

jh170015-NAH

## 熱流動解析のための格子ボルツマン法による超大規模高速 GPU コードの開発と複雑固相界面乱流熱伝達の大規模数値解析

須賀 一彦（大阪府立大学）

**概要** 超大規模 CFD 用超高速 GPU コードの開発を通して複雑固相境界面における乱流・スカラー輸送機構の物理を直接的な数値解析によって明らかにするために、オクツリー型データ構造を持つ局所細密格子法、熱格子ボルツマン法に適用するスカラー境界条件、移動物体周りのリフィル問題を含む境界条件等の要素技術の開発を進めている。これらの手法を導入した汎用 GPU コードを用いて粗面・多孔体界面の乱流熱流動の直接的な数値解析を実施し、複雑固相界面である多孔体界面流れにおいて、界面の透過率・空隙率・透過率異方性といった特徴が乱流・スカラー輸送機構に与える影響を詳細に調査した。さらに、多孔体を用いたヒートシンクを含む流路全体の大规模共役熱流動解析を行って開発した GPU コードのパフォーマンスを確認した。

### 1. 共同研究に関する情報

瀬田 剛：境界条件構築

#### (1) 共同研究を実施した拠点名

東京工業大学

#### (2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

#### (3) 参加研究者の役割分担

- ・大阪府立大学・工学研究科  
須賀 一彦：総括
- ・東京工業大学・学術国際情報センター  
青木 尊之：GPU チューニング技術統括
- ・大阪府立大学・工学研究科  
金田 昌之：熱流動場の解析
- ・大阪府立大学・工学研究科（東京理科大学・理工学部から移動）  
桑田 祐丞：境界条件の構築・解析
- ・東京工業大学・大学院総合理工学研究科  
長谷川 雄大：C++Template によるカーネル生成
- ・東京工業大学・大学院総合理工学研究科  
渡辺 勢也：固体運動と格子ボルツマン法の練成計算
- ・慶応義塾大学・法学部・物理学教室  
小林 宏充：LES モデルの実装
- ・富山大学・理工学研究部

### 2. 研究の目的と意義

本課題の目的は、熱流動解析の LBM（格子ボルツマン法）による超大規模 CFD（計算流体力学）のための高速 GPU コードを開発し、複雑固相界面における乱流・スカラー輸送機構の物理を直接的な数値解析により明らかにすることである。

次世代交通の主役となる電気自動車では、駆動ユニットの高出力コンパクト化に伴い、熱のマネジメント技術が大変重要となっているように、閉空間に閉じ込められた発熱体の冷却に関する解析、即ち複雑領域の熱流動解析が産業機器の最適設計において重要な位置づけにある。同時に実用機器の固体壁は、滑面であることは稀で流体力学的にも粗面であることが大半で、場合によっては透過性も持っている。したがって、そのような非滑面壁近傍のスカラー輸送機構を直接的に数値計算によって解明することは、実用機器の開発にとって大変に意義深いことである。さらには、本研究で進める非滑面壁近傍のスカラー輸送機構を直接的に数値計算によって解明することは、学術的に観点においても大変意義がある。格子ボルツマン法は、有限差分法や有限体積法などの既存スキーマ

ムと比べて、計算コストや精度の面で多くの利点があり、特に次世代の GPU マシンによる熱流体解析手法としては唯一有望な手法ともいえる。しかし、移動境界問題・熱的境界条件などの問題点が存在するのも事実である。当課題により、これらの問題を解決し、格子ボルツマン法による廉価な国産の高精度汎用熱流体 GPU コードを開発することは、我が国の産業界の発展のためにも、非常に意義のあることである。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義  
 研究代表者のグループは、LBM の原理的な手法や LBM による乱流解析に関する研究分野で我が国の研究を牽引してきた。また、研究副代表者の東工大・青木教授は大規模計算 (HPC 分野)、特に近年は GPU コンピューティング研究の第一人者である。共同研究の体制は、LBM の境界条件設定法に詳しい富山大・瀬田准教授や乱流の LES (ラージ・エディ・シミュレーション) モデルにおいて国内外で高い評価を得ている慶応大・小林教授で構成されている。JHPCN の枠組みを使い、熱流体系計算力学分野と HPC 分野の研究者および応用物理系分野の研究者が連携することで始めて Tsubame3.0 において実問題に即した複雑界面の大規模熱流動シミュレーションコードの開発を達成することができている。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

