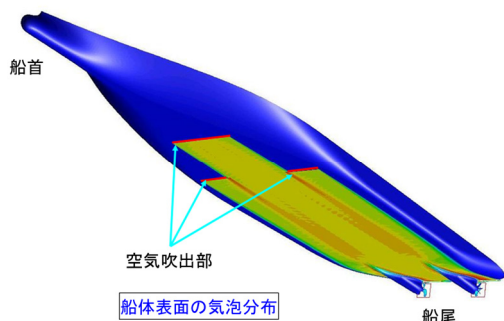


CFD による 三菱空気潤滑システム(MALS)搭載省エネ船の気泡流予測

Predictions of Bubbly Flow around Energy-Saving Ship with Mitsubishi Air Lubrication System Using CFD



川淵 信^{*1}
Makoto Kawabuchi

川北 千春^{*2}
Chiharu Kawakita

溝上 宗二^{*3}
Shuji Mizokami

日笠 靖司郎^{*3}
Seijiro Higasa

小段 洋一郎^{*1}
Yoichiro Kodan

高野 真一^{*1}
Shinichi Takano

“三菱空気潤滑システム(Mitsubishi Air Lubrication System, 以下 MALS)”は、空気潤滑法を用いたシステムとしては、世界で初めて新造船に適用され、大幅な抵抗低減効果が確認された。MALS を一般の商船に適用拡大していくため、CFD による性能推定法の構築が急がれている。本論文では、MALS 搭載船を対象に、船体表面における気泡分布予測を実施し、気泡の船体被覆率に基づく抵抗低減量予測手法を開発した。また、性能低下要因となるプロペラディスク面への気泡流入予測も実施し、プロペラ性能の低下が無視できるレベルであることを確認した。

1. はじめに

新興国の経済発展に伴う原油価格の高騰や、国際海運における CO₂ 排出規制などの環境問題への対応策として、海運業界からの省エネ船開発への期待は大きくなっている。

気泡によって、船体に作用する抵抗を低減する空気潤滑法は、数ある省エネ技術の中でも、とりわけ大きな省エネ効果が期待されることから、各場所で研究が進められている。

これまでの空気潤滑法の実用化に向けた取組みとして、児玉ら⁽¹⁾は全長 50m の平板模型船を用いた実験を実施し、模型船に働く全抵抗や船底の局所摩擦力が低下することを確認した。また、実船での検証も既に実施されており、児玉ら⁽²⁾が実施したセメント運搬船を用いた実船実験において、約5%の省エネ効果が報告されている。

一方、CFD を用いた研究も進められており、村上ら⁽³⁾は児玉ら⁽²⁾が実験を行ったセメント運搬船の周りの流れをシミュレーションし、船の姿勢変化と気泡吹き出し位置が、抵抗低減率とプロペラディスク面におけるボイド率に与える影響を評価している。

当社長崎造船所では、2010 年4月に新造船としては初めて空気潤滑システムを搭載した日出郵船(株)向けモジュール運搬船 YAMATAI を竣工した。本船は引渡し前の海上試運転にて、10%を超える省エネ効果を達成した。

YAMATAI に搭載した MALS の開発に当たり、模型試験・実船試験に加え CFD 技術も駆使した気泡流の予測が行われた。模型試験結果については、高野ら⁽⁴⁾が、船底での気泡の流れ状況確認と、プロペラディスク面におけるボイド率がプロペラ特性及びプロペラ変動圧に及ぼす影響評価を実施している。

著者らは本船にて模型船スケールの CFD を実施し、船体抵抗の低減効果予測のために重要となる船体表面の気泡ボイド率分布と、プロペラ性能に影響を与えるプロペラディスク面におけるボイド率分布の予測を行った。

本論文では、上述した予測計算の結果を報告する。

*1 技術本部長崎研究所船舶・海洋研究室

*2 技術本部長崎研究所船舶・海洋研究室主席研究員

*3 船舶・海洋事業本部船舶・海洋技術部主席技師

2. 船体表面における気泡分布の予測

空気潤滑法による船体抵抗低減において、船体表面の気泡分布は、重要なパラメータと考えられる。したがって、船体抵抗低減効果を高精度に予測していくためには、船体周りの気泡分布を高精度に予測する必要がある。

本章では、船体表面における気泡ボイド率分布の予測計算結果を報告する。ここでのボイド率とは気液混合流体に占める空気の体積割合である。

2.1 計算対象・条件

計算対象は表1に示すとおりである。本船は幅広浅喫水を特徴とした2軸船である。本論文にて掲載する計算結果はすべて、模型船スケールの計算で、自由表面での造波を考慮しないダブルフローモデルによる直進時の結果である。船体のセンターラインを通る面に対称条件を与え、左舷側のみの計算を行っている。

