

OH 赤外吸収波長帯レーザーを用いた ガラスおよび樹脂材料加工に関する研究

自然科学研究機構 核融合科学研究所 ヘリカル研究部
助教 上原 日和
(2018 年度 奨励研究助成 (若手研究者) AF-2018228-C2)

キーワード：中赤外レーザー，レーザー加工，樹脂フィルム

1. 研究背景と目的

近年、スマートフォンや車載ディスプレイに対して軽量化や自由形状化といった新たな付加価値が求められており、従来のガラスベースではなく、機能性を付与した積層樹脂フィルムから成るディスプレイパネルが開発、上市され始めている。樹脂フィルムの切断等加工を高精度に行うには、レーザー加工が適しているが、そのためには、樹脂の吸収特性に適合した特殊波長のレーザー光源が要求される。図 1 に、ディスプレイパネル等に用いられる代表的な樹脂材料の透過率スペクトルと既存の加工用レーザーの波長を示した (透過率が低いほど材料の吸収率が高い)。

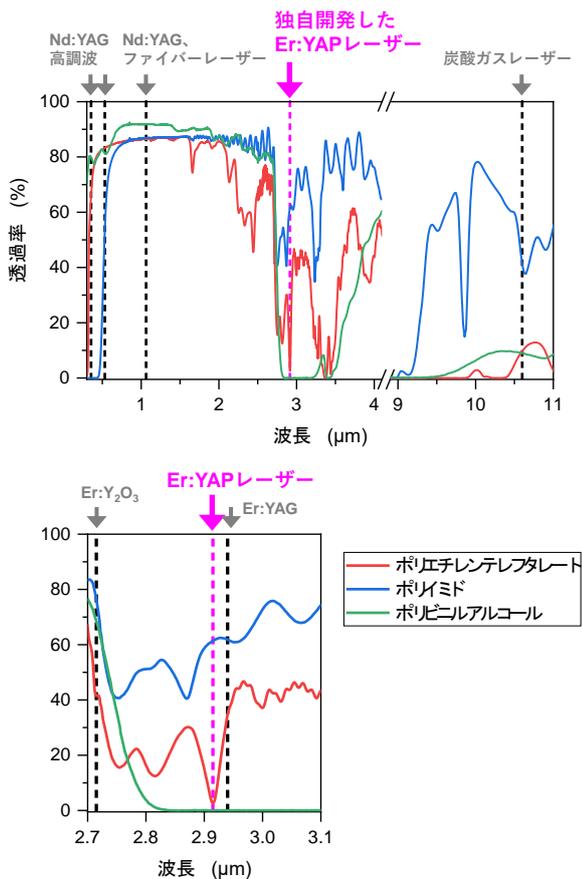


図 1 各種樹脂材料の透過率スペクトル

著者らは、最近、高効率・高出力な中赤外レーザーである「エルビウム添加イットリウム・アルミニウム・ペロブスカイト (Er:YAP) レーザー」を小型で安価な構成にて独自開発した¹⁾。この Er:YAP レーザーは波長 2.92 μm に

おいて、高いビーム品質にて発振する。図 1 からわかるように、特定の樹脂の吸収性は当該波長において特異的に高くなっている。そのため、Er:YAP レーザーを用いることで、積層樹脂フィルムの高品位・高スループットな加工が大いに期待できる。本研究では、加工優位性の高い連続発振 Er:YAP レーザーを開発し、それを用いた高スループットな樹脂フィルムのレーザー加工を実証した。

2. レーザー加工装置の開発

2.1 中赤外レーザーの開発

希土類や遷移金属イオンの直接発振を利用した中赤外レーザーは、安定性が高く、高効率・高平均出力化が可能である。著者らは、これまでに、主にエルビウムを活性元素に用いた直接発振の波長 3 μm ファイバーレーザー¹⁾や固体レーザー²⁾の開発を行ってきた。

