

対水船速の計測精度向上に関する研究

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

Study on Improvement of Measuring Accuracy of Ship's Speed through Water

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

Summary

The flow under bow bottom of ships was calculated using CFD methods and characteristics of flow-speed distribution were analysed. In the study, it was confirmed that flow speed under the bow bottom of a ship changes according to water depth by disturbance of the sailing ship and a range of the field where the disturbance effects depends on types of ships, draft and ship speed. In this report, a developed measuring system named “multi-layered relative velocity meter” is introduced to measure distributions of relative flow speed along water depth. After testing a function of the measuring system on a test boat, the measuring system was installed on a PCC and the relative flow speed at each layer was measured during a voyage. The obtained data were evaluated by comparing with the result of CFD analysis and it was confirmed that relative flow speed measured on the PCC had a similar distribution with the result of CFD analysis. Considering both the CFD analysis result and the onboard measured data, finally a new method to improve measurement accuracy of ship's speed through water is proposed.

1. まえがき

1.1 背景

運航船舶の燃費削減のためにとられる施策は、船体改造や省エネ装置・塗料の採用などのハード的手法と減速運航やウェザールーティングなどのソフト的手法に大分できる。燃料消費量、馬力、船速などを計測し、船舶の運航モニタリングによる性能解析もまたソフト的手法の一つであるが、これはほかの手法の検証・評価の役割を持つため、省エネ運航の基盤となる手法といえる。したがってここで計測される項目は、出来る限り高い精度であることが望ましい。

例えば新たな省エネ装置や塗料が開発され、その改善見込が2%であったとすると、その効果を確認するためには少なくとも1%の性能解析の精度が必要である。このように新規

省エネ技術の正しい評価と次なる改善の方向性を示すためにも、船舶の性能解析の精度向上は重要なテーマである。

我々は性能解析の精度を1%、対水船速計の計測精度を0.3%とする目標を立て、本研究に着手した。(1-1)式のように船速 V は燃料消費量（以下 FOC）に対し約3乗で比例する関係にあり、船速の誤差は(1-2)式のとおり FOC に対し約3倍の影響を持つため、より高い精度が求められる。

$$FOC \propto V^3 \quad (1-1)$$

$$\Delta FOC / FOC \approx 3 \cdot \Delta V / V \quad (1-2)$$

日野ら¹⁾は計算流体力学（CFD）手法によって船首船底下の流場を計算し、流速分布の特性を解析した。これにより、船首船底下の流速は船体による攪乱と排除影響で船底下数十メートルにわたって変化し、その影響範囲は船型、喫水、そして船速により変化することがわかった。

1.2 従来技術の課題

本論文では船首船底に配置されたドップラー式対水船速計の誤差について、装置自体（ハード・ソフト）のもつ流速計としての誤差と、その計測値を対水船速として換算する際の誤差の2つに分類して考える。前者については多くの改良

* 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
 **** 横浜国立大学

と工夫がなされてきており, 最新技術とあわせて第2章で紹介する. 一方で後者についてはこれまで深く議論されることは無かった.

流速計としての装置がどんなに正確であっても, 船体近傍は船体自体によって境界層や攪乱影響, 排除影響で流れが乱れており, もともとの場の流速そのものを測ることはできない. 一方で十分に深く深い位置で流速を測った場合には, 船がいる位置とは海流等の場の影響差が存在する可能性がある. 大型船においては, 遠すぎず近すぎず, 経験的に船底から3~20m程度の位置で流速を測るのが一般的である. このとき, 大きく乱れた領域よりは外側であるものの, 少なからず船体の影響は残っている可能性を鑑み, 海上試運転の速力試験にて同一海域を往復した際のGPS船速, 相対流速の各平均値により, 海流や潮流の影響を除いた補正係数を定め, 運用している.

我々はこのこに, 精度を劣化させる2つの課題が残っていると考えた.

- 計測対象が船底から3~20mと比較的近い場合であっても, 本船の位置とは異なる海流等の存在により, 推進性能を解析する上で意味のある相対流速を計測できていない可能性がある.
- 海上試運転で決めた補正係数はある喫水状態でのものであり, この喫水状態が異なる場合には相対流速を正しく対水船速に補正できていない可能性がある.

1.3 目的

本研究の最終目標はドップラー式対水船速計の計測精度の向上であり, これに向けて本稿では前節の誤差要因のうち, 対水船速として換算する際の誤差の問題を解決すべく, 以下3点を実施したので報告する.

- ① CFD 流場解析結果に基づく計測深度の検討 (第3章)
- ② 多層型相対流速計の開発 (第4章)
- ③ 多層型相対流速計の実船評価 (第5章)

なお実験対象船型は自動船専用運搬船 (PCC) であり, CFD では一般に公開された瘦型船型 KRISO Container Ship (KCS)²⁾を用いた.

これらに先立ち, まず第2章でドップラー式対水船速計の原理と誤差要因, 最新技術情報について報告する.

2. ドップラー式対水船速計の従来技術

2.1 CW式とパルス式の原理³⁾

Fig.2.1 に示すように船底に装備された超音波送受波器から海中斜め下方向に音波を発射すると, 海中の散乱体 (プ

ラントンなどの懸濁物質) や海底で反射して信号が返ってくる. この時, 超音波送受波器と反射体との音線方向に相対速度があれば, 反射信号には相対速度に比例したドップラー効果によるドップラーシフトが生じる. 反射体である海中散乱体は海水とほぼ同じ速度で動いているため, ドップラーシフト量から音線方向の対水速度を得ることができる. 航走時, 船首で発生する泡が後方の船底に流れて計測の妨げになるため, 超音波送受波器は船首部に設置するのが一般的である. ドップラー式対水船速計では, 複数の方向に音波を発射しそれぞれの音線方向の対水速度を求め, その結果を合成することで, 船に対する水平方向の対水速度を計測している. 本研究で用いた実験機は Fig.2.2 のように3方向に音波を発射する.

ドップラー式対水船速計には, 連続した音波を発射するCW (Continuous Wave) 式と, 断続的な音波 (=パルス信号) を発射するパルス式がある. CW式は初期に使用されたが, 送波器と受波器を別々に使用する必要があり, 近距離の水中散乱反射による影響や直接波による影響等が大きいいため, 現在ではパルス式が主流となっている. 以降はパルス式について記述する.

