

三菱空気潤滑システムへのシミュレーション技術の活用

Application of the Simulation Technology to Mitsubishi Air Lubrication System



川北 千春*¹
Chiharu Kawakita

佐藤 慎輔*²
Shinsuke Sato

沖本 貴寛*²
Takahiro Okimoto

船舶の省エネシステムとして開発された三菱空気潤滑システム(Mitsubishi Air Lubrication System, 以下 MALS)の開発・設計にはシミュレーション技術の活用が必要不可欠である。本報は MALS 開発のキー技術である CFD を用いた船体周りの気泡分布及び摩擦抵抗低減効果予測技術, 気泡流中で作動するプロペラの変動圧力予測技術, 及び関連技術としてエンジン冷却水を取り込むためのシーチェスト内の気液分離予測技術について述べる。これらの技術は実船試験や模型試験による検証に基づき推定精度の検証・向上を実施し, 有効な開発・設計ツールとなっている。今後も実船計測結果からのフィードバックを行い MALS の性能向上に活用していく。

1. はじめに

原油等の原材料価格の高騰や, 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い。船体周りの流れにミリオーダーの気泡を混入し摩擦抵抗を低減させる空気潤滑法は, 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注目されている。当社では 2010 年4月に新造船としては世界初となる空気潤滑法を応用した三菱空気潤滑システム(MALS)を搭載した日の出郵船(株)殿向けモジュール運搬船“邪馬台”を竣工した。図1に MALS 搭載船のイメージを示す。本船の海上運転時の実船実験では, MALS により10%以上の省エネ効果が得られた⁽¹⁾。更に2010年12月に竣工した同システムを搭載した姉妹船“大和”では, 海上試運転にて省エネ効果を確認すると共に, 図2に示す曳航式水中曳航体を用いた船底気泡流観察, 及び船底に設置したせん断力計による局所摩擦力計測を実施し, MALS による摩擦抵抗低減効果向上のための貴重な実船データを取得した。モジュール運搬船は就航後4年を経過したが, MALS は大きなトラブル無く稼働中である。現在 MALS は, フェリー, バルク船, 大型客船へと適用船種の拡大を図っている⁽²⁾。

