



1. 実施概要

①研究概要

機械部品では、熱処理をはじめとする各種表面硬化処理が施されている。したがって、製品の機能・精度などの性能・強度は表面処理に大きく依存する。これらの処理においては、ほとんどの場合、必然的に材料中に相変態を伴う。

1. 従来の熱処理～油焼入れ  ガス浸炭, 真空浸炭＋油焼き入れ, 浸炭・窒化
2. 表面処理のシミュレーションに必要な各種データ、特に変態塑性特性、熱伝達特性の実験的・理論的集積
3. 飛躍的な高強度化・低摩擦抵抗を有する表面硬化処理に関して、特に相変態随伴プロセスの立場から、高精度(＝低ひずみ)で緻密な表面組織形成を可能とする真空浸炭・熱処理, 浸炭・窒化技術を確立の予備調査.  次期プロジェクト

当プロジェクト関係者のこれまでの経過

IMS-VHTプロジェクト(熱処理プロセスのモニタリングと最適化のための仮想熱処理ツールの構築)、IMS-MSTCアイデアファクトリー

1. 実施概要

① 研究体制

協力学術

井上 達雄
巨 東英
渡邊 陽一
奈良崎道治
上原 拓也

福山大学
埼玉工業大学
仙台高等専門学校
宇都宮大学
山形大学

企業メンバー

岡村 一男
津乗 充良・石毛

住友金属工業(株) 総合技術研究所
健吾

金森 英夫
市谷 克実
堤 一之
大塚貴之

(株)IHI 基盤技術研究所
出光興産(株) 潤滑油部
出光興産(株) 営業研究所
(株)神戸製鋼所機械研究所
新日本製鐵(株)

七野 勇人

環境・プロセス研究開発センター
(株)小松製作所 材料技術センタ

③ 個別実施事項

1. 材料特性

a. 相変態特性

b. 変態塑性特性 実験 理論 その効果

c. そのシミュレーションへの効果

2. 冷却特性

a. 冷却材の熱伝達係数

b. そのシミュレーションへの効果

3. 部品の強度向上とその評価

4. 表面硬化処理(浸炭・窒化) = 予備調査

a. 化学反応のメカニズム

b. 表面からのN, Cの侵入. 拡散と硬さ

c. 残留応力のシミュレーションと中性子線による測定

2. 成果と分担

材料特性～変態塑性

実験 住金(岡村), 神鋼(堤), 福山大(井上),
[東京農工大(長岐)]

理論 福山大(井上), 新日鐵(大塚), 山形大(上原)

冷却の問題

宇都宮大(奈良崎), 出光(市谷, 金森), 住金

シミュレーションと検証

熱処理 埼玉工大(巨), 住金(岡村), 神鋼(堤),
宇都宮大(奈良崎)

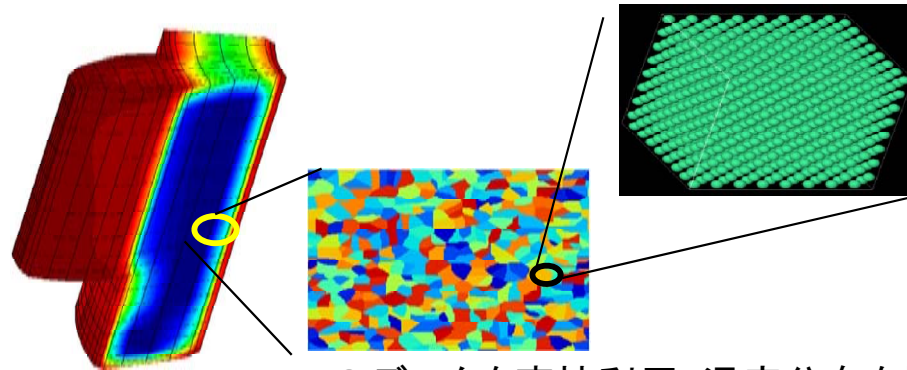
溶接 IHI(津乗)

中性子線応力測定 埼玉工大(巨)

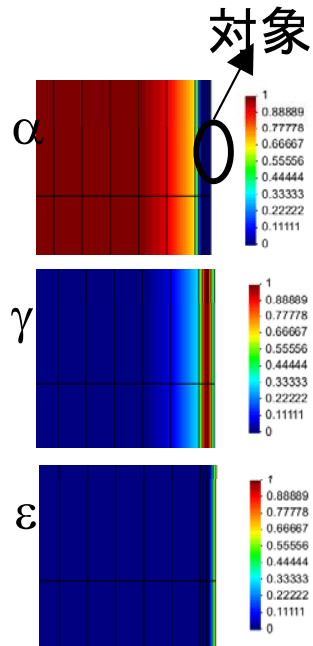
窒化・浸炭 = 予備調査

仙台高専(渡邊), 埼玉工大(巨)

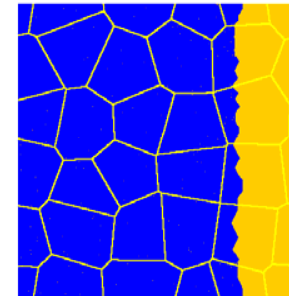
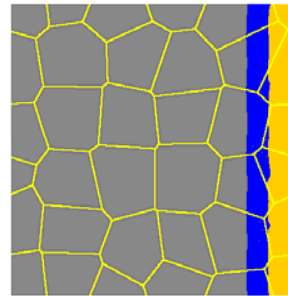
個別研究と4回の会合 住友金属総合技術研究所の見学



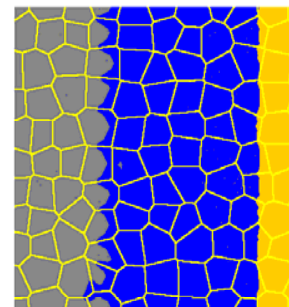
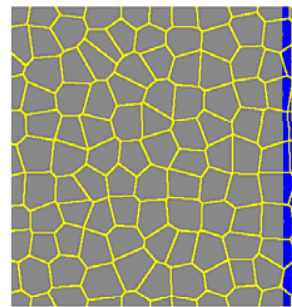
FEMのデータを直接利用 温度分布を補正して入力ファイル作成



FEM



CA解析領域: 50 μm CA解析領域: 50 μm

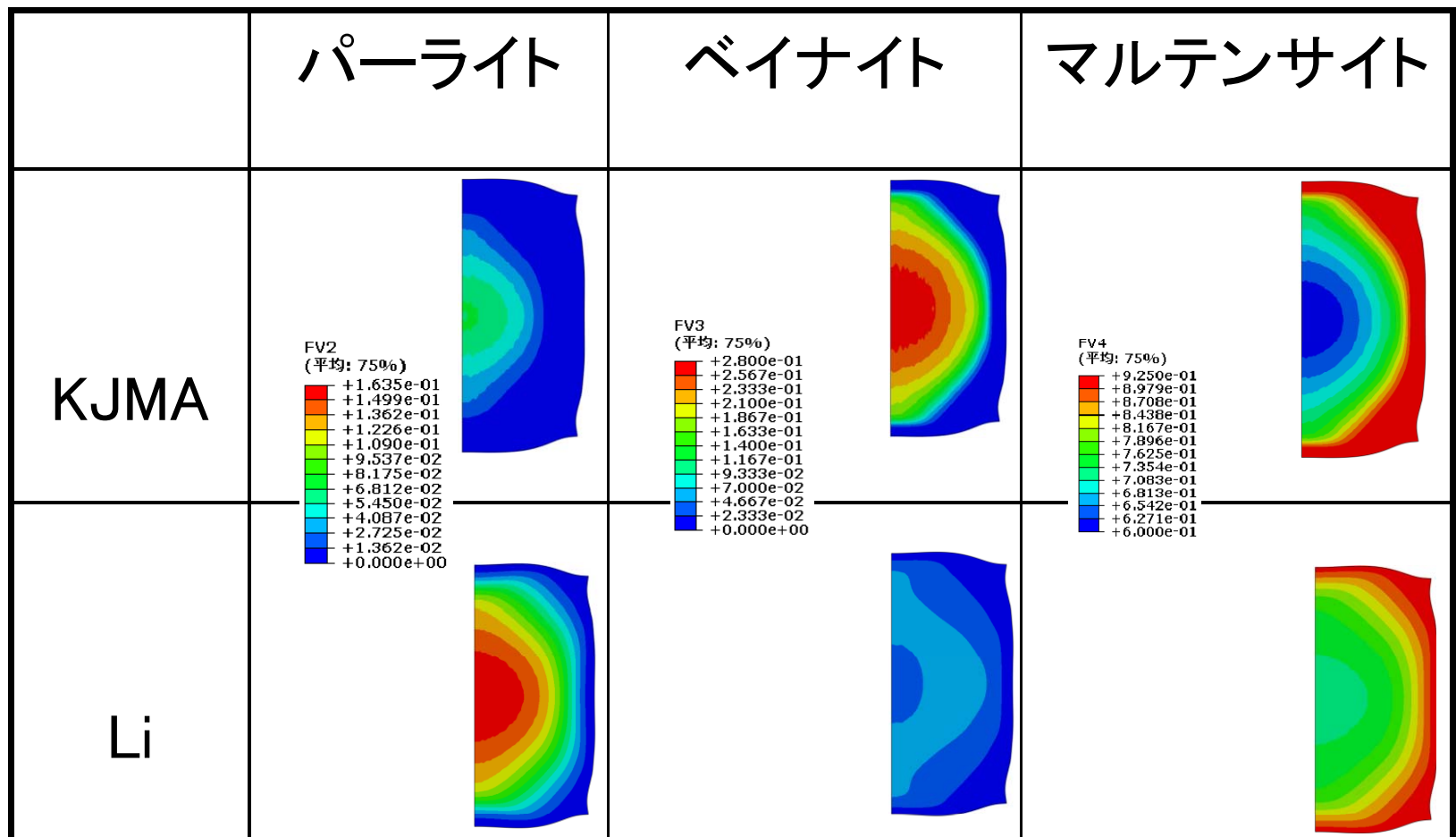


CA解析領域: 100 μm CA解析領域: 100 μm

成果1. 材料特性—変態のカイネティックス 住友金属

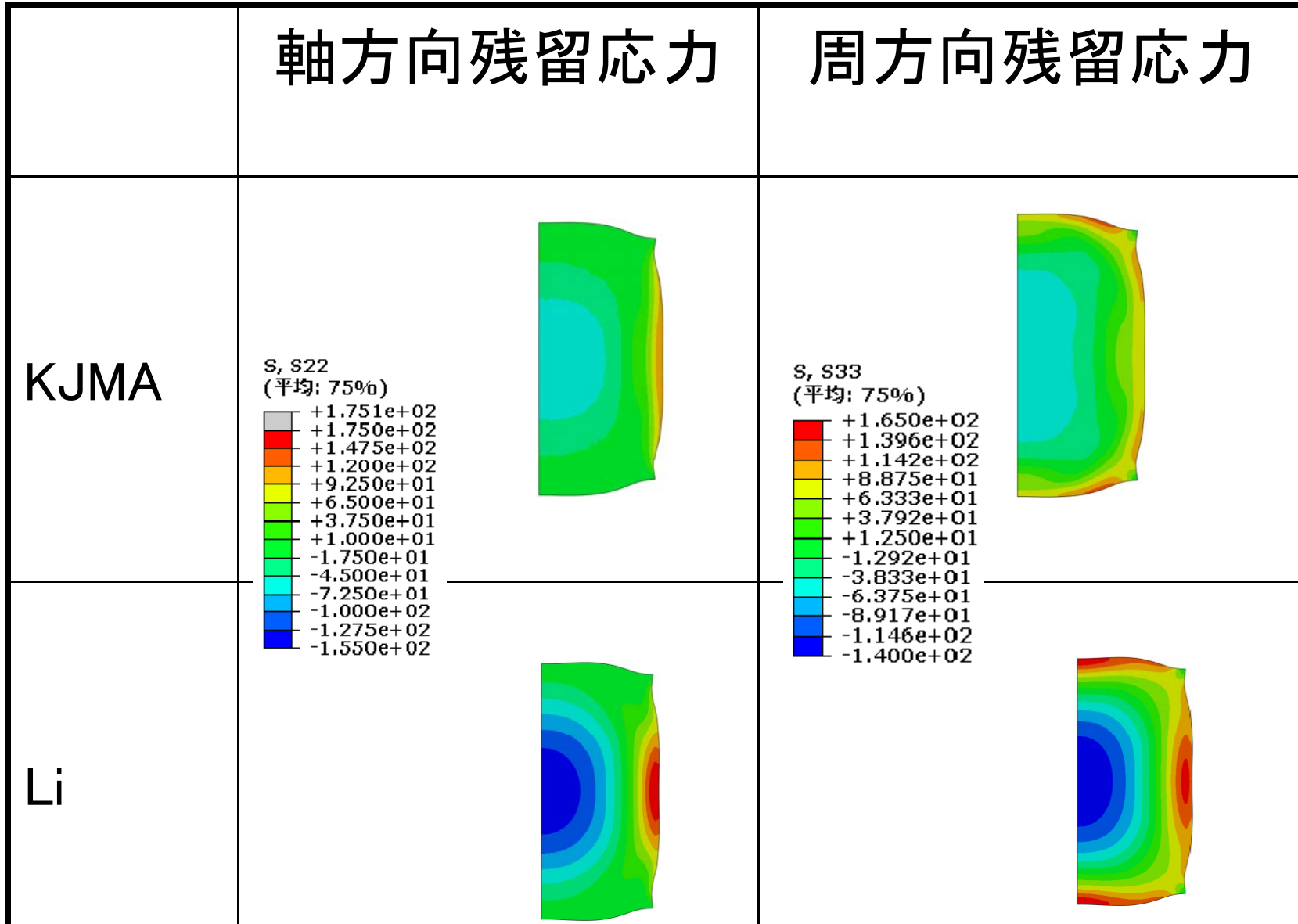
$$\xi_p = 1 - \exp[-f(T)t^{n(T)}]$$

$$\xi_m = 1 - \exp[g(T)(T - T_s)]$$

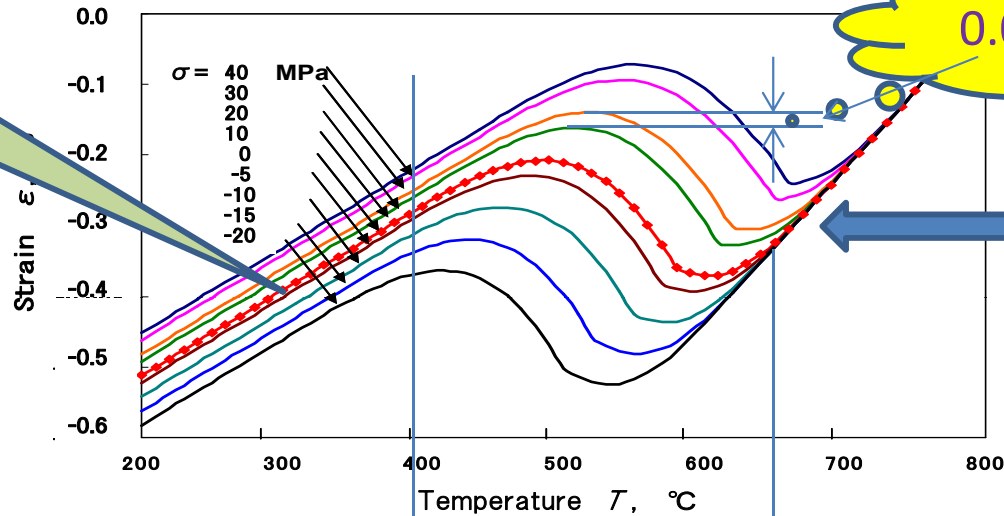


焼入れ後金属組織(変形倍率50)

