

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)

清水 幸丸*¹, 鈴木 利明*²
鈴木 邦仁*², 清川 寛*³

Studies on Fluid Drag Measurement and Fluid Drag Reduction of Woman Athlete Swimming Suit

Yukimaru SHIMIZU, Toshiaki SUZUKI,
Kunihito SUZUKI and Hiroshi KIYOKAYA

Sport science progresses step by step in the world. This work is a challenge to develop the athlete woman swimming suit with low fluid drag. To begin with, the fluid drag of the woman swimming suit is very small. It is very difficult to measure the several percent difference in the fluid drag of the swimming suit. Special experimental apparatus is developed to measure the fluid drag, precisely. It can successfully measure the fluid drag of athlete woman swimming suits at the precision 1~2%. As a result, the cloth with low fluid drag is found. It is worked water repellent into every other stripe on the cloth. The cloth is woven of thin threads (polyester 80% and polyurethane 20%). Also, the relationship between fluid drag for the model body and the water depth from the water surface to the model body is investigated in details.

Key Words: Flow Measurements, Fluid Force, Sport Engineering, Swimmer, Swimming Suit, Free Surface Flow, Hydraulic Jump, Boundary Layer Control, Vortex, Wave

1. 緒 言

今日、スポーツ科学の進歩は著しく、各種運動機能の解明やスポーツ用具、スーツの開発等により記録は向上している。著者らは女子競泳用の水着に着目し、「より抵抗の小さい競泳用水着の開発研究」を行っている。この研究を行う際問題になるのは、(1)競泳時の人体の流体抵抗は、表面摩擦、造波、各種の渦の発生、跳ね水現象等の複雑な流体现象によって生じていること、(2)各種水着のわずかな抵抗差を精度よく測定しなければならないこと、(3)スプリント競技の泳速度 $1.8 \pm \alpha$ [m/s] での泳力は意外と大きな力になり、実験時に大きな駆動装置が必要になること、すなわち、抵抗差が小さく駆動力が大きくなること、等々である。

これまで、上記の問題に関する代表的な研究として、田古里ら⁽¹⁾による回流水槽を用いた人体模型および水着着用時泳者の流体抵抗と人体周囲の流れに関する研究、富樫ら⁽²⁾による水着の抵抗測定研究等がみられ

る。また、関連研究として、泳時の自己推力測定に関する研究がいくつかあるが、本報告では取扱わない。

著者らは、静水路内で、競泳選手をモデルにした人体模型を、可変速モータとワイヤを用いて最大えい航速度 2.02 m/s までえい航できる再現性の高い測定が可能な流体抵抗測定装置を開発した。この測定装置によって各種水着の抵抗差を約±1%の繰返し誤差で測定することが可能になった。

実験に際しては、複雑な流れの影響を明らかにするため、人体模型の没水深を十分に变化させた。さらに、人体模型の迎え角を变化させて、その影響を解明した。また、可視化法を用いて、人体模型周囲流れをある程度解明した。そして、いくつかの興味のある結果を得た。

2. おもな記号

C_d : 抵抗係数 = $D/(1/2\rho U^2 S)$

C_f : 表面摩擦抵抗係数

D : 流体抵抗 N

Fr : フルード数 = U/\sqrt{gL}

g : 重力の加速度 m/s²

Hd : 人体模型の没水深または水深(図2参照)

mm

* 原稿受付 1997年3月26日。

¹ 正員、三重大学工学部(〒514 津市上浜町1515)。

² 学生員、三重大学大学院。

³ (株)ミズノ(〒559 大阪市住之江区南港北1-12-35)。

- L : 人体模型全長(図6参照) mm
- R_a : 抵抗増加率 [式(1)]
- Re : レイノルズ数
- S : 人体模型表面積(ぬれ表面積)(図6参照) m^2
- U : 模型えい航速度 m/s
- α : 模型の迎え角 $^\circ$
- ρ : 水の密度 kg/m^3

3. 実験装置および方法

図1には実験装置の全体図を示す。水槽は長さ11 m, 水深2.5 m, 幅は中央部をすぎた下流で広がっておりそれぞれ1.56 m, 5.06 mである。この水槽上部にレールを設置し、レール上を台車が滑走する。台車はACサーボモータとエンドレスワイヤを用いて加速、定速、減速走行が自由に行えるように設計されている。速度制御は、台車に取付けられた遮光板とレール上のフォトセンサ、P1~P4の信号により、コンピュータで行う。台車の最高速は2.02 m/sで、これは100 m女子競泳選手の世界記録速度より若干速い。人体模型は台車につり下げられている。台車の加速時には人体模型の周りに大きな波が発生し、この波が壁面

で反射することにより発生する反射波が人体模型を振動させる。その結果、測定値が大きく変動し、正確な測定ができない。本実験装置では図1(c)に示すように、水路拡大部に消波装置を設置し、加速および定速走行時に発生する波を吸収低減することにより、反射波を抑え測定精度を向上させた。

