

環状ビーム光学系を用いたプラスチックの高速レーザ溶着

名古屋大学 徐 国建、沓名 宗春
株式会社レーザックス 小川 剛充、池田 剛司、坪井 昭彦

High speed laser welding of plastics using an annular beam optics

Nagoya University, Graduate School of Engineering, Xu Guojian and Kutsuna Muneharu
Laser X CO., Ltd., Ogawa Takemitsu, Ikeda Takeshi, and Tsuboi Akihiko

An annular beam optics was developed for a annular seam welding in short time. Using the annular beam optics, and a 2.0 kW fiber laser (IPG YLR-2000), the laser welding of plastics was studied to improve the productivity. The characteristics of the beam profile were investigated by a Primes Beam Monitor. As the results, with increase of focal length of a collimating lens, the outer diameter as the annular beam was hardly changed, and the inner diameter of the annular beam decreased. Thus, the width of the annular beam was increased in the experiment. A distance (L_{12}) between first axi-cone lens and second one increases, the outer and inner diameters as the annular beam increased simultaneously. And, the width of the annular beam was almost constant. Moreover, it was confirmed that the beam intensity distribution of the annular beam becomes uniform by that it can be adjusted that the coaxial performance by the position adjustment of collimating lens, first axi-cone lens, and second axi-cone lens. On the other hand, connects the annular beam optics to the optical fiber of 2.0 kW fiber laser facility to weld plastics using a Through Transmission Type Laser Welding (TTTLW). The plastics with an annular seam were firmly welded in a short time.

Keywords: Annular beam optics, Axi-cone lens, Fiber laser, Beam transmission plastic, beam absorption plastic.

1. 緒言

ファイバーレーザは、ビーム品質が良く、変換効率がよく、高出力化が容易であり、メンテナンスが容易であり、消耗品が少なく、小型軽量であり、長期にわたり安定性がよく、ランニング費用が低いなどの特徴がある。近年、高出力ファイバーレーザを用いた溶接、切断及びハイブリッド溶接などの研究開発が盛んでいる[1-8]。

本研究は、最新レーザ利用生産システム[1] (ALIMS=Advanced Laser Integrated Manufacturing System、「ALIMS」と略記)の研究開発の一つとして、高出力ファイバーレーザを用いたフレキシブルな環状ビーム光学系の開発と円筒部材の高品質レーザ加工技術の開発において、工業用のプラスチック部材を超高速、短時間にレーザ溶着する技術を検討した物である。

環状ビームを得る方法として、1組のアキシコンレンズを採用した。更に、開発された環状ビーム光学系を用いて、環状の接合面プラスチック部材のレーザ溶着を一度に照射を検討した。

用いたプラスチック(比重=0.83~2.1kg/cm²)は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Fig.1に示す。1973年より2000年にいたるまで、プラスチックや非鉄材料の比率が増加している[9]。また、プラスチックの詳細な構成比率をTable1に示す[9]。この30年間でプラ

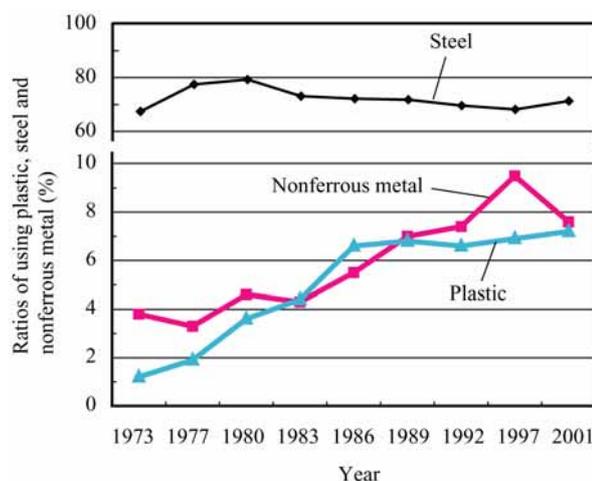


Fig. 1. Relationship between using ratios of materials and year in one normal car in the automobile industry[9].

