

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 ( 共通 )

## 科学研究費助成事業

## 研究成果報告書



平成 2 9 年 6 月 8 日現在

機関番号：1 3 6 0 1

研究種目：基盤研究(C) ( 一般 )

研究期間：2014 ~ 2016

課題番号：2 6 4 2 0 1 0 5

研究課題名 ( 和文 ) 格子ボルツマン法による複雑構造の微小流路内に多数の粘弾性体を含む混相流解析

研究課題名 ( 英文 ) Lattice Boltzmann simulation of multiphase flows containing many viscoelastic bodies in complicated microchannels

研究代表者

吉野 正人 ( YOSHINO, Masato )

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：0 0 3 2 4 2 2 8

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 ) : 粘弾性皮膜物体を含む流れの二相系格子ボルツマン法 ( LBM ) を用いて、狭窄部をもつ円管内ポアズイユ流中における赤血球のような双凹面形状物体の挙動解析を行った。物体が狭窄部を通過する際の変形度や物体の速度の時間変化を計算し、正方形ダクト内流れの場合との比較を行った結果、円管内流れの方が物体は狭窄部の影響を若干大きく受け、元の形状に戻るのに時間を要することがわかった。次に、LBM に埋め込み境界法を組み込んだ手法を用いて、T 字管内における円柱状粒子を含む流れの数値解析を行った。粒子の初期位置、出口間の圧力差、粒子径と管径の比が粒子の挙動に与える影響を調べ、各条件による粒子の到達位置を明らかにした。

研究成果の概要 ( 英文 ) : The lattice Boltzmann method ( LBM ) for two-phase flows containing a deformable body with a viscoelastic membrane is applied to the motion of a biconcave disk-shaped body ( e.g., red blood cell ) in a constricted pressure-driven circular pipe flow. Time variations of the deformation index and the axial velocity of the body are calculated in the constricted region. By comparison with the results in a square pipe flow, it is found that the body in the circular pipe flow undergoes a little larger deformation and passes more slowly than in the case of square pipe flow. Next, fluid flows with a circular cylinder in a two-dimensional T-shaped pipe are simulated by the LBM incorporated with an immersed boundary method ( called IB-LBM ). We investigate the effects of the initial position of the cylinder, the pressure difference between the two outlets, and the ratio of the diameter of the cylinder to the width of the pipe on the behavior of the cylinder.

研究分野：数値流体力学

キーワード：固液混相流 粘弾性体 赤血球 複雑流路 狭窄部 T 字分岐管 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

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、 $\mu$ -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クス特有の問題を解決しなければならない。

研究代表者はこれまでに、粘弾性膜をもつ双凹面形状の赤血球モデルを構築し、平行平板間や正方形ダクト内のポアズイコ流中における単一赤血球の挙動解析を行ってきた。しかしながら、今後は実際の血管を想定して流路を円管に拡張することや、単一粒子から複数個の赤血球の挙動解析へと発展させる必要がある。また、直管だけでなく湾曲した流路や分岐部を含む流路内の流れ解析も重要な課題であると考えられる。

## 2. 研究の目的

上記のような背景を踏まえて、本研究では、(1)これまでに開発した混相流解析の計算コードを拡張して、狭窄部を含む円管流路内を流れる単一赤血球（双凹面形状の粘弾性変形物体）の挙動解析、および (2)分岐部もつ流路内における単一および複数個の物体を含む固液混相流解析を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

Inamuro et al. が提案した等密度の液液二相系格子ボルツマン法に、質点ばねモデルに基づく弾性力を組み込んだ研究代表者らの独自の手法によって、粘弾性体（赤血球）と流体を統一的に計算した。また、T字管内における固体粒子を含む流れ解析では、Multi Direct Forcing Method に基づく埋め込み境界法を改良 Lattice Kinetic Scheme（格子ボルツマン法の拡張版である Lattice Kinetic Scheme をさらに改良して計算精度や数値安定性を改善した手法）に組み込んだ手法を用いた。

## 4. 研究成果

(1) 円管内の狭窄部を通過する粘弾性体の挙動解析

図1に示すような中央に狭窄部をもつ円管を考え、赤血球を模擬した双凹面形状の粘弾性物体（以下では単に物体と呼ぶ）が狭窄部を通過する際の挙動を調べた。領域の入口・出口には圧力差 $\Delta p$ を伴う周期境界条件を用いた。また、円管の表面にはすべりなし境界条件を用いた。

