論文

ショットピーニングにおける単衝突後の表面残留応力の検討

太田 高裕*

Investigation of Residual Stress at Surface after Single Impact of Shot Peening

Takahiro OHTA*

(Received on September 4, 2015)

In order to clarify the mechanisms behind the creation of tensile residual stress at the center surface of a shot indentation after a single impact of a large shot, the effects of shot velocity and shot mass on stress distributions are analyzed by the dynamic explicit finite element method. Tensile residual stress at the center surface and the compressive residual stress depth decrease with decreasing shot velocity under the same mass conditions. The compressive residual stress depth remains constant, but tensile residual stress at the center surface decreases with decreasing shot velocity under the same kinetic energy and the same radius of curvature conditions. Tensile residual stress at the center surface is produced by different springback between surface and the inside of the material. It becomes clear that the ratio of surface strain to interior peak strain is related to tensile residual stress at the center surface.

Key words: Finishing, Sheet metal forming, Shot peening, Residual stress, Elastic-plastic FEM.

1. 緒言

ショットピーニングは鋼球を金属表面に打ち付けることで、金属表面に圧縮残留応力を導入する技術である。簡便に疲労強度を向上することができるため、自動車産業や航空機産業で幅広く採用されている。ショットピーニングにおける圧縮残留応力の発生機構については、小林ら¹⁾は実験で、Al-Obaid²⁾、小川ら³⁾、Hillsら⁴⁾は理論解析で、Koppら⁵⁾、Zang⁶⁾、森ら⁷⁾、高橋ら⁸⁾、Swarzerら⁹⁾、Manoucherifarら¹⁰⁾は有限要素法と実験を用いた研究などが行われてきた。1回の衝突では表面に大きな圧縮応力は生じず、複数回の衝突により、表面の広い範囲が圧縮応力となる過程が小林ら¹⁾、高橋ら⁸⁾、Swarzerら⁹⁾によって解析されている。

ショットピーニングは金属表面に圧縮残留応力を与えるだけでなく、成形にも採用されている。航空機の主翼外板は大型で複雑な形状をしているため、プレスでは成形が困難であり、ショットピーン成形の適用がKoppら⁵⁾、山田ら¹¹⁾、Clausenら¹²⁾から報告されている。ショットピーン成形は数mmのショットを外板表面に衝突させ、ごく表面を伸ばすことにより、金属を曲げる手法である。主翼外板はストリングと一体となった形状の採用が進んでおり¹¹⁾、成形するためには、表面に大きなひずみを加える必要があり、Clausenらはショットの大径化を指向している¹²⁾。ま

た、近年では超音波を利用した超音波ピーニングが開発されており、ピンを用いた超音波ピーニングが可能であることを野瀬が解説している¹³⁾。ピンを用いた場合、球と異なり、接触面の曲率半径と質量の関係が一義的に決まらないため、パラメータが増加する。しかし、従来の研究では球を仮定しており、接触面の曲率半径と質量を分離した検討は見られない。

単衝突の実験および解析も多数行われており、小林らは $\phi 50\text{mm}$ のショットを用いた実験で1回の衝突では圧痕中心部に引張残留応力が生じ、静的な荷重では引張残留応力が生じないことを示している¹⁾。Koppらは $\phi 6\text{mm}$ のショットを用いたFEM解析により、1回の衝突では圧痕中心部に引張残留応力が生じ、衝突速度が低速になると引張残留応力が低下することを示している⁵⁾。Zangはショット径を変えたFEM解析を行い、ショット径が 2mm よりも大きくなると1回の衝突では圧痕中心部に引張残留応力が生じることを示している⁶⁾。以上のように、ショット径が大きくなると、単衝突では圧痕中心部の表面に引張残留応力が発生することが報告されているが、そのメカニズムは必ずしも明確になっていない。

そこで、本研究ではショットピーン成形に大径ショットやピンの適用を考慮して、接触部の曲率半径を 25mm 一定として、単衝突時の衝突速度と質量が圧痕表面の残留応力の及ぼす影響を数値解析で検討し、表面の残留応力の発生機構と残留応力分布の支配パラメータを明確にすることを目的とする。

* 東海大学工学部動力機械工学科 〒259-1292 平塚市北金目 4-1-1
School of engineering, Tokai university,
4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan.

