

(昭和 52 年 5 月 日本造船学会春季講演会において講演)

最大トリム角を制限した高速艇船型

正員 永 井 保* 正員 吉 田 靖*
正員 樋口 道之助** 正員 近 藤 潔***

Hull Form of High Speed Crafts Constrained by the Maximum Trim Angle

by Tamotsu Nagai, Member

Yasushi Yoshida, Member

Michinosuke Higuchi, Member

Kiyoshi Kondo, Member

Summary

Analysing correlations among resistance at Froude number $F_F (=V/\sqrt{P^{1/3}g})=3.5$, trim angles at $F_F=2.5$ through 3.5, by using model test data in still water of the high speed craft, the clear correlation was found to exist between resistance at $F_F=3.5$ and trim angle at $F_F=2.5$.

Therefore, the sequential unconstrained minimization technique was first applied to get the smallest total resistance hull form for each 30 minutes interval of trim angle change, and then followed the discussion concerning deviations arisen and resistance performance due to obtained hull form parameters. Using diagrams related to the total resistance at $F_F=3.5$ and the trim angle at $F_F=2.5$, we clarified finally the influence of the unit trim angle on the total resistance coefficient within high speed range.

ま え が き

高速艇の抵抗性能に関して、今まで得られた結果¹⁾によると、高速域においては、トリム角の抵抗係数におよぼす影響は極めて大きいことがわかった。同様なことが、Clement らの模型試験結果からいへば、トリム角を 4 度から 2 度に減ずると抵抗係数は 80% から 100% 増加する例や、最適トリム角は、細長い船型を除き、同一積載状態では重心位置にも長さ幅比にも無関係で、フルード数 3.25 において $4\frac{1}{4}$ 度になるという一例をもあげている²⁾。

さて、最適トリム角を求める問題となると、飛行艇のフロートへの応用をも含めて考え、Sottorf の実験³⁾が想起される。すなわち彼は、他の条件を一定とした滑走平板に関し、トリム角と幅、トリム角と積載荷重、トリム角と速度およびトリム角と縮尺比との関係を求めるために、四者それぞれ単独に実験をした。そして、全抵抗と揚力との比すなわち滑数を最小にするトリム角は 4 度から 5.5 度で、極小滑数は 0.10 から 0.17 程度になることを述べている。

平水中においては、最小抵抗となる船型のうち、大型を除いたほかの船型⁴⁾が、フルード数 2.5 においてトリム角が高くなることから、今回は Sottorf のような逐一

条件判定によらずに、すべての船型要素とトリム条件とを同時に勘案して最小抵抗の船型を求め、二、三の考察を試みた²⁾。

記 号 の 説 明

船型要素と抵抗性能の記号に関しては、文献 1)、文献 4) および文献 5) による。さらに、

$R'_{F_F=3.5}$: フルード数 ($F_F = V/\sqrt{P^{1/3}g}$ 以下同じ)^{1), 5)}
3.5 における抵抗係数 ($R' = R/\frac{1}{2}\rho V^2 P^{2/3}$ 以下同じ)^{1), 5)}

$\Delta\theta_{F_F=2.5}$: フルード数 2.5 におけるトリム角を分単位で表わした値。他のフルード数におけるトリム角についても同様の表示による。

Fig. 1 から Fig. 4 までにおいて、曲線の右端に示した●印は、トリム角の制限を与えないとき最小抵抗となる船型⁴⁾の示す $R'_{F_F=3.5}$ と $\Delta\theta_{F_F=2.5}$ の値を示す。

Fig. 1 から Fig. 5 までと Fig. 7 に示す $R'_{F_F=3.5}$ — $\Delta\theta_{F_F=2.5}$ 曲線、船型偏差および抵抗性能曲線の値は、次の例によって示す。

(1) ☆, * : ☆はトリム角の制限がない場合、一次式 (文献 4), 5) に従って船尾の半幅 b_1 で無次元化した一次式をいう。以下同じ。) によって求めた R' , $\Delta\theta$, ΔD および船型偏差の値を示し, * は同じく二次式 (一次式と同様の定義による二次式をいう。以下同じ。) による値を示す。

