

令和 6 年 6 月 23 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03873

研究課題名(和文) 固液相変化を考慮したマイクロなアプローチによる氷スラリー熱流動現象の解明

研究課題名(英文) Elucidation of ice slurry flow with heat transfer by microscopic approach including solid-liquid phase change

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：融解・凝固のための計算モデルを構築し、熱を考慮した埋め込み境界-格子ボルツマン法に組み込むことにより、固液相変化を含む熱流動シミュレーション法を開発した。まず、ステファン問題の計算を行い、有限差分法による参照解との比較から本手法の妥当性を確認した。次に、本手法を用いて多数の球形粒子を含む円管内氷スラリー流の熱流動計算を行い、粒子-粒子間および粒子-壁面間の付着により発生するクラスタが流動特性ならびに熱伝達特性に与える影響や、浮力の効果により氷粒子が円管の半径方向にどのように分布するのかなど、最終的にはマイクロな観点からの熱流動現象について考察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した熱流動計算法は、複雑流れに対してもアルゴリズムが簡単な格子ボルツマン法と、任意形状の境界を扱う問題に対して複雑なメッシュ生成が不要な埋め込み境界法を組み合わせた計算効率の高い手法であり、これに融解・凝固の固液相変化を組み込んだ計算手法はこれまでにあまり例がなく、学術的な意義は大きい。また、固体粒子一つ一つを十分な空間解像度で表現することが可能であることから、氷スラリーのような移動境界を伴う熱流動問題の計算に対して有効である。

研究成果の概要(英文)：We constructed a numerical model for simulation of melting and solidification, and then developed a thermal immersed boundary-lattice Boltzmann method with solid-liquid phase changes. First, using this method, we calculated heat-transfer (Stefan) problems, demonstrating the validity of the method in comparison with a reference solution by the finite-difference method. Next, we applied the method to ice slurry flows in a circular tube, where numerous spherical particles were subjected to the particle-particle and particle-wall adhesion models. We investigated the effects of the aggregated particles (clusters) on the flow characteristics and temperature fields as well as the space-averaged Nusselt number. Also, taking account of buoyancy effect, we computed how the particles were distributed in the radial direction of the tube. Finally, on the basis of these results, we discussed the characteristics of flow and heat transfer from the microscopic point of view.

研究分野：数値流体力学

キーワード：格子ボルツマン法 氷スラリー流 固液二相流 融解・凝固 相変化 平均ヌッセルト数

## 1. 研究開始当初の背景

我々の身の回りには多くのマイクロ混相流現象(気相,液相,固相が混在するマイクロスケールの流れ)が存在し,機械工学や土木工学,化学工学をはじめとする幅広い分野で重要な役割を果たしている.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,燃料電池,マイクロ流体チップ( $\mu$ -TAS),マイクロリアクタ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.

本研究開始当初までに研究代表者らが取り組んできた固液二相流解析では,いくつかの課題が残されていた.例えば,現状の計算コードでは熱を考慮した二相流解析は実行可能であるが,融解・凝固などの固液相変化の解析は行えなかった.また,大規模並列計算用のコードではないため,計算精度や効率の面からも十分とは言えなかった.そのため,固液相変化を含む熱移動モデルの提案を行い,そのモデルを用いて固液相変化を考慮した高精度・高効率な熱流動解析手法を開発・構築することが早急の課題であった.

