

疲労特性向上のためのフェムト秒レーザーピーニング技術の開発

大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻
准教授 佐野 智一
(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016217)

キーワード：ベンディング，プレスブレイキ，曲げ荷重

1. 研究の目的と背景

構造物・機器の破壊の 80% 以上は金属の疲労が原因だと言われている。従って、金属の疲労特性を向上させることによって、構造物・機器の寿命を延ばし、安全性を高めることが出来る。疲労特性を向上させる技術として、ピーニングがある。ピーニングとは、ハンマーや金属の微小球を金属にうちつけ、塑性変形を起こすことによって金属を硬化させ、圧縮残留応力を付与し、結果的に疲労特性を向上させる加工法である。現行の加工法を表 1 に示す。ハンマーピーニング、ショットピーニングといった接触式の方法と、レーザーピーニングのような非接触の方法に大別される。現行のレーザーピーニングではナノ秒レーザーが用いられ、塑性変形を起こすのに十分な衝撃波を誘起するために、アブレーション時のプラズマ膨張を抑制するための水などの媒質中で施工される。これまで、水などのプラズマ閉じ込め媒質を用いず、非接触なピーニング加工法は存在しなかった。申請者が考案した“フェムト秒レーザーピーニング”は、これを可能とするピーニング加工法である[1]。

表 1. ピーニング加工法一覧

ピーニングツール	接触/非接触	水などの媒質
ハンマー ショット 微粒子 超音波	接触	不要
ナノ秒レーザー キャビテーション	非接触	必要
フェムト秒レーザー	非接触	不要

申請者はこれまで、フェムト秒レーザーパルスを空气中で材料表面に集光照射することによって衝撃波が駆動され材料中を伝播し、このフェムト秒レーザー駆動衝撃波によって高密度転位や準安定構造が形成されることを世界に先駆けて明らかにしてきた[5,9,10]。また、フェムト秒レーザー駆動衝撃波を金属表面に 2 次的に重畳して負荷することにより、金属表面が硬化し、圧縮残留応力が付与される(図 1) ことを見出し、この手法を“フェムト秒レーザーピーニング”と名付けた[1]。また、フェムト秒レーザーピーニングを施した純鉄の表面を透過電子顕微鏡観察したところ、高密度転位を有する特異なナノ結晶が存在することがわかった[2,3,4,7]。このことから、フェムト秒レーザーピーニング過程は従来の強加工プロセスとは機構が異なることを示した。さらに、申請者らが構築したフェムト秒レ

ーザ駆動衝撃圧縮現象その場計測装置を用いて、ピーニング初期過程の格子ひずみをその場計測したところ、これまで予想されなかった 1.8×10^9 /s の超高速かつ 22 GPa に相当する巨大な弾性ひずみが誘起されていることを発見し、それが転位の核生成を誘起し高密度転位を形成することを示唆した[6,8]。

このように申請者はこれまでの研究で、フェムト秒レーザーピーニングによって金属表面が硬化し圧縮残留応力が付与されること、特異な微細組織が形成されること、さらに圧縮初期過程ではこれまで予想されなかったような超高速でかつ巨大に変形することを見出してきた。しかしながら、溶接継手のような溶接金属、熱影響部といった母材と異なる材料特性を持つ部分を含むような実材料へのフェムト秒レーザーピーニングの適用の可能性は調べられていない。そこで本研究では、フェムト秒レーザーピーニングの溶接継手への適用を目指すことを目的とし、フェムト秒レーザーピーニングしたアルミニウム材料の硬さ、残留応力といった機械特性、TEM による転位組織観察を実施した。

2. 実験方法、結果および考察

アルミニウム材料(2024-T3 アルミニウム合金)をレーザー溶接(IPG 社製 YLS-2000-SM、波長 1070nm、CW、2.0 kW、2.5 m/min) することにより、一枚の板の中に溶融凝固し軟化した部分(凝固部)と、溶融していないが熱影響を受け軟化した部分(熱影響部)を形成した(図 1)。この継手にフェムト秒レーザーパルス(波長 800 nm、パルス幅 130 fs、パルスエネルギー 0.6 mJ)を集光照射することによってフェムト秒レーザーピーニングを施し、機械特性を評価した。