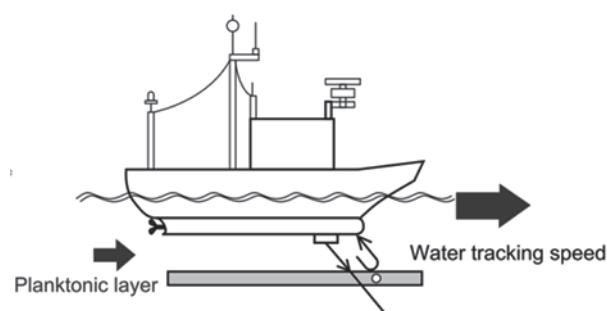


Fig.2.1 Principle of Doppler log.

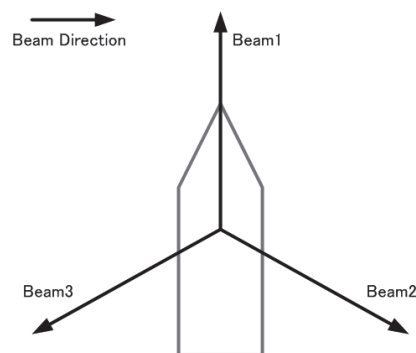


Fig.2.2 Example of ultrasonic beam direction of Doppler log.

2.2 パルス式の誤差要因とその対策⁴⁾

前述のように多くのドップラー式対水船速計はバースト信号を使って周波数を計測することで船速を求めている。その計測値のばらつきについて説明する。

(1) 送信パルス幅とビーム幅

まず、バースト信号の送信パルス幅による帯域の広がりについて述べる。周波数を計測する場合には、対象となる信号の帯域幅が狭いほど周波数計測誤差を少なくすることができる。しかし時間制限されているバースト信号を用いると、送信信号の帯域幅はパルス幅の影響で広がってしまう。ここには、深度分解能を向上させるためにバースト信号のパルス幅を短くすればその分帯域幅が広がり、周波数分解能が低下してしまう、というトレードオフが存在する。一般に送信パルス幅と受信データの計測時間は同じ時間にする場合が多いが、前述の問題は受信データの計測時間についても同様であり、計測時間が短い程得られる周波数分解能が悪くなってしまう。以上のように送信パルス幅や受信データの計測時間により、計測される船速ばらつきが左右される。大まかに言うと、送信パルス幅や受信データの計測時間と計測ばらつきは反比例の関係になる。

上記を言い換えれば、深度分解能が決まれば得られる船速精度は物理的に決まってしまうということである。一般的には必要な深度分解能で要求される船速精度を確保するために、移動平均等のスムージング処理を行っている。つまり、船速応答を犠牲にして対応している。船速計システム構築の際には、深度分解能、船速精度、船速応答時間の3つのパラメータをうまく選択して目的に沿った設計を行うことでこれらのトレードオフを回避している。

次に超音波ビームの幅について述べる。超音波ビームは斜下方向に発射されるが、それはある一点の方向だけではなく物理的な幅（ビーム幅： δ ）を持つ。水平方向を基準としたときの超音波ビームの方向（以下俯角）が θ である場合について Fig.2.3 に示す。このとき、超音波ビームの最下端（水平面に対して $\theta+\delta/2$ 下方向）と最上端（水平面に対して $\theta-\delta/2$ 下方向）では俯角が異なるので、受信信号のスペクトルも広がってしまう。その結果周波数の計測ばらつきが発生し、船速の計測ばらつきが多くなる。ビーム幅と計測ばらつきはほぼ比例の関係にある。

この問題も物理的な要因で発生しているので、直接的に回避することはできない。一般的に超音波のビーム幅は送受波器の開口面積に反比例するため、大きな送受波器を採用すれば、ビームが細くなって計測精度が向上する。ただし、送受波器が大きくなると装備面で問題が発生する。その両面を勘案し、必要な船速精度と許容される送受波器の大きさとのバ

ランスをうまくとり、船速計システムとして成立させている。

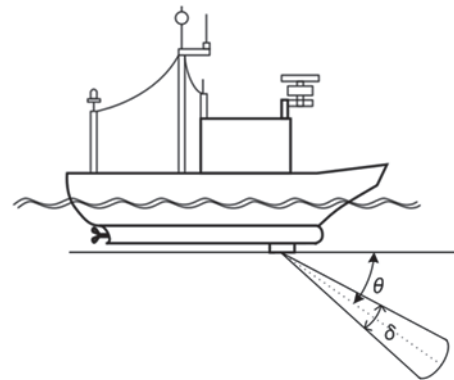


Fig.2.3 Ultrasonic beam width.

(2) SN 比

もう一つ計測のばらつきに寄与するのが、受信信号の SN 比である。SN 比というのは信号レベルとノイズレベルの比を表すもので、ドップラー式対水船速計に当てはめて考えると、対水船速に応じたドップラーシフト情報をもった反射信号そのものが信号であり、それ以外に受信される信号がノイズにあたる。一般的に超音波送受波器や船速計のノイズ環境は一旦船舶に装備された後の変化は少ないが、反射信号強度は例えば計測水深によって変化する。超音波送受波器の近傍（＝浅海域）では信号強度は強いが、速く離れる（＝深くなっていく）に従って信号強度は下がっていく。以下に SN 比が計測精度にどう影響するのかについて述べる。

信号のスペクトルレベルが非常に大きい場合（＝SN 比が高い場合）は容易に周波数検出が可能だが、レベルが次第に下がってノイズのスペクトルレベルに近づいてくる（＝SN 比が低い場合）と、周波数検出精度が悪くなり、測定限界よりも SN 比が低くなると検出不可能になる。実際の海では、海水中気泡群、海中散乱体の反射強度、が信号レベルを下げる要因として働き、電気（電磁）ノイズ、海中からの音響ノイズ（音響干渉含む）などの外来ノイズはノイズレベルを上げる要因として働き、これらも周波数計測ばらつきの原因となる。そのため船速を測る際には、測定限界よりも浅いところを計測対象とする必要がある。対水船速計では、主に SN 比を基準とした閾値を設けて、正常な信号と異常な信号の選別を行い、異常信号は船速演算に用いないという処理を行っている。計測条件が厳しくなると正常データの割合が低くなり船速誤差が大きくなるため、ある一定期間の正常データ割合が一定値以上の時のみ正常な船速が得られていると判断している。

