

## 成果報告書(完了報告)

---

# 省エネ付加物性能評価のための流場データベース の構築とCFD解析ガイドラインの策定

一般財団法人日本海事協会

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所(事務局)

国立大学法人横浜国立大学

国立大学法人大阪大学

ジャパンマリンユナイテッド株式会社

住友重機械マリンエンジニアリング株式会社

三菱重工業株式会社

株式会社三井造船昭島研究所

川崎重工業株式会社

一般財団法人日本造船技術センター(順不同)

# 目次

---

1. 目的
2. 目標
3. 内容
4. 実施スケジュール
5. 実施成果
  5. 1 対象船型および  
付加物の設計・製作
  5. 2 CFDによる実験計画
  5. 3 省エネ効果計測
  5. 4 流場計測
  5. 5 CFDによる検証計算
  5. 6 データベース構築
  5. 7 CFD解析ガイドライン策定
6. 効果の検証
7. 結言

# 1. 目的 (1)

---

- 船舶からの温室効果ガス排出の削減のため、各種省エネ付加物の採用が拡大
- 一方で、船尾の乱流場におかれる省エネ付加物の流力性能/尺度影響評価法は未確立
- CFD(計算流体力学)技術は、船舶の流力性能評価/設計ツールとして活用
- 省エネ付加物の性能評価への適用にはCFD解析結果の検証が不可欠

# 1. 目的 (2)

---

- しかし、省エネ付加物性能の検証用実験データは公開されていない
- 省エネ付加物が付いた模型船を設計・製作
- 最新の計測技術による流場計測、CFD検証のための流場データベースを構築、公開
- 流場データベースを用いて省エネ付加物性能評価のCFD解析ガイドラインを策定
- 省エネ付加物周りの性能評価精度が飛躍的に向上
- 造船産業の技術競争力の維持向上を支援

## 2. 目標

---

- ① CFD検証及びデータベース構築用の船型1隻を設計・製作するとともに省エネ付加物を複数設計し、もっとも高い省エネ効果を示す付加物を選定する。
- ② 検証データベースとして、付加物がある場合とない場合のそれぞれについて、抵抗試験および自航試験を行い、省エネ効果を計測する。合わせてプロペラ有無の状態、詳細な流場計測を長手方向7断面分について実施する。これらのデータにより検証用データベース1式を構築する。
- ③ 上記の検証用データに対応したCFD解析において格子数や乱流モデルなどのパラメータスタディを行い、CFDによる省エネ付加物の性能評価のためのガイドラインを策定する。

### 3. 内容 (1)

---

- ① 模型製作：省エネ付加物の性能評価のための模型船および省エネ付加物を設計・製作する。
- ② CFDによる実験計画：予備的なCFD計算を行い、実験計画を策定する。
- ③ 省エネ効果計測：水槽試験を行い付加物の省エネ効果を計測する。
- ④ 流場計測：省エネ付加物の有り無し、プロペラ有り無し  
の状態の詳細な船尾流場計測を行う。

## 3. 内容 (2)

---

- ⑤ CFDによる検証計算：CFDによる流場解析を行い、実験結果と計算結果との比較検討を行う。
- ⑥ データベース構築：船型データおよび計測データを整理し、データベースを構築する。
- ⑦ CFD解析ガイドラインの策定：実験結果との比較検討やCFD解析におけるパラメータスタディにより、省エネ付加物の性能評価のためのCFD解析ガイドラインを策定する。

# 4. 実施スケジュール

実施項目	平成25年度		平成26年度				平成27年度	
	3/4 注1)	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4
対象船型および付加物の設計・製作	←————→							
CFDによる実験計画			←————→					
省エネ効果計測			←————→			←————→		
流場計測				←————→				
CFDによる検証計算				←————→				
データベース構築							←————→	
CFD計算ガイドライン策定							←————→	
報告書作成							←————→	

注1) 平成25年11月7日～平成25年12月31日



# 5. 1 対象船型および付加物の設計: 船型(1)

## 設計コンセプト

- ・ ケープサイズのバルクキャリア
  - ・海上輸送における太宗船の一つ
  - ・省エネルギー付加物が有効に働く肥大船
- ・ 設計速力14.5kn ( $L_{pp}$ ベースのフルード数,  $F_n=0.142$ )

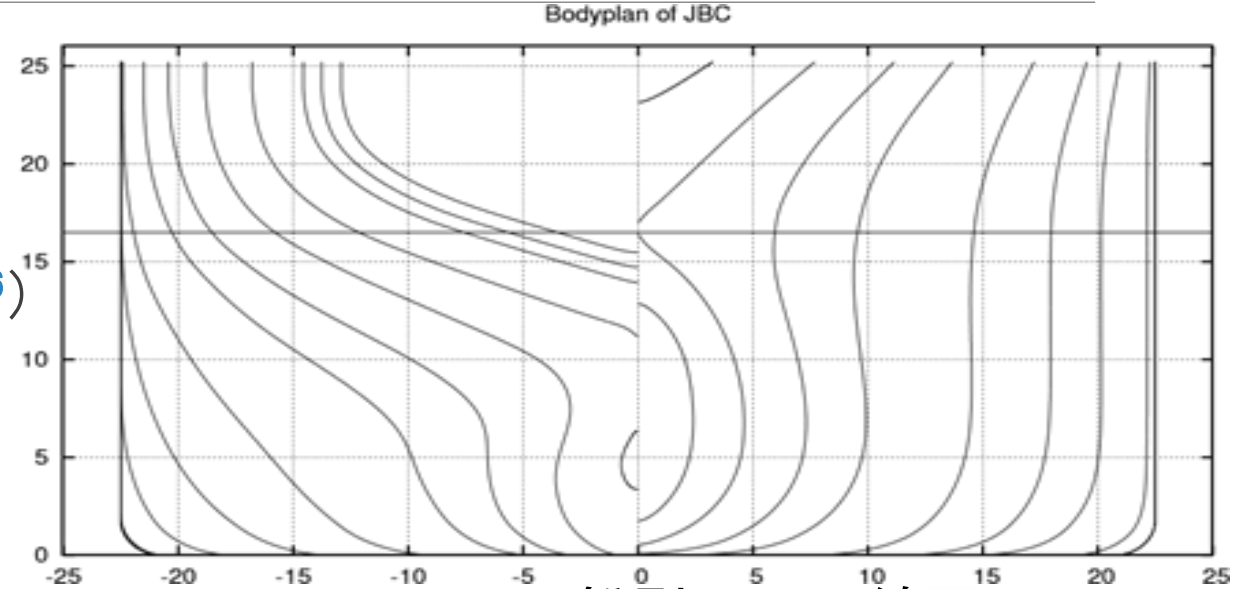
## 対象船の主要目

		実船	模型1	模型2
垂線間長	$L_{pp}$ [m]	280.0	7.000	3.200
水線長	$L_{wl}$ [m]	285.0	7.125	3.257
全幅	$B_{wl}$ [m]	45.0	1.125	0.5143
満載喫水	$T$ [m]	16.5	0.4125	0.1886
浸水面積	$S$ [m <sup>2</sup> ]	19556.1	12.223	2.554
方形係数	$C_B$	0.8580		
浮心位置	$L_{cb}$ [% $L_{pp}$ ]	2.55 (Fwd.)		
			性能評価/流場計測用	流場計測用

# 5. 1 対象船型および付加物の設計: 船型(2)

## CFDによるシリーズテスト

- ・ 海技研CFD (NSソルバー: NEPTUNE)
- ・ 模型1スケール ( $F_n=0.142$ 、 $R_n=7.245 \times 10^6$ )
- ・ 抵抗、wake分布
  - ➔ Japan Bulk Carrier (JBC) 船型



JBC船型の正面線図

## 使用プロペラ

直径: 8.12m      ピッチ比: 0.75  
ボス比: 0.18      展開面積比: 0.50  
翼数: 5              翼型: MAU



模型1の全景(左)と船後(右)

# 5. 1 対象船型および付加物の設計: 付加物(1)

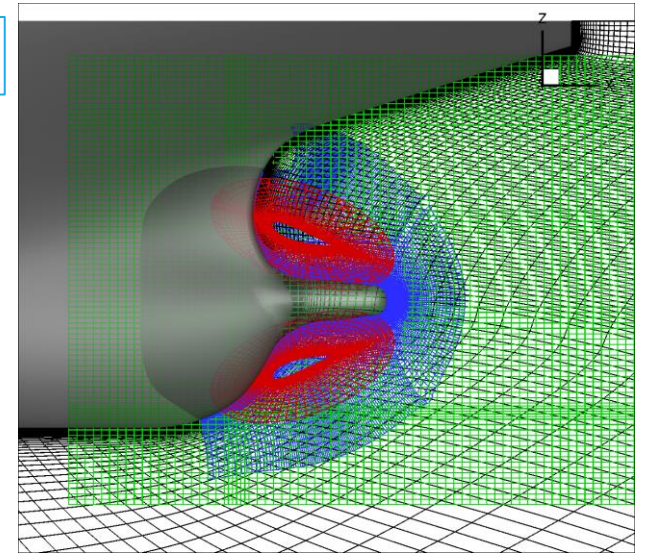
## 省エネ付加物の設計コンセプト

- プロペラ前方に円環ダクト: CFD解析に適したシンプルな形状
- パラメータを振ったシリーズテスト
  - ダクト直径:  $0.50 \sim 0.80 * D_p$  (プロペラ直径)
  - ダクト開き角:  $12 \sim 20$  度
  - 断面形状: NACA4420
  - コード長さ:  $0.30 * D_p$
- 設計速力14.5kn ( $L_{pp}$ ベースのフルード数、 $Fn=0.142$ )

