

氏 名 Caesar Ondolan Harahap

学位（専攻分野） 博士（学術）

学位記番号 総研大甲第 1225 号

学位授与の日付 平成 21 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Development of a New Simulation Method for
Multi-fluid Flows with Moving Interfaces

論文審査委員 主 査 教授 岡村 昇一
准教授 三浦 英昭
准教授 渡邊 清政
教授 柳瀬 眞一郎（岡山大学）
准教授 荒木 圭典（岡山理科大学）

論文内容の要旨

Multi-fluid flows with moving interfaces are very common phenomena. Flows of bubbles, liquid drops, and red blood cells in blood plasma are some examples. An accurate and efficient numerical method is essential to simulate these flows. One major difficulty that such a method must overcome is to include the discontinuities of field variables across the interface. This difficulty is simplified in the popular numerical method for interface problems by smearing the discontinuities. Although such an approach is efficient, it may lead to a low accuracy in general. As a numerical method that has the potential to improve the accuracy of popular methods, recently the Immersed Interface Method (IIM) is gaining wide attention. The IIM is a sharp interface method that accurately captures the discontinuities of field variables without smearing. It makes use of the analytically derived relations between the discontinuities to construct finite difference approximations that are accurate near the interface. However, despite its merits and potentials, currently IIM is still restricted to flows with uniform viscosity and density due to the complexity in the relations between the discontinuities of field variables.

In the present study, with the purpose to simulate multi-fluid flows with moving interfaces, a new computational method based on the IIM is developed. The new method can solve flows with non-uniform viscosity and density. The development consists of two major steps. Henceforth, we describe the main points of the steps. The first step is to derive relations between the jump conditions from the governing equations. Here, the jump condition (JC) of a quantity means the difference of its limit values from each side of a point on the interface. The results of the derivation are systems of equations in jump conditions for velocity, pressure, and their spatial first and second order derivatives. By obtaining the solutions of these equations, it becomes possible to approximate derivatives of velocity and pressure in multi-fluid flows with interfaces using procedures similar to common finite difference methods. In our method, the scaled velocity (product of viscosity and velocity) is used in place of the velocity, and an augmented variable (JC of the scaled velocity) is introduced. It is shown that these simplify the systems of equations in the JCs and the algorithm using them. We emphasize that unlike in the past IIM, due to the inclusion of jumps in viscosity and density, the solutions of the systems of equations in the JCs cannot be obtained explicitly. In the second major step, we show that the systems of equations can be solved by iterative method.

The second step of the development is to construct a numerical technique to solve the newly derived systems of equations, and demonstrate the usefulness of the simulation code incorporating the numerical technique. It is shown that the systems of equations in the JCs can be solved by iterative method. We show that combining interpolation formulae for the

augmented variables with the equations of JCs yields coupled equations that can be solved by iterative computation. Furthermore, as another characteristic not present in the past IIM, it is emphasized that the iteration equations include time derivatives. We also show the numerical method for treating these derivatives.

The usefulness of the numerical method developed is demonstrated by several test problems and numerical simulations. As a test problem, we perform computation of steady rigid revolution vortex induced by a revolving circle. Since the analytical solution of the problem is known, the correctness of our formulations can be verified through this computation. Furthermore, we verify the practicability of our simulation algorithm by performing dynamical simulation of flow induced by a balloon relaxing under the action of surface tension. Simulations until equilibrium are performed. Verification of the area/volume conservation property against variations in the number of grid points, viscosity/density jumps, etc is performed. As another example of application, we also simulate the motion of a rising bubble. The effects of both gravity and surface tension are incorporated. Behaviors expected of the bubble flow, especially in connection with the magnitude of the tension, are observed.

Finally, we give a summary of our study. Points that particularly differ from previous works are highlighted. The applications of the method to multi-fluid flows such as bubble or red blood cell flows are also discussed.

