

プラズマ閉じ込め層の音響インピーダンス制御による レーザピーニング効果向上に関する研究

近畿大学 理工学部 電気電子通信工学科
教授 中野 人志
(2019 年度 一般研究開発助成 AF-2019210-B2)

キーワード：レーザピーニング，音響インピーダンス，プラズマ閉じ込め層

1. 研究の目的と背景

レーザによる金属材料加工の最大の特長は、優れた制御性と非接触処理が可能なことにある。高輝度パルスレーザ照射によるレーザ誘起衝撃波を利用した金属加工は「レーザピーニング」と呼ばれる表面処理技術を生み出し、熱加工では実現できない金属疲労の改善や応力腐食割れの防止策として利用されている^{1,3)}。

レーザピーニングの原理は以下の通りである。水中の金属試料に対してパルスレーザを GW/cm^2 を超えるピークパワーで集光照射すると、試料表面にアブレーションプラズマが発生する。金属試料の周囲に存在する水がプラズマの膨張を抑制することによってプラズマ噴出圧力は GPa を超え、その結果、衝撃波が発生する。衝撃波の圧力が金属試料の降伏限界を超えると、塑性変形が生じ、弾性拘束によって試料表層に圧縮残留応力層が形成される。また、試料表層の硬度は、同時に、加工硬化によって上昇する。圧縮残留応力の増大は金属疲労の改善や応力腐食割れの進展を防止し、表面硬度の上昇は表面の亀裂、応力腐食割れの発生を防止する。

レーザピーニングは 1990 年代には論文化されていた古典的な技術である。しかしながら、現状、レーザピーニングの適用範囲は、原子炉シュラウドや航空機部品等の信頼性が高度に要求される特殊応用に留まっており、一般産業には広がっていない。レーザピーニングは高ピークパワーのレーザを使用するため、レーザとプラズマの相互作用、衝撃波発生等、作用機序が複雑である。

レーザピーニングの一般産業への普及を進めるには各種金属材料におけるデータベース蓄積およびプロセスの高エネルギー利用効率化が必要である。本研究は、プラズマの閉じ込め能力をプラズマ閉じ込め層の音響インピーダンス制御によって向上させ、プロセスの高エネルギー利用効率化に寄与するものである。

2. プラズマ閉じ込め層

レーザピーニングが他のレーザ加工技術と圧倒的に異なる点は、試料の表面にレーザプラズマの閉じ込め層を設けることにある。プラズマ閉じ込め層は、アブレーションプラズマの噴出を抑制して、レーザ誘起衝撃波の振幅を増大させる。プラズマ噴出の抑制に直接寄与する物理量はプラズマ閉じ込め媒質の音速と密度の積、つまり音響インピ

ーダンスである。音響インピーダンス Z_C は次式によって示される³⁾。

$$Z_C = d_L \times v_S \quad (1)$$

ここで d_L および v_S はそれぞれプラズマ閉じ込め層として用いる媒質の密度および音速である。音響インピーダンス Z_C とレーザプラズマ圧力 P の関係は以下のように表される³⁾。

$$P = \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \cdot Z_C \cdot I \quad (2)$$

ここで α は相互作用効率、 I はレーザ照射強度である。(2)式より、効果的なレーザピーニングには、高い音響インピーダンスのプラズマ閉じ込め媒質が望ましいことが分かる。

レーザピーニングのプラズマ閉じ込め媒質としては、レーザ光の透過率が高く、安価に手に入ることから、通常、水が使用されている。大気中に比べ、数十倍のプラズマ圧力が得られるとされている¹⁾。プラズマ閉じ込め媒質はレーザ波長に対して透過率が高く、化学的に安定である（金属材料と化学反応を起こさない）、引火性や爆発性がなくレーザ光を照射しても安全である等の要件を満たす必要がある。また、高出力レーザを水中に照射すると気泡（キャビテーションバブル）が発生するが、このキャビテーションバブルの崩壊によって発生する圧力が金属を塑性変形させるのに十分な大きさであることが近年の研究で明らかにされている⁴⁾。

