

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)」
次年度の報告

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

T E L : 0897 - 72 - 0070 , F A X : 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 . 本事業の成果	7
4 . 派生船型の開発	8
4 - 1 . 派生船型の概要	8
4 - 2 . CFD 計算	10
4 - 3 . CFD 計算結果の評価方法	14
4 - 4 . CFD を用いた平水中の推進性能評価	15
4 - 5 . 波浪中抵抗増加	26
4 - 6 . CFD を用いた Eco-Stator の設計	28
4 - 7 . 派生船型 1 の水槽試験	33
4 - 8 . 派生船型 5 の水槽試験	38
4 - 9 . 実船の推進性能推定	43
5 . 環境負荷低減先進船群の性能推定プログラムの開発	44
6 . CFD 計算サーバーとソフトウェアの導入	45

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 次年度の報告

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に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行え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 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 等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

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。

事業体制

本事業の実施体制を図1に示す。

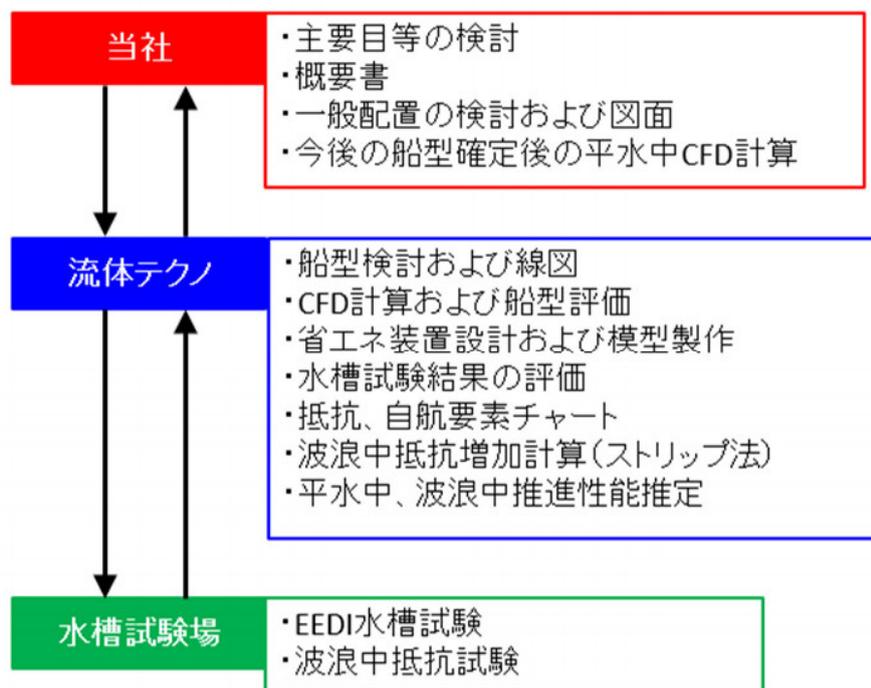


図1 事業の実施体制

技術開発の具体的内容

(1) 船型群の開発範囲

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。初年度では5,000DWTから15,000DWTであったが、市場のニーズからDeadweightの上限を16,000DWTに変更した。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 ~ 16000
満載排水量(トン)		7000 ~ 20000
船の寸法		L(長さ)= 95 ~ 130 (m) B(幅) = 16 ~ 22 (m) d(喫水)= 5.5 ~ 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

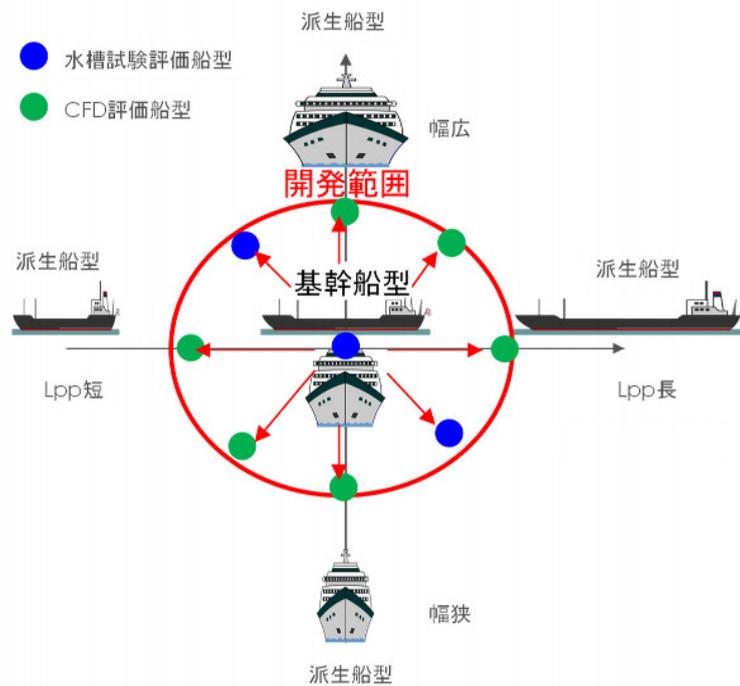


図2 船型群の開発イメージ

(2) 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）

(3) 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

(4) 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

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. 本事業の成果

2年間を通して本プロジェクトに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。成果として、下記のことを達成することが出来ました。

ケミカルタンカーのマーケットを調査した結果、今後のケミカルの需要が増加傾向にあることが予測されるため、運搬するケミカルタンカーの受注を増加させるには、従来船型から更なる省エネ化が必要であることがわかった。そのため、本プロジェクトのような省エネ船型群を開発し、建造船の性能の底上げ、さらに基本設計の時間短縮化を図った。船型群の範囲はDWTを5,000tから16,000tと設定した。当初の計画では15,000tを上限としていたが、2年目の調査において16,000tもニーズがあることがわかり、16,000tへ変更した。

まず、船型群の基幹となる船型、基幹船型を開発し、従来船型よりも満載状態で平水中のサービススピードにおいて約18%のBHP削減となることを確認した。さらに波浪中抵抗増加係数も従来船型より同船速において低減したことを確認した。概要書、一般配置も検討しているため、今後の引合いのときに設計時間の短縮となる。

次に、基幹船型から主要目比、DWTを変化させた派生船型を8隻開発した。派生の手法は、基幹船型を主要目に合わせトランスフォーメーションをさせるため、従来の手法よりも容易となる。基幹船型と同様に概要書、一般配置を検討した。今回開発した派生船型は市場のニーズに合わせた船型、推進性能推定用プログラムを作成するために必要な主要目比に設定した船型とした。派生船型も基幹船型と同様に平水中推進性能、波浪中抵抗増加係数を求めた。開発船型群が環境負荷低減先進船かどうか評価するため、指標をEEDIとしフェーズを満足することを目標とした。EEDI値を計算した結果、派生船型8以外の船型ではフェーズをクリアした。今後、派生船型8のような主要目比、主機馬力、船速を選択しないようにすればよいことが分かった。

次に、推進性能推定用プログラムの根幹となる抵抗要素と自航要素を3隻の水槽試験結果と5隻のCFD計算結果からチャートを作成した。任意の派生船型の推進性能を推定できることを確認した。これまで初期検討においてメーカーに推進性能推定を依頼し回答があるまで1週間から2週間程度日数を要したが、プログラムによって自社内で直ぐできるようになるため、大幅な時間短縮となる。

さらに、開発した船型の流れに問題がないか、造波に問題がないかを確認するため、テクノスター社のCFDを導入した。このCFDは船体オフセットから計算モデルを作成し容易に計算でき、ソルバーがOpenFOAMであることからランニングコストが他社よりも安い。現在、トレーニングを終了したところである。

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ました。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。開発の詳細は以下に記載致します。

4. 派生船型の開発

4 - 1 . 派生船型の概要

開発する船型群の基幹となる船型を基幹船型と称し、初年度に開発した。基幹船型から推進性能推定用のチャート作成のために、また、市場のニーズに合わせ 8 隻の派生船型を開発した。派生船型は基幹船型と同じ 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。EEDI Condition におけるサービススピードの目標は各船型により異なるが、船速を船の長さで無次元化したフルード数 F_n で表すと 0.19 から 0.21 の範囲となる。派生船型の諸元を表 3 に示す。

表 3 派生船型の諸元

船名	派生 1	派生 2	派生 3	派生 4	派生 5	派生 6	派生 7	派生 8
DWT (t)	5,000	5,000	8,800	8,800	13,000	16,000	16,000	5,400
Lpp (m)	98.00	92.40	108.50	107.10	112.60	130.60	127.00	94.40
B (m)	16.00	16.50	18.20	19.00	20.80	22.00	22.00	17.60
D (m)	8.60	8.60	9.65	10.00	11.55	12.00	12.00	8.10
d (m)	6.400	5.800	7.730	7.668	9.000	9.300	9.100	6.200
L/B	6.13	5.60	5.96	5.64	5.41	5.94	5.77	5.45
B/d	2.50	2.84	2.35	2.48	2.31	2.37	2.42	2.84

派生船型のトランスフォーメーションには、流体テクノ社製の初期船型設計ソフトウェア「Initial Lines Gene」を用いたデリベーション機能を用いた。本機能は 1-Cp 法を用いて、主要目に合わせ船型を変形する機能である。デリベーションの例を図 3 から図 6 に示す。

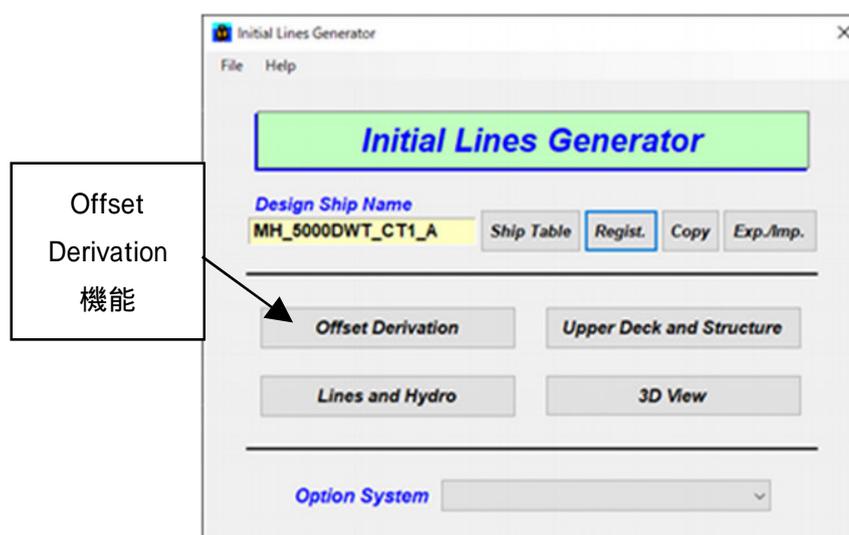


図 3 Initial Lines Generator のメイン画面

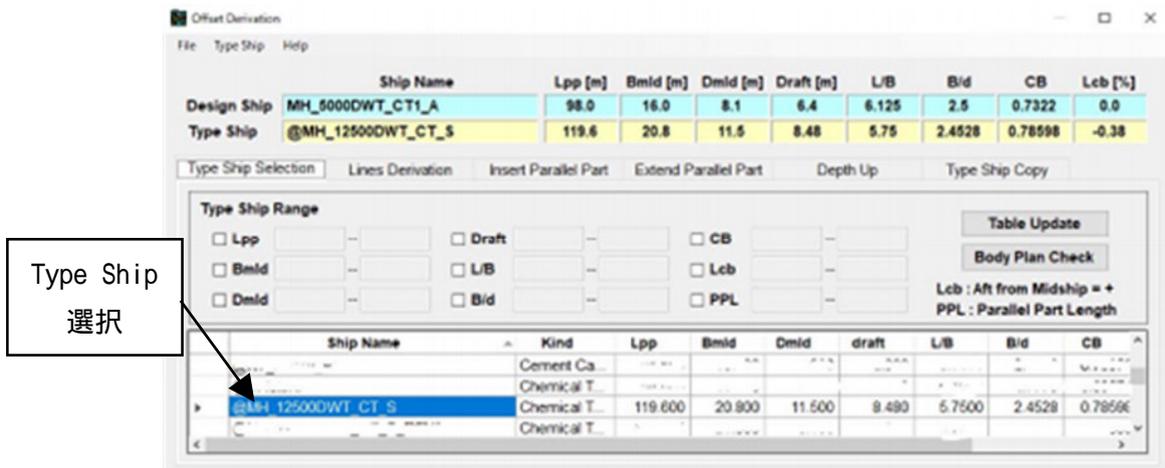


図4 Offset DerivationのType Ship Selection画面

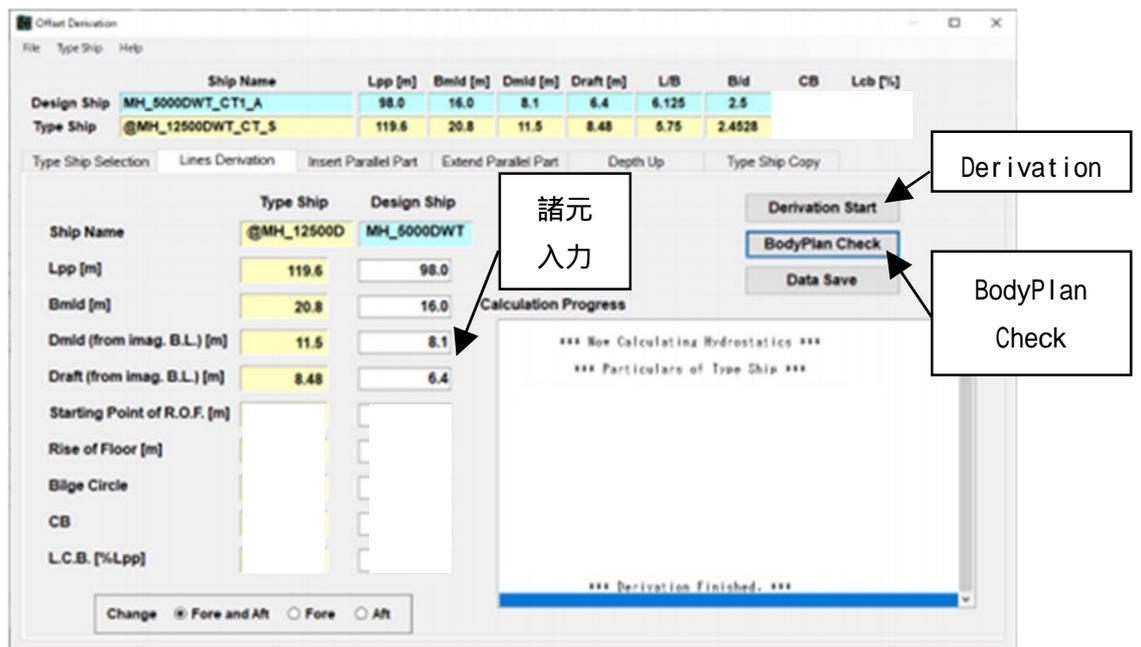


図5 Lines Derivation画面

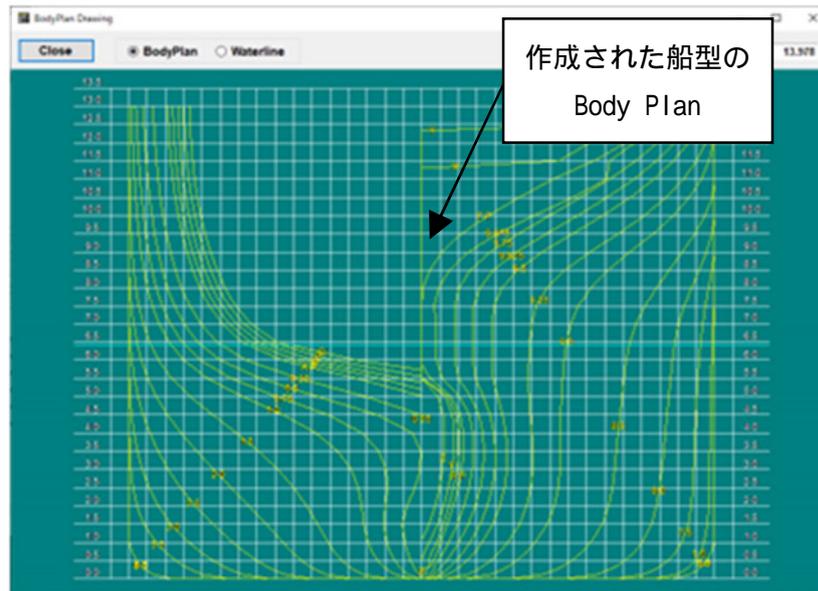


図 6 BodyPlan Check 画面

デリバーションによって作成された船型は主機、プロペラ、目標船速、機器配置等が基幹船型と異なるため、諸条件に合わせ、船首尾船型を随時変更して作成した。

4 - 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・自航要素を求め平水中推進性能を評価する。また、派生船型 1 と派生船型 5 について大型模型船を用いた水槽試験において、抵抗・自航試験を行い、CFD と水槽試験との相関係数を求めた。派生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。計算に用いたサーフェスモデルは船型開発段階においては、模型船の L_{pp} を基幹船型で使用した模型船の $L_{pp}=6.1129\text{m}$ に合わせた。また、抵抗・自航要素のチャート作成段階においては、模型プロペラ直径 0.230m に実機搭載予定のプロペラ直径を合わせた。サーフェスモデルは船体、舵、ビルジキールである。船体はヒーピ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 560 万格子、自航計算用として両舷約 1,190 万格子とした。EEDI Condition 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を受ける抵抗、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。CFD 計算設定を表 4 に示す。CFD に用いたプロペラの単独性能を表 5 および図 7 に示す。計算に用いた格子の一部を図 8 から図 10 に示す。

