

高出力マイクロ秒パルスレーザー照射による ピーニングパラメータ計測

大阪大学 レーザー科学研究所
教授 重森 啓介
(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016214)

キーワード：ピーニング，マイクロ秒レーザー，衝撃波

1. 研究の目的と背景

パルスレーザーをもちいたレーザーピーニングは、高強度レーザーによって生成するアブレーション圧力により衝撃波を駆動し、材料中に圧力波を伝播させて残留応力を制御する手法であり、従来のショットピーニングよりも制御性や発生圧力の高さなど優位点が多く、幅広い応用がすすめられている。このレーザーピーニングの性能のうち、衝撃波を材料中にいかに深く浸透させるか（深層制御）が材料強度向上の鍵となっている。例えば、レーザーピーニングで用いられるレーザー装置のパルス幅はおおよそ ~ 10 nsであり、この場合に 10 GPa（10 万気圧）の衝撃波を発生させた場合の SUS 中での衝撃波伝播距離（衝撃波速度 \times レーザーのパルス幅）は約 100 μm 程度である。この伝播距離を深くする一つの手段として、照射レーザーの大出力化によって強い（圧力の高い）衝撃波を発生させるというアプローチがある。しかしながら、材料中に伝播する衝撃波の圧力はその伝播距離のべき乗で急激に減衰するため、初期圧力を高くすることだけでは効果は薄い。そこで、衝撃波伝播距離を得るもう一つの手法として、パルス幅を長くすることにより衝撃圧縮の持続時間を長くすることが考えられる。しかしながら、このような長パルス幅条件での材料変性にかかわる研究はこれまで行われておらず、レーザー照射による衝撃波や熱波などの伝播に関する基礎的な物理過程に関する知見が不足しているのが現状である。

レーザー照射材料中を伝播する衝撃波は、上記の通り圧力を減衰しつつ空間的に発散しながら伝播する。その伝播プロセスを正しく理解することがレーザーピーニングの成功の鍵を握る。さらに、この衝撃波とは独立してレーザーピーニング特有の問題を評価する必要がある。レーザー照射の場合、アブレーションの反作用によって材料中に衝撃波を駆動するため、衝撃波通過後におけるアブレーションプラズマの熱（熱波）の影響を考慮する必要がある。フェムト秒レーザーのような極めて短いパルス幅の照射条件下ではこの効果が無視できるほどであるが、パルス幅が長くなればなるほどアブレーションプラズマの総量が増加するため、この熱（熱波）の影響を正確に得る必要がある。本研究で狙いとしている長パルスレーザーを用いた深層加工では、上記のような効果を特に正しく理解しなくてはならない。これまでパルスレーザーによるピーニングだけでなく、一般的な加工でもナノ秒 \sim 数 10 ナノ秒でのパルス幅における研

究や技術開発は数多くあるものの、本研究のようなマイクロ秒オーダーでの実験的研究はほとんど行われていない。これらの点を鑑み、申請者らがこれまで行ってきた高精度レーザー駆動衝撃波計測の活かし、これまで明らかになっていなかった長パルスレーザー照射条件下の材料中でのピーニングパラメータ（圧力、温度など）を計測することにより、ピーニング性能を大きく向上させるための物理的知的基盤を得るのが本研究の目的である。

2. 実験方法

2.1 高出力マイクロ秒パルスレーザーの開発

図 1 はレーザーシステムの光学系の配置を示している。なお、波長は 1053 nm、ビーム径は 50 mm となっている。波長 1053 nm に対して反射率 20% のフロントミラーと反射率 100% のリアミラーの間に増幅器を 2 台設置する形でレーザーシステムの共振器としている。レーザー制御器のポテンションメーターの値に応じて励起電圧を変化させることができ、励起電圧に応じてレーザーエネルギーは変化する。本研究では特に記載がない限り、励起電圧 5.4 kV で照射実験を行っている。図 1 の出力側の 0.1% 透過ミラーの透過光をエネルギーメーターで測定することでレーザーエネルギーを算出し、エネルギーメーター表面の散乱板からのレーザー光をフォトダイオードで測定することでパルス波形の計測を行った。加えて、フロントミラーとリアミラーの間の光軸の調整及び、ターゲット表面での集光確認のために、He-Ne レーザーと CCD カメラによるアライメントシステムを設置した。

