船首船底下流場の実船スケール CFD 解析

幸*` 則* 野 孝 正会員 日 正会員 安 藤 英 雅 彦*** 須 藤 康 広 正会員 谷 Ш 正会員 士** 杉 田 浩 虫 眀 昌 彦 正会員 川 浪 敏 志***

CFD Analysis of Flow Fields under Bow Bottom of Ships in Full-Scale

by Takanori Hino, *Member* Hideyuki Ando, *Member* Masahiko Tanigawa, *Member* Yasuhiro Sudo, *Member* Koji Sugita, *Member* Masahiko Mushiake Satoshi Kawanami

Summary

Ship's speed through water is one of the most important factors in the energy efficiency evaluations of ships in operation. Recently ship performance monitoring systems are being installed in the wide variety of ships for efficient operations and ship's speed through water is usually measured using the Doppler speed log system. The measuring accuracy of the Doppler speed log systems, however, may not be sufficient for the evaluations of various energy-saving measures since the measuring locations are 3 to 20 meters below the bow bottom of ships where the water speed may be affected by the local disturbances of a ship hull. In this study, in order to investigate the properties of velocity distributions under bow bottom of ships, the flow fields of full scale ships are simulated using CFD approach. The computed results for a blunt ship and a slender ship in laden and ballast conditions with various ship speeds are presented. It is shown that the properties of the disturbance velocity due to a ship hull depend on ship's draft and ship speeds differently with a ship type.

1. まえがき

船舶運航の省エネルギー化は経済的効率性の追求に加え て、近年は地球温暖化防止の観点からもそのニーズが増大し ており、その実現のためにハード、ソフトの両面から様々な 方法が用いられている.これらの省エネ技術の有効性の検証 のためには実海域における運航モニタリングが必要となる. 運航モニタリングでは各種のデータが計測されるが、その中 でも対水船速はエネルギー効率の算定に直接関わるので、そ の計測精度が極めて重要となる.

通常,対水船速は船首船底におけるドップラー式対水船 速計によって船底から約3~20m下方における流速を計測 して求めている.しかし,この位置での流速には船体自体 による撹乱速度が影響しており表層とは異なる潮流影響な ども含めて,対水流速としての計測精度はそれほど高くな

* 横浜国立大学
 *** 株式会社 MTI
 *** ジャパン マリンユナイテッド株式会社
 **** 古野電気株式会社

原稿受理 平成 28 年 4 月 23 日

い可能性がある.実用上は、海上試運転において GPS 船速 との相対差を用いて補正係数を求めて運用している.

このようなドップラー式対水船速計の計測精度を検討す るために,計算流体力学(CFD)手法を用いて実船スケール の船体について自由表面を考慮した粘性流場計算を行い,船 首船底下の流速分布の特性を調査した.

2. CFD 計算手法

計算に用いた CFD 手法は,海上技術安全研究所で開発された流れシミュレーションのための3次元非圧縮ナビエ・ストークス・ソルバー, SURF¹⁾である.

支配方程式は、非圧縮性レイノルズ平均ナビエ・ストーク ス方程式であり、擬似圧縮性を導入して圧力場と速度場をカ ップリングさせている.レベルセット関数による界面捕獲法 により、非線形自由表面条件を考慮した自由表面流れを計算 できる.自由表面の運動学的条件はレベルセット関数の移流 方程式によって満足し、力学的条件は自由表面における速度 の外挿と圧力の境界条件によって満足させている.また、空 間離散化には非構造格子ベースの有限体積法を用い、セル中 心に変数を配置し、対流項は Flux-Difference-Splitting に基づ く 2 次風上差分, 拡散項は 2 次中心差分を用いている.時間 積分は, 陰的解法により定常流場および非定常流場に対応し ている. 乱流モデルとして, 1 方程式の Spalart-Allmaras モ デル, 2 方程式の *k-ω* モデルなどが組み込まれている.

ここでは,肥大船および痩型船を対象として,実船スケールの CFD 計算を行い,船首船底下の流場を解析した.

