

# 回流水槽における抵抗計測システムの構築とその性能評価

尾崎伯哉\*1・八木 光\*2

## A Hull Resistance Measuring System of the Circulating Water Channel and its Performance Evaluation

Hakuya OZAKI and Hikaru YAGI

### Abstract

The Circulating Water Channel (CWC) of Tokai University has been used for research works and education program since 1981. A resistance measuring system using the channel was newly established in order to broaden its application to the resistance evaluation of ships taking the opportunity of a maintenance work in September, 2004. This report outlines the system including the feature of velocity fluctuation of the channel. Model tests were conducted for the evaluation of accuracy in resistance measurement, and their analyses were made to investigate the characteristics of the test system using four models; two merchant type ships and two fishing boats.

The analyzed results and their comparison with those at towing tanks and/or other circulating water channel indicated that the resistance measuring system is useful in practice for the evaluation of hull resistance qualitatively. It was also confirmed that quantitative evaluation is possible allowing the inevitable scatter of flow velocity, surface disturbance.

### 緒 言

船舶の抵抗性能を評価することは性能設計上非常に重要である。近年はCFD (Computational Fluid Dynamics) の発展により、理論計算手法を用いて抵抗を評価することが日常的に行われるようになった。(例えば、原ほか2004) CFDの利用は有効ではあるが、その解の安定性、精度および適用範囲の問題もあり、船型開発の定性的な評価が主眼であり、最終的な評価には模型実験を行うことが必要であることはいままでもない。一般に、抵抗試験はその性質上非常に高精度を要求されることから大型模型を利用し、長水槽において実施されることが多い。しかし、回流水槽においても、その流速特性や計測精度を認識し、具体的な船型と抵抗の関係を出来るだけ定量的に評価することは可能であり、手軽さ、費用特性から今後も広く利用されると考えられ、抵抗試験システムの構築は非常に重要である。(小倉, 1985)

東海大学では昭和56年(1981年)に回流水槽が6号館実

験棟に設置され、学部教育および各種研究に利用されてきた。2004年9月に一部保守工事を行ったのを機に回流水槽の船舶抵抗試験システムの構築を行い、その性能を調査するために一連の抵抗試験を実施し、今後の実用的な船体抵抗評価への利用可能性を評価した。

本論文では、回流水槽の流速についての特性調査および抵抗試験結果について精度評価を行い、抵抗計測システムの有用性の評価結果を中心に述べる。なお、抵抗試験については標準模型船による大型水槽との比較および同一模型による他回流水槽との計測結果比較を行う。

## 1. 抵抗計測システム

### 1.1 回流水槽

東海大学の回流水槽は2つのインペラを有する立型であり、最大流速は1.0m/sである。一般の整流機能のほかは表面流速加速装置などの機能は有していない。その要目をTable 1に示す。

2005年9月14日受理

\*1 東海大学大学院海洋工学専攻 (Graduate School of Marine Science & Technology, Tokai University)

\*2 東海大学海洋学部 (Department of Marine Design and Engineering, School of Marine Science and Technology, Tokai University)

**Table 1** Particulars of Circulating Water Channel

Type		Vertical
No. of Impeller		2
Maximum Velocity		1.0m/s
Measuring Section	L	2.8m
	B	1.4m
	D	1.15m
	d	About 0.9m

## 1.2 システムの概要

抵抗計測システムは 1) 模型ガイド装置, 2) 曳航装置および 3) 検力計および計測記録装置からなる。模型ガイド装置は旧システム部分を改造し曳航用パンタグラフを新たに作成した。また曳航装置は汎用機器トラバサを利用し, 新たに全抵抗計測用の総量型検力計を設け, 曳航ロッドを介して模型船を曳航するようにした。

システム全体として抵抗試験をルーティンとして実施できるように精度維持に加え, 構成の簡素化も重点的に行った。抵抗計測システムの配置図を Fig. 1 に示す。

### 1) 模型ガイド

模型船ガイドはその上部にスライド型上下運動吸収を設け, 下部のパンタグラフ部にて上下, 前後運動および縦傾斜運動を許す機構である。下部の模型取り付け部にはユニバーサルジョイントを用い, 横傾斜, 縦傾斜を許す構造となっている。なお, 抵抗試験時の定常的な船体の上下移動はガイド本体部でも吸収出来るが, 下部のパンタグラフ機構で大部分の変化を吸収することが出来る。また, ガイド上部のスライド部およびパンタグラフには重量バランス調

整機能を持たせ, ガイド重量が模型船にかからない機構である。本ガイドは船体前方用, 後方用の一対からなり, 模型船の前後に装備することにより船首の左右ゆれを拘束する。

### 2) 曳航装置

曳航装置は汎用機器の 2 軸トラバサを用い, 下端部に検力計を取り付け台に設け, 検力計高さを模型曳航点高さに, また左右位置を船体中心線に容易に調整出来るようにした。

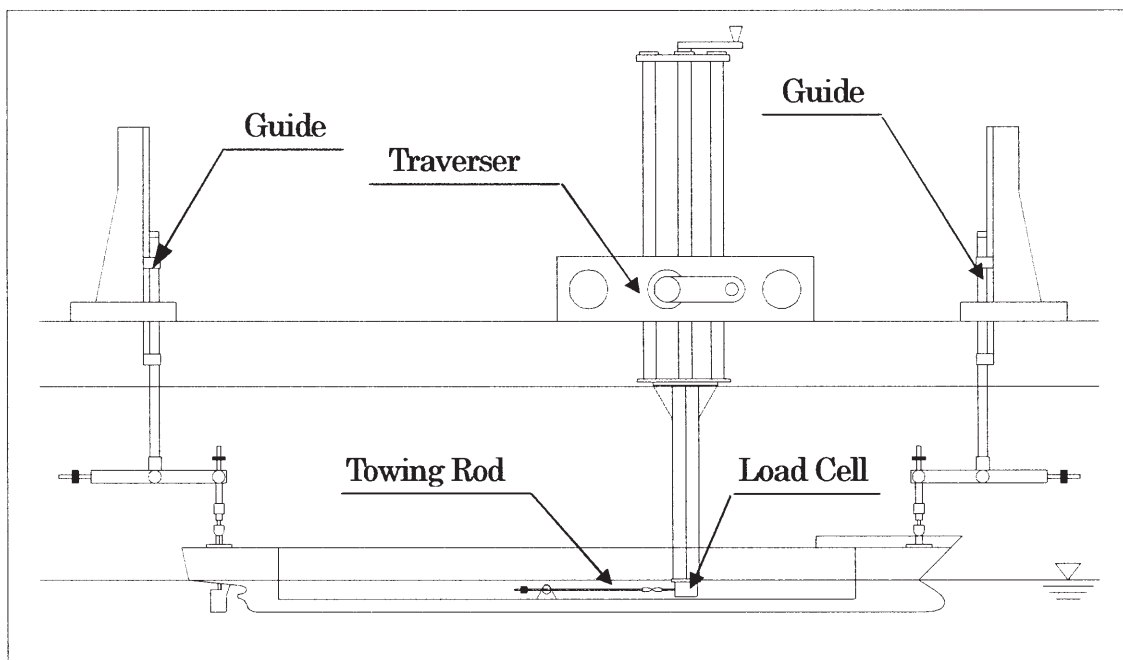
模型船体取り付け部は, 曳航ロッドを自動調心玉軸受にて支持し, 船体姿勢の変化に対しても曳航ラインが変更できる様にした。また, 曳航ロッド後端部にはバランス重量を設け, ねじにより移動可能とし, ロッドの前後配置の変化に対応出来るようにした。

