

論文の要旨

題目 ナノ析出強化型高張力鋼板の高温弾塑性挙動のモデル化と温間成形スプリングバック
(Elasto-Viscoplastic Behavior of Nano-Precipitation Strengthened Steel Sheet at Elevated Temperatures and Springback in Warm Bending)

氏名 齋藤 直子

近年、二酸化炭素 (CO₂) を代表とする温室効果ガスの増加による地球温暖化などの環境問題の深刻化、およびそれに伴う環境問題への関心の高まりから、自動車には CO₂ 排出量削減のための燃費改善が強く求められており、燃費改善の有効な手段の一つである車体軽量化が進められている。車体軽量化に向けては、車体構造の強化及び合理化の検討と並行して、材料の高強度化や軽量材料への置換が推進される。そして、材料の高強度化のために車体部材に用いられる代表的な材料が、高張力鋼板である。高張力鋼板は、近年では、さらなる軽量化と安全性能向上ニーズから、自動車の鉄鋼材料の 5 割以上を占めるまでに車体部材への適用が進み、車両の必要特性と高張力鋼板の材料特性の両方を考慮し、車両部位に応じ材質を使い分けられている。

高張力鋼板の適用における解決すべき課題の一つは、高張力鋼板の成形後における寸法精度不良の改善である。スプリングバックで代表される寸法精度不良は、割れ、しわや面ひずみなどの形状不良などととも自動車車体部品でみられる代表的な成形不良現象の一つである。成形後のスプリングバックが発生しやすい高張力鋼板の成形において、スプリングバックの抑制は重要な課題である。スプリングバックの対策方法として一般的に用いられているのは、スプリングバック量の予測による金型見込みである。近年、スプリングバックは成形シミュレーションによるスプリングバック解析技術と高精度材料モデルを用いて高精度に予測されている。また、スプリングバックそのものの抑制も対策方法として用いられており、スプリングバック量が大きく正確な予測が困難な高張力鋼板の成形では金型見込みと併用されている。しかし、自動車における高張力鋼板の適用範囲と採用される鋼板の材料強度はそれぞれ拡大と上昇を続け、高張力鋼板の成形後のスプリングバックはさらに顕著化し、冷間プレス成形による対応が困難になりつつある。

高張力鋼板の新たな成形法として、ホットスタンプ (熱間成形) および温間成形が行われている。ホットスタンプはオーステナイト域まで加熱した鋼板を成形し、変形抵抗の小さい状態での成形と同時に急冷による焼入れが行う成形技術であるが、新規設備導入による生産コストの増大や大幅な生産性の低下のほか、成形品の表面品質の低下などが問題となる。一方、温間成形は、材料の変形抵抗を加熱により低下させて成形する成形方法である。焼入れを行わない温間成形では、専用設備を導入する必要もなく生産性の低下もないため、温間成形は高張力鋼板の成形上の課題を生産性や成形品品質の低下なく解決することができる成形法と考えられるが、高張力鋼板の成形に対する温間成形の効果やスプリングバック低減のメカニズムは解明されていない。また、冷間成形に多用されている DP 鋼では材料強度は加熱により著しく低下するため、温間成形後の材料強度低下が大きな問題となる。

ナノ析出強化型高張力鋼板は、加工性が良好であるフェライト単一組織で構成される、熱的安定性が極めて高い超微細炭化物を分散させたフェライト結晶粒を硬化させることで鋼板を強化した析出強化型高張力鋼板である。鋼板の強度を担う超微細炭化物は加熱に対し安定であるため、ナノ析出強化型高張力鋼板では DP 鋼と異なり加熱後の材料強度の変化は非常に小さく、温間成形に適した高強度鋼板である。

