ステンレス鋼と非結晶性ポリアミド樹脂とのレーザ直接接合*

－ 金属とプラスチックのレーザ(LAMP)接合 －

片山 聖二**, 川人 洋介**, 丹羽 悠介***, 丹下 章男****, 久保田 修司****

Laser Direct Joining between Stainless Steel and Amorphous Polyamide Plastic*

－ Laser-Assisted Metal-Plastic (LAMP) Joining －

by KATAYAMA Seiji**, KAWAHITO Yousuke**, NIWA Yusuke***, TANGE Akio**** and KUBOTA Shyuji****

Metals and plastics have been widely used in several industrial applications such as automobiles, aircrafts and electronic devices. Joining of a metal and a plastic is important and necessary from a fundamental viewpoint of manufacturing. The joining has been performed using adhesion bonds (glues) or mechanical tools such as rivets. However, it has some problems in terms of environment, preserved conditions and mass production. It is thus expected that a noble innovative method should be developed for direct joining of metals and plastics. Therefore, we have newly developed a noble Laser-Assisted Metal and Plastic (LAMP) joining method. The LAMP joining method could produce a strong joint between a Type 304 stainless steel plate and an amorphous polyamide plastic sheet. The tensile shear test samples of 30 mm width and 2 mm thickness possessed the tensile shear loads of over 1,560 N. Moreover, the tensile shear load of 3,390 N was achieved for a wide LAMP joint including sub-millimeter-sized bubbles, which were formed from rapid heating and quenching due to the heat input of a line-beam-shaped diode laser. It was found that the joint strengths depended upon not only the area of a joint part but also bubbles formation and size. The SEM images of the LAMP joints demonstrated that the stainless steel and the polyamide plastic were closely bonded in micro size.

Key Words: Metal, Plastic, Direct laser joining, Stainless steel, Polyamide, Tensile shear load, Bubbles

1. 緒 言

金属およびプラスチックは、それぞれ強度や靱性などおよび軽量や成形性などの特性が優れているので、自動車、航空機、エレクトロニクスなどの種々の産業分野において広範囲に利用されている。ところで、金属とプラスチックの接合は、接着剤による溶着、リベットやボルトなどによる機械的な結合が一般的である。しかし、溶着では、環境面から揮発性有機化合物（VOC）の排出規制が制定され、また、接着時間が長い、剥離強度が弱い、適切な保管・品質管理が必要であるなど、解決すべき課題が多い。一方、機械的な結合では、別の機械加工工程や接合用部品が必要であり、設計の自由度が制限され、生産性の向上が難しいなどの課題がある。

レーザは、パワー密度が自由に調整でき、どのような材料でも、加熱、溶融、蒸発させることができる。したがって、金属とプラスチックの接合課題の解決策のひとつとし

て、レーザで直接接合する異材接合法が考えられる。これまで、金属同士およびプラスチック同士のレーザ接合技術については活発に研究開発され、金属同士だけでなくプラスチック同士の実用化例^{1) - 3)}も増加している。しかし、金属とプラスチックとの異材のレーザ接合についてトライされはじめているが、接合部の強度特性を評価し、強固な接合部が得られたという報告や、その接合現象まで検討した研究報告はない。

そこで、一般的に使用される Nd:YAG レーザおよび半導体レーザを用いて、金属とプラスチックのレーザ直接接合を試みた。以下、この方法を LAMP 接合法 (Laser-Assisted Metal and Plastic Joining Method) と呼ぶ。本研究では、金属であるステンレス鋼板上にレーザ透過性の非結晶性ポリアミド板を設置し、レーザを種々の条件において照射し、LAMP 接合の可能性について検討した。得られた接合継手に関しては、引張せん断試験を行い、継手強度を評価した。特徴的な継手については、接合部の形成プロセスの観察を高速度ビデオカメラにより行った。また、溶接方向に垂直な線状のビーム形状である半導体レーザを用い、接合部に発生する気泡を微細化することで、高強度化の可能性について検討した。高い継手強度が得られた接合部に対しては、走査型電子顕微鏡（SEM）により断面観察を高倍率で実施し、金属とプラスチックの接合界面状態を微小レベルで確認した。

