

船首形状と抵抗および流場に関する実験的研究

——船首端曲率半径の影響——

正員 金 井 健*	正員 橋 本 美 貴**
正員 青 木 伊知郎***	田 井 祥 史****
正員 森 光 造*****	正員 田 中 和 哉*****
正員 田 中 拓*	

Experimental Study of Resistance and Flow Due to Difference of Entrance Forms
——Influence of Radius of Curvature at Stem——

by Takeshi Kanai, <i>Member</i>	Yoshitaka Hashimoto, <i>Member</i>
Ichiro Aoki, <i>Member</i>	Yoshifumi Tai
Kohzo Mori, <i>Member</i>	Kazuya Tanaka, <i>Member</i>
Hiraku Tanaka, <i>Member</i>	

Summary

To investigate an influence of local modification of entrance form on resistance and flow, the authors made the resistance tests and the flow measurements on the four model ships, with different radius at stem. For these studies the authors have developed a resistance test system using divided model ships in order to obtain bow resistances separately.

As the result of these experiments, the authors found significant differences of the bow resistance and flow around the bow and showed an optimum radius at stem. Learning the results of flow measurements, it could be considered that vortices at bow play important role in these differences of resistance.

Lastly the authors tried to explain the relation among entrance form, vortices and resistance, by Hawthorne's theory. In spite of assumption including the theory, the results of calculation showed good agreement with experimental ones in some points.

1. 緒 言

肥大船に働く抵抗は、船首端の局所的な形状に大きな影響を受ける場合がある。これは船首端に固有の流場、例えば船首付近の自由表面に存在する渦、船底渦などの渦現象、波崩れ等の非線形性の強い造波現象が、船首端の微少な形状変化に影響されるためと推測される。このような流場に

基づく抵抗の研究は、最近の船型の肥大化の傾向の中で、より重要度を増してきている。

船体抵抗と船型については、これまで船体主要目、排水量分布といった、船体全体の流場に影響を与えるような、巨視的な関係が主に研究されてきた。しかし船首端のような局所的な船体形状について、抵抗軽減の手段として使えるような指針は、現在のところ与えられていない。CFDによる流れの計算も、細部の船型変化と抵抗の関係を求める研究手段としては、未だ有効なものとなっていない。

こうした状況の中で本研究では、実用的な船首端形状の設計指針を得ることを指向した。当面の研究の対象を、船首端の曲率半径とそれに基づく Water Line (W. L.) の微細な変化とし、これらによる抵抗、流場の変化を調査した。ここで船首端の曲率半径を取り上げるのは、この部分が抵抗変化の原因の一つであり、かつ工作上の問題にも絡み、線図設計上検討を要するためである。抵抗計測では、分割

* (財)日本造船技術センター

** (株)サノヤス・ヒシノ明昌

*** (株)大島造船所

**** 今治造船(株)

***** 常石造船(株)

***** (株)名村造船所

原稿受理 平成5年1月11日

春季講演会において講演 平成5年5月19, 20日

模型を使用した船首抵抗の分離計測を試み、さらに流場の観察と計測を行った。最後に、これらの結果について理論的に解釈することを試みた。

船首付近の特異な流場として知られる波崩れによる抵抗については、馬場¹⁾の研究以来多くの実験的、理論的研究が行われてきた²⁾。この結果、波崩れをおこしている自由表面に速度欠損がある^{3),4),5)}、比較的低速から自由表面直下に渦が存在する^{5),6)}、自由表面の曲率の大きくなった点から波が崩れる⁷⁾等、船首自由表面流場の特徴が徐々に明らかになってきた。またこれらの現象を説明する理論として、浅水での衝撃波とのアナロジー⁸⁾、Corner Vortex 等の剝離渦との比較⁹⁾、Ray Theory を用いた解釈⁹⁾などが提案されている。しかしこれらは全て自由表面の特徴を説明する理論的モデルであり、船首端の局所的な形状と抵抗を結びつける実用的な道具となるまでには至っていない。

また船首端のもう一つの重要な現象である船首船底渦も、その船型、抵抗値との関係は不明である。これは実用的肥大船型では、船首バルブの整流効果により、顕著な船首船底渦の発生が少なく、またその抵抗に対する寄与も小さいと考えられているためであろう。

このように、従来の研究が船首端における流場現象を把握し、それを理論的モデルで説明し、抵抗改善に応用しようとしていたのに対し、本研究では、まず船首端の局所的な形状と抵抗の関係を把握した後、流場現象を観察し、こ

れらの結果より船首端形状と抵抗の関係を結び付ける実用的な設計指針を得ようと試みている。

2. 分割模型による抵抗試験の方法と結果

2.1 分割模型の構造

この研究で、分割模型による船首抵抗の分離計測を指向したのは、次のような理由による。

- ① 実用船型では船型可分原理¹⁰⁾は必ずしも成立しないと考えられ、全体模型の抵抗変化からでは、船首の船型変化と抵抗の関連を正しく知ることはできない。
- ② 類似船型間で抵抗が異なる場合、その原因を特定できるような試験法の開発は、船型設計に有益な資料を与える。

船体を分割しそれぞれの抵抗を測ろうとする試みは、古くから船型可分原理の証明、造波の船首尾の干渉の解明等のため田村¹¹⁾、Rödström¹²⁾(Fig. 1(a), (b)参照)などにより試みられている。しかしいづれも計測法に問題があり、その後は研究されていない。田村はこれらの計測法について、

- ① 模型船の全抵抗が高々数 kg のオーダーであるのに対し、分割部断面にかかる静水圧は数 10 kg のオーダーに達すること。
 - ② 航走中の、分割部間隙内の水位の変動による、静水圧変化の補正が困難であること。
- 等の問題点を指摘している。最近内藤ら¹³⁾は、これらの問題を解決するため、分割部間隙に水が入り込まないようにビニールシートを張り、波浪中での抵抗増加の計測を試みている (Fig. 1(c)参照)。

今回の研究で使用した分割模型では、内藤らにならない分割部間隙を水密とした。水密材としてゴム管を使うことにより、より簡便で精度の高い計測を可能にしている。船首抵抗は、分割部の船尾側 (船尾模型) に固定された動力計に船首模型を接続し、計測する。船首抵抗の計測値は水密材の弾性によって若干の影響を受けるが、これについては較正試験の方法を工夫することによって対処した。全抵抗は通常の抵抗試験と同様に、曳引車上に固定された抵抗動力計によって、船尾模型を曳航することにより計測する。航走姿勢も、通常と同じ曳航ガイドを用いて、船尾模型の Yaw と Sway を拘束した。