Table 1 普通・小型乗用車1台あたりに占める主要原料構成比率[9]

			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	

スチックの使用量が確実に増大している。

自動車部品で多用される円筒部材（シャフト類）の溶接ならびに平面部材への円周レーザ照射等は、従来レーザヘッドまたは加工対象部材を回転させてレーザを円周状に走行して溶接してきた[10,11]。加工品質及び加工生産性からは環状ビームによる同時照射が望ましい。円周ビード溶着などに対して環状ビーム同時照射することによって、溶接欠陥のしやすい始点及び終点がなく、溶接歪みが少なく、高い生産性（高速加工）達成の可能性がある。

本研究では、この環状ビームの成形原理、環状ビームのプロファイル特性及び環状ビーム光学系を用いた高速レーザ溶着技術について検討した。

2. 実験方法

2.1 実験装置

環状ビームプロファイルの測定レイアウト及び樹脂溶着のイメージを Fig.2 (a) 及び (b) に示す。

実験装置は IPG2.0 kW ファイバーレーザ発振器、発振器用チラー、カップラ、フィードファイバー、プロセスファイバー、環状ビーム光学系及び光学系用冷却水装置などからなる。

IPG2.0 kW ファイバーレーザ発振器及び開発された環状ビーム光学系の写真を Fig.3 に示す。

PRIMES Beam Monitor を用いて、環状ビームのプロファイルを測定した。プロファイル直径は JIS 規格によって取得した。JIS 規格によるビーム直径の測定方

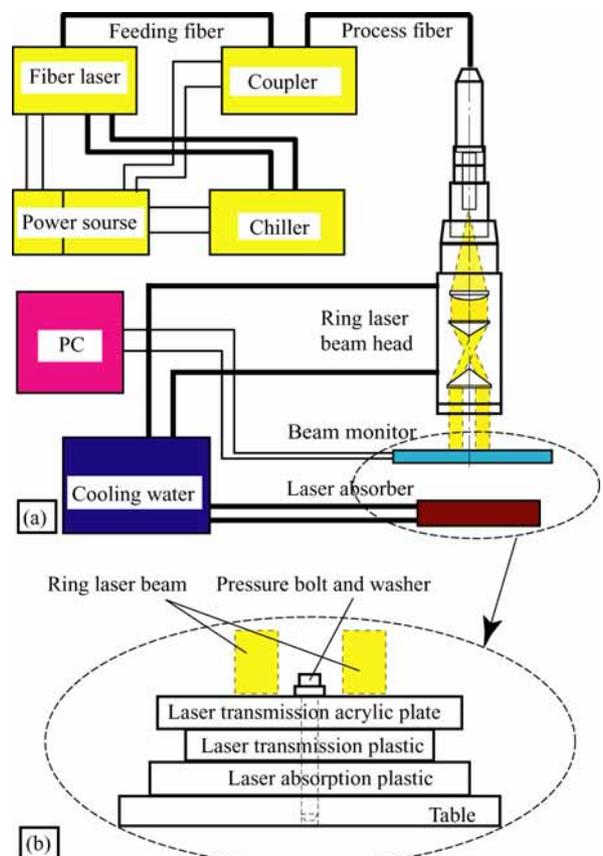


Fig. 2. The schematic of ring laser beam experimental equipment. (a) Layout of profile measurement for ring laser beam, and (b) image of ring plastic welding with the ring laser beam.

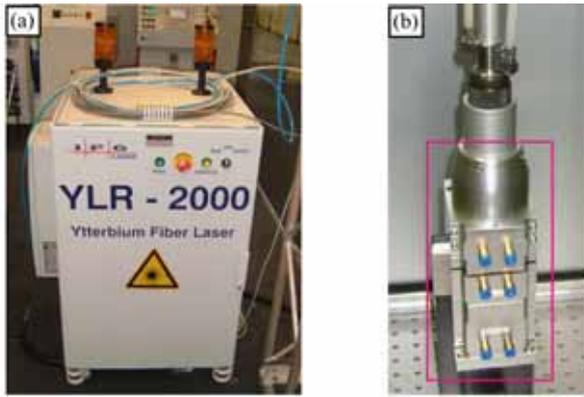


Fig. 3. Appearance of 2.0 kW fiber laser and optical head of ring laser beam. (a) 2.0 kW fiber laser, and (b) optical head of ring laser beam.

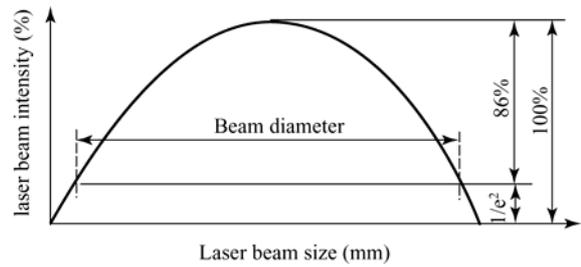


Fig. 4. Measurement method of beam diameter by JIS standard

法を Fig. 4 に示す。即ち、レーザビーム強度が $1/e^2$ であるところのサイズをビーム直径と規定されている。

2.2 環状ビームの成形原理

環状ビームの成形原理を模式的に Fig. 5 に示す。この環状ビーム光学系の光学素子はコリメートレンズ、第 1 アキシコンレンズ、第 2 アキシコンレンズ及び集光アキシコンレンズからなる。Fig. 5 の記号の意味は次のようになる。

