



1. 研究背景と研究目的

放射性物質の拡散予測解析は社会的関心が非常に高く、迅速性及び正確性が求められる。日本での予測手法として、緊急時環境線量情報予測システム(SPEEDI)が用いられており、観測値を基に放射性物質の拡散挙動を計算する。また、日本原子力研究開発機構では、局所解析での予測精度の向上に向けて非圧縮性Navier-Stokes方程式に基づく解析手法(LOHDIM-LES)の開発を進めているが、都市街区を捉えた高解像度の解析の実現には、計算機性能を最大限に引き出すことが可能な解析手法の開発が必須となる。本課題では、GPUスパコンに適した格子ボルツマン法(LBM)に対して、都市部の熱対流および植生等を考慮した物理モデルを導入することで、汚染物質の拡散・沈着を再現可能な解析手法の確立を目指す。今年度は、汚染物質の拡散予測として最も関心が高い、都市部での予測精度の向上に向けて、物理モデルの高度化を行い、迅速性と精度を兼ね備えた予測システムの確立を目指す。

2. 研究計画

昨年度のJHPCN課題「格子ボルツマン法によるリアルタイム物質拡散シミュレーション」により、適合細分化格子(AMR)法に基づく高速・高解像度の汚染物質の拡散解析手法を構築した。今年度は、都市街区における予測精度を向上に向けて、都市部の熱対流構造の解析および汚染物質の拡散・沈着に関する物理モデルの高度化に取り組む。以下に、具体的な研究項目を示す。

- GPUでの並列計算で重要となるNVLinkを用いた高速な通信の実現
都市街区における熱の効果(熱対流構造)を考慮した物理モデルの導入
発電施設周辺や都市街区の森林等を考慮した植生キャノピーモデルの導入
大気環境アセスメント手法のガイドラインに沿った解析モデルの検証
データ同化手法の導入によるメソスケールモデルや観測との連携

3. 共同研究に関する情報

- (1)共同研究拠点：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
(3)研究グループ：代表者 小野寺 直幸(日本原子力研究開発機構)
副代表者 青木 尊之(東京工業大学)
課題参加者 町田 昌彦(日本原子力研究開発機構)
課題参加者 井戸村 泰宏(日本原子力研究開発機構)
課題参加者 河村 拓馬(日本原子力研究開発機構)
課題参加者 下川辺 隆史(東京大学)

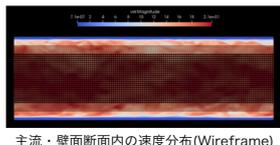
5. 研究進捗状況

5.1. 省通信アルゴリズムの平行平板間乱流計算での検証

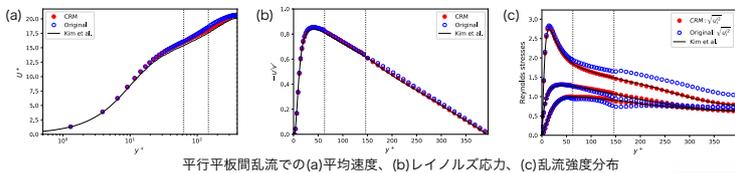
AMR法を適用したLBM法での乱流解析の検証として、平行平板間乱流計算を実施する。解析手法として、従来のマルチタイムステップ法を適用した解析手法、および省通信アルゴリズムを適用した解析手法をDNSの結果と比較する。計算パラメータとして、乱流境界層を捉えるために、Block AMR法にて3階層の格子分割を行った。

計算結果より、省通信アルゴリズムの採用により、マルチタイムステップ法で必要であった時間補間が不必要となり、解像度の境界面で発生する比物理的な数値振動を抑えることが可能となり、DNSと良く一致する結果が得られた。

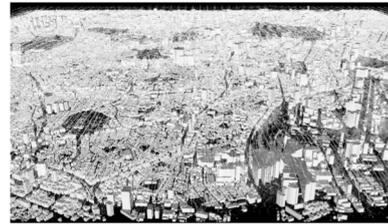
Table with 5 columns: Re\_tau, Domain, AMR lv., # of leaves, Delta x+, Interfaces (y+). Rows show different AMR levels and their corresponding parameters.



