

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560192

研究課題名(和文) 格子ボルツマン法を用いたマイクロスケールの複雑流路内における固液混相流解析

研究課題名(英文) Lattice Boltzmann simulation of solid-liquid multiphase flow in microscale complicated geometries

研究代表者

吉野 正人 (YOSHINO, Masato)

信州大学・工学部・教授

研究者番号：00324228

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：格子ボルツマン法に基づく新しい固液二相流シミュレーション法を開発し、複雑な流路をもつマイクロスケール構造内における変形可能な物体の挙動解析を行った。申請者らのこれまでの研究成果を発展させ、例えば赤血球に代表される双凹面形状などの非球形粒子の挙動や、狭窄部が存在するような複雑流路内における粘弾性物体の挙動について詳しく調べた。その結果、本手法の妥当性が確認され、将来汎用解析コードとしての有望性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：A new numerical method for solid-liquid two-phase flow based on the lattice Boltzmann method is developed, and applied to the motion of a deformable body in microscale complicated geometries. By extending our previous work, we investigate the behavior of a non-spherical body, e.g., a biconcave body such as a red blood cell in viscous fluid. Also, we simulate the motion of a viscoelastic body in complex channels with a constriction. From these results, it is found that the validity of the present method is demonstrated, and it can be a promising numerical method as commercial software in the future.

研究分野：複雑混相流の数値解析

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：固液二相流 粘弾性物体 格子ボルツマン法 マイクロフルイディクス 赤血球 狭窄部

1. 研究開始当初の背景

毛細血管内の血流などに代表されるいわゆるマイクロ混相流現象の解明は、医学、生体工学のみならず機械工学や土木工学、化学工学など幅広い分野で重要な課題となっている。特に、機械工学やエネルギー・環境問題に関連した分野では、MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)、燃料電池、 μ -TAS などに見られるように、マイクロスケールの装置内における混相流現象の解明が国内・国外を問わず盛んに行われるようになってきた。このようなマイクロスケールの流動問題においては、固体壁と流体の間の界面ダイナミクスが重要になるため、濡れ性や接触角などマイクロフルイディクス特有の問題を解決しなければならない。

しかしながら、このような現象を詳細に模擬できる数値計算法はまだ確立しておらず、マイクロ混相流の汎用解析コードを開発することは学術的にも工学的にも有意義であると言える。

2. 研究の目的

上記のような背景を踏まえて、本研究では、ミクロナ物理モデルに基づく新しい混相流シミュレーション法の開発を行い、複雑な流路をもつマイクロスケール構造内における流動現象を解明することを目的としている。具体的には、(1) 非球形粒子(例えば赤血球に代表される双凹面形状)に対する固液混相流解析法の確立、ならびに(2) 流路の途中に狭窄部があるような複雑構造をもつマイクロ流れにおける粘弾性物体の挙動について明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

申請者らのグループが提案した質点ばねモデルに基づく弾性力を液液二相系格子ボルツマン法(Lattice Boltzmann Method; LBM)に組み込むことによって、粘弾性体(赤血球)と流体を統一的に計算した。また、狭窄部を含む流れ解析では、狭窄部入口および出口のスロート形状を表現するために、Direct Forcing Method にもとづく埋め込み境界法(Immersed Boundary Method)を用いた。

4. 研究成果

(1) 流体中における粘弾性皮膜物体の挙動解析

せん断流れ場における物体の挙動解析
 $L_x \times L_y \times L_z = 120 \times 60 \times 120$ (x: 立方体格子の間隔)の流体相 A で満たされた領域の中央に、内部が流体相 B で満たされた物体(初期形状は半径 $R=12$ 、膜厚 ~ 2 の球形)を置き、物体が十分に平衡状態に達した後、時刻 $t=0$ で距離 L_z 離れた上下の壁を水平反対方向にそれぞれ速さ u_w で動かした。上下の壁にはすべりなし境界条件を用い、側面の境界には周期境界条件を用いた。本計算では、周囲の流体の粘性およびせん断速度基

