

アイデアファクトリー成果報告

(テーマ1: 相変態を利用した高機能・高精度
機械部品の生産技術開発の調査検討)

平成22年度 MSTCアイデアファクトリー

テーマ1:

相変態を利用した高機能・高精度
機械部品の生産技術開発の調査検討

リーダー: 井上達雄 (福山大学 構造・材料開発研究センター)

報告: 岡村一男 (住友金属工業 総合技術研究所)

これまでの関連研究実績

- ・IMSアイデアファクトリー
「機械部品の表面処理における冷却剤の影響に関する調査研究」
- ・IMS-VHT (IMS国際共同研究プロジェクト)
「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」
成果報告書
- ・NEDO産業技術実用化開発助成プロジェクト
「高精度真空浸炭加圧ガス冷却システムおよびその制御技術開発に関する研究」
- ・IMS論文賞 (H17,18年度) その他、成果発表の学術論文、報告など
- ・NPO法人変態・熱・力学研究協会の設立と活動

1. 実施概要

①研究概要

【目的・背景】

- ・機械部品の表面硬化処理による高機能化と寸法精度の両立
- ・シミュレーションの適用による開発コスト削減

【課題】

- ・冷却剤(その劣化を含む)と冷却方式による冷却能の変化
- ・相変態(特に拡散型変態)の高精度予測
- ・鋼材の材料挙動(変態塑性)のメカニズム解明と数学モデル化

【研究・検討手法】

- ・熱伝達係数のデータベース化・測定方法の国際標準化
- ・拡散型相変態シミュレーション: 新手法検討, 古典的方法見直し
- ・変態塑性挙動: 実験および理論両面から検討・熱力学データベース

【成果】

- (1) 各種冷却剤の熱伝達率データを蓄積した.
- (2) 冷却油の劣化形態と劣化に伴う熱伝達率変化データの蓄積.
- (3) フェーズフィールド法による力学場と連成させた相変態解析の枠組みが構築された.
- (4) 古典的手法での拡散型変態の予測精度を向上する試みが示された.
- (5) 変態塑性について, 実験および理論的考察から応力の効果が検証された.
- (6) 熱処理シミュレーションコードCOSMAPの機能拡張(高周波焼入れ)
- (7) 表面硬化処理材のピッチング疲労強度評価, シミュレーションの溶接プロセスへの拡張が示された.

②実施体制

リーダー 井上達雄
協力学術 奈良崎 道治
協力学術 巨 東英
教授

協力学術 渡邊 陽一

協力学術 上原 拓也

津乗 充良
市谷 克実
佐々木 信夫
堤 一之

七野 勇人
岡村 一男
石毛 健吾
金森 英夫

福山大学 構造・材料開発研究センター・教授)
宇都宮大学 工学部 機械システム工学科 准教授
埼玉工業大学大学院 工学研究科 物質科学工学専攻

仙台高等専門学校 マテリアル環境工学科 材料工学科
教授

山形大学 大学院 理工学研究科 機械システム工学分野
准教授

(株)IHI 基盤技術研究所 構造研究部 構造解析グループ 主任研究員
出光興産(株) 営業研究所 加工油グループ グループリーダー
川崎重工業(株) 営業推進本部 国際部 シニアアドバイザー
(株)神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所 構造強度研究室
主任研究員

(株)小松製作所 開発本部 材料技術センタ 技術グループ チーム長
住友金属工業(株) 総合技術研究所 主監部長研究員
(株)IHI 基盤技術研究所 材料研究部 部長
出光興産(株) 営業研究所 所長

1. 実施概要

(テーマ1: 相変態を利用した高機能・高精度
機械部品の生産技術開発の調査検討)

③個別実施事項

- 福山大学 : 全体の総括, **変態塑性特性の理論的, 実験的検討**
- 神戸製鋼所 : **変態塑性特性と応力場の相関**の検討
- 山形大学 : 各種表面処理に伴う**金属材料力学特性のミクロシミュレーション**
- 住友金属工業 : 変態塑性特性の実験的把握, 材料の力学的挙動の結晶塑性学的特性評価, **拡散型変態の古典論による予測**
- 宇都宮大学 : **冷却剤の冷却能関連の国際的活動状況の調査**
- 出光興産 : **熱処理油熱伝達特性の経年変化の把握**
- 川崎重工業 : 諸外国における表面処理技術動向の調査研究
- 埼玉工業大学 : ガス冷における熱伝達特性の評価, **高周波熱処理のシミュレーション**
- 仙台高等専門学校: 真空浸炭窒化およびガス冷却による表面組織制御とその高機能化処理への応用
- コマツ : 各種表面処理による歯車などの**機械部品の強度特性**
- IHI : **溶接における相変態を考慮したシミュレーション**の実施

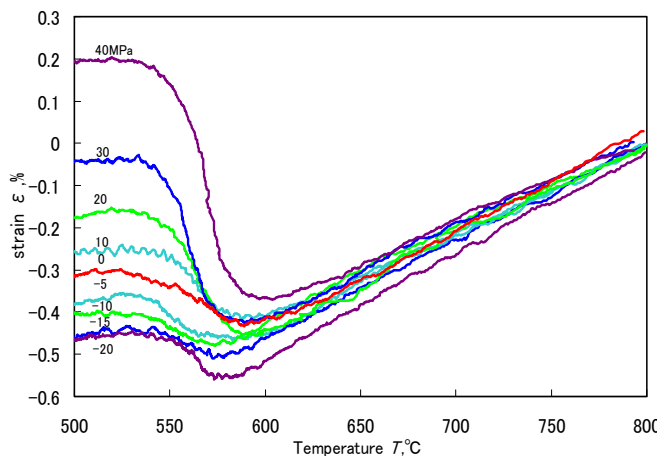
2. 実施の成果 (1)

変態塑性係数算出の試み

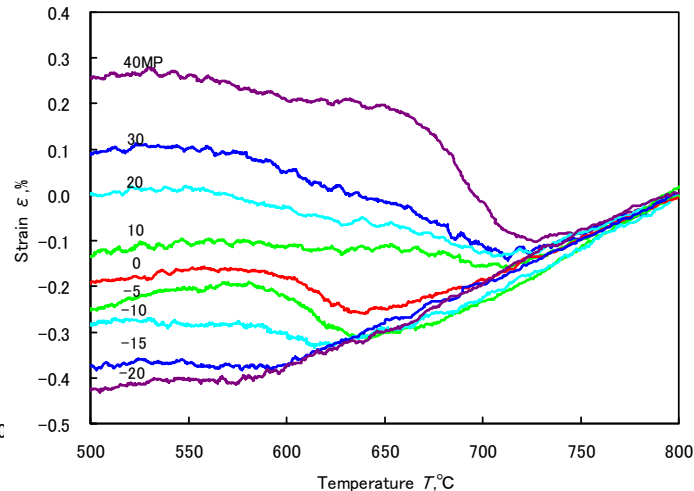
福山大学 構造・材料開発研究センター
井上達雄

変態塑性現象の測定例

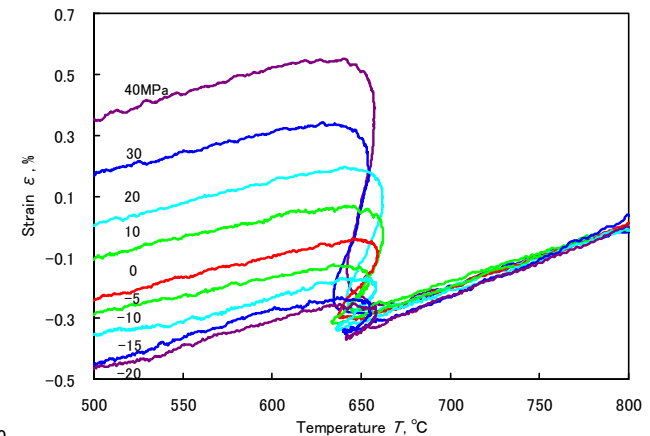
温度－伸び線図(実験結果)の例



高張力鋼



耐火鋼

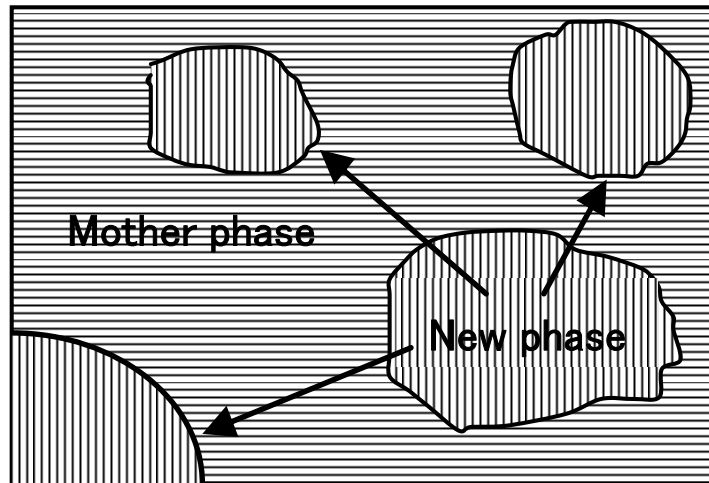


炭素鋼

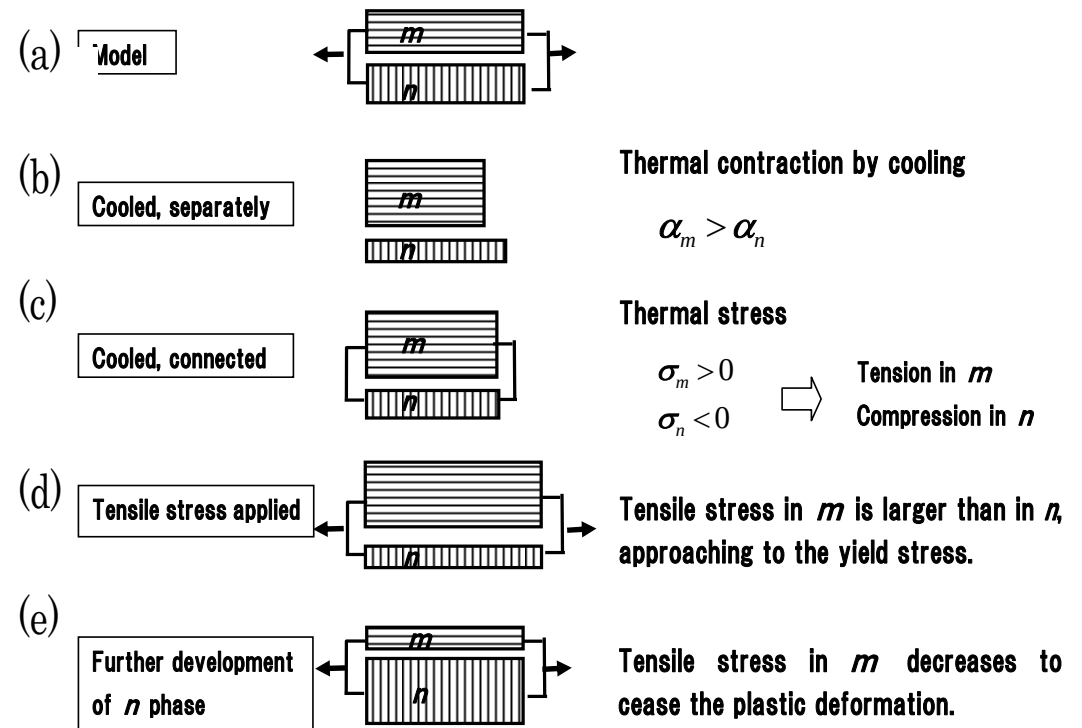
- これらの結果から、変態塑性係数を同定＝材料学会データベースMATEQに移植
- 鋼種による形の違い＞変態温度の応力依存性＋変態発熱の効果
- 実験が煩雑＞解析的に求める可能性

変態塑性モデル 母相から新相の発生と成長

実際



一次元2本棒モデル



支配方程式

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

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

適合式とつり合い式

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

$$\sigma = \sigma_m (1 - \xi) + \sigma_n \xi$$



増分形

$$\begin{aligned}\dot{\sigma} &= \dot{\sigma}_m (1 - \xi) + \dot{\sigma}_n \xi + \sigma_m (-\dot{\xi}) + \sigma_n \dot{\xi} \\ &= G_m (\dot{\varepsilon}_m - \alpha_m \dot{T}) (1 - \xi) + G_n (\dot{\varepsilon}_n - \alpha_n \dot{T} - \beta \dot{\xi}) \xi - (\sigma_m - \sigma_n) \dot{\xi}\end{aligned}$$

結果

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{G} \left[\dot{\sigma} + (\alpha_m (1 - \xi) / (1 / G_m) + \alpha_n \xi / (1 / G_n)) \dot{T} + \beta \dot{\xi} \xi G_n + (\sigma_m - \sigma_n) \dot{\xi} \right]$$

ただし

$$\begin{aligned}G &= (1 - \xi) / (1 / G_m) + \xi / (1 / G_n) \\ \frac{1}{G_m} &= \frac{1}{E_m} + \frac{p}{H_m}, \quad \frac{1}{G_n} = \frac{1}{E_n} + \frac{p}{H_n} \\ &\text{ここに、塑性のとき } p=1, \text{ 弾性のとき } p=0\end{aligned}$$

変態開始温度 $T_s=780^{\circ}\text{C}$
 終了温度 $T_f=680^{\circ}\text{C}$
 [冷却開始温度 $T_0=900^{\circ}$]

応力負荷がない場合

線膨張係数

$$\alpha_m = 2.261 \times 10^{-5} \quad , \quad \alpha_n = 1.564 \times 10^{-5} \quad 1/\text{K}$$