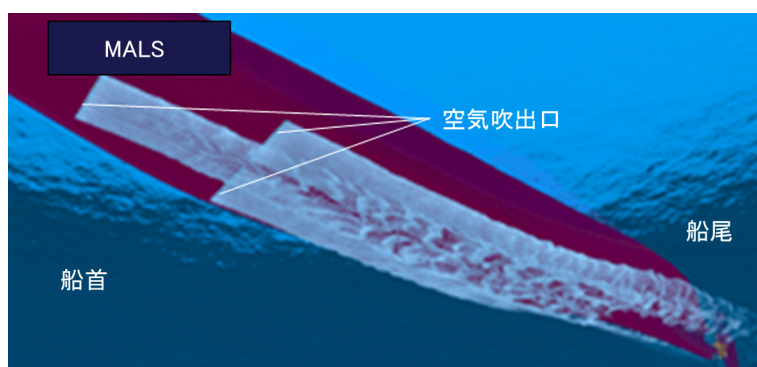


図1 MALS 搭載船のイメージ

船底に設けた空気吹出口から気泡を放出し, 船底を気泡流で覆う様子

*1 技術統括本部 長崎研究所 主席研究員

*2 技術統括本部 長崎研究所

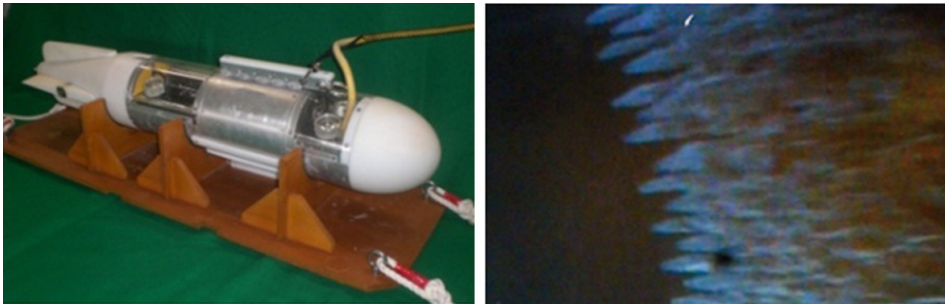


図2 曳航式水中曳航体及び空気吹出口より吹出される気泡流の状況
 カメラを内蔵した曳航式水中航走体(写真左)により、実船の船底を流れる気泡の様子を観察し、空気吹出口より均等に気泡が放出されていること(写真右)、船側から気泡が漏れだしていないことなどを確認した

本報は MALS 設計に活用している主なシミュレーション技術について述べる。はじめに MALS による省エネ効果推定の流れを、次に MALS による省エネ効果推定のキー技術である CFD を用いた船体周りの気泡分布及び摩擦抵抗低減効果予測技術について述べる。本技術は、模型実験や実船実験からのデータをフィードバックさせ、日々予測精度向上に努めている。また、関連技術として気泡流中で作動するプロペラの変動圧力予測技術、及びエンジン冷却水を取り込むためのシーチェスト内の気液分離予測技術について述べる。

2. MALS による省エネ効果推定の流れ

一般船舶の推進馬力の推定には模型船を用いた水槽試験結果が用いられるが、MALS を搭載した船舶の推進馬力を模型船を用いた水槽試験結果より求めることは困難である。その理由は、実船周りを流れるミリオーダーの気泡を模型スケールにした場合、マイクロオーダーの気泡を模型船体周りに流す必要があり、単に模型船から空気を吹き出すだけではマイクロオーダーの気泡を生成することが困難な為である。このため、水槽試験では縮尺比よりも大きな気泡を用いる事になり、摩擦抵抗低減効果やプロペラ周りの気泡分布を過小評価することになる。従って、MALS 搭載船の省エネ効果推定には、水槽試験と CFD を用いた摩擦抵抗低減効果予測手法の組合せによる予測技術が必要かつ重要となる。

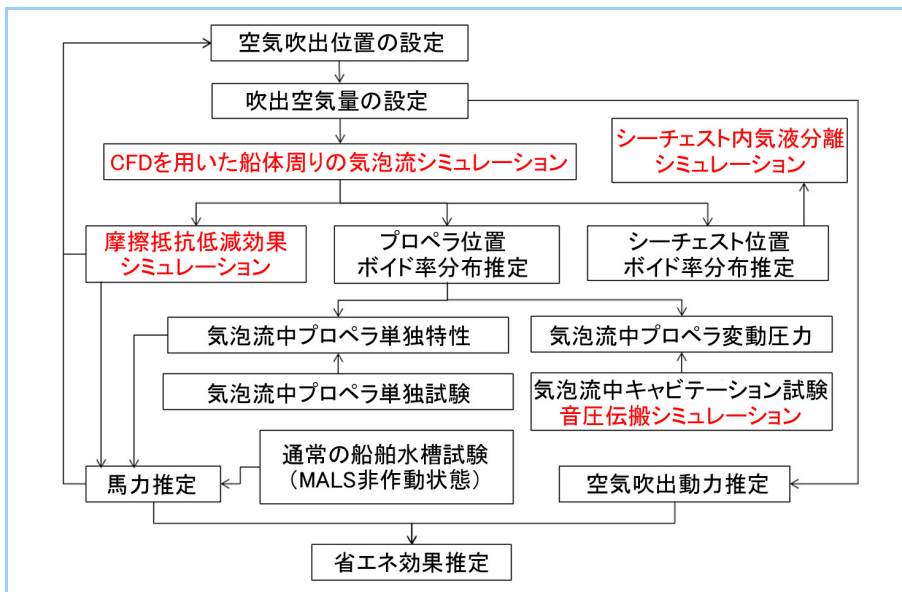


図3 MALS による省エネ効果推定の流れ

MALS による省エネ効果推定の流れを **図3** に示す。はじめに空気吹出位置と空気吹出量を設定後、CFD を用いた船体周りの気泡流シミュレーションにより、船体周り及びプロペラ周りの気泡分布(ボイド率分布)を推定する。次に、船体表面近傍のボイド率分布を入力データとして、当社