本研究では、レーザピーニングの高エネルギー利用効率化を目的として、プラズマ閉じ込め媒質の音響インピーダンスを変化させて金属材料へのレーザピーニング処理実験を行った。表面硬度、圧縮残留応力、および高速度カメラによるプラズマ閉じ込め層の観測結果から、レーザピーニングに適切なプラズマ閉じ込め層の条件を考察した。プラズマ閉じ込め媒質として、水およびグリセリン水溶液を用い、水の温度変化およびグリセリン水溶液の濃度変化によって音響インピーダンスを制御した。

3. 実験方法

本研究ではプラズマ閉じ込め層の音響インピーダンスを水の温度変化、ならびに水の代わりに用いたグリセリン水溶液の濃度変化によって制御した。双方の実験で用いた光学配置図を図1に示す。

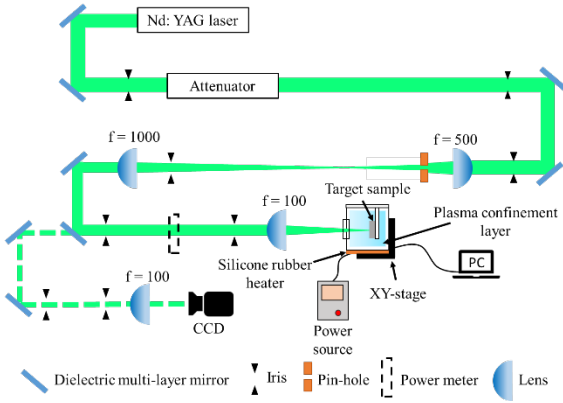


図1 レーザピーニング実験における光学配置図

レーザ光源として、水に対して透過性の高いNd:YAGの2倍高調波(波長 $0.53\ \mu\text{m}$)を用いた。パルス幅 $4\ \text{ns}$ 、繰り返し周波数は $10\ \text{Hz}$ である。レーザ出力の調整には偏光子ペアと半波長板で構成されたエネルギー減衰器を用いた。半波長板を回転させることによって、発散角、パルス幅等、レーザ特性の変化無しに、レーザ出力の任意調整が可能となる。この光学配置においては、焦点距離 $500\ \text{mm}$ のレンズ後方に置かれたピンホールによってレーザの集光径が決定される。ピンホール位置の像は光学倍率 $1/10$ で試料表面に結像される。本研究では、全ての実験においてピンホール径 $2\ \text{mm}$ 一定とした。したがって、集光径は $200\ \mu\text{m}$ 一定である。

金属試料としてオーステナイト系ステンレス鋼のSUS316Lを用いた。試料の大きさは $25\times 25\times 5\ \text{mm}^3$ である。試料内部の残留応力、歪を除去するため、全ての試料はレーザピーニング前にアニーリング処理された。

試料は専用セル内に入れられた液体のプラズマ閉じ込め層中に挿入され、専用セル内は自動XYステージに装着された。レーザ照射のカバレッジ(重ね打ち率)はXYステージの動作で制御された。レーザピーニングにおいては、佐野らが開発した手法に従い、犠牲層を設けなかった²⁾。

レーザピーニング効果の評価指標として、加工硬化によるビッカース硬度、塑性変形に起因した圧縮残留応力の大きさを採用した。ビッカース硬度計にてレーザピーニング処理済試料の表面を10点測定し、平均値を表面硬度とした。圧縮残留応力はX線応力測定法によって評価された。

また、プラズマ閉じ込め層内で発生するキャビテーションバブルの挙動を高速カメラによって撮影した。高速カメラの動作タイミングをレーザ照射後より $100\ \text{ms}$ まで遅延させ、白色LEDを照明光源としたシャドウグラフ法を採用した。時間分解能は $8\ \mu\text{s}$ である。

3・1 水温変化による音響インピーダンス制御

プラズマ閉じ込め層として水を用い、水温を変化させてレーザピーニング実験を行った⁵⁾。専用セル底にステンレス板ならびにシリコンラバーヒータを装着し、熱伝導によって、水温を上昇させた。

図2に水の音響インピーダンスと水温の関係を示す。水温 60°C において、音響インピーダンスが最大になることが示されている。レーザピーニング実験では水温を 80°C まで変化させた。

