

肥大船の形状影響係数の簡易推定

正員 笠原 良和*

A Simple Prediction Method for the Form Factor of Full Form Ships

by Yoshikazu Kasahara, *Member*

Summary

An efficient hull form design needs to incorporate some prediction methods which will be able to predict the influence of hull form modification on the ship performance. This paper presents a new and simple prediction method for the form factor which relates directly to the hull form. Six flow-field parameters which have influences on the form factor are proposed on the basis of the result of double-model flow calculation and 3-dimensional boundary layer calculation around the hull form. A regression equation to predict the form factor is made by using 7 parameters (6 flow-field parameters and displacement-length ratio) and model test results in a towing tank. In order to adopt the minimum Akaike Information Criterion (AIC) estimate method in a regression analysis, 7 parameters are selected among many variations.

Predicted results for the form factor of full form ship at full load condition by the present regression equation show good agreement within 2% with tank test results. At ballast condition, predicted results show good agreement within 3%. Since flow-field parameters in the present regression equation act as intermediary between actual hull form and ship performance, a designer can easily obtain an information of how to modify the hull form according to the flow-field parameter in order to improve ship performance.

1. 緒 言

効率の良い船型設計を行うためには、船体形状の部分変更が及ぼす推進性能への影響を確かめることが可能な、船体形状と直接に結びついた推進性能予測法が必要とされている。低速肥大船の船体抵抗の大部分は、粘性抵抗成分であり船型改良には粘性抵抗を減少させることが抵抗面からの一つのアプローチである。簡易的に計算から粘性抵抗を推定する方法には、境界層計算、粘性流場計算、二重模型流れの計算を利用した種々の手法が提案されている¹⁾。これらの流れ場の計算は流れの剝離を含む場合には対応できないため、計算のみでは直接に粘性抵抗を推定することが困難であり、推定値と食い違う実験値を得ることが少な

くない。最近、Computational Fluid Dynamics(CFD)を用いて形状影響係数を船型設計の場で利用できる精度で計算できるようになっている²⁾。しかし、格子生成から計算結果を得るまでの時間は、まだ実用的ではない。

一方、船型要目と形状影響係数の水槽試験結果とを統計解析して回帰式を作り、形状影響係数を予測する例³⁾もあるが、船型のフレームライン形状の違いまで表現できない。1990年に入って、森⁴⁾やYamano⁵⁾が船型の主要目と横切面積曲線の特性和関連させた幾何形状パラメータを使う推定法を提案している。

ここでは船体まわりの二重模型流れの計算と微小二次流れ境界層理論に基づく奥野法による境界層計算から得られる船型の流場特性を反映するパラメータ群と形状影響係数の水槽試験結果とを最小AIC(Akaike Information Criterion)法⁶⁾により統計解析を行って回帰多項式をつくり形状影響係数を推定することにした。最小AIC法の注目点は回帰式の作成にあたって、与えるパラメータ(説明変数)の全てが目的変数の予測に重要であるとは限らないこ

* (株)ジャパンテクノメイト第一開発部

原稿受付 平成11年7月9日

秋季講演会において講演 平成11年11月18, 19日

とを指摘してくれることにある。必要以上のパラメータ(説明変数)を用いたモデルは近似度を高めるが、どのパラメータが真に効いているのか、わからなくなるおそれがある。最小 AIC 法では、AIC 値を最小とするモデルに用いられているパラメータ群が、目的変数を再現するに十分なパラメータであることを示す。ここで提案する手法は、船体形状と直接に結びついた推定を行うためと船型検討に要するサイクルタイムを極力小さくするために、二重模型流れの計算と 3 次元境界層理論などの解析理論計算を主に採用し、これらのパラメータと水槽試験結果を最小 AIC 法により統計解析をおこない、形状影響係数推定の回帰式をつくるものである。本推定法の特徴は、流場の計算結果を流場特性を表すパラメータ群としてまとめ、計算法の限界から計算結果に表現されない幾何形状特性も加えて、水槽試験結果と統計解析をおこない回帰多項式を作ることにある。船体まわりの流場特性をパラメータとするために、形状のどの部分(どのパラメータ)が原因で見込みと異なったのか把握できるという特徴をもつ。つまり、流場特性パラメータを介して船体形状と形状影響係数が結びついているために実際の船型改良においては、流場特性パラメータに着目して形状変更を行えば良いという非常に有効な Tool となっている。

満載状態の形状影響係数の推定とともにバラスト状態の形状影響係数の推定を行った結果を報告する。

2. 肥大船の形状影響係数の下限値

推定の精度を上げるには、推定する値の上限値と下限値を、あらかじめ知っておくことが重要である。形状影響係数を船型設計の場で推定する場合は、形状影響係数をいかに減らすかという立場であり、この場合は下限値を認識することが重要である。

