

(昭和47年10月日本造船学会秋季講演会において講演)

高次船型の造波機構に対する平底影響

正員 山口 真 裕* 正員 乾 崇 夫**
正員 梶 谷 尚**

Flat Bottom Effects on Wave-Making Resistance

by Masahiro Yamaguchi, *Member* Takao Inui, *Member*,
Hisashi Kajitani, *Member*

Summary

The objective of this paper is to afford a more rational procedure for finding an optimum singularity distribution which will generate a practical ship form with a flat bottom as well as low wave-making resistance. The effects of singularity generated flat bottom on wave pattern are discussed both theoretically and experimentally. Measurements are made of wave pattern and total resistance of two Pienoids. One of them has a flat bottom, while the other has a curved keel line. The difference in the wave patterns measured of the models indicates a remarkable discrepancy between the liner theory and the experiments of the surface disturbances due to the singularities for flattening bottom. An optimum source distribution is then modified with consideration of this discrepancy. The modified singularity distribution is found to give a ship form with lower wave-making resistance than the un-modified.

1 Pienoid による船型計画法の問題点

平底をもつ実用船型の造波特性を理論的に取扱う方法のひとつに Pienoid による方法がある¹⁾。これは Fig.1 (b) に示すごとく船体内部に wall-sided の分布面を考え、side-source と bottom-singularity との組み合わせにより、船型を表示しながら、同時に造波特性をも導こうとするものである。

実際の船型計画では、与えられた設計速力やマクロの船型要素に対し、造波抵抗極小のミクロの船型が要求されるので、side-source と bottom-singularity のそれぞれから成る全後統自由波系のなかでの最適化が行われる。

Pienoid における上記最適化プロセスでは、特異点分布系が複雑なだけに、Fig.1(a) に示す中心面分布(Inuid)のそれに比し、その手数はかなり面倒になる。しかし、最近の大型電算機によれば、計算自体は問題ではなく、問題なのは、果たして各特異点系から理論上発生すると考えられる波が、現実が生じている波との程度一致しているか、という点にある。

もともと Inuid にしろ、Pienoid にしろ二重模型近似という粗い仮定の上に出ており、理論上の波と現実の波との対応という点では、なんらかの修正が必要であろうとはかねてから予測されていた。特に sheltering effect に関連して Pienoid の side-

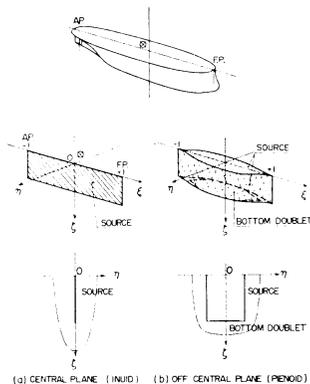


Fig.1 Distribution Plane of Singularities

* 船舶技術研究所 推進性能部
** 東京大学 工学部 船舶工学科

source については船首尾端から船体中央にかけて直線的な傾斜をもつ修正関数 (μ -修正) が作業仮説として提案され²⁾, 最近この仮説がかなり真相に近いことが Inuid について確認された³⁾。

残る問題は bottom-singularity における“波”の対応である。一般に bottom-singularity としては鉛直軸をもつ vertical doublet のほかに sink-source も考えられるが、ここでは前者のみを対象とすることにする。この場合、横切面積曲線が変化せず一定のまま保たれるので、細長船理論との比較に便利である。Pien⁴⁾ は side-source と同様、bottom-singularity についてもなら修正を施すことなく最適化計算を実施しているが、bottom-singularity の現実の造波効果は side-source 以上に sheltering effect を受け、かなり大幅に減殺されているのではないかと予想される。vertical-doublet の付加によりあらたに生ずる流体運動はその大部分が船体内部領域に集中しているからである。

以上の理由から、著者らは Pienoid による船型計画にさいし、bottom-doublet による“現実”の造波効果は少ないものと仮定し、side-source のみの最適化を行う方法を暫定的に採用してきた。

しかし、船型改良が進行するに伴って、より精密な計画法が要求されるようになり、bottom-doublet の波について、どのような減衰と変形がなされているかを波形解析的手法でしらべる必要に迫られた。本論文は以上のことを目的とし、確認の手段としては、いわゆる“波形差”の手法を用いた。その詳細は次章以下に示す通りであるが、従来取扱った例^{5,6)} と異なり、今回の対象は2隻とも高次船型特有の、複雑でかつ振幅の小さい波同志の差を抽出する困難があった。また L. W. L. の形状が変化するため、もっとも安易な船側波形が利用できないという点もその困難を一段と大きくした。

