

報告書 01322032

Report No. 22320

下ノ江造船株式会社 御中

表 題 :

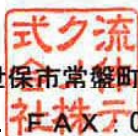
H503 7500m<sup>3</sup> LPG Carrier の船型変更  
および CFD による性能推定



流体テクノ(株)

〒857-0053 長崎県佐世保市常盤町 1-7 6 階

TEL : 0956-42-1685, FAX : 0956-42-1690



H503 7500m<sup>3</sup> LPG Carrier の船型変更  
および CFD による性能推定

承認	査閲	作成
		

令和4年8月31日

## H503 7500m<sup>3</sup> LPG Carrier の船型変更およびCFDによる性能推定

H503 は S-1506 (7500m<sup>3</sup> LPG Carrier) の船体平行部を 1.4m 延長させた船型である。その船型の船体周りの流れおよび波形を CFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) を用いて評価した。さらに CFD で求めた抵抗要素および自航要素を水槽試験相当 (EFD) の値に変換し、実船の推進性能を予測した。CFD と EFD の相関には S-1506 の CFD 結果と水槽試験結果の相関係数を用いた。

以下に船型および推進性能について示す。

### 1. 船体主要目等

本船の船体主要目、装着される主機関および推進器は次のとおりである。

#### 船体

垂線間長さ	114.400m
船幅	19.000m
型深さ	8.950m
計画喫水	6.750m

#### 主機関

主機 : 1 基  
最大出力 : 2800 kW (MCR) × 133.9 rpm  
常用出力 : 2380 kW (85% MCR) × 126.8 rpm

#### 推進器

プロペラ : FPP 1 軸  
直径 : 4.250m  
翼数 : 4 翼

## 2. 船型変更の概要

本船は1基1軸1舵の7500m<sup>3</sup> LPG Carrierである。船首にバルバスバウを有している。S-1506 (7500m<sup>3</sup> LPG Carrier) の船体平行部を1.4m 延長した船型である。この船型をH503(ver.A)とした。船体諸元を表1に、船首尾プロファイル、正面図およびCp曲線を図1に示す。

表1 船体諸元

船型	H503 ver.A					
Scale	1/18.1380					
状態	Scantling		Propane draft		Trial	
サイズ	実船	CFDモデル	実船	CFDモデル	実船	CFDモデル
Lpp [m]	114.400	6.3072	114.400	6.3072	114.400	6.3072
Lwl [m]	116.800	6.4395	116.800	6.4395	116.800	6.4395
df [m]	6.750	0.3721	5.170	0.2850	3.750	0.2067
dm [m]	6.750	0.3721	5.570	0.3071	4.500	0.2481
da [m]	6.750	0.3721	5.970	0.3291	5.250	0.2894
trim [%Lpp]	0.000		0.699		1.311	

### 3. CFD 計算

#### 3-1. CFD 計算の骨子

船型変更を行った H503 船型の抵抗要素をシーメンス PLM ソフトウェア社の“STAR-CCM+ ver. 13”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体、舵、ビルジキールとした。格子数は計算時間と計算数を考慮して約 500 万格子とした。船体は拘束するが沈下、トリムは自由とした。したがって、船速による船体沈下、トリム影響も計算に考慮されている。Scantling 状態、Propane draft 状態、Trial 状態において CFD 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。

さらに、H503 船型の自航要素をシーメンス PLM ソフトウェア社の“STAR-CCM+ ver. 13”を用いて計算した。格子数は約 1050 万とした。計算領域は、船速によるシンケージ、トリムおよび船体周りの波形を考慮している。プロペラは Goldstein によるスラスト、トルクの最適分布理論に基づくプロペラ体積力モデルを採用し、プロペラの単独性能は相関船の水槽試験と同一のものを用いた。Scantling 状態、Propane draft 状態、Trial 状態において CFD 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。

H503 船型の CFD 計算結果に類似船の相関を適用して、水槽試験相当の結果に変換した。計算設定を表 2 に示す。計算に用いた格子の例として、Propane draft 状態の格子を図 2 から図 6 に示す。