形状影響係数は、摩擦抵抗と形状抵抗の和である粘性抵抗成分のうちの形状抵抗に相当する。形状抵抗が生ずる原因を、ここでは以下の 3 種と考える。

第一に、船体表面圧力分布の不均一性から生ずる二次流れ(主流方向と直交する方向の流れ)による抵抗増加である。二番目は、船首部、船尾部のビルジ部における三次元剥離による抵抗増加。三番目は、造波によって船体表面の水面付近の圧力が変化することによる抵抗増加である。形状抵抗の大部分は、二次流れと三次元剥離に起因すると考えられる。二次流れを抑制できれば、三次元剥離も防止できる。この考えに従って、二種類の船型をつくり水槽試験によって形状影響係数を求めた。

通常船型の母型船(Model-C)として、VLCC 船型を選んだ。 $L_{PP}=326.4$ m, $L/B=6.0$, $B/d=3.0$, $C_B=0.80$ という要目をもつ。形状影響係数は $1+K=1.206$ と VLCC においては低い値をもつ船型である。

Model-C と同じ横切面積曲線(C_P カープ)をもち、断

面形状が半円である回転体の船型(Model-R)をつくった。各断面位置で母型船と同じ横切面積をもつ半円の断面形状となるために、喫水と半幅は等しく、喫水は船の長さ方向に変化し中央で最も深く船首尾端に向かって浅くなっている。もう一つの船型(Model-E)は、 C_P カープだけでなく水線面形状も母型船と同じにするために、断面形状に半楕円を選んだ。Model-R と Model-E の正面線図を、Fig. 1, 2 に示す。Fig. 1, 2 に破線で、通常船型の中央横断面形状を示している。3 隻の主要目を Table 1 に示す。

水槽試験に先立ち、母型船を含めて計 3 隻について二重模型流れの計算を実施して船体表面圧力分布の均一性を調べた。側面からみた船体表面圧力分布を、Fig. 3, 4 に示す。断面形状が半円である Model-R の圧力分布は、船首尾部で喫水方向(Frame Line 方向)に均一である。船首

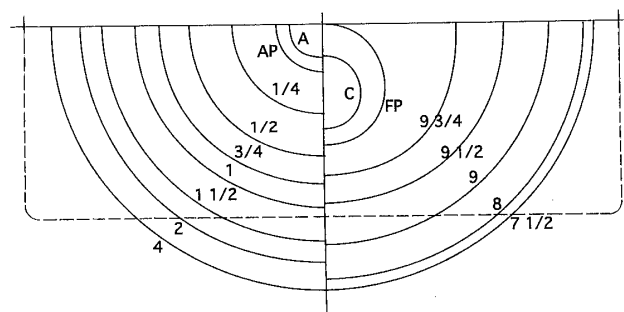


Fig. 1 Body Plan of Model-R

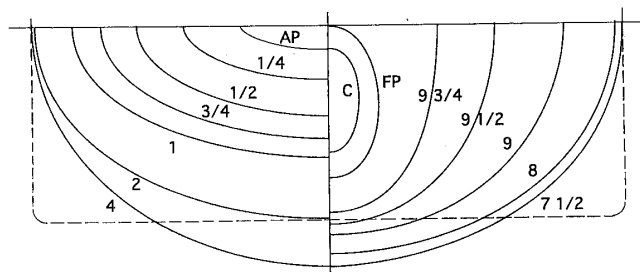


Fig. 2 Body Plan of Model-E

Table 1 Principal Dimensions of 3 Models and Measured Form Factors

	Model-C	Model-R	Model-E
Hull Form	conventional	revolution of body	ellipsoid
$L_{pp}(m)$	326.4		
$B(m)$	54.4	50.08	54.4
$d(m)$	18.13	25.04	23.051
C_p	0.8014		
C_B	0.8003	0.6293	.6294
$1+K$	1.206	1.123	1.127

