

航空機外板部品の成形解析に関する研究

日大生産工(院) ○佐々木 颯翼 (三菱重工業株式会社) 河野 亮
(日大生産工) 高橋 進

1. 緒言

近年、航空機は組立コスト削減を目的に、従来の組立方式より簡易化された **Determinant assembly** の適用が進められている。しかしこれを実用化するには部品精度の向上が必要である。航空機胴体外板部品(スキン)もこの組立法の適用が求められているが、スキンは成形後のスプリングバックの影響により部品精度が悪く、組立の際には大型の治具を使用して形状矯正を行っている。

スキンはストレッチ成形法により製造される(Fig.1)。これは板材を引張り、降伏点を越えたところで雄型に馴染ませて成形する工法である。スキンの部品精度向上にはスプリングバックを正確に予測し、金型の再設計へ適用する必要がある。しかしスキンは板厚に対してのアスペクト比が非常に大きいため自重の影響を受けやすく、成形後の形状はスプリングバックと自重変形が混在した状態となる。よって成形工程を事前検討するための FEM 解析工程に自重変形を加えスプリングバック予測を行う必要がある。しかしこの状況でのスキンの成形解析に関する研究はほとんど進展しておらず、未だ国内では成形金型の設計へ解析結果を適用できるまでには至っていない。

そこで本報告では、航空機胴体外板部品に合わせたアスペクト比が大きい状況での、スキン部品の成形における FEM 解析精度の向上を目的として実験結果と解析結果を比較し、メッシュのアスペクト比が解析値に及ぼす影響を検討したので報告する。

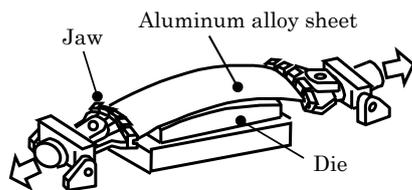


Fig. 1 Sheet stretch forming operation

2. 供試材

供試材は、2000系アルミニウム合金板(A2024-T3)を使用した。供試材の機械的性質をTable1に示す。

Table1 Mechanical properties of specimen

Properties		Value
Young modulus (GPa)		69.9
Poisson's ratio		0.33
Yield stress (MPa)		325
r value	0° (Rolling direction)	0.71
	45°	1.11
	90°	0.70

3. 自重変形実験・解析

スキンの正確な自重変形予測は、スプリングバック量の把握だけでは無く、組立前にハンガーに吊るした状態のスキンの形状把握にも有用である。実験には正方形板(寸法:500×500×1)を用いて自重変形実験を行った。供試材は4枚とした。

3.1 実験条件および計測方法

Fig.1に実験状態を示す。正方形板の角部150×50mmを治具にて保持し固定部から2方向に突き出し、実際のスキンに近い変形を模擬している。供試材の変位測定にはレーザー変位(LB-300,KEYENCE社製)を使用した。実験装置を定盤の上に載せ、下部からレーザーを照射し平行に移動させることで測定することが可能である。測定は対角線上とし、それぞれ50mm間隔にて先端部まで測定した。また、すべての供試材が多少変形していたので供試材を裏返した状態も計測し両者の平均値から変位を求めた。

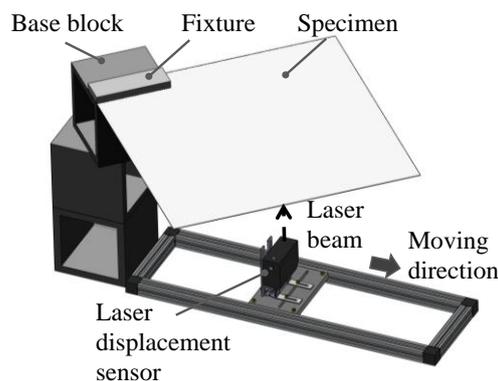


Fig.2 Experiment apparatus

3.2 解析条件

解析には板成形解析ソフト Stampack Ver.6.2.5(Quantech社製)を使用した。Fig.3に使用したメッシュ形状と分割方法の詳細を示す。解析で使用した要素はすべて3角形Shell要素とし、要素の短辺の長さは6.25mmから25mmとした。解析手法は、成形時に金型との接触がある場合と、組立前のハンガーによる保持のみで金型との接触が無い場合の自重変形を考慮し、動的陽解法と静的陰解法を使用し、この2つの解析手法の違いが結果に及ぼす影響を調査した。このとき、動的陽解法は実験同様に板で挟んで固定し、静的陰解法はメッシュの接点(実験で固定される領域150×50mm)を固定した。

