

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560238

研究課題名(和文) 固気混相熱流動のためのメニーコアプロセッサを用いた超高速解析エンジンの開発

研究課題名(英文) Development of Super Fast Analysis Engine for Solid-gas Two-phase flow by Many Core Processors

研究代表者

山口 朝彦 (YAMAGUCHI, Tomohiko)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00284711

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：固気混相流の熱流動現象の数値シミュレーションのために、メニーコアプロセッサなどによる並列計算と相性の良い離散要素法(DEM)-格子ボルツマン法(LBM)ハイブリッド法による高速計算エンジンを作成した。また、連続相として気液二相流を考慮できるように、境界の計算方法に改良を加えたLBMによる気液の密度差の大きい非熱非混合気液二相流の数値シミュレーションプログラムを作成した。現在の高速計算機はメニーコアプロセッサによるものであるが、DEMの分散相の計算が並列化に向いているのに対して、連続相の計算はオイリアンであり並列化に難があるため、並列計算に適したLBMを連続相の計算に用いる方法を提案した。

研究成果の概要(英文)：The hybrid numerical model composed of Discrete Element Method (DEM) and Lattice Boltzmann Model (LBM) has been proposed and developed to analyse solid-gas two-phase flows effectively by parallel computers which are driven by many core processors. In addition, athermal LBM for immiscible liquid-gas two-phase flow with large density difference has studied and modified in order to be implemented into DEM-LBM hybrid model and extend this numerical method to the simulation of the granular or powder flows in liquid-gas two-phase flow. Though the calculation method for dispersed phase in DEM adapts to parallel computing, the computation models for continuous phase have some difficulties to fit the parallel computing because of its Eulerian characteristics. The finite difference methods for continuous phase have been replaced by a lattice Boltzmann model which adapt to parallel computing well.

研究分野：熱工学

キーワード：Solid-gas Two-phase Flow Discrete Element Method Lattice Boltzmann Model Parallel Computing Many Core

1. 研究開始当初の背景

(1) 固体微粒子を含む流れの熱流動現象は複雑で、測定が困難であるため、物理現象の解明にはコンピュータシミュレーションが不可欠である。粉体の数値シミュレーションには、粉体の流れを流体とみなす二流体モデルと、粉体を分散相とみてラグランジアンで扱い、流体を連続相としてみてオイラレンで扱う **Discrete Element Method (DEM)** があるが、近年のコンピュータ性能の向上と、複雑な現象をよく再現できるという理由から後者の **DEM** がよく使われるようになった^{①②}。しかし、**DEM** ではコンピュータのメモリ容量と計算時間のために扱える粒子数が限られるのが現状である^③。

(2) 一方、近年の高速コンピューティングは、演算プロセッサ単体の性能の向上よりも、メニーコアプロセッサに代表されるように、並列計算がトレンドとなっている。並列コンピュータの分散メモリと並列計算を効率よく利用できれば、大きなメモリ空間が利用でき、計算時間の短縮にも繋がる^{④⑤}。

(3) **DEM** の分散相の計算はラグランジアンであり、一つの粒子については隣接する粒子の情報と回りの流体の情報のみが必要であることから、並列計算に向いている。しかし、連続相の計算はオイラレンであり、計算領域全体を同時に解く必要があるため並列計算に向いているとはいえ、近年の並列コンピュータの性能を効率よく利用することが難しい。

(4) そこで、本研究では、**DEM** の連続相の計算に、並列計算と親和性の高い格子ボルツマン法 (**Lattice Boltzmann Model, LBM**) を用いたハイブリッド計算手法により、メニーコアプロセッサの性能を効率良く引き出す高速計算エンジンを提案する。

2. 研究の目的

(1) 固気混相流の熱流動現象を数値シミュレーションによって解析するために、**DEM** による数値シミュレーションエンジンの大容量化、高速化を図る。**DEM** のプログラムを、近年の高速コンピューティングのトレンドであるメニーコアプロセッサによる並列計算に適したシミュレーションコードにするために、連続相の計算を **LBM** で置き換える。

(2) **LBM** による流体の熱流動の数値シミュレーションは、未だ、発展途上の分野であるため、その原型である格子気体法 (**Lattice Gas Cellular Automata**) を含めて **DEM** への適用法を検討する。また、**LBM** や **LGA** による流体の計算手法そのものについても、粉体の数値シミュレーションを念頭に、拡張を試みる。

(3) 本研究分野に関する情報を広めるととも

に、新規参入を容易にすることを目的として、本助成金による研究終了後は、研究成果を **Web** ページや科学イベントなどで公開する。

3. 研究の方法

(1) 粉体の熱流動に関する解析対象としては、研究者が別の計算手法を用いて過去に発表した2次元矩形容器内を吹き上げる高温気体による微粒子群の熱流動^⑥を用いる。また、将来的には研究室で進めている固気混相流による小伝熱面上の伝熱促進の実験体系をシミュレーションできるように考慮する。この実験は拡大管内に水平に置かれ加熱された小伝熱面上の熱伝達を、気相に微粒子を混合させたときの混合比と流速をパラメータに測定するものである。

