課題番号　:2018A-E13

利用課題名（日本語）　:二領域照射レーザーピーニング加工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 with two laser irradiation regions

利用者名（日本語）　:三浦 永祐[1)], 弘中 陽一郎[2)], 重森 啓介[2)], 壁谷 悠希[3)], 宮西 宏併[2)], 松岡 健之[2)], 尾崎 典雅[2)], 栗田 隆史[3)], 渡利 威士[3)], 水田 好雄[3)], 加藤 義則[3)], 黒田 隆之助[1)], 兒玉 了祐[2)]

Username (English)　: E. Miura[1)], Y. Hironaka[2)], K. Shigemori[2)], Y. Kabeya[3)], K. Miyanishi[2)], T. Matsuoka[2)], N. Ozaki[2)], T. Kurita[3)], T. Watari[3)], Y. Mizuta[3)], Y. Kato[3)], R. Kuroda[1)], and R. Kodama[2)]

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

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

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、残留応力分布、集光パターン制御

1. 概要（Summary ）

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鉄鋼材料の残留応力分布を、放射光からの高エネルギーX 線を用いて非破壊で測定した。残留応力層を形成するレーザー駆動衝撃波の材料内部での伝搬形状を観測することができた。また、2 つのレーザー照射領域を設けることによって、2 つの領域から発生した衝撃波の干渉を利用し、深層の改質が可能なことを示唆する結果が得られた。

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、強靭化する手法として、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 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、強靭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[1,2]。

本研究では、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鉄鋼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。図 1 に示すレーザー照射法により、あらかじめ熱処理してひずみを除去した SUS304（20 mm 角 x 5 mm 厚さ）板を用いて 2 種類の試料を作製した。

図 1(a)に示す様にガラスレーザーの基本波光（波長 1.05 μm、エネルギー300 J, パルス幅 10 ns）を 3 mm 径に集光し、一波長一領域照射試料と呼ぶ試料を作製した。

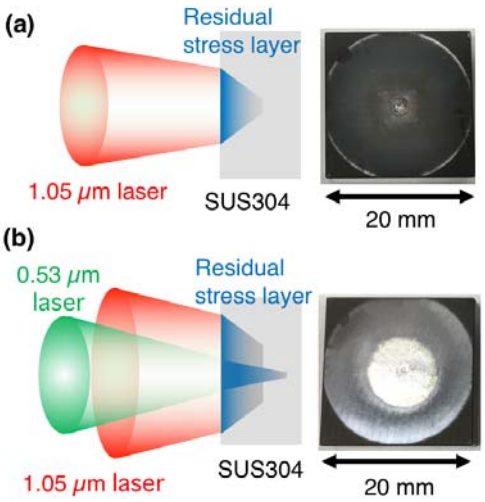

図 1 (a) 一波長一領域照射試料、(b) 二波長二領域照射試料作製のためのレーザー照射法と試料の表面写真。

二倍波光（波長 0.53 μm）と基本波光を一つのレンズで集光し、図 1(b)に示す様な二倍波光の集光領域（1 mm 径）を基本波光の集光領域（10 mm 径）が取り囲む集光パターンを実現し、二波長二領域照射試料を作製した。エネルギー

は二倍波光 30 J, 基本波光 300 J、パルス幅は共に 10 ns で、3 ショット重ね打ちをした試料を作製した。図 1 に各々の作製された試料の表面写真も示す。

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、残留応力分布測定を行った[3]。70 keV の X 線を用い、透過配置で面内方向のひずみを計測した。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 線ビームサイズは 50 μm x 300 μm とした。これにより空間分解能は、面内方向が 50 μm×300 μm、深さ方向が 300 μm 程度となる。

レーザー未照射の試料の測定は行っていないので、無ひずみ時の回折角、回折プロファイルの半価幅は、レーザー集光領域外の材料深層の値を用いて決定した。

3. 結果と考察(Results and Discussion)

3.1 一波長一領域照射試料

回折角 θ 、無ひずみ時の回折角 θ_0 を用いて、ひずみ ε は式(1)で与えられる。

$$\varepsilon = -(\theta - \theta_0)\cot\theta_0 \quad (1)$$

本試料では、試料を X 線の光軸を中心に 90 度回転して二方向(χ=0°, 90°)から面内ひずみ分布を測定した。各々の方向で測定されたひずみを ε_0、ε_{90} とすると、平面 2 軸応力状態を仮定すれば、半径方向の応力 σ_x とそれに直交する径方向の応力 σ_y は式(2)で与えられる。