今年度開始のテーマで該当しない。

5. 今年度の研究成果の詳細

A : 多孔体を敷き詰めたチャンネルにおける乱流熱流動解析

LBM による大規模熱流動解析コード開発の計算例題として、複雑固相界面であるモデル多孔体界面における乱流・スカラー輸送機構の物理をラージ・エディ・シミュレーションにより解析した。そこでは、多孔体を下面に

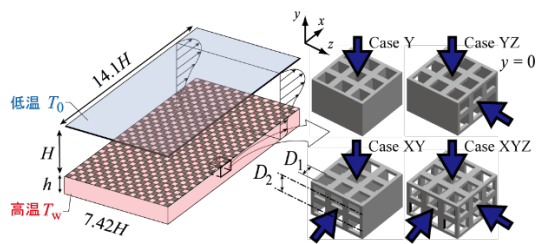


図 1 モデル多孔体チャンネル乱流熱流動の解析系

敷き詰めた乱流熱流動場の解析を行った。これまで、多孔体の透過性が乱流に与える影響は議論されてきたが、実用の多孔体にみられる異方性を持つ多孔体の熱流動に関する知見は皆無であった。

そこで、図 1 に示すような透過率の異方性を持つ 4 つの多孔体を対象とした乱流熱流動解析を行った。Case Y は垂直方向にのみ透過性のある多孔体、Case YX, YZ は垂直方向に加えてそれぞれ主流方向、スパン方向に透過性のある多孔体、Case XYZ は垂直・主流・スパンの全方向に透過性のある多孔体である。すべてのケースで主流方向に対する駆動圧力差を一定として解析を行うことで、同一駆動力における熱流動特性を調査した。上壁・多孔体は温度差を付けた一定温度と設定することで、上壁により冷却された流体が高温の多孔体を冷却する系を模擬した。摩擦レイノルズ数は 130 程度であり、計算領域  $14H(x) \times H(y) \times 4.2H(z)$  に対して、計算格子  $1368(x) \times 170(y) \times 720(z)$  (総格子点数 1.7 億点) として解析を行った。なお、速度場の解析は D3Q27 多緩和時間格子ボルツマン法を、温度場は正規化熱格子ボルツマン法を用いた。

計算領域は主流方向に対して 1 次元的に分割しており、それぞれの領域には袖領域を設定した。LBM の解析はすべて GPU を用いて解析しており、IO と領域間 MPI 通信の際のみにデバイス-ホスト通信を行っている。また、袖領域の MPI 通信を行っている間に、内部領

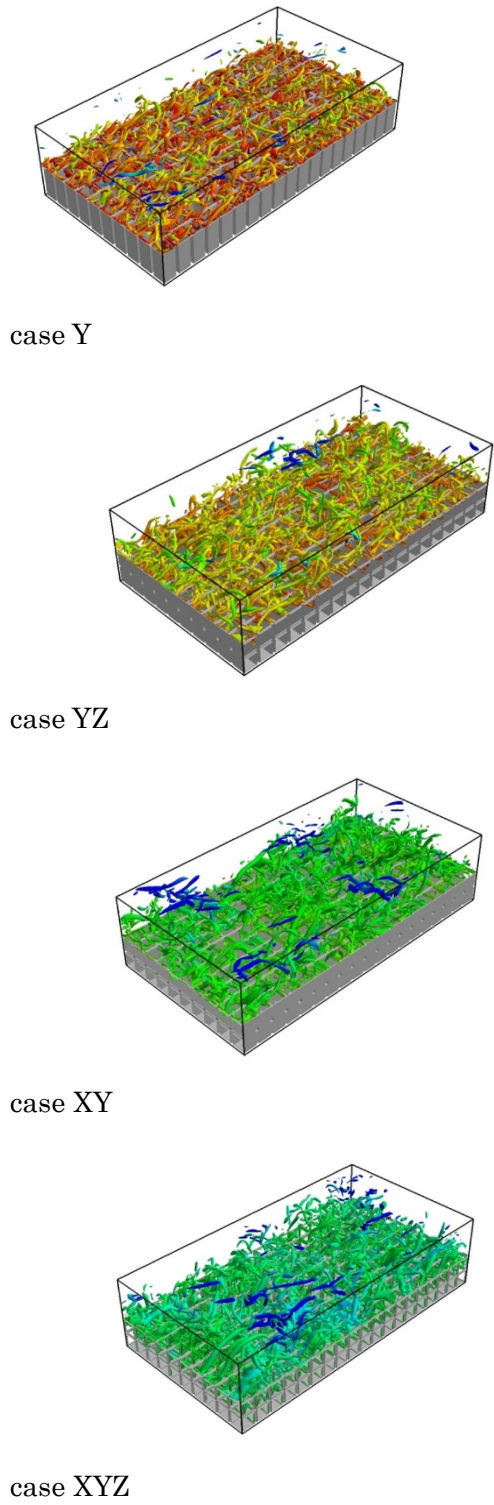


図 2 多孔体上部の乱流渦構造の可視化(速度勾配テンソルの第二不変量の等値面). コンタナーの赤は高温, 青は低温を表す.

