

高効率深層レーザーピーニング処理技術の実用化に関する研究

近畿大学 理工学部 電気電子工学科

講師 津山 美穂

(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016226)

キーワード：レーザーピーニング，レーザーアブレーション，レーザー誘起プラズマ

1. 研究の目的と背景

申請者の研究目的は、高エネルギー利用効率レーザーピーニング技術の確立である。レーザーによる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にある。レーザー加工は幅広い分野で既に利用されているが、穴開け、切断等、レーザー照射によって発生する熱を利用した加工が主となっている。一方、レーザー誘起衝撃波を利用した加工は、「レーザーピーニング」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。レーザーピーニングは、ショットピーニングや溶射等に比べて相対的に深部にまで及ぶ表面処理が可能であり、航空機部品や原子力発電所などの高い信頼性が要求される部分に応用されている^{1, 2)}。

レーザーピーニングの原理は図 1 の通りである。水中の金属試料に対してパルスレーザーを集光照射すると、試料表面にアブレーションプラズマが発生する。発生したプラズマは、金属試料の周囲に存在する水の慣性により膨張が抑制されるため、数 10 GPa にも及ぶ高圧力状態となる。この圧力により発生した衝撃波のエネルギーが試料の降伏限界を超えると、金属試料に塑性変形が生じ、加工硬化とともに塑性拘束によって試料表面層に圧縮残留応力層が形成される^{3, 4)}。

現在、世界各国で報告されているレーザーピーニン

グの研究成果は、レーザーピーニング処理後の材料特性(残留応力、硬度等)を調べたものが主となっている。実験のパラメータはレーザーエネルギー、重ね打ち率のみであり、高エネルギー利用、深層処理等に対する条件設定は全くなされていない。レーザーの制御要素に対して丹念に条件設定し、レーザーピーニングに関わる多種多様なパラメータを制御する系統的な研究が展開されていないのが現状である^{3, 5)}。光学やプラズマ工学に精通した研究者・技術者のレーザーピーニング研究への参加が遅れていたため、レーザーピーニングにおいては基幹道具であるレーザーの取り扱い、レーザー照射条件等が確定されていない。レーザーピーニングは特殊応用については成立するが、一般金属材料への応用、さらに産業応用に対しては発展途上の技術となっている。レーザーピーニング処理を高効率で行い、産業応用に適用可能な技術として成熟させるには、レーザーピーニングの処理プロセスを系統立てた研究が必要である。

レーザーピーニングは、レーザーエネルギーのみで結果が決まるのではなく、レーザー波長、偏光方向、パルス幅、幾何学的なレーザー照射配置、プラズマ密度、衝撃圧力の通過時間等の多種多様なパラメータで、その効果が決まる。レーザーピーニングによる塑性変形量は、次式に示すように、レーザー誘起衝撃波の継続時間とレーザー誘起プラズマ圧力の積に比例する⁶⁾。

$$L_p \propto \tau_p \cdot P \quad (1)$$

ここで、 L_p は塑性変形量、 τ_p は衝撃波の継続時間、 P はレーザー誘起プラズマ圧力である。(1)式より、レーザーピーニング効果は試料表面での力積の大きさによって決定されることになる。 τ_p と P の大きさは、図2のようにレーザーの照射状態、材料の状態、プラズマ閉じ込め層の状態といった3つの要素によって決定される。この3つの要素には、レーザーのピーク強度や金属試料の結晶粒径等、多数のパラメータが含まれていることになる。実験データベースの構築とともにそれぞれの最適条件を明らかにすることで、高効率レーザーピーニングの条件を確立し、レーザーピーニング技術を実用的なプロセスとして成熟させることを目的として