f - コリメートレンズの焦点距離、 F - 集光レンズによる環状ビーム焦点距離、 NA - ファイバーレーザの広がり角 (0.11 rad)、 D - コリメートレンズ上のレーザビーム直径、 $2R$ - 第 2 アキシコンレンズから出た環状ビームの外径、 $2r$ - 第 2 アキシコンレンズから出た環状ビームの内径、 θ_1 - 第 1 アキシコンレンズの頂角 110° 、 θ_2 - 第 2 アキシコンレンズの頂角 110° 、 θ_3 - 集光アキシコンレンズの頂角 110° 、 H_1 - 第 1 アキシコンレンズの厚さ、 H_2 - 第 2 アキシコンレンズの厚さ、 H_3 - 集光アキシコンレンズの厚さ、 L_{12} - 第 1 と第 2 アキシコンレンズ頂点間の距離、 L_{23} - 第 2 アキシコンレンズと集光アキシコンレンズ底面間の距離。

レーザはまずコリメートレンズに入射する。ファイバー端面とコリメートレンズ間の距離は、コリメートレンズの焦点距離と等しいように配置する。それにより、コリメートレンズ通過後のレーザビームは一定の直径を保持したまま次の光学素子である第 1 アキシコンレンズに到

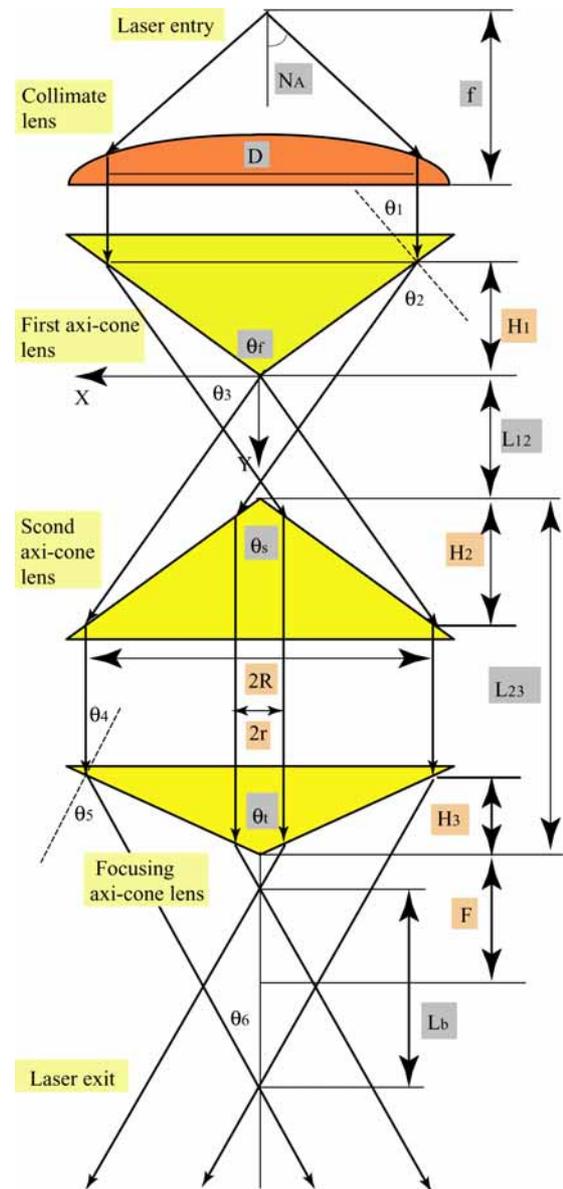


Fig. 5. Formative principle of ring laser beam.

達する。第1アキシコンレンズと第2アキシコンレンズを通過した後に環状ビームが形成される。第1アキシコンレンズと第2アキシコンレンズでは、頂角(110°)を等しいようにおく。これにより、第2アキシコンレンズを通過後に一定の直径を保持したまま進む。集光されない環状ビーム形成が目標であれば、この時点で光学系は終了する。今回は集光されない環状ビームのプロファイルの検討を目的として行なった。

さらに、集光される環状ビームを形成するためには、上述で形成された環状ビームを Fig.5 のように集光アキシコンレンズに入射させることによって形成できる。一方、集光アキシコンレンズを用いるのではなく、普通の集光レンズ(球面平凸集光レンズ)を配置することによって、集光される環状ビームを得ることもできる。

