

ピーン成形におけるショット速度の計測と変形状の制御

広島工業大学 機械システム工学科

教授 太田 高裕

(2020 年度 一般研究開発助成 AF-2020019-B3)

キーワード：ピーン成形，ショットピーニング，残留応力，粒子画像流速測定

1. 研究の目的と背景

ショットピーニングは金属表面に鋼球を衝突させて、表面近傍に塑性ひずみを発生させることで圧縮応力を付与して、疲労強度を向上する技術である。ピーン成形とはショットを金属表面に打ち付けることにより表面近傍に発生する塑性ひずみを利用して、板を成形する技術である。航空機外板では板が非常に大きいこと、曲率半径が数 m~数十 m で複雑に分布することから、ダイレス成形であるピーン成形が適用されている^{1,2)}。

ショットピーニングでは、アルメンストリップと称する鋼片の表面にピーニングし、その変形量（アークハイト）でピーニング強度として、管理する場合が多い。アークハイトはアルメンゲージと呼ばれる専用の治具で計測する³⁾。

空気式ショットピーニングでは主な施工条件は、ショット速度、ショット材質、ショット径、投射角度、カバレッジなどである。ショット速度は空気圧で制御する。カバレッジは圧痕の面積と表面積の比で、通常はピーニング時間で管理する。ショット速度はショットの運動エネルギーを決める重要な因子であるが、計測することが難しく、過去の計測結果はピンポイントで測定した結果のみであり残留応力とショット速度・ショット径の関係を明らかにした研究はほとんどない。

本研究ではショット速度の計測に高速ビデオカメラと粒子画像流速測定（Particle Image Velocimetry: PIV）を適用し、ノズルから供試体までの広い領域でショット速度の変化を計測し、空気圧・ショット外径のショット速度、残留応力分布、および変形量（アルメンストリップのアークハイト）と関係を明らかにした。また、ピーン成形の数値シミュレーション手法についても検討した。

2. 実験方法^{4~6)}

実験では図 1 に示す吸引式ショットピーニング装置を用いた。ノズルの穴径は 4 mm である。垂直にスタンドオフ距離 100 mm でショットピーニングを実施した。ショットはジルコンで比重は 3.85、硬度は 650~800 HV である。直径の異なる 3 種類を使用し平均直径 D はそれぞれ #20 が 0.725 mm、#40 が 0.338 mm、#100 が 0.152 mm である。投射のエア圧 p は 0.20 MPa から 0.60 MPa の範囲で行った。

試験片はアルミニウム合金 A5052-H34 とアルメンストリップである。試験片はホルダに固定し、速度 2.4 mm/s で移動させ、1~16 回施工した。ピーニング時間は施工回数

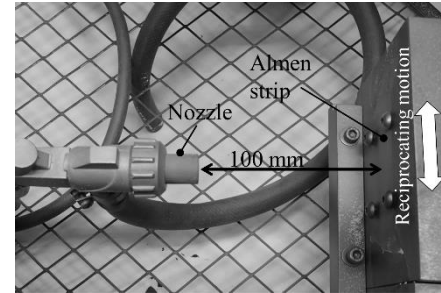


図 1 実験装置の外観^{4~6)}

／移動速度で評価した。試験片全体にショットが当たるように 90mm 移動させた。アルメンストリップは N 片（ばね鋼，6 mm×19 mm×0.8mm）を用いた。アルメンゲージ（JIS B 2711 準拠）を用いて試験片のアークハイトを計測した。アルミニウム合金の寸法は縦 19 mm×横 76 mm×厚さ 5 mm、硬度は 43 HV である。

ショットピーニングを行った後、アルミニウム合金の試験片の残留応力を X 線回折法の $\cos \alpha$ 法を用いたパルステック社の μ -360s で計測した。板厚内の残留応力は直径 8 mm の範囲を表面から電解研磨して、研磨した表面で応力を計測した。

高速カメラと PIV を用いて、ショット速度を直接計測した。ショット速度の計測では試験片を設置しなかった。高速カメラはナックイメージテクノロジー社の MEMRECAM ACS-1 を用いた。シャッター速度は 1/250,000 秒、フレーム速度は 50,000 fps である。解像度は 1028 × 720 ピクセルでノズルから約 120 mm の範囲を撮影した。PIV はフローテック・リサーチ社の FtrPIV を用いた。移動量の推定には粒子追跡法を用いた。検査窓は 24×24 ピクセルである。234 ペアの画像解析を行い、中央値を用いてショット速度を求めた。

