ピーニングに伴うステンレス鋼表面の力学特性変化
に対する高速変形の影響*狩野 真也^{*1}, 西川 雅章^{*2}, 祖山 均^{*2}Effect of High Strain-Rate Deformation on
Surface Mechanical Properties of Stainless Steel after PeeningShinya KANOU, Masaaki NISHIKAWA^{*3} and Hitoshi SOYAMA^{*3} Department of Nanomechanics, Tohoku University,
6-6-01 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

This paper investigated the effect of high-rate deformation on the change of mechanical properties on the surface of metallic materials during a peening as a surface modification of metallic materials. Especially, we focused on the introduced compressive residual stress and the yield stress increase on the surface, which brings about the improvement of fatigue strength of the materials after peening. For this purpose, we compared the results using two different peening. One is a static indentation with a steel ball, and the other is a dynamic peening with high velocity. The residual stresses were obtained through the comparison with experimental depths using an elastic-viscoplastic finite element model for the peening, and the variation in yield stress was also obtained using indentation tests and numerical analysis of indentation tests. As a result, we clarified the effect of strain-rate on the variation in yield stress and induced residual stress. Especially, the compressive residual stress and the increments of yield stress of the surface layer within 600 μm depth after dynamic peening was larger than that after static peening.

Key Words: Surface Improvement, Strain Rate, Residual Stress, Yield Stress, Peening

1. 結 言

原子力・化学プラント用構造材料, 航空機や自動車用部品等に用いられる金属材料の疲労強度向上を目的として表面改質法は有用である。従来より, 金属表面に硬質の金属微粒子を高速で衝突させるショットピーニングが用いられており, 表面を加工硬化させると同時に表面に圧縮残留応力を導入することで疲労強度が向上することが知られている⁽¹⁾。近年, 表面改質技術の発展に伴い, 表面に与える衝撃速度の高速化ないし衝撃圧の高圧化により, 高い表面改質効果を得る試みがなされている。例えば, 現在までに, 数十 μm のショットを用いて 150 m/s 以上の高速度で衝撃力を与える微粒子ピーニング⁽²⁾, 水中においた金属材料に短パルスレーザを照射した際に生じるプラズマ膨張圧を用いるレーザピーニング⁽³⁾⁽⁴⁾, 高速水噴流を金属表面に

噴射した際に生じる気泡の崩壊衝撃圧力を用いるキャビテーションピーニング⁽⁵⁾⁽⁶⁾等が開発されている。このように, 近年の表面改質法は材料表面に高速変形を与えることで, 高い疲労強度向上を得ている。より最適な表面改質方法について検討するためには, ピーニング時の高速変形が改質後の材料表面の力学特性に及ぼす効果を理解することが重要である。

一般に, 疲労強度向上をもたらす力学的要因には大きく分けて二つある。一つは材料の降伏応力であり, 微小き裂初生時のすべり帯形成や, 疲労き裂進展時の塑性変形に影響すると考えられている⁽⁷⁾⁽⁹⁾。もう一つは圧縮残留応力であり, 破壊力学的観点から巨視的き裂伝播を抑制することが知られている⁽¹⁰⁾。ピーニングに伴う疲労強度向上は, 表面改質層において, これらの力学特性が変化した結果であると考えられる。したがって, ピーニングに伴う残留応力や降伏応力といった力学特性変化を詳細に調べることが重要となる。

過去の研究では, 特にピーニング時に導入される残留応力に着目して高速変形の効果が調べられてきた。ピーニングにより導入される残留応力を予測する試みとして, 従来より有限要素法による数値解析がなされ

* 原稿受付 2010 年 5 月 27 日。

^{*1} 東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)。^{*2} 正員, 東北大学大学院工学研究科。