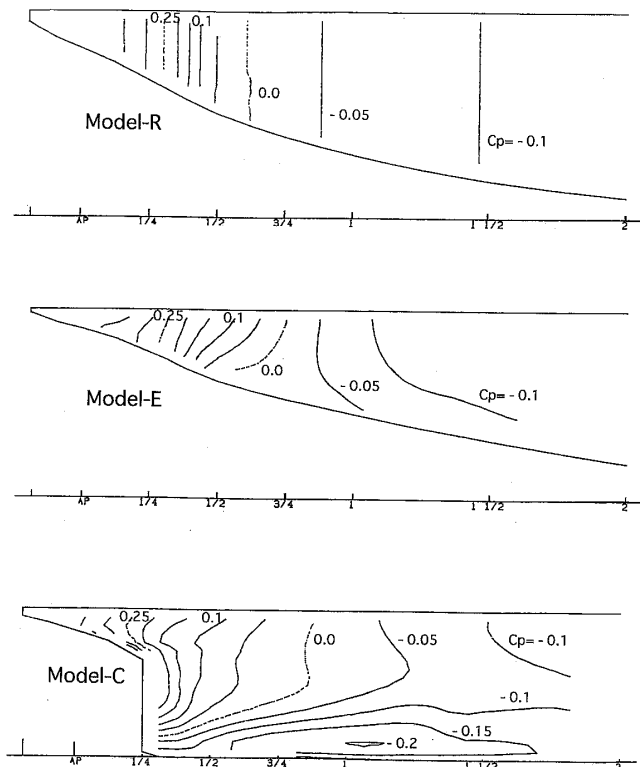


Fig. 3 Calculated Hull Pressure Distributions at Aft body

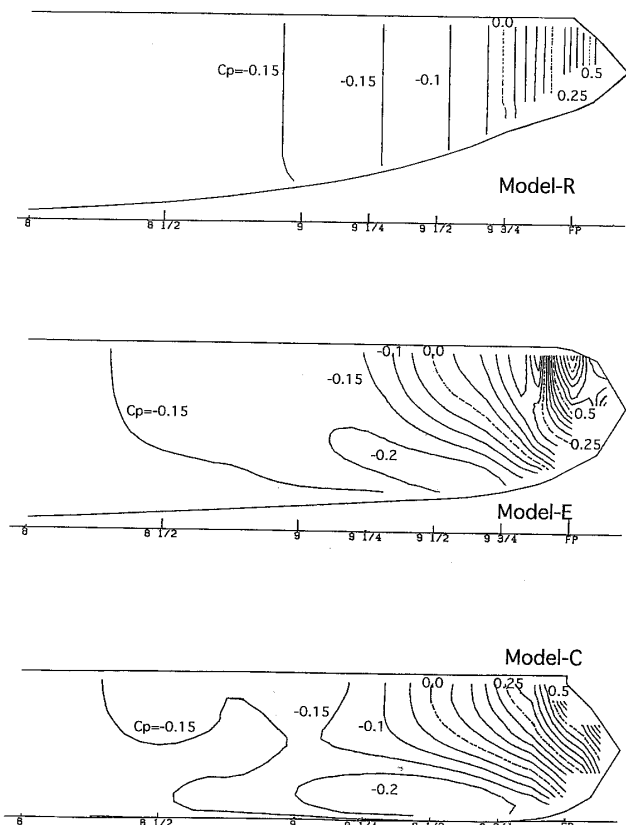


Fig. 4 Calculated Hull Pressure Distributions at Fore body

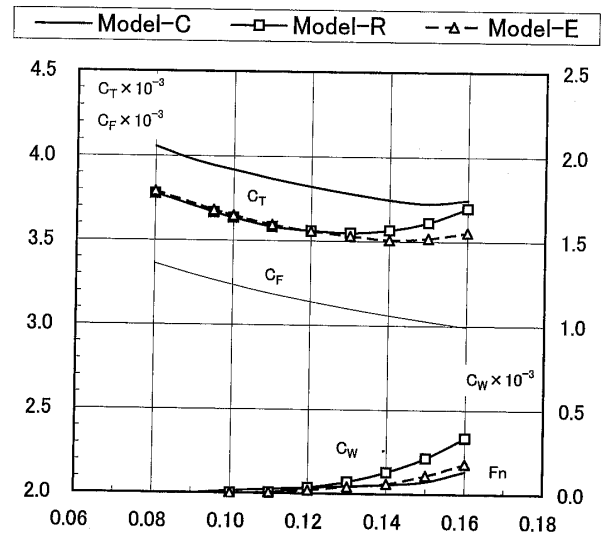


Fig. 5 Resistance Test Results

部については、通常船型 Model-C と半楕円の断面形状をもつ Model-E が、よく似た分布形状になっている。船首形状の流場特性が、 C_p カーブと水線面形状によって、ほぼ依存していることがわかる。船尾部の圧力分布は、通常船型 Model-C だけに低圧が島状に現れる分布形状をもち、形状抵抗の差に現れることが推測できる。

$L_{PP}=7.68$ m の模型船で、NKK 津水槽において抵抗試験を実施した。3 隻の抵抗試験結果を Fig. 5 に示す。二次流れを抑制した二船型の Model-R が $1+K=1.123$ 、Model-E が $1+K=1.127$ と低い下限に近い値が得られた。造波抵抗係数は、通常船型の Model-C と Model-E が低く、 $Fn=0.15$ 付近では喫水と半幅が同じである Model-R のほぼ $1/2$ となっている。

3. 流場パラメータによる形状影響係数の推定

3.1 満載状態の形状影響係数の推定

3.1.1 形状影響係数を推定するためのパラメータ

AIC を最小とするモデルに用いられているパラメータ群として、試行錯誤して 7 個を選んだ。H & S 法による二重模型流れの計算から船首尾で 4 パラメータ、境界層計算から 2 パラメータ、主要目から 1 パラメータの計 7 個である。

(1) 二重模型流れの計算からのパラメータ

船尾形状に基づく流場を表現するパラメータとして二重模型流れの計算によって求めた圧力係数 (C_p) を用いて式(1)と式(2)の 2 パラメータを選んだ。

$$P_1 = \Sigma C_{PA} = \int_{S.S.1/2}^{S.S.2} \int_0^{d/3} C_p \cdot dz \cdot dx \quad (1)$$

$$P_2 = \Delta C_{PA} = \int_{S.S.3/4}^{S.S.11/2} |C_{pmin} - C_{py=0}| dx \quad (2)$$