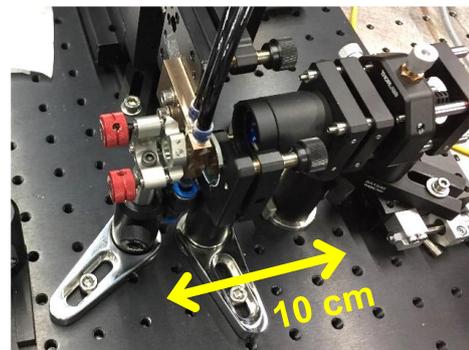


図 2 Er:YAP レーザー光源の外観

YAP 結晶は、高い熱伝導度と酸化物の中では最低レベルのフォノンエネルギーを持ち、高出力かつ高効率なレーザー発振を見込むことができる材料である。波長 2.7 μm で発振する Er:Y₂O₃ と比較してレーザー下準位寿命が長く、定常で 3 準位系となり、発振波長が長波長にシフトする。また、発振波長 2.94 μm の Er:YAG と比較して上準位寿命が長いいため、連続波動作に適している。著者らは、Er:YAP レーザーを世界に先駆け実証し、Er 系固体レーザーの室温連続発振動作では最高となる出力 7 W を達成している³⁾。また、スロープ効率 30% を超えており、ストークス効率 33% に迫る極めて高効率な発振を高いビーム品質を保ちながら実現した。当該レーザーは、励起光源として波長 976 nm の半導体レーザー (LD) を用いており、高出力でありながら、低コストで小型・堅牢な構成にて構

築可能である (図 2)。また、連続発振動作以外にも、受動 Q スwitching、能動 Q スwitching による高ピーク出力なパルス発振動作も実証している⁴⁾。本研究課題では、加工検証のほかにも、Er:YAP レーザーの更なる高出力化のため、主発振器出力増幅 (MOPA) 特性の評価⁵⁾や波長 $0.98 \mu\text{m}$ と波長 $1.7 \mu\text{m}$ で同時に端面励起する新たな出力増強手法を実証した⁶⁾ (引用文献を参照)。本報告書では、レーザー加工検証試験の結果を中心に解説する。

2・2 レーザー加工システムの構築

開発した Er:YAP レーザーを光源としたレーザー微細加工光学系を構築した。図 3 は、システムの外観写真である。ここでは、全てのオプティクス類に金ミラーおよび赤外透過材料を用いており、試料台を 2 軸自動ステージと手動 z 軸で高精度に移動させることで、高スループットな加工を可能にした。 $2.92 \mu\text{m}$ は水蒸気の吸収ラインから外れており、大気吸収による伝送損失は極めて小さい。レーザー発振器は、最大出力 3.6 W で安定動作が可能で、出力 3 W 時の M^2 は $1.8\sim 2.0$ 程度である。対物レンズには焦点距離 12.7 mm の非球面 ZnSe レンズを採用し、ビームスポット半径は約 $10 \mu\text{m}$ (レイリー長 0.05 mm) と見積られる。極めて安定な動作が可能で出力 2 W を最大として加工を行い、このときのレーザーの最大強度は 640 kW/cm^2 に達する。

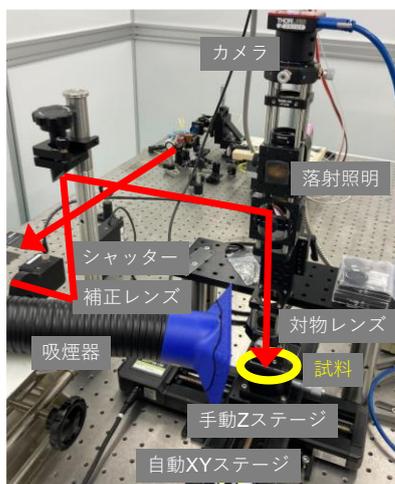
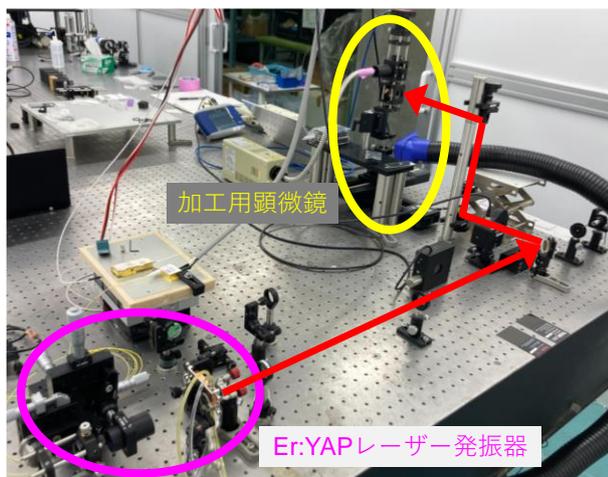


