

FINAS/TPSによる焼入れ変形, 残留応力の解析

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
科学システム事業部

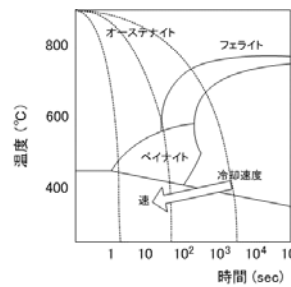
鋼の熱処理

- 熱処理とは
鋼の焼きを入れると硬くなる性質を使い、機械部品の性能(耐久性)をUPするプロセス
通常焼入れ、浸炭焼入れ、高周波焼入れ、レーザー焼入れ等が有る

熱処理CAE

- 熱処理の課題
形状のゆがみ、割れの発生、残留応力による破壊等。
- 熱処理CAEとは
熱処理による変形、材質の変化、残留応力の発生等を定量的に予測
プロセス改善、形状変更、材料変更の指針。最適設計。

冷却速度と金属組織の関係

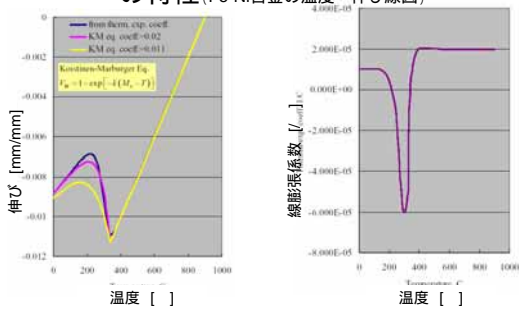


低冷却速度(空冷):
パーライト組織
(やわらかい)

高冷却速度(水冷):
マルテンサイト組織
(硬くてろい)

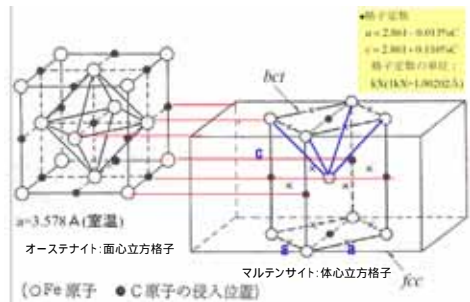
低炭素鋼のCIT線図(等冷却速度変態図)

焼入れ時の相変態(マルテンサイト変態)の特性 (Fe-Ni合金の温度-伸び線図)



マルテンサイト変態による膨張
体積膨張 残留ひずみの発生

オーステナイトとマルテンサイトの結晶構造



FINAS/TPSとは

- 熱処理等の熱プロセス中の変形、組織変化、残留応力の定量的予想を行う有限要素解析コード
- 熱、応力、相変態、拡散、電磁場(外部モジュール)の各ソルバーから構成され1ステップ内で連成させて計算
- 熱プロセス中の時々刻々の状態変化を高精度で予測

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

構造解析 + 相変態

- 構造解析ソフトに相変態モデルを融合した熱プロセス専用ソフトウェア

組織の体積分率: f_i

組織の物性: E_i

混合則: $E = \sum f_i E_i$

熱-弾-塑性結合
相変態結合
拡散結合

- 混合則により有限要素内でオーステナイト、パーライト、マルテンサイト等複数の金属組織を扱うことができる。

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

FINAS/TPSの用途

- 熱プロセスによる材料の相変態、熱的、機械的特性の変化、を考慮した変形・残留応力の定量的予測を行う

- 熱処理(焼入れ、焼き戻し、浸炭)のシミュレーション
TPS: Thermal Process Simulator
- 溶接のシミュレーション

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

FINAS/TPSの特徴

- ひずみ量を、弾性 / 塑性 / 変態 / 変態塑性 / 熱 / 全体の各成分に分けて出力可能
現象の詳細な分析に役立つ
- 自動タイムステップ設定 焼入れ解析の効率化
- 拡散解析機能 浸炭プロセスの解析
- 磁場(MAGNA/FIM)との連成機能 高周波焼入れ解析
- 材料定数は、温度依存、炭素濃度依存、圧力依存で考慮可能
- 高速マリクスソルバーを内蔵