二重模型流れの計算から船尾部断面のフレームライン方向の圧力変化量 ΔC_{PA} を求めるために C_{pmin} は船底から $1/3$

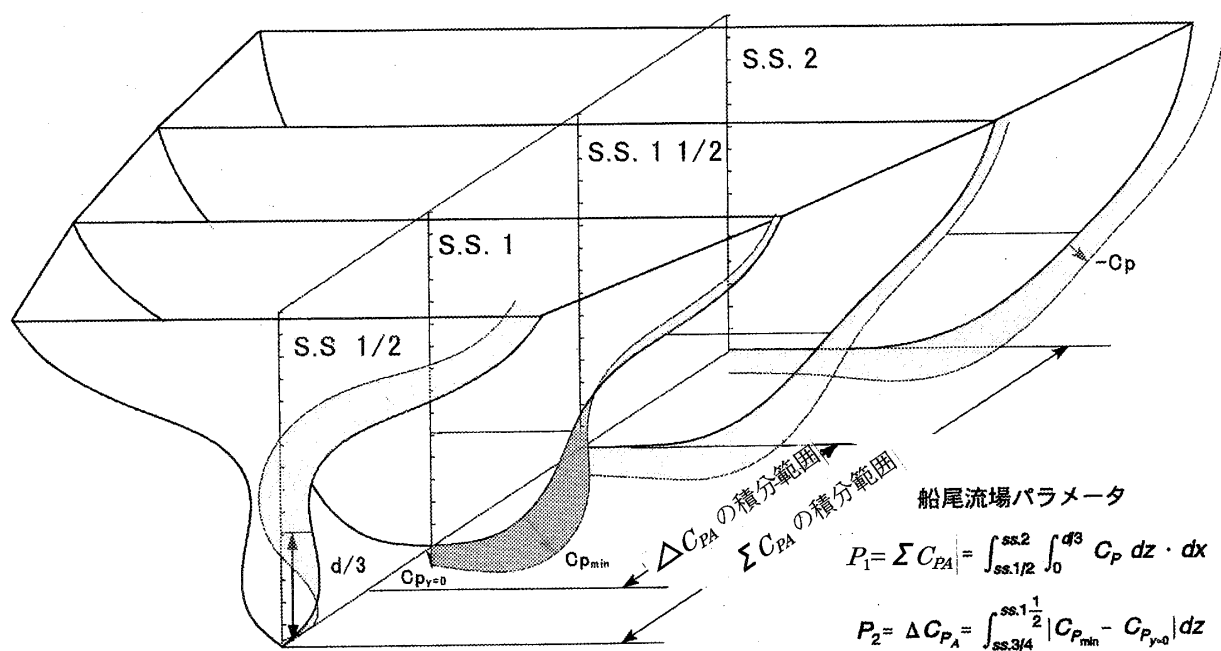


Fig. 6 Flow-field parameters ΔC_{pa} and ΣC_{pa}

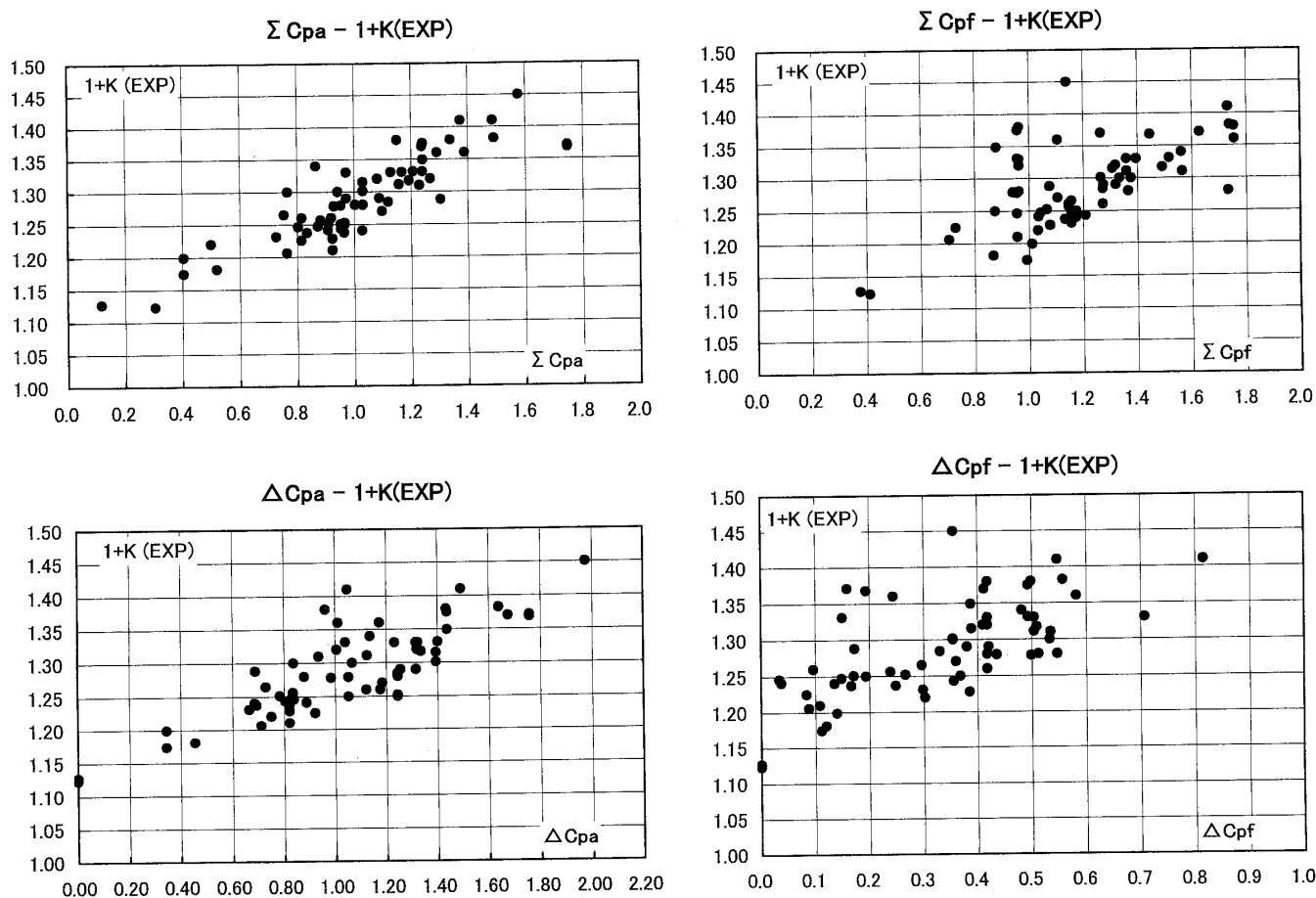


Fig. 7 Correlation of Measured 1+K with Flow-field Parameters-Double Model Flow (Full Load Condition)

喫水までの圧力係数の最小値をとり、船底部の船体中心線上の圧力係数 $C_{P_{y=0}}$ との差をとった。このパラメータ $P_2(\Delta C_{PA})$ が大きいと、船底から上昇して船尾船側へ回り込む流れが圧力勾配の強さに負けてビルジ部で剥離しやすくなり、形状影響係数の増加に直接に影響する。パラメータ $P_3(\Sigma C_{PF})$ は船尾部の横切面積曲線の勾配（傾斜）に関連し、勾配が急であると形状影響係数の増加に結びつく。Fig. 6 に、船尾フレームライン上の圧力分布と流場パラメータの積分範囲を示す。

船首形状に関しては式(3)と式(4)の2パラメータを選んだ。

$$P_3 = \Sigma C_{PF} = \int_{S.S.83/4}^{S.S.91/2} \int_0^{d/3} C_P \cdot dz \cdot dx \quad (3)$$

$$P_4 = \Delta C_{PF} = \int_{S.S.9}^{S.S.91/2} |C_{P_{max}} - C_{P_{min}}| dx \quad (4)$$

