特集

最新のレーザ溶接技術

レーザ溶接技術開発の最新動向*

片山 聖二**

Latest Development Trend of Laser Welding Technology*

by KATAYAMA Seiji**

キーワード 半導体レーザ, レーザ溶接, リモート溶接, 深溶込み溶接, レーザ異材接合

1. はじめに

レーザ溶接は、約 0.01 mm の極薄板から 50 mm 程度の厚板までの継手が作製でき、各種製品や構造物の高品質・低変形・高速・深溶込みの接合法として認められている^{1,2)}。また、レーザ溶接法は、各種溶接・接合法のなかで、システム化・ロボット化・自動化・省力化も容易であることから、自動車や鉄道車両、電子・電機、産業機器や重工業など、各種産業分野において利用が拡大している³⁾。特に最近、レーザ装置の高パワー化・高品質化・高効率化・高輝度化が図られ、レーザ溶接は、高張力鋼、アルミニウム合金、ステンレス鋼、プラスチックなど、種々の材料の溶接がトライされ、ロボットやスキャナ、治具やモニタリング装置などの周辺技術の開発とともに実用化が進展している。

そこで本稿では、最近のレーザ装置の開発動向と各種材料に対するレーザ溶接技術の開発動向について解説する。

2. レーザとその開発動向

溶接・接合（はんだ付（ソルダリング）、ろう付（ブレイジング）を含む）用レーザとしては、CO₂（炭酸ガス）レーザ、パルスまたは連続発振の Nd: YAG レーザ、半導体レーザ（Laser Diode から LD と略称されることがある）、半導体レーザ（LD）励起固体（YAG, YVO₄, YLF など）レーザ、ディスクレーザ、ファイバーレーザなどが利用されている。

まず、高パワー化が容易で高速・深溶込み溶接が可能な CO₂ レーザおよびファイバー伝送が可能で高柔軟性の

ランプ励起（パルスまたは連続発振）YAG レーザが開発され、中・厚鋼板のコイルやパイプ、テーラードブランク材、自動車ルーフ、電装部品などの溶接に適用されてきた^{1,2)}。続いて、レーザの高品質化に際して、スラブ型の高パワー CO₂ レーザおよび LD 励起の連続高パワー YAG レーザが開発され、従来のものの代用として用いられるだけでなく、リモート溶接用にも利用されてきた。なお、前者は航空機のパネルストリンガーにおいてリベット接合から溶接に初めて変わり、利用されたレーザである。しかし、高パワー・連続発振の CO₂ レーザおよび YAG レーザの装置開発と溶接技術開発は一段落している。なお、最近、パルス YAG レーザの場合、LD 励起のパルス YAG レーザ装置が開発され、さらに、半導体レーザと重畳して利用する 2 波長重畳のハイブリッド溶接装置も開発されている³⁾。

電気-光変換効率が最も高くファイバー伝送が可能な高柔軟性の半導体レーザや Yb をドープしたレーザ媒質を用いる高輝度・高品質のファイバーレーザおよびディスクレーザの開発が活発である^{2, 4-7)}。図 1 (a) および (b) は半導体レーザの高パワー化と高品質化およびファイバーレーザの高パワー化の展開をそれぞれ示す^{4, 5)}。いずれも高パワー化が急速に進展したことがわかる。半導体レーザでは、2009 年、パワー 4 または 5 kW の BBP が 30 または 40 mm・mrad となっている。2011 年には、4 kW、6 kW および 15 kW の半導体レーザが 0.6 mm 径 (NA: 0.1)、0.4 mm 径 (NA: 0.2) および 1 mm 径 (NA: 0.2) のファイバーで伝送できるものが市販され、従来の高パワー YAG レーザと同等以上の品質で高効率化が達成されている⁴⁾。一方、ファイバーレーザは、シングルモードレーザによる理想的な発振が 10 kW の高パワーでも可能であると言われており、最大 50 もしくは 100 kW の大出力の装置⁸⁾も販売され、装置サイズも小さいという特長がある。5 kW シングルモードファイバーレーザによる溶接例と 4 kW での溶込み深さを他のレーザ溶接機で得られ

*原稿受付 平成 23 年 8 月 8 日

**正 員 大阪大学 接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka University

(a) 半導体レーザーの高パワー化と高品質化

(b) ファイバーレーザーの高パワー化動向

図1 高パワー半導体レーザーおよびファイバーレーザーの開発・販売動向

図2 レーザによる3箇所同時溶接例

た結果と比較して図2および3⁹⁾に示す。高品質レーザーでは、焦点深度（レイリー長）を深く（長く）でき、空間的に離れた位置でも同時に溶融が可能となる。そして、高パワー密度になると、溶接ビード幅が狭くなり、溶込み深さが非常に深くなることがわかる。また、ディスクレーザーでは、1kWで50 μ mのファイバー径が利用されるものや0.2mm直径のファイバーが利用できる16kW（BPP: 8 mm $\cdot$ mrad）が市販されている⁷⁾。

ただし、高パワー・高品質のレーザーをレンズで集光すると、CO₂レーザーの場合に問題となったのと同様に、図4⁸⁾に示すように、熱レンズ効果と言われる焦点位置が時間と共に上方（レンズ）側に移動することがある^{8) 9)}。伝送ファイバー出口からコリメーションレンズまでの距離が短い場合、焦点距離が長い集光系（薄いレンズ）を用いた場合、保護ガラスが汚れている場合などに起こりや

