# 水泳における人体の姿勢と水着に関する流体力学的研究

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

# Researches on the Fluid Dynamics of Swimming for the Constant form of Human Body and Swimming Suits

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

## ABSTRACT

It is desired that the fluid dynamics of swimming is researched to rise the Japanese record of swimming match. Therefore, in 1983, we carried out the experimental research on water flow around human body and effects of swimming suits, and made clear the water flow at towing condition of constant form and effects of swimming suits on the resistance.

In this research, as next step, we carried out the resistance measurements on a same rigid model of woman body at various trim and sinkage condition, with various swimming suits and without, and the flow observation by means of surface tufts and oil film.

As results, effects of trim, sinkage and swimming suits on the resistance and water flow around human model were made clear, and the reduction of resistance amounted to about 6% by the improvement of swimming suits design.

In addition, the difference of water flow around the woman body with

swimming suits for match and leisure, was made clear by flow observation.

## 要　　旨

我が国の水泳競技記録の向上のため，水泳の流体力学的研究が望まれている．そこで，1983年「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[9]」を行い，一定姿勢の曳航時における水流の状態と，水着の抵抗に及ぼす影響を明らかにした．

今回は同一の女子剛体等身大模型の縦傾斜（トリム）と没水深度を変え抵抗を計測し，水流抵抗に及ぼす姿勢の影響を明らかにし，油膜法とタフト法により人体形状まわりの水流を調べた．

現用競泳用水着着用時における抵抗を計測し，サイズおよび型の影響を調べ，さらに競泳用水着の改造を行って，抵抗値を約6％減少させることが出来た．人体模型の形状も変え，タフト法によって流れを観察したが，流れは改善されており，水着による体形変更の効果が示された．

また，実際に被験者を用い競泳用水着と遊泳用水着について，タフト法実験により水流の違いを明らかにした．

## ま え が き

1984年夏のロサンゼルスオリンピックにおける我が国の水泳の成績はまったく不振であった．日本の水泳界を世界の水準に到達させるには，種々の条件，方法があげられるが，その一つに水泳の流体力学的研究がある．

訓練方法の開発や泳法を改善するに当り，流体力学的に見て人体の形状は複雑であり，しかも変動しつつ，自ら推力を発生し，また抵抗を受ける，という取扱い困難な問題が多い．従来流体力学的視点から行われた研究も若干[1~3]あるが，十分解明されたとは言えない．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あるが[4~8]，これらは実験や理論計算によったものではなく，人体及びその模型は使用されておらず，他の単純な形状の物体まわりの流れを基にしている．

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が望ましい．理論計算については，境界層*1，遷移*2，剝離*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れ，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う順が考えられる．

そこで昨年は，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い，さらに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った．

本研究の場合，人を実験対象にすると，体調，疲労度，呼吸，排泄，気分などの点で実験結果の再現性・安定性に問題があり，また安全性・都合調整の点もあるので人体模型を用いる．この人体模型には，第1段階として剛体等身大模型を用いた．

昨年の研究[9]において，水着のデザイン，布地による抵抗値の差異は無視出来ないものであっ

た．また人体模型表面に油膜を塗布して得られた油膜筋により流線の方向，剝離，剝離線*8 位置，付着線*9，死水領域*10，射流個所*11 などが明らかにされた．

今回はこれに引続いて，回流水槽において同一の人体模型を用い，縦傾斜（トリム），没水深度を変えた姿勢変更時の抵抗計測と，油膜法*12 および表面タフト法*13 による流れの観察を行い，姿勢の影響を調べた．水着については現用競泳用水着および改造試作水着着用時の抵抗計測を行い，抵抗の差異を調べ．水着による抵抗減少の可能性を調べた．さらに小数例ではあるが，被験者を用い競泳用水着とレジャー用水着の水流の差異も調べた．

剛体で一定姿勢の人体模型では，人が泳ぐ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異なるであろう．しかしこれらの実験は今後の研究の基礎となるものであり，泳法の改善や水着の開発の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について流体力学的研究を行い，泳法の改善と水着開発の参考資料を得，もって我が国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．

## 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および石川島播磨重工業㈱技術研究所回流水槽（以下 IHI と略記，ただし，IHI で実験した場合だけ IHI と特記）を使用した．これらの水槽の外形を**図1**，**図2**に，主要目を**表1**，**2**示す．

測定部はいづれも開放水面をもち，両側と底面に観測窓が有り，流れの観察に便になっている．

実験方法の大要は，剛体女子等身大人体模型を用い裸と水着着用における流れの観察と抵抗計測である．

人体模型は，先年函館製網船具㈱回流水槽で行った日米代表選手の実験[3]時における初田選手の姿勢と類似に FRP 製マネキン人形（女子）を改造したものである．**図3** にマネキン人形の改造前，改造後の側面形を示す．

改造個所は両手首の角度，両腕付根，胴（ウエスト部）腰，膝直下である．改造後の要目を**表3**に示す．マネキン人形を利用した関係で，身体各

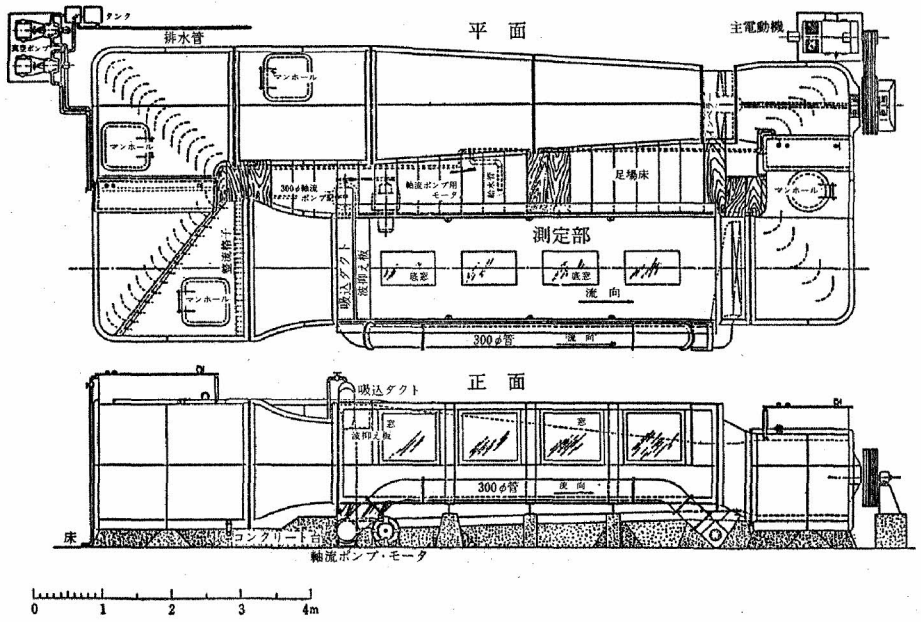



**図1** 東京大学工学部舶用機械工学科回流水槽外形

**表1** 東京大学工学部舶用機械工学科回流水槽主要目

| |
|---|
| 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：0～1.7m/s |

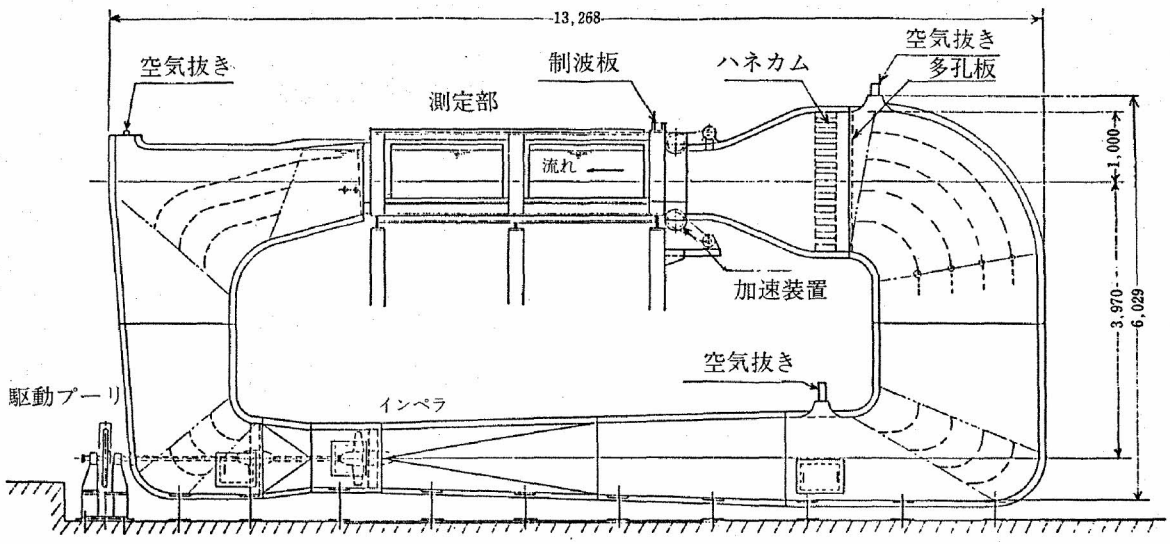


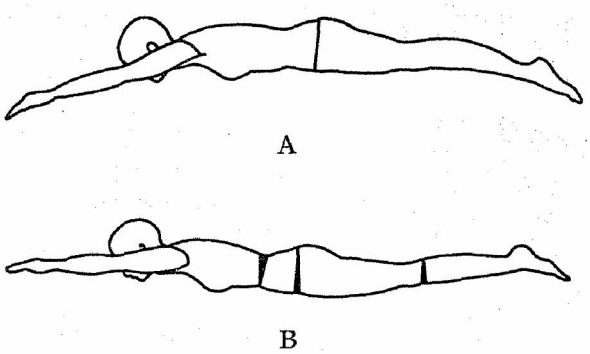

**図2**　石川島播磨重工業㈱技術研究所，回流水槽外形

**表2**　石川島播磨重工業㈱回流水槽主要目

| | |
|---|---|
| 型；開放水面測定部，垂直循環型，鋼製 | |
| 水槽本体外形寸法 | |
| 長さ | 13,268mm |
| 幅 | 1,968mm |
| 高さ | 5,750mm |
| 測定部 | |
| 長さ | 4,700mm |
| 幅 | 1,800mm |
| 水深 | 900mm |
| 主動力 | 22kW 電動機×2 |
| 水面加速装置 | ローター式 |
| 流速 | 0～2.7m/s |

