

# 水泳プールにおける浅水影響の確認

## Confirmation of shallow water effect in swimming pool

深町 得三 (Tokuzo FUKAMACHI) ヤマハ発動機(株)プール事業部製造室  
川瀬 哲男 (Tetsuo KAWASE) ヤマハ発動機(株)プール事業部製造室  
塚田 吉昭 (Yoshiaki TSUKADA) 独立行政法人 海上技術安全研究所

### [abstract]

At the World Swimming Championship Fukuoka 2001, which used a 3 meter depth pool, eight new world records were made in contrast to zero world records at the previous event which used a 2 m depth pool. Why the difference occurred was the motivation for this study. To determine whether "shallow water effect" occurs in a swimming pool, we measured the resistance of a life sized swimmer model in an experimental towing tank with three different water depths of 1.0, 2.0 and 3.5 meters.

The results were as follows;

- 1) When compared to 2.0 m depth condition, the resistance of towed model in the 1.0 m depth condition increased by 3.4 % at speed range 2m/s and above. This can be recognized as "shallow water effect".
- 2) Also compared to 2.0 m depth condition, the resistance in 3.5 m depth condition increased by 1.1 %. This may be regarded as a measurement error.
- 3) In conclusion, these experiments indicate that there is a "shallow water effect" in a swimming pool at a depth of about 1.0 m in the current competitive swimmers' speed range.

**Keywords:** Swimming pool, Shallow Water Effect, Water Depth, Towing Tank, Speed, Resistance

## 1. 目的

一昨年の世界水泳選手権福岡2001大会では、八つの世界新記録、二十の日本新記録を含む数多くの新記録が生まれたが、この原因のひとつに使用したプールの水深(3m)の影響があったのではないかという仮説から、本研究はスタートした。

競泳関係者の間では従来から深いプールでは自己記録の更新がしやすいという非公式な議論があった。一方、船舶の分野では浅い水面を走る船の抵抗が増加する現象は「浅水影響」として広く知られており、理論的にも解明されている。

水泳選手も船も水面を進む物体であると大胆に割りきれば、その議論を裏付けるデータを得ることも可能ではないか?と考へ、また浅水影響が存在するならば、現状の競泳選手の泳速度域で影響が出現する水深はどの辺りになるのかを確かめるために、プールの代わりに船舶の抵抗を計測する曳航試験水槽において確認試験を行なった。

## 2. 試験方法と装置

### (1) 供試模型および試験水槽

試験準備に際しては当初実際の人体を引っ張ることも検討したが、安全衛生面のリスクおよびデータの再現性を優先させる理由から、これを断念し、デパート等で展

表-1 蹴伸び姿勢人体模型主要目

全長 (m)	2.223	手指から足指まで
身長L (m)	1.867	頭頂から足指まで
胸囲 (m)	0.99	
胴囲 (m)	0.8	
胴長 (m)	0.63	肩から股間まで
腰囲 (m)	9.94	
体表面積 (m <sup>2</sup> )	1.82	デュボアの式
重量 (kg)	68.0	
材質	FRP	硝化綿ラッカー エナメル塗装

示されているマネキンの手足を改造して泳ぐ姿勢をとらせ、これに取り付けた支柱で水槽に吊り下げ、曳航速度を変化させながら模型に働く流体力を計測することにした。供試模型は等身大の泳者型人体模型で、蹴伸び姿勢と平泳ぎ姿勢の2体を用意したが、時間の制約で、平泳ぎ姿勢の計測は、1状態のみとなった。蹴伸び姿勢の人体模型要目を表-1に示す。

試験は、国土交通省（当時）海上技術安全研究所の三鷹第3船舶試験水槽（中水槽、長さ150m、幅7.5m、深さ3.5m）で実施した。この水槽は水深を変えて計測を行なうことが可能である。