図3 各種レーザー溶接部の溶込み深さの比較

図4 焦点位置シフトおよび集光径に及ぼすレーザーパワーの影響

すい。レンズやガラス内に温度分布が生じたときに起こるため、集光系のレンズや保護ガラスを冷却し、綺麗に保つ必要がある。

レーザー溶接においては、薄板の場合、特に熱影響が問題となるときは、パルスYAGレーザーが利用されている。最近では、半導体レーザーを直接またはファイバー伝送で利用したり、さらに、低パワー・微細スポット径のディスクレーザーやファイバーレーザーを連続またはパルス化の条件で利用したりすることが検討されている。一方、厚板の溶接では、大出力のCO₂レーザーによる単独溶接またはMAGアークとのハイブリッド溶接が先行して研究開発され、幾つか実用化されたが、最近では、高パワーで高柔軟性のファイバーレーザーもしくはディスクレーザーが単独で適用されるか、またはアルミニウム合金に対してはMIGアークもしくは鉄鋼材料に対してはMAGアークとのハイブリッドで利用されている。

最近、ドイツでは、レーザービームの集光状況とシールドガス圧を変えることによって、1つの加工ヘッド（Combi-Headと命名）で切断と溶接ができる装置が開発されている¹⁰⁾。また、太いファイバー内に細いファイバーが内蔵された形状で、1本のファイバーで伝送し、切

図5 Liイオン電池のケースにおけるロボット利用のレーザー溶接例

図6 リモートレーザー溶接の状況と適用車種

断と溶接を切り替えて使える特殊ファイバーも開発されている¹⁰⁾。いずれも切断と溶接が簡単に行える溶接システム開発を目指している。

ファイバーレーザーやディスクレーザーは、高パワーでも高品質であることから、またパルス化も可能であることから、さらにロボットと組み合わせてほとんどすべての溶接に対応できる可能性があり、更なる利用の拡大が予想される。

3. 各種材料に対するレーザー溶接の動向

3.1 鉄鋼材料のレーザー溶接

レーザー溶接法は、図5にLiイオン電池のステンレス鋼製外枠のレーザー溶接例¹²⁾を示すが、ロボットと治具が協調して動くシステムが開発され、薄板の溶接に広く用いられている。一方、オーステナイト系ステンレス鋼製鉄道車両においては、重ね継手に車体内部側となる方からレーザーを抑え治具付き集光ヘッドを移動させながら照射していき、下薄板の裏面にレーザー溶接の痕跡がでないような部分溶込みのレーザー溶接法が確立され、適用されている¹³⁾。

現在、高速・高生産性の接合法として最も注目されるのがリモート溶接・スキャナ溶接と呼ばれる技術である。リモート溶接には、スキャナ（ミラー）を動かすタイプと動かさないタイプがある。特に、ミラーを動かすタイプでは、レーザーの加工点を瞬時に移動させることができ、機械動作（ロボット等）による移動のロスタイムを画期的に削減することが可能である¹⁴⁾。日本でも、図6にリモートレーザー溶接システムとその適用車種を示すように、亜鉛めっき鋼板のレーザー溶接自動車部品が2007年から量産され始め¹⁵⁾、その後、さらに高品質なレーザー装置

図7 高張力鋼板（板厚：1.2 mm²）のレーザー溶接結果（10 kW, 1.5 m/min, $f_d=0$ mm）

を使うシステムも導入され稼働している¹⁶⁾。また、亜鉛めっき鋼板3枚重ねのリモートレーザー溶接技術の開発についても検討されている。

最近、ファイバーレーザーやディスクレーザーの高パワー化に合わせて、高張力鋼やステンレス鋼厚板においてレーザー溶接法やハイブリッド溶接法で深溶込みの溶接部を得るための開発が鉄鋼や船舶・海洋、重電・重工業の分野で活発に行われている。変形の低減・防止の観点からレーザー溶接法が望まれる場合とギャップ裕度拡大の観点からレーザー・アークハイブリッド溶接法が望まれる場合がある。高張力鋼の場合、図7¹⁷⁾にレーザー貫通溶接結果を示すように、集光光学系が異なると、湯流れやキーホール挙動および溶込み深さが変わり、アンダーフィルビードの生成傾向が異なる。また、気泡の発生の有無が変わり、ポロシティの生成傾向が異なることがある。したがって、高パワーレーザー溶接では、集光光学系の選択も重要である。特に、集光レンズの冷却が十分でないと、熱レンズ効果が起こり、焦点位置が上方へ移動することがあるので注意が必要である⁹⁾。さらに、12 mm厚の鉄鋼材料板の貫通溶接の場合、ワイヤを用いないと板表面にアンダーフィルが起こり、また通常のワイヤの場合、さらに裏面にハンピングが生じて溶落ちが起こりやすかった。図8にギャップ0.4 mmの厚板に対して各種シールドガス中において得られたレーザー突合せ溶接部の断面形状を示すが、100~150 ppmの酸素含有量で良好な溶接部が得られている。裏面にハンピングが生じる場合、適切な酸素量または高パワー・高エネルギーレーザーの利用が有効であることが報告されており¹⁸⁾、対策が必要である。

