SBD の概念による実海域性能を考慮した高速船の 船型設計法の研究

日夏宗彦¹⁾、辻本勝²⁾、平田信行³⁾、小林 寬³⁾、 小川剛孝⁴⁾、長谷川純¹⁾、塚田吉昭¹⁾、深澤良平¹⁾、 日野孝則³⁾、石田茂資¹⁾、右近良孝¹⁾

Study on a Design Method for High Speed Ferry by Use of Simulation Based Design Concept

by

Munehiko HINATSU, Masaru TSUJIMOTO, Nobuyuki HIRATA Hiroshi KOBAYASHI, Yoshitaka OGAWA, Jun HASEGAWA, Yoshiaki TSUKADA, Ryouhei FUKASAWA, Shigesuke ISHIDA Takanori HINO and Yoshitaka UKON

Abstract

So far ship performance has been evaluated through the propulsion performance at a calm sea, however, nowadays this does not always give a sufficient index for the evaluation of ship performance. Recently, instead of the performance at a calm sea, the performance at actual seas has become an important alternative index. Consequently this performance should be considered at an initial design stage for a newly developed ship.

In this study, a design method based on the concept of simulation based design(abbreviately SBD) is presented. In the present paper SBD concept is defined as a seamless process such that a hull form of mother ship is optimized to minimize the ship resistance at actual sea, the summation of the resistance at a calm sea and an added resistance in irregular waves.

In the paper, first of all, the present SBD concept is introduced. In order to show the effectiveness of the present system, a high-speed ferry boat is adopted as an example and it is optimized by use of the system. Furthermore, the system is verified to compare the performances of mother and optimized ships obtained through tank experiments. Since the SBD system consists of many modules such as hull form deformation, the estimation of ship resistance at a calm sea, the estimation of the added resistance in irregular waves, the evaluation of sea condition for a given sea route and so forth, each module can be revised independently. From this point of view, the following three advanced studies have also engaged. They are (1)Database system for winds and waves around Japan, (2)CFD tool to simulate flow around ship with shaft brackets, and (3)Strip method to consider the hull form over the still water line.

Lastly the summary and conclusion are described.

```
    1)流体部門、2)実海域性能評価プロジェクト、3)CFD 研究開発センター、4)構造・材料部門
    原稿受付 平成19年 4月10日
    審 査 済 平成19年 8月 7日
```

目 次

1. まえがき・・・・・・ 2					
2. SBD の概念による船型設計法 ······· 3					
2.1 母船型の設定 ・・・・・・・・・・・・・・・・ (
2.2 システムの構成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3				
2.3 システムの要素 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4				
2.3.1 船型定義モジュール(CAD) ······	4				
232 流れ解析モジュール ・・・・・	4				
23.3 最適化モジュール・・・・・・・	6				
2.5.5 取過日日 7	0				
2.开 政定博家 2. 改自飲刑	0				
3. 吸戌加至 21. 抵抗の是小化	0				
	8				
3.2 水帽訊駛稻米と理論推足値の比較 ・・・・・	9				
3.2.1 平水中抵抗•目机試験 ······	9				
3.2.2 規則波中の抵抗増加 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	10				
3.2.3 船尾変動上の評価 ・・・・・	11				
4. SBD システムのインターフェース ・・・・・	11				
4.1 統合的な性能設計環境 ・・・・・・・・・・	11				
4.2 システムの概要 -パラメータ設定-・・・・・	12				
4.2.1 船型確認	12				
4.2.2 耐航性能計算	12				
4.2.3 推進性能計算 •••••••••••	12				
4.3 システムの概要 -計算の実行-・・・・・	13				
4.4 システムの概要 -計算結果の確認-・・・・・	13				
4.4.1 耐航性能計算結果 ••••••	13				
4.4.2 推進性能計算結果 ••••••	14				
4.5 今後の課題 ・・・・・・・・・・・・・・・	14				
 設計条件設定の高度化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	14				
5.1 波と風のデータベースの概要					
	15				
5.2 統計的性質	15				
521 気象・海象の平均的傾向と	10				
	15				
500 ※ 3 確 恋 と 其 木 統 計 書 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	16				
5.2.2 元元曜中已至不成百重	17				
	10				
5.5 仮と風のケーク・、 へのよとの ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	10				
0. SBD ジベノムの向及11(1) (CED に トスシントフトブラケット MRの計算)	18				
(CFDによるシャノトノソケット相尾の計算)	1.0				
6.1 計昇結朱例 ······	19				
6.2 今後の課題 ······	19				
7. SBD システムの高度化(2) ·····	20				
(耐肌性能評価法の改良)					
7.1 大波高中運動性能推定法	20				
7.2 模型実験による手法の検証 ・・・・・・	20				
7.2.1 船体運動	21				
7.2.2 上下加速度及び相対水位変動 ・・・・・	21				
7.2.3 波浪中抵抗增加	22				
7.2.4 不規則波中船体運動 ・・・・・・・・・・	22				
7.3 まとめと今後の展望 ・・・・・	23				

8.	まとめ・・・・・	23
参考	5文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	24

1. まえがき

1997年に採択された京都議定書の中で、我が国の温 室効果ガスの排出量を2010年までに1990年比で6% 減に削減する数値目標が定められるなど、地球温暖化 防止が世界的な関心事項となっており、我が国として も地球温暖化対策推進大綱を策定するなど、国を挙げ て温室効果ガスの排出抑制に取り組んでいる。交通分 野においては効果的な抑制策の一つとして、内航海上 輸送へのモーダルシフトの推進が挙げられており、海 上輸送を担う船舶の重要度がますます増している。ま た、近年の社会ニーズの変化により、海上輸送に対し 一層の高速化や定時性の確保が求められている。すな わち、海上交通においては、船舶の運航全体を通じて、 より低燃費でかつ利便性の高い船舶の開発が重要な課 題となっている。

従来の船型設計においては平水中の性能が最重視され、実際の運航状況に応じた最適な船舶を設計する設計技術は確立されていない。実海域の海象条件や船体まわりの複雑な現象を設計の当初から考慮して船を設計する方法として、近年格段に進歩を遂げているコンピュータ技術を活用する SBD (Simulation Based Design:使用目的から与えられる仕様と照し合わせながら、船舶の性能を数値的、視覚的に捉えて予測及び評価しながら設計する手法)が有力である。しかしながら、SBD を応用するためには性能推定法の設計ツール化とシステム化が必要であるが、船のまわりに生じる複雑な現象をシミュレートするには高度な計算技術が要求されることから、これらのシステム化がなされていないのが現状である。

本報告では、まず本研究で定義した SBD の概念を示 し、システムの構成を説明する。次に本システムの雛 形を構築した後、高速内航フェリー船型を例にした船 型開発例を示す。またその有効性を示すため改良前後 の2船型について水槽試験を行い、本システムの検証 を行った。

一方、設計条件を設定する際、想定した航路の海象 条件を推定する必要がある。本報告では、日本近海に おける海象条件を推定するために開発した、海象デー タベースに基づく波浪情報推定システムについても報 告する。

今回開発した SBD による船型設計システムでは、船 の推進性能、耐航性能を推定するツールの組み合わせ で構成されている。これらの各ツールは基本的には独 立して改良することが可能であり、改良された各ツー ルは新たにシステムに組み込むことにより、システム の高機能化が実現できる。その観点から、本報告では

二軸高速船で見られるシャフトブラケットを有する複雑 形状の船体周りの CFD(Computational Fluid Dynamics)計算 および、新しい波浪中の抵抗増加推定法を紹介し、将来の システム高度化の可能性について言及した。

2. SBD の概念による船型設計法

造船設計における SBD システムは、データベース上の 統合されたプロダクト・モデルに対して、性能設計、構造 設計、製造、運航などをシミュレーションにより同時並行 的(コンカレント)に評価し、その結果を統合してプロダ クト・モデルに反映するプロセスを可能にする¹⁾。このよ うなシステムでは、様々なシミュレーション、可視化技術、 CAD(Computer Aided Design)などが共通のインターフェー スを介してシームレスに連結する必要がある。

このように一般には SBD は極めて幅の広い概念である が、本研究ではもう少し限定的に定義し直した。すなわち、 設定された設計条件を制約条件とし、目的関数(本報告で は主として想定海域を航走するときの短期予測に基づく 全抵抗)を小さくするように母船型を船型改良していく手 法とした。また、本報告における目的関数は、流体力学的 性能を中心に考え、構造強度的な条件や一般配置に基づく 詳細な制約は考慮していない。これらについては、それぞ れの項目を評価する手法をモジュール化して本システム に機能追加していくことで、実現することが可能である。

2.1 母船型の設定

本システムは母船型を船型改良する手法を取っている ので、まず母船型を設定する必要がある。ここでは母船型 を2軸の高速フェリーとし、実船相当の諸元はLpp=187m、 B=28m、d=7m で、船速は 31.9 ノットと想定した。

表-2.1 母船型の主要目				
	Model	Full Scale		
Lpp(m)	6.656	187.0		
$L_{WL}(m)$	6.870	193.0		
B(m)	.997	28.0		
d(m)	.249	7.0		
Cb	.4815	.4815		