(3) 水中音速³⁾

ドップラー式対水船速計は、船底から発射する音波ビームの発射角を θ 度だけ俯角をつけて下方に発射し、斜下方向の海水から反射して戻って来たエコーが受信できる様に超音波送受波器を備えつける。このとき超音波の進向方向に対する船の速度成分は $V \cdot \cos\theta$ となり、海底から反射して来た音波のドップラーシフトは、

$$f_d = 2 \cdot f_0 \cdot V \cdot \cos\theta / C \quad (2-1)$$

となる。ここで、 f_0 は送信信号の周波数、 V は船と音波の反射物の間の速度、 C は水中音速である。水中音速は温度、塩分濃度等によって変化するため、(2-1) に示す式からも明らかなようにその変化はドップラーシフトにも影響を与える。

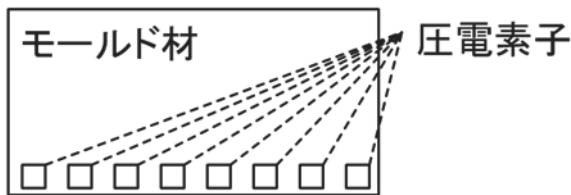


Fig.2.4 Array-type transducer.

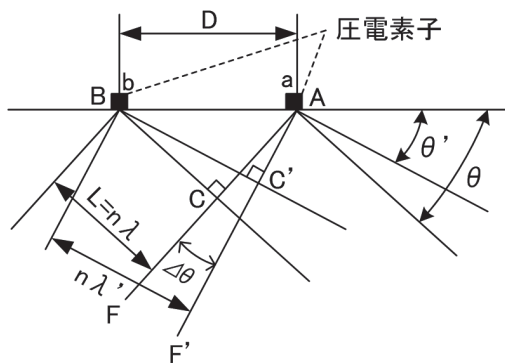


Fig.2.5 Change of beam depression angle by difference of sound velocity.

ここで、実験に使用したアレイ式送受波器について、音速の変化と超音波ビームの俯角の関係について述べる。アレイ式送受波器とは圧電素子（超音波振動子）を複数個並べた構造の送受波器で、模式的には Fig.2.4 のような構造のものである。ここで a, b なる超音波振動子を船の進行方向に沿って前後にそれぞれ A, B の位置に配置した場合について考える。振動子の θ 方向での間隔 L は送信される超音波の波長の整数倍 $n\lambda$ に選ばれている。そして、振動子 a, b から送波され

水中物体から反射して来た超音波信号は振動子 a, b で受信され、重量される。この場合、振動子 a, b の合成指向方向は水平面に対して θ 方向に形成される。超音波の送信周波数 f 、波長 λ 、音速 C は、

$$C = f \cdot \lambda \quad (2-2)$$

であるから、音速 C が増大するにつれて波長 λ も大きくなる。従って、図 5.2(b)において波長 λ から λ' に変化した場合、振動子 a, b から同相で送波され、あるいは、同相で到来する超音波の波面が F から F' に $\Delta\theta$ だけ変化する。ところで、図において $\angle ACB$ 及び $\angle AC'B$ は共に直角であるから、点 C, C' は線分 AB を直径とする半円上にある。従って、超音波振動子 a, b の合成指向方向 θ は、

$$\theta = \cos^{-1}(n \cdot \lambda / D), D: \text{線分 } AB \text{ 間の距離} \quad (2-3)$$

で表わされる。

ドップラーシフトを求める (2-1) 式の右辺において、温度、塩分濃度等で変化する項目は C と $\cos\theta$ である。

(2-2)式、(2-3)式を (2-1) 式に代入すると、

$$f_d = 2 \cdot V \cdot n \cdot \lambda / D \cdot f / (f \cdot \lambda) = 2 \cdot n \cdot V / D \quad (2-4)$$

となり、(2-4) 式では温度、塩分濃度等で変化する項目が無くなる。これは、音速 C が変化するとそれにより俯角 θ も変化するが、その両者は丁度影響を打ち消しあうことを示しており、いうなれば、アレイ型の送受波器では自動的に音速の補正機能が働くことを示している。

2.3 パルス式の最新技術⁵⁾

ドップラー式対水船速計では前述のような誤差要因があるが、通常用いられるパルス幅、受信計測時間、音波ビーム幅という条件下で実船にて計測した結果、船速標準偏差は 0.7kt 前後である (20kt 航走時)。この数字は、単一スペクトルのパースト波を 1 回送受信した時に得られるスムージング処理を施す前の結果である。そのままでは計測船速のばらつきが大きすぎて航海用の船速情報としては使いづらいため、さらに移動平均等のスムージング処理を追加し、船速ばらつきを抑えて最終出力値としている。これに対し最新型のドップラー式対水船速計では Fig.2.6 のように超音波を広帯域にし、複数 (=N 本) のスペクトルピークを持つパース

ト信号を送受信している。こうすることで、各スペクトルピークが各々受けるドップラーシフト量を、独立して一度に計測することが可能になるため、1回の送受信で得られる情報量が旧型の約 N 倍と同等となる。そのため計測精度は旧型の約 $\sqrt{N}$ 倍（検出値ばらつきは $1/\sqrt{N}$ 倍）となる。ただその場合、超音波のエネルギーがスペクトルピークの本数分に分散されるため、各スペクトルピークの SN 比が劣化するが、ばらつきの要因としては送信パルス幅やビーム幅等による影響の方が SN 比の劣化よりも大きいのが実情である。結果的に実際の最新型ドップラー式対水船速計の計測船速標準偏差は実船計測値として 0.2 kt 程度（20kt 航走時）まで改善されており、後述する計測手法を成立させる基盤技術の一つとなっている。

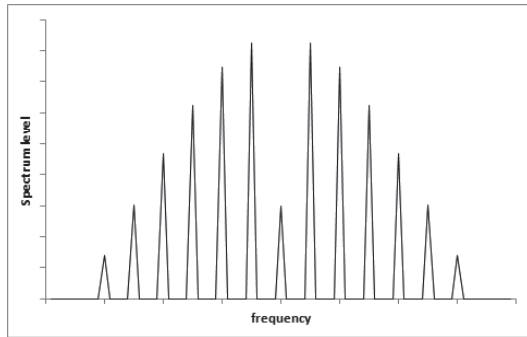


Fig.2.6 Example of spectrum using wideband signal of M sequence code.