3. 実験結果と考察^{4~6)}

3.1 ショット速度の計測結果^{4,5)}

ショットの撮影画像を図 2 に示す。代表例として #20 と #100 の空気圧が 0.4 MPa の場合である。ノズルから投射後、ショットは広がりながら飛行している。#20 に比べて、#100 ではショットの個数が多く、ショットの拡がり大きい。#20 と #100 について PIV で求めたノズル中心線でのショット速度の変化を図 3 に示す。ショットはノズルから投射後に高圧空気により加速され、急激に速度を増加させ、定常速度に達する。スタンドオフ距離 100 mm ではショッ

ト速度は減速しない。いずれの空気圧でもショット速度の変化は同じ傾向を示し、空気圧が高いほど、ショット速度は速い。#40 についても同じ傾向であった。図4には空気圧とショット速度の関係をまとめた。ショット速度はスタンドオフ距離 90~100 mm の平均速度で評価した。空気圧が増加すればショット速度は速くなり、ショット径が大きいほどショット速度は遅くなる。空気圧 p とショット径 D とショット速度 v の関係を以下の近似式にまとめた。

$$v = 3.663 \times 10^1 p^{0.801} D^{-0.458} \quad (1)$$

図中の線は近似式を示す。ショット速度は空気圧の 0.801 乗に比例し、ショット径の -0.458 乗に比例する。

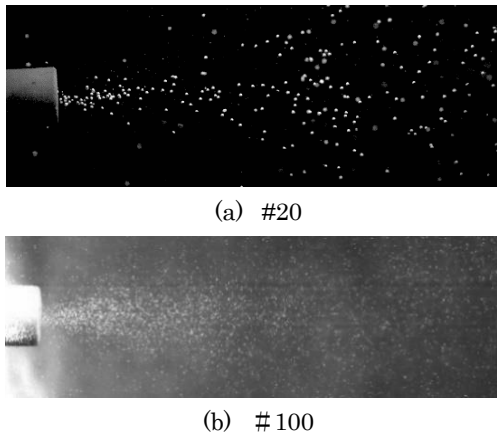
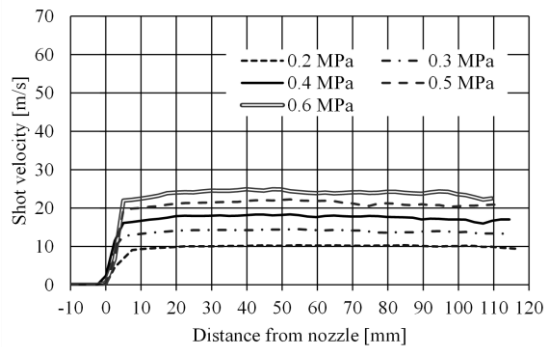
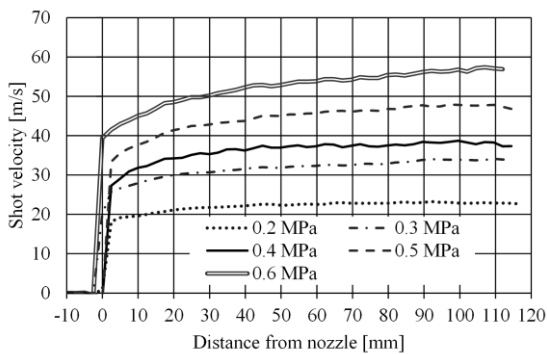