図-2.1 母船型の正面線図

主要目を表-2.1 に示す。また、正面線図を図-2.1 に示 す。

2.2 システムの構成

今回開発したシステムは、与えられた母船型を出発 点とし、最適化手法により船型を改良するシステムで ある。図-2.2 にそのフローを示す。



図-2.2 SBD による船型改良フロー

まず、船主から要求される条件に従って、主要目を 決め、それに応じた従来の実績船を参考にして母船型 を決める。次に、最適化手法を用いて船型最適化を行 う。最適化のための目的関数の取り方は設計すべき船 に対して何を重視するかによって決まる。例えば海上 作業船であれば推進性能よりも波浪中での作業性が重 要視されるであろうから、船体動揺量が目的関数とし てとられるであろう。今回は高速フェリーを想定して いるので、目的関数として、母船型が設計速度で航走 するときの平水中の抵抗値と、同じ速度で設定海象を 航走するときの波浪中の抵抗増加を短期予測により求 め、これらの和を用いた。平水中の抵抗値は NS(Navier-Stokes)方程式を数値的に解いて推定し、規則 波中の抵抗増加は、船体運動に基づく量を丸尾の式で、 反射波による量を Faltinsen の式により推定した。また 流力性能の制約条件として、船首上下加速度が母船型 より悪くならないこと、復原性規則を満足することを 課した。なお、船型の変形に際しては船長や排水容積 を母船型から変えないことを条件に課した。制約条件 については 2.3.3(2)で詳述する。

まず母船型を変形し、制約条件をみたしているか確 認する。満たしていなければ船型を満たすように変形 しなおして、全抵抗を計算し、これまでに得られた最 小抵抗と比較する。この手順を繰り返して制約条件を満た しつつ、全抵抗が最小と判断されたとき、改良船型が決定 される。ただし、これは基本的な考え方であり、最適化手 法によっては若干最適船型探索のプロセスは異なる場合 がある。

2.3 システムの要素

本システムを便宜上3 つのモジュールにわけて説明す る。まず、設計変数から船型を決定するモジュール(船型 定義モジュール)、流体力学的性能を推定する流れ解析モ ジュール、それに最適船型探索を行い最適な設計変数を求 める最適化モジュールである。本システムはこれら3つの モジュールがシームレスに統合している²⁾.

2.3.1 船型定義モジュール(CAD)

船型を定義するには、母船型をベースにする方法とゼロ から形状を組み立てる方法の2通りが考えられる。今回は、 前者を採用し、母船型のプロファイルは固定、幅方向(座 標)に Bezier パッチを乗じる重み関数法を用いて船型変形 を行った。図-2.3 に示すように、母船型の船幅を y₀(u,v) (ただし u,v は船体表面に張った局所座標系)、変形後の 船幅を y₁(u,v)とすると、

$$y_1(u,v) = \alpha(u,v) \ y_0(u,v)$$
 (2.1)

ここで重み関数 α (u, v)は次のとおりである。

$$\alpha(u, v) = 1 + \sum_{i=0}^{n+1} \sum_{j=0}^{m+1} J_{n+1,i}(u) K_{m+1,j}(v) P_{i,j}(u, v)$$
$$J_{n+1,i}(u) =_{n+1} C_i (1-u)^{n+1-i} u^i$$
$$K_{m+1,i}(v) =_{m+1} C_i (1-v)^{m+1-j} v^j$$

なお、 P_{ij} は本船型改良の設計変数である。図-2.4 に α (*u*,*v*) の一例を示す。実際の計算ではm=n=8とし、設計変数は 64 個とした。本パッチは、図-2.4 に示すように滑らかな関 数のため、母船型の滑らかさを保持しながら、自由に船型 を変形できる。このとき単純に幅が変化すると排水容積が 変化するため、拘束条件である排水容積一定を満足するた めに、船型と母船型の排水容積から次式に示すように幅方 向に一定の数を乗じ、新しい船型の計算格子を定義する。 なお、今回は母船型の船長が約 200m であり、200m を超 えると大型船扱いとなるため、船長は母船型と同一とし、 さらに港湾による制約を想定して喫水は変化させずに (2.2)式に示すように船型をさらに変形させた。

$$y_2(u,v) = y_1(u,v) \times V_0 / V_1$$
(2.2)

ただし、 V_0 は母船型の排水容積、 V_1 は、船型変形後の座 標 y_1 に基づく排水容積である。



図-2.3 母船型と船体表面局所座標



図-2.4 Bezier パッチの一例

2.3.2 流れ解析モジュール

本研究では、最小とすべき目的関数は、先述のよう に実際に船舶が航行する海域の環境条件下における抵 抗とした。これを平水中の抵抗と波浪中抵抗増加の2 つの成分に分け、それぞれCFDツールとストリップ法 に基づく抵抗増加計算手法を用いて推定した。

(1) 平水中の抵抗推定

平水中の抵抗推定は CFD を用いた。CFD における対 象は模型船スケールであり、Lpp ベースのレイノルズ 数は 1.6x10⁷、フルード数は 0.3833 である。

最適化計算において、目的関数は数十回から数百回 と大量に計算する必要がある。このため、現実的な時 間で船型改良を終了させるには、非常に高速の Navier-Stokes ソルバーを用いることが必須である。本 研究では、平水中の抵抗を推定するCFDツールとして、 当所で開発した高効率NSソルバーNEPTUNE コード³⁾ を用いた。NEPTUNEの概要は以下の通りである。

- 支配方程式は、擬似圧縮性を考慮した NS 方程 式。
- 空間離散化はセル中心の有限体積法。
- ・ 非粘性項は、Roe スキーム+3 次精度の MUSCL

で評価。

- ・ 粘性項は、2次精度の中心差分で評価。
- 時間離散化は1次精度の陰的差分。
- ・ NS 方程式の解法は、準 Newton 法+SGS 法。
- 自由表面は、表面追跡による適合格子法。
- 乱流モデルは Baldwin-Lomax モデル。
- 高速化のために、マルチグリッド法を適用。
- 計算格子は構造格子対応。

NEPTUNE によって船体周りの流場を計算するために は、前処理として計算格子を生成する必要がある。しかし、 計算格子の品質によって計算結果が大きく変わることは よく知られており、特に格子点数が少ない場合にはこの傾 向が顕著である。最適化手法によって船型を改良する場合 は、膨大な数の船体周りの流場解析を行う必要があり、自 ずと計算格子点数を少なく設定する必要がある。このため、 少ない格子点数でも計算精度が維持できるように母船型 (初期格子)における空間格子を参考にして、船型変形後の 空間格子を生成する方法を採用し、品質の均一化を図った ⁴⁾。(2.2)式により定義された物体形状から、物体より1つ 外側の格子点 $X_{k=2}^{mod}$ を物体表面の直交ベクトルと初期格 子の格子間隔を用いて決定する。次に、物体より2つ外側 の格子点(k=3)から外部境界(k=kmax)までの計算格子を次 式に従って生成する(図-2.5 参照)。

$$X_{k}^{\text{mod}} = X_{k}^{\text{orig}} + w_{k} (X_{k=2}^{\text{mod}} - X_{k=2}^{\text{orig}})$$
(2.3)

なお、 w_k は次式に示すように、母船型の格子線上の外 部境界からの長さを、外部境界 k=kmax で 0、k=2 で 1 に なるように無次元化した重み関数である。本研究では、長 手、ガース、境界層方向にそれぞれ、65 点、25 点、41 点 で計約 67,000 点の格子点数を有する計算格子を用いた。



図-2.5 初期格子に基づいた格子法

最適化を行う前に、NEPTUNEによる平水中抵抗推定の 精度を検証するため、母船型に対して水槽試験結果との比 較を行った。母船型には大きなトランサムスターンが ついているため、計算の安定性のため、船尾端より後 方に船長を5%延ばして船尾を丸めた。用いた計算格子 のトポロジーは H-O で、格子点数は、主流方向に 65 点、ガース方向に 25 点、境界層方向に 41 点の計 66,625 点とした。また、最小格子間隔は 2x10⁻⁶ である。図-2.6 にフルード数 0.3833 で計算した時の収束解の格子を示 す。

形状影響係数 1+K は、計算格子が粗いこともあり、 水槽試験の1.10に対し計算は1.18と少し大きめに評価 されている(50 万程度の計算格子では 1.16)。一方、造 波抵抗は図-2.7に示すように実験と良く一致しており、 本推定ツールは船型改良システムに適用可能であると 考えられる。



図-2.6 母船型周りの計算格子



図-2.7 母船型の造波抵抗計算結果と実験値との比較

(2) 波浪中抵抗増加の推定

波浪中の抵抗増加は、設定海象における短波頂不規 則波(短期海象)中での抵抗増加量とした。これは長 期予測による性能評価を行うときに、今回実施した1つの 短期海象での船型最適化で効果的な結果を得るための工 夫である。抵抗増加は波向分布を $p(\chi)$ 、波の周波数スペ クトルを $S(\omega)$ とすると、以下の式で計算される。

$$\frac{\overline{R_{AW}(T)}}{H^2} = 8\rho g \frac{B^2}{L_{pp}} \int_0^{2\pi} \frac{\overline{K_{AW}(T,\chi)}}{H^2} p(\chi) d\chi$$

$$= 8\rho g \frac{B^2}{L_{pp}} \frac{\overline{K_{AW}(T)}}{H^2}$$
(2.5)

$$\frac{\overline{K_{AW}(T,\chi)}}{H^2} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} K_{AW}(\omega,\alpha) \frac{S(\omega,T)}{H^2} D(\alpha,\chi) d\omega d\alpha$$
(2.6)

ここで、ρ:流体密度、g:重力加速度、B:船幅、 Lpp:垂線間長、ω:入射波の円周波数、α:船と波 との出会い角、H:有義波高、T:平均波周期、χ:波 向、S:波の周波数スペクトル、D:波の方向分布関数

