レーザー溶着技術の自動車部品への応用

坪井 昭彦*

1. 緒言

1960年に初めて発振に成功して以来、レーザーは我々現代人の社会、生活の中に色々な形で広く普及してきた。材料加工への応用も初期の段階から多くの研究者、技術者が取り組み、今や板金加工分野では、「レーザー加工」特殊加工ではなく、「一般的な加工」と認知されるに至っている。

プラスチック接合へのレーザー適用検討は1970年代に遠赤外CO₂レーザー($\lambda=10.6\mu\text{m}$)から始まった。ほとんどのプラスチック材料がこの波長帯において強い吸収を示す。結果として非常に高速加工が可能ではあるが、レーザー光の透過は材料表層に限られるため、プラスチックフィルムの重ね合せ溶着等に限定されたものとなった¹⁾。

その後、近赤外Nd:YAGレーザー($\lambda=1.06\mu\text{m}$)によるプラスチック加熱が検討され²⁾、1985年にプラスチックの表面吸収効果を利用して透過プラスチックと吸収プラスチック界面で接合方法が初めて報告されるに至った^{3)~5)}。

しかし、その後もプラスチックのレーザー溶着利用は非常に限定されたものに留まり、普及発展するには至っていなかった。ところが近年、レーザーシステムの価格低下や、技術の進歩により、プラスチックのレーザー接合技術の普及進展は目覚ましいものがある。

本報では特に近赤外レーザーによる透過レーザー溶着を中心として、最近の特に自動車産業領域への利用展開への取組をレビューする。

2. プラスチックの接合方法^{3), 6)~8)}

熱可塑性プラスチックの溶着には多く(細分すると15種類以上)の方法が利用されてきた。その代表的なもののみ、以下に概要を記述する。

2.1 超音波溶着(Ultrasonic Welding)

高繰返し周波数(一般的には20~40 KHz)の機械的振動を利用して接合する。二つの部品を振動ホーンとアンビル間に加圧状態で保持して加振する。高周波繰返し応力が接触界面で熱を発生させ溶着させる。使用するツールが高価なものとなるため大量生産向きの工法である。接合長さ

表1 プラスチック溶着に関する従来技術とレーザーとの比較

		振動溶着	熱板溶着	レーザー溶着
形状・寸法 構造的制約	三次元形状	△	×	◎
	中空体	×	○	○
	大型部品	○	×	○
	部品内蔵	×	×	◎
溶着部外観		×	×	◎
接合信頼性		○	○	○
工程自動化		○	△	◎

は数cm程度以下に限定され、医療機器用バルブ、フィルタ、カセットケース、自動車部品、掃除機本体等にマルチヘッド機が使用されている。

2.2 摩擦溶着(Friction Welding, Spin Welding)

金属の摩擦溶接と同じ原理である。片方の部品は固定し、もう一方を回転させながら加圧する。摩擦熱により樹脂が溶融し冷却固化する間に溶着が完了する。この工法は単純で良好な溶着品質が得られ、且つ再現性が高い。しかし一方の部品が円筒、円柱形状である必要がある。

2.3 振動溶着(Vibration Welding, Linear friction welding)

樹脂の融点に到達するまで、適切な周波数、振幅(一般的には100~240 Hz, 1~5 mm程度)で二つの部品を擦り合わせる。振動を停止させた後、部品は位置決めされ、溶融樹脂は固化、溶着が完了する。この工法の長所は大型部品の接合を高い生産性で実現できることである。

2.4 熱板溶着(Hot Plate Welding)

最も単純な大量生産技術である。接合すべき表面が軟化するまで熱板(接合材料と板厚に依存するが、一般的には180~230℃)を間に挟む。その後、熱板を引込め特定時間、圧力制御された状態で押し付ける。融合表面が冷却し結合が完了する。

