

レーザー強度分布平坦化による樹脂溶着特性の改善

佐藤 公俊*

Improvement of Characteristics of Laser Plastic Welding by Laser Beam Homogenizing

Kimitoshi Sato*

Abstract: Author have applied the surface-cooling laser welding method to avoid the thermal damage generated on the surface by irradiation of laser for welding of thermoplastics. There is a problem of bubbling within a laser-welded plastic substrate due to concentration of heat generation by irradiating a Gaussian distribution laser beam. To attain excellent quality on welding of plastics, “top-hat beam” by homogenizing the distribution of laser intensity was applied in this study. It has achieved excellent weld which has no bubbling both inside and outside of piled plastic sheets even for the material of high laser absorptivity.

Key words: Infrared-transparent heat sink Surface-cooling Laser Welding, Infrared-transparent Heat Sink, Laser Beam Homogenizing, Top-hat Beam, Fluor Plastic, Polyamide

1. 緒言

複数の樹脂部品を一体化させる技術は、接合面付近を溶融して一体化する熱溶着に限っても、熱板・熱風接合や、振動溶着など多く存在する。これらは、概して1mmオーダーの局所を狙って溶着する技術ではないため、小型・精密な部品に対しては適用に難があり、また、過熱によるガス化の影響がある部材には、とりわけ温度制御が必要であるが、既存の技術はその対応に劣る。例えば、半導体製造装置部品や医療機器などで使用されているオレフィン系樹脂やフッ素系樹脂は、接着剤で付き難く溶着困難な材料といわれている。これまでもポリプロピレン等のオレフィン樹脂についての溶着特性の報告事例¹⁾は有るがフッ素樹脂の取扱いは数少ない。これに対し、精密な加工ができるものと期待される、レーザーを用いる溶着方法が注目されている。ただし、高エネルギー密度のレーザー（例えばCO₂レーザー（発振波長：10.6 μm）のような波長の長い赤外線）では、照射面の部材の温度上昇が急激で、瞬間的に溶融→ガス化に至って損傷が激しい。

著者らは、これまでに、レーザー光を透過する型の熱伝導により溶着部材で発生する余分な熱を放散する性質を利用した、「表面冷却・内部溶融によるレーザー樹脂溶着

技術」を開発している^{2), 3)}。これは、図1のように、溶着したい樹脂部材のレーザー照射面に設置した赤外線透過放熱体（ヒートシンク）が、樹脂部材にレーザー光を内部に導きつつ、樹脂部材で発生した余分な熱を熱伝導で放散し、部材表面温度の上昇を防ぎつつ内部溶着を実現し、表面損傷の無い樹脂溶着を実現するものである。熱可塑性樹脂は一般的に赤外線を吸収し発熱するという原理上、本レーザー樹脂溶着技術は、全ての熱可塑性樹脂に適用可能である。

ここで、一般的な加工用途のレーザーについて、ビーム（概ね円形）内のエネルギー強度は、中心部から外周に指数関数的に下がる「ガウシアン分布」を示す。この特性のため、樹脂部材でのビーム中心部温度が過度に上昇し、溶融部内で局所に気泡が発生するなど強度低下の要因となる課題が存在する。発泡を防いで十分な溶融を満たす適切な溶着条件範囲が狭くなり、十分な溶融幅が確