図2に人体模型と台車の関係を示す。人体模型をえい航すると、最高速度で約100 N(迎え角 0°)~150 N(迎え角 12°)の力が加わる。台車は大きな力が加わっても振動しないよう1.5 mの長さがある。また、揚力が加わっても台車がレール上から離れないよう十分重くしてある。さらに、えい航中の波の観察を行うため、台車上にビデオカメラを取付けた。人体模型に働く流体抵抗は人体模型の迎え角および没水深によって異なる。本装置では、足に取付けられた2本の帯鋼板の長さを調節することにより、迎え角(図2中 α)を $-6, 0, 6, 8.5, 12^\circ$ に変化させ測定を行った。また、没水深(図2中 H_d :腕上面から水面までの深さ)は水路の深さを変化させることにより10, 55, 155, 255, 355, 455, 555 mmの七とおりに変化させた。没水深 $H_d = 10$ mmでは頭部と背部の一部が水面上に出ている状態となる。

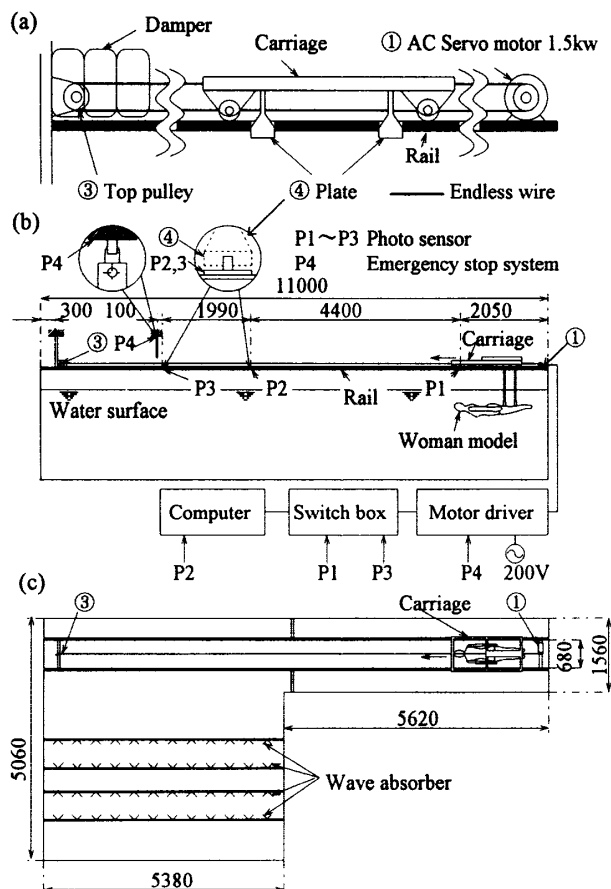


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

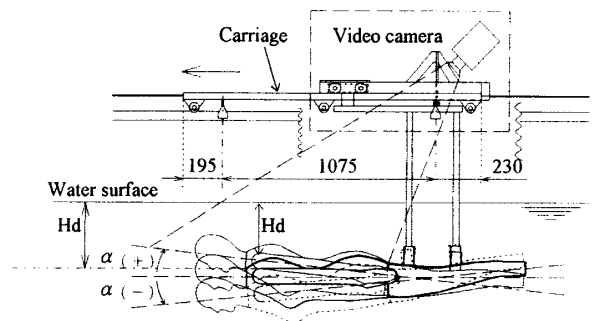


Fig. 2 Details of carriage, the model body and camera. Definitions of attack angle of model body: α , water depth: H_d

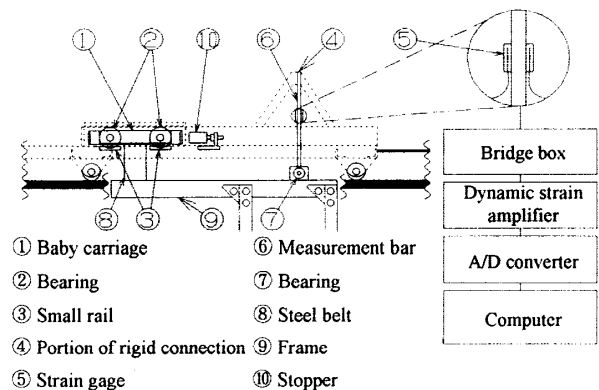


Fig. 3 Details of measurement system of fluid drag

図3に人体模型にかかる流体抵抗の測定方法を示す。図3は図2の破線部分を拡大したものである。人体模型をつり下げている帯鋼板はフレーム⑨にボルトで固定されている。このフレーム⑨は、小形台車①と測定棒⑥によって台車につり下げられている。小形台車①はベアリング②の働きにより摩擦の少ない状態で進行方向にのみ移動が可能となっている。測定棒⑥は上部を台車に取付けた三角形形状フレーム④に固定し、フレーム⑨側はベアリング⑦を介し接続されている。人体模型に流体抵抗が加わると小形台車①が下流方向にのみ滑り、ベアリング⑦が少し回転して、測定棒⑥がたわむ。このたわみを⑤部にはられたひずみゲージで検出する。このとき、①、②や⑦が固定接続されていると系が複雑な振動を起し、測定値がばらつき正確な測定ができない。また、本実験装置では台車の発進加速時に定速走行時よりかなり大きな力が加わり人体模型に振動が発生する。そこでストップ⑩を取付け必要以上の力をキャンセルするよう工夫した。

