

Verification of Transformation Plasticity Behavior during
Quenching process of SCr420 Steel

Tadashi MATSUMOTO and Dong-Ying JU

1 緒 言

焼入れは機械部品を始め、多くの鉄鋼材料に用いられている重要な技術である。近年ではコンピュータの進歩や熱処理シミュレーション技術の向上に伴い、相変態などによる複雑な現象の予測・解析が頻繁に行われている。しかし、熱処理シミュレーションの問題点のひとつに変態塑性ひずみの取扱いがある。近年の研究により変態塑性ひずみは変形や相変態に大きく影響を及ぼすことが明らかになりつつあり、シミュレーションの精度を向上させるためにも、変態塑性ひずみの把握は無視できないものとなっている。

本研究では自動車部品によく用いられている、炭素鋼 SCr420 を用い、部分焼入れを行った。そして変態塑性ひずみの挙動が焼入れ過程においてどのように影響を及ぼすかを調べた。

2 基本の方程式

2.1 応力-ひずみ場の非弾性構成式 非弾性の構成式における全ひずみは(1)式のように構成され、

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p + \dot{\varepsilon}_{ij}^T + \dot{\varepsilon}_{ij}^m + \dot{\varepsilon}_{ij}^p \quad (1)$$

右辺における熱ひずみ速度、変態ひずみ速度、変態塑性ひずみはそれぞれ(2)~(4)式より求められる。

$$\text{熱ひずみ速度: } \dot{\varepsilon}_{ij}^T = \alpha(T - T_0)\delta_{ij} \quad (2)$$

$$\text{変態ひずみ速度: } \dot{\varepsilon}_{ij}^m = \sum_{l=1}^N \beta_l \dot{\xi}_l \delta_{ij} \quad (3)$$

$$\text{変態塑性ひずみ: } \dot{\varepsilon}_{ij}^p = \frac{3}{2} \sum_{l=1}^N K_l h(\xi_l) \dot{\xi}_l s_{ij} \quad (4)$$

ここで、 α と β はそれぞれ熱膨張係数と変態膨張係数、 ξ_l と K_l はそれぞれ第 l 相が生じるときの相変態の体積分率と変態塑性係数、 s_{ij} は偏差応力である。

2.2 相変態のカイネティクス 熱処理においては、固体内において種々の相変態が生じる。加熱過程においては、オーステナイト変態が生じる。焼入れ過程では、オーステナイトがベイナイト、マルテンサイトに変態する。これらの相変態によって生じる金属組織の体積分率 ξ_l は、次式の相変態のカイネティクス(=速度式)によって規定される⁽¹⁾。

$$\dot{\xi}_l = 1 - \exp(-V_e) \quad (5)$$

ここで、 ξ_l は体積分率である。オーステナイト変態は拡張体積が温度のみの関数であるとして取扱うことができ、以下の簡略式を用いることができる。

$$V_e = A \left(\frac{T - T_s}{T_e - T_s} \right)^B \quad (6)$$

ここで、 T_s は変態開始温度、 T_e は変態終了温度、 A と B

はそれぞれ伸び-温度線図より設定される係数である

ベイナイト変態は物体内部の原子の拡散によって生じる組織である。故に拡散型変態と呼ばれ、核生成・成長によって変態が進行する。拡散変態の体積分率は、一般に次式によって求められる。

$$\xi_e = \int_0^t f_T(T) f_s(\sigma) (t - \tau)^3 d\tau \quad (7)$$

ここで、 $f_T(T)$ 、 $f_s(\sigma)$ はそれぞれ温度 T 、応力 σ の関数である。

マルテンサイト変態は、拡張体積分率が時間に依存せず、無拡散形変態に分類される。この変態において、マルテンサイトの拡張体積分率 ξ_e は、熱力学的考察から導かれた Magee のカイネティクス⁽²⁾を修正して、次式を用いることにより計算できる。

$$\xi_e = -\left\{ \psi_1 T + \psi_2 + \psi_3 \text{tr} \sigma_{kk} + \psi_{32} (1/2 \text{tr} s_{ij} s_{ij}) + \psi_4 \right\} \quad (8)$$

この式には、温度 T 、応力 σ の影響が考慮されている⁽³⁾。

ここで、 s_{ij} は偏差応力、 ψ はそれぞれの項の自由度エネルギーから導かれる材料パラメータである。

3 解析のモデリング

3.1 連成解析の流れ 本研究は変態熱力学理論に基づく連成解析コード COSMAP を用いて、焼入れ過程における熱、相変態および応力/変形の連成解析を行う。初めに、材料を、高周波により加熱する過程について計算し、次に焼入れ過程について計算する。熱伝導解析では、相変態による潜熱の発熱および応力による仕事(発熱)を考慮した非定常・非線形解析を行う。次に相変態カイネティクスよりオーステナイトからベイナイト、オーステナイトからマルテンサイトへの相変態解析を行う。最後に応力-ひずみ場の支配方程式、弾塑性構成式などを有限要素法の定式化によって計算し、弾塑性領域の判断およびニュートン・ラフソン法による収束解析を行う。このような連成解析は焼入れ過程の終了時間まで繰り返す。

3.2 解析のモデル Fig.1 に部分焼入れ試験片の形状および寸法、Fig.2 に解析モデルの要素分割図を示す。材料は SCr420 を用いた。解析は試験片の 1/2 を軸対称の 2 次元モデルとし要素分割を行った。総節点数は 1333、総要素数は 1216 とした。拘束条件としては、切断面にある節点すべてを軸方向に、左端にある節点を半径方向に固定する。境界条件は、表面のみを熱伝達境界条件として取り扱う。また、平行部のみ急加熱、急冷を行った。