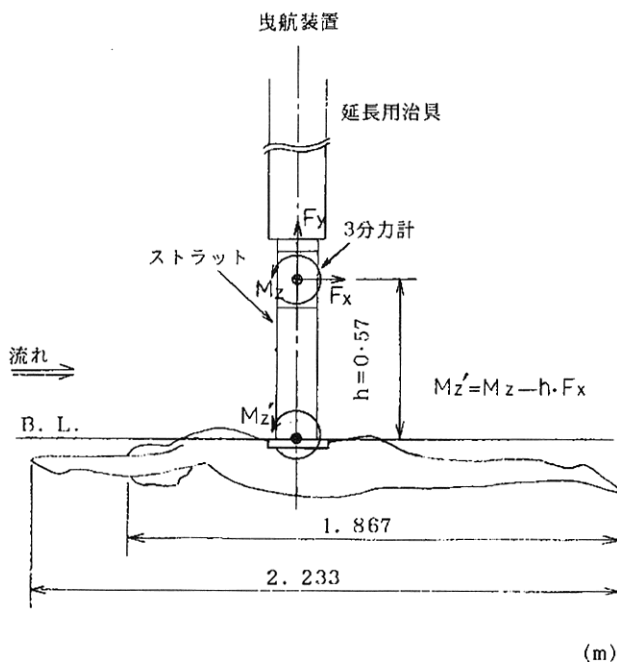


図-1 試験方法概念図

(2) 試験の概要

通常は船舶の模型を引っ張る「曳引車」に設置されている高速艇用の抵抗計測装置（曳航装置）に人体模型をストラットで固定し、水槽の水深を1.0 m、2.0 m、および3.5mの3段階に変化させ、検力計で固定したマネキンを競泳選手の泳速度に近い速度で曳航し、流体力（抵抗、揚力、モーメント）をストラット上部に取り付けた検力計（3分力計）で計測した。試験方法の概念図を図-1に示す。この水槽の通常の水深は3.5mなので、浅水試験時は延長用治具（長さ1.5mおよび1.0m）を曳航装置に取り付けて模型を曳航した。延長治具の剛性不足が計測の精度に影響しないように治具と曳引車間にワイヤーを張って治具を固定、強化した。

試験のセットアップを写真-1～3に示す。

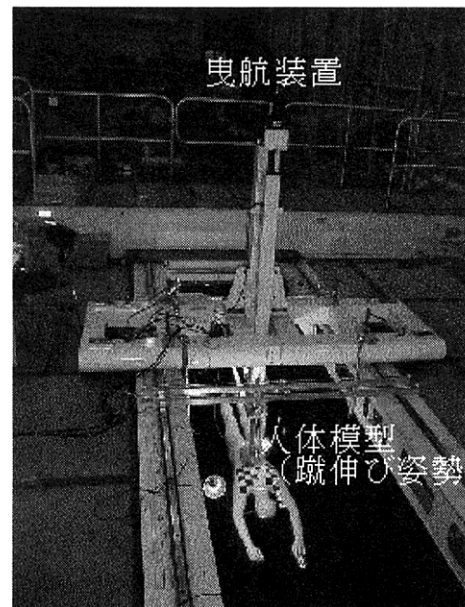


写真-1 曳航装置と人体模型

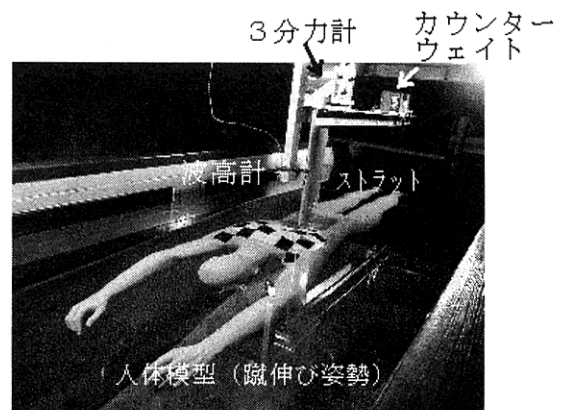


写真-2 3分力計、波高計と人体模型

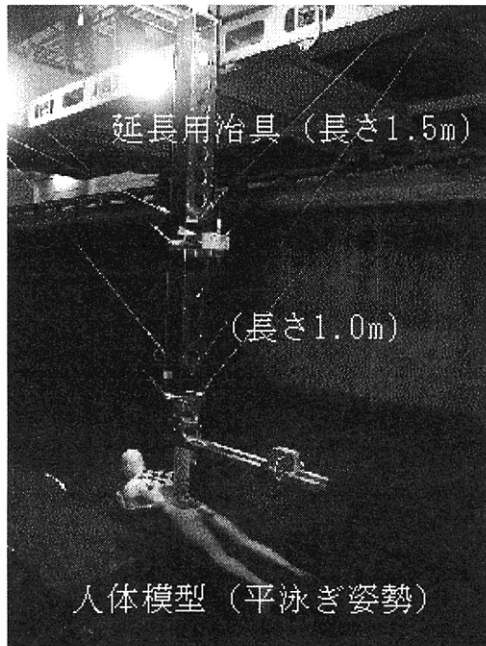


写真-3 延長用治具とワイヤー

表-2 試験状態

		蹴伸び姿勢	
水深 (m)	3.5	2.0	1.0
曳航速度 (m/s)	0.5~2.5	1.5, 2.0, 2.5	1.5~2.5
模型喫水	B. L. (ストラットフランジ上面) から 25.66mm上		

