

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

2024年9月18日(水) 13:30 ~ 17:45 会場 A25 (朱鷺メッセ2F)

[18p-A25-1~16] 3.6 レーザープロセッシング

中村 大輔(九大)、伊藤 佑介(東大)

13:30 ~ 13:45

[18p-A25-1]

[第56回講演奨励賞受賞記念講演] 大気の電離閾値を超える超短パルスレーザーの非線形集光特性

○西端 樹¹、佐野 智一¹ (1.阪大院工)

◆ 奨励賞エントリー

13:45 ~ 14:00

[18p-A25-2]

レーザー加工用広域シールドノズルの開発及び3D流体シミュレーションによるガスフロー解析

○(M2)古場 雅大¹、菊地 俊文¹、小窪 陸斗¹、池上 浩²、中村 大輔¹ (1.九大シ情、2.高知工大総合研)

◆ 奨励賞エントリー

14:00 ~ 14:15

[18p-A25-3]

レーザー加工時の高速制御を目指した多次元モニターとその機械学習解析手法の開発

○豊島 圭一郎¹、竹内 楓¹、道根 百合奈¹、米田 仁紀¹ (1.電通大)

◆ 奨励賞エントリー

14:15 ~ 14:30

[18p-A25-4]

液中レーザーアブレーション法によるカーボン量子ドットの作製と評価

○奥村 太一¹、和田 裕之¹ (1.東工大物質理工)

◆ 奨励賞エントリー

14:30 ~ 14:45

[18p-A25-5]

レーザーアブレーション結晶化に最適なパターン照射条件の探求

○(M1)藤井 紀文¹、高橋 秀実¹、中田 芳樹²、松崎 賢寿¹、吉川 洋史¹ (1.阪大院工、2.阪大レーザー研)

◆ 奨励賞エントリー

14:45 ~ 15:00

[18p-A25-6]

水中レーザー誘起ブレイクダウン分光法における黒体の発光と吸光を考慮した放射輸送モデルの構築

○(M2)新谷 匡史¹、横山 悠子¹、西 直哉¹、作花 哲夫¹ (1.京大院工)

◆ 奨励賞エントリー

15:00 ~ 15:15

[18p-A25-7]

PDMSのレーザー炭化による導電性構造とグラフェン量子ドット (GQDs) 二層構造の一括作製

○塚田 康介¹、寺川 光洋^{1,2} (1.慶大院理工、2.慶大理工)

◆ 奨励賞エントリー

15:15 ~ 15:30

[18p-A25-8]

GHzバーストモードフェムト秒レーザーが形成する新奇微細表面周期構造の固体表面機能評価

○川端 祥太^{1,2}、Sima Felix^{1,3}、Sima Livia⁴、Orobeti Stefana^{3,4}、小幡 孝太郎¹、半澤 未来^{1,2}、白石¹、尾笹 一成¹、宮地 悟代²、杉岡 幸次¹ (1.理研 光量子、2.農工大、3.CETAL-Nat. Inst. for Laser, Plasma and Rad. Phys.、4.Inst. of Biochem. of the Romanian Acad.)

◆ 奨励賞エントリー

15:45 ~ 16:00

[18p-A25-9]

潤滑油中S45Cへの短パルスレーザー照射による表面炭化

○(M2)中村 友哉¹、山中 正人¹、田中 良樹¹、吉田 直樹²、劉 暁旭¹、樋口 和夫¹、前川 覚¹、糸魚川 文広¹、小野 晋吾¹ (1.名工大、2.株式会社ニデック)

◆ 奨励賞エントリー

16:00 ~ 16:15

[18p-A25-10]

液中光渦フェムト秒レーザー加工によるタングステンの微細構造形成

○川口 晴生^{1,2}、安原 亮^{1,2}、楊 浩天²、宮川 鈴衣奈^{1,3}、杉岡 幸次⁴、太田 雅人^{1,2}、上原 日和^{1,2} (1.核融合研、2.総研大、3.名工大、4.理研 光量子)

◆ 奨励賞エントリー

16:15 ~ 16:30

[18p-A25-11]

超短パルスレーザーによるSiC上オーミック電極の電気特性のパルス時間幅依存性

○須藤 直也¹、関 宏都¹、川上 拓哉¹、高林 圭祐^{2,3}、土屋 叡本²、遠藤 翼²、高島 祐介¹、永松 謙太郎¹、直井 美貴¹、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

16:30 ~ 16:45

[18p-A25-12]

超短パルスレーザー照射によるNi/Cu/Sn金属薄膜の合金化

○(M1)中川 功士¹、関 宏都¹、高林 圭祐^{2,3}、遠藤 翼²、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

16:45 ~ 17:00

[18p-A25-13]

p型窒化ガリウム上Ni/Au電極へのサブピコ秒レーザー照射による電気特性改質

○福田 海人¹、須藤 直也¹、関 宏都¹、川上 拓哉¹、遠藤 翼²、高林 圭祐^{2,3}、小林 洋平²、山口 誠³、永松 謙太郎¹、高島 祐介¹、直井 美貴¹、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

17:00 ~ 17:15

[18p-A25-14]

パルスエネルギー変調によるフェムト秒レーザー加工の精密化

○長谷川 亮太¹、服部 隼也¹、福井 智大¹、杉田 直彦¹、伊藤 佑介¹ (1.東大院工)

◆ 奨励賞エントリー ◆ 英語発表

17:15 ~ 17:30

[18p-A25-15]

Precision microprocessing of silica glass using a temporally shaped ultrafast laser

○Guoqi Ren¹, Huijie Sun¹, Keiichi Nakagawa¹, Naohiko Sugita¹, Yusuke Ito¹ (1.Univ. Tokyo)

◆ 奨励賞エントリー

17:30 ~ 17:45

[18p-A25-16]

1.5 kW 青色半導体レーザーを用いた純銅溶接におけるプルームの溶接への影響

○(M2C)須藤 真央¹、藤尾 駿平¹、神田 和輝²、白井 秀彰²、竹中 啓輔³、水谷 正海³、佐藤 雄二³、塚本 雅裕³ (1.阪大院工、2.株)デンソー、3.阪大接研)

大気の電離閾値を超える超短パルスレーザーの非線形集光特性

Nonlinear focusing properties of ultrashort pulse laser above the air ionization threshold

阪大院工, ○西端 樹*, 佐野 智一

Osaka Univ., Itsuki Nishibata, Tomokazu Sano

E-mail: nishibata.an5.itsuki@jp.nipponsteel.com, sano@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

材料への超短パルスレーザー照射により、数 J/cm^2 のフルエンス条件下で熱影響の少ない高品質な微細加工が可能である。さらに、 $10 \text{ J}/\text{cm}^2$ を超えるフルエンス条件下では、 100 GPa 以上の衝撃圧力を得られ、レーザー衝撃加工への応用が可能である[1,2]。パルス幅 100 fs の場合、このフルエンスはレーザー強度が大気の電離閾値を超える $10^{14} \text{ W}/\text{cm}^2$ に相当し、レーザー集光過程で非線形光学現象が生じる。大気非線形光学現象はレーザー集光特性に影響を与え、レーザー加工に重要なフルエンスやアブレーション径を変化させるため、非線形な集光特性変化は重要な現象である[3,4]。本研究では、レーザーの非線形集光特性を実験的および計算的に評価し、レーザー集光条件に応じた非線形な集光特性変化を開始するレーザー強度の閾値を算出する方法を考案した。

本実験条件（パルスエネルギー 1.0 mJ 、パルス幅 115 fs 、波長 800 nm 、ビーム径 10 mm 、焦点距離 250 mm 平凸レンズ）において、実験および計算により得られた非線形な集光特性変化の結果を示す。Fig. 1(a)は純アルミニウムに対する8回のレーザー照射時のアブレーション領域推移を示し、Fig. 1(b)は非線形伝搬シミュレーションによるフルエンス分布の算出結果を示す。Fig. 1(a),(b)の比較より、非線形伝搬シミュレーションは線形焦点位置より上流側でのレーザー発散現象やアブレーション分布の推移を定量的に再現することが示された。シミュレーション結果の分析より、レーザーの非線形な集光特性変化の主要因はレーザー電離によるプラズマの蓄積であり、パルス時間の後方ほど顕著に発散することが示された。Fig. 1(c)は複数の回折とレーザー強度に応じた光カー効果とプラズマ散乱によるレーザー波面の変化量を示す。レーザー強度が増加すると、非線形光学現象による波面の変化量が増加し、やがて回折条件に応じた線形時の変化量を上回る。この交点におけるレーザー強度を非線形な集光特性変化が開始する閾値として算出可能である。

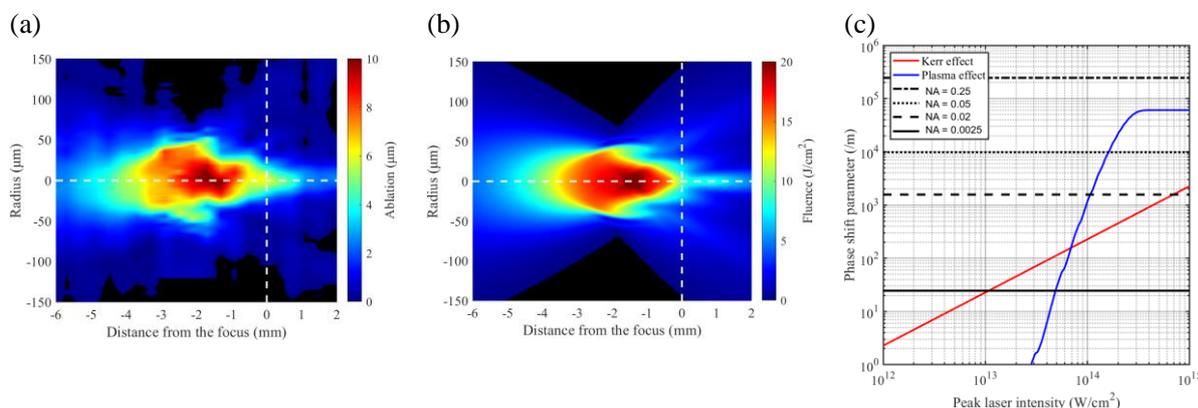


Fig. 1 (a) Transition of ablation distribution per 8 laser irradiations of aluminum. (b) Fluence distribution calculated from nonlinear propagation simulation. (c) The magnitude of phase shift per unit propagation length for linear and nonlinear optical phenomena.