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

FINAS/TPSの構成機能とデータの流れ

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

連成解析における応力とひずみの関係

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^E + \epsilon_{ij}^{TP} + \epsilon_{ij}^{TP} + \epsilon_{ij}^P + \epsilon_{ij}^{TP} + \epsilon_{ij}^C$$

(Total Strain) (Temperature) (Phase Transformation)

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

各ソルバーの基礎式

- 熱伝導解析
 - Fourierの法則 + 相変態による発熱量 $\rho c \dot{T} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L_v \dot{\epsilon}_v$
- ひずみ応力解析
 - $\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^E + \epsilon_{ij}^{TH} + \epsilon_{ij}^{TR} + \epsilon_{ij}^P + \epsilon_{ij}^{TP}$
 - ϵ_{ij}^E : 弾性ひずみ, ϵ_{ij}^{TH} : 熱ひずみ, ϵ_{ij}^{TR} : 変態ひずみ, ϵ_{ij}^P : 塑性ひずみ,
 - ϵ_{ij}^{TP} : 変態塑性ひずみ

各ひずみの計算基礎式

$$\epsilon_{ij}^E = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad \epsilon_{ij}^{TH} = \alpha_i T \delta_{ij} \quad \epsilon_{ij}^{TR} = \beta_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \quad \epsilon_{ij}^P = \Lambda S_{ij}$$

$$\epsilon_{ij}^{TP} = \frac{3}{2} K_{ij} h(\epsilon_{ij}) S_{ij}$$

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

FINAS / TPSの1ステップの解析手順

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

各ソルバーの機能

- 相変態解析ソルバー
 - 有限要素内の相変態量の予測
 - 変態ひずみ、変態潜熱、混合則を通じた材料定数の予測
- 熱伝導解析ソルバー
 - 非定常熱伝導解析 (汎用FEMソルバーを利用)
 - 発熱、熱伝達、等温変化機能
 - 昇温計算、冷却(空冷、炉冷、水冷、油冷等)計算
- 炭素拡散解析ソルバー
 - 非定常熱伝導解析の変数を炭素濃度に変えて利用 (Fourier則をFick則に置き換え)
 - 炭素の移動量計算
- 応力解析ソルバー
 - 非線形弾塑性解析 (汎用FEMソルバーを利用)
 - 残留応力、変形量の計算
- 電磁場解析ソルバー
 - 高周波誘導過熱の計算

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

計算機能

- 有限要素
 - 3次元: 4、5、6面体要素 (1次、および2次要素)
 - 2次元軸対称: 3、4角形要素 (1次、および2次要素)
 - 2次元平面ひずみ: 3、4角形要素 (1次、および2次要素)
 - 2次元平面応力: 4角形要素 (1次、および2次要素)
- 力学境界条件
 - 任意座標系における任意の自由度の拘束、MPC機能、荷重、変位
 - 接触、BODY FORCE、LOCAL座標系
- 時間関数
 - ほぼ全ての力学および熱境界条件は、時間の関数で定義が可能
- 硬さ予測
 - 冷却速度等を見ながら、有限要素の硬さを予測
 - JOMINY曲線、CCT曲線、相の固有硬さの線形和を利用した手法

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

電磁場 (高周波誘導過熱) との連成

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

相変態の考慮

- 焼入れ
 - フェライト変態
 - パーライト変態
 - ベイナイト変態
 - マルテンサイト変態 (無拡散変態)
- 焼き戻し
 - マルテンサイト 低炭素マルテンサイト + 炭化物
 - 残留オーステナイト 焼もどしベイナイト
 - 低炭素マルテンサイト フェライト + セメントライト
- オーステナイト化

(複数の変態が、各所で同時に発生する場合も考慮可能)

