レーザー樹脂溶着時の加工点温度モニタリング

松 本 聡*

1. はじめに

レーザーによるプラスチックの溶着技術は1980年代に提唱されている^{1),2)}。この技術はプラスチックが近赤外線を透過する特性を利用しており、レーザー透過性と吸収性の2種類のプラスチックを重ね合わせ、レーザー透過材側からレーザー光を照射し、レーザー吸収材で発生した熱をレーザー透過材に伝え、両者が溶融する。その後、レーザー照射を停止し、冷却、固化の過程で溶着が行われる。その当時はレーザー装置が非常に高価であったため実用化には至らなかった。

しかしながら、1990年代後半、半導体レーザーの高出力化と急激なコスト低下、および自動車産業における軽量化、低コスト化の要求により再びレーザーによるプラスチックの溶着法が注目を浴びている。すでに数社で実用化も行われている^{3),4)}。

プラスチックのレーザー溶着法のメリットは、

- ①無振動
- ②高精度
- ③高精細
- ④局所加熱により周囲に与える熱影響が少ない
- ⑤設計自由度が高い
- ⑥外観が美しい（バリの発生が少ない）

といったものが挙げられる。これらのレーザー溶着法の特長は既存工法で成し得なかった特性を引き出すことが可能である。

一方で、適用が進む中、以下のようなレーザー溶着の弱点もわかりはじめています。

- ①一筆書きによるタクトタイムの増加
- ②レーザー光に対し透過、吸収特性を有する2種のプラスチックでなければ溶着できない
- ③品質管理方法が確立されていない
- ①に対処するために一筆書きを行わず、全点同時照射を行うタイプのレーザー溶着機も販売されている⁵⁾。
- ②に関してはレーザー透過・吸収の組み合わせを実現するために、色素メーカーではレーザー溶着用色素が販売されており⁶⁾、プラスチックメーカーでは近赤外線の透過性がある

まりよくないポリブチレンテレフタレート（以後PBT）やポリフェニレンサルファイド（以後PPS）もレーザー溶着用グレードが開発されている⁷⁾。

このように、レーザー溶着のインフラは整いつつあるものの、③の問題が残る。この問題に対し、筆者らは光を用いた温度計測により解決を試みており、本稿ではこのことについて紹介する。

2. 光による温度計測

2.1 光による温度計測の有効性

温度計測の有効性について説明する。レーザー溶着の対象となる熱可塑性プラスチックはガラス転移点、融点（軟化点）、分解点といった物性値が示すように、その状態を温度によって知ることができる。たとえば280℃の66ナイロンといえば溶融状態であることを想像できる。したがって、レーザー溶着の場合、界面の温度を測定することは界面の状態を予測することになり、非常に有効である。

しかしながら、温度の基準となっている白金抵抗温度計や熱電対はいずれも接触式温度計であり、実験には用いることができるが、実際の生産ラインではワーク毎に熱電対を埋め込むことはできない。そのため、非接触で温度を測定することが必要であり、筆者らは光による温度測定を試みた。

2.2 温度計測原理

温度計測原理について説明する。物質はその温度に応じて光を発している。溶けた鉄が橙色に見えることや、高温の炭が赤色に見える現象である。このように物質はプランクの放射則（式(1)）にしたがって図1のように光を放出する。

$$L_{(\lambda, T)} = \varepsilon_{(\lambda, T)} \left(\frac{C_1}{\lambda^5} \right) \frac{1}{\exp \left(\frac{C_2}{\lambda T} \right) - 1} \quad (1)$$

$L_{(\lambda, T)}$: 放射強度 (W/m³)

$\varepsilon_{(\lambda, T)}$: 放射率

λ : 波長 (m)

T : 絶対温度 (K)

C_1 : 第1放射定数 3.741832×10^{-16} (W・m²)

C_2 : 第2放射定数 1.438786×10^{-2} (m・K)