(2) **DEM** における連続相の計算には、これまでナビエ・ストークス方程式を差分法で解く **SIMPLE** 法などが用いられてきた。本研究では、ナビエ・ストークス方程式のソルバーとして、本質的に並列計算との相性が良い **LGA** および **LBM** を用いる。具体的には、プログラムコード中の連続相の計算部分を、そっくり **LGA** や **LBM** に置き換えることで、**DEM** によるシミュレーションコードを効率的に改良する。

(3) **LGA** や **LBM**、特に **LBM** は開発途上の流体の数値シミュレーション手法であるので、新しい理論を積極的に取り入れると同時に、計算方法の改良に取り組むことで、**LBM** そのものの研究にも貢献することを試みる。

(4) 市販のグラフィックボードを用いたメニーコア並列計算機を構築して、作成するシミュレーションコードの実行環境とする。本研究の目的は、シミュレーションの並列化による計算の高速化にあるので、スーパーコンピュータや大型の並列ワークステーションの利用による計算時間の短縮よりも、メニーコアの効率的な利用に着目しており、市販のパーソナルコンピュータとグラフィックボードの組み合わせで、評価が可能である。

4. 研究成果

(1) **DEM** と **LGA** との間での運動量カップリングを考慮し、**DEM-LGA** ハイブリッド計算プログラムを作成した。計算例として、**DEM** の連続相の計算に **LGA** を用いた場合の計算結果を検証するために、単独粒子回りの速度分布、密度分布の計算と、粒子の移動度の流体抵抗近似式による計算結果との比較を行った結果を図1に示す。流体は左側が上流であり、粒子近傍の流れの変化が観測され粒子の移動度が流体抵抗から計算された下図とよく一致していることがわかる。これらの計算結果により、**DEM** の連続相の計算を差分法から **LGA** またはそれを発展させた **LBM** によって置換することができることを検証

した。

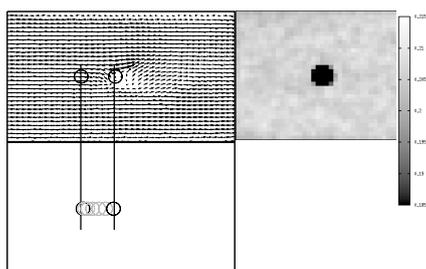


図 1 粒子回りの流体の速度分布と密度分布の計算結果、および粒子移動度の解析解との比較

(2) シミュレーションコードの応用範囲の拡大のために、連続相として気体単相に加えて気液二相流も扱えるよう、LBM の気液二相流モデルを取り入れた。特に、応用範囲の広い水のような気液の密度差が大きい物質のシミュレーションを行なえるように、Inamuro ら^⑥や Yan ら^⑦の方法を採用し、境界の計算方法に改良を加えて、複雑境界内の非熱非混合二相流の LBM シミュレーションを可能とした。図 2 は、焼結ウィックを持つヒートパイプ内の気泡の動きのシミュレーション結果である。複雑境界内における気泡の上昇と合体の様子を観察することができる。

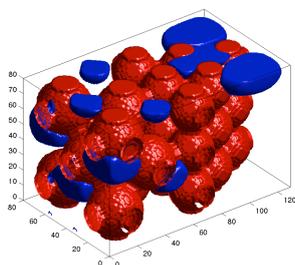


図 2 LBM による複雑境界内の気液二相流の数値シミュレーション

(3) マルチコアプロセッサによる並列計算が可能でグラフィックボードの開発元としては、現在、NVIDIA 社と AMD 社があるが、シミュレーションプログラム実行環境としては、早くから OpenCL の採用を積極的に推進している AMD 社を選択し、パーソナルコンピュータと RadeonHD グラフィックボードによるマルチコアプロセッサ並列計算環境を構築した。AMD 社、NVIDIA 社ともに、マルチコアプロセッサを利用した科学計算のための開発環境を無償で公開、配布しており^{③④}、今回はハードウェア環境に合わせて AMD 社のソフトウェアを利用した開発環境を併せて構築した。

(4) 2 次元矩形容器内の固気二相流の熱流動解析のための、DEM と LBM のハイブリッド計算プログラムを作成した。計算結果については、学会発表^⑨で発表予定である（発表申込済）。今後は、現在、別途に進めている

小伝熱面の伝熱実験の結果と比較するとにより、計算結果の妥当性を検証する。また、(2)の成果を取り入れた、気液二相流中の粉体もしくは微粒子群の数値シミュレーション法の開発に道筋を付けることができた。

