

課題番号 : 2019A-E09

利用課題名 (日本語) : 集光プロファイルを制御した高出力レーザーによりピーニング加工された試料の非破壊三次元残留応力分布測定

Program Title (English) : Non-destructive, three-dimensional measurements of residual stress distribution inside laser shock-peened samples produced by high-power laser with shaped beam profile

利用者名(日本語) : 三浦 永祐<sup>1)</sup>, 弘中 陽一郎<sup>2)</sup>, 重森 啓介<sup>2)</sup>, 尾崎 典雅<sup>2)</sup>, 宮西 宏併<sup>2),4)</sup>, 栗田 隆史<sup>3)</sup>, 渡利 威士<sup>3)</sup>, 壁谷 悠希<sup>3)</sup>, 吉村 涼<sup>3)</sup>, 加藤 義則<sup>3)</sup>, 黒田 隆之助<sup>1)</sup>, 児玉 了祐<sup>2)</sup>

Username (English) : E. Miura<sup>1)</sup>, Y. Hironaka<sup>2)</sup>, K. Shigemori<sup>2)</sup>, N. Ozaki<sup>2)</sup>, K. Miyanishi<sup>2),4)</sup>, T. Kurita<sup>3)</sup>, T. Watari<sup>3)</sup>, Y. Kabeya<sup>3)</sup>, R. Yoshimura<sup>3)</sup>, Y. Kato<sup>3)</sup>, R. Kuroda<sup>1)</sup>, and R. Kodama<sup>2)</sup>

所属名(日本語) : 1) 産業技術総合研究所, 2) 大阪大学, 3) 浜松ホトニクス株式会社, 4) 理化学研究所

Affiliation (English) : 1) AIST, 2) Osaka University, 3) Hamamatsu Photonics K.K., 4) RIKEN

キーワード : 高パルスエネルギーレーザー、レーザーピーニング、衝撃波、集光プロファイル制御

### 1. 概要 (Summary)

中空のリング状の集光プロファイルを持つ数 100 J クラスの高パルスエネルギーレーザーを用いてレーザーピーニング加工されたチタン合金の残留応力分布を、放射光施設からの高エネルギー X 線を用いて測定し、レーザー未照射領域直下にも圧縮応力層の形成を観測した。レーザーの集光プロファイル整形により金属材料内部に形成される残留応力層形状の制御が可能であることを示す結果が得られた。

### 2. 実験(目的,方法) (Experimental)

#### 2.1 研究目的

金属材料に圧縮応力層を形成し、材料を改質、強靱化する手法として、レーザー駆動衝撃波を用いるレーザーピーニング法が注目されている。レーザーピーニング法はこれまで用いられてきたショットピーニングよりも材料深層に残留応力を付与でき、微小領域の選択的処理が可能等の特徴を持つ。従来のレーザーピーニングではパルスエネルギーが 1 J クラスのレーザーが用いられてきたが、我々は数 100 J クラスの高パルスエネルギーレーザーを用いて材料深層の改質、強靱化を可能とするレーザーピーニング法の開発を進めている。また、レーザーの集光プロファイルによりレーザー駆動衝撃波の伝搬を制御し、材料深層を改質することに加え、改質領域の形状制御等、新しい加工手法の開発にも取り組んでいる。

本研究では、集光プロファイルが整形された高パルスエネルギーレーザーを用いてレーザーピーニング加工された金属材料内部に形成される残留応力分布を、高い

空間分解能かつ非破壊で三次元的に測定し、その加工物理解明のための知見を得ることを目的とする。

#### 2.2 レーザーピーニング加工試料作製

試料作製には、大阪大学レーザー科学研究所の激光 XII 号ガラスレーザーを用いた。あらかじめ熱処理し、ひずみを除去したチタン合金 Ti6Al4V (20 mm 角 x 10 mm 厚さ) 板に、エネルギー 600 J、パルス幅 5 ns (ガウス波形) のガラスレーザーの基本波光 (波長 1.05 μm) を 5 mm 径に集光して試料を作製した。