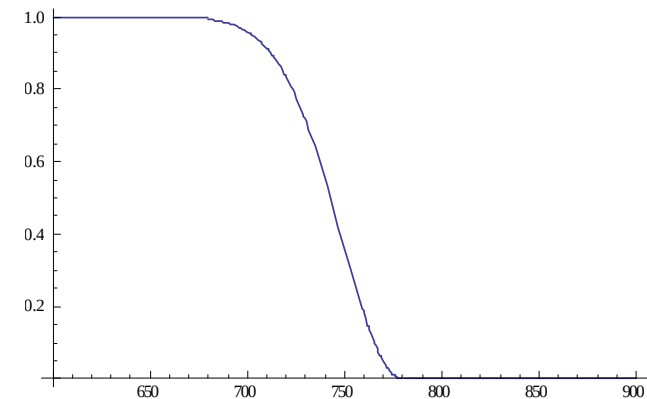
変態カイネティックス

$$\xi_p = 1 - \exp[-k(T - T_s)^n]$$

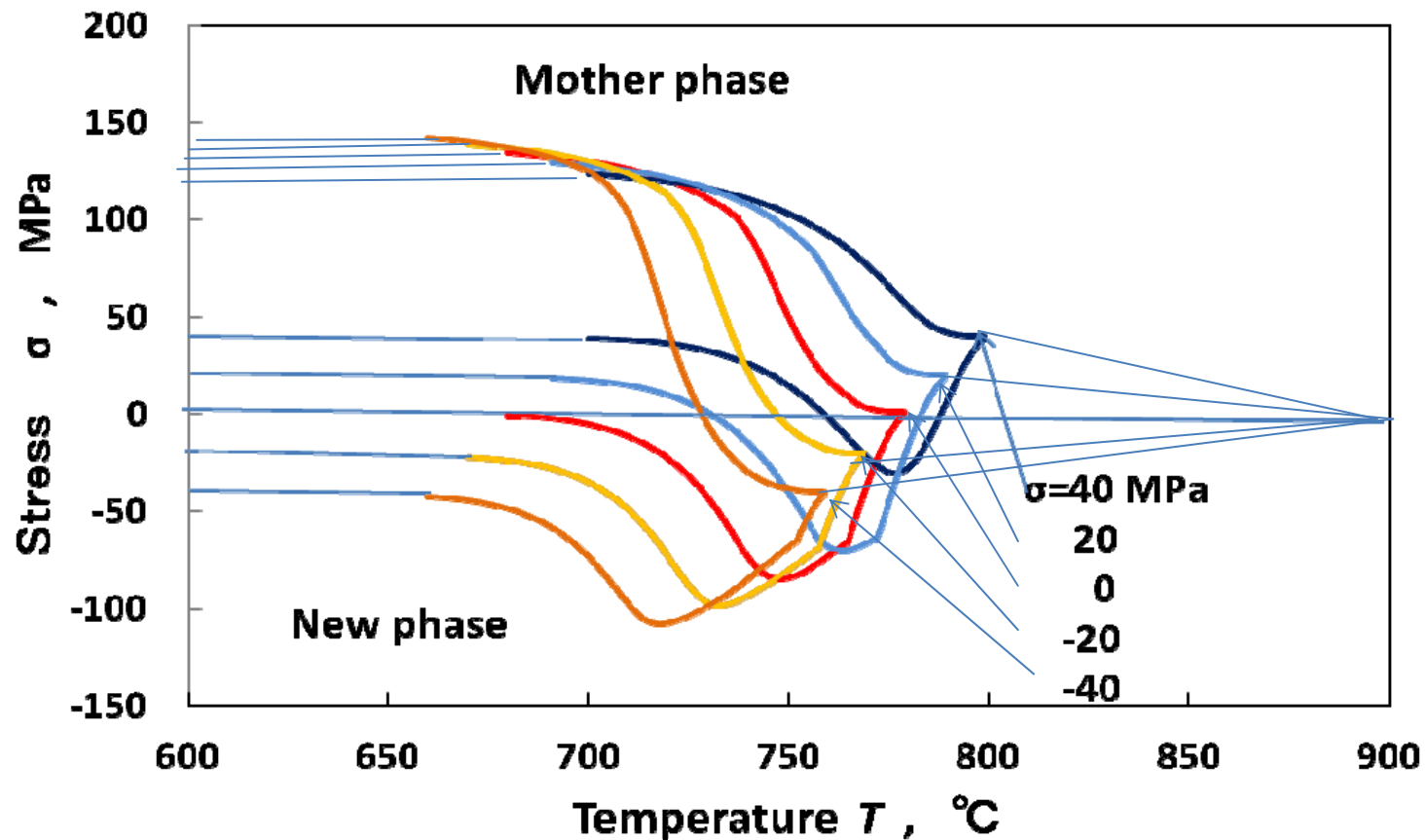
変態温度の応力依存性
 Clausius-Clapeyron の式

$$dT/d\sigma = 0.4 \quad \text{K/Mpa} >>>$$

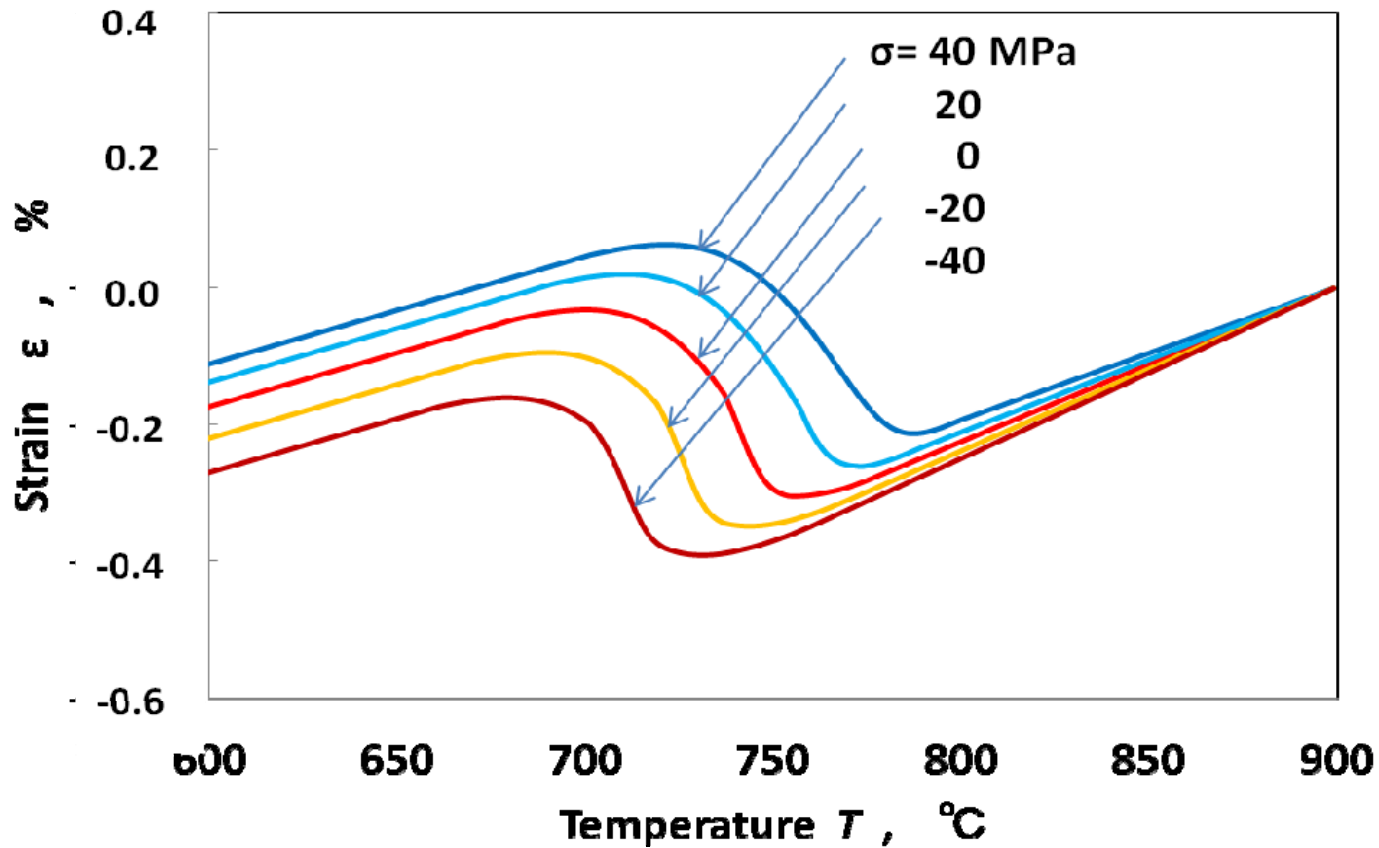
$\sigma = 40\text{MPa}$ の時 20°C 上昇



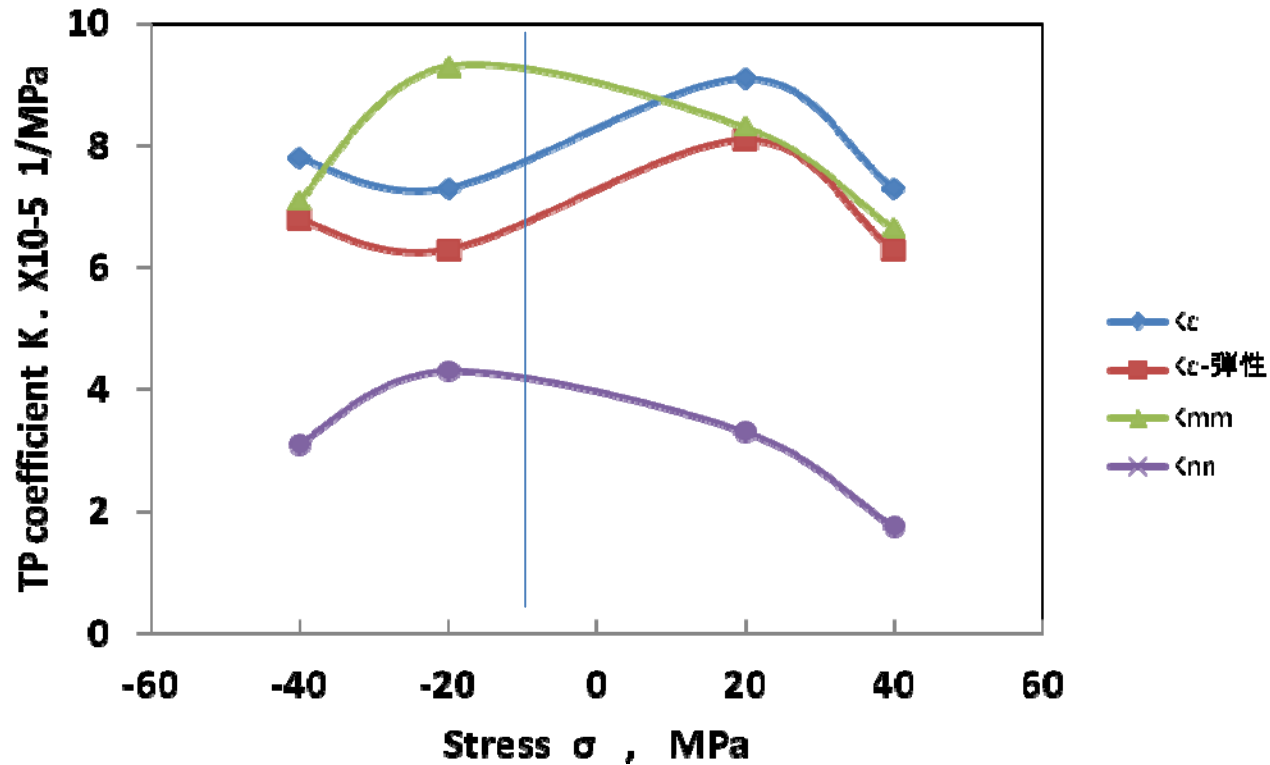
解析結果 Variation of stresses



Elongation -Temperature Diagram



算出結果 TP Coefficient



2. 実施の成果(2)

変態塑性特性と応力場の相関の検討

神戸製鋼所
堤 一之

目的

変態塑性係数の応力場依存性を明らかにするため、炭素量が0.1%以下で、かつ確実にマルテンサイト変態する析出効果型ステンレスについて、単軸および曲げ試験により変態塑性係数を求める。

表1 化学成分

(wt%)

	C	Si	Mn	Cr	Ni
材料A*	0.05	0.29	0.96	15.67	4.23
材料B	0.015	0.51	0.56	13.59	4.18

*) 引張試験用

単軸試験による変態塑性係数の同定

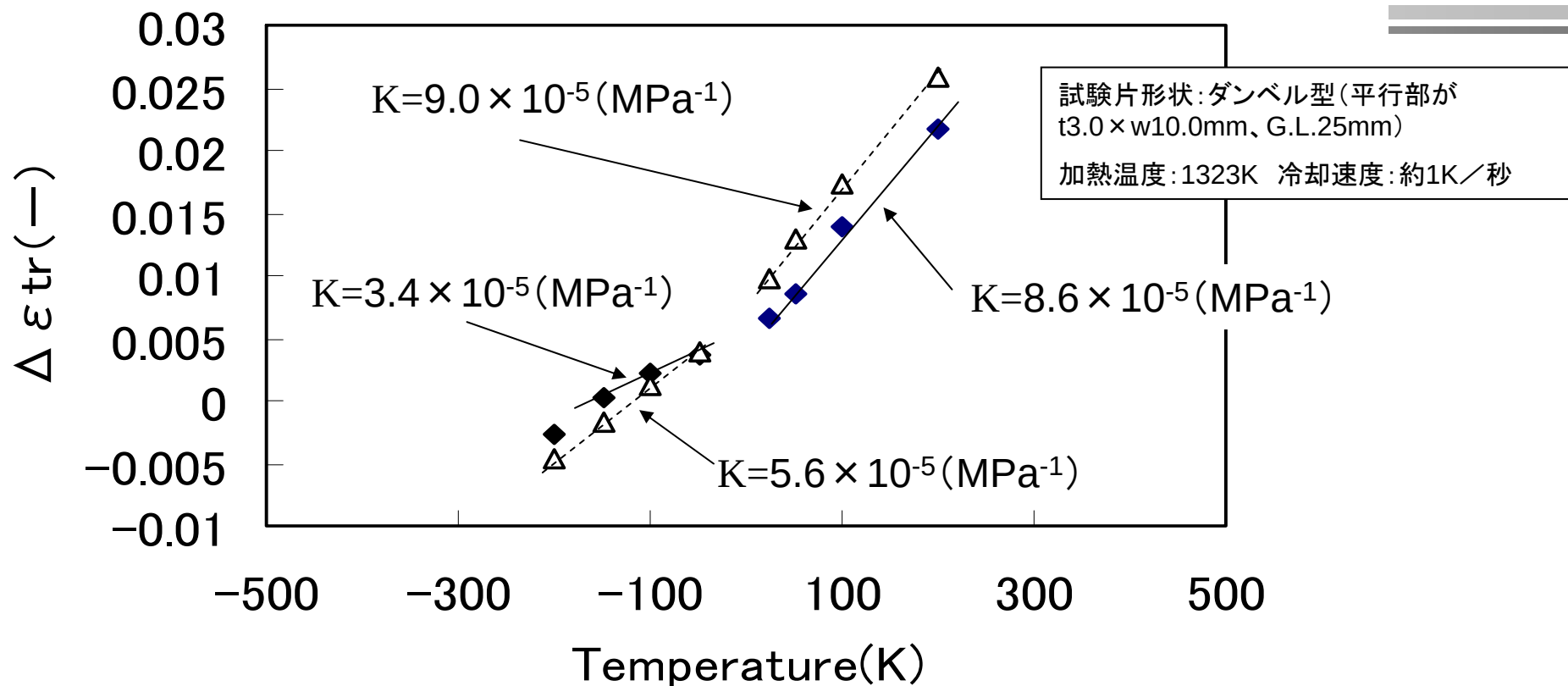


図 相変態時の歪増分と荷重の関係

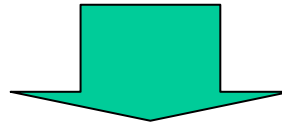
材料A,Bの引張応力下での変態塑性係数は、ほぼ一致
引張, 圧縮で変態塑性係数は異なる

