



# 熱処理シミュレーションにおける解析結果に対する 境界条件の要因効果分析と改善

旭川工業高等専門学校 機械システム工学科 杉本剛

2022/10/21 於材料学会 材料DB分科会





# 自己紹介

**名前** 杉本 剛 (46歳)  
**出身** 広島県 広島市  
**専門** 金属材料・金属熱処理・モビリティ



瀬戸内海 多島美

**経歴**

- 1998年 筑波大学 自然学類 地球科学専攻 卒業
- 2001年 筑波大学 大学院 理工学研究科 物質工学分野 修了
- 2001年 ~ 2020年 日産自動車(株) 生産技術部門・設計部門
- 2016年 ~ 2019年 埼玉工業大学 大学院 工学研究科 電子工学専攻(博士)
- 2020年 ~ 現在 旭川高専 機械システム工学科・キャリア形成支援室長  
 (公社)自動車技術会 北海道支部 理事  
 旭川創造都市推進協議会 アドバイザー

ジムカーナ

学生フォーミュラ(FA)

**趣味** モーター  
スポーツ



旅行



2014年1月に福井県に旅行し、全都道府県踏破





# 本日の内容

---

- ✓ 熱処理シミュレーションとMBD
- ✓ 熱伝達率の影響
- ✓ V&Vによる定量評価
- ✓ Cellular Automatonによる簡易的な定量化



# 本日の内容

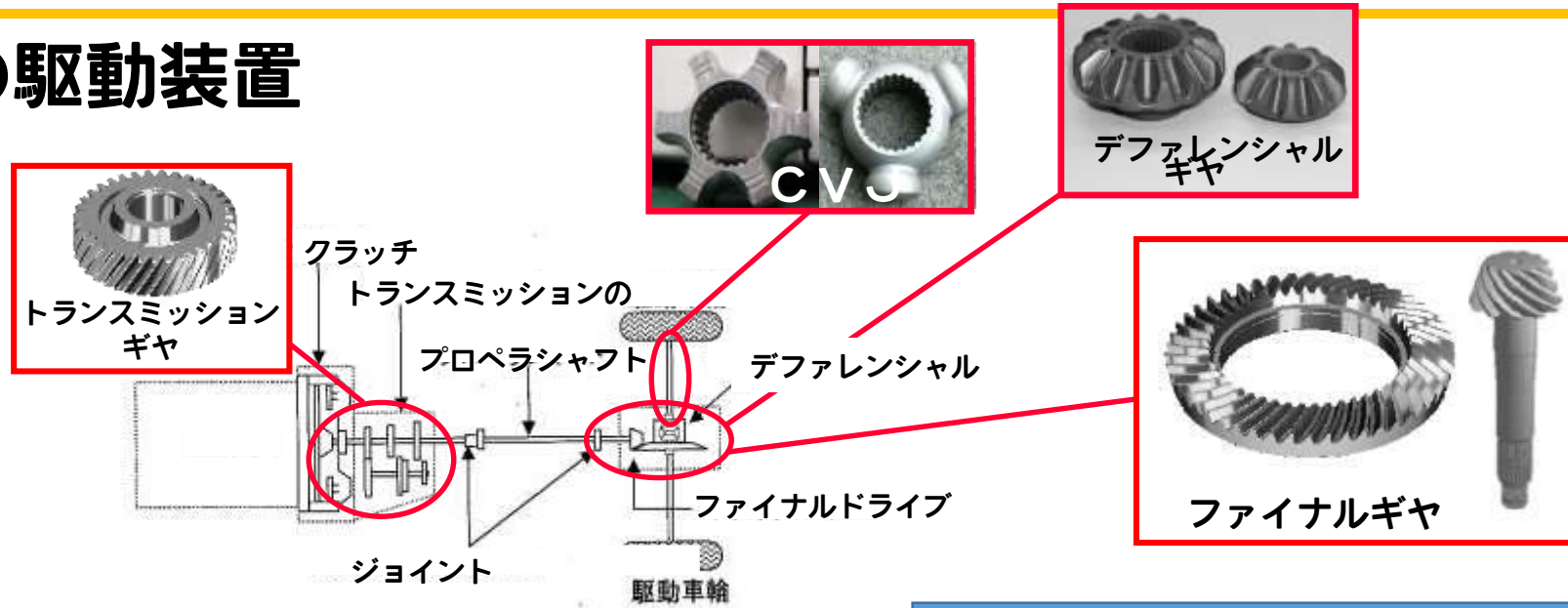
---

- ✓ **熱処理シミュレーションとMBD**
- ✓ 熱伝達率の影響
- ✓ V&Vによる定量評価
- ✓ Cellular Automatonによる簡易的な定量化



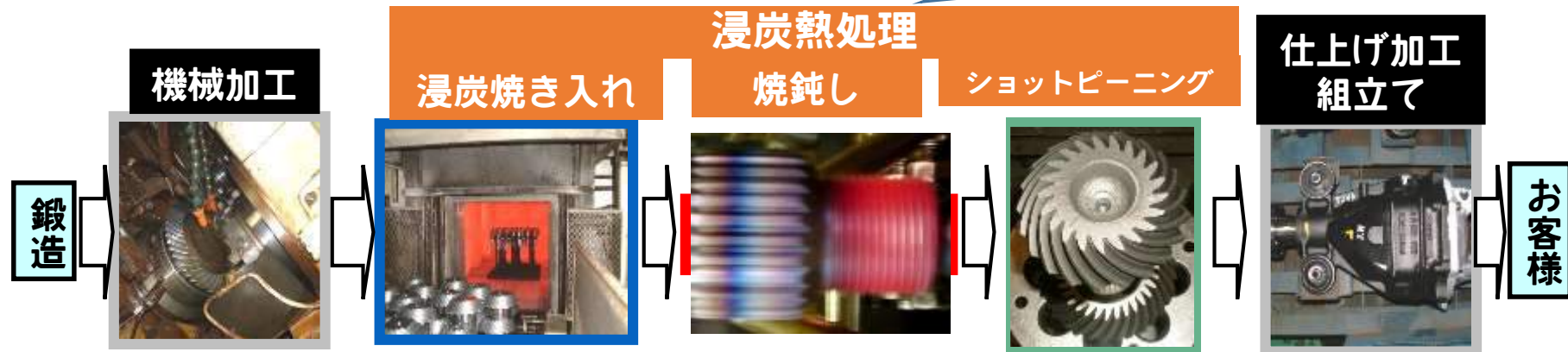
# 歯車部品と浸炭熱処理

## ◆ 自動車の駆動装置



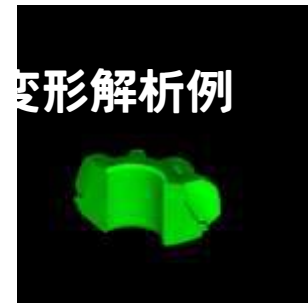
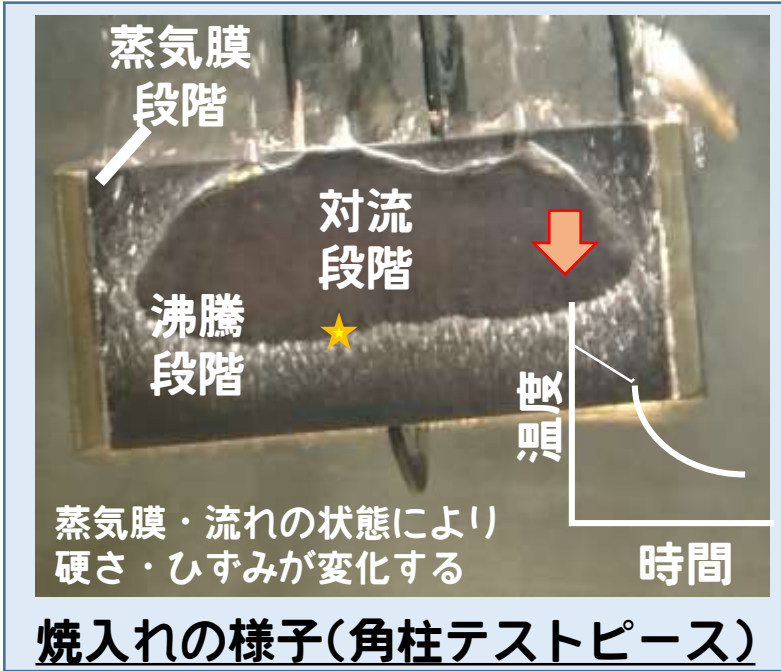
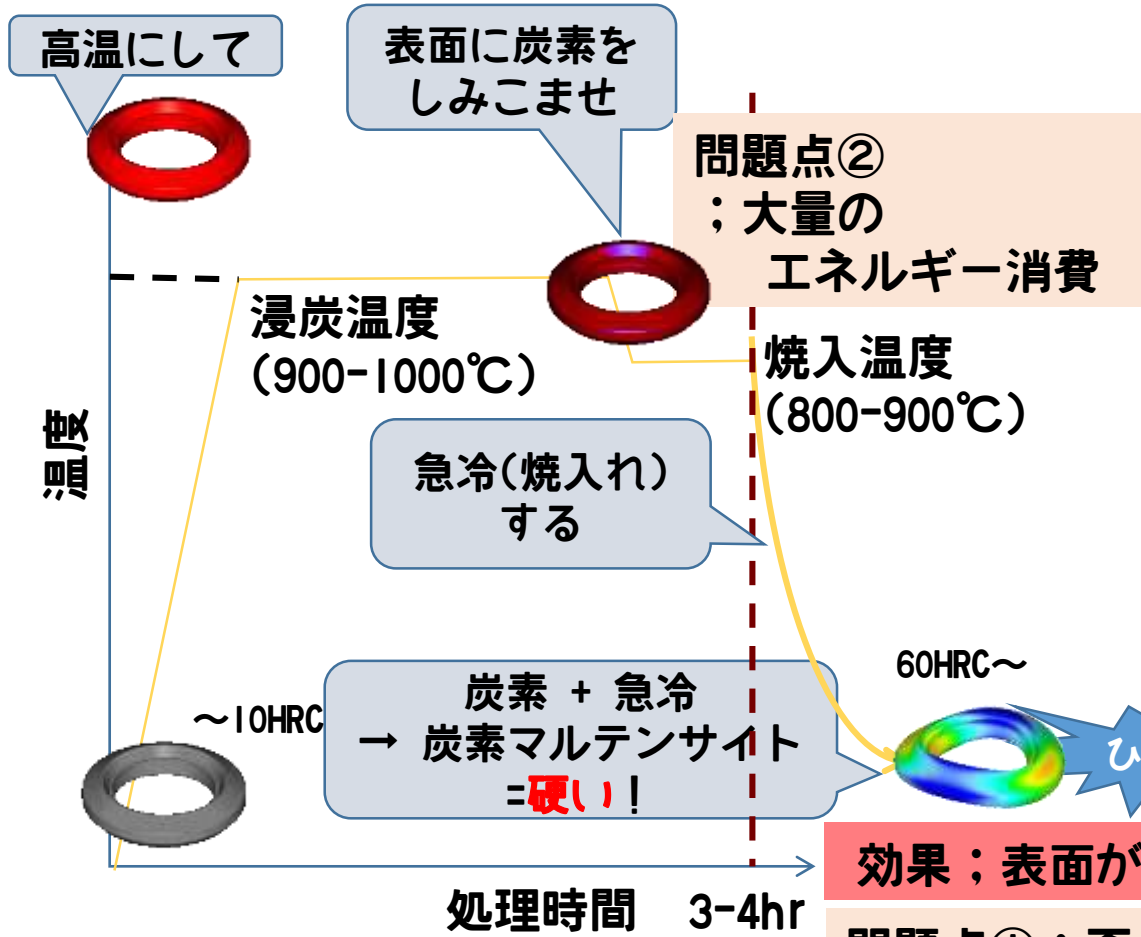
## ◆ 製造工程（ファイナルギヤ）

運転時の破損を防止するため強度を向上させる



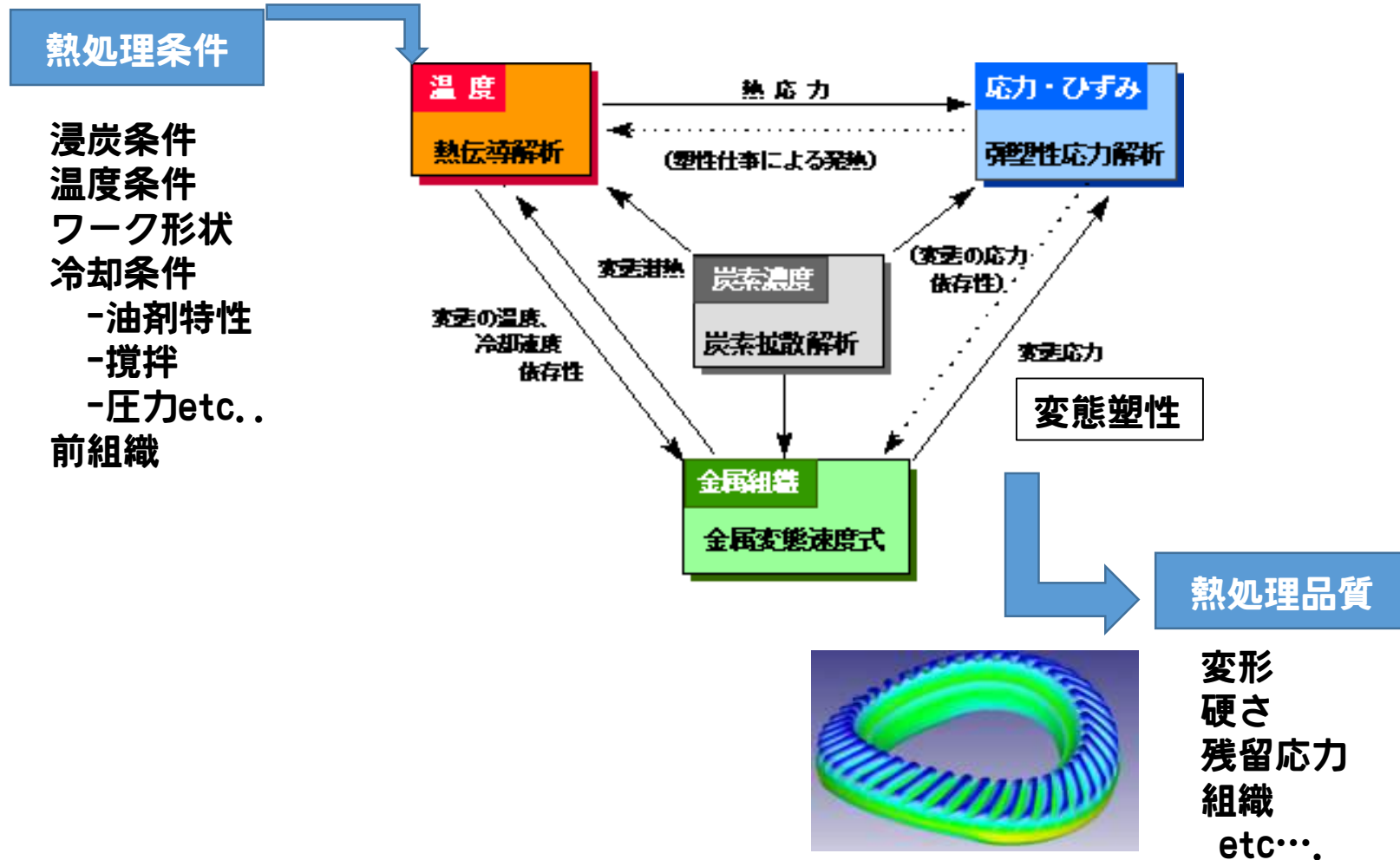
# 浸炭焼き入れ工程とその課題

短い時間でより硬く、歪なく ⇒ 「熱処理シミュレーションによる予測技術の活用」



# 浸炭焼入れシミュレーションの構成

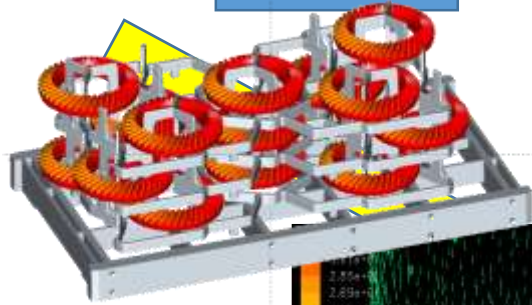
温度 / 応力・歪 / 金属組織 の連成解析によって 熱処理条件から熱処理品質が予測できる





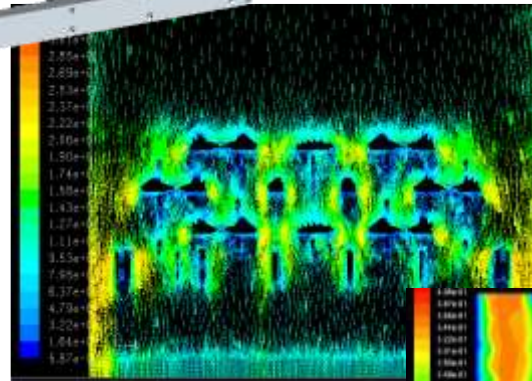
# 浸炭熱処理シミュレーションの課題

START



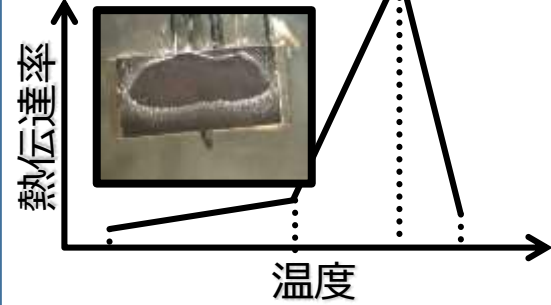
冷媒  
流れ解析

流体解析



部品表面での  
冷媒流れを求め  
る

冷却速度は熱伝達率曲線  
で表現される

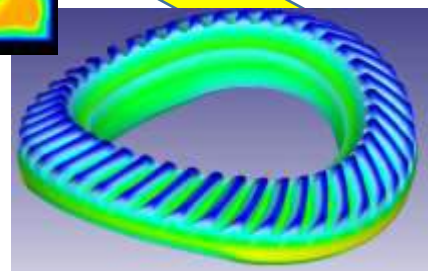
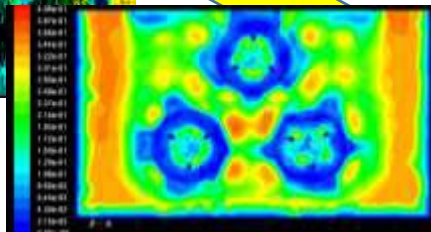


沸騰解析

部品表面での  
冷却速度  
を求める

熱処理  
品質シミュレーション

部品品質の  
解析

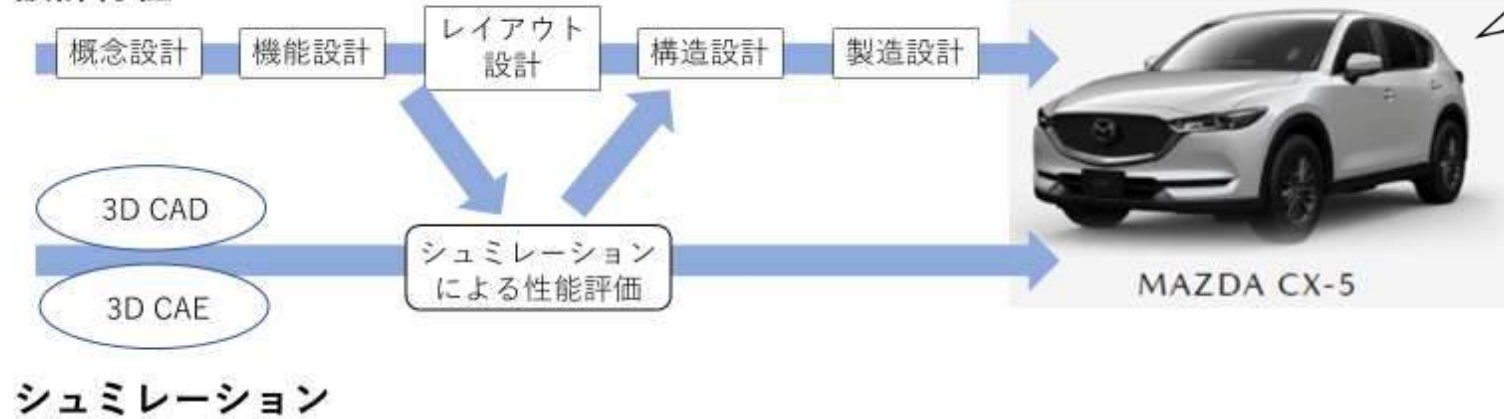


熱伝達率がどのように解析品質  
に影響するか不明

複雑な構成の計算だが体系的な  
解析品質の検証はされていない

# 材料・材料プロセス開発の動向

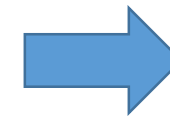
## 設計行程



藤川智士, 「マツダの目指すモデルベース開発」, 『マツダ技報』, 2013, 31, pp. 44-47



車両設計はMBD(Model Based Development)に移行しつつある



材料・材料プロセス開発もMBDに移行しなければ！

# Material Integrationによる材料開発

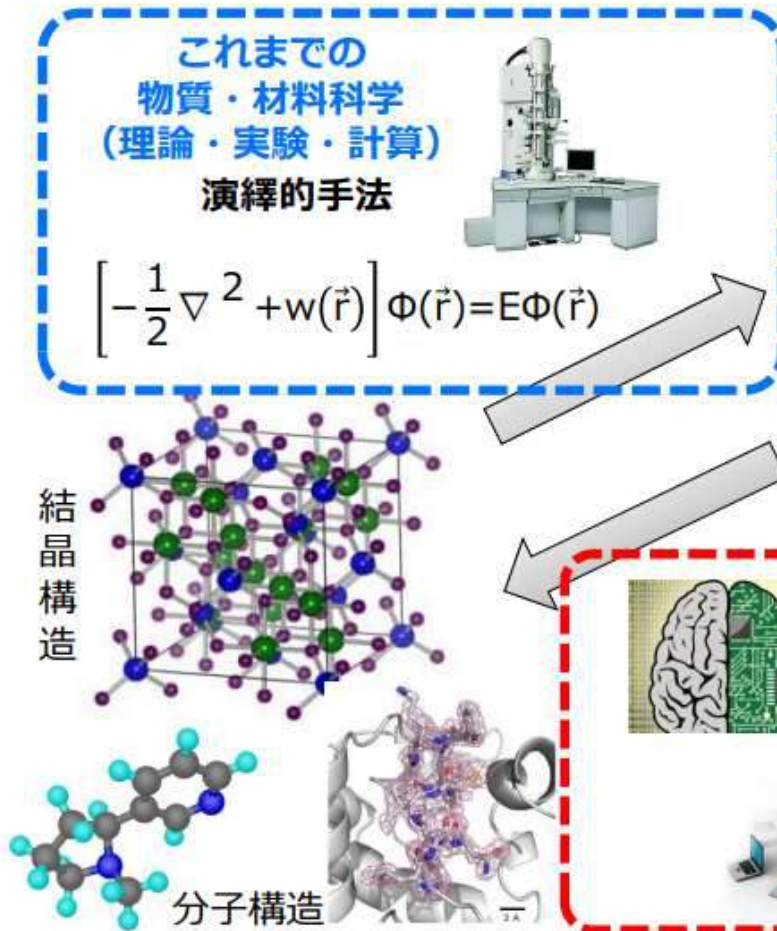


バラク・オバマ元アメリカ大統領(Wikiより)

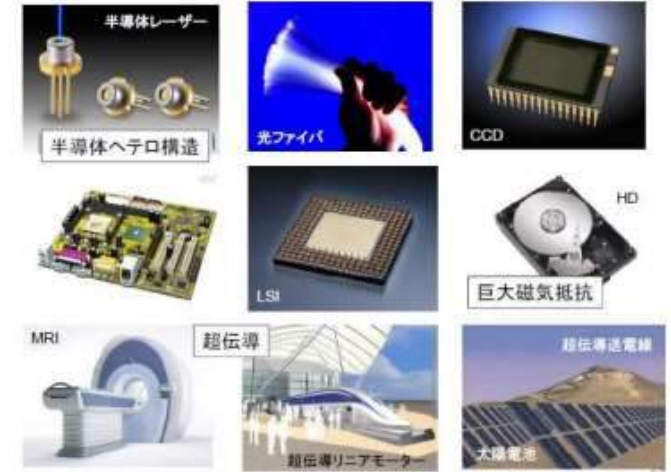
次は材料だ！@2011  
“Material Genome Initiative”

機能から考える

材料の開発・適用スピードを二倍にする



基礎科学の研究が生んだ現代の科学技術



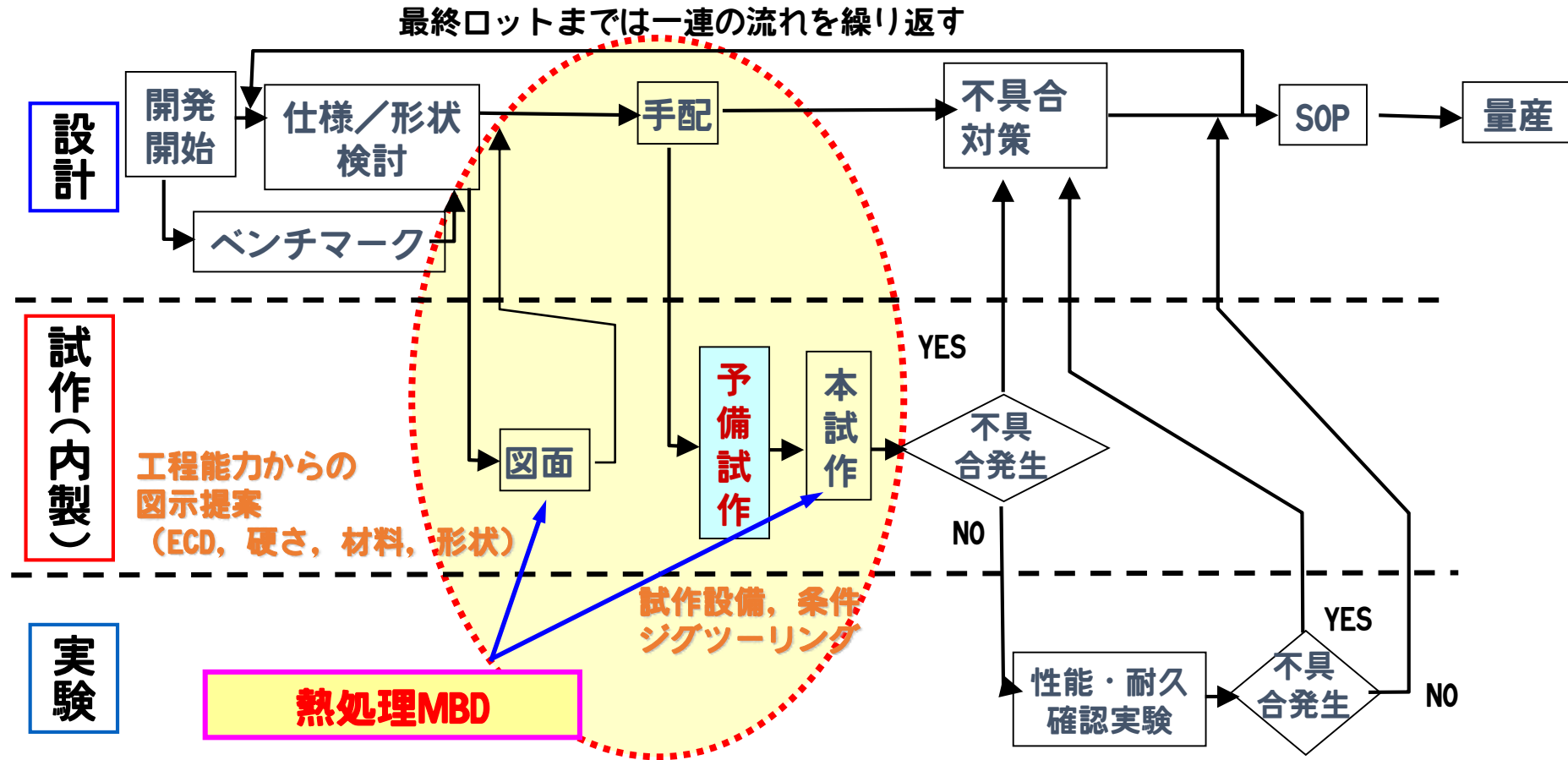
マテリアルズ・インフォマティクス (材料情報を駆使)  
帰納的手法  
機能的手法