独自の摩擦抵抗低減モデルを用いた摩擦抵抗低減シミュレーションを実施する。船体周りの気泡流シミュレーションから得られるプロペラ位置のボイド率分布を参考に、気泡流中におけるプロペラ効率や船体振動予測に必要なプロペラ変動圧力の変化を実験とシミュレーションを併用して推定する。最後に、空気吹出のための動力を推定し、摩擦抵抗低減による省エネ効果から差し引くことにより、正味省エネ効果を推定する。また、船体周りのボイド率分布からシーチェスト内に吸い込まれる気泡量を推定し、シーチェスト内気液分離シミュレーションを参考に、気液分離を問題なく行うためのシーチェスト体格及び内部構造を決定している。

3. CFD を用いた船体周り気泡分布及び摩擦抵抗低減効果予測技術

CFD を用いた船体周りの気泡流シミュレーションに用いた気泡流モデルは、支配方程式に混合相の連続の式、混合相の運動量方程式、気泡のボイド率の保存式及び気泡の並進運動方程式からなる。摩擦抵抗低減効果の推定には、船体周りの境界層内気泡分布を固体壁に垂直な方向に積分することにより得られる相当気膜厚さに基づく当社独自の摩擦抵抗低減モデルを導入している。この摩擦抵抗低減モデルは粗面に対する壁関数を応用したモデルであり、粗面では滑面に対し摩擦抵抗が増加するモデルに対し、空気潤滑法では低減するモデルとしている⁽³⁾。

3.1 計算の流れ

実際の計算では、まず気泡を流さない単相流計算を行い、One-way 計算、Two-way 計算、Three-way 計算と順に行っていく。それぞれの計算概要は以下の通りである。

(1) One-way 計算

水の密度、粘性、通常の渦粘性係数を用いて気泡流の計算を行い、気泡は“パッシブ・スカラー”として解かれる。液相の流れは気相に影響を与えるが、気相の流れは液相に影響を与えないため、この計算を One-way 計算と呼ぶ。この計算では、気泡の分布を求めることが出来る。

(2) Two-way 計算

One-way 計算の結果を読み込み、密度と粘性がボイド率に応じて変化する計算を行う。気相の流れが液相の流れに影響を与えるので、この計算を Two-way 計算と呼ぶ。船体抵抗は密度と粘性が変化する影響で変化する。摩擦抵抗と圧力抵抗はそれぞれ変化するが、気泡による乱流変調の影響は含まれていないので、摩擦低減効果はほとんどない。また、密度変化の影響により、ボイド率分布は少し変化する。

(3) Three-way 計算

Two-way 計算の結果を読み込み、前述の摩擦抵抗低減モデルを有効にして計算を行う。この計算では摩擦抵抗低減とそれによる流れの変化が全て考慮される。

3.2 計算例

計算精度検証のため、実船試験を実施した前述の全長 162m のモジュール運搬船を対象に計算を実施した。船体周りの気泡流シミュレーションにて得られた船体周り及びプロペラ位置のボイド率分布を図4に示す。気泡は船底から船側に漏れ出すことなく船体を流れており、実船試験にて曳航式水中航走体にて観察した気泡流れの様子が再現されていた。プロペラ位置のボイド率は、船底に近い部分のボイド率が高く、船体から離れるに従いボイド率が低くなる傾向が見られる。MALS 作動時及び非作動時の船底でのせん断力分布の計算結果を図5に示す。気泡は船底の広範囲を覆い、その部分のせん断力が低下していることが分かる。船底へ吹き出す空気吹出量を変化させた場合の局所摩擦抵抗低減効果を実船実験と計算結果を比較して図6に示す。空気吹出量が大きくなるほど局所摩擦抵抗低減効果が増加する傾向は計算で評価出来ており、空気投入量大の場合、摩擦抵抗低減効果は 60%にもなることが分かる。計算精度は定量的にも実船試験に概略一致した結果が得られており、本手法は空気潤滑システム搭載船の設計に十分適用可能である。

