時間・空間変調レーザ光を用いた
レーザピーニングの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
（2022 年度 一般研究開発助成 AF-2022224-B3）

キーワード：レーザピーニング，位相変調，ダブルパルスレーザ照射，マルチスポットレーザ照射

１．研究の目的と背景

レーザピーニングは、金属に高輝度のパルスレーザを照射した際に発生するレーザ誘起衝撃波を利用し、金属表層に圧縮残留応力および硬化層を形成する表面処理技術である[1-3]。

レーザピーニングの原理は以下の通りである。水中に設置した金属試料に対し、ピークパワーが GW/cm² を超えるパルスレーザを集光照射すると、試料表面にアブレーションプラズマが発生する。試料周囲に存在するプラズマ閉じ込め媒質（通常は水）がプラズマの膨張を抑制することで、プラズマの噴出圧力は GPa レベルに達し、その結果として衝撃波が発生する。この衝撃波の圧力が金属試料の降伏応力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、試料表層では加工硬化が生じるため、硬度も同時に上昇する。圧縮残留応力の増大は、金属疲労特性の改善や応力腐食割れの進展抑制に寄与し、表面硬度の向上は、表面亀裂や応力腐食割れの発生防止に効果をもたらす。

現在、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など、高い信頼性が要求される特殊分野に限られており、一般産業への普及には至っていない。その理由の一つとして、レーザピーニングで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や衝撃波発生などの作用機序が複雑であることが挙げられる。レーザピーニングを一般産業へ広く普及させるためには、各種金属材料に関するデータベースの蓄積に加え、プロセスにおけるエネルギー利用効率の高度化が必要である。

本研究では、時間的・空間的に変調したパルスレーザ光を金属試料に照射した際のレーザピーニング効果を詳細に調査し、高エネルギー利用効率化に必要な条件を明らかにすることを目的とした。

２．レーザ光の変調

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、レーザ光を時間・空間変調してレーザピーニング処理実験を行った。プラズマ噴出圧力（衝撃波の圧力）の向上に直接寄与するのは逆制動放射によるレーザ光のエネルギー吸収率の向上であり、これを時間変調技術によって制御した。具体的には 2 台のパルスレーザ装置を用いて、レーザパルス間隔を制御することにより、最も効果的なレーザ照射条件を調べた。図 1 は、ダブルパルスレーザピーニング(DPLP)プロセスの概略を示したものである[4]。1 発目のプリパルスが水中にあるターゲット材料に照射されると、材料表面はアブレーションされ、プルームが発生する。続いて 2 発目のメインパルスが照射されると、逆制動放射や共鳴吸収をはじめとしたプルームとの相互作用により、メインパルスのエネルギーは効果的に吸収される。吸収されたエネルギーは、プルーム全体のエネルギーを増加させることでプルーム圧力を高め、高振幅の衝撃波を発生させる。

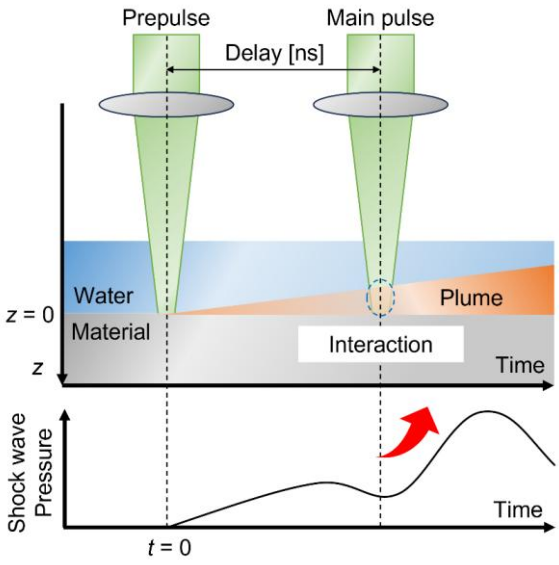


図 1　ダブルパルスレーザピーニングの概略図

レーザーエネルギーの吸収効率は、プリパルスで発生したプルームの状態（電子密度、電子温度、イオン密度、イオン温度、プルーム厚さなど）に影響される。プルームの状態は、パルスの間の遅延時間やプリパルス強度など、レーザの照射条件によって決定される。これらパラメータを正確に調整することで、プルーム状態が最適化され、レーザからターゲット材料への効率的なエネルギー伝達が促進される。

