論文

ショットピーニングにおけるひずみ分布の有限要素解析

高橋 孝幸* 山田 毅* 石川 孝司**

Investigation of Plastic Strain Profile after Shot Peening by Finite Element Method

Takayuki TAKAHASHI*, Takeshi YAMADA * and Takashi ISHIKAWA **

(Received on March 5, 2008)

In peen forming, though the amount and depth of plastic strain near the surface introduced by shot impinging are key parameters affecting the deformation of the whole part, they are not well understood theoretically or even in the computer simulation. In this study, the computer simulation of shot impinging by the finite element method (FEM) is performed to obtain fundamental information on plastic strain introduced by shot peening. In the first step, the simulation of shot impinging with both the static implicit and dynamic explicit methods is conducted to verify the precision of the simulation. It is clarified that simulation by the static implicit method can provide sufficiently precise results for the simulation of shot impinging. As results of the simulation using a single shot, it is found that the diameter of the plastic strain area in the material is about two fold larger than that of shot indent on the surface. Also, the simulation using multiple shots shows that the distance of each shot affects the each plastic strain profile at $0.75 R$ or less (R is the shot radius).

Key words: sheet metal forming, shot peening, elastic-plastic FEM, static implicit analysis.

1. 緒言

ピーン成形法は、ショットピーニング処理により材料表面のみに塑性ひずみを導入し、部材に曲率を付与する成形手法であり、特定の成形型なしに任意の形状に成形可能であることから 1960 年代より航空機用アルミニウム合金部品を中心に適用が拡大している。ピーン成形法では試行錯誤的な成形試験により条件設定を行っているのが現状であり、製造コスト低減、品質安定化の観点から有限要素法 (FEM) 等による変形予測手法の確立が切望されていることから、著者らは前報にて FEM による変形予測手法の提案を行ってきた¹⁾。

ショットピーニング処理自体は部材の疲労寿命や耐食性を改善するための表面改質手法として古くから確立された技術であり残留応力分布を予測するための研究は数多くなされている^{2), 3)}。しかしながら、これらの多くは主に鉄鋼材料部品の疲労特性を改善することを主眼におき残留応力分布の理論予測やシミュレーションを実施しているものであり、アルミ合金部品のピーン成形における成形条件最適化において重要となる塑性ひずみ分布やその導入過程について十分な理解が得られていないのが現状である。

そこで本研究は、ピーン成形において最も重要なパラメ

ータである塑性ひずみを主眼におき、有限要素法 (FEM) を用いてショットピーニングにより導入される塑性ひずみ分布及びその導入過程に関する知見を得ることを目的とする。まず始めに、ショット衝突過程の FEM 解析を静的陰解法 (Static Implicit) 及び動的陽解法 (Dynamic Explicit) を用いて行い、Y. F. Al-Obaid らが提唱している応力分布の理論式と比較することで FEM 解析手法の妥当性を検証した。その後、単一ショット及び複数ショットによる衝突解析を行うことにより材料表面近傍に導入される塑性ひずみ分布に関する知見を得ることとした。なお、本研究では、被加工材としてアルミニウム合金を対象とした。

2. ショット衝突の FEM 解析手法の検討

2.1 解析手法の検討

ショットピーニング処理は無数のショットの衝突により材料表面に塑性ひずみが導入されるプロセスであり、個々のショットと材料表面とは明らかに動的な接触過程である。動的な接触では、静的な取り扱い、すなわち応力の釣り合いに加え、応力波及びひずみ速度の影響を考慮する必要がある。

まず応力波については、変形速度の速い場合、接触域から弾性波、続いて塑性波が発生するが、Al-Hassani らが既に指摘している通り⁴⁾、一般的にショットは被加工材に比べ十分に小さくかつ剛性が高いこと、また、応力波の伝播速度はアルミニウムの場合、約 5000~6500m/sec であり、一般的なショット衝突速度 (16~64m/sec) に比べ十分に速く、多くの応力波はショットが材料から解離するよりも速く材料内部を伝播してしまうことから材料内部では慣性力を無視しても十分な精度が得られると考えられる。一方、

* 三菱重工業 (株) 名古屋航空宇宙システム製作所
〒455-8515 名古屋市港区大江町 10 番地
Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Nagoya Aerospace Systems Works
Oye-cho 10, Minato-ku, Nagoya-city 455-8515, Japan.