[1] A. A. Ionin, *et al.*, JETP Letter 94, 1 (2011). [2] T. Sano, *et al.*, J. Laser Appl. 29, 012005 (2017).

[3] R. Yamada, *et al.*, Opt. Express 31, 5 (2023). [4] I. Nishibata, *et al.*, Appl. Phys. Express. 16, 102002 (2023).

※ 筆者の現所属は日本製鉄株式会社（2024年4月～）である。本研究は筆者が前所属 大阪大学大学院 工学研究科 博士後期課程在籍時（～2024年3月）に行った研究である。

レーザー加工用広域シールドノズルの開発及び3D流体シミュレーションによるガスフロー解析

Development of a Wide-Area Shield Nozzle and 3D Fluid Simulation Analysis

九大シ情¹, 高知工大総合研² ◯(M2)古場 雅大¹, 菊地 俊文¹, (M1)小窪 陸斗¹, 池上 浩², 中村 大輔¹

Grad. Sch. ISEE, Kyushu Univ.¹, Res. Inst., Kochi Univ. of Tech.²,

◯Masahiro Koba¹, Toshifumi Kikuchi¹, Rikuto Kokubo¹, Hiroshi Ikenoue², Daisuke Nakamura¹

E-mail: dnakamura@ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

近年、レーザーを用いた加工技術は金属・非金属材料問わず広く使用されている。使用する発振器や波長は、材料によって適当なものを選択する必要がある。光学系や雰囲気制御が重要となっている。特に金属溶接においては高出力レーザーを用いて金属を溶融させるため、品質低下の原因となる酸化を抑える必要がある。また、この時発生するプラズマや金属蒸気は、レーザーの散乱・保護ガラス等の光学素子汚れを引き起こし、加工を不安定にさせるため、雰囲気制御が不可欠である[1]。本研究では、広範囲を高速かつ高精度で加工可能なガルバノスキャナを用いたレーザー加工に着目し、これまで難しかった広域をシールドするノズルを開発した。このノズルは吹付口と吸引口が対称の位置に配置されており、窒素パーージと金属蒸気の排除を同時に行うことが可能である。この時、雰囲気制御を高い再現性で高効率に行うために、3D流体シミュレーションを用い加工領域のガスフローを解析した。更に解析した構造による実加工試験を行い、広域シールドノズルの効果を検証する。

2. 実施内容

開発したノズルの3DCADモデルをFig.1に示す。ガルバノスキャナの加工範囲を $\phi 60$ mmと想定し、この広い加工領域の雰囲気制御可能な構造とした。吹付口と吸引口をそれぞれ4箇所配置し、サイズは 10×30 mmと全て同じにし、吸引口の角度を10度とした。これにより吹付と吸引の流量を変えることで流速の調整が可能である。本解析では、吹付流量を産業応用に現実的な1箇所あたり40 L/minとし、吸引流量は1箇所あたり200 L/minとした。3D流体シミュレーションでは、ノズル内部に配置するワーク構造及びノズル内部から外部への隙間を変え解析を行った。ワークサイズは $\phi 60$ mm、ワーク設置高さは吹付口の底面を基準とし、 $-5 \sim 5$ mmで調整した。ノズル内部と外部の隙間は、レーザーヘッドとノズル間の隙間1~10 mm、ノズルとベース間の隙間1~10 mmで調整した。解析の評価では円形に評価範囲を設け、その範囲における平均流速、相対標準偏差(RSD)

とした。

3. 結果・考察

3D流体シミュレーション解析結果より、ワーク設置高さ3 mm、両隙間5 mmとした時、平均流速がもっとも高まることを確認した。ワーク設置高さを変えたときの評価範囲の平均流速をFig.2に示す。このときの評価範囲は金属蒸気の排出領域を想定し、 $\phi 60$ mm \times ワーク表面から20 mmまでの範囲とした。ワーク高さにおいては、吹付ガスのワークへの衝突と、ノズル下側の開放による流速減速のない条件が必要であることを示している。Fig.3に隙間幅5 mmにおけるノズル断面の流速分布を示す。この条件では乱流の発生が見られず、ワーク表面で高い流速を保っている。また隙間を狭くするとノズル内に乱流が発生し、広くすると流速が減少することがわかった。これらの3D流体解析は、広域シールドノズルを用いた加工における配置や流量の最適化に有用であるだけでなく、構造やシステムの最適化にも活用できると考えられる。講演ではこの条件を用いた実加工試験についても報告する。

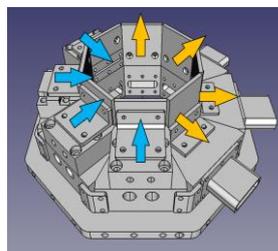


Fig.1 Wide area nozzle

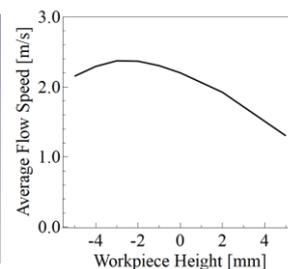


Fig.2 Average flow speed with different workpiece heights

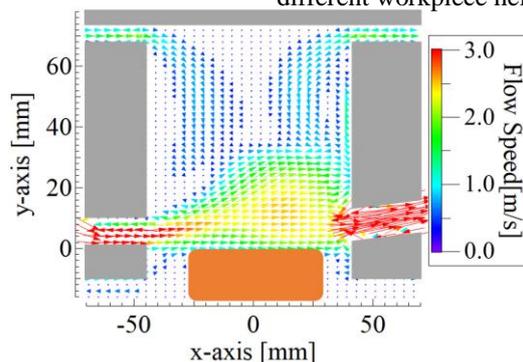


Fig.3 Flow speed vector distribution in the nozzle

[1] Procedia CIRP 74 (2018) 446–449

レーザー加工時の高速制御を目指した多次元モニターとその機械学習解析手法の開発

High speed control of machining laser with multi-dimension detection system and machine learning

○豊島圭一郎, 竹内楓, 道根百合奈, 米田仁紀

Institute for Laser Science, University of Electro-Communications

E-mail: k_toyoshima@ils.uec.ac.jp

1. はじめに

CW レーザーによる切断、穴あけ加工などでは、物質とレーザーの相互作用が高速に変化し、金属内の流体力学的な運動や物質の原子状態の変化なども合わせながら複雑な過程となっている。そのため、ある種の条件での予測はできるものの、通常の産業レベルの加工では、制御と言っても反射光モニター程度で行われていることが多い。しかし、より高性能、高効率な加工のためには、高速でリアルタイム制御を行い、レーザー相互作用過程の最適化を行う必要がある。このため、本研究では 10kHz 程度のサンプリングでデータ取得が可能な検出器を様々な方向、パラメータに対応させたものを設置し、データの高速取得や瞬時のパラメータ解析が可能なシステムを構築している。例えば、これまでも 2 次元分光像計測やプローブ部分を調べるためのプローブ計測、切断面画像計測による評価などを行って来たが、どれも高速制御にはマッチできないため、検出器、フィルターなどを駆使し、多方向からの多面的な分析が高速サンプリングで可能なものだけによるモニターシステムを構築している。本研究では、加工のダイナミクスを瞬時にコンピュータが理解・予測できるシステム作る。

2. 多点モニター実験

これまで、2 次元分光計測などで、ステンレスの加工においては鉄原子の紫外発光線が加工性能を表す指標となることが分かっている。そこで、ターゲットとなった鉄の線スペクトル強度と、輻射温度などに関係づけられる赤外域の発光強度などをバンドパスフィルターの組み合わせを多数配置し、高速サンプリング

を行った。図 1 は、その結果の一例である。

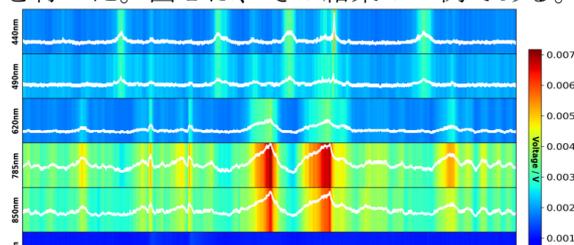


図 1 高速サンプリング多点データの一例

1 方向からの代表的なチャンネル強度を擬似カラー表示し、時間発展が目でわかるように可視化させている。全チャンネルに共通して、ほぼ一定の振動が現れているが、これはレーザーによるエネルギー付与効率が振動し、主に温度で変化している状態の現れであろう。