物質・材料研究機構資料, オープンサイエンスを巡る世界の最新動向, 2017より



# MBD適用のイメージ

目的：図面ベースでの熱処理品質予測による新規部品・新規工法熱処理試作への貢献



# 熱処理も . . . .

DX・IoT化対応を進めないといけない

- ・どのくらいのコストで
- ・どのくらい信頼できる結果で  
評価できるのかが重要！



加えて . . .  
世界共通言語として使える  
説明ツール  
である必要もある。





# 本日の内容

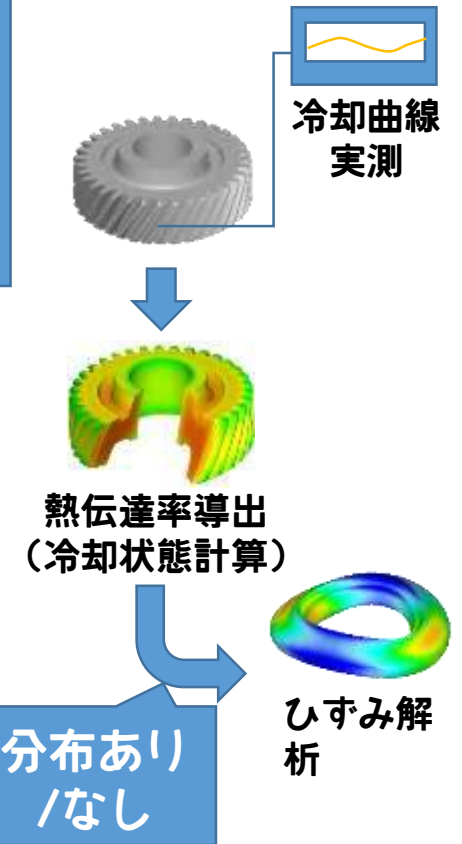
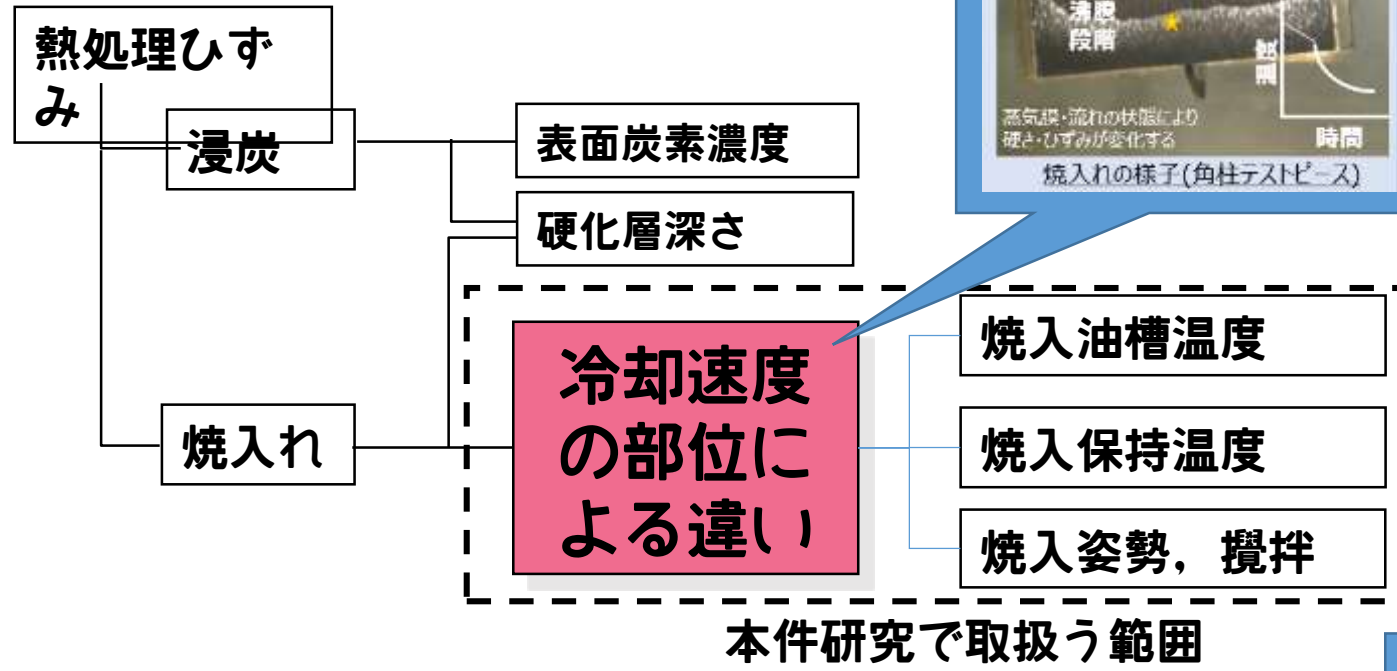
---

- ✓ 熱処理シミュレーションとMBD
- ✓ **熱伝達率の影響**
- ✓ V&Vによる定量評価
- ✓ Cellular Automatonによる簡易的な定量化



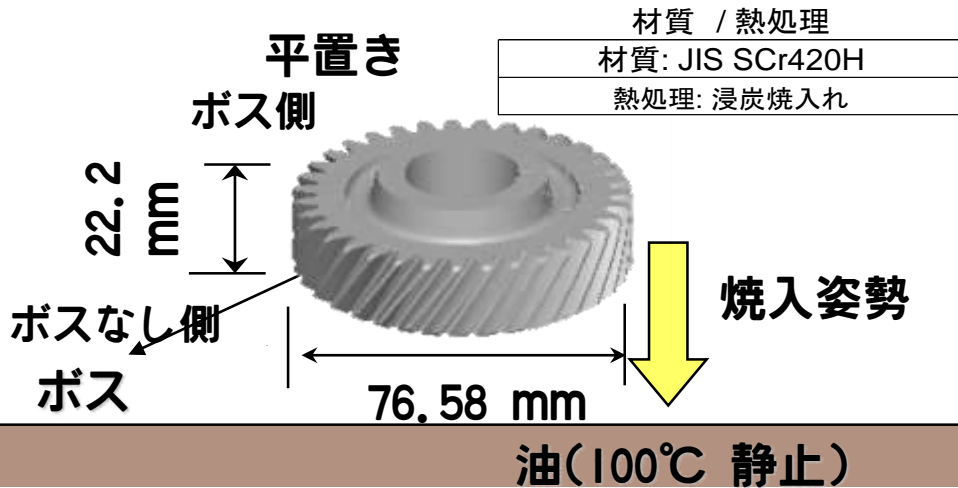
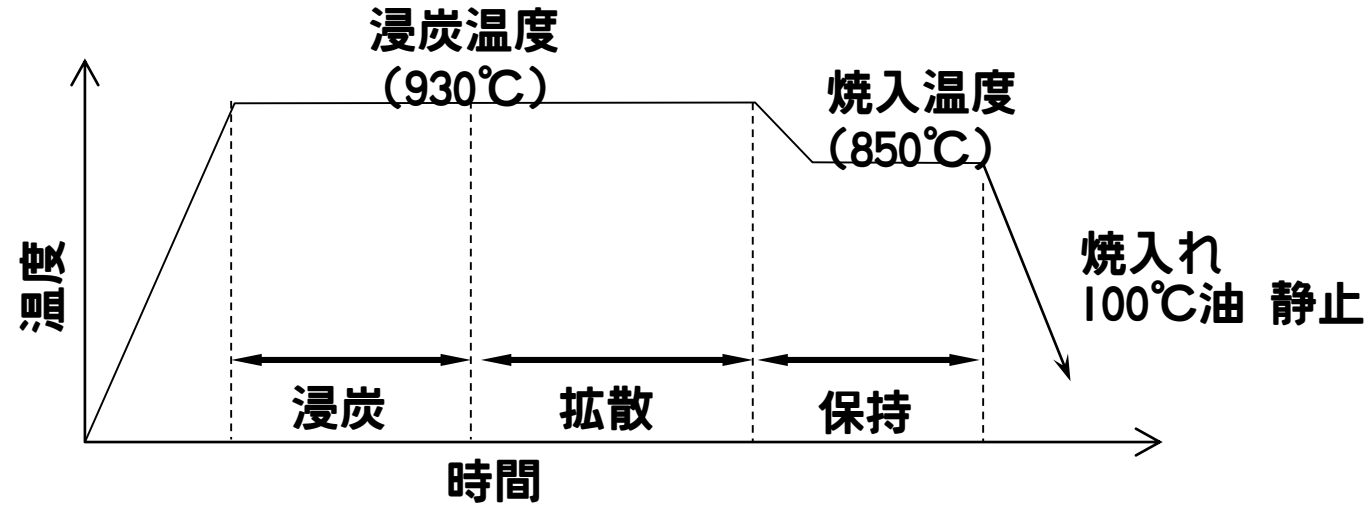
# 冷却境界条件に関する改善と冷却制御 実験方法

まず、影響あるのか？冷却速度の部位による違いが解析品質に与える影響を調査する





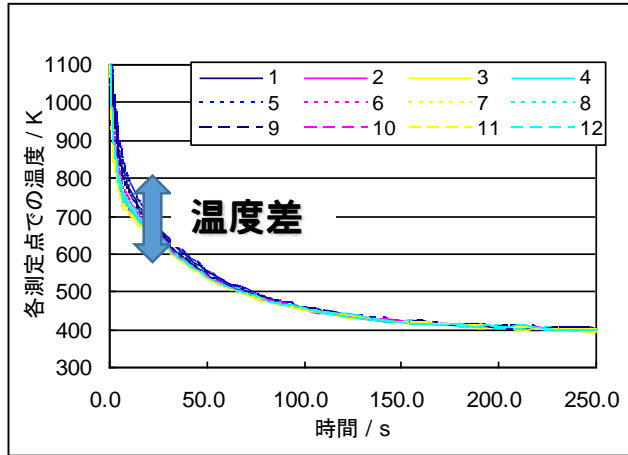
# 冷却境界条件に関する改善と冷却制御 対象部品



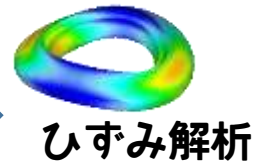
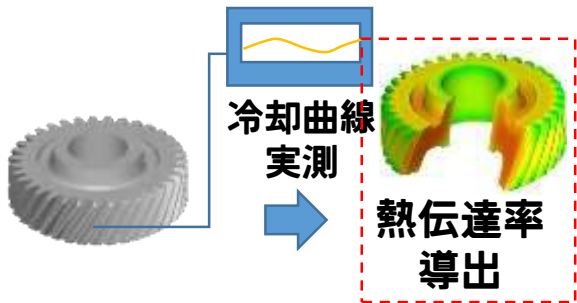
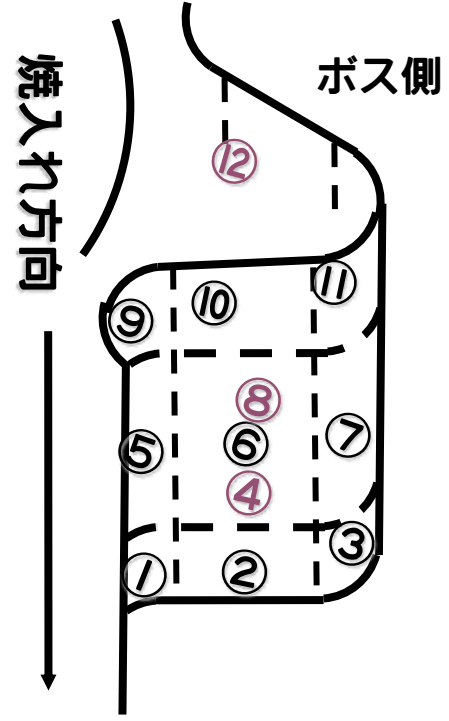
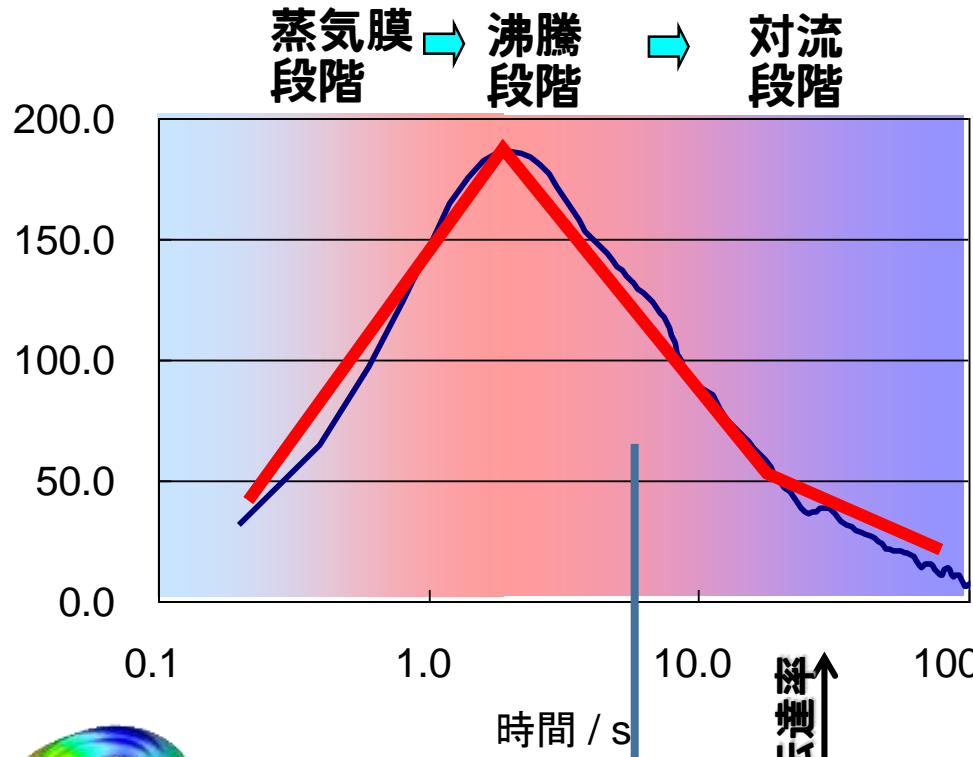
単体焼入れに近い状態で処理をした



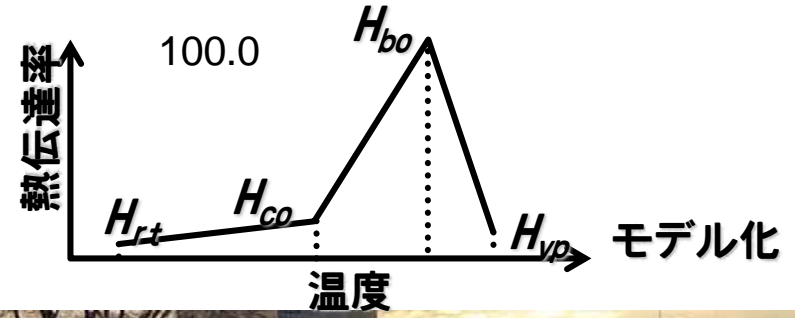
# 熱伝達率のモデル化



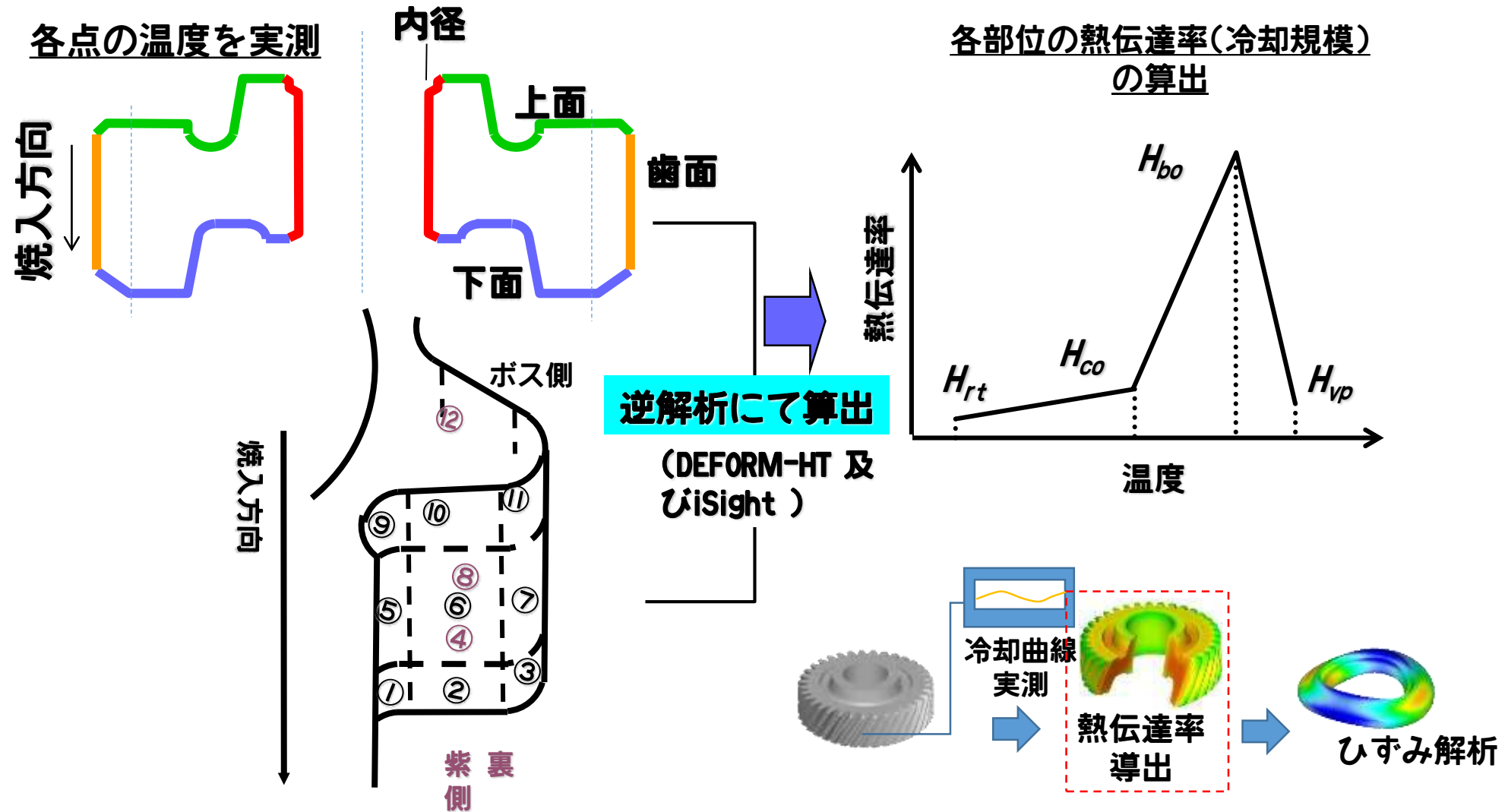
一歯内での温度差



モデル化



# 熱伝達率分布のモデル化

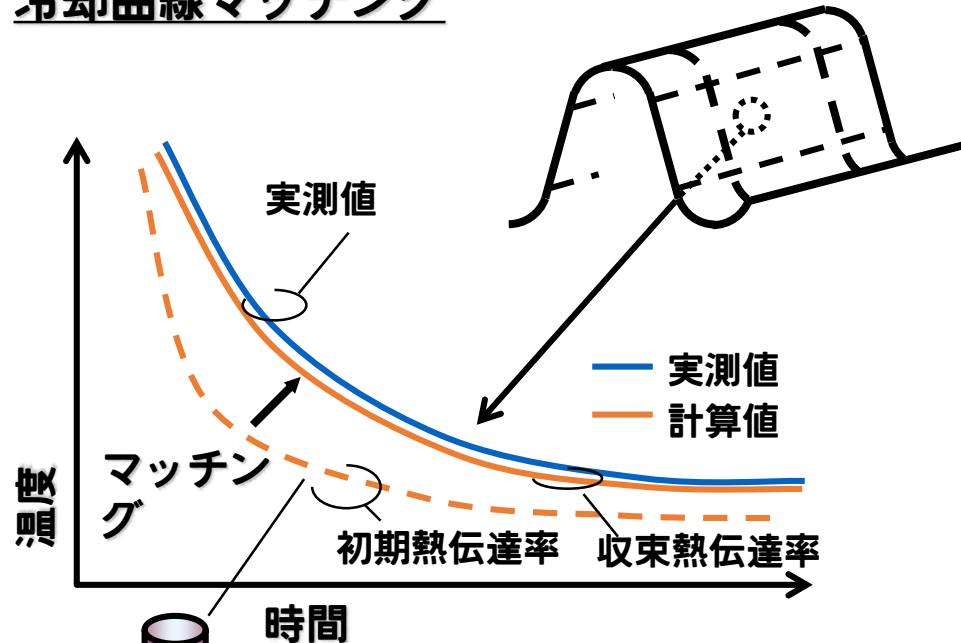


# 熱伝達率計算手法

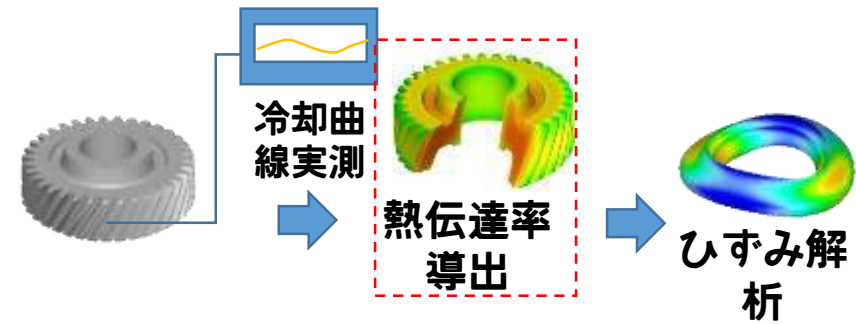
# 逆問題手法



## 冷却曲線マッチング



初期熱伝達率:  
φ20mm x 60mm 丸棒(SCr420H)にて  
算出したもの

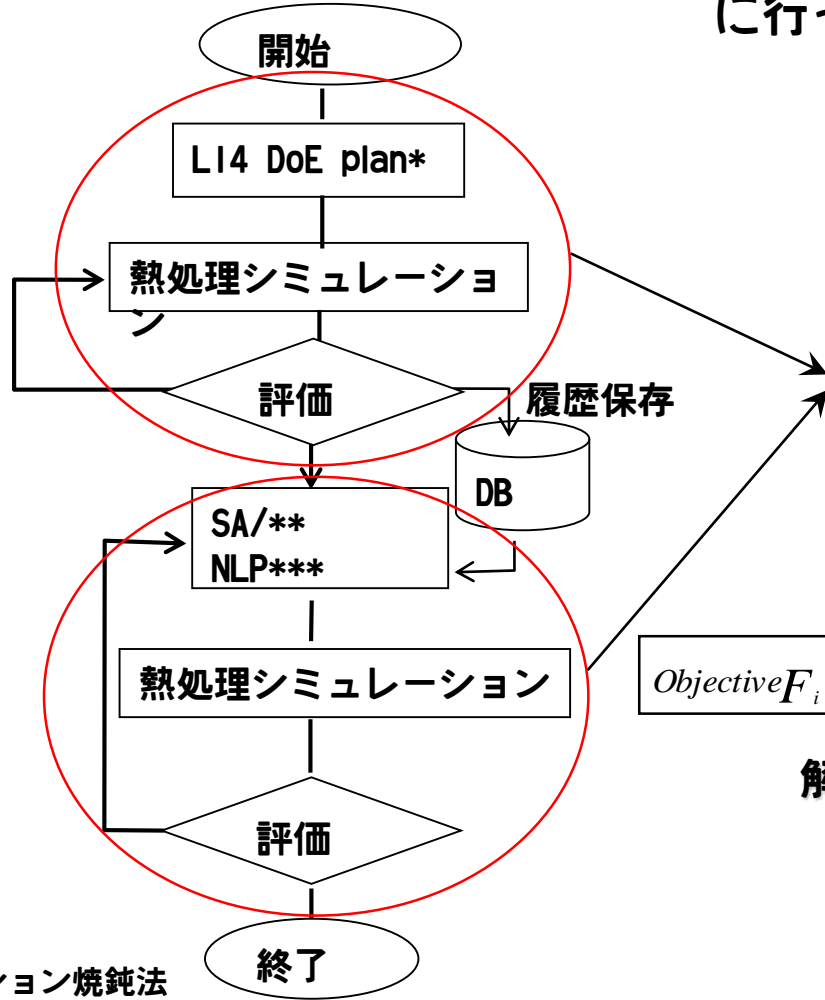


# 熱伝達率計算手法

# 逆問題手法-



## Task plan



計算は右図各断面毎に行った



## 冷却曲線計算

DEFORM-HT 2D

MS-DOS BAT  
プログラム

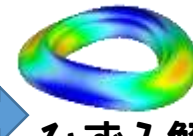
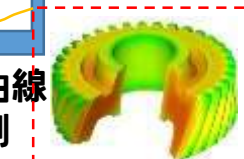
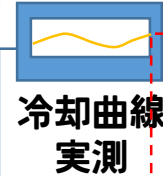
DEFORM起動・終了  
KEYファイル抽出

$$\text{Objective } F_i = \int_{t=0}^{t=\infty} |T_{calc_i} - T_{measure_i}| dt$$

iSight

## 解析結果評価

## 収束評価・条件設定

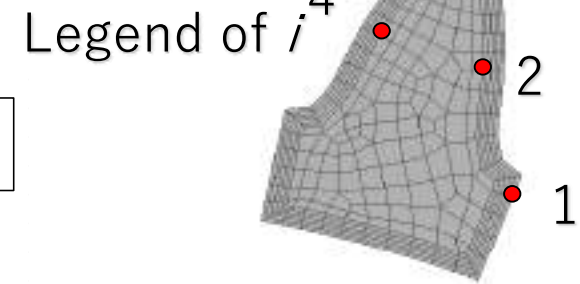
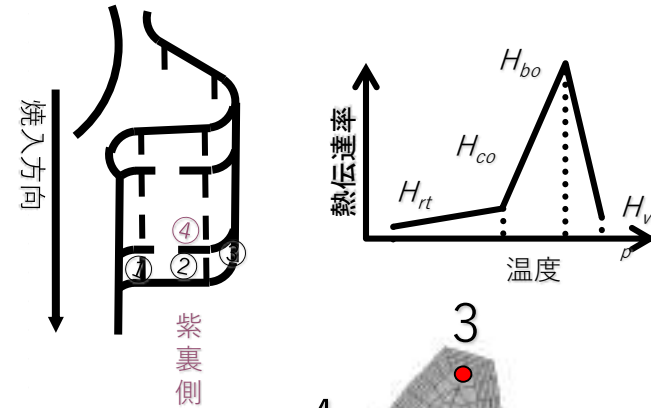
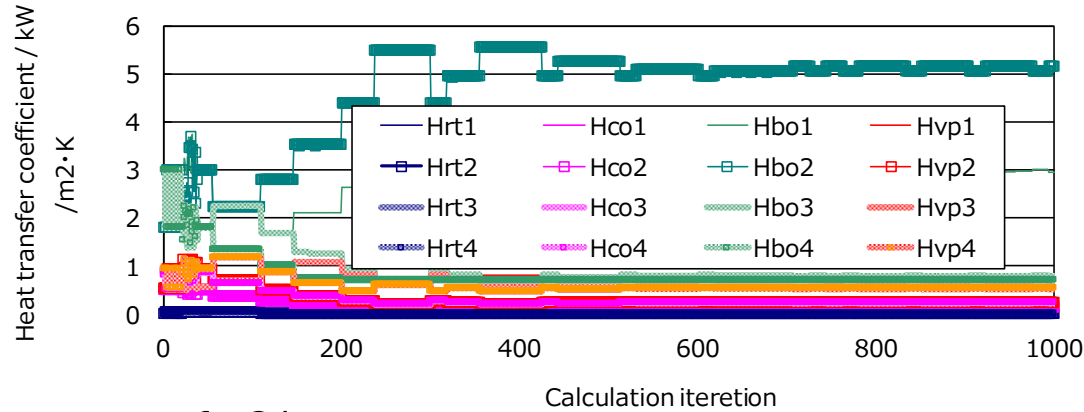