代表的な従来溶着技術とレーザー溶着の比較を表1に示す。従来溶着技術と比較して、レーザー溶着は適用できる領域が広く、品質の高い溶着を高速、自動化できる。

3. レーザーによるプラスチック溶着の特徴

ここでは遠赤外CO₂レーザーを利用する溶着技術についての説明は割愛する。

* Tsuboi, Akihiko
(株)レーザーックス
愛知県知立市新林町小深田7(〒472-0017)
2006.4.18受理

図1 透過レーザー溶着 (TTLW) のメカニズム概念

近赤外レーザーによる熱可塑性プラスチックの加熱・溶融と部品接合に関して二種類のアプローチがなされてきた。すなわち、非接触レーザー溶着 (Non-contact Laser Welding) と透過レーザー溶着 (Through-transmission Laser Welding) である⁹⁾。

3.1 非接触レーザー溶着 (Non-contact Laser Welding (以下 NCLW と略記))

熱可塑性プラスチック製リジッド部材同士の接合 (特に突合せ接合) に利用される方法であり、熱板溶着と類似した接合工法である。即ち接合すべき部材を加熱、軟化させた後に接触加圧して接合させる。

3.2 透過レーザー溶着 (Through-transmission Laser Welding (以下 TTLW と略記))

上記 NCLW と比較して、より幅広い適用が可能であり、リジッド部材同士、フレキシブル部材同士、リジッド・フレキシブル部材の接合に利用できる工法である。「レーザーによるプラスチック溶着=TTLW」という認識が一般的であろう。

(1) 透過レーザー溶着 (TTLW) の原理：TTLW での溶着メカニズムを模式的に図1に示す。

接合する樹脂の一方はレーザー光を透過する透過材、他方はレーザー光を吸収する吸収材という組合せを用いる (吸収材側には吸収を高めるため、カーボンブラック等の顔料が混練されている。透過材側にも着色するために光透過性の高い染料を加えることもある)。

透過材と吸収材は化学的に両立する材料 (通常は同一素材) である。

この TTLW 工法は前項2で述べた従来工法と比較して、熱可塑性プラスチック溶着の革新的方法であり、溶着部の機械的性質の改善、最適化および樹脂材料の吸収・透過特性評価に関する多くの研究が進められている。

以下、レーザーによるプラスチック溶着、ここでは特に TTLW についてその特徴を整理する。

(2) 金属溶接との違い¹⁰⁾：熱可塑性プラスチックは熱的に軟化、熔融可能であるが、金属の溶接とプラスチックの溶着には幾つかの大きな違いがある。

金属は近赤外域に限らず、ほとんどの波長のレーザー光を吸収するが、それと同時に熱伝導性も高く熔融溶接させるためには局所的な非常に高い入熱を必要とする。

これに対して、多くのプラスチックは近赤外レーザー光の波長に対して透明であり、かつ熱伝導性も悪い。その上、熱可塑性プラスチックは比較的低い温度で軟化熔融する。さらにプラスチックは完全液化熔融した状態よりも高度に

図2 等方性材料の光の透過・吸収モデル

軟化された状態で最もよく溶着される。

TTLW は、溶着される一方の部材 (透過材) を通して (透過して)、レーザー光を照射する。レーザー光を吸収するもう一方の部材 (吸収材) が局所的に (両部品の界面においてのみ) 加熱、軟化する。

この TTLW 法で突合せ溶着も重ね合せ溶着もどちらも可能であるが、現実的には重ね合せ溶着の方が簡便であり一般的である。

3.3 溶着プラスチック材料の特性

TTLW を実施するに当っては、溶着すべきプラスチック材料のレーザー光透過・吸収特性を把握することが極めて重要である。

一般的に赤外分光計を用いたプラスチック材料の透過・吸収特性データで示されているケースが多い。しかし、これらのデータが薄い材料で極めて低出力レベルの光源で取得されたものであることを注意しなければならない。つまり実際に溶着に使用されるレーザーの出力は大きく、特定波長、特定板厚での透過・吸収特性は指数関数的に異なってくる。

図2に示すように、強さ I_0 の光が厚さ L の等方性材料に垂直に入射した場合の材料による光の吸収を考える (表面反射や材料内部での散乱は無視)。

材料中の微小領域 dl での吸収を $-dl$ とすると、

$$-dl = -k \cdot I \cdot dl \quad (1)$$

が成り立つ。ここで

k : 吸光係数 (波長と物質の濃度に依存)