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2}\left(\varepsilon_0 + \nu\varepsilon_{90}\right),\ \sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2}\left(\varepsilon_{90} + \nu\varepsilon_0\right) \quad (2)$$

式(2)において E, ν はヤング率、ポアソン比で、SUS304 では各々197 GPa、0.3 である。

レーザー集光中心直下(半径方向の原点)のひずみ分布を図 2 に示す。試料を 90 度回転した方向(χ=90°)では、

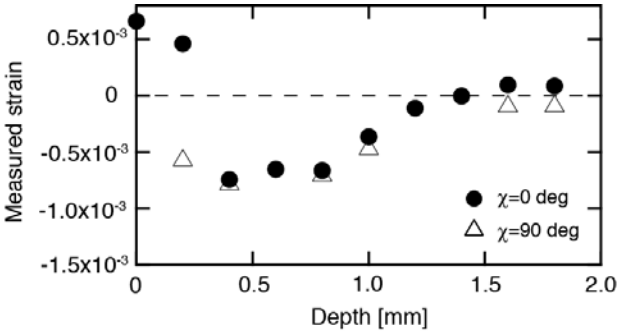

図 2 一波長一領域照射試料のレーザー集光中心直下のひずみ分布

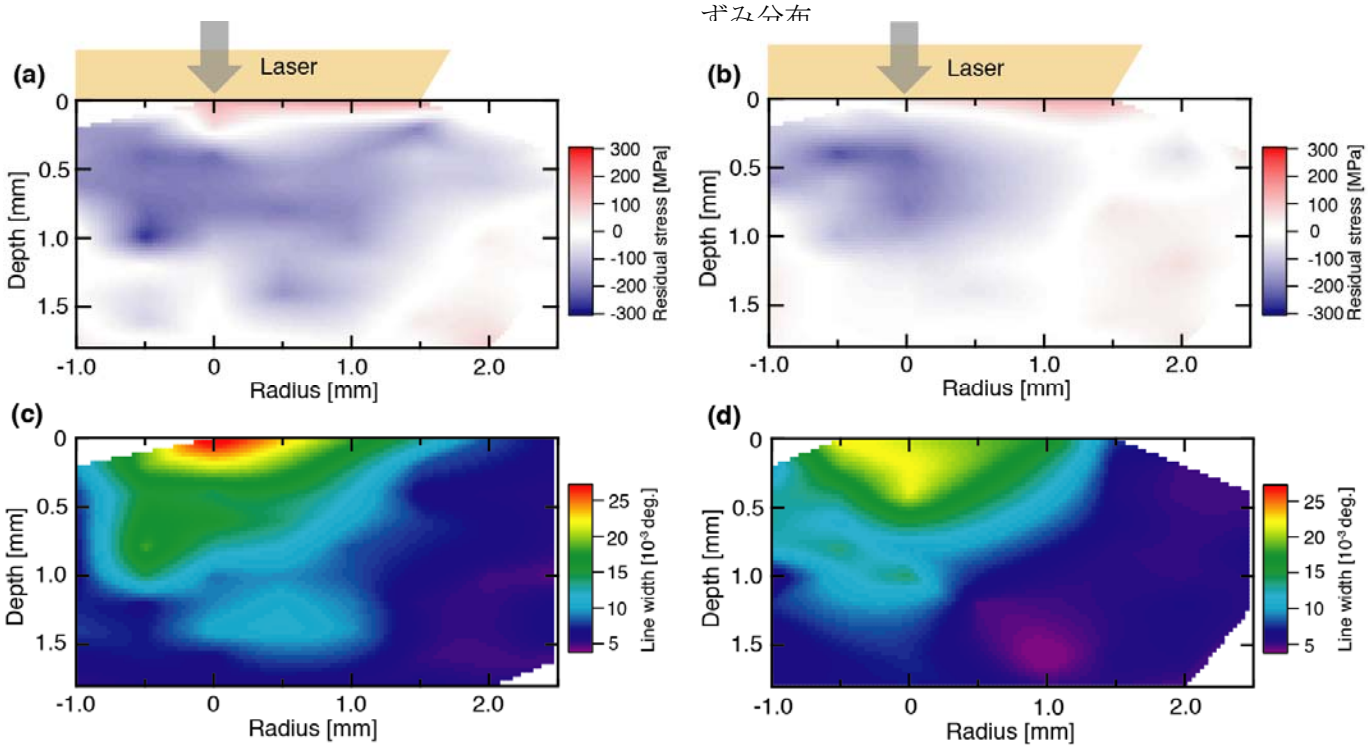

図 3 一波長一領域照射試料の(a)半径方向および(b)周方向の残留応力分布。(c) χ=0° 方向、(d) χ=90° 方向 で測定された半価幅分布。

回折ピークが得られなかった点があったが、ひずみ量が大きく変化する材料表面近傍を除いては、両者のひずみ分布にあまり差がないので、レーザー集光中心直下は等2軸応力状態になっていると考えられる。試料表面に生成される高温プラズマの影響で、表面は引っ張りになっているが、内部には 1.2 mm 程度の深さまで圧縮応力層が形成されており、最大の圧縮応力は 200 MPa 程度と見積もられた。

半径方向 0.5 mm、深さ方向 0.2 mm の間隔で取得した 2 次元ひずみ分布より、ボロノイ近似を用いて内挿して作成した(a)半径方向、(b)周方向の残留応力分布を図 3 に示す。図 3 において、(c)は χ=0° 方向、(d)は χ=90° 方向で測定された X 線回折プロファイルの半価幅分布である。

