

## ショットピーニングで生じる残留応力分布の推定理論

## Estimation of Residual Stress Distribution Induced by Shot Peening

ジョエル カスター J. KUSTER 小林 恒 T. KOBAYASHI

This report describes an estimation of residual stress distribution induced by shot peening. First, process modeling taking into account material nonlinearities under high strain and high strain rate along with derivation of the residual stress profile is introduced. Results obtained with the proposed method are validated against experimental curves. Finally, using approximation expressions, a prediction method for the residual stress profiles depending on the material properties and shot peening conditions is introduced.

**Key Words:** residual stress distribution, shot peening, material characterization, elasto-plastic material, numerical analysis

## 1. はじめに

機械部品の耐久性向上のためには、表面残留応力の制御が重要であり、その制御手法の1つとして、ショットピーニング法がある。1920年代末ごろ発明されたショットピーニング法は産業界で広く使用され、機械部品の表面残留応力の制御だけではなく、熱処理後の表面洗浄などにも使用された例がある。

図1に示すように、多量のショットメディア(投射材, 粒子)が共に高速で対象部材表面に衝突するメカニズムを有するショットピーニングは、対象部材表面組織に影響を与え、次のような効果が得られる<sup>1)</sup>。

- (1)対象部材表面に残留圧縮応力が発生する。
- (2)対象部材表面が硬化する。
- (3)対象部材表面粗さを改善する。
- (4)付着物を除去して表面を清浄化する。

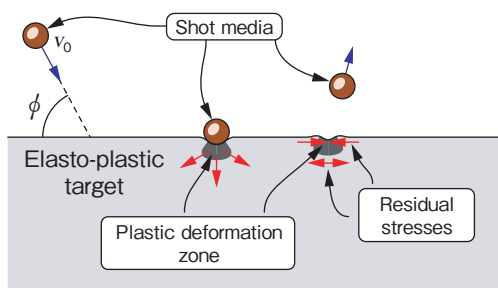


図1 弾塑性材表面のショットピーニング  
Impact of particle with elasto-plastic material

しかし、対象部材表面組織は上述の効果が得られる一方、対象部材に局部弾塑性変形が生じる。この変形は望ましくない結果をもたらすことが多い。つまり、多くの場合は、精度を維持しながら上述のショットピーニング効果を得ることが最も理想的である。既知のようにショットピーニング諸元は、対象部材表面とノズルの間の距離、ショットメディアの大きさ、数量、流速、処理時間などから構成され、表面残留応力の形態はこれらと深く関わっている。現状では、一般に試行錯誤的な実験の繰返しで必要な表面状態(残留応力、表面粗さ、変形)が得られている。そのため、加工効率向上と加工費用低減のためには、加工条件と対象部材の材料特性により表面残留応力を推定する理論的手法の開発がますます重要になっている。

これまで、ショットピーニング後の残留応力を論じた実例はある<sup>2)~4)</sup>が、材料特性を塑性域に限定し、弾性域から塑性域への過程を考慮していないため、ショットピーニングの本質まで論じられていない。

著者らは、弾塑性特性を忠実に反映する材料モデルを構築して応力テンソルの固有値(主応力)を使い、ショットピーニングによる残留応力分布を推定する理論の構築を試み、ショットピーニングの応力分布を実用精度で推定できることを確認した。また、本研究の理論に基づいて、ショットピーニングによる残留応力特性分布曲線を表す近似式を考案して対象部材素材の特性とショットピーニング条件により机上で残留応力分布を精度よく予

測できるようになった。本報ではこれらの結果について報告する。

## 2. ショットピーニングの残留応力分布の推定式

図2に示すように、固定された弾塑性材の対象部材にショットピーニング加工をする例を取り上げて残留応力分布特性を議論する。また、図2に示す座標系  $(x, y, z)$  を本報で使用する。ショットメディアは弾性特性を持つ鋼球であり、その  $xy$  平面における分布は、密度の均一性など<sup>2)</sup>の特性を考慮して、六角形格子に配列する形としておく。ここで、ショットメディア間距離の  $xy$  平面における投影長さは  $d_0$  である。また、ショットメディアの対象部材表面への同時衝突を避け、ランダム分布特性を得るために対象部材表面との距離がそれぞれ異なるものと設定する。さらに、本検討では、ショットメディアの半径  $R$ 、および初期速度  $v_0$  が一定であり、ショットメディアとショットピーニング対象部材表面間の摩擦係数を 0.4 に設定した。