構築された計算コードのエネルギー分野への応用例として,固液二相流の代表例である氷スラリーの熱流動が挙げられる.氷スラリーとは,微細な氷と液体の固液二相混合物のことである.氷スラリーを含む円管内の流れでは,氷粒子の「移流・回転」,「衝突・合体」,「熱移動」,「融解・凝固」などの現象が見られ,これらを解明することは,熱伝達特性に優れる媒体の選定や新材料の発見・開発にとって非常に重要な課題である.しかしながら,既存の研究は,管壁における摩擦損失や熱伝達特性など巨視的な観点からのものがほとんどであり,固相まわりの局所的な流動場や温度場に基づく微視的な観点から現象メカニズムを解明するにはまだ至っていない.実験的アプローチに関して,例えば,超音波流速分布計や熱線流速計を用いて氷スラリーの流速分布の測定が試みられた研究[ ]もあるが,測定の難しさから壁面付近の急激な速度勾配について十分な測定精度が得られず,満足な議論ができていないと言われている.従って,微視的な観点から氷スラリーの熱流動メカニズムを解明することが課題である.さらに,氷スラリー中の氷粒子径は $\mu\text{m}$ ~ $\text{mm}$ オーダーであるため観測が困難であることに加えて,氷スラリーの生成には大規模な施設が必要であるため,実験ベースの研究ではコストが高い.よって,微視的な観点から氷スラリー流の熱流動メカニズムを解明するには,数値計算によるアプローチが有効である.

近年,非圧縮粘性流体の数値計算法において,熱を考慮した埋め込み境界-格子ボルツマン法(Thermal Immersed Boundary-Lattice Boltzmann Method:熱 IB-LBM)[ ]が開発された.この手法は,アルゴリズムが簡単であり並列計算に適している格子ボルツマン法(Lattice Boltzmann Method:LBM)[ ]と,任意形状の境界を扱う問題に対して複雑なメッシュ生成がなく,アルゴリズムが単純である埋め込み境界法(Immersed Boundary Method:IBM)[ ]を組み合わせた手法であり,また,氷粒子一つ一つを十分な空間解像度で表現することが可能であることから,氷スラリーのような移動境界を伴う熱流動問題に対して有効であると考えられる.

## 2. 研究の目的

計算効率の高い数値解析により,固液相変化を考慮した氷スラリー流の熱流動メカニズムを微視的な観点から解明することを目指した.具体的な内容は次のとおりである.

- ・融解・凝固などの固液相変化を考慮した熱移動解析モデルを開発し,計算効率の高い固液二相系の埋め込み境界-格子ボルツマン法(固液二相系熱 IB-LBM)を確立する.
- ・開発した計算コードを用いて,次世代の熱輸送媒体である氷スラリー(氷と液体の固液二相流)の熱流動シミュレーションを実施する.
- ・数値計算結果をもとに,粒子の空間的位置と熱流束の関係について考察し,固体粒子が含まれることによる熱伝達性能の向上について,そのメカニズムを明らかにする.

## 3. 研究の方法

(1) 熱 IB-LBMにおける融解・凝固モデルの構築と妥当性検証:Huang and Wu[ ]によって提案された手法を参考に,融解・凝固モデルを構築した.本手法のアイデアは,融解・凝固によって生じる体積変化を境界点の法線方向の移動速度を用いて表現する.また,この速度は融解・凝固する体積がもつ融解熱とIBMにおいて境界点が分配する熱量が等しいことから決定されるというものである.この融解・凝固モデルを熱 IB-LBMに組み込んで実装し,ステファン問題の計算結果から手法の妥当性検証を行った.

(2) 円管内氷スラリー流の熱流動シミュレーション:熱 IB-LBM[ ]を用いて多数の球形粒子を含む円管内氷スラリー流の熱流動計算を行い,粒子-粒子間および粒子-壁面間の付着により発生するクラスタが流動特性および熱伝達特性に与える影響や,浮力の効果により氷粒子の空間分布がどのように変化するかなど,微視的な観点からの熱流動現象の解明について考察した.

