



密閉容器内に水平に置かれた加熱回転 円板上の共存対流のOpenFOAM解析

Numerical Analysis of Mixed Convection Heat Transfer Above Horizontal Rotating Disk in Closed Case using OpenFOAM

* 細川 雄介

学・岩手大学

谷津 なつき

岩手大学

廣瀬 宏一

岩手大学

福江 高志

正・岩手大学

発表内容：

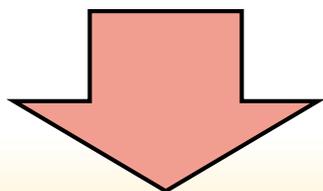
1. 背景および目的
2. OpenFOAM計算モデル
3. 解析結果および考察
4. まとめ

1. 背景と目的

加熱回転円板上の伝熱は広範な工業製品に見られる重要な基礎現象

例：大容量記憶装置 (HDD, CD)
自動車等のディスクブレーキ

高速回転機器



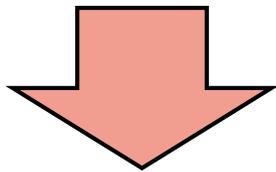
高Reynolds数, 乱流

強制対流支配



1. 背景

例：CVD装置
自転車のディスクブレーキ
低速回転機器



低Reynolds数, 層流
自然対流と強制対流が
相互に影響し合う

共存対流



本研究の目的

1. 密閉容器内に水平に設置された回転する加熱円板上の共存対流をOpenFOAMを用いて解析
2. メッシュ生成ソフト extBlockMeshを使用した回転体解析の有効性の検討

解析結果を研究室で別途実施されたFORTRANによる解析結果と比較しながら報告する。

2. OpenFOAM計算モデル

➤ 解析モデル

CFD Code

OpenFOAM 2.3.0

Computer

Ubuntu 14.04

Intel Core I5 3470 (3.2GHz x 2)

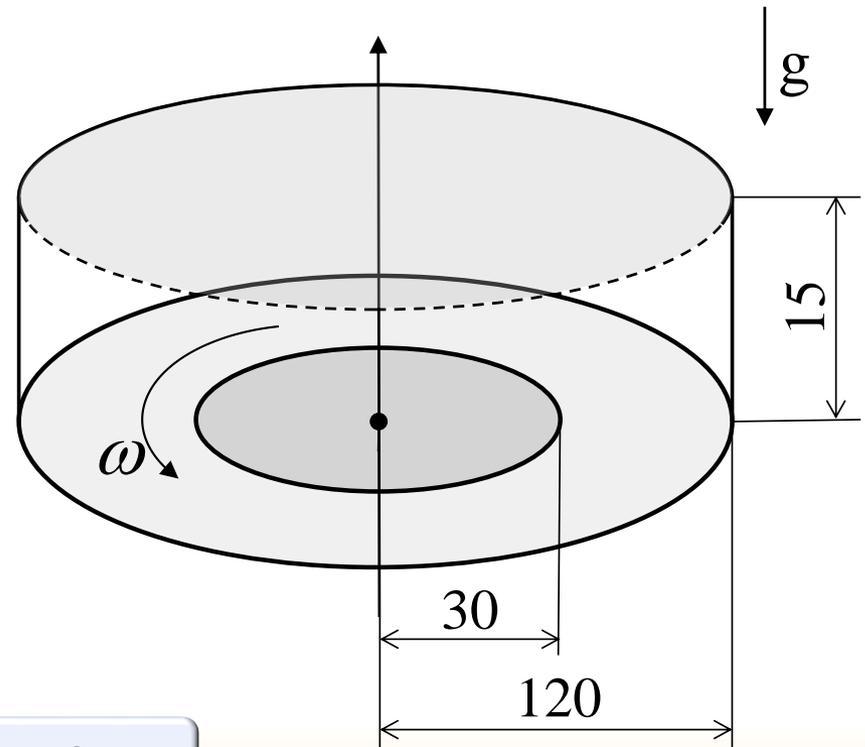
8GB Memory

Mesh generator

extBlockMesh

Mesh number

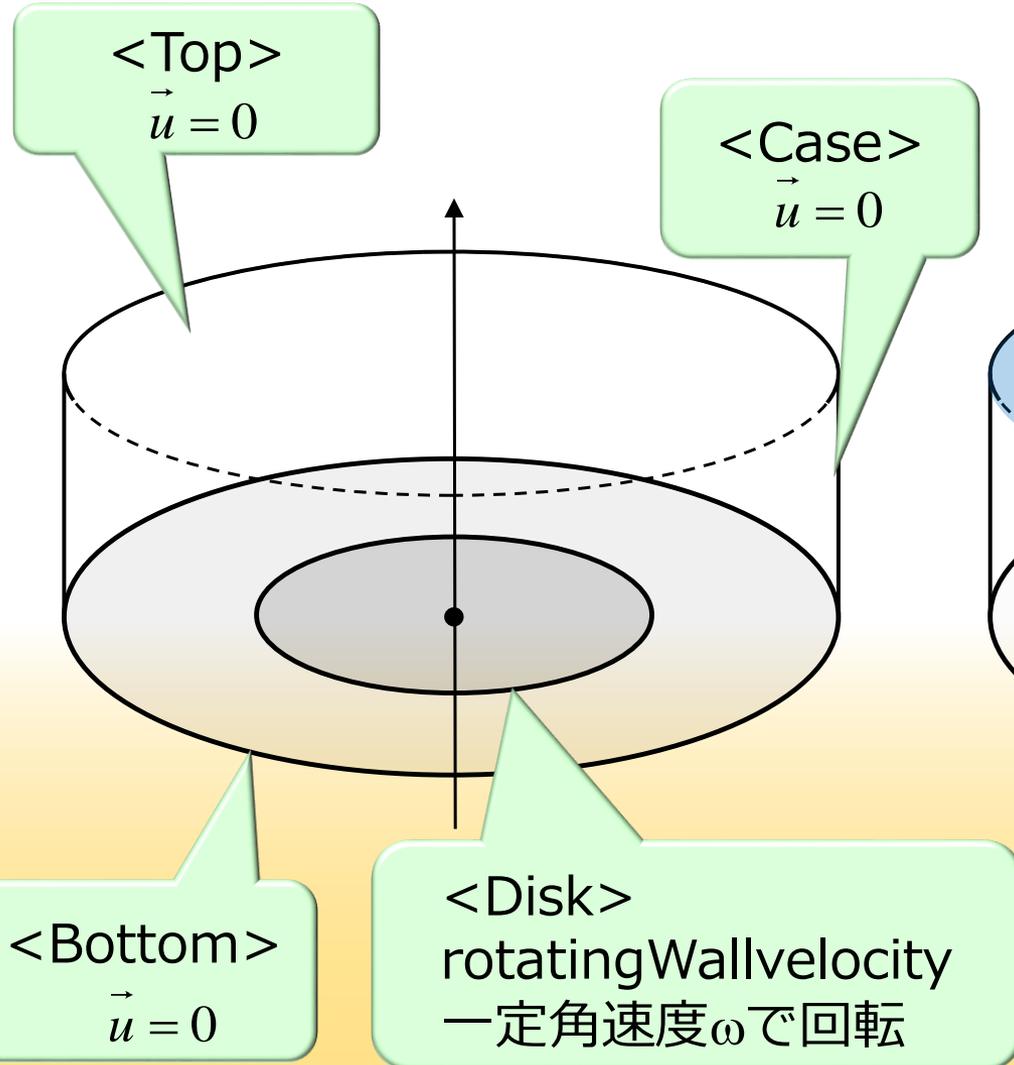
28440 meshes
(r: 44, θ : 72, z: 10)



