波形解析データに基づいた船型計画法について

正員 松 井 政 博* 正員 津 田 達 雄**
正員 大 久 保 勝 裕** 正員 浅 野 誠 一*

A Method for Optimization of Ship Hull Forms based on Wave-pattern Analysis Data

by Masahiro Matsui, *Member* Tatsuo Tsuda, *Member*
Katsuhiko Ohkubo, *Member* Seiichi Asano, *Member*

Summary

This paper presents a method for optimization of ship hull forms on the basis of wave pattern analysis.

The method is primarily based on the assumption that a linear relation exists between the small difference of prismatic curves and the difference of the amplitude functions of the generated waves.

Firstly wave analysis data are collected of several ship models with variant prismatic curves including the specified ship model. If the difference of prismatic curve, $\Delta C_{pj}(\xi)$, and the difference of amplitude functions, $\Delta P_j, \Delta Q_j$, between the specified ship model and the other ship models are known, the modification to be made for a designed ship, $\Delta C_p(\xi), \Delta P, \Delta Q$, can be expressed by the following linear equations:

$$\begin{aligned} \Delta C_p(\xi) &= \sum a_j \Delta C_{pj}(\xi) & (i) \\ \Delta P + i \Delta Q &= \sum a_j (\Delta P_j + i \Delta Q_j) & (ii) \end{aligned}$$

As for the coefficients, a_j s, as the wave-making resistance coefficient, C_w , of designed ship model is to be derived by making use of ΔP and ΔQ in the equation (ii), the a_j s are determined so as to minimize C_w .

The author's method was verified to be successful in the case of being applied to the prismatic-curve series of the ship models with the same hull-form factors. Further study is under way towards extending this method to the case of ship models having different hull-form factors.

1 緒 言

Eggers によって創始された波形解析の理論は、その後の多くの研究によって急速に発展し、現在では抵抗・自航試験というオーソドックスな試験だけではなく、波形計測も船型試験水槽として当然持つべき試験機能の一つとなっている。また、その応用研究も活発で、理論と実際の造波現象の比較という学問的研究にとどまらず、馬場¹⁾、荻原²⁾、堤^{3)~6)}らによって船型計画法にも適用されるにいたり、めざましい成果を上げつつあるようである。著者らも波形解析を応用した船型計画法の研究をここ数年来続けてきたが、在来の方法とは異なった方法

を考案し、実験による検証の結果、ほぼ満足できる成果が上げられたのでここに紹介する。

在来法については、昭和 54 年度抵抗・推進理論シンポジウム・テキスト⁷⁾に要領よくまとめられているが、簡単に説明すると次のとおりである。馬場の方法は、Hogner の影響線の考え方⁸⁾に基づいており、波形解析データのある船型を基本船型として、これに薄い船を重ね合わせ、その結果として造波抵抗が極小となるように薄い船の形状を求める。この際、基本船型の造波抵抗計算には波形解析データを使用し、一方、薄い船の造波抵抗は、横截面積曲線（以後 C_p カーブと呼ぶ）を三角関数で級数表示し、Michell 理論を使って計算する。ここで、理論と実測の波の相違を補正するために、自由波系の振幅修正（船型の有限幅修正）と位相修正を行なうようにしている。荻原の方法は、馬場が船型最適化の対象

* (株)明石船型研究所 (現在、日立造船(株)技術研究所)

** (株)明石船型研究所

を C_p カーブとしたのに対し、喫水方向の形状も最適化できるように船型の半幅関数を $y=\eta(x, z)$ と表わして取扱っているもので、基本的な考え方は同じである。堤の方法は、系統的模型船シリーズの豊富な波形解析データを使って、理論値と実測値の比較検討を行ない、船型と波の重率振幅関数の関係を表わす式を予め求めておき、これを基にして船型の最適化を行なおうとするものである。ここで、船型と重率振幅関数の関係を表わすために、やはり Michell の理論を使用している。

以上3つの方法は、波形解析データを直接的に使うか、間接的に使うかの違いはあるものの、最適値問題を船型 $\leftrightarrow$ 造波抵抗という対応関係で取扱っており、従って、船型と造波抵抗の関係を表わすものとして、Michell の理論式が必要となる。そのために、理論と実際の相違を補正するための修正法が、正しい最適解を得るための要点となる。

