

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/269437070>

Proposal of Ultra Large Block Coefficient Ship and Fundamental Studies on its Bow Wave Breaking

Article · January 2013

DOI: 10.2534/jjasnaoe.18.1

CITATION

1

READS

60

4 authors, including:



Md Ali

Memorial University of Newfoundland

10 PUBLICATIONS 7 CITATIONS

SEE PROFILE



Takanori Hino

Yokohama National University

63 PUBLICATIONS 501 CITATIONS

SEE PROFILE



Aye Aye Mon

Myanmar Maritime University

2 PUBLICATIONS 1 CITATION

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Hydrodynamic interaction [View project](#)

超肥型船型の提案と船首碎波に関する基礎的研究

—碎波現象の基礎的実験およびポテンシャル理論による検討—

正会員 鈴木 和 夫* Md. Ashim Ali **
正会員 日 野 孝 則* Aye Aye Mon ***

Proposal of Ultra Large Block Coefficient Ship and Fundamental Studies on its Bow Wave Breaking

by Kazuo Suzuki, *Member* Md. Ashim Ali
Takanori Hino, *Member* Aye Aye Mon

Summary

Due to the increase of maritime transportation volume day by day it is necessary to design a ship hull having large carrying capacity with low resistance. For this purpose, the authors propose innovative concepts of Ultra Large Block coefficient Ship (ULBS). In this paper, its concepts and study plans are shown, and its bow wave breaking phenomena are investigated as one of the fundamental studies on ULBS hull form. As experimental studies, wave breaking surface areas caused by ULBS models are measured. As theoretical ones, wave making resistance coefficients and distributions of free surface elevation are evaluated by means of Rankine source method, and distributions of free surface disturbance function $D(x, y)$ are evaluated by means of Baba's low speed theory. Various parameters related to the wave breaking phenomena are investigated in comparisons between experimental and theoretical results. Under these investigations, it can be concluded that theoretical results based on wave making resistance coefficients, surface integrals of the square of free surface elevation and surface integrals of the square of free surface disturbance function have strong relations to wave breaking surface areas.

1. 結 言

本論文では、低速航行省エネルギー船型として超肥型船型 ULBS (Ultra Large Block coefficient Ship) を提案し、必要となる船型学的研究のプランを示すとともに、その基礎的研究として、まず ULBS 船型の肥大な船首まわりに生じる碎波現象の観察およびポテンシャル理論による基礎的検討を行った結果について報告する。

省エネルギーの最も効果的な対処方法のひとつは航行速度を下げることであるが、これによる輸送効率低下の問題を、肥大度の増加による載貨重量増でカバーするのが ULBS 船型の狙いである。最近の肥型船型は肥大度が非常に高く実用上の限界に近いと考えられているが、本研究では方形係数が 0.95 以上、 L/B が 5 以下の箱船に近い ULBS 船型を目指す。このような極端な船型については、常識的な形状を踏襲した

だけでは実現が困難であるので、本研究では創造性のある形状を提案するとともに、従来の様々な船型学的知見を考慮しつつ、流体力学的な検討を実施していく。

2. ULBS 船型の提案

船型開発に関わると考えられる最近の状況を模式的に示すと Fig. 1 のようになる。世界の海運による輸送量は経済状況に左右されるとはいえ増加の一途である。従って、肥型な船舶が志向されるようになるのは必然と考えられるが、それに伴って省エネルギーや CO₂ 等の GHG 排出削減などの環境問題、バラスト水による外敵生物侵入の問題等をクリアしていく必要がある。また、2014 年竣工予定でパナマ運河の現行可航最大幅 32.6m が 49m に拡張されるので、 L/B が 5 以下で幅が 49m、という船舶もパナマ運河航行可能船として現実味を帯びてくることになる。本研究では、これらの様々な条件を考慮した上で ULBS 船型として、方形係数が 0.95 以上、 L/B が 5 以下の箱船に近い船型を提案する。極論すれば、低抵抗で箱船を走らせるという目標のプロジェクト、と言ってもよい。しかしながら、このような極端な船型については、現行技術の単なる延長により目標をクリアすることは難しいと考えられ、先にも述べたように常識的な形状を踏襲しただけでは実現は困難であると予想される。従って、創造

