(昭和 49 年 11 月日本造船学会秋季講演会において講演)

船の主要目と造波抵抗 (I)

正員 堤 孝 行* 正員 荻 原 誠 功*
正員 神 中 竜 雄*

On the Principal Particulars of Ship Hull Form and
Wave Pattern Resistance (I)

by Takayuki Tsutsumi, *Member* Seikoh Ogiwara, *Member*
Tatsuo Jinnaka, *Member*

Summary

Series tests were carried out to investigate the relations between hull form and wave resistance obtained by wave pattern analysis. The eleven models selected were composed of four series, namely V/L^3 -series, B/d -series, C_p -series and l_{cb} -series. The hull characteristics of these models are as follows:

- (1) Water lines meet with base line tangentially at both ends.
- (2) Frame lines are consisted of Lewis forms.
- (3) Sectional area curves are equivalent to Tchebycheff's functions.
- (4) Models are symmetric about midship except for l_{cb} -series.

The wave pattern measurements were performed simultaneously with ordinary resistance tests, and wave data were analyzed by the method of J. N. Newman. The test results of wave resistance, residual resistance and sinkage for each series were presented in non-dimensional form. Form factors were derived from these results by deducing wave pattern resistance from residual resistance. Some consequences of experiments were compared with the results of linearized theory, which may be usefull information for the basic hull form design.

1 緒 言

近年、波形解析による造波抵抗の直接測定は、船型試験水槽において日常行なわれる試験の 1 つになった。この方法では、船の作る波を、その構成要素にまでさかのぼって検討できるために、造波抵抗理論の検証とその改善、さらに船型の改良などに役立てられてきた¹⁻⁶⁾。一方この方法では、造波抵抗を剰余抵抗から推定する従来の方法に較べて、原理的に、より正しい造波抵抗値を推定できるという特長があり、これは抵抗分離の問題⁷⁾などに応用されてきたが、この特長を利用して、船型と造波抵抗との関係を広い範囲にわたって調べ直すという試みは、まだ行なわれていないように思われる。この試みを効果的に行なう 1 つの方法として、広範なシリーズテストが考えられるが、例えば Todd⁸⁾ が船型と剰余抵抗との関係を把握するために行なったような大規模な試験は、今の所必要ないであろう。しかし少なくとも造波抵抗に影響を及ぼすと思われる基本的な船型要素について、その影響を総合的に把握するためのシリーズテストを行なうことは、今後の造波抵抗理論の発展の上からも、船型設計の立場からも重要なことである。本論文は、このような観点から船の主要目と造波抵抗との関係を調べ直した結果の第 1 報である。

なお、この種の研究では、供試船型群をいかに選定するかが、その成否の鍵を握る要素の 1 つと考えられる。本研究を実施する際、造波抵抗に大きな影響を及ぼす要素として、主要目の他に船首尾端部の形状と、横切面積

* 石川島播磨重工業(株)技術研究所

曲線とがあることを念頭において、まず船首尾端部の影響を除いた船型を対象に研究を行ない、次に船首尾端部の影響、特に船首バルブの影響を調べるという方針を立てた。本論文で取扱う船型の横切面積曲線が、船首尾端で基準線に接しているのはそのためである。

2 供 試 船 型

まず最初に、船首バルブのない船型として、横切面積曲線が船首尾端で基準線に接するようなものを採用することを前提に、できれば実用船型に類似した形で、造波抵抗があまり大きくならないような船型を選ぼうと考えた。このような考えに適した船型の1つには、細長船理論による極小造波抵抗船型⁹⁾があるが、その横切面積曲線は、無限級数の形で表わされて取扱いが煩雑であるので、ここではこれに良く似た Tchebycheff の関数を選んだ。すなわち、船の長さを L とし、柱形肥せき係数を C_p とし、船の長さ方向の座標を x とすると、次のような横切面積係数 $S(x)$ を採用した。

$$S(x) = \sqrt{1 - \left(\frac{2x}{L}\right)^2} \left\{ 1 + a \left(\frac{2x}{L}\right)^2 - (1+a) \left(\frac{2x}{L}\right)^4 \right\}, \quad -\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2} \quad (1)$$

