

新型競泳用水着が水泳運動中の抵抗指標に及ぼす影響

荻田 太¹, 黄 忠², 黒部一道², 西脇雅人^{2,3}, 小澤源太郎², 田中孝夫¹, 田口信教¹

¹鹿屋体育大学体育学部スポーツパフォーマンス系

²鹿屋体育大学大学院体育学研究科

³熊本県立大学環境共生学部

キーワード: 水着、ポリウレタン素材、抵抗、パフォーマンス

【要 約】

本実験の目的は、北京オリンピックにおいて注目されたポリウレタン素材を使用した新型水着と従来型の水着を着用して泳いだ際の抵抗指標、最大推進パワーを定量・比較するとともに、それらの違いがどの程度競泳パフォーマンスに差を生じさせ得るのか推定を試みることであった。被検者は、体育学専攻の大学競泳選手 2 名とした。本実験では、北京オリンピック以前の従来型の水着(ボックスタイプ)と、北京オリンピックで多数の世界記録の更新を導いたポリウレタン素材を使用した水着(ロングタイプ)を用いた。なお、抵抗指標、および最大推進パワーの測定は、本研究室で開発された MAD システムを用いた。その結果、同一泳速で泳いだときの抵抗値は、新型水着着用時の方が従来型水着着用時より 3~6 N (5~12%) 低い値となった。一方、最大推進パワーについては、新型水着を着用したときの方が 10~20W (7~15%) 高い値となった。さらに、各被検者の抵抗指標や最大酸素摂取量を基に両水着着用時の 400m 泳記録を推定したところ、新型水着着用時の方が 7 秒から 12 秒記録を短縮する可能性が示唆された。同時に、この着用による泳記録の差は、トレーニング効果として換算すると、本被検者の最大酸素摂取量が 10%増加したと仮定したときの記録向上とほぼ同程度であることも推定され、トレーニングによって容易に埋められる差ではないことが明らかとなった。したがって、平成 21 年 7 月、国際水泳連盟のルール改正により、水着に関する規制が強化されたことは、より平等な条件下で、真に泳パフォーマンスを競うための正しい判断と思われる。以上の結果より、少なくともポリウレタン素材によって表面加工された新型水着は、従来型の水着着用時よりも抵抗値を軽減させ、それによって記録を大幅に向上させ得ることが示唆された。

スポーツパフォーマンス研究, 1, 238-250, 2009 年、受付日: 2009 年 8 月 26 日、受理日: 2009 年 10 月 26 日
責任著者: 荻田太 鹿屋体育大学体育学部 〒891-2393 鹿児島県鹿屋市白水町 1 ogita@nifs-k.ac.jp

Effect of the new swimsuit materials on the resistance index during swimming.

Futoshi Ogita¹), Zhong Huang²), Kazumichi Kurobe²), Masahito Nishiwaki²)³),

Gentarō Ozawa²⁾, Takao Tanaka¹⁾, Nobutaka Taguchi¹⁾

¹⁾ National Institute of Fitness and Sports in Kanoya

²⁾ Graduate School of Physical Education, National Institute of Fitness and Sports
in Kanoya

³⁾ Faculty of Environmental and Symbiotic Sciences, Prefectural University of
Kumamoto

Key Words: swimsuits, polyurethane material, resistance, performance

[Abstract]

The purposes of this study were to evaluate the new polyurethane swimsuits highlighted in the Beijing Olympics in comparison with conventional swimsuits in terms of their resistance index and the maximum propulsion power, and to estimate how that difference would affect swimming performance. Participants were 2 university race swimmers majoring in physical education. In the present study, 2 types of swimsuits were used: the pre-Beijing Olympics type (box type) and the new type (long type) which had led to many new world records in the Beijing Olympics. The resistance index and the maximum propulsion power were measured with the MAD system developed in the present authors' laboratory. It was found that the resistance at the same swimming speed was lower by 3-6N (5%-12%) with the new suits compared to the conventional swimsuits. Also, the maximum propulsion power was higher by 10-20W (7%-15%) with the new suits. Furthermore, based on the measured resistance indices and the maximum oxygen intake of the swimmers, 400-m swim times were estimated to be 7-12 s shorter with the new suits. These advantages of the new swimsuits correspond to what might be achieved with a 10% increase in oxygen intake, a level hardly achievable through training. Thus, the FINA's July 2009 amendment of the rules to change the regulations regarding swimsuits was, in the present authors' judgment, a correct decision in order to have fair swimming competitions, that is, competition under equal conditions. In conclusion, the new swimsuits that have their surface processed with polyurethane material reduce the resistance more than conventional swimsuits, with the result of significantly improved records.

