

# 抵抗を制する者、勝負を制す

高木 英樹(Hideki Takagi)

筑波大学体育科学系

## 1. はじめに

近年、日本人スイマーも着実に力を付けてきてはいるが、世界のトップスイマーとの差は、まだまだ歴然としている。ではその差はどこから生じるかと言えば、まずは体格差に起因する発揮パワーの違いが目向けられる。しかしパワーの違いばかりに目を奪われていては、日本人スイマーが世界との差を縮める活路を見いだすことは難しい。なぜなら日本人スイマーがどんなに筋力強化に努めたとしても、結果的にパワーで欧米の選手を凌駕することは大変困難であり、パワーアップとは別の方策が必要と言える。

そのヒントがイアン・ソープの泳ぎに隠されているかも知れない。イアン・ソープはその足の大きさやストローク長の長さが注目されるが、彼は泳ぎの局面だけでなく、スタートやターン局面においても高い技術を持ち、世界トップクラスのタイムを誇る<sup>28)</sup>。ではなぜストローク長が長く、スタートやターンがうまいかと言えば、イアン・ソープは、抵抗の節減能力に優れているのではないかと考えられる。つまり彼は、最も抵抗の少ない姿勢やストローク動作を体得しており、それ故にひとかきで2.8m以上も推進し、スタートやターンの時も水の壁をすりと抜けられるのではないだろうか？

これまでどちらかと言えば、トレーニング現場では、最大パワー発揮や持久力にばかり注目されてきたが、それを記録につなげるためには、機械的効率を高めて入力パワーに対する出力パワーをアップさせる必要がある。特に抵抗を削減するための取り組みは必須であり、それをしなければ、発揮するパワーが向上した割には、泳速度が思うように向上しないということも考えられる。よって抵抗を制する選手が、結果的に勝負を制することになると思われる。そこで本稿では、抵抗を削減するための具体的な取り組みに関して言及したい。

## 2. 泳者に作用する抵抗

水泳中の泳者に作用する抵抗にはいくつかの種類があるが、主な抵抗として、圧力抵抗、造波抵抗、摩擦抵抗などが上げられる。特に、レーススピードに相当するような速度では、圧力抵抗が大きな割合を占める。この圧力抵抗は、水中を進む泳者の前縁部と後縁部の圧力差によって生じる。理想的な流線型をした物体であれば、流れは物体から剥離することなく前縁から後縁へと移動するため大きな圧力差は生じない。しかし人体のように複雑な形状をしていると、水平姿勢をとったとしても後頭部や臀部の下流で流れが剥離し、負圧部分が生じる。さらに下肢が沈んで進行方向に対する迎角が大きくなると、背部での流れの剥離が顕著となり、圧力抵抗の増大につながる。

次に造波抵抗は、泳者が水と空気の境界面付近を移動するとき生じる波によって起こる。泳者が水に対して力を作用させて波が生じると、その反作用として泳者を押し戻す方向に力が作用し、それが抵抗となる。造波抵抗は、圧力抵抗と並んで全抵抗に占める割合が大きい。トップ

スイマーの泳ぐ環境をフルード数( $Fr$ )<sup>注1</sup>で表すと、0.45程度となり、一般的な船型では首飾り渦が生じ、造波抵抗係数が非常に大きくなる<sup>30)</sup>。

最後に摩擦抵抗は、圧力抵抗や造波抵抗に比べると全抵抗に及ぼす影響はやや小さいと考えられる。摩擦抵抗は、水に接している泳者表面における剪断力の反主流方向成分を濡れ面全体にわたって積分したもので、流れの速度や乱れの程度、表面の粗さによって変化する。レーススピードで泳ぐトップスイマーのレイノルズ数( $Re$ )<sup>注2</sup>は $3.5 \times 10^6$ 程度であるので、境界層では層流から乱流への遷移が起こって、摩擦抵抗係数が大きく増加する局面に当たる<sup>30)</sup>。

