

報告書 01321032

Report No. 21210

下ノ江造船株式会社 御中

表 題 :

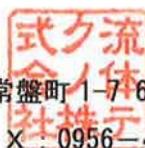
H503N (7500m³LPG) の CFD を用いた船型改良



流体テクノ(株)

〒857-0053 長崎県佐世保市常盤町1-76階

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



H503N (7500m³LPG) の CFD を用いた船型改良

承認	査閲	作成
		

令和3年11月30日

H503N 7500m³ LPG Carrier の CFD を用いた船型開発

7500m³ LPG Carrier の船型を CFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) を用いて船体表面の圧力、船体周りの流れおよび波形を評価しながら開発した。さらに CFD で求めた船体抵抗を水槽試験相当 (EFD) の抵抗に変換し実船の推進性能を予測した。CFD と EFD の相関には水槽試験結果のある主要目比が類似した船の相関係数を用いた。

以下に船型開発および推進性能について示す。

1. 開発船型の船体主要目等

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	113.000m
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 : 3300 kW (MCR) × 178 rpm

常用出力 : 2508 kW (76% MCR)

推進器

プロペラ : FPP 1 軸

直径 : 4.000m

翼数 : 4 翼

2. 船型開発の概要

本船は1基1軸1舵の7500^m LPG Carrierである。船首にバルバスバウを有している。本船の船型を設計する上で、留意しなければならない点はScantling状態におけるサービススピードとプロパン積載時の喫水における船速であった。Scantling状態とプロパン積載時の船首喫水は約1.6m程度の差がある。通常バルバスバウ形状では一方の喫水で効果を発揮できるように設計すると、もう一方の喫水で抵抗増となる恐れがある。そのため、本船の船首形状は、より厳しい条件であるプロパン積載時の喫水にバルバスバウの高さを調整し、Scantling状態では波切りを良くするためバルバスバウ上の喫水線のエントランス角を鋭角にするように設計した。また、船尾形状はマリナー型である。目標船速は、Scantling状態かつ主機関90%出力、シーマージン15%において約13.0knotsであり、プロパン積載時の喫水において、主機出力2066kWのときに13.8knots以上である。

本船の船型を開発するコンセプトは低抵抗・高効率船の開発である。低抵抗な船型にするため、与えられた設計条件の中で造波が小さくなるような船型を求めた。そのため、造波抵抗が小さい船型となったが、機関室のスペース確保のため船尾を肥えさせなければならず、粘性抵抗が大きい船型となった。しかしながら、この粘性により発生した渦を省エネ装置とプロペラで回収できるような船尾フレーム形状を求め、高効率な船型となった。水槽試験を実施した船型はver. Jであるが、水槽試験にて、船首に改良の余地が認められたため、最終船型はver. Nとなった。

本報告書ではCFD計算を用いて開発した船型ver. Jについて記載する。主要目を表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 水槽試験船型 ver. J の主要目

船型	H503N					
Scale	14.5697					
状態	SCANTLING		PROPANE LOAD		BALLAST	
サイズ	実船	CFDモデル	実船	CFDモデル	実船	CFDモデル
Lpp [m]	113.000	7.7558	113.000	7.7558	113.000	7.7558
Lwl [m]	113.000	7.7558	113.000	7.7558	113.000	7.7558
B [m]	19.000	1.3041	19.000	1.3041	19.000	1.3041
D [m]	8.950	0.6143	8.950	0.6143	8.950	0.6143
df [m]	6.750	0.4633	5.577	0.3828	3.870	0.2656
dm [m]	6.750	0.4633	5.577	0.3828	4.735	0.3250
da [m]	6.750	0.4633	5.577	0.3828	5.600	0.3844
trim [%Lpp]	0.000		0.000		1.531	

3. CFD 計算

3-1. CFD 計算

水槽試験をした ver. J 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 530 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、Propane draft、Ballast 状態において、 $Fn=0.1761$ から $Fn=0.2503$ の範囲で 7 点（約 11.4knots から約 16.2knots 相当）の船速について計算を行い、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、ver. J 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 1100 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。プロペラは無限翼数プロペラ理論によるプロペラ体積力モデルを採用し、プロペラの主要目および単独性能は相関船の水槽試験と同一のものを用いた。Scantling 状態において、 $Fn=0.2009$ (13.0knots 相当)、 $Fn=0.2132$ (13.8knots 相当)の船速について、Propane draft 状態において $Fn=0.2132$ (約 13.8knots 相当)の船速について計算を行い、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。

CFD 計算結果を水槽試験相当の結果に変換するために相関船の CFD 計算結果と水槽試験結果から相関係数を求めた。計算状態を表 1 に、計算設定を表 2 に示す。計算に用いた格子を図 2 から図 6 に示す。本報告書では Propane draft 状態についてのみ記載する。

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530万格子
	自航 約1100万格子
レイノルズ数	$1.22 \times 10^7 \sim 1.73 \times 10^7$
フルード数	0.176 ~ 0.250
プロペラモデル	プロペラ体積力モデル (Goldstein)
プロペラ直径	実船 4.0000m
	CFDモデル 0.2745m

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

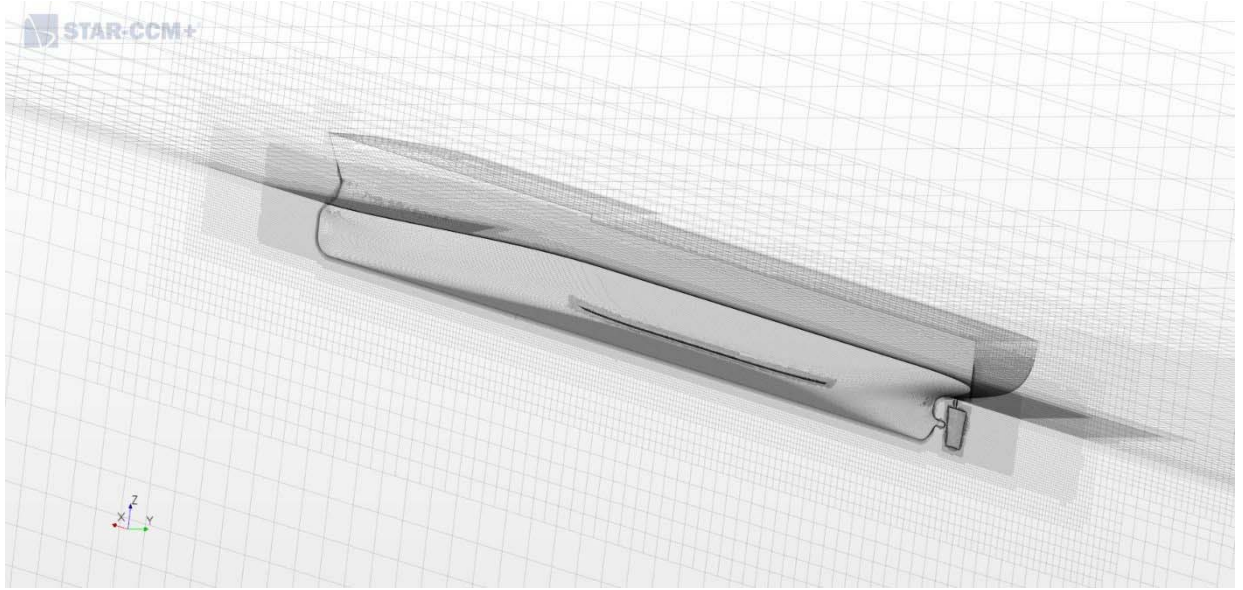


図 2 計算格子 (STAR-CCM+)

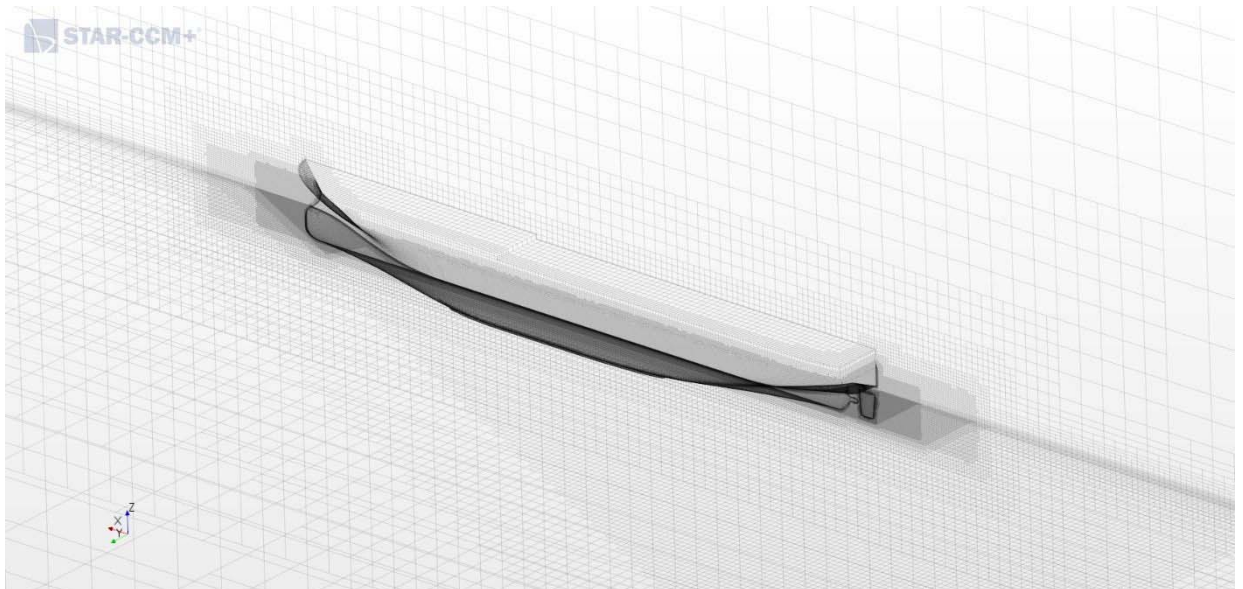


図 3 計算格子 (STAR-CCM+)

