



S. Okihara

近・中赤外レーザによる立体形状の透明樹脂溶着に関する研究

沖原 伸一郎 *

1. まえがき

近年においても液体用容器に用いられる素材は、ガラスから樹脂への置き換えが加速している^{1)~3)}。これらの樹脂溶着においては、従来から接着剤や超音波などを用いた接着加工が用いられているが、生産性などの点からレーザによる接着加工（溶着加工）が普及し始めている^{4), 5)}。我々の着目する食品、薬品、化粧品等の分野の容器においては、透明樹脂の利用が望まれているが、熱変質や人体への影響などを嫌う点から、従来の接着加工技術ではこの透明樹脂の接着要求に対して十分に対応できていない。加えて従来のレーザによる溶着においても波長 940 nm 近辺のレーザ光源が用いられているが、吸収率が極めて低いために透明樹脂同士の溶着加工においては接合部分における吸収体の塗布の必要性⁶⁾があり、食品等の容器溶着加工には用いることができない。また、用途が液体用容器であるため立体的な形状での接合が求められており、透明樹脂同士による立体形状の溶着技術への要求が急速に高まっている。

上述の要求に対する吸収体を用いない透明樹脂同士のレーザ溶着に関する状況について説明する。これまで、透明樹脂同士のレーザ溶着加工については、先の近赤外領域に設定された吸収材の塗布やエラストマーと呼ばれる材料を材料の中間に存在させることによる研究が進められてきた⁷⁾。これに対して、吸収材の塗布やエラストマーと呼ばれる材料そのものの存在を無くする条件における研究としては、中赤外領域のレーザ利用がなされている⁸⁾。ここで透明樹脂への光吸収率の高さの視点でレーザ光源をみていくと、波長 10 μm 近辺の炭酸ガスレーザがある。しかしながら吸収率が非常に高いため切断（溶断）等には効果的だが、透明樹脂同士の溶着では片方の樹脂材料表面近傍で吸収されてしまい、もう片方の樹脂材料に光が到達しないため適さない。次に、近年において開発が進んでいる波長 2 μm 近辺の中赤外領域のレーザ⁹⁾では吸収率が 30-60 % と高く、透明樹脂の溶着にも用いられ始めている。しかし、吸収率が高いため厚さ数 mm 程度の薄板において表面の吸収を起こさずに溶着を行うにはレーザエネルギーのコントロールの許容幅が小さく、加工不良率を高めてしまうなどの課題がある。

以上の状況を踏まえ、これら解決するため我々は 1-2 μm の波長領域の中間にある波長 1.5 μm 帯域 (1470 nm) の半

導体レーザ光源利用に着目して利用研究を進めることとした。レーザ樹脂溶着で用いられている近赤外のレーザダイオードやファイバレーザを用いた装置の出力帯域は 50-100 W であるのに対し、上述の 2 μm 等の中赤外レーザも同様に 5-100 W 程度であるが近赤外域のレーザ装置よりもかなり高価である。このため 1.5 μm 帯域の半導体レーザは、出力も同程度の光源も存在し、価格も 2 μm 等の中赤外レーザに対して大幅に抑えられ、且つ吸収率も 30-60 % 以下に抑えられ吸収率 10 % 程度を確保できるため、表面吸収を抑制した溶着が可能と見込まれる。

本研究の目的は次のように設定した。波長 1470 nm のレーザダイオードと高 NA レンズを用いることにより、透明樹脂同士の高さ方向に選択的な溶着技術の確立を目指す。このため 2 つの研究を行った。①当該半導体レーザによる透明樹脂の薄板によるレーザ溶着加工の研究：PMMA 等の代表的な透明樹脂によるレーザ溶着加工条件（集光位置精度条件、ピークパワー密度等の条件）を明らかにする。②当該半導体レーザと高 NA レンズによる立体形状（円筒）透明樹脂のレーザ溶着加工の実証：立体形状の透明樹脂に対する溶着加工機構の研究とその実証。