図 3 中赤外 Er:YAP レーザー加工システムの外観

試料によっては加工時にヒュームが発生するため、吸煙器を稼働させた。

3. レーザー加工特性の評価

3・1 各種樹脂材料の赤外吸収

レーザー光源波長における材料の光吸収特性は、加工スループットを左右する最も重要な因子である。本研究では、波長 $2.92 \mu\text{m}$ での光吸収率が高いポリエチレンテレフタレート (PET)、中程度のポリエチレン (PE)、吸収が小さなポリカーボネート (PC) の 3 種類の樹脂フィルムに対して加工検証をおこなった。

図 4 は、上記材料の厚さ 0.1 mm のフィルムの透過率スペクトルであり、Er:YAP レーザーの波長 $2.92 \mu\text{m}$ を破線で示した。当該波長は、フェニル基内 CH 伸縮振動や OH 伸縮振動の赤外共鳴波長と良い一致を示しており、PET 樹脂フィルムの透過率は 18% と低く、フレネル反射を考慮した吸収係数は約 160 cm^{-1} である。なお、フェニル基内 CH 由来の吸収はバンド幅が狭く、Er:YAG レーザーの発振波長である $2.94 \mu\text{m}$ における吸収係数は小さいことは特筆すべき点である。また、PE の当該波長における透過率は 64% 、吸収係数は約 40 cm^{-1} であった。一方で、PC の赤外吸収バンドは波長 $2.92 \mu\text{m}$ から大きく外れており、透過率 85% 、吸収係数は 7 cm^{-1} 未満と極めて低いことがわかった。

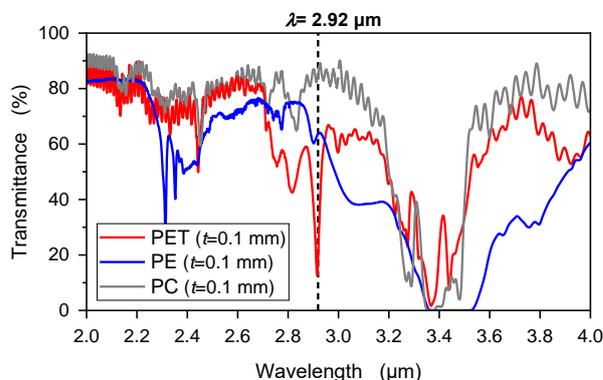


図 4 加工対象に用いた樹脂フィルムの赤外透過率スペクトル

3・2 PET フィルムの加工特性

厚さ 0.1 mm の PET フィルムの加工を試みた。レーザー出力を $0.5\sim 2 \text{ W}$ 、走査速度を $1\sim 20 \text{ mm/s}$ の範囲で変化させ、レーザー顕微鏡を用いて加工痕の表面形状を評価した。図 5 は、出力 2 W 、走査速度 10 mm/s 時の加工痕の光学顕微鏡像 (左) とレーザー顕微鏡像 (右、高さマッピング) である。この条件では、レーザー照射部に沿って樹脂が除去されて、フィルムが均一に切断できた。加工痕の断面プロファイルを図 6 に示す。(a)は、走査速度を 10 mm/s 時のレーザーパワー依存である。出力 $>1 \text{ W}$ でアブレーションによる溝の深さが 0.1 mm を超えており、切断に成功した。一方、 0.5 W では溝深さは $30 \mu\text{m}$ 程度にとどまり、切断できなかった。いずれの条件においても、溝の両側に高さ

