

平成 29 年 5 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420108

研究課題名(和文) 気体・液体・固体が複雑に運動する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 three-phase LBM for complex moving boundary flows of gas-liquid-solid mixtures

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：気体、液体、固体の3相が複雑に運動する移動境界問題に適用できる、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)とを組み合わせた新しい3相系LBM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直交格子を用いて計算することができ、また、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。検証例題として、気液界面に物体が衝突する場合やミルククラウン現象に適用し、物体に働く衝撃力、液面表面の跳ね上がりや微小液滴の分裂、気泡の巻き込みなどに関して、既存の実験結果と比較して妥当な結果が得られた。

研究成果の概要(英文)：We develop a new three-phase LBM combined the two-phase LBM and the IB-LBM for complex moving boundary flows of gas-liquid-solid mixtures. The algorithm of the method is a simple explicit form in Cartesian grid without solving the Poisson equation for pressure and is quite suitable for parallel computing. In order to validate the method, we apply the method to the simulations of the impact of a body on a free surface and a milk crown, and the calculated results of the impact force on the body, the splash of the free surface and the breakup into small droplets are in good agreement with existing experimental data.

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

### 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、砕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。

本問題に対しては、古くから実験や簡易モデルによる理論研究が行われているが、モデル化なしの直接数値シミュレーションについては未だ十分な成果が得られているとは言い難い。すなわち、3相が同時に運動する移動境界流れに対する数値計算法は今でも開発途上にある。その理由は、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直接数値計算がやっと実用計算時間内で精度良く行えるようになってきたのが現状であり、3相についてはまだ今後の課題であると考えられているためである。

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、非圧縮粘性流体に対してポアソン方程式を用いない数値計算法として、近年、格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method, LBM) が注目されている。LBMは、直交格子上で仮想的な粒子の運動を計算し、粒子集合の運動から流体の速度および圧力を求める完全陽的な数値計算法である。また、LBM

では格子上の値は隣接する格子点の値のみから求めることができることから、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法である。研究代表者は、気液2相流が計算できる2相系LBMや移動物体まわりの流れが計算できるIB-LBM (埋め込み境界-格子ボルツマン法) を開発し、この分野で世界的な貢献をしてきている。

したがって、素直なアイデアとして、2相系LBMとIB-LBMとを組み合わせることで、3相が同時に運動する移動境界流れに対する並列計算機に適した3相系LBMを開発できることが考えられ、LBMの研究分野では世界的に活発な研究が行われているが、まだ確立された3相系LBMは完成しておらず、世界の研究者がしのぎを削っている。

### 2. 研究の目的

本研究では、気体、液体、固体の3相が複雑に運動する移動境界問題に適用できる新しい3相系LBMを開発する。具体的には、下記の項目を実施する。

- (1) 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) を組み合わせて3相系LBMを開発する。
- (2) 開発した手法の数値粘性の低減方法や濡れ性の導入を検討し、例題として、気液界面に物体が衝突する場合に、物体に働く衝撃力、液体表面の跳ね上がりや微小液滴の分裂、物体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。

### 3. 研究の方法

気体、液体、固体の3相が複雑に運動する移動境界問題に適用できる新しい3相系LBMを開発することを目的として、以下の課題を検討する。

[平成26年度]

- (1) ポアソン方程式を用いない新しい気液2相系LBMの開発

界面が自由に変形する気液2相系LBMは、大きな密度比の気液2相流に対しても安定に計算できる数値計算法として世界的に評価の高い方法であるが、圧力場の計算にポアソン方程式を用いるためアルゴリズムが複雑になり並列計算に適さないことが欠点である。本来、LBMの特徴は、圧力計算にポアソン方程式を用いる必要がないために並列化効率が優れていることである。そこで、初年度にポアソン方程式を用いない気液2相系

LBMを開発する。

具体的には、LBMによる圧力計算の部分に「過緩和法」と「半陰解法」を組み合わせたスキームを用いて擬似音速の低下（一般に、2相系LBMでは液体領域で擬似音速が小さくなり、連続の式が満たせなくなる）を抑えることを検討する。なお、気体中にある静止液滴の予備計算において、従来の2相系LBMと比較することにより、数値安定性の向上（密度比1000でもシャープな界面の保持が可能）ならびに計算時間の短縮（従来の2相系LBMに比べ50倍程度の高速化が可能）をすでに確認しているが、手法の有用性のさらなる検討が必要である。