3. 肥大船の例

3.1 対象船型

肥大船に関する検討の対象として, Japan Bulk Carrier (JBC) 船型²⁾を選択した. JBC は, CFD による流場解析精度検証の ベンチマークのために設計された,ケープサイズのバルクキ ャリアである. JBC の主要目を Table 1 に示す.

L_{PP}	280.0 m
L_{WL}	285.0 m
В	45.0 m
d (Laden)	16.5 m
C_B	0.8580

3.2 計算条件

満載状態と軽荷状態の 2 状態について解析を行った. 満載 状態は, 喫水 d = 16.5 m のイーブンキールとし, 軽荷状態 の喫水は, FP で df = 6.54 m, midship で dm = 7.62 m, AP で da = 8.69 m とした. 軽荷状態の排水量は満載の約 44%で ある. また, いずれの計算においても航走姿勢を固定した. 乱流モデルは k- ω SST モデルを用いた.

満載状態の計算格子を Fig.1 に示す. O-O トポロジの構造 格子とし、セル数は、256×48×312=3,833,856、計算領域 は、

$$\begin{split} -1.5 &\leq x/L_{pp} \leq 2.5, \ -2 &\leq y/L_{pp} \leq 0, \\ &-1.97 &\leq z/L_{pp} &\leq 0.031 \end{split}$$

である.ここで, (x, y, z)座標は前後方向(後方が正),左右 方向(右が正),鉛直方向(上が正)であり,原点はFP,左右 対称面,静止水面の交点にとる.船体表面における境界層方 向の最小格子間隔は平均で $\Delta/L_{PP} = 1.8 \times 10^{-8}$ である.壁関数 を用いないで,船体表面の境界層を解像するために,十分細 かい格子間隔となるように留意した.また,レベルセット関 数による水面位置の解像のため,自由表面近くの鉛直方向の 格子間隔は平均で $\Delta/L_{PP} = 0.003$ とした.軽荷状態の格子も*z* 方向の領域を除き同様のパラメータで作成した.速度範囲は, 12kt から 18kt まで 2kt 毎とし,船速,レイノルズ数,フ ルード数 (ともに L_{PP} ベース)を Table 2 に示す.なお,レ イノルズ数は 15°C 海水を想定して設定した.



Fig.1 Computational Grid for Japan Bulk Carrier

Table 2 Computational Parameters

Vs (kt)	V s(m/s)	Re	Fr
12.0	6.173	1.454E+09	0.118
14.0	7.202	1.696E+09	0.137
16.0	8.231	1.938E+09	0.157
18.0	9.260	2.180E+09	0.177





Fig.2 Velocity extraction lines (Lines 1, 2 and 3)

Fig.2 に速度を抽出する位置を示す. これは実際のドッ プラー式対水船速計のビームの方向に対応しており, FP よ り 4.2m 後方の船底から前方に向かって 55°下方 (Line1), および 120°後方に向かって 55°下方 (Line2) である. また, Line3 は Line2 と左右対称の位置にある.

3.3 満載状態

Fig. 3 に船速 Fr=0.157(16kt) における船体表面の圧力 分布および左右対称面の x 方向の速度 u 分布を示す.他の 速度における流場もほぼ同様とみなすことができる.船首ビ ルジ部では,流れが船底に回り込むことから,流速が速くな り圧力は低くなる.ここでは示していないが,低圧部分は船 速が速いほど大きくなる傾向がある.速度分布を見ると,船 体より前方では,船首による堰き止め効果により減速してい る.船底では,ビルジ部の低圧部と同様に船底に回り込む流 れのために流速が早くなっている.船底では境界層の発達も 観察されるが,速度抽出位置 (FP より 4.2m 後方)付近で は,境界層はまだ薄い.また,速度抽出線を比較すると, 前方に向かう Line1 は比較的浅い水深で増速域から出てい る.Line2 は左右対称面上にはないので,図に示す左右対称 面の速度とは異なる分布を計測していることになる.



Fig. 3 Hull pressure distribution and velocity distribution on center plane at *Fr*=0.157 (Laden condition).



Fig.4 *u*/*Vs* (velocity in *x* direction) on Line1 (top) and Line2 (bottom) (Laden condition).