表 4 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-
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560万格子
	自航 約1190万格子
レイノルズ数	$7.5 \times 10^6 \sim 1.11 \times 10^7$
フルード数	0.1700 ~ 0.2500
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 ~ 3.2Lpp	-2.3Lpp ~ 3.2Lpp
Y	0 ~ 2.3Lpp	-2.3Lpp ~ 2.3Lpp
Z	-1.6Lpp ~ 1.0Lpp	-1.6Lpp ~ 1.0Lpp
基点 : (X,Y,Z) = (AP,0,dm), Y : 左舷が正		

試験状態	喫水状態	計算点数	計算船速		
抵抗計算	EEDI	9 10	Fn	0.1700	~ 0.2500
自航計算		3 4	Fn	0.1700	~ 0.2300

表6 プロペラ単独性能

Propeller Open Water Characteristics			
J	KT	KQ	ETAO
0.2000	0.2573	0.02852	0.2872
0.2500	0.2400	0.02708	0.3526
0.3000	0.2221	0.02556	0.4149
0.3500	0.2037	0.02398	0.4732
0.4000	0.1848	0.02232	0.5271
0.4500	0.1656	0.02059	0.5760
0.5000	0.1459	0.01877	0.6186
0.5500	0.1256	0.01686	0.6521
0.6000	0.1048	0.01483	0.6748
0.6500	0.0832	0.01266	0.6799
0.7000	0.0607	0.01035	0.6534

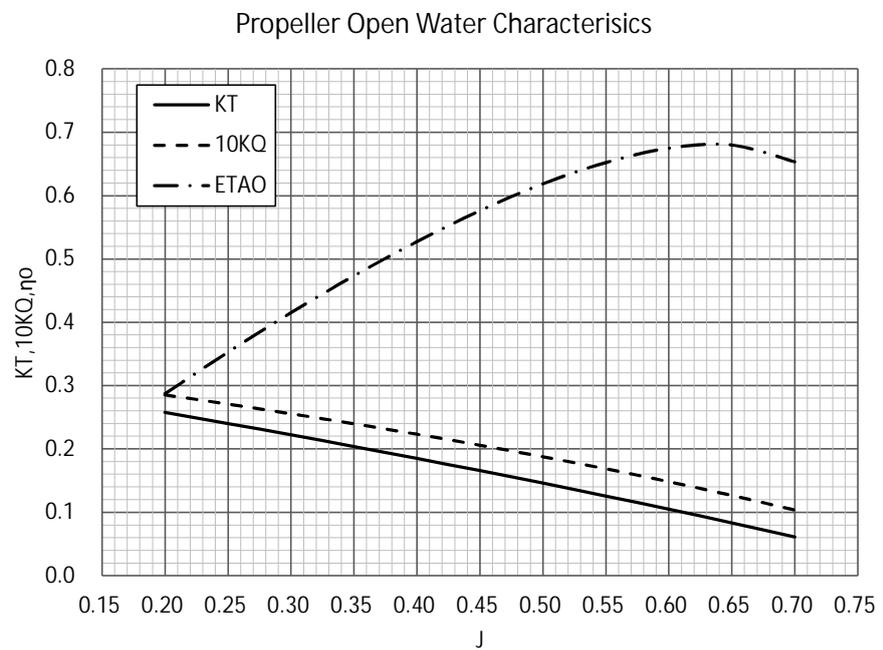


図7 プロペラ単独性能

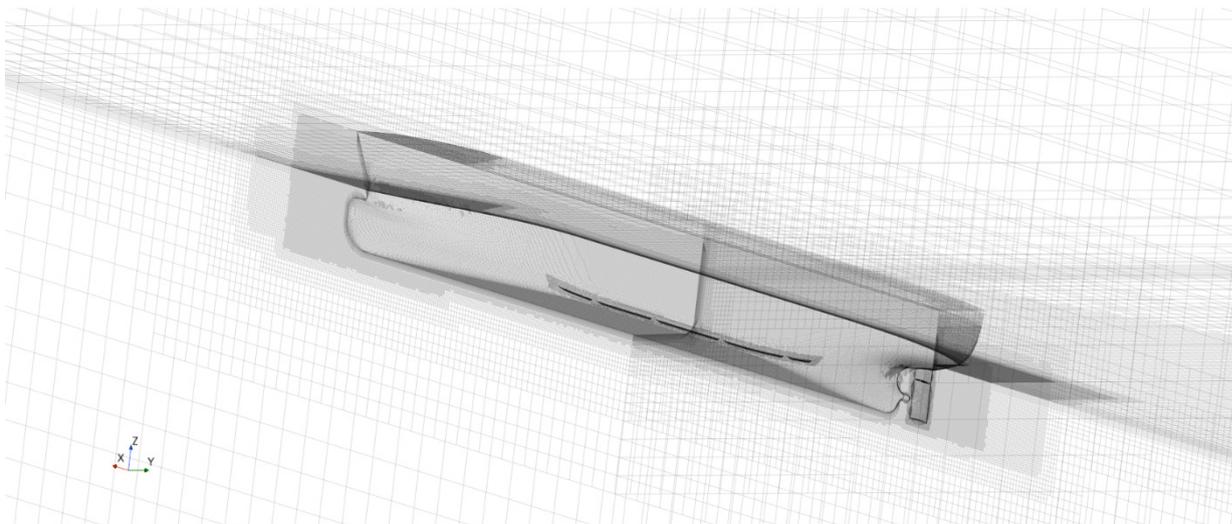


図8 計算格子 (EEDI Cond.)

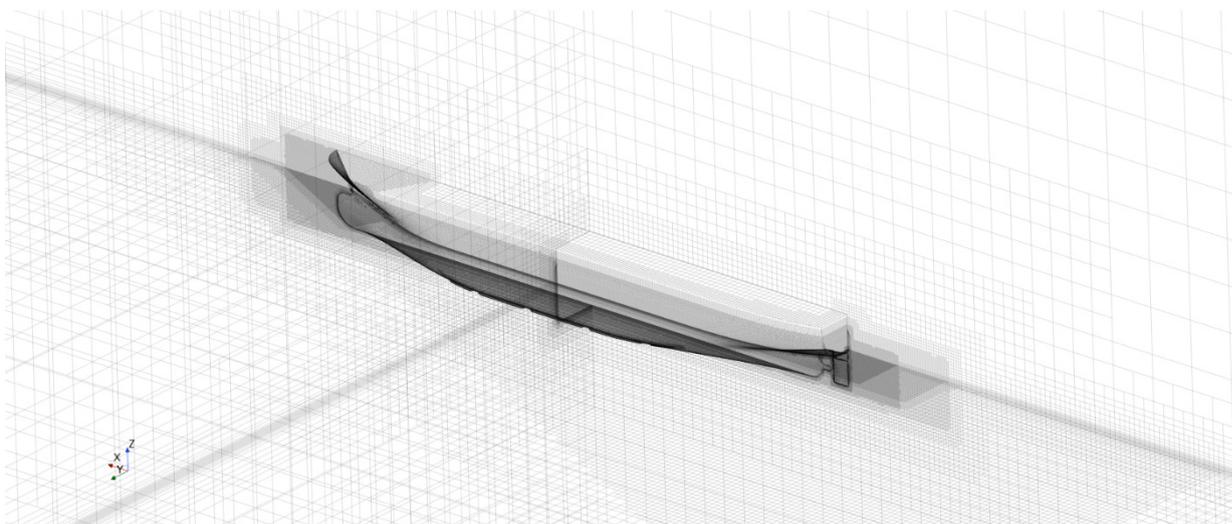


図9 計算格子 (EEDI Cond.)

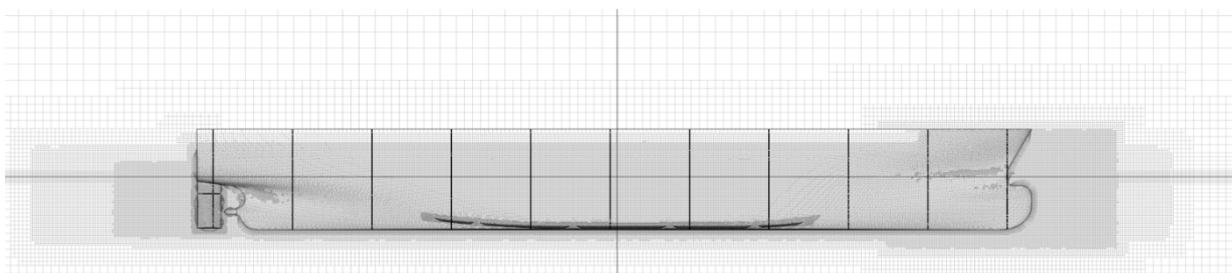


図10 計算格子 (EEDI Cond.)

4 - 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。

4 - 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、各船型の目標船速における波紋の鳥観図を図 11 と図 12 に示す。波紋を比較すると派生船型 2、5、8 の造波が大きく、派生船型 1、6 の造波が小さいことがわかる。顕著になっている造波が船首尾の肩波である。主要目比を比較すると、 L/B (L_{pp} と B の比) が大きいのが派生船型 1、3、6 であり、小さいのが派生船型 2、5、8 である。次に、 C_b (肥脊係数) が小さいのが派生船型 1 であり、大きいのが派生船型 2、7 である。最後に L_{cb} (浮心の前後位置：船首側を負) が大きいのが派生船型 4、6 であり、小さいのが派生船型 2、5 である。これらから造波を小さくするには、 L/B と L_{cb} を大きく、 C_b を小さくすれば良いといえる。

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 r_R 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 r_R 、形状影響係数 K および造波抵抗係数 r_W を推定するため、基幹船型の 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 r_R 、造波抵抗係数 r_W を図 13 から図 20 に示す。