域の計算を行うことで, 通信時間の隠蔽化をはかっている. スレッド・ブロックの配置や数は試行錯誤的に最適化し, 格子ボルツマン法の衝突演算に使用する行列をコンスタントメモリなどの高速なオンチップメモリに乗せるなどして, カーネル全体の最適化をおこなった.

計算結果の一例を図 2 に示す. 乱流渦の可視化を行うために, 速度勾配テンソルの第二不変量の等値面を示した. コンタナーは無次元化した温度を示しており, 赤が高温, 青が低温を表す. 壁面垂直方向の透過性のみがある多孔体(case Y), 垂直方向とスパン方向に透過性のある多孔体(case YZ)上では, 流体温度が全体的に高くなっており, 高温の多孔体の熱が流体によって十分に冷却されていない様子が確認できる. いっぽう, 主流方向に透過性のある多孔体(case XY case XYZ)上では, 流体温度は全体的に低くなっており, 多孔体の熱が流体によって十分に冷却され, 系全体の平均温度が低下した結果, 主流方向の透過性のある多孔体上には活発な乱流渦運動に加えて, ケルビン-ヘルムホルツ不安定性の起因する大規模なロール渦が存在し, 多孔体内への流体の潜り込みや湧き出しが活発に行われることが明らかになった. このような活発な流体運動のために, 熱伝達性能が大きく向上していると考えられる.

次に系全体の熱伝達性能を定量化するために, 図 3 に平均スタントン数を示す.

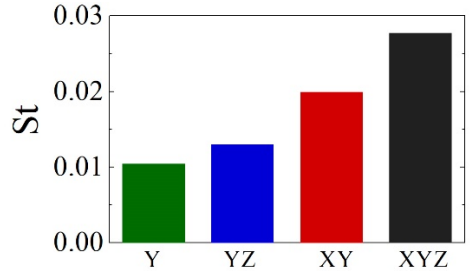


図 3 系全体の平均スタントン数の比較

壁面垂直方向に加えてスパン方向に透過性のある多孔体(case YZ)では, 垂直方向のみに透過性のある多孔体(case Y)に比べて, スタントン数は 30%程度しか上昇していない. そのいっぽう, 主流方向に透過性のある多孔体(case XY XYZ)は, Case Y に比べて 2 倍近くスタントン数が上昇していることが確認できる. この結果からも, 主流方向に透過性のある多孔体は熱伝達性能が極めて高くなることが確認できる.

### B: ヒートシンク周りの乱流熱流動解析

熱流動解析の汎用コードのパフォーマンスを確認するために, 多孔体を活用したヒートシンク全体の共役熱流動解析を行った. 対象とした熱交換器は, 高さ  $2H$ , 幅  $H$  の矩形ダクトの下半分にアルミ製の多孔体を敷き詰めて, 多孔体の最下面にある熱源を流体により冷却するシステムである. 冷却水には水, 多孔体はアルミニウム材質であると仮定して, 物性値を定めた. 多孔体構造は, アルミ角棒をくみ上げた構造となっており, その空隙率は 0.7, 入口流速を用いたレイノルズ数 3800 と設定し, 計算領域  $5H(x) \times 2H(y) \times H(z)$  に対して, 計算格子  $520(x) \times 196(y) \times 104(z)$  (総格子点数 0.11 億点)として解析を行った. 上壁・多孔体の最下壁は温度差を付けた等温条件, ダクト側壁を断熱境界とし, 入口出口で圧力差をつけた周期境界条件を

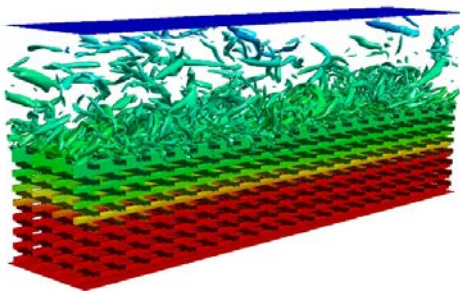


図 4 アルミヒートシンクを設置したダクト内の共役熱流動解析. コンターの赤は高温, 青は低温を表す.