次に、コリメートレンズ $f = 60\text{mm}$ を用いる場合を一つの例として、環状ビームヘッドの設計方法を説明する。コリメートレンズ $f = 60\text{mm}$ を使った場合の初期設定値を Table2 に示す。ファイバーレーザの開口数 $NA=0.11$ 。アキシコンレンズの外形を Fig.6 に示す。アキシコンレンズの仕様決定に際しては、光学系筐体の掴み代としてストレート部が $3\sim 4\text{mm}$ 必要である。

光の屈折法則は公式(1)の関係がある。その相関を Fig.7 に示す。

Table 2 Initial set point of optical head of ring laser beam

Collimate lens (Synthetic fused silica, AR coating)	Focal length, mm	$f=60$
	Diameter, D (mm)	30
First axi-cone lens (Synthetic fused silica, AR coating)	Focal length, mm	$f=80$
	Diameter, D (mm)	50
	Vertical angle, θ_r (Degree)	110
Second axi-cone lens (Synthetic fused silica, AR coating)	Diameter, D (mm)	30
	Height, H (mm)	14
	Height, h (mm)	10.50
Refraction index	n	1.46
Distance between axi-cone lens	L12 (mm)	20
Numerical aperture	NA (rad)	0.11

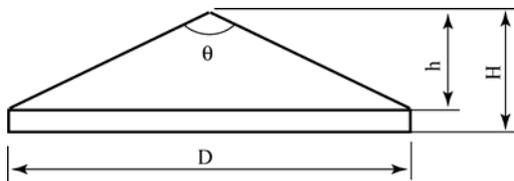


Fig. 6. Appearance of axi-cone lens.

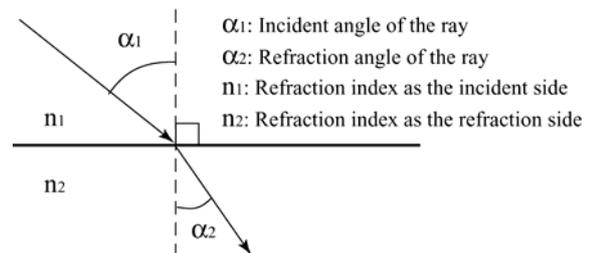


Fig. 7. Schematic drawing of the principle for optical refraction.

Table 3 Set point of optical head of ring laser beam for collimate lens of $f=60\text{ mm}$

θ_1		θ_2		θ_3		θ_4		θ_5		θ_6		2R	2r
Degree	Rad	mm	mm										
35	0.611	56.869	0.993	68.131	1.189	15	0.262	22.202	0.388	7.202	0.126	22.330	9.130

$$\sin \theta_2 / \sin \theta_1 = n_2 / n_1 \quad (1)$$

ここで、 θ_1 - 入射角、 θ_2 - 屈折角、 n_1 - 入射側の屈折率、 n_2 - 出射側の屈折率。

Table 2 の値を用いて、角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ 、外形 2R 及び内径 2r は幾何学的な関係及び光の屈折法則によって算出した。その結果を Table 3 に示す。

3. 実験結果及び考察

3.1 環状ビームのプロファイル

開発された環状ビーム光学系のビームプロファイルの測定を行った。ここでは環状ビームのプロファイルに及ぼすコリメートレンズ焦点距離及び第 1 アキシコンレンズと第 2 アキシコンレンズ間の距離の影響について調査した。コリメートレンズとしては $f = 60\text{mm}$ ($D=30$) 及び $f = 80\text{mm}$ ($D=30$) を使った。第 1 アキシコンレンズと第 2 アキシコンレンズ間の距離の調節は板厚の違う敷板によって行った。