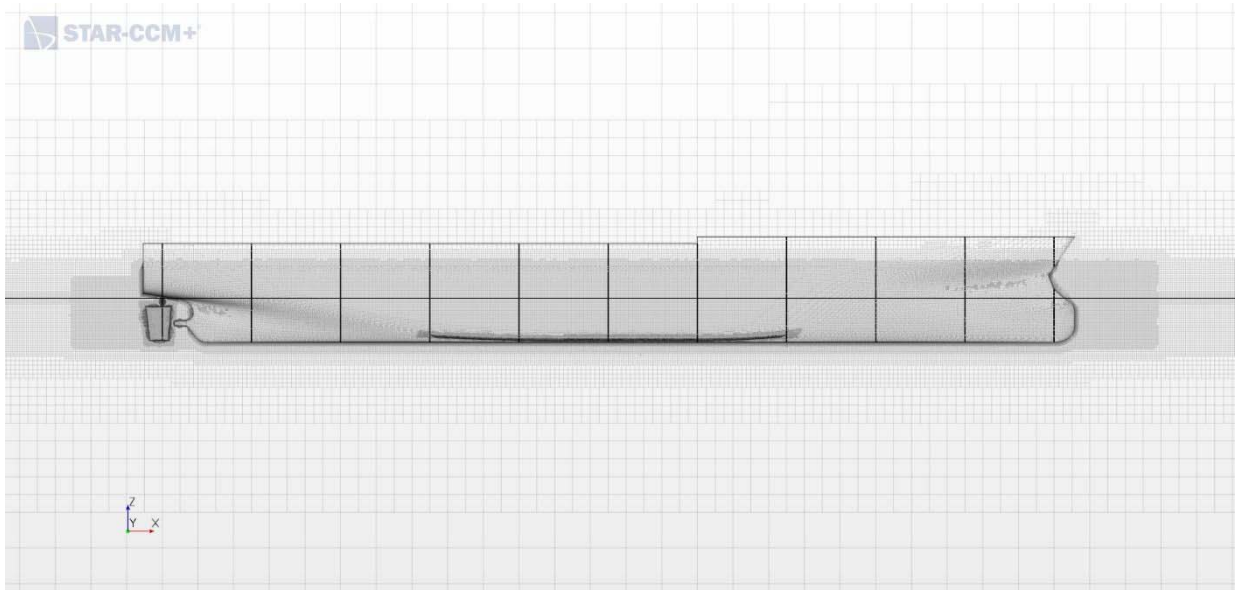


図 4 計算格子 (STAR-CCM+)

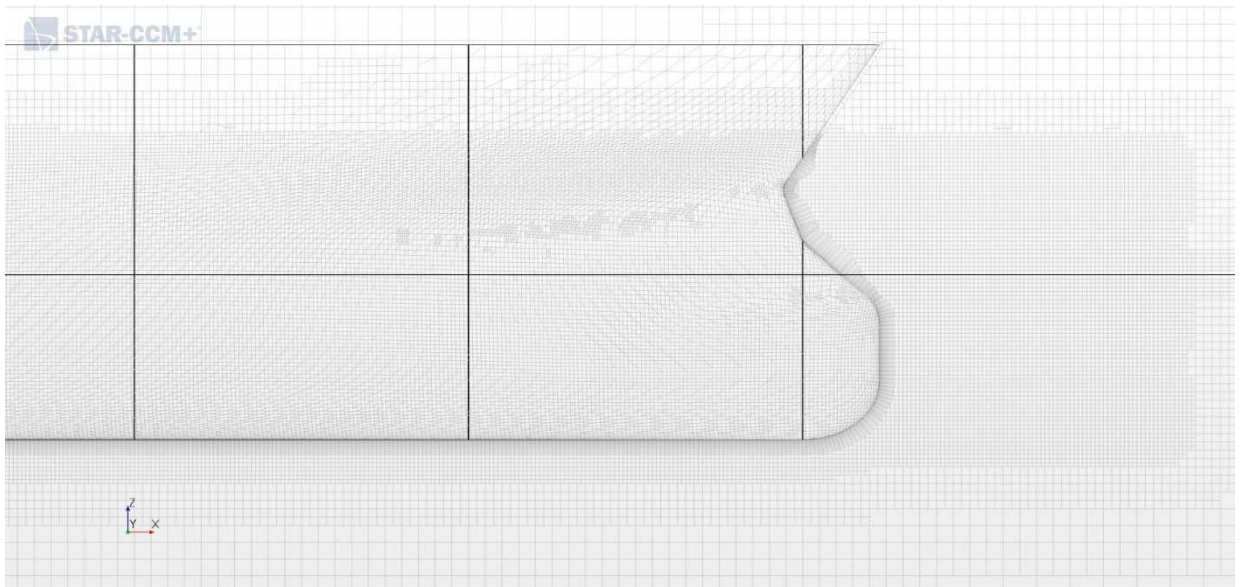


図 5 計算格子 (STAR-CCM+)

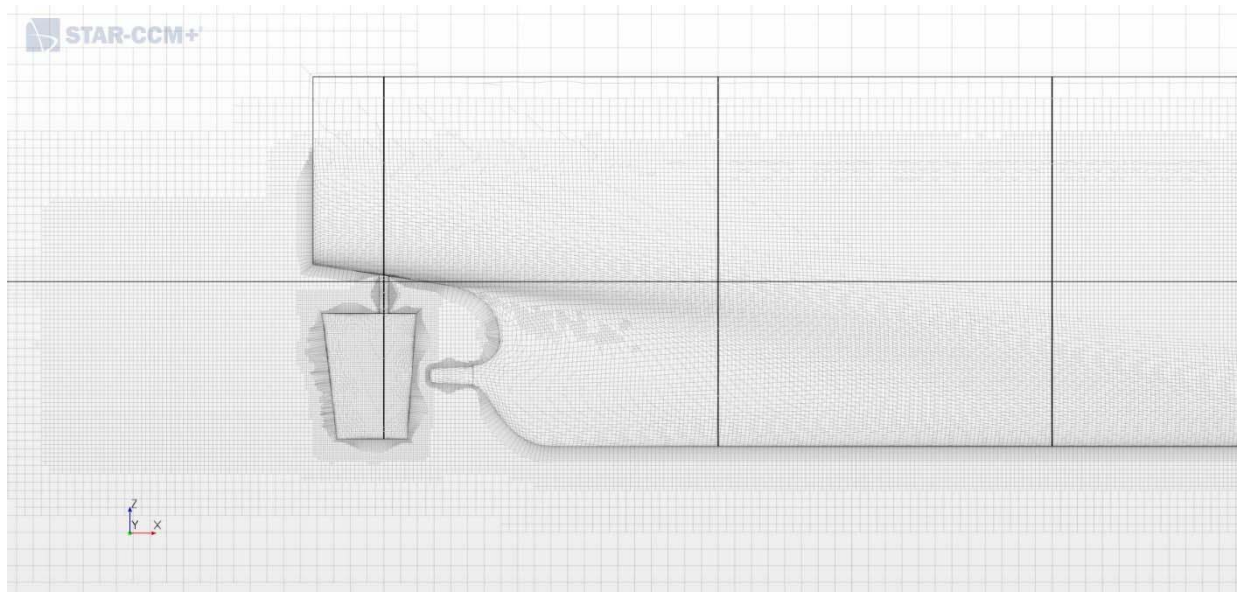


図 6 計算格子 (STAR-CCM+)

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

Ver. J 船型の CFD 計算結果の中から、Propane draft 状態 $F_n=0.2132$ (13.8knots 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。Original 船型の同様の結果を図 7、図 8 および図 10 に示す。船体表面圧力分布において船首端の正圧 (赤色の領域) の面積が Original 船型と比べると小さくなっている。また、船首端から発生している拡散波の角度も鋭角となっており、ver. J 船型の特徴的な船首形状の効果が表れている。船首肩部に肩波が見られるが、接岸する岸壁とマニホールドの位置関係からサイドタンジェンシーラインの位置が決められているため、船首の肩を削ることができず発生している。船尾肩部から発生している拡散波は、排水量分布や水線面形状の急激な変化により発生する。Ver. J 船型の船尾肩部から拡散波が発生しているが、Original 船型よりも曳波が小さいため、船尾端後方に残る波は Original より小さくなっている。船尾拡散波は喫水が深くなる、または船尾トリムとなれば軽減されると推察される。Ver. J 船型のプロペラ面内の伴流分布は、ビルジで発生した縦渦がプロペラ面内に収まっており、プロペラが推進効率として回収すると推察される。