二重模型流れの計算から船首部断面のフレームライン方向の圧力変化量 ΔC_{PF} を求めるための $C_{P_{max}}$ と $C_{P_{min}}$ には船底から 1/3 喫水までの圧力係数の最大値と最小値をあてる。このパラメータ $P_4(\Delta C_{PF})$ が大きいと、船首部船側から船底へ回り込む流れが強くなり、船首部形状に起因する粘性抵抗の増加をもたらす。同じ船尾形状をもち、船首形状が異なったために形状影響係数も異なった事例を、著者ら²⁾ が既に提示している。パラメータ $P_3(\Sigma C_{PF})$ は船首部の横切面積曲線の勾配（傾斜）に関連している。

式(2)と式(4)の船首尾の圧力変化量 ΔC_{PA} , ΔC_{PF} の概念は、呉ら⁷⁾ が船尾剥離渦および船首船底渦の循環を算出した際の被積分量として、既に示している。本論文の特徴はフレームライン方向の圧力変化量を船底から 1/3 喫水までのビルジ部に限定したこと、および船長方向の積分範囲を形状影響係数の増減と相関の強い領域に限定したことにある。

(2) 主要目パラメータ

主要目パラメータとして排水量 ($Disp.$)・長さ (L_{PP}) 比を選んだ。

$$P_5 = \frac{Disp.}{L_{PP}^3} \quad (5)$$

パラメータ P_5 は方形係数 C_B に代わって肥大度の違いを顕著に表すとともに、形状影響係数を妥当に推定できる要目の範囲を示す。極端に小さい P_5 値をもつ船型の推定値は、精度が悪くなる。

(3) 境界層計算からのパラメータ

境界層計算から船尾形状に関するパラメータとして式(6)と式(7)の2パラメータを加えた。

$$P_6 = C_{VOR_{max}} \quad (6)$$

$$P_7 = \int_0^{d/3} (y + \delta^*) \cdot d(girth), \text{ at } S.S.1/2 \quad (7)$$

パラメータ $P_6(C_{VOR_{max}})$ は姫野ら⁸⁾ による船尾の二次流れによる抵抗増加を表すパラメータである。 $C_{VOR_{max}}$ は境界層計算が通常 s.s. 1/2 付近で発散し、それより後方の流場

