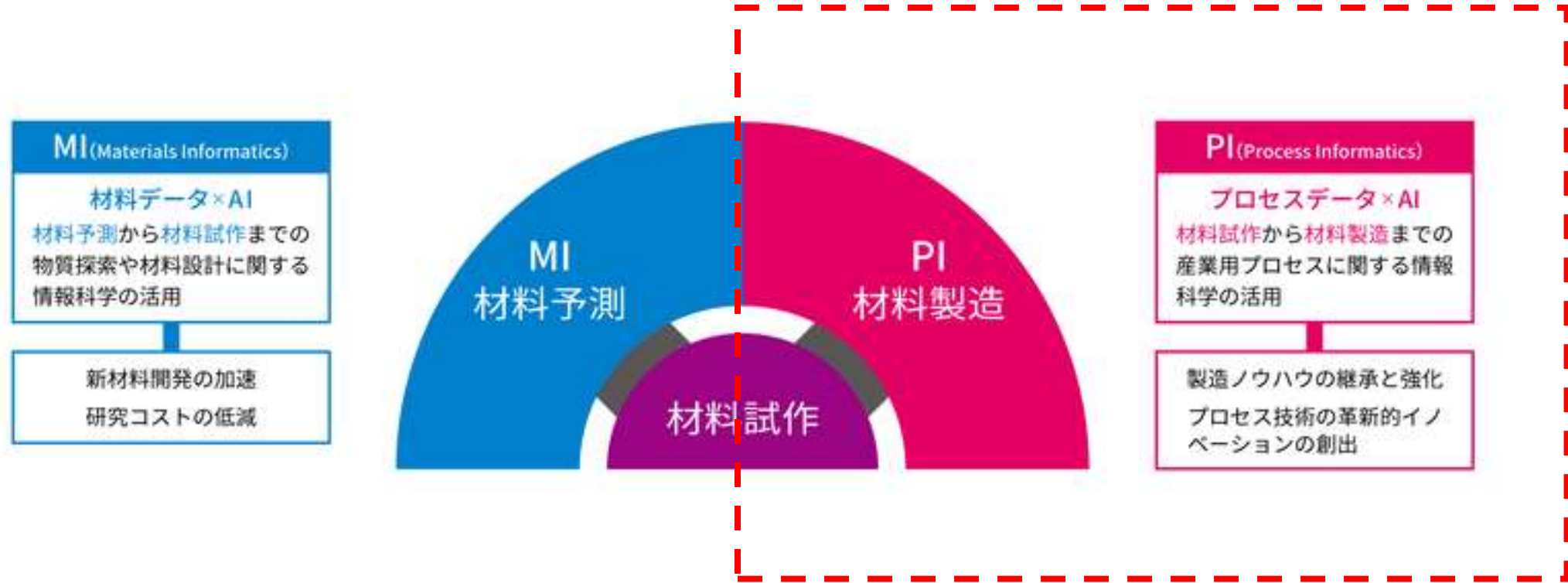


# 材料・熱処理 分野におけるMBD

## ～マテリアルインテグレーション・プロセスインテグレーション～



MIがある程度広がってきて、昨今はプロセス(工法)の取り組みも始まっている

研究機関と企業(プロセス実体)のコラボレーション





# 今日の内容

1. GX・DXとモノづくりのおかれる状況
2. モデルベース開発（MBD）とは
3. 材料・熱処理 分野におけるMBD  
～マテリアルインテグレーション・プロセスインテグレーション～
- 4. なぜシミュレーションは普及しないのか？**
5. 実用的な熱処理シミュレーションのために



# なぜシミュレーションは普及しないのか？

## ChatGPTによる回答

なぜ工程シミュレーションは普及しないのでしょうか？

④ 工程シミュレーションが普及しない理由として、以下のような要因が考えられます。

### 1. コストの高さ

工程シミュレーションを導入するには、高価なソフトウェアや専用のハードウェアが必要になることがあります。また、専門的な知識を持つ人材の採用や育成、あるいは外部のコンサルタントを雇う費用も加わり、導入コストが高くなるのが障壁となっています。

### 2. 専門知識の不足

シミュレーションには、モデリング、データ分析、システムダイナミクスの理解が必要です。しかし、これらの知識を持つ人材は限られており、導入や運用のハードルが高くなる場合があります。

### 3. 導入後のメリットが分かりにくい

シミュレーションは、長期的な視点で見るとコスト削減や効率化に役立つものですが、その効果を短期間で実感するのが難しい場合があります。そのため、経営層が導入に対して慎重になることがあります。

### 4. 現場とのギャップ

現場で使われているデータやプロセスが十分に整備されていない場合、シミュレーションモデルの構築に時間がかかります。また、現場のスタッフがツールの使い方を理解できない、あるいはシミュレーションの結果を信頼しないといった問題もあります。

### 5. 運用の複雑さ

シミュレーションは一度導入すれば終わりではなく、継続的なメンテナンスが必要です。工程や条件が変わるたびにモデルを更新する必要があり、その運用が手間と感じられることがあります。

### 6. 文化的な抵抗感

シミュレーションによる意思決定を受け入れるには、データに基づくアプローチを信頼する文化が必要です。特に経験や直感に基づく意思決定が重視される環境では、デジタルツールに対する抵抗感が強い場合があります。

### 7. 競争的な優位性の認識不足

工程シミュレーションを利用することで競争優位性を得られる可能性があるにもかかわらず、それが経営層に十分認識されていない場合があります。

### 普及のために必要なこと

1. コスト削減策の提示：クラウドベースのサービスや中小企業向けの低価格プランの提供。
2. 教育とトレーニング：ユーザーが使いやすいツールやトレーニングプログラムの充実。
3. 成功事例の共有：シミュレーション導入による具体的な成果を業界で共有。
4. 現場との連携：現場の意見を取り入れたシミュレーションモデルの設計と活用。

