

1 実施概要

① 研究概要

●背景 製造分野では、省エネルギー・CO2排出削減を実現するために、自動車、建設機械、運送機械などにおける熱処理部品の軽量化・高強度化・高精度化とプロセスの高効率化のための設計方法の確立が必要である。

例えば乗用車の場合、高強度化によって可能な駆動および動力伝達系ユニット全体での軽量化率を車両重量の0.5%と見込めば、国土交通省のデータ(自動車燃料消費量調査)によって車種別走行距離、車種別の標準車体重量などを考慮に入れて計算すると、CO2ガス排出量を年間129,197ton低減できることになる。これは我が国の運輸部門総排出量の0.056%になる。しかし、機械部品の軽量化は高強度による保証がなければ、安全を守ることができない。

●目的

これまでのIMS-IFの成果(表面改質を伴わない熱処理などの表面硬化)に加えて、浸炭・窒化などによる材質改善(硬化)を図り、各種の熱処理・表面硬化処理を行う技術の高度化のための基盤作りを行うことを目的とする。

● 主な研究課題

(1) 窒化, 浸炭処理の理論的・実験的基盤の高度化

- ・炭素と窒素の侵入・拡散・合金化のメカニズムの化学量論的理論の構築とシミュレーション
- ・合金化のフェーズフィールド法によるマイクロシミュレーション
- ・窒化処理における生成物の分析と残留応力の実験的計測

(2) 表面処理後の熱処理解析手法の調査検討

- ・拡散・非拡散過程におけるカインティックスの定式化の方法
- ・変態塑性挙動に及ぼす熱間加工の影響調査
- ・材料パラメータの変態・熱・力学シミュレーションへの適用法の検討
- ・気体・液体と鋼表面間の熱伝達係数に及ぼす炭素、窒素の影響
- ・ガス冷却と油冷における熱伝達特性の比較検討

(3) 同定した特性を用いた変態・熱・力学シミュレーションの高精度化と高度化

(4) 省エネルギー・CO₂低減のための環境配慮生産システムの新しい設計手法の検討

● 研究・検討手法

窒化に関する理論構築

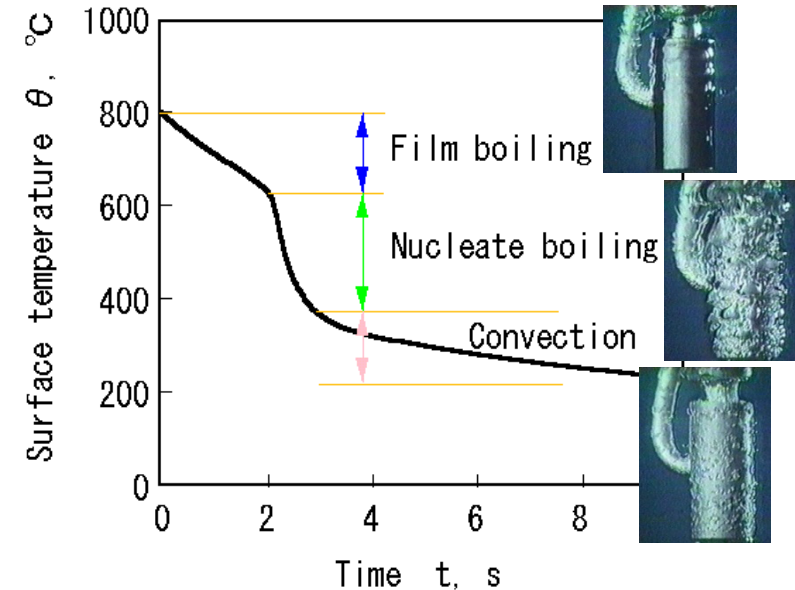
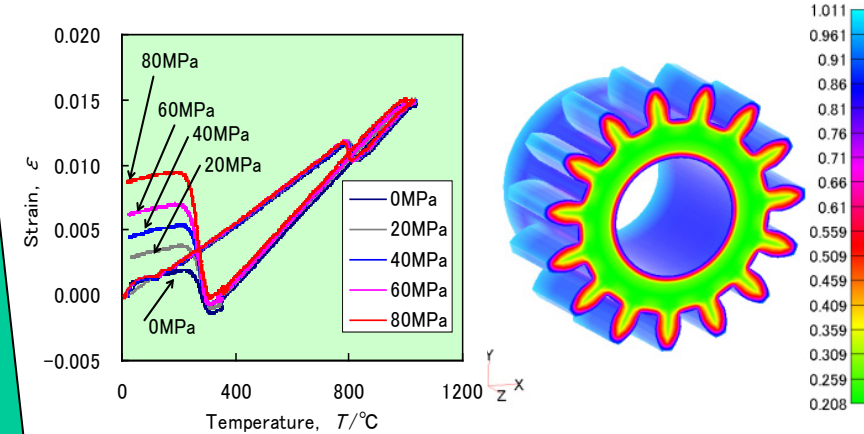
相変態を考慮した非弾性解析の検討

熱伝達率の逆解析と伝熱挙動の検証

シミュレーション手法の検討

材料特性の実験による収集とデータベース化の検討

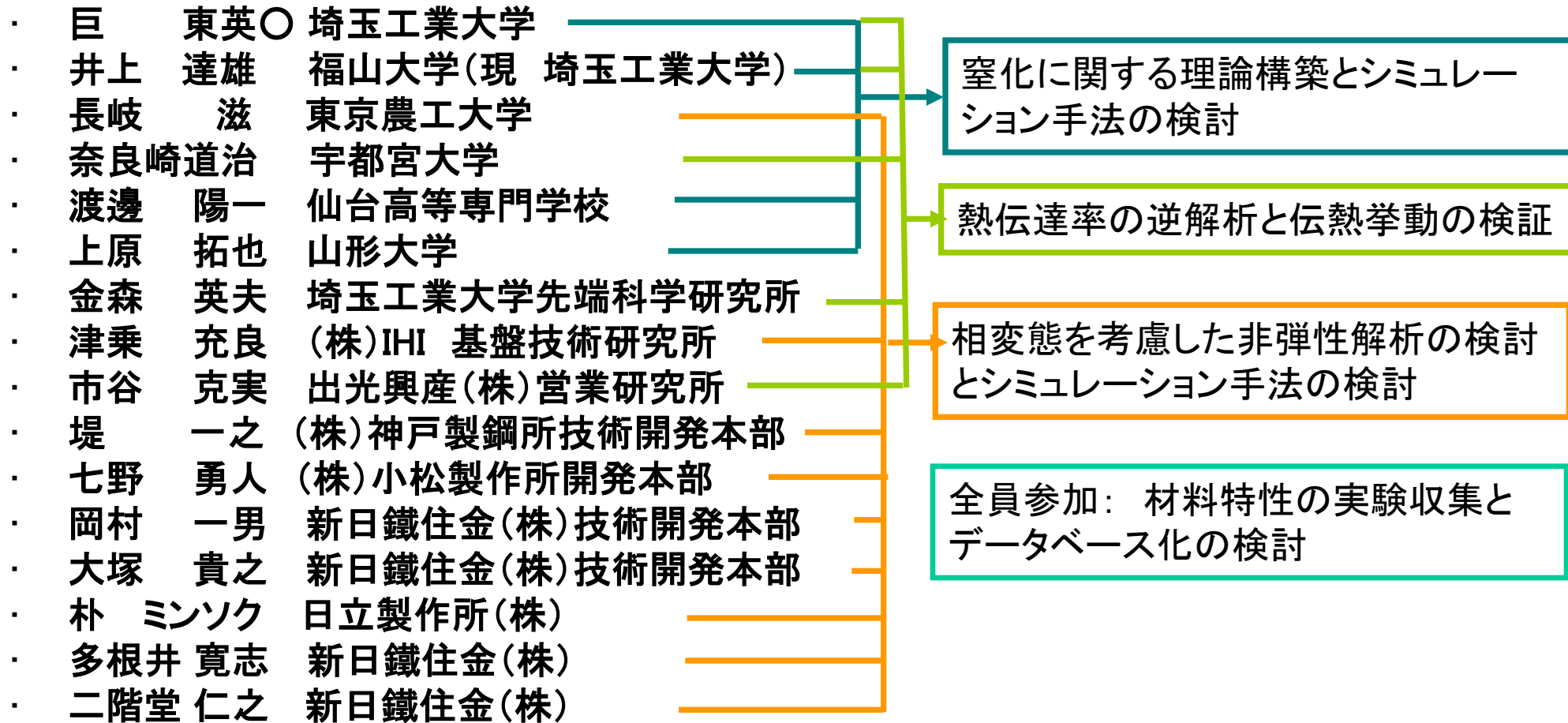
シミュレーションコードの開発と実験検証



● 期待される成果

- 省エネルギー・CO2排出量削減のための**熱処理プロセス**に関する新技術の開発
- 新技術に適用する材料の開発を意図した**材料特性**の調査
- 省エネ・低環境効果のための**冷却方法**，熱伝達率の逆計算法の開発、伝熱現象の解明と冷却剤の選択
- 新技術への**シミュレーション技術**展開
- 部品の変形制御と強度の**シミュレーション**による**予測と評価技術**の提案

② 実施体制 (○リーダー; 事務局:原島 忠雄 (財)製造科学技術センター国際部)



2. 実施の成果

トピックス 1

窒化に関する理論構築とシミュレーション手法

福山大:井上達雄、仙台高専:渡邊陽一、埼玉工大:巨東英、山形大:上原拓也

トピックス 2

相変態を考慮した非弾性解析の検討と
シミュレーション手法

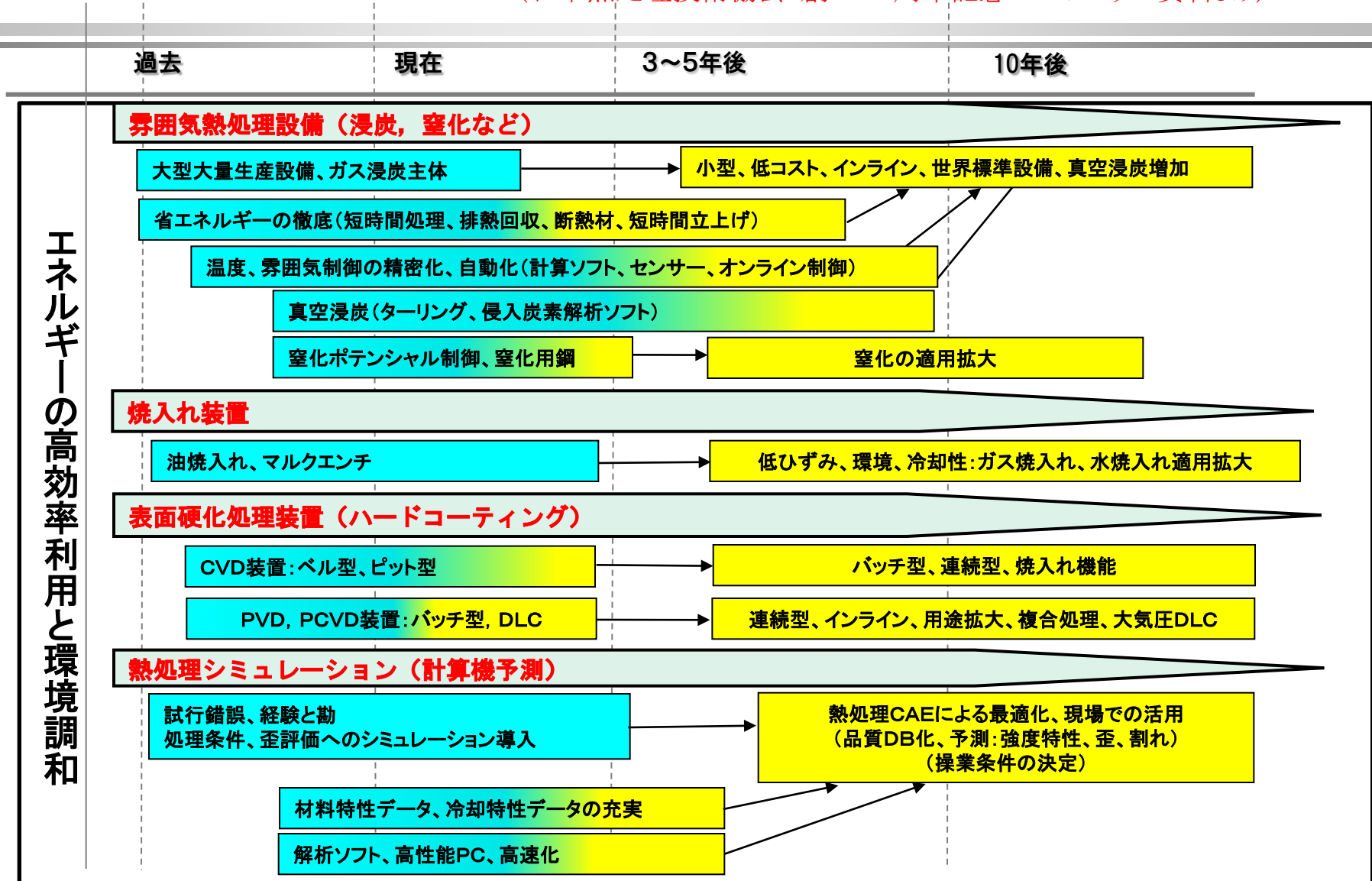
東京農工大:長岐 滋、新日鐵住金:岡村一男、大塚貴之 他2名、
コマツ:七野勇人、IHI:津乗充良、神戸製鋼:堤一之、日立:朴ミンソク

トピックス 3

熱伝達率の逆解析と伝熱挙動の検証

宇都宮大:奈良崎道治、出光興産:市谷克実、埼玉工大:金森英夫、巨 東英、
福山大:井上達雄

(日本熱処理技術協会・創立50周年記念シンポジウム資料より)



我が国と欧州の現状比較と目標

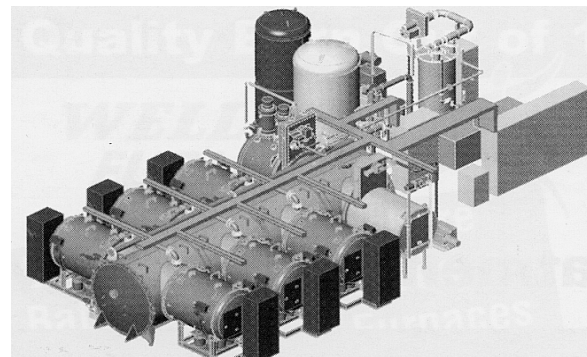
(2006年時点)

項目	現状	期待値
エネルギー原単位	国内・ガス浸炭 0.62 欧州・真空浸炭 0.18(原油換算 kL/ton)	0.16 (原油換算 kL/ton)
焼入油使用量(排出量)	国内・ガス浸炭油焼入炉 2.0 (kL/年・基)	0
CO ₂ 排出量	国内・ガス浸炭 1400 (ton/年・基) 欧州・真空浸炭 226 (ton/年・基)	198 (ton/年・基)
生産性 リードタイム短縮による 生産工程の同期化	国内・ガス浸炭 8hr (250 ton/月) 欧州・真空浸炭 5hr (250 ton/月)	3.5hr (390ton/月) (洗浄・焼戻し含むリードタイム)

国内・ガス浸炭(連続炉)



欧州・真空浸炭



エネルギー使用量 38,974,100 MJ/年

灯油 410 kL/年 × 36.7 MJ/L = 15,047,000 MJ/年

LPG 375 ton/年 × 50.2 MJ/kg = 18,825,000 MJ/年

電力 566,900kWh/年 × 9.0 MJ/kWh = 5,102,100 MJ/年

生産量: 140 ton/月, リードタイム: 8hr

エネルギー使用量 19,731,800 MJ/年

LPG 17.0 ton/年 × 50.2 MJ/kg = 853,400 MJ/年

電力 2,097,600kWh/年 × 9.0 MJ/kWh = 18,878,400 MJ/年

生産量: 250 ton/月, リードタイム: 5hr

次世代真空浸炭プロセス実現による省エネ・CO₂削減効果

真空浸炭+980°C⇒1030°C高温浸炭化(処理時間短縮)