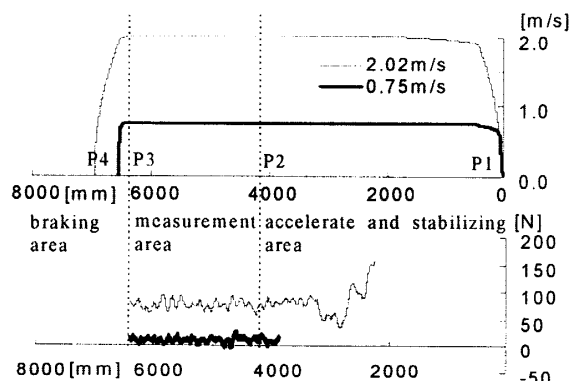


Fig. 4 Relationships among position of carriage, speed and data

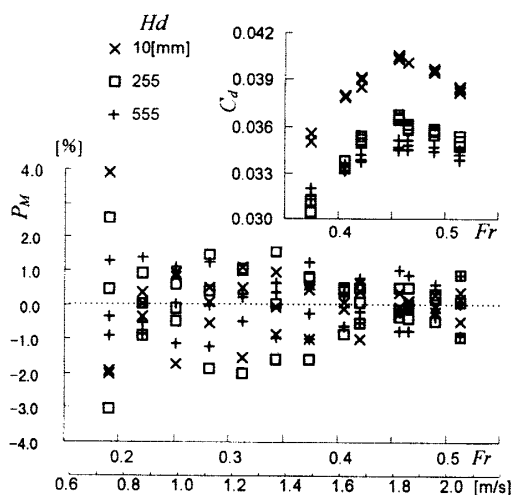


Fig. 5 Measurement precision of fluid drag

図4に台車の位置と速度の関係およびサンプリングデータを示す。細線が $U=2.02$ m/s, 太線が $U=0.75$ m/s の値である。台車スタート位置 P1 から 4.4 m の地点 P2 までを加速, 安定化区間とし, P2 から 6.39 m の地点 P3 まで [図 1(b) P2~P3] を測定区間とした。そして、この測定区間のデータを相加平均して測定値とした。

測定精度の評価：図5では、本実験データの測定精度を検討する。実験においては、同一設定条件で最低3回の測定を行った。図5の右上図には、同一条件で3回行った測定値(同一記号)を記入してある。実験条件は3種類(3種の記号)を示してある。図5の主図には、「(各回の測定値-3回平均値)/(3回平均値)=(平均値からの測定誤差割合(%表示)) = P_M 」を示す。えい航速度が大きい 1.6~2.02 m/s の範囲は、繰返し誤差は $\pm 1\%$ 以内に入る再現性の高い測定が可能であった。なお 1.6 m/s より小さいえい航速度範囲では、流れが遷移流であったり、測定絶対値が相対的に小さいなどの理由により、繰返し誤差は大きくなる。誤差が大きい場合には、さらに3回測定し、最大・最小の二つの値は捨て中間の四つの値を採用し、平均値を求めた。

図6に本実験で用いた女性泳者人体模型の詳細を示す。全長 1580 mm, 胸囲 837 mm, 胴囲 671 mm, 腰囲 923 mm である。模型は FRP 製であるが、水着を着用する胴体部には模型表面にウレタンゴムを張付け弾性をもたせ水着との密着性を高めた。模型内部は空洞で、鉄パイプでフレームが作られており、脚部と胴体部は脱着可能になっている。そして、脚部のフレームから帯鋼板を片足につき2本出し、これによって模型を支えることにより、水着を着せた胴体部までの流れに影響が出ないようにした。また、実験時は、人体模型内部に水を満たし浮力をキャンセルした。

