二相流により熱交換される複雑構造体の熱流動解析ツールの開発ならびにその現象解明（継続課題）

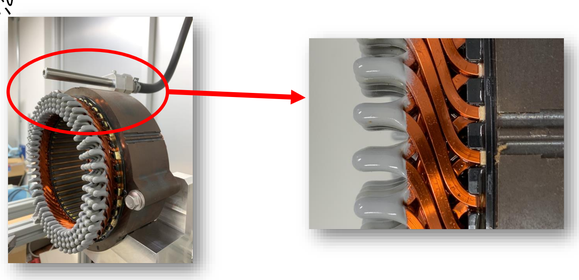
jh220040 金田 昌之（大阪公立大学）

大阪公立大学

Osaka Metropolitan University Heat Transfer Lab.

研究背景

- 温室効果ガス削減を目的とした電動化の推進（例：電気自動車）
- 熱密度の増大=>コイル部分の発熱
- 現状の冷却法（二相流伝熱問題）



- ロータ・ステータ間
  =>テイラー・クエット流れ
- 実機には電磁場の最適化のためロータ，ステータに溝
  =>流れ場がトルクに及ぼす影響

研究目的

- 二相系格子ボルツマン法（LBM）で熱流動を解析できるツールを開発する（理想としては相の移動・変形と熱輸送を同時に解析したい）
- 上記にAMRを実装し解析の高精度高速化を図る
- テイラー・クエット熱流動場に及ぼす内外円筒の構造の影響をLBMで解明する．
- LBMの大規模解析に適したTSUBAMEを利用しMPI-GPU解析をおこなう．

二相流熱流動解析

支配方程式

エネルギー方程式 $\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (T\boldsymbol{u}) = \nabla \cdot (\alpha \nabla T)$　　$\rho c_p =$ 一定

格子ボルツマン方程式

$$h_i(\boldsymbol{x} + \boldsymbol{e}_i\delta_t, t+\delta_t) - h_i(\boldsymbol{x}, t) = \Omega_i^h(\boldsymbol{x}, t)$$

衝突項 $\boldsymbol{\Omega}^h = -\boldsymbol{M}_h^{-1}\boldsymbol{S}^h\boldsymbol{M}_h[\boldsymbol{h} - \boldsymbol{h}^{\mathrm{eq}}]$ (WMRTモデル)

温度 $T = \sum_i h_i$

移動境界を考慮したBounce-back断熱条件

(1)Adiabatic Model 1[8]

$$h_i(\boldsymbol{x}_l) = -h_i^*(\boldsymbol{x}_l) + 2w_iT_l\left[1 + \frac{(\boldsymbol{e}_i\cdot\boldsymbol{u}_l)^2}{2c_s^4} - \frac{|\boldsymbol{u}_l|^2}{2c_s^2}\right]$$

(2)Adiabatic Model 2[9]

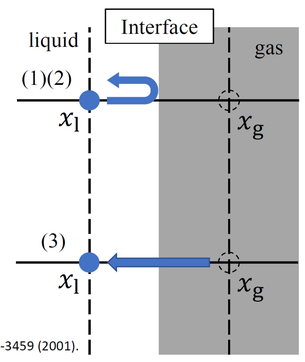
$$h_i(\boldsymbol{x}_l) = h_i^*(\boldsymbol{x}_l) + \frac{2w_iT_l(\boldsymbol{e}_i\cdot\boldsymbol{u}_l)}{c_s^2}$$

