

平成21年6月1日現在

研究種目：基盤研究(C)	
研究期間：2006～2008	
課題番号：18560169	
研究課題名（和文）	計算格子点の追加・削除が可能な完全保存型移動格子有限体積法と界面の流体力学
研究課題名（英文）	Development of Moving-Grid Finite-Volume Method with Geometrically and Physically Conservative Addition and Elimination of Grid Points and Its Application to Free Surface Flows
研究代表者	
	松野 謙一 (MATSUNO KENICHI)
	京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授
	研究者番号：70252541

研究成果の概要： 気液あるいは液液界面を有する多相流体の運動を、力学的保存量を完全に保持しつつ正確に界面を不連続として取り扱い、且つ、界面の分離・合体を考慮したシミュレーション手法として、格子点の追加・削除を組み込んだ移動格子有限体積法を確立し、移動埋め込み格子法と名付けた。平行して、界面の運動を追跡する方法を検討し、移動埋め込み格子法との連成アルゴリズムを確立した。いくつかの応用例を基に手法の有効性を示すとともに、界面の運動の様子を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	600,000	0	600,000
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	810,000	4,110,000

研究分野：数値流体力学

科研費の分科・細目：機械工学・流体力学

キーワード：(1) 流体力学 (2) 計算物理

(3) シミュレーション工学 (4) 流体

1. 研究開始当初の背景

容器内の液面の変化を伴うようなスロッシングや、水滴が板の上を流れ、時には分裂しあるいは他の水滴と合体するような流れ場は、従来の数値計算法では力学的保存量を完全に保持しつつ正確に界面を不連続として取り扱うことが困難であった。これは、特に、水滴の移動や分裂・合体が起きた場合に空間に張られた格子点が追従できないという数値計算上の根本的な問題であった。特に

水滴が合体するような場合には、2つの水滴の間に張られていた格子点を合体と共に消滅させることができず、合体にかかわる現象を正確に計算することは困難である。

気液あるいは液液界面を含む多相流の数値解析は、最近活発に研究が行なわれている。ALE法に代表される界面追跡法とVOF法やレベルセット法に代表される界面補足法がある。界面の分裂・合体を含むような複雑な界面の扱いは、界面補足法が容易であるが接す

る2流体を連続して取り扱うため精度が悪いことや密度比に限界があることなど多くの問題点がある。一方、境界追跡法は、自由表面を解析する方法として計算精度が非常に高いが、界面形状が複雑に変形する場合には計算格子が破綻しその適用範囲に問題がある。特に、水滴が板の上を流れ、時には分裂しあるいは他の水滴と合体するような流れ場は、従来の数値計算法では力学的保存量を完全に保持しつつ正確に界面を不連続として取り扱うことが困難であった。これは、水滴の移動や分裂・合体に対し空間に張られた格子点が追従できないという数値計算上の根本的な問題であった。特に水滴が合体するような場合には、2つの水滴の間に張られていた格子点を合体と共に消滅させることができず、合体にかかわる現象を正確に計算できなかった。

2. 研究の目的

本研究の目標は2つある。一つは、数値流体力学的な側面からの新しい試みとして、従来の計算法では様々な問題点があり困難であった、気液あるいは液液界面を物理保存則を完全に満たしつつ界面を不連続面として追跡し、必要に応じて計算格子を追加・削除しながら正確にシミュレーションする方法を確立することであり、二つ目は、力学的な側面から、その方法を用いて液滴が分裂・合体するような界面流れについて界面追跡の物理モデルを構築し、その力学の詳細をその数値的に明らかにすることである。

3. 研究の方法

本研究は、格子点の追加削除が自由にできるアルゴリズムを構成し、界面が分裂あるいは合体するような複雑流れになった場合においても物理法則を忠実に取り入れた精度の高い界面の追跡を行ない、高精度の解析を可能とするものである。