(ここでは cos 自乗型を用いた)である。また S(ω) は次

の修正 Pierson-Moskowitz 型を用いる。

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} 0.11 H^2 T \left(\frac{T}{2\pi}\omega\right)^{-5} \exp\left\{-0.44 \left(\frac{T}{2\pi}\omega\right)^{-4}\right\}$$
(2.7)

2.3.3 最適化モジュール

(1) 最適化手法

CFD を用いた船型最適化システムでは、流れ場は非線型のNS 方程式に支配されているため、目的関数は設計変数の非線型関数である。したがって、非線型最適化問題として取り扱う必要があり、大域的な最適解を得る可能性の高い遺伝的アルゴリズム(GA)を用いることとした⁵⁾。本研究では、GA のなかでも、再初期化を繰り返すことにより、小さい集団数で速い収束解を得ることが可能なmicro-GA⁶⁰を適用した。集団数は39 とし、変数はバイナリ表現で変換した。なお、GA オペレータとして、トーナメント戦略、一様交叉(0.5)、突然変異(0.02)を用いた。

(2) 制約条件

最適化手法では一般に制約条件が課せられる。本研究では、制約条件として運航限界と船舶復原性規則を設定した。 なお、制約条件は、penalty 関数として目的関数に付加した。

運航限界は、海水打ち込み、プロペラレーシングなど各 種考えられるが、例えば海水打ち込みは主として乾舷高さ に依存し、水面下形状にはあまり関係しないことや、今回 の対象船が旅客フェリーであることから、船首部での上下 加速度を指標とする。

短波頂不規則波中での上下加速度応答Azの分散値 σ^2

は(2.8)式で求められる。

$$\left\{\frac{\sigma(H,T,\chi)L_{pp}}{gH}\right\}^{2} = \int_{0}^{\infty} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left|\frac{A_{z}(\omega,\alpha)L_{pp}}{g\zeta_{a}}\right|^{2} \frac{S(\omega;H,T)}{H^{2}} D(\chi-\alpha) d\alpha d\omega$$

(2.8)

ここで、 ζ_a :入射波振幅である。

母船型について船首(F.P.) 中心線上(C.L.)での上下 加速度の周波数応答関数を図-2.8に示す。

上下加速度分散値の推定は、最適化計算の計算量の 関係から

 ω : 0.45,0.50,0.55,0.60,0.65[rad/s]

 α : 120,150,180[deg]

の値を用いて行った。

このとき、母船型では

$$\frac{\sigma(H,T,\chi)L_{pp}}{gH} = 7.88 \tag{2.9}$$

となり、この値が制約条件となる。







次に、復原性条件は船舶復原性規則により沿海区域以上 を航行する旅客フェリー(鋼船)に適用されるもので、以 下に示す5つの条件である。

① 横メタセンター高さ *GM*

 $\overline{GM} > 0$

② 限界傾斜角 α における復原梃 $\overline{GZ_{\alpha}}$

$$\overline{GZ_{\alpha}} \ge \frac{2.74A_LH_{CB} + 0.214\sum\left\{\left(7 - \frac{n}{a}\right)nb\right\}}{100\Delta} \quad [m]$$

③ C係数基準

 $S_1 > S_2$

④ 最大復原梃

$$\overline{GZ_{\max}} \ge \min \begin{cases} 0.0215B \quad [m]\\ 0.275 \quad [m] \end{cases}$$

5 満載出入港状態における船体横揺角 θ

 $\theta \leq 20$ [deg.]

(ただし、有効な横揺軽減装置を備えた船舶はこ の限りではない)

ここで、A_L:水面上側面積[m²]、H_{CB}: A_Lの中心から浮

心までの垂直距離[m]、n:旅客搭載場所ごとの旅客数、 a:旅客搭載場所ごとの床面積[m²]、b:旅客搭載場所ご との旅客の移動可能の平均幅[m]、Δ:排水量[t]、B:船 幅[m]である。

また、満載出入港状態における船体横揺角θは(2.10) 式により求める。

$$\theta = \sqrt{\frac{138rs}{N}} \quad [\text{deg.}] \tag{2.10}$$

限界傾斜角αは(2.11)式により求める。

$$\alpha = 0.8 \tan \beta \tag{2.11}$$

ここで、 $\beta = \min(\phi_3 [\text{deg.}], 20 [\text{deg.}], \phi_4 [\text{deg.}])、 \phi_3 : 海$ $水流入角[\text{deg.}]、 \phi_4 : 直立状態から舷端が水面に達する$ までの横傾斜角[deg.]である。

 S_1, S_2 はそれぞれ GZ 曲線と $1.5D_w$ の囲む面積(図-2.9 参照) であり、 D_w :定常風による傾斜偶力挺[m]で、 (2.12)式により求める。

$$D_w = k \frac{A_L H_{CB}}{\Delta} \quad [m] \tag{2.12}$$

ここで、*k*=0.0514 [t/m³](沿海以上、旅客フェリー:

標準風速 26[m/s]を想定) である。

母船型に対する入力値を表-2.2 に、復原性判定値を 表-2.3 に示す。表-2.3 から、復原性基準を満足している ことが分かる。なお、本船はフィンスタビライザーを 装備することから、満載出入港状態における船体横揺 角*θ*の条件を満足する。



図-2.9 復原力曲線

表-2.2 母船型入力データ					
記号	値	単位	記号	値	単位
L_{pp}	187.0	[m]	A_L	4223.0	[m ²]
В	28.0	[m]	H_{CB}	15.5	[m]
d	7.0	[m]	T_{ϕ}	12.97	[s]
Δ	18,088	[t]	<i>ø</i> 3	36.9	[deg.]
\overline{GM}	3.00	[m]	ϕ_4	29.1	[deg.]
$\sum \left\{ \left(7 - \frac{n}{a}\right)nb \right\}$	88,690	[-]			

表-2.3 母船型の復原性判測

記号	値	単位	基準値	判定
$\overline{GZ_{\alpha}}$	0.819	[m]	≥ 0.110	0
$\frac{S_1}{S_2}$	1.28	[-]	>1.0	0
$\overline{GZ_{\max}}$	1.13	[m]	≥ 0.275	0
θ	21.3	[deg.]	≤ 20.0	△(有効な横揺 軽減装置必要)

2.4 設定海象

設定海象は、対象船が航行する航路における海象を参考 にして決定するのが通常の方法であるが、ここでは以下の ようにして設定海象を定めた。図-2.10 に設計フルード数 *Fn* で波向分布を一様としたときの短波頂不規則波中抵抗 増加量を示す。これから、平均波周期*T*=8.5s で値が最大 となることが分かる。短波頂不規則波中抵抗増加量は表 -2.4 に示す通り、向波χ=180deg.で値が最大となることが 分かる。有義波高 H は、運航管理規定に定める意識的 操船を行う有義波高値を 4m とし、この値を用いた。 以上から、設定海象を有義波高 H = 4m、平均波周期 T = 8.5s、 向波 $\chi = 180 deg$.とした。



図-2.10 SBD 母船型の短波頂不規則波中抵抗増加量 (波向分布:一様)

表-2.4 SBD 母船型の短波頂不規則波中抵抗増加量

T=8.5sec	
χ (deg)	$\overline{Kaw(T, \chi)}/H^2$
0	0.00509
30	0.00496
60	0.00864
90	0.02044
120	0.03647
150	0.04862
180	0.05273

3. 改良船型

3.1 抵抗の最小化

改良船型を得るための最適化の過程として抵抗最小 化の履歴を図-3.1 に示す。同図の上の図は、平水中の 全抵抗(図中の Ct)と波浪中の抵抗増加(図中の C_{raw}) が最適化プロセス中に母船型の値とどの程度変化する かを示した図である。また、下の図は同じく平水中の 圧力抵抗(図中の C_p)、摩擦抵抗(図中の C_f)、浸水表 面積(図中の S_w)の最適化プロセス中の変化の様子を 示す。縦軸は母船型との改良船型のそれぞれの割合、 横軸は世代を表す。10世代で得た最適解は、平水中の 全抵抗が約 6%、波浪中の抵抗増加が約 10%、全抵抗 も約 6%の抵抗低減を達成している。また、摩擦抵抗は 浸水面積の2%減に伴い同程度減少し、圧力抵抗に関しては10%以上減少していることがわかる。

図-3.2 に母船型と改良船型の水線面形状の比較、図-3.3 に母船型と改良船型の船側波形の比較を示した。なお、両 図とも横軸は船長方向の軸であり x=0,1 は各々F.P.、A.P. を示す。改良船型の船幅は実船相当で26.4mとなり、母船 型の94.3%となった。また、平水中の抵抗低減を反映して、 浸水面積が裸殻状態で母船型と比較して 2.3%の減となっ た。浮心位置は母船型が船体中央から船長(Lpp)の 2.95% 後方であったものが、改良船型では船体中央から 1.91%Lpp 後方と、母船型に比べてわずかに前方に移動し た。このため、船首部の水線面形状が母船型よりわずかに 太くなり、図-3.3に示すように船首波も多少大きくなって いるが、逆に船尾波は小さくなるなど圧力抵抗の低減に寄 与している。図-3.4 に改良船型の正面線図(二点鎖線で表 示)を母船型(実線で表示)と比較する形で示した。今回、フ ェリー船型を対象としているため、船幅は積載可能な車列 に直接影響を及ぼすため、厳密には、連続的な変化を許す のではなく離散的な変化とすべきであると思われるが、船 長、喫水、排水量を固定した今回の拘束条件の設定では、 幅をさらに拘束するとほとんど船型変化が得られなくな るため、あえて連続的な幅の変更を許した。





