

日本財団 御中

表 題 :

日本財団助成事業
「中型ケミカルタンカーにおける
環境負荷低減型先進船群の開発
(革新的建造手法コンソーシアム)」
— 初年度の報告 —

村上秀造船株式会社

〒794-2305 愛媛県今治市伯方町木浦甲 4641-2

TEL : 0897-72-0070, FAX : 0897-72-0484

助成 : 日本財団

目次

	頁
1. はじめに	2
2. 事業の概要	2
2-1. 事業の目的および目標	2
2-2. 船型群の概要および特徴	3
2-3. 開発計画	3
3. 基幹船型の開発	8
3-1. 基幹船型の概要	8
3-2. CFD 計算	9
3-3. CFD 計算結果の評価方法	13
3-4. CFD を用いた平水中の推進性能評価	14
3-5. 波浪中抵抗増加	17
3-6. CFD を用いた Eco-Stator の設計	19
3-7. 水槽試験	25
3-8. 実船の推進性能推定	29
4. 派生船型の開発	31
4-1. 派生船型の主要目	31
4-2. CFD を用いた平水中の推進性能評価	31
4-3. 波浪中抵抗増加	37
5. 初年度のまとめ	37

中型ケミカルタンカーにおける環境負荷低減型先進船群の開発 初年度の報告

1. はじめに

本プロジェクトは日本財団助成金事業「中小造船業緊急支援策（先進船舶の開発・実証助成プログラム）」の採択事業「中型ケミカルタンカーにおける環境負荷低減型先進船群の開発」である。本プロジェクトにご理解頂き、助成して頂いた日本財団様に深く感謝の意を表し御礼申し上げます。

2. 事業の概要

2-1. 事業の目的および目標

新型コロナウイルス感染症拡大による我が国経済の低迷や海上荷動き量の不透明さ・市況の低迷により、低迷した新造船建造意欲の喚起が求められている。外航のコンテナ船やバルクキャリアは好況であるが、ケミカルタンカーは依然として低迷したままである。このような現状において環境問題対策が求められ、国際的に GHG 規制値も厳しくなり、より一層環境負荷を低減した船が求められるようになった。そこで従来船型よりも推進・環境性能が良い船型を開発しなければならない。さらに、これまでは平水中の推進性能向上が重視されていたが、実海域での推進性能改善も求められるようになった。

当社主力であるケミカルタンカーは 1,200DWT から 12,500DWT までの建造実績があり、さらに同じ Deadweight でも主要目が異なる船型の建造実績がある。これは顧客のニーズに対応した実績である。しかし、個船ごとに船型を詳細に開発するには、人材、時間、費用が十分でなく不可能であった。そのため、開発船の船型と性能を関係づけられず、次船の開発に活かせなかった。先の理由から、初期計画時に船型と性能は社内では対応できず外注に頼むことになり、顧客へのレスポンスが遅くなっていた。当社は、これからも顧客のニーズに応え、顧客満足度を向上させリピートや新規契約に繋げていきたい。そのため、本支援策にて 1 隻の開発を支援して頂くより、船型群としての開発を支援して頂くことが当社の未来に意義のある開発と考える。本事業で従来船よりも環境負荷を低減させる船型群を開発し、顧客のニーズに合わせた船型の概要書、一般配置図、線図の作成、推進性能の推定を社内ですることができるようにすることで、顧客へのレスポンスを早め新造船受注に繋げることを目的とする。

目標として従来船よりも環境負荷を低減させ、EEDI のフェーズⅢをクリアすることを掲げる。

2-2. 船型群の概要および特徴

当社の主力である 12,500DWT の船型を基幹船型とし、L/B、B/d、Cb をパラメータとしてトランスフォームした船型を派生船型とする。これらを総称して船型群とする。この船型群は従来船型よりも平水中・航海中性能を向上し、環境対策として DF エンジンの搭載を前提とする。また、水槽試験、CFD を援用して船型群の抵抗・自航要素をチャート化するため、任意の船型の推進性能を求めることができる。

本事業で開発する環境負荷低減先進船群は、当社の主力船型の性能向上、営業力の強化、設計効率改善による建造付加価値を上げ造船所運営を有利にし、さらに、航海性能情報を運航者に提供できるため、船主・オペレーターによる環境対策や経済対策に寄与する。

2-3. 開発計画

① 技術の先進性

本プロジェクト内の技術の先進性とは、当社で採用していた従来の技術から、営業・設計・建造船の性能が改善される新しい技術のことをいう。

(1) Dual Fuel エンジン搭載可能な省エネ船型群の検討

燃料タンクが肥大化するため、従来船型のまま DF エンジンを採用すると推進性能が悪化する。平水中・実海域中の推進性能を向上させるため、船型を最適化する。特に実海域性能を考慮し、船首エントランス角を改善する。

(2) 派生船型の船型設計法の確立

NAPA もしくは Initial Lines Gene の船型変更機能を用いて船型を派生させる方法を確立する。

(3) 船型群の平水中推進性能推定法の確立

船型群の抵抗要素、自航要素をチャート化し、平水中の推進性能推定方法を確立する。

(4) 船型群の実海域推進性能推定法の確立

船型群の波浪中抵抗増加係数をチャート化し、実海域推進性能推定方法を確立する。

(5) CFD を用いた平水中の抵抗・自航計算

船型確定後の平水中の詳細なシミュレーションは自社で CFD 計算を行う。

② 事業体制

本事業の実施体制を図1に示す。

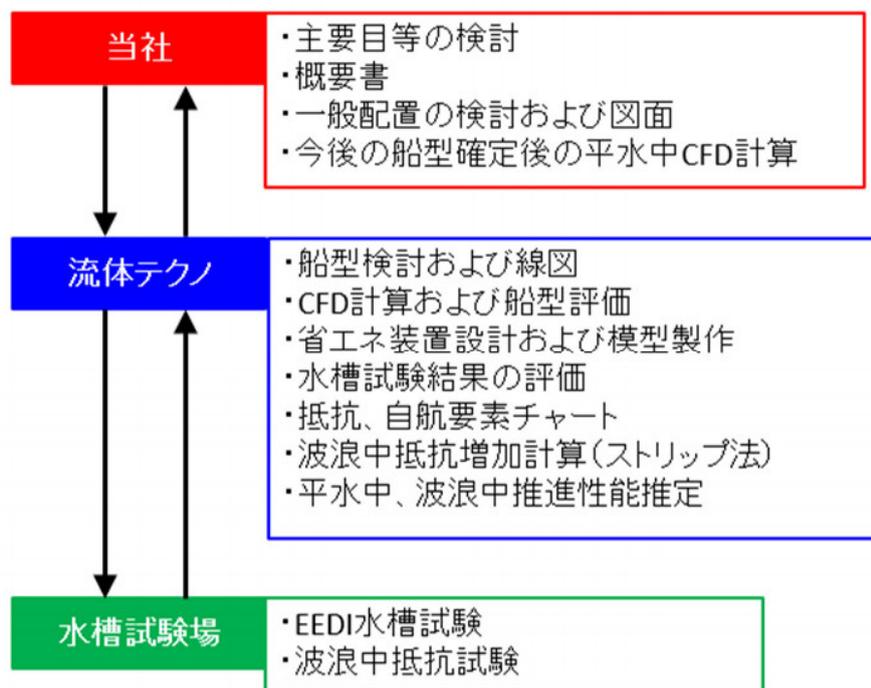


図1 事業の実施体制

③ 技術開発の具体的内容

(1) マーケット調査

ケミカル船の役目として、文字通り、ケミカル製品の安定・安全なる大量輸送にある。基本的なケミカル製品の需要は、生活水準の向上に伴い、また多様化するケミカル製品の出現と需要の増加により、減少する傾向はみられない。また、将来にわたり、開発途上国が先進国へ進化することが想定され、2022年において80億人に達するといわれる世界人口が、2050年には90億人を超え、2058年には100億人を超えると予想され、ケミカル(石油化学製品)の需要は、衰えないことはないことは容易に想定される。(国連人口基金(UNFPA)世界人口白書2022より)

ケミカル製品の運搬においては、LR・MR・SRと呼ばれる、19,000~60,000D/Wの大型ケミカル船での基礎ケミカルの運搬のみならず、5,000~15,000D/Wの小型ケミカル船での、ベンゼン・トルエン・キシレン(BTX)なる基礎原料や、パラキシレンなどの製品ケミカルの運搬も現状では行われており、特にアジア・極東地域においては、中国~韓国~日本の出荷・トレードが強く見て取れる。今後のそれらトレードの継続性を、ケミカル船の運航者に、訪問・聞き取りする方法で、マーケット調査を行った。

まず、日本の元売り各社の対応において、自動車のエネルギー源・動力源が、ガソリン・軽油から電気への移行期あるものの、ケミカルについては、ケ

ミカル製品へのシフトが検討され加速している。ある石油元売り会社では、生産再編は中長期で考えられているもの、着手を早める必要性は認識されている。製油所の閉鎖・停止ではなく、ケミカルの生産に転換するなどの選択肢が検討されている。また、ケミカルリサイクルについても計画が立ち上がり、別の石油元売り会社においても、同様に年間約2万トンのケミカルリサイクルプラントが計画されており、ケミカルの需要はガソリン・軽油と異なり、増加のトレンドを描くものと考えられる。

ケミカル船の更なる開発計画については、ガソリン・灯油・軽油を運搬する白油船（プロダクト船）と異なり、最新鋭の省エネ船型の開発を行う意義が十二分に確認できる。

次いで、開発を行う船型について、これまで当社では、3,400D/W、4,999D/W、6,800D/W、8,800D/W、11,500D/W、12,500D/Wと多様な建造実績があり、これらの船型の需要見通しについて、ヒアリングを行った。そのヒアリングに際して、要点は、次の3点である。

- 1) 4,999D/W 船型の需要の見込み
- 2) 6,800D/W 船型の需要の見込み
- 3) 船舶におけるエネルギー転換含めた省エネ

そのヒアリングの内容は、次の通りであった。

- ターゲット貨物を何にするかだと考える。日本の油槽所向けの石油製品をターゲットとするならば、バースが内航の5,000KLが主流となるので、4,999D/W 船型とした方が入れる棧橋は多くなる。
- 一方、極東～東南アジアにおいて、1ロットが大きめのBTX類をターゲットとするならば、カーゴサイズが5KT/6KT/3KT+3KT等となり、6,800D/W 船型が必要となる。
- 国内の製油所、油槽所、タンクターミナルが大型船を受け入れられるよう、棧橋を拡張する場合は、最適な船型も大きく変わってくるかと思うが、棧橋拡張には費用が膨大にかかる上、工事中の不稼働時間、港湾への届け出等ハードルが高く、これまでのところ実施していた棧橋は、ごく少数である。そう考えると、今後も4,999D/W 船型や6,800D/W 船型へのニーズは引き続きあるのではないかと考えられる。
- カーボンニュートラルの部分では、近年、バイオ燃料関連での相談が入るようになった。既存エンジンで使用の可否も検討する必要があると考えている。
- 省エネ技術については、絶え間なく、情報収集・検討・採用を行う必要があると考えており、また、それを考慮された船型の導入を今後進めたいと考えている。

上記のヒアリング結果を考慮すると、4,999D/W 船型、6,800D/W ならびに11,500D/W/12,500D/W 船型に、引き続き、ニーズがあるものと考えられる。

また、上記船型の開発においては、先進的な省エネ技術の導入が欠かせないことは言うまでもない。

(2) 船型群の開発範囲の計画

船型群の開発範囲は、当社の船台のサイズより小さいことが前提となる。つまり、長さ 162.5m 未満、幅 25.0m 未満となる。次に、当社建造実績と他マーケット調査結果から Deadweight の範囲を定めた。5,000DWT から 15,000DWT である。この範囲のケミカルタンカーの主要目は、表 1 のようになる。さらに船型群の抵抗要素と自航要素を作成するため、船型群の開発イメージは図 2 のように計画した。

表 1 船型群の開発範囲（計画）

		本事業に用いる船種
船種		ケミカルタンカー
載貨重量(トン)		5000~15000
満載排水量(トン)		10000~20000
船の寸法		L(長さ)= 105~130 (m) B(幅) = 17~22 (m) d(喫水)= 7~9.5 (m)
計画速度(ノット)		約13knots(0.18<Fn<0.21)
主機	型式	DFエンジン
	航海中の使用燃料 (A重油 or C重油)	A重油 & LNG

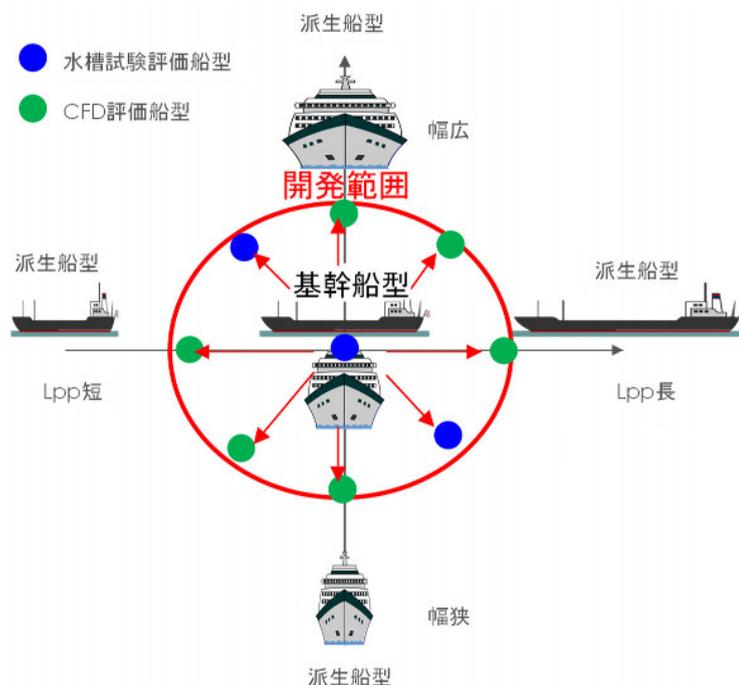


図 2 船型群の開発イメージ

(3) 基幹船型の開発

- ・ 基本設計（主要目・DWTの決定、一般配置の検討、目標船速・主機・プロペラの選定、概要書の作成）
- ・ 船型設計（船型検討、平水中の船型評価(CFDで従来船と比較)、航海中の船型評価、省エネ装置の検討およびCFD評価）
- ・ 水槽試験（EEDI予備認証用平水中抵抗・自航試験、波浪中試験）

(4) 派生船型の開発

- ・ 基本設計（主要目・DWTの決定、一般配置の検討、目標船速・主機・プロペラの選定、概要書の作成）8隻
- ・ 船型設計（トランスフォーメーションによる船型作成、平水中の船型評価(CFD)、航海中の船型評価、省エネ装置の検討およびCFD評価）
- ・ 水槽試験（EEDI予備認証用平水中抵抗・自航試験、波浪中試験）2隻