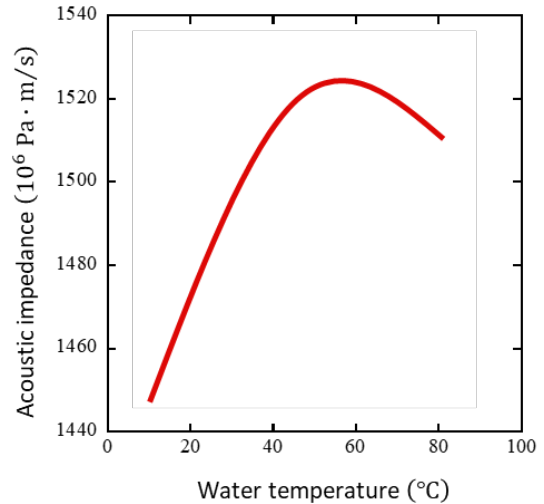


図2 水の音響インピーダンスの温度依存性

3・2 濃度変化による音響インピーダンス制御

プラズマ閉じ込め層にグリセリン水溶液を用いて、グリセリン濃度を変化させることによって音響インピーダンスを制御した⁶⁾。専用セルにグリセリン水溶液を入れ、水を用いたときと同様に、レーザピーニング処理実験を行った。図3に音響インピーダンスとグリセリン水溶液の濃度との関係を示す。音響インピーダンスはグリセリン水溶液濃度の上昇と主に高くなる。

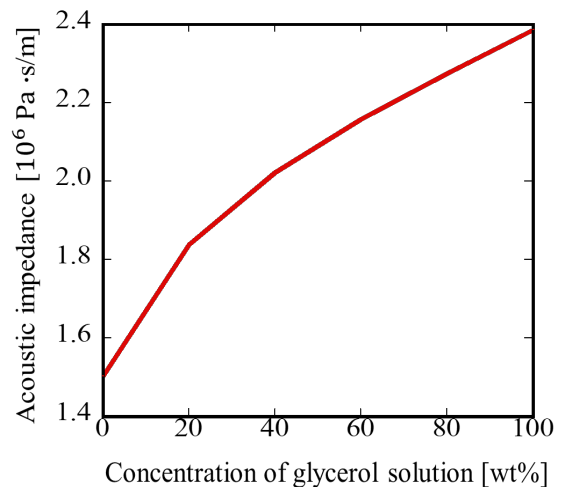


図3 音響インピーダンスのグリセリン濃度依存性

4. 実験結果

4・1 水温変化による音響インピーダンス制御

図4にビッカース硬度の温度依存性を示す。レーザーピーニング処理条件はレーザー照射強度 3 GW/cm^2 、カバレッジ900%一定である。図の縦軸はレーザー未照射時に測定した硬度をゼロとした硬度変化で示しており、エラーバは標準偏差で表している。水温の上昇につれてビッカース硬度が高くなるのが判る。水温 60°C において硬度変化は100を超え、ピーク値となっている。また、図5には同レーザー照射条件における圧縮残留応力の測定結果を示している。硬度測定と同様に水温 60°C において圧縮残留応力もピーク値を示すことが分った。水温変化による音響インピーダンス制御はレーザーピーニングに有効であることが判った。

