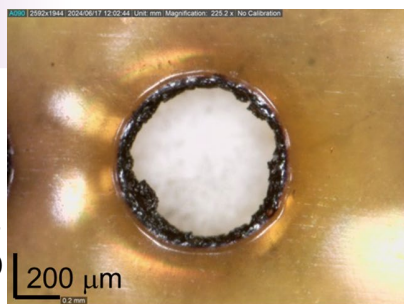
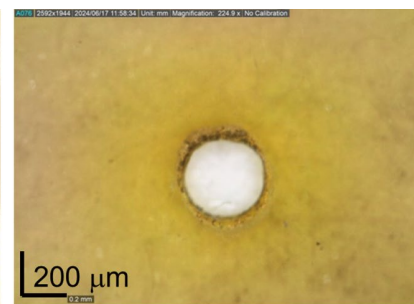


【表紙図】CO₂レーザーによるPIフィルム穴あけ加工結果。同一レーザー条件：フルエンス12.0 J/cm²、照射径479 μm、パルス数50 パルス



ウォーターアシストなし



ウォーターアシストあり

CO₂レーザー加工でも使える ウォーターアシストの新技术

共同研究員 山梨大学准教授 宇野和行

一般的なCO₂レーザー（波長9.6 μmや10.6 μm）は、パルス幅が10 nsから数 msのパルス発振、あるいはCW発振であり、ガラスや樹脂、生体材料に強く吸収され、基本的に熱加工となる。そのため、試料によっては炭化や溶融などの熱影響が問題となる。筆者はこれまで精電舎電子工業株式会社との共同研究により、パルス形状（100 ns - 100 μs）やビーム形状を制御可能なパラメーター制御CO₂レーザーを開発し¹⁻⁴、照射パラメーターを調整することで熱影響の低減や加工形状の制御を実現してきた。具体的には、単純なパーカッション照射においてレーザーパラメーターを調整することで、どのような種類のガラスにもクラックを与えない加工や加工形状（テーパ角）の制御⁵⁻⁷、薄板ガラスにおける直径30 μm程度の穴あけ加工、PTFE加工における加工形状の制御⁸、さらには炭化を与えない歯牙の切削⁹を可能としてきた。

本稿では、水に強く吸収されやすい波長をもつレーザーによるフィルム加工において、シンプルなウォーターアシスト法を提案し、その有効性を実証したことを紹介する。今回使用したのは波長10.6 μmのCO₂レーザーであるが、水に強く吸収されるレーザーであればCO₂レーザーに限定されない。また、厚さ50 μm - 200 μmのポリイミド(PI)フィルムを対象としたが、薄いフィルムであれば他の材料にも適用できる可能性がある。これらについては現在検討を進めている。

●新しいウォーターアシスト法の提案

従来のウォーターアシストには、水中照射や、吹き出す水中にレーザー光を通すウォータージェットガイド照射などさまざまな提案^{10,11}がある。しかし、水はCO₂レーザー波長の吸収が大きいので、通常のウォーターアシストの適用は難しい。そのため、CO₂レーザーでは照射ノズルの先に酸素層を取り付けたドライゾーン照射など特殊な方法^{12,13}が提案されてきた。

本研究で提案するウォーターアシスト法は、学生との実験中に偶然発見したもので、試料フィルムの下に水を配置するだけの単純な方法であるが、これまでに報告例がなく、新しい方法である。実際に学会や国際会議で発表すると、多くの研究者から注目を集めた。しかも後から分かったことだが、水は必ずしもフィルムに密着している必要はなかった。普通は、「フィルムの下に水を置いても何も変わらない」と考え、わざわざ試そうとは思わないだろう。しかし、試してみると、「あれ？熱影響が広がらない！」という結果が得られた。そこで、学生に系統的なデータ取得を依頼し、研究を進めることになった。

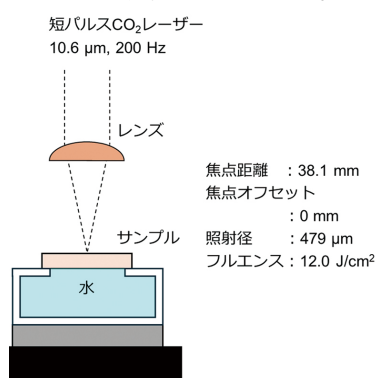
●新しいウォーターアシスト法の実証

使用したCO₂レーザーは、特別なパルス形状やビーム形状の制御は行わず、波長10.6 μm、尖頭パルス幅160 ns、テール長65.8 μsをもつテール付き短パルスを使用した。図1に示すように、レーザー光は水槽上に張られ

