

レーザー透明樹脂溶着の印加圧力とビームプロファイル制御による 品質・強度向上研究

光産業創成大学院大学 光産業創成研究科 光産業創成専攻
准教授 沖原 伸一郎

(2020 年度 一般研究開発助成 AF-2020216-B2)

キーワード：中赤外線レーザー，レーザー樹脂溶着，透明樹脂，印加圧力，プロファイル制御

1. 研究の目的と背景

レーザー波長 1.5~3 μm 帯域における中赤外線領域レーザー光源の高出力化・低価格化が進んでいる。これにより従来困難であった透明樹脂等の溶着が容易となり、従来から接着剤や超音波などを用いた接着加工からの代替が進み始めている^{1~5)}。本件研究自体は 20 年以上前から樹脂加工を取り扱う企業や研究機関で取り込まれ、これらに関する特許等の有効期限が過ぎ、装置化等の事業化が進め易い状況となっている^{6,7)}。筆者らのコミュニティでも 15 年以上前からこれに着目して、研究や知財申請等を行ってきた。更に当財団の助成を受けながら技術開発を行い、立体形状の樹脂溶着を食品、薬品、化粧品、医療等で用いられる容器等に応用する研究を継続している。また、中赤外線レーザーを用いた医療応用研究も別事業にて進めている⁸⁾。

一方、これまでの透明樹脂同士のレーザー接着加工については、近赤外領域に設定された吸収材の塗布⁹⁾やエラストマーと呼ばれる材料を中間に存在させることによる研究が進められてきた¹⁰⁾。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以外の因子の存在を無くする条件における研究としては、次の中赤外線領域（波長 2-3 μm レーザ）の利用の報告がなされている^{11,12)}。中赤外線領域のレーザー出力向上に伴い、樹脂溶着の件数が国内外で増加している。

鉄系金属のレーザー溶接においてビームプロファイルを制御することにより、スパッタフリーの溶接やギャップ対応等による品質向上等の成果が多数報告されている。従来であれば、中赤外線領域のレーザー装置は出力が低く、このような使い方ができなかったが近年の高出力により可能となっている。

現行の研究課題は、透明樹脂内部を透過させながらの溶着となるため、レーザーの単一レンズによる集光照射だけでは品質を維持しつつ強度を確保できないことが挙げられる。特に筆者らが着目している円筒容器等の立体形状の樹脂溶着を想定した場合、従来のガラス等による表面押さえ治具の無い手法にて実現する必要があり、その条件において表面の荒れや膨れの問題が残っている。加えて筆者らにおいて、立体形状を想定した接着部の印加圧力に関する検証が量的に行えていない状況があった。

以上の様な背景を踏まえ、本研究の目的を設定した。

1) 3 種類の近赤外・中赤外線領域のレーザー波長を用いて、

印加圧力特性と溶着特性（品質・強度）について因果関係を調査する。

2) レーザによる透明樹脂溶着の引張り強度と表面品質向上のため、中赤外線レーザービームのプロファイル形状制御する光学系を構築する。

3) 構築された光学系によるレーザービームプロファイル形状における溶着特性（強度・品質）を評価し、特性向上に適したビーム形状を検討する。

2. 実験方法

2・1 実験概要

2・1・1 溶着検証用光源について

以前の当該研究報告においては、透明樹脂溶着検証用には表面荒れを抑制できると考えられた波長 1450 nm の半導体レーザーを利用した。波長 2 μm 近辺の中赤外領域のレーザーは吸収率が 30-60% と高いため、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ー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と考えられた。しかし、既存の中出力 (120 W) の装置を用いたため低出力での評価検証ができなかったことや、高 NA 集光による 1450 nm の光源利用においても図 1 の試験の様に溶着線の膨れを低減できていなかった。