(5) 設計システムの開発

- ・ 派生船型の作成方法、船型のトランスフォーメーション手順の調査
- ・ 船型群の推進性能、航海性能を推定するプログラムを作成

④ 技術開発のスケジュール

スケジュールを表2のように計画した。

表2 技術開発スケジュール

項目	概要	2021 /11~	2022 /02~	2022 /05~	2022 /08~	2022 /11~	2023 /02~	2023 /05~	2023 /08~
基本設計	主要目・DWTの範囲、目標船速、主機・プロペラの検討	→							
	概略船型、一般配置、概要書の検討		→						
船型設計	比較船 平水中CFD計算、波浪中抵抗計算	→							
	基幹船型の検討、平水中CFD計算、航海中船型評価		→						
	基幹船型の省エネ装置の検討			→					
船型評価	基幹船型のEEDI用水槽試験			→					
	基幹船型の波浪中水槽試験			→					
基本設計	派生船型、一般配置、概要書の検討(8隻)				→				
船型設計	派生船型の検討、平水中CFD計算、航海中船型評価(8隻)				→				
	派生船型の省エネ装置の検討(8隻)						→		
船型評価	派生船型のEEDI用水槽試験(2隻)							→	
	派生船型の波浪中水槽試験(2隻)							→	
性能設計	推進・航海性能推定プログラム作成								→

3. 基幹船型の開発

3-1. 基幹船型の概要

開発する船型群の基幹となる船型を基幹船型と称し、12,500DWT ケミカルタンカーと設定した。当社の主力商品である従来船型の12,500DWT ケミカルタンカーと推進性能を比較することで本プロジェクトの有効性を確認するためである。基幹船型は1基1軸1舵である。船首は突出型のバルブ形状を有している。また、船尾はマリナー型形状である。Summer draft 状態におけるサービススピード(90%MCR 15%S.M.)は約13.0knots を目標とした。また、EEDI のフェーズⅢの規制値を満足することも目標である。基幹船型と従来船型である比較船型の主な違いを表3に示す。

表3 基幹船型と比較船型の違い

変更箇所 (比較船型に対して)	基幹船型	効果
主機関	DF エンジンへ変更	GHG 排出量減少
肥脊係数 C_b	約 97%	造波抵抗の減少
船首水線入射角	鋭角	実海域性能の向上
船尾プロファイル	マリナー型へ変更	推進効率の向上
プロペラ直径	約+0.8m	推進効率の向上
船尾形状	プレスワール系省エネ装置装着前提とした形状	船体抵抗が増加するが、推進効率が大幅に向上する

基幹船型と比較船型の船首水線入射角を比較すると基幹船型は比較船型より鋭角になっている。船首水線の入射角およびブラントネス係数 B_f は船首の造波抵抗、波浪中の抵抗増加と関係が深いいため、比較船型と比較する上で重要な要素である。ブラントネス係数 B_f と波浪中抵抗増加の関係を図3に示す。図3から低速かつ波長船長比 λ/L が小さいとき、基幹船型は比較船型より波浪中抵抗増加が小さいことがわかる。

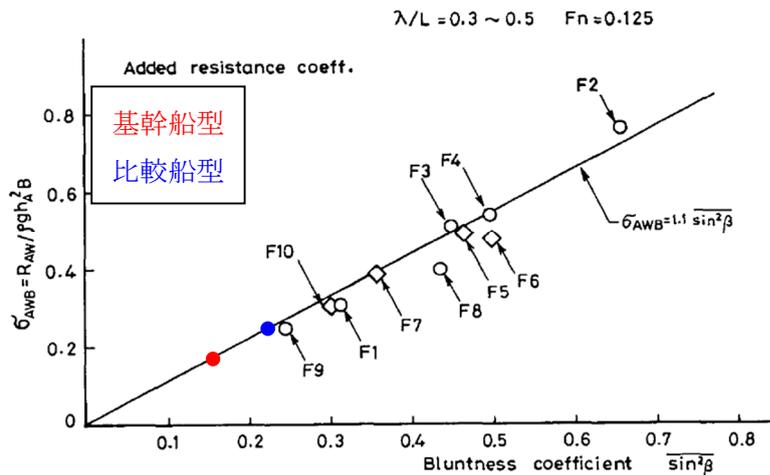


図3 ブラントネス係数 B_f と波浪中抵抗増加の関係

出典：高橋 雄，波浪中抵抗増加の実用的推定法とその船型計画への応用，西部造船会会報 第75号

3-2. CFD 計算

CFD を用いて船体表面の圧力、船体周りの流れ、波形および抵抗・自航要素を求め比較船型と平水中推進性能を比較し評価する。基幹船型と比較船型の抵抗要素および自航要素をシーメンスデジタルインダストリーズソフトウェア株式会社の“STAR-CCM+ ver. 16”を用いて計算した。この計算はRANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)に基づいている。船体周りの流体を粘性流体として取り扱い細かい格子に分割する。したがって分割格子数が結果に影響を与える。また流場の一部の表現として渦モデルが用いられる。サーフェスモデルは船体、舵、ビルジキールである。船体はヒービングおよびピッチングのみ自由とし、船速による船体沈下およびトリム影響を計算に考慮している。格子数は抵抗計算用として片舷約 550 万格子、自航計算用として両舷約 1,200 万格子とした。Summer draft 状態において抵抗計算を行い、船体周りの流れ（流線、造波）及び船体に働く力（圧力分布）を求めた。また、同じ喫水状態で自航計算を行い、プロペラ作動時の船体が受ける抵抗、プロペラのスラスト、トルクおよび回転数を求めた。プロペラはGoldsteinのスラスト・トルク分布の最適化によるプロペラ体積力モデルを採用した。基幹船型と比較船型の諸元を表4に示す。CFD 計算設定を表5に示す。CFD に用いたプロペラの単独性能を表5および図4に示す。計算に用いた格子を図5から図7に示す。

表4 船体諸元

	基幹船型	比較船型
Lpp (m)	119.600	119.600
B (m)	20.800	20.800
D (m)	11.500	10.950
d (m)	8.480	8.100

表 5 CFD 計算設定

計算コード	STAR-CCM+ Ver.16
解析モデル	非定常解析
乱流モデル	RANS
渦粘性モデル	SST k- ω
混相モデル	オイラー混相、VOF法
運動モデル	DFBI (Heave, Pitch Free)
計算領域	抵抗 ハーフモデル(片舷)
	自航 フルモデル(両舷)
格子	非構造格子・セル中心
格子要素数	抵抗 約550万格子
	自航 約1200万格子
レイノルズ数	$4.3 \times 10^6 \sim 1.19 \times 10^7$
フルード数	0.090 \sim 0.250
Y^+	40
プロペラモデル	プロペラ体積力モデル (Goldstein)

CFD計算領域		
	抵抗計算	自航計算
X	-2.3Lpp \sim 3.3Lpp	-2.3Lpp \sim 3.3Lpp
Y	0 \sim 2.3Lpp	-2.3Lpp \sim 2.3Lpp
Z	-2.0Lpp \sim 1.0Lpp	-2.0Lpp \sim 1.0Lpp
基点 : (X,Y,Z) = (AP,0,dm), Y : 左舷が正		

CFD計算	喫水状態	速度数	計算船速		
			Fn		
抵抗計算	Summer draft	8	Fn	0.0900	\sim 0.2300
			Vs	6.08	\sim 15.54
自航計算	Summer draft	1	Fn	0.2100	\sim 0.2100
			Vs	14.19	\sim 14.19

表 6 プロペラ単独性能

Propeller Open Water Characteristics			
J	KT	KQ	ETAO
0.3000	0.2196	0.02566	0.4086
0.3500	0.2011	0.02406	0.4656
0.4000	0.1825	0.02239	0.5189
0.4500	0.1636	0.02062	0.5682
0.5000	0.1441	0.01875	0.6116
0.5500	0.1238	0.01676	0.6466
0.6000	0.1025	0.01465	0.6681

Propeller Open Water Characteristics

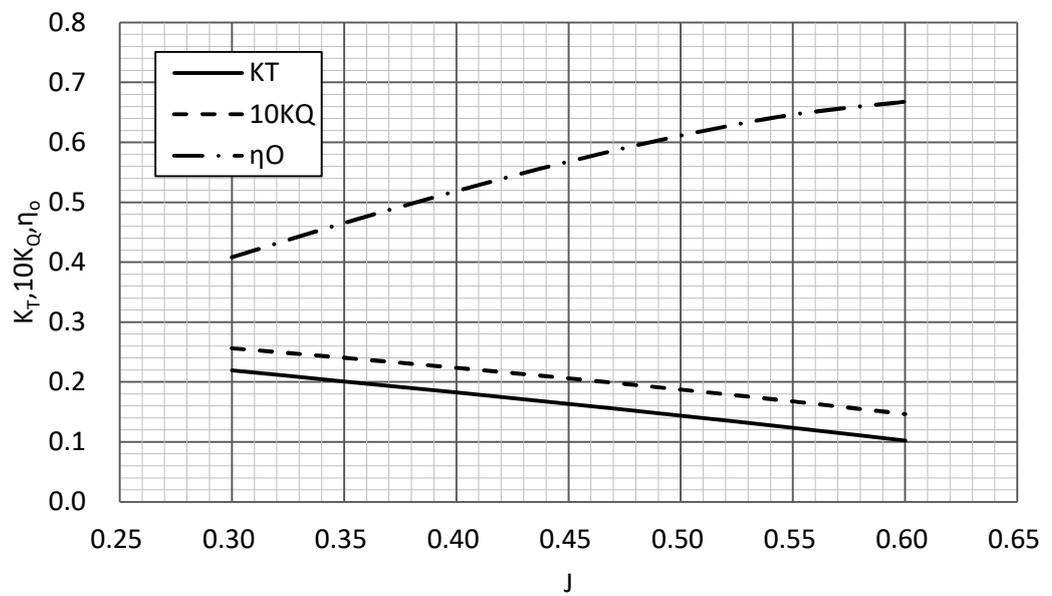


図 4 プロペラ単独性能

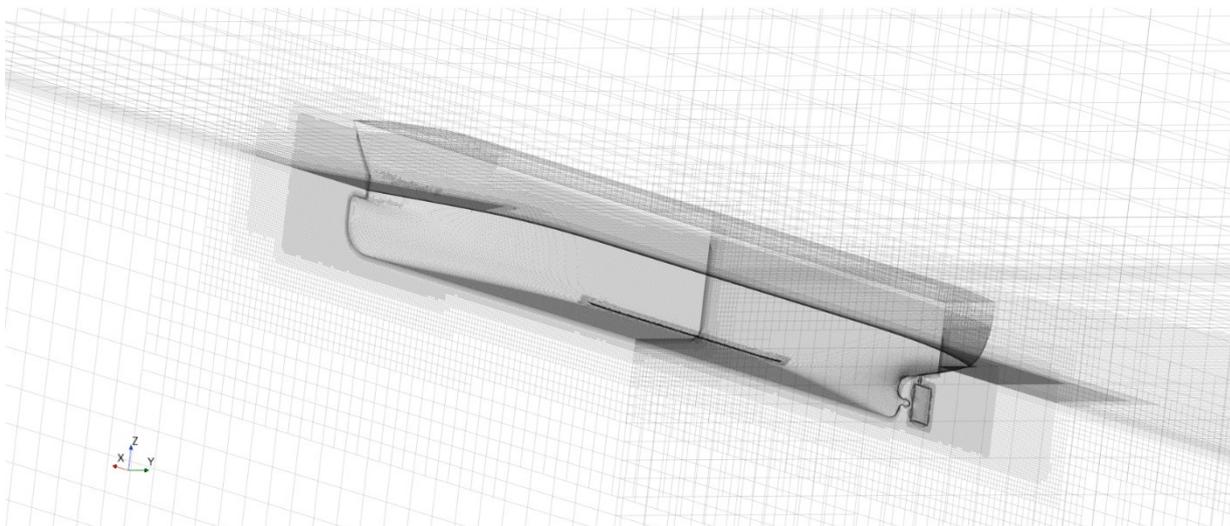


図5 計算格子 (Summer draft)

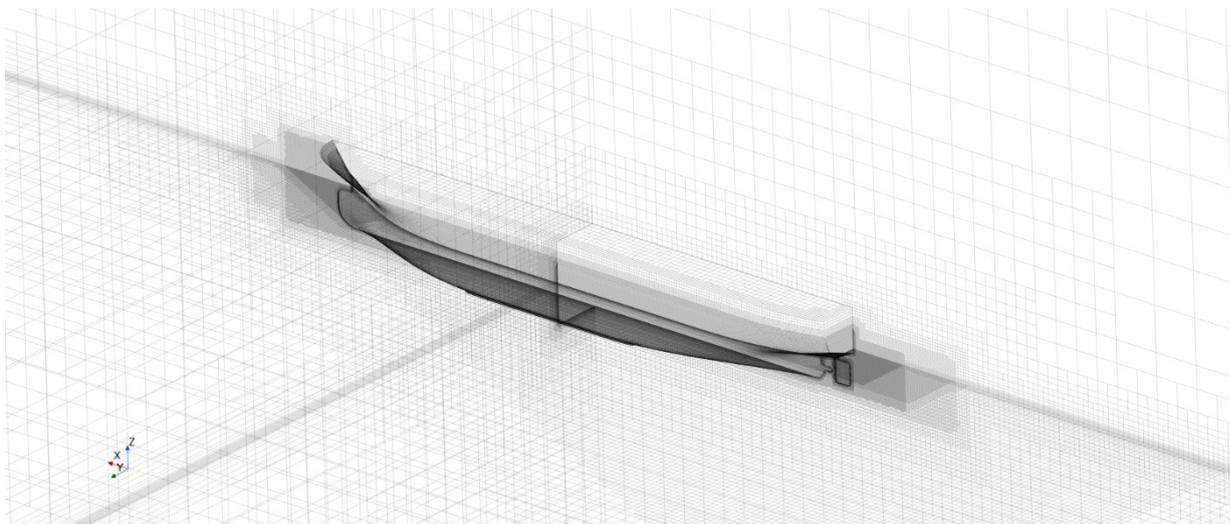


図6 計算格子 (Summer draft)

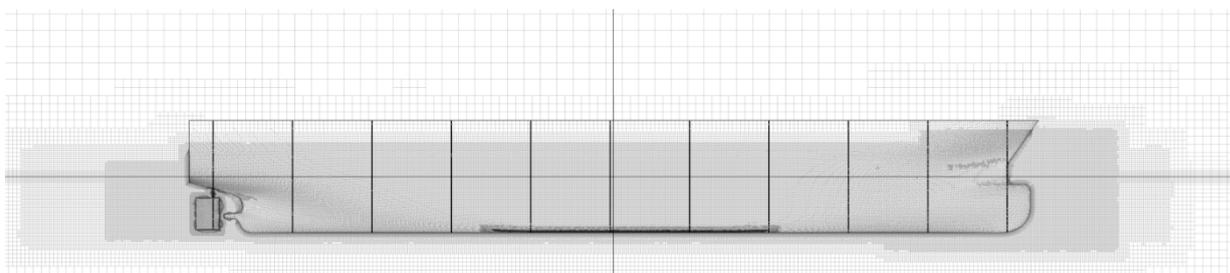


図7 計算格子 (Summer draft)