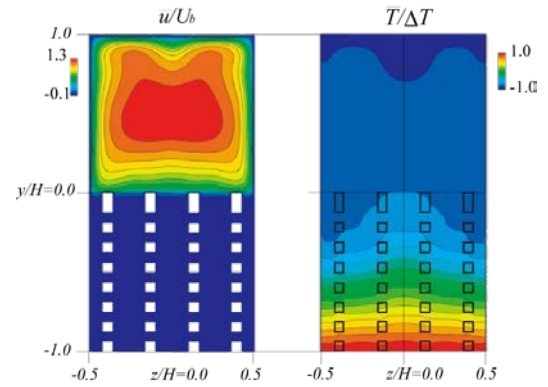


図 5 ダクト断面内の主流平均速度分布と平均温度分布. 左: 速度場, 右: 温度場

適用した. なお, 多孔体部分に関しては全体を等温条件とするのではなく, LBM を用いて, 非定常の熱伝導方程式を解いている.

図 4 に計算結果の可視化図を示す. 乱流渦を可視化するために, 速度勾配テンソルの第二不変量の等値面を示している. コンターは無次元化した温度を示しており, 赤が高温, 青が低温を表す. 最下面の熱が多孔体の上部へと伝導しているが, 多孔体上部では流体温度は全体的に低くなっている様子が確認でき, ダクト流路上部の乱流渦によって活発に熱輸送が行われており, 多孔体の熱が十分に冷却されていることが分かる.

図 5 にダクト断面内における主流平均速度分布と平均温度分布を示す. 主流方向速度はバルク速度  $U_b$  で, 平均温度は上下壁の温度差  $\Delta T$  で無次元化したものを示している. 主流平均速度はプラントル第二種二次流れの影響でダクト角部に引っ張られるような形状を示す. このような形状は多孔体界面近傍 ( $y/H=0$ ) に比べて, 滑面 ( $y/H=1$ ) 近傍で顕著にみられることが分かる. 図 5 右の平均温度場より, 多孔体深部では熱伝導によって熱が伝わるが, 多孔体界面近傍では二次流れの影響を受けて, ダクト中心 ( $Z/H=0$ ) に向かって高温部が引っ張られるような分布を持つことが明らかになった.



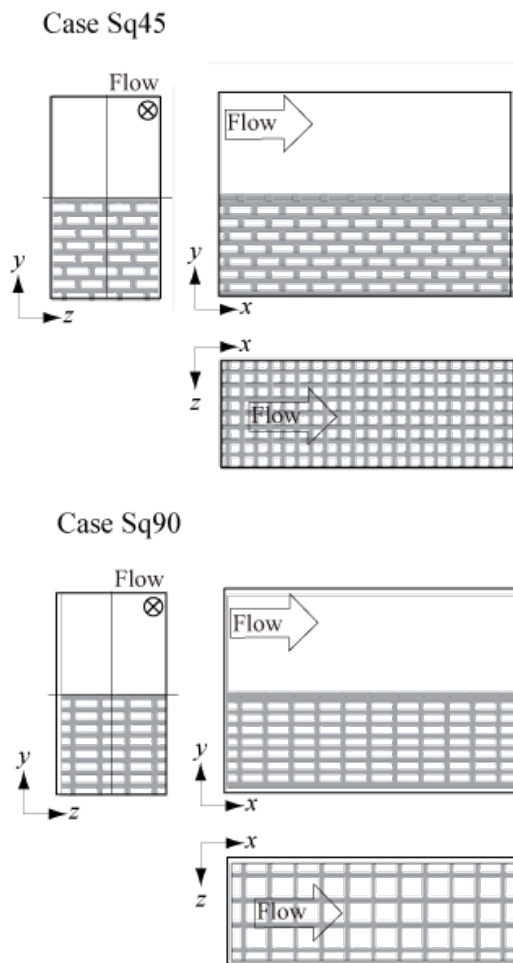


図 6 構造の異なるアルミヒートシンクの模式図

つぎに、アルミヒートシンクの構造の違いが、熱交換器の性能に及ぼす影響を評価するために、図 6 に示すように組み方の異なる 2 つのアルミヒートシンクの流動抵抗と熱伝達性能をそれぞれ平均摩擦係数、平均ヌセルト数を比較することで評価した。Sq45 はアルミ角棒が互い違いとなるように並べられているが、Sq90 ではひとつの列に並ぶように配置されている。2 つの多孔体を敷き詰めたダクト乱流解析を行った結果、2 つの構造の多孔体を用いた際の熱伝達性能の差は 3 % 程度であったが、Sq90 は Sq45 に比べて摩擦係数が 35 % ほど小さくなる結果が得られ、ひとつの列に並ぶように配置された Case Sq90 の多孔体は、Sq45 に比べて流動抵抗を減らしつつ効率よく熱伝達が行えることが分かつ