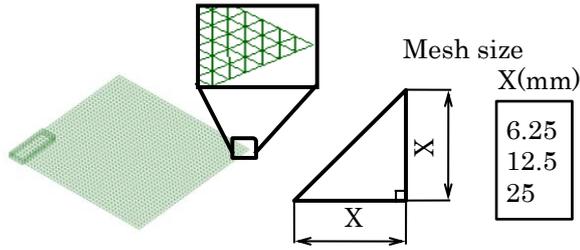


Fig.3 Simulation model of square specimen

3.3 結果および考察

供試材の固定部から対角線方向の自重変形の変位の計測結果を Fig.4 に示す. 板の固定部側から対角線方向の変位量を調査した結果, ばらつきは最大で約 2.3mm, 最少で約 0.35mm となり, 供試材によるばらつきは小さいことが確認されたため, 解析には反りのない供試材を使用した.

Fig.5, Fig.6, Fig.7 に実験平均値との差から求めた動的陽解法と静的陰解法の解析精度の比較結果を示す. その結果, 解析精度は静的陰解法が動的陽解法に比べ誤差が多少小さくなる傾向が認められた. また, メッシュサイズ 6.25mm では実験結果と一致し, 12.5mm も実験結果のばらつき内に含まれており, 十分な解析精度が得られていると考えられる. 一方メッシュサイズ 25mm では実験結果と一致せず, さらに 2 つの解法による違いが見られなかった. よって自重変形解析においてはメッシュサイズ 12.5mm 以下を用いることが望ましいと考えられる.

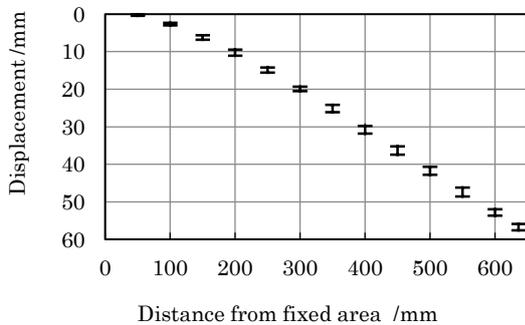


Fig.4 Result of own weight deformation experiment

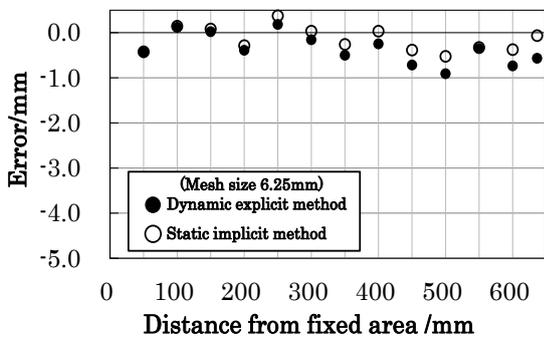


Fig.5 Comparison between analysis error of dynamic explicit method and static implicit method in mesh size 6.25mm

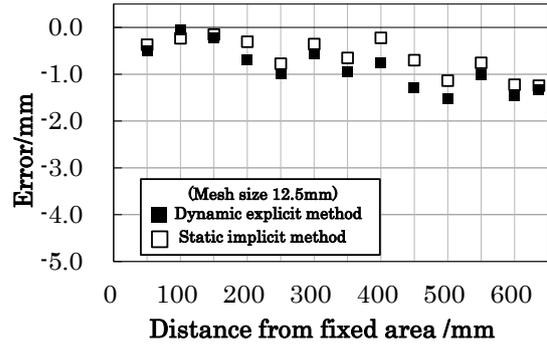


Fig.6 Comparison between analysis error of dynamic explicit method and static implicit method in mesh size 12.5mm