(2) 曲線上の○, ●: ○はトリム角の制限を

* 防衛庁技術研究本部第 1 研究所

** 横浜国立大学

*** 日本鋼管株式会社津研究所

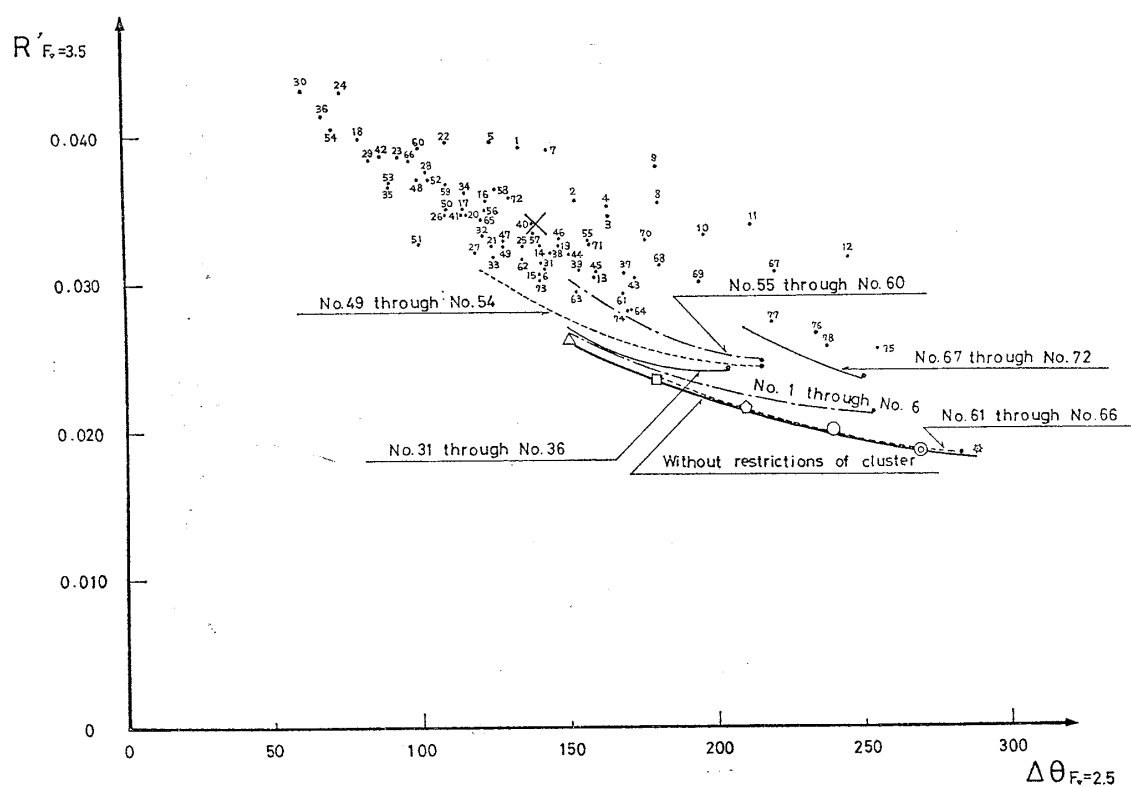


Fig. 1 Relations between R' and $\Delta\theta_{F=2.5}$ by linear equation

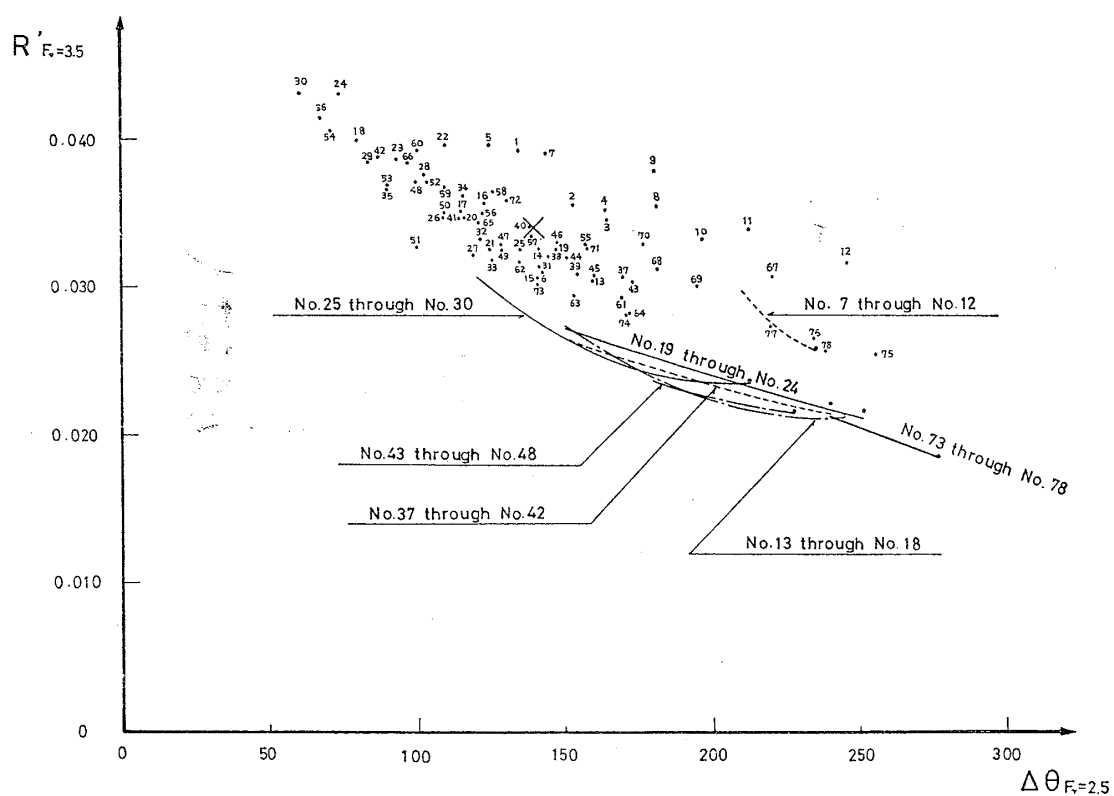


Fig. 2 Relations between R' and $\Delta\theta_{F=2.5}$ by linear equation

(注) 図面にある No.1 から No.78 の番号を付した点は, Fig.1 から Fig.4 まで共通で, 実験結果を表わし, この上に最適化計算の結果をクラ