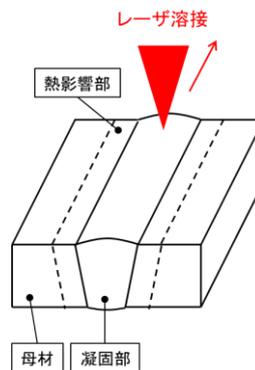


図 1. レーザ溶接によって作製した継手

フェムト秒レーザーピーニングがレーザー溶接による軟化部の表面硬さに及ぼす影響を評価するため、試験片表面のマイクロビッカース硬さ試験を行った。フェムト秒レーザーピーニング施工前に試験片表面を粒径約 $1\ \mu\text{m}$ のダイヤモンドを用いたバフ研磨により鏡面とし、フェムト秒レーザーピーニングを施した。硬さ試験を行う前に、フェムト秒レーザーピーニングにより付着したデブリを粒径 $1\ \mu\text{m}$ のダイヤモンド粒子を用いたバフ研磨により除去し、粒径 $40\ \text{nm}$ のコロイダルシリカ懸濁液を用いた機械化学研磨による機械研磨加工層の除去を行った。測定間隔 $200\ \mu\text{m}$ でビード中心から $\pm 10\ \text{mm}$ の領域に対し、荷重 $200\ \text{g}$ で負荷時間 $15\ \text{s}$ の条件で硬さ試験を行った。測定誤差を減らすため 3 回測定を行いその平均値をその位置での硬さとした。

図 2 にフェムト秒レーザーピーニング施工前後の試験片表面の硬さ測定結果を示す。試験片母材硬さは約 $138\ \text{HV}$ である。図 2 に示す通り、フェムト秒レーザーピーニング前の試験片では凝固部の硬さが著しく減少していることが確認された。凝固部の硬さは約 $100\ \text{HV}$ であり、母材硬さと比較して約 $30\ \text{HV}$ 硬さが低下した。硬さ試験は溶接後 15 ヶ月経過後に行ったため、自然時効は完了している。

凝固部では、析出強化に寄与する Mg 元素が溶接時に蒸発したために、自然時効後に析出強化することが出来ず、硬さが低下したと考えられる。さらにビード中心から約 $4\ \text{mm}$ までの領域では、硬さが約 $130\ \text{HV}$ であり、母材硬さと比較して約 $10\ \text{HV}$ 硬さが低下した。この領域は熱影響部であると考えられ、析出物および結晶粒の粗大化により硬さが低下したと考えられる。図 2 に示す通り、フェムト秒レーザーピーニングによって試験片全体の表面硬さが向上することが確認された。凝固部では、フェムト秒レーザーピーニングにより硬さが約 $30\ \text{HV}$ 向上した。母材および熱影響部でも硬さが向上し、硬さがそれぞれ約 $34\ \text{HV}$ 、 $40\ \text{HV}$ 向上した。

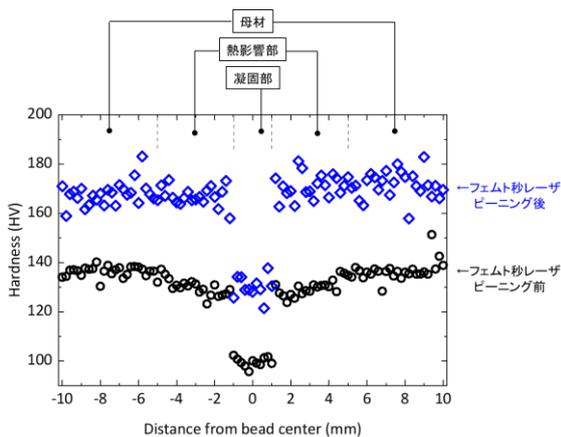


図 2. フェムト秒レーザーピーニング前後のレーザー溶接継手表面の硬さ分布

フェムト秒レーザーピーニングがアルミニウム合金の疲労特性に及ぼす影響を評価するために平板曲げ疲労試験

を行った。疲労試験片の形状を図 3 に示す。図 3 中の赤色で示した領域の両面に対しフェムト秒レーザーピーニングを施した。疲労試験はシェンク式平板曲げ疲労試験機（東京衡機製、PBF-30 型）を用い、完全両振り、変位一定で行った。