3. CFD 流場解析結果に基づく計測深度の検討

ここでは、CFD による瘦型船型の船首船底下の流場解析結果を基にして、船速および喫水状態と、船底下の流速との関係を考察する。

3.1 計算条件

計算条件の詳細は、文献 1 に示されているので、ここでは概要についてのみ述べる。計算対象は、KCS の船長(L_{pp})を 230.0m から 190.0m に縮小し、後述する実験対象船(PCC)に船長を合わせている。CFD ソルバーは海上技術安全研究所で開発された SURF⁶⁾であり、乱流モデルには Spalart-Allmaras モデルを用いた。

Fig.3.1 にドップラー式対水流速計の音波ビームを想定した 3 方向の速度抽出線位置を示す。F.P.から 4.2m 後方の船底から 55° 下向きに 3 方向(進行方向および左右 120°)に伸びている。

3.2 流速分布

Fig.3.1 に示す 3 本の速度抽出線の平均流速を相対流速と定め、この値を船速で正規化し、船底からの鉛直距離との関

係を検討する。Fig.3.2 は Laden 状態の結果である。船底から 25m 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、船速が大きくなると自由表面波の波長が長くなるため、その影響が深いところまで及ぶためと考えられる。

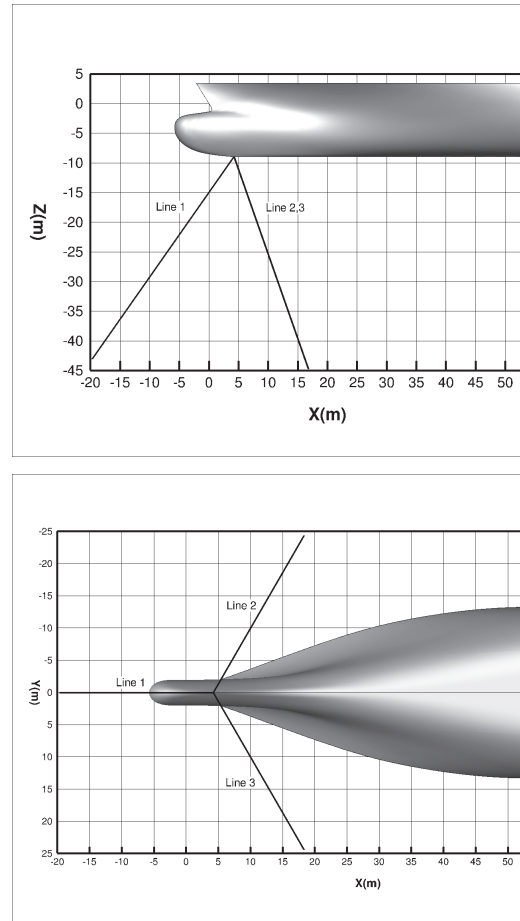


Fig.3.1 Velocity extraction lines.

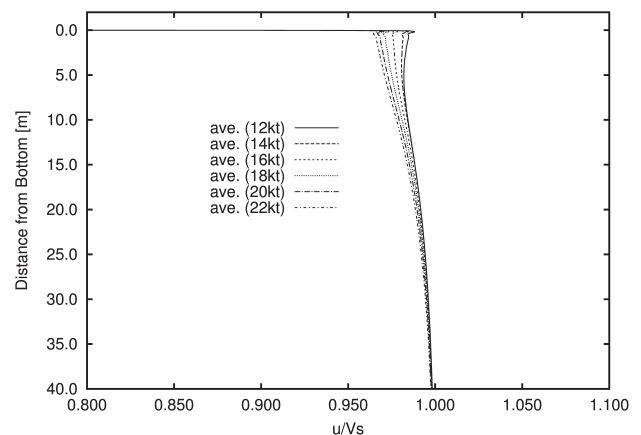


Fig.3.2 Averaged velocity distributions under bow bottom (Laden condition).

Fig.3.3 は Ballast 状態の結果である。船底から平均速度は、船底から 40m 下方では、ほぼ一様流となる。15m 下方まで

の範囲では、船速によって分布が異なり、低速(12, 14, 16kt)では増速し、高速(18, 20, 22kt)では減速となる。

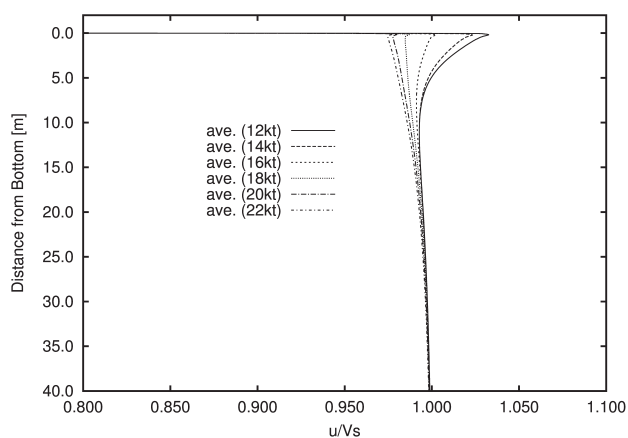


Fig.3.3 Averaged velocity distributions under bow bottom (Ballast condition).

3.3 相対流速の喫水・船速による影響

CFD 流場解析により、ドップラー式対水船速計が計測対象とする船底下3~20mでは相対流速=船速とはならず、また船速や喫水状態によってその比率が変化するとの見解が得られた。

船底下3m, 20m, 60mの相対流速/船速比を、船速を横軸にとり Fig.3.4 に示す。船底下60mではLaden, Ballastとも船速によらずほぼ100%であるが、20mでは98.9%~99.5%, 3mでは96.8~100.8%となり、両者の値に違いが表れること、またそれぞれ0.6%, 4.0%の変化幅を持っていることがわかる。1.2節で述べたとおり、この比が100%とならないことは経験的に知られていて、海上試運転の速力試験にて同一海域を往復した際のGPS船速、相対流速の各平均値により係数を定めて補正する方法が一般的にとられてきた。しかしながら平均流速/船速比が船速や喫水の影響を受けて変化することはこれまで考慮されたことは無く、すべての船速域、喫水において、海上試運転の際に定めた同一の補正係数を用いて運用しているのが現状である。これは Fig.3.4 で示した変化幅が、対水船速としての誤差要因となることを意味している。

深度毎にこの変化幅を図示すると、Fig.3.5の通りとなり、船底下のより遠方を計測するほど、対水船速としての誤差要因は減少することがわかる。

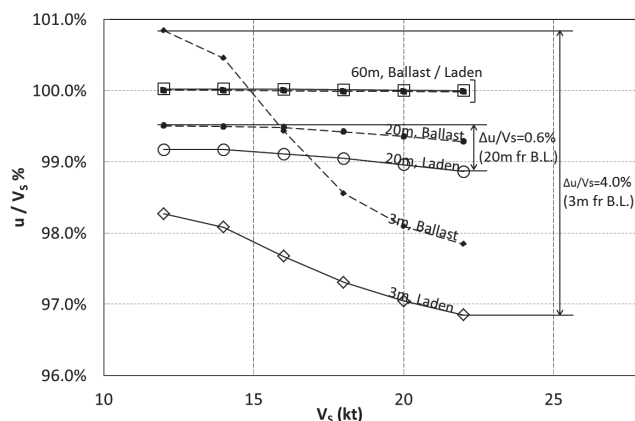


Fig.3.4 Variations of ratio of computed relative flow speed under bow bottom to ship speed against ship speed.