	ガス浸炭連続炉+油焼入れ	真空浸炭, ガス冷
処理時間	8h	3h30min
処理量	140ton/月 =3万個x4.6kg/月	250ton/月 =333kgx760バッチ/月
エネルギー使用量	灯油 410 kL/年 LPG 375 ton/年 電力 566,900kWh/年 合計38,974GJ/年 原油のエネルギー; 3.82 × 10 ⁷ J/l	・電気:205kWh/バッチ (浸炭155+ ガス冷50)→51L(原油) ・フロハ ^ン :1.86kg(0.94m ³)/バッチ→2.4L (原油)/バッチ 合計53.4L(原油)/バッチ
エネルギー原単位	原油:38,974GJ/38.2GJ=1020kL/年 1020kL/140ton/月/12= <u>0.62kL/ton</u>	53.4L/バッチ/333kg(ネット) = <u>0.16kL/ton</u>
CO ₂ 排出量(炭素排出量)	1400 ton-c/年 =38,974GJ/28.9GJ	・電気:51L(原油)→74.5x10 ⁻³ t-CO ₂ ・フロハ ^ン :2.4L(原油) → 5.5x10 ⁻³ t-CO ₂ ・合計80.0x10 ⁻³ t-CO ₂ /バッチx760バッチ/月x12 =730t-CO ₂ = 198 t-C/年
ランニングコスト	灯油 410 kL/年→22,960千円/年 LPG 375 ton/年→32,625千円/年 電力 566,900kWh/年→4,875千円/年 60,460千円/年(合計)/140ton/月/12 = 36円/ton	電気:205kWh→1763円 フロハ ^ン :1.86kg(0.94m ³)→161円 (合計) 1924円/バッチ/333kg/バッチ= 5.7円/kg

原油・CO₂換算は「エネルギーの使用の合理化に関する法律(資源エネルギー庁)」等に基づく

次世代真空浸炭プロセス実現による高精度化とコスト

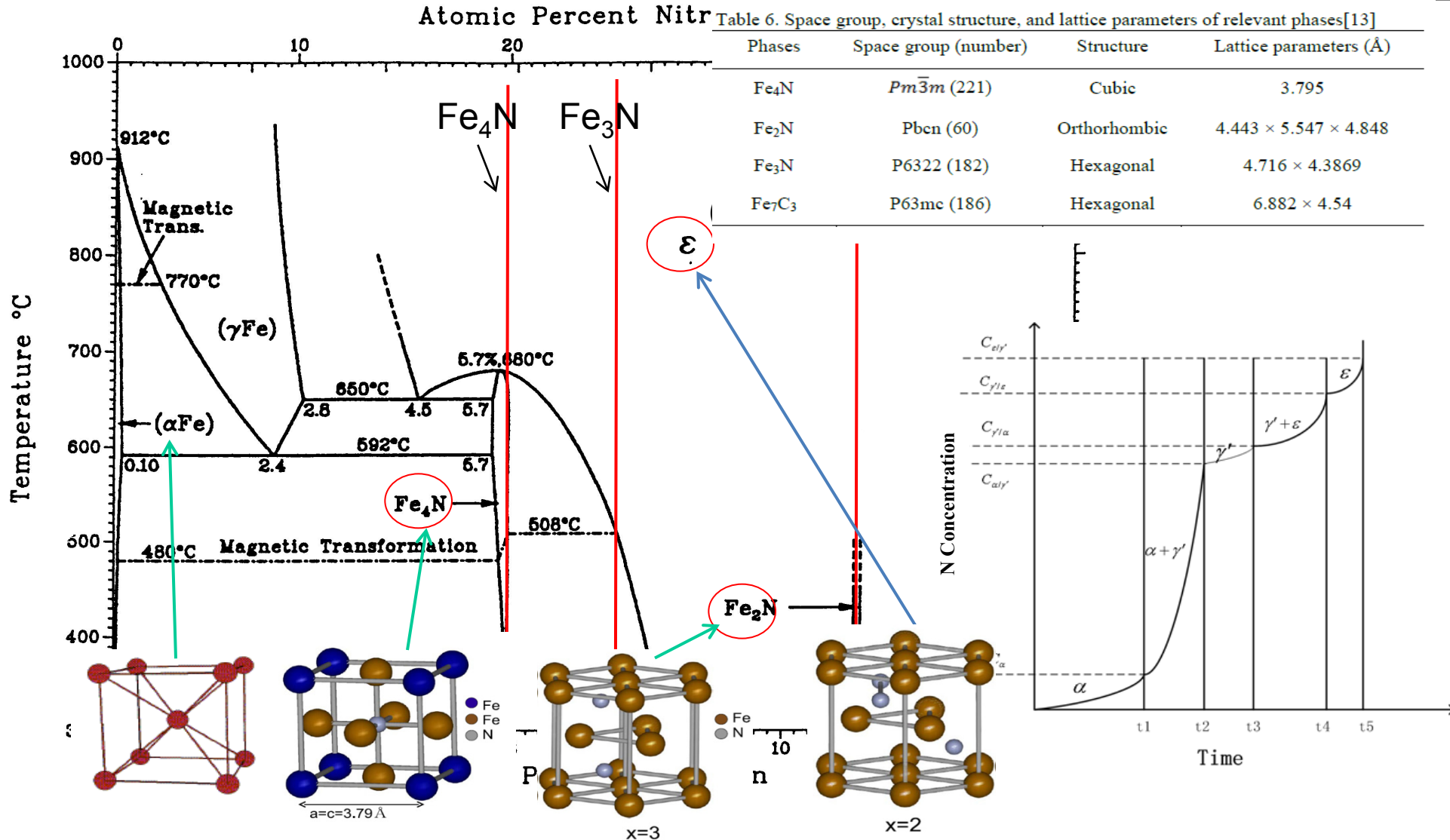
項目	現状	期待値
製品の高精度化（歯車の焼入変化量のばらつき）	歯形変化量ばらつき <2 μ m 歯筋変化量ばらつき <4 μ m (欧州, 国内)	歯形変化量ばらつき <1 μ m 歯筋変化量ばらつき <2 μ m 目標決定根拠: 歯面研削廃止
製品の強度・信頼性 (疲労限の相对比较)	1.0	1.35 目標決定根拠: ユニットサイズダウン(重量: ▲10~26kg/台)
設備コスト(億円)	国内・ガス浸炭油焼入炉 2.5 欧州・真空浸炭ガス焼入炉 3.0	2.7
ランニングコスト(電気, ガス) (円/kg)	国内・ガス浸炭油焼入 36 欧州・真空浸炭ガス焼入 6.4	5.7
製造現場における安全性(可燃物, 危険物)	国内・ガス浸炭油焼入 ◎ 欧州・真空浸炭ガス焼入 △	◎(殆んど危険性なし)

*設備コスト

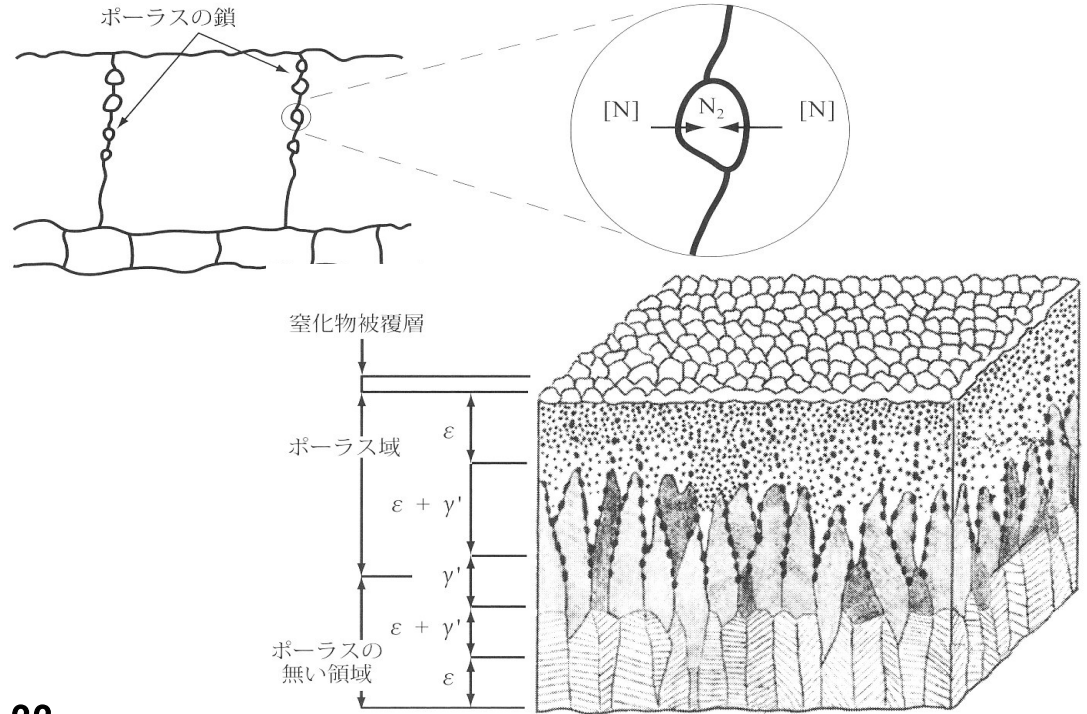
3.5億円・・・真空浸炭炉:2.1億円+ガス冷:1.4億円(高压ガス規制現状)

2.7億円・・・真空浸炭炉:2.1億円+ガス冷:0.6億円(10Bar規制緩和を見込んだ場合)

Fe-N系平衡状態図



(軟)窒化最表面の組織



Pietzsch, S. 1996.

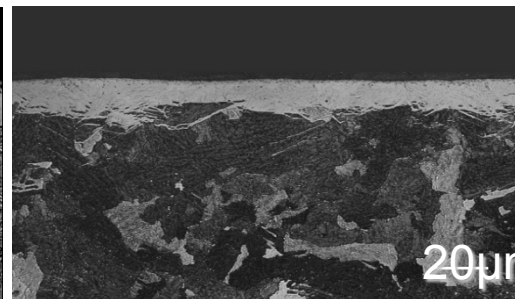
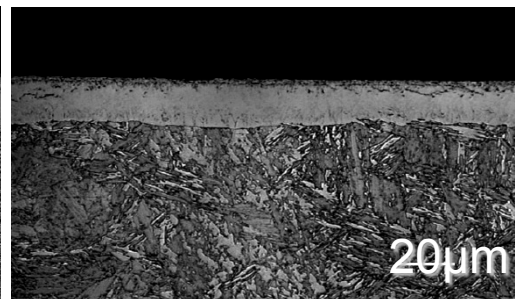
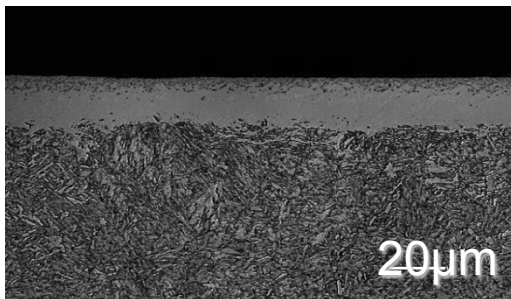
ガス窒化処理 : 570°C × 3hr, $K_N=2.2$

ガス軟窒化処理 : 570°C × 3hr, $K_N=2.0, K_{CW}=0.22$

S45C

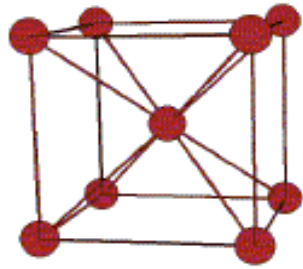
SCM435

SACM645

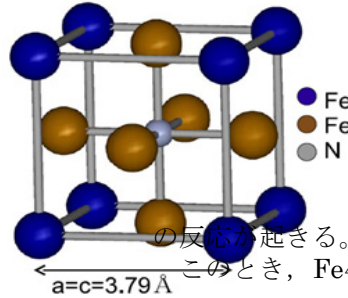


窒化物生成によるひずみ

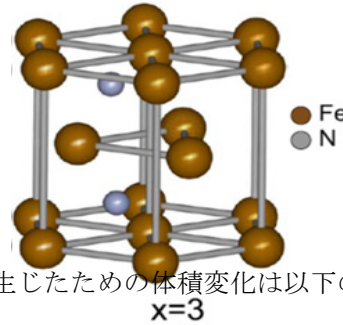
$0 = 1.2 < N < 5.88$ なら γ' -Fe₄N化合物が形成される。このとき



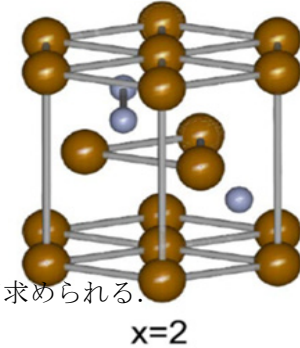
α -Fe



γ' -Fe₄N



ϵ -Fe₃N



δ -Fe₂N

このとき、Fe₄Nが生じたための体積変化は以下のようにして求められる。

$$\epsilon_N = \frac{1}{3} \frac{Fe_4,3N \text{ のモル体積} / 3 - \alpha\text{-Fe の体積}}{\alpha\text{-Fe モル体積} / 3}$$

アボガドロ数 $N_A = 6.0221367 \times 10^{23}$

α -Fe BCC : 単位胞にの数は 2

$a=2.8664 \text{ \AA}$

Fe₄NはFCC : 単位胞にの数は 4

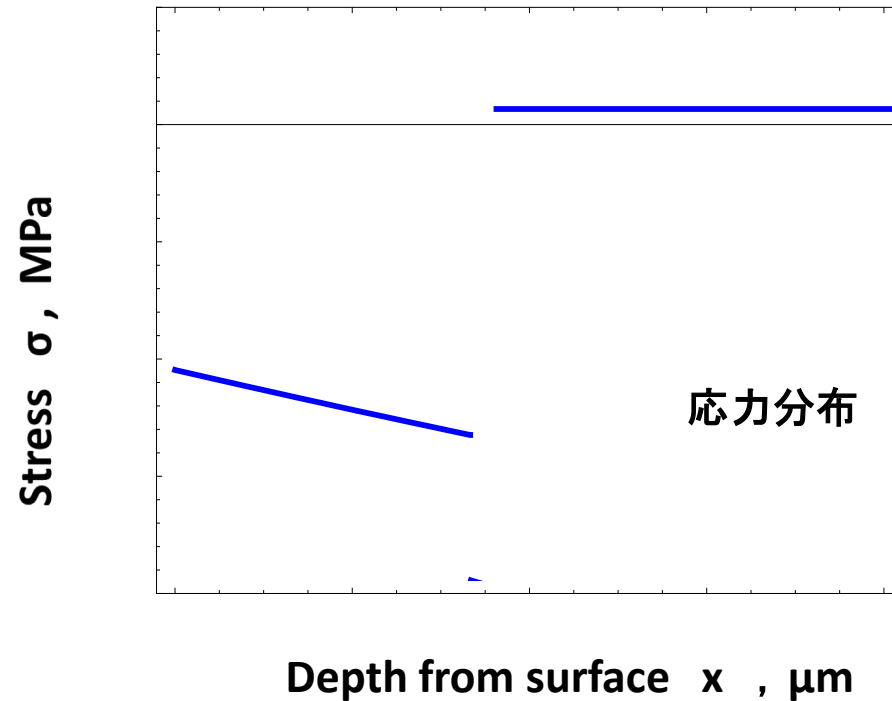
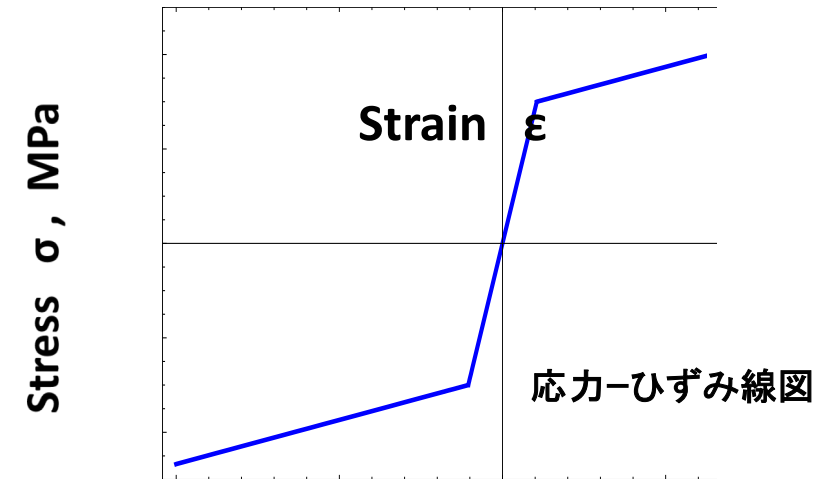
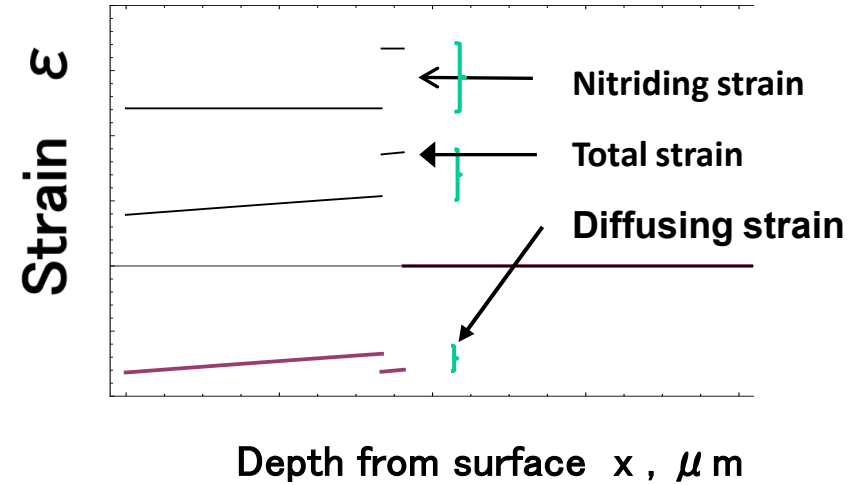
$a=3.795 \text{ \AA}$