まず、図2に示したショット対象部材表面中心から第  $j$  層の残留応力の平均値について議論する。応力分布は対称であるとして扱い、ショット対象部材表面と平行する  $j$  面 (層) に平行な主応力  $\sigma_{//}(z)$  と直交する主応力  $\sigma_{\perp}(z)$  がそれぞれ存在しており、それらの平均値は次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{//}(z) &= \frac{1}{N_{el}} \sum_{i=1}^{N_{el}} \frac{\sigma_{xx}^i + \sigma_{yy}^i}{2} \\ \sigma_{\perp}(z) &= \frac{1}{N_{el}} \sum_{i=1}^{N_{el}} \sigma_{zz}^i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

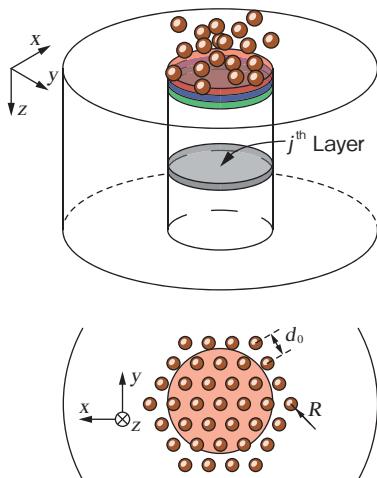


図2 ショットピーニングのモデルと座標系の定義  
Simulation model configuration and coordinate systems definition

式(1)中、 $z$ はショット対象部材表面から第  $j$  層までの距離、 $N_{el}$ は第  $j$  層に扱われる要素数である。また、 $\sigma_{xx}^i, \sigma_{yy}^i, \sigma_{zz}^i$ はそれぞれ第  $j$  層の第  $i$  要素における  $x, y$  および  $z$  軸に沿って互いに垂直する応力テンソルの成分である。

式(1)を解くには、処理対象表面を  $N_{el}$  に分割して、FEM ソフトウェア Abaqus (SIMULIA 社) を使用して各要素  $i$  における応力の成分  $\sigma_{xx}^i, \sigma_{yy}^i, \sigma_{zz}^i$  を求める必要がある。なお、ショットピーニング加工では、ショットメディアを対象部材表面に連続ショットすることで、目標面に微小な振動が生じるため、本報では、その微振動の影響を考慮してモデルの平衡構成の Abaqus/Standard ソルバを使用している。

## 3. ショットピーニングによる残留応力分布推定理論の検証

第2章で論じた残留応力分布の推定式(1)の正確さを検証するため、2つの検討条件で理論推定と実験を行った。検討条件の1つは、浅いショット効果が得られる Wonder Process Craft (WPC, 不二製作所製) に準じた仕様であり、もう1つは通常よく使用される標準仕様 (WPC より大きなショットメディアと遅い衝撃速度) である。ただし、2つの仕様とも、ショットメディアは前述のように鋼球を想定して使用した。なお、実験に使用したショットメディアのサイズ分布は光学式または走査型電子顕微鏡で確認した。

テストピースは  $2.5\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ 、厚さ  $2.5\text{mm}$  の板である。テストピースの材料特性を把握するため、引張テストを行った。引張テストには材料試験機インストロン 8872 (インストロン社) を使用した。この試験機は  $1.39 \times 10^{-4}$  から 4.8 まで変化するひずみ速度を測定でき、衝撃により対象部材表面に生じる変形を精度よく評価できる<sup>2), 5)</sup>。

また、ショットピーニングによる変形速度は試験機によるひずみ速度よりはるかに速いため、Johnson-Cook モデル<sup>6)</sup> を適用して大きなひずみ速度を持ったテスト素材データを次式のように表現した。

$$\sigma = (A + B(\epsilon_{pl})^n) \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}_{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \quad (2)$$

式中、 $A, B, n, C$  および  $\dot{\epsilon}_0$  は材料特性を表す係数であり、各材料を実測して得られたものである。一方、 $\epsilon_{pl}$  と  $\dot{\epsilon}_{pl}$  は、それぞれ材料の塑性変形量と塑性変形速度である。