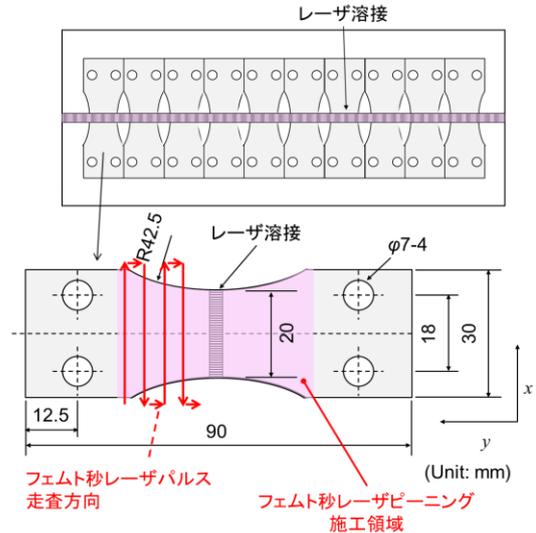


図 3. 疲労試験片

疲労試験結果を図 4 に示す。図中の実線矢印は未破断であることを示す。フェムト秒レーザーピーニング前の試験片の疲労寿命は母材と比較して大きく減少することが確認された。フェムト秒レーザーピーニングを施すことによって、疲労寿命が向上することが確認された。応力振幅 $180\ \text{MPa}$ では、フェムト秒レーザーピーニング後の試験片の疲労寿命は加工前と比較して約 2 倍延伸した。また応力振幅 $120\ \text{MPa}$ では、50 倍以上疲労寿命が延伸したことが確認された。このように、フェムト秒レーザーピーニングを施すことによって比較的応力振幅で疲労寿命が大きく延伸することがわかった。

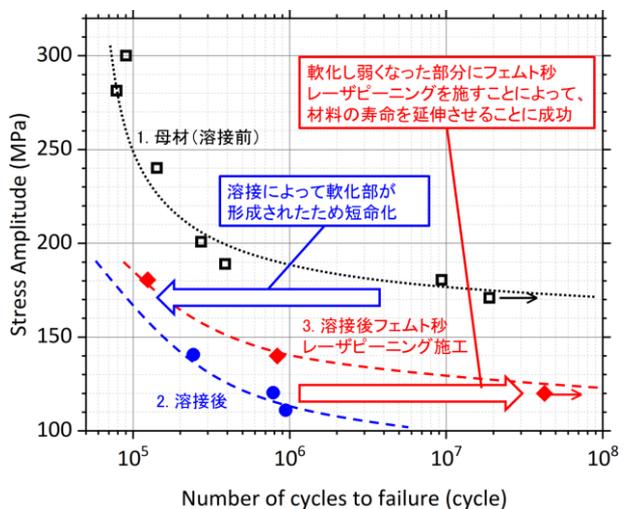


図 4. 疲労試験結果

フェムト秒レーザーピーニングが凝固部の金属組織に及ぼす影響を評価するために、試料表層の転位構造を透過型電子顕微鏡 (TEM: Transmission electron microscope) により観察した。フェムト秒レーザーピーニングを施した試料を集束イオンビーム (FIB: Focused Ion Beam, 日立製作所製 FB2000-A) (30 keV Ga+)によって加工し、約 100 nm の厚さの薄片化試料を作製した。また、イオンビームによる試料表層への損傷を防ぐために、FIB 加工の前に試料表層に金およびタングステンを製膜した。TEM 観察は 200 kV の加速電圧で行った。

図 5(a)にフェムト秒レーザーピーニング施工前の試料の凝固部における TEM 観察結果を、図 5(b)にフェムト秒レーザーピーニングを施した試料の凝固部の TEM 観察結果を示す。フェムト秒レーザーピーニングを施すことにより、転位密度が増加したことが確認された。フェムト秒レーザーピーニング施工材では最表層に厚さ約 600 nm の凝固層が形成されていることが確認された。また、凝固層にも転位が導入されていることが確認された。さらに、この凝固層直下の固相で転位がより高密度に導入されていることが確認された。

TEM 観察結果を用いて転位密度を計算した。その結果、フェムト秒レーザーピーニング施工材の熔融凝固層直下の固相では転位密度が $5.1 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ となり、未施工材の約 5 倍の転位密度となっていることが確認された。

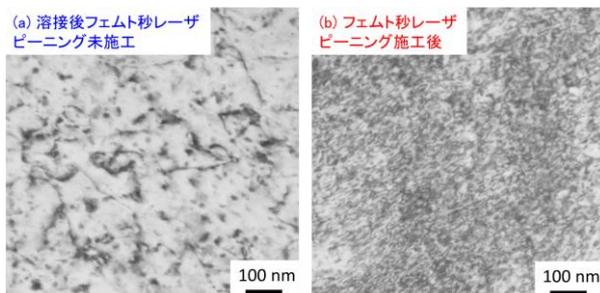


図 5. 転位構造観察結果

フェムト秒レーザーピーニングが溶接試験片の残留ひずみに及ぼす影響を評価するために、透過型ひずみスキャン法による非破壊残留応力測定を行い、試験片表面および深さ方向の残留ひずみ分布を測定した。透過型ひずみスキャン法は高エネルギー放射光 X 線による大きな侵入深さを利用した手法であり、図 6(a)に示すように入射側および受光側のスリットで作られるゲージ体積内のひずみを測定し、さらに試料を移動してゲージ体積を移動させることにより内部のひずみ分布を測定する手法である。また透過型ひずみスキャン法では、試料側面に対し放射光 X 線を入射し、反対側の側面に透過した回折光を測定するためフェムト秒レーザーピーニング施工面と平行な面のひずみを直接測定することが可能となる。そのため残留応力 σ は、平面等二軸応力状態を仮定すれば、残留弾性ひ