3-3. CFD 計算結果の評価方法

(1) 圧力分布

船体および付加物表面上の動圧 $p - p_0$ を速度の 2 乗で無次元化したものを $C_p = (p - p_0) / (0.5 \rho V^2)$ と定義し、本報告書では単純に圧力と呼ぶ。ただし、 p_0 は無限前方の圧力である。船体表面上の圧力分布の青い部分は負圧であり、船体から流体へ向かう方向の力になる。従って船体前半部では推力になるが、船体後半部では抵抗になる。一方、赤い部分は正圧であり、流体から船体および付加物に向かう方向の力になる。従って船体前半部では抵抗になるが、船体後半部では推力になる。また、急な圧力上昇では速度の減速が大きくなり、流れが剥離しやすくなる。逆に、圧力上昇が緩やかであると、速度変化は緩やかになりスムーズな流れになる。

(2) 流線

流線は流速ベクトルの向きを連ねたもので定常流れでは流れの道筋を表す。船体および付加物表面上では流速はゼロであるが摩擦力が存在する。摩擦力に対する摩擦速度ベクトルの向きを連ねたものを限界流線という。従って限界流線は船体および付加物の表面に限りなく近い流れを表している。船体表面の限界流線が船長方向に対して直線的であると、エネルギー損失が少なく、抵抗が小さい船型と言える。逆に限界流線にうねりが生じる場合には、エネルギー損失が多く、抵抗が大きい船型であると言える。また、隣り合う流線の間隔が広がると流速は減少し、その付近で流れが滞る。逆に間隔が狭くなると流れが集中し、船体表面から離れる方向成分の流れを生じ、ひいては剥離に到る。

(3) 波紋図

波紋は船体周りの水面の波高の分布であり、これにより船体の航行による造波の状況を把握することができる。波紋図の赤い部分は波高が高く、青い部分は波高が低い。また波紋図の色が緑に近いほど波は小さく造波抵抗が小さい。船首端、船体前半の肩部、船体後半の肩部および船尾端で主に波が生じ、それらが船後方に向かって広がる拡散波となって確認できる。拡散波の色が緑に近いほど波は小さく、造波抵抗が小さい船型である。

(4) 伴流分布

プロペラ軸に平行な流速成分を船速で無次元化したものを伴流率 $1-w$ と定義する。すなわち、 $1-w = V_a/V$ [V_a : プロペラ軸方向流速 (m/s)、 V : 船速 (m/s)] である。 $1-w$ は場所により異なる。伴流分布の赤い部分は $1-w$ が大きく、プロペラ軸方向の流れが速い。一方、伴流分布の青い部分は遅い流れを示す。ベクトルはプロペラ面内の流れの回転成分を表す。

3-4. CFD を用いた平水中の推進性能評価

CFD 計算結果の中から、 $Fn=0.210$ (約 14.2knots 相当)における波紋の鳥観図を図 8 に示す。図中に比較船型の波紋の鳥観図を並べ基幹船型と比較した。

基幹船型の方が比較船型より船首肩波が減少している。これは船首肩部の張りが緩やかとなり、船体表面の負圧が弱くなったためである。船尾肩部も同様の理由から基幹船型の方が比較船型より船尾拡散波が減少している。プロペラ面内の伴流分布は、マリナー型船尾形状と逆 G 型船尾形状であるため伴流分布の形は異なる。基幹船型はマリナー型船尾形状を活かした強い縦渦をプロペラ面内に作っている。また、プロペラ上部に高伴流域も見られず、プロペラによる船体振動も少ないと推察される。

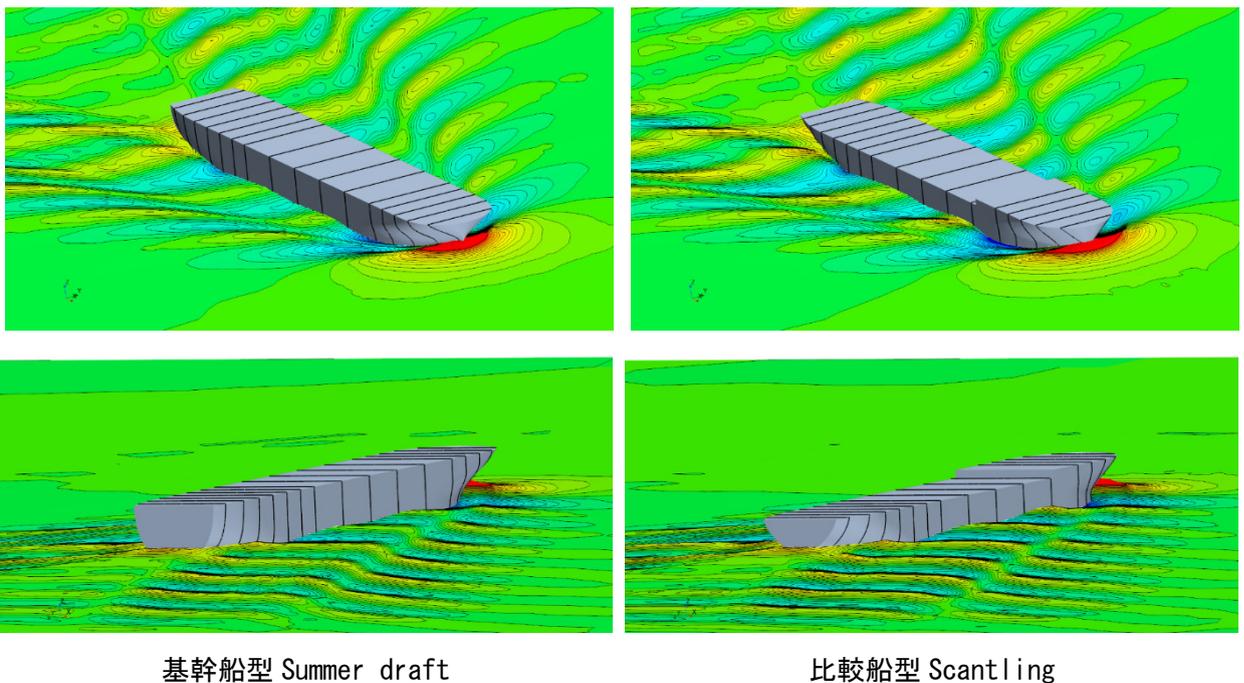


図 8 波紋の鳥観図

抵抗計算で求まる力は摩擦抵抗と圧力抵抗である。後者は造波抵抗と粘性圧力抵抗から成る。通常の抵抗試験で用いられる解析法を適用し、全抵抗から相当平板の摩擦抵抗を除き剰余抵抗係数 rR を算出した。その際、摩擦抵抗係数 C_f は Schoenherr の式を用いた。また、水槽試験相当 (以下、EFD) の剰余抵抗係数 rR 、形状影響係数 K および造波抵抗係数 rW を推定するため、類似船の CFD 計算結果と水槽試験結果の相関を用いて各係数を求めた。

CFD から求めた水槽試験相当 (EFD) の剰余抵抗係数 rR 、造波抵抗係数 rW を図 9 に示す。基幹船型の方が比較船型より高速域で抵抗要素が低減している。

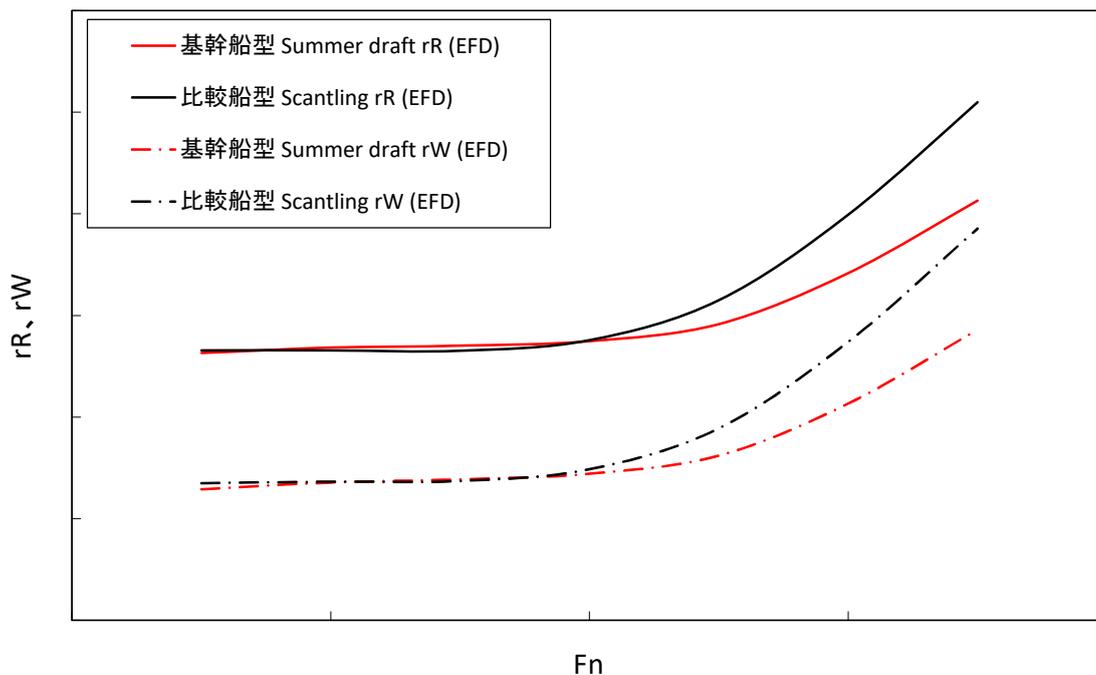


図9 剰余抵抗係数 rR および造波抵抗係数 rW (EFD)

自航状態の CFD 計算は船の抵抗 R' 、プロペラのスラスト T 、曳航力 F の釣り合い状態をシミュレートした。曳航力 F は模型船と実船とのレイノルズ数違いによる摩擦抵抗係数の差分(SFC)とした。すなわち、次式が成り立つような自航要素を求める。

$$R' - T - SFC = 0$$

ここでSFCは形状影響係数 K 、水の密度 ρ 、船速 V_m 、浸水面積 S_m から次式で求める。

$$SFC = (C_{fm} - C_{fs} - \Delta C_f) \cdot \frac{1}{2} \rho V_m^2 S_m$$

C_{fm} , C_{fs} はそれぞれ模型スケールおよび実船スケールのレイノルズ数における摩擦抵抗係数で Schoenherr の式から求めた。釣り合った回転数におけるスラスト、トルクおよび曳航時の抵抗値を用いて、通常の水槽試験解析と同じ手法で自航要素を求めた。CFD から求めた水槽試験相当(EFD)の自航要素を図10に示す。基幹船型の方が比較船型より $1-t$ が増加し、 $1-w$ が減少したことから船殻効率が良くなった。

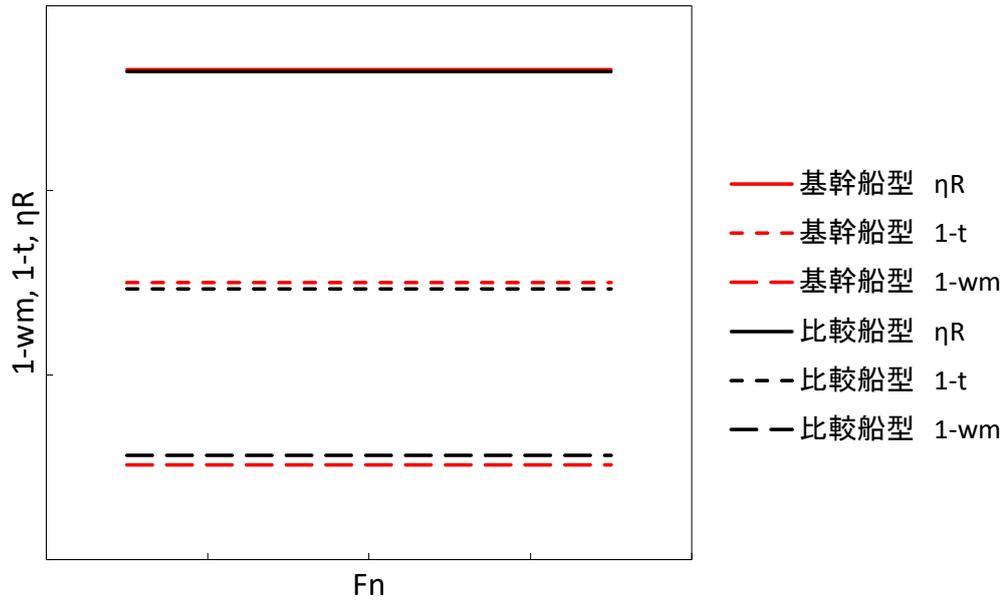


図 10 自航要素 (EFD)

CFD 計算で求めたプロペラ回転数 n_m とトルク Q_m から任意の船速のときのプロペラ馬力 P_m を次式によって求める。

$$P_m = 2\pi n_m Q_m$$

CFD 計算モデルの船速（実船船速 14.2knots 相当）とプロペラ馬力の関係を図 11 に示す。同じ船速において、基幹船型の方が模型船スケールでプロペラ馬力が約 16.7%程度低減した。

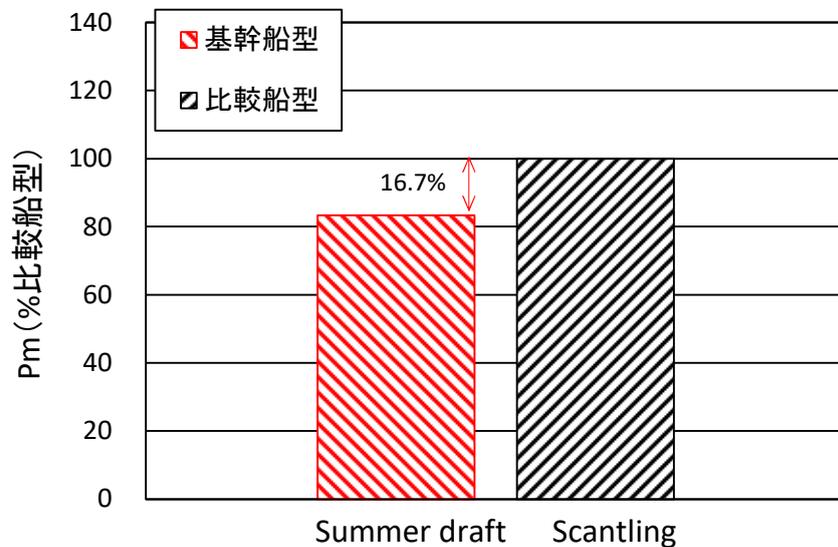


図 11 模型船スケールにおけるプロペラ馬力の比（実船船速 14.2knots 相当）

3-5. 波浪中抵抗増加

基幹船型と比較船型の船体形状から Summer draft、Scantling 状態における波浪中抵抗増加を算出した。船が実海域を航海する場合、風と波の影響により船は船体抵抗の増加を受け、速力、プロペラ回転数あるいは出力が変化する。波の影響による船体抵抗増加は足達の方法^[1]を用いて算出した。足達による波浪中抵抗増加の計算はストリップ法を用いており、その概要を簡単に説明する。

航海中に船が遭遇する波は、短時間で波を計測する場合、一定の方向から一定の波長の波が計測単位時間、船に入射していると考え、この波を狭帯域スペクトラム波浪と考え、計測波高と波周期から波スペクトラムのエネルギーを求める。また、船も波に回答するスペクトラムを持っており、波スペクトラムのエネルギーに回答するエネルギーが求められる。このエネルギーから船体の抵抗増加が求められる。この抵抗増加は規則的波浪中を航走する場合、抵抗増加は線形理論により計算することができる。波浪中の船体抵抗増加は次の三成分で構成されている。