I. 目的

近年、競泳用水着に関する技術開発は目覚ましく、様々な改良点を加えた製品が発表されている。これまでは抵抗軽減を目的として、水着の材質やカット、表面加工、着圧、縫法(無縫製)などの工夫に主眼が置かれていたが、最近では体幹や骨盤をサポートする加工により姿勢の安定性を強化したり、ストローク動作を補助するような伸縮性加工を施すなど、水泳動作の補助に関する機能面に至るまで開発が及んできている。これらの多様な工夫が記録の向上に効果的であることを示唆するように、北京オリンピック前、およびオリンピック時にはS社の水着を着用した選手による世界記録更新が相次いだ。この結果を背景に、我が国においても選手の着水着選択を巡って社会的問題にまで発展したことは記憶に新しい。

実際に水着の違いが、水泳運動時の抵抗やエネルギー消費量を軽減できるか否かについて検討を行った先行研究はいくつかある(Benjanuvatra et al. 2002; Chatard and Wilson 2008; Mollendorf et al. 2004; 荻田ら 1996; Robert et al. 2003; Toussaint et al. 2002)。水泳運動時の生理学的、あるいは力学的指標に何らかの差を認めている報告もある(Benjanuvatra et al. 2002; Chatard and Wilson 2008; Mollendorf et al. 2004)が、必ずしもメーカー側が提示しているような顕著な差が認められるわけでもない(Robert et al. 2003; Toussaint et al. 2002)。また、水着そのものの抵抗値よりも、その人に合った水着を選択する方がよりパフォーマンスに好影響を与えることを示した例もある(荻田ら 1996)。そこで我々は、本研究室で開発したMAD (Measurement of Active Drag) システムを利用し、北京オリンピックで世界記録が量産されたS社の水着と、従来型の水着を着用した際の抵抗値、最大推進パワーなどの力学的指標を定量・比較するとともに、それらの違いが実際にどの程度競泳パフォーマンスに差を生じさせ得るのか推定を試みた。

II. 方法

1. 被検者

本実験における被検者は、体育学専攻の大学競泳選手2名であった。両被検者ともに、全日本学生選手権出場レベルの選手であった。実験に先駆けて、本実験の実施内容については鹿屋体育大学倫理委員会に提出され、許可を受けた。その後、被検者は実験の意義、測定手順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、自主的に参加した。尚、被検者の身体的特性は表1に示す通りである。

表1. 被験者の身体特性

	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)	最大酸素摂取量 ($l \cdot \text{min}^{-1}$) (ml \cdot kg $^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	
被検者A	20	165.0	60.0	4.45	74.0
被検者B	20	174.1	67.9	4.24	63.0

2. 水着の種類

本実験では、北京オリンピック以前までの従来型水着(ボックスタイプ)と、北京オリンピックで多数の世界記録の更新を導いたポリウレタン素材が水着表面に接着された新型水着(ロングタイプ)が用いられた。実際に用いた水着を図1に示す。



図1. 本実験で用いられた従来型の水着(ボックスタイプ:右側)、新型水着(ロングタイプ)

3. 抵抗泳速関係、推進パワーの測定

抵抗の測定は、Toussaint ら(1988, 1989)によって開発された装置に修正を加え、本研究室で開発されたMAD システム(ヤガミ社製)を用いて行われた(Ogita et al. 2006; 荻田ら 2004)(図2)。

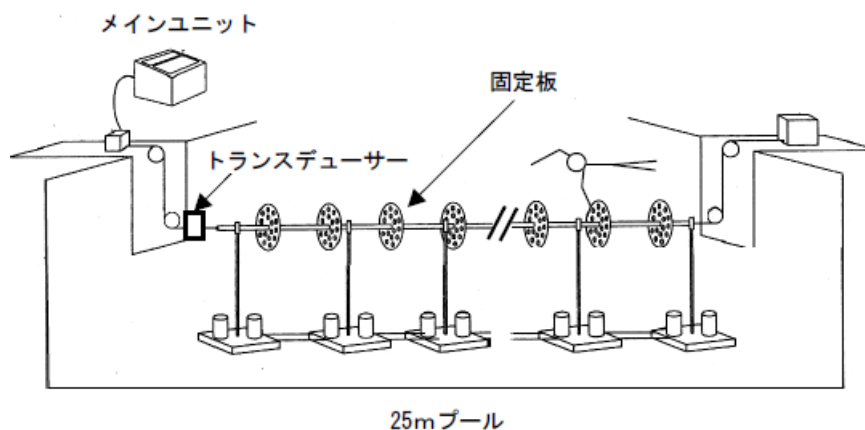


図2. MADシステムの概要図

被検者は、クロール泳のアームストロークにおいて、水中に設置された固定板を1ストローク毎に押しながら、一定速度で25m を泳いだ。一定速度で泳いでいるとき、すなわち加減速なく泳いでいるときは、泳者が産生する推進力と抵抗力が釣り合った状態と考えられるので、本実験における抵抗は、MAD システムの固定版を押した力(=推進力)が抵抗に等しいという仮定に基づき、測定されている。また、測定時には被検者がキック動作を行わないように(キックにおける推進力が作用しないように)、プルブイを大腿部に挟んで泳がせた。尚、MAD システムによる抵抗測定風景の動画

