

粘性流と静磁場の 大規模有限要素計算

金山研究室

1. 粘性浅水波方程式と津波シミュレーション
2. 自動販売機の熱対流シミュレーション
3. 静磁場の大規模有限要素計算



使用環境

OS

□Linux 64 bit (VMWareでCentOSを起動/処理時)

計算機自体はWindows 7だが、計算機自体に負担がかからないよう、重い処理もスムーズに済ませることが可能なLinuxを用いることにした

□Windows7 64 bit (可視化のみ)

使用ソフト

□ADVENTURE_sFlow

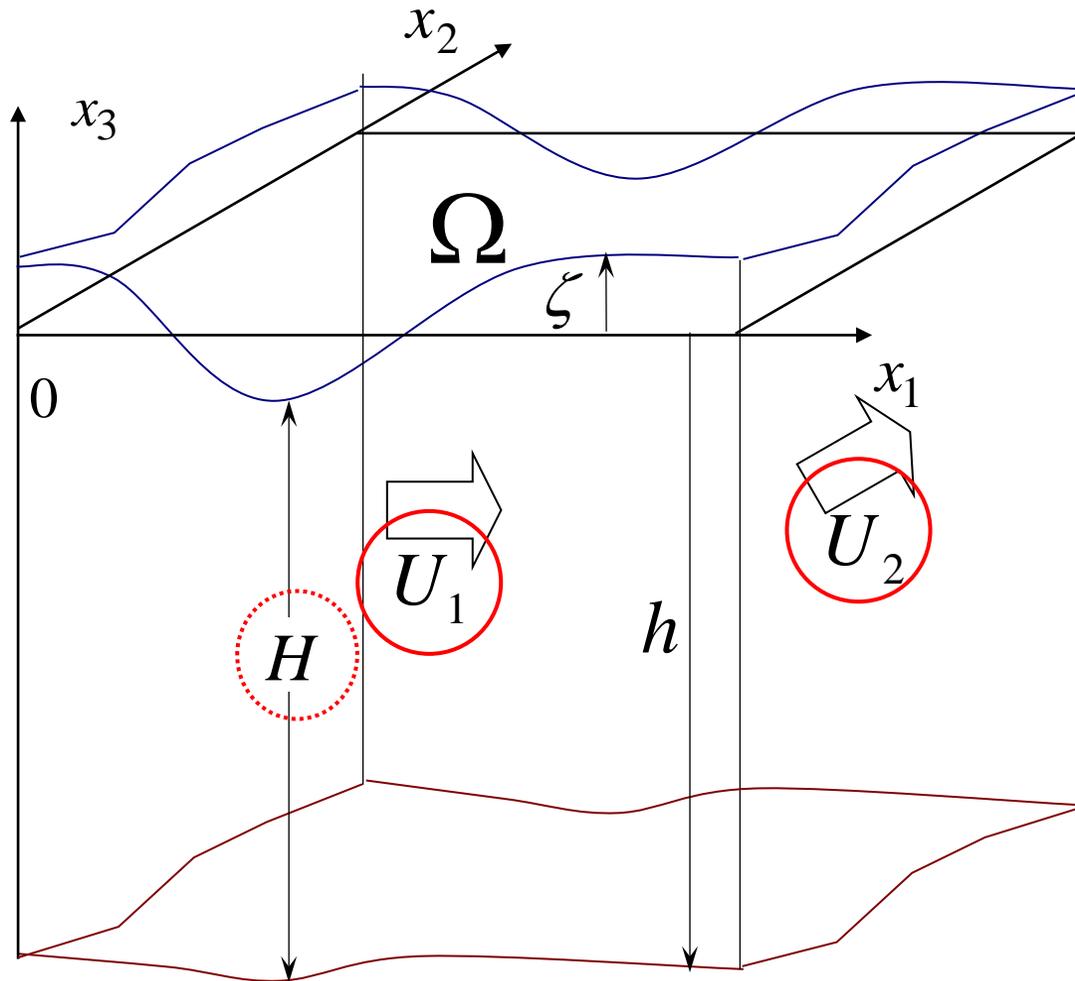
□ADVENTURE_Magnetic

□ParaView

□ParticleViewer



浅水波方程式の導出



層の厚さ

$$H = \zeta - h,$$

層で平均化された速度

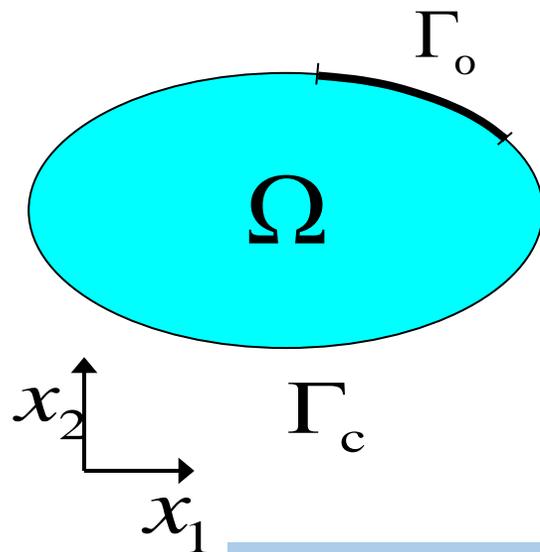
$$U_i = \frac{1}{H} \int_h^\zeta u_i dx_3,$$

ζ : 水面の座標

h : 水底面の座標

浅水波方程式の導出

計算領域は境界 Γ_c, Γ_o に囲まれた2次元の多角形領域 Ω である.



$$\frac{\partial}{\partial t} \zeta + \sum_{j=1}^2 \frac{\partial}{\partial x_j} (H U_j) = 0$$

$$H \left(\frac{\partial}{\partial t} U_i + \sum_{j=1}^2 U_j \frac{\partial}{\partial x_j} U_i \right) = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \sum_{j=1}^2 \frac{\partial}{\partial x_j} (H \tilde{\tau}_{ij})$$

$$+ \frac{1}{\rho} \theta \rho_a W_i \left((W_1)^2 + (W_2)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{g}{C^2} U_i \left((U_1)^2 + (U_2)^2 \right)^{\frac{1}{2}} + (-1)^{i+1} f H U_{i+1}$$

$$U_i(x, t) = 0 \quad \text{on } \Gamma_c, \quad U_i(x, t) = U_{i\Gamma_o}(x, t) \quad \text{on } \Gamma_o.$$

陸に面している境界

外洋に面している境界(自由透過)

$$U_i(x, 0) = U_{i0}(x), \quad \zeta(x, 0) = \zeta_0(x). \quad \text{津波波源}$$

有限要素近似

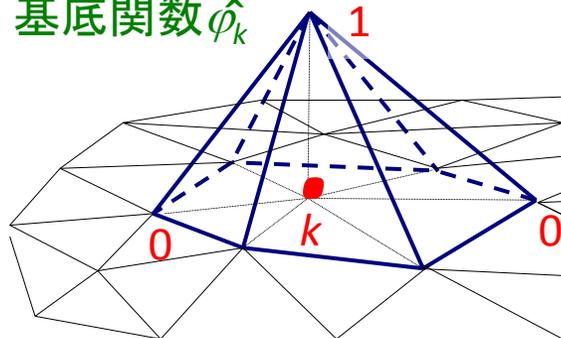
空間微分を含む項に対しては基底関数 $\hat{\phi}_k$,
含まない項に対しては対応する階段関数 $\bar{\phi}_k$,
を用いて有限要素近似を行う。

次のような記号を定義する。

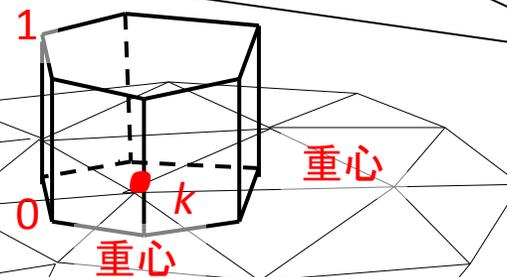
$U_{i,k}^n, \zeta_k^n$: U_i, ζ の n ステップ目の節点 k での近似値

U_i を $\hat{U}_i^n = \sum_k U_{i,k}^n \hat{\phi}_k$ もしくは $\bar{U}_i^n = \sum_k U_{i,k}^n \bar{\phi}_k$ の形で近似している。