試験方法による変態塑性係数の相違

表 負荷応力形態と変態塑性係数の関係

(1/MPa)

	By axial test		By bending test
Material_A	8.6×10^{-5}	3.4×10^{-5}	9.7×10^{-5}
Material_B	9.0×10^{-5}	5.6×10^{-5}	1.5×10^{-4}



まとめ

単軸および曲げ試験によって、SUS630の変態塑性係数を同定し、応力場の相違によって変態塑性係数が異なることを確認した。

今後の課題

- ・組織評価などを実施し、応力場と変態塑性係数の関係を明確にする。

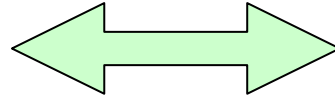
2. 実施の成果 (3)

金属材料の力学特性の解析

山形大学
上原 拓也

金属材料の力学特性解析

巨視的な力学特性

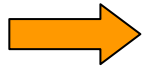


微視組織・微視構造

マルチスケール解析

連続体力学＋微視組織を考慮したモデル

均質化法, 結晶塑性など



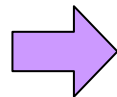
微視組織の影響が不完全

分子動力学法: 領域サイズが小さすぎる

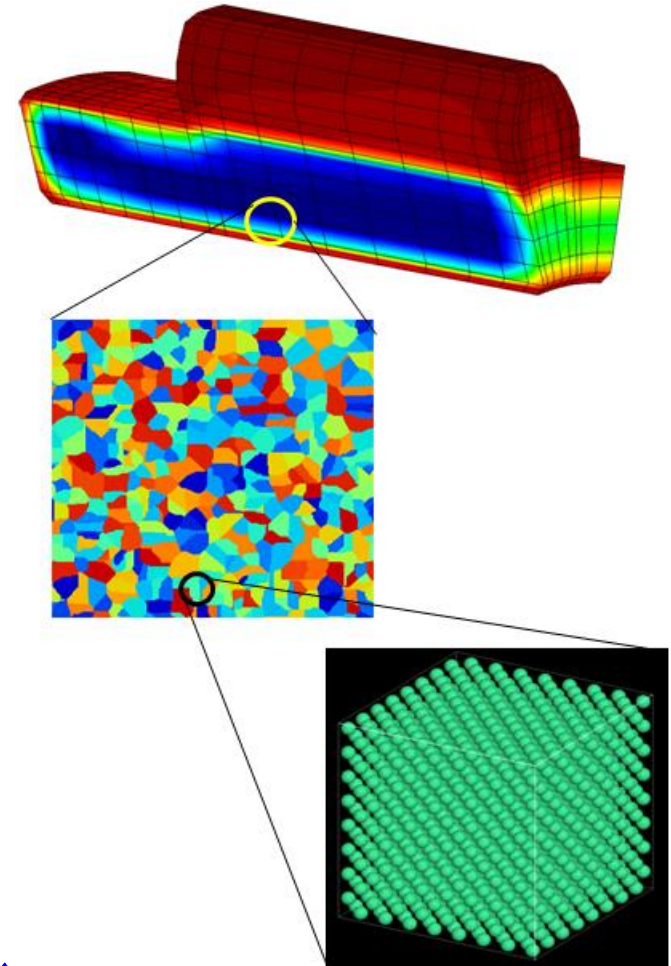
微視組織そのものを直接取り扱う必要

微視組織の動的変化

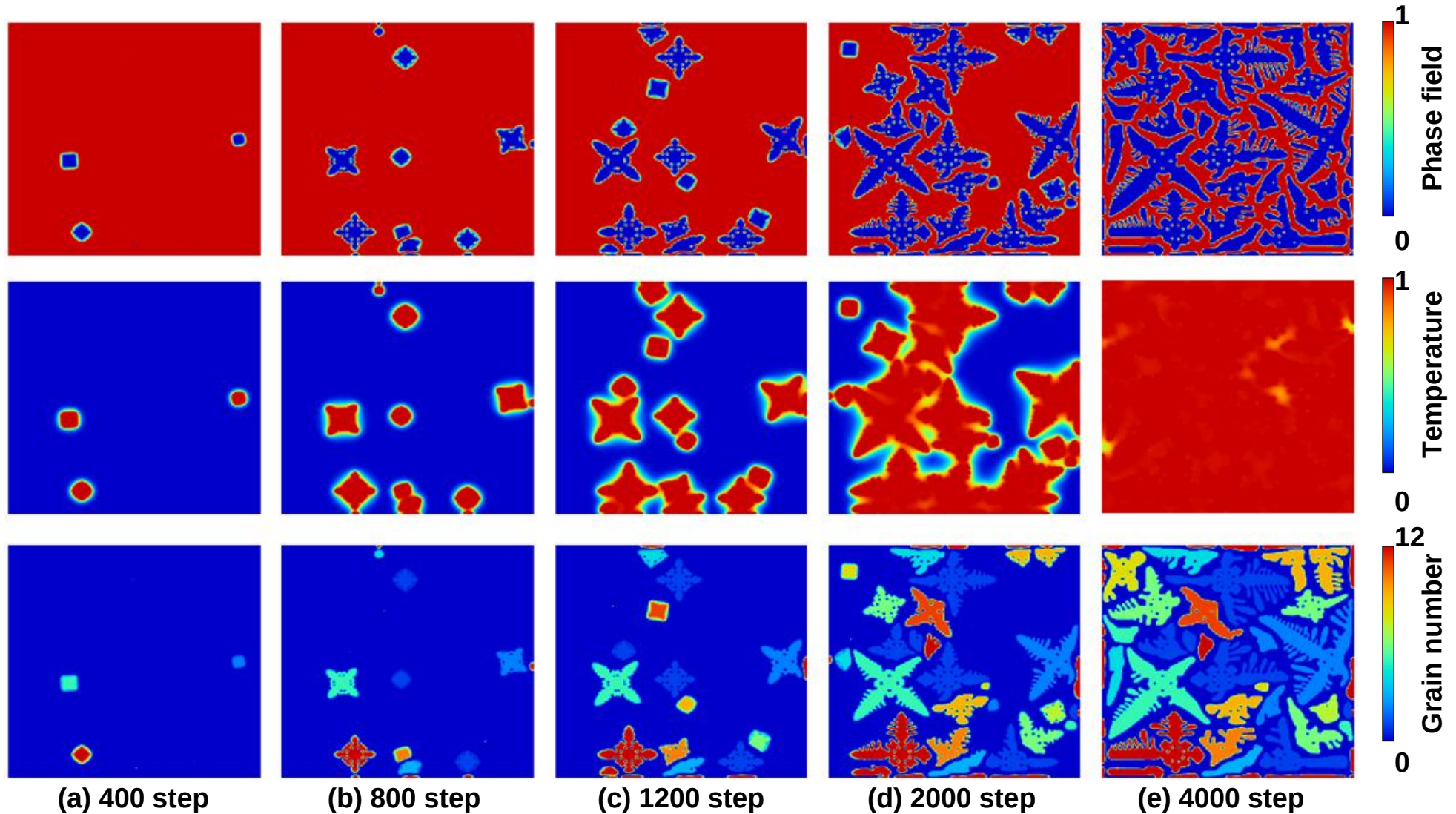
微視組織内の応力分布



フェーズフィールドモデル

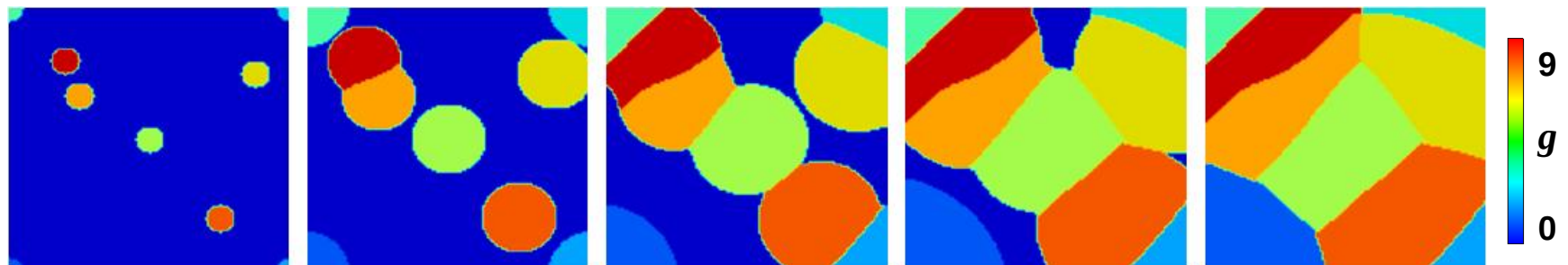


凝固組織(2)

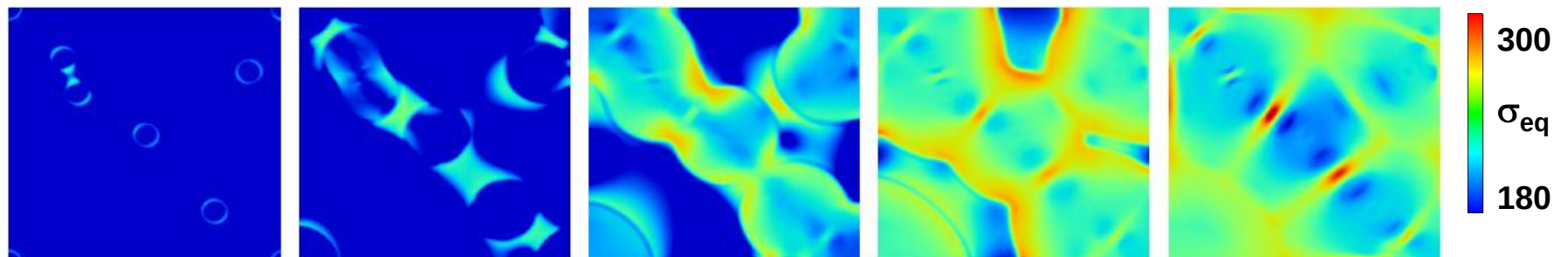


多結晶モデル

結晶粒番号



相当応力



(i) $t = 0.01$

(ii) $t = 1.0$

(iii) $t = 2.0$

(iv) $t = 5.0$

(v) $t = 100.0$

変態塑性式の導入

$$\dot{\epsilon}^{tp} = K_p \dot{\phi} s \quad s: \text{偏差応力}$$

2次元シミュレーション

負荷過程:

一軸方向(x 方向)に一定の引張り荷重負荷

温度一定($T=100$)

変態過程:

一定速度で冷却($T=100$ から 0 へ)

相変態(応力依存): $\dot{\phi} = -k_v (1 + K_s \sigma_m) \phi (T_s - T) \quad (\text{for } T < T_s)$