図2 0.4 MPa で投射時の高速度カメラの撮影画像^{4), 5)}



(a) #20



(b) #100

図3 ショット速度分布の計測結果^{4), 5)}

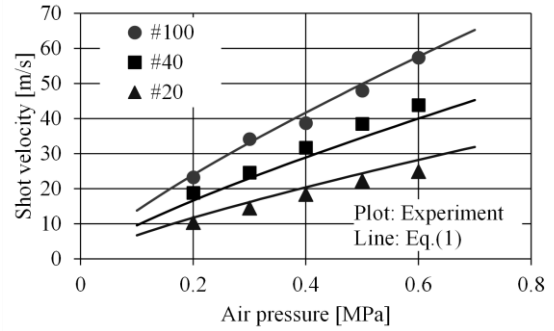
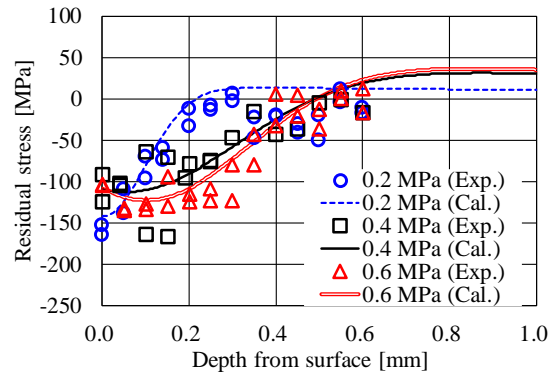
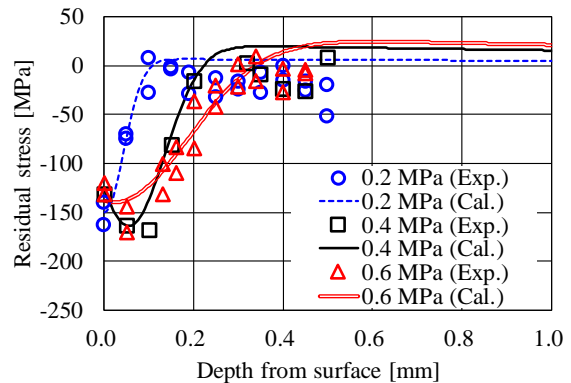


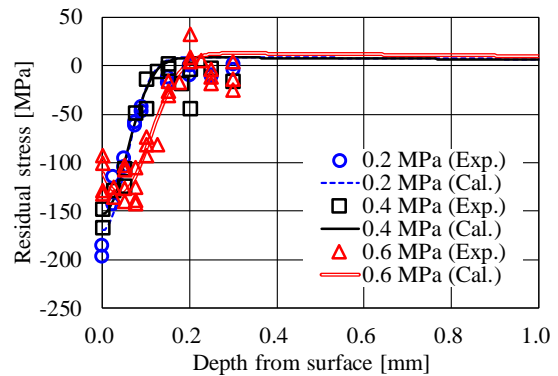
図4 空気圧とショット速度の関係⁵⁾



(a) #20



(b) #40



(c) #100

図5 板厚内の残留応力分布。プロットは計測結果、線は式(7)の計算結果である^{5), 6)}。

3.2 残留応力の計測結果^{5, 6)}

板厚内の残留応力分布を図5に示す。図には計測結果(プロット)と4章で示す計算結果(ライン)を示す。いずれのショットにおいても空気圧の増加とともに圧縮残留応力の最大値は増加し、圧縮残留応力が導入される深さも深くなる。

3.3 アルメンストリップアーケハイトの計測結果^{4, 5)}

#20, #40と#100ともに、いずれの空気圧でもアルメンストリップ N 片のアーケハイトはピーニング時間の増加とともに急激に増加するが、約 4 s/mm でほぼ飽和した。ピーニング時間 T_1 でのアルメンストリップのアーケハイトを H_1 、2 倍の時間 $2 \times T_1$ のアーケハイトを H_2 とすると、 $(H_2 - H_1) / H_1$ が 10 % 下となる時間 T_1 をカバレッジが 100 % となる時間と定義する³⁾。また、飽和したアーケハイトをピーニング強度とする。本実験ではピーニング時間 7.9 s/mm のアーケハイトをピーニング強度(単位は mm と表記)として評価した。

実験結果をもとに、ショット速度、ショット径とピーニング強度 I の関係を考察した。図6にはショット速度とピーニング強度の関係を示す。ピーニング強度 I をショット速度 v とショット径 D の関数として、以下の式で近似した。

$$I = 3.020 \times 10^{-2} v^{1.032} D^{1.085} \quad (2)$$

図中の線は式(2)の計算結果を示している。#40 の 0.2 MPa が近似線から外れているが、その他の結果はほぼ近似線と一致する。本実験条件の範囲では、ピーニング強度はショット速度とショット径にほぼ比例する