*受付日 平成 19 年 1 月 12 日 受理日 平成 19 年 4 月 27 日
平成 18 年度春季全国大会で発表
平成 18 年度秋季全国大会で発表

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

***学生員 大阪大学 工学研究科 Student Member, Graduate School of Engineering, Osaka University

**** 東洋紡績(株) 総合研究所 Toyobo Co., Ltd. Research Center

2. 使用材料, 実験装置および実験方法

2.1 使用材料および実験装置

使用した金属は, オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 であり, サイズは $70 \times 30 \times 3^t$ mm である. 一方, 使用したプラスチックは, サイズが $70 \times 30 \times 2 \sim 2.3^t$ mm の非結晶性ポリアミド PA で, 一般にナイロン (デュポン社の商品名) と呼ばれるエンジニアリングプラスチックのひとつである. その分子構造式, 温度特性, 光学特性などを Table 1 に示す. 非結晶性プラスチックは, 同種の結晶性のものよりも, 一般的に光透過性が優れている. 試料表面形状については, 接触式の表面粗さ測定を実施した結果, SUS304 および PA の平均粗さ Ra は, それぞれ $0.16 \mu\text{m}$ および $0.01 \mu\text{m}$ であった.

本実験では, 最大パワー 1.8 kW の連続発振の Nd:YAG レーザ (波長 λ : 1,064 nm) と最大パワー 200 W の半導体レーザ (波長 λ : 807 nm) の 2 種類のレーザ熱源を使用した.

Table 1 Molecular formula, sheet size, and thermal and optical properties of amorphous PA sheet used.

Plastic (Molecular formula)	Amorphous PA: TOYOBO T-714H	
	$\left[\begin{array}{c} \text{C} - \text{R}_1 - \text{C} - \text{N} - \text{R}_2 - \text{N} \\ \parallel \quad \parallel \quad \quad \\ \text{O} \quad \text{O} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right]_n$ R_1, R_2 : aromatic series or hydrocarbon group	
Size	$70 \times 30 \times 2^t (\sim 2.3^t)$ mm	
Glass-transition temperature, T_g	433 K	
Decomposition temperature, T_D	673 ~ 773 K	
Transmissivity (wavelength, λ)	λ : 1,064 nm	91 %
	λ : 807 nm	93 %

2.2 実験方法および接合部の評価

Nd:YAG レーザを用いた実験方法を Fig. 1 に示す. SUS304 の薄板に PA の薄板を重ねて, その接合界面が, 焦点はずし距離が 22~32 mm になるように固定し, PA 側からレーザを照射し, 溶接速度 5 ~ 20 mm/s で, レーザパワーを 170 W から 1.4 kW まで変化させて LAMP 接合の可能性を検討した. 通常, いずれも表面状態は受入れ材のままで, 脱脂処理を行った後に用いた.

本実験で使用した YAG レーザ光のビーム形状およびビーム径を Fig. 2 に示す. また, シールドガスは, レーザ光と同軸上のノズル (内径 $\phi 6$ mm) から, PA 薄板表面のゴミの除去, 新たなゴミの付着防止およびプラスチックの冷却を目的として, Ar または N_2 ガスを流量 50 l/min で板表面の 10 mm 上方から吹きつけた. また, 試料の固定方法としては, 通常の重ね溶接と同様に, 試料の照射位置から約 10 mm 離れた位置に押え板を設置して規定トルクで締め付け, SUS304

Fig. 1 Schematic experimental set-up of LAMP joining method with Nd:YAG laser beam.

Fig. 2 Nd:YAG laser beam diameters and profiles at 500 W power.

Fig. 3 Schematic experimental set-up of LAMP joining with LD beam, and its shape measured at 170 W laser power.