特性を $C_{VOR_{max}}$ だけでは把握できない。特に船尾バルブ形状の影響を形状影響係数に反映させることを目的に P_7 を選択した。 P_7 が大きいと船尾後流の幅が広がり、いわゆる後流抵抗の増加に結び付けた。

以上の7個のパラメータと形状影響係数の実験値との相関を Fig. 7, 8 に示す。

二重模型流れの計算からの流場パラメータは、良好な相関を示している。特に船尾のビルジ部の流場特性を表現する

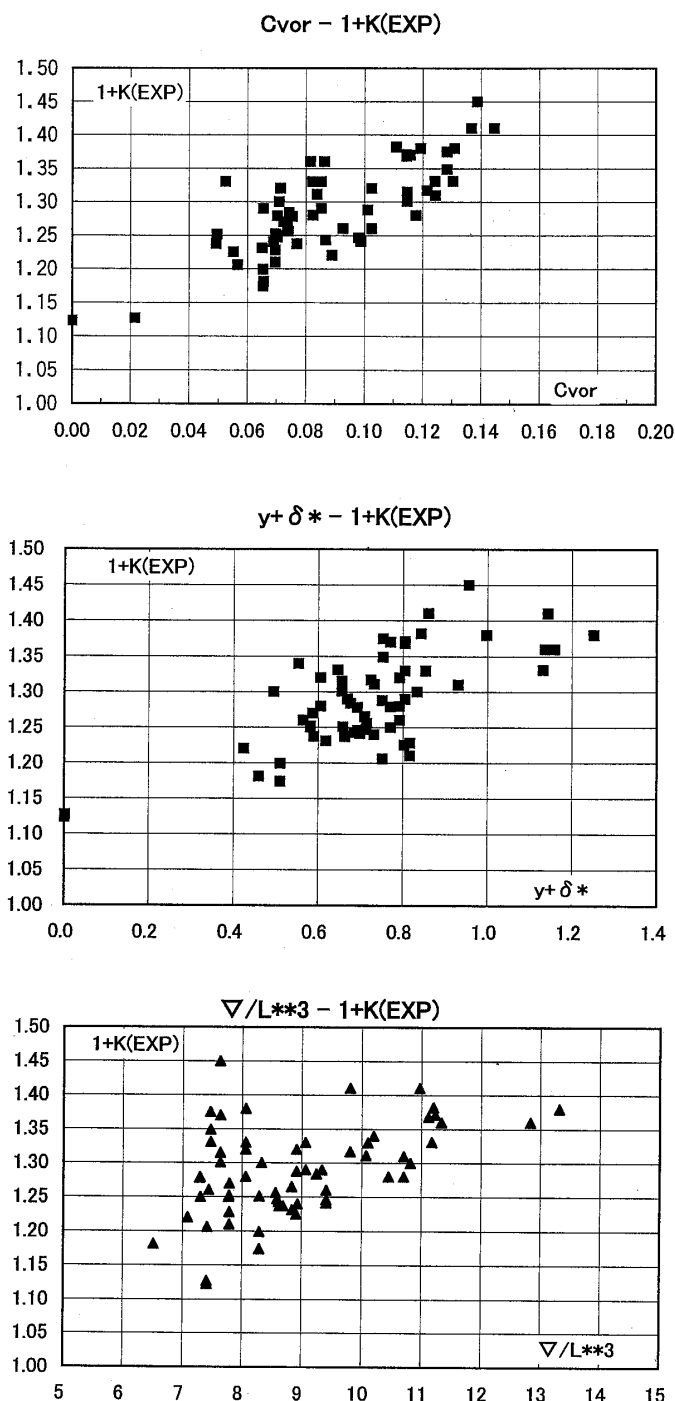


Fig. 8 Correlation of Measured 1+K with Flow-field Parameters—3-Dim. Boundary Layer (Full Load Condition)

$P_1(\Sigma C_{PA})$ と $P_2(\Delta C_{PA})$ の相関は強い。

3.1.2 推定式の作成と推定精度

P_1 から P_7 までの7個のパラメータを用いて式(8)の回帰多項式により肥大船32隻の水槽試験結果を用いて、パラメータの貢献度をAIC値に基づいて調べた。

$$1+K=a_0+a_1\cdot P_1+a_2\cdot P_2+a_3\cdot P_3+a_4\cdot P_4+a_5\cdot P_5+a_6\cdot P_6+a_7\cdot P_7 \quad (8)$$

AIC値が高く近似度の良いパラメータの組み合わせを探すために用いた水槽試験結果は、6Mから9Mまでの垂線間長をもつ模型船によるものであり、 C_B は0.8以上0.82未満が16隻、0.82以上が16隻である。試験水槽は、NKK津水槽において22隻、日本造船技術センターにおいて10隻の結果である。Table 2にパラメータの組み合わせとAIC値を示す。

Table 2は用いたパラメータの数ごとに分けて、AIC値の低い順に並べている。◎印のパラメータの組み合わせが、使ったパラメータ数が同じであれば最もAIC値が小さく、形状影響係数の推定に有効なパラメータの組み合わせ