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 21 から図 28 に示す。

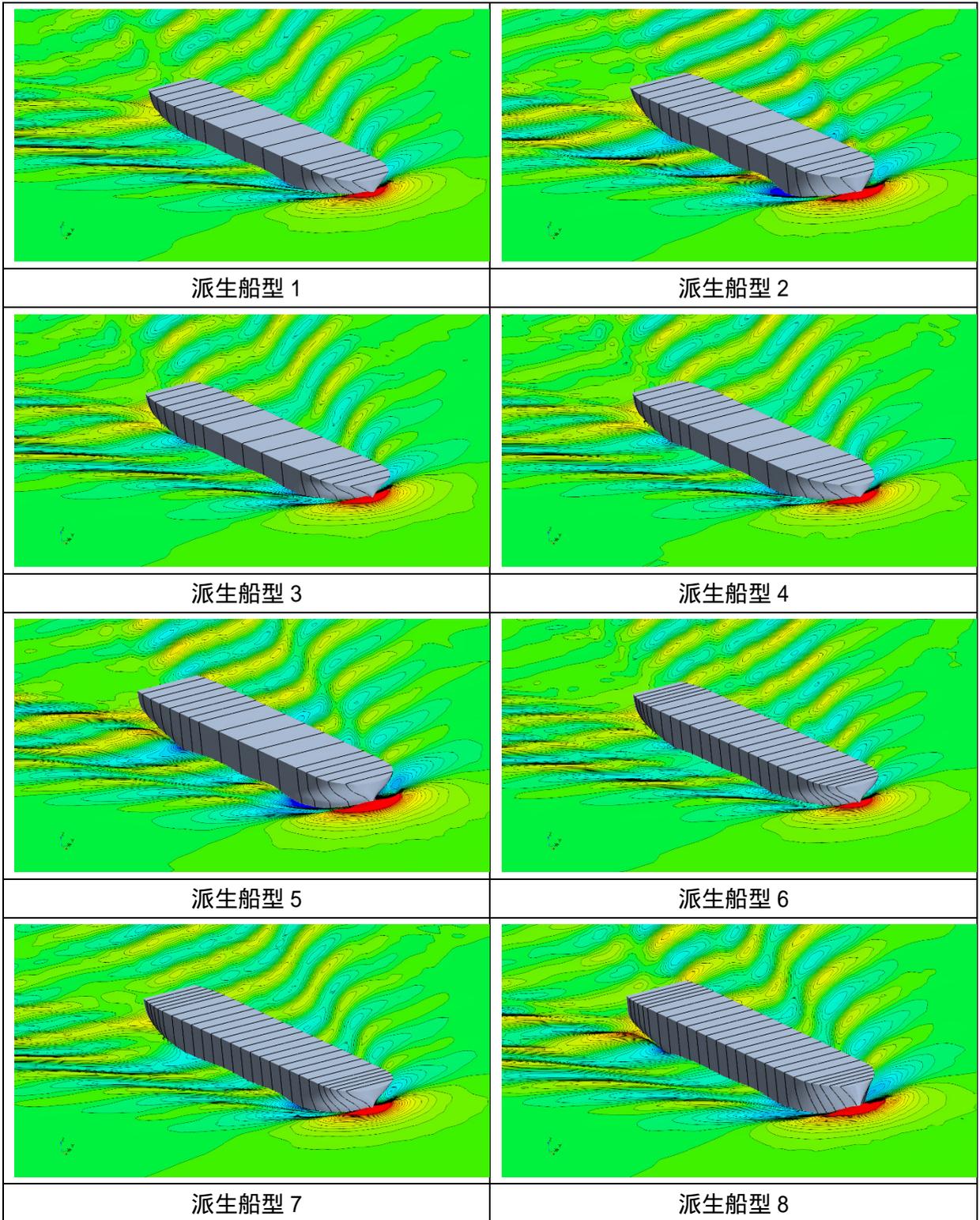


図 11 船首側の波紋の鳥観図

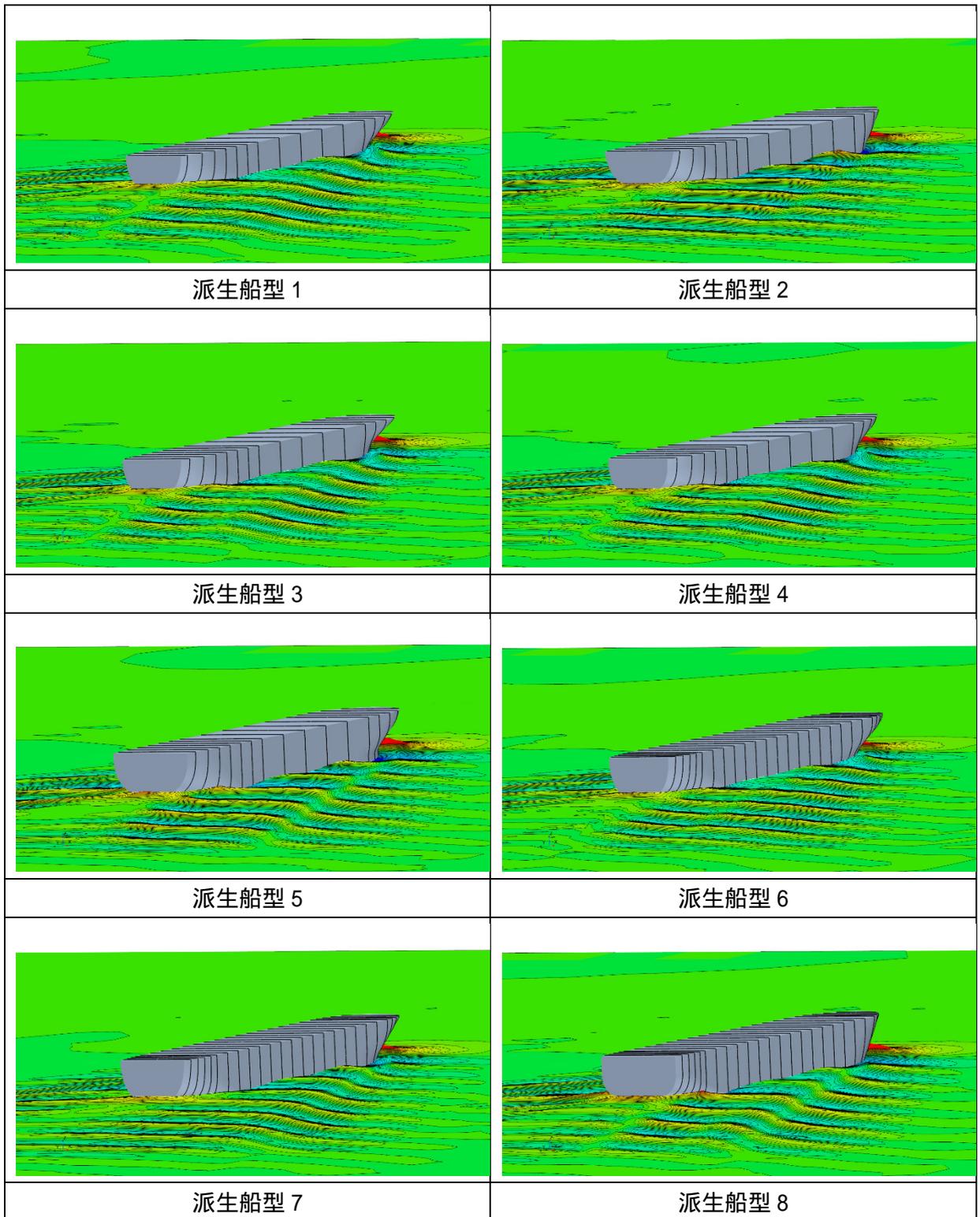


図 12 船尾側の波紋の鳥観図

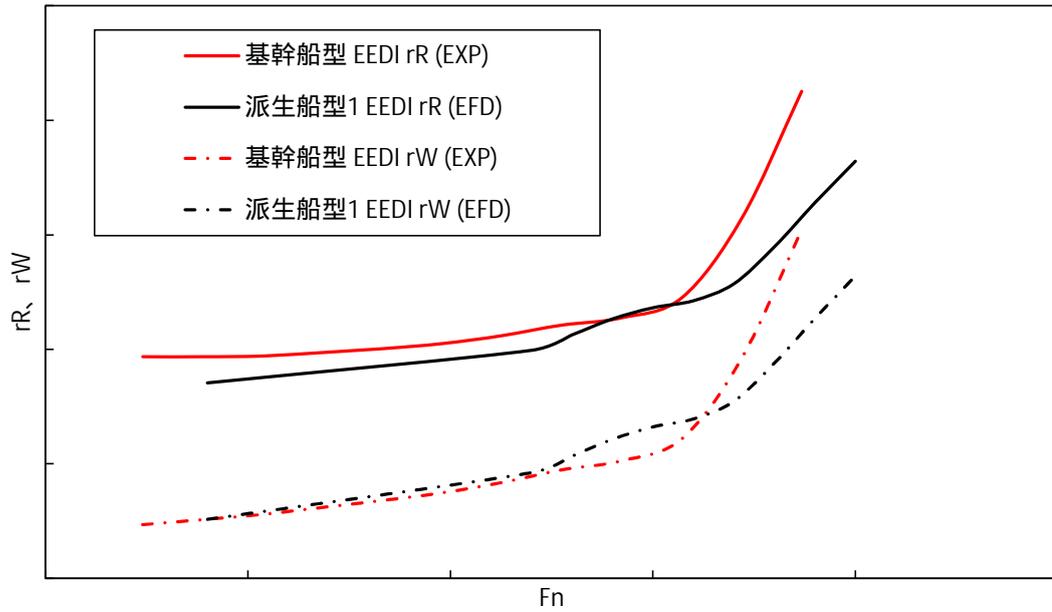


図 13 派生船型 1 剩余抵抗係数 rR および造波抵抗係数 rW (EFD)

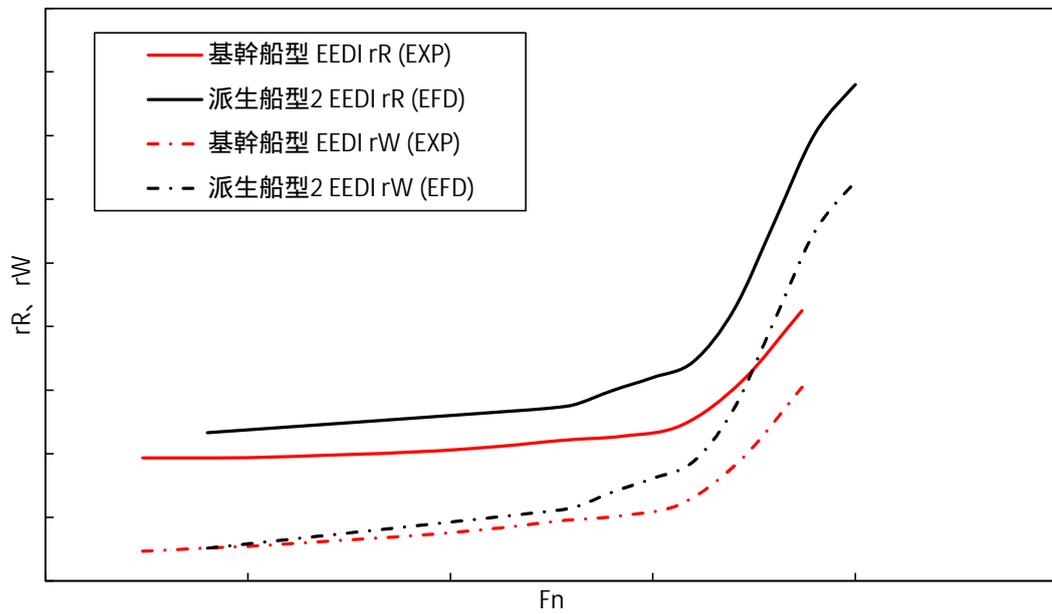


図 14 派生船型 2 剩余抵抗係数 rR および造波抵抗係数 rW (EFD)

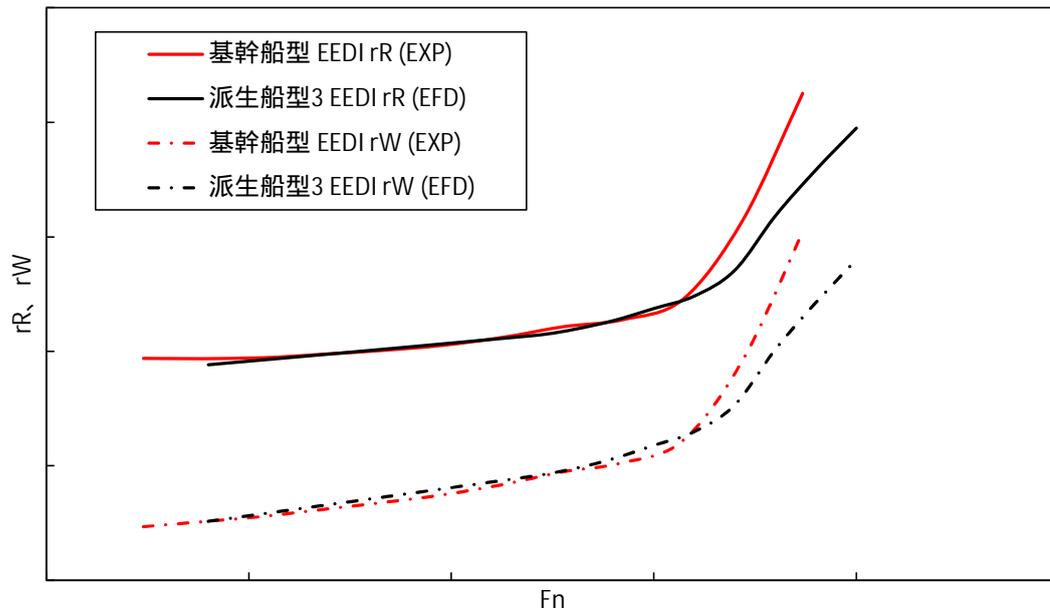


図 15 派生船型 3 剩余抵抗係数 rR および造波抵抗係数 rW (EFD)

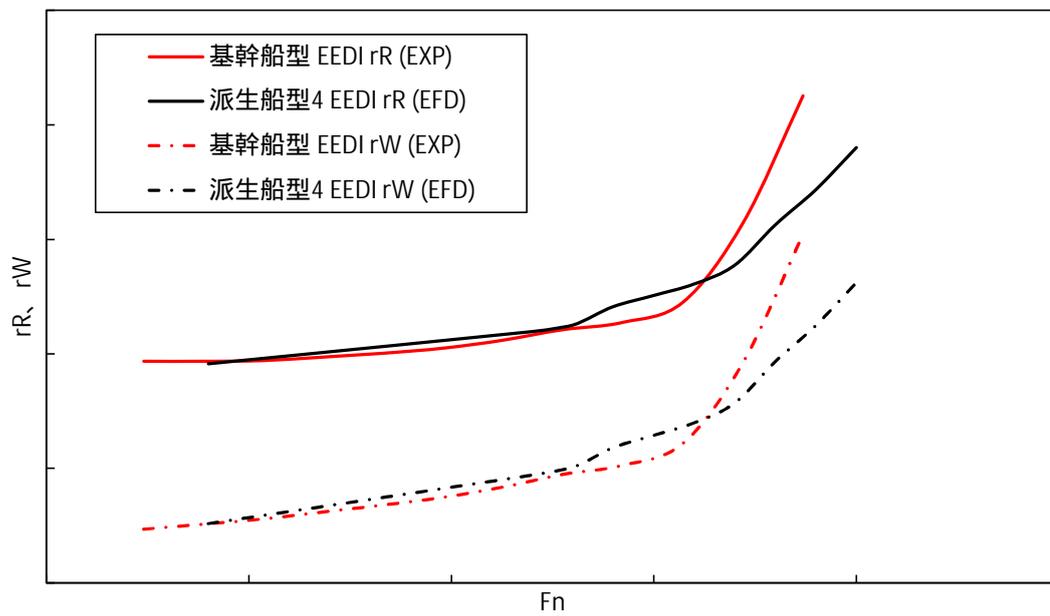


図 16 派生船型 4 剩余抵抗係数 rR および造波抵抗係数 rW (EFD)

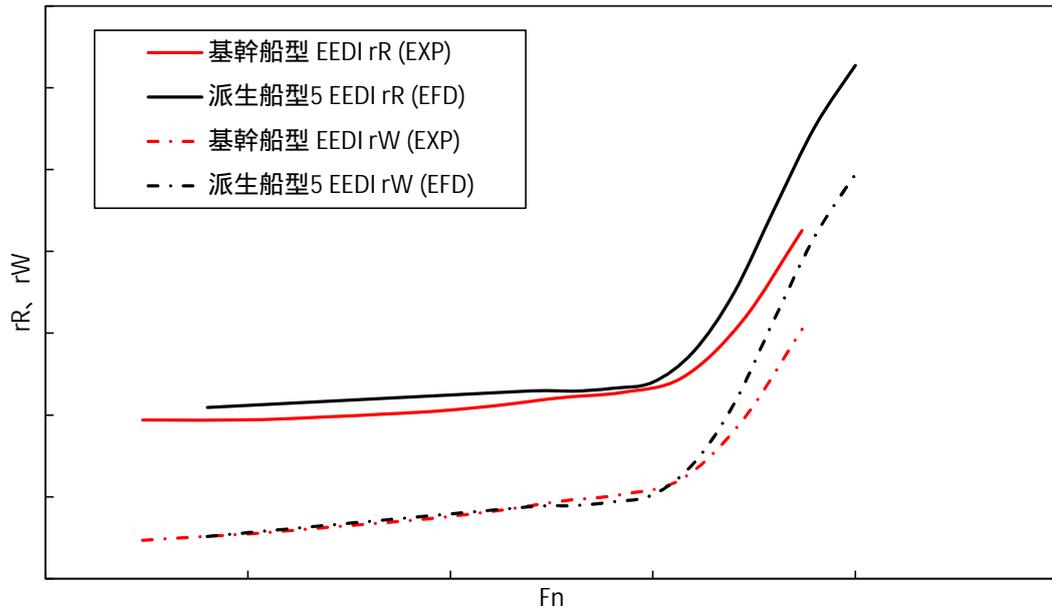


図 17 派生船型 5 剩余抵抗係数 rR および造波抵抗係数 rW (EFD)

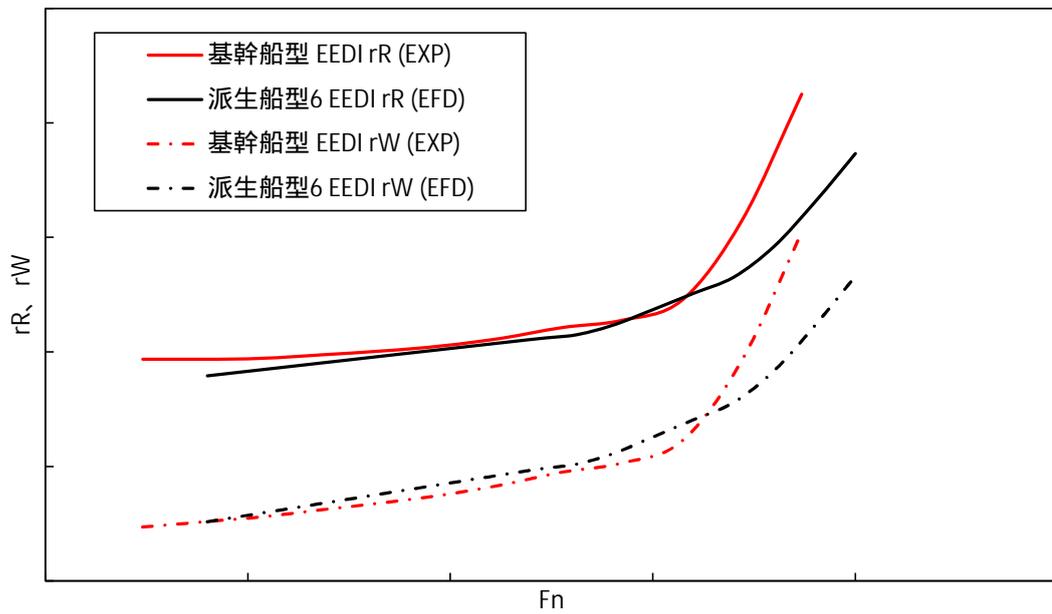


図 18 派生船型 6 剩余抵抗係数 rR および造波抵抗係数 rW (EFD)