図7に供試水着を示す。図7(a)は比較的太い糸で

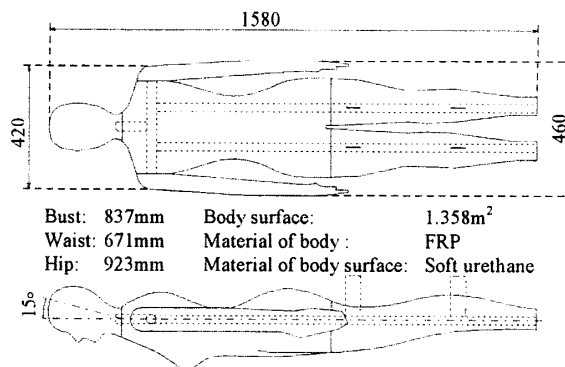


Fig. 6 Construction of the model of woman body

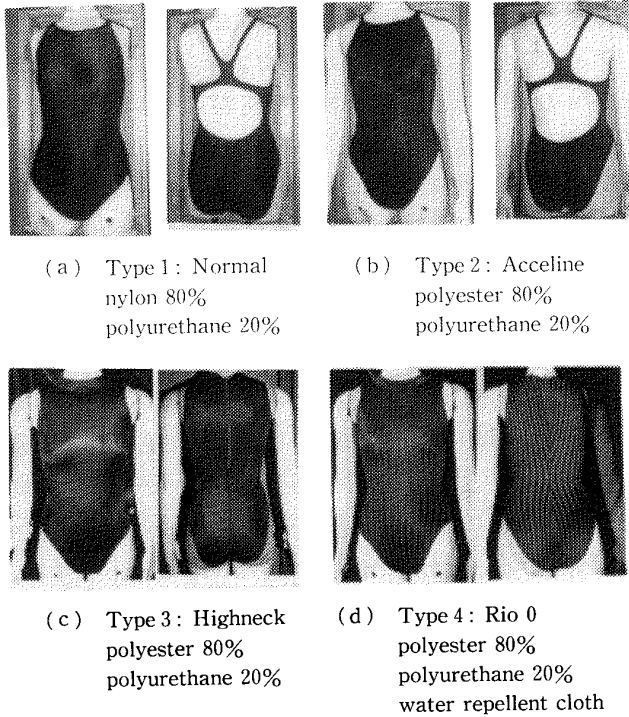


Fig. 7 Pictures of four kinds of athlete swimming suits

織られた厚い布地の一般競泳用水着で布地表面に多少ざらつきがある。図7(b)は細い糸で織られた薄い布地の上級競泳用水着で表面は滑らかに加工されている。また図7(a)に比べまたの切れ角が鋭角で首の締めりもきつくなっている。図7(c)はハイネックタイプの水着である。布地は図7(b)と同様であるが、背および首の部分が完全に覆われており、水着の中に水が入りにくくなっている。図7(d)は図7(c)の水着表面に縦じま状に8mm間隔ではっ水加工を施したもので、はっ水部分とはっ水なしの部分交互に並ぶ状態である。

4. 実験結果および考察

4・1 人体模型裸時の流体抵抗 図8に人体模型裸時の抵抗係数 C_d とフルード数 Fr の関係を示す。参考のため横軸にはえい航速度も記入してある。代表面積には“ぬれ面面積”である人体模型の表面積、フルード数の代表長さには人体模型の全長を用いた。実験では人体模型の迎え角 α を0, 6, 12°の三つにおりに変化させた。また、人体模型の流体抵抗に対する没水深(以後水深と呼ぶ) Hd の影響を明らかにするため、 Hd は10mmから555mmまで変化させた。図8中(a) $\alpha=0^\circ$ の場合、 $Hd=10$ mmの C_d は $Fr=0.18$ から Fr とともに増加し、 $Fr=0.28$ で極大値 $C_d=0.026$ をとり、その後減少し、 $Fr=0.34$ で極小値をとる。その後 C_d は増大し、 $Fr=0.46$ で最大値 $C_d=$

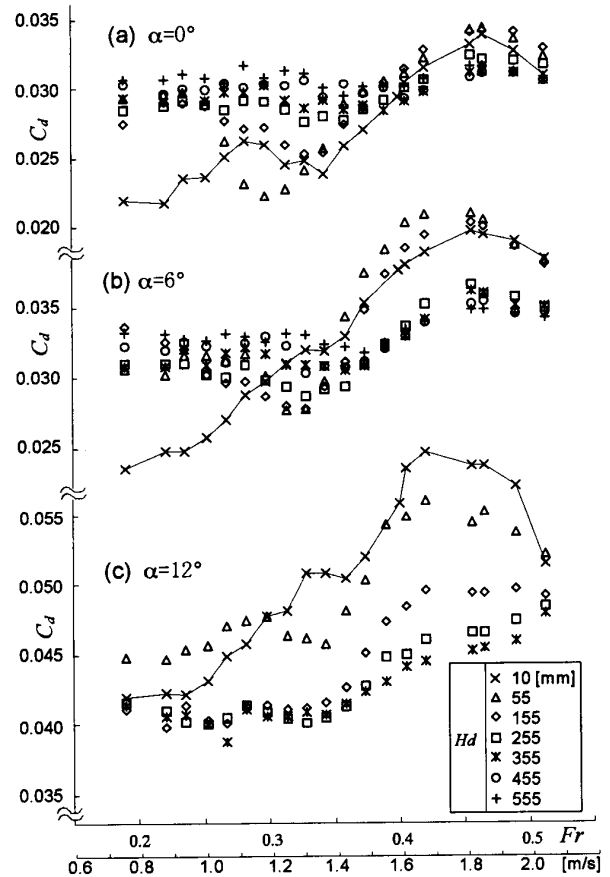


Fig. 8 Relationships between fluid drag coefficient C_d of the model body without swimming suits, “nude”, and Froude number. The attack angle α and the water depth Hd are changed. (a) $\alpha=0^\circ$, (b) $\alpha=6^\circ$, (c) $\alpha=12^\circ$. $Hd=10\sim 555$ mm

