

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

東京大学	田古里 哲 夫
(共同研究者) 同	荒 川 忠 一
同	増 永 公 明
同	岡 本 恒

Experimental Research on Water Flow around Human Body and Effects of Swimming Suits at Swimming

by

Tetsuo Tagori, Chuichi Arakawa,
Komei Masunaga, Hisashi Okamoto
University of Tokyo

ABSTRACT

It is desired that researches on the fluid dynamics of swimming to rise the record of swimming match, but there are only a few investigations and these are not sufficient to solve fluid dynamic problems on swimming. The purpose of our research is to make clear the state of flow around the human body at swimming and to get the data to improve the swimming form. In addition, it is thought that there is the possibility of rising swimming record by the improvement of design and material of swimming suits.

At first step, we carried out the resistance measurement and flow observation on a rigid model of human body, in the circulating water channel at naked condition and with various swimming suits of old and now type.

As results, the water flow around the rigid model of human body at towing condition of constant form, and the effect of swimming suits on the resistance were made clear.

要 旨

我が国の水泳競技記録向上のため、水泳の流体力学研究が望まれている。しかし、十分になされているとはいえない。実際の人体形状について、水流の状態を明らかにすることが必要であり、また、水着のデザイン・材質による記録向上の可能性も考えられる。

そこで、水泳の流体力学研究の第1歩として、今回は剛体等身大人体模型を用い、回流水槽において、一定姿勢時の水流の観察と各種水着用時も含む抵抗計測を行ない、人体形状のまわりの水流の状態と水着による抵抗の差異を調べた。

その結果、両腕を前方にのばした一定姿勢の曳航時における人体まわりの水流の状態と水着の抵抗に及ぼす影響が明らかにされ、改善の可能性が示された。

ま え が き

我が国の水泳記録の向上が強く望まれている。直接水泳競技の関係者ではないが、記録の現状からみてさらに向上をはかるためには、心理、生理、体格・体形、持続力・瞬発力などの筋力・体力、これらを訓練・向上するための訓練法と体格・体形・体力を有効に用いた流体力学面で裏付けされた泳法などの研究が必要であると考えられる。

泳法改善に水泳の流体力学研究が必要であることは古くから考えられていたが、船や魚に比し人体形状が複雑であること、時間的に変動する非定常な流れであること、人体が推力を発生するとともに抵抗も受けていることなど、取扱い困難な問題が多い。したがって、若干の流体力学的視点をもった研究が少しあるようであるが¹⁻³⁾、十分に解明されているとはいえない。また、泳運動の流体力学、人体まわりの水流について、流体力学研究者による解説が若干あるが⁴⁻⁷⁾、これらは実際

に泳運動・人体まわりの水流を実験または理論計算により調べてはいない。他の形状の物体まわりの流れについての結果を基にしているようである。人体まわりの水流は、体形の複雑さ、非定常性によって、従来考えていなかった流れの状態が存在するかも知れず、これを明らかにするには、直接人体形状を用いた実験的研究が望ましい。理論計算については、境界層^{*1}、遷移^{*2}、剥離^{*3}、渦、造波^{*4}、跳水^{*5}、砕波^{*6}、飛沫、気泡巻込み、柔軟弾性体、非定常^{*7}などの現象が複雑に組み合わさり、これらを総合した取扱いは現状では非常に困難である。

人体形状についての水泳の流体力学研究としては、まず一定姿勢時における水流の研究を行ない、次いで動的な各部分の水流の研究、最終的には泳時の水流の研究を行なう順が考えられる。

そこで、本研究においては、水泳の流体力学研究の第一段階として、まず人体模型について一定姿勢時における水流の観察と抵抗計測を行ない、流れの状態を明らかにすることにした。

また、競泳においては、規格はあるが種々のデザイン・材質の水着が用いられて来た。この水着の違いにより流れ・抵抗が異なる可能性があるので、各種の水着について、流れの観察と抵抗の計測を行なうことにした。

人体模型には、第1段階として剛体等身大模型を用いた。剛体でしかも一定姿勢では、泳時の動的な流れとは、非定常、姿勢・形状の変化など多くの点で流れが異なるであろう。しかし、研究の基礎となるものであり、また、水着による抵抗の違いは参考資料となるであろう。

以上のように、本研究は人体まわりの水流を明らかにし、水着開発の参考資料を得、もって水泳記録向上のための指針を得ることを目的としている。

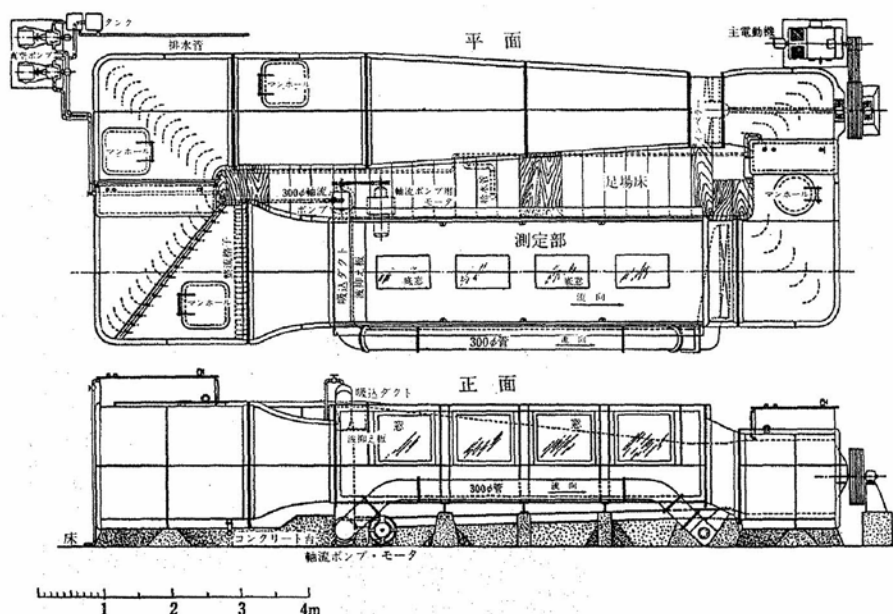


図1 回流水槽外形

表1 回流水槽主要目

型：開放水面測定部，水平循環型，鋼製
水槽本体（内法）
長さ：11,000mm
幅：4,200mm
高さ：1,650mm
測定部（内法）
長さ：5,550mm
幅：1,500mm
水深：1,100mm
主動力：30kW 電動機
水面加速装置：吸込式 動力 11kW
流速：0～1.6m/s