#### 4. 研究成果

##### (1) 熱 IB-LBM における融解・凝固モデルの構築と妥当性検証：

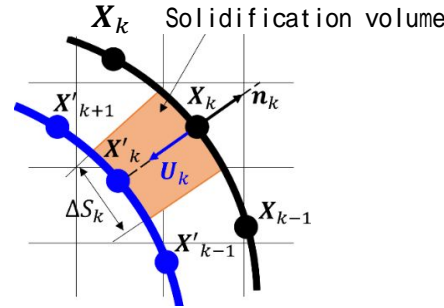


図1 融解における界面の移動と移動速度の定義．

図1に示すように、ある時刻において境界が黒線の位置にあり、 $\Delta t$ 後に凝固によって境界点が速度 $U_k$ で青線へ移動する場合を考える。すなわち、境界点 $X_k$ は $X'_k$ に移動し、凝固体積は橙色の領域となる。このとき、境界点間距離 $\Delta S_k = \Delta V_k / \Delta x$  ( $\Delta x$ : 格子間隔)が十分に小さいため、この領域を長方形で近似する。よって、凝固体積は単位法線ベクトル $n_k$ を用いて表すと、 $V_{\text{solid}} = -(U_k \cdot n_k) \Delta t \Delta S_k$ となるので、この領域が吸収した凝固熱 $Q$ は、

$$Q = \rho_s L V_{\text{solid}} = -\rho_s L (U_k \cdot n_k) \Delta t \Delta S_k \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $\rho_s$ は固相の密度、 $L$ は凝固潜熱である。一方、IBMによって境界点 $X_k$ が周囲に分配した熱量 $Q$ は、分配する単位時間・単位体積当たりの熱量 $q(X_k, t + \Delta t)$ を用いて、

$$Q = -q(X_k, t + \Delta t) \Delta t \Delta V_k \quad (2)$$

となる。式(1)と(2)の熱量は等しいため、これを等置することにより、移動速度は次式となる。

$$U_k = q(X_k, t + \Delta t) \Delta x / (\rho_s L) n_k \quad (3)$$

この融解・凝固モデルを熱 IB-LBM に組み込んで実装し、三次元移動境界問題の計算を行った。一辺の長さが $2D$ の立方体領域があり、その中央に直径 $D$ の球形の固相が配置され、周囲が液相によって満たされている。初期温度は、固相では $T_s = 0$ 、液相では $T_l = 1$ でいずれも一定である。この系において、固相が液相へと変化する融解の計算を行う。流速の境界条件は、全ての壁でゼロノイマン条件を適用し、温度の境界条件は全ての壁を等温条件 ( $T = T_l$ ) とした。固液境界には、すべりなし境界条件および等温境界条件  $T = T_m$  を与え、 $T_m = 1/3$  とした。本問題の支配パラメータは固相のステファン数  $St_s = c_p (T_m - T_s) / L$ 、液相のステファン数  $St_l = c_p (T_l - T_m) / L$  であり、それぞれ  $St_s = 0.15$ 、 $St_l = 0.3$  とした。また、 $c_p = 4.33$ 、 $L = 9.63$ 、 $\rho_s = 1$  とした。

計算結果として、図2に(a)半径方向の温度分布および(b)固液界面の位置の時間変化を示す。図には、有限差分法を用いて計算した参照解も併記してある。これらの図から、両者は良く一致しており、本手法の妥当性を確認することができた。