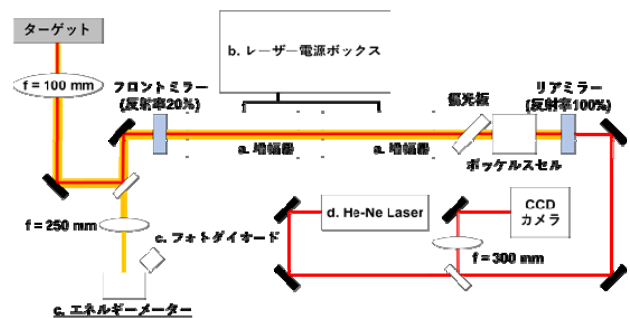


図 1 本研究で用いたレーザーシステム概略

増幅器のみの場合、発振時間波形はフラッシュランプの発光による波形（パルス幅：数 100 μs ）となり、本研究で行うピーニングに必要な照射強度が得られない。そこで、増幅器とリアミラーの間に水平偏光のみを透過する偏光板と電圧印加によって屈折率が変化する径 50 mm のポッケルスセルを設置する Q-switch システムを導入した。ポッケルスセルは Gooch & Housego 社製の Large Aperture KD*P Cell（口径 50 mm）を用いており、 $\lambda/2$ 板として用いるためには 6.9 kV、 $\lambda/4$ 板として用いるためには 3.45 kV の電圧を印加しておく必要がある。本研究において、パルスレーザの発振を抑える光シャッターとして用いるために水平偏光のみを透過する偏光板と組み合わせる場合はポッケルスセルを $\lambda/4$ 板として用いる必要があるため、3.45 kV の電圧を印加するように設定した。得られたパルス波形を図 2 に示す。

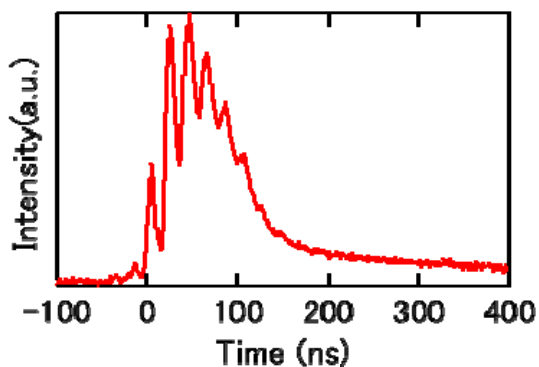


図 2 本レーザシステムにおけるパルス波形

2・2 衝撃波パラメータ計測システム

本研究では、図 3 に示すような VISAR（Velocity Interferometer System for Any Reflector）計測系を用いて計測を行った。プローブレザには出力 500 mW、波長 532 nm の CW レーザ（UniKLasers 社製：Duetto532）を用いている（図 4.22）。エタロンの厚みは 35 mm であり、この際速度感度 VPF (Velocity per Fringe) は 1.28 km/s である。つまり、得られた干渉縞 (Fringe) が 1 Fringe 分シフトした場合にはその裏面速度が 1.28 km/s となる。VISAR 測定において、詳細な解析を行うためには適切な干渉縞密度を選択する必要がある。しかし、レーザ光は非常にコヒーレンスの高い光であるため、試料裏面への入射の仕方により、干渉計の条件に関わらず、至る所で干渉を示すために適切な干渉縞密度を実現する上で問題となる。そのため、プローブレザの空間コヒーレンスを崩すため、光ファイバーを通過させている。また、エタロンのハーフミラーコート面での光が試料裏面へ戻ってしまうことを防ぐため、図 4.21(b) に示すように干渉計を平行四辺形に組んでいる。対物レンズは無限遠補正のレンズ (L1) を用いており、アクロマティックレンズ (色消しレンズ) (L2) で M1, M2 ミラー上に試料裏面の像を結像するように設置している。レンズ (L3) によ

って M1, M2 ミラー上の像をストリークカメラ（浜松ホトニクス製：C7700）に結像してある。M2 ミラーを平行移動させ、式 (4.7) の条件を満たす位置に至ると干渉縞のコントラストが最大になる。また、M2 ミラーを傾ける方向に応じて干渉縞のシフトする方向も変化するため、試料裏面が加速するのは干渉縞がどちらにシフトした時なのかを事前に調査する必要がある。ストリークカメラはその光感度の高さから、パルスレーザのような非常に強い光が入った場合にはカメラが損傷する恐れがある。そのため、対物レンズ (L1) とビームスプリッターの間に波長 1053 nm の光に対する透過率が 1% 以下のフィルターを 5 枚設置し、照射試料を貫通したパルスレーザがストリークカメラに侵入しないようにしている。