ずみ ε を用いて $\sigma = E \varepsilon$ で見積もることが出来る。ここで E はヤング率を表す。さらに、ひずみ ε は格子面間隔 d を用いて、 $\varepsilon = (d-d_0)/d_0$ と表される。ここで d_0 は無ひずみ状態の格子面間隔である。また、格子面間隔 d は回折角 θ を用いてブラッグの条件から $\lambda = 2d \sin \theta$ と表せることから、回折角 θ を測定することにより、内部の残留応力を見積もることが可能となる。ここで λ は X 線の波長である。

残留ひずみ測定は SPring-8 の原子力機構専用ビームライン BL22XU で実施した。試験片表面の残留ひずみ分布を測定する際には、溶接線に対して垂直方向のひずみを溶接中心から 10 mm 離れた位置まで測定した。またそれぞれ測定点において、幅 200 μm 、深さ方向 50 μm の領域のひずみを測定した。残留ひずみの深さ分布は、ビード中心から 0 mm, 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm 離れた位置で溶接線に対し垂直方向で表層から 280 μm の深さまで測定した。表層から深さ 40 μm までは深さ方向の分解能を 10 μm とし、5 μm 間隔で測定を行った。深さ 40 μm から 280 μm までは深さ方向の分解能を 30 μm とし、30 μm 間隔で測定を行った。波長 0.04131 nm (フォトンエネルギー 30.013 keV) の放射光 X 線を入射し、(311)の回折角を用いて測定を行った (図 6(b)). (311)の回折角は $2\theta = 19.56 \text{ deg}$ であり、X 線の弾性定数としてヤング率 $E = 61.7 \text{ GPa}$ を用いて残留応力を見積もった。無ひずみの格子面間隔は $d_0 = 0.12196 \text{ nm}$ であった。得られた回折プロファイルを Gauss 関数でフィッティングすることによって回折角を求めた。

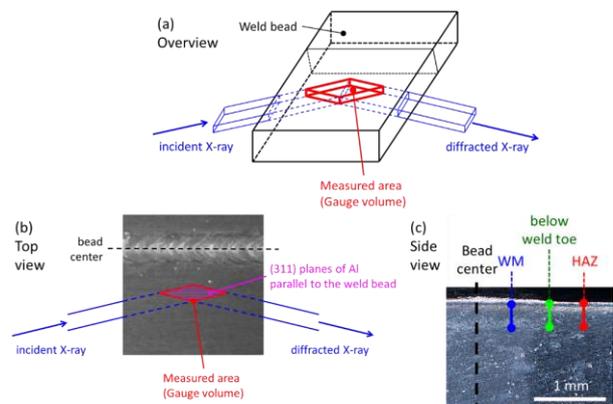


図 6. 残留ひずみ測定方法

図 7(a)にフェムト秒レーザーピーニング施工前後の試験片の表面残留応力分布を示す。横軸はビード中心からの距離、縦軸は残留応力値を示す。図 7(a)に示すように、溶接ままの試料の表面では、凝固部および熱影響部で引張残留応力が発生していることが確認された。そしてその外側の母材領域では部材内での平衡を保つために圧縮残留応力が発生していることが確認された。このように、このレーザー溶接試験片では、一般的な溶接試験片における残留応力分布と同様となることが確認された。溶接試験片にフェムト秒レーザーピーニングを施すことによって圧縮残留応力

が付与されることが確認された。全体として計測値のばらつきが大きい、凝固部および熱影響部に付与される圧縮残留応力の値は同程度である傾向が確認された。しかしながら、母材部に付与される圧縮残留応力の値と比較すると約 100 MPa 程度小さいことが確認された。これは、凝固部および熱影響部では、溶接後に引張残留応力が発生するため、付与される圧縮残留応力の大きさが低下したためと考えられる。

図 7(b)-(d)にフェムト秒レーザーピーニング施工前後の溶接試験片の残留応力の深さ分布を示す。図 7(b), (c)はそれぞれ凝固部、余盛止端部における残留応力の深さ分布を示す。また図 7(d)は溶接中心から 2.0 mm 離れた位置の熱影響部における残留応力の深さ分布を示す。フェムト秒レーザーピーニング前の試験片では、余盛止端部および熱影響部に 50 MPa 程度の引張残留応力が試料内部にも存在することが確認された。一方、フェムト秒レーザーピーニング施工により、これらの領域に対し圧縮残留応力が付与されることが確認された。圧縮残留応力の付与深さは約 100 μm であることが確認された。