2 供試模型・抵抗試験

2.1 供試模型

Table 1 に示す前後対称の船型4隻 ($L=2m$) を作製した。その計画の経緯は次の通りである。

Table 1 Particulars of Models

Model	M 13	M 14	M 15	M 16
L (m)	2.000	2.000	2.000	2.000
B (m)	0.2676	0.2400	0.2945	0.2944
d (m)	0.1643	0.1796	0.1190	0.1190
V (m)	0.03456	0.03468	0.03491	0.03480
S (m)	0.6821	0.6892	0.6904	0.6926
A_{Σ} (m)	0.03416	0.03377	0.03406	0.03393
C_b	0.3930	0.4022	0.498	0.497
C_p	0.5058	0.5133	0.512	0.513
B/L	0.1338	0.1200	0.1473	0.1472
d/L	0.08215	0.0898	0.0595	0.0595
$V/(L/10)^3$	4.320	4.335	4.364	4.350
$S/(L/10)^2$	17.05	17.23	17.26	17.32
$A_{\Sigma}/(L/10)^2$	0.854	0.844	0.852	0.848
Remarks	Pienoid (Curved Bottom)	Inuid (Curved Bottom)	Pienoid (Flat Bottom)	Pienoid (Flat Bottom)

M 13 (P)*: 下記 side-source によって得られた非平底 Pienoid 船型である。

$$m(\xi) = \sum_{i=1}^4 a_i \xi^i \quad (1)$$

$$\eta_s = 0.1 (1 - \xi^2)^2, \quad \zeta_0 = 2 T_0/L = 0.085 \quad (2)$$

(1)式の係数 a_i は計画速力 ($F_n = 0.277$) で下記幾何条件のもとに造波抵抗極小の条件から求めた。このさい μ -修正を採用した。その結果を Fig.2 に示す。

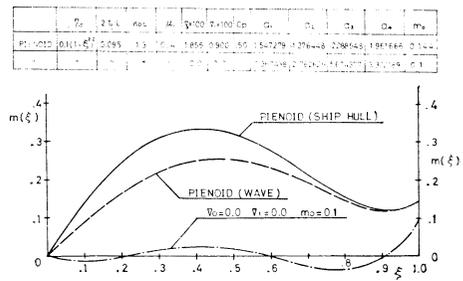


Fig.2 Side-Source Distribution of M 13 (P)

$$F_0 = \int_0^1 \int_0^{\zeta_0} m(\xi) d\xi d\zeta = 0.01856,$$

$$F_1 = \int_0^1 \int_0^{\zeta_0} m(\xi) \xi d\xi d\zeta = 0.00900 \quad (3)$$

(3)式は具体的には下記に相当する。

* 曲底の Pienoid 船型および Inuid 船型を (P), (I), Pienoid の平底船型を (PF) と表示する。

$$C_P=0.50, A_M/\left(\frac{L}{10}\right)^2=0.862, F_F/\left(\frac{L}{10}\right)^3=2.155 \quad (4)$$

M14 (I) : M13 (P) の side-source を船体中心面に投影した Inuid 船型である。本船型は本研究の主たる目的のものではなく、平底影響の両極を比較するために追加した。

M15 (PF) : M13 (P) に下記の bottom-doublet 分布 (Fig.3) を加えて平底化した船型。

$$d(\xi)=0.14956 \xi-0.4528 \xi^2+0.4893 \xi^3 \quad (5)$$

ただし、その分布面の形状は次の通りである。

$$\eta_B=0.1\{1-(\xi/0.8)^2\}^2, \zeta_B=2 T_B/L=0.085 \quad (6)$$

M16 (PF) : この船型については第4章で述べる。

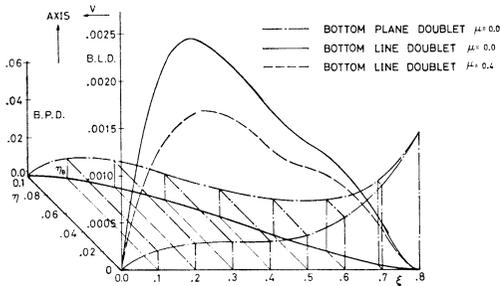


Fig.3 Bottom-Doublet Distributions

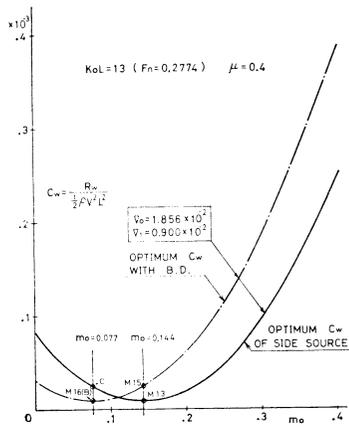


Fig.4 Calculated C_W vs. m_0 ($K_0L=13$)