せであることを示している。Table 2からは以下のことがわかる

① AIC値が最も小さいのは、6個のパラメータを用いたモデル7Aであり、7個のパラメータのモデル8Aは、わずかにモデル7AよりAIC値が大きい。これは、要目のパラメータ $P_5(\nabla/L^3)$ の違いが少ない船型の形状影響係数の試験結果に基づいていることを示している。

② ◎印のパラメータの組み合わせから、形状影響係数の推定に有効なパラメータの第一は、

$$P_2(\Delta C_{PA}) \text{ と } P_7(y+\delta^*)$$

であり、次に有効なパラメータを順に並べると、

$$P_4(\Delta C_{PF}), P_1(\Sigma C_{PA}), P_6(C_{VORmax}),$$

となり、近似度には貢献しているがあまり有効でないのが

$$P_3(\Sigma C_{PF}), P_5(\nabla/L^3),$$

となる。通常には粘性抵抗は船尾形状に起因すると理解されているが、第三番目に船首部のビルジ部まわりの流場パラメータ $P_4(\Delta C_{PF})$ を主要なパラメータとして取り上げているのが本推定法の特徴でもある。

Table 2 Regression Models and AIC Values

Model	Double Model Flow Calculation				3-Dim.BL Cal.	Disp. - Length				
	Fore-part		Aft-part							
	ΣC_{PF}	ΔC_{PF}	ΣC_{PA}	ΔC_{PA}			C_{VOR}	$y^+ \delta^*$	∇ / L^3	10^3
	P_3	P_4	P_1	P_2			P_6	P_7	P_5	AIC
8A	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	-184.9	0.103	8
7A	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙		-185.0	0.110	7
7B		○	○	○	○	○	○	-178.2	0.136	7
7C	○	○		○	○	○	○	-172.6	0.161	7
7D	○	○	○		○	○	○	-161.4	0.229	7
6A		⊙	⊙	⊙	⊙	⊙		-177.5	0.147	6
6B		○		○	○	○	○	-170.9	0.181	6
6C	○	○		○	○	○		-170.7	0.182	6
6D	○	○	○		○	○		-163.3	0.229	6
6E			○	○	○	○	○	-146.9	0.383	6
6F	○	○	○	○			○	-145.2	0.404	6
5A		⊙	⊙	⊙		⊙		-174.5	0.172	5
5B		○		○	○	○		-172.6	0.183	5
5C		○		○		○	○	-163.7	0.241	5
5D	○	○		○		○		-163.6	0.242	5
5E	○	○	○	○				-142.9	0.463	5
5F			○	○	○	○		-140.2	0.537	5
4A		⊙		⊙		⊙		-165.5	0.243	4
3A				⊙		⊙		-140.1	0.572	3
3B		○		○				-114.0	1.294	3
3C		○				○		-108.3	1.546	3

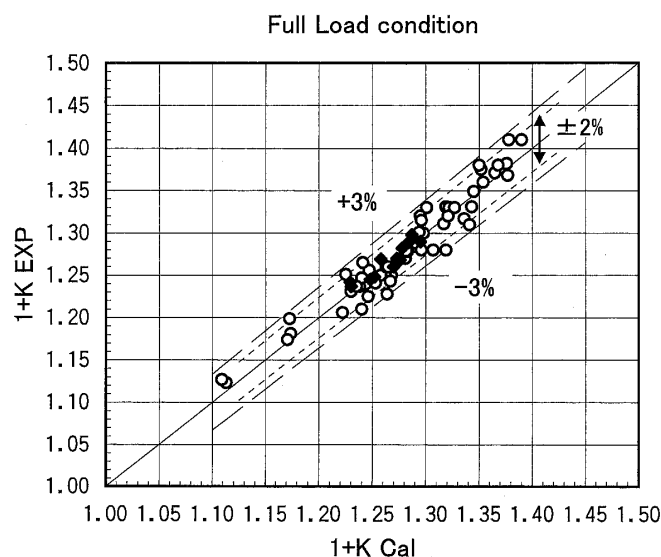


Fig. 9 Correlation of Measured $1+K$ with Estimated $1+K$ (Full Load Condition)

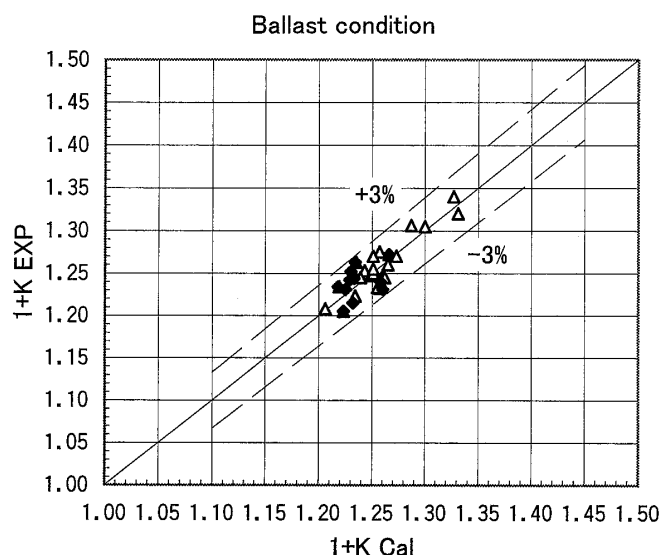


Fig. 10 Correlation of Measured $1+K$ with Estimated $1+K$ (Ballast Condition)