Fig. 2 にこの分割模型システムの較正試験における直線性を示す。この図は、分割模型を水槽に浮かべた状態で、抵抗となる方向に静荷重を掛けたときの誤差をプロットしたものである。最大誤差は同じ年の 7 月と 11 月の 2 期を通じて 0.03% FS (船首抵抗最大値の 0.5%, FS=50 kg) であり、大容量の動力計を用いたにも係わらず満足のできる直線性であった。また各試験ごとに計算された較正係数の標準偏差は、0.47% であり、非常に安定した精度を示した。

この計測法の開発によって、通常の抵抗試験と殆ど変わ

Symbol	Definition
L_{fore}	Length of Fore Model
B	Breadth of Model Ship
d	Draft
R	Radius at Stem
S	Wetted Surface Area
∇	Displacement
R_{rt}	Resistance of Whole Model
R_{rf}	Resistance of Fore Model
C_{F0}	Schoenherr's Frictional Resistance Coef.
r_{wp}	Wave Pattern Resistance (Measured at $Y/l=0.5$)
l	Half of L_{pp} of Whole Model
K	Form Factor
ρ	Density of Fresh Water
V_M	Test Speed of Model Ship
F_n	Froude Number (based on $L_{pp}(=7.5m)$)
F_d	Froude Number (based on d)
V_{ML}	Momentum Loss
V_0	Uniform Velocity in Flow Measurement
v_x	Measured Velocity component of X-Direction
v_y	Measured Velocity component of Y-Direction
v_z	Measured Velocity component of Z-Direction
W_{VZ}	$W_{VZ} = \sqrt{v_y^2 + v_z^2} / V_0$
q	Magnitude of Velocity on Stream line
θ	Angle Between X-axis and Stream Line
ξ	Vorticity Component of Stream Line direction
Y_s	Starting Point of Stream Line (Y-Direction)

* Latest subscript such as f, a and t show fore, after and whole model respectively.

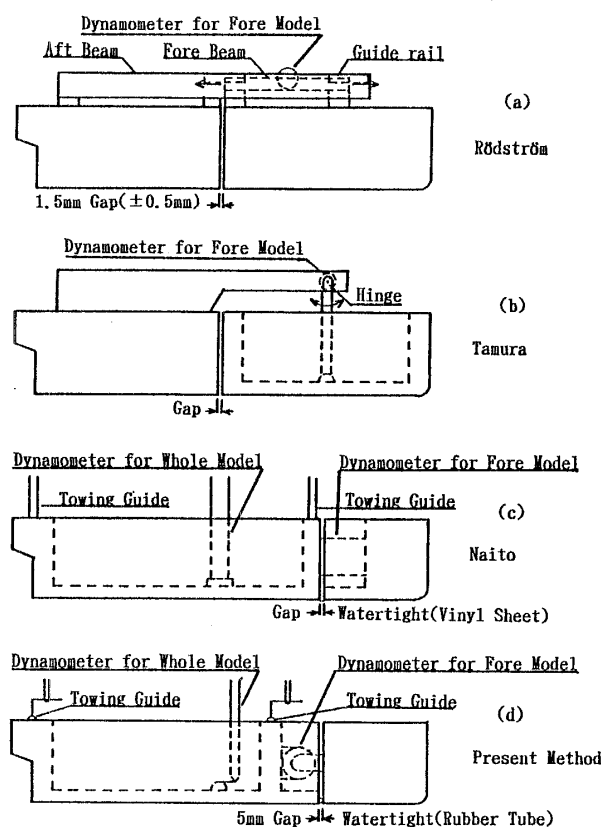


Fig. 1 Concepts of Divided Model

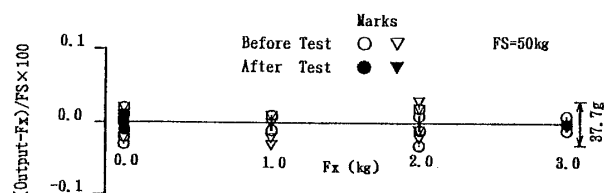


Fig. 2 Calibration Test Results of Dynamometer for Fore Models in Floating Condition

りの無い労力と精度で、船首部の抵抗を計測することができるようになった。

2.2 供試船型

今回使用した分割模型の構成を Fig. 3 に示す。調査の対象となる船型は $L_{pp}=3.0$ m 相当で、Midship で切断され、動力計を介して船尾模型に接続される。今回の研究で図示のような長い船体平行部を採用したのは、この計測技術の有効性を確認するため、船首尾の干渉を計測システム上からも排除できるよう考慮したためである。以下で用いられる S.S. No. は、船首模型に対するもので、船首端が F.P (S.S. 10)、分割部断面が Midship (S.S. 5) となっている。

供試船型を Fig. 4 に示す。この船型は、 $L/B=5.5$, $B/d=3.5$, $C_b=0.80$ の幅広肥大船型を Type Ship とし、船首端の曲率半径 (R) を 4 種類変更したものである。船首部の主要目を Table 1 に示す。S.S. 9 1/4 より後方の C_p カー

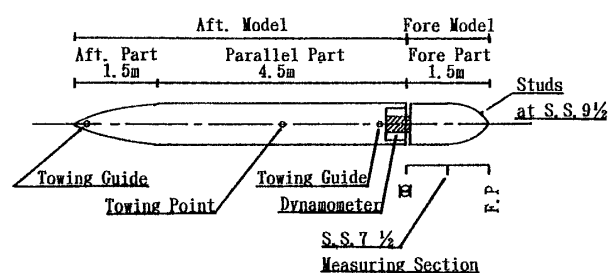


Fig. 3 Configuration of Divided Model (Present Study)

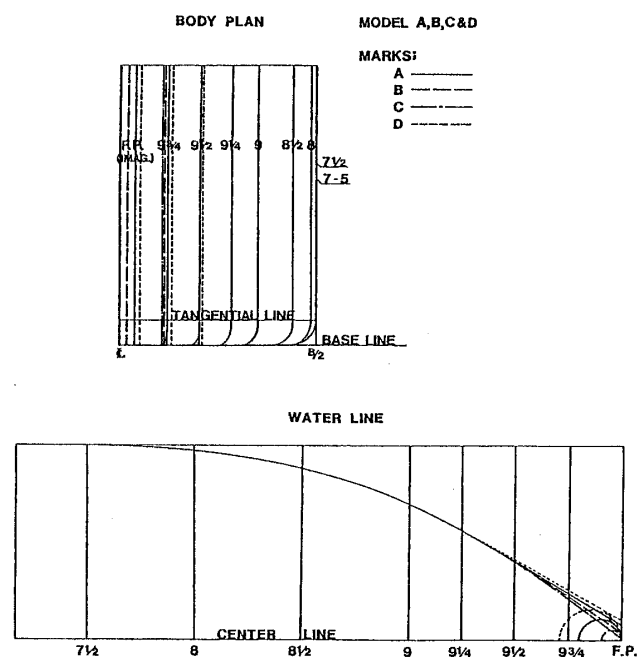


Fig. 4 Body Plan and Water Line of Fore Models

Table 1 Principle Particulars of Fore Models

Model	C	B	A	D
L_{fore} (m)	1.500			
B (m)	0.545			
R (mm)	7.50	15.00	30.00	45.00
d (m)	0.156			
R/B	0.0138	0.0275	0.0550	0.0825
∇_r (m ³)	0.1068	0.1070	0.1072	0.1075
S_r (m ²)	1.1248	1.1255	1.1268	1.1278