Fe₃NはHCP : 単位胞にの数は 6

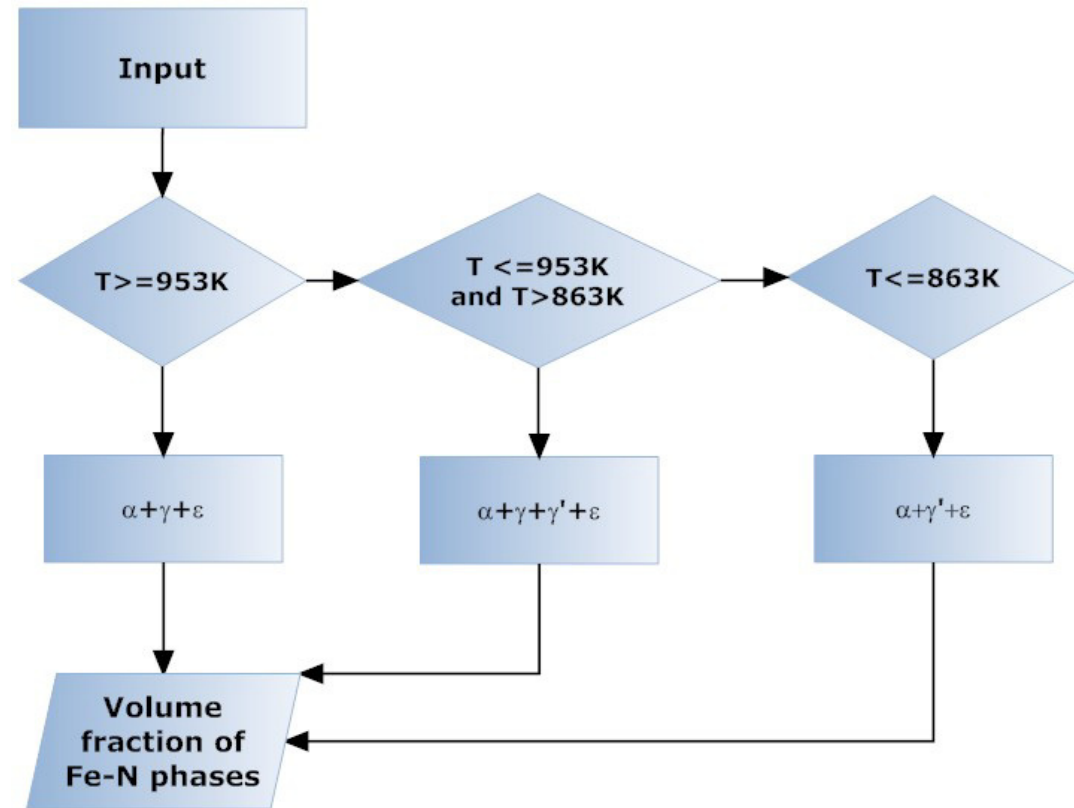
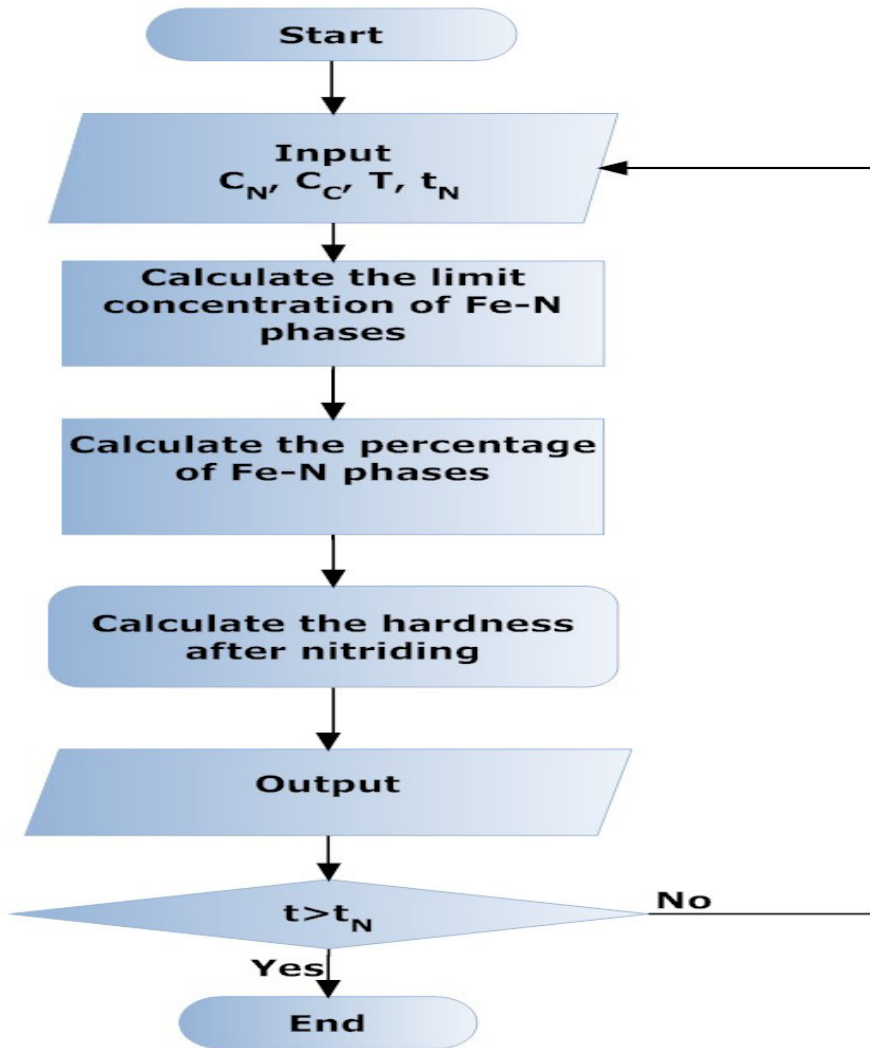
$a=2.764 \text{ \AA}$ $c/a=1.599$

数値はD.H.Jack&K.H.Jack、Mat.Sc.Eng.11,1973,pp.1-27 Table-1によ

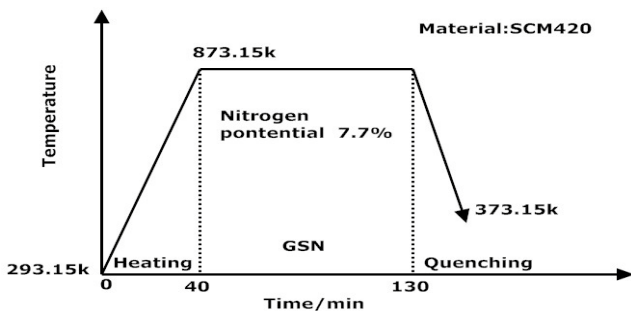
応力-ひずみ関係



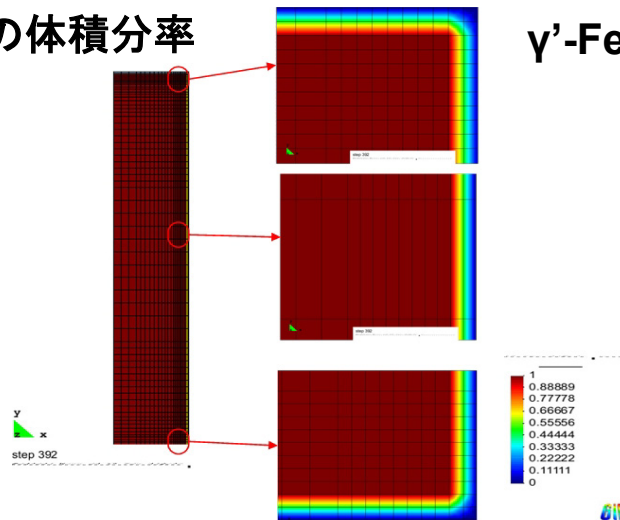
窒化シミュレーションのフローチャート



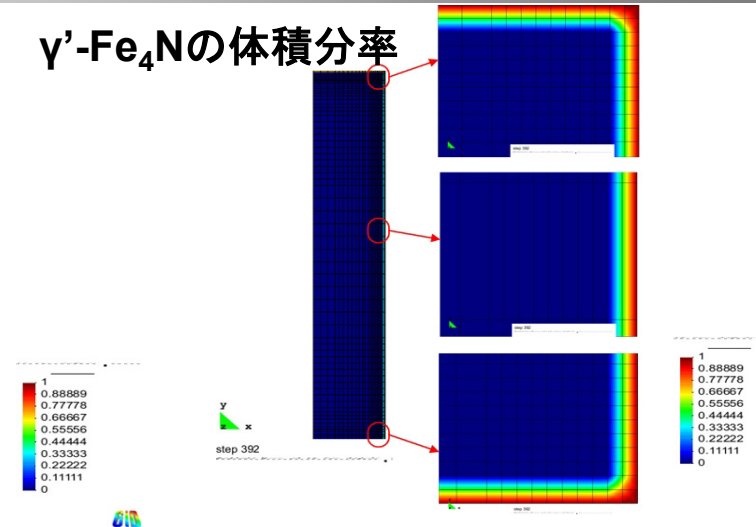
軸対称モデル (60mm*10mm)



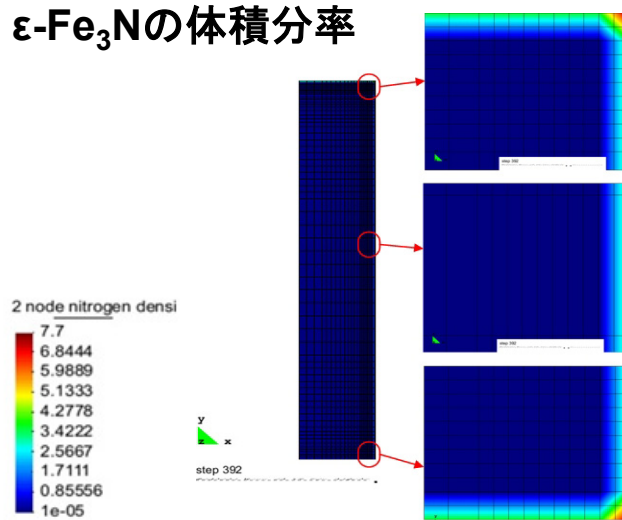
α 相の体積分率



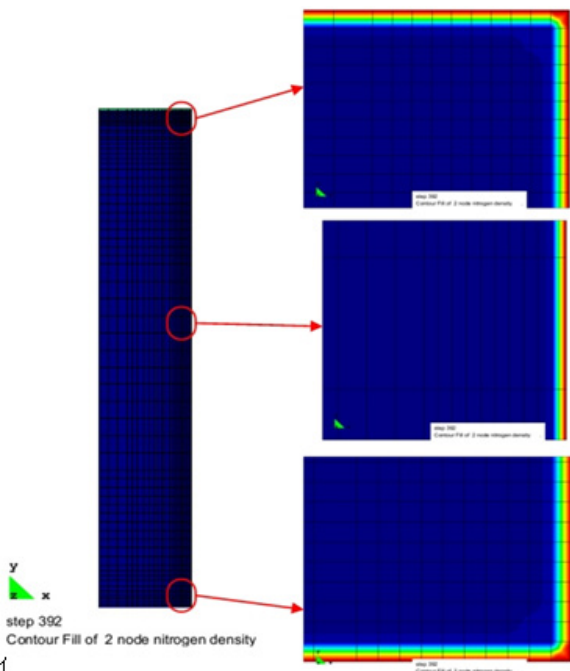
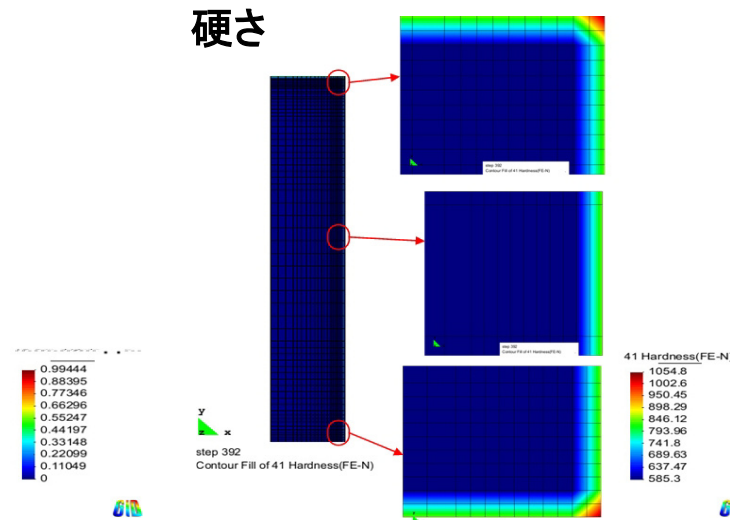
γ' -Fe₄Nの体積分率



ϵ -Fe₃Nの体積分率



硬さ



微視組織の計算モデル

微視組織計算 (α 相 $\rightarrow\gamma'$ 相 $\rightarrow\varepsilon$ 相)

入力条件: 表面窒素濃度

拡散解析: 差分法

フェーズフィールド変数 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3

$\phi_1=1.0: \alpha, \phi_2=1.0: \gamma, \phi_3=1.0: \varepsilon$

$\Sigma\phi_i=1.0$

相変態条件

$C < C_\alpha$: α 相のみ

$C_\alpha < C < C_{\alpha\gamma}$: α 相と γ' 相

$C_{\alpha\gamma} < C < C_{\gamma\alpha}$: γ' 相のみ

$C_{\gamma\alpha} < C < C_{\gamma\varepsilon}$: α 相と γ' 相

$C_{\gamma\varepsilon} < C$: ε 相のみ

設定した速度で相変態が進行

計算条件



初期状態: α 多結晶体

表面窒素濃度: $C_s=1.0$ で一定

パラメータ

拡散係数 $D_\alpha, D_\gamma, D_\varepsilon$

$$D = \phi_1 D_\alpha + \phi_2 D_\gamma + \phi_3 D_\varepsilon$$

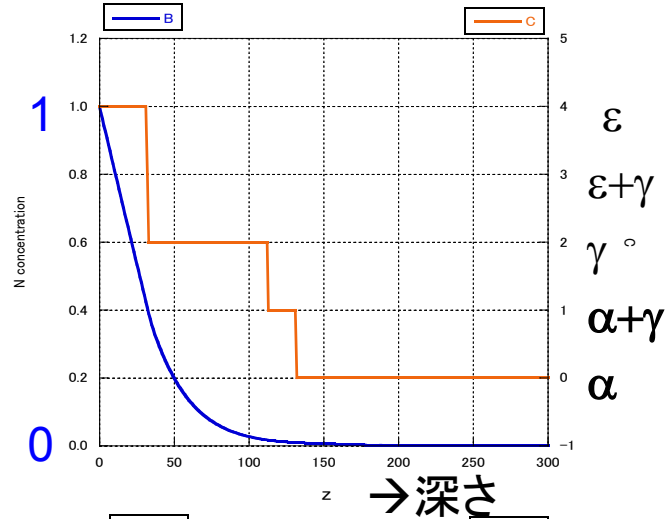
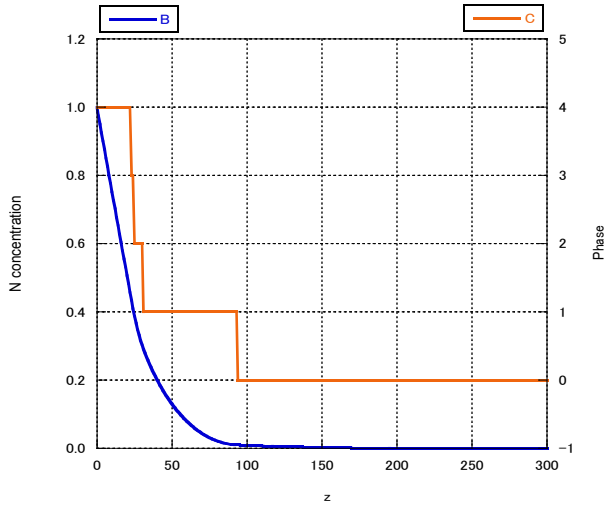
変態速度 $r_{\alpha\gamma}, r_{\gamma\varepsilon}$