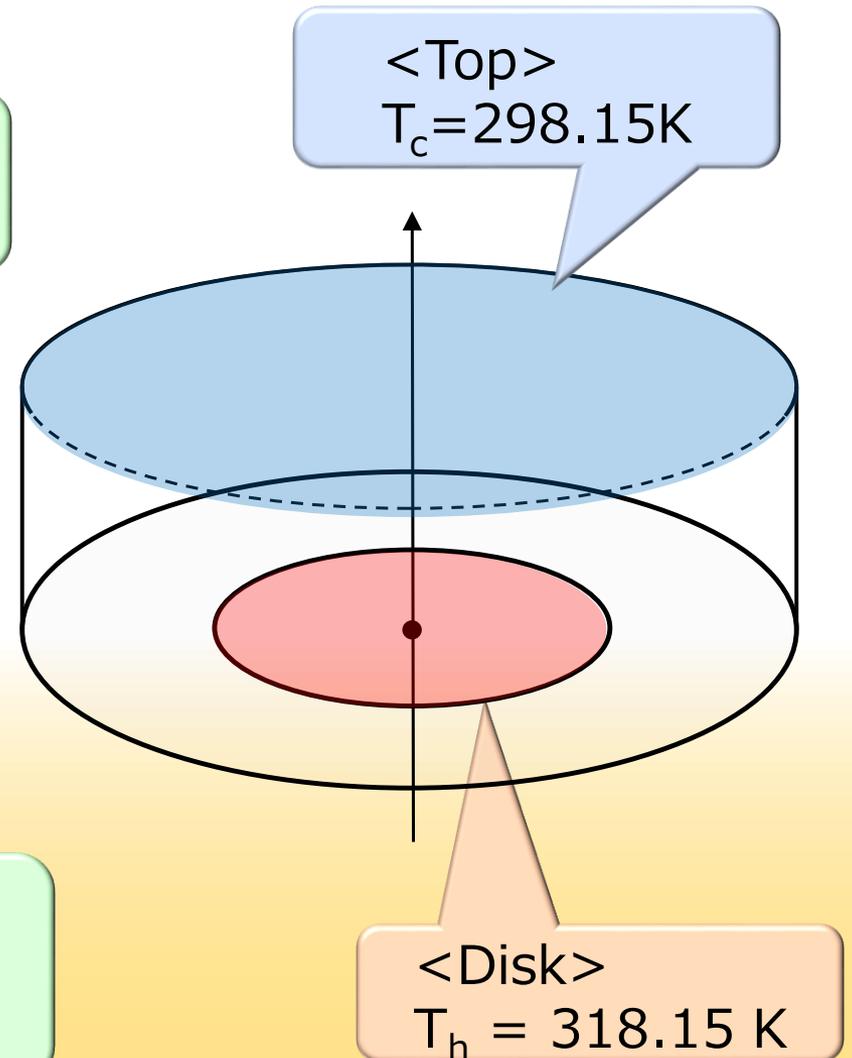
- **buoyantBoussinesqPimpleFoam**を使用 (Boussinesq近似, 非定常解析)

2. OpenFOAM計算モデル

境界条件 (流れ場)



境界条件 (温度場)