図-3.1 抵抗低減の履歴



図-3.2 母船型と改良船型の水線面形状の比較



図-3.3 母船型と改良船型の船側波形の比較



図-3.4 母船型と改良船型の比較

3.2. 水槽試験結果と理論推定値の比較

3.2.1 平水中抵抗·自航試験

最適化された船型が実際に性能改善になっているか を確かめるために水槽試験を実施した。船長で無次元 化した造波抵抗係数の試験結果を図-3.5 に示す。横軸の Fn は Lpp ベースのフルード数である。ほとんどの速度領 域で改良船型が抵抗減となっているが設計速度付近では その差は著しく小さくなった。全体的に造波抵抗が減少し たのは幅が小さくなったためと考えられる。

図-3.6 に馬力を比較した。伝達馬力は2軸プロペラが外回り回転時の自航試験結果から推定した。これによると、母船型と比較して設計速力において有効馬力で約1.5%の減少、伝達馬力で約5%の減少が認められる。これは先の造波抵抗の減少および改良船型での浸水表面積の減少による摩擦抵抗の減少に起因している。



図-3.6 有効馬力及び伝達馬力の比較

3.2.2 規則波中の抵抗増加

Fn=0.3833 における正面規則波中の抵抗増加の試験結果 を図-3.7 に示した。図中の 1/70 等は波高/船長比を表す。 無次元化は波高の自乗と船長の積を用いた。短波長時に改 良船型の方が、抵抗増加量が少なくなっている。これは図 -3.4 の正面図を見れば分かるように船首部分がやせたた めブラントネスが小さくなり反射波成分が小さくなった ためと考えられる。波長/船長比が 1.25 付近で母船型の方 が抵抗増加量は大きくなっているが、その他の点では 両船型で際だった差がないと言える。このことは図-3.8 に示す縦揺振幅無次元値から、ピッチング運動が両船 型ともほとんど変化していないことからも理解される。 なお、図 3-7,3-8 ともマークは計測点で、線はマークを なめらかに結んだものである。

計算で得られた向波中の抵抗増加の結果を図-3.9 に 示す。マークは計算点で、図では計算点を直線で結ん だ。また Mother が母船型、Mod が改良船型に対応して いる。短波長域では抵抗増加量がわずかに改良船型で 小さくなっているが、その他の波長域では改良船型と もほぼ同一である。波周期をパラメータとした短期海 象(有義波高 4m、向波)での抵抗増加を図-3.10 に示 した。



(実験値、Fn=0.3833)



図-3.9 正面規則波中の抵抗増加 (計算値、Fn=0.3833)



図-3.10 短期海象下での抵抗増加 (Fn=0.3833,有義波高=4m)

今回の目的関数は波周期を8.5秒としているが、全ての 波周期で改良船型の方で抵抗が小さくなっており、設定海 象だけでなくこの他の海象でも性能が向上していること を示している。これは主として短波長域において改良船型 の抵抗が減ったことによる。

3.2.3 船尾変動圧の評価

フェリーのような船では船尾振動が船の品位を高め る上で重要な要素の一つとなる。このため改良船型に 対して新たにプロペラを設計し、船後キャビテーショ ン試験を行って実船における船尾変動圧を推定した。 本来であれば、この推定手法も SBD システムに組み込 むことで、船尾変動圧まで考慮した船体-プロペラ設計 が可能となるが、本研究ではシステム化まで至らず、 従来のように改良船型を与えて、別途プロペラを設計 した。試験状態を図-3.11 に示した。キャビテーション の発生量は減少し、その結果 MCR 状態で変動圧の第 ー次成分が母船型で 6.1*KPa*、改良船型で 3.9*KPa*に、 また二次成分は母船型で 10.4*KPa*、改良船型で 6.0*KPa* にそれぞれ減少し、許容レベルとなった。 船尾振動の面でも改良船型のほうが優れているこ とが確認された。





図-3.11 キャビテーション水槽における 船尾変動圧試験(上:母船型、下:改良船型)

4. SBD システムのインターフェース

本章では本研究で定義しているSBDシステムの統合 的な設計環境の実現に向けて、雛形となる設計環境に ついて例を示す。

4.1 統合的な性能設計環境

船舶の推進性能や耐航性能の解析・推定方法は、非 常に数多く存在し、本研究でも用いているストリップ 法や CFD はその中でも代表的なものである。性能推定 の段階においてそれらのツールを使用する場合、各々 のプログラムについてパラメータの設定方法やデータ 入力形式の相違は、余分な手間が発生し工数の増加に つながることも多い。

この問題を解決するためには、対象船型データおよ びそれに対する性能推定計算を一元管理できる環境が 必要である。ソフトウェア開発の場合は、ソースコー ドの記述・管理、コンパイル、デバッグ、動作テスト、デ プロイメントまで、統合開発環境 (IDE: Integrated Development Environment)と称されるソフトウェア開発環 境を用いることで、統合的に扱えるような環境が常用され ている。船型設計に於いても、同様な設計開発環境が有用 であると考えられる。

4.2 システムの概要 ーパラメータ設定-

本研究では、船型の格子データが存在する状態で、

- 耐航性計算(ストリップ法を用いた船体運動および 波浪中抵抗増加)
- 2) 推進性能計算(CFD コード(NEPTUNE)による)

の二つについて、計算条件の設定・計算の実行および結果 の表示までを管理できるシステムを開発した。

格子データは NEPTUNE 形式のものを採用し、同一の格 子データで耐航性計算も CFD 計算も行うことができる。

4.2.1 船型確認

計算を行う前に船型が確認できるように、船体形状を格 子データにもとづき 3D 描画し、任意の視点から対象船型 を確認できるようにした。図-4.1 は、2 軸の高速フェリー を図示(左舷のみ)した例である。



図-4.1 船体形状の 3D 表示

4.2.2 耐航性能計算

ストリップ法による波浪中船体動揺の計算を行う場合 は、船型データに加え、波浪条件等を入力する必要がある。 今回は、計算条件を船体に関する設定と航行・海象条件に 関する設定の2つのカテゴリーに分けて、異なる画面で設 定を行うようにした。船体に関する設定と航行・海象条件 に関する設定の区分を以下に示す。

・ 船体に関するパラメータ:重心位置や慣動半径等。

・航行・海象条件に関するパラメータ:フルード数、出
 会い角の範囲、波長船長比 (λ/L)、波周期、有義波高
 等。

それぞれの設定画面を図-4.2,4-3に示す。





ARCTONE Converse Reads	

図-4.3 航行・海象条件に関する設定入力画面

4.2.3 推進性能計算

推進性能計算用 CFD コードとして、本システムでは NEPTUNE コードを採用した。NEPTUNE コードは、海 上技術安全研究所で開発された Navier-Stokes ソルバー であり、高速計算が可能なこと、計算結果が水槽試験 と良い相関を持っていること等が特徴で、現在 GUI(Graphical User Interface)である NeptuneBoard とと もに、有償で販売されている。今回のシステムでは、 NeptuneBoard とほぼ同じユーザインターフェースで NEPTUNE の計算パラメータの設定を行えるようにし た。パラメータの設定画面を図-4.4 に示す。

W RB - Jaschall !	100
Did and and and	A878
BROTELETE BROTELETE CONSTRAINT -> CONSTRAINT ->	λπο+ει λπ0+22+6 λπ0+22+6 Seattle polyat Γ IMPER2+6 SET0+6 Seattle polyat
	2010 79+68 None C210 -2+64 None None The Name No No No No The Name No No No No No The Name No No No No No No The Name No No
10	

図-4.4 NEPTUNE コントロールパラメータ設定画面

4.3 システムの概要 -計算の実行-

計算の実行は、耐航性・推進性能いずれについても、メ ニューバーから該当する計算を選択することで行うこと ができ、計算状況をコマンドプロンプトウィンドウにて確 認することができる。なお、CFD による推進性能計算に ついては、計算時間が長時間にわたることが多いため、計 算プログラムは GUI とは別プロセスで実行されるように し、計算中も本 GUI プログラムを操作可能にした。

4.4 システムの概要 一計算結果の確認一

4.4.1 耐航性能計算結果

耐航性能計算の結果である波浪中抵抗増加と船体動揺 の結果が、データの値及びグラフで図示されるようにした。 i)波浪中抵抗増加

波浪中抵抗増加については、波周期を横軸にプロット している。短波長不規則波中での表示例を図-4.5 に示 す。

ii) 船体動摇

船体動揺については、運動モードについて5つ (Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw)、物理量について4 つ(運動の振幅と位相並びに流体力あるいはモーメン トの振幅と位相)の計算結果が得られる。これらの結 果を確認する際に、

a) ある特定の運動モードについて、運動や流体力 等の物理量の計算結果を確認する場合

b)運動あるいは流体力のある特定の物理量につい て、各運動モードの計算結果を確認する場合

のいずれにも対応できるように、運動モードを先に選択し て結果を表示する方法(例として、運動モードとして Heave を選択し、物理量として運動の振幅を選んだ場合を図-4.6 に示す)と、逆に物理量を先に選択し、運動モードを切り 替える方法(例としてモーメントの振幅を選択し、運動モ ードとして Pitch を選んだ場合を図-4.7 に示す)の両方を実 装した。