薄板と PA 薄板とを密着させた. なお, 締め付け時の圧力は約 0.5 N/mm^2 であった.

一方, 半導体レーザを用いた実験状況とビーム形状を Fig. 3 に示す. ビーム形状はライン状であり, LAMP 接合部の形成状況と接合部の引張せん断強度に及ぼす接合条件の影響を調査した. 接合条件は, レーザパワーが 170 W で, 溶接速度が 2~3.5 mm/s である. シールドガスは, 水平から斜め 30 度傾けた 0.2×20 mm の長方形ノズル口から, N_2 ガスを流量 35 l/min で吹きつけた.

LAMP 接合部の形成過程については, 1 kW のキノセンランプを照明として用いて 10,000 f/s の高速度で観察した. 得

られたサンプルに関しては、LAMP 接合継手のマイクロレベルの接合状態を調べるために、SEM（エリオニクス製 ERA-8800FE）による観察を行った。

さらに、LAMP 接合継手の引張せん断強度（荷重）について、島津製 AG-10kNE 引張試験機により引張速度 1 mm/s で評価した。なお、接着剤を利用した継手の引張せん断試験では、破壊強度が接着端面の強さで決定され、接合部の幅に比例して大きくならない⁴⁾ので、引張強度特性としては、30 mm 幅の試験片で得られた引張せん断荷重で評価した。

3. 実験結果および考察

3.1 金属とプラスチックのレーザ直接(LAMP)接合

Fig. 1 に示したように、最大パワー 1.8 kW の YAG レーザ装置を用い、種々の条件で SUS304 と PA のレーザ直接 (LAMP) 接合を試みた。得られた LAMP 接合継手の例を Fig. 4 に示す。その特徴は、重ね部界面近傍の PA 接合部に溶融痕とその内部に 1 mm 以下の小さな気泡の生成が確認できることである。なお、金属では、液相中にある空孔を気泡、固相中にある空孔を気孔と呼ぶが、プラスチックでは、固相中にある空孔も一般的に気泡と呼ばれているので、本論文では、気泡という用語を用いる。

次に、レーザパワーが 220～850 W での LAMP 接合部を Fig. 5 に示す。なお、接合部を明確にするため、接合部と未接合部との境界を白線で描いている。平均接合部幅は、白線で囲まれる接合面積をサンプルの幅 30 mm で割って算出した。レーザパワー 220 W では、気泡は接合部の一部に点在しているだけで、あまり多くない。310 W 以上では、1 mm 以下のサイズの気泡が接合部全体に形成し、比較的大きな気泡は中心線状に分布している。さらに高パワーの 560 W および 850 W では、成長した虫くい(Worm-hole)形状のものも確認される。この接合部の気泡は、レーザ加熱によって熱分解された PA の分解ガスにより発生したものと推察される。一方、平均接合部幅に関しては、レーザパワーを 220 W から 850 W まで増加させると、レーザパワーにほぼ比例して約 3 mm から 7.8 mm まで増加していた。

Fig. 4 Typical LAMP joining surface appearance with bubbles produced at 20 mm defocused position with 10 mm/s welding speeds.

得られた 30 mm 幅の継手に対して、引張せん断試験を行った。その結果を Fig. 6 に示す。横軸はレーザパワーで、縦軸は引張せん断荷重である。レーザパワーが 310 W までは、引張せん断荷重はレーザパワーに比例して増加し、310 W でプラスチックの母材で破断し、最大引張せん断荷重 1,560 N が得られた。これは、レーザパワーの増加によって、接合部幅が増加し、接合面積が増えたためと考えられる。しかし、レーザパワーを 310 W 以上に増加させると、接合部幅が増加したにもかかわらず、接合部界面（近傍）で破断し、引張せん断荷重は減少した。これは、気泡が大きくなりすぎ、接合部強度が低下したためと推察される。