0.034に達し、その後再び減少する。 $Hd=55$ mmでは、 $Fr=0.18\sim 0.30$ の間では $Hd=10$ mmと違った傾向を示すが、 $Fr>0.30$ では、 $Hd=10$ mmとほぼ同じ傾向を示す。水深が深くなるにつれ、この減少および増加の割合は少なくなり、 $Hd\geq 355$ mmでは C_d は Fr の増加とともに緩やかな増大、減少、増大を示す。また $Hd\geq 355$ mmでは、 C_d の差は極めて小さい。図8中(b) $\alpha=6^\circ$ の場合、 C_d は $\alpha=0^\circ$ の場合と比べて、全体的に大きくなる。さらに、 Fr に対する C_d 値の変化も大きくなり $Fr=0.44$, $Hd=55$ mmで、 C_{dmax} は約0.042に達する。図8中(c) $\alpha=12^\circ$ になると、 C_d は迎え角 $\alpha=0^\circ$ や 6° の場合よりもさらに大きくなり、 $Hd=10$ mm, $Fr=0.42$ で最大値0.059になる。 $Hd=10\sim 155$ mmにおいて、 C_d の差は大きくなるが、 C_d-Fr の全体的な傾向は類似である。また $Hd\geq 255$ mmの水深では C_d はほぼ等しく、 C_d-Fr の傾向も同一である。図8中(a), (b), (c)の結果は複雑な変化を示すが、この原因は人体模型周りの複雑な流れに基づく。流れの考察は図10で行う。

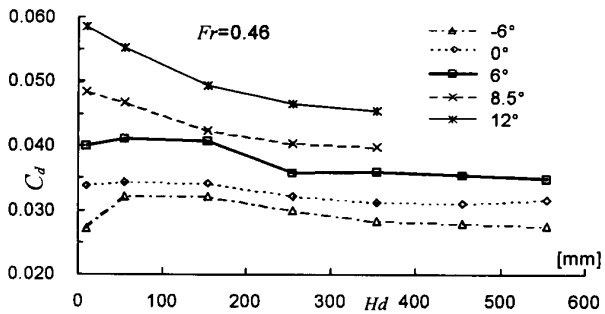


Fig. 9 Relationships between fluid drag coefficient C_d and water depth Hd . $Fr=0.46$. Attack angle is changed; -6° , 0° , 6° , 8.5° and 12°

図9では、抵抗係数 C_d に対する水深 Hd の影響を検討する。 C_d と Hd の関係はフルード数によって異なるが、ここでは紙面の都合上競泳速度の大きい $Fr=0.46$ 、速度 1.8 m/s の場合に限って考察する。人体模型の迎え角は -6° , 0° , 6° , 8.5° , 12° の5種類に変えた。 C_d は、 $\alpha=-6^\circ \sim 6^\circ$ の間では、 $Hd=55 \text{ mm}$ までは増大し、その後一定値になる。 $Hd \geq 155 \text{ mm}$ の深さでは C_d は減少し、 $Hd \geq 255 \text{ mm}$ で一定値に近づく。 $\alpha=-6^\circ$, $Hd=10 \text{ mm}$ の C_d 値が極端に小さくなるのは、人体模型の頭部以外は水中から出て、空気中にさらされる状態になるため、抵抗が減少する結果である。 $\alpha=8.5^\circ \sim 12^\circ$ においては、水深の増加とともに C_d 値は減少し、 $Hd=255 \sim 355 \text{ mm}$ の深さでほぼ一定値になる。この結果より、競泳で潜水を行う場合、水深 $Hd \geq 255 \text{ mm}$ に潜れば造波や跳ね現象はみられず、抵抗減少が十分望めるといえる。

以上、人体模型の流体抵抗係数 C_d とフルード数 Fr および水深 Hd の関係を検討した。 C_d の変化は人体模型周囲の流れの変化と密接に関係する。これまでの研究⁽¹⁾⁽²⁾ から、人体模型周囲の流れは、大略、造波、跳ね水および各種渦から構成されていることが明らかになっている。図10では、著者らの行った可視化結果から C_d の変化の原因を考察する。図10には、代表例として、 $\alpha=0^\circ$ における人体模型周りに生じる波の可視化写真とその模式図を示す。図10(a) $Fr=0.19$, (b) $Fr=0.32$, (c) $Fr=0.47$ の3例を示す。水深は実際の競泳状態に近い $Hd=10 \text{ mm}$ を選んだ。図10(a), (b)は頭部から肩、(c)は腰部を中心に撮影した。人体模型周囲の流れの特徴は、大別すると、頭部から肩の領域では造波、背中から腰部領域では跳ね水現象および各種の渦、肩・腕・背中の間では大きな巻き込み渦、さらに腰部から脚のまた部およびその外側に生じる渦流である。ただし、本可視化写真では、造波と跳ね水は確認できるが、各種渦はみることができない。紙面の都合上、表面タフト法による流れの可