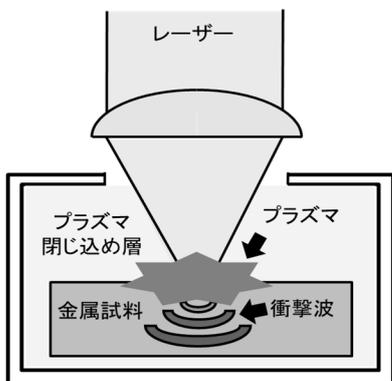


図 1 レーザーピーニングの原理

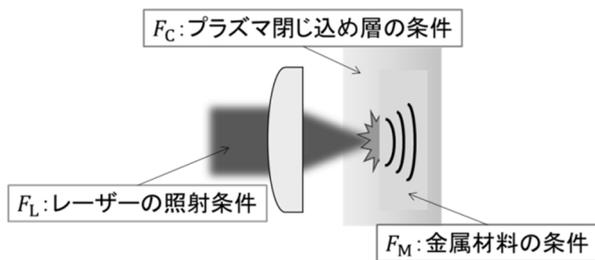


図2 レーザーピーニング効果を決定付ける要素

おり、現在までにレーザーや材料の状態においてはレーザーピーニングに望ましい処理条件が存在することを示している⁷⁻⁹⁾。本研究では、特にプラズマ閉じ込め層に着目し、高効率レーザーピーニングの条件を確定するための研究をさらに進め、成果を産業界に向けて広く情報発信することを目的とした。また、試料表面へのレーザーピーニングの影響を高めるだけでなく、試料深くまでレーザーピーニングの効果を与える条件についても考察した。

2. プラズマ閉じ込め層の効果

プラズマ閉じ込め層とは、プラズマの膨張を抑制し、プラズマ圧力を高めるものである。高強度のレーザーパルスが金属表面上に集光照射すると、レーザー誘起プラズマが形成され、その膨張中に周囲の環境に衝撃波を発生させる。金属照射面を水などの透明な媒質で覆うことで、プラズマ膨張を抑制するための制限媒質として作用し、材料表面でのプラズマ圧力をさらに高めることができる。また、プラズマ閉じ込め層を用いたレーザーピーニング処理では、多数の複雑な物理的現象が生じる。そのためプラズマ閉じ込め層の諸特性およびプラズマ閉じ込め層内で生じる物理現象を理解することは、極めて重要である。

プラズマ閉じ込め能力は、閉じ込め媒質の密度と音速の積である、音響インピーダンス Z_C によって決定される^{3,4)}。

$$Z_C \propto d_L \times v_s \quad (2)$$

d_L と v_s はそれぞれプラズマ閉じ込め媒質の密度と音速である。プラズマ閉じ込め媒質の音響インピーダンスが大きいほど、プラズマの膨張が抑制されプラズマの圧力が高くなり、レーザーピーニング効果が大きくなる。

一般的に、プラズマ閉じ込め層は、ガラスを含む透明材料からなる硬質固体、ゴムを含む透明有機化合物からなる軟質固体、水溶液からなる液体、および気体の4つのタイプに分類できる。現在、水をプラズマ閉じ込め層として用いたレーザーピーニングが議論の中心である。水を用いる利点として、安価で入手が容易であるこ

とや、流体であるために材料の形状に依存しないことなどが挙げられるが、レーザー誘起衝撃波の圧力はプラズマ閉じ込め層の音響インピーダンスに依存する。そのため、プラズマ閉じ込め層の音響インピーダンス制御を行うことで、レーザーピーニング効果の向上が期待できる。レーザーピーニングにおけるプラズマ圧力を高める媒質の研究は世界的に進められているが、音響インピーダンスそのものを変化させる研究例は少ない。そこで本研究では、水以外の液体をプラズマ閉じ込め層とし音響インピーダンスを制御したレーザーピーニング実験を行い、その効果を調べた。

プラズマ閉じ込め層を用いたレーザーピーニングでは、閉じ込め媒質の選択に注意する必要がある。プラズマの圧力はレーザー強度と閉じ込め媒質の音響インピーダンスによって決定される。しかしながらプラズマ閉じ込め層の媒質を選定する際には、音響インピーダンスのみならず、様々なことを考慮する必要がある。以下に本研究におけるプラズマ閉じ込め媒質の選定基準を示す。

- (a) 波長 532 nm において透過率が高いこと
- (b) 水と比較して音響インピーダンスが高いこと
- (c) 化学的に安定であること
- (d) 非電解質であること
- (e) 安価に入手できること

まず、本研究で用いた Nd: YAG レーザーの第2高調波(波長 532 nm)において透過率の高い閉じ込め媒質を選定した。レーザー光の吸収等により透過率が低くなると、金属材料表面にレーザーのエネルギーが到達せず、エネルギー効率が悪くなるためである。また、プラズマ閉じ込め媒質の音響インピーダンスが大きいほど、プラズマの膨張が抑制されプラズマ圧力が高くなる。本研究では高エネルギー利用効率レーザーピーニング処理を目指し、一般的に用いられている水よりも音響インピーダンスが高い媒質を選定した。本実験では、プラズマ閉じ込め層が液体の場合、プラズマ閉じ込め媒質を水槽(アクリルセル)に満たし、その中に金属材料を設置する。そのためプラズマ閉じ込め層には、金属材料やアクリルセルと化学反応を起こさない媒質を選ぶ必要がある。また、実験中の人体への影響も考慮して選定した。さらに電解質とは、溶解した際に電離する物質であり、電解質が溶けた溶液を電解液という。電解液は電気を流すことから、レーザーのエネルギーを逃がしてしまうことが考えられる。よって、閉じ込め媒質には非電解質を選定した。