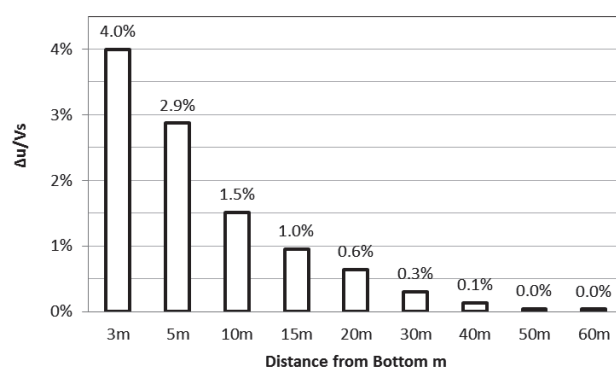


Fig.3.5 Deviations of computed relative flow speed under bow bottom from ship speed against distance from bottom.

4. 多層型相対流速計の開発

4.1 多層型相対流速計の概要

実海域で実船の周りの流れを測るため、我々は深度方向に連続的に相対流速を計測する方法を考案した。従来の対水船速計はある一つの深さにて流速を測る、いわば単層型相対流速計であるのに対し、複数の位置で計測可能な装置をここでは多層型相対流速計 (Multi-layered relative velocity meter) と呼ぶこととする。

船首船底下の流速分布をより細かく詳細に、そして深くまで計測するためには、各層における深度分解能、流速精度、応答時間およびSN比のバランスが、それぞれ十分なレベルで取れていることが必要となる。今回開発した多層型相対流速計は、2.3節の最新技術を搭載した送受信機の採用と、ソフトウェア変更による応答時間短縮化(送信周期の高速化や機器ユニット間の通信速度向上)により、これを実現している。その他の相違点として、多層計測した複数の相対流速を記録・処理するために、対水船速計システムの外に計算機を追加している。

4.2 機器構成

多層型相対流速計のブロック図を Fig4.1 に示す。

まず、送信用のバースト信号を生成し、アレイ式送受波器を駆動するための送信アンプで増幅して、送受切替回路を介して送受波器へ入力し超音波ビームを海中に送波する。海中から反射してきた超音波は送受波器で電気信号に変換され、複数チャンネルで構成される受信アンプで増幅・フィルタリングを行い、A/D 変換器にてデジタル信号へ変換する。そうして得られたデジタル信号は、超音波ビーム毎に時系列でメモリ上にバッファリングする。その後測定深度に応じたデータをバッファメモリから抽出し、FFT 演算を測定層数回繰り返す。その結果、各設定深度、各超音波ビーム方向のドップラシフトが求められ、さらに同一設定深度の各ドップラシフトから前後左右の相対流速へ変換、スムージング処理を行って多層流速として外部に出力する。以上が多層相対流速計の具体的な動作である。

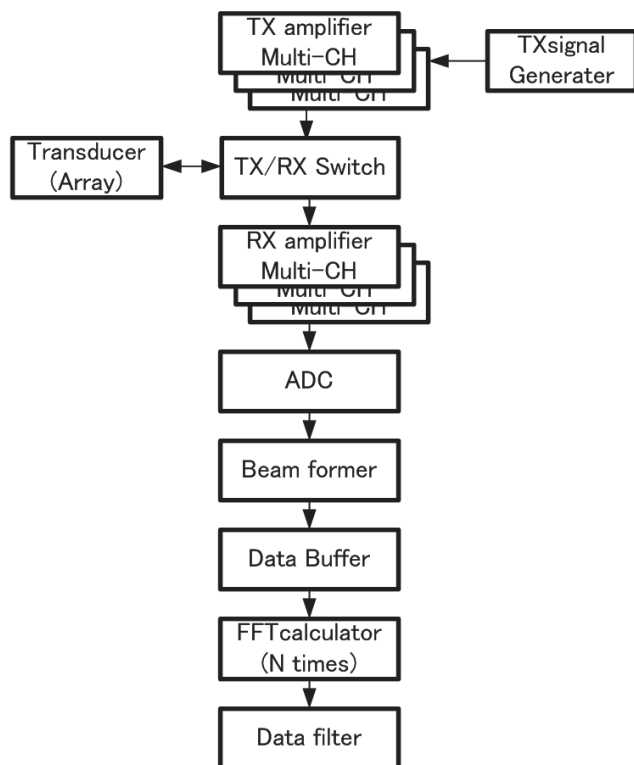


Fig.4.1 Block diagram of multi-layered relative velocity meter.

4.3 実験ボートによる検証

実船装備に先立ち、実験ボートによる海上試験を実施した。各層における正常データ割合と計測流速の標準偏差の調査により、深度分解能、応答時間などの設定が適切であるかの確認を目的とする。Table4.1 に実験に使用したボートの諸元

を示す。このボートの舷側に、Fig.4.2 の通り先端に多層型相対流速計の送受波器を取り付けたパイプを装備して実験を行った。

Table4.2 に計測条件を示す。実験海域の海底の影響を避けるため、設定深度は最大で 41m とした。計測結果は Fig.4.3 に示す通り、移動平均前の流速の標準偏差で 0.20~0.25kt との結果が得られた。移動平均前の値としては単層型と同レベルであり、またこの値は 20kt 程度まで大きくならないことが知られている。したがって多層型でも従来の単層型と遜色ない計測結果が得られたといえる。また、正常データ割合は 76%以上であり、こちらも条件を満たすことが確認された。

Table 4.1 Principal particulars of trial boat

GT	14 t
L [m]	14.68
B [m]	3.6
Depth [m]	1.8
Draft [m]	1.8

Table 4.2 Measuring condition on trial boat

Item	Setting
Distance resolution [m]	7.8
Measuring depth[m]	12,14,16,21,25,29,33,37,41
Ultrasonic transmission period [msec]	200
Moving average time [sec]	10
One data period [sec]	1

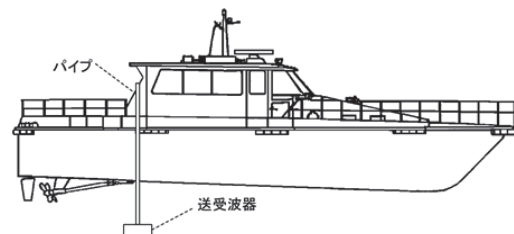


Fig.4.2 Schematic figure of trial boat.