表1に、上述したWPC仕様ショットピーニングと標準仕様ショットピーニングの条件を示した。

ただし、ショットピーニング加工により生じた温度が鉄鋼材の融点よりはるかに低いため、本報では粘着性の温度依存性を考慮しなかった。また、試験におけるショットメディアの初期速度は試験設備仕様に基づいて選定し、理論推定ではショットメディアが対象部材表面と垂直に衝突すると仮定した。

図3に、理論推定した残留応力と実験値の比較結果を示す。横軸は対象部材表面の深さ $z$ を、縦軸はショット対象部材表面と平行する面(層)の残留応力 $\sigma_{//}(z)$ を示す。図から分かるように、対象部材表面が浅いショットピーニング(WPC仕様)および、標準ショットピーニング仕様において、理論推定値と実験値とは、数値には若干の誤差があるものの、分布傾向がよく一致している。

表1 シミュレーションと実験検証の検討条件  
Simulation parameters for validation experiments

	標準仕様	WPC仕様
A	1 265	
B	870	
n	0.245	
C	0.0017	
$\dot{\epsilon}_0$	1.05	
$v_0$	80m/s	200m/s
R	350 $\mu$ m	15 $\mu$ m

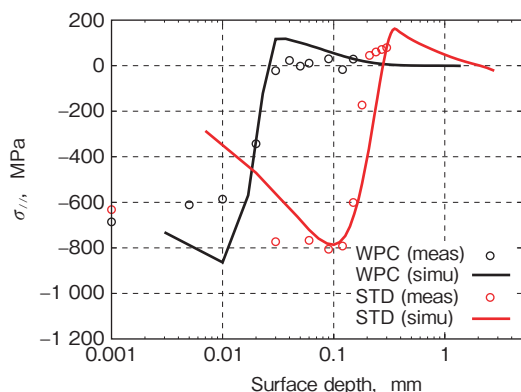


図3 ショットピーニングで生じた残留応力の理論推定値と実験値の比較

Comparison between measured and simulated residual stress profiles for two shot peening conditions

図3より、生じた誤差を考察すると、対象部材表面が浅いところ(WPC仕様 $< 0.01$ , 標準仕様 $< 0.06$ )では理論推定値と実測値との差がやや大きいことが分かるが、その原因は次のように考えられる。すなわち、上述の理論推定では、ショットメディアが目標面に垂直に衝突すると仮定して論じた。しかし、図4に示すように実験に使用した装置のノズルが揺動しながらショットメディアを投射し、対象部材表面に垂直に衝突する条件を満足することが難しい。また、図4の赤線の矢印で示したようなショットメディアの投射で生じた空気流れが、ショットメディアと対象部材表面との衝撃角度にも影響すると考えられる。また、対象部材の取付けが斜めになる場合もある。ショットメディアが対象部材表面に斜めに衝突した場合、浅い表面にせん断変形を増加させる現象が起こり得ると思われる。

このことから、ショットメディアの投射方向と対象部材表面方向とのなす角度 $\phi$ をそれぞれ $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $45^\circ$ と仮定してショットピーニングで生じる残留応力を推定した。その結果を図5に示す。横軸は対象部材表面の深さ $z$ を、縦軸はショット対象部材表面と平行する面(層)の残留応力 $\sigma_{//}(z)$ を示す。図5より考察すると、ショットメディアの投射方向と対象部材表面とのなす角度 $\phi$ が小さい場合、浅い表面部で圧縮応力が大きく現れることが分かった。つまり、上述で推測したように浅い表面部でせん断変形が大きくなることが説明できる。

したがって、図5に示した $\phi = 45^\circ$ の場合の残留応力分布では、図3に示した実験結果がほぼ一致していることが分かる。つまり、 $\phi$ を正確に把握できれば、式(1)を用いて実用的な精度でショットピーニングの残留応力分布を推定できると考えられる。

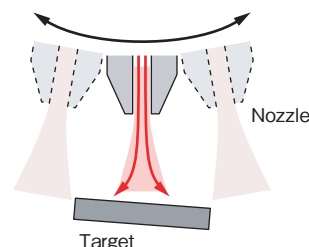


図4 試験機のノズル揺動と対象部材表面の位置関係  
Nozzle swing of shot peening machine and flow orientation with target surface