基底関数 $\hat{\phi}_k$



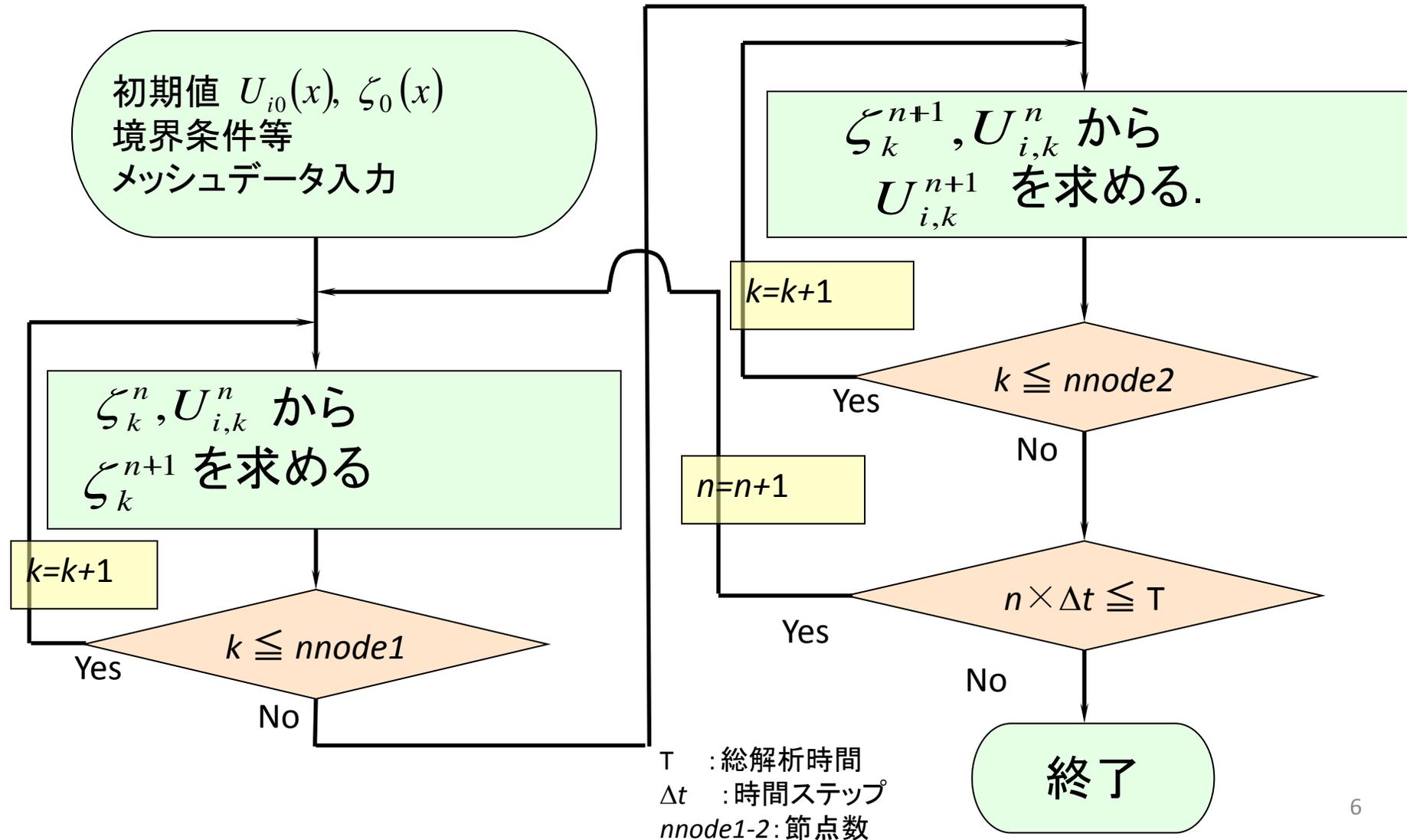
階段関数 $\bar{\phi}_k$



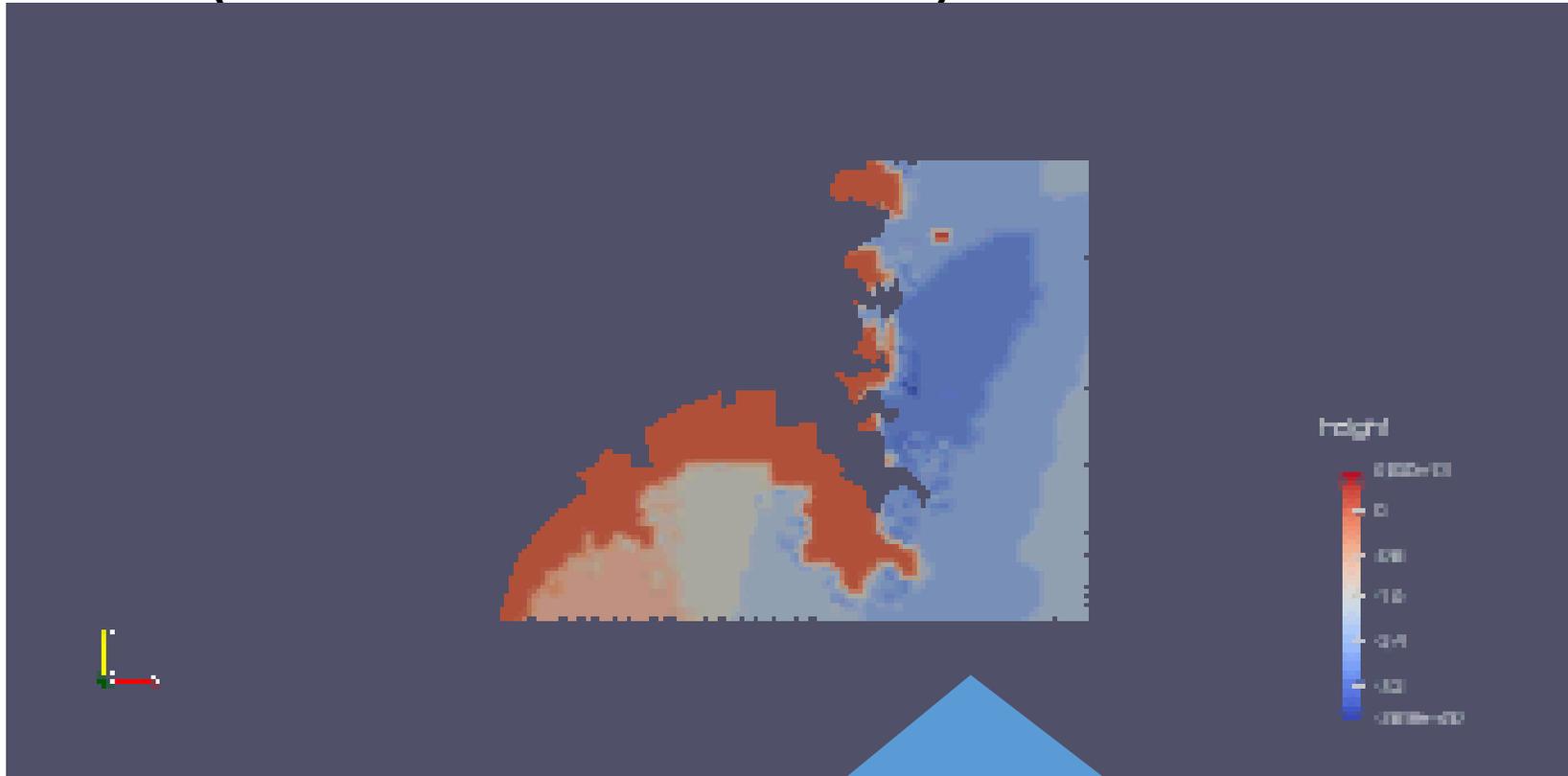
全ての節点について
足し合わせた形

2次元の多角形領域 Ω

解析の流れ



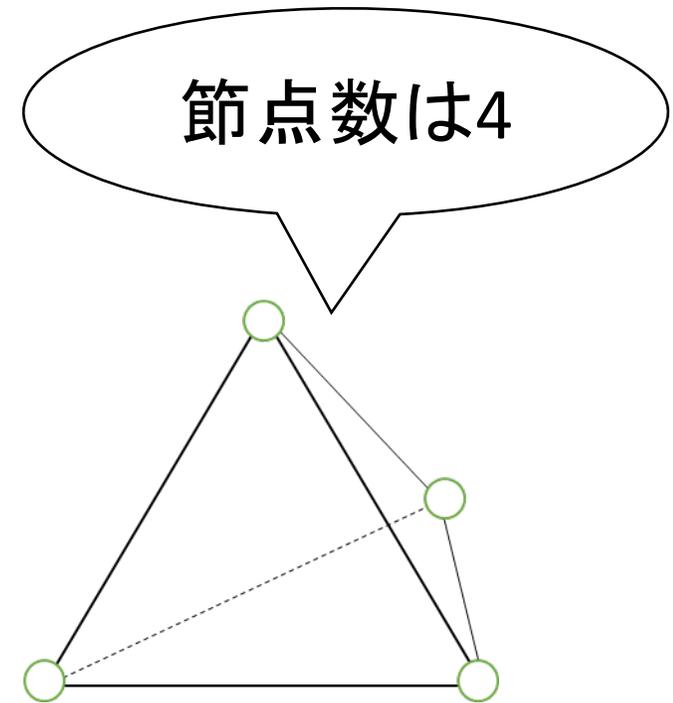
解析例 (宮城県 石巻湾)



動画は金山研究室まで！！！！

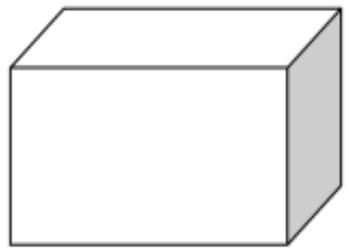
ADVENTURE_sFlowの特徴

- 熱対流方程式の**非定常問題の解析**が可能
- 安定化有限要素法を使用
- Lagrange微分を特性曲線法によって近似した有限要素法を使用
- **四面体一次要素**に対応
- 伝熱問題と流れ問題を分離して解く**弱連成問題**として定式化
- **階層型領域分割法**を使用

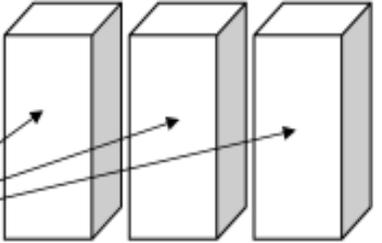


非定常解析機能

解析領域の全体モデル

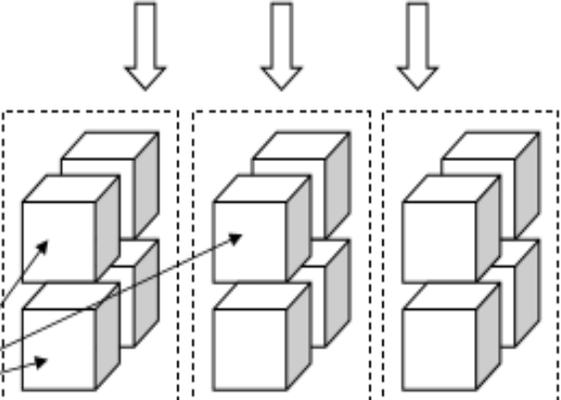


分割モデル (Step 1)

