

改良 9Cr 鋼および 316FR 鋼のレーザ・ピーニング処理

Laser Peening Treatment of modified 9Cr and 316FR Steels

東京理科大学工学部 中曽根 祐司 Yuji NAKASONE Member

This paper describes shot peening treatment of modified 9Cr steel and 316FR austenitic stainless steel, candidate structural materials for FBR by using YAG laser. A laser peening system has been developed and used to provide laser peening treatment for plate specimens of the two types of the steels dipped in water. A high speed digital camera revealed that many small bubbles were initiated along the path of laser light, moved along the path and coalesced with one another to produce a few large bubbles. The large bubbles imploded approximately 300 μ sec after each laser pulse emission. The high speed video implied that water jets were induced by the bubble implosion and impacted the surfaces of specimens to provide peening treatment for the specimens. The X-ray analyses were made around the peened portions of the specimen surfaces and revealed that the residual stress was tensile near the center of the peened portions and gradually decreased away from the center. The residual stress was compressive away from the peened sites.

Keywords: Laser Peening, YAG Laser, Creep, Damage, Recovery, Residual Stress, Implosion of Bubbles

1. 緒言

近年、疲労損傷の回復を図るためにレーザを利用したピーニング技術が開発され、構造部材に適用する試みがなされている^[1-3]。レーザを用いたピーニングでは、ショット・ピーニングのような大掛かりな装置を必要とせず、また、ウォータ・ジェット・ピーニングのように、水の漏洩を許容できる環境でしか使用できないなどの制限がない。さらに、レーザ光照射部の小型化が比較的容易に実現できる可能性があるため、供用中検査の際に損傷を受けた部材の回復・修復作業に用いることが期待できる。

以上のことを考慮し、著者らは、レーザ・ピーニングを先進型高速炉用構造材料の有力な候補材料として考えられている改良 9Cr 鋼および 316FR 鋼のクリープおよびクリープ・疲労損傷を回復する技術として検討してきた。

本研究では、その準備段階として、エネルギー密度の高い YAG レーザ発信機を用いたレーザ・ピーニング装置を試作し、改良 9Cr 鋼および 316FR 鋼母材製平滑平板試験片にレーザ・ピーニング処理を施し、水中におけるレーザ・ピーニング処理の可能性を探るとともに、高速度カメラを用いた観察により、ピーニング過

程の解明を試みた。また、ピーニング効果に及ぼすレーザ光の焦点と試験片表面間の距離の影響およびピーニング痕近傍における試験片表面の残留応力分布を定量的に評価し、レーザ・ピーニング処理をクリープおよびクリープ・疲労損傷材の回復・修復処理に適用する際の基礎データを取得することを試みた。

2. レーザ・ピーニング処理

表 1 に本研究で試作したレーザ・ピーニング装置の

Table 1 Specifications of the present YAG laser.

レーザ方式	YAG (緑色光)
パルス幅	5~7 nsec
パルスエネルギー	380 mJ (532 nm, 10 Hz)
エネルギー密度	10.7 GW/cm ²
スポット径	9 mm
パルス繰返し	10 Hz

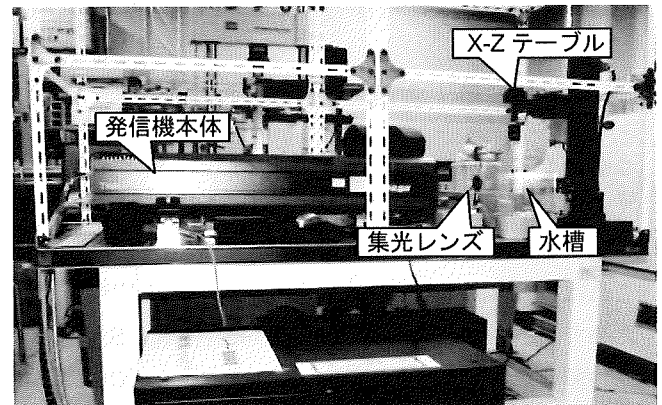


Fig. 1 Whole view of the present laser peening system.

連絡先：中曽根祐司
東京理科大学工学部機械工学科
〒102-0073 東京都千代田区九段北 1-14-6
E-mail: nakasone@rs.kagu.tus.ac.jp

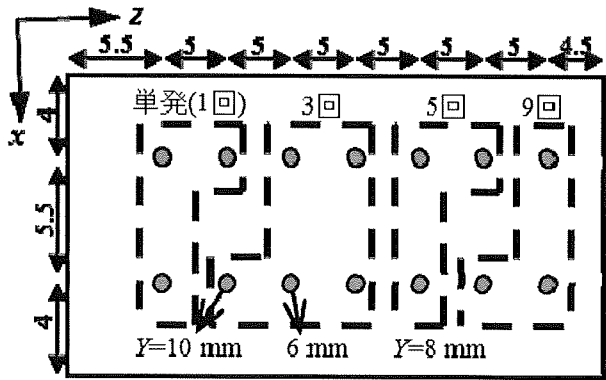


Fig. 2 Schematic illustration of a plate specimen, indicating peening sites, number of laser shots and the nominal distance between laser light focus and specimen surface.