欧州では、客船の製造にCO₂レーザーとMAGアークま

P: 10 kW, v: 1.0 m/min, v_w : 3 m/min, d_z : 3 mm, I: 128 A, Gap: 0.4 mm				
Shielding gas	Ar: 40 L/min Type-1 nozzle	Ar: 40 L/min Type-2 nozzle	He: 40 L/min Type-2 nozzle	CO ₂ : 30 L/min Type-2 nozzle
Oxygen content	150 ppm	43 ppm	29 ppm	98 ppm
Cross section of weld bead
	5 mm			
Length of burn-through (maximum value)	1.8 mm	6.5 mm	7.4 mm	1.2 mm
Vickers hardness	356 Hv	355 Hv	390 Hv	356 Hv

※Oxygen content of base steel: 11 ppm, Vickers hardness of base steel: 205 Hv

図8 各種シールドガス中においてホットワイヤ利用レーザー溶接におけるビード断面、溶接金属部中の酸素含有量、溶落ち長さおよび溶接金属部の硬さ比較 (Type-1 ノズル: 前方よりガス供給; Type-2 ノズル: 上部後方からガス供給)

図9 船舶用ハイブリッド溶接装置と得られた溶接部の断面写真例

図10 SUS 304 鋼厚板の多層盛りレーザー溶接部の断面写真

たはファイバーレーザーと MAG アークのハイブリッド溶接法が使われている¹⁹⁾が、日本でも、図9にファイバーレーザーと MAG アークのハイブリッド溶接機と溶接例を示すように、独自の溶接機が開発され、適用が始まりつつある²⁰⁾。この場合、裏当てを用いて良好な溶接部が得られている。ハイブリッド溶接では、通常、溶着量を得るためにアーク電流の高い条件を使う。しかし、アーク力が強くなって、溶融池表面が凹んで広くなり²¹⁾、表面ビード幅が広がってアンダーフィルやアンダーカットが形成しやすくなるので、裏あてを用いるとか2パス溶接を行うとか添加のワイヤ^{22, 23)}を用いるとかの対策が必要である。

ステンレス鋼の厚板では、図10に溶接部の断面例^{24, 25)}を示すように、ナローギャップに対して多層盛りのレーザー

図11 大気圧中と低真空 (0.1 kPa) 中において各パワーで得られたレーザー溶接部の溶込み深さと高パワーで得られた溶接部の断面写真例

図12 Li イオン電池ケースに対するリモートレーザー溶接の試みと電池の模式図 (右)

溶接が検討され、板厚50および60 mmの溶接が両面または片面から可能であることが示されている。なお、厚板では、割れが起こりやすいため、 δ フェライト量が比較的多めに残留するワイヤが用いられている。

さらに最近、長焦点距離の集光系を用いて低真空中でレーザー溶接が行われている²⁶⁻²⁸⁾。通常の Ar シールドガス中と 0.1 kPa 低真空中において種々のパワーで得られたレーザー溶接部の溶込み深さと真空中での焦点はずし距離をマイナス (－: 焦点が板内部にある) にして溶込み深さの増加を図った結果、ならびにパワー 26 kW での深溶込み溶接部の断面を図11²⁸⁾に示す。低真空中の低速度溶接では、大気圧中の溶接部では得られないような深い溶込み (16 kW パワーば場合、50 mm 以上) が可能であり、0.1 kPa, 26 kW, 0.3 m/min, -40 mm の条件で、70 mm 以上に深い溶接部が1パスで作製できることが報告されている^{27, 28)}。

3.2 アルミニウム合金のレーザー溶接

アルミニウムとその合金は、軽量であることから、レーザー溶接法の適用の期待が大きい。

近年、携帯電話用の Li イオン電池アルミニウムケースの本体と蓋の薄板封止溶接は、内部融液への熱影響低減の観点から、パルス YAG レーザにより実施されている。パルス発振のレーザーによるスポット溶接では、凝固割れが起こりやすいため、純アルミニウム (Alxxx 系) か A3003 合金が使われる²⁹⁾。最近、溶融性を増加させる目的で、半導体レーザーとパルス YAG レーザの重畳 (ハイブリッド) レーザの適用例もある³⁾。また、ハイブリッドカーや電気自動車の開発に伴い、電池ケースが大型化しており、図12に溶接例¹²⁾を示すように、高パワー・高品質の連続発振ディスクレーザーやファイバーレーザー溶

図13 アルミニウム合金製自動車ドアのレーザー溶接例

Welded specimen	AZ31B		AZ61A	
A				
B				

図14 マグネシウム合金のレーザー突合せ溶接ビードの表面および断面写真

接の検討が始まっている。

アルミニウム合金製自動車の場合、ルーフの「3次元」溶接用の光源として連続発振のランプ励起高出力YAGレーザーが使われ、続いて高効率のLD励起YAGレーザーが用いられた。また、図13に示すように、ドア部や車体の一部の溶接において、ランプもしくはLD励起YAGレーザーとMIGとのハイブリッド溶接が適用され^{30, 31)}、最近では、半導体レーザー溶接も実用化されている⁹⁾。アルミニウム合金製自動車に対しては、半導体レーザー、ディスクレーザーまたはファイバーレーザーによる溶接が適用されつつある。また同様に、アルミニウム合金のテラードブランク溶接材(TWB)の製造にYAGレーザーによる突合せ溶接が検討されたが、最近では、ディスクレーザー、ファイバーレーザーまたは半導体レーザーの適用が検討されている。

