



# 熱処理シミュレーションによる 熱処理繰り返しばらつきの再現

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
- ✓ 低次元セルオートマトン法とその検証
- ✓ 熱処理冷却ばらつき再現
- ✓ 熱処理冷却ばらつきによる変形解析
- ✓ まとめ





# 本日の発表の流れ

---

## ✓研究背景

✓低次元セルオートマトン法とその検証

✓熱処理冷却ばらつきの再現

✓熱処理冷却ばらつきによる変形解析

✓まとめ



# 冷却状態と熱処理変形の関係

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

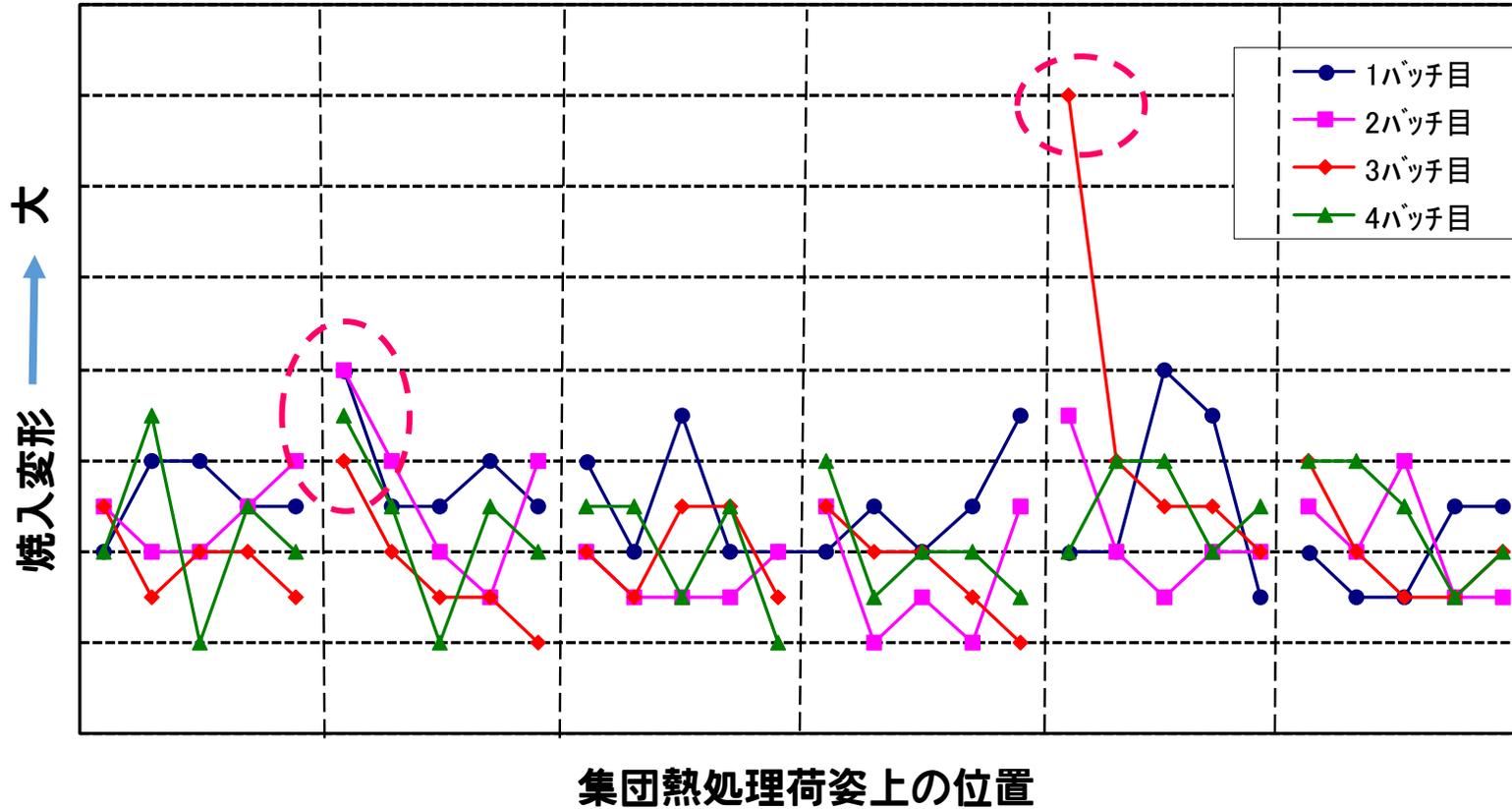


表面での冷却状態ムラは熱処理変形に影響する  
 Influence of thermal boundary conditions on the results of heat treatment simulation, Tsuyoshi Sugimoto, Dong Ying Ju, Materials Transactions 59(6) 950-956 2018年

