

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06155

研究課題名(和文) 界面適合格子(直交格子積み上げ法)を用いた移動境界流れに対する3相系LBMの開発

研究課題名(英文) Development of the three-phase LBM for moving boundary flows by the interface-adaptive lattice method (Building Cube Method)

研究代表者

稲室 隆二 (Inamuro, Takaji)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：20263113

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：新規に開発した2相系格子ボルツマン法(2相系LBM)と埋め込み境界-格子ボルツマン法(IB-LBM)とを組み合わせた3相系LBMを界面適合格子法の一つである直交格子積み上げ法(Building Cube Method, BCM)のフレームワーク上に実装し、並列計算効率の良い数値計算法を開発した。本手法は複雑な気液界面の変形や複雑形状の物体の運動を界面適合格子を用いて計算することができ、また、従来法のように圧力に対するポアソン方程式を解く必要がなく完全陽解法であるため、大規模並列計算機に適した数値計算法である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、直交格子積み上げ法(BCM)のフレームワーク上に3相系LBMを実装するものがある。本計算スキームは、界面適合格子上で完全陽的に計算を行う究極の局所的な計算スキームであり、並列計算機に最適な移動境界流れの新しい計算スキームである。研究代表者はこれまでに2相系LBMおよびIB-LBMの研究で世界を牽引してきており、本研究成果はさらに国内外の研究者に大きなインパクトを与えるものである。

研究成果の概要(英文)：By combining the two-phase system Boltzmann method (two-phase system LBM) and the immersed boundary-lattice Boltzmann method (IB-LBM), we newly developed the three-phase LBM with good parallel computational efficiency and implemented it on the framework of an orthogonal lattice stacking method (Building Cube Method, BCM), which is one of the interface-adaptive lattice methods. This method can compute the complex deformation of the gas-liquid interface and the motion of a complex shaped object using the interface-adaptive grid, and it is a complete explicit method without the need to solve the Poisson's equation for pressure as in the conventional method. Therefore, it is a numerical computational method suitable for large-scale parallel computers.

研究分野：流体力学

キーワード：数値流体力学 格子ボルツマン法 埋め込み境界法 直交格子積み上げ法 移動境界流れ

### 1. 研究開始当初の背景

気体、液体、固体の3相が同時に自由に運動する移動境界問題は、流体力学の課題をすべて含んだ究極の問題である。したがって、本問題は、純粋に学問的な興味があるだけでなく、実用面からは、液滴が固体表面や液体自由表面に衝突する際に発生する界面現象（インクジェットやミルククラウン）や固体が液体自由表面に衝突する際に発生するスプラッシュ現象、碎波による堤防や船体に及ぼす衝撃力、容器内の液体自由表面のスロッシング現象による気泡の巻き込み、雨滴が地面に衝突するときの衝撃力、キャビテーション発生による気泡の回転翼表面への衝突などの様々な現象に関連して工学的に非常に重要な研究課題である。

気体 - 液体あるいは固体 - 気体 (or 液体) の2相の移動境界流れの数値計算法としては、古くは界面適合格子を用いるのが一般的であったが、複雑な界面変形を扱うのが困難であること、プログラミングが煩雑であることなどから、近年では直交格子上でVOF法や埋め込み境界法 (Immersed Boundary Method, IBM) を用いて気体 - 液体あるいは固体 - 気体 (or 液体) の2相の移動境界流れを計算するのが主流になっている。しかし、非圧縮粘性流体の Navier - Stokes 方程式の計算法には従来法 (MAC法, Projection法など) を用いているため、複雑な問題になると圧力に対するポアソン方程式の解法に多大な計算時間を要する。また、ポアソン方程式の解法は一般に並列計算効率が悪いことが知られている。

一方、先行研究で新規に開発した2相系格子ボルツマン法 (2相系LBM) と埋め込み境界 - 格子ボルツマン法 (IB-LBM) とを組み合わせた3相系LBMを開発してきた。本手法は、圧力のポアソン方程式の計算を必要としないため、究極の局所的な計算スキームであるため、並列計算機に非常に適した計算方法である。しかし、本手法は基本的には全領域で同じ大きさの立方体格子を用いるので、界面から離れた領域では必要以上の計算負荷がかかるため、さらなる計算効率の向上を計る必要がある。そこで、本研究では、先行研究で開発した3相系LBMを界面適合格子法の一つである直交格子積み上げ法 (Building Cube Method, BCM) のフレームワーク上に実装し、並列化効率および計算効率の良い数値計算法を開発することを目的とする。