I : 材料 dl に入射する直前の光の強さ

である。式 (1) を初期条件 $L=0$ で $I=I_0$ として積分すると

$$I = I_0 \cdot \exp(-k \cdot L) \quad (2)$$

式 (2) の両辺を I_0 で除し、対数をとると

$$\ln(I/I_0) = -k \cdot L \quad (3)$$

という関係が導かれる (等方性材料の光吸収に関する Lambert の法則)。

一部の實用プラスチック材料について、YAG レーザーおよび半導体レーザーの波長 k における吸収係数を実験的に求めた報告例がある¹¹⁾。

TTLW 工程を設計する際には、実部品相当厚さの試験片にて實用領域レベルのレーザー出力でのレーザー光透過試験を実施している。具体的にはパワーメータにより試験片を透過したレーザー出力を測定して、實用領域での透過・吸収特性を把握する。

3.4 接合形態

TTLW 法において基本的な接合形態は重ね合せ接合であり、吸収材の上に透過材を配置した形態となる。重ね合せ接合に対して突合せ接合の方が困難を伴う。接合部分が入射端部から遠くなることと加圧しにくいことによる (図 3 参照)¹²⁾。

これ以外の接合形態としては重ね合せ接合の変形と突合せ接合の変形が含まれる。

3.5 加圧

TTLW 法において、加圧は非常に重要なパラメータである。レーザー溶着過程ではレーザー光は透過材と吸収材の接触界面に到達し、吸収材側で発熱、透過材側にも熱として伝わらなければならない。

さらに温度の上昇によりプラスチック材料は膨張し始め、分子が励起される。ここでこの膨張を拘束 (加圧) しないと接合界面を通した樹脂の交差結合が起こらず、結果として二つの樹脂は接合できない¹²⁾。

3.6 TTLW 法の特徴

従来のプラスチック溶着技術と比較して特筆すべき TTLW 法のメリットは、

- ・高エネルギーを利用し接合温度を最適化した高速、高精度加工であること。
- ・レーザー光の形状、サイズを変化させることによる熱影響層、接合領域の局所限定が行えること。
- ・接合により視認できるような損傷や痕跡が外表面に現

れないこと。

- ・接合工程前に部品をアSEMBルでき、施行が容易であること。
- ・接合部品の形状、寸法に対する制約が少なく、設計の自由度が飛躍的に向上すること。
- ・接合工程で振動の発生がなく、電子部品や医療機器等振動に敏感な製品の接合に利用可能なこと。
- ・非接触加工 (接合される部品と熱源が物理的に接触しない) であるため、医療、食品等の衛生、安全性を維持し易いこと。
- ・ビーム伝送に自由度が高く、また自動化が容易であること。
- ・有毒なフューム等の発生がなく安全であること。

等を挙げることができる。

逆に TTLW 法導入検討時の制約条件を整理してみると

- ・材料の化学的特性だけでなく光学特性 (透過材、吸収材) に強く依存すること。
- ・接合部が密着、適切な圧力を維持しなければならないこと。
- ・剛性の高い部材の溶着においては、大きな残留応力が発生しえること。

等が挙げられる。

4. 利用されるレーザー装置^{1), 2), 10), 13), 14)}

TTLW 法に利用されるレーザー装置は、接合対象となる製品、接合部への要求仕様等で光源と照射方法を選択することとなる。

4.1 光源

TTLW 法に利用される光源は、主に波長が 750~1000 nm の近赤外光が利用され、その代表は Nd:YAG レーザーと半導体レーザーである。両者の比較表を表 2 に示す。

半導体レーザーは Nd:YAG レーザーと比べると効率の面面で優れているが、ビーム品質は劣る。結果として集光性が悪く、長いワーキングディスタンスを確保しにくくなる。溶着部に照射ヘッドを近接できない場合や溶着幅の狭い微細溶着の場合には Nd:YAG レーザーが採用されることが多い。