E-mail: nishikawa@mm.mech.tohoku.ac.jp

てきた。ピーニング時の材料の高速変形に対するひずみ速度効果を考慮する必要性が Al-Hassani⁽¹¹⁾により提言されて以降、多くの研究で、導入される残留応力は材料のひずみ速度効果の影響を受けることが示されてきた。例えば、Boyce⁽¹²⁾は航空機用チタン材を対象とし、鋼球の高速衝突によって導入される残留応力に対して、材料のひずみ速度依存特性を考慮した弾粘塑性有限要素解析により予測し、ひずみ速度効果の重要性を示している。近年では、複数球のショットピーニング⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾やレーザピーニング⁽¹⁵⁾によりチタン材に導入される残留応力を解析的に予測する試みもなされている。一方で、プラント用ステンレス鋼に対しても、レーザピーニングやキャビテーションピーニングが用いられつつあるが、ピーニング時における降伏応力や残留応力といった力学特性変化に対して高速変形効果を調べた報告例は見られず、検証の余地がある。

本報では、ピーニング時の高速変形がステンレス鋼表面に導入される圧縮残留応力および降伏応力変化に及ぼす影響を検証した。まず、ステンレス鋼に対して鋼球を用いた準静的押込みと単一高速鋼球衝突によるピーニングを施し、準静的変形および高速変形を伴う二種類のピーニング条件で比較した。また、これらのピーニング条件をモデル化した弾塑性有限要素解析により、高速変形が材料表面の残留応力の導入に及ぼす影響を評価した。最後に、表面改質領域に対して微小押込み試験を行い、逆問題解析⁽¹⁶⁾を利用し、改質層の降伏応力を同定し、ピーニングによる降伏応力変化に及ぼす高速変形の影響を検証した。

2. 実験方法および解析方法

2・1 単一ショットピーニング 本実験では、ステンレス鋼に対してひずみ速度の異なる二種類の単一ショットピーニングを施した。図1に模式図を示す。一つは、水噴流式鋼球加速装置を用いて高速で鋼球を衝突させるピーニング(以下、動的ピーニングと呼ぶ)、もう一つは、万能試験機により鋼球を準静的に押込んだピーニング(以下、静的ピーニングと呼ぶ)である。試験片には、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L の調質材を用いた。長さ、幅、厚さをそれぞれ 20 mm, 20 mm, 4 mm とした。なお、本調質材には表面および内部にほぼ残留応力が見られないことを X 線回折計測により確認した。ピーニングには、直径 3.175 mm (1/8 インチ) のステンレス鋼球 SUS440C を用いた。動的ピーニングにおける加速水噴流の噴流圧力は 30 MPa であり、高速度ビデオカメラによる観察から、ショットの速度は 114 m/s である結果が得られている。一方、

Fig. 1 Schematic of a single-shot model experiment

静的ピーニングの押込み荷重は動的ピーニングの圧痕と直径が同程度となるように 4000 N とし、押込み速度 1 mm/s、荷重保持時間は 10 s とした。ここで、一般にピーニング(例えば、複数ショットによるショットピーニング)においては、改質対象の材料表面において、改質された面積(カバレッジ)が増加するにつれて残留応力が大きく導入され、材料表面が全て改質された状態(フルカバレッジ)において導入される残留応力が飽和することが知られている⁽¹⁷⁾ため、改質面積あたりの残留応力導入や降伏応力変化を議論することが有用であると考え、圧痕の直径を同一にして検討した。得られた圧痕に対し、レーザ顕微鏡により、圧痕の半径および深さを計測した。

2・2 微小押込み試験 本実験では、静的および動的ピーニング後の試験片表面における降伏応力変化を評価することを目的として、図2に示すように、ピーニングによって形成された圧痕を深さ方向に切断し、切断面に対して微小押込み試験を行った。なお、切断面の粗さを除去するために粒度 1 μm のダイヤモンドペーストによる研磨を施し、さらに切断加工と機械研磨による改質層を除去するために電解研磨を施した。ピーニングによって変化する残留応力の深さ方向分布を評価するため、圧痕下 1000 μm の深さまで 200 μm 毎に微小押込み試験を実施した。圧子には先端半径 50 μm の球状ダイヤモンド圧子を用い、試験荷重を 0.98 N、荷重分割数を 500、圧子押込み時間を 10 s、荷重保持時間を 1 s、除荷時間を 10 s、ステップインターバルを