Fig.4 は Line1 および Line2 における x 方向の速度分布を船速 で無次元化し、船底からの鉛直距離 db/L_{PP} に対してプロッ トしたものである. Line1 は一度 u/Vs=1.15 (Vs は船速)付 近まで増速してから 0.95 まで減速し、そこから徐々に回復 して 1.0 に近づく. 一方、Line2 は u/Vs=1.15 まで増速後、 徐々に減速して 1.0 に漸近する. 船速による差は微小であり、 各船速ともほぼ同様の分布となる. また、船底からの距離 $db/L_{PP}=0.16$ (約 45m) の位置での u/Vs は、Line1 の場合 Vsの 1%減、Line2 では 1%増となっている.



Fig.5 Averaged *u/Vs* of Lines 1-3 (Laden condition).



Fig.6 Averaged *u/Vs* of Lines 1-3 for double model flow (Laden condition).

Fig.5 は Line1, Line2, Line3 (Line2 の左右対称位置)の 平均の速度分布である.これは実際のドップラー式対水船速 計が、3 つのビーム方向の対水速度を合成することで水平方 向の対水船速を求めていることに対応している.船底からの 距離が db/L_{PP} =0.04(約 10m) より深いところでは, Line1 の 場合は一様流より小さく, Line2 では一様流より大きい (Fig.4) が、平均するとキャンセルして、船底からの距離 db/L_{PP} =0.1(約 25m) 程度の深さでほぼ一定となる.船底から 程度である.

自由表面影響を検討するために、二重模型流れを計算し、 Fig.5 と同様に 3 方向の平均速度分布を求めた(Fig.6). レイ ノルズ数は Table 2 の 12kt 相当に設定した. Fig.6 の速度分 布は Fig.5 とほぼ同様であり、満載状態では自由表面影響は ほとんど見られない.

3.4 軽荷状態

Fig.7 に軽荷状態の船速 Fr=0.157(16kt) における船体表 面の圧力分布および左右対称面の u 分布を示す. 波面形状 から船首波が砕波していることが分かる. 満載状態と異なり, 船首バルブが水面を貫通していることから, 船首部の船体表 面圧力分布は満載とは異なっている. 船首ビルジでの低圧部 は満載と同様であるが, 圧力低下量は満載よりも少ない.

速度分布は,船底での流速が増加する領域が満載状態より も狭くなっているが,境界層の発達は満載状態と同様と考え られる.



Fig.7 Hull pressure distribution and velocity distribution on center plane at *Fr*=0.157 (Ballast condition).

Fig.8 は Line1 および Line2 の速度分布のプロットで ある. 全般的な傾向は満載状態と同様であるが,船底近くの 速度の極値は, u/Vs=1.10 程度であり,軽荷状態の方が小さ い. 喫水が浅く排水量も少ないので,撹乱源としての船体の 影響が小さいためと考察される.



Fig.8 *u* /*Vs* (velocity in *x* direction) on Line1 (top) and Line2 (bottom) (Ballast condition).

Fig.9 は Line1, Line2, Line3(Line2 の左右対称位置)の 平均の速度分布である.満載状態(Fig.5)に比べて船速による 差が大きい.また,船底からの距離が *db/L_{PP}*=0.16(約45m)の 位置でも *u* は深さ方向に変化している. 喫水の差が約 10m あるので (満載状態は喫水 16.5m, 軽荷状態は, FP から 4.2m 後方で喫水 6.57m),静水面からの距離にも差があるこ と,軽荷状態の方が砕波の発生など,自由表面の動きが激し いことなどが理由として考えられる.

Fig.10 に自由表面影響を除外した二重模型流れの場合の3 方向を平均した速度分布を示す.Fig.9 で速度の遅い *Fr*=0.118 の場合は二重模型流れの速度分布と同様であるが, 船速が大きくなると,二重模型流れからの差が見られ, *db/L_{PP}*=0.08 (船底から約 22m)より浅い領域では自由表面影 響があるといえる.



Fig.9 Averaged *u/Vs* of Lines 1-3 (Ballast condition).