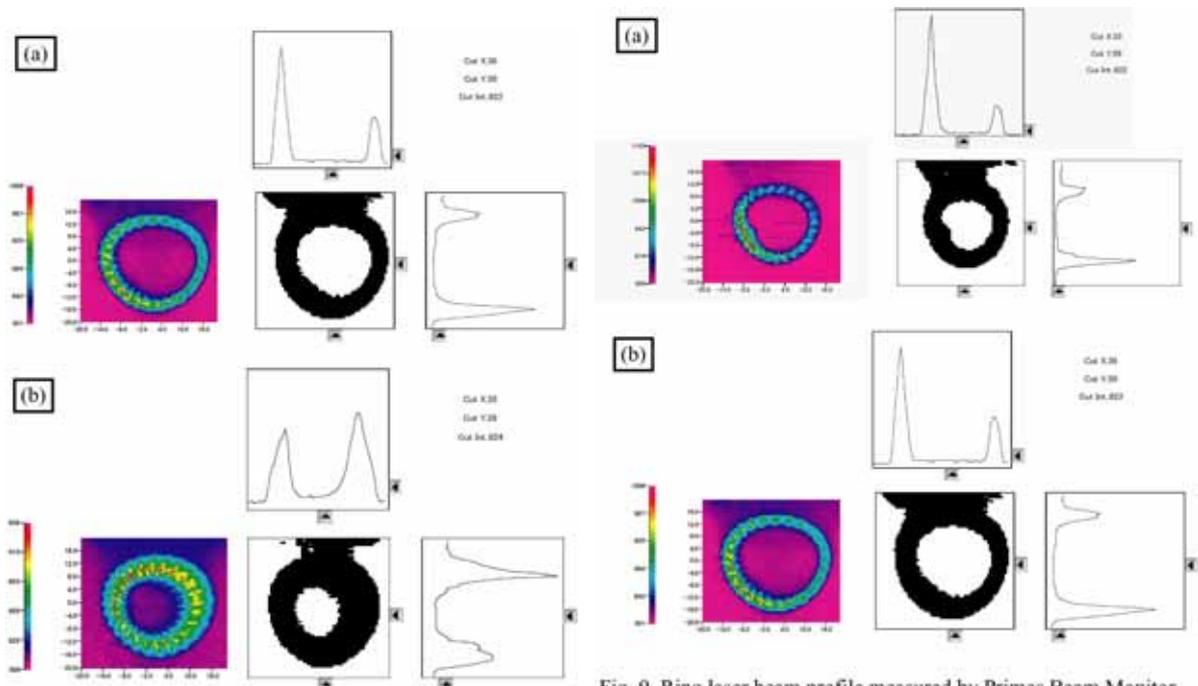


Fig. 8. Ring beam profiles measured by Primes Beam Monitor, $L_{12} = 31$ mm, laser power of 300. (a) Collimate lens of $f = 60$ mm, and (b) collimate lens of $f = 80$ mm.

Fig. 9. Ring laser beam profile measured by Primes Beam Monitor using a collimate lens of $f = 60$ mm and laser power of 300 W. (a) Distance ($L_{12} = 25$ mm) between first axi-cone lens and second axi-cone lens, and (b) distance ($L_{12} = 31$ mm) between first axi-cone lens and second axi-cone lens.

Table 4 Results of calculation and measurement for the ring laser beam profile using the optical head of ring laser beam

Collimate lens mm	Laser power w	L_{12} mm	2R, mm		2r, mm		Width of ring beam, mm	
			Calculation	Measurement	Calculation	Measurement	Calculation	Measurement
f=60 (D=30 mm)	300	25	27.9	27.8	14.7	15.2	6.6	6.3
		28	31.3	31.1	18.1	18.7	6.6	6.2
		31	34.6	33.8	21.4	21	6.6	6.4
f=80 (D=50 mm)	300	25	27.9	27.3	10.3	9.3	8.8	9
		28	31.3	30.1	13.7	11.1	8.8	9.5
		31	34.6	32.5	17	13.4	8.8	9.55

環状ビームのプロファイルを調査するために、集光アキシコンレンズ又は球面平凸集光レンズを入れない場合の環状ビームのプロファイルを測定した。

コリメートレンズ $f=60\text{mm}$ 及び $f=80\text{mm}$ を用いて、測定した環状ビームのプロファイルを図.8に示す。コリメートレンズの焦点距離が増加しても、環状ビームの外径寸法はほとんど変化しなく、内径寸法が小さくなる。その結果、環状ビームの幅は大きくなる傾向が認められた。また、コリメートレンズ $f=60\text{mm}$ を用いて、第1アキシコンレンズと第2アキシコンレンズ間の距離 L_{12} を変化させた時の環状ビームのプロファイルを図.9に示す。二枚のアキシコンレンズ間の距離 L_{12} が長いほど、環状ビームの外径及び内径もともに大きくなり、環状ビームの幅はほとんど変わらないことが分かった。コリメートレンズ $f=60\text{mm}$ 及び $f=80\text{mm}$ を用いて、環状ビームプロファイルの測定結果をTable4に纏めた。測定した環状ビームのプロファイルの寸法は計算値とほとんど同じの寸法であった。

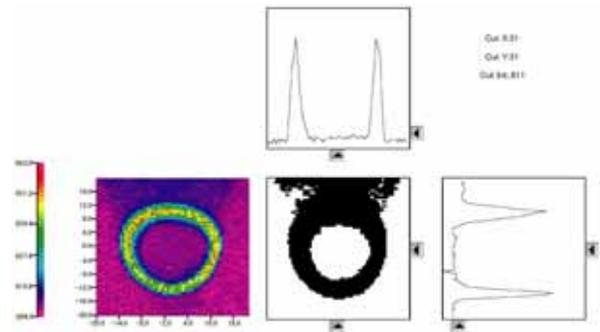


Fig. 10. Ring laser beam Profile that can be adjusted that the coaxial performance by the position adjustment of collimate lens, first axi-cone lens and second axi-cone lens. Collimate lens of $f = 60 \text{ mm}$, distance ($L_{12} = 25 \text{ mm}$) between first axi-cone lens and second axi-cone lens, laser power of 300 W.

