

京都大学大学院 佐橋 真人, 埼玉工業大学工学部 巨 東英, 京都大学工学部 井上 達雄

1. 緒 言

鋼を焼入れ(quenching)した場合, 材料の中にマルテンサイトが生じるので, 高い硬さの材料が得られるが, 反面じん性に欠けることが多い。このため, 焼入れ材を再び炉中で加熱して焼きもどし(tempering)を行って組織の調整を行い, じん性を向上させるのがふつうである。この際焼入れによって生じた残留応力も変化する。したがって, このような熱処理後の材質と残留応力を予測し, 適切な熱処理条件を設定するために, 熱処理過程の相変態を伴う熱・力学解析を行う必要がある。これまで, 熱処理過程の相変態を考慮した応力解析としては, 筆者ら¹⁻⁴⁾は温度と組織変化を連成問題として焼入れ過程の解析を行い, 焼もどし過程での相変態を伴う弾塑性/クリープ解析を行ってきた。本研究では, 焼入れ・焼もどし過程を連続して解析を行う。焼入れ過程では, 前報で行った冷却過程⁽¹⁾だけでなく, 加熱過程で生じるオーステナイト逆変態を考慮する。

焼きもどし過程の組織は焼もどし温度によって3段階に分類される。まず, 第1段階(20-120℃)では, 体心正方格子のマルテンサイトが固溶炭素量の低い体心立方格子マルテンサイト(低炭素マルテンサイト)とε炭化物に変化する。第2段階(120-200℃)では, 残留オーステナイトが分解して, 低温ベイナイトに類似した形態のフェライトとε-カーバイドの微粒子が析出し, 第3段階(200-400℃)はε-カーバイドが消失し, それに代わってフェライトとセメンタイト粒子が析出する。

ここでは, これらの組織変化を支配する速度式を与え, さらに有限要素法による相変態を伴う熱弾塑性/クリープ解析手法を提案した。解析例としてS45Cのリングを850℃から油焼入れの後, 数段階の温度で, 2時間焼もどししたときの組織と応力の変化のシミュレーションを行い, 残留応力を実験結果と比較検討した。

2. 相変態のカイネティックス

鋼における相変態は, 一般に大別して, 拡散型変態と無拡散型変態に分類される。ここでは, 焼入れにおけるマルテンサイト変態のみを無拡散型とし, 加熱時のオーステナイト変態, 冷却時のパーライト変態, さらに焼もどし過程で生じる組織変化はすべて拡散型として, それぞれの変態のメカニズムで生じる組織の体積分率を ξ_M , ξ_D として, その速度式を表示する。

2.1 無拡散型変態

マルテンサイトの組織変化は, 温度のみによって規定されるとする Magee の式を基本とし, これに応力の寄与を考慮した既報の関係をを用いる。すなわち,

$$\xi_M = 1 - \exp[\phi(M_s - T) + \psi \sigma_{kk}] \quad (1)$$

で与えられるとする。

2.2 拡散型変態

拡散を伴う変態は, 時間とともに変化する温度の効果と変態を考慮する必要がある。この点から Johnson-Mehl の式などが用いられることが多いが, これを一般化した関係を用いることにする。これは変態が, 再結晶粒の核生成, 結晶粒界の成長などを考慮したメカニズムを考えて導出されるもので, 次のように与えられる。

$$\xi_D = 1 - \exp(-V_e) \quad (2)$$

ただし

$$V_e = \int_0^t F(\tau) \int_0^\tau G(\tau, \tau_1) d\tau_1 d\tau \quad (3)$$

これは, 核生成と粒界成長速度が時間によらず一定の場合には静水応力 σ_m 依存を含む Johnson-Mehl の関係

$$V_e = \int_0^t f(T, \sigma_m)(t - \tau)^3 d\tau \quad (4)$$

に帰着される。ここに, 関数 $f(T, \sigma_m)$ については

$$f(T, \sigma_m) = f(T, 0) \exp(\Lambda \sigma_m) \quad (5)$$

で規定され, 関数 $f(T, 0)$ は無応力下のデータ(例えば, TTT, CCT, TTTA線図など)から決められる。

3. 相変態を伴う弾・塑性/クリープの解析法

本研究では, 弾性, 塑性, クリープおよび熱と変態膨張の効果と変態を考慮することにする。また, 塑性とクリープの構成式を独立のものとし, 非弾性ひずみは塑性とクリープひずみの和で与えられるとする"重合せ型構成式"を採用する。