以上、SUS304 と非結晶性 PA の LAMP 接合を行った結果、2.3 mm 厚で 30 mm 幅の引張せん断試験片で、最大荷重 1,560 N と非常に高強度な継手部が得られ、金属とプラスチックが直接接合できる LAMP 接合 (Laser-Assisted Metal and Plastic Joining Method) が可能であることが判明した、しかし、LAMP 接合の引張せん断荷重は、接合部面積が増えると、それに伴って高くなるとはかぎらないこともわかった。これは気泡が大きくなりすぎ、そこで破断するようになった

Laser power	220 W	310 W	560 W	850 W
Surface appearance				
Bubbles formation				
Average joint width	3 mm	3.8 mm	5.7 mm	7.8 mm

Fig. 5 Surface appearances, bubbles formation situations and average joint widths in LAMP joints at different laser powers.

Fig. 6 Tensile shear loads (strengths) of LAMP joints at 20 mm defocused distance with 10 mm/s welding speed as function of laser power.

ためと推察された。

3.2 LAMP 接合プロセス現象の観察

3.1 節では、接合部の引張せん断強度は接合部の面積に単純には比例しないことが判明したので、本節では、接合部に含まれる気泡に着目して調査を行った。気泡の形態が異なる 220 W、310 W および 560 W のレーザ接合条件について、接合部の形成過程を 10,000 f/s で高速度ビデオ観察を行った。その結果を Fig. 7 に示す。なお、左上の数字は、計測時間 t であり、左端の画像は、照明の状態で明確に観測できた気泡の生成過程および成長過程を拡大して示したものである。レーザパワー 220 W では、レーザ照射領域に点在した気泡の発生が確認された。気泡の発生時間は 4 ms 程度であった。また、310 W では、レーザ照射領域の中央部に泡を包含する溶融領域が確認され、その内部の先端部近傍では気泡が頻繁に発生する様子が観察された。この気泡の発生時間も 4 ms 程度であった。なお、先端部以外では気泡の顕著な変化は確認できなかった。一方、レーザパワー 560 W では、右下の写真からわかるように、溶融部先端部から常にガスの噴出が確認され、その噴出に伴って溶融状態の樹脂も吹き出ている様子が観察された。また、先端部以外の溶融部内部では気泡が 80 ms 程度経てゆっくりと成長する様子が確認された。

次に、LAMP 接合中の接合部の温度測定をした。SUS 304 板表面温度を熱電対で計測した結果、表面での最高加熱温度は、レーザパワーが 220 W から 850 W に増加すると、700 K~1,300 K 以上に増加した。この結果より、接合界面において SUS 304 は溶融しないが、PA は溶融し、分解温度以上に加熱されていることが確認された。

したがって、金属とプラスチックがレーザで直接接合できる LAMP 接合法では、接合部の気泡が重要な働きをしていることが判明した。強固な LAMP 接合部を得るためには、溶融部が生成し、その近傍で気泡が急速に発生して、融液

Fig. 7 High-speed observation images of LAMP joining phenomena under different laser power conditions.

を金属部に密着させるような接合過程が好ましいことがわかった。

3.3 LAMP 接合性に及ぼすレーザ照射条件の影響

レーザ接合条件を種々変化させて、それらの LAMP 接合性に及ぼす影響を調査した。

まず、焦点はずし距離を 20 mm から 25 および 30 mm とし、スポット径を大きくして作製した LAMP 接合継手を引張せん断試験で評価した。その結果を Fig. 8 に示す。最大引張せん断荷重は、焦点はずし距離 30 mm で、母材破断をして 2,000 N であった。最大引張せん断荷重を記録した条件では、焦点はずし距離 20 mm の 3.8 mm に比べ、平均接合部幅が 6.3 mm と大きく増加していた。このことから、接合部幅の増加が引張せん断強度の向上に寄与した要因のひとつと考えられる。なお、レーザパワーを最大引張せん断荷重が得られたもの以上に高くして接合部幅を広げても、引張せん断荷重は Fig. 6 の強度と同様に減少した。したがって、焦点はずし距離を 20 mm から 30 mm に増加させると、最大引張せん断荷重は 2,000 N と改善されるが、接合部幅には比例しないことも確認された。