をとってゼロ点計測を60秒間20Hzのサンプリング周波数で実施した。抵抗の測定は曳引車の速度が安定する水槽の中間部50m区間を100Hzのサンプリング周波数で計測した。水温および水深の測定は、水槽の中間地点（約70m）で実施したが水温は深さ方向に均一であった。流体力および波高の物理量は、計測区間の平均値と検定係数により求めた。3分力計で計測されたMzは3分力計Z軸回り位置であるため、B. L. (ストラットフランジ上面) 回りのモーメントMz'を図-1の式により求めた。

解析の方法は船舶の水槽試験の方法をそのまま流用したため、計測値の無次元化という作業をおこなった。これはむしろ感覚的な理解のためには煩雑ではあるが、本研究の場合にはあまり問題にならないので、船舶の浅水影響との比較分析のためにそのまま踏襲した。すなわち速度については模型長さの影響を排除したフルード数Fnを用い、流体力に関しては、模型の大きさの影響や流体の密度の影響を排除した抵抗係数等Ct,Cy,CMz'を用いた。

$$Fn = V / (9.8 \cdot L)^{0.5}$$

L: 身長 V: 曳航速度

$$Ct, y = F_{x, y} / (0.5 \cdot \rho \cdot S \cdot V^2)$$

$\rho$ : 密度 S: 体表面積

$$CMz' = Mz' / (0.5 \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot L)$$

本模型の状態では、曳航速度が大きい場合に模型頭下げ方向のモーメントMzが検力計の容量を超えることが予想された。そこで、3分力計に頭上げ方向のカウンターウェイト (10.0Kgf-m) を取り付け、モーメントMzをバランスさせて試験した (写真-2参照)。このカウンターウェイト取り付けによる抵抗値への影響が無いことは予備実験で確認した。

### (3) 試験装置および計測器

曳航装置: 高速艇用曳航装置

検力計: 日章電機製の3分力計 (LMC-3504)

容量Fx,y=30.6Kgf Mz=12.2Kgf-m)

人体模型の抵抗 (Fx)、揚力 (Fy)、モーメント (Mz) を計測。

波高計: 超音波変位計 (株式会社キーエンス)

超音波式変位センサUD-1100 測定範囲35~300mm)

計測位置は、蹴伸び姿勢における模型の背中上で、ストラット前縁より175.0mm頭側、模型センターラインより20.0mm右手側。

波高計は、浅水影響によって起きるはずの模型近傍流場の波高変化を調べる目的で設置した。

### (4) 試験状態

試験状態を表-2に示す。

平泳ぎ姿勢の試験は、参考として水深1.0m、曳航速度0.9~1.7m/sのみ実施した。

### (5) 試験、解析方法

試験にあたっては、抵抗の差を1g単位で精度よく計測するため細心の注意を払い、特に消波板がない水深での引き波が収まるまで前回走行から15~30分の待機時間

### 3. 試験結果

蹴伸び姿勢の曳航（競泳）速度に対する流体力  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $M_z'$  を、水深（○印：約3.5m △印：約2m □印：約1m）をパラメータとして図-2~4に示す。

また、3つの水深に対する流体力の変化を図-5~7に示す。

図-8~10には流体力を無次元化し  $F_n$  に対して示す。図-8~10を見ると  $C_t$  は  $F_n \approx 0.44 \sim 0.5$  において水深1mで増加する傾向が見られる。  $C_y$  には負の揚力が働いており、 $F_n \approx 0.4$  以上で水深1mの方が大きい。  $CM_z'$  は頭下げ方向のモーメントであり、 $F_n \approx 0.4$  以上で水深1mの