一方, 焼もどし過程中的各組織の体積分率を内部変数に取り入れた構成式のうち, 弾・塑性構成式は, 既報⁽³⁾で用いた焼入れ過程における構成式と同一である。また, Mises型の降伏条件に従う等方便化理論を用いる。

3.1 相変態を伴う非弾性構成式

全ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は, 弾性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}^e$, 塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}^p$, クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}^c$, 熱ひずみ速度 $\dot{\epsilon}^T$ および変態ひずみ速度 $\dot{\epsilon}^m$ の和で表されたとする。

変態による組織変化によって, 物体中の微小要素には形状や体積の変化が生じるが, ここでは等方的な体積変化が起こるとみなして, 変態ひずみ速度 $\dot{\epsilon}^m$ を

$$\dot{\epsilon}^m = \sum \beta_i \dot{\xi}_i \quad (6)$$

と仮定する。ここで, ξ_i は各組織の体積分率, β_i は相変態による体積膨張率である。

焼もどし過程におけるクリープの構成式については等方時間硬化則に従うとし, Norton式を用いたつぎのクリープひずみ速度を用いる。

$$\dot{\epsilon}^c = \frac{3}{2} m A^{n-1} t^{m-1} s \quad (7)$$

ここに、 s は偏差応力であり、 A , n および m はそれぞれクリープ変形に関するパラメータである。これらの同定については、高温での高応力のクリープデータが入手困難なため、ここでは種々のひずみ速度での引張り試験の応力・ひずみ線図⁽⁵⁾から決定し、次の結果を得た。

$$\begin{aligned} A &= \exp(3.07 \times 10^{-2} T - 35.7) \\ m &= 5.24 \times 10^{-4} T + 0.0187 \\ n &= -6.78 \times 10^{-3} T + 7.46 \end{aligned} \quad (8)$$

ただし、応力;MPa, ひずみ;l, 温度;℃, 時間;s で数値を表したものである。

弾性ひずみ ϵ^e , 塑性ひずみ ϵ^p および熱ひずみ ϵ^T については、既報に述べたのでここでは省略する。

4 解析と実験結果と考察

4. 1 試料と条件

前節までの理論に基づいて、焼入れ・焼きもどし過程のシミュレーションと、その妥当性を検証するため、2, 3の実験を行う。材料はS45Cのリングであり、高さ25mm, 外径100mm, 内径75mmおよび25mm(解析のみ)のものを対象とした。温度履歴は、電気炉で40分間850℃に保持した後、80℃の油(出光興産製ダフニーマスタークエンチA)中で焼入れを行った後、250℃で2時間の焼きもどしを行った。なお、シミュレーションについては、焼きもどし温度は250℃のほか300, 400, 500, 600℃でも解析を行った。

残留応力測定はつぎのように実施した。試料表面の酸化膜をわずかに電解研磨で除去したうえで、X線応力測定装置(島津製, Cr-K α 2線を使用)によって、試料の端面について σ_r , σ_θ , 側面の σ_z , σ_ϕ の測定を行った。

用いた焼入れ油の熱伝達係数の温度依存性を図1に示す。これは、JISにしたがって、直径10mm, 長さ30mmの銀製の中央円柱を十分に高い温度に加熱後、冷却材に浸せきし、中心に取り付けた熱電対で温度を計測する。一方、円柱の各表面温度に対して仮定した熱伝達係数を用いて計算した中央の温度と計測結果を比較し、十分な一致がないときは、繰返し仮定した値を変えするという逆問題の手法で決定した。