全19ケース

## CFDによる性能比較

- 海技研CFD (NSソルバー: NAGISA、重合格子情報生成: UP\_GRID)
- 模型1スケール (二重模型流れ、 $Re=7.245 \times 10^6$ )
- 抵抗と自航要素

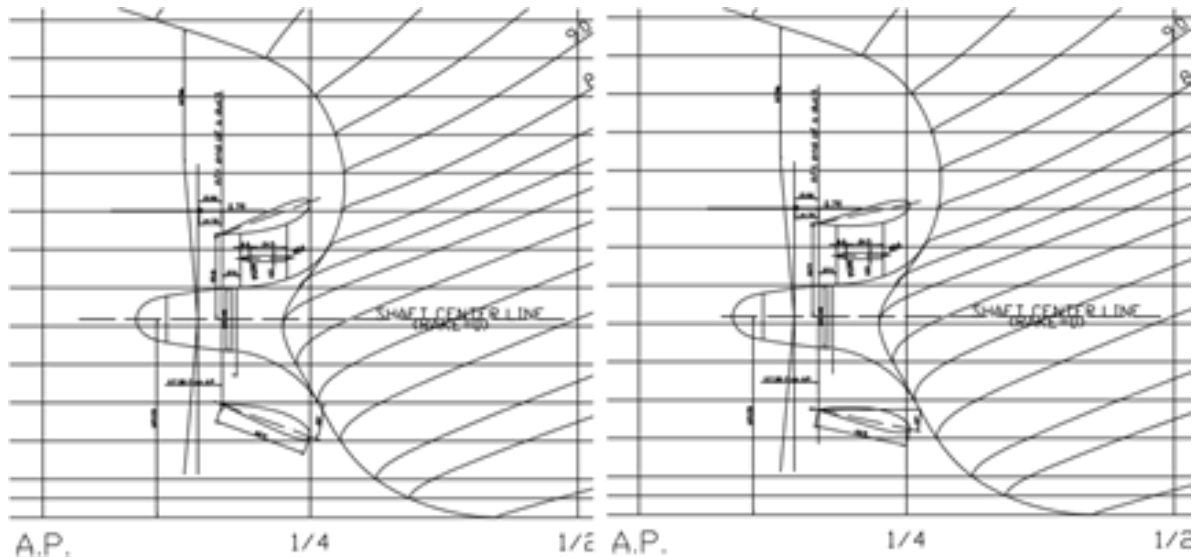


ダクト付き船体まわりの重合格子

# 5. 1 対象船型および付加物の設計: 付加物(2)

## 最終候補

- Duct 1:ダクト直径  $0.55 * D_p$  開き角 20度
- Duct 2:ダクト直径  $0.60 * D_p$  開き角 12度



Duct 1 (左)とDuct 2(右)



Duct 1 (左)と  
Duct 2(右)



Duct 1 とプロペラを付けた船尾

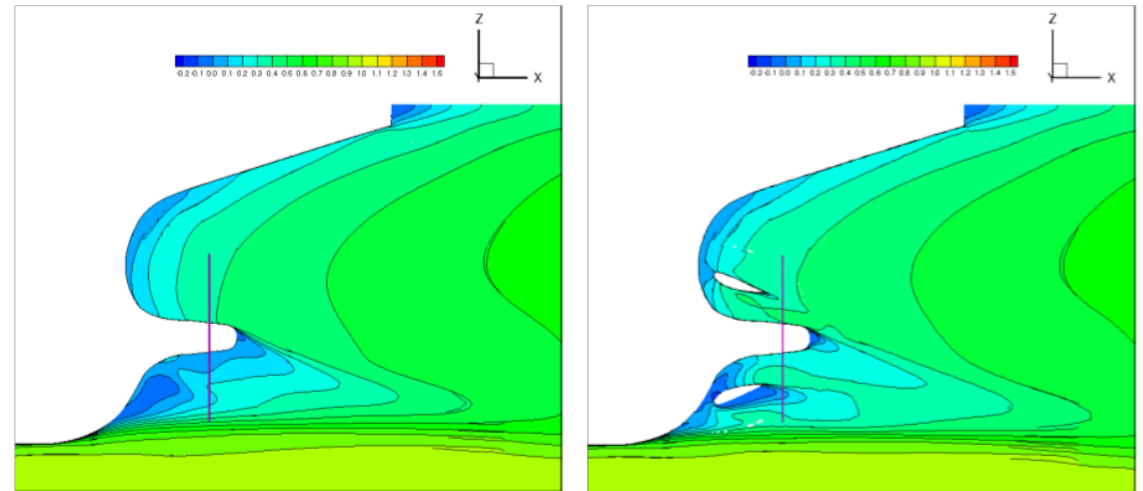
# 5. 2 CFDによる実験計画

## 複雑な船尾流場の検証

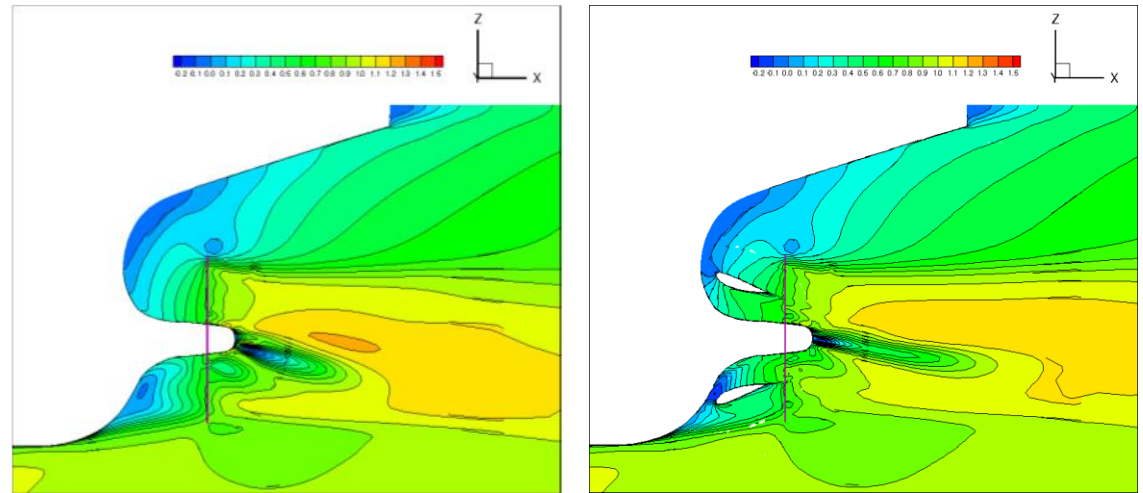
- ・船尾の厚い境界層と強い縦渦
- ・省エネ付加物との流力干渉
- ・低速な伴流域におけるプロペラ吸込

## 予備CFD計算から断面位置の決定

- ・船尾ダクト前方 [SS1/2 & SS3/8]
- ・船尾ダクト位置 [ダクト中心位置]
- ・プロペラ流入位置 [ダクト／プロペラ間]
- ・プロペラ面 [0.7R位置]
- ・プロペラ後流 [プロペラ／A.P.間、A.P.]



船後対称面におけるU分布(抵抗、左:ダクトなし、右:ダクトあり)



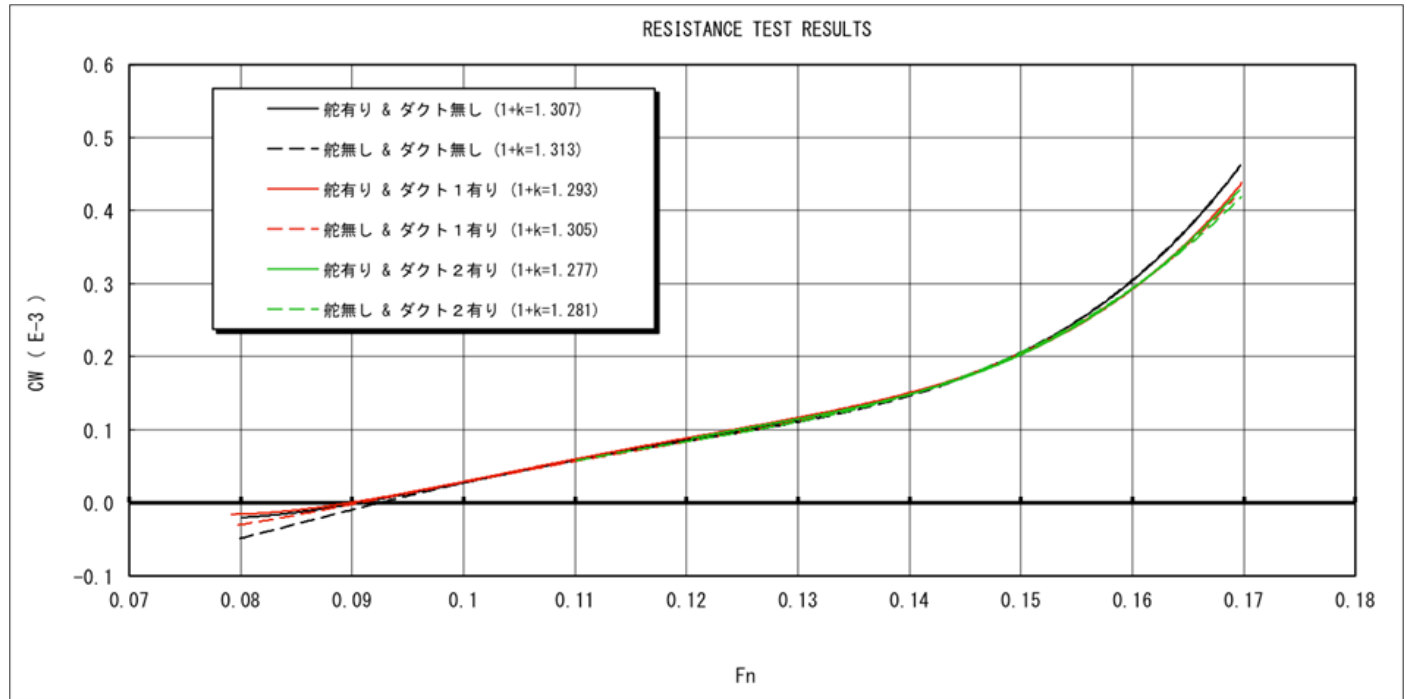
船後対称面におけるU分布(自航、左:ダクトなし、右:ダクトあり)