** 名古屋大学 工学系研究科
〒455-8515 名古屋市千種区不老町
Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-city 464-8601, Japan.

ひずみ速度は材料の機械的特性に影響を与えることが一般に知られているが、坂本らが実験結果を示している通り⁵⁾、アルミニウム合金、特に航空宇宙用部品に多用されている7075 合金では圧縮変形に対するひずみ速度の影響は少ない。

以上のことからショット衝突の解析においては、応力波及びひずみ速度を考慮しない準静的な解析にて十分な精度が得られると予測される。本報では比較のため動的陽解法 (Dynamic Explicit) 及び静的陰解法 (Static Implicit) の2つのFEM解析手法によりショット衝突の解析を実施し、Y. F. Al-Obaid らが提唱する残留応力の理論式による計算結果と比較し、静的陰解法による解析手法の妥当性を検証することとした。

2.2 残留応力分布の理論予測式

ショット衝突により導入される残留応力分布の理論予測式については、既に数多くの研究がなされており、Al-Hassani⁴⁾、Y. F. Al-Obaid²⁾らの論文が詳しい。本報では、ショットにより導入される被加工材表面の変形深さ z 、塑性ひずみ深さ h_p 、残留応力 $\sigma(z)$ の理論予測式として Al-Obaid らが提案した下記の予測式を使用することとした。これらの予測式は、既に多くの論文で引用されており、渡邊らは Al-Obaid の式を基に提案した予測式が実験結果に良く一致することを報告している⁶⁾。

$$\frac{z}{R} = \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho v^2}{p} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\frac{h_p}{R} = 3 \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\rho v^2}{p} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

$$\sigma(z) = \frac{E \varepsilon_m}{1-\nu} \left\{ \frac{12\lambda}{\pi h} (1-\alpha) \left(\frac{h}{2} - z \right) C_1 + \frac{2\lambda}{\pi} (1-\alpha) C_2 - \frac{\varepsilon(z)}{\varepsilon_m} \right\} \quad (3)$$

ただし、

$$\varepsilon_m = \frac{2}{3} \frac{\pi h \delta}{\lambda L^2 (1-\alpha) C_1} \quad (4)$$

$$\varepsilon(z) = \varepsilon_m \cos \pi \left[\frac{z - \alpha h_p}{2(1-\alpha)h_p} \right] \quad (5)$$

$$C_1 = C_2 - 2\lambda + \frac{4\lambda}{\pi} (1-\alpha) \cos \frac{\pi \alpha}{2(1-\alpha)} \quad (6)$$

$$C_2 = 1 + \sin \frac{\pi \alpha}{2(1-\alpha)} \quad (7)$$

ここで、 R :ショット半径、 ρ :ショット密度、 v :ショット速度、 p :衝突時の平均圧力、 E :ヤング率、 h :材料板厚、 h_p :塑性域深さ、 α : h_p に対し最大残留応力が発生する深さ比率、 λ : h_p/h 、 δ :被加工材のアーキハイト、 L :被加工材の長さ、とした。

2.3 FEM 解析方法

FEM 解析には、汎用有限要素解析ソフトである MARC (静的陰解法) 及び LS-DYNA (動的陽解法) の2種類を使用し、応力分布の計算結果を2.2項の理論予測式による計算結果と比較することとした。

ショットは $R=1.18\text{mm}$ の剛体として定義し、被加工材は

8 節点ソリッド要素にて対称境界条件を用いた 1/4 モデルとして作成した。解析モデルを Fig.1 に示す。 $x=7.5$ 、 $z=0$ における節点のみ z 方向変位を拘束し、現実の変形を再現できるようにした。また、解析モデルの大きさは $x=7.5\text{mm}$ 、 $y=7.5\text{mm}$ 、 $z=5.1\text{mm}$ とし、ショットサイズに対し十分な大きさをもたせた。解析はショット速度 32m/sec 及び 64m/sec とし、静的陰解法では押し込み量を制御することで投射条件を模擬した。なお、被加工材はアルミニウム合金 7075-T6 とし、材料特性としてヤング率 $E=74430\text{MPa}$ 、耐力 $F_{ty}=578\text{MPa}$ を使用した。また、摩擦による温度上昇の効果は微小であるため無視した。

