

競泳用水着に関する研究* (境界層制御による水着抵抗の削減について)

清水 幸丸*¹, 鈴木 利明*²
松崎 健*³, 森 健次朗*³

Studies on Reduction of Fluid Drag For Athlete Swimming Suit by Boundary Layer Control

Yukimaru SHIMIZU, Toshiaki SUZUKI,
Takesi MATSUZAKI and Kenjiro MORI

Sport science progresses step by step in the world. The paper describes, the first, the relationships between fluid drag for a model of woman swimmer and the flow around it. The flow around the model swimmer is very complicated, and includes, for example, wave, some kinds of vortices, hydraulic jumping and so on. The complicated flows are visualized by the surface tufts method and so on. Second, the possibility of the reduction of fluid drag for a woman athlete swimming suit is challenged. The boundary layer control is applied to reduce the fluid drag. The separation occurs around the breast of a woman swimmer. The separation can be suppressed by the boundary layer control. Many beads are distributed on the breast area of a woman swimming suit. As the result, it is found that the fluid drag for the model swimmer can be reduced in a range of 1.5%~2% by the suit with the boundary layer control, which is carried out by many beads.

Key Words: Flow Visualization, Fluid Measurements, Fluid Force, Boundary Layer Control, Separation, Low Drag Athlete Swimming Suit, Wave, Vortex, Hydraulic jumping, Sport Engineering

1. 緒 言

競泳は、陸上等の競技とは異なり、水面や水中という特殊な環境下で行われ、泳者の流体抵抗は、表面摩擦、造波、各種渦の発生、跳ね水現象等の複雑な流体現象によって生じる。これまでに、著者らは、繰返し誤差が約±1%という再現性の高い流体抵抗測定装置を開発し、泳者の流体抵抗に対する水着のデザインや布地の影響を明らかにしてきた⁽¹⁾。その結果、背中全面を覆うハイネックタイプの水着で、水着表面に縦じま状に撥水加工を施し、撥水部分と撥水なしの部分とが交互に並ぶようにすると、抵抗が小さくなることを明らかにした。

本論文では、前報⁽¹⁾で述べなかった人体模型の周囲の流れと流体抵抗の関係を可視化法を用いて詳述する。さらに、撥水加工を施した低抵抗水着の胸部にビーズを配置し境界層制御を行うことにより、さらなる水着抵抗削減を実現した。以下、それらの結果を詳述する。なお、手足の動きや人体表面の柔らかさは、水

着抵抗にある程度影響を及ぼすことが推察されるが、この問題の検討は今後の課題とする。

2. おもな記号

C_d : 抵抗係数 $= D/(1/2\rho U^2 S)$

C_w : 造波抵抗係数 [式(1)]

D : 流体抵抗 N

Fr : フルード数 $= U/\sqrt{gL}$

g : 重力の加速度 m/s^2

H_a : 没水深(水面から人体模型肩までの深さ)
mm

L : 人体模型全長 mm

R_d : 抵抗係数増加率 [式(2)]

Re : レイノルズ数

S : 人体模型表面積 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

Δ : 人体模型の体積 m^3

3. 実験装置および方法

図1には実験装置の概要を示す。実験には前報⁽¹⁾

* 原稿受付 1997年9月24日。

*¹ 正員, 三重大学工学部(☎514-8507 津市上浜町1515)。

*² 正員, 三重大学大学院。

*³ ミズノ(株)(☎559-8510 大阪市住之江区南港北1-12-35)。

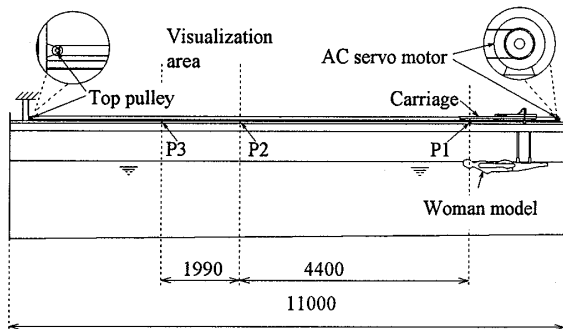


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

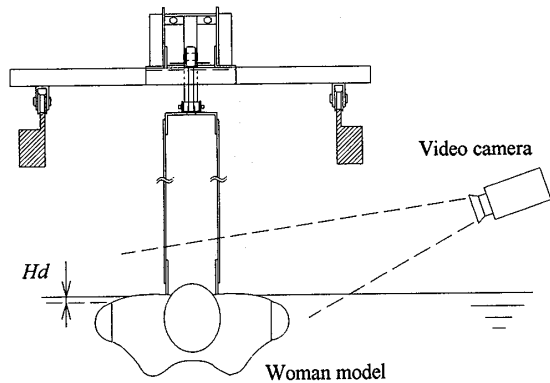


Fig. 2 Flow visualization system around the woman model

と同一の装置を用いた。可視化実験においては、可視化は流れが十分発達する台車スタート位置から4.4 m地点(P 2)と6.39 mの減速開始位置(P 3)において行われた。