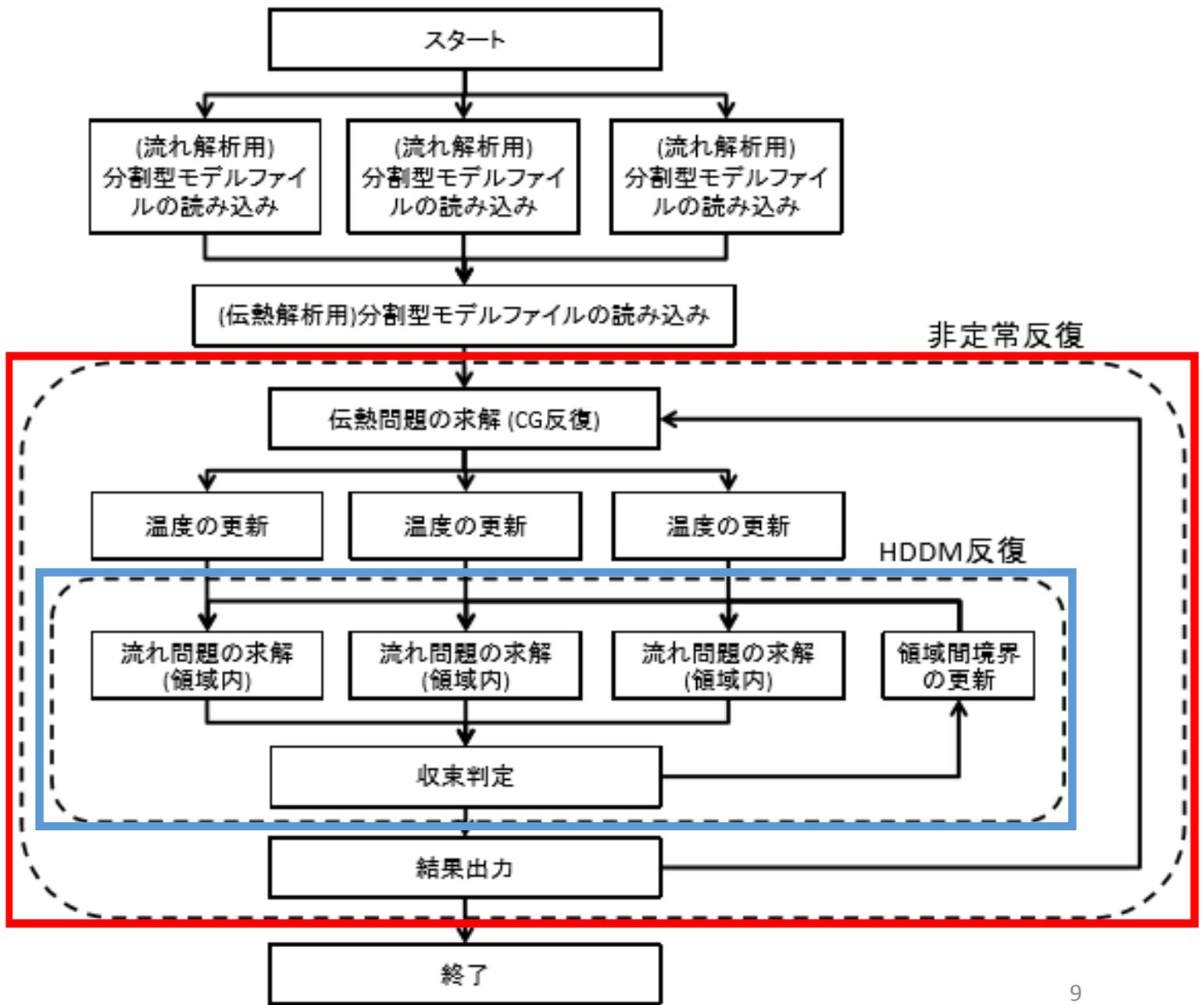


部分(Part)

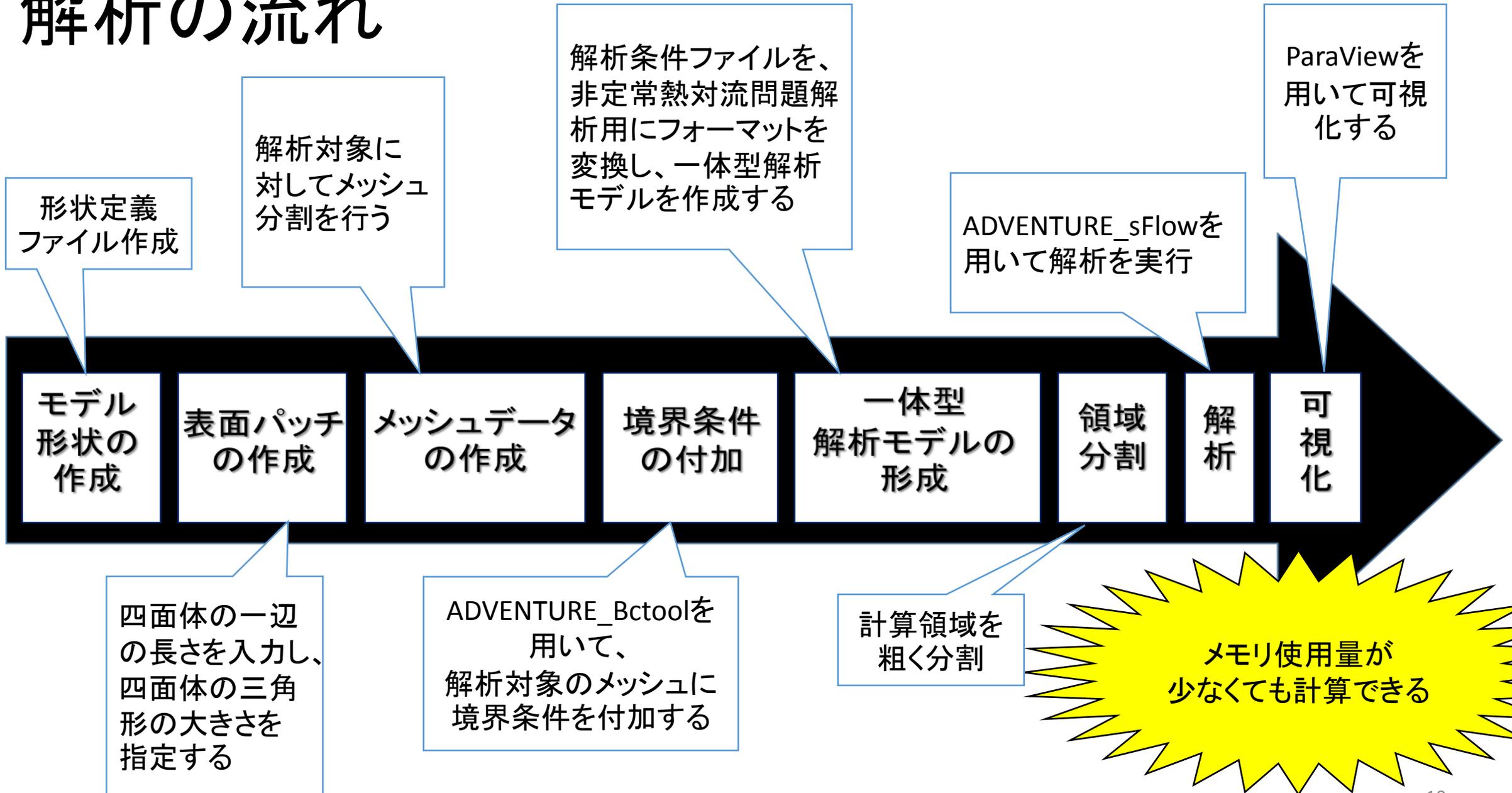
分割モデル (Step 2)



部分領域(Subdomain)



解析の流れ



thermal cavity

-解析モデルの形状と境界条件

温度設定

$$T_{\text{high}}=1.0[\text{K}]$$

$$T_{\text{low}}=0.0[\text{K}]$$

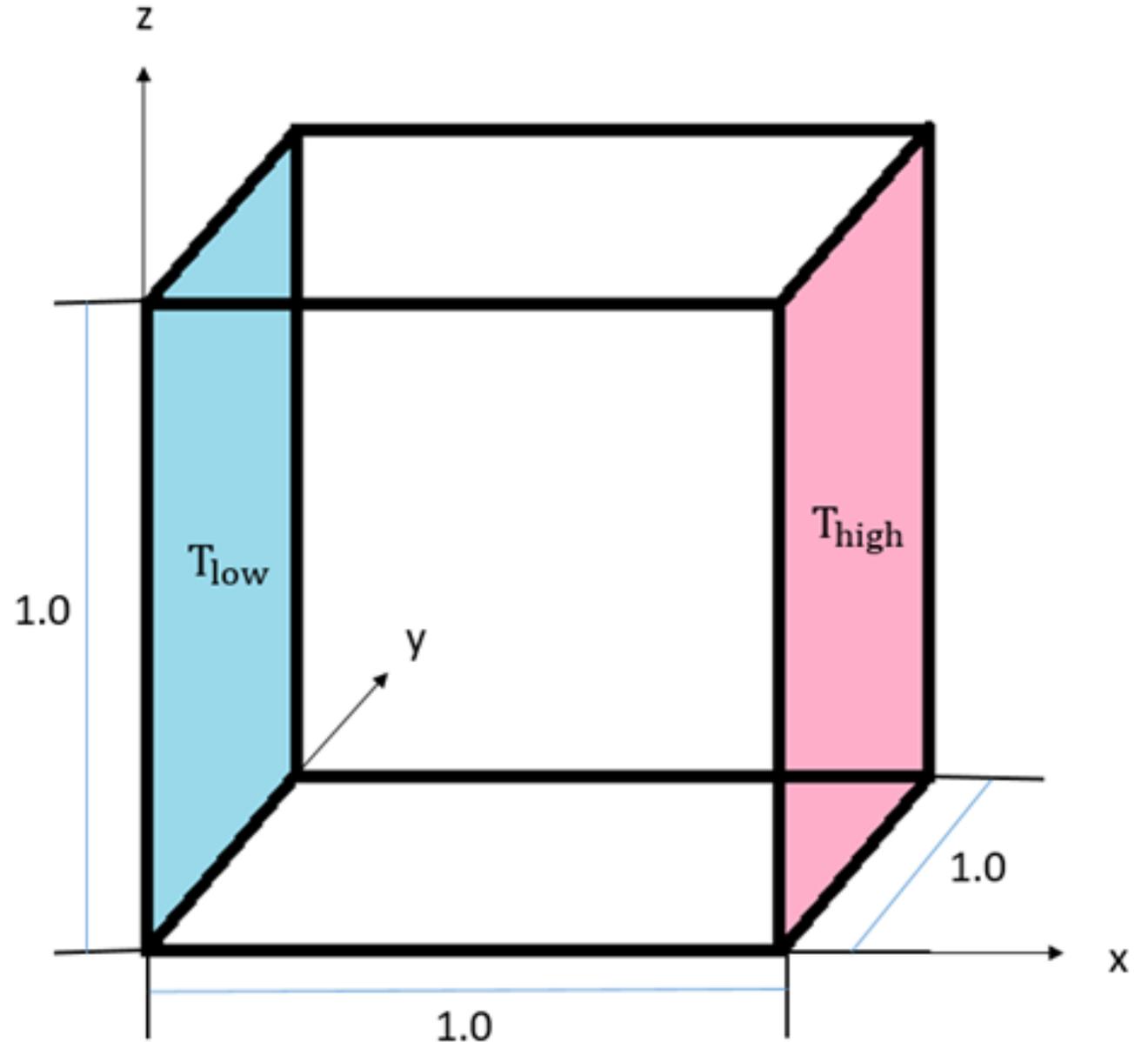
速度指定

$$[x=0.0, x=1.0](u, v, w)=(0, 0, 0)[\text{m/s}]$$

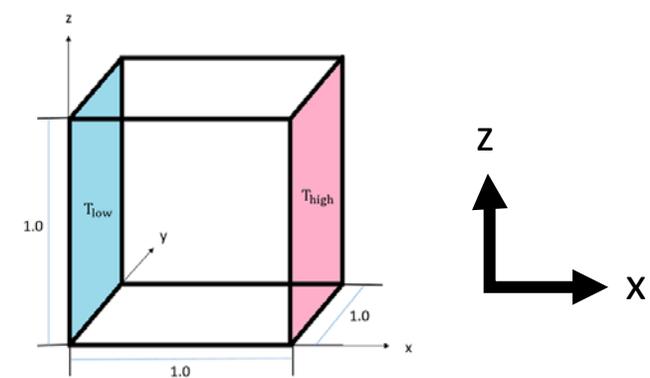
$$[z=0.0, z=1.0](u, v, w)=(0, 0, 0)[\text{m/s}]$$