**表3**　改造後の人体模型主要目

| | |
|---|---|
| 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 | $46.1\times10^{-3}m^3$ |
| 材質 | FRP |
| 分割個所 | 手首，両腕付根，腰 |




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

**図3**　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）

部の寸法は日本人と異なり，また体形は水泳選手に似ていない．なお，実施した体形変更はウエスト部にスポンジとさらし布を巻き「ずん胴」にした1種のみである．

### 1）姿勢変更時の抵抗計測

人体模型の水面に対する姿勢，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．しかしながらこれらを種々組合せた実験は長期間の実験と多大の経費を要するので，帽子着用・水着不着用の裸状態におけるトリム・没水深度変更時の実験にとどめた．

人体模型は頭部 1，ふくらはぎ左右各 1，計3点に吊下金具が取付けてあり，頭部吊下金具位置で頭部上端が水面上 110mm，両脚吊下金具位置で水面下 140mm，（左・右とも）を標準姿勢（姿勢番号①）とした．**図4**に標準姿勢を示す．今回は伸長伏位姿勢のみである．実験姿勢を**表4**に示す．

マネキン人形（人体模型）は内部が空洞で，上

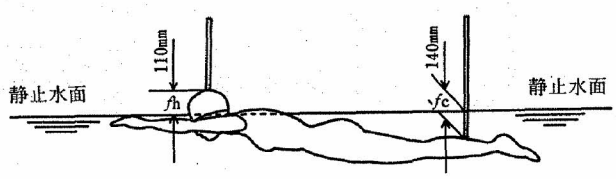



**図4**　標準姿勢①

表4　人体模型抵抗試験姿勢一覧表（$f_h$, $f_c$：図4参照）

| 実　験　姿　勢 | 頭 部 $f_h$ | 右脚部 $f_{cr}$ | 左脚部 $f_{cl}$ | 姿勢番号 |
|---|---|---|---|---|
| 標　準　姿　勢 | +110 | −140 | −140 | ① |
| トリム脚下方 30mm 下げ | +110 | −170 | −170 | ② |
| トリム脚上方 30mm 上げ | +110 | −110 | −110 | ③ |
| トリム頭下方 160mm 下げ | − 50 | −140 | −140 | ④ |
| 標準姿勢平行沈下 160mm | − 50 | −300 | −300 | ⑤ |
| 標準姿勢平行沈下 110mm | ± 0 | −250 | −250 | ⑥ |
| 標準姿勢平行沈下 60mm | + 50 | −200 | −200 | ⑦ |
| 標準姿勢平行浮上 50mm | +160 | − 90 | − 90 | ⑧ |

(+) 水面上の高さ，(−) 水面からの深さ

記トリム・没水深度の姿勢にするのは大きな力を要し，人体模型の強度と抵抗計測上不都合である．それで，流れの観察および抵抗計測に支障ないような位置に小孔をあけ，人体模型内部に水を充満した．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，若干不都合が残る．

そこで，回流水槽上に左右2個の静水槽を置き，これに浮体（フロート）を浮べ，浮体連結棒から人体模型を，流線型支柱3本によって吊下げた．これにより，抵抗試験装置には重力も浮力も加わらない．頭部吊下支柱に曳航桿を取り付け，レバーを介して抵抗検力針に接続した．

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で，抵抗による力の大部分をてんびんの分銅で調整して打消し，残りを力変換器により電気信号として取出し，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，比較的長週期の変動が残るので，デジタル式は用いなかった．人体模型支持装置及び抵抗計測装置の概略を**図5**に示す．

実験流速は約 0.4〜1.7m/s とした．自由形では泳時平均速度，1.8m/s 程度と考えられるので，1.7m/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，また東大回流水槽の現状では，より高速の実験は困難である．

抵抗計測にあたっては，水温などの実験条件の違いによる抵抗値変化の影響を除き，比較の精度・信頼性を確保するため，比較の基準として水着

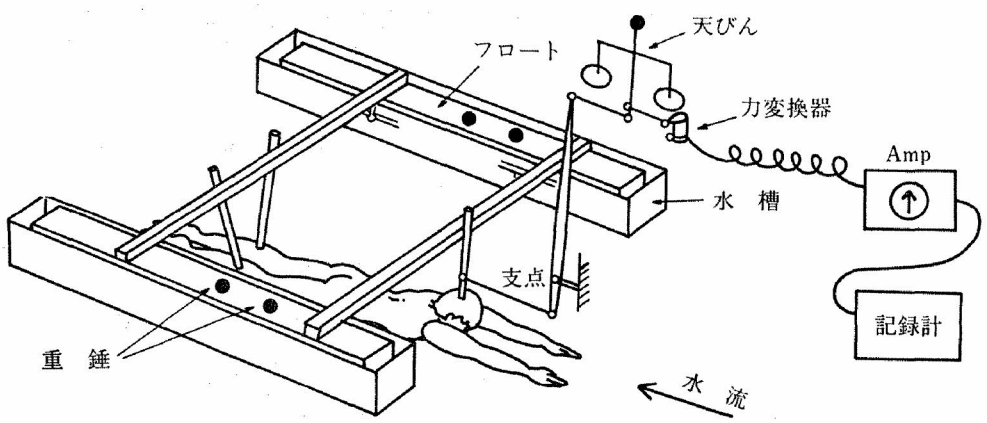



**図5**　人体模型支持装置および抵抗計測装置

不着用または，比較基準用水着着用時の標準姿勢における抵抗計測を，実験の直前または直後同一日に実施した．

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を考慮しなければならない．本実験では右足先右側，回流水槽側壁から 300mm 離し，水深 300mm に翼車式流速計を常時置いて計測した．

**2）各種水着着用時の抵抗計測**

今回使用した水着は現在使用されている競泳用2種各サイズと，その改造3種およびレジャー用1種である．実験に使用した水着の主要目を**表5**に示す．水着写真を**図6～10**に示す．

現用の競泳用水着2種のうち，一種はウェスト背部のあきがなく，太い弾性テープ（パイピング）が背上部から，もも付根前部にかけて付けられているもので，他の一種は縦縞部が縦糸のない，すのこ状になっているものである．改造は前

**表5　水着主要目**

| 水着番号 | 用途 | 表示サイズ | 材質 | 備考 |
|---|---|---|---|---|
| G | 競泳 | O | ナイロン 80%<br>ウレタン 20% | 市販品そのまま<br>G～Jは同一型番 |
| H | 競泳 | L | ナイロン 80%<br>ウレタン 20% | 市販品そのまま<br>G～Jは同一型番 |
| I | 競泳 | M | ナイロン 80%<br>ウレタン 20% | 市販品そのまま<br>G～Jは同一型番 |
| J | 競泳 | S | ナイロン 80%<br>ウレタン 20% | 市販品そのまま<br>G～Jは同一型番 |
| K | 競泳 | O | ナイロン 75%<br>ポリウレタン 20%<br>ポリエステル 5% | 市販品そのまま，縦縞部が水抜きになっている．<br>K～Qは同一型番 |
| N | 競泳 | L | ナイロン 75%<br>ポリウレタン 20%<br>ポリエステル 5% | 市販品そのまま，縦縞部が水抜きになっている．<br>K～Qは同一型番 |
| P | 競泳 | M | ナイロン 75%<br>ポリウレタン 20%<br>ポリエステル 5% | 市販品そのまま，縦縞部が水抜きになっている．<br>K～Qは同一型番 |
| Q | 競泳 | S | ナイロン 75%<br>ポリウレタン 20%<br>ポリエステル 5% | 市販品そのまま，縦縞部が水抜きになっている．<br>K～Qは同一型番 |
| R<br>（改1） | — | S | ナイロン 80%<br>ウレタン 20% | 水着Jと同一のものを，背中の紐をV形からY形に改造 |
| T<br>（改2） | — | L | ナイロン 80%<br>ウレタン 20% | 水着Hと同一のものを縁どりとパイピングを布地の内側に付けかえ |
| U<br>（改3） | — | L | ナイロン 80%<br>ウレタン 20% | 水着Hと同一のものを縁どりとパイピングを布地の内側に付けかえ，ヒップ中央部に水排出孔を設置 |
| V | レジャー用 | 9M<br>（Bカップ） | ナイロン 85%<br>ポリウレタン 15% | Vカット　バストパッド付 |

