

伴流設計技術及び流場計測技術の高度化に関する研究

白石耕一郎*, 一ノ瀬康雄*, 拾井 隆道*, 澤田 祐希*, 川並 康剛*, 藤沢 純一*,
川北 千春*, 新川大治朗*, 若生 大輔*, 金子 杏実*, 大橋 訓英**, 谷口 智之***

Advancement of Automatic Hull Form Generation Method for Design of Specific Wake Field and Flow Field Measurement Technology

by

SHIRAISHI Koichiro, ICHINOSE Yasuo, HIROI Takamichi, SAWADA Yuki,
KAWANAMI Yasutaka, FUJISAWA Junichi, KAWAKITA Chiharu, ARAKAWA Daijiro,
WAKO Daisuke, KANEKO Azumi, OHASHI Kunihide and TANIGUCHI Tomoyuki

Abstract

Further reduction of greenhouse gas (GHG) emissions is crucial in the international maritime industry. To develop ships with zero GHG emissions from shipping, various ship types which are compatible with next-generation fuels will need to be constructed. It is important to reduce the time required by hull shape design methods which utilize numerical hydrodynamic simulation. Furthermore, the accuracy of calculations for estimating the propulsive performance of real ships should be improved for practical application, and a data set of flow field measurements needs to be constructed for computational fluid dynamics (CFD) validation. Toward this end, in this study we have developed an automatic hull form generation method for devising specific wake field techniques and a flow field measurement technique. The automatic hull form generation method for wake field technology consists of a stern flow field estimation method and an accompanying flow design system, which makes it possible to evaluate CFD-based propulsive performance in one-millionth of the conventional time. In the flow field measurement technique, detailed flow field measurements around of energy-saving devices were carried out in NMRI's cavitation tank using stereo PIV. This flow field measurement enables quantitative evaluation of the mechanism of improved cavitation performance due to energy-saving devices from changes in the flow field. Flow field measurements using stereo PIV were also performed in a towing tank using a model of the target vessel for which full-scale flow field measurements were carried out. The flow field characteristics of the full-scale flow field and model-scale flow field were clarified by comparing the flow fields of the full-scale flow field measurements and the model test results.

* 流体設計系, **流体性能評価系, *** 構造・産業システム系

原稿受付 令和 5年 7月 19日

審査日 令和 5年 9月 8日

目 次

1. 序論	48
2. 船尾流場推定手法と伴流設計システム	49
2.1 はじめに	49
2.2 船尾流場推定手法	49
2.3 伴流設計システム	50
2.4 まとめ	52
3. 流場計測技術を用いた省エネ付加物のキャビテーション影響評価	52
3.1 はじめに	52
3.2 水槽試験概要	52
3.2.1 供試模型および供試プロペラ	52
3.2.2 船尾変動圧計測	54
3.2.3 ステレオ PIV 計測	54
3.2.4 試験条件	55
3.3 水槽試験結果	56
3.3.1 キャビテーション観察結果	56
3.3.2 船尾変動圧計測結果	56
3.3.3 ステレオ PIV 計測結果	56
3.4 まとめ	57
4. 実船流場計測結果との比較による模型試験の流場計測技術の検証	57
4.1 はじめに	57
4.2 水槽試験概要	58
4.3 実船スケールと模型スケールでの船尾流場の比較	59
4.4 まとめ	60
5. 結論	60
References	61

1. 序論

現在の国際海運から排出される温室効果ガス(GHG: Green House Gas)の排出量は、世界全体の排出量の約 2% を占め、今後も大幅な増加が見込まれる。そのため、国際海運において、温室効果ガス排出量のさらなる削減が喫緊の課題となっている。国際海事機関 (IMO: International Maritime Organization) は、2023 年に GHG 削減戦略を改訂し、2050 年頃までに GHG 排出のネットゼロと、目標期間の前倒しすることに合意している。この目標を達成するためには、GHG 排出量ゼロを実現する船舶の開発が不可欠である。このような船型開発には、次世代燃料に対応した多種多様な船型の開発が必要であり、従来よりも CFD (Computational Fluid Dynamics) シミュレーションを活用した短時間での船舶設計手法がキーとなる。また、実船推進性能の推定精度の向上も重要であるため、CFD の検証用の流場計測に関するデータセットの確保が不可欠である。

前述の背景を踏まえ、本研究では伴流設計技術と流場計測技術の開発を行った。伴流設計技術は、船尾流場推定手法と伴流設計システムで構成されており、本技術によって、従来の 100 万分の 1 の計算時間で CFD と同等の評価が可能である。流場計測技術では、当所のキャビテーション水槽にステレオ PIV を導入することで、省エネ付加物によるキャビテーション性能の改善のメカニズムを流場の変化にもとづき定量的に評価することを可能とした。また、実船流場計測を行った対象船の模型船について、曳航水槽でステレオ PIV を用いて流場計測を行い、実船計測結果と模型試験結果の流場を比較することで、実船スケールと模型スケールの特徴を明らかにした。本論文では、伴流設計技術と流場計測技術の内容と成果について述べる。

2. 船尾流場推定手法と伴流設計システム

2.1 はじめに

当所では、機械学習技術を活用した船尾流場推定手法と伴流設計システムの開発を行っている^{1,2,3)}。本技術開発の目的は2つあり、1つ目が性能推定に係る時間（主に計算時間）の大幅低減、2つ目がデータベースに基づく船型提案である。この2つの効果により、設計期間の短縮、検討設計案の増加に伴う性能向上などが期待できる。本研究ではCFD（数値流体力学）で算定された数百点の流場情報をベースとしている。また、船型形状について、従来は船型を代表する数種類の船型パラメータからNeural Network（NN）を用いて処理していたが、本研究では、Convolutional Neural Network（CNN）を用いることで、船体の3次元形状自体を数万次元のデータとして処理するものとなっており、データの規模とその次元が大きくなっている（図2.1参照）。本章では、当所で開発した船尾流場推定手法と伴流設計システムを紹介する。