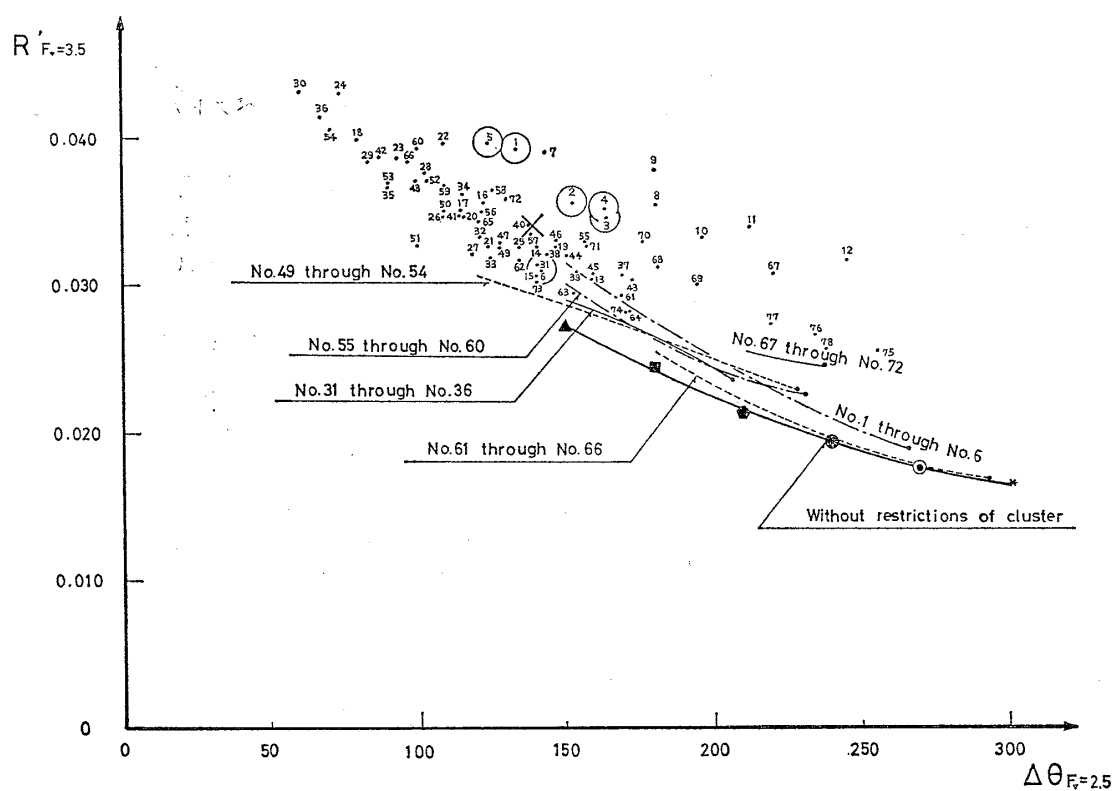


Fig. 3 Relations between R' and $\Delta\theta_{F=2.5}$ by quadric equation

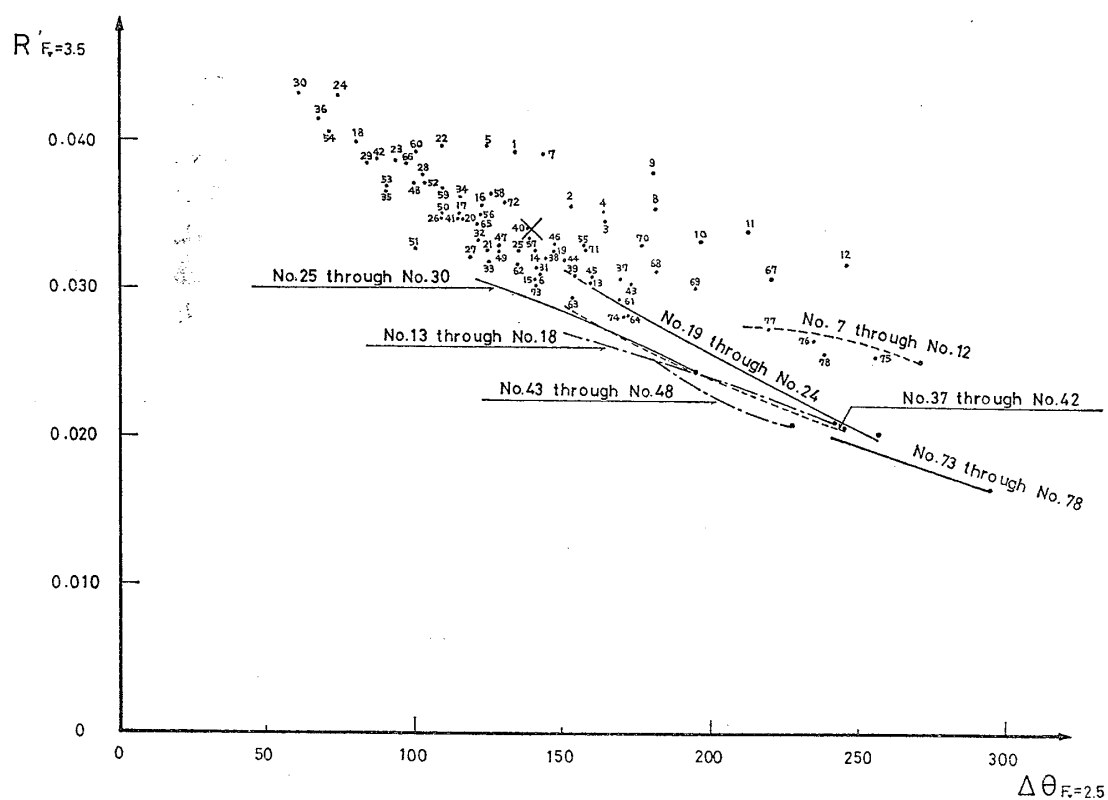


Fig. 4 Relations between R' and $\Delta\theta_{F=2.5}$ by quadric equation

スターゴと併示している。また、一つの図とすると混雑するので、「Fig.1 と Fig.2」および「Fig.3 と Fig.4」など二つに分けて表示した。

$\Delta\theta_{Fr=2.5} \leq 270$ とした場合、一次式によって求めた値を示し、 $\odot$ は同じく二次式による値を示す。

(3) 曲線上の $\odot$, $\bullet$: $\odot$ は前項と同様 $\Delta\theta_{Fr=2.5} \leq 240$ における一次式の値, $\bullet$ は同じく二次式による値を示す。以下同様にして、一次式による場合は記号の塗りつぶしを行わず、二次式では同一の記号に対して黒印で表示すると、

(4) $\square$, $\blacksquare$: $\Delta\theta_{Fr=2.5} \leq 210$ における値

(5) $\square$, $\blacksquare$: $\Delta\theta_{Fr=2.5} \leq 180$ における値

(6) $\triangle$, $\blacktriangle$: $\Delta\theta_{Fr=2.5} \leq 150$ における値

Fig. 7 においての記号はつぎのとおり。

(1) I は初期船型の抵抗性能。ここでは、実験模型 No. 20 を初期船型にとっている。

(2) θ_I は前項による初期船型の初期仰角⁵⁾。

(3) $\theta_{\star}$ はトリム角 $\Delta\theta$ の制限がない条件のもとで一次式によって求めた船型の初期仰角を、 $\theta_{\star}$ は同じ条件のもとで二次式によって求めた船型の初期仰角を示す。

(4) $\theta_{\odot}$ は $\Delta\theta_{Fr=2.5} \leq 270$ のもとで一次式によって求めた船型の初期仰角を、 $\theta_{\odot}$ は同じく二次式による初期仰角を示す。 $\Delta\theta_{Fr=2.5}$ に関して、240, 210, 180, 150 などほかの条件では、 θ に前述の $\odot$, $\bullet$, $\square$, $\blacksquare$, $\triangle$, $\blacktriangle$ などの記号に従って Suffix を付して表示する。

(5) フルード数は、0.5, 1.0, 1.5...など 0.5 刻みをとっている。低速フルード数 0.5 における $\Delta\theta$ と船尾の浮上変化量を b_1 で無次元化した ΔD ⁵⁾ とでは、記号を横に拡げて記入しているが値としてはほぼ同一の値をとっている。各フルード数ごとに対し、左側には一次式による値、右側には二次式による値をそれぞれ記入し、ほぼ同一の値をとるときには側方へ拡げて表示している。

数値計算ではつぎの記号による。

(1) N : 制約条件の数

(2) x : $x_2, x_3, \dots, x_{12}$ の 11 個から成るベクトル

(3) σ, σ_A : σ は標準偏差, σ_A は A に関する標準偏差

(4) p : 抵抗性能に関する実験式⁵⁾の項数を示し、一次式では $p=12$, 二次式では $p=15$

(5) a_i $i=1, 2, \dots, p$: 変数の上限と下限とを規定するため標準偏差に乗ずる定数

(6) $g_i(x)$ $i=1, 2, \dots, N$: i 番目の制約条件

(7) $f(x)$: 目的関数

(8) r_k $k=1, 2, \dots, k$ 段階における摂動パラメータで、段階数が増えれば r_k は小さな値となる

(9) $P(x, r_k)$: SUMT 変換による Penalty function.

(10) ΔP : $P(x, r_k)$ の増分

(11) β_i $i=1, 2, \dots, p$: $R'_{Fr=3.5}$ に対する偏回帰係

数

(12) β_i' $i=1, 2, \dots, p$: $\Delta\theta_{Fr=2.5}$ に対する偏回帰係数

(13) Δx : $x_i - \bar{x}_i$ $i=2, 3, \dots, p$ から成る偏差ベクトル。 Δx^T はその転置ベクトルを示す。ただし、 $-$ は平均を示す。

(14) B^{-1} : 分散共分散行列の逆行列⁶⁾

(15) $\chi^2(f, \alpha)$: 自由度 f , 有意水準 α に対する χ^2 分布の値。ここでは $\alpha=0.05$, f は一次式では 11, 二次式では 14

(16) z_i $i=1, 2, 3, 4$: 第 i 主成分に関するスコア¹⁾

1 高速域フルード数における抵抗係数とトリム角との関係

試験結果⁵⁾を用い、フルード数 3.5 における抵抗係数と、フルード数 2.5, 3.0 および 3.5 におけるトリム角とで相関係数の整理をすると Table 1 のようになる。Table 1 からわかるとおり、フルード数 3.5 における

Table 1 Matrix of correlations

	$R_{F_v} = 3.5$	$\Delta\theta_{F_v} = 2.5$	$\Delta\theta_{F_v} = 3.0$	$\Delta\theta_{F_v} = 3.5$
$R_{F_v} = 3.5$	1.00	SYM.		
$\Delta\theta_{F_v} = 2.5$	-0.76			
$\Delta\theta_{F_v} = 3.0$	-0.71	0.94	1.00	
$\Delta\theta_{F_v} = 3.5$	-0.60	0.85	0.94	1.00

R' とフルード数 2.5 における $\Delta\theta$ とは、三者のうちで最も大きい逆相関関係となる。すなわち、フルード数 2.5 における $\Delta\theta$ を大きくすれば、フルード数 3.5 における R' を小さくすることができ、逆にフルード数 2.5 の $\Delta\theta$ を小さくすれば、 R' は大きくなる。ここで、フルード数 2.5 における $\Delta\theta$ を横軸にとり、縦軸にはフルード数 3.5 における R' をとって、のべ 78 隻の実験模型について図示すると、Fig. 1 のようになる。実験模型の $R'_{Fr=3.5}$ の平均値は $\times$ 印で示したごとく 0.0339, $\Delta\theta_{Fr=2.5}$ の平均値は 139.34 度であり、No. 1 から No. 78 までの実験模型は、その番号の点が示すように後述する最適化を行なった右下りの曲線より高い $R'_{Fr=3.5}$ をとっていることがわかる。