Fig. 1 FEM simulation model for shot impact analysis

2.4 解析結果

理論予測式による残留応力の算出には、前報¹⁾にて実施した実験データを使用し、 $R=1.18\text{mm}$ 、 $h=5.1\text{mm}$ 、 $v=32\text{m/sec}$ のとき $\delta=10.5\text{mm}$ 、 $v=64\text{m/sec}$ のとき $\delta=26.0\text{mm}$ 、 $L=400\text{mm}$ としヤング率、耐力等の材料特性は前述のFEM解析使用データと同一とした。また、 α については、ショット条件により変化することが知られているが、一般的には0.15-0.35の範囲であることから⁶⁾、本研究では $\alpha=0.25$ として計算した。

$v=32\text{m/sec}$ 及び 64m/sec におけるショット衝突後の圧痕直径及び深さの実験値¹⁾及びFEM解析結果を Table1 に示す。静的陰解法、動的陽解法ともに前報¹⁾で実施した実験値に良い一致を示しているが、静的陰解法による解析結果の方が実験値にやや近い。また、残留応力分布計算結果を Fig.2 に示す。なお、FEM解析結果では応力の x 方向成分を示している。全ての解析結果は表面から0.25-0.35mm付近にて最大の圧縮応力を示したのち、表面からの距離が深くなるにつれ0に近づくという、ショットピーニング後の応力分布として一般的に良く知られた分布であり、定性的には同様の傾向を示している。しかしながら、最大圧縮応力値については $v=32\text{m/sec}$ 、 64m/sec ともに静的陰解法による計算結果の方が理論予測値に近く、動的陽解法では理論値の1.6-2.3倍程度の大きな値を示している。一方、残留応力が最大値をとった後にゼロとなる表面からの深さは動的陽解法の方が理論値にやや近い。

以上の解析結果の比較より、静的陰解法によるFEM解析にて実験結果及び理論予測式に十分近い圧痕形状や残留応力分布が得られていることが明らかとなり、ショット衝突のFEM解析手法としては静的陰解法にて十分な精度が得られることを確認した。

Table 1 Measurement results of indentation geometry

Shot Velocity		Diameter /mm	Depth /mm
32m/sec	Test result	0.74	0.052
	FEM(implicit)	0.67	0.048
	FEM(explicit)	0.80	0.061
64m/sec	Test result	0.97	0.108
	FEM(implicit)	0.99	0.109
	FEM(explicit)	1.06	0.118

(a) $v = 32 \text{ m/sec}$ (b) $v = 64 \text{ m/sec}$ **Fig. 2** Residual stress profile through thickness

3. 単一ショットによる塑性ひずみ分布の解析

3.1 解析方法

ショット衝突により導入される圧痕直下の塑性ひずみ分布に関する知見を得るため、単一ショット衝突のFEM解析を実施した。解析モデル及び解析手法は2項と同様とし、FEM解析には静的陰解法(MARC)を用いた。ショット速度 v は16m/sec, 32m/sec, 64m/secの3種類とした。

3.2 解析結果及び考察

$v=32\text{m/sec}$ 及び 64m/sec におけるショット衝突後の相当塑性ひずみ分布コンター図をFig.3に示す。圧痕直下には、ほぼ球状に塑性ひずみ域が分布しており、ショット速度の増加とともに塑性ひずみ域も拡大していることが分かる。また、塑性ひずみ域は圧痕直径以上の領域に広がっている。相当塑性ひずみがゼロとなる表面からの深さを塑性域深さと定義し、ショット速度と塑性域深さとの関係をプロットしたグラフをFig.4に示す。また、本グラフに前項(2)式から計算した塑性域深さの理論値を併記する。

(a) $v=32\text{m/sec}$ (b) $v=64\text{m/sec}$ **Fig. 3** Equivalent plastic strain contour

FEM解析結果は理論予測結果とほぼ良い一致を示しており、(2)式から分かるように塑性域深さ h_p はショット速度 v の1/2乗に比例して増加する。ピーン成形において片面のみをショットし曲率を付与する場合、近藤らの報告⁷⁾にあるようにショット速度の大小により凸面に成形されるか凹面に成形されるかが決まるが、本質的にはショット衝突により導入される塑性域深さが被加工材の中立軸を越えるかどうか依存すると考えられる。ただし、ショット速度 $v=64\text{m/sec}$ においても塑性域深さは部材板厚5.1mmに対して1.2mm程度である($R=1.18\text{mm}$ の場合)。中立軸を越えて塑性ひずみを導入するにはショット速度を相当に高める必要があるが、被加工材の表面品質に問題が起こり得ること、また塑性域深さはショット速度の1/2乗に比例しており、高ショット速度領域では塑性域深さの増加は飽和してくることから、特殊な例を除いては工業的にショット面に対して凹面に成形することは困難であると考えられる。