\*DoE: 実験計画法  
\*\*SA: シミュレーション焼鈍法  
\*\*\*NLP: 非線形計画法

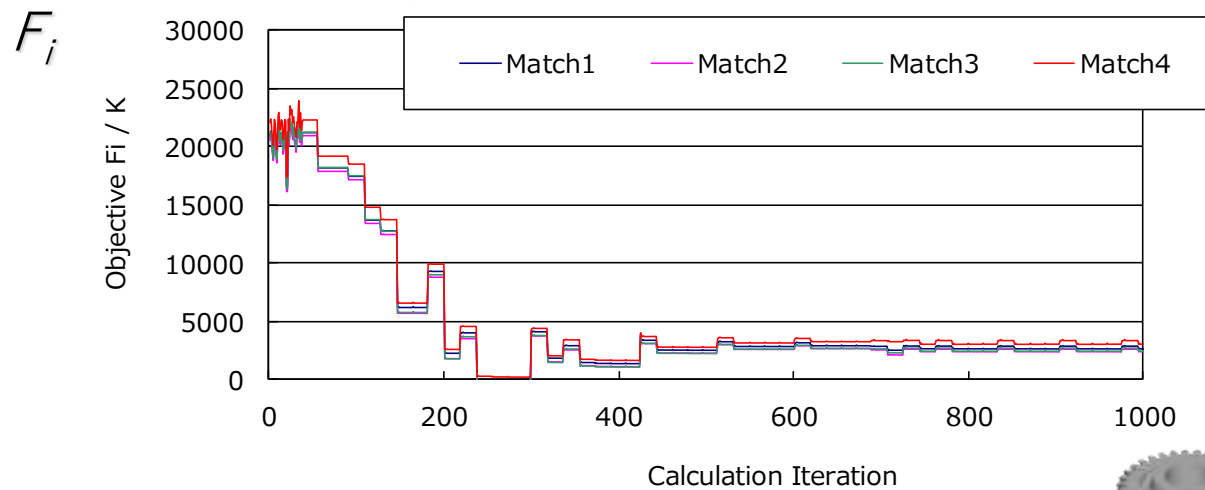
# 熱伝達率算出結果



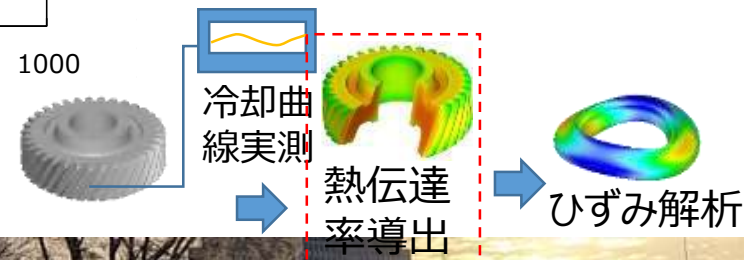
## Transition of $H_i$



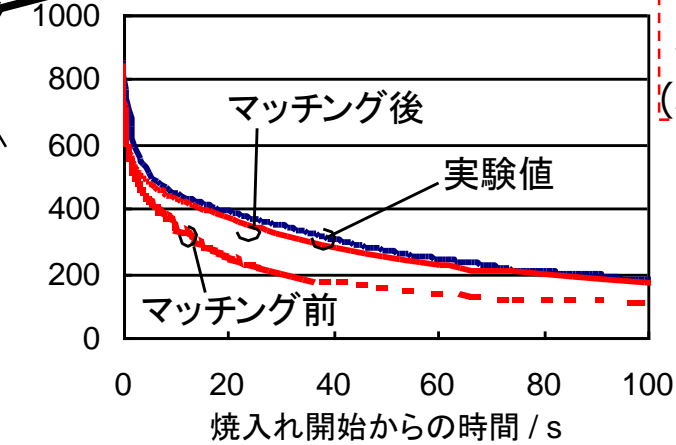
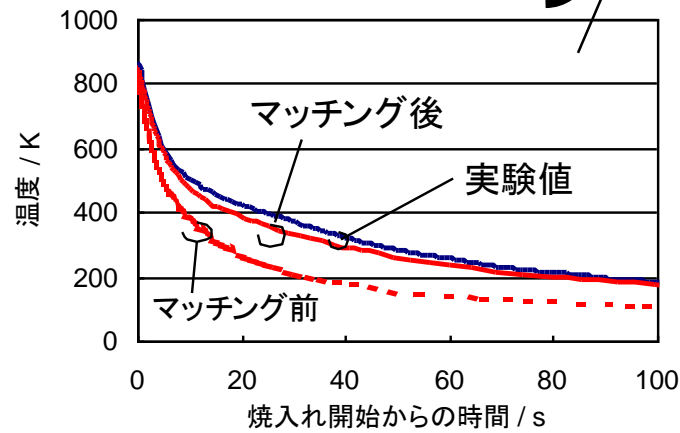
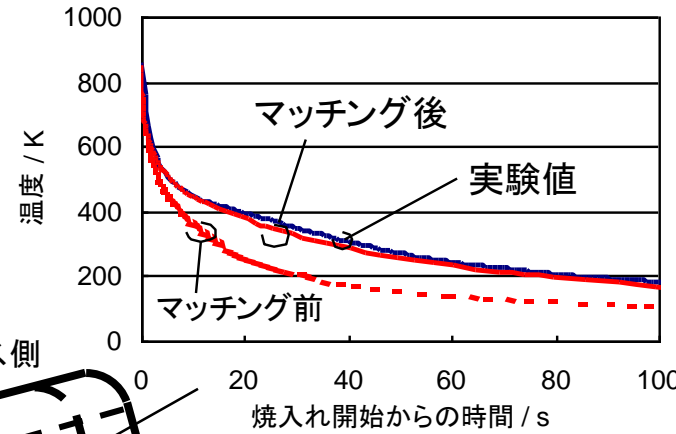
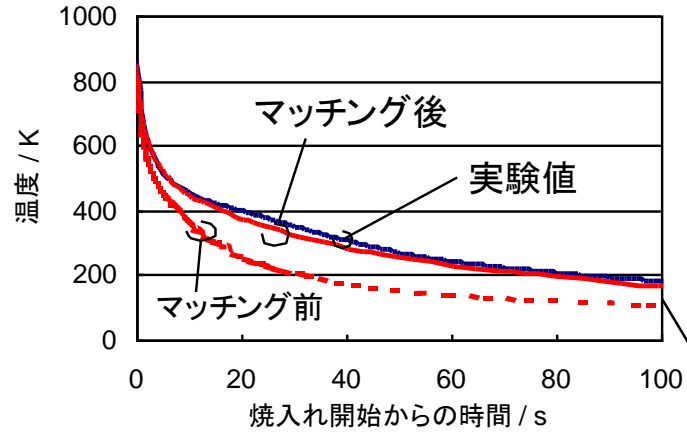
## Transition of Objective



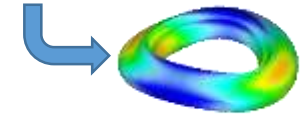
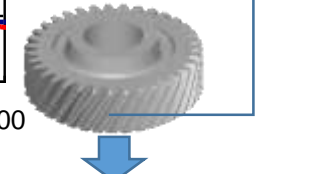
Objective  $F_i = \int_{t=0}^{t=\infty} |T_{calc_i} - T_{measure_i}| dt$



# -フィッティング結果-

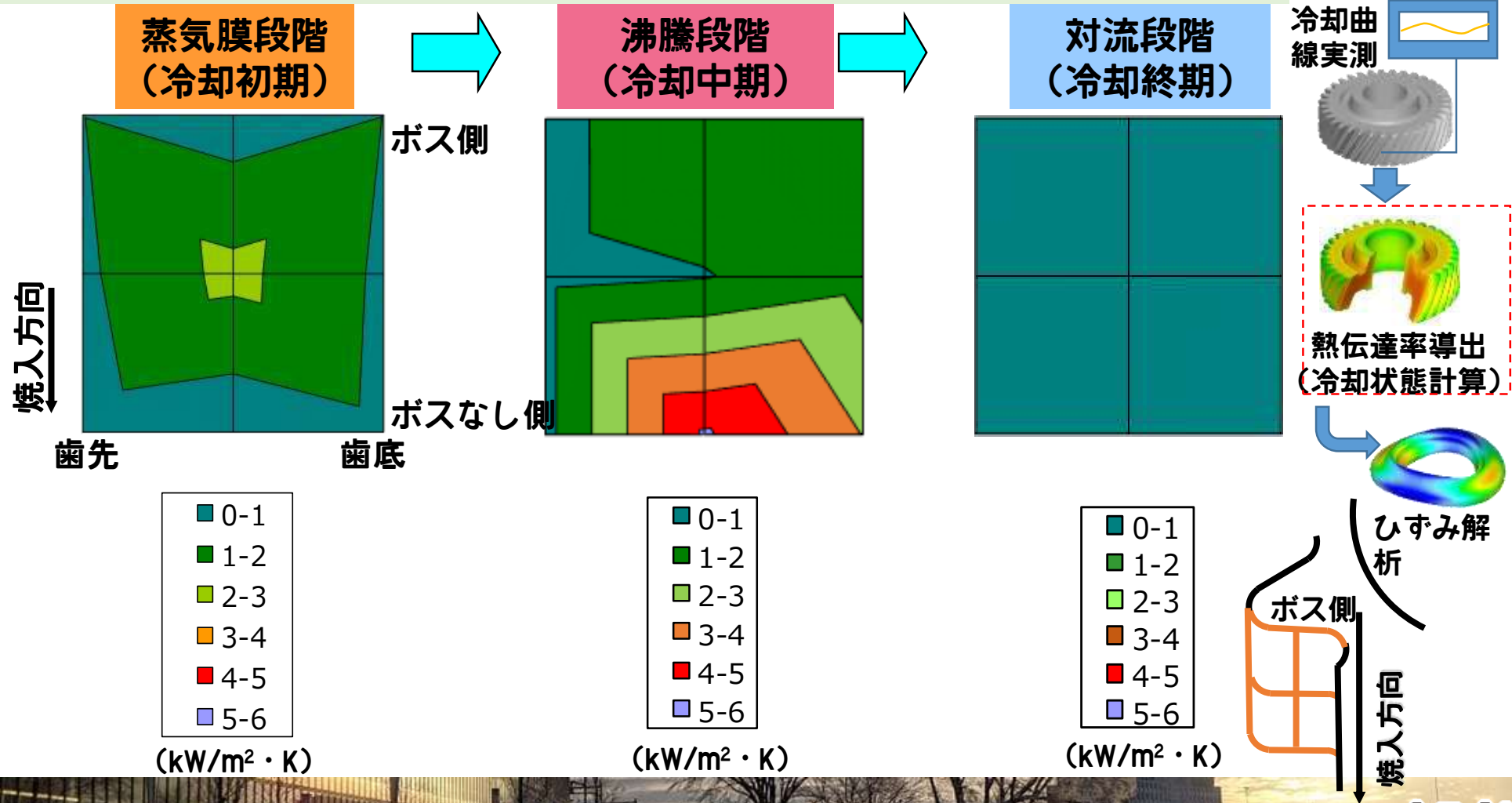


冷却曲線  
実測

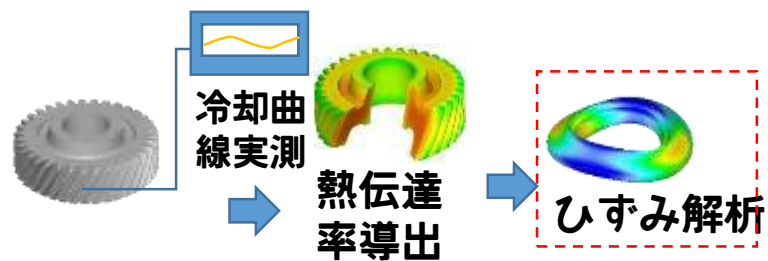
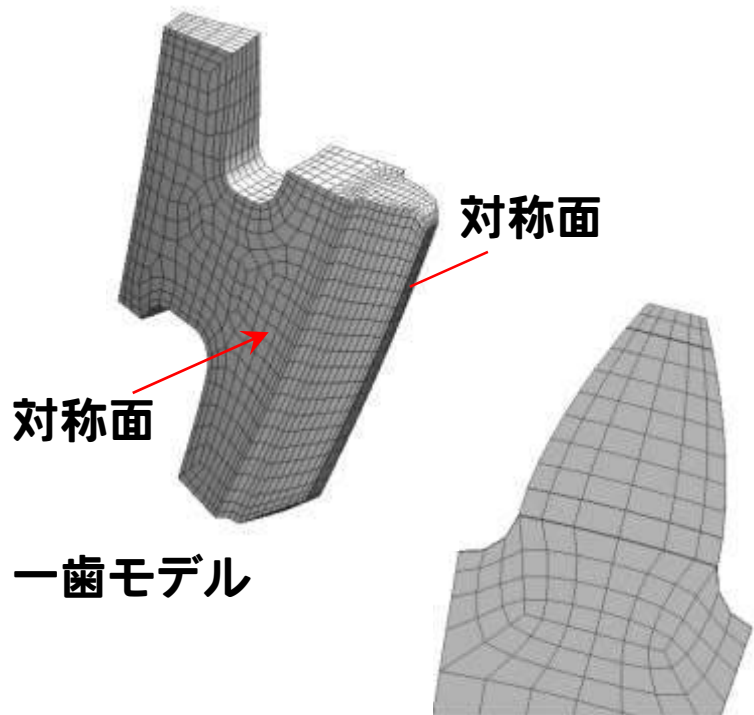


# 熱伝達率の分布

- ・ 冷却速度は沸騰段階(冷却中期のボスなし側(下側))にて最大になっている
- ・ 冷却速度最大位置は時間に応じ変化している



# ひずみシミュレーション条件



## 条件

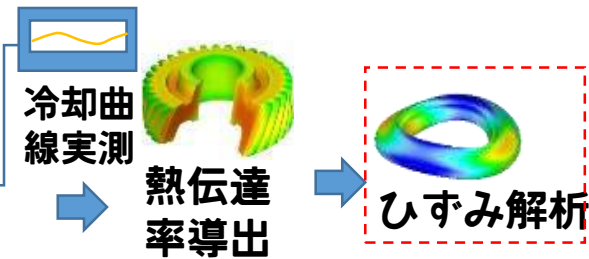
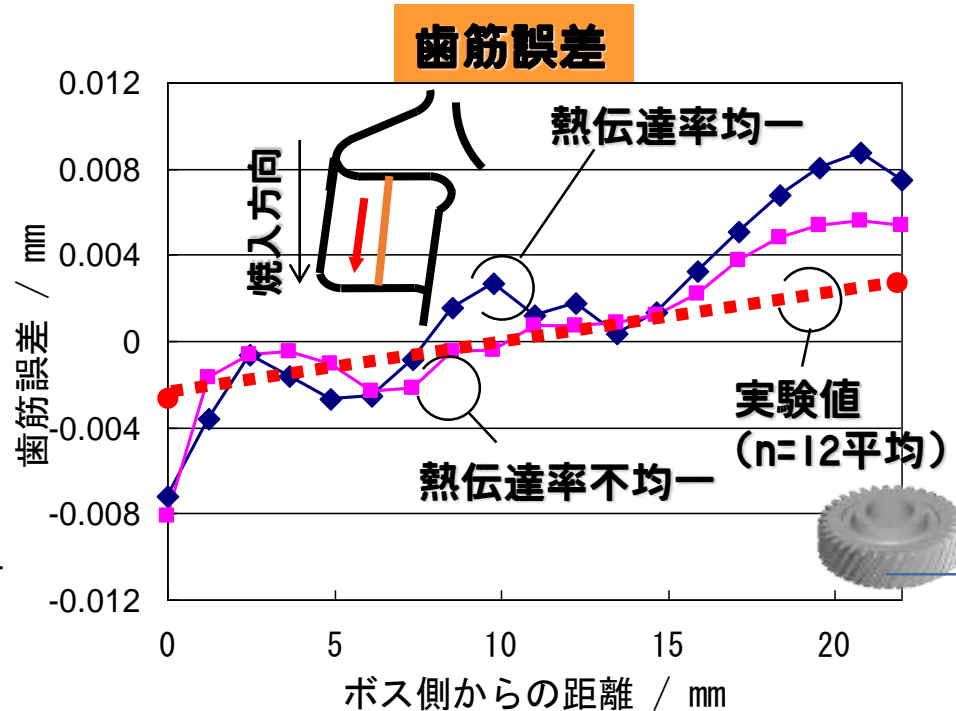
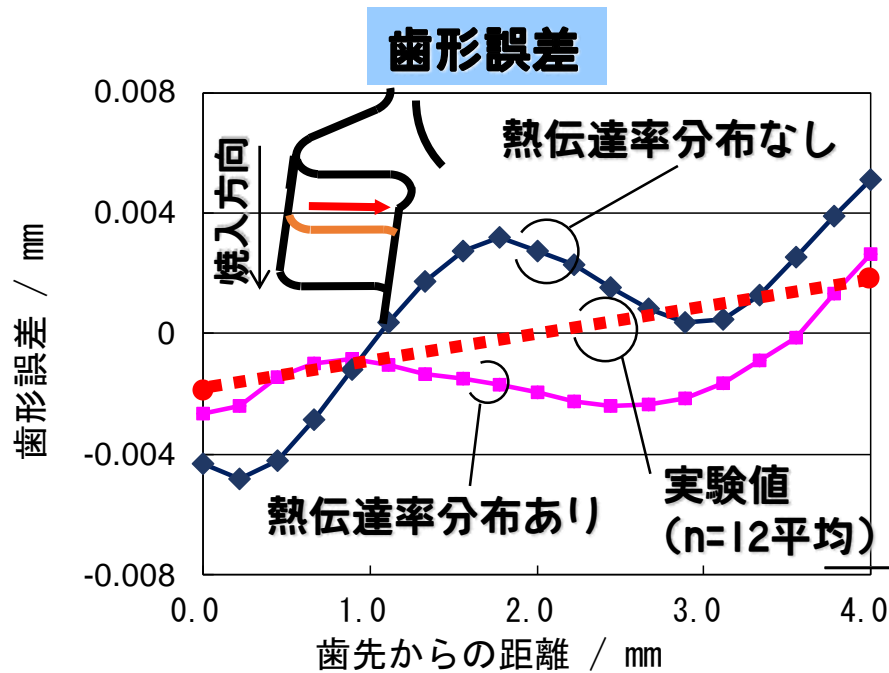
	ソルバ	DEFORM3D-HT Ver. 5.0.3
FE モデル	メッシュ形状	六面体
	要素数	4,518
	節点数	5,641
PC	CPU	Intel Xeon 2.8 GHz Processor x 2
	Memory	2,048 Mbytes
	OS	Microsoft Windows 2000 SP2
	CPU時間	約10 時間
	変態モデル	オーステナイト ( $\gamma$ ) only →ベイナイト, マルテンサイト, 残留 $\gamma$ (フェライト & パーライト)
	冷却モデル	表面への熱伝達率モデルの付与 1. 分布あり (前述の熱伝達率) 2. 分布なし (全表面を均一な熱伝達率とした逆解析結果)



# ひずみ計算結果

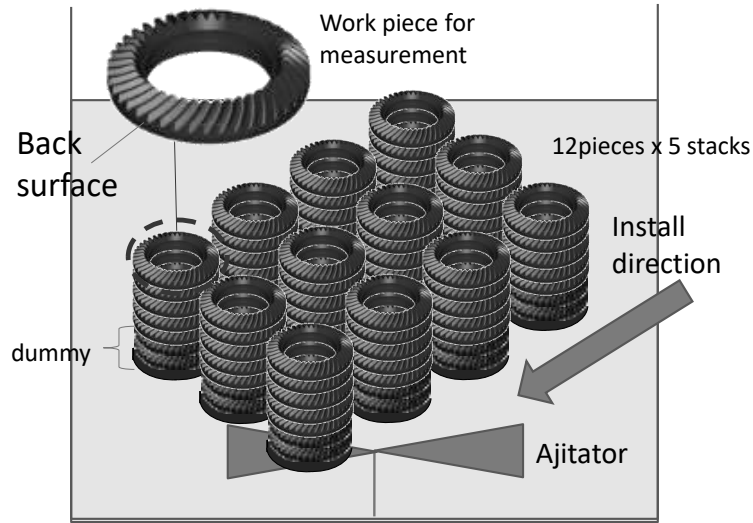
- ・ 場所により異なる熱伝達率を与えた場合(熱伝達率分布あり)を与えることで歯型形状誤差の解析結果は大きく変化した
- ・ 場所により異なる熱伝達率を与えた場合, 解析結果は実験値と近くなった

**熱伝達率分布は重要!**

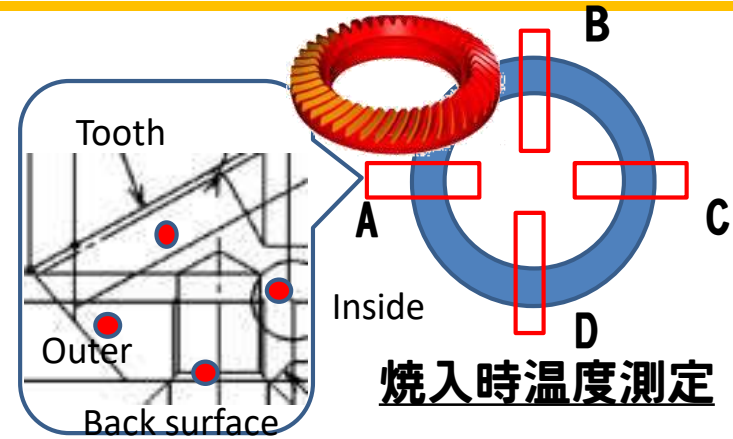


(均一：全表面の熱伝達率を一様と仮定し, 逆解析手法にて熱伝達率を導出)

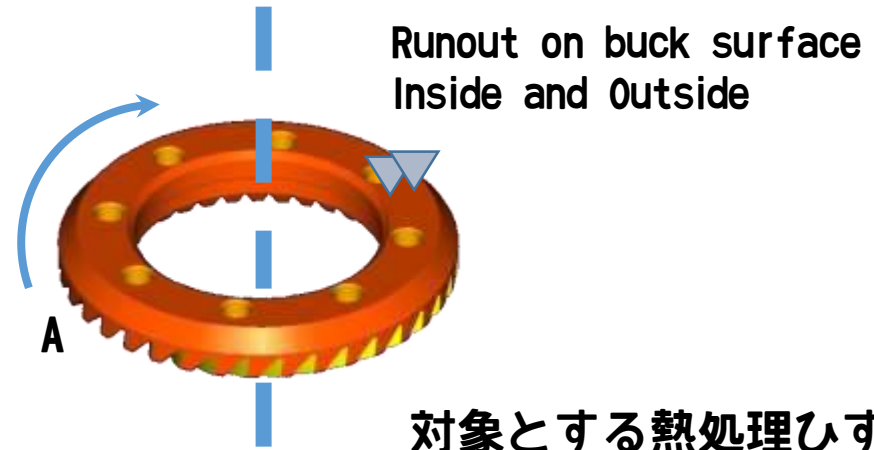
# 実荷姿での効果の検証



対象荷姿



焼入時温度測定

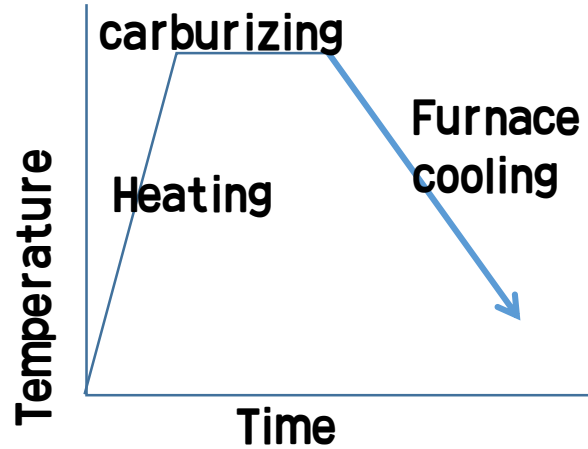


対象とする熱処理ひずみ

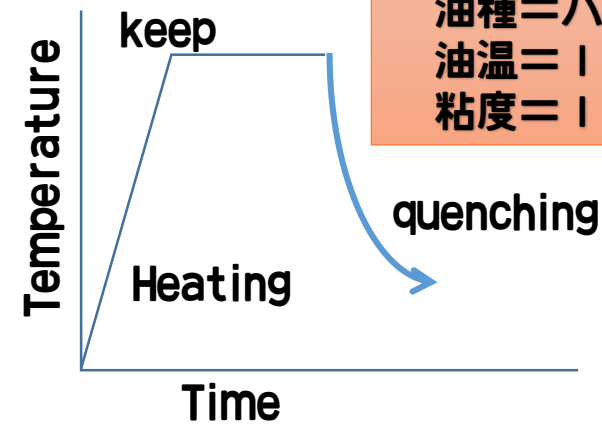
量産荷姿配置を対象に流れ解析・歪測定・温度測定を実施した。

# 実験方法

## 1) Stress relief annealing



## 2) Quenching



焼き入れ油  
 油種=ハイテンプ X  
 油温=100℃  
 粘度=12.2 mm<sup>2</sup>/sec

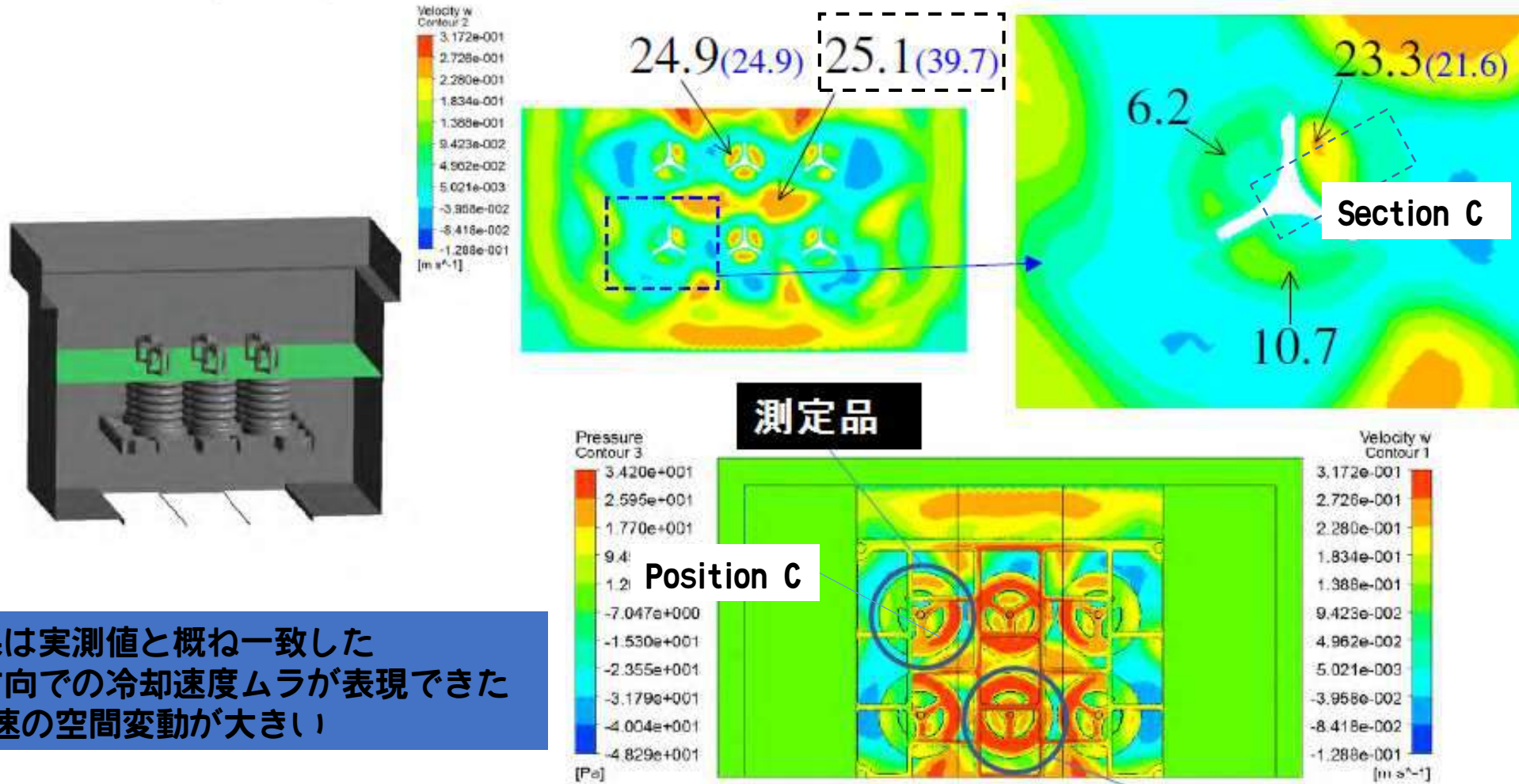


	Ring gear
狙い IECD	0.8mm
浸炭	真空
焼入れ	保持： 850℃x30min N <sub>2</sub> 油： 出光ハイテンプ X 100℃ 攪拌： 1200rpm

