総トン数に制限を有する内航船の船型データベースの構築とその評価

－749 総トン型一般貨物船を対象としたプロトタイプの開発－

正会員 一ノ瀬 康 雄* 正会員 田 原 裕 介*
正会員 久 米 健 一*

A Construction and Evaluation of Hull-form Database for Domestic Vessels with Regulation on Gross Tonnage - Development of a Prototype for 749GT-type Domestic General Cargos -

by Yasuo Ichinose, *Member* Yusuke Tahara, *Member*
Kenichi Kume, *Member*

Summary

The present paper describes a development of hull-form database which can comprehensively include propulsive performances, dead weights, gross tonnages and general arrangement plans, and a verification of the effectiveness of the database for hull-form design. The present database focuses on 749GT-type domestic general cargos, which are subject to restrictions on the gross tonnage by a domestic law. The collaborative work with the shipyard had made the database more practical and more competitive than before. The towing tank test result shows the high performance of the developed standard hull-form which reaches design speed of 12.00 knots at about 61% *MCR*, even installed about 20% smaller main engine than the conventional one.

Firstly, the design space of the database was carefully determined by the construction record of 749GT-type domestic general cargos, which have 3 design parameters with ship length, breadth and draft. 463 hull-forms were generated by hull-form blending (morphing) technique based on 8 basic hull-form. To reduce the wave resistances of its hull-forms effectively, C_B and LCB of 8 basic hull-forms, which define the shapes of the sectional area curves, are formulated by the 3 design parameters.

The relationships between C_B and wave resistance, form factor and self-propulsion factor, respectively were discussed based on the evaluated results of propulsive performances in the view of the effect of increasing the diameter depending on draft. After the 51 hull-forms were selected by the practicality of propulsive performance, we evaluated dead weights and gross tonnages. The integrated evaluation of propulsive performance and dead weight indicates the trade-off relationship to the optimum ship length and breadth.

To solve this problem more designer-friendly, we propose integrated hull-form database and an example of visualization (visualization useful for design), which enables multifaceted and quantitative design discussion. The advantage of this method over the multi-objective optimization methods is the capability to provide multifaceted and highly effective information for decision making in the design process. The design verification about practical design discussion on the trade-off problem is shown the effectiveness of the integrated hull-form database.

1. 結 言

船舶の長さや幅、深さ、排水量等の主要目は、就航予定の航路や港湾設備等の物理的制約、船速や燃料消費量等の船主要求および建造コスト等を意識しながら、入念に検討される。特に、その船が達成しうる推進性能の上限は、主要目に強い影響を受けるため、古くから船型の系統的な模型試験より、長年の研究が積み重ねられてきた。これらの成果は、Taylor

図表¹⁾、山縣の図表²⁾、船舶技術研究所で1955年から1964年の約10年をかけまとめられた肥大船型に対する系統模型試験結果³⁾、並びに内航船に関する系統的模型試験結果⁴⁾等の図表形式でまとめられている。さらに、1990年代後半からは、ニューラルネットワーク等のコンピュータサイエンスを応用した性能データベースの解析手法^{5,6)}が研究され、時代と共に高性能化する性能にデータベースが更新され続けている。

一方、主要目の良否は、前記データベースの対象とする推進性能のみでなく、載貨重量や港湾制限を含めて総合的に評価される。このため、推進性能に対する最適船型は、実用設計における最適船型ではなく、推進性能の図表から総合的な最適船型は得られない。そのため、現在も、設計空間全体を俯瞰して船型を設計するケースは少なく、ほとんどのケースで、設計者の経験則による限定的な設計案を対象とした試行錯誤的な部分最適化が行われている。さらに、内航船の設計においては、総トン数により法令等の適用基準が異なるため

* 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所

(例えば, 750 総トン以上の場合は航海当直の増員が必要⁷⁾), 実質的な総トン数の制限を受ける. このため, 外航船と比較し, 内航船の船型設計は, 強い制約を伴う船型最適化を行う必要があるため, より経験則による試行錯誤的な設計に頼る傾向が強い.

他方, 船型最適化研究では, 一般に最適設計システムを, 性能評価ツール, 形状変形ツール, 最適化ツールの 3 つで構成する⁸⁾. これまで, 性能評価ツールには, ポテンシャル理論や Reynolds-averaged Navier Stokes Equation (以下 RaNS) を基礎とした数値計算法, 最適化ツールには, SQP (Sequential Quadratic Programming) や GA (Genetic Algorithm) といった単目的および多目的の数値的最適化手法が適用され, 船型最適化に対する各ツールの有効性が検証^{9,10)}されている. しかし, この従来の最適船型を探索し, 提示する最適設計システムは, 未だに設計現場で広く採用されていない. その理由は, 従来の最適設計システムに, 次の 3 点の課題があるためであると著者らは考えている.

1. 計算時間の低減 (実用的な精度と解析時間)
2. 波浪統計, 燃料価格といった確率論的な評価関数を含む最適船型の評価手法の確立
3. 船型設計プロセスの意思決定に役立つ方法論の欠如

Kim らは Variable Fidelity Model により, 解析精度と計算時間の異なる性能評価ツールを融合させることで, 解析時間を低減する手法¹¹⁾を提案している. 課題 1 は, このような解析時間の低減手法と計算機の高速化により, 解決すると考えられる. 一方, 熟練の設計者は, 従来の最適設計システムで対象とする推進性能以外にも, 波浪中性能, 生産コストといった複数の項目を経験則により評価する. これらを定量的に評価するためには, 波浪統計, 燃料価格の変動等の確率論的な評価関数を含む, 複数の評価関数を, 統一的かつ定量的に評価する必要がある. Tahara らは, 波浪中船型最適化問題について, 信頼性最適化理論を適用した海象条件等のばらつきを, 理論的に扱う手法¹²⁾を提案している. このように, 課題 1, 2 に対する議論は深められつつあり, 本論文ではこれらを対象とはしない.