$$[y=0.0, y=1.0]v=0[\text{m/s}]$$

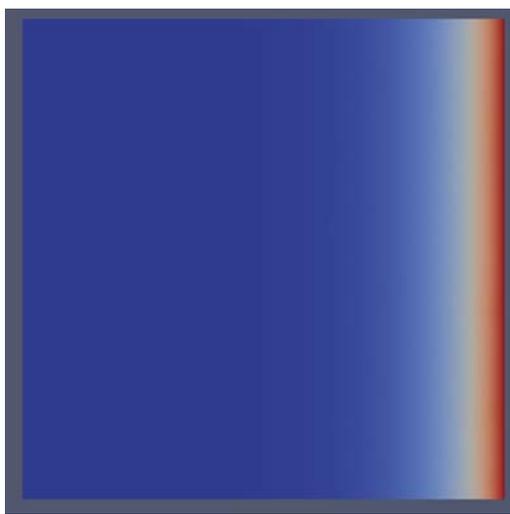
[y=0.0, y=1.0]のとき
u, wは
自然境界条件とする



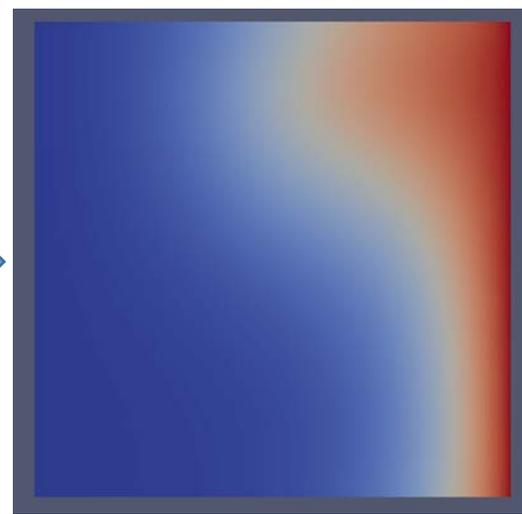
thermal cavity 解析結果 (step数=61, $\Delta t=0.01$)



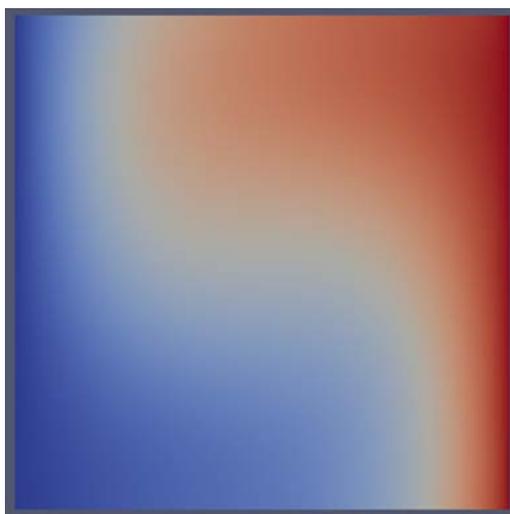
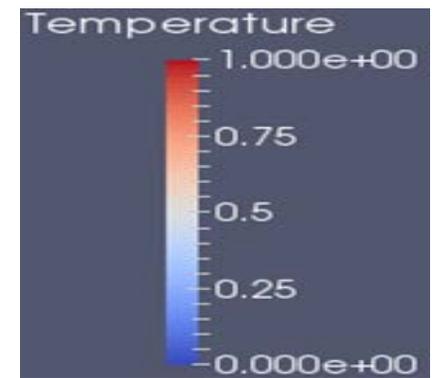
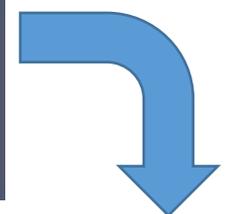
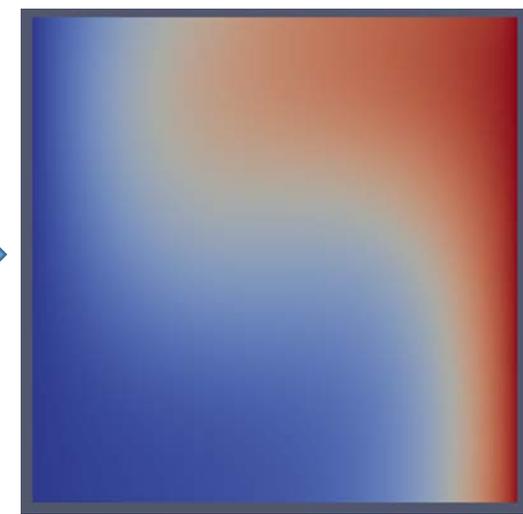
1step