Fig.4 に m_0 ベースに対する $C_{W(opt.)}$ の変化を示す。Fig.5 は正面線図, Fig.6 は L. W. L. 曲線と横切面積曲線を示す。船首から S. S. 9 付近までは M13 (P), M14 (I) および M15 (PF) の3隻とも一致している。

2.2 抵抗試験

上記3隻の模型による抵抗試験結果を Fig.7 に示す。計測は東大水槽にてトリムのみを拘束する水平ガイドを使用して行った。抵抗試験による C_W は粘性抵抗の算定に Schoenherr 式および図中に示す形状因子を採用して求めた。M15 (PF) の C_W は曲底船型の M13 (P), M14 (I) のよりも $F_n \geq 0.23$ の高速域で大きいことがわか

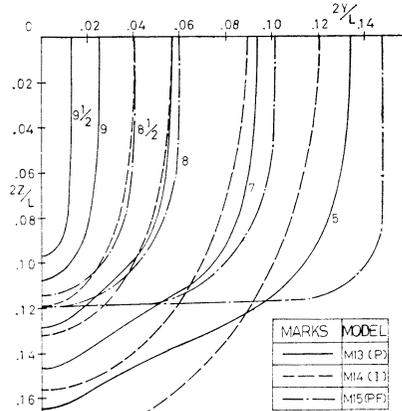


Fig.5 Body Plans of M13, M14, M15

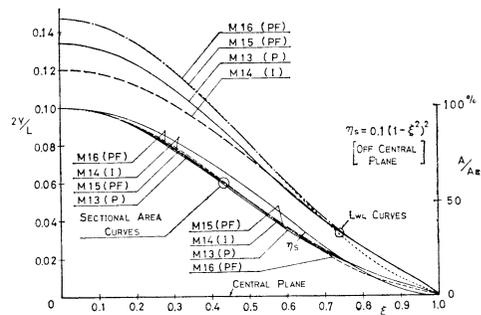


Fig.6 L. W. L. and Sectional Area Curves

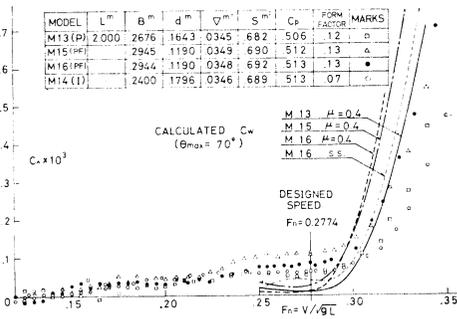


Fig.7 $C_W \sim F_n$ (Towing Test Results)

Table 2 C_W at $K_0L=13$

Model	Calculated C_W ($\mu=0.4$)		Measured C_W	Analyzed C_W
	without B. D.	with B. D.		
M 13 (P)	0.094×10^{-4}		0.56×10^{-4}	0.33×10^{-4}
M 14 (I)	0.12		0.6	0.26
M 15 (PF)	(0.094)	0.25×10^{-4}	1.1	0.47
M 16 (PF)	(0.39)	0.094	0.8	0.14

Table 2 に設計速力 ($F_n=0.277$) における C_W の理論値と実験値とを示す。なお、実験値には抵抗試験による値のほかには波形解析 (附録参照) の結果も示した。また、M 15 (PF) の理論値は次章で述べるように平底の bottom-doublet の造波効果を修正したものである。

Fig.7 および Table 2 に示されるごとく、side-source のみで C_W の最適化を行い、その結果に bottom-doublet を加えて平底化すると、その平底化によって C_W が若干増加している。すなわち、平底化のためにあとから加えられた bottom-doublet は必ずしも理論通りの波を 100% そのまま造らないまでも、幾分かの影響を与えていることを示している。

なお、side-source の分布面だけが異なる M 13 (P) と M 14 (I) との間には形状因子 K が異なることと、 $F_n \geq 0.30$ の高速域で M 14 (I) の方が M 13 (P) よりも C_W が小さいことの 2 点以外は大きな差はみられなかった。