図 3(a)(b)から材料内部の圧縮応力層の分布は、レーザー集光領域を底面とする円すい状の分布をしていると考えられる。材料表面から内部に向かって伝搬する衝撃波は、レーザーパルスの照射終了と同時に表面から侵入する希薄波により減衰する。希薄波はレーザー集光域の周辺からも侵入し、衝撃波を減衰させるため、円すい状の圧縮応力層の分布が形成されたと考えられる。塑性変形により結晶方位が乱れるとX線回折プロファイルの半価幅が大きくなる。半価幅分布は衝撃波の影響層の分布を表すと考えられる。各々の方向の半価幅分布も残留応力分布と同様に、レーザー集光領域を底面とする円すい状の分布をしており、上述の描像を裏付けている。

これらの結果は材料深層に衝撃波を伝搬させるには、レーザーの集光パターンを整形して、集光領域周辺からの希薄波の侵入を抑制することが必要な事を示している。

3.2 二波長二領域照射試料

透過配置で半径方向 1 mm、深さ方向 0.4 mm の間隔で 2 次元のひずみ分布を取得した。測定時間の制限から 1 方向からの測定しか行っていないので、等 2 軸応力状態を仮定し、上記と同様の手法を用いて 2 次元残留応力分布を作成した。その結果を図 4 に示す。図 4(a)は残留応力分布、(b)は半価幅分布、(c)は集光中心直下のひずみの深さ方向の分布を示す。右にひずみ量に相当する残留応力を示した。

図 4(a)に見られる様に、圧縮応力層が 0.53 μm 光の集光径(1 mm)以上に半径方向に広がっている。1.05 μm 光の集光径が 10 mm と大きいため、周辺から中心部への希薄波の侵入が抑制されたため、レーザー強度は低いが集光中心近傍では、1.05 μm 光が駆動する衝撃波も圧縮応力層を形成したと考えられる。図 4(b) の半価幅分布も同様に半径方向の広がりが見られており、上述の描像を裏付けている。