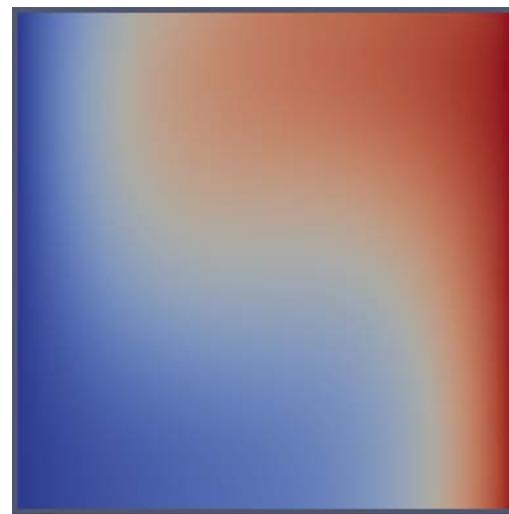
5step



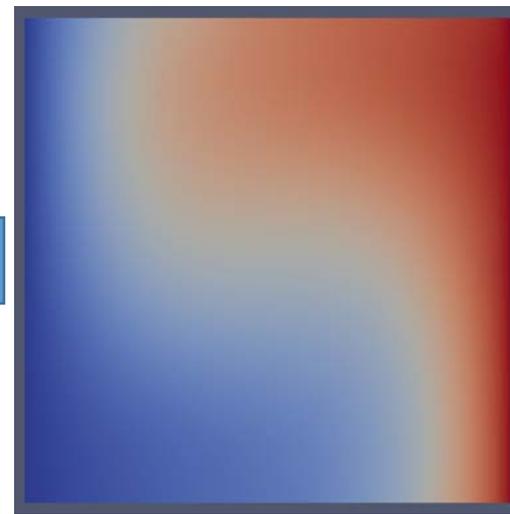
10step



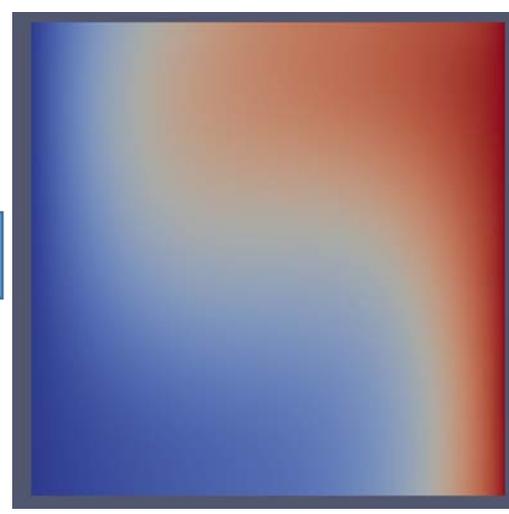
60step



45step



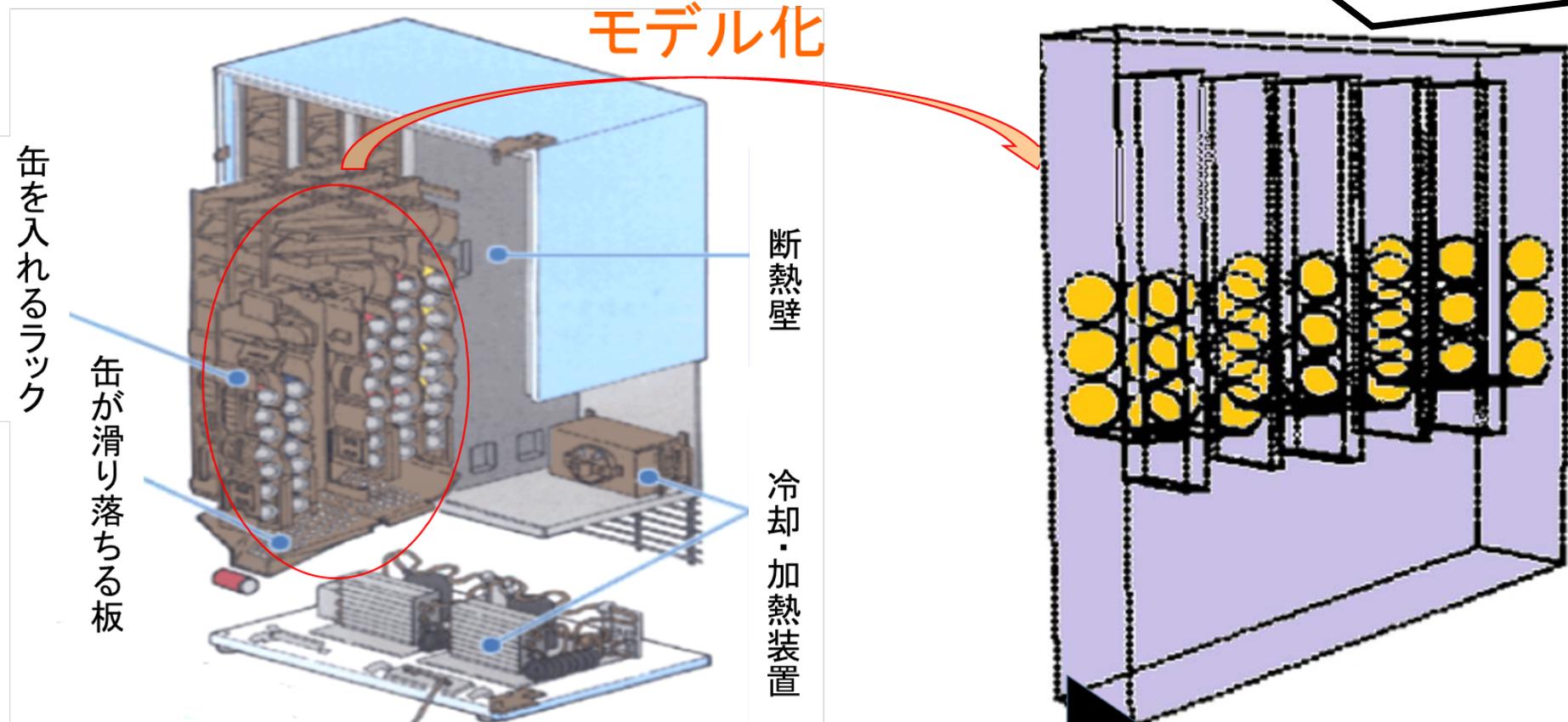
30step



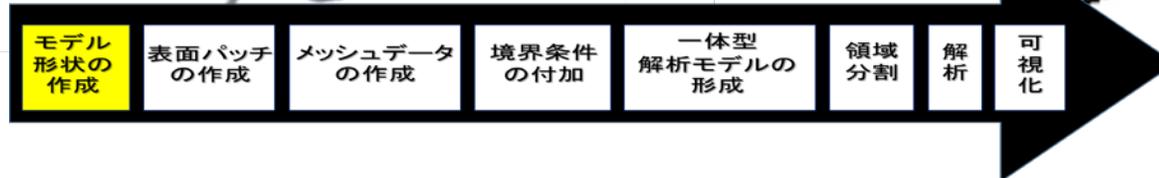
15step

自動販売機のモデリングと境界条件

自動販売機全体では大規模計算になってしまうので収納箱の一行を、取り出した

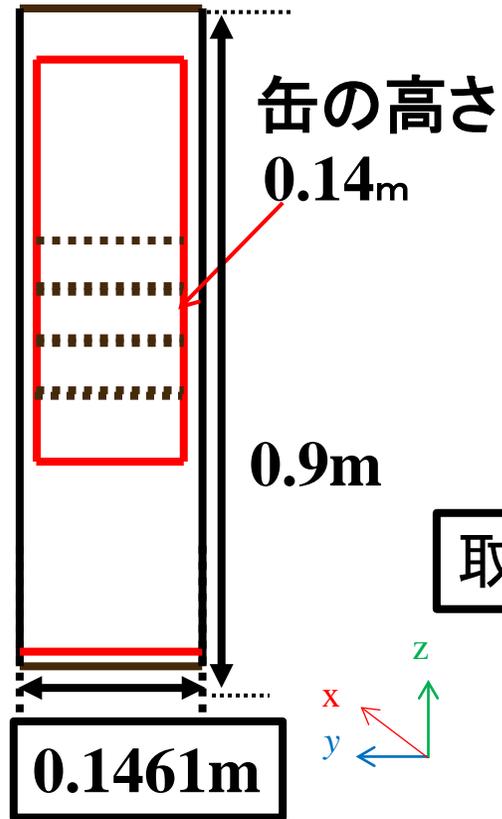


(富士電機リテイルシステムズ株式会社)

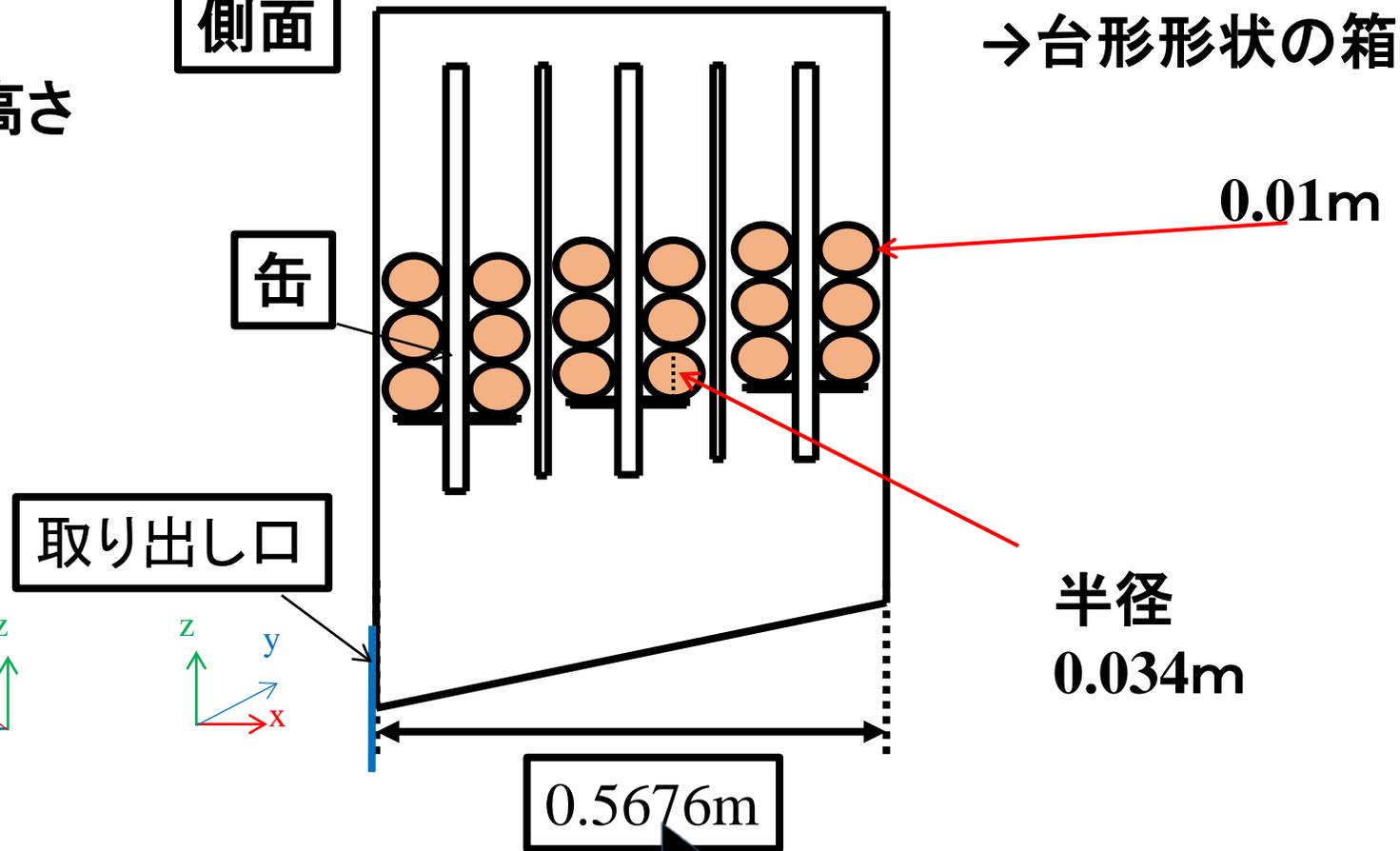


自動販売機モデリングと境界条件

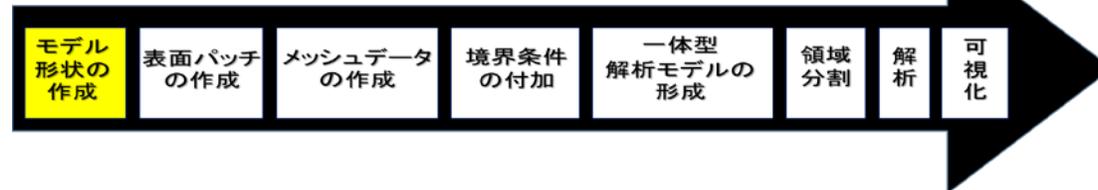
正面



側面



◆解析に使用したモデル
→台形形状の箱

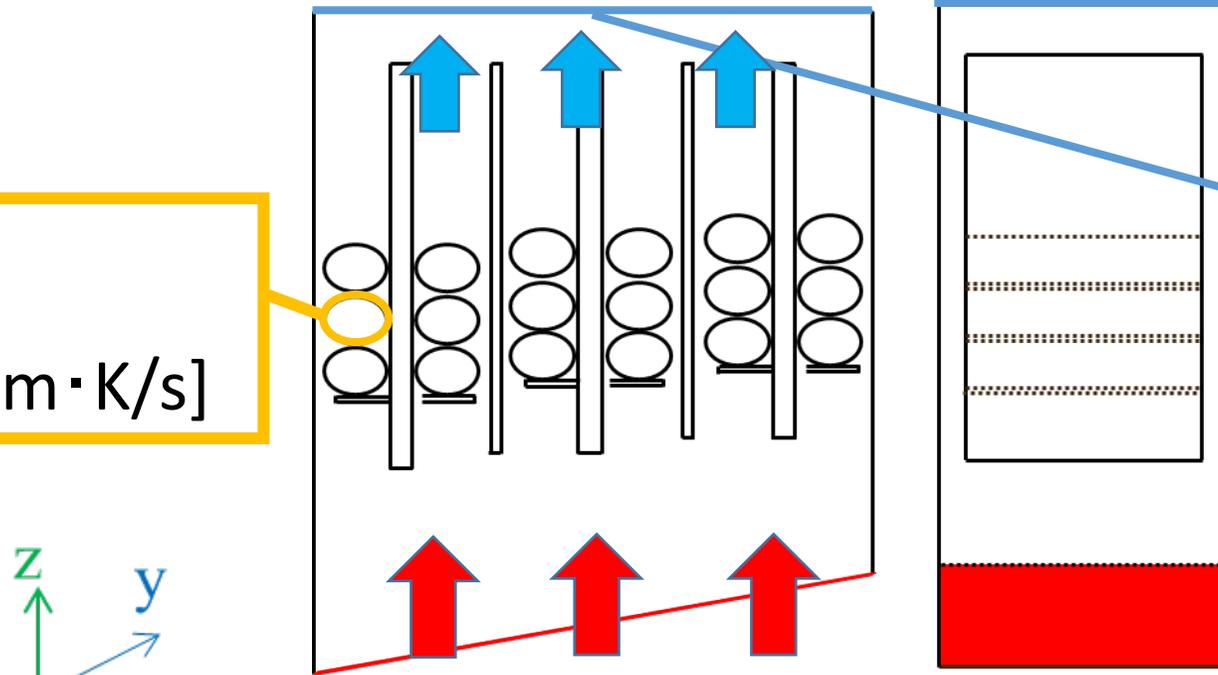


自動販売機のモデリングと境界条件

● ADVENTURE_BCtool

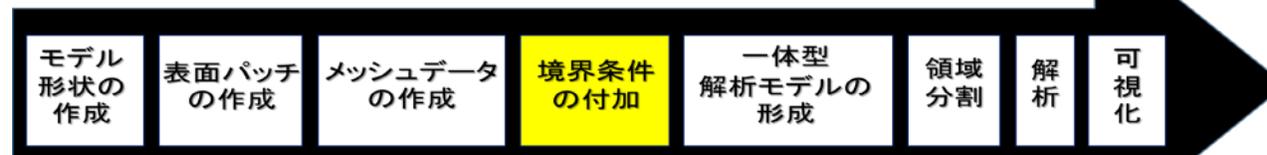
夏の自動販売機内部の冷却

$$-a \frac{\partial T}{\partial n} = -2.673 \times 10^{-5} [\text{m} \cdot \text{K}/\text{s}]$$