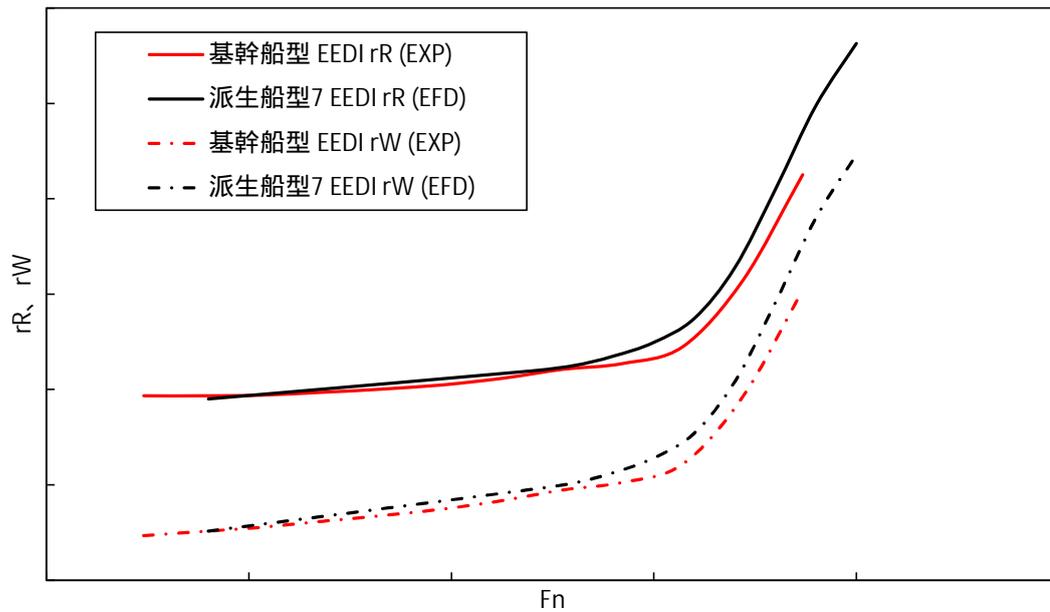


図 19 派生船型 7 剩余抵抗係数 rR および造波抵抗係数 rW (EFD)

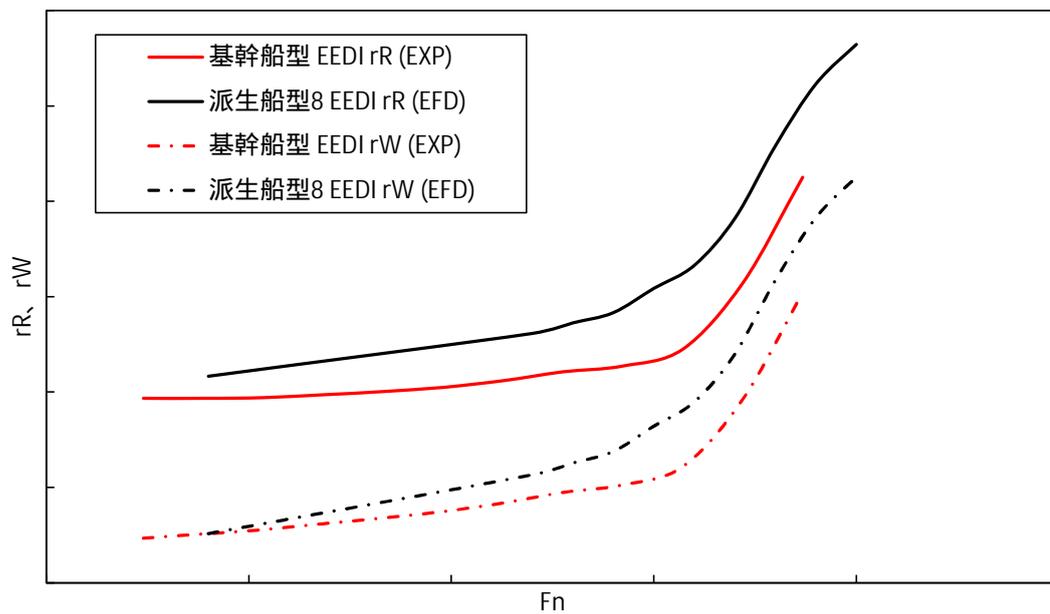


図 20 派生船型 8 剩余抵抗係数 rR および造波抵抗係数 rW (EFD)

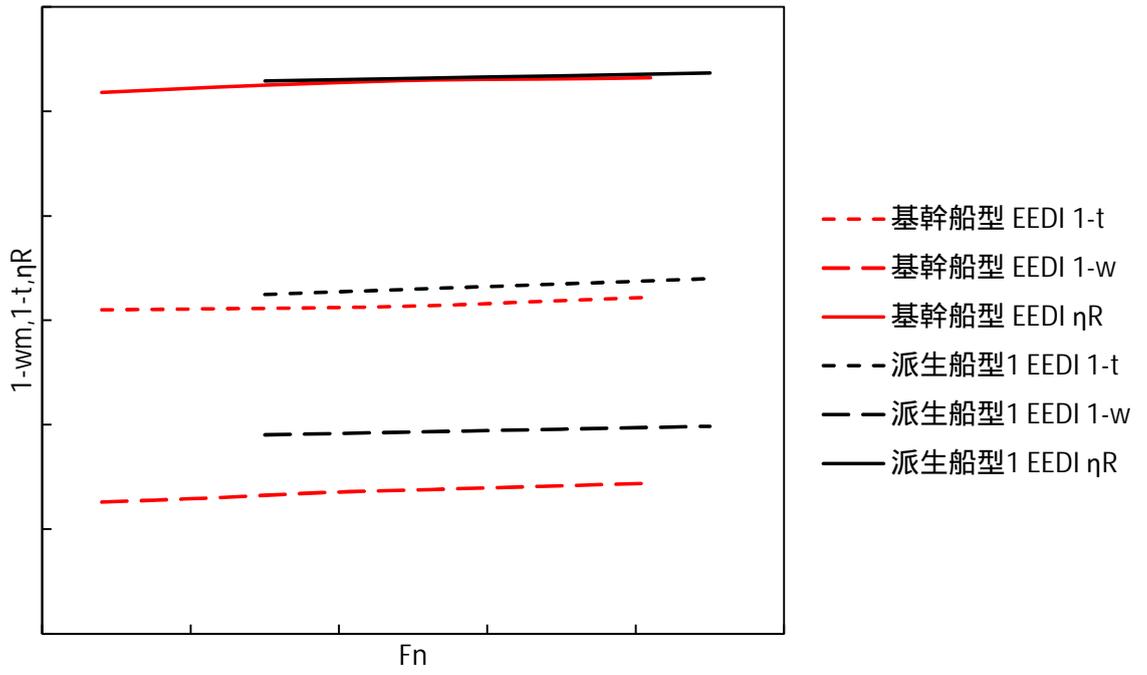


图 21 派生船型 1 自航要素 (EFD)

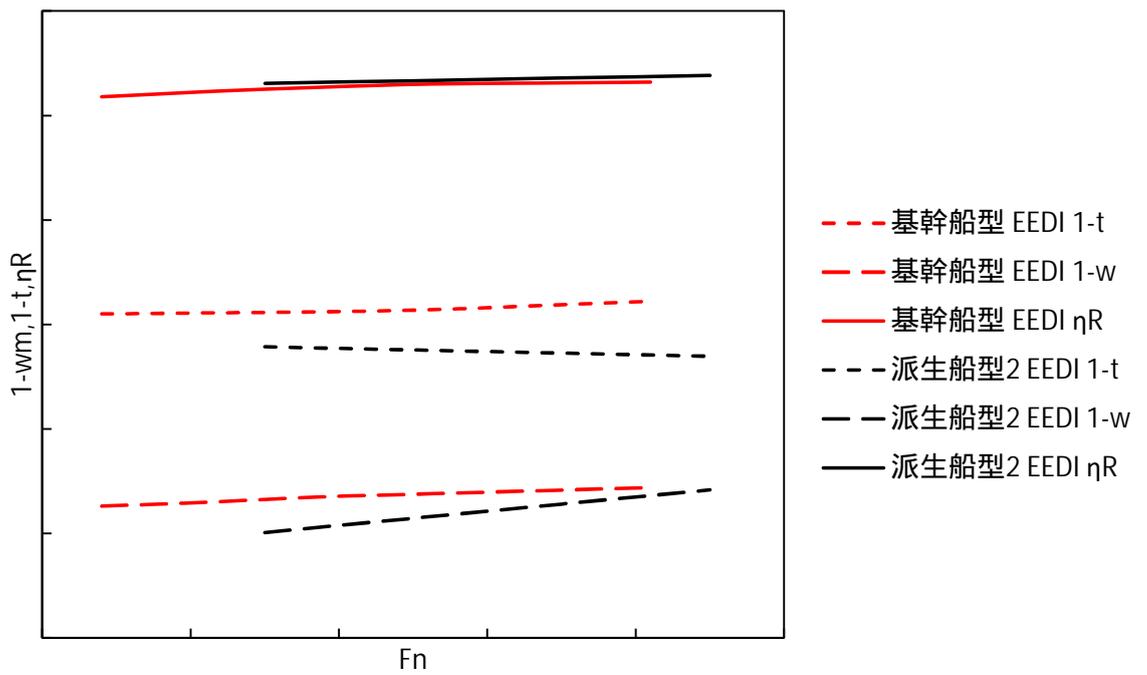


图 22 派生船型 2 自航要素 (EFD)

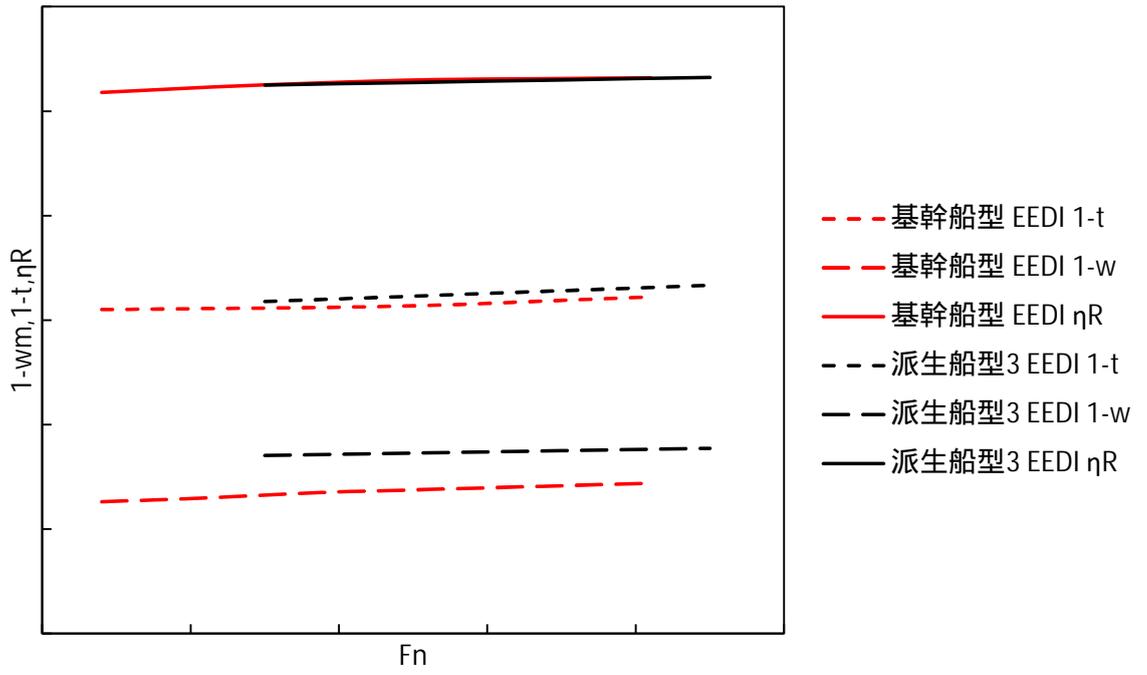


图 23 派生船型 3 自航要素 (EFD)

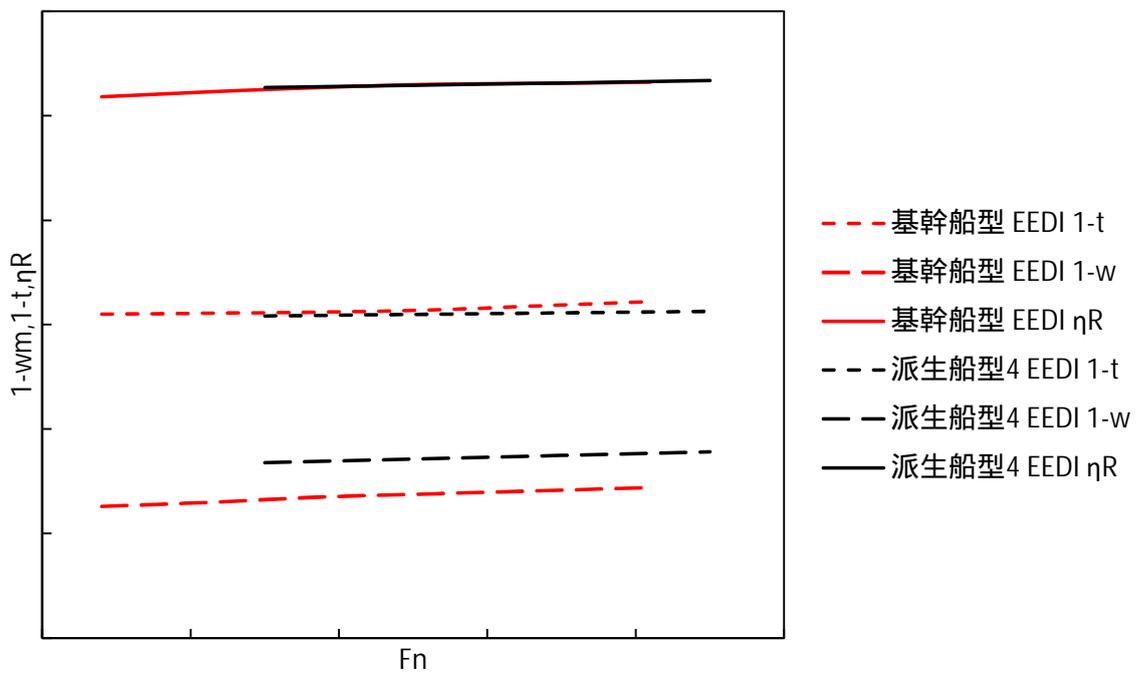


图 24 派生船型 4 自航要素 (EFD)