成果1. 材料特性—変態のカイネティクス 住友金属



無負荷の時塑性変形は起きるか？



0.01%のひずみ

変態開始、終了
温度の応力依存
> Clausius-
Clapeyron の原
理

変態終了 T_f 変態中 T_s 変態前

熱物性値と力学的性質

冷却中の物性値は、一度冷却した材料を再加熱して測定した値と同じか？
 変態過程中的各相の物性値は、どうやって求めるか？
 降伏応力以上の応力の負荷の場合？ 予塑性変形材？
 変態潜熱の扱い方

弾性ひずみ

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma}{E} = \frac{150}{200 \times 10^3} = 0.075\%$$

塑性ひずみ

$$\varepsilon^p = \frac{\sigma}{H'} = \frac{150 - 100}{20 \times 10^3} = 0.25\%$$

熱ひずみ

$$\varepsilon^{th} = \alpha T = 10^{-5} \times 700 = 0.7\%$$

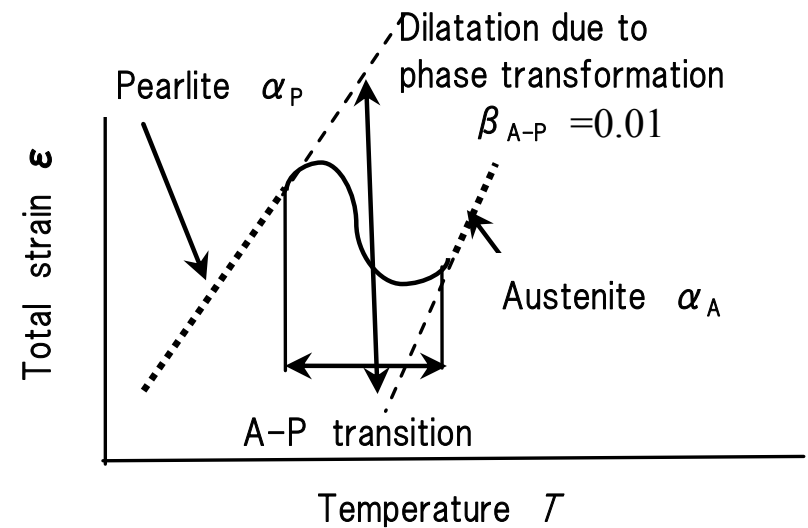
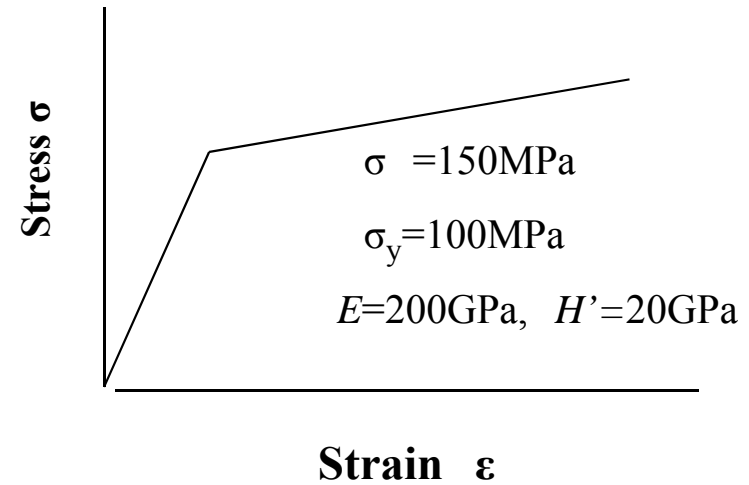
変態ひずみ

$$\varepsilon^m = \beta \xi = 0.01 \times 1 = 0.1\%$$

変態塑性ひずみ

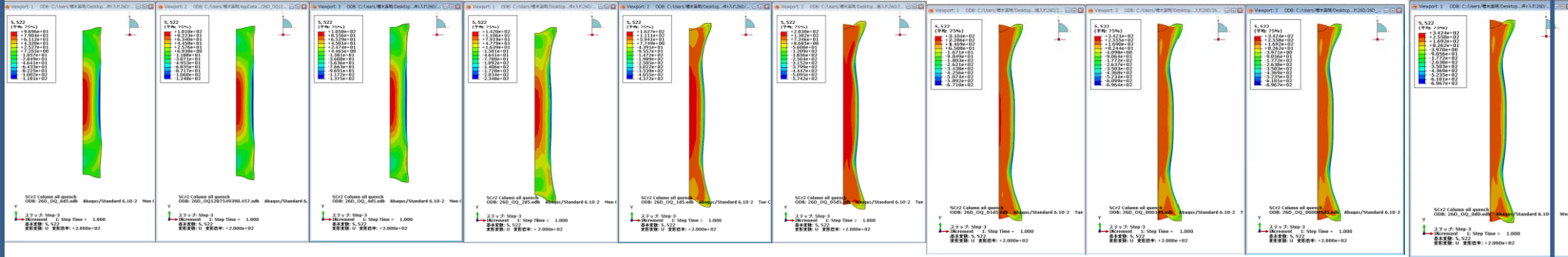
$$\varepsilon^{tp} = K \sigma = 10^{-4} \times 150 = 1.5\%$$

$$T=700^\circ\text{C}, \alpha=10^{-5} 1/\text{K}, K=10^{-4} 1/\text{MPa}$$

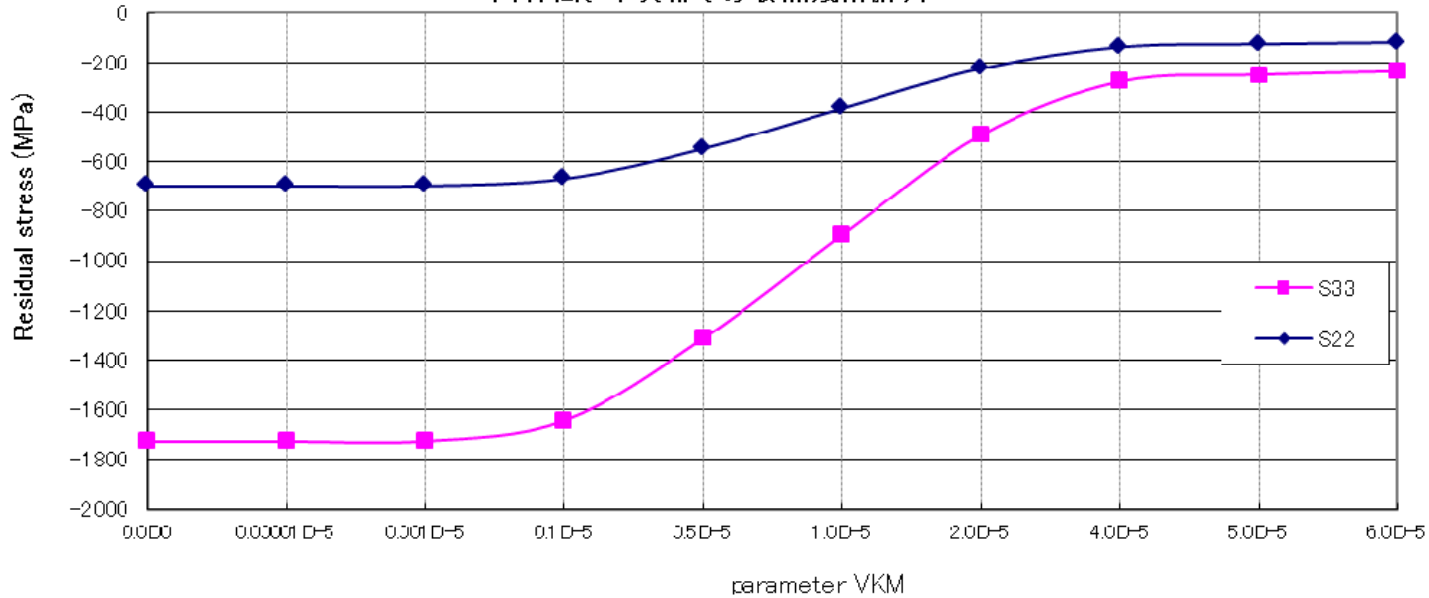


成果1 材料特性 変態塑性の効果 住金

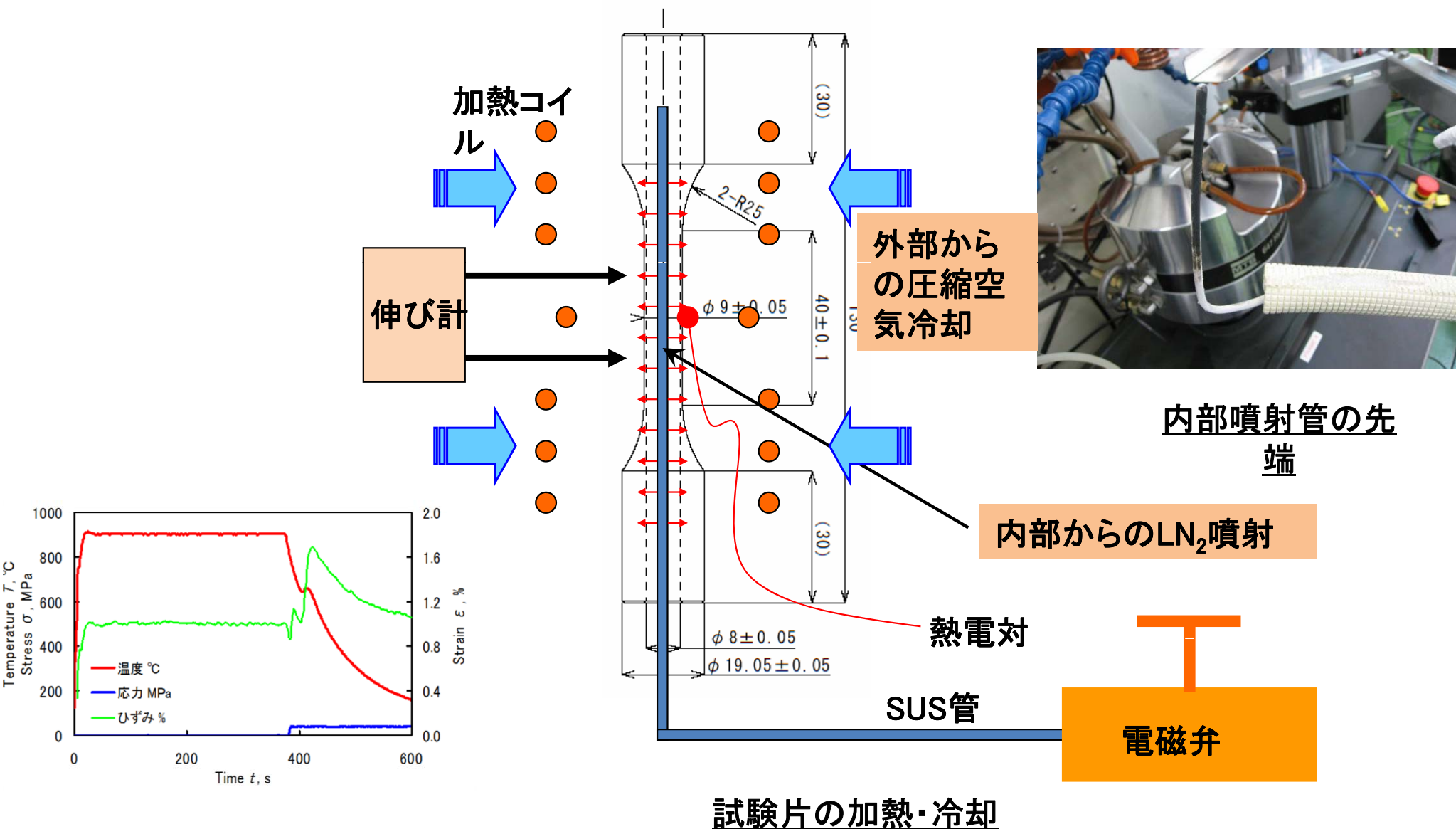
K=6 5 4 2 1 0.1 0.01 0.001 0.0001 0
 $\times 10^{-5} \text{ 1/MPa}$