Bounce-backを用いない界面等温条件

(3) Isothermal Model without BB

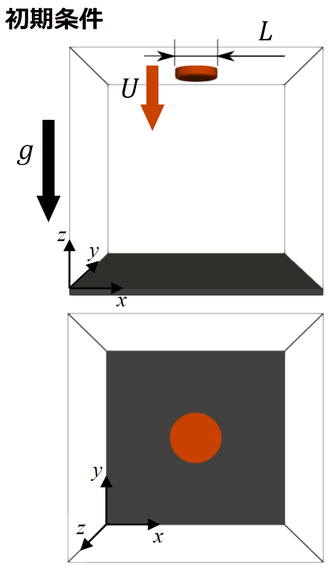
断熱条件を仮定し，界面近傍で気相温度と液相温度が等しいとして

$$h_i(\boldsymbol{x}_l, t+\delta_t) = h_i(\boldsymbol{x}_g, t) = w_iT_l\left[1 + \frac{\boldsymbol{e}_i\cdot\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}_g, t)}{c_s^2}\right]$$



[8] T. Zhang et al., *Phys. Rev. E*, **85**, 016701 (2012). [9] M. Bouzidi et al., *Phys. Fluids*, **13**, 3452-3459 (2001).

初期条件



解析パラメータ

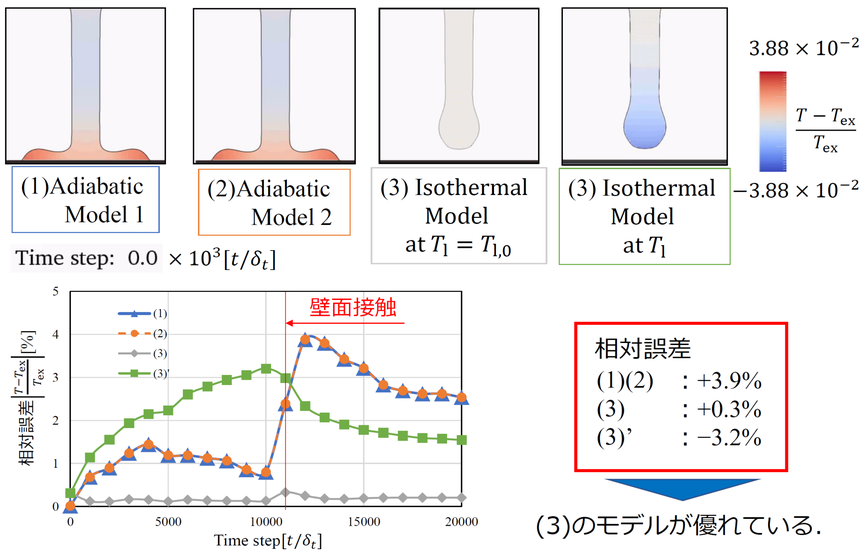
解析領域 (x, y, z)	$(100\Delta, 100\Delta, 100\Delta)$
流入口直径 L	20Δ
界面厚さ W	4Δ
モビリティ M_ϕ	0.167
初期温度 $T_{l,0}$	1.0
$Oh(=\mu_l/\sqrt{\rho_l\sigma L})$	0.174
$Pr_l(=\mu_l c_{pl}/\lambda_l)$	0.358

境界条件

- 断熱条件(HWBB)@壁面
- 断熱条件@気液界面
- 周期 @x, y方向境界
- 流入 @$+z$方向境界

理論解

$T_{ex} = T_{l,0}$



相対誤差
(1)(2)　：+3.9%
(3)　　：+0.3%
(3)'　　：−3.2%

(3)のモデルが優れている．

非物理的な温度場を解消するための改良が必要

AMR

格子ボルツマン方程式

$$f_i(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{e}_i\delta_t, t+\delta_t) - f_i(\boldsymbol{x}, t) = -\frac{1}{\tau_f}f_i^{\mathrm{neq}}(\boldsymbol{x}, t) + \delta_t\left(1 - \frac{1}{2\tau_f}\right)R_i^f(\boldsymbol{x}, t)$$

$$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{e}_i\delta_t, t+\delta_t) - \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}, t) = \boldsymbol{M}^{-1}\left[-\boldsymbol{S}^g\boldsymbol{M}\boldsymbol{g}^{\mathrm{neq}}(\boldsymbol{x}, t) + \delta_t\left(\boldsymbol{I} - \frac{\boldsymbol{S}^g}{2}\right)\boldsymbol{M}\boldsymbol{R}^g(\boldsymbol{x}, t)\right]$$