3.2 環状ビームの強度分布の検討

環状ビームの強度分布の均一性を調査するために、コリメートレンズ及びアキシコンレンズの中心軸を水平面に左右調節できる構造とした環状ビーム光学系を用いて、実験を行なった。アキシコンレンズを水平面に左右調節して、コリメートレンズ及び2枚アキシコンレンズを同軸になるように検討した。

レーザ出力 300W、コリメートレンズ焦点距離 $f = 60\text{mm}$ 、第1アキシコンレンズと第2アキシコンレンズ間の距離 $L_{12} = 25\text{mm}$ の実験条件を用いて、第1及び第2アキシコンレンズを水平面に左右調節することによって、測定した環状ビームのプロファイルを図.10に示す。環状ビームの強度分布は前の測定結果と比べると、横断面にも縦断面にも均一になることが確認された。

3.3 環状ビームを用いた高速レーザ溶着

TTTLW (Through-transmission Type Laser Welding) での樹脂の溶着メカニズム [11-14] を模式的に図.11に示す。樹脂のレーザ溶着の原理は、まず、レーザ光を吸収する樹脂板(部品)と透過する樹脂板(部品)をお互いに接触させ、すき間の無いように圧力にて密着させる。レーザ光を透明な樹脂板へ照射すると当然レーザ光はその樹脂板を通過し、レーザ光を吸収する樹脂板表面に到達する。そこで吸収されたレーザエネルギーにより樹脂板表面では発熱、溶融が始まり、透過する樹脂板へも熱(熱伝達)を伝える。吸収・発熱・熱伝達の過程の結果、二枚の樹脂板が接合界面で溶融

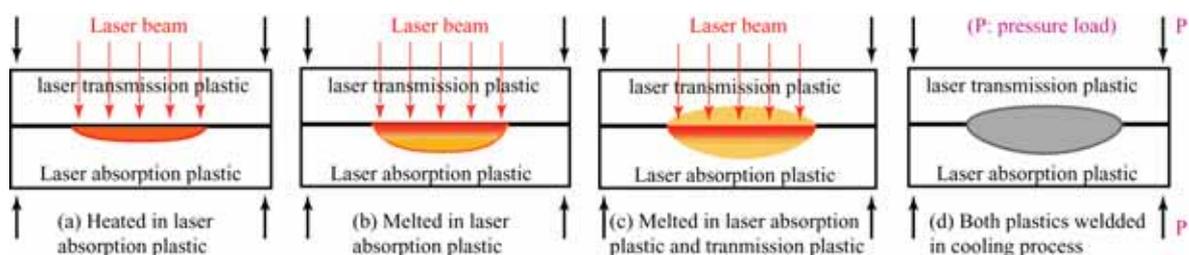


Fig. 11. Mechanism of Through Transmission Laser Welding (TTTLW) made with a laser transmission plastic and a laser absorption plastic.

し溶着されるのである。

接合する樹脂の一方はレーザ光を透過する透過材、他方はレーザ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。TTTLW は、溶着される一方の部材(透過材)を通して(透過して)、レーザ光を照射する。レーザ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。TTTLW 法において、加圧は非常に重要なパラメータである。レーザ溶着過程ではレーザ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じ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。それで、プラスチック溶着の時、適当な圧力Pが必要となることが分かった。

今回実験に対して、用いた樹脂材料の外形を Fig.12 に示す。円形の樹脂材料は内側が透過色素で着色したTPV (動的架橋型オレフェン系エラストマー)二種類の色(黒色と黄色)があり、厚さが2mmである。外側がタルク20%強化のPP{PP - ポリプロピレン

(ポリオレフェンの一種)吸収材)}であり、黒色しかなく、厚さが3mmである。リング樹脂材料を押える透明アクリル板のサイズは70×70×4mmである。

今回実験の溶着条件としては、レーザ出力500～2000W；レーザ照射時間0.05～1.0s；圧力200g；コリメートレンズ焦点距離 $f = 60\text{mm}$ ；環状ビーム外径 54mm及び内径 47mm、その幅3.5mmである。今回の樹脂溶着に対して、集光レンズが取り付けられない。その樹脂溶着のイメージを Fig.1 (b) に示す。ボルト、ワッシャ及び押さえる透明アクリル板によって、二枚の樹脂材料を押し込んで、レーザを上から照射して、レーザ透過樹脂(内側 - 黄色)とレーザ吸収樹脂(外側 - 黒色)間で溶着を行った。外観上から見ると何も変化がないが、二枚の樹脂がしっかり溶着されることが確認された。これにより、瞬間に高速レ

