

レーザー強度分布平坦化による樹脂溶着特性の改善 第二報：数値解析による印加エネルギー密度分布の影響の検証

佐藤 公俊*

Improvement of Characteristics of Laser Plastic Welding by Laser Beam Homogenizing Part II : Verification of Influence of Density Distribution of Laser Incident Energy by Numerical Analysis

Kimitoshi Sato*

Abstract: Author have described the surface-cooling laser welding method to avoid the thermal damage generated on the surface by irradiation of laser for welding of thermoplastics in the first report. 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. For more detailed confirmation of the effect of laser beam intensity distribution on temperature distribution within a processed workpiece, comparison of the difference in the effects of “top-hat-beam laser” by homogenizing the distribution of laser intensity and Gaussian distribution laser beam was investigated by numerical analysis in this study. In the case of irradiation of Gaussian beam, the heat generated inside plastic sheets due to the beam intensity distribution, causing the temperature at the center to become extremely high, and conversely, the temperature at the outer edge is kept low. On the other hand, in the case of irradiation of top-hat beam, nearly uniform temperature distribution in the radial direction at the interface compare to in the case of Gaussian beam. the temperature difference within the beam radius becomes so large that the weld width that guarantees the actual weld strength is also narrowed. It was confirmed that the welding width is narrow in the case of Gaussian beam and wide in the case of top-hat beam.

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

1. 緒 言

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。特に高融点かつ撥水性の高いフッ素樹脂樹脂は、とりわけ加工難易度が高い¹⁾。これに対し、精密に、また、高いエネルギー密度で高速加熱が可能で、レーザーを用いる溶着方法が注目されている。

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)}。本技術の要点は、図1に示すように、溶着対象の樹脂部材のレーザー照射面に赤外線透過性の高い放熱体（ヒートシンク）を設置し、樹脂部材で吸収発熱させ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融を実現し、表面損傷の

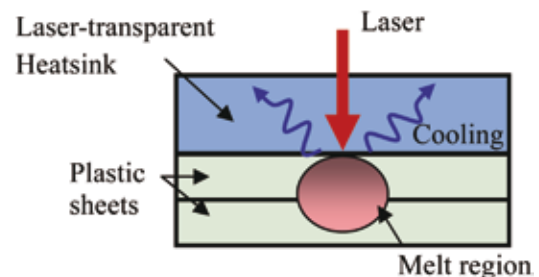


図1 表面冷却・内部溶融によるレーザー樹脂溶着技術の概念図

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

無い樹脂溶着を実現するものである。ただし、発熱・放熱のバランス次第で、満足な熔融領域を得る前に、局所での急激な温度上昇による発泡が起こり得る問題が有るなど、レーザ加工において、投入するビームの性質やエネルギー密度分布が加工結果や精度に影響する⁴⁾。

前報⁵⁾において、一般的な加工用レーザのビーム内のエネルギー強度が中心部から外周に指数関数的に下がる「ガウシアン分布」を持っていることにより、樹脂部材でのビーム中心部温度が上がりすぎて熔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ことを指摘し、「表面冷却・内部熔融によるレーザ樹脂溶着技術」を基にして、レーザ発振器から照射されるレーザの光軸上に適切な光学機器を配置して、レーザ照射スポット内の強度分布を平坦化（レーザ強度分布の形状から「トップハットビーム」と称する）することで、レーザ照射された樹脂部材内の発熱も平坦化して局所の過熱損傷を防ぐ効果が有ることを実験的に検証した。

本報では、ガウシアン分布強度分布を持つレーザビーム（以下「ガウシアンビーム」と称する）と、トップハットビームについて、伝熱解析により樹脂部材内のレーザ照射時の温度分布を求めて、両者の加熱特性を比較し、信頼性の高い樹脂溶着結果を与える加工条件提示に結び付く知見を得ることを目的とする。

2. 解析方法

2.1 対象材料とレーザ

今回、対象とした材料は、フッ素樹脂の一種であるPFA (Perfluoroalkoxy alkane) であり、上側：0.2mm, 下側：0.4mmの2枚のシートを重ね合わせ溶着することを想定している。レーザ照射時には上記のPFAシート上面にレーザ透過ヒートシンクとして単結晶シリコン板を設置する。PFAシートの下部にはアルミニウム型を設置し、これとシリコン製ヒートシンク板で樹脂ワークを挟み込む状態としている。照射するレーザは、発振波長10.6 μm のCO₂レーザを適用し、照射するレーザビームの直径を2mmと規定した。