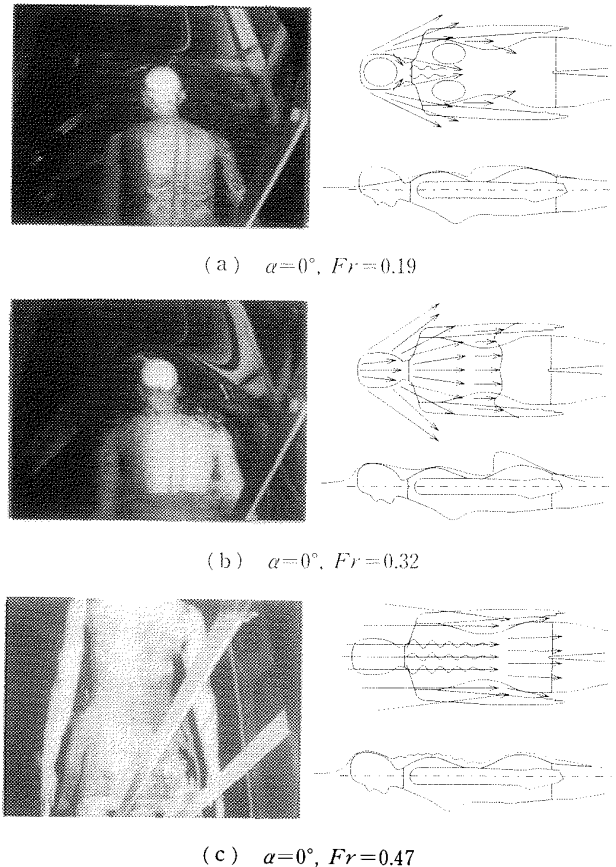


Fig. 10 Flow visualization and flow pattern around woman body

視化は次報で述べる予定である。造波・跳ね水；図10(a)のフルード数が小さい($Fr=0.19$)場合、水深は 10 mm と浅いので頭部と背中は空気中に露出する状態になる。造波抵抗は比較的小さい。図10(b)のフルード数が中程度($Fr=0.32$)の場合、頭部および背中は水をかぶり、背部には跳ね水現象が発生する。この場合には、造波と跳ね水による流体抵抗が大きくなる。図10(c)のフルード数が大きい($Fr=0.47$)場合、頭部の造波は大きく、また腰部脇にも大きな波と巻き込み渦が発生する。しかし、背部の射流は腰部を乗り越えてしまい跳ね水現象は生じない。この結果、 $Fr \geq 0.47$ では、流体抵抗は減少する傾向を示す(図8)。

4・2 水着の流体抵抗の比較 本節では、水着抵抗の大きさを検討する。供試水着については、3章後半図7で説明したが、再度、略述する。実験では4種類、図7(a)Type 1(従来の一般競泳用)、図7(b)Type 2(上級競泳用で薄い布地を使用)、図7(c)Type 3(ハイネックタイプ、布地は図7(b)と同じ)および図7(d)Type 4は図7(c)の表面にさらに縦じま縞状に 8 mm 間隔ではっ水加工を施してある。Type 4においては縦じま状にはっ水部と発水なしの部分が並ぶことになる。著者らがこのような加工を施した目的は、

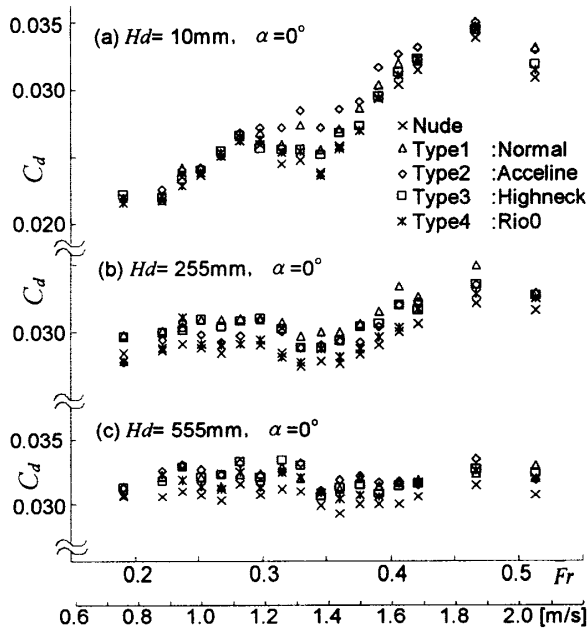


Fig. 11 Relationships among fluid drag coefficient C_d for model bodies with four kinds of athlete swimming suits, Froude number and speed of model bodies. The water depth H_d is changed