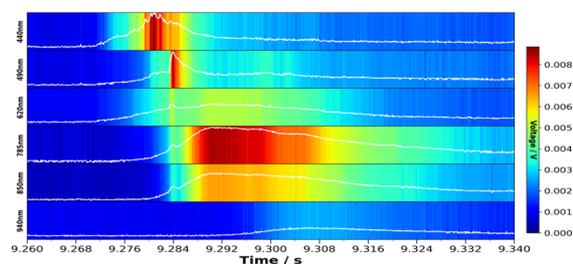


図 2 高速サンプリングで鉄発光の急激な時刻での応答

図 2 は、鉄の線スペクトル強度が急激に増加した場合の一例である、増加は急激であり、それに伴い温度上昇も起きていることが分かる。また再結合をとまなう冷却は加熱に比べて速度が遅く、15ms 程度かかっていることが分かる。

3. まとめと今後

高時間分解能な多点計測でいくつかの周期的な傾向が確認され、突発的な現象も多チャンネルで確認できている。今後、チャンネル数の増加や PC によるパターン解析を含む高速処理を試行していく。

液中レーザーアブレーション法によるカーボン量子ドットの作製と評価

Preparation of carbon quantum dots by laser ablation in liquid and their properties

東工大物質理工¹, [○]奥村 太一¹, 和田 裕之¹Tokyo Inst. Tech¹, [○]Taichi Okumura¹, Hiroyuki Wada¹

E-mail: okumura.t.ah@m.titech.ac.jp

カーボン量子ドットは電気泳動法による単層カーボンナノチューブの精製中に得られた物質で、グラファイトやクエン酸などの有機材料を出発原料とするため、低コストであり人体や環境に対して毒性が少ない点で半導体量子ドットの代替材料として注目されている¹⁾。一般的な作製方法として、水や有機溶媒に有機分子やポリマーを投入して高温高压下でカーボン量子ドットを得るソルボサーマル法がある。しかし、この方法は高温高压に調節する必要があることに加えて、反応に長時間を必要とする²⁾。液中レーザーアブレーション法は、液体中のターゲットおよび懸濁液にパルスレーザー光を照射してナノ粒子のコロイド溶液を作製する手法の1つで、常温常圧かつ短時間で高純度の目的物が作製できる点で優れている。さらに、レーザー条件を調節することで得られるナノ粒子の形状、サイズなどを制御可能である³⁾。本研究では、液中レーザーアブレーション法によってカーボン量子ドットを作製し、その光学特性を評価することを目的とした。

角型容器（ソーダガラス、透明）にカーボンブラック（粒径 ~24 nm, Sigma-Aldrich 社製）4 mg と溶媒を入れて、レーザーを 30 分照射した。レーザーは Nd:YAG レーザー（Continuum Powerlite 8010, 波長 532 nm, パルス幅 5~7 ns, 繰り返し周波数 10 Hz, フルエンス 600 mJ/cm²）を用いた。溶媒には純水, 0.003, 0.006, 0.012 vol%モノオレイン酸ポリエチレングリコール水溶液 (MO-PEG, 富士フイルム和光純薬社製) をそれぞれ 20 mL ずつ用いた。レーザー照射後、生成物をシリンジフィルター（ガラスファイバー, 孔径 1 μm, アズワン社製）でろ過することで未反応の原料を除去した。得られた生成物に対しては、分光蛍光光度計 (F-7000, 日立ハイテック社製) を用い、励起波長 360 nm における蛍光スペクトルを測定した。

純水および MO-PEG 水溶液中のカーボンブラック懸濁液にレーザーを照射して作製した生成物の蛍光強度と波長の関係を Fig. 1 に示す。MO-PEG 濃度が高くなると 460 nm 付近の強度が増加し、540 nm 付近の強度が低下する結果が得られた。これより、界面活性剤である MO-PEG の濃度を変化させることで光学特性が異なるカーボン量子ドットが得られることがわかった。

参考文献

- 1) X. Xu. et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **126**, 12736-12737 (2004).
- 2) C.-H. Ho et al., *Chem. Mater.*, **23**, 1753-1760 (2011).
- 3) G. W. Yang, *Prog. Mater. Sci.*, **52**, 648-698 (2007).

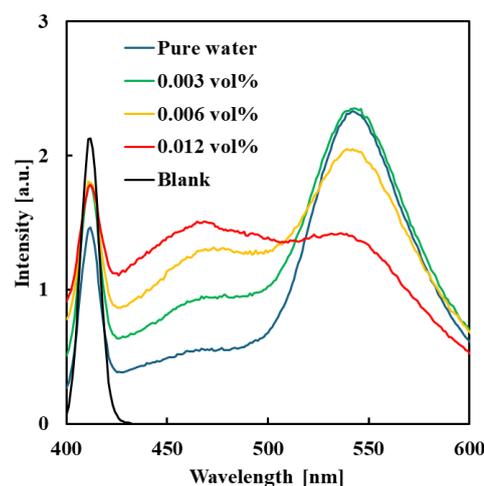


Fig. 1. PL spectra of carbon quantum dots obtained at 600 mJ/cm² for 30 min (Excitation wavelength 360 nm).

レーザーアブレーション結晶化に最適なパターン照射条件の探求

Optimization of pattern irradiation conditions for laser ablation-induced crystallization

阪大院工¹, 阪大レーザー研², [○](M1)藤井 紀文¹, 高橋 秀実¹, 中田 芳樹², 松崎 賢寿¹, 吉川 洋史¹Grad. Sch. Eng.¹, ILE², Osaka Univ. [○]Norifumi Fujii¹, Hozumi Takahashi¹, Yoshiki Nakata²,Takahisa Matsuzaki¹, Hiroshi Y. Yoshikawa¹

E-mail: fujii.n@mp.ap.eng.osaka-u.ac.jp

【序論】これまで我々のグループでは、レーザーアブレーションを外部刺激とした結晶化制御法の開発に取り組み、様々な物質において従来法では困難な構造・形状・サイズ・品質などを有する結晶を得ることに成功してきた[1,2]。またその結晶核発生のメカニズム解明にも取り組み、液体のレーザーアブレーションにより発生するキャビテーションバブルがメイントリガーであることを見出しつつある。本知見は、キャビテーションバブルの挙動を変えることで、結晶核発生がより促進される条件が見出される可能性を示唆している。そこで本研究では、キャビテーションバブルによる結晶核発生の最適条件を解明することを目的とし、空間光位相変調器(Spatial Light Modulator : SLM)を駆使して超短パルスレーザーをパターン照射することでバブルの発生位置や数などを制御し、それが結晶化現象に与える影響について調べた。

【実験・結果】Fig.1a に本研究で構築した SLM を用いたパターン照射系について示す。光源として再生増幅した Ti:Sapphire レーザー(中心波長 800 nm, $\Delta t = 100$ fs or 5 ps)を用いて、室温(約 20 °C)にて 0.5 mL の超純水に対物レンズ($\times 10$, NA = 0.4)を通して集光照射した。高速カメラ(HPV-2, 島津製作所)を用いて水中の様子を撮影したところ、SLM で制御した位相分布を反映した光強度パターンに対応するキャビテーションバブルの形成が観察された(Fig.1b)。興味深いことに、発生したバブルは、部分的に融合し、収縮・崩壊後に安定な気泡となって液中に残存した。次にレーザーを同じパターンで過冷却水に照射したところ、集光領域から氷結晶が発生した(Fig.1c, 赤矢印の先にパターン照射)。本結果は SLM を用いることで、キャビテーションバブルの発生数や位置などと結晶化現象との相関を調べることが可能であることを示しており、その最適化により更なる効率的な核発生条件の解明が期待できる。

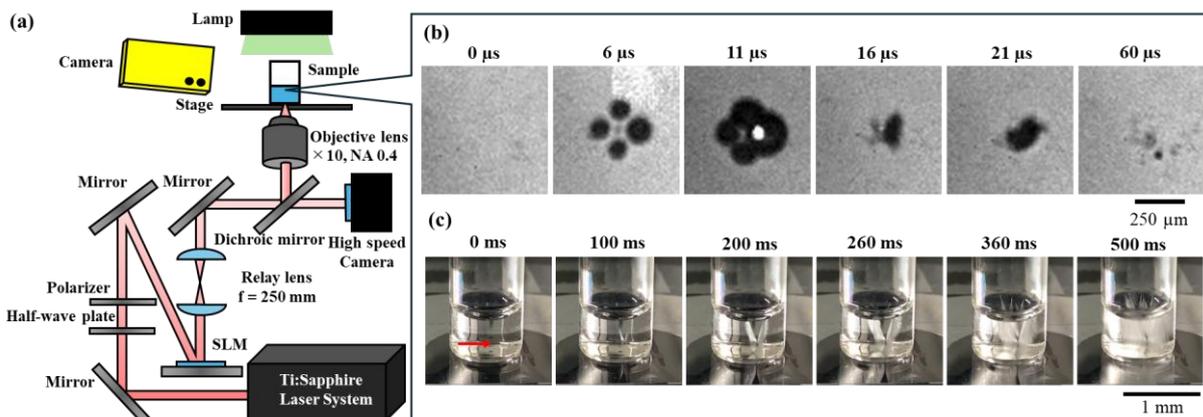


Fig.1 (a)Optical set up for ice crystallization. (b) The behavior of cavitation bubble induced by single laser pulse($E = 60 \mu\text{J}/\text{Pulse}$). (c)Ice crystallization triggered by single laser pulse($E = 300 \mu\text{J}/\text{Pulse}$).