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

相変態量の計算式

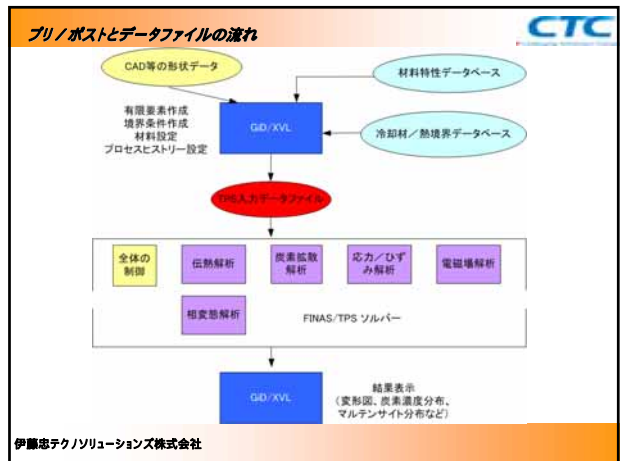
- 相変態量予測
 - 拡散型変態 (TTT図より予測)
 - 開始時間は、TTT図における潜伏期を消費した割合をScheilの加算則により計算
 - 変態量は、TTT図とKolmogorov-Johnson-Mehl-Avrami (KJMA)の式

$$\xi = 1 - \exp(-kt^n) \quad \text{: 変態率, } t \text{: 時間, } k, n \text{: 定数}$$
 - 無拡散変態
 - Koistinen-Marburgerの式** (Ms点及び温度の関数)

$$\xi = \xi_b [1 - \exp\{-k(M_s - T)\}]$$

: 変態率, ξ_b : 初期オーステナイト率, T: 温度, k: 定数

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社



材料特性入力データ

- 相変態特性(TTT図, MS点, 変態パラメータ)
- 硬さ予測(CCT, Jominy線図, 相の硬度)
- 拡散係数(炭素, 窒素)
- 熱伝導率, 比熱, 密度, 変態潜熱
- ヤング率, ポアソン比, 熱膨張係数, 初期降伏応力, 加工硬化係数, 変態膨張係数, 変態塑性係数, クリープパラメータ
- 電気伝導率, 透磁率

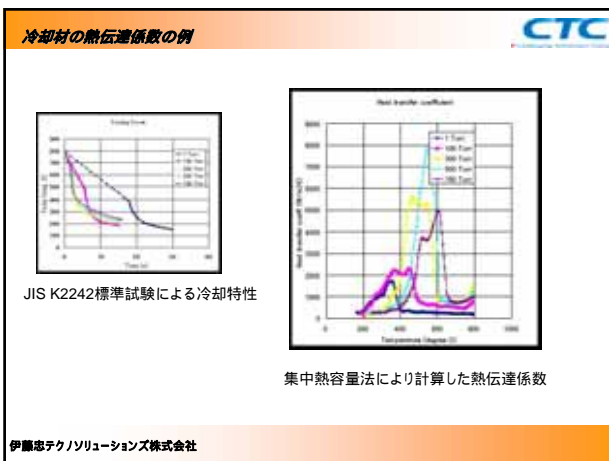
赤は必須, 青は未対応

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

入力データ

- プロセス条件
 - 加熱時間, 加熱温度, 浸炭時間, 焼入れ温度等
- 冷却材のデータ
 - 水冷, 油冷等の冷却材毎の熱伝達係数温度依存データ
 - 部材の形状による場所毎の熱伝達係数

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社



CTC

解析例

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

CTC

丸棒の沸騰水焼入れ解析 (熱伝導解析機能の検証)

武尾敬之助, 前田関一, 上瀬忠興, 岩田 斉, 里見祥明, “沸騰水を利用した高炭素線材の直接パテンチング処理法”, 鉄と鋼, Vol.60, 1974, pp2135-2144

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

CTC

丸棒の沸騰水焼入れ解析 (丸棒中心での温度履歴)