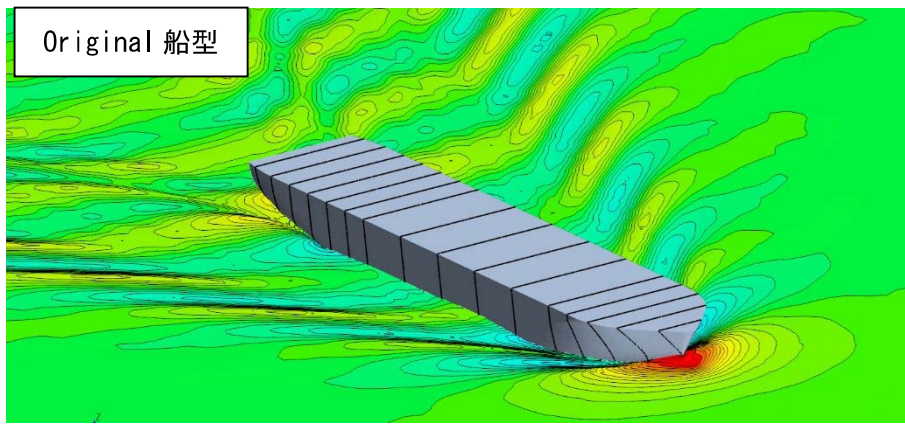
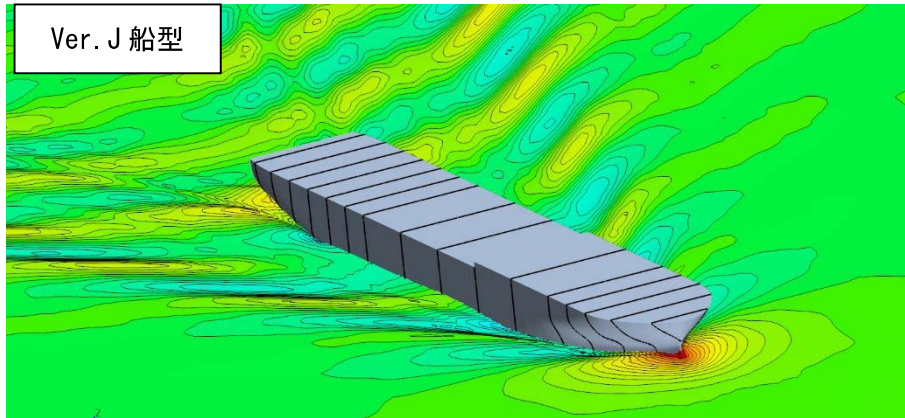


図7 波紋の鳥観図（船首側）

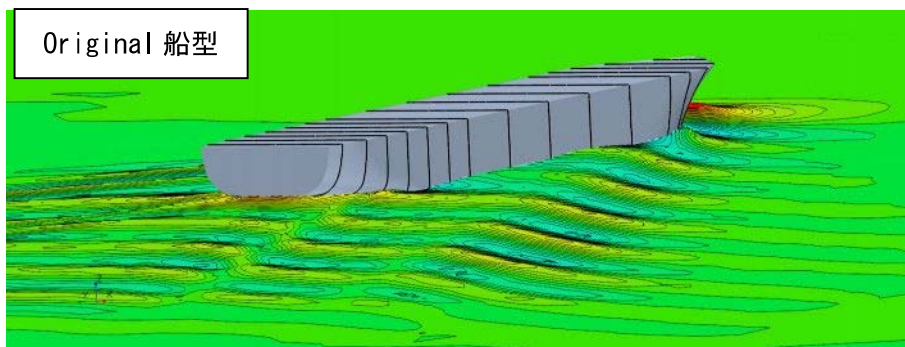
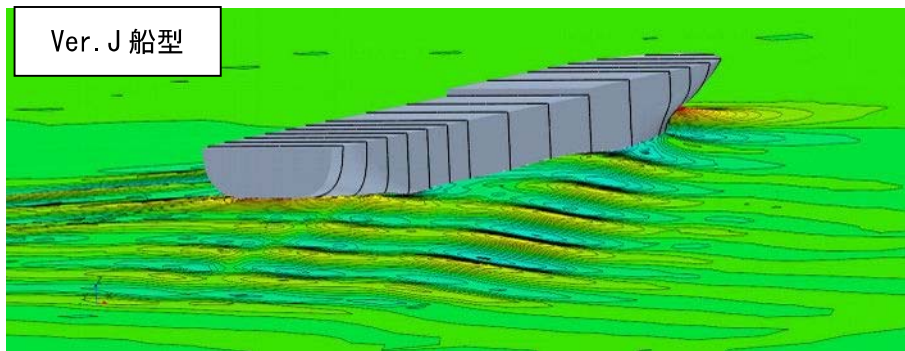
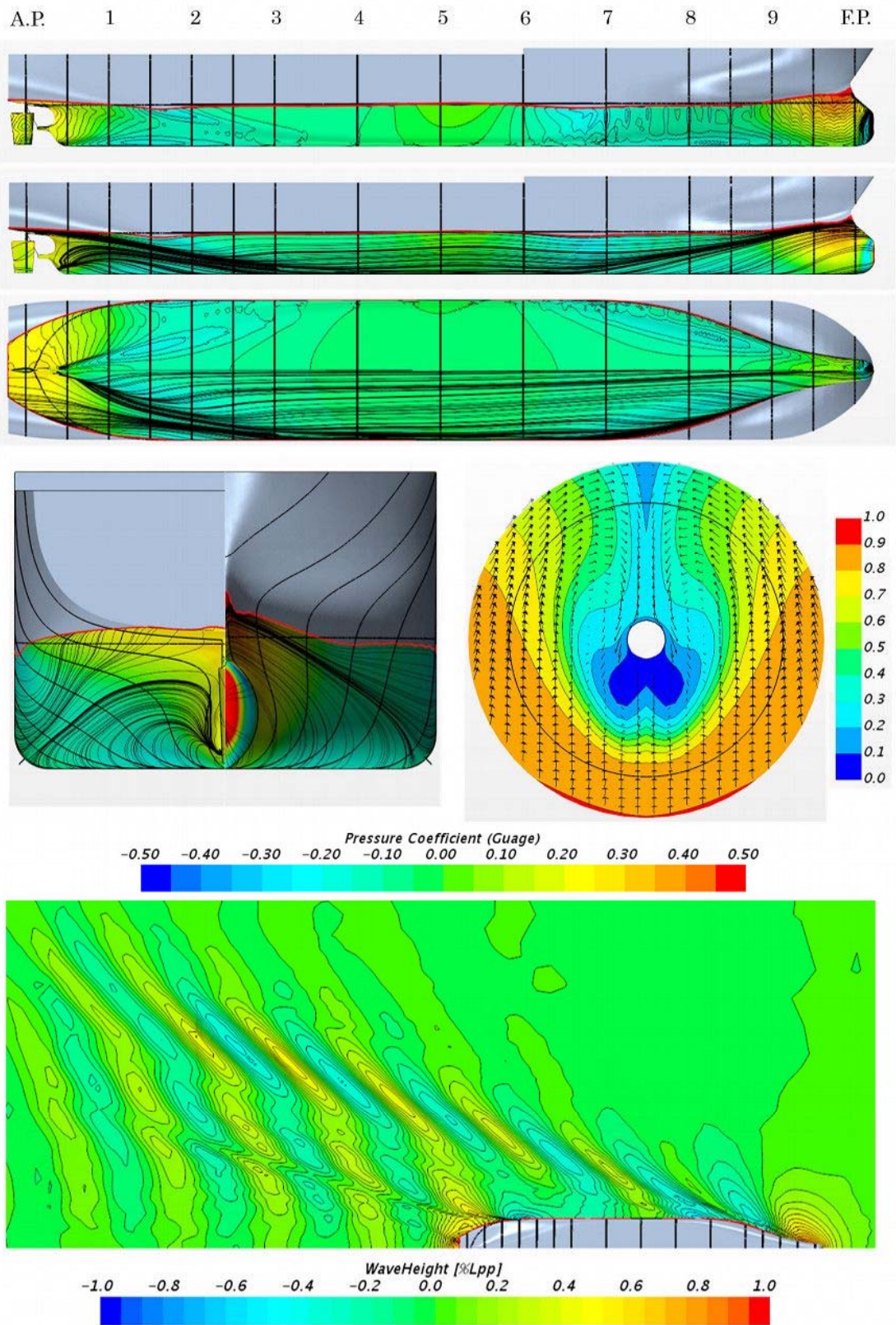
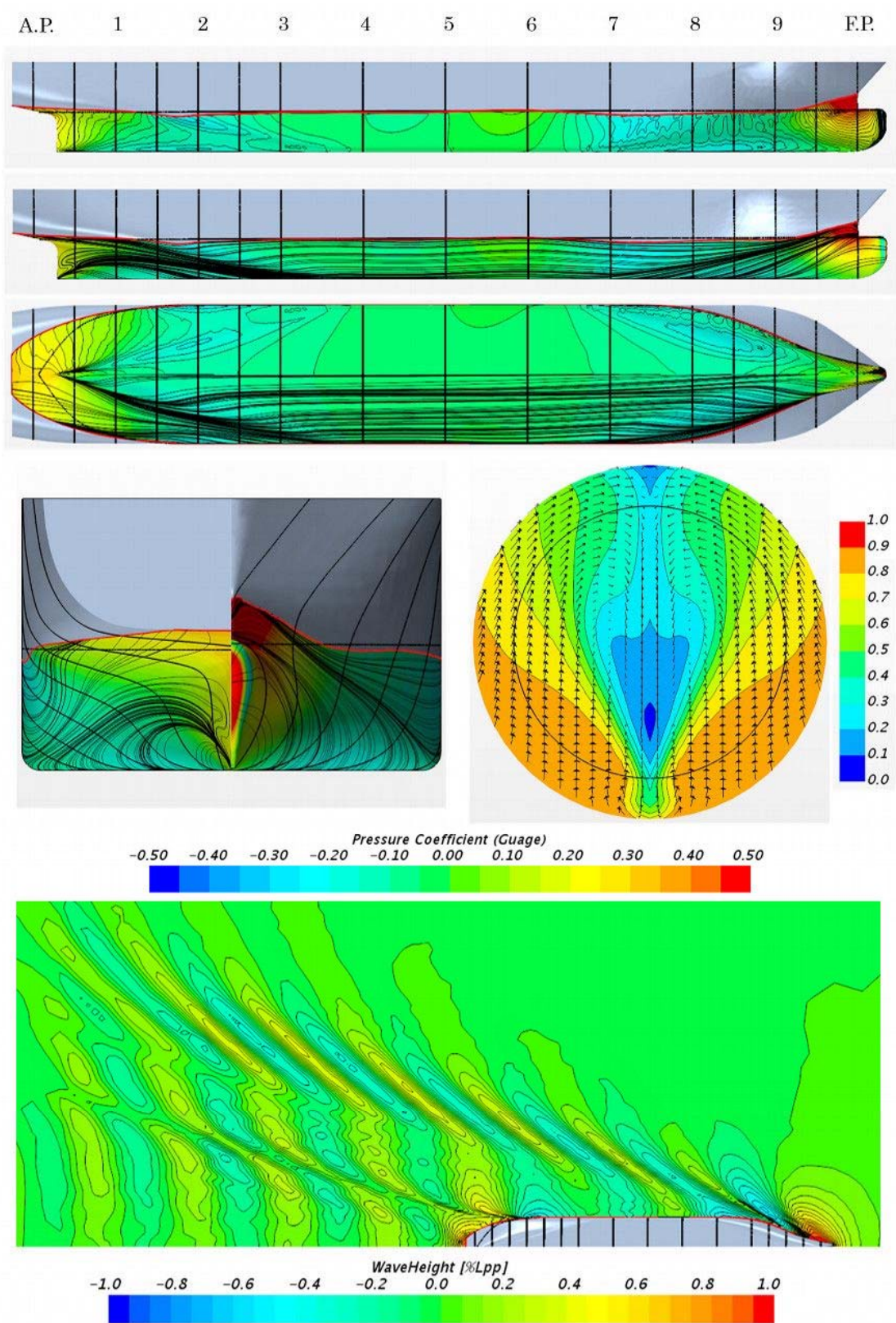