また、計算を行った出会い角の範囲の中から、一部の角

度範囲のみを表示することもできる。例として、出会 い角を 150 度から 180 度 の範囲で Pitch モーメントを 表示したものを図-4.8 に示す。



図-4.5 波浪中抵抗増加の表示



図-4.6 運動モード: Heave, 運動振幅表示



図-4.7 モーメント表示, 運動モード: Pitch



図-4.8 モーメント表示,運動モード: Pitch (出会い角: 150 度-180 度)

4.4.2 推進性能計算結果

CFD による推進性能計算については、計算履歴を表示 する機能を付加した。既に終了した計算結果の確認だけで はなく、別プロセスで実行中の計算の場合でも、途中経過 を把握することが可能である。全抵抗係数 C_d 、粘性抵 抗係数 C_f の履歴を表示した例を図-4.9 に示す。



図-4.9 NEPTUNE 計算履歴表示: Ca, Cf

4.5 今後の課題

SBD の概念に基づく船型設計のための統合的な設計環 境の雛形として、格子データから、平易にストリップ法に よる耐航性計算および CFD(NEPTUNE)による推進性能計 算が行えるシステム例を示した。本システムを使用するこ とにより、船舶の流体力学的性能を簡明に把握することが できる。現段階で行える計算は、ストリップ法と CFD で あるが、他の計算プログラムも使用できるように拡張する ことが可能である。

本システムでは、船体のモデル表現として、CFD 用の 格子データを用いている。しかし、様々なシミュレーショ ンを使用する汎用的なシステムにするには、一般的な CAD データ(NURBS やクーンズパッチ等)を適用し、その データから流体力学的性能推定を行えることが必要で ある。その際には、CADデータから計算に必要な格子 データを自動的に生成する方法等が問題であり今後の 技術的課題である。

また、得られた計算結果を船型設計に反映させる方 法も必要である。最適化を行う場合において、船型を パラメトリックに自動変形させるアルゴリズムの実 装、あるいは設計者が能動的に船型の変更を行う場合 において設計者が必要とする(ハイドロ計算等の)情報 の提供が考えられるが、いずれについても、設計者の 方針や船種といった個々の事案に因る部分も大きく、 それぞれの事案に応じたカスタマイズが必要である。

5. 設計条件設定の高度化

SBD システムでは、船型設計条件として、想定航路 の海象を設定する。このためには海象の統計資料が有 用である。しかし、日本近海で詳細な検討を行うこと が可能な海象の統計資料がないため、新たに統計デー タベースを作成することとした。

海洋の波と風については、船舶の安全性や経済性、 環境影響の評価の観点から、以前からデータの収集、 統計情報のデータベース化が行われてきた。そして、 運航海域における海象評価だけでなく、船体応答を考 慮した耐航性能、波浪荷重の長期予測等を通じ、設計、 運航への反映が行われてきた。これまでの海象データ ベースは、データが主に船舶通報に依存していたこと もあり、観測精度の問題の他、主要航路に観測が偏重 している影響、荒天避航の影響が存在する。そして、 海域区分は十分なデータ数を確保するためにかなり広 いものとなっている。

一方、波浪推算については、近年精度が向上し、また、1994年2月以降気象庁数値データが入手可能となった。さらにデータ間隔が均等であり、時間的、空間的な解像度も高いことから、利用し易いデータとなっている。

そこで、10年間にわたる波浪推算値を基に、詳細な 海域区分により海象評価が行えるよう、日本近海の波 と風データベースを構築し、インターネット版及び詳 細版を公開ⁿした(図-5.1)。ここでは、このデータベ ースを SBD 設計システムのうち、海象条件を設定する 新しい手法として紹介する。



図-5.1 日本近海の波と風データベース操作画面

5.1 波と風のデータベースの概要

日本近海の波と風データベースは波浪推算値を基に、発 現頻度表の形でデータベース化したものである。波浪推算 値は、1日2回気象庁より6分格子間隔で配信される日本 沿岸波浪GPV(Grid Point Value)を基に、(財)日本気象 協会が地形による遮蔽と局所的な風波を加味し、緯度・経 度2分格子間隔に内挿したものである。

この波浪推算データは有義波高 H、有義波周期 T、卓越 波向 x、平均風速 Vw、平均風向 y から構成されており、 領域は北緯 20~50 度、東経 120~150 度で、図 5.1 の白抜 き部をカバーしている。期間は 1994 年 2 月 1 日~2004 年 1 月 31 日(10 年間、12 時間間隔)である。波浪推算値の 精度は、有義波高の 12 時間先予測値で 0.885~0.912 であ ることが報告されている⁸⁾。

この波浪推算値を基に、緯度・経度 0.5 度間隔、月別に 解析を行い、統計データベースを作成した。

本データベースでは H、T、 χ 、Vw、 γ の5 要素から2 要素を選んだ発現頻度表が利用できるだけでなく、H-T- χ の同時発現頻度表が利用できることが特徴である。発現 頻度表における波と風の各要素の区分は、H: 0.5m、T: 1.0s、 χ : 30deg.、Vw: 2.5m/s、 γ : 30deg.としている。

5.2 統計的性質

5.2.1 気象・海象の平均的傾向と荒れた状態の傾向

日本近海の波と風データベースを用いて、気象・海象の 空間分布を作成することにより、平均的傾向、荒れた状態 での傾向を知ることができる。

平均風速 Vw 及び有義波高 H について通年平均値の等値 線を図-5.2, 5.3 に示す。図-5.2 から、平均風速の通年平均 値は、房総半島東方海域で 8m/s を超え大きいこと、日本 海では北海道西方で約 7m/s、東シナ海では台湾北方海域 で約 7.5m/s の空間的ピークを有することが分かる。図-5.3 から、有義波高の通年平均値は、房総半島東方海域で 2.5m 程度と沖合に行くに従い大きくなること、日本海では津軽 海峡西部で約 1.75m のピークが存在することが分かる。な お、有義波高の平均的傾向は、第三世代モデル WAM による波浪追算でも調べられており、同等の結果が示 されている⁹。

次に、(5.1)式に示す超過確率*Q*を用いて、気象・海 象の荒れやすさの傾向を表す。

$$Q(x) = 1 - \int_{-\infty}^{x} p(t)dt \tag{5.1}$$



図-5.2 平均風速の平均値(通年)



図-5.3 有義波高の平均値(通年)

すなわち、超過確率 $Q = 10^{-2}$ (発現値の上位 1%の値)

での平均風速 Vw、有義波高 H を求め、これから等値線 図を作成することにより、気象・海象の荒れやすさの 傾向が分かる。これらの等値線図を図-5.4, 5.5 に示す。 図-5.4 から、三陸東方から房総半島東方にかけて平

図-5.4 から、二座東方から房総千島東方にかりて平 均風速 20m/s 程度の強風海域が広がっていることが分 かる。これは冬季季節風によりこの海域の風速が大きくなることから、その影響と考えられる。

図-5.5 から、沖縄南東海域が荒れやすい海域であり有義 波高 6m 程度であることが分かる。これは台風の影響と考 えられる。



図-5.4 超過確率 10-2 での平均風速の等値線(通年)



図-5.5 超過確率 10-2 での有義波高の等値線(通年)

5.2.2 発現確率と基本統計量

実海域では様々な海象に遭遇するが、その発現確率によ り、海域の統計的性質を表現することができる。また、発 現確率と船体応答から、船体応答の長期予測が行われる。 航行距離と方角がほぼ等しい東京一釧路(往復)、舞鶴 一小樽(往復)航路(図-5.6)を、それぞれ太平洋側、日 本海側の例に選び、航路に沿った海象の発現確率と基本統 計量(平均値、最頻値)を求めた。



東京-釧路航路の出会波向 χ_r の発現確率 $p(\chi_r)$ を

図-5.7 に、 χ_rに関する H と T の条件付き同時発現確

率 $p(H,T \mid \chi_r)$ を図-5.8 に示す。ここで、出会波向 χ_r は

船の方位に対する波の進行方向で、0deg.を船首方向(向 波)としている。なお、往復航行のため、発現確率は 180 度対称となり、図-5.8 ではその部分を省略している。

図-5.7 及び 5.8 から、東京一釧路航路では向波、追波 となる確率が他より低いが、向波、追波で有義波高が 最大となる海象が生じていることが分かる。

次に、東京一釧路航路、舞鶴一小樽航路の H, T, Vw の通年平均値、最頻値をそれぞれ表-5.1、表-5.2 に示す。 これらから、日本海側は太平洋側に比べ H, T, Vw の通 年平均値、最頻値のいずれも小さいことが分かる。ま た、両航路の Vw の差に比べ、H, Tの差が顕著である。 これは、外洋からのうねりの影響で、太平洋側では日 本海に比べ H、T が大きくなるためと考えられる。



図-5.7 出会波向発現確率 $p(\chi_r)$ (東京一釧路)



図-5.8 出会波向別の有義波高-有義波周期の同時発現確

率 $p(H,T \mid \chi_r)$ (東京一釧路)

表-5.1	平均値と最頻値(東京-釧路:通年)			
項目	平均值	最頻値	最頻值出会方向	
H	1.76m	2.0m	斜向波 , 斜迫波	
Т	6.70s	6.5s	新时候·新坦彼	
V_w	6.96m/s	6.75m/s	斜向風・斜追風	

表-5.2	平均値と最頻値	(舞鶴-小樽	:	通年)

項目	平均值	最頻値	最頻值出会方向
Н	1.48m	1.5m	向波 • 追波
Т	5.61s	5.5s	问彼。但彼
V_w	6.56m/s	6.25m/s	向風・追風