この原理を利用して温度測定を行なう装置が放射温度計である。一般的な放射温度計は放射強度 (= 光センサの出

* Matsumoto, Satoshi
浜松ホトニクス(株)中央研究所 第1研究室
浜松市平口5000 (〒434-8601)
2006.4.19 受理

図1 各温度における黒体放射スペクトル
任意の2波長の出力比は温度に対し1対1の関係になっている

力) から温度を算出する⁸⁾。放射強度から温度を求める方式は、式(1)からもわかるように放射率がわからなければ温度に換算することができない。放射率は物質固有の値を持ち、温度と波長によって異なる。さらに表面状態の影響を受ける。この放射率に関しては既知である物質が少ないため、このことが放射強度による温度測定を難しくしている。さらに、光センサの出力は測定状態の影響を受けやすい(例：ピントがずれる⇒出力低下⇒測定値低下)測定状態の安定化が重要である。

筆者らは、これら放射強度から直接温度を求める方式ではなく、任意の2波長の放射強度を測定し、その放射強度の比から温度を求める2色法を採用した。図1に示すように2波長の放射強度比は図の矢印の傾きに相当し、各温度に対し一意に決まるため、放射強度比より温度を求めることができる。2色法を採用した理由は以下の通りである。

- ①放射率の既知でない物体に適用可能(ただし、灰色体仮定を用いる)
- ②再現性が良い

2色法においても放射率の問題は存在するが、観測している2波長の放射率は等しいという灰色体仮定を用いると、放射率をキャンセルすることができる。さらに比で測定しているため、強度が変わっても2波長ともに同様の変化で

あれば比は変動しないといったように安定した、再現性の高い計測が可能である。この特性は産業応用上非常に重要であるものと考えられる。

2.3 プラスチックのレーザー溶着法への放射温度測定適用

プラスチックのレーザー溶着において放射温度計を用いた加工点温度計測は過去にも試みられている⁹⁾。プラスチックのレーザー溶着において、どの部分の温度を測定することが効果的かを考えると、当然のことながら接合界面の温度ということになる。通常、プラスチックの表面温度を光で測定するには、プラスチックの光吸収の大きな波長を利用する。吸収が大きいという事と放射率が高いという事は等価であるためこのような方法が用いられる。しかし、この方法では、レーザー溶着法において、レーザー透過材表面の温度を測定することは可能であるが、界面の温度は測定できない。理由は界面で発生した熱放射がレーザー透過材に吸収されてしまうためである。そのため、我々はプラスチックにおいて比較的透過率の高い波長を用いて温度測定を行なっている。これにより、界面からの赤外線を検出できるため、溶着界面の温度を知ることができる。

さらに、レーザー吸収材には着色料としてカーボンブラックが用いられていることが多い。カーボンブラックは全波長域で高い放射率を示すため、レーザー加熱時はレーザー吸収材から発生する赤外線が支配的になる。このため界面の温度を測定できる。また、カーボンブラックは基本的には全波長吸収体であるため、放射率の波長依存性が低いことから灰色体仮定が成り立つ。そのため、2色法の適用が可能である。

以後、筆者らの構築した温度計測システム(図2)で実験を行っているが、本温度計測システムは温度の絶対値を示すものではないことを付け加えておく。放射温度計測による絶対温度の測定は放射率の問題等のため非常に難しい。したがって、以後温度として記述する値も絶対値にするためには更なる較正や議論が必要になるものと考えられる(放射温度計測については、参考文献8)等を参照)。

3. 実験方法

実験は、図3に示す2種類のワークを用いて行った。非結晶性材料としてポリカーボネート(以後PC)、結晶性材料としてPBTを用いた。実験条件は、表1に示す通り

図2 2色式温度計測システムの構成図

PC & PC

PBT & PBT

図3 加工サンプルの形状

表1 実験条件

サンプル	PC (未強化) PBT (GF 30 wt%強化)
レーザー	ファイバー出力型半導体レーザー
波長	808 nm (PC), 940 nm (PBT)
加工スポット径	φ 2.4 mm (PC), φ 1.6 mm (PBT)
観測スポット径	φ 1.6 mm
加工速度	10 mm/s ~ 50 mm/s
加圧力	約 300 N
引張試験速度	10 mm/min (PC), 2 mm/min (PBT)