気泡流モデルについて、すべての気泡の径は一定であり、流れに従って変化しないものとした。また、気泡同士の合体・分裂は考慮しない。気泡径は表2に示す値で計算を実施した。気泡径は、実船で2～3mmと想定した。気泡径の影響を概略確認するため、Case2・3では気泡径をそれぞれ5倍・10倍に設定した。

気泡の吹き出し口は図1に示すとおり、船底の3箇所に設けられており、センターラインについて対称に配置されている。本計算では、左舷側のみを計算するため、前方と後方の2箇所に吹き出口を設けた。気泡の吹き出しについては、空気吹出口に速度境界を与え、空気のみを一定の流量で吹き出すモデルとした。

表1 YAMATAIの主要目

船名		YAMATAI (モジュール運搬船)
全長	Loa	162m
全幅	B	38m
深さ	D	9.0m
喫水	d	4.5m / 6.34m
載荷重量トン数	-	約 19500t
航海速力	U	13.25kt
模型船の縮尺		1/27.7



図1 空気潤滑法のイメージ

船底に設けた空気吹出口から気泡を放出し、船底を気泡で覆う。

2.2 計算結果と実験結果の比較

Case1～3の船体ボイド率分布予測結果をそれぞれ、図2に示す。

コンターはボイド率分布を示している。この値が大きいほど、単位体積中における空気の割合が高くなっていることを意味する。

2.2 で得られた計算結果から、気泡分布に対する気泡径の影響は小さいことがわかる。したがって、気泡径にばらつきがある実現象の予測も、代表的な単一気泡径の計算で概略再現可能である。

気泡径 0.1mm の結果と、高野ら⁽⁴⁾による実験結果の比較を図3に示す。両者ともに平水中で、直進以外の船体運動は考慮しない状態の結果である。

実験において、気泡分布量を定量的に評価することは困難であるため、ここでは計算によるボイド率分布予測結果と、実験による気泡分布の画像を定性的に比較するにとどまっているが、以下のような傾向が共通して見られる。

- ・ 気泡が船底から漏れ出ることなく船体を通れる。
- ・ 船体のセンターライン近傍では気泡分布が薄い。
- ・ 船尾のプロペラ軸を覆うスケグ周辺に気泡が集まる。

上記から、気泡の大まかな分布は再現できているものと考えられ、この結果得られる気泡の船体表面被覆率と抵抗低減量の水槽試験結果を用いて、概略の抵抗低減効果の予測が可能である。

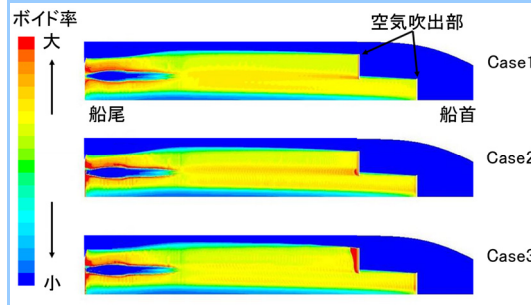


図2 船体表面ボイド率分布

左舷側船底を下から見たところ。コンターはボイド率を示す。

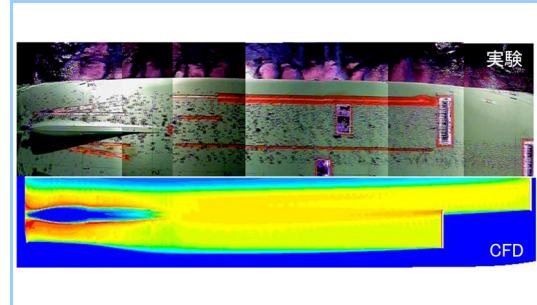


図3 ボイド率分布の比較

上: 模型試験の結果, 下: CFD の結果

3. プロペラディスク面に流入する気泡の分布予測

空気潤滑法は気泡によって抵抗を低減できる一方、プロペラへの気泡混入により、プロペラ効率の悪化や振動・騒音問題などの発生が懸念される。高野ら⁽⁴⁾は、プロペラディスク面に流入するボイド率を変化させ、プロペラ特性及びプロペラ変動圧に及ぼす影響を評価している。CFD によりプロペラに流入する気泡のボイド率を正確に予測することができれば、この実験データを用いてプロペラ性能への影響を把握することが可能になる。