参考文献

[1] Yoshikawa et al., *Chem. Soc. Rev.* 2014, **43**, 2147. [2] Takahashi, et al., *J. Phys. Chem. Lett.* 2023, **14**, 4394.

水中レーザー誘起ブレイクダウン分光法における
黒体の発光と吸光を考慮した放射輸送モデルの構築

Radiation transport model for underwater laser-induced breakdown spectroscopy
considering blackbody emission and absorption

京大院工, °(M2)新谷 匡史, 横山 悠子, 西 直哉, 作花 哲夫

Kyoto Univ., °Masashi Shintani, Yuko Yokoyama, Naoya Nishi, Tetsuo Sakka

E-mail: shintani.masashi.78w@st.kyoto-u.ac.jp

【緒言】レーザー誘起ブレイクダウン分光法 (LIBS) は、水中その場分析に利用可能であり、海洋資源探査といったその場分析への応用が期待されている[1]。水中 LIBS ではプラズマ生成直後、連続発光の中に吸収線が現れる Fraunhofer 型スペクトルが観測され、時間経過とともに発光線の中に吸収線が現れる自己反転型スペクトルに変化していく。現在まで、これらを統一的に再現できるモデルは報告されていない。本研究では Fraunhofer 型スペクトルと自己反転型スペクトルの両方を再現できる放射輸送シミュレーションモデルを構築し、実験との比較を行った。

【実験およびシミュレーション】実験では水中の Al をターゲットとし、パルス幅 200 ns、パルスエネルギー 14 mJ、波長 1064 nm の Nd:YAG レーザーを照射し、プラズマを生成させた。プラズマの発光をレーザー照射からの遅延時間ごとに時間分解測定し、Al 原子線 308.2/309.3 nm のスペクトルを測定した。シミュレーションでは、一次元の放射輸送式 ($dI(x, \nu) = \{\varepsilon(x, \nu) - \kappa(x, \nu)\}I(x, \nu) dx$ 、 I : 光強度、 ε : 発光係数、 κ : 吸光係数、 x : 視線方向の座標、 ν : 周波数) により、実験スペクトルのフィッティングを行った。このシミュレーションでは、Al 原子線の発光・吸光だけでなく、プラズマ中で起こる再結合過程による発光やイオンの発光などの自由度を考慮し、これらが黒体の発光・吸光を示すと仮定した。放射輸送計算で用いる ε 、 κ はそれぞれ着目している原子遷移の ε_A 、 κ_A 、黒体放射の ε_B 、 κ_B の和であるとした。 ε_A 、 κ_A の計算に必要な基底原子密度 n_1 、Stark 広がりを考慮するための電子密度 n_e 、および温度 T は空間的に Gauss 分布していると仮定した。また、 κ_B も空間的に Gauss 分布していると仮定した。これらの量のそれぞれについて分布中心での値と分布幅はパラメータである。ここでは、 κ_B 、 n_e の分布幅が等しいと仮定し、また、 n_1 の分布幅を固定した。

【結果と考察】実験では遅延時間 350 ns から 650 ns で Fraunhofer 型スペクトルが観測され、700 ns から 900 ns で自己反転型スペクトルが観測された。遅延時間 600 ns、900 ns の実験スペクトルとフィッティング結果を Fig. 1 に示す。本研究では黒体の温度と原子励起の温度が等しいと仮定しているにもかかわらず Fraunhofer 型スペクトルと自己反転型スペクトルを一つのモデルで再現することができた。このことは、局所熱平衡が成り立っているにもかかわらず着目している原子密度分布によっては吸収スペクトルにも発光スペクトルにも変化するを示している。なお、フィッティングにより得られたパラメータの詳細については当日報告する。

参考文献

[1] B. Thornton, et al., *Deep Sea. Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.*, **2015**, 95, 20-36.

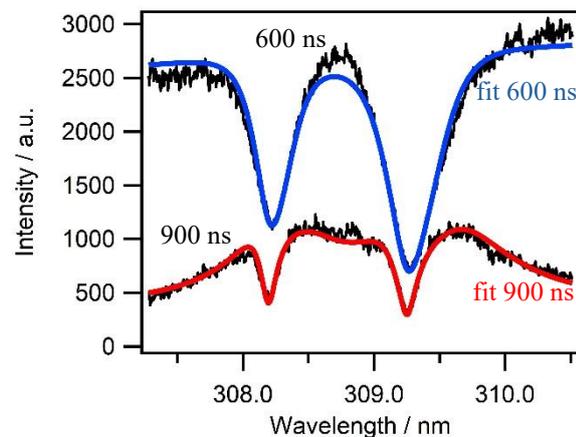


Fig. 1 Best-fits to the spectra at 600 ns and 900 ns delay from the pulse.

PDMS のレーザー炭化による導電性構造と グラフェン量子ドット (GQDs) 二層構造の一括作製

One-Step Fabrication of Two-layer Structure Composed of Graphene Quantum Dots (GQDs) and Conductive Structure by Laser Carbonization of PDMS

慶大院理工¹, 慶大理工² ◯(M2)塚田 康介¹, 寺川 光洋^{1,2,*}

Grad. Sch. Keio Univ.¹, Keio Univ.², ◯Kosuke Tsukada¹, Mitsuhiro Terakawa^{1,2,*}

*E-mail: terakawa@elec.keio.ac.jp

グラフェン量子ドット (Graphene Quantum Dots, GQDs) は黒鉛質炭素のナノ粒子であり、温度に依存した蛍光強度を示すことが知られている。我々はこれまでにポリジメチルシロキサン (Polydimethylsiloxane, PDMS) を前駆体として、レーザー炭化技術により導電性構造の作製 [1] ならびに GQDs の生成 [2] が可能であることを明らかにした。本研究では、導電性構造と同構造周囲の GQDs を一括作製した (Fig. 1(a))。さらに、中心の導電性構造への電圧印加に伴う構造の温度変化により、GQDs の蛍光強度を変化させることを試みた。

PDMS 表面へフェムト秒レーザーパルス (波長 522 nm、パルス幅 192 fs、繰り返し周波数 63 MHz) を集光照射し走査することで黒色構造を作製した。作製した構造の中心部は導電性を示し、蛍光顕微鏡を用いた構造断面の観察により導電性構造の周囲が蛍光を示すことを確認した (Fig. 1(b), (c))。外部電源を用いて同構造に直流電圧を印加した際の蛍光強度変化を Fig. 1(d) に示す。電圧印加により蛍光強度が低下することを確認した。今後、電圧制御方式の偽造防止タグへの応用が期待できる。

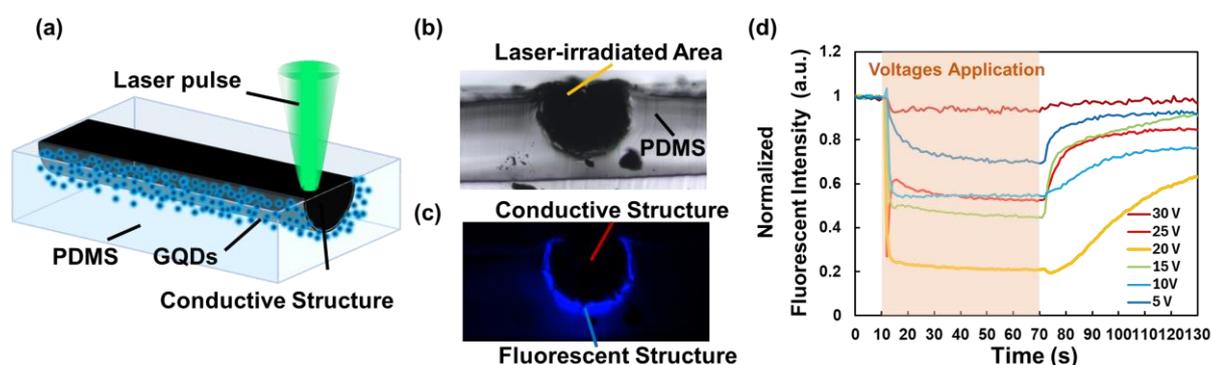


Fig. 1 (a) Schematic illustration of the fabricated two-layer structure. The bright field (b) and fluorescence (c) images of the cross-section of the fabricated structure. (d) Normalized fluorescent intensity under different voltage applications. The orange segment represents the duration which the voltages were applied.

[1] S. Hayashi, *et. al.*, *Adv. Eng. Mater.* **23**, 2100457 (2021). [2] S. Hayashi, *et. al.*, *Nano Lett.* **22**, 775 (2022).