縦じま状に表面摩擦抵抗を変えて境界層内に速度差を作り、微小な縦渦を発生させることである。この縦渦によって、人体凹凸部で生じるはく離面積の削減をめざした。この期待した現象は実験的に確かめられていないが、以下の実験結果によると図7(d) Type 4の水着の抵抗は最も小さくなる。

図11に人体模型に水着を着用させた場合の流体抵抗係数 C_d とフルード数 Fr の関係を示す。人体模型の迎え角 $\alpha = 0^\circ$ で、水深 H_d は図11(a) $H_d = 10$ mm, (b) $H_d = 255$ mm, (c) $H_d = 555$ mm の三とおりに変化させた。比較のため人体模型裸時(Nude)の C_d も示してある。いずれの水深においても Nudeを除いて Type 4の水着が最小の抵抗を示し、Type 1または Type 2の水着の抵抗は大きい。また、 $H_d = 10$ mm, $Fr = 0.33$ において、Type 1および Type 2は特に大きな抵抗値を示す。これは水着のデザインによるものと考えられる。この部分以外は、値に大小はあるが、全体的な傾向には大きな違いはない。

図12には次式で定義される水着抵抗増加率を示す。

$$R_d = \frac{\text{水着着用時の抵抗} - \text{裸時の抵抗}}{\text{裸時の抵抗}} \dots\dots\dots (1)$$

図12(a) $H_d = 10$ mm においては、抵抗の最も大きい Type 2(図中破線)と、最も小さい Type 4(実線)の間には1.8~8%の差が存在し、図12(b) $H_d = 255$ mmでは Type 1(破線)と Type 4(実線)の間に

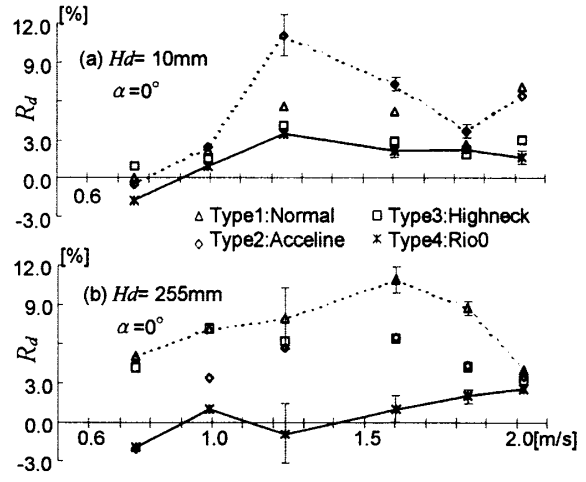


Fig. 12 Relationships between the rate of fluid drag reduction R_d for four kinds of athlete swimming suits and speed of model bodies

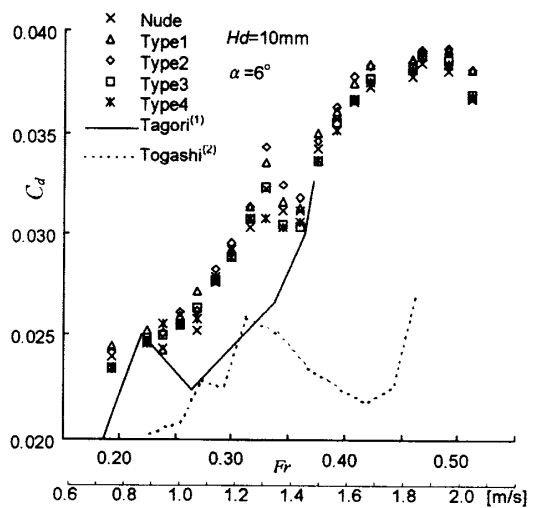


Fig. 13 Relationships among fluid drag coefficient C_d for model bodies with four kinds of athlete swimming suits, Froude number and speed of model bodies. The water depth H_d is 10 mm. Attack angle is 6°

2~9%, 図は省略するが $H_d = 555$ mm では Type 2と Type 4の間に最大4.5%の差が確認できた。

図13には迎え角 α を大きくした $\alpha = 6^\circ$ 、水深 $H_d = 10$ mm における水着を着用させた人体模型の抵抗係数 C_d とフルード数 Fr の関係を示す。この迎え角および水深は、自由形競泳選手の泳時に相当近い。比較のため人体模型裸時の C_d および、田古里ら⁽¹⁾の「水着を着用したけのび姿勢の女子人体模型」、富樫ら⁽²⁾の「水着を着用した腕のない男子人体模型」の抵抗値をおのおの著者らの定義に基づいて抵抗係数化した C_d 値を示す。この結果、田古里らの測定値(図13中実線)には速度1.8 m/s前後の値はないが、図13に示

