



# セルオートマトンを用いた集団荷姿 での熱処理変形の再現

旭川工業高等専門学校 機械システム工学科 ○杉本 剛





# 本日の発表の流れ

---

- ✓ 研究背景
- ✓ 一個内での冷却ばらつきによる熱処理変形
- ✓ 集団荷姿での冷却解析手法
- ✓ 集団荷姿での流体解析
- ✓ 集団荷姿での冷却解析
- ✓ まとめ



# 本日の発表の流れ

---

## ✓研究背景

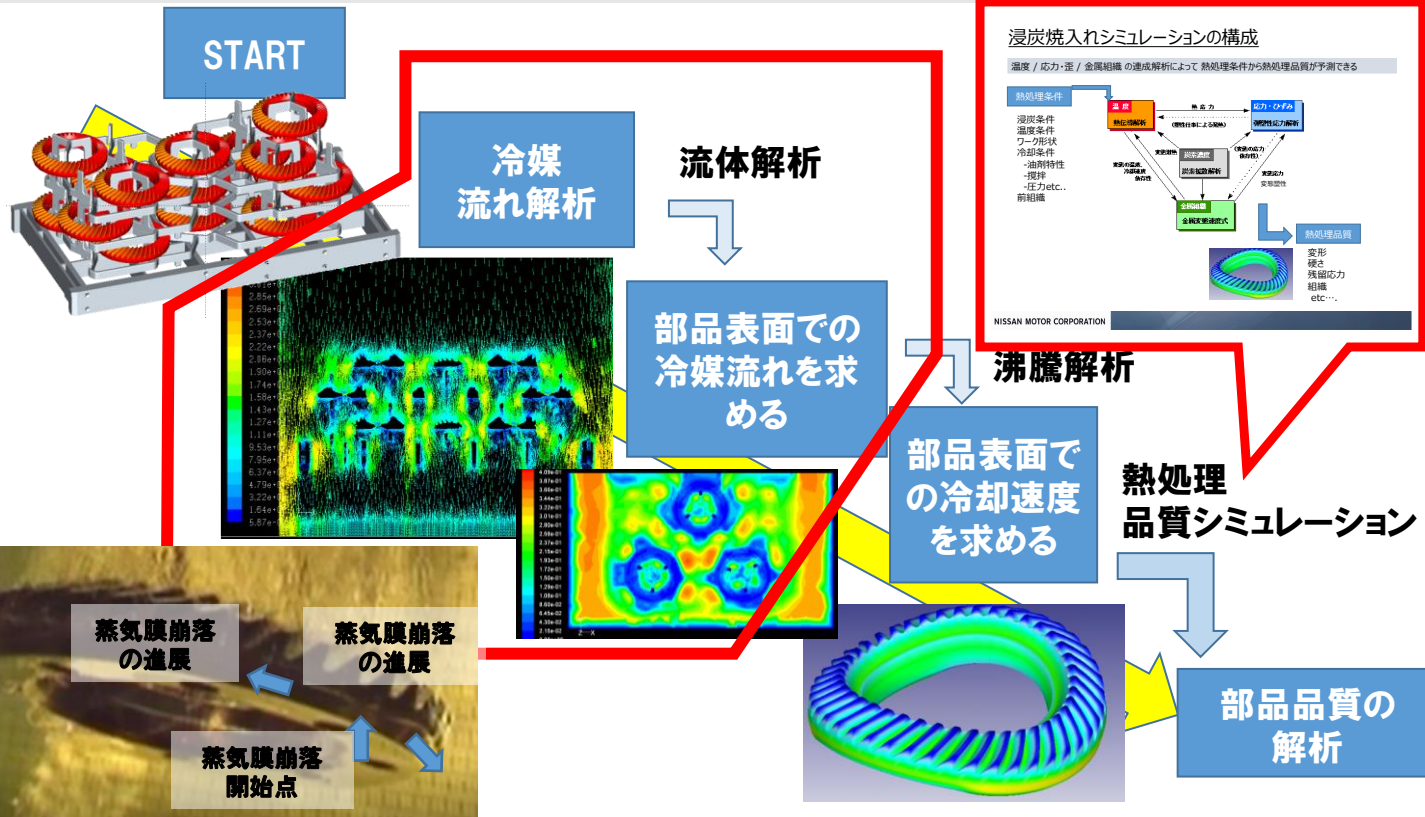
- ✓一個内での冷却ばらつきによる熱処理変形
- ✓集団荷姿での冷却解析手法
- ✓集団荷姿での流体解析
- ✓集団荷姿での冷却解析
- ✓まとめ





# 冷却状態と熱処理変形の関係

## 熱処理シミュレーションの構成① -全体の流れ-

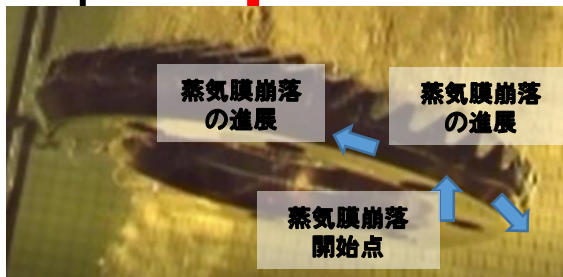


油焼入れの熱処理シミュレーションでは蒸気膜段階・沸騰段階・対流段階を解いて部品モデル表面に境界条件を付与する必要がある

高計算コスト・複雑形状の解析困難

「低次元セルオートマトン法による冷却解析」を提案

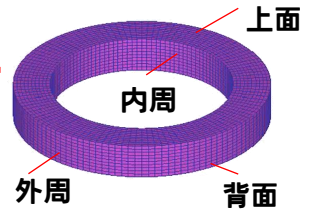
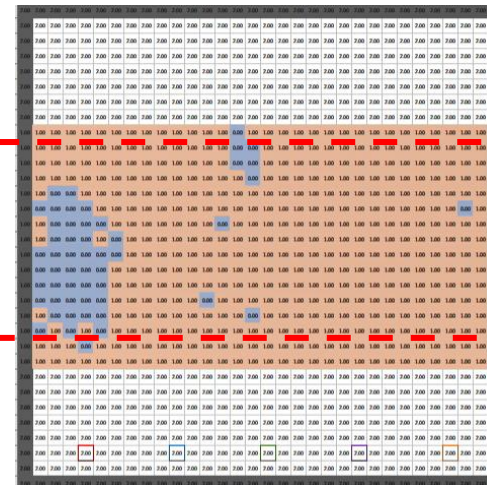
Visualization of vapor film collapse mode during unsteady boiling on oil quenching by using cellular automaton simulation, Tsuyoshi Sugimoto, 27th International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering, Salzburg, Austria 2022



内周

背面

外周

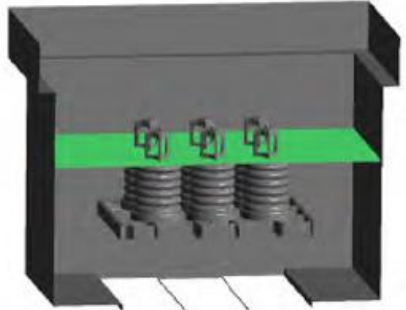


セルオートマトンによる蒸気膜崩壊の再現

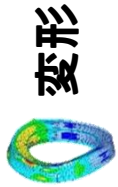
油焼入れでは蒸気膜崩壊による表面の冷却状態ムラが熱処理変形に影響する

Influence of thermal boundary conditions on the results of heat treatment simulation, Tsuyoshi Sugimoto, Dong Ying Ju, Materials Transactions 59(6) 950-956 2018