2.2 支配方程式と境界条件

レーザふく射加熱を受ける積層板の非定常二次元熱伝達モデルにより、レーザ溶着時の樹脂部材内部の温度分布を導出する解析を行う。解析モデルを図2に示す。また解析に用いる各部材（シリコン、PFA、アルミニウム）の物性値を表1に示す。なお、表中のアルミニウムのふく射吸収係数については、照射エネルギーはほぼ表層のみで吸収され吸収係数としては無限大とみなされるが、解析においては便宜上30000m⁻¹（肉厚0.1mmで吸収率95%を基に）として計算した。

まず、溶着部材積層水平方向をx, 垂直方向をyとして、各構成要素における熱移動に対する支配方程式を以

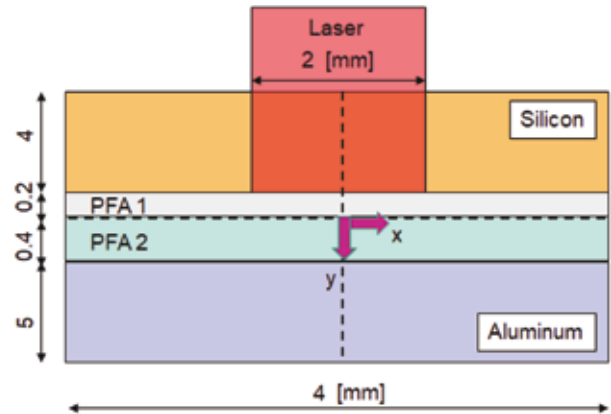


図2 レーザ溶着の解析モデル

表1 構成材料の物性値

Property	PFA	Silicon	Aluminum
Thickness [mm]	0.25	4	5
Transmittance [%]	25	43	0.01
Absorption coefficient [1/m]	4951	128	Assumed to be infinite
Thermal conductivity [W/(mK)]	0.25	163	239
Density [kg/m ³]	2150	2330	2700
Specific heat [J/(kgK)]	1000	703	880

下に示す。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q \quad (1)$$

ここで、 ρ , c , k , T , t は、それぞれ密度 [kg/m³], 比熱 [J/(kgK)], 熱伝導率 [W/(mK)], 温度 [K], 時間 [s] を意味する。解析においては、表1に示す各素材の物性値を各層で用いて計算している。なお(1)式中のQはふく射エネルギー吸収による発熱項で、次のように表される。

$$Q = |dI/dy| = |-\beta I_0 \exp(-\beta y)| \quad (2)$$

ここでIはy方向の到達レーザパワー密度 [W/m²] であり、I₀は投入したレーザパワー密度 [W/m²] で β は輻射吸収係数 [m⁻¹] を意味し、各素材の物性値を用いる。なお、部材初期温度および周囲温度を27°Cとして、空気への自然対流伝熱（熱伝達率10W/(m²K)）として外部への放熱を設定した。

次に、本解析に適用する境界条件を以下に記す。（添え字はシリコン：si, PFA：pf, アルミニウム：al）

Si放熱板-PFA部材の境界条件：

$$k_{si} (\partial T_{si}) / \partial x = k_{pf} (\partial T_{pf}) / \partial x$$

PFA部材-アルミニウム型の境界条件：

$$k_{pf} (\partial T_{pf}) / \partial x = k_{al} (\partial T_{al}) / \partial x$$

レーザー照射条件としては、x方向に半径r=1mmの円を想定した固定点で、実験で溶着可能と判断された走査速度：u=2.3mm/sを基に、ビーム径：2rを通過する時間 $t_r = 2r/u = 0.87s$ をスポットのレーザー照射時間とした。

ガウシアンビームの強度は(3)式のガウシアン分布で与えておりビーム中心で強く端へ行くほど弱くなっている。

$$I = I_c \exp(- (2r^2) / \omega_0^2) \quad (3)$$

ここで I_c 、 ω_0 はそれぞれビーム中心のレーザー強度[W/m²]とビーム中心のエネルギーの1/eとなる場所の半径[mm]である。

一方、トップハットビームの強度分布は直径内一定として与えた。

解析においては、投入レーザーパワー $P_i = 9, 12, 15, 18, 21, 24W$ と設定して、それぞれの条件の照射時間 $t_r = 0.87s$ 経過後の温度分布を求めるため、上記の条件により(1)、(2)の支配方程式をコントロールボリューム法に基づく有限差分法で解いた。