実験方法および装置

本研究の実験には、東京大学工学部舶用機械工学科回流水槽を用いた。この回流水槽の外形図を図1に、主要目を表1に示す。

測定部は開放水面をもち、両側と底に観察窓をもち、流れの観察が便になっている。しかし、やや旧型のため、本実験目的には窓が少し小さい感がある。

実験方法の大要は、剛体等身大人体模型を用い、裸と水着着用時について、種々の流速におけ

る流れの観察と抵抗計測である。

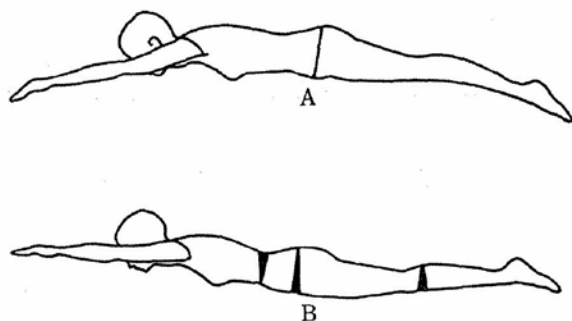
人体模型には、入手容易なるマネキン人形（女子）を改造して用いた。材質はFRPで、先年函館製網船具俣回流水槽で行なった日米代表選手の実験²⁾における初田選手の一定姿勢の抵抗計測時の写真により、初田選手の姿勢類似の姿勢に改造した。

図2に、マネキン人形改造前、改造後の側面形を示す。

改造箇所は、両手首の角度、両腕付根、胴（ウェスト）部腰部、ひざ直下である。改造後の人体模型を図3に、要目を表2に示す。

マネキン人形を利用した関係で、プロポーションは日本人と異なり、体形も違っている感じがする。

水着には、スクール水着1種、旧型競泳用水着1種、やや旧型の競泳用水着1種、現在の競泳用水着3種を用いた。なお、尻部中央のへこみを減らし、人が水着を着用した時の形状に近付けるため、アンダーショーツ（サイズM）を着用させた。水着の形状を図4～9に、水着の主要目を表



A マネキン人形原形
(Viva Sport W-208)
B 改造後人体模型

図2 改造前・改造後のマネキン人形側面形
(黒三角部は胴・脚改造部)

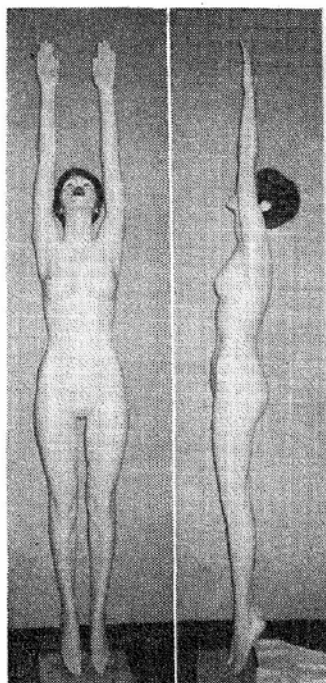


図3 人体模型

表2 人体模型主要目

全長:	2,200mm
身長:	1,700mm
胸囲:	800mm
胴囲:	600mm
腰囲:	890mm
胴長:	630mm
(肩・股間長さ)	
体積:	$46.1 \times 10^{-3} \text{m}^3$
材質:	FRP
分割箇所:	手首, 両腕 付根, 腰

3に示す.