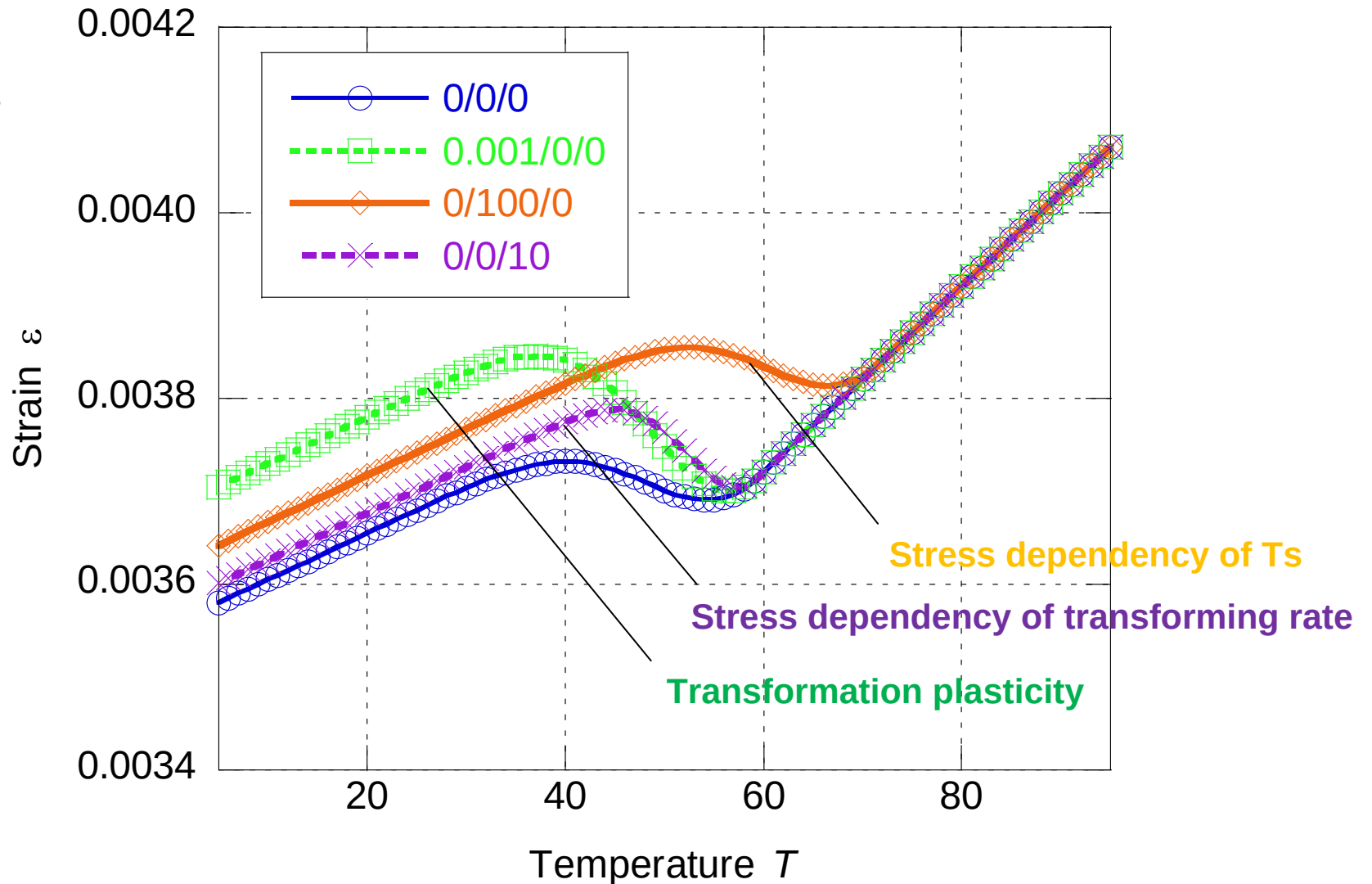
$$T_s = T_0 + K_t \sigma_m$$

σ_m : 平均応力, T_s : 変態開始温度

計算結果

Parameter:

$K_p / K_t / K_s$



2. 実施の成果（4）

拡散型変態の古典論による予測

住友金属工業
岡村 一男

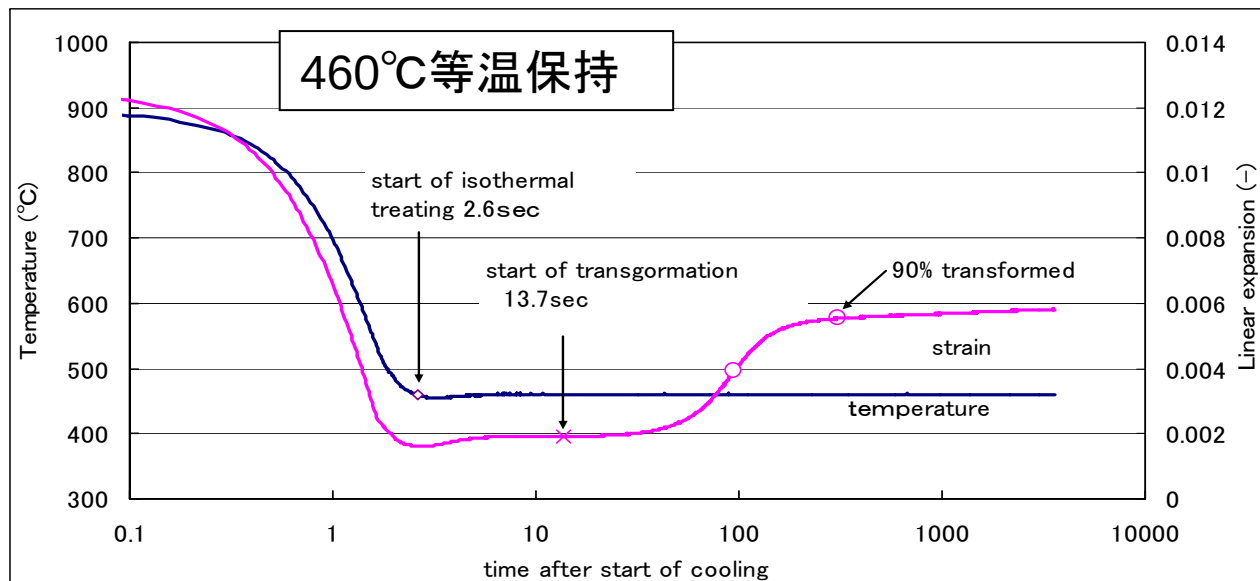
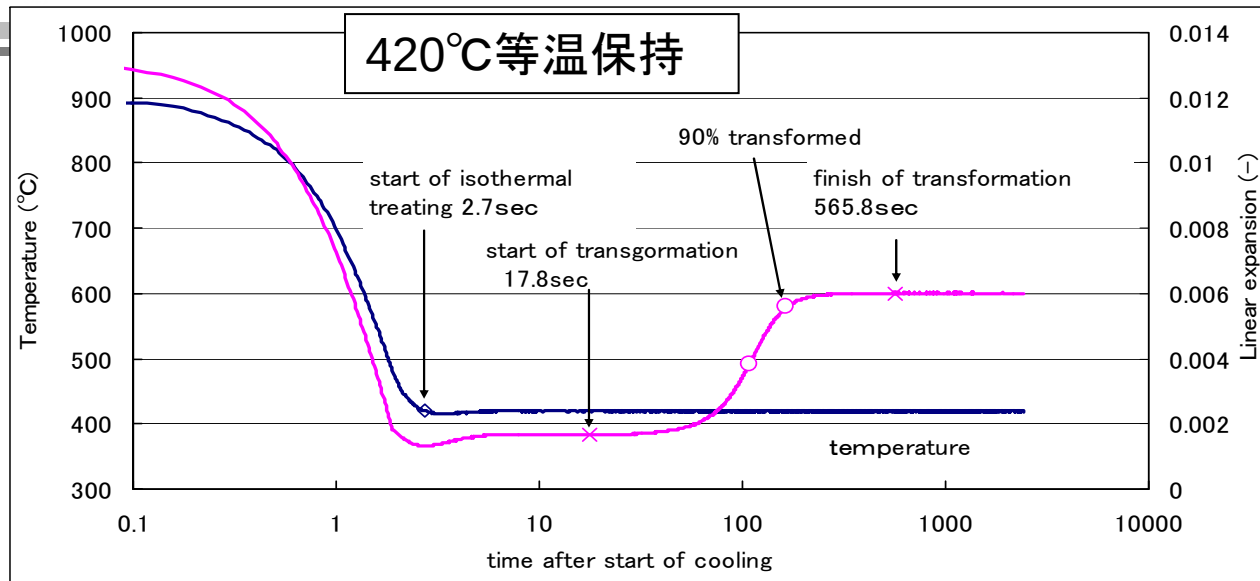
拡散型変態の古典論による予測

材料学会データベース「MATEQ」の
SCr450鋼 (0.5C－1Cr)等温変態膨張曲線を用いて
KJMA (Kolmogorov-Johanson-Mehl-Avrami) 式

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

のパラメータ $f(T)$, $n(T)$ を同定し熱処理シミュレーションに供する

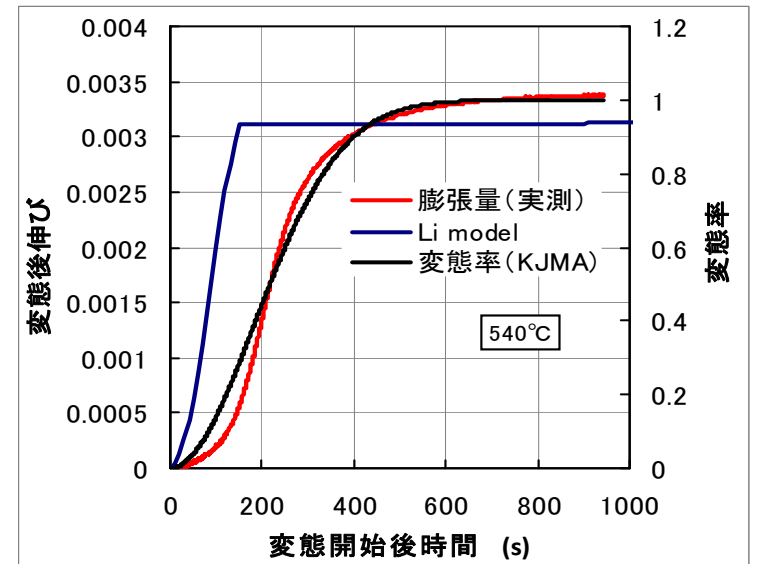
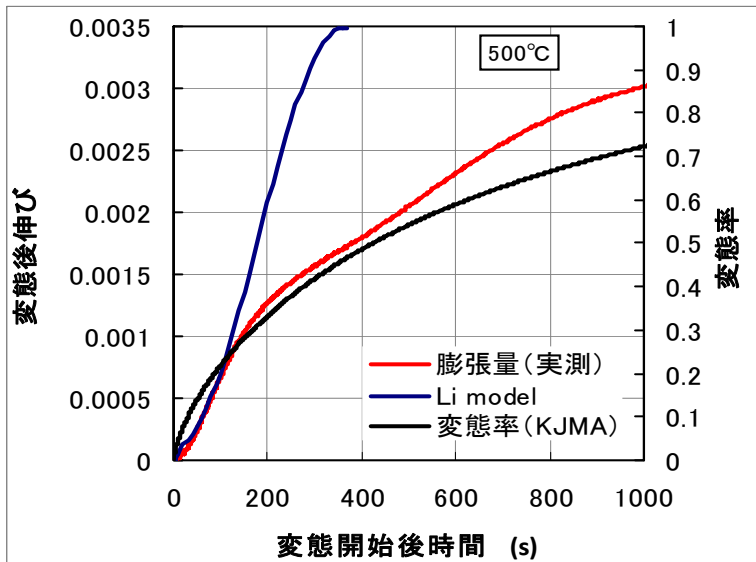
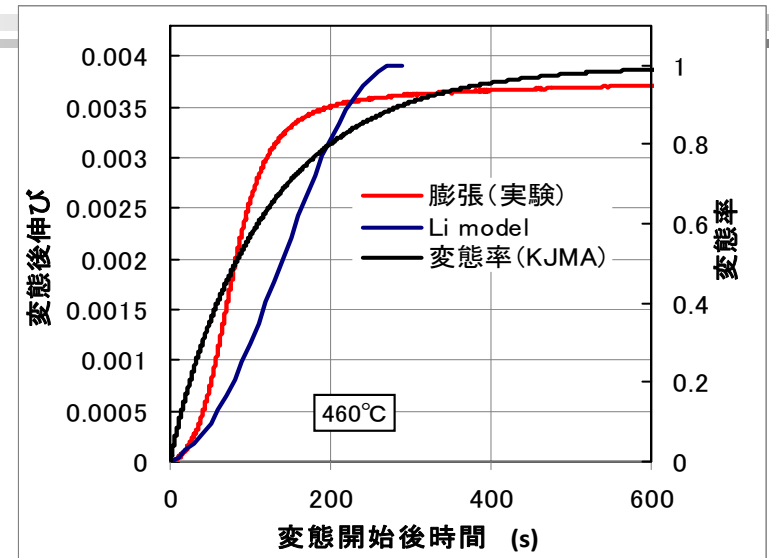
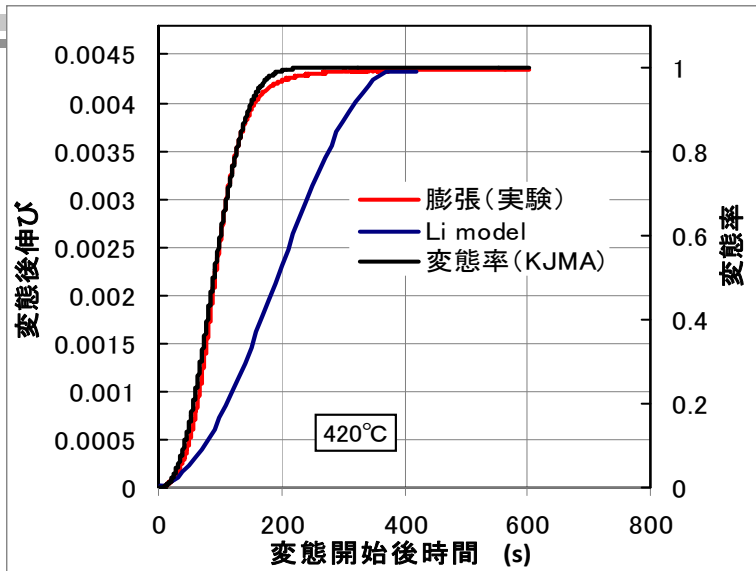
50%および90%変態時間の同定



完全変態の場合には、変態開始前および終了後のある期間の伸びの平均値から開始前後の試験片長さを求め、膨張量と変態率が比例するとして、任意の変態時刻を求めた。

変態が完了しない場合には前ページで示した密度計算式での変態膨張量と実測膨張量の関係を用い、密度計算式での膨張量からその温度での100%変態膨張量を求め、この値と試験時の膨張量から任意の変態時刻を求めた。

変態速度に関するKJMAとLiモデルの比較(一例)



2. 実施の成果 (5)

冷却剤の冷却能関連の国際的活動状況の調査

宇都宮大学 奈良崎道治

◎熱処理用冷却剤の冷却能測定法の規格化の動向

ISO Standards (ISO規格): 1995年～

ISO 9950:1995 Industrial quenching oils -- Determination of cooling characteristics -- Nickel-alloy probe test method (直径12.5mmニッケル合金棒)

ASTM Standards (ASTM規格):

(2001年～: 鋼用焼入れ油, 水溶性ポリマー焼入れ液)