2. OpenFOAM計算モデル

評価方法

Reynolds数

$$Re = \frac{uR}{\nu}$$

Richardson数

$$Ri = \frac{g\beta\Delta Th}{u^2}$$

u [m/s] : 円板外周速度
 g [m/s²] : 重力加速度
 ΔT [K] : 円板と容器の温度差

R [m] : 円板半径
 β [1/k] : 体積膨張率
 h [m] : 容器高さ

2. OpenFOAM計算モデル

評価方法

無次元温度

$$T^+ = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}$$

無次元高さ

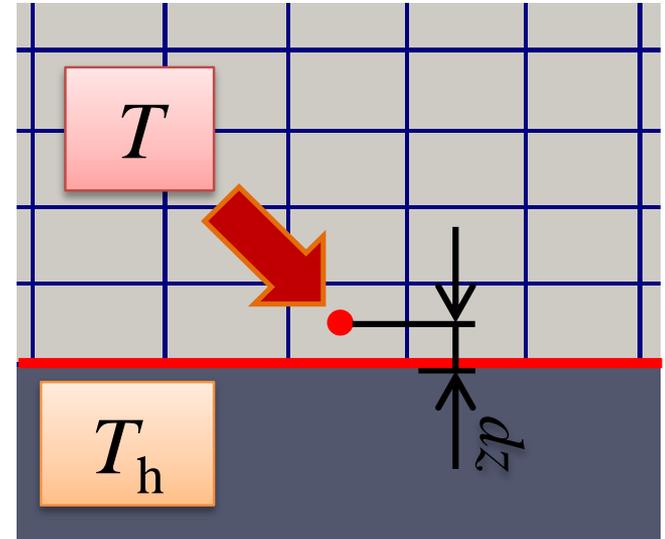
$$z^+ = \frac{z}{H}$$

局所Nusselt数

$$Nu = \frac{T_1^+ - T_2^+}{dz}$$

平均Nusselt数

$$Nu_m = \frac{1}{A^+} \int (Nu) dA^+$$



T^+ [-]: 無次元温度

z [m]: 高さ

T_h [K]: 円板温度

R [m]: 円板半径

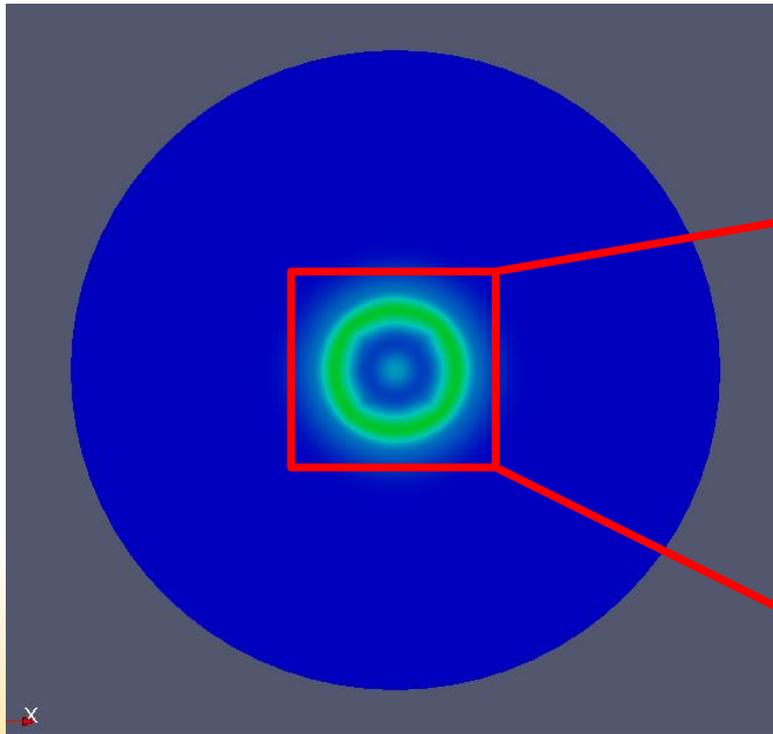
A [m²]: 円板面積

T_c [K]: 容器温度

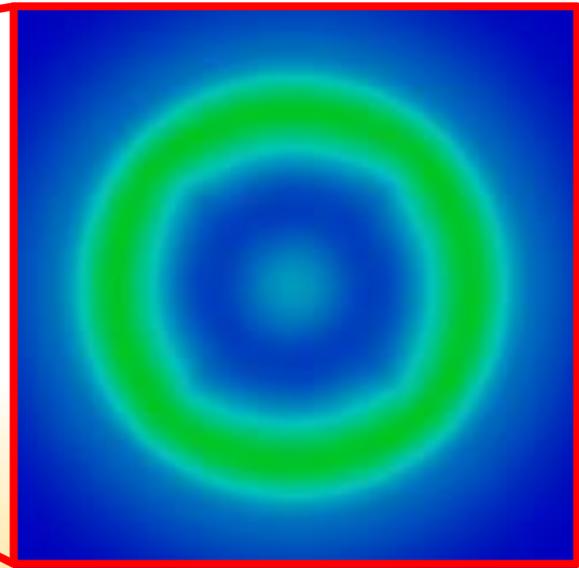
2. OpenFOAM計算モデル

- extBlockMeshの使用

- blockMeshを使用したメッシュの場合、メッシュに不連続点を生じ、解析結果においてメッシュ依存と考えられる不連続性が発生する。



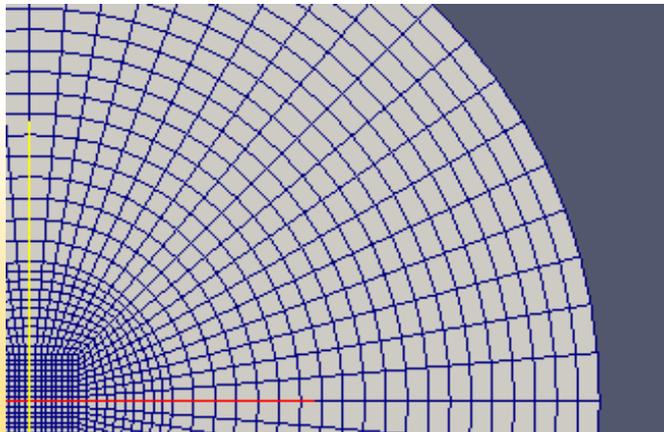
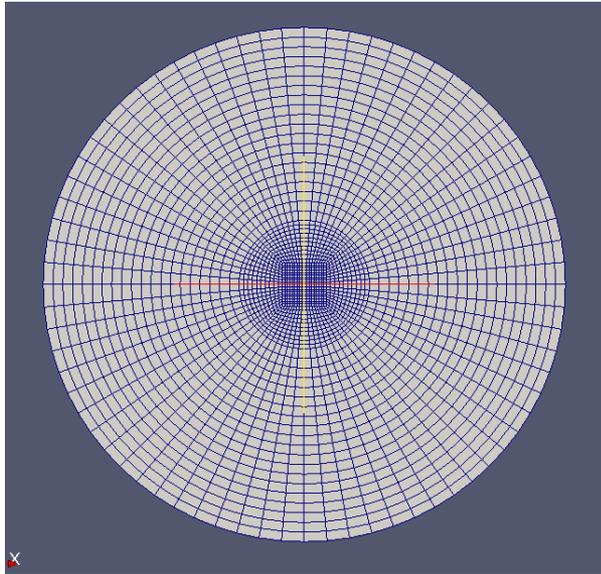
$\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 20rpm, 解析時間1.9秒,
 $z = 7.5\text{mm}$ における断面図