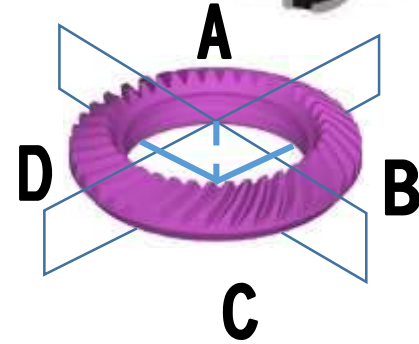


# 流体解析結果：リングギア

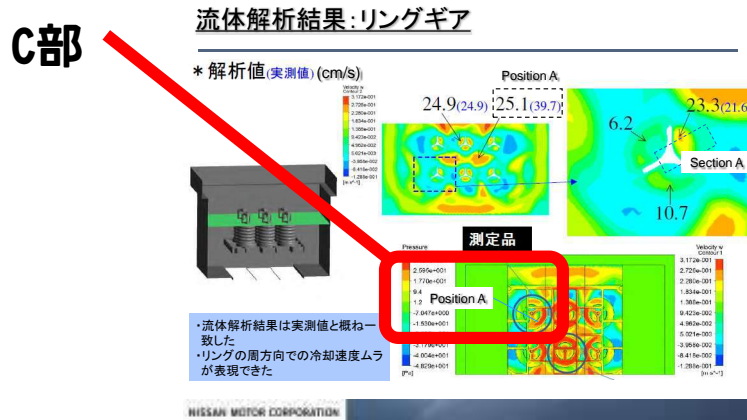
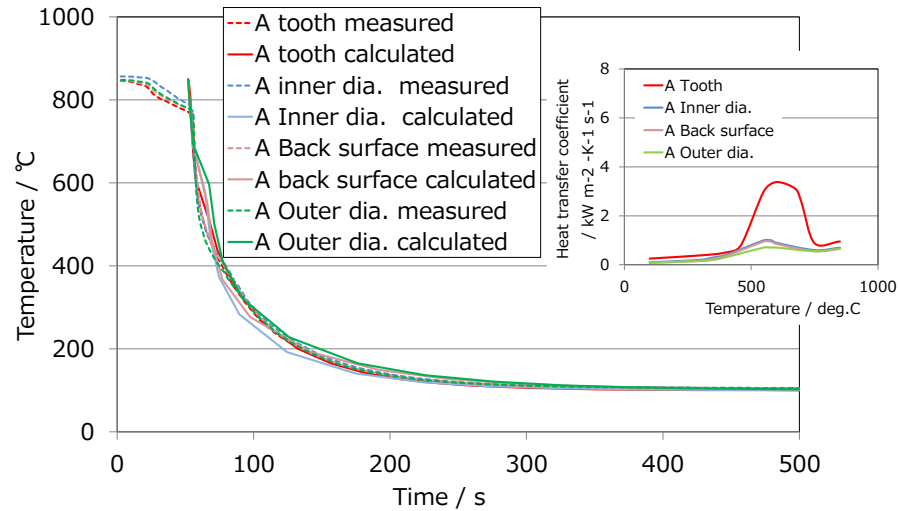
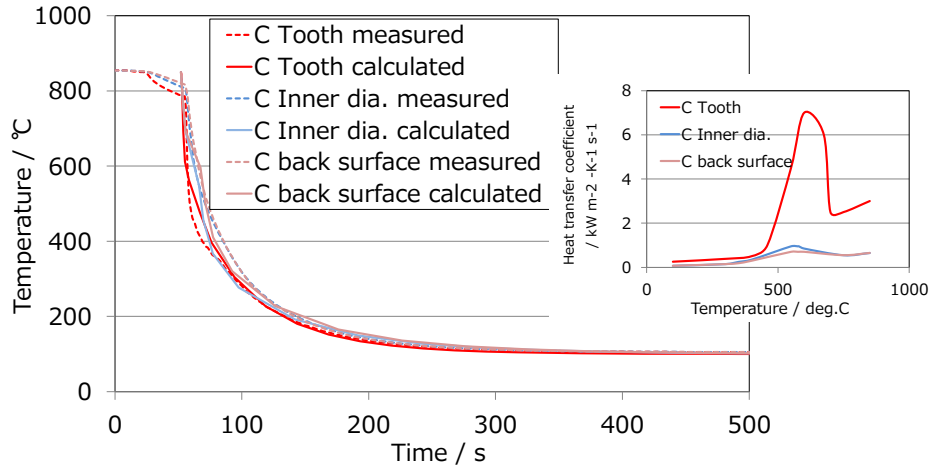
\* 解析値(実測値)(cm/s)



- 流体解析結果は実測値と概ね一致した
- リングの周方向での冷却速度ムラが表現できた
- C方向にて流速の空間変動が大きい



# リングギアでの冷却曲線と熱伝達率



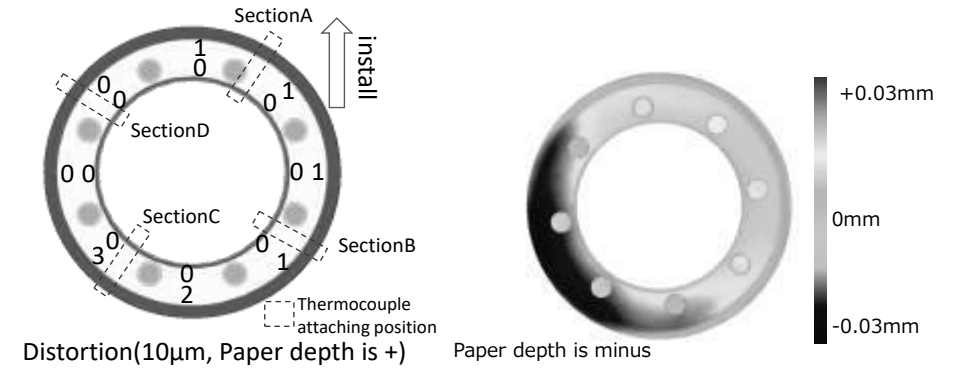
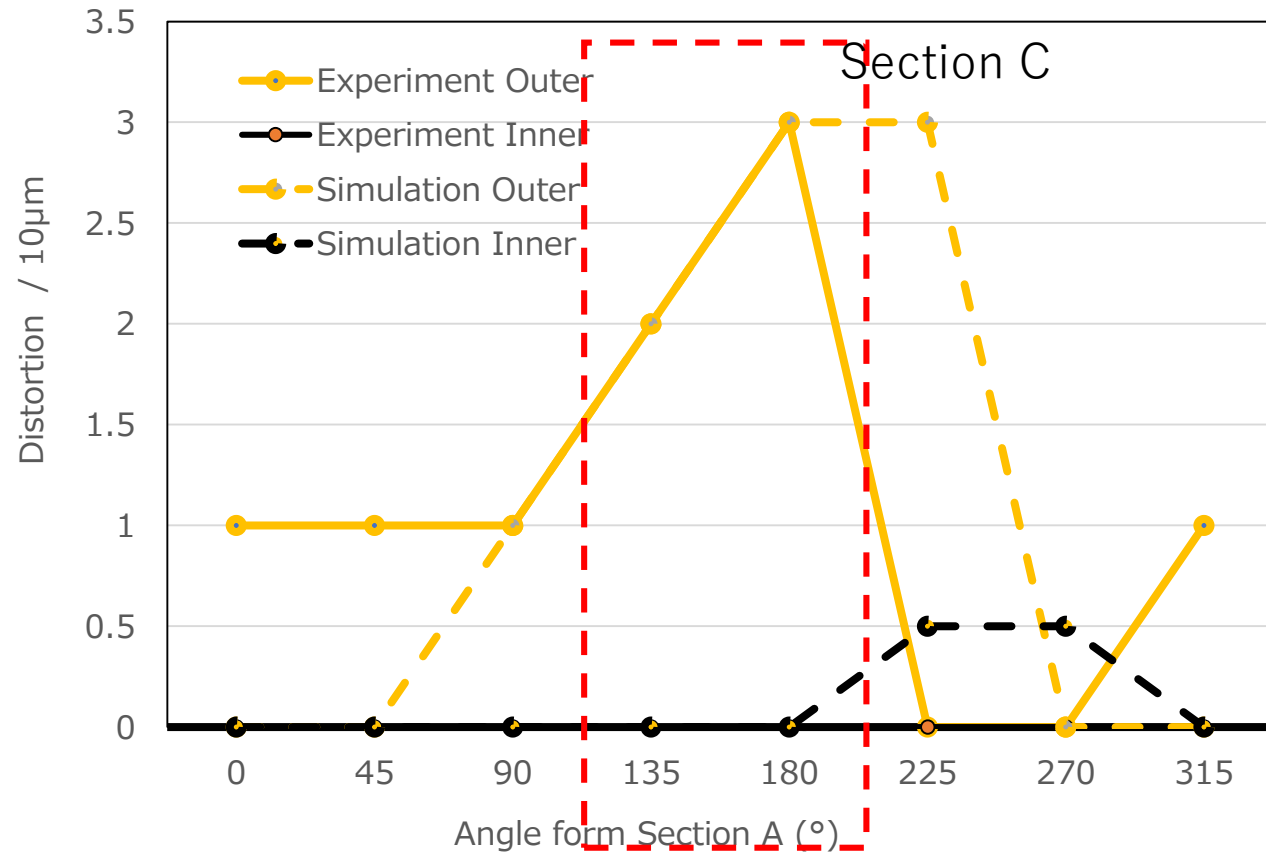
**A部**

・C部の流速ムラとC部の冷却速度ムラは対応する



# リングギアでのひずみ解析結果

リングギアにてひずみの方向定量的な変形規模が一致した



リングギア



ここまでで...

- ・「冷却状態を高精度化することは意味がありそう」と分かった





# 本日の内容

---

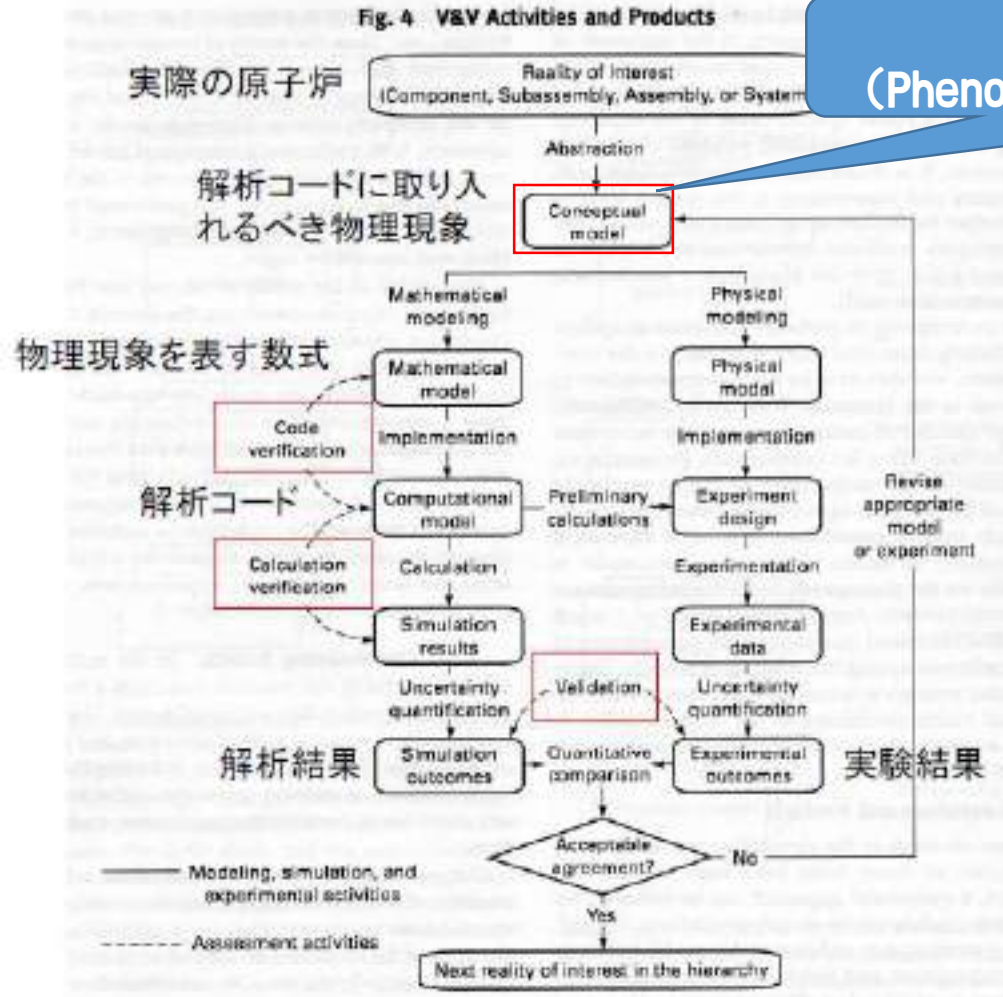
- ✓ 熱処理シミュレーションとMBD
- ✓ 熱伝達率の影響
- ✓ **V&Vによる定量評価**
- ✓ Cellular Automatonによる簡易的な定量化





# シミュレーションの精度を検証する手法

ASME V&V PIRTの産業シミュレーションへの適用を試みた



PIRT (Phenomena Identification Ranking Table)

ASME V&V 10-2006

verification:

数式を正しく解いているか?

validation:

正しい数式を解いているか?

日本版

JCECS S-HQC001:2011  
「工学シミュレーションの品質マネジメント」

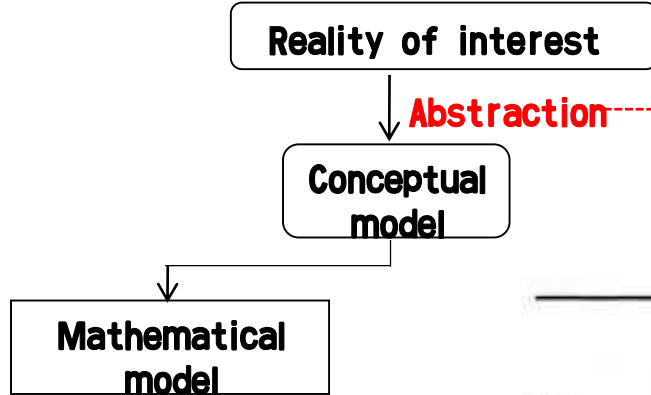




# 熱処理シミュレーションにおけるPIRT

ASME V&V 10-2006

Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics



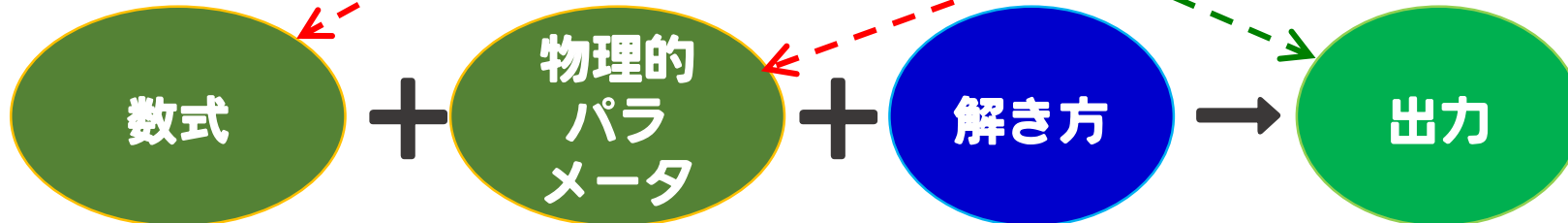
Abstraction

**PIRT**

(Phenomena Identification and Ranking Table)

Table 1 PIRT Example

Phenomenon	Type of Phenomenon	Importance to Response of Interest	Level of Confidence in Model
A	Interface	High	Medium
B	Plasticity	Medium	High
C	Loads	Medium	Low
D	Fracture	Low	Low



熱伝導問題, 相変態, 熱伝達係数, 温度依存性, ...



杉本

# 作成した熱処理シミュレーションPIRTのフォーマット

	評価内容				
プロセス パラメータ	実ラインで 管理するパ ラメータ	入力データ	初期条件 境界条件 物性値 区別	計算出力に 対する影響 度	実課題適用
設計 パラメータ	評価基準				
	因子・ 結果への感 度・ 解析に対して 影響する因子	計測難易度・ 変換難易度 (難/中/易)  入力データの 信頼性 (高/中/低)		要求精度・ 信頼性	影響度 (高/中/低)





# PIRT(プロセス パラメータ)

熱伝達率

分類	実ラインで管理するパラメータ				入力データ								初期条件		境界条件		特性値	実測適用(影響度)															
	工程	因子	影響する因子		入力データ	測定対象	計測器具	交換器具	交換器具	交換器具	入力データ	検出精度	依存性	温度分布	残留応力	熱伝達係数		拘束条件	熱処理品質					形状			機械的性質						
			直接の影響	間接への影響															皮膜硬度	硬さ	全層析離	結晶粒度	残留応力	変形量	線膨張係数	衝撃強度	耐摩耗性	耐腐食性					
プロセスパラメータ (%)	前工程影響	前工程残留応力	残留応力	変形	残留応力	応力	高	高	高	高	高	高	高	○					中	中	中	低	中	中	中	中	中	中	高	高	高		
		焼き温度(ランク)	焼き温度	物性値	物性値	濃度	難	難	難	低	中	○							中	中	中	低	中	中	中	中	中	中	中	中	高		
	炉内	炉内温度	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度	難	難	難	低	中	○			○				不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	
		炉内湿度	熱伝達係数	湿度	熱伝達係数	湿度	難	難	難	低	中	○				○			不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	
		加熱時間	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	難	難	難	低	中	○					○		不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	
		冷却時間	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	難	難	難	低	中	○					○		不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	
		冷却速度	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	難	難	難	低	中	○						○		不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
		冷却方法	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	難	難	難	低	中	○								不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
		冷却装置	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	難	難	難	低	中	○								不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
		冷却媒体	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	難	難	難	低	中	○								不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
溶媒	溶媒の向き	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度	難	難	難	高	高	高	高	○					高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高		
	溶媒の量	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度	難	難	難	高	高	高	高	○					高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高		
溶媒	溶媒の種類	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度	難	難	難	高	高	高	高	○					高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	
	溶媒の濃度	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度	難	難	難	高	高	高	高	○					高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	
	溶媒の温度	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度	難	難	難	高	高	高	高	○					高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	
	溶媒の流量	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度	難	難	難	高	高	高	高	○					高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	
	溶媒の圧力	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度	難	難	難	高	高	高	高	○					高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	
溶媒	溶媒の種類	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	難	難	難	高	高	高	高			○			高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	
	溶媒の濃度	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	難	難	難	高	高	高	高			○			高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	
	溶媒の温度	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	難	難	難	高	高	高	高			○			高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	
	溶媒の流量	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	難	難	難	高	高	高	高			○			高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高
	溶媒の圧力	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	難	難	難	高	高	高	高			○			高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高
	溶媒の種類	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	難	難	難	高	高	高	高			○			高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高
	溶媒の種類	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	難	難	難	高	高	高	高			○			高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高	高



# PIRT Table (設計パラメータ)

分類	分類	項目	影響する因子	入力データ	計測 難易度	交換 難易度	実験 計測	入力 データ	解析精度 依存性												
設計 パラメータ (Dx)	物性値	熱物性 温度等、組織等	熱伝達率	温度	熱伝達率	中	中	中	高	高											
			比熱	温度	比熱	中	中	中	高	高											
			密度	温度	密度	中	中	中	高	高											
			変形係数	温度	変形係数	中	中	中	高	高											
			変形熱	温度	変形熱	中	中	中	中	高											
	機械特性 温度等、組織等	ヤング率	ヤング率	変形	ヤング率	中	中	中	高	高											
			ポアソン比	変形	ポアソン比	中	中	中	高	高											
			降伏係数	変形	降伏係数	中	中	中	高	高											
			引張強さ	変形	引張強さ	中	中	中	高	高											
			加工硬化係数	変形	加工硬化係数	中	中	中	高	高											
	硬さ 温度等、組織等	Vickers	硬さ	硬さ	硬さ	中	中	中	高	高											
			Jominy線図	硬さ	Jominy線図	中	中	中	高	高											
			線の硬さ	硬さ	線の硬さ	中	中	中	高	高											
			TTT線図	相変態	TTT線図	中	中	中	高	高											
			Ms点	相変態	Ms点	中	中	中	高	高											
形状	温度 メッシュ	変形係数	相変態	変形係数	中	中	中	高	高												
		全体形状		メッシュ分析	-	-	-	-	高	高											
		メッシュ		メッシュサイズ	-	-	-	-	高	高											
		要素タイプ		要素タイプ	-	-	-	-	中	中											
		要素タイプ		要素タイプ	-	-	-	-	中	中											
面粗さ	熱伝達係数	熱伝達係数	温度	熱伝達係数			中	中	低												
		輻射率	温度	輻射率			中	中	低												

材料の熱物性

重要と考えられるファクター(難, 高が多い)

- ・ 焼入時の熱伝達率
- ・ 材料の熱物性

について検証を進める





分類	オンラインで管理するパラメータ				入力データ					初期条件		境界条件		実測値運用(影響度)																						
	工程	因子	影響する因子		入力データ	測定対象	計測器具	交換	実験計測	入力データ	解析精度	温度分布	残留応力	熱伝導係数	拘束条件	中継仕様	熱処理品質							機械的性質												
		直接の影響		間接の影響	残留応力	応力	温度	湿度	熱伝導率	熱伝導率	熱伝導率	温度	温度	熱伝導率	熱伝導率	熱伝導率	表面硬度	硬さ	金属組織	結晶粒度	残留応力	変形量	伸び強度	衝撃強度	耐摩耗性	耐腐蝕性										
プロセス(ラメータ0%)	前工程影響	前工程残留応力	残留応力	変形	残留応力	応力	高	高	高	高	高	○	○																							
		焼成温度(ラック)	焼成温度	物性値	物性値	温度	温度	中	中	中	低	中																								
		焼成時間	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数									
		焼成ラック	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数									
		材料のムラ	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数									
		前工程残留物	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数	熱伝導係数									
	雰囲気	圧力	化学ポテンシャル	温度	熱伝導係数	圧力	高	中	中	中	中	○																								
		ガス種	反応係数	温度	熱伝導係数	温度変化	高	中	中	中	中	○																								
		ガス流量	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	流量	高	中	中	中	中	○																								
		ガスの流れ形態	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	流速	高	中	中	中	中	○																								
		雰囲気流量	雰囲気流量	温度	雰囲気流量	流速	高	高	高	高	高	高	○																							
		雰囲気温度	雰囲気温度	温度	雰囲気温度	流速	高	高	高	高	高	高	○																							
治具	治具の向き	治具の向き	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	向き	高	中	中	中	高	○																								
		治具の形状	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	形状	高	中	中	中	高	○																								
		治具構造	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	構造	高	中	中	中	高	○																								
		治具材質	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	材質	高	高	高	高	高	○																								
		治具の設置	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	設置	高	高	高	高	高	○																								
		治具の表面状態	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	表面状態	高	高	高	高	高	○																								
	加熱(均熱)	均熱時間	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	均熱時間	高	高	高	高	高	○																								
		均熱温度	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	均熱温度	高	高	高	高	高	○																								
		均熱雰囲気	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	均熱雰囲気	高	高	高	高	高	○																								
		均熱速度	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	均熱速度	高	高	高	高	高	○																								
		均熱位置	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	均熱位置	高	高	高	高	高	○																								
		均熱方法	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	均熱方法	高	高	高	高	高	○																								
焼入	焼入温度	焼入温度	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	焼入温度	高	高	高	高	高	○																								
		焼入速度	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	焼入速度	高	高	高	高	高	○																								
		焼入雰囲気	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	焼入雰囲気	高	高	高	高	高	○																								
		焼入位置	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	焼入位置	高	高	高	高	高	○																								
		焼入方法	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	焼入方法	高	高	高	高	高	○																								
		焼入時間	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	焼入時間	高	高	高	高	高	○																								
	焼入れ(油却)	油却種	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	油却種	高	高	高	高	高	○																								
		油却量	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	油却量	高	中	中	中	低	○																								
		油却材料	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	油却材料	高	中	中	中	低	○																								
		油却時間	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	油却時間	高	中	中	中	低	○																								
		油却温度	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	油却温度	高	中	中	中	低	○																								
		油却方法	熱伝導係数	温度	熱伝導係数	油却方法	高	中	中	中	低	○																								

熱伝達率

① 熱伝達率についての検証



# 熱伝達率に関する検証方法

基本となる熱処理条件と熱処理変形解析手法

## 解析ソフト

- ・ DEFORM-HT ver I2

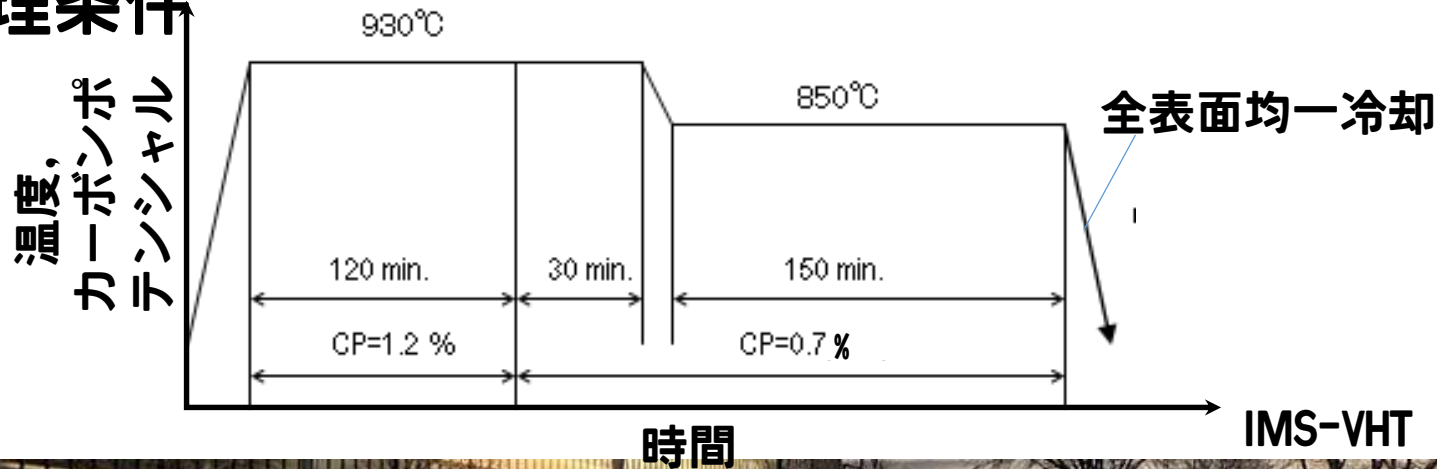
## 試験片形状

- ・ 材質：SCr420H,  $\phi 20$ [mm], 高さ60[mm]の円柱

## 材料物性値

- ・ IMS-VHTにて取得したデータ(SCr420H中央材)

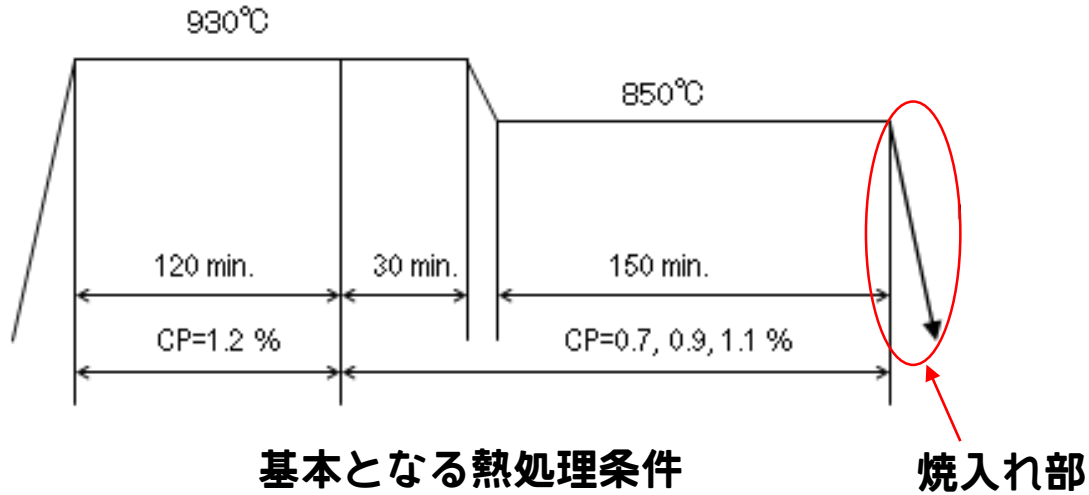
## 熱処理条件



想定する試験片

IMS-VHT Projectで公開された熱処理条件を想定

# 3. 研究方法



・直交表の作成  
結果に影響を与える条件を過去の文献に基づき、実際の条件内であり得る方向に熱伝達率曲線を変形する  
解析条件はL8直交表を用いて作成した

直交表

水準 \ 因子	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

直交表の条件

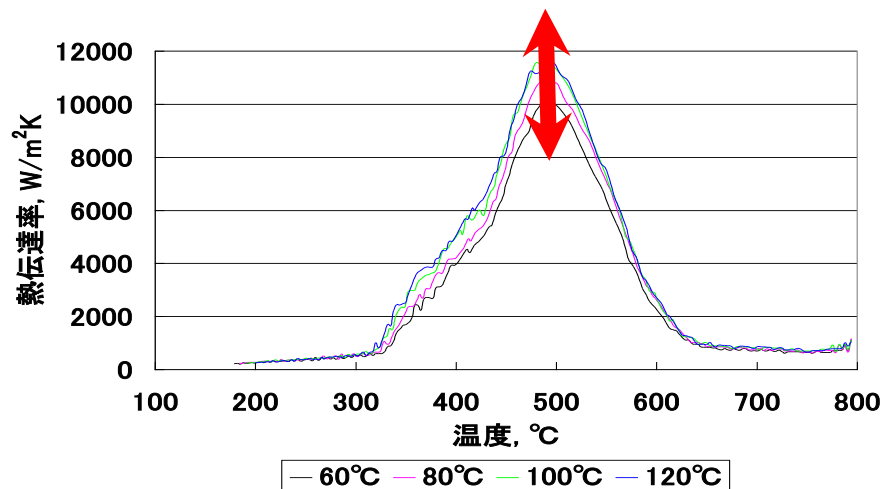
条件 (因子)	
A	冷却媒体の温度 [°C]
B	焼入の圧力 [kPa]
C	攪拌 [cm/s]
D	冷却媒体の種類
E	冷却媒体の量 [ℓ]
F	<b>均熱時間[hr]</b>
G	浸漬時間[min]