図4 加工・観測同軸光学系
左：実物の写真 右：光学系の構成

である。溶着はレーザーを4軸のステージによりスキャンさせて行っている。

実験には加工・観測同軸光学系(図4)を用いている。本光学系はレーザー光の光軸と赤外線計測の光軸をヘッド内で一致させているため、レーザー照射点と温度計測点は常に同じ位置となり、ヘッドをスキャンする場合においても、安定したデータ取得が可能である。

溶着されたサンプルは、PCの場合、全長160 mmのサンプルから砥石により15 mmずつに切り分け、それぞれを引張強度試験機にて引張速度10 mm/minにて強度試験を行った。また、PBTについては図3に示すように、溶着長さは20 mmであるため、各サンプル5個ずつ作成した。引張速度は2 mm/minである。今回示すデータは、各試験片の最大強度の平均値である。

図5 レーザー溶着時の温度測定データ
試料はPCで加工速度30 mm/sのときのデータ
(各々の場所ではほぼ同一温度で溶着されている様子を示す)

図6 レーザーパワーと加工点平均温度の関係(PC)

4. 実験結果および考察

4.1 理想的な状態における温度測定結果

4.1.1 ポリカーボネート(PC)の温度測定

非結晶性プラスチックとしてPCの例を挙げる。図5に30 mm/sでスキャンさせた際のレーザー溶着時の温度測定結果を示す。横軸は時間であり、溶着箇所に対応する。理想的な条件(精度の良い板同士)の溶着においてはパワーによらずほぼ安定した温度で全ての箇所が溶着できていることがわかる。温度の安定性の確認ができたので、全時間域にわたって平均した加工点平均温度と、照射レーザーパワーを比較する。その結果を図6に示す。図6に示されたように各加工速度において加工点平均温度とレーザー照射パワーは比例の関係にある。加工速度が速くなると傾きが小さくなる現象も計測ができています。

次に照射パワーから計算される入熱量と加工点温度の比較を行なう。入熱量は以下の式(2)で定義することとする。

$$\text{入熱量 (J/mm}^2\text{)} = \text{パワー密度 (J/s} \cdot \text{mm}^2\text{)} \times \text{照射時間 (s)}$$

$$\text{パワー密度 (J/s} \cdot \text{mm}^2\text{)} = \text{レーザーパワー (J/s)} \div \text{面積 (mm}^2\text{)}$$

$$\text{照射時間 (s)} = \text{スポット径 (mm)} \div \text{スキャン速度 (mm/s)} \quad \text{(式2)}$$

図7 単位面積あたりの入熱量と加工点温度の関係 (PC)

図8 加工点温度と引張強度の関係 (PC)

加工パラメータより、照射レーザーパワーを入熱量に換算した場合のグラフを図7に示す。図7からわかるように入熱量と温度の関係は今回用いたPCの場合では一定にはならない。特徴的なことは、加工速度が速くなるに従い、低い入熱量でも加工点温度が上がりやすくなるということである。この現象については、それぞれのサンプルの加工断面の観察を行ったところ、加工速度が速くなるに従い、熱影響層が薄く（熔融深さが浅く）なる現象が確認された。すなわち、加工速度が速くなった結果、熔融されるプラスチックの体積が減少したため、温度が上昇しやすくなると考えられる。

図8に、加工点温度と溶着強度の関係を示す。図8より、明らかに温度と強度の相関が見て取れる。ポリカーボネートの軟化点は200℃～240℃とされており、ほぼその温度から溶着され始めている様子がわかる。非結晶性プラスチックの場合、図8のように加工点温度の上昇とともに徐々に溶着強度が高くなる傾向がある。そして最大強度を経て、熱分解により溶着強度が低下する。最大強度に関しては、母材強度が71MPaであることから、母材強度の80%程度であった。また、加工速度により同一加工点温度であっても溶着強度が異なるという現象が見て取れる。