Fig.10 Averaged *u/Vs* of Lines 1-3 for double model flow (Ballast condition)

4. 痩型船の例

4.1 対象船型

KRISO Container Ship ³⁾(L_{PP} =230m) の船長を L_{PP} =190m に縮小した船型を対象とした. 縮小後の KRISO Container Ship の要目を Table 3 に示す.
 Table 3
 Principal Particulars of KRISO Container Ship (After Reduction)

,)		
L_{PP}	190.0 m	
В	26.6 m	
d (Laden)	8.922 m	
C_B	0.6505	

4.2 計算条件

肥大船と同様に満載状態と軽荷状態の 2 状態の解析を行った. 満載状態は *d* = 8.922m のイーブンキール, 軽荷状態 は *d* = 5.4m のイーブンキールである. 軽荷状態の排水量は 満載の約 54%である. ともに航走姿勢の変化は考慮していない. 乱流モデルは, 1 方程式モデルの Spalart-Allmaras モデルとした.

満載状態の格子を Fig.11 に示す. O-O トポロジ の構造格 子であり,格子セル数 256×48×278=3,416,064,計算領域 は,

$$-1.5 \le x/L_{pp} \le 3.5, -2 \le y/L_{pp} \le 0,$$

 $-1.98 \le z/L_{pp} \le 0.018$

また,船体表面の境界層方向の最小格子間隔は平均で, $\Delta/L_{PP} = 1.95 \times 10^{-8}$,自由表面付近の鉛直方向の平均格子間隔 $t\Delta/L_{PP} = 0.0012$ である.軽荷状態の格子も同様のパラメー タで作成した.



Fig.11 Computational mesh for KRISO Container Ship

速度範囲は、 12kt から 22kt まで 2kt 毎とした. 船速, レイノルズ数、フルード数 (ともに L_{pp} ベース)を Table 4 に示す. なお、肥大船の際と同様にレイノルズ数は 15°C 海 水を想定して設定した.

Fig.12 に速度を抽出する位置を示す. 位置は肥大船の場合 と同様であるが,船型に差があるので船体の影響はかなり 異なると思われる.

Table 4Computational parameters

<i>V s</i> (kt)	Vs(m/s)	Re	Fr
12.0	6.173	9.863E+08	0.143
14.0	7.202	1.151E+09	0.167
16.0	8.231	1.315E+09	0.191
18.0	9.260	1.479E+09	0.215
20.0	10.289	1.644E+09	0.238
22.0	11.318	1.808E+09	0.262



Fig.12 Velocity extraction lines (Lines 1, 2 and 3)

4.3 満載状態

Fig.13 は船速 20kt(Fr=0.238)における船体表面の圧力分布 および左右対称面の u 分布である.境界層の外側の外部流れ を見ると,船首バルブの下で流体は加速され,その下流側で は自由表面波の影響で流速が遅くなる領域がある.ここでは 示していないが,船速が速くなると,自由表面波の波長が長 くなるので,それに対応して低速領域が拡大する傾向が見ら れる.また,船底に発達する境界層の厚さは,この船速(レ イノルズ数)の範囲では船速の影響を大きく受けていない.



Fig. 13 Hull pressure distribution and velocity distribution on center plane at *Fr*=0.238 (Laden condition).



Fig.14 *u*/*Vs* (velocity in *x* direction) on Line1 (top) and Line2 (bottom) (Laden condition).

Fig.14 は Line1,2 に沿った速度分布を船速で無次元化し, 船底からの鉛直距離 *db/L_{pp}* に対してプロットしたものであ る. Line1 では,船底からの距離 *db/L_{pp}*=0.10(約 20m) 程度下 方までの領域では船速(フルード数) によって速度分布が異 なり,船速が大きいほど速度の低下率が大きい. これは,船 速の増大に伴って自由表面波の波長が長くなり,その影響が 深いところまで及ぶためと考えられる. 船底から *db/L_{pp}*=0.25(約 50m) 程度離れたところでも流速は船速の **99.8%**であり、微小な差ではあるが、船速とは一致しない. Line2 でも同様の傾向であるが、*db/L_{PP}*=0.25 で流速はほぼ船 速と等しくなる.