一方, 課題 3 は, 従来の最適設計システムでは, 解決できない. 問題は, 数値的最適化手法の解が, 最適化問題の不確実性のある制約条件等に強く依存し, かつ, 性能評価も, 精度および実船尺度影響等の不確実性が高いため, 船型最適化問題を, 意思決定を含む設計プロセスとしてとらえた場合, 最適設計システムの結果のみで, 設計者が意思決定を行うことが極めて困難である点にある.

設計者が意思決定に際し重視している情報は, どの設計範囲で性能が極端に悪化するか, または設計した範囲で性能は安定的かといった設計空間における性能の分布形状である.

従来の最適設計システムには, この情報と最適化の結果を

意思決定に役立てる方法論が欠如している. この課題に対する対策の 1 つは, 船型データベースの構築とその見える化である—見える化は設計に役立つ可視化を意味し, 例えばチャート化や航空分野で先行研究がある自己組織化マップ等データマイニング技術の適用¹³⁾を意味する—. 実用的で競争力のある船型データベースは, 今後も造船業における競争力の源泉である. 推進性能だけでなく, 載貨重量, 総トン数, 波浪中性能などを, 統合的かつ定量的に評価した船型データベースの構築とその評価手法 (見える化) の進展は, 船型学の発展に極めて重要である.

本研究では, 総トン数に制限を有する 749 総トン型一般貨物船を対象として, 従来の推進性能のみでなく, 載貨重量, 総トン数, 概略配置も統合的に評価する船型データベースのプロトタイプを構築し, その評価手法 (見える化) を提案・評価することで, 統合船型データベースの有効性を検証する. 本研究の船型データベースは, 「内航海運のための省エネルギー船型群の研究開発」¹⁴⁾ (以下研究プロジェクト) で構築したもので, 省エネ性能が高く, かつ造船所との協業により実現した, 極めて実用性の高いデータベースである. 本論文では, この船型データベースの推進性能, 載貨重量, 総トン数, 概略配置, それぞれの特性について論じると共に, 実用的な統合的評価を実施するための見える化の例を示し, 船型設計プロセスの意思決定に対する統合船型データベースの有効性を評価する.

2. 船型データベースの構築方法

2.1 船型群の生成手法

本論文では, 船型のみを集めと船型群, 船型と推進性能等の評価値が対になったものを, 船型データベースと定義する.

船型群の生成には, Fig. 1 に示す 3 次元設計空間を正規化形で定義した理論を用いる. Fig. 1 の頂点には基本船型 (8 船型: $f_1 \sim f_8$) を配置し, 内部の融合船型群は $[0, 1]$ の実数パラメータ $\delta\xi, \delta\eta, \delta\zeta$ の重み係数を用い, (1) 式を用いて求める.

$$\begin{aligned}
 f_p = & f_1 + (-f_1 + f_2)\delta\xi + (-f_1 + f_4)\delta\eta \\
 & + (-f_1 + f_5)\delta\zeta \\
 & + (f_1 - f_2 - f_4 + f_3)\delta\xi\delta\eta \\
 & + (f_1 - f_2 - f_5 + f_6)\delta\xi\delta\zeta \\
 & + (f_1 - f_4 - f_5 + f_8)\delta\eta\delta\zeta \\
 & + (-f_1 + f_2 - f_3 + f_4 + f_5 \\
 & - f_6 + f_7 - f_8)\delta\xi\delta\eta\delta\zeta
 \end{aligned} \quad (1)$$

なお, 本研究のデータベースは, 特定の目的関数に集中するような求解を目的とせず, むしろ解空間に広く分散させる特性を持たせるため, 実数パラメータ $\delta\xi, \delta\eta, \delta\zeta$ の重み係数には, Fig. 2 に示す分散特性を有する一様乱数を採用する.

Fig. 1 Regular expression of design space.

Fig. 2 Dispersion characteristic of hull-form series.

本研究ではこの手法を船型ブレンディングと呼び、各基本船型はその船型特徴を表現するために必要十分と判断された離散数の離散化表面点 ($\vec{P}_1 \sim \vec{P}_8$) で表現し、(2) 式のオペレーションによってその融合船型を求める。

$$\vec{P} = (a_1 \vec{P}_1 + a_2 \vec{P}_2 + \dots + a_n \vec{P}_n) \quad (2)$$

so that $a_1 + a_2 + \dots + a_n = 1, n = 8$

本手法は関連する従来研究¹⁵⁾でも使用され、比較的簡便なオペレーションによって変化に富んだ新形状の生成が可能で、設計者の経験的知見を新船型の創生や開発船型の探索に反映できることを確認している。

船型ブレンディングは、基本船型に制約条件を与えることで融合船型群に制約条件を課すことが可能である。本研究では、基本船型に排水量一定条件を課すことで、目的とする船型群を生成する。なお、8つの基本船型については3.2節でその詳細を述べる。

2.2 推進性能の評価手法

船型ブレンディングにより生成した船型群 (463 船型) の推進性能評価 (馬力算定) は、海上技術安全研究所 (以下海技研) 開発の RaNS ソルバー NEPTUNE¹⁶⁾ による数値解析で得られた抵抗係数、自航要素を、省エネ標準船型¹⁴⁾ の水槽試験結果との相関係数 (Correlation Factor: Table 1) により補正する。

まず、数値解析の詳細についての述べる。格子は、海技研と有限会社エイ・シー・ティーとが共同開発した HullDes¹⁷⁾ により生成した HO 型トポロジー 180 万セル (両舷:

Condition(A)) の構造格子である。計算空間は、船長 L_{PP} で無次元化されており、計算領域は、船首から上流に 1.5 船長、船尾から下流に 2.5 船長、幅方向に 1.5 船長である。計算格子は、船首上流側 24 セル、船長方向 104 セル、船尾下流側 48 セル、境界層方向に 80 セルとし、二重模型流れに対してガウス方向 128 セル (両舷)、造波計算に対しては 3% 船長程度の乾舷をとり 128 セル (両舷) で構成されている。境界層方向第 1 層目の格子間隔は、船長 1.0 に対して 1.4×10^{-6} の $y^+ < 1$ である。NEPTUNE は有限体積法離散化・疑似圧縮性ベースの RaNS コードで、複数の乱流モデル、自由表面モデルが実装されている。本研究では、船型設計において適用実績の多い修正 Spalart-Allmaras モデルと Level-Set 法を、乱流モデルと自由表面モデルのそれぞれに適用する。プロペラは無限翼数プロペラ理論に基づく体積力でモデル化する。

3.3 節の省エネ標準船型を対象として、本計算の不確かさ解析を実施する。ここで採用した手法は、ITTC Recommended Procedures and Guidelines¹⁸⁾ に記載の手法で、Roache¹⁹⁾ らにより提案された Factor of Safety (F_s) を用いる方法をベースとしている。Table 2 に格子スタディの結果を示す。ここで、 C_{TDM} は二重模型流れの抵抗係数、 C_{TFS} は造波計算の抵抗係数、 C_W は造波抵抗係数で、CFD では $C_{TFS} - C_{TDM}$ で評価する。また、 k は形状影響係数、 $1-t$ は推力減少係数、 $1-w_T$ は有効伴流係数、 η_R はプロペラ効率比、 F_r はフルード数、 Re はレイノルズ数を表し、Conditions は船長、ガウス方向、境界層方向の格子数を表す。相当矩形平板の摩擦抵抗係数には CFD、水槽試験 (EFD) 共に Schoenherr の式を採用する。EFD と CFD との Re 数の差 (それぞれ 1.11×10^7 , 1.00×10^7) は水温の季節変動の範囲内である。数値計算不確かさ U_{SN} を $U_{SG}^2 = U_{SG}^2 + U_{SI}^2$ で算定した結果を Table 3 に示す。ここで、 U_{SG} は計算格子に起因する不確かさ、 U_{SI} は反復計算に起因する不確かさである。また、CFD では造波抵抗係数 $C_W = C_{TFS} - C_{TDM}$ で評価するため、造波抵抗係数の不確かさ U_{SCW} は、二重模型流れの抵抗値の不確かさ U_{SDM} と造波計算の抵抗値の不確かさ U_{SFS} から $U_{SCW}^2 = U_{SDM}^2 + U_{SFS}^2$ で算定する。Table 3 より抵抗値、自航要素に対する U_{SN} は概ね数% の範囲にあり、本研究船型データベースの計算規模を考慮すれば、本研究の格子は妥当な不確かさレベルを有している。

次に、プロペラ効率の算定手法について述べる。船型群のプロファイルは、省エネ標準船型に対して、船長、計画喫水比でスケールした形状となる。このため、プロペラと船尾のクリアランスをプロペラ直径比ベースで保持し、船尾プロファイルに合わせたプロペラ単独性能の高い、大直径プロペラを適用する。これを実現するため、船型群のプロペラ直径、シャフトセンター高さおよびプロペラ前後位置を、省エネ標準船型との船長、喫水比で変化させ、数値解析を実施する。また、馬力の算定に使用するプロペラ効率 η_o は、省エネ標準船型向けに設計したプロペラ¹⁴⁾ の作動点でのプロペラ荷重度から、算定される運動量理論の理想効率 $\eta_{opt-ideal}$ と設計

プロペラの効率 η_{opt} の比を基準に、対象のプロペラ作動点でのプロペラ荷重度 C_{TH} から、算定される運動量理論の理想効率 $\eta_{o-ideal}$ から (3) 式で算定する。

$$\eta_o = \eta_{o-ideal} \times \frac{\eta_{opt}}{\eta_{opt-ideal}} \quad (3)$$

$$\eta_{o-ideal} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + C_{TH}}} \quad (4)$$

船型群の制動馬力 BHP の算定には、粗度修正係数 $\Delta C_F=0.4 \times 10^{-3}$ 、伴流率の尺度影響係数 ε は矢崎チャート²⁰⁾から得られる値に、経験定数として $1/1.03$ を乗じた値、軸系の伝達効率 η_T は $1/1.03$ 、さらに、想定する減速逆転機（前進側減速比 1.55 ）のギアロスとして $1/1.02$ を用いる。これは、3.2 節で詳細を述べる省エネ標準船型の馬力算定と同じ係数である。

2.3 総トン数・載貨重量・概略配置の評価手法

前節の 463 船型の船型群に対する推進性能評価を踏まえ、実用性のある船型要目について候補船型 51 船型を生成し、新たに推進性能評価を実施した上で、総トン数と載貨重量を

評価する。

総トン数の算定についてその詳細を述べる。本船は 2 層甲板船のため、閉囲場所の総容積に法令で定められた係数がかかることで総トン数を求める。この法令の定める係数 $B/A^{21)}$ は、2 層甲板の上の甲板と下の甲板の深さで決まり、 B/A が 0.7 を超えない範囲の最大値をとると総トン数は最小となる。本研究では、総トン数の最小化を目的に、この手法で船楼甲板高さを求める。上部構造、その他の大きさは、詳細検討した省エネ標準船型と同一形状とし、ハッチカバーの容積は標準船型のハッチカバーを最大として、このハッチカバーが配置できない船型に対しては、船長、船幅の差からその容積を算定する。また、実用設計では水面上の線図修正により 749 総トン型に収まる可能性のある船型に対して、線図修正を行う。本研究でも同様の線図修正を行い、749 総トン型一般貨物船の船型データベースとする。

候補船型 51 船型の内、749 総トン型一般貨物船としての成立性が確認された 30 船型について、造船所において概略の配置図を各々作成し、貨物艙の寸法および載貨容積を算定する。Fig. 3 に概略の配置図の例を示す。

Table 1 Correlation factor and errors.