- ・ 波の無い水面を船体が上下運動や縦揺れ運動しながら進む場合の抵抗成分 (Radiation 問題)
- ・ 波の中、船体が運動しないで進む場合の抵抗成分 (Diffraction 問題)
 - (1) 船首部からの波の反射による抵抗成分 (Reflection 問題)
 - (2) 波が船体を伝播するとき波が変形される船体と波の干渉による抵抗成分 (Diffraction 問題)

これらの抵抗成分は独立して計算することができるが、船体運動と船体と波の干渉による抵抗増加を計算する場合には干渉を考慮することが必要である。波浪中抵抗増加はこの干渉を考慮した抵抗増加と反射による抵抗増加の成分の和で表されるとする。

以上の足達宏之氏の波浪中抵抗増加の計算により、基幹船型の波浪中抵抗増加係数 C_{AW} を求めた。計算条件を表 7 に示し、基幹船型と比較船型の計算結果を図 12 および図 13 に示す。

表 7 波浪中抵抗増加計算の条件

船速	F_n	0.17, 0.20
波向	χ (deg.)	180
波長船長比	λ/L	0.2~2.0 0.1 毎

[1] 足達宏之：波浪中抵抗増加の計算，未発表

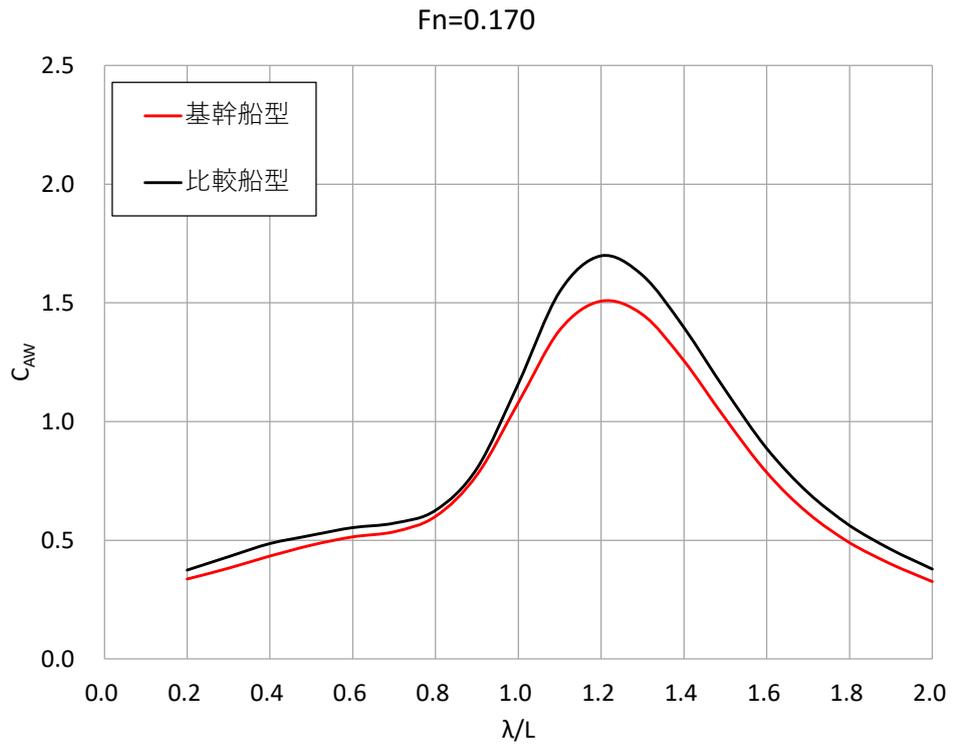


図 12 波長船長比と波浪中抵抗増加の関係（180 度向い波）

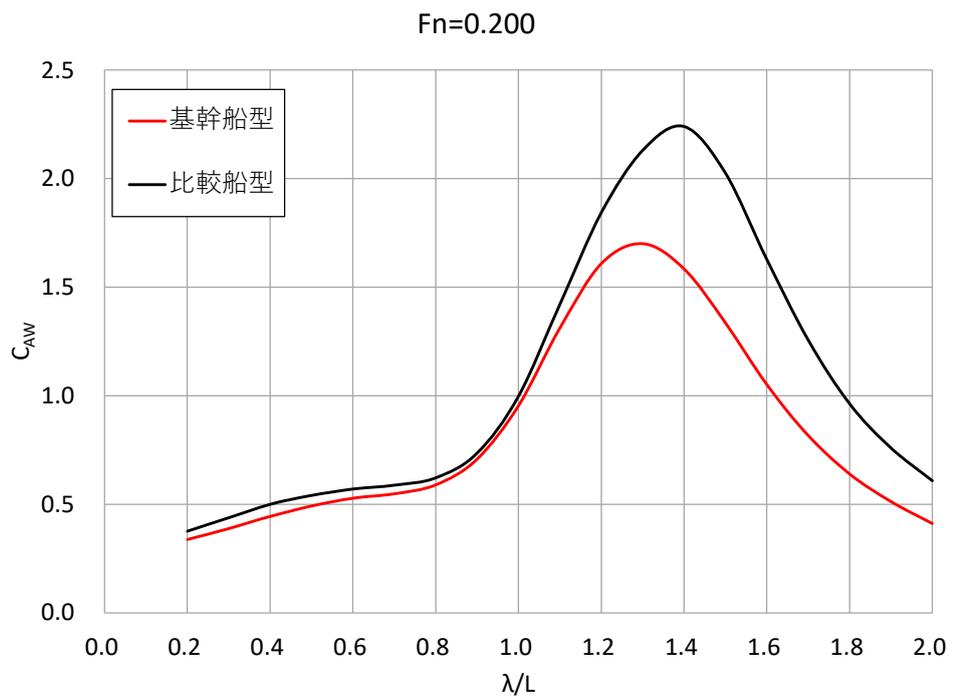


図 13 波長船長比と波浪中抵抗増加の関係（180 度向い波）

全ての波長船長比において、基幹船型は比較船型より波浪中抵抗増加係数 C_{AW} が低い。

3-6. CFD を用いた Eco-Stator の設計

CFD を用いて基幹船型に装着する Eco-Stator (以下、ES と記す。) を設計した。ES は自航要素に影響を与えるため、自航計算でその性能を確認した。また、類似船の水槽試験結果と CFD 計算結果から両者の相関を求め、この関係が本船にも成立するとして、CFD 計算結果から水槽試験結果に相当する自航要素を求めた。

各ステータの名称を図 14 に示す。

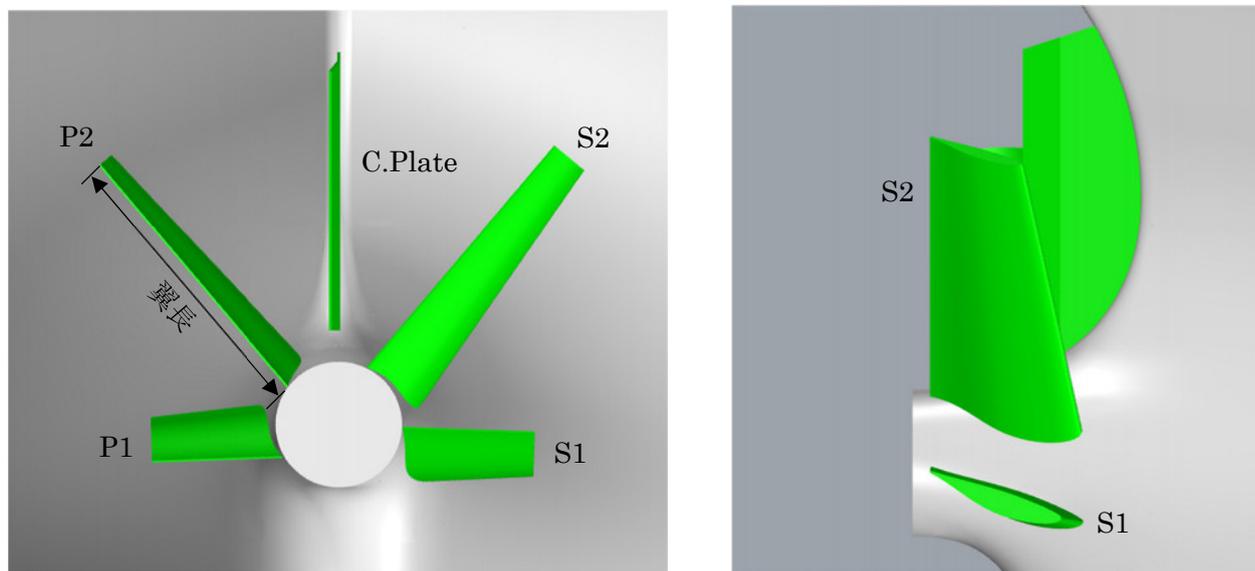


図 14 各ステータの名称

エムエスシーソフトウェア株式会社の SCRYU/Tetra ver. 13 を用いて、本船の自航計算を行った。この計算は抵抗計算と同様に RANS に基づいている。計算モデルは船体、舵、ES を用いた。計算領域は抵抗計算結果の波面を用いて波面以下の流体を計算対象としたモデルを採用した。格子数は抵抗計算および自航計算で約 3,000 万格子とした。また、自航計算で用いたプロペラは体積力モデルとし、MAU プロペラ特性を用いた。自航計算条件を表 8 に示す。計算に用いた格子を図 15 および図 16 に示す。

表 8 CFD 自航計算条件

計算コード	SCRYU/Tetra Ver.13
解析モデル	定常解析
乱流モデル	RANS
渦粘性モデル	SST k- ω
混相モデル	なし 単相流(液相)
運動モデル	なし (拘束)
計算領域	抵抗 フルモデル(両舷)
	自航 フルモデル(両舷)
格子	非構造格子・セル中心
格子要素数	抵抗 約3000万格子
	自航 約3000万格子
レイノルズ数	$9.7 \times 10^6 \sim 9.7 \times 10^6$
フルード数	0.204 \sim 0.204
Y^+	平均1以下
プロペラモデル	プロペラ体積力モデル (無限翼数プロペラモデル)
プロペラ直径	実船 4.5000m
	CFDモデル 0.2218m

CFD計算領域(抵抗・自航)	
X	-3.0Lpp \sim 2.0Lpp
Y	-Lpp \sim Lpp
Z	-1.5Lpp \sim dm
基点 : (X,Y,Z) = (AP,0,dm), Y : 左舷が正	

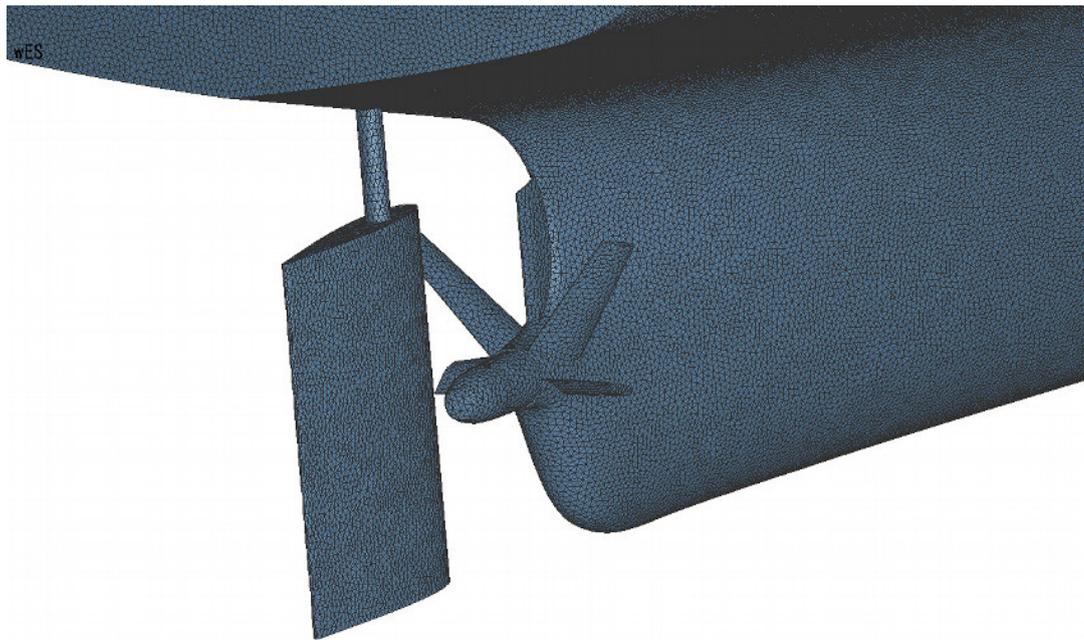


图 15 自航計算用格子

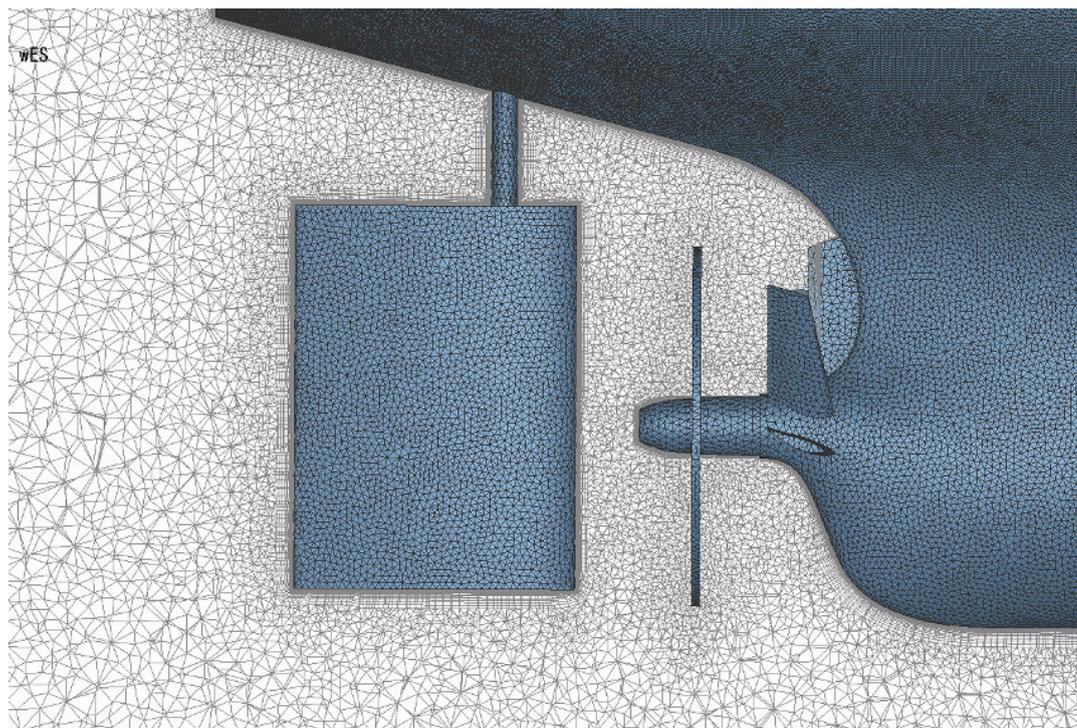


图 16 自航計算用格子

Summer draft の 13.8knots 相当 ($Fn=0.204$) における省エネステータの表面圧力分布を図 17 から図 19 に、伴流分布を図 20 に示す。それぞれ左図は ES 無、右図は ES 有を示す。

