

株式会社名村造船所

風圧抵抗低減型居住区の CFD 計算結果の紹介

馬場 禎男*

Sadao Baba



実海域中を航行する船舶は、常に風波等の外乱の影響を受ける。ウェザールーティングによる最適航路を運航することで外乱の影響を極力小さくすることは可能であると考えられるが、外乱自体を無くすことはできない。そのため、平水中での船舶の推進・操縦性能だけでなく、実海域での性能の最適化も必要となる。一般的に船舶が受ける抵抗の大部分は水による抵抗であるが、風による抵抗も無視できない。弊社建造の 250,000DWT 型鉱石運搬船(以下、WOZMAX®)にて全抵抗に占める風圧抵抗の割合を試算したところ、Beaufort Scale 4~6 (絶対風速 5.5~13.8m/s) の正面向い風の条件下で常用出力において約 5~12%と推定された。そこで、平成 24 年度に風圧抵抗低減型居住区の開発を行った。その風洞試験結果を、名村テクニカルレビューNo.16 の「風圧抵抗低減型居住区の開発」で紹介した¹⁾。

本稿では、風圧抵抗低減型居住区の CFD による検証結果について紹介する。

1. 緒言

環境保護の観点と主力商品の競争力向上の観点から、平成 24 年度に WOZMAX®を対象に風圧抵抗低減型居住区を開発した。既存の居住区(以下、従来型居住区)、従来型居住区前面の左右コーナー部を三角形にカットした居住区、居住区の幅をエンジンケーシングと同じ幅として居住区前面の左右コーナー部を三角形にカットした居住区(以下、タワー型居住区)で風洞試験を行い、風圧抵抗低減量を調査した。弊社では風洞試験施設を所有していないため、風洞試験は外部機関に依頼する。そのため、時間的制約や費用対効果の点で課題があった。

近年、計算機の性能が飛躍的に向上したことにより、多くの格子数を必要とする複雑形状も数値計算できるようになった。風圧抵抗を対象とした CFD 計算も多数報告されている^{2),3),4)}。弊社では、平成 25 年度に非構造格子を作成できるソフトウェアを導入した。そこで、居住区における風圧抵抗の CFD 計算を実施し、風洞試験結果と比較・検証した。

2. 対象形状

計算対象として、従来型居住区、タワー型居住区および満載喫水線上の船体を付加した従来型の上部構造物(以下、従来型の上部構造物+船体)を選定した。風洞試験時の模型をそれぞれ写真 1~3 に示す。なお、風洞試験用の模型について、従来型居住区とタワー型居住区ともに実船寸法比が約 1/64、従来型の上部構造物+船体は約 1/194 の模型を採用した。