本研究では、プラズマ閉じ込め層としてスクロース水溶液、グリセリン水溶液、エチレングリコール水溶液をそれぞれ用いた。水溶液は濃度を変化させることで音響インピーダンス制御を行った。それぞれの水溶液の

特徴を以下に示す.

- スクロース¹⁰⁾

砂糖の主成分である. 約 170°Cに加熱すると, カラメルと呼ばれる褐色の物質に変化する. 溶解度の関係により, 水溶液の濃度は 0-60wt%とした.

- グリセリン¹¹⁾

主に医薬品や化粧品で保湿剤, 潤滑剤として使われている.

- エチレングリコール¹²⁾

主に不凍液やペットボトル, 繊維のポリエステル材料として使われている. 生体内で代謝を受けると有毒化する.

3. 実験方法

本実験で使用した光学配置を図 3 に示す. レーザー光源として, Nd: YAG レーザーの第 2 高調波 (波長 532 nm) を用いた. パルス幅, 繰り返し周波数は, それぞれ 4 ns, 10 Hz である. レーザーの照射条件は, レーザー照射強度 2 GW/cm², カバレッジ (重ね打ち率) 500%, レーザースポット径 200 μm で一定とした. 金属試料にはオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L を用いた. 材料の大きさは 25 mm×25 mm×5 mm である. プラズマ閉じ込め層として水, スクロース水溶液, グリセリン水溶液, エチレングリコール水溶液を用い, プラズマ閉じ込め層の厚さは 20 mm に設定した. レーザーピーニング効果は, ビッカース硬度測定および X 線残留応力測定により評価した.

本実験では, 水よりも音響インピーダンスの高いプラズマ閉じ込め媒質を選び, 濃度を変化させることで音響インピーダンスを制御した. 溶媒として精製水, 溶質としてスクロース, グリセリン, エチレングリコールを用いた. 各水溶液の濃度と音響インピーダンスの関係を図 4 に示す. 各媒質, 濃度の増加に伴って音響インピーダンスが上昇している. 音響インピーダンスの値は, 水と比較してスクロース水溶液の場合約 1.56 倍, グリセリン水溶液の場合約 1.63 倍, エチレングリコール水溶液の場合約 1.25 倍である. また, 紫外可視分光光度

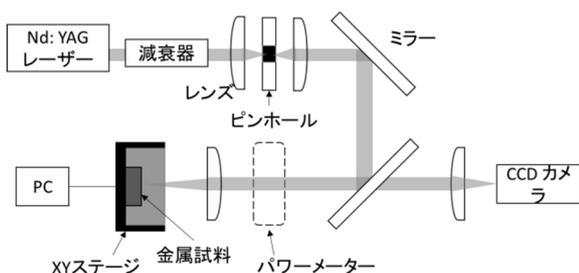


図 3 実験配置図

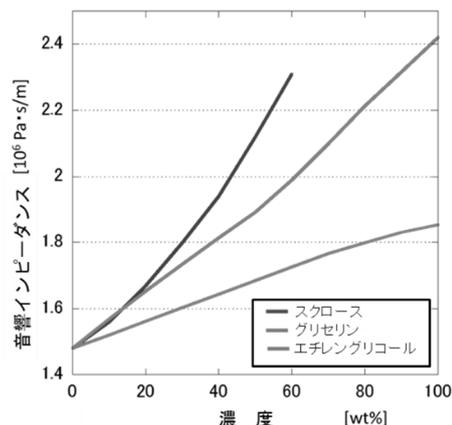


図 4 水溶液濃度と音響インピーダンスの関係

計にて, 各水溶液におけるレーザー光の透過率を測定した. 本実験で用いた Nd: YAG レーザーの第 2 高調波 (波長 532 nm) においての水, スクロース水溶液 (60wt%), グリセリン (100wt%), エチレングリコール (100wt%) に対する透過率は, それぞれ 94.00%, 93.90%, 90.49%, 92.61%と各媒質とも波長 532 nm に対して高い透過率を有している.