図 17 から図 19 の ES の表面圧力に注目すると、それぞれのステータに赤色の部分と青色の部分が存在していることがわかる。赤色になった面（正圧力面）をフェイス面とし、青色になった部分（負圧力面）をバック面とする。つまり、左舷側のステータでは上面がバック面であり、下面がフェイス面である。また右舷側のステータでは上面がフェイス面であり、下面がバック面である。フェイス面とバック面に圧力差が生じており、揚力を発生させていることがわかる。この揚力の中の前進方向が推力となる。

図 20 の伴流分布をみると、ES 無しではプロペラボス周りのベクトルが左右対称であり、左舷側ではプロペラ回転と逆方向の流れであり、右舷側ではプロペラ回転と同一方向の流れであることがわかる。ES を装着すると、プロペラボス周りのベクトルは左回りの流れに変化しておりプロペラ回転と逆方向の流れを発生させている。また、右舷側のステータ下部に遅い流れが見られ、 $1-w$ を改善させ船殻効率を向上させていると推察される。

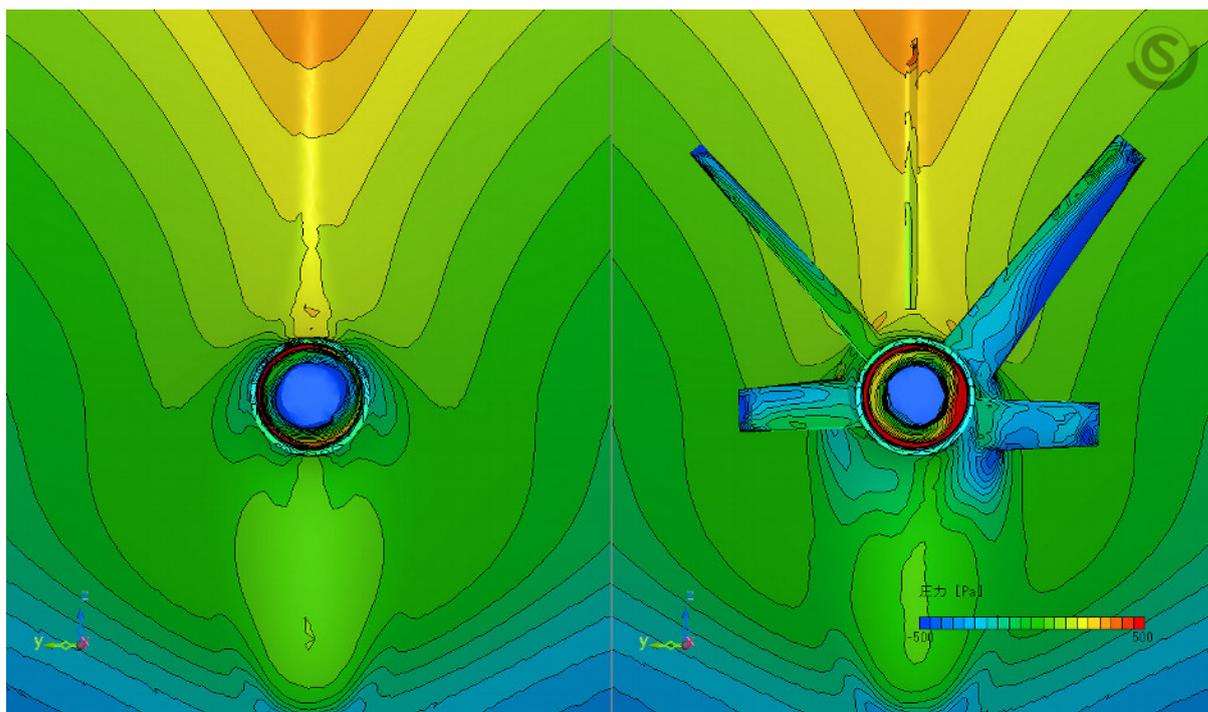


図 17 表面圧力（船尾より見る）

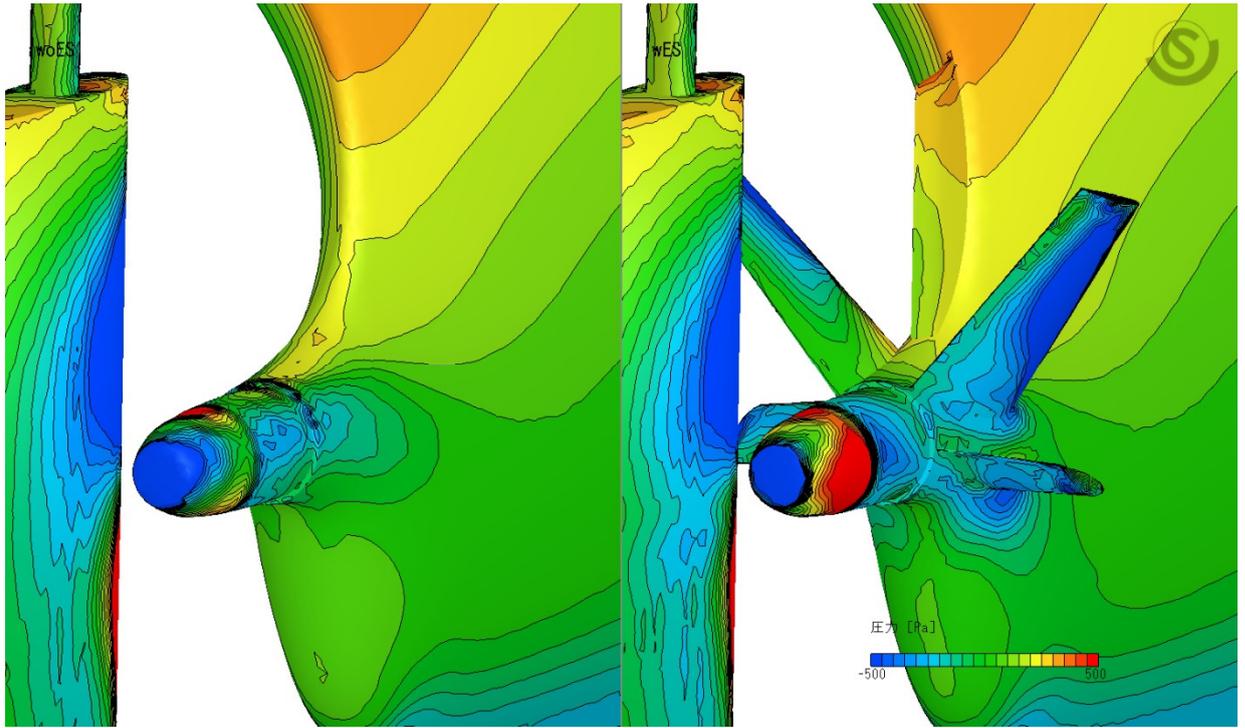


図 18 表面圧力（右舷上方より見る）

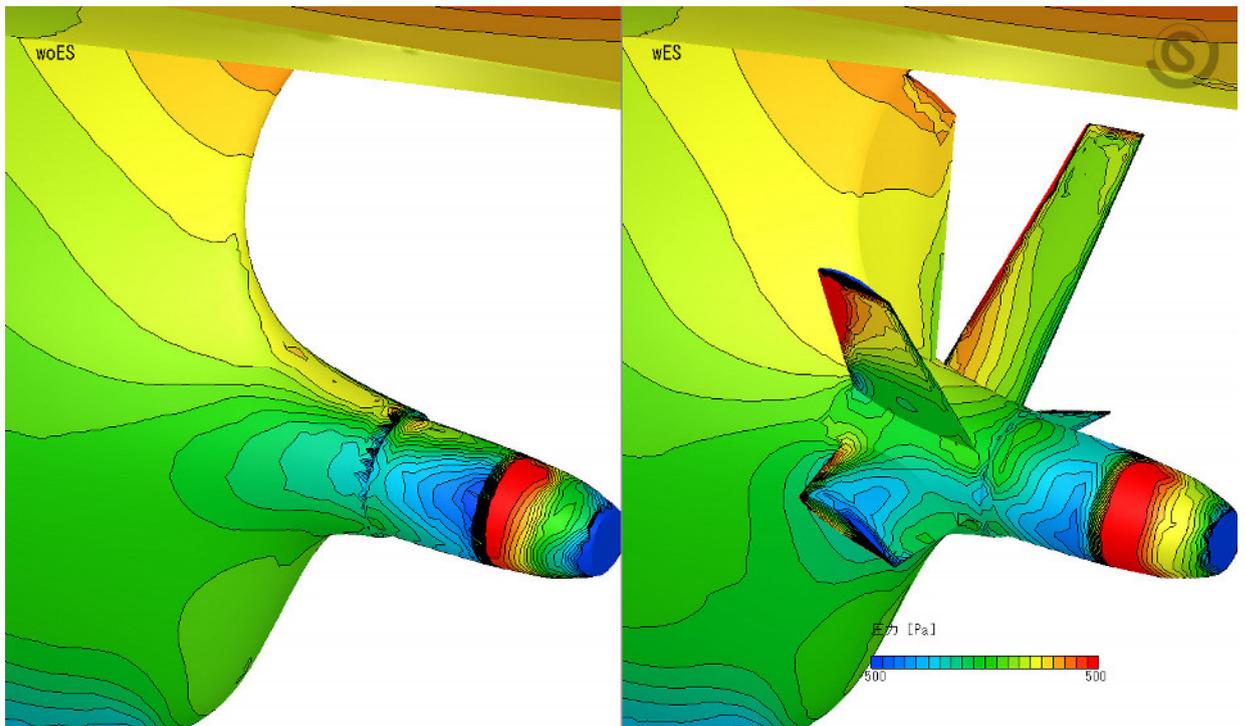


図 19 表面圧力（左舷上方より見る）

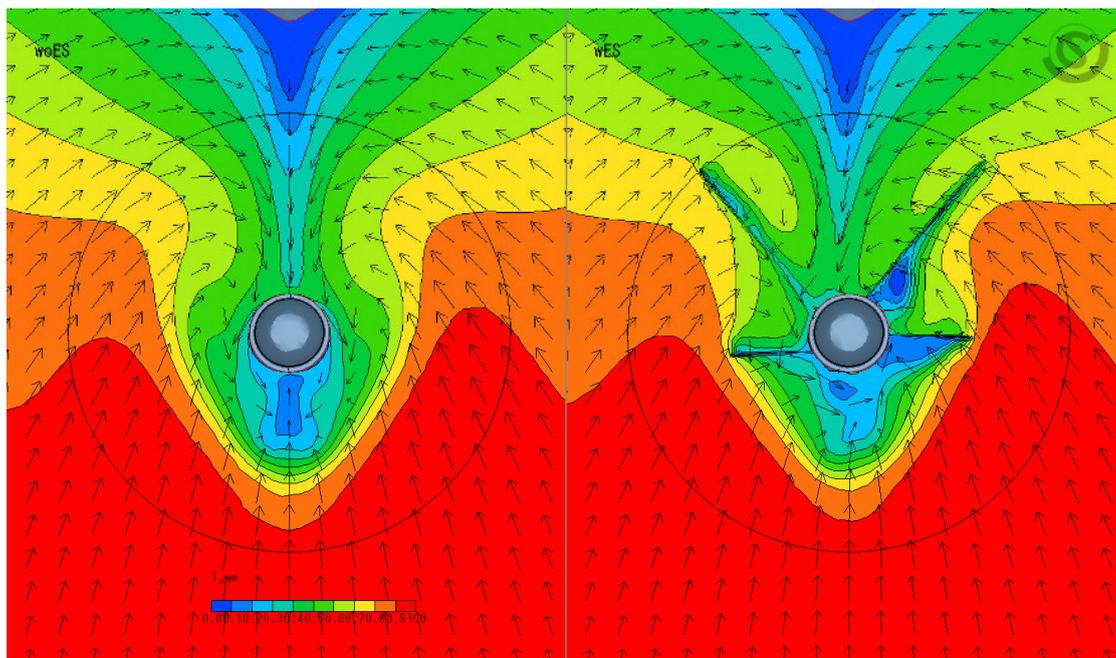


図 20 伴流分布 ($F_n=0.2042$ 、 $V_s=13.8$ knots 相当)
断面位置 X は AP より約 3.3m (ES の後端位置)

自航計算でプロペラへ流入する流れの流速、スラスト、トルク、回転数が求まる。スラスト一致法により自航要素を算出した。自航計算は 13.8knots 相当 ($F_n=0.2042$) で行った。図 21 に示すように ES 有無それぞれの CFD 結果と水槽試験結果 (EXP) から両者の相関が求められる。相関係数を本船の ES 有無の CFD 計算結果に適用して水槽試験相当 (EFD) の 1-t, 1-wm を求め ES 有の自航要素に与える影響を求めた。影響量を表 9 に示す。ES 有の η_R はデータベースから推定を行った。

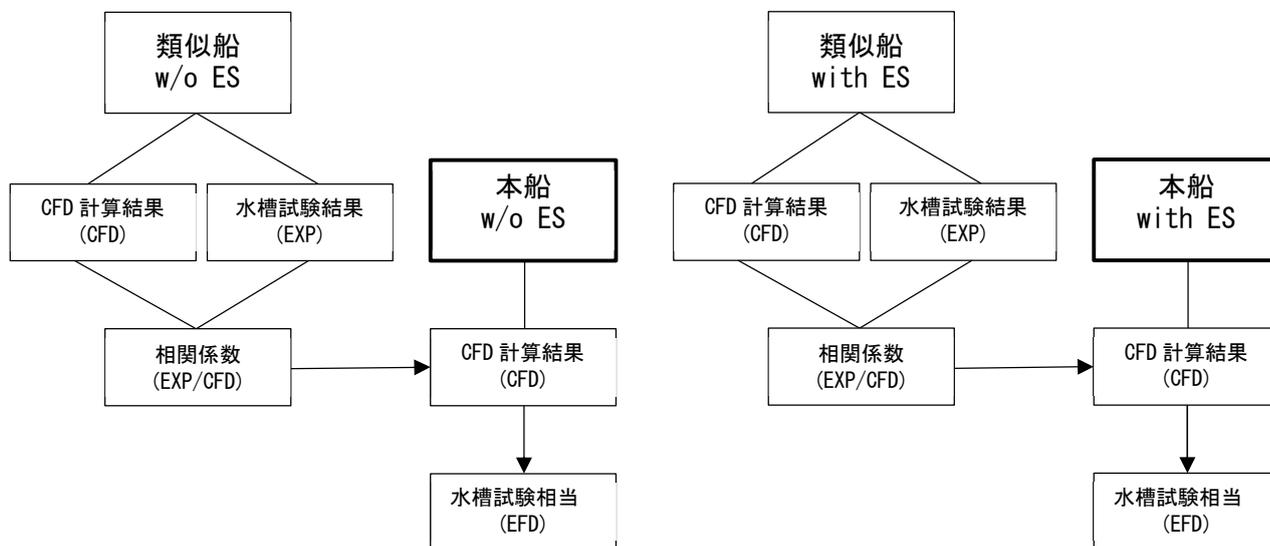


図 21 相関係数について

表9 ESが自航要素に与える影響

	$\Delta 1-t$	$\Delta 1-wm$	$\Delta \eta R$
有-無	-0.019	-0.068	+0.012

3-7. 水槽試験

三井造船昭島研究所の曳航水槽にて抵抗試験、自航試験、波形観察、規則波中試験を行った。使用した本船の模型船は縮率 1/19.5652 の相似模型である。模型船の主要目等を下記に示す。

模型船

- ・材質 : 内部木材補強したパラフィン製
 - ・縮率 : 1/19.5652
 - ・模型船番号 : MSNo. 3054
 - ・主要目
- Length (between perpendiculars) : 6.1129 m
 Breadth (mld) : 1.0631 m
 Depth (mld) : 0.5878 m
 Designed load draft (mld) : 0.4334 m
- ・付加物 : 舵、ビルジキール、Eco-Stator
 - ・乱流促進 : Studs at S.S. 9.5 and bulbous bow.