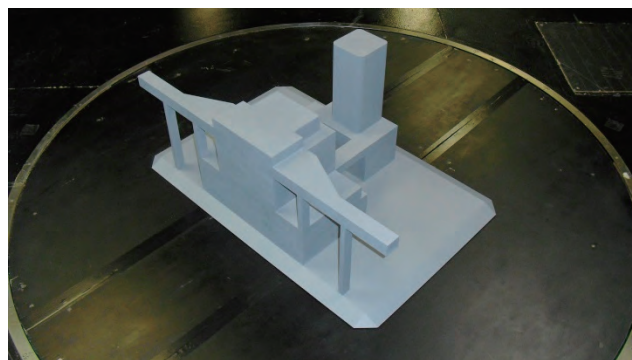


写真 1 従来型居住区模型

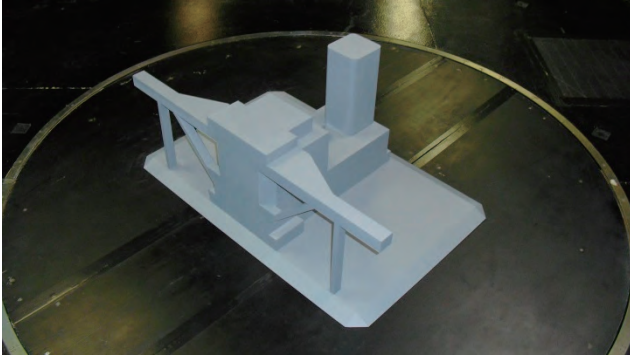


写真2 タワー型居住区模型

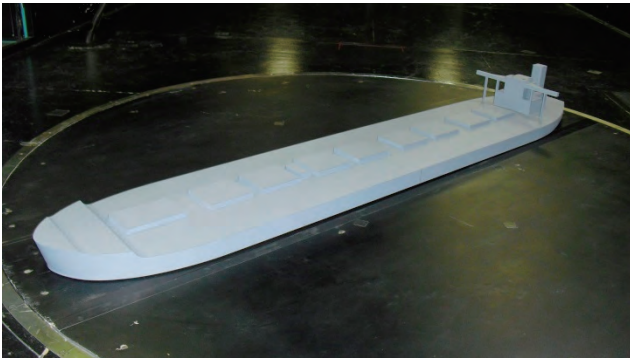


写真3 従来型の上部構造物+船体模型

3. 計算格子

3. 1 格子生成ソフトウェア

格子生成には NUMECA International 社製の HEXPRESS™ を使用した。HEXPRESS™ の特徴を以下に示す⁵⁾。

- ・初期格子生成から境界層の生成まで5つのステップで格子が生成できる。
- ・すべてのセルが高品質な六面体の非構造格子を、短時間で自動生成できる。
- ・レイノルズ数に応じた最適な境界層メッシュが提案される。
- ・自動スクリプト化により、類似形状メッシングの簡単化が図れる。
- ・自動セルサイズ調整で高品質の最適化が図れる。

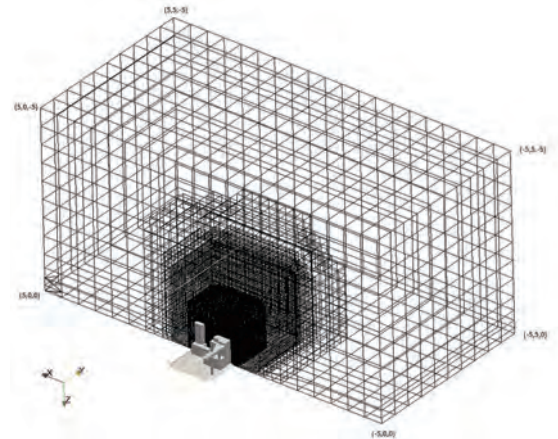
3. 2 居住区単体

計算格子は風洞試験時と同様、居住区+台座とした。従来型居住区とタワー型居住区ともに、長さは居住区前方から後方 (companionway を除く) で無次元化し、座標の原点は風洞試験と一致させた。ただし、座標系の向きは第1図に示した通り、風洞試験と異なる。



第1図 座標系(左: 風洞試験, 右: CFD 計算)

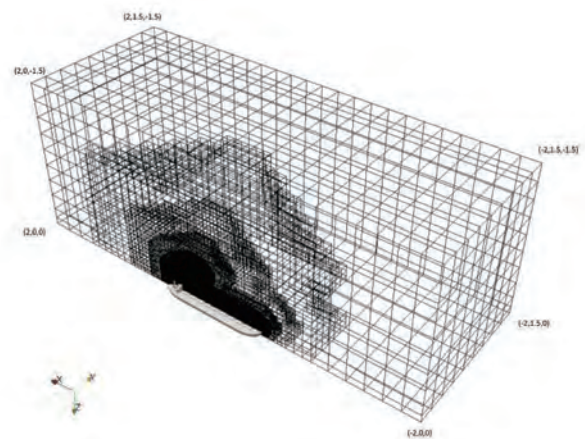
計算領域は、 $-5 \leq x \leq 5$ 、 $-5 \leq y \leq 5$ 、 $-5 \leq z \leq 0$ で、形状は直方体とした。居住区周りに局所細分化領域を設けた。格子数は約 180 万セルである。計算格子を第2図に示す。


第2図 計算格子(空間格子: $y \geq 0$ を表示)

3. 3 上部構造物+船体

計算格子は、垂線間長 L_{pp} で無次元化し、座標の原点は風洞試験と一致させた。座標系は居住区単体と同一である。

計算領域は、 $-2 \leq x \leq 2$ 、 $-1.5 \leq y \leq 1.5$ 、 $-1.5 \leq z \leq 0$ で、形状は直方体とした。船体と上部構造物周りに局所細分化領域を設けた。格子数は約 480 万セルである。計算格子を第3図に示す。


第3図 計算格子(空間格子: $y \geq 0$ を表示)