主な仕様、また、図 1 に装置の全景を示す。レーザ・ピーニング装置は、タレスオプトロニック S.A.社製レーザ発振器 SEGA 220/10M、X-Z テーブル、集光レンズ付き水槽および集光光学系から構成される。

供試材としては、先進型高速炉用構造材料の有力な候補材料として考えられている改良 9Cr 鋼および 316FR 鋼を採用した。これら 2 種類の材料の化学成分

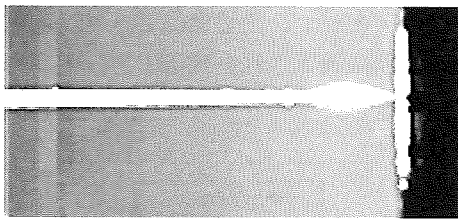
を表 2 に示す。

図 2 に今回用いた平滑平板状試験片のピーニング位置およびその位置における照射回数を示す。図中の Y の値は、レーザ光の焦点と試験片表面間の見掛けの距離である。レーザ発信器から照射されたレーザ光を 2 枚のレンズで集光し、水槽に浸漬した試験片の表面近傍で爆縮を起こさせて、ピーニングを施す。レーザ光を水中で照射する方式^[1]もあるが、本研究では、大気中でレーザ光を照射し、試験片表面近傍の水中で爆縮を起こさせるようにレーザ光を集光レンズで集光させることとした。この爆縮の様子は、(株)ナック製デジタル高速度カメラ ULTRA cam HS-106E (最大 1.25×10^6 fps) で撮影・観察した。

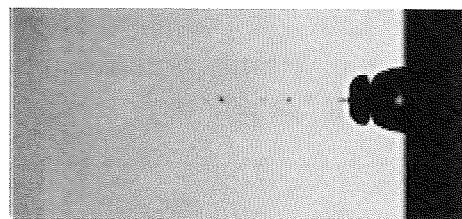
3. レーザ・ピーニング処理の結果

3.1 レーザ光による気泡の発生・成長・爆縮過程

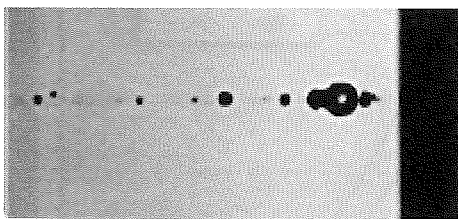
図 3(a)~(f)に、試験片表面近傍で生じたレーザ・ピーニング過程を高速度カメラで撮影した写真を示す。これらの写真から、レーザ・ピーニングについても、次のようなキャビテーションと同様な、レーザ光による気泡の発生・成長・爆縮の一連の過程が推察できる。



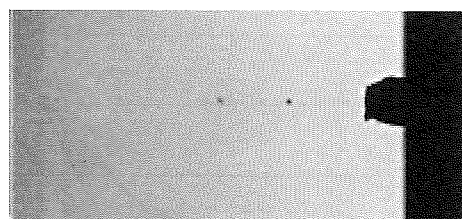
(a) Laser beam reaching specimen surface (0 sec)



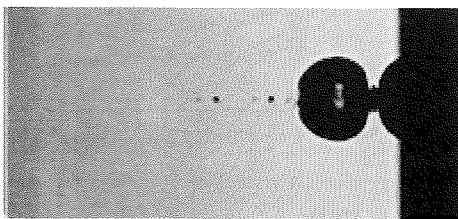
(d) Peening occurs at surface (28×10^{-5} sec)



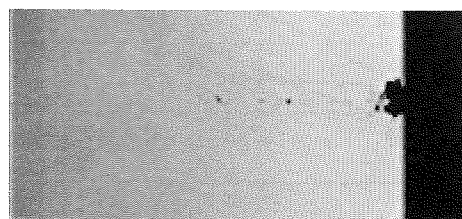
(b) Small bubbles initiated (1×10^{-5} sec)



(e) Shrinkage of large bubbles (31×10^{-5} sec)



(c) Bubble coalescence and growth (12×10^{-5} sec)



(f) Termination of bubble implosion (34×10^{-5} sec)

Fig. 3 High speed camera depicting the progress of the laser peening process (1×10^5 fps, or frames per sec).