航空機においては、A380などのエアバス社のパネルへの補強板の接合に2台の3.5kW CO₂レーザーによるT型すみ肉溶接が適用されている。なお、アルミニウム合金は2xxx系ではなく6xxx系が用いられ、高温割れ防止の観点から高Siワイヤが利用され、ワイヤの溶融の確認としてブルーム中のSi発光信号がモニタリングされている³²⁾。レーザー溶接ビードに対しては、溶接後、疲労限向上のためピーニングが実施されている。研究としては、ディスクレーザーまたはファイバーレーザーによる溶接が検討されている³³⁾が、製造の承認・認証を得るためには長期間を要するようである。

アルミニウム合金製車両では、主に、ミグ(MIG)溶接または摩擦攪拌接合(FSW)が利用されているが、一部、A5xxx系ワイヤを用いてファイバーレーザーとMIGアークのハイブリッド溶接が適用されている³⁴⁾。

3.3 チタン合金、マグネシウム合金などのレーザー溶接

チタン(Ti)またはチタン合金のレーザー溶接は、航空機部品や生体用品において検討されている。また、チタン合金製眼鏡フレームにも、抵抗スポット溶接やろう付に替わって、パルスYAGレーザーが適用され、良好な溶接部が作製できることから、レーザー溶接製品が市販されている³⁵⁾。レーザー溶接では、特に、熱影響部が狭く、高強度でばね性や意匠性に優れたものが作製できることが明らかにされている³⁵⁾。

マグネシウム(Mg)合金のレーザー溶接も、マグネシウムがアルミニウムよりさらに軽量であることから比較的古くから検討されている。図14にマグネシウム合金のディスクレーザーによる貫通溶接例³⁶⁾を示すが、良好な溶接部を得ることが可能である。特に、高速溶接では微細な結晶粒の溶接金属部が生成でき、引張強度の高い溶接継手が得られる。なお、パルスレーザーでは、結晶粒の小さい溶接部の作製が可能であるが、凝固割れが起こる場合が多いため、注意が必要である。

近年、高パワーレーザーの開発に伴い、銅(Cu)や銅合金のレーザー溶接も検討されている。特に、高パワーのディスクレーザーでは安定な溶接部の作製が可能であることが明らかにされている³⁷⁾。また、銅合金では、反射率と熱伝導度が低下し、溶融が容易になることが示されている³⁸⁾。さらに、パルスYAGレーザーと第2高調波の重畳による溶融性の増加が確認されている^{39, 40)}が、最近、ファイバーレーザーと第2高調波レーザーの重畳により溶融性の更なる増加が可能であることが確認されている⁴¹⁾。

ニッケル基耐熱合金のレーザー溶接も種々検討されてきている。パルスYAGレーザー溶接では、結晶粒界に凝固割れが起こりやすいため、注意が必要である⁴²⁾。多結晶合金や特に一方向凝固合金では、結晶粒を横切るように溶融溶接を行うと、ボンド部の結晶粒界に(溶融境界をまたいで)液化割れと凝固割れが起こる場合が多い⁴²⁾。凝固割れおよび液化割れを防止するためには、母材結晶粒の細粒化や低入熱溶接もしくは低速溶接の有効性が示されている^{42, 43)}。

3.4 プラスチックのレーザー溶着

プラスチックには熱硬化性と熱可塑性のものがあるが、レーザー溶着に用いられるのは、熱可塑性のものである。そして、レーザー溶着は、一般に、同種系の材料でレーザー透過性の材料を上板にしてレーザー吸収率の高い材料を下板にし、重ね継手で行われる。レーザー照射により、まず、下板継手部の表面(界面)でレーザーを吸収して熱

表1 プラスチックの種類とレーザ溶着が可能なプラスチックの組合せ

	PP	POM	PBT	PBT/ASA	PA6	PA66	PES	PSU	ABS	ASA	SAN	MABS
PP	◎	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
POM	×	◎	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
PBT	×	×	◎	◎	×	×	○	○	◎	◎	×	×
PBT/ASA	×	×	◎	◎	×	×	○	○	○	◎	×	×
PA6	×	×	×	×	◎	◎	×	×	×	×	×	×
PA66	×	×	×	×	◎	◎	×	×	×	×	×	×
PES	×	×	○	○	×	×	◎	◎	○	×	×	×
PSU	×	×	○	○	×	×	◎	◎	○	×	×	×
ABS	×	×	◎	○	×	×	○	○	◎	◎	◎	◎
ASA	×	×	◎	◎	×	×	×	×	◎	◎	◎	×
SAN	×	×	×	×	×	×	×	×	◎	◎	◎	×
MABS	×	×	×	×	×	×	×	×	◎	×	×	◎
ABS/PA	×	×	○	○	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	×
PS	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