# 5.3 省エネ効果計測(1): 抵抗試験結果

抵抗試験 (海上技術安全研究所400m水槽 [400m\*18m\*8m])

模型船: 7m模型、6状態 [舵なし、ダクト(2種類)の有無]

舵	ダクト	形状影響係数, 1+K
無し	無し	1.313
無し	Duct 1	1.305
無し	Duct 2	1.281
有り	無し	1.307
有り	Duct 1	1.293
有り	Duct 2	1.277



ITTC1957 Friction lineを使用

- ➔ 形状影響係数は、CFD計算と同様にDuct2がDuct1やダクト無しに比べてわずかに小さい  
造波抵抗は、ダクトや舵の有無に対してほとんど影響を受けない

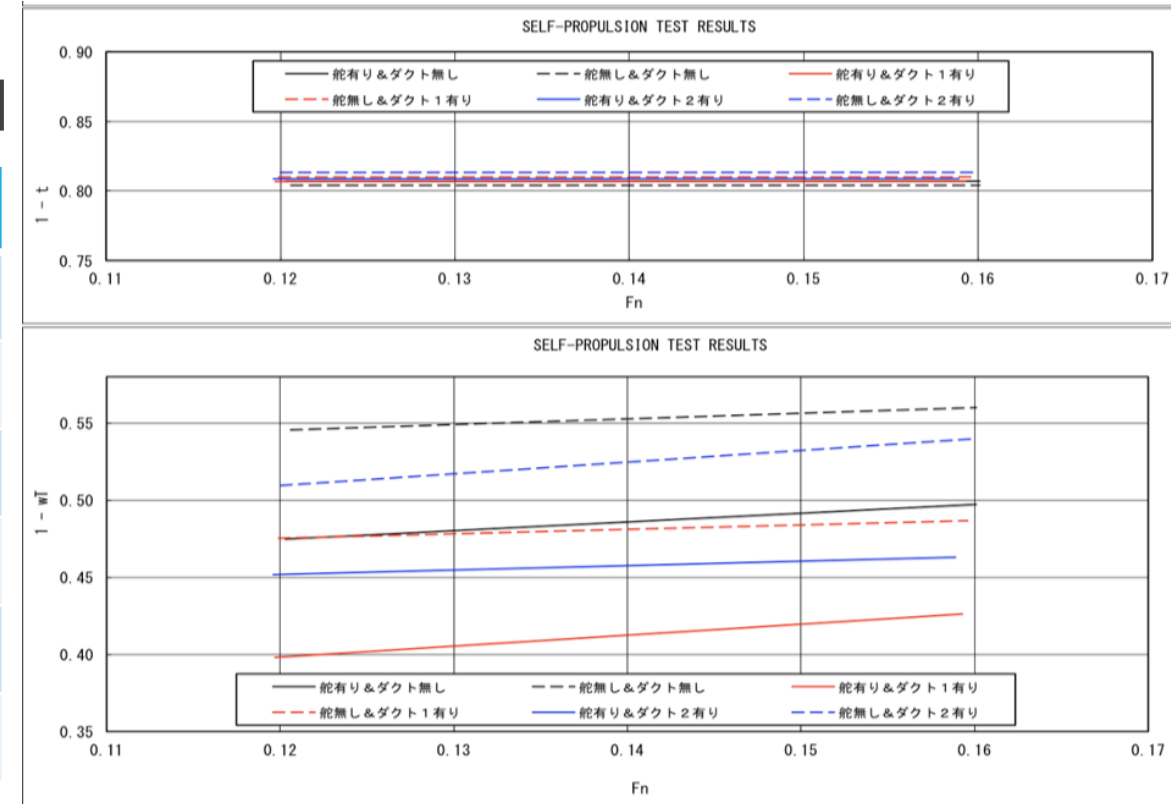
# 5.3 省エネ効果計測(2): 自航試験結果

自航試験 (海上技術安全研究所400m水槽)

型船: 7m模型、6状態 [舵・ダクト(2種類)の有無]

舵	ダクト	1-t	1-wt	$\eta_H$	$\eta_R$
無し	無し	0.804	0.554	1.451	1.015
無し	Duct 1	0.811	0.481	1.686	1.009
無し	Duct 2	0.813	0.526	1.546	1.009
有り	無し	0.807	0.487	1.659	1.027
有り	Duct 1	0.807	0.413	1.952	1.031
有り	Duct 2	0.809	0.458	1.766	1.026

$F_n=0.142$ (設計速度)での自航要素

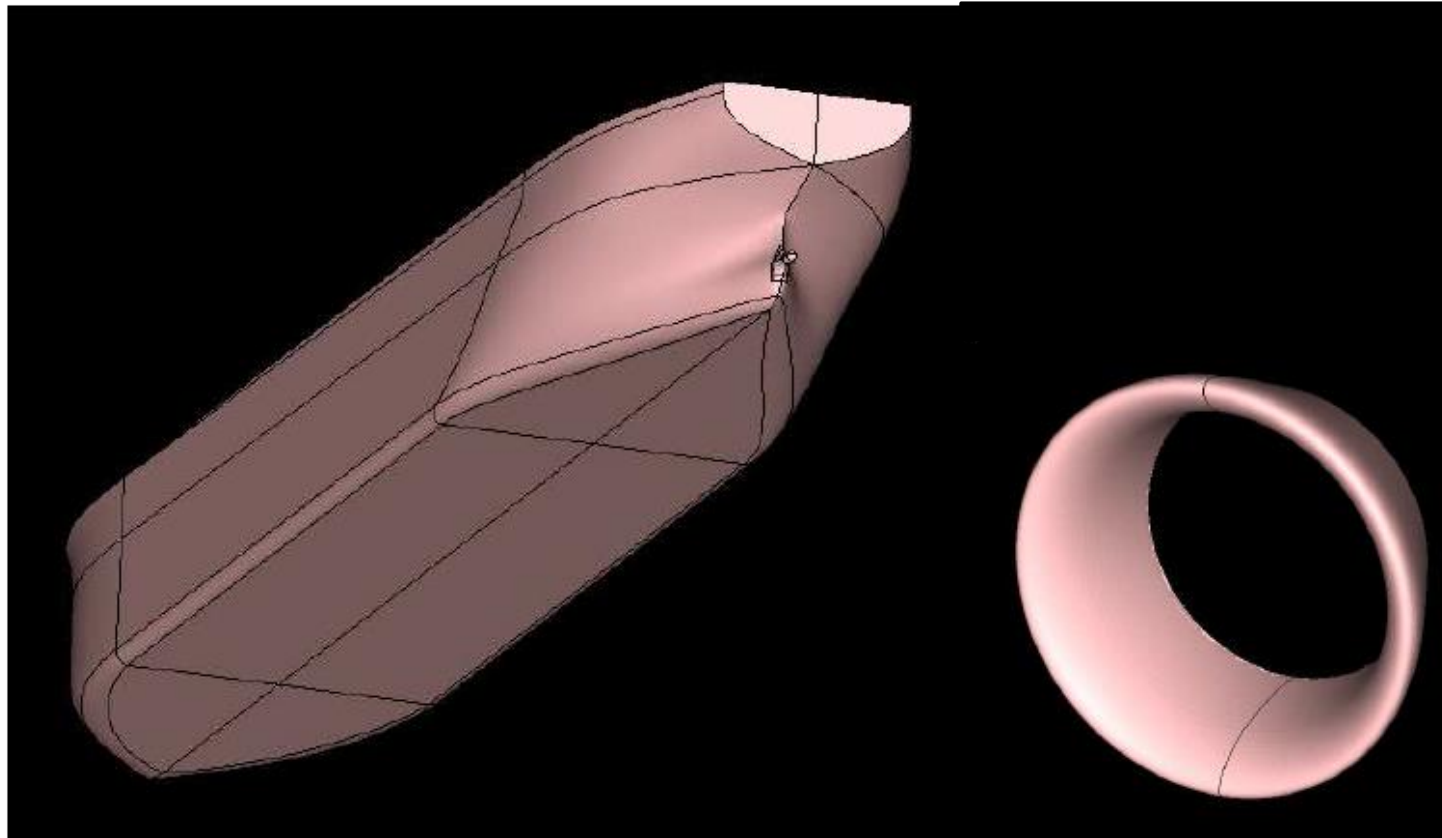


自航要素(1-t, 1-wt)