図2に人体模型周囲の波の可視化方法を示す。レールわき、やや水面より上方にビデオカメラを設置し、えい航時に発生する人体模型周囲の波の撮影を行う。人体模型周りの流れは、その迎え角および没水深により変化する。本実験では、人体模型の迎え角 α を0, 6, 12°の三とおりに変化させた。また、いずれの迎え角についても没水深(水面から肩までの深さ) $H_d=10$ mm一定に設定した。

図3に人体模型胸部を中心とした胴体周りの流れの可視化方法を示す。台車に人体模型を十分な水深(600 mm程度)をとって、仰向けにつり下げ、タフト付きの水着を着用させ、台車上に取付けたビデオカメラにより台車えい航中のタフトの動きを撮影する。なお、通常の泳時の胸部周りには、表面波を代表とする変動流の影響が懸念されるが、これらの変動は準定常的な現象とみなされ、さらに胸部が完全に水中にあるので、両者の流れに基本的な差は小さいと判断される。また、人体模型の迎え角(図3中 α)は、頭部を下げる方向に、0, 6, 12°と変化させた。

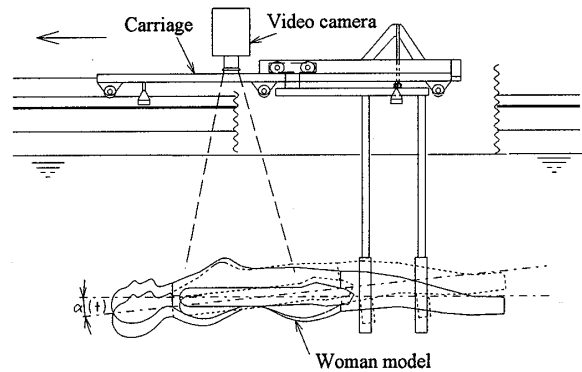


Fig. 3 Flow visualization system of surface tuft method

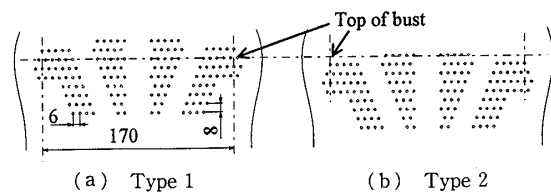


Fig. 4 Distribution pattern of many beads

次に、供試水着について説明する。本研究では3種類の水着を用いて実験を行った。Type 0は撥水加工を縦じま状に(撥水部分と撥水なしの部分が交互に並ぶように)施した水着、Type 1はType 0の水着の胸部周りに直径3 mm、高さ2 mmの突起物(ビーズ)を配置したもので、Type 2は突起物をType 1より下流側にずらして配置したものである。図4に突起物の配置と胸の頂点の位置を示す。図4(a)がType 1、(b)がType 2である。Type 1は胸の頂点がサイドの突起物の前から2列め、端から1個めと2個めの間にくる。Type 2ではサイドの突起物は胸頂点より下流側にくる。前報において、著者らは、水着に縦じま状に撥水加工を施すことにより抵抗が小さくなることを明らかにした。本論文では、この水着のさらなる抵抗削減のため、胸部に突起物を配置し、境界層制御による胸部はく離領域削減をめざした。なお、突起物(ビーズ)の配置および配列、おのおのの寸法の影響について、風洞および水路の実験によって詳細を検討した。その結果に基づいて、本論文では、はく離抑制効果の高いType 1およびType 2について詳述する。

図5(a)には水着にタフトを付けた写真、(b)には突起物(ビーズ)を付けた境界層制御水着(Type 1)胸部の写真を示す。図5(a)のタフトは、Type 0水着の胸頂点より下流方向へ8行(行の間隔は25 mm)および一つの行について15 mm間隔に19本取付けてある。タフトは長さ20 mm、太さ1.5 mmの毛糸(アクリル70%、毛30%)で、それをミシン糸で水着に縫い

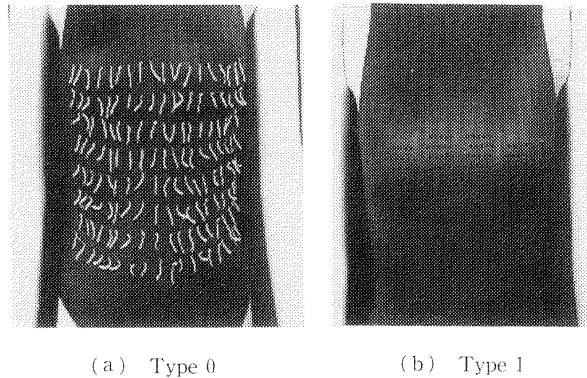


Fig. 5 Distribution pattern of tuft and the picture of many beads

つけてある。なお、直径0.4 mmのミシン糸を用いての可視化も行ったが、その流れと1.5 mmの毛糸の流れとの差はみられなかった。そこで、本論文では、写真写りのよい毛糸を用いた。