ただし、

$$a = \frac{32}{\pi} C_p - 7 \quad (2)$$

である。

一方フレームラインには、比較の実用船型に近い数式形状ということでルイスフォームを採用し、満載吃水線は横切面積曲線と同じ傾向のものを選んだ。今模型表面上の任意の点における半幅と静水面からの深さをそれぞれ $y(x), z(x)$ で表わし、静水面における半幅を $b(x)$ で表わすと、これらは次のような式で表わされる。

$$b(x) = \frac{B}{2} S(x) \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} y(x) &= (a_0 + a_1) \cos \theta + a_3 \cos 3\theta \\ z(x) &= (a_0 - a_1) \sin \theta - a_3 \sin 3\theta \end{aligned} \right\}, \quad 0 \leq \theta \leq \pi \quad (4)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{4} \left[3\{b(x) + d\} - \sqrt{b^2(x) + 10 \cdot d \cdot b(x) + d^2 - \frac{16}{\pi} A(x)} \right] \\ a_1 &= \frac{1}{2} [b(x) - d] \\ a_3 &= \frac{1}{4} \left[-\{b(x) + d\} + \sqrt{b^2(x) + 10 \cdot d \cdot b(x) + d^2 - \frac{16}{\pi} A(x)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

であり、 $A(x)$ は横切面積 $Bd C_m S(x)$ を表わす。

シリーズモデルは、模型船の長さを 4m、中央横切面積係数を 5/6 とし、船型要素 $L/B, B/d, C_p$ のうち、2つを一定に保って残りの1つを変化させるという方法により、次の4通りのシリーズを選んだ。

- (i) $B/d, C_p$ を一定にして、 L/B を変化させる排水量長さ比シリーズ
- (ii) $L/B, C_p$ を一定にして、 B/d を変化させる吃水の深さシリーズ
- (iii) $L/B, B/d$ を一定にして、 C_p を変化させる肥せき度シリーズ
- (iv) $L/B, B/d, C_p$ を一定にして、船体前半部の C_p (C_{pF}) と、後半部の C_p (C_{pA}) を変化させる前後非対称シリーズ

なお、(iv)の場合の船体前半部の $S(x)$ は、(2)式の C_p の代りに C_{pF} を、後半部のそれには C_{pA} を用いて計算した。Fig. 1, Fig. 2 に本研究で使用したシリーズモデルの計画を、Fig. 3 には、その横切面積曲線を示す。また Table 1 に要目表を示す。(1)~(5)の諸式および Table 1 から分かるように、M. No. 337-F, 337-A 以外は、すべて前後対称であり、さらに M. No. 337-F は、丁度 337-A の前後を反転させた形であり、両船型は1隻の模型船の前進時と後進時に相当している。Fig. 4 には、フレームラインの1例として、シリーズの原型である M. No. 331 の前半部正面線図を示す。

Fig.1 Plan of models ($L/B=8$, $B/d=3$) Fig.2 Plan of models ($C_P=0.6$)

Fig.3 Prismatic curves

Fig.4 Example of body plan (M. No. 331)

Table 1 Particulars of models

M. No	L (m)	B (m)	d (m)	$\bar{V}$ (m^3)	S (m^2)	L/B	B/d	C_b	C_p	C_{pF}	C_{pA}	C_M	I_{cb} (% L)	$S/\bar{V}^{2/3}$	$\bar{V}/L^3$ ($\times 10^{-3}$)
331	4.000	0.500	0.167	0.167	2.099	8.0	3.0	0.50	0.60	0.60	0.60	0.833	0.0	6.932	2.603
332	4.000	0.667	0.222	0.296	2.798	6.0	3.0	0.50	0.60	0.60	0.60	0.833	0.0	6.298	4.628
333	4.000	0.400	0.133	0.107	1.679	10.0	3.0	0.50	0.60	0.60	0.60	0.833	0.0	7.469	1.667
334	4.000	0.267	0.083	0.047	1.119	15.0	3.0	0.50	0.60	0.60	0.60	0.833	0.0	8.542	0.741
335	4.000	0.500	0.125	0.125	1.826	8.0	4.0	0.50	0.60	0.60	0.60	0.833	0.0	7.304	1.953
336	4.000	0.500	0.250	0.250	2.675	8.0	2.0	0.50	0.60	0.60	0.60	0.833	0.0	6.740	3.906
337-F	4.000	0.500	0.167	0.167	2.106	8.0	3.0	0.50	0.60	0.50	0.70	0.833	4.85	6.957	2.603
337-A	4.000	0.500	0.167	0.167	2.106	8.0	3.0	0.50	0.60	0.70	0.50	0.833	-4.85	6.957	2.603
338	4.000	0.267	0.533	0.284	4.460	15.0	0.5	0.50	0.60	0.60	0.60	0.833	0.0	10.312	4.444
339	4.000	0.500	0.167	0.139	1.960	8.0	3.0	0.417	0.50	0.50	0.50	0.833	0.0	7.310	2.169
340	4.000	0.500	0.167	0.194	2.252	8.0	3.0	0.583	0.70	0.70	0.70	0.833	0.0	6.711	3.038