円柱高さ中央部での表面残留応力

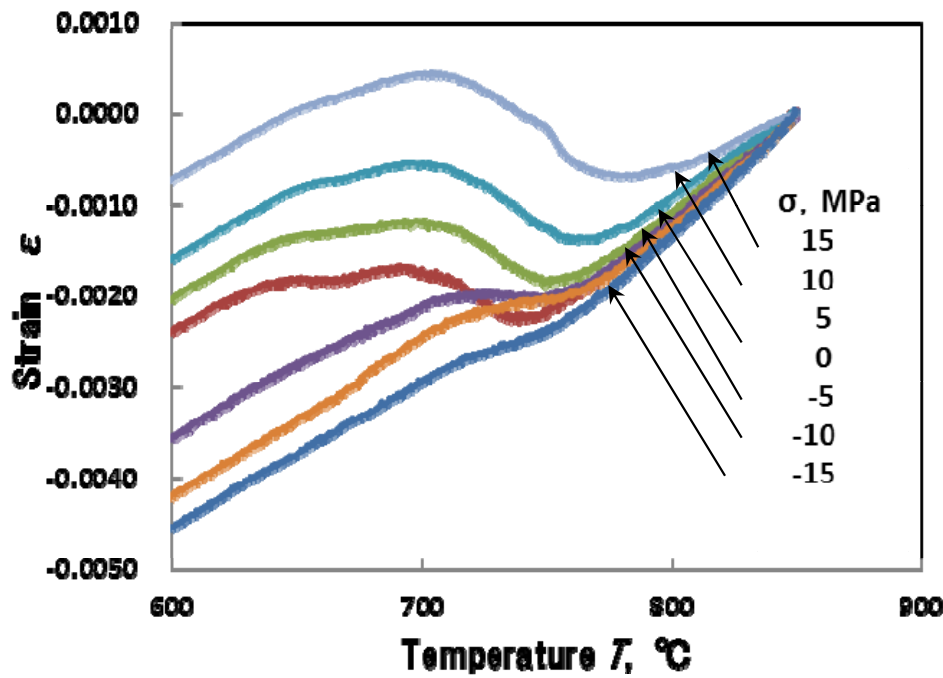


成果1. 材料特性 変態塑性の実験的到底
福山大学

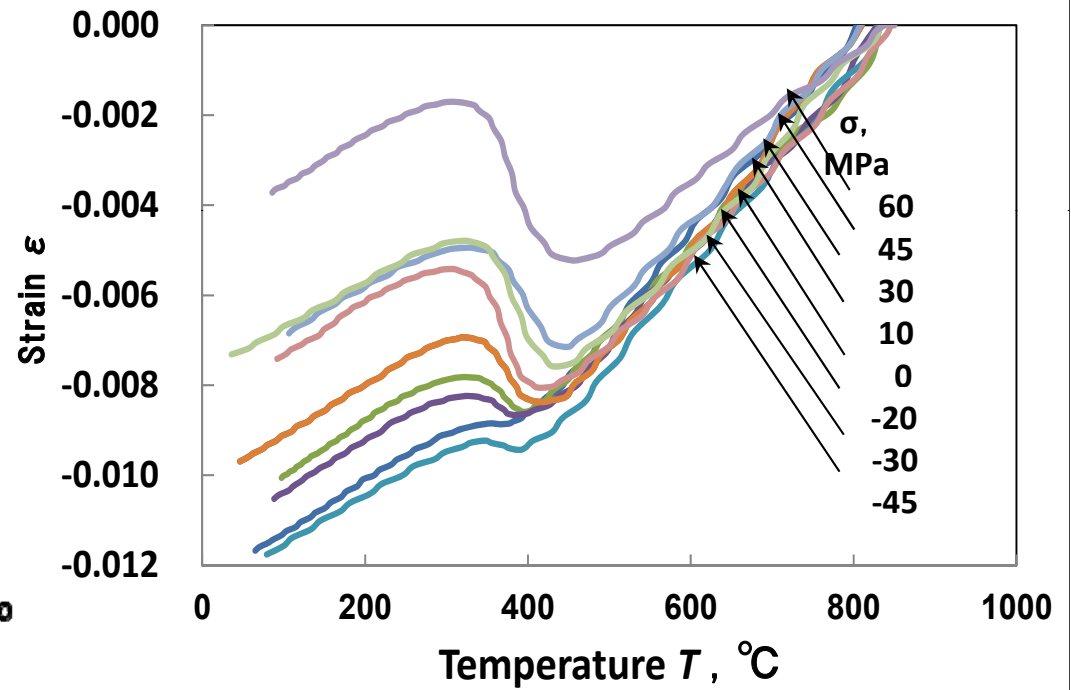


成果1 材料特性—変態塑性 実験結果
福山大学

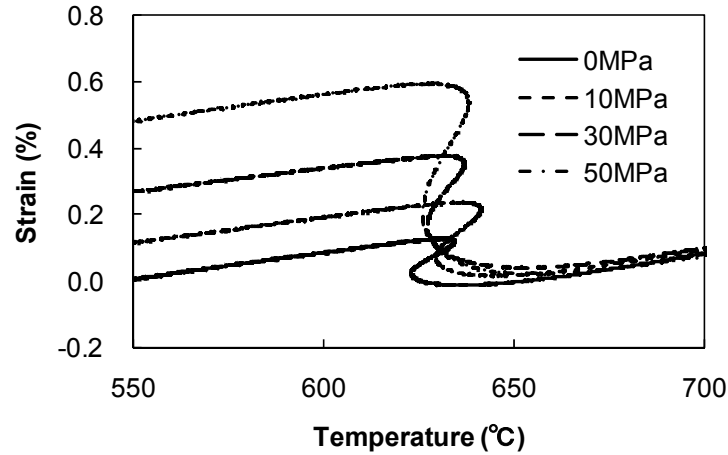
温度—伸び線図



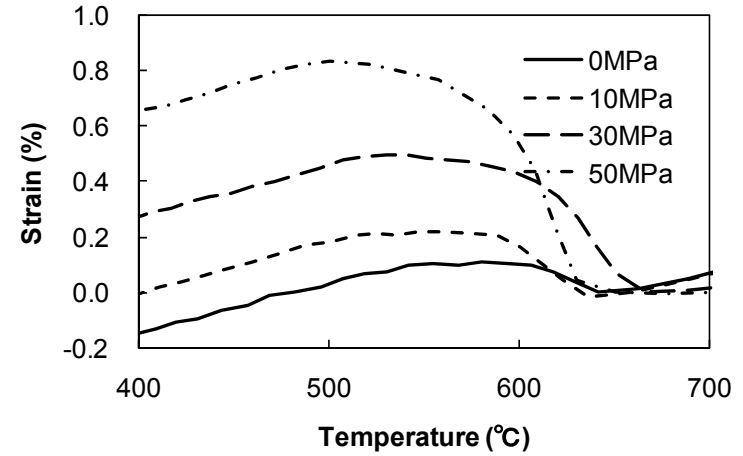
パーライト変態



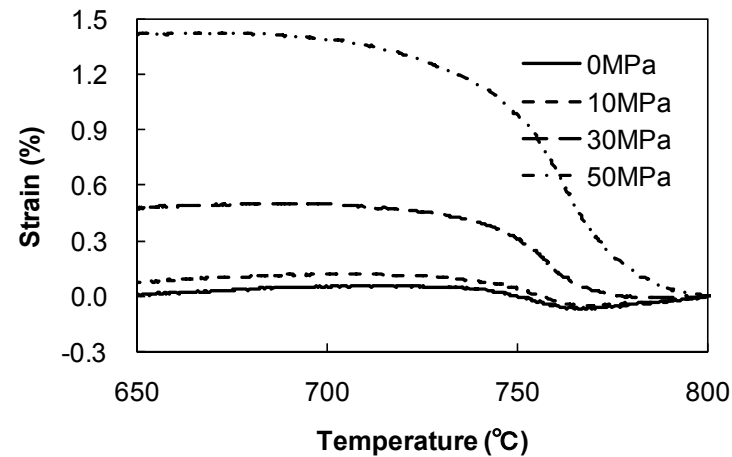
マルテンサイト変態



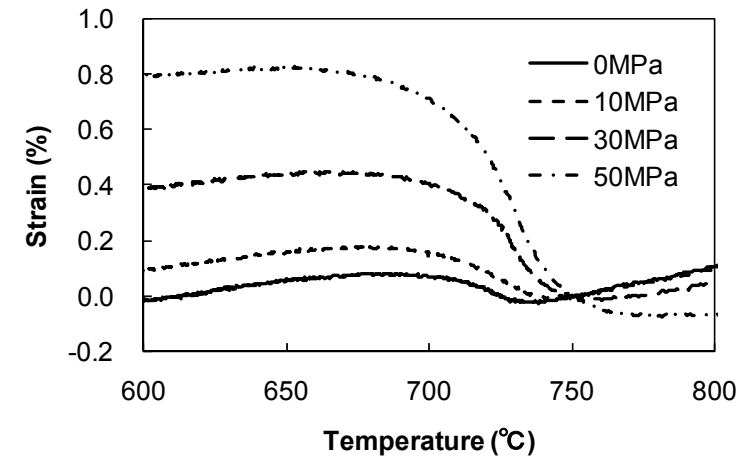
(a) S45C



(c) SM490

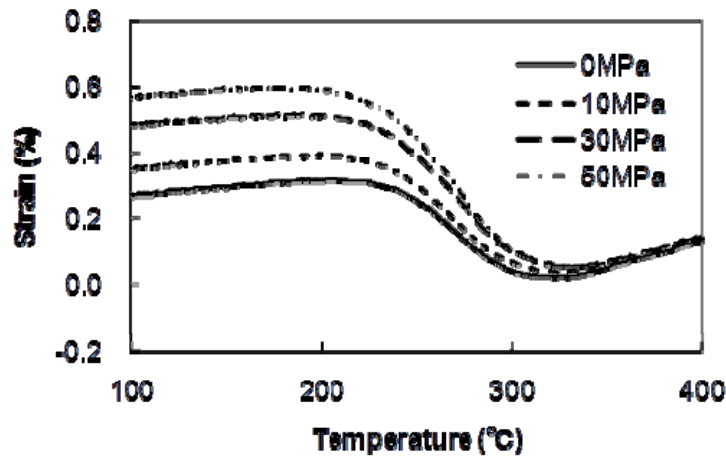


(b) SCM415

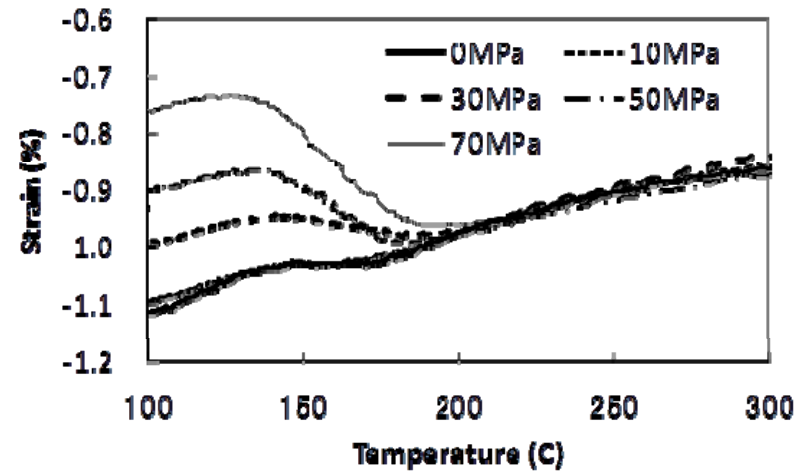


(d) SCr420

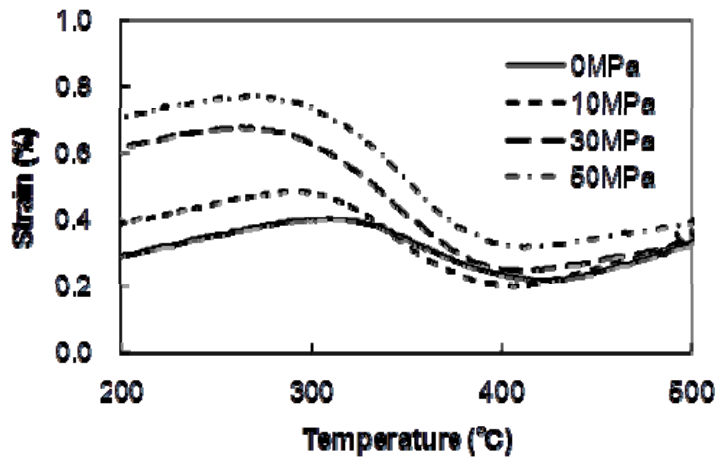
1 材料特性 変態塑性
新日鉄



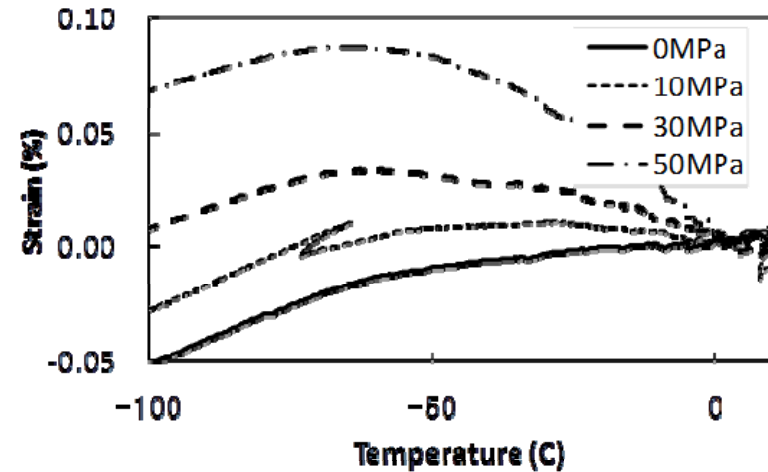
(a) S45C



(c) Fe-25Ni-20Co

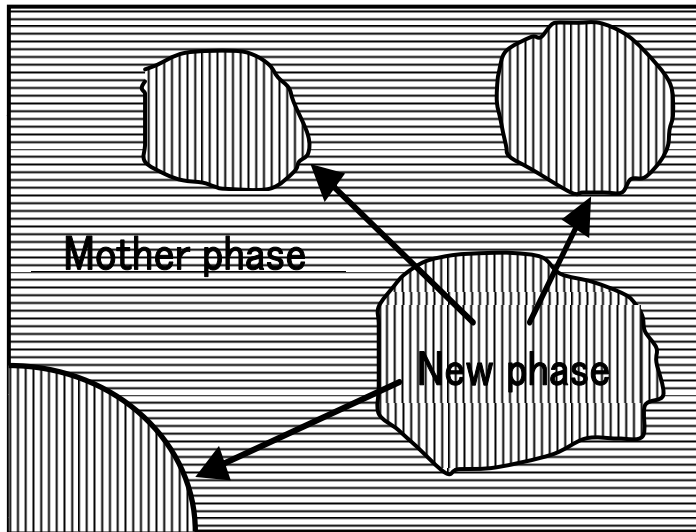


(b) SCr420

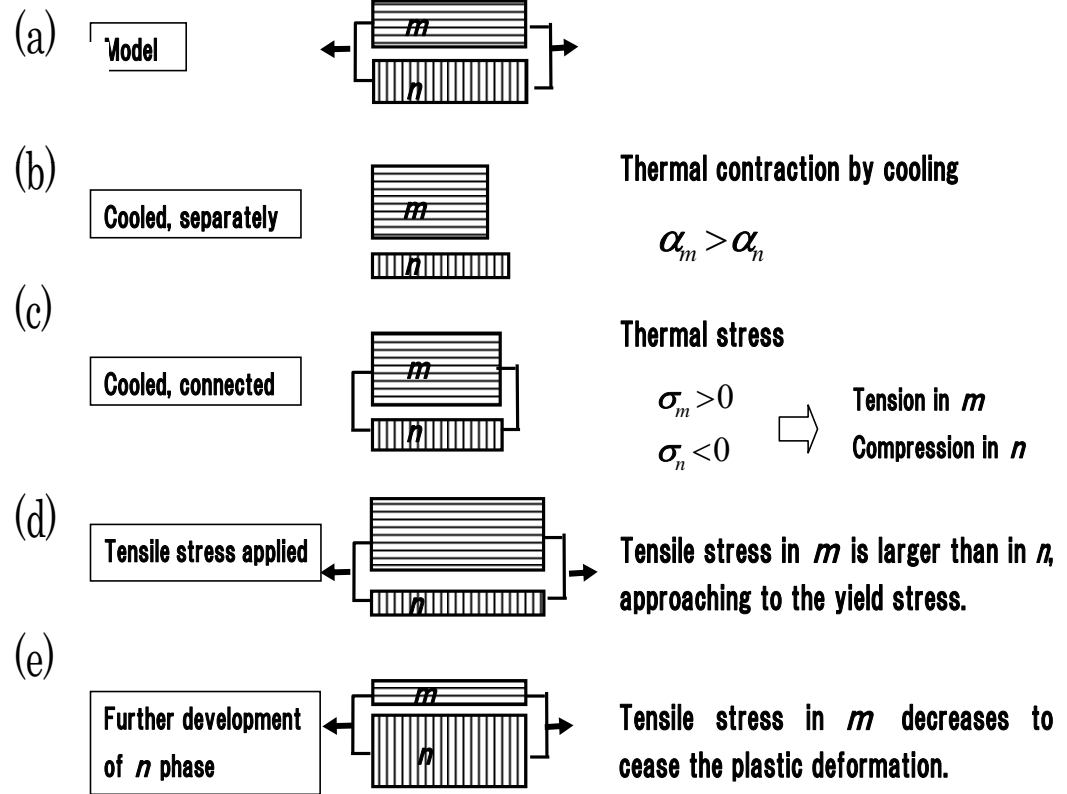


(d) Fe-27Ni-20Co

実際の相変態



一次元モデル化



成果1 材料特性 変態塑性

福山大

構成式 母相

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_m &= \dot{\varepsilon}_m^e + \dot{\varepsilon}_m^t + \dot{\varepsilon}_m^p \\ &= \frac{\dot{\sigma}_m}{E_m} + \alpha_m \dot{T} + \frac{\dot{\sigma}_m}{H_m} = \left(\frac{1}{E_m} + \frac{1}{H_m} \right) \dot{\sigma}_m + \alpha_m \dot{T} \\ \dot{\sigma}_m &= \frac{1}{\left(\frac{1}{E_m} + \frac{1}{H_m} \right)} (\dot{\varepsilon}_m - \alpha_m \dot{T}) = G_m (\dot{\varepsilon}_m - \alpha_m \dot{T})\end{aligned}$$