#### (2) 埋め込み境界法 (IBM) と新しい気液 2相系 LBM の組み合わせ

埋め込み境界法 (IBM) は、直交格子を用いて複雑な形状をした物体や自由に運動する物体を表わす方法である。したがって、直交格子を用いて流れ場を計算する LBM との相性は良く、IBM と LBM とを組み合わせた IB-LBM が、流体中を自由に移動する複雑形状の物体まわりの流れの数値計算法として有望視されている。本課題では、この IBM と(1)で開発した新しい2相系 LBM とを組み合わせることで3相系 LBM を開発する。これにより2相流の中で自由に運動する物体まわりの流れや物体に作用する流体力を容易に計算することができるようになる。2相系 LBM に IBM を導入する際の技術的課題はそれほど困難でないと考えられるが、2相の界面が物体に接する、いわゆる3相の接触線で正しい計算ができるかどうかことが重要である。

[平成27年度]

#### (3) 数値粘性の低減方法の検討

上記(1)で開発する新しい2相系 LBM は、従来の2相系 LBM の問題を解決する新しい方法であるが、従来法と同様にレイノルズ数が大きな流れに適用する場合、数値粘性が大きくなる問題点を含んでいる。この原因は、粘成項の差分法(ただし、LBM は通常の N-S 方程式の差分法とは異なることに注意)にあると考えられている。最近、Asinari らは数値粘性の少ない LBM の粘成項の新しい差分方法を提案して成功を収めている。そこで、上記(1)で開発した、新しい2相系 LBM に参考文献6の差分法を導入して、高レイノルズ数の計算で数値粘性が低減できるかどうかを調べる。数値粘性の大きさを調べる例題としては、例えば、薄い液面に衝突する液滴(いわゆるミルククラウン)を取り上げる。ミルククラウンの数値計算は、『計算科学の夢』

と言われており、薄い界面や微小液滴を正確にとらえるには数値粘性による誤差の影響を極力抑える必要がある。既存の実験条件にあわせた様々な計算を行い、微小液滴の飛散の様子などを比較して精度の確認をする。

#### (4) 濡れ性および Slippage 問題の検討

2相の界面が物体に接する3相の接触線では、濡れ性あるいは接触角が重要になってくる。2相系 LBM において静止壁にこの接触角を導入することは、すでに実績があり問題はないが、移動物体を IBM で表わしたときに接触角を導入する方法を検討する。さらに、3相の接触線では、物体表面上での流体の no-slip 条件と気液2相界面の移動が両立しない Slippage 問題がある。2相系 LBM では、この Slippage 問題は2相の移動度を考慮することにより解決できる。そこで、3相系 LBM についても移動度がうまく考慮できて Slippage 問題が解決できるかどうかを調べる。

[平成28年度]

#### (5) 開発手法の実用性の検討

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、開発手法の実用性を検討する。さらに、その他の実際的な3相問題にも適用する。

#### (6) 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「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) ポアソン方程式を用いない新しい気液 2相系 LBM の開発

LBM は弱圧縮性流体を仮定(流れのマッハ数  $\ll 1$ ) している。そのため、非圧縮性流体の連続の式  $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$  を満たす圧力  $p$  は、速度分布関数のモーメントから計算した密度  $\rho$  (連続の式を満たしている) を状態方程式  $p = c_s^2 \rho$  (ここで  $c_s = (1/3)^{1/2}$  は音速) に代入して求めることができる。このように、圧力に対するポアソン方程式を解くことなく圧力  $p$  を求めることができるのが LBM の最大の利点である。2相系 LBM においても圧力  $p$  はポアソン方程式を解くことなしに求めることができるが、密度比1000の場合には安定した計算が困難になる。すなわち、高密度比の2

相系 LBM では、圧力計算が Key となる。

現在、2 相系 LBM で用いられている、ポアソン方程式を用いずに圧力を求めるには 2 つの方法がある

[1] 連続の式と状態方程式を用いる方法

[2] 圧力発展式を用いる方法

この 2 つの方法は原理的には等価であるが、一般に、[2]の方が安定であることが知られている。すなわち、[1]でも密度比 $<100$ では圧力を計算することができるが、それ以上の密度比では発散する。一方、[2]では密度比 1000 が計算できるが、差分スキームに工夫が必要である。また、 $\rho_L=O(1)$ および  $\rho_G \ll 1$  の場合（これまでに提案されているほとんどの 2 相系 LBM は、この場合を取り扱っている）には、気相の速度場が大きく変動して  $u/c_s \ll 1$  の条件を満たせなくなり発散することが多い。特に、密度比 1000 の気泡流の計算が困難になることが指摘されている。