## 熱処理シミュレーションの構成① -全体の流れ-



# 熱処理変形の繰り返しばらつき



焼入集団荷姿の特定位置で

- ・ 焼入変形平均値が大きくなること  
がある
- ・ 繰返し処理で特定の荷姿位置に急  
に大きな熱処理変形が現れる  
⇒ 「繰返しばらつき」



冷却の繰返しばらつきを  
再現する手法が必要



不安定な蒸気膜崩落起点



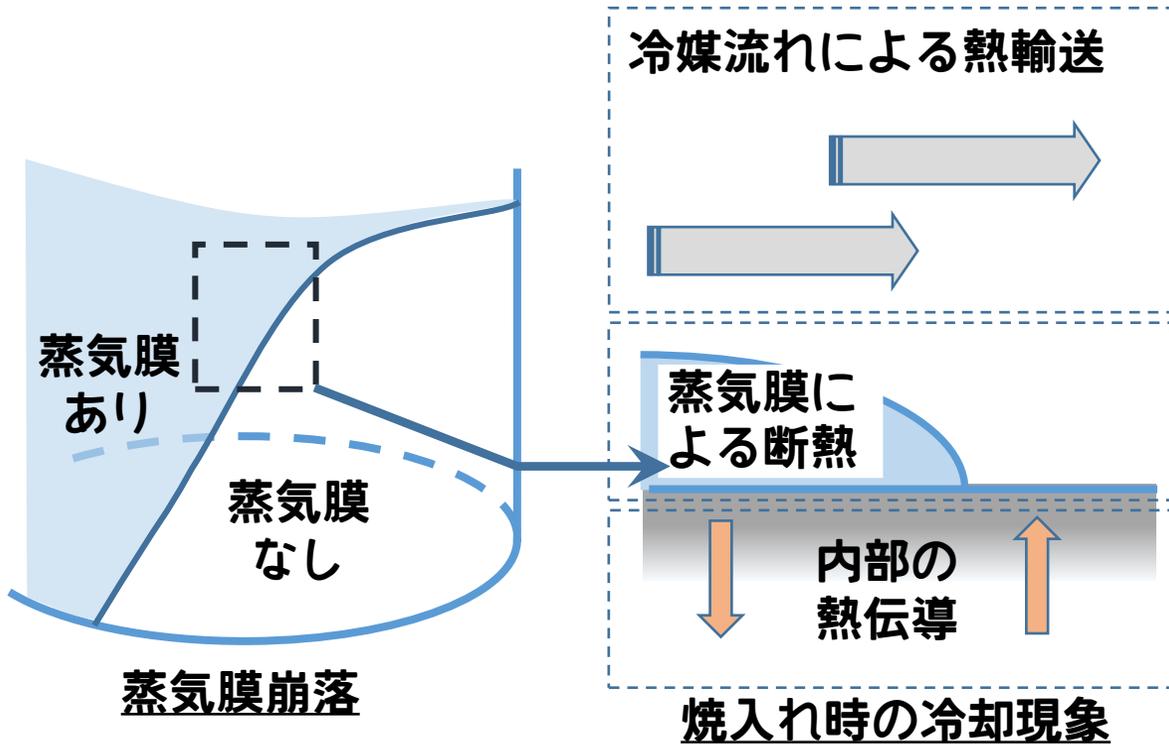
# 本日の発表の流れ

---

- ✓ 研究背景
- ✓ **低次元セルオートマトン法とその検証**
- ✓ 熱処理冷却ばらつき再現
- ✓ 熱処理冷却ばらつきによる変形解析
- ✓ まとめ



# 低次元セルオートマトン法



	時間依存性	次元	優先する状況
冷媒の流れ	流れ成分: 定常 熱輸送: 非定常	3	強い攪拌
熱伝達	非定常	2	弱/無攪拌 複雑形状
熱伝導	定常 (変態潜熱は非定常)	3	大型部品

蒸気膜崩落による断熱変化の解析(熱伝達)により  
低負荷(2次元)で冷却状況を予測できる⇒多数回の計算可能

Calculation method between heat treatment simulation and computer fluid dynamics, Tsuyoshi Sugimoto, Kouichi Taniguchi, Shigenori Yamada, Toshiyuki Matsuno, Masaru Sonobe, Dong Ying Ju, Materials Performance and Characterization, 2018, 8(2) 37-49