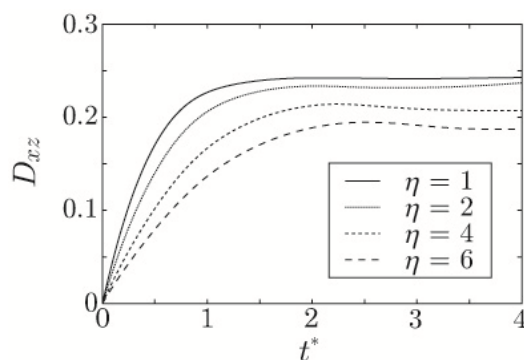


Fig. 1 Time variation of deformation index D_{xz}

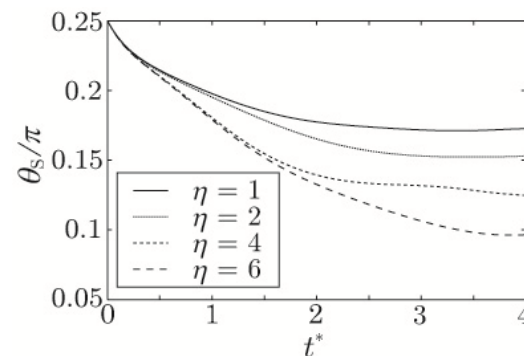


Fig. 2 Time variation of inclination angle θ_s

準のレイノルズ数 Re 、ならびに無次元せん断速度 G (せん断力と弾性力の比) の値をそれぞれ $Re=0.025$, $G=0.075$ とした。ここで、内部流体と周囲の流体の粘度比を $\eta = \mu_{FB} / \mu_{FA}$ と定義する。本計算では、周囲の流体の粘度を $\mu_{FA}=0.01$ と一定とし、内部流体の粘度 μ_{FB} を $0.1 \sim 10$ となる範囲で変化させた。なお、膜の粘度は内部流体の粘度と等しいとした。

まず低粘度比 ($0.1 < \eta < 1$) の場合、物体はせん断方向に引き伸ばされ、楕円体に変形しながら水平方向に傾いた。物体の変形は時間が経過するにつれ次第に緩やかになり、最初球形であった物体は、せん断速度による無次元時間が 1.0 以降ではほぼ定常となる結果が得られた。さらに、物体内部には回転流が見られ、膜を構成する任意の質点を追跡した結果、膜が tank-treading 運動していることがわかった。なお、 $0.1 < \eta < 1$ の結果については、 η が大きいほど初期の変形速度は小さくなる傾向が見られたが、定常状態に達した後の物体形状は、 $\eta=0.1$ の場合とほぼ同様であり、この範囲の粘度比による差異はほとんど見られなかった。

次に高粘度比 ($1 < \eta < 10$) の場合、 $\eta=0.1$ の場合とは形状が異なり、物体は水平方向に大きく傾いている様子が得られた。この物体の変化に対し、 $\eta=1, 2, 4, 6$ における物体の変形度 D_{xz} および傾き角 θ_s の時間変化をそれぞれ Fig.1 および Fig.2 に示す。粘度比が高くなるにつれて、物体の変形速度および定常状態における変形度は小さくなり、逆に傾き角は大きくなることがわかった。

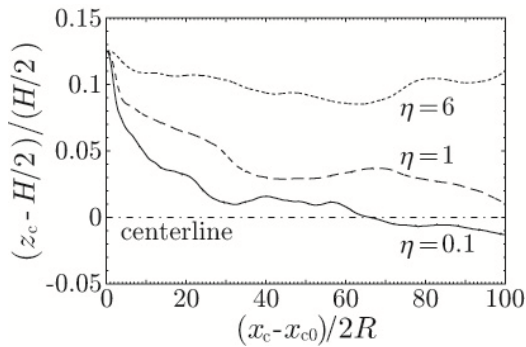


Fig. 3 Trajectories of the centroid of the body for $\eta = 0.1, 1,$ and 6 at $Re = 0.28$

正方形ダクト内を流れる物体の挙動解析

$H \times H \times L_x = 48 \times 48 \times 128 \times$ の正方形ダクト内を圧力勾配によって流れる流体中の物体の挙動を計算した。入口・出口には圧力差を伴う周期境界条件, その他の面にはすべりなし境界条件を用いた。初期状態において, 計算領域内を流体相 A で満たし, 前節と同じ球形物体を管軸から z 軸の正の方向に $R/4$ だけオフセットした位置に配置した。本計算では, 周囲の流体の粘性および入口流路幅基準のレイノルズ数を $Re = 0.28$ とした。

$\eta = 0.1$ および $\eta = 6$ に対して, 物体形状ならびに物体まわりの速度ベクトルを調べたところ, 両ケースとも初期時刻では, 物体は管壁側が伸ばされた上下非対称のスリッパ形状に変形するが, $\eta = 0.1$ のケースでは物体は管軸へと移動していき, 次第に下流側に凸形状, 上流側に凹形状のパラシュート形状に変形する結果が得られた。一方, $\eta = 6$ のケースでは, 物体は流れ方向に対し約 45 度傾いた状態でスリッパ形状を維持ながら流れる結果が得られた。

最後に, 各ケースにおいて同じ初期位置より動き始めた物体重心の軌跡を Fig. 3 に示す。

$\eta = 0.1$ および $\eta = 1$ ケースでは, 物体は徐々に管軸方向に移動し, その後管軸付近を流れ続ける軸集が見られた。一方, $\eta = 6$ のケースでは, 物体は初期に管軸方向に移動するが軸付近までは到達せず, 管壁と管軸との間を流れ続けることがわかった。