次に、最大強度 2,000 N が得られた焦点はずし距離 30 mm で、溶接速度 5、10 および 20 mm/s においてレーザパワーを 170 W から 1,400 W まで変化させて LAMP 接合性に及ぼす溶接速度の影響について検討した。得られた引張せん断試験の結果を Fig. 9 に示す。引張せん断荷重は、溶接速度 10 mm/s、レーザパワー 720 W で母材破断をしたもので得られた 2,000 N が最大であった。低速 5 mm/s では、平均接合部幅が 7.6 mm と増加したにもかかわらず、最大引張せん断強度は 1,600 N と低く、母材破断と接合部破断が混在する引張せん断試験結果となった。また、発生した気泡には、1 mm

Fig. 8 Tensile shear loads of LAMP joints at 20, 25 and 30 mm defocused distances and 10 mm/s welding speed as function of laser power.

Fig. 9 Tensile shear loads of LAMP joints at 5, 10 and 20 mm/s welding speed and 30 mm defocused distance as function of laser power.

以上の大きく成長したサイズのものも存在し、低速であるため、気泡が成長したと考えられる。一方、高速 20 mm/s では、平均接合部幅が 6.3 mm と溶接速度 10 mm/s の場合と変わらず、1,970 N の同等な引張せん断荷重が得られた。

なお、レーザパワーが 1.2 kW を越えると、母材破断が起こっているが、引張せん断荷重は 1,500 N 以下になっており、高パワーレーザによるプラスチック母材自体の劣化が起こる可能性が考えられる。そこで、高パワー密度のレーザ光を非結晶性 PA にのみ照射して吸収・透過させ、その試料の引張せん断試験を行った。その結果、レーザ照射の非結晶性 PA は受入れ母材の強度である 4,000 N とほぼ変わらない値が得られ、高パワー密度のレーザ光が一部吸収され、透過しただけではプラスチック PA はダメージを受けないこともわかった。つまり、3.1 節でも述べたが、高パワーレーザの場合、大きな気泡が形成することが継手の引張せん断強度の低下の原因であると考えられる。

以上の結果より、適切な入熱方法が重要であり、本実験下では、レーザパワー 720 W で溶接速度 10 mm/s の場合、母材破断をし、最大引張せん断荷重 2,000 N が得られた。

LAMP 接合では、気泡が大きくなると引張せん断荷重（強度）が低下した。そこで、大きな泡の生成を抑制するように、レーザ光のビーム形状をスポット形状から接合の進行方向に垂直なライン形状に変更し、気泡の形成状況と接合継手の改善の可能性について検討した。

半導体レーザパワー 170 W で、溶接速度を変えて得られた LAMP 接合部を Fig. 10 に示す。平均接合部の幅は、8.3 mm と広いが、接合部内の気泡が 1 mm 以下と非常に細かく密集している。それらの継手の引張せん断試験結果を Fig. 11 に示す。最大引張せん断荷重は 3,390 N となり、母材破断をする超高強度の接合部が得られた。

最後に、LAMP 接合法で検討した各条件とそれらで得られた最大引張せん断荷重を Table 2 にまとめて示す。なお、

Fig. 10 LAMP joint surface appearances with bubbles, using 170 W LD beam at 2.5 mm/s welding speed.

Fig. 11 Tensile shear loads of LAMP joints with LD beam as function of welding speed.

Table 2 Maximum tensile shear loads and LAMP joining conditions for production of joints with such high strengths.