2. 実験方法

2.1 薄板溶着実験の概要

2.1.1 薄板溶着実験（狭集光条件）

薄板溶着実験で用いたレーザ溶着のための光学系の概要を図 1 に示す。

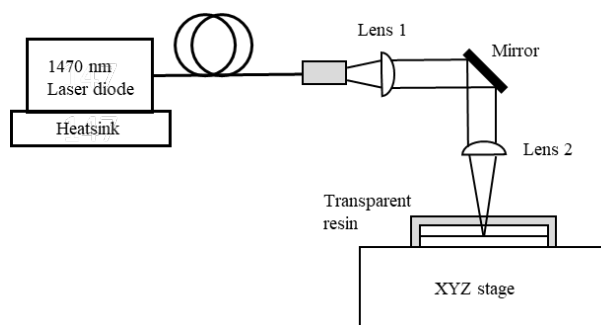


図 1 薄板透明樹脂溶着実験光学系

* 光産業創成大学院大学 光産業創成研究科 准教授

光源として近赤外のファイバカップリング型レーザダイオード（LIMO 社製 最大出力 15 W 波長 1470 ± 20 nm, LIMO15-F200-DL1470-EX1257 ファイバコア径 $200 \mu\text{m}$, N.A. 0.22）を使用し、ファイバー端から出射されるビームを焦点距離 50 mm の平凸レンズでコリメートし、これを焦点距離 25.4 mm の平凸レンズ（高 NA レンズ）にて集光照射する。1 対 2 の拡大率で組まれた光学系により集光スポット径を $100 \mu\text{m}$ とした。当レーザユニットはシステム化されていないため、水冷ヒートシンク的设计、電源整備を行い、これらを光源システムとして構築した（図 2）。ワーク（薄板透明樹脂）は専用の固定治具を作製し 2 枚のワーク同士を押さえつけるのみの機構とした（図 3）。報告されている多くの樹脂溶着実験事例では押さえガラス（石英ガラス等）を透過させた機構が用いられるが、透明樹脂への吸収率のある光源利用と今後の立体溶着への応用性を踏まえこれを用いない方針とした。レーザ照射軸は固定とし、ワークを XYZ 自動ステージにて駆動させる。

本実験で用いたワークは PET（Polyethylene terephthalate）、PMMA（Polymethyl methacrylate）、PC（Polycarbonate）の 3 種類を用いた。これらの光吸収特性の測定例を図 4 に示す。本測定は日立ハイテックスサイエンス社製 UH4150 形分光光度計を用いた。波長 1470 nm において透過率は PC、PET それぞれ 70 %、74 % であり表面反射等を考慮しても 10 % 以上の吸収率があることを確認した。ちなみに、本研究で比較対象としている近赤外（1070 nm）、中赤外（1940 nm）それぞれにおける PC、PET の透過率は 90 %・90 %、17.7 %・45.7 % である。この結果より PET を事例にすると波長 1470 nm の光源は近赤外（1070 nm）よりも 2.6 倍程度吸収率がよく、中赤外（1940 nm）よりも約半分程度の吸収率となっている。

最初に PET（上板 12 mm、下板 8 mm）を用いた重ね合わせ溶着実験について図 5 に示す。レーザ出力 15 W、コリメートレンズ（焦点距離 50 mm）、集光レンズ（25.4 mm）を用い、ビームスポット径 $\phi 102 \mu\text{m}$ にて直線上に集光走査し、焦点位置に対する走査速度条件とその際の溶着の可否のみにて評価した。