GHz バーストモードフェムト秒レーザーが形成する 新奇微細表面周期構造の固体表面機能評価

Characterization of novel periodic surface nanostructures fabricated by GHz burst mode femtosecond laser pulses

理研 光量子¹, 東京農工大², CETAL-National Institute for Laser,
Plasma and Radiation Physics³, Institute of Biochemistry of the Romanian Academy⁴

○川端 祥太^{1,2}, Sima Felix^{1,3}, Sima Livia⁴, Orobeti Stefana^{3,4}, 小幡 孝太郎¹,
半澤 未来^{1,2}, 白石¹, 尾笹 一成¹, 宮地 悟代², 杉岡 幸次¹

RIKEN Center for Advanced Photonics¹, Tokyo University of Agriculture and Technology²,
CETAL-National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics³,
Institute of Biochemistry of the Romanian Academy⁴

○Shota Kawabata^{1,2}, Felix Sima^{1,3}, Livia Sima⁴, Stefana Orobeti^{3,4}, Kotaro Obata¹,
Mirai Hanzawa^{1,2}, Shi Bai¹, Kazunari Ozasa¹, Godai Miyaji², Koji Sugioka¹

E-mail: ksugioka@riken.jp

近年、パルス間隔が数百ピコ秒 (ps) 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、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、熱損傷が少なく、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報告されている[1]。我々は、直線偏光のイントラパルスからなる GHz バーストモードを Si や Ti のレーザー誘起表面周期構造 (Laser-Induced Periodic Surface Structure: LIPSS) の形成に応用した結果、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、偏光方向に平行な 2 次元 (2D) LIPSS が形成されることを初めて見出した[2,3]。さらに、円偏光 GHz バーストモード fs レーザーでは、円偏光シングルパルスモードで形成されるドット状構造とは異なる、新奇な微細表面周期構造が形成されることも明らかにした[4]。Ti は生体親和性等の優れた特性から医療用インプラントとして広く使用されており、表面形状の制御によりインプラントの機能性向上が期待されている。本研究では、LIPSS を形成した Ti 表面に細胞骨格および細胞外接着に関わるタンパク質を蛍光染色したヒト間葉系幹細胞 (human bone marrow mesenchymal stem cells: hMSCs) を培養し、形態観察および蛍光強度についての統計的評価を行うことにより、GHz バーストモードにより形成される微細構造が幹細胞に与える影響を検討した。

フルエンス 0.81 J/cm^2 の直線偏光の fs レーザー (中心波長: 1030 nm、パルス幅: 220 fs、繰り返し周波数: 10 kHz) を、7 mm/s の速度でステージを走査しつつ照射した。Fig. 1(a)および(b)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 (c), (d)および(e)は、それぞれ未加工 Ti、(a)、(b)に示す表面に hMSCs を播種し、24 時間培養した後の免疫蛍光顕微鏡画像を示す。青色蛍光は hMSCs の核、緑色蛍光はアクチンフィラメント (細胞骨格) を示している。未加工 Ti 基板では、フィロポディアが伸長していることが確認され、シングルパルスモードで形成した LIPSS 上では、形成されたナノ溝に沿って 1 方向に伸展して成長している。2D-LIPSS 上の hMSC は全方向に成長しており、他の Ti 表面では見られない hMSCs の伸展の様子が確認された。以上の結果から、2D-LIPSS は従来の 1D-LIPSS とは異なる細胞成長を促進することが示唆される。

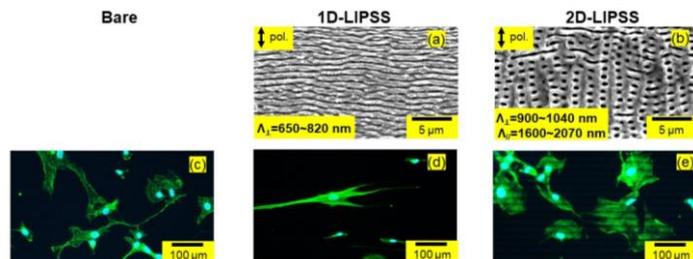


Figure 1. SEM images of LIPSS on Ti substrates formed with (a) single-pulse mode fs laser pulses and (b) GHz burst mode fs laser pulses with 7 intra-pulses of 0.81 J/cm^2 at a scanning speed of 7 mm/s. Immunofluorescence microscopy images at 24 hours after hMSCs seeding on Ti of (c) bare surface and with (d) 1D-LIPSS and (e) 2D-LIPSS.

- [1] K. Sugioka, *Int. J. Extreme Manuf.*, vol. 3, 043001 (2021). [2] S. Kawabata *et al.*, *Int. J. Extreme Manuf.*, vol. 5, 015004 (2023). [3] S. Kawabata *et al.*, *Front. Nanotechnol.*, vol. 5, 1267284 (2023). [4] S. Kawabata *et al.*: 第71回応用物理学会春季学術講演会, 23p-13M-5.

潤滑油中 S45C への短パルスレーザー照射による表面炭化

Surface carbonization of S45C in lubricating oil by short-pulse laser irradiation

名古屋工業大学¹, 株式会社ニデック 研究開発本部 研究開発センター 基盤技術研究所²

○(M2)中村 友哉¹, 山中 正人¹, 田中 良樹¹, 吉田 直樹², 劉 曉旭¹, 樋口 和夫¹, 前川 寛¹,

糸魚川 文広¹, 小野 晋吾¹

Nagoya Inst. of Tech.¹, NIDEK CO., LTD. Basic Technology Institute, R&D Center, R&D Div.²

○Yuya Nakamura¹, Masato Yamanaka¹, Yoshiki Tanaka¹, Naoki Yoshida², Xiaoxu Liu¹,

Kazuo Higuchi¹, Satoru Maegawa¹, Fumihito Itoigawa¹, Shingo Ono¹

E-mail: y.nakamura.495@stn.nitech.ac.jp

1. はじめに

鉄鋼材料は軸受けやシャフトといった様々な摺動部品に用いられている。各部品の寿命を延ばすために耐摩耗性の向上が望まれている。現在、材料の靱性を保持した状態での表面硬化のため表面炭素量の増加を目的とした浸炭が行われている。本研究では炭化水素系合成潤滑油中で高ピークパワーの短パルスレーザー照射することにより、S45C 表面の照射位置のみを局所的な高温状態にする [1, 2]。この高温状態での反応によって浸炭層を作製し、耐摩耗性に優れた表面の形成を行った。

2. 実験方法

本研究ではマイクロチップレーザーを用いて潤滑油として用いられている PAO4 中で鉄鋼材料である S45C 板に対してレーザー照射を行った。各種評価のために 2 軸ステージを用いて走査し 10mm 角の範囲に照射を行った。走査速度により 1 点あたりの照射パルス数 N を 2.4 ~ 78.5 に制御した。

3. 実験結果及び考察

Fig.1 にボールオンプレート法での往復摩擦試験の結果を示す。潤滑油に PAO4 を用いて SUJ2 球を試料に接触させ試験を行った。図より未照射の試料は往復回数 15 回程度で摩擦係数の増加が確認できる。照射を行った試料ではいずれも往復回数 30 回以上での低摩擦係数が確認された。また、N19.6 において低摩擦表面の長寿命化が確認できる。これはレーザー照射による加熱時間が増加したことに加え、複雑化した表面形状が関連したと考えられる。次に N78.5 においてレーザー照射後の試料断面を撮影した像を Fig.2 に示す。試料表面側に厚さ約 200nm 程度の改質層の形成が確認された。

改質層 A ではアモルファスの Fe_5C_2 , Fe_3C に該当する回折パターンが確認された。レーザー照射によって試料表面の Fe 原子と PAO4 中の C 原子が炭化鉄を形成した。レーザーの局所加熱に加え、油中では大気中よりも冷却速度が速いため、アモルファス状態となったと考えられる。アモルファス金属は耐摩耗性に優れているため、摩擦試験の結果に反映されたと考えられる。

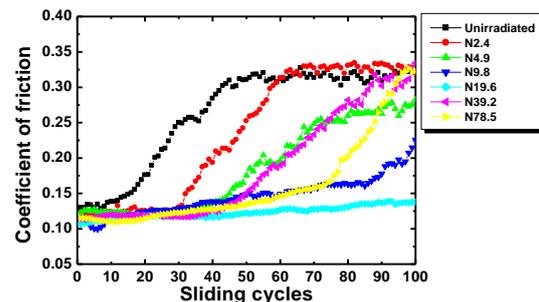


Fig.1 Friction coefficient of surface as a function of number of sliding cycles

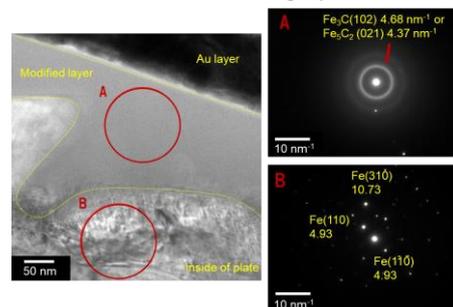


Fig.2 TEM image of an irradiated S45C plate and electron diffraction image

4. 参考文献

- [1] X. Liu, et al., J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf., 17, 1, JAMDS0014 (2023)
- [2] Y. Tanaka, et al., ACS Omega, 8, 8, 7932-7939 (2023)

液中光渦フェムト秒レーザー加工によるタングステンの微細構造形成 Tungsten Microstructureing by Femtosecond Optical Vortex Laser Processing in Liquid