4. 実験結果および考察

4.1 人体模型の流体抵抗と周囲の流れ 図6には、人体模型裸時の抵抗係数 $C_d [= D/(1/2\rho U^2 S)]$ とフルード数 $Fr (= U/\sqrt{gL})$ の関係を示す。Sは人体模型の表面積、Lは人体模型の全長を表す。迎え角は◆、◇が $\alpha=0^\circ$ 、▲、△が $\alpha=6^\circ$ 、●、○が $\alpha=12^\circ$ で黒印が没水深 $H_d=10$ mm、白抜き印が $H_d=355$ mmである。没水深の浅い $H_d=10$ mm(黒印)の場合、いずれの迎え角においても、 C_d は、 $Fr=0.2$ からフルード数とともに増加し、 $Fr=0.44\sim 0.46$ で最大値をとった後、少し減少する。ただし、 $\alpha=0^\circ$ では、他の迎え角の場合と多少傾向が異なり、 $Fr=0.35$ で極小値をとる。一方、没水深の深い $H_d=355$ mmでは、この増加、減少の割合はかなり小さくなり、 $Fr=0.35$ まではほぼ一定の値を示す。 $Fr>0.35$ において、迎え角 $\alpha=0, 6^\circ$ では、抵抗係数は Fr 数が増加するとともに緩やかに増加し、 $Fr=0.45$ で最大値をとり、その後、減少する。迎え角 $\alpha=12^\circ$ では、抵抗係数は最大値をとらず、 Fr 数の増加とともに緩やかに増加する。

図7にえい航中に発生する人体模型周囲の波、各種渦、跳ね水の可視化写真とその模式図を示す。人体模型の迎え角 α は左からそれぞれ0, 6, 12° で没水深 H_d はすべて10 mmである。速度 U は上から0.75, 1.25, 1.85 m/sである。表1には可視化結果に基づいて考察した模型周囲の流れを整理してある。流れは「造波」、「人体模型周囲の渦」、「背部の跳ね水」に分類し、その強弱を記述してある。これらの可視化の結

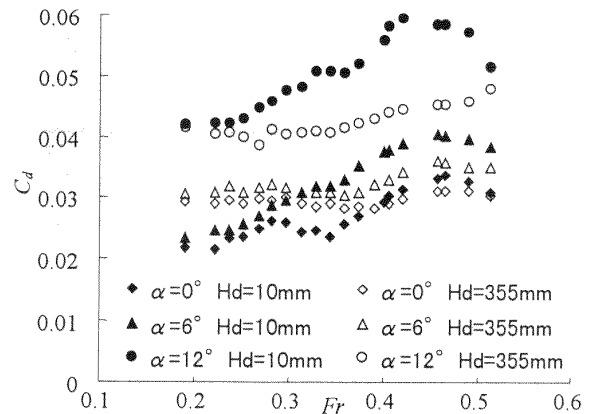


Fig. 6 Relationships between the fluid drag coefficient C_d of the model body without suit, "Nude" and Froude number Fr

果から、図6に示した没水深 $H_d=10$ mm(黒印)における各迎え角での抵抗増減の理由を考察する。速度0.75 m/s($Fr=0.19$)と遅い場合、 $\alpha=0^\circ$ および 6° では人体模型の一部が水面上に出ており、しかも、造波および跳ね水もそれほど大きくないため、低い抵抗係数を示す。 $\alpha=12^\circ$ と迎え角が大きくなると、頭部の一部が水面上に出ているが造波も比較的大きく、腰部後方に強めの巻き込み渦も発生しているため、抵抗係数は、かなり大きくなる。

速度 $U=1.25$ m/s 近傍($Fr=0.32\sim 0.34$)において、迎え角 $\alpha=0^\circ$ では、抵抗係数はいったん減少して再び増加し、 $\alpha=6, 12^\circ$ では抵抗係数の増加する割合が小さくなる現象は、跳ね水の位置に関係していると考えられる。速度1.25 m/s($Fr=0.32$)の可視化の結果において、迎え角 0° では背中のかぼんだ部分(ウェスト部)で、迎え角 $6, 12^\circ$ ではその少し手前で跳ね水が発生している。跳ね水が発生した位置では、水面に渦を伴う大きな乱れが発生し、エネルギーを消費して流れは射流から常流へ急激に変化し、物体に多大な抵抗を与えることが知られている。横幅の狭いウェスト部分で跳ね水が発生する場合、跳ね水の幅は狭くなり、抵抗係数が減少する。速度が増加し、ウェスト部分から臀部の頂点にかけて跳ね水が発生する場合には、跳ね水の幅が広くなり、また、跳ね水で増加した水深が腰部両側に強い波を発生させ、臀部後方の巻き込み渦も大きくなるため、抵抗係数が一段と増加する。