空気は上面から自由に流出

空気が流速 u_z で流入



昨年度までの研究における問題点

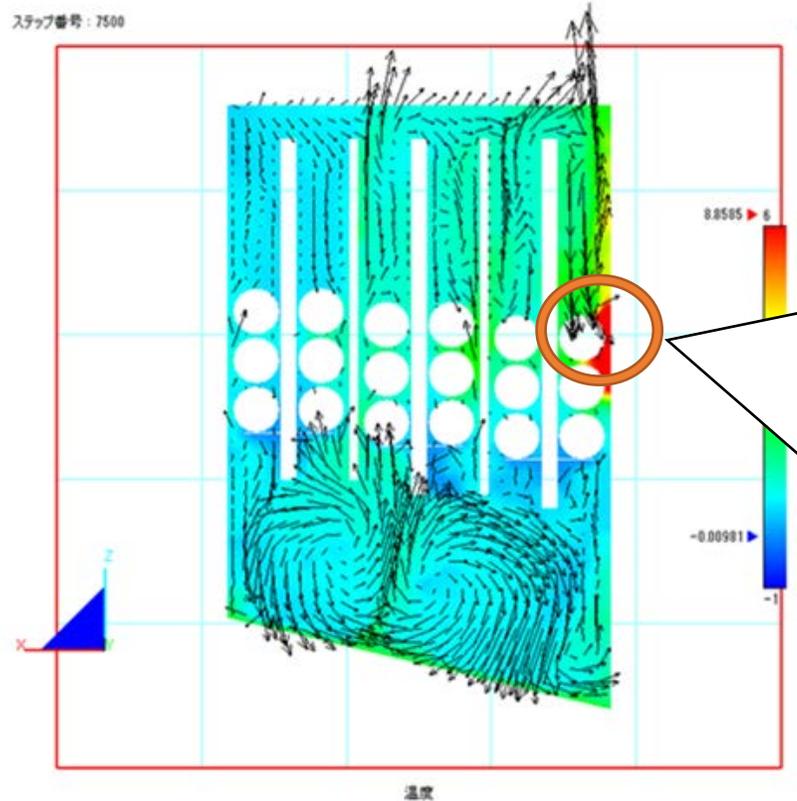
7500step(750秒後)