表 2 CFD 計算設定

計算コード	STAR-CCM+ Ver.13	
解析モデル	非定常解析	
乱流モデル	RANS	
渦粘性モデル	SST k- $\omega$	
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500万格子	
	自航 約1050万格子	
レイノルズ数	$3.7 \times 10^6 \sim 1.03 \times 10^7$	
フルード数	0.0900 $\sim$ 0.2500	
Y+	40	
プロベラモデル	プロベラ体積力モデル (Goldstein)	
プロベラ直径	実船	4.2500 m
	CFDモデル	0.2343 m

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	-1.6Lpp $\sim$ 1.0Lpp	-1.6Lpp $\sim$ 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		
			Fn	Vs	
抵抗計算	Scantling	8	Fn	0.0900 $\sim$ 0.2400	
			Vs	5.92 $\sim$ 15.79	
自航計算		3	Fn	0.1900 $\sim$ 0.2300	
			Vs	12.50 $\sim$ 15.13	
抵抗計算		Propane draft	8	Fn	0.0900 $\sim$ 0.2500
				Vs	5.92 $\sim$ 16.45
自航計算	3		Fn	0.2000 $\sim$ 0.2400	
			Vs	13.16 $\sim$ 15.79	
抵抗計算	Trial		8	Fn	0.0900 $\sim$ 0.2500
				Vs	5.92 $\sim$ 16.45
自航計算		3	Fn	0.2000 $\sim$ 0.2400	
			Vs	13.16 $\sim$ 15.79	

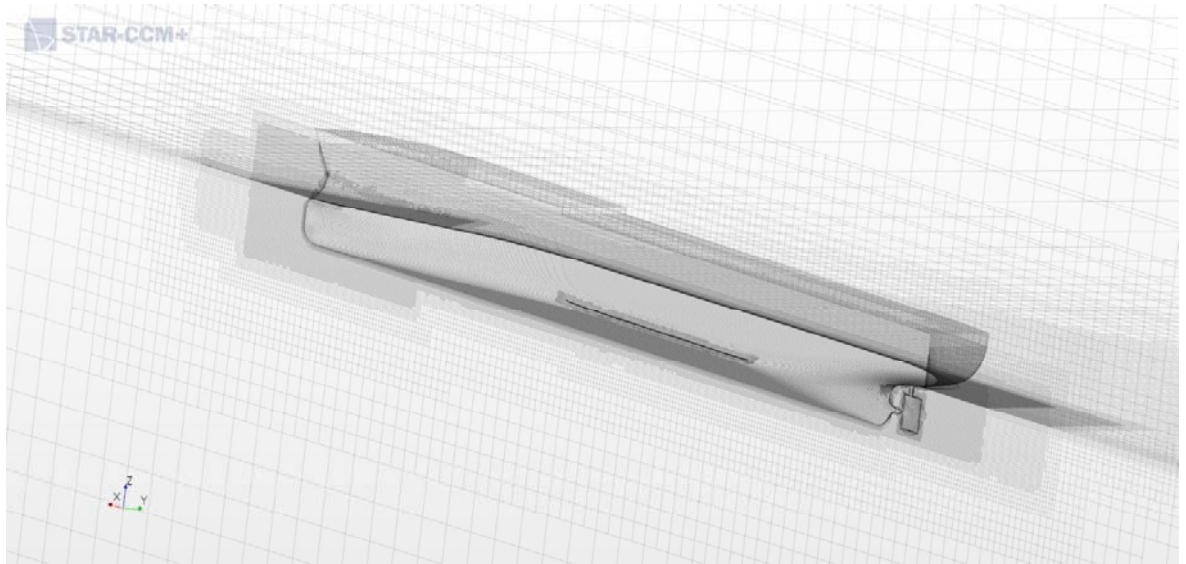


図2 計算格子 (Propane draft 状態)