* 横浜国立大学大学院工学研究院

** バングラデシュ工科大学(研究当時 同上工学府)

*** 横浜国立大学大学院工学府

性のある形状とともに様々な船型学的検討が必要になってくる。

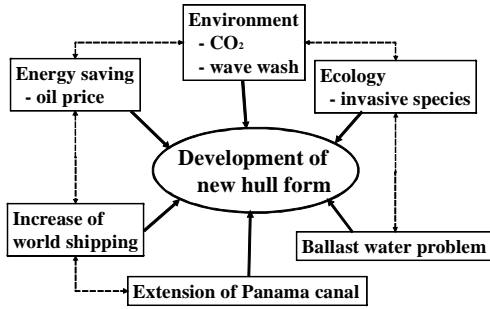


Fig. 1 Background of ULBS.

本研究で提案する ULBS 船型の概念図を Fig. 2 に示す。Fig. 2 に見られるとおり提案する船型は独特な船尾形状を有し、平底船型で中央横切面積係数は 1 に限りなく近い。本研究ではこのような独特な形状に対して、様々な流体力学的検討に基づく付加物等を積極的に採用することにより、フルード数で 0.1 程度、船長 250m 程度、実船換算速力で 10 ノット程度を初期の目標として実現性のある船型を提案したい。まず、ULBS の概念に基づく基本船型の抵抗特性を把握した上で、Fig. 2 に示したように現段階(順不同)では、スパイク型船首バルブやフィン型付加物による船首部砕波抵抗低減、平底船型を活かした空気膜やマイクロバブルによる船底部摩擦抵抗低減、ダクト型推進装置の船側部流体吸込による境界層制御、船尾部両舷に配置されたタブ型舵とダクト型推進装置による死水領域低減や船尾流一様化に基づく伴流抵抗低減(ロケットの底面抵抗低減と似たアイデア)、両舷のタブ型舵とダクト型推進装置および船尾船底部の溝形状(船尾ガイドチャンネル(トンネル))による左右流場対称性の保持、等が可否も含め流体力学的な検討事項になるものと想定している。このような検討を順次進めていくことにより最終的にはフルード数で 0.15 程度の速力、すなわち現行の肥大船の速力 15 ノット程度の可能性をも視野に入れて研究を実施していきたい。

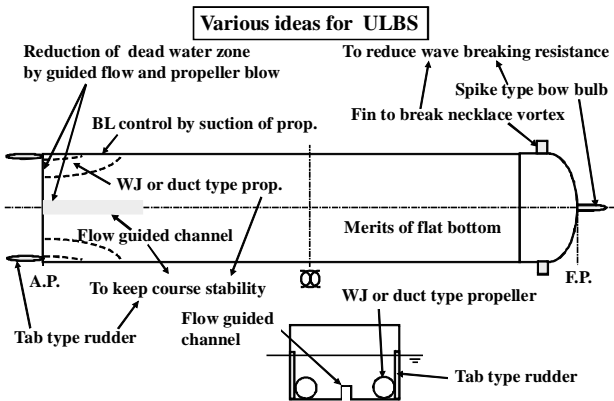


Fig. 2 Proposed ULBS hull form.

ULBS 船型に関する研究プランを Fig. 3 に示す。実験や CFD 等の数値解析に基づく船型まわりの流体现象の把握、非線形計画法を利用した形状最適化、さらには抵抗低減のための付加物の研究等を想定しているが、まず本論文では基礎的研究として ULBS 船型の船首まわり砕波現象に焦点を当てて、可視化実験による観察とポテンシャル理論による検討結果について報告する。

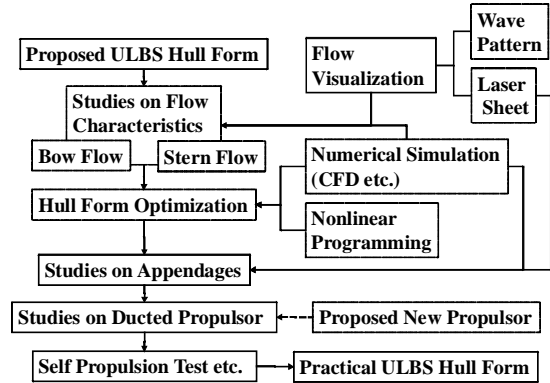


Fig. 3 Plan of studies on ULBS.