核融合研¹, 総研大², 名工大³, 理研 光量子², ○川口 晴生^{1,2}, 安原 亮^{1,2}, 楊 浩天²,
宮川 鈴衣奈^{1,3}, 杉岡 幸次⁴, 太田 雅人^{1,2}, 上原 日和^{1,2}

NIFS¹, SOKENDAI², Nagoya Institute of Technology³, RIKEN RAP⁴, °Haruki Kawaguchi^{1,2},
Ryo Yasuhara^{1,2}, Haotian Yang², Reina Miyagawa³, Koji Sugioka⁴, Masato Ota^{1,2},
and Hiyori Uehara^{1,2}

E-mail: kawaguchi.haruki@nifs.ac.jp

液体媒質中のレーザー加工は液体媒質のキャビテーション[1]や流体渦[2]等の流体力学現象によって大気中とは大きく異なる表面微細構造形成を誘導できるため、学術・産業両面において近年急速に研究が活発化している。一方で、著者は以前に光渦レーザー誘起前方転写法[3]の研究において光渦が液体に誘起する特異な流体運動が内部物質の構造を秩序化することを明らかにした。本研究では光渦を液中レーザー加工に適用した「液中光渦フェムト秒レーザー加工」を提案し、光渦によるタングステン加工特性と特異な微細構造形成について調査を行った。

フェムト秒レーザーシステム(λ :1040 nm、 τ :420 fs)を第二次高調波発生により変調した波長 520 nm の可視レーザーを光源とし、螺旋位相板によって生成した直線偏光 1 次光渦を対物レンズ(NA 0.6)によって水中のタングステン表面へと集光し加工を行った。水面からタングステン表面までの距離は \sim 5 mm、ビーム径は空气中: 6.5 μ m/ 水中: 8.4 μ m であった。照射回数を 1000 回に固定し、繰り返し周波数 10~100kHz で照射した際に得られた構造体を図 1 に示す。1 kHz 以下の場合には Laser induced periodic surface structure: LIPSS が形成され、周期幅は \sim 260 nm と空气中より約 10%縮小された。繰り返し周波数が 1 kHz を超えるとポンプ光とキャビテーションバブルとの干渉により LIPSS 構造が消失した他、高フルエンスパルス照射時には光渦暗部で特徴的な砂時計型マイクロ構造体が形成されることを発見した。詳細は発表にて報告する。

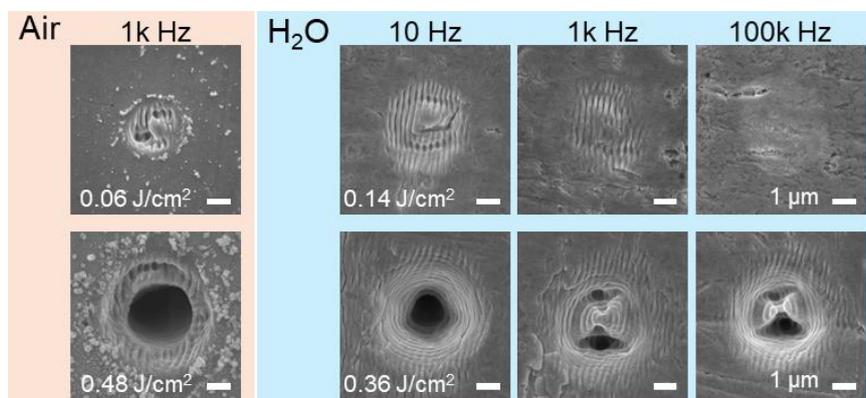


図 1 各繰り返し周波数における水中光渦レーザー加工によって形成されたタングステン微小構造体(上: LIPSS 形成条件、下:マイクロ構造体形成条件)

1. D. Zhang, et al., Int. J. Extrem. Manuf. 2, (2020).
2. D. Zhang, et al., Opto-Electronic Adv. 5, (2022).
3. R. Wei, et al., APL Photonics 9, (2024).

超短パルスレーザーによる SiC 上オーミック電極の電気特性の パルス時間幅依存性

Pulse Duration Dependence of Electrical Properties of Ohmic Electrode on SiC by Ultrashort Pulsed Laser

徳島大院創成¹, 東大物性研², 秋田大理工³

○須藤 直也¹, 関宏都¹, 川上拓哉¹, 高林 圭佑^{2,3}, 土屋 勲本², 遠藤 翼², 高島 祐介¹,
永松 謙太郎¹, 直井 美貴¹, 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 Tokyo.², Akita Univ.³.

○Naoya Suto¹, Hiroto Seki¹, Takuya Kawakami¹, Keisuke Takabayashi^{2,3}, Eibon Tsuchiya²,
Tsubasa Endo², Yuusuke Takashima¹, Kentaro Nagamatsu¹, Yoshiki Naoi¹, Makoto Yamaguchi³,
Tatsuya Okada¹, Yohei Kobayashi², Takuro Tomita¹

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

SiC 半導体上のオーミック電極作製では、通常のアニールの代替手法として、レーザーを用いた手法が研究されている。SiC と電極界面を局所的に変化させることができるので、電極作製前に基板を研削するすることができ、結果としてオン抵抗を低減することができる。オーミック性電極を得るには、電極金属との反応や、SiC から分離した炭素が重要になっているといわれているが、正確なメカニズムは明らかになっていない。一方、SiC に超短パルスレーザーを照射することで点欠陥や特異な改質が起こり、それに伴い電気特性が向上することが報告されている¹。本研究では、オーミック性のメカニズムの解明のため、異なるパルス時間幅のレーザーを SiC 電極に照射し、その I-V 特性へのパルス時間幅依存性を調査した。

試料として、Rohm 社の N をドープした n 型 4H-SiC ウェーハを用いた。試料洗浄後、基板上に 100 μm 角で厚さ 100 nm の正方電極として Ni を蒸着した。その後、試料に対して走査速度 15 mm/s、走査間隔 20 μm でレーザーを走査することで試料に照射を行った。パルス幅は 10 ps、1 ps、300 fs のレーザーをフルエンス 0.4-1.2 J/cm² で I-V 特性を調査した。

パルス幅 10ps のレーザーを照射したときの I-V 特性図を Fig.1 に示す。フルエンスが減少するにつれて、電流量が大きくなり、オーミック性に近付いていることがわかる。3 種類のパルス幅 (10 ps と 1 ps と 300 fs) のレーザー照射では、10 ps の 0.4J/cm² が最も良好な電気特性を示した。

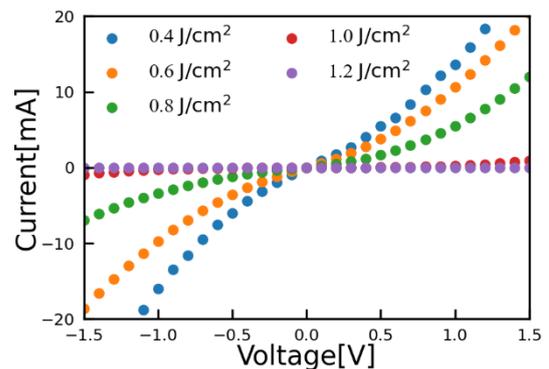


Fig.1. I-V Characteristics (pulse duration = 10 ps)

1. Ahn, M. *et al.* Low damage electrical modification of 4H-SiC via ultrafast laser irradiation. *J. Appl. Phys.* **123**, 145106 (2018).

超短パルスレーザー照射によるNi/Cu/Sn金属薄膜の合金化 Alloying of Ni/Cu/Sn metal thin films by ultrashort pulse laser irradiation

徳島大院創成¹, 東大物性研², 秋田大理工³

○中川 功士¹, 関 宏都¹, 高林 圭佑^{2,3}, 遠藤 翼², 土屋 観本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 Tokyo ², Akita Univ. ³

○Koji Nakagawa¹, Hiroto Seki¹, Keisuke Takabayashi^{2,3}, Tsubasa Endo², Eibon Tsuchiya²,
Makoto Yamaguchi³, Tatsuya Okada¹, Yohei Kobayashi², Takuro Tomita¹

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

パルス時間幅が短いことで、瞬間的に高いピーク強度を得ることができる超短パルスレーザーは様々な特長を持つ。我々の研究室の先行研究において、超短パルスレーザーを照射することにより、Au/Niの合金化を確認したという研究結果[1]がある。これは超短パルスレーザー照射特有の急熱急冷現象によって、高温でのみ固溶体を維持できるAu/Niを常温環境下まで瞬間的に冷却できたからであると考えられる。しかし、超短パルスレーザーを多元系金属薄膜に照射し、分析を行ったという報告は少ない。そこで、我々はレーザー照射によって多元素系金属薄膜においても合金化できる可能性があると考えた。

本研究ではGaN基板上にNi、Cu、Snを各15nmずつ蒸着した試料を用いた。蒸着後、レーザーパラメータを変化させ、金属薄膜に対して照射を行った。その後、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いてエネルギー分散型X線分光(EDS)分析及び制限視野電子線回析(SADP)を取得し、レーザー照射による金属薄膜の影響を分析した。

レーザー照射部における金属薄膜のEDS像及びSADP像をFig.1に示す。レーザーのフルエンスは 0.1 J/cm^2 で、パルス時間幅はそれぞれ10ps、300fsである。EDS像は各元素色分けをしており、白色の領域は元素が混在化している部分である。EDS像において、パルス時間幅300fsではSnが確認できず、Ni、Cuの混在化も見られなかった。しかし、パルス時間幅10psでは各元素が混在化している領域が見られ、SADPからは純粋なNi、Cu、Sn以外の斑点も見られた。d値から物質を検索するとNi、Cu、Snの合金が候補に挙がり、超短パルスレーザー照射によって多元素合金が生成できる可能性が示唆された。