3. 解析結果

二種類の強度分布の影響の全体的な傾向の比較として、解析結果の二次元温度分布について、ガウシアンビーム照射の場合を図3に、トップハットビーム照射の場合を図4に、それぞれ示す。両者に共通して表面冷却の効果により、レーザー照射面となるPFA部材上面の温度は常に50℃以下に維持されていることが分かる。

ガウシアンビーム照射では、ビーム中心の強度が強いガウシアン分布の影響を受けて樹脂内の発熱もそれに倣うような分布となり、その結果、部材の半径方向中心部の温度が高く外縁へ離れるに従い低くなる温度分布となり、照射するビーム半径内でも中心と外縁ではかなりの温度差が生じている。また、投入レーザーパワー条件の影響については、先ず $P_i = 9W$ 以下では樹脂部材内で融点温度に到達する部分は見られなかった。次に、 $P_i = 12W$ 以上で、両樹脂部材の溶着の前提条件となるPFAの融点：310℃を超えた領域が現れるが、ビーム中心付近に限られた。更に $P_i = 15W$ になるとPFAの熱分解温度：380℃以上の部分も現れ、この条件では前報で報告したように実験においても部材中心部で発泡が起きやすくなることと符合する。

一方、トップハットビーム照射の場合、ガウシアンビームと比較して半径方向に同程度の温度となる幅が広く、ビーム中心のみ温度が高くなるということが見られ

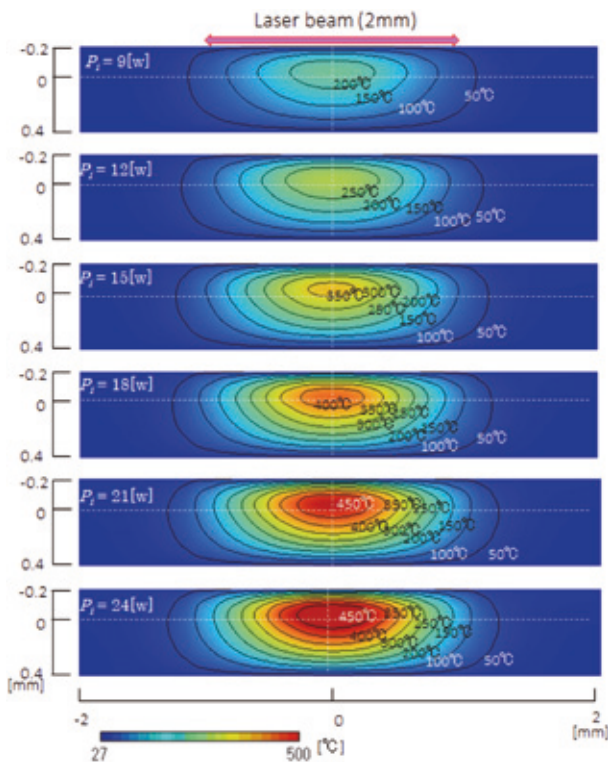


図3 ガウシアンビーム照射後の二次元温度分布

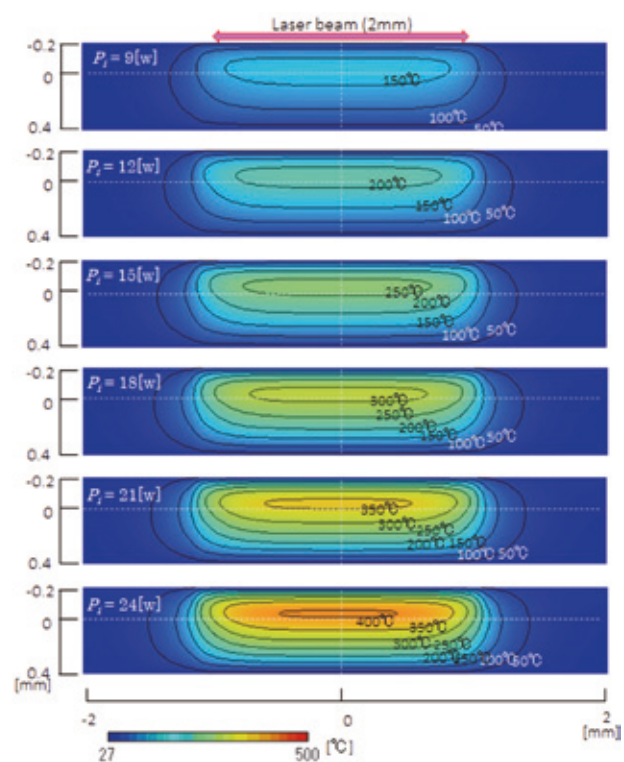


図4 トップハットビーム照射後の二次元温度分布

なくなった。そのため、投入レーザーパワーを上げていても、21Wまでは360℃以上の領域は現れず、24Wでようやく380℃超となった。

ここで、更なる理解の為、 $P_i=18W$ の場合における2枚のPFAの接合界面 ($y=0$ の位置)における半径方向一次元の温度分布を並べて比較してみる(図5)。ガウシアンビームの場合の $r=0$ と $r=1$ における温度がそれぞれ435℃、100℃で、温度差が335℃にもなることに対し、トップハットビームの場合では、 $r=0$ で315℃と $r=1$ で218℃となり、100K未満の温度差に留まり半径方向により均一に加熱できることを示した。

