

## 適合細分化格子ボルツマン法による熱流動解析

Locally Mesh-Refined Lattice Boltzmann Method for thermal convective flows

- 小野寺 直幸, 原子力機構, 千葉県柏市若柴 178-4 柏の葉キャンパス 148 街区 4,  
onodera.naoyuki@jaea.go.jp  
井戸村 泰宏, 原子力機構, 千葉県柏市若柴 178-4 柏の葉キャンパス 148 街区 4,  
idomura.yasuhiro@jaea.go.jp  
アリ ユスフ, 原子力機構, 千葉県柏市若柴 178-4 柏の葉キャンパス 148 街区 4,  
ali.yussuf@jaea.go.jp  
下川辺 隆史, 東京大学, 東京都文京区弥生 2-11-16, 東京大学情報基盤センター  
shimokawabe@cc.u-tokyo.ac.jp

Naoyuki Onodera, Japan Atomic Energy Agency, 178-4 Wakashiba, Kashiwa-shi, Chiba, JAPAN  
Yasuhiro Idomura, Japan Atomic Energy Agency, 178-4 Wakashiba, Kashiwa-shi, Chiba, JAPAN  
Ali Yussuf, Japan Atomic Energy Agency, 178-4 Wakashiba, Kashiwa-shi, Chiba, JAPAN  
Takashi Shimokawabe, The University of Tokyo, 2-11-16 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, JAPAN

A thermal flow analysis is one of important topics for decommissioning the TEPCO's Fukushima Daiichi nuclear power station. Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has been evaluating the air cooling performance of the fuel debris by using the JUPITER code, which is based on an incompressible fluid model on uniform Cartesian grids. However, the JUPITER code requires a large computational cost to capture complicated debris' structures at the actual scale. To accelerate such air cooling analyses, we use the CityLBM code, which is developed using a locally mesh refined lattice Boltzmann method (LBM) and is highly optimized for GPUs. The CityLBM code is validated against free convective heat transfer experiments at JAEA.

### 1. 緒言

福島第一原子力発電所の廃炉において、炉内の熱流動解析は重要なテーマの一つである。特にデブリから発生する熱および炉内の複雑な構造物を捉えた詳細解析により、炉内の温度分布を事前に予測した安全な廃炉作業が必要となる。しかしながら、Navier-Stokes 方程式を解く従来の解析手法では、圧力 Poisson 方程式に対する集団通信を伴う反復計算が必要となり、詳細解析に対応した大規模計算が難しい。上記課題を、GPU を用いた格子ボルツマン法(LBM)に基づく解析手法にて解決する。GPU は画像処理用の演算機であったが、近年これを汎用計算に適用する研究が盛んに行われている。GPU は従来の演算機である CPU と比べて消費電力あたりの演算性能が極めて高いため、将来のエクサスケールの計算機の有望なアーキテクチャと考えられており、今後、飛躍的な性能向上が期待できる。

格子ボルツマン法は単純なアルゴリズムで規則的なメモリアクセスを行う手法であるため、GPU 等のメニーコア・プロセッサにおいて高い演算性能が得られる。炉内熱流動解析では、数 mm のデブリから、数 m の炉内構造物を捉えたマルチスケールの乱流解析が必要となる。適合格子細分化(AMR)法[参考文献 1,2]は格子解像度を任意に変化させることが可能な格子生成法であり、これを LBM に適用することで、計算の高速化および計算資源を削減が可能となる。本解析の基となる CityLBM コードは、先行研究において風洞実験を再現可能であると共に、都市の風況解析において実時間に近い詳細解析が可能であることが示された[参考文献 3,4]。

本研究では AMR 法を適用した LBM に対して、熱流動モデルを導入することで、炉内の熱流動解析システムの構築を目指す。解析手法の基本的な検証として、2次元の自然対流問題および日本原子力研究開発機構発(JAEA)で行われている実験に対しての検証計算を行った。

### 2. 格子ボルツマン法

格子ボルツマン法(LBM)は連続体である流体に対して格子点を並

進・衝突する仮想的な粒子の集合と仮定し、格子上の粒子の速度分布関数について時間発展方程式を解く手法である。空間は等間隔の格子上で離散化され、有限個の速度を持つ粒子は並進運動により 1 タイムステップ後に格子点上に位置するため補間に伴う離散化誤差を含まない。また、粒子の衝突過程は、粒子分布が局所平衡状態へと緩和すると仮定する。ここで、時刻  $t$ 、位置  $x$  において、速度  $c_i$  に対応する粒子の分布関数  $f_i(x, t)$  の時間発展は以下の式で示される。