以上、抵抗試験の結果から bottom-doublet の造波効果に関する大局的な情報は得られたが、これ以上の詳細は直接各船型の造る波を観測し、かつ、これを理論波形と対応せしめる手段によらざるをえない。

3 波紋計測・波形差

M 15 (PF) と M 13 (P) との同一速度における波形差をそれぞれの実測波形から抽出できれば、これを bottom-doublet による理論波形と対応づけることにより、後者の実効造波特性が求められるはずである。ところで M 15 (PF) と M 13 (P) は Fig.6 に示されるように L. W. L. が異なるために、従来採用されていた船側波形差を利用する方法が採用できない。そのため、船側波形計測よりもはるかに手数のかかる波紋計測を行い、波紋上での波形差を求めることにした。

3.1 波紋計測

水槽に固定された容量型波高計 (幅方向に 10cm 間隔 3 コ並列) を用いて、船体縦中心面から 20cm 離れたところから 5cm 間隔のタテ切り波高プロファイルを測定し、これより cross fairing により波紋図を求めた。Fig.8 には設計速力 ($F_n=0.277$) における M 13 (P) と M 15 (PF) の比較を、また Fig.9 には M 13 (P) と M 14 (I) との比較を示した。いずれも波高が非常に小さく、高次船型の特徴である複雑な波紋を示している。

M 13 (P) と M 15 (PF) の波紋を比較すると、M 15 (PF) の方が約 2 倍ほど大きい。また M 14 (I) の波紋は Fig.9 に示すように M 13 (P) の波紋とよく一致している。これらの波紋の比較から平底船型 M 15 (PF) は M 13 (P) よりも C_W が大きいことが容易に推察される。なお、これらの波形記録から解析によって求められた振幅関数については附録に示す通りである。

3.2 実測波形差

Fig.8 に示す M 15 (PF), M 13 (P) 両船型の設計速力 $F_n=0.277$ における波紋差を求めた結果を Fig.10 の上半に示す。この場合、高次船型の特徴の複雑かつ小さい波の間の差を読みとる必要があり、その作業はかなり困難であった。上記実測波紋差に対応する理論波紋は (5) 式および Fig.3 に示す bottom-doublet による波紋と考えられる。

3.3 bottom-doublet による理論波形

bottom-doublet による理論波形計算は、doublet の分布が Fig.1 に示すごとく 2 次元的面分布であるために、高速電子計算機を利用してもかなり長時間を要する。そこで、この面分布 $d(\xi)$ による波が下記に示す船体縦中心線上の線分布 $D(\xi)$ (Fig.3) によってどの程度近似できるかをしらべてみた。

る。しかし、3 船型とも C_W 曲線は設計速力 ($F_n=0.277$) 付近で谷になっている。図中には理論計算による C_W 曲線をも示したが、これらは上記抵抗試験の結果と類似の傾向を示している。ただし、 $F_n \geq 0.30$ の高速域で急増したり、あるいは、設計速度付近での C_W の値が非常に小さいなど実験と若干異なるところがある。