一方、著者らの方法は、Michell 理論の考え方は援用するものの、造波抵抗の算出には Michell の理論式そのものは使わず、波形解析データ・ベースに徹して、船型の最適化を行なおうとするものである。すなわち、複数の船型（データ船と呼ぶ）について波形解析データが得られている場合、計画船の C_p カーブをデータ船の C_p カーブ（モード関数と呼ぶ）の線形結合で表わすと、実際の造波現象でも線形の仮定が成り立つならば、計画船の振幅関数がデータ船の実測振幅関数の線形結合で表わせるはずである。これを使って、造波抵抗が極小となるモード関数の係数を求めることができ、同時に最適船型が求まることになる。換言すれば、最適値問題を振幅関数 $\leftrightarrow$ 造波抵抗という対応関係で扱い、最適船型は最適造波特性を与える振幅関数と同形の一次結合で与えるという2段階方式を採用している。この方法では、計画船の振幅関数を複数のデータ船の実測波形から求めるので、理論と実際の相違の補正という問題が取り除かれている点が、他の方法とは異なる大きな特徴である。

以下に本方法の詳細と検証テストの結果について述べる。

2 基礎理論

造波抵抗 R_w は、Havelock の公式により振幅関数 $P(\theta), Q(\theta)$ を使って、(1) 式のように表わされる。

$$R_w = \frac{\rho K_0^2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \{P^2(\theta) + Q^2(\theta)\} \sec^3 \theta d\theta \quad (1)$$

ここに、 $K_0 = g/V^2$ である。無次元化しておくとして

$$C_w = \frac{R_w}{\frac{1}{2} \rho S V^2} = r \int_0^{\pi/2} \{P^2(\theta) + Q^2(\theta)\} \sec^2 \theta d\theta \quad (2)$$

ただし、 $r = 2/\pi S L^2 V^2 F_N^4$, $F_N = V/\sqrt{gL} = 1/\sqrt{K_0 L}$ で

Fig. 1 Co-ordinates system

ある。なお、説明なしに使う記号は ITTC 記号⁹⁾に準拠している。

波形解析から振幅関数を求める方法は、Newman-Sharma の方法^{10), 11)}が一般的で、座標系を Fig. 1 のようにとると、(3) 式のように表わされる。

$$P(\theta) + iQ(\theta) = V \cos \theta \sin \theta \exp(iK_0 y \tan \theta \sec \theta) \times \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(x, y) \exp(iK_0 x \sec \theta) dx \quad (3)$$

ここに、 $\zeta(x, y)$ は波形計測より求められる。

一方、船体形状を表わす式を

$$y = \pm \frac{B}{2} f(x, z) \quad (4)$$

とおくと、Michell の近似を用いて、振幅関数は (5) 式で船型と関連づけられる。

$$P(\theta) + iQ(\theta) = -VB \int_{-l}^l dx \int_{-T}^0 \frac{\partial f}{\partial x} \exp[K_0 \sec^2 \theta (z + ix \cos \theta)] dz \quad (5)$$

ただし、 $l = L/2$ である。

(5) 式は船体形状と振幅関数を結ぶ式であるが、 C_p カーブと振幅関数の関係の方が一般に利用しやすい。船を垂直舷側と仮定し、 $\xi = 2x/L$, $\eta = 2z/L$ と記せば、

$$f(\xi, \eta) = f(\xi) = \frac{A_M}{BT} C_p(\xi) \quad (6)$$

$C_p(\xi)$ は C_p カーブを表わす。(6) 式を (5) 式に代入し、 $f(\pm 1) = 0$ として ξ に関して部分積分を実行し、さらに η について積分を行なってしまうと (7) 式を得る。

$$P(\theta) + iQ(\theta) = \int_{-1}^1 C_p(\xi) \{G(\xi, \theta) + iH(\xi, \theta)\} d\xi \quad (7)$$

ここに、

$$G(\xi, \theta) + iH(\xi, \theta) = i \frac{VLA_M}{2T} \cos \theta \{1 - \exp(-K_0 T \sec^2 \theta)\} \exp(iK_0 l \xi \sec^2 \theta) \quad (8)$$

以上のように、Havelock の公式を使えば、波形解析から求められる振幅関数 (3) 式からでも、Michell 近似から得られる振幅関数 (7) 式を使っても造波抵抗係数 C_w を求めることができる。今後、理論値と実測値の区別を明確にするために、実測値には記号にダッシュ (') をつけることにする。著者らの目的とすることは、理論

だけでは実際との相違が大きいので、実測の振幅関数を使って、造波抵抗を表わし、かつそれを船型と関係づけることである。しかし、(3)式には船型を表わすパラメータは何も入っていない。そこで、次のように考える。

実測の振幅関数 $P'(\theta), Q'(\theta)$ についても、(7)式と同様の関係が成り立つものと仮定すれば、

$$P'(\theta) + iQ'(\theta) = \int_{-1}^1 C_p(\xi) \{G'(\xi, \theta) + iH'(\xi, \theta)\} d\xi \quad (9)$$