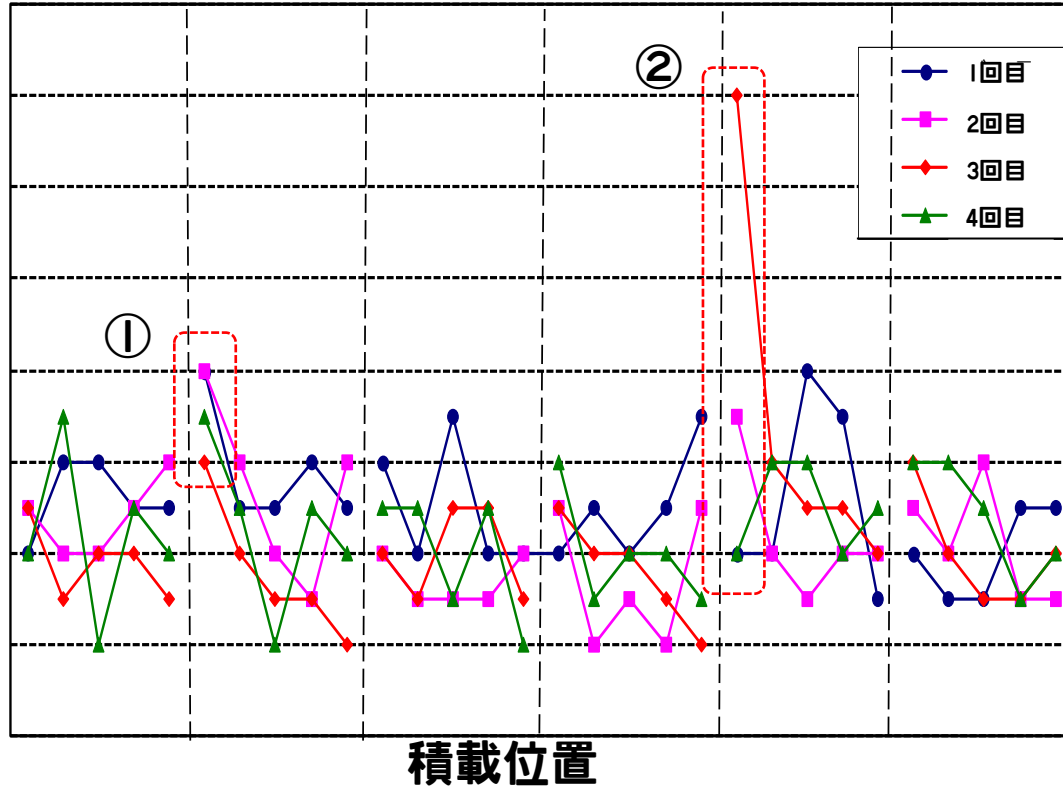
# 集団荷姿での熱処理変形



集団荷姿



変形



熱処理品質の繰り返し変化(実験値)

集団荷姿の熱処理変形には

- ① 特定の位置で常時変形が大きくなる場合
- ② 特定の位置で変形の繰り返しバラツキが増える場合

がある



# 熱処理変形の種類

注)実際には交互作用があるので単純ではないが...

		要因		
		物体の形状 起因	沸騰冷却の 繰返し不安定性	流れの影響
変形	①常時発生	◎	○	◎
	②繰り返し バラツキ	◎	◎	○

予測手法

DEFORM-HT等

蒸気膜崩壊  
シミュレーション  
(前回報告)

今回





# 本日の発表の流れ

---

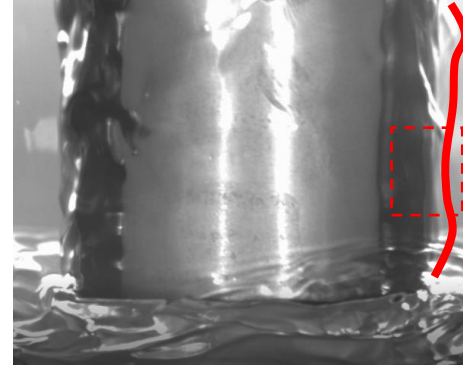
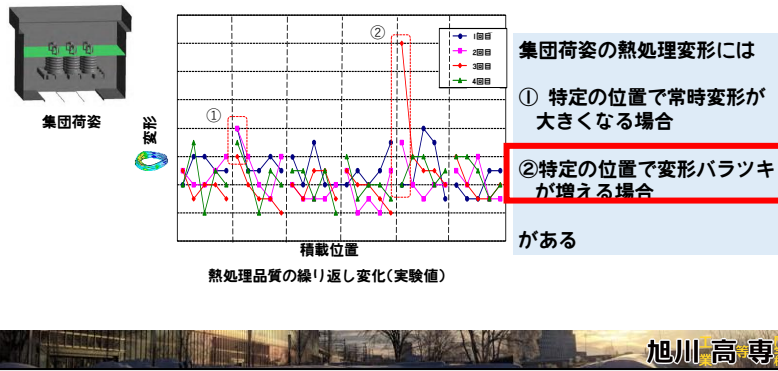
- ✓ 研究背景
- ✓ **一個内での冷却ばらつきによる熱処理変形**
- ✓ 集団荷姿での冷却解析手法
- ✓ 集団荷姿での流体解析
- ✓ 集団荷姿での冷却解析
- ✓ まとめ



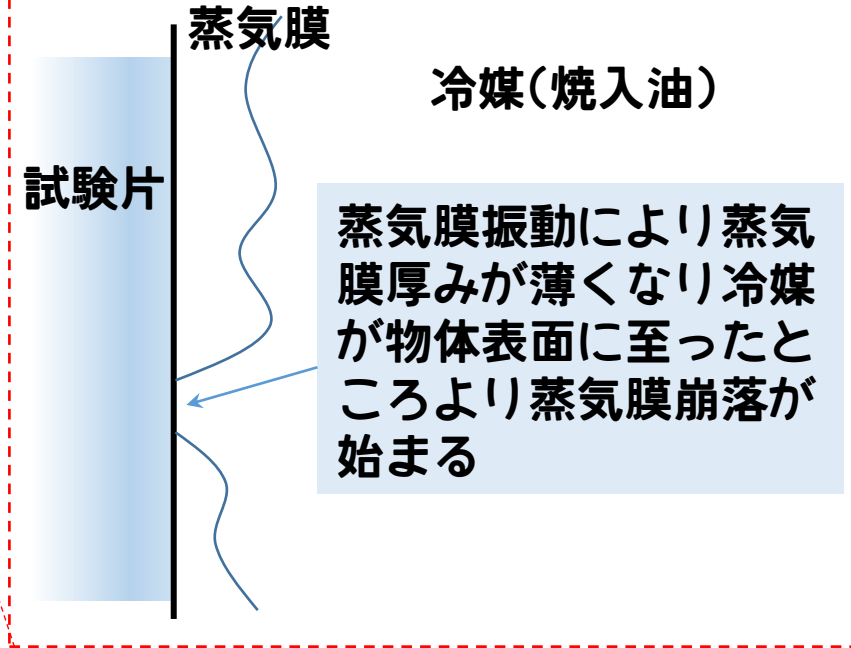
# 蒸気膜振動による冷却バラツキの発生



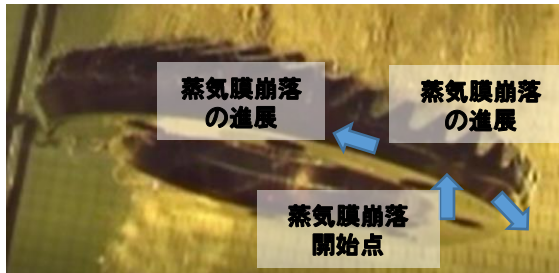
## 集団荷姿での熱処理変形



蒸気膜振動



蒸気膜振動を波動として再現する事で冷却ムラを再現した



波動の伝播方程式:  $\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla^2 u$  ・式(4)