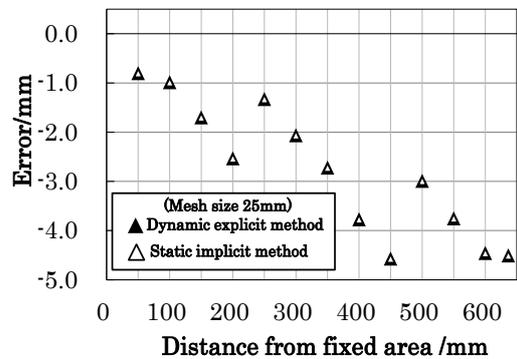


Fig.7 Comparison between analysis error of dynamic explicit method and static implicit method in mesh size 25mm

4. 引張曲げ実験・解析

4.1 実験装置実験条件および計測方法

自重変形とスプリングバックが混在した状態の解析検証データ取得のため, 引張曲げ実験を行った. 実験装置および金型寸法を Fig.8, Fig.9 に示す. 実験では万能引張試験機(島津製作所製オートグラフ AG-100kNX)を使用した. これに実験装置を固定し, 供試材を金型の曲率半径 1500mm に沿わせるようにして引張曲げ成形を行った.

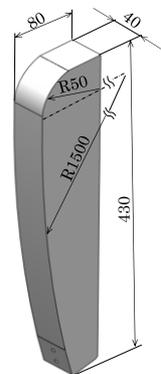
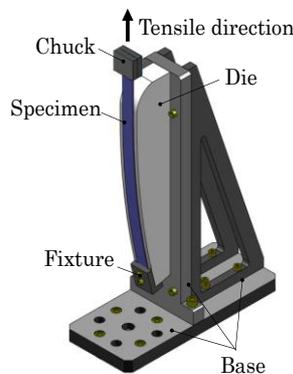


Fig.8 Experiment apparatus Fig.9 Dimensions of die

引張試験機は上下に稼働するチャックが一つしか備え付けられていない為、ストレッチ成形のように素材の両端をつかんで引張ることができない。そこで試験片の片端 40mm をチャックでつかみ、もう一端の 40mm は固定治具と金型間に挟み、ボルトで締めつけて固定した。

4.2 実験条件および計測方法

供試材の寸法は $500 \times 25 \times 1$ とし圧延方向を長手方向とした。初期ひずみ速度は $1.5 \times 10^{-4} \text{S}^{-1}$ 、伸びを約 1.9% とし、実際の成形と同じ成形条件とし、成形後の曲率半径を計測した。成形後に、供試材を万能引張試験機のチャックで固定し、レーザー変位計により形状計測を行った。

レーザー変位計を Fig.10 に示すように固定し、チャック部を基準位置として引張試験機のクロスヘッドを上昇させ、水平方向距離を計測した。なお、金型により供試材が成形される領域は、チャック部下方 95mm の位置から固定治具により金型に固定される位置 420mm までとなる。変位の測定はチャック部下方 95mm の位置から 50mm 間隔で測定した。供試材本数は 3 本とし、成形前に試験片の反り量を計測した。成形後の曲率半径は前述測定点のうち隣接する 3 点(チャック部下方より 95-145-195, 145-195-245, 195-245-295, 245-295-345 の位置)から計算により求めた。測定には KEYENCE 社製レーザー変位ヘッド LK-H155 を使用した。

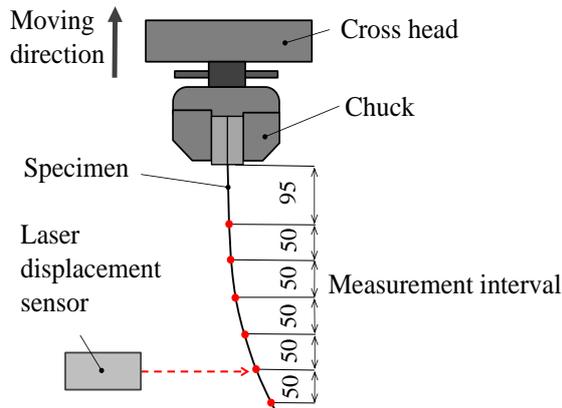


Fig.10 Shape measurement method

4.3 引張曲げ解析

解析には板成形解析ソフト Stampack Ver6.2.5(Quantech 社製)を使用した。引張曲げ実験をモデル化し解析を行い実験結果と比較した。解析モデルを Fig.11 に示す。本解析ではまず解析内の成形速度パラメータを 0.038m/s から 0.13m/s まで変化させてメッシュアスペクト比が解析精度におよぼす影響を確認後、最適な成形速度パラメータを使用して実験結果と比較した。解析手法は、引張成形時に動的陽解法、自重変形とスプリングバック解析には静的陰解法を用いた。要素はすべて 3 角形 Shell 要素とし、要素の短辺の長さを 6.25mm から 25mm まで変化させた。