	EFD	CFD	Correlation Factor		Error
			EFD / CFD	EFD - CFD	
$C_{TFS} \times 10^3$	3.883	3.689	-	-	5.0%
$C_W \times 10^3$	0.325	0.136	2.38	-	-
$1 + k$	1.231	1.228	-	0.003	0.2%
$1 - t$	0.825	0.827	-	-0.002	0.2%
$1 - w_T$	0.596	0.610	-	-0.014	2.3%
η_R	1.007	1.009	-	-0.002	0.2%

* R_e adjustment is adopted to CFD C_{TFS} with Schoenherr's formula from 1.00×10^7 to 1.11×10^7 .

Table 2 Resistance and self-propulsion factor for grid uncertainty analysis.

Conditions	$F_r=0, R_e=1.00 \times 10^7$				$F_r=0.222, R_e=1.00 \times 10^7$			
	(A)	(B)	(C)	(D)	(A)	(B)	(C)	(D)
$C_{TDM} \times 10^3$	176×128×80	240×128×80	176×176×80	240×176×112	176×128×80	240×128×80	176×176×80	240×176×112
$C_{TFS} \times 10^3$	3.6027	3.5309	3.6016	3.5465	-	-	-	-
$C_W \times 10^3$	-	-	-	-	3.7392	3.6261	3.7453	3.6435
$1 + k$	-	-	-	-	0.1365	0.0952	0.1438	0.0971
$1 - t$	1.2278	1.2033	1.2274	1.2086	-	-	-	-
$1 - w_T$	0.8266	0.8278	0.8252	0.8285	-	-	-	-
η_R	0.6098	0.6165	0.6087	0.6230	-	-	-	-
	1.0095	1.0115	1.0076	1.0126	-	-	-	-

Table 3 Summary of numerical uncertainties.

	U_{SG}		U_{SI}		U_{SN}		based on
C_{TDM}	2.3%	-	3.9%	0.0%	2.3%	-	% C_{TDM} (Condition A)
C_{TFS}	3.8%	-	6.4%	0.2%	3.8%	-	% C_{TFS} (Condition A)
C_W	4.4%	-	7.4%	0.2%	4.4%	-	% C_{TFS} (Condition A)
$1 + k$	2.3%	-	3.9%	0.0%	2.3%	-	% $(1 + k)$ (Condition A)
$1 - t$	0.3%	-	0.6%	0.1%	0.3%	-	% $(1 - t)$ (Condition A)
$1 - w_T$	3.0%	-	5.1%	1.0%	3.2%	-	% $(1 - w_T)$ (Condition A)
η_R	0.4%	-	0.7%	0.0%	0.4%	-	% η_R (Condition A)

* p is assumed to be 2.5 – 3.5. $F_s=3$ is applied. ε between condition (A) and (D) is adopted.

Fig. 3 A sample of general arrangement.

3. 船型データベースの構成

3.1 設計空間

749 総トン型一般貨物船の船型データベースの構築にあたり、実用的な設計空間について検討する。

 Fig. 4 The construction record of 749GT-type domestic general cargos. ²²⁾

日本船舶明細書 ²²⁾ から、研究プロジェクトにおいて集計した 749 総トン型一般貨物船の建造実績を Fig. 4 に示す。総トン数に制限を有する、749 総トン型一般貨物船の船長 L_{PP} 、船幅 B 、計画喫水 d には、一定の設計範囲があることが分かる。本研究では、Fig. 4 の結果に加え、研究プロジェクトで実施した船主、船社、荷主等へのヒアリング結果を基に、船型データベースの設計変数として、船長 L_{PP} 、船幅 B 、計画喫水 d の 3 つを採用し、設計変数の範囲を Table 4 に示す範囲と定める。

一方、総トン数が 750 トン未満に制限されていることを考慮し、排水量一定の条件を船型データベースに課す。この場合、方形係数 C_B が要目に応じ、Fig. 5 のように変化する。本研究では、船型変形の試行錯誤の結果から、実現性のある C_B の範囲として、0.68 から 0.80 の範囲を設定する。本研究の 749 総トン型一般貨物船の船型データベースの設計空間を Fig. 6 に示す。ここで、図中①～⑧は 3.3 節で述べる船型ブレンディングの基本船型である。

Table 4 Dimension ranges for the hull-form database.

L_{PP}	73.0 m - 83.0 m
B	12.8 m - 14.5 m
d	3.8 m - 4.8 m

 Fig. 5 Distribution of C_B in design space for L_{PP} , B , d .

 Fig. 6 Design space with C_B in 0.68-0.80 for L_{PP} , B , d .

3.2 省エネ標準船型

基本船型の基となる省エネ標準船型について、その概要を述べる。省エネ標準船型の船型開発に関する浮心位置、横切面積曲線（以下 C_P カープ）等の設計詳細は、文献 ¹⁴⁾ に記載

されている。

省エネ標準船型は、Table 5 に示す主要目を有しており、海技研 400m 水槽において、船長 $L_{PP}=6.771$ m の模型船により実施した水槽試験で、その推進性能を評価する。（写真：Fig. 7, 性能概要：Table 1）研究プロジェクトでは、省エネ標準船型の伴流に対して、小展開面積プロペラが理論設計され¹⁴⁾、このプロペラ単独性能と 2.2 節に記載した粗度度修正係数等から、Fig. 8 に示す馬力曲線を算定する。この省エネ標準船型は、従来の 749 総トン型一般貨物船より約 2 割小さい主機 $MCR = 1,177$ [kW] (1,600 [PS]) を搭載した場合も、約 61% MCR で計画速力 12.00 [knots] に到達する、高い省エネ性能を有する船型である。

Table 5 Principal dimension of standard-type ship.