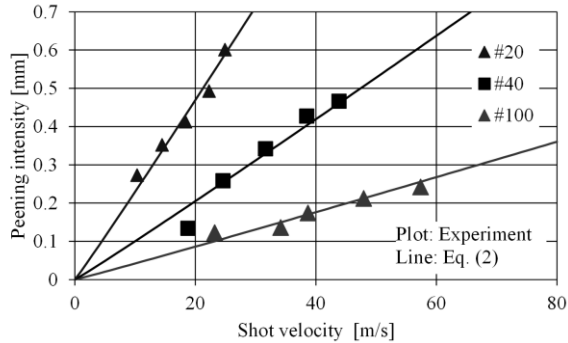


図6 飽和アーケハイト(ピーニング強度)とショット速度、ショット径の関係^{4, 5)}

4. 残留応力の予測手法と検証⁶⁾

4.1 予測手法⁶⁾

残留応力の発生源は材料内部に発生する塑性ひずみの不均一さであり、この塑性ひずみの食い違いを固有ひずみとして定義する。固有ひずみを用いることでショットピーニング後の残留応力分布は以下の式で弾性計算できる。ショットピーニングにおいて、一つのショットが衝突して発生するひずみは軸対称であるため、複数のショットが衝突した場合でもショットピーニングで発生する x 方向と y 方向

の固有ひずみ成分 g_x と g_y は同じで、材料全域で同じ分布とする。ここで、 z 方向を板厚方向、 x と y 方向のピーニング面に平行な方向とする。材料に外力 F_0 と曲げモーメント M_0 が負荷され、伸びおよび曲げが全く発生しない場合(完全拘束の場合)で発生する x 方向応力 σ_x^* と y 方向応力 σ_y^* を固有応力と呼び、 σ_x^* と σ_y^* も等しくなる。深さ z 位置の固有応力 $\sigma_{(z)}^*$ を式(3)で示す

$$\sigma_{(z)}^* = -\frac{1+\nu}{1-\nu^2} E g_{(z)} \quad (3)$$

ここで、 E はヤング率、 ν はポアソン比である。

x 方向と y 方向の伸びを拘束している力 F_0 と逆向きの力により、式(4)で計算される応力が発生する。 x 方向応力と y 方向応力は等しく、 $\sigma_{F(z)}$ として示す。板厚を h 、板幅を b とする。

$$\sigma_{F(z)} = \frac{\int_0^h \sigma_{(z)}^* b dz}{hb} \quad (4)$$

x 方向と y 方向の曲げを拘束している M_0 と逆向きの曲げモーメント M が発生し、ピーニング面を凸に変形する。 x 方向と y 方向の曲げモーメントも等しく、 M と表記する。

$$M = \int_0^h \sigma_{(z)}^* \left(z - \frac{h}{2}\right) b dz \quad (5)$$

M により、板は x 方向と y 方向に同じ曲率半径 R に曲げられ、球面状に変形し、曲げ応力 $\sigma_{M(z)}$ が発生する。

$$R = \frac{Ebh^3(1+\nu)}{12M(1-\nu^2)} \quad (6)$$

$$\sigma_{M(z)} = \frac{E}{(1-\nu)} \frac{(z-h/2)}{R} \quad (7)$$

以上の式で材料内の x 方向と y 方向の力とモーメントのつり合いが計算され、板厚内に発生する残留応力 $\sigma_{(z)}$ は以下の式で示される。

$$\sigma_{(z)} = \sigma_{(z)}^* + \sigma_{F(z)} + \sigma_{M(z)} \quad (8)$$

本研究ではショットピーニングにおける固有ひずみ分布をガウス分布と仮定して検討した。

$$g_{(z)} = \frac{A}{\sqrt{2\pi}S} \exp\left\{-\frac{(z-B)^2}{2S^2}\right\} \quad (9)$$