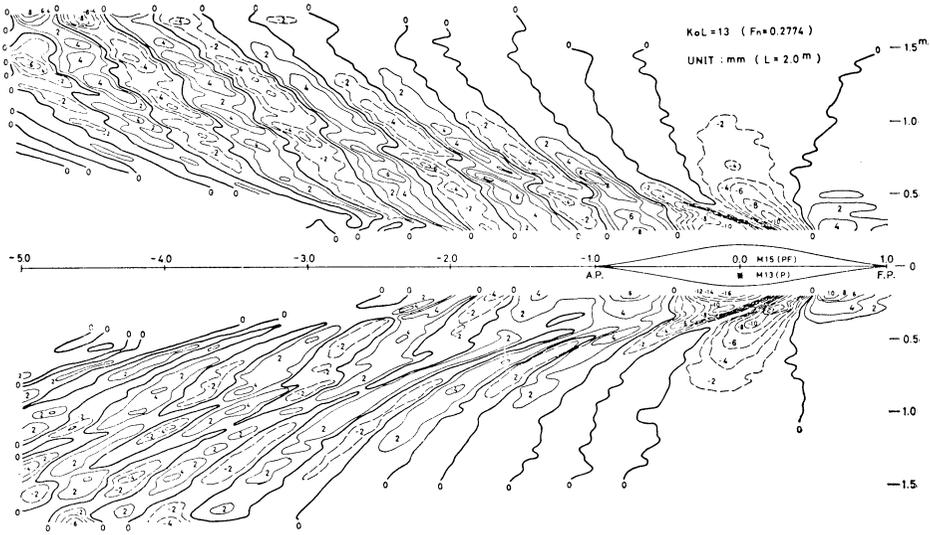


Fig.8 Measured Wave Contours of M 13, M 15

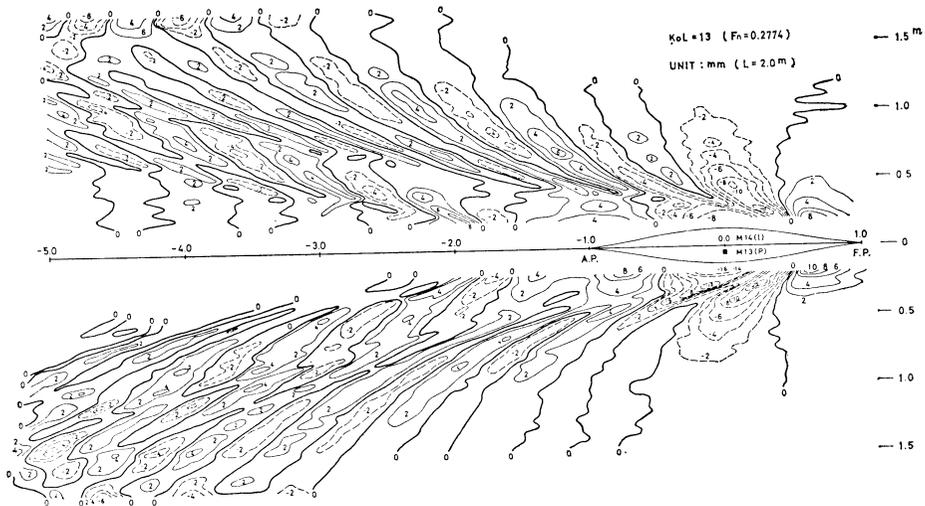


Fig.9 Measured Wave Contours of M 13, M 14

$$D(\xi) = \int_{-\eta_B(\xi)}^{\eta_B(\xi)} d(\xi) d\eta = 2 \int_0^{\eta_B(\xi)} d(\xi) d\eta \quad (7)$$

Fig.11 に $F_n=0.277$ における $2 Y/L=0.3$ での比較を示す。船尾位置直前の crest 附近において若干相違がみられるが、それよりも後方になると、面分布と線分布の波は全く一致してしまう。すなわち、これは分布を面から線に集中させると、タテ波が若干変化するが、ヨコ波は変化しないことを示している。このことは Fig.9 の M13 (P) と M14 (I) の波紋の類似性からもまた容易に想像できる。

以上の結果より bottom-doublet の面分布の代りに理論波形にさいしては、線分布で近似できることがわかった。それで Fig.10 の下半は上記線分布による理論波紋を示したものである。ただし、この計算では後に示すように $\mu_B=0.4$ の修正を加えている。実測波紋差と比較して、理論の波紋は単調であるが、その絶対値はほぼ一致している。一般に波紋図は船体造波の全体の傾向を把握するには適当であるが、波の位相・振幅など細部にわたった検討にはタテ切りの波形プロファイルが有効である。Fig.12 にその1例を示す。これらからもわかる。

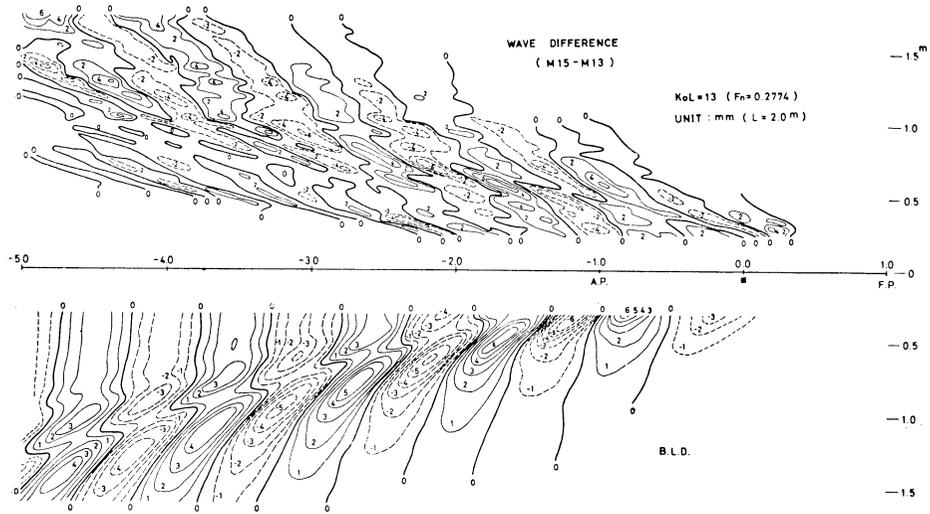


Fig.10. Difference of Measured Wave Contours (M15-M13) vs. Wave Contours Calculated by Bottom Line Doublet