L_{PP} [m]	79.000	Hold Type	Box
B [m]	13.000	Hold Size [m]	42.0 × 10.0
d [m]	4.689	DWT [ton]	2,420
LCB [% L_{PP}]	-0.25	Gross Ton.	749
D_P [m]	2.800	Mariner type flap rudder

Fig. 7 A Photograph of towing tank tests.

Fig. 8 Power curve at designed full condition from EFD results.

研究プロジェクトの省エネ性能の評価基準は、(5) 式で算定される CO_2 排出量 ($EmissionCO_2$) である。

$$EmissionCO_2 = \frac{3.1144 \cdot FOC_{ME} + 3.2060 \cdot FOC_{AE}}{V_S \cdot DWT} \quad (5)$$

$$FOC_{ME} = FOCCR_{ME} \cdot 0.75 \cdot MCR \quad (6)$$

$$FOC_{AE} = FOCCR_{ME} \cdot 0.08 \cdot MCR \quad (7)$$

ここで、 $FOCCR_{ME}$ は主機の燃費率、 FOC_{ME} は主機の 75% MCR での燃料消費量、 FOC_{AE} は補機の燃料消費量であり、主機の MCR での燃料消費量の 8% と仮定している。 DWT

は造船所が算定した載貨重量、 V_S は 75% MCR での到達速力である。本研究では、 $FOCCR_{ME}$ は定められた既定の同一値を省エネ標準船型および船型群で使用する。

省エネ標準船型の CO_2 排出量を Table 6 に示す。省エネ率は、1990 年代の類似船型の平均値 (32.73 [g CO_2 /(ton·mile)]) に対する比率である。

Table 6 Energy saving of standard-type ship.

Output(MCR)	[kW]	1,177
$FOCCR_{ME}$	[g/kWh]	202.9
FOC_{ME}	[g/h]	178,960
FOC_{AE}	[g/h]	19,089
V_S	[knots]	12.61
DWT	[ton]	2,420
$EmissionCO_2$	[g CO_2 /(t·mile)]	20.27
Energy Saving Ratio	[%]	38.1

3.3 基本船型

基本船型は、省エネ標準船型の拡大縮小とステーション移動法を用いて生成する。本節ではその詳細を述べる。

749 総トン型一般貨物船は、設計フルード数 F_r が 0.22 と比較的高いために造波抵抗が大きく、船首部の肥大度を落とすことにより大きな性能改善が期待できる。設計空間の L_{PP} , B , d の 3 つの設計パラメータを排水容積 (∇ [m³]) 一定条件で変更すると、(8) 式で定義される方形係数 C_B は 3 つの設計パラメータの従属変数となる。

$$C_B = \frac{\nabla}{L_{PP} B d} \quad (8)$$

造波抵抗の低減を目的に、船首部肥大度を低減するためには、浮心位置 LCB [% L_{PP}] を C_B の関数とする必要がある。本研究では、 C_B に対する LCB の算定式として海技研で開発した HOPE Light²³⁾ の浮心位置評価式の F_r , B/d 項を省略し、省エネ標準船型の浮心位置を通る (9) 式を用いる。

$$LCB = -23.02C_B + 16.35 \quad (9)$$

Fig. 9 An example of sectional-area-curve deformation.
(dark color: standard, light color: deformed.)

C_B と LCB を設計パラメータ L_{PP} , B , d の従属変数として定式化すると 1 - C_P 法により, 船型群の C_P カーブは Fig. 9 の例に示すように定められる. Fig. 9 の例は省エネ標準船型に対して, C_B が小さくなる例であり, 前記目的のとおり船首部の肥大度を効果的に削減している.

基本船型は, 設計パラメータ L_{PP} , B , d と前記の通り定めた C_P カーブに従い, 省エネ標準船型の拡大縮小とステーション移動法により生成する. なお, 船型群 (463 船型) 全体の排水量差は $\pm 0.15\%$ ($\pm 4.8\text{ton}$) である.

4. 船型データベースの評価

4.1 船型データベースの妥当性評価

2.2 節に記載の手法で評価した, 船型群 (463 船型) の船速 12knots における制動馬力 BHP (以下所要馬力) と C_B との相関関係を Fig. 10 に示す. 本船型群の推進性能は C_B でよく整理される. 一方, $C_B = 0.74$ から 0.8 の範囲に, 同一の C_B の所要馬力に対して, 極端に小さい算定結果がある. これは, 肥大度が大きい範囲において, 特に造波計算の不安定性のために収束に至らなかったケースであると考えられる. ただし, 赤色四角の省エネ標準船型, 黄色下三角の基本船型の収束性が確認されており, この範囲内の結果は正しく収束したものとできる. なお, C_B が 0.73 を超える船型は, 所要馬力が過大で, 実用的な内航船の船型ではないため, 総トン数等の評価を実施していない.

船型群の推進性能推定結果について, 抵抗・自航の要素毎に分析する. 前述の通り本船型群の所要馬力は, C_B でよく整理される. Fig. 11 に示すとおりこの要因は, 造波抵抗係数 C_W に C_B を基準とした強い相関がみられるためである. ここで, 図中の誤差範囲は, Table 3 に示した数値解析不確かさ (95%信頼区間) である. 本研究において CFD の造波抵抗係数 C_W は, 造波計算の抵抗値と二重模型流れの抵抗値 C_{TDM} との差で算定している. Fig. 12 に, 造波計算の船長を基準とした無次元抵抗値 C_{DFS} と二重模型流れの無次元抵抗値 C_{DDM} をそれぞれ示す. C_{DFS} と C_{DDM} が, それぞれ一様なばらつきを有していることから, Fig. 11 の結果は, 数値解析のエラーではなく, 数値解析で捉えられたある物理現象であると推論できる.