さらに速度が大きくなり、速度1.85 m/s($Fr=0.47$)以上では、抵抗係数は減少する傾向を示すが、この現象は次のように説明される。速度1.85 m/sの可視化写真より、迎え角 0° では跳ね水が腰よりも後方で発生し、迎え角 $6, 12^\circ$ では、射流が臀部を乗り越えてしまい、跳ね水そのものが発生しない。よって、速

Table 1 Schematic flow pattern around the woman model with the result of flow observation

Experimental speed	Three kinds of flow patterns	The angle of attack		
		$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 6^\circ$	$\alpha = 12^\circ$
U=0.75m/s Fr=0.19	Wave	Weak waves from head and shoulder.	Weak waves from head and shoulder.	Weak waves from both sides of head and back.
	Vortex	Weak vortices from hip downstream.	Weak vortices from hip downstream.	Weak vortices from waist downstream.
	Hydraulic jumping	non	non	non
U=1.25m/s Fr=0.34	Wave	Waves from shoulder and waist.	Waves from shoulder and waist.	Strong waves from both sides of head and back.
	Vortex	Vortices from hip downstream.	Weak vortices from hip downstream and necklace type vortices.	Vortices from waist downstream and necklace type vortices.
	Hydraulic jumping	On waist	A little front of waist	On the center of back
U=1.85m/s Fr=0.47	Wave	Strong waves from head and hip.	Strong waves from the head , shoulder and back.	Strong waves from head and back.
	Vortex	Vortices from hip downstream.	Vortices from hip downstream.	Vortices from waist downstream.
	Hydraulic jumping	On the top of hip	non	non