論文の審査結果の要旨

ハラハップ君の研究は、移動する界面を含む流体系の運動を解析するための、新しいシミュレーション手法を見いだしたことである。ここで界面とは、水中の気泡における水と空気との境界、血液中の赤血球の運動の解析においては赤血球の表面の膜、プラズマのMHDモデルではプラズマと真空領域との境界等に示されるように、性質の異なる二種の流体を分離する境界のことである。対象とする物理モデルは単純なものであるが、流体力学の計算手法としては多くの問題点を含んだ課題となっている。計算領域が分離しているという事情から、あるいは界面そのものが、膜の張力効果として圧力平衡に付加的な項として加わることから、流体の運動を記述する方程式系から自然に導かれる保存則が十分でないために、例えば血管壁を界面としてモデル化した血液の流れのシミュレーションにおいて、血液の量の多くが失われてしまうというような結果をもたらすこともある。ハラハップ君は、これまでに開発されたそれぞれ特徴を持つ様々なシミュレーション手法をベースとして、二種類の流体が界面をはさんだ系のダイナミックな動きに対して、高い精度によりシミュレーション解析することが可能な計算モデルを新しく構築した。

界面を含む流体系の解析のために開発されてきたシミュレーション手法としては、位置が固定された界面に対して用いられる Sharp Interface Method (SIM)、張力が一様な界面についての Ghost Fluid Method など、限定された条件に対する手法がある。また一方境界部を滑らかな近似的デルタ関数で表現することによって、界面における流体の性質の不連続な変化を処理する手法も開発され、多くの研究課題に広く適用されてきた。しかしデルタ関数を連続関数で近似していることから、物理量の保存についての信頼性が無い。これらに対して、界面における不連続性を物理量のジャンプ条件（付加的な項）として直接的に方程式系に取り込むことにより、高い計算精度を得ることが可能な手法として Immersed Interface Method (IIM)が開発された。ただしこれまでは界面で接する流体は同じ性質を持つものに限られている。本論文は、このIIM手法を二種の流体が界面で接する一般的な系に対しても適用できるように拡張したものである。今回の研究において流体は電氣的に中性で非圧縮性を持つとの条件を課している。

実際の計算手法について具体的に記述すると、まず二種流体が接する界面を含む三次元 Navier-Stokes方程式系に対して、界面における物理量の不連続変化量をジャンプ条件として計算する。そのために一般的な三次元界面形状を表現する座標系を定義した上で、圧力、速度について二次微分までを含む方程式系を導いた。計算機シミュレーションで解くために、ここでIIM手法による離散化を行いシミュレーションコードとして整備した。系の時間発展を計算するスキームとしては、ジャンプ条件を含む離散方程式系の解を繰り返し計算で求め、求められた二種の流体と界面についての速度分布に基づいて次の時間ステップに進むという計算の仕組みである。本論文では三次元系について計算手法を完全に導出した上で、今回の手法の精度を確認するための計算機シミュレーションは二次元系に対して適

用した。本論文に記述したシミュレーション手法の適合性を確認する目的で、三種類の問題設定についてシミュレーション計算を実行した。それらは、解析的な解が求められている定常円形流れ、張力を持つ変形された膜に閉じ込められた流体の緩和運動、水中の気泡の動きの二次元モデルによるシミュレーションの三つの課題であり、シミュレーション結果が当初の目標通りの高い精度を持つこと、また界面における物理量のシャープな不連続性の表現が確認された。今後の研究発展の方向としては、今回導出された三次元計算手法を三次元シミュレーションコードとして完成させること、血液中の赤血球の運動等の具体的な課題に対して適用すること、さらに流体の圧縮性や磁場などの効果を加えた上で、プラズマ物理学の問題に適用することなどが考えられている。

ハラハップ君の以上記述した研究内容は、流体力学の基本的問題として重要な界面を含む二種流体の系に対して、高い精度の計算結果をもたらすことが可能な新しい計算手法を見いだしたという点で、総合研究大学院大学の学術博士を授与するに十分な価値を持つものと判断した。