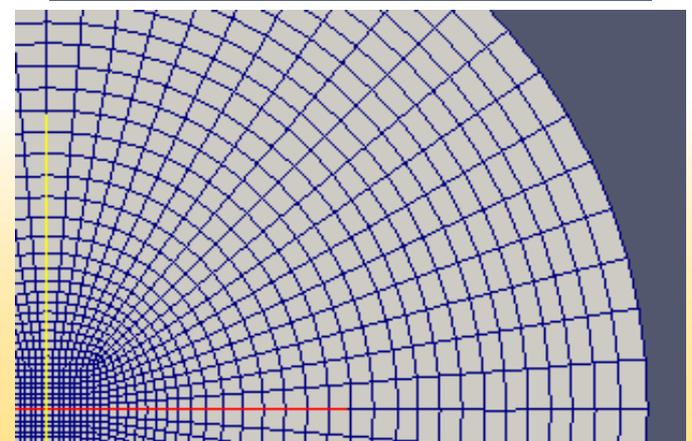
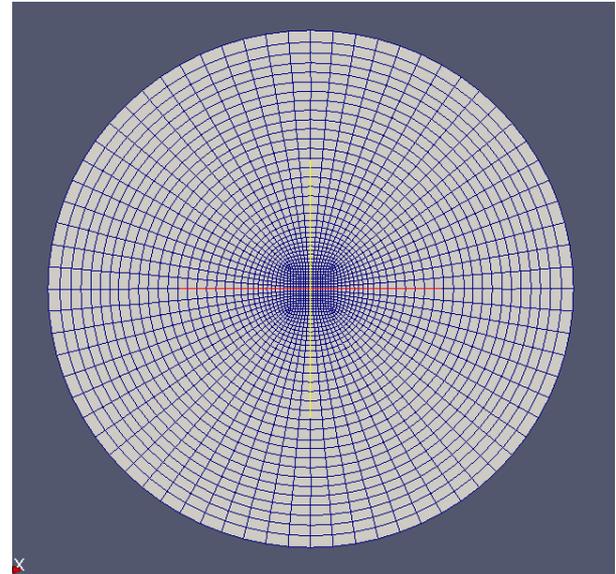
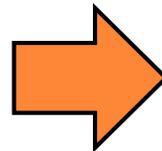
extBlockMeshを用いてメッシュをスムージングすることで、
メッシュの品質改善を行った。

2. OpenFOAM計算モデル

メッシュの比較



blockMesh

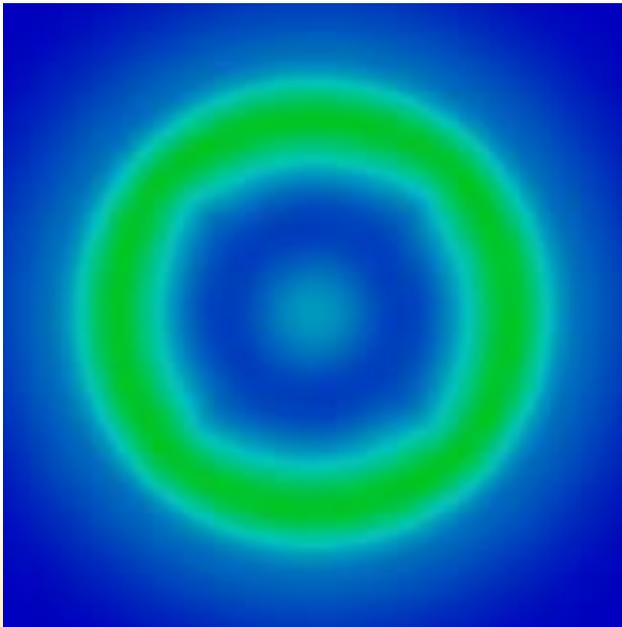


extBlockMesh

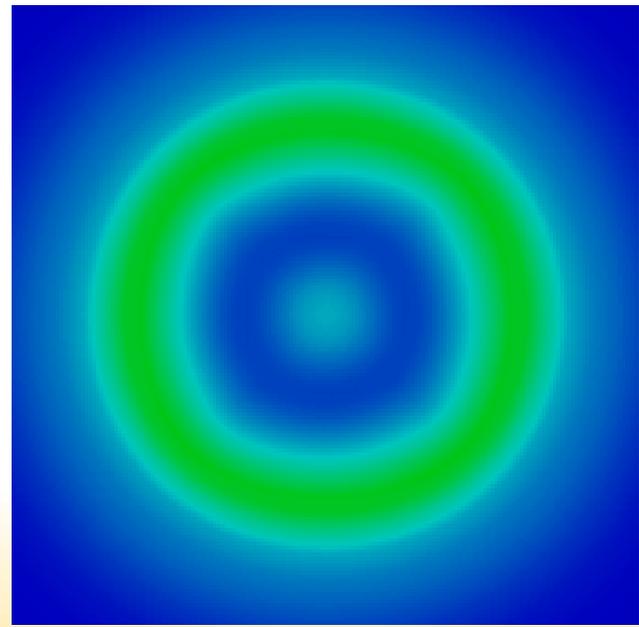
2. OpenFOAM計算モデル

- 結果の比較 ($\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 20rpm, 解析時間1.9秒, $z = 7.5\text{mm}$ における断面図)