新相

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_n &= \dot{\varepsilon}_n^e + \dot{\varepsilon}_n^t + \dot{\varepsilon}_n^m + \dot{\varepsilon}_n^p \\ &= \frac{\dot{\sigma}_n}{E_n} + \alpha_n \dot{T} + \beta \dot{\xi} + \frac{\dot{\sigma}_n}{H_n} = \left(\frac{1}{E_n} + \frac{1}{H_n} \right) \dot{\sigma}_n + \alpha_n \dot{T} + \beta \dot{\xi} \\ \dot{\sigma}_n &= \frac{1}{\left(\frac{1}{E_n} + \frac{1}{H_n} \right)} (\dot{\varepsilon}_n - \alpha_n \dot{T} - \beta \dot{\xi}) = G_n (\dot{\varepsilon}_n - \alpha_n \dot{T} - \beta \dot{\xi})\end{aligned}$$

平衡方程式

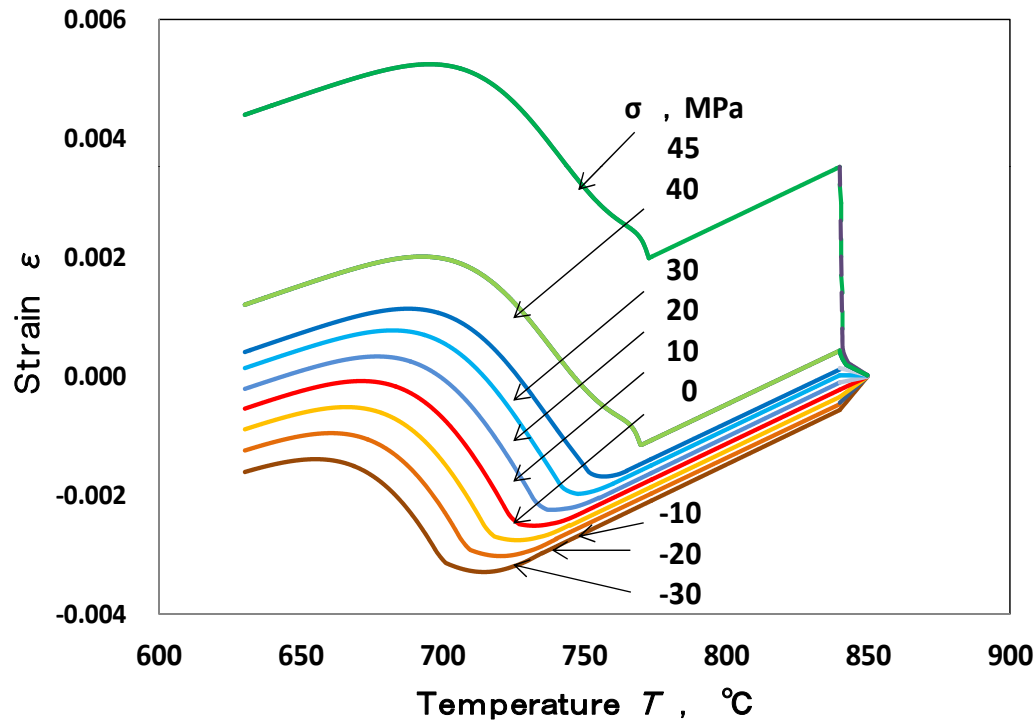
$$\sigma = \sigma_m \xi_m + \sigma_n \xi$$

適合条件

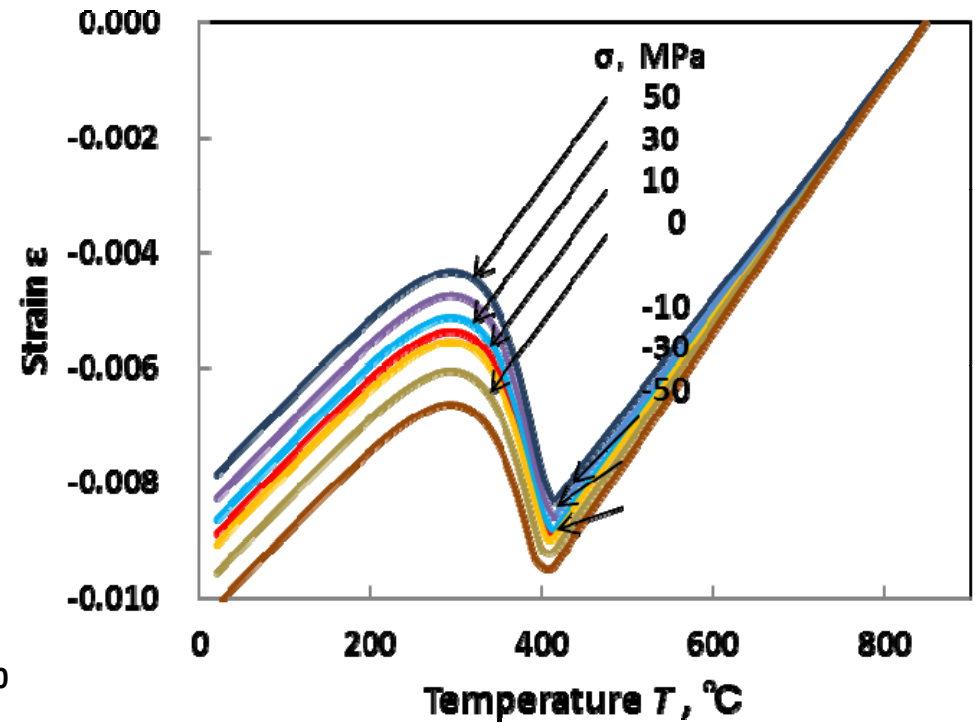
$$\varepsilon_m = \varepsilon_n \equiv \varepsilon$$

成果1 材料特性 変態塑性 福山大

温度一伸び線図 計算結果

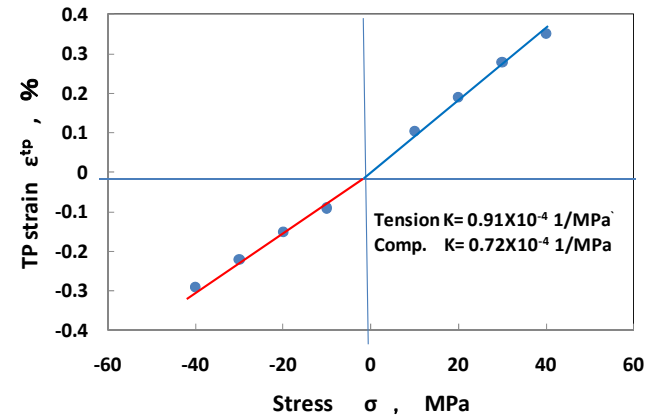


パーライト変態



マルテンサイト変態

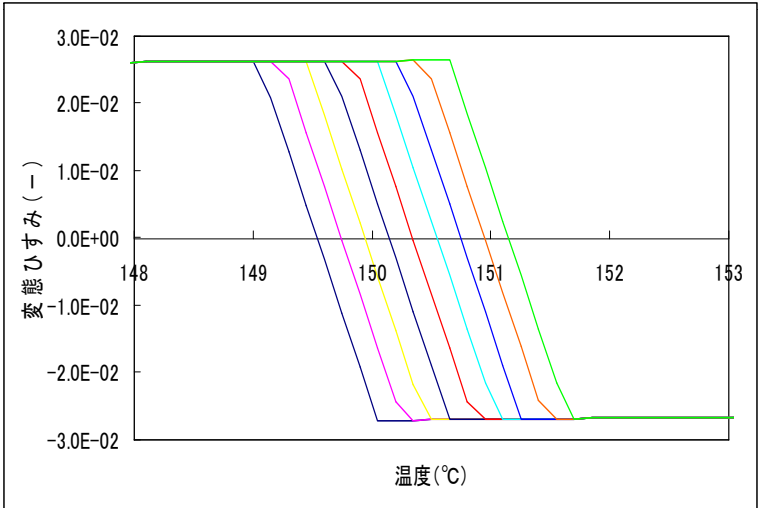
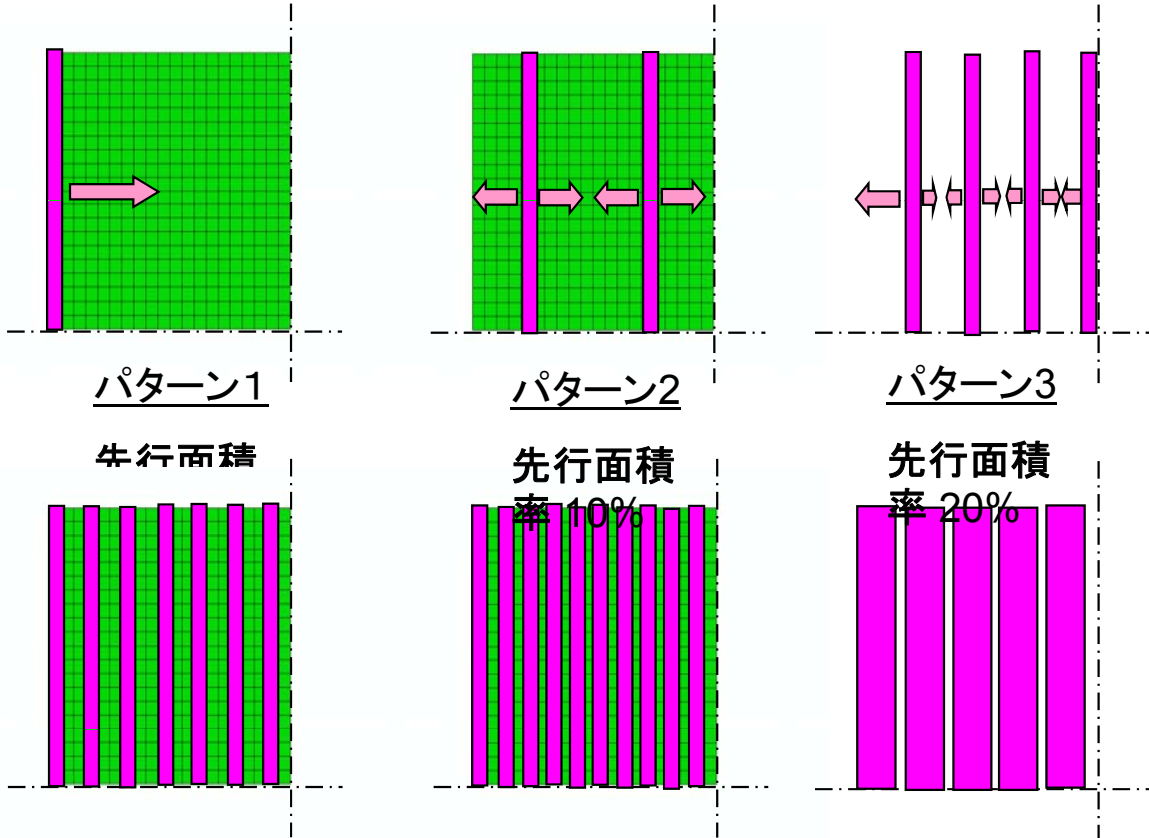
変態塑性係数 実験と計算
~さらに進展中



TP coefficient, $\times 10^{-5} / \text{MPa}$		Calculated	Experimental
Pearlite K_p	Tension	1.5	6.2
	Comp.	2.0	4.1
Martensite K_m	Tension	1.2	3.3
	Comp.	1.5	3.2

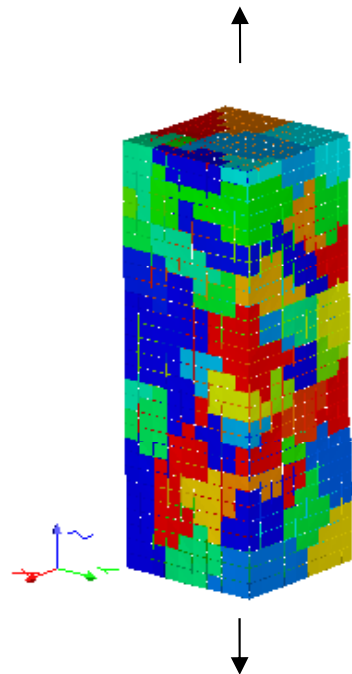
変態の進行(曲げの場合)

局所的に変態進行速度の

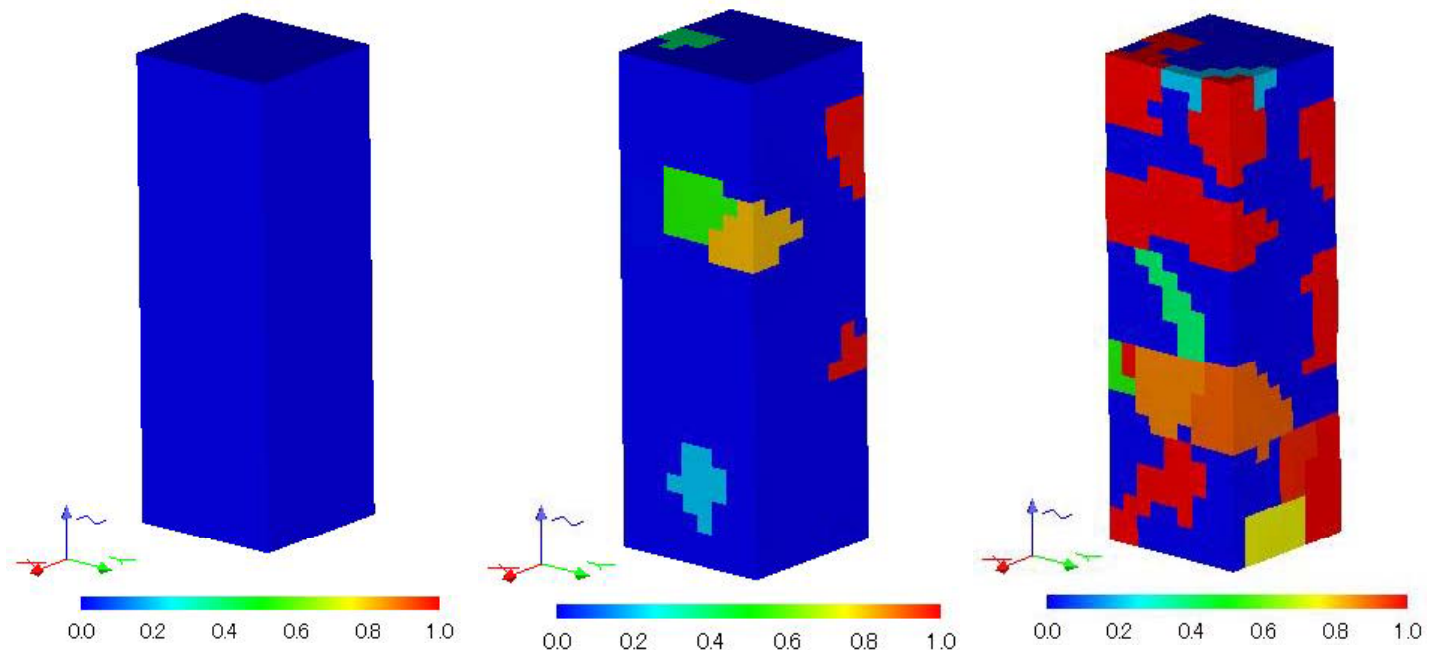


変態の進行(引張・圧縮の場合)