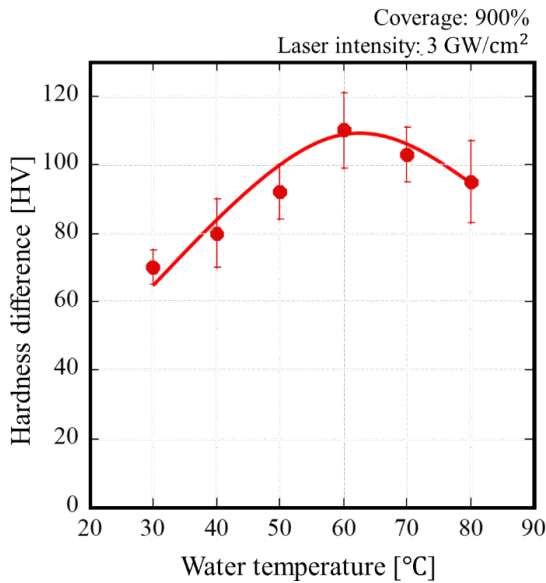


図4 ビッカース硬度の温度依存性

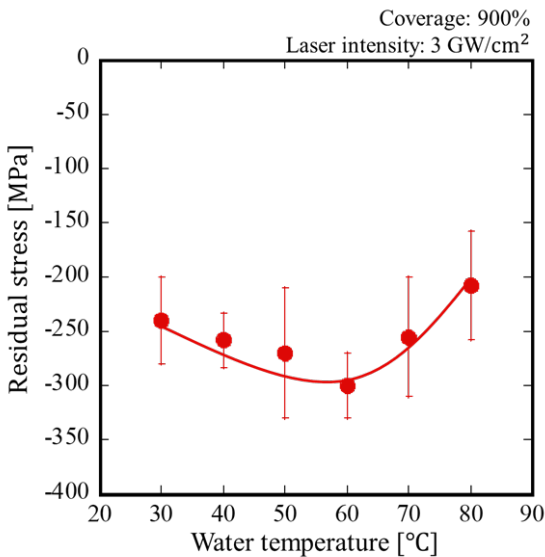


図5 圧縮残留応力の温度依存性

4・2 濃度変化による音響インピーダンス制御

プラズマ閉じ込め媒質としてグリセリン水溶液を用いた。図6にビッカース硬度のグリセリン濃度依存性を示す。図では種々のカバレッジに対しての硬度測定結果も同時に示している。レーザーピーニング処理条件はレーザー照射強度 2 GW/cm^2 一定である。