- ➔ 1-wtは、CFD計算と同様に、Duct1がDuct2やダクト無しに比べてはるかに小さい
- 1-tは、CFD計算と同様に、Duct2が他に比べてわずかに高い

## 5. 3 省エネ効果計測(3): 最終ダクト形状

- ➔ 抵抗、自航要素を勘案し、伴流利得の大きなDuct1の流場計測を行うこととした  
なお、流場計測は舵なしの状態を実施する。



JBC船型(左)とDuct 1(右)のCAD形状



# 5.4 流場計測(1): 計測状態

## □ SPIVを用いた船尾周りの流速計測

- ① 模型船: 7m模型、海上技術安全研究所(以降、海技研)中水槽[150m\*7.5m\*3.5m]
- ② 模型船: 3.2m模型、大阪大学(以降、阪大)水槽[100m\*7.8m\*4.3m]

## □ 計測対象: 3方向速度成分、乱流エネルギー

## □ 計測状態

- ダクト有り/無し、舵およびビルジキールは無し
- 抵抗/自航状態(trim/sinkageフリー)

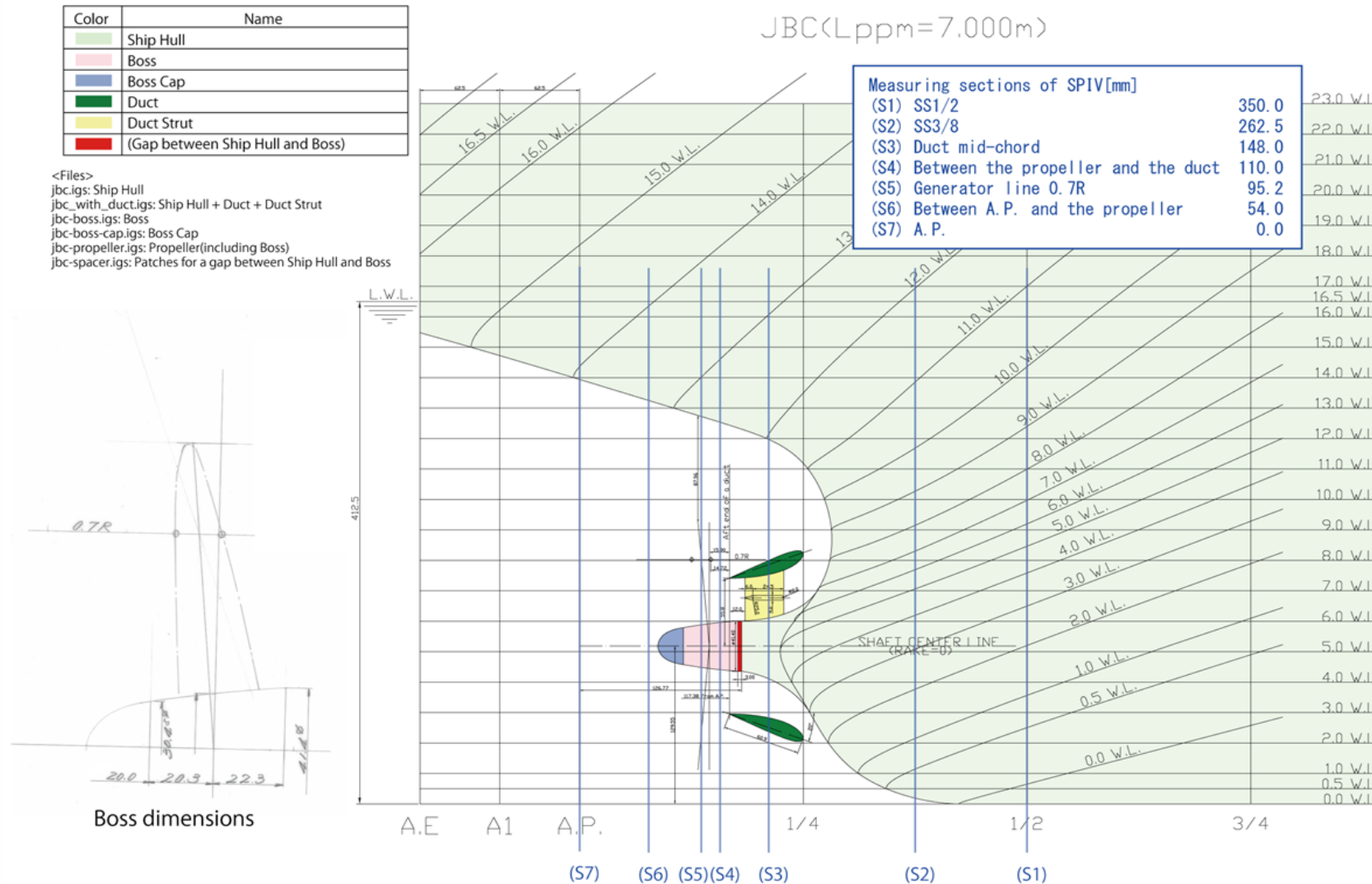
なお、自航時はプロペラ翼角度(0, 24, 48度)で同期をとった計測と時間平均値を計測  
プロペラは左回り、右回り両方を使用

- 速度: 設計速力( $F_n=0.142$ )
- 断面数: 7断面(SS1/2からAPまで、次ページ参照)



海技研水槽でのSPIV計測

# 5. 4 流場計測(2): 船尾プロファイルと計測断面

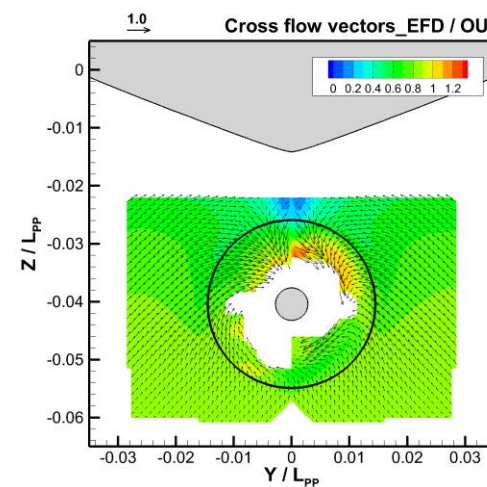
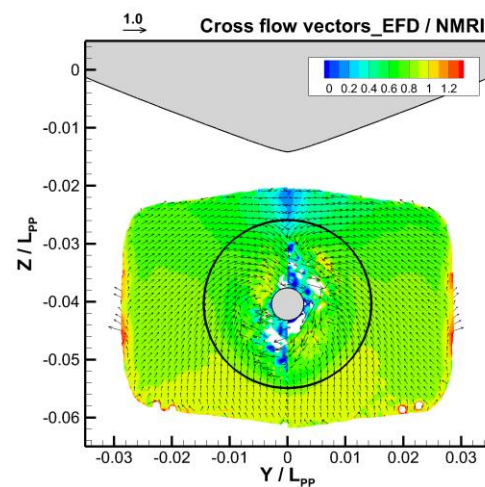
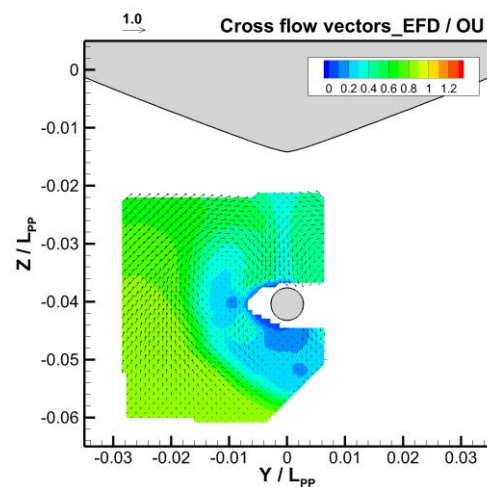
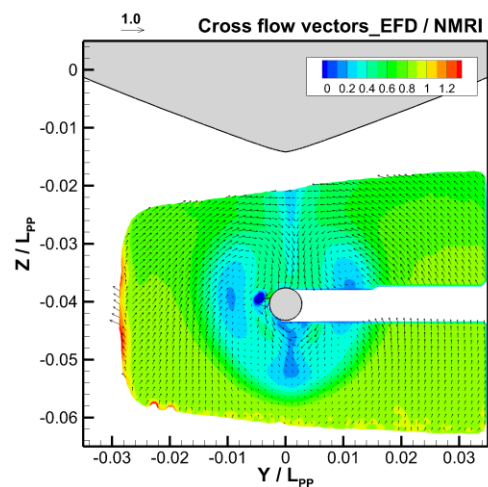
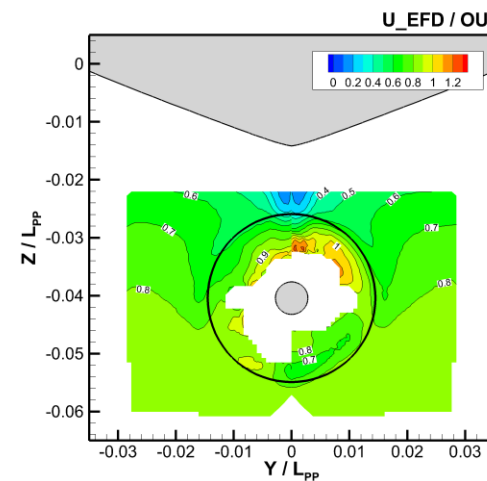
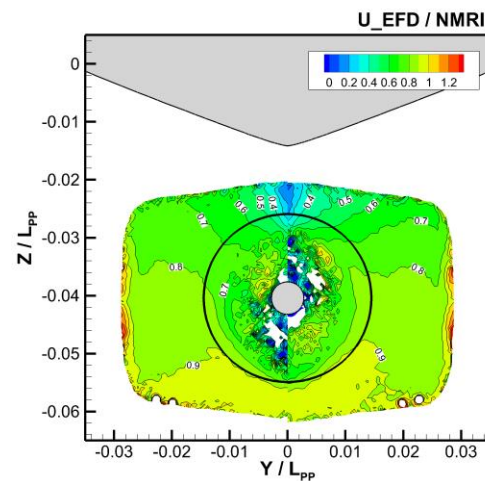
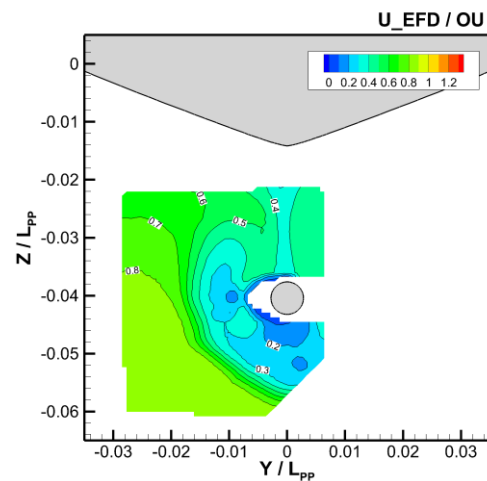
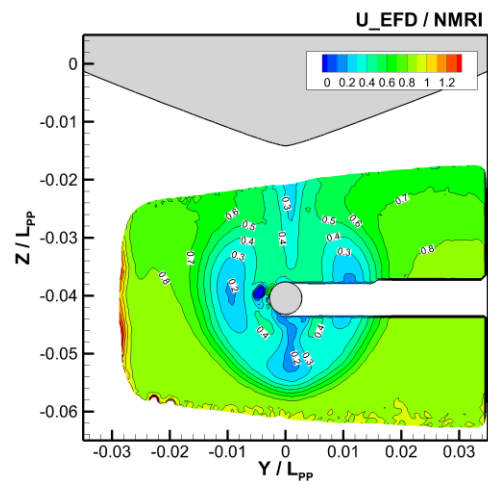