模型プロペラ

- ・模型プロペラ番号 : P557R
- ・直径 (m) : 0.230
- ・翼数 : 4

また、本船の試験状態および試験内容は次のとおりである。

1. Summer draft (2022/06/29)
 - ・抵抗試験、自航試験、波形観察
2. Sea Trial (2022/06/30)
 - ・抵抗試験、自航試験、荷重度変更試験、波形観察
3. Summer draft (2022/07/07, 08)
 - ・規則波中試験

図 22 および図 23 に水槽試験の写真を示す。



基幹船型の模型船（船側）



基幹船型の模型船（船尾）



基幹船型の模型船（船首）



日本財団シールと模型船番号

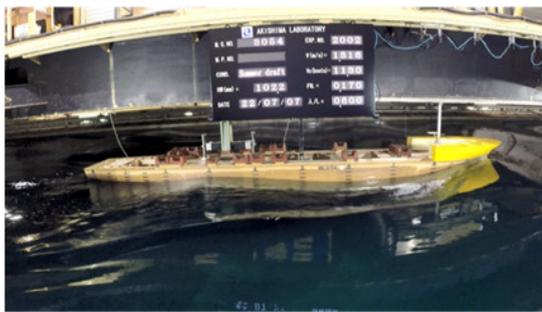
図 22 基幹船型の模型船写真



Summer draft 状態 抵抗自航試験



SeaTrial 状態 抵抗自航試験



Summer draft 状態 規則波中試験



Summer draft 状態 規則波中試験

図 23 基幹船型の水槽試験写真

水槽試験で得られた抵抗・自航要素を図 24 および図 25 に示す。図中の赤線が実験値を示し、黒線が CFD 計算値を示す。CFD 計算値は実験値の傾向を良く捉えている。船型群の抵抗・自航要素のチャートを作成するための良いデータが得られた。Eco-Stator の自航要素に与える影響も水槽試験で確認でき、CFD を用いて推定した影響量とほぼ同じ影響量であった。規則波中試験において船体抵抗を計測し、平水中の抵抗係数を基準とした抵抗増加係数を求めた。事前に計算した結果との比較を図 26 に示す。実験値と計算値は、ほぼ一致しており計算値が実用的に問題ないことを確認した。

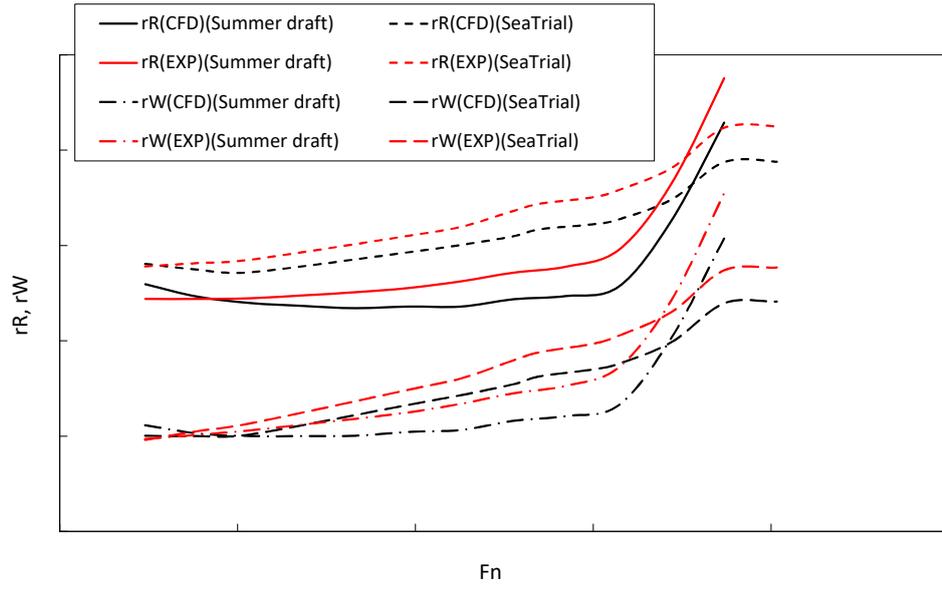


図 24 抵抗要素 (CFD と EXP 比較)

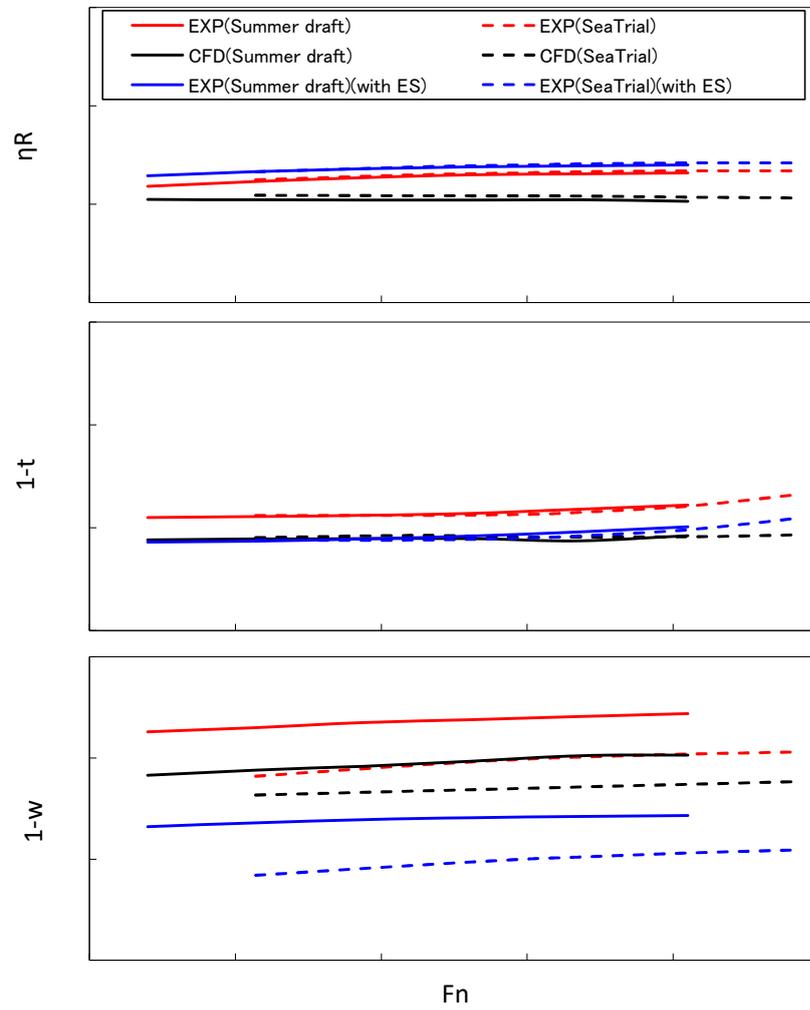


図 25 自航要素 (EXP と CFD の比較)

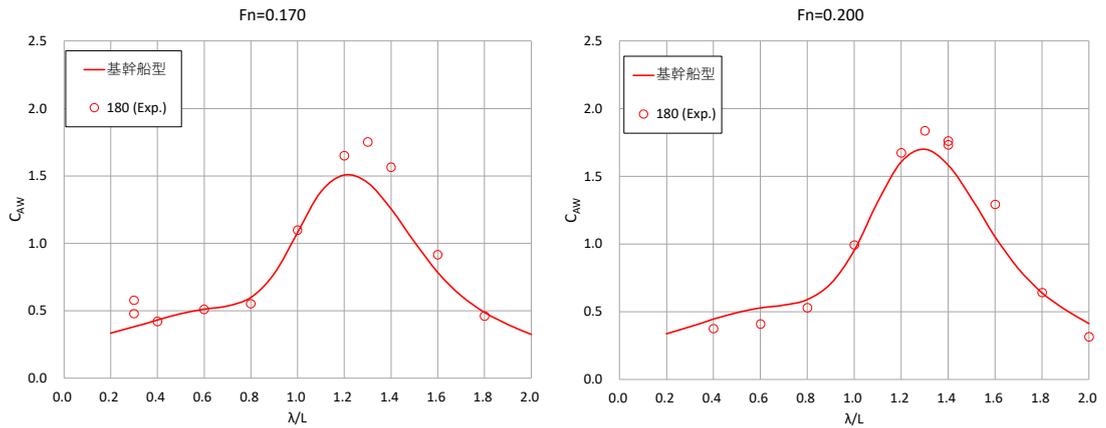


図 26 波浪中抵抗増加係数 (EXP と計算値の比較)

3-8. 実船の推進性能推定

実船の推進性能の推定結果を以下に示す。有効馬力の計算には 3 次元解析を用いた。本船に装着されているプロペラ要目から MAU チャートに基づいて設計したプロペラの効率を用いた。本推定結果は船体およびプロペラがクリーンな状態の推定結果である。Summer draft 状態と SeaTrial 状態の船速と馬力の関係を図 27 に示す。

また、本船の EEDI 値を計算すると目標とするフェーズⅢをクリアすることができた。

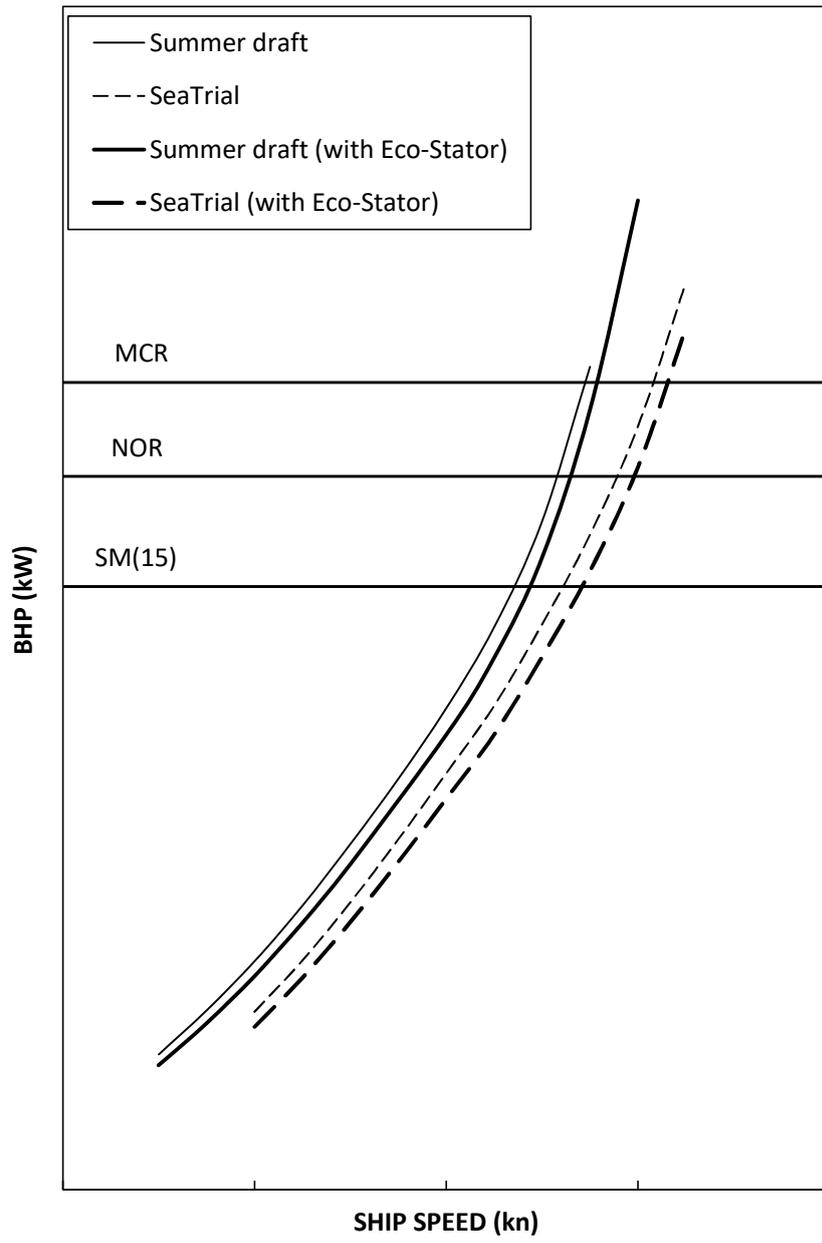


図 27 船速と馬力の関係

4. 派生船型の開発

4-1. 派生船型の主要目

派生船型は設定した主要目の範囲の中で基幹船型からトランスフォーメーションをした船型である。派生船型は全部で8隻設計する予定であり、初年度は4隻を設計する。初年度に開発する派生船型は、5,000DWT ケミカルタンカーを2隻、8,800DWT ケミカルタンカーを2隻とした。1隻目の5,000DWT ケミカルタンカーの主要目は従来船型と同じとし、2隻目の5,000DWT ケミカルタンカーは計画した主要目の範囲の中で推進性能が悪化しやすい主要目を選択した。また、3隻目、4隻目の8,800DWT ケミカルタンカーの主要目は従来船型と同じとし需要が高い主要目を選択した。表11に派生船型の主要目を示す。

表11 派生船型の主要目

	派生船型1	派生船型2	派生船型3	派生船型4
DWT	5,000	5,000	8,800	8,800
Lpp (m)	98.000	92.400	108.500	107.100
B (m)	16.000	16.500	18.200	19.000
D (m)	8.100	8.100	9.650	9.650
d (m)	6.040	5.800	7.730	7.668

