

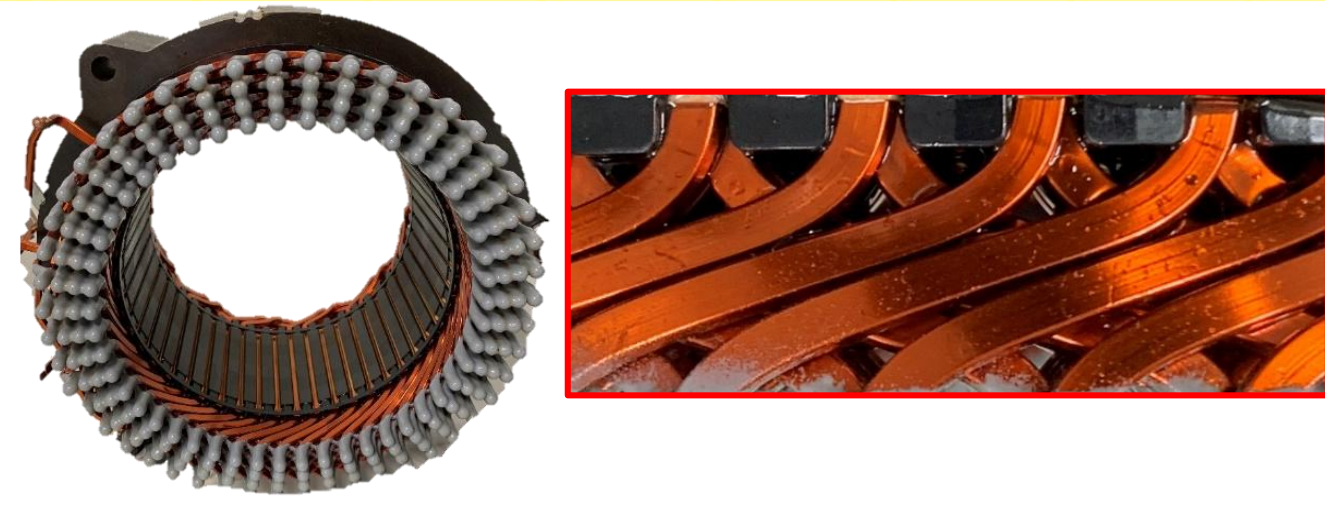


電気モータ直接冷却の除熱量定量評価のための大規模数値解析

金田 昌之（大阪公立大学）

研究背景

- パリ協定→EVシフト
- 電気モータ：ブラシレス
- 小型高出力化＝高速回転化（13,000 → 50,000 rpm）
- コイル熱密度上昇対策→冷却
- 直接冷却（冷却液を直接コイルに流下）
- コイルからの発熱，熱収支＝冷却液との気液二相伝熱，コイル内の熱伝導，自然対流による放熱の和（放射は無視）



直接冷却の除熱量定量評価

解決すべき課題

二相流伝熱問題

二相系共役伝熱
LBMの開発

- 冷却液－コイル間の熱伝達（固液）
- 定常解析で評価したい（流入出条件）
- 液相移動時の温度異常（気液共役伝熱LBMの検討）
- コイル内の熱伝導も考慮必要（固気液共役伝熱LBM実装）
- 高Pr数流体（～100）→温度境界層の解像（温度場AMR実装）
- 安定かつ高精度に解析する手法を用いた現象のキャラクタリゼーション

コイルからの自然対流

単相自然対流
LBMの解析

- 複雑形状以前に基礎的な伝熱学的知見が必要（水平角柱群周りの自然対流は意外にも研究事例が少ない）
- 発熱対象周りにはかなり広い解析領域が必要（ドメイン境界条件の影響を避けるため）

研究スケジュール

Q1 （）内はマイルストーン

- 流入出条件実装・検証（圧力場異常解消）
- 固気液共役伝熱アルゴリズム調査（モデル選択）
- 二次元温度場AMR実装（粗密格子間で異常値原因を検討）
- 自然対流解析・検証（二次元解析妥当性評価）