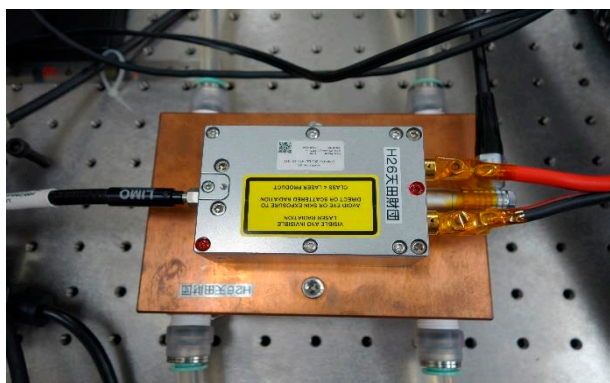


図 2 ファイバカップリング型レーザダイオード

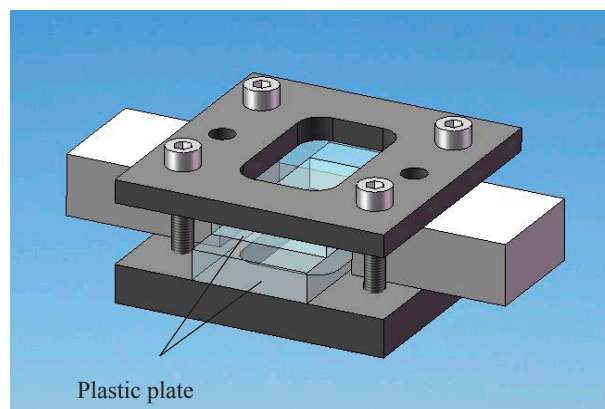


図 3 薄板透明樹脂溶着固定治具

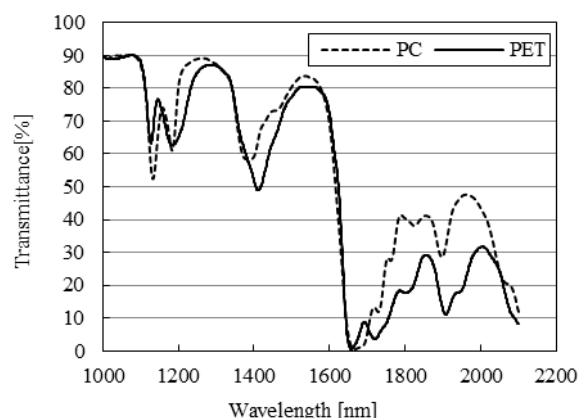


図 4 使用した PC、PET との測定した吸収率

焦点位置の原点を 2 枚のワークの合せ面位置として、レーザ伝搬軸方向で位置を 1 mm 単位で設定し、集光位置の最適箇所を探った。照射レーザのレイリー長は $109 \mu\text{m}$ であり焦点位置の稼動範囲はこれに対して約 1 桁大きい条件設定となっている。本実験結果より、溶着が可能となる焦点位置の領域が数 mm であり、レイリー長の 10-30 倍の範囲にあることが示された。走査速度のパラメータが不十分ではあるが 3-4 mm/sec (0.18-0.24 m/min) の走査範囲で溶着できること、及び走査エネルギー密度 38 J/mm^2 で溶着できることが示された。