と表わされる。ここで、 G', H' 関数も(8)式と同様に C_p カーブとは無関係であると仮定すると、 $C_p(\xi)$ が $\Delta C_p(\xi)$ だけ変化したときの振幅関数の変分 $\Delta P', \Delta Q'$ は(10)式のように書ける。

$$\Delta P'(\theta) + i\Delta Q'(\theta) = \int_{-1}^1 \Delta C_p(\xi) \{G'(\xi, \theta) + iH'(\xi, \theta)\} d\xi \quad (10)$$

さて、母型1隻を含む $(n+1)$ 隻(データ船と呼ぶ)の実験結果より n 個の $\Delta C_{pj}(\xi)$ (モード関数と呼ぶ)と $\Delta P_j', \Delta Q_j'$ ($j=1, 2, \dots, n$) を得て、最適の $\Delta C_p(\xi)$ を次のようにして求めることができる。

$$\Delta C_p(\xi) = \sum_{j=1}^n a_j \Delta C_{pj}(\xi) \quad (11)$$

$$\int_{-1}^1 \Delta C_p(\xi) d\xi = 0 \quad (12)$$

と表わせば、振幅関数の変分 $\Delta P' + i\Delta Q'$ は(10)式より

$$\Delta P'(\theta) + i\Delta Q'(\theta) = \sum_{j=1}^n a_j \{\Delta P_j'(\theta) + i\Delta Q_j'(\theta)\} \quad (13)$$

となる。これから、 $\Delta C_p(\xi)$ に対応する C_w の変分 ΔC_w は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \Delta C_w = & \gamma \int_0^{\pi/2} 2 \{ \sum a_j [P_0'(\theta) \Delta P_j'(\theta) + Q_0'(\theta) \Delta Q_j'(\theta)] \\ & \times \sec^3 \theta d\theta + \gamma \int_0^{\pi/2} [\sum a_j \Delta P_j'(\theta)]^2 \\ & + [\sum a_j \Delta Q_j'(\theta)]^2 \sec^3 \theta d\theta \end{aligned} \quad (14)$$

ここに、 $P_0'(\theta), Q_0'(\theta)$ は母型の振幅関数である。

次に、 ΔC_w の極値条件

$$\frac{\partial \Delta C_w}{\partial a_k} = 0 \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

を求めると、

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \left\{ \int_0^{\pi/2} (\Delta P_k' \Delta P_j' + \Delta Q_k' \Delta Q_j') \sec^3 \theta d\theta \right\} a_j \\ = - \int_0^{\pi/2} (P_0' \Delta P_k' + Q_0' \Delta Q_k') \sec^3 \theta d\theta \end{aligned} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

が得られる。ここで、データ船が C_p カーブ・シリーズで構成されているものとすれば、すべてのデータ船が

$$\int_{-1}^1 \Delta C_{pj}(\xi) d\xi = 0 \quad (17)$$

となるから、(12)式は自動的に満足されている。この場

Table 1 Main particulars of models

SERIES, MODEL	M.S. No.	A-SERIES	B-SERIES	C-SERIES
		1001 P *	2064 L *	5044 P *
		1003 P	1016 P	1013 P
		1005 P	1017 P	1015 P
		1012 P **	1022 P **	1021 P **
L _{PP} (m)	7.000	6.650	7.000	
L / B	6.50	6.21	5.50	
C _B	0.571	0.731	0.760	
C _P	0.589	0.740	0.762	
l _{CB} (% of L _{PP}) ***	1.45	-1.69	-3.00	

Remark : * Parent ship
** Optimized hullform
*** aft +, fore -

合、最適解は(16)式の連立方程式を解けばよい。

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta C_{11} & \Delta C_{12} & \dots & \Delta C_{1n} \\ \Delta C_{21} & \Delta C_{22} & \dots & \Delta C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta C_{n1} & \Delta C_{n2} & \dots & \Delta C_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} \quad (18)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \Delta C_{kj} &= \int_0^{\pi/2} (\Delta P_k' \Delta P_j' + \Delta Q_k' \Delta Q_j') \sec^3 \theta d\theta \\ B_k &= - \int_0^{\pi/2} (P_0' \Delta P_k' + Q_0' \Delta Q_k') \sec^3 \theta d\theta \end{aligned} \right\} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (19)$$

(18)式を(11)式に代入すれば、最適な $\Delta C_p(\xi)$ が求まる。

以上のように、この方法では、計画船の C_p カーブをデータ船の C_p カーブの線形結合で表わし、その振幅関数をデータ船の実測振幅関数の線形結合で表わしている。ここでは、線形重ね合わせの原理のみを使って、理論式は一切使用していないので、理論と実際の相違を修正するということが必要でない。この点が本方法の大きな特徴であり、本方法が成功するか否かは、実際の造波現象においても線形の仮定が成立するか否かによる。

上記の議論は $\int \Delta C_p(\xi) d\xi = 0$ の条件下に行なわれたが、一般に $\int \Delta C_p(\xi) d\xi \neq 0$ としても同様な議論が成り立つ。また、モード関数として $\Delta C_{pj}(\xi)$ ではなく、 $C_{pj}(\xi)$ を用いることも可能であり、その説明は付録に示しておいた。