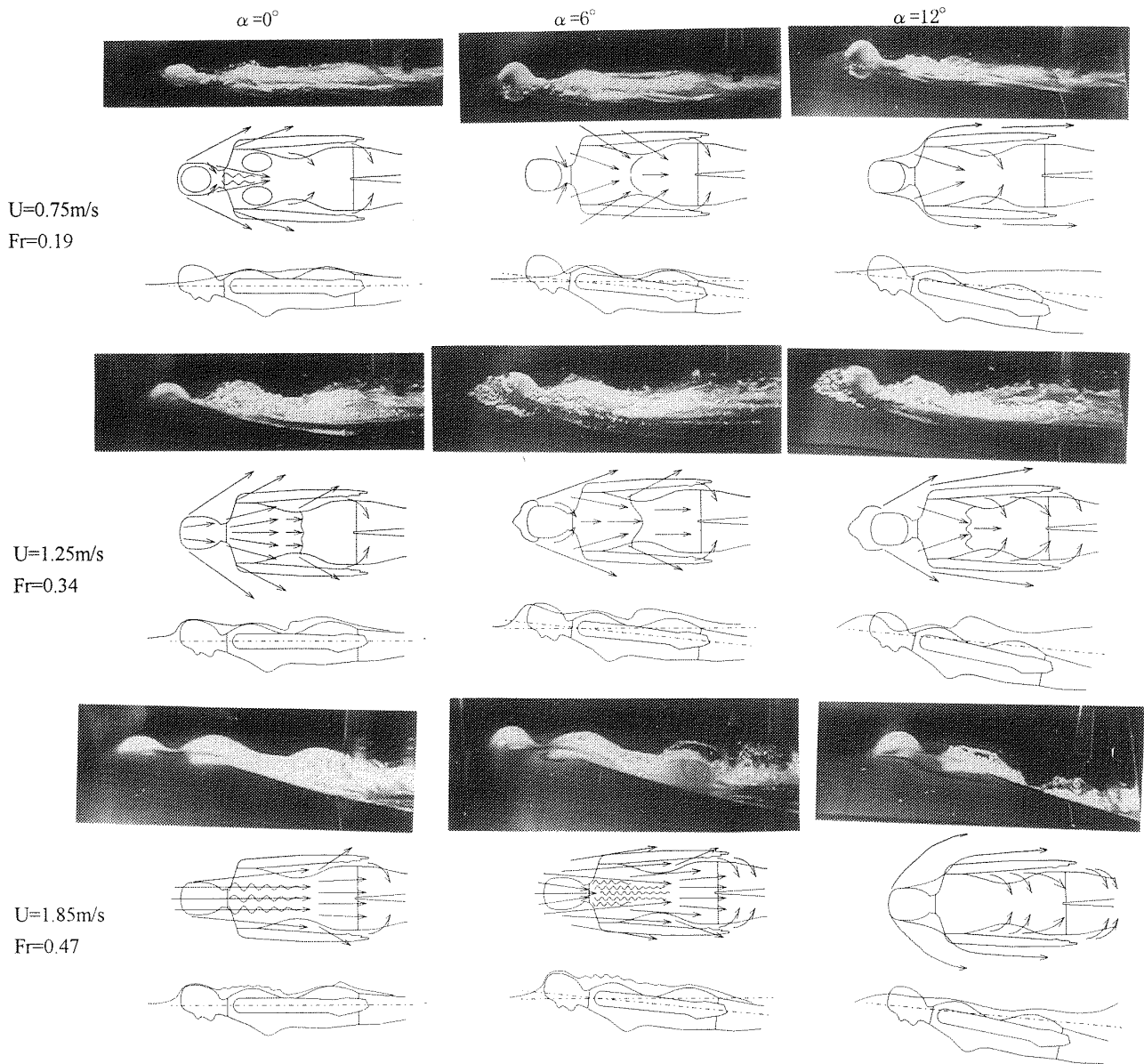


Fig. 7 Flow visualization and flow pattern around woman model

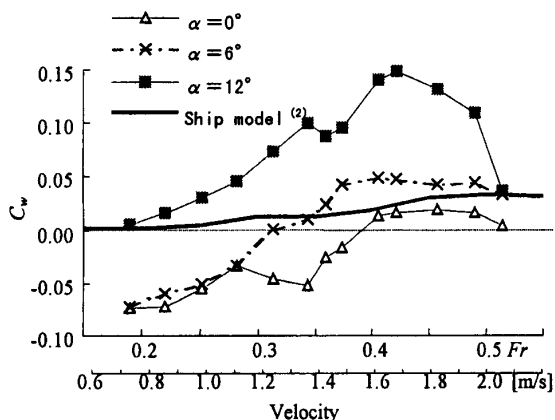


Fig. 8 Relationships among wave drag coefficient C_w , Froude number Fr , and velocity of woman model

度 1.85 m/s 以上では、射流が臀部を乗り越えるため、跳ね水による抵抗増加がなくなり、また、腰部後方に発生する巻き渦も小さくなっていくため、抵抗係数が減少する。

図 8 では人体模型の抵抗に対する造波の影響を検討する。縦軸の C_w は次式のように定義する。

$$C_w = (C_{dHd=10\text{mm}} - C_{dHd=355\text{mm}}) \times S / \Delta^{2/3} \dots\dots (1)$$

C_w は、 $H_d = 10\text{mm}$ の C_d からほぼ造波の影響がなくなると判断される水深 $H_d = 355\text{mm}$ での C_d を差引いた値に人体模型の表面積 S を掛け、(人体模型の体積 Δ)^{2/3} で除したものである。比較のため太線で船の造波抵抗の一例⁽²⁾を示す。いずれの迎え角においても、 C_w は $Fr = 0.42 \sim 0.45$ まで増加し、最大値を示した後、再び減少する。また、迎え角 α が大きくなるにつれ高速域での C_w は増大する。これは、前述の図 7 の結果から推察すると、迎え角の増加に伴い人体模型背後に発生する渦が大きくなるためであると考えられる。また、迎え角 0° では $Fr < 0.4$ 、迎え角 6° では $Fr < 0.35$ で C_w が負の値を示す。この理由は、図 7 の結果から、人体模型の頭部や背中の一部、迎え角 0° においては臀部も水面上に出ているため、この部分の抵抗が空気抵抗のみになり、人体模型全体の流体抵抗が極端に小さくなる結果と推定される。迎え角 12° では造波および渦抵抗ともに大きくなり、負の値は示さなくなる。

太線実線の船の造波抵抗係数と比較して、 Fr が大きくなるにつれ C_w が大きくなるという大まかな傾向は似ているが、人体模型周囲の流れは、船に比べ、造波以外に、跳ね水や各種渦による損失が大きく、非常に複雑になるので、一致の程度はこの程度である。

4.2 水着胸部境界層流れの観察 図 9 に表面タフト法による、人体模型に水着を着用させた場合の水

Table 2 Separation area around the breast downstream. Swimming suits without beads; Type 0

Angle of attack		$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 6^\circ$		$\alpha = 12^\circ$	
Experimental speed	column	Left side	Right side	Left side	Right side	Left side	Right side
	$U = 0.75\text{m/s}$ $Fr = 0.19$	row 3	3-5	3-5	3-7	—	0-1
4		3-7	1-7	0-7	0-9	0-9	0-9
5		—	9	1-6	3-7	0-9	0-9
$U = 1.85\text{m/s}$ $Fr = 0.47$	2	2-5	3-7	4	4	—	—
	3	0-9	0-9	0-9	0-9	0-5	0-7
	4	0-9	0-9	0-9	0-9	0-9	0-9
	5	0-9	0-9	0-9	0-9	6-9	6-9
	6	0-4	0-5	3-4	5-6	—	—