$$\Delta\phi_1 = -\Delta\phi_2 = r_{\alpha\gamma}$$

変態による組成変化 $\Delta C_{\alpha\gamma}, \Delta C_{\gamma\varepsilon}$

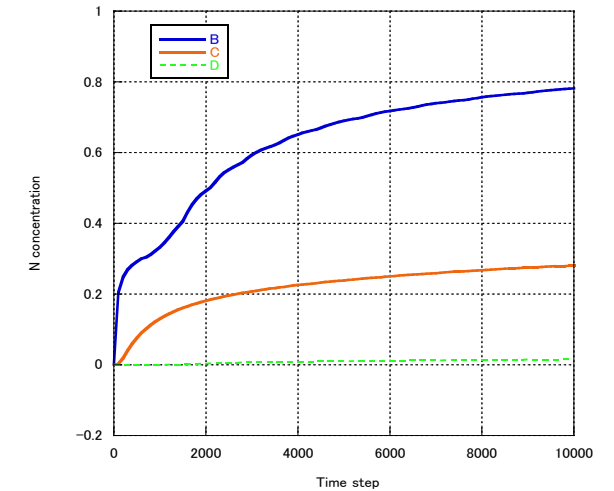
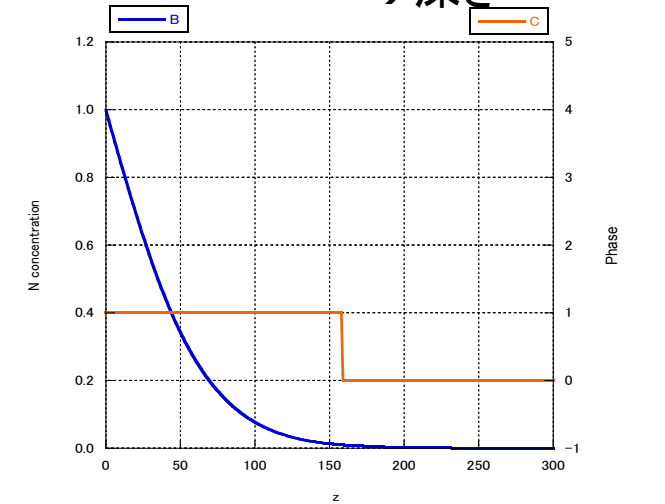
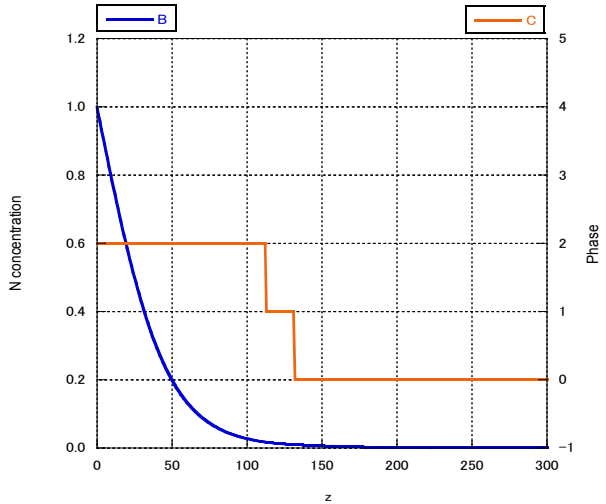
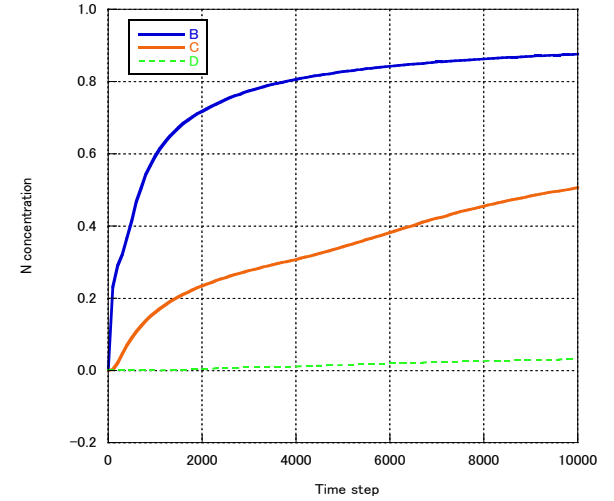
計算例(濃度分布)

濃度分布, 相分布 v.s. 深さ

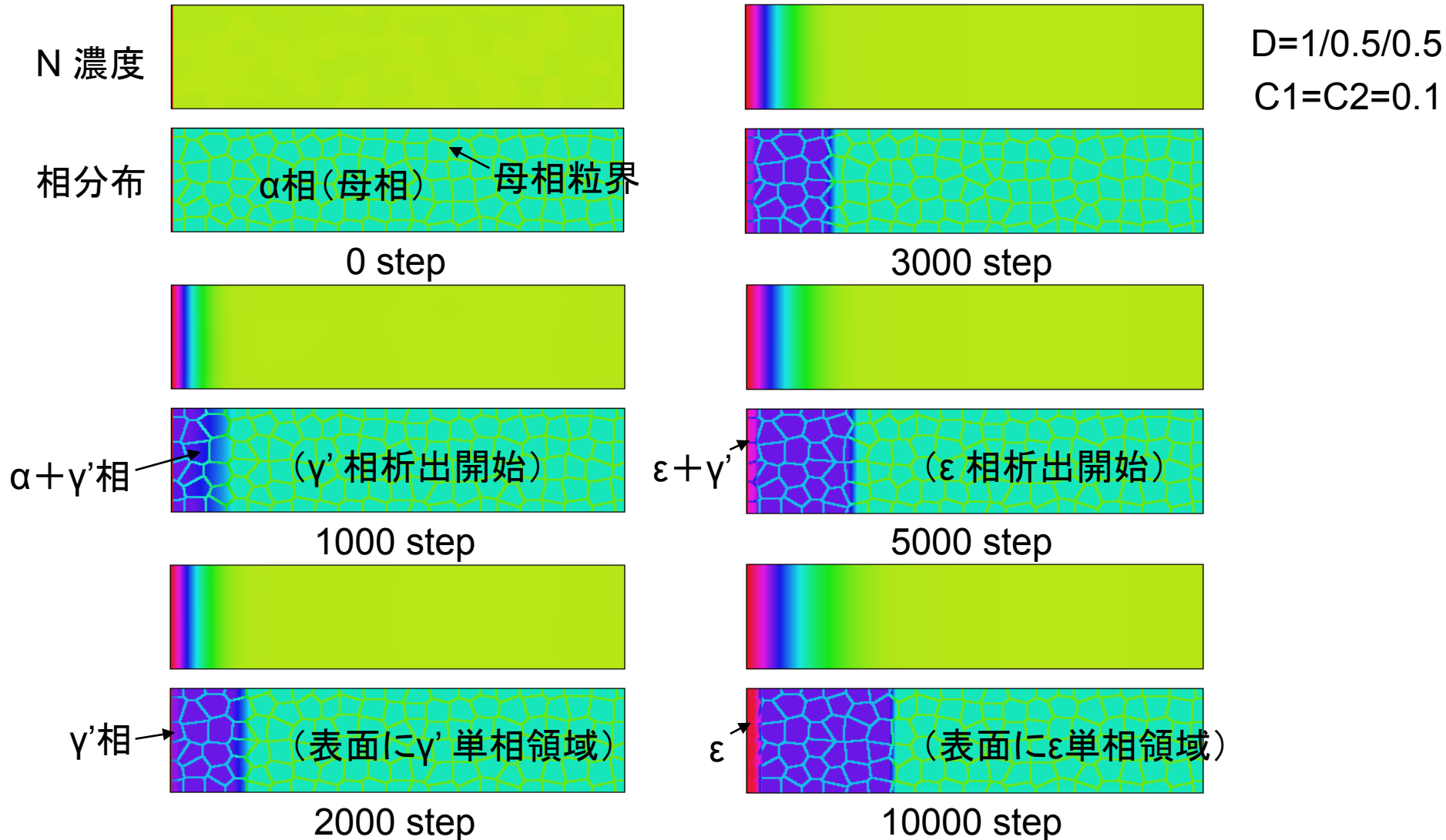


濃度分布

z=5,20,75



微視組織分布



トピックス1のまとめと予定

窒化技術の開発と調査研究

現段階のまとめ

- 窒化技術に関する調査研究
- 新規窒化技術の開発準備
- 窒化メカニズムに関する研究

今後の予定

- 新しい窒化技術の開発
- 窒化の実験検証
- 窒化メカニズムの解明

窒化理論の検討と調査研究

現段階のまとめ

- 窒素の拡散解析の研究
- 窒化によるひずみ変化の検討
- 窒化過程の非弾性解析モデル

今後の予定

- 1次元問題の窒素拡散シミュレーション
- 窒化物の解析モデルの提案
- 窒化のひずみ解析と実験検証

窒化シミュレーションの開発

現段階のまとめ

- 窒化物の体積分率理論の提案
- 濃度拡散－窒化物相の解析モデルと2次元解析
- 窒化後の硬さの計算

今後の予定

- 窒化の拡散ひずみと残留応力の計算
- 3次元解析プログラムの開発
- 実験検証

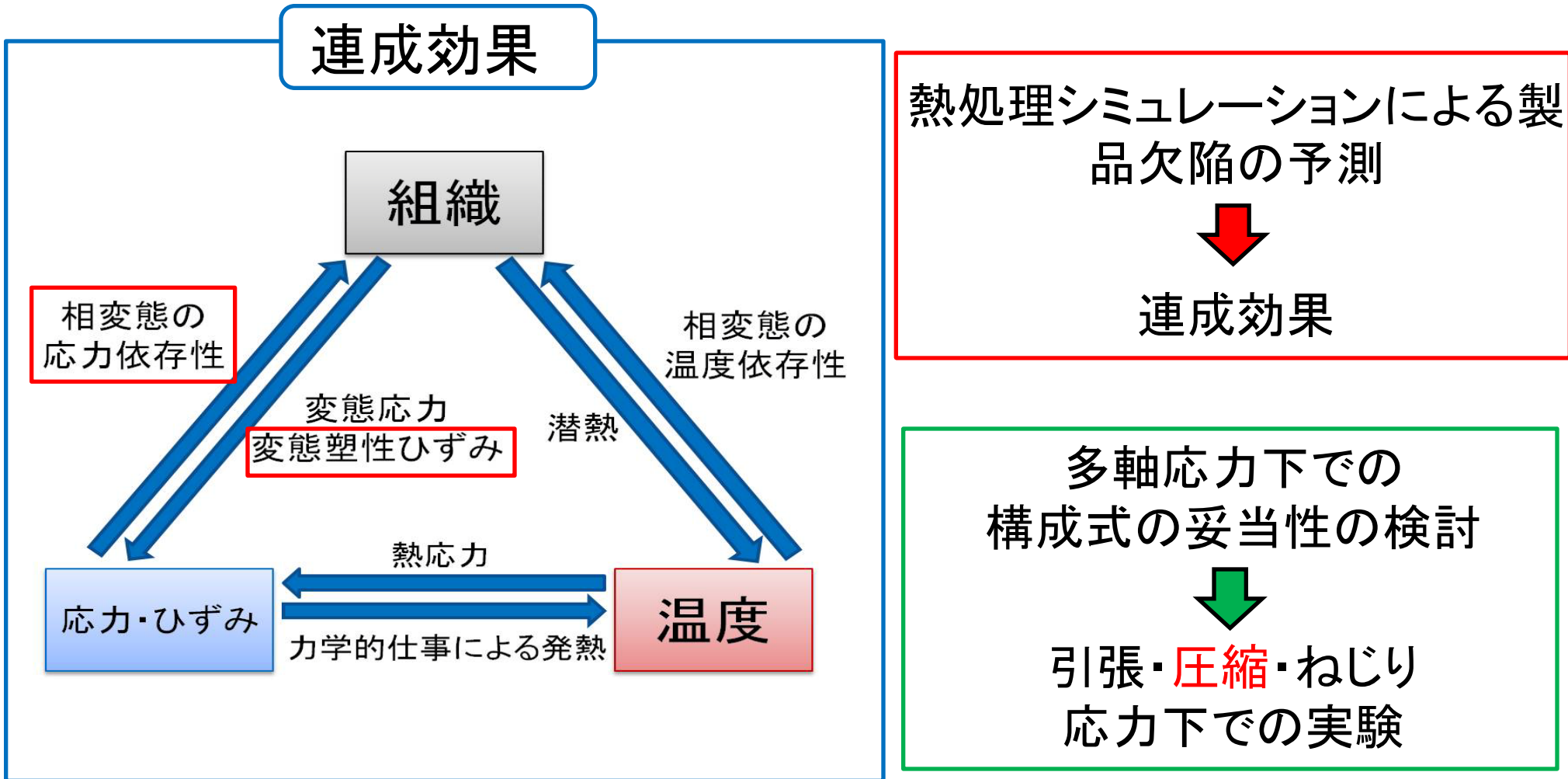
窒化物の形成シミュレーションの開発

現段階のまとめ

- フェーズフィールド変数を用いた相変態の表現
- 濃度拡散と相変態の関係
- 母相多結晶組織の考慮

今後の予定

- フェーズフィールド方程式による相変態解析
- 窒素濃度＋温度との連成解析と定量評価
- 応力との連成解析



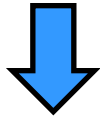
* 先行研究では引張・ねじり応力のみ

変態塑性理論

全ひずみ速度

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p + \dot{\varepsilon}_{ij}^T + \dot{\varepsilon}_{ij}^{ph} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{tp}$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{tp} = 3K(1 - \xi) \sigma'_{ij} \dot{\xi}$$



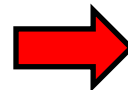
$$\dot{\bar{\varepsilon}}^{tp} = 2K(1 - \xi) \bar{\sigma} \dot{\xi}$$