4. 計算法および計算条件

4. 1 CFD ソルバー

数値解析には海上技術安全研究所で開発された非構造格子対応の粘性流体解析ソフト SURF[®]を使用した。SURF の特徴を以下に示す⁷⁾。

- ・非圧縮性レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式を用い、疑似圧縮性を導入して定常解を求める手法である。
- ・疑似時間と実時間の二つの時間刻みを導入することにより非定常流れを計算できる。
- ・二重模型流れおよび非線形自由表面条件による自由表面流れを計算できる。
- ・空間離散化には非構造格子ベースの有限体積法を用い、変数配置は Cell-centered である。
- ・対流項は Flux-Difference-Splitting に基づく 2 次風上差分 (MUSCL type)、拡散項は 2 次中心差分を用いる。
- ・乱流モデルとして、Spalart-Allmaras モデル、修正 Spalart-Allmaras モデル、k- ω BSL モデルおよび k- ω SST モデルの 4 種類が組み込まれている。
- ・行列反転には対称ガウス・ザイデル法を用いる。
- ・時間微分は定常流れの場合は、1 次後退差分で近似し (陰的解法)、非定常流れの場合は、疑似時間は 1 次後退差分、実時間は 1 次または 2 次の後退差分で評価する。
- ・局所時間刻み、多重格子 (マルチグリッド) 法による収束加速を行なう。
- ・無限翼数プロペラ理論による簡易プロペラモデルが組み込まれている。

4. 2 計算条件

4. 2. 1 居住区単体

計算条件は、二重模型流れで、レイノルズ数を 8.52×10^5 とした。乱流モデルは SA モデルと k- ω SST モデルを用い、乱流遷移を伴わない全乱流モードで計算した。風向 Ψ は 0° から 360° の範囲を 10° 刻みとした。風向を -40° から 40° の範囲内で計算できるように、計算格子を z 軸まわりに回転させた。

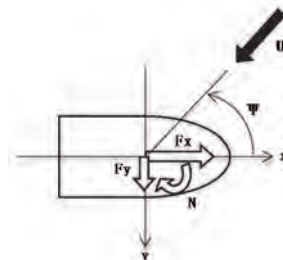
4. 2. 2 上部構造物+船体

計算条件は、二重模型流れで、レイノルズ数を 2.92×10^6 とした。乱流モデルは SA モデルを用い、乱流遷移を伴わない全乱流モードで計算した。風向 Ψ は 0° から 360° の範囲を 30° 刻みとした。風向を -30° から 30° の範囲内で計算できるように、計算格子を z 軸まわりに回転させた。

5. CFD 計算結果と風洞試験結果の比較

5. 1 各種係数

CFD 計算結果を風洞試験での座標系に変換する。風洞試験で用いた座標系を第 4 図に示す。



第 4 図 座標系

CFD 計算結果と風洞試験結果は、前後力 F_x 、横力 F_y 、回頭モーメント N を下記 (1) ~ (3) 式で示した無次元数で比較する。 C_x は風圧抵抗係数、 C_y は横力係数、 C_n は風圧回頭モーメント係数を表す。

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho A_T U^2} \quad (1)$$

$$C_y = \frac{F_y}{\frac{1}{2} \rho A_L U^2} \quad (2)$$

$$C_n = \frac{N}{\frac{1}{2} \rho A_L L U^2} \quad (3)$$

ここで、 ρ は空気密度、 A_T は正面風圧面積、 A_L は側面風圧面積、 L は全長、 U は風速である。なお、 F_x は船首方向を正としているため、抵抗の場合には負の値となる。

5. 2 可視化

CFD 計算結果を可視化し、居住区形状や乱流モデルの違いによる圧力分布の影響を調べる。可視化には、フリーソフトの ParaView[®]を用いた。

5. 3 計算の発散

従来型居住区単体模型において、風向が 10° 、 260° と 350° の k- ω SST モデルによる計算で発散が生じた。また、タワー型居住区単体模型において、風向が 120° の SA モデルによる計算で、風向が 130° の k- ω SST モデルによる計算で発散が生じた。発散したデータは取り除いて風洞試験結果と比較する。なお、従来型の上部構造物+船体模型においては、発散は生じていない。

5. 4 居住区単体

5. 4. 1 各種係数

従来型居住区単体模型について、第 5 図に C_x の結果を、第 6 図に C_y の結果を、第 7 図に C_n の結果を示す。 C_x について、風向が $0^\circ \sim 20^\circ$ と $340^\circ \sim 360^\circ$ で CFD 計算結果と風洞試験結果に差異がみられるが、概ね一致している。風洞試験結果では風向が 330° で C_x の絶対値が最大値となり、CFD 計算結果では SA モデルで風向が 10° 、 $k-\omega$ SST モデルで風向が 330° で最大値となった。 C_y について、風向が $70^\circ \sim 100^\circ$ と $280^\circ \sim 300^\circ$ で CFD 計算結果と風洞試験結果に差異がみられるが、概ね一致している。 C_n について、風向が $30^\circ \sim 140^\circ$ と $230^\circ \sim 310^\circ$ で差異がみられる。 C_x 、 C_y および C_n のいずれも乱流モデルによる差は小さい結果となった。