5.2.3 極値統計解析による長期分布推定

長期に亘る海象の極大値の推定は、海象の示す極大値が 従う長期分布を仮定して、再現期間に対する再現値を求め ることにより行われる。前節と同じく東京-釧路航路、舞 鶴-小樽航路に対し極値統計解析を行った。ただし、海洋 構造物と異なり、船舶は荒天域を避けることが可能であり、 実際にはこのような海象には遭遇しないが、ここでは、航 路に沿った海象の統計的性質を調べるために解析を行っ た。 解析には10年分の年間最大値の全数極値資料を用い、 合田¹⁰⁾に従い Fisher Tippet I (FT-I)型分布((5.2)式)、 Weibull 分布(形状母数 *k* =0.75、1.0、 1.4、2.0:(5.3) 式)から最良近似となる分布を最小 2 乗法により推定 した。

$$P(x) = \exp\left\{-\exp\left(-\frac{x-B}{A}\right)\right\}$$
(5.2)

$$P(x) = 1 - \exp\left\{-\frac{(x-B)^k}{A}\right\}$$
(5.3)

ここで、Aは尺度母数、Bは位置母数である。

標本のプロッティングポジションを定める非超過確率 *Pm*は、FT-I型分布に対しては Gringorten 公式((5.4)式)、Weibull 分布に対しては Petruaska & Aagaard 公式 を修正した合田の式((5.5)式)を用いた。

$$P_m = 1 - \frac{m - 0.44}{N + 0.12} \tag{5.4}$$

$$P_m = 1 - \frac{m - \left(0.20 + \frac{0.27}{\sqrt{k}}\right)}{N + 0.20 + \frac{0.23}{\sqrt{k}}}$$
(5.5)

ここで、*m*は標本を降冪に並べたときの順位、*N*は極 大値の総数である。また、母集団が未知であることに 起因する偏り修正も行った。

これら標本パラメータと推定した分布パラメータを 表-5.3 に示す。ここでx、sは標本の平均値及び標準

偏差、k、 \hat{A} 、 \hat{B} は推定した形状母数、尺度母数及び 位置母数、rは相関係数である。

表-5.4 に再現期間 *R*、有義波高の再現値(確率波高) *H_R* 及び標準誤差 σ(*H_R*)を示し、分布形状と標準誤差の 幅を航路別に図-5.9、図-5.10 に示す。これらから、太 平洋側航路は日本海側航路に比べ、確率波高が約 1.5 倍大きく、推定の標準誤差は約 2 倍大きいことが分か る。 また、有義波高の年間最大値の発生時期と海域 を調べると、東京一釧路航路では、秋季の房総半島沖 で生じることが多く、舞鶴一小樽航路では冬季の津軽 海峡西部で生じることが多い。

航路	有義波高		
項目	東京-釧路	舞鶴-小樽	
\overline{x}	8.73m	7.37m	
S	1.82m	0.75m	
最適分布形状	FT-I	Weibull	
k	-	1.0	
Â	1.51m	0.82m	
\hat{B}	7.91m	6.55m	
r	0.985	0.988	

表-5.3 標本及び最適分布パラメータ

表-5.4 再	現期間と	催率波局
---------	------	------

	再現 期間	東京一釧路		舞鶴一小樽	
		H_R	$\sigma(H_R)$	H_R	$\sigma(H_R)$
	10年	11.9m	1.7m	8.5m	0.8m
	20 年	13.2m	2.3m	9.1m	1.1m
	30年	13.9m	2.7m	9.5m	1.3m
	50年	14.8m	3.3m	9.9m	1.6m
	100年	16.1m	4.1m	10.6m	2.0m



5.3 波と風のデータベースのまとめ

このデータベースを利用して、有義波高の平均値及び超 過確率10⁻²での等値線図を示した。これから、房総半島東 方で平均的に有義波高が大きく、日本海側では津軽海峡西 部に有義波高のピークが存在すること、また、沖縄南東沖 海域が荒れやすいなど、船舶の初期設計に必要な波浪状況 が得られることが示された。さらに、船型設計時の具体的 な想定として、東京一釧路、舞鶴一小樽航路を選び、航路 に沿った海象の発現確率、基本統計量、極値統計解析によ る確率波高を求めた。その結果、太平洋側と日本海側 では海象の統計的性質が異なり、有義波高は太平洋側 が日本海側に比べ大きいこと、極値統計解析による確 率波高の標準誤差も太平洋側が大きいことを定量的に 示した。このような情報は将来のより高度化された SBD システムの中では、設計条件あるいは、耐航性能 に基づく制約条件を評価するときの入力データとして 活用されることが期待される。



図-5.10 再現期間と確率波高(舞鶴-小樽)

6. SBD システムの高度化(1) (CFD によるシャフトブラケット船尾の計算)

第2章で示した SBD システムで使用した CFD コー ド、NEPTUNE は構造格子系に基づく高速ソルバーで あり、最適化計算に適した計算法であるが、反面、シ ングルブロックの構造格子を用いていることから、複 雑な形状を有する船体周りの流れ解析は、現状では困 難である。今回、例として用いたシャフトブラケット を有する高速二軸船に対して、プロペラ影響を含めて 船型最適化を行う場合は、付加物も考慮した流場を計 算する手法を用いる必要がある。そこで、本章では SBD システム高度化の一つとして、複雑形状への適用を念 頭にして、非構造格子系に基づくシャフトブラケット を装備した船体周りの流場計算例を示す¹¹⁾。

ここで紹介する手法は海上技術安全研究所で開発された非構造格子系に基づくNSソルバーSURFによるものである。SURFの概要は以下の通りである。

- 支配方程式は、擬似圧縮性を考慮した NS 方程 式。
- ・ 空間離散化はセル中心の有限体積法。
- ・ 非粘性項は、2次精度の MUSCL で評価。
- ・ 粘性項は、2次の中心差分で評価。
- ・ 時間離散化は1次の陰的差分。
- ・ NS 方程式の解法は、準 Newton 法+SGS 法。

- ・ 自由表面は、レベルセット法による界面捕獲法。
- 乱流モデルは Spalart-Allmaras モデル(オリジナル と修正版)。
- ・ 高速化のために、マルチグリッド法を適用。
- 非構造格子に対応。

ただし、本計算例では自由表面は対称条件を用いた。また 非構造格子生成は、市販コード CENTOUR を用いた。

6.1 計算結果例

計算対象は今回の研究における母船型(2 軸高速フェリー)である。主要目や船型は2章に示されている。計算条件は、自由表面を対称面として扱う二重模型流れとし、レイノルズ数は水槽試験にあわせ、2.1×10⁷とした。

図-6.1 に船尾付近の格子分割を示す。船体表面および水面(上下対称面)に、三角形および四角形の格子を用いることで、シャフト、シャフトブラケット、舵などの付加物を含む複雑形状まわりに格子を生成することができる。なお、物体表面付近はプリズムあるいはヘキサ形状として、物体に垂直な方向の格子間隔をコントロールすることによって、格子を集中させている。





図-6.2 には船尾付近の圧力分布の計算結果を示した。プロペラ影響は無限翼数プロペラ理論をもとにした体積力 モデルで表現されている。船体表面のみでなく、複雑な形 状を有するシャフトブラケット周りの圧力分布やプロペ ラ後流中の舵表面圧力も計算されている。



図-6.2 船尾部の圧力分布の計算例



図-6.3 母船型のプロペラ面での伴流分布 図-6.3 にはプロペラ影響がない場合の、プロペラ面 に流入する伴流分布を示した。左側は実験結果、右側 は計算結果である。実験結果では計測点数が少ないこ ともあり、計算結果に見られるシャフトブラケットの 伴流と思われる低速域が明確に現れていない。計算結 果をさらに検証するためには、計測密度の高い実験が 必要であるが、全体的な傾向で言えば、実験と計算の 一致度は良好である。

6.2 今後の課題

本手法を将来 SBD システムに組み込むためにクリア すべき用件を列挙すると、まず、計算時間の短縮が上 げられる。これはコンピュータハードウエアの今後の 発達にも依存するが。計算スキームとしてもより高速 な手法の開発が望まれる。さらに、最適化プロセスに おいて、船型が変化したときに、初期格子と同じトポ ロジーを維持したまま(格子間の関係を維持したまま) 柔軟に非構造格子型を再構成するシステムが SBDシス テムに組み込まれる必要がある。非構造格子生成法の 開発はそれ自体、大きな研究要素をなすため、現状は 商用コードを用いているが、このような外部プログラ ムを SBD システムという大きなフレームワークの下で動 かせるようなシステム化も今後の課題である。

SBD システムの高度化(2) (耐航性能評価法の改良)

SBDシステムの様な設計システムで対象とする船種は、 今回対象としたフェリーに限らないことは言うまでもな い。例えば、定時性を確保するために荒天中を航海速力に 近い船速で航行するコンテナ船のような船種も評価する 場合がある。このような荒天中では波高の増加にともない 船体運動が大きくなるため、大振幅動揺による非線形影響 が強くなる。今回 SBD システムに実装した耐航性能評価 法は、従来の線形理論に基づく方法であって、基本的に船 型は静止水面以下のみ考慮されている。しかしながら、船 舶はその航海において少なからず荒天中を航行するため、 大波高中での大振幅動揺やスラミングと海水打ち込みに よる衝撃荷重等による波浪荷重及びこれに対する構造強 度が問題となる場合がある。また、長期・短期海象におけ る性能評価をする際には、このような荒天中での性能評価 は不可欠である。より一層実用的な設計システムにするた めには、これらの評価も適切に組み込んでいく必要がある ため、平水中での推進性能の検討ではほとんど考慮されな い水面上形状を考慮する必要がある¹²⁾。