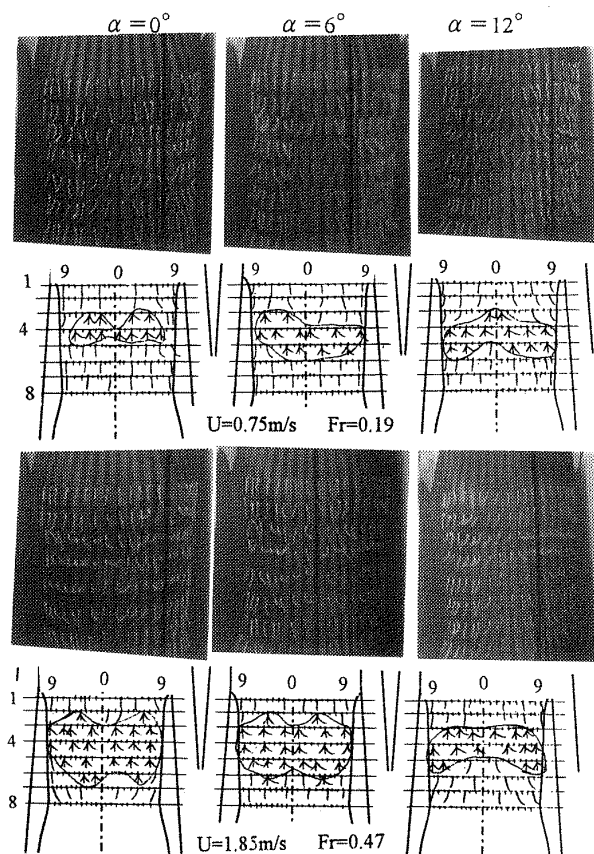


Fig. 9 Flow visualization around the breast by surface tuft method. \uparrow tufts on the separation area. Swimming suit without beads; Type 0

着表面境界層流れの可視化写真と、それに基づいて描いたタフトの動きの模式図を示す。タフトには行番号と列番号をつけ、行番号は上流側から 8 行、列番号は体中心を 0 として左右にそれぞれ 9 列である。タフトの最前列が胸の頂点に相当する。左からそれぞれ迎え角 $\alpha = 0, 6, 12^\circ$ 、上段が速度 $U = 0.75\text{m/s}$ 、下段が $U = 1.85\text{m/s}$ である。表 2 には、タフトにより判定

した胸部はく離領域を示す。迎え角 $\alpha=0^\circ$ 、速度 0.75 m/s では、3, 4 行めにはく離が確認できる。この胸下流のはく離領域は速度の増加とともに広がり、速度 1.85 m/s では 6 行めの、胸頂点から 150 mm 下流まで及んでいる。また、この速度ではわきの下からへそ部に向かう流れが確認できる。

迎え角 $\alpha=6^\circ$ においても流れは $\alpha=0^\circ$ に似ているが、胸頂点のはく離領域は $\alpha=0^\circ$ の場合より多少狭い。また、わきからへそ部に向かう流れはなくなっている。

迎え角 12° においては、胸頂点より下流のはく離領域はさらに狭くなり、1.85 m/s において 3~5 行めではく離が確認できるのみである。また、その位置も、 $\alpha=0^\circ$ や 6° では胸の膨らみの直下か、やや内側よりに発達するのに対し、5 行め、6~9 列のタフトの動きから、胸の膨らみからやや外側よりに発達している。また、全体的に流れは体中心から外側に向かい、浅い迎え角の場合の流れとは異なっている。

4.3 競泳用水着の境界層制御による抵抗削減

図 9 の可視化結果から、迎え角 $0, 6^\circ$ では胸下流のかなり広い範囲において、はく離領域が確認できた。このはく離領域を減少させることにより、泳者にかか

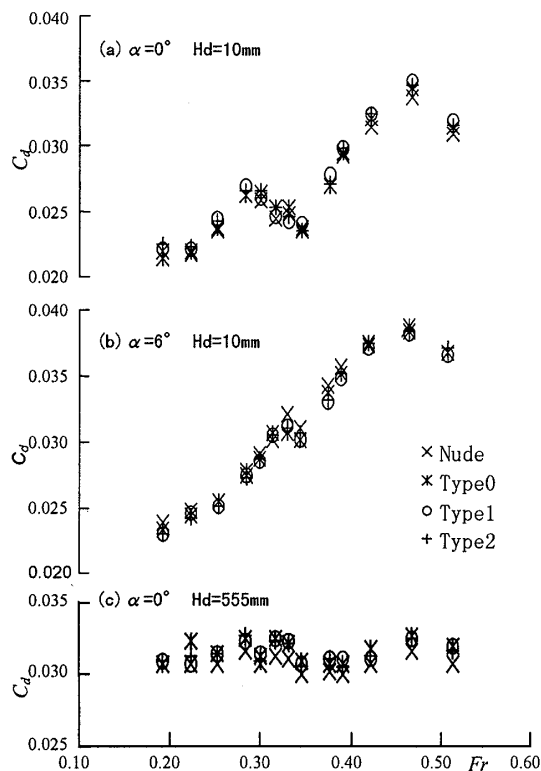


Fig. 10 Relationships between fluid drag coefficient C_d and Froude number Fr . The angle of attack α and the water depth H_d are changed