### 4. 材料特性によるショットピーニングの残留応力の予測方法

第3章では、式(1)を用いてショットピーニングの残留応力分布を実用精度で推定できることを確認した。本章では、式(1)の理論結果を基準として、材料特性とショットピーニング条件、ショットメディアの半径  $R$  (mm) と初期速度  $v_0$  (m/s) を用いてショットピーニングにおける残留応力分布の定量的予測を机上で試みる。

式(2)に示すように、本報では材料の温度依存性を考慮せず、ショットピーニングによる塑性変形速度に適用した Johnson-Cook モデルを使用して素材データを表現した。すなわち、材料特性を表す実測曲線をモデル化して、理論計算の簡略化を図った。

ここではそれらに加えて、図3、図5で示したショットピーニングによる残留応力分布曲線について、Tufft の方程式<sup>7)</sup> を使って近似し、指数関数と三角関数の複合式で残留応力の平行成分  $\sigma_{//}$  は次のように表すことができる。

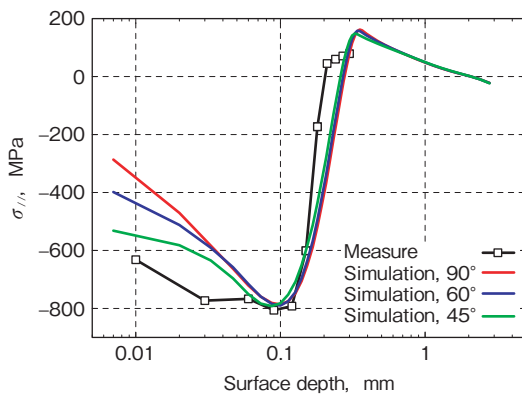
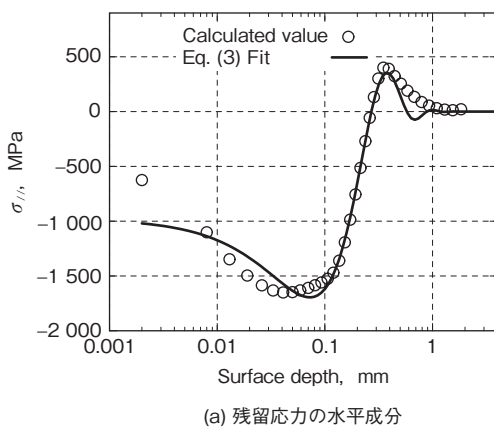


図5 残留応力分布に対する衝撃角度の影響  
Influence of impact angle on residual stress distribution



$$\sigma_{//}(z) = \alpha \exp\left[\frac{-z}{\beta}\right] \sin(\vartheta z + \lambda) \quad (3)$$

さらに、式(1)の結果を考察して、著者らが Log-Normal 分布を適用して垂直成分  $\sigma_{\perp}$  を次のように考案した。

$$\sigma_{\perp}(z) = \kappa \exp\left[-\frac{(\log z - \mu)^2}{\xi}\right] \quad (4)$$

式(3), (4)中の、 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\vartheta$ ,  $\lambda$ ,  $\kappa$ ,  $\mu$  と  $\xi$  はショットピーニング条件と材料特性値の組合せパラメータであり、次のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= f_1(A, B, n, C, \dot{\epsilon}_0, v_0, R) \\ \beta &= f_2(A, B, n, C, \dot{\epsilon}_0, v_0, R) \\ \vartheta &= f_3(A, B, n, C, \dot{\epsilon}_0, v_0, R) \\ \lambda &= f_4(A, B, n, C, \dot{\epsilon}_0, v_0, R) \\ \kappa &= f_5(A, B, n, C, \dot{\epsilon}_0, v_0, R) \\ \mu &= f_6(A, B, n, C, \dot{\epsilon}_0, v_0, R) \\ \xi &= f_7(A, B, n, C, \dot{\epsilon}_0, v_0, R) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここに、関数  $f_i(A, B, n, C, \dot{\epsilon}_0, v_0, R)$  のパラメータは実験計画法に基づいて次のように決められる。