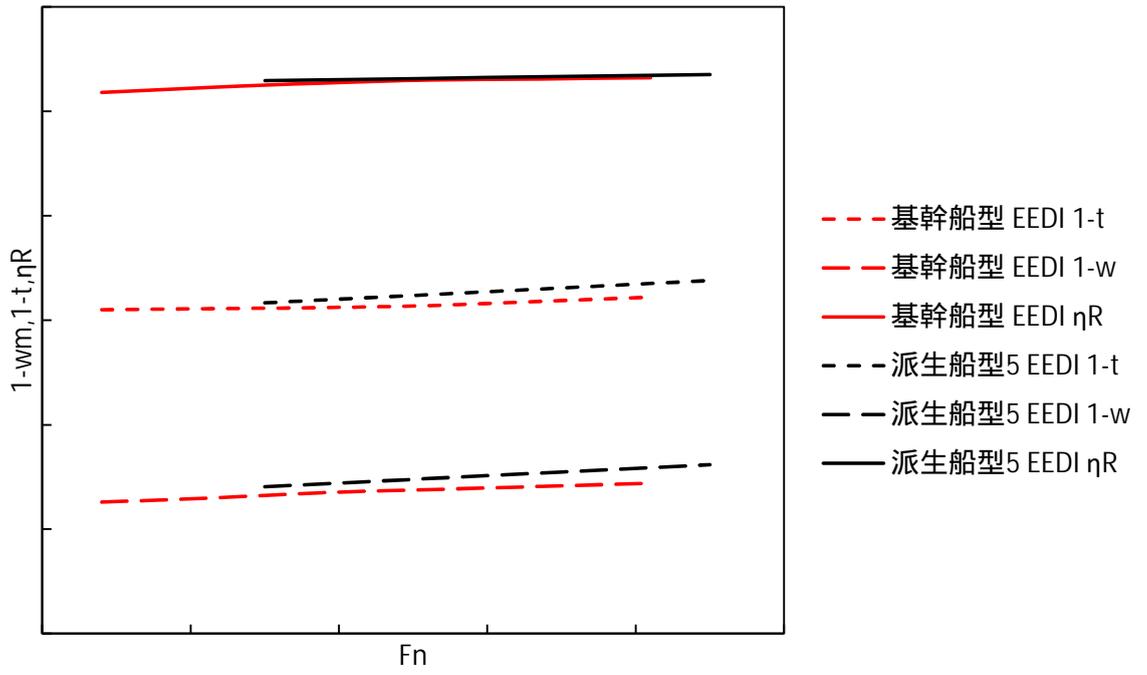


图 25 派生船型 5 自航要素 (EFD)

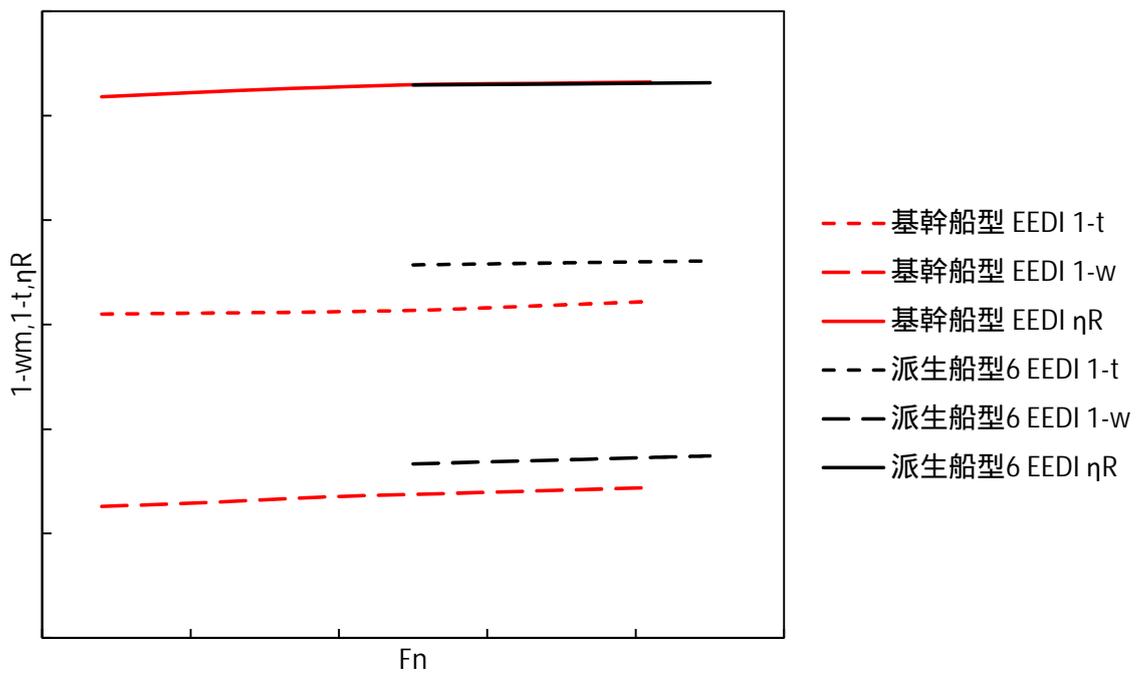


图 26 派生船型 6 自航要素 (EFD)

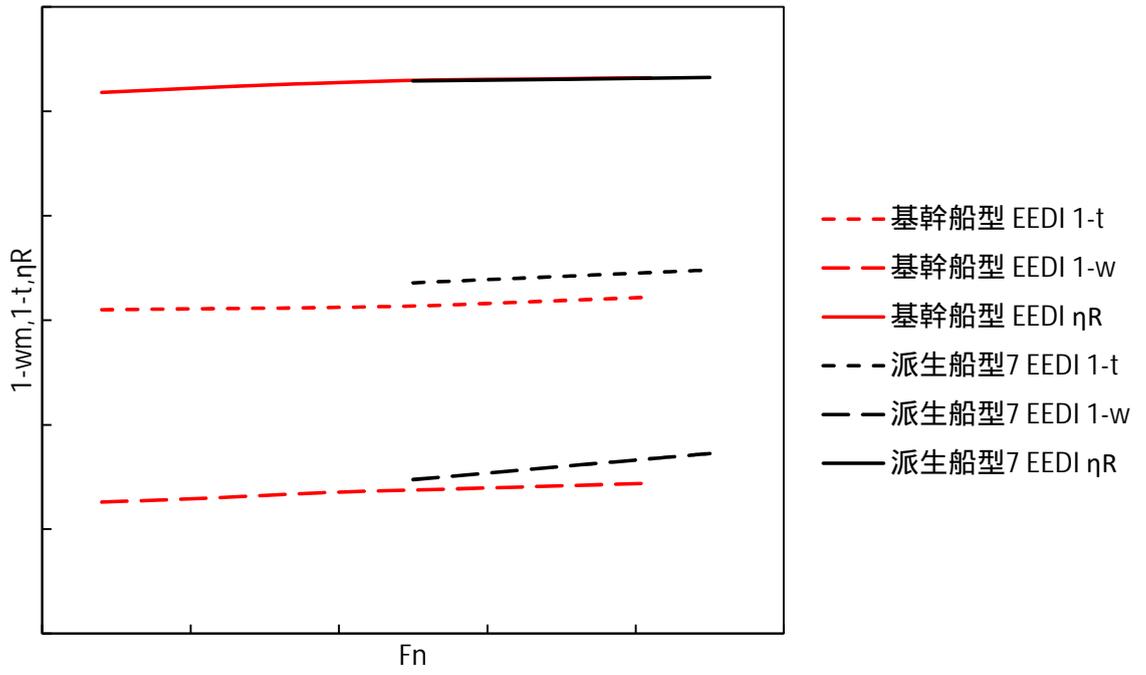


图 27 派生船型 7 自航要素 (EFD)

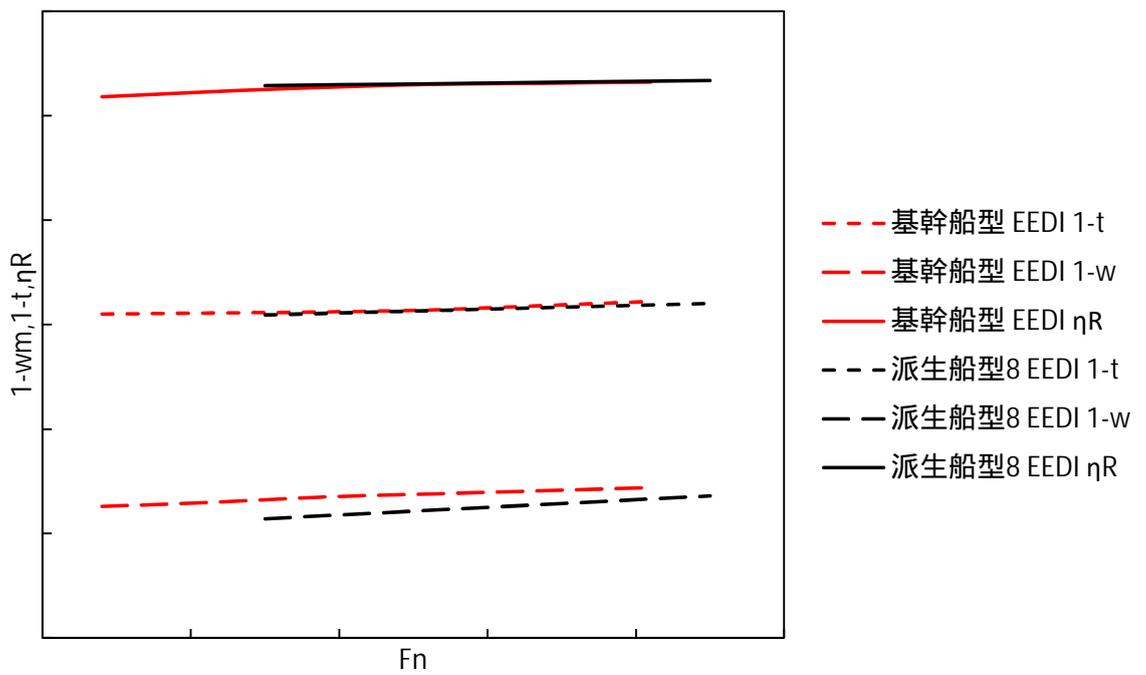


图 28 派生船型 8 自航要素 (EFD)

4 - 5 . 波浪中抵抗増加

派生船型の船体形状から EEDI Condition 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、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 7 に示し、派生船型の計算結果を図 29 および図 30 に示す。

表 7 波浪中抵抗増加計算の条件

船名		派生 1, 2, 3, 4, 8	派生 5, 6, 7
船速	Fn	0.19	0.20
波向	(deg.)	180	
波長船長比	/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

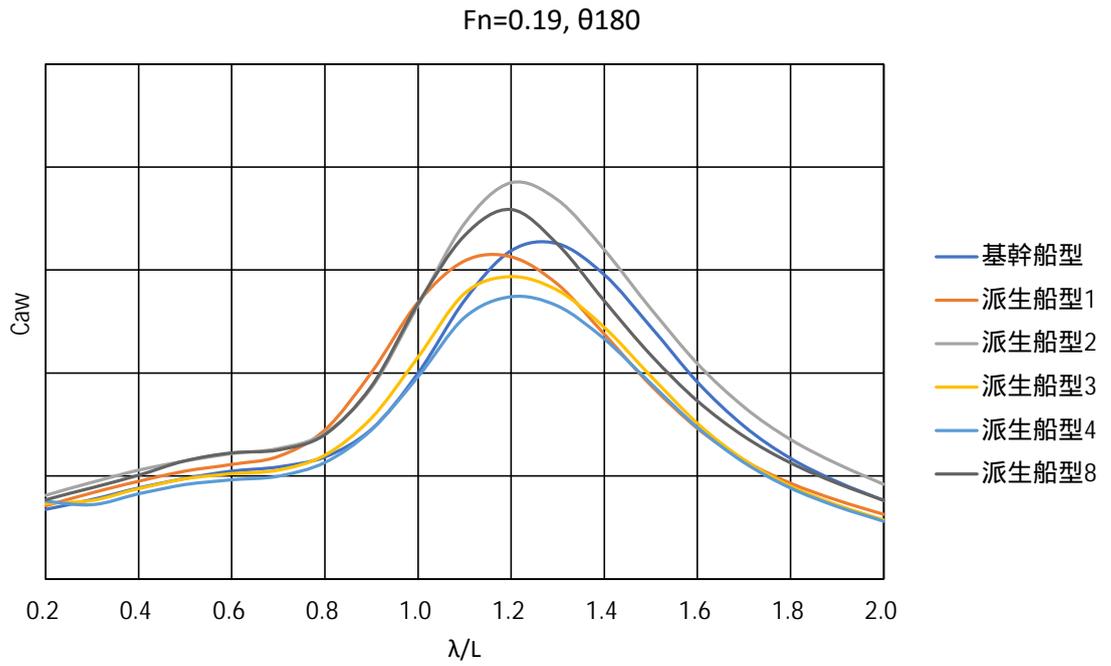


図 29 派生船型 1,2,3,4,8 波長船長比と波浪中抵抗増加の関係 (180 度向い波)

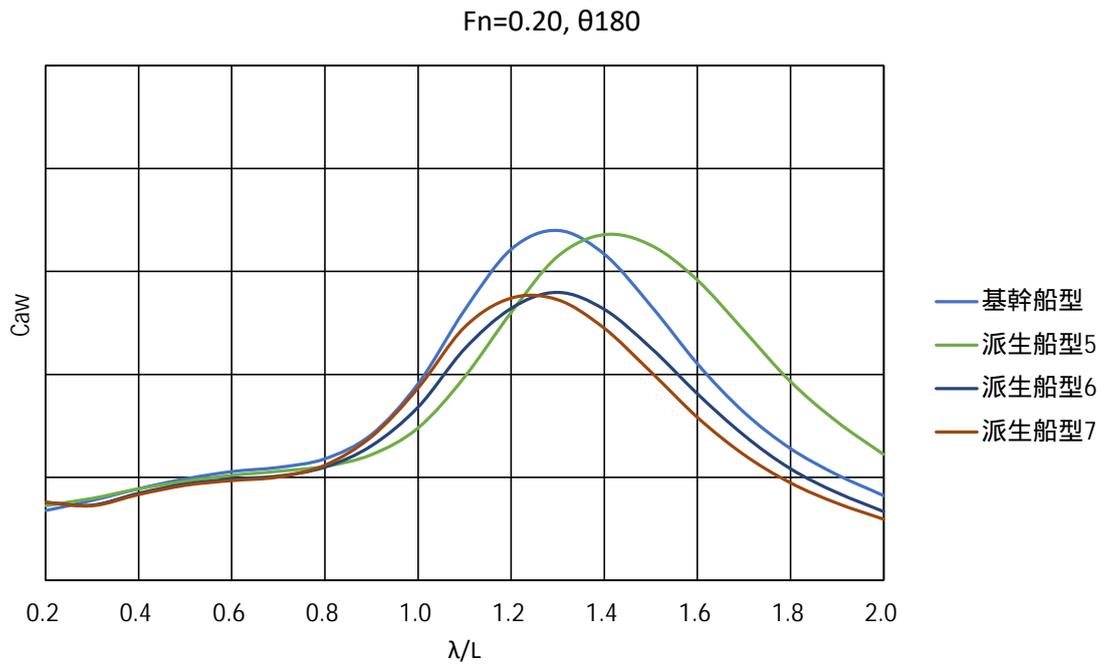


図 30 派生船型 5,6,7 波長船長比と波浪中抵抗増加の関係 (180 度向い波)

4 - 6 . CFD を用いた Eco-Stator の設計

CFD を用いて派生船型に装着する 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、基幹船型の水槽試験結果と 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 31 に示す。

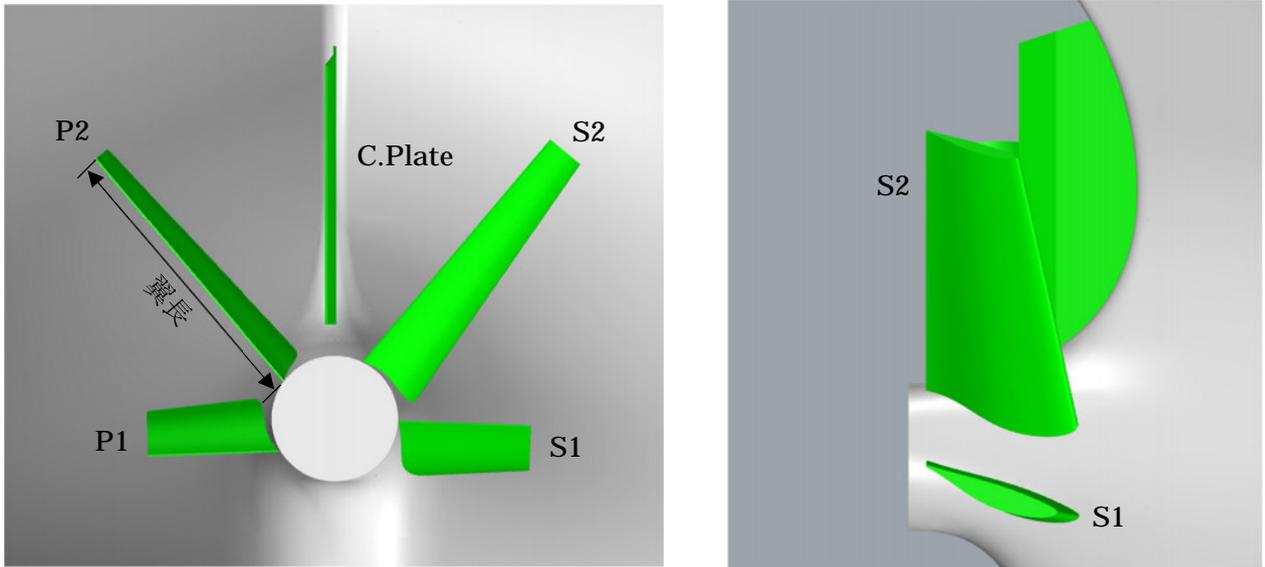


図 31 各ステータの名称

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、派生船型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。ここでは例として派生船型 2 について示す。計算モデルは船体、ビルジキール、舵、ES を用いた。格子数は抵抗計算および自航計算で約 1,100 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 32 および図 33 に示す。