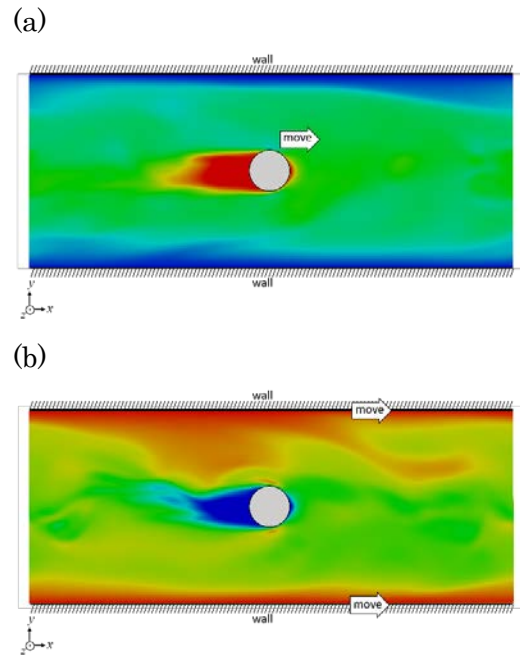


図 7 矩形ダクト内の球体周りの乱流解析: (a) 移動球体周りの解析, (b) 静止球体周りの解析

た。

### C : 移動する固体物体の壁面境界条件の検討

熱流動解析の汎用的なコードを開発するための一環として、移動物体の壁面境界条件の開発を行った。移動物体周りの流動解析を固定座標系において行う際には、物体の移動計算の前後で流体ノードが固体物体ノードに変化する場所/固体ノードが流体ノードに変化する場所が存在し、これらの取り扱いが問題（リフィル問題）となる。これまで、格子ボルツマン法の Bounce-Back 法と組み合わせた手法では、新たに出現した流体ノードは、複雑な補間計算を行うことで分布関数が決定されるが、これにより数値振動が生まれることなどが知られている (Luo et al., JCP 184(2) 406-421)。本研究では、補間計算を行う代わりに、格子ボルツマン法の分布関数をテイラー級数展開することで、移動境界近傍に新たに現れる流体ノード、固体に飲み込まれる流体ノードに対して適切に境界条件を

与える手法を開発した。手法の評価のために、図 7 に示す 2 種類の系における解析を行った。1 つは、周囲のダクト壁は停止しており、球体が移動する系 (図 7 (a))、もう一方は、球体は静止しているが、周囲のダクト壁が移動する系 (図 7 (b)) となっている。これらの 2 つの系はガリレイ変換を行うと物理的には同一の流れ場となり、正しい計算スキームで解析を行うと、抗力係数等は同一の値をとる。今回は簡単な手法評価のために、ダクト一辺を 125 格子とした比較的小さな解析系を対象としている。球直径を基にしたレイノルズ数は 1 0 0 0 としており、D3Q27MRT LBM GPU コードを用いて解析を行った。

図 8 に抗力係数の時間履歴を示す。比較のために、Luo らの提案した既存手法による結果も載せた。流れ場は乱流となっており、抗力は時間に対して大きく変動していることが分かる。本研究で開発した手法の平均抗力係数は、Luo の手法による結果、球体が静止しているケース (stational) の結果と比べてもわずかに過小評価してしまっている。いっぽう、本研究で開発した手法で得られた抗力の分散値は、球体が静止している系の結果と近い値が得られていることが確認できる。

次に、抗力変動の特徴を詳細に調べるために、図 9 に抗力係数のエネルギースペクトルを示す。3 つの手法とも低周波数領域における結果はほぼ完璧に一致しているが、無次