工程シミュレーションは、製造業やサービス業の効率化に大きな可能性を秘していますが、これらの課題を克服することで、より多くの企業で普及が進むと考えられます。



# なぜシミュレーションは普及しないのか？

## ChatGPTによる解決策の提案

### **コスト削減策**の提示：

クラウドベースのサービスや中小企業向けの低価格プランの提供。

### 教育とトレーニング：

ユーザーが使いやすいツールやトレーニングプログラムの充実。

### 成功事例の共有：

シミュレーション導入による具体的な成果を業界で共有。

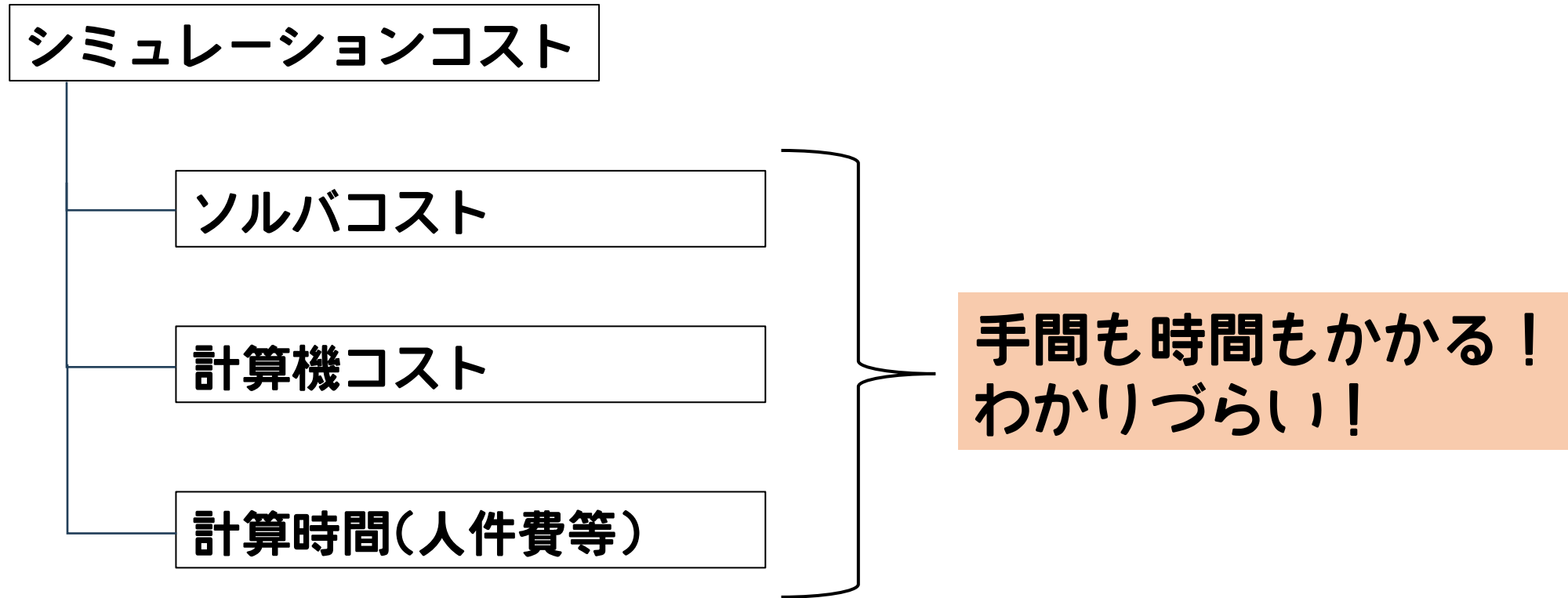
### 現場との連携：

**現場の意見を取り入れたシミュレーションモデル**の設計と活用。





# なぜシミュレーションは普及しないのか？



# なぜシミュレーションは普及しないのか？

**現場の意見**

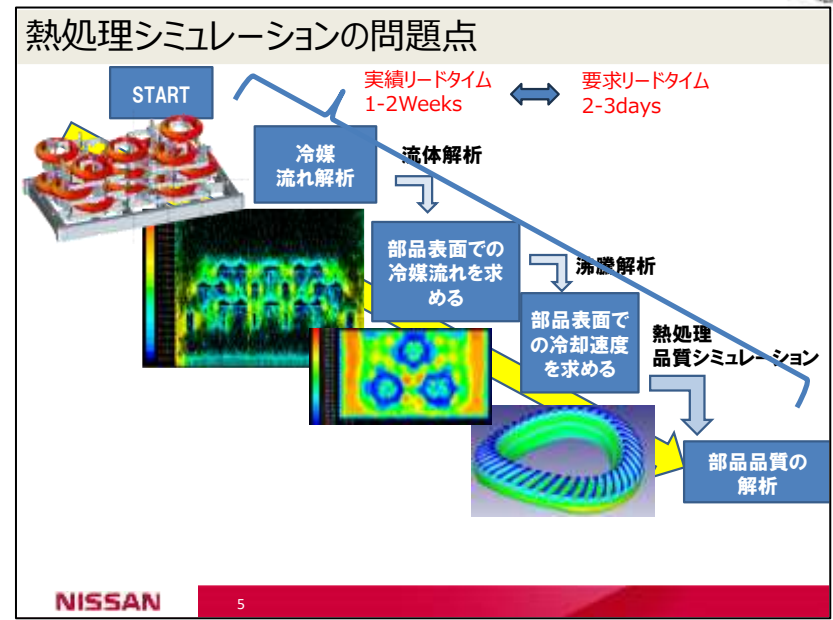
- ・ 実験の方が合うだろう
- ・ 面倒だ
- ・ 現象の理解ができるといい

シミュレーションの確度

複雑な現象をどう理解するか

新しい部品で何が起きているかわかる方策

計算準備



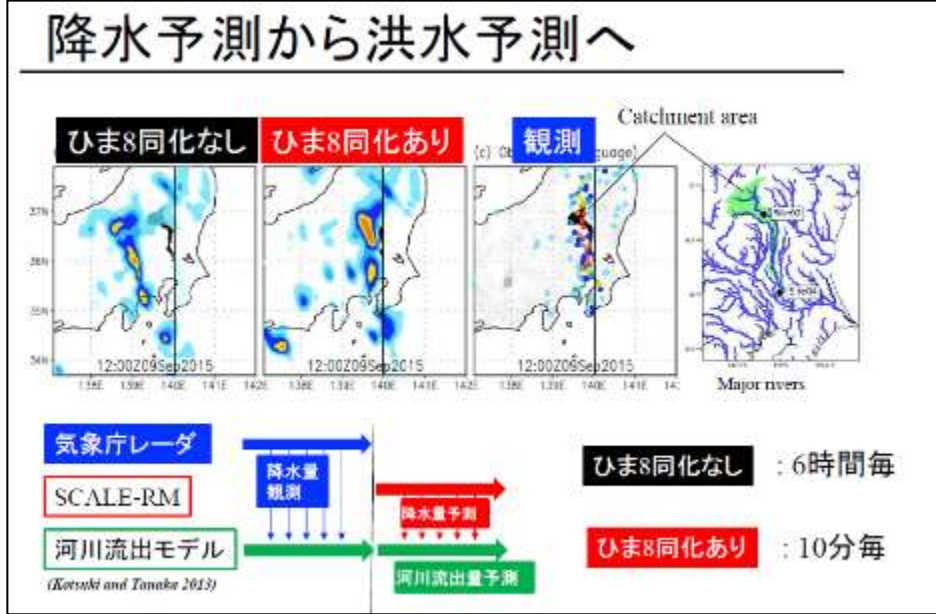
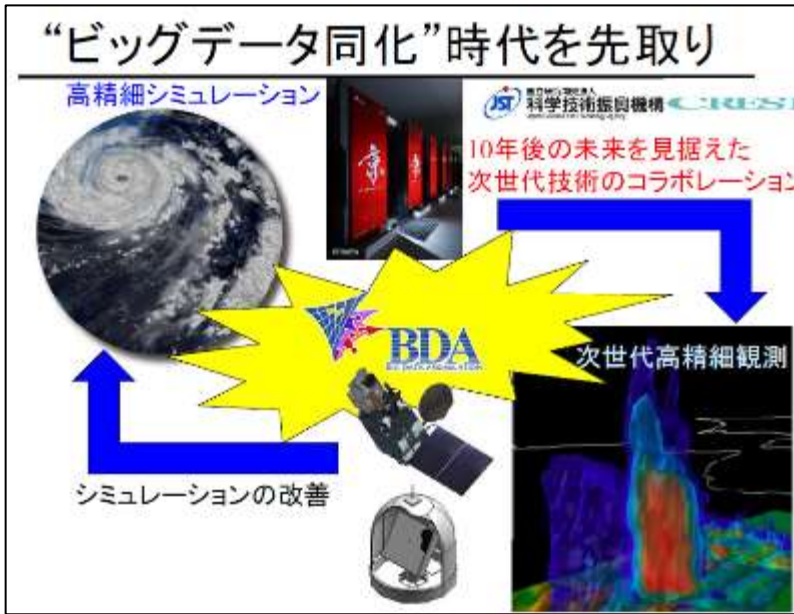
既存スキーム

既存のスキームは問題ないがそれを拡張しこれらに対応する方策を！



# なぜシミュレーションは普及しないのか？

## 気象学での事例



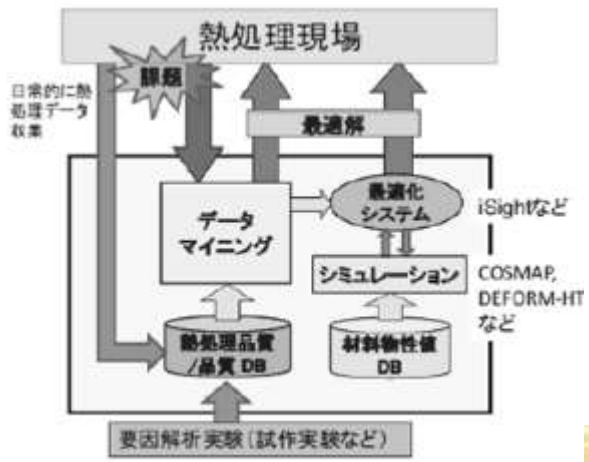
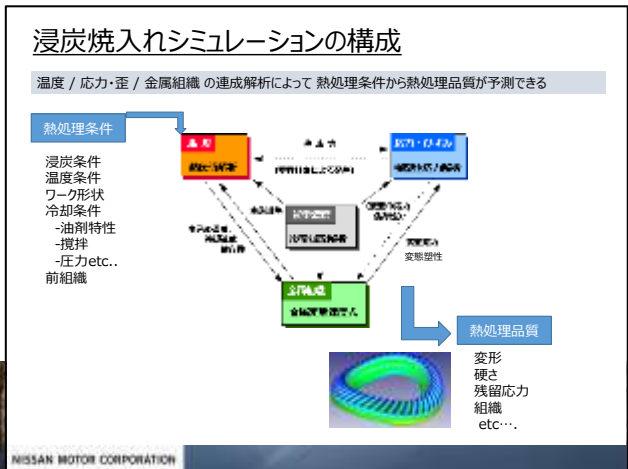
三好建正 : [https://www.jma-net.go.jp/sat/himawari/news/20170722\\_symposiumreport/siryou/kouen4.pdf](https://www.jma-net.go.jp/sat/himawari/news/20170722_symposiumreport/siryou/kouen4.pdf)  
 , 気象衛星ひまわりシンポジウム 講演資料

## 材料プロセスでは???

## 実プロセスのデータの織り込み修正

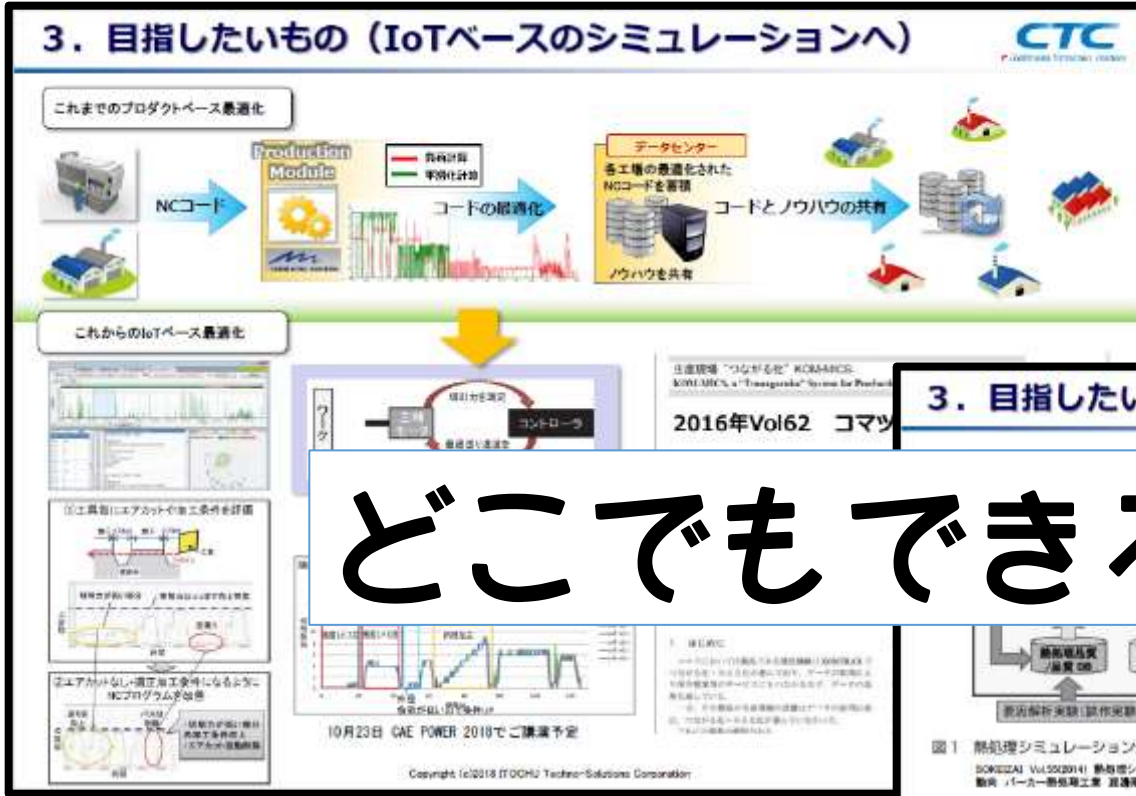


シミュレーション結果を受けての条件改善



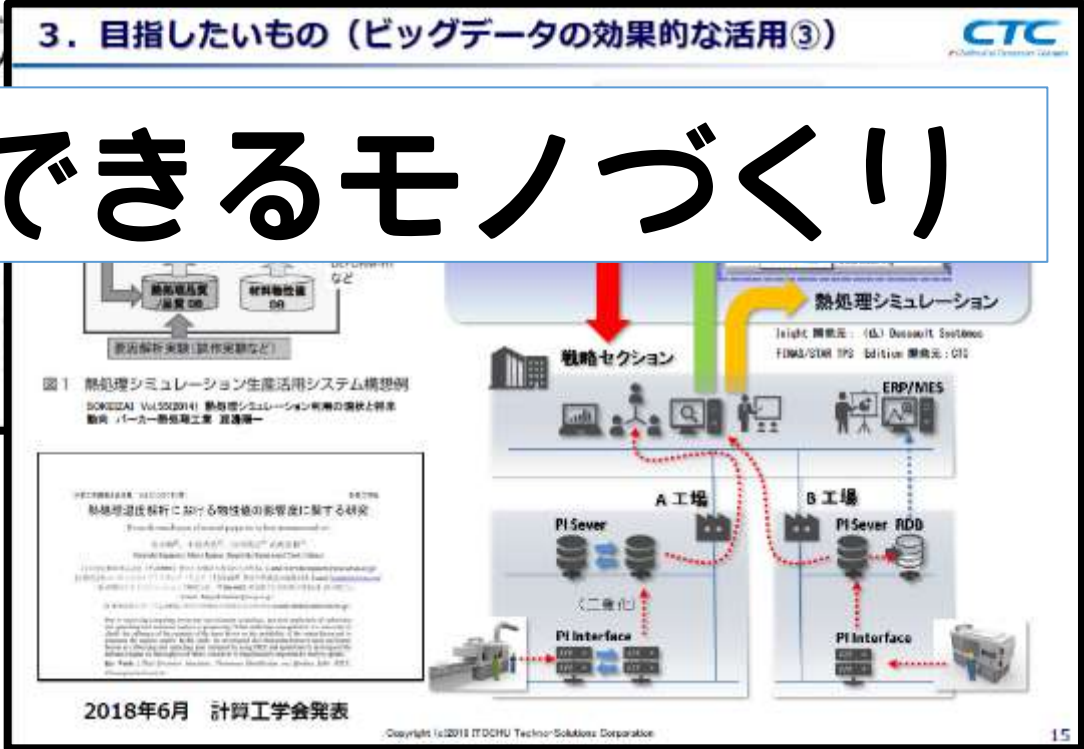
システムの一例

# なぜシミュレーションは普及しないのか？



材料・材料プロセスとデザインをシームレスにつなぐ技術

熱処理での適用案(CTC様ご提供資料)



どこでもできるモノづくり

機械加工での事例 (コマツ技報 2016(2), CTC様ご提供資料)