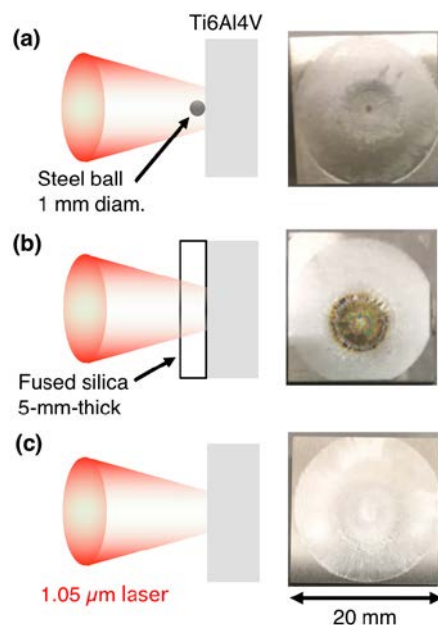


図 1 試料作製のためのレーザー照射法と試料の表面写真。(a)リング状集光試料、(b)プラズマ閉じ込め層のある試料、(c)参照試料。

図 1(a)のリング状集光試料は、直径 1 mm の鉄球で集光中心近傍のビームをブロックし、中空のリング状集光プロ

ファイルを用いて作製される。図 1(a)右の試料表面写真に 1 mm 径のレーザー未照射領域が確認できる。図 1(b)の場合、試料に密着させた合成石英窓(厚さ 5 mm)を通してレーザー光が照射される。合成石英は試料表面に生成されるプラズマを閉じ込める。図 1(c)の照射で作製される試料は、リング状集光、プラズマ閉じ込め層の加工効果を検証するための参照試料として用いられる。

### 2.3 測定条件

BL22XU ラインに設置された応力イメージング測定装置等を用い、70 keV の X 線により透過配置で面内方向のひずみを計測した。X 線ビームサイズは 50  $\mu\text{m}$   $\times$  300  $\mu\text{m}$  とした。これにより空間分解能は、面内方向が 50  $\mu\text{m}$   $\times$  300  $\mu\text{m}$ 、深さ方向が 300  $\mu\text{m}$  程度となる。図 1 に見られる試料表面に形成されたレーザー照射痕中心を原点として、深さ方向、半径方向を軸としたひずみ 2 次元マップを作成するためのデータ取得を行った。X 線の光軸と直交する 2 軸に沿って試料をスキャンして得られる 2 つのひずみ 2 次元マップを用い、平面 2 軸応力状態を仮定して半径方向、周方向の残留応力分布を得た<sup>[1]</sup>。

図 2(a)(b)は、図 1(c)の照射配置で作製された参照試料の(a)半径方向、(b)周方向の残留応力分布である。レーザーの集光領域(半径 2.5 mm)の下に、深さ 0.8 mm 程度まで圧縮応力層が形成されている。レーザー強度分布はガウス状分布で集光中心( $r = 0$ )近傍の強度が高いため、集光中心直下に強い圧縮応力の付与が見られる。図 2(c)(d)は、図 1(a)のリング状集光で作製された試料の(c)半径方向、(d)周方向の残留応力分布である。各々の上部に破線で示した領域にはレーザーが照射されていないが、その直下に深さ 0.3 mm 程度にわたり比較的強い圧縮応力の付与が見られる。図 1(a)の表面写真に見られる様に、レーザー照射領域では試料表面が変形する。未照射領域との間に生じるせん断力がもたらすひずみにより残留応力層が形成されたと考えられる。図 2 には、レーザーの照射、未照射の境界がある集光の外周( $r = 2.5$  mm)付近にも局所的にやや強い応力の付与が見られており、同様の機構によって応力層が形成されたと考えられる。