詳細な条件

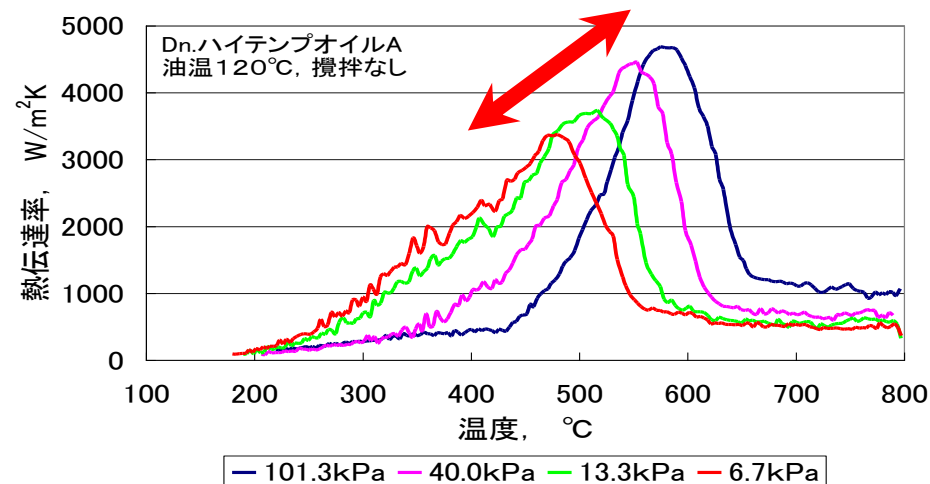
1	2
100	10
40	101.3
50	—
油	水
50	10
0	1
5	15



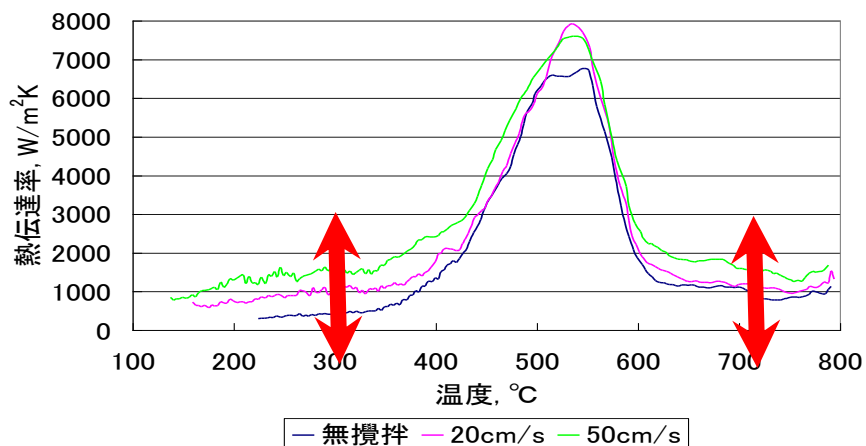
# 研究方法



冷媒温度の影響



油面圧の影響



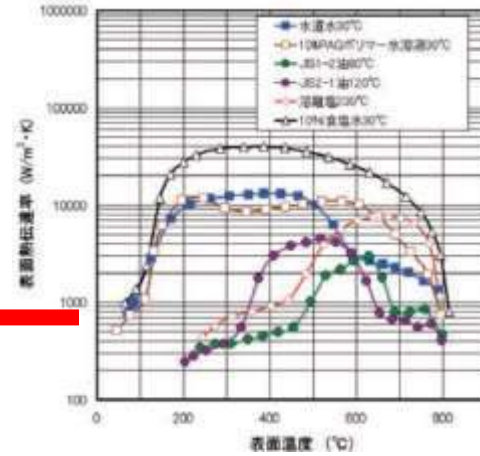
攪拌流速の影響

IMS-VHTプロジェクトの報告書(平成14年度IMS国際共同研究プロジェクト国内研究開発企画)より, 熱伝達率曲線の変化について条件設定をした。

冷媒量: 焼入時の冷媒温度上昇(0 $^{\circ}C$ , 40 $^{\circ}C$ )とした。

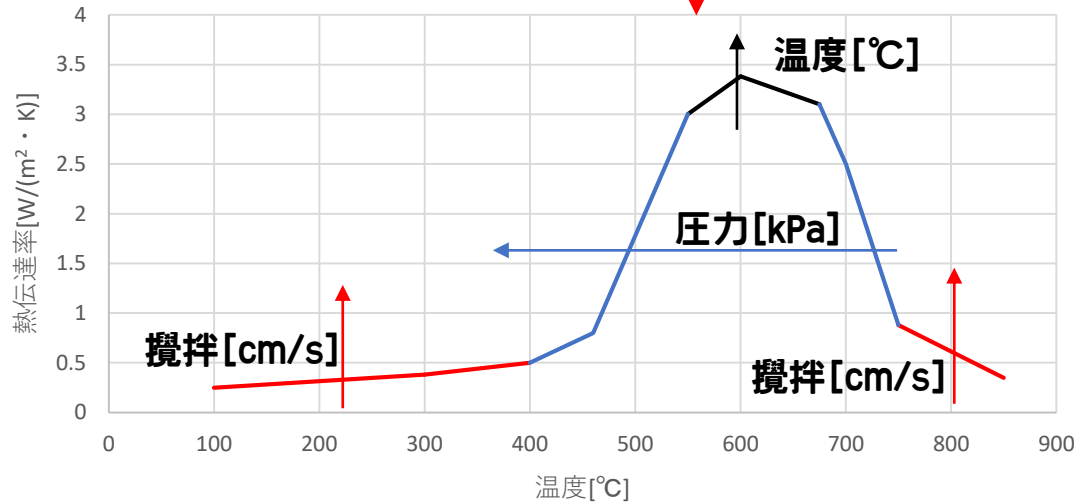
⇒実工程における小型油槽での一般的な温度上昇値を実工程の積載量, 油量比率より推定

# 研究方法



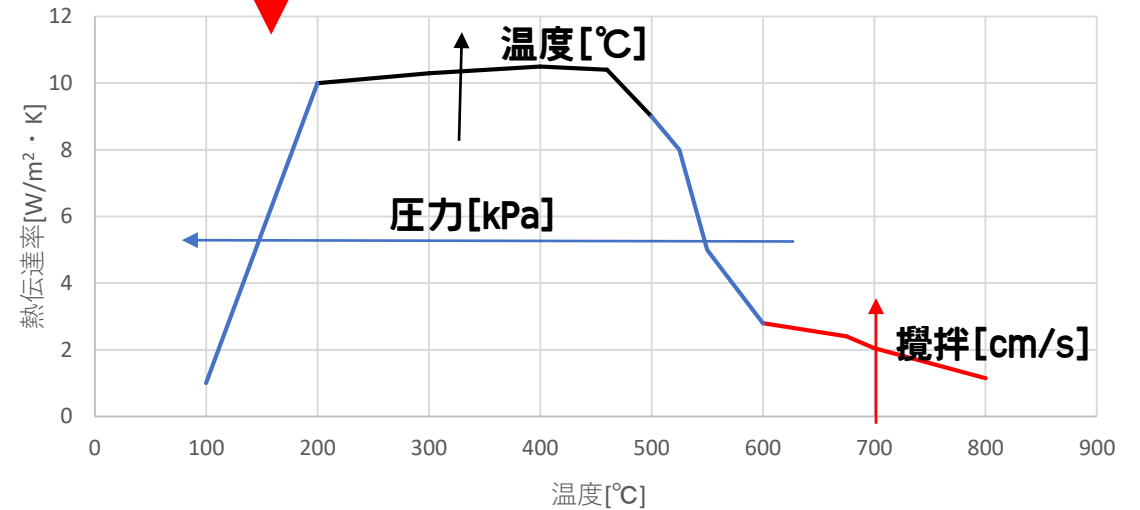
奈良崎道治, 焼入冷却と焼入れ  
シミュレーション, NACHI TECHNICAL REPORT, 2008

熱伝達率 (油)



基となる油(出光ハイテンプX)の熱伝達率

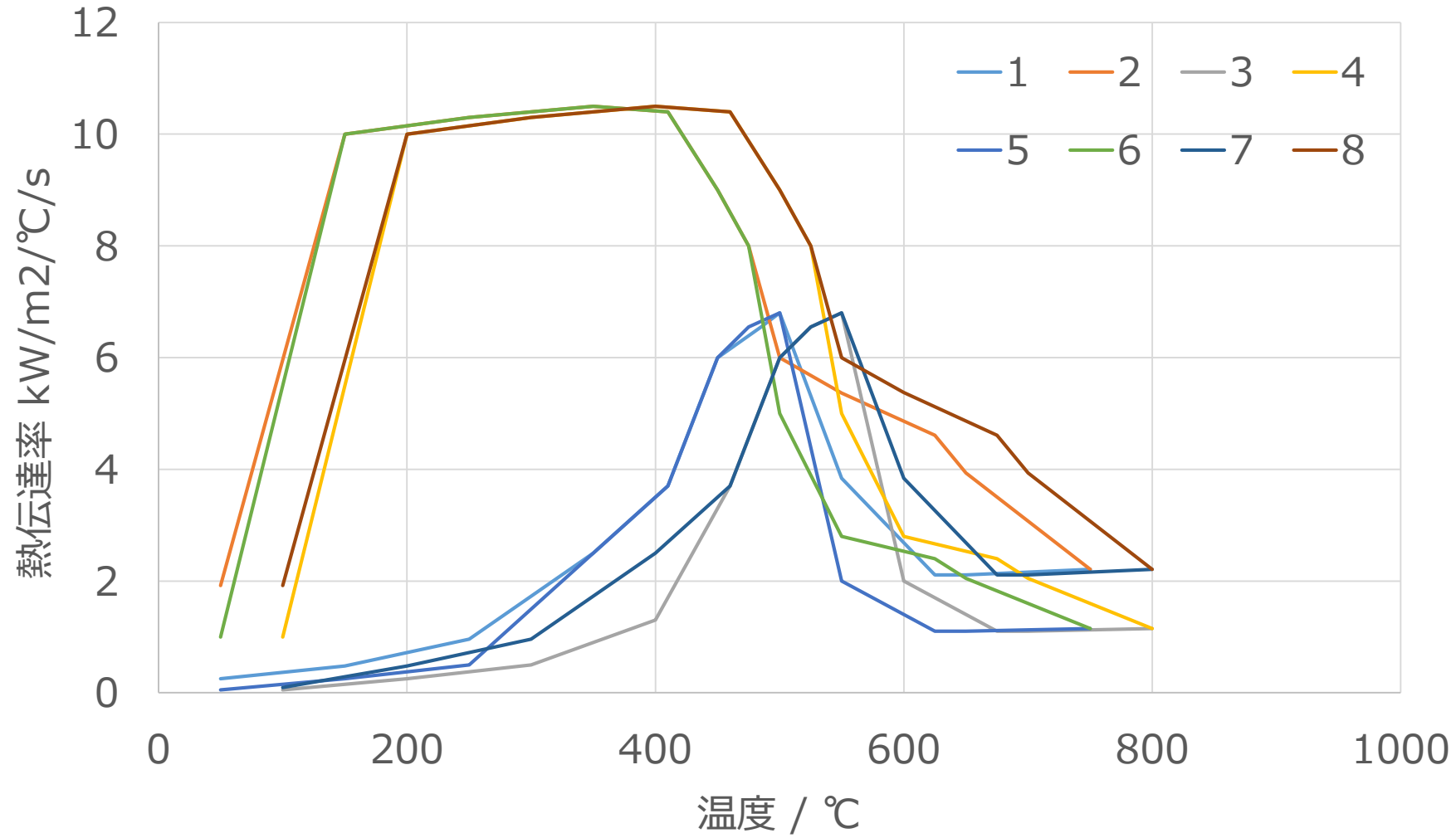
熱伝達率 (水)



基となる水(水道水)の熱伝達率



# 研究方法



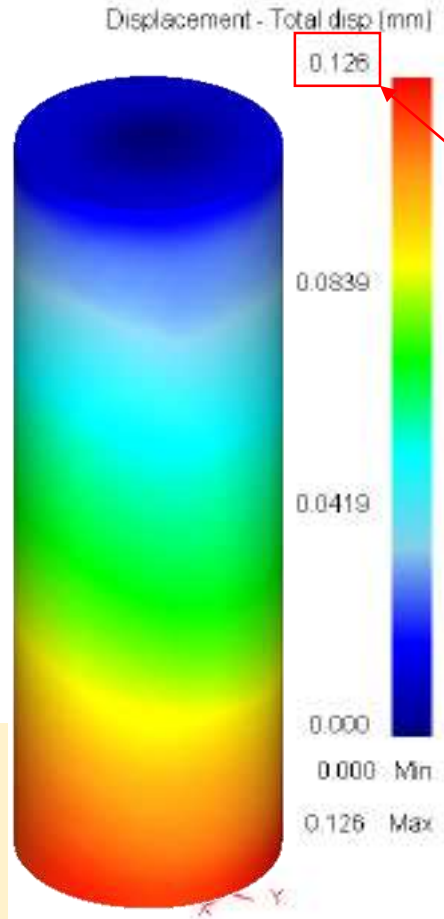
設定した熱伝達率曲線



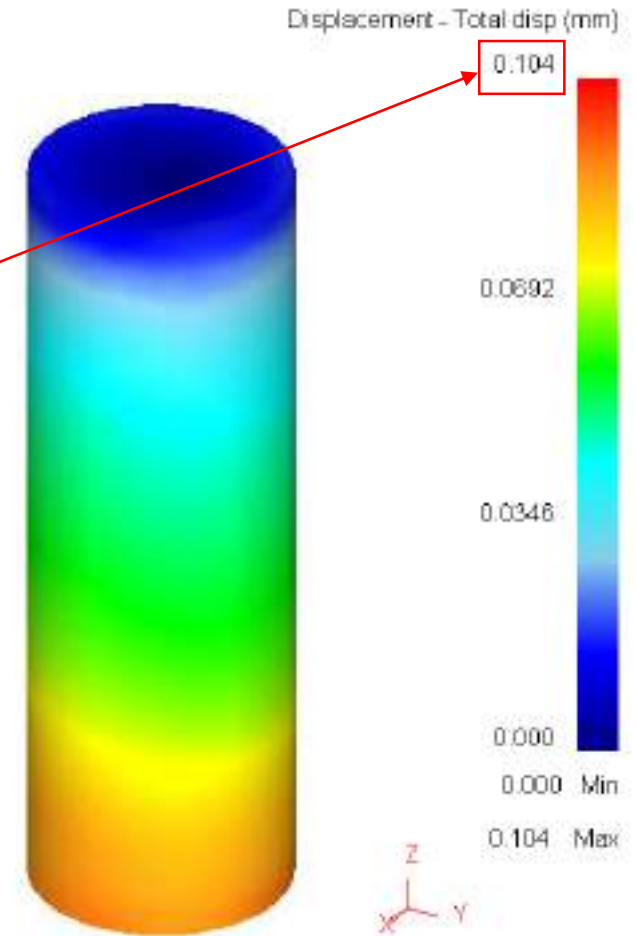
# 解析結果

条件 (因子)	
100	冷却媒体の温度 [°C]
40	焼入の圧力 [kPa]
50	攪拌 [cm/s]
油	冷却媒体の種類
50	冷却媒体の量 [ℓ]
0	均熱時間[hr]
5	浸漬時間[min]

条件 (因子)	
10	冷却媒体の温度 [°C]
101.3	焼入の圧力 [kPa]
-	攪拌 [cm/s]
水	冷却媒体の種類
10	冷却媒体の量 [ℓ]
1	均熱時間[hr]
5	浸漬時間[min]



解析4の変位量



解析7の変位量

数値が違う

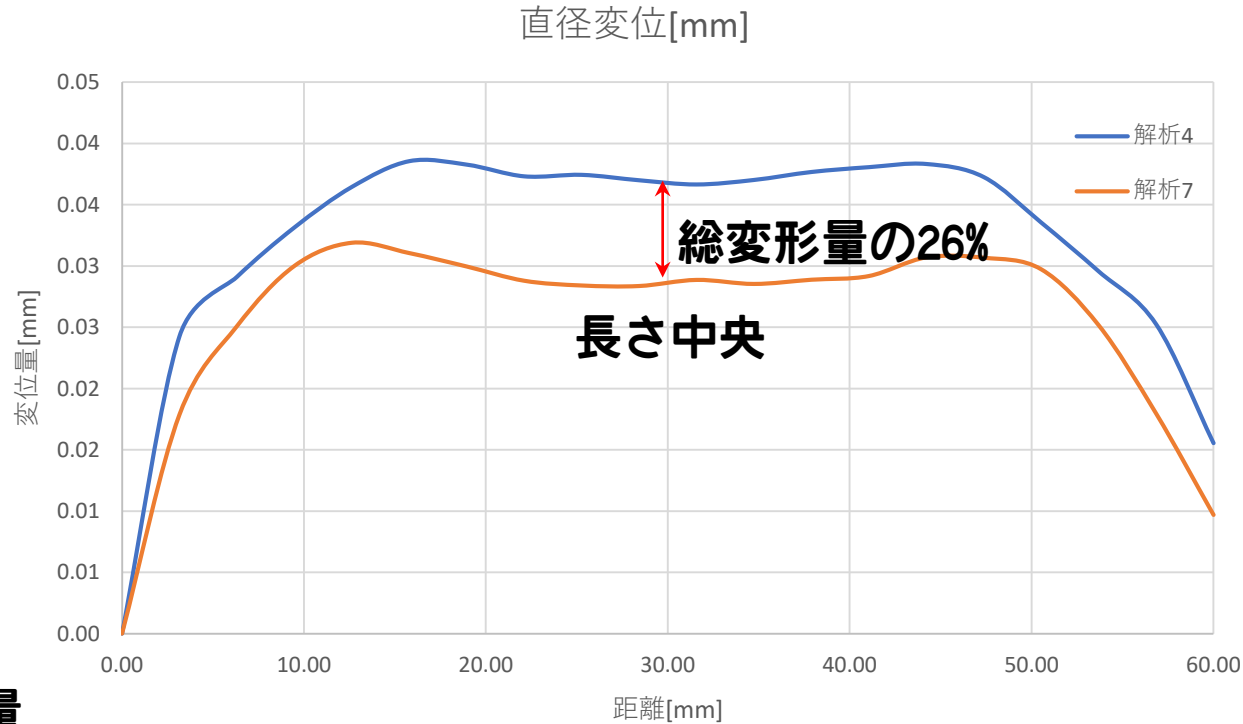
条件によって顕著な形状の差はないが、変形量に差異が見られた





# 解析結果

中央部における変形量の差異は26%であった



変位量のグラフ

変位量



距離

条件 (因子) 4	
100	冷却媒体の温度 [°C]
40	焼入の圧力 [kPa]
50	攪拌 [cm/s]
油	冷却媒体の種類
50	冷却媒体の量 [ℓ]
0	均熱時間[hr]
5	浸漬時間[min]

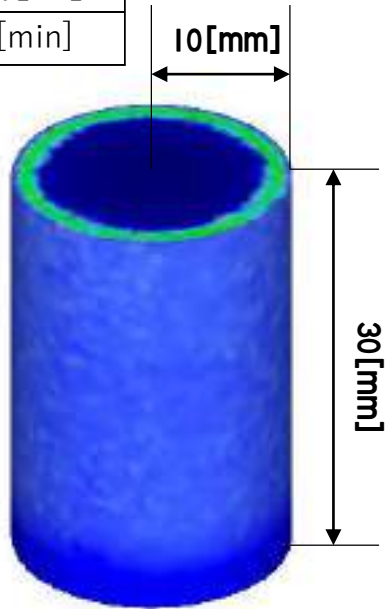
条件 (因子) 7	
10	冷却媒体の温度 [°C]
101.3	焼入の圧力 [kPa]
-	攪拌 [cm/s]
水	冷却媒体の種類
10	冷却媒体の量 [ℓ]
1	均熱時間[hr]
5	浸漬時間[min]

変位量

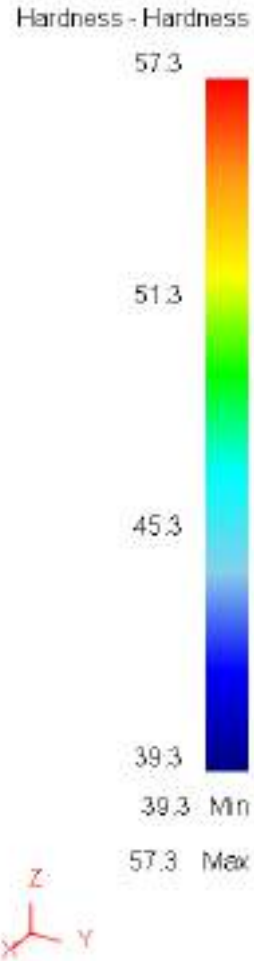
	解析4	解析7
距離	X軸	X軸
0.0000	0.0000	0.0000
3.1579	0.0243	0.0179
6.3158	0.0291	0.0251
9.4737	0.0331	0.0300
12.6316	0.0365	0.0319
15.7895	0.0386	0.0311
18.9474	0.0383	0.0300
22.1053	0.0373	0.0288
25.2632	0.0374	0.0284
28.4211	0.0370	0.0284
31.5789	0.0367	0.0289
34.7368	0.0370	0.0285
37.8947	0.0377	0.0289
41.0526	0.0381	0.0292
44.2105	0.0383	0.0307
47.3684	0.0373	0.0307
50.5263	0.0335	0.0297
53.6842	0.0296	0.0252
56.8421	0.0253	0.0180
60.0000	0.0155	0.0097

# 解析結果

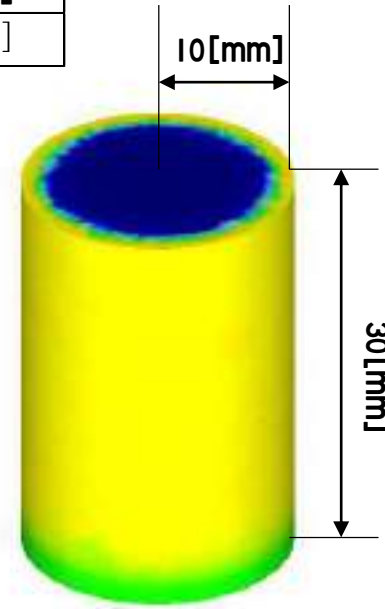
条件 (因子)	
100	冷却媒体の温度 [°C]
40	焼入の圧力 [kPa]
50	攪拌 [cm/s]
油	冷却媒体の種類
50	冷却媒体の量 [ℓ]
0	<b>均熱時間[hr]</b>
5	浸漬時間[min]



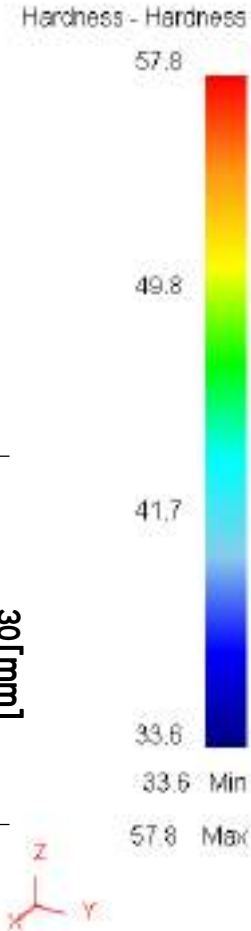
解析4の硬さ



条件 (因子)	
10	冷却媒体の温度 [°C]
101.3	焼入の圧力 [kPa]
-	攪拌 [cm/s]
水	冷却媒体の種類
10	冷却媒体の量 [ℓ]
1	<b>均熱時間[hr]</b>
5	浸漬時間[min]



解析7の硬さ

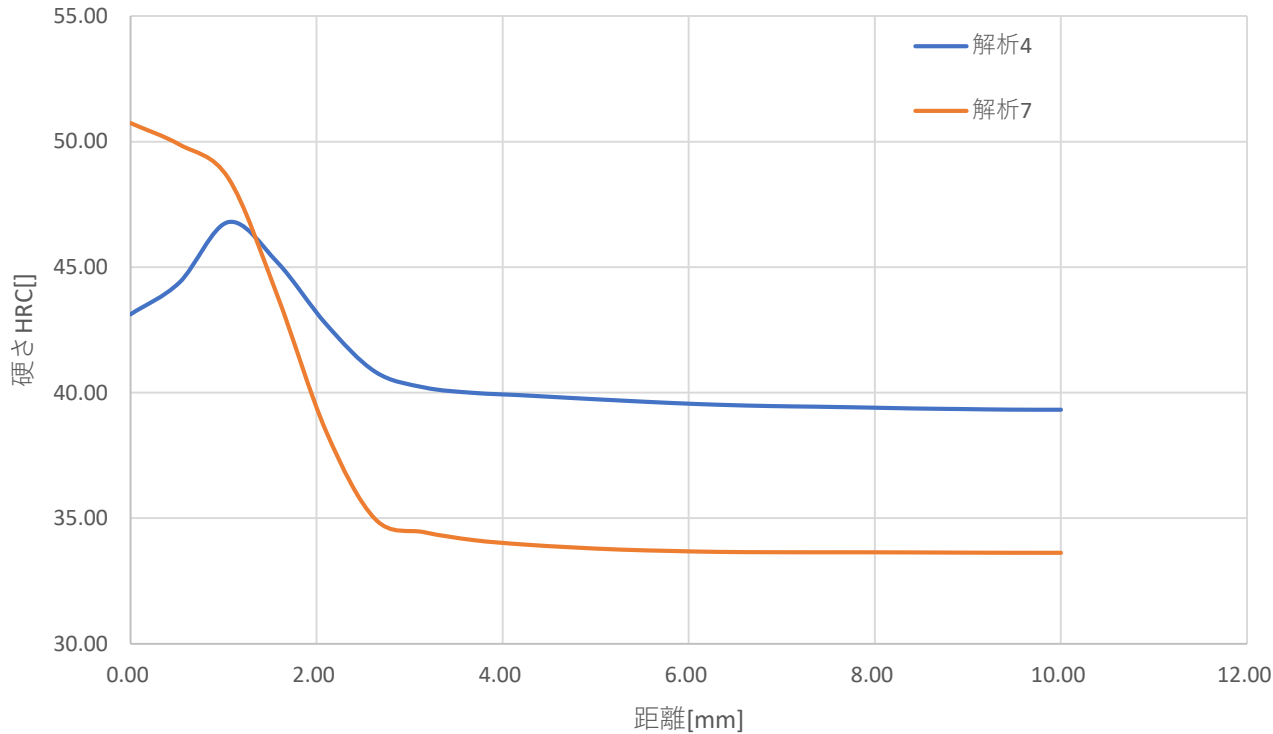




# 解析結果

硬さについても差がみられたが、  
変形量とは逆の傾向がみられる

硬さ [HRC]



硬さ

	解析4	解析7
距離	硬さ	硬さ
0.0000	43.1211	50.7437
0.5263	44.3885	49.8890
1.0526	46.7949	48.5489
1.5789	45.1951	43.8723
2.1053	42.7232	38.4447
2.6316	40.8348	34.9674
3.1579	40.2123	34.4474
3.6842	39.9986	34.1348
4.2105	39.9019	33.9625
4.7368	39.7944	33.8460
5.2632	39.6939	33.7553
5.7895	39.5988	33.7036
6.3158	39.5248	33.6638
6.8421	39.4744	33.6513
7.3684	39.4470	33.6487
7.8947	39.4140	33.6481
8.4211	39.3765	33.6431
8.9474	39.3523	33.6345
9.4737	39.3295	33.6290
10.0000	39.3265	33.6285

