The Society of Materials Science, Japan

# 208 レーザーピーニング処理したアルミニウム合金の残留応力のレーザーパワー依存性

徳島大学　○日下一也　徳島大学[学部]　田中　剛
徳島大学　英　崇夫

## 1 緒　言

金属やセラミックの小片を，高速で試料表面に打ちつけることにより，試料表面層を塑性変形させてその表面層に圧縮残留応力を確実に付与することができるショットピーニング技術は，繰り返し疲労を受ける環境にある自動車や航空機用部品，腐食環境で使用される構造材料など，広い工学の分野において実用化され疲労強度の改善や応力腐食割れの予防など多くの成果を挙げている．こういった表面改質技術の新しいものとして注目されているものにパルス状レーザーを用いたレーザーピーニングがある．これはレーザーの集光エネルギを利用した技術である．処理の際の反動が存在しない点，空間伝送による遠隔操作が可能な点，また微小領域および複雑形状部品への適応が可能など，多くの利点を持った技術である．しかし，技術としてまだまだ新しいものであるために国内，国外ともに実用化に即した本格的研究は始まったばかりと言ってよい．また，本研究のように小出力レーザーを用いたレーザーピーニングの研究は全く行われていない．将来的に光ファイバを用いた遠隔操作処理を目指した場合，ファイバを壊すことなく，遠く離れた部分へレーザーを導き，試料表面を改質することを考慮すると，小出力のレーザーを用いて効率よくピーニングすることが重要となってくる．したがって，この技術の基礎的な特性データを収集することは重要な研究であり，また早急にされるべき項目である．

本研究では，レーザーピーニング処理条件の一つであるレーザー出力を変化させ，表面に発生する残留応力とレーザー出力の関係を調べた．

## 2 実験原理および実験装置

**2.1 実験装置**　レーザーピーニングは，パルス状のレーザーを水中に設置した試料表面に向かって照射することで行われる．発振されたレーザー光は，設置された試料の手前に置かれた平凸レンズによって試料表面へと集光され，徐々にレーザーのエネルギが高められる[1]．そしてエネルギが十分に高められると，その集光点付近において瞬間的に，高温高圧のプラズマが発生する．発生したプラズマは周囲に存在する水によって抑制され，より高い圧力状態へと高められる．このときのプラズマの圧力は2 GPa程度[2]であるとも見積もられている．そしてこの瞬間的なプラズマの発生は，周囲の水を瞬時に膨張させ，音速程度の衝撃波を発生，試料内部へと伝播させる．この結果，衝撃波によって試料表面は塑性変形させられ，圧縮残留応力が発生するものと考えられる．Fig. 1にレーザーピーニング原理についてのモデルを示す．

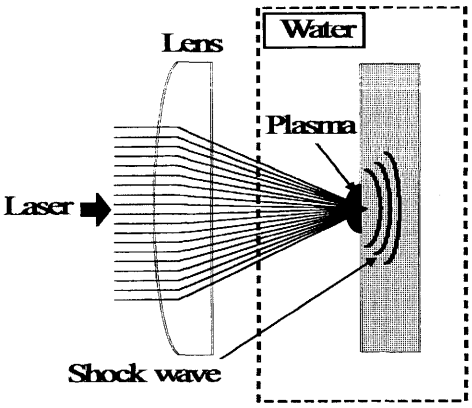


Fig. 1. Principle of underwater laser peening.

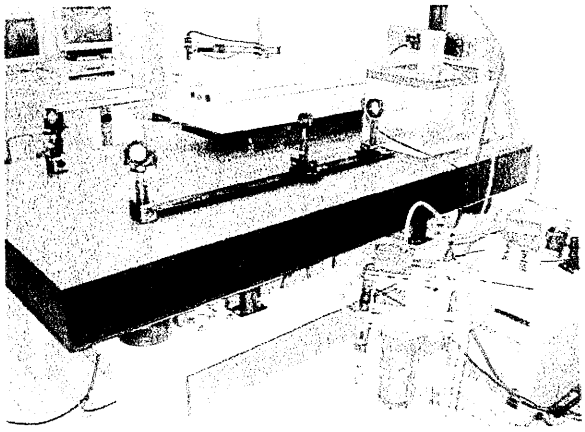

Fig. 2. Laser peening device.

**2.2 実験方法**　光源にはYAGレーザー第2高調波（$\lambda$=532nm，f=10Hz）を用いた．発振されたレーザー光は，2枚の全反射ミラーによって空間伝送される．その後，平凸レンズによって集光され，水中に設置された試料表面へと照射される．レーザパルス幅は6～7nsで，集光させる前のレーザー径は$\phi$10mmである．レーザー集光に使用した平凸レンズの焦点距離は250mmである．装置の外観をFig. 2に示す．本装置は新しく水の循環濾過システムを導入し，プラズマによって水中に放出された金属粒子を回収する．このシステムの導入により，水の汚染によるレーザーの散乱が軽減され，最後まで一定のピーニング処理が期待できる．レーザーピーニング処理条件をTable Ⅰに示す．

**2.3 X線応力測定**　本研究において試料表面の残留応力はX線回折による$\sin^2\psi$法を用いた．特性X線としてCrK$\alpha$線を用い，平行ビームを用いた並傾法を用いて測定を行った．回折面としては$2\theta$=139.3°に出現する311回折線を用いた．



NII-Electronic Library Service

The Society of Materials Science, Japan

Table Ⅰ. Conditions of laser peening.

| | |
|---|---|
| Laser power $P$, W | 0.10, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00, 2.25, 2.50 |
| Intervals of scanning lines, mm | 0.2 |
| Water temperature, ℃ | 22 |
| Exposed area, $mm^2$ | 10×10 |
| Scanning speed, mm/s | 2.0 |
| Laser spot diameter on specimen, mm | 0.1 |