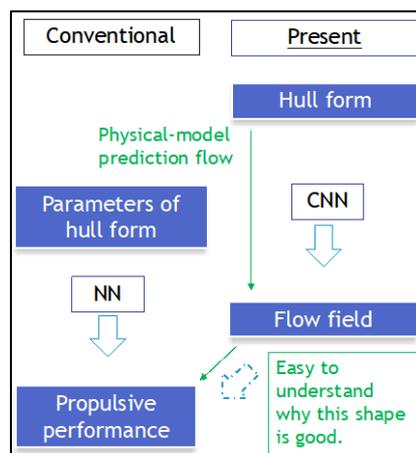


図 2.1 従来手法と本研究の手法の違い

2.2 船尾流場推定手法

船舶の性能推定に係る計算時間の大幅低減（約10時間が0.001秒程度）することが可能な船尾流場推定手法の概要を紹介する。本手法ではデータベースにないデータの予測性能（汎化性能）の向上を目的に、画像解析で用いられているConvolutional Neural Network（CNN）を活用している。従来、性能に影響が大きく出る船型パラメータを表す船型データの特徴量は、線形造波抵抗理論等に基づき事前に定められ、その数は多くても数十程度に限定されていた。一方、CNNではデータ自体から特徴量を直接抽出することが可能であり、従来よりも飛躍的に推定精度を向上させられる可能性がある。

CNNを推進性能推定に適用するためには、学習に使用する大規模データベースとCNNに適した船体曲面の3次元形状の表現方法が必要である。本研究では船型ブレンディング手法¹⁾と海技研で開発したImage-based Hull form Representation(IHR)²⁾という図2.2に示す3次元形状を2次元画像データに置き換える手法を用いることでCNNによる推進性能推定を可能とした。

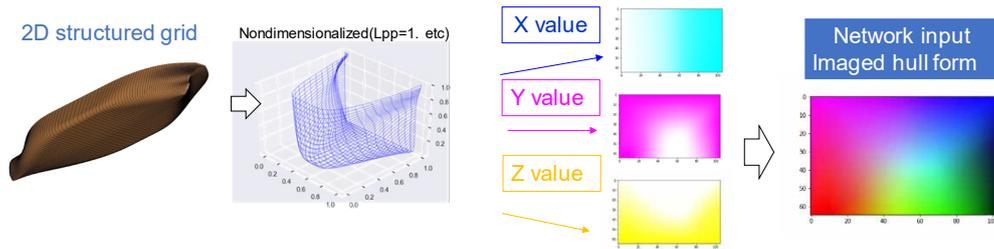


図 2.2 CNN に適した船体表現手法 (IHR) の概要

提案手法の検証のため、749 総トン型内航一般貨物船の 2,730 隻の船型データベース (1947 隻を学習データ, 253 隻を検証データ, 530 隻をテストデータ) を対象に図 2.3 に示す CNN モデルを構築し, 推定精度の事前検証を行った。

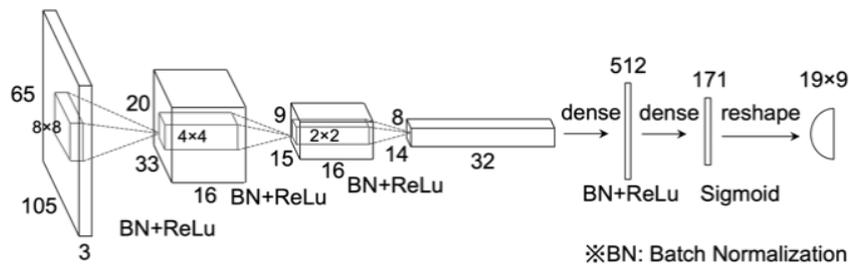


図 2.3 CNN モデルの概略図

図 2.4 に推定結果として, プロペラ面にセンターライン上の軸方向速度の CNN モデルと元データ (CFD 計算結果) の比較図を示す. 元となるデータベースは通常的设计範囲より広い範囲となっているが, 推定結果は実用上十分な精度で伴流場を推定できている。