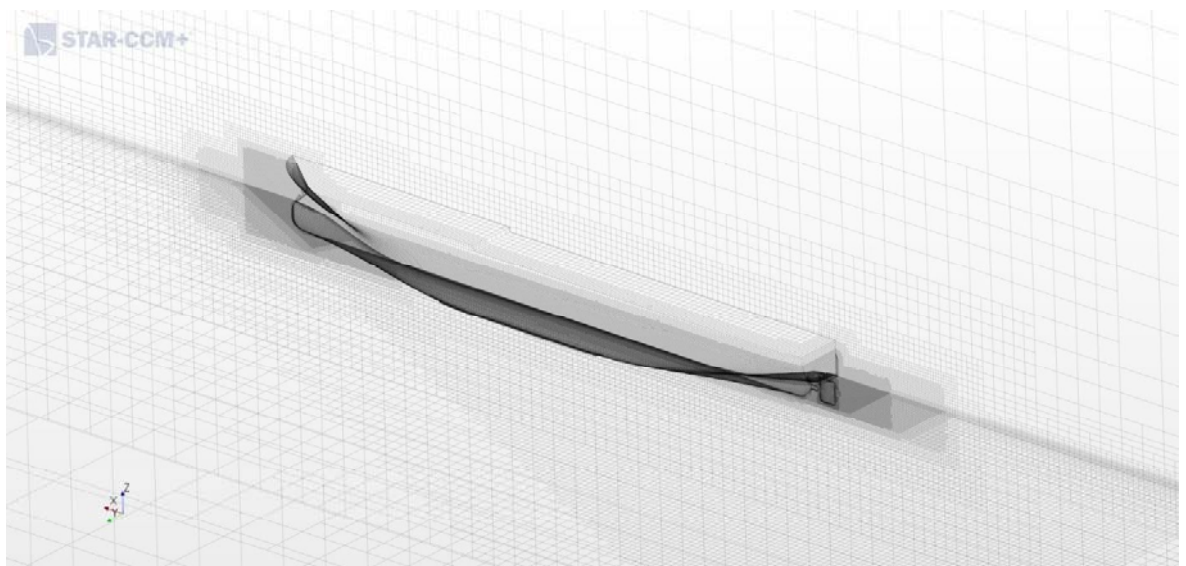


図3 計算格子 (Propane draft 状態)

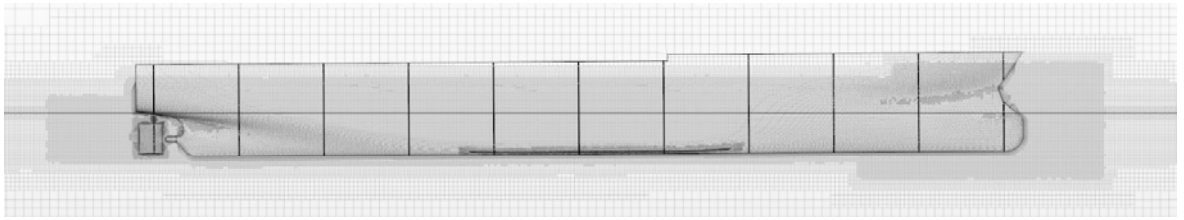


图 4 计算格子 (Propane draft 状态)