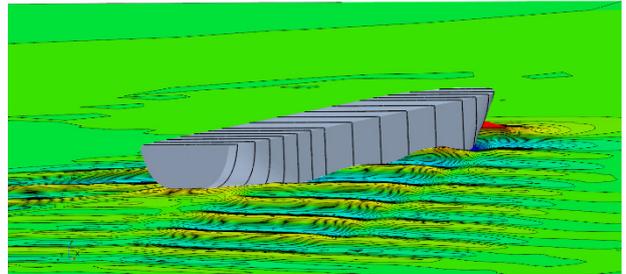
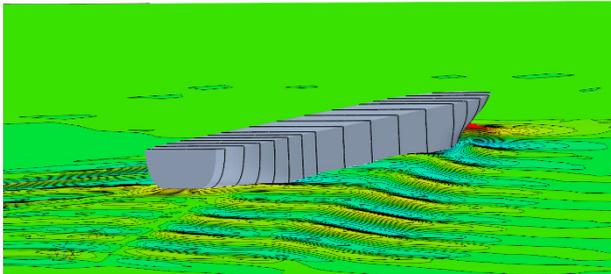
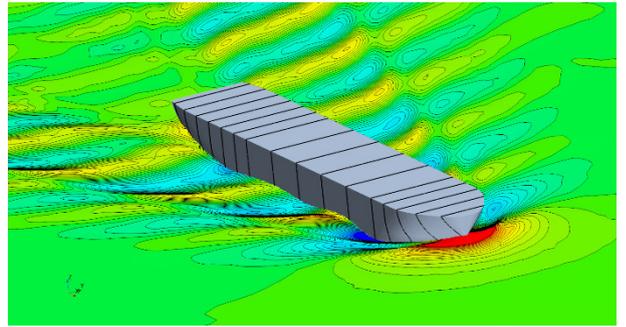
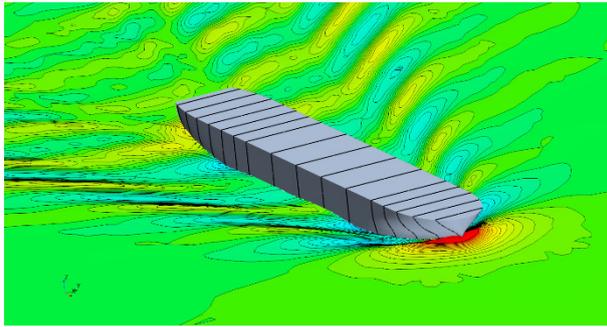
派生船型は基幹船型と主機、プロペラ直径が異なるため、船尾形状を個々に調整する必要がある。まず、流体テクノ社の初期船型計画ソフトウェア「Initial Lines Gene」を用いて基幹船型を任意の主要目にてトランスフォーメーションを行った。次にNAPAで船尾形状の調整とフェアリングを行った。船首形状はトランスフォーメーションで作成された形状を用いてフェアリングを行った。

4-2. CFDを用いた平水中の推進性能評価

派生船型も基幹船型同様、CFD計算を行った。CFD計算設定は基幹船型と同じであるため、記載を省略する。派生船型のSummer draft状態、船速 $F_n=0.21$ のCFD計算結果を図28と図29に示す。

図28では5,000DWT ケミカルタンカーである派生船型1と2の波紋の鳥観図を示している。この2船型は船型群の範囲の中で対照的な船型となる。L/B、B/d、Cbのような主要目比で比較すると、派生船型1は船型群の範囲の中で推進性能が良いところ、つまりL/Bが大きく、B/dが小さく、Cbが小さいところに位置しており、派生船型2は悪いところに位置している。そのため、船首肩波が特に大きく、プロペラへ流入する流れに高伴流域が見られるなど悪化点が顕著となった。派生船型2の結果から、船型群の主要目比の選定範囲が絞れるようになった。

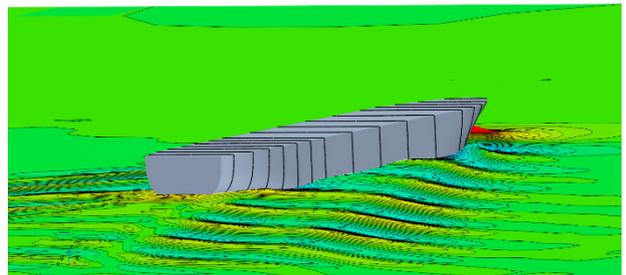
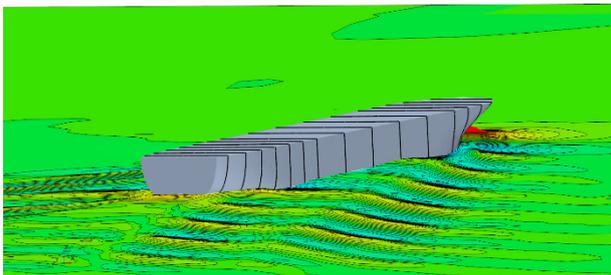
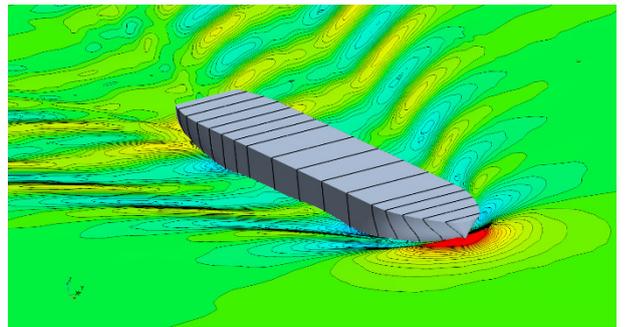
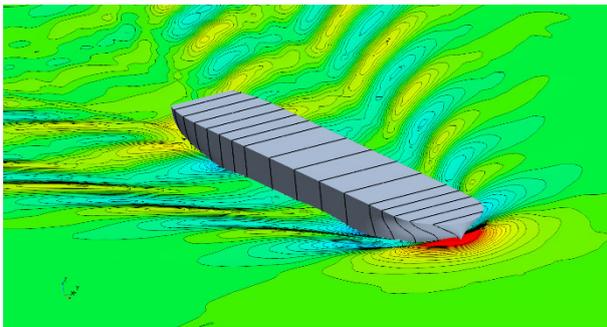
図29では8,800DWT ケミカルタンカーである派生船型3と4の波紋の鳥観図を示している。両者の波紋に大きな違いは見られない。また、プロペラへ流入する流れにも大きな違いが見られず、主要目比の差が小さければ波紋や流れの違いが小さいと考えられる。



派生船型 1

派生船型 2

図 28 派生船型 1、2 の波紋の鳥観図



派生船型 3

派生船型 4

図 29 派生船型 3、4 の波紋の鳥観図

派生船型の水槽試験相当の抵抗・自航要素を CFD 計算から求めた。派生船型 1 と 2 の
 剰余抵抗係数 rR と造波抵抗係数 rW を図 30 に示す。また、派生船型 3 と派生船型 4 の
 rR と rW を図 31 に示す。自航要素を図 32 に示す。求められた抵抗要素と自航要素を用
 いて、派生船型の推進性能を推定した。図 33 に派生船型 1 と 2 の船速と馬力の関係
 を示す。図 34 に派生船型 3 と 4 の船速と馬力の関係を示す。いずれの派生船型も EEDI
 フェーズⅢをクリアしている。