Q2

- 固気液共役伝熱モデルを実装（実装完了）
- 温度場AMR改良・検証（粗密格子間異常を解消）
- 自然対流（二次元解析でキャラクタリゼーション）

Q3

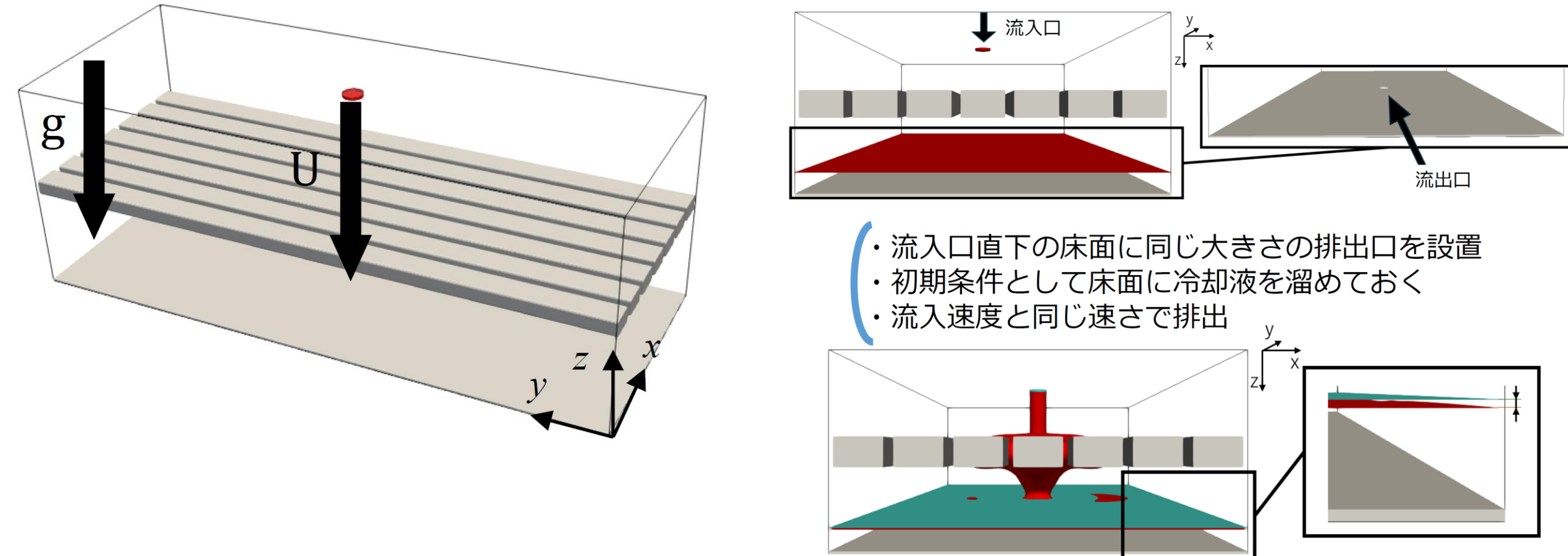
- AMR三次元化
- 固気液共役伝熱解析（コイル徐熱量評価）
- 自然対流（三次元化もしくは二次元共役伝熱実装）

Q4

- AMR+固気液共役伝熱解析（除熱量評価）
- 自然対流伝熱も考慮した除熱量総合評価（参照データと比較・議論）

研究内容

①定常解析の実現＝流出条件の設定・評価



②液相移動時の温度異常（気液共役伝熱LBMの検討）

③固気液共役伝熱LBM実装

- Karani & Huber 2015： ρC_p の変化を考慮していない

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \nabla \cdot (\rho c \mathbf{u} T)$$

- Karani & Huber 2015, Yue et al. 2021, Wang et al. 2019：熱輸送方程式の不整合（Korva et al. 2020で議論）

$$\nabla \cdot (\rho c \mathbf{u} T) = \rho c \mathbf{u} \cdot \nabla T + T \nabla \cdot (\rho c \mathbf{u})$$

- Zhao et al. 2025で修正？→実装して検証したい

$$(\rho c)_e \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_e \nabla T) - (\rho c)_e \mathbf{u} \cdot \nabla T$$