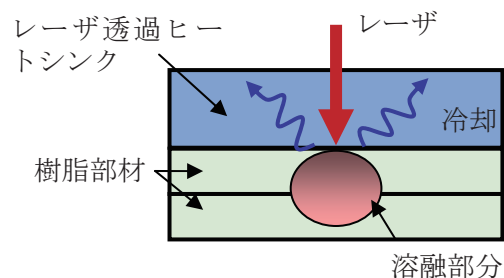


図1 表面冷却・内部溶融によるレーザー樹脂溶着技術の概念図

* 国士舘大学 理工学部 機械工学系, 准教授
e-mail: kisatoh@kokushikan.ac.jp

保できなかつたり、溶着可能な部材肉厚が制限されたりする問題があった。これに対し、レーザー発振器から照射されるレーザーの光軸上に適切な光学機器を配置して、レーザー照射スポット内の強度分布を平坦化（レーザー強度分布の形状から「トップハット」と称する）することで、照射するレーザーのスポット内のエネルギー強度分布を平坦化することが可能である⁴⁾。トップハット化により樹脂の温度上昇の偏りを防ぎ部材内の発泡を抑えて十分な溶融幅を確保する溶着条件を容易に得ること、また、それまで溶着が不可能であった樹脂も溶着可能となることが確認できたので報告する。

2. 方法

2.1 トップハットレーザーの為の光学系

トップハット化の手法は、レーザー波長および均一化する範囲などにより異なるが、基本的にはマイクロレンズアレイ拡散板などでビームを拡散し平行光にしてから集光レンズで必要な範囲に絞る事が一般的である⁵⁾。今回使用するCO₂レーザーに合わせて上記に倣い単純なガリレオ光学系で拡散し平行光を得る方式を用いた。その構成を図2に示す。まず、スポット内の強度がガウシアン分布となる基本的なモード（TEM₀₀）のCO₂レーザーの強度分布を図3に示す。図のように、スポット径の半分以内の領域に約70%のエネルギーが集約されている。このモードのレーザーを実際にアクリル樹脂に照射したときの溶融痕を図4に示すが、円錐状に穴が掘られており、ビ-

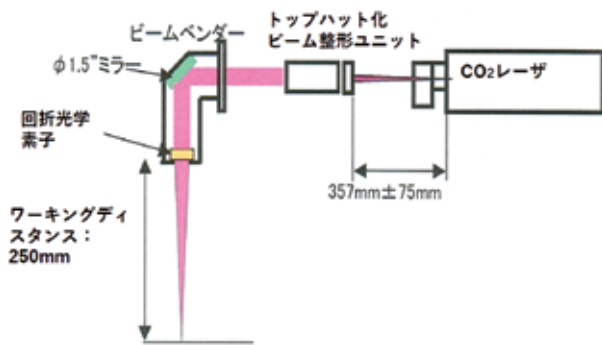


図2 トップハットビーム用光学系

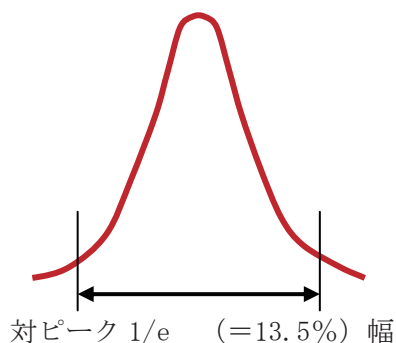


図3 ガウシアン分布のレーザー強度模式図

ム中心部の温度上昇が著しいことが分かる。

一方、トップハット化したビームを同様にアクリル材に照射した結果を図5に示すが、前述のガウシアン分布ビームの場合とは違い、台形状に穴が掘られている様子が分かる。これにより目的の樹脂溶融においても発泡抑制効果が期待できる。

2.2 レーザ樹脂溶着の実験装置および方法

今回、実験対象とした材料は、フッ素樹脂パーフルオロアルコキシアリカン（以下PFAと略記、融点：310℃）のシート（肉厚0.05mm）およびポリアミド6（以下PA6と略記、融点：225℃）のシート（肉厚0.25mm）である。使用したレーザーは、出力40WのCO₂レーザー溶着システム（図6）である（前述のトップハット化光学系を組込）。レーザー照射時には樹脂部材上面に冷却保持用のレーザー透過ヒートシンクとして単結晶シリコン板を