2. 解析方法

ショットピーニングは無数のショットが金属表面に衝突して、塑性ひずみ分布を形成する加工である。ショットの速度は一般に数十 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ であり、ショットと金属の衝突は動的な挙動である。一方、炭素鋼中の応力波の伝搬速度は約 $5000\sim 6000\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ であり、ショットの衝突速度に比べて速い。しかし、先に述べたように小林らの実験結果では動的実験と静的実験で表面の残留応力に差が生じている⁹⁾。また、高橋らは動的な解析（解析コード：LS-Dyna）と静的な解析（解析コード：Marc）において、残留応力分布に差異が生じることを示した⁸⁾。ショットピーニングは本来動的な挙動であるため、本研究では動的な解析手法を採用し、実際のショットピーニングに使用される速度 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ から、静的な挙動に近い $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ までの衝突速度におけるショット衝突後の残留応力分布について検討した。用いた解析コードは動的陽解法の ABAQUS Explicit(Ver.6.8)である。使用した要素は軸対称 4 節点 4 辺形の低減積分要素である。本研究ではショット単体での衝突について詳細を検討するため、軸対称で解析を実施した。

動的な解析では、ショットの衝突速度を変化させると、発生する荷重が変化するため、発生する塑性ひずみ分布も大きく変化する。ショットの速度を変化させても、発生する荷重を一定とするため、本研究では運動エネルギー $U=mv^2/2$ (m ：質量， v ：衝突速度)を一定とする方法で解析を実施した。すなわち、衝突速度を n 倍すれば、質量を $1/n^2$ 倍とした。解析条件を Table 1 に示す。Case 8 の解析モデルの例を Fig. 1 に示すが、金属と接触する面の曲率半径 R を一定として、ショットの体積を増減することで質量を調整した。なお、衝突速度の影響を確認するため、質量一定での解析も実施した。金属と接触する部分の曲率半径 R は 25mm で一定とした。ショットとベースは鋼製で弾性体（ヤング率 E ： 210GPa ，ポアソン比： 0.33 ，密度 ρ ： $7.8\times 10^3\text{kg/m}^3$ ）とした。試験体は小林らの実験結果⁹⁾（炭素鋼：S40C）を参考に 2 直線近似弾塑性体（ヤング率 E ： 210GPa ，ポアソン比： 0.33 ，密度 ρ ： $7.8\times 10^3\text{kg/m}^3$ ，耐力： 345MPa ，硬化係数 S ： 780MPa ）とした。ショット単衝突時の温度上昇は Rouquette らによって、 100°C 程度であると推定されている¹⁴⁾。試験体は炭素鋼であり、室温から 100°C での変形抵抗のひずみ速度および温度依存性は小さいため、本研究では考慮していない。試験体の板厚は 50mm ，外径は 150mm

とした。ショットの速度は初速度として与え、重力の影響は考慮していない。ショットと試験体の間の摩擦はクーロン摩擦とし、摩擦係数 μ は 0.3 とした。Manoucherifar らはショットと試験体間の摩擦係数 μ は $0.1\sim 0.8$ の間で残留応力分布に影響を与えないことが示している¹⁰⁾。本モデルにおいても摩擦係数 μ が 0.1 と 0.3 で差がないことを確認した。

Fig. 1 An instance of analysis model (Case 8)

3. 解析結果

3.1 衝突速度の影響（質量一定の場合）

解析結果の妥当性を確認するため、小林らの実験結果と比較を行った。小林らの実験は直径 50mm の鋼球を用い、圧痕の近傍の残留応力を調査したもので、高さ 2m から落下させた動的実験では表面に引張残留応力が発生し、静的実験では表面に大きな引張残留応力が発生しないことを示している⁹⁾。そこで、速度を $6.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ として、衝突の解析を行った。解析結果と小林らの実験結果の比較を Table 2 に示す。圧痕の大きさと深さは解析結果では動的実験結果よりもやや大きい、ほぼ一致した。また、圧痕の中心部分では半径方向応力および周方向応力は大きな引張応力が残留しており、この結果は解析結果と一致する。解析により動的実験結果をほぼ模擬できていることを確認した。