また、レーザピーニングによって金属材料に付与される圧縮残留応力の大きさと分布はレーザの集光径と重ね打

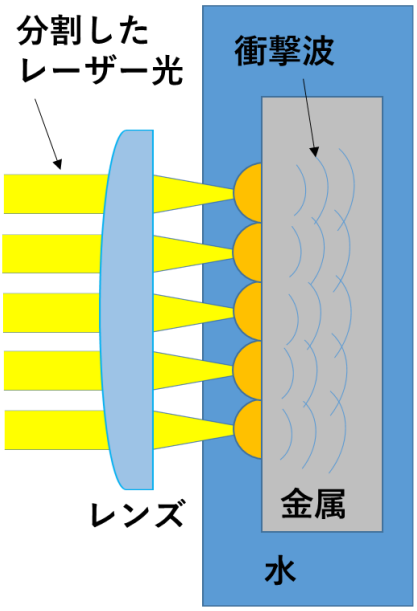


図 2　マルチスポットレーザピーニング

ち率（カバレッジ）に強く依存することから、レーザを空間位相変調することによって集光径ならびに集光パターンを様々に変化させたレーザピーニング処理を行った。本稿ではマルチスポットレーザピーニング(MSLP)の実験研究成果について示していく。図 2 にマルチスポットレーザピーニングの概念図を示す。圧縮残留応力の深層化をはかるためには大きな集光径でのレーザピーニング処理が望ましい。しかしながら、大集光径でのレーザピーニング処理はレーザ装置から出射されるエネルギーの増加を意味する。市販装置等の現実的なレーザエネルギー（数百 mJ 程度）で深層化等、効果的なレーザピーニング処理を実現するため、集光スポットを分割し多数の衝撃波を発生させ、衝撃波の伝播特性を変化させた。衝撃波の干渉は圧縮残留応力の増大に寄与する。また、試料表面の圧縮残留応力分布は集光スポットの形状・数、重ね合わせ率によって様々に変化する。

３．実験方法

DPLP ならびに MSLP の実験方法について、以下、示していく。

3・1　時間変調レーザピーニング

DPLP で使用した光学系配置図を図 3 に示す。光源には、波長 532 nm の Nd: YAG (2ω) パルスレーザを 2 台使用した。波長 532 nm は、水に対する透過率が高く、水中でも効率の高いエネルギー伝達が可能である。プリパルスおよびメインパルスのパルス幅はそれぞれ 6 ns、4 ns であり、これらは偏光ビームスプリッターを介して同一光路に合流させた。偏光ビームスプリッターの角度は、プリパルスの入射光路に対してブリュースター角(56.6°)に設定した。合流後のレーザパルスは、4 枚のレンズで構成された 4f

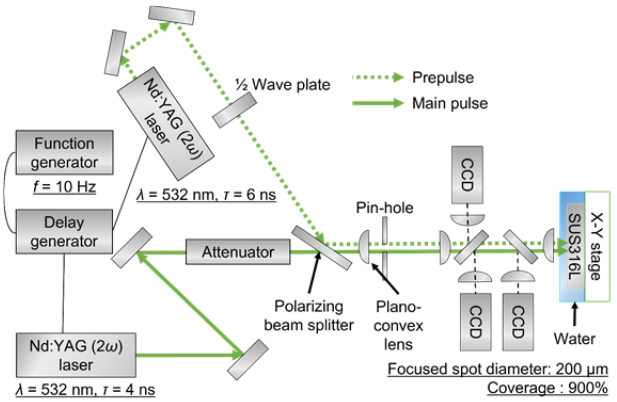


図 3　DPLP の実験配置

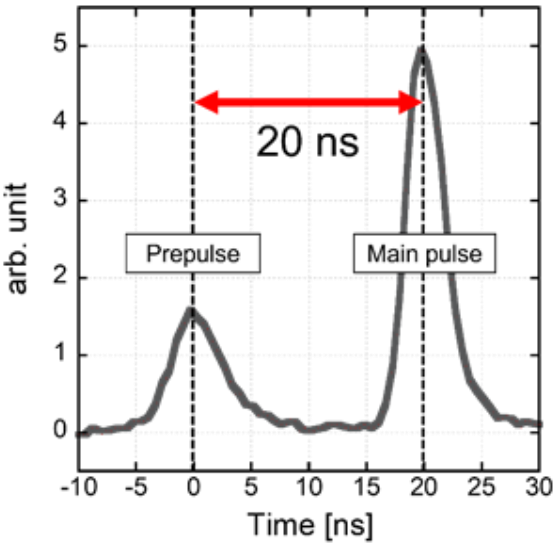


図 4　照射レーザパルス

光学系を通過して試料に集光照射される。この 4f 光学系はピンホールの結像が試料表面に 10 分の 1 の大きさで得られるように設計されている。ピンホール径は 2 mm であったので、スポット径は 200 μm となる。プリパルスとメインパルスの間の遅延時間は、デジタル・ディレイ・ジェネレータを用いて制御し、その信号波形を図 4 のようにピンフォトダイオードで確認した。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 25×25×5 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、900%一定とした。プリパルスおよびメインパルスの集光強度、重ね打ち率（カバレッジ）を変化させレーザピーニング処理実験を行った。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]。金属試料の塑性変形に伴う加工硬化をビッカース硬度計で測定し、また、試料の応力分布を X 線回折装置で評価し、レーザピーニング効果の指標とした。

3・2　空間変調レーザピーニング

レーザパルスの空間変調は一般に LCOS-SLM(Liquid Crystal On Silicon Spatial Light Modulator)として知られている空間光位相変調器を用いて行った。レーザピーニングが金属材料に与える圧縮残留応力の大きさ・分布はレーザ誘起衝撃波の空間プロファイルによって決定される。したがって、集光径、集光形状、カバレッジ、スキャンニング方向等が主なパラメータとなる。LCOS-SLM を用いてレーザ光の位相変調を行い、MSLP を実現した。

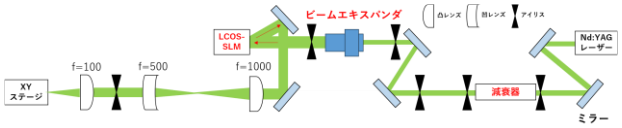


図 5　MSLP の光学系配置図

図 5 に MSLP の光学配置図を示す。Nd:YAG レーザから出射された 2ωのレーザ光は減衰器を通過した後、ビームエキスパンダによってビーム径が拡大される。拡大されたレーザ光は、PC で制御された LCOS-SLM のヘッド全体に照射され位相変調を受ける。位相変調後のレーザ光はレンズにより集光され、金属表面へ任意のパターンとして照射される。

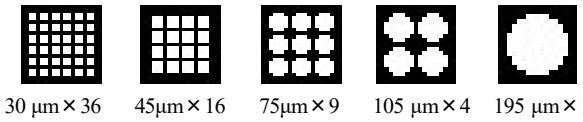


図 6　MSLP のターゲットパターン例

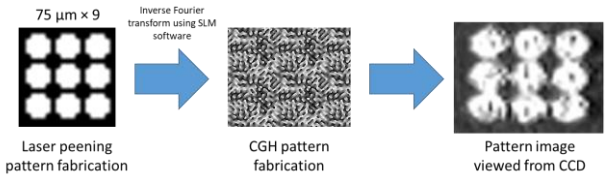


図 7　75 μm×9 における測定結果の一例

図 6 は本研究で実施した MSLP のターゲットパターン例であり、それぞれ集光径×分割数で示されている。30 μm×36、45 μm×16、75 μm×9、105 μm×4 とし、比較のため 195 μm×1 のシングル集光スポットでの照射実験も行った。ターゲットパターンを基に計算機合成ホログラム(CGH)を作製し、その信号を LCOS-SLM に送信することで、LCOS-SLM ヘッド部に照射されるレーザ光を空間的に変調した。これらのマルチスポットのスポット径は照射面積が等しくなるように設定した。図 7 に一例として 75 μm×9 の場合において CCD カメラで取得した集光パターン像を示した。レーザピーニング処理実験のパラメータ・評価方法は DPLP とほぼ同様である。