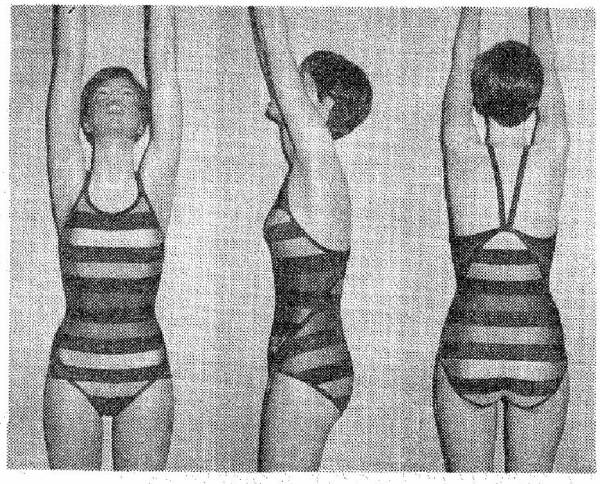


図6　水着 H（原型）
（水着 G, H, I, J は同一型番）

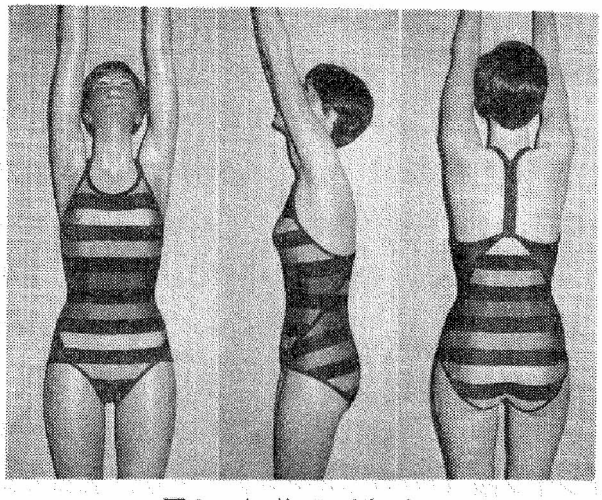


図9　水着 T（改2）
（水着Hと同一のものを改造）

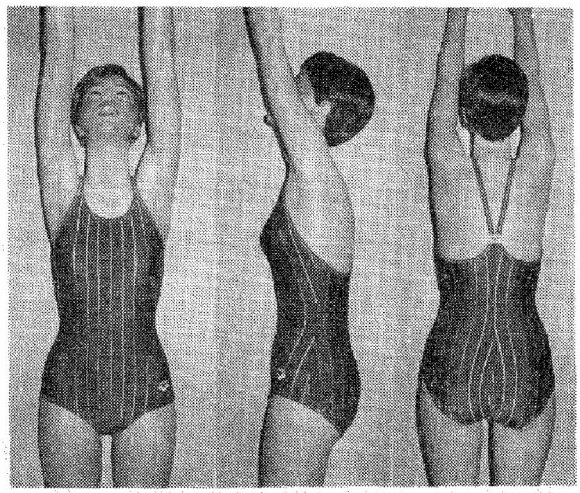


図7　水着K（水着 K, N, P, Q は同一型番）

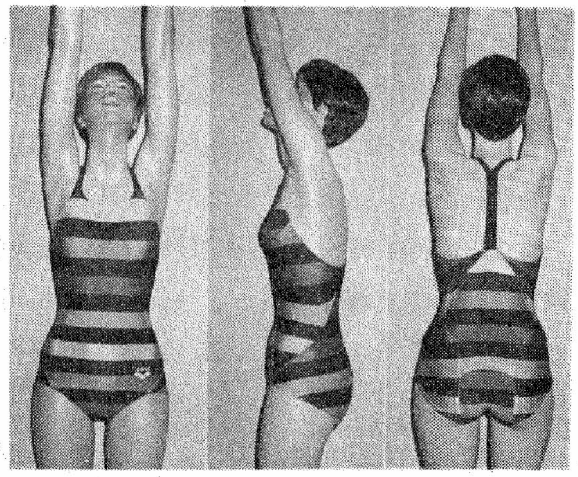


図10　水着 U（改3）
（水着Hと同一のものを改造）図24参照

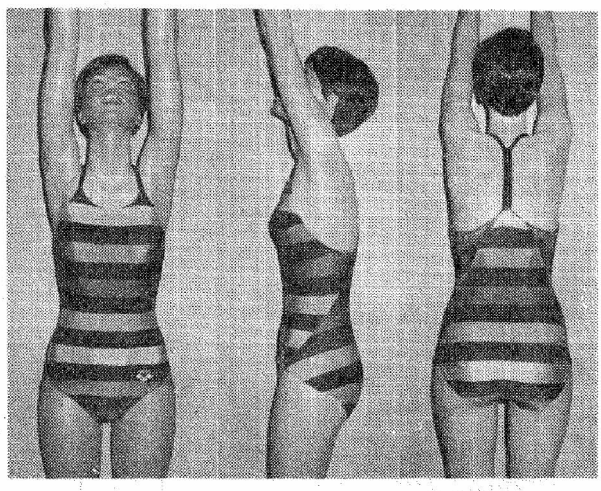


図8　水着 R（改1）
（水着Jを改造）

者について，抵抗を減少する目的で，（改1）背における流れと肩ひもが交差しないよう背中の肩ひもをY形にしたもの，（改2）胸と背の縁，その縁，背上部から，もも付根前部にかけてのパイピングを布の内側にし，水着表面の凸起を減らしたもの，（改3）さらに改2に加えて，ヒップ中央を一部ダブルにし，水着内側から水を排出できるスリット孔を設けたもの，計3種である．レジャー用水着1種には飾りのないバストを強調したものを選んだ．なおヒップ中央の凹部を減らし，人が水着を着用した時の形状に近付けるため，スポーツショーツを着用させた．帽子も着用させた．抵抗計測装置と方法は前記と同様である．

### 3）流れの観察

流れの観察には種々の流れの可視化法があるが，流速 1～2m/s の水面付近の物体まわりの流

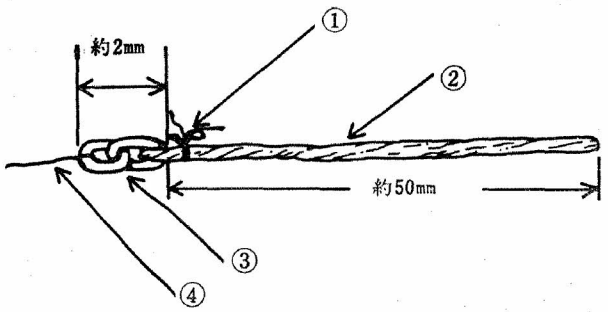
れに適した実験法は少ない．本実験においては，油膜法と表面タフト法を主として用いた．

油膜法は供試物体表面が滑らかで，油が浸み込まないことを要するので，水着着用時には使用できない．そこで標準姿勢，トリム増加，トリム減少，潜水時の計4姿勢について，裸状態，流速1.5m/s に対して，油膜法を用いて人体模型表面の流れを調べることにした．

油膜材料は，光明丹19ｇ流動パラフィン7.5ｇオレイン酸（液体）3ｇを乳鉢にとり，乳棒で30分間練合せた．これを毛絵筆で人体模型表面に塗布した．

油膜実験は人体模型全体に油膜を塗布するので，模型の運搬，揚降，曳航装置に取付，取外しに細心の注意が必要である．水流中での撮影では，造波，泡，跳水などのため，背面，ヒップ，脚上方などの観察が出来ない．したがって油膜筋模様形成後，人体模型を水から揚げて，陸上，空中で撮影する．そのためには，油膜は水に降す時，水から揚げる時の水面の線の跡が付き難いこと，水滴の垂れた跡が付かないことが要求される．このために油膜材料は堅練りとした．

表面タフト法には，図11に示すタフトを用い，人体表面付近の流れを観察することにした．このタフトにより流れの方向と変動状態を知ることができる．




① カタン糸で縛る
② ナイロンレース糸（タフト）
赤色蛍光塗料，黒色マジックインキなどでまだらに着色
③ 市販のネックレス，鎖2連
④ カタン糸
人体模型には接着剤で取付け，水着には針と糸で縫い付け，人体にはテープで貼り付け

図11 タフトの形状と構造

表面タフト法実験は人体模型については，標準状態，流速 1，1.5m/s 潜水状態 1.5m/s に対して行った．また被験者（スイミングスクールコーチ）については，競泳用とレジャー用水着各一種に対して，曳航伸長伏位姿勢 1.5m/s で行った．なお，水着からの水の排出状況を知るため細いビニールチューブでポスターカラー液（白液と略記）を水着内側に注入して観察した．