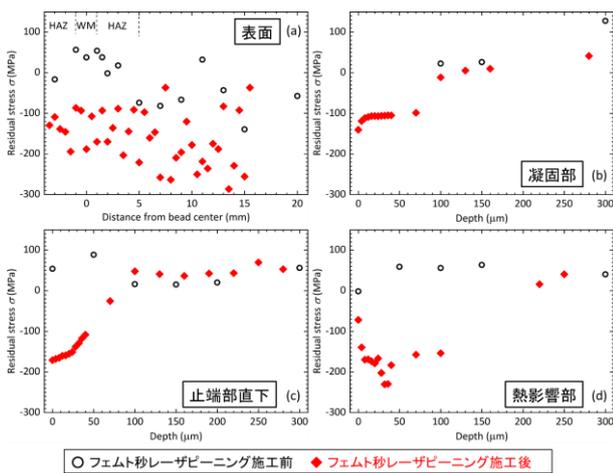


図 7. 残留ひずみ (応力) 分布

3. 結論

フェムト秒レーザーピーニングがアルミニウム合金の溶接継手の疲労特性向上にも有効であることが示された。フェムト秒レーザーピーニングは、水やガラスといったプラズマ閉じ込め媒質を必要とせず、施工材の表面へのカーボンテープやアルミニウムテープといったコーティングも不要であることから、今後より多くの産業分野への展開が期待される。

謝辞

本研究を遂行するにあたりご支援頂きました公益財団法人天田財団に心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] T. Sano, T. Eimura, S. Iwata, N. Matsuyama, R. Kashiwabara, T. Matsuda, Y. Isshiki, A. Hirose, K. Arakawa, T. Hashimoto, S. Tsutsumi, K. Masaki, and Y. Sano, "Femtosecond Laser Peening without Sacrificial Overlay under Atmospheric Conditions," 5th International Conference on Laser peening and Related Phenomena, University of Cincinnati, USA, May 10-15, 2015. (招待講演)
- [2] T. Matsuda, T. Sano, K. Arakawa, O. Sakata, H. Tajiri, A. Hirose, "Femtosecond laser-driven shock-induced dislocation structures in iron," Applied Physics Express 7, 122704-1-4 (2014).
- [3] T. Matsuda, T. Sano, K. Arakawa, A. Hirose, "Dislocation structure produced by an ultrashort shock pulse," Journal of Applied Physics 116, 183506-1-5 (2014).
- [4] T. Matsuda, T. Sano, K. Arakawa, A. Hirose, "Multiple-shocks induced nanocrystallization in iron," Applied Physics Letters 105, 021902-1-4 (2014).
- [5] 佐野智一, 廣瀬明夫, "固体のフェムト秒レーザー駆動衝撃圧縮," レーザ研究 Vol. 42, No. 6, 452-455 (2014).
- [6] T. Sano, "Ultrafast Structural Dynamics of Shock-Compressed Iron Probed with XFEL," Symposium TT: Advanced Materials Exploration with Neutrons and X-Rays - The State-of-the-Art in the International Year of Crystallography, 2014 MRS Fall Meeting & Exhibit, Boston, USA, Nov. 30 - Dec. 5, 2014. (招待講演)
- [7] 松田朋己, 佐野智一, 廣瀬明夫, 荒河一渡, "フェムト秒レーザー駆動衝撃波により形成される衝撃初期の転位組織," 日本金属学会 2014 年秋期(第 155 回)講演大会, 名古屋大学, 平成 26 年 9 月 24-26 日. (第 23 回優秀ポスター賞受賞)
- [8] 佐野智一, "フェムト秒レーザー駆動衝撃圧縮下のその場 XFEL 回折計測," 放射線化学会誌 Vol. 96, 23-28 (2013).
- [9] M. Tsujino, T. Sano, O. Sakata, N. Ozaki, S. Kimura, S. Takeda, M. Okoshi, N. Inoue, R. Kodama, K. F. Kobayashi, and A. Hirose, "Synthesis of submicron metastable phase of silicon using femtosecond laser-driven shock wave," Journal of Applied Physics 110, 126103-1-3 (2011).
- [10] T. Sano, H. Mori, E. Ohmura, and I. Miyamoto, "Femtosecond laser quenching of the ϵ phase of iron," Applied Physics Letters 83, 3498-3500 (2003).