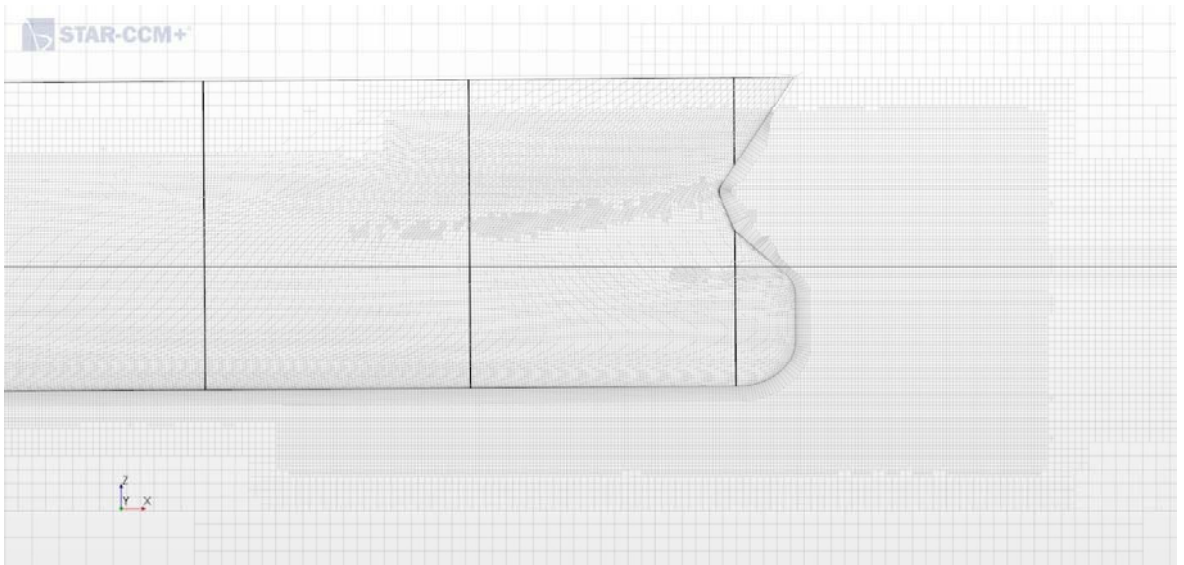


图 5 计算格子 (Propane draft 状态)

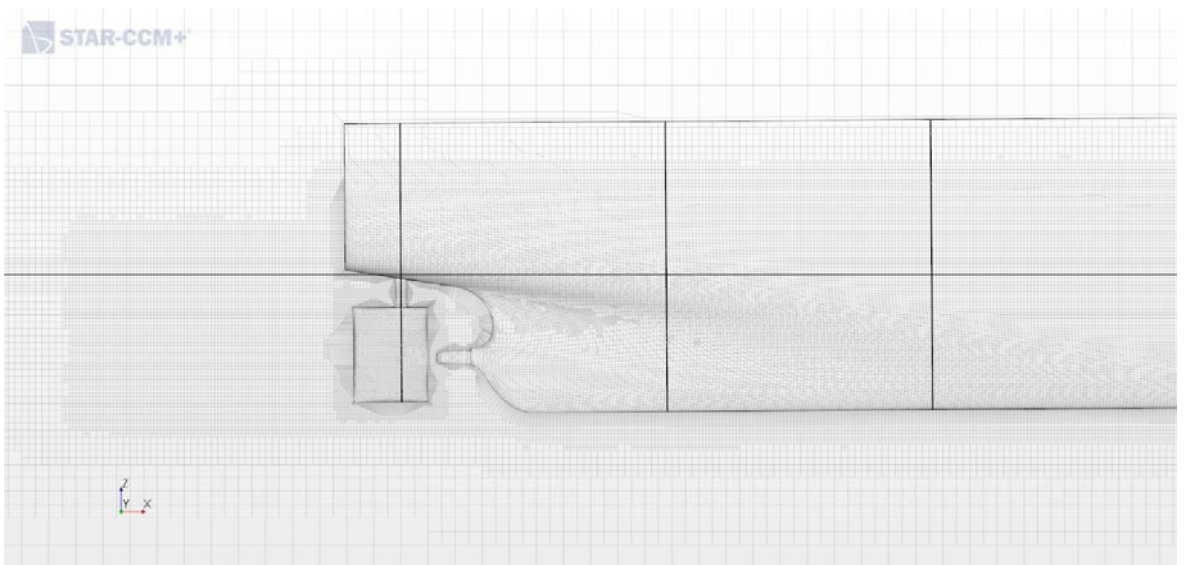


图 6 计算格子 (Propane draft 状态)



### 3-2. 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。

### 3-3. 船型の評価

H503 船型の CFD 計算結果の中から、Propane draft 状態  $F_n=0.22$  (14.5knots 相当) における波紋の鳥観図を図 7 および図 8 に、船体表面圧力分布および波紋図を図 9 に示す。S-1506 船型の同様の結果を図 7、図 8 および図 10 に示す。S-1506 から H503 への船型変更は平行部の 1.4m 延長のみであるため、船首および船尾の造波、船体表面の圧力分布、伴流分布に顕著な差は見られない。伴流分布の違いはプロペラ直径の差異によるものである。