- i) すべてのパラメータ ( $A, B, n, C, \dot{\epsilon}_0, v_0, R$ ) を使用した最小2乗法により、それらの5番目の順序までの相互作用を考慮する。
- ii) 分散分析表を作成する。
- iii) 材料特性とショットピーニングモデルに有意性が低いものを除去する。
- iv) 縮小したモデルで精度確認する。

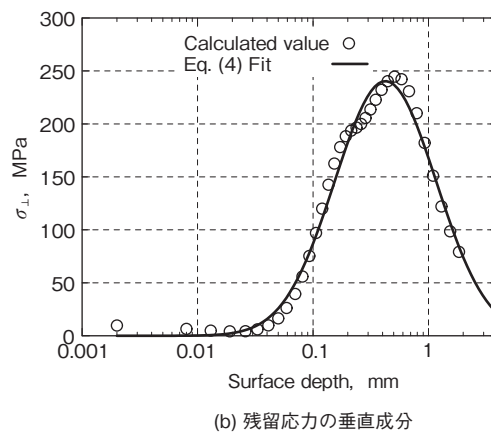


図6 ショットピーニング残留応力分布の予測結果  
Prediction results of shot peening residual stress distribution

以上より、式(3) (または式(4)) と(5)を連立して解けば、ショットピーニングにより生じた残留応力の分布を予測することができる。

図6に式(1)で算出した残留応力分布と式(3), (4)で予測した残留応力分布の比較結果を示す。図6(a)は残留応力の水平成分、図6(b)は残留応力の垂直成分を示す。図より、両者がよく一致していることが分かる。すなわち、対象部材の材料特性、ショットピーニングの条件が前もって分かれば、本報で考案した式(3), (4)の予測式を用いて、机上で残留応力分布を精度よく予測できる。

## 5. おわりに

ショットピーニングにより対象部材表面の残留応力状態を検討し、その分布を推定する理論の構築を試みた。得られた結果は次の通りである。

- (1)材料の弾塑性特性、およびショットメディアと対象部材表面との摩擦などを考慮してショットピーニングにより生じた応力分布を推定する理論式を導出した。実験結果より精度よく残留応力分布を推定できることを確認した。
- (2)ショットメディアと対象部材表面の衝撃角度の差異による残留応力への影響を考慮し、応力分布の推定精度および応力分布の制御に対する手掛かりを提供した。
- (3)ショットピーニングによる残留応力分布曲線を表す近似式を考案して対象部材の材料特性やショットピーニングの条件より机上で残留応力分布を精度よく予測できる理論を確立した。

## 参考文献

- 1) O. Higoune: Correlation of Shot Peening Parameters to Surface Characteristic, International Conference of Shot Peening ICSP-9, Paris(2005)28.
- 2) J. Schwarzer and V. Schulze: Finite Element Simulation of Shot Peening - A Method to Evaluate the Influence of Peening Parameters on Surface Characteristics, International Conference of Shot Peening ICSP-8, Munich (2002)507.
- 3) R. Fathallah, G. Inglebert, and L. Castex: Modeling of Shot Peening Residual Stresses and Plastic Deformation Induced in Metallic Parts, International Conference of Shot Peening ICSP-6, San Francisco(1996)464.
- 4) M. Klemenz, Th. Hochrainer, L. Delonnoy, V. Schulze, O. Voehringer, and P. Gumbsch: Similarity Rules for the Shot Peening Process based on Finite Elements Simulations, International Conference of Shot Peening ICSP-9, Paris (2005)94.
- 5) E. Rouhaud, A. Ouakka, C. Ould, J.-L. Chaboche and M. Francois: Finite Elements Model of Shot Peening, Effects of Constitutive Laws of the Material, International Conference of Shot Peening ICSP-9, Paris(2005)107.
- 6) G.R. Johnson and W.H. Cook: A Constitutive Model and Data for Metals subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures, 7th International Symposium on Ballistics(1983)541.
- 7) M. Tufft: Shot Peen Impact on Life, Part 3: Development of a Fracture Mechanics / Threshold Behavior Predictive Model, International Conference of shot peening ICSP-7 Warsaw(1999)264.

## 筆者



ジョエル カスター\*

J. KUSTER



小林 恒\*\*

T. KOBAYASHI

\* 研究開発センター 機械システム研究部

\*\* 研究開発センター 機械システム研究部 工学博士