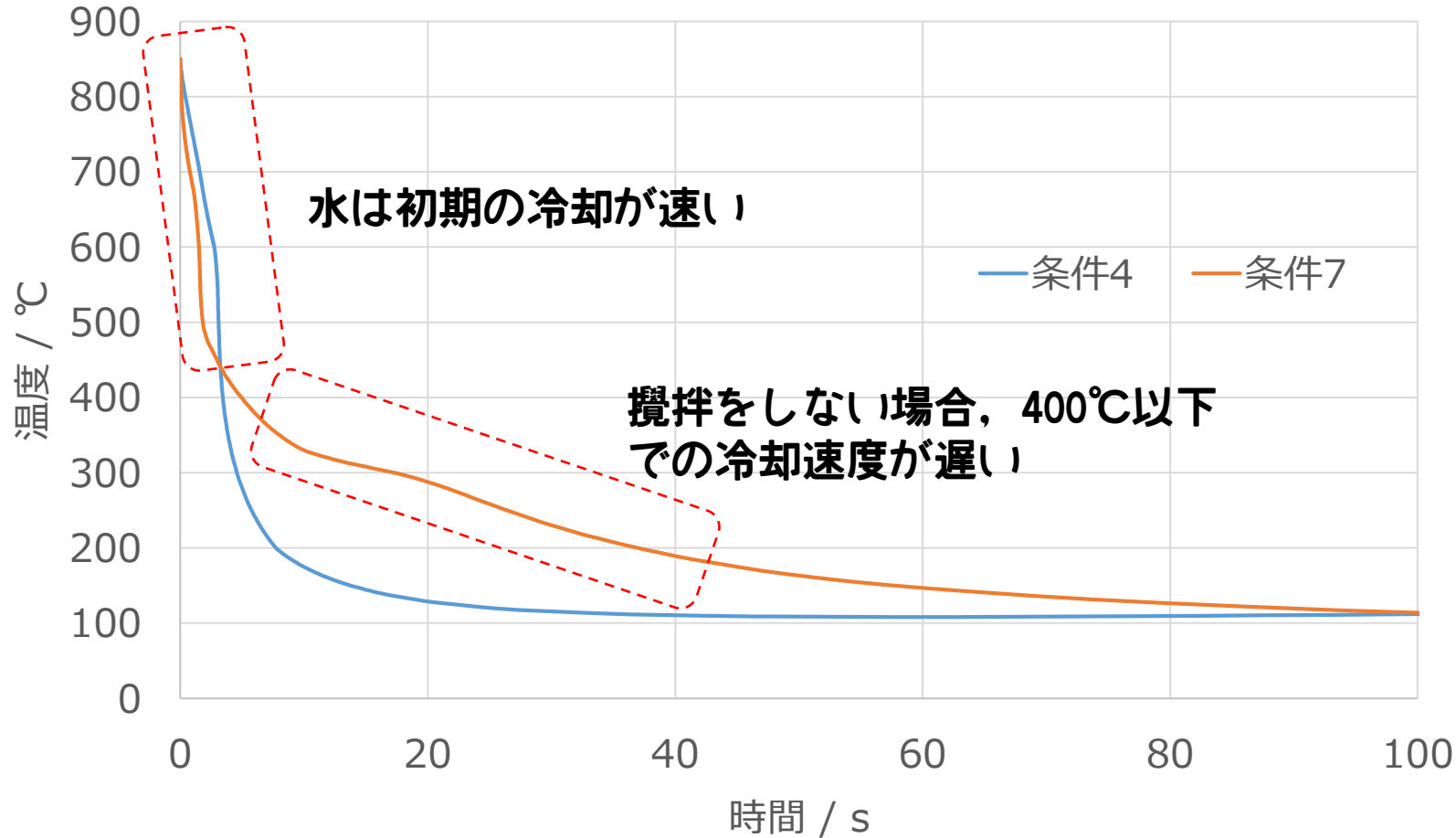
条件 (因子) 4	
100	冷却媒体の温度 [°C]
40	焼入の圧力 [kPa]
50	攪拌 [cm/s]
油	冷却媒体の種類
50	冷却媒体の量 [ℓ]
0	均熱時間 [hr]
5	浸漬時間 [min]

条件 (因子) 7	
10	冷却媒体の温度 [°C]
101.3	焼入の圧力 [kPa]
-	攪拌 [cm/s]
水	冷却媒体の種類
10	冷却媒体の量 [ℓ]
1	均熱時間 [hr]
5	浸漬時間 [min]



# 解析結果

温度域によって夫々影響因子が違う事が推測される



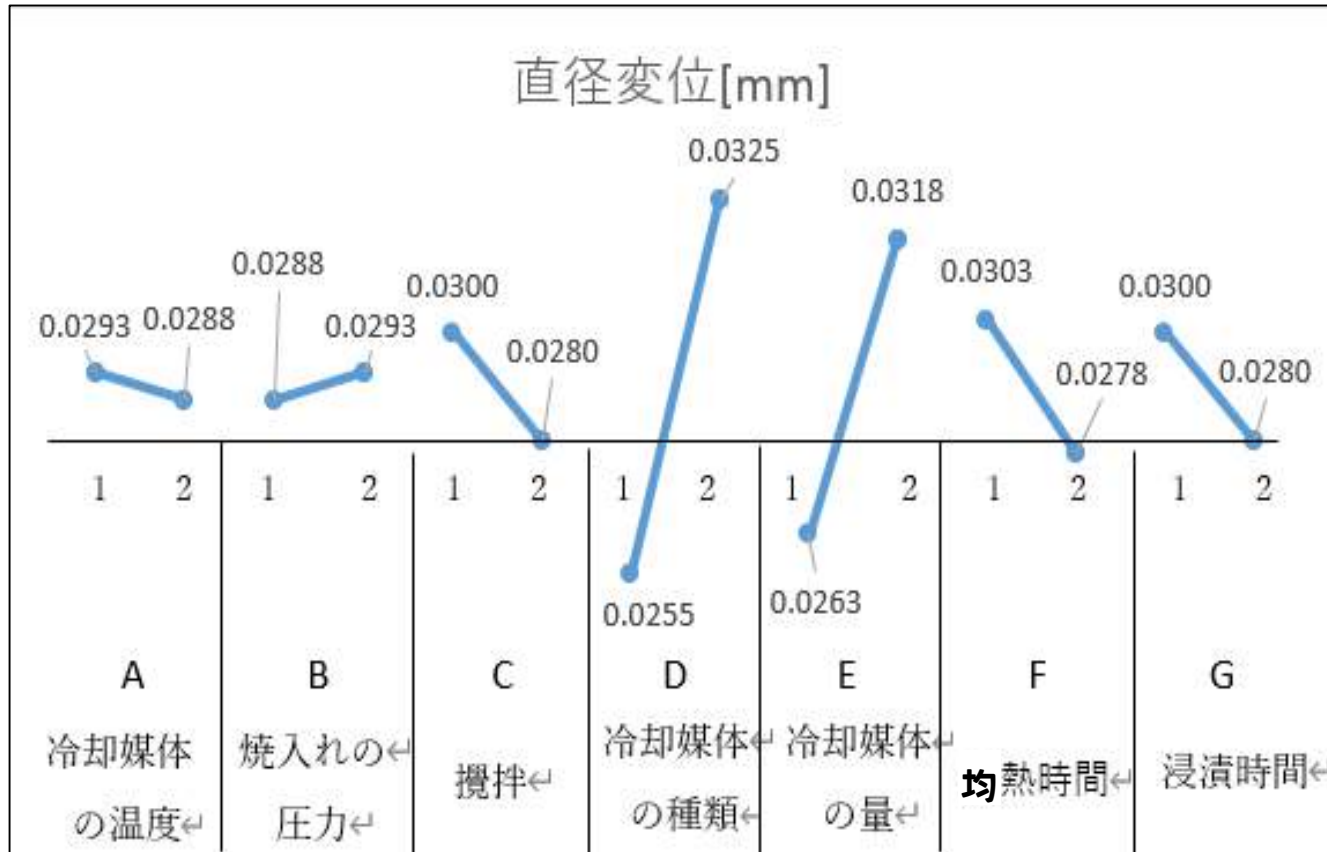
条件 (因子) 4	
100	冷却媒体の温度 [°C]
40	焼入の圧力 [kPa]
50	攪拌 [cm/s]
油	冷却媒体の種類
50	冷却媒体の量 [ℓ]
0	均熱時間[hr]
5	浸漬時間[min]

条件 (因子) 7	
10	冷却媒体の温度 [°C]
101.3	焼入の圧力 [kPa]
-	攪拌 [cm/s]
水	冷却媒体の種類
10	冷却媒体の量 [ℓ]
1	均熱時間[hr]
5	浸漬時間[min]





# 解析結果



長さ中央

長さ中央における直径変位の要因効果図



## 変形に対し

- ・一番効果が大きかったのは  
D：冷却媒体であった
- ・二番目に効果が大きかったのは  
E：冷却媒体の量となった
- ・以下、均熱時間、攪拌、浸漬時間  
の影響が大きく、冷媒の影響の  
1/3程度である

- ・冷媒温度、圧力の影響は  
大きくない



## 6. 考察

- ・ 丸棒で全体を均一な冷却状態とした場合、焼入後の変形形状は類似の形状となった
- ・ 変形量は最大で26%変化した
- ・ 変形量への影響の寄与は 冷媒種，冷媒量，均熱時間，攪拌および浸漬時間の順になった。

# 要因効果調査での計算・実験条件のふり幅

現実の量産範囲で変動として振れる範囲を条件のふり幅とした。

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
Max	0.23	0.35	0.90	0.03	0.03	0.25	1.20	97.01
Mean	0.205	0.250	0.750	0.015	0.015	0.125	1.050	97.59
Min	0.18	0.15	0.60	0.00	0.00	0.00	0.90	98.17

実験

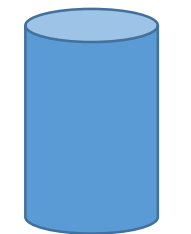
JIS規格によるSCr420の成分範囲を上記3水準で計算した。

計算条件

$\gamma$ 粒径 : 9 ASTM

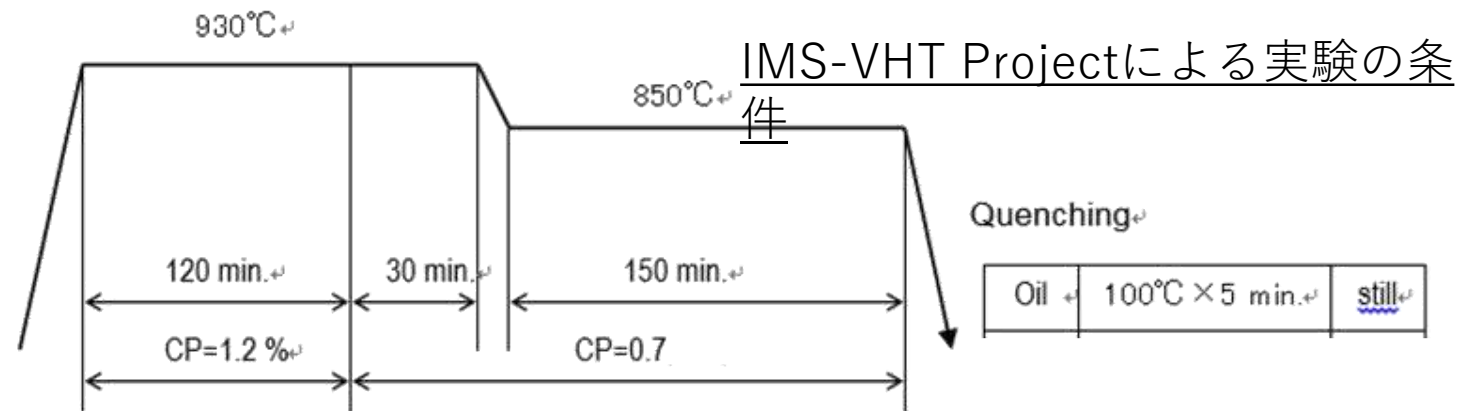
焼入れ温度 : 860°C

冷却速度 : 30, 50, 80°C



Φ 20mm  
x  
60mm

丸棒

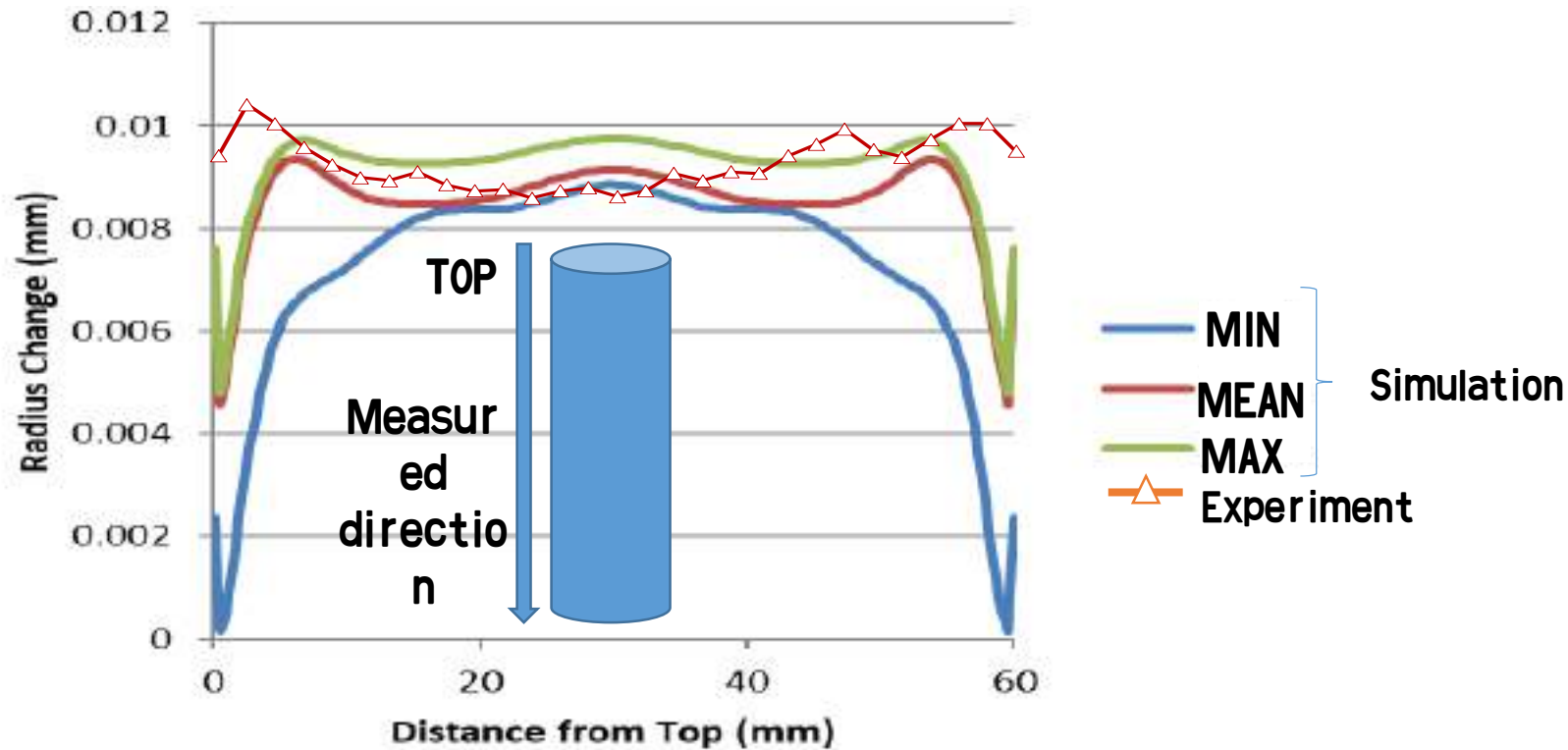


(a) Carburizing and quenching

# 要因の把握 熱処理変形への影響把握-

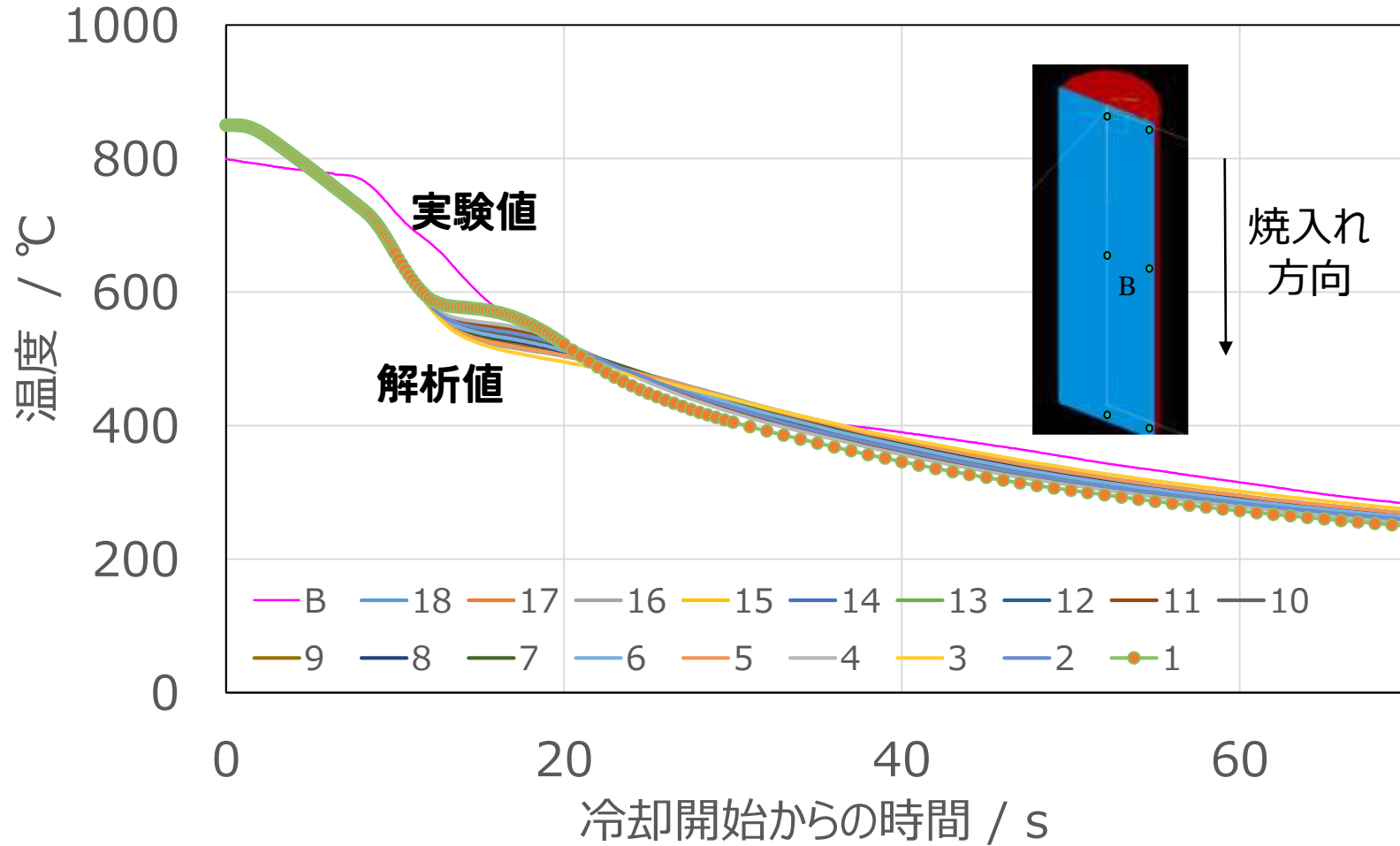
材料成分の変動により変形量の計算結果は変化した。

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
Max	0.23	0.35	0.90	0.03	0.03	0.25	1.20	97.01
Mean	0.205	0.250	0.750	0.015	0.015	0.125	1.050	97.59
Min	0.18	0.15	0.60	0.00	0.00	0.00	0.90	98.17



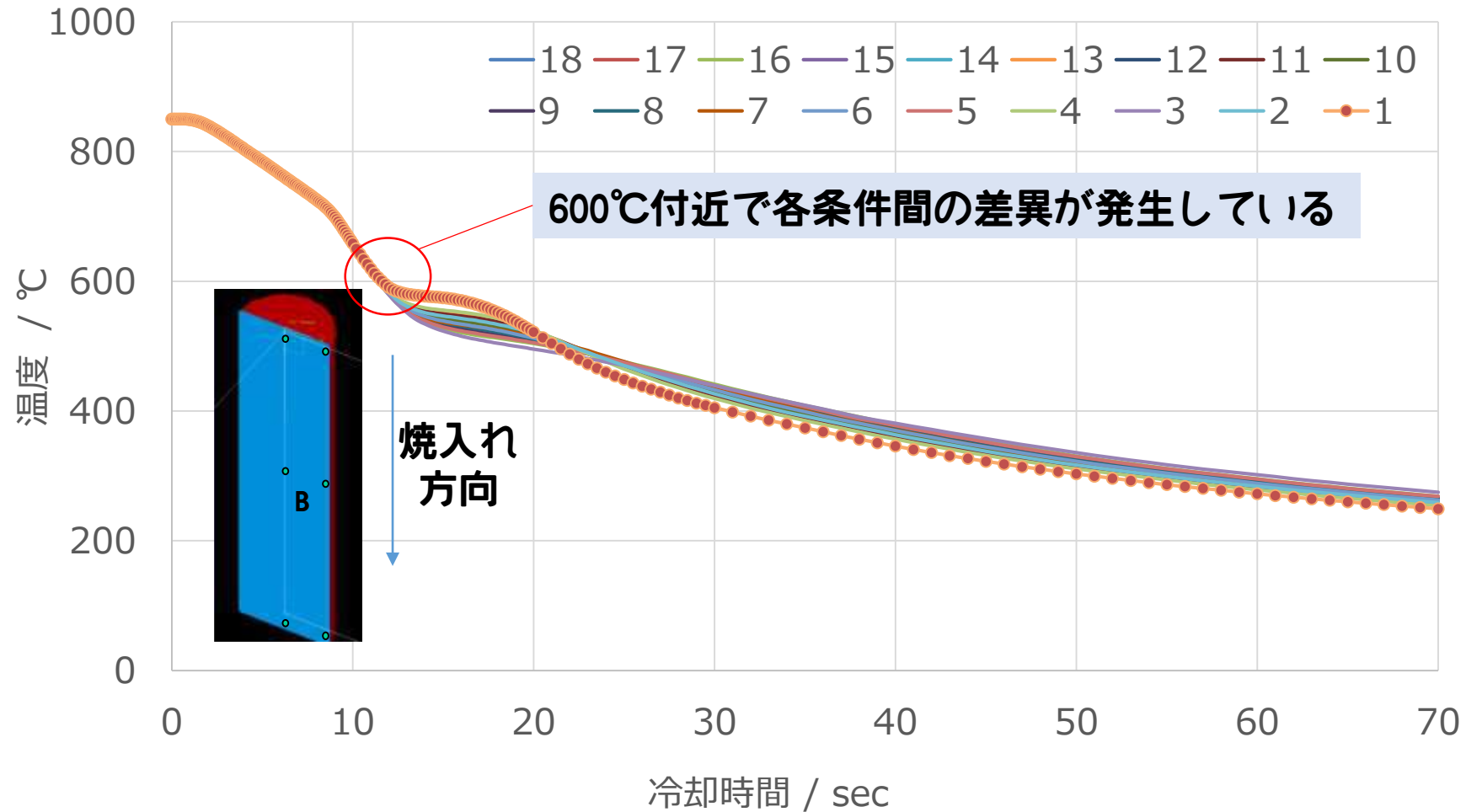
# 解析結果

解析値と実験値の冷却速度規模は近くなった。→ 概ね現実に近い解析ができています



# 解析結果

JMatPro-FINAS/STAR TPS Editionを組み合わせた解析で材料成分変化の影響を見ることができた。





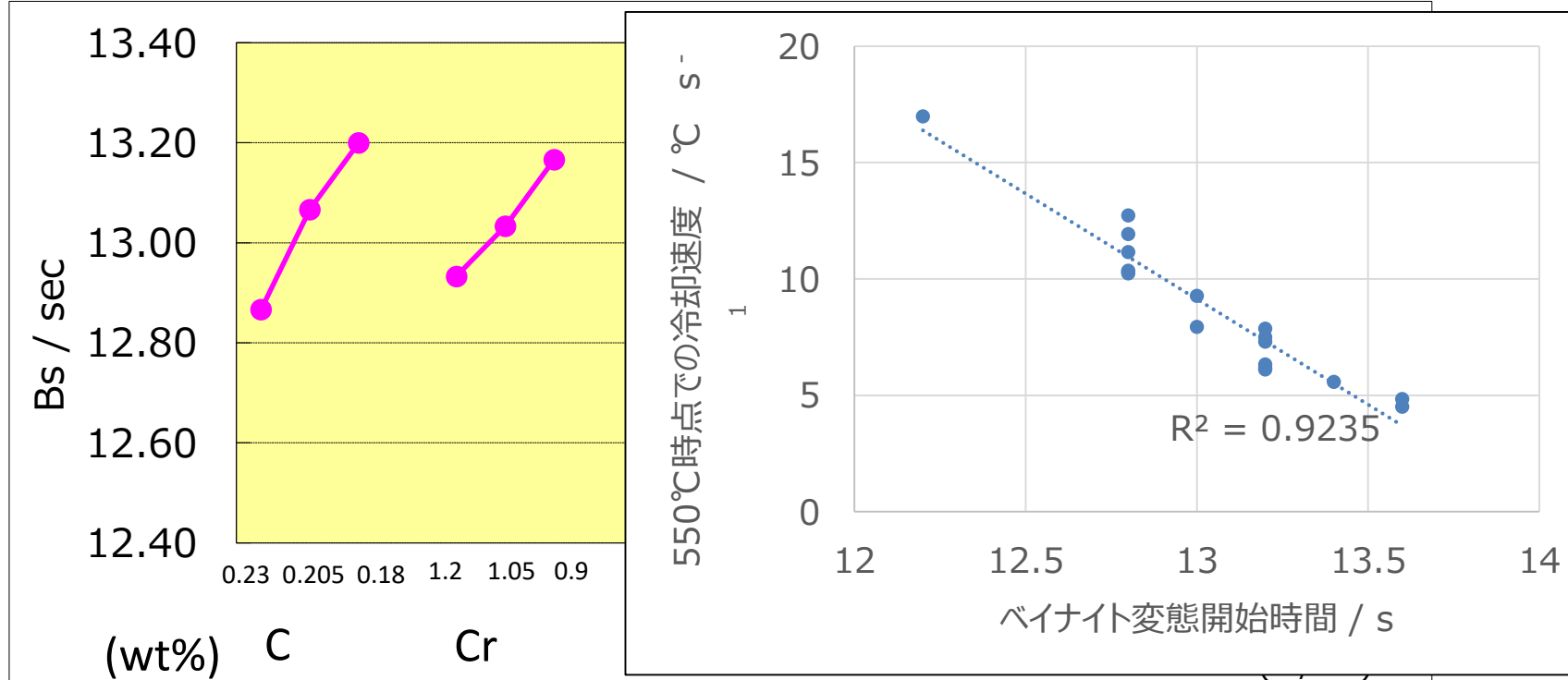
# 要因の把握 ベイナイト変態開始時間-

- ベイナイト開始時間は各成分ともに負の相関を持っている
- 550℃時点での冷却速度はベイナイト変態温度と強い相関を持っている

$$\rho c \dot{T} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial \dot{T}}{\partial x_i} \right) + L_{IJ} \dot{\xi}_{IJ}$$

$\xi_{IJ}$  変態相分率  
(I→J相)

ベイナイト変態温度;  $t$   
 $\xi_{IJ}(t)$  オーステナイト  
→ベイナイト





# 本日の内容

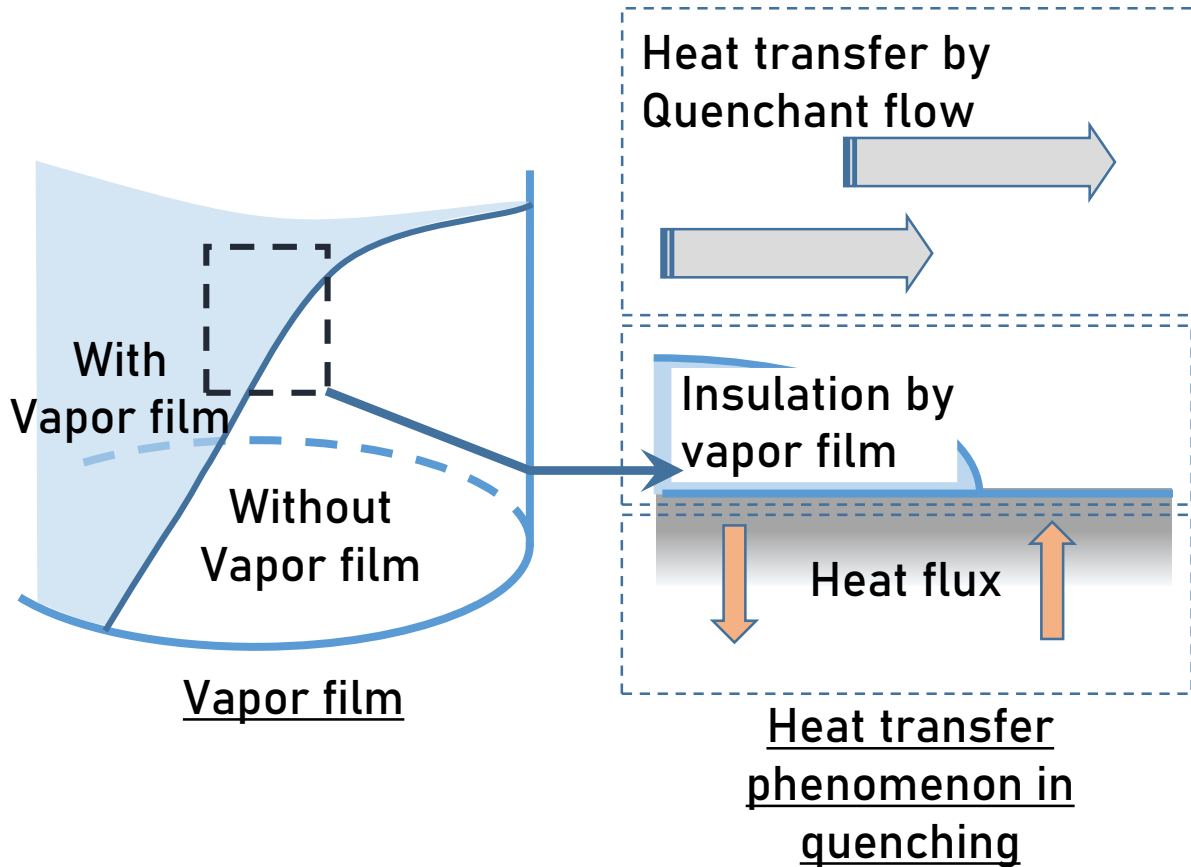
---

- ✓ 熱処理シミュレーションとMBD
- ✓ 熱伝達率の影響
- ✓ V&Vによる定量評価
- ✓ **Cellular Automatonによる簡易的な定量化**