### 3) 検力計

検力計には総量型および部分型の 2 種類が考えられるが, 計測時の操作性と取り扱いの容易さを考慮し, 総量型とした。検力計の容量は当回流水槽の使用模型船が約 1 m 前後の長さであること, 流速が最大 1.0m/s であることから想定模型の総抵抗量の算定を行い, 10N 型 (共和 LTS-1KA) を選定した。また, 検力計先端部にはユニバーサルジョイントを設け, 曳航ロッドとの接合をスムーズに出来るようにした。

### 4) 計測記録装置

検力計出力の増幅器, AD 変換器は共和 PCD300A とし, 記録は汎用 PC を利用した。計測時間およびサンプリング周波数は計測標準値として 20Hz, 20秒とし, 計測波の変動を確認しながら調整を出来るようにした。

**Fig. 1** Arrangement of Resistance Measuring Apparatus

## 2. 回流水槽の流速特性

回流水槽はその特性から曳航水槽と異なり流速変動を避けることが出来ない。そこで、整備後の流速特性を翼車流速計により計測し、回流水槽のモーター回転速度と流速の関係および計測に伴う出力変動を調査した。調査速度範囲は0.3m/sから回流水槽の定格最大速度1.0m/sとした。流速計測は翼車流速計 (KENEK VOT2-200-20W) を使用した。

Fig. 2 に垂直方向の流速分布図 (無次元値), Fig. 3 にモーター回転数と翼車流速計で計測した速力の関係を平均値, 最大・最少値を示す。流速計測中心位置は, 模型配置を参考にし, 流出口先端から40cm後方, 水深7cm, 水槽中心位置とした。計測は20Hzの周波数でサンプリング数200とし, 10秒間の計測結果である。Fig. 2 から, 上下方向分布を見ると, 水面付近の流速は水槽下部に比べ水面下数センチまで直線的に低下していることが分かる。これは本回流水槽に表面加速装置が装備されていないためであると考えられる。左右方向分布では, 右舷側 (船首方向に対して) の流速が若干速い傾向を示している。これは, 水槽の整流格子を備え整流を行っているにもかかわらず生じており, 本回流水槽の特性として考えられる。Fig. 3 から流速変動の最大, 最少値はモーター回転数/翼車流速計の出力に比例している。しかし, 低回転の一部を除いてはほぼ直線性が確保出来ていることが分かる。回帰直線のピア

ソンの積率相関係数  $r$  を求めると  $r^2$  は 0.9976 と良い相関がえられている。

$$r = \frac{n(\sum XY) - (\sum X \sum Y)}{\sqrt{[n\sum X^2 - (\sum X)^2][n\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

各流速ごとの変動値を標準偏差で見ると, Fig. 4 に示したように変動の平均値に関する比率はほぼモーターの回転数に比例した量であり, 低速では1.5%から2%程度, 高速回転では増加傾向となるものの最大回転数で3%程度であることが分かる。

速度変動の船体抵抗への影響のほかにも, 水面の乱れや水面傾斜の影響など回流水槽に関する諸要因が抵抗に影響を及ぼすが, 定量的には必ずしも明確ではないため, 抵抗試験結果の平均値としてある程度の変動があることを前提に, 抵抗試験結果を評価することとした。(小倉, 1985)

## 3. 対象模型船

対象模型船は検証内容を考慮し, Table 2 に示す商船模型および漁船模型の2種類の模型群を用いた。全模型船とも  $Sq. St. 9\frac{1}{2}$  にスタッドをつけ乱流促進を行っている。