Fig. 2 Schematic of indentation tests

20 ms とした。本実験では、試験中の荷重と圧子の変位を記録し、荷重－変位曲線を得ることで最大押し込み深さ h_{max} を評価した。なお、試験結果に対する装置の剛性の影響を取り除くため、澤ら⁽¹⁸⁾の方法に従い、装置コンプライアンスを $0.294 \text{ N}/\mu\text{m}$ として補正した。

2・3 ショットピーニングの有限要素解析 本解析は、ピーニング後の残留応力分布を評価することを目的とし、弾塑性接触解析により、静的および動的ピーニングをモデル化した。本解析には、汎用有限要素解析プログラム MSC. Marc を用いた。図3に、本解析で用いた軸対称有限要素モデルを示す。鋼球および試験片は、いずれも実験と同寸法とし、四節点アイソパラメトリック四辺形要素を用いて分割した。試験片の要素数は1922であり、鋼球の要素数は573である。試験片と鋼球の接触部付近の要素寸法を小さくした。試験片の最小要素の一边の長さは $50 \mu\text{m}$ 、鋼球の最小要素の一边の長さは約 $70 \mu\text{m}$ とした。境界条件は、図3に示すように、対称軸上の節点において半径方向変位を移動支持とし、試験片底面において厚さ方向変位を移動支持とした。静的ピーニングの解析では、押し込み荷重は実験と同じ 4000 N を荷重境界条件として鋼球に与え、実験と同等の条件とした。一方、動的ピーニングの解析では、初期境界条件として鋼球の全節点に速度 114 m/s を与えた。静的ピーニングの解析では、鋼球と試験片は均質な等方弾塑性体とし、 J_2 流れ理論

Fig. 3 Finite element model for a single-shot peening

による等方硬化弾塑性モデルを用いた。一方、動的ピーニングの解析では、試験片材料のひずみ速度依存特性を考慮するため、式(1)で表される Cowper-Symonds の式を用いた。

$$\bar{\sigma} = \sigma_Y \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{P}} \right] \quad (1)$$

$\bar{\sigma}$ は動的降伏応力、 $\sigma_Y = g(\bar{\epsilon}^P)$ は静的降伏応力、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度、 D 、 P は材料定数である。本解析では、文献⁽¹⁹⁾を参照し、 D 、 P をそれぞれ 3 ms^{-1} 、 4.7 とした。解析は更新ラグランジュ法で行った。同様の解析方法は複数球のショットピーニングにおける残留応力値の予測に用いられており、実験的に検証されている⁽¹⁴⁾。本報では、単一ショットピーニングにより形成した圧痕直下の残留応力を実験的に計測することが困難であったため、本解析により残留応力値を算出した。

表1には、解析に用いた材料物性を示す。なお、試験片の材料物性および加工硬化曲線は、試験片と同一の鋼板から得た引張試験片の引張試験結果より得た。

2・4 微小押し込み試験の有限要素解析 本解析は、ピーニング後の降伏応力を逆問題解析により求めることを目的に、2・2節の微小押し込み試験を有限要素法によりモデル化し、荷重変位曲線を算出することで最大押し込み深さ h_{max} を評価した。用いた軸対称有限要素モ

Table 1 Material properties used in the analyses

	Specimen	Steel ball
Young's modulus E GPa	188	200
Poisson's ratio ν	0.28	0.28
Yield stress (0.2 % offset)	280	1900
$\sigma_{Y,0.2\%}$ MPa		
Density ρ kg/m ³	7800	7800