結晶分割の例



Ferrite変態分率

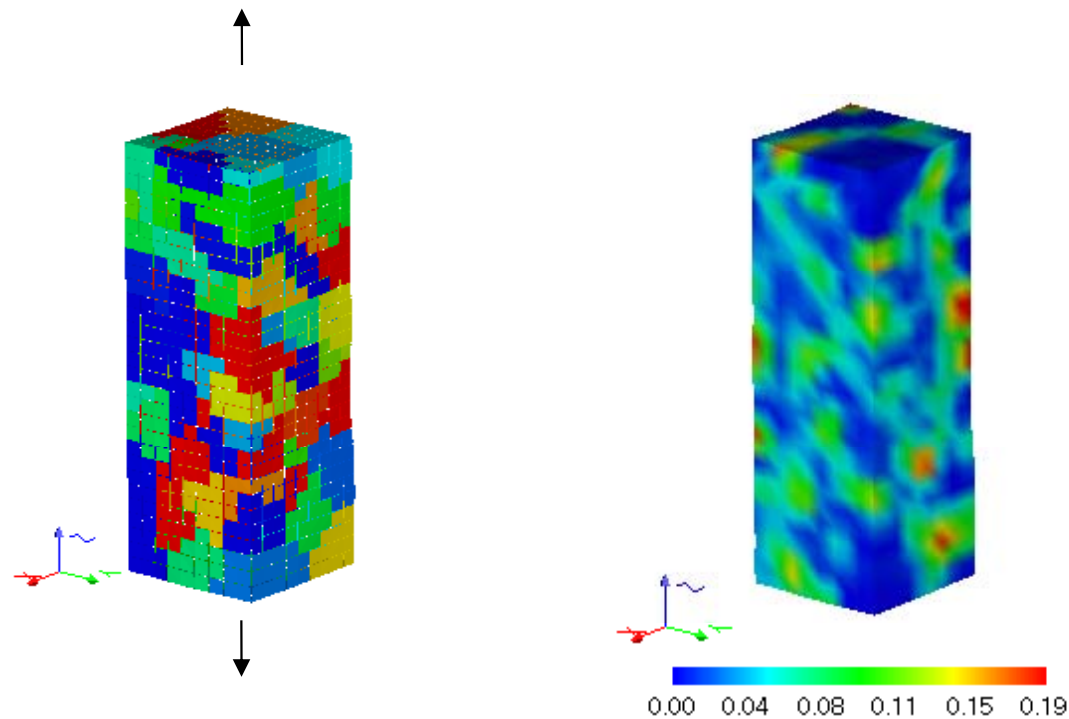


----->

変態の進展

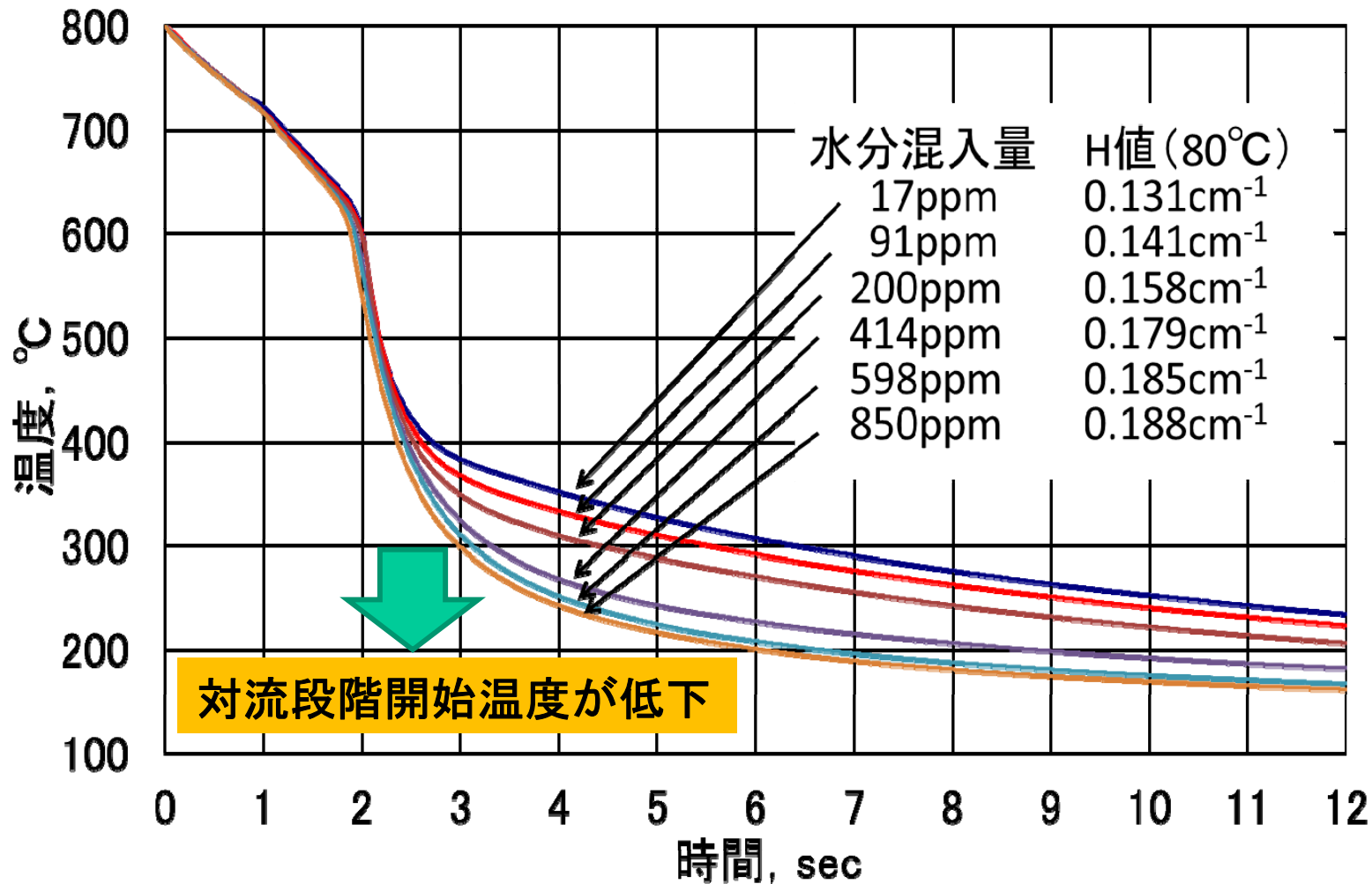
変態の進行(引張・圧縮の場合)

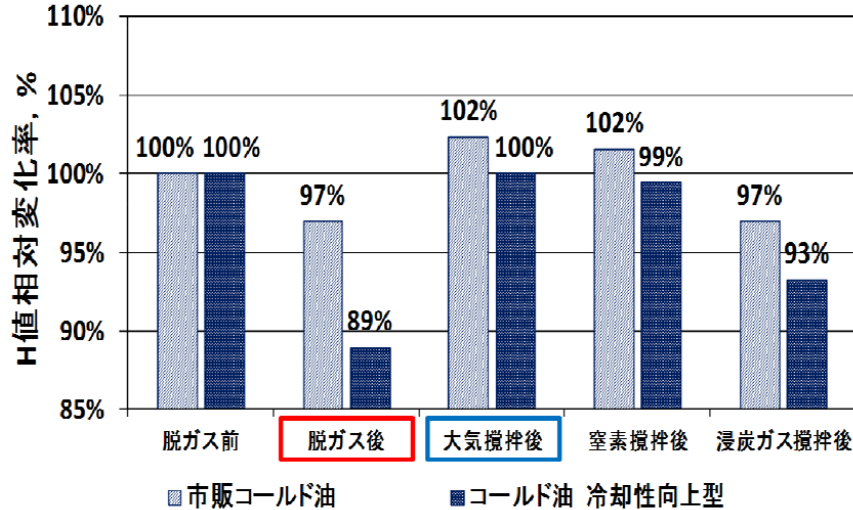
変態終了時の相当塑性ひずみ分布



結晶の位置に対応した塑性変形が進展

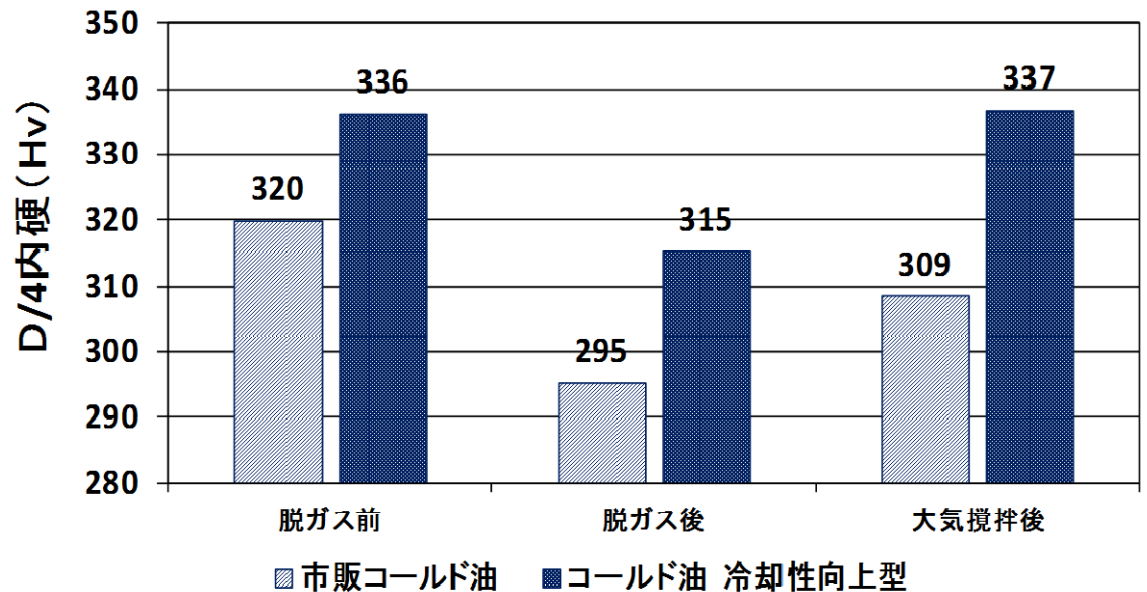
油中水分の影響 (水分による冷却性の変化)



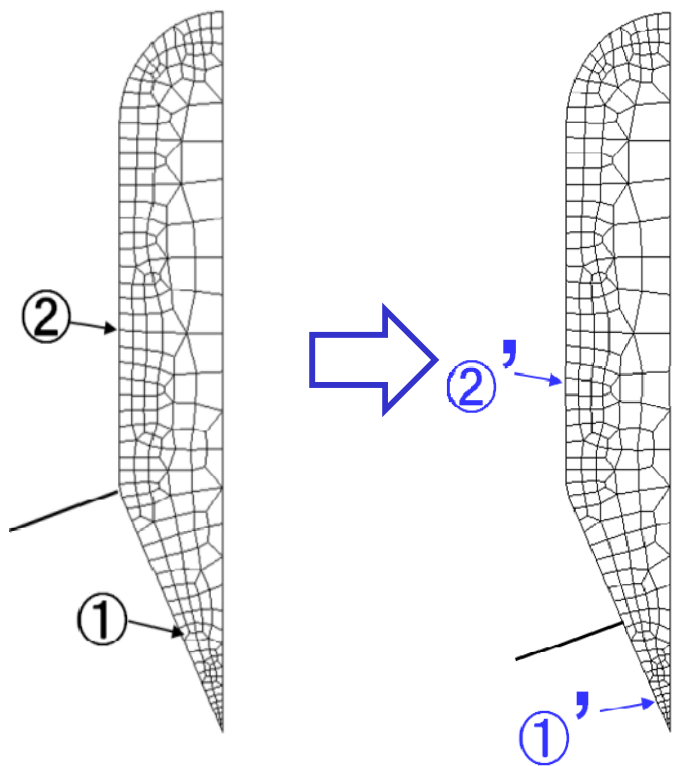


(1) 油中溶存ガスの影響 (冷却性変化)

(1) 油中溶存ガスの影響 (硬度変化)

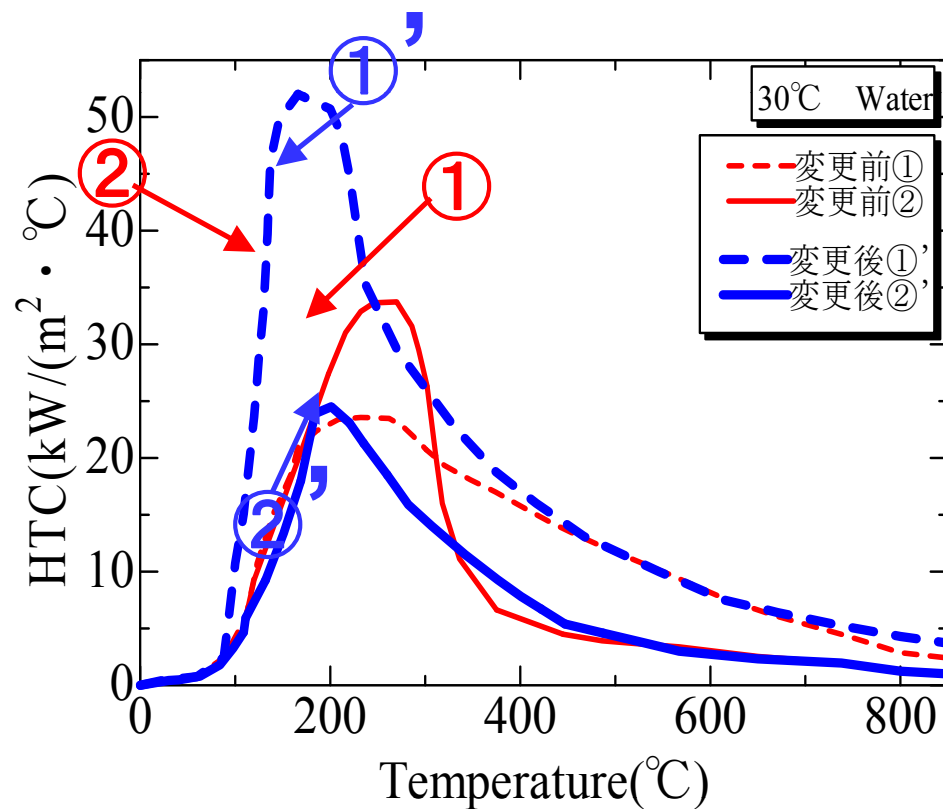


表面領域の分割の変更による表面熱伝達率の精度改善



変更前

変更後

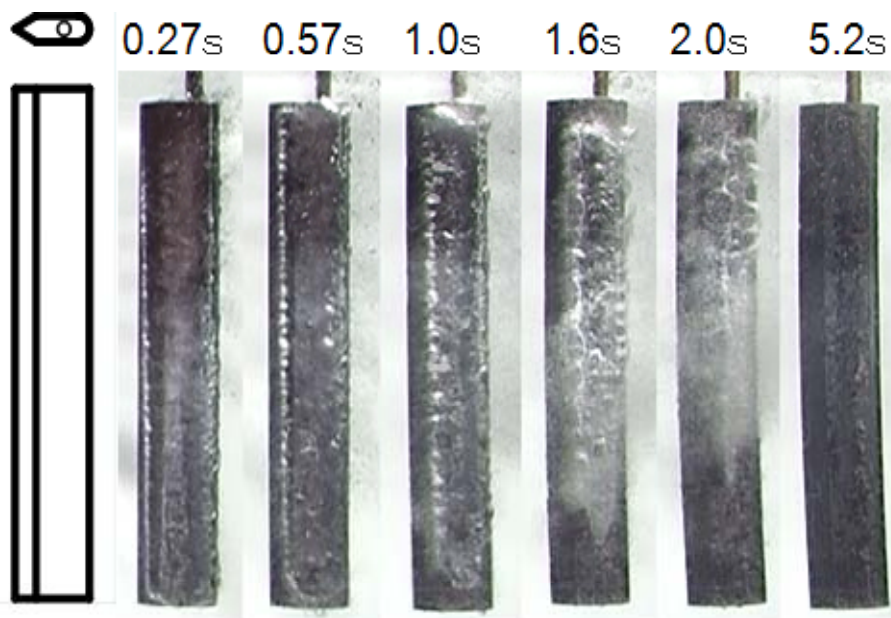


修正前後の表面熱伝達率

成果2. 冷却特性 シミュレーションへの効果 宇都宮大

水焼入れ時の沸騰
様相(実験結果)と
表面温度分布(解
析結果)

