



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

研究目的

- 格子ボルツマン法(LBM)による超大規模熱流動解析を行うための高速GPUコードを開発する。
- 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解明する。
- 超大規模CFDに対してのGPUマシンのコストパフォーマンスの高さを実証する。

背景

- 電気自動車の駆動ユニット
 - CPUやGPU等のプロセッサ
- ⇒ 高性能化・コンパクト化

熱のマネージメント技術はますます重要化

閉空間に閉じ込められた発熱体の冷却に関する解析は産業機器の最適設計において最重要

実用機器の壁面は複雑な粗さや透過性を有する

非滑面の乱流スカラー輸送機構の知見は少ない

⇒ LBMによる直接解析を検討

- LBMによる大規模CFDコードの開発

- ✓ シミュレーションの高精度化・高効率化に向けてこれまで検討・開発されてきた手法を統合
- ✓ スカラー境界条件・移動境界条件の高精度化

複雑固相界面の乱流スカラー場の大規模直接解析の実施

(3) 条件分岐不使用のGPUカーネル自動生成

Shimokawabe, Aoki & Onodera, Procedia. Comp. Sci. 80 (2016)



- 単純実装に比べて10倍以上の高速化

研究計画

- 開発してきた手法(1)-(5)を統合し、乱流スカラー場の大規模解析のためのGPUコードを開発する。
- 透過性壁・粗面壁などの非滑面上の乱流熱流動の直接数値解析を実施し、透過性・粗さがスカラー輸送に与える影響を調査する。さらに、高いレイノルズ数における大規模解析を行う。
- 回転体や移動物体周りに適用する移動境界条件(リフィル問題)について検討し、さらに、熱的境界条件(ノイマン・ディレクレ条件)の高精度化を行う。
- 移動する複雑粗面壁をもつ回転二重円筒内流れを解析し、コードの実用性・パフォーマンスを実証する。

(1) 27方向速度多緩和時間LBM (D3Q27MRT-LBM)

Suga et al., Comp. Math. Appl. 69 (2015)

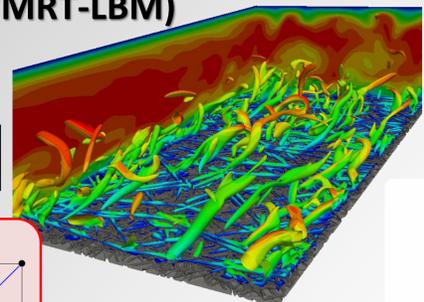
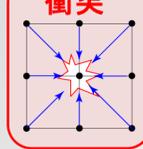
$$f_\alpha(x + e_\alpha \delta t, t + \delta t) - f_\alpha(x, t) = -M^{-1} \hat{S} [m_\alpha(x, t) - m_\alpha^{(eq)}(x, t)]$$



多緩和時間衝突モデル

f_α : 密度分布関数 M : 変換マトリクス(27×27)
 $m_\alpha = M f_\alpha$: モーメント $m_\alpha^{(eq)}$: 平衡モーメント
 \hat{S} : 緩和マトリクス e_α : 粒子速度ベクトル

衝突

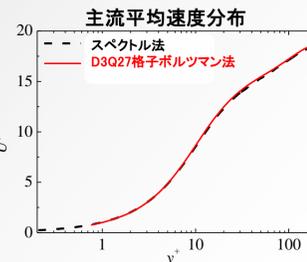
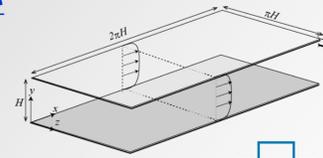


空隙率0.8のカーボンペーパー界面乱流の解析例: ひずみ速度テンソル第二不変量の等値面, バルクレイノルズ数3000

密度分布関数の並進&衝突計算の繰り返し

- シンプルなアルゴリズム
- 隣接ノード点を用いる計算が少ない
- 完全陽解法
- ポアソン方程式を解く必要ない
- 格子生成不用

平行平板間直接数値解析 (摩擦レイノルズ180)

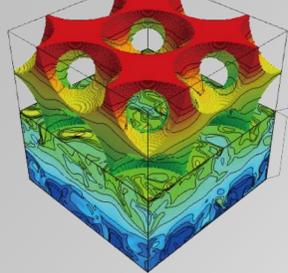


- 高い並列化性能・計算効率
- スペクトル法に匹敵する高い解析精度

(2) 正規化熱格子ボルツマン法

Suga et al., Int.J. Heat Fluid Flow (2017)

$$g_\alpha(x + e_\alpha \delta t, t + \delta t) = g_\alpha^{eq}(x, t) + \left(1 - \frac{1}{\tau_g}\right) \hat{g}'_\alpha(x, t)$$



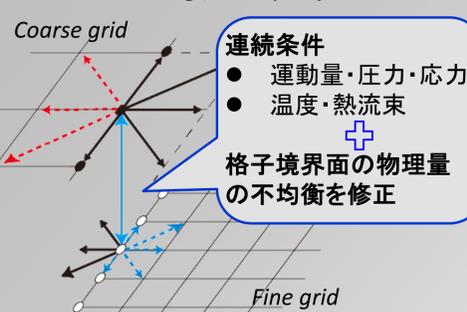
固体: 伝導伝熱
 流体: 対流伝熱

- 共役伝熱解析が容易に可能
- 複雑境界面の容易に取り扱い可能

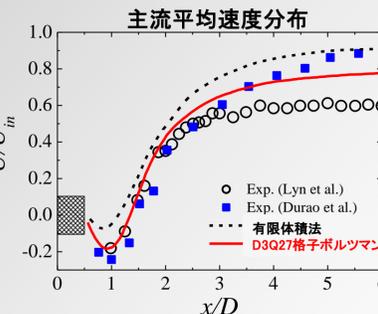
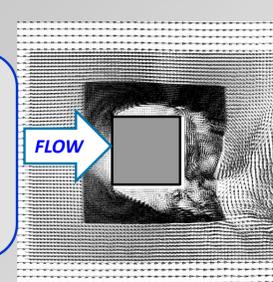
GPUによる複雑壁面の大規模熱流動解析に有効

(4) 局所細密格子法

Kuwata & Suga, J. Comp. Phys. 311 (2016)



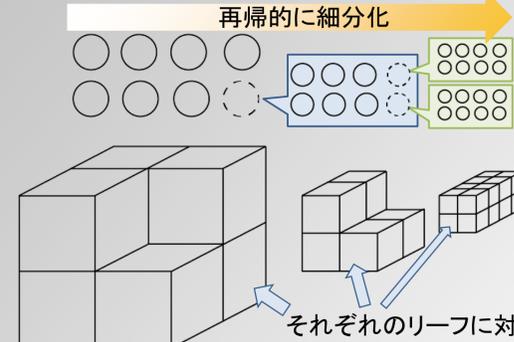
局所細密格子法による角柱周りのLES解析



- 90%以上の計算コスト低減を実現
- 複雑乱流場も高い解析精度

(5) 8分木に基づく細密化

長谷川 & 青木, 情報処理学会論文誌 Comp. Sys. 9 (2016)



直交格子を8分木データ構造に基づき再帰的に細分化する適合細分化格子を導入。

同じ計算セル数を持つリーフを複数GPUに均等分配

- 計算負荷の均衡化・高い並列化性能
- 連続メモリアクセスによるキャッシュの活用