Fig. 4 Finite element model for spherical indentation

デルを図4に示す。試験片は圧子に対して十分大きい寸法として、半径1mm、厚さ1mmとした。試験片の要素数は2079である。ショットピーニングの有限要素解析同様、試験片は等方硬化弾塑性体としてモデル化した。球状圧子は剛体としてモデル化し、半径50 μm とした。試験片の材料物性は、ショットピーニングの有限要素解析と同じとし、対称軸上の節点において、半径方向変位を移動支持とし、試験片底面において、厚さ方向変位を移動支持とした。また、ピーニングによって既に導入されている試験片の残留応力 σ_r を考慮するため、本解析では図4に示すように、表面力境界条件として与えた。このときの残留応力は、2・3節の有限要素解析によって算出した残留応力分布から決定した。なお、試験片の切断により、半径方向残留応力成分 σ_r は解放されていると考え、深さ方向残留応力成分 σ_z のみ考慮し、応力再分配の影響は無視した。

2・5 降伏応力の同定 2・4節の有限要素解析を用いた逆問題解析により、ピーニング後の降伏応力を同定した。残留応力の導入による影響を除外して評価するため、文献⁽¹⁶⁾の手法を参照し、2・2節の微小押込み試験結果と2・4節の微小押込み試験の有限要素解析結果とが一致するときの降伏応力値を算出した。

図5には、本同定手法の概略図を示す。2・4節で述べたように、微小押込み試験の有限要素解析は、ピーニングにより導入された残留応力を荷重境界条件として考慮している。しかし、実際の微小押込み試験により押込んだ面はピーニングにより改質されており、圧縮残留応力が導入されているだけでなく塑性変形により加工硬化している。微小押込み試験の有限要素解析では、ピーニング後の加工硬化を考慮していないため、図5に示すような荷重変位曲線の違いが現れる。そこで、微小押込み試験の解析において、試験片の降伏応力を変化させて算出した最大押込み深さ h_{max} が、実験で得られた最大押込み深さ h_{max} と一致する時の降伏応力をピーニング後の降伏応力とした。

Fig. 5 Schematic illustration of load-displacement curve

3. 結果および考察

図6には、静的ピーニングおよび動的ピーニングによって形成された圧痕の半径と深さの関係を示す。また、表2には、圧痕の平均半径 R および平均深さ h を示す。図6より、静的および動的ピーニングによって形成された圧痕を、同等の圧痕半径で比較した場合、動的ピーニングによって形成された圧痕の方が浅いことがわかる。これは、ピーニングに伴うひずみ速度の影響により、瞬間的に材料表面の降伏応力が増大したことで、静的ピーニングに比べて動的ピーニングの方が塑性変形しづらく、より弾性的な変形をしたために、圧痕が浅くなったものと考えられる。つまり、ステンレス鋼においても、ピーニング時に材料のひずみ速度依存性の影響を受けることを示している。

図7には、動的および静的ピーニングの有限要素解析により算出した、圧痕形成後の表面からの深さ方向の残留応力分布を示す。図には、半径方向残留応力 σ_r および深さ方向残留応力 σ_z を示す。なお、動的ピーニングの残留応力は、鋼球と試験片の接触状態が解放されてから、10 μs の平均値として評価した。疲労強度向上に影響を与える半径方向の圧縮残留応力は、動的ピーニング後の方が大きく導入されていることがわかる。

図8には、本実験により得た最大押込み深さと圧痕下深さの関係を示す。なお、静的および動的ピーニングにより形成された圧痕半径が同等である試験片の組み合わせを3通り選び、それぞれに対して最大押込み深さ h_{max} を評価し、その平均値で示した。図8より、

Fig. 6 Relationship between dimple radius and depth

Table 2 Experimental results of dimple size

	$R \mu\text{m}$	$h \mu\text{m}$
Static peening (Static load 4000 N)	844 ± 14	220 ± 8
Dynamic peening (Velocity 114 m/s)	852 ± 13	215 ± 7

Fig. 7 Residual stress predicted by finite element analyses

Fig. 8 Relationship between $h_{\max}$ and depth from the surface obtained by indentation tests Fig. 9 Relationship between $h_{\max}$ and depth from the surface predicted with finite element analyses considering the introduced residual stress

