

一般セッション(口頭講演) | 3 光・フォトンクス：3.6 レーザープロセッシング (旧3.7)

■ 2023年9月20日(水) 13:30 ~ 17:30 | 会場 B205 (市民会館)

■ [20p-B205-1~15] 3.6 レーザープロセッシング (旧3.7)

奈良崎 愛子(産総研)、中嶋 隆(京大)

◆ 奨励賞エントリー

13:30 ~ 13:45

[20p-B205-1] 誘電体ガラス基板のフェムト秒パルスレーザー加工におけるマルチタイムスケール時間分解複素透過率イメージング

○(D)川野 将太郎¹、戸田 圭一郎¹、櫻井 治之¹、小西 邦昭¹、井手口 拓郎¹ (1.東大院理)

◆ 奨励賞エントリー

13:45 ~ 14:00

[20p-B205-2] 空気中でのフェムト秒光パルスの非線形伝搬効果を利用した加工穴形状制御

○山田 涼平¹、小松原 航¹、櫻井 治之¹、小西 邦昭¹、三尾 典克¹、湯本 潤司¹、五神 真¹ (1.東大院理)

◆ 奨励賞エントリー

14:00 ~ 14:15

[20p-B205-3] 青色パルスレーザーによる銅の高効率加工

○井本 大暉¹、萩野 裕幸¹、森 正裕¹、堤 太志²、加藤 直也²、岡田 真一²、信岡 政樹²、大野 啓¹ (1.パナソニックホールディングス(株)、2.パナソニック コネクト(株))

◆ 奨励賞エントリー

14:15 ~ 14:30

[20p-B205-4] 軸方向電場を増強したベクトルビームによるレーザー微細加工

○(M2)津留 志音¹、小澤 祐市¹、上杉 祐貴¹、佐藤 俊一¹ (1.東北大多元研)

◆ 奨励賞エントリー

14:30 ~ 14:45

[20p-B205-5] ナノ秒パルスレーザーを照射したチタン表面のナノドット構造形成

○關 一樹¹、岡崎 未来瑠²、坂上 仁志^{3,4}、山口 滋¹、橋田 昌樹³ (1.東海大院理、2.東海大院工、3.東海大総科研、4.核融合科学研)

◆ 奨励賞エントリー

14:45 ~ 15:00

[20p-B205-6] 二段階レーザー照射によるバブル駆動粒子集積プロセスと集光部周辺対流の直接観察

○(M1)青山 昌央¹、沼田 洸¹、西山 宏昭¹ (1.山形大院理工)

◆ 奨励賞エントリー

15:00 ~ 15:15

[20p-B205-7] 深紫外パルスレーザーを用いたガラスへの超撥水性付与に向けた研究

○草川 義起^{1,2}、藤本 靖¹、伊藤 功²、小林 洋平² (1.千葉工大院工、2.東大物性研)

◆奨励賞エントリー

15:15 ~ 15:30

[20p-B205-8] GHz バーストモードフェムト秒レーザーによりTi表面に形成した2次元表面微細周期構造の固体表面機能の検討

○川端 祥太^{1,2}、Sima Felix^{1,3}、白石¹、小幡 孝太郎¹、宮地 悟代²、杉岡 幸次¹ (1.理研 光量子、2.東京農工大、3.Natl. Inst. for Laser, Plasma and Radiation Physics)

◆奨励賞エントリー

15:45 ~ 16:00

[20p-B205-9] ピコ秒レーザー照射によるチタン／ニッケル界面への影響

○(M1)関 宏都¹、古市 健人¹、土屋 叡本²、山口 誠³、岡田 達也¹、小林 洋平²、富田 卓朗¹ (1.徳島大院創成、2.東大物性研、3.秋田大理工)

◆奨励賞エントリー

16:00 ~ 16:15

[20p-B205-10] 1180MPa級超高張力鋼の真空中ドライレーザピーニング

○小松原 佳貴¹、佐野 智一¹ (1.阪大院工)

◆奨励賞エントリー

16:15 ~ 16:30

[20p-B205-11] 周波数領域干渉法によるアルミニウム中のフェムト秒レーザ駆動衝撃波の診断

○(M2)井上 聖流¹、中新 信彦²、佐野 智一¹ (1.阪大院工、2.量研機構)

◆奨励賞エントリー

16:30 ~ 16:45

[20p-B205-12] 銅のフェムト秒レーザ駆動衝撃圧縮初期過程の直接計測

○(M2)江頭 尚弥¹、松田 朋己¹、奥地 拓生²、瀬戸 雄介³、伊藤 佑介⁴、菖蒲 敬久⁵、中新 信彦⁶、犬伏 雄一⁷、富樫 格⁷、宮西 宏併⁸、佐野 智一¹ (1.阪大院工、2.京大複合研、3.阪公大院理、4.東大院工、5.原研、6.量研、7.JASRI、8.理研)

◆奨励賞エントリー

16:45 ~ 17:00

[20p-B205-13] 時間分解偏光マッハ・ツェンダー干渉計による超短パルスレーザ誘起応力波の空間プロファイル計測

○服部 隼也¹、伊藤 佑介¹、徳味 健太¹、杉田 直彦¹ (1.東大工)

◆奨励賞エントリー

17:00 ~ 17:15

[20p-B205-14] 低損失光導波路実現に向けた超短パルスレーザによる改質書き込み過程の直接観察

○吉崎 れいな¹、福井 智大¹、伊藤 佑介¹、服部 隼也¹、杉田 直彦¹ (1.東大工)

◆奨励賞エントリー

17:15 ~ 17:30

[20p-B205-15] 高出力青色半導体レーザーを用いた純銅溶接時に発生する プルームの分光解析

○(M1C)須藤 真央¹、藤尾 駿平¹、竹中 啓補²、水谷 正海²、佐藤 雄二²、塚本 雅裕² (1.阪大院工、2.阪大接研)

誘電体ガラス基板のフェムト秒パルスレーザー加工における マルチタイムスケール時間分解複素透過率イメージング Multitimescale Time-Resolved Complex Optical Field Imaging of Femtosecond Pulsed Laser Processing of Dielectrics

東大院理

○川野 将太郎、戸田 圭一郎、櫻井 治之、小西 邦昭、井手口 拓郎

Graduate School of Science, The Univ. of Tokyo

°Shotaro Kawano, Keiichiro Toda, Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, Takuro Ideguchi

E-mail: s-kawano518@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

非接触で微細な自由形状造形が可能な超短パルスレーザー加工の制御性の更なる向上のためには、フェムト秒からマイクロ秒に及ぶ長大な時間領域で展開されるアブレーションダイナミクス[1]の原理の探求が重要である。近年、ポンププローブ法に基づく時間分解デジタルホログラフィ(Time-Resolved Digital Holography, TRDH)を用いた時間分解複素透過率イメージングにより、加工に伴うパルス光と物質の相互作用を、各時間遅延におけるプローブパルス光の透過率と位相遅れ(Optical-Phase-Delay, OPD)として直接観測する試みがなされている[2,3]。特に OPD 画像は、電子励起などの初期過程のみならず、アブレーション後に物質内部に残留する応力や熱による屈折率変化を可視化できるため、高繰り返しフェムト秒パルス加工で課題とされる熱蓄積[4]などの重要なプロセスを直接観測できる可能性を有している。

我々はこれまでに、BK7 ガラス基板の紫外超短パルス光(波長 257 nm、パルス幅 200 fs)による単一パルス加工について、加工パルス光による電子励起から物質除去までの一連の現象を反映した、サブピコ秒から数ナノ秒の各時間遅延における複素透過率画像の取得に成功している[5]。特に、加工痕形成後のナノ秒領域における形態変化に起因しない複素透過率変化は応力や熱に由来する信号と考えられ、より遅いマイクロ秒以降の時間領域で消失すると予想される。しかし、単一のパルス光をポンプとプローブの二つに分離し、ディレイラインにより光学遅延を設ける従来の方式では、光学系の長大化とそれによる光路調整の煩雑化などにより、マイクロ秒の時間遅延領域の観測は困難である。このような長い時間遅延を実現する方法の一つとして、異なる二つの光源間の電気的時間遅延制御が挙げられる。この手法では、ポンプパルス光に対するプローブパルス光の出射タイミングを時間遅延発生器で制御することで、光路長を掃引することなく、光源の外部トリガー信号に対する電気的ジッターの精度で大きな時間遅延を実現できる。

本研究では、パルス幅 1 ns の Yb 添加ファイバーレーザーをプローブ光源として導入した(Fig.1)。フェムト秒ポンプパルス光源のオシレーターをクロック源として二つの光源を電気的に同期し、時間遅延発生器により両者の出力タイミングを制御することで、時間分解能 1 ns、ジッター 200 ps 未満でのナノ秒時間分解複素透過率イメージングを実現した。本光学系で取得された加工穴形成後の時間分解 OPD 画像及び透過率画像を Fig.2 に示す。加工パルス光入射から 100 μ s より遅い領域まで OPD・透過率ともに有意な変化が確認された。これにより、これまで実験的に観測が困難であった加工痕形成後の緩和過程を議論することが可能となる。

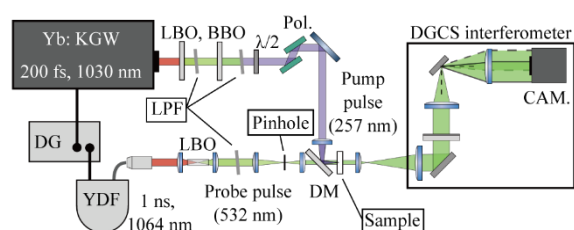


Fig. 1 Schematic of our ns-resolved TRDH system with DGCS (diffraction-grating-based common-path shearing) interferometer. DG: delay generator; Pol.: polarizer; DM, dichroic mirror; LPF: low-pass filter.