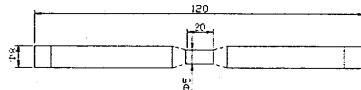


Fig.1 Specimen of SCr420 steel



Fig. 2 FEM model

3.3 実験方法の概要とプロセスの条件 本研究では、直径 8mm、長さ 120mm、平行部直径 5mm、長さ 10mm の部分焼入れ試験片を、電磁誘導加熱装置 (Geble-1500 機)に取り付けて電流加熱によって並行部分を 60sec で 900℃まで加熱する。その後十分なマルテンサイトに変態させるために 150℃/sec の冷却を行い焼入れ実験を行った。Fig.4 に本研究で用いた SCr4 2 0 の連続冷却曲線 (CCT 線図) を示す。この図からわかるように、マルテンサイト変態のみを生じるために 150℃/sec で急冷する必要がある。したがって、本研究は Fig.5 に示すプロセス条件を用いる。また変態塑性ひずみを考慮した場合と考慮しない場合の 2 通りの解析を行ない比較・検討する。

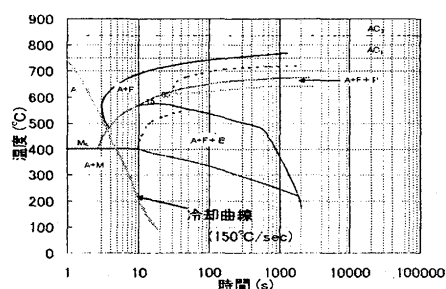


Fig. 6 CTT curves

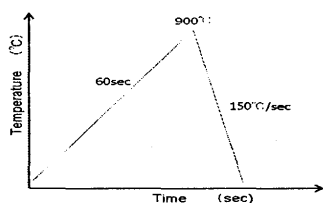


Fig. 4 Process condition

4 実験およびシミュレーション結果

4.1 焼入れ変形の検証

Fig.5 に部分焼入れの実験結果およびシミュレーション結果の温度-伸び線図を示す。

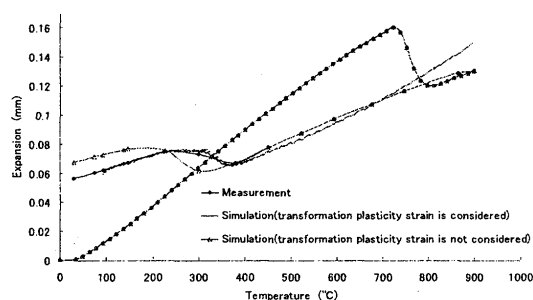


Fig. 5 Chart of temperature vs strain

実験および変態塑性ひずみを考慮した場合、380℃付近でマルテンサイト変態による膨張が見られる。また、変態塑性ひずみを考慮しない場合は 300℃付近でマルテンサイト変態による膨張が見られる。今回の実験では、冷却速度が速いため、高温域で生じやすい拡散変態が完全に阻止され、組織全体がマルテンサイトになった事が分かる。Fig5 より、マルテンサイトが生じる前は、変態塑

性ひずみの有無に関係なくほぼ同じ伸びであったが、マルテンサイトが生じた後は、変態塑性ひずみを考慮しない場合の伸びが小さいことが分かる。

4.2 温度によるマルテンサイト分布 Fig.7 に焼入れ開始から 4sec 後のマルテンサイト分布を示す。この時間は、マルテンサイトが生じ始めた時間である。温度-伸び線図からもわかるように、370℃付近でマルテンサイトが生じ始めたことを確認することができる。しかし、急冷部全体からマルテンサイトが生じたのではなく、内部およびその付近から生じ始めている。これは、冷却速度が速すぎたためオーステナイトが残留しているものと思われる。



Fig. 7 Martensite distribution after quenching time (4sec)

4.3 マルテンサイトの分布 Fig.8 に焼入れ終了時におけるマルテンサイト分布図を示す。この図から、マルテンサイトが焼入れ部分全体に生じているのが見てとれる。CCT 線図からもわかるように、焼入れ速度が速いためにベイナイトなどの拡散変態が生じず、マルテンサイトのみが生じていることがわかる。



Fig. 8 Martensite distribution after quenching

4.4 焼入れ終了時における残留応力分布 Fig.9 に焼入れ終了時における半径方向応力分布図を示す。試験片全体が膨張による引張応力が生じていることがわかる。平行部も引張残留応力が生じているが面取り部分では応力集中による強い圧縮残留応力が生じている。

Fig.10 に焼入れ終了時における周方向応力分布図を示す。平行部において引張応力が生じていることがわかる。また、左端部は固定されていることによる引張り残留応力生じていることがわかる。



Fig. 9 Distribution of radial residual stress.



Fig. 10 Distribution of circumferential residual stress.

5 結論

本研究では、SCr420 を用いた部分焼入れ実験値とシミュレーション値の比較を行った。そして、変態塑性ひずみの影響が焼入れ過程に影響を及ぼすことがあきらかになった。

参考文献

- (1) (社)日本機械学会, 相変態と材料挙動の数値シミュレーション, (株)コロナ社 (1991)
- (2) C. L. Magee : The Nucleation of Martensite, Chap. 3, ASM (1968)
- (3) 王 志剛, 井上達雄 : 材料, 32, p.991 (1983).