を**図3**(**動画a**:水上、**動画b**:水中)に示す。

MAD システム固定板は、水面より0.75m の深さに設置された23m の水平ロッドに、1.30m間隔で15 枚装着された。被検者が後方向へ固定板を押した力(推進力)は、プール壁と水平ロッドの連結部分に設置されたトランスデューサーによって測定された。力信号はローパスフィルター(30Hz以上をカット)処理され、デジタル信号化され、100Hz の頻度でコンピューターに取り込まれた。

本実験において、各被検者はMAD システムを用い、異なる泳速で5~6 回泳いだ。尚、最後の1 回は全力泳とした。各試行における平均の抵抗力を求めるに当たり、第1固定板にかかった推力は、壁を蹴ってスタートしたときの推進力の影響を除くために、また最終固定板にかかった力は、壁際の減速の影響を避けるために、計算には採用しなかった。残りの13 枚の固定板より得られた力信号がすべて積分され、さらにそれら13 枚の固定板を通過するのに要した時間で除すことで平均の推進力を算出した。なお、各試行時の平均泳速は、第2 固定板に手が触れた時点から最終固定板に手が触れた時点までに要した時間とその泳距離より算出された。各試行における泳速と抵抗値(=推進力)から、最小二乗法を用いて以下のような泳速抵抗関係が求められた。

$$F_d = A \cdot v^n$$

ここで F_d は抵抗力、 v は泳速、 A (抵抗係数)と n (抵抗指数)はこの回帰式の比例定数である。また、最大努力で泳いだときの推進力と平均泳速の積より最大推進パワーを算出した。

III. 結果

1. 泳速抵抗関係と抵抗指標

従来型水着と新型水着を着用して測定された泳速抵抗関係より算出された抵抗指標を比較してみると、被検者A、B ともに、抵抗係数は新型水着を着用した方が小さく、抵抗指数は従来型水着を着用した方が小さい値となった(**表2**)。そこで両者の関数として決定される泳速-抵抗関係の回帰曲線を比較すると、被検者A、B ともに、新型水着を着用した方が、従来型水着を着用したそれより右下にシフトしており(**図4**)、それらの回帰式を利用して推定された泳速 $1.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $1.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $1.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 時の抵抗値は、3~6 N(5~12%)、新型水着の方が小さい結果となった(**表2**)。

表2. 従来型水着と新型水着を着用したときの泳速-抵抗関係から得られた抵抗係数、抵抗指数、および泳速 1.0 、 1.4 、 $1.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 時の抵抗推定値の比較

	被検者A		被検者B	
	従来型水着	新型水着	従来型水着	新型水着
抵抗係数	25.8	22.6	28.1	23.2
抵抗指数	1.85	1.98	2.04	2.27
抵抗力@ $1.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (N)	25.8	22.6	28.1	23.2
抵抗力@ $1.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (N)	48.1	44.0	55.8	49.8
抵抗力@ $1.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (N)	76.5	72.4	93.2	88.1

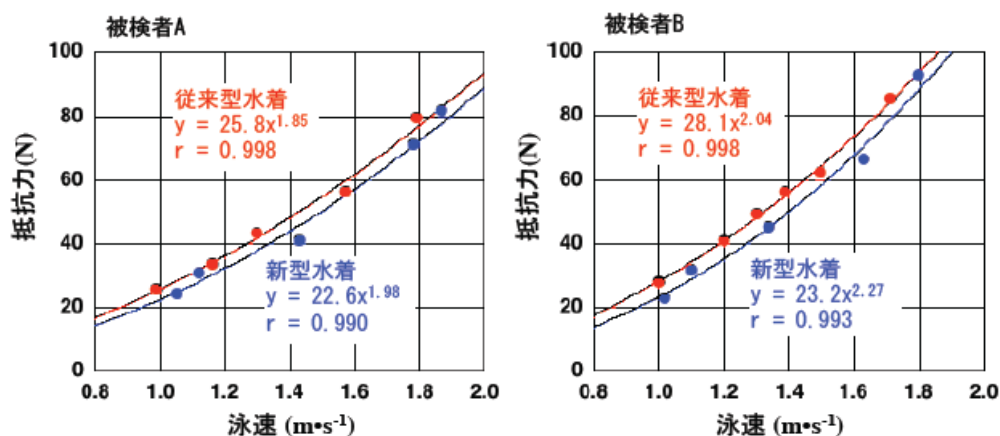


図4. 従来型水着と新型水着を着用したときの泳速抵抗関係の比較

● 従来型水着 ● 新型水着抵

2. 最大推進パワー

最大努力泳時の泳速とそのときの推進力の積によって算出された最大推進パワーを比較してみると、両被検者ともに新型水着を着用したときの方が10~20W(7~15%)高く(表3)、そのときの泳速と推進力を比較したところ、いずれも新型水着着用時の方が高い値を示した。