## 3 実験結果および考察

**3.1 残留応力のレーザー出力依存性** レーザー出力と表面残留応力の関係をFig. 3に示す．ここで$\sigma_x$はピーニング走査方向の応力，$\sigma_y$は走査方向に対して垂直方向の応力を示す．すべてのレーザー出力において$\sigma_x$よりも$\sigma_y$の方が約50MPa圧縮側へ移行している．レーザー出力$P$=0.25Wのとき，圧縮残留応力が$\sigma_x$，$\sigma_y$ともに最大となり，それぞれの値は$\sigma_x$=-190MPa，$\sigma_y$=-250MPaとなる．P≧0.25Wの領域では，レーザー出力の増加とともに，圧縮残留応力は$\sigma_x$，$\sigma_y$ともに減少する．

鉄鋼材料に1発のパルスレーザーによりピーニング処理した場合，レーザースポットの内部は引張，外周部は圧縮残留応力が発生することが明らかになっている[3]．今回の実験では，ピーニングはX軸方向に連続的に走査したので，レーザースポットの重なりはY軸方向よりもX軸方向の方が大きくなる．レーザースポットが重なることにより，外周部が失われる，すなわち，圧縮残留応力部が少なくなる．したがって，走査方向の残留応力$\sigma_x$が$\sigma_y$よりも小さくなったと考えられる．

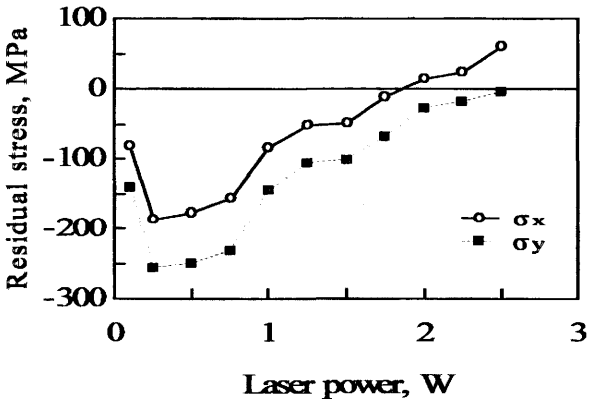


Fig. 3. Effect of laser power $P$ on residual stresses in the laser peened aluminum surface.

**3.2 X線半価幅変化率のレーザー出力依存性** レーザーピーニング処理面におけるX線半価幅変化率のレーザー出力依存性をFig. 4に示す．X線半価幅変化率は次式で与えられる．

$$\frac{\Delta B}{B_0}=\frac{B-B_0}{B_0}, \qquad (1)$$

ここで，$B_0$はレーザーピーニング処理前の試料から得られたX線回折の半価幅，$B$は処理後の試料から得られたX線回折の半価幅である．すべてのレーザー出力においてX線半価幅変化率は正となった．また，レーザー出力の増加とともにX線半価幅変化率も増加することが分かった．

X線半価幅変化率の増加原因の一つとして，結晶粒の微細化が挙げられる．したがって，レーザーピーニング処理を行うことによって試料表面が組成変形し，結晶が微細化したと考えられる．また，レーザー出力が増加するほど組成変形量が増加すると思われるので，レーザー出力の増加とともにX線半価幅変化率も増加すると考えられる．

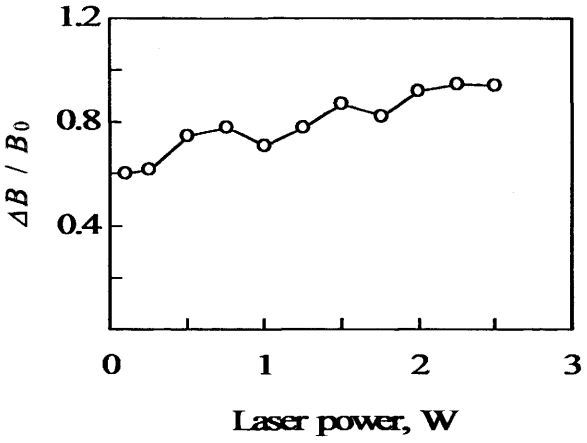


Fig. 4. $\Delta B/B_0$ of the laser-peened aluminum surface.

## 4 まとめ

本研究では，レーザーピーニング処理条件の一つであるレーザー出力を変化させ，表面に発生する残留応力とレーザー出力の関係を調べた．その結果，次のことが明らかとなった．

(1) 今回得られたほとんどすべてのアルミニウム試料表面に圧縮残留応力が発生した．

(2) すべてのレーザー出力において，レーザーピーニング走査方向の残留応力$\sigma_x$は$\sigma_y$よりも引張側に移行する．

(3) レーザー出力$P$= 0.25Wのとき，$\sigma_x$，$\sigma_y$ともに最大圧縮残留応力値が得られた．したがって，レーザー出力$P$= 0.25Wのときがレーザーピーニングの最適条件となる．

(4) X線半価幅変化率は，レーザー出力の増加とともに増加する．

### 参考文献

1) Y. Sano, N. Mukai, K. Okazaki and M. Obata: Nucl. Instr. Meth. B, 121, 432 (1997).

2) 小畑稔，久保達也，佐野雄二，依田正樹，向井成彦，嶋誠之，管野眞紀，J. Soc. Mat. Sci., Japan, 49, 193 (2000).

3) K. Akita, Y. Sano, T. Kubo, Y. Yoshioka and H. Suzuki, Proceedings of ATEM'03 (International conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2003), JSME-MMD, 2003.



NII-Electronic Library Service