そこで本節では、SBD による設計システムの将来における高度化の観点から、静止時の水面上形状を考慮した実用的推定法について記述する。本手法をモジュール化の上、SBD システムに組み込むことで水面上形状を評価指標として加えることが可能となる。

7.1 大波高中運動性能推定法

はじめに、当所で開発した大波高中での船体運動推定法 NMRIW(<u>Nonlinear Motion in Regular and Irregular Waves</u>) ¹³⁾について概説する。本推定法は、時々刻々の水面下形状 とラディエイション及びディフラクション流体力を考慮 した時系列計算法であり、非線形ストリップ法の考えにも とづいている。

波浪中での操縦運動や斜波中の耐航性能を評価するためには、波による流体力だけでなく、操縦流体力も考慮する必要がある。異なる座標系で扱われてきたこれらの流体力を同時に取り扱うために、Horizontal Body 座標系¹⁴⁾を用いて流体力を表した。これにより、大振幅の回転運動を近似的に取り扱うことなく船体重心周りの 6 自由度の運動 方程式を解くことができる。座標系を図-7.1 に示す。

このように操縦流体力も考慮した船体運動方程式は、次 式で表すことが出来る。

$\mathbf{A}(\omega_e)\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{B}(\omega_e)\dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C}\mathbf{X}(t) = \Xi(\omega_e, t) + \Gamma(t)(7.1)$

ここで、ω_eは出会い波周波数、*A*,*B*,*C*はそれぞれ 6 ×6の質量及び付加質量マトリックス、造波減衰力マトリ ックス、復原力マトリックス、X は船体運動ベクトル をそれぞれ表す。また、 E は波強制力ベクトル、 *Г*は 操縦流体力ベクトルを表す。この運動方程式では、プ ロペラスラストと船体抵抗及び舵による流体力も考慮 している。また、舵を PID 制御することで船の針路を 制御している。



図-7.1 NMRIW の座標系

非線形ストリップ法にもとづく計算法はこれまでに もいくつか開発されている^{たとえば15)}。しかしながら、こ れらは船体固定座標系において波浪による流体力だけ を考慮していたため、斜波中におけるブローチング等 による大きな回頭運動や、斜波中での波浪荷重の推定 が困難であった。この結果、主に正面向波中での船体 運動の計算に活用されるだけであった。本研究で開発 した推定法では、流体力の取り扱いを変えることで、 これまでほとんどの手法で困難であった斜波中での船 体応答の推定が可能となる。

7.2. 模型実験による手法の検証

本手法の妥当性を検証するため3章で示した改良高 速フェリー模型を用いて模型実験を行った。はじめに、 当所400m水槽(長さ×幅×深さ:400×18×8m)にお いて規則波中試験を行った。模型船をガイド装置に取 り付けて正面向波中(χ =180°)を曳航し、波浪中抵抗増 加、船体運動及び上下加速度を計測した。船速は、航 海速力31.9kt(Fn=0.3833)に設定した。上下揺、縦揺、 前後揺の船体運動は、ポテンショメーターにより計測 した。左右揺と船首揺は拘束している。また、加速度 計を用いて S.S.8 での上下加速度を計測した。なお、こ のときの縦慣動半径 κ y/Lpp は 0.243 であった。

波高が抵抗増加や船体運動に及ぼす影響を調べるた め、波高 Hw は 2.3m (Hw/Lpp≒1/80)、3.1m (Hw/Lpp ≒1/64)、5.1m (Hw/Lpp≒1/37) の3種類を設定した。

さらに、短期海象での運動性能について調べるため に、当所 80m 角水槽(長さ×幅×深さ:80×80×4.5m) において長波頂不規則波中実験も行った。ここでは、 正面向波(χ=180°)及び斜向波(χ=135°)における船 体運動、上下加速度、相対水位変動を計測した。不規 則波は実船スケールで平均波周期 T_{02} =8 秒、有義波高 $H_{1/3}$ =2m 及び 4m に設定した。波スペクトルは ISSC スペク トルを用いた。実験で用いた出会い波の数は約 1000 波で ある。ここでは、波高 1m の規則波中(正面向波及び斜波) での船体運動、上下加速度、相対水位変動の計測も別途行 った。

7.2.1 船体運動

正面向波中で計測した上下揺と縦揺の応答関数を波高 毎に整理して図-7.2 及び図-7.3 に示す。縦軸は、フーリエ 解析により求めた 1 次成分であり、上下揺振幅 Z は波振幅 くで、縦揺振幅 θ は最大波傾斜 k くでそれぞれ無次元化し ている。ここで k は波数を表す。横軸は波長船長比 λ/L で ある。図中には本推定法による計算結果を実線及び点線で 示す。また、斜向波中(χ =135°)での上下揺と縦揺の応答 関数を図-7.4 に示す。



(正面向波(x=180°)、Fn=0.3833)



(正面向波(χ=180°)、Fn=0.3833)

今回比較対象とした実験は、フルード数 0.3 を越える高速 域での実験であるため、ストリップ法ベースの計算法では 十分に考慮できていない前進速度影響により主に縦運動 の同調点付近での精度が低くなると予想された。しかしな がら、本推定法による計算結果は、同調点付近ほど波高の 非線形影響も大きくなく相対的に高い精度で推定できる と予想された長波長域の計算結果のうち、斜向波中で実験 値との差が大きくなるものの、概ね精度よく推定できてい ることがわかる。

これまでの研究結果から、ある程度波高が大きくな りスラミングや海水打ち込みが頻繁に発生するように なると、船体運動の非線形影響が強くなることが知ら れている¹³⁾。本実験の波高は最大で約5mと極端に大 きくはない。また、波高の二乗の関数で表される波浪 中抵抗増加に比べると船体運動に対する波高の非線形 影響は顕著ではない。しかしながら、後述する波浪中 抵抗増加の結果とも照合した結果、縦運動の同調点付 近で波高が大きくなるにつれて振幅の無次元値が微小 ではあるが小さくなっている本研究での実験結果にも、 波高による非線形影響が現れていると考えられる。



図-7.4 上下揺及び縦揺の応答関数 (斜向波(χ=135°)、Fn=0.3833、波高1m)

7.2.2 上下加速度及び相対水位変動

正面向波中で計測した上下加速度(S.S.8)の応答関数 を波高毎に整理して図-7.5 に示す。縦軸は、フーリエ 解析により求めた1次成分であり、加速度振幅 a を船 長 L と波振幅くの比 L/gくで無次元化したものである。 また、正面向波及び斜向波における相対水位の応答関 数を図-7.6 に示す。

これらの結果から、船体運動の場合と同様に、本推 定法により上下加速度と相対水位が精度よく推定でき ていることがわかる。また、あまり顕著ではないが、 上下加速度にも波高による非線形影響が現れているこ とがわかる。





図-7.6 相対水位変動の応答関数 (S.S.91/8、正面向波及び斜向波、Fn=0.3833、波高 1m)

7.2.3 波浪中抵抗增加

波浪中抵抗増加 R_{AW0}の推定には、丸尾の抵抗増加公式¹⁶⁾を用いた。公式の入力である船体運動は、NMRIW により計算した。これにより大波高中での波浪中抵抗増加の推定が可能となる¹⁷⁾。

また、本推定法はストリップ法の考え方に基づいて船体 運動を計算しているので、船首部の反射波による抵抗増加 は考慮していない。そのため、反射波による成分△*R*_{AW}は、 藤井・高橋¹⁸⁾の式を用いて推定した。ここで示す波浪中 抵抗増加の計算結果は、両成分の和(=*R*_{AW0}+△*R*_{AW})を表す。

正面向波中での波浪中抵抗増加の応答関数を波高毎に 整理して図-7.7 に示す。縦軸は、波浪中抵抗増加を ρ gB²H_W²/L で無次元化した値である。先にも述べたように、 計算値及び実験値ともに波浪中抵抗増加に対する波高の 非線形影響が船体運動に比べて大きくなっていることが わかる。しかしながら、波高の非線形影響が顕著になりは じめる波高が計算値と実験値では異なった。今回比較対象 とした実験は、フルード数 0.3 を越える高速域での実験で あるため、ストリップ法ベースの計算法では前進速度影響 を十分に考慮できていない。この結果、本研究のような違 いが生じたと考えられる。このような高速域での推定精度 向上については、今後の課題としたい。しかしながら、本 推定法による計算値は、短波長域で実験値との差が大きく なるものの、波高の非線形影響を考慮した合理的な推定が 可能であることがわかる。船舶の大型化が進む昨今、短波 長域での推定精度向上は、今後益々必要になってくると予 想される。短波長域では、反射波成分が卓越するが、船体 運動の精度による誤差も必ずしも無視できない。今後更に 詳細に解析が必要となるため、こちらも今後の課題といた したい。



(正面向波、Fn=0.3833)

7.2.4 不規則波中船体運動

不規則波中の船体運動性能を評価するためには周波 数応答関数を求めるだけではなく、短期及び長期海象 における最大期待値を計算する必要がある。ここでは、 この計算に必要となる船体運動の分散値についても検 証を行った。結果の一例として、縦揺の超過確率につ いて示す。正面向波($\chi = 180^\circ$)及び斜向波($\chi = 135^\circ$) 中での縦揺の時系列から正負それぞれの極値のヒスト グラムを求め、これから超過確率を計算した。極値の 絶対値の超過確率を図-7.8 及び図-7.9 に示す。ここでは、 船首上げを正とする。縦軸は超過確率を対数軸で表す。