このように人間は泳ぐのに適しているとは言い難い。よって少しでも速く楽に泳ぎたいとの思いから、水泳中の抵抗に関する研究は、既に1900年の初頭から行われている。報告されている最も古い泳者の抵抗に関する研究は、1905年にDuBois-Reymond<sup>7)</sup>によって湖で行われた実験で、人間をボートで牽引しながら張力計で抵抗を測定した。その実験では、泳者は通常の泳ぐ姿勢とは異なり、けの

び姿勢（うつ伏せで両腕を上げた状態）で牽引された。  
この様な静的な状態で測定された抵抗を受動抵抗と呼ぶ。  
DuBois-Reymond以後、多くの研究者によって受動抵抗  
が測定され、身体特性や泳記録との関係が検討されてき  
た<sup>4, 5, 8, 12, 13, 19, 26, 31</sup>。しかし、この受動抵抗は、泳者が  
自己推進している場合の動的な抵抗（以下、自己推進時  
抵抗： $Da$ という）とは異なる。もし、泳記録に対する抵  
抗の影響を議論するならば、四肢を駆動させて推進して  
いるときの  $Da$ を測定する必要がある。しかし、 $Da$ を正  
確に測定することは大変困難である。なぜなら、 $Da$ を正  
確に測定するには、泳者の泳ぎを妨げることなく、泳者  
回りの全摩擦抵抗分布と圧力分布を計測しなければならないが、それはほぼ不可能と言える。よって今日まで $Da$   
の定量方法は確立されておらず、流体力学的には十分に  
は検討されてこなかった。

注1)  
$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gl}}$$
（ $U$ は流速、 $g$ は重力加速度、 $l$ は基準長さ）

注2)  
$$Re = \frac{Ul}{\nu}$$
（ $U$ は流速、 $l$ は基準長さ、 $\nu$ は動粘性係数）

### 3. 自己推進時抵抗の測定

何人かの研究者が25年ほど前から $Da$ の測定を試みている。  
Holmer<sup>8)</sup>、Clarys<sup>6)</sup>、Toussaint<sup>34,35)</sup>、Kolmogorov<sup>10)</sup>  
あるいは、Zamparo<sup>36)</sup>は、それぞれ独自の測定方法を開  
発して、 $Da$ の定量に取り組んできた。しかしいずれの研  
究も抵抗値や速度を測定された物理量そのまま記録し  
ているので、被験者や実験条件が異なる各々の研究間で  
 $Da$ の比較を行うことができない。そこで、泳者の体格や  
水温の違いによる動粘度の影響を除いた無次元値である  
抵抗係数を用いて $Da$ の比較検討を試みた。ここで、一般  
的に抵抗係数を算出する際には、次式(1)に示すように物  
体の主流方向に対する断面積を用いて計算するが、泳者  
の場合には常に断面積が変化するので断面積を特定でき  
ない。

$$D = \frac{1}{2} \rho S C_D U^2 \quad (1)$$

（ $\rho$ は流体の密度、 $S$ は断面積、 $C_D$ は抵抗係数、 $U$ は流速）  
そこで身長と体重から体表面積（ $S_B$ ）<sup>注3</sup>を推定し、その  
面積を用いて無次元化を行った。さらに流速も身長を基  
準長さとしてフルード数に変換した。以上のような手順  
で無次元化した以前の研究結果に我々の最近の実験デー