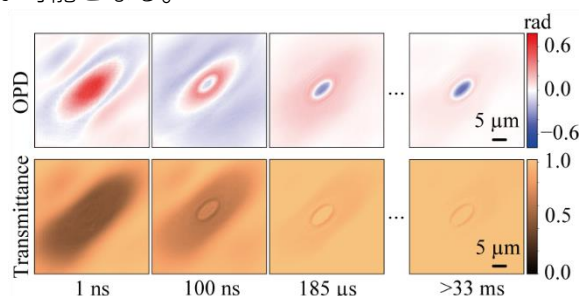


Fig. 2 Time-resolved OPD and transmittance images of a crater on a BK7 glass substrate ablated with 6- μ J single pulses. The right most panels show images of the crater after the processing.

- [1] R. R. Gattass & E. Mazur, *Nat. Photonics* **2**, 219 (2008).
[2] Y. Hayasaki *et al.*, *Sci. Rep.* **7**, 10405 (2017).
[3] B. Momgaudis *et al.*, *Opt. Express* **27**, 7699 (2019).

- [4] H. Shen *et al.*, *J. Heat Transfer* **143**, (2021).
[5] S. Kawano *et al.*, 2022 IPC, IEEE Xplore, ThG1.3.

空気中でのフェムト秒光パルスの非線形伝搬効果を利用した加工穴形状制御

Control of the Ablation Crater Shape Using Effects of Nonlinear Propagation of Femtosecond Laser Pulses in Air

東大院理

○山田 涼平、小松原 航、櫻井 治之、小西 邦昭、三尾 典克、湯本 潤司、五神 真

Graduate school of Science, The Univ. of Tokyo

○Ryohei Yamada, Wataru Komatsubara, Haruyuki Sakurai,

Kuniaki Konishi, Norikatsu Mio, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami

E-mail: yamada@ipst.s.u-tokyo.ac.jp

フェムト秒レーザー加工は、他の手法では困難な透明材料の精密微細加工技術として期待されている。近年では、レーザー加工穴形状の制御のために、ビームの空間強度プロファイル进行操作する手法の開発が進められている。例えば、通常のガウシアンビームとは異なるトップハット型の空間プロファイルを用いた加工は、加工穴のテーパ角や表面荒さを低減する手法として重要である[1]。一方、パルス幅が 100 fs 以下の光パルスを用いた、より高精度かつ高品質な加工が注目されている[2]。しかしながら、パルス幅がサブ 100 fs の領域では、光学素子を透過する際の分散の効果によってパルス幅が伸びてしまうため、サブ 100 fs 領域の光パルスの空間プロファイルの制御を簡便に行うことは難しいという問題がある。

近年我々は、サブ 100 fs の光パルスが空気中を非線形伝搬する効果を適切に取り込むことによって、レーザー加工痕の穴径を極めて精緻に予測できることを見出した[3]。その際、光パルスの空間プロファイルが、空気中での非線形伝搬の効果によってガウス型からトップハット型に変化する振る舞いが観測された。これは、我々の計算手法が空間プロファイルの予測のみならず制御にも利用することができ、サブ 100 fs 領域の光パルスの新しい空間プロファイル制御技術となる可能性を示している。そこで本研究では、空気中における非線形伝搬シミュレーションによって、サブ 100 fs 領域のフェムト秒光パルスに生じる空間プロファイルの変化を明らかにし、実際にレーザー加工を行うことで加工穴形状の制御を試みた。

まず、波長 800 nm、パルス幅 38 fs の光パルスが焦点でビーム半径 $10.7\ \mu\text{m}$ となる条件で集光された場合のビームの伝搬を数値計算によって求めた。Fig. 1(a)は、パルスエネルギーが $30.0\ \mu\text{J}$ の場合のフルエンス分布である。非線形伝搬の効果によって集光位置が焦点($z=0$)よりも手前にシフトしていることがわかる。フルエンス分布の z 位置依存性を Fig. 1(b)に示す。ビームが焦点に近づくともフルエンス分布がガウス型からトップハット型へと変化していることがわかる。続いて、計算と同じ条件でレーザー加工実験を行った。波長 800 nm、パルス幅 38 fs の光パルスを銅板に 60 パルス照射した結果をレーザー走査顕微鏡で観察した。Fig. 1(c)は、試料を設置する位置を z 方向に対して変化させ、各位置においてパルスエネルギー $30.0\ \mu\text{J}$ で加工を行った場合の加工穴の断面プロファイルである。試料の位置が焦点に近づくともフルエンス分布がトップハット型となることを反映して加工穴の形状がボトムフラット型に変化しており、数値計算による予想と整合している。さらに、加工穴径の z 位置依存性を求めた結果、数値計算で予測された値と実験結果が定量的に一致することが確認された。以上の結果は、空気中での非線形伝搬効果を利用することでビームの空間プロファイルおよび加工穴形状の制御が可能であることを示している。

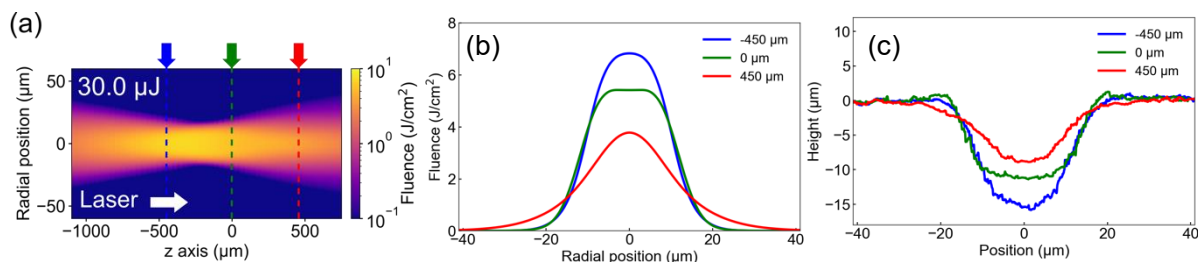


Fig. 1 (a) The simulation result of the fluence distribution for the beam propagation, where blue, green, and red arrows and dashed lines represent $z=-450, 0, 450\ \mu\text{m}$, respectively. (b) Simulated fluence distributions at three different z positions. (c) The experimental results of copper at three different z positions.

[1] H. Le *et al.*, *Micromachines* **11**, 221 (2020). [2] O. Utéza *et al.*, *Appl. Phys. A* **105**, 131-141 (2011). [3] R. Yamada *et al.*, *Opt. Express* **31**, 7363-7382 (2023).