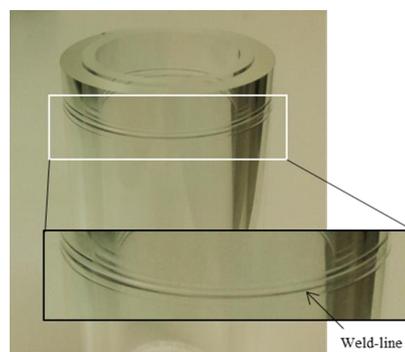


図 1 円筒樹脂の溶着線の膨れ (PMMA, 1450 nm)

3 種類の近赤外・中赤外線領域のレーザー波長光源 (1450, 1940, 1070 nm) を整備し、集光点における照射領域を揃え比較した。以前の報告では高 NA レンズを用いることに

よる表面吸収の影響を低減させる条件を設定したが、実利用上の作動距離が短く、取り回しに影響があったため、利用条件に適した作動距離を確保するために、その距離を30 mm以上確保し、試験で用いるサンプル厚みを2 mmとした。

2・1・2 レーザビーム形状制御光学系について

レーザビームプロファイル形状を制御する光学系について当初以下の3つのパターンを想定していた(図2)。

- (a) 中心部の尖頭値を高くし、周辺部の尖頭値を抑えた円形凸型形状
- (b) 走査方向に対して、2つの円形ビームスポットをタンデムにした形状(先行するレーザの尖頭値を高くし、後部の尖頭値を抑えた形状)
- (c) 会津磐梯山形状(中心部の尖塔値を周辺部に対して低めにした円形凹型形状)

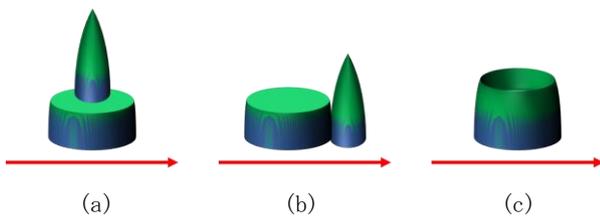


図2 レーザビーム形状制御パターン例

しかしながら、試験中心部の尖塔値が高い(a),(b)については、予備試験において中心部の膨れの問題が生じたため、(c)会津磐梯山形状にて検証を進めた。金属溶接におけるビームパターン制御の要諦は急峻な吸収過程を回避するため、照射領域を広くすること、適切な照射強度を保つために照射パワーを大きくすることにある。このため、ビームプロファイル制御については、各波長用の反射防止コーティングがなされたアキシコンレンズと単レンズの組み合わせによる光学系を構築(図3)し、図2(a)と(c)の組み合わせの様なパターンとした(図4)。外形リングは直径2.25 mm、太さ500 μm ($1/e^2$)、中心部 ϕ 500 μm ($1/e^2$)とした。

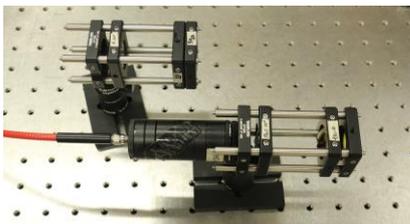


図3 溶着線の膨れ防止抑制光学系

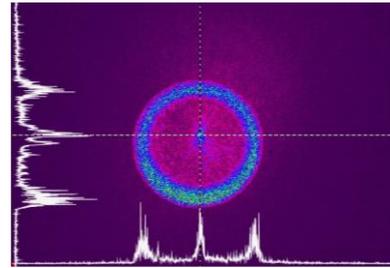


図4 疑似リングビーム形状

2・1・3 検証サンプル・治具について

厚さ1~4 mmのPET (Polyethylene terephthalate : ペット), PMMA (Polymethyl methacrylate : アクリル), PC (Polycarbonate : ポリカーボネート), ABSの4種類の吸収率について表面反射等を計測評価した。今回種々の評価に用いる厚さを2 mmに固定した。吸収率の評価結果を図5に示す。本測定は日立ハイテックサイエンス社製UH4150 形分光光度計を用いた。