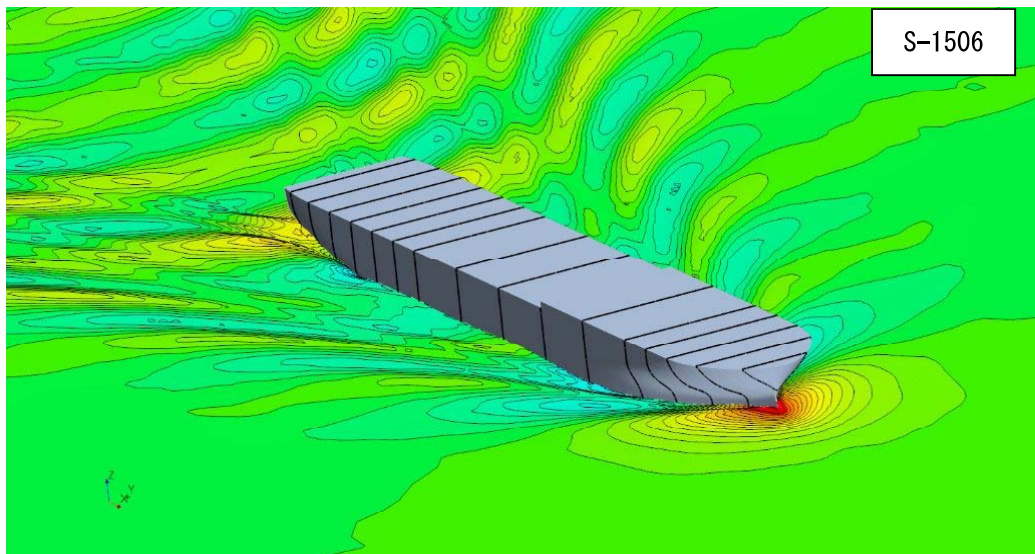
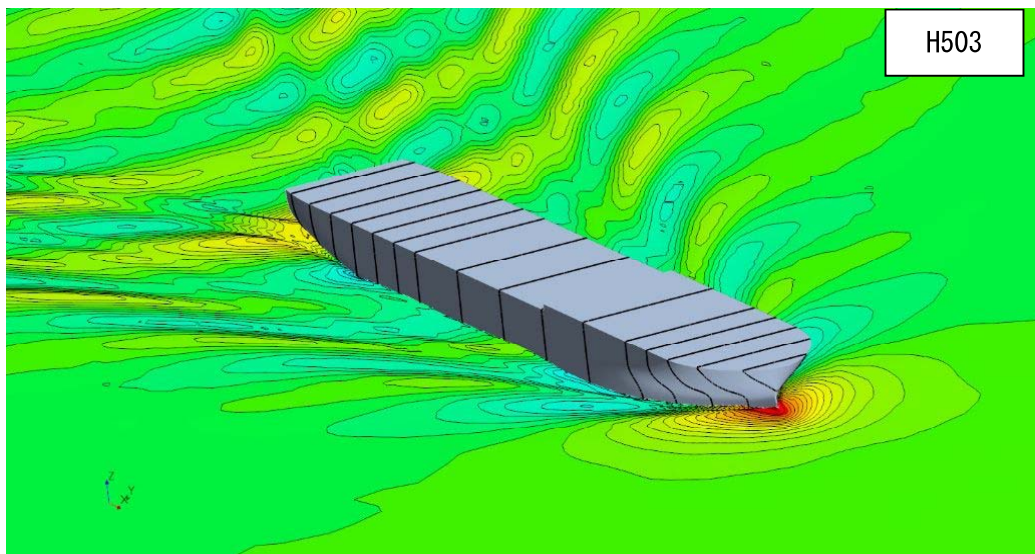


図 7 波紋の鳥観図 (船首側)