青色パルスレーザーによる銅の高効率加工 Highly Efficient Processing of Copper by Blue Pulsed Laser

パナソニック ホールディングス(株)¹, パナソニック コネクト(株)²

○井本 大暉¹, 萩野 裕幸¹, 森 正裕¹, 堤 太志², 加藤 直也², 岡田 真一², 信岡 政樹², 大野 啓¹

Panasonic Holdings Co., Ltd.¹, Panasonic Connect Co., Ltd.²

○D. Imoto¹, H. Hagino¹, M. Mori¹, F. Tsutsumi², N. Kato², S. Okada², M. Nobuoka², H. Ohno¹

E-mail: imoto.daiki@jp.panasonic.com

近年、脱炭素社会の実現に向けて環境・エネルギー制約が強まる中、EV 市場が急速に拡大している。EV 向けバッテリーやモーターには多くの銅(Cu)が使用されており、これら Cu 部品の加工にレーザー加工が使われ始めている。Cu の光吸収率は波長依存性をもち、波長が短いほど光吸収が大きくなることが知られている。つまり、短波長のレーザーを用いることで、エネルギー損失が少ない高効率なレーザー加工が可能となる。

これまでに我々は、Fig.1 に示す青色レーザー加工機を開発してきた[1][2]。GaN(窒化ガリウム)系の青色半導体レーザーバーを複数搭載し、独自技術である波長合成方式を用いることで、光出力>400W、ビーム品質<2.0mm・mrad を実現するとともに、ガルバノスキャナヘッドを搭載することで青色レーザーでのリモート・高速加工を可能としている。一方、レーザー加工分野において、パルス駆動でピークパワーを高めて Duty を下げることで同じ入熱量でもより高効率な加工が可能となることが知られている。本加工機においてもパルス駆動による加工効率の向上が期待されるが、高出力のパルス駆動青色半導体レーザーにおける加工実証はこれまでに報告がない。

そこで今回、スイッチングレギュレータ方式を用いた高効率かつ大電流動作を実現するパルス電源を開発し、パルス駆動対応の青色レーザー加工機で銅板の加工実験を行ったので報告する。Fig.2 にビードオンプレート加工実験の概要を示す。板厚 0.5mm の銅板に CW あるいはパルス駆動したレーザー光を走査速度 10mm/s で長さ 40mm 走査した。計算上の焦点スポットサイズは $\phi 81\mu\text{m}$ である。Fig.3 に同一入熱量における CW 加工(光出力 175W)とパルス加工(ピーク光出力 350W, 周波数 1.0kHz, Duty50%)の銅板断面の顕微鏡画像を示す。どちらもキーホール型の溶融形状が得られたが、溶け込み深さは CW 加工で $130\mu\text{m}$ であったのに対し、パルス加工は $360\mu\text{m}$ と約 2.8 倍深くなった。本結果より青色レーザーのパルス化による銅の高効率加工を実証した。詳細については当日報告する。

【謝辞】 本研究の一部は、環境省の「革新的な省 CO2 実現のための部材や素材の社会実装・普及展開加速化事業」のもとで実施した。

【文献】 [1] 大野他, ワイドギャップ半導体学会, 第 6 回研究会, 2022.

[2] F. Tsutsumi, et al., Proc. of SPIE Vol. 11994 119940L, 2022.



Fig.1 Blue laser processing machine

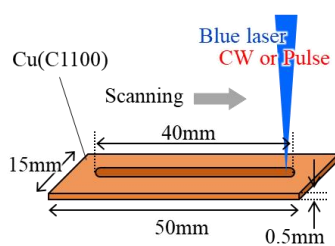


Fig.2 Schematic diagram of copper plate processing

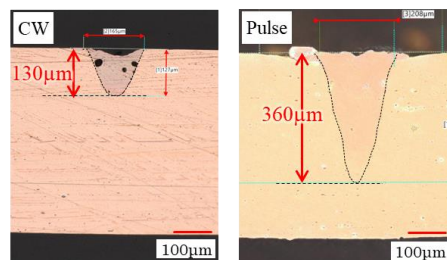


Fig.3 Cross sections of copper plate by CW and pulsed laser processing

軸方向電場を増強したベクトルビームによるレーザー微細加工 Laser microprocessing by a vector beam with enhanced longitudinal electric field

東北大多元研[○](M2)津留 志音, 小澤 祐市, 上杉 祐貴, 佐藤 俊一

IMRAM, Tohoku Univ. [○]Yukine Tsuru, Yuichi Kozawa, Yuuki Uesugi, Shunichi Sato

E-mail: yukine.tsuru.q1@dc.tohoku.ac.jp

近年、ビーム断面において放射状の偏光分布を持つ径偏光(radially polarized)ビームを用いたレーザー加工が注目されている。径偏光ビームを高い開口数 (NA) のレンズで強く集光すると、焦点付近で軸方向電場が顕著に発生し、通常のレーザー光を用いた場合に比べ微小な集光スポットを形成することが知られている。このような微小集光スポット特性をレーザー加工に適用できれば、加工分解能のさらなる向上や高精度化につながると期待される。しかし一般に、異なる媒質の界面における境界条件のために、界面に垂直な成分である軸方向電場の大きさは 2 つの媒質の屈折率の比に依存して変化する。強く集光した径偏光ビームによる金属表面のシングルショットレーザーアブレーションに関する先行研究では、レーザー加工に対する軸方向電場の寄与がターゲット材料に依存する結果が得られているものの、詳細については不明な点も多く残されている[1]。

本研究では、径偏光ビームの集光に対して円環状の振幅マスクを導入することで、焦点での軸方向電場がより増強される加工条件を設定し、軸方向電場に起因したレーザー加工特性を詳細に検討することを目的とした。フェムト秒パルスレーザービーム (波長: 1040 nm、パルス幅: 311 fs) を用いてシングルショット加工を行い、得られた加工痕を走査型電子顕微鏡 (SEM) により詳細に観察した。また、本条件で得られる加工痕形状とレーザーの焦点での強度分布との比較を行うために、ベクトル回折積分を用いた数値計算に基づいてガラス・空気界面に径偏光ビームを集光した場合の界面近傍での強度分布を計算した。対物レンズ (NA=0.85) により径偏光ビームをホウケイ酸ガラス ($n=1.52$) 表面に集光し、シングルショット加工を行った場合の加工痕の観察結果を図 1 に示す。振幅マスクがない場合にはドーナツ状の加工痕であるのに対して、幅の細い円環状マスクによりビーム整形を行った場合にはスポット状に近い加工痕となった。いずれも数値計算で予測される集光スポットの強度分布とよく一致しており、焦点での軸方向電場が加工に直接寄与していることが示唆された。講演ではこれに加えて油浸レンズ (NA=1.40) を使ったガラス裏面への加工結果についても詳細に報告する。

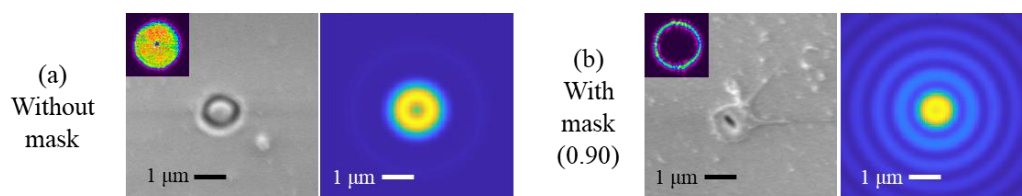


図 1. ホウケイ酸ガラス表面に形成された加工痕の観察結果(左)と集光スポットの計算結果(右) : (a) マスクなし (b) マスクあり(マスクサイズ 0.90)。挿入図は対物レンズ直前の径偏光ビームの強度分布

参考文献 [1] Y. Kozawa, M. Sato, Y. Uesugi, and S. Sato, “Laser microprocessing of metal surfaces using a tightly focused radially polarized beam,” Opt. Lett. **45**, 6234 (2020).

ナノ秒パルスレーザーを照射したチタン表面のナノドット構造形成

Nanodot structure formation on titanium surface irradiated with nano-second laser

東海大院理¹, 東海大院工², 東海大総科研³, 核融合科学研⁴ ○關 一樹¹, 岡崎 未来瑠², 坂上 仁志^{3,4},
山口 滋¹, 橋田 昌樹³

Dept. Sci. Tokai Univ.¹, Dept. Eng. Tokai Univ.², RIST Tokai Univ.³, NIFS⁴, °Kazuki Seki¹,

Mikuru Okazaki², Hitoshi Sakagami^{3,4}, Shigeru yamaguchi¹, Masaki Hashida³

E-mail: 2csnm011daigaku@gmail.com

1. はじめに

レーザーフルエンスが材料の破壊閾値を超えると、飛散・剥離（アブレーション）が起こり、加工痕跡が残る。破壊閾値については、融解閾値とアブレーション閾値が知られている。融解閾値は材料の融点とレーザーの反射率などの値から求められる。ナノ秒レーザーを用いたチタンの微細周期構造形成に関する報告は数例¹⁾あるものの、融解閾値 ($0.30\text{J}/\text{cm}^2$)²⁾以下での報告についてはない。このため、融解閾値以下のレーザーで照射した場合の表面形態に関する知見はない。本研究ではナノドット構造形成を目的とし、融解閾値以下で照射を行い、その表面形態を調べたので報告する。