# なぜシミュレーションは普及しないのか？

---

実体実験を置き換えるわけですから．．．

- ・ 実体実験と同じクオリティの品質保証
- ・ 実体実験レベルの時間・工数での開発

ができないといけない！

手間の削減・データベースの準備

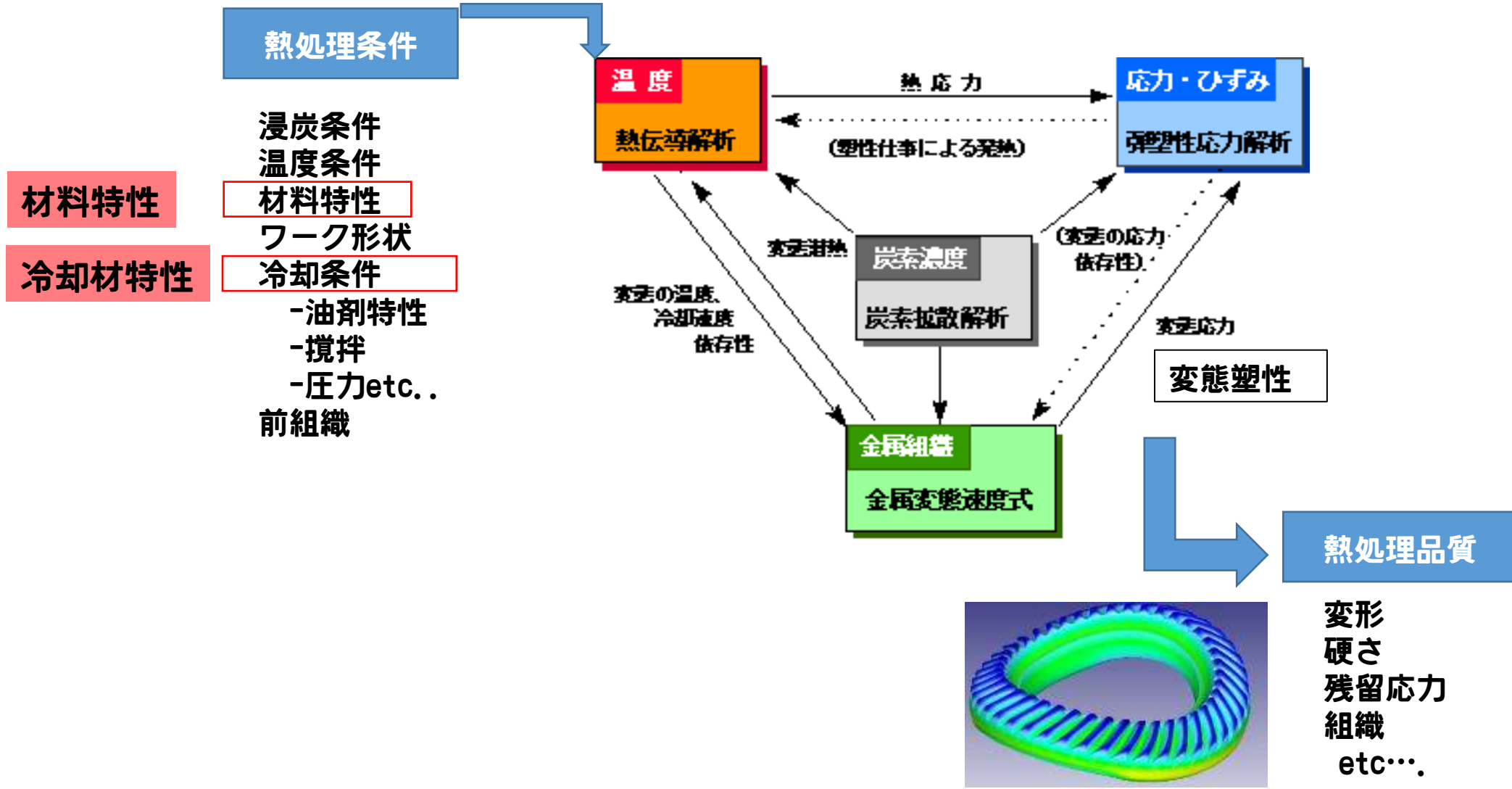




# 今日の内容

1. GX・DXとモノづくりのおかれる状況
2. モデルベース開発（MBD）とは
3. 材料・熱処理 分野におけるMBD  
～マテリアルインテグレーション・プロセスインテグレーション～
4. なぜシミュレーションは普及しないのか？
5. **実用的な熱処理シミュレーションのために**

# 実用的な熱処理シミュレーションのために



# 実用的な熱処理シミュレーションのために



## 冷却材データベース



一般社団法人  
日本熱処理技術協会  
THE JAPAN SOCIETY FOR HEAT TREATMENT

28th IFHTSE  
Congress

セミナー・講  
習会

講演大  
会

会  
誌

研究部  
会

支部活  
動

国際交  
流

書籍購  
入

J-  
STAGE

関連団体  
HP

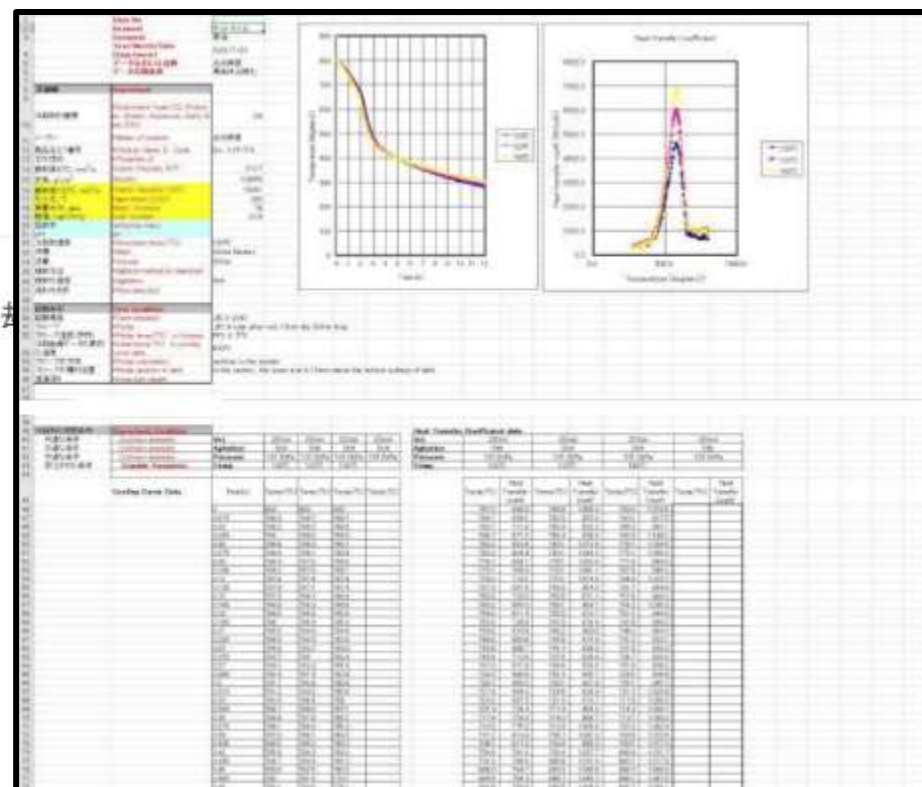
フロントページ > 研究部会

### 活動成果公開

2016年から2018年まで活動してきた熱処理シミュレーション実用化研究部会にて、シミュレーションに必要な冷却材データベースを構築してまいりました。利用規約を守ってご利用ください。  
パスワードは協会事務所にお問い合わせください。

・[一般公開データ](#)

・[研究会メンバー限定データ](#)



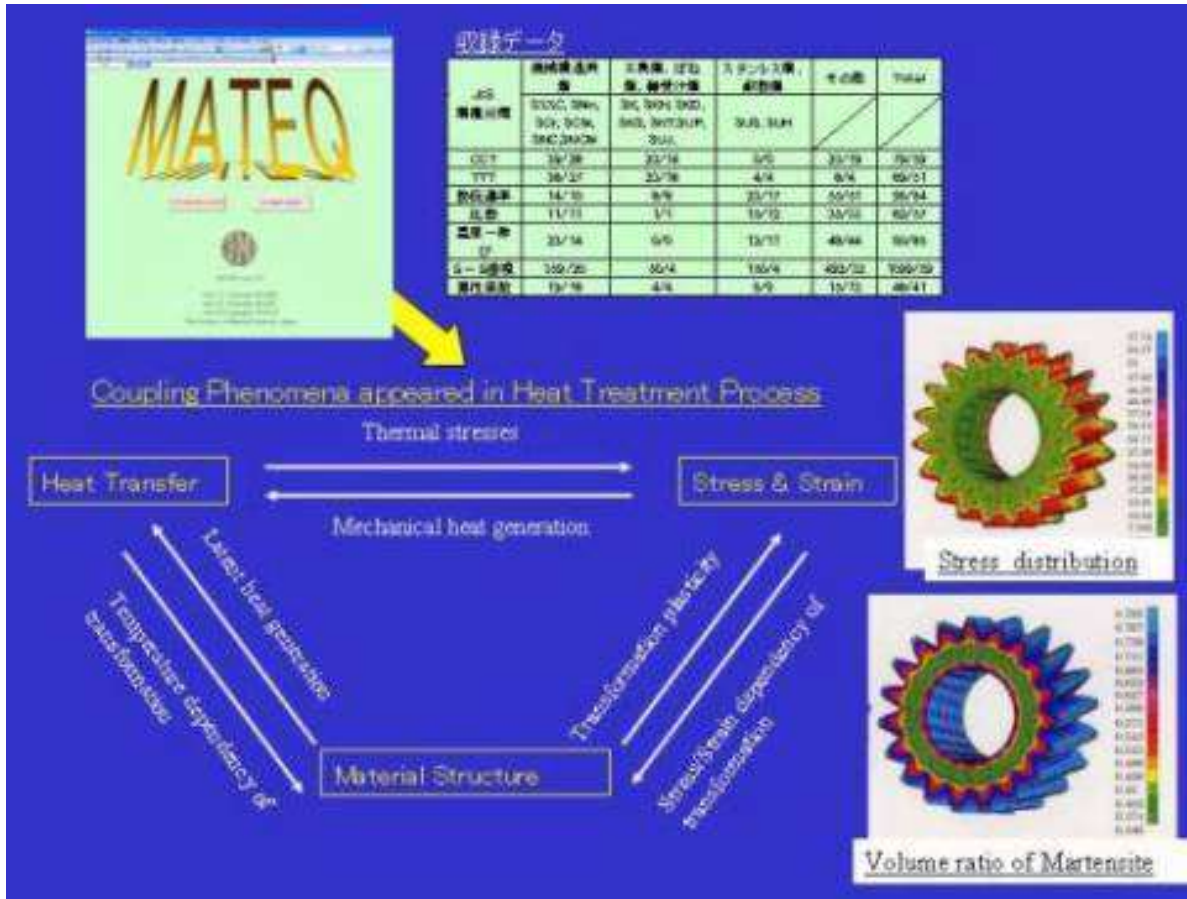
データベースの一例



# 実用的な熱処理シミュレーションのために

## 材料データベース

MATEQ(材料学会 材料データベース研究部会)