30~50 μm 程度の凸構造が形成された。これは、蒸発には至らなかった周辺部が温度上昇によって溶融・膨張したものと考えられる。レーザー照射部から蒸発した樹脂が再凝固した堆積物である可能性もあるが、ヒュームを吸引しているため、堆積はわずかである。レーザーパワーが 0.5 W から 2 W に増加するにしたがって、溝の幅は 100 μm から 170 μm に、膨張部の幅は 230 μm から 400 μm に増加した。図 6(b)は、レーザー出力を 2 W に統一した際のスキャン速度依存である。速度 1~20 mm/s の範囲では、いずれも切断加工に成功しており、PET の高い吸収係数に基づいた高スループットな切断加工を実証した。速度を 1 mm/s から 20 mm/s に増加すると、溝の幅は、250 μm から 130 μm まで細くなった。20 mm/s においても急峻な切断プロファイルとなっていることから、さらに高速かつ微細な切断加工も十分に可能と考えられる。

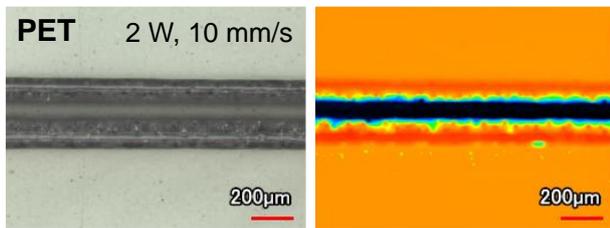


図 5 PET フィルムの加工痕の光学顕微鏡像と高さマッピング

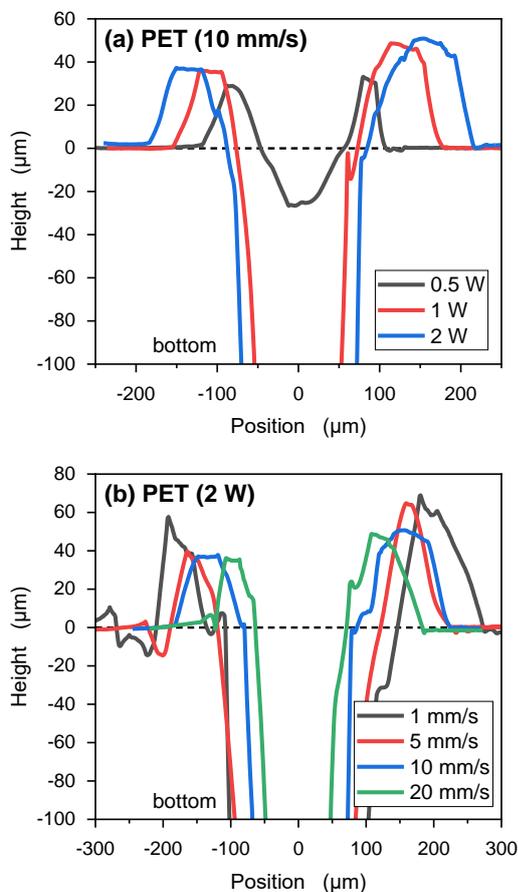


図 6 PET フィルムの加工断面プロファイル
(a)レーザー出力依存、(b)走査速度依存

3・3 PE フィルムの加工特性

続いて、厚さ 0.1 mm の PE フィルムの加工を、前項と同じ要領でおこなった。出力 2 W、走査速度 1 mm/s 時の加工痕の顕微鏡像を図 7 に示す。この条件下においても、PET と同様に長距離にわたる切断に成功した。加工痕の断面プロファイルを図 8 に示す。(a)の走査速度 10 mm/s でのパワー依存を見ると、0.5~2 W では、いずれも凸構造となっており、溝は形成されなかった。走査速度が速く、照射時間が短いため、十分なエネルギーが投入されず、アブレーションに至らなかったものと考えられる。膨張部の幅は出力 0.5~2 W で 50~230 μm となったが、1 W 以上ではその中央部により急峻な稜が形成された。この凸部の幅は 10~30 μm であり、レーザースポット径と同程度であることから、レーザー照射部近傍において局所的な温度上昇が