ベースとなる計算アルゴリズムは、報告者が考案した移動格子有限体積法である。この手法は、元々は、移動境界問題を正確に計算するために考案されたものである。この計算アルゴリズムは、時間・空間を統一的に考えた (x, y, z, t) の4次元空間において発散形表示された基礎方程式に有限体積法を適用するものである。本方法は、4次元空間における検査体積を用いた離散化であり、4次元空間で自由に検査体積を採ることができることから、理論上、3次元空間に張られた格子点を自由に追加・削除できる可能性を秘めている。本研究では、まず、この移動格子有限体積法の拡張と検証を行い、更に、この移動格子有限体積法に対し、従来の計算スキームでは不可能であった物理保存則を完全に満たした状態で自由自在に格子点を追加・削

除するアルゴリズムを追加し、その定式化を行うとともに、検証を行うことにより、新しい、格子点の追加・削除を可能な方法として確立する。具体的には、計算領域の中で自由に運動できる複数の補助計算領域を埋め込み、この補助計算領域の境界を気液あるいは液液界面に対応させ、格子点を追加・削除しながらグローバルな計算領域内を自由に運動できるような手法を確立する。

平行して、界面を不連続境界として正確に追跡する方法についてモデル化を行い、簡単なモデル流れに適用し検証を行う。最終的には、気液あるいは液液界面が、分裂・合体する流れ場をシミュレーションする手法の基礎を確立する。

次にその手法および界面追跡モデルを用いて容器内のスロッシングの問題に適用し検証を行う。最終的には、スロッシング問題における気液界面運動の流体力学を検証する。最終目標は、気液固界面を有する多相流に対し、界面を不連続面として厳密に且つ正確に数値シミュレーションする方法を確立し、それを用いて、液滴の分裂・合体するメカニズムの詳細を明らかにすることを狙う。

4. 研究成果

計算アルゴリズムの研究は、構造格子・非構造格子の両方について行った。また、対象とする流れは、格子点の追加・削除アルゴリズムは、一般的かつ汎用の手法であるので、非圧縮性流だけでなく圧縮性流れについても行った。

(1)移動格子有限体積法の改良・発展： 本研究課題のベースとなる計算アルゴリズムの移動格子有限体積法に関する改良・発展および検証を行った。まず、二次元問題では、移動境界問題として、せん断流中の円柱の渦励起振動の解析に適用し、一様流中の場合との比較を行い、せん断流中の円柱自励振動の特徴を見出すとともに、移動格子有限体積法の更なる改良を行うことができた。三次元問題では、対象が計算領域内で大移動する場合の3次元格子を効率よく形成するための格子モーフィング法について、血管流を想定した心臓モデルを対象にいくつかの検討を行い、問題点の指摘と効率的な方法を学会に於いて提案した。一方、非構造格子に基づく移動格子有限体積法については、圧縮性流体に対する方法の直接的な非圧縮性流体への拡張として、擬似圧縮性法を用いた非圧縮性解析コードを作成し、検証を行った。更に、3次元への拡張を行った。

なお研究は、三次元計算が主となり、通常の計算機では計算負荷が大きくなりすぎ実用的ではなくなってきたため、新たに小規模なクラスターマシン（4ノード、各ノード1CPU 2コア、4GBメモリ：計8CPUコア、16GB）