## 実験結果

裸状態標準姿勢，トリム変更時の抵抗計測結果を図12に示す．裸状態標準姿勢と同一のトリムでの没水深度変更時の抵抗計測結果を図14に示す．

没水深度による抵抗変化を図16に示す．

水着各種サイズについての抵抗計測結果を図19，20，21に示す．

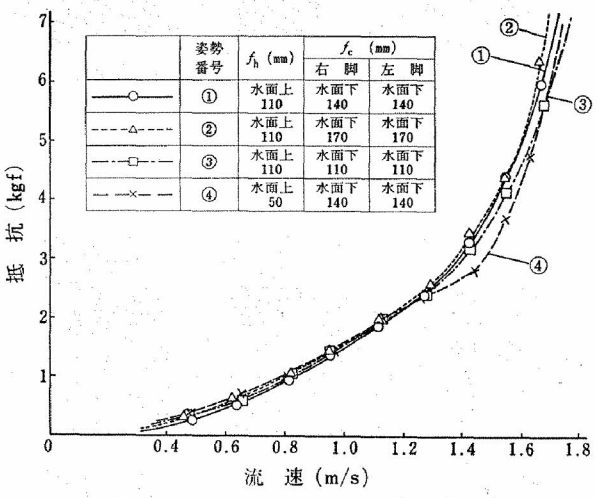



図12 標準姿勢，各種トリム時の抵抗

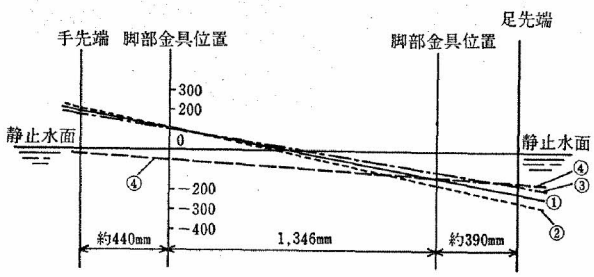



図13 標準姿勢の各種トリム図
（吊下げ金具位置の人体模型表面により示す）

水着R（改1）の改造前と改造後の抵抗値を図22に示す．

水着T（改2）の改造前と改造後の抵抗値を図23に示す．

水着U（改3）の改造前と改造後，および水着Qの抵抗値を図25に示す．

油膜法の結果を図26～31に示す．

表面タフトによる流れの観察結果を図32～41に示す．

ポスターカラー液注入の結果の一例を図42に示す．

## 考　　察

(1) 姿勢変更時の抵抗計測

標準姿勢，各種トリム時の抵抗計測結果（図12）においてトリム姿勢④の抵抗曲線は，他の抵抗曲線と著しく異なっているが，これは人体模型が潜水状態であり（図13参照），剝離，造波などの様相が大きく違っているためと思われる．人体模型に取付けられた吊下げ用金具の間隔1,346 mm に対して 30mm のトリム変化は角度にして 1°16′ である（図13参照），このわずかなトリム変化により流速 1.7m/s のとき，標準姿勢①に対して，姿勢②のトリム，脚下方 30mm 下げ，の状態では抵抗値約12%増になる．また姿勢③では標準姿勢①に対し抵抗値約12%減となっている．

姿勢②と③のトリム差は 60mm，角度にして 2°32′ で抵抗は20%位の差に達する．泳時の姿勢が抵抗に大きな影響を及ぼすことを示している．

各種没水深度時の抵抗（図14）において，潜水状態である頭部水中 50mm（姿勢⑤）の場合，流速 1.25m/s 付近で抵抗曲線は急変している．これは姿勢④と同様に潜水状態で（図15参照）剝離，造波等の様相が似ているためであろう．

図16は頭部金具位置の水面からの距離 $f_h$（頭頂部没水深度）による抵抗変化を示す．図中破線は実験姿勢がやや少ない関係で推定した部分である．抵抗の最大値は $f_h$ が水面から 75mm 位のと

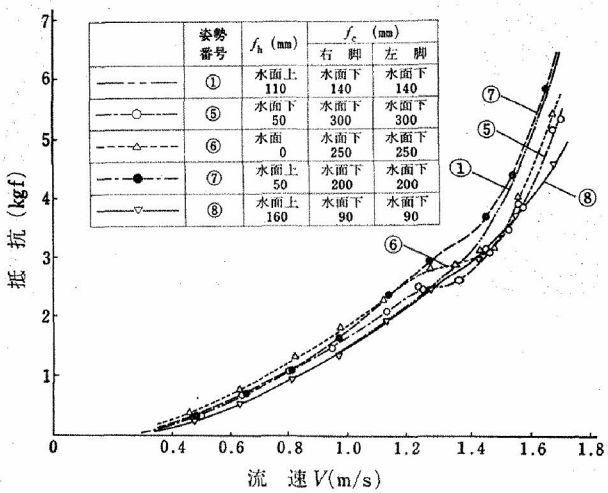



図14　一定トリム，各種没水深度時の抵抗，裸状態

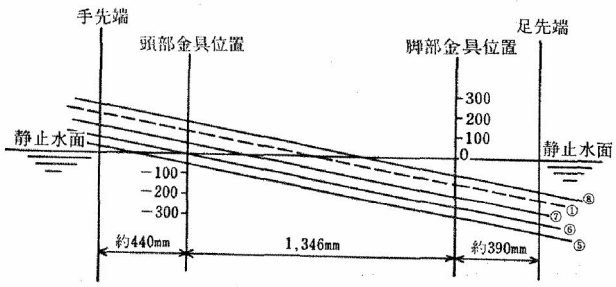



図15　標準姿勢・各種没水深度図
（吊下げ金具位置の人体模型表面により示す）

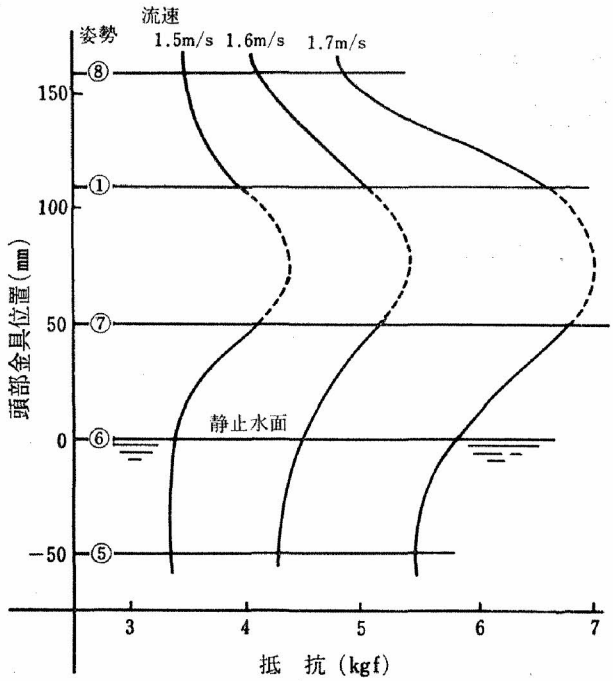



図16　頭部位置深度と抵抗（一定トリム時）

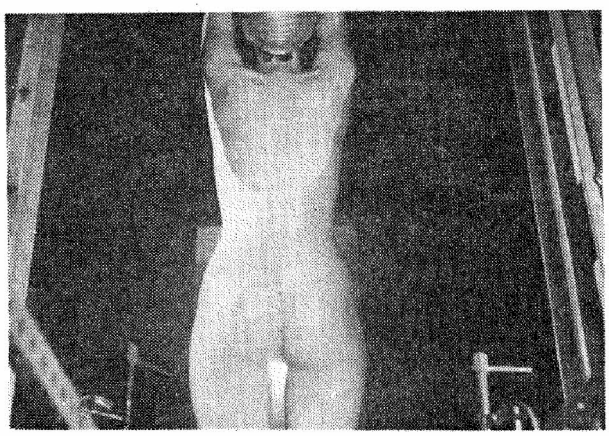


図17　姿勢番号⑧の実験姿勢流速 0m/s

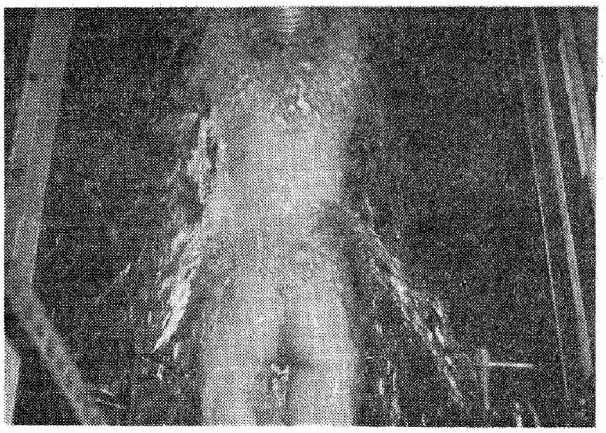


図18　姿勢番号⑧　実験状態における水流及び波 $V=1.677$m/s

ころにあると思われる．

姿勢⑧の抵抗曲線は**図14**の中では，抵抗は最も低く，抵抗の立ち上り方も他に比較しゆるやかである．この姿勢は，**図17**に示すように上腕から肩，背中の大部分とヒップ部上端が水上に露出し，人体模型の水中容積（排水量）が減ったことが原因の一つであろう．

姿勢⑧では，流速の上昇に伴い，背中，ヒップ，大腿部まで水面より上方になり，その上を水は薄い射流状態で流れている．その状況を**図18**に示す．

姿勢⑧の実験では低速度時にも，程度の差はあるが射流状態は存在しており，1.3m/s までは標準姿勢①と同一抵抗位となった．1.3m/s 以上では姿勢①との抵抗値の差は大きく開いて，1.7m/s では標準姿勢①の抵抗値より24%も低い．

本実験に使用した人体模型は水泳選手の体型とは異なっているが，トリム，没水深度変更の実験によって得られた抵抗値の傾向は大差ないものと思われる．

(2)　各種水着着用時の抵抗計測

水着サイズの違いによる抵抗値の差はわずかであり，**図19～21**からその差を読取ることは困難と思われるので，標準姿勢裸状態の抵抗との比の形でその差異を**表6**に示す．

水着G～Jにおいて水着H（サイズL）の抵抗値が他のサイズに比較して，やや大きくなったのは，着せ替えの回数が多く，多少伸びて胸のくり等から水のすくい込みが増し，抵抗計測時の写真