表3. 従来型水着と新型水着を着用したときの最大推進パワー、およびそれが得られたときの泳速と推進力

	被検者A		被検者B	
	従来型水着	新型水着	従来型水着	新型水着
最大推進パワー(W)	142.1	152.5	145.5	166.8
最大泳速 (m・s ⁻¹)	1.79	1.87	1.71	1.80
最大推進力 (N)	79.4	81.6	85.1	92.7

IV. 考察

本実験は、ポリウレタン素材を水着表面に接着加工した新型水着が、従来型の水着よりも、水泳時の抵抗を軽減し得ることを初めて明らかにしたものである。競泳の場合、抵抗の軽減は、同じ速度で泳いだときの外的仕事率の軽減、あるいは同じ外的仕事率で泳いだときの速度の向上を意味することから、直接パフォーマンスの向上を意味する結果といえる。

1. 抵抗に影響する要因

水泳中の抵抗は、圧抵抗、摩擦抵抗、および造波抵抗の総和によって決定される(Toussaint and Hollander 1994)。まず、圧抵抗であるが、これは進行方向に対する物体の前後に生じる圧差によってできるもので、主に身体の前投影面積(横断面積)に依存する(Toussaint et al 1988; Toussaint and Hollander 1994)。そのため身体の大きさは当然であるが、いかに水平姿勢を保てるかという泳技術などにも影響を受ける。

本実験において、抵抗軽減が認められたS社製の新型水着は伸縮性が乏しく、着用時締め付けの強いことが大きな特徴である。そのため、一般的には水着着用によって身体容積が減少し、それともなうて身体水抵抗が軽減すると言われている。しかしながら、水着の締め付けによって身体形状が変わることは考えられても、実際に身体容積が低下することは考えにくい。変わり得るとしたら、下肢の圧迫によって脚の血液が胸郭内にシフトする程度であろう。仮にこれが起こった場合、浮心がわずかに上半身側に移動することが考えられ、より水平姿勢を維持しやすくなるかもしれない。ただし、本実験では、抵抗測定時にプルブイを足首部に挟んで測定したため、全身泳時より下肢に大きな浮力が作用し、沈みにくい(水平姿勢を維持しやすい)状態であった。そのため、血液のシフトによる浮心の移動が実際に抵抗を軽減させ得たかどうかについては明らかでない。

一方、血液シフトが起こるほど締め付けがきつい状況であれば、運動時には下肢への血流低下が考えられる。この血流低下は、活動筋への酸素運搬を低下させるだけでなく、筋疲労に関与する代謝産物や熱の除去をも低下させることになる。これらのことは、パフォーマンス低下に寄与することはあっても、パフォーマンス向上に対して貢献するとは考えにくい。

また、一般的に考えられているように新型水着の圧迫によって身体容積の低下が起こるならば、それに伴って体重が減少しない限り、身体密度が増大することになる。これは、浮力を低下させ、身体が沈みやすい状態を作ってしまうため、水面下における身体の前方投影面積を増大させてしまうであろう。その結果、抵抗が増大することは考えられても、低下することは考えにくい。以上のことから、本実験における新型水着着用時の抵抗の低下を圧抵抗の低下から説明することは困難といえる。

次に摩擦抵抗であるが、これは皮膚および水着と水との摩擦によって生じる抵抗である。理論上は表面が同質であるならば、全体表面積に依存して増加する(Toussaint and Hollander 1994)。逆に、低抵抗の素材を用いた水着において、その素材の面積が大きいほど、従来型と比較して抵抗減少が大きかったことも報告されている(Benjanuvatra et al. 2002)。本実験では、新型水着については脚全体を覆うロングタイプを、旧型水着にはボックスタイプを使用した。吸水性の乏しいポリウレタン素材によって加工された新型水着の摩擦抵抗が、皮膚や従来型水着のそれより小さければ、摩擦抵抗を十分軽減させ得ることが考えられる。

また、摩擦抵抗は材質の表面や形状にも依存する。したがって、締め付けの強い新型水着を着用した場合、水泳中に起こる水面下での皮膚のひずみ(動作にともなう皮膚の波打ち)を押さえることによって摩擦抵抗を軽減できる可能性もある。新型水着着用時に抵抗係数が小さかったことも、上述した摩擦抵抗に関する要因に起因しているのかもしれない。

