

# 引抜き加工後の残留応力が熱処理過程に及ぼす影響に関する解析的研究

京大エネルギー科学研究科 学○生田浩之, 正 今谷勝次, 正 井上達雄  
住友金属(株) 正 秋山雅義

## 1.はじめに

機械部品の材料となる棒材や線材は圧延, 押出し, 引抜き加工等の一次加工を経て作られる。しかし, これらの一次素材に熱処理をはじめ様々な二次加工, 三次加工をあたえると, 一次加工で生じた残留応力が加工後の製品の精度に影響を及ぼす。そこで, 本研究では引抜き加工でつくられた丸棒を焼入れしたとき, 引抜き加工による残留応力が焼入れ後の変形・ひずみにどのような影響を及ぼすかについて, 熱弾塑性有限要素法を用いて解析を行った。また, 引抜き・焼入れの実験を行い解析結果と比較した。

## 2.引抜き過程の解析

まず, 図1のようなモデルを用いて引抜き加工の解析を行った。ダイス半角  $\alpha$  を5, 7, 9度の三種類とし, 断面減少率は12.1%, 引抜き速度  $v$  は10.0 mm/sで一定とした。材料はS45Cとした。

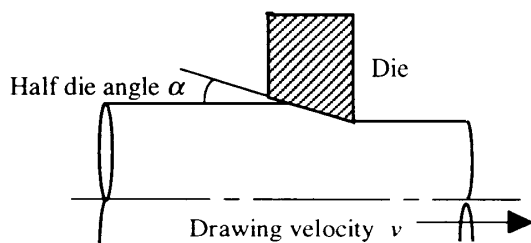


Fig.1 Simulation model of drawing.

解析では塑性仕事による発熱, 工具との摩擦熱, 外部への熱伝達を考慮した温度解析と, 負荷過程だけでなく除荷過程も考慮した弾塑性応力解析を連成させた。温度解析において, 塑性仕事による発熱は仕事量の90%が熱に変わると考えた。また, 応力解析では増分計算を行ったため, 工具を出た直後から素材表面の工具による圧縮力を除荷する操作を行い, 引抜き終了後には丸棒断面に生じる軸力も除荷した。

このような条件で解析を行った結果を図3に示す。これから表面近傍では引張りの残留応力, 中心部

では圧縮の残留応力になっており, またダイス角が大きくなるにつれて表面の引張りも, 中心部の圧縮も大きくなっていくことがわかる。これはダイス角が大きくなるにつれて加工中に生じる表面の塑性変形域が局所的になり, 応力勾配が大きくなるとともに, 表面と中心部の応力値の差が大きくなるためと考えられる。

このように, 丸棒には引抜き加工によって表面引張り, 中心部圧縮の残留応力分布が存在することがわかった。そこで, 得られた結果を初期応力分布として焼入れ過程の解析を行うことにする。

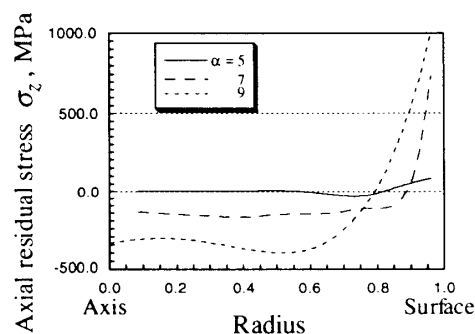


Fig.3 Axial residual stress distributions.

## 3.焼入れ過程の解析

焼入れ過程は相変態を伴うため, 解析では温度, 応力のほかに相変態を考慮する必要がある。そこで, 本研究では井上, 有本<sup>(1)</sup>と同様の考え方を用いて相変態の効果を取り入れることにした。

焼入れの条件としては, まず, 材料を293.15 Kから1123.15 Kまで均一に加熱し, その後水焼入れを行うとした。加熱過程では, 初期組織はすべてパーライトとし, 加熱にしたがってパーライトからオーステナイトへの変態のみがおこる。ただし, 回復(recovery)やポリゴン化(polygonization), 再結晶(recrystallization)などの微細な結晶構造の変化については考慮しなかった。冷却過程では, オーステナイトからマルテンサイトへの変態と, オーステナイトからパーライトへの変態の2種類と考えた。

図3にダイス半角が7度のときの焼入れ終了後のマルテンサイトの体積分率を示す。(a)は初期応力を0として解析を行った場合を、(b)は引抜き過程で得られた応力、ひずみ分布を初期値に用いた場合を表す。