### 2. 研究の目的

本研究では、先行研究で開発した3相系LBMの並列計算効率をさらに向上させる数値計算法を開発する。具体的には、下記の項目を実施する。

- (1) 3相系LBMを界面適合格子法の一つである直交格子積み上げ法 (BCM) のフレームワーク上に実装し、並列化効率および計算効率の優れた数値計算法を開発する。
- (2) 開発した手法を用いて、例題として、気液界面に物体が衝突する場合に、物体の働く衝撃力、液体表面の跳ね上がりや微小液滴の分裂、球が沈むときの気体の巻き込みなどを調べ、既存の実験結果と比較し、手法の実用性を検討する。さらに、計算科学の夢と呼ばれるミルククラウン現象にも適用し手法の計算効率や計算精度を調べる。

### 3. 研究の方法

先行研究で開発した3相系LBMを界面適合格子法の一つである直交格子積み上げ法 (Building Cube Method, BCM) のフレームワーク上に実装し、並列化効率および計算効率の良い数値計算法を開発する目的として、以下の課題を検討する。

[平成29年度]

- (1) 3相系LBMをBCMのフレームワーク上に実装

先行研究で開発した3相系LBMは、基本的には全領域で同じ立方体格子を用いるため、界面から離れた領域では必要以上の計算負荷がかかるため、さらなる計算効率の向上を計る必要がある。そこで、本研究では、先行研究で開発した3相系LBMを界面適合格子法の一つである直交格子積み上げ法 (BCM) のフレームワーク上に実装し、並列化効率および計算効率の良い数値計算法を開発する。

BCMとは、計算領域を多数のCubeと呼ばれる計算単位に分割し、そのCubeをCellと呼ばれる同じ格子数の立方体格子に分割して、計算を進める解適合格子作成法の一つである。様々な大きさのCubeを用いることにより、界面や物体近傍は細かい格子で、遠方では粗い格子で計算することができる。また、1つのCube内での格子数が等しいので、計算負荷はすべてのCubeで等しくなるため、並列計算に適している。一方、3相系LBMも立方体格子上で計算を実行するスキームである。したがって、BCMは3相系LBMと相性が良い解適合格子法と考えられる。初年度では、3相系LBMを界面適合格子法の一つであるBCMのフレームワーク上に実装する。

[平成30年度]

- (2) 動的BCMの基本手法を構築

前年度に開発するBCMのフレームワークは、Cubeの構成が時間的に変化しないことを前提にしている。しかし、例えば、ミルククラウンの計算 (等間隔格子を使用) では、界面形状が時々刻々変化する。この問題を等間隔格子で計算すると、液相から遠い領域の計算が非効率であることは明らかである。この問題に解適合格子を適用するには、Cubeの大きさや構成を時々刻々変える必要がある。本研究では、隣りのCubeの大きさは、同じか2倍か1/2倍かの3通りしかないと利用して、動的にCubeの大きさや構成を変化させる動的BCMのフレームワークを構築する。その後、この動的BCMのフレームワーク上に3相系LBMを実装する。

- (3) 基本問題への適用

(2)で開発した手法を用いて、気液界面に物体が衝突する場合に、物体の働く衝撃力、液体表面の跳ね上がりや微小液滴の分裂、球が沈むときの気体の巻き込みなどを調べる。また、ミルククラウンの計算結果を既存の実験結果と比較し、手法の計算効率や計算精度を調べる。  
[令和元年度]

(4) 開発手法の実用性の検討

先行研究で開発した3相系LBMと比較して、本研究で開発した動的BCM上の3相系LBMの計並列計算機における計算効率および計算精度を調べる。特に、動的BCMではCube分割も動的に変える必要があるが、Cube分割の仕方と並列計算効率の関係を明らかにし、汎用的な界面適合格子を用いた3相系LBM法を提案する。

(5) 今後の検討課題の抽出

3年間で行った研究により、今後の研究課題を抽出し、次段階の研究へ発展させる。例えば、「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題募集に「大規模並列計算機を用いた次世代流体シミュレーション法の開発およびその応用研究」として応募する。