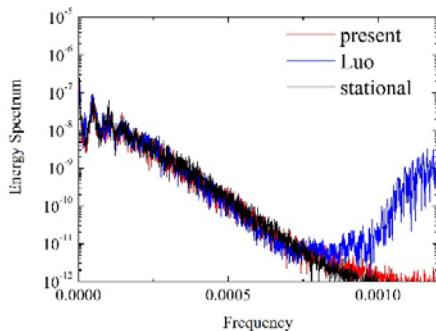


図 8 抗力係数のエネルギースペクトル

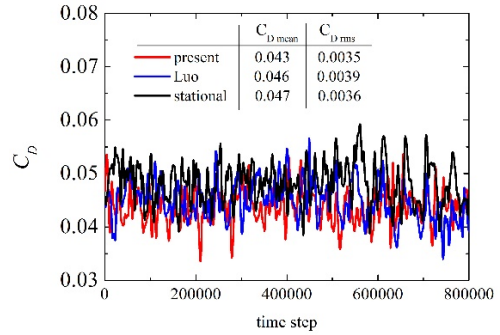


図 9 抗力係数の時間履歴

元周波数が 0.0075 を超える領域では、Luo の手法はエネルギースペクトルの増加がみられる。これは、非物理的な数値振動に起因していると考えられ、これによって抗力係数の分散値は、球が静止している系の結果に比べて、大きくなってしまったと考えられる (図 8)。このような非物理的な数値振動は、開発した手法では完全に取り去ることができていることが確認できる。

## 6. 今年度の進捗状況と今後の展望

今年度は共役熱流動解析汎用 GPU コードの開発と開発途上のコードを用いて、多孔体界面の乱流熱流動の直接数値解析を行うことで、物理現象の解明も進め、多孔体構造と熱輸送の相関関係について調べた。また、汎用コードのパフォーマンスを確認するために、多孔体を用いたヒートシンクのシステム全体の共役熱流動解析を行った。さらに、解析コードの汎用性を上げるために、移動物体周りの壁面境界条件の開発を行い、既存手法にみられるような数値振動の影響を抑える手法を開発することができた。それらでは、解析効率向上のため、コードに多階層の局所細密格子法を実装した。今年度は熱流動解析 LBM のプログラムコード構築とともに、複雑固相界面における乱流—スカラー輸送機構を直接的な数値解析により明らかにすることができたという点で、当初の目標を十分達成でき

たと言える。

今後は、汎用コードのさらなる高速化を実現するために、オクツリー型のデータ構造を用いて局所細密格子法を実装する。そのほかに、開発した移動境界法を用いて、粗さをもつ内壁を回転させる 2 重円筒乱流解析を行い、開発したコードの性能を実証する必要がある。

## 7. 研究成果リスト

### (1) 学術論文

1. K. Suga, R. Chikasue, Y. Kuwata, Modelling turbulent and dispersion heat fluxes in turbulent porous medium flows using the resolved LES data, Int. J. Heat Fluid Flow, vol.68 (2017) 225-236.
2. N. H. Ahmad, A. Inagaki, M. Kanda, N. Onodera, T. Aoki, Large-Eddy Simulation of the Gust Index in an Urban Area Using the Lattice Boltzmann Method, Boundary-Layer Meteorology, 163(2017) 447-467.
3. T. Takaki, R. Rojas, S. Sakane, M. Ohno, Y. Shibuta, T. Shimokawabe, T. Aoki, Phase-field-lattice Boltzmann studies for dendritic growth with natural convection, J. Crystal Growth, 474(2017) 146-153.
4. S. Sakane, T. Takaki, R. Rojas, M. Ohno, Y. Shibuta, T. Shimokawabe, T. Aoki, Multi-GPUs parallel computation of dendrite growth in forced convection using the phase-field-lattice Boltzmann model, J. Crystal Growth, 474(2017) 154-1591.
5. 青木尊之: GPU による粉体・混相流の大規模シミュレーション, 化学工学 特集「大規模流動解析 on HPC」, Vol.81, No.5 (2017)232-235.
6. T. Seta, T. Uchiyama, N. Takano, Smoothed profile-lattice Boltzmann method for non-penetration and wetting boundary conditions in two and three dimensions, Comput. Fluids, 159(2017) 64-80.
7. T. Seta, K. Hayashi, A. Tomiyama, Analytical and

numerical studies of the boundary slip in the immersed boundary-thermal lattice Boltzmann method, Int. J. Numer. Methods Fluids, 86(2018) 454-490.