タ<sup>24, 25, 27)</sup>を加えて得られた自己推進時抵抗係数（ $C_{Da}$ ）  
とフルード数との関係を図1に示す。図1より $C_{Da}$ の値は、  
かなりばらつきを見せたが、全体的に見ればフルード数（泳  
ぐ速さ）の増加に伴って、 $C_{Da}$ は減少する傾向にあった。  
一般的に、抵抗は速度の2乗に比例すると考えられ、その  
場合には、抵抗係数は速度に関係なく一定の値を示すは  
ずである。実際に受動抵抗を $Da$ と同様の手順で係数化し  
た場合、受動抵抗係数は、図2に示すように0.03程度で  
ほぼ一定の値を示した。しかし $C_{Da}$ の場合には泳ぐ速さ  
の増加に伴って減少していた。その原因としては、泳ぐ  
速さの上昇に伴って泳者の身体が浮き上がり、濡れ面積  
が減少したためではないかと考えられる。身体が水中翼  
船のように浮き上がることで抵抗が減る現象は、  
Toussaintら<sup>33)</sup>が泳者にウェットスーツを着せて泳がせ  
たときの実験においても確認されている。Toussaintらに  
よるとウェットスーツを着用することで浮力が増し、15  
%の抵抗減少が見られたとしている。現行のルールでは、  
水着自体の浮力に制限があるため、ウェットスーツを着  
用して競技に出場することは禁じられているが、それに  
代わる方法で $Da$ を削減する方法を考えなければならない。  
その方法としては、次のような方策が考えられる。

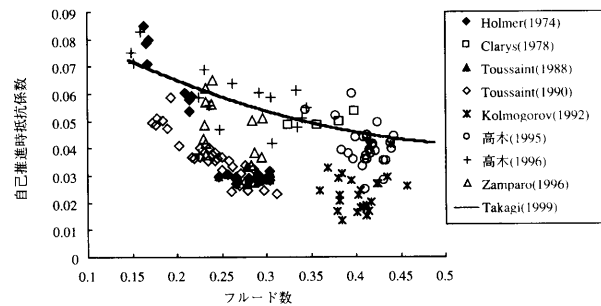


図1 フルード数の変化に伴う人体の自己推進時抵抗係数の変化

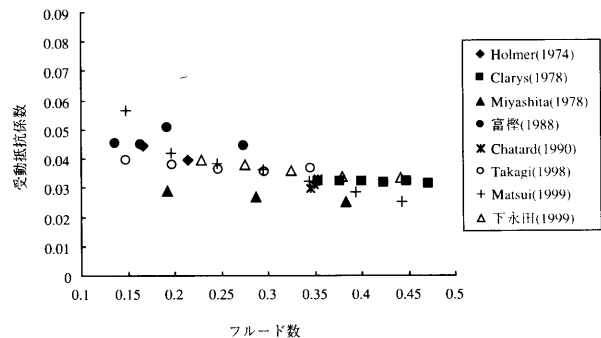


図2 フルード数の変化に伴う人体の受動抵抗係数の変化

注3)

$$S_B = 0.007246 (100 H)^{0.725} W^{0.425}, \quad (H \text{は身長}, W \text{は体重})$$

#### 4. 姿勢制御による圧力抵抗の削減

人体各部位の比重は脂肪を除いて1.0を上回り、成人の場合には平均身体比重は1.0を越える。よって本来であれば、重力が浮力を上回り身体は沈むはずであるが、人体には浮き袋の役目をする肺があるため、最大吸入期には浮力が若干重力を上回り、余剰浮力が生じる。青年男子水泳選手を対象とした研究<sup>3)</sup>によれば、余剰浮力は、1.7kg～3.0kg程度とされている。しかし浮力の中心と重心にはずれが生じるため、通常の浮き身姿勢をとった場合には、下肢が沈む方向へモーメントが働くことになる。下肢が沈むと、前方からの見かけの断面積が増加し、圧力抵抗の増大につながる。よって泳者は下肢が沈まないように適切なキック動作を行うことで、できる限り水平姿勢を保つよう心がける必要がある。実際に水中での姿勢を変えることで抵抗を低減させようとする試みとして、Zamparo<sup>36)</sup>は、腰回りにチューブを巻き、そのなかを密度の異なる物質で満たして泳者の姿勢を変化させて、水中でのモーメントと $Da$ および代謝効率との関係を考察している。その結果、チューブ内を空気で満たし、モーメントを小さくすると、代謝量は約9%、 $Da$ は約16%減少するとの結果を得た。