一方、タワー型居住区単体模型について、第 8 図に C_x の結果を、第 9 図に C_y の結果を、第 10 図に C_n の結果を示す。 C_x について、風向が 0° 、 100° と 250° 付近で CFD 計算結果と風洞試験結果に差異がみられるが、概ね一致している。風洞試験結果では風向が 20° で C_x の絶対値が最大値となり、CFD 計算結果では SA モデルで風向が 340° 、 $k-\omega$ SST モデルで風向が 20° で最大値となった。 C_y について、風向が $70^\circ \sim 110^\circ$ と $260^\circ \sim 280^\circ$ で CFD 計算結果と風洞試験結果に差異がみられるが、概ね一致している。 C_n について、風向が $40^\circ \sim 140^\circ$ と $220^\circ \sim 320^\circ$ で差異がみられる。

正面風圧抵抗係数 $C_{x,0}$ において、CFD 計算結果と風洞試験結果を比較した。風洞試験結果では、タワー型居住区は従来型居住区よりも約 8.6% 減となった。一方、CFD 計算結果では、SA モデルと $k-\omega$ SST モデルともに約 6.0% 減となった。

5. 4. 2 圧力分布

風向が 0° での従来型居住区単体模型に働く圧力分布について、第 11 図に SA モデルによる CFD 計算結果を、第 12 図に $k-\omega$ SST モデルによる CFD 計算結果を示す。居住区前面に働く圧力については乱流モデルによる差異がみられない。また、センターライン周辺の圧力分布について、第 13 図に SA モデルによる CFD 計算結果を、第 14 図に $k-\omega$ SST モデルによる CFD 計算結果を示す。 $k-\omega$ SST モデルの方が SA モデルよりも居住区後端の剥離域が広い結果となった。

一方、風向が 0° でのタワー型居住区単体模型に働く圧力分布について、第 15 図に SA モデルによる CFD 計算結果

を、第 16 図に $k-\omega$ SST モデルによる CFD 計算結果を示す。従来型居住区単体模型と同様、居住区前面に働く圧力については乱流モデルによる差異がみられない。また、センターライン周辺の圧力分布について、第 17 図に SA モデルによる CFD 計算結果を、第 18 図に $k-\omega$ SST モデルによる CFD 計算結果を示す。従来型居住区単体模型と同様、 $k-\omega$ SST モデルの方が SA モデルよりも居住区後端の剥離域が広い結果となった。

5. 5 上部構造物+船体

5. 5. 1 各種係数

従来型の上部構造物+船体模型について、第 19 図に C_x の結果を、第 20 図に C_y の結果を、第 21 図に C_n の結果を示す。 C_x について、風向が 0° 、 150° と 210° で CFD 計算結果と風洞試験結果に差異がみられるが、良い一致を示す。 C_y について、風向が $60^\circ \sim 120^\circ$ と $240^\circ \sim 300^\circ$ で CFD 計算結果と風洞試験結果に大きな差異がみられる。 C_n について、風向が 30° と 330° で CFD 計算結果と風洞試験結果に若干の差異がみられるが、良い一致を示す。

5. 5. 2 圧力分布

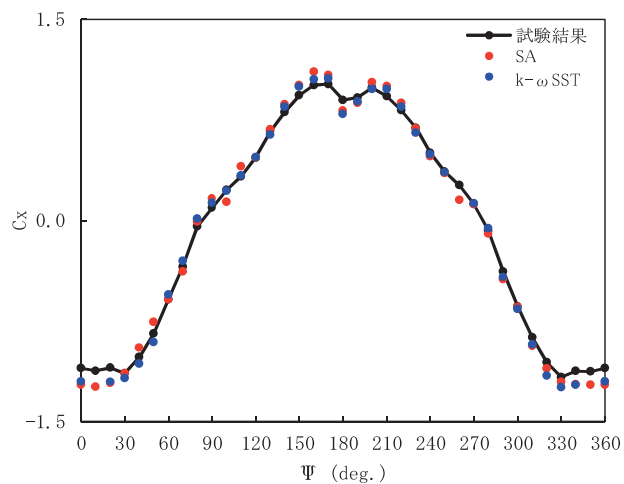
風向が 0° での従来型の上部構造物+船体模型に働く圧力分布について、第 22 図に CFD 計算結果を示す。また、センターライン周辺の圧力分布について、第 23 図に CFD 計算結果を示す。前方にハッチカバーがあることで、居住区に働く圧力分布が居住区単体模型と異なることが分かる。