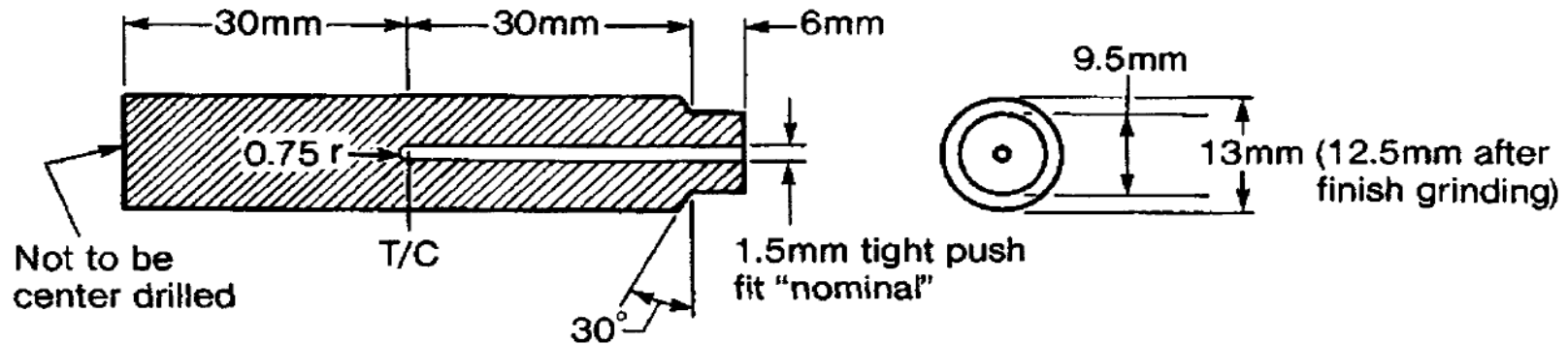
・D 6200 – 01 Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Quench Oils by Cooling Curve Analysis (直径12.5mmニッケル合金棒)

・D 6482 – 01 Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Aqueous Polymer Quenchants by Cooling Curve Analysis with Agitation (Tensi Method) (直径12.5mmニッケル合金棒)

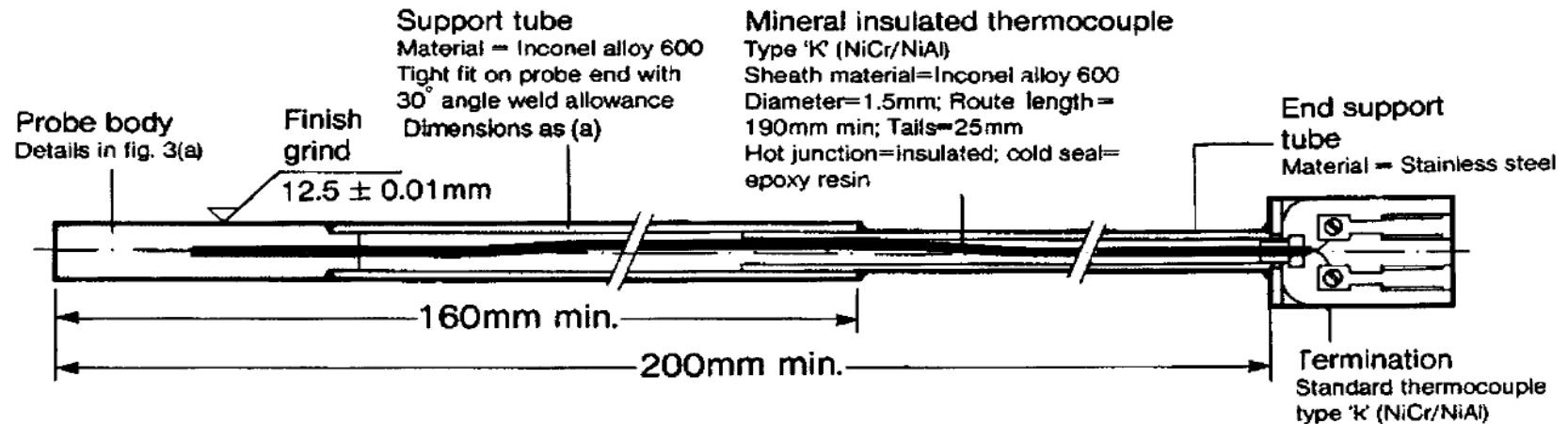
(2010年～: アルミ合金用水溶性ポリマー焼入れ液)

・D7646 – 10 Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Aqueous Polymer Quenchants for Aluminum Alloys by Cooling Curve Analysis (直径10mm銀棒: JIS K2242 B法を適用)

ISO & ASTM インコネル600プローブ (ISO 9950 & ASTM D6200-01)



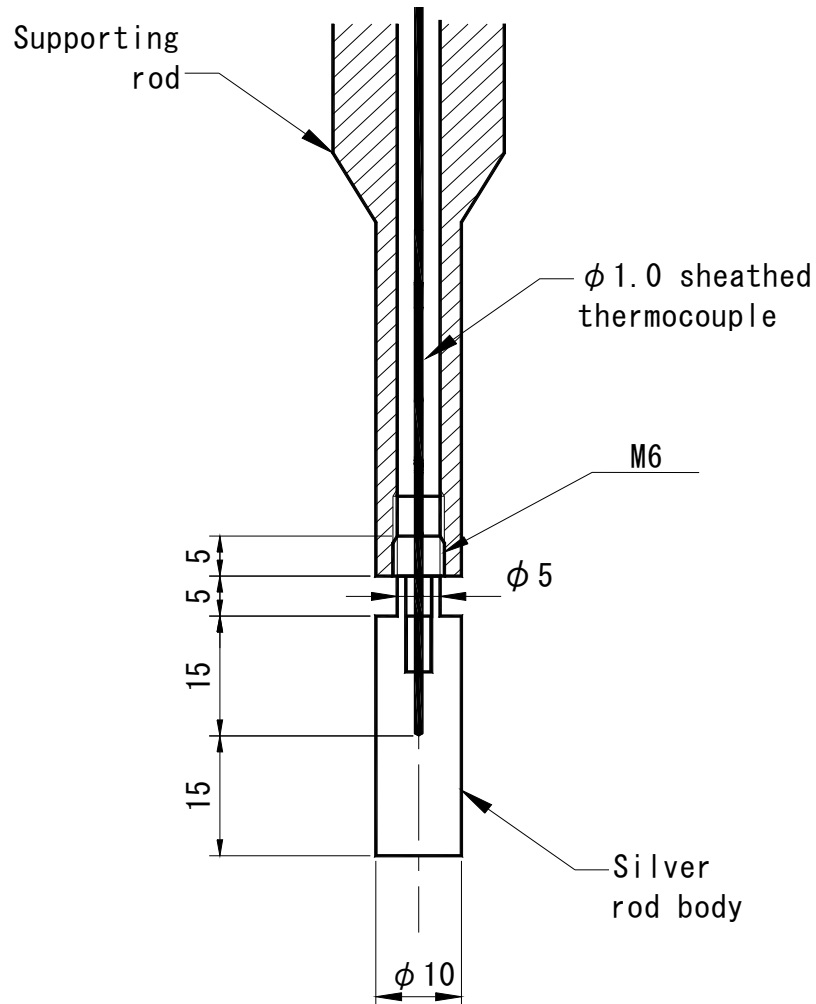
(a) Probe details



(b) General assembly

銀棒プローブ

(JIS K2242 B法 & ASTM D7646-10)

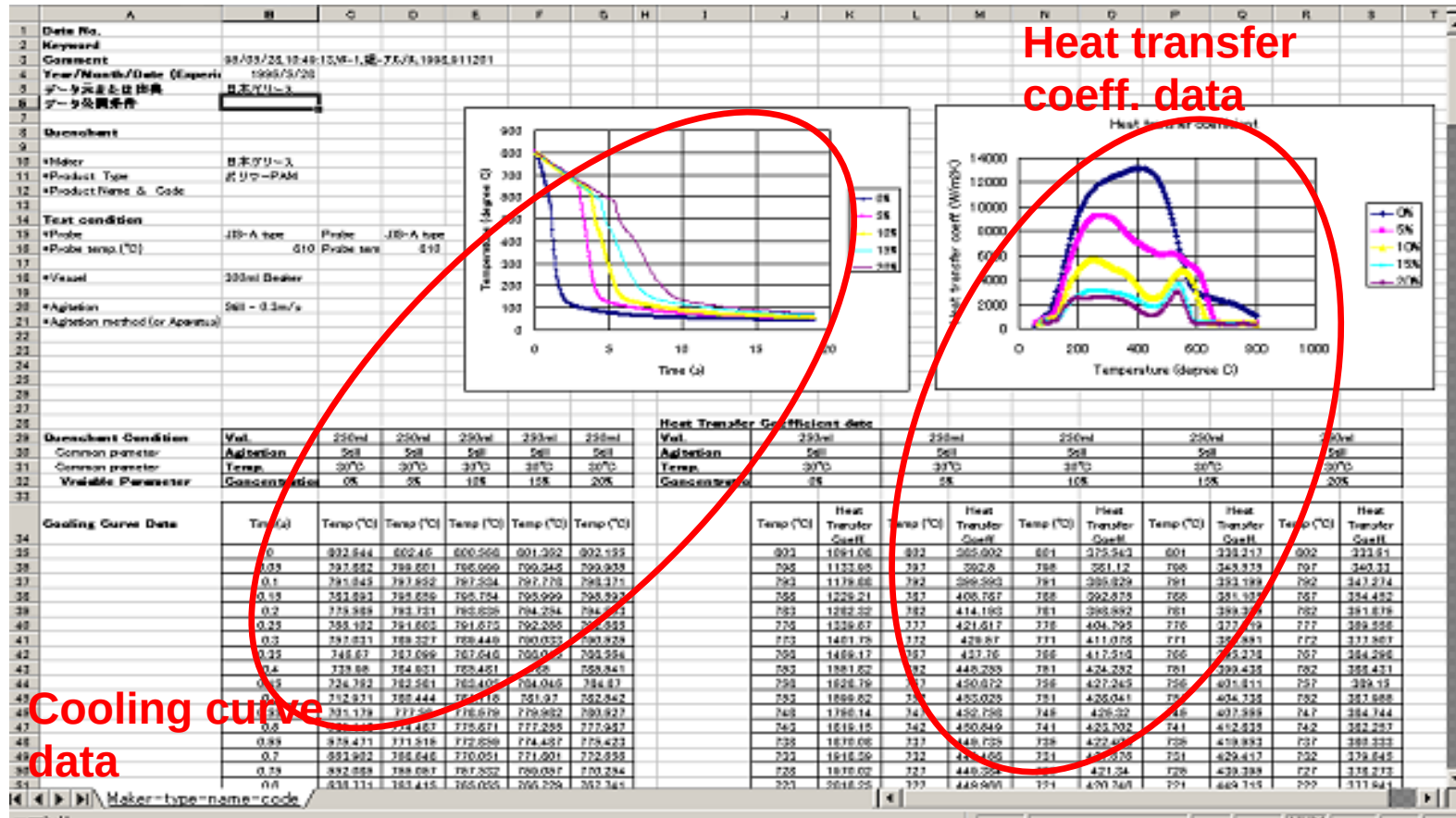


銀棒による冷却特性および熱伝達率データの収集



A method (surface) B method (center)

Silver Probes



Example of Data Sheet

◎焼入れ冷却剤の冷却能測定法の国際規格化とデータベース化の動向

- 1) 日本熱処理技術協会焼入れ関連研究部会でのWG活動による冷却能データの収集と銀棒法の国際規格化活動(進行中)
- 2) 国際熱処理表面処理連盟(IFHTSE)液体冷却Activity Groupの国際規格化活動(進行中)
- 3) 国際熱処理表面処理連盟(IFHTSE)液体冷却剤のデータベース・プロジェクト“GLOBAL DATABASE FOR COOLING INTENSITIES OF LIQUID QUENCHANTS”, (Prof. Liscic提案, 2011より開始)

2. 実施の成果(6)

熱処理油熱伝達特性の経年変化の把握

出光興産
市谷 克実

熱処理油熱伝達特性の経年変化の把握

調査対象

- ①代表的ホット油 : ダフニーハイテンプA
- ②代表的コールド油 : ダフニーマスタートクエンチA

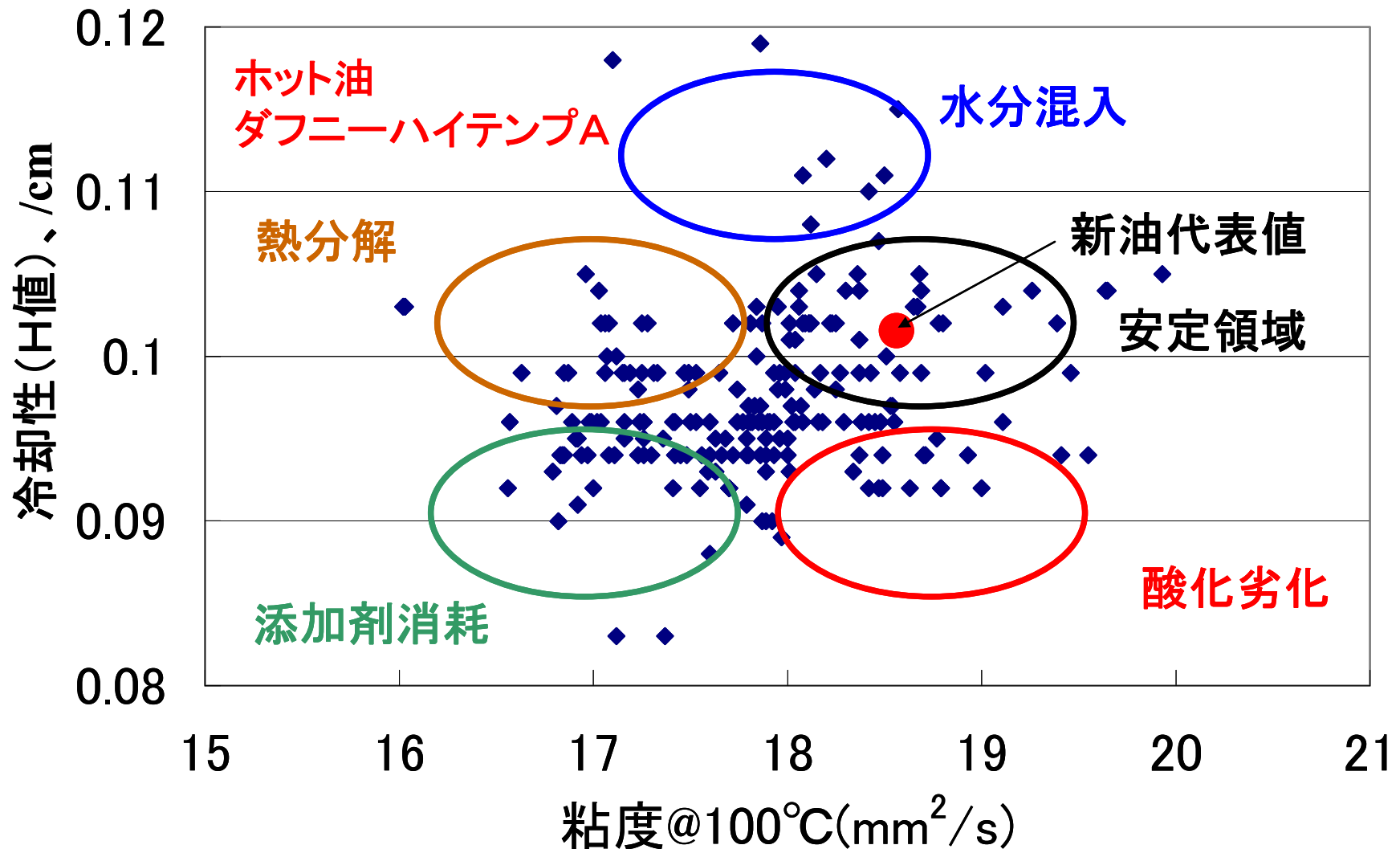
調査方法

- ①、②を使用しているユーザー約100箇所で、
経年劣化による熱伝達特性の変化を調査

結果の概要

- ・同じ油でも、使用状態で劣化形態が異なり、
冷却性の変化も異なっている。
- ・劣化形態は、熱分解、酸化劣化、添加剤消耗、
水分混入に分けられる。
- ・熱伝達特性は、酸化劣化、添加剤消耗により低下、
水分混入により上昇する。