図4 ガウシアン分布モードレーザーを照射したアクリル材の加工痕

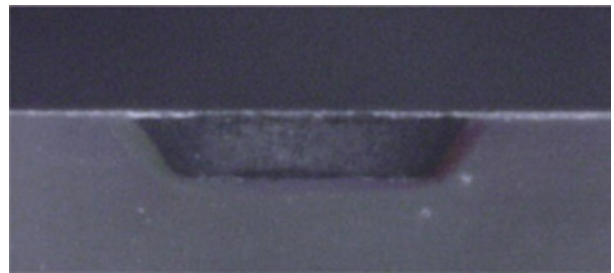


図5 トップハット分布レーザーを照射したアクリル材の加工痕



図6 トップハット化光学系を組み込んだCO₂レーザーシステム

設置し、図7のプレス治具で所定の圧力（約0.2MPa）で保持している。

図8にPFAシート、PA6シートおよびヒートシンク材のゲルマニウム板（肉厚4mm）の赤外透過スペクトルを示す。本研究で適用するCO₂レーザーの波長：10.6μmでの特性は、PFAシートは透過率49%、吸収率47%、PA6シートは透過率1.3%、吸収率94%で、レーザー照射による吸収発熱はもちろん可能で、重ね合わせ設置の際の界面へのレーザーエネルギーの浸透も可能である。一方、ゲルマニウム板は透過率72%で、樹脂部材への外部からのレーザーエネルギーを十分内部へ透過できる。

実験対象ワークの形状は、図9に示すように外形が全

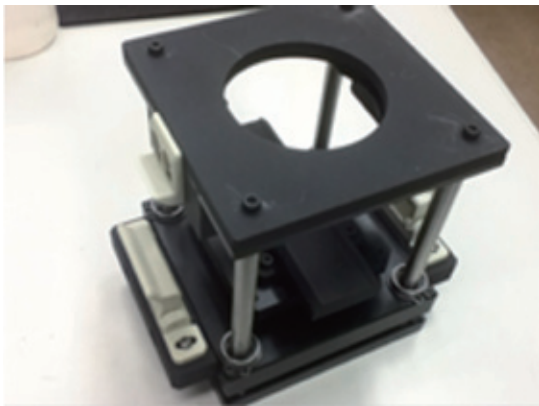


図7 レーザ溶着用プレス治具

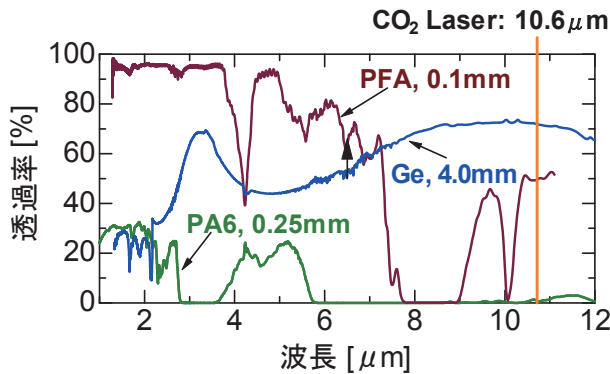


図8 PFAシート、PA6シートおよびゲルマニウム板の赤外透過スペクトル

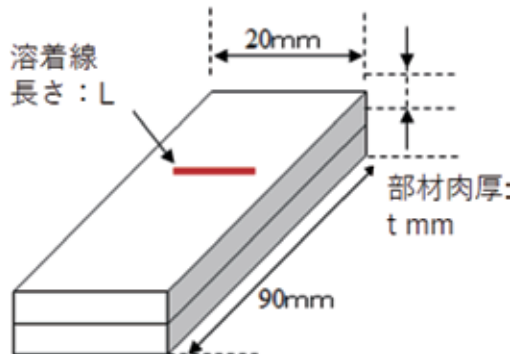


図9 樹脂部材の形状・寸法

長90mm×幅20mmである。これを図7に示したプレス治具に装着し、図1の概念図のようにレーザー透過ヒートシンク下で重ね合わせて保持し、中央部にL=18mmの溶着線を描くようレーザーを照射する。