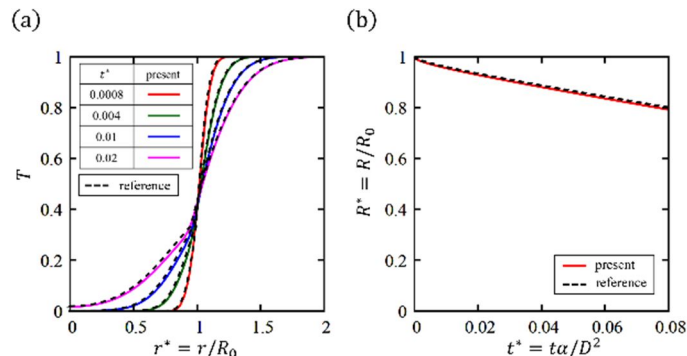


図2 本計算結果と有限差分法の参照解: (a)半径方向の温度分布; (b)固液界面の位置の時間変化．

##### (2) 円管内水スラリー流の熱流動シミュレーション：

図3に示すような計算領域 $L \times H \times H = 150\Delta x \times 150\Delta x \times 150\Delta x$ に直径 $D = 150\Delta x$ の円管を設け、密度 $\rho_f$ の流体中に氷粒子を模した密度 $\rho_p$ 、直径 $d = 15\Delta x$ の球形低温粒子 (温度 $T_p = 0$ ) をランダムに複数個配置し、円管壁面上を等温熱源 (温度 $T_w = 1$ ) とした。領域の入口・出口には、圧力差 $\Delta p$ を伴う周期境界条件を課した。また、Kumano et al. [ ]の実験を参考に、ガリレイ

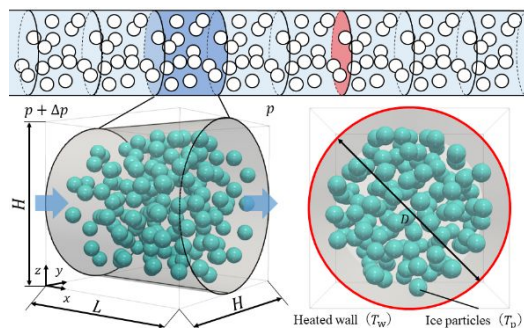


図3 球形の氷粒子を含む円管内スラリー流 .

数  $Ga = (gD^3)/\nu^2 = 6.26 \times 10^5$  , プラントル数  $Pr = \nu/\alpha = 19.2$  , グラスホフ数  $Gr = [g\beta(T_w - T_p)D^3]/\nu^2 = 1.38 \times 10^3$  とした . ここで ,  $g$  は重力加速度の大きさ ,  $\nu$  は動粘性係数 ,  $\alpha$  は温度伝導係数 ,  $\beta$  は体膨張係数であり , 流体にはたらく浮力は , ブジネスク近似を用いて考慮した . また , 断面平均流速  $U_{ref}$  基準のレイノルズ数  $Re = (U_{ref}D)/\nu$  と氷充填率 IPF を変化させてその影響を調べた . なお , 氷粒子密度  $\rho_p$  と流体密度  $\rho_f$  の比は , 実験データを参考に  $\rho_p/\rho_f = 0.92$  としており , 実験と同様に浮力が発生すると考えられる . また , 設定したレイノルズ数を一定にするため , 氷粒子を含んだ定常流れにおける断面平均流速が一定となるように圧力差  $\Delta p$  を制御した . なお , 円管壁面には , すべりなし条件および等温条件を満たすために改良 bounce-back 条件 [ ] を用いた . また 粒子 - 粒子間や粒子 - 壁面間の反発や付着の相互作用を再現するモデルは , Suzuki et al. [ ] が提案したモデルを参考にした .

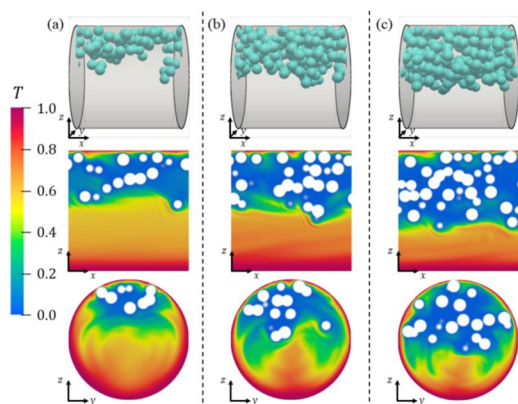


図4 氷粒子分布 (上段) , 出口から見た断面  $x = L/2$  上の温度分布 (中段) , 側面から見た断面  $y = D/2$  上の温度分布 (下段) . レイノルズ数  $Re = 200$  : (a) IPF = 5% ; (b) IPF = 10% ; (c) IPF = 15% .

