船型バリエーションの開発

ーノ瀬 康雄*, 久米 健一*, 金子 杏実*, 笠原 良和**

Development of High-Performance Hull Form Variations of Coastal Ships

by

ICHINOSE Yasuo, KUME Kenichi, KANEKO Azumi, KASAHARA Yoshikazu

Abstract

This paper introduces state-of-the-art technologies for the development of the hull form variations and applications of such technologies in practical design. Our research project aims to reduce CO_2 emission from coastal ships around Japan by providing 60 types of high-performance-ship designs to the domestic shipbuilders. Our research contributions are twofold: the optimization of a hull form based on an original hull form, and the development of hull form variations (hull form groups). The variations differ significantly in shape to satisfy the target energy conservation levels, i.e., a 16 % decrease in CO_2 emission compared with that of an average ship built in 1990's. Thirty hull form variations were developed for the 499 gross-tonnage tankers and 749 gross-tonnage general cargo ships. The variations are available for domestic shipyards which build coastal ships. Many cutting-edge technologies have been introduced to facilitate the development of various hull forms while maintaining the high-performance of the designed ships.

*	流位	本設計	十系			
* *	研究	当時	} 海_	上技術	安全码	研究所
原利	稿 受	付	令和	2年	7月	30日
審	査	日	令和	2年	9月	8日

目 次

1.	まえがき・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2.	船型バリエーションの生成方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	2.1 船型生成手法 ····································
	2.2 推進性能の評価手法・・・・・・31
3.	船型バリエーションの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・32
	3.1 499 総トン型ケミカルタンカー・・・・・・・32
	3.2 749 総トン型一般貨物船・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
4.	おわりに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
誹	
疠	≳考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

1. まえがき

本研究は、平成28年度経済産業省補助事業・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)「内航海運のための省エネルギー船型群の研究開発」¹⁻⁵⁾の一環として実施したものである.海 上技術安全研究所(以下海技研)は同研究コンソーシアムからの研究分担要請に応じ、実船建造を視野に入れた 設計上の制約条件も考慮した上で省エネ性能を追求した499総トン型タンカー船型及び749総トン型一般貨物船 型の開発を請負研究として実施した.

本研究プロジェクトの特徴は、単に与えられた初期船型に基づく最適船型を求めるだけでなく、省エネ目標値 を満たしつつ有意な形状差を有する船型バリエーション(船型群)を開発することである.本プロジェクトでは 汎用性の高い 499GT 型ケミカルタンカー30 船型,749GT 型一般貨物船 30 船型の計 60 船型の船型バリエーショ ンを、内航船舶を建造する国内の造船所に無償で公開することにより、広く内航船舶の省エネ化に資することを 目的としている.

実利用の観点からこの船型バリエーションを出来るだけ系統的かつ合理的に生成する必要がある. その観点に おいて、本研究では類似する過去の研究事例には無かった多くの新しい要素技術が導入された. 本報では特に船 型バリエーションの開発の要素技術に焦点を当てると共に実際に 499GT 型ケミカルタンカーおよび 749GT 型一 般貨物船の船型バリエーションの開発に応用した事例に関し、得られた船型バリエーションの流体力学的特性と 実際設計の観点から評価した結果について報告する.

2. 船型バリエーションの生成方法

ここでは本研究におけるバリエーション船型群の生成方法について述べる.まず図1に本研究で使用する手法 の全体概要を示す.バリエーション船型群の開発では従来研究で開発した船型最適化システムの機能のを応用し た.図1に示す通り船型最適化システムは形状変形を行う Geometry and grid Manipulation: GM,性能評価を行う Asynchronous Evaluator: AE および最適化を行う Optimizer: OPT の3つの要素から構成される.この内 OPT では実 数値遺伝的アルゴリズム(Real-Coded Genetic Algorithm: RCGA)を使用した.AE として本船型開発システムでポテ ンシャル理論に基づく CFD: PF-CFD とレイノルズ平均ナビエストーク方程式法(Reynolds-averaged Naiver-Stokes equation method: RaNS-CFD)の2つを選択できるが、本研究では計算精度が高いと考えられる粘性を考慮した RaNS-CFD を使用した.なお、今回用いる RaNS-CFD には海技研で開発したコード2種⁷, NEPTUNE version 6.41 および NAGISA version 3.1 を使用した.



