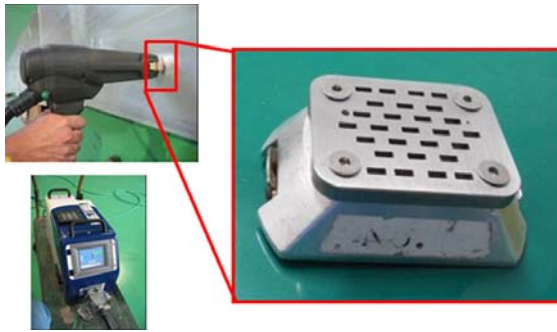


曲率異方性の高い複曲面の成形技術の開発

Forming Technology Development of High Curvature Anisotropy Double-curved Surface



河野 亮*¹
Akira Kono

池田 陽介*²
Yousuke Ikeda

小崎 貴史*³
Takashi Kozaki

深見 典明*³
Noriaki Fukami

赤沼 宏輔*³
Kousuke Akanuma

太田 高裕*⁴
Takahiro Ohta

大物板材部品の成形法としてピーン成形が採用されている。一般的なピーン成形で付与される表面ひずみは等方的であるため、航空機主翼やロケットタンクのような曲率異方性を有する複曲面部品に対しては、ピーン成形前に予備曲げ加工を必要とする場合があり、設計の自由度や製造工程設計の制約となっている。そこで、予備曲げを行わずに複曲面の成形が可能なピーン成形技術を開発した。

1. はじめに

ショットの投射エネルギーを利用した加工法として、一般的に鋳物の砂落としに用いるショットブラस्टリング及びスケール除去、表面処理に用いるショットピーニングが知られている。ショットピーニングを用いるピーン成形は、1950年代初めに翼厚板部品の成形法として登場し、現在は航空機主翼やロケットタンクのような複曲面を持つ外板の成形に実用化されている。航空宇宙製品は生産機種が少ない典型的な多種少量生産製品であるため、設備や金型の投資回収率が低い。そのためダイレス成形が広く用いられており、ピーン成形は型を必要としない成形であり、究極のダイレス成形である。

ピーン成形の原理は、空圧やインペラー回転にて鋼球、又は超音波加振にて半球形状の圧子を材料表面に衝突させる(超音波ピーニング)ことにより局所的塑性降伏を起こさせて圧痕をつけるもので、ピーニングの影響を受けなかった圧痕周囲の深い弾性域が塑性変形の拡大を押し戻してバランスする。その結果、圧縮応力によってピーニングした面が凸面となる湾曲面形状に部品を成形するような曲げモーメントが発生する。投射面と逆方向に板が盛り上がる現象が生じ、加工法を目にした人は誰でも、まずその原理の奇抜さに驚かされる。ピーン成形により素材に導入される成形は球形であるため、**図1**に示すように等方的となる。一方向に異方性を持つような曲率をつけたい場合にはクランプ(素材の弾性域以内にて)した状態でピーニングする方法(ストレスピーニング)が用いられる。クランプの付与は治具の設置など多大な時間が必要で成形時間が増加する。**図2**に示すように球形形状の圧子を直方体型に近づけることにより塑性ひずみ付与の大きさを方向によって変化させると、一方向に異方性の高い曲率を付与することができ容易に成形することが可能となる。そこで塑性ひずみ異方性を付与可能なピーン成形圧子の開発を行った。