# 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

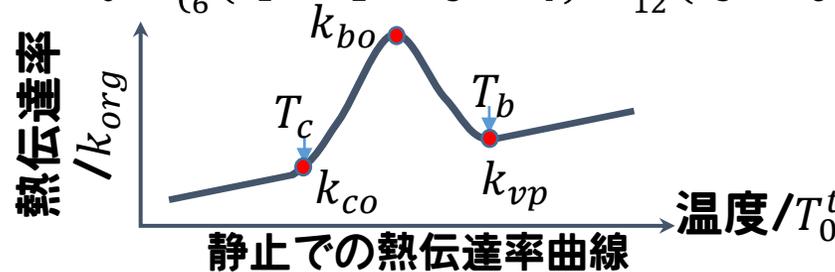
蒸気膜崩落

## サブクール沸騰モデル

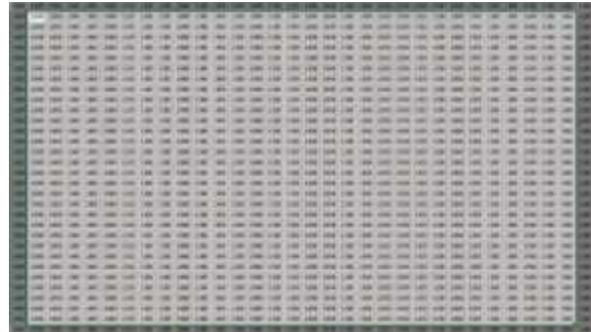
相変態:  $S_0^t = 0$  and  $\sum_i S_i^t \geq b$  and  $T_0^t \leq T_b$  then  $S_0^{t+1} = 1$ ,  $T_0^{t+1} = T_0^t - \alpha$  ..式.(1)