質量を一定として、衝突速度を変化させた場合(Case 1～4)の解析結果を Fig. 2, Fig. 3 に示す。板厚は 50mm であるが、残留応力分布を明確にするため、横軸は表面から深さ 20mm の範囲で表示している。Fig. 2 には中心軸上での板厚内の残留応力分布を示す。衝突速度 $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では表面近傍の要素を細分して、解析を行った。衝突速度が大きくなると、板厚内に導入される圧縮残留応力の領域が深くなると共に、圧縮残留応力の最大値も大きくなる傾向にある。一方、衝突速度 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では表面の残留応力は引張応力である。衝突速度が遅くなると表面の応力は低下し、衝突速度 $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では表面は圧縮応力となる。

以上の結果は半径方向応力と周方向応力ではほぼ同じ傾向である。衝突速度が増加すると、板厚内の圧縮残留応力の領域が増加することは多くの報告があるが、表面に大きな

Table 1 Analysis conditions

Case	R / mm	m / kg	$v / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	U / J
1	25	5.1×10^{-1}	20	$1.0\times 10^{+2}$
2	25	5.1×10^{-1}	5	6.4
3	25	5.1×10^{-1}	2	1.0
4	25	5.1×10^{-1}	0.5	6.4×10^{-2}
5	25	3.2×10^{-2}	20	6.4
6	25	5.1×10^{-1}	5	6.4
7	25	3.2	2	6.4
8	25	$5.1\times 10^{+1}$	0.5	6.4

(Note) R : tip radius of shot, m : mass of shot, v : velocity of shot, U : kinetic energy of shot (see Fig. 1)

Table 2 Comparison between analytical results and experimental ones by Kobayashi et al¹⁾

Results	Shot indentation		Residual stress on center of surface	
	Dia. /mm	Depth /mm	Radial /MPa	Hoop /MPa
Experimental (Dynamic) ¹⁾	7.0	0.180	250	200
Experimental (Static) ¹⁾	7.0	0.195	0	0
Analysis ($v=6.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	7.6	0.27	215	235

Fig. 2 Residual stress distribution along center line under the constant mass condition

引張応力が発生する報告は小林らの報告¹⁾や Kopp⁵⁾らの報告⁵⁾, Zang⁶⁾のショット径を変化させた報告⁶⁾などがある。また、速度が遅くなると表面の引張残留応力が低下する傾向は Table 2 に示した小林らの報告¹⁾や Kopp⁵⁾らの報告⁵⁾と一致する。

Fig. 3 には中心軸上での板厚内でひずみ分布を示す。ひずみは表面では小さく、板厚内で最大値を示す。最大値は衝突速度の増加とともに、深い位置に移動し、最大値も大きくなる。一方、表面のひずみ量は衝突速度とともに増加しているが、ピークほどの差は見られず、ピークと表面のひずみ量の差が衝突速度と共に増加している。

3.2 衝突速度の影響 (運動エネルギー一定の場合)

次に、運動エネルギーを一定にして、衝突速度の影響を解析で検討した(Case 5~8)。基本ケースを衝突速度 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ とし、衝突速度を n 倍すれば、質量を $1/n^2$ 倍とした。質量を増加させるために、Fig. 1 に示したように、ショットの

曲率半径を 25mm 一定として、上部の円柱形状を変化させた。

Fig. 4 には中心軸上での板厚内の残留応力分布の解析結果を示す。Fig. 2 に示したように、半径方向応力と周方向応力で同じ傾向であり、ここでは半径方向応力のみを示した。運動エネルギーを一定とした場合、衝突速度が変化しても板厚内に導入される圧縮残留応力の領域はほぼ一定である。一方、表面の残留応力は衝突速度 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では差が小さく、引張残留応力である。しかし、衝突速度 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では表面の応力は低下しており、 $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では圧縮残留応力となる。