生成項&外力項

$$R_i^f = w_i\frac{\boldsymbol{e}_i\cdot[\partial_t(\phi\boldsymbol{u}) + c_s^2\lambda\boldsymbol{n}]}{c_s^2}$$

$$R_i^g = w_i\frac{\boldsymbol{e}_i\cdot(\mu_\phi\nabla\phi + \rho\boldsymbol{G}) + (\boldsymbol{e}_i\cdot\boldsymbol{u})(\boldsymbol{e}_i\cdot\nabla\rho)}{c_s^2}$$

表面張力　重力

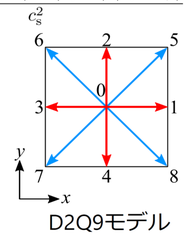
巨視的変数

Phase-field変数： $\phi = \sum_i f_i$

密度： $\rho = \phi\rho_l + (1-\phi)\rho_g$

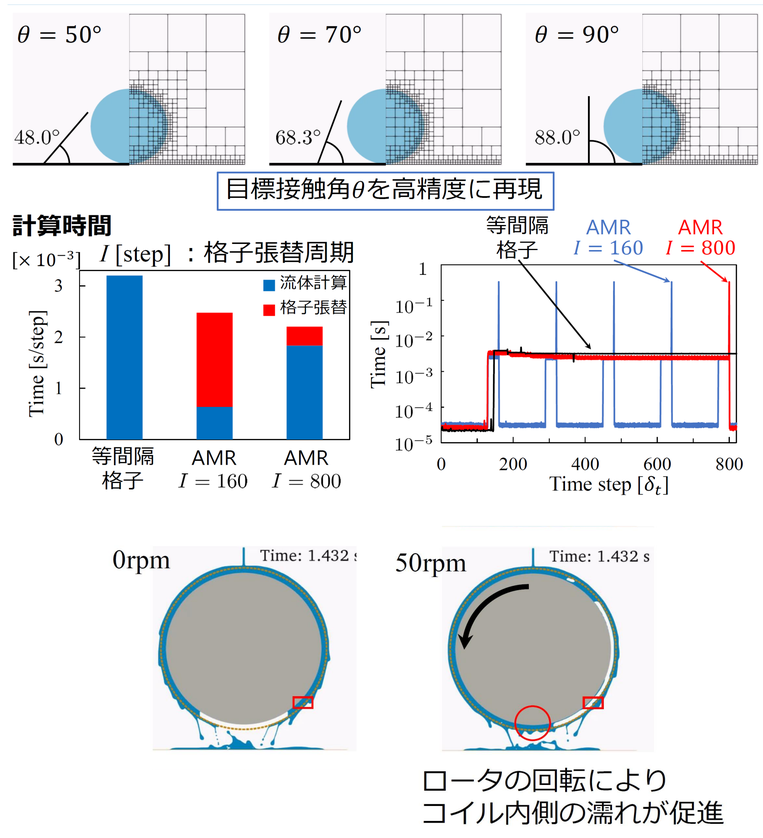
速度： $\boldsymbol{u} = \frac{1}{\rho}\left[\sum_i \boldsymbol{e}_i g_i + \frac{\delta_t}{2}(\mu_\phi\nabla\phi + \rho\boldsymbol{G})\right]$

圧力： $p = \frac{c_s^2}{1-w_0}\left[\sum_{i\neq0} g_i - w_0\rho\frac{\boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{u}}{2c_s^2} + \frac{\delta_t}{2}\boldsymbol{u}\cdot\nabla\rho\right]$