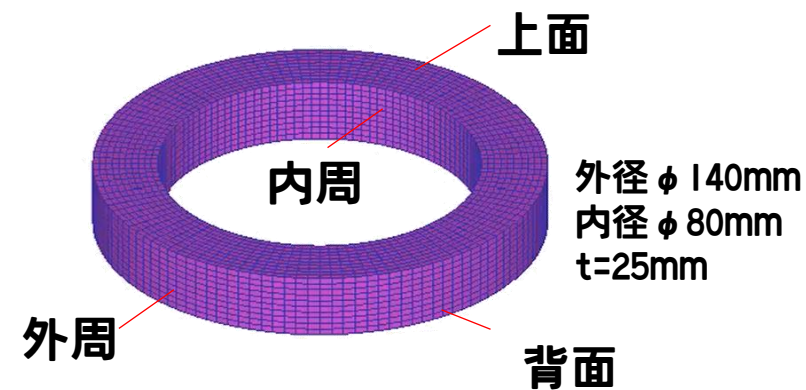
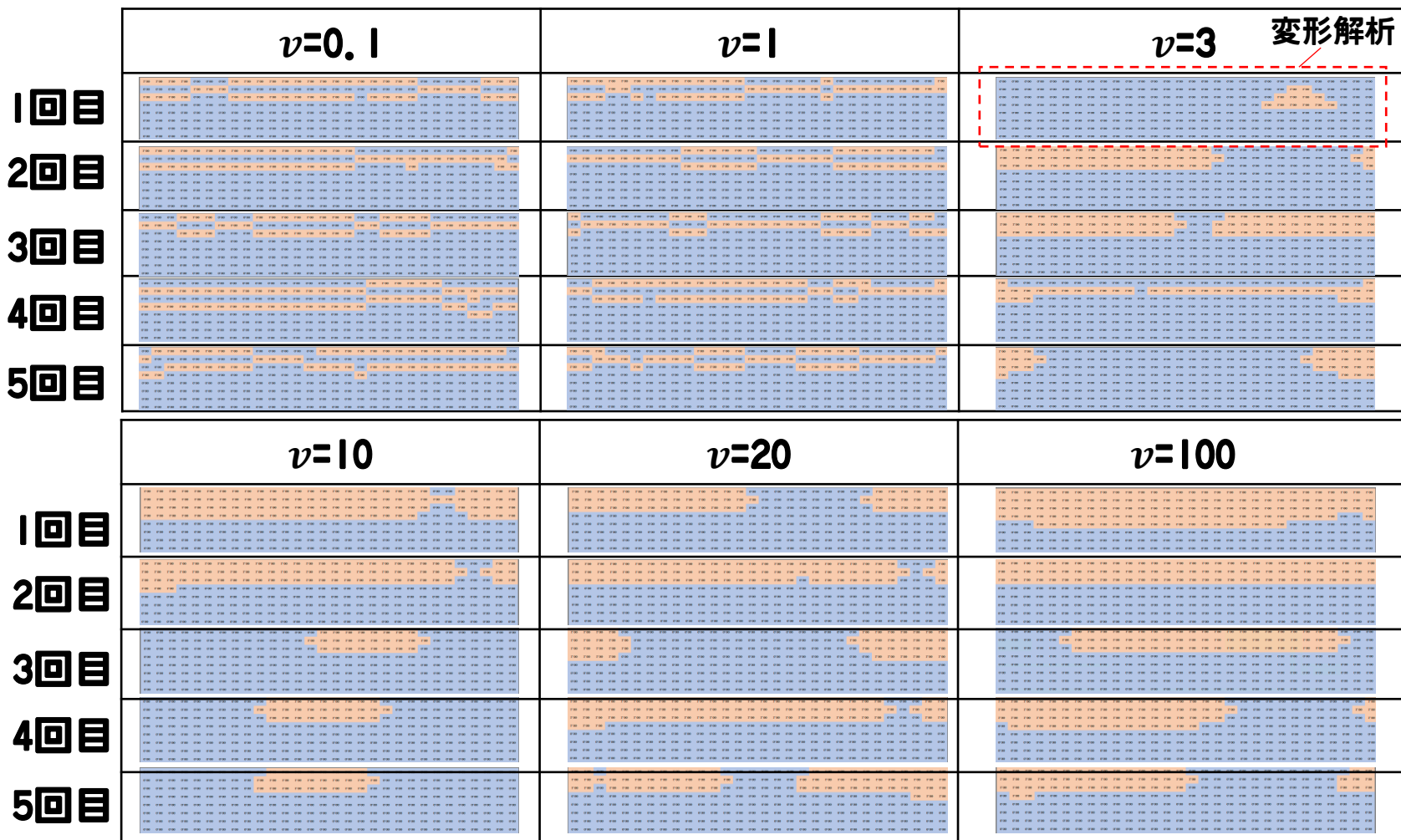
+  
乱数因子による外部加振:  $r$

$v$ : 位相速度  
 $u$ : 蒸気膜厚み  
 $t$ : 時刻



# 単品での熱処理変形計算

# -蒸気膜崩壊の変化-



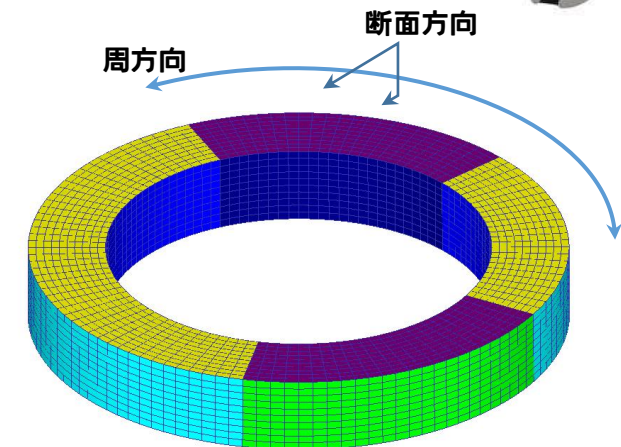
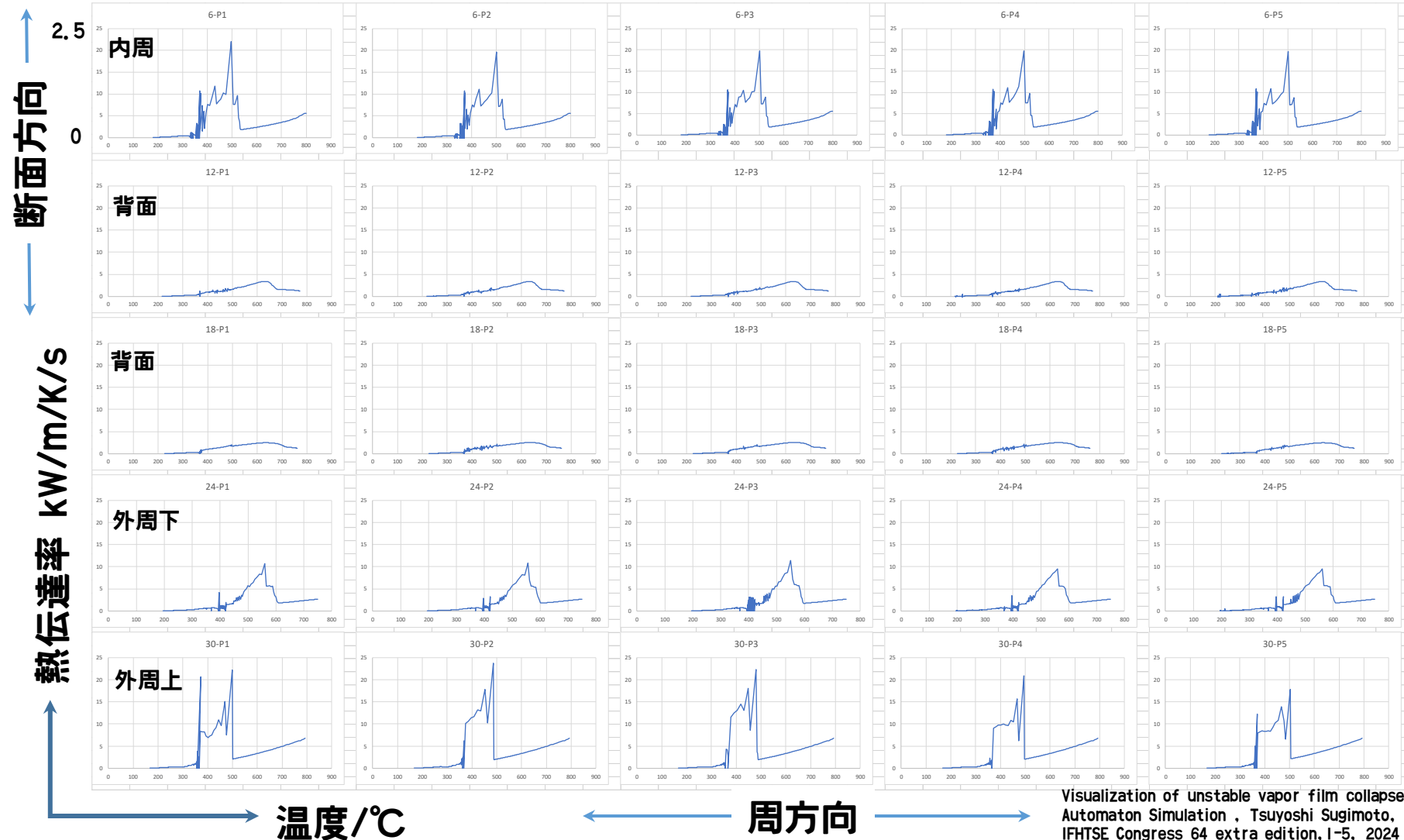
蒸気膜崩落形態・繰り返し変化は位相速度(振動の様子)により変化する  
カオス現象

