

|             |                                                                 |
|-------------|-----------------------------------------------------------------|
| 氏 名         | 梁 儒 全                                                           |
| 学位(専攻分野)    | 博 士 (工 学)                                                       |
| 学 位 記 番 号   | 博 甲 第 173 号                                                     |
| 学位授与の日付     | 平成 10 年 3 月 25 日                                                |
| 学位授与の要件     | 学位規則第 4 条第 1 項該当                                                |
| 研 究 科・専 攻   | 工学科学研究科 情報・生産科学専攻                                               |
| 学 位 論 文 題 目 | Numerical Analysis on Incompressible Gas-Liquid Two-Phase Flows |
| 審 査 委 員     | (主査)<br>教 授 里 深 信 行<br>教 授 矢 田 順 三    教 授 萩 原 良 道    助教授 徳 永 宏  |

### 論 文 内 容 の 要 旨

本研究では、高効率かつ信頼性の高い非圧縮性気液二相流の計算法の構築や気液二相間の界面の解像度の向上及び気液界面での表面張力の効果の取り込み、単一液滴あるいは気泡を含む気液二相流から複数の液滴あるいは気泡を同時に含む気液二相流に至る広い範囲での気液二相流の安定な計算を可能とすることを目的とする。また、線の方法を基本とし、界面の取り扱いには標位関数法を採用し、表面張力の効果を CSF 法によって組み込み、空間の離散化としては移流項に 3 次精度風上差分の QUICK 法、その他の項に對して 2 次精度中心差分法を適用する。

気液二相流の数値解析をする上で、最も重要となるのが異相物質間に存在する界面の捕獲である。界面を捕らえる手法としては、界面を直接追跡する方法と間接的に表現する方法に大別できる。本研究では、まず従来の自由表面を表す方法を検討する上で、新しい自由表面を追跡する方法として標位関数法を取り上げている。さらに、流体の運動量の保存や界面での力学的境界条件の観点から着手し、理論的考察を通じ、標位関数法を用いることで表面張力の効果を組み込んで計算することが可能となるということを理論的に示している。しかし、標位関数法は標位関数が絶えず界面からの垂直距離関数となることが絶対条件である。よって、これを満足するために標位関数法の再初期化という特別な作業を行う必要がある。

しかしながら、標位関数は界面からの垂直距離関数としての性質を持たせる標位関数の再初期化を行っても、質量の保存を十分に満足しない場合がある。この問題を改善する方法として再初期化を行う際に、各時間ステップごとに界面を挟む点を探し出し、その点においては再初期化する前段階での標位関数の値はそのまま固定し、それ以外の点の標位関数の値は反復計算で定義し直す新たな方法を提案した。そこで検証計算を通じ、再初期化を行っていない場合には標位関数は界面からの垂直距離関数としての性質が失われ、実際の界面を捕獲できなくなる恐れがあることを明らかにすると共に、再初期化を行っている場合に標位関数はどの時間段階においても界面からの垂直距離関数としての性質を保っていることを示し、本計算法の再初期化が十分機能していることが確認できた。さらに、気液二相間の密度比、表面張力及びレイノルズ数は気液界面の変形へ及ぼす影響をも検討している。

気液移動界面問題において表面張力は本質的な問題である。表面張力を精度良く計算するには 3 つの困難を解決しなければならない。1) 界面をシャープに解像する; 2) 質量の保存を誤差の範囲内で満足する; 3) 粗いデータから界面の曲率を推算する。本研究において表面張力を組み込む方法として CSF 法を検討する上で、表面張力による正方液滴の振動問題や合体した液滴表面の振動問題を取り上げ、表面張力の効果を明確に再現していることを示している。