運動が大きくなるにつれて非線形影響が顕在化する。 超過確率が 0.01 以下で比較すると、有義波高 4m の縦 揺は、同じ超過確率での有義波高 2m の縦揺の 2 倍よ りも小さくなっており、縦揺は波高に比例しないこと がわかる。このことからも、規則波での実験結果と同 様に波高の非線形影響があることが確認できた。



有義波高 2m 及び 4m、平均波周期 8 秒)





また、本推定法を用いて、不規則波の有義波高(2m及び4m)と等しい波高で縦揺の周波数応答関数を計算した。 これと波スペクラム(ISSC スペクトラム)を掛け合わせ る事で縦揺の分散値を計算した。このようにして求めた縦 揺の分散値を用いたレーリー分布を同じく図-7.8,7.9 に Cal.として示す。

波高が大きくなるにつれてスラミングや海水打ち込み が激しく発生するようになると、正負の非対称性が顕著に なる。そのために実験値とは差が大きくなるものの、本推 定法を用いた超過確率は実験値をよく説明している事が わかる。このように、波高の非線形影響を考慮した周波数 応答関数を用いる方法は、長波頂不規則波中での超過確率 の推定に有用である事がわかる。

また、本推定法を用いることにより波高の非線形影響を 考慮して波浪中抵抗増加を計算することが出来る。不規則 波中での抵抗増加量の計算例を図-7.10 に平均波周期の関 数として表す。有義波高 H_{1/3}は 1.87m と 5.0m の 2 状態と した。波向きは正面向波とし、波浪中での船速はフルード 数 Fn=0.3833 で一定とした。波スペクラムは ISSC スペク トラムを仮定した。船体運動に対する波高の非線形影響が 大きくなる波周期の範囲では、抵抗増加量に対する波高の 非線形影響も同様に大きくなることが分かる。このように、 本推定法により水線面上形状を考慮した不規則波中にお ける抵抗増加量の評価が可能となる。



7.3 まとめと今後の展望

大波高中での船体応答推定法を開発し、高速フェリ ーを用いた波浪中実験結果と比較することにより検証 を行った。その結果、以下のことが分かった。

- (1)船体運動に比べて波浪中抵抗増加に対する波高の 非線形影響は相対的に大きくなる。
- (2)本推定法のように、時々刻々の水面下形状を考慮することで、荒天下での船体運動や波浪中抵抗増加を 精度よく推定することができる。
- (3)本推定法を用いることで、船体応答の超過確率を 適切に把握することができる。

本計算法は、時系列計算法であるもののストリップ 法がベースになっているため、計算時間を要さないと ころが特徴である。パソコン(Pentium 3GHz 程度)を用 いて 2,3 分程度で周波数応答関数及び短期海面におけ る応答の分散値まで計算することが出来る為、SBD シ ステムに組み込む上での物理的な制約は殆どない。

今後は、推定法の更なる精度向上を図る一方で、波 浪中性能と水線面上形状を定量的に結びつけることが 課題となろう。波浪中での運航を評価することは単に 船速だけでなく、安全上の点から耐航性能や構造強度 を適切に制約条件として組み合わせる必要がある。し かしながら、現状では水線面上形状と耐航性能及び構 造強度との定量的な関係が十分に明らかにされたとは 言い難い。また、本手法においては短期海面の確率分 布をレーリー分布と仮定しているが、対象とする応答 によっては、この仮定の妥当性も吟味する必要がある。 これらについては、更に研究を進める必要があり今後 の課題としたい。

8. まとめ

本研究の概要および得られた知見を以下にまとめる と、

- 実海域性能を考慮した船型設計法を開発するため、 設計システムの雛形を構築した。本システムでは、 まず母船型を設定し、与えられた設計条件および 制約条件を満たしながら目的関数を最小とするよ う船型を探索していく最適化手法を基幹の技術と している。
- 2)本研究では主として流体力学的性能の観点から船型改良を行った。このため目的関数は、与えられた海象下での短期予測に基づく抵抗増加量と平水中の抵抗の和とした。また、制約条件は、復原性規則および運航条件(船首上下加速度が母船型より上回らないこと)を課した。
- 3)本システムを用いて、2軸高速フェリーを例に取り、船型の最適化を行った。最適化された船型は母船型とともに水槽試験を実施した。その結果、

設計速度で改良船型が平水中、波浪中とも抵抗が下回 っていることが確かめられた。

- 4) 設計システムに不可欠なユーザーインターフェースに 富んだ設計総合環境の開発の一例として、船型のチェ ック、CFD および耐航性能計算が一元的に行えるイ ンターフェースを開発した。本システムは船型改良と してのシステムだけでなく、CFD 計算を行った船型 に対して、耐航性能計算も設計者の手間を煩わせるこ となく実行できるなどの利点を備えている。
- 5) 船舶の初期設計および船型改良時の制約条件を設定す るためには、想定航路の海象条件の設定が必要である。 このため、日本近海の風および波浪データベースを構 築し、その有効性を紹介した。
- 6) 今回の SBD システムの一部である CFD 技術の高度化 として、2軸船で装備されているシャフトブラケット を含む複雑船型形状周りの流場解析を非構造格子系 に基づく CFD コードを用いたで解析を行った。
- 7) 今回の SBD システムの一部である耐航性能計算法の 高度化として、静止水面より上方の船体形状を考慮し た耐航性能計算法を示し、計算値と実験値を比較する ことにより本方法の有効性を示した。

今後の課題として、

- 1) 船型の数式表現法の柔軟化:
 - 今回は船体変形量を船体全体にわたり Bezier パッチ で表現したが、この方法では局所的な変形に不向きで ある。一つの方法として局所的にパッチを当てていく 方法があるが、これを行うには設計者がどの部分にパ ッチを当てるか流体力学的、幾何学的な指標に基づき インタラクティブに指定できるようなユーザーインタ ーフェースの開発など、新たな名技術開発が必要であ る。
- 2) 船体プロペラ干渉を含めた船型及び推進器の最適 化:

現時点では CFD による自航要素の推定が可能とな りつつあるので、プロペラ設計法の組み込みが課題 となる。

3)多胴船等の複雑な形状の船型改良への拡張: 今回、複雑形状周りの CFD 技術の拡張として、2軸 船の船尾まわりの流場シミュレーション例を示すこと により機能としての可能性は示すことができたが、省

参考文献

エネデバイスなどの付加物装着状態の船型改良や、多 胴船の船型改良に柔軟に対応できるためには、ユーザ ーインタフェースに優れた格子生成システムの整備が 必要である。 などがある。

1)Boudreaux, J.S., Naval Ships and Simulation Based Design,

SNAME Trans. vol.103 (1995).

- 2)Hino,T. and Hirata,N.: A CAD/CFD Integration System for Ship Hull Form Design, Proc. of 1st World Matirime Conf. of Marine Tech., SNAME (2003).
- 3)Hirata,N. and Hino,N.: An Efficient Algorithm for Simulating Free-Surface Turbulent Flows around an Advancing Ship, JSNAJ, vol.185 (1999).
- 4) Hino, T.: Shape Optimization of Practical Ship Hull Forms Using Navier-Stokes Analysis, Proc. of 7th Intern. Conf. on Numerical Ship Hydrodynamics (1999).
- 5)Hirata,N.: Comparison of Genetic Algorithm and Gradient-Based Method Applied to Ship Shape Optimization, JKSNAJ, no.241 (2004).
- 6)Coello,C.A. and Pulido,G.T.: A Micro-Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization, 1st Intern. Conf. on Evolutionary Multi-Criterion Optimization (2001).

7)http://www.nmri.go.jp/wwjapan/namikaze main.html

- 8)日本気象協会:沿岸局地波浪予測手法の研究開発報告 書, 平成6年度事業, 1995.
- 9) Kawaguchi, K. and Hashimoto, N.: Characteristics of Ocean Waves around Japan Based on WAM Wave Hindcasting Data, Proc. of 13th ISOPE, 2003.
- 10) 合田良実:極値統計におけるプロッティング公式な らびに推定値の信頼区間に関する数値的検討、港 湾技研報告, 第 27 巻第 1 号, 1988.
- 11)Hino, T., Ohashi, K. and Ukon, Y.:Flow Computations around a Ship with Appendages by an Unstructured Grid Based NS Solver, Proc. of 8th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Busan, Korea, 2003.
- 12)日本造船学会試験水槽委員会:日本造船学会試験水 槽委員会シンポジウム「実海域における船舶性能に 関するシンポジウム」、2003.
- 13)Ogawa, Y. et. al. : The effect of a bow flare shape on the water impact pressure, Proceedings of ISOPE2005, 2005.
- 14)Hamamoto, M. et. al.: A New coordinate system and the equations describing manoeuvring motion of ship in waves, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.173, 1993.
- 15)藤野正隆他:大波高波浪による船体の波浪荷重に関 する研究(第1報)、日本造船学会論文集第156号、 1984
- 16) 丸尾孟他: 簡易化公式による向い波中抵抗増加の計 算、日本造船学会論文集第 140 号、1976.
- 17)小川剛孝他:荒天時の波浪中抵抗増加について、第3 回海上技術安全研究所研究発表会講演集、2003.
- 18)藤井斉他:肥大船の波浪中抵抗増加に関する実験的 研究、日本造船学会論文集第137号、1975.