表6　水着サイズの違いによる抵抗比較

| 水着記号 | 各種水着の抵抗 $R_T$/標準姿勢の抵抗 $R_{TO}$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | G | H | I | J | K | P | Q |
| 流速 $V$ m/s | サイズ | | | | サイズ | | |
| | O | L | M | S | O | M | S |
| 0.5 | 1.057 | 1.057 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 0.7 | 1.055 | 1.055 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 0.9 | 1.032 | 1.072 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 1.1 | 1.032 | 1.059 | 1.021 | 1.021 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 1.3 | 1.027 | 1.057 | 1.011 | 1.011 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 1.5 | 1.010 | 1.045 | 1.030 | 1.030 | 1.000 | 1.000 | 0.995 |
| 1.7 | 1.095 | 1.116 | 1.103 | 1.103 | 1.070 | 1.070 | 1.019 |

には腹部あたりに，わずかに脹みが見られ，これが原因と思われる．背骨からヒップにかけても脹みがあると思われるが，波に妨げられて写真では判定できない．この人体模型は剛体であるため，着せかたによっては間隙が生じて，抵抗値に差が出ることも有り得る．

水着K，P，Qが裸時の抵抗値に酷似している

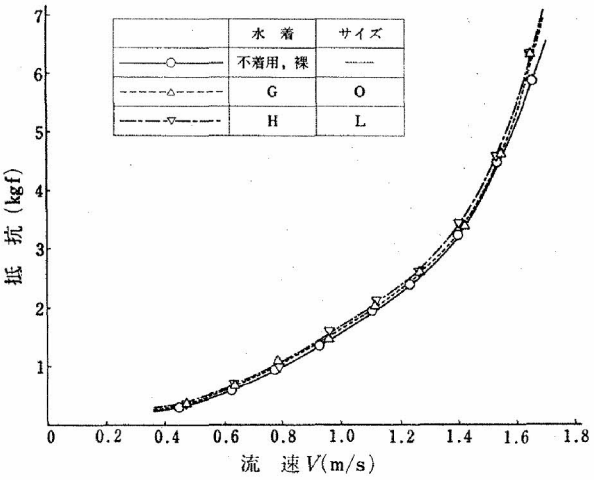



図19　水着着用時人体模型の抵抗，標準姿勢

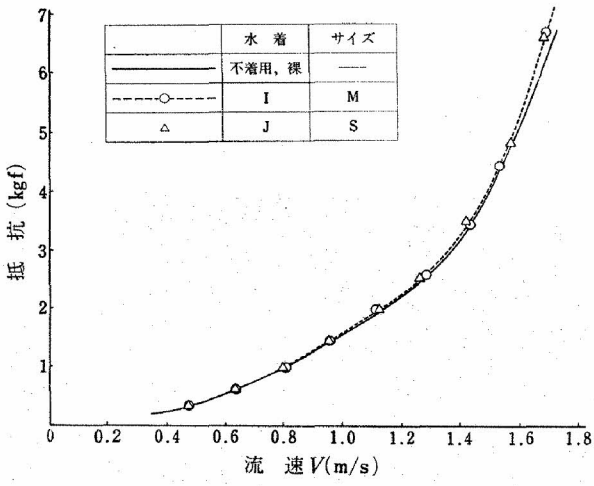



図20　水着着用時人体模型の抵抗，標準姿勢

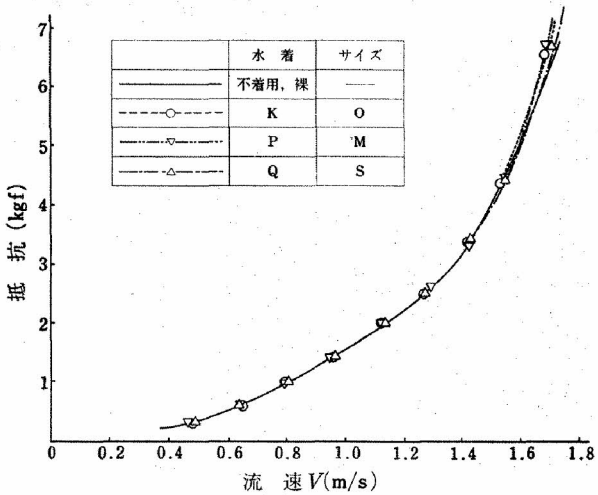



図21　水着着用時人体模型の抵抗，標準姿勢

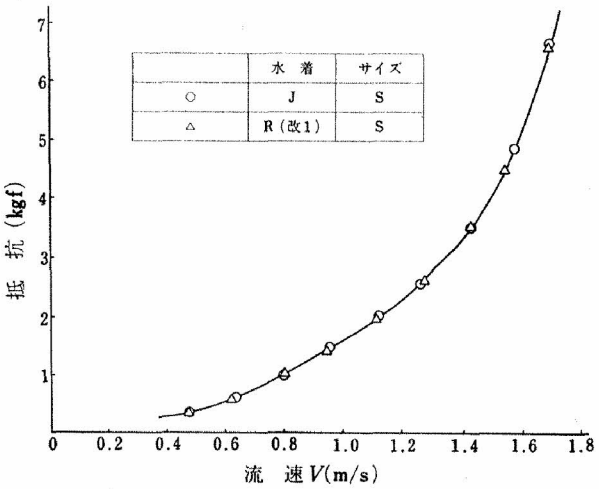



図22　改造水着の抵抗，標準姿勢

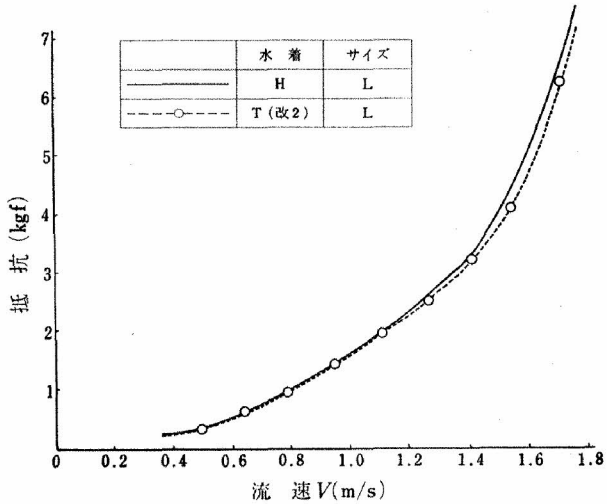



図23　改造水着の抵抗，標準姿勢

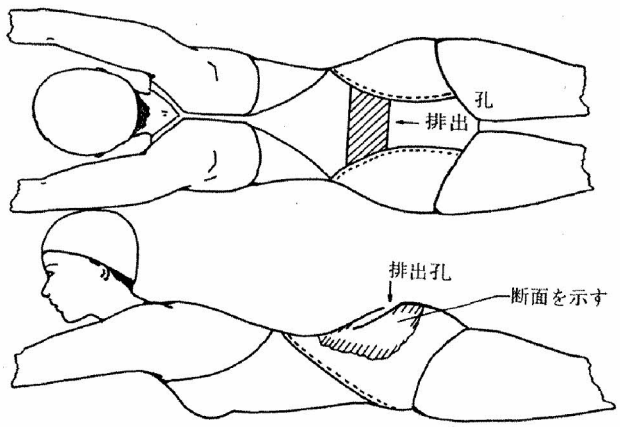



図24　水着U　改3　略図

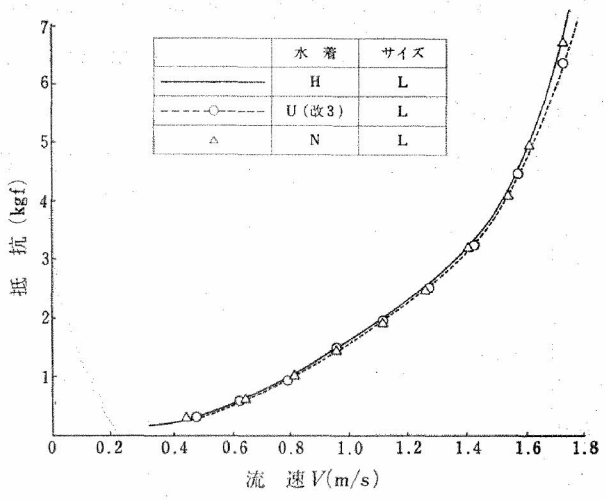



**図25** 改造水着等の抵抗，標準姿勢

のは，水抜きの縦縞と縁以外の表面の平坦化の効果が現れたものと思われる（**図21**）．

水着R（改１）の抵抗は改造を行わない水着Jと等しく，肩から背中の流れは射流であるが，流速が低く肩ひもと流れが交差しても，抵抗増加が小さいことを示すと考えられる（**図22**）．

水着Hの表面を平坦化したのが水着T（改造２）である．水着の背中から脇腹を通り，もも付根前部に至るパイピング，胸から背中に至る縁取り，すそ部の縁取り等の凸起は，数%の抵抗増の原因となっていると概算されたので，これら突出部は総て布の内側に移し外表面を平坦化した．この結果，抵抗は改造しないものに比較し５～６%減少した（**図23**）．