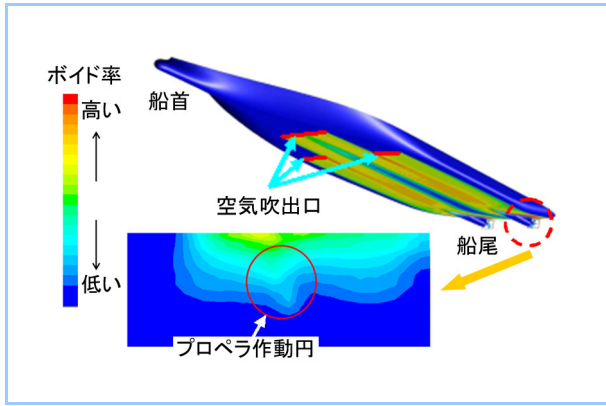


図4 船体表面及びプロペラ位置のボイド率分布
 上図は空気吹出口から船尾に向かって流れる船体表面の気泡分布をボイド率で表示。下図は左舷側プロペラ位置のボイド率分布を拡大表示

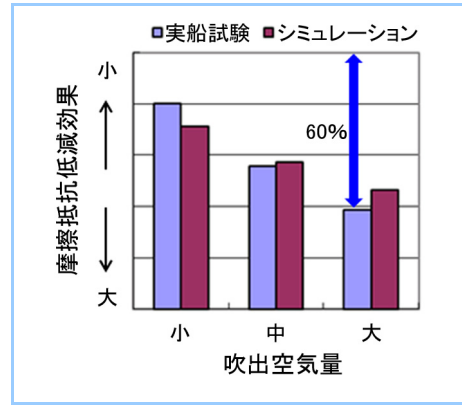


図6 局所摩擦抵抗低減効果の比較
 MALS 非作動時をベースとした摩擦抵抗低減効果。棒の高さが低いほど摩擦抵抗低減効果は大きい。

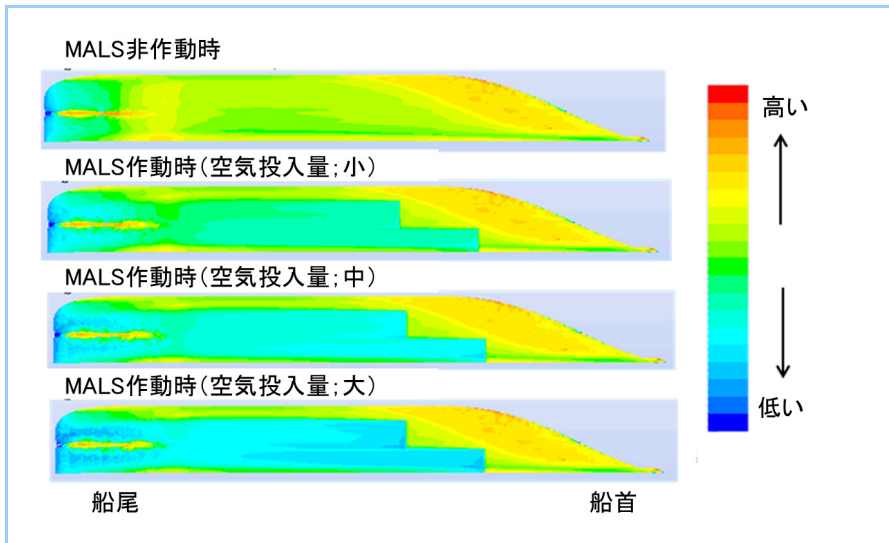


図5 船体表面摩擦抵抗分布の予測値
 左舷側船底を下から見た分布。船底の広範囲の摩擦抵抗が低減している。

4. 音圧伝搬シミュレーションを用いた気泡流中で作動するプロペラ変動圧力増減に関する予測技術

MALS を搭載した場合、船体周りを流れる気泡がプロペラに流入することが予想され、模型プロペラに気泡を流入させる水槽試験からの知見では、プロペラ効率低下やプロペラ変動圧力が増加または減少する事が知られている。プロペラ効率低下は、圧力勾配による気泡の集積による説明がなされている。一方、プロペラ変動圧力の増加または減少のメカニズムについては、プロペラと船底間の気泡層により圧力波の反射、干渉等が影響していることが明らかになりつつある。

