

機関番号：13601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760123

研究課題名(和文) 格子ボルツマン法を用いたマイクロ流路内における粘弾性固体の挙動解析

研究課題名(英文) LATTICE BOLTZMANN SIMULATION OF BEHAVIOR OF VISCOELASTIC BODIES IN MICRO-CHANNEL FLOWS

研究代表者

吉野 正人 (YOSHINO MASATO)

信州大学・工学部・准教授

研究者番号：00324228

研究成果の概要(和文): 粘弾性固体を含む二相系格子ボルツマン法を構築した。本手法を用いて、せん断流れ場における固体の挙動について数値シミュレーションを行い、得られたせん断速度と固体の変形度の関係は既存の計算結果とよく一致することがわかった。また、膜の tank-treading 運動が再現されることを確認し、本手法の妥当性が示された。次に、微小流路内を流れる固体の挙動を調べ、固体は変形能の違いによってその平衡位置が管軸あるいは管壁と管軸との間に現れることがわかった。さらに、粘弾性膜の内部流体と外部流体の粘度比が、流路内を流れる固体の挙動に与える影響について調べた。

研究成果の概要(英文): A lattice Boltzmann method for two-phase flows containing viscoelastic bodies is developed. Numerical simulations of behavior of the bodies in shear flows are carried out by the present method. The relations between the dimensionless shear rate and the deformability of the body are in good agreement with available other numerical results. Also, the tank-treading motion, which is a periodic rotary motion like a caterpillar, is observed, and the validity of the present method is demonstrated. In addition, the behavior of the bodies in micro-channels is simulated. It is found that the body in equilibrium migrates toward the center of the channel or laterally between the centerline and the wall according to deformability of the body. Finally, these simulations are performed for various viscosity ratios of the internal fluid and the surrounding fluid, and the effect of the ratio on the behavior of the body is investigated.

交付決定額

(金額単位:円)

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |
| 2010年度 | 1,700,000 | 510,000 | 2,210,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：数値流体力学、複雑流れ

## 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固液混相流現象の解明は、医学、

生体工学のみならず機械工学をはじめとする幅広い分野で重要な課題となっている。とりわけ、MEMS (Micro-Electro-Mechanical

Systems) や燃料電池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外を問わず盛んにおこな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では、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、そのような数値シミュレーション法は確立しておらず、微視的な観点から現象を解明するには、まず物理モデルの構築と計算手法の開発が必要であった。

## 2. 研究の目的

流れ場の中に粘弾性固体を含む固液二相流問題に対して、ミクロな物理モデルに基づく新しい混相流シミュレーション法を開発し、流体力を受けて変形を伴いながら流れる固体の挙動を数値シミュレーションによって調べることににより、マイクロスケールの流動現象を解明することを目的とした。

## 3. 研究の方法

(1) 粘弾性固体、特に赤血球のような粘弾性皮膜構造を有する物体の運動に関する三次元物理モデルの構築を行った。

(2) 構築された物理モデルを既存の二相系格子ボルツマン法に組み込み、FORTRAN コードを作成した。

(3) せん断流れなどの基本的な問題の計算を行うことにより、開発された手法の妥当性を検証した。

(4) 微小流路内を流れる固体の挙動に関する数値シミュレーションを実施し、固体の変形能、初期形状、ならびに初期位置が固体の挙動や流れ場に与える影響について調べた。

(5) 粘弾性膜の内部流体と外部流体の粘度比に着目し、その比が流路内を流れる固体の挙動に与える影響について調べた。

## 4. 研究成果

(1) せん断流れ場における単一粘弾性固体（以下では単に固体と記す）の挙動を計算し、本手法の妥当性を検証した。まず、膜のせん断変形に対する弾性抵抗を考慮したモデルを用いて、固体の挙動について計算を行ったところ、Fischer ら[Science, Vol. 202, No. 4370 (1978), pp. 894-896.] によって報告された膜が周期的に回転する tank-treading

運動が再現された。次に、膜のせん断変形および固体の膨張に対する弾性抵抗を考慮したモデルを用いて計算を行った。図1は、各無次元せん断速度に対する固体の変形度の時間変化を表している。この図より、定常状態に達した際の固体の変形度について既存の研究結果と良く一致することがわかる。以上の結果より、本手法の妥当性が示された。

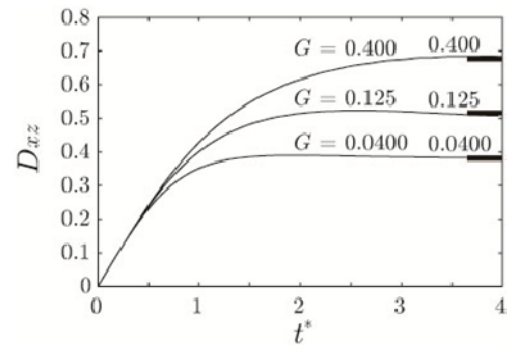


図1 固体の変形度の時間変化。 $G$  は無次元せん断速度、太線は Sui ら[Int. J. Mod. Phys. C, Vol. 18, No. 6 (2007), pp. 993-1011.] の計算による平衡状態における値。

