

## 論文の内容の要旨

氏名：河野 亮

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：航空機部材の成形および自重変形解析に関する研究

近年、航空機部材は CAD/CAM システムを導入することで精度が向上してきており、相互の部材の基準穴同士を合わせるだけで位置決めが可能なホール to ホール組立法を用いる試みがされてきている。各航空機製造メーカーではホール to ホール組立法を生産に採用して組立治具等のコストダウンを実現している。しかしながら、この方法を用いるためには航空機部材の精度改善が必要である。多くの航空機製造メーカーはシミュレーション技術を導入することにより精度を向上する試みを行っている。航空機部材は主に 2024-T3 と 7075-T6 のようなアルミニウム合金によって製造される。これらの材料は鋼と比較してスプリングバックがより大きくなる傾向がある。航空機スキン部材の形状は航空機組立プロセスにおけるとても重要なパラメータであるので、それゆえに、金型を設計する目的でスキンのストレッチ成形のスプリングバックを予測可能なシミュレーション技術の開発が必要とされている。

航空機スキン部材の形状精度は航空機組立工程に対してとても重要なパラメータであるので、金型を設計する目的でシミュレーション技術を開発することが必要とされている。スキン部材のスプリングバックは、ストレッチ成形時に板材が引っ張られ、両端でつかんでいるジョーが解放された時に弾性的に戻るため、成形後にスプリングバックが発生することは避けられない。さらに、スキンはサイズが大きい一方板厚は薄いため、常に自重で変形している。FEM 解析により成形後の部材形状を正確に予測するためには、スプリングバックだけでなく自重変形も考慮しなければならない。

そこで、本研究では、航空機部材ストレッチ成形特有の上記影響を考慮したスプリングバック予測技術向上に関する研究を行った。はじめに航空機胴体外板のストレッチ成形工程において付与されるひずみを正確に予測する降伏関数について検討を行った。航空機用アルミ材に関する降伏曲面はほとんど求められていないため、参考にできるデータが存在しないのが現状である。降伏関数については、二軸引張試験法により正確な降伏曲面を求めスプリングバック予測精度を高める研究が多く行われているが、二軸引張試験法は一般的な単軸引張試験と比較すると試験片形状が複雑で、且つ直交する二方向に応力を付与できる専用設備もしくは治具を要する為、単軸引張試験のように容易にデータ取得することができない。そこで、本研究ではストレッチ成形時に付与されるひずみを測定し、ストレッチ成形時の応力状態と単軸応力場との比較を行い、材料データ取得試験法の簡易化も考慮に入れた材料モデルの構築を行った。航空機胴体外板ストレッチ成形工程において付与されるひずみを正確に予測できる材料モデルにつき検討を行った。航空機ストレッチ成形は金型が有ることにより単軸引張よりもストレッチ直交方向に張り出される傾向を示した。しかしながら全ひずみ比、塑性ひずみ比共にストレッチと直交方向に対しては大きく圧縮変形をしておりほぼ単軸引張に近い成形をしていた。以上からストレッチ成形解析の場合は、単軸引張の材料特性で良いことが分かった。

次に、検討結果から最適化された材料モデルを用いて、航空機スキンのストレッチ成形の有限要素シミュレーションの精度にモデリング条件やパラメータが及ぼす影響につき調査を行った。シミュレーション結果の精度と、メッシュアスペクト比等のモデリング条件及び収束判定等の解析パラメータとの関係につき調査し、より良いモデリング条件及びパラメータを提案した。

航空機外板部材に合わせたアスペクト比が大きい状況での引張曲げ成形(ストレッチ成形)実験及び自重解析結果と解析を比較しメッシュのアスペクト比が解析値に及ぼす影響を検討する。航空機スキン部材は素材サイズが約 3m×5m と大きい一方、板厚は 1~6mm と薄いため、大きな自重変形が発生する。しかしながら、メッシュサイズを小さくすると 5m サイズのモデルを計算するのに膨大な時間がかかることとなる。本研究では解析精度のみならず、動的陽解法等の解析手法、メッシュ形状等のパラメータを解析時間の観点からも評価し、航空機部材のようなサイズの大きい解析モデルを実用的な時間で計算することも目標と

した。

航空機外板部品に合わせたアスペクト比が大きい状況での自重変形実験結果と解析を比較しメッシュのアスペクト比が解析値に及ぼす影響を調査した。静的陰解法を用いる場合にはメッシュサイズ 25mm 以下に動的陽解法を用いる場合にはメッシュサイズ 12.5mm 以下にすることで実験のばらつき ( $\pm 1\text{mm}$ ) 以内の精度で予測可能となった。さらに計算時間については、動的陽解法を用いる場合に Reyleigh 型の振動減衰を適切に与えることにより、計算時間を 45~58%短縮した。

また、引張り曲げ成形の解析予測精度評価を目的として基礎試験を行った。解析結果は理論式ともほぼ一致していることを確認した。成形後の供試体の曲率半径は実験値に対し解析値は 200mm 程小さい値を示した。

そこで、実験値との差を少なくするために引張曲げ時の引張方向板厚断面の外周側と内周側のひずみ分布に関して調査を行った。その結果、引張曲げ成形の外周面と内周面のひずみは金型との摩擦によりばらつきが大きくなり、一部で内周面側の塑性ひずみが外周面側の全ひずみよりも大きな値を示すことが判明した。これは引張成形時の金型との摩擦により不均一な変形が板厚方向に発生したものと考えられ、この現象が引張曲げ後のスプリングバック実験値が理論及び解析値と異なる理由と考えられる。ここで、この引張曲げ成形時における金型との摩擦のスプリングバック量依存性を理論式によりモデル化し有限要素解析を行った。その結果、予測精度が約 75%改善された。

最後にこれら最適化されたモデル及び解析条件により航空機胴体外板部品 (6,604×2,388×3.8mm) の実機ストレッチ成形シミュレーションを行い、スプリングバック予測精度向上の効果を確認した。解析では、航空機スキンのストレッチ成形および成形後部品の自重変形シミュレーションを行なった。最適化されたモデル及び解析条件を適用した結果、スプリングバック予測結果の精度向上が確かめられた。解析結果と実験結果のずれ量は、4 角形シェル要素を用いた静的陽解法で最大 5mm、3 角形シェル要素を用いた動的陽解法で最大 6mm 認められるが、スキン部品の大きさを考慮するとこのずれ量はそれぞれ 0.1%、0.12%と高い精度でスプリングバック量を予測できたことを確認した。