圧痕直下における深さ方向に対する相当塑性ひずみ分布をFig.5に示す。表面近傍の相当塑性ひずみ量は $v=16\text{m/sec}$ では5.7%であるのに対し、 $v=32\text{m/sec}$ では10.4%と約1.8倍、 $v=64\text{m/sec}$ では27.8%と約4.8倍となり、指数関数的に増加している。一方、塑性域深さは前述のようにショット速度の1/2乗に比例することから、ショット速度が速くなるに従い、深さ方向への塑性ひずみの増加よりも表面近傍での面内方向(x 方向又は y 方向)への塑性ひずみ量の増加の方が著しくなる傾向が明らかとなった。

また、圧痕近傍の深さ方向の変形量及び相当塑性ひずみの面内方向(x 方向)分布をFig.6に示す。Fig.3のコンター図からも分かる通り、塑性ひずみは被加工材内部において圧痕直径以上の領域に広がっている。塑性ひずみ領域/圧痕直径の比率は $v=16\text{m/sec}$ では2.0、 $v=32\text{m/sec}$ では1.8、 $v=64\text{m/sec}$ では2.1となっており、塑性ひずみ領域はショット速度によらず圧痕直径の約2倍の領域まで広がっていることが分かる。すなわち、塑性ひずみ領域とショット圧痕の面積比は約4:1であり、これは塑性ひずみ領域のカバレッジが100%のとき、ショット圧痕のカバレッジ(目視により確認できる一般的な定義での“カバレッジ”)は25であることを意味する。言い換えると、カバレッジ25%の時点で既に塑性ひずみ領域は被加工材全面に達していると考えられる。被加工材のショットピーニングによる変形をカバレッジの観点から考えると、 $R=1.18\text{mm}$ の場合、カバレッジ25%程度まではカバレッジの増加とともに表面の塑性ひずみが増加し変形が進行するが、カバレッジ25%を越えると表面の塑性ひずみ増加量が飽和してくること、

また材料の加工硬化の影響も無視できなくなることから変形の増加は鈍くなると推測される。

Fig. 4 Depth of plastic deformation zone

Fig. 5 Equivalent plastic strain profile through thickness

Fig. 6 Deformation and Equivalent plastic strain profile

4. 複数ショットによる塑性ひずみ分布の解析

前項の解析により単一ショットにて導入される塑性ひずみ分布が明らかとなったが、現実のショットピーニングでは隣接して投射されたショット同士の影響が無視できなくなる。ここでは4つのショットによる衝突解析を実施し、塑性ひずみ分布に及ぼす影響について調べた。

4.1 解析方法

複数ショットが塑性ひずみ分布に及ぼす影響を調べるため、4個のショットによる衝突解析を実施した。モデル及び解析方法は2項と同様とし、それぞれのショット同士の距離 D は $D=0.25R$, $0.5R$, $0.75R$ (ただし R はショット半径: 1.18mm) の3通りとした。Fig.7に4ショット衝突の模式図(上面図)を示す。4個のショットがFig.7に示す順番で $v=32\text{m/sec}$ にて衝突することとした。

Fig. 7 Sequence of 4 shots impinging

4.2 解析結果及び考察

$D=0.75R$ における各ショット衝突後の相当塑性ひずみコンターの变化をFig.8に示す。Fig.7の順番に従い、個々のショット衝突により塑性ひずみが導入されている。また、3項にて明らかになったように個々の塑性ひずみ領域は圧痕直径以上に広がることから $D=0.75R$ においても塑性ひずみ領域は各境界部において融合している様子が分かる。