<問題点>

・昨年までの研究結果では、7500step(750秒後)に局所的に高温な部分が発生

⇒全体の温度が低下する中で、高温な部分が発生するのは、考えにくい

・自動販売機全体が冷えすぎている



局所的に高温な部分

熱方程式の境界条件の処理に田端法を導入する

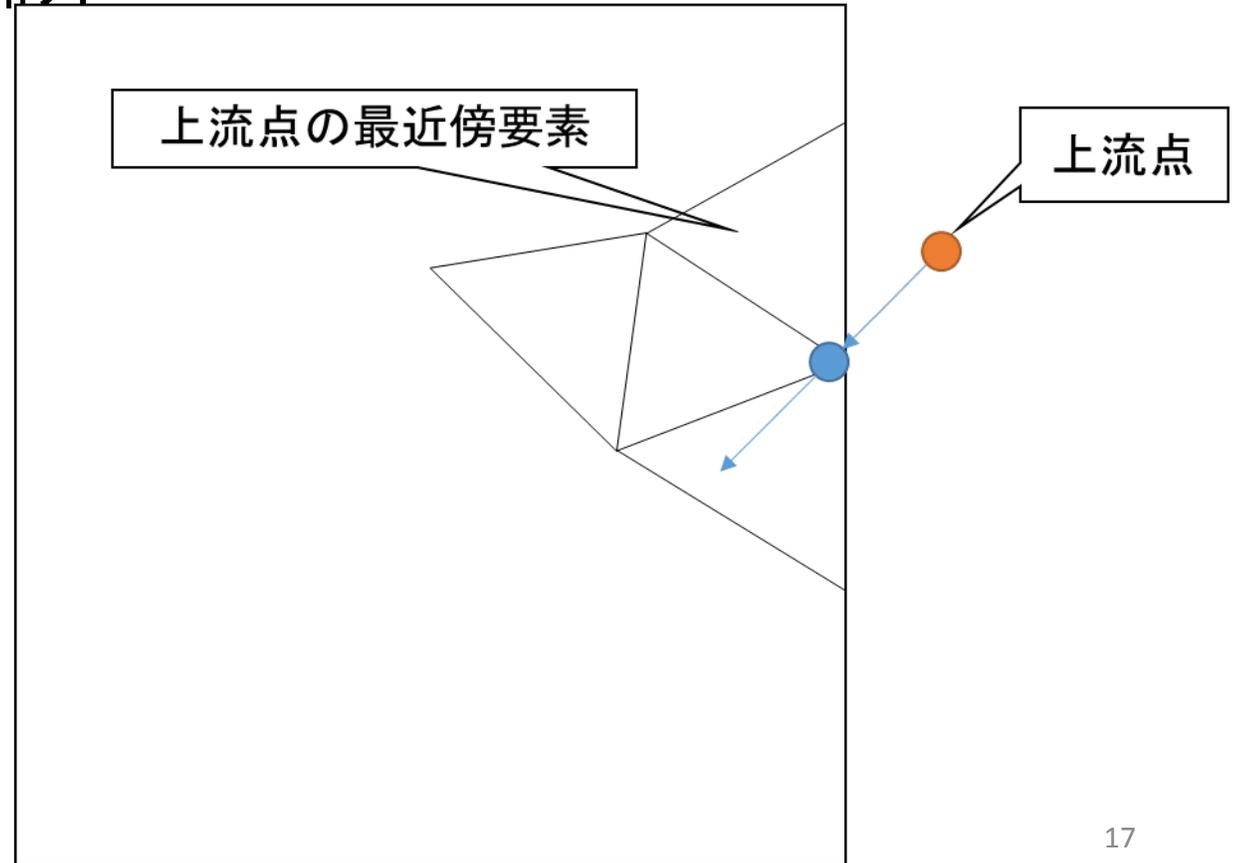
田端法による解析

・従来手法

上流点が解析領域の外だった場合、
従来手法では最近傍要素を用いて補外



線形補外だったため最近傍要素中より過大/過小な不自然な物理量分布が出てくる



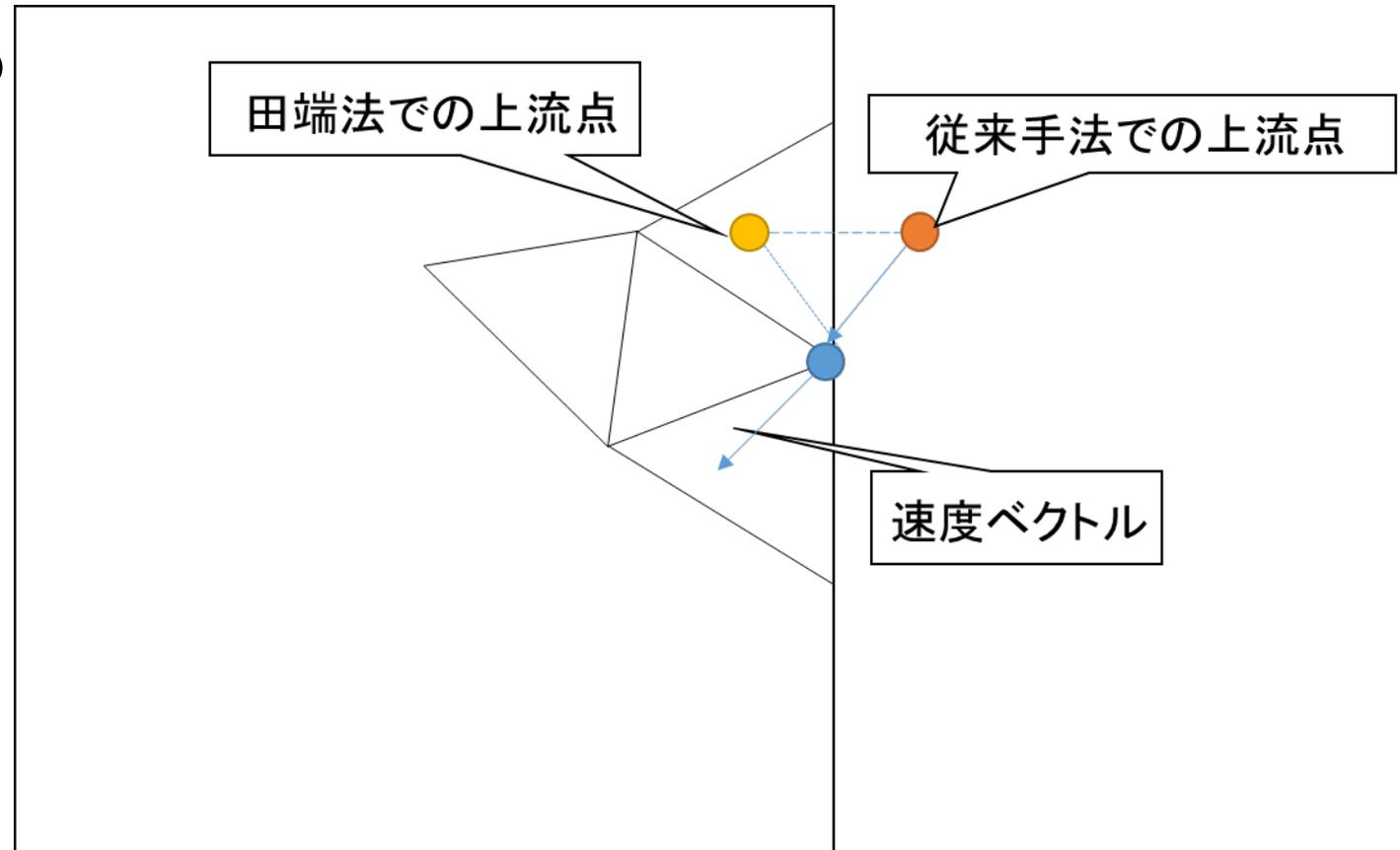
田端法による解析

- 田端法

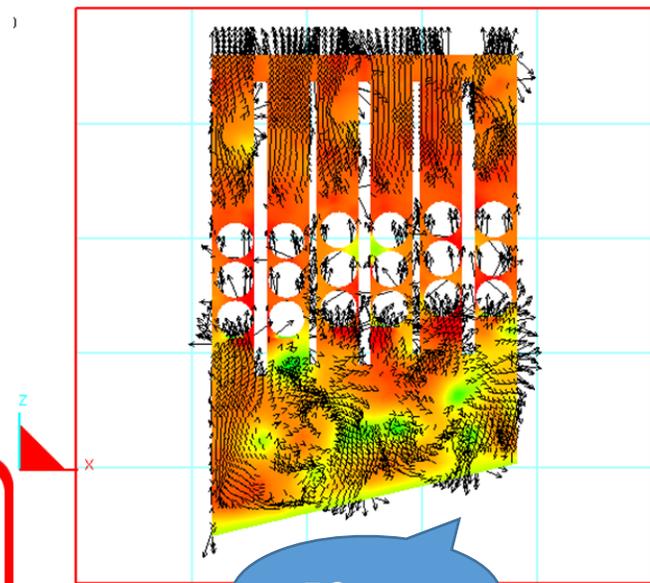
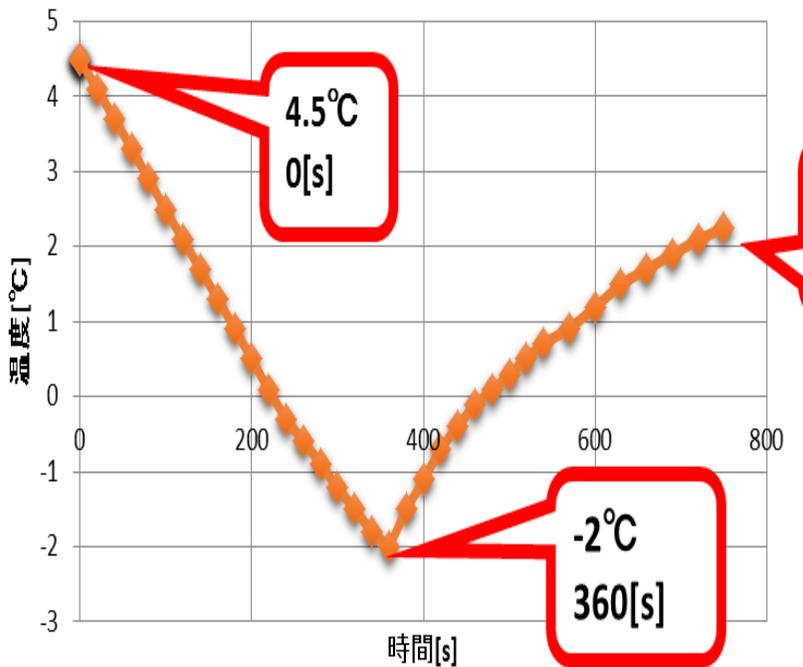
解析領域の境界面で
上流探索ベクトルを反射させる



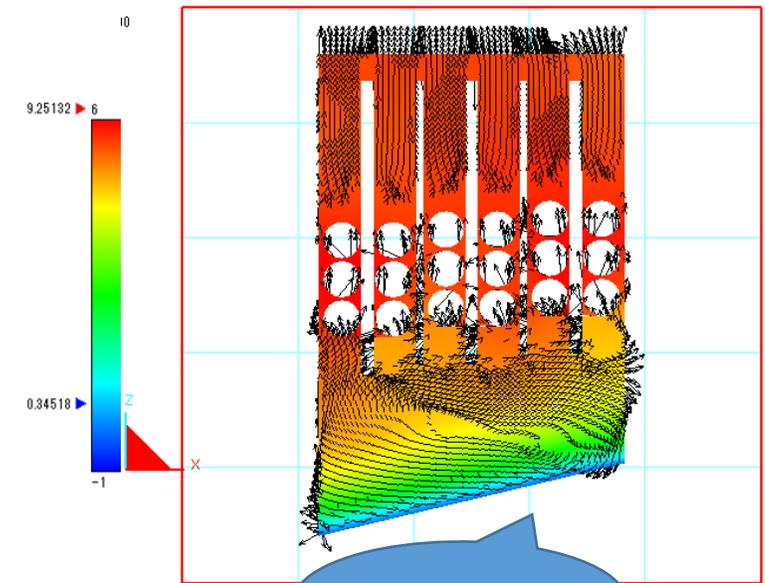
常に上流点が
解析領域内となるので、
物理量分布が、
より自然になると仮定できる



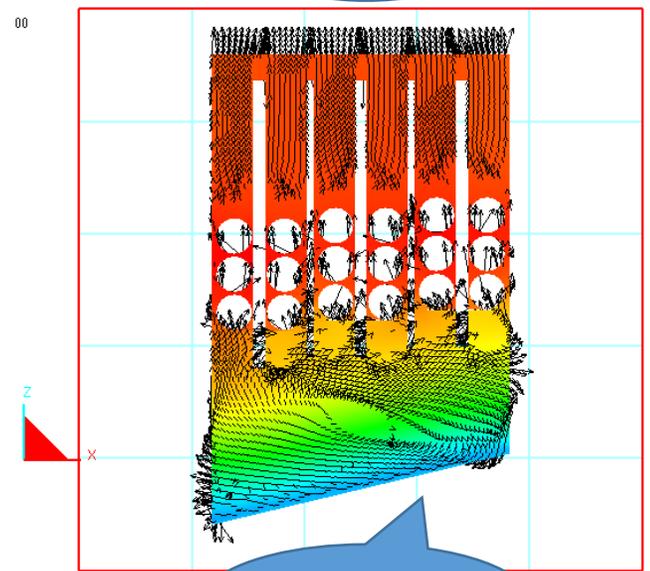
流入口の温度



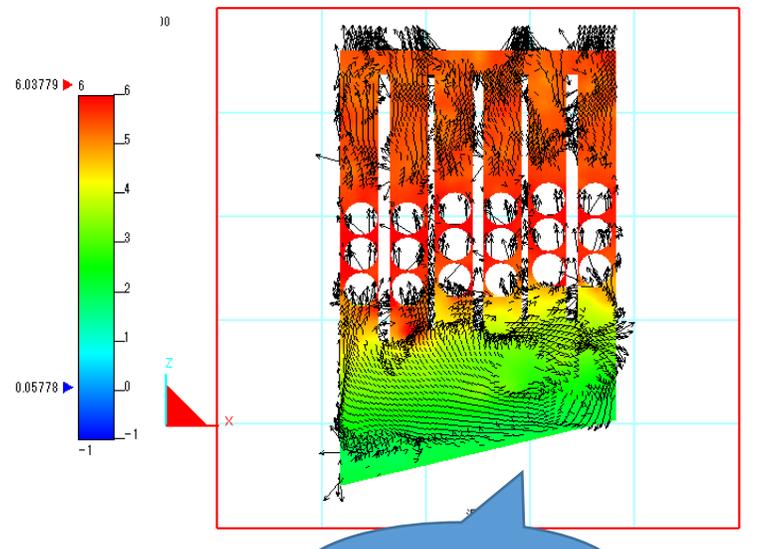
50step



2500step



5000step



7500step

- 大規模並列計算の反復回数を少なくするために前処理が必要
- 大規模計算をするにあたって効率よく実行できる手法の一つである領域分割法に注目



5年間未解決！

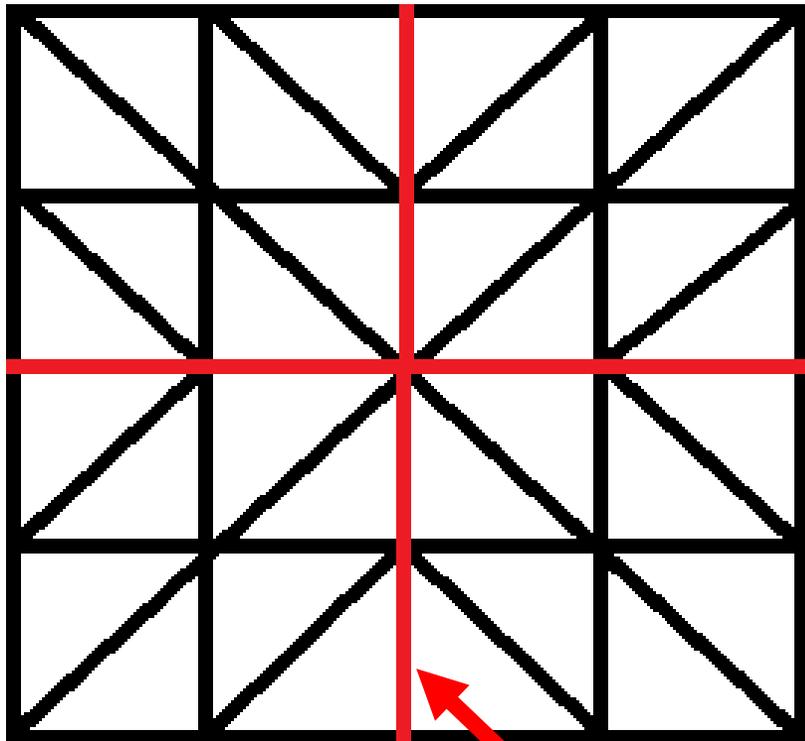
さらに効率よく計算できる
BDD前処理の開発

領域分割法

有限要素近似

《基礎方程式》

$$\begin{cases} \operatorname{rot}(v \operatorname{rot} A) = J & (\text{in } \Omega) \\ A \times n = 0 & (\text{on } \Gamma_E) \\ (v \operatorname{rot} A) \times n = 0 & (\text{on } \Gamma_N) \end{cases}$$