### 3.1 商船型模型

Series 60 (Todd, 1952, Todd, 1953) は世界的に幅広く調査された一般商船用船型のプロトタイプであり, 各種

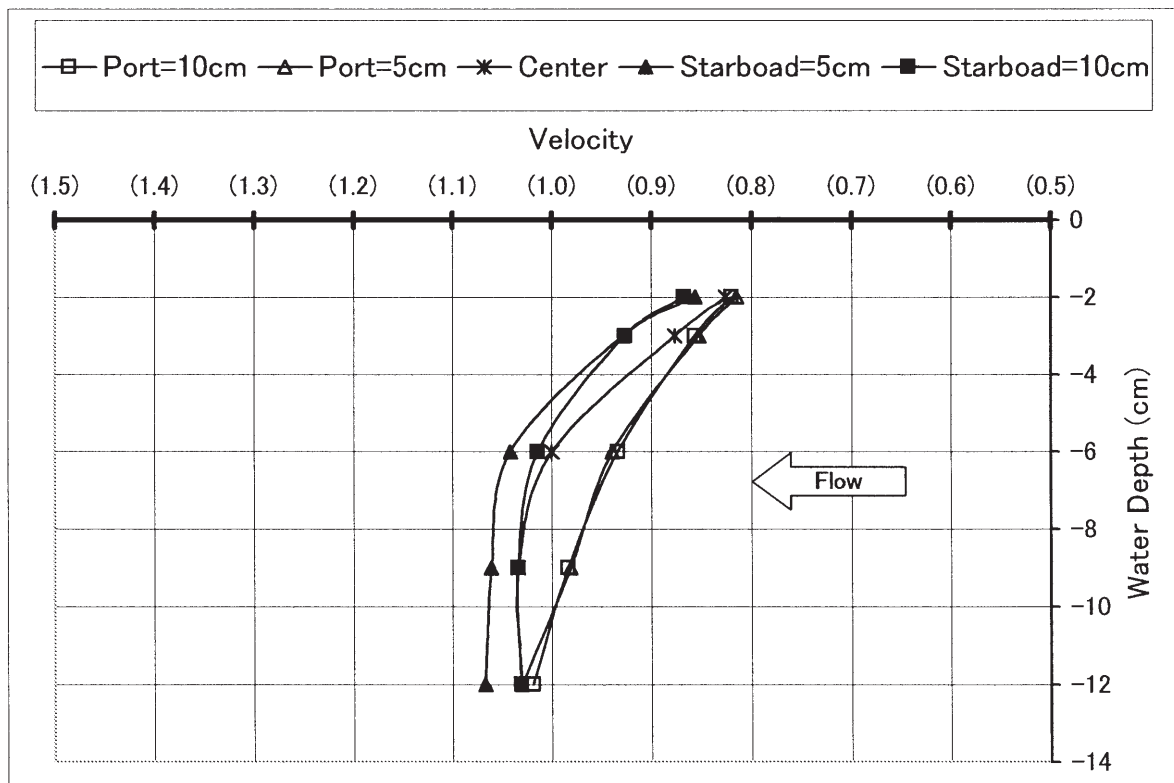


Fig. 2 Vertical Distribution of Flow Velocity

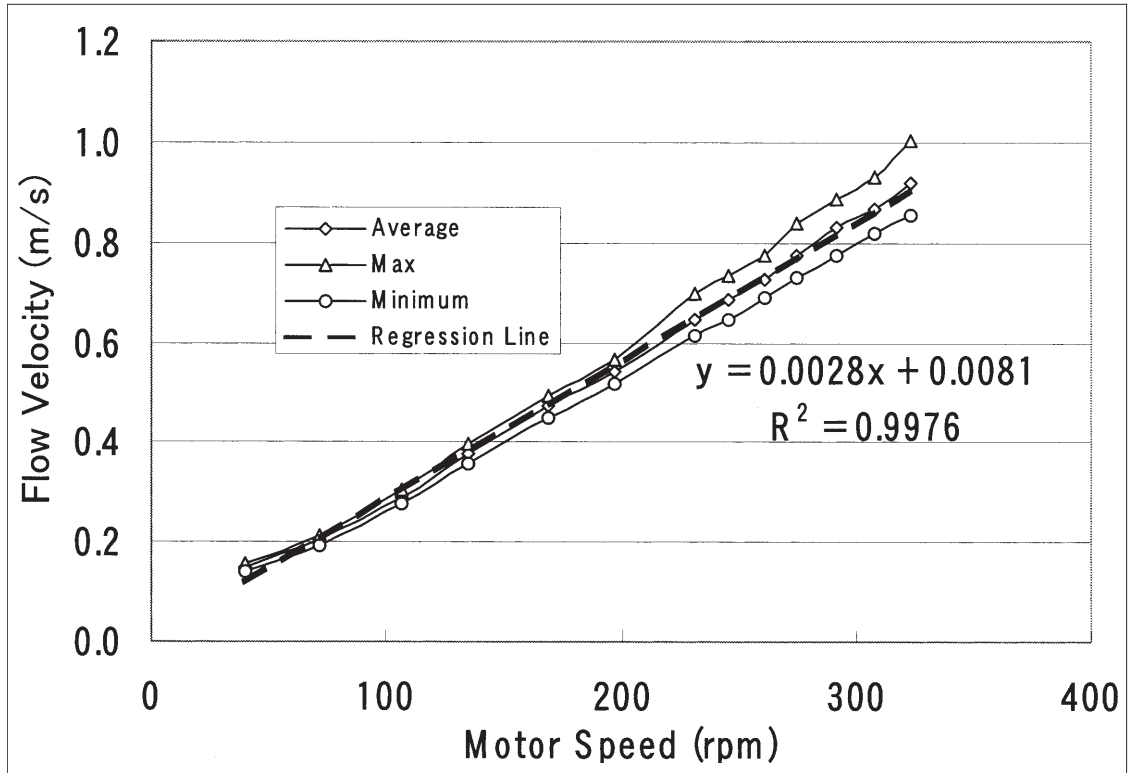


Fig. 3 Relation of Motor Speed and Flow Velocity

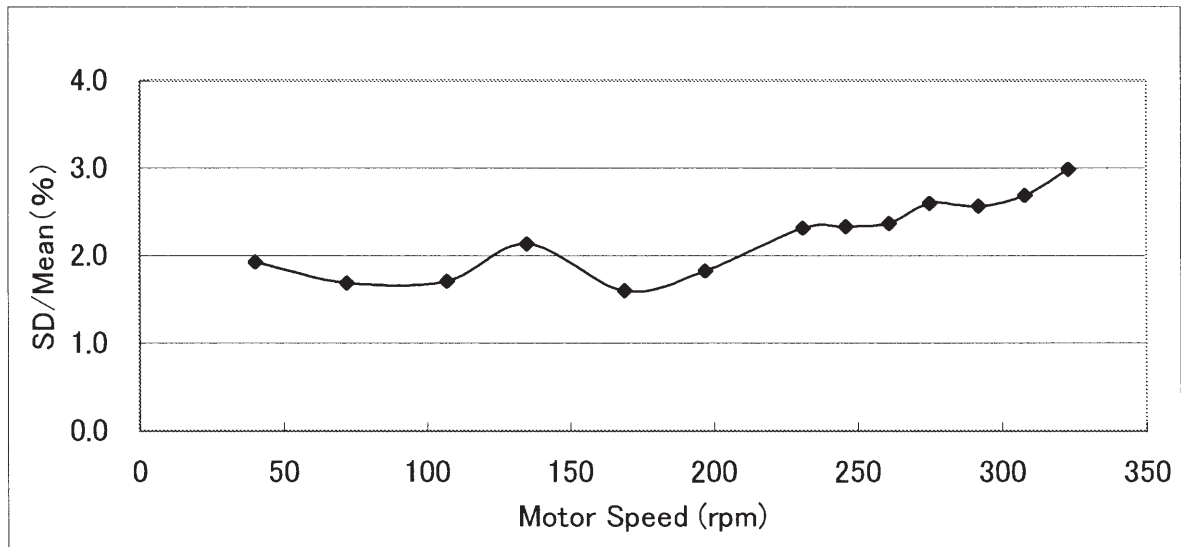


Fig. 4 Variation of Flow Velocity

Table 2 List of Model Ships

Series	Model No.	L <sub>PP</sub> (m)	B (m)	d (m)	Note
Series 60	M.No.001	1.250	0.172	0.0690	C <sub>B</sub> =0.65
	M.No.002	1.200	0.171	0.0686	C <sub>B</sub> =0.70
Fishing Boat	M.No.003	1.000	0.197	0.0784	Tuna