5. 5. 3 計算モデル

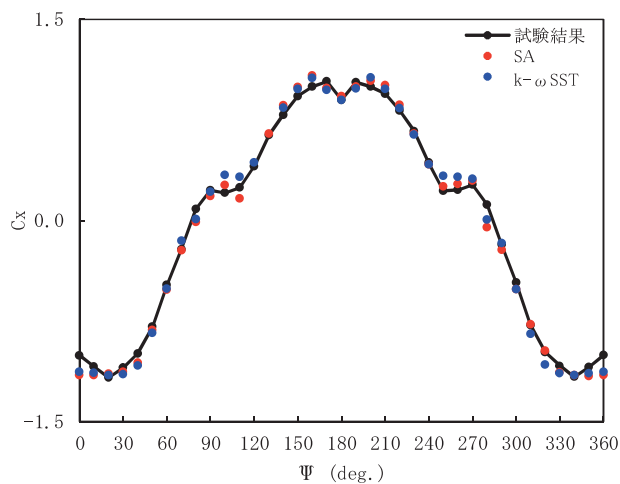
C_y で CFD 計算結果と風洞試験結果が大きく乖離しているため、風向が -30° (330°) $\sim 30^\circ$ の計算で使用したモデルにて 60° の計算を実施した。 x 軸を船長方向とした計算モデルにおける上部構造物+船体模型表面の正面圧力分布図、側面圧力分布図と甲板高さでの圧力分布図を、それぞれ第 24 図、第 25 図と第 26 図に示す。一方、 y 軸を船長方向とした計算モデルにおける圧力分布図を、それぞれ第 27 図、第 28 図と第 29 図に示す。両者の計算モデルで差異はみられない。また、第 1 表に CFD 計算結果を示す。

第 1 表 CFD 計算結果 ($\Psi=60^\circ$)

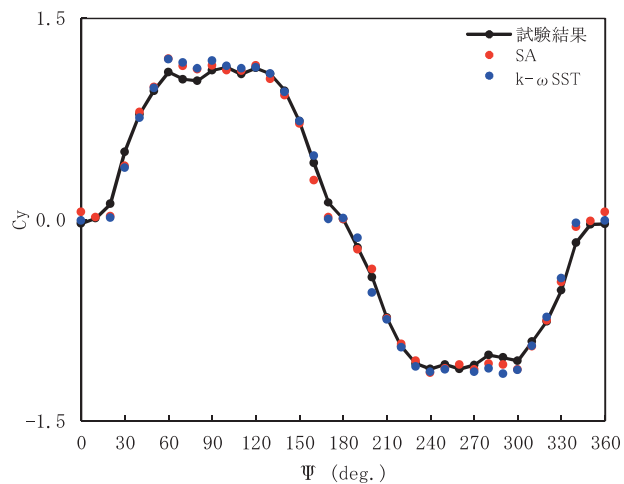
船長方向	船幅方向	C_x	C_y	C_n
x 軸	y 軸	-0.266	0.795	-0.023
y 軸	x 軸	-0.270	0.803	-0.024



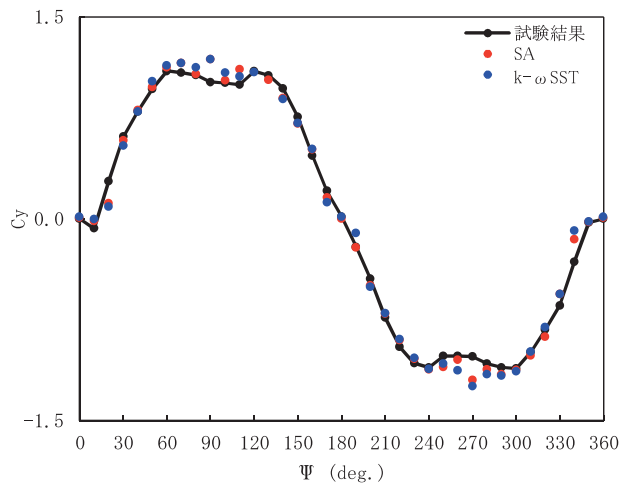
第5図 従来型居住区単体模型による試験結果とCFD計算結果(SAモデル, $k-\omega$ SSTモデル)の C_x の比較



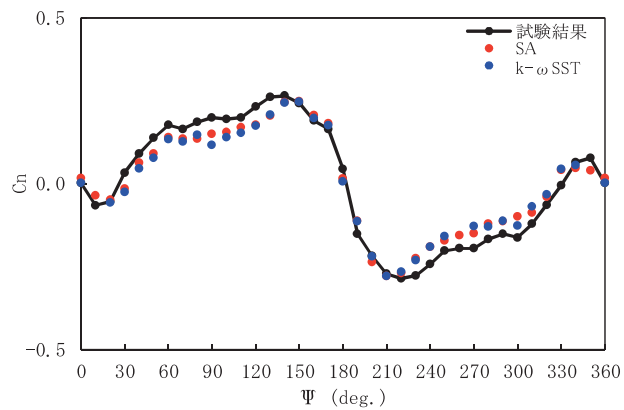
第8図 タワー型居住区単体模型による試験結果とCFD計算結果(SAモデル, $k-\omega$ SSTモデル)の C_x の比較