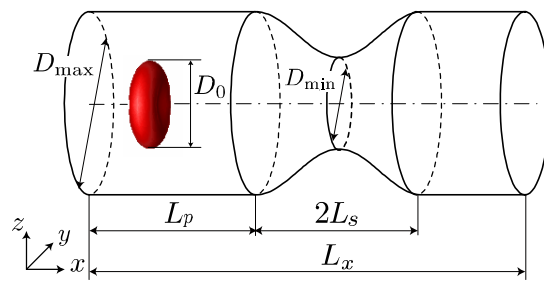


図1 円管内流れの計算領域

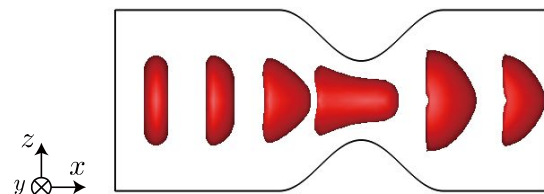


図2 物体が狭窄部を通過する際の挙動

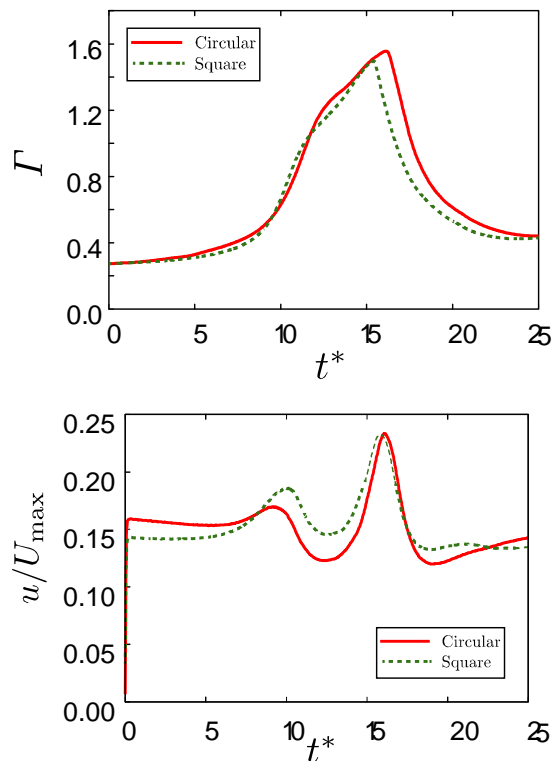


図3 物体の変形度の時間変化（上図）、x方向の流速の時間変化（下図）

まず、物体の終端速度  $U_t$  および長軸の長さ  $D_0$  で定義されるレイノルズ数が  $Re = 6.2 \times 10^{-3}$  の時の物体の挙動を図2に示す。この図から、物体は狭窄部を通過する際に前後方向に長く伸び、通過後は上流側が凹形で下流側が凸形のパラシュート形状で流れる様子がわかる。次に、物体の変形度およびx方向の流速の時間変化を図3に示す（赤色の実線が本結果）。ここで、 $t^* = tU_{max}/D_0$  は無次元時間を表し、 $U_{max}$  は物体が存在しないときのポアズイコ流の最大流速である。また、同図には比較のために、辺の長さが円管の直径と等しい正方形ダクト内流れの場合の結果（緑色