ブ、 C_w カーブは Type Ship のものをそのまま採用し、フレームラインは、問題を単純化するため Wall Sided にした。船首端 R と W.L. の接する部分は、2 次の微係数まで連続となるよう設計されている。図を見ても分かる通り、船型が異なっているのは、S.S. 9 1/4 より前のわずかな範囲だけである。

2.3 抵抗試験

模型船にセットされた 2 組の動力計により計測される抵抗 (R_n , R_{rr}) は、Table 2 に示した式を用いて解析する。摩

Table 2 Definitions of Resistance Coefficients for Divided Models

		Whole Model	Fore Model	After Model
Total	Resistance Coef.	$r_{Tt} = \frac{R_{Tt}}{\rho \nabla_t^{2/3} V_n^2}$	$r_{Tf} = \frac{R_{Tf}}{\rho \nabla_t^{2/3} V_n^2}$	
Frictional	Resistance Coef.	$r_{Ft} = \frac{S_t}{2 \nabla_t^{2/3}} C_{F0}$	$r_{Ff} = \frac{S_f}{2 \nabla_t^{2/3}} C_{F0}$	
Residual	Resistance Coef.	$r_{Rt} = r_{Tt} - r_{Ft}$	$r_{Rf} = r_{Tf} - r_{Ff}$	$r_{Ra} = r_{Rt} - r_{Rf}$
Viscous	Resistance Coef.	$r_{Vt} = (1+K_t) r_{Ft}$	$r_{Vf} = (1+K_f) r_{Ff}$	
Wave Making	Resistance Coef.	$r_{Wt} = r_{Tt} - (1+K_t) r_{Ft}$	$r_{Wf} = r_{Tf} - (1+K_f) r_{Ff}$	
		$r_{Wst} = r_{Wt} - r_{Wp}$	$r_{Wsf} = r_{Wf} - r_{Wp}$	

* Latest subscript such as f, a and t show fore, after and whole model respectively.

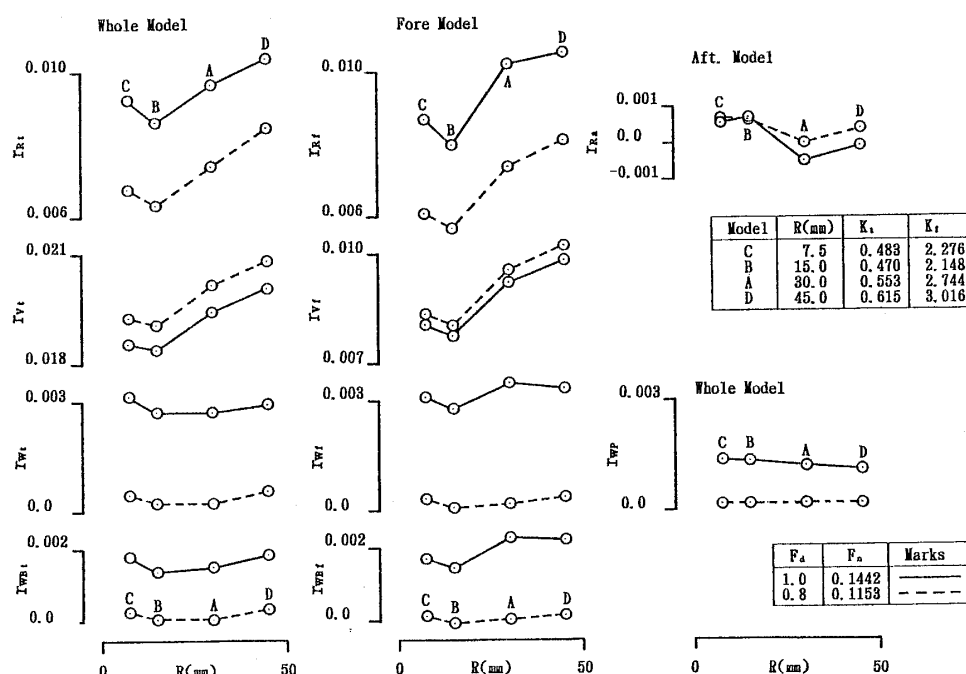


Fig. 5 Resistance Test Results of Models With Various Radius of Curvatures at Stem $d=0.156$ m ($B/d=3.5$)

擦抵抗係数 (C_{F0}) としては Schoenherr の算式を、波形解析には Newman-Sharma の方法を用いた。形状影響係数は低速抵抗試験の結果より求めた。

分割模型の抵抗について、若干留意すべき点を述べる。ここで使用されている船首抵抗 (R_{Tf}) とは、分割点を介し、船首模型が船尾模型を押す力を意味している。抵抗という概念が分かりやすいので、船首模型についても便宜的にそう呼んでいるに過ぎない。また船首抵抗の抵抗成分への分解方法も、試験結果の理解を助けるための便宜的なものである。

抵抗試験は、満載状態 ($d=0.156$ m) で行われた。抵抗試験の結果得られた抵抗値を、代表的な速度について、船首

端 R をベースに整理したものが Fig. 5 である。 F_d は、喫水を代表長さとしたフルード数を表している。Fig. 5 には船首抵抗と共に全体抵抗を、また剰余抵抗については船尾抵抗も示してある。

r_{Rt} と r_{Rf} の船首端 R に対する傾向は、ほぼ一致している。 r_{Ra} の変化は、 r_{Rt} , r_{Rf} のそれと比較して小さい。また r_{Ra} の変化量は、Fig. 2 の最大誤差以下である。これらのことより、分割模型による抵抗試験が妥当なものであることが分かる。

Fig. 5 で最も重要なのは、全体模型および船首模型共に、船首端の微少な形状の違いで、剰余抵抗 (r_R) が大きく変化し、一方、波形造波抵抗 (r_{Wp}) はほとんど変化していないこ

とである。 r_R と r_{WP} のこうした傾向は、計測した全ての速度範囲 ($0.6 \leq F_d \leq 1.2$) にわたって同様であった。 r_R は、船首端 R に伴って単調に増加するといった単純な振舞いはせず、 $R=15\text{ mm}$ 近辺で極小値を示す、下に凸のカーブを描いている。 r_R と r_V , r_W を比較すると、船型による抵抗の差の主因は、 r_V であることが分かる。また r_{WP} はほとんど変化しないが、 $r_{WB}(=r_W - r_{WP})$ は量こそ少ないものの、 r_V と同様の傾向で変化することも注目される。

3. 流場観測と流場計測

3.1 流場観測

船首端 R による抵抗の挙動を、流場観測によって説明することを試みた。

前項で示した満載状態、 $F_d=1.0$ に対応する船体表面の限界流線をペイント法により可視化したものが、Fig. 6 である。船型は A($R=30\text{ mm}$)、B($R=15\text{ mm}$)、C($R=7.5\text{ mm}$) の3船型である。船側の限界流線は、Fig. 6(b) に示すように目立った違いは現れていない。しかし船底部 (Fig.