# Scope of this research



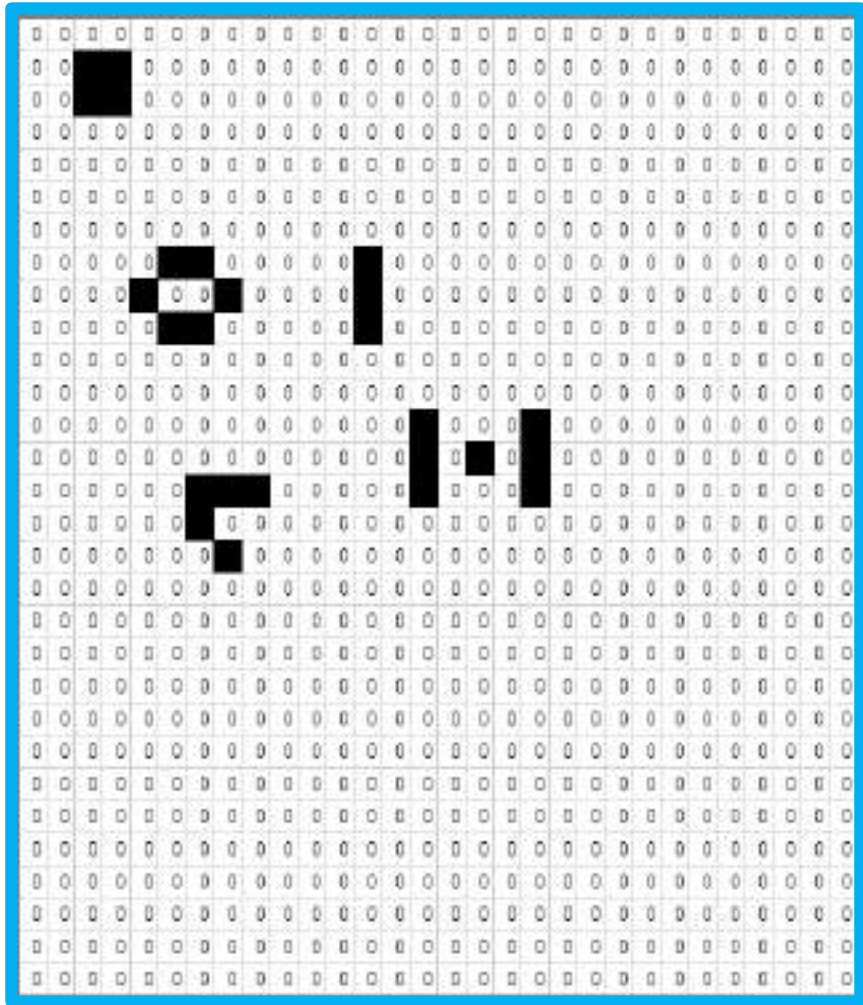
	Time dependence	Dimension	Prior Situation
Quenchant flow	Flow component: Steady Heat transfer component: Unsteady	3	Strong agitation Vapor pool
Heat Transfer	Unsteady	2	Weak/Still Agitation Complex Shape
Heat conduction	Steady (Latent heat of transformation is unsteady)	3	Large Size

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



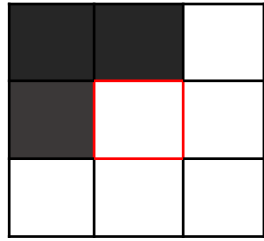


# What is Cellular Automaton?



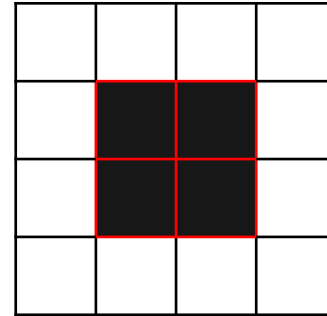
LIFE GAME(Cell Automaton)

## LIFE GAME



Neighborhood:3

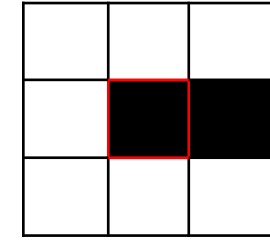
BIRTH



Neighborhood:2 or 3

LIFE

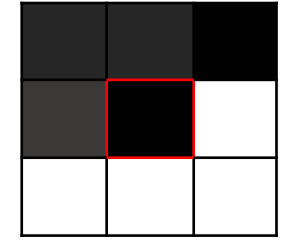
(Suitable Density)



Neighborhood:1

DEAD

(Depopulation)



Neighborhood:4

DEAD

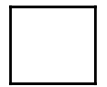
(Overcrowding)



Interesting cell



LIFE



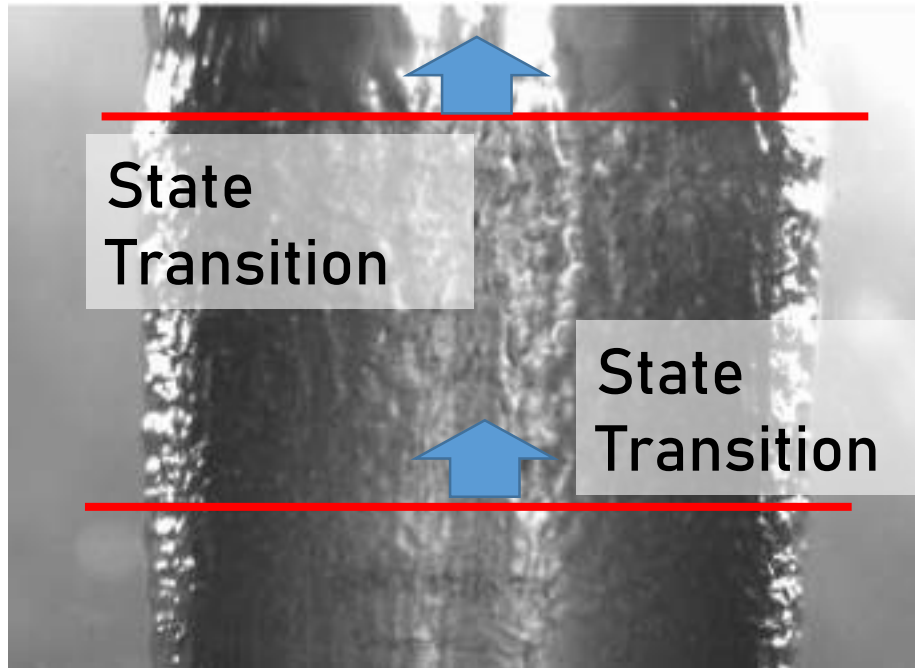
DEAD

- ✓ Calculation method for **state transitions** (time evolution) devised by Von Neumann, the father of computers, in 1940
- ✓ Calculation speed is very fast because it is always **Turing-complete** (does not diverge)

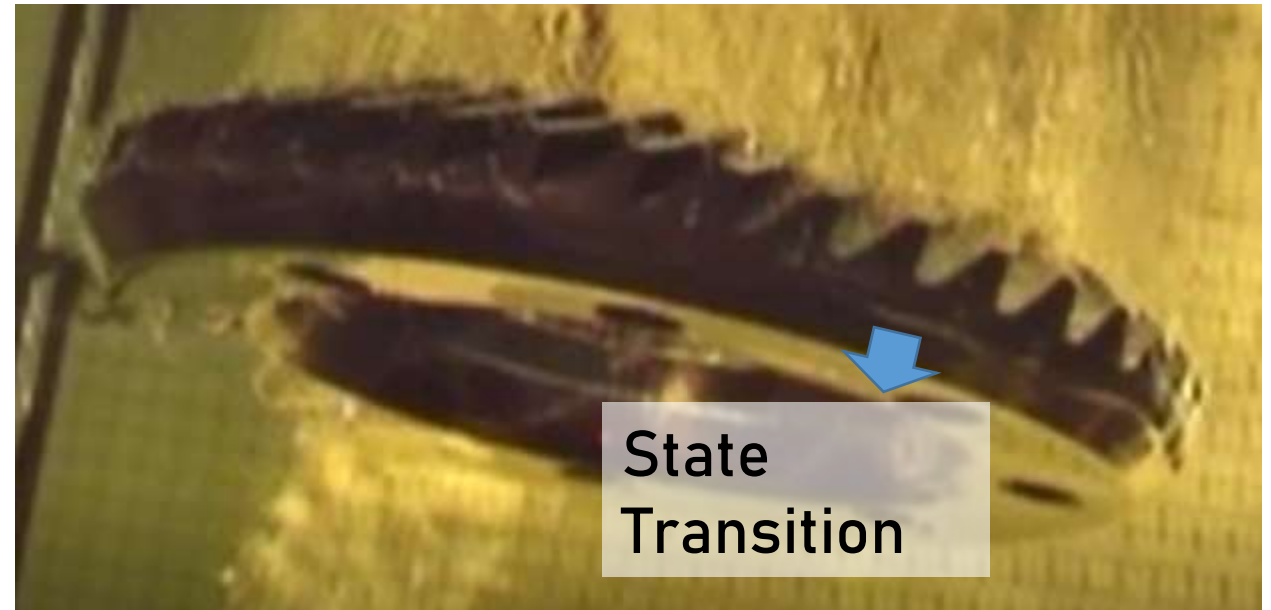


# Confirming the Boiling Phenomenon in Quenching

The boiling phenomenon in quenching is a two-dimensional one on part surface  
->State transition can be estimated by a cellular automaton.



Quenching in Cylinder

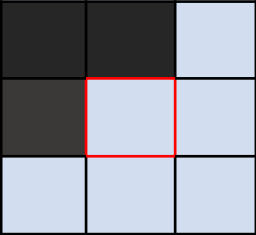
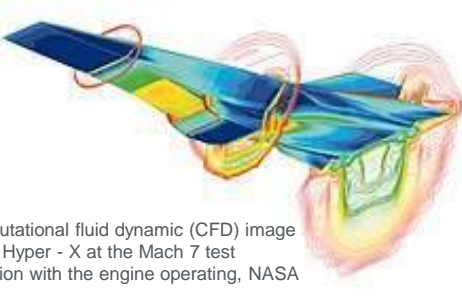


Quenching in Hypoid Gear



# Advantage of Cellular Automaton Method

Compared to FEM/FDM (standard fluid analysis method), cellular automaton method are suitable for simple shape and complex boundary condition calculations.

	Cellular Automaton	FEM/FDM
		 <p>Computational fluid dynamic (CFD) image of the Hyper - X at the Mach 7 test condition with the engine operating, NASA</p>
Element Number	Low	High
Convergence(Calculation Cost)	Complete	In-complete
Complex Boundary Conditions	Easy	Possible
Multi Phase	Easy	Possible
Moving Part	Difficult	Easy
High Dimension	Difficult	Easy

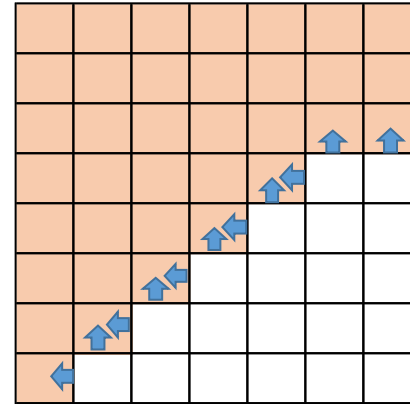
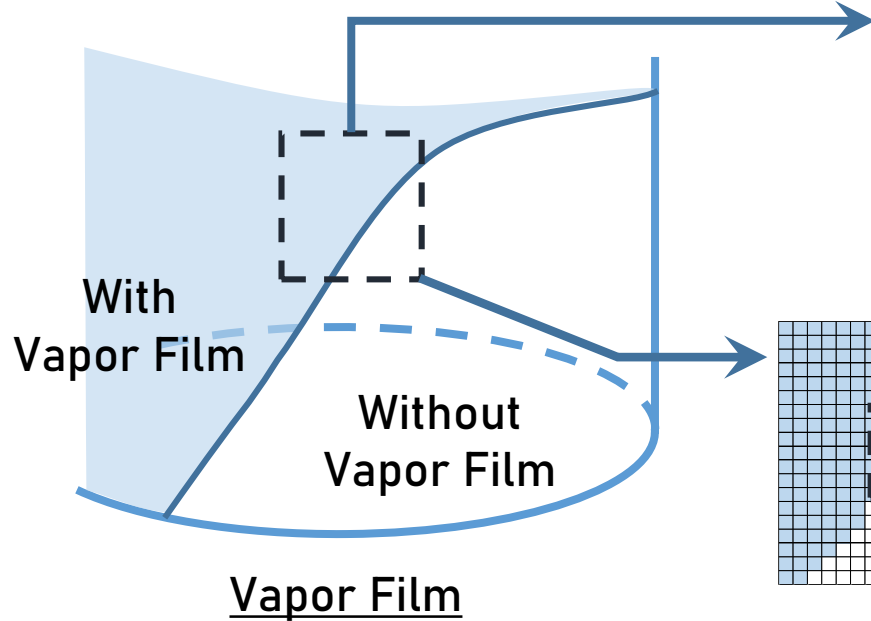
 Advantage point





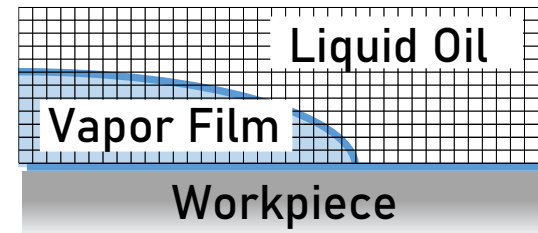
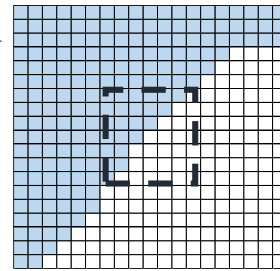
# Application of Cellular Automaton to Boiling Phenomena

Purpose : In this research, we realize an ultra-low-cost oil quenching simulation by a low-dimensional (2-dimensional) cellular automaton.



Perspective of Calculation:  
phase transition and **Propagation**

This research : Low dimensional cellular automaton

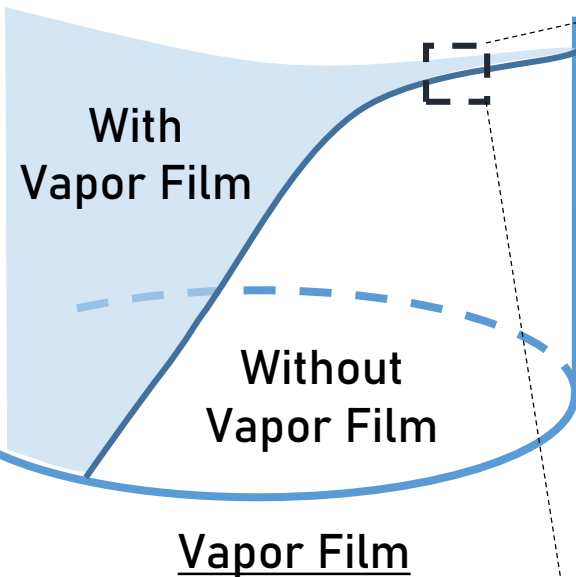


Perspective of Calculation:  
the **Status** of Each Grid Point

Conventional : 3-dimensional CFD



# Basic Formulation



## Perspective Cell

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

Phase Change:  
Von Neumann Neighborhood  
(Weakly affected by surroundings cells)

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

Temperature:  
Moore Neighborhood  
(Strongly affected by surroundings cells)

$S_i^t$  : Phase  
0: Vapor Blanket Stage  
1: Boiling Stage  
2: Convection Stage  
 $t$ :time  
 $i$ :Position

$T_i^t$  : Temperature

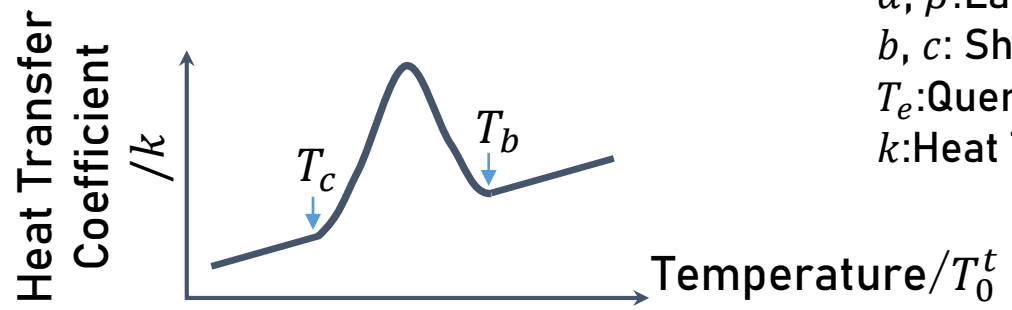
Wolfram, S., *A New Kind of Science*,  
Wolfram Store, 2007

Phase Change :  $S_0^t = 0$  and  $\sum_i S_i^t \geq b$  and  $T_0^t \leq T_b$  then  $S_0^{t+1} = 1$ ,  $T_0^{t+1} = T_0^t - \alpha$  ·· Eq. (1)

$S_0^t = 1$  and  $\sum_i S_i^t \geq c$  and  $T_0^t \leq T_c$  then  $S_0^{t+1} = 2$ ,  $T_0^{t+1} = T_0^t - \beta$  ·· Eq.(2)

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

$\alpha, \beta$ : Latent Heat  
 $b, c$ : Shape Factor  
 $T_e$ : Quenchant Temperature  
 $k$ : Heat Transfer Coefficient



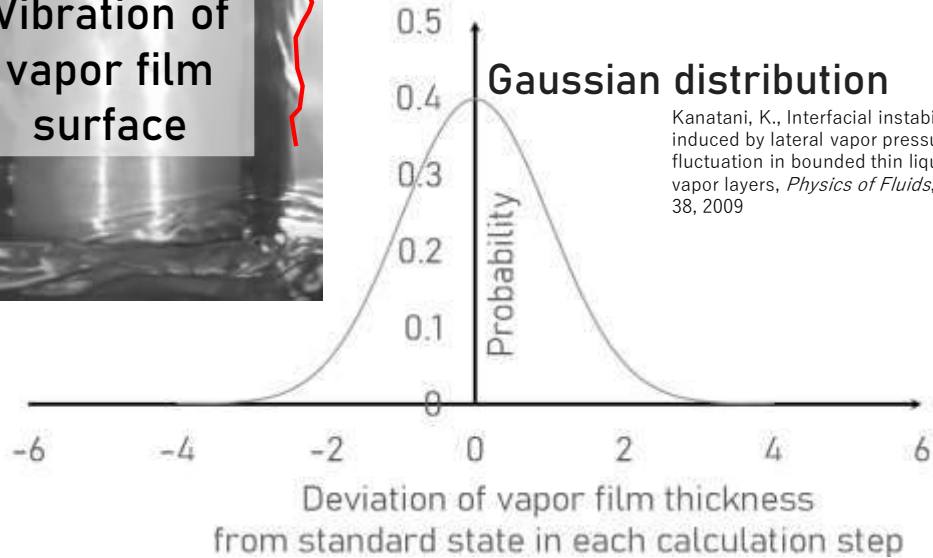


# Formulation of Tilt, Edge Shape and Fluctuation of Vapor Film

Vapor film vibration, edge shape and tilt is reflected as time evolution and position change of vapor film thickness.



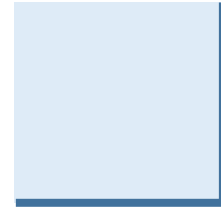
Vibration of vapor film surface



$$b = b_0 + \gamma N(\mu, \sigma^2) \quad \cdot \cdot \text{Eq. (4)}$$

$\gamma, \mu, \sigma$ : Control parameter for vapor film vibration

Effect of Vapor film vibration

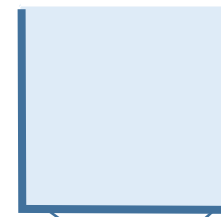


$$b = b_0 + \delta \quad \cdot \cdot \text{Eq. (5)}$$

$\delta$ : Vapor film collapse due to edge

Vapor film

Effect of Edge Shape



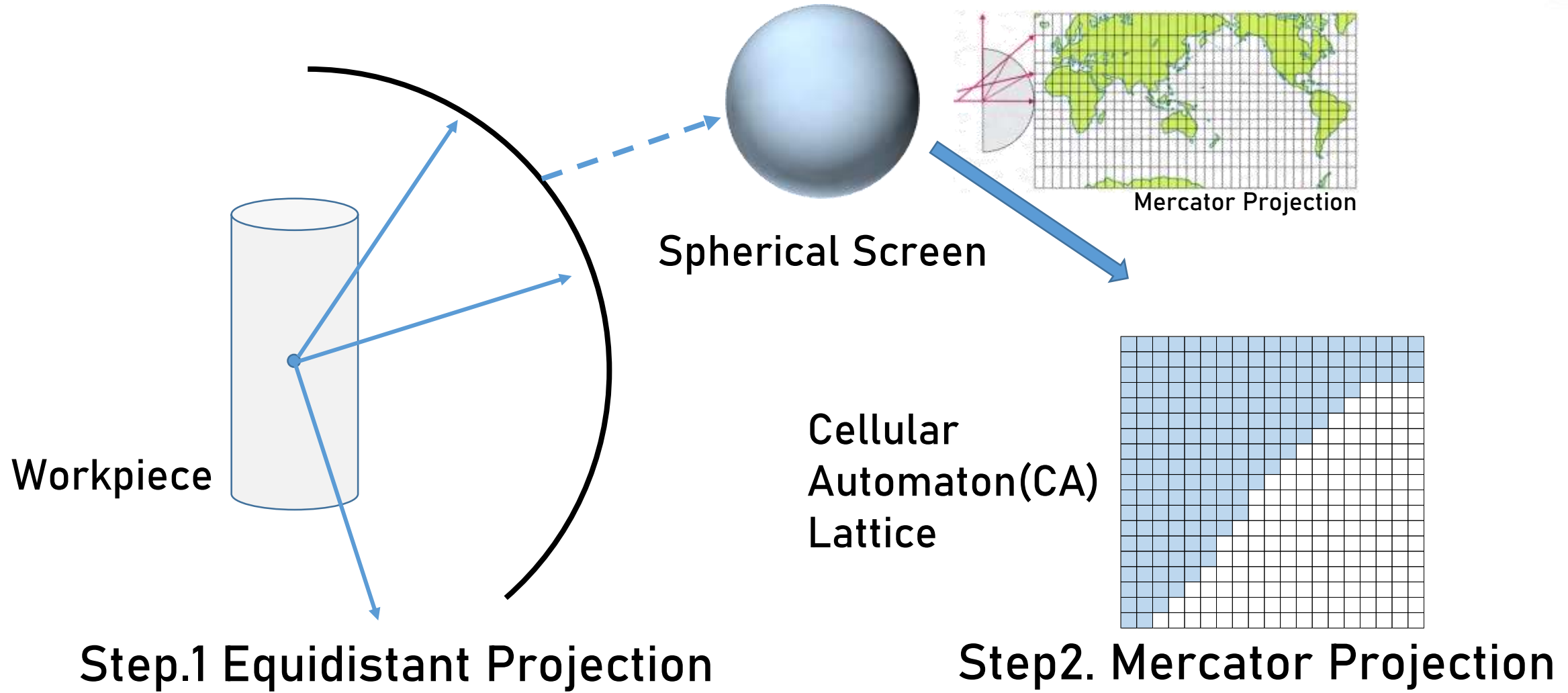
$$b = b_0 - \varepsilon \cos \theta \mid \theta \leq 0 \quad \cdot \cdot \text{Eq. (6)}$$

$\theta$ : Tilt of surface  
(Horizontal:0, downward is minus)

Vapor film

Effect of Surface Tilt

# Projecting Workpiece Shape onto CA Lattice





# Agenda



## ✓ Correlation

- Cylinder Shape
- Cylinder Shape with Asymmetrical Boundary
- Bar shape with Keyway



Reproduction of normal heat transfer



cooling asymmetry

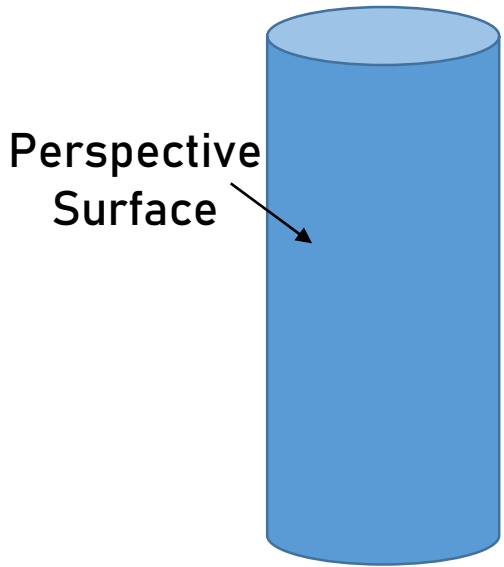


Complex shape

# Cylinder Shape with Asymmetrical Boundary



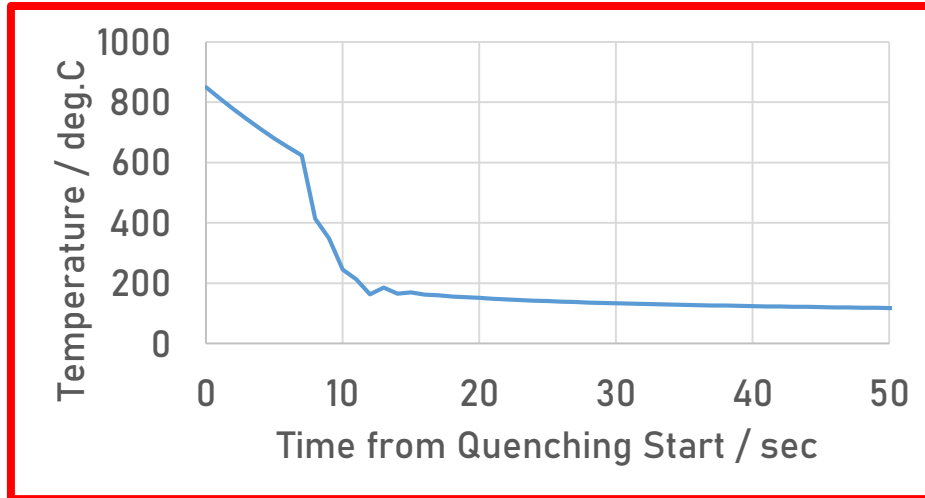
# Correlation -Cylinder Shape-



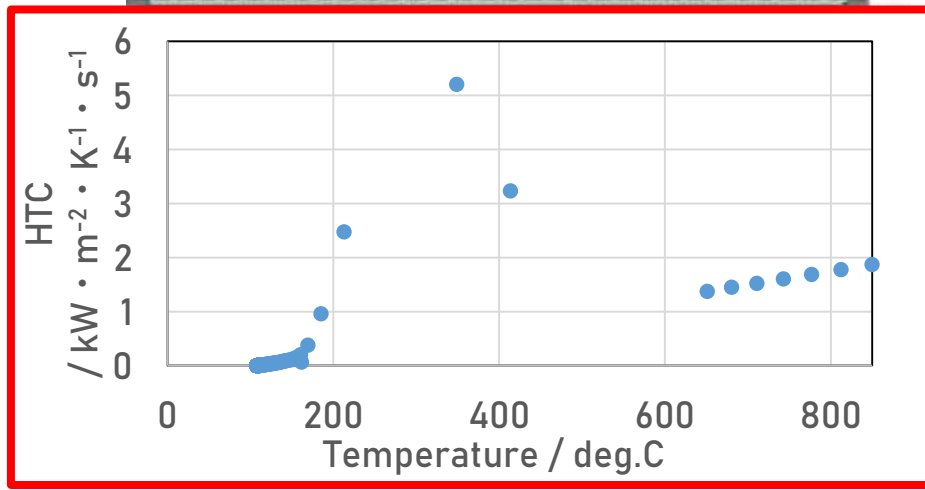
Φ20mmx60mm  
Cylinder

Quenchant:

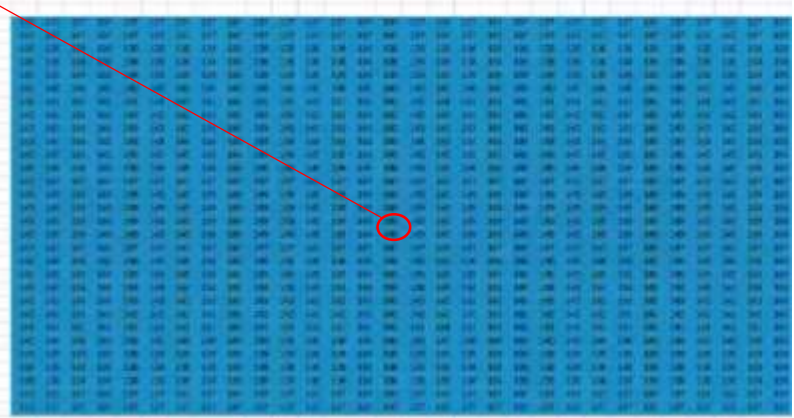
Idemitsu High-Temp X  
850deg.C→100deg.C



