

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	弱圧縮性流体計算による非圧縮性気液二相流の数値シミュレーション
Title(English)	Incompressible Gas-Liquid Two-Phase Flow Simulation based on Weakly Compressible Scheme
著者(和文)	松下真太郎
Author(English)	Shintaro Matsushita
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11415号, 授与年月日:2020年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:青木 尊之,平井 秀一郎,末包 哲也,肖 鋒,長崎 孝夫
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11415号, Conferred date:2020/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	松下 真太郎		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	青木 尊之	
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)		

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は「弱圧縮性流体計算による非圧縮性気液二相流の数値シミュレーション」と題し、以下の 7 章より構成される。

第 1 章「緒言」では、研究背景と研究目的を述べる。気液二相流の高精度な解析には自由界面を高解像度で計算する必要があるが、非圧縮性解析手法ではポアソン方程式を陰解法で解く必要があり、大規模化のボトルネックとなり、ほとんど格子収束性を得られる十分な格子解像度で計算できていない。そこで、弱圧縮性流体計算手法に基づく完全陽解法による気液二相流の解析手法を提案し、激しい流れを含む非圧縮性領域の超大規模計算が可能な手法を開発する。界面に高解像度格子を集める AMR(Adaptive Mesh Refinement)法の適用と、粘弾性流体解析・マランゴニ効果を考慮した計算を導入することで、非定常流中の薄い液膜形成計算が可能であることを示し、粘弾性・マランゴニ効果が液膜安定化に与える影響を考察する。

第 2 章「特性線に基づく弱圧縮性解法による気液二相流解析」では、圧縮性 Navier-Stokes 方程式にフラクショナル・ステップ法と方向分離法を適用した特性線解法に基づく流体計算とフェーズフィールド法による界面捕獲計算を組み合わせた気液二相流解析手法を提案し、非圧縮性気液二相流の典型的なベンチマーク問題を解き、既往研究での実験結果と計算結果のよい一致を示すことで、提案手法の妥当性を検証した。完全陽解法で数値安定性を保つことが難しいとされる濡れた床に向かって崩壊するダムの流れ計算に対し、1.27 億格子を用いた場合でも安定に計算できることを示している。

第 3 章「等温過程の Navier-Stokes 方程式を解く弱圧縮性解法の導入」では、等温過程の状態方程式を仮定した弱圧縮性解法を新たに提案する。2 章の特性線解法では適用が困難であった液相と気相の高い密度差を考慮した差分式を完全陽解法で解くことを可能とする。提案した手法が非圧縮性領域の気液二相流計算へ十分適用可能であることを示し、2 章の特性線解法と比較して液相の速度場発散を評価した際の圧縮性が 1/10 程度緩和されることを示した。

第 4 章「界面に適合する AMR 法」では、AMR 法の導入と GPU 計算の実装に関して述べる。木構造に基づくブロック構造の細分化格子により、界面近傍に局所的に高解像度格子を適合させることで、計算精度を維持しつつ格子点数の大幅な削減を可能にする。保存形マルチモーメント法に AMR 法を適用することで単一のリーフ内で高次精度補間を可能とする手法を提案し、AMR 法の適用によって 1/12.3 の格子点数削減に対して 9.26 倍の計算時間短縮を達成した。均一格子と AMR 法を適用した場合でベンチマーク問題を解いて比較することで、提案した手法が格子点数を削減しながら高精度に気液二相流解析が可能であることを示した。既往の均一格子による非圧縮性ソルバーを用いてメニーコア CPU スパコン上で計算されたジェット流れ問題を本ソルバーで計算し、時間平均で 1/30 にメモリ使用量を削減しながら非常に高速に計算可能であることを示した。2 次元シャボン玉形成シミュレーションでは、高解像度格子を界面に適合させることで初期直径の 7.8 枚程度まで膨張する過程を再現しており、数値計算上でほとんど議論されてこなかった非定常流中の非常に薄い液膜を含む流動解析が可能であることを示している。