PCのような非結晶性プラスチックの場合、透過材に可視光透明材料を用いると溶着面が見えるため、温度モニタリングの必要性に関して質問を受ける場合がたびたびある。確かに溶着面を画像で観察できるが、見た目に関しては溶

図9 レーザーパワーと加工点平均温度の関係 (PBT)

図10 単位面積あたりの入熱量と加工点温度の関係 (PBT)

図11 加工点温度と引張強度の関係 (PBT)

融してから分解する寸前までほとんど区別がつかない。したがって、溶着強度を知るには溶着面の画像観察ではなく、溶着面の温度でなければ難しいものと考えられる。

4.1.2 ポリブチレンテレフタレート (PBT) の温度測定

結晶性プラスチックの例としてPBTを挙げる。PCと同様に、加工点平均温度のレーザーパワー依存性を図9に示す。PCと同様に、各加工速度において、レーザーパワーと加工点平均温度は比例の関係にある。さらに、その傾きは加工速度が速くなるに従い小さくなる。また、加工点温

図 12 隙間の検出実験結果 (PC)
隙間 10 μm のサンプルは隙間が埋められ、溶着できている。

度の入熱量依存性を図 10 に示す。PBT の場合も、入熱量と加工点温度の関係は速度によらず一定とはならない。傾向も PC と同様で、加工速度が速くなるに従い、低入熱量で加工点温度が上がりやすくなる。この場合も PC と同様の現象が起きているものと予測される。

次に、図 11 に溶着強度の加工点温度依存性を示す。結晶性プラスチックの場合、光散乱のため溶着面積の同定が困難であったため、溶着強度は最大点強度 (N) で示すこととした。

PBT の場合、材料の融点である 225°C 付近から溶着ができてることが見て取れる。変化の仕方は融点以上で急激に溶着強度が上昇し、強度が飽和し、その後強度低下が起こる。加工点温度が高く、強度低下した部分では、溶着面がえぐれており、高温のため分解したものと考えられる。また、PC の場合と同様の、加工点温度が同じ場合は、加工速度が低い方が溶着強度は高くなる。

PBT のような結晶性プラスチックの場合、溶着面の画像による観察は難しい。理由は結晶部と非晶部界面による光散乱のためである。この光散乱により曇りガラスのような状態になっている。さらに、エンジニアリングプラスチック系材料は、通常ガラス繊維で強化されて使用されるため、このガラス繊維とプラスチックの界面でも光散乱が起こり、さらに画像観察が難しくなる。温度計測を用いることで、内部の画像を得ずとも溶着強度の予測ができることがわかる。

表 2 隙間検出実験条件

サンプル	PC (未強化) 隙間 4 箇所 (吸収材側に溝)
レーザー	ファイバー出力型半導体レーザー
波長	940 nm
加工スポット径	ϕ 1.6 mm
観測スポット径	ϕ 1.6 mm
加工速度	10 mm/s
加圧力	約 300 N

4.2 溶着不良の検出

プラスチックのレーザー溶着は、レーザー吸収材で発生した熱が熱伝導によりレーザー透過材に伝わり、両者が溶融するため、吸収材と透過材間に隙間が存在すると、熱伝導が阻害されるため溶着ができない。

したがって、上記の理由により、隙間部分では透過材に熱が伝わらず、吸収材に熱がこもることとなり、溶着できている場合に比べ、界面の温度が上昇することが予測される。

図 12 に PC の場合の隙間検出例を示す。左上の図に示すように、ワークに意図的に隙間を設け、レーザーをスキャンさせて、レーザー照射点の温度を測定した結果である。この際のレーザー照射条件を表 2 に示す。

先にも記したように、我々の使用している温度計測システムは溶着界面の温度測定を行なっているため、予想通り図 12 にあるように隙間の部分では急激な温度上昇を示すことがわかる。最も浅い隙間 (10 μm) では温度上昇が検出されていない。図 12 の溶着部の写真からわかるようにこの部分では溶着ができていた。これは溶融した材料が隙間を埋めることができたためであると考えられ、その結果温度上昇を示さなかったものと考えられる。