本章では、モジュール運搬船を対象にプロペラ性能影響を評価した。

3.1 プロペラディスク面流場予測

本船はプロペラ前方にリアクション・フィン(以下 R/F)を備え、複雑な流場を有することが予想されるため、プロペラディスク面への気泡混入量の予測に先駆けてプロペラディスク面の流場予測を行った。

本船の R/F はスケグの外側に3枚配置されており、鉛直上方からそれぞれ、45deg, 90deg, 135deg ずつ傾けてスケグに設置されている。

(1) プロペラディスク面流場予測結果

プロペラディスク面での伴流コンター・速度ベクトル分布の実験結果との比較を図4に示す。

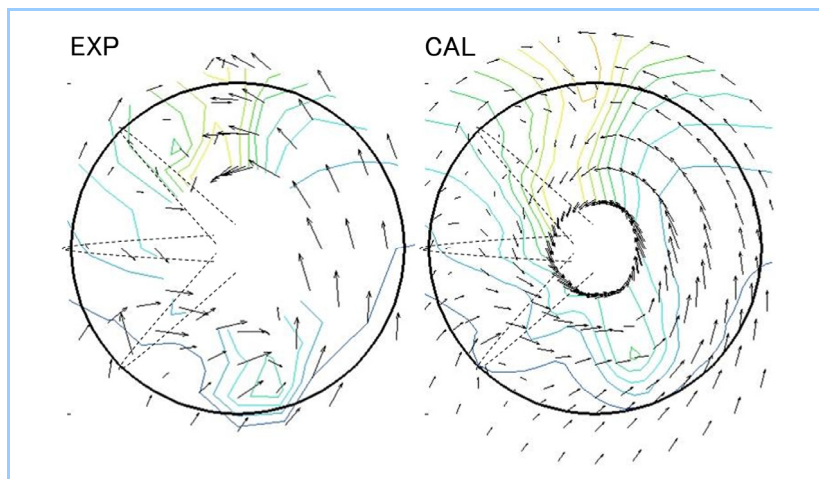


図4 プロペラディスク面における流場の比較

コンターは長手方向の流速分布、ベクトルは幅・高さ方向の速度ベクトルを示す。点線は上流側に R/F があることを示す。

(2) 流場予測の結果評価

図4において、R/F の位置は点線で示している。まず、コンターを見ると、コンター分布については、おおむね一致している。一方ベクトルについても、プロペラ軸よりも左側でベクトルが小さくなり、右側で大きくなるという特徴や、流れの方向などはおおむね一致する。

図4に示すようにプロペラディスク面内への流速分布はおおむね実験結果と一致している。このことから、船首船底部に設置された空気吹出口から排出された気泡のプロペラディスク面への流れの様子についても、CFD で十分予測可能と考えた。

3.2 プロペラディスク面におけるボイド率分布の予測

船底から気泡を流す計算を実施し、プロペラディスク面への気泡の混入量について予測した。

(1) 計算条件

計算の基本的な設定は 2.1 と同様である。表2に示した各ケースについて計算を実施し、気泡径の違いによる影響を評価した。

(2) 計算結果

プロペラディスク面における気泡ボイド率分布について、気泡径 0.1mm, 0.5mm, 1.0mm の結果を図5にそれぞれ示す。いずれの図もプロペラディスク面に該当する部分を赤い円で示した。また、図の上端は静止水面位置に相当する。

表2の各ケースにおいてプロペラディスク面に流入する気泡のボイド率をそれぞれ面積平均した結果を表3に示す。

表2 気泡径の設定

	模型船 (mm)	実船 (mm)
Case 1	0.1	2.77
Case 2	0.5	13.8
Case 3	1.0	27.7

表3 プロペラディスク面に流入するボイド率の平均値

気泡径 (mm)	ボイド率の平均値 (%)
0.1	0.030
0.5	0.017
1.0	0.014

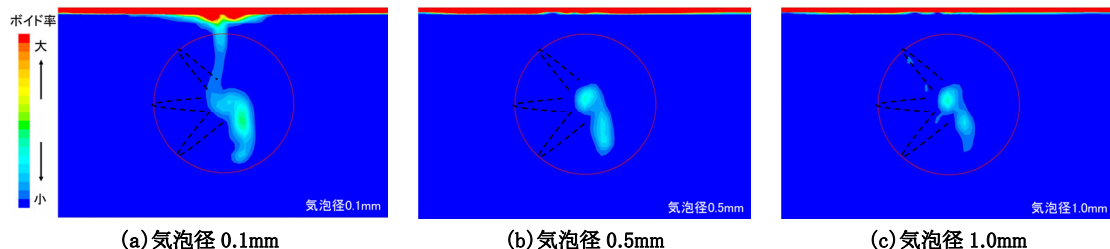


図5 プロペラディスクの面ボイド率分布予測結果

赤丸はプロペラディスクを示す。点線は上流側に R/F があることを示す。

(3) 気泡の流入によるプロペラ性能への影響

図5(a)～(c)を比較すると、気泡径が大きくなるにつれて、プロペラディスク面に流れ込む気泡量が減少していることがわかる。これは気泡径が大きくなるほど、気泡にかかる浮力が大きくなることによるものと考えられる。また、気泡径が変化しても、ボイド率のピーク位置に大きな差は見られない。