3 水槽試験による検証

3.1 供試船型

上に述べた船型計画法の有効性を検証するために、3種の船型を選んで水槽試験を実施した。各シリーズの模型船番号と主な要目をTable 1に示す。母型の C_p カー

Fig. 2 Prismatic curves of parent ships

 Fig. 3 ΔC_p -curves (A-series)

 Fig. 4 ΔC_p -curves (B-series)

 Fig. 5 ΔC_p -curves (C-series)

プを Fig. 2 に、母型と他のデータ船あるいは最適化船との C_p カーブの変分 $\Delta C_p(\xi)$ を Fig. 3, 4, 5 に示す。各シリーズの設計速力は A シリーズ $F_n=0.29$, B シリーズ $F_n=0.21$, C シリーズ $F_n=0.22$ である。

3 シリーズのうち、A シリーズはすでに C_p カーブ・シリーズの波形解析データが多数揃っていた船型を使って、その中から取捨選択して、本方法の検証用にシリーズを構成してみたものである。一方、B および C シリーズは、この検証テストのために新たに組んだもので、データ船となる C_p カーブ・シリーズを次のような方針で作成した。

(1) 造波抵抗に大きな影響を及ぼすのは船首部であると考え、船尾部 C_p カーブは不変とし、船首部のみを変更する。

(2) 隻数は母型を含めて各シリーズ 3 隻とする。

(3) 3 隻の C_p カーブは互に独立なものとする。

C_p カーブの独立性の意味は、次節で考察するとおりであって、この点を考慮して最適な C_p カーブ・シリーズを作成するのが望ましいが、今回は C_p カーブの作成方法を取りあえず次のようにした。実用船型としては変曲点の多い C_p カーブは望ましくないので、 ΔC_p カーブの節数を 1 節と 2 節にし、それらの節点位置は無理のない範囲で互にできるだけ離れるように作成した。

シリーズ船の線図は、一般に系統的模型試験の線図作成に使われている方法で、 $C_p(\xi)$ の値が一致する所で母型のフレーム・ライン形状と同じにする方法で作成した。

3.2 C_p カーブの独立性

本船型計画法では、データ船の C_p カーブとして互に独立なものを採用することが、正しい最適解を得るための一つの要点となる。しかし、その独立性の意味は必ずしも明らかでないので、ここに若干の考察を加え

ておくこととする。

一般に $y=f_1(x)$, $y=f_2(x)$ なる2つの関数がある場合、それらが互に直交していれば、2つの関数は独立である。関数の直交性は(20)式で定義される。

$$r = \int_a^b f_1^*(x) \cdot f_2^*(x) dx \quad (20)$$

ここで、 $f_k^*(x) = f_k(x) / \int_a^b f_k^2(x) dx$ ($k=1, 2$) であり、 $f_k(x)$ を正規化したものである。また、 $f_1(x)$, $f_2(x)$ は共に区間 (a, b) で積分可能とする。この r は一種の相関係数である。 $r=0$ のとき $f_1(x)$, $f_2(x)$ は直交しているといわれ、 $r=1$ ならば $f_1(x) \equiv f_2(x)$ である。従って、 $|r| \ll 1$ ならば、 $f_1(x)$, $f_2(x)$ は独立性が強く、 $|r| \approx 1$ ならば、従属性が強いことになる。

さて、造波特性から見た ΔC_p カーブの独立性について考える。 $\Delta C_{pk}(\xi)$ に対する振幅関数は、(10)式から、 $\Delta P_k'(\theta) + i \Delta Q_k'(\theta)$

$$= \int_{-1}^1 \Delta C_{pk}(\xi) \{G'(\xi\theta) + iH'(\xi, \theta)\} d\xi \quad (21)$$

である。いま、2つの C_p カーブがあるとき、これらの振幅関数の直交性は(20)式にならって、(22), (23)式のように表わされる。ただし、造波抵抗を念頭において、 $\sec^3 \theta$ の重み関数を掛けておく。

$$\begin{aligned} r_p &= \frac{P_{12}}{\sqrt{P_{11} \cdot P_{22}}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{P_{11} \cdot P_{22}}} \int_0^{\pi/2} \Delta P_1'(\theta) \cdot \Delta P_2'(\theta) \sec^3 \theta d\theta \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} r_q &= \frac{Q_{12}}{\sqrt{Q_{11} \cdot Q_{22}}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{Q_{11} \cdot Q_{22}}} \int_0^{\pi/2} \Delta Q_1'(\theta) \cdot \Delta Q_2'(\theta) \sec^3 \theta d\theta \end{aligned} \quad (23)$$

