

[別紙 2]

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 鄭 魯澤

本論文は、移動する非構造格子を用いた二相流の直接数値解析法に関するものである。解析対象はレイノルズ数 50 から 1200 程度の範囲で溶媒中を上昇する液滴であり、本論文の新規性は特に、高シュミット数での液滴界面からの物質移動を取り扱った点にある。上昇しながら溶解する液滴が対象であれば、液滴からの渦放出が溶解に影響することが考えられ、空間上任意の場所の計算格子を適宜細かくでき渦形成などの流体運動の空間解像度を上げることのできる非構造格子は有効である。また高シュミット数問題に関しては、物質移動を解く際のみ液滴界面に接する薄い格子一層をさらに細分化した格子によって急峻な物質濃度の勾配を解像するという手法（本論文では Very Thin Layer 法と命名されている）を提案し、移動する非構造格子を用いた二相流直接数値解析法に実装している。

第 1 章は序論で、本研究の背景となった地球温暖化対策技術である二酸化炭素の海洋隔離を紹介した後、局所海洋スケールの海水流動数値シミュレーション法に必要な液滴の上昇速度と溶解速度の実験式の精度が不十分であるため深海中での溶存二酸化炭素の希釈の予測精度が期待できない現状を説明し、局所海洋スケールシミュレーションの 1 ランク下の階層モデルとなる本研究の必要性について言及している。さらにこの工学的問題を解析するツールとなる二相流の直接数値計算法の過去の研究をレビューした後、本論文の目的は、従来の数値解析手法では取り扱えなかった高シュミット数の物質移動問題をターゲットにした、非構造格子でフロントトラッキング法を達成する二相流直接数値解析法の開発である旨を述べている。

第 2 章では、二相界面の変形や合体・分離が容易で応用性に富むフロントキャプチャリング法を用いた上昇液滴についての数値計算法について説明し、その利点の反面、二次流れの方向が格子に依存して決定されてしまうという欠点を実際に数値計算によりシミュレートし、また本論文で取り扱うような高シュミット数問題に対しては、計算格子を多数生成しなくてはならないため計算時間や計算機容量に関して高価につく点を指摘し、フロントキャプチャリング法の限界について議論している。

第 3 章は、本研究で開発した数値計算法の支配方程式、境界条件について述べている。流体運動の支配方程式は、二相流体おのおのに関するナビエ・ストークス方程式と連続の式であり、これに物質移動の移流拡散方程式を連立させている。

第 4 章は、本研究で開発した非構造格子での有限体積法を用いた数値計算法について説明している。移流項には 3 次精度のコンパクトスキームを、流体の非圧縮性を達成するため Rhie-Chow 法を、時間刻み幅を大きくするため準陰的な数値積分法を、その時間積分に

は2次精度を確保するため Crank-Nicholson 法を採用している。

第5章は、本研究のポイントとなった高シュミット数問題に対する新しい数値解析手法についての説明である。速度勾配対比、空間的スケールがオーダーが異なるほど小さい物質濃度勾配に対して、流体の運動方程式を解く格子のうち界面に接する一層を、物質移動を解析するためだけに細分化するという Very Thin Layer 法について解説している。

第6章では本研究での界面に関わる数値的な取り扱いについてまとめている。圧力の反復計算に直接関わる界面の曲率の計算精度を向上させる手法、界面の変形に伴って格子を移動させる手法、界面での厳密な境界条件の数値的な取り扱いについて解説している。

第7章では数値解析結果が示されている。まず抗力係数や物質移動速度に関して実験結果やそれを元にした実験式が既にいくつか提案されている固体球について、高シュミット数問題を解析し、それらと比較することでこの手法の妥当性 (validation) を論じている。次に界面が変形する液滴を対象として、挙動形態が異なるいくつかの典型的なレイノルズ数について、液滴上昇の軌跡と液滴後方の非対称渦の発達や渦放出との関係、その際の液滴からの物質溶解の関係を計算結果を用いて説明している。界面張力の大きさを表現するオーネゾルゲ数を変化させたシミュレーションでは、液滴の変形が大きくなるとその面積変化の割合以上に物質溶解を促進することを示した。これは変形により渦放出の形態が変化するためであると説明している。さらに二相流体の粘性比の効果、密度比の効果、界面の汚染の効果についてシミュレーションを行い、物質溶解への感度について調べている。これらは定性的には従来から理解されていた現象であるが、定量的に評価できる計算法を開発した点が評価できる。すなわち本研究で開発した数値計算法を用いれば、深海中での二酸化炭素液滴の挙動や二酸化炭素の溶解を、高価なフィールド実験や压力容器を用いた実験をすることなく、計算機上で再現することが可能となる。

第7章では本論文の結論が述べられている。

以上、本論文は、二酸化炭素の海洋隔離や化学プラント、バイオリクターなどの工学的アプリケーションの中で重要となる、液滴が媒体中を上昇（下降）しながら溶解するという問題について、移動変形する非構造格子を用い、高シュミット数であるため運動量とは空間スケールの異なる物質移動現象に対して数値的な取り扱い法を提案し、新しい数値解析手法を開発した。そしてこの手法を用いたシミュレーション結果から、液滴の上昇形態と渦放出、液滴からの物質溶解の関係を明らかにした。この手法によれば、物性値が知られている液-液系二相の分散相の挙動や溶解は計算機による仮想空間上で定量的に評価できることとなる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。