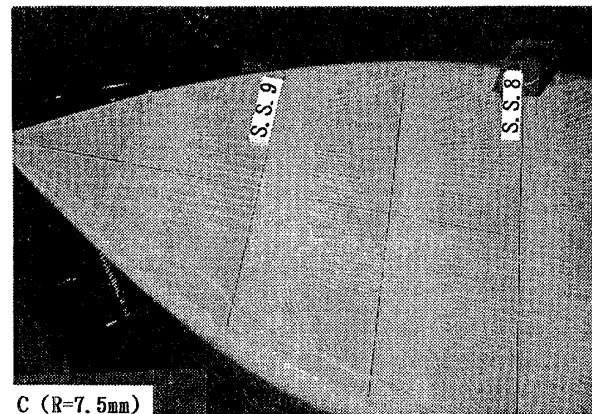
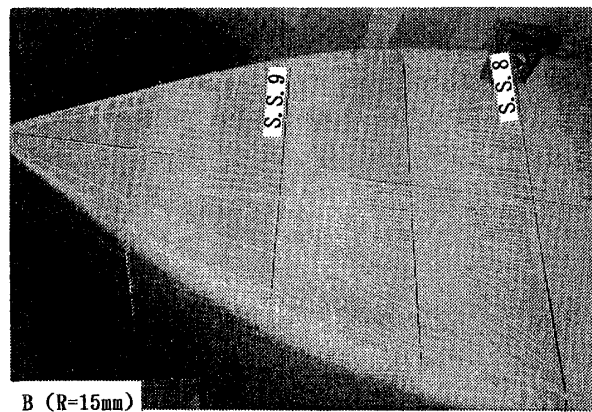
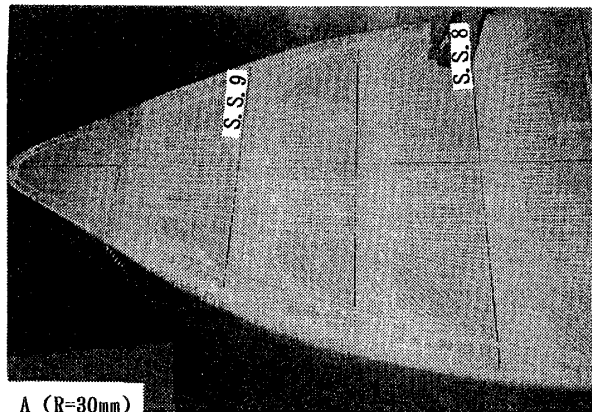


Fig. 6(a) Limited Stream Lines of Hull Bottom $d=0.156\text{ m}$ ($B/d=3.5$), $V_0=1.236\text{ m/s}$ ($F_d=1.0$)

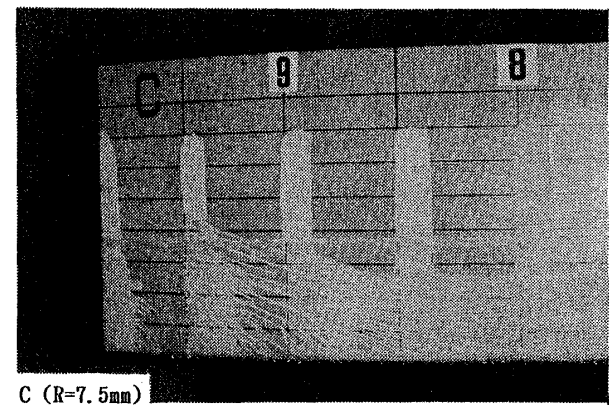
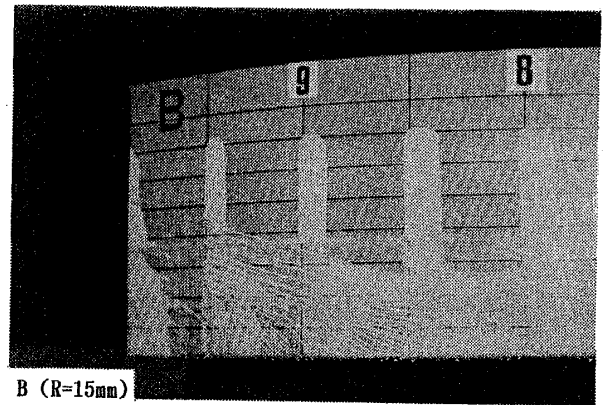
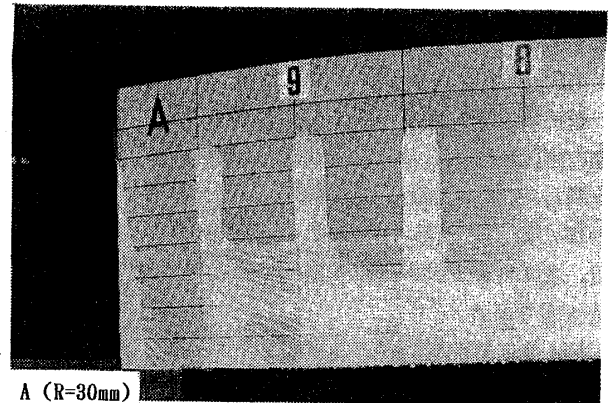


Fig. 6(b) Limited Stream Lines of Side Hull $d=0.156\text{ m}$ ($B/d=3.5$), $V_0=1.236\text{ m/s}$ ($F_d=1.0$)

6(a))には、抵抗変化と対応づけることができる。非常に明瞭な差が現れている。船底の限界流線の Center Line に対する角度が B 船型 ($R=15\text{ mm}$) が最も小さく, A ($R=30\text{ mm}$), C ($R=7.5\text{ mm}$) の両船型がそれより明確に大きくなっている。A, C 船型には, B 船型より強い船底渦が存在することが想像できる。この違いは特に S. S. 9 付近で著しい。また, 再付着線と考えられる線の位置も, B 船型のみ他より内側にある。B 船型の船首船底渦は他の船型より小さく, 渦抵抗が他の船型よりも少なくなっていると考えられる。