Fig. 5 には中心軸上での板厚内のひずみ分布を示す。Fig. 3 に示したように、半径方向と周方向でひずみは同じ傾向であり、ここでは半径方向ひずみのみを示した。ひずみが残留している深さは衝突速度 $20\sim 0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ で一定で、約 10mm である。 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ではひずみの分布はほぼ一

Fig. 3 Strain distribution along center line under the constant mass condition **Fig. 4** Residual radial stress distribution along center line under the constant kinetic energy condition

致している。一方、衝突速度 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では、表面のひずみは大きくなる傾向にあり、ひずみのピーク位置も表面側にシフトする傾向にある。 $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では、ピークのひずみがわずかに増加するが、表面のひずみも大きく増加し、表面とピークとの差は小さくなる。

Fig. 6 には表面の残留応力分布を示す。図中には圧痕の大きさも示している。試験体は半径 75mm であるが、中心から 20mm の範囲を拡大して表示している。半径方向応力についてみると、衝突速度 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では、圧痕中心部付近が引張応力で、中心から 2mm から圧縮応力となり、 6mm 付近で最も大きな圧縮応力となった後、 0MPa に収束している。衝突速度 $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では圧痕の中心部付近も圧縮応力である。圧縮応力が最も大きくなる位置は 6mm 付近で $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ と同じ位置である。周方向応力についてみると、衝突速度 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では、圧痕中心部付近が引張応力となった後、 0MPa に収束している。衝突速度 $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では圧痕の中心部付近も圧縮応力であり、 4mm 付近から引張応

Fig. 5 Radial strain distribution along center line under the constant kinetic energy condition

(a) Radial stress

(b) Hoop stress

Fig. 6 Stress distribution on the surface under the constant kinetic energy condition

力となり、その後 0MPa に収束している。 4mm 付近から遠い領域では応力に差はあるが、 $0.5\sim 20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では同じ傾向である。

Fig. 7 には表面のひずみ分布を示す。半径方向ひずみを見ると、衝突速度 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では中心のひずみは約 0.6% の引張であり、中心から約 2mm の位置でピークとなり、減少する。中心から 4mm 付近から圧縮ひずみとなり、 0 に収束する。衝突速度 $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では中心の引張ひずみが約 1.7% と最も大きく、その後、引張ひずみは減少する。中心から 4mm 付近から圧縮ひずみとなり、 0 に収束する。 4mm 付近から遠い位置では衝突速度による差異は見られない。

周方向ひずみを見ると、衝突速度 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では中心のひずみは約 0.5% の引張であり、中心から約 3mm の位置でピークとなり、減少する。すべての領域で引張ひずみである。衝突速度 $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では中心の引張ひずみが約 0.8% で、中心から約 3mm の位置でピークとなり、減少する。 4mm 付近から遠い位置では衝突速度による差異は見られない。

4. 考 察

Fig. 2 と Fig. 4 に示したように、衝突速度が $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では圧痕中心表面に引張残留応力が生じる。Fig. 8 に衝突速度と圧痕中心表面の残留応力およびひずみの関係を示す。図に示すように、運動エネルギーが変わった場合 (質量一定) においても、運動エネルギーが一定 (質量変化) の場合においても、衝突速度が遅くなると、表面の応力は低下し、衝突速度 $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では圧縮応力となる。表面のひずみは質量一定の場合は、衝突速度が増加するとひずみが増加する傾向にあるが、 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ の差は小さい。

(a) Radial strain

(b) Hoop strain

Fig. 7 Strain distribution on the surface under the constant kinetic energy condition

Fig. 8 Effect of velocity on residual stress and strain at the surface of the center of indentation

一方、運動エネルギー一定の場合は、衝突速度が増加するとひずみが低下する傾向にあるが、 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ での差は小さい。このように、表面の残留応力は衝突速度の影響を強く受けるので、その機構を考察した。