たシート状サンプルに打ち下ろす形で照射した。焦点距離38.1 mmのレンズで、サンプル表面に集光した。サンプルは表面に水滴が付着しないよう注意し設置した。照射条件は、照射径479 μm 、1パルスあたりのフルエンス12.0 J/cm²、繰り返し周波数200 Hzでのパーカッション照射とした。サンプルの下に水を配置しない場合(ウォーターアシストなし)と配置した場合(ウォーターアシストあり)で比較を行った。

図2に厚さ50 μm のPIフィルムに照射した時の表面写真を示す。ウォーターアシストなしの場合、貫通穴径(D_{hole})とHAZ径(D_{HAZ})は照射パルス数の増加に伴い拡大した。一方、ウォーターアシストありの場合は、照射パルス数を増加させても貫通穴径およびHAZ径はほとんど変化しなかった。200パルス照射、総照射フルエンス2400 J/cm²(1パルスあたりのフルエンス×照射パルス数)まで測定した結果、照射径に対する貫通穴径の比は照射パルス数に依存せず約70%で一定であり、照射径に対するHAZ径の比も照射パルス数に依存せず79 ± 2%でほぼ一定であった。すなわち、貫通穴径、HAZ径ともに照射パルス数に依存せず、照射ビーム径のみに依存することが分かった。この結果から、ウォーターアシストにより熱影響が大幅に低減されることが明らかになり、照射ビーム径のみで貫通穴径を正確に制御できることが分かった。

照射中のアブレーション発光にも違いが確認された。ウォーターアシストなしでは照射中を通して発光が観測されたのに対し、ウォーターアシストありでは照射途中で発光が消失した。この現象は、ウォーターアシストによってサンプルへの過剰照射が抑制されていることを示唆している。考えられるメカニズムは以下の通りである。ウォーターアシストなしの場合、サンプルに貫通穴が形成された後もレーザーパルスが照射され続け、過剰照射となって穴径、HAZ径が拡大する。一方、ウォーターアシストありの場合は、貫通穴形成後に後続パルスが水に到達し



【図1】ウォーターアシストCO₂レーザー加工照射配置図

	10/パルス照射	20/パルス照射	50/パルス照射
ウォーターアシストなし	 D _{hole} : 294 μm D _{HAZ} : 503 μm	 D _{hole} : 383 μm D _{HAZ} : 576 μm	 D _{hole} : 629 μm D _{HAZ} : 728 μm
ウォーターアシストあり	 D _{hole} : 339 μm D _{HAZ} : 370 μm	 D _{hole} : 334 μm D _{HAZ} : 392 μm	 D _{hole} : 342 μm D _{HAZ} : 370 μm

【図2】ウォーターアシスト有無によるPIフィルム加工形状の違い。同一レーザー条件：フルエンス12.0 J/cm²、照射径479 μm

な水滴がサンプル表面や周辺に噴出する。これらの水滴がPIフィルム到達前にレーザー光を吸収することで発光が消失するとともに、過剰な加熱が抑制されると考えられる。換言すれば、貫通穴が形成されると自動的にレーザー照射が「オフ」になる仕組みが働いているといえる。

●今後の展望

本研究により、CO₂レーザーによるPIフィルム加工において、フィルムの下に水を配置するだけというシンプルなウォーターアシスト法が熱影響を大幅に低減できることを示した。本稿では誌面の都合により厚さ50 μm の穴あけ加工のみを示したが、厚さ200 μm の穴あけ加工や切断加工においても同様の効果を確認している。今後は、更なるHAZ低減のための照射レーザーパラメーターの最適化、メカニズムの詳細解明、他材料への適用性評価を進めていく予定である。