次に, 前記と同様に C_B で整理した系統的船型群の形状影響係数 k を Fig. 13 に, 推力減少係数 $1 - t$ を Fig. 14, 有効伴流係数 $1 - w_T$ を Fig. 15, プロペラ効率比 η_R を Fig. 16 にそれぞれ示す. 図中の誤差範囲は, 同様に Table 3 に示した数値解析不確かさである. 本研究の船型データベースは, 形状影響係数に対して, 数値解析不確かさと同程度の性能変化があり, 造波抵抗, 自航要素に対しては, 数値解析不確かさの数倍の性能変化がある. このため, 本船型データベースは推進性能の差を有意に議論できる.

4.2 船型データベースの特徴

4.2.1 推進性能

船型群 (463 船型) の所要馬力を設計パラメータである船長 L_{PP} , 船幅 B , 計画喫水 d で整理して, Fig. 17 と Fig. 18 に示す. 図中, 赤色四角は水槽試験を実施した省エネ標準船型, 黄色下三角は基本船型, 丸印の色は赤いほど所要馬力が大きいことを示す. Fig. 18 より, 喫水の浅い船型では所要馬力が大きくなる一方, Fig. 17 より, 船長, 船幅は喫水と比較して所要馬力に与える影響が小さいことが分かる. これは, 喫水の浅い船型では, C_B が大きくなることに加え, 船尾にプロペラ単独効率の低い, 小直径プロペラしか配置できないためである.

次に, Fig. 11 に示した船型パラメータ C_B と造波抵抗の関係について述べる. 本船型群は船型パラメータ C_B と造波抵抗との間に, 強い相関がある. 造波抵抗は, 造波抵抗理論により C_P カーブから算定できるので, C_P カーブを C_B の関数で規定する本研究の船型群の生成手法が, この相関の主因であると考えられる. これを一般化し, 本研究の船型群の生成方法と独立した関係性を明らかにするためには, 経験則的な設計パラメータで, 谷口ら²⁴⁾により提案されている C_P カーブの傾きなど, より詳細な設計パラメータで, 船型データベースを整理する必要がある. なお, 省エネ標準船型の造波抵抗係数 C_W は, 系統的に生成された船型群の C_B に対する平均的な C_W よりも小さい. これは, 省エネ標準船型の開発 (C_P カーブの所謂肩張り, 肩落ち傾向, 船首バルブ等) の有効性を示す.

本船型群は Fig. 15, Fig. 16 に示す通り, 有効伴流係数, プロペラ効率比に, C_B との相関がみられる. 一方, 一般的^{例え}ば²⁴⁾に形状影響係数と船尾 C_P カーブとの間には, 相関があると言われているが, 本船型群では船尾 C_P カーブと相関関係にある C_B と形状影響係数との間に強い相関は見られない.

船型群 (463 船型) の推進性能評価結果を踏まえ, 実用的な 51 船型を新たに生成し, この 51 船型について改めて推進性能評価を実施し, 総トン数・載貨重量・配置の評価を行った. 以下に 51 船型を新たに生成した理由を述べる.

Fig. 10 Distribution of BHP at 12 knots vs. C_B .

Fig. 11 Distribution of wave resistance C_W vs. C_B . Fig. 12 Distribution of total resistances of free surface model and double model vs. C_B . Fig. 13 Distribution of $1 + k$ vs. C_B . Fig. 14 Distribution of $1 - t$ vs. C_B . Fig. 15 Distribution of $1 - w_T$ vs. C_B . Fig. 16 Distribution of η_R vs. C_B . Fig. 17 Distribution of BHP at 12 knots vs. L_{PP} and B . Fig. 18 Distribution of BHP at 12 knots vs. L_{PP} and d .

実用船型において、船幅 B 、計画喫水 d は 13.2, 13.3 とステップ関数で変化する。本研究では、船型群 (463 船型) の生成に一樣乱数を用いたため、船型群から実用船型の要目は得られない。このため、実用的な所要馬力を有する $C_B=0.68$ から 0.73 までのデータを喫水毎に整理し、船長、船幅、計画喫水の数値が 0.1m 単位で変わる実用性のある船型を新たに 51 船型生成した。51 船型と省エネ標準船型の所要馬力を Fig. 19 および Fig. 20 に示す。 L_{PP}/B が大きいほど所要馬力が小さく、従来から指摘される一般的 (例えば 25) な傾向が捉えられる。一方、この傾向と載貨重量の良否は逆相関のトレードオフ関係となる。次項では、載貨重量の評価の詳細について述べる。

Fig. 19 Distribution of BHP at 12 knots vs. L_{PP} and B .

Fig. 20 Distribution of BHP at 12 knots vs. L_{PP} and d .

4.2.2 総トン数・載貨重量

51 船型の船型データを造船所に提供し、載貨重量と総トン数を評価する。Fig. 21 と Fig. 22 に 51 船型の主要目と総トン数による 749 総トン型船型としての成立性との関係性を示す。Fig. 21 より 749 総トン型船型として成立するためには、排水量が一定で、船長が短く、船幅が広い必要があることが分かる。一方、Fig. 22 より総トン数に対して、喫水は船長ほど強い影響を与えないことが分かる。さらに、Fig. 19 に示した所要馬力の傾向と、Fig. 21 の総トン数との関係を整理すると、省エネ標準船型は 749 総トン型船型の条件を満た

しながら、最も所要馬力が小さい傾向を持つ主要目を選定していることが分かる。

Fig. 21 Distribution of requirement by the domestic law, vs. L_{PP} and B . (blue: passed, white: failure, red: standard ship)

Fig. 22 Distribution of requirement by the domestic law, vs. L_{PP} and d . (blue: passed, white: failure, red: standard ship)

次に、Fig. 23 と Fig. 24 に船型群の主要目と載貨重量との関係性を示す。載貨重量も船長との相関が強く、船長が短いほど大きな載貨重量が取れることが分かる。この主たる要因は船殻重量であり、この傾向は一般に (例えば 26) 船殻重量が $L(B+D)$ で整理されることから分かる。