$S_0^t = 1$  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 ( $k_{vp}, k_{bo}, k_{co}$ )

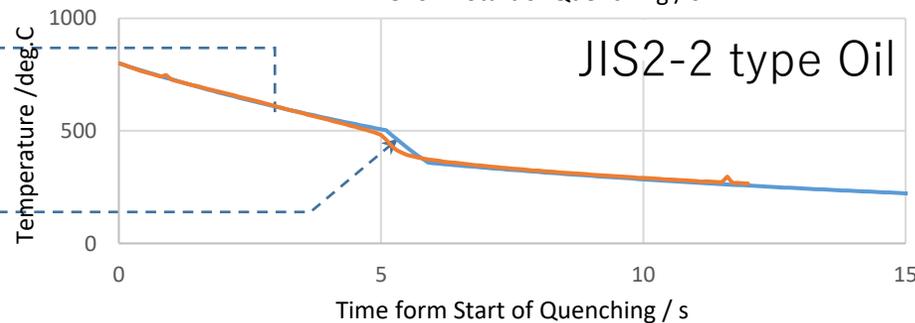
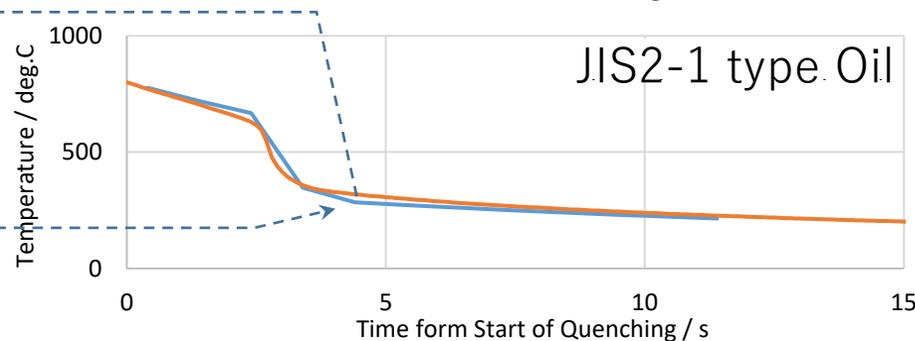
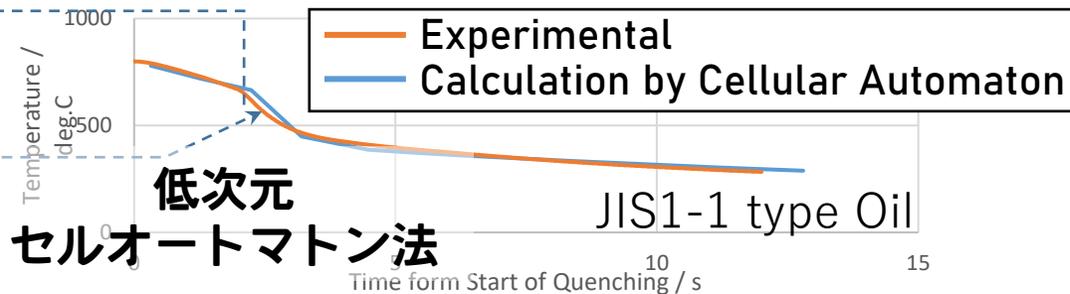
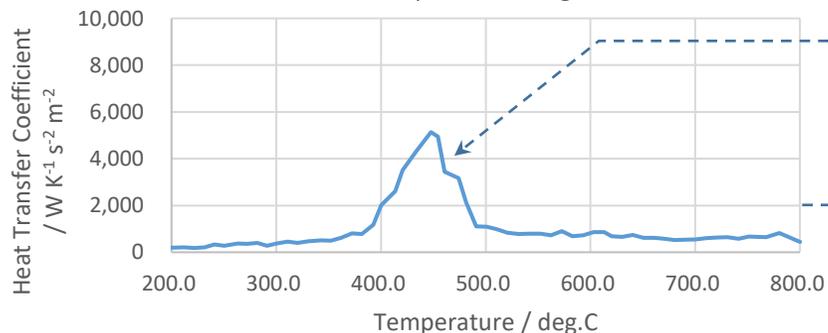
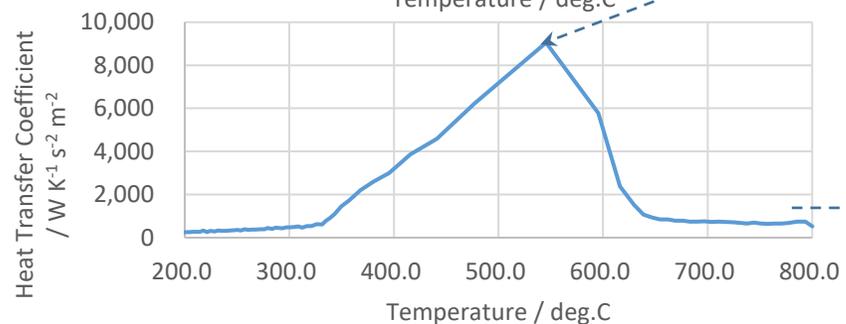
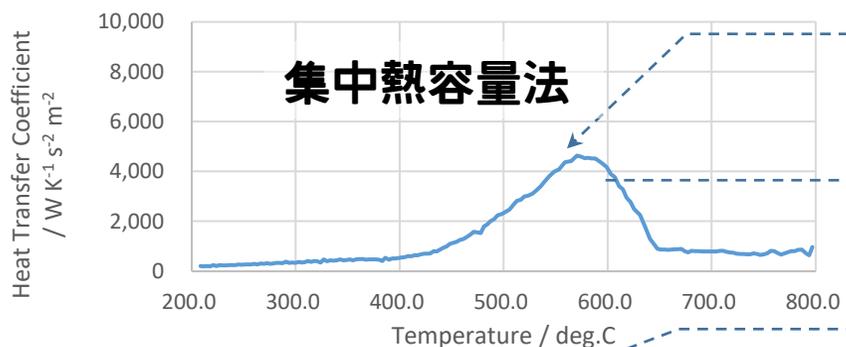