### (2) 国際会議プロシーディングス

1. K. Suga, Y. Kuwata, A lattice Boltzmann method for turbulent flow simulations, Proc. Direct and Large-Eddy Simulation 11, Pisa, Italy (2017).
2. Y. Kuwata, Y. Kawaguchi, Lattice Boltzmann direct numerical simulation of turbulence over resolved and modelled walls with irregularly distributed roughness, Proc. 10<sup>th</sup> Int. Symp. Turbulence and Shear Flow Phenomena, Chicago, U. S. A, (2017).
3. H. Kobayashi, Improvement of SGS model using analysis of SGS force and SGS Energy transfer, Proc. 10<sup>th</sup> Int. Symp. Turbulence and Shear Flow Phenomena, Chicago, U. S. A, (2017).
4. Y. Kuwata and Y. Kawaguchi, Lattice Boltzmann direct numerical simulation of turbulence over randomly distributed hemispheres, Proc. 16<sup>th</sup> European Turbulence Conference, 21-24, Stockholm, Sweden (2017).
5. T. Shimokawabe, T. Endo, N. Onodera, T. Aoki, A Stencil Framework to Realize Large-Scale Computations Beyond Device Memory Capacity on GPU Supercomputers, Proc. 2017 IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER) Hawaii, U. S. A. (2017).
6. S. Watanabe, T. Aoki, Y. Hasegawa: A large-scale LBM-DEM simulation based on direct calculation of fluid-solid interactions using multiple GPUs, Proc. COUPLED PROBLEMS, Rhodes Island, Greece (2017).
7. Y. Hasegawa, T. Aoki: Lattice Boltzmann

- Simulations Coupled with Octree-based Locally-refined Mesh using Space-filling Curves, Proc.COUPLED PROBLEMS, Rhodes Island, Greece (2017).
8. S.Watanabe, T. Aoki, Y.Hasegawa: Large-Scale Simulations For Multiphase Flows By Coupled LBM-DEM Using Multiple GPUs, Proc.DSFD2017, Erlangen, Germany, (2017).
  9. T.Aoki: Large-scale Multiphase Flow Simulations on a GPU Supercomputer, Proc.The 24th National Computational Fluid Dynamics Conference, Hsinchu, Taiwan, (2017).
  10. S. Watanabe, T.Aoki, Y.Hasegawa: Large-scale Simulations for Fluid-particle Systems Using Coupled LBM-DEM on a GPU Supercomputer, Proc. PARTICLES2017, Hannover, Germany, (2017).
  11. Y. Hasegawa, T.Aoki: An Octree-Based AMR Lattice Boltzmann Method for Multi-GPU Aerodynamics Simulations, Proc.SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP18), (2018).
  12. Y. Nishiyama, Y. Kuwata, K. Suga, Lattice Boltzmann turbulent heat transfer LES of flows over porous interfaces, Proc. ASCHT2017, Chennai, India, Paper No.73(2017)
  13. T. Seta, T. Uchiyama, N. Takano: Numerical Study of Wall Wettabilities by Immersed Boundary-Lattice Boltzmann Method, Proc. Third International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering, 267-272, Toyama, Japan (2017).
- (3) 国際会議発表
1. K. Suga, Y. Kuwata, A lattice Boltzmann method for turbulent flow simulations, Direct and Large-Eddy Simulation 11, Pisa, Italy (2017.5).
  2. T. Seta, T. Uchiyama, N. Takano: Numerical Study of Wall Wettabilities by Immersed Boundary-Lattice Boltzmann Method, Third International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering, Toyama, Japan (2017.5).
  3. S.Watanabe, T.Aoki, Y.Hasegawa: A large-scale LBM-DEM simulation based on direct calculation of fluid-solid interactions using multiple GPUs, COUPLED PROBLEMS 2017, Rhodes Island, Greece, (2017.6).
  4. Y.Hasegawa, T.Aoki: Lattice Boltzmann Simulations Coupled with Octree-based Locally-refined Mesh using Space-filling Curves, COUPLED PROBLEMS 2017, Rhodes Island, Greece, (2017.6).
  5. S.Watanabe, T. Aoki, Y.Hasegawa: Large-Scale Simulations For Multiphase Flows By Coupled LBM-DEM Using Multiple GPUs, DSFD2017, Erlangen, Germany, (2017.7).
  6. Y.Kuwata, Y. Kawaguchi, Lattice Boltzmann direct numerical simulation of turbulence over resolved and modelled walls with irregularly distributed roughness, 10<sup>th</sup> Int. Symp. Turbulence and Shear Flow Phenomena, Chicago, U.S.A, (2017.7).
  7. H. Kobayashi, Improvement of SGS model using analysis of SGS force and SGS Energy transfer, 10<sup>th</sup> Int. Symp. Turbulence and Shear Flow Phenomena, Chicago, U.S.A, (2017.7).
  8. T.Aoki: Large-scale Multiphase Flow Simulations on a GPU Supercomputer, The 24th National Computational Fluid Dynamics Conference, Hsinchu, Taiwan, (2017.8) **(Keynote)**
  9. Y.Kuwata and Y. Kawaguchi, Lattice Boltzmann direct numerical simulation of turbulence over randomly distributed