さらに、身体回りの流れを自らの動きでコントロールすることができれば、抵抗削減できる可能性がある。圧力抵抗は、身体表面における流れの剥離領域が増大するほど、低下部分が增大し、抵抗増加につながる。田古里<sup>23)</sup>によれば、できる限り身体を水平に保って死水を生じさせないようにし、身体全体に適当な波動運動を起こして剥離を防ぐことが有効であると指摘している。実際に $Da$ が最も大きいと考えられる平泳ぎにおいては、多くのトップスイマーが、ウェーブストロークと呼ばれる波打つような動作を用いている。

#### 5. 潜行による造波抵抗の削減

一般的に物体の水深と抵抗との間には図3に示すような関係があり、水泳競技のように水面付近を物体が移動する時、最も造波によるエネルギー損失が大きくなる<sup>29)</sup>。それゆえ、造波抵抗を削減する最も簡単な方法は、水面下へ潜ることである。実際に鈴木大地選手は背泳においてスタートから30m程潜るバサロ泳法で金メダルを取ったことをご存じの方も多いと思う。しかし現在は国際水泳連盟の競技規則によって15m以上潜ることは禁止されている。しかしながら、現行の競技規則下にあっても造波

抵抗を削減するための取り組みは大変重要と考えられる。ではどの程度の深さまで潜ればよいのであろうか？そこで清水ら<sup>17)</sup>がおこなった人体模型を使って、水槽中を曳航した場合の深度と抵抗との関係を調べた結果を図4に示す。図中に示された水深とは、水面から模型の肩の中心までを表している。図4より、0.5m/sから1.6m/sの比較的遅い速度においては、身体全体が浸水している0.45mより水面近傍である0.01mの方が小さな抵抗係数を示す。しかし、1.6m/sから2.0m/sまでの高速域では両者の値は逆転し、水面近くの抵抗係数が0.45mの抵抗係数よりも大きくなった。

同様の結果はLyttleら<sup>11)</sup>によっても報告されている。Lyttleらは、実際の泳者を使って水深を変えながら牽引したときの受動抵抗を計測しており、1.9m/s以上の高速で水面近傍を牽引した場合の抵抗は、水中を牽引したとき

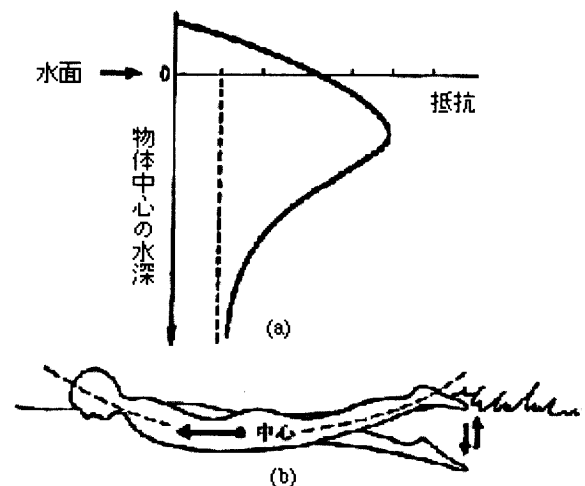


図3 物体の水深と抵抗との関係 (高木、1983)

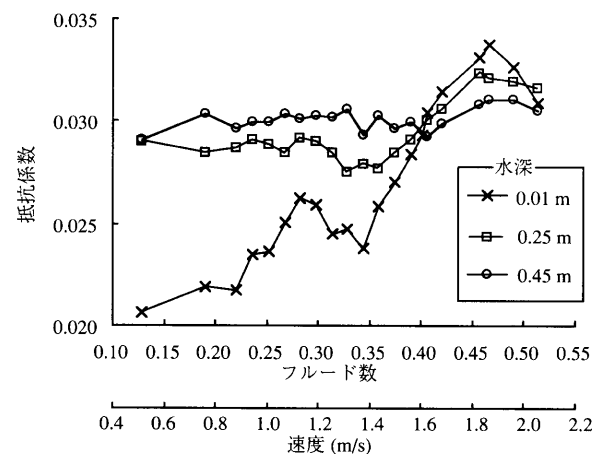


図4 泳者が発生させる造波抵抗に対する水深と速度の影響 (清水ら、1997)