Condition	Power density	Welding speed	Beam spot	Laser irradiation direction	Average joint width	Tensile shear load (fracture morphology)
1	37 W/mm ²	10 mm/s	φ 4.6 mm (Gaussian)	Plastic side	3.8 mm	1,580 N (Base metal fracture)
2	35 W/mm ²	10 mm/s	φ 7.2 mm (Gaussian)	Plastic side	6.3 mm	2,000 N (Base metal fracture)
3	38 W/mm ²	2.5 mm/s	1.2 × 9.4 mm (line)	Plastic side	8.3 mm	3,390 N (Base metal fracture)

パワー密度は、最大引張せん断荷重が得られたレーザパワーをそのときの面積（ $1/e^2$ ビーム径から算出）で割って計算した。プラスチック側からのレーザ照射では、パワー密度が 37 W/mm² 前後の値となった。このパワー密度は、適度な気泡の発生と密接に関係していると考えられる。また、本パワー密度では、引張せん断荷重が平均接合部幅に比例して増加していることが読み取れる。したがって、接合部幅の増加に伴って、引張せん断荷重が増加したのは、引張せん断試験時の PA 板の変形が接合部幅の増加によって抑制され、曲げモーメントの負荷が少なくなったことが考えられる。

3.4 LAMP 接合機構と接合の高強度化

継手の接合状態を SEM により観察した。高強度の接合部が得られた半導体レーザ接合継手の SEM 観察例を Fig. 12

に示す。サブミクロンレベルでしっかりと SUS304 と PA が結合している。このサブミクロンレベルの密着した接合は、非常に強硬な物理的な結合であるアンカー効果やファンデルワールス力などが期待できる。また、金属との接合に酸素 (O) を含む塩基の関与が指摘されることがある^{5)~7)}が、LAMP 接合でも、界面の PA が分解温度以上に加熱されていることから金属接合面では O を介する化学結合も期待される。

以上の接合部の SEM 観察結果および接合時のビデオ観察結果や温度計測結果から、金属とプラスチックとの LAMP 接合機構を推定した。その模式図を Fig. 13 に示す。照射されたレーザー光は、非結晶性 PA を通過して SUS304 板表面を加熱し、この熱が重ね部界面近傍の PA を急速に加熱して PA を熔融 (非結晶質から流動可能な融液へと変化) させ、分解温度以上になったところでは気泡を発生させると考えられる。その時、急速な加熱により発生した気泡の発生・膨張の圧力によって、高温で活性化した PA の融液が SUS304 表面に押しつけられて、密着部が生成したと考えられる。したがって、本レーザー直接接合法では気泡の発生が非常に重要であり、接合部に気泡が発生している接合を LAMP 接合と呼ぶ。

特に、パワー密度約 $35\sim40\text{ W/mm}^2$ の条件では、1 mm 以下の小さい気泡が接合部全体に発生し、引張せん断試験では、PA 母材で破断し、その時の接合部幅に比例して最大引張せん断荷重約 1,600 N $\sim$ 3,400 N が得られ、母材の引張強度 4,000 N に対し半分以上の強固な LAMP 接合継手の作製が可能であることが判明した。

一方、レーザーパワーを過剰に投入した場合には、熔融部の先端部からガスの噴出が起こり、LAMP 接合時の重要な

要素である気泡の発生時の圧力が利用できなかったこと、先端部以外の (レーザービームの中心部近傍の) 高温部では気泡が合体・成長し、大きな気泡が形成したことなどにより、LAMP 接合強度が低下したと推察される。なお、LAMP 接合強度の低下には、高パワー密度のレーザー光がプラスチックを透過する際に、材料自身にダメージを与えた可能性も考えられたが、その影響は小さいと判断された。

4. 結 言

本研究では、連続発振の Nd:YAG レーザと半導体レーザーの 2 種類のレーザー熱源を用い、金属材料のステンレス鋼薄板とプラスチック材料の非結晶性ポリアミド薄板とのレーザー直接接合 (LAMP 接合) の可能性を検討し、引張せん断荷重 (強度) で評価した。得られた結果は以下の通りである。