実験結果



熱伝達率の与え方



Temperature (C)

820

557

380°C

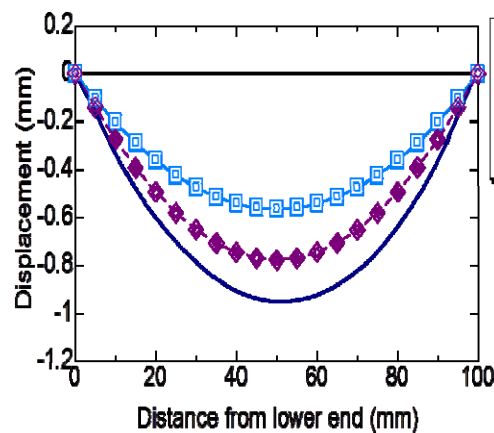
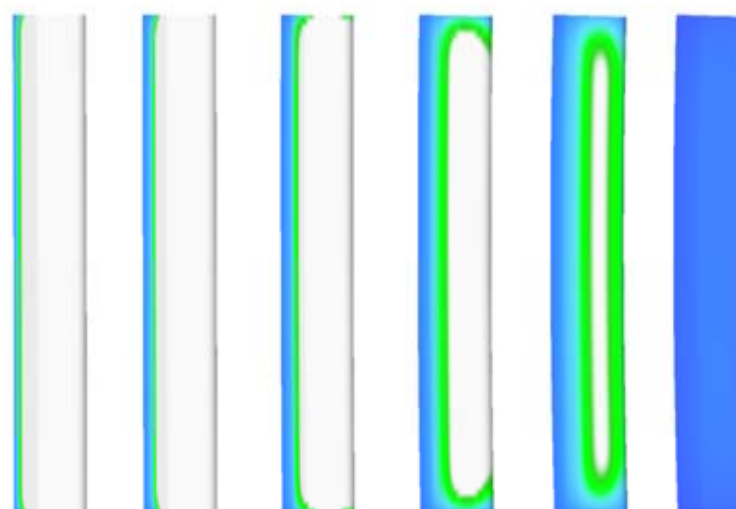
293

30.0

蒸気膜崩壊時
の表面温度

解析の結果,
最大冷却速度を示す温度は約380°C

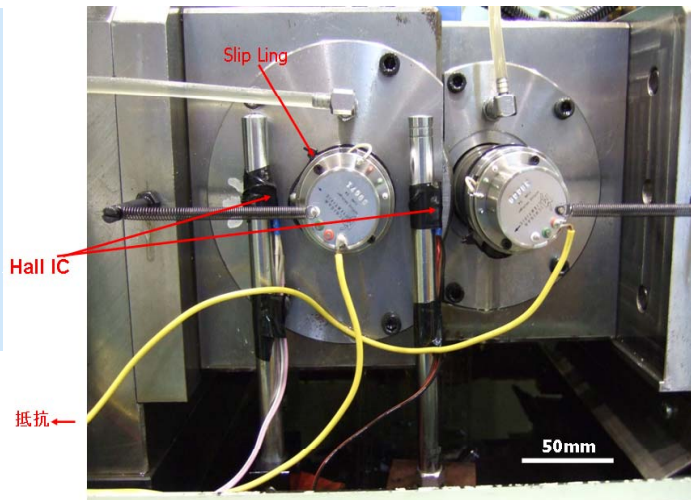
解析結果



試験中の金属接触状態を電気抵抗で評価

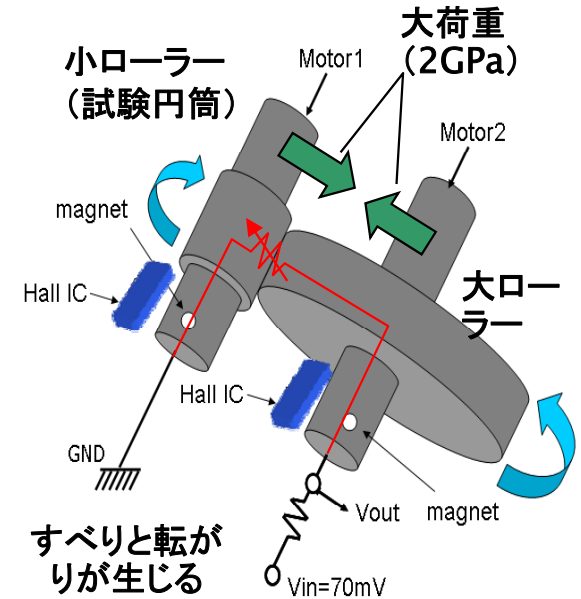
ローラーピッチング試験装置

2個のローラに荷重を負荷して回転させることで、歯車の表面を模擬した疲労試験



電気抵抗の測定方法

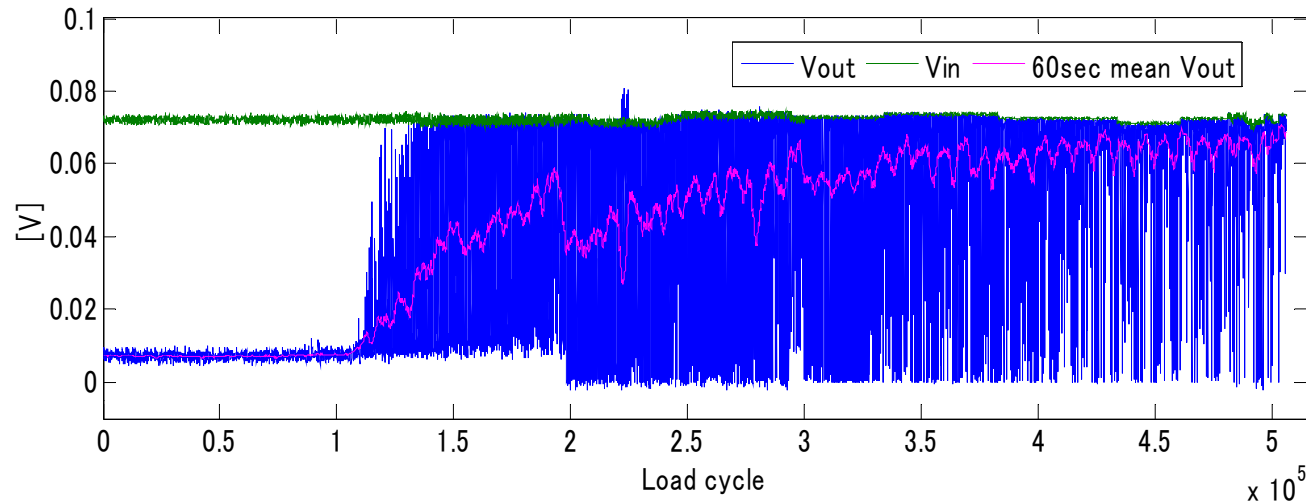
2個のローラ間の電気抵抗を測定することで金属接触状態を評価



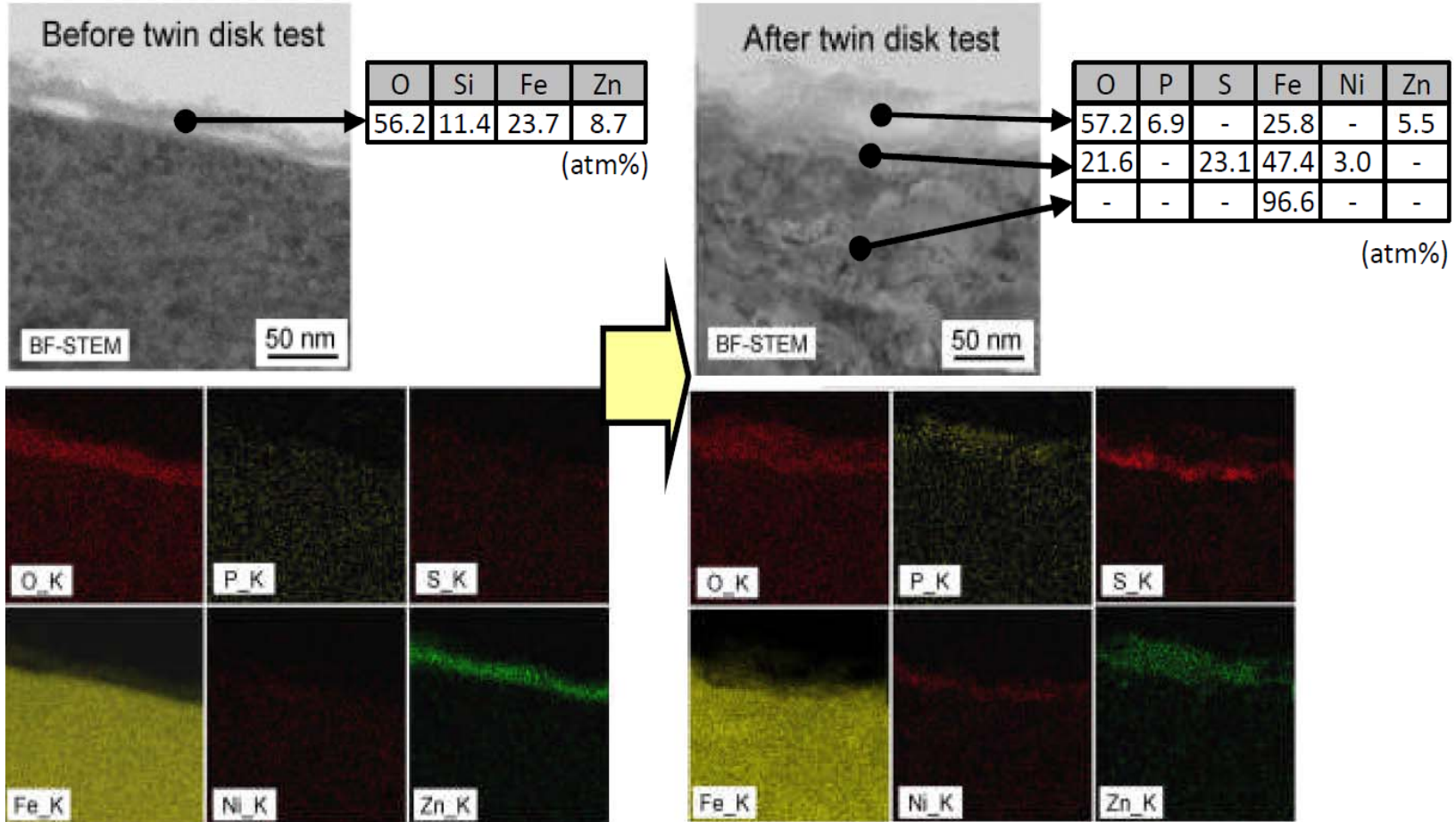
電気抵抗の測定結果

初期の金属接触の導通状態から、徐々に油膜やトライボ膜の生成により、電気抵抗が増加していく

電気抵抗大 (油膜酸化膜接触)
↔
電気抵抗小 (金属接触)



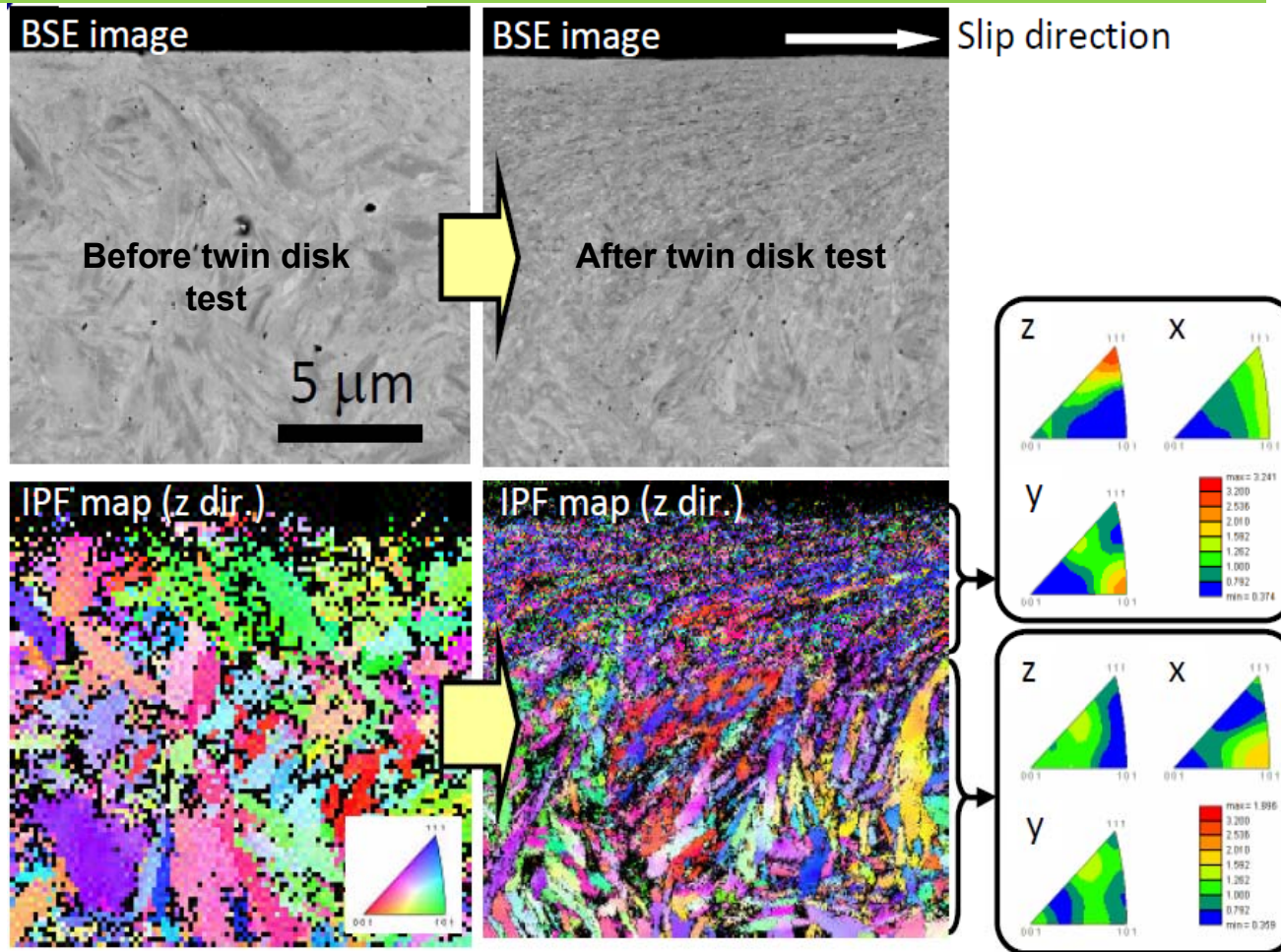
ローラーピッチング試験前・後の表面の分析結果 (STEM, EDS)



試験後の表面において

最表層に40nm厚さでPとZnが含まれる膜と、その下に10nm厚さのSとNiが含まれる膜が生成している

ローラーピッチング試験前・後の表面近傍の分析結果 (SEM, EBSD)