(2) 微小流路内を流れる固体の挙動について計算し、固体の変形能の違いが固体の挙動に与える影響を調べた。

(2-1) 平行平板間を流れる固体の挙動を計算した。その結果、変形能の高い(変形しやすい)固体は変形を伴い平板間の中心軸方向へ移動し、中心軸付近を流れ続ける軸集中を示した。一方、変形能が低い(変形しにくい)固体は、初期位置にかかわらず、平板と中心軸との間のある平衡位置を流れる Segre-Silberberg 効果と同様の現象を示した。

(2-2) 正方形ダクト内を流れる単一固体の挙動について計算した。その結果、初期に固体の重心を管軸上に配置した場合、固体は軸対称のパラシュート形状に変形し管軸上を流れる様子が見られた(図2を参照)。一方、初期に固体の重心を管軸からオフセットして配置した場合、固体は上下に非対称なスリッパ形状に変形し、tank-treading 運動を伴い流れる結果が得られた。

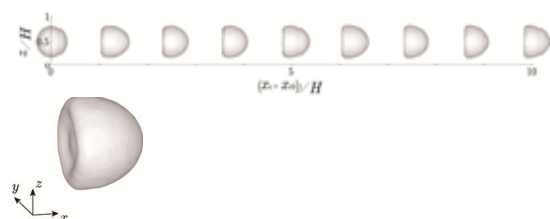


図2 正方形ダクト内を流れる球状固体の形状(上図)および拡大図(下図)。

(3) 管内に固体を複数個含んだ流れ場の計算を行い、固体の流路に対する体積分率が流れに与える影響を調べた。計算結果の一例として、流路に対する固体の体積分率が7.56%のときの固体の形状を図3に示す。初期状態では千鳥配置のように流れていた複数個の固体が、変形を伴いながらしだいに管軸方向に集合し、軸付近を流れ続けることがわかった。

次に、異なる体積分率の計算に対する入口における流れ方向の流速分布を図4に示す。図において、破線は固体がない場合のポアズイコ流に対する分布(放物線)を表している。固体が密集する管軸付近では、固体を含まない場合の流れ場に比べ流速が低下し、固体の体積分率が大きいほど流速が低下する結果が得られた。

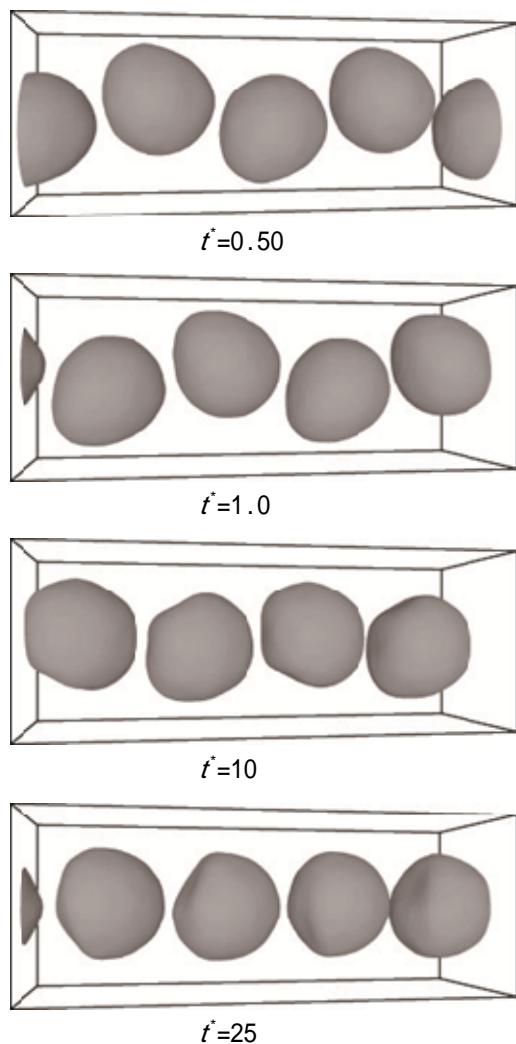


図3 微小流路内を流れる複数個の粘弾性固体の形状変化。 $t^* = tu_{in}/D$  ( $u_{in}$ は入口流速、 $D$ は固体の初期直径)は無次元時刻。固体の体積分率:  $H_t = 7.56\%$ 、流路幅基準のレイノルズ数: 0.28。