*1 総合研究所製造研究部主席研究員 工博

*2 総合研究所 製造研究部

*3 交通・輸送ドメイン民間航空機事業部部品工作部

*4 東海大学工学部動力機械工学科 准教授 工博/技術士

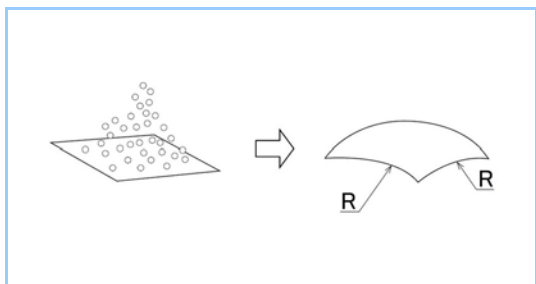


図1 ピーン成形により素材に導入される成形

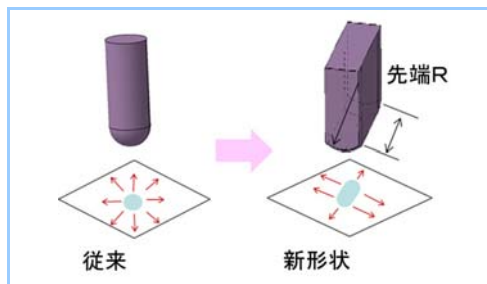


図2 圧子を直方体型に近づけることによる塑性ひずみ付与の大きさ

2. 円柱型ピーニングによる異方性向上の効果検証

共同研究先の東海大学にて解析及び実験により塑性ひずみ異方性を付与可能なピーニング圧子形状の導出を行った。

2.1 ピーニング圧子形状の解析検討

ピーニング圧子は対象物に高速度で衝突させる必要がある。そこで、圧子重量は半球形圧子と同じ重量を維持できる範囲で、圧子形状を変化させ圧子1回の衝突について解析を実施した。図3に解析モデルを示す。圧子の幅と長さを固定し、形状のパラメータとしては先端半径 R と面取り半径 Rc を設定した。

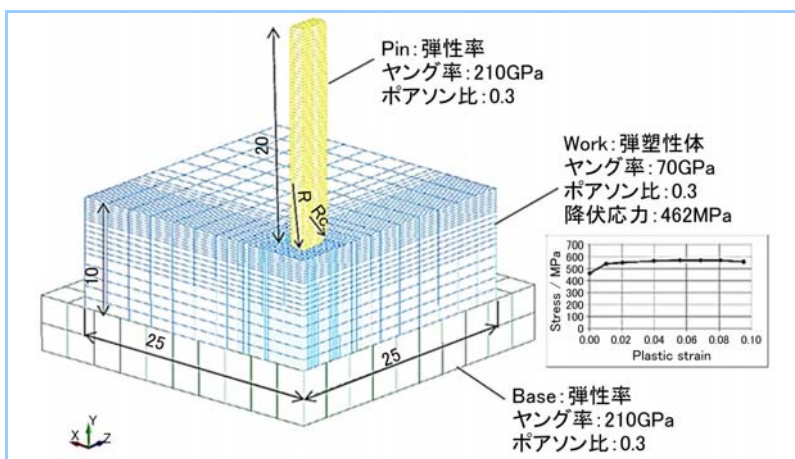


図3 解析モデル

先端 R を変化させた場合の表面の圧子長辺方向に関して、圧子長辺方向の塑性ひずみと圧子短辺方向の塑性ひずみの分布を図4に示す。圧子平行部の範囲に塑性ひずみを生じている。塑性ひずみの比は先端半径 R を変化させた場合、R が小さいほど発生する塑性ひずみ比が大きくなっている。

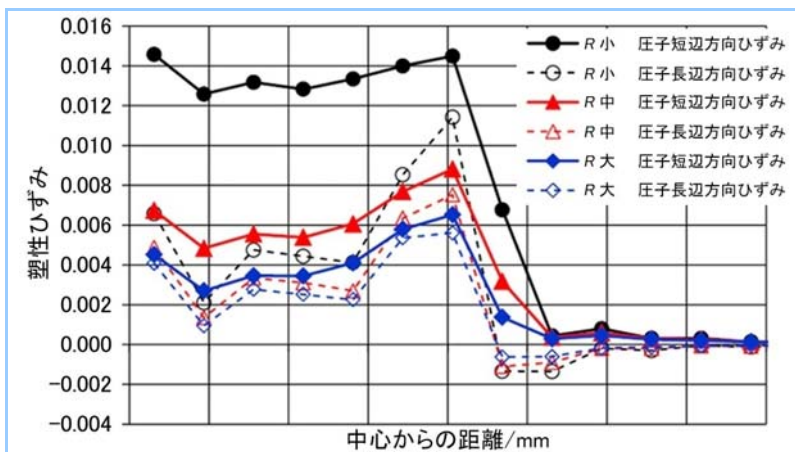


図4 先端Rを変化させた場合の表面の圧子長辺方向に関して、圧子長辺方向の塑性ひずみと圧子短辺方向の塑性ひずみの分布

対象面表面の圧子長辺方向に関して圧子長辺方向の塑性ひずみと圧子短辺方向の塑性ひずみの分布を図5に示す。圧子底面の平行部の範囲に塑性ひずみが生じている。面取り半径 Rc が小さいほど、塑性ひずみの異方性が大きくなるのが確認できる。以上のように圧子の半径を変えることで塑性ひずみ比の比率を変化させることが可能である。