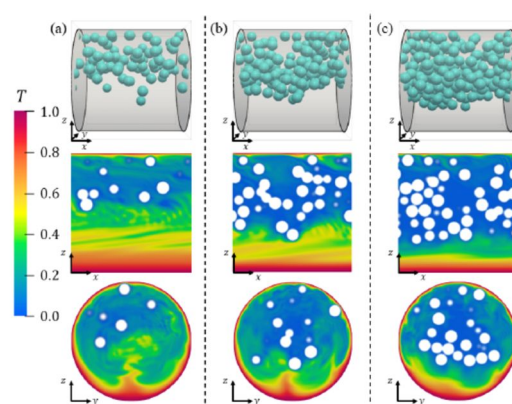


図5 氷粒子分布 (上段) , 出口から見た断面  $x = L/2$  上の温度分布 (中段) , 側面から見た断面  $y = D/2$  上の温度分布 (下段) . レイノルズ数  $Re = 1000$  : (a) IPF = 5% ; (b) IPF = 10% ; (c) IPF = 15% .

計算結果の一例として ,  $Re = 200, 1000$  , IPF = 5.0% , 10% , 15% に対する氷粒子分布および温度分布を図4ならびに図5に示す . まず , レイノルズ数の違いに注目すると ,  $Re = 200$  (図4) では , いずれのIPFでも氷粒子同士の付着により粒子クラスタを形成しており , 浮力の影響により氷粒子が円管壁面上部に集中していることがわかる . また , 温度分布から , 氷粒子が分布していない円管壁面下部の温度境界層は厚くなるのがわかる . 一方 ,  $Re = 1000$  (図5) では , 浮力の効果により氷粒子が円管流路上部に集中するが ,  $Re = 200$  の時と比較すると , 氷粒子は円管流路中心付近を流動していることがわかる . また , 温度分布から , レイノルズ数が高いほど円管壁面下部の温度境界層が薄く保たれていることがわかる .

次に , IPFに注目すると , IPFが高くなるほど粒子クラスタを形成しやすく , 主流方向に長い柱状の粒子クラスタを形成していることがわかる . これは , 円管流路内における氷粒子数が増加したことで , 氷粒子同士が集中しやすくなるためである . また , 温度分布から , IPFが高いほど温度境界層が薄く保たれており , 粒子の総表面積が増加したことや , 粒子クラスタの周りを独立して流動する氷粒子数が増加したことが要因と考えられる .

さらに , 円管内の氷粒子分布を示す . 図6の挿入図に示すように円管断面を5つの領域に分割し , 各領域に球の中心が存在する氷粒子の数を求めた . この図より ,  $Re = 200$  では , 円管壁面付近の領域 (#4 , #5) に多く分布しており , いずれのIPFにおいても同様の傾向が見られた . また , 図(a) IPF = 5%における $Re = 600, 1000$ では , 円管壁面付近の領域 (#5) に多く分布している . これは , 氷粒子が浮力の影響により , 円管壁面上部付近を流動したためだと考えられる .



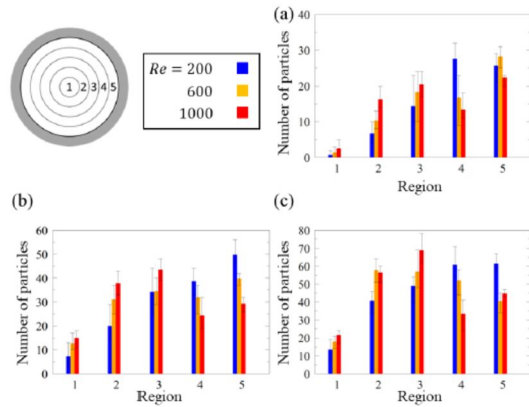


図6 氷粒子数の半径方向分布 . (a)IPF = 5%; (b)IPF = 10%; (c)IPF = 15%;