負荷応力が一定
相変態が均一に生じる

$$\bar{\varepsilon}^{tp} = K \bar{\sigma}$$

構成式の妥当性の検証



引張・圧縮・ねじり
応力下での実験

ξ ; 新相の体積分率

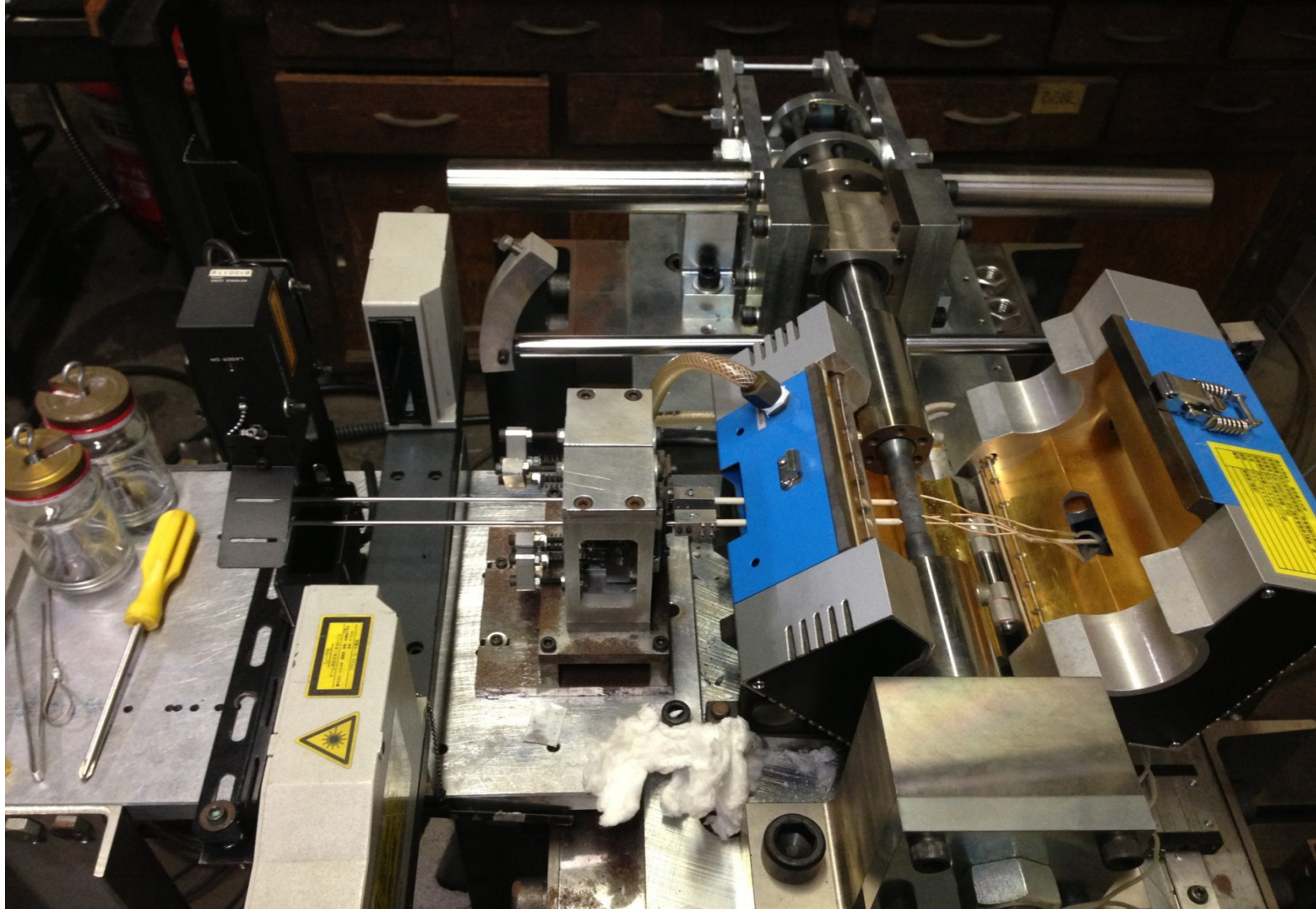
σ' ; 偏差応力

K ; 変態塑性係数

$\bar{\sigma}$; ミーゼスの相当応力

$\bar{\varepsilon}^{tp}$; 相当変態塑性ひずみ

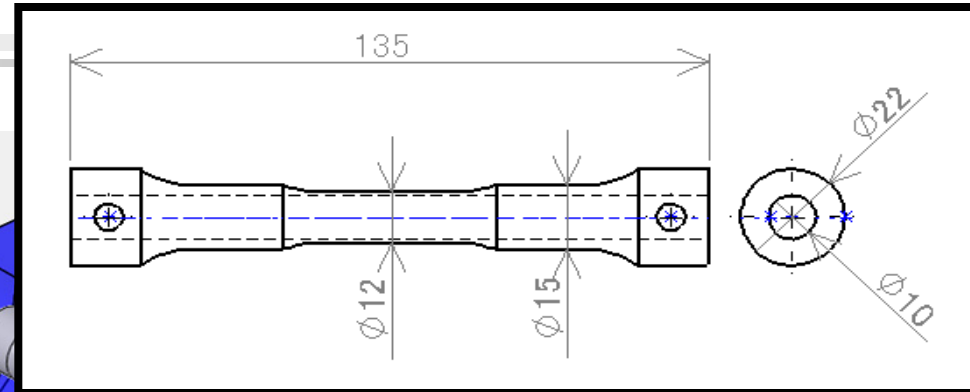
実験装置



測定方法

レバー式変位計

試験片変位を炉外に取り出す



S45C 肉厚1mm

レーザ変位計

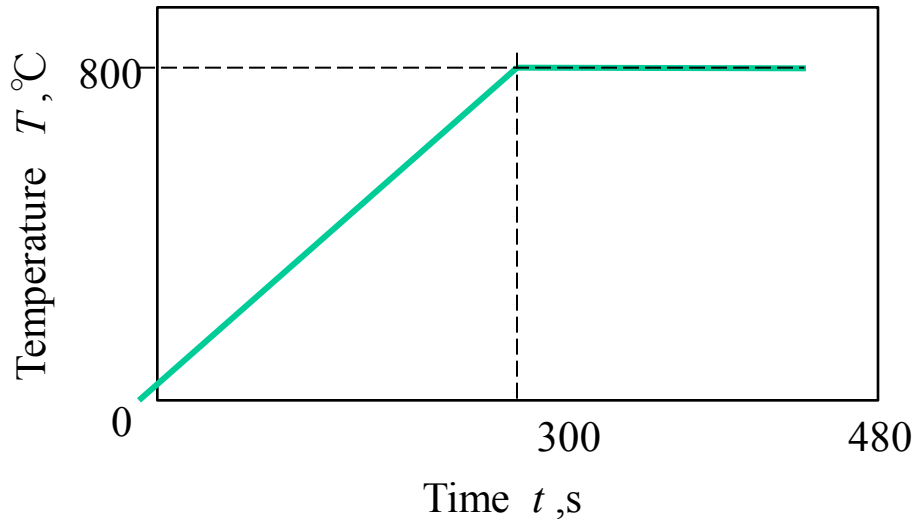
二軸変位の測定が可能

赤外線加熱炉

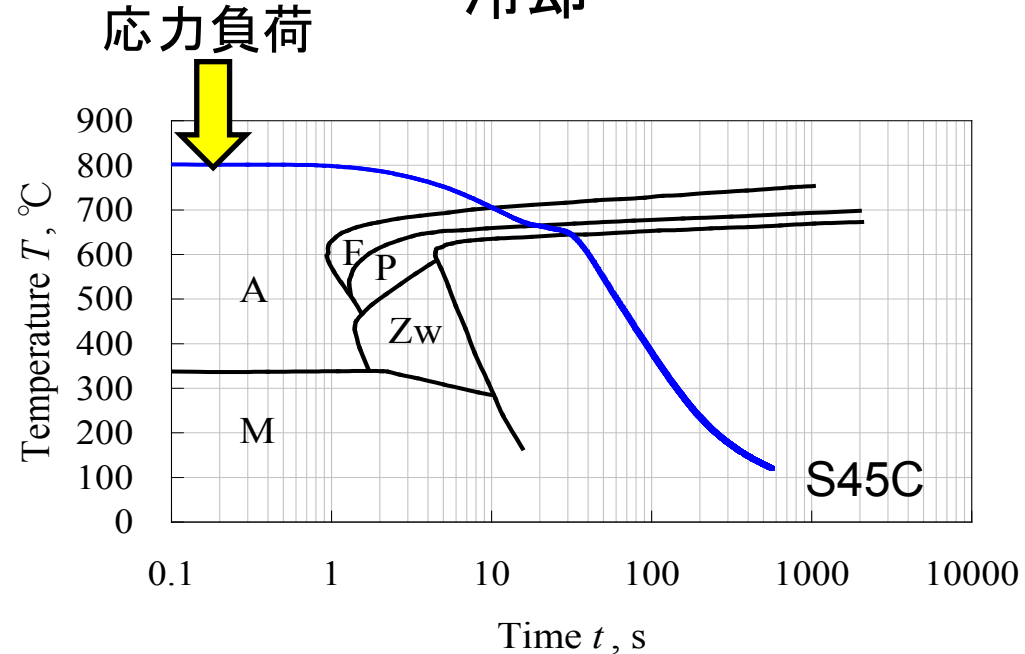
試験片を800°Cに加熱
K熱電対で温度測定

実験方法

加熱・保持



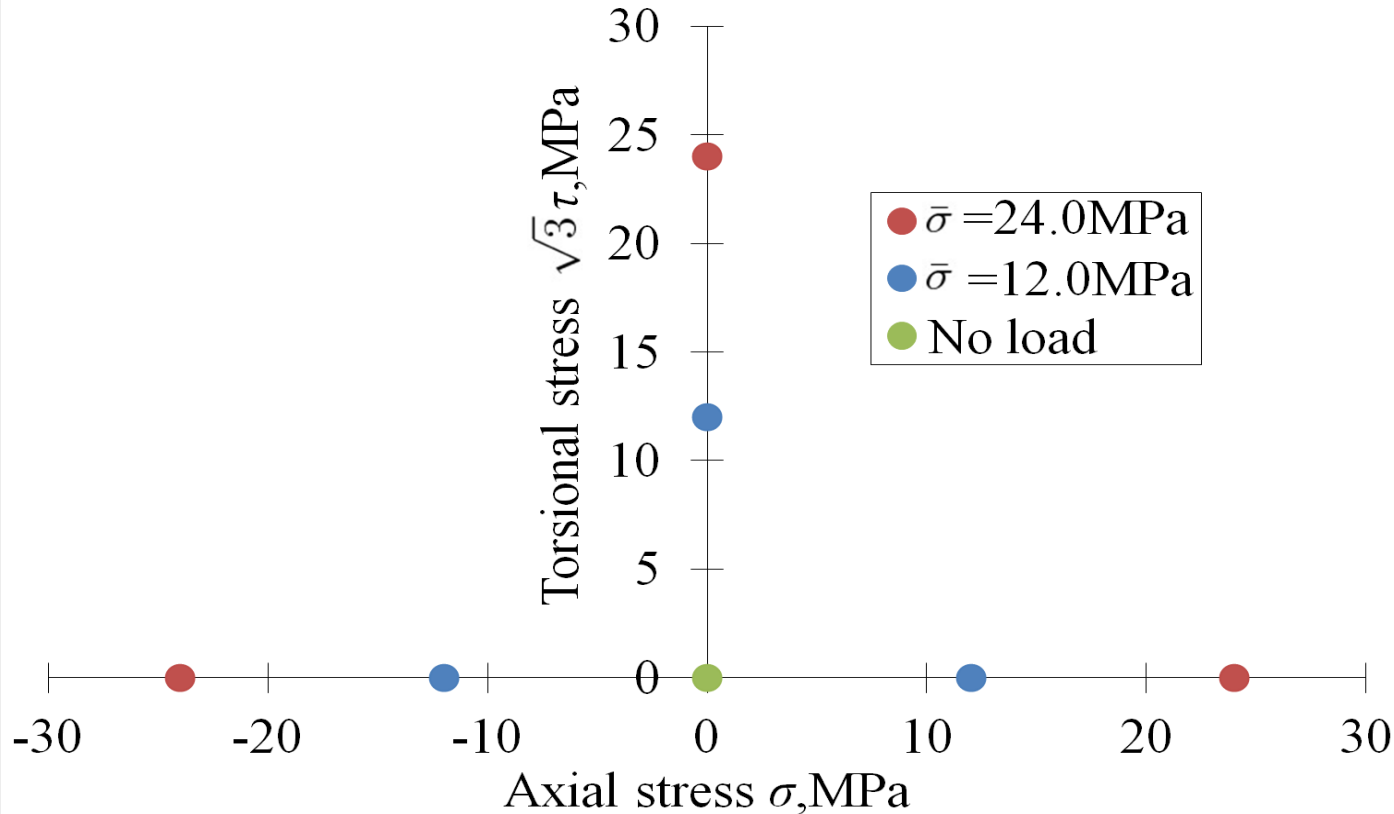
冷却



オーステナイト相から自然冷却によりパーライト変態

冷却過程の温度-ひずみ線図を取得

応力条件



ミーゼスの相当応力

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

試験回数

無負荷 × 5回

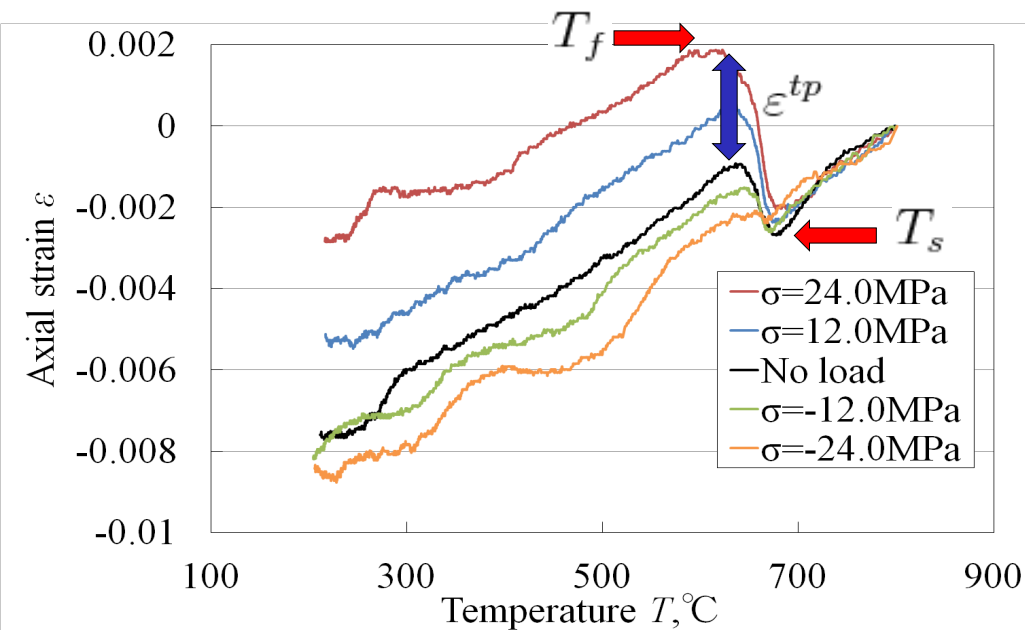
単軸引張・圧縮 × 3回

単軸ねじり × 2回

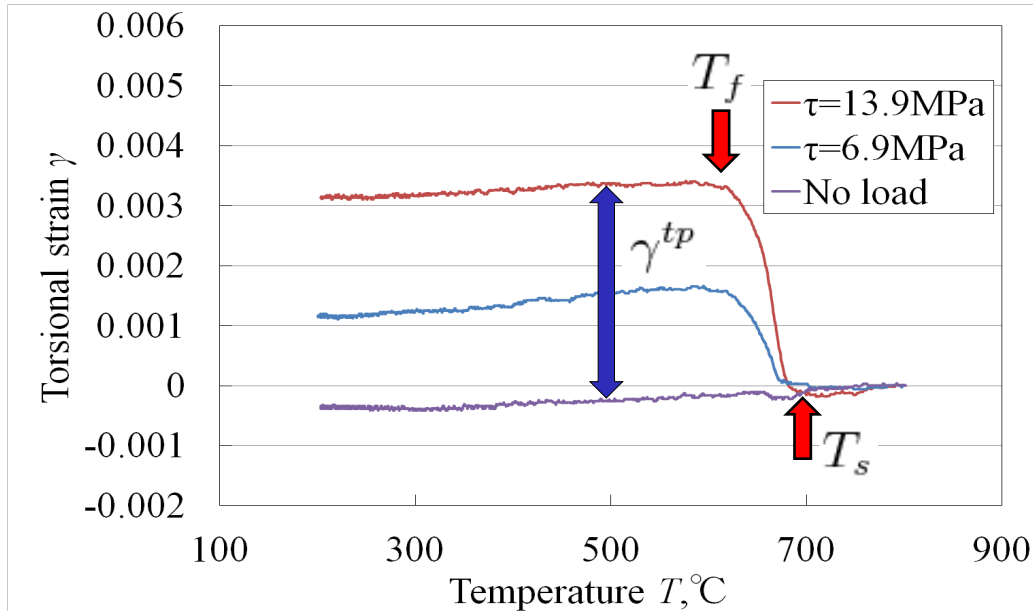
負荷応力は降伏応力以下で一定
(800°Cでの降伏応力は53MPa程度)