流線観測と同状態の船首近傍の波形写真の例を, Fig. 7 に示す。船型間で r_{WB} が異なるにも関わらず, 自由表面の形状や乱れに目立った違いは現れていない。

3.2 流場計測

船首船底渦と抵抗の関係を把握するため, また r_{WB} の相違の原因をつかむため, 五孔管を使用して流速ベクトルを計測した。計測位置は流線観測の結果を参考に, W. L. が平行部にはいる S. S. 7 1/2 (F. P より 0.75 m 後方) を選んだ。速度および喫水は流線観測の時と同一で, $F_d=1.0$, 満載状態である。

Fig. 8 に計測断面内の速度ベクトルと主流方向の速度分布を示す。予測通り 4 船型ともに強い渦があることが分か

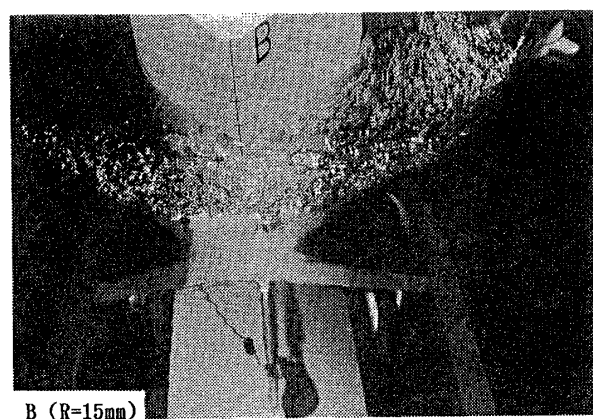
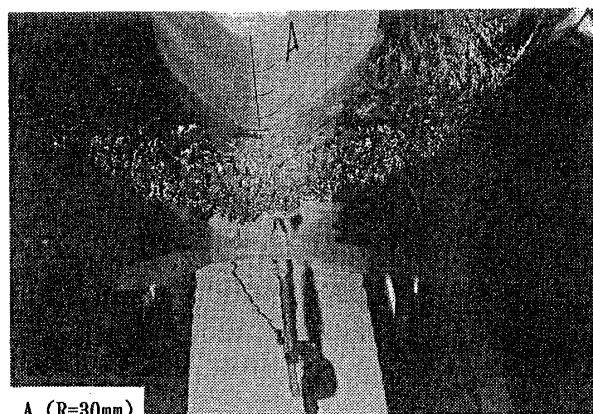


Fig. 7 Samples of Wave Patterns (Front View) $d=0.156\text{ m}$ ($B/d=3.5$), $V_0=1.236\text{ m/s}$ ($F_d=1.0$)

る。この結果の概略は, 呉¹⁴⁾ による長方形断面船についての計測結果と一致する。この渦は Model D < B < C < A の順で強くなっているように見える。

このような船体まわりの流れが抵抗に及ぼす影響を考えると, 運動量損失を (1) 式を用いて計算した。

$$V_{ML} = \rho \iint v_x (V_0 - v_x) dy dz \quad (1)$$

$$v_{ML} = V_{ML} / (\rho \nabla^{2/3} V_0^2) \quad (2)$$

通常, 運動量損失による抵抗は, 十分圧力が回復した船体の後方の断面で計測される。今回のような計測位置では圧力, 渦の回転エネルギー等の影響を考慮せねばならないが, ここでは簡単のため (1) 式のような主流方向の運動量

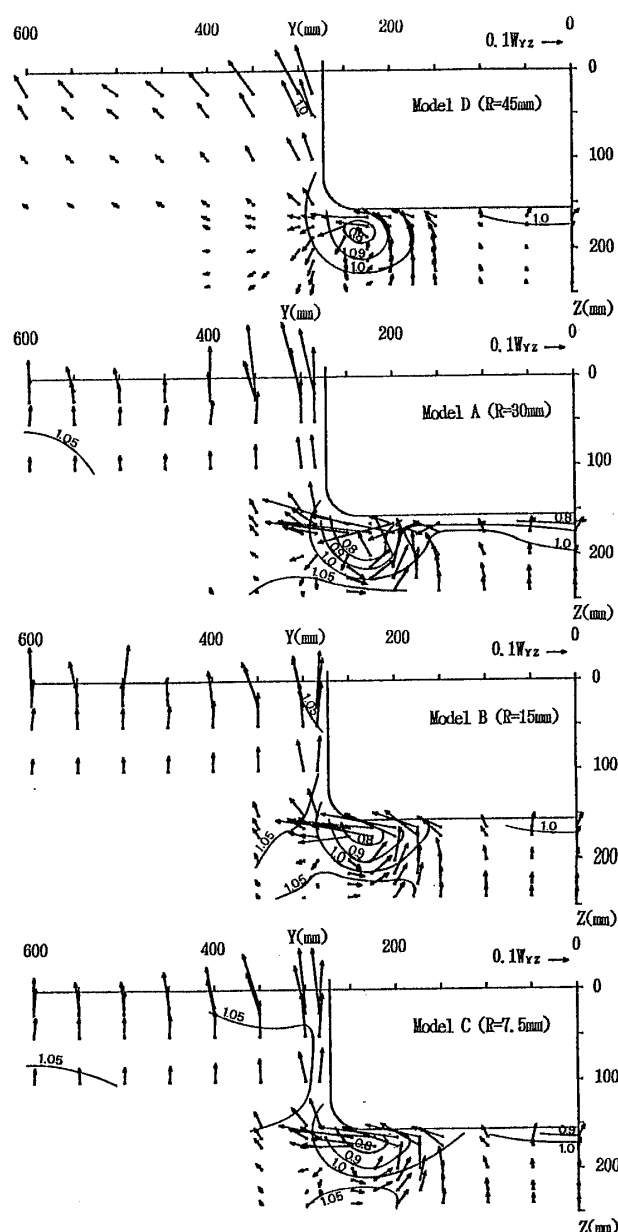


Fig. 8 Velocity Vectors (W_{yz}) and Velocity Contours (v_x/V_0) around Models, Measured at S. S. 7 1/2, $d=0.156\text{ m}$ ($B/d=3.5$), $V_0=1.236\text{ m/s}$ ($F_d=1.0$)