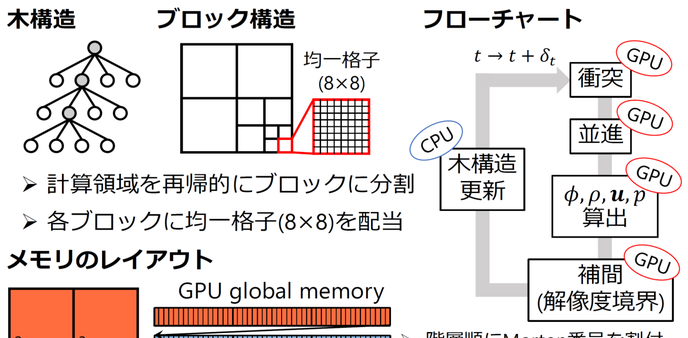


D2Q9モデル

[2] Liang, H. et al., *Phys. Rev. E*, **97**, 033309 (2018). [3] Fakhari, A. et al., *J. Comput. Phys.*, **341**, 22 (2017).

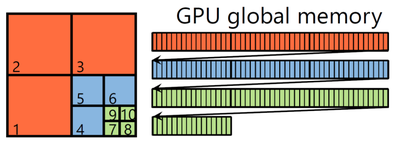


木構造　**ブロック構造**　**フローチャート**



- 計算領域を再帰的にブロックに分割
- 各ブロックに均一格子(8×8)を配当

メモリのレイアウト



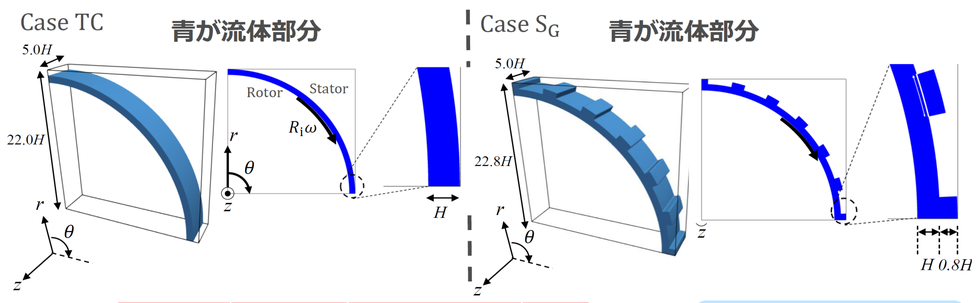
- 階層順にMorton番号を割付
- 従属変数は一次元配列に保存
- コアレッシング

[4] Watanabe, S. and Aoki, T., *Comput. Phys. Commun.*, **264**, 107871 (2021).

ロータの回転により
コイル内側の濡れが促進

GPU実装はほぼ完了
MPI実装と三次元化をめざす

テイラー・クエット



Case	η	Nodes	Re
TC	21/22	11,888,200	1050
TC	21/22	90,782,800	3500
S_G	21/22	15,166,200	1050
S_G	21/22	116,400,000	3500

$$\eta = \frac{R_i}{R_o}$$

R_i；内円筒半径（回転）
R_o；外円筒半径（固定）

$$\mathrm{Re} = \frac{U_R H}{\nu}$$

U_R；回転速度
H　；ロータとステータの間隔
ν　；動粘性係数

□ 直方体全体ではなく，流体相＋壁から2格子固相内部にのみデータを持たせることで，それぞれ約14，11倍の計算メモリの削減
✓ ロータ壁面は壁面速度を考慮し，ロータ・ステータ壁面でno slip条件，回転・スパン方向は周期境界条件を適用

溝無しT-C流れについては精度検証済み
溝の影響の検証と温度場の解析をめざす

まとめ

- 二相流の流動と熱輸送を同時に解析するには工夫が必要．メンバー間の情報交換と実装作業を効率的に運用したい．
- AMRは二次元単一GPUでほぼ実装できたが解析安定性と速度の向上が課題．大規模化にはMPI実装も必須．
- テイラー・クエット乱流は解析の課題設定と熱解析の実装が課題．

mkaneda@omu.ac.jp