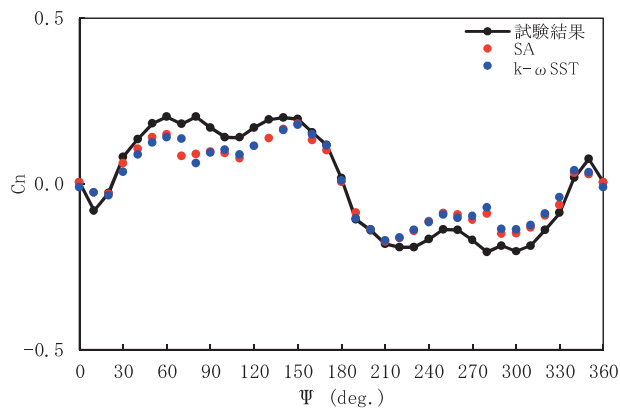
第6図 従来型居住区単体模型による試験結果とCFD計算結果(SAモデル, $k-\omega$ SSTモデル)の C_y の比較



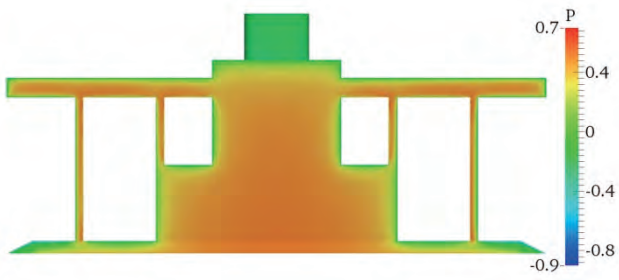
第9図 タワー型居住区単体模型による試験結果とCFD計算結果(SAモデル, $k-\omega$ SSTモデル)の C_y の比較



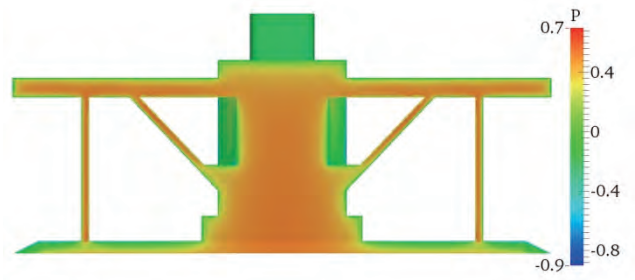
第7図 従来型居住区単体模型による試験結果とCFD計算結果(SAモデル, $k-\omega$ SSTモデル)の C_n の比較



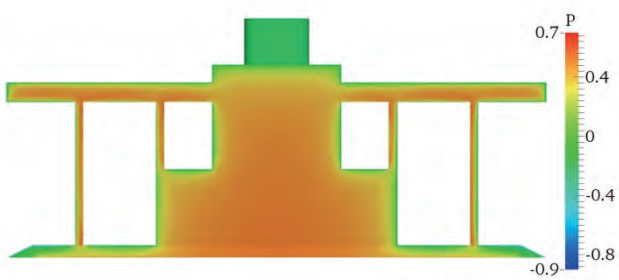
第10図 タワー型居住区単体模型による試験結果とCFD計算結果(SAモデル, $k-\omega$ SSTモデル)の C_n の比較



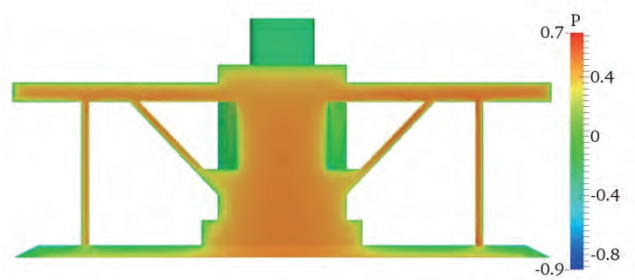
第 11 図 従来型居住区単体模型の正面圧力分布
 $\Psi=0^\circ$ CFD 計算結果(SA モデル)



第 15 図 タワー型居住区単体模型の正面圧力分布
 $\Psi=0^\circ$ CFD 計算結果(SA モデル)



第 12 図 従来型居住区単体模型の正面圧力分布
 $\Psi=0^\circ$ CFD 計算結果(k- ω SST モデル)



第 16 図 タワー型居住区単体模型の正面圧力分布
 $\Psi=0^\circ$ CFD 計算結果(k- ω SST モデル)



