

## 論文の要旨

題目 SUS304 鋼板材の成形時に生成する加工誘起マルテンサイト量の予測に関する研究

(Prediction of Evolution of Deformation-induced Martensite in SUS304 Stainless Steel Sheet during Forming)

氏名 石丸 詠一朗

本研究は、世界で最も多く使用されている SUS304 鋼の薄板における成形シミュレーション精度を向上させるために必要な加工誘起  $\alpha'$ マルテンサイト相の予測を目的として実施した。まず、引張特性や成形性（時期割れ、スプリングバック）におよぼす加工誘起  $\alpha'$ マルテンサイトの影響を解析した。成形性には、加工誘起  $\alpha'$ マルテンサイトの量のみではなく、その性質を把握する必要があることが明確となった。したがって、成形性を考察する際には、化学成分、特にオーステナイト安定度を事前に把握する必要がある。そこで、一般的な化学組成の SUS304 鋼を供試材として、加工誘起  $\alpha'$ マルテンサイト変態のカイネティクスの構築に着手した。まず、応力負荷状態が異なる場合や応力反転時の加工誘起  $\alpha'$ マルテンサイトの生成挙動をマイクロ組織変化から考察し、従来提案されている数理モデルであるひずみ誘起モデルでは、繰り返し応力負荷状態の予測精度が低いことを明らかとした。さらに、応力反転時のバウシinger効果と  $\alpha'$ マルテンサイト生成挙動に着目し、変形過程における最大応力と  $\alpha'$ マルテンサイト量が良い相関を持つことを見出した。この相関を用い、従来のひずみ誘起モデルとは異なる応力誘起モデルにより、SUS304 鋼板材の成形時に生成する加工誘起マルテンサイト量を予測する方法を提案した。

第1章では、加工誘起  $\alpha'$ マルテンサイトと引張特性および時期割れの関係に関する過去の研究をレビューすることで、現在の SUS304 鋼との化学成分の差異から推定される成形性の違いを明確にした。また、加工誘起  $\alpha'$ マルテンサイトの影響を考慮できていない、現状における成形シミュレーションの課題を開示にした。これらの結果から、SUS304 鋼板材の成形シミュレーションの精度を向上させるために、加工誘起  $\alpha'$ マルテンサイトの影響を考慮した材料モデルとマルテンサイト量の正確な予測が必要であることを提案した。

第2章では、引張特性におよぼす  $\alpha'$ マルテンサイト相の質と化学成分の影響を考察した。CやNなどは  $\alpha'$ マルテンサイト相の質（硬度など）と量を変化させ、C量の増加により著しく硬化する。一方、Nはマルテンサイト相ではなくオーステナイト相の硬化へ影響する。対して伸びには、化学成分によって算出されるオーステナイト安定度で最適条件が存在するとともに、低N-高Cの成分で加工硬化が大きいなどの特異な挙動を示す。したがって、引張特性は加工誘起  $\alpha'$ マルテンサイト量のみでは決まらないことが明確となった。

第3章では、加工誘起  $\alpha'$ マルテンサイトがおよぼす成形性への影響を解析するため、時期割れ、引張特性およびスプリングバックを評価した。耐時期割れ特性においては、加工誘起  $\alpha'$ マルテンサイト硬さの影響が顕著であり、少量の加工誘起  $\alpha'$ マルテンサイトであっても高C量であれば、高ひずみ部の著しい硬化により時期割れが生じやすい。侵入型元素のCやNに比べ、置換型元素のNiの影響はオーステナイト相の安定度を高める効果として発揮され、過度の加工誘起  $\alpha'$ マルテンサイト生成を抑制するため、低C-低Nの成分でオーステナイト相の安定度が下がっても耐時期割れ性は低下しない。また、スプリングバック挙動に関しては、試験片にマルテンサイトが存在する場合、硬質相の影響により耐力の増加が生じるためスプリングバックが著しく大きくなることを示した。

第2章および第3章の結果より、SUS304鋼板の成形性には加工誘起 $\alpha$ マルテンサイトの量と性質の両方が影響していることが明らかとなった。また、マルテンサイト相の性質は、概ね化学成分より算出されるオーステナイト安定度によって決定されていることも明らかとなった。つまり、化学成分が明らかである場合には、加工誘起 $\alpha$ マルテンサイトの量が予測できれば、高精度の成形シミュレーションが可能となると推定される。