人体模型の水流に対する姿勢, 位置は水流に大きな影響を及ぼすので, 浮き沈み(喫水または没

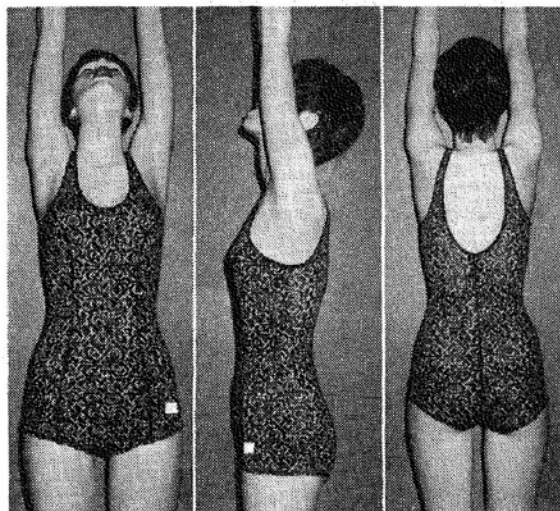


図5 水着 B

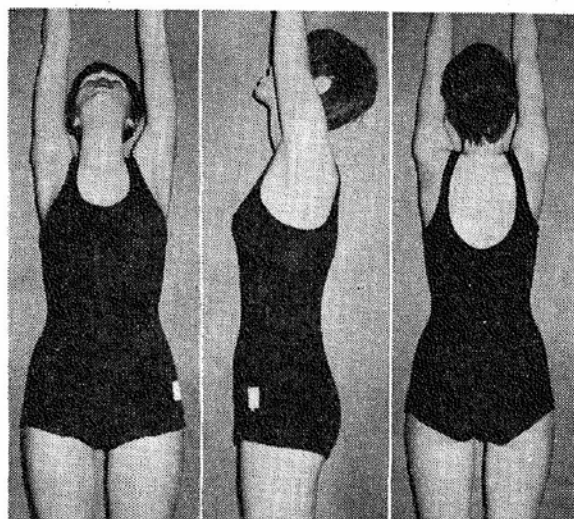


図4 水着 A

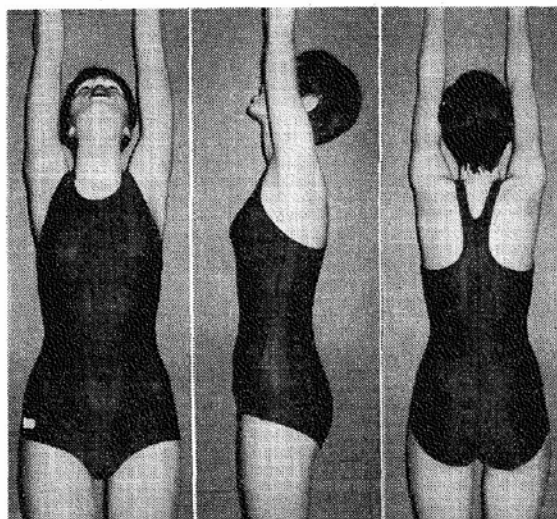


図6 水着 C

表3 水着 主要目

水着 記号	用 途	使用時期	型	表 示 サイズ	材 質	備 考
A	スクール	現 用	前ダブル	M	ウーリーナイロン	日本水泳連盟認定
B	競 泳	旧 型	前ダブル	L	ナイロントリコット	
C	競 泳	やや旧型	—	L	ウレタン混紡 ナイロントリコット	
D	競 泳	現 用	—	S	ウレタン混紡 ナイロントリコット	小さくて着せるのに難渋した
E	競 泳	現 用	—	S	ウレタン混紡 ナイロントリコット	小さくて着せるのに難渋した
F	競 泳	現 用	—	S	ウレタン混紡 ナイロン(薄地)	小さくて着せるのに最も難渋した

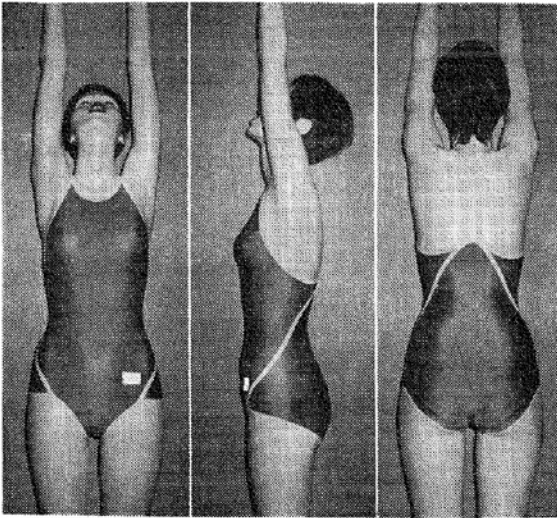


図7 水着 D

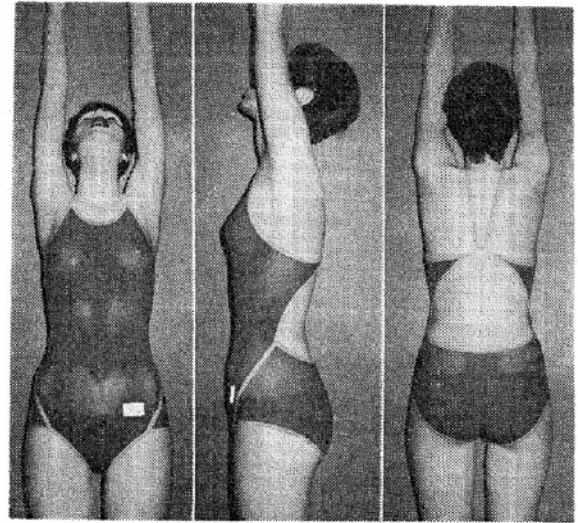


図9 水着 F

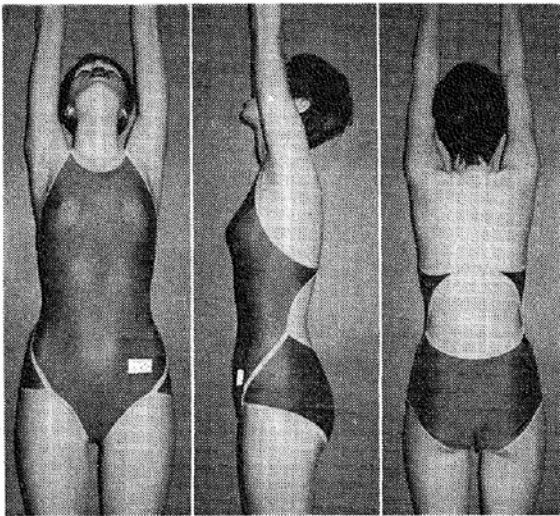


図8 水着 E

水深度), 縦傾斜 (トリム), 横傾斜を種々変えた実験が望ましい. しかし, 長期間の実験と多大の経費を要するので, 今回は, 上記初田選手²⁾ その他の結果を参考にした没水深度・トリム 1 例にとどめた.

人体模型は, 頭部 1, 足ふくらはぎ部左右計 2, 合計 3 点に吊下金具を取付けてあり, 頭部吊下金具位置で頭上面が水面上 110mm, 両脚吊下金具位置で右ふくらはぎ上面が水面下 144mm, 左脚ではふくらはぎ上面が水面下 136mm である. マネキン人形は若干左右非対称にできていて, 両肩上面が同程度に水面すれすれにした関係で, 左右脚の没水深度が少し異なることになっ

た.

マネキン人形は内部が空洞で, 上記没水深度に沈めるには大きな力を要し, 抵抗計測上不都合である. そこで, 流れの観察および抵抗計測に支障ないような位置に小径の孔をあけ, 人体模型内部に水を満した. このようにすると, 抵抗計測装置に人体模型の重力 (重量と浮力の差) が加わり, 不都合が残る. 回流水槽上に左右 2 個の静水槽を設け, これに浮体 (フロート) を浮べ, 浮体から人体模型を流線形支柱 3 本により吊下げることにした. これにより, 抵抗計測装置には重力も浮力も加わらない. この頭部吊下支柱に曳航桿を取付け, レバーを介して抵抗検力計に接続した. 研究室備付けの力変換器の関係で, レバー比は 1:10 である. 抵抗検力計は磁歪式力変換器付きで, てんびんにより抵抗による力の大部をてんびんの分銅調整により打消し, 残りを力変換器により電気信号とし, 記録計によりアナログ記録した. 電子回路によるフィルターは備えているが, 比較的長週期的変動が残るので, デジタル式は用いなかった. 人体模型支持装置および抵抗計測装置の概略を図 10 に示す.