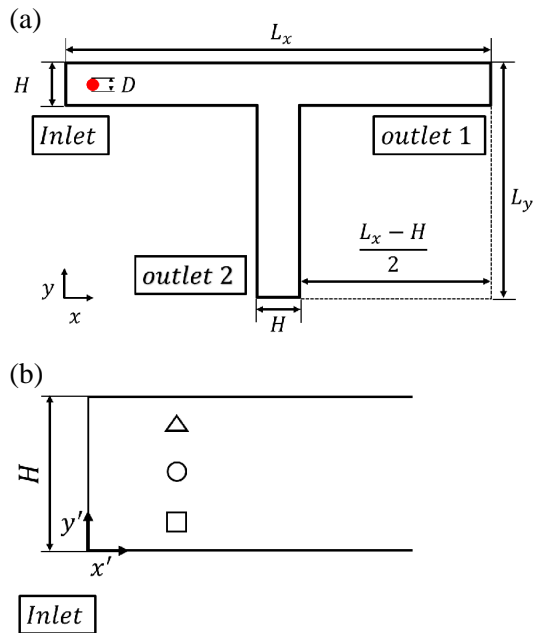


図 4 二次元 T 字管内流れの計算領域  
(a)全体図；(b)粒子の初期位置

の点線)も併記してある。物体は、狭窄部を通過する際に変形度が初期状態の 5 倍程度大きくなることからわかる。一方、流速は、狭窄部に差しかったときにわずかに大きくなり通過中はいったん減速するが、狭窄部を抜け出る際に大きく増加することがわかる。この現象を正方形ダクト内流れの場合と比較すると、大きな違いは見られず傾向はよく似ているが、円管内流れの方が若干変形度は大きく、狭窄部をゆっくり通過することがわかる。したがって、正方形ダクト内流れよりも円管内流れの方が物体は狭窄部の影響を若干大きく受け、元の形状(双凹面形状)に戻るのに時間を要することがわかった。

## (2) 二次元 T 字管内における固体粒子を含む流れの数値解析

図 4 に示すような二次元 T 字管内において、流体が定常的に流れている中に、流体と密度の等しい直径  $D$  の円柱状粒子(以下では単に粒子と呼ぶ)を 1 個配置し、初期位置を変えて運動を開始した場合の粒子の挙動を調べた。計算領域は  $L_x \times L_y = 500\Delta x \times 275\Delta x$ 、入口の幅は  $H = 50\Delta x$  とした。流入口(Inlet)には、流入条件としてポアズイユ流れの速度分布および圧力勾配一定とし、流出流路の出口(Outlet 1)ならびに分岐流路の出口(Outlet 2)では、それぞれ流出条件として速度勾配 0、圧力一定とした。その他の壁面にはすべりなし境界条件を用いた。レイノルズ数は  $Re = U_{in}H/\mu = 100$  とした。ここで、 $\rho$  は流体の密度、 $\mu$  は流体の粘度、 $U_{in}$  は流入口における平均流速である。Outlet 1 および Outlet 2 の圧力をそれぞれ  $p_1, p_2$  とし、その両出口間の無次元圧力差を  $P = (p_1 - p_2)/(\rho U_{in}^2)$  と定義する。

以下では、図 4(b)に示す座標を用いる。時

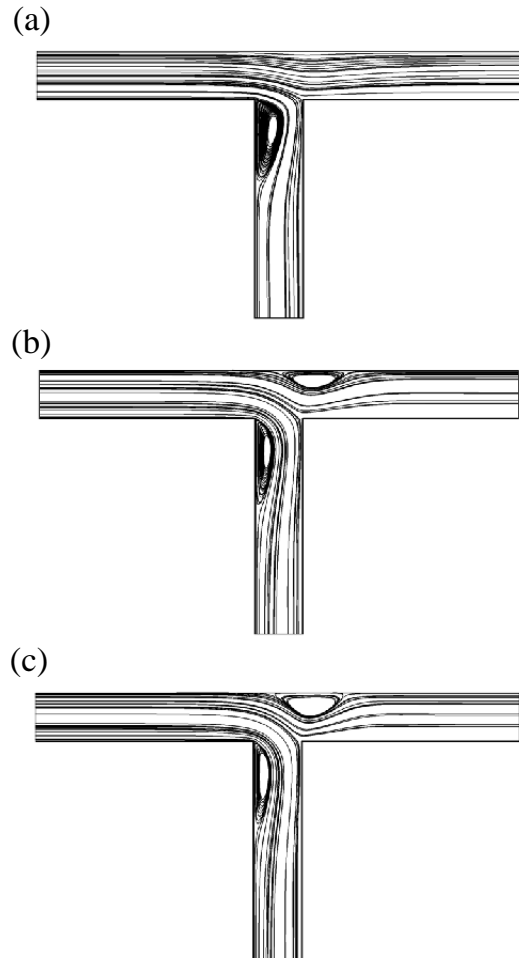


図 5 各無次元圧力差における流線 ( $Re=100$ )  
(a)  $P=0$  ; (b)  $P=0.713$  ; (c)  $P=0.891$

刻  $t=0$  における粒子の初期位置として、 $(x', y') = (0.5H, 0.8H)$ ;  $(x', y') = (0.5H, 0.5H)$ ;  $(x', y') = (0.5H, 0.2H)$  の 3 点を考える。粒子の初期速度を  $\mathbf{U}_p = \mathbf{0}$  とする。流れ場の初期条件は、粒子を配置せずに T 字管内流れを計算した場合の定常に達した流れ場とする。いくつかの無次元圧力差  $P$  に対する流線を図 5 に示す。この図より、 $P$  が増加するにつれて、分岐流路側の渦は徐々に小さくなり、逆に流出流路側には渦が生じ始め、徐々に大きくなることからわかる。これらの条件に対して、両出口間の無次元圧力差および円柱直径と管径の比が粒子の挙動におよぼす影響を調べた。本研究では、 $p_1$  を一定にしたまま  $p_2$  を小さくして  $P$  を変化させた。また、 $H$  を一定とし  $D$  を変えることで、管径比  $D/H$  を変化させた。