の抵抗より15~18%大きかったと報告している。一方Jiskoot<sup>9)</sup>らの報告によれば、1.9m/s以下の速度で泳者を牽引した場合には、Lyttleらとは反対に、水面近傍での抵抗値が水中での抵抗値を20%下回っていたという。これらの結果を総合すると、比較的低速域では、潜ることによって造波抵抗を削減する効果はあまり望めず、1.9m/s(男子100m自由型世界記録の平均泳速度に相当)を超えるような高速域でないと削減効果が見込めないとと言える。つまり通常の泳ぐ局面より速い速度に達する飛び込みやターン局面で潜った方が効果的と考えられる。

Blanksby<sup>2)</sup>の報告によれば、トップスイマーは、ターン局面において壁をけた直後の初速が2.5m/sに達するので、水中を潜行する方が有利としている。しかしここで考慮すべきは、潜行する際、最適な水深が存在することである。つまり浅すぎれば波が立ってしまうし、かといって深く潜りすぎると再び水面上に浮上してくるまでに時間がかかり、結果としてタイムをロスしてしまうのである。よって0.35m~0.45mの水深が最適としている。

## 6. ハイテク水着による摩擦抵抗の削減

摩擦抵抗の影響は、他の抵抗に比べると小さい。しかし1/100秒を争うようなシビアな競技場面では摩擦抵抗の大小が勝負を左右することもある。そこで少しでも摩擦抵抗を減らそうと水着の抵抗に関する研究<sup>14,18,20,21,22,32)</sup>が行われ、今日のハイテク水着の開発へと発展してきた。田古里<sup>21, 22)</sup>の報告によると、女子のレジャー用の水着と競泳用の水着を比較した場合には、流速1.5m/sの条件下でレジャー用の水着が競泳用より約30%も抵抗が大きいとしている。また水着の抵抗を減らす工夫として田古里<sup>23)</sup>は、(1)水をすくい込まない、(2)内部に水が溜まらない、(3)体型を緊縮させる、(4)突起がない、(5)段差や食い込みがない、(6)筋肉や皮下脂肪がはみ出さない、(7)表面がなめらかであるなどをあげ、これらの改良により約6%抵抗が改善されたと報告している。富樫<sup>32)</sup>は、人体模型を用いた実験で模型表面にポリエチレンオキサイドを塗布することにより、約16%の抵抗減少を達成し、水着への塗布によっても約6%の抵抗減少効果を得た。しかしその効果は、2~4分しかもたず現在の競泳規則では違反行為とされるため実用化は困難としている。Starling<sup>20)</sup>は、首まで上半身を覆うタイプの水着を男子に着用させて泳がせたところ、通常の水着を着た場合より、酸素需要量は4%低下し、血中乳酸濃度は16%低下したと報告している。

荻田<sup>14)</sup>は、平板に材質、カット、サイズの異なる水着を張り付け、抵抗測定を実施した。さらに実際に水着を女子競泳選手に着用させ、50mの記録と酸素摂取量を測定し、水着の影響を比較した。その結果、水着の材質による影響はさほど大きくないが、カットを工夫し、体型にフィットした水着を着用することにより、記録を向上させることが可能としている。さらに高性能の低抵抗水着の抵抗測定を行った清水<sup>17, 18)</sup>の報告によると、細い糸で織りの細かい薄い布製(ポリウレタン・ポリエステル製)女性用競泳用着に縦縞状に一定間隔(例えば8mm)で撥水加工を施すことにより抵抗を減少させることが可能であるとしている。