実験流速は約 0.7~1.5m/s とした. 自由形では, 泳時平均速度は 1.8m/s 程度と考えられるの

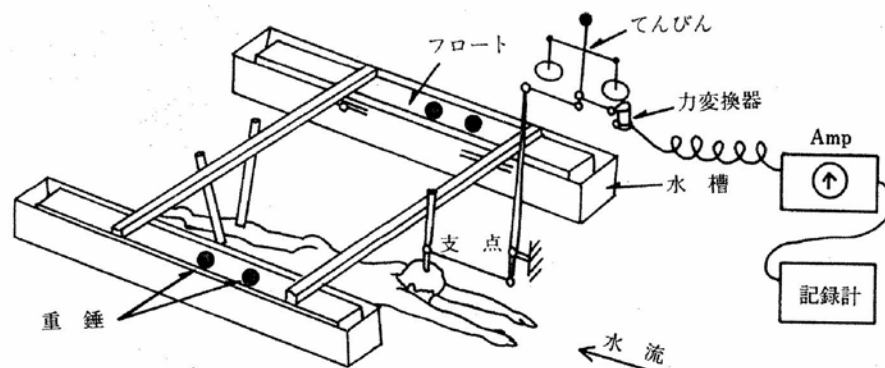


図10 人体模型支持装置および抵抗計測装置

で、1.5m/s ではやや不足であるが、今回の研究目的からはこの範囲でも良く、また、本回流水槽の現状では、より高速の実験は困難である。

流れの観察には、種々の流れの可視化法があるけれども、流速 1~2m/s の水面付近の物体まわりの流れに適した実験法は少ない。本実験においては、裸状態の流速約 1.5m/s に対して、油膜法を用いて人体模型表面の流れの状態を調べることにした。

油膜法とは、油と顔料の混合物を供試物体に塗り、その油膜が流れにより下流に筋をなしてなびき、供試物体表面に筋模様が生じるが、これを利用し、物体表面ごく近傍の流れの状態を知る方法である。供試物体表面が滑らかで、油がしみ込まないことを要するので、水着着用時にはこの方法は不適當である。

注入流脈法^{*8}は、流速が大きいと一般に良好なコントラストが得られず、低流速に適するので、低流速で小数例試みるにとどめた。その他、水面の状態の観察、水流中に混在する小気泡による流れの観察も行なった。他に、タフト法の使用を考えたが、準備作業に長期間と手間を要するので、今回は見送り、次回に回すことにした。

流速の計測については、回流水槽の流速分布、実験物体の影響など考慮しなければならない。本実験では、足先付近の右側方、回流水槽側壁から

約 300mm 離れた位置に、水深約 250mm に翼車式流速計を常時置いて計測した。

実験結果

裸状態における剛体人体模型の抵抗計測結果を図11~13に示す。

図11は抵抗 R_t と流速 V の関係、図12は排水量 1kg 当りの抵抗と流速の関係、図13は抵抗係数 C_t^{*9} とフルード数 F_n^{*10} の関係を示す。なお、参考のため、初田選手の抵抗計測結果も記載した。

水着着用時における剛体人体模型の抵抗計測結果を図14、15に示す。

この場合は、水着相互の比較ができれば良いので、抵抗と流速の関係の図示にとどめた。

油膜法による実験結果の写真を図16、17に示す。

注入流脈法の結果の一例を図18に示す。

水面状態観察結果の例を図19に示す。

考 察

図11に示す裸状態の抵抗計測結果は、数回の実験により再現性を確認したものである。記載はしなかったが、没水深度・トリムが変わると抵抗がかなり変わる結果を得たので、没水深度・トリムを流速にかかわらず常に一定になるよう調整し

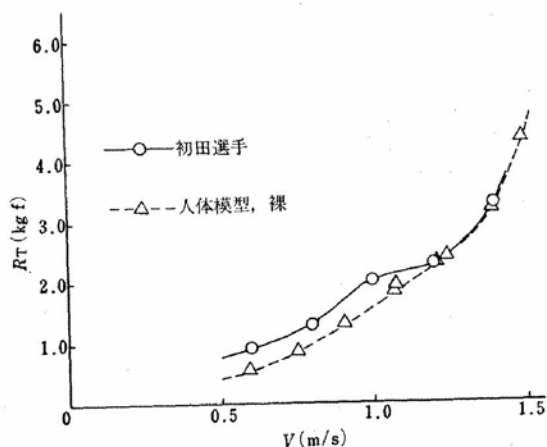
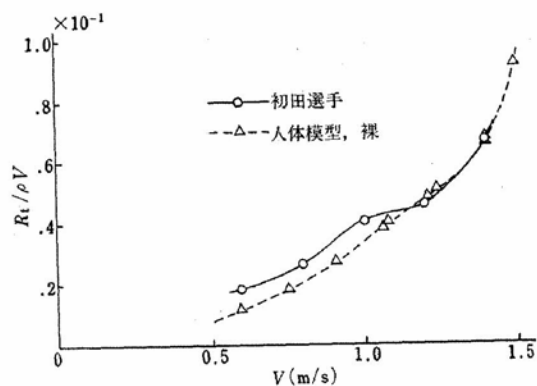


図11 人体模型の抵抗 ($R_T \sim V$)

た。この結果は初田選手の結果と比較的近いが、身体の形状・寸法が違い、初田選手の場合、流速により姿勢の変化が見られたことを考慮する必要がある。選手の抵抗計測の時、流速が増加するに従い、没水深度の変化やトリムの減少が見られた。これが、高速域で人体模型の抵抗に近付いた一因と考えられる。

図12は単位排水量（全没状態）当りの抵抗で、近似的には筋肉の単位重量当りの抵抗の目安を表わすと考えられる。初田選手の結果より高速域で〔抵抗〕/〔排水量〕がわずかに大きくなっている。人体模型の方が身長が大きく、したがってレイノルズ数^{*11}が大きく、フルード数が^{*10}が小さく、さらに瘠形であるにもかかわらず、このような結