3 試 験 方 法

波高計測法はいわゆる Longitudinal Cut 法で、通常の抵抗試験と同時に行なわれる。水槽中央付近の壁際に置かれた容量型プローブからの波高データ信号は、ヘッドアンプを介して水中ケーブルで電送され、曳引車発進位置に設置したデータ集録装置に送り込まれる。この集録装置は主に波高計メインアンプ、AD コンバータ、コントローラ、紙テープ穿孔機から構成され、データ信号は、曳引車発進から停止までの間にリミットス

イッチ、および光電スイッチのパルス信号によって制御され、自動的に集録して穿孔紙テープに打出される。波高計の検定もリモコン装置を用いて試験前後に行ない、そのデータもあわせて紙テープに集録しておく。紙テープデータは、大型計算機（現在 UNIVAC 1108 を使用している）で解析処理される。解析には J. N. Newman の方法¹⁰⁾を用い、結果として波形データとそれに対する振幅関数およびスペクトラムをデジタルプロッター (CALCOMP) に作図させている。また波高データを用いるところの比較的簡単な応用計算には小型計算機 (IBM)

Fig.5 Block diagram of data processing system

Fig.6 Example of wave analysis results

Fig.6 Example of wave analysis results

1130) も活用している。波形計測および解析システムの構成図を Fig. 5 に、また解析結果の 1 例を Fig. 6 に示す。Fig. 6 では打ち切り修正による波形の接続の様子を見ることができ、これによって打ち切り修正が適当かどうか判断している。

Fig. 7 Comparison of amplitude functions (V/L^3 -series)

Fig. 8 Comparison of wave spectra (V/L^3 -series)

Fig. 9 Wave profiles (M. No. 331)

このシステムによって解析された本シリーズの 1 例として、排水量長さ比シリーズの振幅関数およびスペクトラムの比較図をそれぞれ Fig. 7, Fig. 8 に示す。

また船側波形の写真撮影も同時に行なわれ、それから読み取った値を各模型船について Fig. 9 のような形で整理している。

4 試験結果

4.1 剰余抵抗および造波抵抗

排水量長さ比シリーズ、吃水の深さシリーズ、肥せき度シリーズおよび前後非対称シリーズの剰余

抵抗と造波抵抗の比較図を、それぞれ Fig. 10~Fig. 14 に示す。図中の○, △, □, ×印は実験値を示している。また摩擦抵抗の推定には Shoenherr の式を用いた。いずれのシリーズにおいても、剰余抵抗曲線と造波抵抗曲線との対応は、きわめて良好である。そして、排水量長さ比が大きくなればなる程、または吃水が深くなればなる程造波抵抗が増大する傾向や、 C_p シリーズの場合に、フルード数によって造波抵抗が最小となるような C_p が存在し、その C_p の値はフルード数が大きい程大きくなる傾向、さらに前後非対称シリーズの場合に、線形理論に反して前進時の造波抵抗と後進時の造波抵抗がかなり異なる傾向などが分かる。この最後の傾向は、船型と波に関して線形重ね合わせの原理を適用する場合に、船体前半部と後半部とで取扱い方が異なることを示唆しており、波形解析法の応用に役立つ重要な結果の 1 つである。

4.2 沈下量

抵抗試験の際に計測される船体の沈下量は、線形理論に従えば造波抵抗にも波形にも影響しないが、実際にはトリムを固定した場合とそうでない場合で、造波抵抗値に大きな差を生じることが知られている¹¹⁾。したがって沈下量が造波抵抗に何らかの影響を及ぼしていることは明らかであり、船型と沈下量との関係を調べることも、今後の造波抵抗理論の発展に役立つことと思われる。Fig. 15~Fig. 19 に、それぞれ排水量長さ比シリーズ、吃水の深さシリーズ、肥せき度シリーズおよび前後非対称シリーズの沈下量の比較を示す。図中の δ_F , δ_A は、F. P. および A. P. における沈下量を表わす。排水量長さ比シリーズでは、沈下量は L/B が小さい程大きいが、吃水の深さシリーズでは必ずしも B/d の大きさ順にはなっていない。肥せき度シリーズでは、 $C_p = 0.5$ の船型のトリムが高速域で最も大きい点が目立つ。また前後非対称シリーズでは、 C_{pF} または C_{pA} が 0.7 のときに沈下量