ここに、

$$P_{kl} = \int_0^{\pi/2} \Delta P_k'(\theta) \cdot \Delta P_l'(\theta) \sec^3 \theta d\theta \quad (24)$$

$$Q_{kl} = \int_0^{\pi/2} \Delta Q_k'(\theta) \cdot \Delta Q_l'(\theta) \sec^3 \theta d\theta \quad (25)$$

ただし、 $k=1, 2$, $l=1, 2$

r_p, r_q を統合した形として、次式が考えられる。

$$\begin{aligned} r_{PQ} &= \frac{1}{\sqrt{(P_{11} + Q_{11})(P_{22} + Q_{22})}} \\ &\int_0^{\pi/2} \{\Delta P_1'(\theta) \cdot \Delta P_2'(\theta) + \Delta Q_1'(\theta) \cdot \Delta Q_2'(\theta)\} \sec^3 \theta d\theta \\ &= \frac{\sqrt{P_{11} \cdot P_{22}} r_p + \sqrt{Q_{11} \cdot Q_{22}} r_q}{\sqrt{(P_{11} + Q_{11})(P_{22} + Q_{22})}} \end{aligned} \quad (26)$$

このような振幅関数の直交性は、最適化計算時に取り扱う連立方程式の解の不定性と関係がある。いま、(16)～(19)式で $k=2$ の場合を考えると、(27)式となる。

$$\begin{cases} \Delta C_{11} a_1 + \Delta C_{12} a_2 = B_1 \\ \Delta C_{21} a_1 + \Delta C_{22} a_2 = B_2 \end{cases} \quad (27)$$

ここで、(26)式および $\Delta C_{11} = P_{11} + Q_{11}$, $\Delta C_{22} = P_{22} + Q_{22}$, $\Delta C_{12} = \Delta C_{21} = P_{12} + Q_{12}$ であることを考慮すると、(27)式の係数行列式は、(28)式となる。

$$\begin{vmatrix} \Delta C_{11} & \Delta C_{12} \\ \Delta C_{21} & \Delta C_{22} \end{vmatrix} = \Delta C_{11} \cdot \Delta C_{22} (1 - r_{PQ}^2) \quad (28)$$

Fig. 6 Polynomial expressions of ΔC_p -curves

Table 2 r_P, r_Q & $|r_{PQ}|$ for various ΔC_p -curves

	① ②	① ③	① ④	① ⑤	① ⑥	② ③	② ④	② ⑤
r_P	0.647	0.278	0.764	0.861	0.987	-0.552	0.889	0.171
r_Q	-0.316	0.733	-0.596	0.882	0.901	-0.876	0.647	-0.718
$ r_{PQ} $	0.289	0.366	0.040	0.847	0.960	0.706	0.712	0.259
	② ⑥	③ ④	③ ⑤	③ ⑥	④ ⑤	④ ⑥	⑤ ⑥	
r_P	0.545	-0.285	0.727	0.394	0.408	0.727	0.917	
r_Q	-0.397	-0.766	0.962	0.742	-0.697	-0.328	0.885	
$ r_{PQ} $	0.219	0.625	0.865	0.509	0.299	0.179	0.866	

$$\textcircled{1} \quad \Delta C_p(\xi) = -100\xi^2(\xi-1)^2(\xi-1/2)$$

$$\textcircled{2} \quad \Delta C_p(\xi) = -20\xi^2(\xi-1)(\xi-0.58)(\xi-2.6)$$

$$\textcircled{3} \quad \Delta C_p(\xi) = 50\xi^3(\xi-1)(\xi-2/3)$$

$$\textcircled{4} \quad \Delta C_p(\xi) = 50\xi^2(\xi-1)^2(\xi-0.311)(\xi-0.689)$$

$$\textcircled{5} \quad \Delta C_p(\xi) = -5\xi^2(\xi-1)(\xi-0.4)(\xi-0.79)(\xi+2.4)$$

$$\textcircled{6} \quad \Delta C_p(\xi) = -100\xi^2(\xi-1)(\xi-0.5)(\xi-0.9)(\xi+0.429)$$

$|r_{PQ}|=1$ の場合、(27)式の解は不定となる。 $|r_{PQ}|$ が 1 でなくても、非常に 1 に近いと係数行列式が 0 近くになり、数値計算上誤差が大きくなる。 C_p カーブの独立性を r_{PQ} で定義した場合の数学的な意味は以上のとおりであって、 C_p カーブ・シリーズを構成する際には、 $|r_{PQ}|$ ができるだけ小さくなるような C_p カーブを選定することが望ましい。