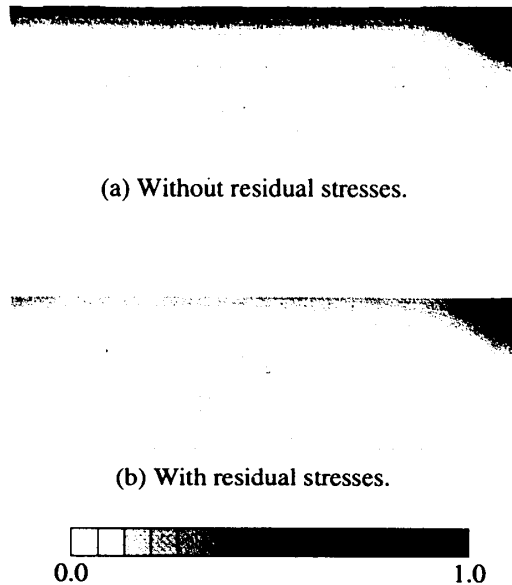


Fig.3 Volume fraction of martensite ( $\alpha = 7$ ).

これらを比較すると、残留応力を考慮したものの方が表面から浅い部分までにしか焼きが入っていないことがわかる。これは引張り残留応力がパーライト変態を促進するため、逆にマルテンサイトが少なくなっていることを表している。つぎに焼入れ後の残留応力分布を図4に示す。

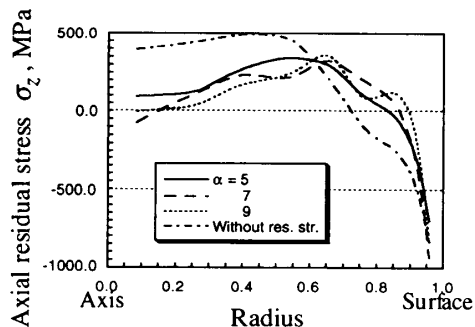


Fig.4 Axial stress distributions after quenching.

図4から、焼入れ後の丸棒は表面圧縮、中心部引張りの応力分布になっていることがわかる。また、引抜きによる残留応力を考慮したものは表面近傍の応力勾配が大きく、中心部の引張り応力が小さいことがわかった。応力勾配が異なるのは材料表面に存在するマルテンサイト相の厚さが異なるためであり、中心部の応力が異なるのは焼入れ前の

残留応力の影響によるものである。

#### 4.実験による残留応力測定

実験の手順として、まず引抜き加工を行い、次にその後の素材に焼入れを行った。引抜き加工を行う前にひずみ取り焼なましを行い、残留応力を除去した。焼入れ後の素材の残留応力測定にはSachs法<sup>(2)</sup>を用いた。

ダイス半角が7度のときの焼入れ後の円周方向残留応力分布と実験の測定結果を図5に示す。ただし、実験結果は断面減少率が17.3 %のときのもので使用しているので定量的な比較は困難であり、またSachs法の性質上、軸近傍では孔ぐりが困難なので、中心に近いところの値は精度が十分ではないが解析と実験結果の間に比較的良好な対応がみられる。

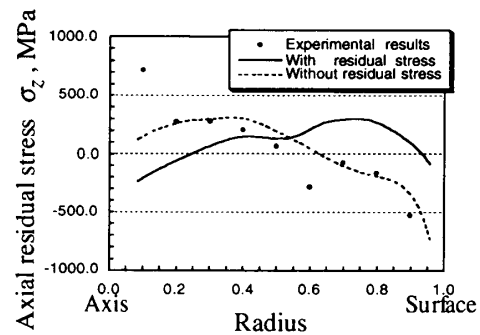


Fig.5 Tangential residual stress distributions.

なかでも、実験結果と引抜きによる残留応力を考慮せずに解析を行ったものの間に定性的に非常によい相関がみられる。これは実験の際の加熱に850℃で30分という比較的長い時間をかけたため、引抜きによる残留応力の影響が小さくなったことによる。

#### 5.まとめ

上述のことから、引抜きによる残留応力が存在したまま焼入れを行うと所定の深さまで焼きを入れることができないことがわかった。ただし、焼入れの際の加熱に充分時間をかければその影響を小さくすることができる。

#### 参考文献

- 1.井上達雄, 有本享三, 材料, 44-496, pp.103-109, 1995
- 2.日本材料学会編, X線応力測定法, 養賢堂, 1981