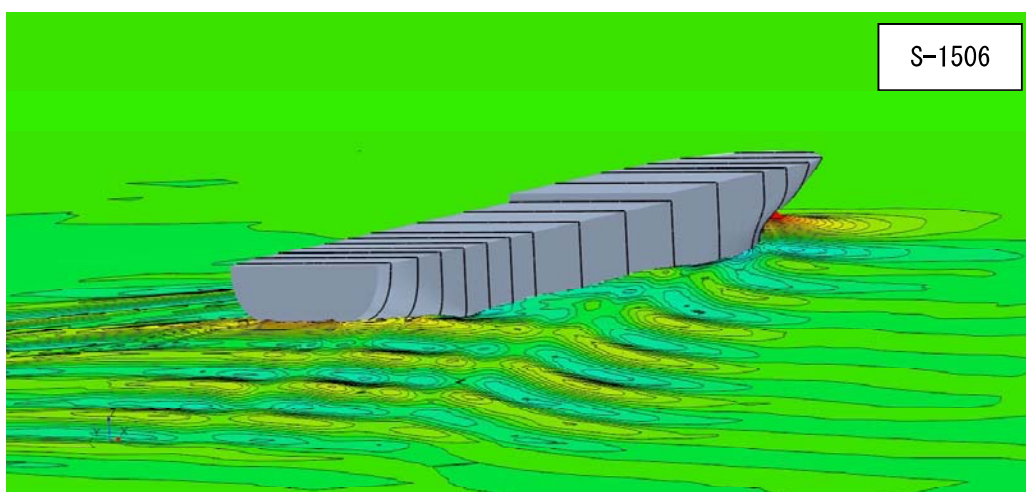
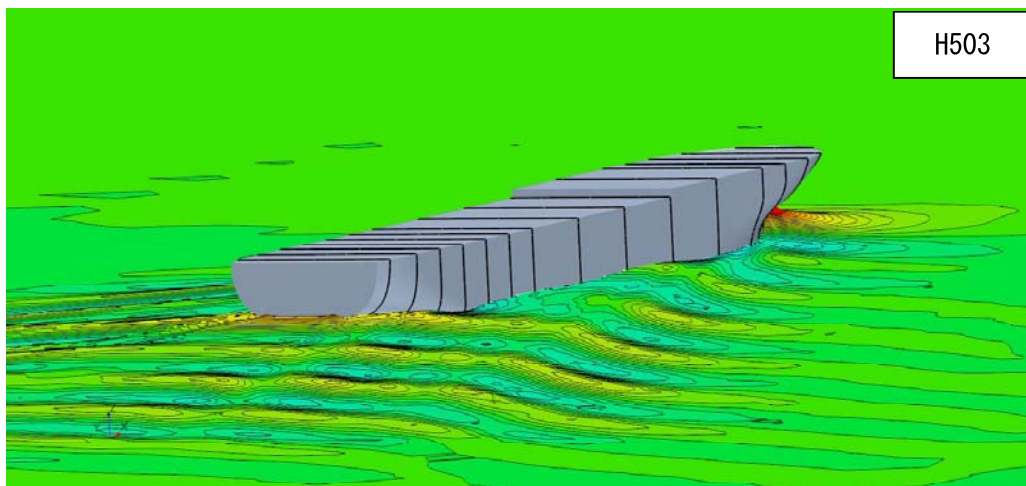