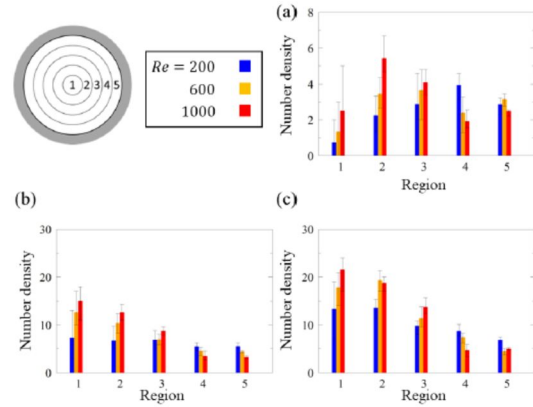


図7 氷粒子密度の半径方向分布 . (a)IPF = 5% (b)IPF = 10%; (c)IPF = 15%;

一方,図(b)IPF = 10%および図(c)IPF = 15%におけるRe = 600,1000では,円管流路中心付近の領域(#2,#3)に多く分布している.これは,Re = 200と比較して,浮力より慣性力の影響が大きいことで,粒子クラスターが円管流路中心付近(#2,#3)を流動したためだと考えられる.

粒子分布に加えて,各領域における数密度の分布を図7に示す.その定義は,各領域#m (m = 1,2,3,4,5)の数密度 = [領域#mの粒子数] × [領域1の面積] / [領域#mの面積]で与えられる. Re = 200では,円管壁面付近の領域(#4,#5)の数密度が増加しており,Re = 600,1000では,円管流路中心付近の領域(#1,#2,#3)の数密度が増加している.また特に,図(b)IPF = 10%および図(c)IPF = 15%ではレイノルズ数が高いほど,ガウス分布に近い形となることわかる.

最後に,粒子間作用に付着・剥離モデル[ ]を適用し,レイノルズ数と氷充填率を変化させたときの計算結果から,以下で定義される円管壁面上の平均ヌッセルト数を計算した.

$$Nu = D(\mathbf{q} \cdot \mathbf{n}_w) / [\lambda(T_w - T_p)] \quad (4)$$

$$\bar{Nu} = \frac{1}{\pi DL} \int_{\text{wall}} Nu \, dS \quad (5)$$

ここで,  $\mathbf{n}_w$ は壁面の単位法線ベクトルであり,壁面上の熱流束 $\mathbf{q}$ を計算することで, $\bar{Nu}$ が求まる.なお,本計算結果の平均ヌッセルト数は,過渡状態後じゅうぶんに時間が経過した時点での時間平均値とした.その結果を図8に示す.この図から,レイノルズ数が高いほど平均ヌッセルト数が増加する傾向があることがわかる.また,IPFが高い場合の方が平均ヌッセルト数は大きくなっている.これは,氷粒子の表面積が増加し,熱伝達が促進されたためだと考えられる.

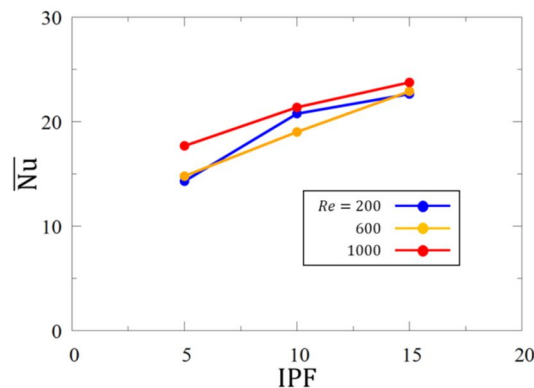


図8 平均ヌッセルト数と氷充填率の関係 .