図8 波紋の鳥瞰図（船尾側）



H503N Ver.J Propane draft 13.8kts (EvenKeel, $F_n = 0.213$)

図9 ver.J 船体表面圧力分布、波紋図およびプロペラ面内伴流分布



H503N Original Propane draft 13.8kts (EvenKeel, $F_n = 0.213$)

図 10 Original 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 Shoenherr 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。

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 ρ 、船速 V_m 、浸水面積 S_m から次式で求める。

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

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。有効馬力の推定には CFD から求めた rR (EFD) を用いた 2 次元外挿法とした。 ΔC_f は造船所指示値とした。自航要素も CFD から求めた値を用いた。プロペラ効率は MAU チャートに基づいた。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。

[添付資料]

用語定義 A - 1

船型 ver. J の CFD 計算結果

(1) Propane draft 状態	11.4knots	. . . . .	A - 4
(2) Propane draft 状態	12.2knots	. . . . .	A - 5
(3) Propane draft 状態	13.0knots	. . . . .	A - 6
(4) Propane draft 状態	13.8knots	. . . . .	A - 7
(5) Propane draft 状態	14.6knots	. . . . .	A - 8
(6) Propane draft 状態	15.4knots	. . . . .	A - 9
(7) Propane draft 状態	16.2knots	. . . . .	A - 10

用語定義

NOMENCLATURE

(1) HULL

Lpp	Length between perpendiculars (m)
Lwl	Length of designed load waterline (m)
B	Breadth moulded (m)
D	Depth moulded (m)
d	Draught moulded (m), suffix a:aft m:midsection f:fore
C_B , C_b	Block coefficient C_B , $C_b = \nabla / (Lpp \cdot B \cdot d)$
C_p	Prismatic coefficient $C_p = C_B / C_M$
C_M , C_m	Midship section coefficient $C_M = A_M / (B \cdot d)$
A_M	Area of midship section
C_W	Waterplane coefficient $C_W = A_W / (Lpp \cdot B)$
A_W	Area of waterplane
Lcb	Longitudinal center of buoyancy from midship in percent of Lpp (for fore from midship(-) and for aft(+))
∇_n	Displacement volume (m ³) naked
∇_a	Displacement volume (m ³) with all appendages
Δ_n	Displacement weight (ton) naked
Δ_a	Displacement weight (ton) with all appendages
S	Wetted surface with all appendages (m ²)
S_0	Naked wetted surface (m ²)
S_r	Rudder wetted surface (m ²)
S_b	Bilge Keel wetted surface (m ²)
I	Immersion of shaft center line at propeller plane (m)
Hs	Shaft center height at propeller plane (m)

(2) PROPELLER

D, D_p	Diameter of propeller (m)
R	Radius of propeller (=D/2)
A_E , E. A. R	Expanded area ratio

(3) RESISTANCE

V	Speed of ship (m/s)	
V _A	Advanced speed of propeller (m/s)	
V _S	Speed of ship (knot)	
Fn	Froude number	$Fn = V / \sqrt{gLwl}$
Rn	Reynolds number	$Rn = VLwl / \nu$
R _t	Total resistance (kg)	$C_t = R_t / 0.5 \rho V^2 S$
C _t , r _t	Total resistance coeff.	$r_t = R_t / \rho V^2 \nabla^{2/3}$
R _R	Residual resistance (kg)	$C_R = R_R / 0.5 \rho V^2 S$
C _R , r _R	Residual resistance coeff.	$r_R = R_R / \rho V^2 \nabla^{2/3}$
R _W	Wave resistance (kg)	$C_W = R_W / 0.5 \rho V^2 S$
C _W , r _W	Wave resistance coeff.	$r_W = R_W / \rho V^2 \nabla^{2/3}$
R _F	Frictional resistance (kg)	$C_F = R_F / 0.5 \rho V^2 S$
C _F , r _F	Frictional resistance coeff.	$r_F = R_F / \rho V^2 \nabla^{2/3}$
R _V	Viscous resistance (kg)	$C_V = R_V / 0.5 \rho V^2 S$
C _V , r _V	Viscous resistance coeff.	$r_V = R_V / \rho V^2 \nabla^{2/3}$

Friction Formulae

$$C_f = 0.455 / \left(\log_{10} \frac{VLwl}{\nu} \right)^{2.58} \text{ --- Prandtl - Schlichting}$$

$$0.242 / \sqrt{C_f} = \log_{10} \left(\frac{VLwl}{\nu} C_f \right) \text{ --- Schoenherr}$$

$$C_f = 0.075 / \left(\log_{10} \frac{VLwl}{\nu} - 2.0 \right)^2 \text{ --- ITTC1957}$$

$$C_f = 0.066 / \left(\log_{10} \frac{VLwl}{\nu} - 2.03 \right)^2 \text{ --- Hughes}$$

K	Form factor	$1+k=C_V/C_F$
---	-------------	---------------

ΔC_F , DCF Roughness allowance coefficient for Schoenherr's friction line in general