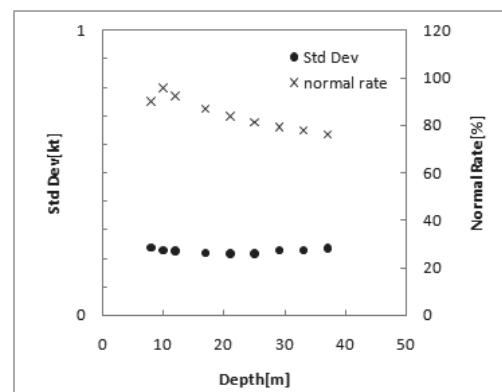


Fig.4.3 Measuring result of normal data ratio and standard deviation of ship speed.

5. 多層型相対流速計の実船評価

5.1 Panamax. PCC への搭載

多層型対水船速計の実機評価のため、Table5.1 に示す対象船に実験機を追加搭載した。取付概略図を Fig.5.1 に示す。また今回調査を実施した多層型相対船速計の計測条件は Table5.2 に示すとおりで、深度方向に 14m～54m まで合計 9 層の相対流速を計測する。超音波の送受信間隔は 200msec であるが、計測された生の相対流速データには 10 秒間の移動平均を施し、それを 1 秒間隔に分割したものを 1 データとする。

Table 5.1 Principal particulars for PCC

Type	Panamax. PCC
L [m]	190 m
B [m]	32.2 m
Depth [m]	34.8 m
Draft [m]	10.3 m



Fig.5.1 Schematic figure of PCC.

Table 5.2 Measuring condition on PCC

Item	Setting
Distance resolution [m]	7.8
Measuring depth[m]	14, 19, 24, 29, 34, 39, 44, 49, 54
Ultrasonic transmission period [msec]	200
Moving average time [sec]	10
One data period [sec]	1

5.2 計測データのフィルタリング

多層計測によって得られた船首船底下の流速分布について、平穏海象で、ある一方向に定速直進航行しているデータを抽出する。Fig.5.2 に解析対象とする期間中の対地船速の時系列変化、Table5.3 にフィルタ条件を示す。

このフィルタ条件を満たすデータは 11628 点にのぼり、紙面上図示することは難しいため、Fig.5.3 では各時刻零分を過ぎて最初の計測結果を抜き出して図示する。各時刻の相対流速が一定で無いのは、刻々と変化する運転状況や外乱影響等により船速が変動しているからであると推察できるが、それに加えて各計測タイミングでの深度方向分布も不規則に変化していることがわかる。

Table 5.3 Filtering condition

Item	Condition
Sampling period	2014/11/20 19:00～ 2014/11/22 7:00
Ship speed [kt]	18.1～20.8
Rolling[deg]	-5～5
Pitching[deg]	-1.5～1.5
Drifting[deg]	-3～3
Acceleration of fore-aft direction through water [kt/sec]	-0.01～0.01
Total data number	11628

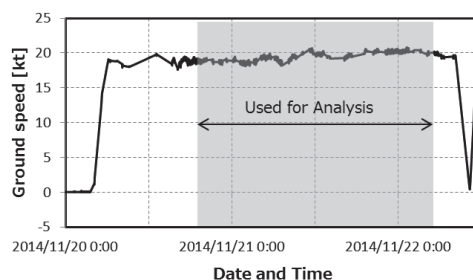


Fig.5.2 Time series of ground speed.

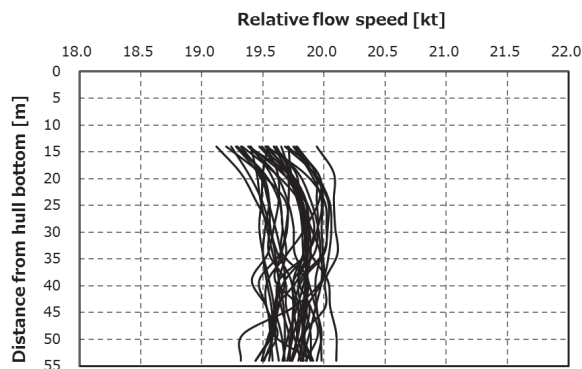


Fig.5.3 Distribution of one-sec. of relative flow speed.

5.3 実海域相対流速分布の解析

Fig.5.3 で得た船と海水の相対流速は、時刻毎、深さ毎にそれぞれ大きなばらつきがある結果であった。フィルタリングを実施済みであることから、このばらつき要因は以下3つであると考えられる。

- ① 真の対水船速（船が居る層における海水との相対流速）が時刻毎に変化したことによる影響
- ② 深度方向各層の海流が時刻変化したことによる影響
- ③ 船体の存在により与えられる流速変化の影響

精度の高い対水船速計として得たい情報は要因①である。これを船上で、都度の計測データから取得するためにはその他の要因②、③の特性を考慮する必要がある。

まず要因②は自然現象であるため、完全に把握することは難しい。これによる誤差を小さく抑えるには、なるべく船体近傍にて計測するのがシンプルな回避方法と考えられる。

ただしここで留意すべきは要因③の影響である。3章で示したように、CFDによれば船体があることによる相対流速変化は船体近傍ほど大きく、喫水や船速域が異なればその影響度合いも変化する。したがって船体近傍で相対流速を計測した場合には、その時々条件に合った適切な補正係数を選択する必要がある。すなわち Fig.3.3 および Fig.3.4 に示すような情報が船型毎に必要ということである。CFD でこれらを事前につかむことも一案ではあるが、以下では実船計測により得られたデータを解析して要因③の情報を取得する。