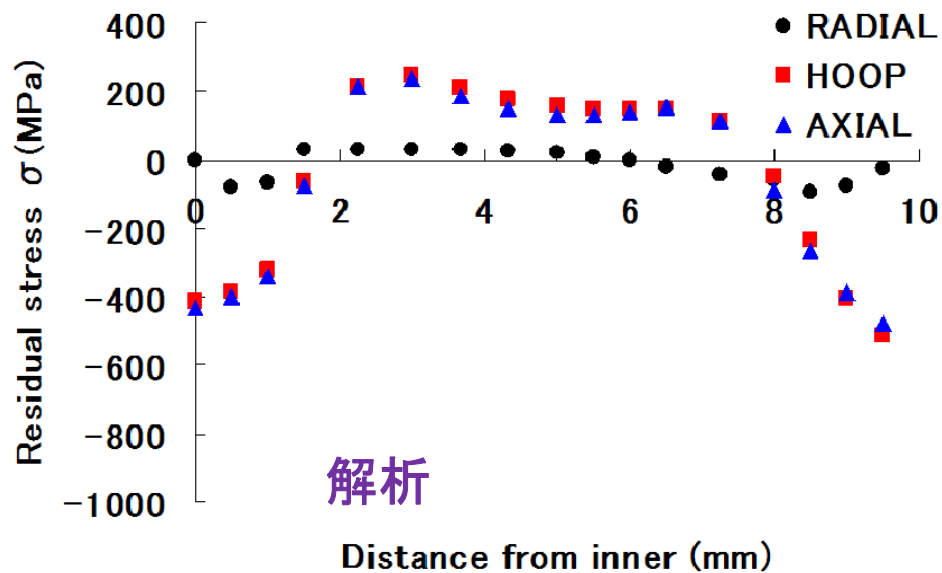
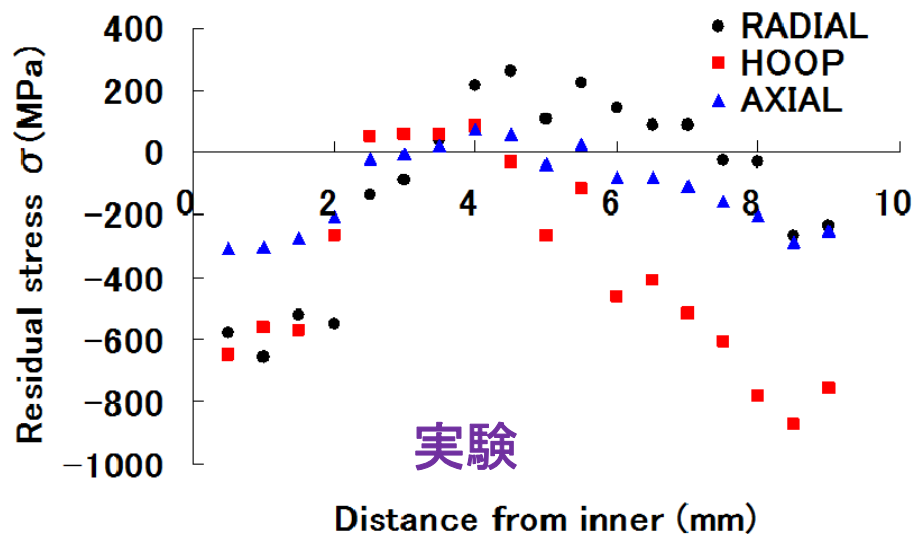
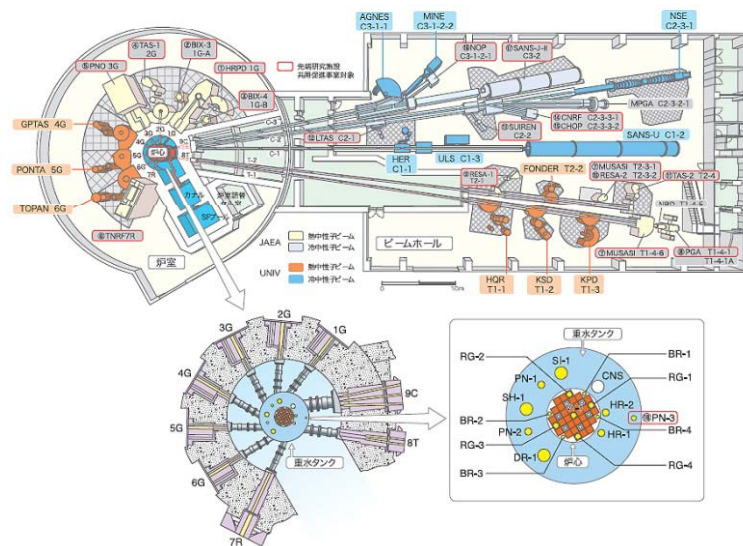
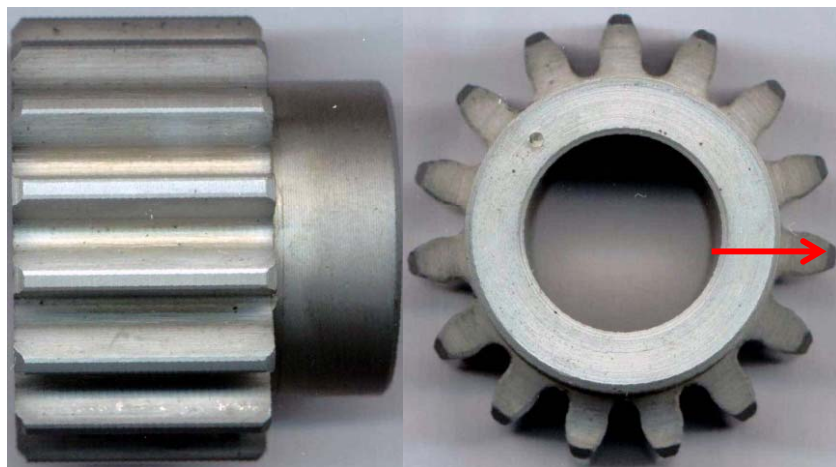


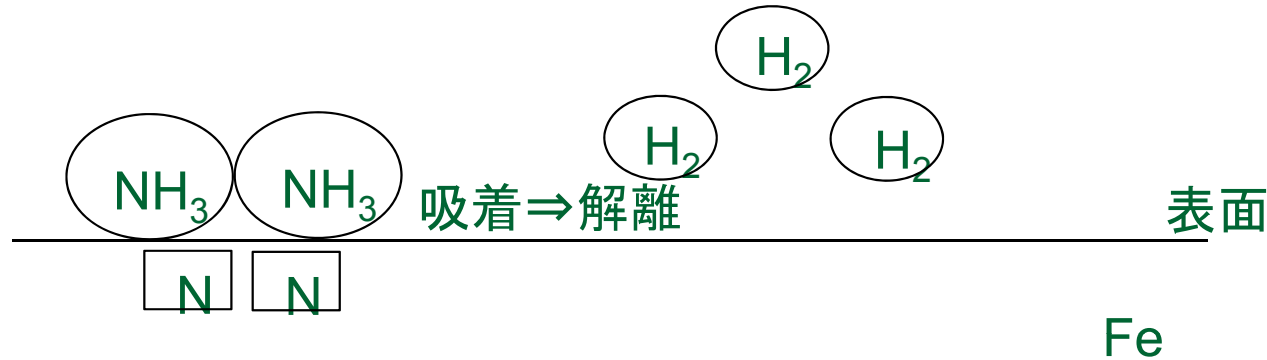
試験後の表面近傍において

金属組織は表面から深さ5 μm の領域で微細化し、すべり方向に結晶方位(100)の塑性流動が生じている

成果3. 残留応力の中性子線による計測

埼玉工大



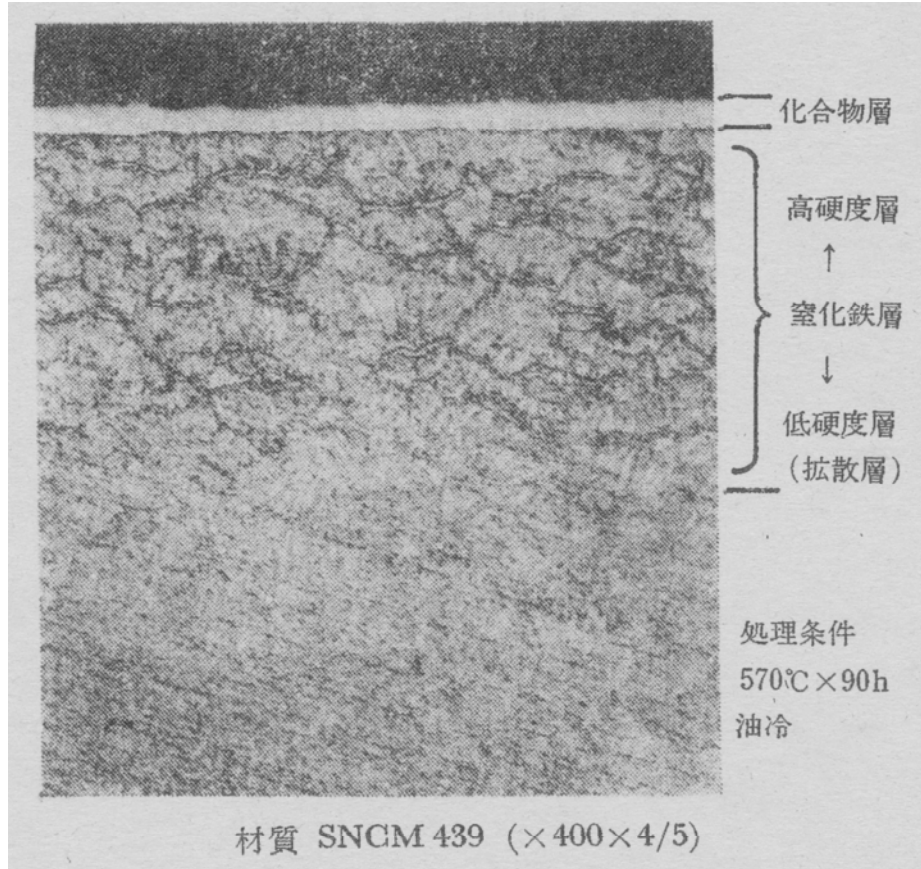


$$N_s(a_N) = K P_{\text{NH}_3} / (P_{\text{H}_2})^{3/2}$$

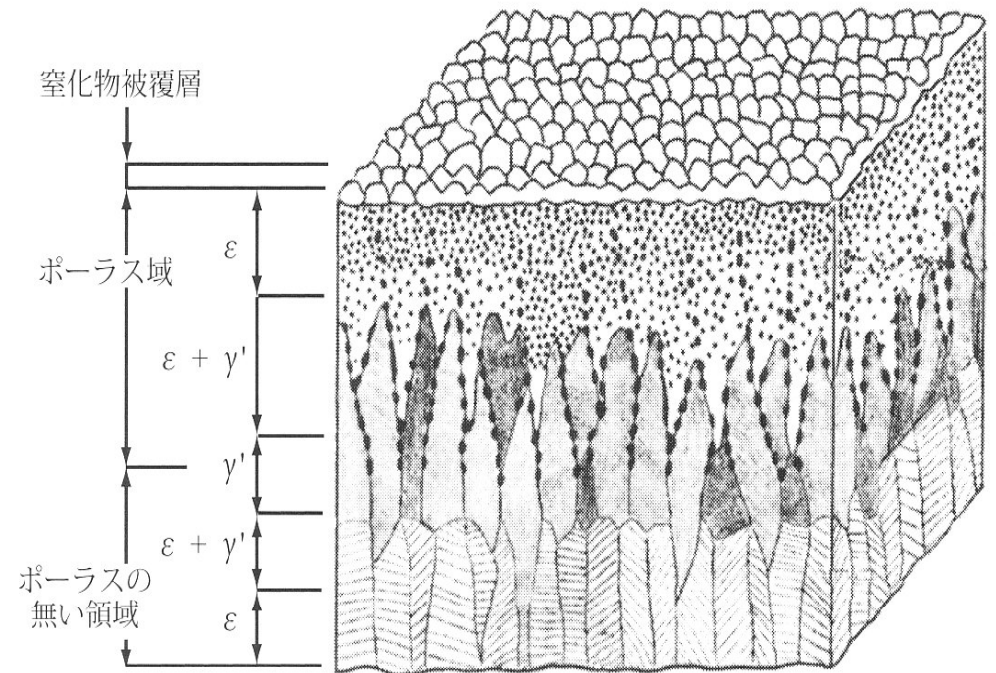
窒化層厚さ $d = k \sqrt{t}$ (拡散・放物線側, 窒化層)

