

2019 年度 若手・女性研究者奨励金 レポート

研究課題	プラズマ閉じ込め層を制御した際の レーザーピーニング効果 -プラズマ閉じ込め媒質の音響インピーダンス制御-
キーワード	①レーザーピーニング、②プラズマ閉じ込め層、③レーザーアブレーション

研究者の所属・氏名等

フリガナ 氏名	ツヤマ ミホ 津山 美穂	所属等	近畿大学 理工学部 講師
プロフィール	専門分野として、レーザー装置の開発研究、レーザー応用研究、ならびにレーザー関連周辺技術の開発研究を行っています。とりわけ、金属の表面処理技術であるレーザーピーニングについては、大学4年生の卒業研究より従事しており、高エネルギー利用効率化を目指した系統的な研究を続けております。		

1. 研究の概要

レーザー誘起衝撃波を利用し、金属の表面を局所的に変形させて応力状態を改善する技術のことを「レーザーピーニング」という。レーザーピーニングは衝撃加工であり、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。現時点におけるレーザーピーニングの対象は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留まっており、一般的な産業応用における表面処理技術としては未成熟である。レーザーピーニング処理の高エネルギー利用効率化を実現させ、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となる。

レーザーピーニングの原理を図1に示す。水中の金属試料に対し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。発生したプラズマの圧力は、金属試料の周囲に存在する水(プラズマ閉じ込め層)の慣性により膨張が抑制されるため数10 GPaにもおよび、その結果、衝撃波が発生する。発生した衝撃波は試料中を伝播し、試料を塑性変形させ、周囲からの弾性拘束によって試料表面層に圧縮残留応力層や加工硬化層が形成される。

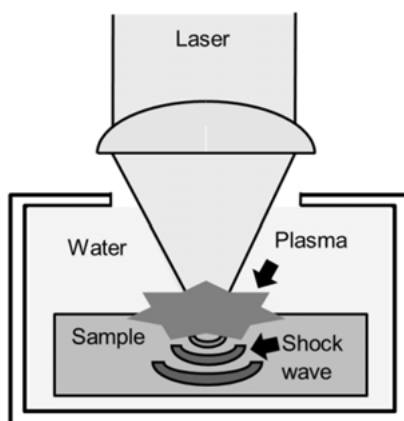


図1 レーザーピーニングの原理

衝撃波は金属表面で生じる急激な運動量変化に起因して発生しており、金属内部に及ぼされる衝撃の効果は力積として評価可能である。レーザーピーニングによる塑性変形層の厚さ L_p は、(1)式に示すように、レーザー誘起衝撃波の継続時間 τ_s とプラズマ圧力 P の積に比例し、

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

と示される。 τ_s と P の大きさは、レーザーピーニングの効果を決定する3つの因子、すなわち図2のように、レーザーの照射条件に関わる因子 F_L 、材料の状態を決定する因子 F_M 、プラズマ閉じ込め層の条件に関わる因子 F_C によって制御可能である。これらの因子を制御することにより、高エネルギー利用効率レーザーピーニング処理条件を明らかにするための実験研究を行っている。

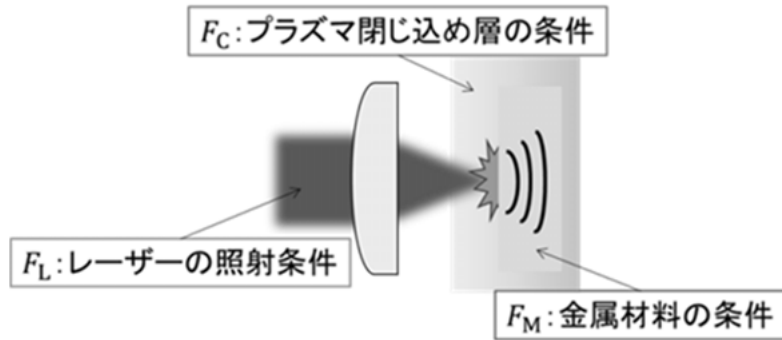


図2 レーザーピーニングの効果を決定付ける要素

2. 研究の動機、目的

レーザーピーニング処理は金属疲労の改善や応力腐食割れの防止策として有効であるが、使用用途は限られており、産業界への幅広い普及はしていない。研究者はすでにオーステナイト系ステンレス鋼・アルミ合金や炭素鋼に対するレーザーピーニング効果を見出しているため、フェライト・マルテンサイト系ステンレス鋼やタングステン等、核融合炉を構成する金属材料に対してもレーザーピーニングの効果が期待できると考えた。レーザーピーニング処理においては、発生するレーザー誘起プラズマを閉じ込めることが必須であり、プラズマ閉じ込め層として用いる媒質は、レーザーの波長に対して透過率が高い、科学的に安定である（金属試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ー光を照射しても安全であるといった条件を満たす必要がある。一般にレーザーピーニングにおけるプラズマ閉じ込め層の媒質としては、レーザー光の透過率が高く安価に手に入ることから水が使用されており、大気中に比べ数10倍のプラズマ圧力が得られるとされている。しかしながら、水中でのレーザーピーニングはレーザーエネルギーのブレイクダウンや金属の錆びを誘発するとともに、真空中での使用は困難である。レーザーピーニング処理技術を核融合炉へ応用可能とするためには、真空中でのレーザーピーニング処理を確立する必要がある。したがって、ガラス等の固体中およびガス等の気相中でのレーザーピーニング処理を確立することを目的とし、プラズマ閉じ込め層として、従来の水ではなく固体・気体媒質を選定した。