4. 2 焼入れの結果

焼入れ後の組織は、図2のように、中心はパーライ

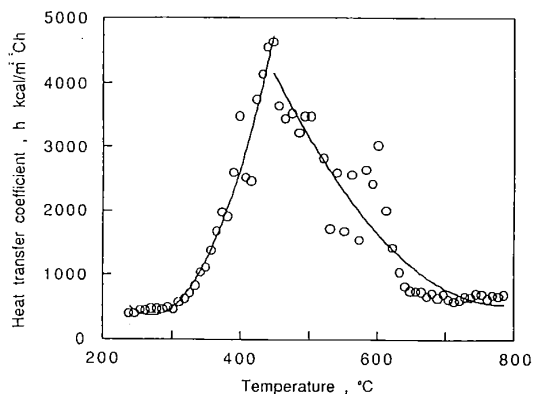


図1. 熱伝達係数の温度依存性

トのみであり、表面近傍はマルテンサイト+オーステナイトであった。また、図3に焼入れ後の応力分布を示す。

4. 3 焼きもどしの結果

焼きもどし温度は、250, 300, 400, 500, 600℃であるが、図4に250と600℃の場合の応力分布を、図5に600℃の場合の外側コーナーにおける組織の時間的变化を示す。端面における半径方向の応力分布の焼きもどし温度依存性を図6に表示した。図中の●は焼入れのままの値、○は250℃x2時間の焼きもどし後の結果である。