水着U（改３）は水着Hを**図10**，**24**のように改造したもので，水着Tと同様にして外表面を平坦化するとともに，胸のくりや背から侵入した水がヒップに溜る前に，外部へ流出させるため，ヒップ中央部に排出孔を設けた．前年の実験で一部の水着では，すくい込んだ水や気泡がヒップで水着を大きく脹らませ 1.5m/s 付近では抵抗が急激に増加していた．今回使用した水着Hでは，このような極端な状況は見られなかったが，少量の水，気泡が溜っていたと思われ，排出孔を設けたために外部に流れ去り，抵抗は改造前よりも約６%減少した（**図25**）．しかしヒップ形状との関係から，ヒップ中央部のダブル部の幅をやや減少し，位置を下流側に移す方がより水抜きが容易ではないかと思われる．

推力発生との関係で水着による抵抗減少率が，そのまま水泳記録向上とはならないであろうが，若干の記録向上につながると考えられる．

本実験では剛体人体模型を用いているので，水着による身体の緊縮，変形が抵抗に及ぼす影響が現れない．したがってサイズの影響が小さかったものと考えられる．また縁のくい込みの影響も現れない．さらに抵抗を減少させる水着の研究のためには，柔軟弾性体人体模型の使用が必要である．

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って，水，気泡のすくい込みによる脹み，布地のはためき，表面粗さ，体形変化，締付けによる排水容積の減少，パイピング，

**図26** 油膜法の結果
姿勢④ 流速 1.5m/s

縁取り，ひもによるかく乱，体外部から見た体表面の柔軟性などの変化が考えられる．

水着による体形変化を利用して，剝離，渦の発生を抑制し，また造波を減らして，抵抗を減少できる可能性がある．

(a) 油膜法実験

油膜法による実験は，標準姿勢①，姿勢②，③および④の4種類実施した．**図26～30**は姿勢④の潜水状態のもので，流速 1.5m/s である．油膜法の結果から姿勢④における流れを判定し図示すると**図31**のようになる．

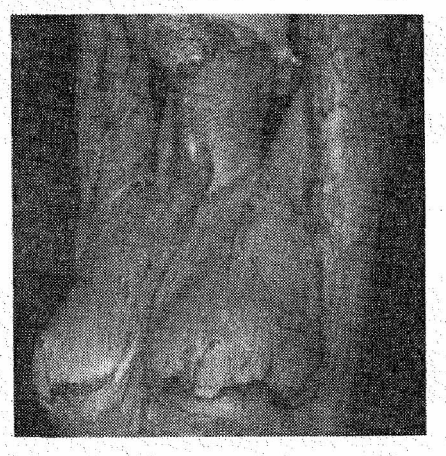


**図27** 油膜法の結果
姿勢④ 流速 1.5m/s

剝離泡，剝離線，付着線は各部に見られ，人体模型は流体力学的には，良い状態とはいえない．姿勢④でも，油膜の様相は標準姿勢[9]と大略似ている．油膜筋の模様は姿勢②，③ともに標準姿勢に類似し，わずかな剝離線位置の変化と跳水位置変化を示すのみであった．

**図27**のバスト下流の剝離線位置は，標準姿勢①と比べてやや下流側になっている．上腕から腋下を通りバスト側部にいたる剝離線はアンダーバストの横に走る剝離線と交わっている．アンダーバストと腹部の平坦部との境いには，明瞭な付着線があり，複雑な剝離，渦発生を示している．このような，剝離線，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．

**図28**では標準姿勢に見られたみぞおち部の油膜

**図28** 油膜法の結果
姿勢④ 流速 1.5m/s

**図29** 油膜法の結果
姿勢④ 流速 1.5m/s

がやや濃い領域があり，流速低下を示すと思われる．

**図29**の背中の流線は大体揃っていて，標準状態①の下流に広がる状態とは様相を異にしている．背側部の剝離線は上腕付根の側部から出て，細く短かくなっているようである．ウエスト背部では中央に集まる流線が見られ弱い剝離線が存在すると思われる（後述）．表面タフト法**図39**にもこの現象によるタフトの動きが見られる．

ヒップから大腿側部にかけての強い剝離線が見

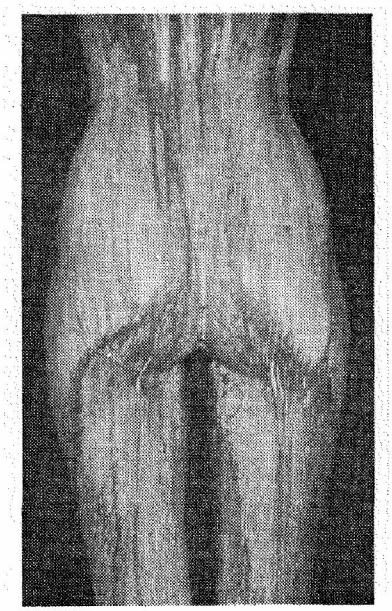


図30 油膜法の結果
姿勢④ 流速 1.5m/s

られる（図30）．ヒップ下流端から約 90mm 下流の大腿部には剝離泡の存在を示す流線が見られる．標準姿勢①ではこの部分に，楕円形剝離泡と思われる流線があった．

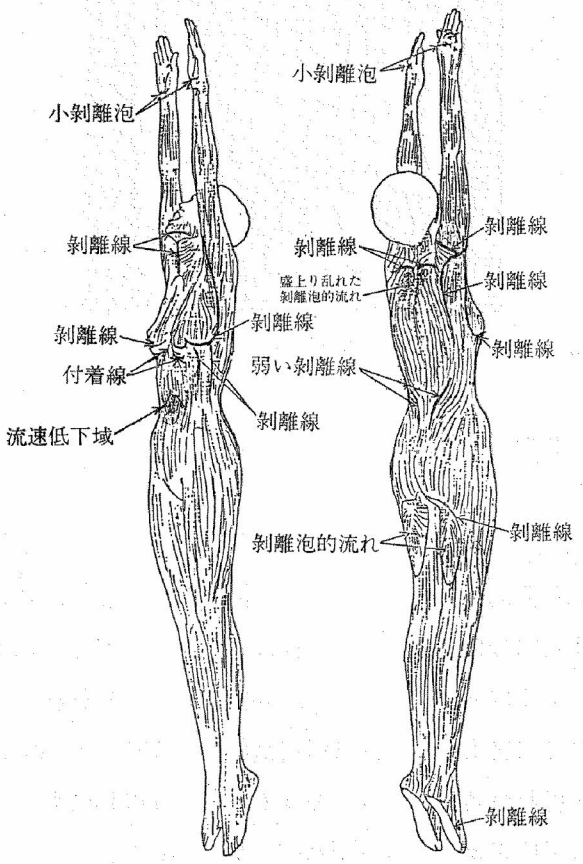
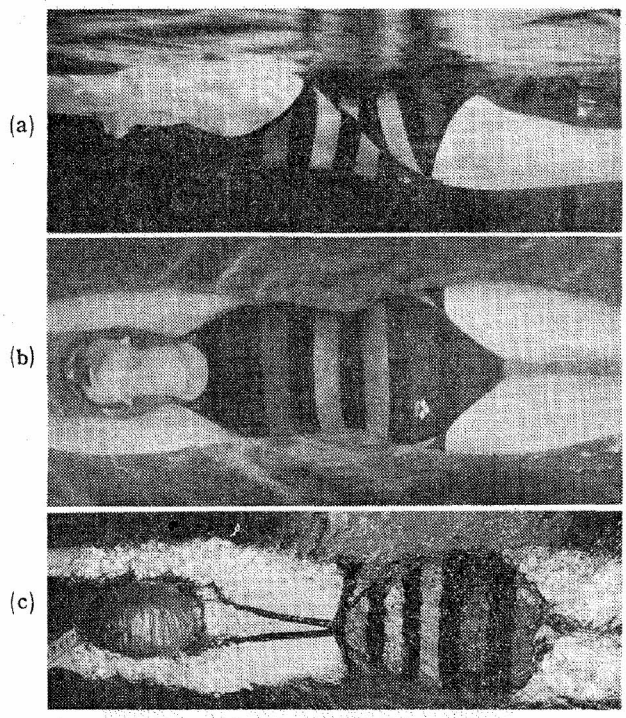
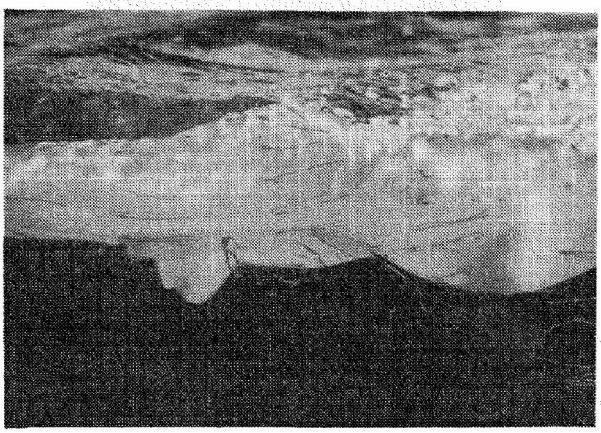



図31 人体模型表面の流れ，潜水状態




(a) 側面，(b) 下面，(c) 上面
図32 タフト法実験結果，標準姿勢 1m/s



註）あご下流の渦とバスト側部の乱れに注意
図33 タフト法実験結果，標準姿勢 1m/s，首部

(b) 人体模型，表面タフト法実験

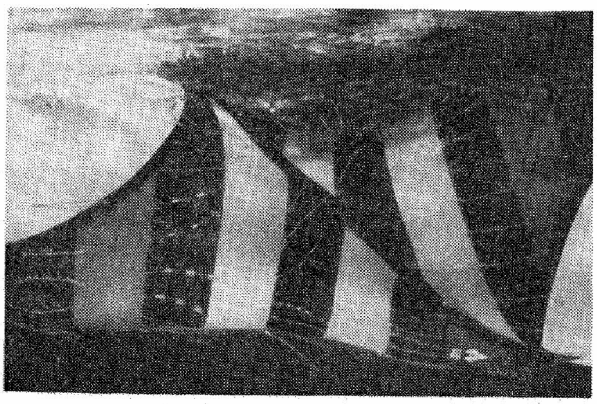
図32～34の標準姿勢①は流速 1m/s のもので，図33ではあご下流の首下方では剝離と造渦を示すタフトの動きが見られ，タフトは上流に向ってなびいているものもある．