を発生し、下板と上板を熔融させて溶着が進行する⁴⁴⁾。また、レーザ透過性の高い材料同士では、重ね継手部にレーザ吸収性の高い薄膜や液膜を挟んで行うレーザ溶着法もある。一方、レーザ吸収性のある材料同士では、熱伝導性の高いガラスを上下から挟んで表面の熱を奪うことにより継手界面近傍のみの温度を上昇させて熔融させる溶着法が開発されている⁴⁵⁾。これらの場合、ギャップの少ない方が良好な溶着部が作製できる。一般に、表1⁴⁶⁾にレーザ溶着の可能な組合せを示すが、同種の組合せにおいてはレーザ溶着が可能であるが、異種の組合せにおいてはレーザ溶着が困難な場合があることが報告されている。レーザ溶着により作製された製品の例を図15⁴⁷⁾に示す。自動車や医療の分野において実用化の進展が少しずつ見られる。

レーザ吸収剤としてカーボンブラック (C) が用いられるが、レーザ溶着の柔軟性を向上させるために粒子サイズの小さい顔料入りのプラスチックが開発されている^{48, 49)}。この場合、レーザ照射を吸収性のあるプラスチック側から行うことも可能である。また、レーザ溶着性を向上させるため、エラストマ薄膜や極性処理薄膜を継手界面に挿入する方法も開発され、レーザ溶着部の拡大や強度の向上が図られている⁵⁰⁾。

4. 高品質・高機能なレーザ異材接合部の作製

近年、構造物や部品の軽量化が要望されることが多い。これに対応して、多量に使用される鉄鋼材料と軽量のアルミニウム合金やマグネシウム合金などのレーザ異材接合が種々検討されてきている。鉄鋼とアルミニウム合金のレーザ異材接合結果については、すでに紹介している^{2, 51)}ので、マグネシウム合金と鉄鋼材料の接合性について紹介する。鉄 (Fe) とマグネシウム (Mg) は、Fe と Cu と同様に、金属間化合物を生成しない組合せである。鉄鋼材料とマグネシウム合金のレーザ突合せ溶接では、レーザビーム照射部を突合せ継手界面の位置から鉄鋼材料側に少しずつらせる手法により、鉄鋼材料を熔融させて、その熱によって継手接合界面においてマグネシ

樹脂部品へのレーザ溶着の適用

図15 レーザ溶着法で作製された自動車プラスチック部品の例

図16 Li イオン電池電極のレーザ溶接例

ウム合金のみを熔融させることによって界面拡散接合をし、高強度な継手が得られている⁵²⁾。AZ31 合金では、Fe (鉄鋼やステンレス鋼) 中への Al の拡散が Mg より広範囲に起こっている。一方、重ね溶接では、めっきのない裸鋼板とマグネシウム合金の場合、レーザをどちらから照射しても、Mg がスパッタとして飛散したり、接合部の面積が狭くなったりして、良好なビード外観や高強度の接合部を得るのが困難である。一方、亜鉛めっき鋼板においては、亜鉛を熔融させると接合が可能となる結果が得られている。特に、鋼板側からレーザを照射して部分溶込みの溶接部を作製し、その入熱で亜鉛めっきとマグネシウム合金を熔融させ、Mg と Zn の混合相を比較的広範囲に生成し、一部 Mg と Fe が直接拡散接合して、強度の比較的高い接合継手が得られている⁵³⁾。

最近、Li イオン電池の製造に際し、電気伝導性の良い銅とアルミニウムのレーザ異材接合法の開発が要望されている。図16に電池電極のレーザ溶接例⁵⁴⁾を示すが、重ね溶接性が種々検討されている。レーザは、一般には、反射率の低い Al 側から照射されている。薄板の溶接であることとレーザ反射率・熱伝導率の高い銅を用いているため、どのようなレーザを、どのような条件で、どちら側から照射したらよいかなどに対する結論は出ていない。数年前に銅に対する吸収率が高い第2高調波のパルス YAG レーザが開発されたが、それも含めて検討する必要があるかもしれない。

最近、超軽量であるプラスチックの利用が増加し、金属とプラスチックの接合も要望されている。それらの接合は、通常、接着剤やボルトなどの機械的な結合で行われるが、接着剤では、接着に長時間を要する、剥離強度が弱い、有害物質が排出されるなど、また、機械的な結合では、別の機械加工工程が必要である、接合用部品が必要である、設計の自由度が制限されるなど、種々の問

図17 金属 (Type 304) とプラスチック (PET) のレーザ直接接合継手の引張試験前と後の状況および接合部の高倍率 TEM 観察結果

題がある。そこで、金属とプラスチックをレーザで直接接合する簡便な方法が開発されている⁵⁵⁻⁶²⁾。その方法で得られたステンレス鋼 SUS 304 と非結晶 PET とのレーザ接合サンプルと接合部の拡大 TEM 写真を図17⁵⁶⁾に示す。引張せん断試験前後のサンプルである。試験では、プラスチック母材が伸びて破断し、その荷重は、幅 30 mm、板厚 2 mm のサンプルで、1500 から 4000 N を呈するほど高かった。鉄鋼材料、チタン、アルミニウムなどの金属とポリアミド (ナイロン)、ポリエチレンテレフタレート (PET)、ポリカーボネートなどのプラスチックの接合では、継手強度が十分に高く、プラスチック母材で破断する継手を得られている⁵⁵⁻⁶²⁾。レーザは金属の接合界面を溶融しない程度に加熱させ、プラスチックのみを溶融させる。さらに、高温部では一部のプラスチックが分解して気泡が発生し、その気泡の発生と急膨張に伴う高圧の発生により、溶融プラスチックが流動して金属表面に密着し、穴や隙間にプラスチックが侵入したアンカー効果、酸化膜を通じてファンデルワールス力や化学結合などの関与する高密着機構の発現が考えられている。