ρ Density of water (kg. sec²/m⁴); 104.61 (15°C) for salt, 101.87 for fresh water

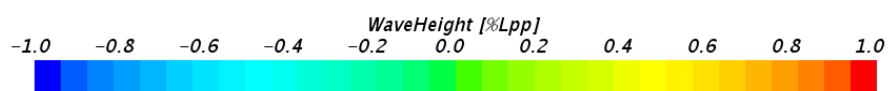
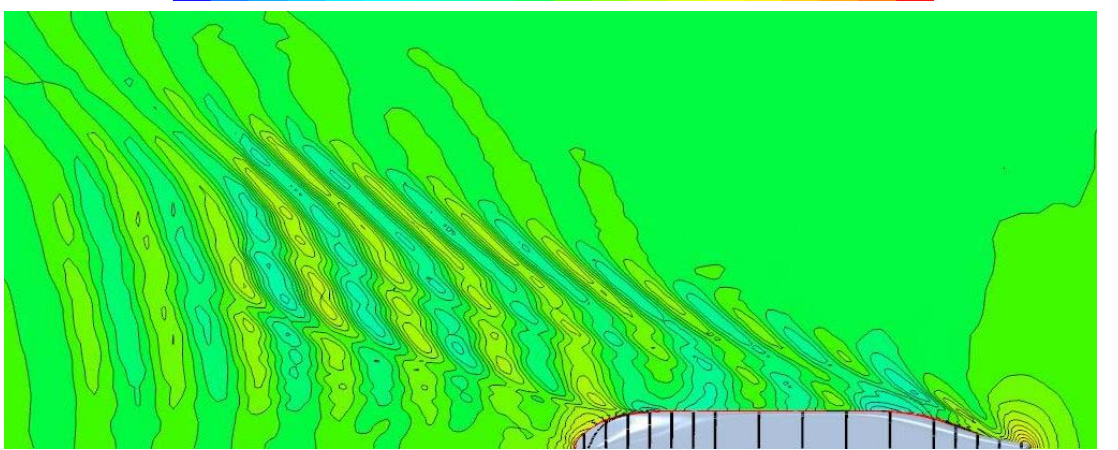
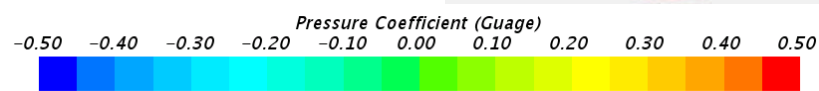
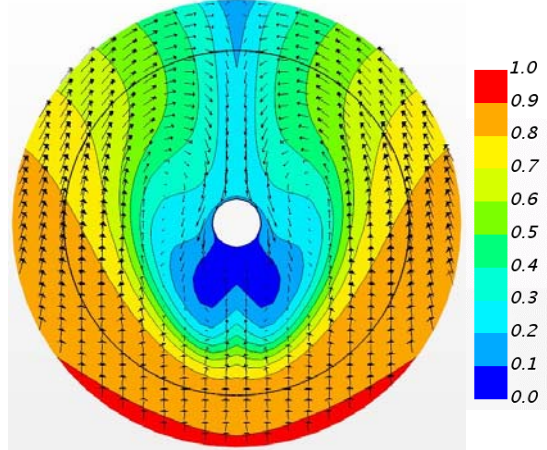
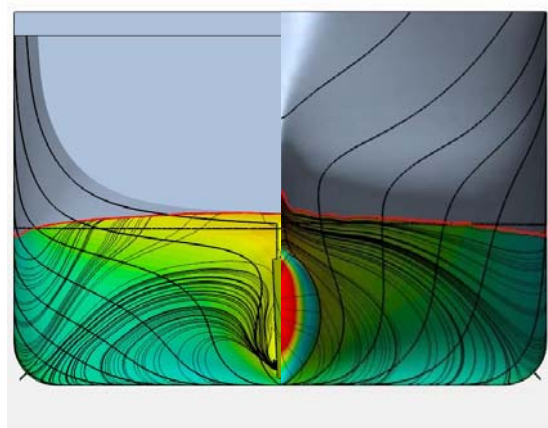
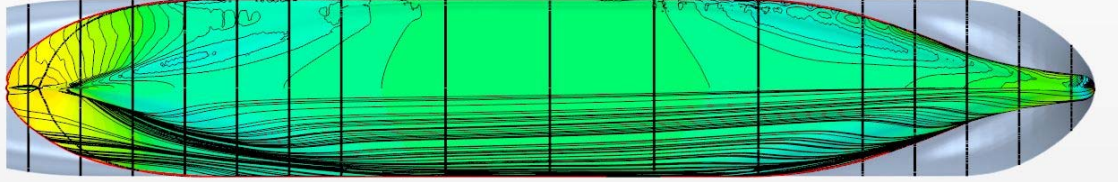
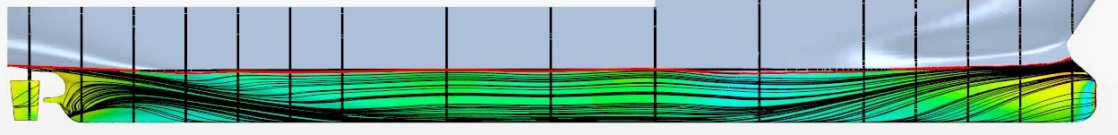
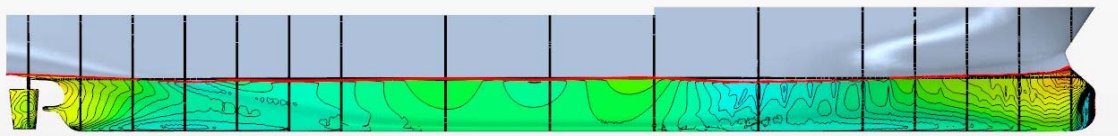
ν Kinematic viscosity ; 1.1883*10⁻⁶ (15°C) for salt,
1.1390*10⁻⁶ for fresh water

g Gravity acceleration (m/sec²)

(4) PROPULSION

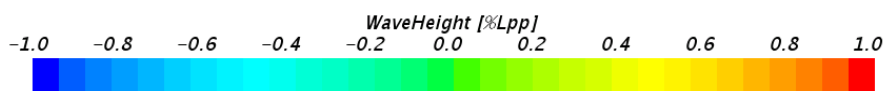
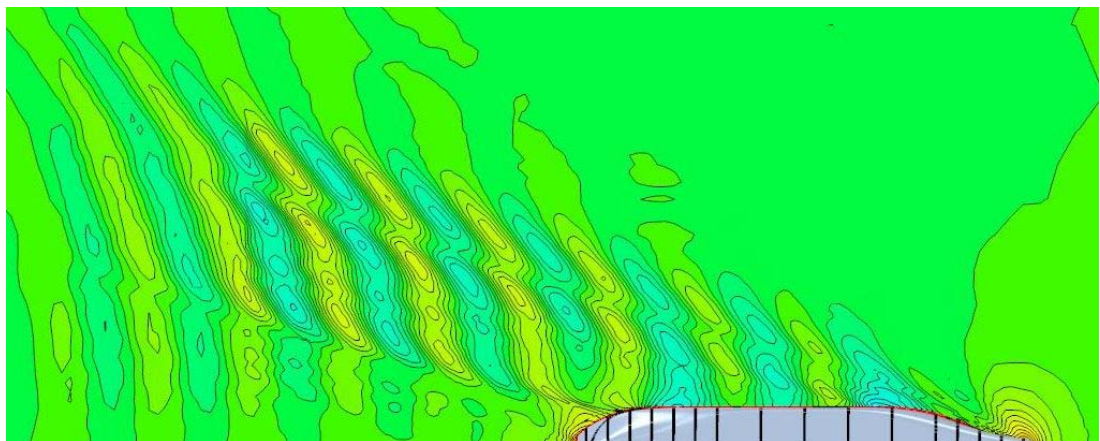
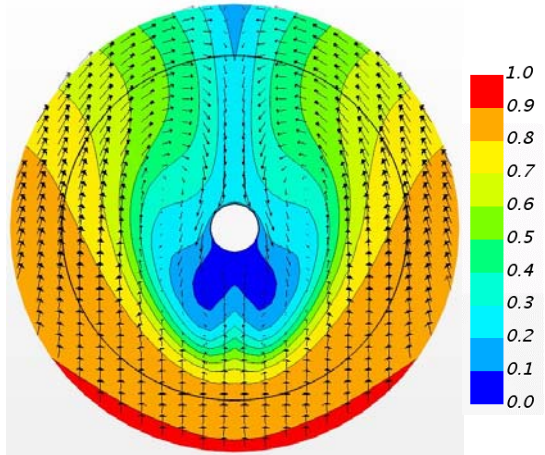
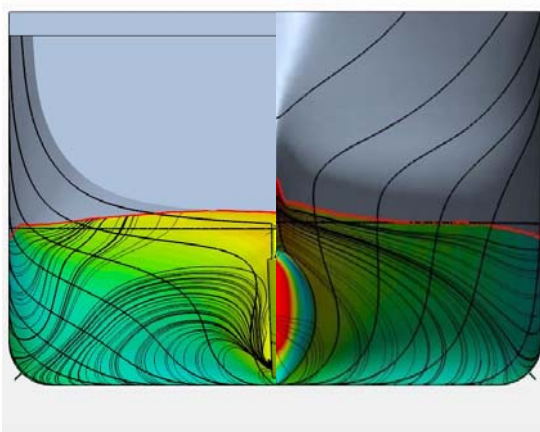
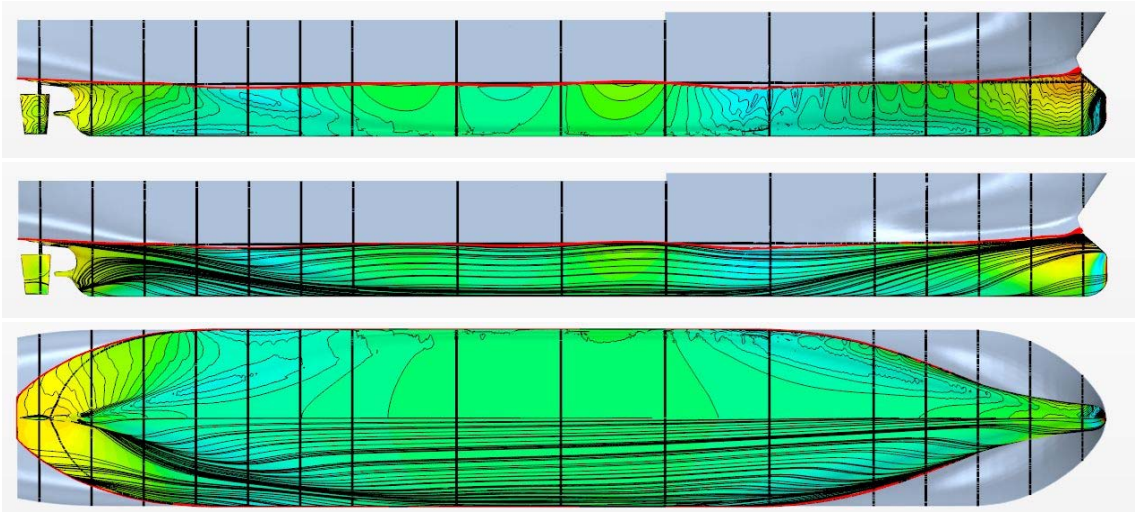
n	Rate of revolution per second	
N	Rate of revolution per minutes	
J	Advance coefficient	$J=V_A/(nD)$
T	Propeller thrust (kg)	
Q	Propeller torque (Kgm)	
K_T	Thrust coefficient	$K_T=T/(\rho n^2D^4)$
K_Q	Torque coefficient	$K_Q=Q/(\rho n^2D^5)$
t	Thrust deduction factor	
w_s	Wake fraction of ship	$1-w_s=(1-w_m)*e_i*C_2*C_3$
w_m	Wake fraction of model	
e_i	Correlation due to the difference of Ship and Model ship	
C_2	Correlation due to the difference of propeller diameter	
C_3	Correlation factor to YAZAKI' chart	
η_t	Transmission efficiency	
η_R , ETAR	Relative rotative efficiency	
η_P , ETAP	Propeller efficiency of ship	
η , ETA	Propulsive efficiency	$\eta = \eta_t \eta_R \eta_P (1-t) / (1-w_s)$
EHP	Effective horse power (ps, kw)	
DHP	Delivered horse power (ps, kw)	
BHP	Brake horse power (ps, kw)	$BHP=EHP/\eta$
Cadm	Admiralty constant	$Cadm=(\Delta^{2/3}Vs^3)/BHP$
SG	Specific gravity	γ : 1.00 for fresh water, 1.025 for salt water

A.P. 1 2 3 4 5 6 7 8 9 F.P.