蒸気膜段階 (blue)  
沸騰膜段階 (orange)

$v$ を変化させたときの外周での蒸気膜崩落の繰り返し変化



# 単品での熱処理変形計算 -熱伝達率-



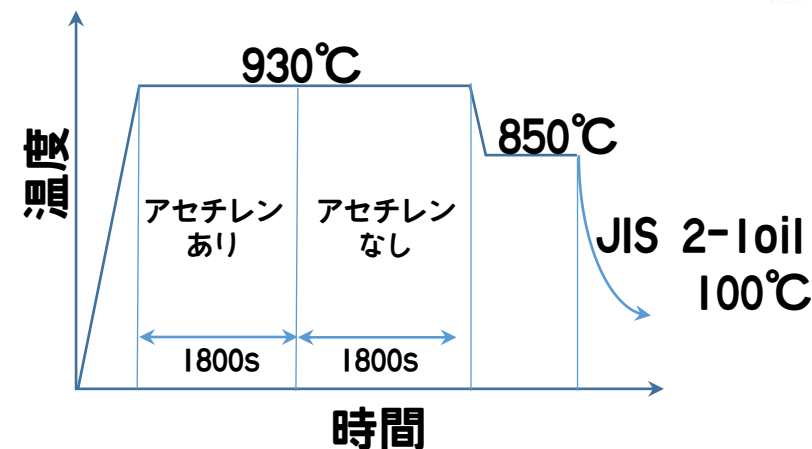
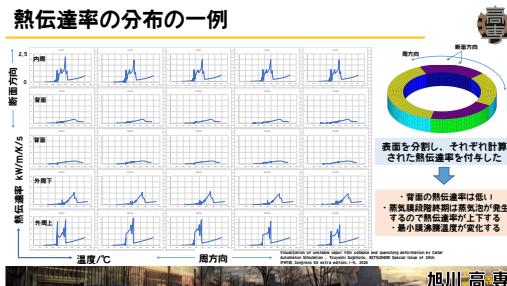
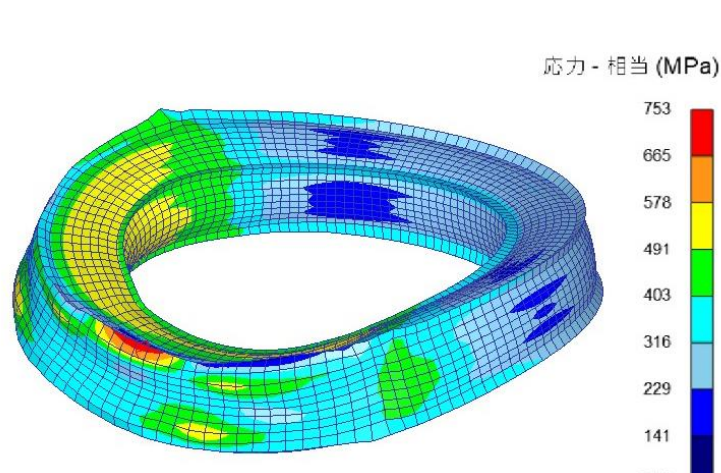
表面を分割し、それぞれセル  
オートマトン法で求めた熱伝  
達率を付与した

- ・ 背面の熱伝達率は低い
- ・ 蒸気膜段階終期は蒸気泡が発生するので熱伝達率が上下する
- ・ 最小膜沸騰温度が変化する

Visualization of unstable vapor film collapse and quenching deformation by Cellar  
Automaton Simulation, Tsuyoshi Sugimoto, NETSUSHORI Special Issue of 28th  
IFHTSE Congress 64 extra edition, 1-5, 2024

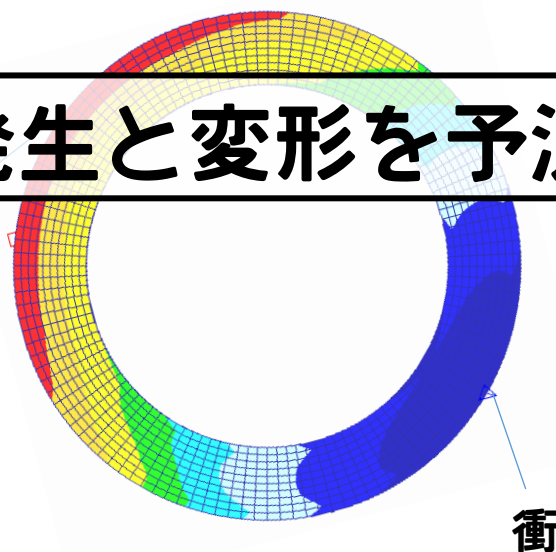


# 単品での熱処理変形計算 -変形計算-



冷却ムラの発生と変形を予測する事が出来た

最大変位0.3mm  
(同条件での実験背面平面度0.3mmがあった)