さらに、金属と CFRP とのレーザ接合も可能である。その例を図18⁶³⁾に示すが、条件によっては、PA 基の CFRP の場合、極めて高い引張せん断強度を有する継手を得られている。また、異種金属の接合では、局所電池作用による腐食が問題となる場合がある。これを防止するため、異種金属間にプラスチックを挟んだものに対してレーザ異材接合を行い、高強度接合部の作製が可能であることが確認されている。

5. 終わりに

レーザ溶接の適用は順次増加している。半導体レーザ、ディスクレーザおよびファイバーレーザの高パワー化が急速に進展し、今後の利用拡大が予想される。高速度溶接としてはファイバーレーザかディスクレーザによるリモート溶接法が注目されている。鉄鋼材料やステンレス鋼の深溶込み溶接としては、高パワーレーザ単独溶接法とハイブリッド溶接法が検討されている。通常の熱源では溶接できないような微細部の溶接については、パルス YAG レーザが利用されている。薄板溶接に対しては、パルスレーザ、半導体レーザ、ディスクレーザおよびファイバーレーザによる競合が始まっている。レーザ

図18 金属 (Type 304) と CFRP のレーザ直接接合継手と得られた継手の引張試験結果

異材溶接については今後の実用化展開が待たれる。本稿がレーザ溶接・接合法の今後の発展に貢献できれば幸いである。

参考文献

- 1) 片山：「レーザ溶接」，溶接学会誌，78-2 (2009)，pp.40-54.
- 2) 片山：「ものづくりを革新するレーザ溶接」，溶接学会誌，78-8 (2009)，pp.682-692.
- 3) T. Sakagawa, . Nakashiba and H. Hiejima: "Laser Micro Welding System and its Application to Seam Welding of Rechargeable Battery", Physics Procedia (Proc. of 6th Int. WLT Conf. on Lasers in Manufacturing), 12 (2011), pp.6-10.
- 4) Laserlineカタログ；Laserline 社 (Web:http://www.laserline.de/diode_laser/diode_laser_material_processing.html)；丸文株式会社；(http://www.marubun.co.jp/product/laser/process/qgc18e0000006gm2.html)
- 5) 辻：「高出力ファイバーレーザと最新加工事例の紹介」，高温学会誌，35-4 (2009)，pp.171-175. (http://japanese.ipgphotonics.com/)
- 6) フラウンホーファー IWS Web 2009 Annual report (Web; http://www.iws.fraunhofer.de/e_welcome.html)
- 7) トルンプ株式会社 Web (http://www.jp.trumpf.com/)
- 8) D. Reitemeyer, T. Seefeld and F. Vollertsen: "Online Focus Shift Measurement in High Power Fiber Laser Welding", ICALEO 2010, LIA, (2011), pp.13-20. (CD)
- 9) Zhang X., Ashida E., Katayama S. and Mizutani M.: "Deep Penetration Welding of Thick Section Steels with 10 kW Fiber Laser", 溶接学会論文集，27-2 (2009)，pp.64s-68s.
- 10) D. Petring: "Enhanced Capabilities of Laser Welding by Hybridization and Combination Techniques", 第70回レーザ加工学会講演論文集，(2008)，pp.7-12.
- 11) R. Brockmann: "The laser as a versatile tool: Switching from radiation quality by means of dual core fibre", EALA - European Automotive Laser Applications 2011, (2011)，pp.293-310.
- 12) M. Brandner: "Laser Applications for Manufacturing of Li-Ion Batteries Mercedes Benz S400 Hybrid", EALA - European Automotive Laser Applications 2011, (2011)，pp.311-320.
- 13) 平嶋，梅林，田口，下山，神岡，丸谷，村田，平松：「美しい車体を作るーレーザ溶接ステンレス構体，FSJ ハニカムアルミ構体」，川崎重工技報，No.160 (2006)，pp.50-53.
- 14) 三瓶：「自動車産業へのレーザ応用の変遷」，レーザ加工学会誌，16-1 (2009)，pp.8-15.
- 15) 吉川，樽井，森，長谷川：「自動車車体部品へのリモート溶接適用」，LMP シンポジウム2007「輸送機器のレーザ