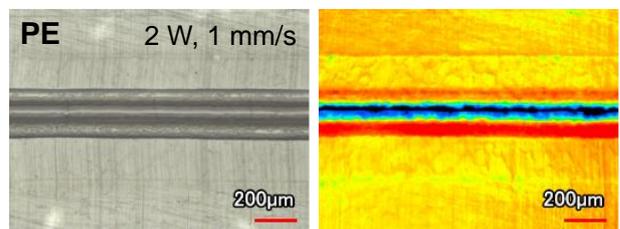


図 7 PE フィルムの加工痕の光学顕微鏡像と高さマッピング

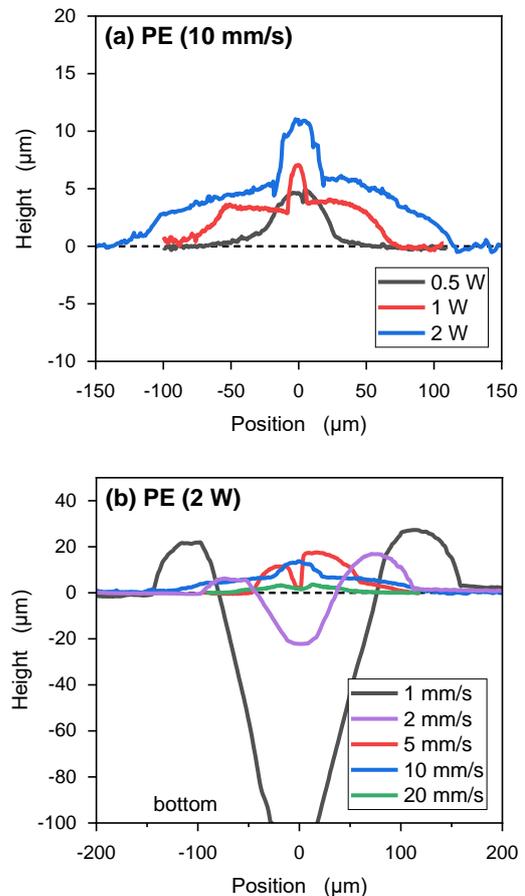


図 8 PE フィルムの加工断面プロファイル
(a)レーザー出力依存、(b)走査速度依存

起こったと予想される。図 8(b)は、レーザー出力を 2 W に統一した際のスキャン速度依存である。速度 1 mm/s のとき、アブレーションによるフィルムの切断が約 150 μm の溝幅できているが、2 mm/s 以上では切断できなかった。また、2, 5 mm/s の条件のとき、膨張部の中心が蒸発して溝が形成されるが、速度を 10 mm/s まで増加させると、凸構造のみが残った。吸収係数が PET と比較して 1/4 程度の PE では、アブレーションしきい値が高く、切断可能な条件が狭いが、出力と走査速度を制御することで凹構造と凸構造のいずれも形成できることが実証された。

3・4 PC フィルムの加工特性

最後に、厚さ 0.1 mm の PC フィルムの加工を試みた。出力 2 W、走査速度 10 mm/s 時の加工痕の顕微鏡像を図 9 に示す。幅が <100 μm の凸構造が形成された。図 10(a)の断面プロファイルの出力依存を見ると、高さ 3~12 μm 、幅 30~90 μm の滑らかな凸構造であることがわかる。図 10 (b)は、出力 2 W 時の走査速度依存である。速度を 1 mm/s から 20 mm/s に増加させると、膨張部の高さは 20 μm から 3 μm まで低くなり、幅は 250 μm から 60 μm まで細くなった。波長 2.92 μm における PC の吸収係数は 7 cm^{-1} 未満と極めて低く、Er:YAP レーザーでのアブレーション加工は困難である。一方で、微小範囲の膨張が再現性良く得られるため、導波路の作製などの用途が期待できる。

4. まとめ

著者は、高出力かつ高ビーム品質な波長 2.92 μm の Er:YAP 固体レーザーを小型で安価な構成にて独自開発した。この中赤外レーザーを用いることで、その波長特異性から、従来光源と比較して優位性の高い透明材料加工が期待できる。しかし、これまで詳細な加工検証は為されてこなかったため、本研究では、Er:YAP レーザーを光源利用した加工システムを新たに構築した。当該波長における吸収係数が大きな PET 樹脂、中程度の PE 樹脂、吸収の少ない PC 樹脂のフィルムを対象に加工検証をおこなった。各樹脂の加工特性を表 1 に纏めた。