図6に高野ら⁽⁴⁾による水槽実験で得られた、本船用プロペラの作動点付近(Slip=0.4)における気泡流中プロペラ特性計測結果を示す。この実験では、プロペラ前方から流量を変更しながら気泡を放出し、円形状に拡散する気泡群をプロペラ中心部と上方部(0.7R*付近)に流入させた場合の、プロペラディスク面のボイド率変化に伴う推力、トルク及びプロペラ効率に与える影響を示している。 *R:プロペラ半径

計算結果から得られたプロペラディスク面の平均ボイド率分布を、図6の結果に照らし合わせると、本船の場合、プロペラ効率の低下は小さいと予想される。

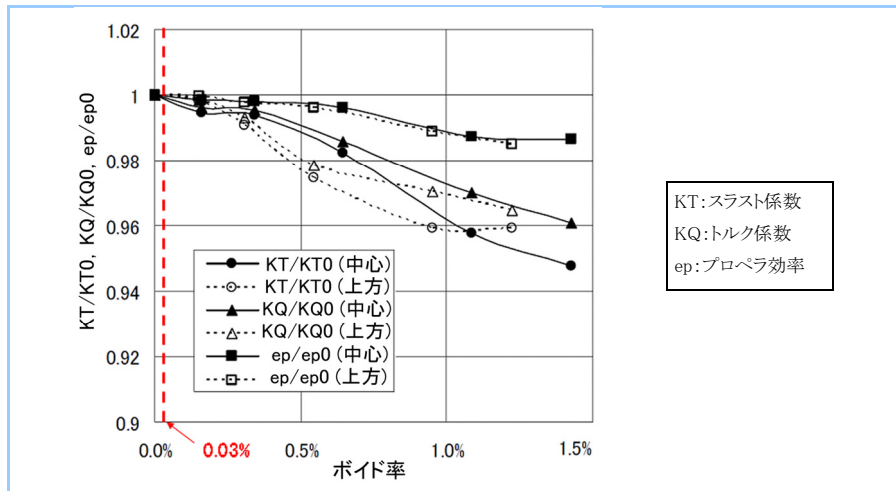


図6 プロペラディスク面平均ボイド率とKT, KQ, ep の関係 (Slip=0.4)

プロペラに混入する空気の流量に対する、プロペラの性能低下量を示したグラフ

4. まとめ

模型スケールの解析を実施し、MALS 搭載船の船体表面での気泡分布と、プロペラへの気泡の流れ込み量を概略予測することができた。

その結果、船底部表面の気泡分布については、気泡径による影響が小さいことと、CFD によって得られる気泡分布が定性的に実験結果とよく一致することが確認できた。また、プロペラ近傍の現象について、気泡径が変化してもプロペラディスク面でのボイド率のピーク位置に変化は見られないが、プロペラに流入するボイド率は、気泡径が小さくなるほど高くなることがわかった。気泡流中プロペラ特性実験結果に CFD によるボイド率推定結果を照らし合わせると、今回想定した条件において、気泡が船底面に沿ってプロペラ上方を流れるため、気泡による推進効率のロスは無視できるレベルに抑えられることも確認できた。

空気潤滑法の抵抗低減メカニズムについては、流体の密度変化による影響や、境界層内部での気泡による乱流変調の効果など、複数の原因が挙げられているが、いまだその原因は完全には解明されていない。今後は、詳細な物理現象の把握による原因の究明に向けても、CFD の果たす役割は大きいと考えられる。

参考文献

- (1) Kodama, Y. et al., Experimental Study on Microbubbles and their Applicability to Ships for Skin Friction Reduction, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.21, Issue 5 (2000) p.582
- (2) 児玉良明ほか, 大型セメント運搬船を用いた空気潤滑法による省エネ実船実験(結果と解析), 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 6 号(2008) p.163
- (3) 村上麻子ほか, 気泡吹き出し装置を有する実船周りの数値シミュレーション, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 6 号(2008) p.153
- (4) 高野真一ほか, 船底に放出した空気の挙動およびプロペラに及ぼす影響の模型試験による検証, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 10 号(2010) p.455