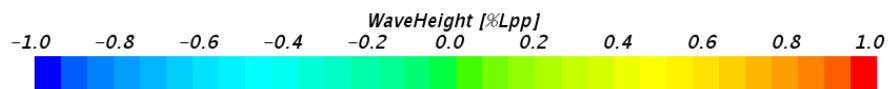
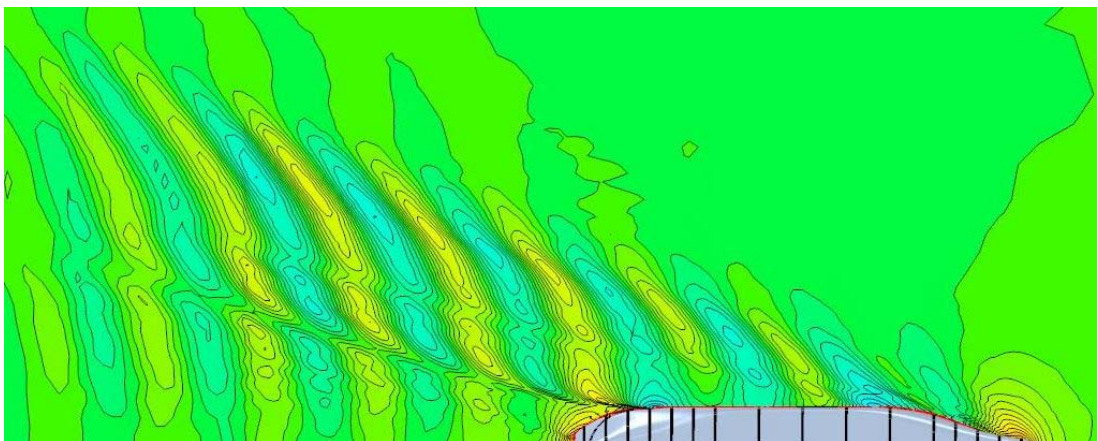
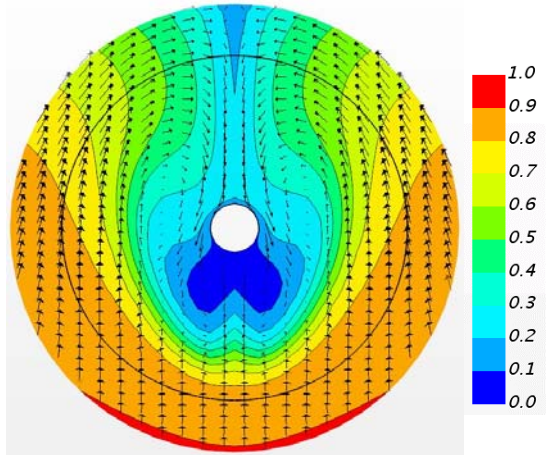
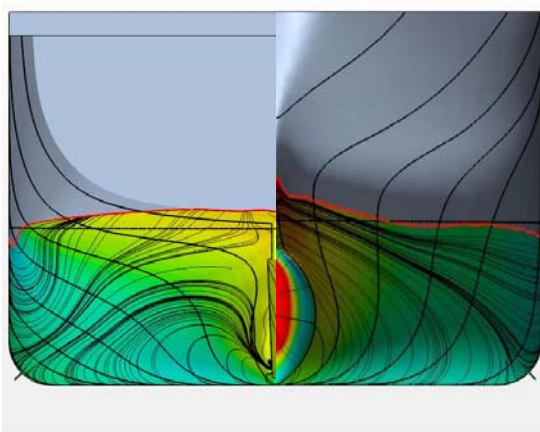
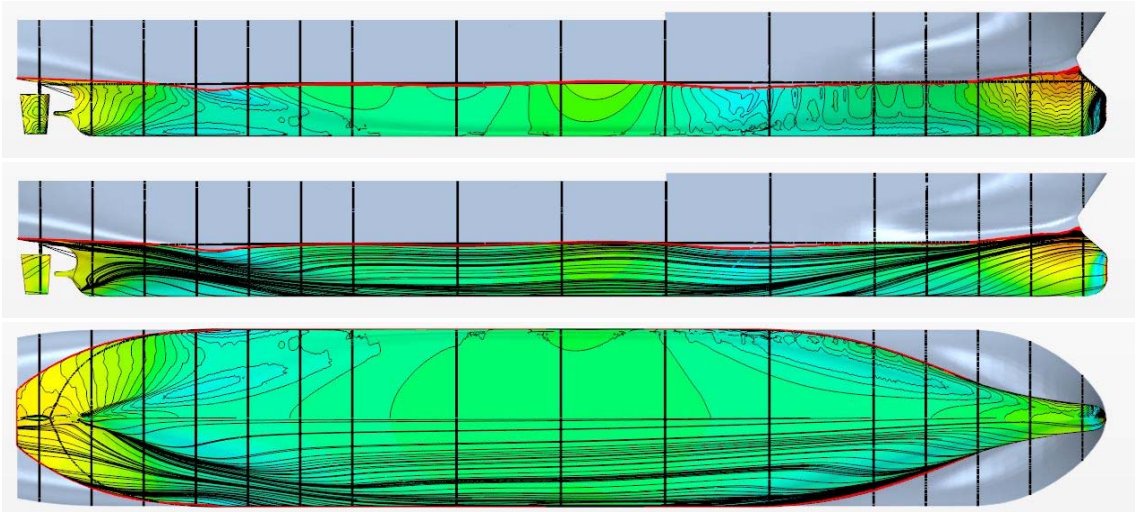
H503N Ver.J Propane draft 11.4kts (EvenKeel, $F_n = 0.176$)

A.P. 1 2 3 4 5 6 7 8 9 F.P.



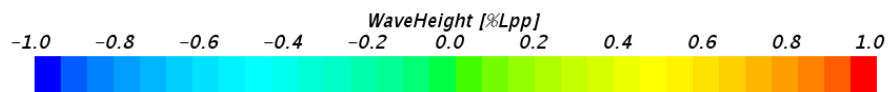
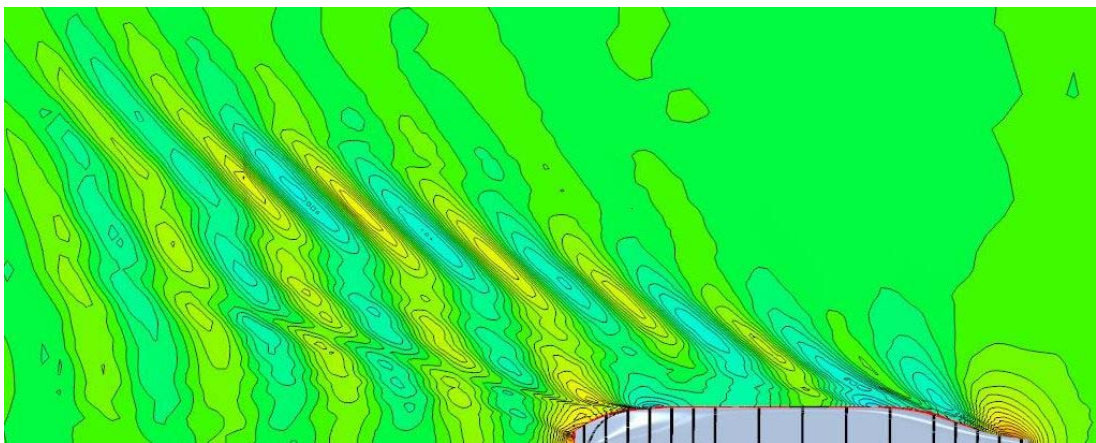
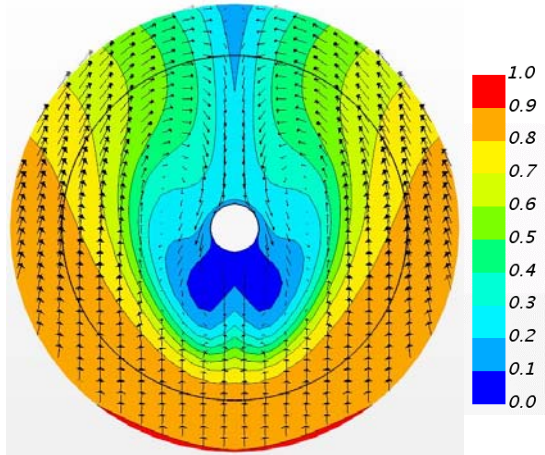
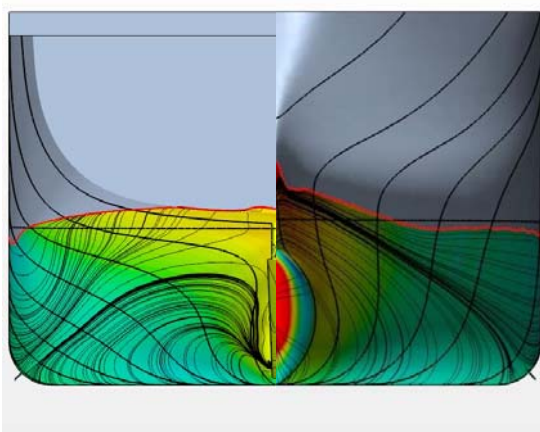
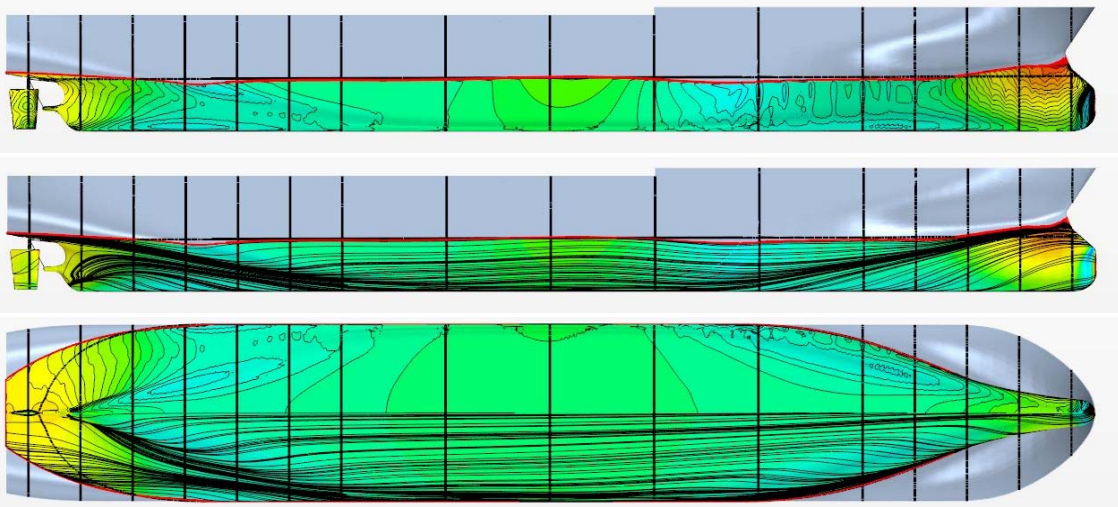
H503N Ver.J Propane draft 12.2kts (EvenKeel, $F_n = 0.189$)