る流体抵抗の削減が期待できる。そこで、胸部に直径 3 mm、高さ 2 mm の突起物(ビーズ)を配置した水着を作成し、人体模型に着用させ抵抗測定を行った。図 10 は、各種水着を着用させた人体模型の流体抵抗係数 C_d とフルード数 Fr の関係を示す。水着 Type 0 は撥水加工を縦じま状に施した水着、Type 1 は Type 0 の水着の胸部周りに図 4(a) のように突起物を配置、Type 2 は図 4(b) のように突起物を配置したものである。図 10(a) $\alpha=0^\circ$ 、 $H_d=10$ mm の場合、 C_d は、全速度範囲でおおむね突起物のない Type 0 が最も小さく、次に Type 2、Type 1 の順になる。図 10(b) $\alpha=6^\circ$ 、 $H_d=10$ mm の場合、速度 1.5~1.85 m/s ($Fr=0.38\sim0.48$) の間(自由形女子競泳選手の泳速度)では、Type 1 の C_d が最も小さく、Nude の値よりも小さくなる。図 10(c) は潜水泳時に対応する $H_d=555$ mm で $\alpha=0^\circ$ の場合である。Nude を除いて Type 2 が最も C_d が小さくなる。

図 11 には、次式で定義される水着抵抗係数増加率 R_d を示す。

$$R_d = \frac{\text{水着着用時の抵抗係数} - \text{裸時の抵抗係数}}{\text{裸時の抵抗係数}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

競泳選手の泳速度である 1.5~1.85 m/s に注目すると迎え角 $\alpha=0^\circ$ 、 $H_d=10$ mm [図 11(a)] においては、突起物(ビーズ)を付けることにより C_d は 1~2% 増加する。しかしながら、迎え角が少し大きい

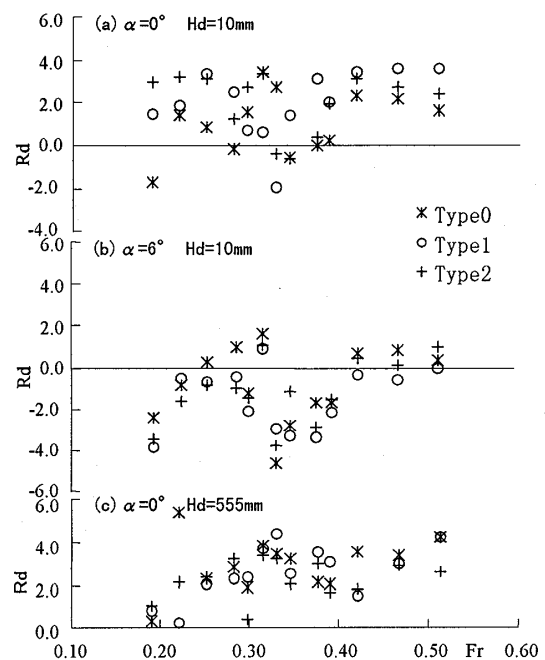


Fig. 11 Relationships between the rate of fluid drag increase R_d and Froude number Fr

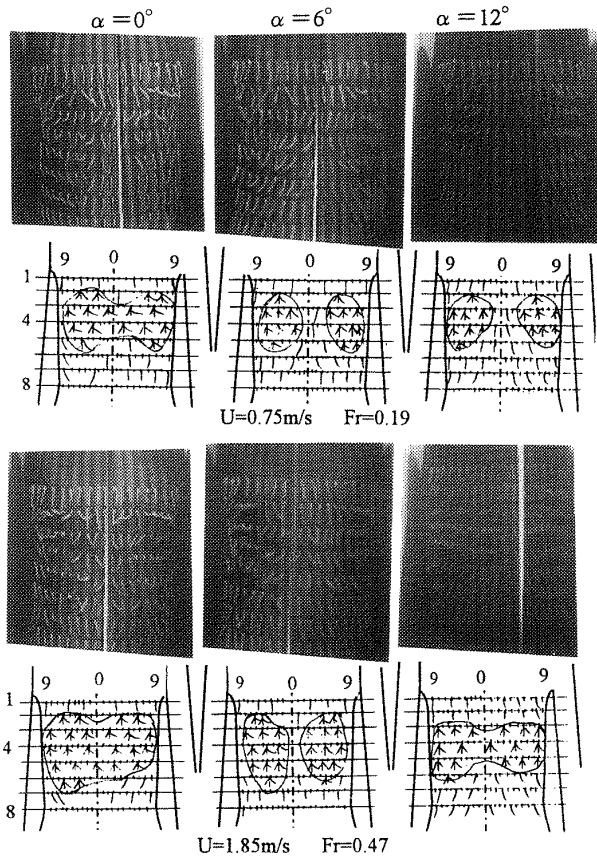


Fig. 12 Flow visualization around the breast by surface tuft method. \uparrow tuft on the separation area. Swimming suit with beads; Type 1