ショット間距離が塑性ひずみ分布に及ぼす影響を明らかにするため、第2ショット衝突後における x 軸方向に対する表面の相当塑性ひずみ分布をFig.9に示す。ショット間距離 D が近づくにつれ、互いの塑性ひずみ領域の境界(塑性ひずみの谷間)が小さくなり、 $D=0.25R$ では谷間がなく、ほぼ連続的な塑性ひずみ分布を示すようになる。第2ショット圧痕部表面の最大塑性ひずみ量は $D=0.25R$ では12.9%であり、第1ショットの最大塑性ひずみ量11.4%よりも1.5%高く、同様に $D=0.5R$ の第2ショット最大塑性ひずみ量は14.7%であり、第1ショットよりも3.3%高い値を示している。これは互いのショットにより導入される塑性ひずみが重ね合わされることにより単一ショットよりも高い塑性ひずみが得られたためと考えられる。ただし、その量は、材料の加工硬化や圧痕近傍の塑性流動の影響により単純な代数和にはなっていない。 $D=0.75R$ では第2ショットの最大塑性ひずみ量は第1ショットとほぼ同等であり、 D が0.75R以上離れると、互いの最大塑性ひずみ量には影響を与えなくなる。

次に第4ショット衝突後の x 軸方向に対する相当塑性ひずみ分布をFig.10に示す。第4ショット衝突後の第2ショット圧痕近傍の最大塑性ひずみは、ショット間距離によらず一定となっており、単一ショットでの最大塑性ひずみに、ほぼ一致する。前項の解析結果を考慮すると $D=0.25R$, $D=0.5R$ の条件では第3、第4ショット衝突により、最大塑性ひずみが見かけ上、減少したことになる。また、第1ショット直下の塑性ひずみは $D=0.75R$ では、第4ショット衝突後も第1ショット衝突直後の塑性ひずみが維持されているが、 $D=0.25R$, $0.5R$ では約1/2に減少している。これらは

ショット間距離が近くなるにつれ、周囲のショット衝突による塑性流動の影響を大きく受けるためと考えられる。

Fig. 8 Equivalent plastic strain contour

Fig. 9 Equivalent plastic strain profile after 2nd shot indent

Fig. 10 Equivalent plastic strain profile after 4th shot indent

Fig.11 に $D = 0.5R$ における圧痕近傍の深さ方向への変形量の変化を示す。第1ショットの圧痕が周囲のショット衝

突による塑性流動の影響を受け、圧痕直径、深さともに減少していく様子が分かる。

Fig. 11 Deformation through thickness after each indent

5. 結 言

アルミニウム合金を被加工材として実施した本研究の成果を以下にまとめる。

- (1) ショット衝突の FEM 解析を静的陰解法及び動的陽解法の 2 種の解法により実施し、理論予測式との比較を行った結果、静的陰解法による FEM 解析にて十分な解析精度が得られることが明らかとなった。
- (2) 単一ショット衝突の FEM 解析を実施した結果、被加工材内部の塑性ひずみ領域はショット圧痕直径を越えて生成されており、ショット投射速度に依らず、圧痕直径の約 2 倍であることが明らかとなった。
- (3) 単一ショットにより導入される塑性ひずみの深さは、ショット投射速度の 1/2 乗に比例する一方、表面近傍の面内方向への塑性ひずみ量はショット速度の増加とともに指数関数的に増加することが分かった。
- (4) 4 個のショットによる衝突の FEM 解析を実施した結果、ショット同士の距離が $0.75R$ 以上離れると互いの塑性ひずみ分布に影響を与えないが、 $0.75R$ 未満では塑性ひずみの重ね合わせや塑性流動によるひずみの緩和が起こることが明らかとなった。

なお、本研究を実施するにあたり、動的陽解法による解析に協力頂いた名古屋市工業研究所 西脇武志氏に深く謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 高橋孝幸・山田毅・石川孝司：塑性と加工, **48**-553(2007), 120-124.
- 2) Al-Obaid, Y.F. : Journal of Applied Mechanics, **57**-June (1990), 307-312.
- 3) Kopp, R. & Wustefeld, F. : Proceedings of ICSP-4, (1990), 561-572.
- 4) Al-Hassani, S.T.S. : SAE paper, 821452 (1982).
- 5) 中川紀壽・関口泰久・加藤隆一・坂本淳一郎：材料, **45**-10(1996), 1145-1150.
- 6) 渡邊吉弘・長谷川典彦・松村義和：同上, **44**-496(1995), 1100-1115.
- 7) 近藤一義：塑性と加工, **42**-489(2001), 1008-1013.