$$\text{窒素濃度 } N_d = N_s \{1 - \text{erf}(d/2\sqrt{Dt})\}$$

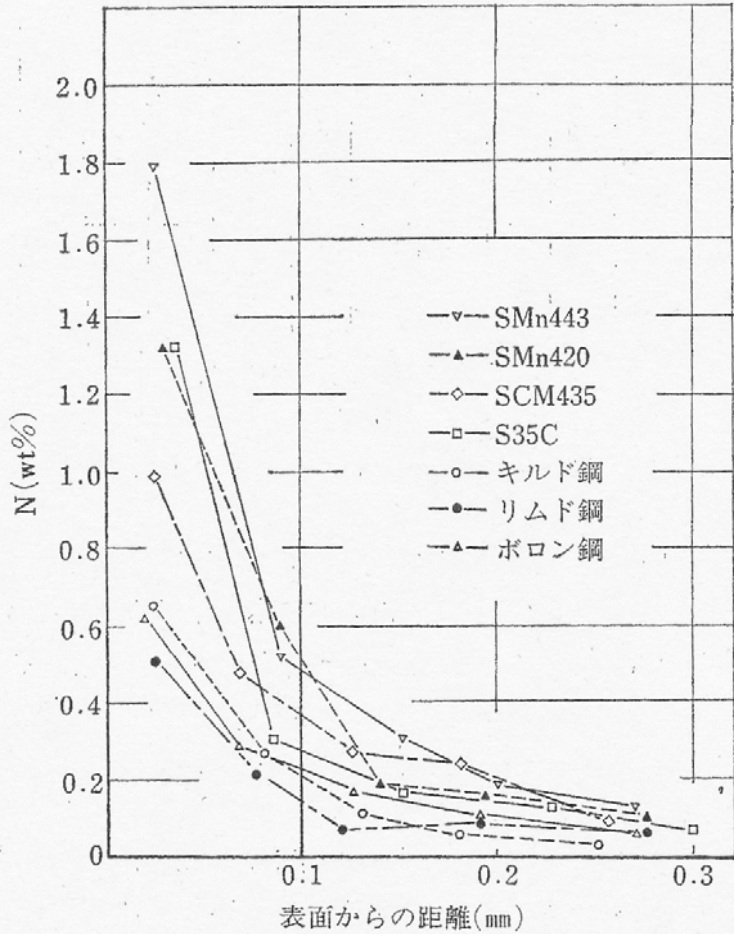
成果4. 浸炭・窒化 仙台高専



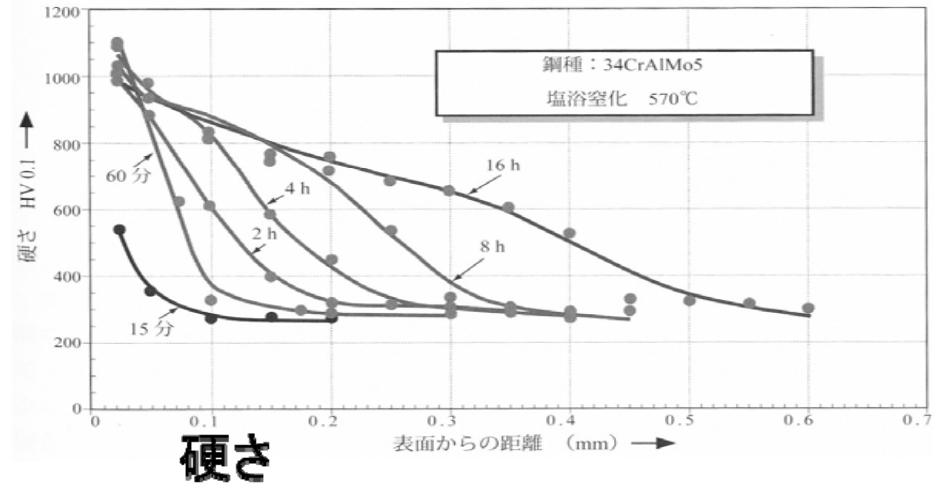
窒化による組織



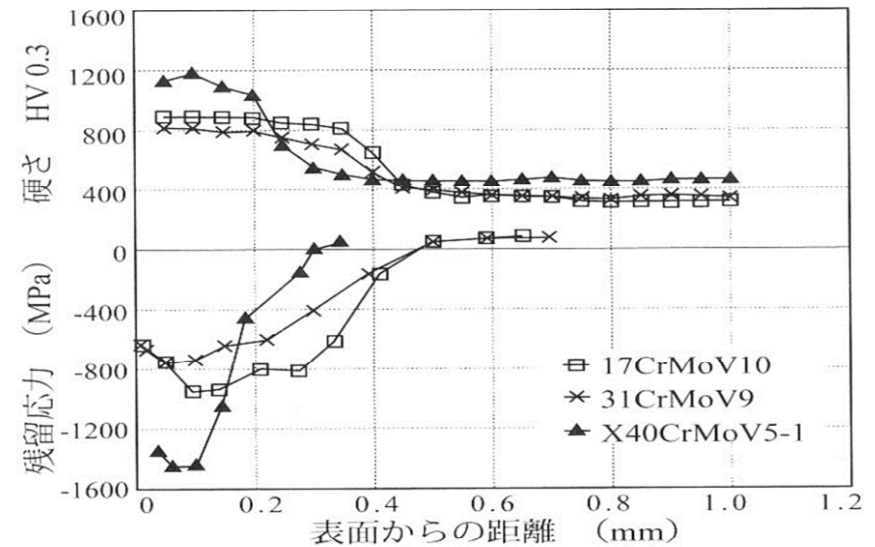
最表面の組織 = 相変態



窒素分布

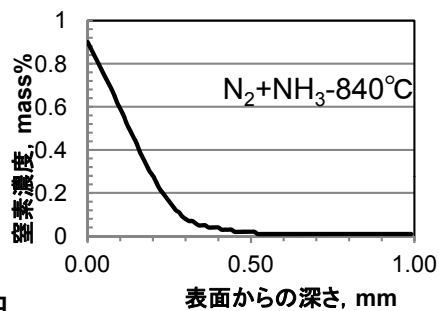
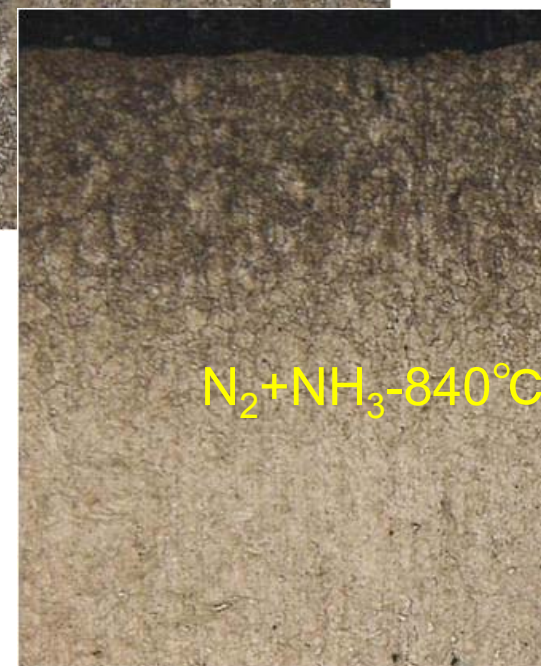
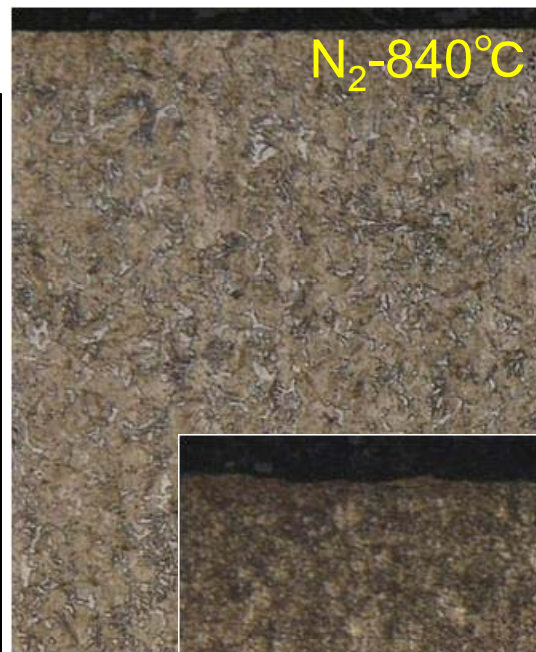
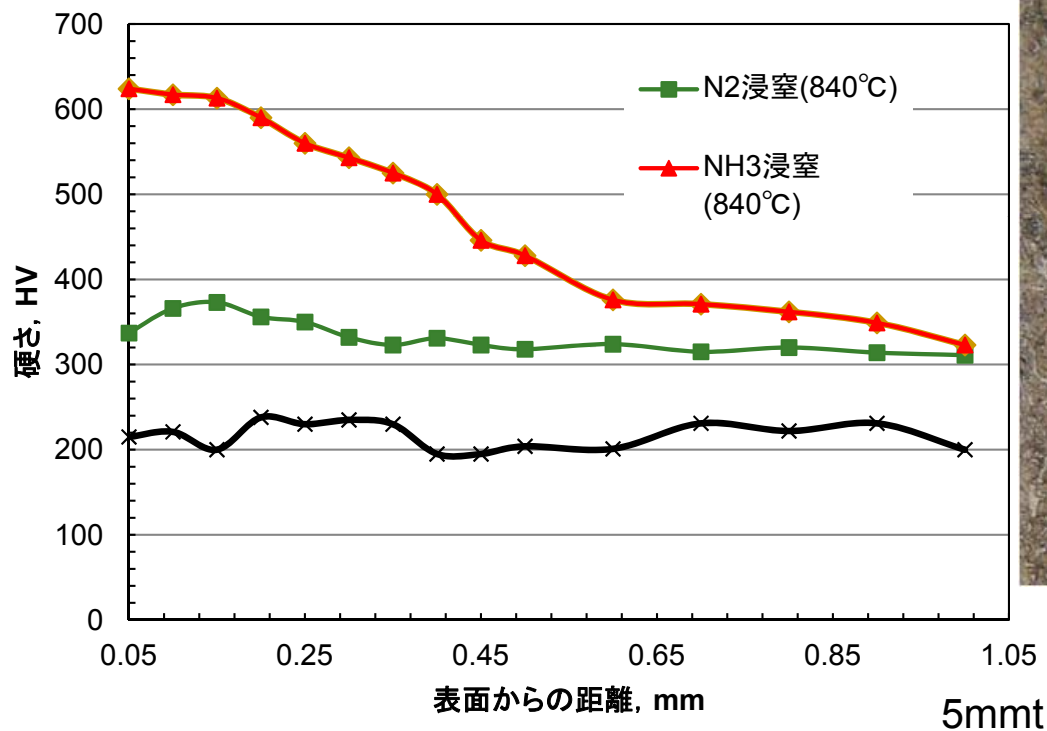


硬さ

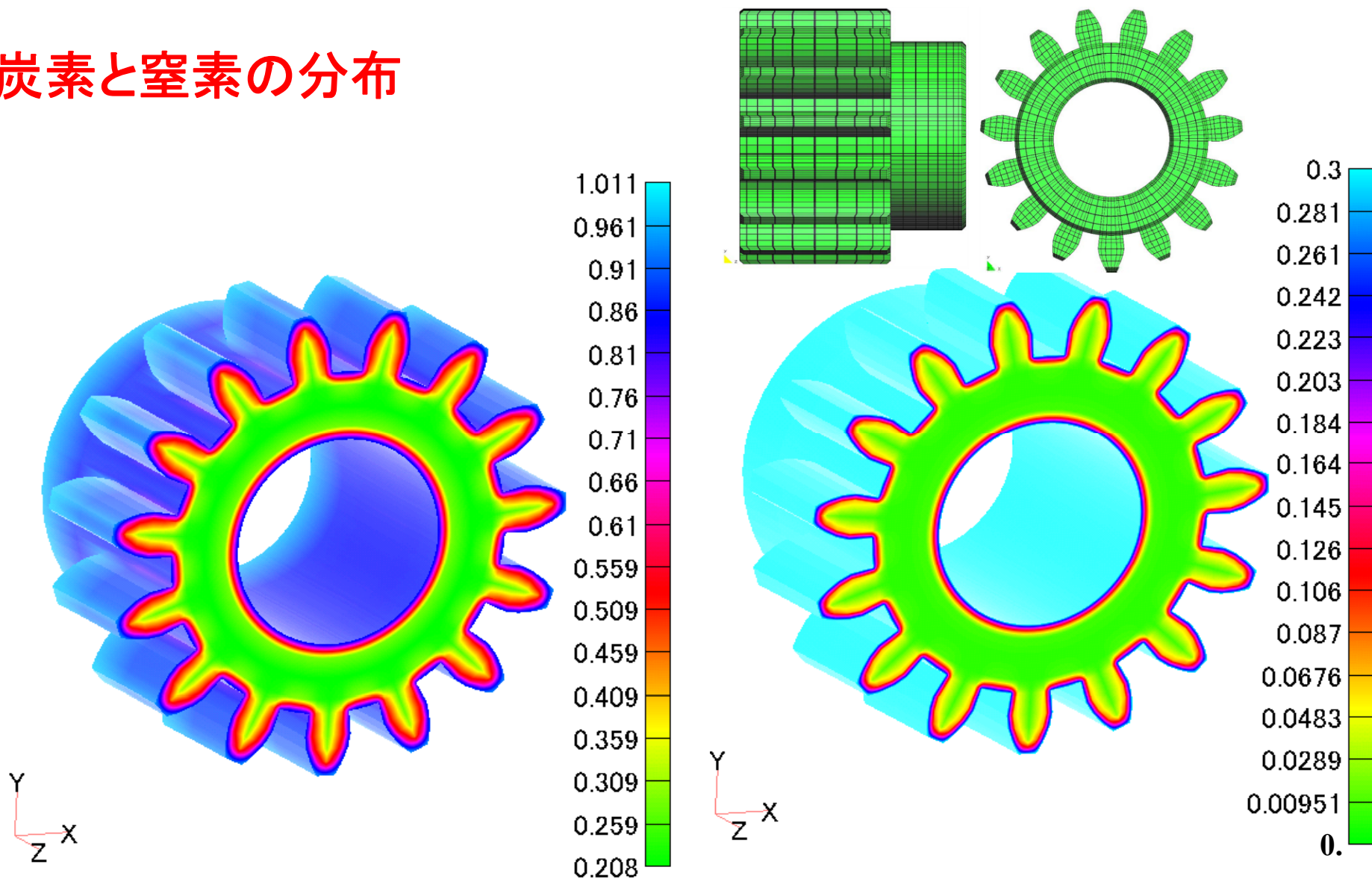


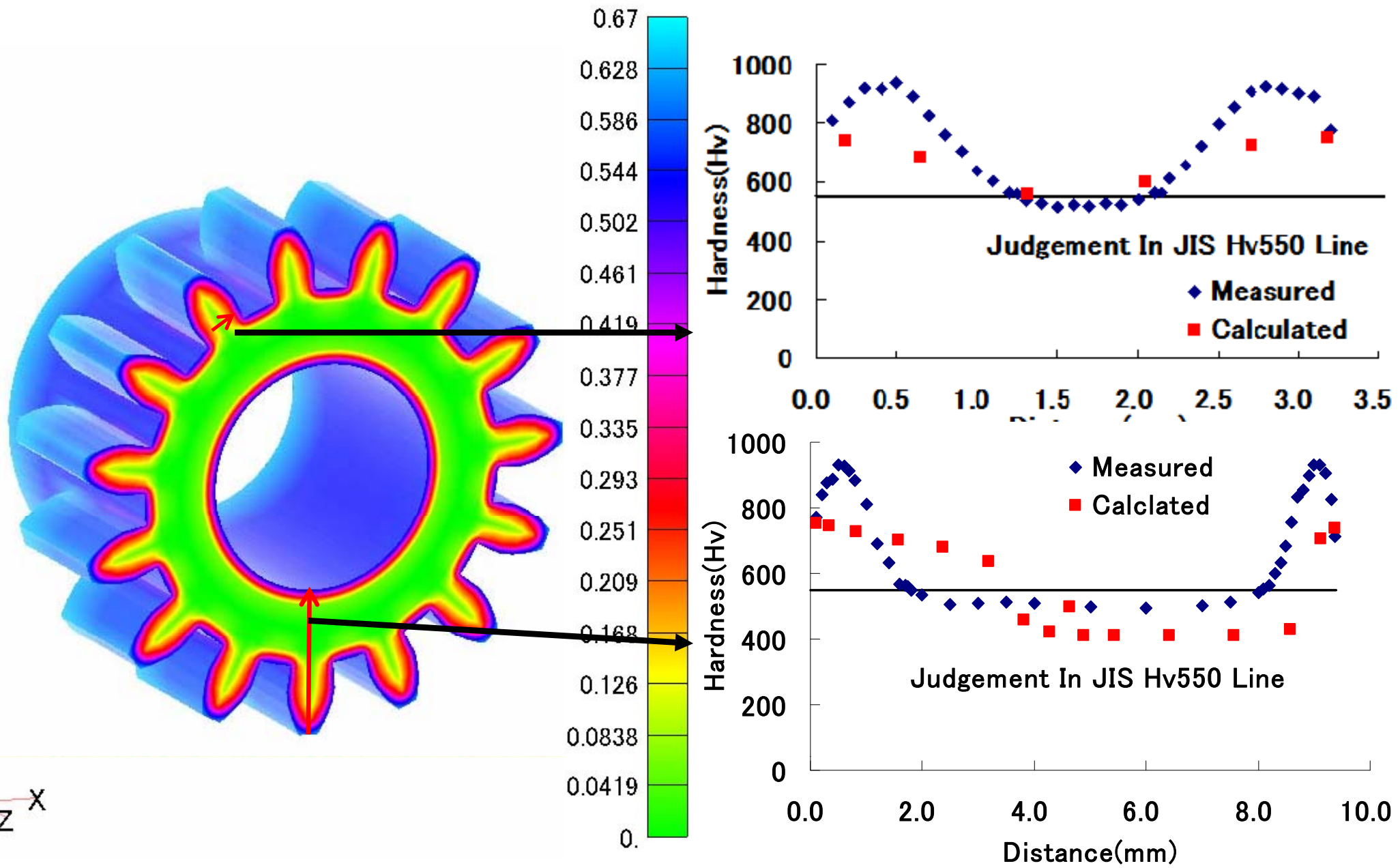
残留応力

肌焼き鋼の浸窒焼入



炭素と窒素の分布





3. 今後の展開予定

機械部品の高精度・高強度化を目指して

- 各メンバーによる**相変態**利用技術向上の推進
- とくに、表面硬化処理とくに**浸炭・窒化硬化処理**への展開
- 省エネルギー，CO₂ガス低減を目指した技術の確立
- MSTC－IFの成果を基盤に，プロジェクト化をめざしたい。

ご清聴感謝