$\alpha = 6^\circ$, $H_d = 10$ mm [図 11(b)] においては, 胸部周りに突起物を付けた Type 1 の C_d が突起物なしの Type 0 に比べ 1~2% 程度小さくなる。図 11(c) に示した没水深が深い $H_d = 555$ mm の場合, 胸下流に突起物を付けた Type 2 の抵抗が Type 0 に比べ 0.5~2% 程度小さくなる。以上の結果から, 胸部周りに突起物を付けることにより泳者にかかる抵抗が変化し, 抵抗削減も可能であることが明らかになった。この理由をタフト法を用いた流れの可視化から考察する。

図 12 では, Type 1 水着における胸部はく離領域と突起物(ビーズ)の関係を可視化によって考察する。可視化実験は, 迎え角 $\alpha = 0, 6, 12^\circ$ の 3 種類で, フルード数は $Fr = 0.19$ ($U = 0.75$ m/s 低速) および $Fr = 0.47$ ($U = 1.85$ m/s 高速) の 2 種類である。図 12 には可視化写真とそれに基づいて描いたタフトの動きの模式図を示す。タフトには図 9 と同様に行番号と列番号をつけ, 行番号は上流側から 8 行, 列番号は体中心を 0 として左右にそれぞれ 9 列である。タフトの最前列が胸の頂点に相当する。表 3 には, タフトにより判定

Table 3 Separation area around breast downstream. Swimming suits with beads; Type 1

Angle of attack		$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 6^\circ$		$\alpha = 12^\circ$	
Experimental speed	column	Left side	Right side	Left side	Right side	Left side	Right side
	row						
$U = 0.75$ m/s $Fr = 0.19$	2	1-7	2-7	2-4	3-5	4-5	5-6
	3	0-9	0-9	1-6	3-8	2-7	3-9
	4	0-9	0-9	0-7	2-7	2-9	2-9
	5	2-8	5-7	1-6	3-7	4-9	4-9
$U = 1.85$ m/s $Fr = 0.47$	2	3-7	2-8	3-7	5-7	7-8	7-8
	3	0-9	0-9	0-9	0-9	2-9	3-9
	4	0-9	0-9	2-7	3-8	0-9	0-9
	5	0-9	0-9	3-7	3-7	0-9	0-9
	6	0-4	0-2	3-4	4	3-9	—
7	3-6	—	3-5	—	—	—	

した胸部はく離領域を示す。迎え角 0° , 速度 0.75 m/s では, 胸頂点より直下の 2 行めのタフトにおいて, 左列では 1~7 列のタフトがはく離を示し, 右列では 2~7 列のタフトがはく離を示している。これは, 突起物なしの場合とは異なり, 2 行めからはく離領域が始まっていることを示す。また, このはく離領域は下流方向にも広く 5 行め(左列では 2~8 列, 右列では 5~7 列)にまで及んでいる。しかしながら, この胸下流のはく離領域は速度が増加してもあまり増加せず, 速度 1.85 m/s において左列では 7 行め, 3~6 列めのタフトまで, 右列では 6 行めまでと突起物なしの場合とほぼ同様である。よって, 2 列めからはく離が生じた分だけはく離領域が増加し, 抵抗が増加したと考えられる。

迎え角 6° では, はく離は迎え角 0° 同様 2 行め(左列 3~7 列, 右列 2~8 列)から始まり, 速度とともに増加する。また, 突起物を付けることにより抵抗係数が削減する速度 1.85 m/s において, 左列では 7 行めの, 3~5 列めのタフトにまではく離が確認でき, これは突起物を付けていないものより長い。しかしながら, 体中心のタフトに注目すると, 突起物なしの場合 3 行め, および 4 行めの中心から左右 1 列のタフトが大きく乱れているのに対し, 突起物ありではその乱れが小さい。また, わきの下(8, 9 列)のタフトの乱れも小さい。このことから, はく離領域は下流方向には長くなるが, その幅は狭くなり, 全体としてはく離領域が減少するため, 抵抗係数が小さくなると推察される。

5. 結 論

以上の結果, 次のような結論を得た。

(1) 胸部周りに突起物を配置することにより、胸下流のはく離領域を減少させ、流体抵抗を削減することが可能であることが示された。

(2) 自由形を想定した迎え角 $\alpha=6^\circ$, $H_d=10$ mm では胸部周りに突起物を配置することにより泳者にかかる流体抵抗が減少することが明らかとなった。

(3) 潜水泳時を想定した迎え角 $\alpha=0^\circ$, $H_d=555$ mm では胸頂点より下流側に突起物を配置すること

により泳者にかかる流体抵抗が減少することが明らかになった。

本研究にあたり、ミズノ(株) 清川寛, 藤田正樹両氏に多大の助力を得た。ここに謝意を表す。

文 献

- (1) 清水幸丸・ほか3名, 機論, 63-616, B(1997), 3921-3927.
- (2) 種子田定俊, *Nagare*, 9-2(1977), 10-16.