表 8 CFD 自航計算条件(例：派生船型 2)

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-
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	フルモデル (両舷)
格子	非構造格子・セル中心
格子要素数	約1130万格子
レイノルズ数	9.3×10^6
フルード数	0.210
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	
自航計算	
X	-2.3Lpp ~ 3.2Lpp
Y	-2.3Lpp ~ 2.3Lpp
Z	-1.6Lpp ~ 1.0Lpp
基点 : (X,Y,Z) = (AP,0,dm), Y : 左舷が正	

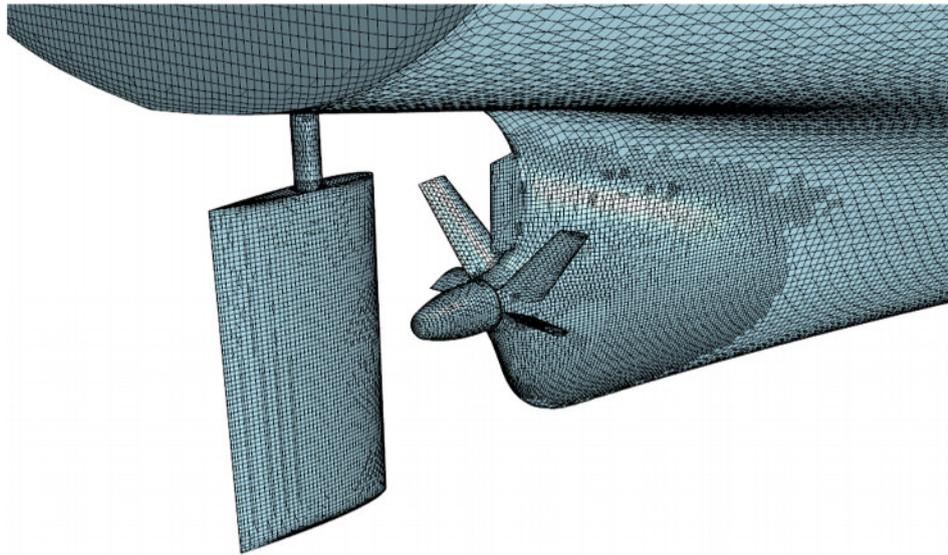


図 32 自航計算用格子(例：派生船型 2)

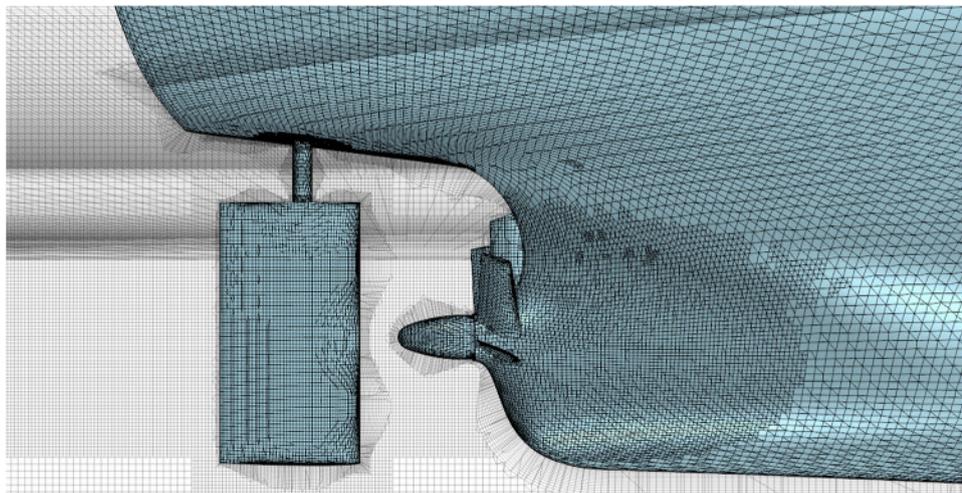


図 33 自航計算用格子(例：派生船型 2)

EEDI Condition の目標船速における省エネステータの表面圧力分布を図 34 から図 36 に、伴流分布を図 37 に示す。それぞれ左図は ES 無、右図は ES 有を示す。

図 34 から図 36 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 37 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。

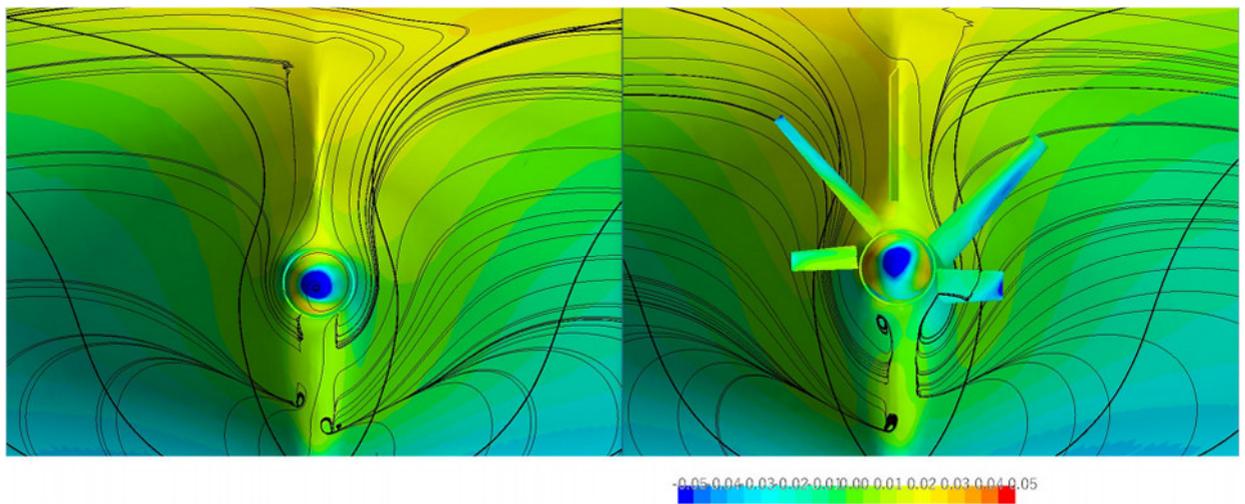


図 34 表面圧力（船尾より見る）（例：派生船型 2）

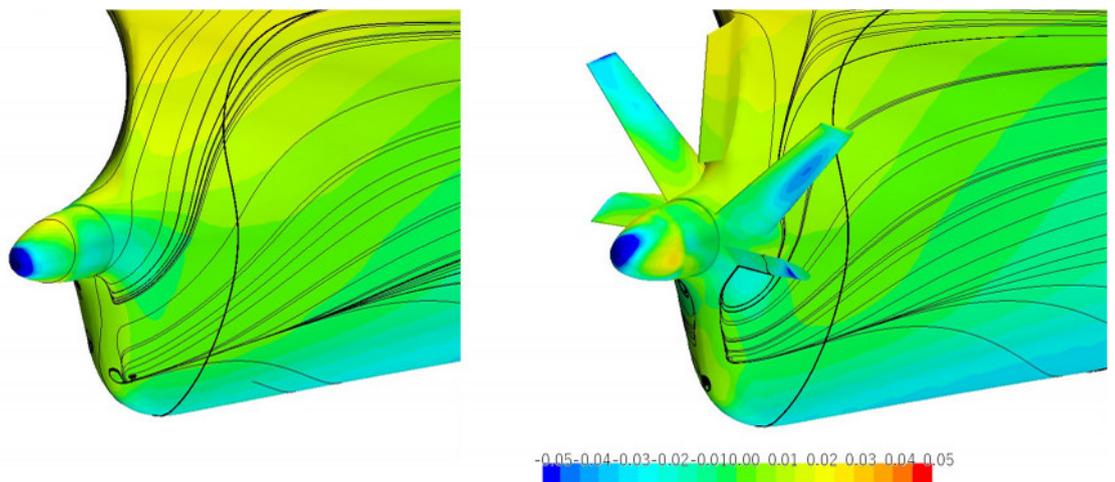


図 35 表面圧力（右舷上方より見る）（例：派生船型 2）

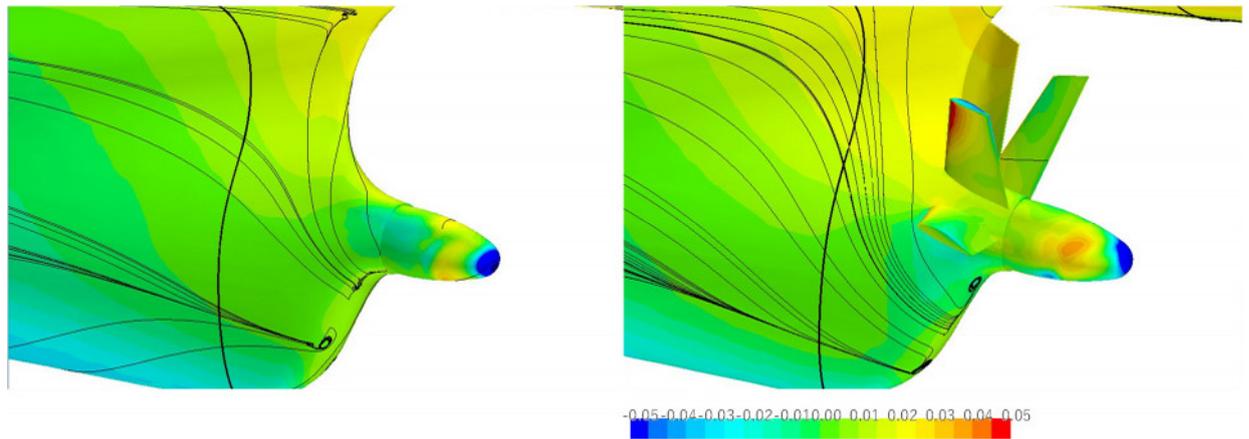


図 36 表面圧力（左舷上方より見る）（例：派生船型 2）

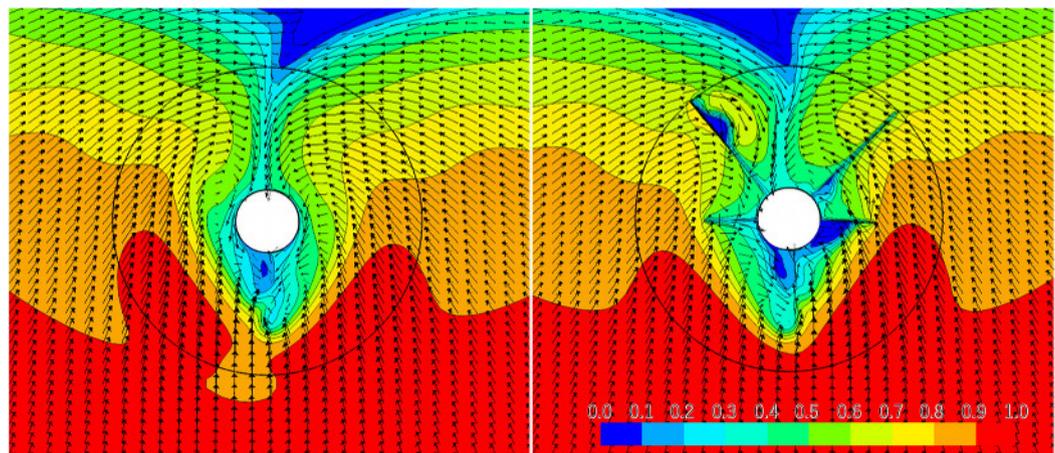


図 37 伴流分布(例：派生船型 2)
（ES の後端位置）

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。自航計算は目標船速で行った。求められた結果は相関係数を適用して水槽試験相当(EFD)の $1-t$ 、 $1-wm$ に変換した。

4 - 7 . 派生船型 1 の水槽試験

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 1/18.2609 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.3070
- ・主要目

Length (between perpendiculars) : 5.3667 m

Breadth (mld) : 0.8762 m

Depth (mld) : 0.4710 m

EEDI Condition draft (mld) : 0.3505 m

- ・付加物 : バウスラスター、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 : P619R
- ・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. EEDI Condition (2023/04/26)
 - ・抵抗試験、自航試験、波形観察
2. Trial Condition (2023/04/27)
 - ・抵抗試験、自航試験、荷重度変更試験、波形観察
3. EEDI Condition (2023/05/11,12)
 - ・規則波中試験

図 38 および図 39 に水槽試験の写真を示す。



派生船型 1 の模型船（船側）



派生船型 1 の模型船（船尾）

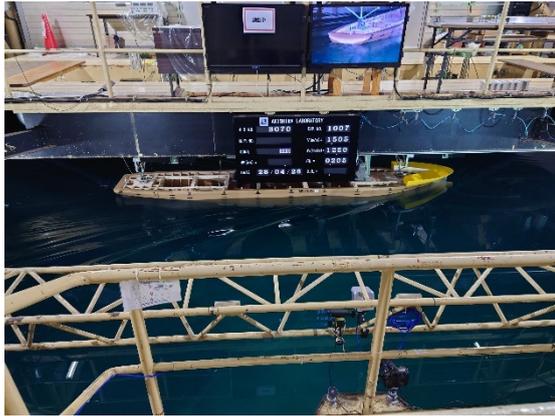


派生船型 1 の模型船（船首）

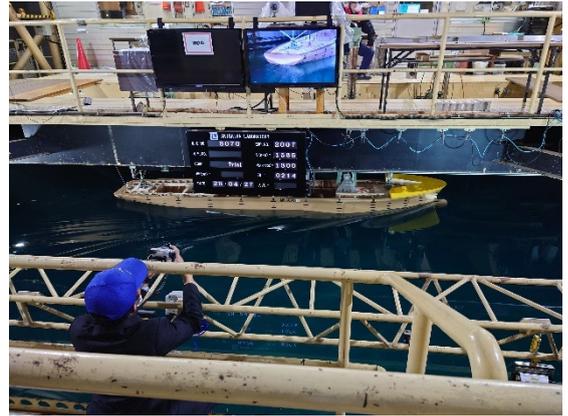


日本財団シールと模型船番号

図 38 派生船型 1 の模型船写真



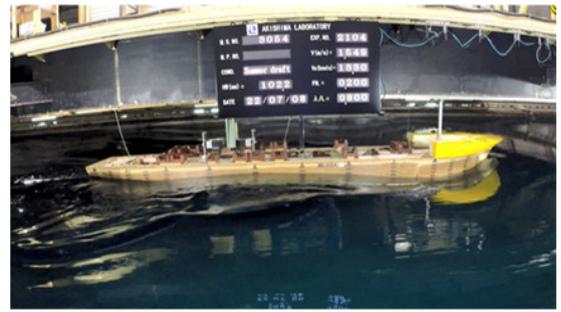
EEDI Condition 抵抗自航試験



Trial Condition 抵抗自航試験



EEDI Condition 規則波中試験



EEDI Condition 規則波中試験

図 39 派生船型 1 の水槽試験写真

水槽試験で得られた抵抗・自航要素を図 40 から図 42 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 43 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。