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(x, t) + \Omega_i(x, t)$$

ここで  $\Omega_i(x, t)$  は粒子の衝突過程に関する式であり、BGK モデルを用いて、粒子分布が単一時間内に局所平衡状態へと緩和すると過程する。

$$\Omega_i = -\frac{1}{\tau} (f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t))$$

$\Delta t$  は時間刻み、 $\tau$  は緩和時間係数、 $f_i^{eq}(x, t)$  は局所状態における粒子分布である。平衡分布関数は以下の式で表される。

$$f_i^{eq} = w_i \rho \left( 1 + \frac{3c_i \cdot u}{c^2} + \frac{9(c_i \cdot u)^2}{2c^4} - \frac{3u^2}{2c^2} \right)$$

$\rho$  は密度、 $u$  は速度、 $w_i$  は重み係数である。

炉内の熱流動解析では、高レイノルズ数の計算での安定性および精度が重要となる。近年、単一の粒子分布の緩和過程をモデル化した SRT モデルや、物理量(Moment)の緩和過程をモデル化した MRT モデルとは異なり、高次の物理量に対して拘束条件を与えることで緩和過程をモデル化する Cumulant LBM モデルが提案されている[参考文献 5]。Cumulant LBM モデルの特徴として、高レイノルズ数の乱流計算においても安定に計算を実施できることが挙げられる。本研究では Cumulant LBM モデルおよびラージェディ・シミュレーションのコヒーレント構造スモギンスキーモデルを採用し解析を行なった。

### 3 格子ボルツマン法への熱流動モデルの導入

格子ボルツマン法による熱流動解析は様々な手法が提案されている。本課題では、熱の時間発展手法として、メモリの使用量に優れている事、都市街区を対象とした温度および格子解像度においては陽的な時間発展が可能である事より、差分法に基づく手法を採用した。温度がLBMに与える影響はブジネスク近似を用いて外力項として評価した。温度の時間発展方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_j} = \left( \alpha + \frac{v_{sgs}}{Pr} \right) \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2}$$

ここで、 $\alpha$ は流体の温度拡散、 $v_{sgs}$ はコヒーレント構造スマゴリンスキーモデルの渦粘性係数、 $Pr$ はプラントル数となる。

### 4. 適合格子細分化(AMR)法

炉内熱流動解析では、数 mm のデブリから数 m の炉内構造物を捉えたマルチスケールの解析が必須となる。AMR 法は格子解像度を任意に変化させることが可能な格子生成法であり、これをLBMに適用することで、計算の高速化および計算資源の削減できる[参考文献 2,3]。

AMR 法の一つとして、木構造(Tree)内の末端の葉(Leaf)に  $N^3$  等の格子を割り当てるブロック型の AMR 法がある。この手法は、AMR 法においても Leaf 内にて  $N^3$  の連続的なメモリアクセスが可能となるため、GPU 計算に適している。本研究では Leaf に対して  $4^3$  の格子点を割り当てた。並列計算では、各プロセスの計算を担当している Leaf の周囲に通信用の Leaf を配置した。

本研究では GPU を用いた並列計算に対して、テンポラルブロッキング法を用いた通信削減アルゴリズムを採用することで、計算の高速化を行なった[参考文献 4]。

### 5. 自然対流解析

#### 5.1 2次元自然対流解析

基礎的な検証計算として2次元自然対流解析を行った。計算条件として、正方形の計算領域に対して、左の壁が高温壁面、右の壁に低温壁面を設定し、上下の壁は断熱壁面を設定した。

レイリー数  $10^4$  での温度分布を Figure 1 に示す。等高線は高温壁面から低温壁面温度までを 20 分割した温度に対して引いており、AMR 法の格子の境界面において温度が連続的に捕らえられていることが確認できる。

レイリー数をパラメータとした解析での平均ヌセルト数を Table 1 に示す。計算結果より、一様格子および壁面近傍に AMR 法を採用した格子において、参照値[参考文献 6]と同程度の値が得られており、定式化に問題がないことを確認した。