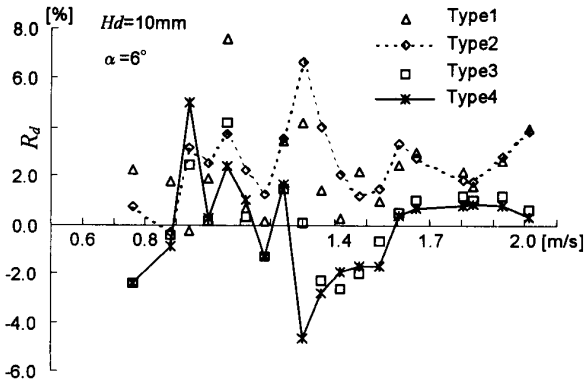


Fig. 14 Relationships between the rate of fluid drag reduction R_a for four kinds of athlete swimming suits and speed of model bodies. The water depth H_d is 10 mm. Attack angle α is 6°



(a) Type 1 (b) Type 2, 3 (c) Type 4

Fig. 15 Pictures show cutting section of vertical direction to strips on cloth of swimming suits

した実験の範囲では、著者らの傾向とほぼ似ている。しかし、富樫らの測定値(図13中破線)とは違った傾向を示す。これは富樫らの人体模型は男性でしかも腕がなく模型周囲の流れが相当異なるためと推察される。

図14には、図13の結果より求めた迎え角 $\alpha=6^\circ$ における抵抗増加率を示す。この結果、泳時速度1.5~1.8 m/sにおいて、最も抵抗の小さいType 4(図14中実線)の C_d 値は従来型のType 1, Type 2(図14中破線)に比べ1~4%減少する。

4.3 水着に用いた布の摩擦抵抗 抵抗減少の一因として布地自体の抵抗減少があげられる。図15には水着に使用した布地の断面写真を示す。写真撮影に当たって、模型物体に水着を着せた引張りのある状態で、布地にエポキシ樹脂を染み込ませて固定し、流れ方向(縦じま方向)に垂直方向に切り取った。図15(a)はType 1, (b)はType 2, 3, (c)はType 4の水着の布地である。写真の白い部分は、エポキシ樹脂の染み込んだ部分である。この写真からType 1に用いた布地は厚く、織りが粗いことがわかる。図15(b), (c)は布地は薄い。また、図15(c)に黒い部

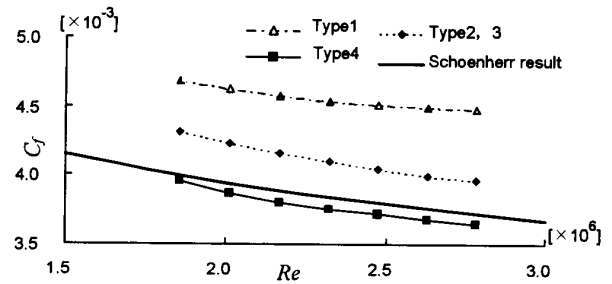


Fig. 16 Relationships between friction drag coefficient C_f of the cloth of swimming suits and Reynolds number

分がある。これは、はっ水加工を施したため、この部分にエポキシ樹脂が染み込まず、切断時に繊維が図15(b)のようにきれいに切れず、けばだった状態になっているためである。

図16には、各水着に用いた布地の表面摩擦抵抗係数 C_f とレイノルズ数 Re の実験値を示す。実験では、布地に引張りを加えて、平板に密着させ、その抵抗を測定した。測定範囲において、織りの粗いType 1の布地に比べType 2, 3の布地は、摩擦抵抗係数が約10%減少する。この布地にさらに縦じま状に8 mm間隔にはっ水加工を施すことにより布の抵抗は約8%減少する。これは、発水加工により、表面摩擦抵抗が減少したためと考えられる。

5. 結 論

(1) 競泳用水着の抵抗差の再現性の高い測定ができた。

(2) 細い糸で、織りの細かい、薄い布地製(ポリウレタン・ポリエステル製)女性競泳用水着に縦じま状に一定間隔(例えば8 mm)ではっ水加工を施すことにより抵抗減少が可能であることが示された。

(3) 流体抵抗と水深には深い関係があり、浅い水深では、フルード数の増加とともに造波抵抗や跳ね水現象により抵抗が増大するが、深い水深(255~355 mm以上潜った状態)では、造波や跳ね水現象は生じず、抵抗は小さくなることが明らかとなった。

本研究に当たり、ミズノ(株)松崎健、森健次郎両氏に多大の助力を得た。ここに謝意を表する。

文 献

- (1) 田古里哲夫・ほか3名, デサントスポーツ科学, 5(1985), 173-184.
- (2) 富樫泰一・ほか2名, デサントスポーツ科学, 10(1989), 75-82.