<引用文献>

- ① Clayton Crowe, Martin Sommerfeld, Yutaka Tsuji, Multiphase Flows with Droplets and Particles, CRC Press, 1998.
- ② 酒井幹夫, 粉体の数値シミュレーション, 丸善出版, 2012.
- ③ AMD development central, <http://developer.amd.com>
- ④ NVIDIA CUDA Zone, <https://developer.nvidia.com/cuda-zone>
- ⑤ Yamaguchi, T., Kanemaru, K., Momoki, S., Shigechi, T., Fujiwara, R., Numerical analysis for heat and mass transfer of granular flow in a duct by the discrete particle simulation, Proceedings of 17th International Conference on Nuclear Engineering ICONE17, Brussels, Belgium, 2009.7, ICONE17-75762.
- ⑥ Inamuro, T., Ogata, T., Tajima, S., Konishi, N., A lattice Boltzmann method for incompressible two-phase flows with large density differences, Journal of Computational Physics, 2004, 198(2), 628-644.
- ⑦ Yan, Y., Zu, Y. Q., A lattice Boltzmann method for incompressible two-phase flows on partial wetting surface with large density ratio, Journal of Computational Physics, 2007, 227, 763-775.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Yamaguchi, T., Wan, Q., Yan, Y., Hong, J., Numerical Simulation of Liquid-gas Two-phase Flow with Large Density Difference in Multi-layered Sintered Wick by the Lattice Boltzmann Method, The 15th International Heat Transfer Conference, IHTC15, Kyoto, Japan, 2014.8, 査読有, IHTC15-9543 DOI: 10.1615/IHTC15.tpn.009543
- ② Yamaguchi, T., Wang, Q., Yan, Y., Numerical Analysis of Two-phase flow in Sintered Copper Wick by Lattice Boltzmann Method, Proceedings of the ASME 2013 11th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, Sapporo, Japan, 2013.6, 査読有, ICNMM2013-73025.

[学会発表] (計9件)

- ① 岩永大輔, 筒井燦, 山口朝彦, DEM と LBM のハイブリッドモデルによる微粒子流れの流動解析, 日本機械学会九州支部長崎講演会, 長崎大学(長崎), 2015.9.25 (発表予定).
- ② Yamaguchi, T., Kanemaru, K., Momoki, S., Sasaki, S., Numerical Simulation of Liquid-Gas Two-Phase Flow by Lattice Boltzmann Method, The Fifth International Conference on Science and Engineering (ICSE2014), Yangon, Myanmar, 2014.12.29, Invited Talk.
- ③ Yamaguchi, T., Wan, Q., Yan, Y., Hong, J., Numerical Simulation of Liquid-gas Two-phase Flow with Large Density Difference in Multi-layered Sintered Wick by the Lattice Boltzmann Method, The 15th International Heat Transfer Conference, IHTC15, Kyoto International Conference Center (Kyoto), Japan, 2014.8.13, Reviewed, IHTC15-9543.
- ④ Yamaguchi, T., Yan, Y., Lattice Boltzmann simulation of liquid-gas two-phase flow with large density difference in complex boundary, International Heat Transfer Symposium 2014, Beijing, China, 2014.5.8, Keynote 13.
- ⑤ Yamaguchi, T., Yan, Y., Numerical simulation of liquid-gas two-phase flow in sintered wick with face-centred structure by the athermal Lattice Boltzmann Method, 9th UK – Japan Seminar on Multi-Phase Flows 2013, London, UK, 2013.9.16.
- ⑥ Yamaguchi, T., Wan, Q. and Yan, Y.Y., Numerical simulation of liquid-gas two phase-flow in sintered wick with face-centred structure by the athermal Lattice Boltzmann Method, 13th UK Heat Transfer Conference, London, UK, 2013.9.3, UKHTC2013-185.
- ⑦ Yamaguchi, T., Wang, Q., Yan, Y., Numerical Analysis of Two-phase flow in Sintered Copper Wick by Lattice Boltzmann Method, Proceedings of the ASME 2013 11th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, Hokkaido University (Sapporo), Japan, 2013.6.18, Reviewed, ICNMM2013-73025.
- ⑧ 山口朝彦, 吉原正悟, 金丸邦康, 離散粒子法と格子気体法の結合による固体微粒子一流体間相互作用の検討, 第49回日本伝熱シンポジウム, 富山国際会議場(富山), 2012.5.31.

- ⑨ 吉原正悟, 山口朝彦, 金丸邦康, 固気混相流の格子気体シミュレーションにおける粒子境界条件の検討, 2011年度日本機械学会九州支部講演会, 九州大学(福岡), 2012.3.17.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www2.mech.nagasaki-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 朝彦 (YAMAGUCHI, Tomohiko)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 00284711

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし