

133

# ジョミニー試験における焼入過程の変態・熱・力学的シミュレーションと各種鉄鋼材料の焼入性の評価

京都大学エネルギー科学研究所

○森本吉浩 井上達雄

## 1 緒 言

鋼の焼入性を評価する方法に焼入性試験方法(JIS G 0561),いわゆるジョミニー試験があり、これまでに種々の組成の鋼に対してこの方法によってデータが得られてきた。この方法では直径25mm, 長さ100mmの丸棒試験片をオーステナイト化した後、噴水を試験片の下端部に噴射して焼入れを行う。その後、試験片の側面を研磨して硬さを測定し、焼入端からの距離と硬さの関係を図示すると焼入性曲線が得られる。焼入端からの距離が小さいところではマルテンサイト組織が生成されているので、高い硬さの値を示し、焼入端からの距離が大きくなるにしたがって変態組織がマルテンサイトからフェライトやパーライトへ変化し、硬さが低下する。この硬さの大きな変曲点であるところでマルテンサイト組織が50%生成しているとされており、焼入端からこの位置までの距離をジョミニー距離という。ジョミニー距離の大きい鋼ほど焼入性が高いといえる。

本研究では、4鋼種(S45C, SCM420H, SCM440H, SCr420H)についてジョミニー試験によって焼入性の評価を行う。次に、変態・熱・力学の連成を考慮して構築された熱処理シミュレーションソフトHEARTSとデータベースMATEQ(材料学会塑性工学部門委員会材料データベース研究分科会で構築)を用いてジョミニー試験における焼入れ過程の解析を行う。解析結果から、①焼入性=組織の変化、②焼入硬さ、③残留応力分布の評価を行う。それぞれの方法は以下の通りである。①解析ではマルテンサイトの分布を知ることができるので、これが50%存在する座標を読み取ることによってジョミニー距離とする。ジョミニー距離が算出できることから、鋼材の焼入性を解析によって評価する。②各座標における温度変化から冷却速度を計算し、連続冷却変態線図(CCT線図)に記載されている各冷却速度に対する硬さとの対応からその座標における硬さを求める。③残留応力の分布を出力することによって応力の効果を評価する。これによって、シミュレーションソフトHEARTSと材料データベースMATEQを用いて、評価した焼入れ性等の妥当性を実験との比較によって検証する。

## 2 热伝達係数の同定

噴水への熱伝達の境界条件として冷却面における熱伝達係数 $h$ を知ることが必要である。冷却過程での沸騰の影響を考慮すると、熱伝達率は表面温度の関数として与えられる。酸化膜が殆ど生じないステンレス鋼で冷却曲線の測定を試みたが、冷却速度が著しく小さいという結果を得たため、変態潜熱の影響は生じるが、実際に用いる材料で計測することとした。試験片端部近くまで直径1.5mmの穴をあけ、そこに設置した熱電対によって測定した試験片端面温度 $T$ の時間的変化の例をFig.1に示す。これから熱伝達係数 $h$ を逆計算によって求めた。すなむち、ある時間間隔において熱伝達率の値

を少しづつ変化させて収束計算した試験片表面温度の中から実際に測定された試験片表面温度に近いものを探し、さらに回帰分析を行う。以上の操作を繰返して求めた熱伝達率のSCr420H材の例をFig.2に示す。