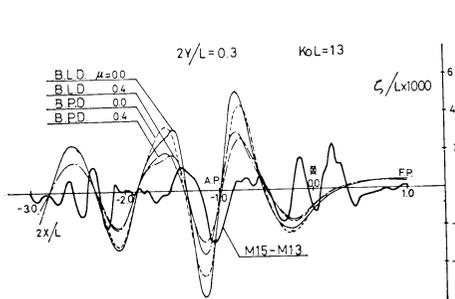


Fig.11 Calculated Wave Cut at $2Y/L=0.3$ ($K_0L=13$), Bottom Plane Doublet vs. Bottom Line Doublet

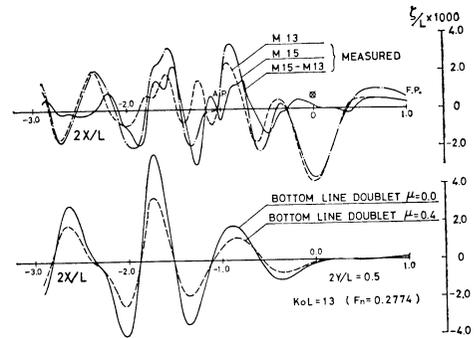


Fig.12 Difference of Measured Wave Cut (M15-M13) vs. Wave Cut Calculated by Bottom Line Doublet

ように、波の減衰の大きい実測波形差 (M15-M13) に対して bottom-doublet による理論波形は単調である。また bottom-doublet の強さを一様に弱くした場合と μ -修正のごとく F.P. と船体中央の間に傾斜をつけた場合と 2種の修正方法を行ってみたが、いずれも波の振幅が一様に減衰するだけで、波の位相には全然変化がない。1例として $\mu_B=0.4$ として波形計算をしたものを図に示したが、この波の絶対値と実測値とがほぼ一致している。この結果より平底の bottom-doublet による造波効果は予想されていた通り、全く無視できるものではなく、また 100% 理論値そのままでもない。すなわち、理論値のほぼ半分の造波効果をもつものと考えべきであることがわかった。Fig. 10, 11 および 12 の理論波形計算は side-source と同じように水線方向に傾斜をつけた修正 ($\mu_B=0.4$) を加えたものであり、この場合の M15 (PF) の理論値 C_w を求めると、Fig.7 および Table 2 に示すごとく、実験値と傾向がよく一致してくる。

4 M16 の計画と M15 との比較

4.1 M16 の計画

bottom-doublet の実効造波効果は従来の線型理論による値の約 1/2 であるという前章の結果を受けて、M15 (PF) と同一の設計条件に対し、あらためて side-source, bottom-doublet それぞれより発生する実効波形系間の最適化を行った。その結果、得られた平底線型が M16 (PF) である (Table 1)。

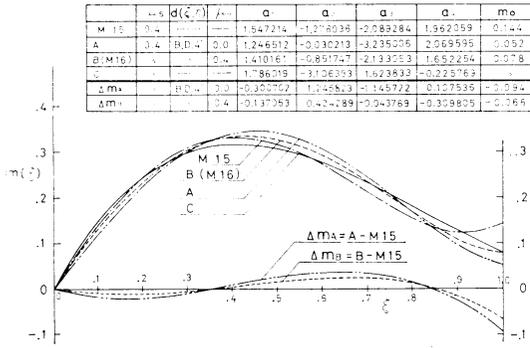


Fig.13 Side-Source Distribution of M16 (PF)