図1 計算手法の全体概要計算手法

今回の適用では1つの最適船型を求めるのではなく船型バリエーションを構築することが目的であるため,解 空間に広く解が分散するように探索を行う必要がある(図2).そのため OPT において,RCGA のクロスオーバー・ オペレーションを使用せず,ミューテーション・オペレーションの代替として用いているジーンプール型データ セットに,高い分散性を考慮した船型ブレンディング情報を実数型で保存しそれを活用した.この観点において RCGA は別の GA 型アルゴリズムであるバイナリー型 GA(Binary-Coded Genetic Algorithm: BCGA)よりも分散性に 優れ,その特徴を用いてより均等に分布したパレート解を求める目的のために適用した事例がある^{8,9}.今回の適 用においても,図3 に示す2 次元設計空間における場合だけなく,図4 に示す3 次元設計空間においてその有効 性が確認できている.なお,図3 の水平方向の軸 (et,xi) は設計パラメータ,垂直軸は (a)F_1: 粘性抵抗 (b)F_2: 全抵抗(造波抵抗含む)をそれぞれ示す.



図3 2次元設計空間における評価値の分散特性

29



図4 3次元設計空間(設計パラメータδξ, δη, δζ)における解の分散特性

2.1 船型生成手法

バリエーション船型群の生成においては、図5に示す3次元設計空間の正規化形で定義された理論を用いている. 図中,各頂点には基本船型 (8船型: $f_1 \sim f_8$)を配置し、内部の融合船型群は実数パラメータ $0 \leq \delta\xi$, $\delta\eta$, $\delta\zeta \leq 1$ に関連する重み係数を用い、下記の式を用いて求める.

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

また、2次元設計空間では上記実数パラメータδζを0とすることにより、基本船型を4船型として更に簡便な 以下の形になる.

$$f_p = f_1 + (-f_1 + f_2)\delta\xi + (-f_1 + f_4)\delta\eta + (f_1 - f_2 - f_4 + f_3)\delta\xi\delta\eta$$
(2)

本研究ではこの手法を船型ブレンディング(船型融合)と呼んでおり,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を基にして融合船型を求める.



図5 正規化した3次元設計空間における設計パラメータの定義

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された船型バリエーションの推進性能は、海技研開発の RaNS ソルバー NEPTUNE および NAGISA による数値解析で得られた抵抗係数,自航要素を,最適船型の水槽試験結果^{2,3}との相 関係数により補正することで求める.749GT型一般貨物船の補正係数の例を表1に示す.

749GT型一般貨物船の計算を例に、数値解析の詳細について述べる.格子は、海技研と有限会社エイ・シー・ ティーが共同開発した AutoDes⁷⁾ により生成された 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 Lppで無次元化されており,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ース方向 128 セル(両舷)、船体による造波を考慮する 計算では静止水面上に 3%船長程度の乾舷をとり, ガース方向に 128 セル(両舷)で構成されている. 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 を満たす. NEPTUNE および NAGISA 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、本研究では乱 流モデルと自由表面モデルに,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 法を適用する.

表2に文献12で実施されている749GT型一般貨物船の最適船型³を対象とした本計算の不確かさ解析の結果 を示す.ここで、 C_{TDM} は二重模型流れの全抵抗係数、 C_{TFS} は造波計算の全抵抗係数、 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 ラ効率比を表し,Uscは計算格子に起因する不確かさ,Usc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 Cw = CTFS - CTDM で評価するため、造波抵抗係数の不確かさ USCW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.表2より抵抗値,自航要 素に対する Uswは概ね数%の範囲にあることが確認できる.