Fig.15 は, Linel, 2, 3 の平均流速である. 傾向は Fig.14 と 同様であり, 船底から db/L_{pp} =0.15(約 30m)程度までは, 船速 による流速の差が顕著である. Fig.16 は二重模型流れ計算に よる平均速度分布である. レイノルズ数は Fr=0.143 の場合 と同一とした. 速度分布は Fig.15 の Fr=0.143 の場合とほぼ 同様であり, 自由表面影響が, 低速では小さく, 速度が大き くなると顕著になってくる.



Fig.15 Averaged *u/Vs* of Lines 1-3 (Laden condition).



Fig.16 Averaged *u/Vs* of Lines 1-3 for double model flow (Laden condition).

4.4 軽荷状態

Fig.17 は船速 20kt(Fr=0.238)における左右対称面の u 分 布および船体表面の圧力分布である. 高速船型に対応した 薄型バルブが水面を貫通しているので,船首の波形は特徴 的であり,この速度域では水面がバルブ上面を覆う形とな る.船首波のピークの後方では船体側面で波面が大きく沈 み込む. 沈み込みの位置は船速の増大に伴って後方へシフ トしている.

Fig.18は二重模型流れによる同様のプロットである. 船底 下の速度分布に自由表面影響が大きく現れることが分かる.



Fig.17 Hull pressure distribution and velocity distribution on center plane at Fr=0.238 (Ballast condition).



Fig.18 Hull pressure distribution and velocity distribution on center plane for double model flow (Ballast condition).

Fig.19 は Linel, 2 に沿った速度分布を船速で無次元化し, 船底からの鉛直距離 *db/L_{pp}* に対してプロットしたものであ る. *u* 分布は船底からの距離 *db/L_{pp}=0.25(約 50m)* 下方でほ ぼ一様流となる. 船底近傍では, Linel, Line2 とも, 低速 の *Fr=*0.143, 0.167, 0.191 (12kt, 14kt, 16kt) では増速して いるが, 高速の *Fr=*0.215, 0.238, 0.262 (18kt, 20kt, 22kt) で は減速している. これは, 船首バルブ後方の波面の沈み込み 位置が船速によって変化しているためである.



Fig.19 *u*/*Vs* (velocity in *x* direction) on Line1 (top) and Line2 (bottom) (Ballast condition).

Fig.20 は Line1, 2, 3 の平均流速である. 満載状態と同様に, 船底からの深さで *db/L_{PP}*=0.15 (約 30m)程度までは, 船速に よる流速の差が顕著である.



Fig.20 Averaged *u/Vs* of Lines 1-3 (Ballast condition).

Fig.21 は二重模型流れによる平均速度分布である. Fig.20 と比較すると、満載状態とは異なり、低速の *Fr*=0.143 においても、自由表面影響が大きく現れている.



Fig.21 Averaged *u/Vs* of Lines 1-3 for double model flow (Ballast condition).

5. 結論

ドップラー式対水船速計の計測精度検討のため,実船スケ ールの船体について CFD 計算を行い,船首船底下の流速分 布の特性を解析した.

今回解析した,肥大船と痩型船の速度分布から,船首船底 の境界層厚さはいずれもおよそ0.2m程度と推定される.ま た,船首船底の流速分布は,船型および喫水,さらに船速に よって変化することが明らかとなった.船速によって変化す る,自由表面波の影響が特に顕著であり,その範囲は,肥大 船では,満載状態で船底から15m,軽荷状態で25m程度で ある.一方,痩型船では自由表面波の影響範囲は30m(満載) から35m(軽荷)と推定された.これらの影響範囲より深いと ころでは,流速はほぼ一様流と等しいと見なすことができる.

これらの結果は、ドップラー式対水船速計の計測精度向上 の検討に有用である.

参 考 文 献

- Hino, T.: A 3D Unstructured Grid Method for Incompressible Viscous Flows, J. of the Soc. Naval Archit. Japan, Vol.182 pp.9-15, 1997.
- Larsson, L et al. (ed.): Proceedings of CFD Workshop Tokyo 2015, 2015.
- Kim, W.J., Van, D.H. and Kim, D.H.: Measurement of flows around modern commercial ship models, Exp. in Fluids, Vol. 31, pp 567-578, 2001