第 13 図 従来型居住区単体模型のセンターライン周辺の
圧力分布 $\Psi=0^\circ$ CFD 計算結果(SA モデル)



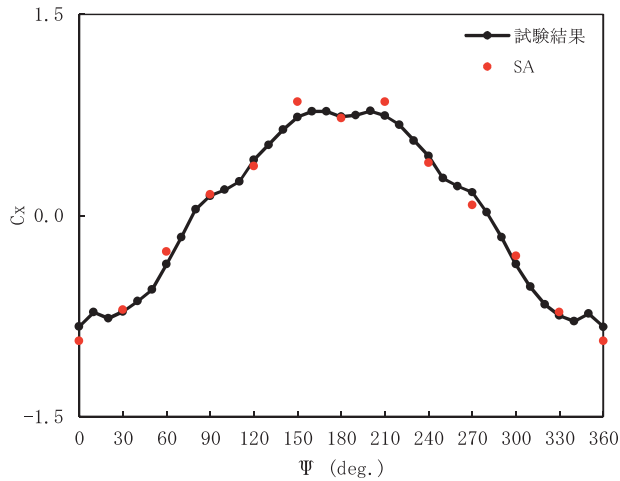
第 17 図 タワー型居住区単体模型のセンターライン周辺
の圧力分布 $\Psi=0^\circ$ CFD 計算結果(SA モデル)



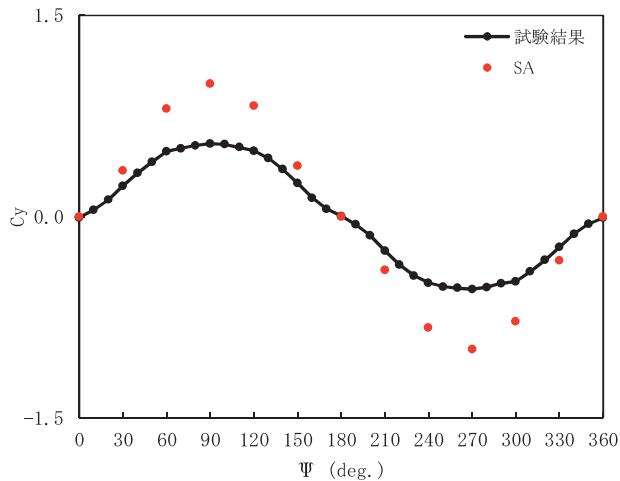
第 14 図 従来型居住区単体模型のセンターライン周辺の
圧力分布 $\Psi=0^\circ$ CFD 計算結果(k- ω SST モデル)



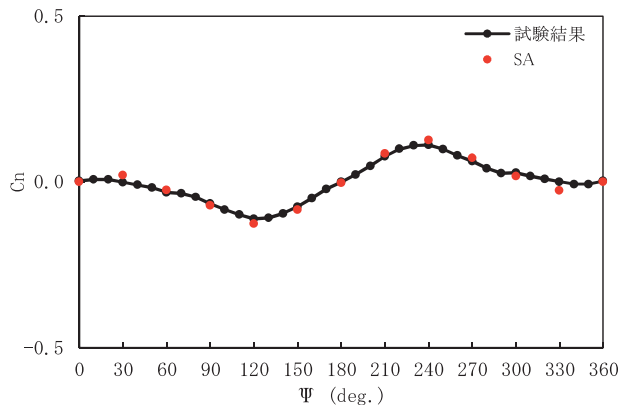
第 18 図 タワー型居住区単体模型のセンターライン周辺
の圧力分布 $\Psi=0^\circ$ CFD 計算結果(k- ω SST モデル)



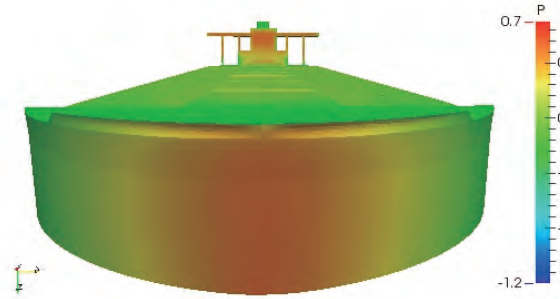
第19図 従来型の上部構造物+船体模型による試験結果とCFD計算結果(SAモデル)の C_x の比較



第20図 従来型の上部構造物+船体模型による試験結果とCFD計算結果(SAモデル)の C_y の比較



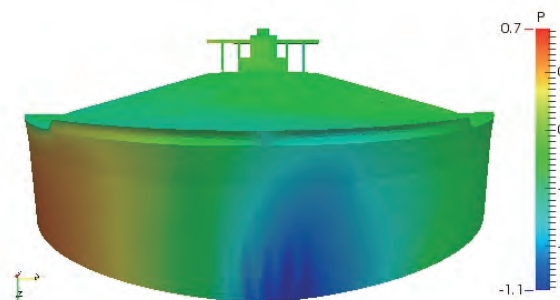
第21図 従来型の上部構造物+船体模型による試験結果とCFD計算結果(SAモデル)の C_n の比較