blockMesh



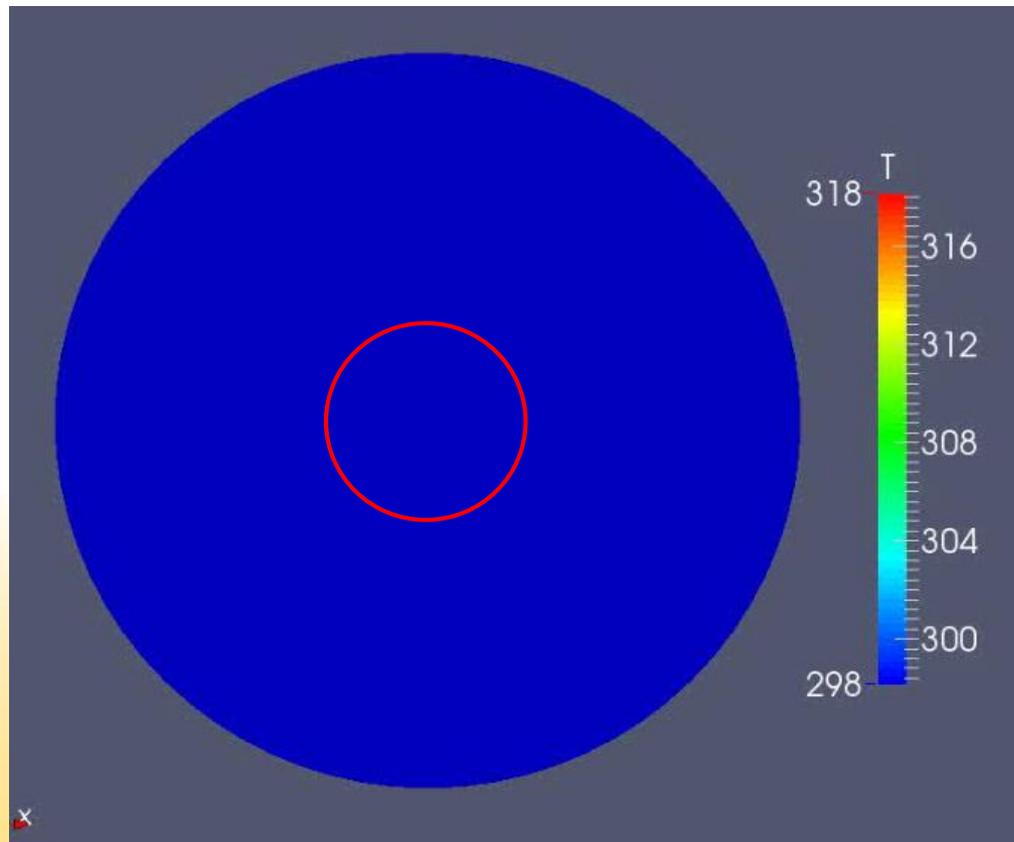
extBlockMesh



メッシュ依存とみられる不連続性が緩和された。

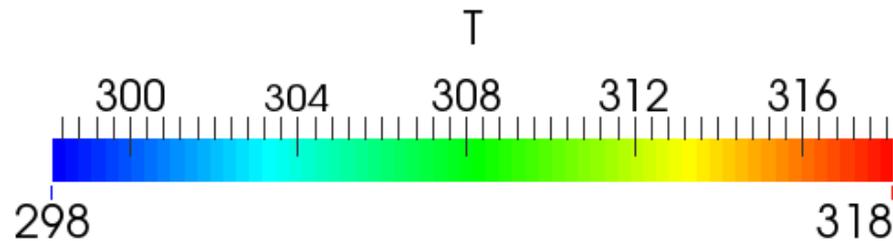
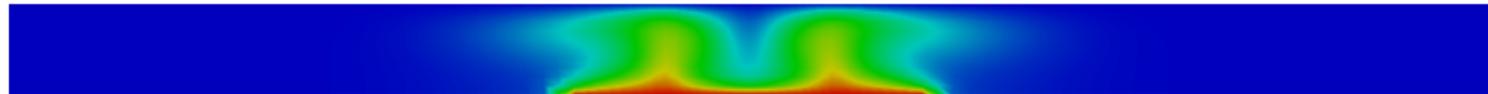
3. 解析結果および考察

- 高さ方向7.5mmにおける断面図 (円板を赤線で示した。)
- 円板温度 45°C
- 容器温度 25°C
- 回転数 20rpm



3. 解析結果および考察

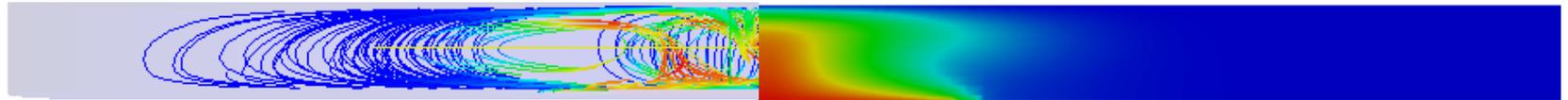
- 解析開始から 30 s の時刻における円板中心の断面図
 - 円板温度 45°C
 - 容器温度 25°C
 - 回転数 20rpm
 - 円板上にベナールセルが形成されていることが確認できる。



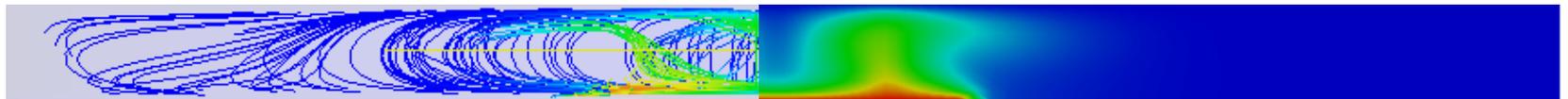
3. 解析結果および考察

- 回転数による流れの挙動の変化 (円板温度 45°C, 容器温度 20°C)