レーザー照射条件は、照射スポット径2mm、送り速度とレーザー照射強度はそれぞれ樹脂材料の溶着可能な条件（外観が良好で腕力で溶着したシートが引っ張っても剥離しない条件）に変化させて、溶着した部材の顕微鏡による部材断面の接合界面近傍の熔融痕の観察を通してレーザービーム強度分布の影響の差異を調べた。

3. 結果および考察

3.1 PFAの溶着

ガウシアン分布のレーザーでのPFA部材の重ね合わせ溶着が発泡しない上限の条件は、レーザー照射出力12W、レーザー走査速度2mm/sであった。この条件で作成した試験片の断面観察写真を図10に示す。更に、同じレーザー照射出力かつ走査速度でトップハット化したレーザーを照射した結果についても同様に図11に示す。この断面観察時の画像を基に、上下部材の界面で実際にどれだけの溶着幅が有るのかを採寸したところ、ガウシアン分布レーザーの場合：307μm、トップハット化ビームの場合：991μmとなって、両者の比は1：3の結果となった。

3.2 PA6の溶着

ガウシアン分布のレーザーでのPFA部材の重ね合わせ

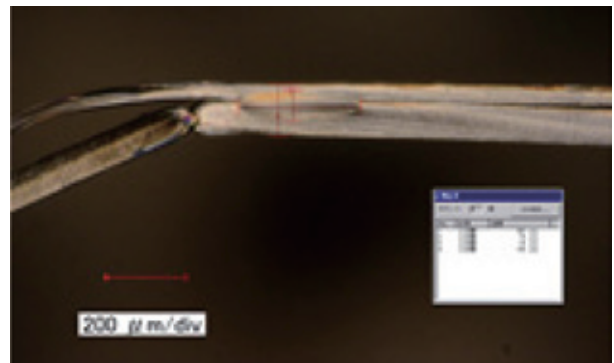


図10 断面観察写真（PFA; ガウシアン）

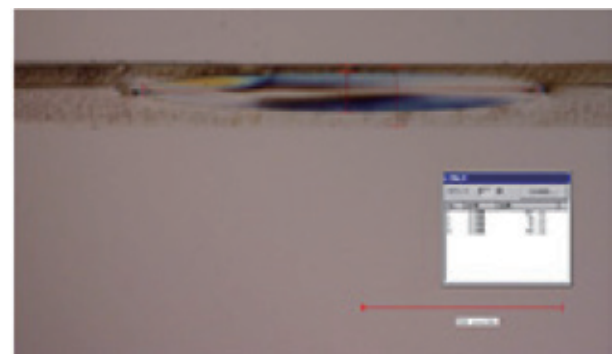


図11 断面観察写真（PFA; トップハット）

溶着が発泡しない上限の条件は、レーザー照射出力10W、レーザー走査速度5mm/sであった。この条件で作成した試験片の断面観察写真を図12に示す。同様に、同じレーザー照射出力かつ走査速度でトップハット化したレーザーを照射した結果についても図13に示す。

元々、PA6の肉厚0.25mmの重ね合わせではガウシアン分布のレーザーでは十分な強度の溶着が得られず、今回の条件でも界面での溶着幅は142 μm と僅かであった。一方、トップハット化ビームの場合では、溶着幅は873 μm と大幅に増えた。

3.3 樹脂シートの溶着特性の改善

概して、樹脂シートの重ね合わせ溶着部材を十分な強度で保持するにはシート肉厚以上の溶着幅が必要である。その意味では、今回のPFA部材は元来、透過率も比較的高かつ非常に薄い肉厚であったためレーザービーム強度分布の影響は致命的ではなかったが、より透過率の低い（つまり高吸収の）PA6の場合ではビーム強度の高低の影響は顕著に表れて、ガウシアン分布のままのビームでは、ほぼ溶着不可であり、「より太く」溶融を稼ぐために、投入するレーザーエネルギーをバルクで増加しても、今度は中心部ではエネルギー過多となって温度上昇が気化を超過して発泡が起こってしまう。透過率が低ければ樹脂表面で多くの熱吸収がおこなわれ樹脂温度は局