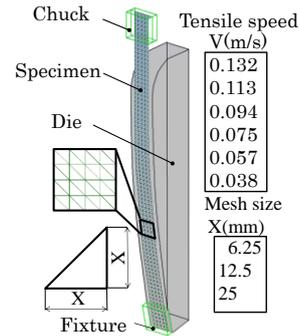


Fig.11 Simulation model for stretch bending

4.4 結果及び考察

4.4.1 供試材成形後の曲率半径

供試材成形前の試験片反り量を Fig.12 に示す。プラス側変位は金型側に反りを生じていることを示す。全ての試験片に反りが確認され、最大で 15mm であった。引張曲げ成形後の試験片の変位を Fig.13 に示す。成形後の形状はすべての供試材で一定の値を示していることから成形前の形状の影響は認められず、解析では反りの無い供試材を適用した。引張り曲げ成形を行った後の供試材曲率半径計測結果を Fig.14 に示す。チャックからの距離が 295mm のときのみ曲率半径が 1470mm を示し金型の曲率より小さな値を示した。これは測定誤差であると考えられ、この 1 領域を除いては全ての領域において $1500 \sim 1840 \text{mm}$ の曲率半径を示し、スプリングバックと自重変形により金型の曲率半径 1500mm に対して $0 \sim 350 \text{mm}$ 程度曲率半径が大きくなる変形が認められた。