MALS の検討では、プロペラ変動圧力の増減を有限要素法を用いた音圧伝搬シミュレーション技術と図7に示す模型プロペラを用いた気泡流中キャビテーション試験により、気泡がプロペラ変動圧力に及ぼす影響を予測している。船体周りの気泡流シミュレーションから求まるプロペラ周りのボイド率分布を参考にプロペラと船底間の気泡層厚さやボイド率分布を設定し、プロペラの先端に変動するキャビテーションを模擬した点圧力源を設けた計算モデルを用いて、プロペラ変動圧力のプロペラ翼周波数に対応した変動圧力の増減を推定する⁽⁴⁾。

プロペラ変動圧力が増加するメカニズムを考察するために、変動圧力の増加する気泡層厚さ及び周波数における気泡層無しの場合(水のみ)と気泡層有りの場合の変動圧力分布を図8に示す。気泡層が存在する場合、気泡層境界での圧力波の反射、気泡層内での圧力減衰効果により船底でのプロペラ変動圧力は低下する。しかし、気泡層内の圧力波の干渉により、気泡層厚

み方向に定在波(腹-節-腹)が発生するため、定在波が発生する周波数では船底でのプロペラ変動圧力が増加することになる。

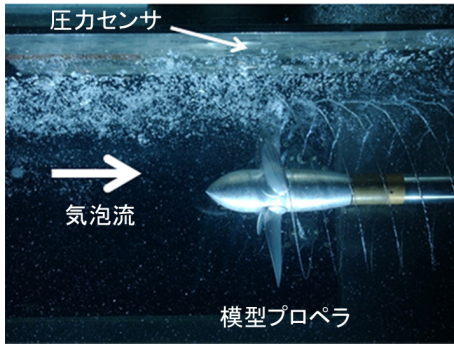


図7 気泡流中キャビテーション試験
 プロペラ直上に計測平板に埋め込んだ複数の圧力センサによりプロペラ変動圧力を計測する。上流に設置した気泡吹き出し装置から気泡を流している。