3. 船首砕波現象の観察

3.1 ULBS 供試模型

本研究で提案している ULBS 船型について、船首砕波現象に関する基礎的な実験を実施するために、数式で表示した供試模型船を採用する。方形係数がほぼ 0.95 以上となる船型であり、要目および実験フルード数を Table 1 に示す。

Table 1 Particulars of models and tested Froude numbers

Type	I		II		III	
Length: L [m]	1.500					
Breadth: B [m]	0.300					
Depth: D [m]	0.250					
Draft: d [m]	0.100	0.150	0.100	0.150	0.100	0.150
Block coeff.: C_b	0.948	0.949	0.960	0.962	0.973	0.974
Midship coeff.: C_m	0.995	0.997	0.995	0.997	0.995	0.996
Bilge radius: R [m]	0.0187					

Tested Froude numbers

Draft: d [m]	0.100			0.150		
F_n	0.103	0.129	0.155	0.126	0.158	0.190
F_{nd}	0.400	0.500	0.600	0.400	0.500	0.600

模型船形状は前述の ULBS 船型の概念に基づき計画した、船首部の水線が楕円でそれより後部が船尾まで平行部となっている特異な船型であり、次のような数式で与えられる。

船首の楕円部長さを a 、半船幅を $b = B/2$ として、中央横断面係数および方形係数を表すと次のようになる。

$$C_m = 1 + \frac{R^2(\pi - 4)}{4bd} \quad (1)$$

$$C_b = C_m + a \frac{C_m(\pi - 4)}{4L} \quad (2)$$

従って、 a を肥せき係数を使って表すと

$$a = \frac{4L(C_m - C_b)}{C_m(4 - \pi)} \quad (3)$$

となる。楕円部の吃水線形状は

$$b_i = b \sqrt{1 - \frac{1}{a^2} \left(x - \frac{L}{2} + a \right)^2} \quad (4)$$

で表される。船底を平底としてビルジサークルの中心角 θ を船底側からとると、船体中央ビルジ部の半幅は

$$y_b = b - R(1 - \sin \theta) \quad (5)$$

となるので、船首部の半幅を次のように定める。

$$y_{bi} = \frac{b_i}{b} y_b \quad (6)$$

また、フルード数は以下のように定義され、砕波現象を論じる場合には吃水ベースのフルード数が重要なパラメータであるとされている。

$$F_n = \frac{U}{\sqrt{gL}}, \quad F_{nd} = \frac{U}{\sqrt{gd}} \quad (7)$$

ただし、 U は船速(一様流速)、 g は重力加速度である。実際の模型船形状の例を Fig. 4 に示す。

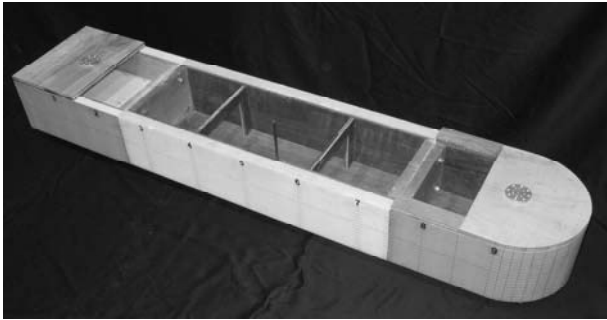


Fig. 4 Example of tested ULBS model (Type III).

3.2 砕波領域可視化実験

本論文では、以上のような模型船の船首前方に発生する砕波領域の面積を、回流水槽実験により求める。砕波領域の可視化については、模型が小型であり表面張力の影響をできる限り排除したいので、鈴木らによる実験手法¹⁾を用いることとし、Fig. 5 のように定義した砕波領域の面積 S_{WB} を、撮影したデジタル写真より画像上で計測する。具体的には、回流水槽(横浜国立大学)の観測部(長さ 2500 mm × 幅 1200 mm × 水深 600 mm)の水槽底に白黒ストライプ板を設置し、水面上方から縞の屈折光を撮影するという手法であり、同時

に表面張力波を除去するために界面活性剤を含有する洗剤の希釈液を模型船首前方に噴霧している。本論文では、この実験手法によって得られた砕波による段波のフロントラインと船首端のラインで囲まれる領域を砕波領域の面積と定義している。