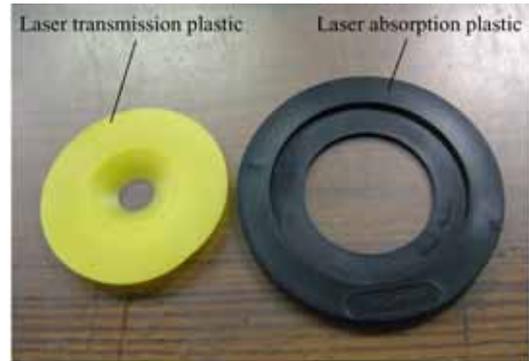


Fig. 12. Appearance of laser transmission plastic and laser absorption plastic with a ring form.

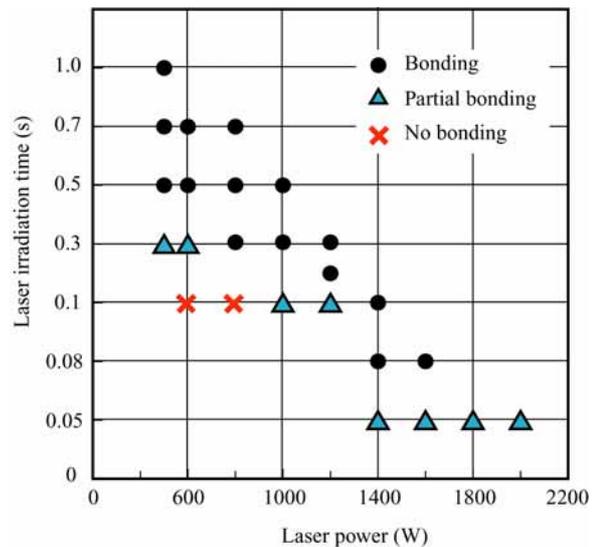


Fig. 13. Effect of welding parameters on bonding property of Through Transmission Laser Welding (TTLW) made with a laser transmission plastic and laser absorption plastic (pressure load of 200 g and collimate lens of $f = 60\text{ mm}$ used).

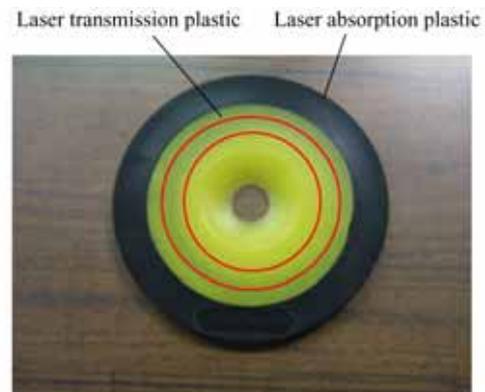


Fig. 14. Welded plastics using Through Transmission Laser Welding (TTLW) made with a laser transmission plastic and laser absorption plastic (laser power of 800 W, laser irradiation time of 1 s, pressure load of 200 g, and collimate lens of $f = 60\text{ mm}$).

ーザ溶着が実現した。樹脂溶着品質に及ぼすレーザ出力及びレーザ照射時間の影響結果をFig.13に示す。溶着したサンプルの写真をFig.14に示す。溶着の範囲が二つの丸ラインで囲んだリング範囲であった。二枚の樹脂材料がしっかり接合したことが確認された。その最高溶着速度を直線溶着速度に換算すると、約118 m/minと非常に早いことが分かった。

溶着した樹脂材料サンプルを横断して、エポキシ樹脂とエポマウント硬化剤の混合物に埋めた後、エメリー紙で1500#までペーパー研磨を行った。その横断面マクロ写真及び光学顕微鏡写真をFig.15に示す。二枚樹脂のインターフェースでお互いに突入の形で接合したことが確認された。

4. 結論

コリメートレンズの焦点距離が増加するとともに、環状ビームの外径寸法が変化しない、内径寸法が小さくなる。従って、環状ビームの幅は大きくなる傾向が認められた。

同じコリメートレンズの場合、

二枚のアキシコンレンズ間の距離 (L_{12}) が増加するとともに、環状ビームの外径及び内径寸法は同時に大きくなり、環状ビームの幅はほとんど変化しないことが認められた。