# 5. 4 流場計測(3):計測結果リスト

計測断面	ダクト	翼角度	海技研			阪大				
			抵抗	自航、回転方向		抵抗	自航、回転方向			
				右回り	左回り		右回り	左回り		
[1] SS1/2	無し	平均	○	○	-	-	-	-		
	有り	平均	○	○	○	-	-	-		
[2] SS3/8	無し	平均	○	○	○	○	○	○		
		0[deg.]	-	-	-	-	○	○		
	有り	平均	○	○	○	○	○	○		
		0[deg.]	-	-	-	-	○	○		
[3] ダクト中心	無し	平均	○	○	-	○	○	-		
	有り	平均	○	○	○	○	○	○		
[4] ダクト/プロペラ間	無し	Mean	○	○	○	○	○	○		
		0[deg.]	-	○	○	-	-	○		
		24[deg.]	-	○	○	-	-	○		
		48[deg.]	-	○	○	-	-	○		
	有り	平均	○	○	○	○	○	○		
		0[deg.]	-	○	○	-	○	○		
		24[deg.]	-	○	○	-	○	○		
		48[deg.]	-	○	○	-	○	○		
		[5] プロペラ面	無し	平均	○	○	○	●	○	-
				0[deg.]	-	○	○	-	-	-
24[deg.]	-			○	○	-	-	-		
48[deg.]	-			○	○	-	-	-		
有り	平均	○	○	○	○	○	○			
	0[deg.]	-	○	○	-	-	-			
	24[deg.]	-	○	○	-	-	-			
	48[deg.]	-	○	○	-	-	-			
	[6] プロペラ/舵間	無し	平均	○	○	-	○	○	-	
			0[deg.]	-	○	-	-	○	-	
24[deg.]			-	○	-	-	○	-		
48[deg.]			-	○	-	-	○	-		
有り		平均	○	○	-	○	○	-		
		0[deg.]	-	○	-	-	○	-		
		24[deg.]	-	○	-	-	○	-		
		48[deg.]	-	○	-	-	○	-		
[7] AP.	無し	平均	○	○	-	○	○	-		
		0[deg.]	-	○	-	-	○	-		
		24[deg.]	-	○	-	-	○	-		
		48[deg.]	-	○	-	-	○	-		
	有り	平均	○	○	-	○	○	-		
		0[deg.]	-	○	-	-	○	-		
		24[deg.]	-	○	-	-	○	-		
		48[deg.]	-	○	-	-	○	-		

○:3方向速度成分 U, V, W  
 ●:3方向速度成分 U, V, W  
 乱流エネルギー TKE

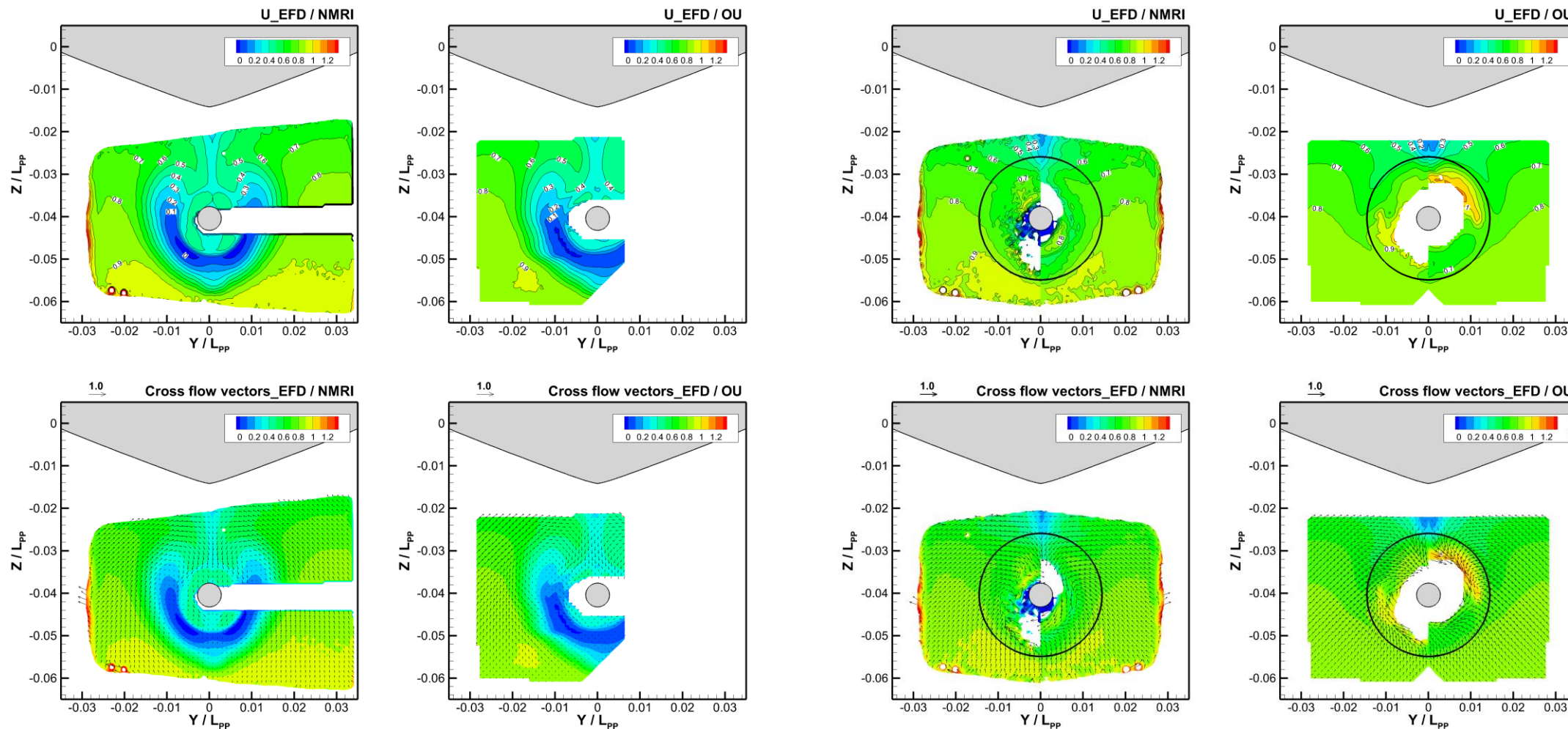
# 5. 4 流場計測(4): 結果例① - ダクトなし(S4面)



抵抗(左:海技研、右:阪大)

自航(左:海技研、右:阪大) <時間平均値>

# 5. 4 流場計測(5): 結果例② - ダクトあり(S4面)



抵抗(左:海技研、右:阪大)