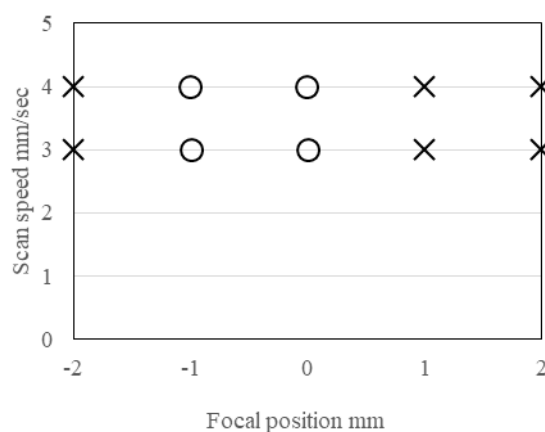


図 5 薄板透明樹脂溶着試験（PET）



図6 集光位置（原点），走査速度 3 mm/sec
における薄板溶着表面（PET）

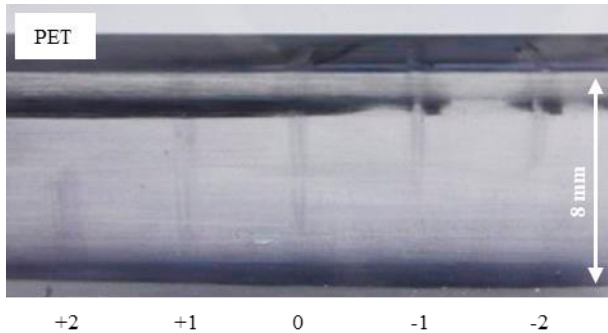


図7 側面熔融外観（PET），走査速度 3 mm/sec

加えて図5の集光位置（原点），走査速度 3 mm/sec における表面の状態を示す写真を図6に，同走査速度における側面からみた熔融状態の外観を図7に示す．前者からは美観，透明度が維持されていることが分かる．後者においては，溶着している条件である原点 0 mm とインフォーカス（マイナス方向）-1 mm では，上の合せ面より熔融跡が延びており，原点における方が長いことが示されている．一方，溶着していない条件ではあるが，アウトフォーカス（プラス方向）の +2 mm においては下側のワークに焦点が原点より移行している条件であり，下側のワークの中央より裏面に向けて溶着痕がみられる．となりの +1 mm の条件と比較しても違いがみられる．これについては，空気よりも高い屈折率を有するワーク内にてその作用を受けたためと考えられる．

本実験に関して，より最適な条件を評価するために引張試験の併用にて，溶着強度を把握する試験を行った．但し，ここでは引張強度を高めるために走査速度を再度検証した（図8）．これにより，溶着できる焦点位置領域が改めて数 mm の領域にあることが示された．一方で先の試験よりも走査速度を遅くした条件（2 mm/sec）においては，1,000[N]を超える引張破断強度になることが示された．

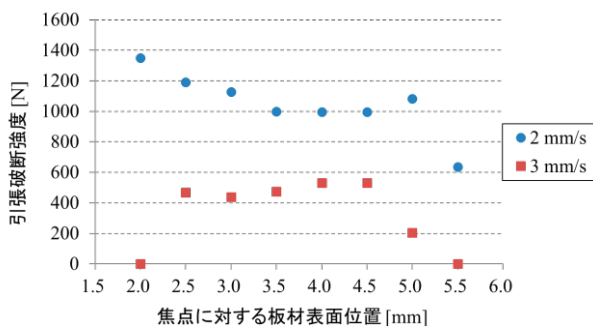


図8 集光位置に対する引張強度試験（PET）

続いて PMMA（上板 3 mm，下板 8 mm）を用いた実験について図9に示す．レーザ条件は先の PET を用いた条件と同条件である．本実験では，先の PET に比較して走査速度の条件を遅くすることにより溶着条件を見つけることができた．また，本条件においても溶着に関する集光位置の境界がレイリー長の 10-30 倍の範囲にあることが示された．加えて走査速度のパラメータ 2 mm/sec (0.12 m/min) の走査範囲で溶着できること，及び走査エネルギー密度 75 J/mm² で溶着できることが示された．本実験に関しても，より最適な条件を評価するために引張試験の併用にて，溶着強度を把握する試験を行った．但し，ここでは引張強度を高めるために走査速度を検証し走査速度 1 mm/sec の条件及び高い集光点位置精度の条件にて評価を行った（図10）．これにより，溶着できる焦点位置領域が改めて数 mm の領域にあることと，溶着できた領域においては 1,000[N]を超える引張破断強度であることが示された．

続いて PC（上板 3 mm，下板 8 mm）を用いた実験も行った．しかしながら，PMMA の実験の様に走査速度を遅くした試験等を試みるも溶着条件を見つけ出すことができなかった．速度を遅くした条件では上板が溶解し炭化するなどの現象がみられた．但し，市販されているレーザ溶着機（波長 1070 nm，出力 45 W 以上）等においては PC 同士の溶着について実証されているため，より高出力且つ高速度での試験条件で行うことにより条件が見つけられると考えられる．