## JMatPro



# 実用的な熱処理シミュレーションのために

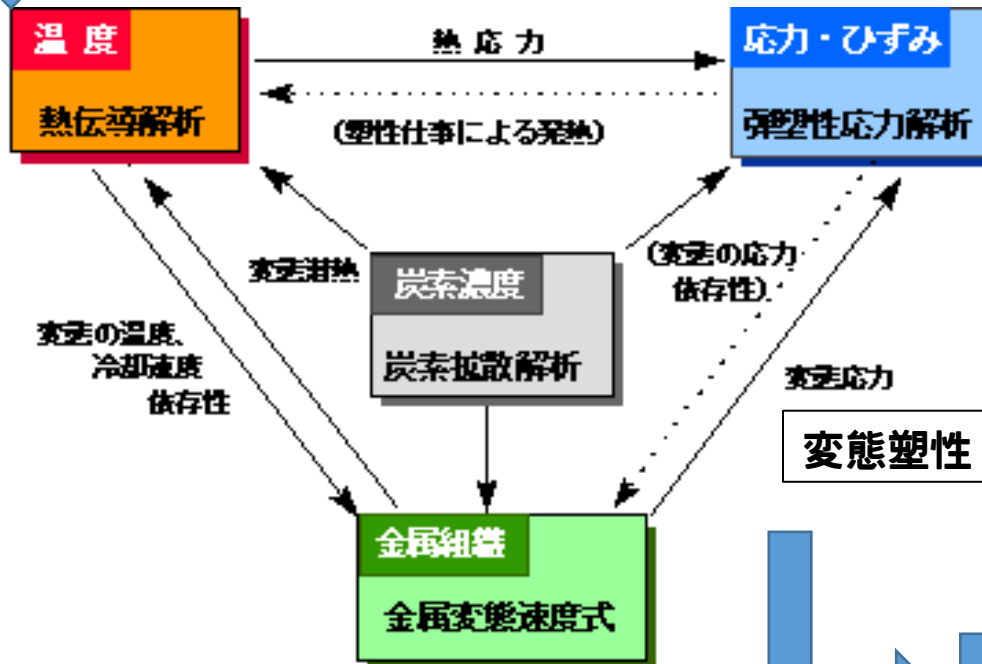


## 熱処理条件

浸炭条件  
温度条件  
材料特性  
ワーク形状  
冷却条件

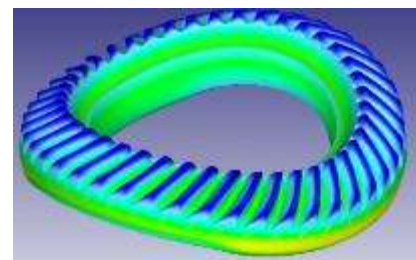
## 冷却材特性

-油剤特性  
-攪拌  
-圧力etc..  
前組織



## 熱処理品質

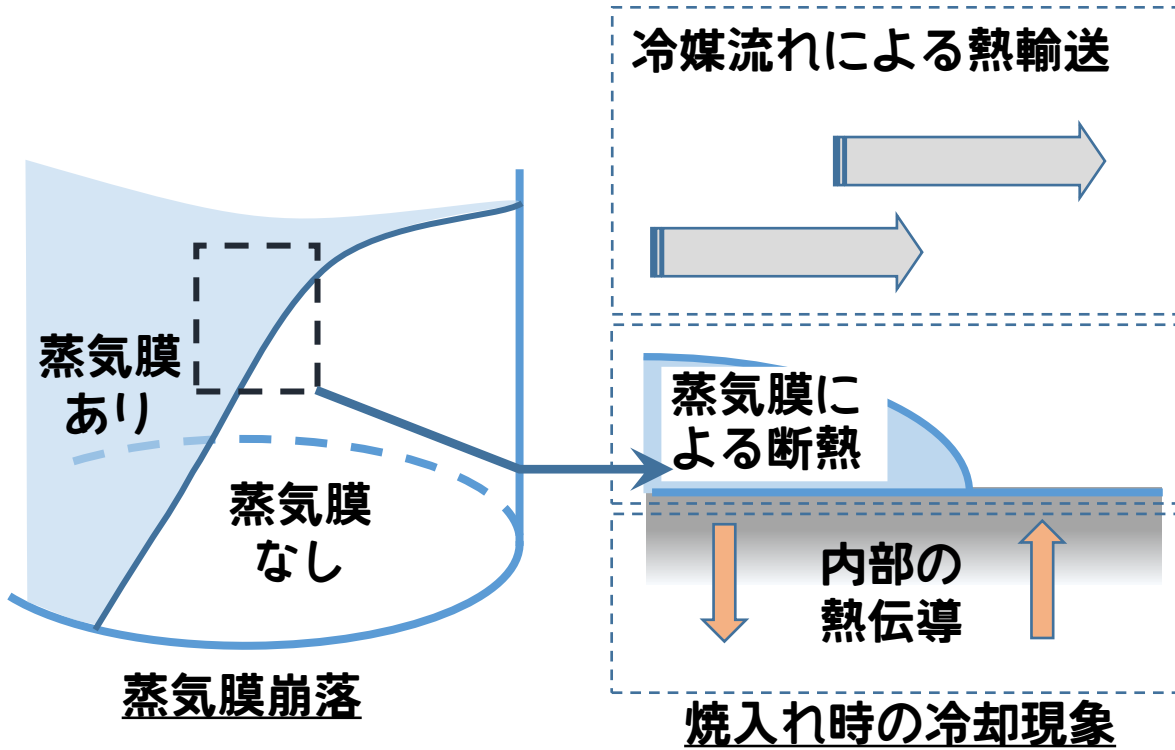
変形  
硬さ  
残留応力  
組織  
etc...



# 実用的な熱処理シミュレーションのために



## 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

蒸気膜による断熱の解析では低負荷(2次元)で特定の冷却状況を予測できる



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

# 実用的な熱処理シミュレーションのために



## 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

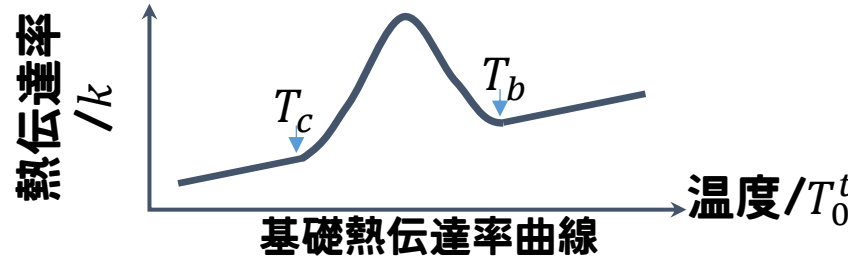
蒸気膜崩落

## サブクール沸騰モデル

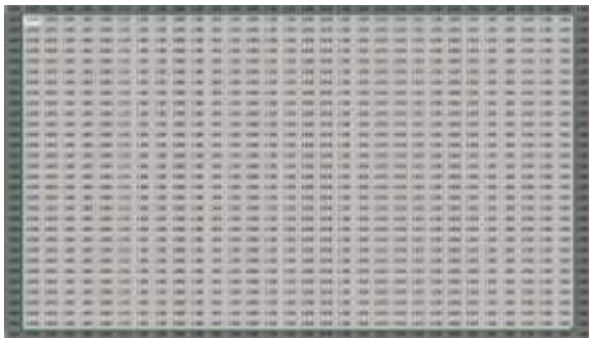
相変態:  $S_0^t = 0$  and  $\sum_i S_i^t \geq b$  and  $T_0^t \leq T_b$  then  $S_0^{t+1} = 1$ ,  $T_0^{t+1} = T_0^t - \alpha$  ..式.(1)

$S_0^t = 1$  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



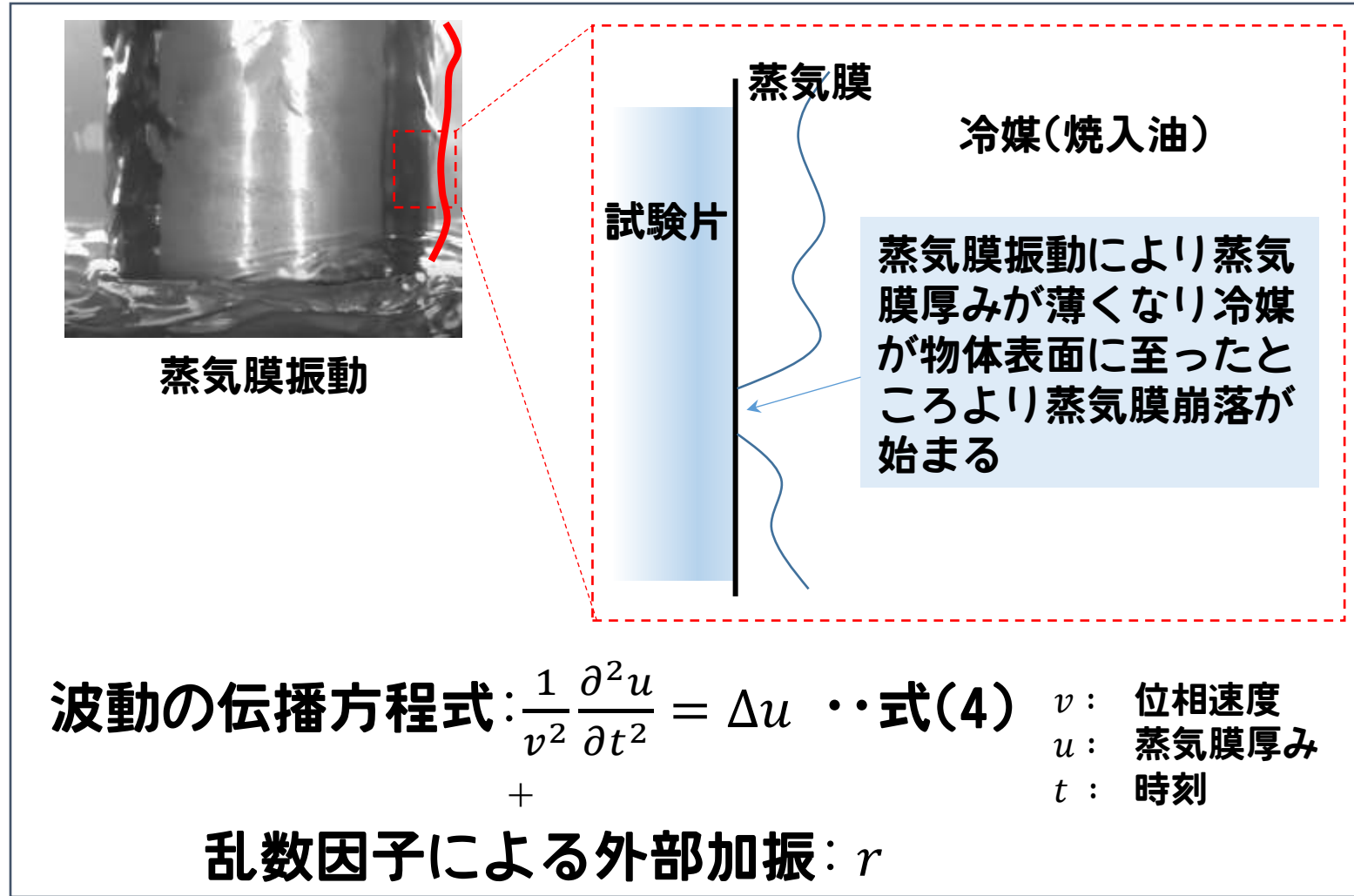
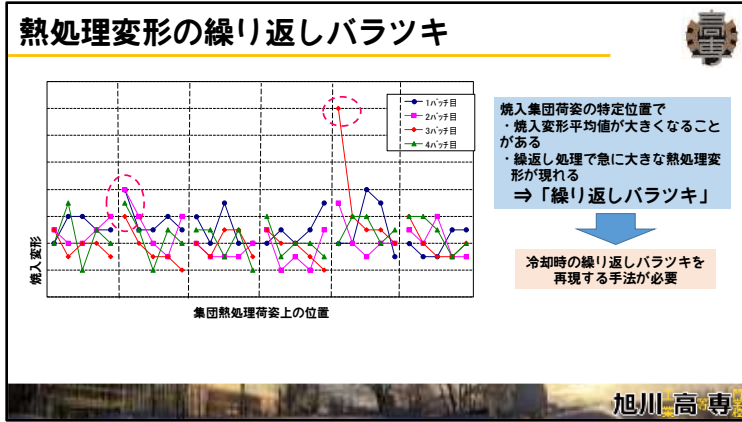
セルオートマトン法による蒸気膜崩落