Fig. 25 と Fig. 26 に C_B と載貨重量および総トン数との関係それぞれを示す。749 総トン型一般貨物船の所要馬力は C_B との相関が強い一方、載貨重量および総トン数と C_B との相関はとても弱いことが分かる。また、Fig. 19 と Fig. 23 との比較から所要馬力を低減するためには、船長を長くするのが好ましいのに対して、載貨重量を大きくするためには船長を短くするほうが好ましいというトレードオフ関係となっている。

このトレードオフ関係を、多目的最適化問題として解析するとパレート解が得られる。一方、緒言で述べた通り、船型設計プロセスの意思決定には、船型データベースの見える化 (設計に役立つ可視化) が役立つ。次節では、見える化の例を示し、その有効性を評価する。

Fig. 23 Distribution of dead weight vs. L_{PP} and B . Fig. 24 Distribution of dead weight vs. L_{PP} and d . Fig. 25 Relationship between C_B and dead weight. Fig. 26 Relationship between C_B and gross tonnage.

4.3 船型データベースの有効性評価

本研究では、船型データベースを船型設計プロセスの意思決定に役立てる方法論の1つとして、船型データベースの見える化を提案する。見える化の例としてCO₂排出量を示し、その最適船型について議論することで、船型データベースとその見える化の有効性評価を行う。なお、実際の設計では、経済状況、船社の方針、燃料価格等でその評価指標（特に所要馬力と載貨重量の重み係数）は変化するが、本研究ではその1例としてCO₂排出量の見える化の例を示すものとし、本船型データベースはその他の指標についても同様に最適船型を議論できるものである。

Fig. 27 Energy saving ratio vs. L_{PP} and B . Fig. 28 Energy saving ratio vs. L_{PP} and d .

51の船型群の内、749総トン型として成立する30船型について、概略配置の検討と出力1600PSの主機を搭載した場合のCO₂排出量 [gCO₂/(ton・mile)] を評価する。1990年代基準値からの省エネ率とその要目の関係を、Fig. 27とFig. 28に示す。図中Aが船型データベースにおいて最も省エネ率の高い船型である。この船型は、Fig. 19とFig. 20に示す所要馬力最小船型ではない。これは、省エネ評価式において載貨重量が線形に評価されるのに対して、推進性能は到達船速の差として評価されるためである。省エネ標準船型の場合、例えば75%MCRから60%MCRまで20%下げた場合も、船速

は 12.61 knots から 11.98 knots と 5%しか下がらない。すなわち、(5) 式で算定される CO_2 排出量 $[\text{gCO}_2/(\text{ton}\cdot\text{mile})]$ 評価は、推進性能の向上と比較し、積載重量の向上により重きを置く。

次に、この推進性能、載貨重量、総トン数および概略配置を統合的に評価した船型データベースの船型設計の意思決定に対する有効性を示す。Fig. 27 の船型 A は前述の通り、本船型群で最も省エネ率の高い優秀船型であり、その省エネ率は 38.9%である。一方、船型 B は市場調査においてニーズの高いホールド長さ 42m 以上を確保できる船長 77m 以上の船型データベースにおいて最も省エネ率の高い船型である。船型 B の省エネ率は 38.7%で、船型 A との差は 0.2%しかない。このように、統合船型データベースは船型の良否を総合的かつ定量的に評価できる。さらに、本研究で提案した船型データベースの見える化（例えば Fig. 27）は、船型の良否を最良船型の 1 点だけではなく、面的な分布として評価できるため、船型設計の意思決定に極めて有用な情報を提供できる。

5. 結 言

本研究では、従来の推進性能のみでなく、載貨重量、総トン数、概略配置も統合的に評価する船型データベースの実用設計における有効性を検証することを目的に、749 総トン型一般貨物船を対象とした省エネ性能が極めて高く、競争力のある船型データベースのプロトタイプを構築し、その最適船型の評価過程において、統合船型データベースの船型設計の意思決定に対する有効性を評価した。

まず、749 総トン型一般貨物船の建造実績から船長 L_{PP} 、船幅 B 、計画喫水 d には一定の設計範囲があることを示し、設計パラメータを L_{PP} 、 B 、 d とした。この設計パラメータに対して総トン数制限に対応する排水量一定の条件を課し、この条件に適合する実現性のある方形係数 C_B の範囲を検討して、船型データベースの設計空間を定めた。この設計空間内に 8 つの基本船型の船型ブレンディング手法により 463 船型の船型群を生成した。なお、8 つの基本船型は、 C_B と LCB を設計パラメータ L_{PP} 、 B 、 d の従属変数として定式化することで、船首部の肥大度を効果的に落とし造波抵抗の低減を図っている。また、基本船型の基となる省エネ標準船型は、従来比で約 2 割小さい主機でも計画速力 12.00 knots に、約 61%MCR で到達する省エネ性能の高い船型であることを水槽試験で確認した。

次に、船型群の推進性能評価の結果から、 C_B と造波抵抗、形状影響係数および自航要素の相関、並びに喫水変化によるプロペラの大直径化の効果について考察し、推進性能が実用的範囲にある船型の C_B 範囲を 0.68 から 0.73 と定めた。実用的な推進性能を有する 51 船型を対象に載貨重量と総トン数を評価し、 L_{PP} 、 B に対して最小所要馬力と最大載貨重量との間にトレードオフ関係があることを示した。

本研究ではこのトレードオフ問題に対して、統合船型データベースの見える化（設計に役立つ可視化）を提案し、実用設計における最適船型を議論した。最適船型の定義は、経済状況、船会社の方針、燃料価格等で異なるが、本研究では 1 例として、 CO_2 排出削減量の評価例を示した。その結果、本研究で提案した統合船型データベースの見える化は、ホールド長さの制限を含め、船型の良否を最良船型の 1 点だけではなく、面的な分布として定量的に評価できるため、船型設計の意思決定に極めて有用な情報を提供できることを示した。