主流・壁面断面内の速度分布(Wireframe)



平行平板間乱流での(a)平均速度、(b)レイノルズ応力、(c)乱流強度分布



東京都心1m解像度10km四方気流計算の可視化 (格子数10080x10240x512, GPU数4032)



JAEA: 福島県における放射性核種の環境中移動調査・研究より抜粋 https://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/pdf/project.pdf

4.1. Cumulant relaxation timeモデルを用いた解析

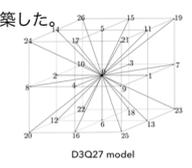
格子ボルツマン法(LBM)は連続体である流体を格子点上を並進・衝突する粒子の集合と仮定し、格子上の粒子の速度分布関数に対して時間発展を行う手法である。LBMは規則的なメモリアクセスおよび高密度な演算を持つ陽的なアルゴリズムを持つため、GPUを用いた大規模計算に適している。しかしながら、都市気流解析のような乱流解析では、安定性の観点からサブグリッドスケール(SGS)モデル等が必須となる。本研究では、LBMの衝突・緩和モデルとして、Cumulant relaxation timeモデルを採用することで、SGSモデル等が必要となる空間微分を必要としない、メモリアクセスが局所的でGPUに適した解析手法を構築した。

ボルツマン方程式

f\_{ijk}(x + c\_{ijk}\Delta t, t + \Delta t) = f\_{ijk}(x, t) + \Omega\_{ijk}(x, t)

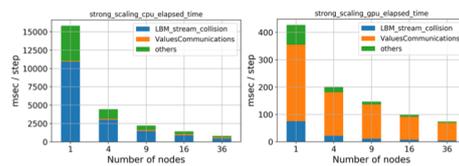
Cumulant relaxation timeモデル

C\_{\alpha\beta\gamma}^\* = C\_{\alpha\beta\gamma}^{eq} \omega\_{\alpha\beta\gamma} + C\_{\alpha\beta\gamma}(1 - \omega\_{\alpha\beta\gamma})

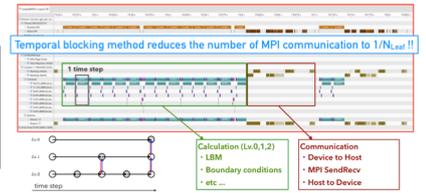


4.2. Temporal blocking法を用いた省通信アルゴリズム

GPUを用いた解析では、その演算性能の高さから通信のオーバーヘッドが顕著となる。特にAMR法を適用した解析では、格子解像度間の境界面における余分な時間・空間補間が必要となり、そのオーバーヘッドはより深刻である。Temporal blocking(TB)法は、計算に必要なメモリバンド幅の比(Byte/Flops)を削減可能な方法であり、そのアルゴリズムの採用により、対象のオーバーヘッドを別の計算に置き換えることが可能である。本研究では、Block AMR法での袖領域のLeafの通信を、GPUを用いた時間発展計算に置き換えることで、通信量および通信回数を削減した。



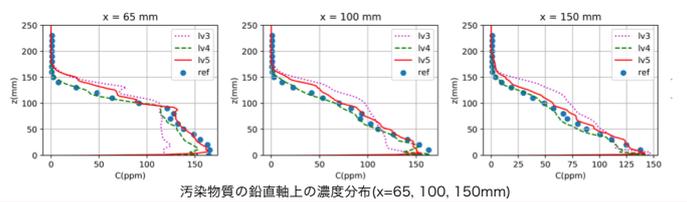
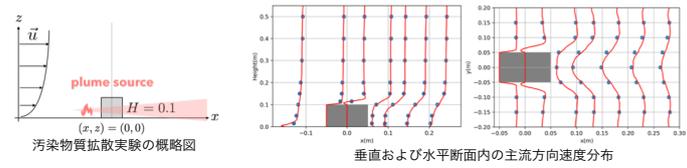
強スケーリング性能：省通信マルチタイムステップ法。(左)有、(右)無



省通信マルチタイムステップ法による解析でのタイムライン

5.2. 産総研の風洞での汚染物質拡散実験

汚染物質の拡散解析の検証として、産総研の風洞実験との比較を行った。計算条件として、長さ20m・幅および高さ2mの計算領域に対して、汚染源および物体近傍に最密格子を配置することで、計算速度の向上および総格子点数の削減を行った。汚染源は物体前方の50mm手前に配置され、汚染物質は物体近傍の流れにより激しく拡散される。計算結果より、物体近傍の速度および汚染物質の拡散分布が実験結果と良く一致することを確認した。



汚染物質の鉛直軸上の濃度分布(x=65, 100, 150mm)