

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 21 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760787

研究課題名（和文）気相・気泡ハイブリッドモデルによる混相流シミュレーション手法の開発

研究課題名（英文）Development of numerical simulation method for two-phase flows based on hybrid model of air phase and bubbles

研究代表者

大橋 訓英 (OHASHI KUNIHIDE)

海上技術安全研究所・流体性能評価系・主任研究員

研究者番号：10462871

研究成果の概要（和文）：気相と気泡のハイブリッドモデルを開発し、気相と気泡が混在する二相流場の推定手法を構築した。まず、開発した手法を気泡が上昇するケースに適用し、既存の計算結果と定性的に一致する結果を得た。次に計算格子サイズより大きな気泡と、ハイブリッドモデルに適した数で格子サイズより小さな気泡を与え、気相・気泡が混在しても、安定した計算ができることを確認した。今後は、検証例を増やすことにより、実用への完成度を高めていく予定である。

研究成果の概要（英文）：A new hybrid model of air phase and bubbles has been developed. Present method is applied to cases of rising bubbles and a rising bubble with an arbitrary number of small bubbles which are smaller than a grid size. Although additional verifications should be carried out, the present method is stable for a mixture condition with large and small bubbles.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：推進・運動性能

1. 研究開始当初の背景

1997年に京都市で開かれた地球温暖化防止会議において締結された京都議定書の条項達成に向けて、我が国では、二酸化炭素を1990年度と同水準に抑制することが一つの大きな目標であった一方、国内産業メーカーは国際競争に生き残るため、効率向上を目的として、設計・生産手法、工場稼働率、物流、その他あらゆる方面で、可能な方策が既に採られており、船舶に関連する産業分野も例外ではなく、造船部門では船舶最適化及び生産効率化、運輸部門では配船、航路最適化等の方策が採られ、更なる二酸化炭素削減のためには新たな技術によるブレークスルーが必要であった。

船舶から排出する二酸化炭素は、船体抵抗を低減することにより、大幅に削減することができる。抵抗低減のためのデバイスとして、船体への付加物、空気もしくは気泡を船底から吹き出す空気潤滑法等が挙げられる。

中でも、空気潤滑法は、船体付加物と比較して突起物等を必要とせず、かつ、船体抵抗の大半を占める摩擦抵抗を大幅に削減できることが示されている。また、空気を船底より吹き出すシステムは環境に悪影響を与えない。海上技術安全研究所では、空気潤滑法の研究を長年に渡り続けており、気泡吹き出し時の流場計測と摩擦抵抗低減メカニズムの解明、大型施設を活かした長さ50mの長尺模型による高レイノルズ数での摩擦抵抗

低減量推定、実船への適用による低減効果の確認等、研究成果は多岐に渡る。

一方で、吹き出した気泡と主流体(水)の干渉、気泡が合体することによる気膜の流れ、気泡・気相による流場の変化と抵抗低減量等、未だ解明されていない点が多く存在し、数値シミュレーションはその解決の一助となりえる。

平水中の抵抗推定手法として、数値流体力学(CFD)を使用することは一般的となった。海上技術安全研究所でも CFD コードを開発しており、最新の計算手法、数値モデルを構築するとともに、一相のナビエ・ストークスの式に基づく計算法を様々な問題に適用し、計測結果との比較による精度検証を行ってきた。

空気潤滑法に適用が可能と考えられる数値計算手法として、混相流モデルの中でも気泡を個々にモデル化し、ラグランジュ法で追跡する手法、気泡を気相としてモデル化しオイラー法で二相流れとして解く手法等が挙げられ、これらの手法はそれぞれに問題を抱えている。ラグランジュ法に基づき気泡をモデル化する場合、扱う気泡の数が莫大となり、また低レイノルズ数型乱流モデルを採用する場合、船体近傍の格子解像度は、一般に気泡より小さくなることから、主流体(水)の支配方程式であるナビエ・ストークスの式に、気泡の影響をソース項として付加した運動量方程式を安定に解くことは不可能に近い。オイラー法で二相として解く手法においても、気泡をモデル化し、ナビエ・ストークスの式に二相間の干渉項として付加するモデルでは、安定性の問題は解決せず、また、相に応じたナビエ・ストークスの式を解くことから、計算負荷が高くなりすぎる。