計算条件	
ソルバ	SFTC DEFORM-HT ver13
節点数	14520
要素数	12000
コーティング メッシュサイズ	0.1mm
要素形状	六面体

- ・ 定量的に概ね正しく計算できている
- ・ 初期の温度ムラによる熱変形が最後まで影響している



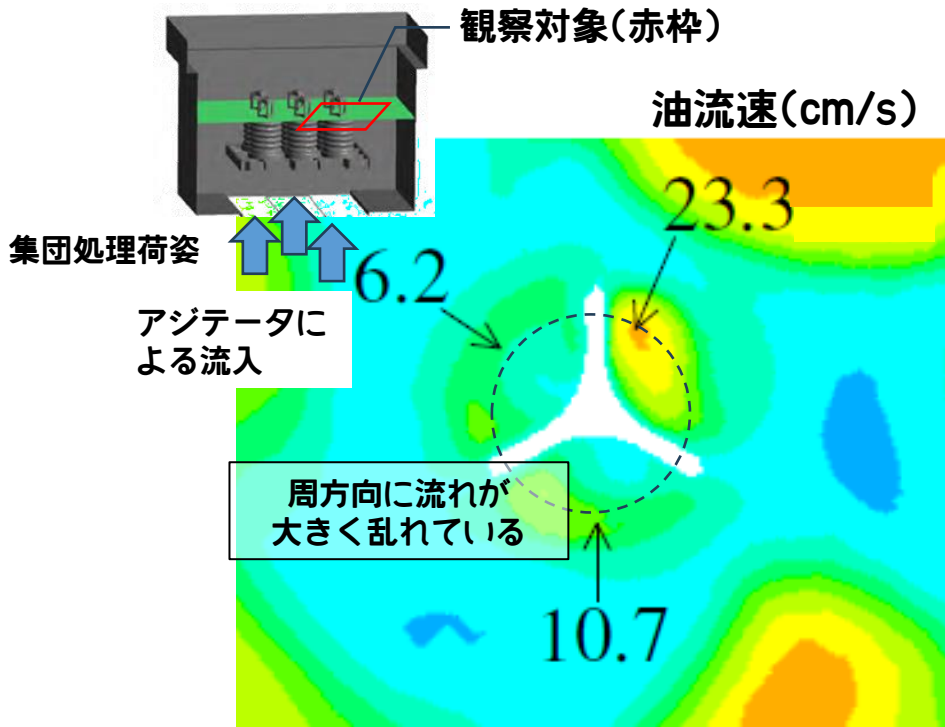
# 本日の発表の流れ

---

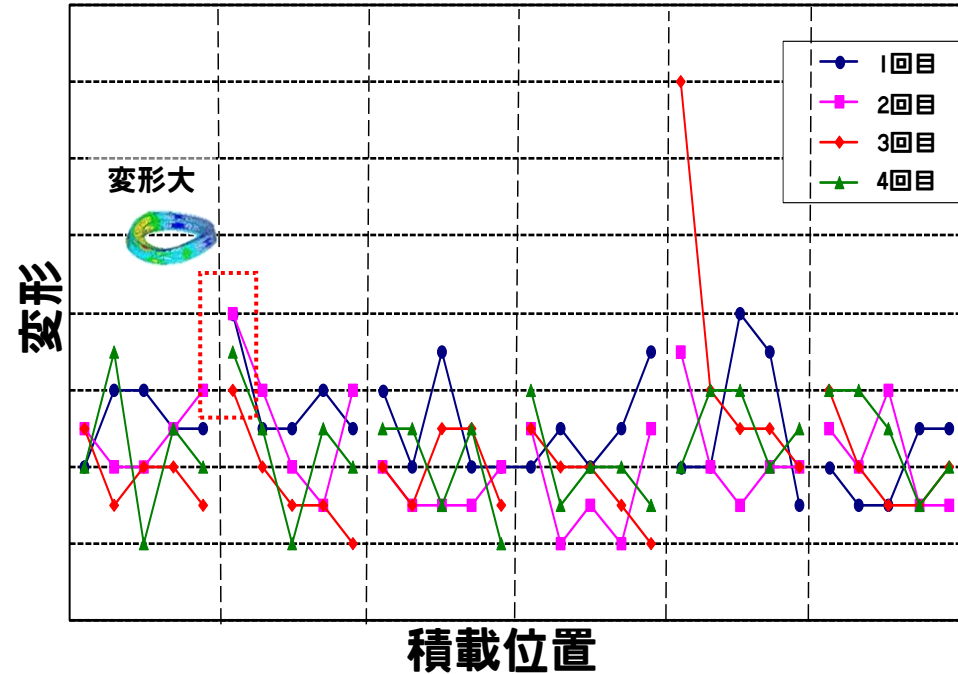
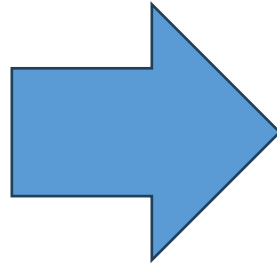
- ✓ 研究背景
- ✓ 一個内での冷却ばらつきによる熱処理変形
- ✓ **集団荷姿での冷却解析手法**
- ✓ 集団荷姿での流体解析
- ✓ 集団荷姿での冷却解析
- ✓ まとめ