表1	計算補正係数と水槽試験との差(749GT 型一般貨物船)								
			Correlati						
	EFD	CFD	EFD / CFD	EFD - CFD	Error				
$C_{TFS} \times 10^3$	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%				

表2 数値計算の不確かさ解析結果(749GT 型一般貨物船)

	U_{SG}	U_{SI}	U_{SN}		based on	
C_{TDM}	2.3% - 3.9%	0.0%	2.3% -	3.9%	$%C_{TDM}$ (Condition A)	
C_{TFS}	3.8% - 6.4%	0.2%	3.8% -	6.4%	$%C_{TFS}$ (Condition A)	
C_W	4.4% - 7.4%	0.2%	4.4% -	7.4%	$%C_{TFS}$ (Condition A)	
1 + k	2.3% - 3.9%	0.0%	2.3% -	3.9%	(1 + k) (Condition A)	
1 - t	0.3% - 0.6%	0.1%	0.3% -	0.6%	%(1 - t) (Condition A)	
$1 - w_T$	3.0% - 5.1%	1.0%	3.2% -	5.2%	$%(1 - w_T)$ (Condition A)	
η_R	0.4% - 0.7%	0.0%	0.4% -	0.7%	$\%\eta_R$ (Condition A)	

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最適船型²³⁾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 比に、対象船型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 $\eta_{o-ideal}$ をかけた ものとする.

$$\eta_o = \eta_{o-ideal} \times \eta_{opt} / \eta_{opt-ideal} \tag{4}$$

$$D^{-ideal} = \frac{1}{1 + \sqrt{1 + C_{TH}}}$$
(5)

$$C_{TH} = \frac{1}{0.5\rho V_A^2 \pi D_P^2 / 4} \tag{6}$$

ここで、Tはスラスト、hoは水の密度、 V_A はプロペラ前進速度、 D_P はプロペラ直径である。

η

3. 船型バリエーションの開発

ここでは前節で述べた手法で開発した船型バリエーションの概要と,さらにその船型群の性能について述べる.

3.1 499GT 型ケミカルタンカー

造船所や船会社からのヒアリングの結果 499GT 型ケミカルタンカーの喫水については設計の自由度が比較的 低いことがわかったため、499GT 船型のバリエーション船型群の開発については *L/B - C_B*を基準とした 2 次元設 計空間を定義することとした.ここで,*L*は船長,*B*は船幅,*C_B*は方形係数である.船型ブレンディングの基準に は図 7 に示す 4 船型 D.1~D.4 を採用した.



図7 499GT 型ケミカルタンカーの船型バリエーションにおける4つの基本船型

図 8 に 499GT 型ケミカルタンカーの設計空間における設計船速での所要馬力(*BHP*)の変化を示す.ここで 描画領域は所要馬力が 458[kW]以下の船型バリエーション選択範囲である.図 9 には選択範囲に対応する船型の 形状特性値の分布を示す.図 8,9 の座標軸は XI および X2 は,(2)式の $f_1 \sim f_4$ に図 7 の船型 D.1,D.2,D.4, D.3 を組込 んだ時の $\delta\xi$, $\delta\eta$ であり、それぞれ図 7 の L/B と C_Bにそれぞれ対応する. 船型 D.2 は基本 4 船型の中では最も低抵抗かつ低馬力であり,図 8 に示す通り BHP の分布は船型 D.2 付近を 中心に低い.これは *L/B* 軸および *C*_B 軸の方向性から考えて従来設計法の知見を裏付けるもので,この計算の妥当 性を示している.



図8 499GT 型ケミカルタンカーの設計空間での設計船速における BHP の変化



図 9 499GT 型ケミカルタンカーの船型バリエーションの設計パラメータの最終選択領域における形状特性値

図 10 および表 3 に 30 船型の船型バリエーションの設計パラメータと省エネ率等の比較を示す. なお,省エネ率は文献 2,3 に記載の方法で算定した CO₂排出量に対する値で,499GT 型ケミカルタンカーの基準値(資源エネルギー庁の示した 1990 年代の平均燃費)は 32.84 gCO2/(ton·NM)である. ここで NM は Nautical Mile である。

30 船型の船型バリエーションの最終選択では、まず所定の馬力改善基準・CO₂ 改善基準を満たす範囲から造船所設計者の意見をもとに実際に建造可能な船型形状を選定した.建造基準は船長の最短条件、カーゴタンクの 重心、復原性、そして総トン数から定められる要目の数値基準で、具体的には次の3つ条件を全て満たすことで ある。 34

① *B*≧10.0m

② B=10.1m では $C_B \ge 0.688$, B=10.0m では $C_B \ge 0.69$ (B は 0.1m おきに変化)

③ 浮心位置 LCB は MIDSHIP から 0.5% L 以上船首側

この建造基準に準拠した船型の中から推進性能を基準に図 10 および表 3 に示す 30 船型の 499GT 型ケミカル タンカーの船型バリエーションを選定した.図8 において高い推進性能を示している船型でも建造基準に準拠し ないために最終 30 船型の選択からは除かれている場合もある.