つぎに、実験模型の系統的な分類¹⁾にしたがって、フルード数 2.5 における $\Delta\theta$ に制約条件を与え、その条件のもとで、フルード数 3.5 において最小抵抗となる船型を求めてみた。

2 最大トリム角を制限した高速艇船型

文献 4) では、形態、初期仰角および chine などについて所望の船型を保持した状態で、最小抵抗となる船

型を求めた。その船型のフルード数 3.5 における R' は Fig. 1 から Fig. 4 における曲線の右端に ● で示す抵抗係数の値をとっている。これらの曲線の右端で示す $\Delta\theta_{Fr=2.5}$ を右端とし、実験結果から文献⁴⁾ p. 58 Fig. 3 で示した初期船型がとり得る $\Delta\theta_{Fr=2.5}$ までの間において、フルード数 2.5 における $\Delta\theta$ を 270 分以下、240 分以下、210 分以下、180 分以下、150 分以下および 120 分以下など 30 分おきに制約条件を与えて、最小抵抗となる船型を以下に述べる SUMT 法^{6),7)}によって求めた。

(1) 実験範囲内であること、(2) 船型要素は実験した模型の平均付近であること、(3) 形態、初期仰角および chine などに関して所望の船型を保持するというクラスター¹⁾の制限、それから (4) 最大トリム角などの諸制約条件を同時に勘案して、フルード数 3.5 における R' を最小にする船型を SUMT 法 (Sequential Unconstrained Minimization Technique) によって求めた。SUMT 法の概要を述べるとつぎのようになる。

2.1 SUMT 法による解法手順

「制約条件 $g_i(\mathbf{x}) \geq 0$ $i=1, 2, \dots, N$ のもとで、目的関数 $f(\mathbf{x})$ を最小化する」という最適化問題において、SUMT 法では、「制限条件なしで、

$$P(\mathbf{x}, r_k) = f(\mathbf{x}) + r_k \sum_{i=1}^N \frac{1}{g_i(\mathbf{x})}$$

を最小化する」という問題に変換して最小値を求めている。最小値の求め方は、文献⁷⁾の Zangwill の方法によった。この方法は、微分を用いない共役傾斜法の考え方を用いており、数値計算では安定性のよい方法であると思われる。

さて、上記の目的関数と制約条件とを列挙してみるとつぎのとおりになる。二次式を例にとると、

目的関数：

$$f(\mathbf{x}) = \text{フルード数 3.5 における } R'^{5)}$$

$$= \beta_1 + \sum_{i=2}^{15} \beta_i x_i$$

ただし、 $x_{13} = x_7^2$, $x_{14} = x_7 \cdot x_{11}$, $x_{15} = x_{11}^2$ ここで、 x_2 から x_{15} までは非負化¹⁾を行なっている。以下同じ。

制約条件：

(i) 実験範囲内であること⁵⁾

$$\Delta \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{B}^{-1} \cdot \Delta \mathbf{x} \leq \chi^2 (14, 0.05)$$

(ii) 船型要素等⁵⁾が平均値付近にあること

$$0 \leq x_i \leq 2a_i \sigma_{x_i}$$

$$i=2, 3, \dots, 14$$

ここで、すべての i に対して $a_i = 2.0$

ただし、実験模型 No. 67 から No. 72 のクラスターでは、 $a_7 = 2.5$, $a_{10} = 3.0$ ⁴⁾

(iii) クラスターの内側にあること¹⁾

たとえば、実験模型 No. 1 から No. 6 と多次元的に考えて類似の船型要素を保持するという条件¹⁾では、文献

4) p. 58 Fig. 3 における ⑥ のクラスターの外側を構成する面が、主成分軸 z_1 , z_2 および z_3 と交わる切片の座標を計算して、クラスターを立体で表現すると、クラスターはつぎに述べる平面で囲まれる。

$$1 - \left(\frac{z_1}{0.92547} + \frac{z_2}{-27.13450} \right) \geq 0$$

$$1 - \left(\frac{z_1}{0.41436} + \frac{z_2}{-2.04928} \right) \geq 0$$

$$\frac{z_1}{0.74558} + \frac{z_2}{-65.76129} - 1 \geq 0$$

$$\frac{z_1}{0.44520} + \frac{z_2}{-3.89285} - 1 \geq 0$$

$$1 - \left(\frac{z_2}{2.27207} + \frac{z_3}{-1.71477} \right) \geq 0$$

$$1 - \left(\frac{z_2}{2.06565} + \frac{z_3}{-1.22895} \right) \geq 0$$

$$\frac{z_2}{1.98010} + \frac{z_3}{-1.59003} - 1 \geq 0$$

$$\frac{z_2}{1.79135} + \frac{z_3}{-1.19695} - 1 \geq 0$$

$$1 - \left(\frac{z_1}{1.00296} + \frac{z_3}{-22.19370} \right) \geq 0$$

$$1 - \left(\frac{z_1}{0.83203} + \frac{z_3}{-2.44817} \right) \geq 0$$

$$\frac{z_1}{0.76803} + \frac{z_3}{-54.39666} - 1 \geq 0$$

$$\frac{z_1}{0.65007} + \frac{z_3}{-3.79811} - 1 \geq 0$$

このほかに、情報量の損失¹⁾を軽減するため、第 4 主成分についても主成分分析のスコア¹⁾によって最小値から最大値までを

$$-0.66523 \leq Z_4 \leq -0.43843$$

と制限する。

他の船型についても同様にクラスターによって制限する。

(iv) 最大トリム角の制限

フルード数 2.5 における $\Delta\theta$ ⁵⁾

$$= \beta_1' + \sum_{i=2}^{15} \beta_i' x_i$$

最適化計算では、最適設計プログラム NKSUMT を用い、収束定数は $|\Delta P/P(\mathbf{x}, r_k)| \leq 10^{-4}$ 、摂動パラメータ r_k の初期値は 10^{-3} と定め、 k は 5 段階とし、 10^{-1} ずつ r_k を小さくした。

まず、(i) から (iii) までの制約条件のもとで $R'_{Fr=3.5}$ を最小にする船型を求めると文献⁴⁾のとおり平水中最小抵抗となる船型がえられる。さらに、(iv) の条件を追加すると、最小抵抗の船型よりも高い $R'_{Fr=3.5}$ の船型がえられることが予想される。そこで、今回は、(i) から (iv) までの条件のもとで船型を求め、抵抗性能を予測したが、その結果について述べることにする。

以下船型については、文献4)に従い、船尾の半幅 b_1 を単位にとった場合として述べることにする。

2.2 得られた船型とその抵抗性能

まず、(iii)の制約条件を除いた条件のもとで最小抵抗となる船型について検討した。

(1) 実験範囲内で最小抵抗となる船型

一次式と二次式との二通りによって最小抵抗となる船型を求めた。その結果は Fig. 5 に示すようになる。Fig. 5 には、平水中最小抵抗となる船型⁴⁾を基準として、フルード数 2.5 における $\Delta\theta$ を 270 分以下、240 分以下など逐次に制約条件を強化した場合の船型に関して、その偏差を実験模型の各船型要素に対する標準偏差 σ を単位とし、船型 5 要素¹⁾に従って記してある。この図から特にいえることは、 $\Delta\theta$ を小さくすると、全長が長くなることと、船尾 Ord. 10 における chine の高さが高くなることである。

ここで、 $\Delta\theta_{F=2.5} \leq 240$ と $\Delta\theta_{F=2.5} \leq 180$ との二通りの制約条件について、それぞれ得られた船型を示すと Fig. 6 のごとくなる。なお、点線で図示した船型は、 $\Delta\theta$ の制限がない場合の船型、すなわち、文献4) p.56, Fig. 2 の船型を示している。