肥大船の船首まわり砕波現象と砕波抵抗との関係を最初に発見したのは馬場²⁾であり、砕波に伴う首飾り渦が船側を回り込んで伴流域に達し、中心部から半幅程度離れた両側に速度損失領域を生じる。その部分の伴流解析から得られる抵抗成分が砕波抵抗とされているが、Table 1 に示した実験ケースの全てにわたって伴流解析を実施するのは不可能であるため、本論文では伴流域における速度損失の現象源である砕波に着目して、砕波領域の面積を計測している。

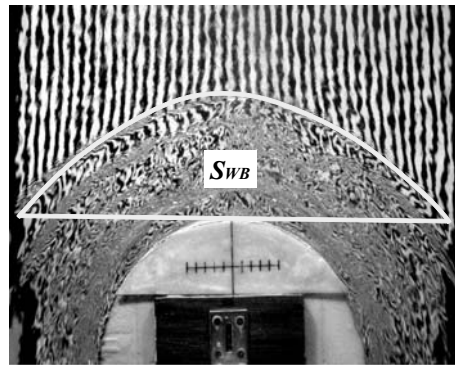


Fig. 5 Definition of wave breaking surface area.

4. ポテンシャル理論に基づく検討

4.1 低速造波理論およびランキンソース法

以上のような砕波領域の実験に対し、本論文では馬場による低速造波理論³⁾および楕円型自由表面パネルを採用したランキンソース法⁴⁾により数値計算を実施し、それらから得られる計算結果相互および実験結果との比較を行って、ULBS 船型の研究に対するポテンシャル理論の利用可能性について検討する。粘性流 CFD 全盛の時代にあつて、両理論とも古典的な解析法になりつつあるが、このような検討を行う理由の1つは、将来的に非線形計画法等の最適化手法で例えば砕波抵抗最小化による形状最適化の研究を実施する際に、計算時間のかかる粘性流 CFD ではなくポテンシャル理論に基づいて目的関数を設定することが可能かどうかを調査することにある。

ランキンソース法と馬場の低速造波理論は、いずれも二重模型流れを基底流れとする理論であり、速度ポテンシャルを

$$\phi(x, y, z) = \phi_0(x, y, z) + \phi_1(x, y, z) \quad (8)$$

のように二重模型速度ポテンシャル ϕ_0 と波動ポテンシャル ϕ_1 の和として表す。座標系は、船体中央静止自由表面上に原点をとり、一様流の方向に x 軸、右舷向きに y 軸、鉛直上向きに z 軸をとる。船型が与えられれば Hess & Smith 法⁵⁾

により数値解析的に ϕ_0 を求めることができる。数値解析の概略フローを Fig. 6 に示す。以下に、ランキンソース法および馬場の理論の本研究内容に關係する部分について概要を紹介し、本論文で検討する評価関数について述べる。

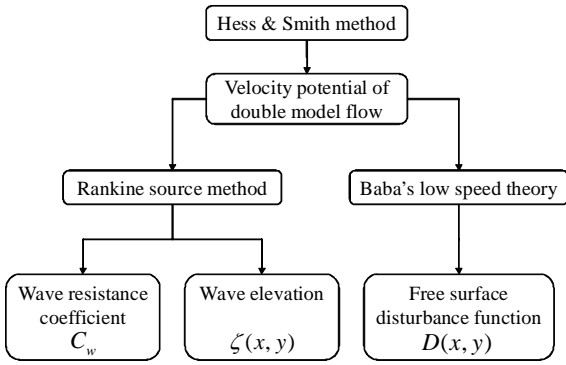


Fig. 6 Flow chart of present numerical calculation.