表3に示す通り,開発した30船型の499GT型ケミカルタンカーの船型バリエーションの全てで当初の目標とした16%以上のCO₂削減率を達成した.



図 10 499GT 型ケミカルタンカーの船型バリエーションの最終選択船型(30 船型)の設計パラメータ

id	Lpp	В	d	Cb	Χ1 (δξ)	Χ2 (δη)	Output_75%MCR	Vs	Emission	FOC	Energy Saving Ratio
	m	m	m				kW	knot	gCO2 / (ton*mile)	liter / (ton*mile)	%
0	60.7	10.0	4.2	0.705	0.733	0.356	551	12.16	26.46	0.00976	19.4
1	60.8	10.0	4.2	0.705	0.778	0.356	551	12.16	26.45	0.00976	19.4
3	60.9	10.0	4.2	0.702	0.778	0.311	551	12.16	26.45	0.00976	19.5
4	61.0	10.0	4.2	0.702	0.822	0.311	551	12.17	26.44	0.00976	19.5
7	61.2	10.0	4.2	0.699	0.822	0.267	551	12.17	26.44	0.00976	19.5
13	61.4	10.0	4.2	0.692	0.822	0.178	551	12.17	26.43	0.00975	19.5
14	61.5	10.0	4.2	0.696	0.911	0.222	551	12.17	26.44	0.00976	19.5
16	61.6	10.0	4.2	0.696	0.956	0.222	551	12.18	26.42	0.00975	19.6
20	61.7	10.0	4.2	0.692	0.956	0.178	551	12.18	26.42	0.00975	19.6
22	61.8	10.0	4.2	0.692	1.000	0.178	551	12.18	26.41	0.00974	19.6
23	61.9	10.0	4.2	0.689	0.956	0.133	551	12.18	26.42	0.00975	19.6
24	62.0	10.0	4.2	0.689	1.000	0.133	551	12.18	26.41	0.00975	19.6
25	61.1	10.0	4.2	0.696	0.733	0.222	551	12.16	26.44	0.00976	19.5
26	61.2	10.1	4.2	0.692	0.733	0.178	551	12.17	26.44	0.00976	19.5
27	61.3	10.0	4.2	0.692	0.778	0.178	551	12.17	26.43	0.00975	19.5
28	61.5	10.1	4.2	0.689	0.778	0.133	551	12.17	26.43	0.00975	19.5
30	62.1	10.0	4.2	0.687	1.000	0.089	551	12.17	26.42	0.00975	19.5
31	62.3	10.0	4.2	0.681	1.000	0.022	551	12.16	26.46	0.00976	19.4
32	60.3	10.1	4.2	0.700	0.511	0.311	551	12.17	26.43	0.00975	19.5
33	60.4	10.1	4.2	0.700	0.556	0.311	551	12.16	26.45	0.00976	19.5
34	60.5	10.1	4.2	0.697	0.511	0.267	551	12.16	26.45	0.00976	19.5
35	61.3	10.1	4.2	0.689	0.689	0.133	551	12.17	26.44	0.00976	19.5
36	61.4	10.1	4.2	0.688	0.733	0.133	551	12.17	26.43	0.00975	19.5
37	61.6	10.1	4.2	0.686	0.778	0.089	551	12.17	26.43	0.00975	19.5
39	61.7	10.1	4.2	0.685	0.822	0.089	551	12.17	26.43	0.00975	19.5
40	61.8	10.1	4.2	0.683	0.867	0.089	551	12.17	26.43	0.00975	19.5
41	61.9	10.1	4.2	0.682	0.911	0.089	551	12.17	26.43	0.00975	19.5
42	62.1	10.1	4.2	0.681	0.911	0.022	551	12.16	26.45	0.00976	19.4
43	62.2	10.1	4.2	0.681	0.956	0.022	551	12.16	26.46	0.00977	19.4
44	62.4	10.1	4.2	0.680	1.000	0.000	551	12.16	26.46	0.00977	19.4

表3 499GT 型ケミカルタンカーの船型バリエーション

35

3.2 749GT 型一般貨物船

499GT 型ケミカルタンカーは船型の自由度が低い一方,749GT 型一般貨物船は船型の自由度が比較的高い。 そのため749GT 型一般貨物船のバリエーション船型は以下の検討方針で開発することとした.