なお、図 4(a)に示す T 字管において、入口部分(粒子の助走区間)を延長すると、得られる粒子軌跡とは異なる結果になることが予測される。その理由は、流体と等密度の粒子が管内を流れる場合、Segré-Silberberg 効果により、どの初期位置から出発した粒子も定常状態では管壁と管軸の間のある平衡位置を流れる性質があるため、初期位置による影響が顕著に現れなくなるからである。

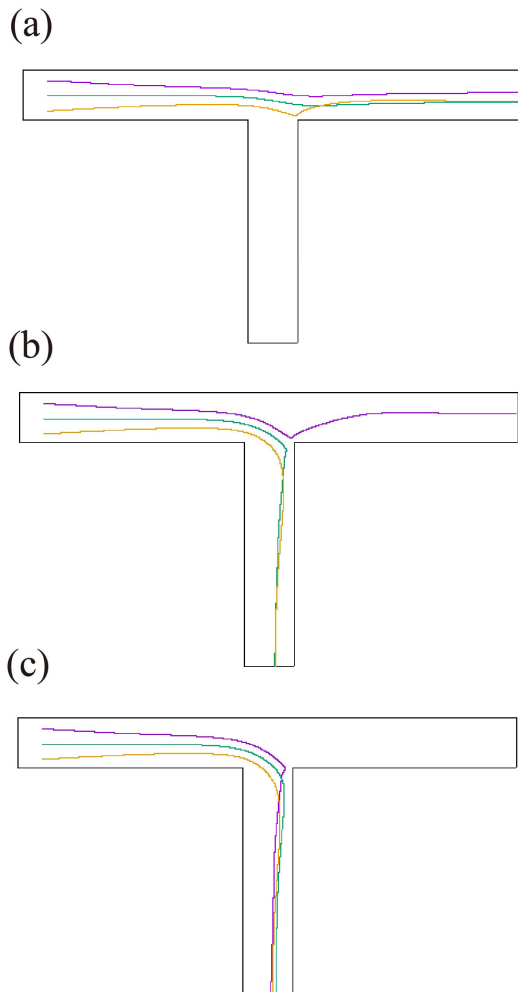


図 6 各初期位置から出発した粒子の軌跡  
( $Re = 100$  および  $D/H = 0.20$ )

(a)  $P=0$  ; (b)  $P=0.713$  ; (c)  $P=0.891$

よって本研究では、粒子が最終的な平衡位置に近づかないうちに分岐部を通過するような T 字管構造を考え、計算対象としていることに注意されたい。

結果の一例として、両出口間の無次元圧力差が粒子の軌跡に与える影響について述べる。管径比を  $D/H = 0.20$  で一定とし、 $P$  を様々に変化させて計算を行った。各無次元圧力差における粒子の軌跡を図 6 に示す。図 6(a) より、初期位置によらず、粒子は分岐部を通過して Outlet 1 へと移動していることがわかる。また、 $P = 0.713$  とした時の粒子の軌跡 (図 6(b)) では、初期位置から動き始めた粒子は分岐部を通過した後、壁に接触してから Outlet 1 へと移動していることがわかる。一方、初期位置が  $y'/H \approx 0.2$  から動き始めた粒子は Outlet 2 へと移動しており、無次元圧力差を大きくすると初期位置によって分離されることがわかる。さらに、 $P=0.891$  とした時の粒子の軌跡 (図 6(c)) では、初期位置によらず、粒子は分岐部を通過後に Outlet 2 へと移動していることがわかる。種々の初期位置と両出口間の無次元圧力