Real-time simulation is possible by using cellular automaton simulation



Temperature  
(Full scale in same time)



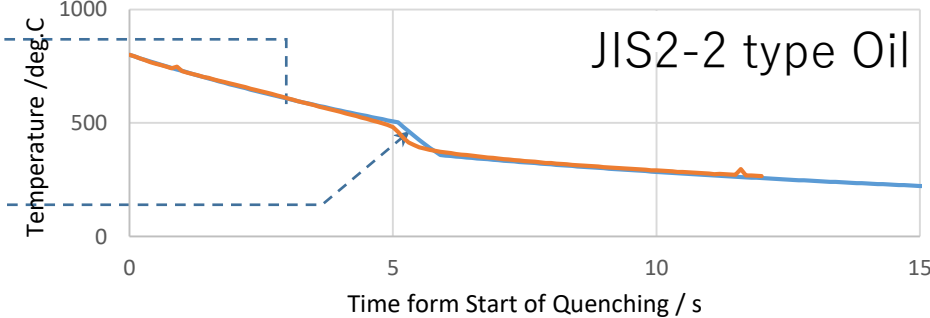
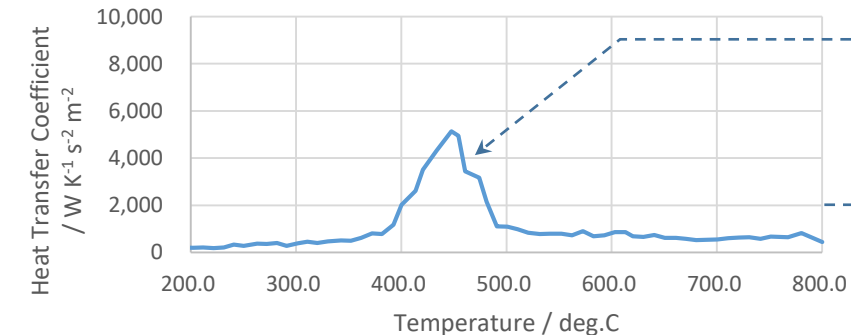
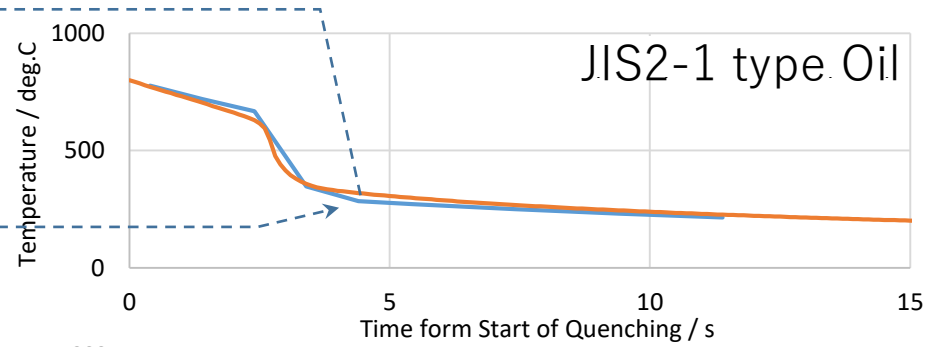
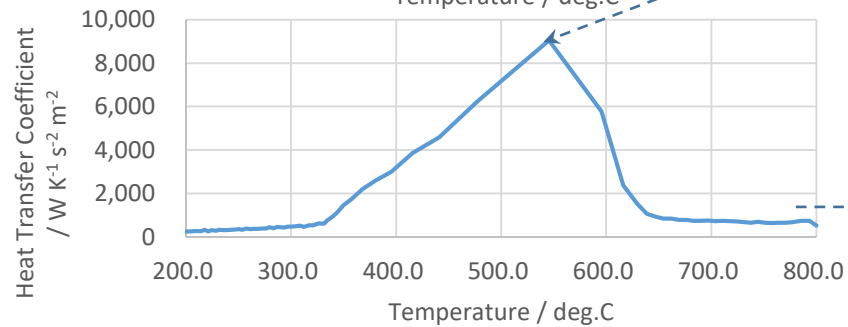
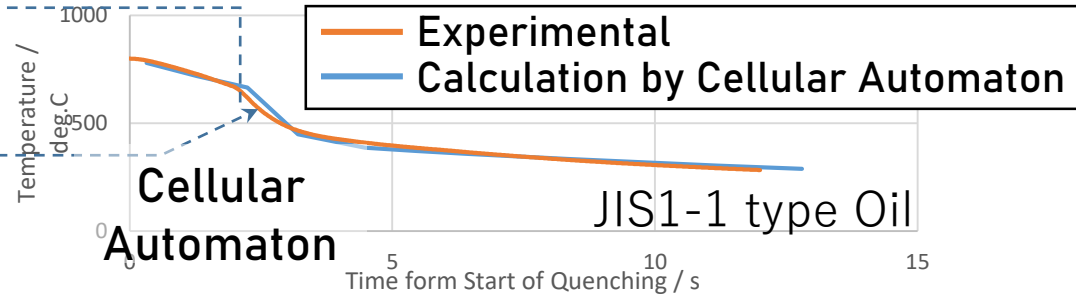
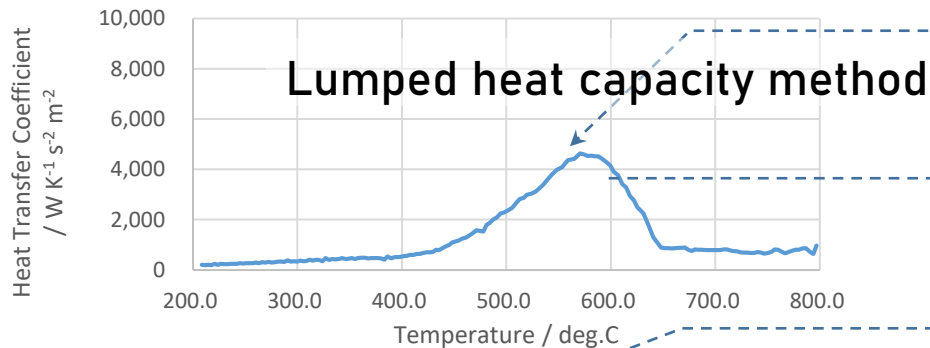
Temperature  
(Full scale in Full Time)



# Correlation -Cylinder Shape-



Characteristics of oil and each cooling curve is be able to reproduce



JIS K2422 type A  
Silver Probe

Experimental cooling curve  
and lumped heat capacity  
calculation:  
<https://www.jsht.or.jp/study/>

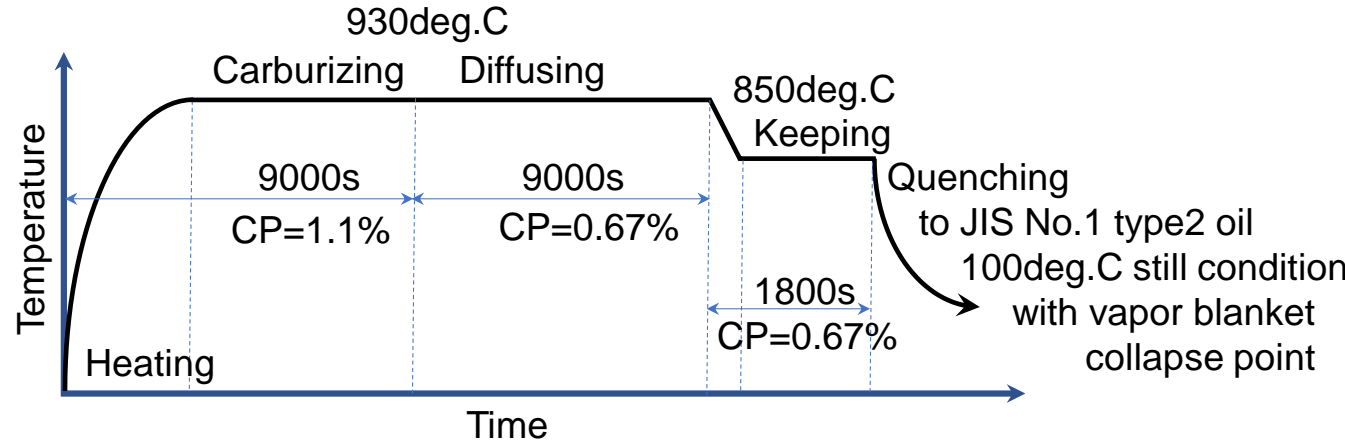




# Correlation

## -Cylinder Shape with Asymmetrical Boundary-

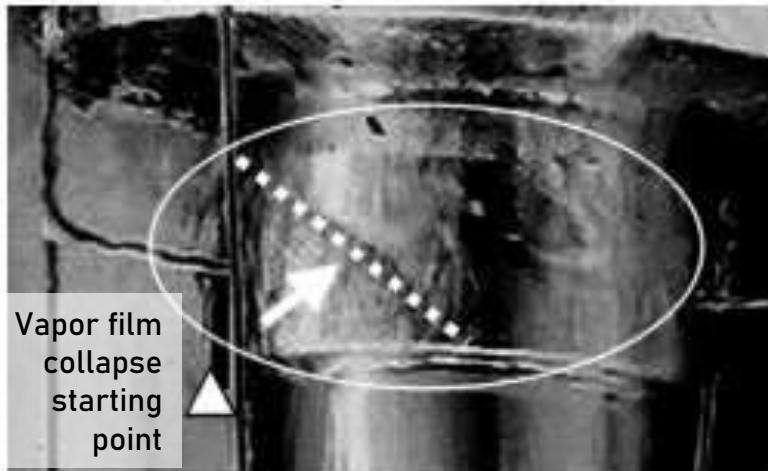
### Heat Treatment Condition in This Simulation



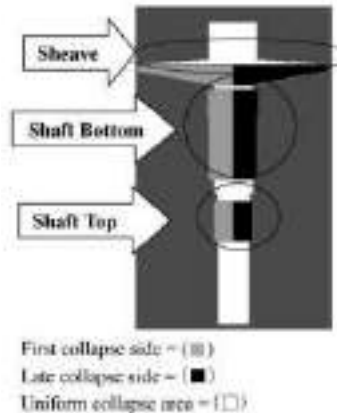
### Simulation conditions

Solver	SFTC DEFORM-HT ver12.1
Element type	Hexagonal with coating mesh
Nodes	35,558
Elements	33,540

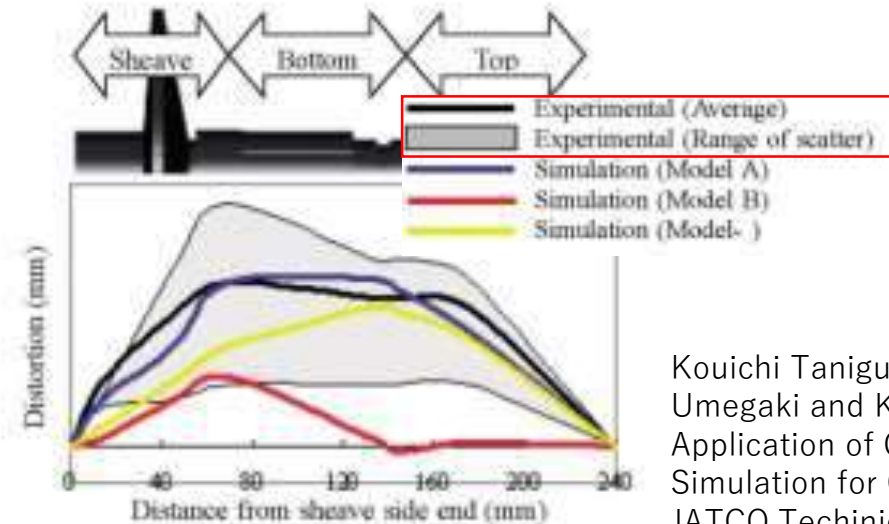
### Example of Axial Bending simulation in Pulley Quenching



Collapse mode of Vapor film



Boundary Condition of Simulation



Result

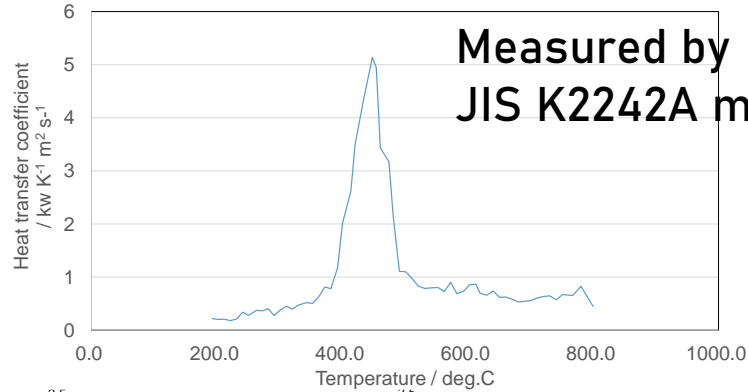
Kouichi Taniguchi, Shunzou, Umegaki and Kanji Ueno, Application of Quenching Simulation for CVT Pulleys, JATCO Technical Review No.7, pp. 88-94



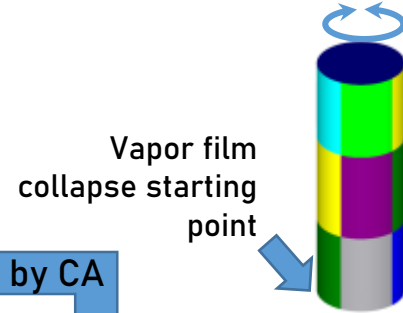
# Correlation

## -Cylinder Shape with Asymmetrical Boundary-

### Estimation of Heat Transfer Coefficient Distribution on Cylinder Surface



Calculated by CA

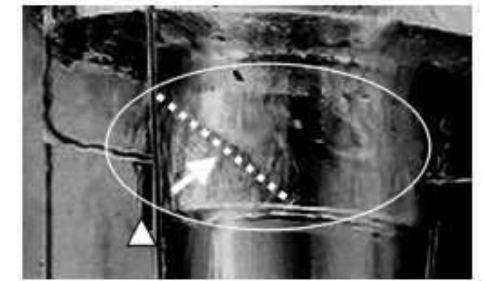
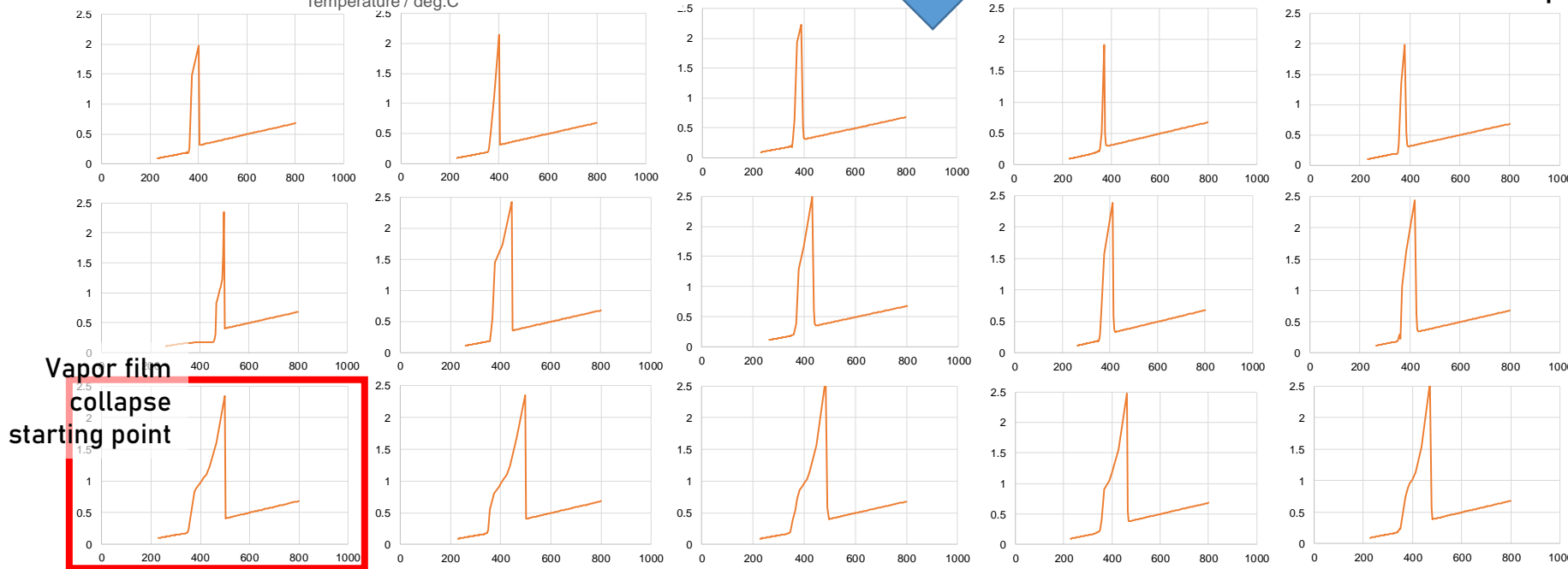


Rotational direction: 5

Length direction : 3

Heat transfer coefficient /  $\text{kW m}^2 \text{K}^{-1} \text{s}^{-1}$

Temperature / deg.C

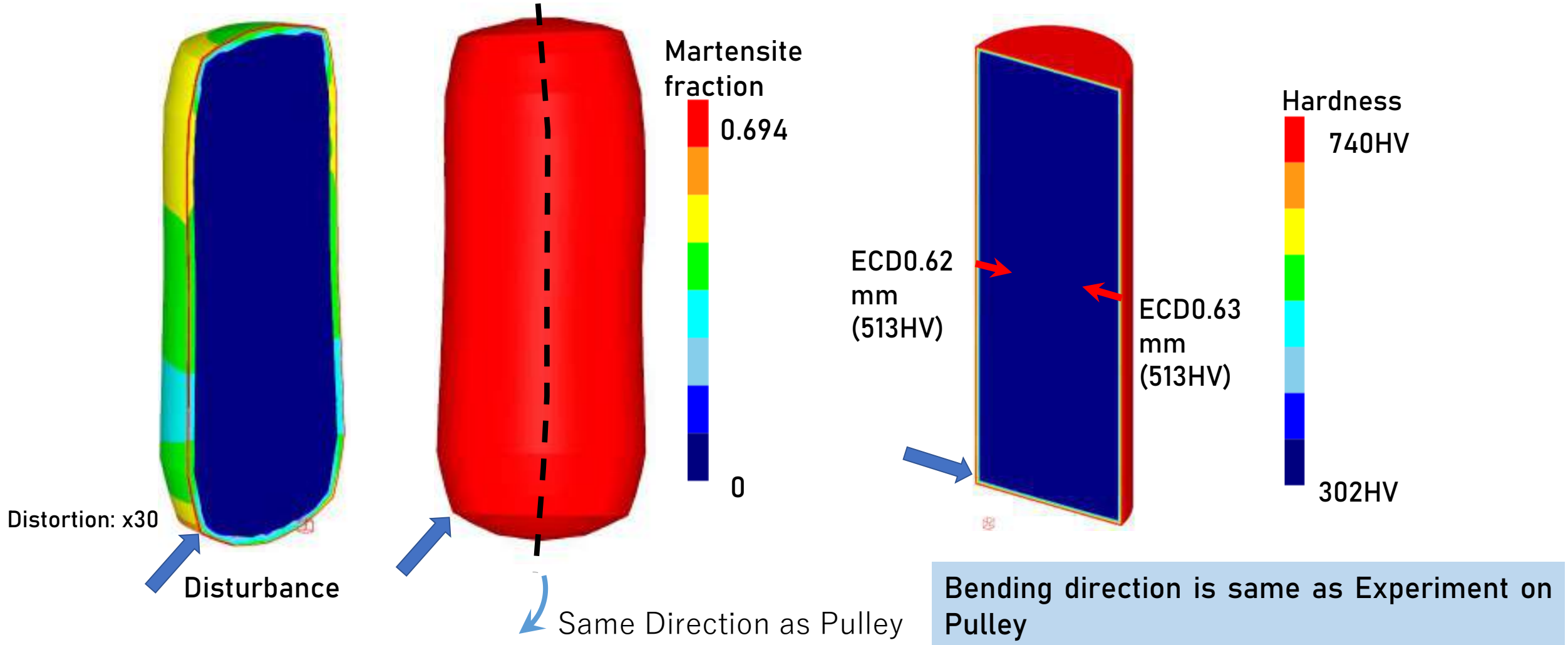


Heat Transfer coefficient distribution is like as vapor film collapse mode of CVT Pulley in past research.



# Correlation

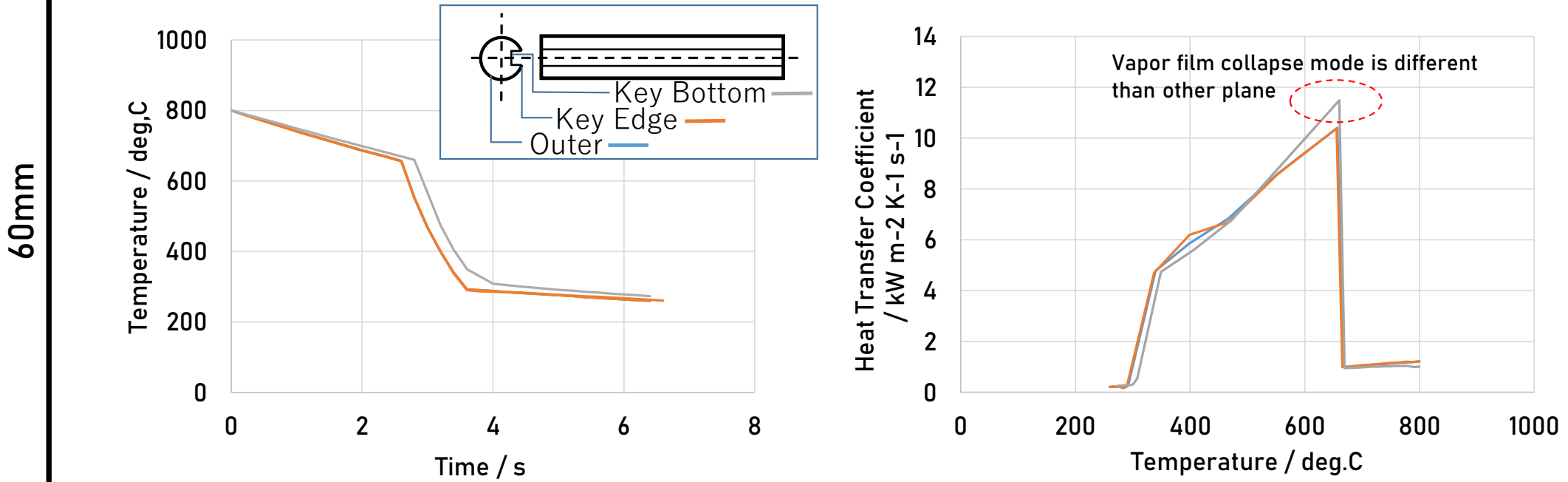
## -Cylinder Shape with Asymmetrical Boundary-





## Correlation -Bar shape with Keyway-

- The cooling speed is effected with edge sharpness.
- In the Key bottom plane, cooling speed is rapid than other position, because of the propagation of collapse of boiling film from key edge.



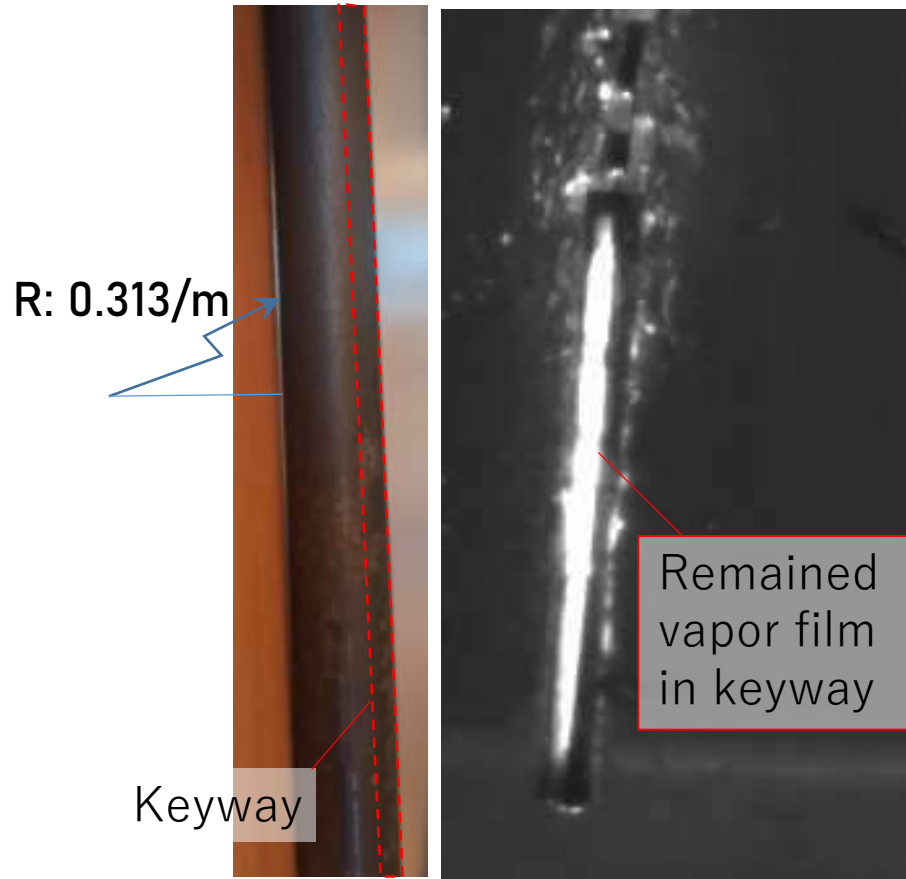
Quenchant: JIS2-1 type Oil

The cooling state of the key way is reproduced

旭川工業高等専門学校

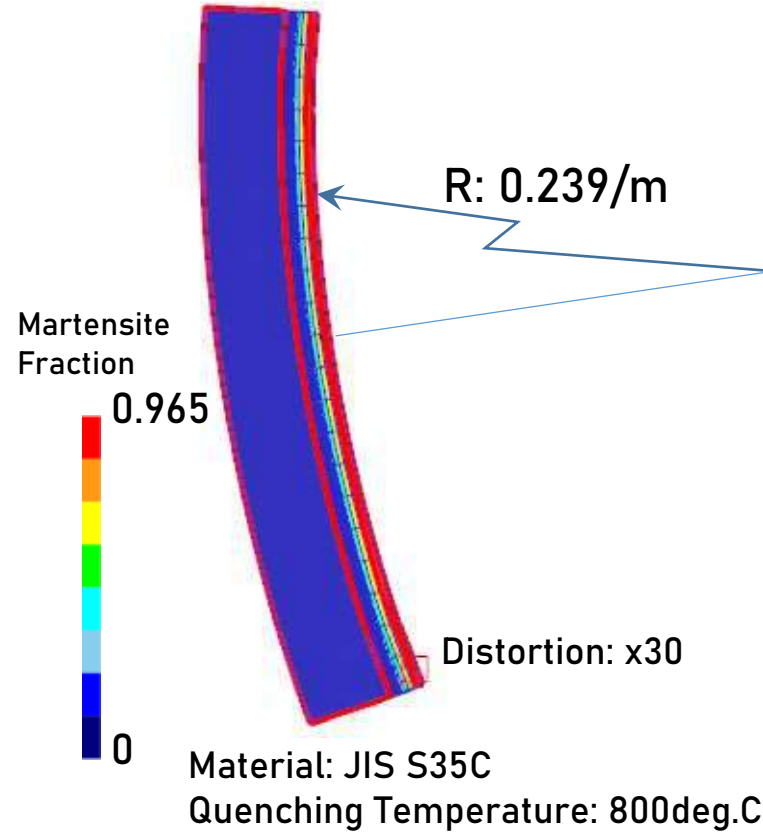
旭川工業高等専門学校

# Correlation – Bar shape with Keyway–



## Experiment

SHODENSHA Speed Viewer  
500fps, full aperture, normally open



## Simulation

(Cellular Automaton + DEFORM-HT)

Bending direction is different between experiment and simulation.

Remained vapor film occur very slow cooling in keyway.



Reproduce method for Vapor film pools is required







# Conclusion

- ✓ By using a cellular automaton simulation, we are able to reproduce the vapor film collapse, cooling, and heat transfer coefficient in real time speed
- ✓ With this method, characteristics of oil and each cooling curve is be able to reproduce .
- ✓ With this method, shape factors such as edges and corner R can be incorporated into the calculation.
- ✓ The reproduce method for Vapor film pools is required.

## Acknowledges

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP21K14061 “Quenching simulation including manufacturing variations by the low-dimensional cellular automaton method”





# 熱処理MBDについて

- ・ V&Vによる実用下での実用性の保証が進められている
- ・ V&Vに基づいたMBDの実用化開発が進められている
  - ⇒精度保証・計算コストの削減
  - 他領域への展開（以下，当研究室での研究内容）
    - 真空浸炭・窒化・より簡便なツールの開発
    - 実用環境下での評価
    - （複合応力での寿命評価等への活用）





END