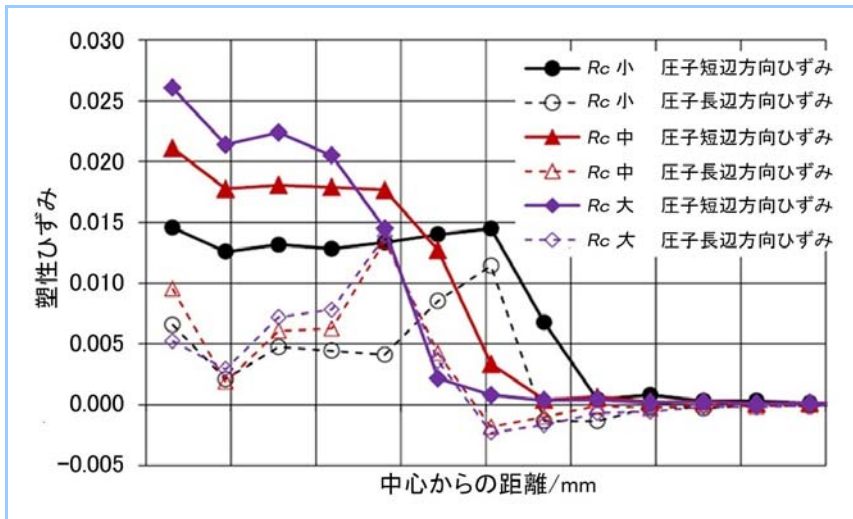


図5 対象面表面の圧子長辺方向に関して圧子長辺方向の塑性ひずみと圧子短辺方向の塑性ひずみの分布

2.2 ピーニング圧子形状の実験検討

落下試験にてピーニング圧子形状の検討を行った。圧子形状は解析検討を参考に決定した。落下試験装置では落下高さは最大 2m であるため圧子の重量を増やして運動エネルギーを超音波ピーニングに近づけるようにした。材質は、入手性と加工性を考慮して炭素鋼とした。落下試験装置を図6に示す。装置には複数(最大27本)の圧子を装着できるように複数の穴を開けた板を設置した。圧子はこの穴に嵌めるよう鍔(つば)を付けた構造とした。圧子は鍔上で板上に置かれている状態で落下し、試験体に衝突すると外れて上方にはじき出される。圧子を保持している板は試験体に当たる前にストップで止められるので、試験体に衝突するのは圧子のみである。試験体はクランプで固定され、クランプの位置を X 方向、Y 方向に移動させることで、試験体全面への落下を可能にしている。試験体はアルミニウム合金 A7075-T651 で形状は 50×50×10mm である。

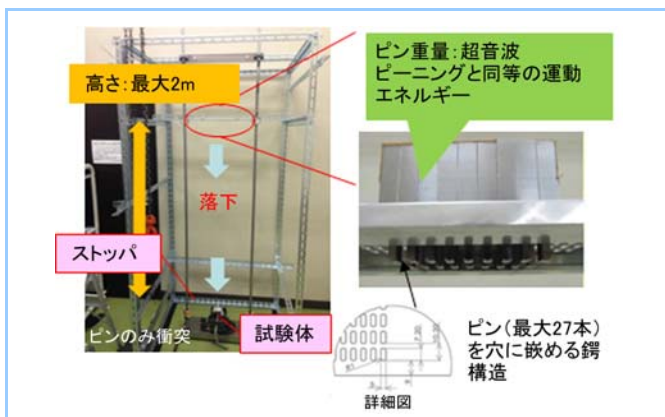


図6 落下試験装置

試験後に接触式の形状測定器でピーニング面と裏面の板中央部の形状計測を実施し曲率異方性を評価する指標としてアークハイト比を用いた。試験片はショットを投射すると、加工面が叩き延ばされるため、円弧状に変形する。この円弧において板中心の反り量がアークハイトである。正方形板のある一辺のアークハイトに対し、それに直交する辺のアークハイトで割った値をアークハイト比として定義し、異方性を評価した。

図7に落下試験によって得られたアークハイト比を示す。解析と同様にアークハイトの比率が異なっていることが確認できる。全運動エネルギー43Jと157Jの条件では157Jの条件でアークハイト比が低下した。これは、圧子材質の硬度が不十分であることから圧子のショット回数が増加するにつれて先端形状が変形したためであり、材質変更等の耐久性の改善対策が今後の課題である。

