

## 論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 高橋 進

（副査） 教授 加藤 数良 教授 邊 吾一

航空機部材は、CAD/CAM/CAEの導入で部品精度が向上してきていることにより、部品の組み立て方法も革新が起きている。従来は、部品精度が不十分なままで組み立てたので、組立段階で部品形状を大型の治具を使用して形状を矯正する必要があり、工数と広い治具置場を必要としていた。しかしながら近年、部品精度が向上してきたことから、部品に予め開けておいた穴を合わせてリベットでかしめる、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。本手法は、組立ロケータやコンバータ等も最小で済み、組立治具が簡素化および削減されることにより、組立作業のスペース確保が可能となり、生産性向上による低コスト化を達成できる。

上記のように、航空機部材のホール to ホール組立法は、大変効果的ではあるが、比較的小型で剛性が高い、フレームおよびストリンガー等の部品の組み立てには適しているが、本研究の対象部材の航空機外板部材であるスキンには、困難であった。その理由は、当該部材はアルミニウム合金製の板材の端部を引張りながら金型に押し付けて成形するストレッチ成形で加工される。また、表面の寸法に比較して板厚が非常に薄いために、成形後の弾性回復による変形のスプリングバックと自重による変形が複合された形状となり部品形状の予測が困難であるためである。そこで、本論文では、スキンのストレッチ成形における成形現象の解明を行い、成形解析に必要な材料特性を明確化すると共に、有限要素法を使用した数値シミュレーションの解析精度向上方法を提案することを目的としている。

本論文は、全7章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、本研究の背景および既往の研究をまとめることにより、本研究の意義および目的を明確化している。また、本論文の構成を説明している。

第2章では、航空機用アルミニウム合金板のストレッチ成形におけるひずみ予測に関して述べられている。スキン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可能な降伏関数に関して検討が行われた。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、現状把握のために、実部材の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、スキンに使用するアルミニウム合金板に関して行なった。そして、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ことにより、数値解析による成形シミュレーションを実行し易くする。

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いても検討を行った。スキンのストレッチ成形では、材料を引張りながら金型に押し当てる工法となっているので、単軸引張よりもストレッチ方向とその直交の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および塑性ひずみ比、共にストレッチと直交の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時の状況であることを解明し、スキンのストレッチ成形解析の場合、単軸引張の材料特性で良いことが判明した。このことより、材料特性の計測に特別な治具が必要なくなり、解析実行が非常にやり易くなる効果がある。

第3章では、スキンのストレッチ成形におけるスプリングバックの解析精度に有限要素モデルが及ぼす影響が述べられている。メッシュアスペクト比などのシミュレーション条件および収束判定等の解析パラメータとの関係を検討した。ここでは、メッシュサイズを変化させた場合の有限要素解析によるスプリングバック量の変化をシミュレーション精度の尺度として用いた。シミュレーションのパラメータとしては、収束判定条件(相対力, 相対変位), 板厚方向の積分点数(3, 5, 7点)および降伏関数(von Mises, Hill'48)を選択した。検討結果として、解析精度には、収束判定条件が最も解析精度に影響をおよぼすことが判明し、推奨条件は、相対変位が $1 \times 10^5$ であることを示した。

第4章では、スキんに合わせたアスペクト比が大きい状況における自重変形の予測技術の向上を目的とし、自重変形シミュレーションにおける解析パラメータが解析精度に及ぼす影響を検討した。解析の検証データ取得として、長方形のアルミニウム合金板製の試験片の短辺の全体を固定した場合と、正方形板の1辺の一部を拘束した場合の実験を行った。解析手法として静的陰解法を適用した場合は、板材モデルのメッシュサイズが25mm以下に、また、動的陽解法を使用した場合のメッシュサイズは、12.5mm以下にすることにより、実験結果のばらつき(±1mm)以内の精度で、変位の予測が可能であることを示した。また、動的陽解法での解析では、運動方程式を基本としているために、解析上の振動が発生する。この振動を効率良く減衰させることにより、解析時間の短縮が可能となる。そこで、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%短縮可能とした。

第5章では、引張曲げ成形の解析予測精度評価を目的として成形実験を行い、シミュレーション結果と比較した。まず、成形後の供試体の曲率半径の解析結果が理論式とほぼ一致していることを確認した。一方、実験値に対して解析値は、約15%小さい値となった。そこで、実験値との乖離を減少させ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実験と解析により検討を行った。その結果、引張曲げ成形の外周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の実験値が理論及び解析値と異なる理由と思われた。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への依存性を変形の理論式によりモデル化して解析を行った結果、予測精度が約75%向上したことを示した。

第6章では、前章までで得られた知見を反映し、実機スキンの変形解析を行い、実測の変形量との比較を行い、解析精度の確認を行った。解析結果と実験結果の変位の差は、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認められたが、スキン部品の高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可能であることを示した。

第7章では、結論と今後の課題であり、本論文において得られた結論を総括すると共に、解析手法の更なる精度向上のための課題を示した。

以上の結果から、ストレッチ成形される板厚が長さの約1/10,000の大きなアスペクト比を有する航空機外板部品の成形後の部品形状の予測を、高精度に行える解析手法が示された。その結果、本論文は、薄板材のストレッチ成形の数値解析において有用な知見を示すものであり、この分野に大きく貢献するものである。

この成果は、生産工学、特に成形工学に寄与するものと評価できる。

よって本論文は、博士(工学)の学位を授与されるに値するものと認められる。

以上

平成27年3月12日