自航(左:海技研、右:阪大) <時間平均値>

# 5. 5 CFDによる検証計算

---

## 概要

### □ JBC船型のダクト有無状態について

- 格子分割数
- 乱流モデル
- プロペラモデル

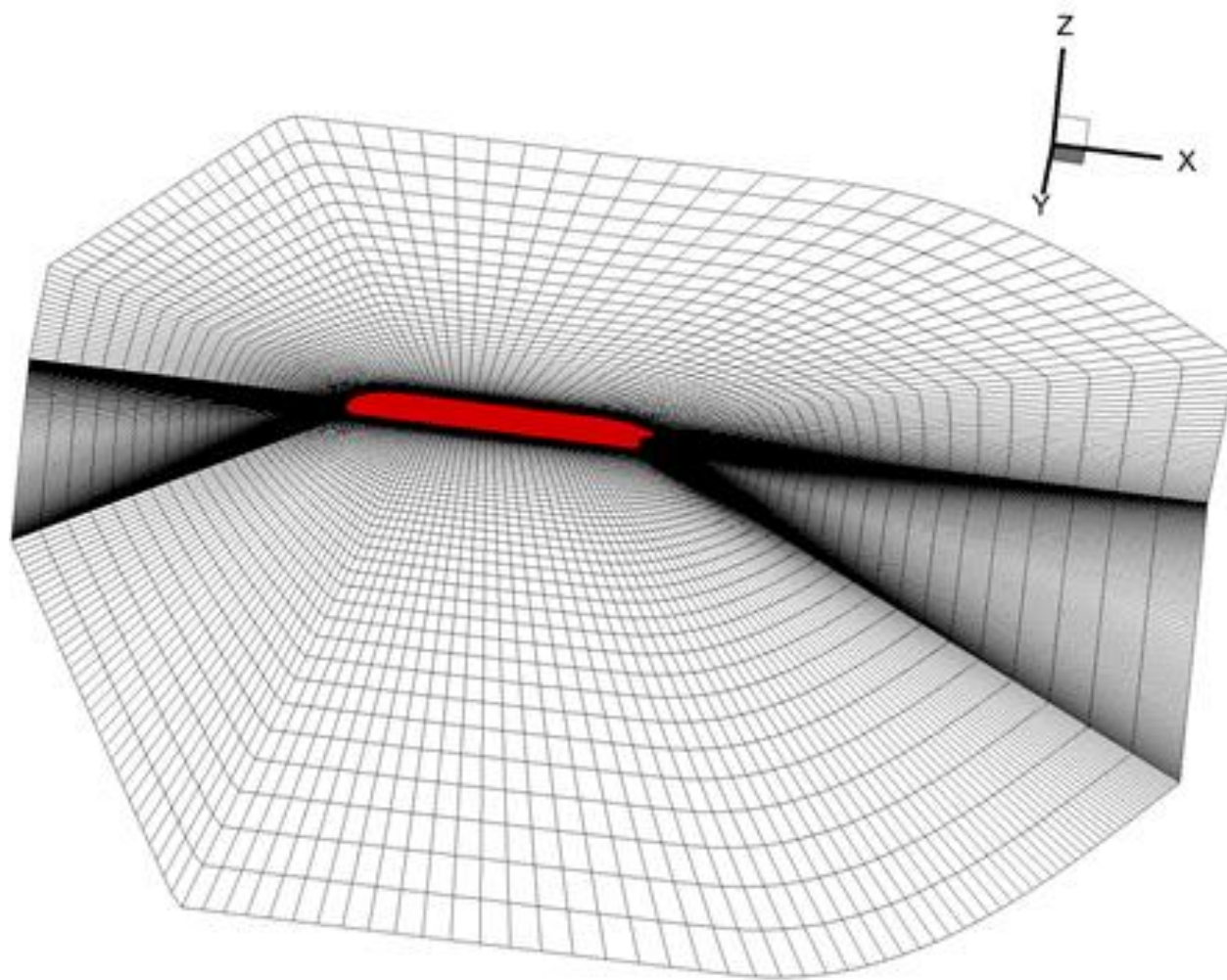
の影響調査をベース

### □ 海技研CFDコード[ NSソルバー: NAGISA、重合情報生成: UP\_GRID]

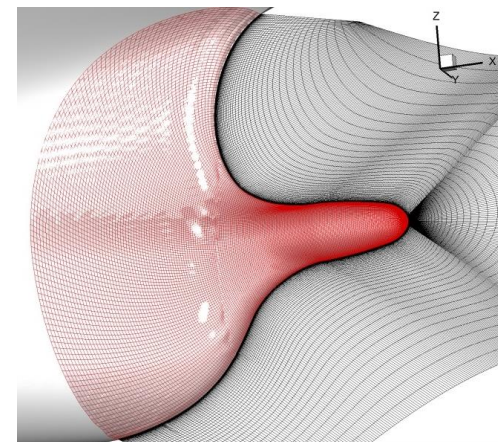
### □ 計算条件

- 二重模型流れ
- 抵抗状態および自航状態
- レイノルズ数  $Rn=7.428 \times 10^6$  (7m模型対応)
- プロペラモデル: 体積力モデル
- 乱流モデル: 代数応力方程式モデル