4. 実験結果および考察

プラズマ閉じ込め層として水, スクロース水溶液, グリセリン水溶液, エチレングリコール水溶液を用い, 音響インピーダンス (水溶液の濃度) を変化させてレーザーピーニング処理を行った結果を以下に示す.

試料表面のビッカース硬度の測定結果を図 5 に示す. 縦軸は試料表面における硬度上昇量 (レーザー未照射時とレーザーピーニング処理後の硬度差), 横軸はプラズ

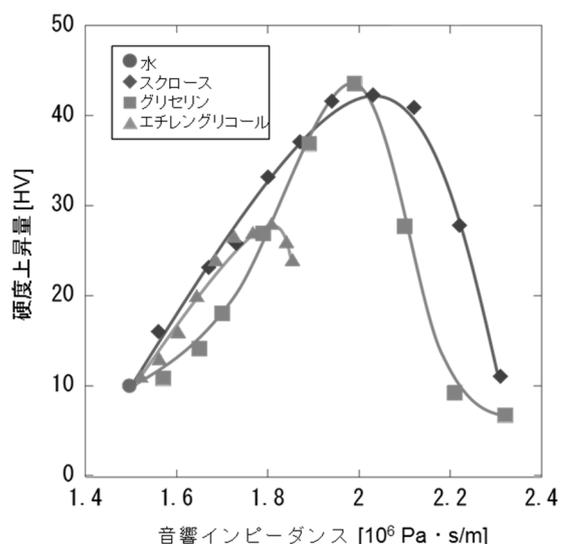


図 5 音響インピーダンスと硬度上昇量の関係

マ閉じ込め媒質の音響インピーダンスである。グラフより、音響インピーダンスの上昇に伴って、硬度も上昇していることがわかる。また、それぞれの媒質において、ある音響インピーダンス以降は硬度上昇量が小さくなる傾向が示された。

次に、レーザーピーニング処理によって金属試料に付与された残留応力を X 線回折装置によって測定した。図 5 の各媒質の硬度上昇量ピーク点において、材料表面から深さ方向に対する残留応力分布の測定結果を図 6 に示す。縦軸は残留応力であり、残留応力がマイナス値のとき圧縮残留応力、プラス値のとき引張残留応力をそれぞれ表す。横軸は材料表面からの深さである。プラズマ閉じ込め媒質が水の場合と比較すると、音響インピーダンスの高いスクロース水溶液、グリセリン水溶液、エチレングリコール水溶液を用いた方が大きな圧縮残留応力が付与されていることが判った。また、圧縮残留応力は深さ 20 μm 付近で最大となり、深さ 200 μm 付近まで圧縮残留応力が付与されていることが示された。また、プラズマ閉じ込め媒質の音響インピーダンス

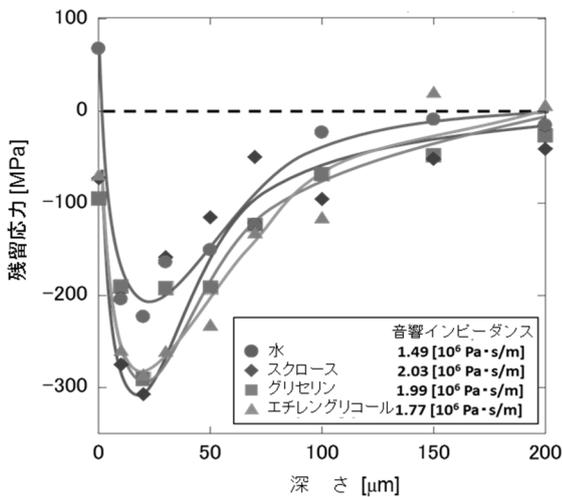


図 6 深さ方向に対する残留応力分布

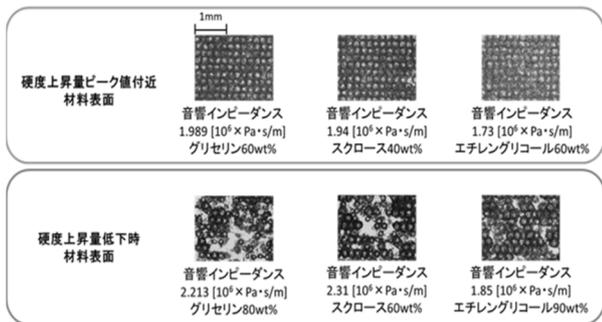


図 7 レーザーピーニング処理後の試料表面

が大きくなるほど、より深くまで圧縮残留応力が付与されていることが判った。

プラズマ閉じ込め層をスクロース水溶液、グリセリン水溶液、エチレングリコール水溶液とした場合、音響インピーダンスの上昇に伴ってレーザーピーニング効果が向上した。その理由として、プラズマ閉じ込め層の音響インピーダンスが上昇することでプラズマ閉じ込め能力が向上したと考えられる。閉じ込め媒質の音響インピーダンス Z とプラズマ圧力 P の関係は式(3)で表されるので、プラズマ閉じ込め媒質の音響インピーダンスの上昇に依存してプラズマ圧力が上昇し、レーザーピーニング効果が向上したと示唆される³⁾。