ランキンソース法では ϕ_0 を基底とする自由表面条件に基づいて数値解析的に ϕ_1 を求め、 ϕ_0 および ϕ_1 から圧力分布および波形を次のように求めることができる。

$$p - p_0 = \frac{1}{2} \rho (U^2 - \phi_{0x}^2 - \phi_{0y}^2 - \phi_{0z}^2 - 2\phi_{0x}\phi_{1x} - 2\phi_{0y}\phi_{1y} - 2\phi_{0z}\phi_{1z}) \quad (9)$$

$$\zeta(x, y) = \frac{1}{2g} (U^2 - \phi_{0x}^2 - \phi_{0y}^2 - 2\phi_{0x}\phi_{1x} - 2\phi_{0y}\phi_{1y}) \quad (10)$$

ただし、 p_0 は無限遠方における基準圧力、 ρ は流体密度を表し、造波抵抗係数は船体浸水表面を S 、その法線と x 軸との方向余弦を n_x として

$$C_w = \frac{R_w}{\frac{1}{2} \rho U^2 L^2}, \quad R_w = -\iint_S p n_x dS \quad (11)$$

のように S 上の圧力積分によって求めることができる。また、波形分布(10)式に基づく次のような評価関数を定義する。ただし、積分範囲は前述の砕波領域の定義と同様に船首前方領域のみとしている。

$$I_{\zeta^2} = \int_0^{\infty} \int_{-0.5L}^{-\infty} \zeta^2(x, y) / L^2 dx dy \quad (12)$$

これは、造波抵抗と波形の 2 乗との間に密接な関係があり、さらに砕波現象は波形の急峻さに関係するからである。急峻さを正確に表現するためには波形の傾斜を求める必要があるが、砕波を伴うような最も急峻な波形は船首近傍に生じることから、波形の 2 乗で十分にこの領域の波形の急峻さを表現できると考え、本論文では(12)式による評価関数を採用している。

一方、馬場の理論では ϕ_0 から

$$D(x, y) = \frac{\partial}{\partial x} [\phi_{0x}(x, y, 0) \zeta_0(x, y)] + \frac{\partial}{\partial y} [\phi_{0y}(x, y, 0) \zeta_0(x, y)] \quad (13)$$

$$\zeta_0(x, y) = \frac{1}{2g} [U^2 - \phi_{0x}^2(x, y, 0) - \phi_{0y}^2(x, y, 0)]$$

で表わされる $D(x, y)$ 関数を使って ϕ_1 に対する自由表面条件を定めているが、実際には $D(x, y)$ 関数に基づく振幅関数の表示式が得られ、振幅関数を用いて造波抵抗を評価する理論となっている。ただし、本論文ではこの $D(x, y)$ 関数の船首前方の分布を検討の対象とする。この関数が重要であるのは、馬場が当初から $D(x, y)$ 関数と砕波現象との関係を指摘しているからである⁶⁾。本論文では $D(x, y)$ の分布に基づく

$$I_{D^2} = \int_0^{\infty} \int_{-0.5L}^{-\infty} D^2(x, y) / U^2 dx dy \quad (14)$$

を評価関数として、実験結果等との比較に用いる。

以上をまとめておくと、本論文で砕波現象に絡んで検討するパラメータは、幾何学的なパラメータとして主要目比と方形係数、速度に関するパラメータとして(7)式のフルード数、ポテンシャル理論に基づくパラメータとして(11)式の造波抵抗係数、(12)式の波形に基づく評価関数、および(14)式の $D(x, y)$ 関数に基づく評価関数、さらに実験結果に基づくパラメータとして Fig. 5 の砕波領域の面積ということになる。

4.2 計算結果

以上の理論に基づく数値計算を実施するために、船体表面および自由表面を Fig. 7 のように分割する。ULBS 船型の船尾は一種のトランサム形状ともみなせるので、この部分の船体表面および近傍の自由表面にはパネルを配置していない。従って、造波抵抗は平行部前方の船首部分に働く圧力分布のみによって決まるので、造波抵抗計算値が負になることはない。

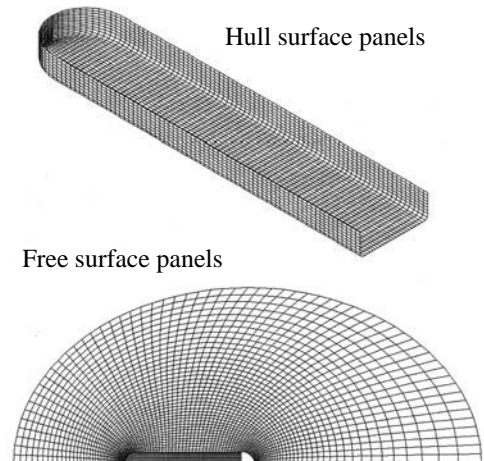


Fig. 7 Example of panel arrangement for ULBS (Type III).