# 集団荷姿での熱処理変形



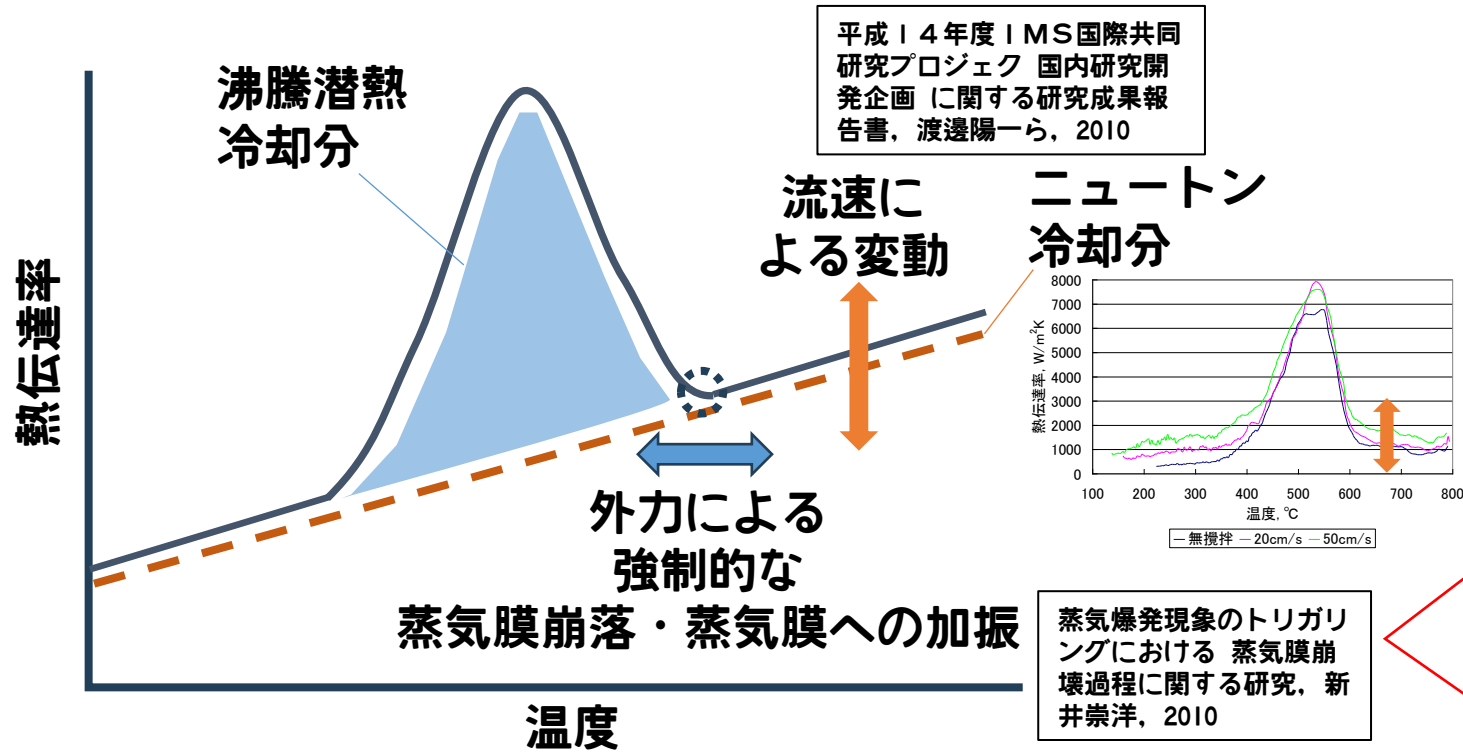
リング部品焼入時の赤枠内の油流速分布



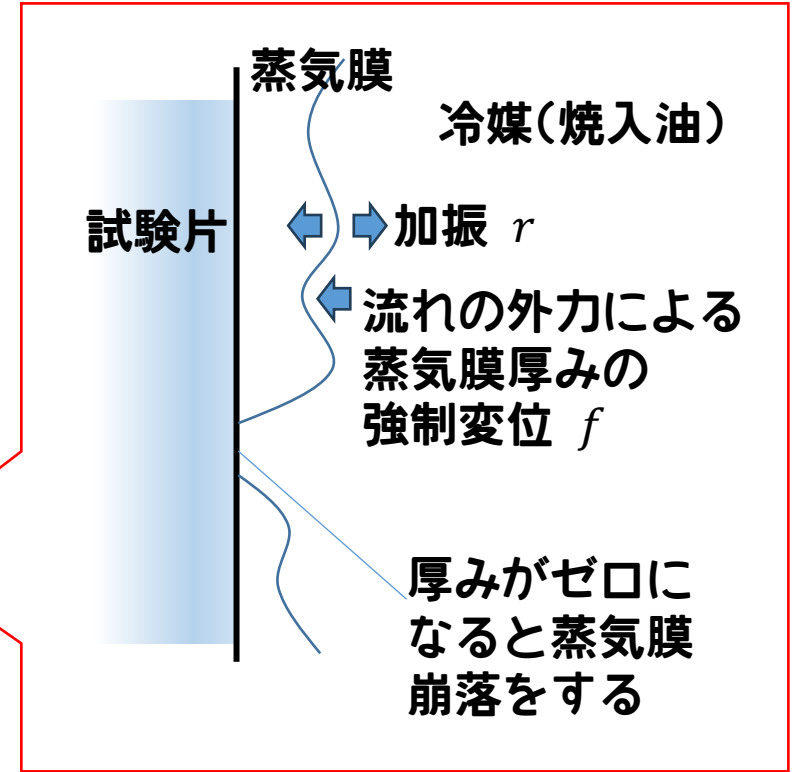
熱処理品質の繰り返し変化(実験値)

流体と冷却の相互作用を解くことで集団荷姿の熱処理変形を解く事が出来るのではないか???

# 流体と蒸気膜崩落の相互作用



流速及び流れによる蒸気膜厚みに変化, 蒸気膜振動の変化を蒸気膜振動方程式に織り込む



仮説



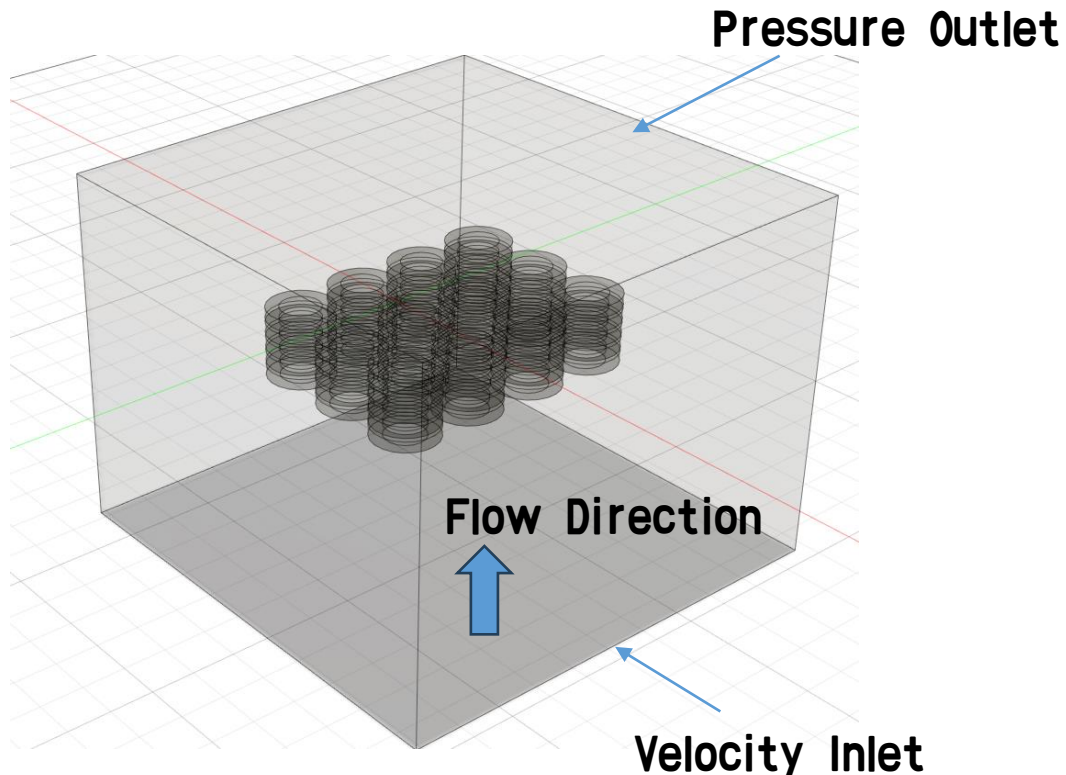


# 本日の発表の流れ

- ✓ 研究背景
- ✓ 一個内での冷却ばらつきによる熱処理変形
- ✓ 集団荷姿での冷却解析手法
- ✓ 集団荷姿での流体解析**
- ✓ 集団荷姿での冷却解析
- ✓ まとめ



# 流体解析条件



Solver	ANSYS Fluent 2023
Quenchant Density[kg/m <sup>3</sup> ]	800
Quenchant Viscosity[kg/m/s]	0.8m/s
Inlet Velocity[m/s]	0.8m/s
Outlet Pressure[Pa]	0
Flow Model	Laminar
Mesh number	313,567
Target maximum cell size[mm]	3mm
Target minimum cell size[mm]	35mm