- 加工」, (社) 日本溶接協会 LMP 研究委員会, (2007), pp.3-10.
- 16) N. Yoshikawa, K. Mori and T. Sakamoto: "Development of New Remote Welding System for All Closure Assembly at Nissan", EALA - European Automotive Laser Applications 2011, (2011), pp.321-334.
 - 17) 片山, 松本, 大西, 阿部, 川人, 水谷: 「ファイバーレーザー溶接適用基盤技術の開発」, (社) 溶接学会 平成21年度春季全国大会 シンポジウム 溶接技術イノベーションへのシナリオ -NEDO「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」プロジェクトから-, 東京, (2009.4.22), 溶接学会全国大会講演概要, 第84集, (2009-4), pp.S-13-S-14.
 - 18) 大西, 川人, 水谷, 片山: 「高出力・高輝度レーザーによる高張力鋼厚板のホットワイヤ併用突合せ溶接法」, 溶接学会論文集, 29-1, (2011), pp. 41-47.
 - 19) M. Litmeyer and H. Lembeck: "Laser Welding in Shipbuilding - report of practical application-", 第70回レーザー加工学会講演論文集, (2008), pp.139-143.
 - 20) 古賀: 「レーザー・アークハイブリッド溶接の造船への適用」, LMP シンポジウム2010「レーザーおよびレーザー加工の基礎と応用」, 日本溶接協会レーザー加工技術研究委員会, 大阪, (2010), pp.81-87.
 - 21) S. Katayama: "Fundamentals of hybrid laser-arc welding, Hybrid laser-arc welding of steel, in Hybrid laser-arc welding", ed. by F. O. Olsen, Woodhead Publishing Limited, (2009), pp.28-46, pp.299-311.
 - 22) 王, 西村, 片山: 「アルミニウム合金への FLA 溶接法の適用」, 溶接技術, 57-5 (2009), pp.90-94.
 - 23) 王, 西村, 片山, 水谷: 「軟鋼のフィラー・レーザー・アークハイブリッド溶接法 (FLA 溶接法) による高速溶接に関する検討」, 溶接学会全国大会講演概要, 第84集 (2009-4), 東京, pp.206-207.
 - 24) 多羅沢, 曾我: 「厚板狭間先レーザー溶接継手性能及び JSME 施工法の取得」, 第74回レーザー加工学会講演論文集, レーザ加工学会, 75 (2010), pp.137-143.
 - 25) X. Zhang, E. Ashida, S. Tarasawa, Y. Anma, M. Okada, S. Katayama and M. Mizutani: "Welding of thick stainless steel plates up to 50 mm with high brightness lasers", Journal of Laser Applications, 23-2 (2011), pp.022007-1-7.
 - 26) Y. Abe, M. Mizutani, Y. Kawahito and S. Katayama: "Deep Penetration Welding with High Power Laser under Vacuum", Proc. of 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2010), (2010), pp.648-653.
 - 27) S. Katayama, Y. Abe, M. Mizutani, and Y. Kawahito: "Development of Deep Penetration Welding Technology with High Brightness Laser under Vacuum", Physics Procedia, 12, Part 1(2011), pp.75-80.
 - 28) S. Katayama, Y. Abe, M. Mizutani, and Y. Kawahito: "Deep Penetration Welding with High Power Laser under Low Vacuum", IIV Commission IV, (2011), IIV Doc. IV-1055-11/ XII-2046-11/212-1204-11, pp.1-9.
 - 29) S. Katayama, Y. Kawahito and M. Mizutani: "Weld Penetration, Defect Prevention and Phenomena in Laser and Hybrid Welding of Aluminium Alloys", INALCO 2007 (Proc. of the 10th Int. Conf. on Joints in Aluminium), Osaka, (2007) pp.53-62.
 - 30) A. Scherz: "Laser beam welding of aluminum doors in the large scale production on the new car generation of the BMW Group", Proc. of 8th Int. Conf. on Beam Technology, Halle, (2010), pp.80-83.
 - 31) C. Ebert: "Car body presentation: Challenges entailed in laser welding of the new Audi A8", EALA - European Automotive Laser Applications 2011, (2011), pp.59-68.
 - 32) J. Schumacher, I. Zerner, G. Neye and K. Thormann: "Laser Beam Welding of Aircraft Fuselage Panels", Proc. ICALEO 2002, LIA, (2002), Section A-Welding, pp. 311-317.
 - 33) D. Ditttrich, J. Standfuss, J. Liebscher, B. Brenner and E. Beyer: "Laser Beam Welding of Hard to Weld Al Alloys for a Regional Aircraft Fuselage Design -First Results", Physics Procedia, 12, Part 1(2011), pp.113-122.
 - 34) 米谷: 「レーザー・MIG ハイブリッド溶接のアルミニウム車両への適用」, 近畿車輛技法, 10 (2006), pp.33-35.
 - 35) 中村浩: 「レーザー応用の新展開-マイクロレーザー溶接の眼鏡フレームへの応用」, 第75回レーザー加工学会講演論文集, レーザ加工学会, 75(2011), pp.39-43.
 - 36) M. Wahba, M. Mizutani, Y. Kawahito and S. Katayama: "Keyhole stability in disc laser welding of AZ31B and AZ61A magnesium alloys and weld metal properties", Science and Technology of Welding and Joining, 15-7 (2010), pp.559-566.
 - 37) S. Saitoh, K. Wakabayashi and S. Katayama: "Characteristics of Copper Welding with High Power Disk Laser", Proc. of LAMP 2009, Kobe, Japan (2009). (JLPS Website)
 - 38) D. Petring and V. N. Gonedhany: "Parameter Dependencies of Copper Welding with Multi-kW Lasers at 1 Micron Wavelength", Physics Procedia, 12, Part 1(2011), pp.95-104.
 - 39) 文, 水谷, 片山, 松縄: 「異波長重畳レーザーによる各種金属材料の溶融特性」, 溶接学会論文集, 20-4 (2002), pp.449-457.
 - 40) 川人, 船見, 岡田, 片山: 「純銅のレーザーマイクロスポット溶接におけるインプロセスモニタリングと適応制御」, レーザー研究, 31-3 (2003), pp.231-235.
 - 41) A. Hess, R. Schuster, A. Heider, R. Weber and T. Graf: "Continuous Wave Laser Welding of Copper with Combined Beams at Wavelengths of 1030 nm and of 515 nm", Physics Procedia, 12, Part 1(2011), pp.88-94.
 - 42) 片山, 柴柳, 池内, 野城: 「Ni 基単結晶超耐熱合金のレーザー結晶制御凝固補修・造形に関する基礎的検討」, 革新複合機能化製造プロセスシンポジウム資料, (2006), pp.69-76.
 - 43) 篠崎賢二, 山本元道, 温 鵬, 田村知子: 「溶接凝固割れ発生の予測」, 溶接学会誌, 77-4 (2008), pp.20-25.
 - 44) 三瓶: 「レーザーによる樹脂の溶着技術」, レーザ加工学会誌, 14-4 (2007), pp.211-215.
 - 45) 黒崎: 「CO₂レーザーによる樹脂溶着-ヒートシンク利用による無損傷溶着への展開-」, レーザ加工学会誌, 14-4 (2007), pp.235-240.
 - 46) 舊橋章: 「プラスチックレーザー溶接の範囲を拡大した BASF 社の新素材 (1)」, 工業材料 55-4, (2007), pp.91-95.
 - 47) 三瓶: 「レーザー加工の過去〜現在〜将来 -自動車産業を中心に」, 第75回レーザー加工学会講演論文集, (2011), pp.73-78.
 - 48) 木原: 「レーザーを用いた新規の樹脂溶着法」, レーザ加工学会誌, 14-4 (2007), pp.231-234.
 - 49) 菅原: 「レーザー溶着用の透過色素と吸収色素の開発, 透過性を阻害する要因と対策」, 「レーザー樹脂溶着技術 ノウハウ集」, 監修長谷川, 責任編集三瓶, 技術情報協会, (2009), pp.61-74.
 - 50) 水戸岡, 日野, 浦上, 高田: 「エラストマーシートを用いた異種プラスチックのレーザー接合」, レーザ加工学会誌, 16-2 (2009), pp.136-140.
 - 51) 片山: 「異種材料のレーザー接合技術」, レーザー研究, 38-8 (2010), pp.594-602.
 - 52) S. Katayama, M. Morita and A. Matsunawa: "Laser Joining of Steel and Magnesium Alloy", Proc. DIS '02 (Designing of Interfacial Structures in Advanced