	M.No.004	0.903	0.200	0.0568	High speed Type

水槽における抵抗試験の評価基準として利用され、その結果が公表されている。今回の調査では方形係数 ( $C_B$ ) 0.65 および 0.70 の 2 船型を用いた。代表例として  $C_B=0.65$  の船型線図を Fig. 5 に示す。

### 3.2 漁船型模型

本計測システムの適用性評価のため、フルード数が高く、抵抗にハンパ、ホローが生じ複雑な抵抗係数曲線を示す傾向を有する漁船を対象として選定した。具体的には、鮪漁船および高速型漁船各1隻である。両船型共大型水槽において抵抗試験結果が行われている。前者の模型写真を

Photo 1 に後者の概略線図を Fig. 6 に示す。模型 M.No. 003 は鮪漁船であり、M.No.004 は高速型漁船模型である。両船とも傾斜船底を採用し、M.No.004 は船体にチェーンを持ち、船首部には波除スプレーリストを装備している。

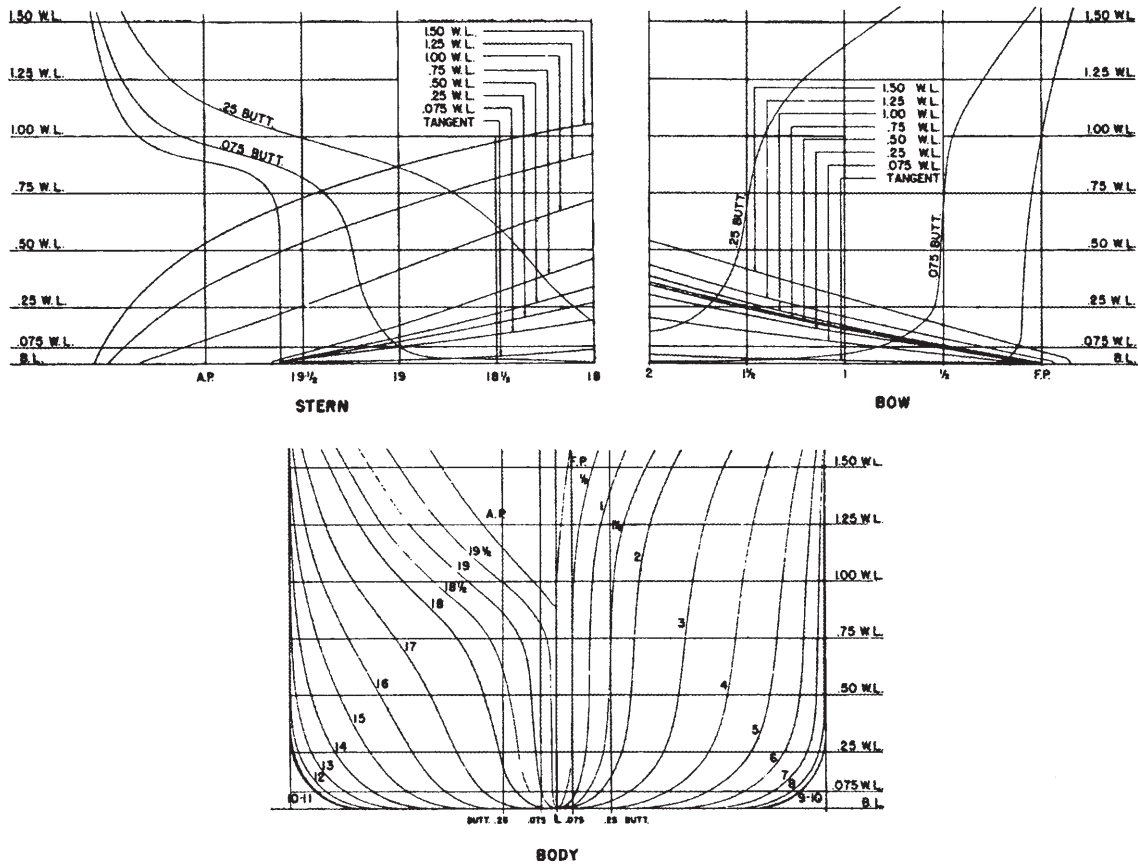


Fig. 5 Hull form of M.No.001 (Series60,  $C_B=0.65$ )