このように、ガウシアン分布のレーザービームを適用する条件下では、部材界面での溶着幅を太くする、かつ、溶け込み深さを深くする、という目的で投入レーザーパワーを増加させる事は、上述のようなビーム中心部での極端な温度上昇に基づく発泡という温度上限制約に縛られて、未溶着から発泡発生までのレーザー加熱条件幅が狭いという実際のレーザー溶着における条件設定の難しさの裏付けとなる結果が確認できた。逆に、トップハットビームの場合では、局所的な温度上昇という縛りに囚われずに投入エネルギーをある程度まで上げる事が可能となった。

実際の溶着強度を保証する主要因として接合界面の溶着幅があるが、同一投入レーザーパワーで樹脂融点を超える温度となる領域幅をどれだけ広げられるか、が重要であり、ガウシアンビームでは溶着幅は狭く、トップハットビームでは広くなることが確認できたため、実際のレーザー溶着加工での信頼性をトップハットビームの適用で実現できることを示唆できた。

4. 結 言

樹脂溶着におけるレーザービームの強度分布の影響について伝熱解析による温度分布の比較から検証した。ビーム中心で非常にエネルギー密度の高いガウシアンビームの場合は、樹脂部材内の発熱も照射したビーム強度分布を反映して極端に中心部の温度が高くなり、逆に外縁部の

温度は低く抑えられ、ビーム半径内の温度差が非常に大きくなって、実際の溶着強度を保証する溶着幅も狭くなる。一方、平坦化したエネルギー密度のトップハットビームでは、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中心に偏ることなく半径方向に同水準で温度上昇を示し、溶着幅を広げることに繋がった。

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 Vol.65, No.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] Stefan Rung, Mal Rexhepi, Christian Bischoff and Ralf Hellmann: Laserscribing of Thin Films Using Top-Hat Laser Beam Profiles, Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol.8, No.3, 309-314, 2013.
- [5] 佐藤公俊: レーザー強度分布平坦化による樹脂溶着特性の改善, 国士館大学理工学部紀要 Vol.15 1-4, 2022.

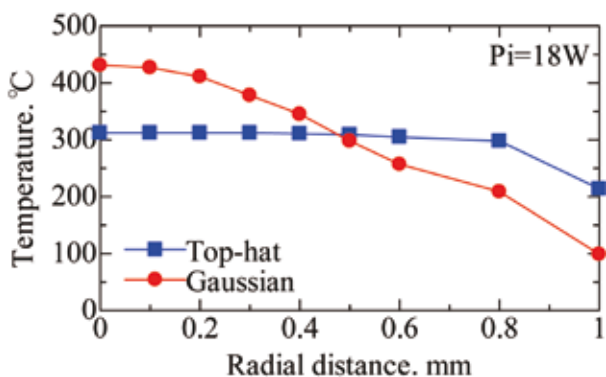


図5 溶着界面における半径方向一次元の温度分布比較