2. 実験と解析

Nd:YAG レーザーから発振したナノ秒パルス（波長 532 nm、パルス幅 10 ns、繰り返し周波数 10 Hz）は、シリンドリカルレンズ（ $f=300\text{ mm}$ ）を用いてチタン表面に入射角度 0° で集光照射した。照射位置でのビーム径 ($FWe^{-1}M$) は水平方向 8.8 mm、垂直方向 $18 \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ であった。垂直方向のレーザー光の空間形状はガウス分布を示した。一方、水平方向はトップハット形状の分布を示した。レーザーエネルギーは偏光子と 1/2 波長板からなるエネルギー減衰器によって 172 μJ から 5.55 mJ に変化させ、レーザーフルエンスは $F = 0.11\text{ J}/\text{cm}^2$ から $3.30\text{ J}/\text{cm}^2$ に制御した。照射パルス数 N は、レーザーの繰り返し周波数 R 、掃引方向（水平方向）のビーム径により求められ、 $N=100$ パルスとなるようにチタンを水平方向に速度 0.88 mm/s で掃引した。レーザー照射はハッチング距離を 16 μm にし、2 往復した。

照射し表面改質したチタン表面を FE-SEM を用いて観察した。Fig.1(a)は大気下における融解閾値以下のレーザーフルエンスで照射した場合の表面形態と(b)未照射の表面形態の FE-SEM 観察像を示す。

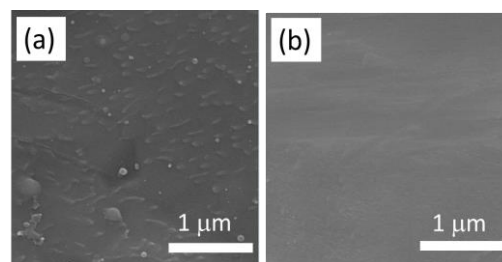


Fig.1 FE-SEM images of titanium surface irradiated by nano second laser at the fluence of $0.22\text{J}/\text{cm}^2$ (a) and nonirradiated titanium surface (b).

融解閾値以下のフルエンスでは、約 100 nm の大きさのドット構造が形成された。

3. 終わりに

大気において、融解閾値 ($0.30\text{J}/\text{cm}^2$) 以下及び、以上のレーザーフルエンスで照射されたチタンの表面形態と未照射の FE-SEM 観察像を比較した。融解閾値以下のフルエンスでは、約 100nm の大きさのドット構造が形成された。一方、融解閾値以上のフルエンスにおいて大気中で照射された表面は融解に伴う亀裂が発生した。

謝辞:本研究の一部は、H30-R9 年度文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)基礎基盤研究「先端ビームによる微細構造物形成過程解明のためのオペランド計測」JPMXS0118070187, 天田財団重点研究開発助成(課題番号 AF-2018203-A3), NIFS 共同研究(NIFS22KIIS004)及び大阪大学接合科学研究所「接合科学共同利用・共同研究拠点」共同研究員制度の支援を受けて行われた。

4. 参考文献

- 1) A.F. Pan, W.J. Wang, X.S. Mei, B.X. Zheng, Z.X. Yan, Appl. Surf. Sci. **387** (2016) 1046-1053.
- 2) 關 一樹, 山口 滋, 橋田 昌樹, “ナノ秒パルスレーザーによるチタンの破壊閾値フルエンス”, レーザー学会学術講演会第 43 回年次大会(2023 年) P01-19p-P-13.

二段階レーザー照射によるバブル駆動粒子集積プロセスと 集光部周辺対流の直接観察

Direct observation of laser-induced convection in two-step ultrashort pulse laser
assembly process

山形大院理工, °青山 昌央, 沼田 洸, 西山 宏昭

Yamagata Univ., °Masaharu Aoyama, Hiroshi Numata, Hiroaki Nishiyama

E-mail: nishiyama@yz.yamagata-u.ac.jp

我々は、超広域材料群に拡張可能な光パターニング手法である超短パルスレーザー駆動粒子集積固化プロセスの開発に取り組んでいる。同プロセスは、材料の感光性に制限されることなく、セラミックスや金属、半導体、生体親和性材料など幅広い材料群のレーザー描画を可能とする[1,2]。この集積固化機構として、集光部での二光子還元反応で析出した Ag を起点とした熱バブル発生と周辺対流の駆動を提案するとともに、この機構に基づき、光化学反応過程と流体现象を分離した二段階照射による粒子集積体パターン形成を報告してきた。本研究では、この二段階照射による粒子集積体パターン形成における集光部周辺対流の直接観察とその評価を行うとともに、これまで我々が取り組んできた一段階照射による集積体形成の場合との比較を行った。

光源として近赤外フェムト秒レーザー（中心波長 780 nm、繰返し周波数 100 MHz）を用い、微粒子が分散した AgNO_3 溶液へと集光した。対流は PS ビーズ（粒径 2 μm ）を分散した AgNO_3 溶液を用い高速度カメラで観察した。

図 1 は、二段階照射における集光部周辺対流の光学顕微鏡像を示している。集光部でのバブルとともに、レーザー走査方向に対して前方及び後方から集光部に向かう対称性の高い流れが観察された。これまで、我々が報告してきた一段階照射での粒子集積固化プロセスでは、レーザー走査方向の後方から前方にかけた対流であり、なおかつ、その流れには大きな傾斜が生じていた。伝熱解析から、このような一段階照射と二段階照射での対流挙動の差異は、集光部で生じるバブル表面温度分布の違いに起因していることが分かった。

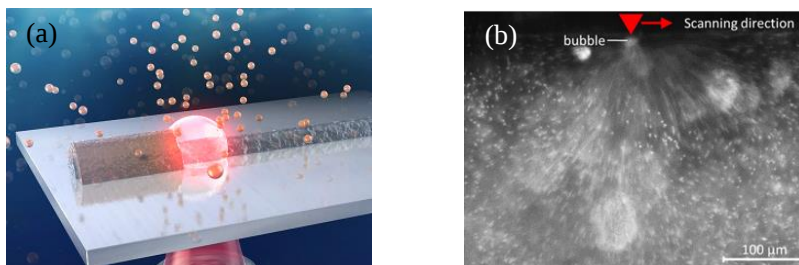


Fig. 1 (a) Schematic illustration of two-step bubble-based assembly process and (b) optical microscope image around the laser focus.

[1] H. Nishiyama, et al., Sci. Rep., 9 (2019) 14310. [2] H. Nishiyama, et al., PCT/JP2022/005217.

深紫外パルスレーザーを用いたガラスへの超撥水付与に向けた研究

Research on the use of ultraviolet pulsed lasers to achieve superhydrophobicity to glass

千葉工業大学¹, 東大物性研², ○(M2)草川 義起^{1,2}, 藤本 靖¹, 伊藤 功², 小林 洋平²

Chiba Inst. Tech.¹, ISSP, Univ.Tokyo.², °Yoshiki Kusakawa^{1,2}, Yasushi Fujimoto¹

Isao Ito², Yohei Kobayashi²

E-mail: s18a4062sz@s.chibakoudai.jp

ガラス表面への超撥水性(接触角 θ (Fig.1) $\geq 150^\circ$)付与は産業界への応用が大いに期待されている。例えば、撥水性の自浄作用を生かした高層ビルの窓ガラスや、濡れプロセスが多い電子部品製造過程などが挙げられる。ガラスへの超撥水性付与には大きく 2 つの性質が必要である。1 つ目がマイクロ、ナノレベルの微細構造、2 つ目が低い表面自由エネルギーである。1 つ目の微細構造に関しては、シングルプロセス、加工の自由性、環境低負荷の点からパルスレーザーを用いることが多くなってきた[1]。しかし、2 つ目の低い表面自由エネルギーを得るために、シラン系の薬品を使用することやプラズマを使用することなど、複雑な処理が必要である[2]。そのような複雑な処理は危険を伴ったり、環境に負荷がかかったりと、手間がかかる上にコストもかかる。そこでレーザー加工によって撥水に適した構造を見つけ出し、複雑な処理を伴わない、シンプルで安全にガラスへ超撥水性を付与するというのを我々の大きな目的としている。

本研究では、ソーダ石灰ガラス(アズワン株式会社)をレーザー加工機(TAKANO UVTM-4200-SAN)で加工を行った。レーザーの波長は 266 nm、パルス幅は 10 ns、スポット径は 10 μm である。加工痕は、優れた耐久性が期待できる周期的な穴構造[3]を大きさや深さ、線幅を変えて作製し、加工痕の形状評価は走査型電子顕微鏡とレーザー顕微鏡を用いて行った。加工後の試料は撥水性を発現させる為に、毒性の無い、環境に安全なフッ素系潤滑剤を採用し、適切な浸漬方法と浸漬時間の探索を行った。撥水性の評価は自作した接触角測定装置(Fig.2)を用いて行った[4]。Fig.3 に様々な加工痕のうち現段階での最大接触角 143° を示した加工痕の電子顕微鏡画像と水滴画像を示す。講演では、様々な形状の構造を比較し、その中で撥水性が良好な構造に関して議論する。

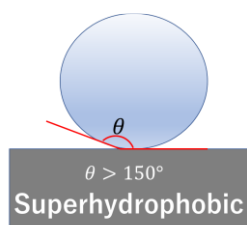


Fig.1 Definition of superhydrophobic

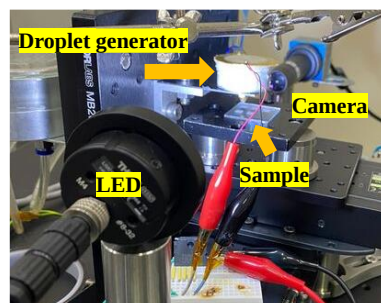


Fig.2 Drop let generator which is capable of dripping 1 μL

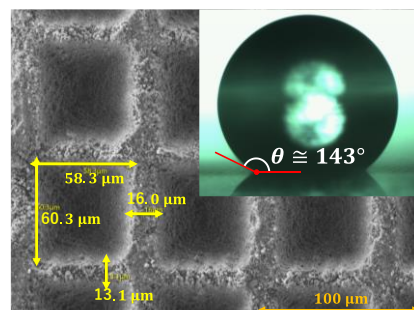


Fig.3 SEM image and water droplet image of the surface laser processing showing the maximum contact angle (143°) at present

[1] Peixun Fan et al., Langmuir 35, 16693 (2019). [2] R. Jagdheesh et al., Lasers in Engineering 50, 289 (2021).