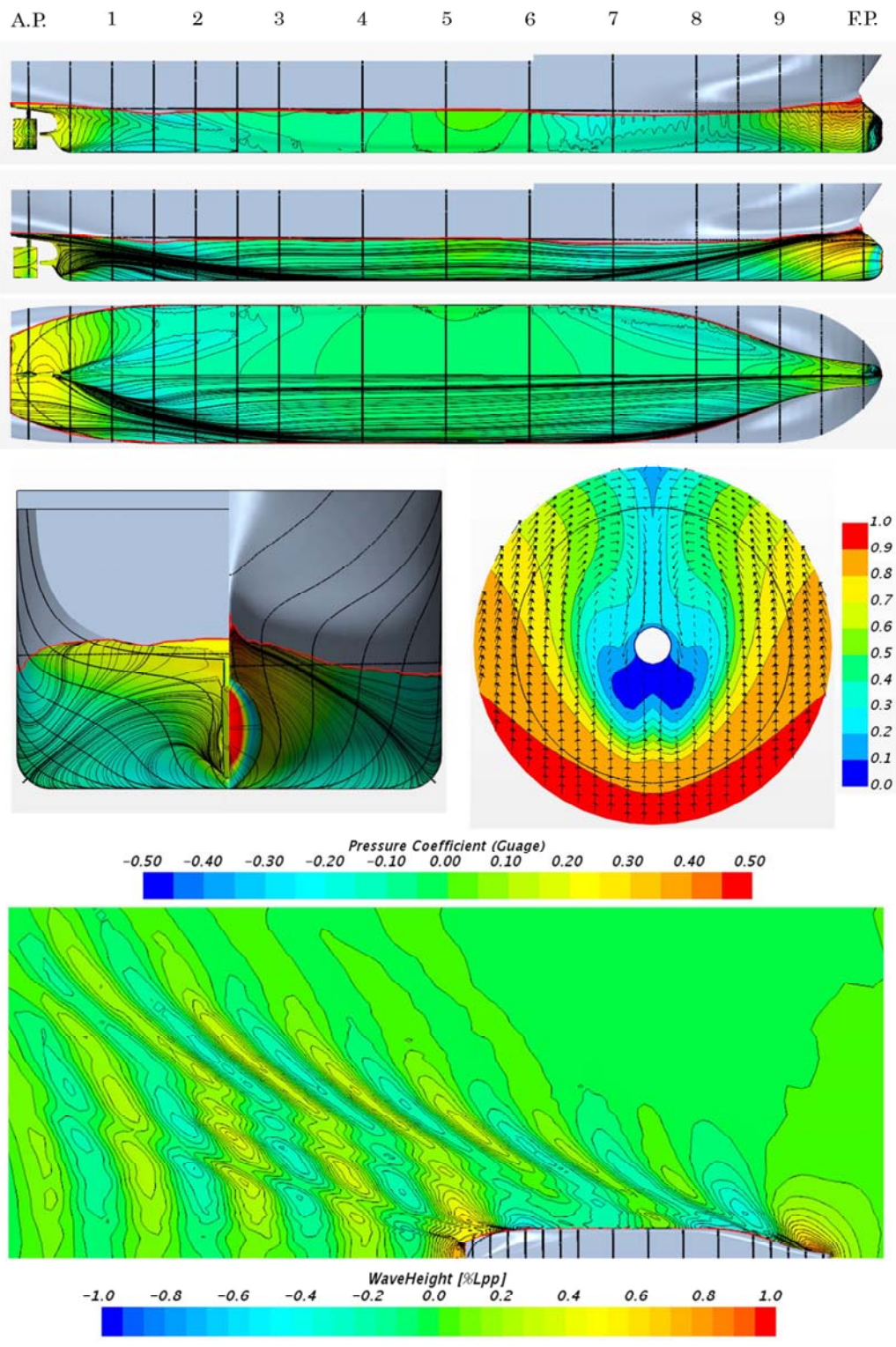