図 13 に隙間についても一例を示す。図 13 にあるように治具による押さえが不完全であったために起こった不良である。透過材と吸収材を密着させるには、できるだけ多くの箇所を押さえる必要があるものと考えられるが、図 13 の場合は透過材の両端のみを強い力で押さえたために中央部が浮いてしまった例である。強く押さえられている部分は良好な場合とほぼ同じ温度を示しているが、透過材がたわみ、中央部が浮き始めると徐々に温度が上昇している。

図 13 隙間の検出 (PMMA&ABS)
隙間の大きさに応じて温度が上昇していることがわかる。

レーザー照射条件が最適条件であったため、密着できなかった部分では温度が上昇しすぎて分解し、その結果、内部がえぐれている。この実験でわかることは明らかな隙間ではなくても、材料の接触状態を温度は反映しているということである。

今回の実験では内部の観察を行うため、透過材として非結晶性プラスチックの可視光透明材料を用いている。このような材料系以外では、界面の隙間を画像などで観測することは極めて困難であるため、ここでも温度測定が有効であることがわかる。

5. おわりに

加工点温度の測定により以下のことを示した。

- (1) 加工点温度により溶着強度の予測が可能である
- (2) 被溶着材における接触状態の予測が可能である
- (3) 隙間が検出できる

この知見を用い、プラスチックのレーザー溶着を製品の生産に適用する場合、以下のプロセスで進めることができる。

被溶着材における接触状態の予測ができるため、金型や治具の修正に温度データを用いることができる。これにより隙間の極めて少ない条件を材料側から求めることができる。

次に、加工点温度は入熱量に敏感に反応するため、溶着形状などによる温度変化（例えば角部）も捕らえることができる。さらに、溶着強度が温度計測により予測できる。したがって、取得した温度データを用いることで、溶着箇所で起きている現象を予測することができる。このプロセスでは溶着現象が感覚でなく数値化されているため早期に最適なレーザー溶着条件を求めることが可能と考えられる。

さらに、ここまで得られた温度データは次のステップにおいて品質管理の基準データとなる。各ユーザの必要性能に応じて温度による管理基準を設け、リアルタイムで溶着状態を管理することが可能である。また、リアルタイムでの溶着状態管理は、同時に溶着システム自体のモニタリ

ングを行っていることになる。レーザーパワーが低下すれば加工点温度は低下する。部材の押圧状態に異常があれば温度のパターンが変化するなど、温度の変化により材料やシステムの変化を知ることができる。さらに原因の特定が容易になると考えられる。

このように、プラスチックのレーザー溶着において加工点温度モニタリングは様々なメリットを持つ。この技術がレーザー溶着の適用拡大に貢献できれば幸いである。

最後に、材料の一部を提供いただきましたオリエント化学工業㈱に御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 中俣秀夫：異種合成樹脂材料の接合方法（特開昭 60-214931）
- 2) 牛木陽二：レーザによる部材の接着方法（特開昭 62-142092）
- 3) 寺田真樹，中村秀生：トヨタ自動車における半導体レーザの適用検討，シンポジウム「21 世紀の自動車における接合技術」(JAAA 2002) 講演資料，63 (2002)
- 4) 中村秀生，寺田真樹，平田雅巳，酒井朋博：半導体レーザの樹脂部品溶着への適用，第 59 回レーザ加工学会論文集，1 (2003)
- 5) プランソン社カタログ
- 6) 油科平八，畑瀬芳輝：ポリプロピレン材料におけるレーザ光透過黒色色素とレーザ光吸収黒色色素，MATERIAL STAGE, 3(2), 43 (2003)
- 7) 白川信明ら：レーザ溶着用樹脂に求められる特性，成形加工 '05, 123 (2005)
- 8) 例えば，温度の計測，計測管理協会編（1988），コロナ社
- 9) Dirk Hansch et al.: Welding of Plastics with Diode Laser ICALEO 1998 PROCEEDING SectionG, 131 (1998)