セルオートマトン法による蒸気膜崩落

# JIS銀棒試験による検証



各種焼入油について冷却状況が再現できた



測定/計算点

**JIS K2422 type A  
銀棒試験片**

実験冷却曲線と熱伝達率は  
以下による  
<https://www.jsht.or.jp/study/>





# 本日の発表の流れ

---

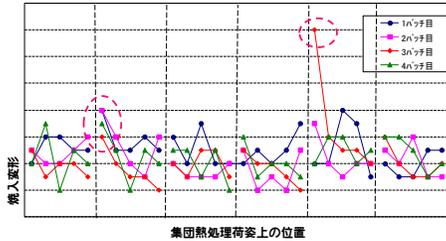
- ✓ 研究背景
- ✓ 低次元セルオートマトン法とその検証
- ✓ 熱処理冷却ばらつき再現**
- ✓ 熱処理冷却ばらつきによる変形解析
- ✓ まとめ



# 蒸気膜振動による冷却ばらつきが発生



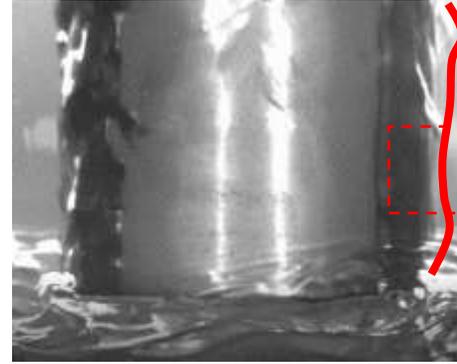