4．実験結果

4・1　時間変調レーザピーニング

図 8 に DPLP の一例としてビッカース硬度変化のレーザ強度依存性の結果を示す。プリパルスのレーザ強度を 0.5 GW/cm^2、カバレッジを 900%、遅延時間を 10 ns に設定している。図の縦軸はレーザ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。シングルパルスで行ったレーザピーニング実験

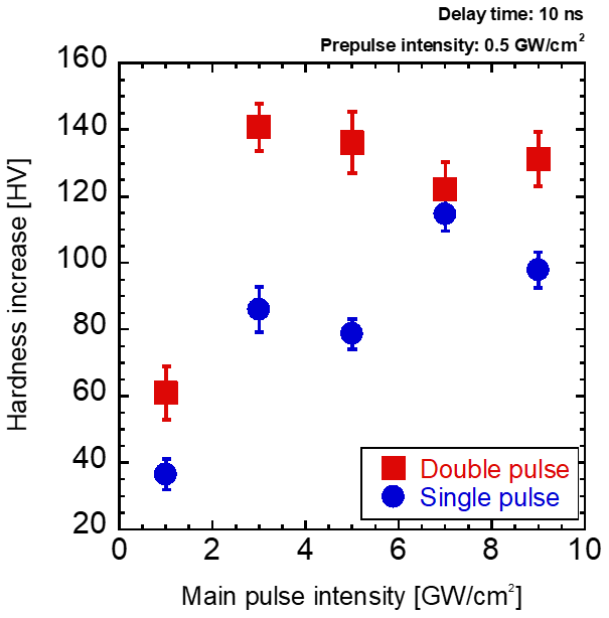


図 8　ビッカース硬度のレーザ強度依存性

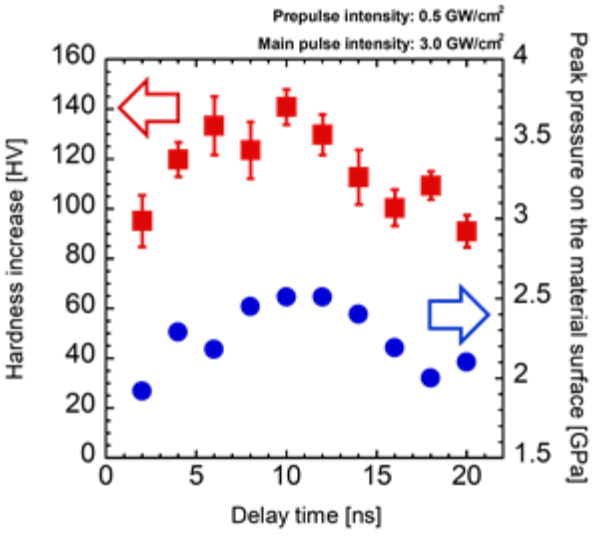


図 9　ビッカース硬度の遅延時間依存性

(SPLP)の結果も、比較のため、示している。レーザ強度の増加につれビッカース硬度が増大していることがわかる。レーザ強度 3 GW/cm^2 において、硬度変化は 140 を超えており、SPLP と比べて 64%の向上が観られ、DPLP はレーザピーニングの高エネルギー利用化に有用な技術であることが示された。

また、図 9 にはビッカース硬度の遅延時間依存性を示している。プリパルスのレーザ強度 0.5 GW/cm^2 においては概ね 10 ns 程度の遅延時間が有効であることが判明した。●印で示しているのは試料表面でのストレス波圧力のシミュレーション[5]結果であり、10 ns 近傍の圧力が大きく、この傾向は実験と良く一致している。