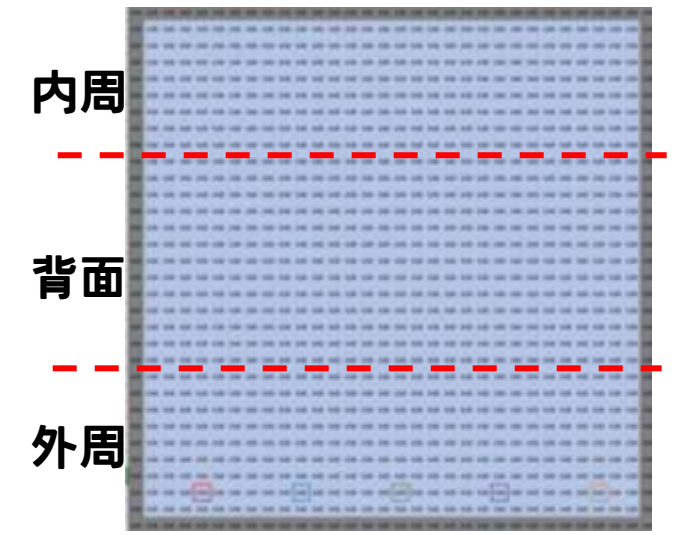
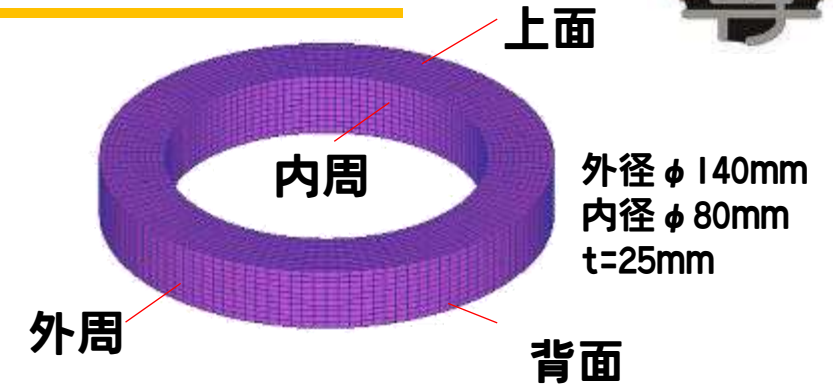
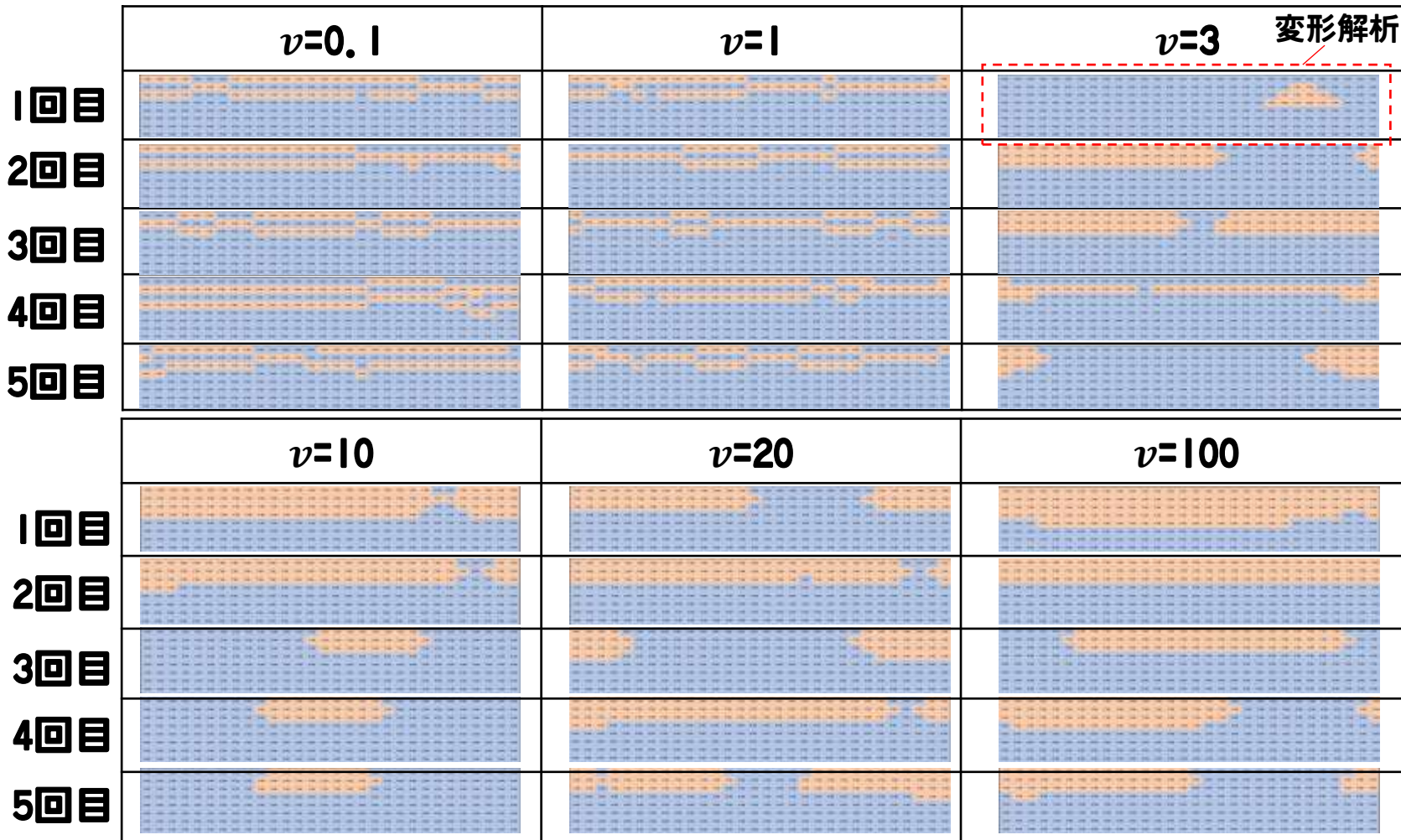
# 実用的な熱処理シミュレーションのために



## 蒸気膜振動による冷却バラツキの発生



# 実用的な熱処理シミュレーションのために



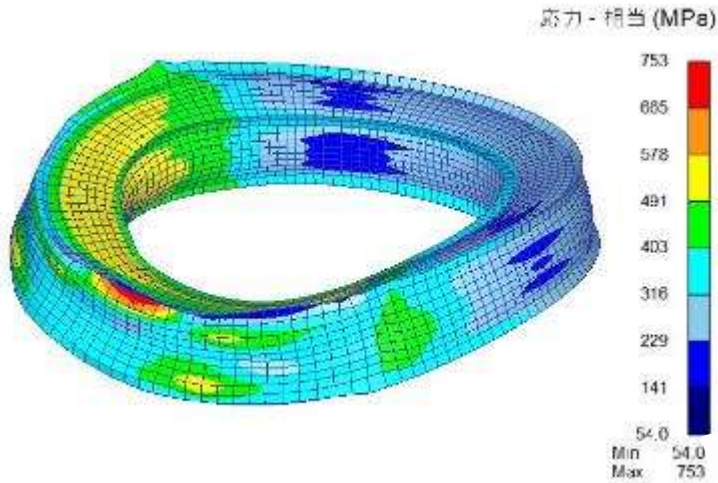
$v=3$ での蒸気膜崩落の様子

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

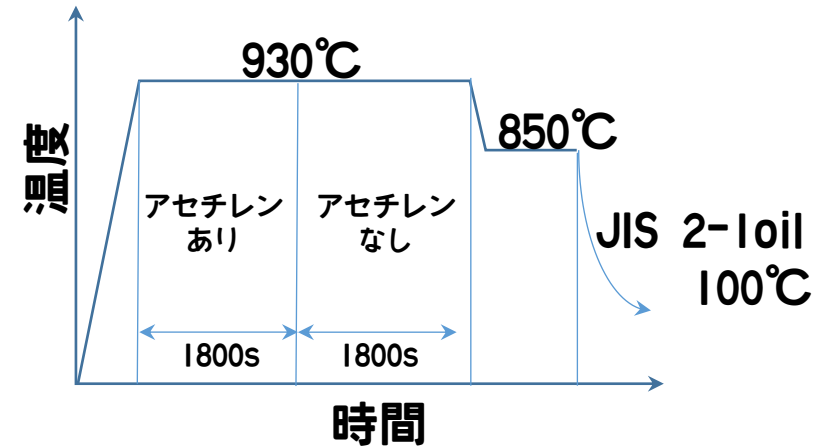
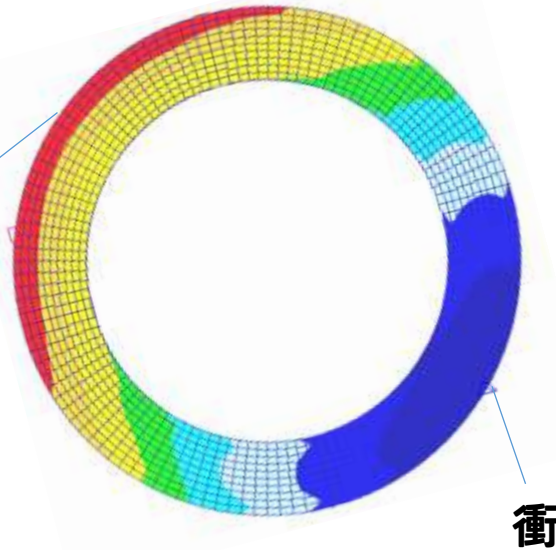
蒸気膜段階 (blue) 沸騰膜段階 (orange)  $v$ を変化させたときの外周での蒸気膜崩落の繰り返し変化



# 実用的な熱処理シミュレーションのために



最大変位0.3mm  
(同条件での実験背面平面度0.3mmがあった)



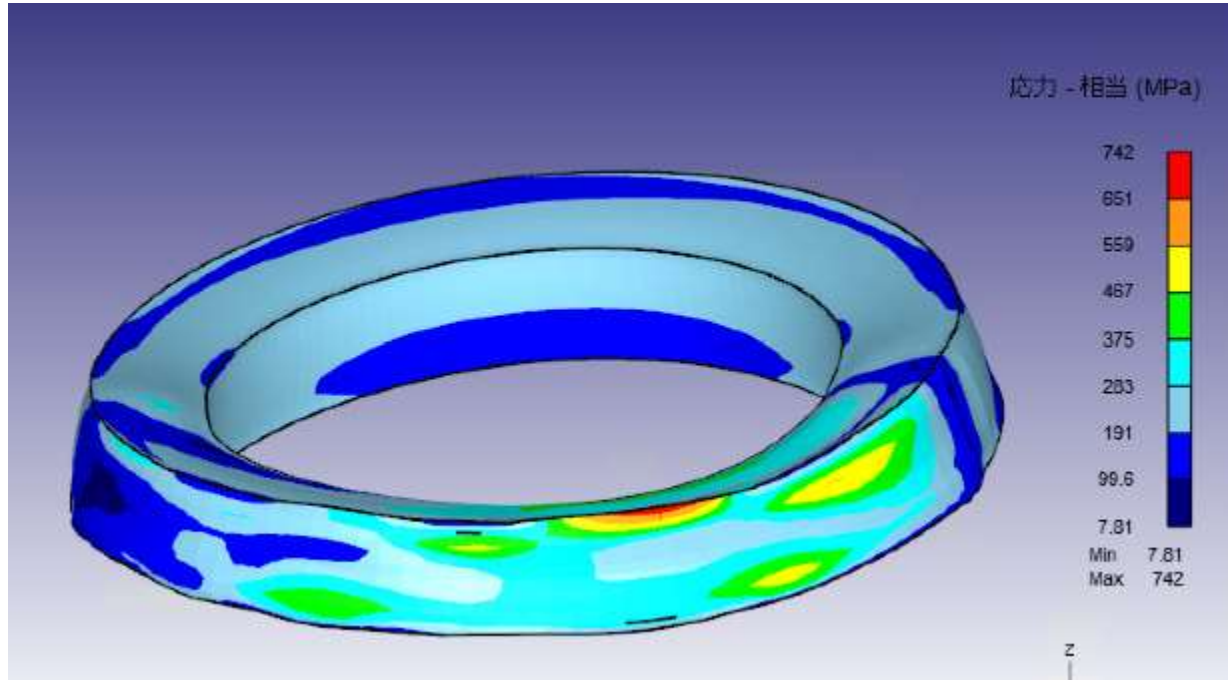
計算した熱処理条件

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
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

# 実用的な熱処理シミュレーションのために



解釈もAIでできないか??