最後に造波抵抗であるが、造波抵抗は水面が歪んだ結果生じる。泳速が高くなると弓状の波が形成され(Alley 1952)、泳速が上がるほど造波抵抗が全抵抗を増大させる主要因となる(Miller 1975)。そのため、より高速で泳げる新型水着の方が、より大きな影響を受ける可能性がある。新型水着着用時に抵抗指数が大きかったのも、これに起因しているのかもしれない。

理論上、水泳時の抵抗は抵抗係数と抵抗指数の関数として決定されるため、両指標ともに小さ

い方が抵抗軽減に有利である。本実験では新型水着着用時に抵抗指数が大きかったが、得られた泳速-抵抗関係式から算出する限り、被検者Aの場合泳速 $2.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、Bの場合 $2.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ を超えない限り、新型水着の抵抗値が従来型のそれを超えることはない。現在、最も高速で競われる男子自由形50mにおける世界記録が20秒94(スタートを含む平均泳速が $2.39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$:2009年8月現在)であることを考慮すると、実際に泳ぐことが可能な泳速範囲における抵抗値は新型水着の方が低く、その着用は有利に作用すると思われる。

2. 最大推進パワーに及ぼす影響

本実験では、下肢のみ覆われる水着を使用したことから、当初の仮説では「泳者がアームストロークのみで発揮し得る最大推進パワーは両条件間に差はなく、新型水着を着用することによって抵抗が軽減される分、高速で泳げるであろう」と考えていた。しかしながら、本実験における最大推進パワーは、両被検者ともに新型水着を着用したときの方が高く、これはより速い泳速度とより大きな推進力(抵抗値)の双方によって達成されていた。実際問題として、下肢のみの水着によってアームストローク時の推進力が大きくなることは考えにくいだが、仮にそうなるのであれば非常に興味深い事象である。しかしながら、この点については、本実験の結果よりそれを支持する根拠は無く、更なる検討が必要である。

3. 本実験の抵抗値の差より推定される記録差

競泳競技の場合、抵抗の軽減がパフォーマンスの向上に有利に作用することはいうまでもない。本実験において観察された新型水着と旧型水着における抵抗値の差は3~6N程度の差でしかなかったが、このわずかな抵抗値の差が、実際の競泳パフォーマンスにどの程度の差を生じるのだろうか。そこで、Toussaint(1994)のシミュレーションモデルを参考に、以下に泳記録の推定を試みた。

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)の関数によって決定される(式1)(この式の詳細については文献))参照)。

$$\dot{E} = P_d / (e_p \cdot e_g) \quad (1)$$

ここで、 P_d は抵抗力(以下 F_d)と速度(以下 v)の積で表されるので、式2のように表せる。

$$P_d = F_d \cdot v \quad (2)$$

また、 F_d は各泳者固有の抵抗係数(以下 A)、速度(以下 v)、および抵抗指数の関数であり、式3のように表せる。

$$F_d = A v^n \quad (3)$$

式3を式2に代入すると

$$P_d = F_d \cdot v = A v^n \cdot v = A v^{n+1} \quad (4)$$

となり、結果的に式1は式5のように変換できる。

$$\dot{E} = Av^n + 1 / (ep \cdot eg) \quad (5)$$

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5はさらに次のように変換できる。

$$\dot{E} = Ad^{n+1} / (ep \cdot eg) t^{n+1} \quad (6)$$

この式6を積分すると、ある距離(d)をある時間(t)で泳ぐために必要な全エネルギー消費量(以下 E)を算出できる式となる。

$$E = Ad^{n+1} / (ep \cdot eg) t^n \quad (7)$$

式7の右辺、すなわち任意の距離を任意の時間を要して泳ぐために必要な全エネルギー消費量については、本実験で得られた各被検者の A 、 n を直接利用し、さらに eg 、 ep については本学水泳部選手より得られた選手の代表値、9%および60%(黄ら 2008)を代入することによって推定算出できる。

そこで、両水着を着用したときの400m泳記録の推定を試みた。400m泳はほぼ4~5分を要する競技種目であることから、このときのエネルギー需要量を $100\% \dot{V}O_{2max}$ と仮定した(Ogita 2006; 荻田ら 1998)。ちなみに、被検者Aの最大酸素摂取量は $4.45 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ であったので、 $100\% \dot{V}O_{2max}$ 強度で泳ぎ続けたときの総エネルギー供給量の経時的变化は、図5の黒線で表したグラフとなる。また、従来型と新型水着を着用し、400mを任意の時間で泳ぐために必要なエネルギー量を式7 より算出して表すと、赤線(従来型)と青線(新型)のグラフのようになる。理論上、その被検者が任意の時間で供給し得るエネルギー供給量と、任意の距離を任意の時間を要して泳ぐために必要なエネルギー量の両グラフの交点がベスト記録と考えられる(ただし、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)。