さらに、プラズマ閉じ込め層の音響インピーダンスは、閉じ込め媒質の密度と音速の積で決定されるが、音響インピーダンスが大きくなるとプラズマ閉じ込め能力も高くなるため、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に望ましいプラズマ閉じ込め媒質を選定することも目的としている。

3. 研究の結果

研究の一例として、レーザーピーニングのプラズマ閉じ込め層として、ホウケイ酸ガラスを用いた結果を図3、シリコンゴムを用いた結果を図4に示す。レーザー光源には波長532nmのナノ秒レーザー（Nd:YAGレーザー）を用いた。レーザーパルス幅は4ns、レーザーのビームスポット径を200 μ mとし、レーザーの繰り返し周波数を10Hzとした。金属試料にはステ

ンレス鋼Cを用い、試料内部のひずみを取り除くため、900°Cでアニーリングを施した。

図3, 4より、ホウケイ酸ガラスおよびシリコンゴムをプラズマ閉じ込め層としても、圧縮残留応力は付与される、つまりレーザーピーニング効果は付与されることが判った。したがって、ホウケイ酸ガラスおよびシリコンゴムはレーザーピーニングのプラズマ閉じ込め層媒質として有益であると言える。しかしながら、どちらも水をプラズマ閉じ込め層とした場合に比べて付与される圧縮残留応力が小さいため、金属と固体媒質の密着方法等、改善実験を進めている。

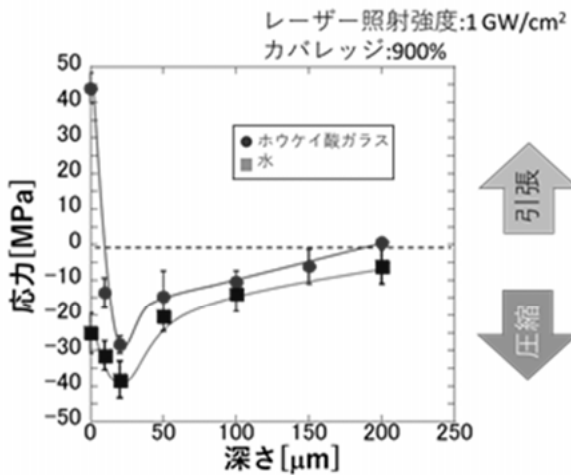


図3: ホウケイ酸ガラスをプラズマ閉じ込め層とした際の圧縮残留応力

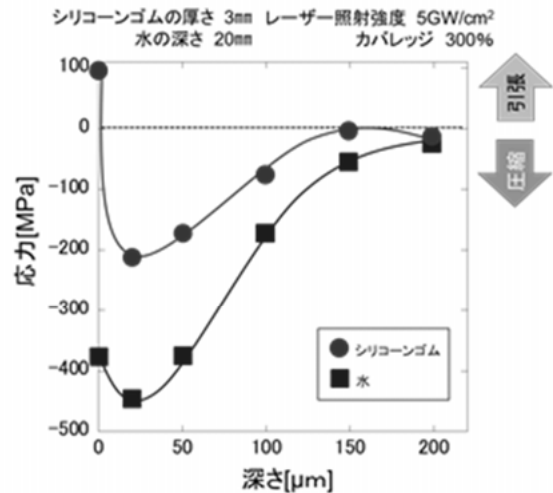


図4: シリコンゴムをプラズマ閉じ込め層とした際の圧縮残留応力

4. 研究者としてのこれからの展望

今回の研究結果より、固体媒質をプラズマ閉じ込め層として用いてもレーザーピーニングの効果を得られることが判りました。今後は液体を使用できない状況でのレーザーピーニング処理を可能とするため、固体媒質および気体媒質をプラズマ閉じ込め層とした実験研究を進めたいと思います。

このように、未だ応用されていない箇所へとレーザー処理を用いることが目標です。レーザー処理には利点が多いのですが、コストや設置場所、使用方法への懸念等から、特定の分野でしか積極的な応用がされていません。そのため、さまざまな分野において、懸念事項を上回るほど有益な応用方法を示し、レーザーを用いた技術を広めたいと考えております。

また、本分野は日本国内では男性研究者が多いため、女性の視点を活かした貢献をしていきたいです。

5. 社会に対するメッセージ

本奨励金をいただいたことにより購入した物品によって、レーザーの照射条件や対象材料の幅を広げることができました。様々な分野や状況への応用を目標としているため、実験の幅を広げることとはとても重要です。1年度の御支援のみでも幅を広げることができましたし、今後の展開への足掛かりとなりました。

レーザーピーニングの今後の展開として、核融合炉をはじめとした真空中等、液体を用いることの困難な状況への応用を目標としております。実現のためには長期的な実験研究が必要となります。

以上より、今回御支援いただいたことに感謝するとともに、長期的な御支援の機会をいただけますと幸いです。

最後になりましたが、2019年度に奨励金をいただいたことにより、研究を進めることができました。誠にありがとうございました。