インターフェース

インターフェース上の自由度(u_B)を出したい

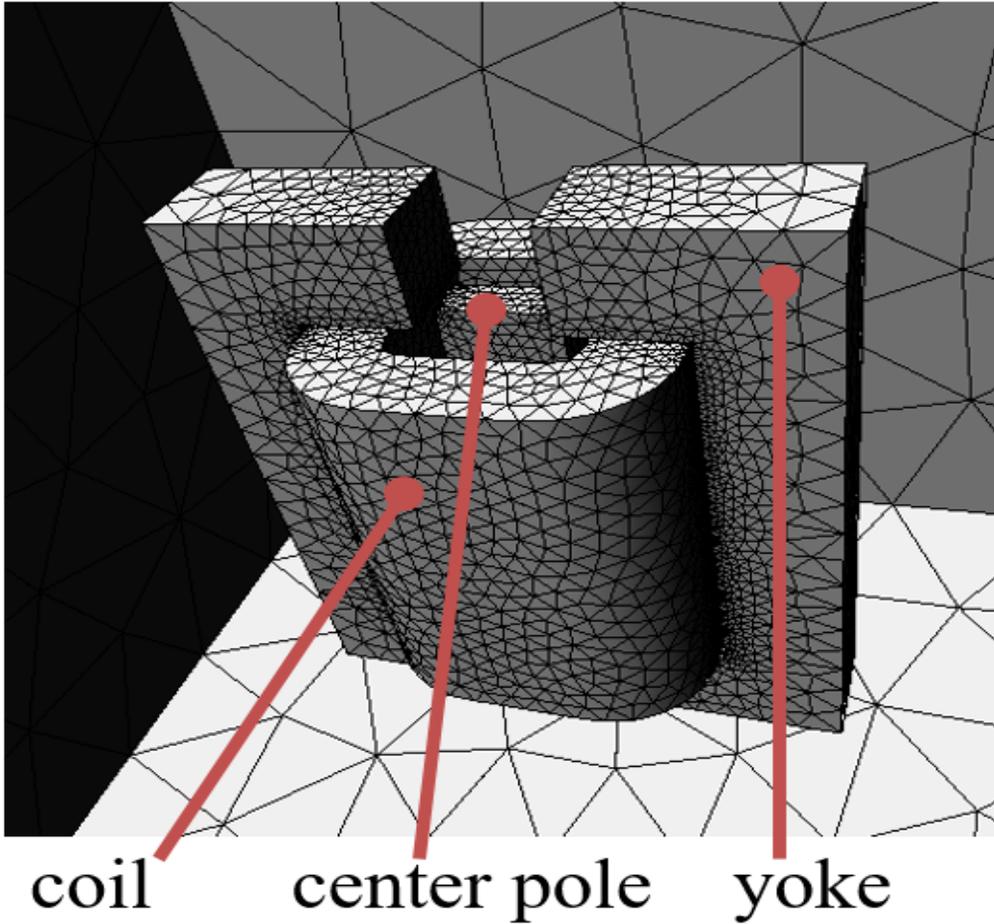
$$S u_B = g$$

$$M^{-1} S u_B = M^{-1} g$$

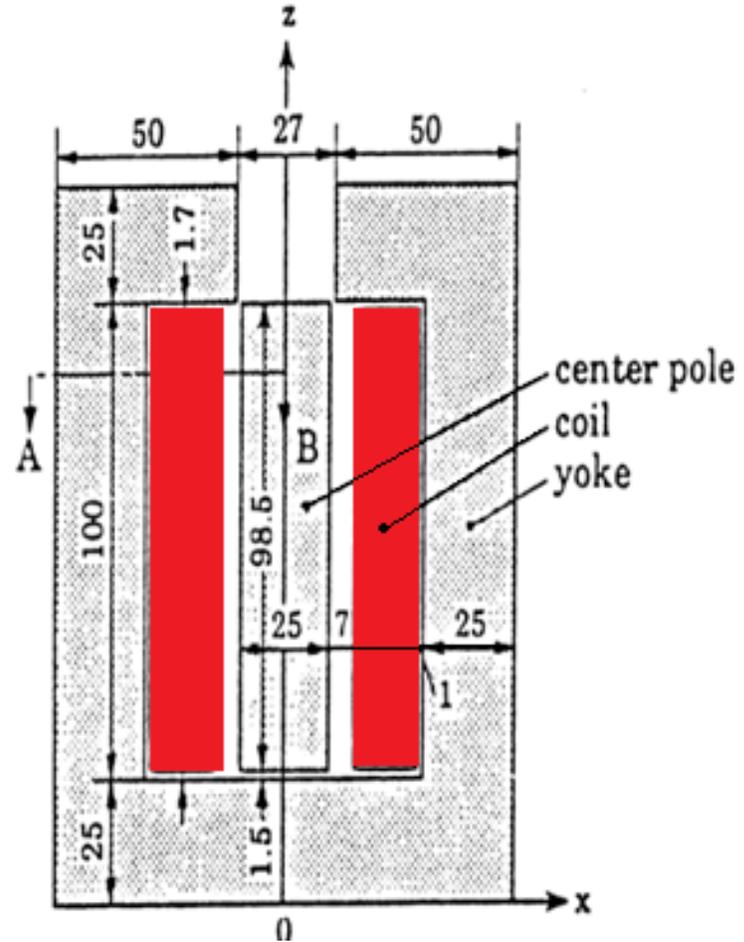
$$\begin{cases} \text{none}(= 1) \\ \text{diag} \\ \text{bdd_diag} \end{cases}$$

M^{-1} 入れて効率よく計算!

Team20 ～解析モデルの形状～



Mesh



境界条件としてすべての境界面で基本境界条件 $A \times n = 0$ を考慮

解析の実行

Magneticを使った解析

分割された解析モデルを入力として解析を行う

〈解析条件〉

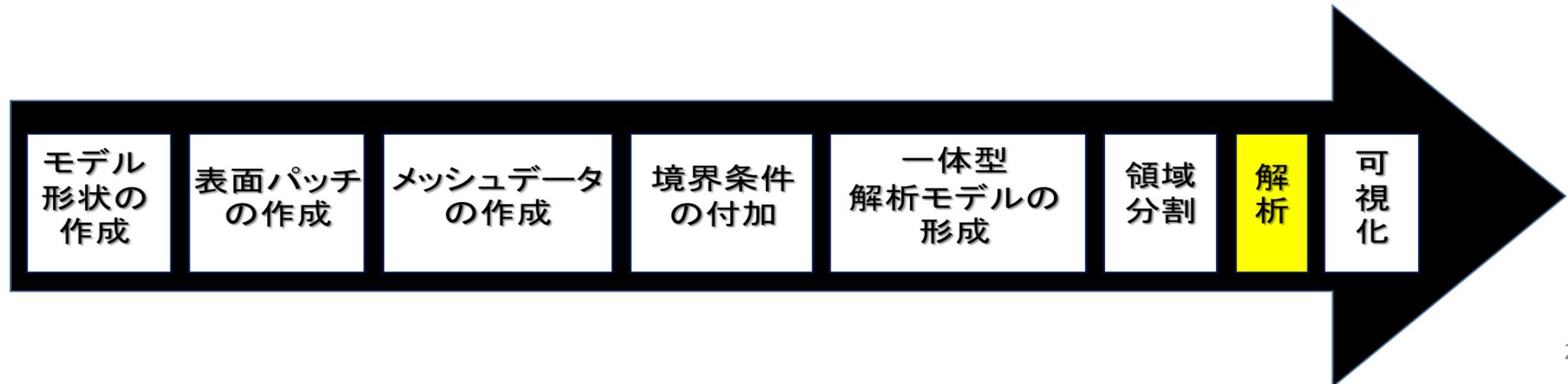
Team20_50,000

Interface DOF: 16,450

Elements: 40,551

Subdomains: 300

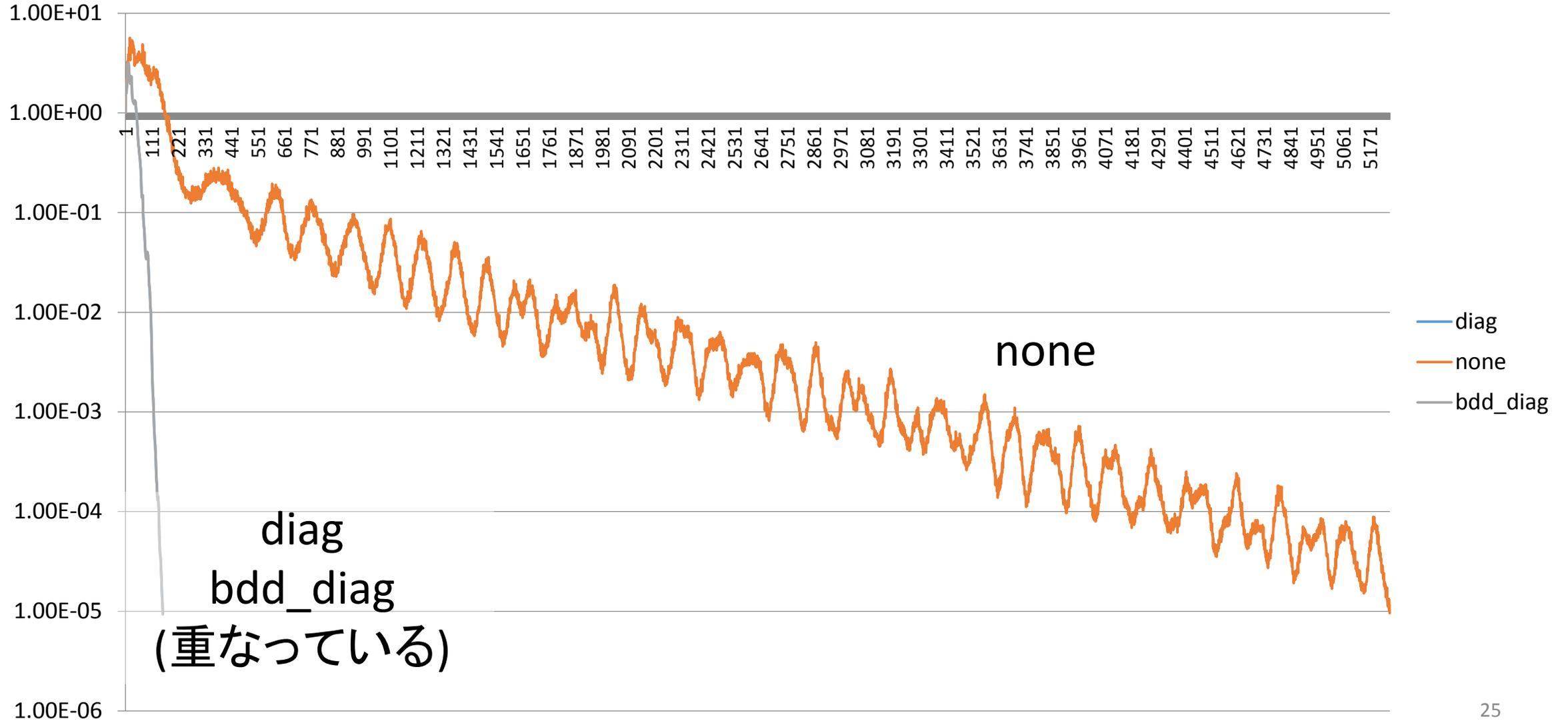
前処理: none(前処理なし)
diag
bdd_diag



前処理の効果

Team20_50,000	none	diag	bdd-diag
interface DOF	16,450	16,450	16,450
iteration counts	5,251	155	155
elements	40,551	40,551	40,551
subdomains	300	300	300
part	1	1	1

前処理の効果(グラフ)



磁束密度ベクトル図