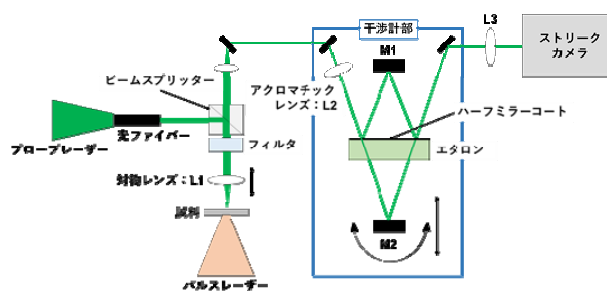


図 3 衝撃波計測システム概略図

3. 実験結果

3・1 先行加熱の評価

ポッケルスセルと偏光板による Q-switch を導入し、厚さ 200 μm の Al 試料への照射実験を行った結果、試料の照射痕を観察すると溶解している痕跡が見られ、熱の影響が生じていることが予想された。この原因の一つとして、Q-switch が完全な光シャッターとして機能しておらず、メインパルスの前に漏れ光が発生し、その結果として先行加熱が生じている可能性が考えられた。そのため、サブマイクロ秒パルスレーザシステムによる漏れ光の発生で先行加熱が生じているかを金属試料に照射実験を行い、調査した。なお、漏れ光の有無を確かめるため、Q-switch を動作させずに偏光板とポッケルスセルを光シャッターとして動作させ、レーザエネルギーやレーザ波形を計測した。図 4 (a) に示すように厚さ 3 μm モリブデン薄膜を大阪大学・レーザ科学研究所のレーザ加工機で短冊状 (1 mm \times 5 mm) に加工し、透明体である合成石英ガラスに導電性銀ペーストで銅線と共に接着した。作製したモリブデン試料には図 4 (b) に示すようにレーザを照射する。モリブデン試料に対してレーザ照射面側に透明体材料である合成石英ガラスが置いてあるが、この合成石英ガラスによるレーザ誘起プラズマの閉じ込め (後述) は生じない。これは漏れ光の温度がプラズマ発生温度 (6500 K ~ 9000 K) に達しないためである。モリブデンは良導体であり、電気抵抗値が小さいこ

とから電気抵抗値の精密計測を行うためにホイートストンブリッジ回路を介してオシロスコープで計測を行った。

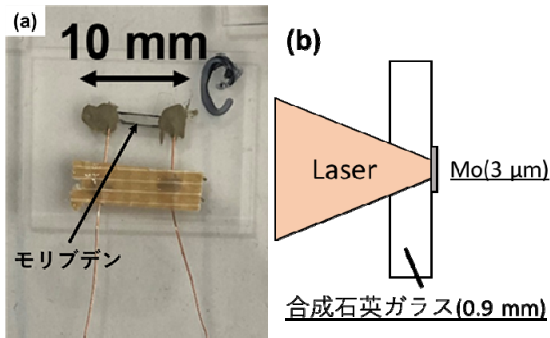


図 4 先行加熱計測系の概略

図 5 は照射実験中のモリブデン試料の電気抵抗率の変化をオシロスコープから得られたものを示す。時間 0 μs でメインパルスが到達することから 200 μs 前から加熱が始まっていることがわかる。この結果から、サブマイクロ秒パルスレーザーシステムで生じた漏れ光によって、メインパルス直前までに $980 \pm 100 \text{ K}$ の先行加熱が生じることが確認された。