「はじめに,船体曲面形状が成立する可能な限り大きな設計空間で船型を生成し,広範囲で推進性能評価を行う. その後,推進性能の急激な悪化,各種ルール,船主要望から実船型として成立する船の範囲を絞り込む.」

日本船舶明細書から抽出した 749GT 型一般貨物船の主要目を基に,船長 L_{PP},船幅 B,喫水 dの3つを設計変数とした表4に示す設計空間を定めた.

総トン数が 749 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に課した. この場合, *C_B* が要目に 応じ変化する. 図 11 に *L_{PP}*, *B*, *d* の設計空間と *C_B* の関係を示す. 本研究では船型変形の試行錯誤により, 実現 性のある *C_B* の範囲を 0.68 から 0.80 に設定した.



表 4 749GT 型一般貨物船の設計空間の主要目範囲

(**左** $: <math>C_B$ の分布, 右 : 設定した C_B の範囲 0.68–0.80)

基本船型(図 11 中①~⑧)は、設計パラメータ L_{PP} , B, dについて最適船型³⁾を拡大縮小とステーション移動法により C_B を変更して生成した.なお、船型群(463 船型)全体の排水量差は±0.15%(±4.8ton)である.

図 12 に前節の方法で評価した船型群 (463 船型)の船速 12knots における所要馬力 BHP の分布を示す. 図中, 赤色四角は水槽試験実施船型,黄色下三角は基本船型,丸印の色は赤いほど船速 12knots における所要馬力 が大きいことを示す.図 12 右図より,より喫水の浅い船型では所要馬力が大きくなることが分かる.これ は、*C*_Bが大きくなる影響に加え、大直径プロペラを配置できないためである.



図 13 に 749GT 船型群の船速 12knot における所要馬力と *C*^{*B*} との相関関係を示す. なお,図より本船型群の推進性能は *C*^{*B*} で良く整理されることが分かる.このため,本研究の船型バリエーションの選定基準に *C*^{*B*} を採用した.



本船型群の性能, すなわち所要馬力 BHP は C_Bでよく整理されるが, この要因は図 14 に示すとおり, C_Bの増 大に伴い造波抵抗 C_Wが大きくなるためである. なお図中の誤差範囲は, 表 2 に示した数値解析不確かさであ 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¹³⁾ 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)の有効性を示している.



図 14 C_Bで整理した 749GT 型一般貨物船の船型群の造波抵抗の分布

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,推力減少係数 1 - t,有効伴流係数 1 - w_T, プロペラ効率比η_Rを図 15 にそれぞれ示す.図中の誤差範囲は,同様に表 2 に示した数値解析不確かさである. 本船型群は有効伴流係数,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 13)}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.



この船型群(463 船型)の推進性能評価結果を踏まえ,最終的な船型バリエーションを選択するため,新たに 実用的な51 船型を生成し,推進性能評価に加えて,総トン数・載貨重量・配置の評価を行った.新たに生成した 51 船型と最適船型の所要馬力を図16 に示す. *Lpp/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14)} 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.



51 船型の船型データを造船所に提供し,総トン数と載貨重量を評価した結果を図 17 及び図 18 に示す.図 17 は 51 船型の主要目と総トン数による 749GT 型船型としての成立性との関係性を示す.図 17 より 749GT 型一般 貨物船として船型が成立するためには,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,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,図 16 に示した所要馬力の傾 向と,総トン数との関係を整理すると,最適船型は 749GT 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.



次に、図18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15)}船殻重量が *L*(*B*+*D*)で整理されることからも分かる.

39



図 19 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.749GT 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,図 15 と図 17 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,載貨重量を大きくと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とが分かる.

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,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.