前節で得られたデータは喫水および船速域が限定されているため、要因③による流速分布は同一であると考えられる。また相対流速を計測したうちの最浅層は船底から 14m 離れているものの、ここでは船体自身がいる層と同じ海流中であるとして解析を進める。以上により、計測した各時刻、各層の相対流速を同時刻の最浅層の流速で無次元化することで、要因①の影響を取り除くことができる。無次元化した相対流速比 U_x/U_{14} (U_x : 船底下 $X[m]$ における相対流速) の分布を Fig.5.4 に示す。Fig.5.3 と同様に、紙面の都合により各時刻零分を過ぎて最初の計測結果を抜き出して図示する。

最浅層の相対流速にて無次元化された相対流速比分布は、深さを増すほどばらつきが大きくなっていることがわかる。このばらつきの時刻変化を、22 日 0:00~1:30 の計測データを例に Fig.5.5 に図示する。最深層相対流速 U_{54} を最浅層相対流速 U_{14} で無次元化した値および、その 5 分毎の平均値、標準偏差 σ を示す。各時刻の σ は 0.3% 程度と限定的であり、ばらつきの主要因は長い時間幅を持った 1.5% 程度の大きな変動であることが確認できる。すなわちこれが要因②の深度方向各層の海流が時刻変化したことによる影響である。

この要因②による影響は、船とは独立した動きであり、時刻毎、場所ごとに予測や制御することは難しい。しかし十分な量で且つ偏りの無いデータを収集することでできれば、それらを平均化することでこの影響を極小化することができる。今回計測の 11628 個の相対流速比分布がこの条件にあてはまるとして平均化処理を行うと Fig.5.6 の通りとなり、実海域の計測データから要因③として分類した船体の存在により与えられる流速変化の影響を得ることが出来る。

Fig.5.6 では 14m での相対流速を基準として無次元化しているため、計測対象の深度を上げていくと、相対流速比は徐々に大きくなり、29m より深くなると、1.016 に収束している様子が得られた。この結果から 29m より浅い範囲では、船体の影響を受けているということがわかる。すなわち今回計測した喫水、船速域であれば、最浅層 14m での相対流速を計測し、1.016 倍することで最も確からしい対水船速が得られることになる。

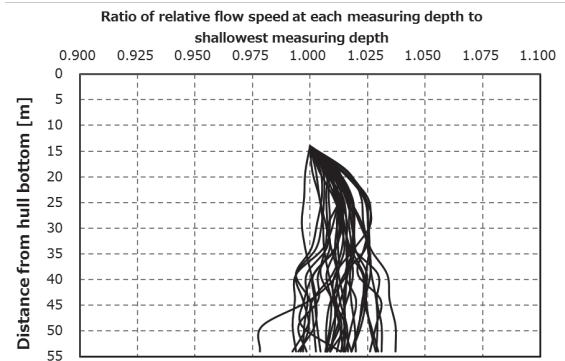


Fig.5.4 Distribution of one-sec. of relative flow speed ratio.

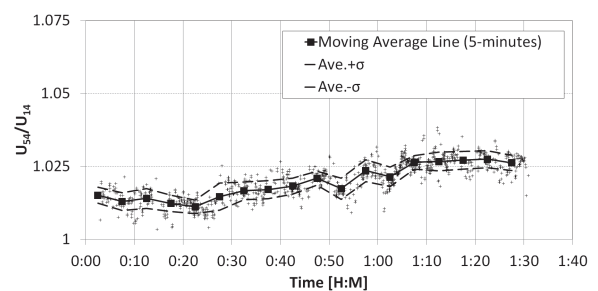


Fig.5.5 Distribution of one-second and five-minute average of relative flow speed.

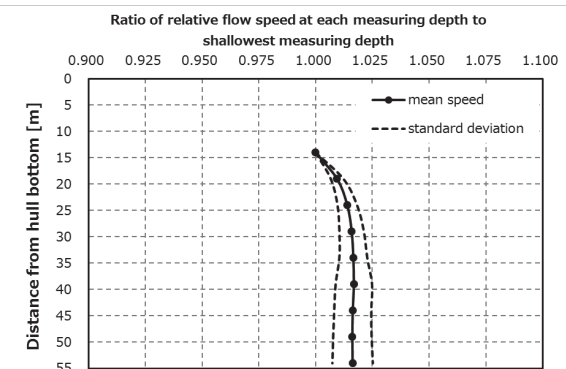


Fig.5.6 Overall average of relative flow speed ratio at every layer to the shallowest layer.

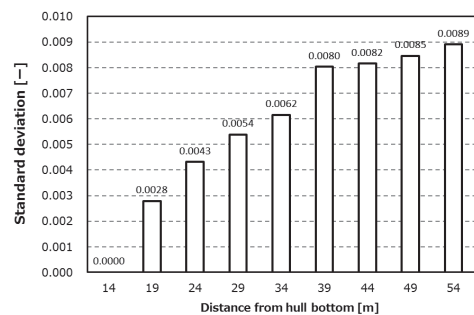


Fig.5.7 Standard deviation of overall average of relative flow speed ratio at every layer to the shallowest layer.

以上の解析により、実海域にて計測したデータからも CFD と同様の分布が得られた。また、実海域における海流変動による影響は Fig.5.6 図中にて破線で示す標準偏差のとおりに深さを増すほど大きくなることがわかる。Fig.5.7 は各層の標準偏差を棒グラフで示したものである。これにより少なくとも最浅層から 5m 離れた 19m 位置にて標準偏差 0.28% の影響を受けることがわかる。

なお本解析においては、船底下 14m の最浅層は船体自体がいる層と同じ海流中であるとして進めたが、より精度を求めるのであれば、最浅層を可能な限り船体近傍に設定することが有効であると推察される。 U_{19}/U_{14} の標準偏差が 0.28% であることを考慮すると、0.3% の精度を求めるならば、少なくとも船底から 5m 以内を計ることが望ましい。

また要因②を極小化するために平均化の処理を行っているが、これに供するデータの品質・個数には注意が必要である。この基準策定は今後の課題であるが、データの異常や偏り、サンプル数が十分であるかなどについては、各層の相対流速比 U_x/U_{14} のヒストグラムにて正規性を確認することが有効であると考えられる。今回得られたデータは Fig.5.8 に示す通り、概ね正規性を持ってきれいに分布していることがわかる。