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

CTC

検証解析例：円柱試験片の焼入れ残留応力

Ni鋼を900 から0 の水へ焼き入れ
応力計測はSachs法による

F.G.Rammerstorfer, D.F. et.al.
On Thermo-Elastic-Plastic Analysis of Heat-Treatment Processes Including Creep and Phase Changes,
Computer & Structures Vol.13, 1981, pp771-779

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

CTC

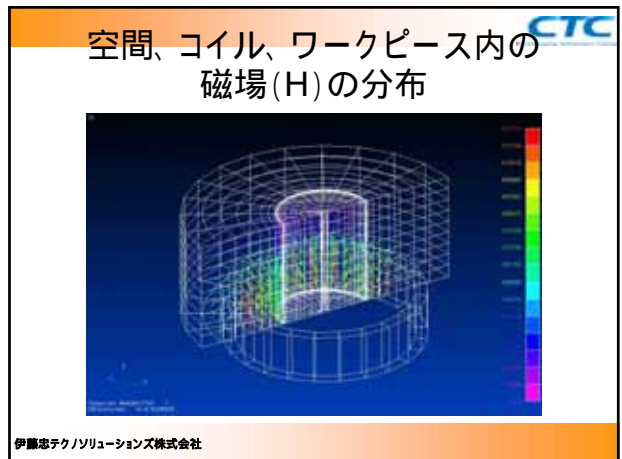
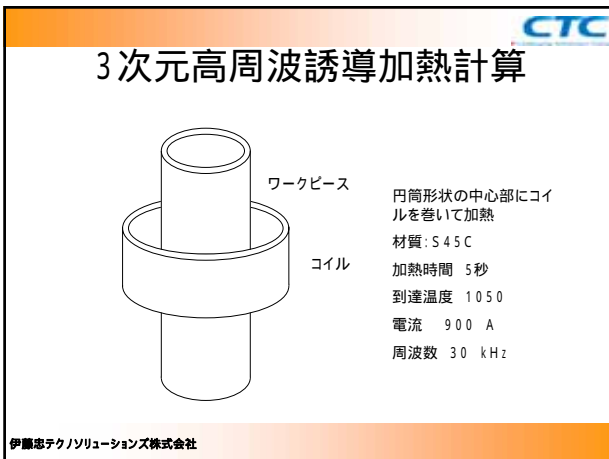
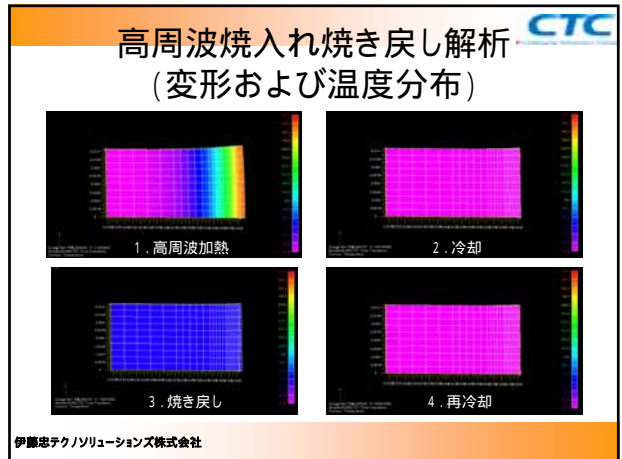
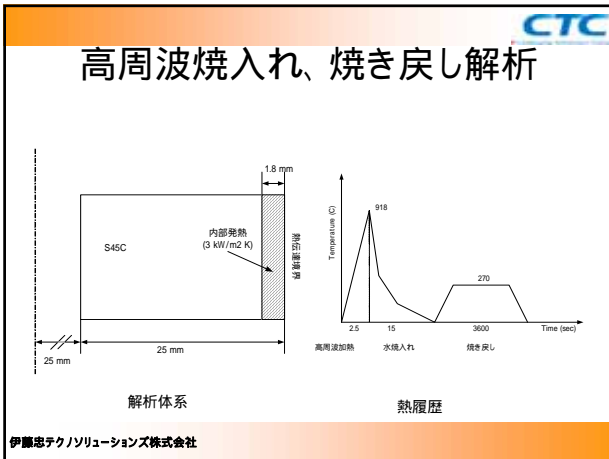
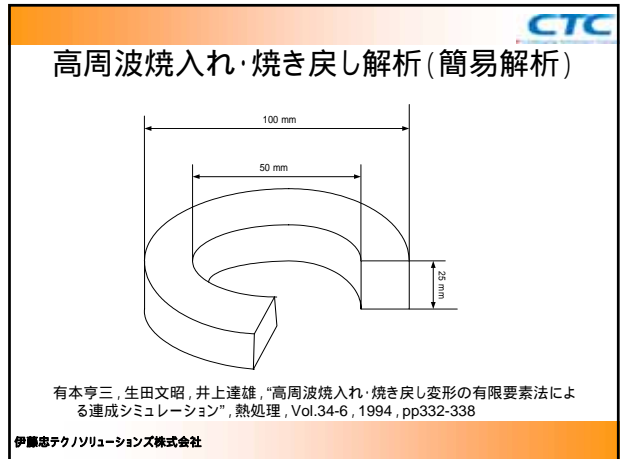
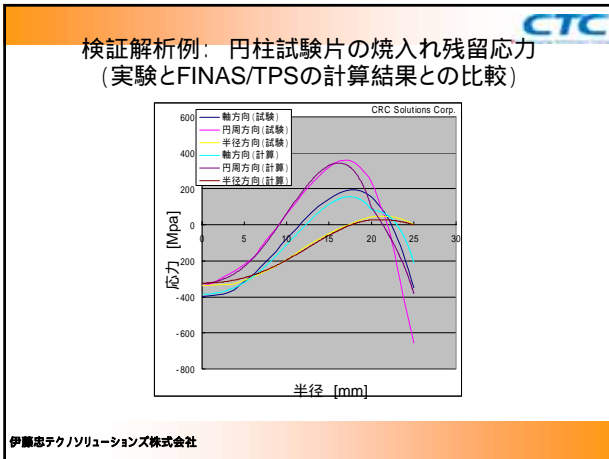
検証解析例：円柱試験片の焼入れ残留応力 (計算モデル)