参考のために、数種の ΔC_p カーブについて、 r_{PQ} の計算をしてみた。次のような 2 種の多項式を考える。

(i) 1 節の場合

$$\Delta C_p(\xi) = a\xi^2(\xi-1)(\xi-\xi_1)\left(\xi - \frac{3\xi_1-2}{5\xi_1-3}\right) \quad (29)$$

$$\text{ただし, } \frac{1}{2} \leq \xi_1 \leq \frac{2}{3}$$

(ii) 2 節の場合

$$\Delta C_p(\xi) = a\xi^2(\xi-1)(\xi-\xi_1)(\xi-\xi_2)(\xi-b) \quad (30)$$

ここに、

$$b = \frac{21\xi_1\xi_2 - 14(\xi_1 + \xi_2) + 10}{7\{5\xi_1\xi_2 - 3(\xi_1 + \xi_2) + 2\}}$$

また、 ξ_1, ξ_2 の変域は $b \leq 0$ あるいは $b \geq 1$ を満足する範囲とする。

ここでは C_p カーブ・シリーズを考えているので、(29)、(30)式は $\int_0^1 \Delta C_p(\xi) d\xi = 0$ を満足するものとしてある。 a は任意の定数である。

(29)、(30)式で表わされる ΔC_p カーブの例が Fig. 6 に示してある。これら 6 つの ΔC_p カーブを組合せて、 $r_P, r_Q, |r_{PQ}|$ を $F_N=0.21$ について計算してみた結果を Table 2 に示す。ただし、実測の振幅関数はないので、(21)式の計算には Michell 理論による (7) 式を使った。この計算結果から $|r_{PQ}|$ の小さな組合せをみると、①④、④⑥、②⑥、②⑤……の順になっている。ここで、⑥の ΔC_p カーブは 2 節とはいうものの、全体的傾向が①のカーブに似ていることを考えると、造波特性からみて互に独立性の強い ΔC_p カーブとは、節数が異

なり、かつ節点の位置ができるだけ離れているものであることがわかる。

以上は、 ΔC_p カーブを多項式で与えて $|r_{PQ}|$ を計算してみたものであるが、逆に $r_{PQ} \equiv 0$ となる ΔC_p カーブを求めることも考えられる。このような解が求められれば、本船型計画法にとって理想的な C_p カーブ・シリーズが作成されたことになる。この点は今後の研究課題であるが、上記のような計算例でも、独立性の強い C_p カーブとはどのようなものなのかという見当はつけられるし、実用的観点からはこれで十分であろう。

3.3 実験結果とその検討

各シリーズの波形解析より求めた造波抵抗係数 C_w を Fig. 7, 8 および 9 に示す。A シリーズでは、最適化船型 1012P は、設計点においてデータ船中の最良船型である母型 1001P を凌駕するにはいたっていないが、フルード数の低い所では良くなっており、全体としては母型と同程度である。B シリーズ、C シリーズでは、データ船にも設計点で抵抗値が相当低い船型 (1017P, 1015P) があるものの、最適化船型 (1022P, 1021P) はさらにそれを下回った性能を示している。

設計フルード数に対する振幅関数およびスペクトラム

Fig. 7 Results of wave pattern analysis (A-series)

を Fig. 10~15 に示す。スペクトラム S は $\{P^2(\theta) + Q^2(\theta)\} \sec^3 \theta$ の形のものである。Fig. 11, 13 および 15 が最適化船型に対するものであるが、これらの図の破線は各 3 隻のデータ船の波形解析結果 (Fig. 10, 12, 14) を使って、(13) 式より求めた推定値である。実線が実測値であり、線形重ね合わせの原理が成り立つならば、両者はよく一致するはずである。最もやせた船型である A シリーズでは、 θ の全領域にわたってよく一致している。次の B シリーズでは、 $\theta < 40^\circ$ くらいまでは P 関数、 Q 関数個々にみると若干の相違があるが、それらを合成したスペクトラム S でみると比較的よく一致している。 $\theta > 40^\circ$ では、絶対値的にも位相的にもかなりの相違を

示している。これは、 θ の大きいほど素成波が短波長となり、波傾斜や船体排除効果などの面から非線形影響を受けやすいためと考えられる。最も幅広で肥大した C シリーズでは、 θ の全領域で両者の一致度が悪い。しかし、波高レベルは他のデータ船より平均的にかなり低くなっており、上述の相違もその低いレベルでの違いである。Fig. 9 の C_w 曲線でみると、他のシリーズより波の相互干渉を最もうまく利用して最適化されている様子を示しており、巨視的にみれば、この C シリーズでも線形重ね合わせの原理が成立していると言ってよいようである。

上記の 3 例中、線形性の近似度が最も高いと思われる

Fig. 8 Results of wave pattern analysis (B-series)

Fig. 9 Results of wave pattern analysis (C-series)

Fig. 10 P, Q & S of data-ships (A-series)

Fig. 11 P, Q & S of optimum hull form (A-series)

 Fig. 12 P, Q & S of data-ships (B-series)