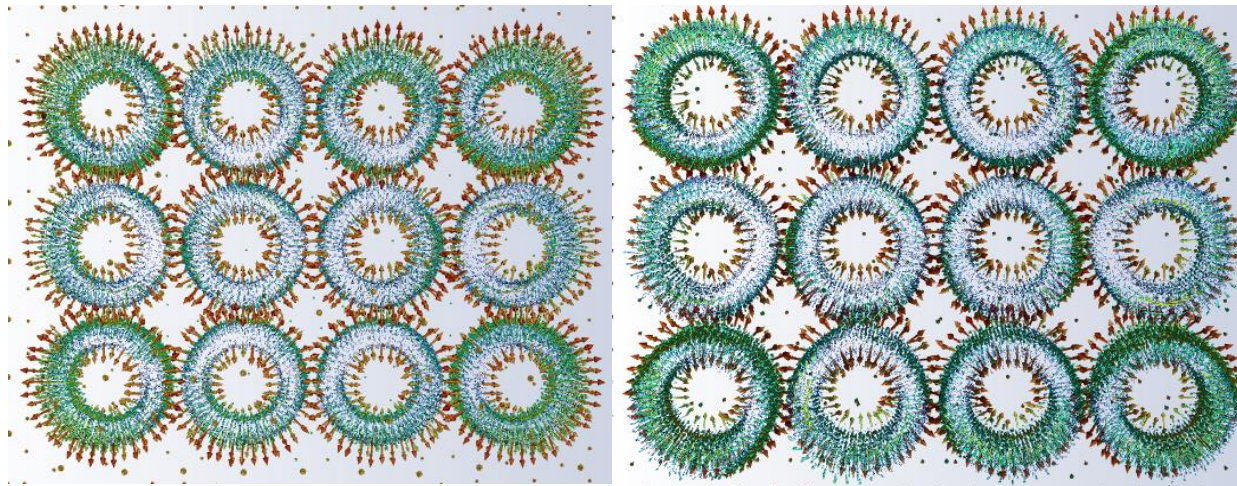
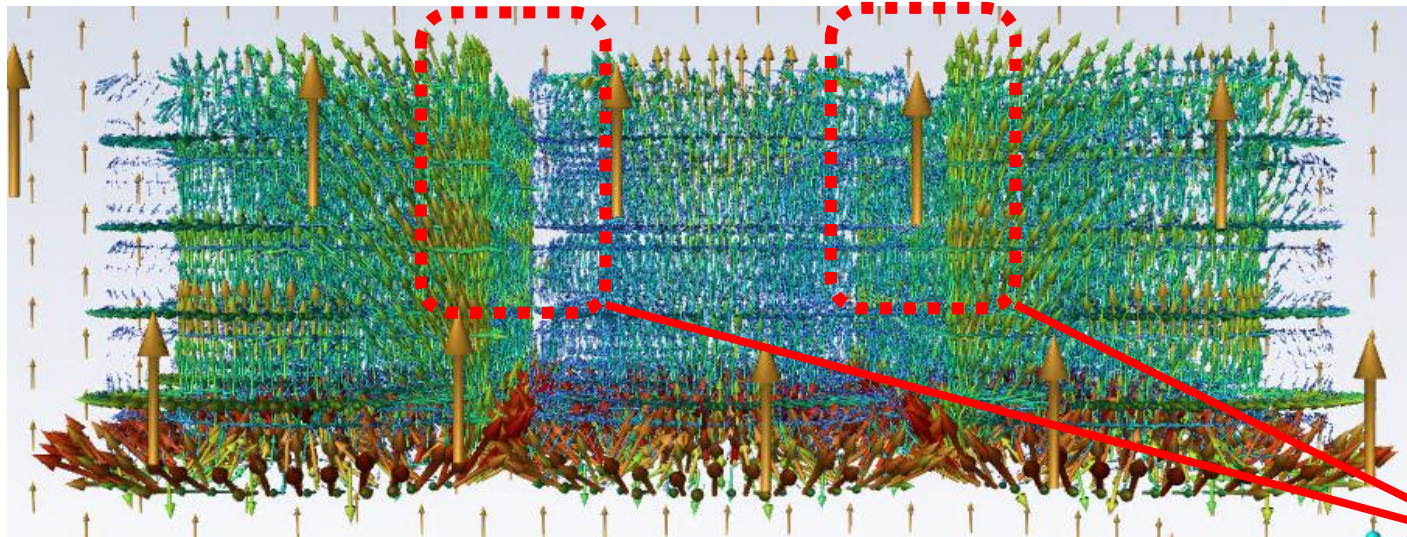
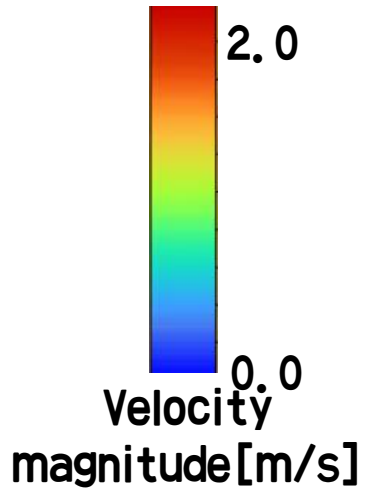
Model:  $\phi$  180mm(outer),  $\phi$  100mm(inner) x t=35mm  
 Process Load setting: 3 x 4 x 7 pieces  
 Area size: 1200 x 1200 x 1000 (mm)

