レーザー解説 1

レ ー ザ ー 加 工

小 林 昭*

Fabrication Methods by Laser

Akira KOBAYASHI*

1. レーザー加工の基礎

1960年にルビーレーザーがはじめて発振してから、各方面への適用が試みられだした。Fig. 1は、各種加工法の開発年代をまとめて示したものであって、¹⁾²⁾近代産業のきっかけとなったウィルキンソンの改良円筒中ぐり盤が世の中にあらわれた1775年から200年間の主なものが記載されている。機械的エネルギーを用いる加工

法に比べれば、電気応用加工法の歴史は新しく、そのほとんどが第2次大戦後である。そのなかでも、レーザー加工法はもっとも新しいものであって、20世紀最後の偉大な発明といわれる³⁾ゆえんであろう。生産技術に関する唯一の国際会議であるC. I. R. P. ⁴⁾では2000年までの将来技術の予測を、全世界の技術者・研究者を対象として行ない、その結果が報告された。⁵⁾そのなかでもレーザー加工の今後が重要な地位を占め

Fig. 1 各種加工法の開発年代

* 東京芝浦電気株式会社生産技術研究所 (川崎市幸区柳町70)

* Manufacturing Engineering Research Laboratory, Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd. (70, Yanagimachi, Saiwaiku, Kawasaki)

Fig. 2 各種加工法の位置づけ

ることが強調されている。

レーザー加工の主な特徴をまとめると次のとおりとなる。

- (1) 平行性のよい高パワーのレーザー光を加工物表面に微小スポットとして集束することができるので、パワー密度はFig. 2に示すとおり、従来の加工法のなかではもっとも大きな部類に属する。そこで従来の方法では加工困難な材料、高融点材料、耐熱合金類、セラミック、宝石やダイヤモンドなどの硬脆材料に対しても加工が可能となる。
- (2) レーザー光を微小スポットに集束することができるので、その部分はレーザー光を吸収して高温に加熱され、瞬間的に蒸発または熔融する。Fig. 3は、空气中でサファイアをレーザー加工した瞬間の高速度写真の一例⁶⁾であって、加工点から溶融物が蒸発していく模様がよくわかる。微小スポットに絞ることによって、マイクロ加工が可能であり、加工物の種類や厚さによって異なるが $10\mu\text{m}$ 程度の穴径が最小径である。
- (3) 加工物を加工機から適当に離して非接触加工ができるので、遠く離れた所や人の入れない所での加工ができる。

レーザー光
↓

Fig. 3 サファイアをレーザー加工した瞬間

- (4) 加工条件を適当に選ぶことによって、加工変質層や熱変形の少ない加工をすることができる。
- (5) 加工に用いるレーザーの波長によっては、透明体を通しての加工ができる。ガラスをよく透過するルビーレーザーを用いれば、真空管などの内部の線の切断や溶接が、ガラス管の外からレーザー光を照射することによって行なえる。
- (6) 電子ビーム加工機のように真空を必要としないし、X線に対する防護が不要である。したがって装置が比較的簡便であり、廉価であり、作業性も良好である。
- (7) 小出力レーザーを用いた場合、電子ビーム

溶接に比べて溶け込み深さが浅いので、薄膜、薄板や細線の溶接ができる。また大出力レーザーを用いることにより、10mm厚以上の鋼板溶接も可能になってきている。

- (8) 加工の自動化が容易であるし、最適制御もやりやすい。

このようにすぐれた特徴を生かして、現在いろいろな分野の加工が行なわれている。

- (1) 穴あけ

非金属材料…伸線用ダイヤモンドダイス、時計用軸受、セラミック、ゴム、プラスチックなど

金属材料…超硬合金、ステンレス鋼など

- (2) 切断……各種金属、木材、紙、布地、皮革、プラスチック、セラミックなど

- (3) スクライピング…半導体材料、セラミックなど

- (4) トリミング…薄膜および厚膜抵抗

- (5) チューニング…水晶発振子、音叉など

- (6) バランスとり…時計用てんぶ、マイクロモータ、タービンなど

- (7) 溶接…金属箔・板、線、ガラス、超硬合金など

- (8) 処理…焼入など

これらの加工に対して、現在 Table.1 にまとめるレーザーが用いられている。

2. レーザによる穴あけ

Fig.4 に、現在穴あけ用として広く使われて

いる YAG レーザ穴あけ加工機の代表例を示す。この加工機を用いた加工例の二、三を次に述べる。

(a) 外観図

(b) 構成

くり返し	1パルスあたり出力
400 pps	0.4J
20 pps	1 J
10 pps	3 J

Fig.4 YAGレーザー穴あけ加工機
(東芝製LAY-504型)