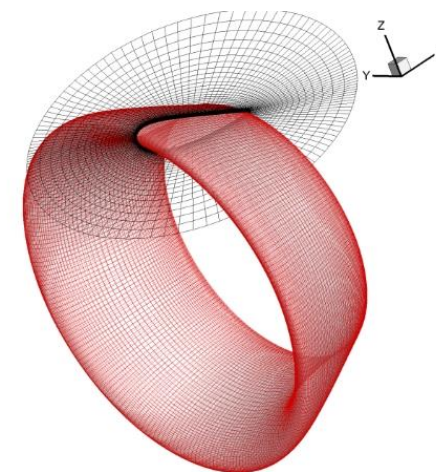
# 5. 5 CFDによる検証計算 (1) 格子ブロック



全体格子 101 X 241 x 121



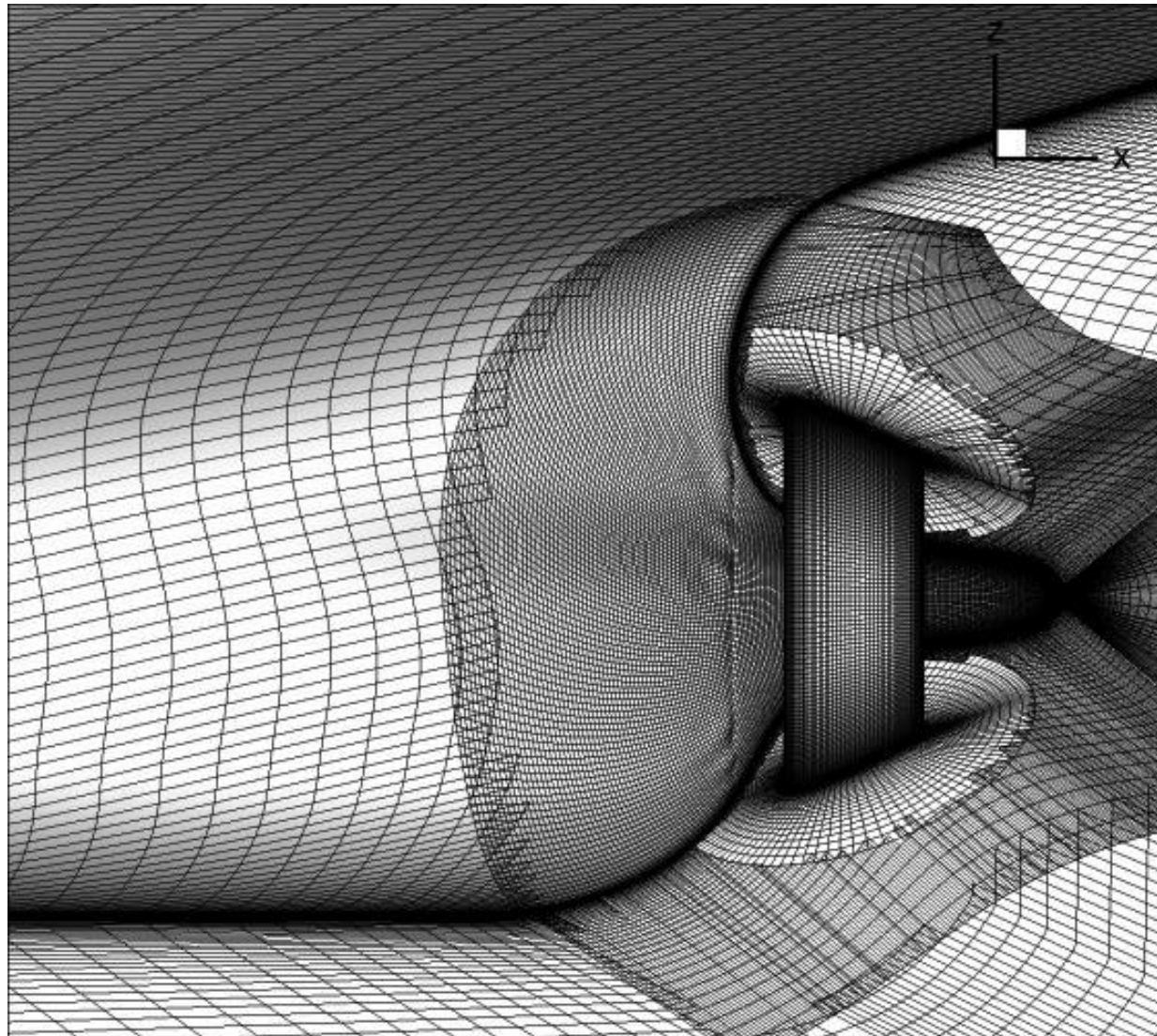
スターンチューブ格子 193 X 209 x 57



ダクト格子 225 X 65 x 161

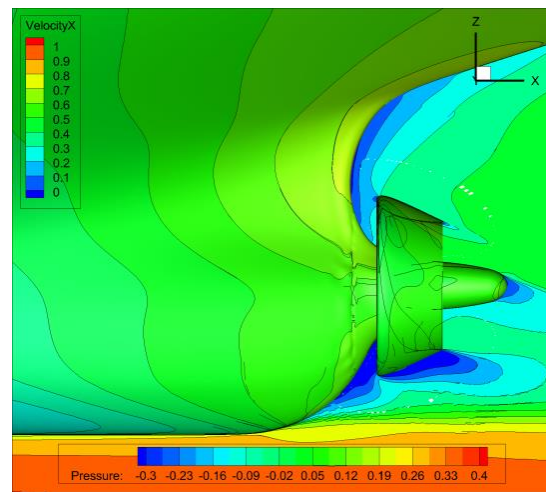
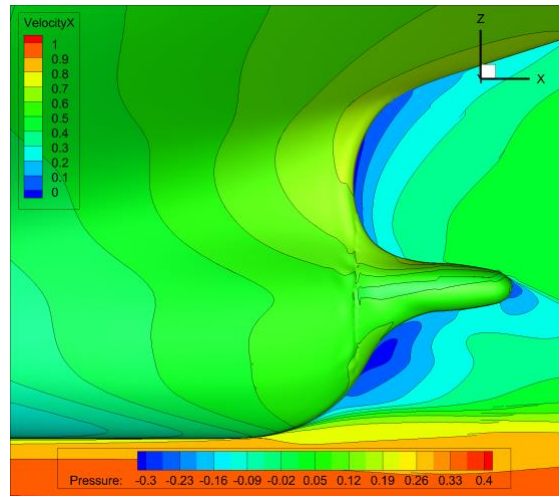
# 5. 5 CFDによる検証計算 (2) 重合格子

---





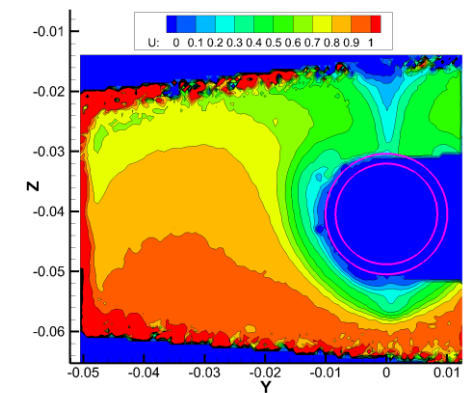
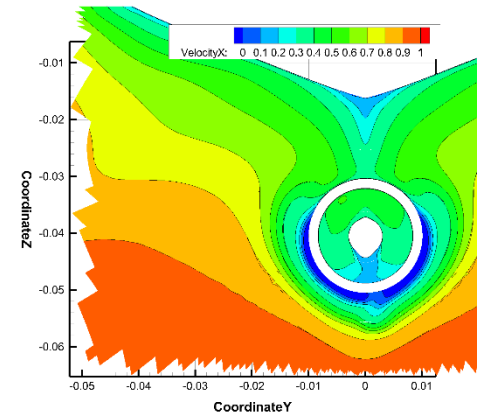
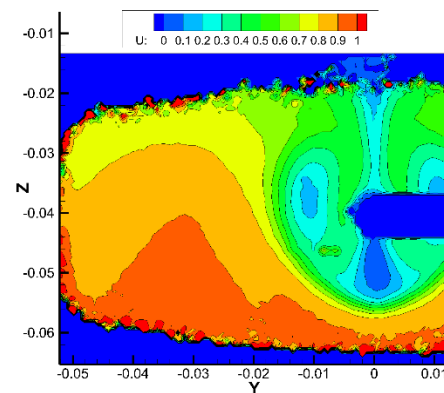
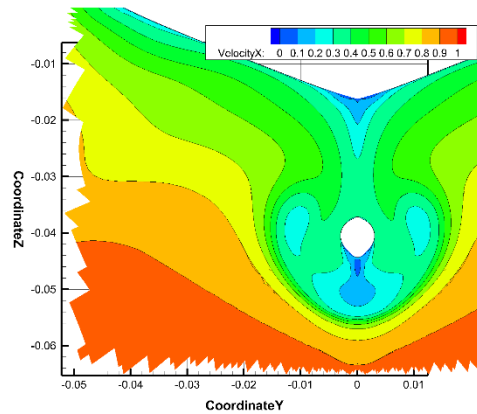
# 5. 5 CFDによる検証計算 (3) 抵抗状態



全抵抗の計算値  
 $C_t=0.004008$  ダクト無  
 $C_t=0.004010$  ダクト有

傾向は実験と一致  
流場の再現性も良好

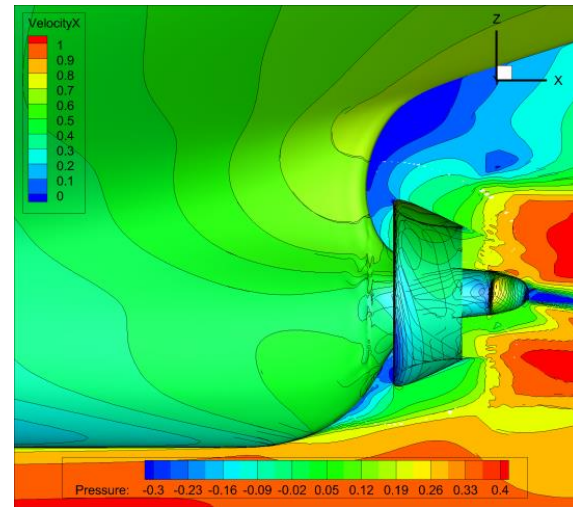
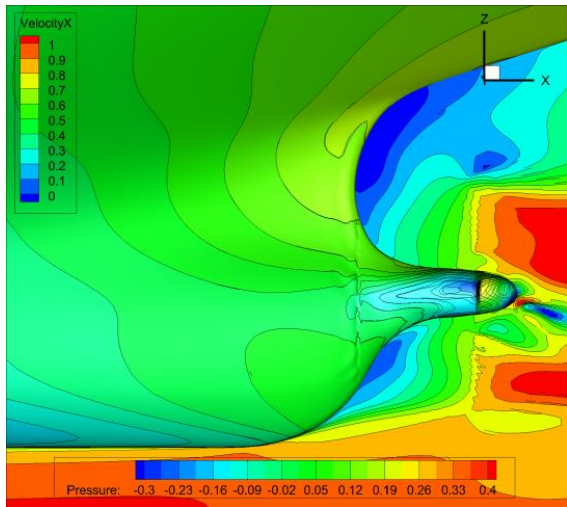
船体表面圧力分布および中心面速度分布(左:ダクト無、右:ダクト有)



ダクト中央位置の伴流分布(左:CFD、右:SPIV)  
ダクト無

ダクト中央位置の伴流分布(左:CFD、右:SPIV)  
ダクト有

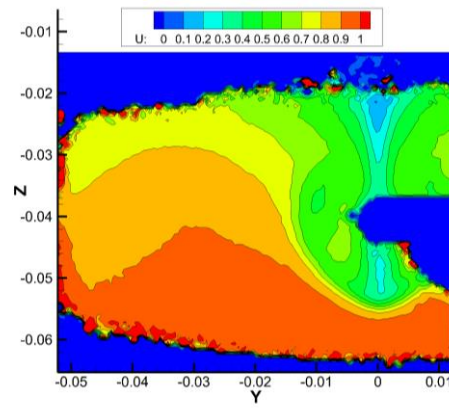
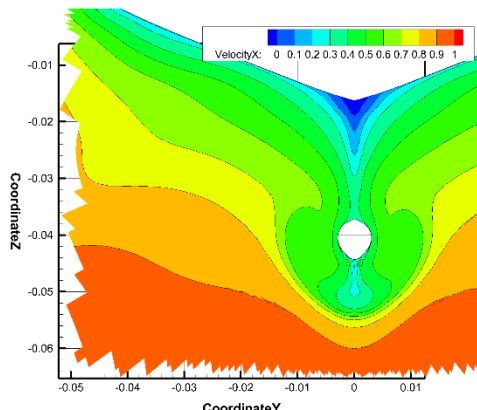
# 5. 5 CFDによる検証計算 (4) 自航状態



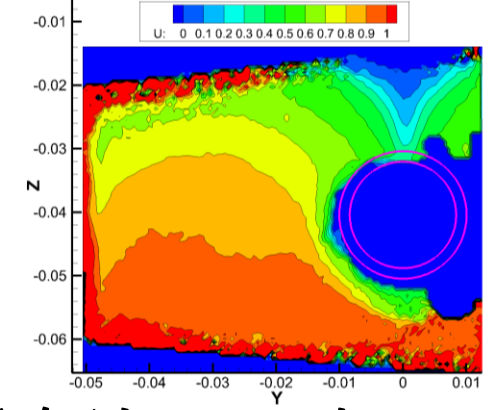
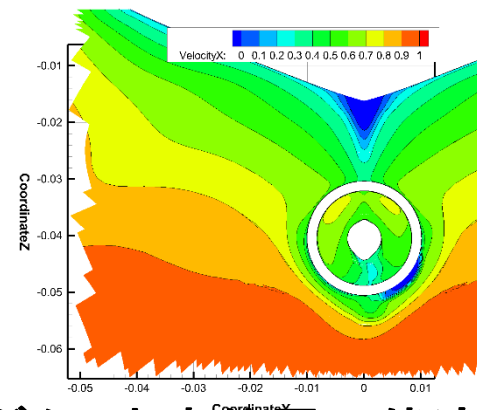
	推力減少 係数	有効伴流 係数	プロペラ 効率比
実験結果 (ダクトなし)	0.804	0.533	1.015
実験結果 (ダクトあり)	0.810	0.481	1.009
計算結果 (ダクトなし)	0.814	0.500	1.008
計算結果 (ダクトあり)	0.812	0.447	1.004