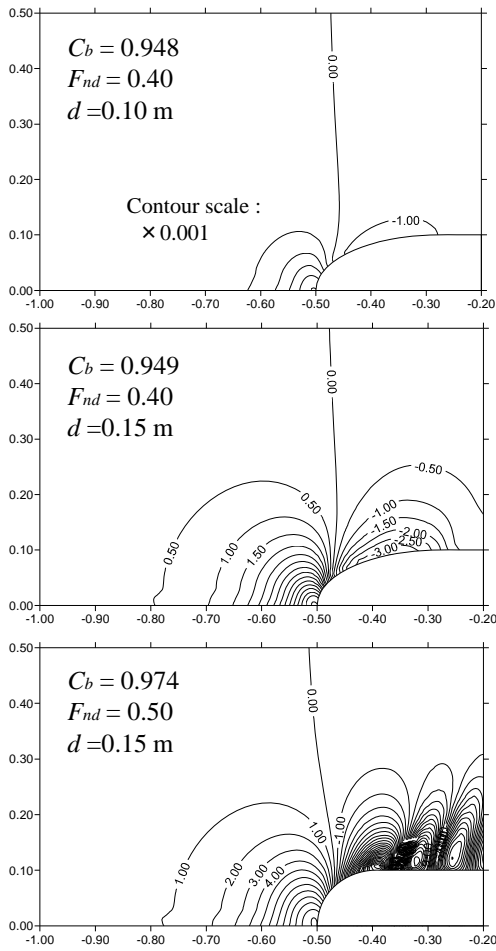


Fig. 8 Contour of $\zeta(x, y)/L$ around ULBS bow.

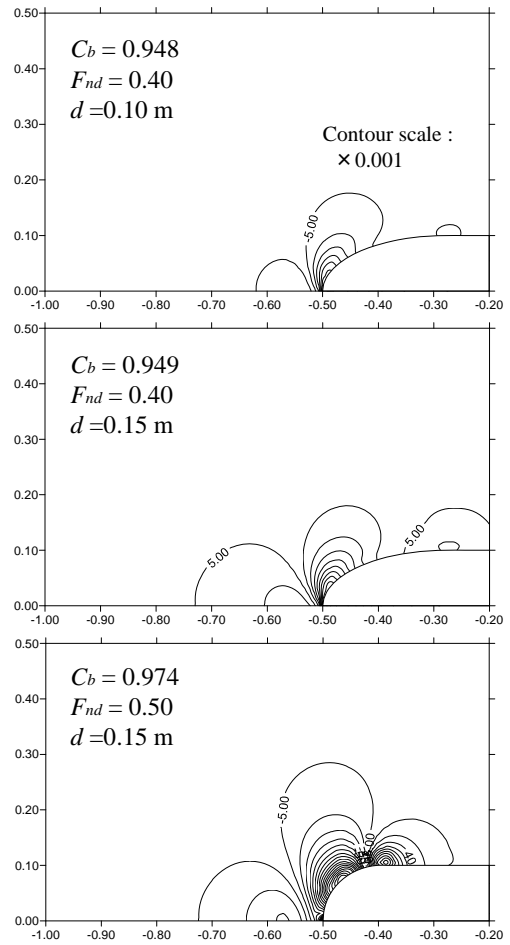


Fig. 9 Contour of $D(x, y)/U$ around ULBS bow.

計算結果の例として、まず、波形および $D(x, y)$ 関数の等高線図を Fig. 8 および Fig. 9 に示す. なお、これらの等高線図を得る際には補間精度の高い Akima の手法^{7), 8)}を用いている.

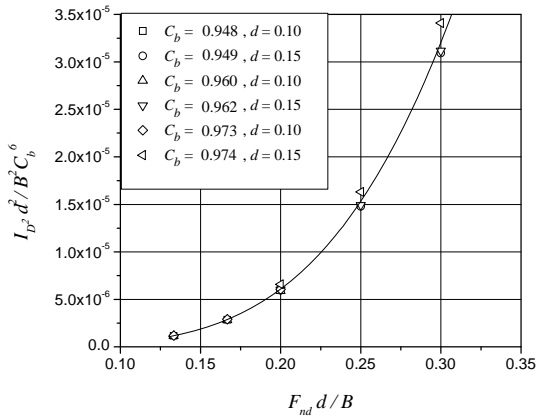


Fig. 10 Relation between F_{nd} and I_{D^2} .