本研究では、[2]の圧力発展式を満たす圧力  $p$  を LBM の発展形である LKS (Lattice Kinetic Scheme) を用いて計算する方法を提案した。なお、本方法では、気相の密度を  $\rho_G=1$ 、液相の密度を  $\rho_L \gg 1$  としている。そのため、気相に比べて液相では圧力の時間発展が大きくなる。このことを考慮して、圧力計算における LKS に過緩和係数  $\omega$  を導入することにより、両相の音速の値が  $O(1)$ になるように調整している。以下の数値計算例で示すように、新手法では密度比 1000 の計算が可能である。

(2) 埋め込み境界法 (IBM) と新しい気液 2 相系 LBM の組み合わせ

次に、新しい 2 相系 LBM と埋め込み境界法を組み合わせた方法を用いて、水面に落下する球（表面は親水性）の計算結果を図 1 に示す。球の直径  $D=250 \times$  とし、気液の密度比=800、レイノルズ数  $Re=5000$ 、キャピラリー数  $Ca=0.033$ 、ウェーバー数  $We=166$  としたときの計算結果である。図 1 より、落下する球に水面が引きずり込まれ(b-e)、その反動で水柱が形成される様子(f)が確認できる。この問題は、気・液・固の三相が絡む難しい流体問題であるが、2 相系 LBM が適した応用分野である。

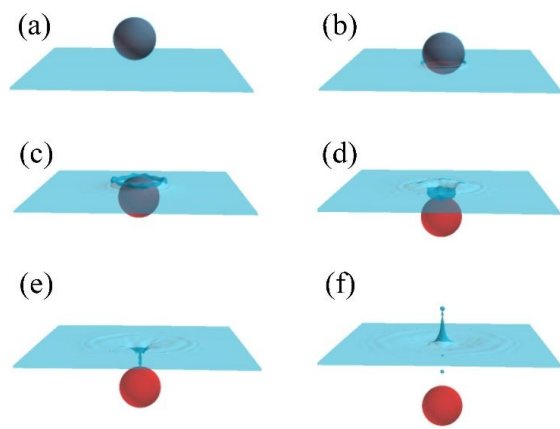


図 1. 水面に落下する球の計算結果。(a)  $t^*=0$ , (b)  $t^*=0.28$ , (c)  $t^*=0.88$ , (d)  $t^*=1.48$ , (e)  $t^*=1.96$ , (f)  $t^*=2.80$  ( $t^*=tU/D$ ,  $U$ : 初期落下速度,  $D$ : 球の直径)

(3) 数値粘性の低減方法の検討

また、従来の 2 相系 LBM では、高レイノルズ数の計算において数値粘性が大きくなることが指摘されている。本研究では、LWACM (Link-Wise Artificial Compressibility Method) を用いて数値粘性を抑えることにした。以下の計算例に示すように、高レイノルズ数の流れも安定して計算できる。

(4) 濡れ性および Slippage 問題の検討

3 相系 LBM では固体と気液界面が接触するので、固体表面の濡れ性を考慮する必要がある。本研究では、固体表面上の密度を規定することにより、固体表面上での気液界面の接触角を変化させる方法を提案した。例題としては、図 2 に示すような液面に衝突する物体を取り上げた。物体の形状を様々な形に変化させ、さらに物体表面の接触角を変化させて計算を行い、既存の実験結果と比較した。図 2 より、物体の形状により気泡の巻き込みや自由表面の跳ね返りの挙動が変化の様子がわかる。