自航要素の傾向は実験と一致  
流場の再現性も良好

船体表面圧力分布および中心面速度分布(左:ダクト無、右:ダクト有)



ダクト中央位置の伴流分布(左:CFD、右:SPIV)  
ダクト無



ダクト中央位置の伴流分布(左:CFD、右:SPIV)  
ダクト有

## 5. 6 データベース構築

---

省エネ付加物が付いたケープサイズのバルクキャリア (Japan Bulk Carrier, JBC) を新規に設計開発し、その模型船周りの流場を、最新の計測技術を用いて計測することにより、CFD検証のための流場データベースを構築し、公開した。

データベースに収録したデータは、

- 船型・省エネ付加物の形状データ
- 抵抗・自航試験に関する計測データ
- SPIVを用いた流場データ

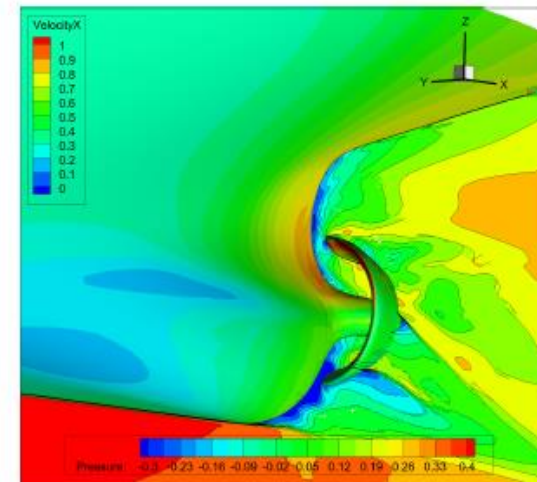
である。

# 5. 7 CFD解析ガイドライン策定

本研究によって構築したデータベースを用いて、CFD解析における種々の設定についてパラメータスタディを行い、「省エネ付加物付き船体に関するCFD解析ガイドライン」を策定した。  
ガイドラインに含まれる項目は、以下の通りである。

- 計算条件
- 計算格子
- 乱流モデル
- プロペラモデル
- 後処理

省エネ付加物付き船体に関する CFD 解析ガイドライン



## 5.7 CFD解析ガイドライン (1) 計算条件

---

### □ 自由表面の影響

推進性能向上を狙う水面下の省エネ付加物については  
二重模型流れで可

### □ 流れパラメータ

有次元計算: 重力加速度、動粘性係数、船速を設定

無次元計算: レイノルズ数、フルード数を設定

水槽試験データがある場合は試験状態と同じ条件を設定

## 5.7 CFD計算ガイドライン (2) 計算格子

- 船体格子: ITTCガイドライン7.5-03-02-04を参照

格子点数は両舷で300万点程度

- 省エネ付加物格子

付加物形状の再現、付加物影響評価を考慮

翼面形状の場合、片面45分割程度、前後縁では均等分割の30%程度の間隔で滑らかに分布

境界層方向の最小格子間隔 
$$\frac{\Delta_{amin}}{L} = \frac{\Delta_{min}}{L} \times \sqrt{\frac{C_f}{C_{fa}}}$$

$\Delta_{min}$ : 船体格子の境界層方向の最小格子間隔  
(ソルバーや乱流モデルに依存)

$L$ : 船長

$C_f$ : 船長に基づくレイノルズ数による摩擦抵抗係数

$C_{fa}$ : 付加物の代表長さに基づくレイノルズ数による摩擦抵抗係数

## 5. 7 CFD計算ガイドライン (3) 乱流モデル

---

省エネ付加物の多くは船尾の乱流境界層の中におかれ、プロペラの影響が大きい場合もあり、流れはかなり複雑になる。

省エネ付加物と船体等の干渉影響を評価するため、乱流モデルには

- ・k-omegaモデルなどの線形の2方程式モデル
  - ・代数方程式応力モデル
- あるいは、これらと同等以上のモデルを推奨

・ゼロ方程式モデルや1方程式モデルでは、流れの特性を再現しないおそれがある。

## 5. 7 CFD計算ガイドライン (4)プロペラモデル(I)

---

推進性能推定のためのプロペラ影響を考慮した自航状態のシミュレーションにおけるプロペラモデル

- ・比較的簡便な体積力モデル
    - ・揚力線理論に基づく簡易プロペラモデル
    - ・翼素理論に基づくプロペラモデルなど
    - ・揚力面・揚力体理論と組み合わせたモデル
- これらのモデルについては計算結果の差は小さい



## 5. 7 CFD計算ガイドライン (4)プロペラモデル(II)

---

- ・実プロペラ計算手法
  - ・プロペラ形状を正確に再現する必要がある場合は、プロペラ周りの計算格子を生成して計算
  - ・スライディングブロック法や重合格子法の適用が必要
  - ・自航シミュレーションおよびその解析法については、ITTCガイドライン7.5-03-03-01を参照

## 5.7 CFD計算ガイドライン (5)後処理(I)

---

### 省エネ付加物の効果の検討 積分量

- 省エネ付加物の有無での全抵抗値、公称伴流、自航要素の比較
- 省エネ付加物単独の流体力の比較(計測結果がある場合)

### プロペラ流入速度

- 省エネ付加物の有無でのプロペラ面の流速分布を比較
- 省エネ付加物により特徴のある断面について流速分布を比較

## 5.7 CFD計算ガイドライン (5) 後処理(II)

---

省エネ付加物の効果を再現できていない場合、以下を検討

- ①計算条件(レイノルズ数、フルード数、自由表面影響等)を確認する。
- ②省エネ付加物の影響評価に必要な形状を再現できているか確認する。
- ③格子分割数を変更して影響を調査する。
- ④数理モデルを変えて影響を調査する。

## 5.7 CFD計算ガイドライン (5)後処理(III)

---

### 流場計測データによる検証

- 省エネ付加物により特徴的な流場の変化を計算で再現できているかを確認するために計算結果を可視化
- SPIV計測結果を参照できる場合、省エネ付加物近傍の流速分布、プロペラ前方や後方の流速分布をSPIV計測結果と比較

## 5.7 CFD計算ガイドライン (5)後処理(IV)

---

### 不確かさ解析

CFD解析の一般的な不確かさ解析は、ITTC推奨手順7.5-03-01-01を参照

省エネ付加物有無でのCFD計算結果の相対差が計算の不確かさより大きい場合

求めた相対差は有効と考えられ、不確かさ解析により推定された真値 $S_0$ に基づく比較も可

CFDによる相対差が不確かさより小さい場合

計算で求められた相対差は不確かかであると判定できる。この場合は、格子をより細かくするなど、USNの低減を行ってさらに解析

## 6. 効果の検証(1): 技術的効果

---

- 構築された省エネルギー付加物付き船体まわりの流場データベースの公開は世界初の成果であった
- 船舶流体力学におけるCFDやEFD(実験流体力学)の研究に大きなインパクトを与えた
- 世界的権威のある船舶CFDの国際ワークショップ(CFD Workshop TOKYO 2015)におけるテストケースの一つとして、本データベースを使用した課題が採用された
- 船型名として”Japan Bulk Carrier(JBC)”が広く認知され、日本の研究開発力や技術力を世界にアピールした

## 6. 効果の検証(2): 経済的効果

---

- 付加物性能評価のためのCFD解析ガイドライン策定により、CFD手法の高度実用化が達成された
- 国際試験水槽会議(ITTC)の省エネルギー付加物に関する専門家委員会における、CFDガイドラインの作成において日本の先導的な立場をアピールした
- 今後の国際的な標準化や環境基準策定においても議論をリードすることが可能になった
- ガイドラインの策定により、省エネ付加物周りの性能評価精度が飛躍的に向上し、設計手法の高度化が達成された

## 7. 結言 (1)

---

- CFD 検証及びデータベース構築用の船型 (Japan Bulk Carrier) を設計し、7.0mモデルおよび3.2mモデルを製作した。
- 省エネルギー付加物として環形ダクトを採用し、CFD計算と水槽試験によって高い省エネ効果を示す付加物を設計した。
- 付加物がある場合とない場合について、抵抗試験および自航試験を行い、省エネ効果を計測した。
- SPIV (Stereo Particle Image Velocimetry) により流場計測を行い、長手方向7断面分について流速データを取得した。



## 7. 結言 (2)

---

- 船型データ、性能データおよび流速データを整理し、世界初の省エネ付加物付き船体周りの詳細な流場データベースを構築した。
- 上記データベースのデータに対応したCFD解析において格子数や乱流モデルなどのパラメータスタディを行い、省エネ付加物の性能評価のためのガイドラインを策定した。

# 本共同研究は、

---

一般財団法人日本海事協会  
国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所(事務局)  
国立大学法人横浜国立大学  
国立大学法人大阪大学  
ジャパンマリンユナイテッド株式会社  
住友重機械マリンエンジニアリング株式会社  
三菱重工業株式会社  
株式会社三井造船昭島研究所  
川崎重工業株式会社  
一般財団法人日本造船技術センター(順不同)

との共同研究体制により研究を実施するとともに、一般財団法人日本海事協会の「業界要望による共同研究」のスキームにより実施した。

(研究期間:開始2013年11月～終了2015年9月)