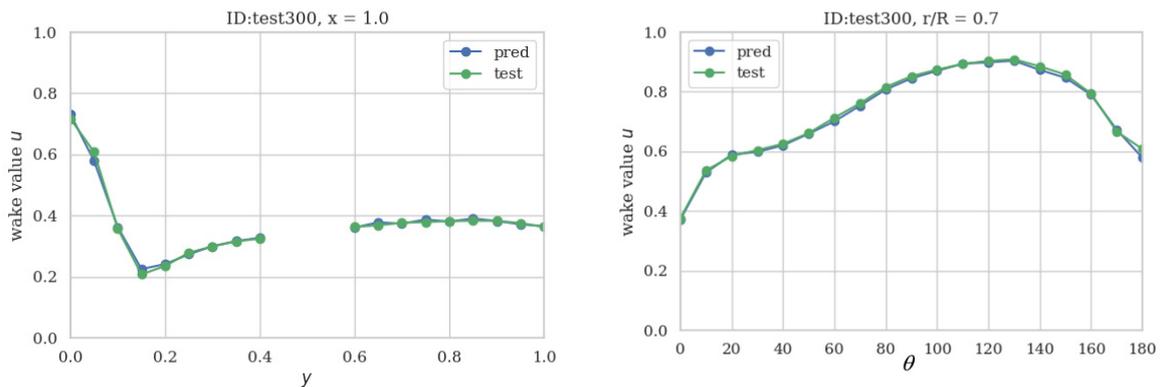


図 2.4 提案手法の推定結果 (pred) と CFD 推定 (test) の比較

2.3 伴流設計システム

船型データベースは通常 CFD が行う船型形状から伴流場を推定することとは逆の, 理想的な伴流場からそれを実現する船型を提案することが可能である. これを実現する手法として海技研で開発しているのが, 図 2.5 に示す伴流設計システムである. このシステムでは理想伴流を与えるとデータベースから理想伴流に近い伴流を類似度 (伴流同士のユークリッド距離で評価・選定) し, さらに類似度に応じてデータベース上の複数の船型を船型ブレンディングし, 船型データベースにはない新たな船型を生成することで, 理想伴流をもつ船型を提案できる。

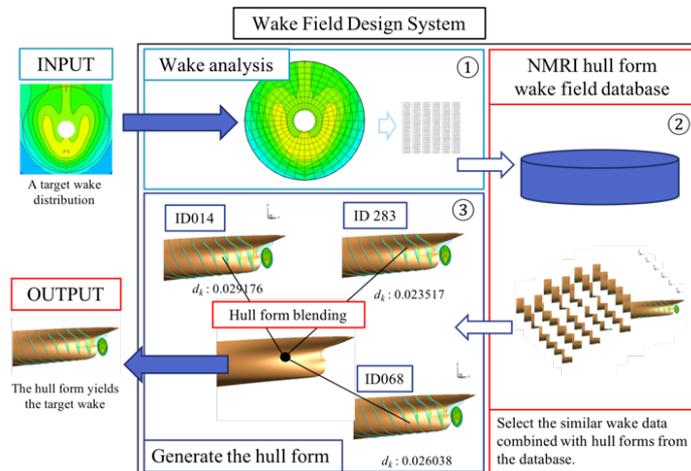


図 2.5 伴流設計システムの概要図

伴流設計システムの実用性の検証として、ダクトに適した伴流を持つ船型を設計し、水槽試験によりその効果を検証した。具体的には、ダクトによる伴流改善を狙い、原船型に比べダクト内に遅い流れが入るように船型と伴流分布を設計した。図 2.6 に伴流設計システムの検証方法の概略図を示す。



図 2.6 伴流設計システムの実用化検証（船型比較）

図 2.7 に元船型のダクト未装備の状態を基準とした省エネ効果（同一船速の必要馬力の比）を示す。伴流設計システムの出船型は、ダクト無し状態では性能が 0.4%悪化するものの、ダクトの省エネ効果が 4.1%と高いため、元船型のダクト付きと比較しても 2.2%省エネとなる船型を設計できていることがわかる。伴流設計システムは、ダクトが有る状態で性能が向上するように設計しているため、ダクト無し状態での性能は考慮していない。そのため、ダクト無し状態での性能が悪化したと考えられる。

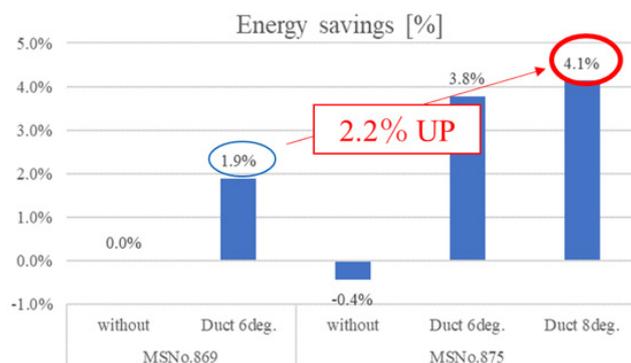


図 2.7 伴流設計システムの効果（ダクト型省エネ付加物の効果向上）

2.4 まとめ

本章では、当所で開発している機械学習技術を船型設計に活用するための2つの手法について、その概要を紹介した。1つ目の船尾流場推定手法は、性能推定に係る時間（主に計算時間）の大幅低減を実現し、また2つ目の伴流設計システムは、データベースに基づく新たな船型提案が可能である。これらの手法により、設計期間の短縮、検討設計案の増加に伴う性能向上が可能である。

3. 流場計測技術を用いた省エネ付加物のキャビテーション影響評価

3.1 はじめに

プロペラの前方に配置する省エネ付加物は、それ自体が推力を発生し、プロペラへ流入する船尾伴流を変化させて自航要素を向上することを目的に設計されている^{4,5,6}。またプロペラに発生するキャビテーションも自航要素と同様に伴流の影響を強く受ける。そのためプロペラの前方に搭載する省エネ付加物による伴流変化は、推進効率への影響とともにキャビテーション性能への影響も持つと考えられる。先行研究⁴においては、ダクト型省エネ付加物が搭載された模型船におけるキャビテーション試験を行い、ダクトの搭載によってキャビテーション発生面積と船尾変動圧力が低減されることを報告している⁷。これらは、ダクトが船尾伴流の形状を変化させることによって生じるものと考えられるが、そのキャビテーションの低減機構については検証されていない。この省エネ付加物によるキャビテーション性能の向上メカニズムが明らかになれば、推進効率と同時にキャビテーション性能の向上にも資する省エネ付加物の開発が可能となる。