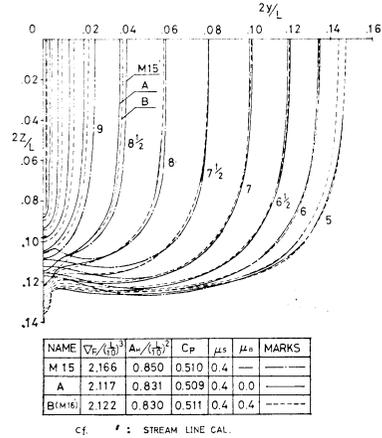


Fig.14 Body Plans of M15, M16

ただし、M16 (PF) については(5)式に示す bottom-doublet をそのまま採用したのでは過大であることが判明したので、これを若干緩和させた次式 (B. D. 4' とする)

$$d(\xi) = 0.114956 \xi - 0.25025 \xi^2 + 0.182532 \xi^3 \quad (8)$$

を採用することにした。最適化計算では side-source, bottom-doublet とともに μ -修正 ($\mu_s = \mu_B = 0.4$) を加えてある。

かくして求められた side-source (opt.) が Fig.13 の B 曲線である。これを M15 (PF) と比較すると船体端部で弱く、S. S. $9\frac{1}{4}$ ($\xi = 0.85$) から船体中央にかけては逆に強くなっている。図には両者の差に相当する Δm_B のほかに、bottom-doublet の理論波形をそのまま 100% 考慮した場合 (A) およびそのときの变化量 Δm_A をも示してある。

また Fig.4 には bottom-doublet の実効造波効果を $\mu_B = 0.4$ とした場合の $C_{W(opt.)}$ を m_0 ベースで示し、side-source のみの $C_{W(opt.)}$ と比較した。

Fig.14 には M16 (PF) の正面線図を M15 (PF) とともに示し、また、Fig.6 には M16 (PF) の L. W. L. と横切面積曲線を他の3隻とともに示してある。M16 (PF) では船首尾端が他船型に比しホローになっている。これらにより2m 模型を作製し、前と同様の波形計測、抵抗試験を実施した。

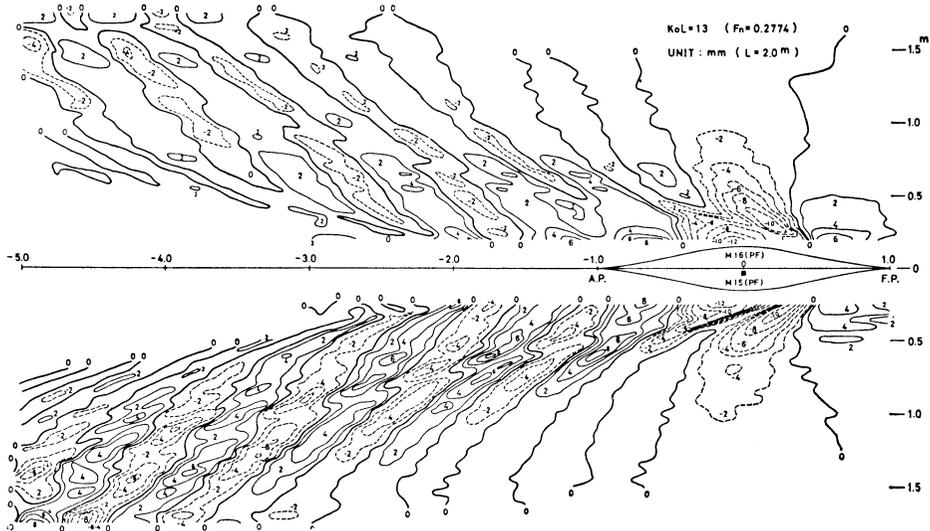


Fig.15 Measured Wave Contours of M15, M16

4.2 M16 (PF) と M15 (PF) との比較

波紋 Fig.15 に $F_n=0.277$ における M16 (PF) の波紋を M15 (PF) と比較して示してある。M16 (PF) の波紋は M15 (PF) のと船体近傍では似ているが、船体の後方につれて波が急速に減衰している。これより M16 (PF) の造波抵抗が M15 (PF) よりかなり小さいであろうことが想像される。

波形プロファイル Fig.16 の上段に M16 (PF) の実測波形プロファイル ($2Y/L=0.4$) と理論波形との比較を示す。両者はよく一致しているが、この理論波形は side-source については、船体中心面分布で近似し (図の中段)、また、bottom-doublet については線分布で近似した波 (図の下段) を加えあわせたものである。

抵抗試験 M16 (PF) の抵抗試験の結果から C_W を求めて、Fig.10 に重ねた。 $F_n=0.22\sim 0.30$ の範囲で M16 (PF) の C_W が小さくなっていて、それより高速では M15 (PF) より大きくなっている。平底影響を $\mu_B=0.4$ と考慮した理論値 C_W も似たような傾向を示している。