[3] Rui Zhang et al., Soft Matter 12(26), 5808 (2016). [4] 飯田他., 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 22p-C301-13

GHz バーストモードフェムト秒レーザーにより Ti 表面に 形成した 2 次元表面微細周期構造の固体表面機能の検討

Investigation of surface functionality of two-dimensional periodic surface
nanostructures formed on titanium with GHz burst mode femtosecond laser pulses
理研 光量子¹, 東京農工大², National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics³

○川端 祥太^{1,2}, Sima Felix^{1,3}, 白 石¹, 小幡 孝太郎¹, 宮地 悟代², 杉岡 幸次¹

RIKEN Center for Advanced Photonics¹, Tokyo Univ. of Agri. and Tech.²,
National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics³

°Shota Kawabata^{1,2}, Sima Felix^{1,3}, Shi Bai¹, Kotaro Obata¹, Godai Miyaji², and Koji Sugioka¹

E-mail: ksugioka@riken.jp

従来の fs レーザーパルスの照射方式（シングルパルスモード）と比較して、パルス間隔が数百ピコ秒程度の超高繰り返しフェムト秒（fs）レーザーパルス（イントラパルス）列で構成される GHz バーストモード fs レーザーは、熱損傷の少ない高品質、高効率、高速なアブレーション加工が可能であることが実証されている[1,2]。我々は、GHz バーストパルスを Si や Ti のレーザー誘起表面周期構造（Laser-Induced Periodic Surface Structure: LIPSS）形成に応用し、シングルパルスモードで形成される偏光方向に垂直な LIPSS に加えて平行な方向にも周期性を有する新しい 2 次元（2D）LIPSS が形成されることを初めて見出した[3,4]。Ti は生体親和性や適合性に優れることから医療用インプラントとして用いられているが、シングルパルスモードで LIPSS を形成した Ti 表面では、細胞が nanogroove に沿って伸展し、未処理の Ti 表面と比較して、接着性に優れることが報告されている[5]。本研究では、2D-LIPSS を形成した Ti 表面において細胞を培養し、その形態観察を行うことにより、細胞接着性における 2D-LIPSS が提供する優位性および新規性について検討した。

レーザーパワー16 mW の直線偏光の fs レーザー（中心波長: 1030 nm、パルス幅: 230 fs、繰り返し周波数: 10 kHz）を、焦点距離 50 mm のアクロマティックレンズにより Ti 基板表面に直径約 20 μm で集光し、ステージを 5 mm/s の速度で走査しつつ照射した。Fig. 1(a)および(c)は、それぞれ Ti 基板表面にシングルパルスモード、および GHz バーストモード fs レーザー（イントラパルス数: 7、間隔: 205 ps（4.88 GHz））により形成した LIPSS の走査型電子顕微鏡（SEM）画像である。Fig. 1 (b)および(d)は、それぞれ(a)、(c)に示す表面に 5000 cells/cm² のヒト間葉系幹細胞（human mesenchymal stem cell: hMSC）を播種し、72 時間培養した後の免疫蛍光顕微鏡画像である。シングルパルスモードで形成した LIPSS 上に培養した hMSC は形成された nanogroove に沿って 1 方向に伸展して成長するのに対して、2D-LIPSS 上の hMSC は全方向に伸展して成長している。以上の結果は、2D-LIPSS が、従来の LIPSS とは異なる細胞成長を促進することが可能であり、細胞接着性の向上が期待できることを示唆するものである。

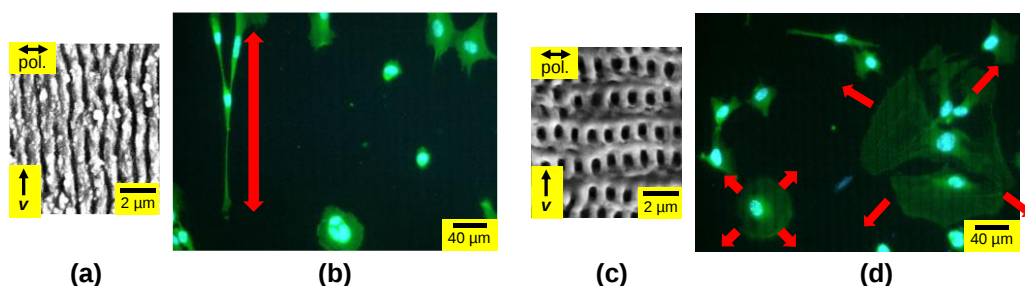


Figure 1. SEM images of LIPSS on titanium substrates formed with (a) single-pulse mode fs laser pulses and (c) GHz burst fs laser pulses (7 intra-pulses) for 16 mW at a scanning speed of 5 mm/s. Immunofluorescence microscopy images after 72 hours culture of human mesenchymal stem cells (hMSCs) on titanium surfaces with (b) 1D-LIPSS by single-pulse mode and (d) 2D-LIPSS by GHz burst mode.

- [1] F. Caballero-Lucas *et al.*: “Enhanced ablation efficiency for silicon by femtosecond laser microprocessing with GHz bursts in MHz bursts (BiBurst)”, *IJEM*, vol. 4, 015103 (2022).
- [2] K. Obata *et al.*: “GHz bursts in MHz burst (BiBurst) enabling high-speed femtosecond laser ablation of silicon due to prevention of air ionization”, *IJEM*, vol. 5, 025002 (2023).
- [3] S. Kawabata *et al.*: “Two-dimensional laser-induced periodic surface structures formed on crystalline silicon by GHz burst mode femtosecond laser pulses”, *IJEM*, vol. 5, 015004 (2023).
- [4] S. Kawabata *et al.*: “GHz バーストモードフェムト秒レーザーを用いた Ti 表面への新奇 2 次元表面微細周期構造の形成”, 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-A405-2.
- [5] T. Shinonaga *et al.*: “Formation of periodic nanostructures with femtosecond laser for creation of new functional biomaterials”, *Procedia CIRP*, vol. 42, pp. 57-61 (2016).

ピコ秒レーザー照射によるチタン／ニッケル界面への影響

The effect of picosecond laser irradiation on the interface

between titanium and nickel films

徳島大院創成¹, 東大物性研², 秋田大理工³

○関 宏都¹, 古市 健人¹, 土屋 叡本², 山口 誠³,

岡田 達也¹, 小林 洋平², 富田 卓朗¹

Tokushima Univ.¹, ISSP Univ. of Tokyo², Akita Univ.³

○Hiroto Seki¹, Taketo Furuichi¹, Eibon Tsuchiya², Makoto Yamaguchi³,

Tatsuya Okada¹, Yohei Kobayashi², Takuro Tomita¹,

E-mail: tomita@tokushima-u.ac.jp

近年、優れた機械的強度、生体親和性などを示すハイエントロピー合金（HEA）と呼ばれる金属材料が注目されている。HEA は主成分を持たない多元系合金であるため、偏析を生じやすく、加工性が低いといった課題がある。この解決策として、フェムト秒レーザーによる合金生成手法を提案する。

我々の研究室において、GaN 結晶上に Au と Ni の 2 層膜を蒸着し、GaN 結晶側からフェムト秒レーザー照射を行ったときに照射部において一部で合金化した粒子の形成が確認された[1]。これは瞬間的に高いピーク強度を出すことができるフェムト秒レーザー加工特有の急熱急冷作用により、高温でしか固溶体を維持できない Au-Ni 合金が固溶体を維持したまま室温まで凍結したものだと考えられる。この結果から、我々の研究室ではフェムト秒レーザー照射による非熱力学過程が従来の合金形成手法では適用できない HEA の形成に応用できるのではないかと考えている。しかし、フェムト秒レーザーを金属改質に利用した研究は少なく、材料による依存性など不明な点が多い。そのため本研究では GaN 結晶上の Ti / Ni 膜にレーザー照射をし、界面への影響の観察・検討を試みた。