ここで、 A は分布の面積を示す係数、 S は標準偏差で分布の広がりを示す係数、 B は平均で固有ひずみの最大位置を示す係数となる。

実験結果の残留応力分布と最小二乗法でフィッティングした応力分布を図5に線で示す。(8)式の係数とショット速度およびショット径の関係は下式で表される⁶⁾。

$$A = (1.793 \times 10^{-6} v^2 + 3.487 \times 10^{-4}) D^{1.467} \quad (10)$$

$$S = (1.778 \times 10^{-5} v^2 + 1.241 \times 10^{-2} v + 4.470 \times 10^{-2}) D^{1.264} \quad (11)$$

$$B = (2.089 \times 10^{-4} v^2) D^{1.828} \quad (12)$$

ここで、ショット速度 v は(1)式で求めた値を用いた。

4.2 予測手法の検証⁶⁾

(1)と(3)~(12)式を用いて残留応力の予測手法を検証するため、実験結果と計算結果の比較を行った。予測式の決定に用いていないショット径が 0.51 mm の#30 ジルコンショットを用いた結果を図 7 に示す。実験結果と予測結果は一致しており、予測手法の妥当性を示せた。

固有ひずみ分布は板厚の影響を受けないため、本手法は板厚が異なる場合の残留応力分布の予測ができることを確認しており、残留応力分布に及ぼす板厚の影響を計算できることが利点である^{6,7)}。また、アルミニウム合金だけでなく、鉄鋼材料にも適用可能であることも確認している^{6,7)}。さらに、実験で求めた残留応力分布ではなく、有限要素法で求めた残留応力分布を用いる方法も検討し、有効性を確認した⁷⁾。

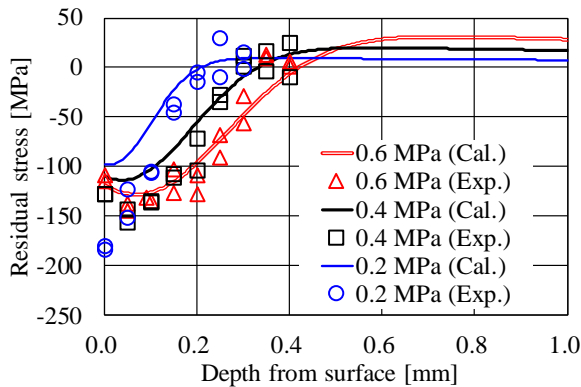


図 7 #30 ショットを用いた場合の残留応力分布の計測結果と予測計算結果⁶⁾

5. ピーン成形の変形制御

ピーン成形において、Kulkarni ら板の形状により、同じピーニング条件でも球面形状から円筒形状に変形モードが変化することを実験で示した⁸⁾。Fauchaux らは数値シミュレーションで板形状により、変形モードが変化することを示した⁹⁾。しかし、変形モードの変化するメカニズムと変形モードが変化する条件は明確になっていない。

本研究ではアルミニウム合金板の形状を変えて、ピーン成形後の形状に及ぼす試験片形状の影響を有限要素法と実験で検討した

5.1 有限要素モデル^{10~12)}

有限要素法(FEM)コードは Marc を使用した。材料はアルミニウム合金 A5052-H34 であり、ヤング率 70 GPa, ポアソン比 0.3, 質量密度 2.7×10^{-6} kg/mm³, 降伏応力 170 MPa で等方材料とした。ショットピーニングによって発生する塑性ひずみを熱ひずみで模擬して弾塑性計算を実施した。有限要素モデルを図 8 に示す。複合材シェル要素を用い、各層(積分点)に塑性ひずみ分布に対応した熱膨張係数を与えた。層の厚さはピーニングした面付近では 0.02 mm, 表面から 0.6 mm より深い領域では 0.10 mm ~ 0.25 mm とした。熱膨張係数の分布は図 9 にプロットで示す空気圧

0.3 MPa 時の塑性ひずみ分をベースとした。x と y 方向に同じ値を入力した。計算ではモデル全体を均一に仮想温度に上昇し、板厚内にひずみ分布を与えた。仮想温度を変えることで、塑性ひずみの量を変えて計算した。図 9 には 1.5 倍と 0.5 倍の例を示す。

板厚 2 mm とし、形状は正方形で 1 辺が 100~400 mm を計算した。板は図 8 の A~E に示す 5 つ領域に分けて、端の領域 A から順に温度を上げていき、最終的に全体を同じ温度になるようにした。計算後に x 方向と y 方向の中心線での変位 z を出力し、誤差の 2 乗和が最小になるように円方程式にフィッティングし、曲率半径(R_x と R_y)を求めた。