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

しかしながら、スクロース水溶液、グリセリン水溶液、エチレングリコール水溶液すべてにおいて、ある音響インピーダンス以降、硬度上昇量が小さくなっている。そこで、レーザーピーニング処理後の試料表面のレーザー照射痕を光学顕微鏡で観察した。図 7 にレーザーピーニング処理後の試料表面写真を示す。図 7 より、各媒質において硬度上昇量ピーク値付近の試料表面はレーザー照射痕が規則正しく並んでいるのに対して、硬度上昇量が低下した試料表面は、レーザーの照射痕にムラがあるため、レーザーのエネルギーが試料表面へ到達しなかったことが考えられる。

その理由について考察するため、スクロース水溶液に着目し、プラズマ閉じ込め層内の状態を観測した。レーザー光を金属材料に照射した際のプラズマ閉じ込め層内の状態を時間分解計測するためにシャドウグラフ法を用いた。本実験で用いたレーザー装置は発振周波数が 10 Hz であり、100 ms 毎に 1 回レーザーパルスを発振するため、レーザー照射後 100 ms 経過時における濃度 0wt% (水)、20wt%、40wt%、60wt% のスクロース水溶液中のシャドウグラフを図 8 にまとめた。矢印はレ

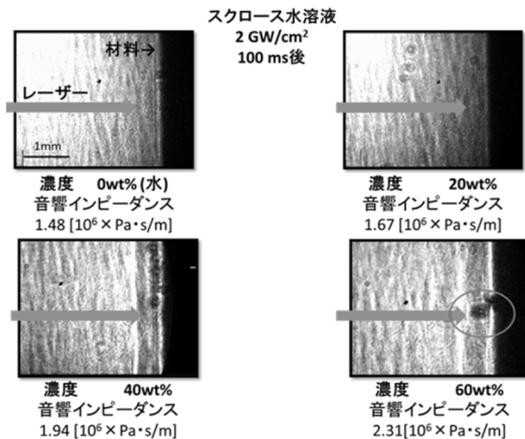


図 8 プラズマ閉じ込め層内のキャビテーション泡

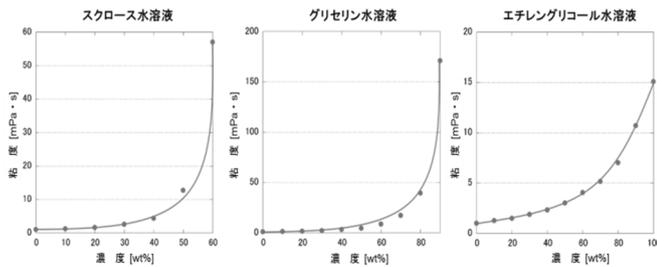


図9 各水溶液の濃度と粘度の関係

レーザーの光路を表し、矢印方向へレーザー光は照射された。また、矢印方向の黒い影は金属試料であり、反対側がプラズマ閉じ込め層となっている。撮影画像より、高濃度時では、気泡が長時間プラズマ閉じ込め層内に滞留していることが確認された。この気泡はレーザー照射によって発生するキャビテーション泡であると考えられる。画像より、高濃度時（高音響インピーダンス時）では、レーザーの光路上に気泡が確認され、レーザーパルス照射によって生じたキャビテーション泡が、後のレーザーパルスに影響を与えることが示唆された。

以上の結果より、硬度上昇量が急激に低下した要因は、レーザー光がプラズマ閉じ込め層内の気泡によって散乱・屈折され試料表面に到達していないことが考えられる。気泡が滞留する要因として、水溶液の粘度が関係していると考え、スクロース水溶液、グリセリン水溶液、エチレングリコール水溶液において、各濃度における水溶液の粘度をオストワルド粘度計を用いて測定した。各水溶液の濃度と粘度の関係を図9に示す。測定結果より、スクロース水溶液の濃度 50wt%付近、グリセリン水溶液の濃度 70wt%付近、エチレングリコール水溶液の濃度 80wt%付近から急激に粘度が増加している。以上の結果より、スクロース水溶液、グリセリン水溶液、エチレングリコール水溶液は、高濃度時に高い粘性を有する液体であるため、レーザー照射時に発生した気泡が流動性を失ってレーザー光路上に滞留することが示唆された。よって、高濃度時には、レーザーのエネルギーが試料表面へ到達しなかったと考えられる。