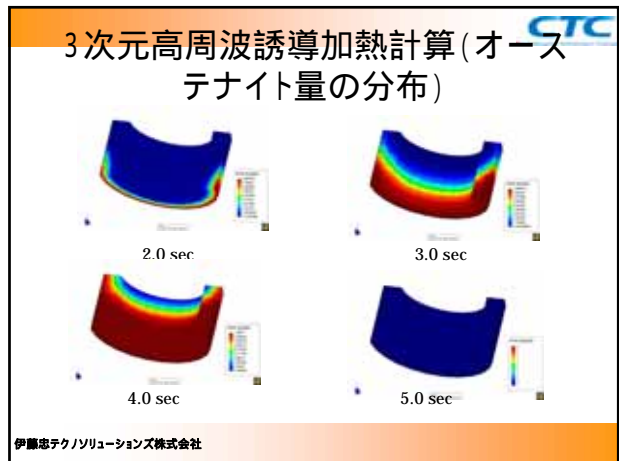
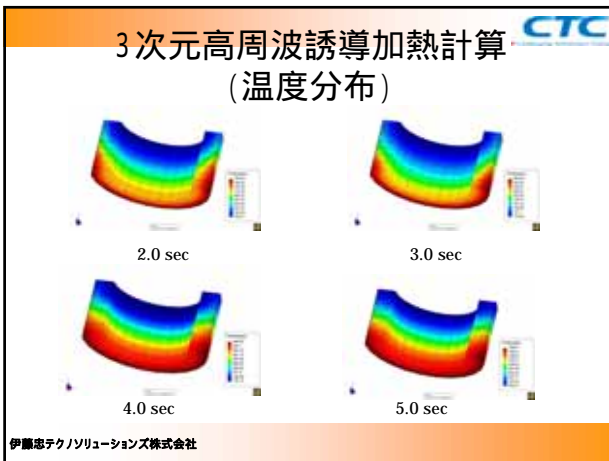
伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