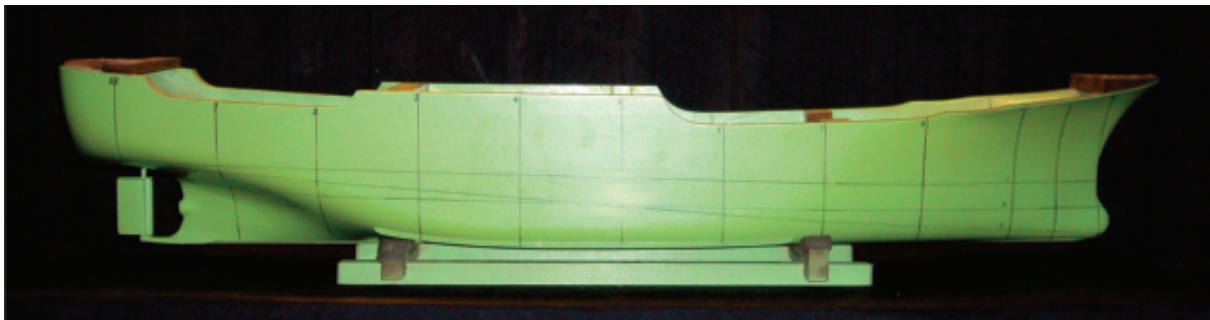


Photo 1 Model Hull of M.No.003

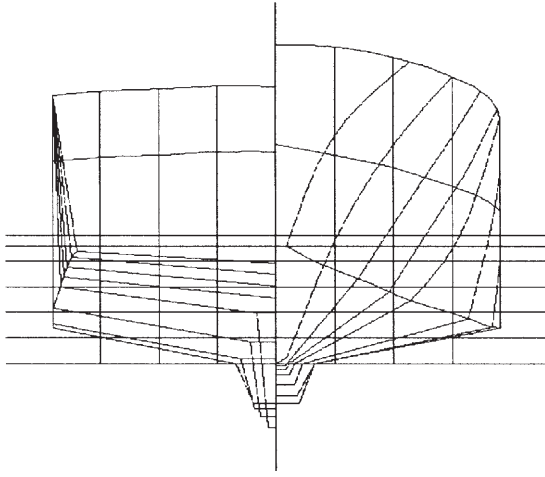


Fig. 6 Body Plan of M.No.004

#### 4. 実験結果とその解析

##### 4.1 Series 60 模型

M.No.001 ( $C_B=0.65$ ) 抵抗計測状態の写真を Photo 2 に示し, M.No.001 ( $C_B=0.65$ ) および M.No.002 ( $C_B=0.70$ ) の抵抗試験結果を速度と抵抗係数の関係として Fig. 7 に  $C_B=0.65$ , Fig. 8 に  $C_B=0.70$  の結果を示す.

ここで,  $C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^2}$  は全抵抗係数,

$C_F$  は Schoenherr の平板摩擦抵抗係数,

$C_R$  は剰余抵抗係数で  $C_R = C_T - C_F$  ある.

両図から抵抗係数の値には若干の変動はあるが, 計測速

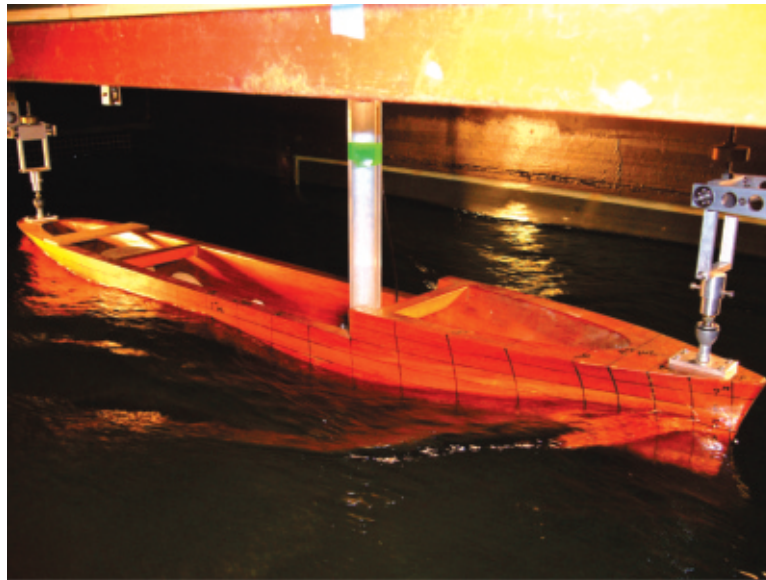


Photo 2 A Running Condition of M.No.001 (Series60,  $C_B=0.65$ )