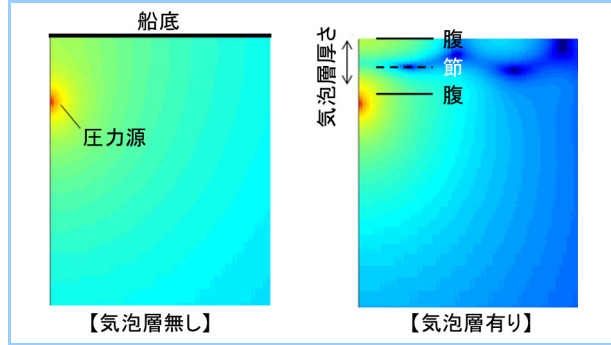


図8 気泡層の有無による変動圧力分布の変化
 変動圧力の高い圧力源(赤色部分)から伝搬する変動圧力分布のコンタ図を示す。

気泡層内の平均ボイド率を一定とし、気泡層厚さを変化させた場合のプロペラ変動圧力の低減効果を調査した。プロペラと船底間の気泡層は、一般に船底近傍ほどボイド率が高くなる傾向であるため、平均ボイド率一定の条件では、気泡層厚さが薄いほど、船底近傍のボイド率が高い気泡層内ボイド率分布としている。計算結果の一例を図9に示す。低周波数において変動圧力の低減効果は見られないが、周波数が高くなると気泡層厚さが薄くなるほど大きな変動圧力の低減効果が見られる。このことから、プロペラ変動圧力を低減させる条件は、船底近傍にボイド率が高く、薄い気泡層を形成することであると考えられる。プロペラ位置におけるボイド率分布をコントロールする技術、例えば、プロペラ上流から新たに気泡を船底近傍に流す、または船底を流れる気泡をプロペラ前方で回収しプロペラ上流船底近傍から再度吹き出すなど気泡流を制御することにより、MALS 搭載船舶のデメリットであるプロペラ変動圧力の増加リスクを、プロペラ変動圧力低減のメリットに変更できる可能性がある。

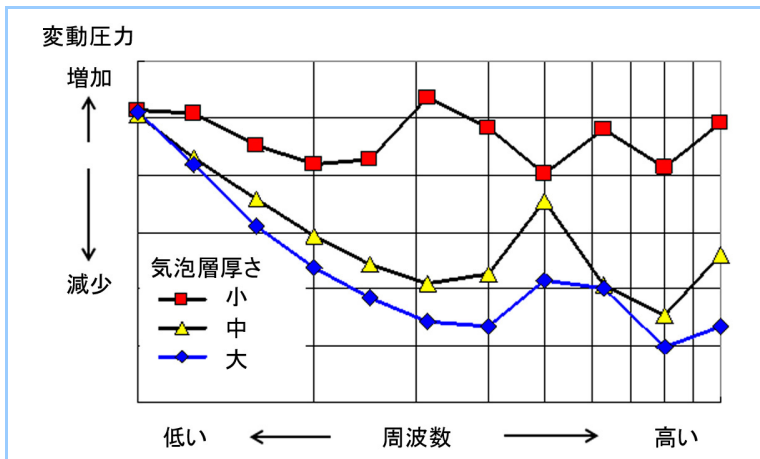


図9 気泡層によるプロペラ変動圧力の変化
 プロペラと船底間の気泡層厚さ及びプロペラ翼周波数を変化させた場合のプロペラ変動圧力の変化を示す。

5. CFD を用いたシーチェスト内気液分離予測技術

シーチェストはエンジン冷却水を取り込むために船尾船底に配置される。MALS 搭載船では船底を流れた気泡がシーチェスト内に吸い込まれ、多量の気泡がポンプに流入するとポンプ性能が低下し、エンジン冷却性能に影響を与える恐れがある。このため、シーチェスト内で確実に気液分離を行うためのシーチェスト体格及び内部構造を決定する必要がある。このため、図10に示すCFD を用いたシーチェスト内気液分離シミュレーションの計算結果等を活用して、シーチェストの

体格及び内部構造を決定する為の設計標準を整備している。

シーチェスト内気液分離シミュレーションの有効性を検証するため、シーチェスト模型を用いた気泡流観察実験を行い、シーチェスト内気液分離予測技術の推定精度の検証を行っている。CFD 計算結果と気泡流観察実験結果の一例を図 11 に示す。シーチェストに流入した流れは仕切り板に沿ってシーチェスト内を上昇し、仕切り板上端部では循環流が発生しており、気泡は循環の経路に位置している液相と気相の境界面である自由表面にて気液が分離される。計算結果は実験結果とフローパターンや流速が概略一致しており、本予測技術はシーチェスト内の気液分離構造の検討に有効である。