A.P. 1 2 3 4 5 6 7 8 9 F.P.



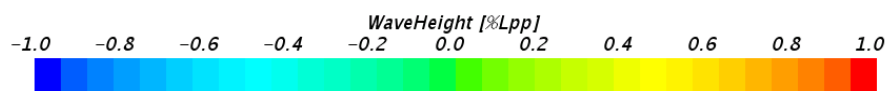
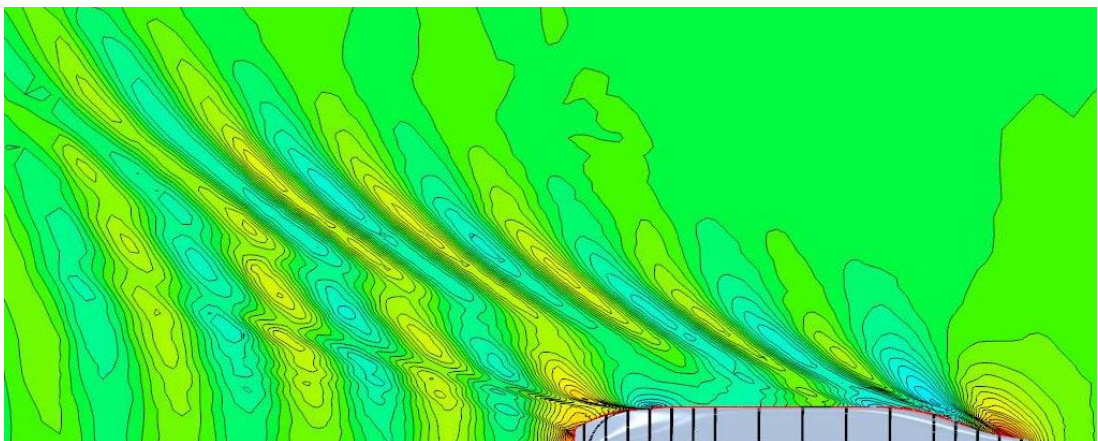
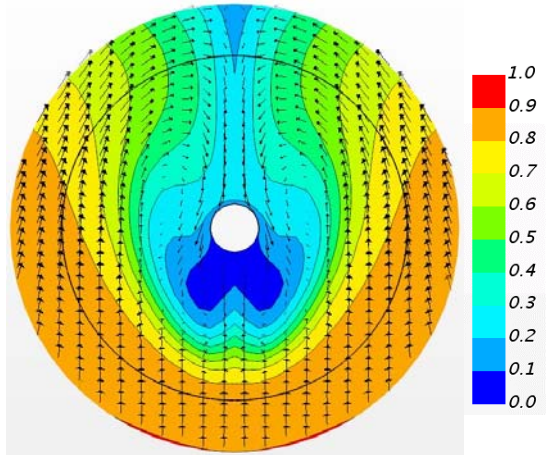
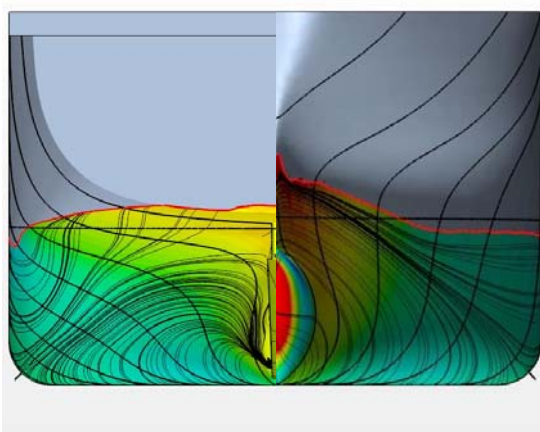
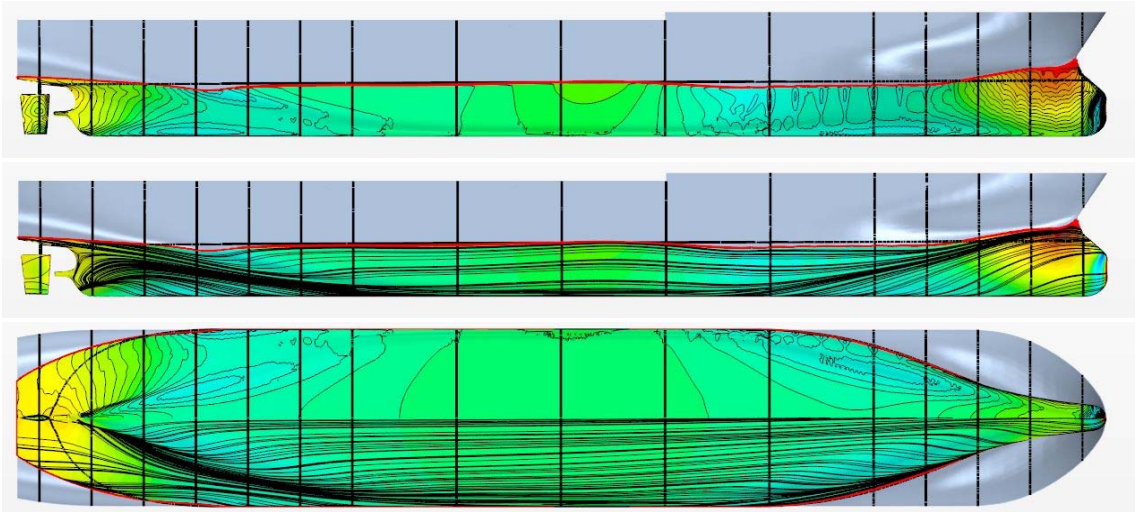
H503N Ver.J Propane draft 13.0kts (EvenKeel, $F_n = 0.201$)

A.P. 1 2 3 4 5 6 7 8 9 F.P.