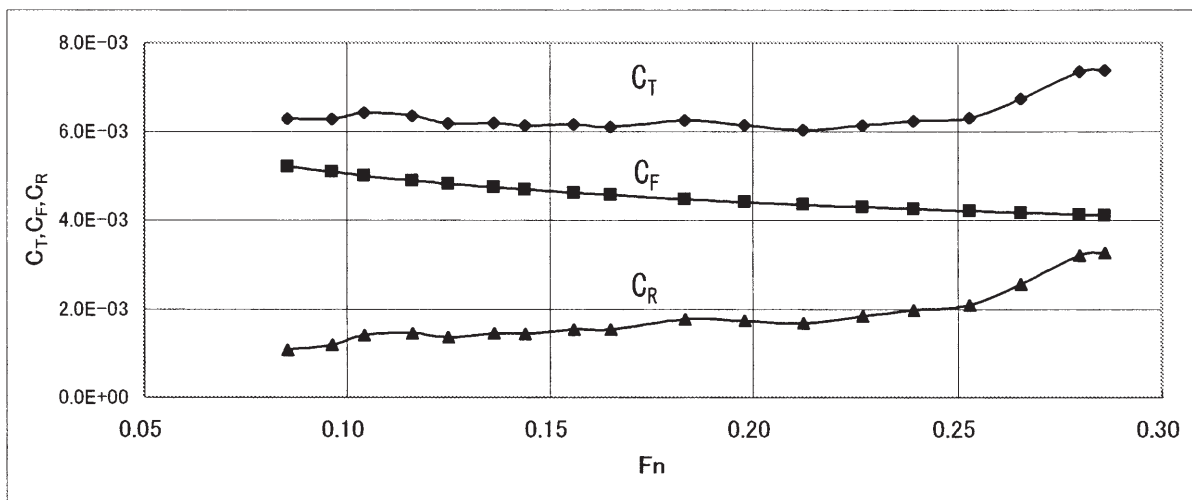


Fig. 7 Resistance Test Results of Series 60,  $C_B=0.65$

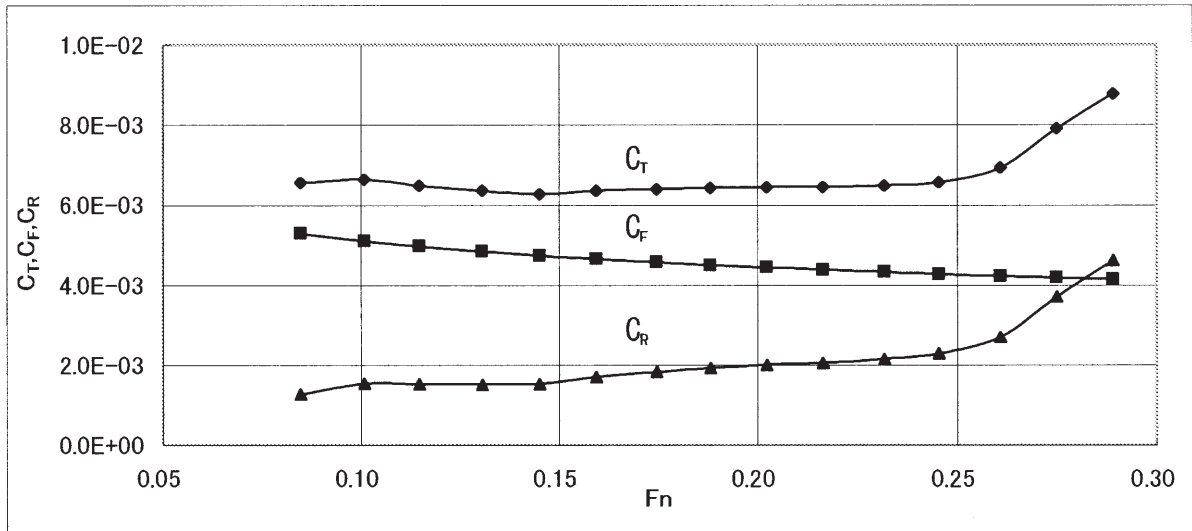


Fig. 8 Resistance Test Results of Series 60,  $C_B=0.70$

力範囲全般でほぼスムーズな抵抗係数曲線を得られていることが分かる。本模型試験の結果から低速域で  $1+K=C_T/C_F$  から、形状係数  $K$  を定め、造波抵抗係数  $C_W=C_T-(1+K)C_F$  を算出し、Todd による約 6 m (20feet) 模型船での結果と比較し、Fig. 9 および Fig. 10 に各々示す。Fig. 7 には M.No.001 の同一模型を用いて他の回流水槽で行った抵抗試験の例もあわせて示した。また、求められた形状影響係数  $K$  は Table 3 に示す。

$C_B=0.65$  の例を見ると、曲線は当試験ではフルード数 0.18 程度までの低速領域で若干のばらつきが見られること、またフルード数 0.18-0.20 付近にハンパが生じている特徴が見られる。3 者の結果を総合的に比べると、模型寸法の差異、曳航水槽と回流水槽の差異があるにもかかわらず、抵抗係数は定性的および定量的にもほぼ妥当な一致を与えていることが分かる。また、抵抗の実用評価に重要な

造波抵抗係数の急増するフルード数についても 3 者ともほぼ 0.25 付近であり、ハンパ、ホローもほぼ一致しているといえる。

$C_B=0.7$  の例では、造波抵抗係数  $C_W$  の値は回流水槽の結果は本例でもフルード数 0.18-0.20 付近にハンパが生じているが、Todd の結果とも全般的には良い一致を示しているといえる。

両図の比較から、造波抵抗係数  $C_W$  は  $C_B$  の増加により全領域で増加すること、また形状影響係数  $K$  の  $C_B$  による影響は Table 3 に示すように  $C_B$  の増加に伴い  $K$  が増加することが示されており、一般的な船舶の船型要素と抵抗の関係を正しく示している。一方、 $K$  の増加量の定量的な比較では Todd (1953) に結果に比べ約 1/2 と小さいが、この差異は、回流水槽の速度変動や検力計の誤差に関する考察でも述べた通り、最も精度の低い低速での抵抗計測値

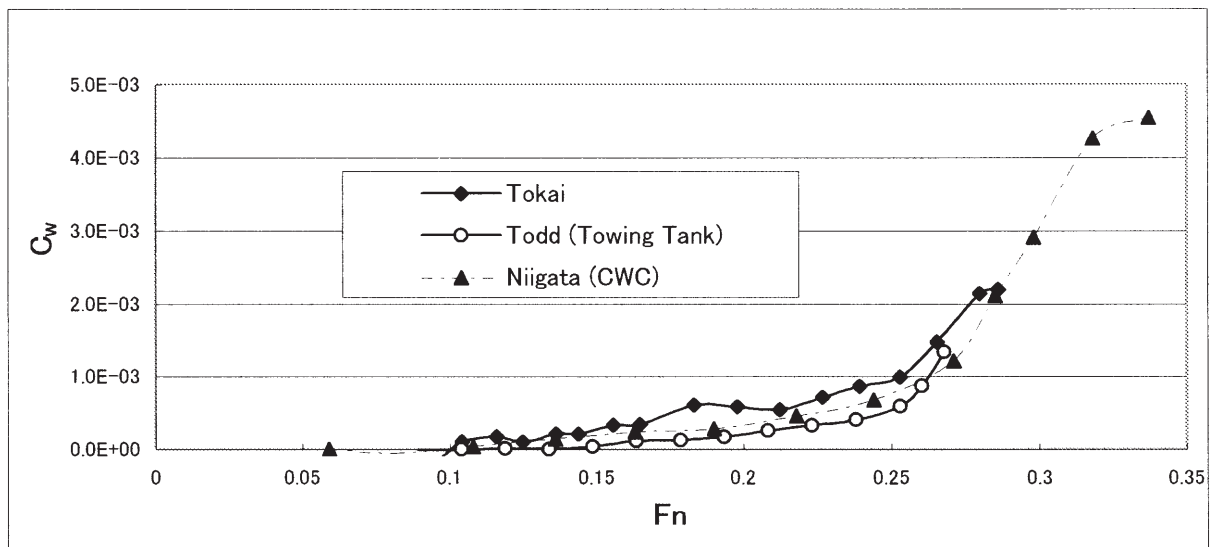
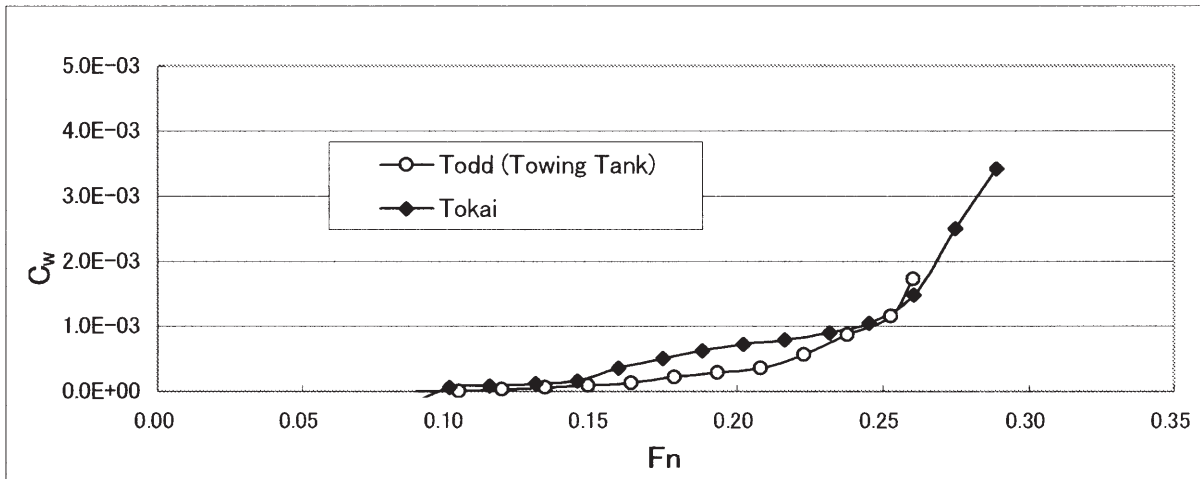