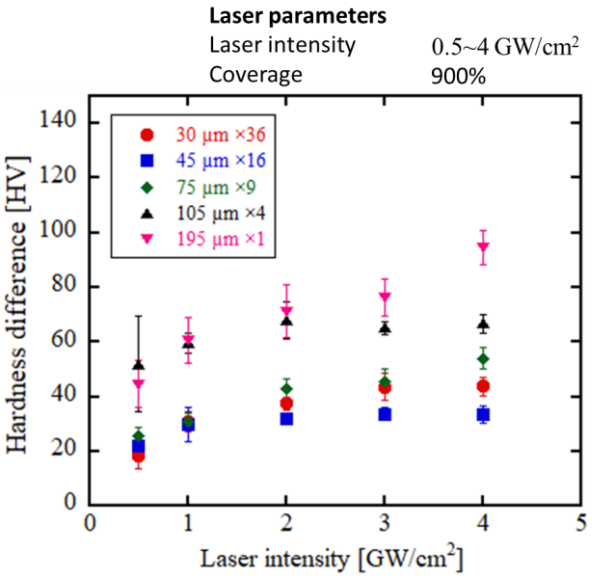


図 10　ビッカース硬度のレーザ強度依存性

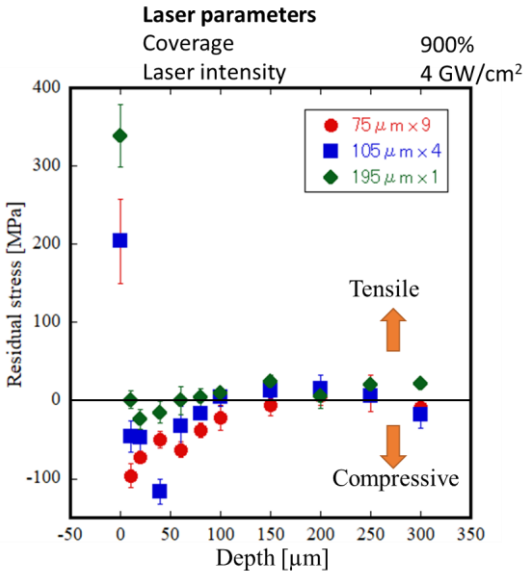


図 11　MSLP における圧縮残留応力

4・2　空間変調レーザピーニング

図 10 に MSLP におけるビッカース硬度測定結果を示す。SPLP ではレーザ強度 4 GW/cm^2 において概ね 100 程度の硬度変化が得られているが、MSLP では、若干、硬度が低下している。特に 2 GW/cm^2 以上のレーザ強度においては大きな硬度変化が観られない。

図 11 に MSLP における圧縮残留応力の測定結果を示す。レーザパラメータはレーザ強度 4 GW/cm^2、カバレッジ 900%である。本実験においては 75 μm×9、105 μm×4 のレーザ照射において得られた圧縮残留応力を示している。実験全般を通じて圧縮残留応力の大きさは小さく、また表層において引張の残留応力が観測されている。しかしながら、MSLP は比較的深部に応力が付与されており、応力分布の深層化については有用な結果が得られている。

5．考察

DPLP における図 8 の結果は、DPLP が SPLP よりも表面硬度を向上させることを明らかにした。特に、3.0 GW/cm^2 のレーザ強度で顕著な向上が見られ、DPLP は SPLP よりも最大 64%の高い表面硬度上昇が見られた。この DPLP による表面硬度の向上は、プリパルスによって生成されたプルームに起因しており、このプルームは、メインパルスのエネルギー吸収効率を高める。結果として加工硬化を増大させる高振幅・圧力のレーザ誘起衝撃波が生成された。しかしながら、レーザ強度が 3.0 GW/cm^2 を超えると、表面硬度の上昇は頭打ちになり、DPLP と SPLP の硬度差は小さくなった。高強度レーザ照射下では、DPLP に限界があることが示唆される。高強度のレーザ照射は、水中でのブレイクダウンを引き起こし、ターゲット材料へのレーザーエネルギーの伝達が阻害される[6]。レーザとプルームとの相互作用が制限されたものと考えられる。