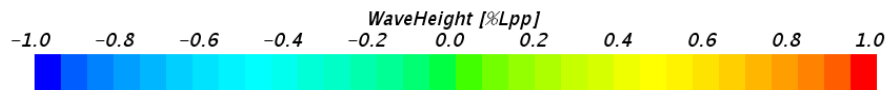
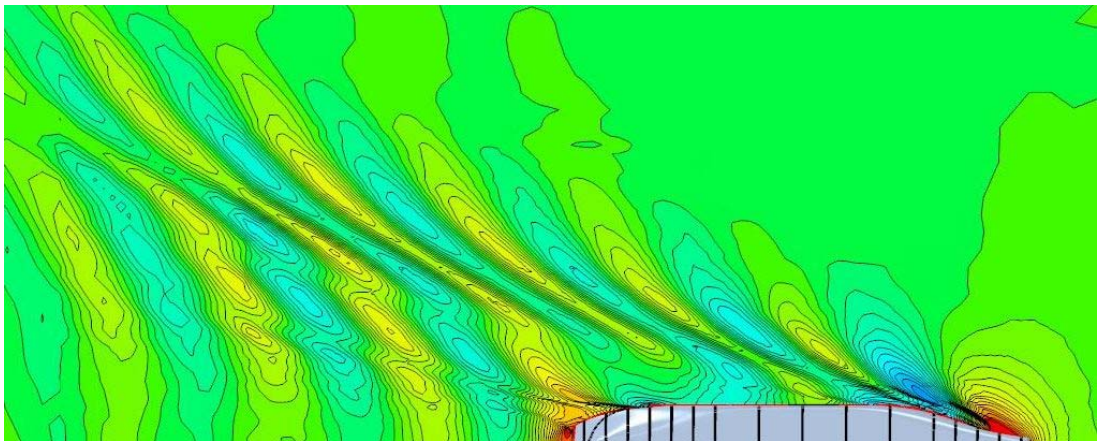
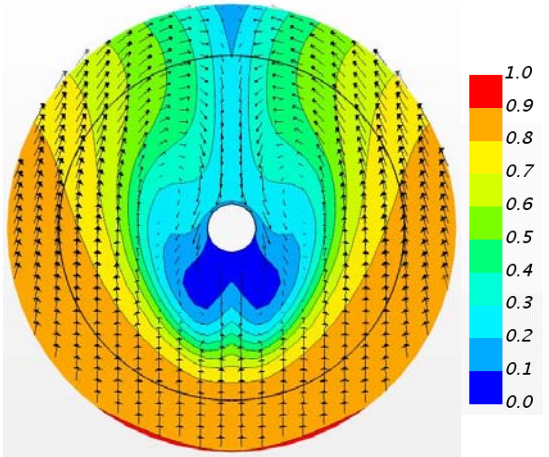
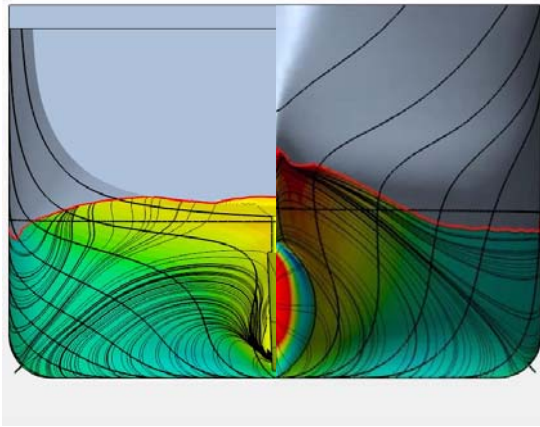
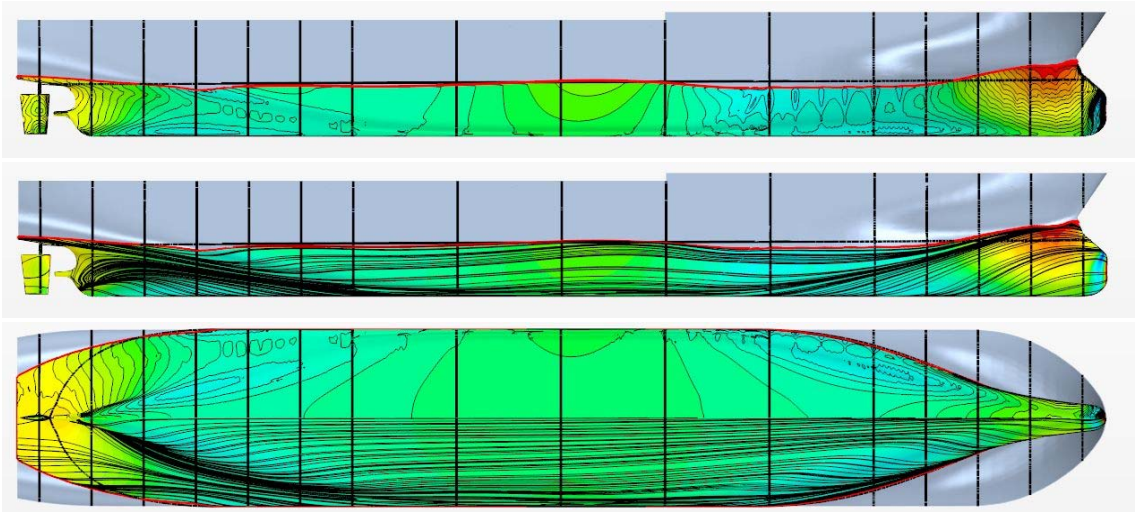
H503N Ver.J Propane draft 13.8kts (EvenKeel, $F_n = 0.213$)

A.P. 1 2 3 4 5 6 7 8 9 F.P.



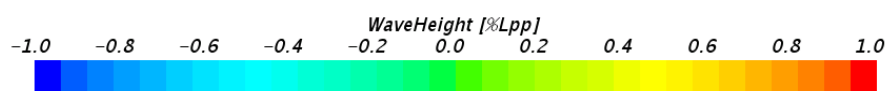
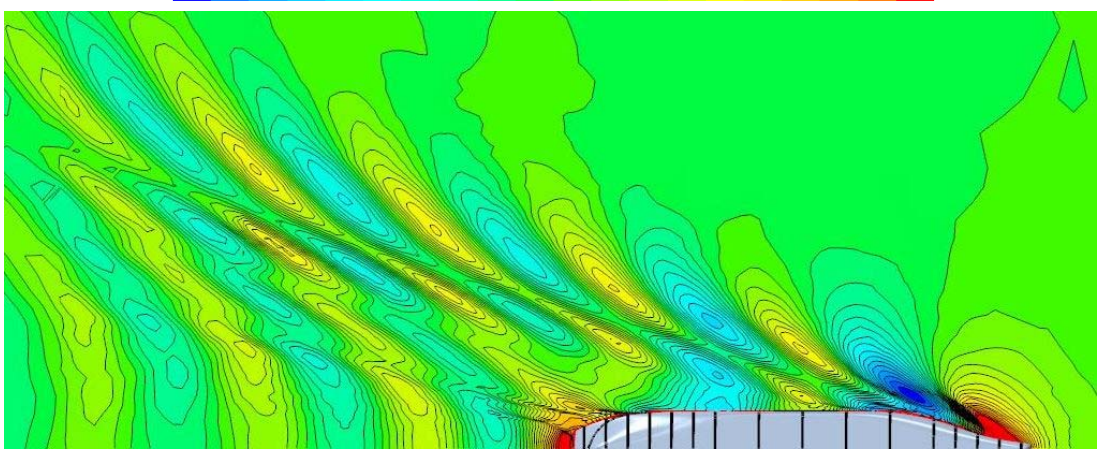
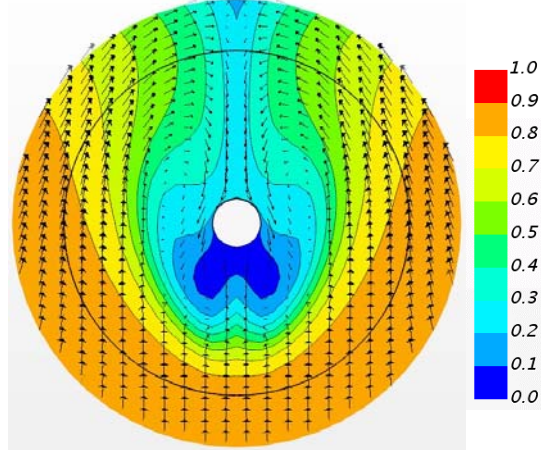
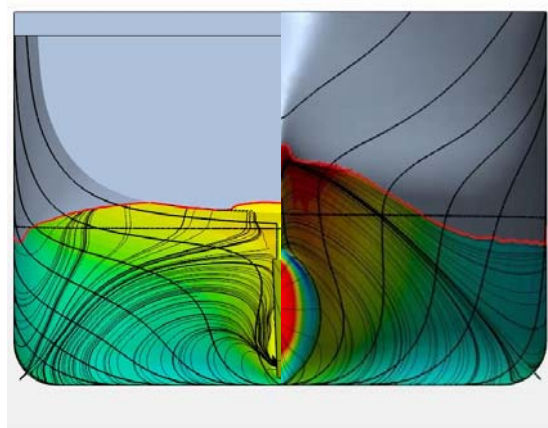
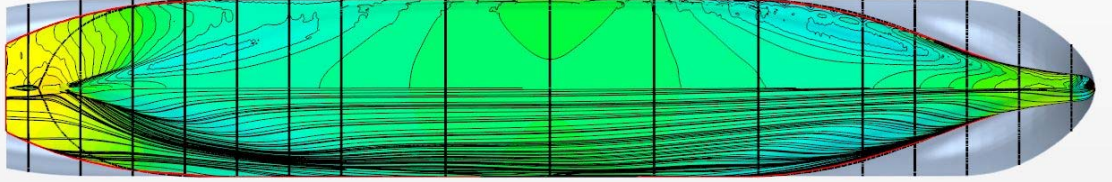
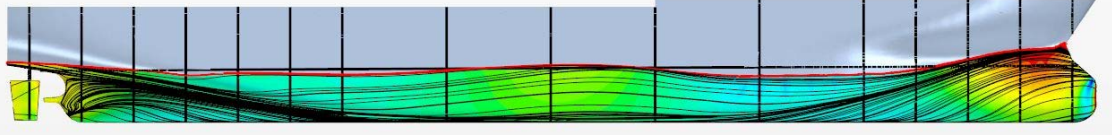
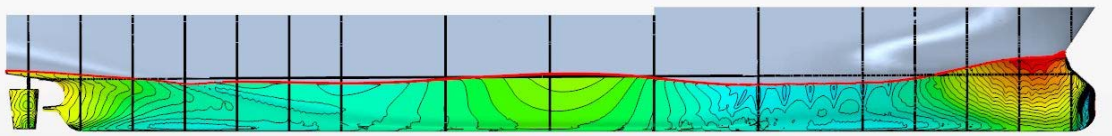
H503N Ver.J Propane draft 14.6kts (EvenKeel, $F_n = 0.226$)

A.P. 1 2 3 4 5 6 7 8 9 F.P.



H503N Ver.J Propane draft 15.4kts (EvenKeel, $F_n = 0.238$)

A.P. 1 2 3 4 5 6 7 8 9 F.P.



H503N Ver.J Propane draft 16.2kts (EvenKeel, $F_n = 0.250$)