図 20 に 749GT 型一般貨物船としての成立する 30 の船型バリエーションに対して,出力 1600PS(1177kW)の主機を搭載した場合の 1990 年代の CO2 排出量[gCO₂/(ton·NM)] 基準値からの省エネ率とその要目との関係を示す.なお、省エネ率は文献 2,3 に記載の方法で算定した CO₂排出量に対する値で,749GT 型一般貨物船の基準値(資源エネルギー庁の示した 1990 年代の平均燃費)は 32.73 gCO₂/(ton·NM)である。

図中Aが船型バリエーションにおいて最も省エネ率の高い船型である.この船型は、図16に示す通り所要馬 力最小船型ではない.これは、CO₂排出量の評価式が、馬力と積載重量との流体力学的な関係性よりも積載重量 の向上を高く評価するためである.



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以上の船型バリエーションにおいて最も省エネ率の高い船型であり,省エネ率は38.7%で船型Aとの省エネ率の差は0.2%である.このように省エネ率を定量的に評価し,建造する船型を議論できる点に本船型バリエーションの価値がある.

7. おわりに

本研究では内航船舶の建造を担う中小造船所で低コストかつ容易に省エネルギー内航船舶が建造可能となる よう,1990年代基準値からの省エネ率が16%を上回る499GT型ケミカルタンカーと749GT型一般貨物船の船型 バリエーション(計60船型)を開発した.本論文では,系統的船型群の生成手法について紹介し,この系統的船 型群の推進性能及び成立性等について評価した.

船型の評価は経済状況,船社の方針等により変化するが,その評価を定量的に示したことに本船型バリエー ションの価値がある.本船型バリエーションの一部が建造され内航海運の省エネに寄与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関係者各位に深く感謝の意を表します.

また、本研究は田原裕介博士(2019年1月25日逝去)と共同で実施しました. 故田原博士の高い見識と技術力に より本研究を成功させることができました. 心より感謝いたします.

参考文献

- 1) 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) P51「内航 海運のための省エネルギー船型群の研究開発」研究成果報告書, P51 研究委員会,(非刊行),3 月,2017.
- 2) 笠原良和:499GT 型ケミカルタンカーの省エネルギー船型の開発,日本船舶海洋工学会講演会論文集, 24, 2017.
- 3) 久米健一,一ノ瀬康雄,三浦則和,深澤良平,大場弘樹:749総トン型一般貨物船の省エネルギー船型の開発, 日本船舶海洋工学会講演会論文集,第24号(2017).
- 4) 田原裕介,金子杏実,笠原良和:499GT型ケミカルタンカーの船型バリエーションの開発,日本船舶海洋工学 会講演会論文集,24,2017.

- 5) 一ノ瀬康雄,田原裕介,久米健一:749GT型一般貨物船の船型バリエーションの開発,日本船舶海洋工学会講 演会論文集,24,2017.
- Tahara, Y., Ichinose, Y., Kaneko, A., Kasahara, Y.: Application of Simulation Based Design for ESD Installed Commercial Ships, 31st Symposium on Naval Hydrodynamics, Monterey, California, 11-16 September, (CDROM), 2016.
- 7) 平田信行,田原裕介,大橋訓英,小林寛,小野寺直幸:船舶設計用CFDソフトウェア,海上技術安全研究 所報告,第15巻,第4号,2015.
- Tahara, Y., Takai, T.: High-Performance Multi-Objective Evolutionary Algorithms for Computational Fluid Dynamics-Based Design Optimization, Proc. 3rd PAAMES and AMEC2008, Chiba, Japan, pp. 313- 323, 2008.
- 9) Tahara, Y., Peri, D., Campana, EF., Stern, F.: Single and Multi-objective Design Optimization of a Fast Multihull Ship: numerical and experimental results, J. Marine Science and Technology, Vol.16, No.4, pp. 412-433, 2011.
- Ichinose, Y., Tahara, Y., Kasahara, Y.: Numerical Study on Flow Field around the Aft Part of Hull Form Series in a Steady Flow, 18th Numerical Towing Tank Symposium, Cortona, Italy, 2015.
- Kasahara, Y.: Hull Form Design utilizing CFD for improvement of EEDI, International Workshop on Ship Technologies Related to Energy Efficiency Design Index (EEDI), Tokyo, Japan, 2015.
- 12) ーノ瀬 康雄,田原 裕介,久米 健一: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,日本船舶海洋工学会論文集,26 巻,p.51-62,2017.
- 13) 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.
- 14) 森正彦:船型設計,船舶技術協会,1997.
- 15) 関西造船協会:造船設計便覧(第4版),海文堂出版,2004.