## 熱処理変形の繰り返しバラツキ



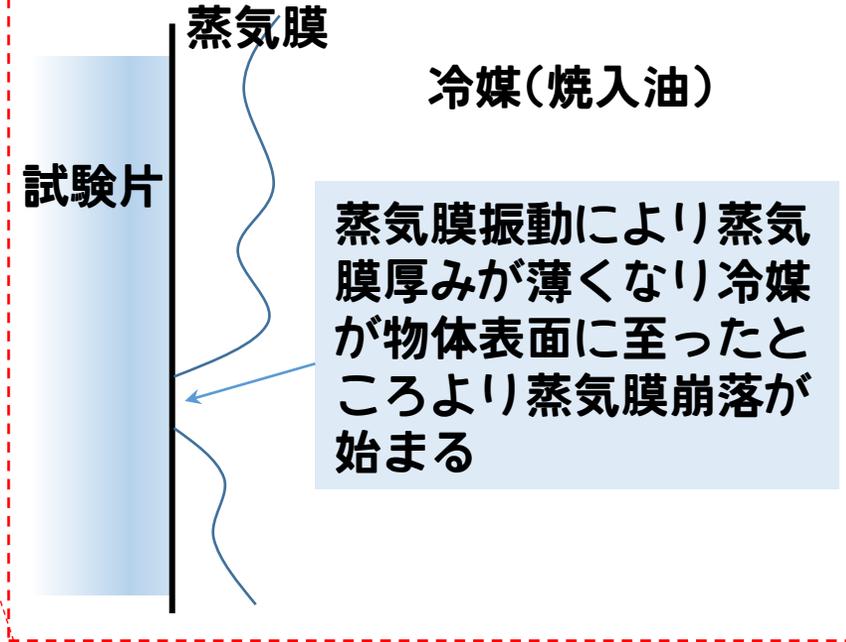
焼入集団荷姿の特定位置で  
・焼入変形平均値が大きくなること  
がある  
・繰り返し処理で急に大きな熱処理変  
形が現れる  
⇒「繰り返しバラツキ」

冷却時の繰り返しバラツキを  
再現する手法が必要

旭川高専



蒸気膜振動



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

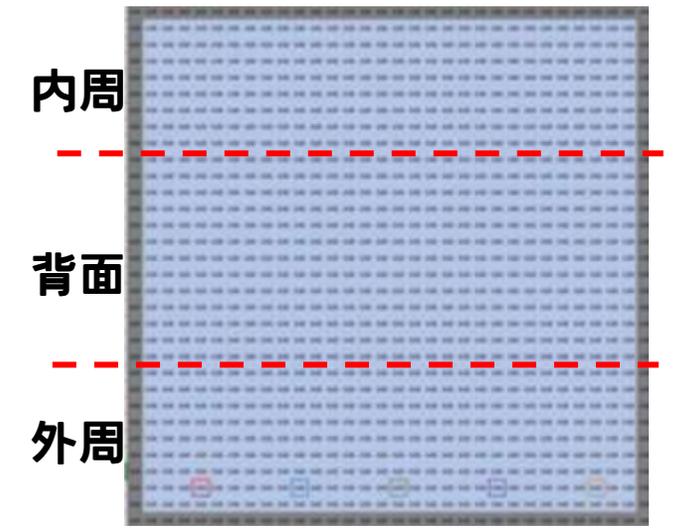
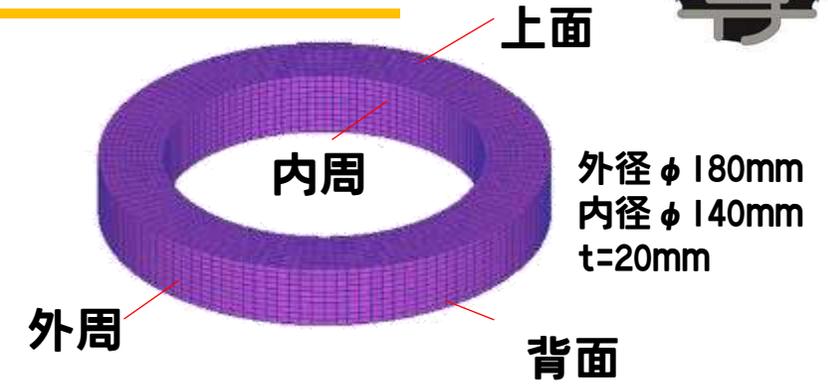
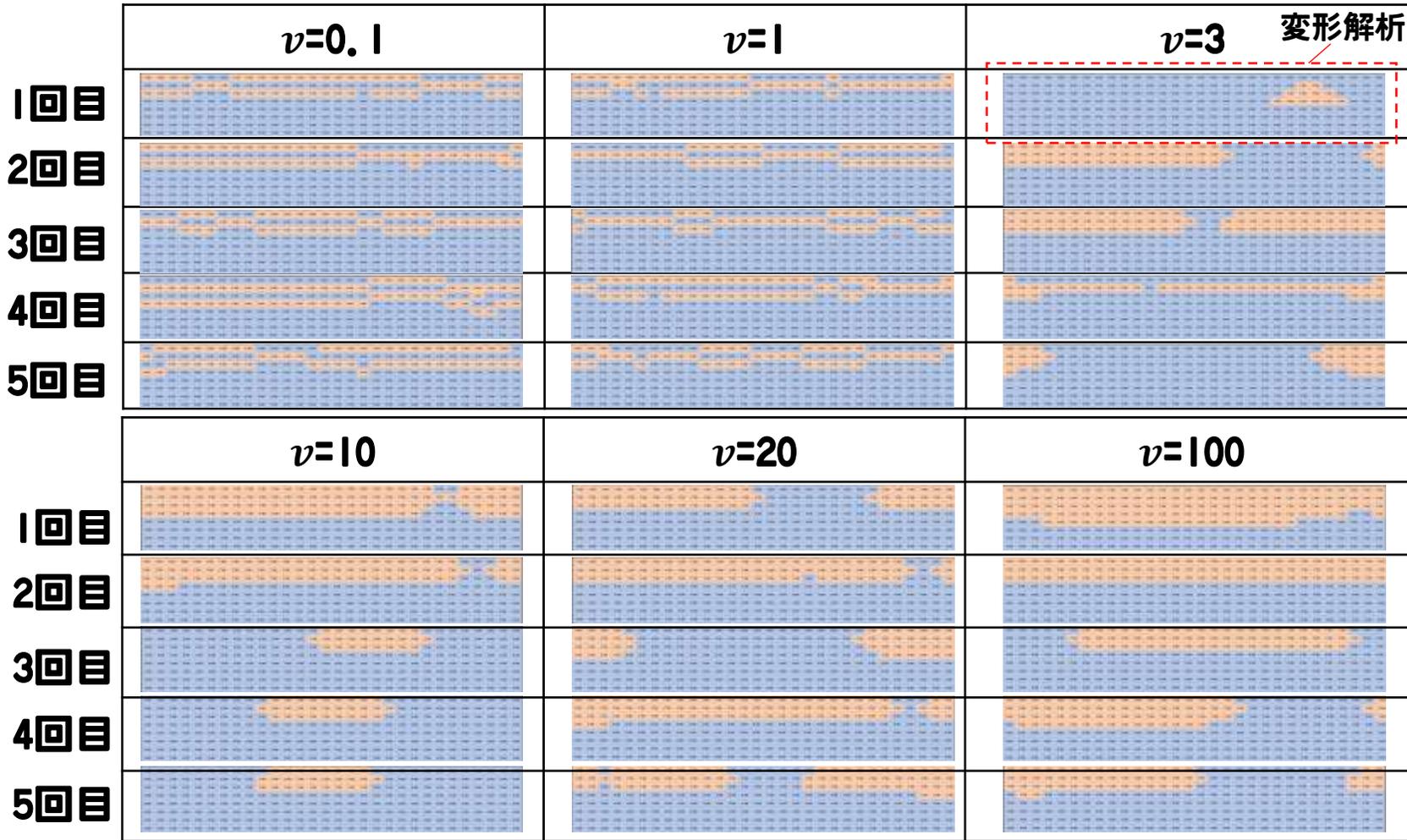
+