< 引用文献 >

E. Stamatiou and M. Kawaji, Int. J. Heat Mass Transfer, 48, 2005, 3527 - 3543.  
 K. Suzuki et al., Int. J. Heat Mass Transfer, 121, 2018, 1099 - 1117.  
 稲室隆二ほか, 丸善出版, 2020, ISBN: 978-4-621-30476-1 (176pp).  
 C. S. Peskin, J. Comput. Phys., 10, 1972, 252 - 271.  
 R. Huang and H. Wu, J. Comput. Phys., 277, 2014, 305 - 319.  
 H. Kumano et al., Int. J. Refrig., 41, 2014, 72 - 81.  
 D. Yu et al., Prog. Aerosp. Sci., 39, 2003, 329 - 367.  
 K. Suzuki et al., Comput. Fluids, 228, 2021, 105064 (18pp).  
 A. L. Fogelson and R. D. Guy, Math. Med. Biol., 21, 2004, 293 - 334.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 遠藤円、鈴木康祐、吉野正人	4. 巻 22
2. 論文標題 融解・凝固を考慮した応力テンソルの不連続に基づく埋め込み境界 - 格子ボルツマン法の開発と妥当性検証	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 61-72
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 ENDO Madoka, SUZUKI Kosuke, YOSHINO Masato	4. 巻 17
2. 論文標題 Sensitivity to the application range of buoyancy force in the diffuse-interface immersed boundary method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 JFST0015
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jfst.2022jfst0015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 松本葵、浅岡龍徳	4. 巻 40
2. 論文標題 アイススラリーの流動様相に及ぼす気泡と水溶液濃度の影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本冷凍空調学会論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 原崎太希、浅岡龍徳	4. 巻 40
2. 論文標題 流動するアイススラリー中の氷の凝集によるブロック状流れの発生条件	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本冷凍空調学会論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Suzuki Kosuke, Kuroiwa Takuya, Asaoka Tatsunori, Yoshino Masato	4. 巻 228
2. 論文標題 Particle-resolved simulations of ice slurry flows in a square duct by the thermal immersed boundary - lattice Boltzmann method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computers & Fluids	6. 最初と最後の頁 105064
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2021.105064	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24件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 塩見凌大、吉野正人、鈴木康祐
2. 発表標題 熱を考慮した埋め込み境界 格子ボルツマン法による自然対流を伴う円管内における氷スラリー流の熱流動解析
3. 学会等名 第60回伝熱シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 黒田裕也、鈴木康祐、吉野正人、本間直彦、福井智哉
2. 発表標題 保存型Allen-Cahn 方程式を導入した自由表面格子ボルツマン法の融解・凝固問題への適用
3. 学会等名 第60回伝熱シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 塩見凌大、吉野正人、鈴木康祐
2. 発表標題 埋め込み境界 - 格子ボルツマン法による粒子 - 粒子間および粒子 - 壁面間付着を伴う円管内氷スラリー流の熱流動解析
3. 学会等名 混相流シンポジウム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 塩見凌大、吉野正人、鈴木康祐
2. 発表標題 粒子 - 粒子間および粒子 - 壁面間の相互作用を伴う円管内氷スラリー流の熱流動解析
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 塩見凌大、吉野正人、鈴木康祐
2. 発表標題 円管内氷スラリー流の熱流動シミュレーションと氷粒子クラスタ化現象の解析
3. 学会等名 第37回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 黒田裕也、鈴木康祐、吉野正人、本間直彦、尾中洋次、岸田七海
2. 発表標題 保存型Allen-Cahn 方程式を導入した自由表面格子ボルツマン法による融解・凝固計算
3. 学会等名 第37回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 青柳悠人、鈴木康祐、吉野正人
2. 発表標題 埋め込み境界 - 格子ボルツマン法による融解・凝固を含むステファン問題計算とノイマン解との比較
3. 学会等名 第61回伝熱シンポジウム
4. 発表年 2024年



