

埼玉工業大学 正 ○巨 東英, 宇都宮大学 正 奈良崎 道治
同和鉱業(株) 神杉 普文, 平野 晴義

1. 緒言

鉄鋼材料の浸炭焼入れでは、浸炭条件、焼入れ条件は材料の機械性質に与える影響が大きい、その要因はまだ十分解明されていない。近年、相変態・熱・力学の理論を用い、焼入れ過程における相変態、熱および応力/変形の相互作用を記述できる解析手法と汎用コードが幾つか開発され、浸炭焼入れにおける複雑な現象を解明することが可能になってきたが、実際の浸炭焼入れの場合、冷却剤の熱伝達率、ミクロ的組織の変化による変形などの不明確な要因があるため、実験とシミュレーションの両面から浸炭焼入れの変形制御の手段を把握する必要がある。本研究では、炭素鋼 S45C の円柱モデルを取り上げ、有限要素法の汎用コード“HEARTS”を用いて浸炭焼入れのシミュレーションを行い、浸炭焼入れ後の応力、変形の実測値との比較によって浸炭焼入れ条件の妥当性について検討する。

2. 実験条件と熱伝達率の同定

2.1 実験条件 本研究では、Fig.1 に示された実験条件を用いた。浸炭過程では、炉内の雰囲気は吸熱型 RX ガスを使用し、試験片は炉の中で 160min をかけて浸炭を行う。浸炭過程における試験片の周りの炭素濃度は 0.9% とする。焼入れに使用された冷却剤はハイスピードクエンチ 2070F (攪拌) であり、油温は 60℃ である。

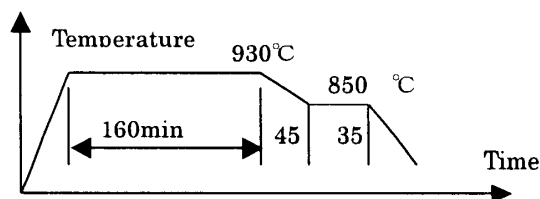


Fig.1 Carburization and quenching process.

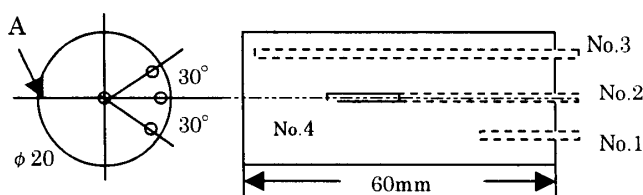


Fig.2 Configuration of the test specimen.

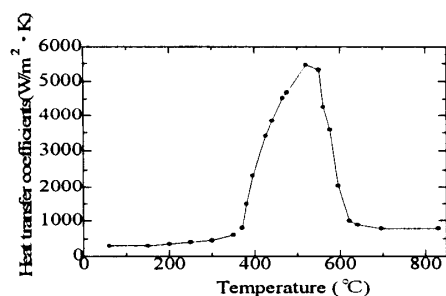


Fig.3 Heat transfer coefficient in oil quenching.

2.2 熱伝達率の同定 実験に使用する試験片は日本熱処理技術協会の「焼入れとひずみ制御」研究部会の共同研究で採用された S45C 材の円柱である。冷却曲線を測定するために、Fig.2 に示すように 4 本の熱電対を円柱内に埋め込んで試験片の中心および表面の 3 箇所で冷却曲線を測定する。さらに、それらの実験結果から、集中熱容量法と焼入れシミュレーションの相互補正を用いた逆解析法によって焼入れ中の熱伝達率を求める。その結果を Fig.3 に示す。

3. 解析のモデリング

3.1 解析のモデル 解析するモデルは、Fig.4 に示すような円柱と同様な長さで取られた軸対称のモデルを使用した。計算上では、境界条件としては、円柱の軸方向に沿っている r 方向の変位を拘束し、中心の一点をすべての自由度を拘束した。また、円柱の表面は熱伝達率に与える冷却境界条件とした。

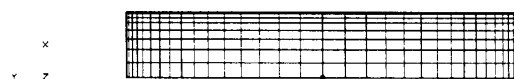


Fig.4 Finite element mesh of model.

3.2 連成解析の概要 本研究は汎用コード HEARTS を用いて、浸炭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。解析はヒートサイクルによって 5 段階とする。すなわち初めに、材料を 930℃ まで加熱する過程について計算する。浸炭段階として炭素濃度の拡散解析を行い、次に、45min に経て 850℃ まで冷却し、そのまま 35min 程度の間保持されるよう計算が行われる。その後、焼入れ過程のシミュレーションを行う。また、変態塑性のひずみは焼入れ過程のシミュレーションに有効であるため^{(1),(4)}、本計算にはオースナイト変態からパーライト変態へ、オースナイト変態からマルテンサイト変態への組織変化によって生じた変態塑性ひずみを導入した。

4. シミュレーションの結果と実験検証

シミュレーション結果として、浸炭を開始してからの A 点の炭素濃度の変化を Fig.5 に示す。この図から、表面の炭素濃度が徐々に内部に拡散されていく模様がわかる。最終的に浸炭層の厚みは約 1.3mm である。Fig.6 は、シミュレーションで得られた冷却曲線を実験結果と比較したグラフであり、この図から両者の結果はよく一致していることが検証された。そして、浸炭と急冷により、Fig.7 に示すように試験片の表面では高レベルの炭素濃度(a)とマルテンサイト変態(b)が生じ、その傾向は Fig.8 に示した硬さと一致している。また、

焼入れ後の変形量に関する実測値と変態塑性を考慮した計算値の比較を Fig.9 に、残留応力の結果を Fig.10 に示す。これらの図から、試験片の中央における計算結果は実験値と比較的に近い値を示しているが、両端における計算結果は実験値とやや大きい差が現れることがわかる。その原因として、計算精度のほか、焼入れ時の試験片両端における冷却剤の流動などが考えられる。

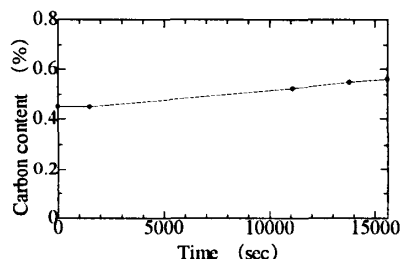


Fig.5 Variation of carbon content on point A.

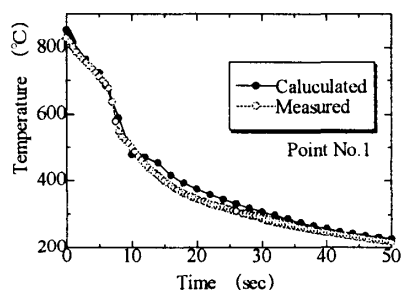
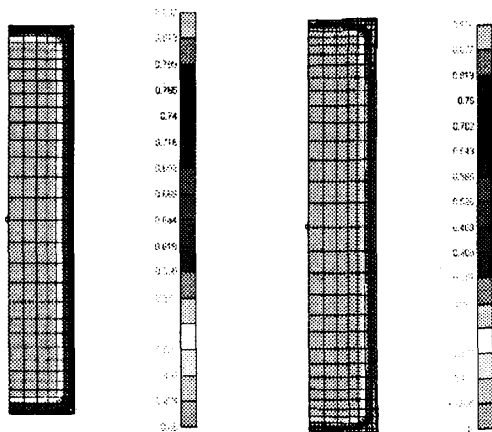


Fig.6 Calculated and measured cooling curves on point No.1



(a) Carbon content (b) Martensite

Fig.7 Distribution of martensite and carbon content.

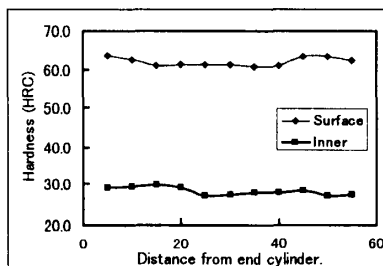


Fig.8 Hardness on surface and inner of cylinder.

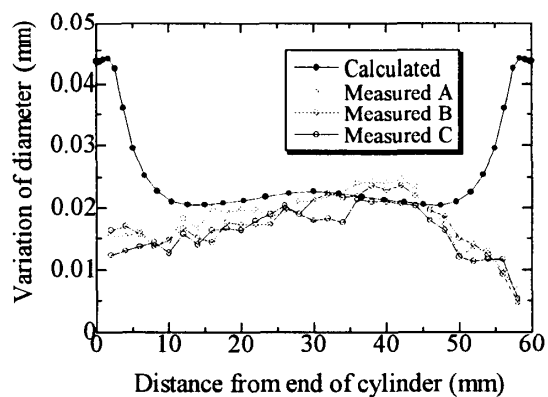


Fig.9 Variation of diameter after quenching.

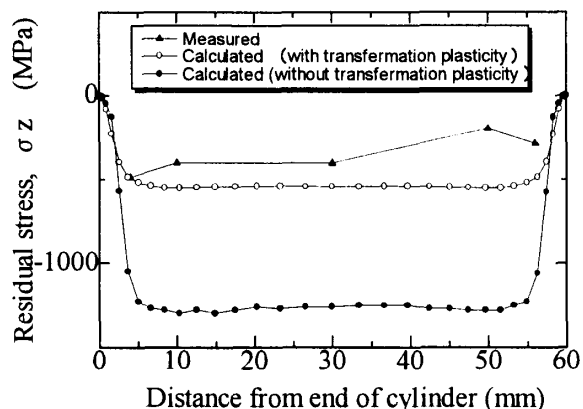


Fig.10 Distribution of residual stress σ_z .

5. 結論

浸炭過程における炭素拡散、相変態の分布、焼入れ変形および残留応力のシミュレーションを行い、実験値との比較を行った。さらに、解析の結果から、熱伝達率の同定法が浸炭焼入れ解析に及ぼす影響は検討され、変態塑性を考慮した解析を用い、焼入れ後の変形および残留応力への影響を検討した。これらの結果から、変態塑性を考慮した場合、焼入れ後残留応力の計算精度が向上することが明らかになり、シミュレーションの有効性が確認された。

参考文献

- [1] Inoue, D.Y. Ju and K. Arimoto, Proc. 1st Int. Conf. on Quenching and Distortion Control, Chicago, p.205(1992)
- [2] M. Narazaki, M. Kogawara, A. Shirayori and S. Fuchizawa, *Proceedings of the 6th International Seminar of IFHT*, Kyongju, Korea, 428-435 (1997)
- [3] 巨, 奈良崎, 熱処理技術協会「焼入れひずみ制御」研究部会資料, pp.47 (1999)