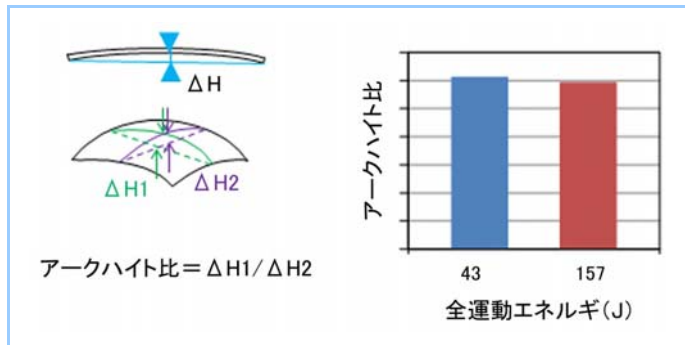


図7 落下試験によって得られたアークハイト比

3. ピーニング設備を用いた成立性の検証

得られた結果をもとに航空宇宙部品模擬試験用のピーニング装置を設計製作した。図8に設計製作したピーニング装置を示す。異方性を大きくするために、ピーニング圧子を並行に配置し、かつ成形性能を従来工法と同等にするために、できるだけ多くの圧子が配置できるようにした。圧子の本数は27本である。図9に航空宇宙部品模擬試験片の試験片形状を示す。試験片のサイズは300mm×500mm×5～10mmのA7075-T651である。新工法だけでなく従来のストレスピーニング法でも同じ試験片を加工しアークハイト比を測定した。

図10に航空宇宙部品模擬試験片のアークハイト比を示す。従来工法のストレスピーニングに対し、新工法はいずれの試験片もアークハイト比が大きくなっており、ストレスを付与せずに成形可能なことが確認できた。

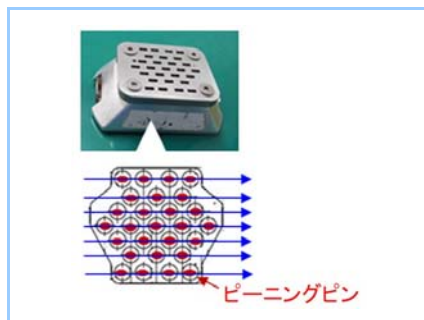


図8 設計製作したピーニング装置

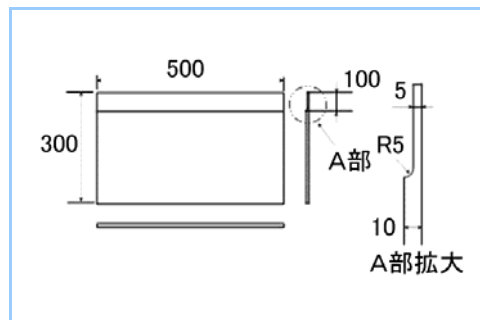


図9 実機模擬試験片の試験片形状

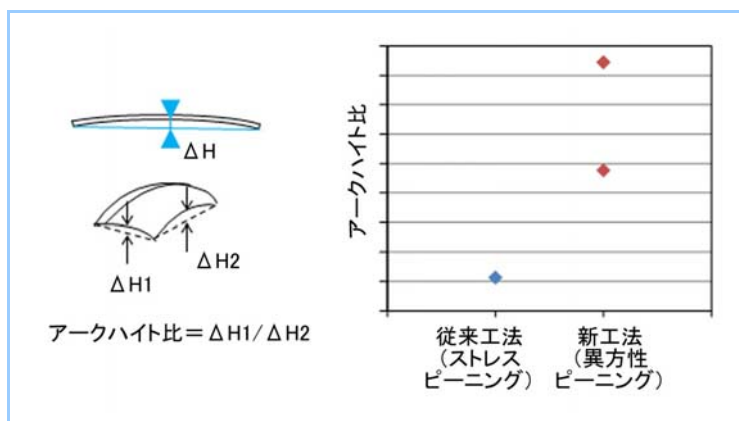


図10 実機模擬試験片のアークハイト比

4. 今後の計画

今後の計画としては、本技術を航空宇宙部品の成形に適用することを目指している。現在は超音波ピーニング装置にて成立性を確認できた段階であり、本新工法の圧子の材質を改良し耐久性を向上し、実機適用可能な技術開発を継続していく。

5. まとめ

解析により塑性ひずみ異方性を付与可能なピーニング圧子形状(直方体型)の導出を行い、単純落下試験にて成立性を確認した。次に、既存超音波ピーニング装置の圧子を改良し、従来工法よりも高い異方性を付与することが可能なピーニング装置を開発した。さらに、ピーニング設備を用いて航空宇宙部品の成形に適用できることを確認した。

今後、本技術を航空宇宙部品製造に適用し、当社製品の競争力強化を図っていく。

参考文献

- (1) 黒井邦宏ほか, 航空機主翼外板への超音波ピーニング成形技術の適用, 第48回飛行機シンポジウム講演論文集, (2010) p.852