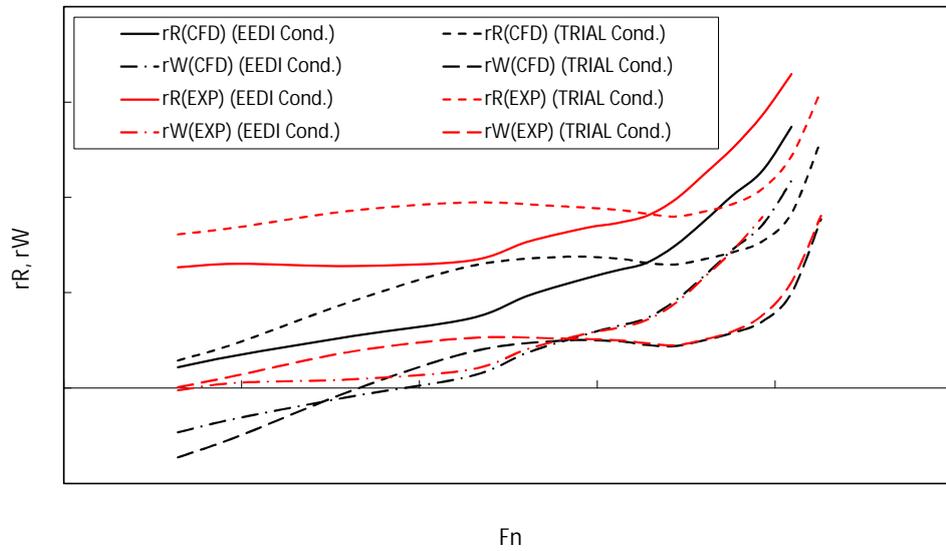


図 40 抵抗要素(CFD と EXP 比較)

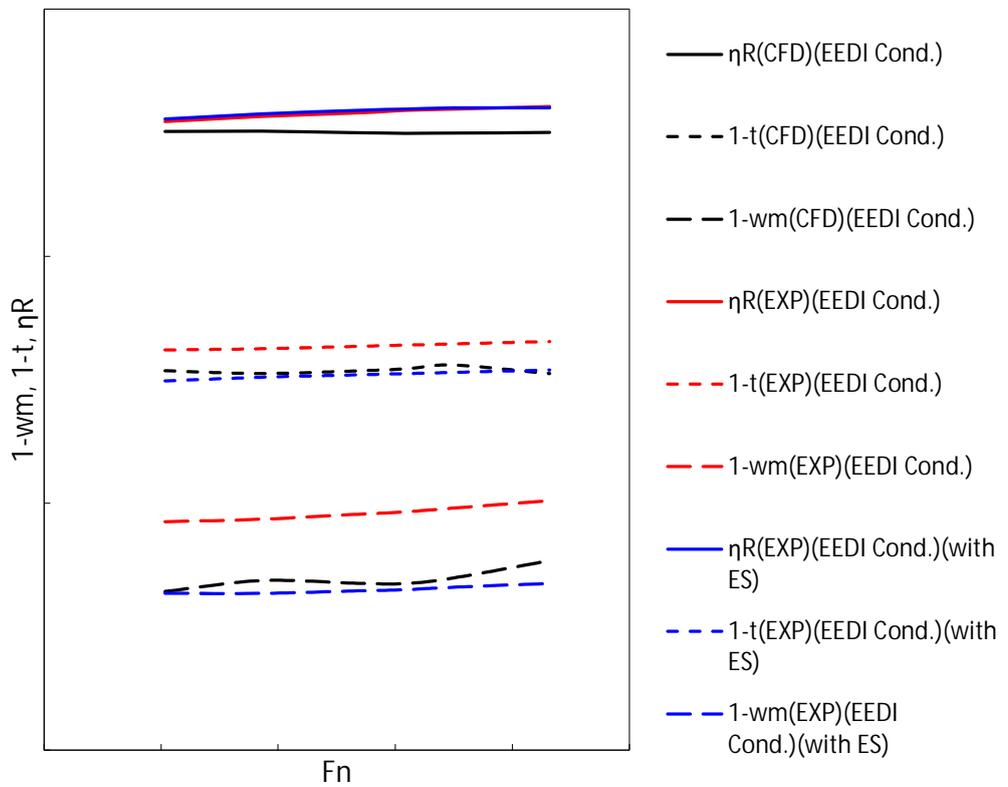


図 41 自航要素(EEDI Cond.) (EXP と CFD の比較)

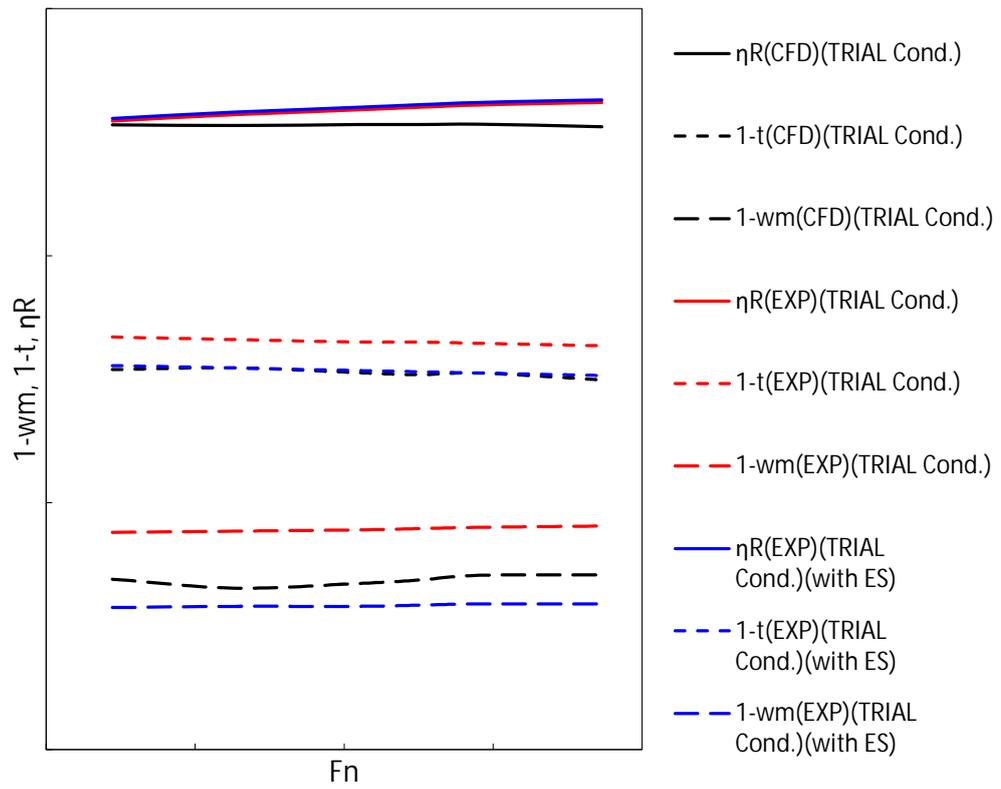


図 42 自航要素(TRIAL Cond.)(EXP と CFD の比較)

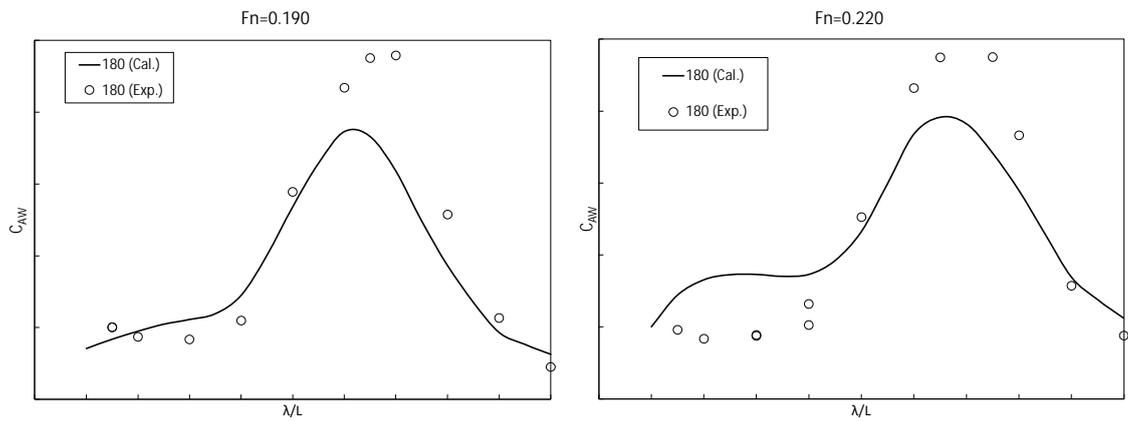


図 43 波浪中抵抗増加係数(EXP と計算値の比較)

4 - 8 . 派生船型 5 の水槽試験

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 1/20.0000 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 : 1/20.0000
- ・模型船番号 : MSNo.3076
- ・主要目

Length (between perpendiculars) : 5.6300 m

Breadth (mld) : 1.0400 m

Depth (mld) : 0.5775 m

EEDI Condition draft (mld) : 0.4500 m

- ・付加物 : バウスラスター、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 : P619R
- ・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。

4. EEDI Condition (2023/07/25)

- ・抵抗試験、自航試験、波形観察

5. Trial Condition (2023/07/26)

- ・抵抗試験、自航試験、荷重度変更試験、波形観察

6. EEDI Condition (2023/08/02,03)

- ・規則波中試験

図 44 および図 45 に水槽試験の写真を示す。



派生船型 5 の模型船（船側）



派生船型 5 の模型船（船尾）



派生船型 5 の模型船（船首）



日本財団シールと模型船番号

図 44 派生船型 5 の模型船写真



EEDI Condition 抵抗自航試験



Trial Condition 抵抗自航試験



EEDI Condition 規則波中試験



EEDI Condition 規則波中試験

図 45 派生船型 5 の水槽試験写真

水槽試験で得られた抵抗・自航要素を図 46 から図 48 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 49 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。

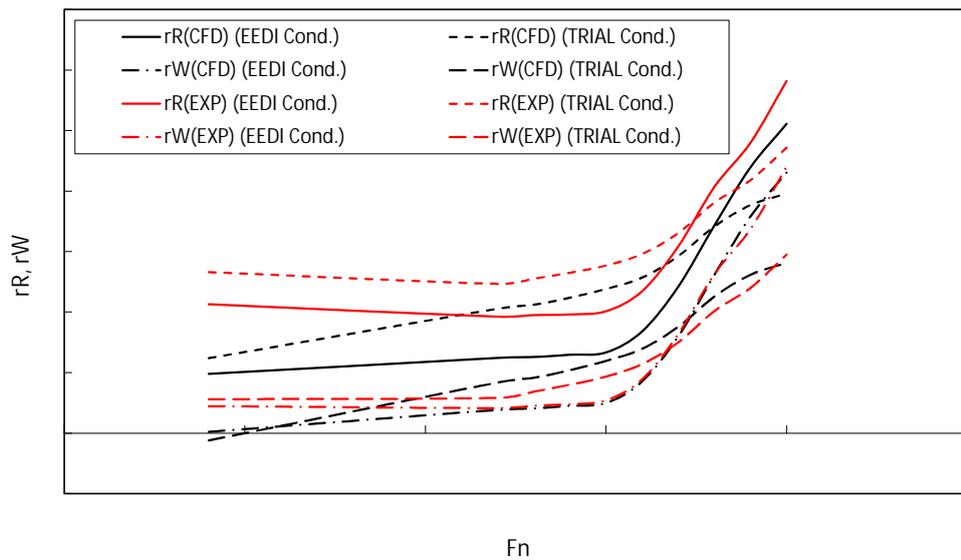


図 46 抵抗要素(CFD と EXP 比較)

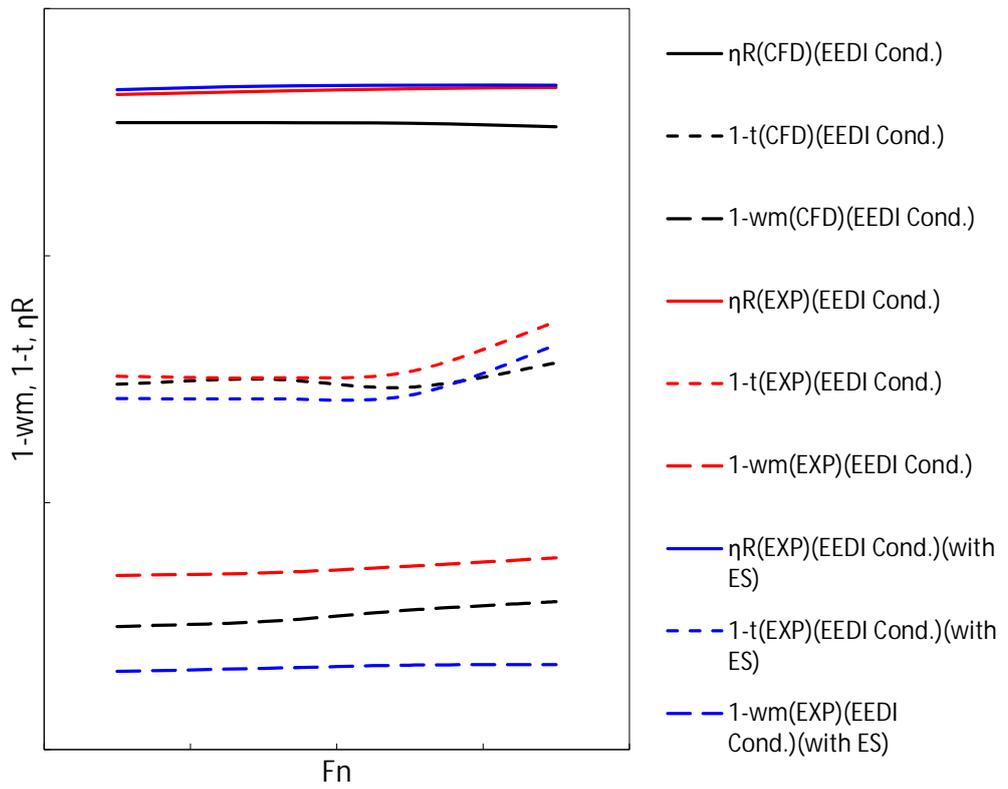


図 47 自航要素 (EXP と CFD の比較)

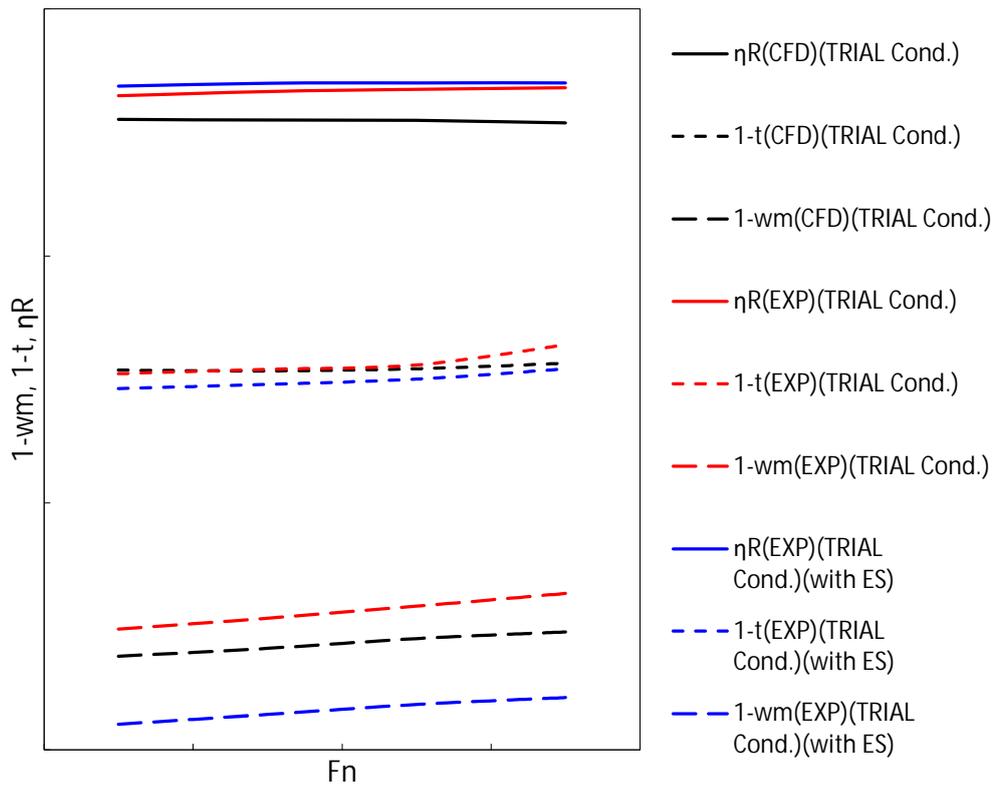


図 48 自航要素 (EXP と CFD の比較)