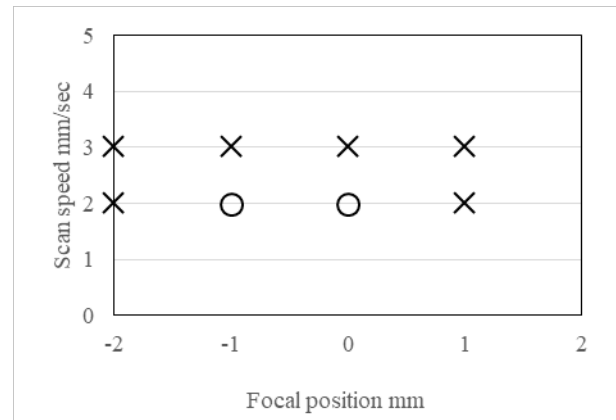


図9 薄板透明樹脂溶着試験（PMMA）

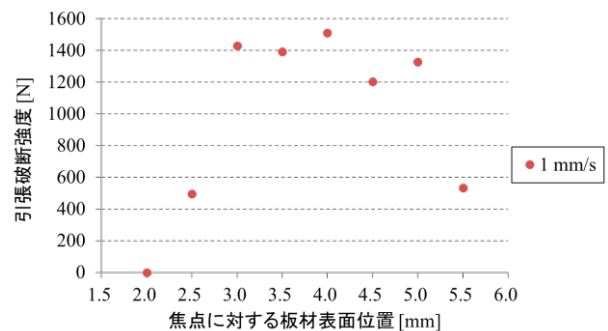


図10 集光位置に対する引張強度試験（PMMA）

2.1.2 薄板溶着実験（集光径拡大照射条件）

前節の薄板溶着実験で用いたレーザ溶着の光学系において、コリメートと集光を同じ焦点距離 25.4 mm の平凸レンズを用いることにより 1 対 1 の光学系を構築し、集光スポット径を 200 μm に拡大して同様の実験を行った。

この目的は、スポット径を 100 μm から 200 μm へと面積を広げることによる溶着効果確認である。前節と同様にを行った PET（上板 2 mm、下板 8 mm）を用いた実験、PMMA（上板 3 mm、下板 8 mm）を用いた実験をそれぞれ、図 11、12 に示す。溶着の可否のみの評価では、前節と同様の結果となり、各集光位置に対する走査速度による溶着状況は同じであった。但し、溶着可否に関わる走査エネルギー密度の閾値の推定値を PET、PMMA それぞれ半分の値まで下げることができた。

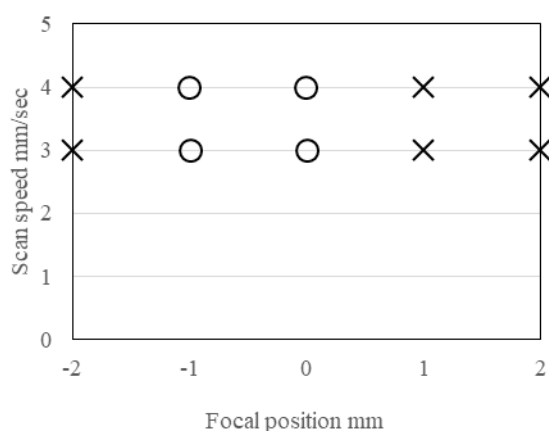


図 11 薄板溶着試験（PET，スポット径 $\phi 200 \mu\text{m}$ ）

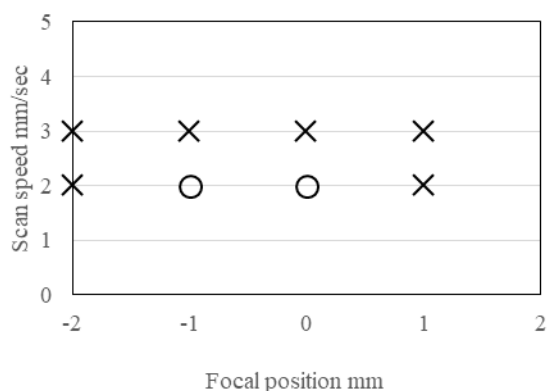


図 12 薄板溶着試験（PMMA，スポット径 $\phi 200 \mu\text{m}$ ）

2.2 円筒溶着実験の概要

本実験における当初の研究目的は立体的な立体形状樹脂の溶着であり、円筒形状及び段差のある樹脂サンプルを用意し、プログラム制御によるレーザ出力設定を行い、これを実証することであった。しかしながら、後者については、焦点可変レンズのプログラム制御に対応することができておらず、前者のみの結果報告に留める。