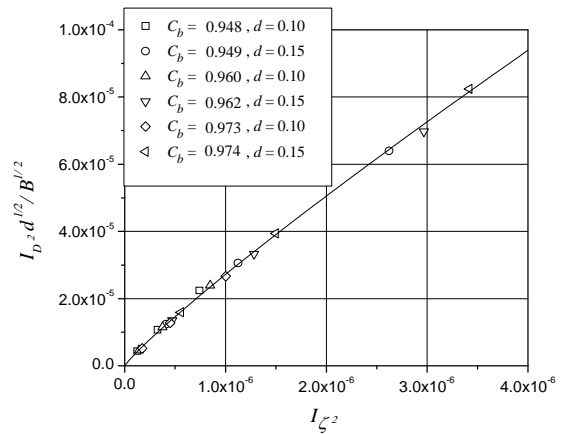


Fig. 11 Relation between I_{ζ^2} and I_{D^2} .

Fig. 8 および Fig. 9 から、方形係数やフルード数の変化により波形や $D(x, y)$ 関数の分布が概ねどのように変化するか、例えば急峻さがどのように変化するか、を確認することができる. このような計算を Table 1 に示した全ケースについて実施し、波形に基づく評価関数(12)式、さらに $D(x, y)$ 関

数に基づく評価関数(14)式の計算を行う。さらに、幾何学的なパラメータやフルード数等のパラメータおよびポテンシャル理論に基づくパラメータについて、相関の良い関数がどのような形になるかを試行錯誤的に検討することにより、例えば Fig. 10 や Fig. 11 のような関数同士に強い相関が得られることが確かめられる。

4.3 実験との比較

次に前節と同様な試行錯誤的な検討に基づいて、実験結果に基づくパラメータとポテンシャル理論に基づくパラメータとの関係について調査を行い、将来的な船型最適化への応用についての可否について考察する。

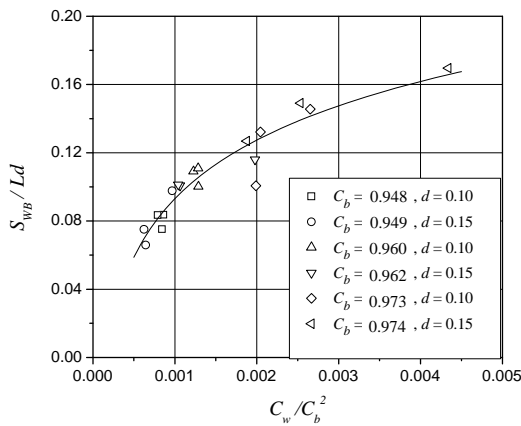


Fig. 12 Relation between C_w and S_{WB} .

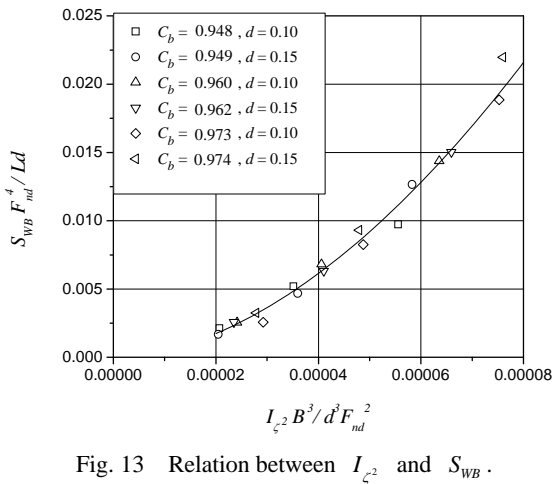


Fig. 13 Relation between I_{ζ_2} and S_{WB} .