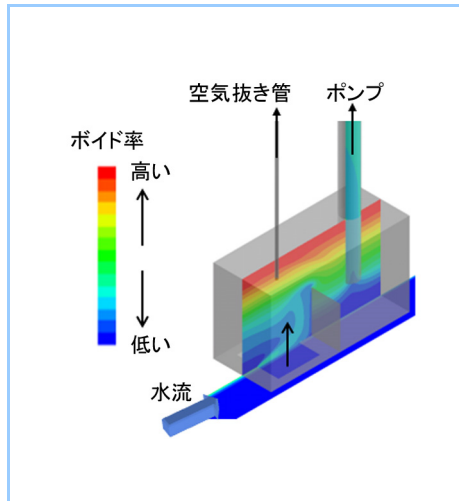


図 10 シーチェスト内気液分離シミュレーション

船底を流れる気泡がシーチェスト内に吸い込まれ、シーチェスト内にて気液に分離される様子をボイド率のコンタ図で示す。

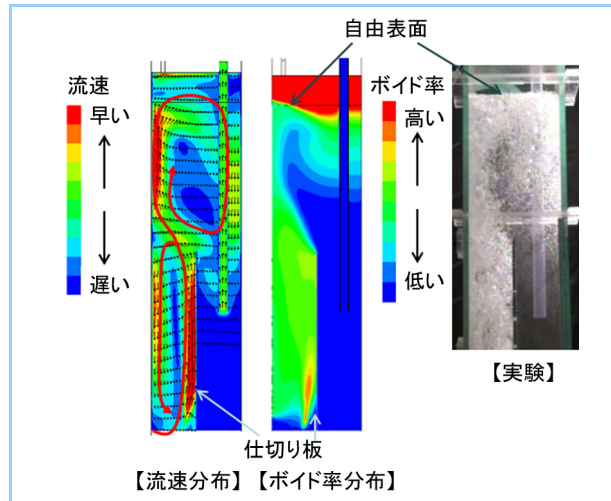


図 11 シーチェスト内の流速・ボイド率分布

シーチェストの部分模型を用いた実験とシミュレーション計算結果により得られるシーチェスト内の流速分布とボイド率分布を示す。流速分布中に示す赤線は循環流の様子を示している。

6. まとめ

船体周りの流れにミリオダの気泡を混入し摩擦抵抗を低減させる空気潤滑法を応用した MALS の開発・設計にはシミュレーション技術の活用が必要不可欠である。CFD を用いた船体周りの気泡分布予測技術及び当社独自の摩擦抵抗低減モデルを導入した摩擦抵抗低減効果予測技術は、MALS による省エネ効果を推定するためのキー技術であり、その予測結果は実船試験に概略一致し、本シミュレーション技術は設計に十分適用可能であることを示した。気泡流中で作動するプロペラの変動圧力予測技術は、将来プロペラ位置におけるボイド率分布をコントロールする技術を開発することにより、現在 MALS 搭載船のデメリットであるプロペラ変動圧力の増加リスクを、プロペラ変動圧力低減のメリットに変える可能性があることを示した。シーチェスト内気液分離技術は、冷却水用ポンプへの気泡混入防止に有効なシーチェストの体格や内部構造の検討に活用可能であることを示した。今後も MALS 搭載船からの実船データをシミュレーション技術にフィードバックさせ、シミュレーション精度の向上に努めると共に、MALS の更なる性能向上及び MALS を搭載する船種の拡大を図っていく。

参考文献

- (1) 溝上宗二ほか, 空気潤滑法の模型試験による検討及び実船試験による効果確認, 三菱重工技報 Vol.47 No.3 (2010) p.70~75
- (2) 溝上宗二ほか, 船舶の省エネ運航を実現する三菱空気潤滑システム -MALS(Mitsubishi Air Lubrication System)-, 三菱重工技報 Vol.50 No.2 (2013) p.59~64
- (3) 川北千春, Estimation of Frictional Drag Reduction Effect for the Ship with Air Lubrication System, 日本船舶海洋工学学会講演会論文集 第 19 号 2014A-JK-2
- (4) 川北千春, 気泡流中で作動する船用プロペラの変動圧力の増減に関する研究, 日本船舶海洋工学学会講演会論文集 第 19 号 2014A-GS7-6