本研究では、円型のプロペラ前方ダクトであるWAD（Weather Adapted Duct）を搭載したばら積み船の模型船の船後キャビテーション試験を実施し、船尾変動圧によるキャビテーション性能の変化について調査した。また、ダクト後流の流場を対象にステレオPIV（Particle Image Velocimetry）計測⁸を行い、キャビテーション低減メカニズムについて検証した。

3.2 水槽試験概要

3.2.1 供試模型船および供試プロペラ

キャビテーション試験は、当所の大型キャビテーション水槽第2計測胴にて行った。本水槽は計測部に模型船を使用した船後キャビテーション試験が可能である。本研究にて使用した模型船の形状と模型プロペラの写真を図3.1に示し、模型船主要目を表3.1、模型プロペラ主要目を表3.2に示す。本船はCFDのベンチマーク船型として開発された船型Japan Bulk Carrier (JBC)^{9,10}の平行部を40m短縮した模型である。模型船の縮尺は約1/40である。模型船は、PIV計測におけるレーザーの反射を防ぐために船体表面は黒色塗装を施している。プロペラは本船用に設計した5翼、φ250mmの模型プロペラを用いた。



図 3.1 模型船の形状（左図），模型プロペラの写真（右図）

表 3.1 対象船の主要目

Scale	Ship	Model
L_{pp} [m]	240.0	6.0
B [m]	45.0	1.125
draft [m]	16.5	0.4125
$Trim$ [m]	0.0	0.0
C_b	0.8345	

表 3.2 模型プロペラの主要目

Scale	Model
Diameter, D_p [m]	0.25
Pitch ratio at 0.7R	0.80
Number of blades, Z	5
Boss Ratio	0.18
E.A.R. (A_E/A_D)	0.50
Turning Direction	Right

本研究で使用した船尾付加物を図 3.2 に示す。本研究では、海技研にて開発した小直径円形ダクト Weather Adapted Duct (以降, WAD)^{4,5,6)}を使用し、キャビテーション試験を実施した。WAD は、その直径をプロペラ直径の 50%以下とすることで、プロペラキャビテーションが発生しやすいプロペラ翼端付近への影響を小さくし、更にプロペラダクト間の干渉効果を高めるためプロペラに近接配置した小直径高干渉ダクトである。



図 3.2 ダクト型省エネ付加物 WAD の形状

3.2.2 船尾変動圧計測

本研究では、プロペラ直上の模型船船尾に埋め込んだ圧力センサ（共和電業製 PCMC-A-200KP）を使用して変動圧力計測を行った。圧力計の配置を図 3.3 に示す。プロペラ変動圧 K_{pi} はプロペラ 30 回転分を位相平均した波形データを対象に離散フーリエ変換を行い、翼周波数成分における片振幅を求めて以下の(3.1)式を用いて無次元化した。 Δp_i は各周波数成分の片振幅、 ρ は水の密度、 n_p と D_p はそれぞれ模型用プロペラの回転数と直径を示している。

$$K_{pi} = \Delta p_i / (\rho n_p^2 D_p^2) \quad (3.1)$$

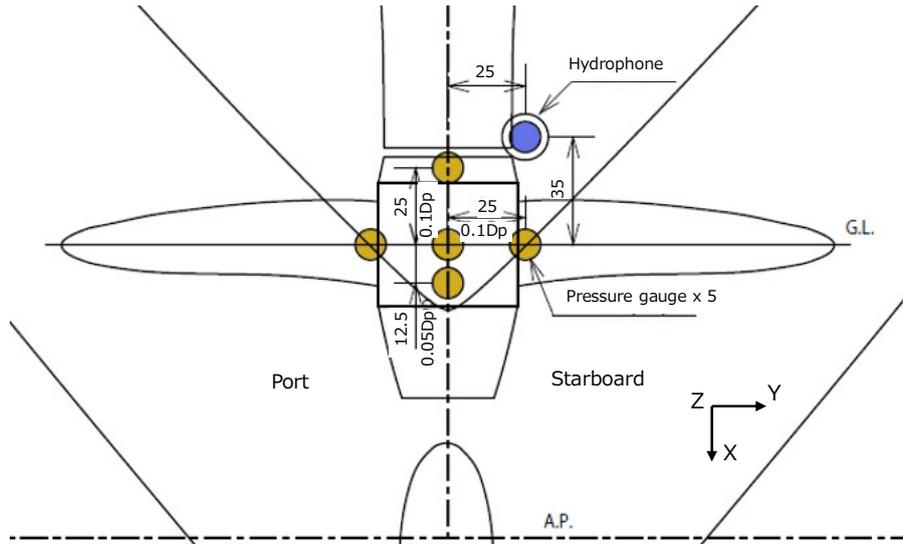


図 3.3 圧力計の設置位置

3.2.3 ステレオ PIV 計測

本研究では、カメラ 2 台を用いたステレオ PIV 計測によりダクト後流場の評価を行った。本研究で使用したステレオ PIV システムの概略図を図 3.4 に示す。レーザーは Nd:YAG ダブルパルスレーザー (Lotis Tii 社製, Max. output: 300mJ, Max. repetition rate 15Hz, $\lambda=532\text{nm}$) を使用し、水槽側面側より計測断面へ照射した。カメラは 200 万画素の CCD カメラ (JAI 社製, AM-200GE, GigE, 1600pixel \times 1200 pixel) を 2 台使用した。図 3.4 から分かるように、PIV 計測は計測窓越しで行うため、計測窓と水槽内の水による屈折影響が大きい。この影響を低減するために、本研究ではプリズムを使用した。また、図 3.4 に示すように、計測窓と模型船の位置の制約から、PIV 計測は計測面に対して斜めから撮影を行う必要がある。通常、被写体に対して斜め方向から撮影した場合、近距離の撮像面と遠距離の撮像面において、焦点距離が異なるため被写体全体に焦点を合わせることが難しい。そこで、本研究ではシャインプルーフを用いることで、斜め方向から撮影した場合でも計測面全体に焦点が合うようにした。シャインプルーフは、撮像素子の受光面とレンズ主面を平行ではなく角度をつけて設置することで、近距離の撮像面と遠距離の撮像面とを同時に焦点を合わせられる特徴を持つ。