1) 金属とプラスチックのレーザー直接接合とその接合現象について、

- ① SUS304 と非結晶性 PA の LAMP 接合を行った結果、2.3 mm 厚で 30 mm 幅の引張せん断試験片で、最大荷重 1,560 N と非常に高強度な継手部が得られ、金属とプラスチックが直接接合できる LAMP 接合 (Laser-Assisted Metal and Plastic Joining Method) が可能であることが判明した、
- ② レーザパワーが小さいと、接合部幅が狭く、気泡の生成も少ないと接合強度は低かった。
- ③ LAMP 接合の引張せん断強度は、接合部面積が増えると、それに伴って高くなるとはかぎらないこともわかった。これは気泡が大きくなりすぎたためと推察された。
- ④ LAMP 接合法では、接合部の気泡が重要な働きをしていることが判明した。強固な LAMP 接合部を得るためには、熔融部が生成し、その終焉部近傍で気泡が急速に発生して、融液を金属部に密着させる接合過程が好ましいことがわかった。

2) LAMP 接合強度に及ぼすレーザー接合条件の影響について、

- ① 焦点はずし距離を 20 mm から 30 mm に増加させると、最大引張せん断荷重は 2,000 N と改善された。
- ② 半導体レーザーのラインビーム形状を用いた LAMP 接合により、最大引張せん断荷重は 3,390 N と驚異的な接合強度を達成した。また、この継手の SEM 観察結果からサブミクロンレベルでの SUS304 と非結晶性 PA との密着した接合が確認され、非常に強硬な物理的・化学的な結合が期待できることもわかった。
- ③ 高強度な接合部を得るためには、適切な気泡を生成するように、レーザーパワー、焦点はずし距離 (パワー密度) および溶接速度の適切な条件の組合せが重要であることが確認された。

Fig. 12 SEM image of LAMP joint of SUS304 and PA.

Fig. 13 Schematic illustration of LAMP joining process.

- ④ パワー密度約 $35 \sim 40 \text{ W/mm}^2$ の条件では、1 mm 以下の気泡が接合部全体に発生し、最大引張せん断荷重 1,600 ～ 3,400 N が得られた。その荷重は、接合部幅に比例して増加し、強固な LAMP 接合部が得られることが判明した。

謝 辞

本研究は、大阪大学接合科学研究所の平成 16 年度所長裁量経費所内プロジェクトにおいてなされた研究の一環であり、野城清所長をはじめとする関係各位に深く感謝申し上げます。また、本研究の遂行にあたり、御助言とご協力を頂いた大阪大学接合科学研究所水谷正海技官および塔本健次技官に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) H. Nakamura, M. Terada, M. Hirata and T. Sakai: Application to the

- plastic parts welding of diode laser, The 59th Laser Materials Processing Conference, (2003), pp.1-7.
- 2) T. Kurauchi and Y. Senzaki: Technology of laser welding, Toyoda Gosei Technical Review, Vol.45 No.1, (2003), pp.31-32.
- 3) Y. Kurosaki, T. Matayoshi and K. Sato: A novel CO₂ laser welding of plastic using a transparent solid heat sink without causing thermal damage, Proc. of ICALEO 2006, LIA, Scottsdale AZ, (2006), pp.369-374.
- 4) A. Matsumoto: Polymers for adhesion and removal, CMC Publishing, p. 12.
- 5) M. J. Goldberg, J. G. Clabes and C. A. Kovac: Metal-polymer chemistry. II. chromium -polyimide interface reactions and related organometallic chemistry, J. Vac. Sci. Technol., A6-3, (1987), pp.991-996.
- 6) P. S. Ho, P. O. Hahn, J. W. Bartha, G. W. Rubloff and F. K. Legoues: Chemical bonding and reaction at metal/polymer interfaces, J. Vac. Sci. Technol., A3-3, (1985), pp.739-745.
- 7) J. L. Jordan, C. A. Kovac, J. F. Morar and R. A. Pollak: High-resolution photoemission study of the interfacial reaction of Cr with polyimide and model polymers, Phys. Rev. B, 36-3, (1987), pp.1369-1