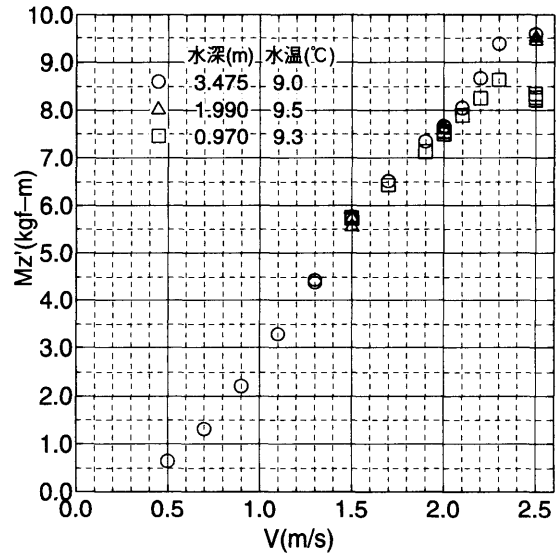


図-4 人体模型のモーメント

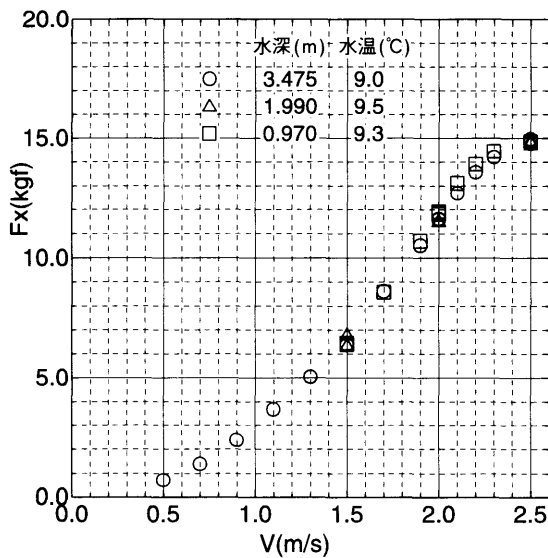


図-2 人体模型の抵抗（蹴伸び姿勢）

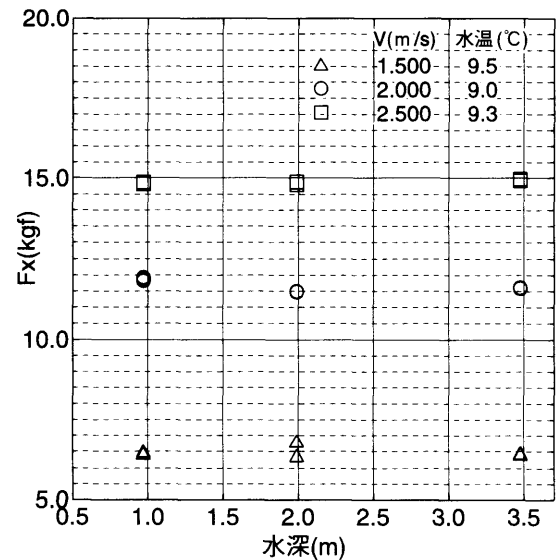


図-5 水深変化と抵抗との関係

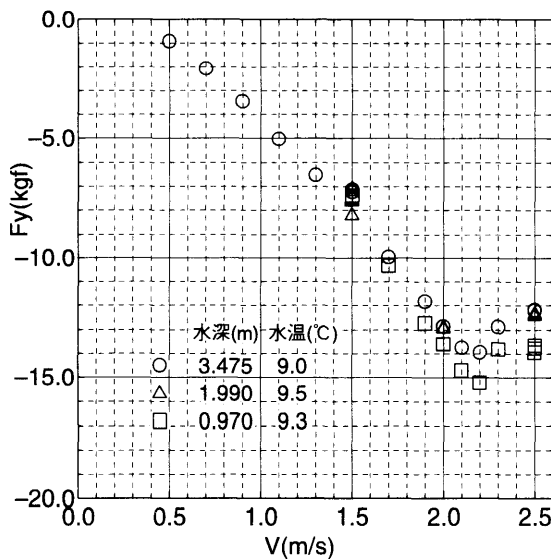


図-3 人体模型の揚力

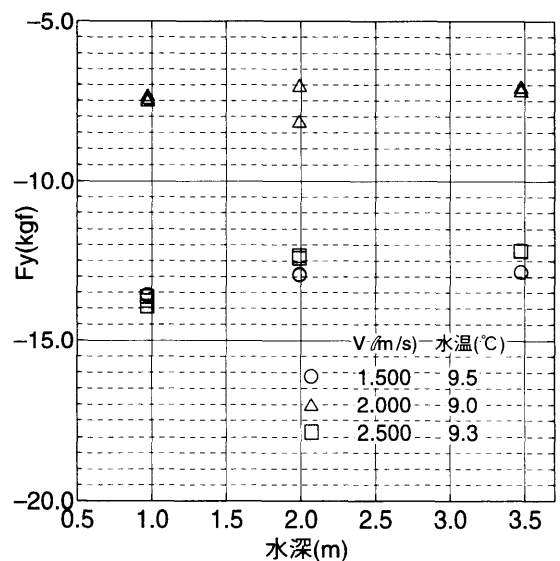