熱処理油熱伝達特性の経年変化の把握



まとめ

劣化形態	劣化の状態	熱伝達特性の変化
熱分解	粘度低下(軽質分生成による)	↑ 冷却性上昇 (沸騰段階拡大)
酸化劣化	粘度上昇(酸化重合による)	↓ 冷却性低下 (沸騰段階縮小)
添加剤消耗	冷却性向上剤の減少	↓ 冷却性低下 (対流段階上昇)
水分混入	微量水分の上昇	↑ 冷却性上昇 (対流段階低下)

現場の劣化状態を反映した熱伝達率を与えることが必要

2. 実施の成果 (7)

高周波熱処理のシミュレーション

埼玉工業大学
巨 東英

2. 高周波熱処理のシミュレーションの実施成果

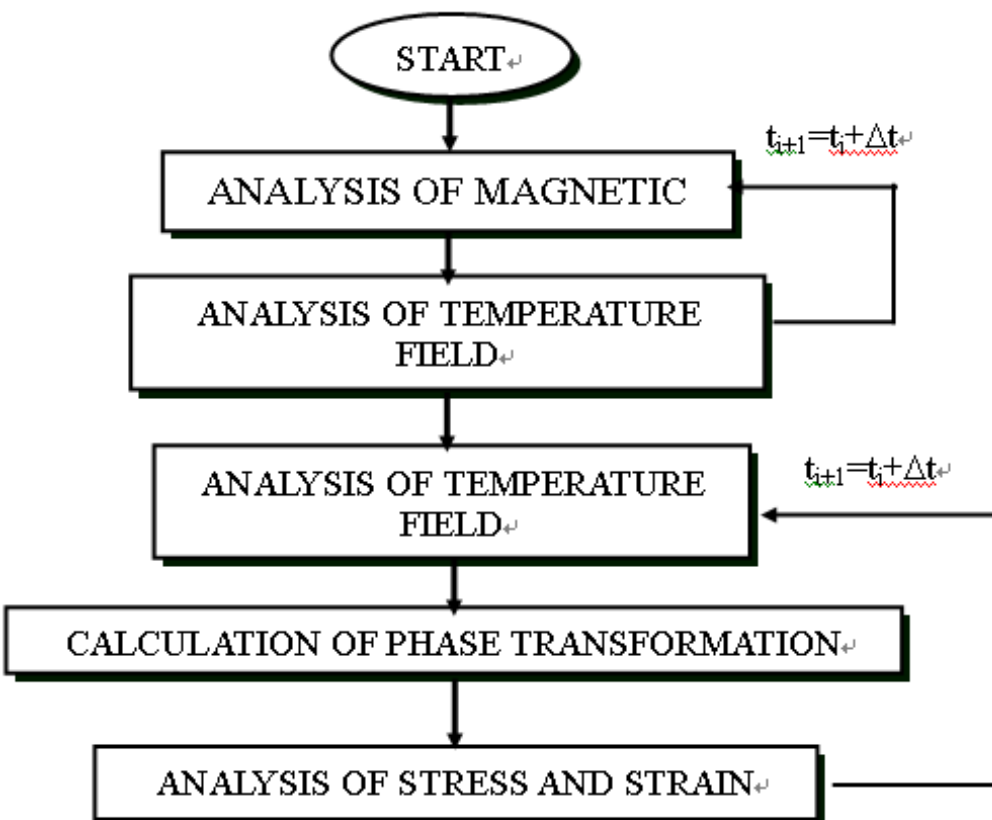
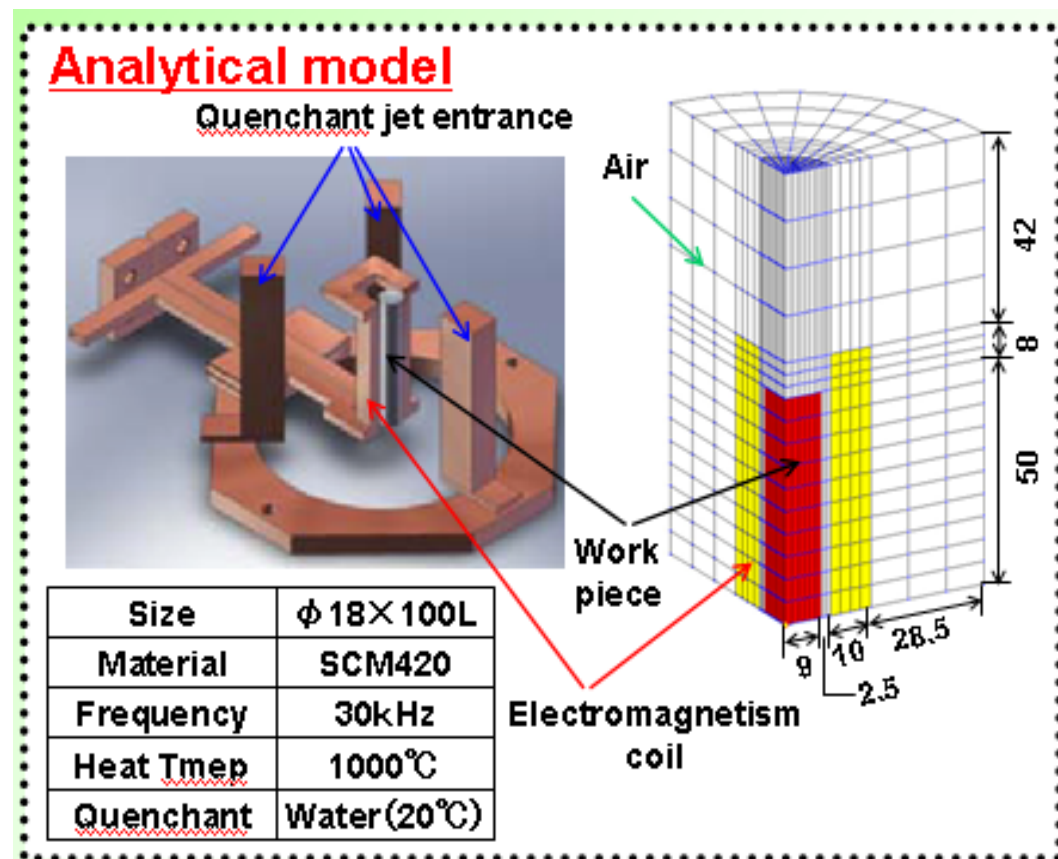
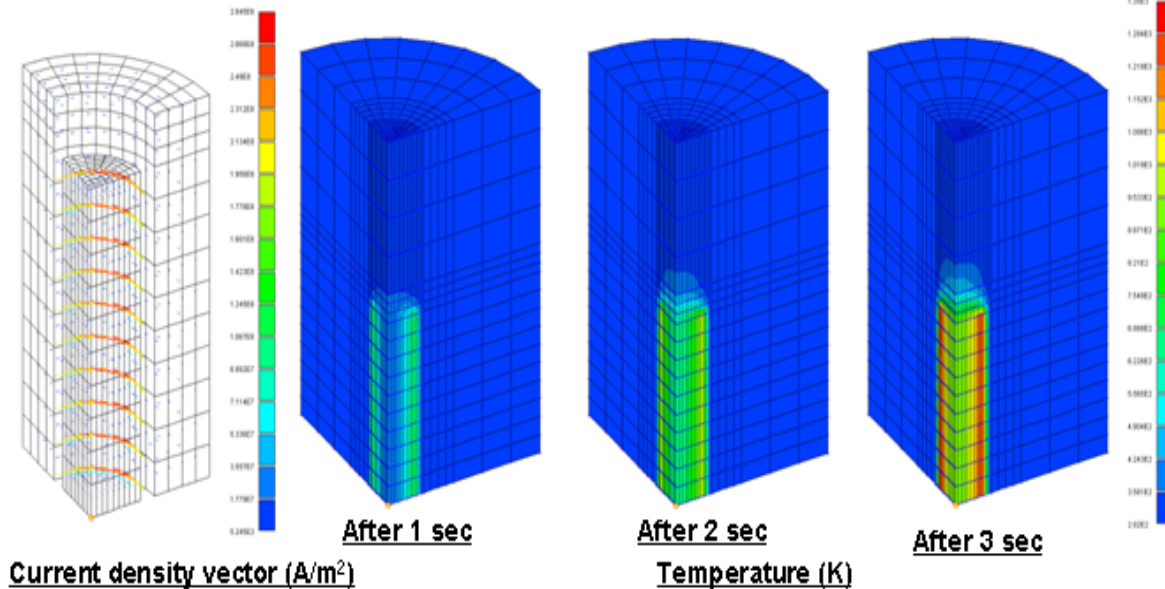


Fig.2 Flowchart of simulation.