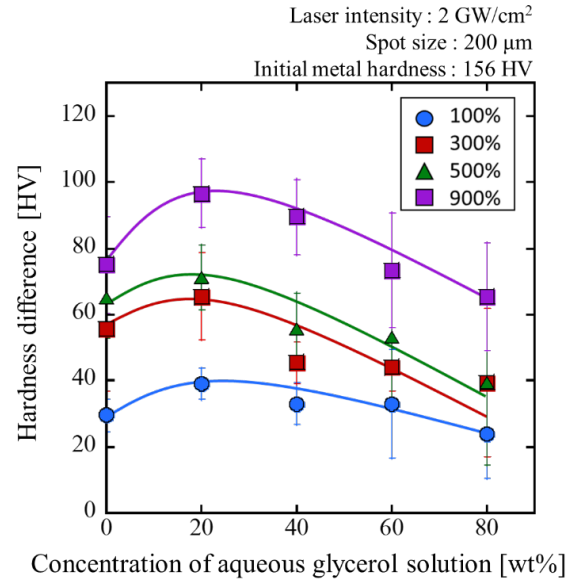


図6 ビッカース硬度のグリセリン濃度依存性

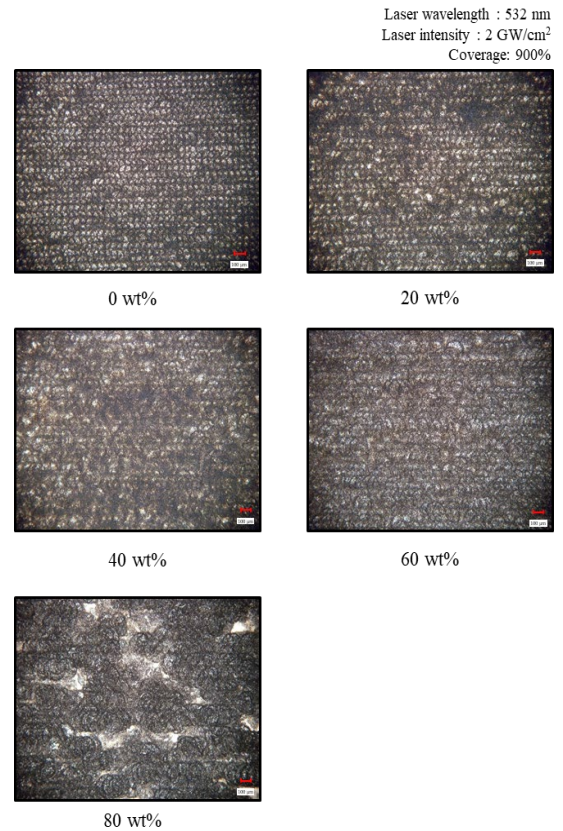


図7 試料表面のバーンパターン

グリセリン水溶液の濃度を増加させると、ビッカース硬度が変化することが判る。硬度は20~60 wt%の範囲で増加しているが、本実験の最大濃度である80 wt%では減少に転じている。これらの実験結果は図3で示した音響インピーダンスの増加によるプラズマ閉じ込め能力向上と矛盾している。また、硬度はカバレッジの増加に対して単純に上昇しており、高いカバレッジはいずれの濃度においてもレーザピーニング効果向上に有効であることが判る。

図7には各グリセリン水溶液濃度における試料表面でのレーザ照射の痕跡(バーンパターン)を示している。低濃度のときは、設定したカバレッジ900%に従って、規則正しくバーンパターンが並んでいるが、濃度80 wt%においてはバーンパターンが不規則に並んでおり、レーザ光が試料まで到達していないことが示唆される。高濃度におけるレーザピーニング効果の低下はレーザ光が適切に照射されていないことが原因である。

図8にグリセリン水溶液濃度20 wt%における圧縮残留応力測定結果を示す。レーザ強度は2 GW/cm²、カバレッジは900%の設定である。図は試料表面からの応力の深さ分布であり、同条件で測定した水の場合の結果も比較として示している。本実験においては、金属表面で引張残留応力が付与されてしまっているが、金属の内部は圧縮残留応力となっている。20 μm程度の深さをピークとして、約100 μm程度の深さまで圧縮残留応力が付与されている。残留応力分布形状は両者ともに同様となっているが、グリセリン濃度20 wt%の方が圧縮残留応力の最大値は大きく、高い音響インピーダンスの効果が表れている。金属試料表面では、レーザ光による蓄積熱の影響より、試料表面にへこみや溶融が生じ、引張応力になったと考えられる。圧縮残留応力が付与される深さは、本研究では100 μm程度であったが、レーザの集光径、重ね打ち率、レーザ強度等のレーザパラメータ変化によって、さらなる深層処理は可能である。

5. 考察

図4~6に示したように、水温変化、媒質変化共に、レーザピーニング効果が向上している。両者共に簡便な制御であり、複雑な作業を伴わない。特に水温変化の結果は「お湯」をプラズマ閉じ込め層に用いることで一定のレーザピーニング効果向上が見込めることを示しており、実用性は高いと考えられる。

図4および図5に示した結果からは水温60°Cのときに最も高いレーザピーニング効果が得られている。これらは図2に示した音響インピーダンスの温度依存性と矛盾しない。したがって、音響インピーダンス制御はレーザピーニング効果の向上に有効であることが判った。

図6に示したレーザピーニング効果のグリセリン濃度依存性については、低濃度においては、図3の音響インピーダンスの増大による効果向上で説明できるが、高濃度においては図3と矛盾する結果となっている。また、図7

の結果からは高グリセリン濃度においてレーザ光が試料表面にまで到達していないことが示唆された。

グリセリン水溶液は濃度が50 wt%を超えると急激に粘度が上昇する。また、高ピークパワーのレーザを液中に集光照射すると焦点近傍でキャビテーションバブルが生成することが知られている。高粘度の溶液では、流動性が失われ、キャビテーションバブルの成長・移動・崩壊が生じる速度が遅くなる。高繰り返しレーザ照射においては、キャビテーションバブルが消滅する前に次のレーザパルスが到達する可能性が考えられ、この場合、液体とキャビテーションバブル界面においてレーザ散乱が生じる。

図9に高速度カメラを用いてシャドウグラフ法で観察したプラズマ閉じ込め層を示す。レーザ照射後、100 ms経過後のプラズマ閉じ込め層の像であり、レーザの進行方向についてはグリーンで表している。(a)はグリセリン濃度20 wt%、(b)は80 wt%の場合をそれぞれ示している。両者共にキャビテーションバブルの存在が観測できるが、(a)ではバブルが光路から移動しているのに対して、