表面の引張残留応力発生メカニズムを考えるため、衝突速度 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ のモデルで、表面の要素と圧縮残留応力が最も大きかった要素（深さ 2.7mm ）について、半径方向ひずみと半径方向応力の関係を Fig. 9 に示す。表面ではショット衝突時に約 -800MPa の大きな圧縮応力が発生するが、拘束が大きいため、塑性ひずみは少ない。除荷時に引張弾性ひずみが発生して残留応力は約 200MPa の引張応力となる。表面から深さ 2.7mm の位置では初期にわずかに引張応力が発生し、その後は小さな圧縮応力で塑性ひずみが導入され、最終的には約 2.4% に達する。除荷時にはわずかに圧縮弾性ひずみが発生するが、約 -500MPa の圧縮応力が残留する。板厚内部では衝突時に発生した大きな引張ひずみが除荷時にスプリングバックし、圧縮弾性ひずみが発生する。一方、表面では内部よりも発生する引張ひずみが小さいため、内部とのバランスで引張の弾性ひずみが発生して、除荷時に引張応力に転換されることがわかった。すなわち、内部のピークひずみと表面の引張ひずみの差が大きい場合に表面に引張残留応力が生じると考えられる。

Fig. 8 に示したように、衝突速度が遅くなると、表面のひずみは大きくなる。この現象はショットが接触している表面での変形の違いであると考えられる。また、Fig. 7 に示したように、表面でのひずみ分布は衝突速度が遅い場合に圧痕内で均一化する傾向にある。そこで、衝突速度 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ について、ショットの変位と表面で発生するひずみの関係を調べた。半径方向ひずみの結果を Fig. 10 に示

Fig. 9 Relation between radial stress and radial strain (Case 6 : $v=5.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig. 10 Radial strain histories at the surface under the constant kinetic energy condition (x is distance from center line)

す。図中の x は中心軸からの距離である。初期にショットと試験体の間に 0.2mm の隙間を設けていたので、 -0.2mm の変位から接触が始まる。中心 ($x=0\text{mm}$) に注目すると、 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では初期に 0.3% 程度の引張ひずみが発生した後、増加量は低下し、最終的に約 0.5% の引張ひずみとなる。一方、 $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では初期に引張ひずみは発生し、その後も引張ひずみは増加を続け、最終的に約 1.5% となる。衝突速度 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ではショットの変位とともに、中心から 1.2mm 、 1.9mm の位置に急激に引張ひずみが発生するが、ひずみの増加は接触後の短時間でほぼ停止する。すなわち、ショットと接触を始めた位置にひずみの発生が集中する傾向にある。衝突速度 $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ でもショットの変位とともに、中心から 1.2mm 、 1.9mm の位置に引張ひずみが発生するが、ひずみの増加は緩やかであり、長い期間でひずみが増加を続けており、中心部と圧痕内（図中では $x=2.7\text{mm}$ 以下）では発生するひずみの大きさに差は小さい。圧痕から離れた位置 ($x=4.6\text{mm}$

と 7.0mm) では初期から圧縮ひずみが発生しており, 衝突速度 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ の差は少ない。

弾性波の速度は $\sqrt{E/\rho}$ (ヤング率: E , 密度: ρ) である。本研究の解析条件では弾性波の速度は $5.2\times 10^3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ である。 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ でのショットと試験体の接触時間は $8.6\times 10^{-5}\text{s}$ であり, $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ でのショットと試験体の接触時間は $8.7\times 10^{-4}\text{s}$ で, 約 10 倍異なる。衝突速度 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ において, 衝突時の弾性波の伝播距離は約 0.44m であり, 変形領域 (約 10mm) に比べて十分に長い。一方, 塑性波の速度は $\sqrt{S/\rho}$ (硬化係数: S) である¹⁵⁾。本研究の解析条件では塑性波の速度は $3.2\times 10^2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ である。衝突速度 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ において, 衝突時の塑性波の伝播距離は約 0.02m であり, 変形領域の 2 倍程度である。塑性域に入ると, 応力波の速度が遅くなり, 大径ショットで変形領域が大きいと, 衝突速度が速い場合では塑性変形が表面では接触部に限定されたと考えられる。