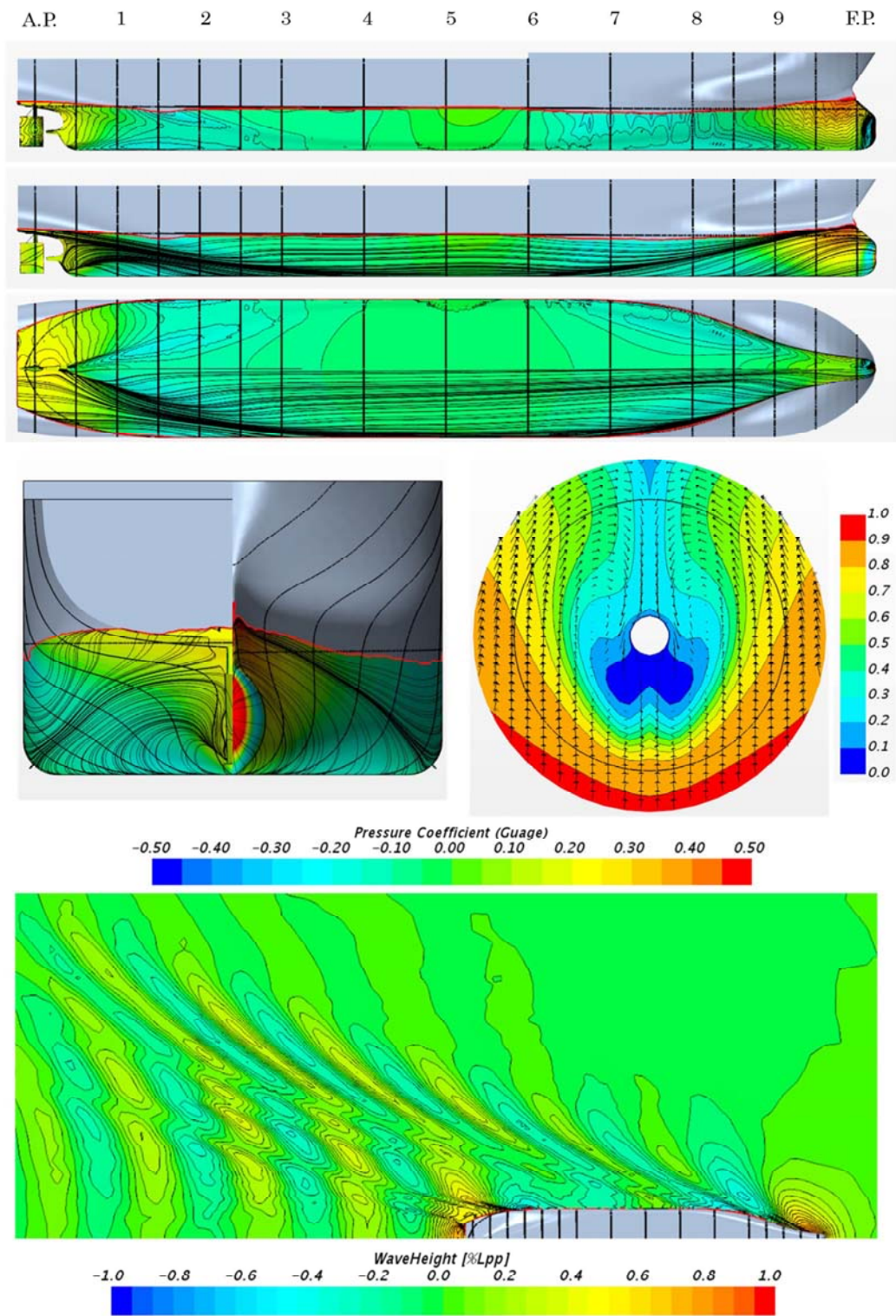
図 8 波紋の鳥瞰図（船尾側）





H503 Ver.A Propane draft 14.5kts (Trim = 0.8m, Fn = 0.220)

図9 H503 船体表面圧力分布、波紋図およびプロペラ面内伴流分布



S-1506 Propane draft 14.4kts (Trim = 0.8m,  $F_n = 0.220$ )

図 10 S-1506 船体表面圧力分布、波紋図およびプロペラ面内伴流分布

### 3-4. 抵抗要素

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いた剰余抵抗を無次元化し、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。さらに、CFD で求めた  $rR$  を相関船の CFD と水槽試験結果 (EXP) の相関を用いて、水槽試験相当 (EFD) の値に変換した。また波がほとんど立たない船速 ( $Fn=0.09$  と設定) の CFD 計算結果から CFD の形状影響係数  $K$  を求め、相関を適用し EFD の  $K$  に変換した。EFD の  $rR$  と  $K$  から、造波抵抗係数  $rW$  を算出した。

### 3-5. 自航要素

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 は水の密度  $\rho$ 、船速  $V_m$ 、浸水面積  $S_m$  から次式で求める。

$$SFC = (C_{fm} - C_{fs}) \cdot 0.5 \rho V_m^2 S_m$$

$C_{fm}$ ,  $C_{fs}$  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、トルクおよび自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。

#### 4. 実船の推進性能推定

実船の推進性能を推定した結果は以下の通りである。有効馬力の推定は CFD から求めた  $rW$  (EFD) を用いた 3 次元外挿法とした。 $\Delta C_f$  は S-1506 の性能推定に用いた値と同じとした。自航要素も CFD から求めた値を用いた。H503 はプレスワール系省エネ装置である「Eco-Stator」を装着する予定であるため、Eco-Stator を装着したときの推進性能も推定した。Eco-Stator は主に自航要素に影響を与えることが水槽試験で明らかとなっている。そのため、装着前の自航要素に Eco-Stator の影響を考慮しなければならない。Eco-Stator を装着した際の自航要素の影響量は S-1506 と同じとした。プロペラ効率は MAU チャートに基づき、Eco-Stator 有無でそれぞれ設計した。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。