ρ は水の密度、 ∇ は身体の体積
初田選手は体重 47.7kg から身体
の比重0.99と仮定して算出。

図12 単位排水量当りの抵抗

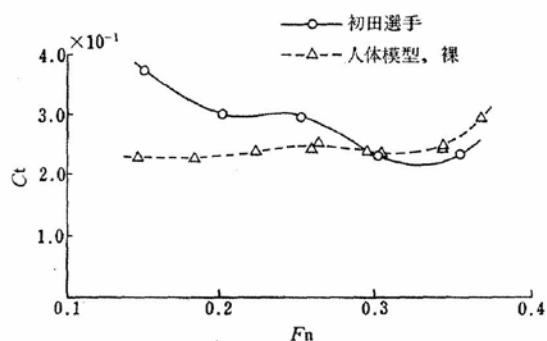
果となった原因は、体形、プロポーションなどの違いが原因の一つであろう。また、後に述べるように、造渦、造波など流体力学的性能が劣っていることも原因にあげられる。

以上、図11、12は、水泳競技記録面での優劣の参考にするため、流速をそのまま用いて図示した。流体力学面から抵抗性能、形状の優劣を知るには、抵抗と流速の無次元値すなわち抵抗係数、フルード数またはレイノルズ数を用いて表わす必要がある。

図13は、身体体積を考慮した抵抗係数の造波抵抗性能面における優劣を知るための図である。低速域では、初田選手の姿勢を適当にできなかった関係で、初田選手の抵抗係数が人体模型よりかなり大きくなっているが、流速の増加とともに姿勢が良くなった関係で抵抗係数が小さくなり、高速域では人体模型より小さくなっている。これは高速域で、造渦が減少し、造波面でも若干改善されたことと体形の違いが原因であろう。

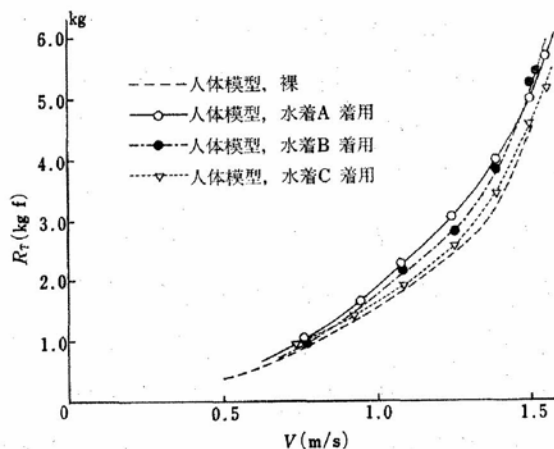
図14は、この流速範囲では水着着用時はすべて裸時より抵抗が大きくなることを示している。

水着Aは、流速にかかわらず、人体模型表面に密着しているようであったが、抵抗は約 1.4m/s 以下では最大であった。これは、材質とデザイン



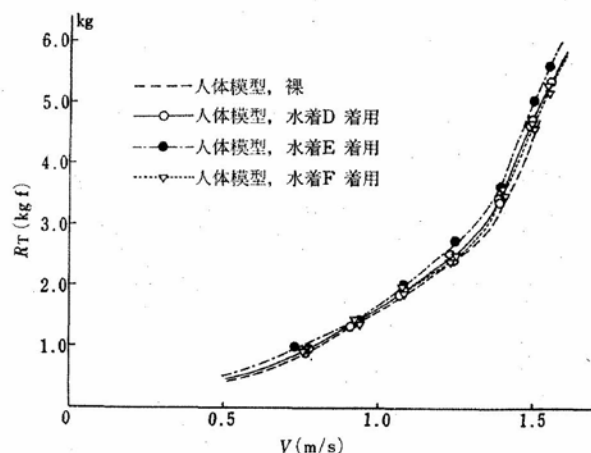
抵抗係数 $C_T = [\text{抵抗}] \div \left[\frac{1}{2} \times (\text{水の密度}) \times (\text{身体の体積})^{\frac{2}{3}} \times (\text{流速})^2 \right]$
フルード数 $F_n = [\text{流速}] \div [(\text{身長}) \times (\text{重力の加速度}) \text{の平方根}]$

図13 人体模型の抵抗係数



(水着A, B, C着用時)

図14 人体模型の抵抗



(水着D, E, F着用時)

図15 人体模型の抵抗

が原因であろう。裸時と比較すると、約 1.4m/s 以上では抵抗曲線の傾斜が小さくなっている。これは、尻部下流の水面状態が裸時より暴れず、造渦抵抗、造波抵抗などが減少したことが原因の一つと考えられる。

水着Bは、約 1.4m/s 以上では抵抗が最大で、これは胸部で水をすくい、材質の関係によるためか水が抜けず、尻部がふくらんだことが原因で造渦抵抗・造波抵抗が増加したものと考えられる。尻部下流の水面状態の暴れは大きかったことから、これが推定できる。

水着Cは、水着A, Bよりかなり抵抗が小さいが、流速約 1.2m/s 以上で胸部から水をすくい、胸部布地にはためきが見られた。また、裸時と比較すると、約 1.4m/s 以上では抵抗曲線の傾斜が小さくなっている。これは尻部下流の水面状態が裸時より暴れていないことが原因の一つであろう。

回流水槽の性能と抵抗計測装置の強度の関係で、今回はより高速の実験はできなかったが、もし水着Cの 1.5m/s 付近での抵抗曲線の傾向がより高速域まで保たれるならば、水着Cは、より高速域で裸時より抵抗を小さくする可能性が考えられる。

図15は、現在使用されている型の水着着用時の

抵抗と裸時の抵抗の比較を示す。水着D, E, Fのうち、水着Eは流速約 1.1m/s 以上では抵抗が最大で、同一デザインの水着Fと同一材質の水着Dより大きい。肩ひも背部の処理、ウェスト部両脇の隙間からの水の流入流出、サイズの実質的な違い、縁材・布地の伸縮性などで違いが現われたのではないかと考えられる。流速約 $1.2\sim 1.4\text{m/s}$ で、水着Dはわずかではあるが水着着用時の抵抗が最も小さいようであるが、流速 1.5m/s 以上では水着Fとほとんど同じになっている。水着D, E, FはSサイズであるため、丈と腰囲りが本人体模型には小さ過ぎ、着せるのに難渋した。特に水着Fは腰囲りが小さく着せるのが困難で、甚しく難渋した。これが、胸部や尻部の着用時外形に影響し、高速域での抵抗曲線が裸時に類似した傾向となったのであろう。