一方、標位関数法において本来ならば厚さのない界面をある程度の厚さを持つ層と定義する。しかしな

がら、異なる界面が衝突する際に、界面同士はなかなか接触できないという問題が存在し、界面の追跡の精度を低下させる。それを解決する対策として衝突が発生する際に、ある判定基準に基づき定義した界面厚さを次第に減少させて本来の実際の界面同士を接触させる新たな界面定義法を提案した。本計算法の検証には単一気泡、液滴及び複数の液滴の衝突問題を取り上げている。その結果、本計算法の信頼性を確認するとともに、計算法が実用上非常に効率の良いことを示している。また、本計算法において用いた界面の厚さは Osher らが用いた界面の厚さの半分（同じ格子幅）で、精度の向上に良い影響を与えていると言える。

さらに最終的には、本数値計算法の適応性を示すため、界面の大変形問題および三次元気泡や液滴流などの問題を取り上げている。界面の大変形問題においては、ダム崩壊問題および静止液面に衝突する液滴問題の計算を試みることで本数値計算法は大変形を伴う界面の変形を捉える上で非常に有効な手法であることを示している。本数値計算法の三次元への拡張の結果、三次元における気液界面の追跡に適用できることを示している。以上の研究の成果、提案する新たな標位関数法は異相物質間に存在する界面の捕獲を重視し、世界に類のない独創的な非圧縮性二相流の数値計算法として、その一般性が確率された。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は論文内容の要旨に述べられているように、現在、工学および自然科学の多くの分野で重要で、かつ緊急を要する研究課題である、気泡や液滴に代表される、相の異なる物質が混ざった気液二相流の解析を計算流体力学的アプローチにより試みたものである。気液二相流の数値計算において、最も問題となるのは気液界面の取扱いであり、従来、界面を直接追跡する方法と間接的に表現する方法の二通りがあり、それぞれ一長一短があったが、申請者は最近提案された標位関数法を採用することにより気液二相流における界面の大変形を伴う複雑な流動現象の解明を可能にしている。

本論文では、気液二相とも非圧縮性を仮定し、ナビエ・ストークス方程式に対する数値計算法として空間微分項のうち移流項の離散化には QUICK 法を、粘性項には中心差分法を適用した線の方法を用い、圧力に対するポアソン方程式の解法には SOR 法を採用している。まず標位関数法の適用において重要となる、標位関数の移流後の再初期化の必要性和界面の人為的拡散による厚さの許容値に関する比較的単純な検定問題による検討を行った後、気泡および液滴の壁面あるいは液面との衝突、複数の液滴の衝突およびダム崩壊問題等の気液界面の大変形、液滴の合体、分離を伴う複雑な二相流の流動現象の計算を行い、相対速度、表面張力、気液密度比等の効果に対して工学上重要となる知見を得ている。さらに、三次元への拡張を行い、液滴間および液滴と液面との相互作用など界面の大変形を伴う複雑な流れ場を計算することに成功しており、標位関数法が複雑な三次元二相流の解析に有効であることを示している。これらの成果は今後様々な工学上重要な問題への応用が期待できる。また、内容の一部は既に国際会議のプロシーディング<sup>(1)</sup>と日本機械学会論文集<sup>(2)</sup>に掲載され、さらに日本機械学会論文集に一編<sup>(3)</sup>の掲載が決定しており、その学術的価値と信頼性が客観的に認められている。

以上により結論として申請者の論文は学位授与に値すると判定した。

- (1) Ruquan LIANG and Nobuyuki SATOFUKA, Numerical Simulation of Incompressible Gas-Liquid Two-Phase Flows Using Level Set Method, Proc. of 7<sup>th</sup> International Symp. on Computational Fluid Dynamics 97 in Beijing, International Academic Publishers, pp.502-507, 1997
- (2) 梁儒全、里深信行、標位関数法を用いた非圧縮性気液二相流における移動気液界面の挙動の数値計算、日本機械学会論文集(B)、64巻、617号、pp.42-49, 1998
- (3) 梁儒全、里深信行、液滴流動の非定常数値シミュレーション、日本機械学会論文集(B)に掲載決定