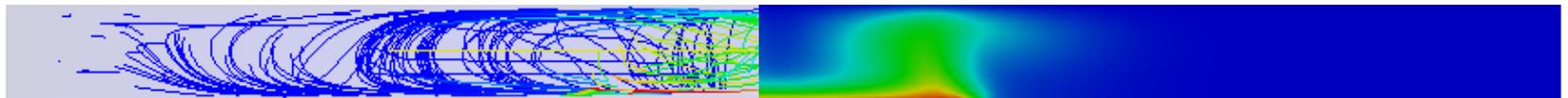
➤ 10rpm



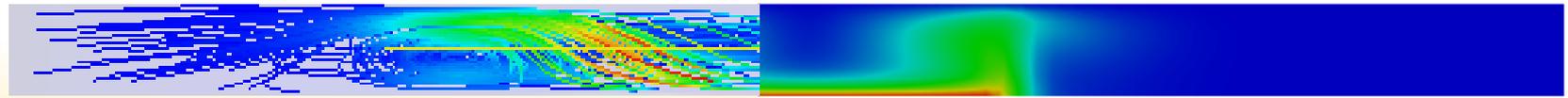
➤ 30rpm



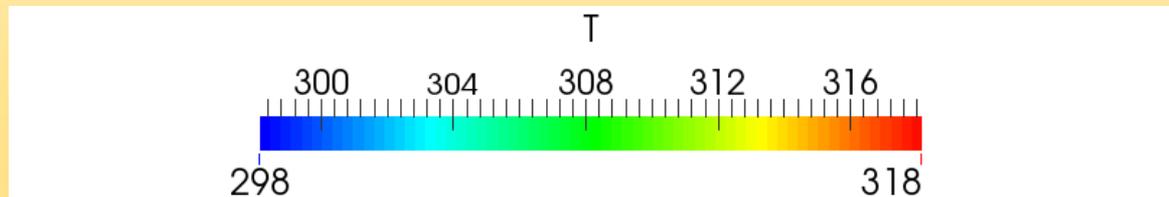
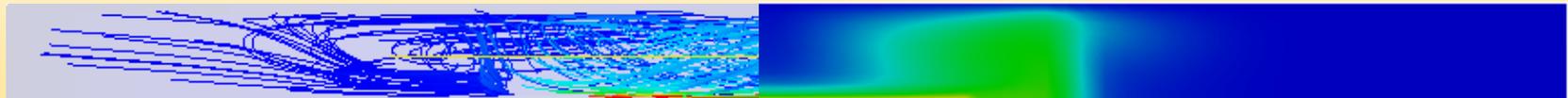
➤ 50rpm



➤ 100rpm



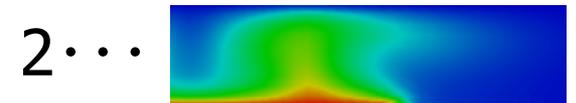
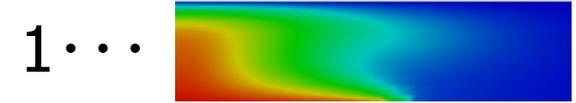
➤ 300rpm



3. 解析結果および考察

1. 温度差に対して回転数が小さい場合

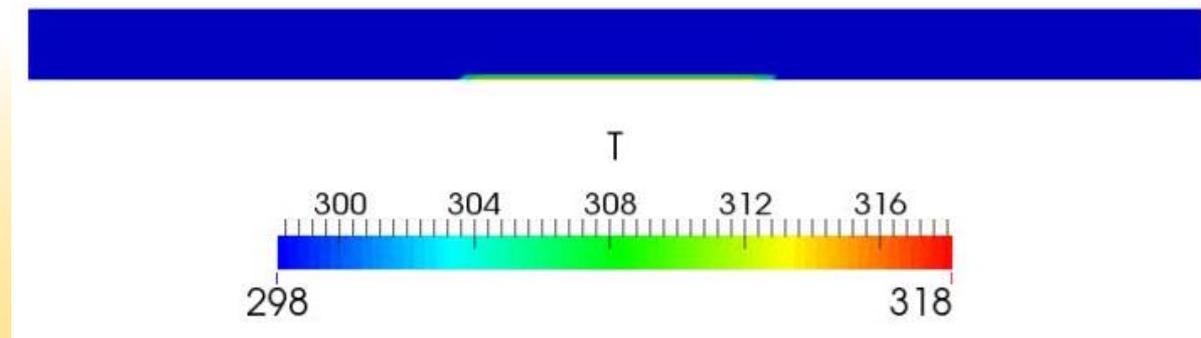
- 浮力の影響が大きくなり、円板中央から上昇流が形成される.



2. 温度差に対して回転数が大きい場合

- 遠心力の影響が大きくなり、ドーナツ状のベナールセルが形成される.
- 回転数が大きくなるほど中心から外側に広がる流れとなる.

- 浮力と遠心力が拮抗する場合は流れの形成が不安定となり、定常状態に達するまで時間を要するようになる.



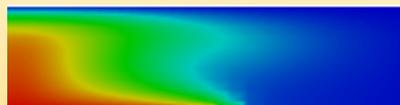
$T_h = 45^\circ\text{C}$, $T_c = 25^\circ\text{C}$, 回転数15rpmの場合の断面図

3. 解析結果および考察

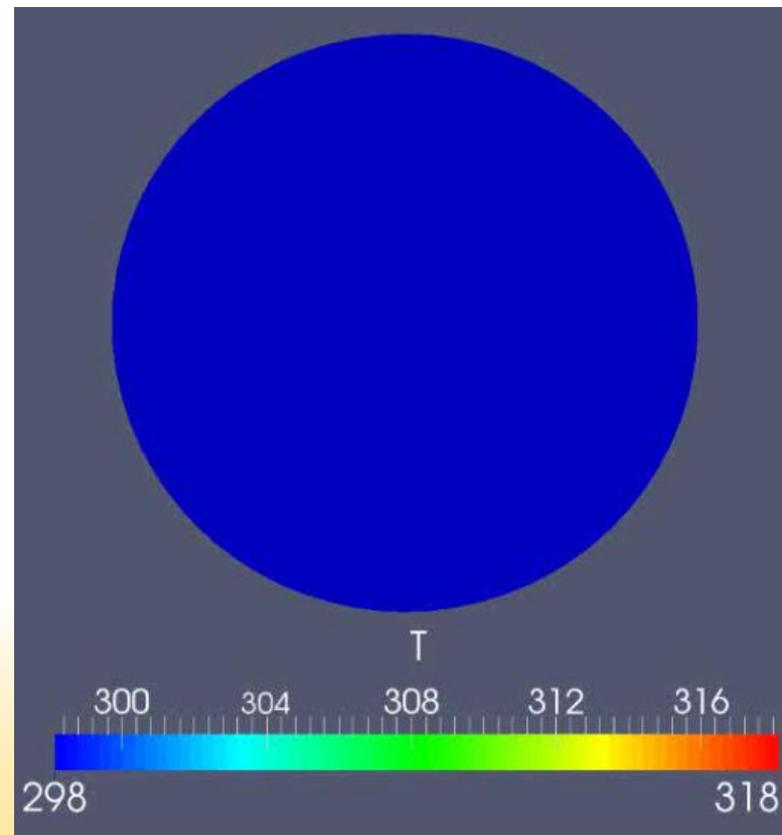
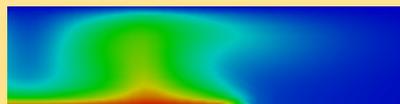
Richardson数について