4. 研究成果

(1) 3相系LBMをBCMのフレームワーク上に実装

まず、先行研究で開発した3相系LBMを界面適合格子法の一つである直交格子積み上げ法(BCM)のフレームワーク上に実装した。細分化で新しく生成されたCubeは、順に番号を割り振っていき、粗大化で消滅したCube番号は空き番号とした。また、解像度が低いCubeから高いCubeへと細分化される場合の補完は、周囲の点からの平均を取ることで行った。具体的に2次元の例を示すと、下図の点Aにおける物理量はAを挟む2点から、点Bにおける物理量はBを囲む4点からそれぞれ行う。逆に解像度が高いCubeから低いCubeへと粗大化される場合は補完の必要はない。

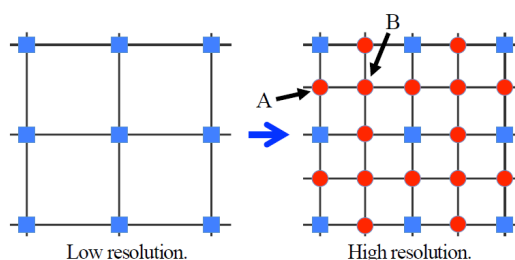


図1. 異なるCube内のCellでの補間

(2) 動的BCMの基本手法を構築

移動境界流れの問題に解適合格子を適用するには、Cubeの大きさや構成を時々刻々変える必要がある。本研究では、隣りのCubeの大きさは、同じか2倍か1/2倍かの3通りしかないと利用して、動的にCubeの大きさや構成を変化させる動的BCMのフレームワークを構築した。その後、この動的BCMのフレームワーク上に3相系LBMを実装した。

(3) 基本問題への適用

本手法の計算精度検証および計算効率化検討として、液滴衝突の数値計算を行った(図2)。計算領域を全て細かい(Uniform)格子で計算した結果と動的BCM格子で計算した結果を比較した。まず、Uniform格子と動的BCM格子の結果で、良好な一致が見られた。動的BCMにおける構成Cubeの変化の様子を図2に示す。図2から、細分化と粗大化がうまく行われていることが確認できる。最後に、両者の計算時間の比較した。計算時間はUniform格子、動的BCM格子ともに並列計算せずに同じ計算機により20000ステップまで計算したときの時間である。計算時間を比較すると、動的BCM格子を適用しても計算時間は多少速くなるもののほとんど変わらないことがわかった。この原因としては、今回の計算では、BCM格子におけるbuffer領域を含む全ノード数がBCM格子での計算時間の支配的な要素になっていること、Cubeの細分化・粗大化の判断に計算時間を要することが考えられる。

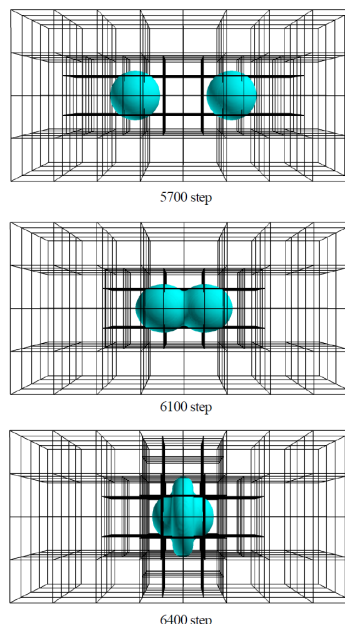


図2. 動的BCMを用いた液滴衝突の計算結果

#### (4)開発手法の実用性の検討

新しい方法を用いたミルククラウンの計算結果を図3に示す。液滴直径  $D$  を  $240 \times$ 、液膜を  $30 \times$  とし、密度比=800, レイノルズ数  $Re=2000$ , ウェーバー数  $We=426$  とした計算結果である。完全3次元計算である。液滴が液膜に衝突後に形成されるクラウンのシート状膜が広がる様子や最後にシート状膜が小さな液滴に分裂する様子が実験結果と良く対応している。また、クラウンのシート状膜の半径の時間変化が簡易な理論予測値と良く一致していることがわかった。ミルククラウンの計算は、計算科学の長年の夢と言われている難しい問題である。2相系LBMにより、その夢が叶えられることが期待される。

