

# 論文の要旨

題目 金属薄板のスプリングバックに及ぼす弾塑性特性の影響と  
その予測精度向上に関する研究  
(Effect of Elasto-Plastic Properties on Springback of Sheet Metals  
and Its Highly Accurate Prediction)

澄川 智史

近年、地球温暖化の原因となる温室効果ガスの排出量削減に対する要求は近年ますます高まっている。世界各国が掲げる排出量削減目標の達成に向けて、自動車業界が果たすべき役割は非常に大きく、燃費向上のための車体軽量化が進められている。一方で、乗員保護の観点から自動車の衝突安全性に対する要求も年々厳しくなっており、自動車業界では車体を軽量化するとともに、衝突安全性を確保しなければならないという課題を抱えている。この相反する要求を満足させるために、車体および部品構造の最適化に加え、高強度材・軽量材への材料置換が活発に行われている。とりわけ、高張力鋼板（ハイテン）の適用により、衝突性能を確保しながら部品の薄肉化および部品数の削減が行われている。

ハイテンのプレス成形で生じるスプリングバックは解決すべき最も重要な課題である。スプリングバックとは、プレス成形時、金型荷重から解放された際に部品に生じる形状変化であり、成形中にblankに蓄積した応力が解放され、これによって生じる戻りひずみが原因である。自動車部品のプレス現場では、目標寸法の部品を得るために金型を補正してトライアンドエラーによる形状出しを行っている。ここ最近では、有限要素法（FEM）ソフトウェアが広く普及し、シミュレーションによりスプリングバックをある程度の精度で事前に予測することが可能となった。それらの結果は金型形状に反映され、工数削減による金型補正コスト低減や部品開発期間の縮小に繋がっている。しかしながら、近年のハイテンの更なる高強度化によりスプリングバック量は増加する傾向であるのに対し、部品に要求される許容寸法は変わらないことを考慮すると、スプリングバック予測の更なる高精度化が求められる。

スプリングバックの予測精度は大きく分けて材料特性、部品性状、成形条件、解析条件など様々であるが、特に材料特性は材料の挙動に直接寄与するため最も重要な因子である。過去の研究では材料特性の測定方法について種々の検討がなされ、材料の変形挙動および硬化挙動を規定する材料モデルが数多く提案されてきた。これらの材料特性を解析上で考慮することで、スプリングバックの予測精度はより信頼し得るものとなると考えられる。一方で、考慮する材料特性が多くなると FEM ソフトウェアで使用する材料モデルはより複雑なものとなり、計算時間が増加する傾向となる。また、ソフトウェアに入力する材料定数の数も増え、その材料定数を得るための材料試験を行う必要がある。特に、実際の部品開発では、限られた期間で成形シミュレーション・金型玉成・部品評価を行う必要があり、計算効率と予測精度の両立が要求される。したがって、どの材料特性がスプリングバック予測精度向上に大きく寄与するかを踏まえた上で、適切な材料モデルの選定を行うことが必要不可欠である。

そこで本論文では、金属薄板、特にハイテンのプレス成形におけるスプリングバック予測精度向上を目的とし、種々の材料試験によりバウシinger効果や異方性、除荷特性などの材料特性を測定しモデル化した。さらに、それら材料特性を考慮する FEM シミュレーションにより、各材料特性がスプリングバック予測に及ぼす影響度を調査した。また、スプリングバック予測に重要な除荷応力-ひずみ関係の非線形性に着目し、種々の応力状態での除荷特性の実験観察と、非線形除荷特性を再現する材料モデルを新たに構築し、スプリングバック予測精度の検証を行った。

本論文の構成は、第1章 序論、第2章 弾塑性構成式、第3章 スプリングバック予測に及ぼす種々の材料特性の影響、第4章 除荷特性の応力状態依存性、第5章 非線形弾塑性挙動を再現する材料モデルの構築、第6章 結論 である。

第1章では、本研究に関わる社会的背景を述べ、材料特性およびスプリングバック予測に関する過去の研究を概説した。それらを踏まえた上で、本研究の目的および意義を示した。

第2章では、本研究に用いる弾塑性構成式、とりわけ硬化則、異方性降伏関数、見かけのヤング率、弾性異方性について説明した。さらに、FEM ソフトウェア導入にあたり必要となる弾塑性マトリクスを導出した。

第3章では、強度の異なる2種類のハイテン（590R, 980Y）の種々の材料試験を行いバウシinger効果、見かけのヤング率、弾性異方性、塑性異方性の実験観察およびこれらのモデル化を行った。さらにそれら4つの材料特性を全て考慮できる材料モデルを開発し、汎用FEMソフトウェアに組み込んだ。そして、プレス成形試験およびスプリングバック解析を行い、種々の材料特性がスプリングバック予測結果に与える影響と予測精度について検証した。バウシinger効果を考慮した解析によりスプリングバックは小さく、見かけのヤング率を考慮した解析によりスプリングバックは大きくなる傾向となった。弾性および塑性異方性の影響度はスプリングバックの形態によって異なるが、590Rでは10%以上の変化率となり、異方性の大きな材料においては無視できない材料因子であることがわかった。さらに、各材料特性を全て考慮した弾塑性構成式を用いることで590Rおよび980Yともにスプリングバック予測精度は大幅に向上することを示した。

第4章では、応力状態による除荷特性の違い、つまり除荷特性の応力状態依存性を明らかにすることを目的とし、4つの応力状態；①単軸、②平面ひずみ、③等二軸、④せん断での除荷特性を種々の材料試験により系統的に測定した。試験で得られた除荷応力-ひずみ曲線から、平均勾配と非線形性を各応力状態で比較することで、除荷特性の応力状態依存性を検証した。見かけの弾性率（除荷平均勾配）は応力状態によらず予ひずみの増加に伴い低下する傾向となり、さらに応力状態によって見かけの弾性率は異なることが分かった。これにより、多軸応力除荷での見かけの弾性率は等方性を仮定したフックの法則に従わないことが明らかとなった。除荷応力-ひずみ関係の非線形性も応力状態によって異なり、応力状態依存性が確認された。特に、せん断除荷は最も顕著な非線形性を示したのに対し、等二軸除荷は最も小さな非線形性となった。また、材料の強度や強化機構によって非線形性が異なることが分かった。

第5章では、ハイテンの面内応力反転試験により除荷および再負荷特性を詳細に調査した結果、応力反転後の応力-ひずみ関係は、変形形態（除荷/再負荷）や反転応力、予ひずみ量に関わらず、応力反転からの応力の変化量によって決まることを見出した。この傾向を元に、2曲面モデルの枠組みを採用した新たな材料モデルを提案した。提案材料モデルを市販のFEMへ導入し、ドロ-成形のスプリングバック解析により提案材料モデルの高い予測精度を示した。

以上のように、金属薄材のプレス成形で発生するスプリングバックを高精度かつ効率的に予測するためには、その材料の材料特性を把握し、影響度の大きい材料特性を考慮した材料モデルをスプリングバック解析に用いることが重要であると言える。本論文で示した結果は、材料モデルの観点でスプリングバックを高精度に予測するための指針となることから、学術的かつ工業的に大きな意味を持つと考えられる。