第4章では、加工誘起 $\alpha$ マルテンサイトのカイネティクスを考察するため、引張と圧縮変形における応力-ひずみの関係をマイクロ組織の比較による詳細な解析を実施した。ひずみ20%程度までは引張と圧縮で差が生じないが、その後は圧縮変形で高い応力を示した。ひずみ30%における $\alpha$ マルテンサイト量は、圧縮変形では引張よりも大きくなった。ひずみ30%材のマイクロ組織を比較すると、引張変形後には転位セルが多く観察されるのに対し、圧縮変形後はせん断帯が多く観察された。さらに、EBSD観察により引張変形では $\gamma[001]$ ,  $\gamma[111]$ へ、圧縮変形では $\gamma[101]$ ,  $\gamma[311]$ に集積することを確認した。この引張変形の安定方位は加工誘起 $\alpha$ マルテンサイト変態を抑制する方位であるため、ひずみ量30%では引張変形により生じた $\alpha$ マルテンサイト量が圧縮時よりも少なくなり、転位密度が高いにも関わらず変形抵抗が小さくなったと考えられる。このような単軸変形試験により得られたマルテンサイト生成挙動をひずみ誘起モデルであるO-Cモデルを用いて計算した結果、材料パラメータを引張と圧縮で変更することで高精度の予測が可能であることが判明した。さらに、圧縮変形の方が引張変形に比べ核生成が促進される材料パラメータの特徴が得られており、マイクロ組織観察結果と一致していることから、単軸応力負荷においては、ひずみ誘起モデルを用いた加工誘起 $\alpha$ マルテンサイト量の予測は妥当であると考えられる。

一方、繰り返し応力負荷試験において、応力反転直後にバウシinger効果とマルテンサイト変態の停滞域が発生することが明らかとなり、単軸応力負荷と同様にひずみ誘起モデルが適用可能かは不明である。

第5章では、ひずみ誘起モデルを用いた繰り返し応力負荷試験における加工誘起 $\alpha$ マルテンサイト量の予測およびマルテンサイト変態の影響を考慮した応力-ひずみ構成モデルの妥当性を検証した。加工誘起 $\alpha$ マルテンサイト変態のカイネティクスには、繰り返し応力負荷試験のため、O-Cモデルではなく静水圧応力の影響を考慮しているStモデルを用いた。Stモデルでは、応力反転直後の停滞域は再現されず、 $\alpha$ マルテンサイトはひずみ増加にともない増加したため、実験値と予測値が大きく異なる結果が得られた。そこで、応力反転後のバウシinger効果に着目し、マルテンサイト変態が開始する閾値を応力に設定した改良Stモデルを提案した。改良Stモデルでは、応力反転後のマルテンサイト変態の停滞域を再現することは可能となったが、停滞域および停滞域後の増加挙動ではその誤差が大きいため、高精度の成形シミュレーションに使用するマルテンサイト量の予測モデルとしては適用できないことが判明した。

一方、応力-ひずみ構成モデルには、吉田-上森モデルを基にしたSUS304鋼板モデルを提案した。その特徴は、移動硬化によりバウシinger効果等の繰り返し変形挙動を記述し、等方硬化により加工誘起 $\alpha$ マルテンサイトによる硬化を表現している点である。この提案モデルに、実験で得られたひずみとマルテンサイト量の関係を導入して繰り返し応力負荷試験時の応力-ひずみの関係を計算した結果、実験値と計算値の誤差は少なく、さらにバウシinger効果も再現されていることから、高精度に予測できることがわかった。

第6章では、ドローバンド成形を用い、曲げ曲げ戻し変形時の加工誘起マルテンサイト生成挙動を単軸引張試験と比較し、加工誘起 $\alpha$ マルテンサイトのカイネティクスを構成および予測を検討した。ドローバンド成形後の板厚方向における硬度分布は、表層の硬度が板厚中心部よりも高い。この結果は、クッション圧10kNでは側壁部の張力の影響が小さく、表層付近では曲げ曲げ戻し変形によるひずみが板厚中心部よりも多く、 $\alpha$ マルテンサイト量が多いためである。ドローバンド成形の曲げ曲げ戻し変形によって生じた $\alpha$ マルテンサイト量は、同じひずみ量の単軸引張変形より少量となる。この理由は、曲げ曲げ戻し時の応力反転において、バウシinger効果が

生じ  $\alpha$ マルテンサイトの生成が停滞するため、同じひずみ量でも単軸引張試験より少なくなるためと推定される。すなわち、加工誘起  $\alpha$ マルテンサイト生成は応力誘起変態であり、応力が増加しなければ  $\alpha$ マルテンサイト量も増加しないと考えられる。

したがって、どのような成形方法もしくは製品形状においても、成形過程における最大相当応力を成形シミュレーションにより算出できれば、各工程もしくは最終形状に生成しているマルテンサイト量を正確に予測できることが明らかとなった。

第7章は、得られた結果を総括している。

以上より、SUS304 鋼板材の成形時に生成する加工誘起  $\alpha$ マルテンサイト量を予測する応力誘起モデルを提案した。具体的な板材成形時の加工誘起  $\alpha$ マルテンサイト量の予測方法は、以下に示す通りである。

- ①対象となる SUS304 鋼板材を用いて、引張試験等の負荷応力が明確な試験により、応力と  $\alpha$ マルテンサイト量のマスターカーブを作成する。
- ②予測対象である形状までのシミュレーションを行い、成形過程における最大応力値を測定する。
- ③得られた最大応力値をマスターカーブに参照し、加工誘起  $\alpha$ マルテンサイト量を求める。