第 5 章「FENE-CR モデルの導入による粘弾性流体解析」では、FENE-CR モデルに基づく構成方程式の導入と AMR 法を適用した弱圧縮性解析手法への導入を行なっている。検証問題を解き、既往の非圧縮性ソルバーの結果と良好な一致を得たことで、弱圧縮性解法による液相を粘弾性流体とする気液二相流解析が可能であることを示している。重力の元での液膜を含む流動解析を実施し、計算した系において、粘弾性応力が液膜を崩壊させる重力に対抗しうる要因とはなりにくいことと、弾性バネの復元力パラメータが液膜崩壊をわずかに遅らせる効果を持つことを明らかにしている。

第 6 章「界面活性剤の吸着・脱離を考慮した輸送方程式と濃度差マランゴニ効果の導入」では、溶液中と界面上における界面活性剤の輸送方程式とマランゴニ効果を、AMR 法を適用した弱圧縮性解法に導入する。検証計算として、界面活性剤溶液中を上昇する単一気泡の計算を行い、既往研究の結果や実験結果との良好な一致を示すことで、マランゴニ効果を考慮した完全陽解法による気液二相流解析が可能であることを示している。重力の元で液膜を含む流動解析を行い、吸着特性が十分強く液膜形成時まで界面上の界面活性剤濃度が飽和濃度に近く時、マランゴニ効果が強く働くことによって液膜が崩壊せず長時間安定維持できることを数値計算によって示している。

第 7 章「結言」では、各章において得られた成果を要約し、結論を述べている。弱圧縮性近似に基づいた完全陽解法による大規模計算向けの気液二相流解析手法を提案し、界面に高解像度格子を適合させる AMR 法を適用し、粘弾性流体モデル、界面活性剤輸送を含む計算手法を導入したことにより、幅広い気液二相流に対する詳細な解析を実現可能にしたことを本論文の結論としている。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	松下 真太郎		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	青木 尊之	
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)		

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

It is important to keep mesh resolution enough to simulate the gas-liquid two-phase flows accurately. However, the mesh convergence has not been achieved in most cases of high Reynolds number and violent two-phase flows.

The incompressibility assumption together with semi-implicit time integrators has been widely used. The convergence of iterative process to solve Poisson equation becomes poor as increasing the mesh number and a large-scale simulation of two-phase flows is recognized as a challenging problem. The purpose of this study is developing two methods to achieve higher-resolution two-phase flow simulations, those are a fully-explicit scheme to avoid solving Poisson equation and interface-adapted AMR (Adaptive Mesh Refinement) method.

In chapter1, the background and motivation of this study are described.

In chapter2, the derivation of numerical methods for the weakly compressible scheme based on characteristic theory are described. The accuracy and numerical stabilities for violent flows are validated by solving benchmark problems and dam-breaking onto wet floor problem using 127 million meshes, respectively.

In chapter3, another method solving isothermal Navier-Stokes equations are proposed and the density-weighted discretization is used for the advection term. The accuracy and numerical stability are examined.

In chapter4, the computations of interface-adapted AMR method are described. The 9.26-times speed up under 1/12.3-reduction of mesh points is achieved on CPU-code of solving the conservative Allen-Cahn equation using multi-moment scheme. A jet flow problem with 1/30 reduction of memory compared with uniform grid system and the formation of a soap bubble with 7.8 times expanding from initial radius were demonstrated.

In chapter5, FENE-CR model for viscoelastic fluid is introduced and the numerical method is validated. The effect of viscoelasticity to liquid film under the gravity is considered.

In chapter6, the transport equations of surfactants are introduced to evaluate Marangoni force. The numerical method is validated to compare with experimental results. The formation of stable thin liquid film onto liquid surface rising from underwater under the gravity can be simulated due to high-resolution mesh and Marangoni effect.

In chapter7, the conclusions were summarized.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).