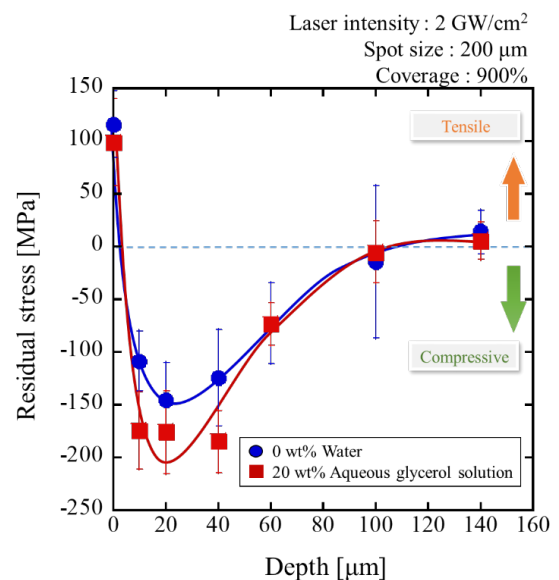


図8 グリセリン水溶液濃度20wt%のときの試料深さ方向の圧縮残留応力分布

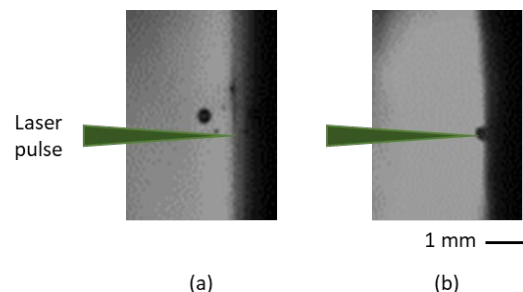


図9 シャドウグラフ法によって測定したレーザ照射後100 ms後におけるプラズマ閉じ込め層内のバブル (a)グリセリン濃度20 wt%, (b)グリセリン濃度80 wt%,

(b)では光路にバブルが留まっている。レーザーの繰り返し照射においては、(b)の状況ではレーザーが散乱を受け、レーザーパルスは試料表面に到達できない。図7のバーンパターン密度が高濃度グリセリンにおいて粗となった結果もこの考察を裏付けるものとなっている。本研究で用いたレーザーの繰り返し周波数は10 Hzであり、比較的低周期ではあるが、高濃度のグリセリン水溶液においては、キャビテーションバブルの移動あるいは崩壊の時間スケールがパルス周期以上であったと考えられる。したがって、粘性を有する液体をプラズマ閉じ込め媒質として利用するためにはキャビテーションバブルの振る舞いに注意が必要となる。

6. まとめ

レーザーピーニングの高エネルギー利用効率化を目的として、プラズマ閉じ込め層の音響インピーダンス制御を行った。本研究で示した簡便な音響インピーダンス制御によって、レーザーピーニング効果の向上が見込めることが分かった。本研究の成果がレーザーピーニングの一般産業への浸透

に寄与できれば幸いである。

謝 辞

本研究の遂行にご協力頂いた近畿大学工学部の津山美穂講師、ノールシャヒラ氏に感謝致します。

参考文献

- 1) K. Ding and L. Ye: Laser Shock Peening (CRC Press, 2006).
- 2) 佐野雄二, 依田正樹, 向井成彦, 小畑稔: レーザー研究, **26** (1998) 793.
- 3) R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard, D. Devaux and J. Virmont, J. Appl. Phys. **68** (1990) 775.
- 4) Hitoshi Soyama, Metals, **11** (2021) 531.
- 5) Noor Shahira Masroon, Akihiro Hata, Miho Tsuyama, Manabu Heya, Hitoshi Nakano, Optik **242** (2021) 167097.
- 6) Noor Shahira Masroon, Hikaru Hirata, Miho Tsuyama, Manabu Heya, Hitoshi Nakano, J.Laser Micro/Nanoeng., **16** (2021) 160.