本研究は、簡便に集団荷姿での冷却を解く事を目的とするので  
 単純な計算モデルを設定  
 上面自由表面・アジテーションによる旋回流・温度 等を無視





# 流体解析結果 -流れの様相-



部品間の隙間が狭い部分で流速が速くなっている



# 本日の発表の流れ

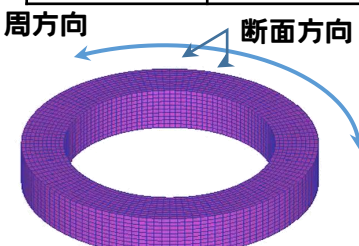
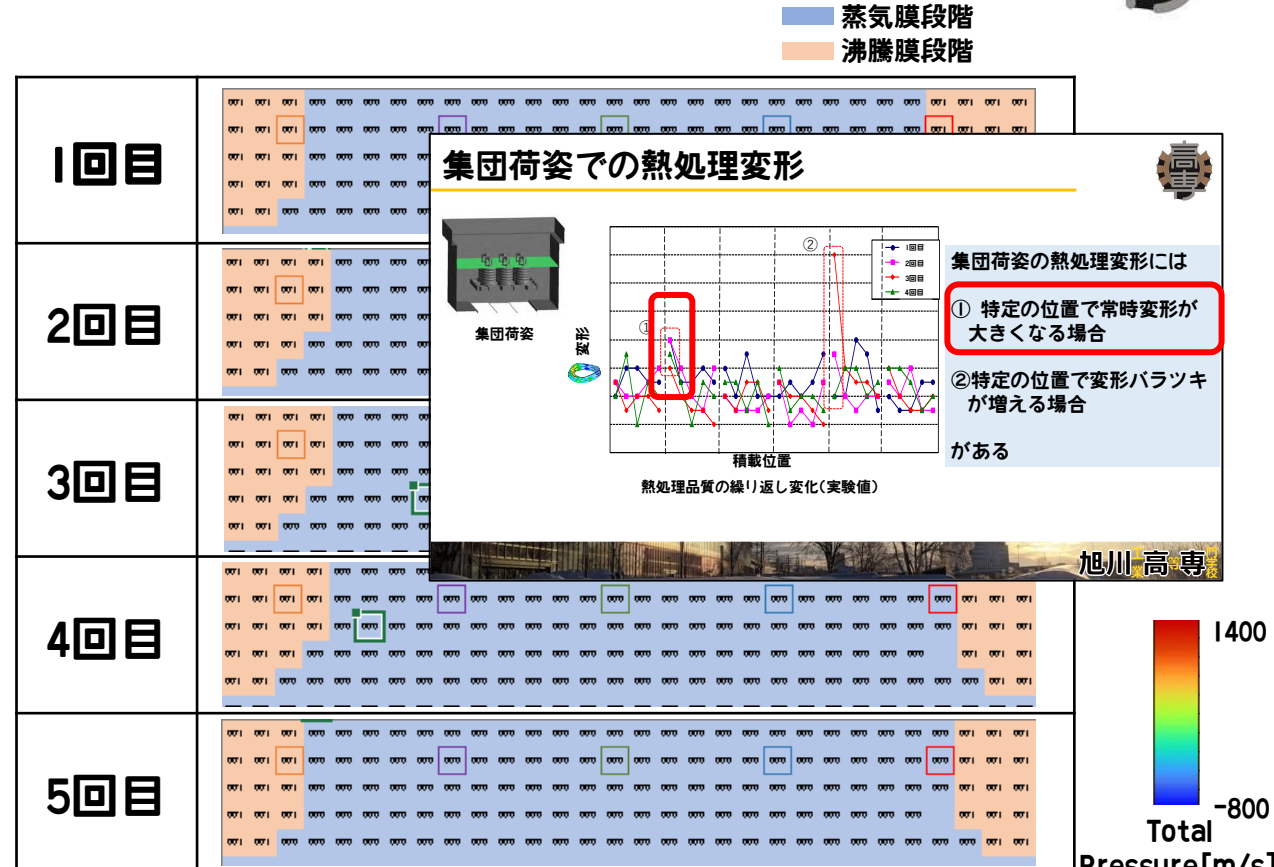
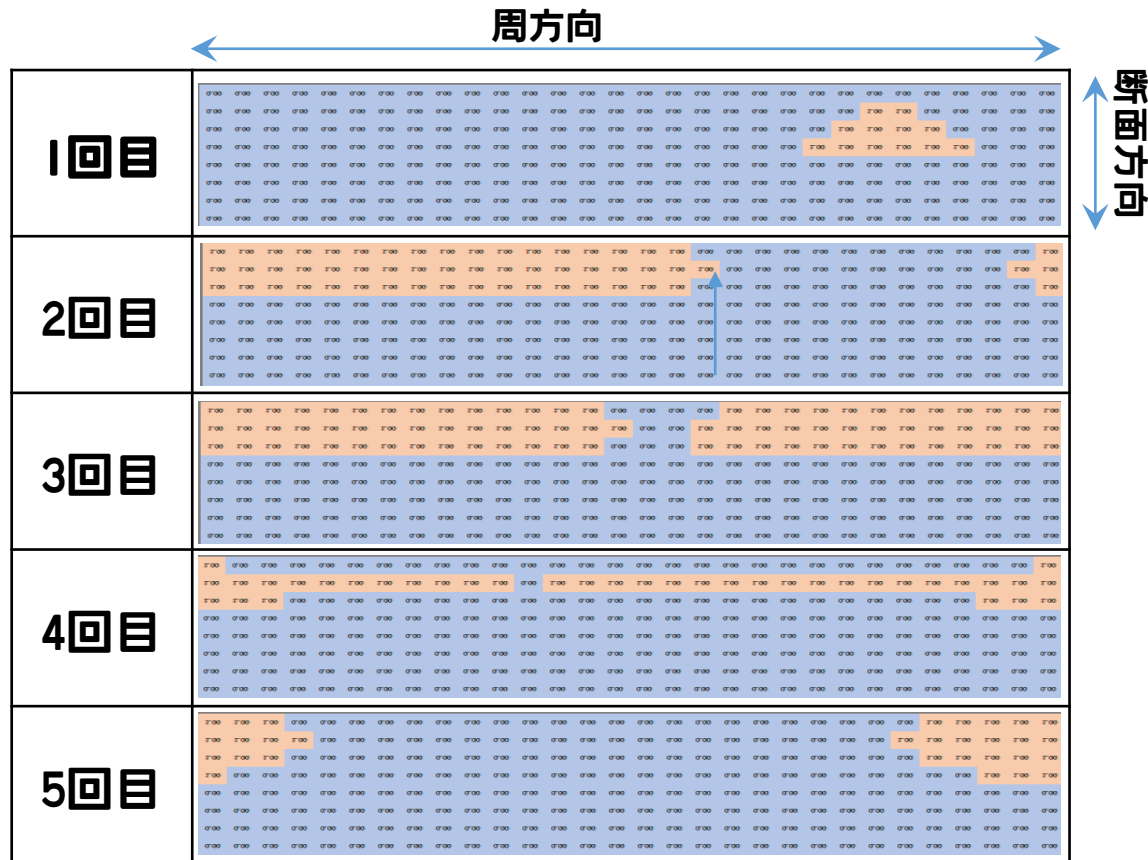
---

- ✓ 研究背景
- ✓ 一個内での冷却ばらつきによる熱処理変形
- ✓ 集団荷姿での冷却解析手法
- ✓ 集団荷姿での流体解析
- ✓ **集団荷姿での冷却解析**
- ✓ まとめ





# 集団荷姿での圧力変動を反映させた蒸気膜崩壊



Total Pressureの大きな部位に強制膜厚変化 $f$ を与える事で蒸気膜崩壊は安定した

安定して大きな冷却ムラ(熱処理変形)を示す







# 本日の発表の流れ

- ✓ 研究背景
- ✓ 一個内での冷却ばらつきによる熱処理変形
- ✓ 集団荷姿での冷却解析手法
- ✓ 集団荷姿での流体解析
- ✓ 集団荷姿での冷却解析
- ✓ **まとめ**



# まとめ



## 結果からわかる事

- ✓ 位相速度  $v$  (～油の性状, スケール), 蒸気膜加振力  $f$  (～圧力等) を織り込み, 定常流体解析と連成する事で集団荷姿の冷却解析ができた

## 今後の進めかた

- ✓ 蒸気膜厚みを変化させる現象は多数報告されている為, 特に「集団焼入れ」で重要なパラメータを実験的に抽出し, 織込む
- ✓ 繰返し 及び 荷姿内バラツキの定量検証

本件研究の一部はJSPS科学費 JP21K14061 「低次元セルオートマトン法による製造バラツキを反映した焼入れシミュレーション」の助成を受けたものです



END





# 基礎方程式



## Wolframによる相変態モデル

### 注目セル

	$S_4^t$	
$S_2^t$	$S_0^t$	$S_1^t$
	$S_3^t$	

相変態: ノイマン近傍  
(周辺セルから弱い影響を受ける)

$T_8^t$	$T_4^t$	$T_5^t$
$T_2^t$	$T_0^t$	$T_1^t$
$T_3^t$	$T_3^t$	$T_7^t$

温度: ムーア近傍  
(周辺セルから強い影響を受ける)

$S_i^t$ : 相

0: 蒸気膜段階  $t$ : 時刻  
1: 沸騰段階  $i$ : 位置  
2: 対流段階

$T_i^t$ : 温度

Wolfram, S., *A New Kind of Science*, Wolfram Store, 2007

蒸気膜あり

蒸気膜なし

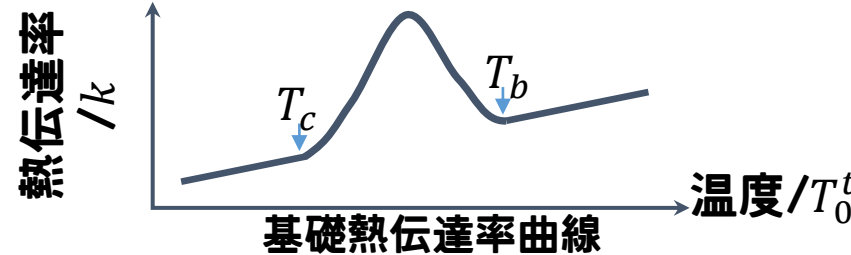
蒸気膜崩落

## サブクール沸騰モデル

相変態:  $S_0^t = 0$  and  $\sum_i S_i^t \geq b$  and  $T_0^t \leq T_b$  then  $S_0^{t+1} = 1$ ,  $T_0^{t+1} = T_0^t - \alpha$  • 式.(1)

$S_0^t = 1$  and  $\sum_i S_i^t \geq c$  and  $T_0^t \leq T_c$  then  $S_0^{t+1} = 2$  • 式.(2)

温度:  $T_0^{t+1} = T_0^t + \left\{ \frac{1}{6} (T_1^t + T_2^t + T_3^t + T_4^t) + \frac{1}{12} (T_5^t + T_6^t + T_7^t + T_8^t) - k \cdot (T_e - T_0^t) \right\}$  • 式.(3)



$\alpha$ : 潜熱  
 $b, c$ : 形状因子  
 $T_e$ : 冷媒温度  
 $k$ : 熱伝達率

セルオートマトン法による  
蒸気膜崩落