この画像はリングギアを油焼入れ処理した際に発生した熱処理完残留応力と熱処理変形(70倍に表示)を示したものである。どのようにすれば熱処理変形が少なくなるか、また、より詳細な検討をするにはどのような特性を見ればよいか提案してください

# 実用的な熱処理シミュレーションのために



## 熱処理変形を少なくするための対策

熱処理変形の主な要因は、急冷による内部応力の発生と不均一な冷却による組織変化です。以下の方法で変形を抑制できます。

### 1. 冷却速度の最適化

急冷（オイルクエンチ）の代わりにポリマー焼入れやガス焼入れを検討することで、冷却の均一性を向上させる。

オイル焼入れを採用する場合、攪拌の強さを調整し、リングギア全体が均一に冷却されるようにする。

### 2. 焼入れ温度の適正化

焼入れ温度が高すぎるとオーステナイト粒が粗大化し、変形しやすくなるため、適切な温度管理が重要。

### 3. 焼戻しの最適化

焼入れ後に高温焼戻しを実施することで、残留応力を低減させ、変形を抑える。

### 4. 応力除去焼鈍の適用

焼入れ前に\*\*応力除去焼鈍（600～650° C）\*\*を実施し、内部応力を減少させることで変形を抑える。

### 5. 治具を用いた拘束焼入れ

焼入れ中に専用の治具を使用し、リングギアの形状を保持することで変形を低減。

## 詳細な検討のために見るべき特性

より精密な評価を行うために、以下の特性を解析すると良いです。

### 1. 熱処理時の温度分布

FEMシミュレーションでリングギア全体の温度変化を解析し、冷却ムラを可視化。

### 2. 組織変化（マルテンサイト、ベイナイト、フェライトなど）

\*\*硬さ分布（HV測定）\*\*を確認し、熱処理後の組織変化を評価。

### 3. 残留応力分布（X線回折など）

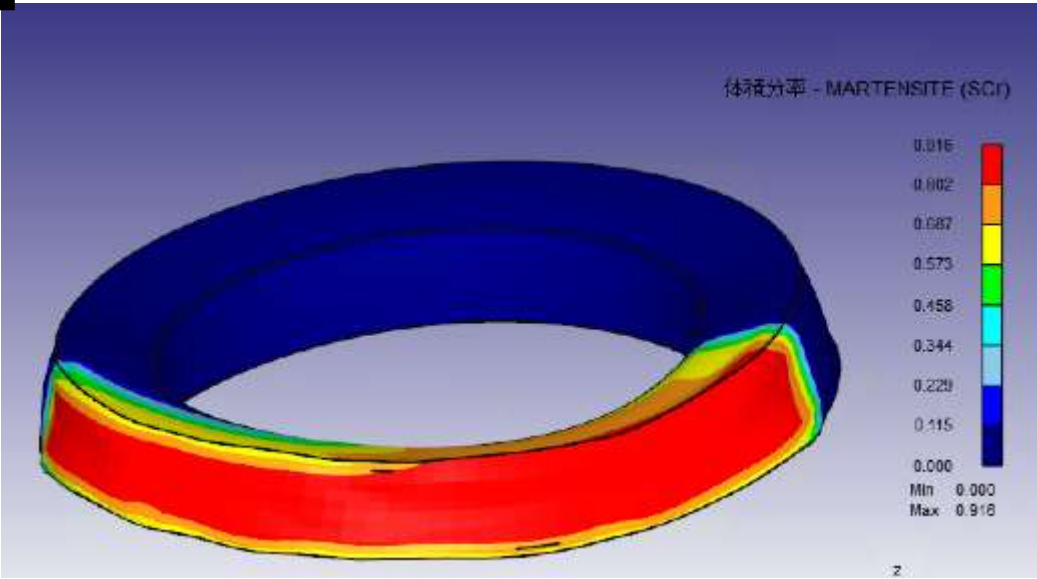
XRD（X線回折法）やホールドリル法を使用し、実際の残留応力を測定。

### 4. 変形量の測定

3Dスキャナーを用いて変形量を定量的に評価し、異常部位を特定。

これらを活用することで、より精度の高い対策が可能になります。

# 実用的な熱処理シミュレーションのために



マルテンサイト分布から言えること

この画像はリングギアの表面におけるマルテンサイトの体積分率を示しています。以下の点が重要です。

1. 表面層のマルテンサイト量が高い

外周部の表面（赤色・オレンジ色の部分）は 90%以上がマルテンサイトで占められている。これは 急冷によるマルテンサイト変態 が強く進行したことを示している。

2. 内部のマルテンサイト量が低い

材料を学んだ直後の高専生のような回答 . . . .  
→ 知識の蓄積でなにか改善するか???