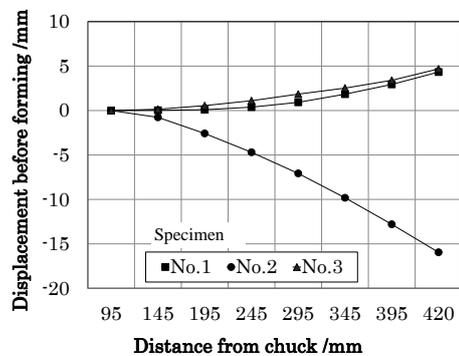


Fig.12 Deflection of specimen before forming

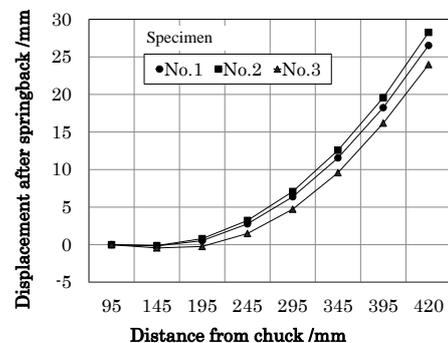


Fig.13 Displacement of specimen after springback

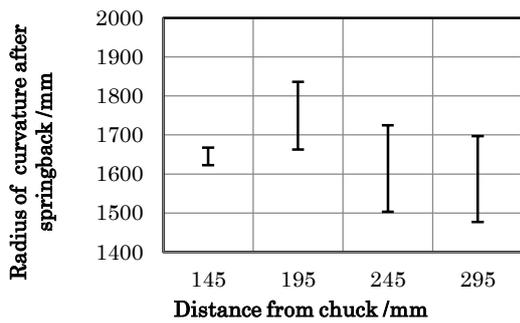


Fig.14 Variation in the radius of curvature after forming

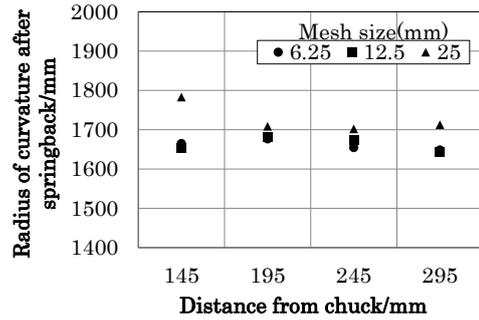


Fig.17 Radius of curvature after springback in FEM analysis

4.4.2 曲率半径解析結果

解析内の成形速度パラメータ(チャック移動速度)を変化させた際の、チャックからの距離 195mm, 245mm での曲率半径を Fig.15, Fig.16 に示す. その結果, 移動速度 0.094mm/s までの解析結果の変動が安定していることが確認された. また, メッシュサイズ 6.25mm と 12.5mm では曲率半径がほぼ一致し, その後の推移が±20mm 以内となった. 引張速度が遅くなると解析時間が長くなることを考慮し, チャック移動速度は 0.094mm/s が望ましいと考えられる. チャック移動速度 0.094mm/s で計算し, 得られた供試材曲率半径を Fig.17 に示す. 25mm のメッシュサイズにて引張曲げ成形解析を行った場合での曲率半径変化のばらつきは 10~100mm 程度であるが, 6.25mm と 12.5mm は 10~50mm 程度のばらつきとなった. 実験値の各領域での曲率平均と比較するとメッシュサイズ 6.25mm での曲率半径の誤差は最大約 3.5%, メッシュサイズ 25mm では最大約 10% であった. メッシュサイズ 12.5mm は 6.25mm とほぼ同等の結果となることから, メッシュサイズは 12.5mm 以下が適切であると考えられる.

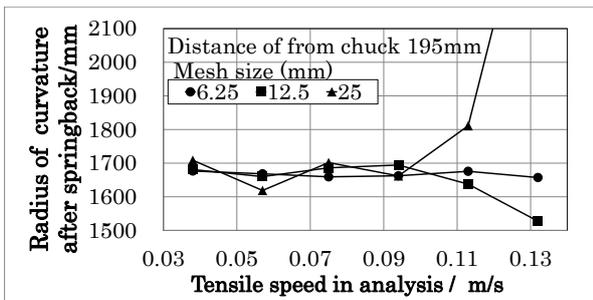


Fig.15 Change of the analysis result by tensile speed at 195mm from chuck

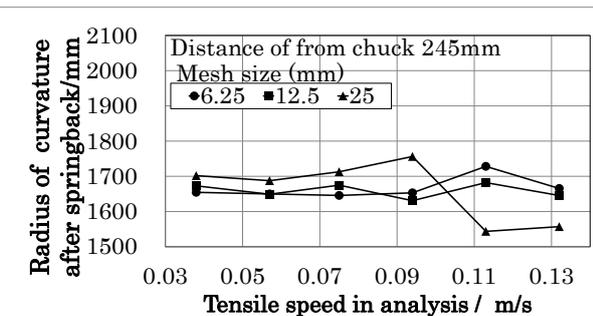


Fig.16 Change of the analysis result by tensile speed at 245mm from chuck

5. 結言

スキン部品の成形における FEM 解析精度の向上を目的として自重変形試験と引張曲げ試験を行い, 実験結果と解析結果を比較し, 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最適な解析パラメータを求めた.

- 1) 辺の一部を支えた, 正方形アルミニウム合金板の自重変形解析結果からメッシュサイズ 12.5mm 以下にすることで実験結果に一致する変位が得られることが分かった.
- 2) 動的陽解法と静的陰解法の 2 種類の解析手法を用いて自重変形解析を行った結果, メッシュサイズ 6.25mm と 12.5mm において解析精度は静的陰解法が動的陽解法に比べ誤差が小さくなる傾向が認められたが, メッシュサイズ 25mm ではどちらも同じ解析結果となった.
- 3) 金型の曲率半径 1500mm に対してスプリングバック後の自重変形により 0~350mm 程度曲率半径が大きくなった.
- 4) メッシュサイズが小さくなるにつれて, 曲率半径のばらつきが小さくなり, 25mm のメッシュサイズでは 10~100mm, 6.25mm では 10~50mm 程度のばらつきを示した. メッシュサイズ 12.5mm 以下であれば実験結果のばらつき内の精度で自重変形を含んだスプリングバックを予測することが可能である.

6. 参考文献

- 1) 岡田豪生: 航空機部品への成形解析技術の応用, 第 42 回飛行機シンポジウム, (2004), 439-442.
- 2) 河野亮, 近藤美智雄, 山田毅, 都筑隆之: 航空機スキンの高精度化への取り組み, 第 44 回飛行機シンポジウム, 日本航空学会, (2006), 784.