(2) 狭窄部を通過する赤血球の挙動解析

Fig. 4 に示すような $L_x \times L_y \times L_z$ のダクト ($L_z = L_y$, $L_x = 2.39 L_y$) に長さ L_s のスロート部と, $L_d \times L_h$ の矩形断面をもつ狭窄部を作成した。内部に赤血球をモデル化した物体 (以下では単に物体と呼ぶ) を配置し, 物体が狭窄部を通過する挙動を考える。計算領域を $L_y = 44 \times$, $L_x = 10 \times$ とし, 境界条件として, 流入口および流出口に圧力差 $\rho (= 5.00 \times 10^{-6})$ を伴う周期境界条件を用い, その他の壁面にはすべり無し境界条件を与えた。計算パラメータは, 物体の径, 密度および粘性係数をそれぞれ $D_0 = 11 \times$, $\rho_B = 1.00$ および $\mu_B = 0.05 \times$ とした。その他の計算

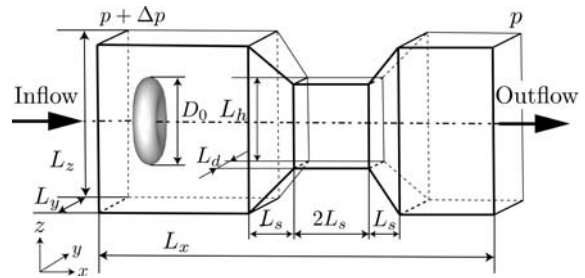


Fig. 4 Overall view of computational domain.

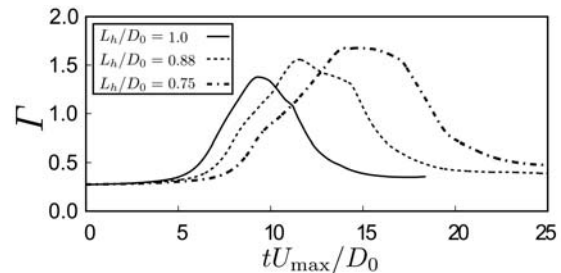


Fig. 5 Time variation of deformation index Γ .

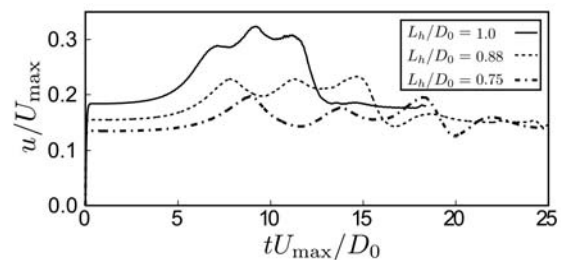


Fig. 6 Time variation of velocity of viscoelastic body

パラメータは, $a = 9 / 49$, $b = 2 / 21$, $T = 0.55$, $\phi_{\max} = 4.937$, $\phi_{\min} = 2.251$, $\phi = 0.01(x)^2$ とした。また, 物体が狭窄部を通過する挙動を評価するために, 変形度を Γ と定義し, $\Gamma = 2D_x / (D_y + D_z)$ (物体の x, y, z 軸方向の長さ: D_x, D_y, D_z) として計算した。物体の重心の初期位置を $(x_c^0 / L_x, y_c^0 / L_y, z_c^0 / L_z) = (0.10, 0.50, 0.50)$ で固定し, $L_h = L_d$ として, $0.625 \leq L_h / D_0 \leq 1.13$ の範囲で狭窄部の断面積を変化させて計算を行った。 $L_h / D_0 = 1.0, 0.88, 0.75$ の各ケースにおける Γ ならびに物体の x 方向の流速 u の時間変化をそれぞれ Fig. 5, Fig. 6 に示す。Fig. 6 において, u_{\max} はモデルを配置しなかった場合の流れ場における最大流速である。物体が狭窄部に流入し始めると, 変形度および流速はともに増加しながら狭窄部を通過することがわかった。加えて, L_h / D_0 の値が小さくなるにつれて, 物体の変形度の最大値は上昇するが, 一方, 流速の最大値は減少することがわかった。このことから, L_h / D_0 が小さいほど物体により大きな変形が要求され, そのため流速が減少し, 結果として狭窄部の通過にかかる時間が増加したと考えられる。

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 5 件)

吉野正人, 鈴木崇司, 村山寿郎, U 字曲がり管内を流れる単一粒子の挙動解析, 計算数理工学論文集, 査読有, 13 巻, 2013, pp. 97 - 102

<http://gpsun1.gee.kyoto-u.ac.jp/JASCOME/denshi-journal/index.html>

吉野正人, 小林勇貴, 田中義人, 濡れ性を考慮した多数の球状物体間を浸透する液相の挙動解析, 混相流, 査読有, 26 巻, No.5, 2013, pp. 499 - 506