PET では、優れた吸収特性に基づき、高スループットな切断加工に成功しており、ディスプレイパネル製造過程への導入が大いに期待できる。アクリル樹脂 (PMMA) やポリビニルアルコール (PVA) などの加工需要の高い樹脂も吸収性が高く、同様の加工が可能と予想される。生体試料でも高スループット加工が期待され、レーザーメスや歯科・皮膚治療用光源としての利用が考えられる。

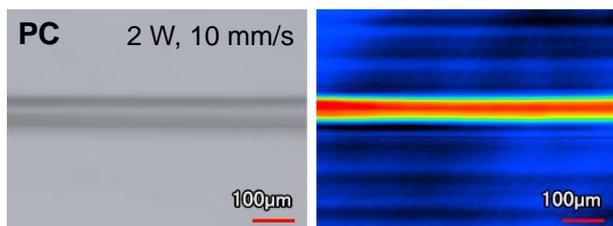


図 9 PC フィルムの加工痕の光学顕微鏡像と高さ分布

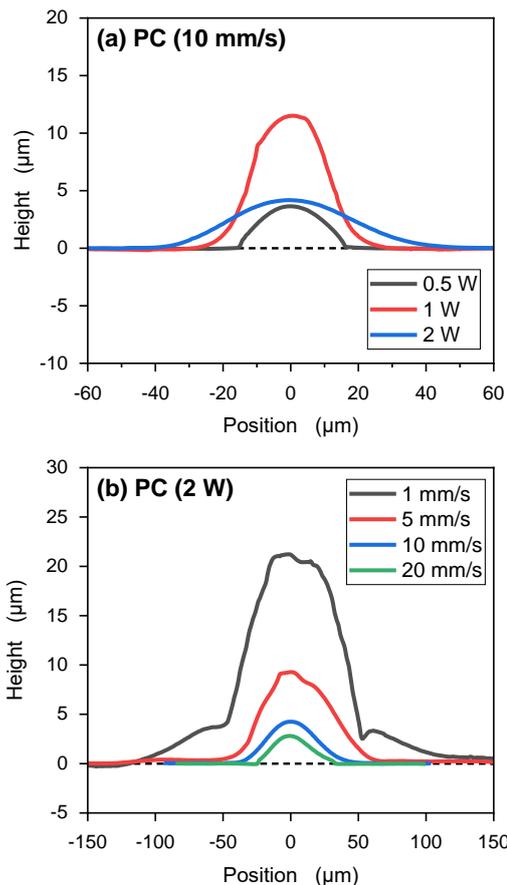


図 10 PC フィルムの加工断面プロファイル
(a)レーザー出力依存、(b)走査速度依存

表 1 樹脂フィルム加工特性のまとめ

	樹脂材料		
	PET	PE	PC
吸収係数@2.92 μm	約160 cm^{-1}	約40 cm^{-1}	<7 cm^{-1}
切断加工条件 (0.1 mm、典型値)	出力 > 0.5 W	2 W~	×
	走査速度 > 20 mm/s	1 mm/s	×
凸型加工	×	△	○
期待される用途	高スループットな切断加工	切断加工 マイクロ流路形成	局所溶融 導波路形成
吸収係数が近い樹脂	PMMA、PVA、 生体組織など	PVC、POM、 ポリイミドなど	PTFE (フッ素樹脂) など

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団の奨励研究助成 (若手研究者) (AF-2018228-C2) を受け実施されたものであり、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) H. Uehara et al., Opt. Lett. **44**, 4777 (2019).
- 2) H. Uehara et al., Opt. Express **26**, 3497 (2018).
- 3) W. Yao, H. Uehara et al., Opt. Express **28**, 19000 (2020).
- 4) H. Uehara et al., Appl. Phys. Express **12**, 022002 (2019).
- 5) W. Yao, H. Uehara et al., Opt. Express **29**, 24606 (2021).
- 6) W. Yao, H. Uehara et al., Opt. Laser Technol. **152**, 108073 (2022).