度であったためと考えられる。
5. Interval Testを行った際の反復回数を合計休息時間で説明しようと回帰分析を試みた結果、回帰直線の決定係数が、3段階の泳速度V100max, V200max及びV400maxにおいて、全被験者ともに極めて高い値を示したことにより回帰方程式の有効性を意味していると考えられ、それ以降の反復回数と休息時間の関係及び休息時間と泳速度の関係を表すモデルが妥当であることが示された。

6. critical combinationを決定する際、本研究の実験が疲労困憊に至るまで繰り返し泳ぎ続けるといった過酷な内容であるがゆえに短期間において測定することは困難であり、毎測定時に高い集中力の持続が必要とされたことから、選手それぞれがInterval Testを実施するのではなく、むしろ最も良いコンディションを想定した上でInterval Testの推定結果をアンケート調査することによってcritical combinationを決定する方法も有用ではないかと考えられる。
7. critical combinationを活用することによって、トップアスリートとされる選手を育成してきた指導者のトレーニングカテゴリー分類法を組み込んだシステムを構築することができ、それを現場の指導者に提供することで、トレーニングメニューを作成する際の1つの指針として参考になると考えられる。
8. 今後は、酸素摂取量や血中乳酸濃度などの生理学的な指標を調査することで、インターバルトレーニングにおける4要素全てを考慮したトレーニングカテゴリーの開発に繋がると考えられ、それを活かすことで個人に適したトレーニング処方を行うことが期待される。また50m以外の単位距離や、Pull, Kickといった他のトレーニングスタイルにおいても同様にcritical combinationを決定することができると思われることから、様々なインターバルトレーニングにこのモデルが活用可能であると考えられる。

参考資料

- 1) Åstrand I. , Åstrand P.O. , Christensen E.H. , Hedman R.(1960)Intermittent muscular work , Acta physiol.scand . 48:448-453
- 2) Åstrand P.O. , Rodahl K.(1970)Continuous versus intermittent exercise , Physical training . In: Textbook of work physiology , Mc graw-hill book company , London:382-387
- 3) Beltz J.D. , Costill D.L. , Thomas R. , Fink W.J. , Kirwan J.P.(1988)Energy demands of interval training for competitive swimming , Swimming Research . 4(3):5-9
- 4) Capodaglio P. , Bazzini G.(1996)Predicting endurance limits in arm cranking exercise with a subjectively based method , Ergonomics . 39:924-932
- 5) Christensen E.H. , Hedman R. , Saltin B.(1960)Intermittent and continuous running , Acta physiol.scand . 50:269-286
- 6) Counsilman J.E.(1977)Competitive swimming manual . Counsilman Co. , Inc. , Bloomington , Indiana:3-17
- 7) De Vries H.A. , Moritani T. , Nagata A. , Magnussen K.(1982)The relation between critical power and neuromuscular fatigue as estimated from electromyographic data , Ergonomics . 25(9):783-791
- 8) Holmer I.(1983)Energetics and mechanical work in swimming. In: Hollander A.P. , Huijing P.A. , Groot G.D.(Eds.) , Biomechanics and Medicine in Swimming , Human Kinetics , Champaign , Illinois:154-164
- 9) 池上晴夫(2002)新版運動処方 - 理論と実際 - , 朝倉書店 , 東京:145-151
- 10) Jenkins D.G. , Quigley B.M.(1990)Blood lactate in trained cyclists during cycle ergometry at critical power , Eur.J.Appl.Physiol . 61:278-283
- 11) 金久博昭(1994)Anaerobicsのトレーニング , J.J.Sports Sci . 13-5:575-596
- 12) Karlsson J. , Saltin B.(1971)Oxygen deficit and muscle metabolites in intermittent exercise , Acta physiol. scand . 82:115-122
- 13) Maglischo E.W.(2003)Swimming fastest , Human Kinetics , Champaign , Illinois:417-450