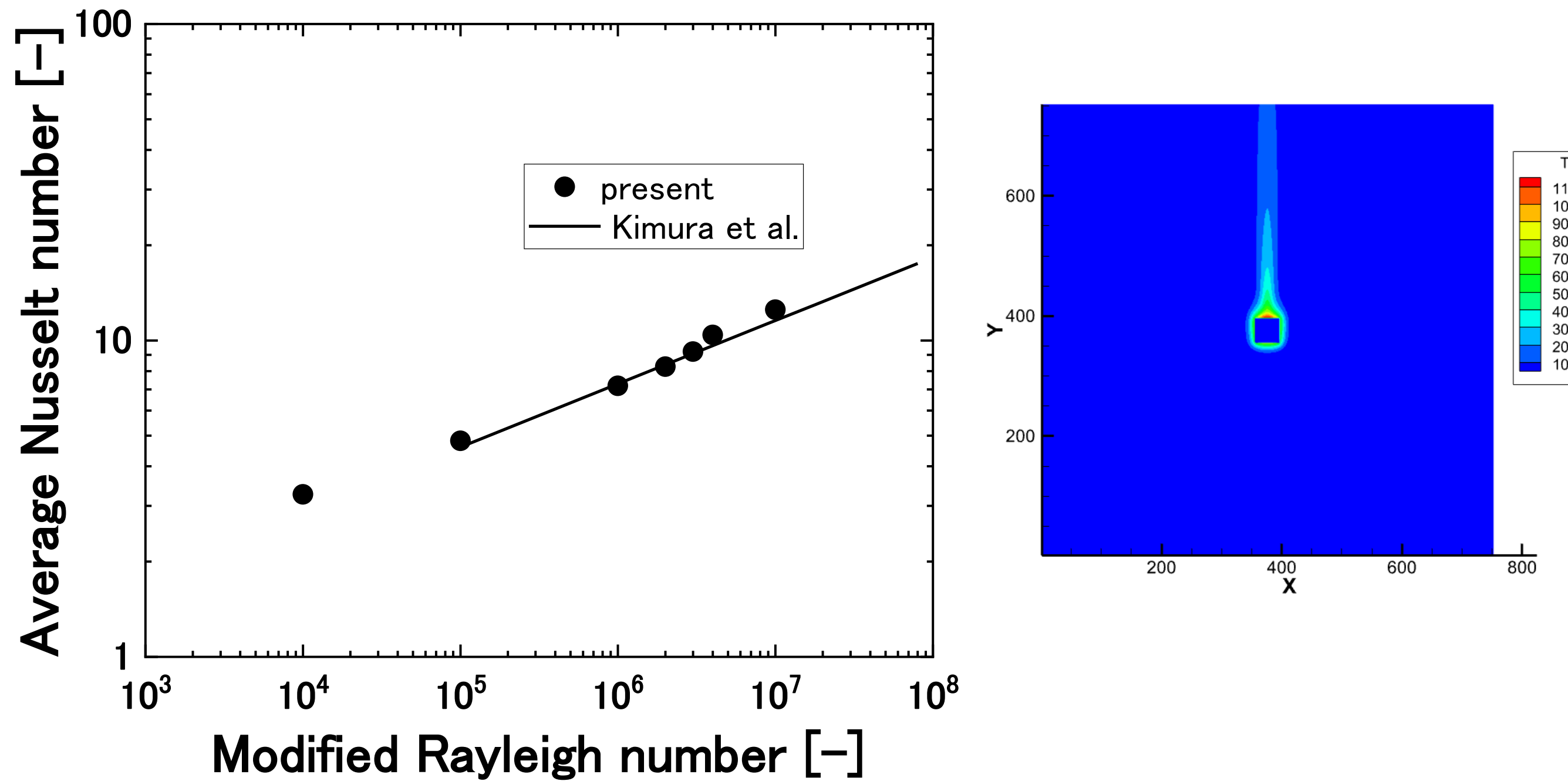
- 以上を検討の上，表面張力（spurious current）や界面移動に伴う温度場異常についても議論する。

④高Pr数流体→温度境界層の解像必要（温度場AMR実装）

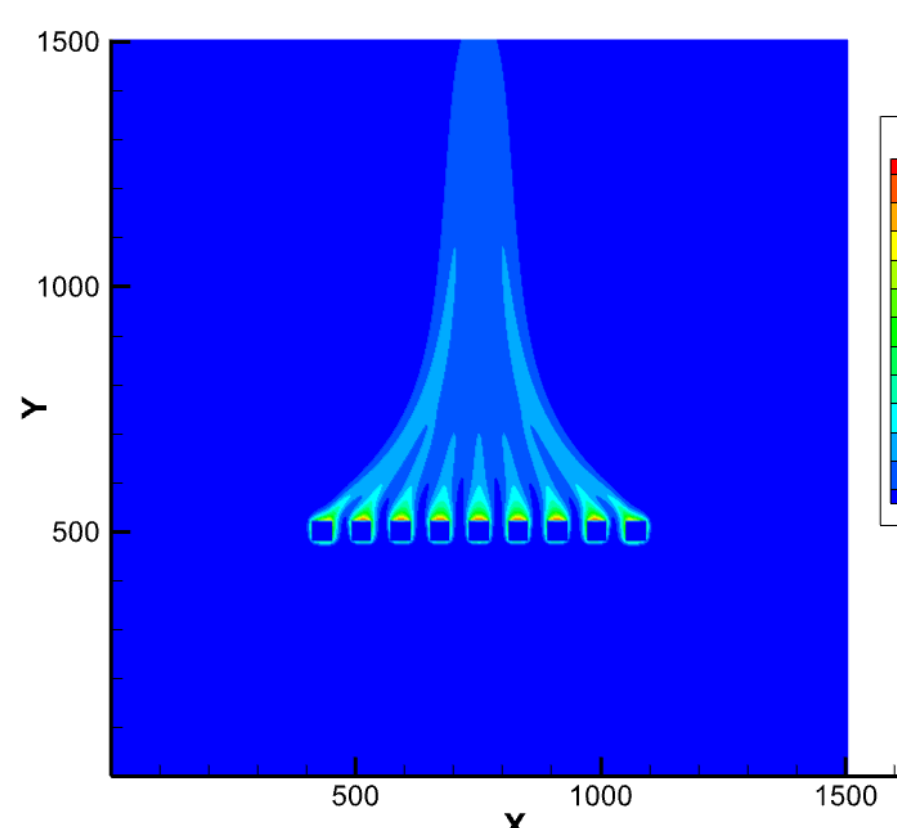
- 速度場，秩序変数と同様の手法でコード実装
- 温度場の詳細チェック中

⑤コイル周りの自然対流伝熱解析

- 単一角柱周りの検証結果



- 複数角柱へ拡張（解析領域の広さが課題）



まとめ

- 二相流の熱流動場解析の共役伝熱問題実装+AMRが必要。手法についてはメンバー間の情報交換と知見の共有が必要。
- 自然対流問題は解析領域（局所細密格子？）の確保と共役伝熱化or三次元化を検討中。