- Richardson数は浮力と慣性力の比を表す無次元数であり、数字が大きいほど自然対流の影響が強くなる。
- 円板回転数が16rpm ($Ri=4.27$) のとき、円板中央から上昇流が生じる流れとドーナツ状のベナールセルが交互に生じ、定常状態に達しなかった。
- 17rpm ($Ri=3.78$) においてはドーナツ状のベナールセルとなったため、前述した2種類の流れに分かれる臨界Richardson数はおおよそ4前後であると考えられる。

$Ri > 4$



$Ri < 4$

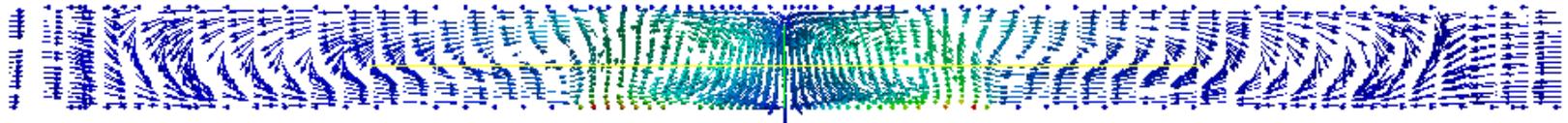


$\Delta T=20^\circ\text{C}$, 回転数16rpm,
 $z=7.5\text{mm}$ における断面図
(再生速度2倍)

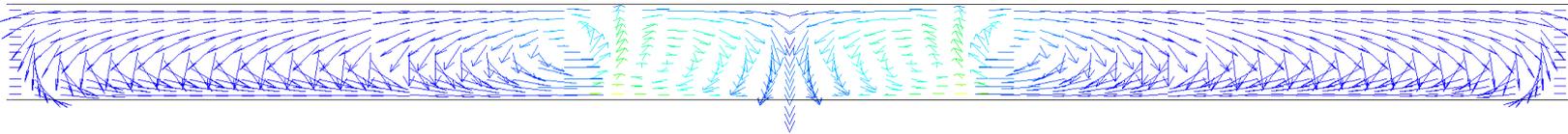
3. 解析結果および考察

- FORTRANとの比較
 - 温度差 20°C , 回転数 50rpm における速度ベクトル図

- OpenFOAM



- FORTRAN



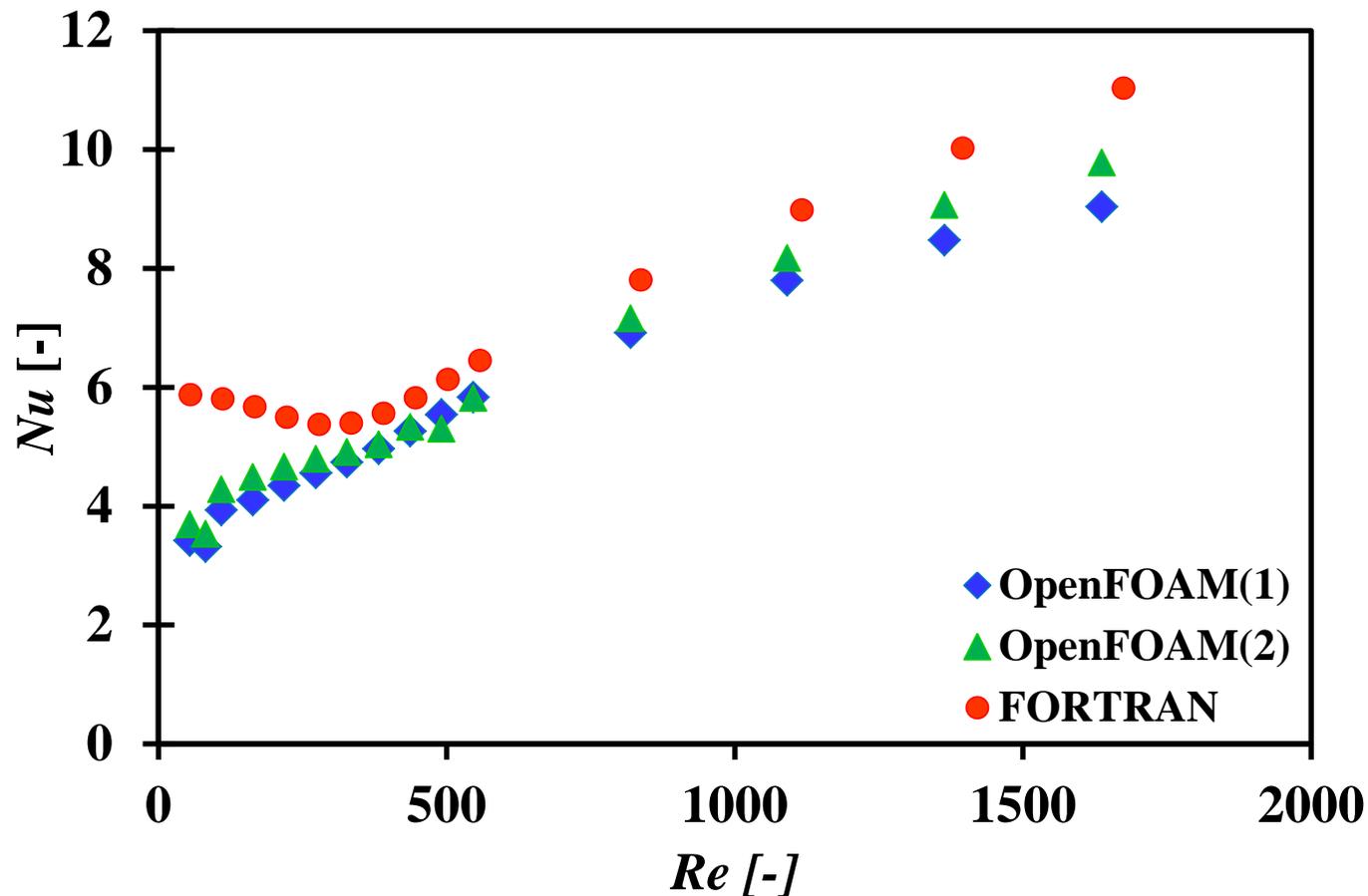
- 同一寸法, 同一条件におけるOpenFOAMとFORTRANの解析結果の流れの挙動に類似性が見られる.