両者ともにミラーおよび光ファイバでの導光、伝送が可能である。

4.2 照射方法

接合対象物の形状、寸法、接合部への要求仕様等により、照射方法を検討、決定することとなる。多くのメーカーから、さまざまな形式の加工システムが提案されているが、大別すると

- (1) 集光ヘッドと XYZ 駆動による直接描画照射

表 2 Nd:YAG レーザーと半導体レーザーの比較

	Nd:YAG レーザー	半導体レーザー
波長 (nm)	1064	808~980
最大出力 (W)	10,000	6,000
生ビーム形状	円形	矩形
エネルギー変換効率 (%)	約 3%	約 30%
ビーム品質	○	△

図 3 TTLW における接合形態

図4 普通・小型乗用車1台当りに占める主要原材料の構成比率推移¹⁵⁾ (出典：日本自動車工業会)

- (2) ガルバノメータ駆動による直接描画照射
 - (3) ファイバアレイまたは半導体レーザーアレイを並べた固定照射
 - (4) 線状ビームとマスキングを利用した面照射
- に分類できる。

5. レーザー樹脂溶着の実施例

以下、各種資料等で公開されているレーザーによるプラスチック溶着事例を産業分野別に紹介する。

5.1 自動車産業

プラスチックはアルミとともに車体軽量化を進めるための有望な材料である。普通・小型乗用車1台当りに占める主要原材料の構成比率の推移を図4、詳細な構成比率を表3に示す¹⁵⁾。この30年間でプラスチックの使用量が確実に増大している。

公表されているレーザー樹脂溶着事例は、

- (1) キーレス・エントリー^{16)~18)}
- (2) テールランプ等の照明灯¹⁶⁾
- (3) メータグリル¹⁸⁾
- (4) インテークマニホールド^{19), 20)}
- (5) 各種センサ (オイル, 温度, アクセルペダル等)²¹⁾
- (6) 防振・防音用ゴムシール²¹⁾
- (7) 燃料タンクおよび燃料送給系^{21), 22)}
- (8) フィルタケース²³⁾

等々がある。レーザー溶着の採用により高生産性が得られるだけでなく、部品点数と前後を含めた工程数削減による大きなコストダウン効果も得られることが報告されている¹⁹⁾。

5.2 その他産業

自動車産業と比較すると多くはないが、医療機器産業領域等でもプラスチック溶着事例が公表され始めている。

- (1) 薬品、医療用具の滅菌包装
- (2) 注射器²⁴⁾
- (3) マイクロポンプ (バルブ部分の微細接合)²⁵⁾
- (4) 輸液用コンテナ

等である。非接触加工であり衛生的な工法であること、接着剤を使用せず生体に対して悪影響を及ぼさないこと、微細接合が可能であることが医療機器産業領域での普及を進展させている。

その他、携帯電話その他電子機器の表示窓部分の接合や合成繊維の縫製 (防水, 防護衣料用) 等の事例がある。

6. ま と め

レーザーによるプラスチック溶着技術は、この数年で大きく普及し始めた。これには半導体レーザーの大出力化が大きく寄与していると考えられる。更に広く普及発展させるためには、供給者、使用者ともに更なる開発努力が必要である。

レーザー供給者に対しては、更に安価で高効率、高ビーム品質なレーザー光源の開発、供給が期待されており、近

表3 普通・小型乗用車1台当りに占める主要原料構成比率 (出典：日本自動車工業会)

				1 台当たりの重量 (kg) (2001)	構成比 (%)
鉄鋼材料				949	73.0
非鉄金属				101	7.8
非金属	プラスチック	汎用樹脂	フェノール	1	0.1
			ポリウレタン	13	1.0
			塩化ビニル	13	1.0
			ポリエチレン	5	0.4
			ポリプロピレン	52	4.0
			ABS	5	0.4
			その他	4	0.3
			小計	94	7.2
		高機能樹脂		13	1.0
		合成樹脂合計		107	8.2
	その他			143	11
合計				1500	100

同時照射領域
・外径 ϕ 54mm
・内径 ϕ 47mm

図5 高出力ファイバレーザー+環状ビーム成形光学ヘッドによる高速同時溶着試験片

透過材：透過色素で着色したTPV（動的架橋型オレフィン系エラストマー）

吸収剤：タルク20%強化のPP[PP-ポリプロピレン（ポリオレフィンの一種）]