を製作し、並列アルゴリズムの実装を行った。併せて並列計算を実施しその効率を評価した。

(2) 格子点の追加・削除アルゴリズムの開発：既に、報告者が開発した移動格子有限体積法は、理論的に格子点の追加・削除が可能であることを具体的に定式化し実際に二次元非構造格子に対して実装しそれを示してきた。本研究課題に於いて、その格子点の追加・削除アルゴリズムを発展、展開し、計算領域の中で必要に応じ計算格子の削除・追加を行いながら2種以上の流体が界面を持ちながら自由に運動する場合をシミュレーションするために以下のような改良発展を行った。まず、水滴が移動するような場合を考えると、一つの流体領域中を他の流体が混ざることなく移動することになる。したがって、本研究では、ベースとなる計算格子（主格子と呼ぶ）の中に別の格子を埋め込み（埋め込み格子と呼ぶ）、その埋め込み格子が自由に主格子中を変形しつつ移動できるようなアルゴリズムを構成することとした。このため、まず、より簡単な場合として、物体を含む補助格子が、自由に主格子中を運動できるようなケースを想定したアルゴリズムを開発した。すなわち、物体境界が大移動した場合の、あるいは、複数物体が相互運動することによって誘起される流れ場の解析に適した方法として、物体を囲む格子群を静止主格子の中に埋め込み、それが、格子の追加・削除アルゴリズムを組み込むことにより、主格子中を自由に動き回ることが可能でかつ物理量が完全に保存されるという特徴を持つ「移動埋め込み格子法」と名付けた新しいアイデアを提案し、2次元問題についてその有効性の検証を行った。また、流体中を移動する物体を別の物体が追い抜くときに誘起される干渉流れ場を解析し双方の物体が受ける抵抗と横向き力の時間変化を明らかにした。これにより二つの液滴が相対的に近づいたり遠ざかったりする場合の効果的な計算アルゴリズムを確立することができたと考えている。次に、構造格子を対象に考案した二次元空間に対する「移動埋め込み格子法」を、三次元への拡張を行った。特に、三次元空間での埋め込み格子を、形状の汎用性を持たせるため、マルチブロック構造として拡張を行った。結果として、格子点の追加・削除はマルチブロック構造をもつ格子系に対し確立できた。これにより、主格子を流体Aとし、埋め込み格子を流体Bとし、流体Bは、複数個存在する場合の気液あるいは液液界面を有する場合の液滴の運動を追跡する計算アルゴリズムは確立することができた。液滴の分離・合体は、マルチブロックの分離・合体として取り扱うことにより可能で、全体的な理論的整備を行った。

非構造格子計算法については、非圧縮性流体への展開を二次元に続けて三次元への展開を実施したものの、非構造格子に関する格子点の追加・削除は、いびつな格子が生成されてしまうという問題点が生じ、今後の問題点として残った。ただし、上述の構造格子で成功した手法に倣い非構造格子を層となるようにして追加削除を実行することでその可能性は示された。

(3) 界面移動モデルの構築と応用：格子系は、界面の位置に、常時、格子点を置く界面適合格子系とし、界面とともに格子点が移動するものとする。まず、界面追跡モデルとして2種類のモデルについて定式化を行い検証した。一つは、もっとも単純な近似モデルとして界面の位置に於いた格子点座標 \mathbf{r} とし、界面における流体速度を \mathbf{v} とするとき微分方程式 $d\mathbf{r}/dt = \mathbf{v}$ を用いて界面を追跡するものである（以下、追跡法Iと呼ぶ）。2番目のモデルは界面を表す関数を $f(x, y, z, t) = 0$ とするとき、微分方程式 $df/dt + udf/dx + vdf/dy + wdf/dz = 0$ を解くことによって界面を追跡する方法である（以下、追跡法IIと呼ぶ）。

検証問題として二次元ノズル出口からの層流流出過程（フィルムコーティング）および容器内のスロッシング現象を計算した。特に、移動格子有限法と自由表面問題へのインプリメントについて検討を行うとともに、いくつかのスロッシング問題を例にアルゴリズムの検証を進めた。

分離・合体を考慮したとき、追跡法Iは、格子点の追加・削除を伴う移動格子有限体積法にインプリメントが容易なことが判明した。追跡法IIは、分離・合体時における多重連結に関し、いくつかの問題点が明らかとなり更に検討が必要なことがわかった。一方、自由表面問題について重要な、体積保存に関して検討した結果、追跡法Iは、誤差が生じ、ケースによっては実用的ではないことが判明した。基本的な計算は、たとえば2流体の場合、上述の移動埋め込み格子が液滴そのものとし、主格子を空気として計算を進めている。なお、界面運動の力学では、モデルとして、表面張力の効果、濡れ角の効果等について検討を行ったが、分離・合体におけるそれらの効果については課題として残った。