次に、回転分裂とよばれる液滴衝突現象に適用した結果を示す。液滴形状の時間変化の計算結果と実験結果の比較を図4に示す。密度比=600, オーネゾルゲ数  $Oh=0.0126$ , ウェーバー数  $We=35.4$  とした計算結果である。図からわかるように、液滴形状は回転運動、扁平運動(パンケーキ形状)および伸長運動(チューブ形状やダンベル形状)が組み合わさって複雑な変化をする。これらの運動は合一した液滴内の外側の回転流れと内側の反射流れの組み合わせで生じる。回転運動は継続的に保たれるが、扁平運動( $t = 0.98T$ )は徐々に伸長運動( $t = 1.98T$ )に移行し、最終的にはダンベル形状( $t = 2.78T$ )に変形して分離する。計算結果の液滴形状の時間変化は実験結果に良く一致している。なお、回転分裂は、非常に複雑な現象なので、2018年に初めて実験で確認された新しい現象である。本数値計算により、世界で初めて回転現象が数値計算でも再現できた。

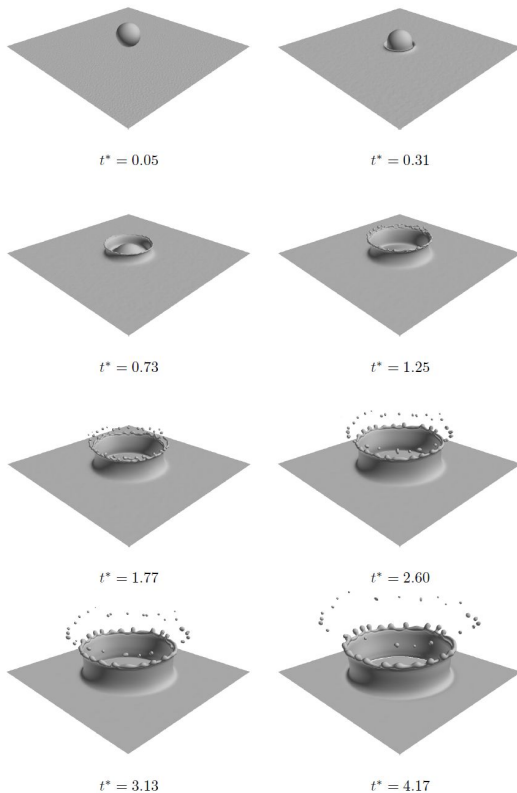


図3. ミルククラウンの計算結果

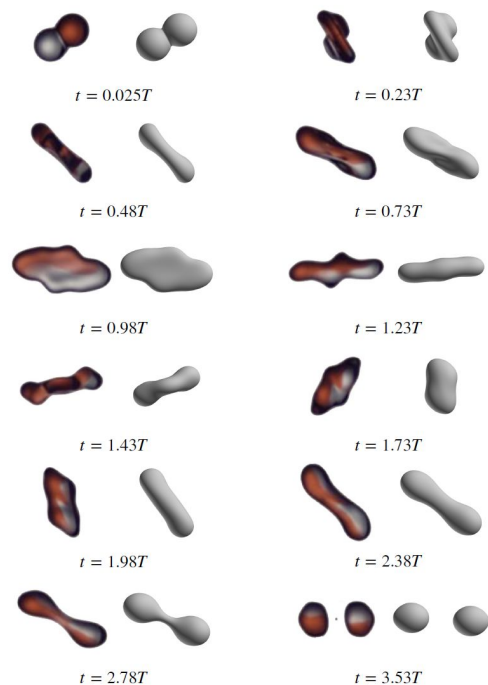


図4. 回転分裂の実験結果(左)と計算結果(右)

最後に、本手法を用いて、トンボの自由飛翔の計算結果を図5に示す。レイノルズ数  $Re=800$  とした計算結果である。図は4枚の翅まわりの渦度場を示している。複雑な後流や翼端渦が生成されている様子がわかる。

#### (5) まとめおよび今後の課題

Cube 構成を時々刻々変化させる直交格子積み上げ法 (Building Cube Method, BCM) と組み合わせ、大規模並列計算機に対してより計算効率の良い3相(気体・液体・固体)の移動境界問題に適用できる動的BC-LBMを開発した。液滴衝突やミルククラウンに適用して開発手法の計算精度を検証した結果、非常に良い結果が得られた。