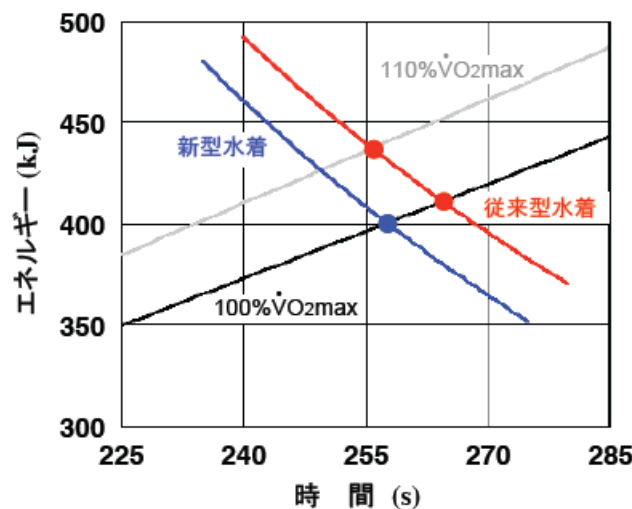


図5. 被検者Aが $100\% \dot{V}O_{2max}$ 強度で泳ぎ続けたときの総エネルギー供給量の経時的变化(黒線)、最大酸素摂取量が10%増加した場合($110\% \dot{V}O_{2max}$)のエネルギー供給量の経時的变化(グレイの線)、および従来型水着(赤線)、新型水着(青線)を着用して400mを任意のタイムで泳いだときに必要とされるエネルギー量。エネルギー量は、酸素を1リットル消費したときの熱量を5kcalと仮定し、さらに1kcal=4.19kJとして換算した。

このようにして算出された400m泳記録は、被検者A において従来型:4分24秒6、新型:4分17秒7、被検者Bにおいて従来型:4分43秒7、新型:4分31秒9となり、新型水着着用により7秒から12秒程度短縮できることが推定された(表4)。もちろん、この推定記録は推進効率や機械的効率(ただし、機械的効率は性差や技術差がほとんど反映せず、ほぼ一定の値であるToussaint et al. 1990))、およびレースにおける運動強度(エネルギー需要量)などの仮定があるため誤差を含んではいるものの、新型水着出現後、飛躍的に記録が向上したことに対する科学的根拠の1つといえよう。

表4. 従来型水着と新型水着を着用したときに得られる抵抗指数を用いて現在の最大酸素摂取量、および最大酸素摂取量が10%増加した場合に推測された400m泳記録の比較

	従来型水着 (分' 秒")	新型水着 (分' 秒")	記録差 (秒")	110%最大酸素摂取量 (分' 秒")
被検者A	4'24"6	4'17"7	6"9	4'15"9
被検者B	4'43"7	4'31"9	11"8	4'34"8

本実験後にも、S 社以外でポリウレタン製、あるいはナイロン製などの新型水着が開発されており、イタリア(ローマ)で開催された世界選手権では、オリンピック翌年にもかかわらず43もの世界記録が更新された。そこで、参考までに新型水着が開発されていない2007 年の世界選手権(メルボルン)、本実験で使用された新型水着が主流を占めた2008年の北京オリンピック、そして様々なメーカーの新型水着が用いられた2009年の世界選手権(ローマ)における男女200m、400m自由形の決勝記録の平均値を表5に表した。男女ともに、2007年から2009年までの間に200mで約2秒、400m で約3秒の記録の短縮が観察されている。本実験の被検者から予測された記録短縮から考えると小さな伸びではあるが、世界の一流選手全体の平均値が、2年間のうちに数秒単位で短縮することは考えにくい事実である。更には、個人的に着目してみると2009年の世界選手権、女子400m自由形で世界記録(3 分59 秒15)を更新したフェデリカ・ペレグリニ選手は、2007年の世界選手権(5位)のときの記録(4分05秒79)を約7 秒のばしている。また、同様に2009年の世界選手権、男子200m自由形であるマイケル・フェルプス選手を破り、世界記録を更新したパウル・ビーダーマン選手は、200mであるにも関わらず、2 年間で約6 秒(1分48秒09から1分42秒00)も記録を短縮している。これらの結果から見ても、本実験の結果が示す記録向上の妥当性は低くないことがうかがい知れる。もちろん、これらの記録の短縮の陰には選手の努力、科学的トレーニング法などのサポートもあることは否定できないが、本実験の結果と併せて鑑みると、水着の選択がコンマ数秒差で競われるレース成績に少なからず影響し得ることを強く示唆している。

表5. 2007年から2009年にかけて開催された世界選手権、オリンピックにおける男女200m、400m自由形決勝における全選手の平均記録

	男子		女子	
	200m (分'秒")	400m (分'秒")	200m (分'秒")	400m (分'秒")
世界選手権(2007)	1'46"99	3'46"43	1'57"78	4'05"69
オリンピック(2008)	1'45"81	3'43"71	1'56"35	4'04"89
世界選手権(2009)	1'44"73	3'43"73	1'55"80	4'02"74