また、ステレオ PIV を用いた流場計測風景を図 3.5 に示す。計測断面はプロペラ G.L.位置とした。PIV 解析にはフローテックリサーチ社の FtrPIV を使用した。画像関連には直接相互関係法を用いた。PIV 計測では模型船は抵抗状態 (シャフト無, ボス無, 舵無) として、裸殻状態および WAD 付きの計測を行い、比較検証した。

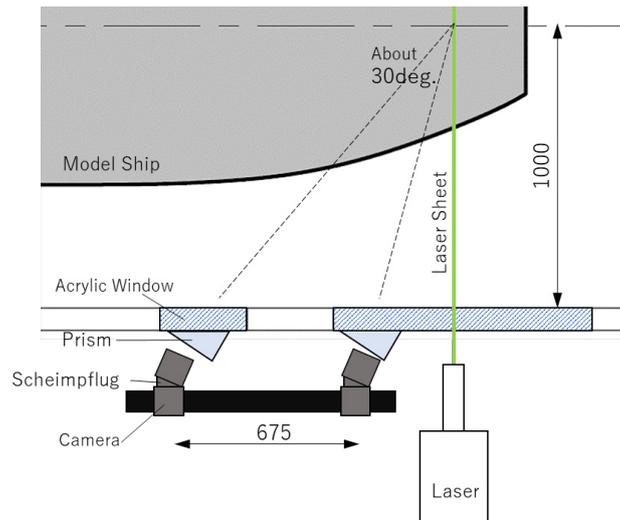


図 3.4 ステレオ PIV システムの概略図

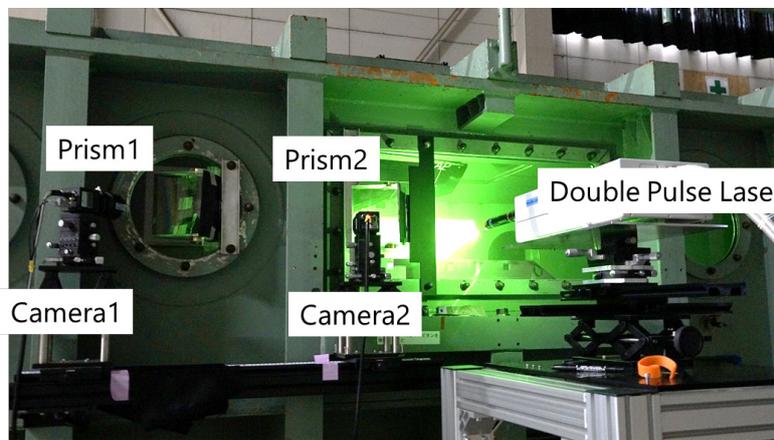


図 3.5 ステレオ PIV を用いた流場計測風景の写真

3.2.4 試験条件

本研究にて試験した変動圧計測の計測条件を表 3.3 に示す. キャビテーションの発生が大きい状態において比較を行うため, スラスト係数 K_T は設計 MCR の 1.2 倍 ($K_T=0.206$) とした.

表 3.3 計測条件

Test condition	n_p [rps]	K_T	σ_n
Bare	25.0	0.206	1.950
With WAD	25.0	0.206	1.950

PIV 計測では, 変動圧計測の条件と同様の流速下にて, 裸殻状態にて省エネ付加物比較を実施した. スラスト係数 K_T およびキャビテーション数 σ_n の定義式を(3.2)式, (3.3)式にそれぞれ示す. T はスラスト, D_p はプロペラ直径, n_p はプロペラ回転数, P_0 は軸心高さの静圧, e は飽和水蒸気圧である.

$$K_T = T / (\rho n_p^2 D_p^4) \tag{3.2}$$

$$\sigma_n = 1/2 \times (P_0 - e) / \rho n_p^2 D_p^2 \tag{3.3}$$

3.3 水槽試験結果

3.3.1 キャビテーション観察

ハイスピードカメラ(Phantom v7.1)にて撮影した $\theta=16\text{deg.}$ におけるキャビテーションパターンを図 3.6 に示す。裸殻状態と比較して、WAD 有りではシートキャビテーションの発生範囲が小さい傾向が見られた。



図 3.6 省エネ付加物の有無によるキャビテーションパターンの比較

3.3.2 船尾変動圧計測結果

次に変動圧計測結果について述べる。図 3.7 に裸殻状態と WAD 有りの変動圧計測結果を示す。図 3.7 より、WAD によるキャビテーション発生抑制による変動圧低減効果が確認できる。WAD によって、1 次成分(K_{p5})は 34%、2 次成分(K_{p10})は 45%、3 次成分 (K_{p15}) は 60%減少していることが確認できる。