油膜法の結果から、人体模型表面の流れを判定し図示すると、図20のようになる。

剥離泡^{*12}、剥離線^{*13}、付着線^{*14}が各部に見られ、流体力学的には良い形状とはいえない。剥離線、付着線の存在とその形状から、渦が下流に放出され、造渦抵抗を生じていると考えられる。あごと首前中心線の剥離線により、あご部の剥離と首前部の剥離渦の存在がわかる。これは、水槽水に混入した気泡の動きからも認められた。首後部

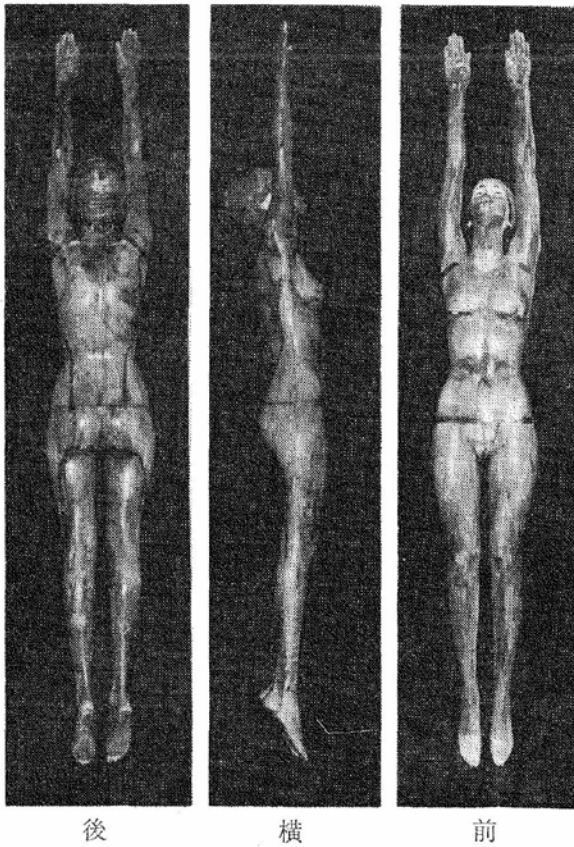


図16 油膜法の結果

から背中心にかけて油膜が濃い領域があり、円形の模様もある。首と両腕の付根の間から上方に水が吹上げ、この領域で水流の方向が一定せず暴れ

た状態になっているため、円形模様は渦の発生を示しているようである。両腕の付根背側に剥離線があり、これの側部から腰部にかけ明りょうな剥離線があり、これは強い剥離と渦発生を示している。乳房部では横方向の剥離線、これから腕付根側部へ連なる剥離線、横方向の剥離線からアンダーバスト部を経てウェスト側方へ連なる弱い剥離線、アンダーバスト部では中心から側方へ向かう付着線が見られ、複雑な剥離状態・渦発生状態を示している。ウェスト部前中心付近で油膜が菱形状に濃くなっているが、胸廓下部の胃部に当たり体形がやや凹んでいるので、弱い剥離泡（弱い死水域）^{*15} となっているためかと考えられる。この菱形油膜域下流の油膜筋は、ややへそ両側付近で中心よりに向いている。尻部では、中心から両腿側方に向け強い剥離線と尻下流の腿後部に楕円形の剥離泡と思われる模様が現われている。足首部では、接地面との角に剥離線がある。その他、手首では甲の関節部、掌の付根に油膜がたまり、小さな剥離泡の存在を示している。

水面上からの直接観察では、下記の流れが見ら

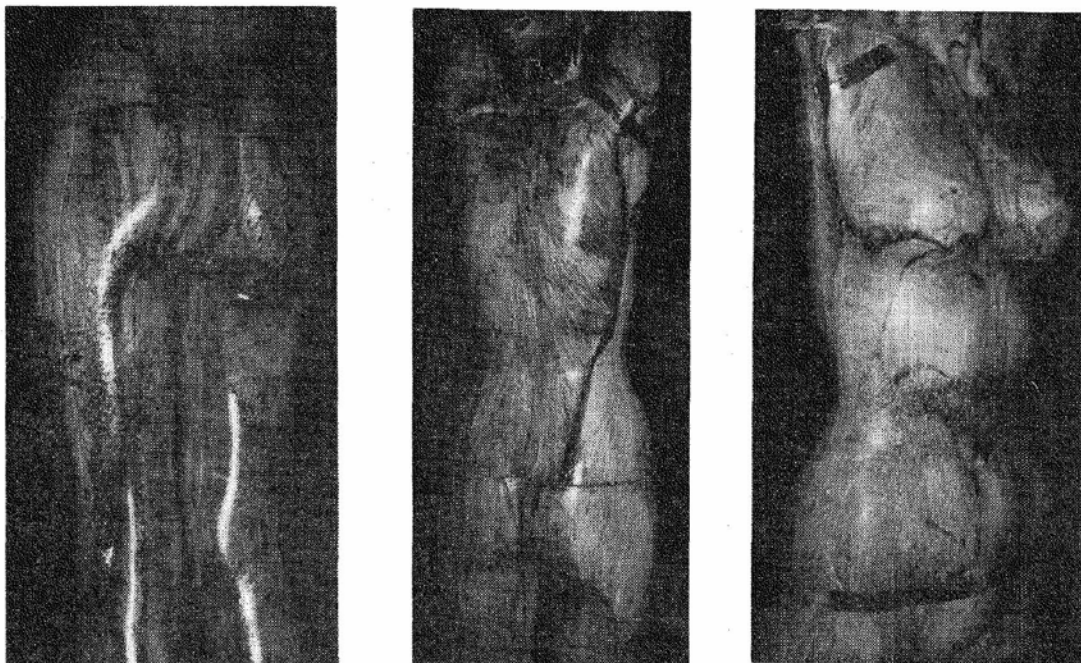
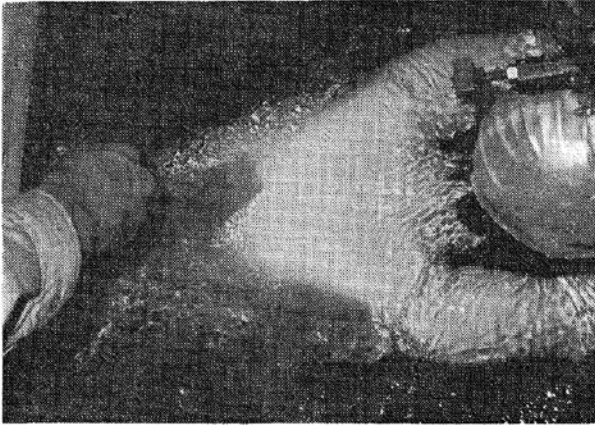