本実験で用いたレーザ溶着の光学系を図 13 に示す。前節と同様の半導体レーザを使用し、集光スポット径を 200 μm とした。各種円筒形状の透明樹脂の筒を回転自動ステージにて定量的な速度で駆動させた。

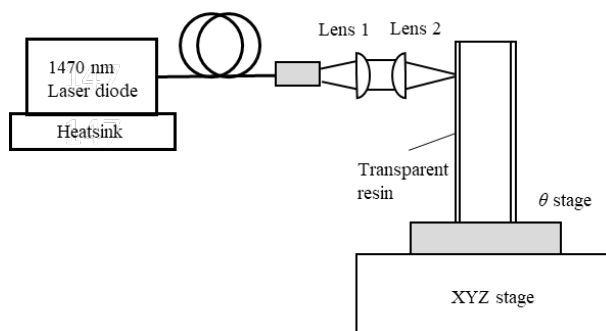


図 13 円筒樹脂溶着実験光学系

ワークは 2 種類用いた。最初の実験では PET 円筒ケース（蓋付き）：外径 $\phi 60 \text{ mm}$ 、板厚 1 mm を使い、その合わせ面に焦点位置を設定し、ワークを 1.24 rpm で回転させ実行的に加工速度 3.9 mm/s で溶着することができた（図 14）。続いて PMMA 円筒：外径 $\phi 50 \text{ mm}$ ／内径 $\phi 40 \text{ mm}$ （板厚 5 mm）と外径 $\phi 40 \text{ mm}$ ／内径 $\phi 34 \text{ mm}$ （板厚 3 mm）を図 15 の様に片方の中に入れてその合わせ面に焦点を設定し、等速度でワークを回転させることで外周を集光走査による加工を行った。レーザ条件も前節と同じく出力 15 W にて、ワークを 1 rpm で回転させ実行的に加工速度 2.1 mm/s で溶着することができた。本実験の課題として前節の一部の試験と同様に溶着強度を評価できていないため、これを設定した上での照射上限の最適化を行う必要がある。また、レーザ入射表面における変色や、治具等で押さえしていないために溶融線が盛り上がるが発生しておりこれらに対する対策も必要としている。