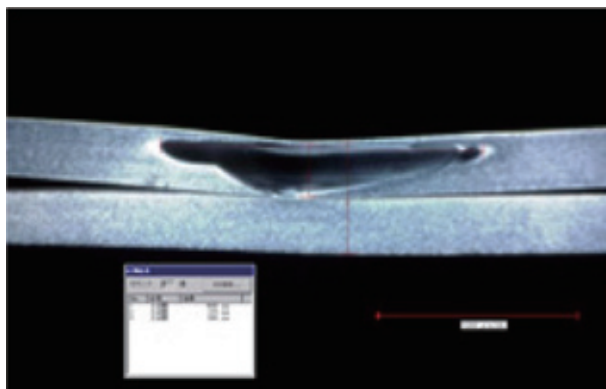


図12 断面観察写真 (PA6: ガウシアン)

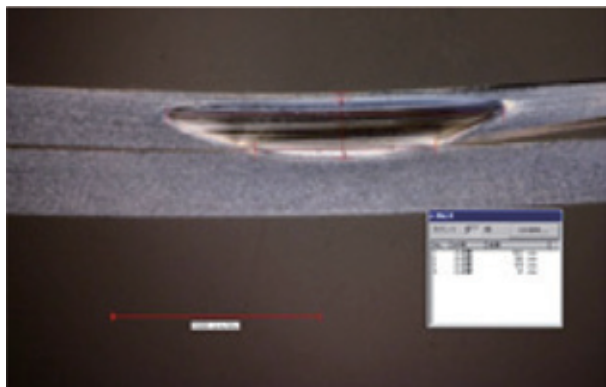


図13 断面観察写真 (PA6: トップハット)

部的に上昇する。樹脂温度が過度に上昇すれば気泡が発生し、良好な溶着品質は得られない。ビームフラット化により、溶着特性が改善するのは、レーザー照射域で均一な加熱が得られ、局部的温度上昇がなくなるため、より強いレーザーパワーを与えられ、溶着条件の幅が広がるためと考えられる。

4. 結 言

樹脂溶着におけるレーザービームの強度分布の平坦化（トップハット化）はレーザーが照射された樹脂の温度上昇の偏りを平準化して局所の発泡を防ぎ、溶着特性を著しく改善することが確認でき、難溶着条件を易化できることが可能となった。これは今回使用したCO₂レーザーに限らず、他の、波長の短いレーザーでも有効となる。課題としては、トップハット化のために組み込む光学系はレーザー発振器と同等の金額を要するため、標準的なレーザーシステムのコストを倍増させることである。将来的に量産効果によって光学系の低価化が可能となれば、樹脂溶着の条件緩和および信頼性向上に対して、有効な要素技術となることが期待される。

参考文献

- 1) 邱建輝, 高畑宏樹, 黄玉東, 潘裕柏: 結晶性高分子材料の熱板溶着における界面構造と溶着強度の関係, 高分子論文集 65 (3), 235-241, 2008.
- 2) 佐藤公俊: ヒートシンク式レーザー樹脂溶着, 日本包装学会誌 Vol.24 No.2, 63-67, 2015.
- 3) 小柳洋, 佐藤公俊: 半導体製造装置用途のフッ素樹脂製流量計および流体部品のレーザー溶着, 日本包装学会誌 Vol.27 No.4, 205-208, 2018.
- 4) Reinhard Voelkel, Kenneth J. Weible: Laser Beam Homogenizing: Limitations and Constraints, Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering 7102. DOI: 10.1117/12.799400, 2008
- 5) 唐崎秀彦: プリント基板レーザー加工の現状と動向, レーザー研究, Vol. 29, 106-107, 2001.