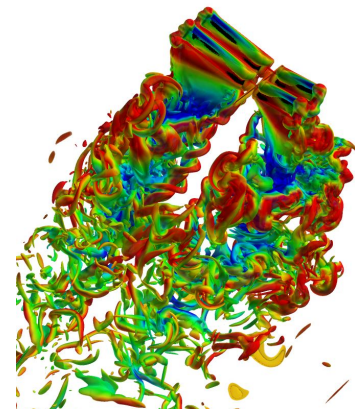


図5. トンボの自由飛翔時の渦度場の様子

一方、動的 BCM 格子を適用しても計算時間は多少速くなるもののほとんど変わらないことがわかった。この原因としては、今回の計算では、BCM 格子における buffer 領域を含む全ノード数が BCM 格子での計算時間の支配的な要素になっていること、Cube の細分化・粗大化の判断に計算時間を要することが考えられる。

今後の課題としては、動的 BC-LBM のアルゴリズムを改良して計算時間の短縮を検討する必要がある。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Harunari Hino, Takaji Inamuro	4. 巻 50
2. 論文標題 Turning flight simulations of a dragonfly-like flapping wing-body model by the immersed boundary-lattice Boltzmann method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	6. 最初と最後の頁 065501 (18pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takaji Inamuro, Takuya Echizen, Fuminori Horai	4. 巻 175
2. 論文標題 Validation of an improved lattice Boltzmann method for incompressible two-phase flows	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Computers and Fluids	6. 最初と最後の頁 83-90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kensuke Hirohashi, Takaji Inamuro	4. 巻 49
2. 論文標題 Hovering and targeting flight simulations of a dragonfly-like flapping wing-body model by the immersed boundary-lattice Boltzmann method	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	6. 最初と最後の頁 045502 (16pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 日野美徳, 稲室隆二	4. 巻 37
2. 論文標題 IB-LBMを用いたトンボを模した羽ばたき翼 - 胴体モデルの旋回飛翔の数値計算	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 137-143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Harunari Hino, Takaji Inamuro
2. 発表標題 Turning flight simulations of a dragonfly-like flapping wing-body model by IB-LBM
3. 学会等名 27th International Conference on Discrete Simulation of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 日野美徳, 田中浩平, 稲室隆二
2. 発表標題 トンボを模した羽ばたき翼 胴体モデルの飛翔性能の数値計算：旋回および滑空
3. 学会等名 日本流体力学会年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 蓬萊文紀, 中神貴裕, 稲室隆二
2. 発表標題 改良二相系格子ボルツマン法における保存型拡散界面モデルの検討
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中浩平, 稲室隆二
2. 発表標題 IB-LBMを用いたトンボを模した羽ばたき翼 - 胴体モデルの滑空飛翔の数値計算
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takaji Inamuro, Takuya Echizen, Fuminori Horai
2. 発表標題 Validation of a two-phase LBM for incompressible two-phase flows with large density differences
3. 学会等名 26th International Conference on Discrete Simulation of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 日野美徳, 稲室隆二
2. 発表標題 トンボを模した羽ばたき翼 胴体モデルのロール回転制御の数値計算
3. 学会等名 日本流体力学会年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 日野美徳, 稲室隆二
2. 発表標題 IB-LBMを用いたトンボを模した羽ばたき翼 胴体モデルの旋回飛翔の数値計算
3. 学会等名 第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 越前拓也, 稲室隆二
2. 発表標題 動的Building-Cube法を用いた二相系格子ボルツマン法の計算効率化
3. 学会等名 第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 南 慶輔, 広橋謙介, 鈴木康祐, 稲室隆二
2. 発表標題 トンボを模した羽ばたき翼-胴体モデルの数値計算による飛翔性能の検討
3. 学会等名 日本流体力学会年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中村 葵, 蓬莱文紀, 稲室隆二, 潘 國隆
2. 発表標題 2 つの液滴衝突現象におけるRotational Separation の数値計算
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Inamuro, A. Nakamura, H. Horai
2. 発表標題 Numerical investigation of rotational separation in binary droplet collision
3. 学会等名 72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 稲室隆二, 吉野正人, 鈴木康祐	4. 発行年 2020年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 165
3. 書名 格子ボルツマン法入門 - 複雑境界および移動境界流れの数値計算法	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----