図-6 水深変化と揚力との関係

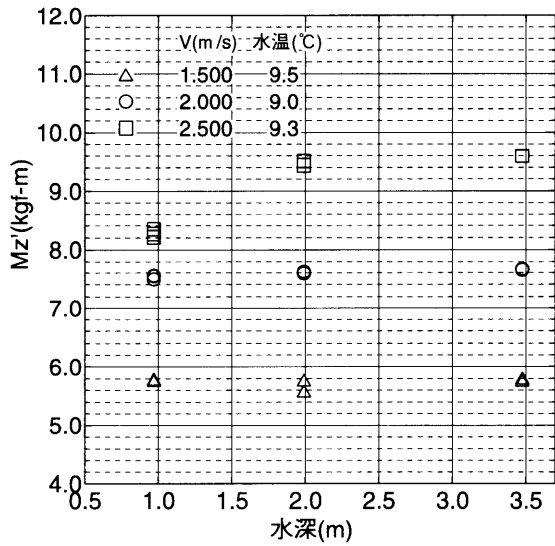


図-7 水深変化とモーメントとの関係

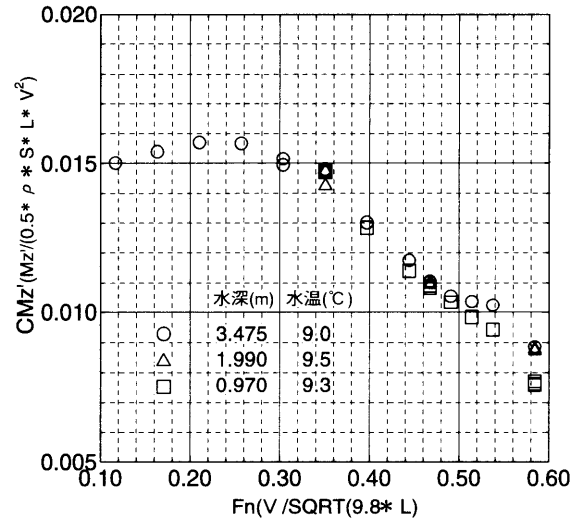


図-10 人体模型のモーメント係数

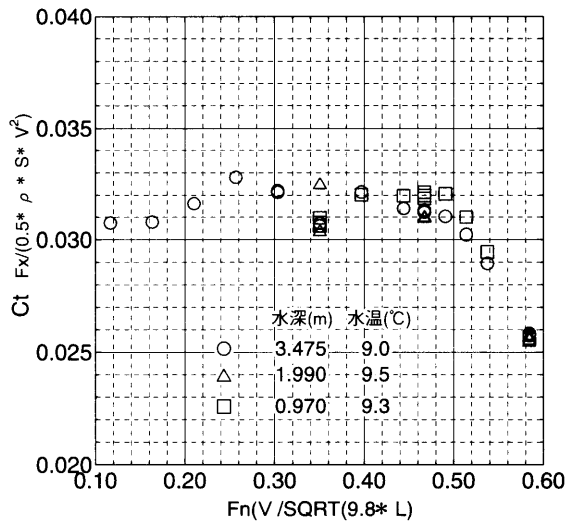


図-8 人体模型の抵抗係数

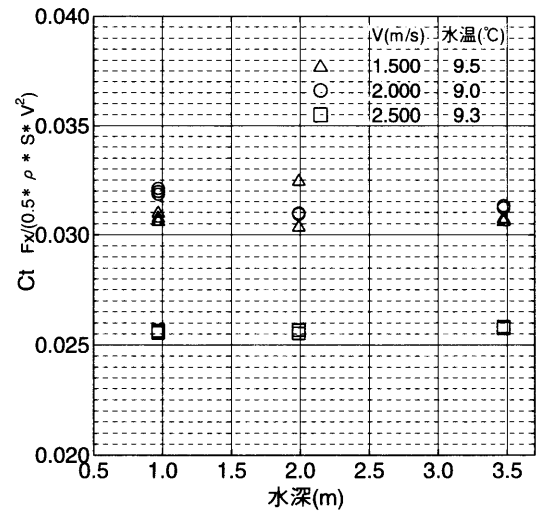


図-11 水深変化と抵抗係数