二枚アキシコンレンズを水平面に左右調節できる環状ビーム光学系を用いた環状ビームは水平面に左右調節できない環状ビーム光学系と比べると、強度分布は均一になることが確認された。

環状ビーム光学系を用いた瞬間に高速レーザ溶着が実現された。二枚樹脂がしっかり接合されることが確認された。

参考文献

- [1] Akihiko Tsuboi, Muneharu Kutsuna: Development of advanced laser integrated manufacturing system, Digest of Technical papers, 26th Annual Meeting of the Laser Society of Japan, February 9-10 (2006), 131-132.
- [2] Hiroshi Fukube: Welding Technology (in Japanese), 53-2 (2005) 100-106.
- [3] Takeshi Araya: Welding Technology (in Japanese), 53-5 (2005), 103-110.
- [4] Takeshi Araya: Welding Technology (in Japanese), 53-6 (2005), 122-129.
- [5] Takeshi Araya: Welding Technology (in Japanese), 53-7 (2005), 155-160.
- [6] Takeshi Araya: Welding Technology (in Japanese), 53-8 (2005) 117-125.
- [7] Takeshi Araya: Welding Technology (in Japanese), 53-9 (2005) 120-130.
- [8] Takeshi Araya: Welding Technology (in Japanese), 53-10 (2005), 116-122.
- [9] Takeshi Ikeda, Takemitsu Ogawa, Guojian Xu, and Akihiko Tsuboi: "Laser welding

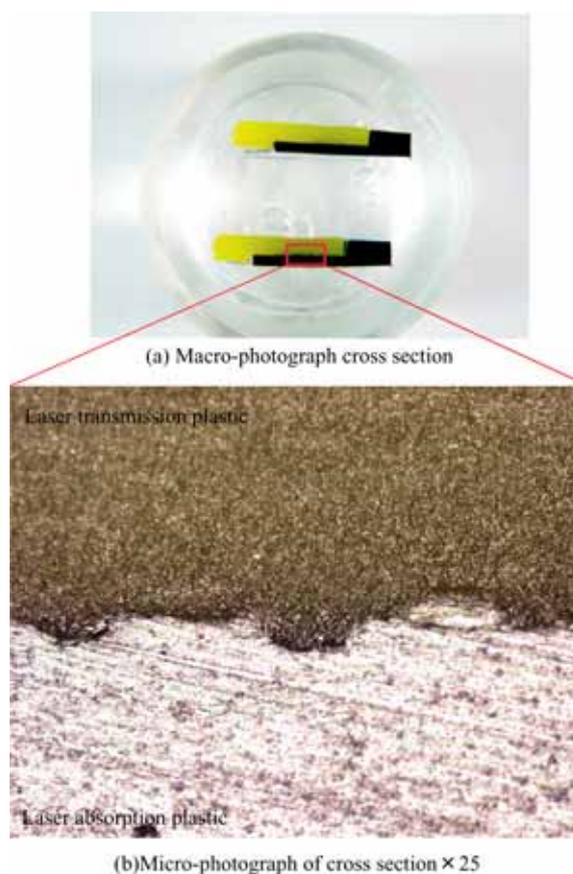


Fig. 15. Macro- and micro-photography of cross section for welded plastics. Laser power of 800 W, laser irradiation time of 1 s and pressure load of 200 g, collimate lens of $f = 60$ mm.

technology and application to automotive components” (in Japanese), Technical information institute Co., Ltd, June. 26. 2006, Tokyo Japan, 1-10.

[10] Andrei Boglea, Luedher Bosse, Alexander Olowinsky, and Silvia Bou: "Fiber laser pick-and-join tool for welding of thermoplastics", 25th ICALEO, October 30-November 2 (2006), Scottsdale, AZ USA, Laser Materials Processing conference P.383-388.

USA, Laser Materials Processing conference P.124-133.

[11] Anssi Jansson, Saara Kouvo, and Veli Kuianpaa: "The effect of parameters on laser transmission welding of polymers", 22nd ICALEO, October 13-16 (2003), Jacksonville, Florida

[12] Takasu Nobuo: JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY (in Japanese), 72-3 (2003), 34-37.

[13] Nakamura Hideo and Terada Masaki: JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY (in Japanese), 72-2 (2003), 29-32.

[14] Yasuo Kurosaki: “Radiative heat transfer in plastic welding process”, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 93-(1-3) (2005), 25–41.

[15] J. P. Coelho, M. A. Abreu and M. C. Pires: “High-speed **laser welding of plastic films**”, Optics and Lasers in Engineering, 34-(4-6) (2000), 385-395.