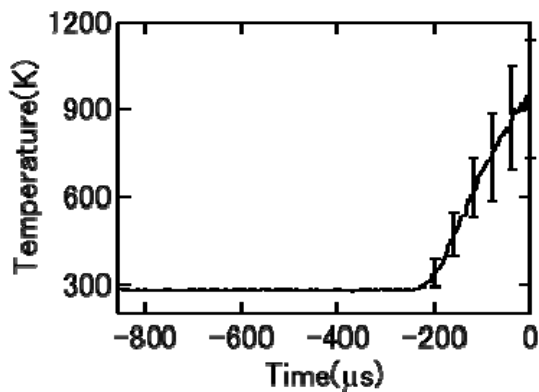


図 5 先行加熱温度計測結果

3・2 衝撃波パラメータの評価

図 6(a)に Al 薄膜(厚さ 400 μm)へ照射実験を行った(@1 mm 集光)際の VISAR 測定の結果を示している。このときの掃引時間は 10 μs であり、時間分解能は 140 ns であった。図 6(b)はこのレーザー照射の際に得られたレーザー波形、図 6(c)は照射後の Al 試料である。得られたレーザーエネルギーは 85 J、パルス幅は 100 ns であった。レーザー照射後に干渉縞の乱れが確認できるが、シフトは確認されないことから試料裏面に観測に有意な裏面速度が到達していないことがわかる。また、図 7(a)に Ti 薄膜(厚さ 100 μm)へ照射実験を行った(@1 mm 集光)際の VISAR 測定の結果を示す。このときの掃引時間は 2 μs であり、時間分解能は 45 ns

であった。図 7(b)はこのレーザー照射の際に得られたレーザー波形、図 7(c)は照射後の Ti 試料である。得られたレーザーエネルギーは 25 J、パルス幅は 100 ns であった。Ti 試料での照射実験の際、レーザー径が半分(面積は 1/4)であったため、エネルギーが前者に比べて 1/4 ほど小さくなる。Ti 試料への照射実験においても干渉縞のシフトが確認されないことから、試料裏面に観測に有意な裏面速度が到達していないことがわかる。

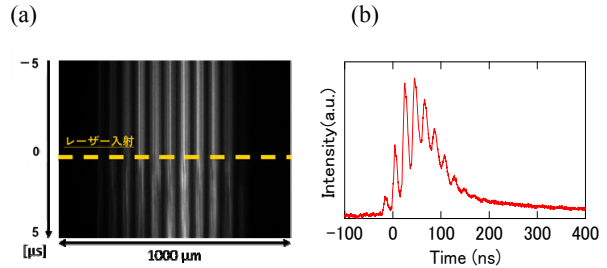


図 6 Al 試料への照射実験から得られた結果

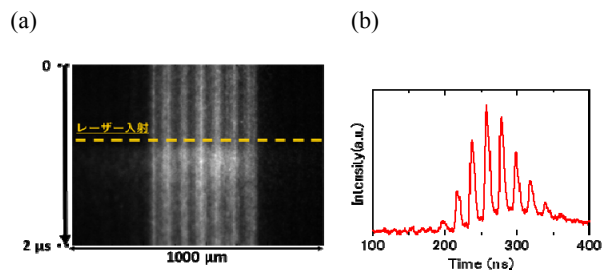


図 7 Ti 試料への照射実験から得られた結果

3・3 プラズマ閉じ込め効果による圧力の増大

直接照射法におけるレーザ誘起衝撃波はレーザ照射後(レーザ入射からパルス幅の時間の後)から希薄波の急速な進行が始まり、衝撃波に希薄波が追いついた場合、衝撃波が急激に減衰する。一方で、試料のレーザ照射面側を透明体媒質で覆った場合には、衝撃波を追いかける希薄波の伝搬を遅らせることが可能になる。また、直接照射法ではレーザ誘起プラズマが真空中で自由に拡散してしまうため、断熱膨張によってプラズマは急速に冷却されてしまう。そのため、圧力持続時間はレーザのパルス幅と同等になることが知られている。先行研究²⁾において、レーザ誘起プラズマをガラスなどの透明体に閉じ込めることで、直接照射を上回る圧力及び、パルス幅の2倍以上の圧力持続時間が達成されることが報告されている。以上の理由から、透明体媒質で試料を覆うプラズマ閉じ込め法の導入により、開発したレーザシステムの課題を克服し、直接照射以上の高圧力と圧力保持時間を達成できる可能性がある。