Fig.10 Results of towing test and wave pattern analysis

Fig.11 Results of towing test and wave pattern analysis

Fig.12 Results of towing test and wave pattern analysis

Fig.13 Results of towing test and wave pattern analysis

Fig. 14 Results of towing test and wave pattern analysis

Fig. 15 Comparison of dipping curves

Fig. 16 Comparison of dipping curves

Fig. 17 Comparison of dipping curves

Fig.18 Comparison of dipping curves

Fig.19 Comparison of dipping curves

Fig.20 Form factor k

Fig.21

δ_F または δ_A が極端に大きくなる。各シリーズ全体を通じて、トリムが急激に変化し始めるフルード数 $F_n \approx 0.3 \sim 0.35$ は、丁度造波抵抗曲線の立上がり点に対応していることは興味深い。

4.3 形状影響係数

次式により、各フルード数に対する形状影響係数を計算した。

$$k = \frac{C_R - C_W}{C_{f0}} \quad (6)$$

ただし, C_R, C_W, C_{f0} はそれぞれ剰余抵抗係数, 波形解析により求めた造波抵抗係数, 相当平板の摩擦抵抗係数 (Shoenherr) を表わす。計算の結果を Fig. 20 に示す。図より分かるように M. No. 331~336 および 338 の k は, $Fn \leq 0.37$ ではほぼ一定値を示すが, M. No. 337-A, 337-F, 339, 340 の k はフルード数の増加と共に増加する。前者の船型の特徴は, $C_p = 0.6$ の前後対称船型という点であるが, このような船型では, 従来の Hughes の方法がほぼ成り立つと言えよう。一方 k 値がフルード数の増加と共に急激に増加する M. No. 337-A および 340 の船型の特徴は, 船体前半部の柱形肥せき係数がその他の船型に較べて大きいという点であり, これらの船型の船側波形の写真によると, 高速域で船首部に波のくずれが認められた。

なお $Fn \geq 0.37$ における k のバラツキは, 主として波形解析上の誤差, すなわち波形計測打切り点以後の波の推定誤差に原因があると思われる。

5 考 察

5.1 排水量長さ比の影響

前述のように排水量長さ比シリーズ船型は, $B/d, C_p$ を一定にして, L/B を変化させるという方法によって決定した。細長船理論によると, このシリーズの造波抵抗係数は B/L の 4 乗に比例する。この理論が実際にどの程度合うかを調べるために, $C_W \propto (B/L)^M$ として, 前章の試験結果から最小自乗法によって M の値を計算した。Fig. 21 に, この結果と Michell および細長船理論の計算結果とを比較する。試験結果より推定した M は, フルード数が大きくなるに従い, 理論値に近づく傾向を示した。また Michell の理論結果は, 細長船理論の結果より実際に近いが, このことは, 本研究で用いた船型すべてに対して言えるものであった。1 例として Fig. 22

Fig. 22 Comparison of wave resistance ($L/B=15, C_p=0.6$)

Fig. 23 Wave resistance C_W vs. B/L ($B/d=0.3, C_p=0.6$)

に, 造波抵抗に対する両理論の計算結果と試験結果とを比較して示す。Fig. 23 には, 3つのフルード数における C_W と B/L との関係を図示する。図より分かるように, 実験値は B/L (つまり V/L^3) が小さい程 Michell の理論値に近づき $B/L=1/15$ ($V/L^3=0.741 \times 10^{-3}$) で略々両者は一致する。

一方排水量長さ比と形状影響との関係を Fig. 24 に示

Fig. 24 Form factor vs. V/L^3

す。図中 k 値は、前章で推定した k のうち、 $F_n \leq 0.37$ の値の平均値である。また図中の点線は、実験結果と摩擦抵抗に及ぼす横曲率の影響を表わす曲線とを結んだ仮想線であるが、この図から V/L^3 が零に近づいても k は零に収斂しないと言えそうである。

5.2 吃水の深さの影響

細長船理論の場合吃水の深さシリーズの船型の造波抵抗係数は d/B の自乗に比例するが、実際には何乗に比例しているかを調べるために、 $C_w \propto (d/B)^N$ として、前章の試験結果を用いて最小自乗法により N の値を計算した。その結果を Michell および細長船理論の計算結果と共に Fig. 25 に示す。この図によると、Michell 理論の結果は実際にかなり近いように見えるが、Fig. 26 に示すように、造波抵抗値そのものは、実験値とある程度くい違う。しかしそのくい違う割合は、 d/B が変化してもあまり変化しないと考えて良いであろう。