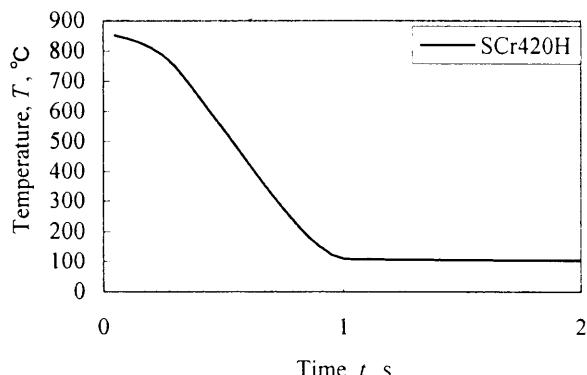


Fig. 1. Cooling Curve

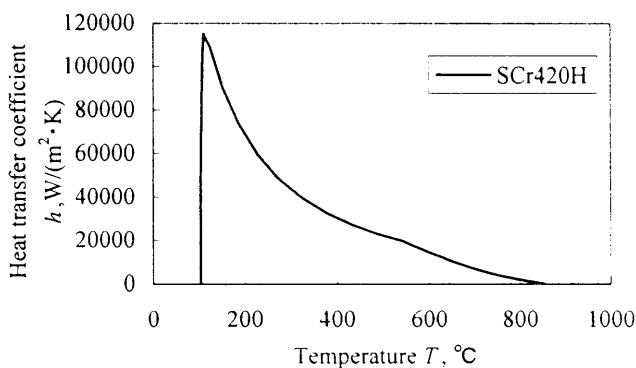


Fig. 2. Estimated heat transfer coefficient

## 3 ジョミニー試験による焼入性の評価と残留応力の測定

各鋼種についてジョミニー試験を行い、焼入性曲線=硬さをプロットしたものをFig.3に示す。このグラフから2次差分の正負が入れ替わる点を変曲点と考え、各鋼材のジョミニー距離を読み取ると、S45C: 5~7.5mm, SCr420H: 15~20mm, SCM440H: 20~25mm, SCr420H: 5~7.5mmの間にがあることがわかる。つぎに、このグラフから試験片側面のいくつかの点について、軸方向および接線方向の残留応力をX線回折法によって求め、これと焼入端からの距離の関係を示したもののがFig.4の記号で表している。これらの結果から、鋼材の種類によって焼入性や焼入れ後の残留応力分布が異なることがわかる。

## 4 烧入過程の解析および考察

2次元軸対称のジョミニー試験片の有限要素モデルについて解析を行う。解析結果の例として、焼入端から50mmまで

のマルテンサイト生成量の分布を Fig. 5. に示す。これからマルテンサイトが 50% 存在する座標、つまりジョミニー距離を読み取るとそれぞれ S45C: 4.0~4.5mm, SCM420H: 15.0~17.5mm, SCM440H: 20.0~22.5mm, SCr420H: 4.0~4.5mm となる。この値は Fig. 3 のジョミニー曲線から推定した値とほぼ一致する。

CCT 線図から推定した硬さ分布を Fig. 6 に示す。この結果は Fig. 3 で表されるジョミニー曲線にほぼ一致するものであった。ただし、解析では空気への熱伝達を考慮していないが、実際の焼入れでは試験片側面において空気による冷却の影響があり、焼入れ端からの距離が大きいところ程この影響が大きくなるため、解析結果においてジョミニー距離がやや小さくなっている。

試験片側面における軸方向残留応力の分布の解析結果を Fig. 4 の曲線で示す。各鋼種のマルテンサイト組織とパーライト組織の境界付近において大きな圧縮応力が生じていることがわかる。これは丸棒全体では冷却による負の残留熱ひずみが存在するが、マルテンサイト組織の生成によって体積膨張