ポテンシャル理論に基づくパラメータである(11)式の造波抵抗係数、(12)式の波形に基づく評価関数、(14)式の $D(x,y)$ 関数に基づく評価関数と、実験に基づく砕波領域の面積との比較をそれぞれ Fig. 12, 13, 14 に示す。本研究で提案している ULBS 船型のシリーズの範囲、および砕波抵抗係数そのものではなく砕波領域の面積、という制限は付くが、これら Fig. 12, 13, 14 の比較結果より、ポテンシャル理論に基づく評価関数はいずれも実験結果を説明できるという結

果が得られる。従って、砕波抵抗を小さくするという形状最適化の目的関数として、(11)式の造波抵抗係数、(12)式の波形に基づく評価関数、(14)式の $D(x,y)$ 関数に基づく評価関数、いずれも利用できる可能性がある。今回の供試模型には船首バルブが採用されていないが、その形状の検討にも利用できると思われる。

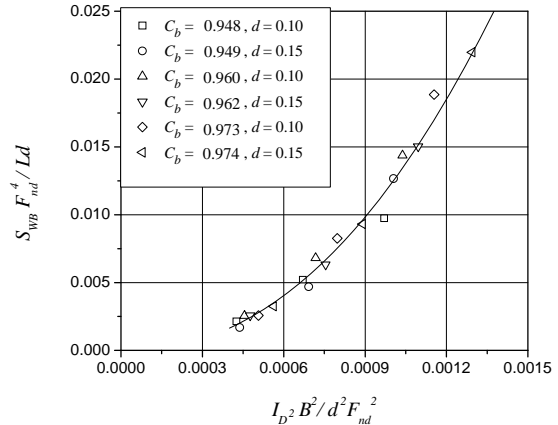


Fig. 14 Relation between I_{D^2} and S_{WB} .

5. 結 言

本論文では、低速航行省エネルギー船型として超肥型船型 ULBS (Ultra Large Block coefficient Ship) を提案し、概念や研究プランについて提示した。今回は、研究プランの中から ULBS 船型の肥大な船首まわりの砕波現象に絞って検討することとし、基礎的研究として、砕波現象の観察およびポテンシャル理論による基礎的検討を行った。

回流水槽において ULBS 船型の模型実験を実施し、船首まわりに生じる砕波領域の面積を求めた。この実験結果を説明できるパラメータとして、主要目比等の幾何学的パラメータ、フルード数、およびポテンシャル理論に基づくパラメータからなる関数について検討した。結果として、ランキンソース法に基づく造波抵抗係数と波形の 2 乗の面積分による評価関数、さらに馬場の低速造波理論に基づく $D(x,y)$ 関数の 2 乗の面積分による評価関数は、いずれも砕波領域の面積と強い相関があり、今後の研究において船型最適化の目的関数としても有力であると期待できる。

謝 辞

本論文の実験に関してご助言をいただきました岡田 功技術職員(現技術長)および実験を担当いただきました宮内 創氏(研究当時横浜国立大学工学部、現日本航空)に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 鈴木和夫, 他: 回流水槽における小型模型船の造波よる波紋の可視化, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 8 号, pp. 81-87, 2008.
 - 2) Baba, E.: A New Component of Viscous Resistance of Ships, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 125, pp. 23-34, 1969.
 - 3) Baba, E. and Takekuma, K.: A Study on Free-Surface Flow around Bow of Slowly Moving Full Forms, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 137, pp. 1-10, 1975.
 - 4) 鈴木和夫, 伊岡森信臣: Rankine source 法に基づく造波抵抗最小船型の計算, 日本造船学会論文集, 第 185 号, pp.9-19, 1999.
 - 5) Hess, A. J. and Smith, A.M.O.: Calculation of Non-lifting Potential Flow about Arbitrary Three-dimensional Bodies, Journal of Ship Research, Vol. 8, No. 2, pp 22-44. 1964.
 - 6) Baba, E.: Blunt Bow Forms and Wave Breaking, The First Ship Technology and Research (STAR) Symposium, Washington, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, pp. 8-1~8-12, 1975.
 - 7) Akima, H.: A method of Bivariate Interpolation and Smooth Surface Fitting for Values Given at Irregularly Distributed Points, ACM Transactions on Mathematical Software, Vol. 4, No. 2., 1978.
 - 8) Akima, H.: On Estimating Partial Derivatives for Bivariate Interpolation of Scattered Data, Rocky Mountain Journal of Mathematics, Volume 14, Number 1, 1984.
-