さらにシドニーオリンピック後は、多くのスイマーが図5に示すような見慣れない水着を着ていた。この水着は、スイマーの全身を包み込み、体にぴったりフィットするようにデザインされている。この水着の特徴は、その生地とカッティングにある。水着に用いられた生地の表面には鮫の肌を模倣した細かな縦溝が施してある(図5上参照)。この縦溝による効果は、リブレット効果と呼ばれ、溝に沿って縦渦が生じることによって境界層を制御し、摩擦抵抗を低下させるものである。このような境界層を制御することによって摩擦抵抗を減らそうとする試みは、10年以上前から既に行われていたが、着心地が悪いなど、実際の使用に耐えうる製品を作るのは困難であった。しかし技術の進歩により、軽く伸縮性に富みながら表面に微細な加工を施せる技術が新しい生地を誕生させた。さらにこの水着は、スイマーの動きを妨げることなく、体全体を覆うために3次元的なカッティングを採用している。この3次元的なカッティングにより違和感なく身体全体を緊縮させ、泳運動中の体表面における振動を抑える効果

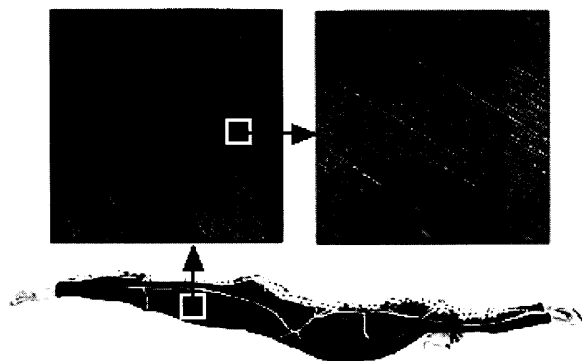


図5 リブレット効果を狙ったハイテク水着 (SPEEDO FastSkin, <http://www.speedo.de/> および (株) ミズノより)

もあるという。実際の効果について検討した、Benjanuvatra ら<sup>1)</sup>の報告によれば、けのび状態あるいはキックのみの場合には、通常の水着と比べて4.8%~10.2%の抵抗削減効果があるとしている。

しかしこれはあくまでも受動抵抗における効果であり、自己推進時抵抗も同様に削減できるかどうかについては、Sandersら<sup>15)</sup>の報告によればやや疑問がのこり、今後さらに詳細な検討を加える必要を唱えている。

最後に水着ではなく、体毛を剃ることによる抵抗の変化についてSharp<sup>16)</sup>が報告している。それによれば、男子競泳選手が全身の体毛をすべて剃って泳いだ場合、抵抗の減少により、生体への負担度が減少し、剃毛の前後で心拍数および血中乳酸濃度などが有意に低下し、ストローク長も伸びたとする結果が得られており、剃毛の効果が裏付けられている。

## 7. まとめ

本稿では、抵抗発生のメカニズムに言及したが、抵抗を削減するために、スイマーはありとあらゆる努力を惜しまないであろう。世界のトップクラスともなると、いずれの選手も優れた体格を持ち、筋力や持久力に大差はなく、推進技術や抵抗の僅かな差が勝敗を決するのである。幸いと言うべきか、水中では陸上と比較すると抵抗が大変大きい。と言うことは、陸上競技等では少々姿勢やフォームが悪くても大きなパワーを出せる欧米選手の方が有利であるが、水中では、姿勢やフォームが悪いと推進以外に使われるパワーロスが大変大きいため、パワーでは劣る日本人選手でも抵抗削減技術で優位に立てる可能性がある。ここでは、抵抗を削減するためのいくつかのヒントを提示したつもりであるが、これを参考に日本人スイマーが世界の檜舞台で活躍できることを心から祈ってやまない。