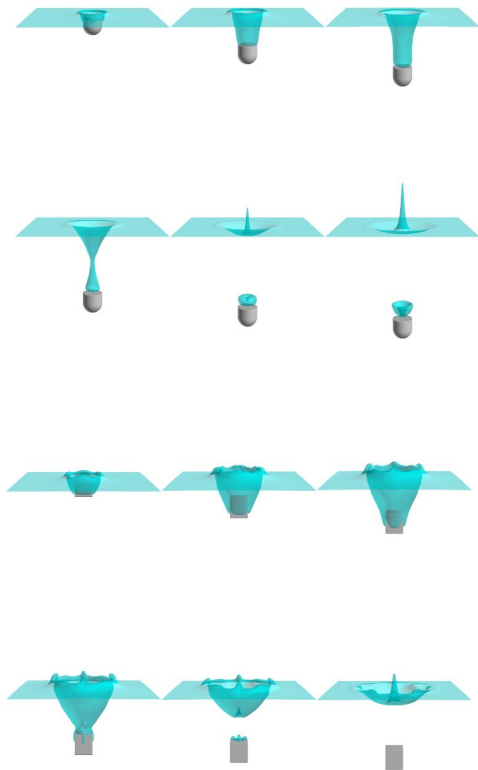


図 2. 固体（上図：砲弾型，下図：四角柱）と自由表面の衝突現象の数値計算例．固体表面はどちらも親水性である．

#### (5) 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  $We=1000$  とした計算結果である．3次元計算であるが，液滴中心を通る2次元平面上の密度分布を示している．液滴が液面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は良くとらえられているが，最後にシート状膜が小さな液滴に分裂する様子は実験結果と少し異なっている．図 4 は，クラウンのシート状膜の半径  $r_w$  の時間変化を簡易な理論予測値と比較したものである．計算結果の  $r_w$  が理論予測値と良く一致していることがわかる．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を期待している．

#### (6) まとめおよび今後の課題

気体，液体，固体の3相が複雑に運動する移動境界問題に適用できる新しい数値計算法を開発した．具体的には，2相系格子ボル

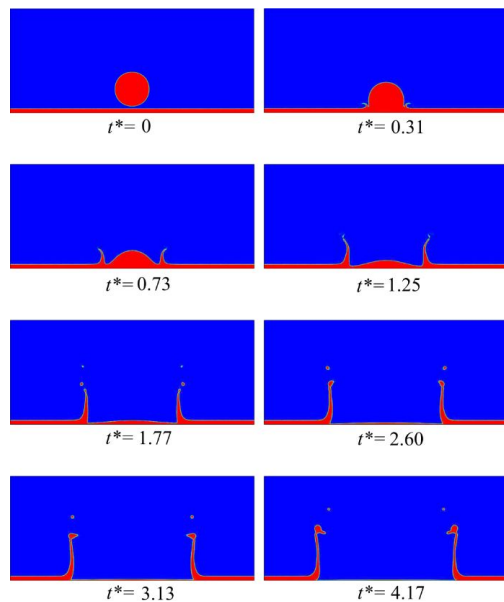
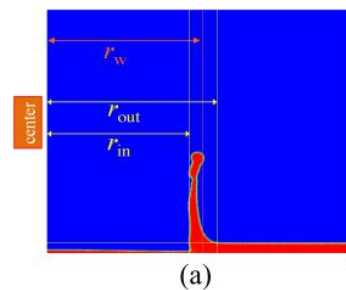
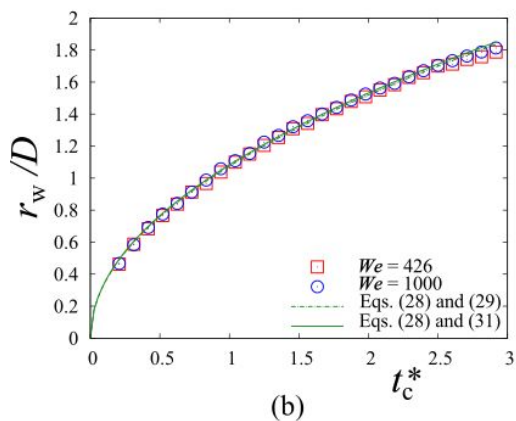


図 3. ミルククラウンの計算結果 ( $t^*=tU/D$ ， $U$ ：液滴の初期速度， $D$ ：液滴直径)



(a)



(b)

図 4 クラウンのシート状膜の半径  $r_w$  の時間変化．実線と破線は簡易な理論予測値を示す．( $t_c^*$ ：液滴が液面に接触してからの無次元時間)

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直交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。検証例題として、気液界面に物体が衝突する場合に、物体に働く衝撃力、液面表面の跳ね上がりや微小液滴の分裂、物体が沈むときの気泡の巻き込みなどを調べ、既存の実験結果と比較して妥当な結果が得られた。

今後の課題としては、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) と組み合わせて、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 の開発がある。

## 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 8 件)

K. Suzuki, T. Inamuro, An improved lattice kinetic scheme for incompressible viscous fluid flows, *Int. J. Mod. Phys. C* 25 (2014) 1340017 (9pp)