Fig. 9 Comparison of Wave Resistance Coefficient (Series 60,  $C_B=0.65$ )

Fig. 10 Comparison of Wave Resistance Coefficient (Series 60,  $C_B=0.70$ )Table 3 Comparison of Form Factor  $K$  (Series 60)

	$C_B=0.65$	$C_B=0.70$	Increment
Tokai	0.26	0.29	0.03
Todd	0.33	0.39	0.06

を利用することから小型模型船を利用するには避けることができない誤差を含む。しかし、この解析結果は、 $K$ の定性的推定と  $C_r$ の定量的推定には充分可能な精度を有していると考えられ、定量的な船型評価に利用可能である事が明らかになった。

この様に商船型標準模型船の解析結果を見ると、曳航水槽に比べ定量的にはある程度の差異はあるものの船型の変化、本例では  $C_B$ の変化を充分反映できるシステムといえる。また造波抵抗についてもほぼ妥当な結果を与えるといえる。

#### 4.2 漁船模型

漁船型模型2隻を用い抵抗試験を行い、本計測システムの精度検証を行った。M.No.003は鮪漁船であり、模型船長さ1mである。M.No.004は高速艇型の船型をした高速型漁船である。M.No.003の抵抗試験結果を剰余抵抗係数  $C_r$  で Fig. 11に大型模型の曳航水槽における試験結果とあわせて示した。回流水槽の結果は2mの大型模型曳航水槽結果に比べ低速域および高速域でやや低く、中間速度域ではやや高い傾向を示しているが、定性的な傾向はほぼ一致していることが分かる。また、フルード数0.25付近のハンパ、フルード数0.27付近のホローおよびさらに高速域のラストハンパへの剰余抵抗係数の急激な増加など、抵抗のハンパ、ホローを詳細に再現しており、両者の一致度は高いことが分かる。

M.No.004 (高速型漁船)の試験結果を Fig. 12に示す。

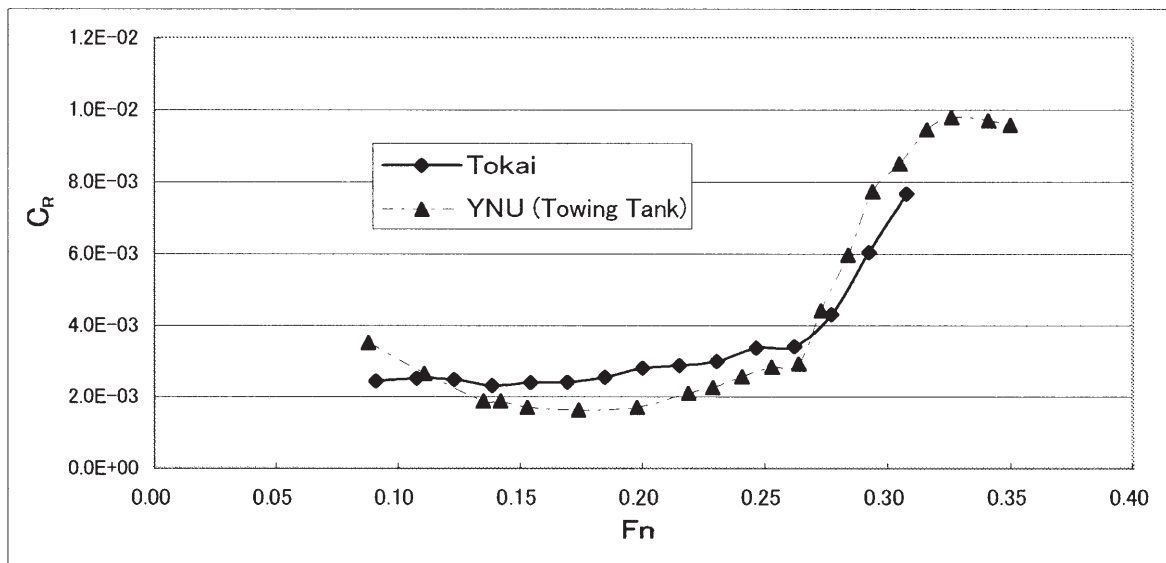


Fig. 11 Comparison of Residual Resistance Coefficient (M.No.003)