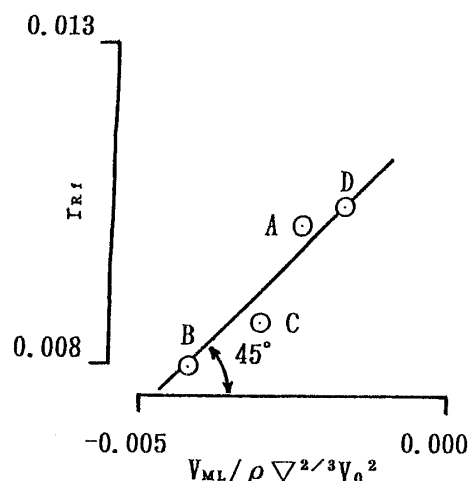


Fig. 9 Relation between Residual Resistance and Momentum Loss, Measured at S. S. 7 1/2, $d=0.156$ m ($B/d=3.5$), $V_0=1.236$ m/s ($F_d=1.0$)

損失のみを考えている。抵抗値と流場、船型の相対的な関係を把握することが目的であるので、このような方法でもさしつかえないと考えられる。

抵抗と運動量損失の関係を把握するため、抵抗試験の結果と運動量損失を比較した。Fig. 9 は縦軸に r_R を、横軸に (1) 式を計測面内で積分して得られた運動量損失をとり、各船型ごとにプロットしたものである。以下の図で使用している運動量損失は、(2) 式を使い無次元化してある。4 船型のデータは一つの直線上によくまとまり、かつこの直線は 45° の傾きを持ち、運動量損失と r_R の間に強い相関があることを示している。この結果は、分割模型による船首抵抗の計測結果を裏付けるとともに、ここで計測された運動量損失の中に、船型による抵抗の相違の原因がほぼ含まれていることも示している。

運動量損失の相違の原因となっている流れを知るため、Fig. 10 に代表的な計測深さにおける (1) 式の被積分関数を示した。また Fig. 10 を、それぞれの計測深さ、船型ごとに積分し、深さをベースにプロットした結果を、Fig. 11 に示す。Fig. 8 の速度ベクトル図と比較することにより、船底渦が抵抗に大きく影響を与えていることが読み取れる。また、渦が弱いように見えた D 船型 ($R=45$ mm) は、運動量損失の最大値は小さいものの、深さ方向での運動量損失の減少が小さく、結果として抵抗が大きくなっていることも分かった。

船側での運動量損失も明確に異なっている。Fig. 11 の計測深さ $0 < d < 150$ mm の範囲で、その大小関係を比較すると、 r_{WB} の船型間の関係と同じ傾向になっていることが分かる (Fig. 5 参照)。しかしこの部分では、渦等の特徴的な流場はみられない。この運動量損失の相違をもたらした現象 (例えば、船首付近の自由表面に存在する渦) は、散逸し不明瞭になってしまった可能性がある。

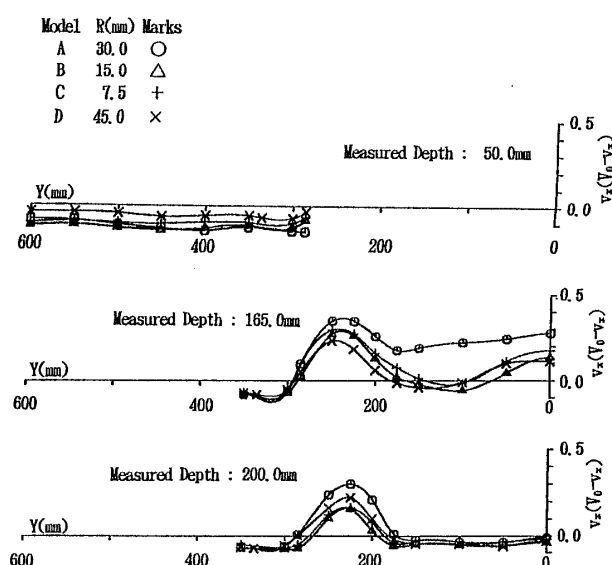


Fig. 10 Samples of Momentum Loss Distribution (Y-direction) at Three Depths, Measured at S. S. 7 1/2, $d=0.156$ m ($B/d=3.5$), $V_0=1.236$ m/s ($F_d=1.0$)

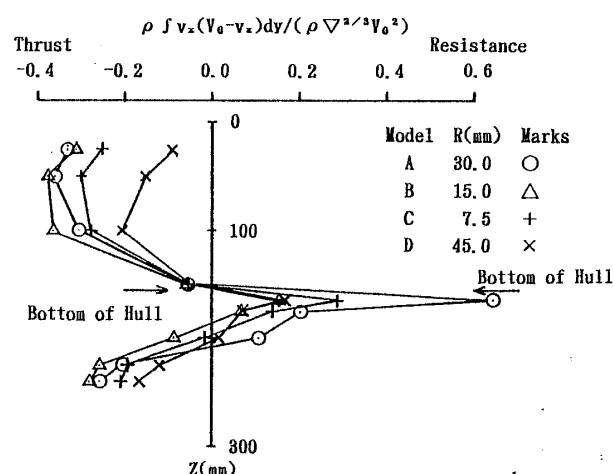


Fig. 11 Integrated Momentum Loss Distribution in Y-direction, Measured at S. S. 7 1/2, $d=0.156$ m ($B/d=3.5$), $V_0=1.236$ m/s ($F_d=1.0$)

4. 考 察

流場計測の結果より、2 章で確認された局所的な船首形状の差による抵抗の変化には、渦が重要な役割を果たしていることがわかった。船底では、剩余抵抗の変化に対応する船底渦の変化と、それによる運動量損失の相違を確認することができた。また船側では、渦の存在は確認できなかったが、 r_{WB} に対応する運動量損失の変化があった。船首端の自由表面は低速から渦が存在することが知られており、船側での運動量損失はこの渦によるものと考えられることもできる。

このような、船首端の局所的な形状と抵抗および流場の関係の理解を助けるため、加用ら¹⁵⁾によって紹介された、Hawthorne¹⁶⁾の理論を応用することを試みた。

Fig. 12 のような Z 方向に速度勾配を持つ流れ ($U(Z)$) の中に置かれた、2次元柱体を考える。自由表面にこの仮定のような速度欠損が存在することは、実験的に良く知られている。Hawthorne はこのような流れを、 Z 方向に変化する2次元的な流れ ($U(Z) \cdot \vec{V}(X, Y)$) と、微少な3次元流れ ($\vec{v}(X, Y, Z)$) の和として、

$$\vec{u}(X, Y, Z) = U(Z) \cdot \vec{V}(X, Y) + \vec{v}(X, Y, Z) \quad (3)$$

のようにモデル化した。ここで流れが非粘性、かつ攪乱が無限上流の速度より十分小さいと仮定すると、運動方程式と連続の式の高次の項は無視され、以下に示す、柱体周りの渦度の流線方向成分に関する近似式を得る¹⁵⁾。

$$\xi = 2 \cdot q \frac{dU}{dZ} \int \frac{1}{q^2} d\theta \quad (4)$$

ここで ξ は流線方向の渦度、 q は速度ベクトルの大きさ、 θ は流線の X 軸に対する角度をそれぞれ表している。加用らは、この式を解析的に流場を求めることができる円柱 (Circular Section) とレンズ型 (Biconvex Section) に適用し、実験結果とよい一致を得たと報告した。この研究では、より実用的な水線形状を扱っているので、Hess & Smith 法により自由表面 (Double Model の鏡像面) の流線とそれに沿った速度ベクトルを求め、加用にならない流線に沿った渦度のパラメータ ($\int (1/q^2) d\theta$) を計算した。