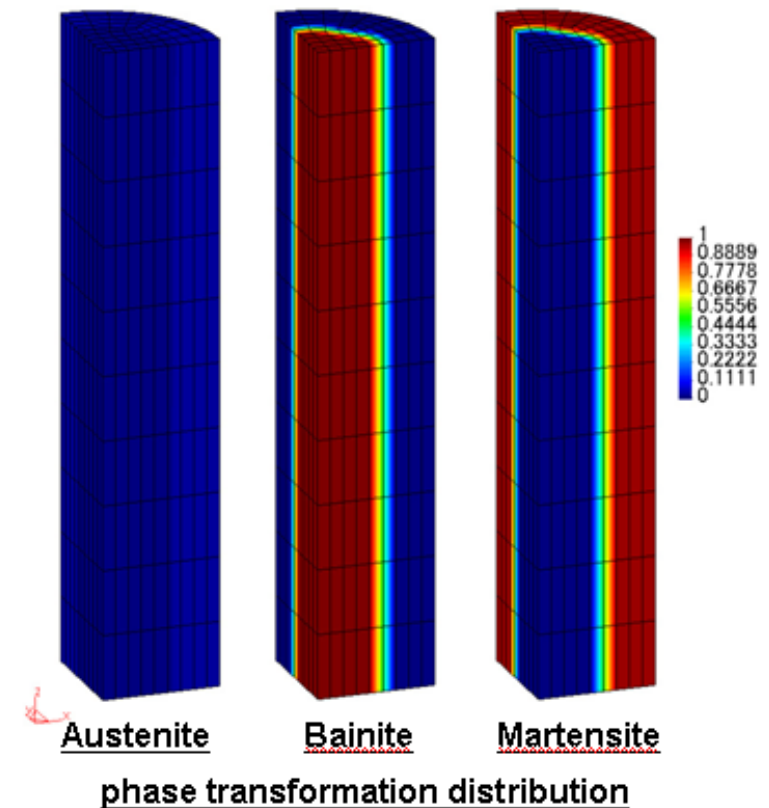


2. 高周波熱処理のシミュレーションの実施成果

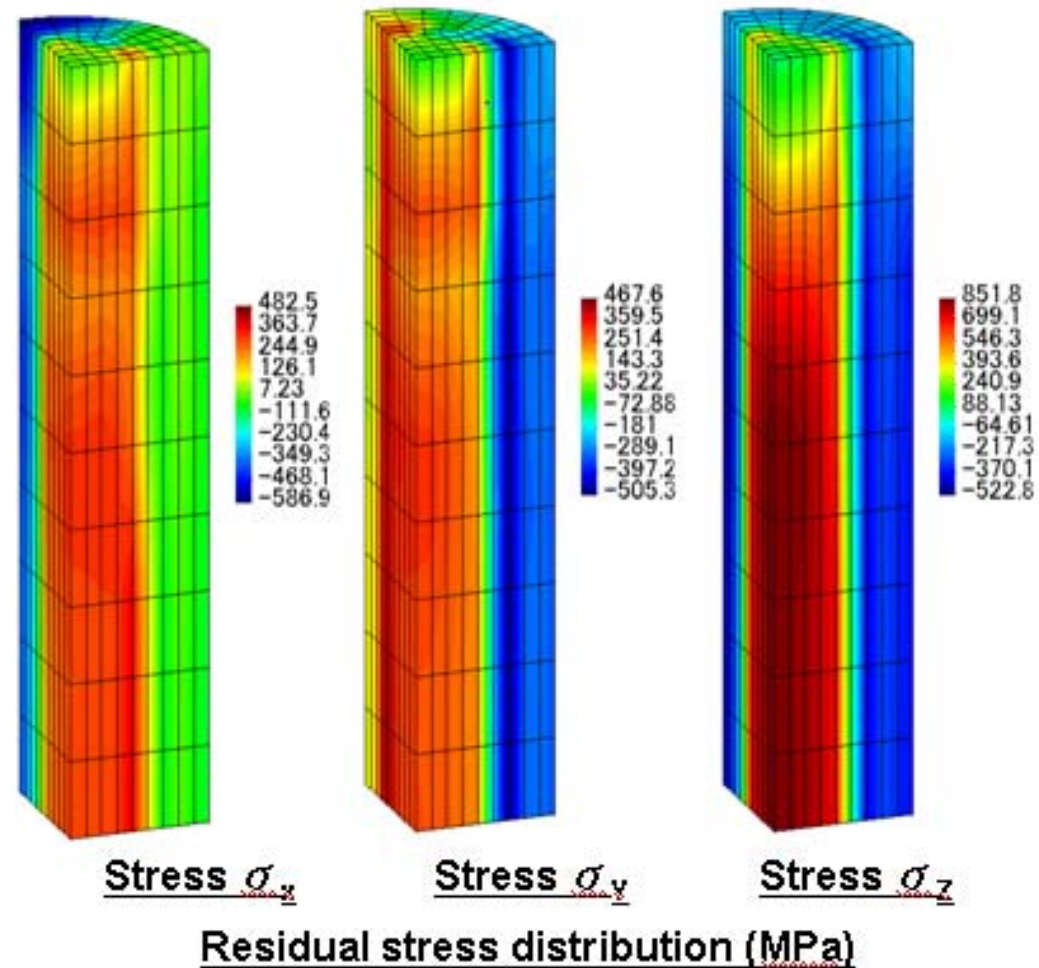
Analysis by photo



Analysis by COSMAP



2. 高周波熱処理のシミュレーションの実施成果



各種表面処理による歯車などの 機械部品の強度特性

コマツ
七野 勇人

各種表面処理による歯車などの 機械部品の強度特性

ねらい

歯車などに見られる転動疲労(ピッチング)において、その疲労現象の観察から強度を支配している因子を明らかにすることで高強度の指針を検討する。

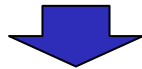
実施事項

歯車の転動疲労を模擬したローラーピッチング試験で、金属接触状態と表面損傷の観察およびFEM解析を実施し、き裂進展の考察を行った。

実施の成果

ローラーピッチング試験におけるピッチングの発生は、以下の現象と考えられる。

- ・摺動による初期なじみにより、油膜およびトライボ膜が形成され、一旦は金属接触しなくなるがその後、き裂の進展に伴って金属接触が強くなり、急速にき裂が進展する。
- ・FEMの弾性解析により、き裂を有する表面の接触面圧分布を評価した結果、き裂の進展法方向と逆側の表面で接触応力が高く、油膜の流れに対する障壁になると考えられる。



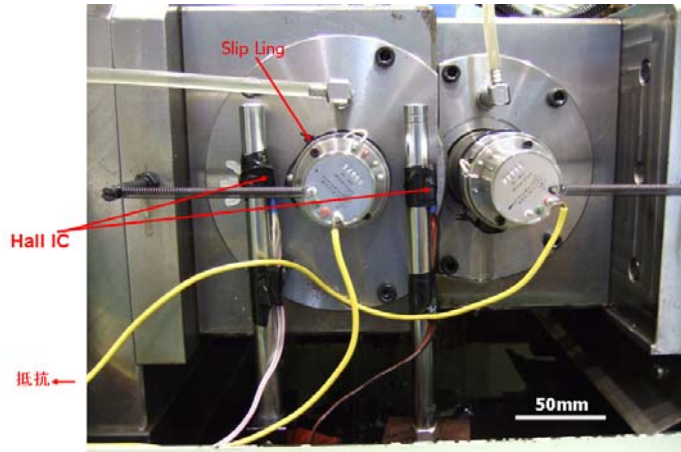
これらの結果から、き裂に油が侵入し加圧作用によりき裂が進展し、ピッチングに至る。

ローラーピッチング試験における 金属接触状態の観察

試験中の金属接触状態を電気抵抗で評価

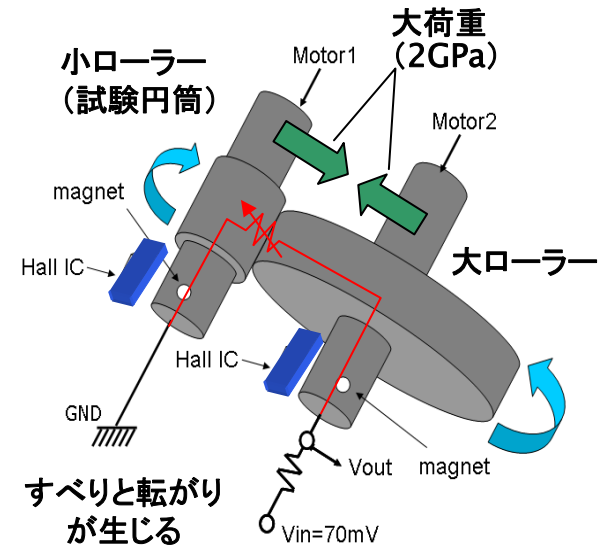
ローラーピッチング試験装置

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

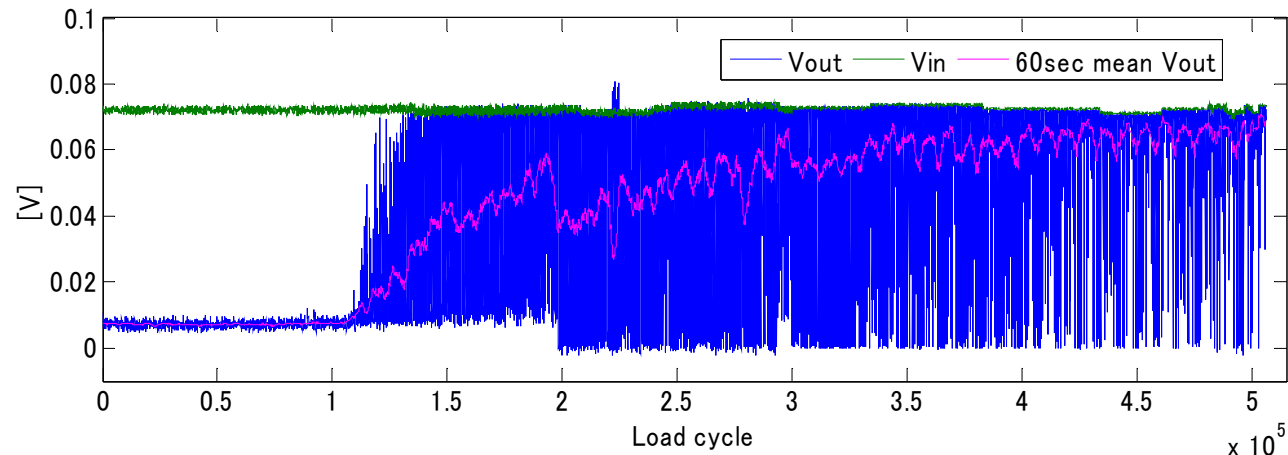
2個のローラ間の電気抵抗を測定することで金属接触状態を評価



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

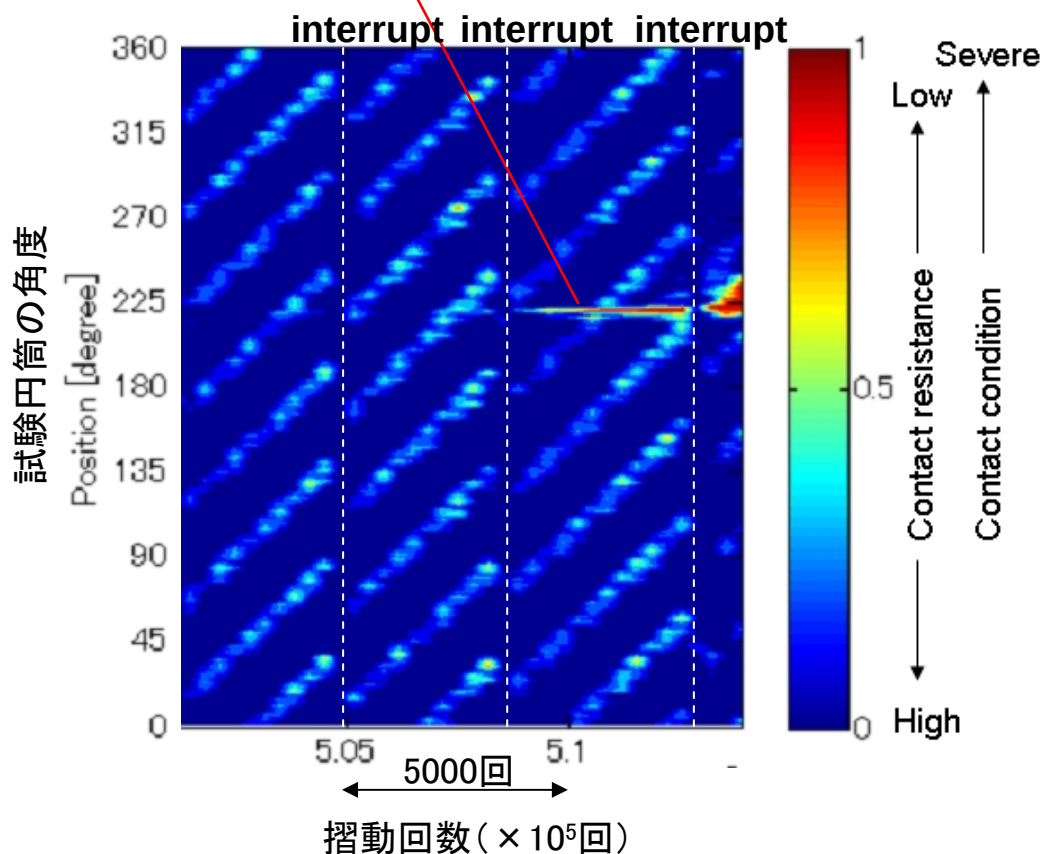
電気抵抗大 (油膜酸化膜接触)
↓
電気抵抗小 (金属接触)



金属接触状態と表面のき裂の観察

金属接触(電気抵抗)の状態

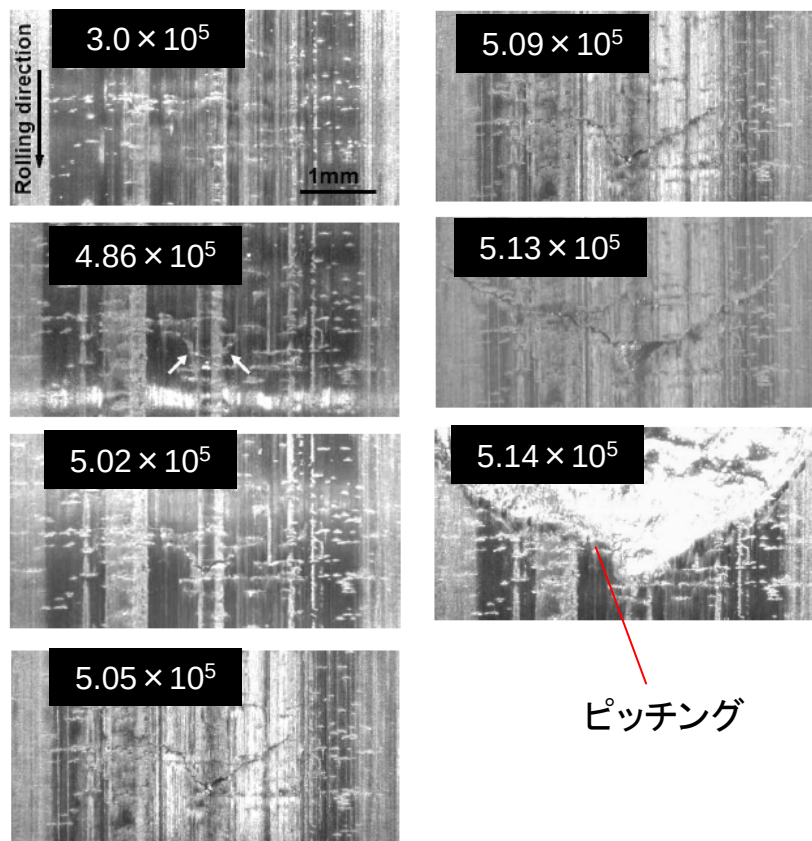
明るい部分, 茶色の部分は金属接触
ピッチングが発生した位置で強い金属接触が見られる



表面のき裂の進展

V字形状にき裂が進展し, ピッチングに至る

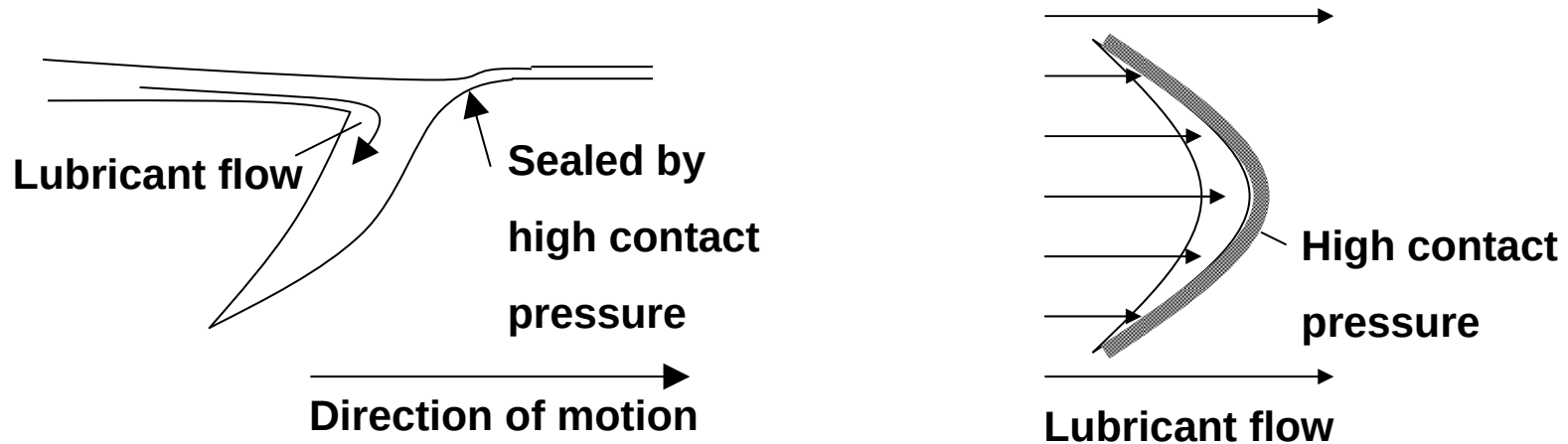
摺動回数



ピッチングにおけるき裂の 進展メカニズム

わかったこととその解釈

- ・ クラックの右側（潤滑油の流出端）で接触圧力が高まることがわかった。
- ・ ピッチングの直前に金属接触していたのは、接触圧力が高いこの位置の可能性が高い。
- ・ マイクロピットの右側に潤滑油が流れない現象に対して、
接触圧力の高まりがシールの役割をしているという新しい解釈を与えた。