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 9 件）

- ① 浅尾慎一、松野謙一、大移動する複数物体によって誘起される非圧縮性流れに対する三次元移動埋め込み格子法、日本機械学会論文集（B編）、75 巻、2009、査

- 証有 (掲載決定)
- ② S. Asao and K. Matsuno, Parallel Computation of Incompressible Flows Driven by Moving Multiple Obstacles using a New Embedded-Grid Method, Parallel Computational Fluid Dynamics, Lecture Notes in Computational Science and Engineering 67, Springer, pp.147-154, 2009, 査証有
 - ③ M.Yamakawa and K.Matsuno, Numerical Simulation of Compressible Flow using Three-Dimensional Unstructured Added/Elliminated Grid Method, Parallel Computational Fluid dynamics, Lecture Notes in Computational Science and Engineering 67, Springer, pp. 245-252, 2009, 査証有
 - ④ 山川勝史、浅川弘也、松野謙一、振動する翼周りの流れに対するハイブリッド型非構造移動格子有限体積法、日本機械学会論文集(B編)、75巻、pp. 213-218, 2009、査証有
 - ⑤ 浅尾慎一、松野謙一、非圧縮性流体の大移動境界問題に対する移動埋め込み格子法、日本機械学会論文集(B編)、74巻、pp. 25-33、2008、査証有
 - ⑥ 吉岡一志、西田秀利、松野謙一、オイラー方程式における圧力補正法を用いた全音速統一解法に関する研究、Transaction of JSCES (計算工学会)、Paper No. 20070026, pp.1-6, 2007, 査証有
 - ⑦ 山川勝史、松野謙一、重畳格子の概念を用いた非構造移動はめ込み型格子法、日本機械学会論文集(B編)、73巻、pp. 2070-2076, 2007, 査証有
 - ⑧ M.Yamakawa and K.Matsuno, A Fluid-Structure Interaction Problem on Unstructured Moving-Grid Using OpenMP Paralleization, Parallel Computational Fluid Dynamics-Parallel Computing and Its Applications, (Elsevier), pp. 269-276, 2007, 査証有
 - ⑨ M. Yamakawa and K. Matsuno, Applications of Unstructured Moving-Grid Finite-Volume Method for Compressible flows, Computational Fluid Dynamics Journal, Vo.15, No.38, pp. 281-287, 2006, 査証有
- [学会発表] (計27件)
- ① 山川勝史、圧縮性流れに対するハイブリッド型非構造移動格子有限体積法、日本機械学会 関西支部第84期定時総会講演会、2009年3月16日、近畿大学大阪
 - ② 中島優樹、擬似圧縮性法を用いた三次元非構造移動格子有限体積法、日本機械学会第21回計算力学講演会、2008年11月3日、琉球大学、沖縄
 - ③ 渡邊広司、旋回する高速移動車両周り流れの数値シミュレーション、日本機械学会第21回計算力学講演会、2008年11月3日、琉球大学、沖縄
 - ④ 岩間紀貴、コラプシブルチューブ内流れの流体・構造連成シミュレーション、日本機械学会第21回計算力学講演会、2008年11月3日、琉球大学、沖縄
 - ⑤ 浅尾慎一、3次元移動埋め込み格子法を用いた移動する複数物体によって誘起される流れの数値シミュレーション、日本機械学会第21回計算力学講演会、2008年11月3日、琉球大学、沖縄
 - ⑥ 石原定典、移動表面を有する流れに対する界面追跡型移動格子有限体積法、日本機械学会第21回計算力学講演会、2008年11月3日、琉球大学、沖縄
 - ⑦ 仲智博紀、せん断中に縦に置かれた円柱周りの三次元剥離流れ解析、日本機械学会第21回計算力学講演会、2008年11月2日、琉球大学、沖縄
 - ⑧ S.Asao, Progressive Development of Moving-Grid Finite-Volume Method for Three-Dimensional Incompressible Flows, International Conference on Parallel CFD 2008, 2008年5月21日、Lyon, France
 - ⑨ H. Asakawa, Applications on Hybrid Unstructured Moving Grid Method for Three-Dimensional Compressible Flows, International Conference on Parallel CFD 2008, 2008年5月20日、Lyon, France
 - ⑩ 浅尾慎一、移動埋め込み格子法を用いた複数物体の運動によって誘起される流れ場の数値シミュレーション、第21回数値流体力学シンポジウム、2007年12月20日、東京
 - ⑪ 浅川弘也、三次元圧縮性年性流に対する非構造移動格子有限体積法、第21回数値流体力学シンポジウム、2007年12月20日、東京
 - ⑫ 山本竜平、スライド接合格子による多段翼列の数値シミュレーション、第21回数値流体力学シンポジウム、2007年12月20日、東京