Fig. 25

Fig. 26 Weve resistance C_w vs. d/B
($L/B=8$, $C_p=0.6$)

Fig. 27

Fig. 28

5.3 肥せき度の影響

肥せき度シリーズの波形解析結果を用いて、各フルード数における造波抵抗を C_p の 2 次式で近似し、造波抵抗が最小となるような C_p を計算した。このシリーズ船型は、船長と中央横切面積が一定であって、排水量が増えるから、こうして求めた C_p は、通常船型設計で問題となる最小造波抵抗船型の C_p とは異なるが、理論と実際のくい違いを調べるための 1 つの要素と考えて良いであろう。細長船理論および Michell 理論に従って同様の計算を行ない、それぞれの結果を Fig. 27 に示す。波形解析による結果は理論計算と良く似た傾向を示し、高速域では両理論値のほぼ中間ぐらいの値になる。

5.4 前後非対称性の影響

前後非対称シリーズの波形解析結果を用いて、各フルード数における造波抵抗を l_{cb} の 2 次式で近似し、造波抵抗が最小となるような l_{cb} を計算した。その結果を Fig. 28 に示す。線型理論では、最小造波抵抗の l_{cb} は零となるが、この図によると、最適の l_{cb} はフルード数の関数であり、フルード数が小さくなればなる程大きくなる傾向である。

6 結 言

波形解析の方法による造波抵抗と船の主要目との関係を調べるために、数式船型 11 隻のシリーズテストを行ない、その試験結果と線型理論とのいくつかの比較例を示した。その主な結果は、次の通りである。

- (i) 各シリーズにおける造波抵抗と剰余抵抗の曲線の傾向は良く一致する。
- (ii) 造波抵抗係数の実験値は、排水量長さ比シリーズの場合 B/L の 2～3 乗に比例し、吃水の深さシリーズの場合略々 d/B に比例する。
- (iii) 造波抵抗係数の計算値は、排水量長さ比シリーズの場合 L/B が大きくなる程実験値に近づき、 $L/B=15$ で Michell の理論値と実験値はほとんど一致する。

(iv) 波形解析法は、船型と形状影響係数との関係を調べるためにも役立つ。

なお本報告では船側波形、後続波形、振幅関数、波スペクトラムの結果についてほとんど言及しなかったが、これらに関しては次の機会に報告する予定である。また主要目シリーズに引き続き、船首バルブのシリーズテストなどを行なったが、この結果も次の機会に譲る。

最後に、本研究を実施するにあたり種々のご討論と全面的なご協力をいただいた石川島播磨重工業(株)技術研究所の田崎部長、並松次長以下関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) S.D.Sharma : Some Results Concerning the Wave Making of Thin Ship, Journal of Ship Research Vol.13 (1969).
 - 2) 大楠 丹：単純船型の波形解析一幅の影響（その1）一，日本造船学会論文集第126号（昭44）。
 - 3) J.T.Everest : Measurements of the Wave Resistance on a Series of Mathematical Model including comparison with Theoretical Estimates, N.P.L. Rep. No.120 (1969).
 - 4) J. T. Everest, N.Hogben : An Experimental Study of the Effect of Beam Variation and Shallow Water on Thin Ship Wave Predictions, R.I.N.A, Vol.112 (1970).
 - 5) 乾崇夫，梶谷尚：単純船型の船首波波形解析，日本造船学会論文集第124号（昭43）。
 - 6) E.Baba : An Application of Wave Pattern Analysis to Ship Form Improvement, Jour. Soc. Nav. Arch. of Japan, Vol.132 (1972).
 - 7) E.Baba : Study on Separation of Ship Resistance Components, Jour. Soc. Nav. Arch. of Japan, Vol.125 (1969).
 - 8) F.H.Todd, G.R.Stuntz & P.C.Pien : Series 60— The Effect upon Resistance and Power of Variation in Ship Proportions, SNAME, Vol.65 (1957).
 - 9) H.Maruo : Calculation of the Wave Resistance of Ships, the Draught of Which is as Small as the Beam, Jour. Soc. Nav. Arch. of Japan, Vol.112 (1962).
 - 10) J.N.Newman : The Determination of Wave Resistance from Wave Measurement along a Parallel Cut, International Seminar on Theoretical Wave Resistance, Ann Arbor (1963).
 - 11) J.R.Shearer : A preliminary investigation of the discrepancies between the calculated and measured wave making of hull forms, North-East Coast Inst. Eng. Shipbld, Trans. 67 (1951).
-