- hemispheres, 16th European Turbulence Conference, Stockholm, Sweden (2017.9).
10. T. Shimokawabe, T. Endo, N. Onodera, T. Aoki, A Stencil Framework to Realize Large-Scale Computations Beyond Device Memory Capacity on GPU Supercomputers, 2017 IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER) Hawaii, U.S.A. (2017.9).
  11. S. Watanabe, T. Aoki, Y. Hasegawa: Large-scale Simulations for Fluid-particle Systems Using Coupled LBM-DEM on a GPU Supercomputer, PARTICLES2017, Hannover, Germany, (2017.9).
  12. Y. Nishiyama, Y. Kuwata, K. Suga, Lattice Boltzmann turbulent heat transfer LES of flows over porous interfaces, ASCHT2017, Chennai, India, (2017.12).
  13. Y. Hasegawa, T. Aoki: An Octree-Based AMR Lattice Boltzmann Method for Multi-GPU Aerodynamics Simulations, SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP18), Tokyo, (2018.3).
- (4) 国内会議発表**
1. 岩崎颯, 青木尊之, 渡辺勢也, 長谷川雄太: 格子ボルツマン法を用いたイルカのフリースイミングの数値解析, 第 22 回計算工学講演会, 大宮, (2017.5).
  2. 渡辺勢也, 青木尊之, 長谷川雄太: 流体-粒子間相互作用の直接計算に基づく非球形粒子を含む流動層シミュレーション, 第 22 回計算工学講演会, 大宮, (2017.6).
  3. 長谷川雄太, 青木尊之: 適合細分化格子を用いた格子ボルツマン法の複数 GPU による大規模計算, 第 22 回計算工学講演会, 大宮, (2017.6).
  4. 渡辺勢也, 青木尊之, 長谷川雄太, 松下真太郎: 自由界面流れと固体粒子の連成シミュレーション, 混相流シンポジウム 2017, 東京, (2017.8).
  5. 瀬田剛, 内山知実, 高野登: Smoothed Profile-Lattice Boltzmann Method による濡れ性解析, 混相流シンポジウム 2017, 東京, (2017.8).
  6. 西山悠大, 桑田祐丞, 須賀一彦, 格子ボルツマン法を用いた多孔体界面の熱流動 LES, 日本流体力学会 年会講演会 2017 (2017.8).
  7. 2. 渡辺勢也, 青木尊之, 長谷川雄太, 松下真太郎, Phase-field 法による界面捕獲手法を用いた自由界面流れと固体粒子の連成解析, 日本機械学会 第 30 回計算力学講演会, 近大 (2017.9).
  8. 長谷川雄太, 青木尊之, 適合格子細分化法を導入した格子ボルツマン法の複数 GPU 計算による非圧縮流れの空力解析, 日本機械学会 第 30 回計算力学講演会, 近大(2017.9).
  9. 小野洋祐, 杉本 真, 金田昌之, 須賀一彦, Phase Field LBM による多孔体表面から内部へ移動する液滴の挙動, 日本機械学会 第 30 回計算力学講演会, 近大(2017.9).
  10. 岩崎颯, 青木尊之, 渡辺勢也, 長谷川雄太: 格子ボルツマン法によるイルカのフリースイミングのシミュレーション, 第 30 回 計算力学講演会, 近大(2017.9).
  11. 長谷川雄太, 青木尊之: 適合格子細分化法を導入した格子ボルツマン法による複雑形状物体周りの流れの複数 GPU 計算, 第 31 回 数値流体力学シンポジウム (CFD2017), 京都, (2017.12).
  12. 渡辺勢也, 青木尊之, 長谷川雄太: 格子ボルツマン法を用いた浮遊物体を含む自由界面流れのシミュレーション, 第 31 回 数値流体力学シンポジウム (CFD2017), 京都, (2017.12).
  13. 瀬田剛, 林公祐, 富山明男: 反復計算に基づく埋め込み境界-熱流動格子ボルツマン法の提案, 第 31 回 数値流体力学シンポジウム (CFD2017), 京都, (2017.12).
  14. 津田航志, 桑田祐丞, 須賀一彦, 格子ボルツマン法による多孔体乱流の熱流動 LES, 日本機械学会 関西支部第 93 期定時総会講演会, 摂南

大, (2018.3).

(5) その他（特許, プレス発表, 著書等）

なし