本統合船型データベースとその見える化は、本研究で対象とした 749 総トン型一般貨物船以外にも、同様にその有効性を有していると考えられ、今後も船種等を増やしながらか統合船型データベースを拡張し、読者の参考に供することとしたい。さらに、本研究で対象としたデータベースの規模は数十から数百であるが、今後は数万から数億スケールのデータベースが構築できることが想定されるため、データベースのスケールに合わせた見える化についても、今後も研究を進展させていく予定である。

なお、研究プロジェクトにおいて開発された本研究の成果は内航船舶の建造を行う者が無償で使用できることとなっている。本成果を活用した実船が建造され内航海運の省エネに貢献することを期待する。

謝 辞

本研究は経済産業省の補助事業平成 28 年度輸送機器の実使用時燃費改善事業費補助金（海上輸送機器の実使用時燃費改善事業）を受けて、日本船舶海洋工学会、三浦造船所、興亜産業、本瓦造船が研究コンソーシアムを組んで実施した研究「内航海運のための省エネルギー船型群の研究開発」の一環として実施したものです。

研究の実施にあたり、お世話になりました P-51 研究委員会：内航海運のための省エネ母船型の研究開発委員会の日野孝則委員長を始めとする委員各位、三浦造船所の三浦則和設計部次長、また関係者各位に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) M. Gertler: A Reanalysis of the Original Test Data for the Taylor Standard Series, DTMB Report 806, 1954.
- 2) 山縣昌夫：船型学，天然社，1953.
- 3) 土井陽，横尾幸一，矢崎敦生，森山茂男，大橋誠三：普通型船首を有する大型肥大船型に関する系統的模型試験，船舶技術研究所報告，第 1 巻，第 6 号，pp.1-36, 1964.
- 4) 斉藤勇，松田登：内航船に関する系統的模型試験，船舶技術研究所報告別冊，1980.
- 5) 松村竹実：ニューラルネットワークを利用した中高速艇の速力性能初期推定ツールの構築，日本造船学会論文集，第 181 号，pp.221-232, 1997.

- 6) 金井健: ニューラルネットワークによる船舶の推進性能推定とその船型最適化への応用, 西部造船会会報, 第 99 号, pp.1-11, 2000.
- 7) 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構: 海上労働条約に対応した船舶設計について, 海上労働条約に対応した船舶設計セミナー, 2013.
- 8) Y. Tahara, F. Stern, and Y. Himeno: Computational Fluid Dynamics-Based Optimization of a Surface Combatant, Journal of ship Research, Vol. 28, No.4, pp.273-287, 2004.
- 9) S.Li, F. Zhao and Q. Ni: Bow and Stern Shape Integrated Optimization for a Full Ship by a Simulation-based Design Technique, Journal of Ship Research, Vol.52, No.2, pp.83-96, 2014.
- 10) 岡本直也, 鈴木和夫, 日野孝則, 増田聖始: BHP 最小化を目的とした船尾船型最適化手法 (第 1 報) -最適化手法の検討, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 23 号, pp.19-26, 2016.
- 11) H. Kim, H. Kim and C. Yang: Hydrodynamic Optimization of Ship Hull From Using Finite Element Method and Variable Fidelity Models, Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.888-896, 2012.
- 12) Y. Tahara, M. Diez, S. Volpi, X. Chen, E. Campana and F. Stern: CFD-Based Multi-objective Stochastic Optimization of a Waterjet Propelled High Speed Ship, 30th Symposium on Naval Hydrodynamics, 2014.
- 13) 大林 茂: 航空機設計空間の見える化, 可視化情報, Vol.31, No.121, pp.2-7, 2011.
- 14) 日本船舶海洋工学会 P-51 研究委員会: 内航海運のための省エネ母船型の研究開発委員会報告書, 2017.
- 15) Y. Tahara, D. Peri, EF. Campana and F. Stern: Single and Multi-objective Design Optimization of a Fast Multihull Ship: Numerical and Experimental Results, Journal of Marine Science and Technology, Vol.16, No.4, pp. 412-433, 2011.
- 16) N. Hirata and T. Hino: An Efficient Algorithm for Simulating Free-surface Turbulent Flows around an Advancing Ship, Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol.185, pp.1-8, 1999.
- 17) 平田信行, 田原裕介, 大橋訓英, 小林寛, 小野寺直幸: 船型設計用 CFD ソフトウェア, 海上技術安全研究所報告, 第 15 巻, 第 4 号, pp.395-406, 2015.
- 18) ITTC Recommended Procedures and Guidelines 7.5-03-01-01, Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures, Revision 02, Effective Date 2008.
- 19) P.J. Roache: Verification and Validation in Computational Science and Engineering, Hermosa publishers, 1998.
- 20) 矢崎敦生: 模型船による水槽試験から実船の伴流係数を推定するための図表について, 日本造船学会誌, 第 480 号, pp.270-272, 1969.
- 21) 船舶のトン数の測度に関する法律施行規則, 第 36 条, 第 37 条, 昭和 56 年運輸省令第 47 号, 1981.
- 22) 一般社団法人 日本海運集会所: 日本船舶明細書, 2016.
- 23) 一ノ瀬康雄, 久米健一: 船型要目最適化プログラム HOPE Light, 海上技術安全研究所報告, 第 15 巻第 4 号, pp.407-419, 2015.
- 24) 谷口中, 渡辺恭三, 田村欣也: 船型可分原理による肥大船の新設計法, 造船協会論文集, 第 120 号, pp.36-45, 1967.
- 25) 森正彦: 船型設計, 船舶技術協会, 1997.
- 26) 関西造船協会: 造船設計便覧 (第 4 版), 海文堂出版, 2004.