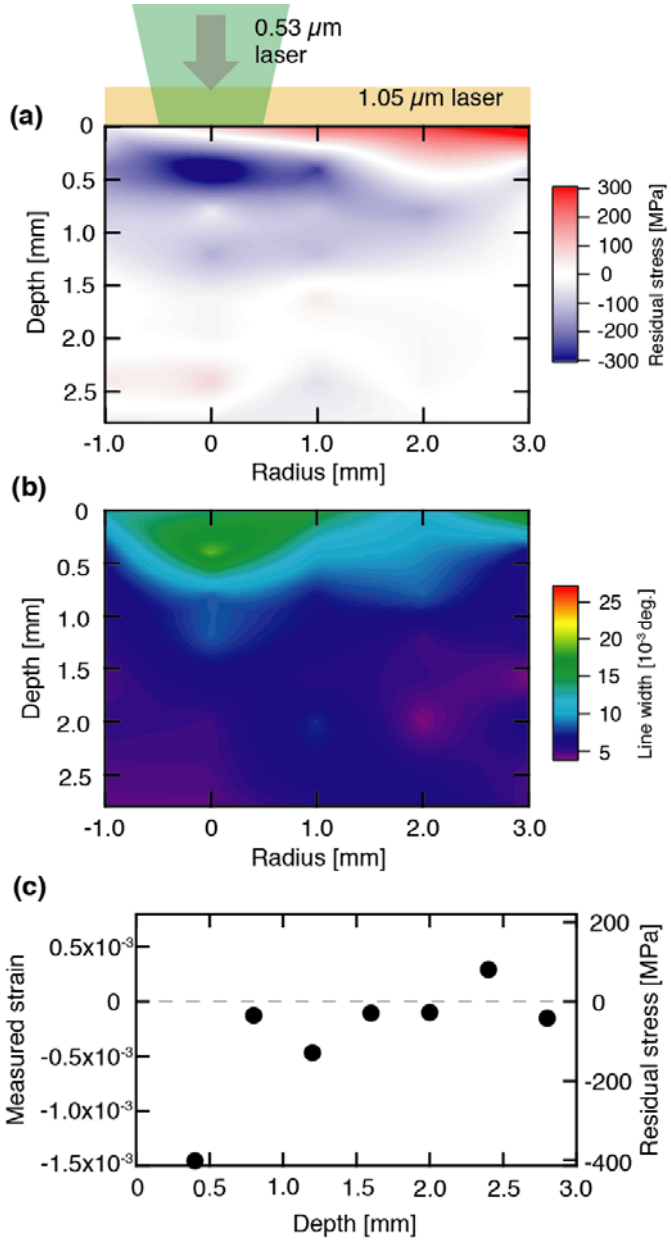

図 4 二波長二領域照射試料の(a)残留応力分布、(b)半価幅分布、(c) 集光中心直下のひずみ分布。

また、図 4(c)に示した様に、集光中心直下では、残留圧縮応力が図 2 に示した一波長一領域照射試料の様に単調に 0 に漸近するのではなく、深さ 1 mm 近傍で一旦増大するような特徴的な分布が得られ、より深層までの残留応力層形成が見られた。この結果は、二つのレーザー照射領域から発生する衝撃波の材料内部での干渉を示唆していると考えられる。これまでに、1 ショットで作製した二波長二領域照射

試料を表面研磨し X 線回折装置を用いて集光中心直下の残留応力分布を調べている[4,5]。図 4(c)と同様に深さ 1 mm 近傍で圧縮応力が一旦増大するような分布が得られており、本測定結果はこれまでの結果を裏付けている。

1 ショットで作製した二波長二領域照射試料での最大の圧縮応力は 200 MPa 程度であった[4,5]。一方、3 ショットの重ね打ちで作製した本試料の最大の圧縮応力は 400 MPa を超えており、レーザーの重ね打ちにより残留応力を増強できることも検証できた。

二波長二領域照射の様に、レーザーの集光プロファイルを制御し、材料内部に発生する衝撃波を制御することが可能なことが示唆された。しかし、今回は一方向からしか測定しておらず、また、測定点が少なく、空間分解能があまり高くないので、より精度の高い測定を再度実施する必要があると考えている。

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鉄鋼材料内部の残留応力分布を測定し、レーザー駆動衝撃波の材料内部での伝搬形状を観測した。2 つの照射領域を設ける等、レーザー集光パターンの制御により材料内部の衝撃波伝搬を制御し、深層の加工が可能であることを示唆する結果が得られた。今後は、流体シミュレーションとの比較を行い、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] 栗田隆史, 弘中陽一郎, 三浦永祐, 渡利威士, 黒田隆之助 他, 第 60 回放射線化学討論会, I-13 (2017).

[2] 栗田隆史, 弘中陽一郎, 三浦永祐, 黒田隆之助, 重森啓介 他, レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会, C124aV02 (2018).

[3] 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).

[4] 弘中陽一郎, 三浦永祐, 黒田隆之助, 宮西宏併, 重森啓介 他, 第 78 回応用物理学秋季学術講演会, 7a-S45-3 (2017).

[5] 弘中陽一郎, 三浦永祐, 黒田隆之助, 宮西宏併, 重森啓介 他, Plasma Conference 2017, 23Ea-06 (2017).

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。