- ③ 船尾形状の流場に関するパラメータのみを用いたモデル 6E は、パラメータ数が 2 個少ないモデル 4A よりも AIC 値、残差ともに劣っている。これまで考えられている以上に船首形状が粘性抵抗に影響することを表している。
- ④ 二重模型流れの計算結果のみによる推定精度は、モデル 6F でわかる。AIC 値が大きく境界層計算結果が推定には重要であることを示している。しかし二重模型流れの計算からだけで概略の形状影響係数を知ることができることは、初期計画段階では有効である。

形状影響係数の推定結果と実験結果との相関を Fig. 9 に示す。○印が回帰式を作成したデータベース船型群 (58

隻) の推定値と実験との相関である。図中に示す破線内にあり、 $\pm 3\%$ の推定精度をもつことがわかる。◆印は、実際の船型設計に適用した例であり、回帰式のデータベースと無関係な船型の相関を示す。実験結果と約 $\pm 2\%$ 以内という非常に良好な推定結果が得られている。

3.2 バラスト状態の形状影響係数の推定

満載状態と同じパラメータを使って、バラスト状態の形状影響係数を試みに推定した。バラスト状態では通常トリムがついているが、計算の簡単化のために二重模型流れの計算は、船尾喫水に基づく一様喫水としている。24 隻の船型から回帰式を作成した。結果を満載状態と同じ様式で Fig. 10 に示す。▲印が、回帰式のデータベースと無関係な船型の結果であるが、実験結果と約 $\pm 3\%$ 以内の精度をもつ推定結果である。満載状態より少し推定精度が劣るようであるが、実用上は十分である。

4. 結 言

形状影響係数を流場パラメータを介して船体形状と結びつけて推定する方法を示した。流場パラメータと船型の幾何特性パラメータを船型試験水槽の実験値と最小 AIC 法を用いて統計解析を行い回帰式を作成する方法である。

- ・肥大船の満載状態の形状影響係数が、 $\pm 2\%$ 以内の高精度で推定可能である。

- ・肥大船のバラスト状態の形状影響係数も、 $\pm 3\%$ 以内で推定可能である。

本推定法は、設計の場で十分に使用できる精度を有しているだけでなく、流場パラメータの値を知ることによって、形状のどの部分が性能の悪化または改良を、もたらしたのかが分かることが最大の特徴である。特定の流場パラメータを減少 (または増加) させるように、形状変更を行えば、望みの性能が得られることになる。

加えて、推定結果が得られるまでの時間が非常に短いことも特徴の一つである。船型が四辺形パネルで近似されていれば、5 分以内で形状影響係数の推定結果を知ることができる。

また、満載状態の形状影響係数の推定精度を上げるために二次流れを抑制した二隻の船型から、形状影響係数の下限値を求める水槽試験をおこない、 $1+K=1.123$ を得た。

ここで提案した手法は、「船尾ビルジ部を膨らませると形状影響係数が増える」といった経験に裏付けられた知見を、流場パラメータと蓄積された水槽試験結果を用いることにより定量性のある推定手法として構築したものである。船型設計における経験に基づくノウハウである「暗黙知」を、「形式知」へ変換するアプローチへの第一歩と位置づけ、本手法を造波抵抗係数、自航要素の推定へ、拡張していく予定である。

最後に、本論文は著者が NKK エンジニアリング研究所に在籍中の研究をまとめたものであることを、付記する

とともに水槽試験の実施, 解析を担当された(株)ジャパンテクノメイト第一開発部の関係者に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 橋本美貴, 木下義直, 荻野繁之: ポテンシャル流れの計算を利用した形状影響係数, 伴流分布の推定法, 関西造船協会誌, 第200号(1985), pp. 33-40
- 2) 増田聖始, 笠原良和: CFDコードにより推定した流場の検証, 関西造船協会誌, 第228号(1997), pp. 21-28
- 3) 三嶋聡紀, 平野雅祥, 織田博行, 片桐光雅: 統計解析による形状影響係数の推定, 関西造船協会誌, 第179号(1980), pp. 59-70
- 4) 森正彦: 船型設計, (株)船舶技術協会, 1997年, pp. 174-182
- 5) Yamano, Tadao: A Practical Estimation Method of Wake Pattern, 関西造船協会誌, 第217号(1992), pp. 21-29
- 6) 坂元慶行, 石黒真木夫, 北川源四郎: 情報量統計学, 共立出版, 1983年
- 7) 呉清達, 田中一朗, 馬場哲治, 林明泉: 肥大船まわりに発生する剝離渦に関する研究, 関西造船協会誌, 第271号(1978), pp. 81-88
- 8) 姫野洋司, 石井立志: 境界層理論による粘性抵抗の推定, 日本造船学会論文集, 第154号(1983), pp. 65-77