実験結果

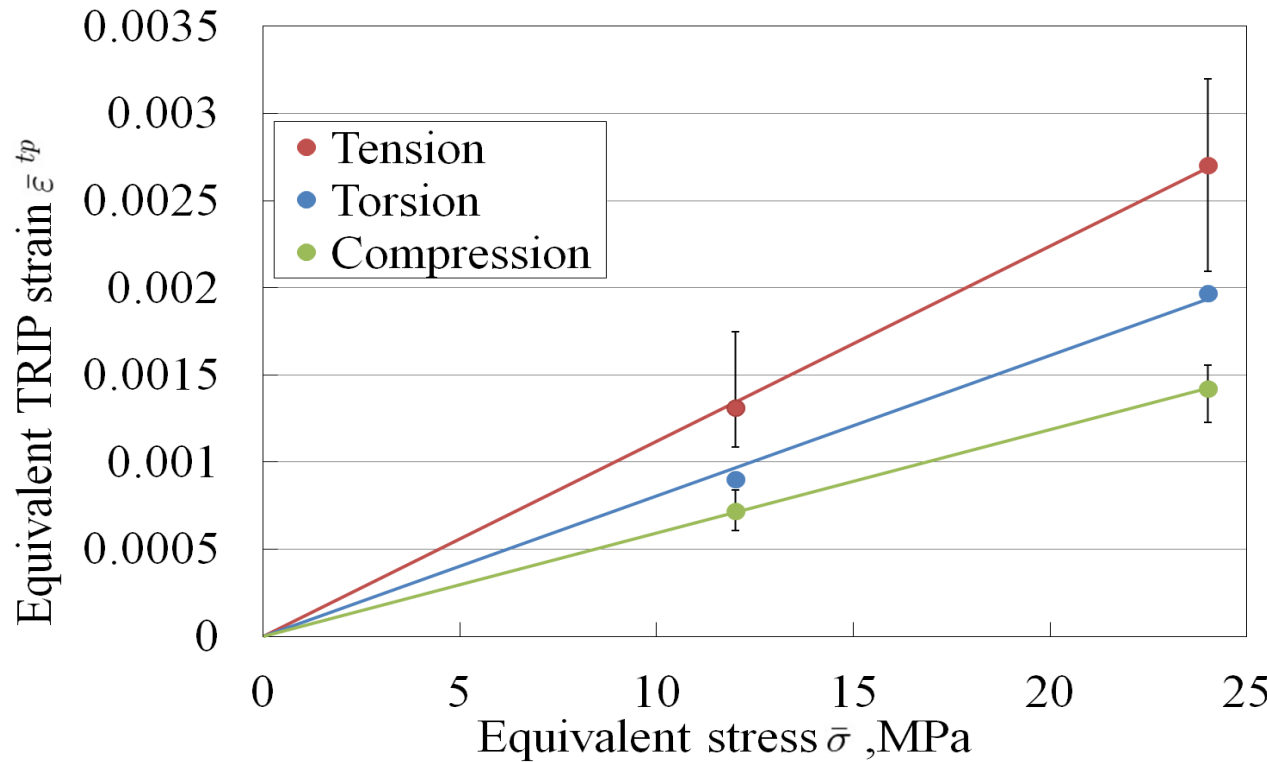
引張・圧縮単軸応力



ねじり単軸応力



変態塑性係数の結果



$$\bar{\epsilon}^{tp} = K \bar{\sigma}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

$$\bar{\epsilon}^{tp} = \sqrt{\epsilon^{tp2} + \frac{1}{3}\gamma^{tp2}}$$

負荷方向により
変態塑性係数が異なる。

TRIP coefficient $K, 10^{-5}\text{MPa}^{-1}$		
Tension	Torsion	Compression
11.2	8.06	5.94

研究の目的

- ・ 溶接や熱処理における残留応力の予測精度は材料の構成式(応力-ひずみ関係)に左右される.
- ・ 応力が非弾性的に、引張 \leftrightarrow 圧縮の時間変化を示す場合には、硬化則の影響が大きい.
- ・ 温度変化および金属組織変化を伴う場合で、任意の硬化則や降伏関数をモデルに組み込むためには、応力積分を正確に行う必要がある.
- ・ 商用コードに材料の構成モデルを組み込む場合の方法論を、最も簡単なMises降伏関数 & 等方硬化について確立する.

～ 定式化-1 ～

微小変形を対象に、全ひずみ速度が、以下のように弾性、塑性、熱・変態、変態塑性の各ひずみ速度の和で与えられるものとする。

$$d\boldsymbol{\varepsilon} = d\boldsymbol{\varepsilon}_e + d\boldsymbol{\varepsilon}_p + d\boldsymbol{\varepsilon}_v + d\boldsymbol{\varepsilon}_{TP}$$

全ひずみ増分
弾性ひずみ増分
塑性ひずみ増分
熱, 変態ひずみ増分
変態塑性ひずみ増分

応力は、弾性係数の温度依存性を考慮すると以下のように表される。

$$d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} : (d\boldsymbol{\varepsilon} - d\boldsymbol{\varepsilon}_v - d\boldsymbol{\varepsilon}_p - d\boldsymbol{\varepsilon}_{TP}) + \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial T} : \mathbf{C}^{-1} : \boldsymbol{\sigma} dT$$

上式を時刻nからn+1における増分形式で表示すると、

$$\Delta\boldsymbol{\sigma} = {}^{n+1}\mathbf{C} : (\Delta\boldsymbol{\varepsilon} - \Delta\boldsymbol{\varepsilon}_v - \Delta\boldsymbol{\varepsilon}_p - \Delta\boldsymbol{\varepsilon}_{TP}) + \Delta\mathbf{C} : {}^n\boldsymbol{\varepsilon}_e$$

したがって時刻n+1における応力は、

$$\begin{aligned} {}^{n+1}\boldsymbol{\sigma} &= {}^n\boldsymbol{\sigma} + \Delta\boldsymbol{\sigma} = {}^n\mathbf{C} : {}^n\boldsymbol{\varepsilon}_e + {}^{n+1}\mathbf{C} : (\Delta\boldsymbol{\varepsilon} - \Delta\boldsymbol{\varepsilon}_v - \Delta\boldsymbol{\varepsilon}_p - \Delta\boldsymbol{\varepsilon}_{TP}) + \Delta\mathbf{C} : {}^n\boldsymbol{\varepsilon}_e \\ &= ({}^n\mathbf{C} + \Delta\mathbf{C}) : {}^n\boldsymbol{\varepsilon}_e + {}^{n+1}\mathbf{C} : (\Delta\boldsymbol{\varepsilon} - \Delta\boldsymbol{\varepsilon}_v) - {}^{n+1}\mathbf{C} : (\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_p + \Delta\boldsymbol{\varepsilon}_{TP}) \end{aligned}$$

～ 定式化ー2 ～

すなわち,

$${}^{n+1}\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^{(T)} - {}^{n+1}\mathbf{C} : (\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_p + \Delta\boldsymbol{\varepsilon}_{TP})$$

とあらわされる. ここで,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma}^{(T)} &= ({}^n\mathbf{C} + \Delta\mathbf{C}) : {}^n\boldsymbol{\varepsilon}_e + {}^{n+1}\mathbf{C} : \Delta\boldsymbol{\varepsilon}_M \\ &= {}^{n+1}\mathbf{C} : {}^n\boldsymbol{\varepsilon}_e + {}^{n+1}\mathbf{C} : \Delta\boldsymbol{\varepsilon}_M = {}^{n+1}\mathbf{C} : ({}^n\boldsymbol{\varepsilon}_e + \Delta\boldsymbol{\varepsilon}_M) \end{aligned}$$

$$\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_M = \Delta\boldsymbol{\varepsilon} - \Delta\boldsymbol{\varepsilon}_v$$

である. $\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_p$ と $\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_{TP}$ は時刻n+1における応力状態に基づいて決定されるべきだが、従来の方法では、 $\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_{TP}$ を時刻nの応力状態から計算される値で近似し、有限要素法における外力項として扱う方法をとっていた.

リターンマッピング法では、 $\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_p$ と $\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_{TP}$ を時刻n+1における応力状態と時刻n+1における温度、金属組織状態から定まる降伏応力にもとづいて、厳密に計算を行う.

～ 計算事例 ～

【問題設定】

丸棒に時間比例引張負荷を与えたときの変態塑性による伸びのシミュレーション

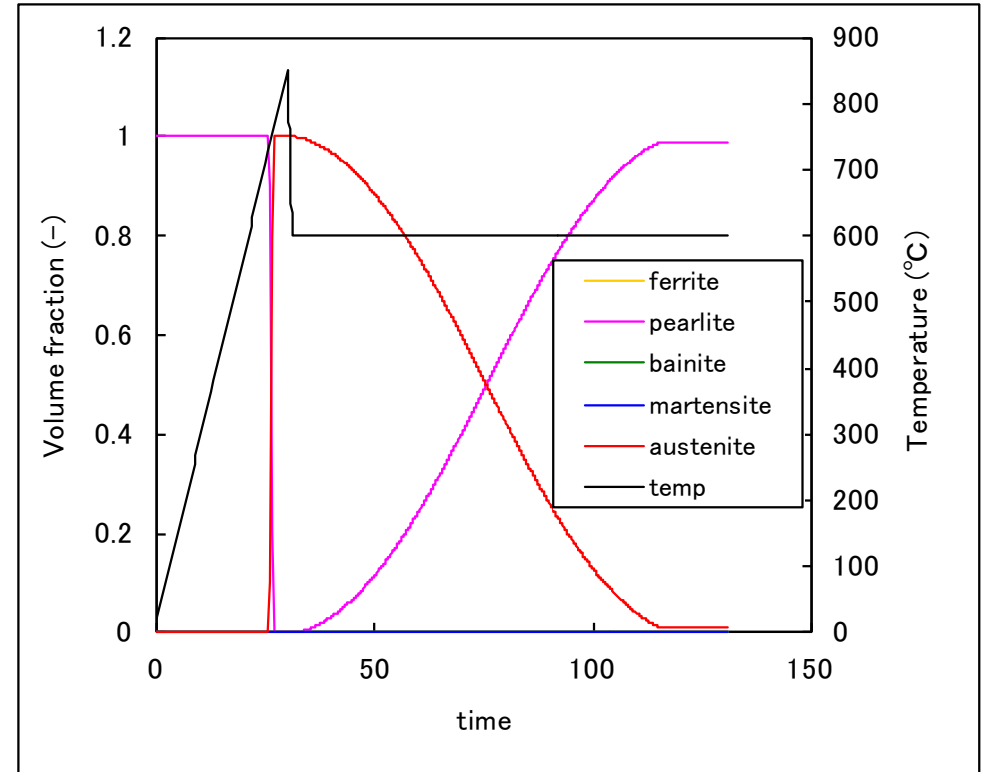
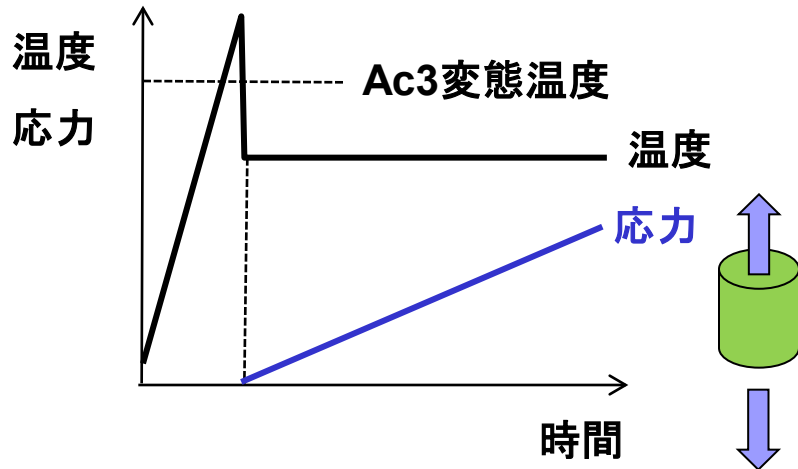


図 温度変化に対する金属組織の時間変化

熱・変態効力解析におけるリターンマッピング法の適用

～ 計算事例 ～

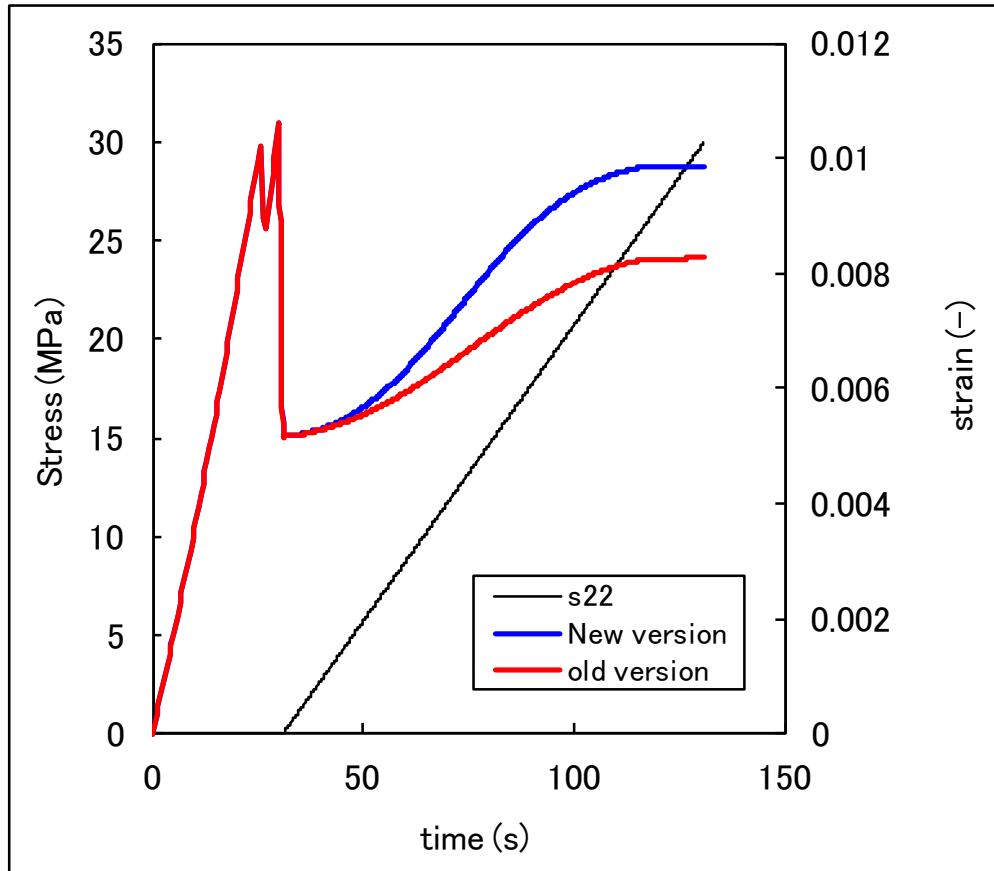


図 伸び変化のシミュレーション結果

従来法では、一つ前の時刻の応力に基づいて変態塑性ひずみを計算するので、リターンマッピング法よりも伸びを小さく計算する。

従来法で計算精度を得るためには、時間増分を十分に細かくする必要がある。

リターンマッピング法では、時間増分を大きくとっても十分な計算精度が得られる。

リターンマッピング法によって計算精度、計算速度の向上が可能になった

トピックス2の成果まとめと今後の予定

結言

ひずみの測定結果(特に引張り方向)にばらつきはあるものの、以下の結論を得た

- 変態塑性挙動が負荷方向(引張, 圧縮, ねじり)に依存することを確認した
- この挙動はMiese形の構成式では表現できない

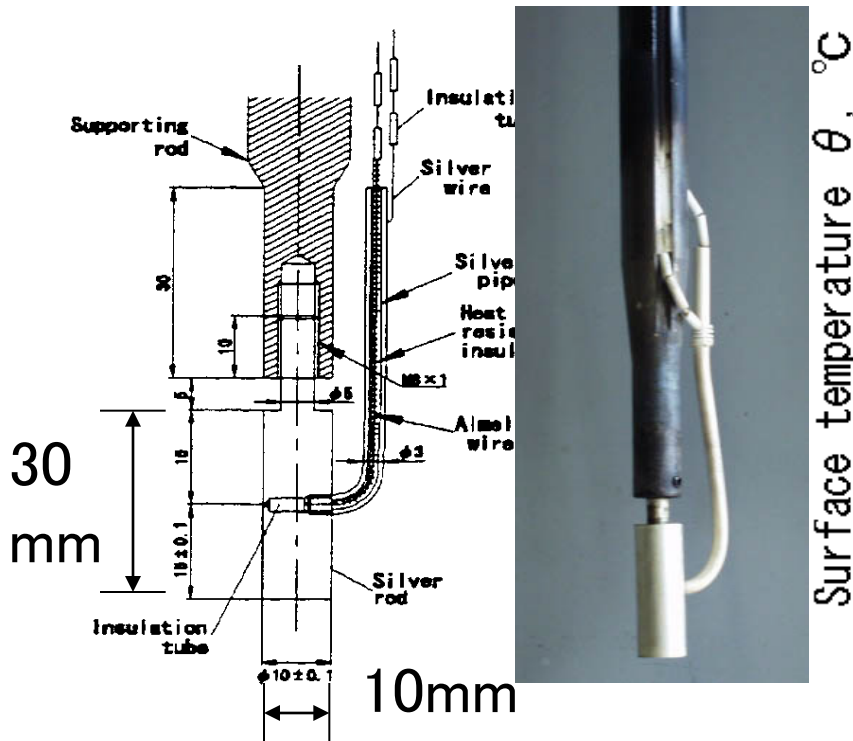
今後の予定

- 引張・ねじり, 圧縮・ねじり二軸同時負荷での実験
- 無拡散型変態についての同様な実験
- 変態塑性挙動を表現する構成式の検討

熱伝達係数の同定

冷却曲線の測定 — 従来の方法

Surface temperature is measured by silver cylinder, JIS K 2242 and obtain cooling curve of coolant.