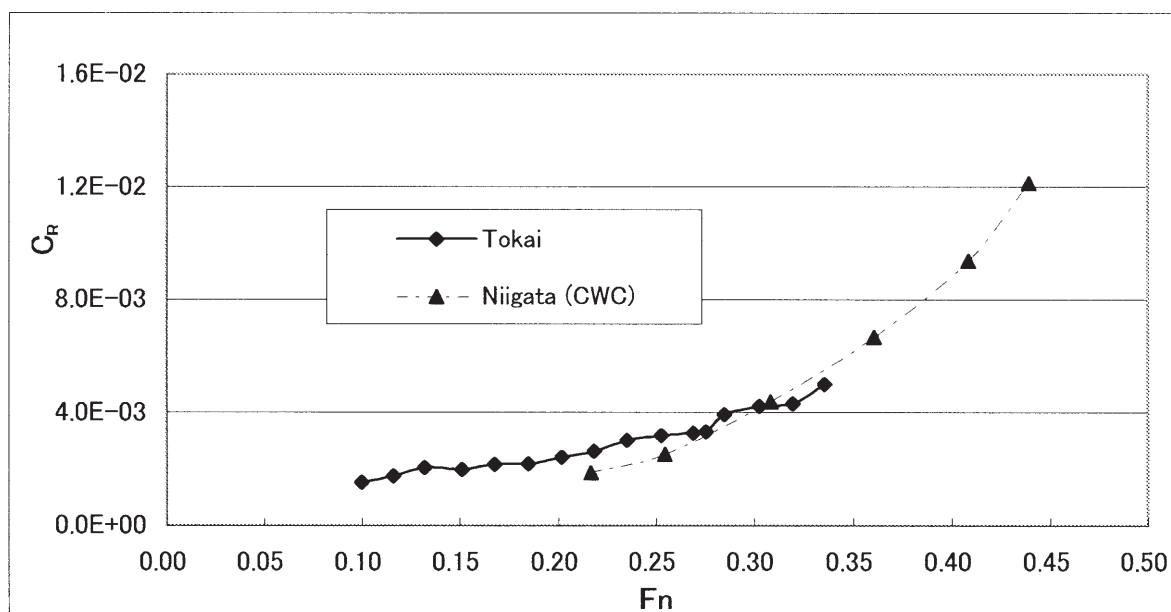


Fig. 12 Comparison of Residual Resistance Coefficient (M.No.004)

本例では模型船長さが0.9mと最も短い回流水槽の流速制限から計画速力 ( $Fn=0.43$ ) の高速域までの試験は不可能であり最大フルード数0.35までの実施である。本模型の他回流水槽の試験データを重複速度領域のみで比較すると、東海大学の例はフルード数0.2-0.25で抵抗のハンプがあるが、それ以上の高速域では両者の剰余抵抗係数の値はほぼ同等である。また、同一船型の1.8m, 3.5mの大型模型船結果（(財)日本小型船舶工業会, (財)日本造船技術センター, 1976, 限定出版物）の結果との比較や回流水槽の特性差を考慮するこの試験結果は妥当で、本システムは高速船型にも十分な精度を発揮できるものと考えられる。

## 5. 結 論

本研究では、船型評価のルーティンとして行われる抵抗試験について回流水槽を用いて実施できるように抵抗計測システムを再構築し、一般商船を代表するSeries60 模型2隻および漁船船型2隻の合計4隻の船について船体抵抗の精度を実用的な利用可能性を評価した。その結果、下記の結論を得た。

- 1) 全量型検力計を用いた抵抗計測システムによる船体抵抗計測結果は、妥当な抵抗値の計測精度を有することが示された。また、回流水槽では回避できない流速変動および模型長さの制約はあるものの、抵抗の解析結果は大型曳航水槽の結果と比べても妥当な抵抗特性を十分示すことがわかった。
- 2) 商船型船型であるSeries 60 模型による肥大度影響については、方形肥せき係数  $C_B$  の変化に伴う形状影響係数  $K$  の増加を適切に反映し、大型模型船との結果とも

定性的に良い一致を示している。造波抵抗係数については速度影響およびハンプ、ホローの発生位置および大きさなど定性的および定量的にも大型模型船の曳航水槽における結果と良い一致を示している。

- 3) 漁船船型模型においては、速度影響による剰余抵抗係数の変化が複雑であるが、回流水槽の結果は大型曳航水槽の試験結果と比較して、定性的にも定量的にも非常に良い一致を示している。また高速型漁船においても若干のハンプホローは見られるが高速域では他回流水槽の結果と比しほぼ同等な剰余抵抗係数の特性を与えることが分かった。
- 4) 以上の結果から、今回構築された回流水槽の抵抗計測システムは実用的な精度レベルを有しており、各種の船型評価に有用であると結論できる。

なお、今後の課題としては、多くの比較検証実績を積み上げることにより、回流水槽の固有特性を明確にし、回流水槽を利用した実用的な定量的評価を可能にすることが上げられる。

## 6. 謝 辞

本研究の遂行に当たり、システム構築について各種助言や便宜をはかっていただいた株式会社昭島研究所福島雅博様に感謝申し上げます。また、模型船の使用およびその実験結果の提供を快く許可いただいた株式会社三井造船昭島研究所および新潟造船株式会社の関係各位に御礼を申し上げます。

### 参考文献

- Todd, F. H. and Forest, F.X.: A Proposed New Basis for the Design of Single-Screw Merchant Ship Forms and Standard Series Lines, Vol. xx, Trans. SNAME, pp.642-744, 1952
- Todd, F. H.: Some Further Experiments on Single-Screw Merchant Ship Form=Series 60, Vol. xx, Trans. SNAME, pp.517-589, 1953
- 原 文枝, 平山 明仁, 八木 光: CFD の船体周り流場計

- 算への適用と抵抗評価に関する研究—その1 波形解析法の応用と造波抵抗—, 東海大学紀要海洋学部 Vol. 2, No. 3, 2004, pp.13-23
- (財)日本小型船舶工業会, (財)日本造船技術センター: FRP 製船舶船型開発委員会報告, 1976年3月, pp.17-37 (限定出版物)
- 小倉理一: 回流水槽の特性, 回流水槽セミナー—回流水槽の実験技術と利用—, 回流水槽懇談会, 1985年12月, pp.15-38

### 要 旨

今般回流水槽に船体抵抗計測システムを構築し, その計測精度等を調査した。船体模型については商船型2船型, 漁船型2船型, 合計4船型の抵抗試験計測と解析および大型水槽での試験結果との比較等を行い, 大型水槽の結果と比較して絶対値としては若干の差異があるものの定量的な傾向を十分反映することが明らかになった。また, 回流水槽間の結果の比較によっても, 比較した両者間でも精度を考慮すれば妥当な結果が得られ, 実用的な船型評価に利用することが出来ることが明らかとなった。