- 14) Margaria R. , Oliva R.D. , Di Prampero P.E. , Cerretelli P.(1969)Energy utilization in intermittent exercise of supramaximal intensity , J. Appl. Physiol . 26(6):752-756
- 15) 松村雅嗣(2000)Pedalingおよびcranking運動におけるcritical powerの決定およびエネルギー代謝との関係 , 奈良教育大学修士論文集抄録:206-213
- 16) 宮下充正 , 波多野勲 , 林祐三(1982)競泳のコーチング , 大修館書店 , 東京:202-206
- 17) Monod H. , Scherrer J.(1965)The work capacity of a synergic muscular group , Ergonomics . 8:329-338
- 18) Moritani T. , Nagata A. , de Vries H.A. , Muro M.(1981)Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold , Ergonomics . 24(5):339-350
- 19) Nagata A. , Moritani T. , Muro M.(1983)Critical power as a measure of muscular fatigue and anaerobic threshold , Biomechanics , A Human Kinetics , Champaign :312-320
- 20) 日本体力医学会体力科学編集委員会(1993)運動処方 の 指針 , アメリカスポーツ医学協会(編) , 南江堂 , 東京:93-118
- 21) 荻田太(1999)水泳の代謝特性とトレーニングへの指針 - ブル , キック , スイムの特性比較 - , 体育の科学 . 49(3):241-247
- 22) 荻田太(1999)水泳中の無酸素性エネルギー供給動態 , Japanese Journal of Science in Swimming and Water Exercise . 2:47-56
- 23) 高橋繁浩 , 若吉浩二 , 長澤省吾 , 北川薫(2002)水泳疲労性閾値としてのcritical swimming velocityの簡易決定法 - 男子自由形短距離選手と長距離選手を対象として - , バイオメカニクス研究 . 7(1):110-115
- 24) 田中勤(2000)柔道選手における上肢及び下肢筋群のcritical powerの決定とその妥当性 , 奈良教育大学修士論文集抄録:198-205
- 25) Wakayoshi K. , Ikuta K. , Yoshida T. , Udo M. , Moritani T. , Mutoh Y. , Miyashita M. (1992)Determination and validity of critical velocity as an index of swimming performance in the competitive swimmer. Eur.J.Appl. Physiol . 64:153-157

- 26) Wakayoshi K. , Yoshida T. , Udo M. , Kasai T. , Moritani T. , Mutoh Y. , Miyashita M. (1992)A simple method for determining critical speed as swimming fatigue threshold in competitive swimming. *Int.J Sports Med* . 13:367-371
- 27) Wakayoshi K. , Yoshida T. , Udo M. , Harada T. , Moritani T. , Mutoh Y. , Miyashita M.(1993)Does critical swimming velocity represent exercise intensity at maximal lactate steady state? , *Eur.J.Appl.Physiol* . 66:90-95
- 28) 若吉浩二(1995)水泳疲労性閾値としてのcritical swimming velocityの決定とその妥当性 , トレーニング科学 . 7(2):45-52
- 29) 若吉浩二 , 立貞栄司 , 寺田晶裕 , 森弘暢 , 小野桂市(1999)競泳インターバルトレーニングにおける泳速度と休息時間の変化に伴う血中乳酸濃度およびストローク頻度の変化 , スポーツ方法学研究 . 12(1):69-77
- 30) 若吉浩二 , 高橋繁浩(2004)水球・競泳選手のスィム , プル及びキックにおけるcritical velocityの決定とその比較 , 日本体育学会第55回大会抄録:544
- 31) Wakayoshi K , Takano C , Ogita F(2006)Determination and application of interval swim critical velocity and critical rest time in the 50m interval swim training , *Biomechanics and Medicine in Swimming X* , Portuguese Journal of Sport Sciences , 6 , Suppl2:321-324
- 32) 山本正嘉 , 金久博昭(1990)間欠的な全力運動の持久性に関する研究 ; 無酸素性および有酸素性作業能力の関係 , *J.J.Sports Sci* . 9-8:526-530
- 33) 山本正嘉(1994)Anaerobicsとaerobicsの二面性をもつ運動をとらえる . - 間欠的運動のエナジェティクス - , *J.J.Sports Sci* . 13-5:607-615
- 34) 山本正嘉 , 金久博昭(1991)間欠的運動における血中乳酸の蓄積;運動強度 , 休息時間 , および運動時間との関連から , *J.J.Sports Sci* . 10-11:764-770