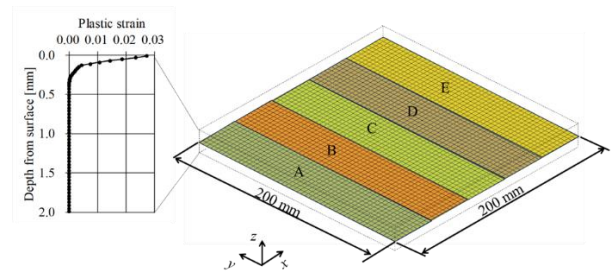


図 8 ピーン成形の有限要素モデル¹²⁾

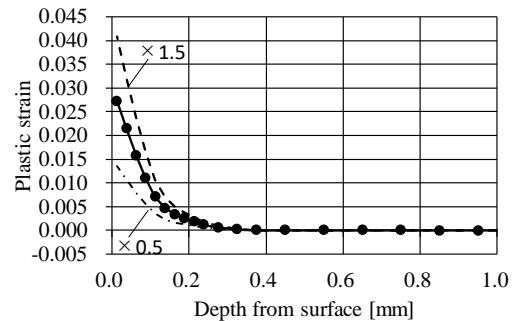


図 9 有限要素モデル入力した塑性ひずみ分布の例¹²⁾

5.2 有限要素法の結果^{10~12)}

図 10 に計算した z 方向変位のコンター図を示す。等方的にひずみを付与したにもかかわらず、変形は球面変形と円筒変形の 2 つのモードが発生した。

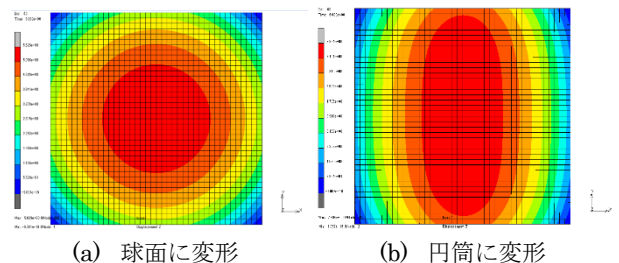


図 10 典型的な変形モード (z 方向変位コンター図)¹¹⁾

板厚 2 mm の FEM の結果を図 11 に示す。x 方向の曲率を $1/R_x$, y 方向の曲率を $1/R_y$ とした。200 mm × 200 mm の場合をみると、入力した塑性ひずみが小さい場合は

$1/R_x$ は小さく、 $1/R_x$ と $1/R_y$ は同じ値で球面に変形する。塑性ひずみを大きくすると $1/R_x$ は増加し、 0.45 m^{-1} 付近で $1/R_x > 1/R_y$ の円筒形状に変形モードが変化する。300 mm×300 mmでも同じ傾向であるが、変形モードが変化する $1/R_x$ は板形状が大きいほど、小さくなる。50 mm×50 mmと100 mm×100 mmでは計算した条件では球面形状で明確に円筒形状に変形モードは変化しない。

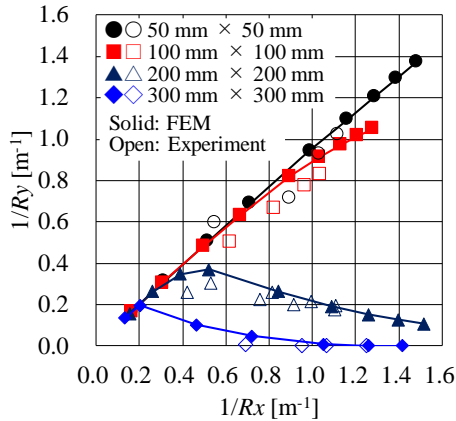
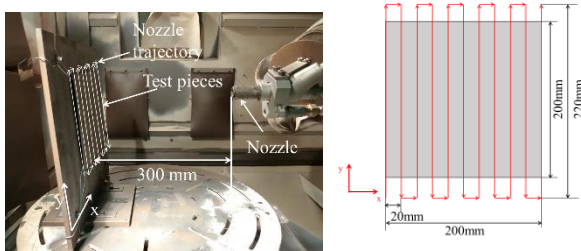


図 11 板厚 2 mm における試験片形状と曲率の関係¹²⁾

5.3 実験方法と結果^{11,12)}

FEMの結果を確認するため、実験を実施した。図12に示す6軸ロボットのショットピーニング装置を使用してピーン成形を行った。試験片はアルミニウム合金 A5052-H34を使用した。4隅を針金で固定し自由に变形できるようにした。ショットは鋼球(平均粒径:0.3 mm)を使用し、空気圧は0.2 MPa~0.5 MPaで行った。施工後にレーザ計測器でx方向、y方向の変位zを計測した。計測後はFEM結果と同様に誤差の2乗和が最小になるように円の方程式に合わせて曲率半径を求めた。