加振力:  $r(x_i, t)$  正規分布関数より  
ランダムサンプリング

$v$ : 位相速度  
 $u$ : 蒸気膜厚み  
 $t$ : 時刻



# 蒸気膜振動による冷却ばらつきが発生



$v=3$ での蒸気膜崩落の様子

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

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(蒸気膜崩落開始から1.5s後)





# 本日の発表の流れ

---

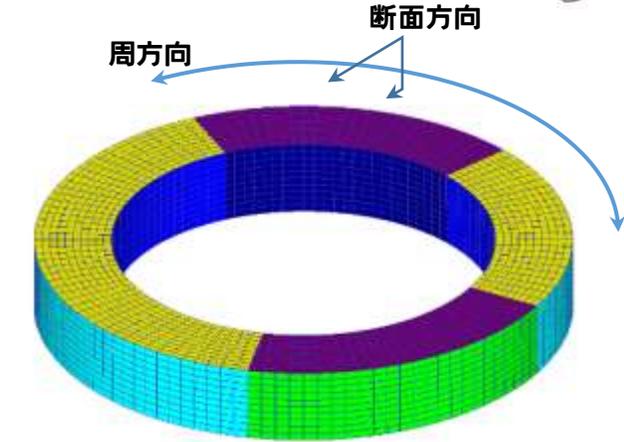
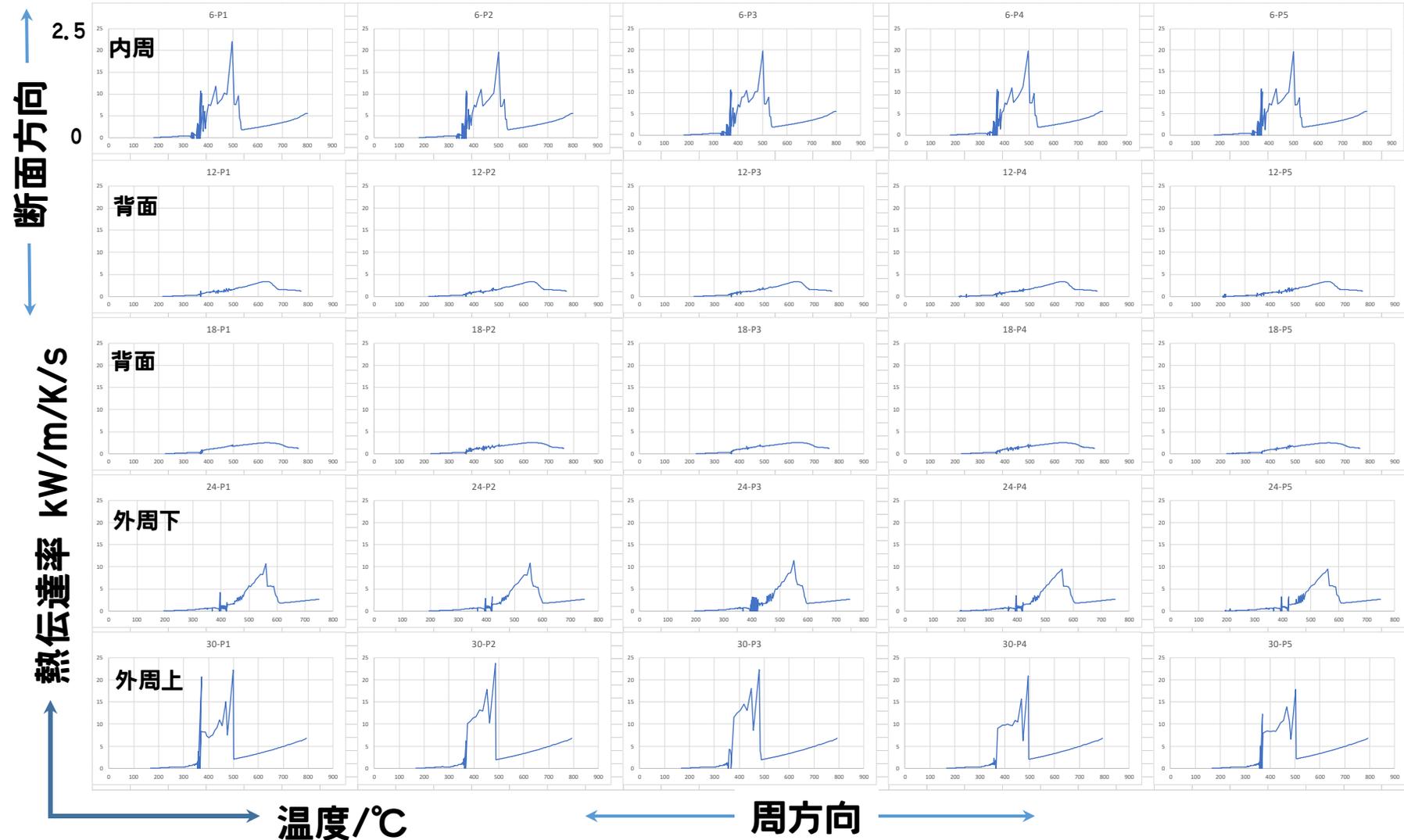
- ✓ 研究背景
- ✓ 低次元セルオートマトン法とその検証
- ✓ 熱処理冷却ばらつき再現
- ✓ **熱処理冷却ばらつきによる変形解析**
- ✓ まとめ