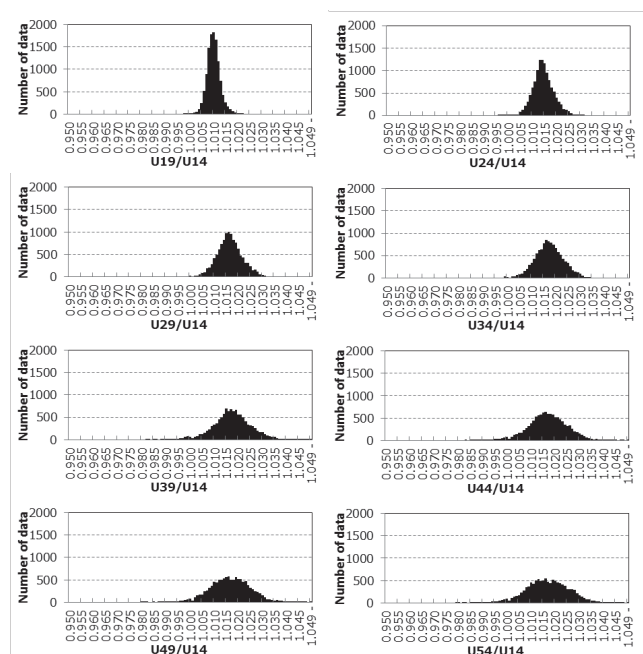


Fig.5.8 Distribution of relative flow speed ratio at every layer to the shallowest layer.

6. まとめ

6.1 新しい対水船速計測方法の提案

本研究の目標は対水船速の計測誤差 0.3%以下とすることである。これを満足するために、CFD によれば船体影響を避けるには船底下 30m より深い位置を計測対象とすることが条件となり、一方で実海域データからは海流等の影響を抑えるために船底から 5m 以内で測ることが望ましいとの考察が得られた。これら相反する条件により、従来の 1 つの補正係数による修正方法では目標値を達成することは難しいことがわかった。

そこで我々は多層型相対流速計を使用してこの問題を解決する方法を提案する。以下にその実施手順を示す。

準備段階

- 1) 多層式流速計を用いて船底下各層の相対流速分布を計測し、船体近傍層における相対流速を底に無次元化を行う。
- 2) 十分なサンプル数を収集し、喫水、船速毎に流速比をグループ化し平均化処理する。これにより潮流影響を極小化した船体周りの流速比分布をグループ毎に取得する。
- 3) 得られた流速比分布にて、深度を増して収束する値を求め、これを船体近傍層の相対流速と真の対水船速に対する比率と見做す (Fig.5.6 の場合には、29m より下方における 1.016 がこれに相当する)。この値をグループ毎にて収集し、流速比分布チャートを作成する。

利用段階

- 4) 船体近傍の相対流速を計測する。
- 5) 計測条件 (喫水、相対流速) に応じて、準備段階にて取得した流速比分布チャートから、適切な補正係数を選択し、これを計測値に乗じて対水船速に換算する。

従来は相対流速に単一の補正係数に乗じて対水船速としていたが、以上の方法を用いることで Fig.3.4, Fig.3.5 にある喫水・船速による影響を考慮でき、且つ Fig.5.5 に示す海流等の影響を最小限に抑えて、より精度の良い対水船速を得ることができる。すなわち馬力、FOC に対する相対流速のばらつきが小さくなることが期待される。この結果は実海域にて実証を重ね、次報にて報告することとする。

なお多層型流速計を用いる方法の他に、従来型の単層型の流速計に GPS 対地船速を組み合わせる解析に供する方法も考えられる。船体近傍の相対流速と対地船速の比率データを蓄積し、条件毎にフィルタリングや平均化を施すことによっ

て、従来機器のみの組み合わせで同様の流速比チャートを作成することは可能と考えられる。ただしこの場合には、しばらく船体影響の大きな船体近傍の流速のみを計測することとなり、チャートが完成するまでは精度を大きく犠牲にしなければならない点が課題となる。また実際の運航では潮流利得のため、追い潮となるよう航路を選ぶことも多く有り、対地船速の平均値は真の対水船速平均値よりも大きくなっている可能性が高い。この点も考慮した解析が、チャート作成の際に求められることとなる。

6.2 結論

日野¹⁾による船首船底下の流場計算に関する知見に基づき、多層型の相対流速計測手法を開発し、船体の影響、海流等の深度方向変化による影響について計測、解析した。本論文の結論を下記に示す。

- KCS 船型（船長を 190m に縮小）を対象とした CFD 解析は、船首船底下の相対流速は広い範囲において船体の影響が存在し、その影響は船速、喫水によって変化することを示している。これにより従来の 1 つの補正係数による修正方法を適用するのであれば、船首船底下 30m より遠方を計測対象とする必要があることがわかった。
- 多層型相対流速計の実験機を完成させ、正常データ割合と計測流速の標準偏差の調査により、深度分解能、応答時間についての有効な設定条件と、各層計測値の十分な信頼性を確認した。
- 実船計測により得られた 36 時間、11628 点の計測結果を平均化することで CFD 計算結果と共通する傾向が得られ、29m より深い領域では平均流速がほぼ一定値に収束する結果を得た。
- 実海域における船体周りの相対流速は海流によって深さ方向で変動する要因があり、その影響は距離が離れるほど大きくなることがわかった。今回の計測値を元に考察すると、この影響を標準偏差 0.3%以下に抑えるためには船底から 5m 以内で測ることが望ましいことがわかった。

以上を踏まえ、対水船速精度向上のため、多層型相対流速計を用いた新しい手法を提案した。これにより海流変化のリスクが少ない船体近傍の相対流速を利用することができ、かつ船体自身による流場変化の影響を排除して正確な相対船速を計測出来る目途が立った。同一船型の異なる船速、喫水での船首船底下流速分布の取得により、CFD 解析結果の検

証と対水船速の新しい計測方法を確立することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 日野孝則, 安藤英幸, 谷川雅彦, 須藤康広, 杉田浩士, 虫明昌彦, 川浪敏志 : 船首船底下流場の実船スケール CFD 解析, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 24 号, pp31-38, 2016.
- 2) 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.
- 3) 箕原喜代美 : ドップラー方式による潮流計, 日本船用機関学会誌, 第 16 巻, 第 3 号, pp.160-166, 1981.
- 4) 川浪敏志 : 実海域における実船性能モニタリング, 運動性能研究会シンポジウム : 日本船舶海洋工学会, 2015.
- 5) 川浪敏志 : ドップラーソナーの最新動向, Navigation : 日本航海学会誌, 第 178 号, pp35-39, 2011.
- 6) Hino, T., A 3D Unstructured Grid Method for Incompressible Viscous Flows, J. of the Soc. Naval Archit. Japan, Vol.182 pp.9-15, 1997.