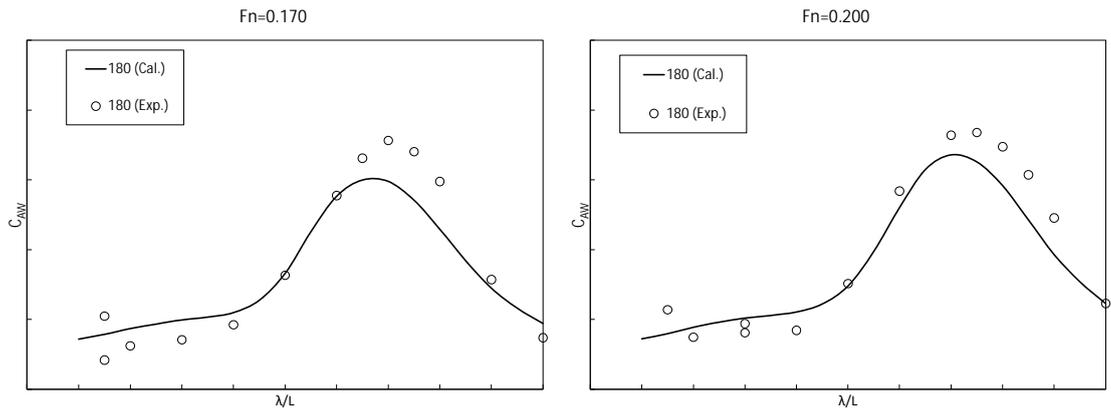


図 49 波浪中抵抗増加係数(EXP と計算値の比較)

4 - 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 Eco-Stator 付であり、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。船型群の EEDI Condition の船速と馬力の関係を図 50 に示す。図中の線の色は DWT の違いで変更した。赤は 5,000DWT から 5,400DWT、緑は 8,800DWT、黒は 12,500DWT から 13,000DWT、青は 16,000DWT である。

また、各船型の EEDI 値を計算すると、派生船型 8 以外は目標とするフェーズ をクリアすることができた。派生船型 8 はフェーズ をクリアすることができなかったが、今後の引合いの時に派生船型 8 のような主要目、主機、プロペラの組み合わせを避け、船型を検討すればよい。派生船型 8 は派生させる船型の境界の役割となった。

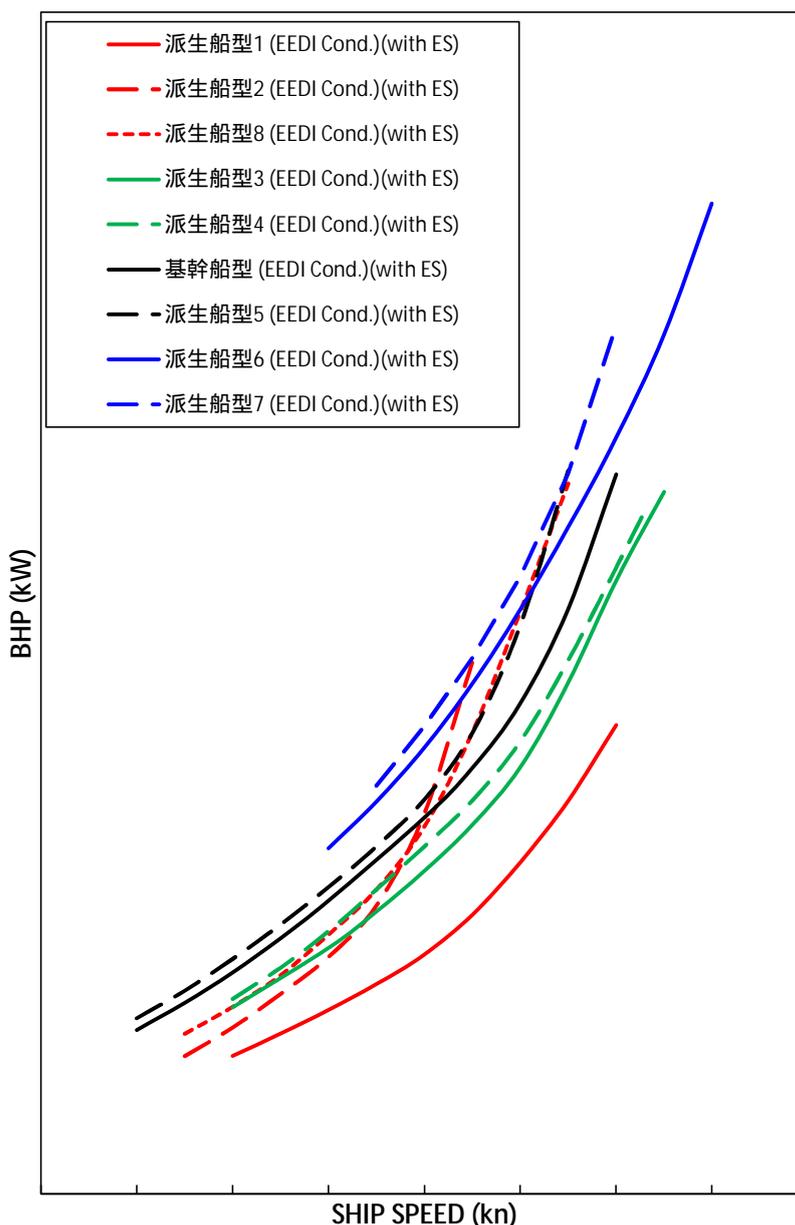


図 50 船速と馬力の関係

5. 環境負荷低減先進船群の性能推定プログラムの開発

基幹船型と派生船型 1、派生船型 5 の水槽試験結果と CFD 計算結果から、水槽試験と CFD 計算結果の相関係数を求め、その他の派生船型の CFD 計算結果に相関係数を適用し、水槽試験相当の抵抗要素および自航要素に変換した。水槽試験結果および水槽試験相当の抵抗要素および自航要素を船体主要目比と関係付けチャートを作成した。また、基幹船型と開発した派生船型 8 隻の波浪中抵抗増加係数の計算にはストリップ法を用いているため、任意の派生船型の波浪中抵抗増加係数を求めるには船体形状を作成する必要がある。しかしながら、主要目の確定していない初期検討段階において船体形状を作成し波浪中抵抗増加係数を計算するには時間を要する。そのため、既に計算した基幹船型と派生船型の波浪中抵抗増加係数を船体主要目比と関係付けチャートを作成した。これらのチャートをデータベースとする推進性能推定プログラムを開発した。図 51 にシステムの構成を示す。社内サーバーにデータベースと推定プログラムを格納し、社外からでもアクセスし使用できるようなシステムである。図 52 に入力画面を図 53 に計算結果のサンプルを示す。

システム構成

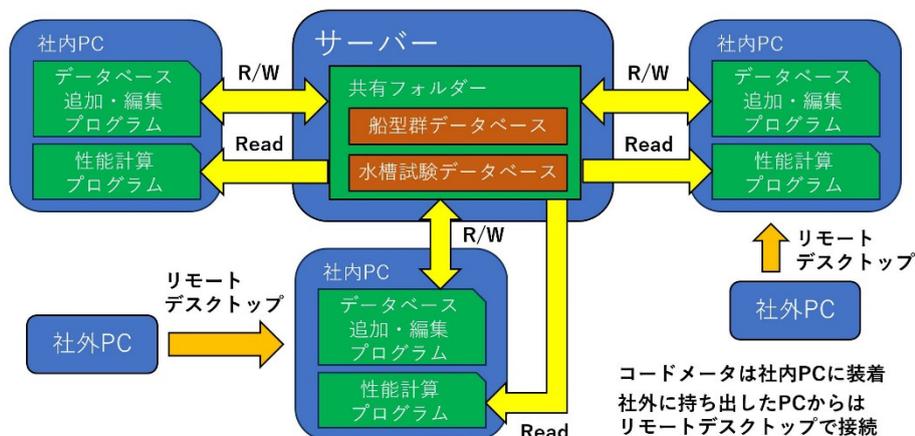


図 51 システム構成図

Project											
MS No.											
No. of Cond.											
Condition (0)											
Condition (1)											
Condition (2)											
Coef	Model Lpp (m)	Air Resist Coef	Blp ratio	Keen point	Diameter Roundness						
Dimensions	Lpp (m)	Lat (m)	B (m)	D (m)	d (m)	Trim (°)	Cb	Cb (m)	Wetted S (m ²)		
M/E	Number	Position	Type	×1	Diameter Point (mm)	MOR or MOR(W)	SM (°)	RPM (rpm)			
Propeller	Shaft No. (1~2)	Blade No. (4~6)	Diameter (m)	E.A.R.	H/D	Material	S.C.H. (m)				
Coef	Speed (knot)	Dimension	Type of CF	K	△CF	C1	C2	C3	Fluid		
Condition	△E/△F × 100	Lat (m)	dm (m)	Cb	Trim (°)	Wetted S (m ²)	K	△CF	C1		
Condition (1)											
Condition (2)											
Condition (0)											
Fo											
R Coef											
T-coef											
I-coef											
△R											
No. of Vp	Range	0.00	~	0.00							
Vp											
Condition (1)											
Fo											
R Coef											
T-coef											
I-coef											
△R											
No. of Vp	Range	0.00	~	0.00							
Vp											

主要目等、初期データを入力

水槽試験データが表示される

図 52 入力画面

IDENTIFICATION :		SHIP : FULL (100.0%)				
PROJECT	A	LENGTH PP	152.000 (m)			
SHIP MODEL No.	A	LENGTH WL	156.400 (m)			
LPP	6.000 (m)	BREADTH	26.800 (m)			
SCALE FACTOR	25.33	DEPTH	11.500 (m)			
PROPELLER :		DRAFT FWD	7.000 (m)			
		DRAFT MID	7.000 (m)			
		DRAFT AFT	7.000 (m)			
NUM. OF PROP.	1	WETTED S.A.	5370.0 (m ²)			
NUM. OF BLADES	5	DISPLACEMENT	23097.3 (m ³)			
BLADE SECTION	MAU	CB	0.8100			
TYPE	F.P.P.	L.C.B. (Xlpp)	-2.500			
OPTIMUM DIA.	4.492 (m)	FRICITION COEFFICIENT CF :				
DESIGN POINT	7150 * 1 ps	SCHOENHERR				
	160.0 + 2.8 rpm	SALT WATER				
ACTUAL DIA.	4.492 (m)	2 DIMENSIONAL ANALYSIS				
E. A. R.	0.910					
PITCH RATIO	0.664					
SHIP MODEL :						
Fn Rn(E+6)Cf(E-3)rR(E-3) 1-T 1-WM ETA R						
0.130	5.481	3.245	3.150 0.760 0.509 1.000			
0.150	6.324	3.165	3.270 0.760 0.516 1.000			
0.170	7.167	3.099	3.700 0.760 0.524 1.000			
0.180	7.509	3.069	4.140 0.760 0.528 1.000			
0.190	8.010	3.042	4.750 0.760 0.533 1.000			
0.200	8.432	3.016	5.500 0.760 0.536 1.000			
SPEED ESTIMATION :						
DHP/BHP=0.970 DCF= 0.200E-3 CPP eff.=1.000 C1=1.188 C2=1.000						
Vs	Fn	Rn(E+9)Cf(E-3)	E H P	B H P	N	Cadm
knots			ps	kw	r p m	
11.00	0.145	0.745	1.588	1877 (1300)	3350 (2470)	126.7 326.8
11.50	0.151	0.779	1.579	2147 (1579)	3852 (2833)	132.9 325.6
12.00	0.158	0.812	1.570	2455 (1806)	4422 (3252)	139.2 322.2
12.50	0.164	0.846	1.562	2812 (2068)	5090 (3744)	145.9 316.4
13.00	0.171	0.880	1.554	3226 (2373)	5800 (4325)	152.8 309.1
13.50	0.177	0.914	1.547	3709 (2728)	6612 (5010)	160.2 297.8
14.00	0.184	0.948	1.540	4278 (3146)	7930 (5832)	168.2 285.3
14.50	0.191	0.982	1.535	4942 (3635)	9255 (6807)	176.8 271.6
Vs(kts)	ETA	ETA P	ETA H	1-W5	J	KT(E-1)KQ(E-2)
11.00	0.559	0.463	1.245	0.610	0.364	1.723 2.156
11.50	0.557	0.464	1.239	0.613	0.365	1.715 2.147
12.00	0.555	0.464	1.233	0.617	0.365	1.712 2.143
12.50	0.552	0.464	1.227	0.620	0.365	1.715 2.146
13.00	0.549	0.464	1.220	0.623	0.364	1.723 2.154
13.50	0.544	0.462	1.214	0.626	0.362	1.736 2.166
14.00	0.539	0.461	1.207	0.630	0.360	1.751 2.178
14.50	0.534	0.459	1.200	0.633	0.357	1.769 2.191
MCR		B H P	Vs	Fn	RATE OF REVS.	
NOR		7150.0ps	13.66kts	0.179	162.7rpm	
SM(15.0)		6345.0ps	13.26kts	0.174	156.6rpm	
		5517.4ps	12.78kts	0.168	149.7rpm	

図 53 推進性能推定結果サンプル

6 . CFD 計算サーバーの導入

船型開発や改良をした際の船型評価には、水槽試験や CFD 計算が有効であると認識しているが、自社に設備や人材がなく外注せざるを得なかった。外注すると結果を受け取るまでに時間が掛かるため、船型を確定させるまでに時間が掛かってしまう。そこで自社で CFD 計算サーバーを導入することで、さらなる初期検討を高速化し営業力を強化する。

テクノスター社の CFD 計算サーバーとソフトウェア Jupiter-CFD を導入した。この CFD は船体オフセットを入力すると計算モデルを作成し簡易的な設定で抵抗計算、自航計算をすることができる。ソルバーには OpenFOAM を用いておりランニングコストも抑えられる。現在、チュートリアルを終え CFD 計算を本格的に進めるため、習熟度を上げるトレーニングを開始している。図 54 に Jupiter-CFD の画面を示す。

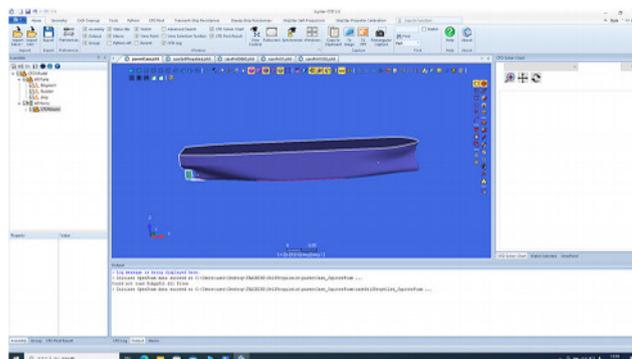


図 54 Jupiter-CFD の画面