5. まとめ

本研究では、レーザーピーニングの効果を決定する要素の中から特にプラズマ閉じ込め層に着目し、プラズマ閉じ込め媒質の音響インピーダンスを制御することで、高効率レーザーピーニングの条件を確定するための研究を進めることを目的とした。得られた結果を以下にまとめる。

・レーザーピーニングにおけるプラズマ閉じ込め層には一般的に水が用いられるが、スクロース水溶液、グリセ

リン水溶液、エチレングリコール水溶液もレーザーピーニング処理におけるプラズマ閉じ込め層としての能力を有する。

・水よりも音響インピーダンスの大きな水溶液をプラズマ閉じ込め層として用いることで、金属試料表面の硬度・圧縮残留応力ともに水を用いた場合よりも増加し、より深くまで圧縮残留応力が付与される。

・スクロース水溶液、グリセリン水溶液、エチレングリコール水溶液は高濃度時に高い粘性を有する液体であるため、高濃度時にはレーザー照射時に発生した気泡が流動性を失ってレーザー光路上に滞留し、レーザーのエネルギーが試料表面へ到達していないと考えられる。

実験結果より、プラズマ閉じ込め層の音響インピーダンスを制御することでレーザーピーニング効果を制御できることがわかった。また、プラズマ閉じ込め層として粘性を有する媒質を用いる場合、高効率レーザーピーニングを実現するためには適切な媒質の粘度が存在することがわかった。ただし、閉じ込め媒質としての適切な粘度はレーザー装置の繰り返し周波数、レーザーの照射方法などの実験条件によって異なるため、実験条件に応じた媒質を選択する必要がある。本研究で得られた成果は、高エネルギー利用効率レーザーピーニング技術の確立に向けて有益であると考えられる。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究開発助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 佐野雄二, 依田正樹, 向井成彦, 小畑稔: レーザーピーニング現象の観察とモデル化, レーザー研究, **26**, (1998), p. 793.
- 2) (社)レーザー学会: レーザープロセッシング応用便覧, NGT, (2006), p. 15.
- 3) R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard, D. Devaux, J. Virmont: Physical study of laser-produced plasma in confined geometry, J. Appl. Phys., **68**, (1990), p. 775.
- 4) Y. Sano, N. Mukai, K. Okazaki, M. Obata: Residual stress improvement in metal surface by underwater laser irradiation, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, **121**, (1997), p. 432.
- 5) 佐野雄二, 向井成彦: レーザーピーニングによる金属構造物の寿命延伸, レーザー加工学会誌, **17**, (2010), p. 4.
- 6) R. Fabbro, P. Peyre, L. Berthe, X. Scherpereel: Physics and applications of laser-shock processing, J. Laser

- Applications, **10**, (1998), p. 265.
- 7) M. Tsuyama, T. Shibayanagi, M. Tsukamoto, N. Abe, and H. Nakano: Grain Size Dependence of Surface Hardness of Laser-Peened Steels, *The Review of Laser Engineering*, **41**, (2013), p. 134.
 - 8) 水田浩平, 津山美穂, 部谷学, 塚本雅裕, 柴柳敏哉, 中野人志: レーザーピーニングにおける金属硬化特性に対するレーザー入射角度変化の効果レーザー学会誌レーザー研究, **41**, (2013), p. 942.
 - 9) M. Tsuyama, Y. Kodama, Y. Miyamoto, I. Kitawaki, M. Tsukamoto, and H. Nakano: Effects of Laser Peening Parameters on Plastic Deformation in Stainless Steel, *Journal of Laser Micro/Nanoeng.*, **11-2**, (2016), p. 227.
 - 10) 阿武喜美子 “糖化学の基礎”: 講談社、1984、pp.101-104
 - 11) E.Jungermann, N.Sonntag (著)、中野善郎 (翻訳) “グリセリンの科学”: フレグランスジャーナル社、1995、pp.127-145
 - 12) 化学大辞典編集委員会 “化学大辞典 1”: 共立出版、1997、pp.908-909