実験手法としては、GaN 結晶上に Ti, Ni の順に 20 nm ずつ蒸着し、GaN / 金属界面に焦点を合わせ、フェムト秒レーザーと同等の効果が期待できるピコ秒レーザーを GaN 結晶側から照射した。照射条件としては、波長 1030 nm, 繰り返し周波数 1 MHz, 走査速度 1.5 mm/s というパラメーターで行った。レーザー照射後、透過型電子顕微鏡を用いて照射箇所断面における STEM-EDS 元素マッピング図 (Fig.1) を取得し、レーザー照射による金属界面への影響を調査・検討した。

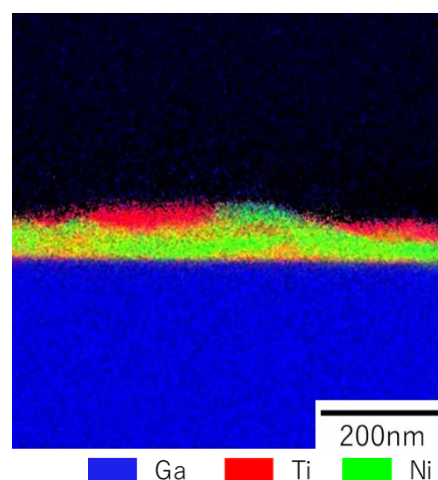


Fig.1 STEM-EDS mapping in irradiated area at 160 mJ/cm²

[1] T.Okada et al., Appl. Phys. A, 125, 690 (2019)

1180MPa 級超高張力鋼の真空中ドライレーザピーニング

Dry Laser Peening of 1180MPa Grade Ultra-High Strength Steel in Vacuum

阪大院工, °(M2) 小松原 佳貴, 佐野 智一

Osaka Univ., °Yoshiki Komatsubara, Tomokazu Sano

E-mail: y.komatsubara@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

ドライレーザピーニング (DLP: Dry Laser Peening) 加工¹⁾とは、金属材料に対してフェムト秒パルスレーザを照射することで、衝撃波を駆動し、衝撃塑性変形によって材料表層の硬化および圧縮残留応力の付与を行い、材料の疲労特性向上を目指す手法である。フェムト秒パルスを使用することで、従来法のナノ秒パルスレーザピーニングと比較して材料への熱影響が抑えられ、激しいアブレーションを発生させることが可能であるため、ドライプロセスでピーニング効果を付与することができる。しかし、この施工法はエアブレイクダウンを伴い、ピーニング特性に悪影響を及ぼす場合がある。そこで本研究では、エアブレイクダウンを回避するために真空中で 1180MPa 級超高張力鋼に DLP 加工を行い、そのピーニング効果を明らかにすることを目的とした。

Fig. 1 に示すように、波長 800 nm、パルス幅 100 fs のパルスレーザを用いて実験を行った。パルスエネルギーを 0.5 mJ から 5 mJ まで変化させて、1180MPa 級超高張力鋼に真空中で DLP 加工を施し、試料の力学特性を評価した。その結果、種々のレーザ照射条件において試料表面に非常に高い圧縮残留応力が付与されていることが確認された。本研究より 1180MPa 級超高張力鋼に対する真空中 DLP 加工では、高いピーニング効果が得られることが明らかになった。発表では、真空中と大気中の施工雰囲気の違いがピーニング効果に及ぼす影響とその機構について言及する。

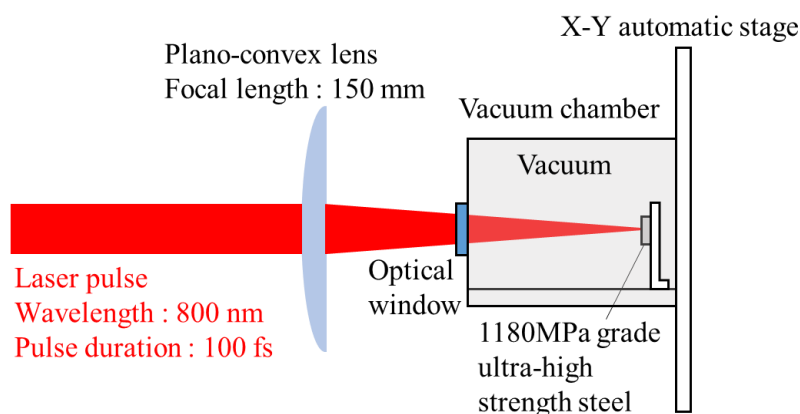


Fig. 1 Schematic illustration of experimental setup.

参考文献 : 1) Sano et al, J. Laser Appl. 29, 012005 (2017).

謝辞 : 本研究は文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) JPMXS0118068348, 科研費 (20H02048) の助成を受けたものである。

周波数領域干渉法によるアルミニウム中のフェムト秒レーザ駆動衝撃波の診断

Diagnostics of the Femtosecond Laser Driven Shock Wave in Aluminum using

Frequency Domain Interferometry

阪大院工¹, QST², (M2)井上 聖流¹, 中新 信彦², 佐野 智一¹

Osaka Univ.¹, QST.², Seiru Inoue¹, Nobuhiko Nakanii², Tomokazu, Sano¹

E-mail: s.inoue@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

フェムト秒レーザを用いたドライレーザピーニング(DLP: Dry Laser Peening) 加工 [1]は材料表面に圧縮残留応力を付与することで材料の疲労特性を向上させるプロセスである。ドライレーザピーニング効果はフェムト秒レーザ駆動衝撃波の特性に依存する。これまでフェムト秒レーザ駆動衝撃波は様々な手法で研究が行われてきた [2]。しかし、非常に短い時間スケールで起こるフェムト秒レーザ駆動衝撃波の立ち上がりに対して十分な時間分解能を持つ精確な計測はなされていない。そこで本研究では高い時間分解能を持つ周波数領域干渉法を構築し、フェムト秒レーザ駆動衝撃波の特性を調べることを目的とした。

波長 800 nm、パルス幅 120 fs のフェムト秒レーザを用い、1.33 ps の時間分解能を持つ周波数領域干渉法を構築し計測を行った。試料はBK7 ガラス基板に蒸着したアルミニウム薄膜を使用した。Fig. 1 に示すように、衝撃波を駆動させるポンプ光をアルミニウム薄膜側から、二つのプローブ光をガラス基板側から入射させ、衝撃波速度と粒子速度を測定した。衝撃波速度は異なる膜厚のアルミニウム薄膜を用い、試料裏面の動き出し時間と膜厚差から求めた。一方、粒子速度はアルミニウムとガラス基板の衝撃インピーダンスを考慮した 1.33 ps 間の試料の変位量とした。その結果、衝撃波速度と粒子速度の同時計測に成功し、フェムト秒レーザ駆動衝撃波波形を測定することができた。発表では、ドライレーザピーニング効果とフェムト秒レーザ駆動衝撃波特性との相関関係についても述べる。

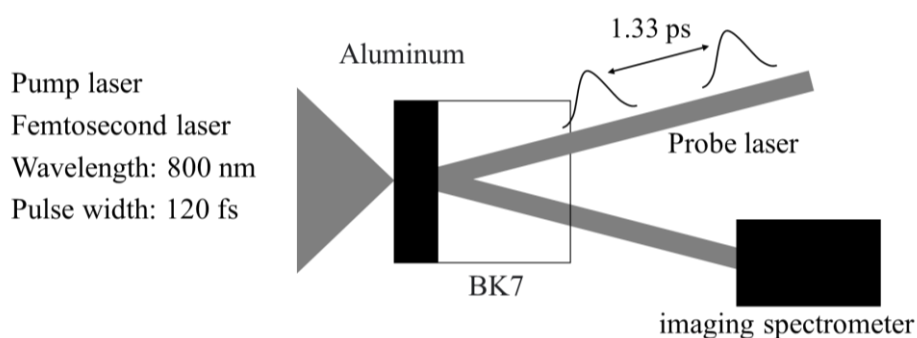


Fig. 1 Schematic illustration of experimental setup.

[1] Sano et al, J. Laser Appl. 29, 012005 (2017).

[2] R. Evans et al, PRL, 77, 16, (1996).