つぎに、抵抗性能を示すと Fig. 7 のようになる。フルード数 2.5 における $\Delta\theta$ の制限を強化していくと、

フルード数 3.5 における R' とフルード数 1.5 における ΔD とは、ともに上昇することがわかる。ここで $\Delta\theta$ は、初期仰角 θ^0 からの変化量を示している。したがって、水面を基準として、実験模型の滑走時の仰角、すなわち船尾から船体中央部までにおける keel line と水面とのなす角を求めるには、Fig. 7 の $\Delta\theta$ の値に、さらに上段に記した初期仰角 θ を加える必要がある。

つぎに、(iii)の条件をも付与して、最小抵抗となる船型を検討した。

(2) 実験範囲内でありかつ所望の形態などを保持する条件での最小抵抗となる船型

形が大きい船型、小さい船型、初期仰角の大きい船型、小さい船型、chine の高い船型、低い船型など、所望とする船型の特性をある程度保持して、 $\Delta\theta_{F=2.5}$ に関する制約条件を変化させたときに最小抵抗となる船型を求め、前項と同じ要領で検討を行なった。

まず、船型偏差については、 $\Delta\theta_{F=2.5}$ を減少させた場合に、たとえば全長が長い船型となる、排水容積が少ない船型となるなど、前述の実験範囲内での最小抵抗となる船型を求めたときの傾向を一応の基準として仮説を立てて、得られた船型では仮説のとおり偏差となるかどうか、比較を行なってみた。Table 2 では、 $\Delta\theta_{F=2.5}$ を減少させた場合、上段に述べる仮説に従うか、船型偏

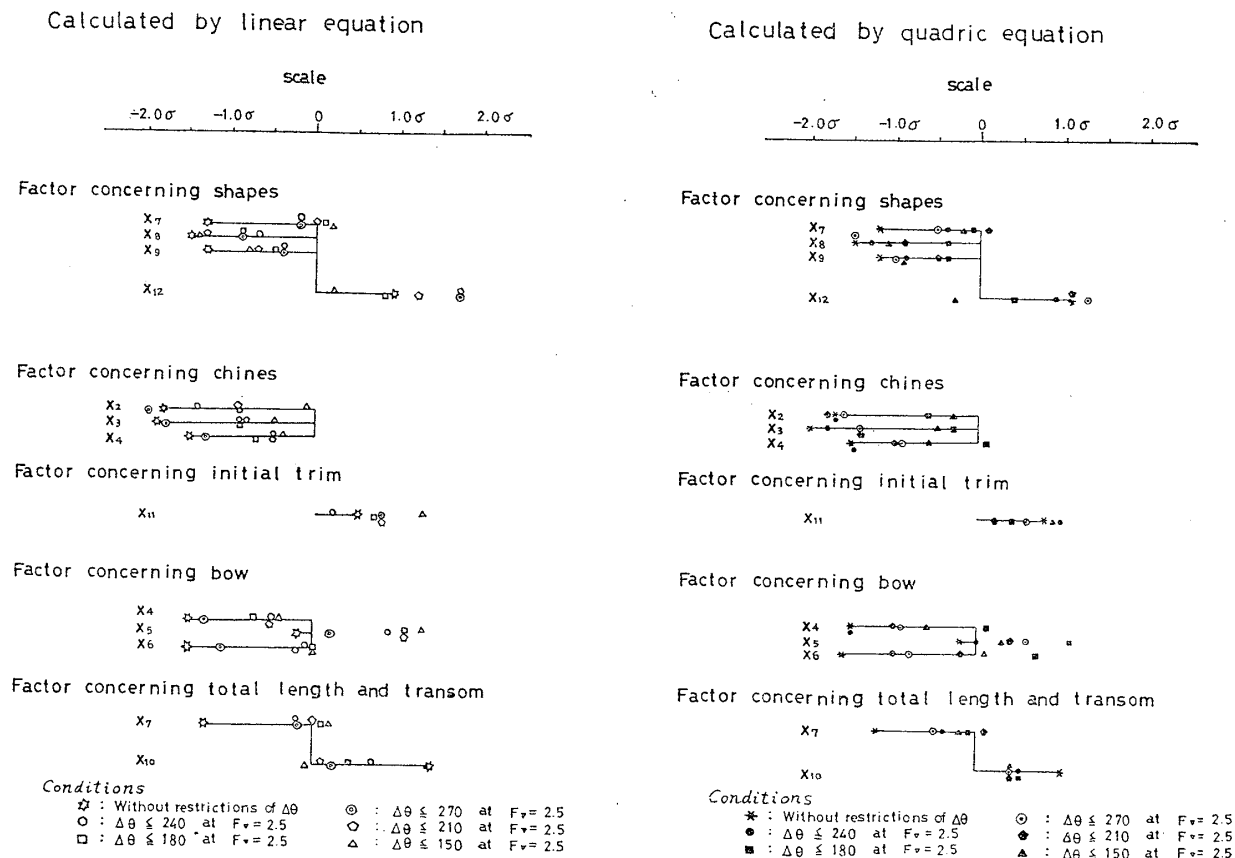


Fig. 5 Analyses by five elements concerning hull form parameters for model with smallest resistance through all range