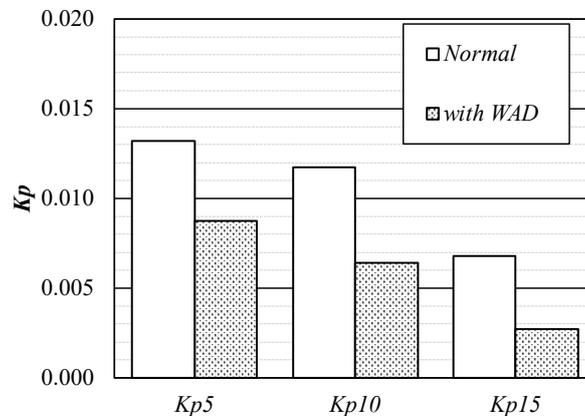


図 3.7 省エネ付加物の有無による変動圧力の比較 (at $X/D_p = 0.0$)

3.3.3 ステレオ PIV 計測結果

図 3.8 にステレオ PIV を用いた流場計測結果を示す。図 3.8 では WAD の有無による伴流分布を比較しており、破線は裸殻状態の計測結果を示しており、コンターが WAD 付の計測結果を示している。WAD 付の場合、プロペラ上部の低速領域が小さくなっており、これによりシートキャビテーション量が抑制されたものと考えられる。低速領域の減少はダクトの翼形状に起因するダクト内部の加速が原因と考えられる。

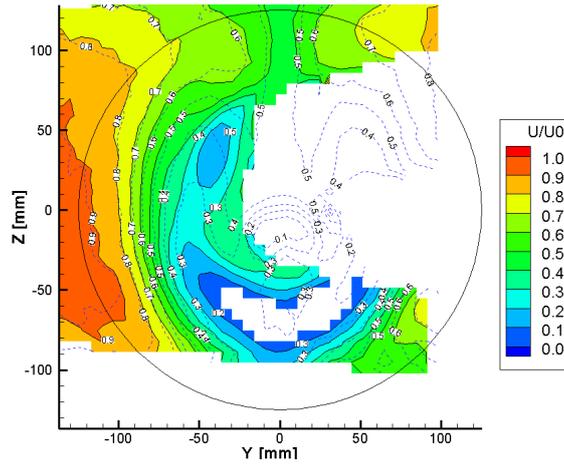


図 3.8 WADの有無による伴流分布の比較

次に詳細に速度分布を調査するため、半径比補間した際の主流方向の流速分布の比較結果を図 3.9 に示す。キャビテーション発生に関連すると考えられる $r/R = 0.7$ では、 $\theta = 0$ [deg.]にて WAD は裸殻状態と比較して約 5%以上の主流方向速度の上昇を確認した。以上の結果より、WAD によってプロペラ上部にて速度上昇が見られ、これによりキャビテーション低減効果が得られたと考えられる。

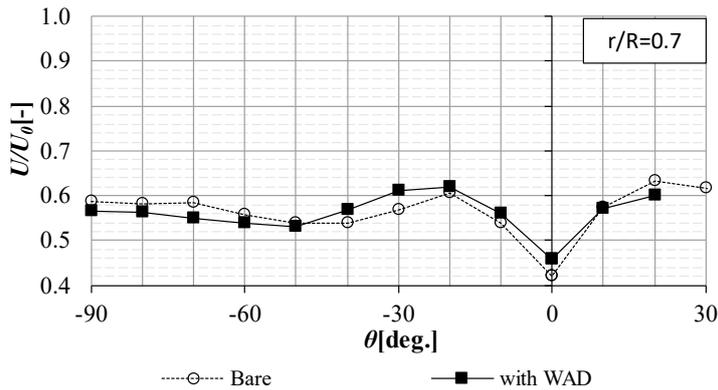


図 3.9 0.7r/R 位置における円周方向の伴流分布

3.4 まとめ

本研究ではダクト型省エネ付加物である WAD を使用した際のキャビテーション性能変化を調査するため、キャビテーション試験および PIV 計測を行い以下の知見を得た。

変動圧計測にて、WAD 付は裸殻状態と比較して 1 次成分で約 34%、2 次成分で約 45%、3 次成分は 60% の低減効果が確認された。

PIV 計測にて、キャビテーション発生に関連すると考えられる $r/R = 0.7$ 位置の $\theta = 0$ deg.において、WAD によって約 5%以上の主流速度の向上を確認した。この結果より、WAD による伴流ピークの改善がキャビテーションの低減に影響していることを示した。

4 実船流場計測結果との比較による模型試験の流場計測技術の検証

4.1 はじめに

近年計算機の性能向上により、実船レイノルズ数の CFD 計算が可能となってきた。一方 CFD の精度は、模型

レイノルズ数においては模型試験結果との比較により確認されているが、実船レイノルズ数においては比較対象となる実船流場データの不足により十分に確認されていない。また、船舶からの温室効果ガスの削減の義務化により、多くの船舶が推進効率を向上させるための省エネデバイスを船尾のプロペラまわりに装着している。省エネデバイスは尺度影響を大きく受ける船尾伴流中で作動しているため、この性能向上のためには、実船スケールにおける省エネデバイスまわりの流場の把握が不可欠である。

本研究では、船尾伴流分布における尺度影響を評価するため、実船流場計測を行った外航ばら積み船^{11,12)}と同形状の模型を用いて、曳航水槽内でステレオ PIV による流れ場の計測を行った。実船スケールと模型スケールの流場計測結果を比較し、それぞれの流場の特徴について調査を行った。

4.2 水槽試験概要

ステレオ PIV 計測は、当所の 150m 曳航水槽（中水槽）で実施した。曳航水槽は長さ 150 [m]、幅 7.5 [m]、深さ 3.5 [m]である。対象船は 63,000 重量トン型ばら積み船である。表 4.1 に対象船の主要目を示す。本研究では、船尾伴流分布における尺度影響を評価するため、実船と同形状の模型を用いて、曳航水槽内でステレオ PIV による流れ場の計測を行った。模型船の垂線間の長さは 6.960 [m]であり、縮尺は約 1/28 である。船体、プロペラ、ダクトの形状は実船と同じである。