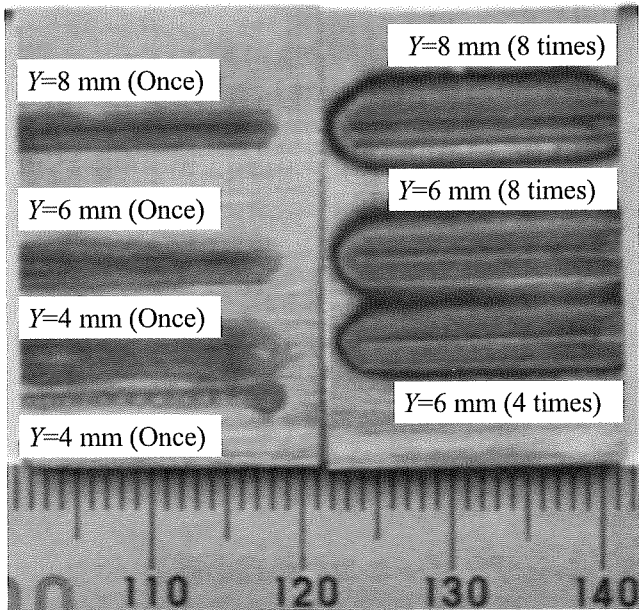


Fig. 4 Laser peening marks remained on the surface of a modified 9Cr steel specimen: Y is the nominal distance between the laser light focus and specimen surface and the numbers in brackets indicate the number of overlap peening.

すなわち、レーザ光によって水中に気泡が発生し、レーザ光が試験片表面に到達 ($t=0$ sec) した直後に、レーザ光の光路上の水が複数箇所でも局所的な沸騰を起こし、それらを核として、試験片前方で複数個の小さな気泡が生じる ($t=1 \times 10^{-5}$ sec 後)。次に、それらの小さ

な気泡が、光路に沿って試験片表面に向かって移動し、合体・成長を繰り返して、大きな気泡を形成 ($t=12 \times 10^{-5}$ sec) する。このようにして大きく成長した1~2個の気泡の試験片表面と反対側の壁が崩壊する。この気泡壁が破れる際に発生した水流が試験片表面へ向かうジェットとなり、このジェットが試験片表面に当たって試験片表面に衝撃圧を及ぼす ($t=28 \sim 31 \times 10^{-5}$ sec)。このような一連の過程を経て、1回のピーニング過程は約 34×10^{-5} sec 間で終了する。

3.2 レーザ・ピーニング痕

図4に、改良9Cr鋼試験片表面に導入されたレーザ・ピーニング痕の例を示す。レーザ光焦点と試験片表面間の見掛けの距離 Y の値を変化させるとレーザ光による気泡の爆縮発生点と試験片表面との間の距離が変化するため、 Y の値はピーニングの効果に影響を与えると考えられるが、今回実験した範囲では Y 値を変化させてもピーニング痕の寸法に大きな差は見られなかった。ただし、レーザの走査回数を増加させると、ピーニング痕の幅及び深さが増加する傾向があることが明らかとなった。

3.3 レーザ・ピーニング処理による試験片表面近傍の残留応力分布

レーザ・ピーニング処理によって改良9Cr鋼試験片表面近傍に導入された残留応力分布の例を図5に示す。図5は、レーザ・ピーニング痕の中心および

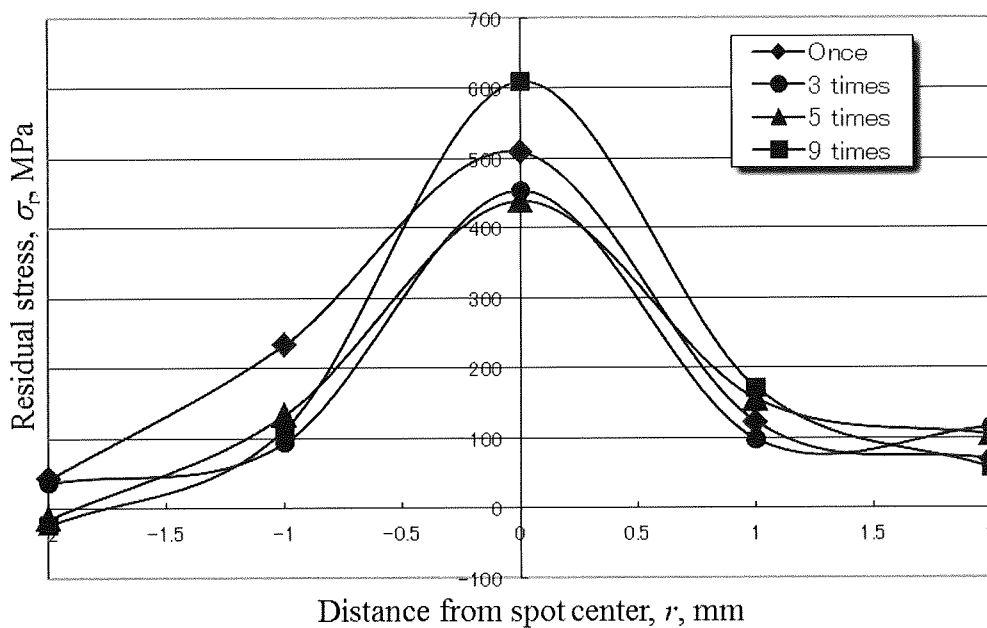


Fig. 5 Residual stress distributions in a near surface region of approximately $3 \mu\text{m}$ in depth around the peening center: The residual stress distributions were measured by the X ray diffraction method.