参考文献

- 1) K. Uno, et al., Opt. Laser Technol. 101 (2018) 195-201.
- 2) K. Uno, et al., Proc. SPIE 10811 (2018) 1081111.
- 3) K. Sakamoto, K. Uno, et al., Proc. SPIE 10898 (2019) 108980U.
- 4) K. Uno, et al., Opt. Laser Technol. 152 (2022) 108174.
- 5) M. E. Rahaman, K. Uno, Lasers Manuf. Mater. Process. 9 (2022) 72-80.
- 6) M. E. Rahaman, K. Uno, Laser Phys. 33 (2023) 096004.
- 7) K. Uno, et al., J. Eng. Appl. Sci. 70 (2023) 137.
- 8) K. Uno, et al., Infrared Phys. Technol. 151 (2025) 106100.
- 9) K. Uno, et al., Proc. SPIE-OSA 10417 (2017) 104170U.
- 10) J. Wang, et al., Proc. 7th Int. Conf. Nanomanuf. (2022) 165-173.
- 11) A. Kruusing, Opt. Laser Eng. 41 (2004) 329-352.
- 12) O. Matsumoto, et al., J. Nucl. Sci. Technol. 29 (1992) 1074-1079.
- 13) M. N. Mahdi, et al., Photonics 10 (2023) 89.

国際会議報告-Pacific-rim Laser Damage Conference 2025

レーザー技術開発室 本越伸二

2025年9月24日～26日、那須高原において、Pacific-rim Laser Damage conference 2025(PLD2025)が開催され、参加、講演を行った。Laser Damage Sym-

posium(主催SPIE)が毎年米国で開催され、世界各国の高出力レーザー機関、光学部品メーカーが参加し、レーザー損傷、高耐力光学素子について議論されている。今

回参加したPLD2025はそのアジア版。といってもアジアで高出力レーザー用光学部品の研究機関、メーカーは限定されているため、日本と中国で開催を持ち回り、2年ごとに開催している会議である。参加人数は約40名、半分は中国、半分は日本、招待講演の欧米研究者数名であった。会場的那須高原は、避暑地、温泉地で有名な所。会議でなくプライベートでゆっくり来たいと思わせる場所であった。

プログラムは、招待講演15件、口頭発表10件、ポスター発表9件が3日間で行われ、筆者は中国、上海光機所のJ.Shao氏とともにPlenary talkを担当し、ILTで行っているレーザー損傷耐性試験とレーザー損傷しきい値のデータベースについて講演した(写真)。ここでは、いくつかの興味ある講演内容について紹介する。

●世界最大の金コート回折格子の開発

中国・上海光機所では、100 PWの高強度レーザー装置の開発を進めている。その出力増大の課題は、パルス圧縮用回折格子の性能であった。1つは30 fs以下のパルス幅に必要な400 nm以上の帯域幅に対して90%以上の回折効率を持つこと。もう一つは、0.1 J/cm²以上のレーザー損傷しきい値を持つこと。誘電体多層膜ミラーを基材にした回折格子であれば、1 J/cm²以上の高耐力は期待できるが、400 nm以上の広帯域に亘り回折することは困難である。そのため、金コートの回折格子を選択し、損傷を抑えるために、大口径化を図った。結果、1620×1070 mm²の世界最大の回折格子を開発。また帯域幅450 nmに亘り回折効率90%を達成。レーザー損傷しきい値も、パルス幅17 fsに対して0.3 J/cm²を得たと報告。次の5年間で、100 PWレーザーを完成すると紹介していた。

●広帯域波長変換用DADP結晶

中国・山東大学から、D₂(重水素)置換したADP (Ammonium Dihydrogen Phosphate: リン酸二水素アンモニウム)非線形結晶について報告があった。ADP結晶は透過帯域が広く(200~1600 nm)、大型育

成が可能であることから、KDP結晶と同様に古くから、研究、開発が進められてきた。しかしながら、位相整合条件が厳しく、広帯域光の波長変換には不向きであった。それを改善するために、水素の一部を重水素に置換する研究が進められている。報告では、23%重水素置換し7×7×6 cm³の結晶育成に成功。非位相整合(NCPM)の中心波長は、KDP結晶、ADP結晶ではそれぞれ1036 nm、1053 nmであったのに対して、DADP結晶では1027 nmであった。中心波長1027 nmの180 fsパルスを使い波長変換試験の結果、KDP結晶、ADP結晶ではそれぞれ45%、52%の変換効率に対して、DADP結晶では48%で従来の結晶と遜色ない品質であると報告された。

●今後のPLD会議

中国が国を挙げて、高強度レーザー装置開発に取り組んでいることが伺えられた。それに必要な若手研究者の育成にも力を入れている。日本では、研究者が足りない分、集中して要素技術開発に取り組むことが必要と感じた。