なお、対象船に設置された省エネ付加物は、当所が開発した WAD (Weather Adapted Duct) と呼ばれるプロペラ前方に設置されたダクトである。

表 4.1 対象船の主要目

Scale	Ship	Model
L_{pp} [m]	195.0	6.960
B [m]	32.24	1.151
d [m]	13.4	0.478

模型試験における船尾流場の計測には Dantec Dynamics 社製の水中ステレオ PIV 計測システムを使用した。表 4.2 にこの PIV システムの仕様を示す。また、図 4.1 に PIV システムの写真を示す。本システムは、曳航水槽で一般的に使用される構成である。流れ方向に垂直な平面にレーザー光シートを照射し、その平面上の 3 つの速度成分を計測するものである。

表 4.2 ステレオ PIV システムの仕様

Laser	Double-pulse Nd:YAG Laser (Quantel laser, Evergreen EHP15-340, Wavelength 532 [nm], Max. repetition rate 15 [Hz], Max. energy 340 [mJ])
Camera	CMOS camera×2 (Dantec Dynamics, FlowSense EO 4M32, 2072 [pix] × 2072 [pix], 12 [bit])
Field of view	Approximately 300 [mm] × 300 [mm]
Tracer particle	Silver-coated hollow glass sphere (Ave. diameter 14 [μm], Specific gravity 1.7)
Analysis method	FFT-based cross-correlation (Dantec Dynamics, Dynamic studio 7.5)



図 4.1 流場計測に用いたステレオ PIV システムの写真

実船における船尾流場の計測断面を図 4.2 に示す。図 4.2 中に示されている Flame 9 (F9) と Flame 7 (F7) の位置が計測位置である。模型試験においても実船と同じ位置において流場計測を行った。

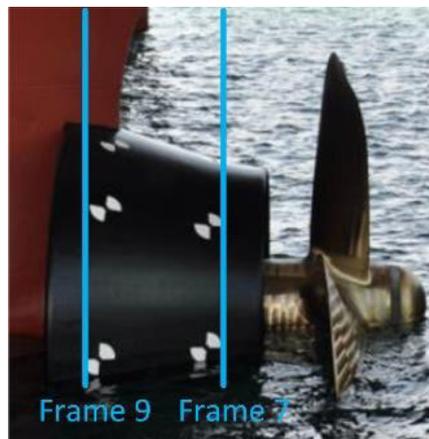


図 4.2 実船の流場計測位置 (F9: Flame 9, F7: Flame 7)

4.3 実船スケールと模型スケールでの船尾流場の比較

図 4.3 と図 4.5 は、F9 と F7 の計測位置における実船流場計測結果である。図 4.4 と図 4.6 は同計測位置における模型試験での流場計測結果である。実船計測および模型試験計測における流場は、それぞれの主流速で無次元化されている。図 4.3 から図 4.6 について実船スケールと模型スケールの結果を比較すると、模型スケールの流場でも、境界層やダクト沿いの低速域など、実スケールの流れ場と同様の傾向があることが分かる。また、実船スケールではレイノルズ数の増加に起因する流場全体の高速化傾向も観察された。流場全体が高速化される原因は、レイノルズ数の増加によって境界層が薄くなることが原因であると考えられる。これらの結果は、実船計測結果の高い信頼性も裏付けている。一方、ダクト近傍の詳細な流れ場は、他の領域に比べ、模型試験と実船計測との差が大きく、笹島田中法などの従来の尺度影響修正法では推定できない複雑な流れ場となっていることがわかった。

今後は、これらの計測結果と CFD による計算結果を比較していくことで、実船スケールでの CFD の推定精度を改善していく予定である。

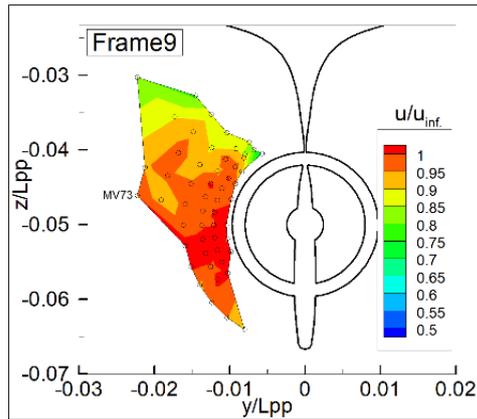


図 4.3 F9 位置における伴流分布計測結果
(実船スケール)

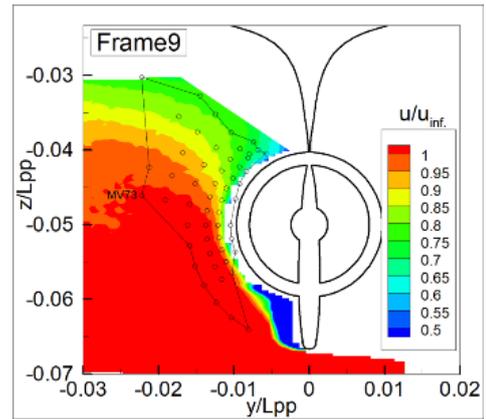


図 4.4 F9 位置における伴流分布計測結果
(模型スケール, 自航状態)