 Fig. 13 P, Q & S of optimum hull form (B-series)

 Fig. 14 P, Q & S of data-ships (C-series)

 Fig. 15 P, Q & S of optimum hull form (C-series)

A シリーズの最適化が成功しなかった理由は、次の点にあると考えられる。B, C シリーズは船型資料の少ない中速船型であるのに対し、A シリーズは比較的資料の豊富な高速船型で、母型そのものが経験的に洗練された船型で、ほぼ最適化に近い状態になっていたのではないかと考えられる。また、B, C シリーズは新たに設計したので、 C_p カーブの変化を船体前半部に限って、後半部

船体の造波現象に対する複雑な影響を取り除いているが、既存のデータを使った A シリーズは後半部も変化したシリーズとなっており、このため後半部船体にもとづく造波現象の非線形性が、結果に悪影響を及ぼしたことも考えられる。

以上、検証例を 3 つ示したが、かなり肥大した幅広の船型に対しても、本船型計画法の有効なことが証明でき

た。この成功の原因は、船型と振幅関数との間には実際の造波現象においても、線形関係が成立するという仮定をもとに、実測の波形解析データのみを使って船型の最適化を行なった点にあると考えられる。

ここでは、データ船として C_p カーブ・シリーズを構成するもののみを取扱った。これを一般化して主要目の異なる船型をデータ船として採用することも原理的には可能である。この場合、モード関数としては $\Delta C_p(\xi)$ ではなく、 $C_p(\xi)$ を採用する方が取り扱いに便利である。一般化した場合の最適解の求め方が付録に示されているが、このように一般化しても、本方法が有効であることがわかれば、今後の船型開発に大いに役立つものと期待できる。波形計測をルーチン試験として実施し、多数のデータが蓄積してくれば、多賀野の方法¹²⁾に準ずる統計的手法により任意の船型について、最適化計算することも可能となる。この際の問題点は、どの程度の船型変化の範囲までなら線形理論の仮定が、実際現象において統計的に成り立つかということである。これに関連して、堤ら^{3)~5)}が $L/B \geq 6$ の数学船型について主要目の造波抵抗に対する影響を詳細に調べているが、より幅広く肥大した実用船型に対しては、明らかではない。この点が今後の重要な研究課題である。

4 結 言

これまでの研究成果と今後の課題をまとめると次のとおりである。

(1) 船型と波の振幅関数との間には線形関係が成り立つという仮定と実測波形データのみを使って、船型を最適化する方法を開発した。

(2) この方法は、最適値問題を船型 $\longleftrightarrow$ 造波抵抗という対応関係で取扱わずに、まず振幅関数 $\longleftrightarrow$ 造波抵抗という対応関係で扱い、最適船型は最適造波特性を与える振幅関数と同形のデータ船の一次結合で与えるという2段階方式になっている。従って、最適化しようとする船型の振幅関数を、複数のデータ船の実測波形から求めることができ、理論と実際の相違を補正するための修正操作を何も必要としない点に本方法の特徴がある。

(3) 本方法を、3種の船型例について検証してみた結果、かなり肥大した幅広船型に対しても有効であることがわかった。

(4) 上の検証例は、主要目比の同じ C_p カーブ・シリーズに対するものであるが、これを主要目比の異なった船型をデータ船として実施できるように一般化しておくことが望ましい。その際、線形理論の成り立つ主要目範囲を明らかにしておくことが重要な研究課題となる。

船型研究所3社の共同研究として実施されたもので、標記の著者以外に、次の方々が研究担当者として参加された。池畑光尚(研究当時川崎重工業)、岩崎泰典(川崎重工業)、田中秀信、北沢孝宗(以上、日立造船)、斎藤泰夫(明石船型研究所)の諸氏である。特に、現横浜国大助教授池畑先生には、種々有益な御討論、御指導をいただいた。ここに深く感謝する。また、渡辺前研究室長には、本研究の遂行にあたり、終始変らぬ御指導・御鞭達を賜ったことに対し、謝意を表する次第です。最後に、東大教授乾崇夫先生に、論文作成にあたり御指導をいただき、深く感謝する次第です。