気泡の運動をモデル化し、気泡の体積率を移流方程式で時間発展させ、体積率を介してナビエ・ストークスの式を解く Volume of Fluid(VOF)法の適用も、気泡の運動方程式においてパラメータが多く存在することから、吹き出し方法に応じた流場の変化や抵抗低減量を精度良く推定することが難しい。

2. 研究の目的

本研究では、空気潤滑法における流体现象把握のためのツールとして、流場を気相・液相の混相流として扱う二相流モデルに、気泡運動モデルを組み合わせた、ハイブリッドモデルを開発する。長尺模型での空気吹き出し時の流場可視化により、船体周りの気泡・気相の流場を観察すると、気泡は吹き出された後に気膜・気塊となり、後方で大きな気泡に分離する。この現象をシミュレートするため、気膜や格子サイズより大きな気泡を捉える、レベルセット法に基づく気液二相流ソルバーを開発するとともに、ラグランジュ法で追

跡する、格子サイズより小さな気泡の位置に基づく気相体積の変化を考慮した、ハイブリッドモデルを構築する。気泡運動は支配的要素のみを記述した運動方程式に基づき、ハイブリッドモデルに適した気泡数のもと、ラグランジュ法で追跡する。気泡運動の影響を気相の体積を介して混相の運動量方程式に付加することで、運動量方程式にソース項は必要とせず、安定した計算が可能となる。

3. 研究の方法

まず、モデル開発のベースとなる気液二相流ソルバーを開発する。海上技術安全研究所では、非圧縮性に基づくソルバーを有しており、本ソルバーは船体周り流れに対し精度・実績を有している。しかしながら、液相のみを対象としているため、気液二相に拡張する。具体的には、本ソルバーは擬似圧縮性に基づき圧力と流場をカップリングしており、同手法に密度、動粘性係数を変数として新たに加える。密度と動粘性係数は、レベルセット関数で定義する。

気泡モデルの運動方程式は支配的要素のみを考慮し、人為的パラメータは可能な限り取り除く。気泡数はハイブリッドモデルに適した数とし、ラグランジュ法にて気泡運動を計算した後、計算格子セル内の気泡位置に基づき、気相体積に考慮する。更新したレベルセット関数により導出した密度と動粘性係数に基づき、混相のナビエ・ストークスの式を解く。以上を繰り返すことで、気泡・気相のハイブリッドモデルに基づき、空気潤滑法により吹き出された空気を含む流場をシミュレートすることができる。

4. 研究成果

現状調査として、市販コードに組み込まれた気泡モデルによる計算を行った。適用した手法は、気泡モデルに基づくオイラー型二流体モデルであり、各相の支配方程式と気泡の運動方程式で構成される。計算対象は長尺模型であり、図1に示す通り、船首付近に空気吹き出し口を備えた状態である。

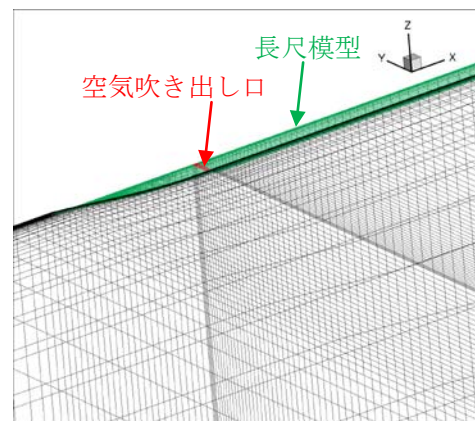


図1 計算格子(空気吹き出し口付近)