照射試料には図8のような厚さ 50 μm 、100 μm の Ti 箔と厚さ 0.9 mm の合成石英ガラスをアセトアミドで接着したものを用いた。なお、接着材として使用したアセトアミドの厚さは 1 μm 以下である。Ti 試料と合成石英ガラスの厚みは衝撃波に希薄波が追いつかない範囲 $\tau + L_{\text{Ti}}/W_2(\text{Ti}) < 2L_{\text{glass}}/W_2(\text{glass})$ で設定してある。VISAR で計測される衝撃圧縮の保持時間は、試料裏面は衝撃波によって加速されて動き出してから圧力の開放に伴って動き出した試料裏面は初期位置(衝撃波到達前の位置)に戻るまでの時間となる。しかし、衝撃波によって HEL を越える圧力を与えられた物質は塑性変形によって、試料裏面が初期位置に戻ることができない。そのため、試料裏面に押さえとなる媒質を置くことで衝撃圧縮の立下りが観察できるようになると考え、厚さ 5 mm の合成石英ガラスを設置した。

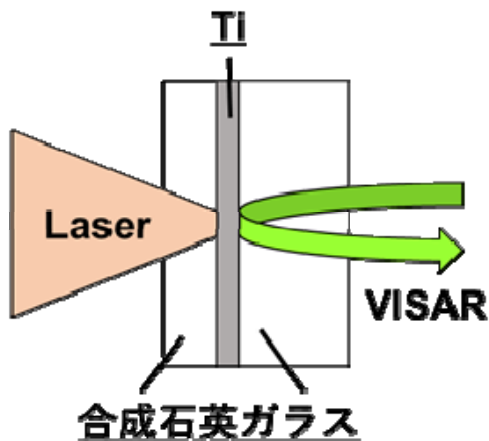


図8 プラズマ閉込法における試料セットアップ概略

図9(a)は図5.6の試料(Ti厚み 50 μm)に集光径 1 mm でレーザを照射した際の VISAR 測定の結果を示している。このときの掃引時間は 2 μs であり、時間分解能は 40 ns であった。干渉縞のシフトが確認されることから試料裏面に衝撃波が到達していることがわかる。試料裏面に到達する衝撃波の圧力の時間変化を図9(b)に示す。Ti の Co と S はそれぞれ 6.16 km/s, 3.19 km/s である。また、図9(c)に示すように照射後の試料に強い圧縮の痕跡が確認できる。この結果から、レーザ誘起プラズマの閉じ込め法の導入により、最大で 15 ± 1 GPa の圧力が試料裏面に到達していることがわかった。また、 10 ± 1 GPa 以上の圧力が 200 ns 以上保持されていることがわかった。

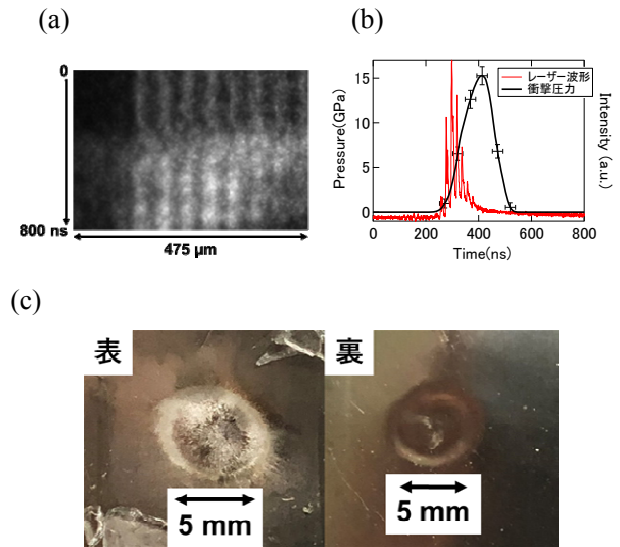


図9 プラズマ閉じ込め法を導入した Ti 試料@厚さ 50 μm への照射実験の結果

4. 結び

本研究では、これまで適用されていなかったマイクロ秒オーダーのパルス幅レーザにおけるピーニングパラメータの計測を実施した。100 J 級の出力をもつユニークな装置系を開発し、衝撃波パラメータをはじめとしたレーザピーニングに重要なパラメータの計測を実施し、試料や照射強度依存性を得た。また圧力増大の方策のためにレーザプラズマ閉込法を適用し、有意な効果を証明した。

謝辞

本研究の遂行にあたり、援助いただきました公益財団法人天田財団に深く感謝いたします。また、実験実施にあたって尽力いただきました弘中陽一郎特任研究員、大学院学生の藤原宇央氏に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) L. M. Barker and R. E. Hollenbach., *J. Appl. Phys.*, 43, 4669, 1972
- 2) R. Fabbro, *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 68, 1990