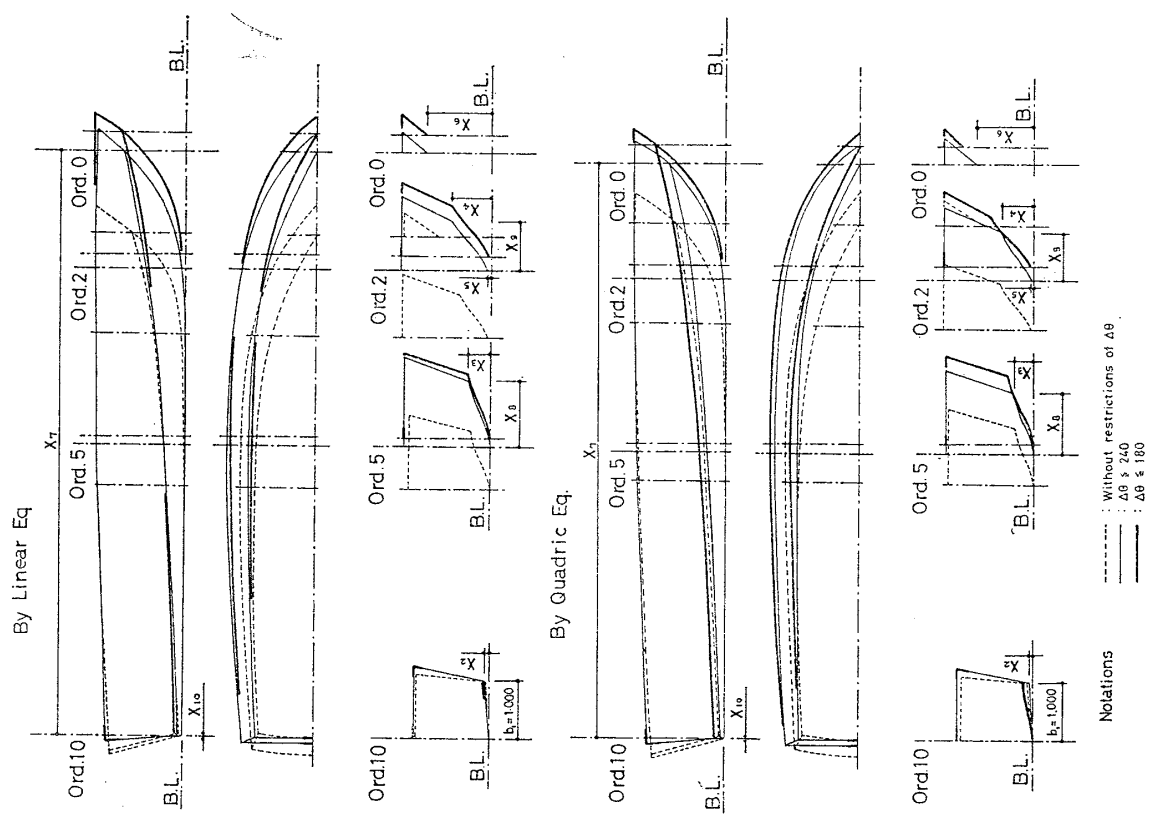


Fig. 6 Hull form parameters with smallest resistance through all range

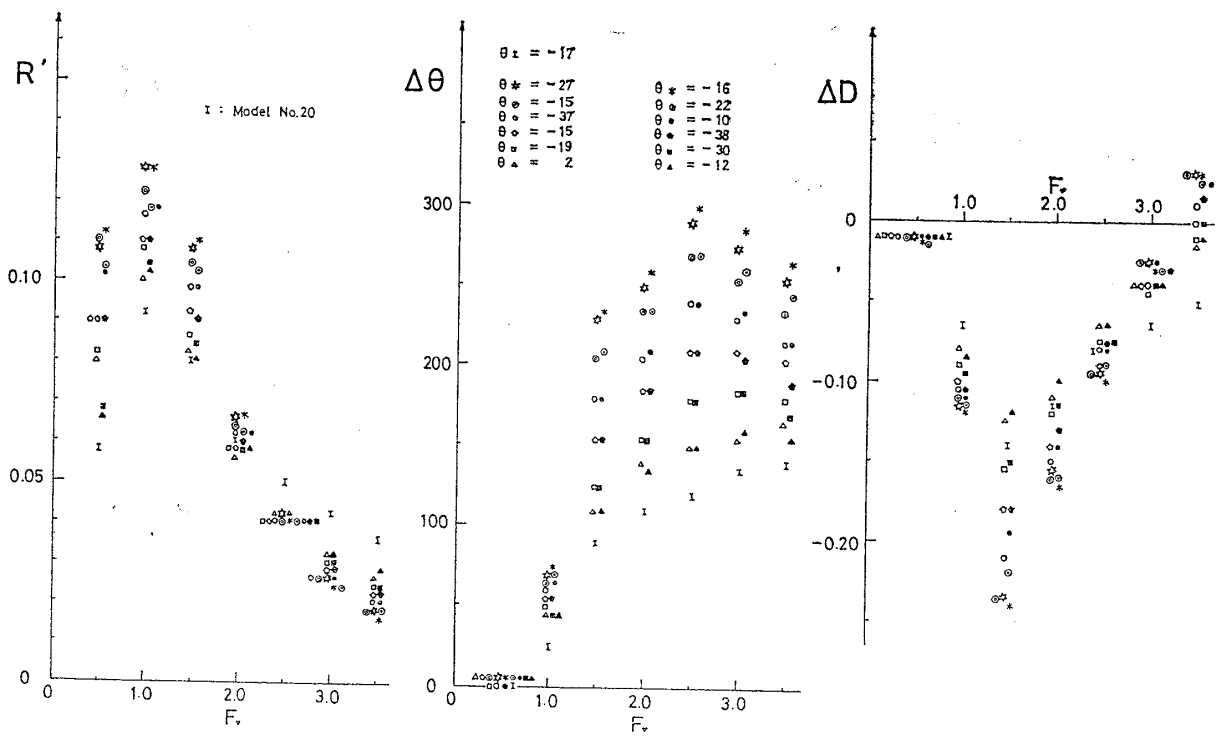


Fig. 7 Resistance performance with smallest resistance through all range

Table 2 Deviations of restrained hull form parameters from unrestrained hull form parameters

Propositions Kinds of cluster	Length increase	Ord. 5 width increase	∇ decrease	Ord. 10 chine high up	θ decrease	Ord. 0 keel high up	Transom L decrease	Note
Cluster of Model No. 1 through No. 6	⊙	○	○	⊙	⊙	○	x	Large initial trim
Cluster of Model No. 7 through No. 12	=	○	⊙	=	○	⊙	○	
Cluster of Model No. 13 through No. 18	○	⊙	x	○	x	○	⊙	
Cluster of Model No. 19 through No. 24	○	○	⊙	○	x	○		
Cluster of Model No. 25 through No. 30	⊙	○	⊙	○		=	=	
Cluster of Model No. 31 through No. 36	○	⊙	x	⊙	○	○	=	Large shapes
Cluster of Model No. 37 through No. 42	⊙	○	⊙	⊙	x		○	
Cluster of Model No. 43 through No. 48	=	=	⊙	○	x	=	=	
Cluster of Model No. 49 through No. 54	○	=	○	⊙		○		High chines
Cluster of Model No. 55 through No. 60	○	=	⊙	⊙		○	⊙	Small initial trim
Cluster of Model No. 61 through No. 66	⊙	=	⊙	⊙	=	⊙	x	Low chines
Cluster of Model No. 67 through No. 72	=	○	⊙	○	=	=	○	Small shapes
Cluster of Model No. 73 through No. 78	○	○	=	⊙	x	x	○	
Without restrictions co- ncerning cluster	⊙	⊙		○	○	○	○	

Notations

⊙ : Clearly yes

○ : Yes

= : No change

x : No

X : Clearly no

Left notation of square bracket : By Lin. Eq.

Right notation of square bracket : By Quad. Eq.

差は不変とみなされるか、仮説とは逆の傾向となるかなどについて、船型の種類ごと検討を行なった結果を示している。

たとえば、初期仰角の大きい実験模型 No. 1 から No. 6 を含むクラスターの船型では、 $\Delta\theta_{Fr=2.5}$ を減少させた場合、Table 2 第1行目の各欄に示すごとくなる。ここで欄の左側は一次式による結果を、右側は二次式による結果をそれぞれ示しており、双方の実験式によって同一の結果ならば、仮説の検証ははっきりしているとみなしてよいであろう。さて、项目的に検討すると Table 2 の示すところは、

- (a) 全長は長くなること、
- (b) 排水容積は減少すること、
- (c) 一次式によると船尾 Ord. 10 における chine の高さは不変であるが、二次式では chine の高さは上昇していること、
- (d) 初期仰角は一次式では不変であるが、二次式ではどちらともいえないこと、
- (e) 船首 Ord. 0 における keel の高さは一次式では上昇するが、二次式では下降すること、
- (f) 艇中央部の幅と transom の後方へのわん曲度についてはどちらともいえないこと、

などである。

総括してみると、 $\Delta\theta_{Fr=2.5}$ を減少させることによって、全長が長くなって排水容積の小さい船型となることが、chine が高い船型となることがその総論である。

他のクラスターについても、同様の検討を行なった (Table 2 参照)。

以上で船型の検討を終るが、前述の (a) から (f) までの項目について、一次式による結果と二次式による結果とがたとえ矛盾していても、抵抗性能に関しては、双方の式による結果は同一の傾向となっている。すなわち、フルード数ごとに、 R' 、 $\Delta\theta$ および ΔD の値を調べた結果、双方の式では $\Delta\theta_{Fr=2.5}$ に関する逐次の制約条件に対して、抵抗性能は Fig. 7 に示すような傾向を示し、しかもどちらの式で求めても R' 、 $\Delta\theta$ および ΔD の値はほぼ同じである。