### 【参考文献】

- 1) Benjanuvatra, N., Dawson, G., Blanksby, B. and Elliott, B. (2001) Comparison of bouyancy, active darg and passive drag with full length and standards swimsuit. Blackwell, J. R. and Sanders, R. H. (Eds.) Proceedings of Swim sessions, XIX International Symposium on Biomechanics in Sports. University of San Francisco : San Francisco, pp.105-108.
- 2) Blanksby, B. (1999) Gaining on Turns. ISBS Coaches Information Service, <http://www.education.ed.ac.uk/swim/papers99/bb.html>.
- 3) Chatard, J. C., Lavoie, J. M. and Lacour, J. R. (1990) Analysis of determinants of swimming economy in front crawl. European Journal of Applied Physiology 61 : 88-92.
- 4) Chatard, J. C., Bourgoin, B. and Lacour, J. R. (1990) Passive drag is still a good evaluator of swimming aptitude. European Journal of Applied Physiology 59 : 399-404.
- 5) Clarys, J. P., Jiskoot, J., Rijken, H. and Brouwer, P. J. (1974) Total resistance in water and its relation to body form. Nelson, R. C. and Morehouse, C. A. (Eds.) Biomechanics IV, University Park Press : Baltimore, pp.187-196.
- 6) Clarys, J. P. (1978) Relationship of human form to passive and active hydrodynamic drag. Asmmussen, E. and Jorgensen, K. (Eds.) Biomchanics VI-B, University Park Press : Bltimore, pp.120-125.
- 7) DuBois-Reymond, R. (1905) Arch. f. Anat. und Physiol. 24 : 252-278.
- 8) Holmer, I. (1974) Propulsive efficiency of breaststroke and freestyle swimming. European Journal of Applied Physiology 33 : 95-103.
- 9) Jiskoot, J. and Clarys, J. P. (1975) Body resistance on and under the water surface. Clarys, J. P. and Lewillie, L. (Eds.) Swimming II. University Park Press : Baltimore, pp.105-109.
- 10) Kolmogorov, S. V. and Duplishcheva, O. A. (1992) Active drag, useful mechanical power output and hydrodynamic force coefficient in different swimming strokes at maximal velocity. Journal of Biomechanics 25(3) : 311-318.
- 11) Lyttle, A., Blanksby, B., Elliot, B. and LLOYD, D. (1999) Optimal depth for streamlined gliding. Keskinen, K. L., Komi, P. V. and Hollander, A. P. (Eds.) Biomechanics and Medicine in Swimming VIII, Gummerus Printing : Jyvaskyla, pp.165-170.
- 12) Matsui, T., Miyachi, M., Miyakawa, T. and Onodera, S. (1999) The effects of specific gravity of water on posture and passive drag during prone floating in the swimming flume. Book of abstracts, International Society of Biomechanics XVII th Congress : Calgary, pp.398.
- 13) Miyashita, M. (1974) Method of calculating mechanical power in swimming the breast stroke. Research Quarterly 45(2) : 128-137.
- 14) 荻田太, 田中孝夫, 田口信教 (1996) 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. デザントスポーツ科学 17 : 101-112.
- 15) Sanders, R., Rushall, B., Toussaint, H., Stager, J. and Takagi, H. (2001) Bodysuit yourself: but first think about it. Journal of Turbulence (Exchange), <http://www.iop.org/Journals/JoT/extra/20>.
- 16) Sharp, R. L. and Costill, D. L. (1989) Influence of body hair removal on physiological responses during breaststroke swimming. Medicine and Science in Sports and Exercise 21(5) : 576-580.
- 17) 清水幸丸, 鈴木利明, 鈴木邦仁, 嘉数昇太郎, 藤田正樹, 松崎健, 森健次郎 (1996) 水着の抵抗測定に関する研究 (第2法 水路による実験). 日本機械学会第73期通常総会講演会講演論文集(III), pp.345-346.
- 18) 清水幸丸, 鈴木利明, 鈴木邦仁, 清川寛 (1997) 競泳用水着の抵抗測定に関する研究 (人体模型および水着の流体抵抗). 日本機械学会論文集 (B編) 63(616) : 3921-3927.
- 19) 下永田修二, 田口正公, 田場昭一郎, 大城敏裕, 浜口麻衣子 (1999) クロール泳におけるActive Drag定量法の検討. 第14回日本バイオメカニクス学会大会編集委員会編 バイオメカニクス研究概論, pp.270-275.
- 20) Starling, R. D., Costil, D. L., Trrape, T. A., Jozsi, A. C., Trappe, S.