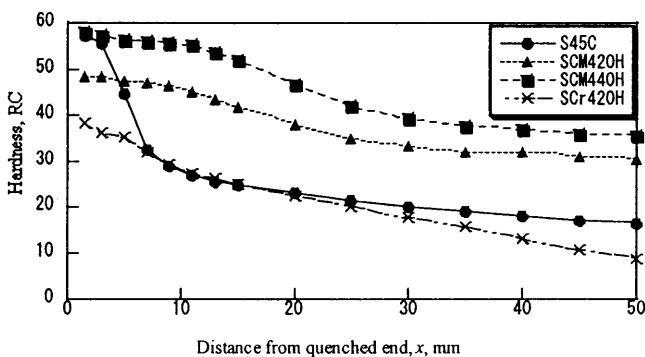


Fig. 3. Jominy curve of each steel

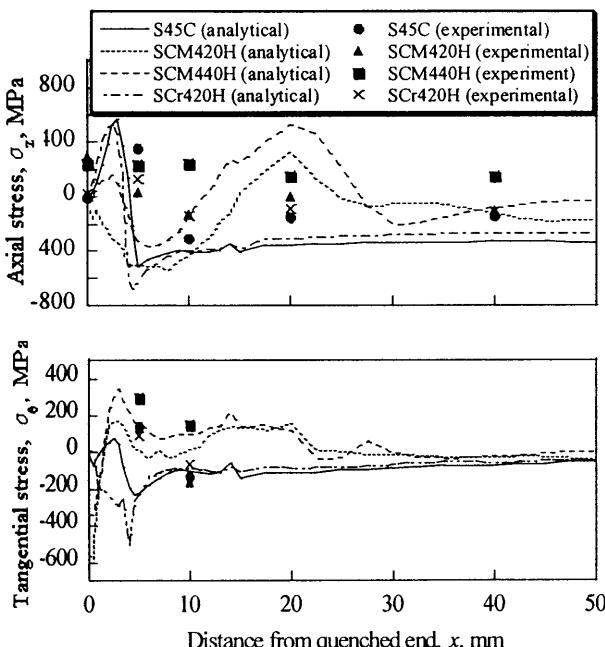


Fig. 4. Residual stress at the side surface of the specimen

が起り、その部分で負のひずみが緩和され、ひずみに差が生じたためである。また、この傾向は実験結果にも見られた。

## 5 結言

データベース MATEQ を用いて、HEARTS でシミュレーションすることによって、実用上、広く用いられる 4 鋼種の焼入れ性を評価し、その妥当性を、実験で確認することができた。このことはコスト、時間削減の面で極めて有用である。

## 参考文献

- 1) 井上達雄, 有本亨三, 材料, 32-360 (2000) pp.991-996
- 2) T.Inoue and K. Okamura, Proc.5<sup>th</sup> Inter. Symp.on Quenching and Distortion Control, ASM, St Louis, 2000, pp.753-760.
- 3) 材料学会材料データベース研究分科会、材料 51-3 (2002) pp.350-355
- 4) M .Narazaki, J.Kogawara, A.Shiroyori and S. Fuchizawa, Proc.5<sup>th</sup> Inter. Symp.on Quenching and Distortion Control, ASM, St Louis, 2000, pp.753-760.
- 5) 金森英夫, 中村英一, 内田均, 小山三郎, 井上達雄, 热处理, 36-5 (1996) pp.390-396

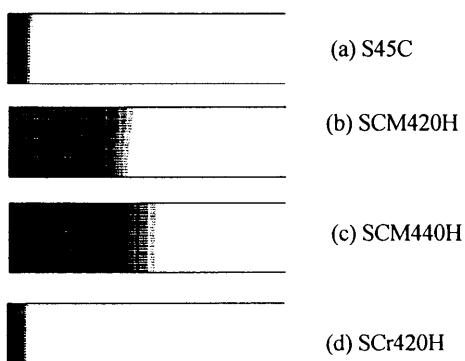


Fig. 5. Volume fraction of martensite phase in the upper half section of Jominy bar.

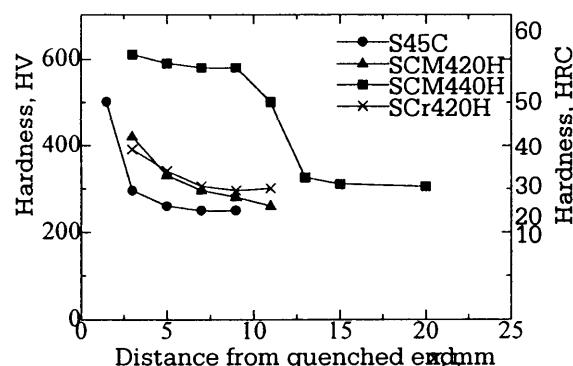


Fig. 6. Hardness distribution evaluated from CCT diagram