JIS K2242 Silver Probe

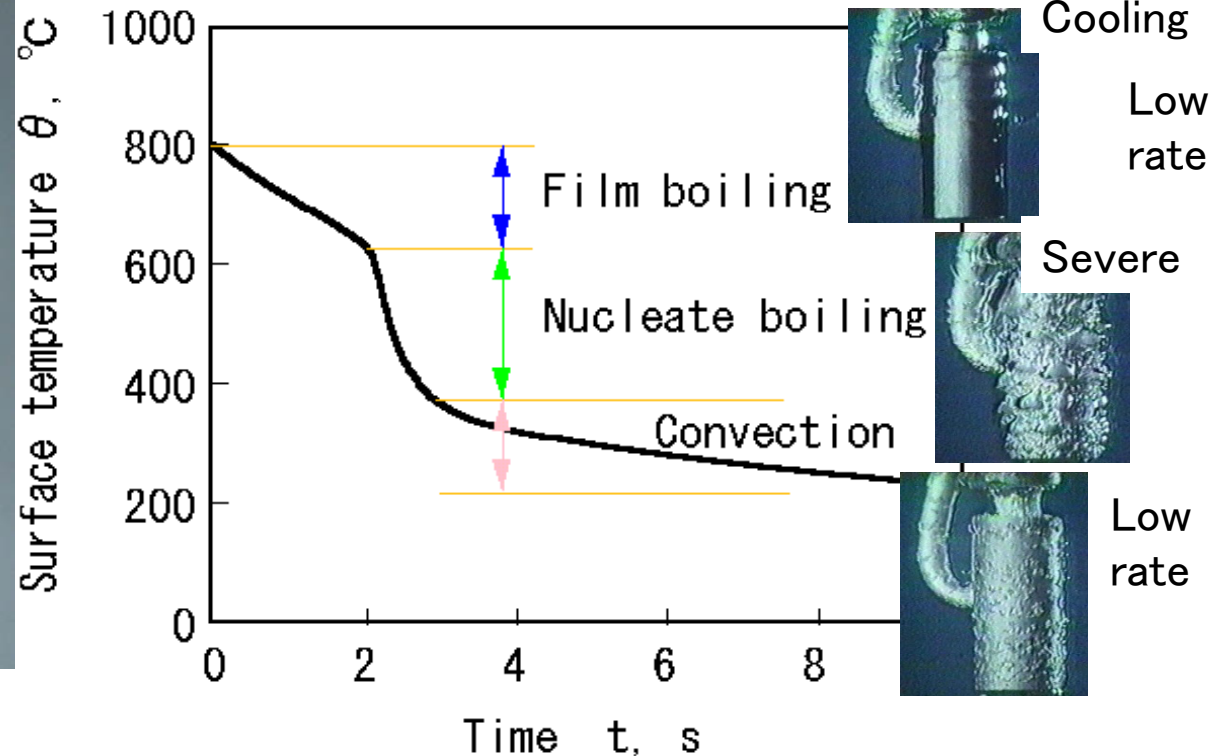


Fig. Cooling curve of quenching oil

熱伝達率の逆解析

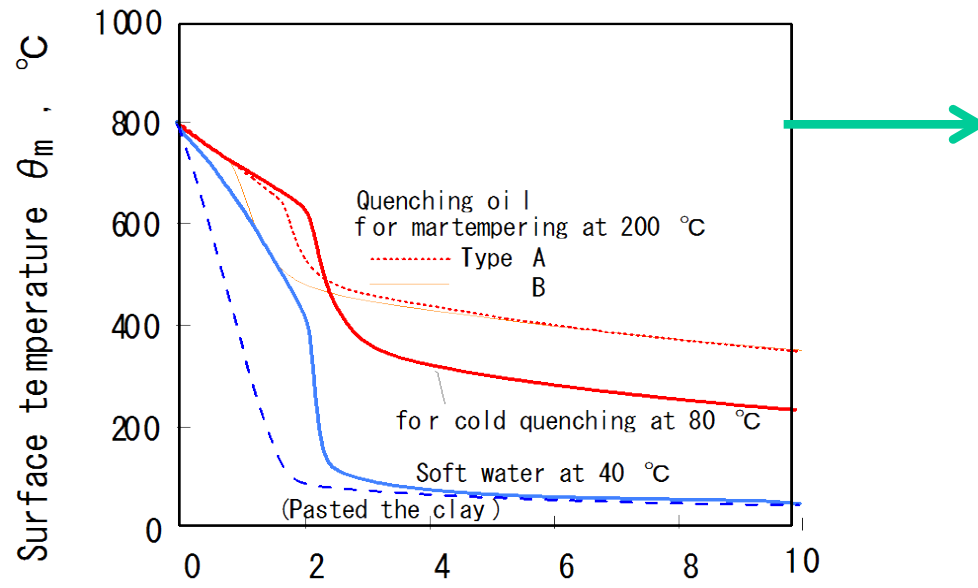
逆解析の方法

$$\text{Solution } \theta(r, t) = \frac{2}{a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R \lambda_n^2}{(h a^2)} \left[-\exp\left(\frac{\kappa \lambda_n^2 t}{a^2}\right) \right],$$



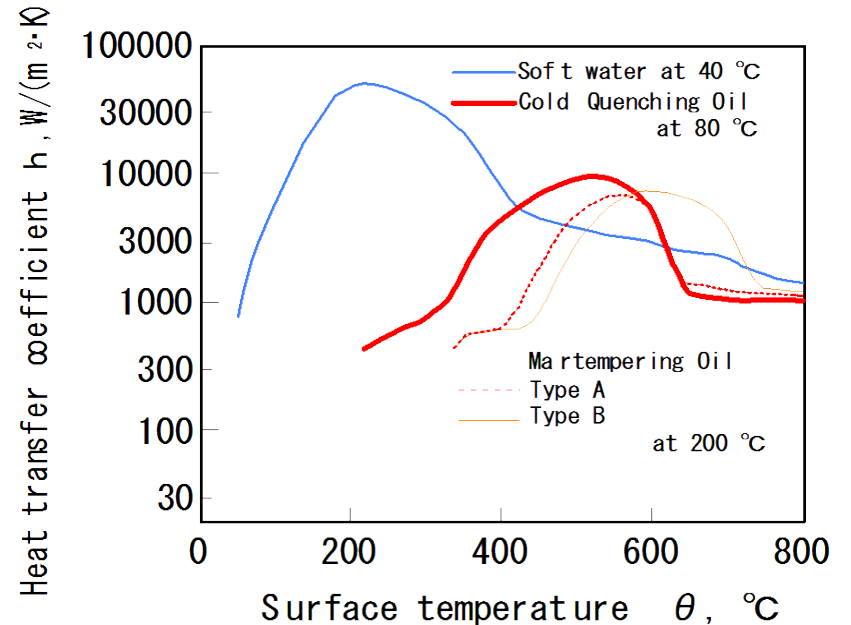
Obtained Cooling Curves

Cooling curves obtained under different quenching oils, water according to JIS K 2242.



Obtained h (θ)

Relationship between heat transfer coefficients h under the different quenching conditions.

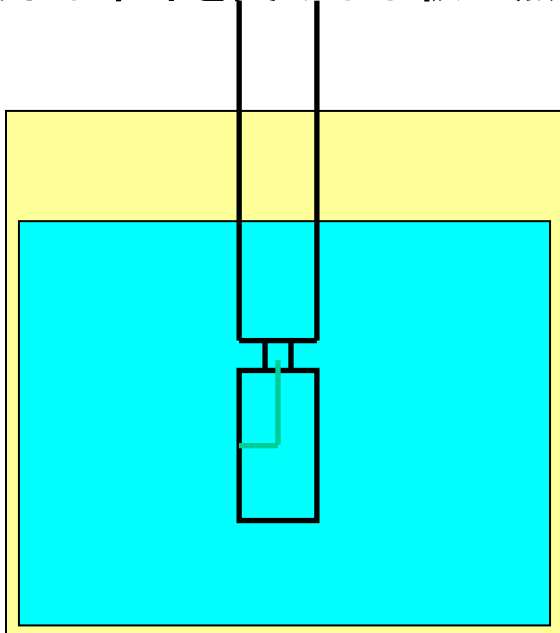


1. 目的

熱処理ひずみを低減させる熱処理冷却油剤の冷却特性を評価し改善する方法を検討する。

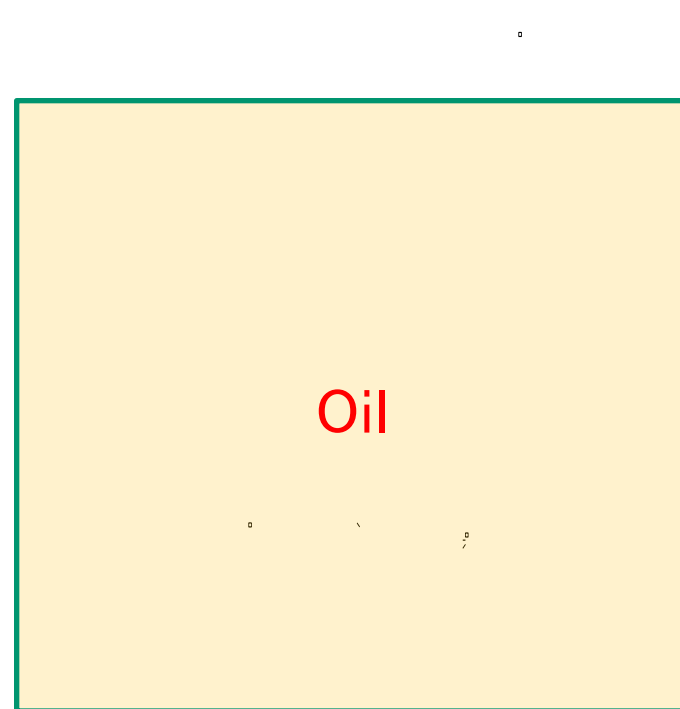
2. 方法

両面で異なる冷却を受ける平板の熱伝達係数の同定



従来法＝一面

表面の一点で計測し熱処理油剤の特徴を明確に示すことができた
(冷却むらや均一性は評価不可)

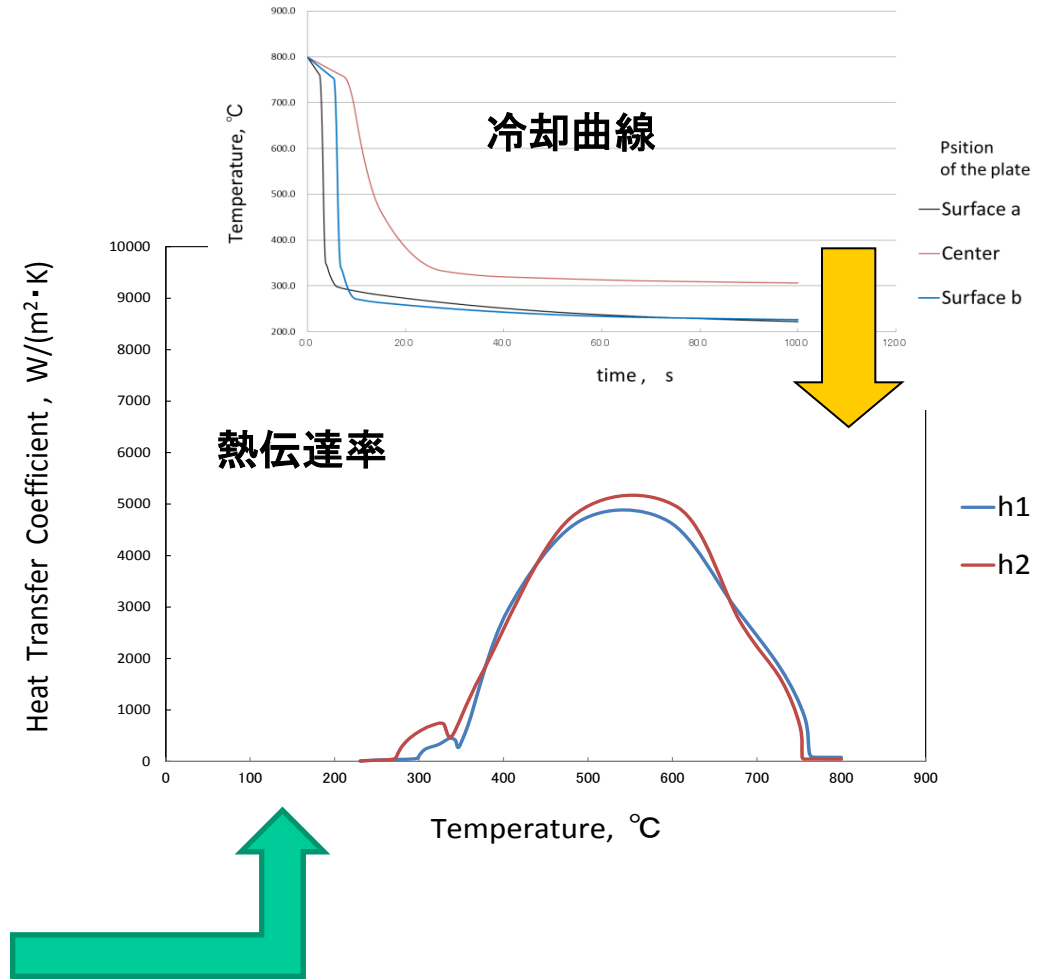
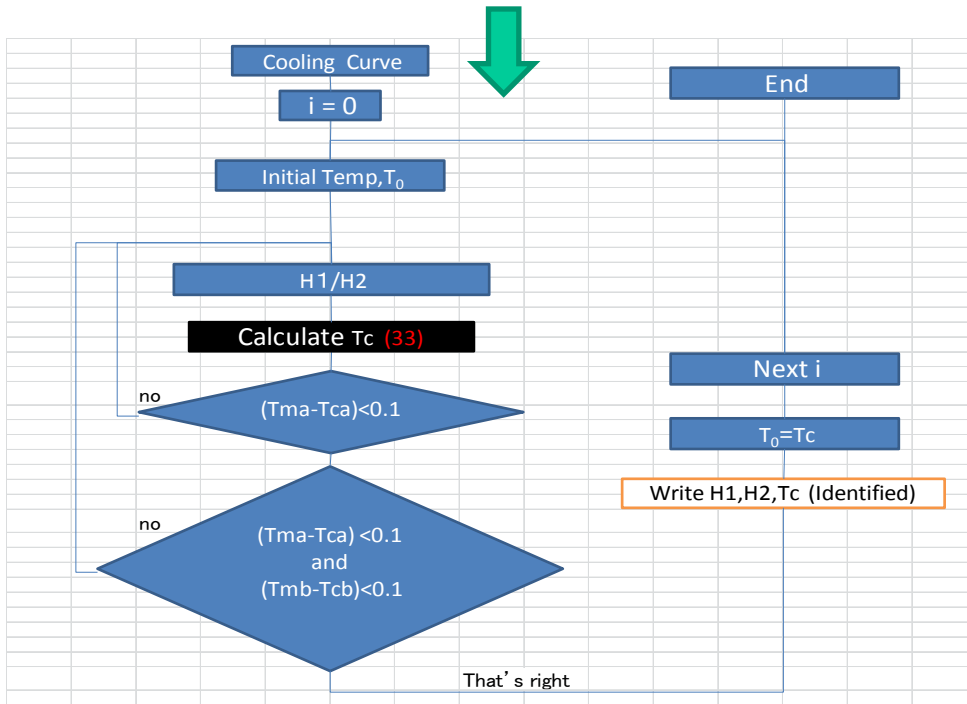