設計速度 ($F_n=0.277$) における M16 (PF) の実験値 C_W は Table 2 に示すように M13 (P) より若干大ききめであるが、M15 (PF) より約 30% 減少している。

以上によって、Pienoid による平底影響の計画では side-source には μ -修正を施し、また bottom-doublet に対してはその造波効果を約半減させて最適化を行うのがよいことが確認された。

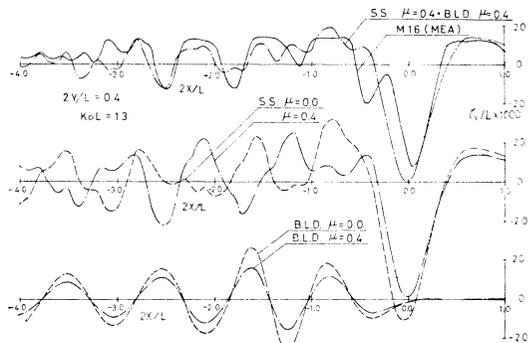


Fig.16 Wave Cut of M16, Measured vs. Calculated

5 結 言

Pienoid による船型計画法のプロセスのなかで未解決のままに残されていた bottom-doublet による実際の造波効果が波形差の手法によってあきらかにされた。

bottom-doublet 付加によりあらたに生ずる波は、理論値の約 1/2 であり、そのことを考慮した最適平底船型の造波抵抗は、bottom-doublet の波を無視し、side-source のみで最適化した平底船型より約 30% も減少することが確認された。

本研究の実験・解析に多大なるご協力を得ました日下祐三修士ならびに辻憲彦、辻岡正次、山本尚利の三学士および東大船型試験水槽の職員に、また終始ご鞭撻いただいた船舶技術研究所横尾部長に深く感謝いたします。なお、本計算に利用させていただいた東京大学大型計算機センターの HITAC 5020 E の関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) P. C. Pien: The Application of Wave-Making Resistance Theory to the Design of Ship Hulls with Low Total Resistance, Fifth Symposium on NAVAL HYDRODYNAMICS, O. N. R., ACR-112, Bergen (1964).
- 2) 乾崇夫外: 高次船型の造波機構, 日本造船学会論文集第124号 (昭和43年12月).
- 3) 茂里一祐外: 船側波形による造波特性解析とその船型計画への応用, 日本造船学会論文集 (昭和47年秋発表予定).
- 4) P. C. Pien, J. Strom-Tejsten: A Hull Form Design Procedure for High-Speed Displacement Ships, SNAME (1968).
- 5) 高幣哲夫: Waveless Bow の研究 (その1), 造船協会論文集第108号 (昭和35年12月).
- 6) 池畑光尚, 梶谷尚: 第一種ウェーブレス船型の実用化に関する研究, 造船協会論文集 第114号 (昭和38年12月).

附録 波形解析による振幅関数と造波抵抗の比較

波形解析の方法として Newman-Sharma 法 (以下 N-S 法と記す) を採用した。

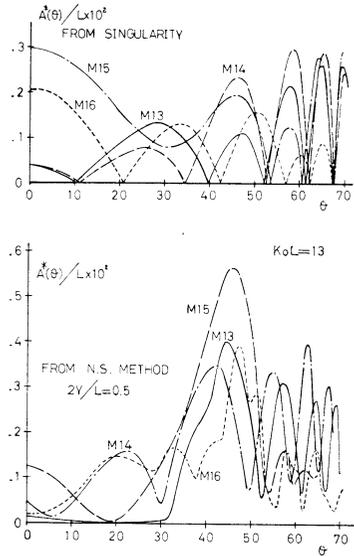


Fig. A Amplitude Functions Analyzed by N-S Method

東大水槽は幅が狭いので、模型を水槽の中心から 25cm 横に移動して、船体中心から 50cm ($2Y/L=0.5$) 上の波高を測定した。その波高から、N-S 法によって解析を行った。供試模型 4 隻の設計速力 ($F_n=0.277$) に対する振幅関数を Fig. A の下段に示す。上段には $\mu_S=\mu_B=0.4$ とした場合の理論の振幅関数を示したが、それらと比較すると、ヨコ波・タテ波とも差がみられる。これは粘性影響などによるものと考えられるが、この問題を解析するには今後の研究を待たねばならない。なお、これらの振幅関数から算出された C_W は Table 2 に示されるように、抵抗試験の実験値と傾向がほぼ一致している。