## 改善策

マルテンサイト分布をより均一にし、変形や応力を抑えるためには

1. 焼入れ冷却の均一化

冷却速度を適正化し、内部まで均一に冷却できるよう調整。ポリ

2. 焼戻しによる応力低減

高温焼戻し（例：550° C～650° C）を実施し、マルテンサイトによる内部応力を低減。

3. 事前の熱処理最適化

徐冷焼きならしを事前に行い、組織の均一性を向上させる。焼入れ前の予熱を最適化し、均一な変態を促す。

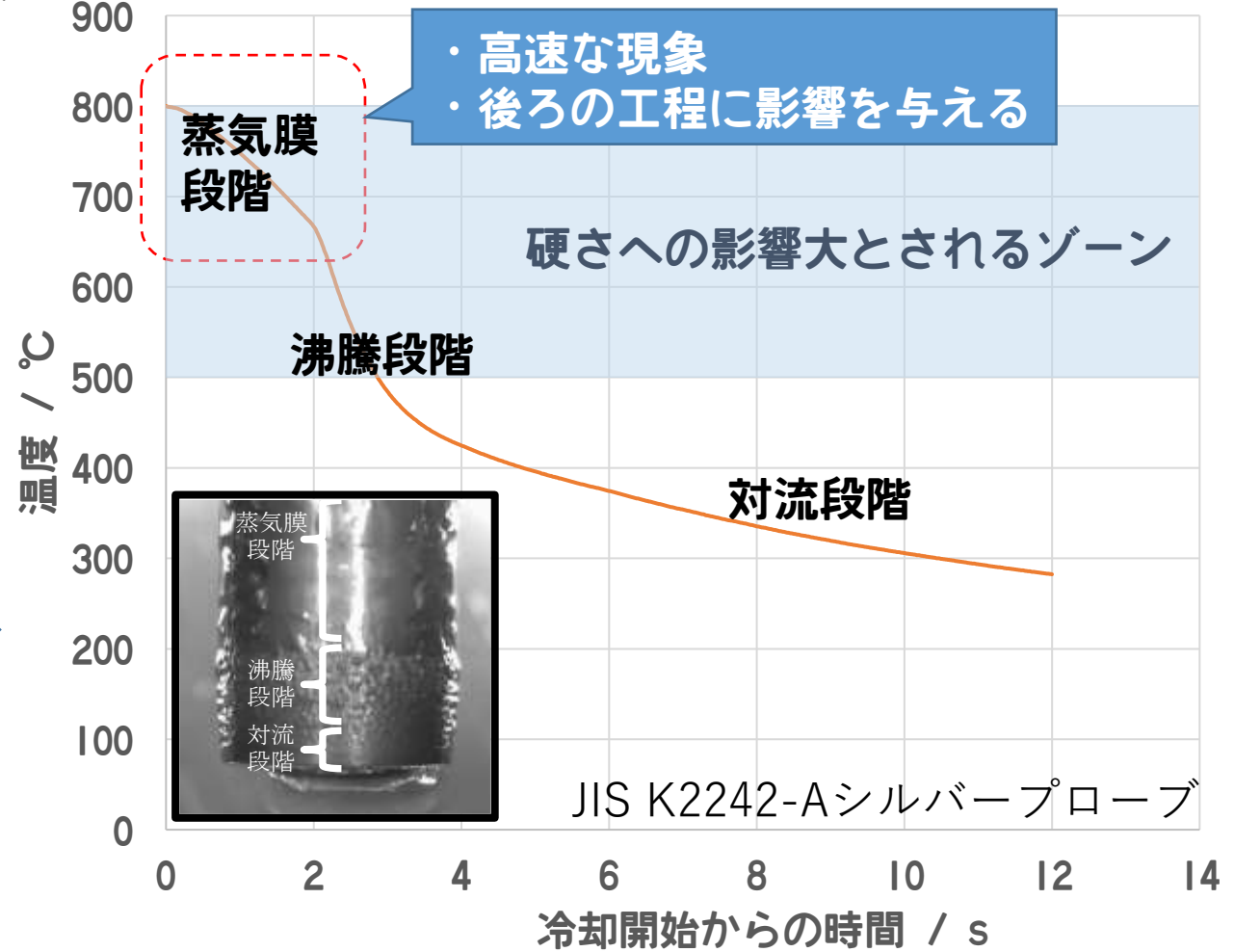
## 結論

このマルテンサイト分布から、表面層と内部の組織差が大きく、変形や残留応力が発生しやすいことが分かります。

冷却条件や焼戻し処理を適正化し、より均一な組織を得ることで、変形や応力を抑える対策が可能です。

# 実用的な熱処理シミュレーションのために

## 両対数式によるシンプルな熱伝達モデル



赤枠の部分について  
精度高く計算をしたい

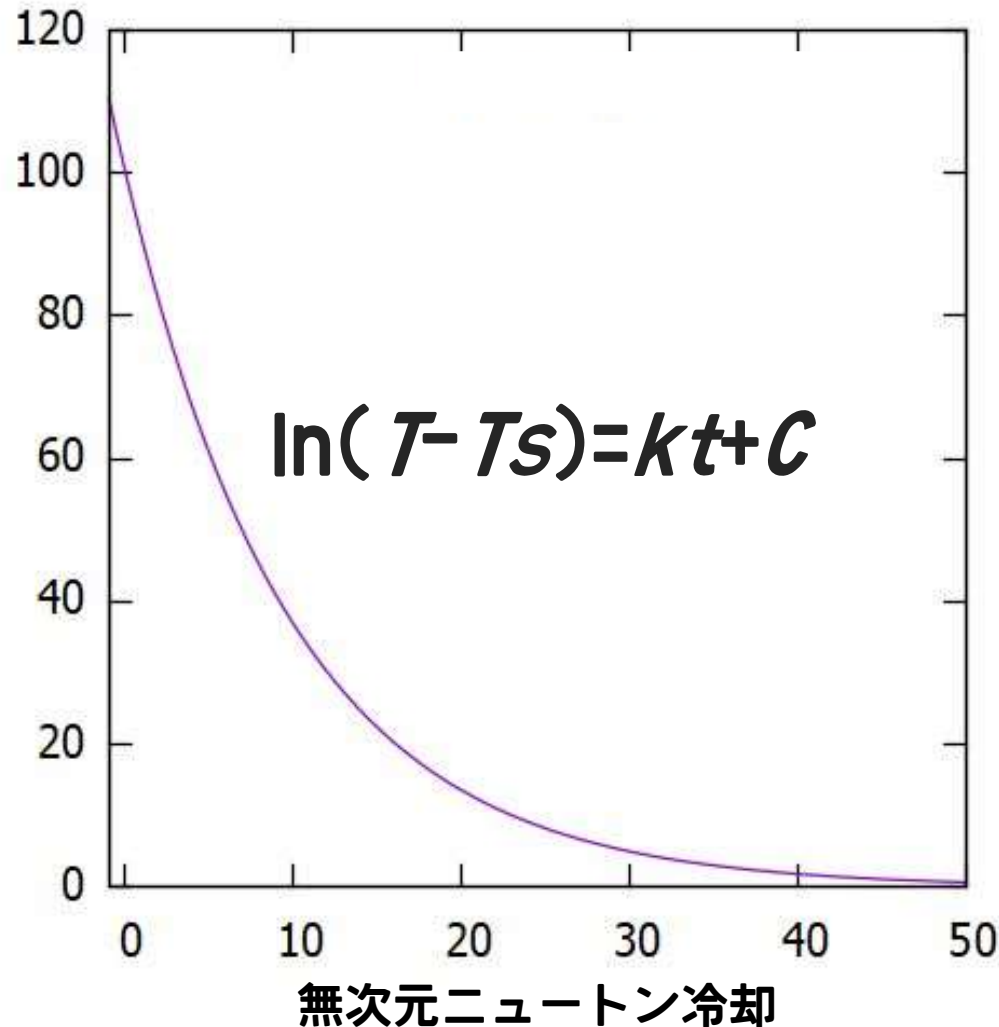
ニュートン冷却分を精度よく解析する必要あり



# 実用的な熱処理シミュレーションのために



## 両対数式による熱伝達計算



ニュートン冷却とは変化しない冷媒で冷やされる場合の冷却で、指数曲線で表現される

パラメータは対数で表現される

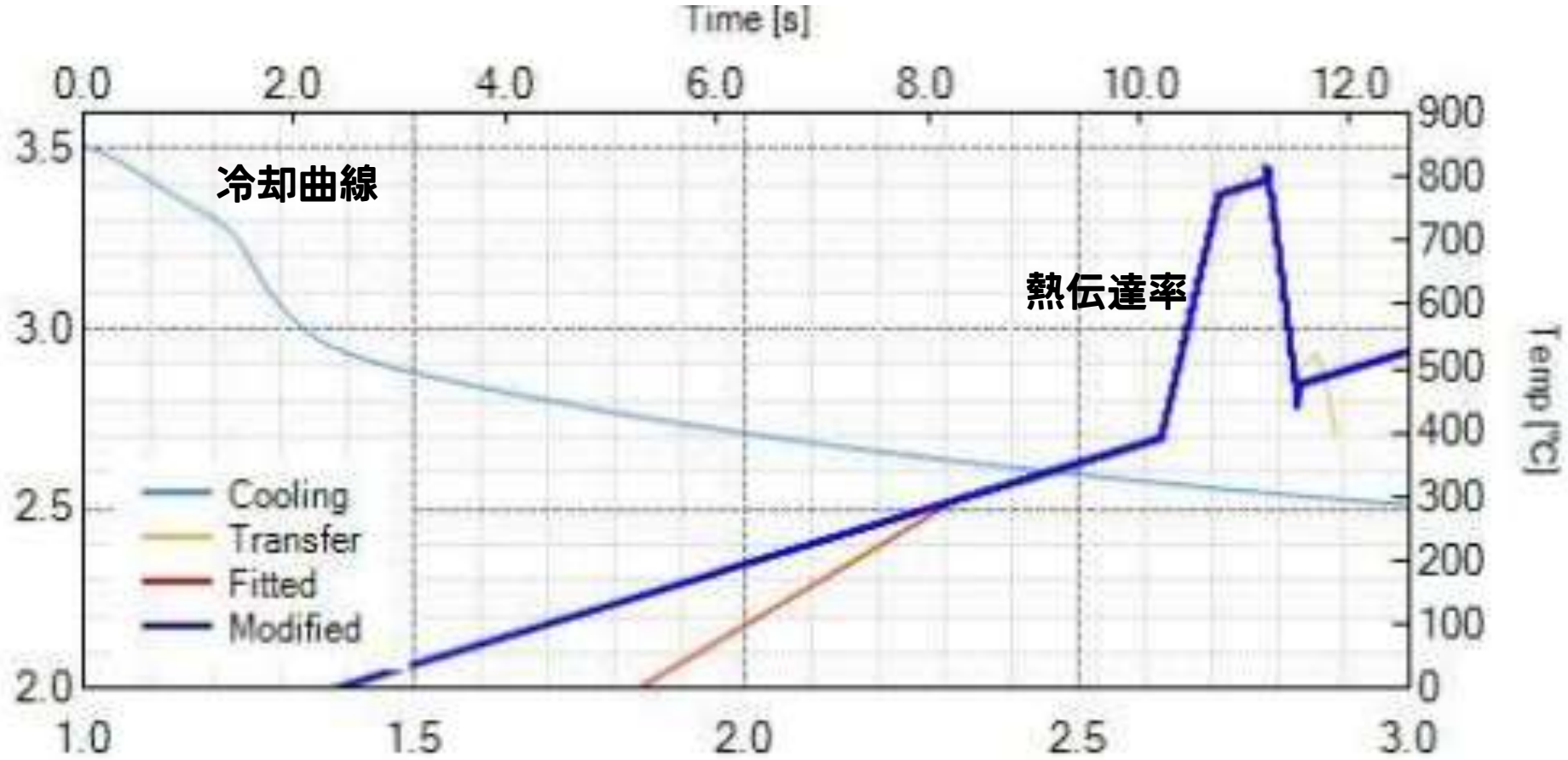


# 実用的な熱処理シミュレーションのために



対数

$\ln H$  [ $\ln W/m^2 \cdot s$ ]



$\ln \Delta T_{sup}$  [ $\ln ^\circ C$ ] —  $\ln(\text{ワーク温度}-\text{冷媒温度})$

冷却曲線を $\ln$ 熱伝達率- $\ln(\text{ワーク温度}-\text{冷媒温度})$ で表現した熱伝達率でフィッティングしたところ、熱伝達率は直線で表現された

直線になったのでパラメトリックに取り扱える

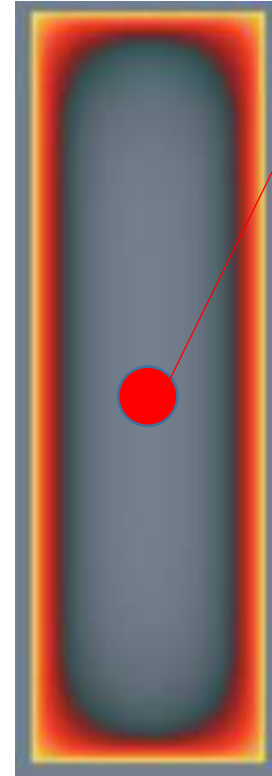
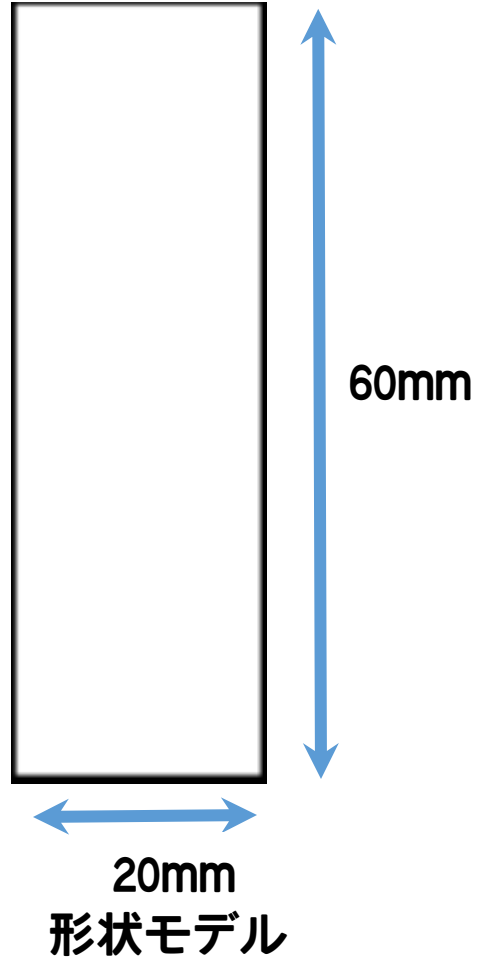
# 実用的な熱処理シミュレーションのために



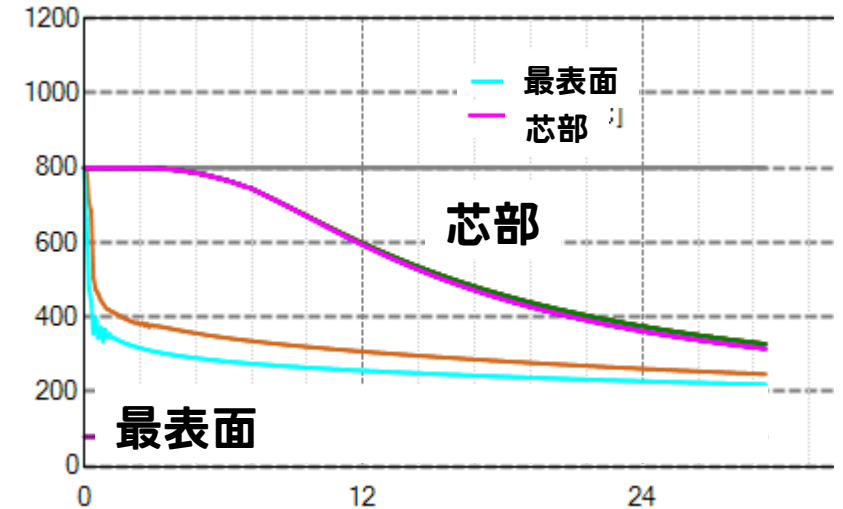
## 検証

焼入温度：850℃  
材質：SCM420H  
冷媒：ハイテンプX

計算時間：3.02s  
メッシュ数：2772要素

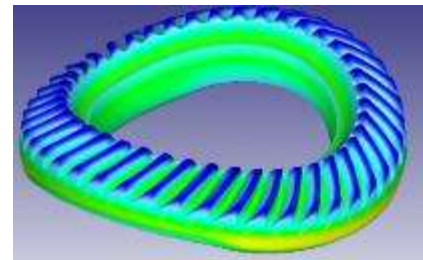
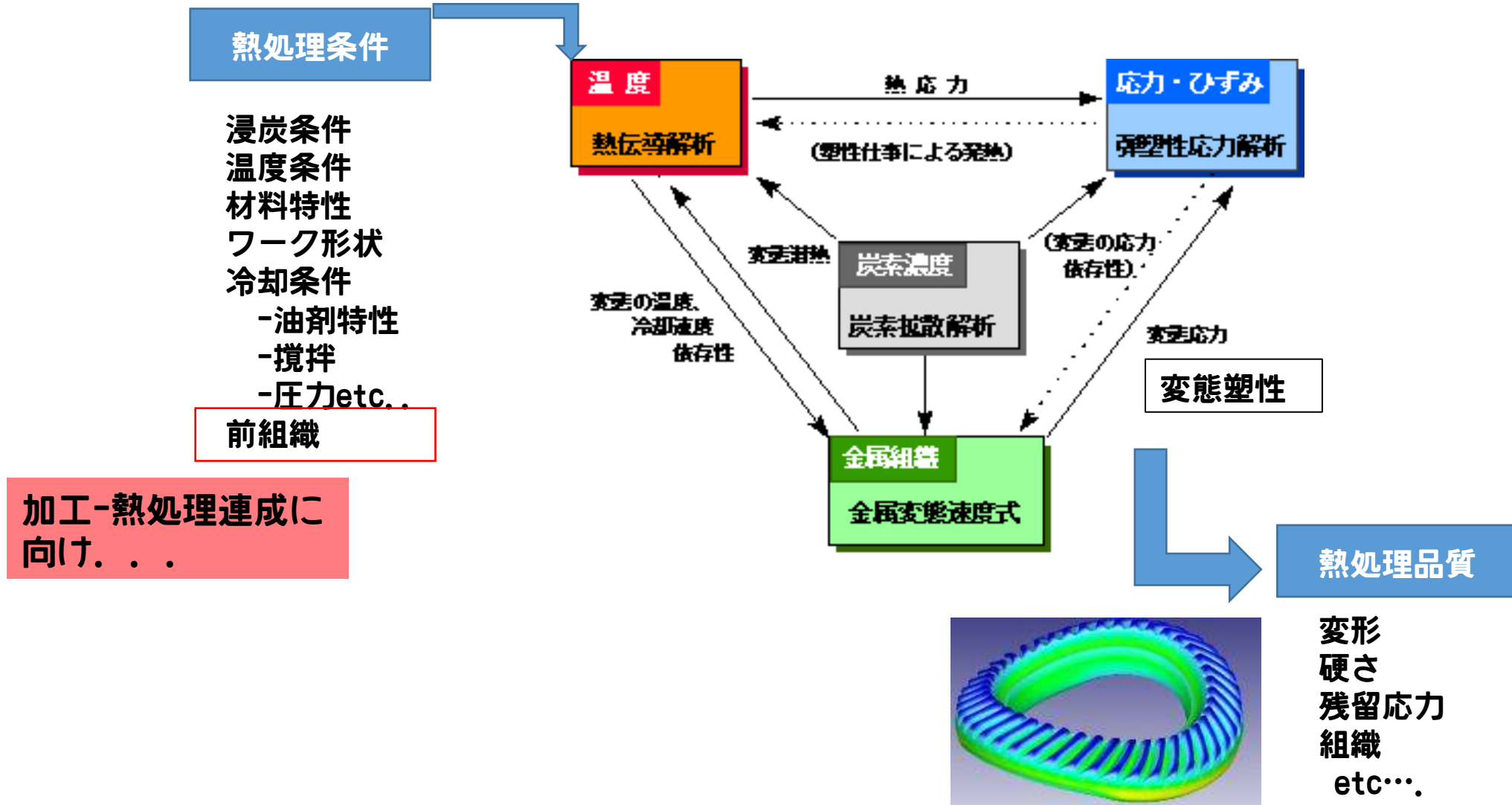


深部硬さ  
計算 312HV  
実験 322HV



実用可能な速度・硬さの予測値が確認できた

# 実用的な熱処理シミュレーションのために



# 実用的な熱処理シミュレーションのために



結晶粒成長がどう起きているのか??