今回は、流線計算の幅方向の開始点 (Y_s) を変更した3本の流線について計算し、その結果を Fig. 13 に示した。この図は (4) 式の被積分関数を角度ベースにプロットしたものであり、(4) 式によれば、十分下流ではこの図形が囲む面積が、渦度の流線方向成分の大きさに比例することになる。

Fig. 13 によれば、船首端 R の大きい船型では、船首 ($X=0.0$ 付近) でのポテンシャル流線の角度 θ が大きく、その後 θ は漸減する。これに対し船首端 R の小さい船型では、船首付近の θ は小さいものの、船首より後方で θ はなかなか減少せず、逆に $X=0.05$ (S. S. 9 1/2) 付近では増加する部分も存在する。(4) 式の積分を4船型について実行すると Fig. 14 のようになる。Fig. 13, Fig. 14 をあわせて考える

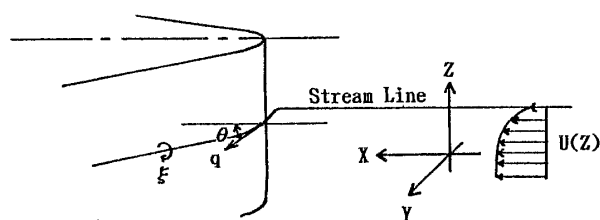


Fig. 12 Coordinate System Used in Hawthorne's Theory

と、船首端の形状と渦度 (= 渦抵抗) の関係について、
① 船首端曲率半径を小さくすると、それに続く W. L. の

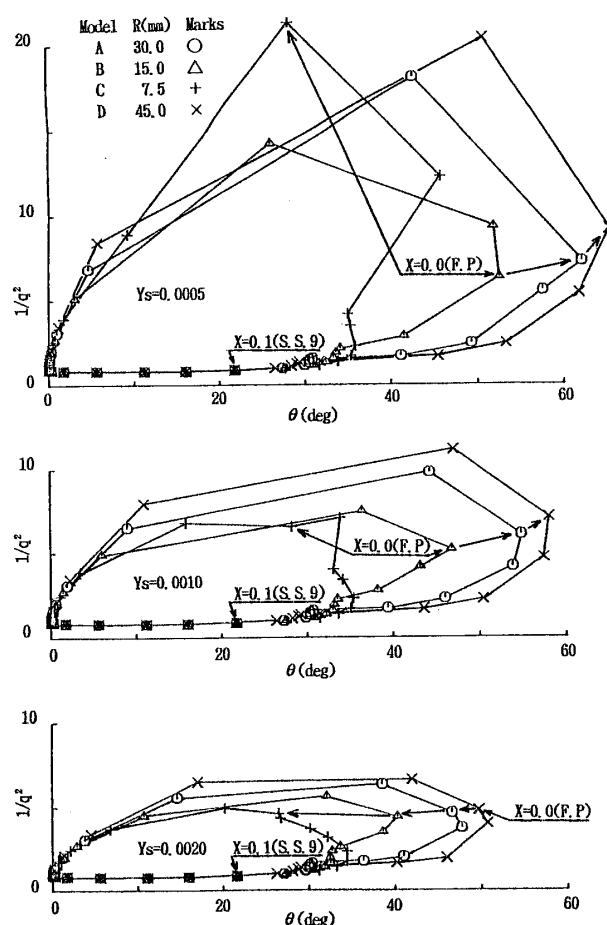


Fig. 13 Integrand of Eq. (4) along Each Stream Line

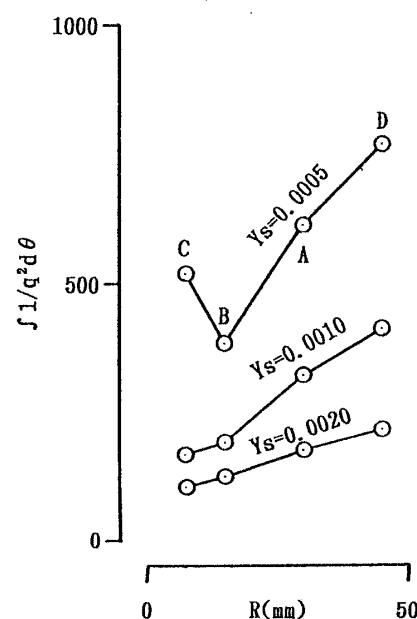


Fig. 14 Relation between Calculated Vorticity Parameter and Radius of Curvature at Entrance

傾きが大きくなり、これによってポテンシャル流線の流向変化が大きくなり、渦度(≡渦抵抗)が増す。

② S. S. 9 1/2 付近の傾きを小さく取ろうとした場合、船首端 R が大きくなり、ポテンシャル流線は大きく曲がり流速も小さくなり、渦度(≡渦抵抗)が大きくなる。

③ 従って、平均的な曲率を持つ中間の船首端 R の船型の渦度(≡渦抵抗)が小さくなる。

のように理解することができる。Fig. 13 を見てもわかるように、船首端では流線の曲率変化が大きく、このような流線追跡の間隔では十分な精度は得られない。しかし一般的な傾向は 3 本の流線ではほぼ同一であり、以上のような定性的な議論をすることは許されよう。

この計算結果と実験により得られた数値の関係を考えるため、Fig. 15 に計測面全体の運動量損失 (v_{ML})、船側における運動量損失 ($v_{ML}(\text{Side})$: $d \leq 150 \text{ mm}$)、船首残余抵抗 r_{RF} と r_{WBf} の 4 種の実験値と Fig. 14 の計算値を、それぞれ B 船型 ($R=15 \text{ mm}$) と D 船型 ($R=45 \text{ mm}$) の差が同一となるようなスケールでプロットしてみた。Hawthorne の理

論による計算値は r_{RF} , v_{ML} の傾向とほぼ一致し、傾斜した S 字型を示している。

Hawthorne の理論による渦度は、その仮定より船首付近の自由表面に存在する渦に対応すると考えることができる。しかし本研究での計測結果との関係は、今後検討を要する課題である。

5. ま と め

船首端曲率半径とそれに続く W. L. という、局所的な形状変化に伴う抵抗変化を、分割模型による船首抵抗計測と流場計測によって調査した。この結果、次のような結論が得られた。