<http://gpsun1.gee.kyoto-u.ac.jp/JASCOME/denshi-journal/index.html>

吉野正人, 田中義人, 細井祐介, Lattice Kinetic スキームにおける複雑流路形状に対応した空間微分近似方法の提案, 計算数理工学論文集, 査読有, 11 巻, 2011, pp. 111 - 116

<http://gpsun1.gee.kyoto-u.ac.jp/JASCOME/denshi-journal/index.html>

Toshiro Murayama, Masato Yoshino, and Tetsuo Hirata, Three-dimensional lattice Boltzmann simulation of two-phase flow containing a deformable body with a viscoelastic membrane, Communications in Computational Physics, 査読有, Vol.9, No.5, 2011, pp. 1397-1413

DOI: 10.4208/cicp111109.241210s

Yoshito Tanaka, Masato Yoshino, and Tetsuo Hirata, Lattice Boltzmann simulation of nucleate pool boiling in saturated liquid, Communications in Computational Physics, 査読有, Vol.9, No.5, 2011, pp. 1347 - 1361

DOI: 10.4208/cicp.141109.161210s

[学会発表](計 13 件) ~ のみ

天野慎也, 吉野正人, 二相系格子ボルツマン法を用いた分岐部を流れる粒子の挙動解析, 第 27 回数値流体力学シンポジウム講演要旨集, D08-2, 6 pages, 2013 年 12 月 19 日, 名古屋大学

小宮山智, 吉野正人, 飯沼幹雄, 網目状多孔体内における熱流動現象の数値解析, 第 11 回日本流体力学会中部支部講演会講演概要集, 2-3, p. 7, 2013 年 12 月 16 日, 名古屋大学

當舎諒美, 吉野正人, T 字型マイクロリアクタにおける液液二相スラグ流の数値計算, 第 11 回日本流体力学会中部支部講演会講演概要集, 2-2, p. 6, 2013 年 12 月 16 日, 名古屋大学

吉野正人, 二相系格子ボルツマン法とそ

の形状最適化問題への適用, 日本機械学会 第 26 回計算力学講演会 (CMD2013) (CDROM), No. 2201, 3 pages, 2013 年 11 月 3 日, 佐賀大学

本田健二, 吉野正人, 二相系格子ボルツマン法を用いた固体壁に衝突する液滴の動的挙動解析, 第 26 回数値流体力学シンポジウム講演要旨集, E03-5, 8 pages, 2012 年 12 月 18 日, 東京都渋谷区

勝見真悟, 吉野正人, 二相系格子ボルツマン法による狭窄部を通過する赤血球の挙動解析, 第 10 回日本流体力学会中部支部講演会講演概要集, 3-1, p. 11, 2012 年 11 月 10 日, 千曲市

吉野正人, 小林勇貴, 田中義人, 濡れ性を考慮した球状物体間における三次元気液二相流解析, 日本混相流学会年会講演会 2012 講演論文集, B213, pp. 152 - 153, 2012 年 8 月 10 日, 東京大学柏キャンパス

吉野正人, 地村啓, 天野慎也, 曲がり管内を流れる変形する物体の挙動シミュレーション, 第 17 回計算工学講演会講演論文集 (CDROM), G-5-6, 4 pages, 2012 年 5 月 30 日, 京都市

地村啓, 吉野正人, 鈴木崇司, 格子ボルツマン法を用いた曲がり管内流れにおける物体の挙動シミュレーション, 第 25 回数値流体力学シンポジウム講演要旨集, E03-5, 8 pages, 2011 年 12 月 19 日, 大阪大学

地村啓, 吉野正人, 鈴木崇司, 二相系格子ボルツマン法を用いた曲がり管内流れにおける変形する物体の挙動シミュレーション, 第 9 回日本流体力学会中部支部講演会講演概要集, 3-4, p. 12, 2011 年 11 月 19 日, 豊橋技術科学大学

小林勇貴, 田中義人, 吉野正人, 濡れ性を考慮した多数の球状物体間を浸透する液相の挙動解析, 第 9 回日本流体力学会中部支部講演会講演概要集, 3-3, p. 11, 2011 年 11 月 19 日, 豊橋技術科学大学

村山寿郎, 吉野正人, 勝見真悟, 格子ボルツマン法による流体中における粘弾性皮膜物体の挙動解析, 日本混相流学会年会講演会 2011 講演論文集, A123, pp. 14 - 15, 2011 年 8 月 6 日, 京都工芸繊維大学

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.shinshu-u.ac.jp/laboratories/r/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉野 正人 (YOSHINO, Masato)

信州大学・工学部・教授

研究者番号: 0 0 3 2 4 2 2 8