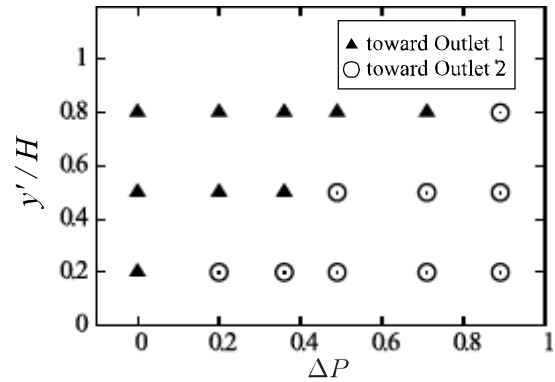


図 7 種々の無次元圧力差に対して各初期位置から出発した粒子が到達した出口の計算結果  
( $Re = 100$  および  $D/H = 0.20$ )

差に対する到達位置のマップを図 7 に示す。

$P$  を少し大きくすることで、管の下部に配置した粒子が Outlet 2 に移動するようになることがわかる。さらに  $P$  を大きくすると、Outlet 2 に移動する初期位置の範囲が広がり、管の上部に配置した粒子でも Outlet 2 に移動するようになることがわかる。

本研究の成果は、分岐部を含む流路内のマイクロスケールの固液混相流解析につながる基礎研究であり、現象の解明のみならず新しい計算手法の開発という意味でもインパクトは大きいと考えられる。今後の展望として、現在、三次元問題への拡張ならびに複数個の粒子の輸送解析を行っており、得られた成果を論文にまとめて投稿する予定である。さらに、複雑な構造をもつ流路への拡張についても重要な課題であると言える。

#### <引用文献>

- T. Inamuro, R. Tomita, F. Ogino, Lattice Boltzmann simulations of drop deformation and breakup in shear flows, Int. J. Mod. Phys. B, Vol.17, Nos.1-2, 2003, 21-26
- T. Murayama, M. Yoshino, T. Hirata, Three-dimensional lattice Boltzmann simulation of two-phase flow containing a deformable body with a viscoelastic membrane, Commun. Comput. Phys. Vol.9, No.5, 2011, 1397-1413
- Z. Wang, J. Fan, K. Luo, Combined multi-direct forcing and immersed boundary method for simulating flows with moving particles, Int. J. Multiphase Flow, Vol.34, No.3, 2008, 283-302
- C. S. Peskin, Flow patterns around heart valves: A numerical method, J. Comput. Phys., Vol.10, No.2, 1972, 252-271
- K. Suzuki, T. Inamuro, An improved lattice kinetic scheme for incompressible viscous fluid flows,



Int. J. Mod. Phys. C, Vol.25, No.1, 2014, 1340017 (9pp)  
 T. Inamuro, A lattice kinetic scheme for incompressible viscous flows with heat transfer, Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A, Vol.360, No.1792, 2002, 477-484  
 G. Segré, A. Silberberg, Radial particle displacements in Poiseuille flow of suspensions, Nature, Vol.189, 1961, 209-210

## 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 7 件)

吉野正人, 白涵夫, 鈴木康祐, 埋め込み境界 - 改良 Lattice Kinetic Scheme を用いた T 字管内における固体粒子を含む流れの数値計算, 計算数理工学論文集, 16 巻, 31-36, 2016, 査読有  
<http://gspsun1.gee.kyoto-u.ac.jp/JASCOME/denshi-journal/16/JA167.pdf>  
 K. Suzuki, I. Okada, M. Yoshino, Accuracy of the laminar boundary layer on a flat plate in an immersed boundary-lattice Boltzmann simulation, J. Fluid Sci. Tech., Vol.11, No.3, JFST0017 (17pp), 2016, 査読有  
 DOI: 10.1299/jfst.2016jfst0017  
 吉野正人, 二相系格子ボルツマン法による混相流シミュレーション, 伝熱 55 巻, 233 号, 73-78, 2016, 査読無  
[http://www.htsj.or.jp/wp/media/2016\\_10.pdf](http://www.htsj.or.jp/wp/media/2016_10.pdf)  
 吉野正人, 小宮山智, 鈴木康祐, Lattice Kinetic スキームに基づく網目構造の多孔体内における流動・伝熱問題の数値計算法, 計算数理工学論文集, 15 巻, 73-78, 2015, 査読有  
<http://gspsun1.gee.kyoto-u.ac.jp/JASCOME/denshi-journal/15/JA1513.pdf>  
 鈴木康祐, 下口拓志, 大庭広輝, 吉野正人, 改良 bounce-back 法を用いた二相系格子 Boltzmann 法に基づく移動固体物体を含む気液二相流の数値計算法, 計算数理工学論文集, 15 巻, 25-30, 2015, 査読有  
<http://gspsun1.gee.kyoto-u.ac.jp/JASCOME/denshi-journal/15/JA155.pdf>  
 吉野正人, 天野慎也, 鈴木康祐, 二相系格子ボルツマン法による T 字型分岐部を流れる粒子の挙動解析, 計算数理工学論文集, 14 巻, 107-112, 2014, 査読有  
<http://gspsun1.gee.kyoto-u.ac.jp/JASCOME/denshi-journal/14/JA1423.pdf>  
 M. Yoshino, S. Katsumi, Lattice Boltzmann simulation of motion of red