Y. Kimura, K. Suzuki, T. Inamuro, Flight simulations of a two-dimensional flapping wing by the IB-LBM, *Int. J. Mod. Phys. C* 25 (2014) 1340020 (8pp)

K. Minami, K. Suzuki, T. Inamuro, Free flight simulations of a dragonfly-like flapping wing-body model: immersed boundary-lattice Boltzmann method, *Fluid Dyn. Res.* 47 (2015), 659-695

K. Suzuki, K. Minami, T. Inamuro, Lift and thrust generation by a butterfly-like flapping wing-body model by the immersed boundary-lattice Boltzmann method, *J. Fluid Mech.* 767 (2015) 659-695

Y. Nakatani, K. Suzuki, T. Inamuro, Flight control simulations of a butterfly-like flapping wing-body model by the immersed boundary-lattice Boltzmann method, *Computers & Fluids* 133 (2016) 103-115

T. Inamuro, T. Yokoyama, K. Tanaka, M. Taniguchi, An improved lattice Boltzmann method for incompressible two-phase flows with large density differences, *Computers & Fluids* 137 (2016) 55-69

鈴木康祐, 稲室隆二, 移動境界流れの数値シミュレーション, *シミュレーション* 36 (2016) 62-65

稲室隆二, 二相系格子ボルツマン法の最近の研究動向, *伝熱* 55 (2016) 8-13

〔学会発表〕(計 16 件)

仲谷雄一, 鈴木康祐, 稲室隆二, 蝶を模した 3 次元羽ばたき翼モデルの姿勢制御の数値計算, 日本流体力学会年会 2014, 仙台, 2014

K. Suzuki, K. Minami, T. Inamuro, Pitching motion control of a butterfly-like 3D flapping wing-body model, 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, San Francisco, USA, 2014

T. Inamuro, K. Minami, K. Suzuki, Free flight simulations of a dragonfly-like flapping wing-body model: immersed boundary-lattice Boltzmann method, 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, San Francisco, USA, 2014

矢野真弘, 稲室隆二, LBM による気液固三相流の計算

手法の開発, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2014

仲谷雄一, 稲室隆二, IB-LBM による羽ばたき翼モデルの姿勢制御の数値計算, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2014

谷口源貴, 稲室隆二, CSF を用いた高密度比二相系 LBM の開発, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2014

M. Yano, T. Inamuro, Gas-liquid-solid three-phase flow simulations using the two-phase lattice Boltzmann method combined with the immersed boundary method, 24<sup>th</sup> Int. Conf. Discrete Simulation of Fluid Dynamics, Edinburgh, UK, 2015

川勝翔太郎, 稲室隆二, 蝶を模した羽ばたき翼モデルの旋回飛翔の数値計算, 日本流体力学会年会 2015, 東工大, 2015

広橋謙介, 稲室隆二, トンボを模した羽ばたき翼モデルのホバリング飛翔の数値計算, 日本流体力学会年会 2015, 東工大, 2015

福永剛史, 稲室隆二, 二相系格子ボルツマン法の計算効率化の検討 (Building-Cube 法の適用), 第 29 回数値流体力学シンポジウム, 九州大学, 2015

広橋謙介, 川勝翔太郎, 稲室隆二, IB-LBM を用いた羽ばたき飛翔におけるレイノルズ数の影響の検討, 第 29 回数値流体力学シンポジウム, 九州大学, 2015

K. Horohashi, T. Inamuro, Hovering and targeting flight simulations of a dragonfly-like flapping wing-body model by IB-LBM, 25<sup>th</sup> Int. Conf. Discrete Simulation of Fluid Dynamics, Shenzhen, China, 2016

木村健吾, 稲室隆二, 蝶を模した羽ばたき三角翼モデルのピッチング回転および飛翔方向制御の数値計算, 日本流体力学会年会 2016, 名工大, 2016

T. Inamuro, K. Hirohashi, Hovering and targeting flight simulations of a dragonfly-like flapping wing-body model by IB-LBM, 69th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Portland, USA, 2016

木村健吾, 稲室隆二, IB-LBM を用いた蝶を模した翼形状の羽ばたき飛翔の数値計算, 第 30 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2016

中田 大, 稲室隆二, 二相系 LBM と Ghost-cell 法を組み合わせた気液固三相流の計算手法, 第 30 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2016

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

<http://fd.kuaero.kyoto-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

稲室 隆二 (INAMURO, Takaji)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 20263113

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

なし