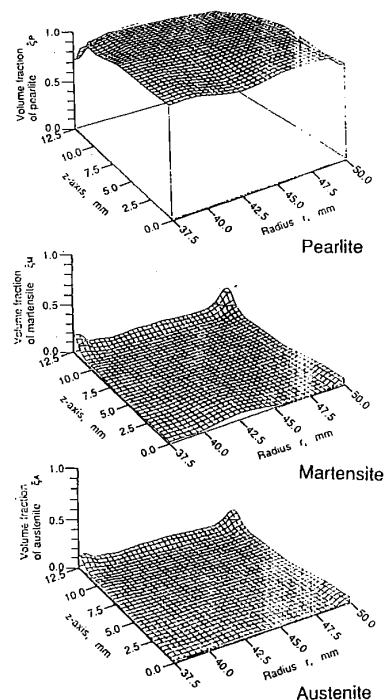


図2. 焼入れ後の組織分布

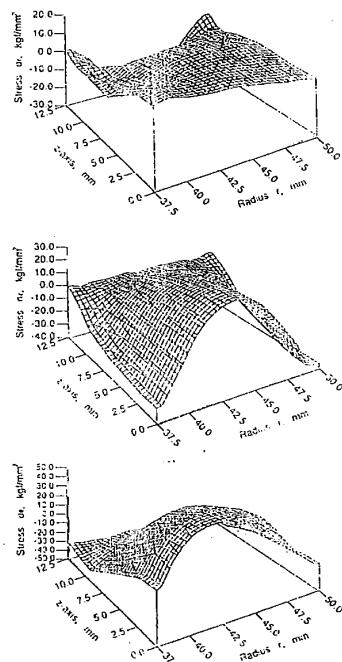


図3. 焼入れ後の残留応力

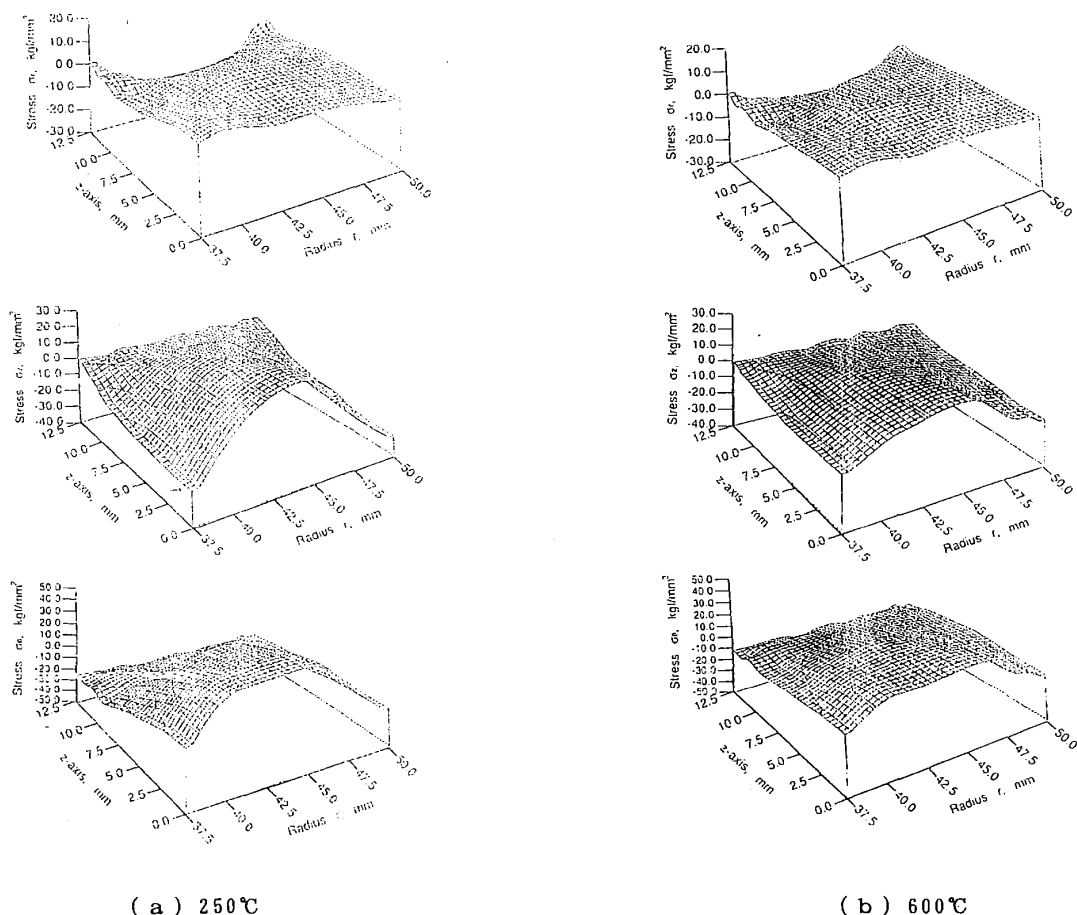


図4. 残留応力分布の焼きもどし温度による相違

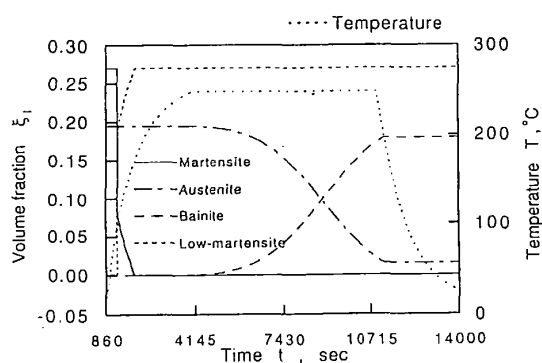


図5. 焼きもどしによる組織の変化

これらの図から、焼きもどし温度の上昇によって、焼入れ残留応力が低減する様子がよくシミュレートされていることが了解できる。

5. 結 言

Metallo-thermo-mechanicsの立場から鋼の焼入れ・焼きもどしにおける組織、温度および応力のシミュレーションのための基礎的諸関係を規定し、それを用いてS45Cのリングの解析を行った。とくに焼きもどし温度が残留応力の変化に与える効果について吟味し、実験結果と比較した。

オーステナイト変態のカイネティックスについては、

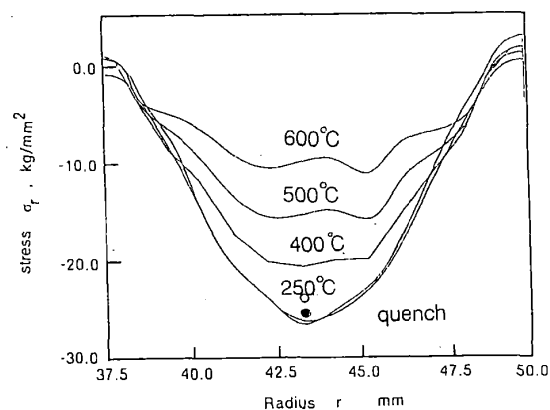


図6. 端面の残留応力の焼きもどし温度依存性

京都大学大学院佐久間淳君の寄与が大きいことを記し、謝意を表する。

参考文献

1. 井上達雄, 原口賢一, 木村茂人, 材料, 25(昭51)521
2. T. Inoue, K. Haraguchi and S. Kimura, Trans. Iron and Steel Inst. of Japan, 18(1978)11
3. 門河昌弘, 長岐滋, 井上達雄, 材料, 29(昭55) 1173
4. T. Inoue, S. Nagaki, T. Kishino and M. Monkawa, Ing.-Arch, 50(1981) 315
5. 戎嘉男, 関根和喜, 葉山益次郎, 鉄と鋼, 76(昭3) 2152