- Materials and Their Joints), Edited by M. Naka, Osaka, (2002), pp.747-750.
- 53) M. Wahba, Y. Kawahito and S. Katayama: "Application of keyhole and heat-conduction modes to laser dissimilar metals welding of magnesium alloy and steel", Proc. ICALEO 2011, LIA, Orlando, (2011), To be presented in October.
 - 54) J. Gedicke, B. Mehlmann, A. Olowinsky and A. Gillner: "Laser Beam Welding of Electrical Interconnections for Lithium-Ion Batteries", Congress Proc. of ICALEO 2010, LIA, Anaheim, 103 (2010), pp.844-849.
 - 55) 片山聖二, 川人洋介: 「第3編 手法開発 第4章 金属とプラスチックのレーザー直接接合」; 松本章一監修 “接着とはく離のための高分子 —開発と応用—”, シーエムシー出版, (2006), pp.175-187.
 - 56) Y. Kawahito, A. Tange, S. Kubota and S. Katayama: "Development of Direct Laser Joining for Metal and Plastic", Congress Proc. of ICALEO 2006, LIA, Scottsdale, Paper#604 (2006), pp.376-382. (CD)
 - 57) S. Katayama, Y. Kawahito, A. Tange and S. Kubota, "Laser-Assisted Metal and Plastic (LAMP) Joining", Online Proc. of LAMP 2006, JLPS, #06-7 (2006).
 - 58) S. Katayama, Y. Kawahito, Y. Niwa and S. Kubota: "Laser-Assisted Metal and Plastic Joining", Proc. of LANE 2007, (2007), pp.41-51.
 - 59) 片山聖二, 川人洋介, 丹羽悠介, 丹下章男, 久保田修司: 「ステンレス鋼と非結晶性ポリアミド樹脂とのレーザー直接接合 —金属とプラスチックのレーザー (LAMP) 接合—», 溶接学会論文集, Vol.25, No.2, (2007), pp.316-322.
 - 60) S. Katayama and Y. Kawahito: "Laser direct joining of metal and plastic", Scripta Materialia, Vol.59, No. 12, (2008), pp.1247-1250.
 - 61) 川人洋介, 丹羽悠介, 片山聖二: 「LAMP接合法によるアルミニウム合金とステンレス鋼との接合」, 第70回レーザー加工学会講演論文集, 70, (2008), pp.135-138.
 - 62) Y. Niwa, Y. Kawahito, S. Kubota and S. Katayama: "Development and Improvement in Laser Direct Joining of Metal and Plastic", Proc. ICALEO 2007, LIA, Orlando, (2007), pp.461-470.
 - 63) Y. Niwa, Y. Kawahito, S. Kubota and S. Katayama: "Evolution of LAMP Joining to Dissimilar Metal Welding", Proc. ICALEO 2008, LIA, Temecula, CA, (2008), pp.311-317.
 - 64) S. Katayama, K.-W. Jung, Y. Kawahito: "High Power Laser Cutting of CFRP, and Laser Direct Joining of CFRP to Metal", Proc. of 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2010), (2010), pp.333-338.