溶着条件：800 W 1 秒
（レーザックス，オリエント化学工業）

年，最新のファイバレーザーをプラスチック溶着に利用しようという試みが数多くなされている²⁶⁾（図5参照）。

ファイバレーザーは高効率，高ビーム品質なレーザー光源であるだけでなく，システムとして小型，簡便，メンテナンスの面で使い勝手が良く，ここ数年のうちに，幾つかの領域でNd：YAG等の従来レーザー光源を駆逐する可能性も出てきている。

使用者においては，今後も登場して来るであろう新たな光源も含めて，各種レーザーの持つ特徴，レーザー溶着技術の特徴を活かせる製品設計手法の確立が必要である。

参 考 文 献

- 1) "Laser welding of Plastics", *TWI Knowledge Summary* (2003)
- 2) Hoult, T.: "The Best Prescription for Processing Medical Materials", *Medical Design News* (Apr.2002)
- 3) Jones, I., Taylor, N., Sallavanti, R. and Griffiths, J.: "Use of Infrared Dyes for Transmission Laser Welding of Plastics", *ICALEO'99* (Nov.1999)
- 4) Jones, I.: "Clearweld", *TWI Knowledge Summary* (2003)
- 5) Burrell, M. and Woosman, N.M.: "Invisible Seams", *Appliance Manufacturer magazine* (Jan.2002)
- 6) Joshi, A.M.: "Welding of Plastics"
- 7) "Engineer on a Disk", p.233-239, Hugh Jack
- 8) Jones, I. and Chipperfield, F.: "A Review of Joining Processes for Packaging with Plastics", *Pharmaceutical and medical packaging* (May 1999)
- 9) Kagan, V. and Bray, R.G.: "Advantages and Limitations of Laser Welding Technology for Semi-Crystalline Reinforced Plastics"
- 10) Li, M. and Keirstead, M.: "Welding Plastics with near-IR Lasers", *Industrial Laser Solutions* (Sept. 2002)
- 11) Grimm, R.A.: "Infrared Welding of Polymers", *MDDI* (May 2001)
- 12) Hartke, K.: "Laser Welding of Plastics" *Spectra-Physics Application Note*
- 13) Jones, I. and Taylor, N.: "Laser sealing of plastics for medical devices", *Medical Plastics '98-12th International Conference*
- 14) 例えば「NOVOLAS μ Laser Welding」，パーカーコーポレーション社資料
- 15) 「注目される自動車用高機能樹脂」，日刊工業新聞（2003/10/16）
- 16) "Plastic Welding with Diode Lasers", *Fraunhofer USA Center for Laser Technology 資料*
- 17) 湯浦孝史，佐伯仁司：「樹脂製キーケースのレーザー溶着技術」，中部レーザー応用技術研究会誌，**17** (Mar.2003)
- 18) Leaversuch, R.: "Laser Welding Comes of Age", *Plastics Technology* (Feb.2002)
- 19) 中村秀生，寺田真樹：「半導体レーザーによる樹脂溶着」，溶接学会誌，**72** (3)，29 (Apr. 2003)
- 20) Schulten, S., Krause, F. and Grosser, U.: "Laser-welded Air Intake made of Durethan", *Bayer Application Technology Information* (July 2001)
- 21) www.rofin.com
- 22) 倉内敬史，千崎恭史：「レーザー溶着技術」，豊田合成技報，**45** (1) (2003)
- 23) Bachmann, F.G. and Russek, U.A.: "Laser Welding of Polymers Using High Power Diode Lasers", *SPIE*, **4637 B** (2002)
- 24) "Laser Welding Plastic medical products" *Industrial Laser Solutions* (Sept. 2002)
- 25) "Lasers in Microtechnology" *Institute of Microtechnology Mainz 資料*
- 26) 例えば坪井昭彦，沓名宗春：「最新レーザー利用生産システムの開発」，レーザー学会学術講演会第26回年次大会予稿集