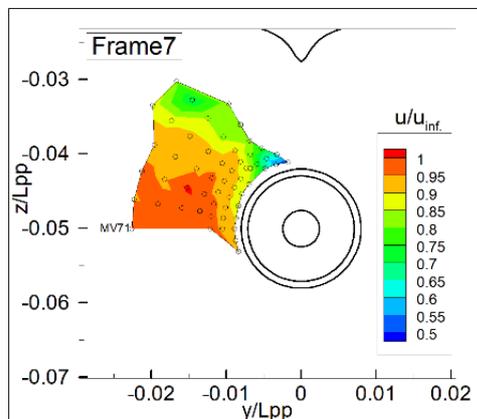


図 4.5 F7 位置における伴流分布計測結果
(実船スケール)

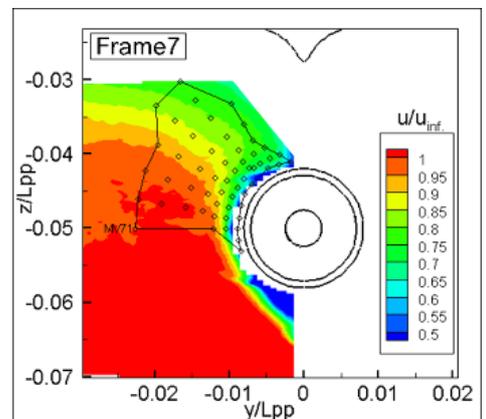


図 4.6 F7 位置における伴流分布計測結果
(模型スケール, 自航状態)

4.4 まとめ

ばら積み船の ESD 付近の実規模航跡計測を PIV を用いて実施した。この論文では、測定方法、測定中の条件、時間平均流れ場と位相平均流れ場、流れ場のスケール効果について述べた。本研究から以下の結論を得た。

- (1) 実船試験と同じ条件下で模型試験を実施し、レイノルズ数の違いによる差異が予想されるものの、同じ測定断面において同様の流れ場特性が確認された。これは実船計測の信頼性を裏付けるものである。
- (2) ダクト近傍の流れ場は笹島田中法などの従来の尺度影響修正法では推定できない複雑な流れ場となっていることが明らかになり、ESD 設計における実船データの重要性が確認された。

5. 結論

本論文では、当所が開発した伴流設計技術と流れ場計測技術について述べた。伴流設計技術は、船尾流れ場推定手法と伴流設計システムで構成されており、本技術によって、従来の 100 万分の 1 の計算時間で CFD と同様の評価が可能である。流れ場計測技術では、当所のキャビテーション水槽にステレオ PIV を導入することで、省エネ付加物によるキャビテーション性能の改善のメカニズムを流れ場の変化にもとづき定量的に評価することが可能である。今後は、両技術を活用することで、ゼロエミッションに対応した船型開発に貢献していきたい。

References

- 1) Ichinose, Y. and Tahara, Y.: A wake field design system utilizing a database analysis to enhance the performance of energy saving devices and propeller, *Journal of Marine Science and Technology*, 24, (2019), pp.1119-1133.
- 2) Ichinose, Y. and Taniguchi, T., A curved surface representation method for convolutional neural network of wake field prediction, *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 27, no. 1, (2022), pp. 637-647.
- 3) Ichinose, Y., Method involving shape-morphing of multiple hull forms aimed at organizing and visualizing the propulsive performance of optimal ship designs, *Ocean Engineering*, vol. 263, (2022), Article number 112355.
- 4) Kawashima, H., Kume, K., Sakamoto, N.: Study of Weather Adapted Duct (WAD), General meeting of National Maritime Research Institute, vol.14, (2014), pp.19-34, (in Japanese).
- 5) Kawashima, H., Ichinose, Y., Kasahara, Y., Kume, K., Kaneko, A., Fukasawa, R., Tahara, Y.: Research on the Development of Energy Saving Device in Actual Sea, *Papers of National Maritime Research Institute*, Vo. 17, (2017), pp.73-86, (in Japanese).
- 6) Web site of WAD description by NMRI:
https://www.nmri.go.jp/oldpages/center_project/eedi_project_team/sub/wad.html
- 7) Kume, K., Fujisawa, J., Sawada, Y., Yamamoto, Y.: Hydrodynamic Forces and Effects to Propeller Cavitation of the Energy Saving Duct “WAD”, *Proceedings of Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, (2018), pp. 257-26, (in Japanese).
- 8) Soloff, S.M., Adrian, R.J., and Liu Z.-C.: Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry, *Measurement Science and Technology*, Volume 8, Issue 12, (1997), pp.1441-1454.
- 9) Web site of CFD Workshop Tokyo 2015 (2015): <https://www.t2015.nmri.go.jp>.
- 10) Hino, T., Hirata, N., Ohashi, K., Toda, Y., Zhu, Makino K., Takai M., Nishigaki M., Kimura K., Anda, M. and Shingo S.: Hull Form Design and Flow Measurements of a Bulk Carrier with an Energy-Saving Device for CFD Validations, *Proceedings of the 13th International Symposium, Practical Design of Ships and Other Floating Structures* (2016), pp.31-38.
- 11) Hiroi T., Windén, B., Kleinwächter A., Ebert E., Fujisawa J., Kamiirisa H., Damaschke N. and Kawakita C.: Full-Scale On-board Measurements of Wake Velocity Profiles, Underwater Noise and Propeller Induced Pressure Fluctuations, *Proceedings of The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, Vol. 29, (2019), pp.193-198.
- 12) Sakamoto N., Kobayashi H., Ohashi K., Kawanami Y., Windén B. and Kamiirisa H.: An overset RaNS prediction and validation of full scale stern wake for 1,600TEU container ship and 63,000 DWT bulk carrier with an energy saving device, *Applied Ocean Research*, Vol. 105, (2020), Article number 102417.