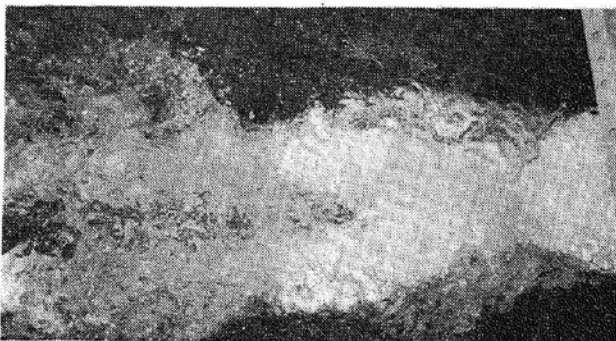
図17 油膜法の結果



(注入流脈法)
図18 背および脇の逆流



a) 背部 流れ ←



b) 腰とその下流 流れ ←



流れ → c) 尻とその下流(側方から見る)

図19 水面状態 (流速 1.5m/s)

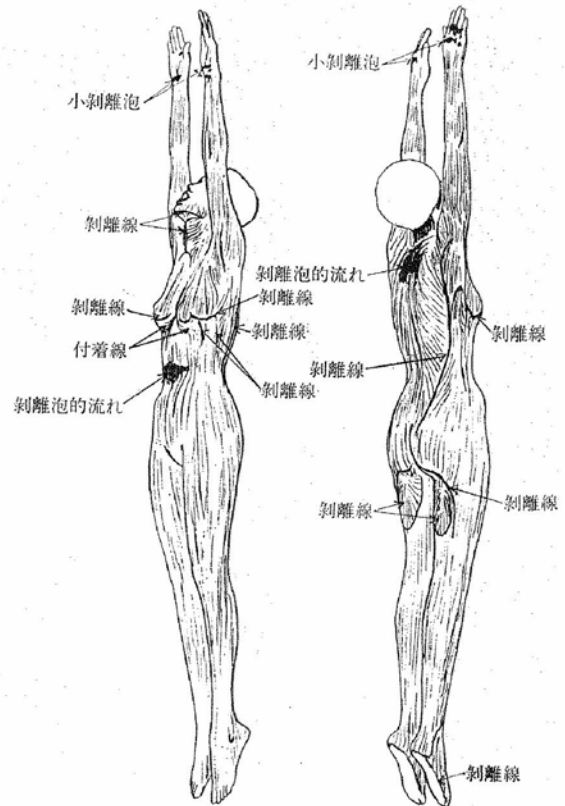


図20 人体模型表面の流れ

れた．首と両腕付根との間の肩部から上方に水が吹上げて乱れ，その下流の背に沿う流れは射流^{*16}状態と思われ，ウェスト部および両側に斜に流れ込んでいる．両腕付根側部からウェスト側方にかけて，水面が凹むとともに剥離と逆流がある．背を流れた射流は，ウェスト部よりやや上流で跳水的な水面状態を示し，水面が不規則に盛り上がり，造波し逆流している．

図18は，ウェスト部に染料液を注入すると，この逆流により跳水的の水面前端，両腕付根側部にまで染料液が達することが示されている．尻下流では，跳水的な水面の盛り上がり，激しい乱れ，造波が見られる．これは，裸時に特に甚しいようである．(図19参照) 尻部にも染料液を注入し観察してみたが，激しい乱れのため拡散が甚しく，観察が困難であった．頭部の前方と側方には，水面の盛り上がりと巻返しがみられ，八字波を作っている．この巻返しにより，えりまき渦の発生が推定され

る。しかし、染料液注入によりこの観察を試みたが、明りょうには見えなかった。

本実験に用いた人体模型は、選手体形と大幅に異なっている。例えば、首と両腕付根の間の隙間（肩の隙間）が大きいこと、大腿間の隙間が大きいこと、尻の形状が異なり、中央の凹みが広いこと、やせ型であること、乳房の形状・大きさが異なり、競泳用水着着用人体に比較して突出量が大きく、また位置が高いこと、肩幅がせまいこと、プロポーションなどである。また、市販水着の寸法と対比すると、身長の間ではLサイズ、胸囲・胴囲ではSサイズ、腰まわりではMまたはLサイズに相当する。実際の人体・選手の体形では、上記の流れの状態と若干異なる場合がある。しかし、基本的には、現象の強弱はあっても、極端な大差はないであろう。したがって、本人模型の実験により、一定姿勢の曳航時における人体まわりの水流の状態が大体明らかにされたと考えられる。

また、本人体模型は剛体とみなしうるので、人体のような柔軟弾性体と異なる点がある。例えば、流れによる変形、水着着用による変形、水着の縁の食込みによる水のすくい込みの減少がある。柔軟弾性体の人体模型使用が望まれる。

肩ひも背部のデザインについては、裸、水着A、B、Fの背部水流状態の観察結果と水着D、Eの結果とを比較すると、水着D、Eではひも取付部で水面の盛上りと乱れが見られ、抵抗にわずかながらも影響を及ぼすと考えられる。また、油膜法の結果を見ると、背部では流れは斜側方に向い、ひもと交叉する方向になっている。流れの方向にひもが向けられれば、わずかではあろうが流体力学的に改善できるかも知れない。