今回から主催SPIEから離れ、独自開催になったとのこと。そのため、次回を2年後ではなく明年2026年に中国・桂林で開催することが確認された。今回と同程度の日本人研究者を連れ出せるかが課題。



【写真】PLD2025 講演の様子

新入研究員

レーザー計測研究チーム **磯谷 舟佑** いそがい しゅうすけ



2025年10月1日付でレーザー技術総合研究所へ入所し、レーザー計測研究チームに配属されました「磯谷舟佑」と申します。2024年11月から非常勤職員として研究に従事しておりましたが、この度研究員として入所することになりました。大学および大学院時代には、物理化学や地球科学の研究を行い、具体的には電子スピン共鳴(ESR)を用いてシリカクラスレートというケイ酸包接化合物に含まれる、ラジカル種の挙動や反応に関する研究を行っていました。これらの研究を通じて、ラマン分光法を用いた物質の観察を経験しています。当研究所では、ラマンライダーに関連する技術開発に従事します。

レーザーを用いた研究については経験が浅いですが、そのぶん一日も早く知識と技術を吸収し、当研究所の発展に貢献できるよう日々精進してまいります。ご指導ご鞭撻のほど、何とぞよろしくお願い申し上げます。

レーザー総研オープンセミナー 「レーザー加工からインフラ診断まで」 ～ILT2025 令和6年度研究成果報告会開催案内(横浜)～

研究成果報告会 ILT2025を下記により開催いたします。レーザー加工からインフラ診断まで、昨年度の研究成果をわかりやすく報告します。ポスター発表では、研究員との個別・直接対話により技術的なご相談にも対応いたします。ぜひご参加ください。

この報告会は、「インターオプト2025-光とレーザーの科学技術フェア-」の併催イベントです。

◆プログラム

- | | | |
|-------------|---|--------------------|
| 13:00～13:15 | 開会挨拶 レーザー技術総合研究所概要 | 所長 井澤靖和 |
| 13:15～13:40 | 月面環境での3Dプリンティング！そこでは何が起きるのか | 副所長 藤田雅之 |
| 13:40～14:05 | レーザーで簡単にできる！ナノ粒子合成手法の開発と応用 | 主任研究員 谷口誠治 |
| 14:05～14:30 | レーザーのポインティングを超高精度角度で揃える！画期的ビームアライメント法 | 副主任研究員 ハイク コスロービアン |
| 14:30～14:45 | 休憩 | |
| 14:45～15:10 | 海洋を利用する脱炭素化や原発の廃炉にレーザーで貢献！
ハイパースペクトルラマンイメージングライダーの開発 | 主任研究員 染川智弘 |
| 15:10～15:35 | 測ったその場ですぐわかる！ダブルパルスLIBS法を用いたRC構造物の遠隔塩害評価 | 研究員 倉橋慎理 |
| 15:35～16:00 | レーザー損傷耐性試験を自動化へ！プラズマ発光計測による光学素子の損傷検出 | 主席研究員 本越伸二 |
| 16:00～ | 閉会挨拶 | 常務理事 梅林 徹 |
| 16:05～16:40 | ポスター発表 | |
- ・月環境での3Dプリンティング
 - ・プラズマ発光による微小レーザー損傷の検出
 - ・レーザーを用いたナノ粒子合成手法
 - ・新しいビーム重ね合わせ手法：超高精度角度ポインティング制御技術
 - ・ダブルパルスLIBSによるRC構造物の塩分検出
 - ・PCV気相漏洩検出のための遠隔光検出技術
 - ・液中レーザーCO₂検出と脱炭素への貢献

◆開催概要

- <日 時> 2025年11月11日(火)13:00～16:40
- <場所> パシフィコ横浜 アネックスホールF202
神奈川県横浜市西区みなとみらい1-1-1
アクセス：みなとみらい駅から徒歩5分ほか
<https://www.pacifico.co.jp/access>
- <受講料> 無料
- <申し込み方法> インターオプト2025-光とレーザーの科学技術フェア-共催イベントよりお申し込み下さい。
<https://www.opt-seminar.jp/ilt2025y/>
- <申し込み締切> 定員(50名)になり次第締め切らせていただきます。
- <お問い合わせ> 公益財団法人レーザー技術総合研究所
(E-mail:seika@ilt.or.jp)