なお、吹き出した空気が側面から流出することを防ぐため、側壁と中心線に端板を設置した状態であり、断面では図2に示す速度分布となる。

図3に重力項の有無を比較したボイド率分布を示す。ゼロが水で1.0が空気を表している。重力項がない場合、気泡は流れに従うため、ボイド率分布に粗密が見られ、重力項がある場合、船底に気泡が広がるのが分かる。しかしながら、気泡モデルに基づくオイラー型二流体モデルでは、大きな気泡や気膜が生じる程度に空気吹き出し量を増やしていくと、モデルの適用限界を超えるため、計算が極めて困難になることを確認した。

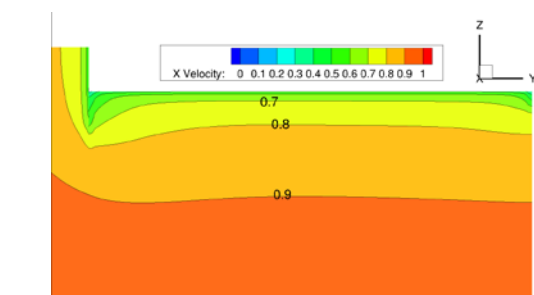


図2 断面速度分布

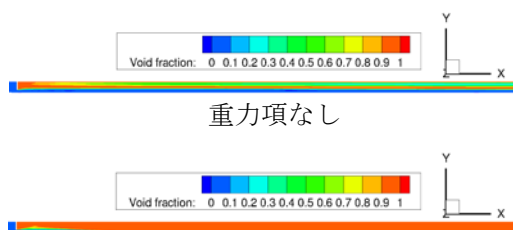


図3 船底のボイド率分布

気相・気泡ハイブリッドモデルによる混相流シミュレーション手法開発のため、まず、ハイブリッドモデル開発のベースとなる気液二相流ソルバーを開発した。海上技術安全研究所で開発中の、船体周り流れに対し精度・実績を有している一相の非圧縮性に基づくソルバーを、体積率に基づく気液混相一流体による気液二相に拡張し、気相の体積率の移流方程式は、界面捕獲に優れたレベルセット法により解き、質量保存則を満たすようレベルセット関数を補正した。密度と動粘性係数はレベルセット関数により導出する。表面張力には Continuum Surface Force モデルにより境界面を挟む有限厚さに分布させる方法を適用した。

図4と図5に二次元チャンネル流れ内の単一気泡に適用した例を示す。液体には水、気体には空気の物理量を与えることにより、気泡が大きく変形するが、密度は与えた有限厚さ(計算格子の1.5セル)に分布することが分か

る。図6に示す通り、体積の誤差は初期体積の $1.0 \times 10^{-3}\%$ 以下となり、計算法の有効性を確認できる。

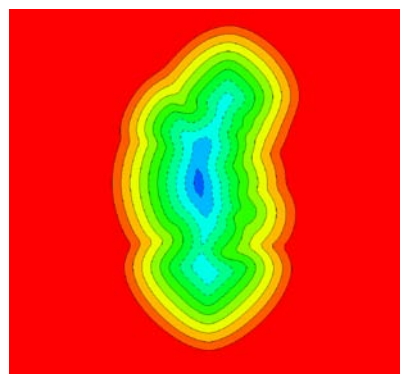


図4 二次元チャンネル流れ内における単一気泡のレベルセット関数

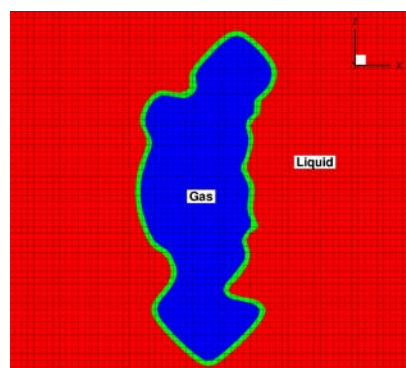


図5 二次元チャンネル流れ内における単一気泡の密度分布

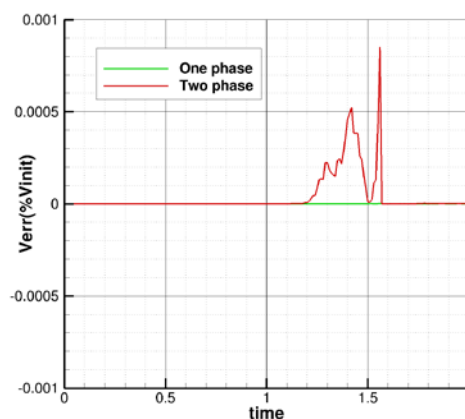


図6 体積誤差の時刻歴

また、既存の計算結果との比較として、三次元の二気泡上昇問題に適用した。密度比20:1、フルード数1.0、ウェーバー数50.0等の条件を与えた計算結果として、図7に気泡形状を示す。既存の計算結果と比較し、気泡形状は定性的に一致することから、計算法の有効性を確認した。