CTC

検証解析例：円柱試験片の焼入れ残留応力 (FINAS/TPSによる計算、時刻毎の軸方向応力の分布図)

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社



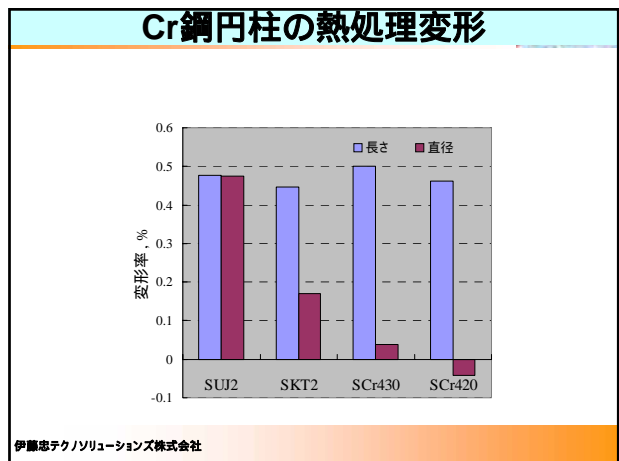
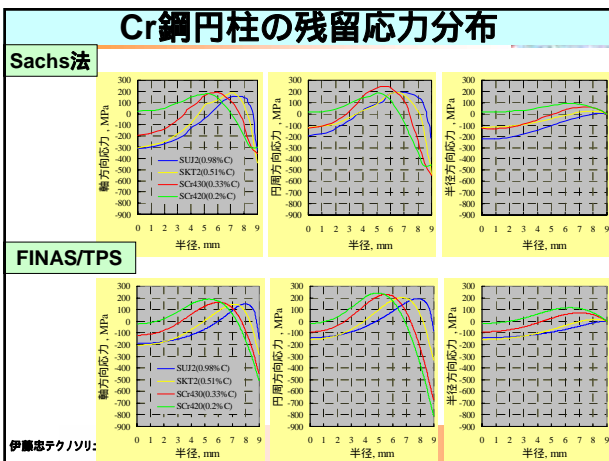
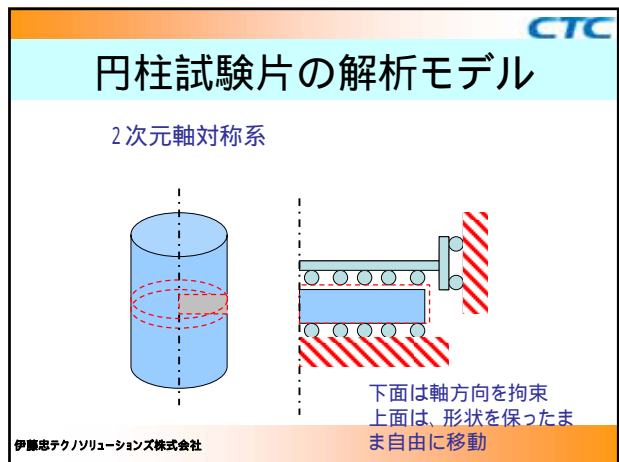


円柱試験片水焼入れ時の残留応力解析 (磯村の試験)

- 試験片
 - 炭素量の異なる4種類のクロム鋼 (SUJ2, SK2, SCr430, SCr420)
 - 円柱 (外径: 18mm, 長さ: 100mm)
- 水焼入れ
 - 静止水, 16 (±2)