本研究においては応用性の高いPETを基準に用いている。仕様したPET 2 mmの各波長1070, 1470, 1940 nmにおける吸収率は9%, 15%, 39%である。また、サンプルサイズは30×60 mmとした。図6のサンプル固定用治具にて、4箇所ボルト固定についてトルクドライバを用いて印加圧力を変化させながら固定を行った。トルク範囲は0.3~1.2 N・m。2枚のワーク同士を押さえつけるのみの機構としている。ガラス(合成石英)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ている。

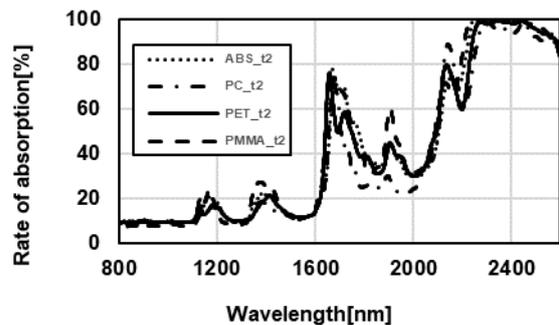


図5 厚み2 mmの4種類の樹脂サンプルの吸収率

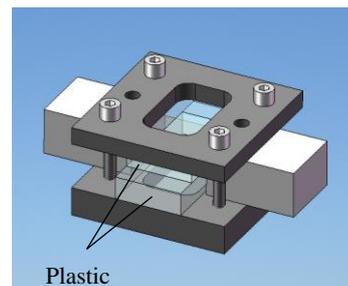


図6 薄板透明樹脂溶着固定治具

2・2 薄板溶着実験の概要

2・2・1 薄板溶着実験（印加圧力・品質）

薄板溶着実験によって印加圧力特性と溶着特性（品質・強度）を調査した。レーザ溶着の光学系の概要を図7に示す。光源として近赤外線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 nm, ファイバコア径200 μm）、近赤外線シングルモードファイバレーザ（SPI社製 最大出力200 W 波長1070 nm）、中赤外線ファイバカップリング型レーザダイオード（Coherent社製 最大出力12 W 波長1940 nm, ファイバコア径400 μm）を用いたファイバー端から出射されるビームを平凸レンズでコリメートし、平凸レンズにて集光する。各光源の集光スポット径をφ0.25 mmとした。

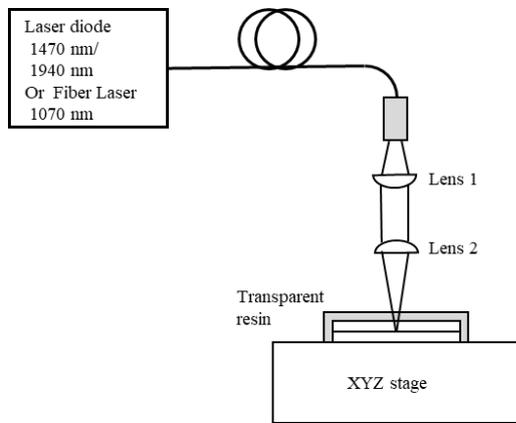


図7 薄板透明樹脂溶着実験光学系

1470 nm, 1940 nm レーザユニットはシステム化されていないため、水冷/空冷ヒートシンク的设计、冷却器、電源整備を行い機構として整えた。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た。

最初に適正な印加圧力を設定するため、サンプルを押える板のネジ締め圧力をパラメータとし基準となる条件としてPET（上板¹2 mm, 下板³3 mm）を用いた溶着実験を行った。レーザは1470 nm, レーザ出力最大15 Wを用い、2枚のサンプルの界面に焦点を設定し、ビームスポット径φ250 μmにて直線上(x軸方向)に集光走査した。以前の当該研究報告より1470 nmのレーザを用いた同様の試験において、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/mm²で溶着できることが示された。このことを踏まえ、スポット径を大きくしているため、走査速度を3 mm/secに設定した。