(1) 分割模型について

- ① 分割模型による、精度の高いかつ簡便な、船首抵抗の分離計測法を開発した。
- ② 上記の計測法の信頼性を、実際の船型試験、流場計測などを通じて確認した。

(2) 船首端形状と流場、抵抗について

- ① 船首端の曲率半径とそれに基づく W. L. のわずかな違いで抵抗は大きく変化し、かつ抵抗を極小にする曲率半径と W. L. の組合せが存在する。
- ② 船首端の局所的な形状に影響を受ける抵抗成分は、 r_v , r_{WB} であり、 r_{WP} は殆ど影響を受けない。
- ③ 船首端の微少な形状の差は、船首船底渦に大きく影響を与える。また、船側の流場にも影響がある。
- ④ Hawthorne の理論により船首端形状と抵抗の関係を説明できる可能性が示された。

分割模型による抵抗の分離計測の成功は、船型開発、船型改良に新たに手段を与えた。この計測法によって、改良すべき部位、現象を比較的容易に特定することができる。また、CFD 計算と実験値の関係をよりの確に評価することができる可能性もある。今後の応用が期待される。

なおこの論文では述べていないが、この研究に続き、主要目比が同一 ($L/B=5.5$, $B/d=3.5$, $C_B=0.80$) の実用船型について、船首端 R を同様に変更したシリーズの抵抗試験を行っている。その結果、船首端 R と抵抗(特に r_{WB}) の関係は、この研究と同様の傾向を示したことを参考までに報告する。

6. 謝 辞

この研究は、造船所 8 社 (今治造船(株), (株)大島造船所, 尾道造船(株), (株)サノヤス・ヒシノ明昌, (株)新来島どつく, 常石造船(株), (株)名村造船所, (株)三保造船所) および(財)日本造船技術センターによる共同研究として実施された。研究の過程で貴重なご討論をいただき、また研究の発表を承諾された各造船所と造船技術センターに感謝致します。

また、分割模型の研究について助言を頂いた田村欣也博

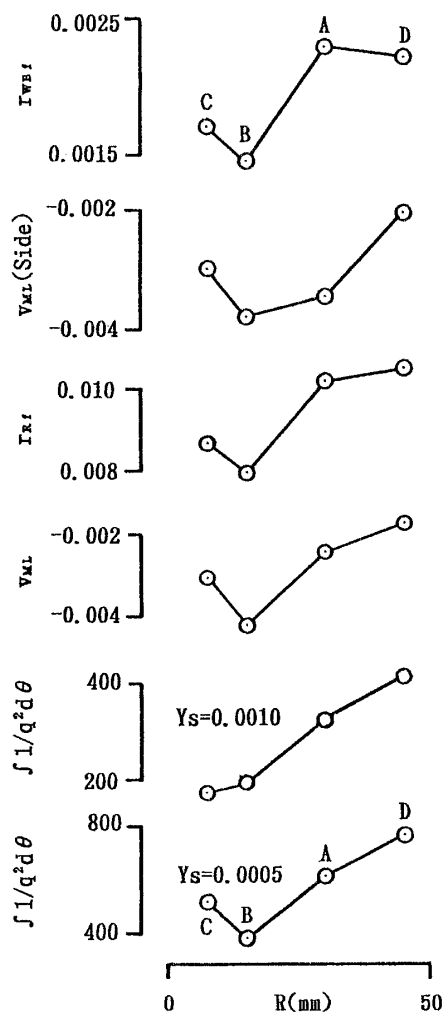


Fig. 15 Relation among Calculated Vorticity Parameter and Various Measured Values

士，大阪大学内藤林助教授，研究方針について有益な示唆をいただいた荻野繁之博士に謝意を表します。

模型の製作，実験に当たっては造船技術センター関係者から熱心な協力を，特に佐藤和範博士および塩田昭男氏から懇切な御指導を頂きました，分割模型の実験は，造船技術センターの技術と助言が不可欠であったと考えており，この場を借りて御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Baba, E.: A New Component of Viscous Resistance of Ships, Journal of Society of Naval Architects of Japan, Vol. 125, P. 23 (1969.5)
- 2) 茂里一紘：波崩れ—その発生と特性について—，船体まわりの流れと流体力，推進性能研究委員会第3回シンポジウム，P. 5 (1989.7)
- 3) Miyata, H., Masuko, A., Kajitani, H., Aoki, K.: Characteristics of Free Surface Shock Waves Around Wedge Models, 日本造船学会論文集第151号，P. 1 (1982.6)
- 4) 荻原誠功，増子章，佐藤隆一，堤孝行：波崩れを伴う船首流場に関する実験，関西造船協会誌第194号，P. 119 (1984.9)
- 5) Kayo, Y., Takekuma, K.: On the Free Surface Shear Flow Related to Bow Wave Breaking of Full Ship Models, 日本造船学会論文集第149号，P. 11, (1981.6)
- 6) 松井政博，北沢孝宗，長浜光泰：船首部モデルにおける造波現象，日立造船技報第44号第4号，P. 45 (1983.12)
- 7) Mori, K.: Necklace Vortex and Bow Wave Around Blunt Bodies, Fifteenth Symposium on Naval Hydrodynamics, P. 9 (1984)
- 8) Kawamura, N., Kajitani, H., Miyata, H., Tsuchiya, Y.: Experimental Investigation on the Resistance Component Due to Free surface Shock Waves on Series Ship Models, J. Kansai, N. A. Japan, No. 179 P. 45 (1980.12)
- 9) 丸尾孟：模型船首まわりの自由表面流れについて，日本造船学会論文集第158号，P. 1 (1985.11)
- 10) 谷口中，渡辺恭二，田村欣也：船型可分原理による肥大船型の新設計法，造船協会論文集第120号，P. 36 (1966.11)
- 11) 田村欣也：模型船の前後部抵抗の分離計測，第22回JSPC資料 (1990.7)
- 12) Rödström, R.: Resistance Experiments with Devided Ship Models, Publications of the Swedish State Shipbuilding Experimental Tank, No. 30 (1954)
- 13) 内藤林，藤本圭祐，香川和彦：船首部形状と波浪中抵抗増加，関西造船協会誌，P. 53 (1988.3)
- 14) 呉清達：長方形断面船周りに発生する剝離渦に関する研究，関西造船協会第168号，P. 51 (1978.3)
- 15) Kayo, Y.: Shear Layer and Secondary Vortical Flow Beneath Free Surface, 西部造船学会会報第65号，P. 17 (1982.11)
- 16) Hawthorne, W. R.: The Secondary Flow about Struts and Airfoils, Journal of the Aeronautical Sciences, (1954)