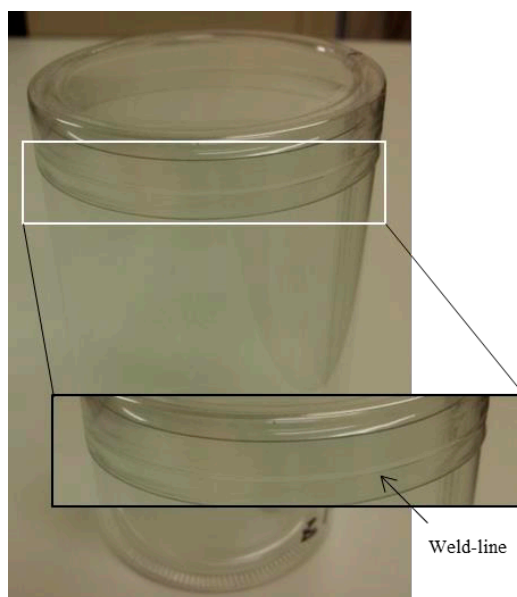


図 14 円筒樹脂溶着実験（PET）

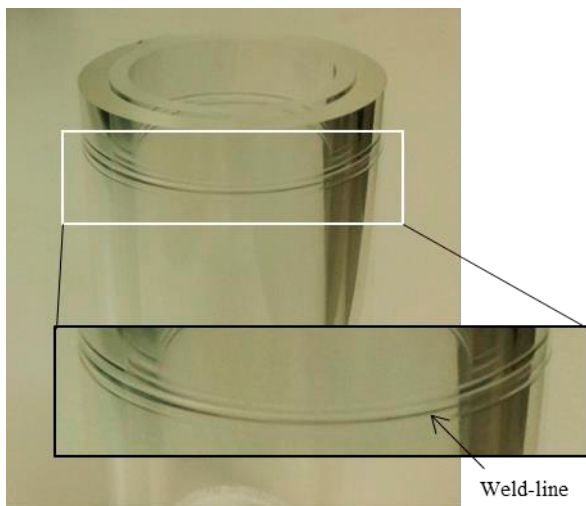


図 15 円筒樹脂溶着実験 (PMMA)

3. まとめ

本研究によって我々が着目する $1\text{--}2\ \mu\text{m}$ の波長領域の中間にある波長 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯域 ($1470\ \text{nm}$) の半導体レーザを用いた実証研究を進めることができた。開始当時にはユニット化されていない当該波長領域の光源について冷却系、電源の構築を行い所望の研究を進めるための光源が整備できた。

続いて常温の透明樹脂において吸収率が高い領域にある当該半導体レーザを用いることによる透明樹脂の薄板によるレーザ溶着 (PET, PMMA) を実証し、レーザ溶着加工条件 (集光位置精度条件、ピークパワー密度等の条件) を調査できた。

更に、高 NA レンズによるパワー密度勾配の差を利用した、高さ方向の選択的溶着加工のための基礎実験を行った。これらの結果によりレーザによる立体形状の溶着加工を想定した円筒透明樹脂の溶着を実証することができた。

今後においても本研究を継続的にを行い、我々が着目する波長領域におけるレーザ利用の有効性の比較実証 (各帯域の光源による溶着と引張り試験による評価)、立体形状に追随するレーザ 3D 溶着走査機構の確立、及び今回深くふれなかったが入射表面の変色・膨れ防止に関するレーザ制御方法の確立を行っていく予定である。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団平成 26 年度一般研究開発助成 (AF-2014222) を受けて進められました。ここに厚く感謝申し上げます。また、本研究テーマは共同研究者である光産業創成大学院大学 (現・(株)レイコネクト) の真鍋武士氏、及び静岡県工業技術研究所浜松工業技術支援センター (当時) の山下氏の協力を得て行われました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 葛良 忠彦：プラスチック包装・容器の歴史と機能，廃棄物資源循環学会誌, 273-280 (2010), 21, 5.
- 2) 阿部 信行：高出力半導体レーザによる材料加工の現状，レーザ研究, 318-325 (2003), 31, 5.
- 3) 一橋大学イノベーション研究センター編，米倉誠一郎，大山健太郎：一橋ビジネスレビュー, 134-143 (2013), 61, 2, 東洋経済新報社
- 4) 佐藤俊二：樹脂材料のレーザ溶着ーレーザ溶着用樹脂に求められる特性と溶着技術ー，レーザ協会誌, 3-9 (2015), 44, 2.
- 5) 松本聡：レーザ樹脂溶着技術の最近の進歩，プラスチックエージ, 45-50 (2017), 3.
- 6) 山本聡：レーザ樹脂溶着と赤外線レーザ透過・吸収色素技術について，レーザ協会誌, 11-16 (2015), 44, 2.
- 7) 水戸岡豊：インサート材を用いたプラスチックと異種材料のレーザ接合，レーザ協会誌, 17-24 (2015), 44, 2.
- 8) 山下清光，岩崎清斗： $2\ \mu\text{m}$ ファイバレーザによる透明樹脂の溶着，第 78 回レーザ加工学会講演会 (2013), Dec, 13.
- 9) 浅井和弘：アイ・セイフ固体レーザ，応用物理, 478-482 (1994).