溶着したサンプルは引っ張り強度試験機[株式会社イマダ製, 最大500 N, 引っ張り速度10 mm/sec]にて評価した。

最大出力15 W, 3 mm/secの条件においては、引っ張り強度が評価閾値を超えたため、出力を低下させた条件(10 W)にて行った。結果を図8に示す。押さえネジトルクの最小値0.3 N・mである。この結果より、印加圧力を高め

ても引っ張り強度が数10%以上の向上に寄与しないことが明らかとなった。このため、低トルク且つ最大値に近い0.35 N・mにて以後の試験は実施することとした。また、溶着品質についても、表面に僅かな膨れがあるのみであり裏面は無し状況であった(トルクを変えても品質に影響しないことが示された)。

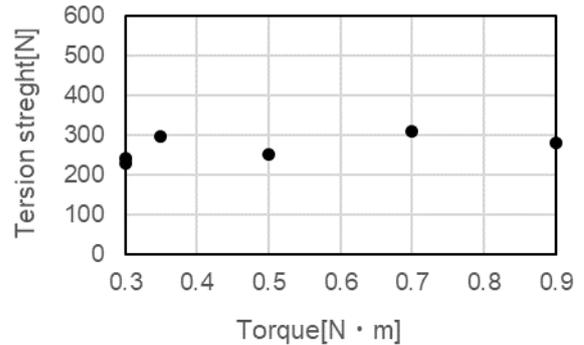


図8 印加圧力に対する引っ張り強度
1470 nm, 10 W, 3 mm/sec

2・2・2 薄板溶着実験（材料依存性）

この実験では、図7の光学系にて、レーザ波長1470 nmの光源を用いて、PET, PC, PMMAの溶着試験・引っ張り強度試験評価を行った。サンプルの厚みも（上板¹2 mm, 下板³3 mm）とした。これは材料依存性を確認する目的であるため溶着実績のある光源(1470 nm)にて行った（図9）。当波長に対する吸収率は図5より10%以上の差は無いが、入射エネルギー密度に対する引っ張り強度の差が示された。溶着品質についても、走査速度3 mm/secで溶着が行っているPETの条件が最も良く、これについて1.2-1.5 mm/secのPMMA, 1.2-1.3 mm/secのPCとなる。この結果より、条件検証や実用利用の視点からPETがサンプル材料として扱い易いといえる。

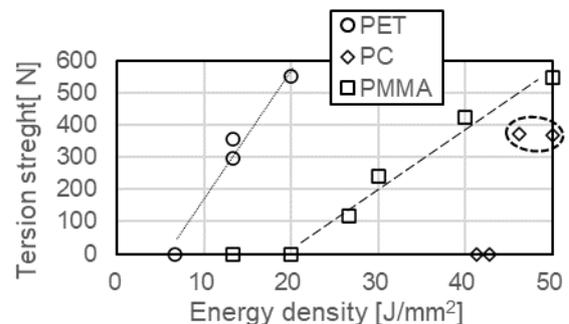


図9 入射エネルギー密度に対する各材料における^{1,2,3}PET, PC, PMMA)引っ張り強度(1470 nm)

2・2・3 薄板溶着実験（波長依存性）

これまで近赤外-中赤外線領域の波長における透明樹脂溶着の比較試験が行われていなかった。図7の光学系に

て、界面におけるスポット径を $\phi 250 \mu\text{m}$ に揃え、レーザ波長 1470, 1940, 1070 nm の光源を用いて、PET、溶着試験・引っ張り強度試験評価を行った。サンプルも PET (上板 $^{\circ}2 \text{ mm}$, 下板 $^{\circ}3 \text{ mm}$)とした (図 1 0)。