- ⑬ 岩崎良之、心臓血管モデルにおける拍動流の数値シミュレーション、第21回数値流体力学シンポジウム、2007年12月20日、東京
- ⑭ 廣瀬充彦、せん断流中に置かれた円柱の渦励起振動の数値シミュレーション、第21回数値流体力学シンポジウム、2007年12月20日、東京
- ⑮ K. Matsuno, Adaptive Grid Generation Based on Detection of Flow Discontinuities, APCOM'07 International Conference, 2007年12月5日、京都国際会議場
- ⑯ S. Asao, Simulation of Incompressible Flows Driven by Moving Multiple Obstacles Using a Moving Embedded-Grid Method, APCOM'07 International Conference, 2007年12月5日、京都国際会議場
- ⑰ M. Yamakawa, Application of Unstructured Grid Method to Three-Dimensional Moving Boundary Problem, APCOM'07 International Conference, 2007年12月5日、京都国際会議場
- ⑱ H. Yoshioka, Numerical Simulation of Quasi-incompressible Turbulence Using Higher Order Mach-uniform Method, APCOM'07 International Conference, 2007年12月5日、京都国際会議場
- ⑲ M. Yamakawa, Unstructured Finite-Volume Method for Three-Dimensional Moving-Boundary Problem, Inter-national Conference on Recent Development of Numerical Schemes for Flow Problems, 2007年6月27日、九州大学西新プラザ
- ⑳ S. Asao, Parallel Computation of Incompressible Flows Driven by Moving Multiple Obstacles Using a New Moving Embedded-Grid Method, Parallel CFD 2007 Conference, 2007年5月21日、Antalya, Turkey
- 21 M. Yamakawa, Numerical Simulation of Compressible Flow using Three-dimensional Unstructured Added Eliminated Grid Method, Parallel CFD 2007 Conference, 2007年5月21日、Antalya, Turkey
- 22 H. Yoshioka, Parallel Computation of Pressure Based Euler Equations on Personal Cluster System, Parallel CFD 2007 Conference, 2007年5月21日、Antalya, Turkey
- 23 浅尾慎一、大移動する境界を持つ非圧縮性流れに対する移動埋め込み格子法、第20回数値流体力学シンポジウム、2006年12月19日、名古屋
- 24 岩崎良之、大変形移動境界問題における格子モーフィングについて、第20回数値流体力学シンポジウム、2006年12月19日、名古屋
- 25 浅尾慎一、非圧縮性流に対する格子の追加・削除を伴う移動格子法、第38回流体力学講演会、2006年9月29日、室蘭
- 26 山川勝史、三次元非構造移動格子有限体積法とその応用、第38回流体力学講演会、2006年9月29日、室蘭
- 27 M. Yamakawa, Three-Dimensional Unstructured Moving-Grid Finite-Volume Method for Unsteady Compressible Flow, The 17th International Symposium on transport Phenomena, 2006年9月5日、富山

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松野 謙一 (MATSUNO KENICHI)
 京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授
 研究者番号：70252541

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者