水着の抵抗に及ぼす影響としては、プラス面とマイナス面とがあり、水のすくい込み、ふくらみ、布面の波打ち（はためき）、表面粗さ、体形

変形、締付けによる排水容積の減少、厚さによる排水容積の増加、縫目、縁、ひもによる攪乱、体外部から見た体表面の柔軟性の変化などが考えられる。水着による体形変化を利用し、剝離・渦の発生を抑制し、また造波を減らし、抵抗を減少できる可能性が考えられる。これを実現するには、選手各個人の体形に応じた、また自由形、平泳などそれぞれの競技ごとにオーダーメイドの水着となるかも知れない。また、訓練によって体形を変え、抵抗を減少する可能性もあるかも知れない。

む す び

以上、水泳競技記録の向上をはかるため、人体まわりの水流および水着の影響を知る第一歩として、一定姿勢の曳航時において、剛体等身大人体模型の抵抗計測と流れの観察を行なった。その結果の大略は下記ようになる。

(1) 水着の抵抗に及ぼす影響は無視できない。

(2) 本実験に用いた人体模型のまわりの水流が大体明らかになった。水流は複雑で、体形の改善により抵抗を減少できる可能性がある。

今後、引続いて本人体模型を用い、タフト法などにより流れの状態を調べる予定であるが、さらに可能ならば、柔軟弾性体人体模型を作り実験を行ない、次いで運動時の動的な水流状態の研究、最終的には泳運動時の水流の総合的研究をしたいと考えている。

文 献

- 1) 宮下充正；泳運動のパワー，第1回キネシオロジー・セミナー，身体運動の科学（1971）
- 2) 宮下充正，他；泳法の分析的研究，日本体育協会スポーツ科学研究報告集，日本体育協会（1975）
- 3) 波多野勲；水泳の力学的考察，Nagere，第9巻第2号，流体力学懇談会（1976）
- 4) 種子田定俊；自己推進運動を行う物体の抵抗，Nagere，第9巻第2号，流体力学懇談会（1977）
- 5) 高木隆司；水泳の流体力学，Nagere，第9巻第2号，流体力学懇談会（1977）

- 6) 種子田定俊, スポーツと抵抗, 数理科学 No. 181 (1978)
7) 高木隆司ら; 泳ぐ, 数理科学 No. 181 (1978)

注)

- *1) 境界層: レイノルズ数^{*11} の大きな粘性流体の流れにおいて, 粘性により物体表面ごく近傍の流速が外部より急に小さくなる薄い層をいう。
- *2) 遷移: 境界層にはその内部では流れが層状に流れ不規則なマクロな混合がない層流境界層と, 流体粒子が不規則なマクロな混合をする乱流境界層とがある。流れが, あるレイノルズ数より大きくなると, 境界層は層流から乱流に移り変わる。これを遷移という。層流より乱流の方が摩擦抵抗は大きいが剝離^{*3}は起りにくい。
- *3) 剝離: 物体のまわりの流れが, 下流に行くに従い流速が小さくなる場合, 圧力は下流に行くに従い高くなる。この場合境界層内の流れは, 物体表面との摩擦と圧力が高い下流へ流れ込むためにより運動エネルギーを失ってしまうことがある。すると, 上流側が圧力が低いので逆流し, 上流から来る流れはこれとぶつかり, 物体表面から剝れる。これを境界層の剝離といい, 抵抗増加の原因となる。
- *4) 造波: 水面付近の物体の運動により水面に波が発生する。物体の進行により後方に八字形の波と八字波の内側に物体の進行方向の直角な横波とが生じる。造波にエネルギーを要するので造波抵抗を生じる。
- *5) 跳水: 開放水面のある水路の流れが射流^{*16} から常流^{*17} へ変わる場所では, 水面が急に盛上り甚しい攪乱が生じる。この現象を跳水といい, エネルギー損失が生じる。
- *6) 碎波: 水面の波が崩れ, 巻込み, 乱れた流れとなる現象をいう。
- *7) 非定常: 時間とともに変化する場合をいう。
- *8) 注入流脈法: 流れの可視化法の一つで, 流れの中に染料液や煙を細管, 孔, スリットなどから注入し, それが流れて行く様子を観察する方法である。
- *9) 抵抗係数: 抵抗の無次元値で, $[\text{抵抗}] \div [\frac{1}{2} \times (\text{流体の密度}) \times (\text{流速})^2 \times (\text{物体の代表面積})]$ である。物体の代表面積には, 最大正面面積, 浸水面積, 最大投影面積, 物体の長さの2乗, 物体の体積の $\frac{2}{3}$ 乗などが用いられる。
- *10) フルード数: 造波現象など重力の影響がある流れを支配する無次元数で, $[\text{流速}] \div [(\text{物体の代表寸法}) \times (\text{重力の加速度})^{\frac{1}{2}}]$ である。慣性力と重力の比を意味し, フルード数が等しい時, 相似形状物体の造波現象は相似になる。
- *11) レイノルズ数: 粘性流体の流れを支配する無次元数で, $[\text{物体の代表寸法}] \times [\text{流速}] \div [\text{流体の動粘度}]$ をいう。慣性力と粘性力の比を意味し, レイノルズ数が等しい時, 相似形状物体のまわりの粘性流体の流れは相似になる。
- *12) 剝離泡: 剝離した流れが再び物体表面に付着する場合がある。この剝離から再付着に至る流れの内側の領域を剝離泡という。
- *13) 剝離線: 物体表面のこの線上で剝離が生じている時, この線を剝離線という。
- *14) 付着線: 物体表面のこの線上で流れが物体に付着する時, この線を付着線という。
- *15) 死水: 流れの中におかれた物体付近で, 剝離により流れが止まっていることを死水という。
- *16) 射流: 開放水面をもつ水路の流れで, $[\text{流速}] > [(\text{重力の加速度}) \times (\text{水路の水深})^{\frac{1}{2}}]$ の場合を射流という。
- *17) 常流: 開放水面をもつ水路の流れで, $[\text{流速}] < [(\text{重力の加速度}) \times (\text{水路の水深})^{\frac{1}{2}}]$ の場合を常流という。