4. トレーニングに対する示唆

このような水着の違いによって生じる泳記録の差は、トレーニングによる体力向上によって簡単に埋められるのであろうか。そこで、先述したToussaint(1994)のシミュレーションモデルを用い、各被検者の最大酸素摂取量が10%増加したと仮定した場合の従来型水着着用時の泳記録について、推定してみた(図5、グレイ色の線と赤線の交点)。

その結果、被検者Aでは4分15秒9、被検者Bでは4分34秒8となり、現在の体力で泳いだときより約9秒の記録短縮が予測された(表4)。したがって、被検者Aでは、従来の水着着用でも、最大酸素摂取量を10%向上させることによって新型水着の推定記録を上回ることが予測されたが、被検者Bにおいてはそれでも尚、新型水着の推定記録を上回ることができていない。日々高度に鍛錬されている両被検者にとって、10%も最大酸素摂取量を向上させるということは非常に困難であるとともに、さらに被検者Aについては、すでに最大酸素摂取量が体重あたり $74\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ もあることから、実現可能な数値とは考えにくい。以上のことから、水着の素材の違いによって生じる泳記録の差は、通常のトレーニングで容易に埋められる差とは言い難く、ドーピングに匹敵するような効果といえるかもしれない。よって、平成21年7月、国際水泳連盟のルール改正により、水着に関する規制を強化し、審査が厳しくなったことは、より平等な条件下で、真に泳パフォーマンスを競うための正しい判断と思われる。

また、本実験の結果、異なる素材で作られた水着によって生じた抵抗の違いは、3~6N程度にすぎなかった。しかしながら、このわずかな抵抗の違いは、最大酸素摂取量が10%増加してやっとその差を埋められるか、あるいはそれでも尚、記録を超えられない程の大きな効果を生み出す。換言すると、抵抗の軽減、あるいは推進効率の向上といった泳技術の改善は、体力の向上と同様、あるいはそれ以上の記録の向上をもたらすことを示唆するものである。シミュレーションではあるが、有酸素性、無酸素性エネルギー供給能力が10%向上した場合と、推進効率が10%高まったときの泳記録の向上を比較した研究では、推進効率を向上させたときにもっとも泳記録が向上することも示されている(荻田ら 1998; Toussaint and Hollander 1994)。どのようなストローク技術の変化が抵抗の軽減、推進効率の向上に結びつくのか、あるいはどのような練習方法が効果的であるかは今後検討しなければならない課題ではあるが、本実験の結果は、少なくとも日々の練習において泳技術を向

上させることの重要性を示す結果ともいえよう。

5. 課題と問題点

本実験における抵抗は、アームストロークのみで泳いだときに測定された。しかしながら、実際のレースはキックを用いた全身泳で行われることから、この結果が直接当てはまるかどうかまでは言及できない。また、仮に水着を着用した下肢部分の摩擦抵抗が小さくなっているとしたら、キック動作によって水を押し出しながら発生される推進力は小さくなることも考えられる。これらの点については、今後検討の余地が残されている。

また、今回は2人の被検者ともに新型水着において小さな抵抗が観察されたが、新型水着着用した選手全てにおいてベスト記録が更新されているわけでもない。このことは、新型水着がフィットする選手とそうでない選手がいることを示唆するものである。現在のところ、新型水着の中でも水着のカットや面積(下肢のみか、全身か)が異なったものに対する抵抗の差異については、全く検討されていない。水着の面積がさらに大きくなった場合、理論的には抵抗軽減はより大きくなることが考えられるが、締め付けがきついため、微妙な上半身のストロークメカニクスへの影響も考えられる。そのため、水着のカットも影響する可能性があり、それらが記録にどのように反映するかについては興味深い点である(ただし、先述したように水着に関するルール改正により、男性は上半身を覆う水着の着用が禁止となり、下肢についても男女ともに膝上までの水着着用が義務づけられることとなった)。

2009年に入って多くのメーカーが様々な水着に加工を施し、新製品を開発した。しかしながら、それらの多くの製品が採用した表面加工は、その後のルール改正にともない使用できない。したがって、従来型のような水着に一旦帰着するか、あるいはルールの範囲内でさらなる新たな加工技術が考案されることが考えられるが、それらと2008年までに採用された水着との差異を検討し、記録を更新させるためには何がどれだけ必要となるか検討することが、今後当面の課題といえよう。

IV. まとめ

本実験は、本研究室で開発したMAD システムを用い、S社製の新型水着と、従来型の水着を着用した際の抵抗力、最大推進パワーなどの力学的指標を定量・比較するとともに、それらの違いがどの程度競泳パフォーマンスに差を生じさせ得るのか推定を試みた。