Fig. 5 に示したように, 衝突速度が遅くなると, 表面のひずみは大きくなるが, 材料内部の最大ひずみは変化が小さい。Fig. 11 には表面の半径方向ひずみの内部の最大ひずみに対する比率と表面の半径方向残留応力の関係を示した。図中には Fig. 2, Fig. 3 (質量一定: 運動エネルギー変化) と Fig. 4, Fig. 5 (運動エネルギー一定) のデータを合わせてプロットしている。内部の最大ひずみに対する表面のひずみの比率が大きくなると表面の残留応力は低下し, 約 0.4 よりも大きくなると表面の残留応力が圧縮応力となる。この傾向は運動エネルギーを一定にした条件でも, 質量を一定にした条件でも同じ傾向である。

本研究では接触部の曲率半径を 25mm で一定として, 表面の残留応力について検討した。ショット径の異なる Kopp⁵⁾ や Zang⁶⁾ の解析結果と本研究の結果は傾向は同じであり, Fig. 9 と Fig. 11 に示した表面の引張残留応力の発生機構はショット径が異なっても同じであると考えられる。

Fig. 11 Relation between ratio of surface strain to interior peak strain and residual stress at the surface of the center of indentation

5. 結 言

ショットピーン成形に大径ショットやピンの適用を考慮して, 接触部の曲率半径を 25mm で一定として, 単衝突時

の衝突速度と質量が圧痕表面の残留応力の及ぼす影響を動的有限要素法解析で検討した結果, 以下の結論を得た。

- (1) 質量が一定の条件では, 衝突速度が速くなると, 板厚内に導入される圧縮残留応力の領域が深くなる。衝突速度 $2\sim 20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では圧痕中心部表面の残留応力は引張応力となる。衝突速度 $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では圧痕中心部表面の残留応力は圧縮応力となる。
- (2) 運動エネルギー一定条件では, 衝突速度 $0.5\sim 20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ で板厚内に導入される圧縮残留応力の領域は一定である。しかし, 圧痕中心部表面の引張残留応力は衝突速度が $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では低下し, $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では圧縮応力となる。
- (3) 圧痕中心部表面の半径方向残留応力は, 内部の最大半径方向ひずみに対する表面の半径方向ひずみの比率と良い相関があり, 比率が約 0.4 よりも大きくなると圧痕中心部表面の半径方向残留応力が圧縮応力となる。この相関はショット径が異なっても同じであると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 小林幹和・松井利治・村上敬宣: 日本機械学会論文集 (A 編), **63**-610 (1997), 1226-1230.
- 2) Al-Obaid, Y. F.: J. Appl. Mech., **54**-June (1990), 307-312.
- 3) 小川一義・浅野高司: 材料, **48**-12 (1999), 1360-1366.
- 4) Hills, D. A., Waterhouse, R. B. & Noble, B.: J. Strain Anal., **18**-2 (1983), 95-100.
- 5) Kopp, R. & Wustefeld, F.: Proc. Int. Conf., Shot Peening-4 (1990), 561-572.
- 6) Zang, Y.: Proc. Int. Conf., Shot Peening-8 (2002), 561-572.
- 7) 森謙一郎・小坂田宏造・塩見誠規・岡田達夫: 日本機械学会論文集 (A 編), **59**-566 (1997), 2420-2426.
- 8) 高橋孝幸・山田毅・石川孝司: 塑性と加工, **50**-577 (2009), 114-118.
- 9) Schwarzer, J., Schulze, V. & Vohringer, O.: Proc. Int. Conf., Shot Peening-8 (2002), 507-515.
- 10) Manoucherifar, A. & Rezvani, R.: Proc. Int. Conf., Shot Peening-11 (2011), 67-74.
- 11) 山田毅・高橋孝幸・池田誠・杉本周造・太田高裕: 三菱重工技報, **39**-1 (2002), 36-39.
- 12) Clausen, R. & Bruder, M.: Proc. Int. Conf., Shot Peening-3 (1987), 319-326.
- 13) 野瀬哲郎: 溶接学会誌, **77**-3 (2008), 210-213.
- 14) Rouquette, S., Rouhaud, E., Pron, H., Francois, M. & Bissieux, C.: Proc. Int. Conf., Shot Peening-9 (2009), 113-118.
- 15) 横山隆(編): 衝撃工学の基礎と応用, (2014), 1-18, 共立出版.