第22図 従来型の上部構造物+船体模型の正面圧力分布
 $\Psi=0^\circ$ CFD計算結果(SAモデル)



第23図 従来型の上部構造物+船体模型のセンターライン
周辺の圧力分布 $\Psi=0^\circ$ CFD計算結果(SAモデル)



第24図 従来型の上部構造物+船体模型の正面圧力分布
 $\Psi=60^\circ$ CFD計算結果(SAモデル) x軸:船長方向



第25図 従来型の上部構造物+船体模型の側面圧力分布
 $\Psi=60^\circ$ CFD計算結果(SAモデル) x軸:船長方向



第26図 従来型の上部構造物+船体模型周辺の甲板上の圧
力分布 $\Psi=60^\circ$ CFD計算結果(SAモデル) x軸:船長方向

6. 結言

SURF による CFD 計算結果と風洞試験結果を比較し、次の知見を得た。

- ・居住区単体モデルでは、 C_x と C_y は CFD で精度良く推定できる。
- ・SA モデルと $k-\omega$ SST モデルでは、剥離範囲に差異がみられるが、 C_x 、 C_y と C_n に与える影響は小さい。
- ・上部構造物+船体モデルでは、 C_x と C_n は CFD で精度良く推定できるが、 C_y は横風において過剰に推定される。

弊社では、船の抵抗・自航計算や省エネ付加物の計算等、水中における計算に SURF を活用してきた。今回、風圧抵抗の計算を実施し、風洞においても精度良く推定できることが分かり、SURF の活用の幅が広がった。

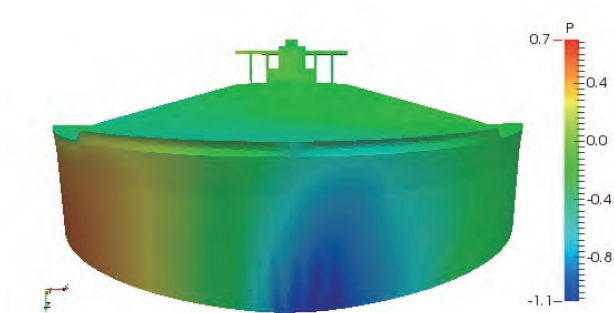
今後は、海上技術安全研究所で開発中の次世代 CFD ソルバーの NAGISA⁹⁾ も活用し、船体や付加物に働く圧力計算に取り組む。

謝辞

本稿の CFD 計算に際し、国立研究開発法人 海上技術安全研究所 CFD 研究グループの皆様にご指導、ご協力を頂きました。この場を借りて御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 馬場禎男：風圧抵抗低減型居住区の開発 名村テクニカルレビューNo.16 2013 年 pp.18-23
- 2) 中島卓司ほか：段差隅切り形状による船舶居住区風抵抗低減効果の数値解析 日本船舶海洋工学会論文集 第 9 号 2009 年 pp.87-95
- 3) 池田剛大ほか：風圧抵抗低減船型に関する検討 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第 14 号 2012 年 pp.409-412
- 4) 水谷圭介ほか：チップ船の荷役装置が風圧力特性に及ぼす影響について 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第 18 号 2014 年 pp.421-424
- 5) NUMECA ジャパン(株)：HEXRESS_製品概要_ver2.0 pp.18
- 6) T. Hino：Navier-Stokes Computations of Ship Flows on Unstructured Grids, Proceedings of the 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics, 1998
- 7) 海上技術安全研究所：SURF Ver 6.44 ユーザーズ・マニュアル 2012 年 pp.3
- 8) ParaView：http://www.paraview.org/
- 9) 大橋訓英ほか：重合格子対応構造格子 NS ソルバーの開発 第 28 回数値流体力学シンポジウム論文集 2014 年 F06-2



第 27 図 従来型の上部構造物+船体模型の正面圧力分布
 $\Psi=60^\circ$ CFD 計算結果(SA モデル) y 軸:船長方向



第 28 図 従来型の上部構造物+船体模型の側面圧力分布
 $\Psi=60^\circ$ CFD 計算結果(SA モデル) y 軸:船長方向



第 29 図 従来型の上部構造物+船体模型周辺の甲板上の圧力分布 $\Psi=60^\circ$ CFD 計算結果(SA モデル) y 軸:船長方向