図 5 より各波長に対する吸収特性とこれまで各機関等で行われた結果より予測されるものであるが、吸収率の低い近赤外 (1070 nm) では、50-70 W の入射において溶着が行えているものの品質の面では、荒れが酷く利用に適さない。これよりも大きな出力を入射した場合においては発火等が生じている。一方で、1470 nm と 1940 nm の比較においては、最大出力 15 W の 1470 nm にて、500 N オーバー (測定限界) の引っ張り強度となるのに対して、1940 nm においては、5 W にて 500 N オーバーとなった。溶着品質についてはいずれも表面のみ裏面無しの膨れとなり同様であった。この結果より、ビームプロファイル形状制御による試験については出力に余裕のある 1940 nm の光源を用いて行うこととした。

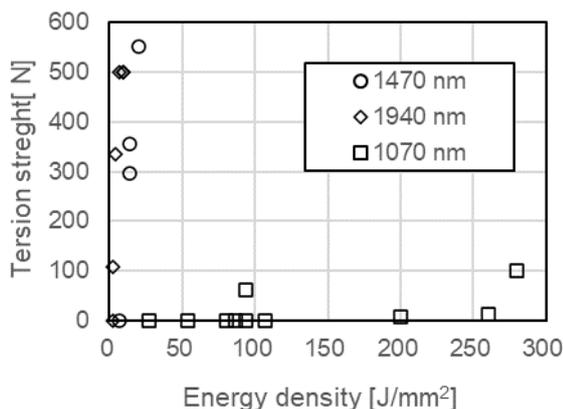


図 1 0 入射エネルギー密度に対する各波長 1470, 1940, 1070 nm におけるサンプル (PET) 引っ張り強度

2・2・4 照射ビーム形状制御による膨れ抑制検証

これまでの印加圧力検証, 材料依存性, 波長依存性等の結果より, 膨れ抑制のための条件検証試験を行うために図 7 の光学系において波長 1940 nm, 走査速度 3 mm/sec, サンプルを PET (上板 $^{\circ}2 \text{ mm}$, 下板 $^{\circ}3 \text{ mm}$) に設定し, 2・1・2 節で検討し選択した疑似リングビームを, アキシコンレンズ等を用いた光学系を構築して試験を行った。これにより, 高い引っ張り強度の溶着ができることの実証 (図 1 1) とともに, プロファイル制御をすることにより, 膨れを半減させることと溶着品質の大幅な向上をすることができた (図 1 2)。また, 照射強度を抑えた条件において, 溶着強度を維持しつつ膨れをほぼ無くすることができた。この結果については, ビーム径を広げ, 入射出力を大きくしただけという捉え方もできるが, 溶着強度の確保・溶着品質の確保・中心部の膨れの抑制・シンプルなビームプロフ

ァイルを制御するヘッドの実現というバランス条件を実証したという視点では意義があると考えられる。このビームプロファイル形状制御については, アキシコンレンズを用いているが任意の形状に調整することが困難である。このため最適なビーム形状については今後も調査を行っていく予定である。また, より最適な条件を検証する上においては, 2次元空間プロファイル制御や Z 軸方向 (深さ方向) のプロファイル制御が可能な空間光変調器を用いた制御・試験が有効である。

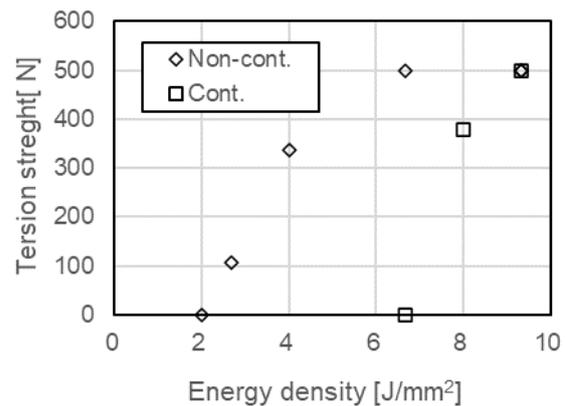
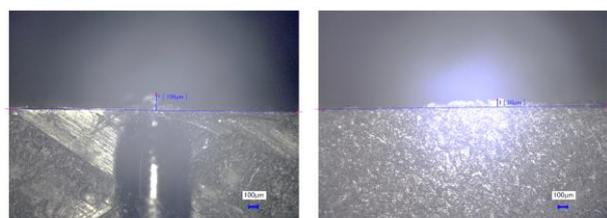