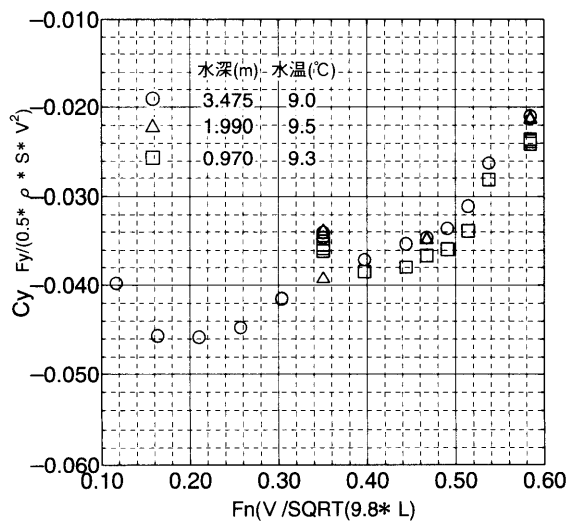


図-9 人体模型の揚力係数

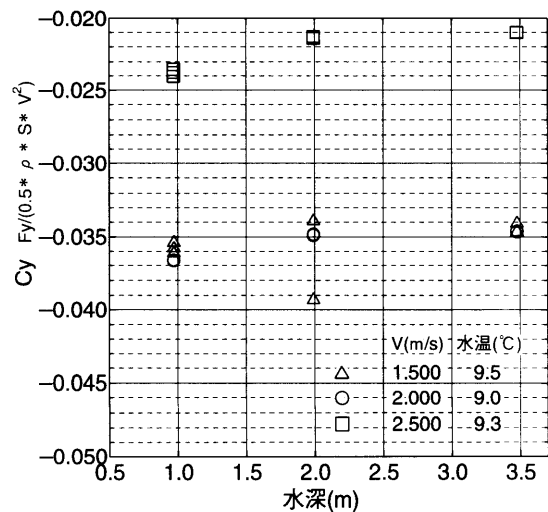


図-12 水深変化と揚力係数

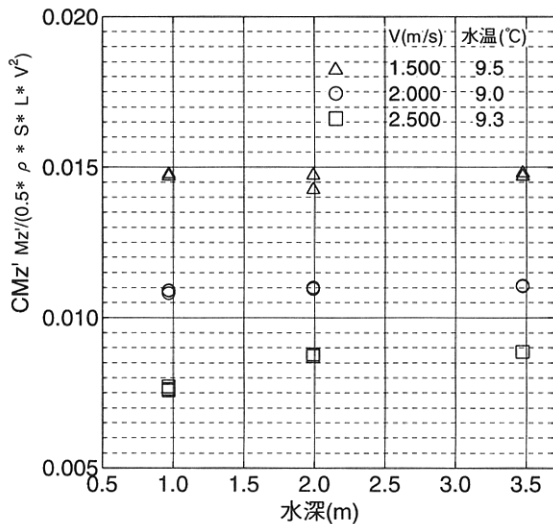


図-13 水深変化とモーメント係数



写真-4 引き波 (1.5m/s)

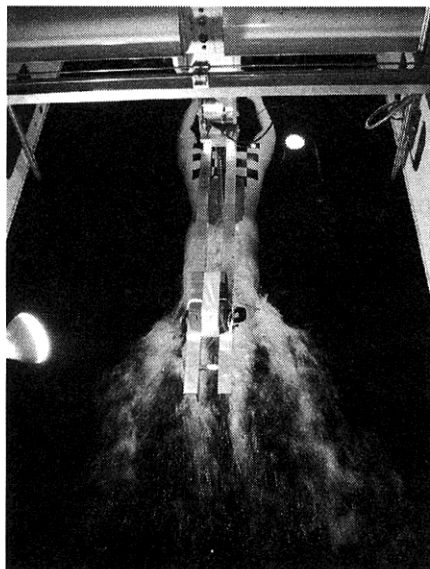


写真-5 引き波 (2.5m/s)