① 圧下



② ねじり



型



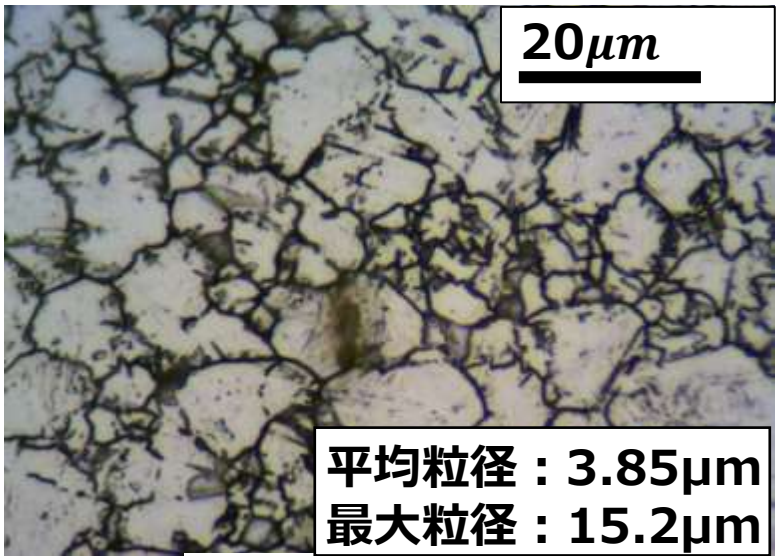
加工前



加工後

本加工で付与される  
ひずみ量： $\sigma = b/a$

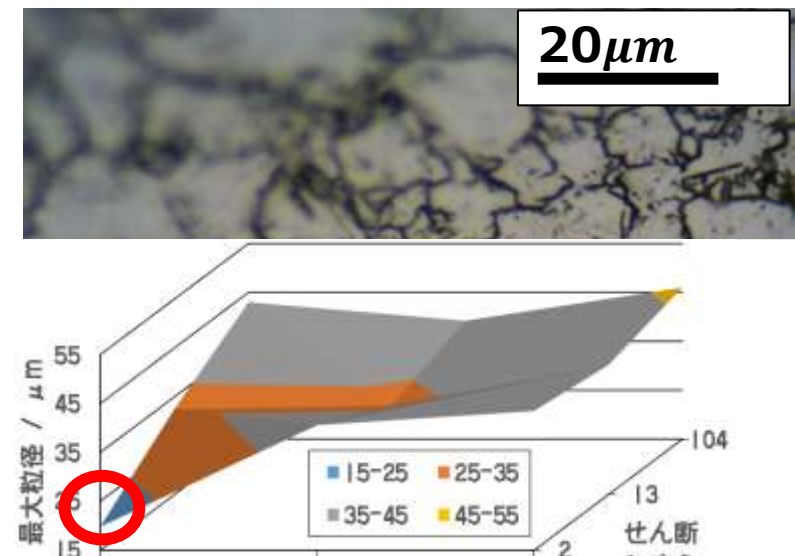
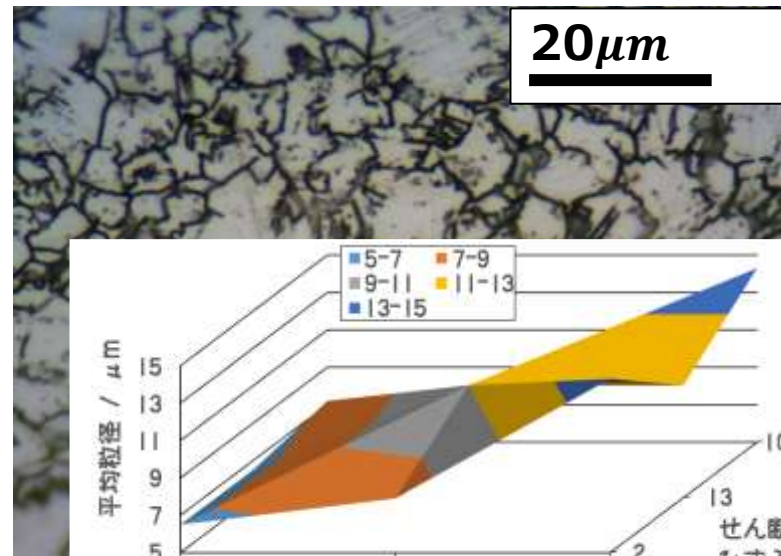
SCr420H,  
HPT加工後, 930°Cx1.5hr →WQ



20µm

平均粒径：3.85µm  
最大粒径：15.2µm

剪断ひずみ0

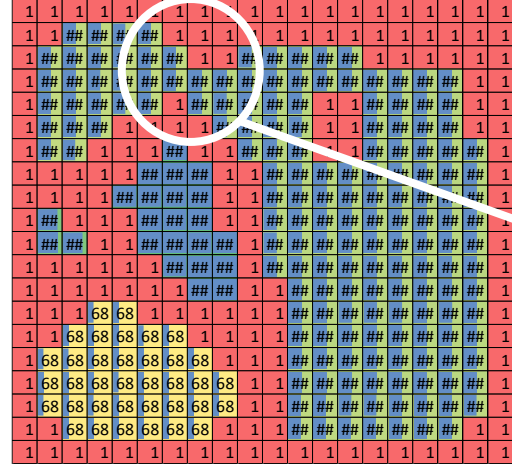
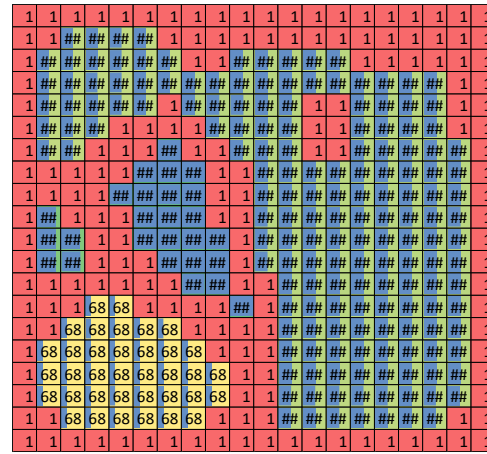
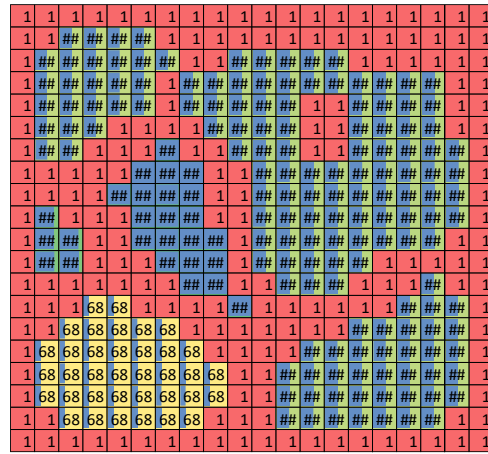


# 実用的な熱処理シミュレーションのために



## 結晶粒成長シミュレーション

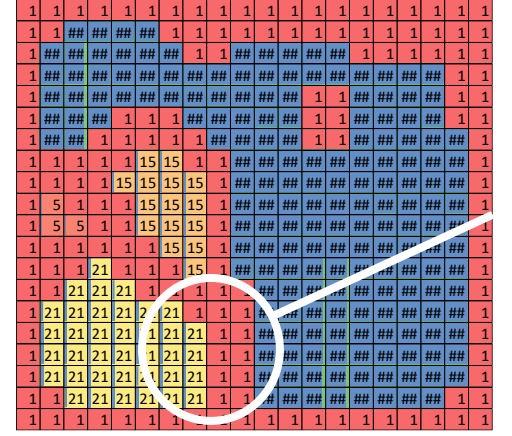
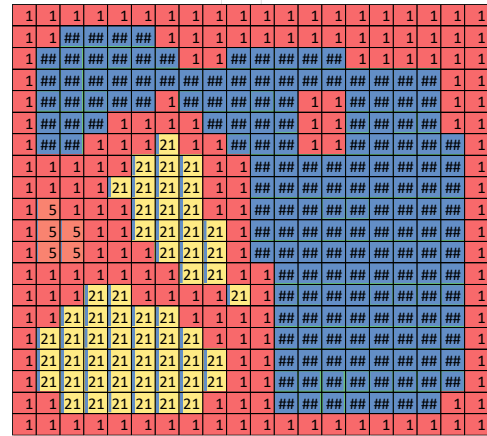
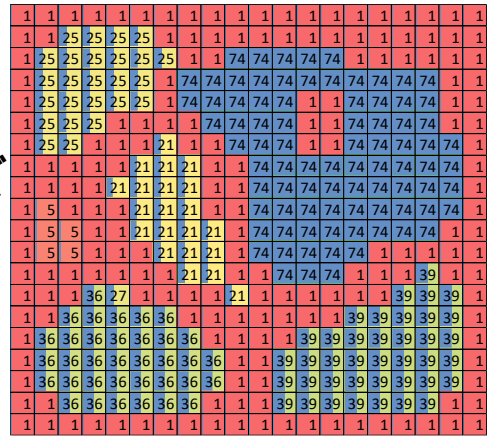
粒方位



粒の融合



粒サイズ



粒の縮小

結晶粒⇒熱伝導率  
etc...を通じて熱処理シミュレーション結果に影響

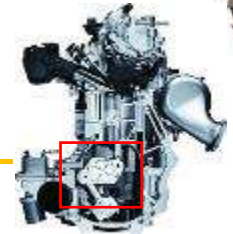
10min 20 μm

30min

46min



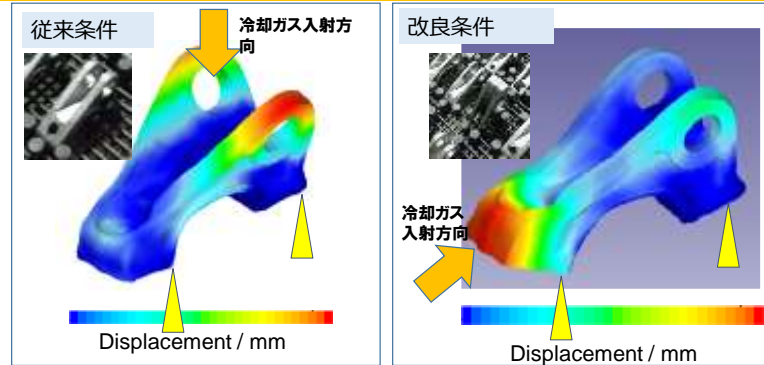
# 実用的な熱処理シミュレーションのために



KR20DDTエンジン

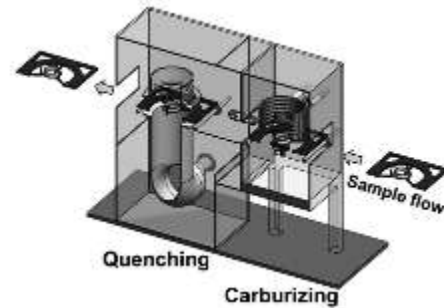
高い曲げ疲労とエンジン部品に要求される高形状精度を両立する為、低ひずみ浸炭技術が必要となった。

## 可変システムで必要とされる材料技術



解析条件	
ソルバ	DEFORM-HT11.0 B
要素数	276,996
節点数	62,355
熱伝達係数	円柱TPでのN <sub>2</sub> ガス実測値を使用

熱処理ひずみシミュレーションにより  
ひずみの少ないプロセス条件を決定した



超小ロット処理による熱処理ひずみバラツキの低減  
(JTEKT Thermo様)



## ガス焼入れ・油焼入れの使い分け

	油焼入れ	ガス焼入れ
小物	○	○
大物	○	×
流れの影がある形状	○	×
ロット内バラツキ	△~○	△
ロット間の繰り返し変動	×	◎

# DX時代のモノづくり



- ・わかる
- ・短納期
- ・確実

なモノづくりが進むのではないのでしょうか？  
どんどん変わるものづくりの世界に熱処理が  
貢献できればと思います。  
本講演がその一助になれば幸いです！



END