OpenFOAMを用いて回転体における共存対流の解析が可能であると考えられる.

3. 解析結果および考察

- Reynolds数とNusselt数の関係について



OpenFOAM(1) : z軸方向 10分割
OpenFOAM(2) : z軸方向 20分割

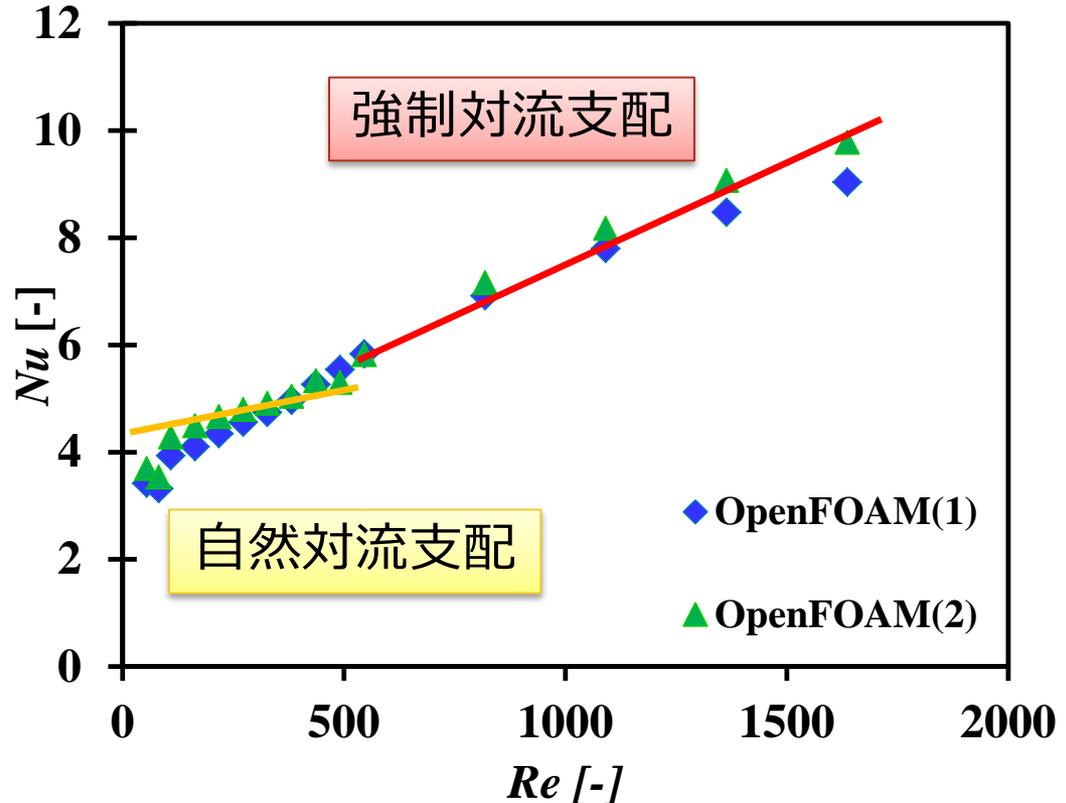
3. 解析結果および考察

- 低Reynolds数の場合、自然対流の影響が大きいためにReynolds数に対するNusselt数の増加が少ない。
- 一方で高レイノルズ数においては強制対流支配となるため、Reynolds数にほぼ比例してNusselt数が増加する。



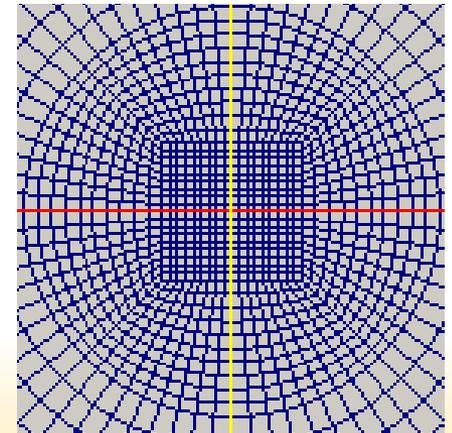
Reynolds数とNusselt数のグラフを2本の漸近線により近似されるといふ共存対流の特徴が現れている。

- メッシュ分割数を増やした場合の解析結果は、よりFORTRANによる解析結果の値に近付いている。



3. 解析結果および考察

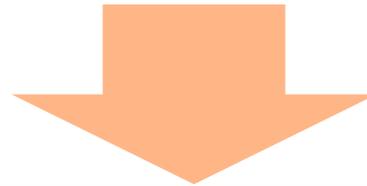
- OpenFOAMとFORTRANとの比較について
 - 同一条件における流れの挙動はよく似ている。
 - Reynolds数に対するNusselt数の値の傾向については一致しているものの、値の不一致がみられた。
- この原因として以下の要素が考えられる。
 1. メッシュ生成方法の相違
 - blockMeshの性質上、円板中央付近のメッシュが正方形に近い形状となる。
 2. 計算方法および座標系の相違
 - FORTRANでは円筒座標系を使用したか、OpenFOAMでは直交座標系を使用している。



4. まとめ

本研究では、OpenFOAMによる加熱回転円板上の共存対流の解析を行い、その結果として、以下の知見を得た。

- OpenFOAMを用いた解析により、回転円板上の共存対流の挙動を見ることができた。
- OpenFOAMを用いた解析により、加熱回転円板上の伝熱特性の傾向をつかむことができた。



課題

- extBlockMeshの数値を修正する。
- 他のメッシュ生成ソフトとしてcfMeshの応用を検討する。
- 垂直方向の加熱回転円板について解析を行い、FORTRANによる解析と比較する。

...That's all.
Thank you for your kind attention.

Numerical Analysis of Mixed Convection Heat Transfer Above Horizontal Rotating Disk in Closed Case using OpenFOAM



細川 雄介
谷津 なつき
廣瀬 宏一
福江 高志

Appendix.