ピッチングのき裂進展現象

- ・ エッジの高い接触圧力で潤滑油がせき止められ、き裂内部へ流れ込むと考えられる。
- ・ き裂に侵入した油の加圧作用によりき裂が進展し、ピッチングに至ると考えられる。

2. 実施の成果(8)

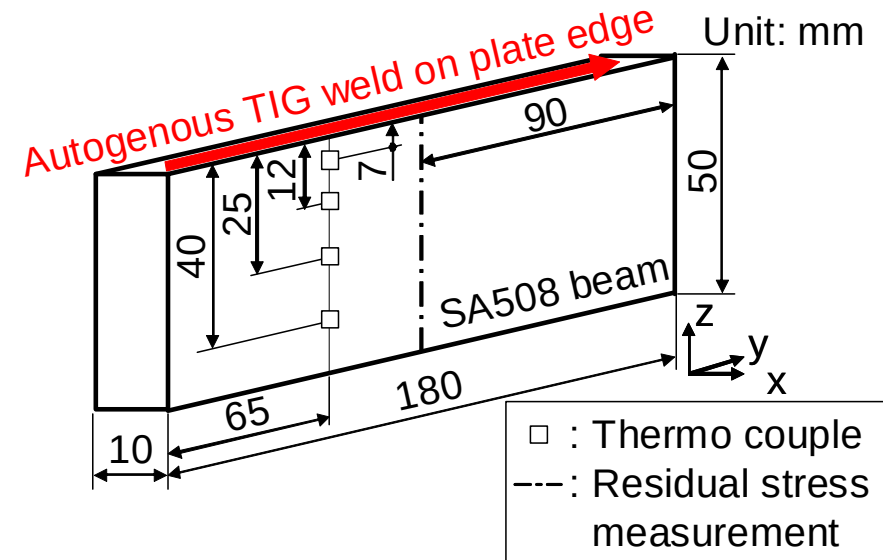
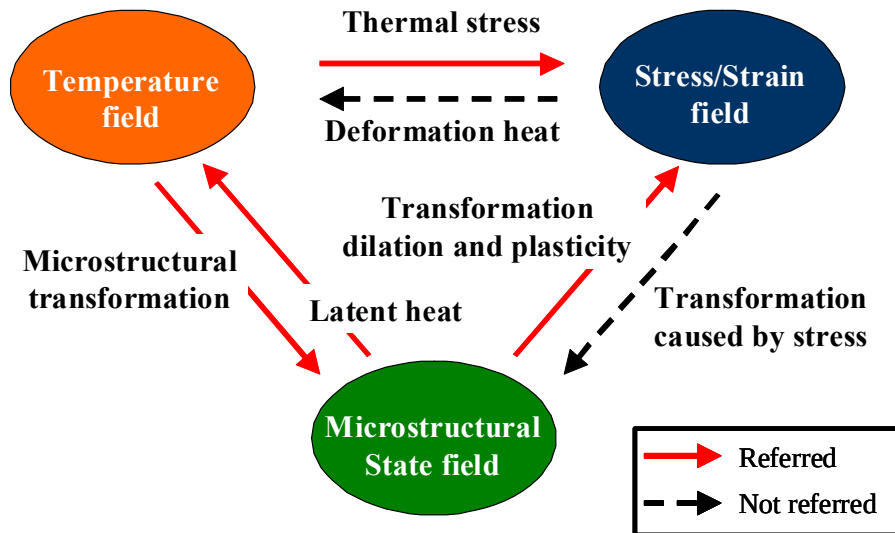
相変態を考慮した溶接残留応力解析

IHI

津乗 充良

相変態を考慮した溶接残留応力解析

- ✓ 欧州で実施されている溶接残留応力の計測・解析に関するRound Robinプロジェクト(NeT)のTask Group 5を取り上げた。
- ✓ SA508 1パスビードオンプレート TIG溶接
- ✓ 温度、残留応力計測(欧州プロジェクト実施)
- ✓ 相変態ABAQUSユーザサブルーチン開発(IHI実施)
- ✓ 温度-材料組織-構造の連成解析を実施(IHI実施)



熱電対による温度計測

相変態を考慮した溶接残留応力解析

1. 有限要素モデル

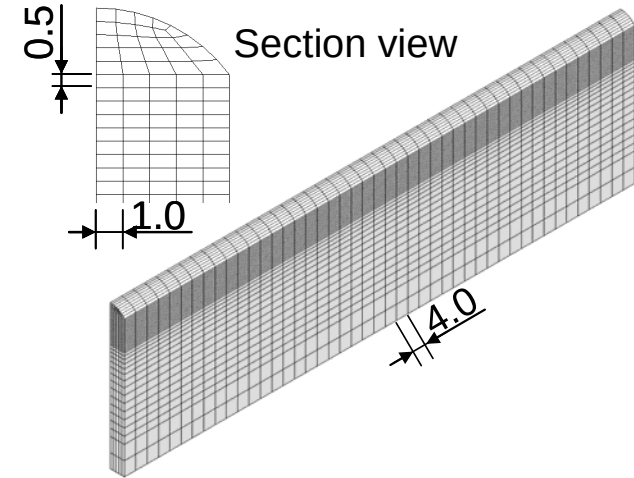
- ✓ 1/2対称
- ✓ 要素タイプ:C3D20RT
- ✓ 要素数:9,405
- ✓ 節点数:44,640

2. 境界条件

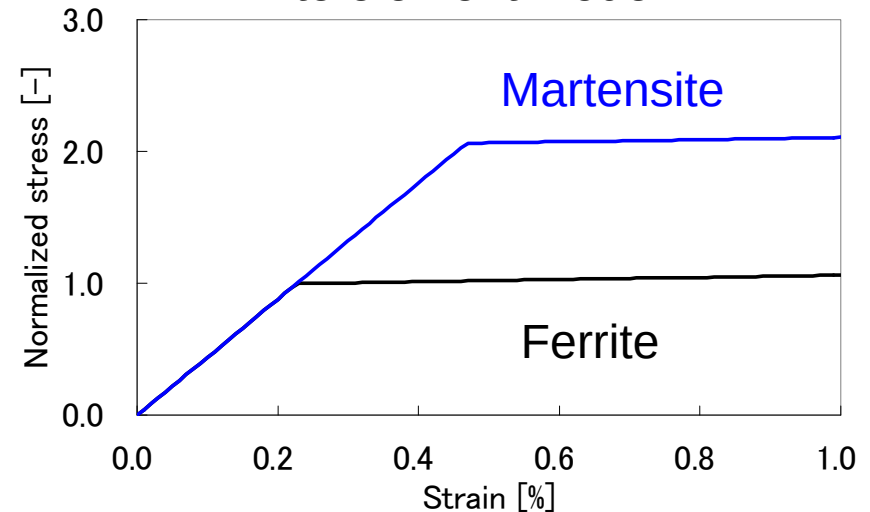
- ✓ 移動熱源モデル (DFLUX)
- ✓ 溶接熱効率:65%
- ✓ 熱伝達率
4~13W/mm² (FILM)
- ✓ 輻射率=0.4

3. 材料定数

- ✓ 温度・材料組織依存2直線等方硬化則
- ✓ アニーリング温度=850°C



Finite element model

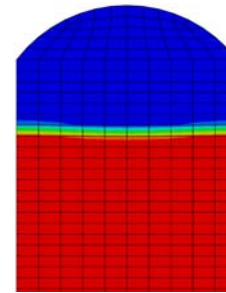


Stress strain curve of SA508

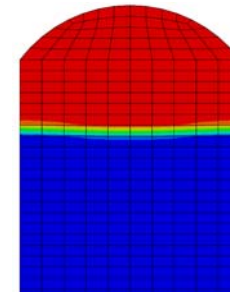
相変態を考慮した溶接残留応力解析

1. 熱電対による計測結果と比較し、
良い温度解析結果を得た。
2. 溶接線方向応力は、相変態を考慮
する事で引張から圧縮へ変化した。
また、計測結果と一致する解析結
果を得られた。

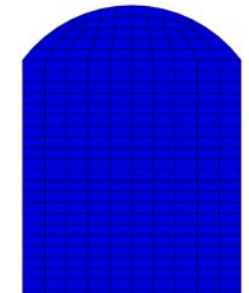
材料
組織



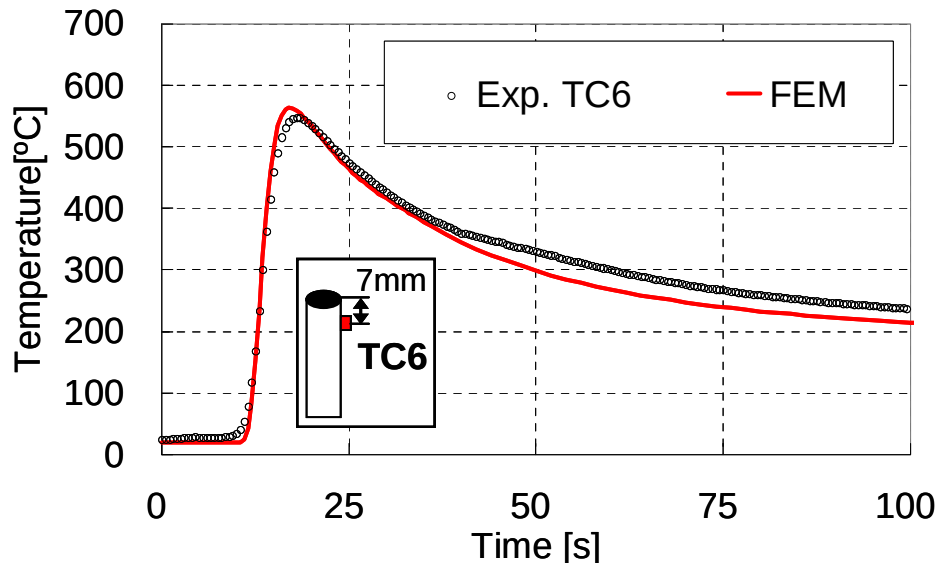
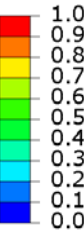
Max. 1.00
フェライト



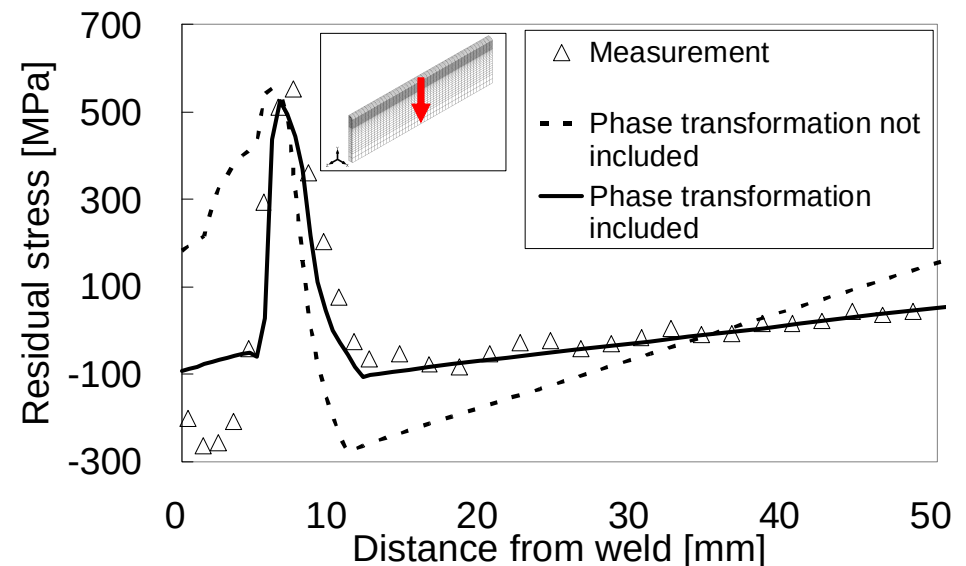
Max. 1.00
ベイナイト



Max. 0.10
マルテンサイト



TC6 (7mm from plate edge)



溶接線方向残留応力

3. 今後の予定

- 熱処理, 溶接, 鋳造など, 相変態を伴う製造加工工程において, 品質制御を行うためには, 温度, 応力, 組織変化の把握とそのシミュレーション手法の確立が重要である.
- このために,
 - ・境界条件としての熱伝達特性の各種冷媒に対する同定と, データベース化
 - ・材料特性, 特に変態塑性特性の測定と理論的決定
 - ・固相変態, 溶融・凝固の組織変化の金属学的把握について今後も継続しつつ, 学術的成果を国内外へ情報発信していく.
- さらに, 試行錯誤ないしは膨大な実験、試作の抑制による経費削減など, シミュレーションを“ものづくり”に適用する事業者の裾野拡大を目指して,
 - ・シミュレーションの事例やノウハウなどの情報交換
 - ・上記の海外への展開(特にアジア圏)に関する仕組みづくりを検討する.