- W. and Goodpaster, B. H. (1995) Effect of swimming suit design on the energy demands of swimming. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 27(7) : 1086-1089.
- 21) 田古里哲夫, 荒川忠一, 増永公明, 岡本恒 (1984) 水泳における人体まわりの水流および水着の影響の実験的研究. *デサントスポーツ科学* 5 : 173-184.
- 22) 田古里哲夫, 荒川忠一, 増永公明, 岡本恒 (1985) 水泳における人体姿勢と水着に関する流体力学的研究. *デサントスポーツ科学* 6 : 185-230.
- 23) 田古里哲夫 (1986) 水泳競技の流れ学-スポーツと工学-. 東京大学公開講座スポーツ. 東京大学出版会 : 東京, pp.155-189.
- 24) 高木英樹, 清水幸丸, 前田太佳夫, 野村照夫, 若吉浩二 (1995) Active Drag (自己推進時抵抗) を指標としたトレーニング効果評価法の開発. *デサントスポーツ科学* 16 : 149-159.
- 25) 高木英樹, 清水幸丸, 小段載久, 小野木裕, 草川喜種 (1996) 水泳における自己推進時抵抗定量法の開発. *日本機械学会第74期全国大会講演論文集(III)*, pp.201-202.
- 26) 高木英樹, 野村照夫, 松井敦典, 南隆尚 (1997) 日本人競泳選手の抵抗係数. *体育学研究* 41(6) : 484-491.
- 27) Takagi, H., Shimizu, Y. and Kodan, N. (1999) A Hydrodynamic study of active drag in swimming. *JSME International Journal, Series B* 42(2) : 171-177.
- 28) 高木英樹 (2001) バイオメカニクス的アスリート論「トップの条件」. *ATHRA*, 4 : 102-103.
- 29) 高木隆司 (1983) 水をける. *スポーツの力学* 講談社 : 東京, pp.79-116.
- 30) 種子田定俊 (1978) スポーツと抵抗. *数理科学* 181 : 5-9.
- 31) 富樫泰一, 向井良生, 野村武男 (1988) 児童の人体牽引抵抗に関する研究. *筑波大学体育科学系紀要* 11 : 145-151.
- 32) 富樫泰一, 野村武男, 藤本昌則 (1989) 競泳用水着に関する研究. *デサントスポーツ科学* 10 : 75-82.
- 33) Toussaint, H. M., Bruinink, L., Coster, R., De Looze, M., Van Rossem, B. and De Groot, G. (1989) Effect of a triathlon wet suit on drag during swimming. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 21(3) : 325-328.
- 34) Toussaint, H. M. (1990) Differences in propelling efficiency between competitive and triathlon swimmers. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 22(3) : 409-415.
- 35) Toussaint, H. M., de Groot, G., Savelberg, H. H. C. M., Vervoorn, K., Hollander, A. P. and van Ingen Shenau, G. J. (1988) Active Drag Related to Velocity in Male and Female Swimmers. *Journal of Biomechanics* 21(5) : 433-438.
- 36) Zamparo, P., Capelli, C., Termin, B., Pendergast, D. R. and di-Prampetro, P. E. (1996) Effect of the underwater torque on the energy cost, drag and efficiency of front crawl swimming. *European Journal of Applied Physiology* 73 : 195-201.