そこで本論文では、熱的に安定な微細炭化物で析出強化され温間成形後において成形前と同等の強度が得られるナノ析出強化型高張力鋼板を対象に、温間成形の高張力鋼板のスプリングバック低減に対する効果を成形実験により検証した。また、温度とひずみ速度の依存性を考慮した弾粘塑性モデルと数値解析を用い、成形実験で明らかにした温間成形のスプリングバック低減に対する効果を定量化するとともにスプリングバックが低減するメカニズムについて具体的に検討した。

本論文の構成は、第 1 章 緒言、第 2 章 ナノ析出強化型高張力鋼板の弾塑性挙動の実験観察、第 3 章 高温 V 曲げ及び U 曲げにおけるスプリングバック実験、第 4 章 材料の高温弾粘塑性モデル、第 5 章 温間曲げ及びスプリングバックの数値解析、第 6 章 結論、である。

第 1 章では、高張力鋼板に関する自動車産業および学問的背景を述べた上で、高張力鋼板の成形に関する従来の研究を展望し、スプリングバック低減における課題を明らかにした。

第 2 章では、ナノ析出強化型高張力鋼板の高温弾塑性挙動を明らかにするため、高温での単軸引張試験を行った。単軸引張における応力-ひずみ応答は温度に強く依存し、材料の応力（変形抵抗）は温度の上昇に伴いより顕著に低減することがわかった。さらに、応力はひずみ速度に依存し、その依存性は高温になるほど強くなることを確認した。ヤング率は、応力やひずみと同様に、温度に依存し、温度上昇に伴い減少することがわかった。一定のひずみを与えたもとで生じる応力緩和は、ひずみを加えた直後に急速に進行した後、緩やかに進行する。また、応力緩和による応力の低下率は温度上昇に伴い増大することがわかった。

第 3 章では、板材成形で最も単純な形状である V 型、およびフォーム成形である U 型の曲げ成形試験を室温から 923 K で行い、スプリングバックに対する温度と成形速度の影響について検討した。スプリングバックは温度の上昇に伴い低下し、成形速度が低速で高温の場合では、スプリングバックは大幅に減少することがわかった。また、スプリングバックは、高温で成形後の試験片を金型で保持することにより低下し、低減後は保持時間を延長しても変化しないことがわかった。このスプリングバック低下は、試験片が高温かつ一定のひずみで保持されることにより生じた応力緩和の結果である。

第 4 章では、高温における材料の応力-ひずみ応答を記述するための、温度とひずみ速度依存性を考慮した弾粘塑性構成モデルを検討した。この弾粘塑性モデルは、温度に依存するパラメータ、および温度とひずみ速度に依存する抗応力および応力感度指数を含むことで、温度とひずみ速度の依存性を表現できることを特徴としている。構築した弾粘塑性モデルを用いて高温での単軸引張および応力緩和の数値解析を行った結果、解析結果は第 2 章の単軸引張試験で得られた結果と良い一致を示し、構築した弾粘塑性モデルにより本鋼板の高温弾塑性挙動を再現できることがわかった。

第 5 章では、構築したモデルを用いて高温における板材の曲げおよびスプリングバック過程の数値解析を行い、それぞれの過程における応力緩和およびクリープの影響について検討した。解析結果は前章までの各種実験結果と同じ傾向を示し、材料の変形抵抗が温度とともに小さくなることでスプリングバックが低減し、さらに板材の金型保持（数秒間）中の応力緩和もスプリングバック低減に大きな効果があることがわかった。さらに、低速除荷プロセスではクリープにより曲げが進行し、このこともスプリングバック低減に寄与していることを明らかにした。また、解析結果から、板材の応力およびスプリングバック後の残留応力は、高温での成形により著しく低下することを確認した。

第 6 章では、本研究で得られた主な成果をまとめてある。すなわち、ナノ析出強化型高張力鋼板の温間成形を適切な温度、速度、工具保持の条件で行うことにより、スプリングバックを大幅に低減できることが明らかになった。また、温間成形は板の成形後の残留応力の低減に極めて有効であることがわかった。