参 考 文 献

- 1) Baba, E.: An Application of Wave Pattern Analysis to Ship Form Improvement, Jour. Soc. Nav. Arch. of Japan, Vol.132 (1972).
- 2) Ogiwara, S.: Study on the Application of wave Pattern Analysis to the Tank Test with Ship Models, IHI Eng. Review, Vol.8 (1975).
- 3) 堤 孝行, 荻原誠功, 神中竜雄: 船の主要目と造波抵抗 (I), 日本造船学会論文集, 第136号 (昭49).
- 4) 堤 孝行, 荻原誠功: 船の主要目と造波抵抗 (II), 日本造船学会論文集, 第137号 (昭50).
- 5) 堤 孝行, 荻原誠功: 船の主要目と造波抵抗 (III), 日本造船学会論文集, 第138号 (昭50).
- 6) Tsutsumi, T.: An Application of Wave Resistance Theory to Hull Form Design, Jour. Soc. Nav. Arch. of Japan, Vol.144 (1978).
- 7) 日本造船学会: 船型設計のための抵抗・推進理論シンポジウム・テキスト, (昭54).
- 8) Hogner, F.: Influence Lines for the Wave Resistance of Ships, Proc. Roy. Soc. A., Vol. 155 (1938).
- 9) B. S. R. A. Naval Architecture Technical Memorandum: International Towing Tank Conference Standard Symbols 1971, T. M. No. 400, (1971).
- 10) Newman, J. N.: The Determination of Wave Resistance from Wave Measurements along a Parallel Cut, International Seminar on Theoretical Wave Resistance, Ann Arbor, Michigan (1963).
- 11) Sharma, S. D.: A Comparison of the Calculated and Measurement Free Wave Spectrum of an Inuid in Steady Motion, International Seminar on Theoretical Wave Resistance, Ann Arbor, Michigan (1963).
- 12) 多賀野寛: 統計解析による実用船型の造波抵抗推定法に関する研究, 関西造船協会誌, 第147号 (昭48).

<付録> データ船型の一般化

本研究は、川崎重工業(株)、日立造船(株)、(株)明石

モード関数として、各データ船の C_p カーブそのもの

を用いると、求めようとする船型の C_p カーブは (A-1) 式で表わされる。

$$C_p(\xi) = \sum_{j=1}^n b_j C_{pj}(\xi) \quad (\text{A-1})$$

このとき、本文 (9) 式の仮定から、

$$\begin{aligned} P'(\theta) + iQ'(\theta) &= \sum_{j=1}^n (\alpha/\alpha_j) \{P_j'(\theta) + iQ_j'(\theta)\} b_j \\ &= \sum_{j=1}^n b_j \{\bar{P}_j(\theta) + \bar{Q}_j(\theta)\} \end{aligned} \quad (\text{A-2})$$

と表わせる。新船型の柱形肥せき係数を $\bar{C}_p$ とし、 $C_p(0)=1$ とすれば、

$$\int_{-1}^1 C_p(\xi) d\xi = \bar{C}_p \quad (\text{A-3})$$

$$\sum_{j=1}^n b_j = 1 \quad (\text{A-4})$$

が拘束条件となるから、

$$\begin{aligned} J &= r \int_0^{\pi/2} \left\{ \left(\sum_{j=1}^n b_j \bar{P}_j \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^n b_j \bar{Q}_j \right)^2 \right\} \sec^3 \theta d\theta \\ &\quad + 2\lambda_1 \left(\sum_{j=1}^n b_j \bar{C}_{pj} - \bar{C}_p \right) + 2\lambda_2 \left(\sum_{j=1}^n b_j - 1 \right) \end{aligned} \quad (\text{A-5})$$

を評価関数として、 J が最小となるように係数 b_j などを求めてやればよい。すなわち、次の連立方程式を解けば、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial b_j} &= 2r \sum_{j=1}^n b_j \int_0^{\pi/2} (\bar{P}_k \bar{P}_j + \bar{Q}_k \bar{Q}_j) \sec^3 \theta d\theta \\ &\quad + 2\lambda_1 \bar{C}_{pj} + 2\lambda_2 = 0 \quad (k=1, 2, \dots, n) \\ \frac{\partial J}{\partial \lambda_1} &= 2 \left(\sum_{j=1}^n b_j \bar{C}_{pj} - \bar{C}_p \right) = 0 \\ \frac{\partial J}{\partial \lambda_2} &= 2 \left(\sum_{j=1}^n b_j - 1 \right) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{A-6})$$

その解は、

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \cdots C_{1n} & \bar{C}_{p1} & 1 \\ C_{21} & C_{22} \cdots C_{2n} & \bar{C}_{p2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} \cdots C_{nn} & \bar{C}_{pn} & 1 \\ \bar{C}_{p1} & \bar{C}_{p2} \cdots \bar{C}_{pn} & 0 & 0 \\ 1 & 1 \cdots 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \bar{C}_p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A-7})$$

である。

ここに、

$$C_{kj} = r \int_0^{\pi/2} (\bar{P}_k \bar{P}_j + \bar{Q}_k \bar{Q}_j) \sec^3 \theta d\theta \quad (\text{A-8})$$

$$\bar{P}_j + i\bar{Q}_j = \frac{\alpha}{\alpha_j} (P_j' + iQ_j') \quad (\text{A-9})$$

$$\alpha = V l A_M / T, \quad \alpha_j = V l_j A_{Mj} / T_j \quad (\text{A-10})$$