参考文献
「磯村良蔵, "鋼の熱処理と残留応力", アグネ技術センター, 1996.」

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 H17年春 日本熱処理技術協会講演大会にて発表

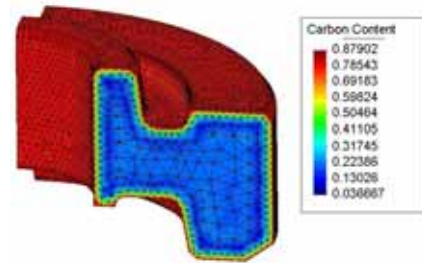


3次元歯車ブランク材の浸炭焼入れ解析

- 930 で260分浸炭処理後、油焼入れ
- 材質: Scr 420
- 4面体要素で、全体の1/4モデル
- メッシュサイズ: 表面付近で1 mm、中心部は6 mm程度
- GiDで自動分割
- ノード数: 7,263 メッシュ数: 27,990

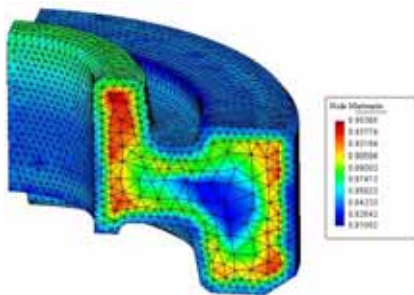
伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

炭素濃度分布



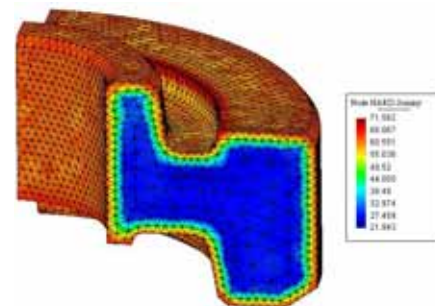
伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

マルテンサイト量分布



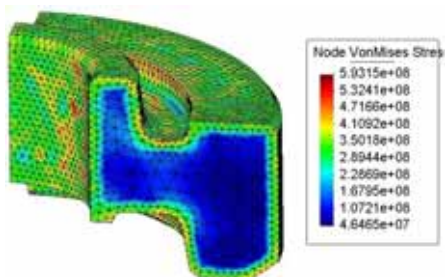
伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

硬度分布



伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

残留応力(Von Mises)分布



伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

変形図



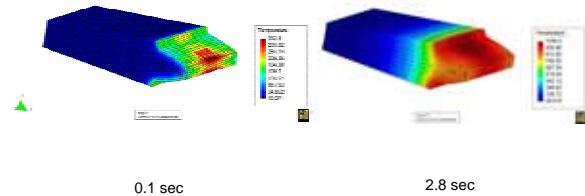
伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

3次元高周波焼入れ解析 (電磁場と連成)

- 平歯車の1歯分を取り出して計算
- 材料:S45C
- 入力パワー:1,962 W 一定制御
- 加熱時間:2.8秒、その後水冷
- 冷却時の熱伝達率:20,000 W/m2K 一定
- 加熱計算は、MAGNA/FIM + TPSの連成
- 冷却計算は、TPSのみ

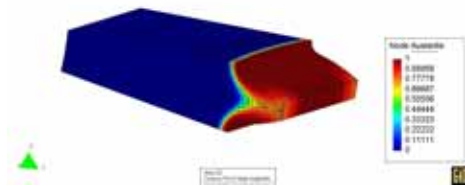
伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

加熱時の温度分布



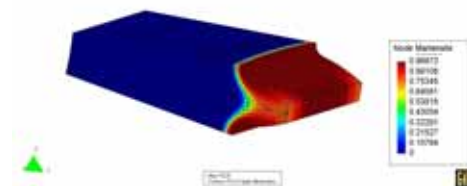
伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

加熱終了時のAustenite量の分布



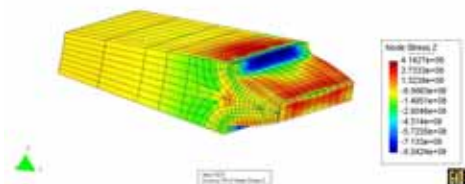
伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

冷却終了時のMartensite量の分布



伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

図のZ方向の応力分布



伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

変形量(20倍)



伊藤忠テクノソリューションズ株式会社