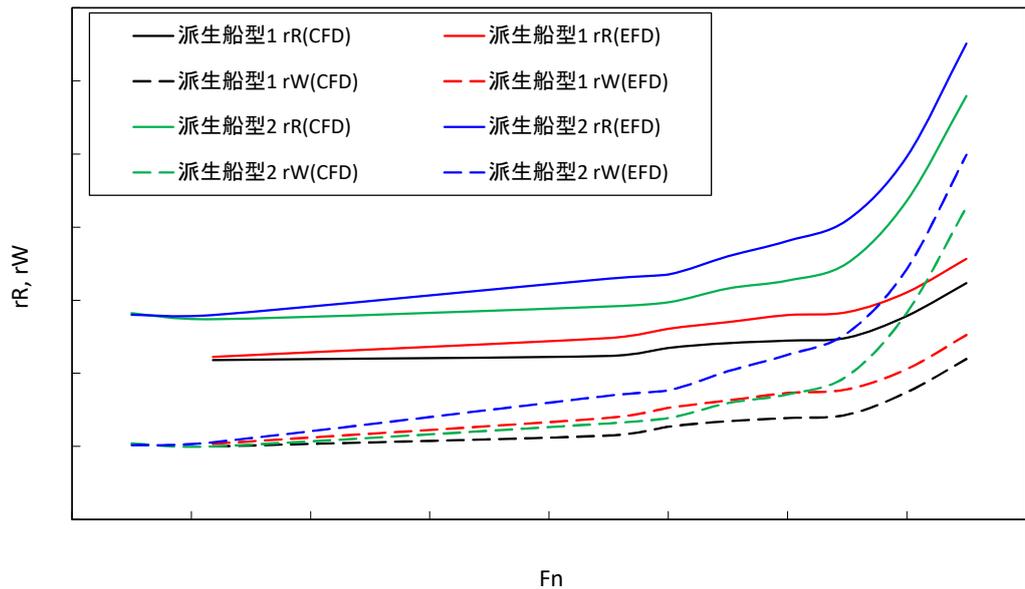


図 30 派生船型 1 と 2 の抵抗要素

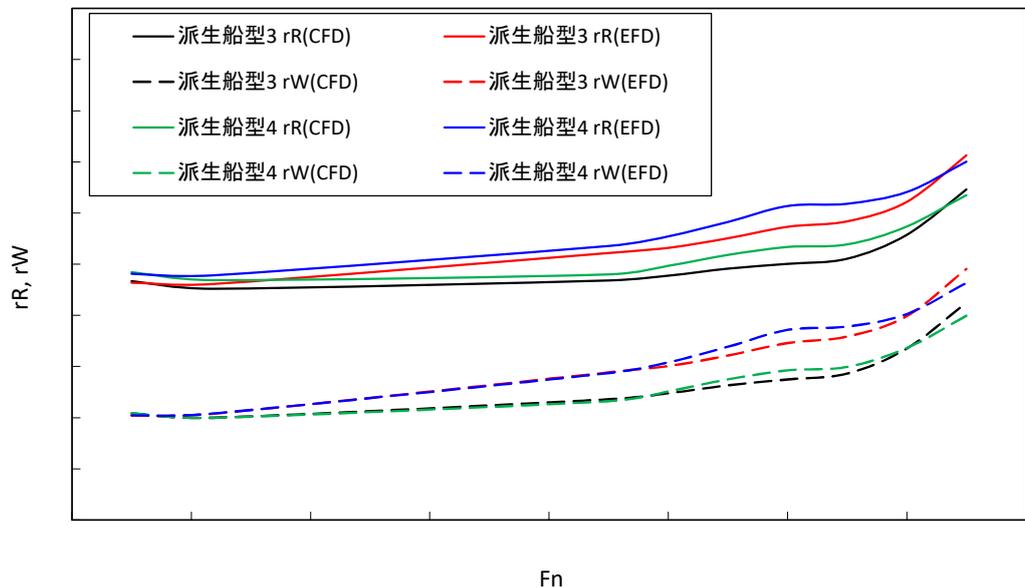


図 31 派生船型 3 と 4 の抵抗要素

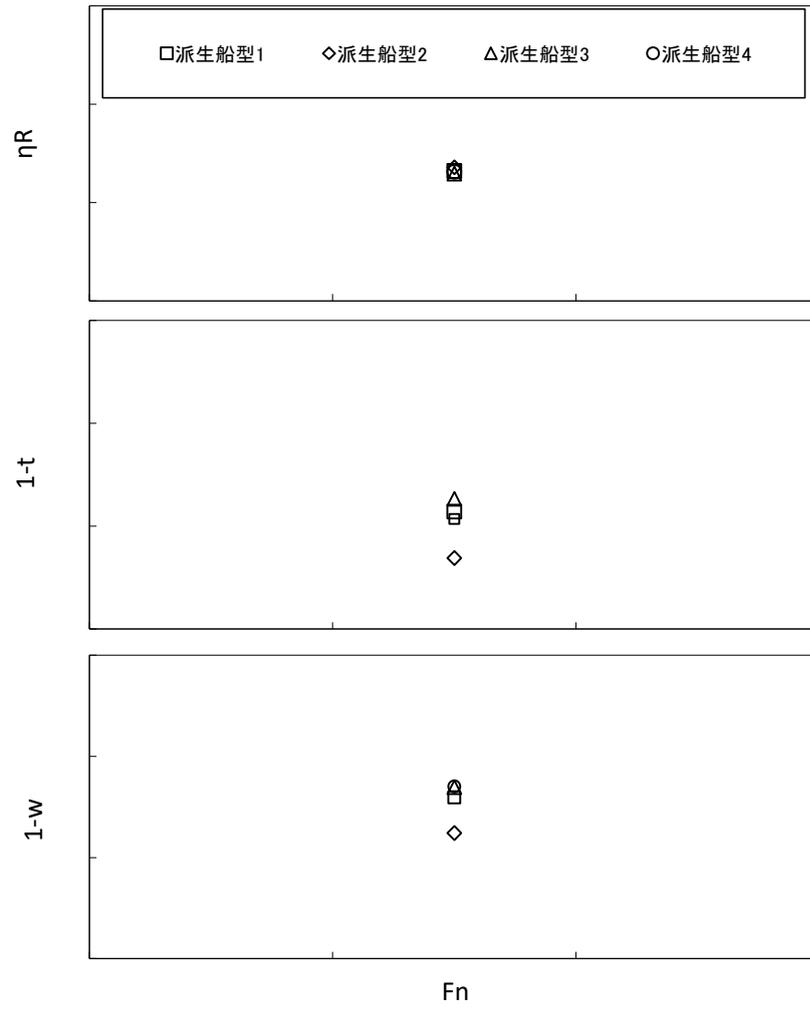


図 32 派生船型の自航要素

REQUIRED POWER

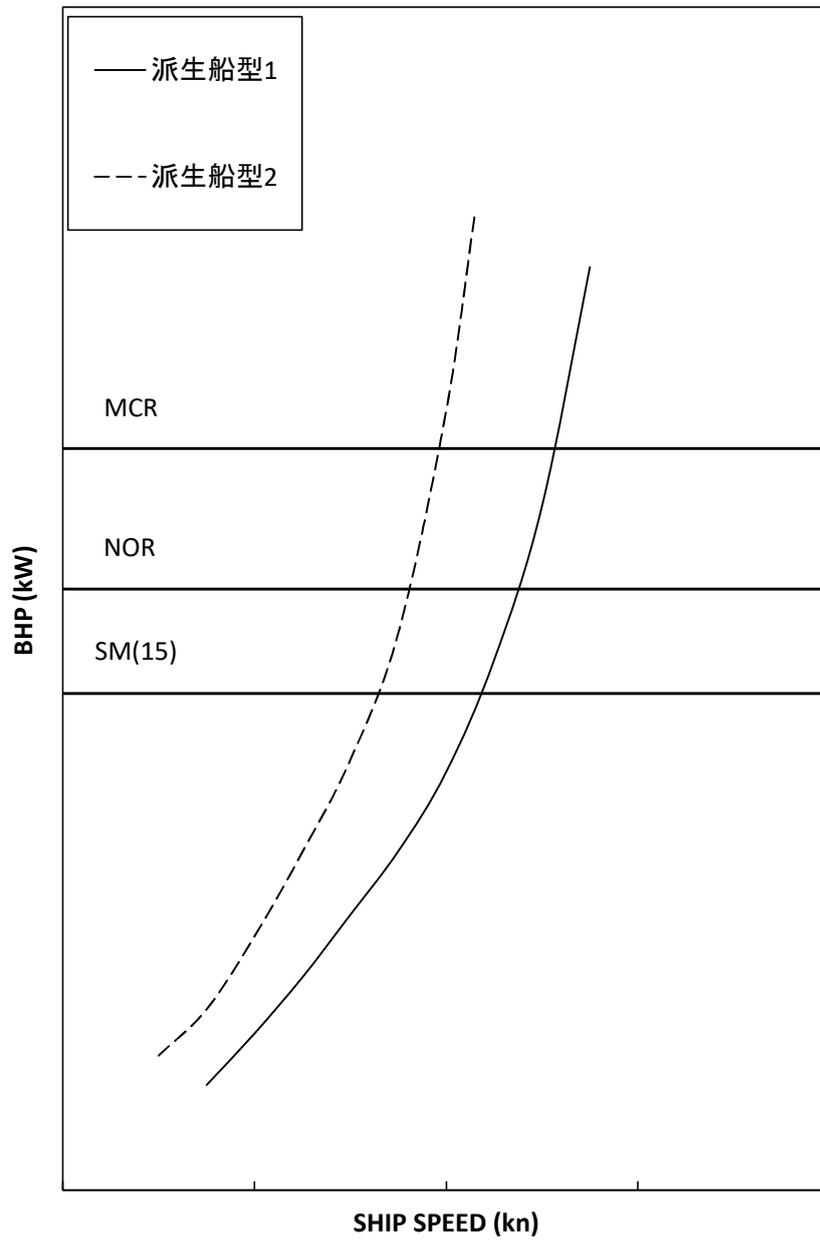


図 33 派生船型 1 と 2 の船速と馬力の関係

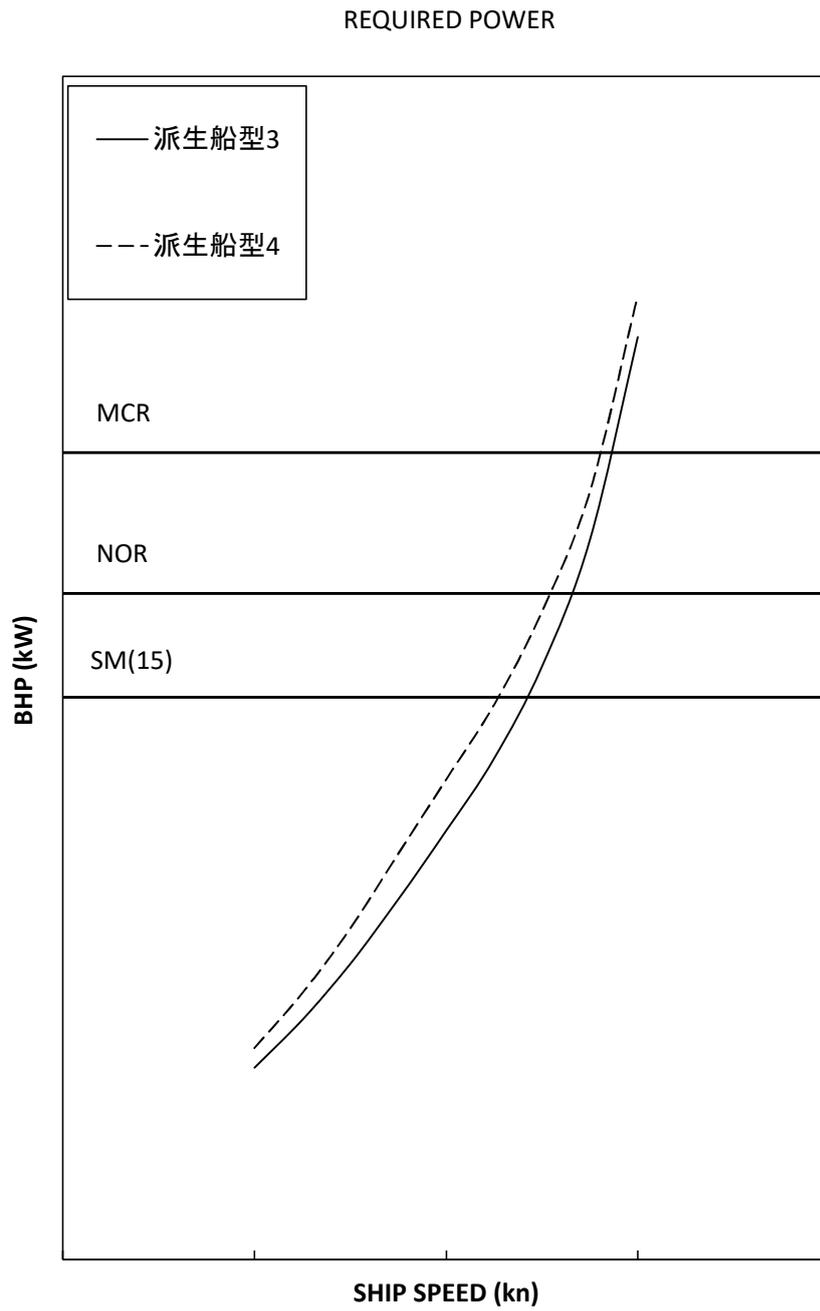


図 34 派生船型 3 と 4 の船速と馬力の関係

4-3. 波浪中抵抗増加

足達宏之氏の波浪中抵抗増加の計算により、派生船型の波浪中抵抗増加係数 C_{AW} を求めた。計算条件を表 12 に示し、派生船型の計算結果を図 35 から図 38 に示す。

表 12 波浪中抵抗増加計算の条件

船速	F_n	0.20
波向	χ (deg.)	180
波長船長比	λ/L	0.2~2.0 0.1 毎

図 35 と図 36 に 5,000DWT ケミカルタンカーである派生船型 1 と 2 の計算結果を示す。両船型とも抵抗増加係数のピークが基幹船型よりも大きくなった。さらに、派生船型 1 では、抵抗増加係数ピーク時の波長船長比が小さくなっている。これは、船型変更によって船体運動に変化があったと推察される。

図 37 と図 38 に 8,800DWT ケミカルタンカーである派生船型 3 と 4 の計算結果を示す。抵抗増加係数のピークは、派生船型 3 は基幹船型と同等であり、派生船型 4 は基幹船型よりも低い。抵抗増加係数ピーク時の波長船長比は基幹船型と大きく変わっていない。

いずれにしても基幹船型と比較した比較船型よりも波浪中抵抗増加係数は低くなっており、船型群の実海域における推進性能は従来船型よりも良いことがわかる。

5. 初年度のまとめ

本プロジェクトの進捗は、下記のとおりである。

- ・マーケット調査 次年度も継続
- ・船型群の開発範囲の検討 終了
- ・基幹船型の基本設計 終了
- ・基幹船型の船型開発 終了
- ・派生船型（4 隻）の基本設計 終了
- ・派生船型（4 隻）の船型開発 終了
- ・テクノスター社 CFD サーバー導入 トレーニング中。

初年度に予定していた開発を終了することができた。

日本財団様のおかげで、当社建造船の推進性能を向上することができ、環境負荷を低減し、かつ、営業力を強化できる船型群を開発することができた。ご支援いただいた日本財団様には深く感謝申し上げます。この開発はまだ途上であり、引き続き開発を進めていきたい。今後ともご支援お願い申し上げます。

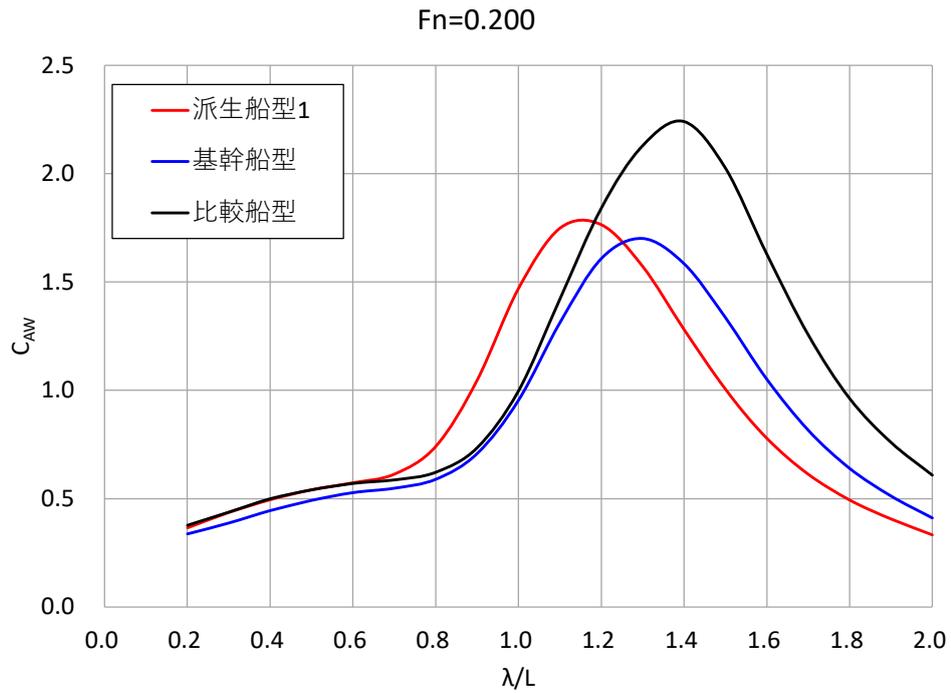


図 35 派生船型 1 の波長船長比と波浪中抵抗増加の関係 (180 度向い波)

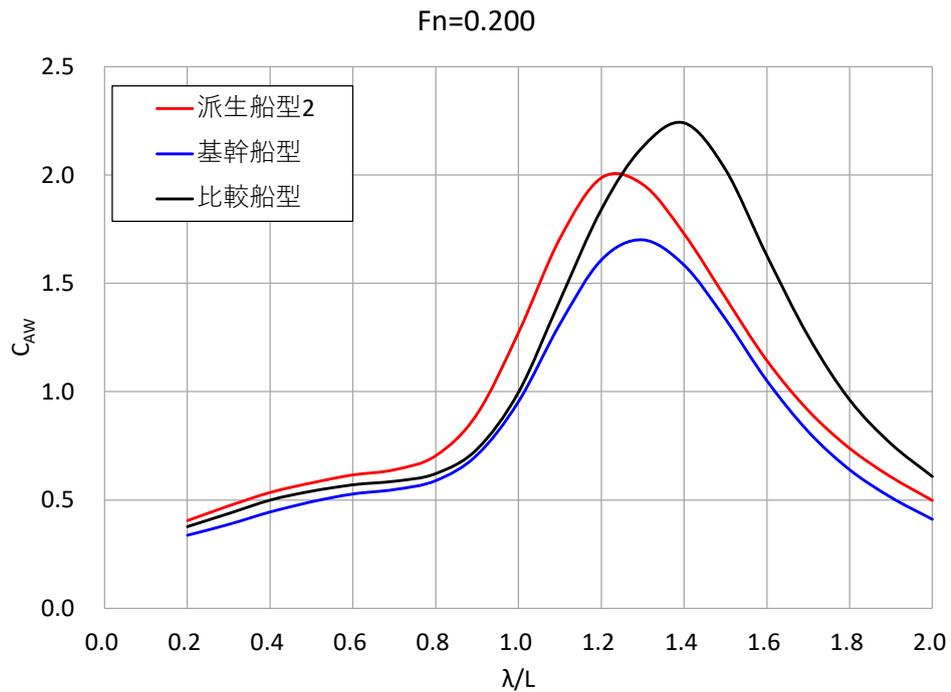


図 36 派生船型 2 の波長船長比と波浪中抵抗増加の関係 (180 度向い波)

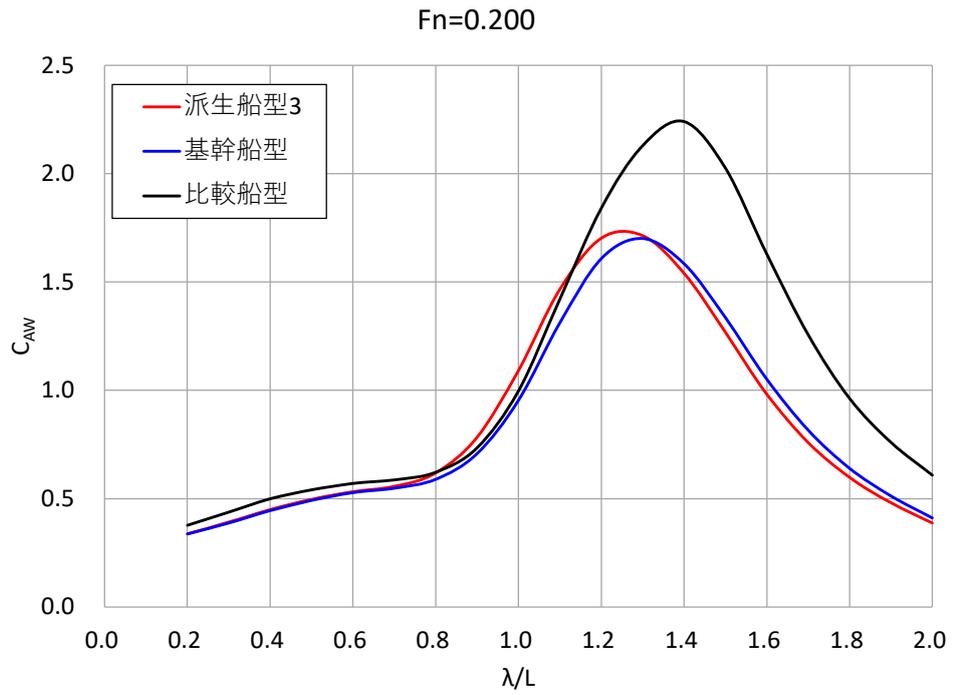


図 37 派生船型 3 の波長船長比と波浪中抵抗増加の関係 (180 度向い波)

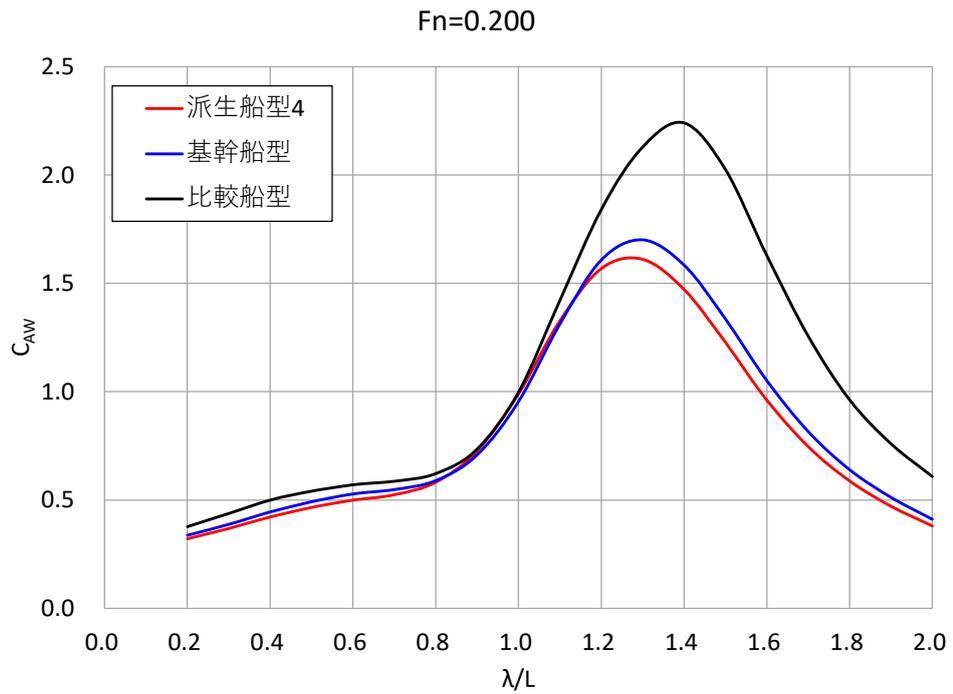


図 38 派生船型 4 の波長船長比と波浪中抵抗増加の関係 (180 度向い波)