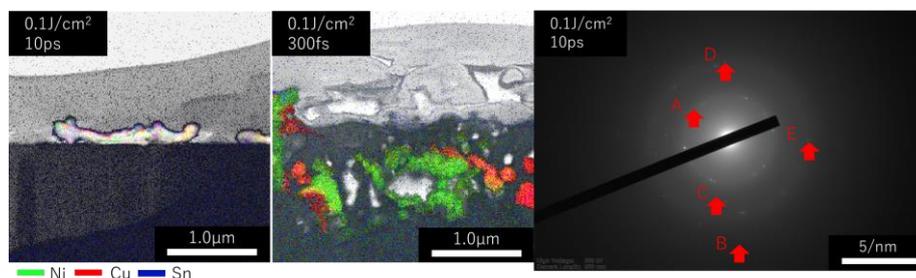


Fig.1 TEM-EDS and SADP in the laser irradiation area

[1] T.Okada *et al* : Applied Physics A,690,Vol.125 (2019)

p 型窒化ガリウム上 Ni/Au 電極への サブピコ秒レーザー照射による電気特性改質

Electric characteristics modification of Ni/Au electrode on p-type gallium nitride by subpicosecond laser irradiation

徳島大院創成¹, 東大物性研², 秋田大理工³

◦福田 海人¹, 須藤 直也¹, 関 宏都¹, 川上 拓哉¹, 遠藤 翼², 高林 圭佑^{2,3},
小林 洋平², 山口 誠³, 永松 謙太郎¹, 高島 祐介¹, 直井 美貴¹, 富田 卓朗¹

Tokushima Univ.¹, ISSP Univ of Tokyo.², Akita Univ.³

◦Kaito Fukuda¹, Naoya Suto¹, Hiroto Seki¹, Takuya Kawakami¹, Tsubasa Endo²,
Keisuke Takabayashi^{2,3}, Yohei Kobayashi², Makoto Yamaguchi³, Kentaro Nagamatsu¹,
Yuusuke Takashima¹, Yoshiki Naoi¹, Takuro Tomita¹

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

P型窒化ガリウム(p-GaN)上に低接触抵抗のオーミック電極をレーザーアニールにて作製する方法はいくつか報告されている^[1,2]。なかでも超短パルスレーザーを用いた手法は、局所的処理が可能で空間選択性に優れた加工ができ、低接触抵抗率を達成する上で有用である^[3]。しかし、超短パルスレーザー照射を用いた電気特性改善の詳しいパラメータは分かっていない。そこで、本研究では、蒸着した金属電極に内側からレーザー照射を行い、p-GaN/金属界面に相互作用を起こして電気特性を改質し、そのフルエンス依存性を調査した。

サファイア基板の上にエピタキシャル成長させた p-GaN 層(~1 μm)の上に 100 μm²の電極をもつ IV 測定用のマスクパターンを用いてフォトリソグラフィを行い、金属膜(Ni/Au)を蒸着した。レジスト除去を行った後、ピコ秒レーザーをサファイア基板側から金属電極界面に照射した。走査速度 1.5 mm/s、パルス幅は 0.3 ps でフルエンス 0.08-0.40 J/cm² を 0.04 J/cm² 毎に変化させた。

Fig.1(a)に未照射電極と 0.08 J/cm² の IV 特性、(b)に 0.12-0.40 J/cm² の IV 特性を示す。Fig.1(a)から、未照射部ではショットキー特性だったが、レーザー照射後はオーミック特性へ変化し、電流値が増加していることがわかる。0.16 J/cm² 以上の照射フルエンスでは電流量増加にフルエンス依存性が見られなくなり、電極部だけでなく広範囲の結晶構造にも変化が起こったと考えられる。

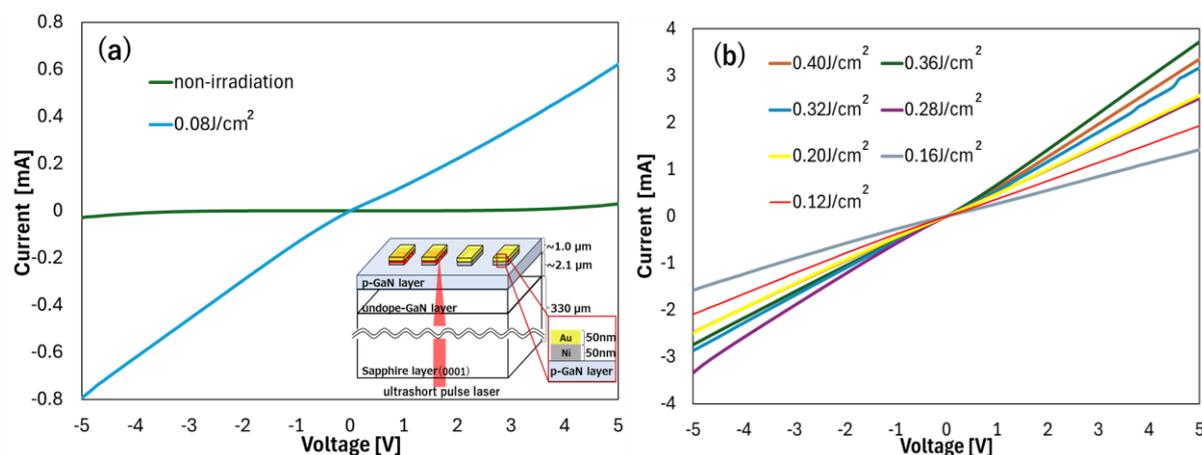


Fig.1. I-V Characteristics (a: non-irradiation and 0.08 J/cm², b: 0.12-0.40 J/cm²)

- (1) Min-Suk Oh *et al.* : Appl. Phys. Lett. 89, 042107 (2006)
- (2) Bo-Sheng Zheng *et al.* : J. Appl. Phys. 118, 085706 (2015)
- (3) Xinwei Wang *et al.* : Materials Science in Semiconductor Processing. 140, 106371 (2022)

パルスエネルギー変調によるフェムト秒レーザー加工の精密化

Precision femtosecond laser processing by modulating pulse energy

東大院工, °長谷川亮太, 服部隼也, 福井智大, 杉田直彦, 伊藤佑介

Univ. Tokyo, °Ryota Hasegawa, Junya Hattori, Tomohiro Fukui, Naohiko Sugita, Yusuke Ito

E-mail: y.ito@mfg.t.u-tokyo.ac.jp

フェムト秒レーザー加工はガラスや SiC 等の透明硬脆材料の微細加工手法として注目されているが、加工時にクラックが発生するため、精密加工が困難である。クラックの生成要因として、レーザー照射の都度材料内部を伝搬する応力波があげられる。応力波が表面から伝搬開始する時、波面後方に強い引張応力が分布する[1]ため、この引張応力を抑制することが精密加工実現の上で大切であると考えられる。

そこで本研究では、パルスエネルギーを段階的に変化させることにより、強い引張応力を抑制することを狙う、マルチステップ加工法について報告する[2]。パルスエネルギーを 150, 300, 600 μJ と、3 段階に上昇させながら加工することにより、石英ガラスおよび SiC に対し、クラックレスな精密加工が実現することを示した。また、加工時の応力波の観察を通して、マルチステップ加工法において応力波強度が低下していることを示した。加えて、より細かいステップでエネルギーを変化させることで、加工穴入口付近に発生する電子的ダメージの低減も可能であることを示した。

石英ガラスに対し、マルチステップ加工を行った結果を Fig.1(a) に示す。また、ポンプ・プローブ撮像法を用いて加工時の応力波の観察を行った結果を Fig.1(b) に示す。結果からマルチステップ加工時は除去領域が穴側面の広範囲に及ぶため、加工穴先端に荷重が集中しない。したがって、加工先端で発生する応力波の発生が抑えられ、クラックの発生が抑制されることが分かった。また、10 段階のパルスエネルギー変調により、クラックに加え、電子的ダメージも抑制された結果を Fig.1(c) に示す。本手法は、硬脆材料への新たな精密加工法となり得る。

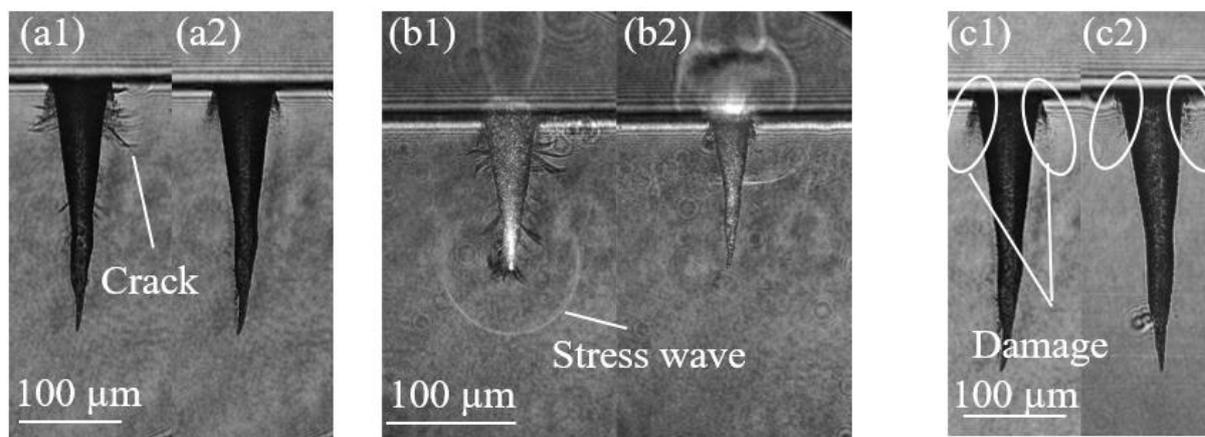


Fig.1 (a) Microscopic images of holes drilled using the (a1) conventional and (a2) proposed methods.
 (b) Pump-probe images of stress wave propagation taken during the (b1) conventional and (b2) proposed methods.
 (c) Microscopic images of holes drilled using the multi-step drilling of (a) 3 steps and (b) 10 steps.