謝辞：本研究は文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) JPMXS0118068348, 科研費 (20H02048) の助成を受けたものである。

銅のフェムト秒レーザ駆動衝撃圧縮初期過程の直接計測

Direct Observation of Femtosecond Laser-Driven Shock Compression in Copper

阪大院工¹, 京大複合研², 阪公大院理³, 東大院工⁴, 原研⁵, 量研⁶, JASRI⁷, 理研⁸

○(M2) 江頭 尚弥¹, 松田 朋己¹, 奥地 拓生², 瀬戸 雄介³, 伊藤 佑介⁴,

菖蒲 敬久⁵, 中新 信彦⁶, 犬伏 雄一⁷, 富樫 格⁷, 宮西 宏併⁸, 佐野 智一¹

Osaka Univ.¹, Kyoto Univ.², Osaka Metropolitan Univ.³, The Univ. of Tokyo⁴, JAEA⁵, QST⁶,

JASRI⁷, RIKEN⁸, ○(M2) Naoya Egashira¹, Tomoki Matsuda¹, Takuo Okuchi², Yusuke Seto³,

Yusuke Ito⁴, Takahisa Shobu⁵, Nobuhiko Nakanii⁶, Yuichi Inubushi⁷, Tadashi Togashi⁷,

Kohei Miyanishi⁸, Tomokazu Sano¹

E-mail: n.egashira@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

フェムト秒レーザを材料に照射すると、アブレーションによって衝撃波が駆動される。このフェムト秒レーザ駆動衝撃波によって材料中には高密度格子欠陥や、高压相、準安定相など、従来の衝撃圧縮法では得られない特異な微細組織が形成されることが確認されている¹⁾。この機構を理解するためには、フェムト秒レーザ駆動衝撃圧縮中の格子挙動を明らかにする必要があるが、未だ調べられていない。そこで本研究ではフェムト秒レーザ駆動衝撃圧縮の初期過程における格子挙動を明らかにすることを目的とし、X線自由電子レーザー（XFEL: X-ray Free Electron Laser）を用いたその場計測を行った。

材料は銅の単結晶を対象とし、Fig. 1 に示すように、ポンプレーザとして波長 797 nm、パルス幅 101 fs、パルスエネルギー10.74 mJ のフェムト秒レーザを平凸レンズで集光して材料に照射し、プローブレーザとしてパルス幅 10 fs、フォトンエネルギー13 keV、モノクロビームの XFEL を用いて計測を行った。その結果、衝撃波が形成される過程と考えられる最初の立ち上がりが X 線回折の変化、つまり格子面の変化により直接観測され、非常に高いひずみ速度で高压力状態に到達することが確認された。

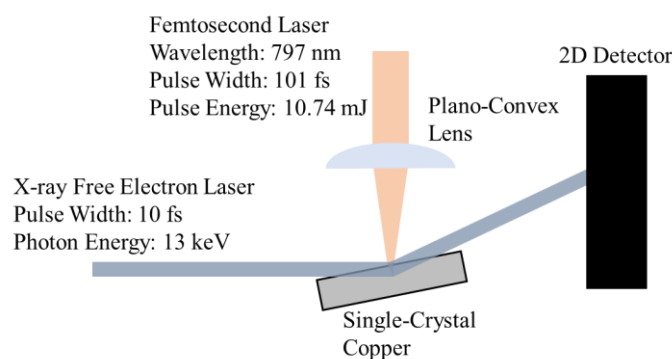


Fig. 1 Schematic illustration of experimental setup

参考文献：1) Sano et al. Appl. Phys. Lett. 83, 3498 (2003).

謝辞：本研究は文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP) JPMXS0118068348, 科研費(20H02048)の助成を受けたものである。

時間分解偏光マッハ・ツェンダー干渉計による 超短パルスレーザー誘起応力波の空間プロファイル計測

Spatial Profile Measurement of Ultrashort Pulsed Laser-induced Stress Wave

Using Time-resolved Polarized Mach-Zehnder Interferometer

東大工¹ ○(D)服部隼也¹, 伊藤 佑介¹, (B)徳味 健太¹, 杉田 直彦¹

Univ. of Tokyo¹, ○Junya Hattori¹, Yusuke Ito¹, Kenta Tokumi¹, Naohiko Sugita¹

E-mail: j.hattori@mfg.t.u-tokyo.ac.jp

高強度のパルスレーザーを材料表面に集光するとアブレーションが起こり、その反力により材料内部に応力波が発生する。このレーザー誘起応力波は、レーザーショックピーニングやレーザーピーンフォーミング、穴あけ加工などの各種の超短パルスレーザー加工において重要な役割を果たしている。これらの加工法の更なる発展のためには超短パルスレーザー加工中の応力波によって作られる応力場の解明が必要である。

本研究では、時間分解偏光マッハ・ツェンダー干渉計を用いた超短パルスレーザー誘起応力波の空間プロファイル計測手法を提案する。時間分解偏光マッハ・ツェンダー干渉計とは、図1に示すような光学系であり、ポンプ・プローブ法による時間分解イメージングと、 $\lambda/4$ 波長板を利用した偏光状態制御が可能なマッハ・ツェンダー干渉計を組み合わせた手法である。

波長 1030 nm, パルス幅 180 fs, パルスエネルギー 100 μ J の超短パルスレーザーを石英ガラス表面に集光し、ガラス内部に応力波を発生させ、この応力波を時間分解偏光マッハ・ツェンダー干渉計で撮影した。これにより得られた干渉縞画像を解析することにより、図2に示すような位相変化分布が得られた。この位相変化分布は応力波の3次元応力テンソル場の情報がプローブ光の伝搬方向に積算された結果である。そこで、超短パルスレーザー誘起応力波によって作られる応力場が軸対称であるという仮定に基づいた、テンソル場における逆アーベル変換と、偏光マッハ・ツェンダー干渉計における異なる偏光状態を用いた計測という2つの手法を組み合わせることで、図3に示すような応力波の空間プロファイルの再構築を行った。

本研究で提案した計測手法を応力場の制御を可能とする手法と組み合わせることにより、超短パルスレーザー加工のさらなる発展につながる。

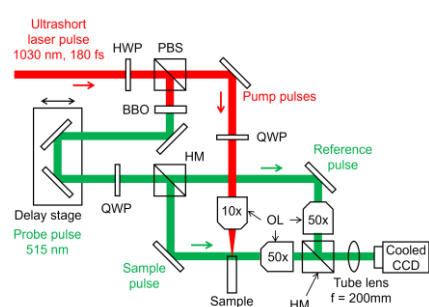


図1：時間分解偏光マッハ・ツェンダー干渉計

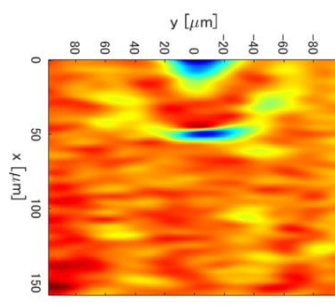


図2：応力波の位相変化分布計測結果

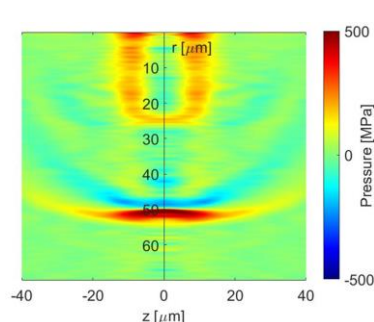


図3：応力波の空間プロファイル再構築結果

低損失光導波路実現に向けた 超短パルスレーザによる改質書き込み過程の直接観察

In-situ Observation of Ultrashort Pulsed Laser writing for Low-Loss Optical Waveguide

東大院工¹ ○吉崎 れいな¹, (M1)福井 智大¹, 伊藤 佑介¹, (D3)服部 隼也¹, 杉田 直彦¹

Univ. Tokyo¹ ○Reina Yoshizaki¹, Tomohiro Fukui¹, Yusuke Ito¹, Junya Hattori¹, Naohiko Sugita¹