方が小さい。各流体力とも  $F_n=0.351$  でバラツキが見られる。ビデオ撮影による波の観察によると、この速度において模型の股から足の間で大きな乱れ（渦）が見られた。この渦が流体力に対するバラツキの一原因として考えられる。

図-11~13に無次元値を水深に対して示す。  $C_t$  は  $V=2.0\text{m/s}$  ( $F_n=0.468$ ) で、かつ最も水深が浅くなる  $0.97\text{m}$  で抵抗が増加するが、その他の速度では水深の影響が殆ど見られない。  $C_y$  は3速度とも水深  $0.97\text{m}$  で負の揚力が大きくなり、  $CM_z'$  は  $V=2.5\text{m/s}$  ( $F_n=0.585$ ) の水深  $0.97\text{m}$  で頭下げモーメントが小さくなっている。以上から、水深の最も浅い  $0.97\text{m}$  で速度が速い場合に流体力に変化が見られ、抵抗に関しては  $V=2.0\text{m/s}$  の時に増加が見られた。これらの流体力の変化は浅水影響によると思われる。

抵抗計測と併せて模型の周囲に起きる波の高さを計測したが、今回の計測位置では、浅水影響に関する変化はほとんど見られなかった。

数値計測と同時に模型が起こす曳き波の状態を目視で観察し、静止画像およびビデオ映像として記録した。試験中の曳き波の状態を写真-4~5に示す。

今回使用した水槽（海技研・中水槽）は水深を変化させて曳航試験が出来る国内でも数少ない水槽であるが、実際に水深を満水の  $3.5\text{m}$  から  $1.0\text{m}$  まで変化させた計測事例は過去になかったため、  $150\text{m} \times 7.5\text{m}$  の水槽から  $2.650$  トンの水を抜いていくための時間が予想外に掛かってしまった。次回に同様の試験をおこなう場合は、事前にさらに綿密な実験計画を立てる必要があることを痛感した。

#### 4. まとめ

本研究では、一昨年の世界水泳選手権福岡2001大会で、八つの世界新記録、二十の日本新記録を含む数多くの新記録が生まれた原因のひとつにプールの水深の影響があったのではないかという仮説から、船舶の分野で広く知られている「浅水影響」理論から水深と泳者の抵抗の関係を説明することを試み手実寸模型の曳航試験を実施した。

実験では、水深を  $1\text{m}$ 、  $2\text{m}$ 、 および  $3.5\text{m}$  の3段階に変化させ、検力計で固定したマネキンを経泳選手の泳速度に近い速度で曳航し、流体力（抵抗、揚力、モーメン

ト) を計測したがこの結果をまとめると、

- 1) 水深1mではマネキンに働く流体力の変化が確認された。これは浅水影響と考えられる。
- 2) 水深 2 mと水深 3.5 m との間には、流体力の有意な差はなかった。したがってこの水深範囲では浅水影響は無視できると考えられる。
- 3) 上記2点から、水深1mの近辺から有意な浅水影響が表れることが考えられる

水深1mで浅水影響と見なせる流体力の変化が見られた部分をさらに細かく見ていくと、我々の関心をもっとも高い泳者の抵抗に関しては、曳航速度2m/sec付近において水深1mでは2mと比較して約 3.4%の抵抗増加が計測された。一方水深 3.5 mでは2mと比較して約 1.1%の抵抗増加が計測された(図-11)。

今回の試験結果は当初予測した水深2mと 3.5 mの間には流体力にほとんど差がなく、むしろ水深 2 mが一番抵抗の少ない深さという結果に終わったが、幸い、通常の公認プールの水深は2m以上となっていて、その限りでは現在のトップスイマーたちのスピード域では浅水影響は考慮しなくてよいことが明らかになった。また、今回の計測はマネキンという固体で行われたが、実際は競泳者の手足の動きが加わり、より複雑な要素の中での流体力の変化が起きているはずであり、最終的には推進力に及ぼす浅水影響としての評価をする必要がある。