図32 b)ではこの渦が胸から腹部へ流れて行くことを示すタフトの振れがあり，アンダーバストに渦発生を示すと思われるタフトの振れが目立っている．バスト側面において，タフトの振れがやや大きく剝離の発生を示している．

水面近くの上腕部の付根では，タフトの先端が重なり合うように接近して，この位置に剝離線が存在することを示している．油膜実験でも同様であった（**図32**)(**a**)．

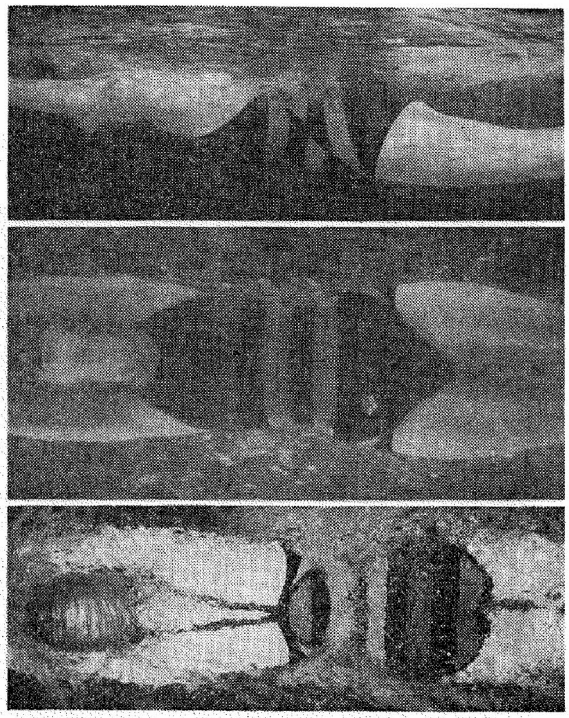
ウエスト背部では跳水と逆流（**図32**）脇腹では跳水と造波，ヒップ下流では剝離，造渦および強い伴流*14 が発生している．パイピング直後にタフトがひき込まれていて，渦が発生していると考えられる（**図34**)．

**図35**は標準姿勢① 1.5m/s のもので，頭部の水面は盛り上がり，巻き返し，砕波が発生し大きな造波が見られる．襟巻渦も発生しているようである．バスト側部ではタフトが前方になびき剝離・逆流が存在することを示す（**図36**)．



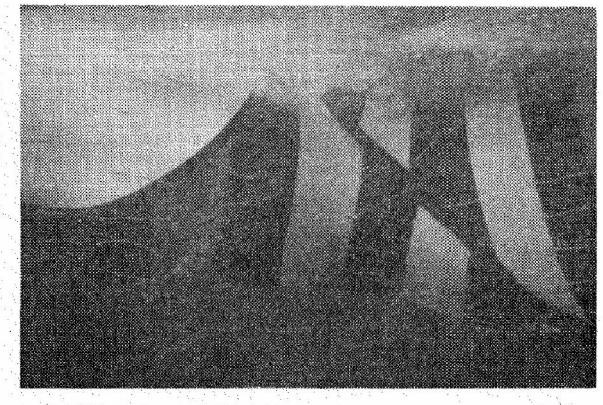
註）背中の逆流と背から腿前付根に至るパイピングの直後へのタフトの引込まれに注意

**図34**　タフト法実験結果，標準姿勢① 1m/s，胴部



(a) 側面，(d) 下面，(c) 上面

**図35**　タフト法実験結果　標準姿勢 1.5m/s



註）バスト下流側部の逆流と背中の逆流に注意

**図36**　タフト法実験結果，標準状態 1.5m/s，胴部

背側部，ウエスト部，ヒップでも造波が見られる．ウエスト背部で跳水と逆流が発生している．**図36**には写っていないが，水着のパイピング直後に小さな剝離泡*15 が発生するらしく，タフトがそこに引込まれる現象も見られた．

頭部，脇腹，ウエスト背部，ヒップにおいて気泡の発生と巻込みが起き，この気泡の動きからヒップ下流の脚上方に強い伴流と渦が観察された．脚下方では，気泡の動きは早く上方のような渦は見られない（上方，下方とは水平伸長姿勢に対する垂直方向である)．剛体模型であるため，水着の胸ぐり部に間隙があり，わずかであるが，水，気泡等をすくい込み水着内ヒップに溜る傾向があった．

**図37**は人体模型の胴体部の形状を変え，アンダーバストからウエスト側部，背中を脹ませて，通称「ずん胴」形の標準姿勢①で流速 1.5m/s における結果を示す．

人体模型はウエスト部にスポンジ薄板・さらし布を巻き「ずん胴」にし，競泳用水着（水着Ⅰと同一）を着せたものである．アンダーバストの渦発生，バスト側部の逆流が抑制され，タフトの方向が整ってきている．背部も逆流は見られない．

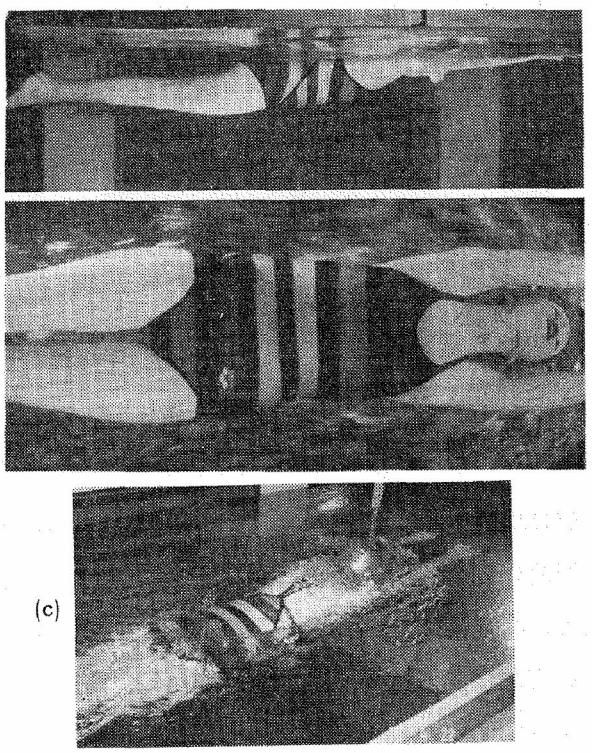



**図37**　ずん胴タフト法実験結果，標準姿勢
1.5m/s (IHI)

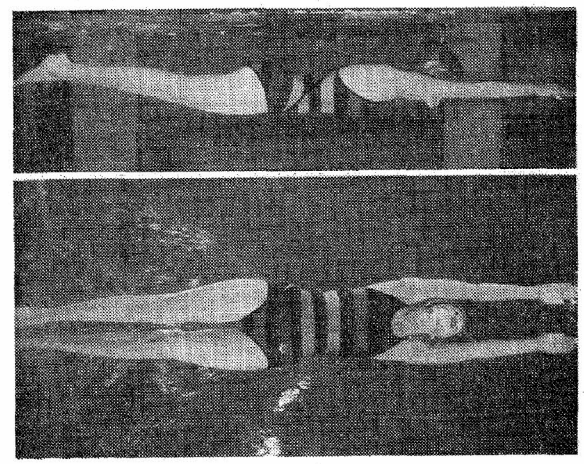



**図38**　タフト法実験結果，潜水状態
1.5m/s (IHI)

造波は頭部とヒップからが主になり，波紋は原型と大幅に異なる（**図37**）（**c**）.

**図38**，**39**は姿勢④の潜水状態で，流速 1.5m/s である．標準姿勢に比べて，やや前突込みの姿勢である．背部の跳水のないことなどによりウエスト背部の逆流が抑制されているが，タフトの動きから弱い渦発生があると思われる．パイピング上の脇腹に取付けられた2本のタフトは，パイピングの下流側に巻込まれている．パイピングの突出

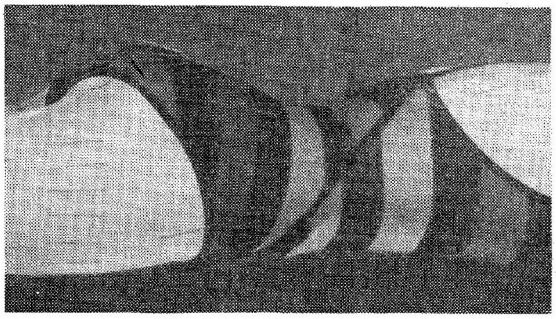


**図39**　タフト法実験結果，潜水状態 1.5m/s
（右胴部）

によって剝離泡が発生するらしく，タフトがそこに引込まれるのであろう．前突込み姿勢のためアンダーバストの渦発生は若干強くなったようである．**図39**にはバスト側部の3本のタフトの交差が見られ，剝離，渦発生を示す．

**図38**の肩のタフトは先端部が接近し，腋に取付けられたタフトと，肩のタフトの先端は体側中心部に向ってなびき，その中間に剝離線のあることを示している．前突込み姿勢であるためヒップの剝離も強くなっているようである．潜水状態であるために造波は少なくなり，ウエスト付近の上方からの造波が主になっている（**図38**）（**b**）.