図 1 1 ビームプロファイル制御による入射エネルギー密度に対する引っ張り強度 (7 W, 3 mm/sec, $^{\circ}2$, PET, 1940 nm)



(a) 表面形状



プロファイル制御無し 膨れ 196 μm 、溶着荒れ有り
プロファイル制御有り 膨れ 90 μm 、溶着荒れ無し

(b) 断面形状

図 1 2 ビームプロファイル制御による膨れ比較 (7 W, 3 mm/sec, $^{\circ}2$, PET, 1940 nm)

3. まとめ

本研究によって我々が着目する 1-2 μm の波長領域にある 3 種類の近赤外・中赤外線領域のレーザー波長 (1470, 1970, 1070 nm) を用いて、印加圧力特性と溶着特性 (品質・強度) について因果関係を調査するための実証研究を進めることができた。

従来からの課題である表面抑えフリー照射における膨れ問題を解決すべくレーザービームプロファイル形状制御の検討を行い、これに基づいたビーム整形のための光学系を構築し、これを用いて膨れの大幅な改善とともに溶着特性 (強度・品質) を評価した。ここでは、適正な試験を実施するために、印加圧力、サンプル選択、波長検討等の基礎データ取得・実験を行った。

今後においても本研究を継続的に行い、我々が着目する近赤外・中赤外・赤外線波長領域 (1-10 μm) の比較実証とともに、空間光変調器等を活用した課題解決のためのビームプロファイル制御とその最適化を行いたい。結果的に 1470 nm よりも 1940 nm を用いた試験になったが、前者において現在は更に高出力の装置も存在しており、実用化に向けた高速・高品質 (膨れフリー)・高強度の条件を検証していきたい。また、開始当時においてユニット化されていない当該波長領域の光源 (1940 nm) について冷却系、電源の構築を行い所望の研究を実施するための光源が整備できた。またこの研究を開始することにより、高出力の 2 μm 、他 3, 6, 8 μm といったより中赤外線・赤外線が利用できる環境を実利用とともに、確保することができた。

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), 及び 2020 年度同 (AF-2020216-B2) を受けて進めることができました。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元・光産業創成大学院大学博士後期課程 (現・㈱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ーによる材料加工の現状, レーザー研究, 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, 東洋経済新報社, 134-143 (2013), 61, 2.
- 4) 佐藤俊二: 樹脂材料のレーザー溶着ーレーザー溶着用樹脂に求められる特性と溶着技術ー, レーザー協会誌, (2015), 44, 2.
- 5) 松本聡: レーザー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) Fraunhofer ILT : Research for a Sustainable Future, Annual Report (2022).
- 7) 嵩西智: 2 μm レーザを用いた加工事例, 第 116 回 中部レーザー応用技術研究会 (2023), July, 13.
- 8) Shun Sasaki: Principles and development of collagen-mediated tissue fusion induced by laser irradiation, SCIENTIFIC REPORTS, 9383-9383 (2019), 9 (1).
- 9) 山本聡: レーザー樹脂溶着と赤外線レーザー透過・吸収色素技術について, レーザー協会誌, 11-16 (2015), 44, 2.
- 10) 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ー接合, レーザー協会誌, 17-24 (2015), 44, 2.
- 11) 山下清光, 岩崎清斗: 2 μm 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.
- 12) 浅井和弘: アイ・セイフ固体レーザー, 応用物理, 478-482 (1994).