両面法

両面で温度を計測しこれに基づいて各面で異なる冷却特性が求まるため、冷却油剤固有の冷却むら(不均一性)を評価できる。

モデル冷却曲線からの熱伝達係数の同定

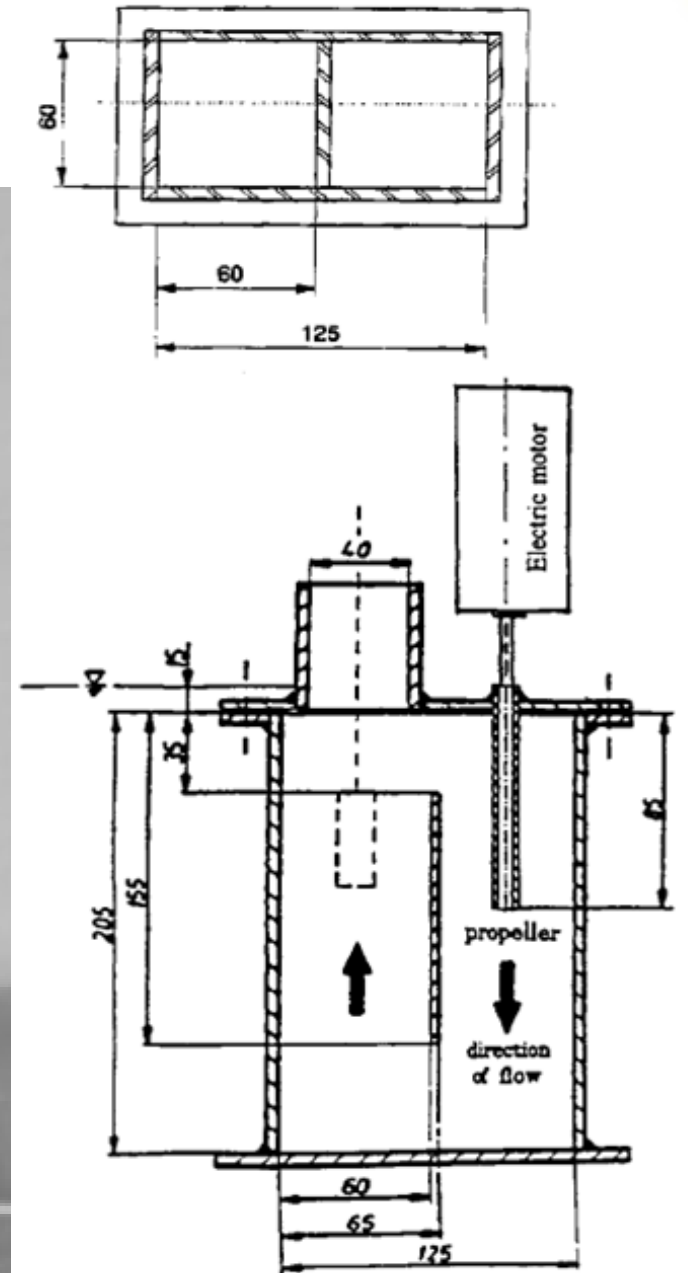
熱伝達率の同定フローチャート



～研究の目的～

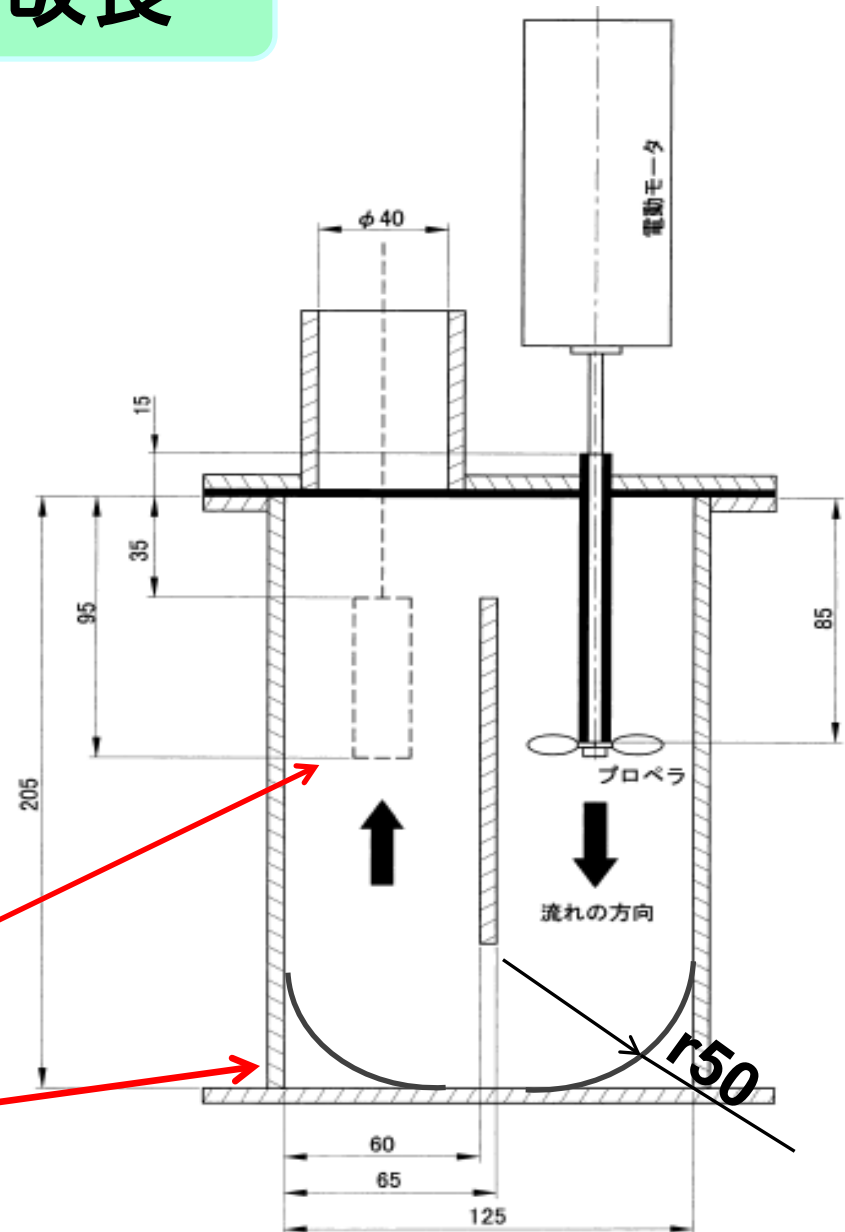
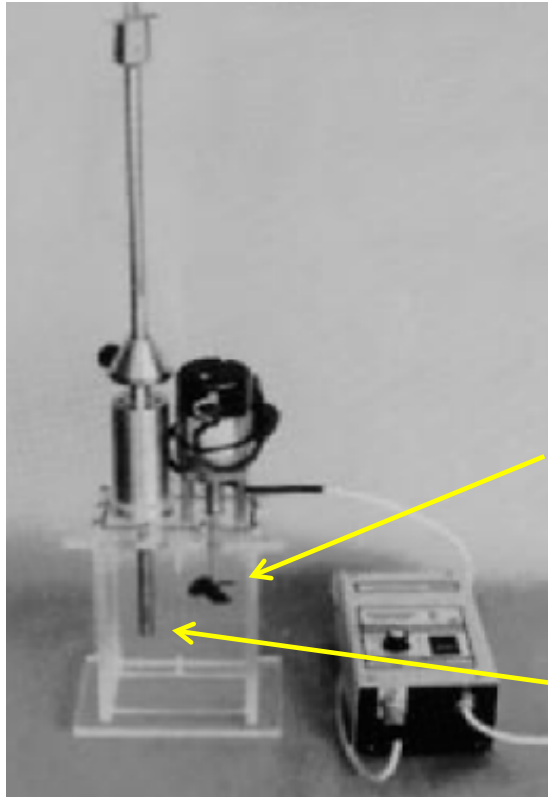
- ・ 焼入液の**攪拌による冷却性能の変化**を定量的に把握する。
- ・ ASTM規格のTensi式**プロペラ攪拌槽の改良**により測定精度の向上を図る。
- ・ **ISOプローブ**（インコネル合金円柱）と**JISプローブ**（銀円柱）での**測定結果の比較検討**

プロペラ式攪拌装置

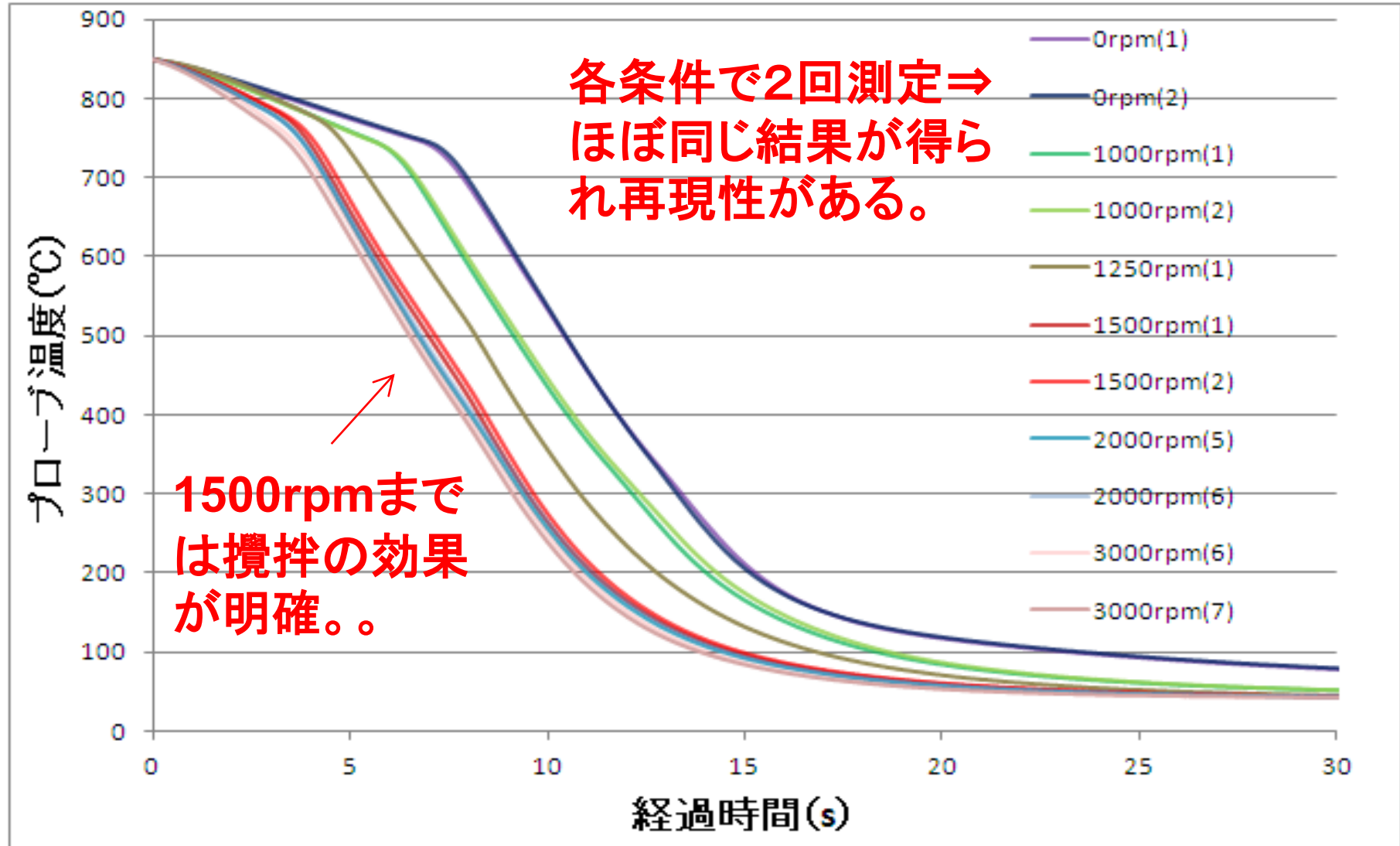


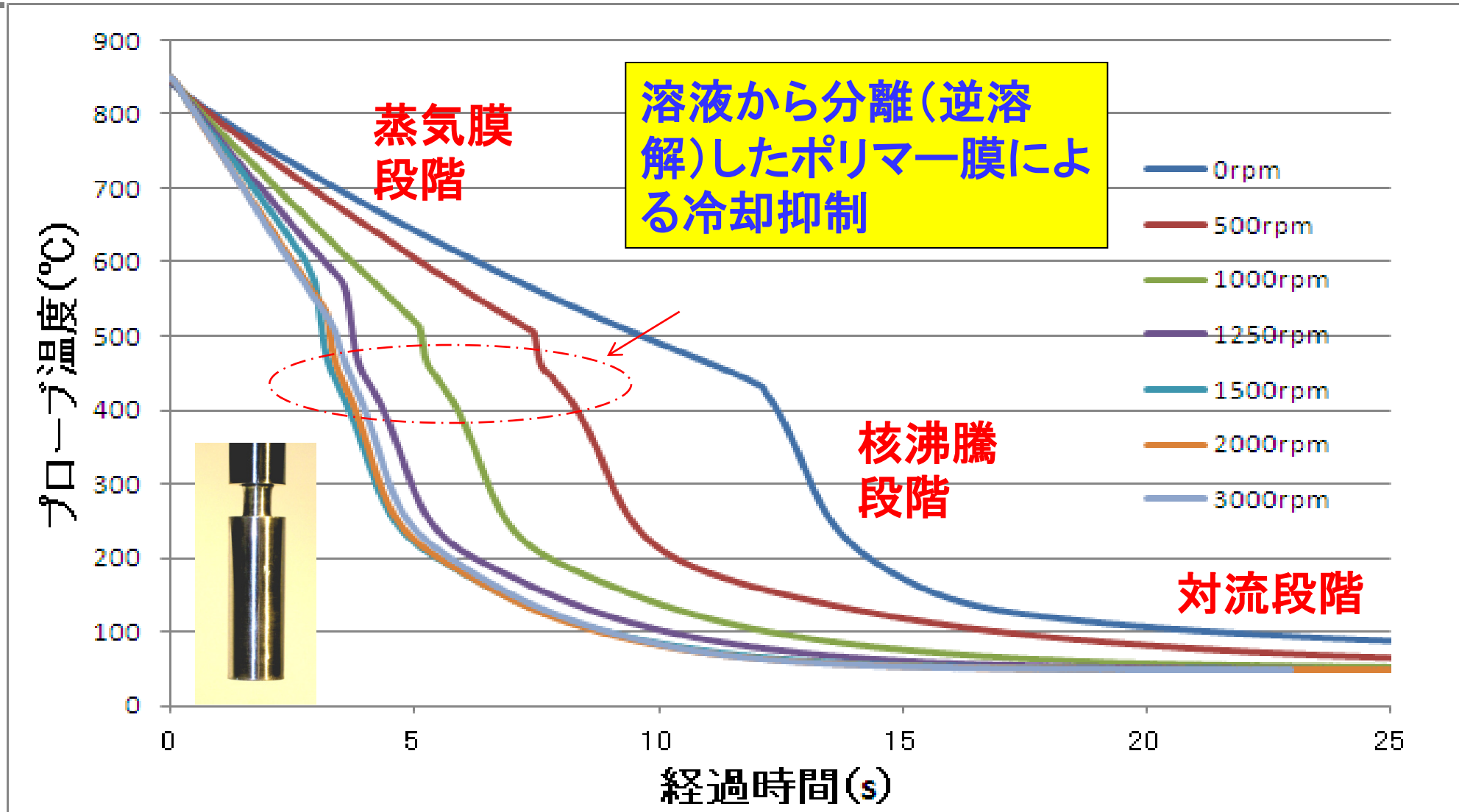
攪拌装置の改良

攪拌装置 (ASTM規格)



整流板を設置

ISOプローブの冷却曲線に及ぼす攪拌の影響
(UQE25%, 液温40°C, 整流板設置)



熱伝達率の同定について

1. 現段階の結論

- (1) 両面で異なる冷却を受ける平板の熱伝導方程式を導入しその解析解を導いた。
- (2) 上述の解析解を用いて、その境界条件である板の両面で異なる熱伝達係数を冷却曲線から各温度ごとに逆問題的に同定するプログラムを開発した。
- (3) 用いた冷却曲線と同定に用いた計算値は完全に一致し熱伝達係数が正確に求められ同定できていることが分かった。

2. 今後の予定

- (1) 開発したプログラムを活用しさまざまな熱処理油剤や冷却剤の冷却の不均一性を評価する。
- (2) 板両面の冷却曲線を正確に測定するための最適なアナログ回路を開発し精密測定方法を確立する。
- (3) COSMAPなどの熱処理シミュレーションに適用し、冷却剤による熱処理ひずみ低減レベルを評価する。

冷却性能測定法の改良について

1. 現段階の結論

- (1) ASTM規格のプロペラ式攪拌槽では空気の巻き込みによる気泡の影響で再現性が得られないと確認された。
- (2) 整流板を追加した改良型攪拌槽では攪拌の影響がより明確に把握することができた。
- (3) 冷却性能測定の際に流れの乱れや気泡の発生を抑えるように注意することで再現性の改善が可能である。
- (4) ポリマーの逆溶解現象による影響はISOプローブでは観察されず、感度の良いJIS銀プローブでは明確に観察された。

今後の予定

継続にISOプローブ(インコネル合金円柱)とJISプローブ(銀円柱)での測定結果を比較・検討する。

3 今後の展開と予定

機械部品の高精度，高強度化，省エネ・低環境負荷を目指して

- 各メンバーによる表面処理利用技術向上の推進
- 表面硬化処理とくに浸炭・窒化技術の高度化への展開
- 省エネルギー，CO2ガス低減を目指した技術の確立
- 期待される成果を基にNEDO, JSTなどによるプロジェクト化