**図40**は競泳用水着（水着Ⅰ）着用時における，女子水泳コーチのまわりの流れ（流速 1.5m/s）を観察したものである．水着は胸ぐりが高く，身体との間隙が出来ないように，またバストの張み

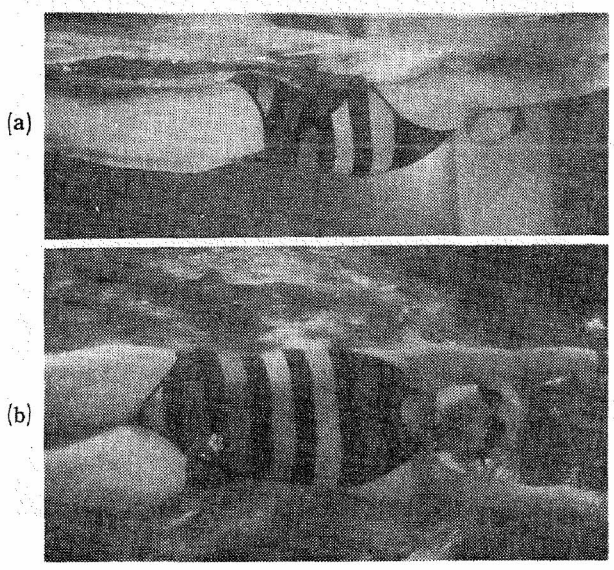



**図40**　水着Ⅰ　タフト法実験結果 1.5m/s

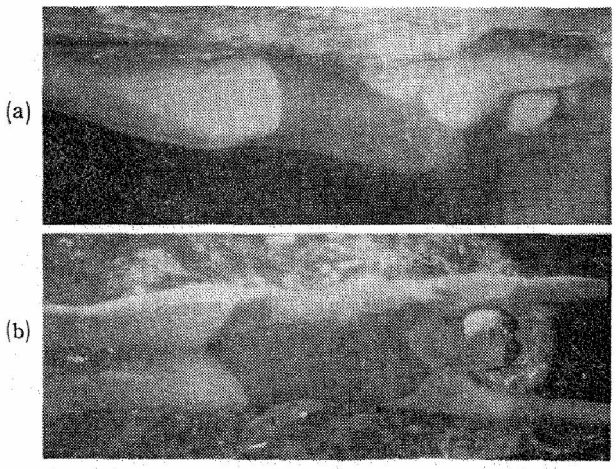



図41　レジャー用水着
タフト法実験結果 1.5m/s

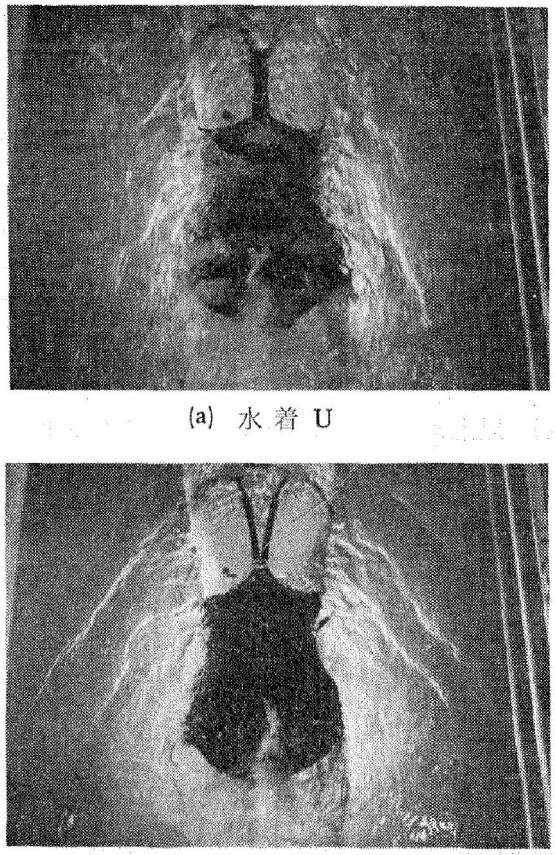
を減らすよう考慮されているので，胸部での剝離・渦の発生は殆んどないようである．胸・腹部中心線付近のタフトの振れは，あごの渦が流れてきたためであろう．ウエスト側部タフトの方向から縦渦の発生が考えられる．

ヒップ下流は渦と流速低下が見られる．背のウエスト付近で跳水が発生し，逆流が見られる．造波は主に頭部とウエスト部からと思われる．パイピング直後に剝離泡・渦が発生するらしく，タフトが引込まれている．

**図41**は最近のレジャー用水着（水着V）でファッション性の強い水着である．水泳コーチに着せて，まわりの水流（流速 1.5m/s）を観察したが，競泳用ではなく，泳いでも速度 0.7m/s 以下のものと思われる．したがって水着胸ぐり部と身体には間隙があり，速度の大きい時には水をすくい込んで脹み，しかもバストパッドによる外方への脹みもあって，水着胸部から腹部にかけて，はなはだしく乱れた流れの領域（剝離・渦）が出来ている．造波は主として頭部・ウエスト部のようである．なおこの水着着用時は水着Ⅰ着用時に比較し抵抗が約30%大きかった．

以上**図37～41**は石川島播磨重工業㈱技術研究所（横浜）回流水槽において実験した．

**図42**の状態は標準姿勢①で流速は約 1.3m/s で



(a)　水着 U

(b)　水着 N

図42　水着内水の排出状況実験

ある．(**a**)の水着Uは白液はヒップに溜らず，排出孔から横に平面的に拡がって流出している．この図から排出孔が有効に働いていると思われる．

(**b**)　水着Nの観察条件は，標準姿勢①，流速約 0.8m/s である．この水着Nは縦縞の部分が水抜きとなっており，この有効性を見るために行った．ビニールチューブを設置した場所は同じであるが，白液はウエスト背部の縦縞から外部に流れ出している．

## むすび

我が国の水泳記録の向上をはかるため，剛体等身大人体模型を用いて，昭和58年から実験的研究を行い，本年は伏位姿勢変更時の抵抗と水流，改造試作を含む各種水着着用時の抵抗と水流を調べた．その結果の大略は下記のようになる．

(1)　抵抗は縦傾斜，没水深度など，姿勢によって大幅に変化する．

(2) 水着の縁どり，パイピングによる抵抗増加は数%に達すると思われる．

(3) 水着内にすくい込んだ水を排出すると，抵抗増加を抑制できる．

(4) パイピング付き現用競泳用水着を改造し，約6%の抵抗減少をえた．

(5) 流れの観察実験により，人体形状まわりの水流の状態を明らかにすることが出来た．

(6) 以上により競泳用水着抵抗減少法の指針をえた．

本実験は剛体人体模型を用いているので，実際の人体の場合と異る面が考えられる．さらに柔軟弾性体人体模型についての実験と，次いで運動時の動的な水流状態の研究，泳運動時の総合的な流体力学的研究が必要である．

終りに，本研究の一部に石川島播磨重工業㈱の施設を使わせてい頂いたことを厚く御礼申し上げます．

## 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) J.D. van Manen and H. Rijken; Experimetal studies of Human Swimming at the Neatherlands Ship Model Basin, *Swimming and Flying in Nature*, Vol. 2, Plenum Press (1974)
3) 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）
4) 波多野勲；水泳の力学的考察，Nagare, 第9巻第2号，流体力学懇談会（1977）
5) 種子田定俊；自己推進運動を行う物体の抵抗 Nagare, 第9巻，第2号，流体力学懇談会（1977）
6) 高木隆司；水泳の流体力学，Nagare, 第9巻，第2号（1977）
7) 種子田定俊；スポーツと抵抗，数理科学，No. 181 (1978)
8) 高木隆司；泳ぐ，数理科学，No. 181 (1978)
9) 田古里哲夫，他；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　Vol. 5 (1984)


注）

*1) 境界層：レイノズル数*16 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，下流に行くに従って流速が小さくなる場合，圧力は下流に行くに従って高くなる．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こと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*11 から常流*17 へ変わる場所では，水面が急に盛り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) 砕波：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) 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．

*9) 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．

*10) 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っていることを死水という．

*11) 射流：開放水面をもつ水路の流れで，〔流速〕>〔(重力の加速度)×(水路の水深) の平方根〕の場合を射流という．

*12) 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，物体表面でごく近傍の流れの状態を知る方法である．

*13) 表面タフト法：物体表面に糸などを取付け流れ

になびかせ，物体表面付近の流れの方向と状態を知る方法である．

*14) 伴流：普通，物体後端または下流で，物体まわりの流線の変化，流体摩擦，剝離，波などによって生じる流れ．剝離と流体摩擦により物体にひきずられて，ついて行く流れのことが多い．

*15) 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．

*16) レイノズル数：粘性流体の流れを支配する無次元数で，〔物体の代表寸法〕×〔流速〕÷〔流体の動粘度〕をいう．慣性力と粘性力の比を意味し，レイノズル数が等しい時，相似形状物体のまわりの粘性流体の流れは相似になる．

*17) 常流：開放水面をもつ水路の流れで，〔流速〕<〔(重力の加速度)×(水路の水深) の平方根〕の場合を常流という．