ここで特に重要なことは、フルード数 2.5 における $\Delta\theta$ とフルード数 3.5 における R' であり、この関係を次章で述べることにする。

3 最大トリム単位角が抵抗係数に与える影響

フルード数 2.5 において最大トリム角を制限して、第2章に示した方法によって、フルード数 3.5 で最小抵抗となる船型を求め、その R' を記入していくと、Fig. 1

Table 3 The rate of increase for R' with restriction at unit angle

Kinds of cluster \ Kinds of Eq.	By lin. eq. (/deg)	By quad. eq. (/deg)
Cluster of Model No. 1 through No. 6	0.00336	0.00655
Cluster of Model No. 7 through No. 12	0.00884	0.00232
Cluster of Model No. 13 through No. 18	0.00384	0.00394
Cluster of Model No. 19 through No. 24	0.00348	0.00633
Cluster of Model No. 25 through No. 30	0.00470	0.00485
Cluster of Model No. 31 through No. 36	0.00345	0.00569
Cluster of Model No. 37 through No. 42	0.00329	0.00530
Cluster of Model No. 43 through No. 48	0.00287	0.00597
Cluster of Model No. 49 through No. 54	0.00423	0.00445
Cluster of Model No. 55 through No. 60	0.00526	0.00581
Cluster of Model No. 61 through No. 66	0.00314	0.00454
Cluster of Model No. 67 through No. 72	0.00505	0.00239
Cluster of Model No. 73 through No. 78	0.00449	0.00382
Without restrictions concerning cluster	0.00333	0.00428

から Fig. 4 に示す曲線が得られる。ここで、横軸にはフルード数 2.5 における $\Delta\theta$ をとっている。フルード数 2.5 において $\Delta\theta$ を制限すると、大部分の船型では、フルード数 3.0 と 3.5 とではフルード数 2.5 で制限した $\Delta\theta$ よりも小さいトリム角を示す船型が得られる。フルード数 3.0 と 3.5 において、フルード数 2.5 で制限した $\Delta\theta$ よりもいちじるしく大きなトリム角となるような船型となったときには、フルード数 2.5, 3.0 および 3.5 を通じて同一にトリム角 $\Delta\theta$ 以下となるように制約条件を与え、再度計算を行なっている。

Fig. 1 から Fig. 4 に示す曲線の右端は、文献 4) の R' すなわち、フルード数 2.5 における $\Delta\theta$ の制限がないときの抵抗係数であり、この点から、 $\Delta\theta$ を 270 分以下、240 以下など 30 分ごとに制限を強化して計算を行ない、左端はフルード数 2.5 において実験した模型 No. 1 から No. 78 までの $R'_{Fr=3.5}$ が散在する範囲までとして最適化計算を行なっている。2.2 (1) に述べた最小抵抗の船型の計算結果を Fig. 1 に $\triangle$, $\square$, $\diamond$, $\circ$, $\odot$ などで示した。また、Fig. 3 においても同様に $\blacktriangle$, $\blacksquare$, $\blacklozenge$, $\bullet$, $\odot$ などで示した。これらの点について放物線によって最小 2 乗法による補間を行なった。その結果は、図で太線によって示したごとく、 $\triangle$ 印、 $\square$ 印などの距離をみればわかるように、適切な曲線が得られたと思われる。また、 $\triangle$ 印、 $\square$ 印などについて直線による最小 2 乗法の補間を行ない、この直線で示される勾配を平均的

な勾配と考え、単位のトリム角あたりの抵抗係数の増分を求めると、Fig. 1 の場合には Table 3 最下行の左に示すように 0.00333/deg, Fig. 3 の場合には同表同行の右に示すように 0.00428/deg となる。

2.2 (2) で述べた、形態などに制限を付与した場合についても、3 点以上の計算値に対しては放物線により、2 点のみの場合には直線によってそれぞれ最小 2 乗法で補間を行ない、実験模型 6 隻からなるクラスターごとに Fig. 1 から Fig. 4 に示す曲線を得ているが、前記の場合と同様に補間がよい結果となっている。また、計算値に対しての平均的な勾配についても前記の場合と同様な方法で求め、Table 3 に示した。

Table 3 の数値は、形態の大きい船型から低い chine の船型など船型の種類ごとについて、最適化計算を行なった船型の範囲での最大トリム角 1 度の制限に対する抵抗係数の増加を示している。Table 3 において、一次式と二次式との場合について、増加率の平均値を計算すると、一次式では 0.00424、二次式では 0.00473 となっている。ここで、一次式による場合の増加率と二次式による場合の増加率とでは差がないであろうかということに関して、つぎの要領で検定を行なってみた。二通りの計測器による測定値に偏りがあるかを調べるときに、「対応ある 2 標本の有意差検定」を行なうが、その方法を適用して検定した結果、一次式による増加率と二次式による増加率とは 5% の危険率で差がないことが明らかとなった。

ここで、実験模型の測定値をも含めて考察し、一例として実験模型 No. 1 から No. 6 のクラスターを用い、Fig. 3 に示す二次式による計算結果をもとにして $\Delta\theta_{Fr=2.5}$ の制限に対する $R'_{Fr=3.5}$ の増加を説明するとつぎのようになる。すなわち、平水中最小抵抗の $R'_{Fr=3.5} = 0.018$, $\Delta\theta_{Fr=2.5} = 266$ の点から $\Delta\theta$ を制限すると、 R' が 0.00655/deg の割合で増加して、Fig. 3 において一点鎖線で示した曲線をたどる。そして、実験模型についての番号 No. 1 から No. 6 までの実測点を $\circ$ でマークすると、これらの 6 点の群と前述の鎖線とは一貫していることがわかる。いま、最大トリム角 $\Delta\theta_{Fr=2.5} = 240$ では曲線から $R'_{Fr=3.5} = 0.021$, 同じく $\Delta\theta_{Fr=2.5} = 120$ では曲線の延長とマークされた実測の 6 点とを勘案すると $R'_{Fr=2.5} = 0.038$ となり、最大トリム角をまえがきで述べたように 4 度から 2 度に制限するとおよそ 85% の抵抗係数の増加となっていることがわかり、抵抗を最小とするように船型を変換しているが、文献 2) の例と同様の傾向となっている。

4 数値計算上の問題点

今回は、実験式の適用範囲について、統計的に実験結

果が約 95% 存在する範囲としており、その範囲の外側は一次式では $\chi^2(11, 0.05)$ によって規定している⁵⁾。ここで適用範囲について若干補足すると、船型要素が例えば x のみであるならば、適用範囲は $(x-\bar{x})^2/\sigma_x^2 \leq \chi^2(1, 0.05)=3.84$ となり、平方根をとれば、この場合における x の適用範囲は、平均 $\bar{x}$ から標準偏差 σ_x の 2 倍以内となる。また、船型要素が x と y との二つになると、適用範囲の外側は $\chi^2(2, 0.05)$ で示され、二次元平面に展開してみるとつぎのようになる。すなわち、 x と y の相関が高いと細長い楕円、相関があまりないと円形に近い楕円によって、前述の一次元の場合と同様に適用範囲の限界を規定することができる。一次元の場合における適用範囲の限界を示す 2 点も、二次元における楕円周上も、平均点から標準偏差の 2 倍であるという確率的な距離すなわちマハラノビスの汎距離は同一である。船型要素がふえた場合においても、このような概念で多次元まで拡張し、2.1 制約条件(i)で述べた適用範囲は、14次元楕円体の内側であることを示している。