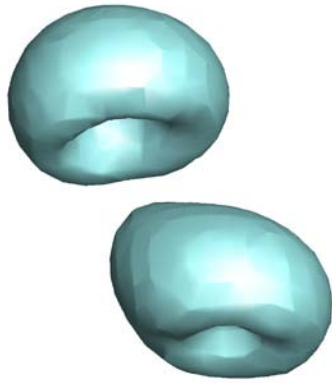


図7 気泡形状

次に、ラグランジュ追跡による気泡モデルを開発した。気泡の運動方程式は船体周りの気泡追跡に実績のある、Johnson & Hsieh が提案した、抗力項、圧力勾配項、重力項からなるシンプルな式である。抗力項における抗力係数は、船体周りの気泡追跡にて検討された値を使用した。

最後に、計算格子で解像でき、レベルセット関数にて表される気泡・気膜と、格子サイズより小さな気泡を混在させたハイブリッドモデルを構築した。格子サイズより小さな気泡の位置が、計算格子で解像できる気泡の中にある場合、格子サイズより小さな気泡は大きな気泡に付加し、レベルセット関数を補正する扱いとした。得られたレベルセット関数に基づき密度と動粘性係数を計算した上で、混相のナビエ・ストークスの式を解いた。図8に気泡上昇問題に適用した結果を示す。

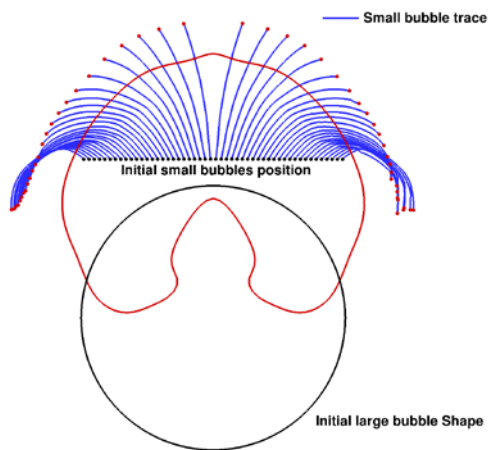


図8 気泡分布

基礎検討のため、格子サイズより小さな気泡を一様に分布させている。計算格子で解像できる気泡の上昇に伴い、小さな気泡が拡散することが分かる。今後、実現に近い気泡分布による検証等により、実用度を高めてい

く予定である。

以上、気相と気泡を含む二相流れのハイブリッドモデルを開発し、気泡を船底から吹き出す空気潤滑法に適した二相の流れ場の推定手法を構築した。開発したモデルと手法を気泡上昇問題に適用し、気相と気泡が混在しても、安定した計算ができることを確認した。今後は、検証例を増やすことにより、実用への完成度を高めていく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 3 件)

①大橋訓英、空気吹き出し法における気泡モデルの適用性について、日本混相流学会年会講演会 2011、2011年8月6日、京都

②大橋訓英、空気吹き出し法に伴う混相流れの数値計算、第26回数値流体力学シンポジウム、2012年12月18日、東京

③大橋訓英、空気吹き出しに伴う二相流れの数値計算、日本混相流学会混相流シンポジウム 2013、2013年8月9日、長野

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

<http://www.nmri.go.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大橋 訓英 (OHASHI KUNIHIDE)
海上技術安全研究所・流体性能評価系・主任研究員
研究者番号：10462871

(2) 研究分担者

()
研究者番号：

(3) 連携研究者

()
研究者番号：