# 熱伝達率の導出( $\nu=3$ )



各部位での熱伝達率を冷却曲線から集中熱容量法で導出

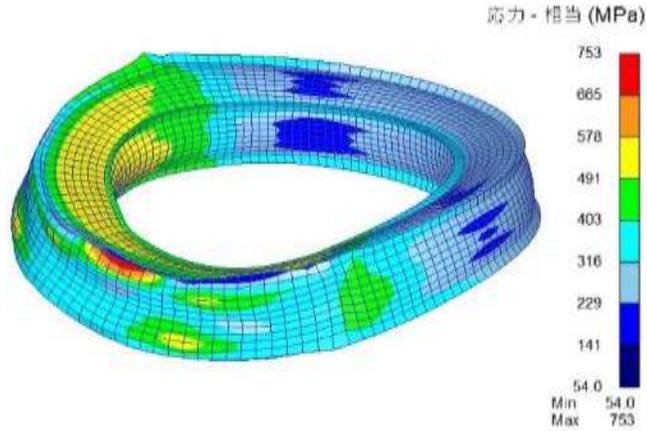


表面を分割し、それぞれ計算された熱伝達率を付与した

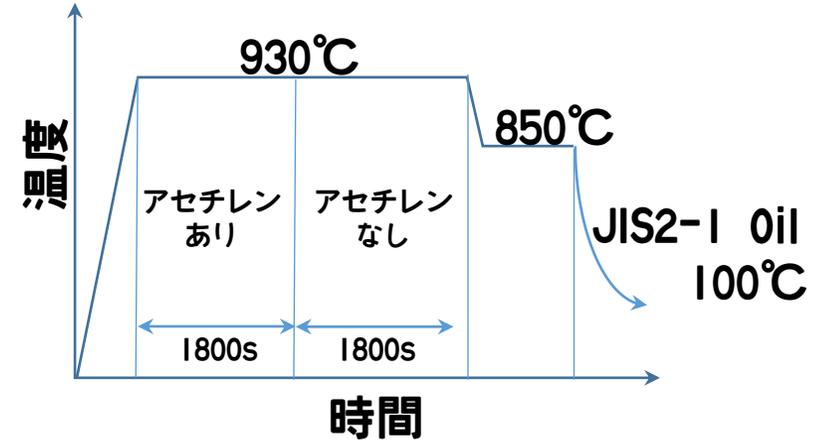
- ・背面の熱伝達率は低い
- ・蒸気膜段階終期は蒸気泡が発生するので熱伝達率が上下する
- ・最小膜沸騰温度が変化する



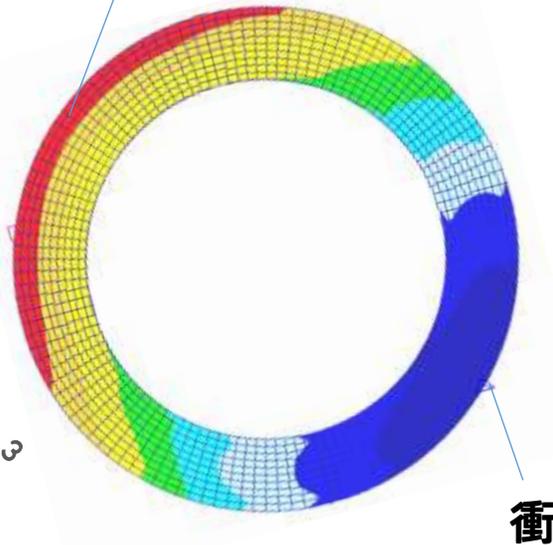
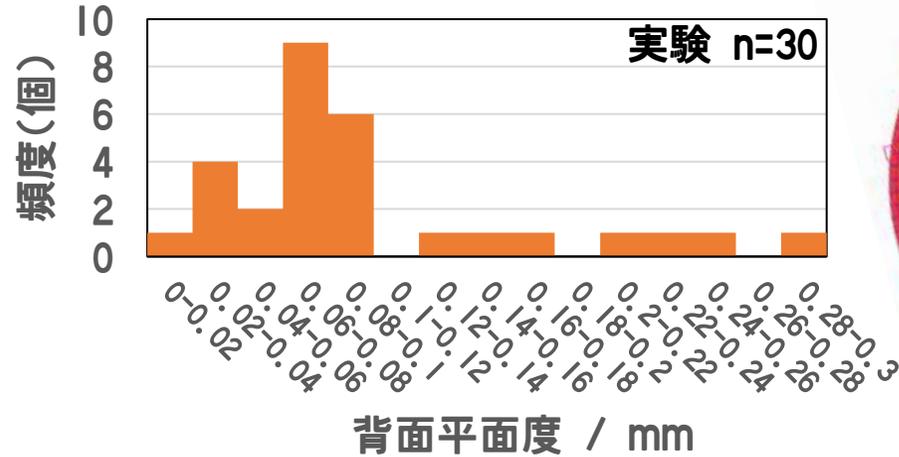
# 変形計算結果



シミュレーション  
最大変位  
0.3mm



計算した熱処理条件



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 x 15層
要素形状	六面体

- ・ 最大変形について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
- ✓ 低次元セルオートマトン法とその検証
- ✓ 熱処理冷却ばらつき再現
- ✓ 熱処理冷却ばらつきによる変形解析
- ✓ **まとめ**



# まとめ

## 結果からわかる事

- ✓ 蒸気膜振動により冷却ばらつきが発生する可能性がある
- ✓ 冷却ばらつきにより熱処理変形が発生する
- ✓ 本手法により熱処理変形の繰返しばらつきを安価に解析できる

## 今後の進めかた

- ✓ 位相速度  $v$  (～油の性状, 解析スケール), 蒸気膜への加振力  $r$  (～流速等)を織り込み, 定常流体解析と連成する事で集団荷姿の解析をする
- ✓ 繰返し冷却ばらつきの定量検証

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ばらつき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