1. 発表者名 井原啓詞、塩見凌太、川上嵩仁、浅岡龍徳、鈴木康祐、吉野正人
2. 発表標題 矩形ダクト中の氷スラリー流シミュレーションにおける狭窄部にトラップされた粒子挙動
3. 学会等名 第61回伝熱シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中村優花、吉野正人、鈴木康祐
2. 発表標題 円管内氷スラリー流の熱流動解析：氷粒子形状が流動と熱伝達特性に与える影響
3. 学会等名 第61回伝熱シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 塩見凌太、吉野正人、鈴木康祐
2. 発表標題 矩形狭窄部を含む二次元流路内における氷スラリー流の熱流動解析
3. 学会等名 第59回伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川上嵩仁、吉野正人、鈴木康祐
2. 発表標題 矩形狭窄部を含む三次元ダクト内における氷スラリー流の熱流動解析
3. 学会等名 第59回伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠藤円、鈴木康祐、吉野正人
2. 発表標題 応力テンソルの不連続に基づく埋め込み境界 - 格子ボルツマン法の融解・凝固問題への適用
3. 学会等名 第59回伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠藤円、鈴木康祐、吉野正人
2. 発表標題 応力テンソルの不連続に基づく埋め込み境界 - 格子ボルツマン法による融解・凝固を伴う移動境界流れの数値計算
3. 学会等名 混相流シンポジウム2022【オンライン開催】
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉野正人
2. 発表標題 格子ボルツマン法による二相流問題の数値シミュレーション
3. 学会等名 化学工学会 粒子・流体プロセス部会 熱物質流体工学分科会セミナー2022【オンライン開催】（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原崎太希、浅岡龍徳
2. 発表標題 氷スラリーの流動様相に氷の凝集が及ぼす影響
3. 学会等名 2022年度日本冷凍空調学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本葵、浅岡龍徳
2. 発表標題 アイススラリーの流動様相に及ぼす気泡と液相濃度の影響
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠藤円、鈴木康祐、吉野正人
2. 発表標題 応力テンソルの不連続に基づく埋め込み境界 - 格子ボルツマン法を融解・凝固問題へ適用した際の妥当性検証
3. 学会等名 第36回数値流体力学シンポジウム【オンライン開催】
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川上嵩仁、吉野正人、鈴木康祐
2. 発表標題 埋め込み境界 - 格子ボルツマン法を用いた矩形狭窄部を含む正方形ダクト内における氷スラリー流の熱流動解析
3. 学会等名 第36回数値流体力学シンポジウム【オンライン開催】
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠藤円、鈴木康祐、吉野正人
2. 発表標題 埋め込み境界 格子ボルツマン法を用いた融解・凝固を伴う熱流動解析
3. 学会等名 化学工学会 岡山大会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠藤円、鈴木康祐、吉野正人
2. 発表標題 融解・凝固を考慮した応力テンソルの不連続に基づく埋め込み境界 格子ボルツマン法の開発と氷スラリー流れへの応用
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 2023年合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内田涼太，鈴木康祐，吉野正人
2. 発表標題 熱を考慮した埋め込み境界 - 格子ボルツマン法による円管内固液二相流シミュレーション
3. 学会等名 混相流シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kosuke Suzuki, Takuya Kuroiwa, Ryota Uchida, Masato Yoshino
2. 発表標題 Particle-resolved simulations of ice slurry flows by the immersed boundary - lattice Boltzmann method
3. 学会等名 2nd Asian Conference on Thermal Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内田涼太，鈴木康祐，吉野正人
2. 発表標題 熱を考慮した埋め込み境界 - 格子ボルツマン法の円管内における氷スラリー熱流動問題への適用
3. 学会等名 第19回日本流体力学会中部支部講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内田涼太, 鈴木康祐, 吉野正人
2. 発表標題 熱を考慮した埋め込み境界 - 格子ボルツマン法を用いた円管内における氷スラリーの熱流動解析
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Takaji Inamuro, Masato Yoshino, Kosuke Suzuki	4. 発行年 2021年
2. 出版社 World Scientific Publishing Co. Ltd.	5. 総ページ数 172
3. 書名 An Introduction to the Lattice Boltzmann Method: A Numerical Method for Complex Boundary and Moving Boundary Flows	

〔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
研究分担者	鈴木 康祐  (SUZUKI Kosuke)  (10735179)	信州大学・学術研究院工学系・准教授   (13601)	
研究分担者	浅岡 龍徳  (ASAOKA Tatsunori)  (30508247)	信州大学・学術研究院工学系・准教授   (13601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------