Table 3 Residual stress used in the finite element analyses

Depth from the surface	Static peening	Dynamic peening
200 μm	-35 MPa	134 MPa
400 μm	-56 MPa	24 MPa
600 μm	-85 MPa	-106 MPa
800 μm	-128 MPa	-183 MPa
1000 μm	-164 MPa	-261 MPa

表面近傍では動的ピーニング後の最大押し込み深さ $h_{\max}$ の方が小さい、もしくは同等であることがわかる。

図9には、図7より得られた残留応力を考慮して、微小押し込み試験の有限要素解析により算出した最大押し込み深さ $h_{\max}$ の圧痕下深さ方向分布を示す。なお、この結果では、表3に示す残留応力値を境界条件として導入した。表3の値は図7における深さ方向残留応力 σ_z の値である。図9の結果から、ピーニング後の残留応力のみを考えた場合、表面近傍では動的ピーニング後の方が、最大押し込み深さ $h_{\max}$ が大きくなる。したがって、図8の実験結果との差異が、表面の降伏応力変化に起因すると考えられる。

図10には、図8に示した微小押し込み試験より得た最大押し込み深さ $h_{\max}$ と、図9に示した微小押し込み試験の有限要素解析より算出した最大押し込み深さ $h_{\max}$ の差である $\Delta h_{\max}$ の圧痕下深さ方向分布を示す。2・5節で述べたように、 $\Delta h_{\max}$ はピーニング後の加工硬化度の指標となるため、図10より表面近傍では動的ピーニング後の方が加工硬化していると考えられる。

図11には、図10の結果を用いて同定したピーニング後の降伏応力の圧痕下深さ方向分布を示す。表面近傍では静的および動的ピーニング後の降伏応力は、それぞれ約250 MPa、約180 MPa増大しており、動的ピーニング後の場合に、降伏応力がより顕著に増大して

Fig. 10 Relationship between $\Delta h_{\max}$ and depth from the surface Fig. 11 Estimated yield stress $\sigma_{y,0.2\%}$ after peening

いた。一方、圧痕下約 600 μm よりも深い領域では静的ピーニング後の方が、降伏応力が增大していた。すなわち、ひずみ速度が大きいピーニングの場合、表面近傍に大きな降伏応力の上昇を与えているものと結論づけられる。

4. 結 言

本報では、ピーニング時の高速変形が、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L 表面への残留応力導入および降伏応力変化に及ぼす影響を検証した。得られた結論を以下に示す。

- (1) SUS316L ステンレス鋼において、静的および動的ピーニング後の圧痕に顕著な差異が見られ、材料のひずみ速度依存性の効果が現れていることが明らかとなった。つまり、ステンレス鋼のピーニングにおいて、ピーニングに伴う高速変形の効果を議論することは重要である。
- (2) ピーニングによって導入される半径方向残留応力成分に着目した場合、ひずみ速度の大きいピーニングの方が、より大きな圧縮残留応力を導入することができることがわかった。
- (3) ピーニング後の表面近傍 (約 600 μm までの深さ) の降伏応力変化に着目すると、ひずみ速度の大きいピーニングの方が、より大きな降伏応力変化をもたらすことがわかった。ひずみ速度が大きいピーニングの場合、表面近傍に大きな降伏応力の上昇を与えているものと結論づけられる。

謝 辞

なお本研究の一部は、(財)スズキ財団・平成 21 年度科学技術研究助成によったことを記す。また本研究結果の一部は、東北大学サイバーサイエンスセンター大規模科学計算システムを利用して得られたことを記す。