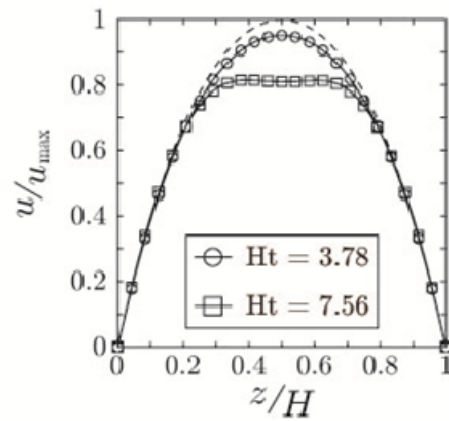


図4 入口における流速分布。破線はポアズイコ流に対する放物線分布 ( $H_t$ は固体の体積分率[%]を表す)。

(4) せん断流れ場および微小流路内を流れる固体において、内部流体と周囲の外部流体の粘度比を  $0.1 \leq \eta \leq 10$  の範囲で変化させ計算を行い、固体の挙動に与える内部流体の粘度の影響を調べた。

(4-1) せん断流れ場における単一固体の挙動解析を行った。各粘度比に対する固体の変形度および傾き角の時間変化を図5に示す。

が高くなるほど固体の変形度は低下し、固体はより水平方向に傾く結果が得られた。また、定常状態での固体の変形度は、 $0.1 \leq \eta \leq 1$  の範囲ではほぼ一定であるのに対し、 $1 < \eta \leq 10$  の範囲では線形的に減少した。

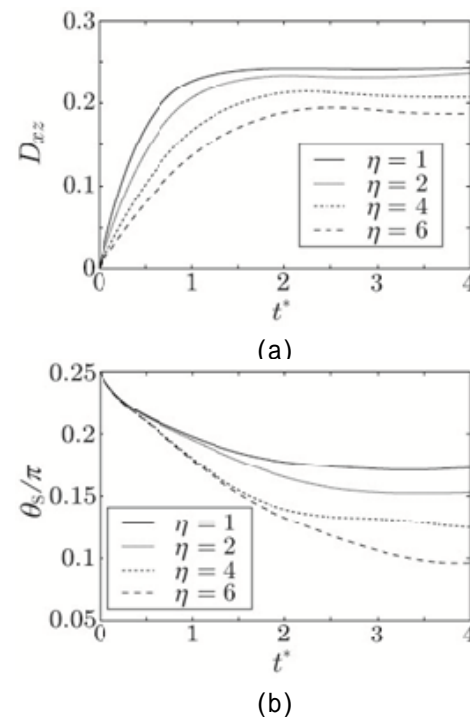


図5 各粘度比に対する固体の変形度(a)および傾き角(b)の時間変化。

(4-2) 正方形ダクト内を流れる固体の挙動を計算した。  $\beta$  が低いケース (例えば、 $\beta = 0.1$  および  $1$ ) では、固体は変形を伴い管軸方向に移動し、管軸付近をパラシュート形状で流れ続ける軸集中を示した。一方、  $\beta$  が高いケース (例えば、 $\beta = 6$ ) では、固体はスリッパ形状で管壁と管軸の間を流れる結果が得られた。

## 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3件)

T. Murayama, M. Yoshino, T. 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, 2011, 1397 - 1413

村山寿郎、吉野正人、平田哲夫、二相系格子ボルツマン法を用いた流体中における粘弾性皮膜固体の挙動解析 (内部流体の粘度が固体の挙動に与える影響について)、日本機械学会論文集 B 編、査読有、77 巻、2011、4 - 19

地村啓、吉野正人、村山寿郎、格子ボルツマン法を用いた平行平板間内を流れる複数個の粘弾性皮膜固体の挙動解析、計算数理工学論文集、査読有、10 巻、2010、99 - 104

### [学会発表](計6件)

鈴木崇司、村山寿郎、中西喬也、吉野正人、格子ボルツマン法を用いた曲り管内の二相流シミュレーション、第 24 回数値流体力学シンポジウム講演要旨集、E6-5、2010、慶應義塾大学

村山寿郎、吉野正人、平田哲夫、ダクト内を流れる複数個の粘弾性皮膜固体の挙動解析、日本混相流学会年会講演会 2010 講演論文集、B-111、2010、pp. 34 - 35、静岡大学

地村啓、村山寿郎、吉野正人、格子ボルツマン法を用いた複数個の粘弾性皮膜固体を含む流れの二次元シミュレーション、第 15 回計算工学講演会講演論文集、B-15-2、2010、pp. 291 - 294、九州大学

中西喬也、村山寿郎、吉野正人、格子ボルツマン法による円管内流れの数値シミュレーション、日本機械学会北陸信越支部第 47 期総会・講演会講演論文集、102、2010、pp. 3 - 4、新潟大学

村山寿郎、吉野正人、平田哲夫、格子ボルツマン法による管路内流れにおける粘

弾性皮膜固体の変形解析、第 87 期日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集、1415、2009、pp. 455 - 456、名古屋工業大学

村山寿郎、吉野正人、平田哲夫、二相系格子ボルツマン法による流れ場における粘弾性皮膜固体の挙動解析 (固体の体積および表面積変化を考慮した弾性モデルの改良)、日本混相流学会年会講演会 2009 講演論文集、D344、2009、pp. 338 - 339、熊本大学

### [その他]

ホームページ等

<http://cfd200.shinshu-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉野 正人 (YOSHINO MASATO)

信州大学・工学部・准教授

研究者番号：00324228

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：