(a) 装置の外観

(b) ノズル軌跡

図 12 ピーン成形の実験装置^{10,11)}

実験結果を図11に示す。同じ形状のプロットで $1/R_x$ が大きいプロットが空気圧の大きい条件である。FEM結果と実験結果はほぼ一致する。200 mm×200 mmと300 mm×300 mmでは $1/R_x$ が $1/R_y$ よりも大きく、円筒形状に近い変形となる。空気圧が増加すると $1/R_x$ は増加し、 $1/R_y$ は減少しており、FEM結果と一致する。50 mm×50 mmと100 mm×100 mmでは $1/R_x$ と $1/R_y$ はほぼ一致して球面上に変形する。以上のように、試験片形状によっ

て球面形状と円筒形状に変形モードが変わることが示された^{11,12)}。

本実験に用いた装置と材料ではノズル軌跡や材料の圧延方向が変形形状に及ぼす影響は非常に小さいことが確認されている¹²⁾。

球面変形では板の端部には板厚中央において圧縮ひずみが発生する。しかし、ピーン成形では材料を伸ばすことはできるが、縮めることができないので、板の端部板厚中央の圧縮ひずみには限界があり、その以上の圧縮ひずみが発生する曲率半径となると円筒変形にシフトすると推定されている¹²⁾。

謝辞

本研究は天田財団 2020 年度一般研究開発助成 AF-2020019-B3 を受けて実施した。残留応力計測では大阪大学接合科学研究所教授、麻寧緒先生にご協力を頂いた。実験において、東海大学大学院工学研究科修士課程の河野直季君、村上尚紀君、He Jiabin 君にご協力を頂いた。

参考文献

- 1) 太田 高裕・八代 充造・池田 誠：グローバルエクスプレス機主翼インテグラルタンクの最新製造技術の開発，三菱重工技報，33-3(1996)，162~165
- 2) Yamada, T., Takahashi, T., Ikeda, M., Sugimoto, S. and Ohta, T.: Development of Shot Peening for Wing Integral Skin for Continental Business Jets, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 39-2(2002), 57-61.
- 3) JIS B2711:2013, "Springs-Shot peening".
- 4) He Jiabin・水島 滉貴・太田 高裕，空気式ショットピーニングにおけるピーニング強度に及ぼすショット径の影響，第72回塑性加工連合講演会論文集(2021)，309-310.
- 5) Ohta, T., He, J., Takahashi, S. and Ma, N.: Measurement and identified prediction equation for residual stress distribution in aluminum alloy A5052 under various pneumatic shot peening conditions. Journal of Materials Engineering and Performance, 33(2024), 693-705.
- 6) 太田高裕・河野直季・麻寧緒：固有ひずみを用いたショットピーニングによる残留応力分布の評価，塑性と加工，64-754(2023)，202-208.
- 7) Ohta, T. and Ma, N.: Analytical prediction of shot peening residual stress distribution using inherent strain in aluminum-magnesium alloy plates under various peening conditions, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 130(2024), 3065-3079.
- 8) Kulkarni, K. M., Schey, J. A. and Badger D. V.: Investigation of shot peening as a forming process for aircraft wing skins, Journal of Applied Metalworking,

- 1 (1981), 34-44.
- 9) Faucheux, P. A., Gosselin, F. P., and Lévesque, M.: Simulating shot peen forming with eigenstrains. *Journal of Materials Processing Technology*, 254 (2018), 135-144.
- 10) 村上尚紀・太田高裕: 試験片形状によるピーン成形形状の変化, 第 73 回塑性加工連合講演会論文集, (2022), 233-234.
- 11) 村上尚紀・木林隼人・窪田紘明・太田高裕: 固有ひずみを用いたピーン成形の数値解析, 2023 年塑性加工学会春季講演会論文集, (2023), 225-226.
- 12) Murakami, T. and Ohta, T.: Effects of peening conditions and sheet geometry on spherical to cylindrical deformation shifts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132(2024), 967-981.