また、適用範囲を示す式は、与えられた船型要素の組が適用可能な船型要素の組から成る母集団に属するか否かを見分ける判別関数とも考えられるので、得られた船型からマハラノビスの汎距離を再び計算してみると、最小値を追求する問題の特性上、適用範囲の内側でしかもその最外側、すなわち判別限界一杯のところまで最小抵抗となる船型を得ている。適用範囲を拡張すれば、さらに抵抗の少ない船型を得ることも考えられるが、今回は一応実験結果が統計的に約 95% 存在する範囲で計算した。

以上、主として一次式の場合について述べたが、二次式では独立した船型要素は 11 であり、二次の項は 11 個のうちから、全長×全長、全長×初期仰角、初期仰角×初期仰角を抽出して、これを独立した船型要素と同等に扱って適用限界を $\chi^2(14, 0.05)=23.68$ としている。実験模型 78 隻についてマハラノビスの汎距離を求めると判別値 23.68 を超えるものもあるが、最適化計算を行なった船型については、ほとんどの場合 23.68 の近傍となっている。ところで、二次式の場合の特色としては、一次式の場合に比べて、非負化された項を相乗していることと、前述したように二次の項を独立した船型要素と同等に扱っていることが挙げられる。そこで、得られた船型について一次式の適用範囲に換算すればどうなっているか、一応検討しておく必要がある。そこで、得られた船型について一次式の場合に用いた B^{-1} ⁵⁾ を用いてマハラノビスの汎距離を求めると、ほとんどの場合、およそ $\chi^2(11, 0.025)$ になっている。この $\chi^2(11, 0.025)$ の意味するところは、適用範囲の限界を、実験結果が統計的に約 95% 存在する区域から約 97.5% 存在する区域まで拡張したところに船型を得ていることである。

なお、二次式での計算において、文献 5) に述べるような一次式の適用範囲で規定すると、実現不可能な船型となるので、必ず二次式による B^{-1} を計算して演算を行なう必要がある。

また、文献 4) p.58 Fig. 3 に示す形態の小さい船型すなわち⑧のクラスターでは、 $R'_{Fr=3.5}=0.026$ とでているが、この値から $\Delta\theta_{Fr=2.5}$ に対して制限条件を付与して計算を行なってみると、下記のような常識に反する結果を得たので、収束定数と振動パラメータのとり方で $R'_{Fr=3.5}$ の小数第 3 位の数値がどうなるか検討を加えた。

すなわち、文献 4) p.58 Fig. 3 に示す全クラスターについて、収束定数と振動パラメータを本論文の第 2 章のとおり定めた結果得られた最適解としては、他のクラスターと同様、⑧のクラスターも制約条件を満足した正しい解とみなしうる。しかし、⑧のクラスターについて $\Delta\theta_{Fr=2.5}$ の条件を追加して計算したところ、 $\Delta\theta_{Fr=2.5}$ の条件によって $R'_{Fr=3.5}$ がわずかに低い値となる船型を得た。このことは一般の常識とは反するので、今回は、収束定数を 10^{-6} 、振動パラメータも 10^{-6} として計算を試みた。それでも得られた船型では、艇前部 Ord. 2 における keel line の高さが base line⁵⁾ よりわずかではあるが下方になる船型を得たので、「Ord. 2 における keel line が base line よりも上方となること」という制約条件をさらに追加して計算を行なってみた。その結果、文献 4) では $R'_{Fr=3.5}=0.026$ であったのが、今回では $R'_{Fr=3.5}=0.024$ となってやや低い抵抗係数となった。そして収束定数と振動パラメータのとり方を変更して $\Delta\theta_{Fr=2.5}$ の制限を逐次強化して計算した結果、常識的な $R'_{Fr=3.5}$ を推定することができた。

また、全艇について Ord. 2 における keel line の条件を当初から設定しておく必要を認めた。

このように、艇前部 Ord. 2 における keel line が base line よりも低くなった例は、実験模型 No.7 から No.12 のクラスターについて二次式で $\Delta\theta_{Fr=2.5} \leq 240$ という制約条件を付与した場合にも現われ、同様の制約条件を付与して解決を行なっている。

ま と め

オメガプラン型高速艇の試験結果を分析し、最適化計算を試みた結果、つぎの成果をえた。まず、

(1) 高速域フルード数 3.5 における抵抗係数とフルード数 2.5, 3.0 および 3.5 におけるトリム角との相関関係では、フルード数 3.5 の抵抗係数とフルード数 2.5 のトリム角とは最も強い逆相関関係にあることがわかった。そこでつぎに、

(2) フルード数 2.5 におけるトリム角について 30

分おきに制限を付与して、フルード数 3.5 において最小抵抗となる船型を逐次求めた。その結果、フルード数 2.5 においてトリム角を小さくすると、概して全長が長く、排水容積の小さくなる船型となることがわかった。またこれらの船型について、

(3) フルード数 2.5 におけるトリム角とフルード数 3.5 における抵抗係数との関係を図示することによって、(a) (2) で述べた最適化計算を行なった範囲では、最大トリム角 1 度の制限に対して抵抗係数がおおよそ 0.004 増加すること、(b) (1) で述べたフルード数 3.5 の抵抗係数とフルード数 2.5 のトリム角との実測値を図示した範囲から最適化計算を行なった範囲まで含めて考察すると、たとえば実験模型 No. 1 から No. 6 のクラスターでは、トリム角を 4 度から 2 度にすると抵抗係数がおおよそ 85% 増加し、Clement らの実験と傾向が一致していることがわかった。

終りに臨み、本研究を行なうにあたり、絶えず激励を賜わり、種々の御教示と有益なご意見、活発なご討論をいただきました田宮 真教授、丸尾 孟教授、田村欣也室長はじめ試験水槽委員会第 1 部会関係各位、寺沢一雄名誉教授、丹羽誠一専務理事、高橋幸伯教授はじめ船舶用軽金属委員会関係各位、日本鋼構造協会最適化委員会関係各位に厚く御礼申し上げます。

また種々討論していただいた防衛技研第 3 部田中宏績、新谷 厚両室長、日本鋼管株式会社津研究所杉田進一研究員に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 吉田 靖, 永井 保: 高速艇の平水中水槽試験結果に関する主成分分析と因子分析, 日本造船学会論文集, 第 140 号, (昭和 51 年 12 月).
- 2) Clement, Eugene P. and Donald L. Blount: Resistance Tests of a Systematic Series of Planing Hull Forms, Trans. SNAME, Vol. 71, (1963).
- 3) Sottorf, W.: Versuche mit Gleitflächen, IV Teil Analyse, Werft Reederei Hafen, 19 Jahrgang Heft 5, (1938).
- 4) 吉田 靖, 田中宏績, 永井 保: 高速域において抵抗が最小となる高速艇船型, 日本造船学会論文集, 第 140 号, (昭和 51 年 12 月).
- 5) 永井 保, 田中宏績, 吉田 靖: 高速艇に関する平水中水槽試験結果の統計解析, 日本造船学会論文集, 第 137 号, (昭和 50 年 6 月).
- 6) 山本善之, 小山健夫共訳: 非線形最適化問題, 培風館, (昭和 48 年 4 月).
- 7) Zangwill, Willald I.: Minimizing a Function without Calculating Derivatives, Computer Journal, (Oct. 1967).