E-mail: r.yoshizaki@mfg.t.u-tokyo.ac.jp

透明材料への光導波路書き込みは次世代コンピュータでの活用が期待される光集積回路制作に必須の技術である。ダイヤモンド、水晶などの透明材料では、超短パルスレーザ (USPL) 照射による密度低下の改質で導波路は書き込まれる[1]。高効率かつ低損失な光導波路書き込みのためにパラメータの最適化が行われてきている[2]が、そのパラメータで光導波路がどのように形成されるかは十分に明らかになっていない。そこで本研究は光導波路書き込み過程の直接観察によって、光導波路形成メカニズムを探り、ミクロな視点の加工現象とマクロな視点の光導波路の性能 (伝搬損失) の関係を明らかにすることを目的とする。光導波路書き込み過程の直接観察に用いた実験系を Fig. 1(a)に示す。波長 1030 nm, パルス幅 10 ps の USPL は空間光変調器 (LCOS-SLM X15213-03; 浜松ホトニクス) で球面収差補正と二点分岐変調が施され (Fig. 1(b)), 20 倍の対物レンズで α 水晶内部に集光された (Fig. 1(c))。USPL の吸収を観察するために、Pump-probe 撮像法でレーザ照射から 10 ps 後のシャドウグラフを得た (Fig. 2(a))。更に最終的に形成される試料のひずみを観察するためにマッハツェンダー干渉計測を行った (Fig. 2(b))。光導波路書き込みを模し 1.5 μm ずつ (Fig. 1(c)の p) 試料を動かし計 4 回 USPL を照射した際の、Pump-probe 撮像における吸光度とマッハツェンダー干渉計で得られた位相変化量を Fig. 2(c)(d)に示す。複数回の照射では吸収位置・改質域が変化していき (Fig. 2(c1)(c2)(d1)(d2)), 3・4 回目の照射時にある程度定常に達する (Fig. 3(c3)(c4)(d3)(d4))。これは集光径が 3 μm 程度であることと合致する。Figure 3 に積算された位相変化量を示す。1 回の USPL 照射ではほとんど確認されなかった光導波路内部における位相変化が 2 回目の照射で顕著になり、照射を重ねるごとに増加する過程、つまり光導波路が形成する過程が観察できた。発表では導入された改質と光導波路の損失の関係を議論する。

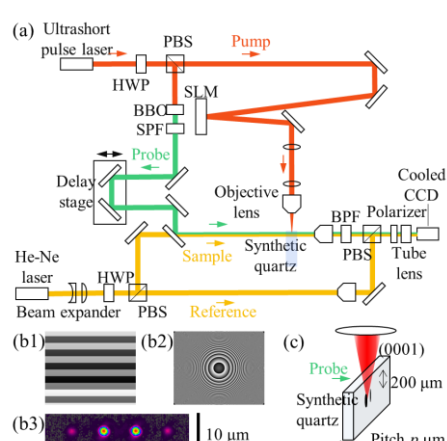


Fig. 1(a)Setup. (b1)CGH for beam splitting. (b2)CGH for spherical aberration correction. (b3)Beam profile. (c)Setup of sample.

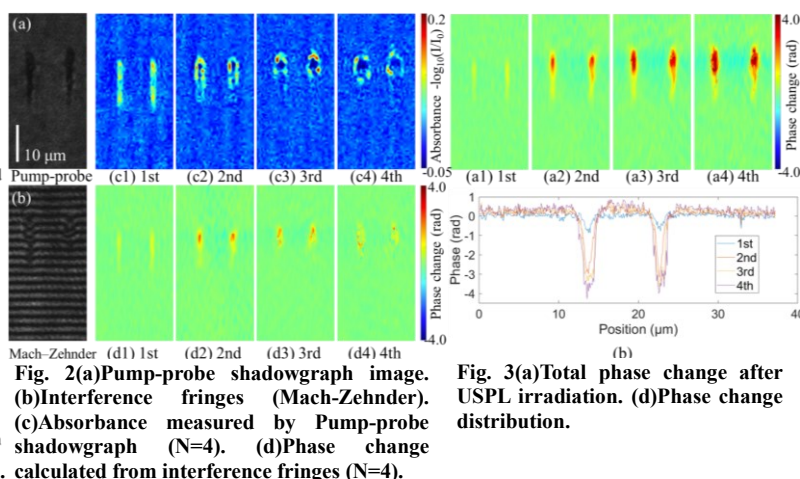


Fig. 2(a)Pump-probe shadowgraph image. (b)Interference fringes (Mach-Zehnder). (c)Absorbance measured by Pump-probe shadowgraph (N=4). (d)Phase change calculated from interference fringes (N=4).

Fig. 3(a)Total phase change after USPL irradiation. (d)Phase change distribution.

[1] F. Chen & J. R. Vázquez de Aldana, *Laser Photon. Rev.*, 8(2), 251-275 (2014).

[2] S. Nolte, et al. In: *Commercial and Biomedical Applications of Ultrafast Lasers IV*. SPIE, 164-171 (2004).

高出力青色半導体レーザーを用いた純銅溶接時に発生する ブルームの分光解析



Spectroscopic analysis of plumes generated during welding of pure copper
using a high-power blue diode laser

阪大院工¹, 阪大接研² ○(M1C)須藤 真央¹, 藤尾 駿平¹, 竹中 啓輔², 水谷 正海²,
佐藤 雄二², 塚本 雅裕²

Grad. Sch., Osaka Univ.¹, JWRI, Osaka Univ.², °(M1C) Mao Sudo¹, Shumpei Fujio¹,

Keisuke Takenaka², Masami Mizutani², Yuji Sato², Masahiro Tsukamoto²

E-mail: sudo.mao.25m@ecs.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

純銅は電気伝導率・熱伝導率が高く様々な工業製品に用いられている。特に、脱炭素社会の実現に向けて、電気自動車への転換が求められている。電気自動車に使用される純銅の量はガソリン車に比べ 3~4 倍増加すると言われており、電気自動車には欠かせない材料である。純銅の接合加工法には様々な手法が挙げられるが、加工速度が速く、熱影響層が小さい等の特性から、レーザー溶接が注目されている。従来、レーザー溶接用の光源は、波長 900 nm~1100 nm の近赤外線波長によるレーザーが主流であった。しかし、近赤外線レーザーは純銅の光吸収率が約 10 %と低いため加工効率が低かった。これに対し、純銅に対する光吸収率が近赤外線領域に比べ約 6 倍高い青色領域の波長による溶接が注目されている。これまでに我々は、高効率な純銅溶接を実現するために、最高出力 1.5 kW の高出力青色半導体レーザーを開発してきた。本レーザーを用いて熱伝導型溶接を行うとスパッタが皆無で安定な溶接が可能となった。しかし、青色半導体レーザーを用いたキーホール型溶接では、溶接挙動が不安定となり、溶接品質が低くなってしまった。この不安定となる因子の 1 つとして、溶接時に発生するレーザー誘起ブルームの影響が挙げられるが、このブルームの性状は明らかになっていない。

そこで本研究では、高出力青色半導体レーザーを用いた純銅のキーホール型溶接におけるレーザー誘起ブルームの時間・空間分光解析を行うために、微小エリアのサンプリング用光学系を設計し、レーザー誘起ブルームの性状を明らかにした。

2. 実験方法

分光解析実験の模式図を Fig.1 に示す。最高出力 1.5 kW の青色半導体レーザーを、集光レンズを用いてスポット径を 300 μm とし純銅板に対し垂直に照射した。集光レンズ保護のためエア

ーナイフを用いて乾燥空気を、純銅の酸化防止のためシールドガスとして Ar を吹き付けた。ハイスピードビデオカメラを用いて溶接挙動を観察し、発生したブルームの分光解析を行った。

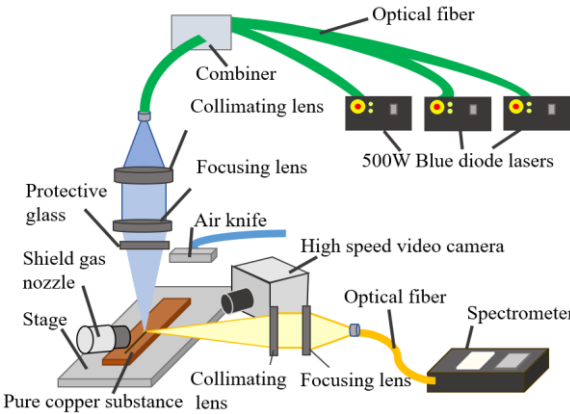


Fig.1 Schematic diagram of pure copper welding with 1.5 kW blue diode laser.

3. 実験結果

Fig.2 に照射位置から 4 mm 高さのブルームを検出し分光解析した結果を示す。実験で得られたスペクトルのピークは、Cu と CuO のスペクトルと一致し、ブルームの構成要素が明らかになった。当日はこれらのスペクトルの時間変化に関する発表も行う。

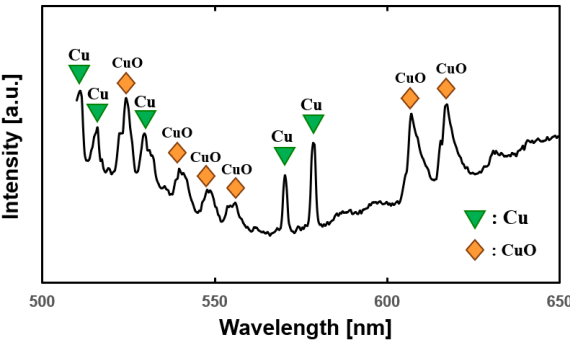


Fig.2 Time-averaged intensity during pure copper welding with 1.5 kW blue diode laser.