blood cell in constricted circular pipe flow, J. Fluid Sci. Tech., Vol.9, No.3, JFST0031 (13pp), 2014, 査読有  
 DOI: 10.1299/jfst.2014jfst0031

[学会発表](計 12 件)

中島紘基, 吉野正人, 鈴木康祐, 二相系格子ボルツマン法を用いた固体壁面上における液滴の衝突挙動解析, TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2017 (TEC17) 第 66 期総会・講演会, 2017.3.14-15, 静岡大学(静岡県浜松市)  
 鈴木康祐, 吉野正人, 応力テンソルの不連続条件を用いた埋め込み境界 - 格子ボルツマン法の提案, 第 30 回数値流体力学シンポジウム, 2016.12.12-14, タワーホール船堀(東京都江戸川区)  
 吉野正人, 白涵夫, 鈴木康祐, 埋め込み境界 - 改良 Lattice Kinetic Scheme を用いた T 字管内における固体粒子を含む流れの数値計算, 日本計算数理工学シンポジウム 2016 (JASCOME symposium 2016), 2016.12.2-3, 呉羽ハイツ(富山県富山市)  
 鈴木康祐, 吉野正人, 応力テンソルの不連続性を用いた新しい埋め込み境界 - 格子ボルツマン法, 日本機械学会 第 29 回計算力学講演会(CMD2016), 2016.9.22-24, 名古屋大学(愛知県名古屋市)  
 飯田峻也, 森口巧海, 吉野正人, 鈴木康祐, 格子ボルツマン法による T 字管内の液液二相スラグ流解析, 日本機械学会 第 29 回計算力学講演会(CMD2016), 2016.9.22-24, 名古屋大学(愛知県名古屋市)  
 松永克樹, 吉野正人, 鈴木康祐, 改良 bounce-back 法を適用した移動境界流れの二相系格子ボルツマン法の妥当性検証, 日本機械学会 第 29 回計算力学講演会(CMD2016), 2016.9.22-24, 名古屋大学(愛知県名古屋市)  
 吉野正人, 二相系格子ボルツマン法による混相流シミュレーション, 第 25 回格子ボルツマン法の基礎と応用に関する研究会, 2016.6.3, 富山大学(富山県富山市)  
 吉野正人, 小宮山智, 鈴木康祐, Lattice Kinetic スキームに基づく網目構造の多孔体内における流動・伝熱問題の数値計算法, 日本計算数理工学シンポジウム 2015 (JASCOME symposium 2015), 2015.12.4-5, 伊勢二見浦 朝日館(三重県伊勢市)  
 鈴木康祐, 岡田伊織, 吉野正人, 埋め込み境界-格子ボルツマン法による平板上の層流境界層の計算精度, 第 13 回日本流体力学会中部支部講演会, 2015.11.20-21 富山大学(富山県富山市)  
 吉野正人, 格子ボルツマン法の基礎と混相流問題への適用について, 第 57 回「乱

流遷移の解明と制御」研究会，  
2015.9.7-8，信州大学（長野県長野市）  
下口拓志，吉野正人，鈴木康祐，名取武  
治，濱田正和，二相系格子ボルツマン法  
を用いたクリームはんだ印刷機内の版離  
れ過程における気液二相流解析，第28回  
数値流体力学シンポジウム，  
2014.12.9-11，タワーホール船堀（東京  
都江戸川区）  
吉野正人，天野慎也，鈴木康祐，二相系  
格子ボルツマン法によるT字型分岐部を  
流れる粒子の挙動解析，日本計算数理工  
学シンポジウム2014（JASCOME symposium  
2014），2014.12.6-7，浅間温泉 和泉荘  
（長野県松本市）

〔その他〕

ホームページ等

信州大学工学部 機械システム工学科 熱  
流体解析研究室

[http://www.mech.shinshu-u.ac.jp/labo  
ratories/r/index.html](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・学術研究院工学系・教授

研究者番号：00324228