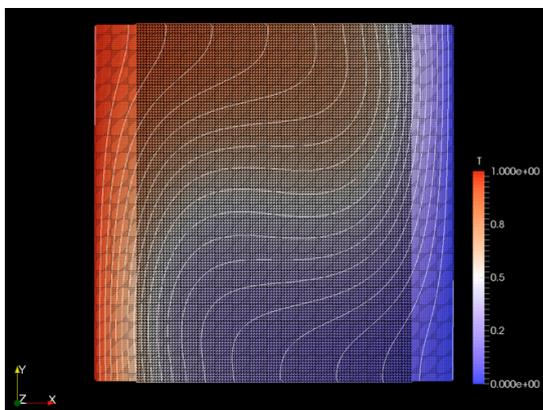


Figure 1 Isotherms at  $Ra = 10^4$ .

Table 1 Nusselt numbers of natural convection at different Rayleigh numbers.

Ra	1E+04	1E+05	1E+06
Nusselt num. (Uniform grid)	1.115	2.246	4.453
(AMR)	1.119	2.244	4.490
(References)	1.115 ~ 1.118	2.232 ~ 2.245	4.498 ~ 4.523

#### 5.2 3次元自然対流解析

原子炉内のデブリから発生する熱流動解析に向けて、3次元自然対流解析を行なっている。計算領域として、縦横高さ方向に  $580 \times 580 \times 800 \text{ mm}^3$  を設定した。境界条件として、中心から半径  $250 \text{ mm}$  の底面に  $420 \text{ K}$  の熱源を配置し、その他の底面は断熱境界条件、側面および上面にたいして  $312 \text{ K}$  を設定した。Figure 2 に、底面および中心断面での温度分布ならびに速度ベクトルを示す。計算結果より、中心から発生する上昇流および非常に細かな温度変化が捉えられていることが確認できる。

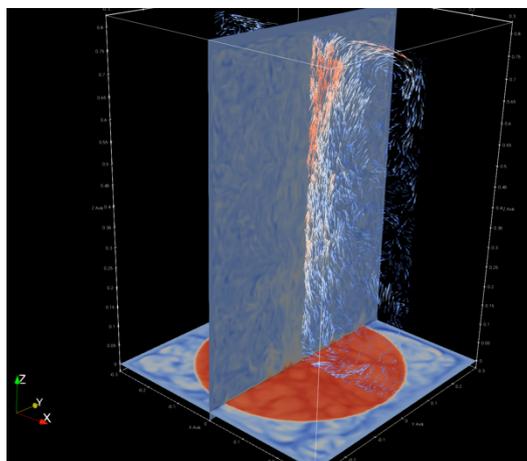


Figure 2 Temperature and velocity distributions.

### 6. まとめ

炉内の熱流動解析の実現に向けて、LBMによる熱流動解析手法を実装した。2次元自然対流問題においては、一様格子およびAMR法を適用した計算において参照値と同等の結果が得られることが確認された。JAEAの実験を模擬した自然対流計算においては、加熱された底面から立ち上る中心から発生する上昇流および非常に細かな温度変化が捉えられていることが確認された。本会議では実験値との詳細な比較を行い、解析手法の有効性を示す。

### 7. 謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金・基盤研究(C)17K06570、基盤研究(B)17H03493、および学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点(Project ID: jh180041-NAH, jh180061-NAH)から支援を頂いた。記して謝意を表す。

### 参考文献

1. Stephen M. Guzik, et al., J. Comp. Phys, Vol.259, 15, pp. 461-487
2. O. Malaspinas, P. Sagaut, Phys. Fluids, 23 (2011), p. 105103
3. N.Onodera and Y.Idomura, Proceedings of the 26th International Conference on Nuclear Engineering, (2018)
4. N.Onodera, Y.Idomura, Y.Ali, and T.Shimokawabe, 9th Workshop on Latest Advances in Scalable Algorithms for Large-Scale Systems (ScalA) held in conjunction with SC18, (2018)
5. Martin Geier, Martin Schönherr, et al., Comp. & Math. Applications, Vol. 70, Issue 4, pp.507-547
6. Z.Chen, C.Shu, and D.Tan, Int. J. Heat Mass, 105, pp.741-757, (2017)