図 9 に示した結果は、硬度を最大化するためには、最適なパルス間遅延時間とプリパルス強度の選定が重要であることを示している。プリパルス強度 0.5 GW/cm^2 では、遅延時間 10 ns 近傍が望ましいことを明らかにした。最適な遅延時間とプリパルス強度は、プルームの長さ、密度、温度など、レーザーエネルギー吸収に適したプルーム状態を生成する。ダブルパルスレーザ技術を利用した効果的なレーザーエネルギーの吸収は、レーザピーニング以外の先行研究においても、同様の遅延時間で報告されている[7]。

DPLP のレーザーエネルギー吸収過程の理解はターゲット材料の機械的特性変化を正確に予想するために重要となる。DPLP におけるレーザーエネルギーの吸収は主に部分電離領域の自由電子による逆制動放射によって行われる。材料表層における自由電子密度、温度等の情報を詳細に分析し、最適な DPLP の条件を見出すことが今後の課題となる。

図 10 の結果は MSLP が表面硬度に及ぼす影響が比較的小さいことを示している[8-9]。スポット数の増加が硬度上昇を減少させる要因は現在のところ不明であるが、レーザーエネ

ルギーが複数のスポットに分散されることにより、表面における局所的な塑性変形層が減少したためと考えている[8]。

図 11 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。引張残留応力が発生した要因は試料表面の溶融によるものと考えられる。重ね打ち率をさらに向上させるか犠牲層を用いて改善をはかる必要がある。

MSLP の 105 μm×4 においては、試料深さ 40 μm で圧縮残留応力のピーク値－116 MPa が得られている。75 μm×9 の MSLP では、圧縮残留応力深さ 10 μm で－96 MPa となり、深さ 150 μm でゼロに漸近している。

本実験においては、MSLP は、SPLP(195 μm×1)と比較して、深い圧縮残留応力層が得られている。これは複数のレーザ誘起衝撃波の重ね合わせ効果によるものと考えられる。しかしながら、本実験で得られた圧縮残留応力の絶対値は、同一のレーザ強度で行われる SPLP に比べて低く、衝撃波発生に関しての詳細な考察が必要である。LCOS-SLM において発生するゼロ次光（変調受けない光）が MSLP 処理時に重畳している可能性があり、光学配置の最適化も必要と考えられる。

６．まとめ

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、レーザ光を時間・空間制御した DPLP、MSLP を実施した。両技術共に、適切な条件設定によって、レーザピーニング効果の向上を見込めることが明らかとなった。本研究の成果がレーザ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き近畿大学大学院総合理工学研究科を修了した諸氏、特に下間友裕氏、Megat Adam Bin Megat Harris 氏、古川夏暉氏、下代明夫氏に感謝致します。

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) T. Shimotsuma, A. Geshiro, M. Tsuyama, M. Heya, and H. Nakano, J. Laser Appl. **36** (2024) 042064.
5) M. Heya, H. Furukawa, M. Tsuyama, and H. Nakano, J. Appl. Phys. **129** (2021) 235108.
6) M. Tsuyama, Y. Kodama, Y. Miyamoto, I. Kitawaki, M. Tsukamoto, and H. Nakano, J. Laser Micro/Nanoeng. **11** (2016) 227.
7) D. Courapied, L. Berthe, P. Peyre, F. Coste, J. P. Zou, and A. M. Sautivet, J. Laser Appl. **27** (2015) S29101.
8) M. A. B. M. Harris, N. Furukawa, M. Tsuyama, M. Heya, and H. Nakano, Proceedings of SPIE, **13234** (2024) 132340.
9) N. Furukawa, Y. Fukui, M. Heya, H. Nakano, Proceedings of SPIE, **13713** (2025) 13713U.