その結果、

- 1) 各被検者より得られた泳速抵抗関係より推定された抵抗値は、新型水着着用時の方が、従来型水着着用時のそれより3~6 N(5~12%)低い値となった。
- 2) 最大推進パワーについては、新型水着を着用したときの方が10~20W(7~15%)高い値となった。
- 3) 本実験のデータを基に400m 泳記録を推定したところ、新型水着着用時の方が7 秒から12 秒程、記録が向上する可能性が示唆された。

本実験で得られた結果は下肢のみを覆う水着より得られたものであり、全身を覆う水着については明らかでないが、少なくともポリウレタン素材が水着表面に接着された新型水着は、従来型の水着着用時よりも抵抗値の軽減に貢献し、それによって記録を向上させ得ることが示唆された。

参考文献

1. Alley, M.J. An analysis of water resistance and propulsion in swimming the crawl stroke. *Research Quart.* 23 : 253-270, 1952.
2. Benjanuvatra, N., Dawson, G., Blanksby, B.A., Elliott B.C. Comparison of buoyancy, passive and net active drag forces between fastskin and standard swimsuits. *J.Sci.Med.Sports*, 5 : 115-123, 2002.
3. Chatard, J.-C., B.Wilson. Effect of Fastskin suits on performance, drag, and energy cost of swimming. *Med.Sci.Sports Exerc.*, 40 : 1149-1154, 2008.
4. 黄忠, 田中孝夫, 荻田太. 一流選手競泳選手における推進効率の定量化. 日本水泳・水中運動学会2008年次大会論文集 : 70-73, 2008.
5. Miller, D.I. biomechanics of swimming. In Wilmore & Keogh (Eds), *Exercise and Sports Sciences Reviews*, pp.219-248, Academic Press, New York, 1975.
6. Mollendorf, J.C., A.C.Termin II, E.Oppenheim, D.R.Pendergast. Effect of swim suit design on passive drag. *Med.Sci.Sports Exerc.*, 36 : 1029 -1035, 2004.
7. Ogita, F. Energetics in competitive swimming and application for training. *Biomechanics and Medicine in Swimming X*, eds., J.P.Vilas-Boas, F.Alves, A.Marques, Porto ; Portuguese journal of sport sciences 6, Suppl.2: 117-121, 2006.
8. Ogita, F., T.Tanaka, H.Tamaki, A.Wagatsuma, T.Hamaoka, H.M.Toussaint. Metabolic and mechanical characteristics of olympic female gold medalist. *Biomechanics and Medicine in Swimming X*, eds., J.P.Vilas-Boas, F.Alves, A.Marques, Porto ; Portuguese journal of sport sciences 6, Suppl.2: 194-197, 2006.
9. 荻田太, 田卷弘之, 前田明, 我妻玲. 競泳パフォーマンスの限定要因に関する検討 -MADシステムを用いた力学的・代謝的解析より-, *デサントスポーツ科学* 25 :122-130, 2004.
10. 荻田太, 小野寺丈晴, 若吉浩二. 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, 1998.
11. 荻田太, 田中孝夫, 田口信教. 競泳用水着の材質, サイズ, カットの違いが水泳中のエネルギー消費量に与える影響, *デサントスポーツ科学* 17 : 101-112, 1996.
12. Roberts, B.S., K.S Kamel, C.E.Hedrick, S.P.Mclean, R.L.Sharp. Effect of a Fastskin™ suit on submaximal freestyle swimming. *Med.Sci.Sports Exerc.*, 35 : 519-524, 2003
13. Toussaint, H.M., M.Truijens, M.-J. Elzinga, A.van de Ven, H.de Best, B.Snabel, G.de Groot. Effect of a Fast-skin™ 'body' suit on drag during front crawl swimming. *Sports*

Biomech.1:1-10, 2002.

14. Toussaint,H.M., A.P.Hollander : Energtics of competitive swimming, Implications for traininig programmes. Sports Med.18 : 384-405, 1994.
15. Toussaint,H.M., W.Knops, G.de Groot, A.P.Hollander. The mechanical efficiency of front crawl swimming. Med.Sci.Sports Exerc. 22 : 402-408, 1990.
16. Toussaint,H.M., L.Bruinink, R.Coster, M.de Looze, B.van Rossem, R.van Veenen, G.de Groot. Effects of a triathlon wet suit on drag during swimming. Med.Sci.Sports Exerc. 21 : 325-328, 1989.
17. Toussaint,H.M., G.de Groot, H.H.C.M.Savelberg, K.Vervoorn, A.P.Hollander, G.J.van Ingen Schenau : Active drag related to velocity in male and female swimmers. J.Biomech. 21 : 435-438, 1988.