文 献

- (1) Society of Shot Peening Technology of Japan ed., *Fatigue of Metals and Shot Peening* (in Japanese), (2004), p.10, Gendai-kougaku-sya Co. Ltd.
- (2) Kagaya, C., Development of Trends and Technical Outlooks of Fine Particle Peening (FPB), *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 72, No. 9, (2006), pp. 1067-1070.
- (3) Sano, Y., Obata, M., Kubo, T., Mukai, N., Yoda, M., Masaki, K. and Ochi, Y., Retardation of Crack Initiation and Growth in Austenitic Stainless Steels by Laser Peening without Protective Coating, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 417, Nos. 1-2, (2006), pp. 334-340.
- (4) Saito, T., Sano, Y., Jimbo, M., Suezono, N. and Kitamura, T., Retardation of Small Crack Propagation by Laser Peening, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 74, No. 744, (2008), pp. 1-8.
- (5) Soyama, H., Sekine, Y. and Oyama, Y., Improvement of the Fatigue Strength of Stainless Steel SUS316L by a Cavitating Jet with an Associated Water Jet in Water, *ISIJ International*, Vol. 48, No. 11, (2008), pp. 1577-1581.
- (6) Soyama, H. and Sekine, Y., Sustainable Surface Modification Using Cavitation Impact for Enhancing Fatigue Strength Demonstrated by a Power Circulating-Type Gear Tester, *International Journal of Sustainable Engineering*, Vol. 3 No. 1, (2010), pp. 25-32.
- (7) Yokobori, T. and Yoshida, M., Kinetic Theory Approach to Fatigue Crack Propagation in Terms of Dislocation Dynamics, *International Journal of Fracture*, Vol. 10, No. 4, (1974), pp. 467-470.
- (8) Kitagawa, H. and Takahashi, S., Fracture Mechanical Approach to Very Small Fatigue Crack Growth and to the Threshold Condition, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 45, No. 399, pp. 1289-1303.
- (9) Tanaka, K., Nakai, Y. and Yamashita, M., Fatigue Growth Threshold of Small Cracks, *International Journal of Fracture*, Vol. 17, No. 5, (1981), pp. 519-533.
- (10) Xiang, Y. and Liu, Y., Mechanism Modelling of Shot Peening Effect on Fatigue Life Prediction, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 33, No. 2, pp. 116-125.
- (11) Al-Hassani, S. T. S., Kormi, K. and Webb, D. C., Numerical Simulation of Multiple Shot Impact, *Proceedings of the 7th International Conference on Shot Peening. Warsaw*, pp. 217-227.
- (12) Boyce, B. L., Chen, X., Hutchinson, J. W. and Ritchie, R. O., The Residual Stress State Due to a Spherical Hard-Body Impact, *Mechanics of Materials*, Vol. 33, No.8, (2001), pp. 441-454.
- (13) Meguid, S. A., Shagal, G. and Stranart, J. C., Development and Validation of Novel FE Models for 3D Analysis of Peening of Strain-Rate Sensitive Materials, *Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 129, No. 2, (2007), pp. 271-283.
- (14) Klemenz, M., Schulze, V., Rohr, I. and Lohe, D., Application of the FEM for the Prediction of the Surface Layer Characteristics after Shot Peening, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 8, (2009), pp. 4093-4102.
- (15) Peyre, P., Chaieb, I. and Braham, C., FEM Calculation of Residual Stresses Induced by Laser Shock Processing in Stainless Steels, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 15, No. 3, (2007), pp. 205-221.
- (16) Nishikawa, M. and Soyama, H., Indentation Technique for Characterization of the Metal Surface Modified by Cavitation Peening, *Metal Finishing News*, Vol. 10, No. 6, (2009), pp. 58-60.
- (17) Evans, R. W., Shot Peening Process: Modelling, Verification, and Optimisation, *Materials Science and Technology*, Vol. 18, No. 8, (2002), pp. 831-839.
- (18) Sawa, T. and Tanaka, K., Simplified Method for Analyzing Nanoindentation Data and Evaluating Performance of Nanoindentation Instruments, *Journal of Materials Science*, Vol. 16, No. 11, (2001), pp. 3084-3096.
- (19) Burgan, B., Elevated Temperature and High Strain Rate Properties of Offshore Steels, *Offshore Technology Report*, (2001), p. 67.