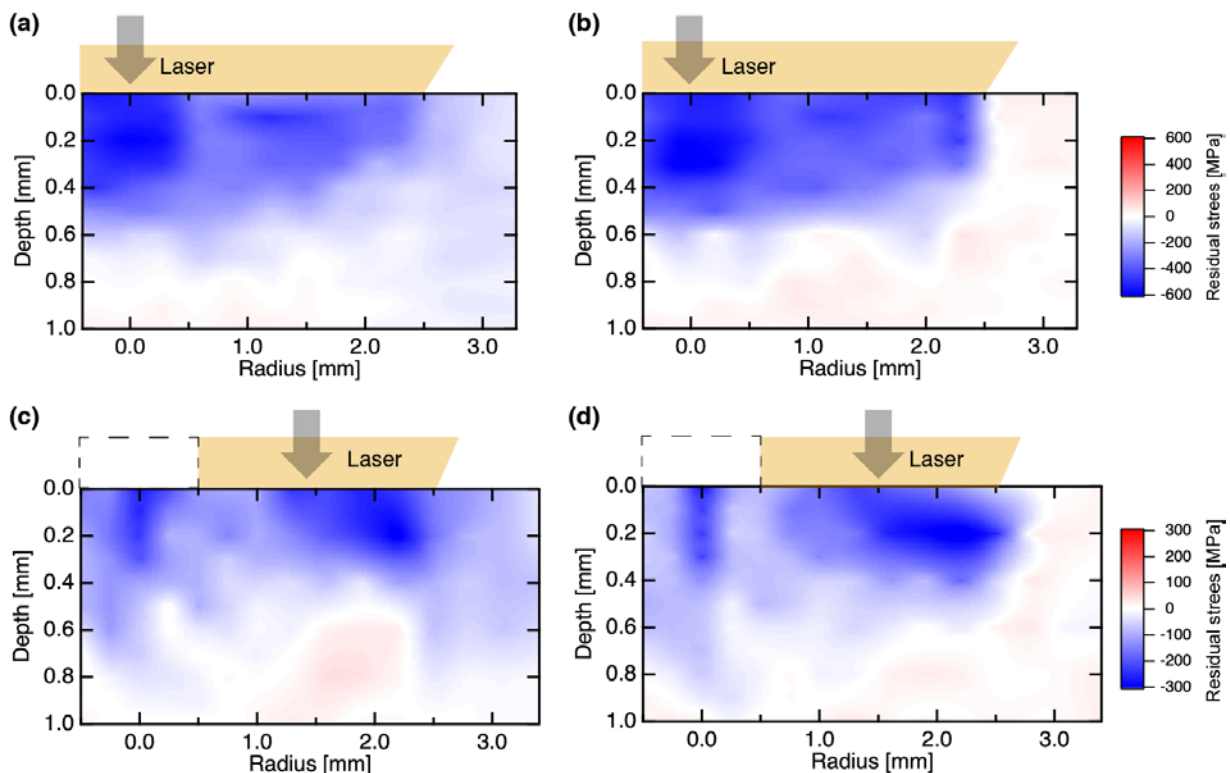


図 2 参照試料の (a)半径方向および(b)周方向の残留応力分布。リング状集光試料の(c)半径方向および(d)周方向の残留応力分布。

## 3. 結果と考察(Results and Discussion)

### 3.1 リング状集光試料

リング状の集光プロファイルを用いることにより、レーザー照射領域下に発生した衝撃波が集光中心下で干渉

し、強い衝撃波を形成し深層まで伝搬することが示されている<sup>[2]</sup>。本試料の場合、幾何学的配置から衝撃波の干渉点は表面から 0.5 mm の位置になる。図 2(c)(d)に見られる集光中心直下の 0.3 mm までの比較的強い応力層の形成は衝撃波干渉によるものではないと考えられる。一方、集光中心下では 1 mm まで、弱い圧縮応力の付与が見られる。この部分は図 2(a)(b)には見られず、干渉により形成された衝撃波がより深層まで伝搬し、形成した応力層と考えることができる。

### 3.2 プラズマ閉じ込め層の効果

図 3 に図 1(b)のプラズマ閉じ込め層のある試料の半径方向のひずみ分布を示す。この試料については、1 方向のみの測定を行ったので、ひずみ 2 次元マップとして結果を示した。圧縮応力層の厚さは 1.2 mm 程度とプラズマ閉じ込め層のない参照試料 (図 2(a)(b)) の 1.5 倍程度であり、その効果を検証することができた。プラズマ閉じ込め層により、衝撃波を駆動するプラズマの高圧力が維持される時間が長くなったためと考えられ、非常に妥当な結果である。

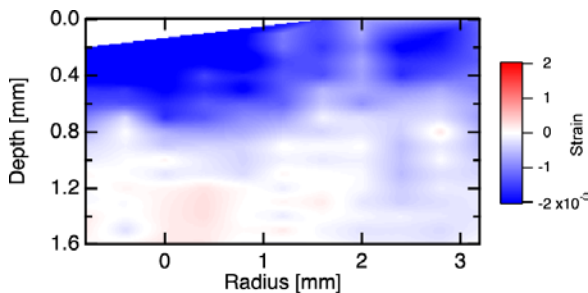


図 3 プラズマ閉じ込め層のある試料のひずみ分布。  
中空のリング状集光プロファイルを持つ数 100 J クラスの

高パルスエネルギーレーザーを用いてレーザーピーニング加工されたチタン合金の残留応力分布を測定した。レーザー未照射領域直下に圧縮残留応力層の形成を観測し、材料深層には干渉により深層まで伝搬した衝撃波が形成した圧縮応力層も観測された。レーザー集光プロファイルにより、レーザー駆動衝撃波の伝搬を制御し、材料深層を改質することに加え、改質領域の形状制御等の新しいピーニング加工が可能な事を示す結果が得られた。今後は、流体シミュレーションとの比較を行い、その加工物理を明らかにしていく予定である。

## 4. その他・特記事項 (Others)

### 4.1 参考文献

- [1] 田中 啓介, 鈴木 賢治, 秋庭 義明, 菖蒲 敬久, “放射光による応力とひずみの評価”(養賢堂).
- [2] 弘中 陽一郎, 壁谷 悠希, 宮西 宏併, 三浦 永祐, 重森 啓介 他, IFSA2019, 5p-57 (2019).

### 4.2 謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託事業「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」により行われたものです。