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 (22KJ0935, 21H01224) の助成を受けたものである。感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Ito, *et al.*, *Appl. Phys. A* 124, 181 (2018).
 [2] J. Hattori, *et al.*, *CIRP Annals* 72(1), 185-188 (2023).

Precision microprocessing of silica glass using a temporally shaped ultrafast laser

Univ. Tokyo, °Guoqi Ren, Huijie Sun, Keiichi Nakagawa, Naohiko Sugita, Yusuke Ito

E-mail: g.ren@mfg.t.u-tokyo.ac.jp

Owing to the extremely high intensity and the small heat-affected zone, ultrafast lasers have been widely used for the microprocessing of transparent hard and brittle materials [1]. However, the great pressure applied on the base materials during the fast expansion of plasma results in severe cracks in the processing regions [2], which degrades the precision and makes the application limited. In recent years, several methods have been demonstrated to improve processing precision, including the GHz burst mode [3], transient and selective laser processing method [4], and liquid-assisted processing [5]. Nevertheless, these methods have either expensive equipment or complicated setups.

In this work, we achieve crackless precision processing through temporally shaping an ultrafast laser [6]. The experimental setup is shown in Fig.1(a). An ultrafast laser having a pulse duration of 5 ps is split into two sub pulses (P1 and P2). P1 is directly delivered into the silica glass sample for electron excitation. P2 is temporally stretched to ~ 300 ps using a CVBG, and then used to heat the electrons and achieve the material removal. Many cracks are generated at the inner side walls in the conventional single-pulse processing, as shown in Fig. 1(b), where the pulse numbers are 3000. By using the proposed method, the cracks are almost inhibited, as shown in Fig. 1(c). Moreover, the hole depth increases more than 3.3 times, and the aspect-ratio is improved at least 2.2 times. This method provides a new route for the precise processing.

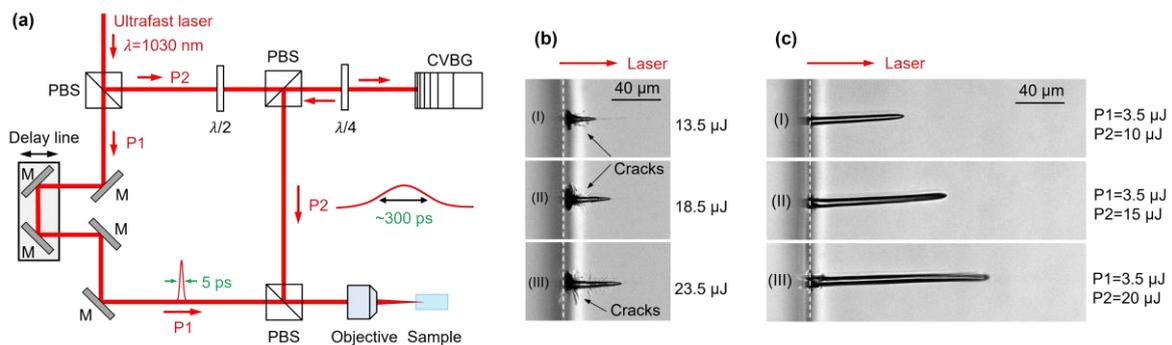


Fig. 1 (a) Experimental setup. PBS: polarizing beam splitter; CVBG: chirped volume Bragg grating; M: mirror; $\lambda/2$: half waveplate; $\lambda/4$: quarter waveplate. (b) Conventional method. (c) Proposed method.

Acknowledgment: This research was conducted with the support of JST PRESTO (JPMJPR22Q1).

Reference

1. K. Sugioka and Y. Cheng, *Light Sci. Appl.* **3**, e149 (2014).
2. Y. Ito, R. Shinomoto, K. Nagato, A. Otsu, K. Tatsukoshi, Y. Fukasawa, T. Kizaki, N. Sugita, and M. Mitsuishi, *Appl. Phys. A* **124**, 181 (2018).
3. C. Kerse, H. Kalaycıoğlu, P. Elahi, B. Çetin, D. K. Kesim, Ö. Akçaalan, S. Yavaş, M. D. Aşık, B. Öktem, H. Hoogland, R. Holzwarth, and F. Ö. Ilday, *Nature* **537**, 84 (2016).
4. Y. Ito, R. Yoshizaki, N. Miyamoto, and N. Sugita, *Appl. Phys. Lett.* **113**, 061101 (2018).
5. W. Wang, H. Song, K. Liao, and X. Mei, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **112**, 553 (2021).
6. G. Ren, H. Sun, K. Nakagawa, N. Sugita, and Y. Ito, *Opt. Lett.* **49**, 2321 (2024).

1.5 kW 青色半導体レーザーを用いた純銅溶接における ブルームの溶接への影響

Effect of plume on welding in pure copper welding using a 1.5 kW blue diode laser

阪大院工¹, 株)デンソー², 阪大接研³



○(M2C)須藤 真央¹, 藤尾 駿平¹, 神田 和輝², 白井 秀彰², 竹中 啓輔³, 水谷 正海³,
佐藤 雄二³, 塚本 雅裕³

Grad. Sch., Osaka Univ.¹, DENSO CO.², JWRI., Osaka Univ.³

°(M2C) Mao Sudo¹, Shumpei Fujio¹, Kazuki Koda², Hideaki Shirai², Keisuke Takenaka³,
Masami Mizutani³, Yuji Sato³, Masahiro Tsukamoto³

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

1. はじめに

近年, 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, 純銅は電気自動車に欠かせない材料である. 純銅の接合加工には様々な手法が挙げられるが, 加工速度が速い, 熱影響が小さいといった特性から, レーザー溶接が注目されている. 純銅のレーザー溶接において, より高い溶接効率を達成するために, 青色半導体レーザーの研究が広く行われている. これは, 従来主流であった波長 900 nm~1100 nm の近赤外線波長のレーザーでは, 純銅の光吸収率が約 10 % であるため加工効率が低かったが, 青色半導体レーザーの光吸収率は近赤外線領域に比べ約 6 倍高いからである. 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研究を行ってきた. 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. レーザー誘起ブルームとレーザー光との干渉は溶接効率の低下や, 溶接欠陥の原因となることが懸念される.

そこで本研究では, 1.5 kW 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いて, レーザー誘起ブルームの除去前後の溶接効率や, 溶接挙動の変化を定量化した.

2. 実験方法

Fig.1 に純銅板のビードオンプレート溶接の実験セットアップを示す. 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 300 μm とし純銅板に対し垂直に照射した. 掃引速度 25 mm/s でステージを動かして溶接を行った. 集光レンズを保護するためエアークナイフを用いて乾燥空気を吹き付けた. また, ブルームの溶接への影響を評価するために, エアークナイフを用いて乾燥空気を 70 L/min で吹きつけた. さらに, ハイスピードビデオカメラを用いて溶接挙動を観察した.

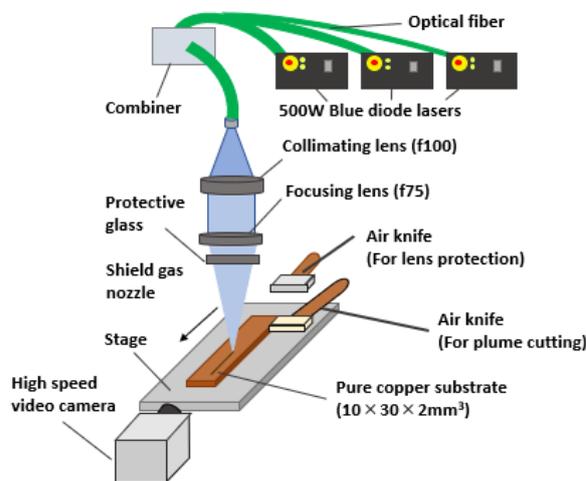


Fig.1 Schematic diagram of experimental setup of pure copper welding with 1.5 kW blue diode laser.

3. 実験結果

ビードオンプレート溶接を行った結果, 銅板直上 2 mm 高さに設置したエアークナイフを用いて溶接したほうが, 熔融断面積が約 1.4 倍増加するという結果が得られた. 当日はこれに加え, ハイスピードビデオカメラを用いた, ブルーム除去前後の溶接挙動の変化に関する結果を併せて示す予定である.