Fig.5 は1.1mm厚のダイヤモンドダイスに穴あけした例であって、ろうと状の穴がきれいにあいている。これは左図に示すとおり、あるパ

Table 1. 加工に用いられるレーザーの種類

種 類		母 体	活性イオン	レーザ光波長 (μm)	発 振 形 式
固 体	ルビー	Al_2O_3	Cr^{3+}	0.6943	パ ル ス
	YAG	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	Nd^{3+}	1.065	パルス,連続(CW)
	ガラス	ガラス		1.065	〃
	CaWO_4	CaWO_4		1.065	〃
気体	CO_2	$\text{CN}_2\text{-He-Ne}$	CO_2	10.63	連続 (CW)

ルスごとに照射エネルギーを変えていったものであり、総計20パルスで貫通している。いま加工に用いたものは20ppsであるので、1秒足らずで

Fig.5 ダイヤモンドダイスの穴あけ

Fig.6 ルビーの穴あけ

穴あけが終わったことになる。今まで、ダイヤモンドダイスの下穴加工は超音波加工や放電加工が用いられていたが、1.1mm厚に対しては10～15時間かかっていた。最近ダイヤモンドダイスの需要が増すにつれて、このように画期的に短い時間で穴あけできることが非常に喜ばれ、実際のラインで広く使われるようになった。

Fig. 6 は時計用軸受に用いられるルビーに穴あけた例である。1パルスで穴は貫通し、パルスを増すにつれて側面が加工され、5パルス以上照射しても穴形状はほとんど変わらない。ふつう腕時計用の受石としてもっとも多く使われているのは、厚さ 0.3mm の人造ルビーに直径 70 μm の穴をあけたものである。このた

めに下穴として、仕上代を見込んで40～60 μm 程度の大きさの穴にする必要がある。この図に示すように、径 40 μm のストレート穴が望ましく、5パルスであくことは高能率である。ただ焦点はずし量やパワー密度によって穴形状は変わり、焦点はずし量を0.13～0.16mmに選ぶとストレート穴が得られる。この場合パルス幅 1 ms, 1パルスあたり35mJのYAGレーザーが用いられている。スイスでは20ppsのYAGレーザーを用いて、6～10個/秒の割合で時計用軸受の加工をしているという⁷⁾

Fig. 7 はステンレス鋼に穴あけた例である。図(a)は2mm厚板に穴あけたものであって、約30秒で貫通穴が得られる。これは化繊用ノズル

(a)

(b)

Fig. 7 ステンレス鋼の穴あけ

6 ϕ $\times$ 5 ϕ スリーブに
0.13 ϕ の穴あけ

YAGレーザー (10pps)
5パルスで穴あけ

Fig. 8 超合金の穴あけ

の穴あけとして用いられる基礎となるものである。図(b)は特殊な穴あけの例であって、0.35mm径ピンの長手方向に直径0.15mm×1mm深さの穴をあけたものの断面を示してあり、1パルスで穴あけされている。

Fig. 8は超硬合金に穴あけした例である。これは、外径6mm、内径5mmのスリーブに、0.13mm径の穴をあけたものであって、10ppsのYAGレーザーを用いて5パルスで穴があいている。すなわち0.5秒で穴があくことになる。

Fig. 9は特殊な穴あけ加工方式のいくつかを示したものである。図(a)は円錐レンズと集束レンズとを組合せることによって、直径1mmから12mmぐらいまでのリング状のスポットに絞り穴をあけることができる例である。図(b)のような円

柱レンズを使えば直線状のスリットをあけることができる。また図(c)のようにレーザービームを分けることによって、同時に多数の穴をあけたり、曲面に垂直に穴をあけたりするのに用いることができる。図(d)に回転レンズによるビーム偏向方法の原理を示す。集束レンズの軸心はレーザービームの軸心のまわりに回転するようになっているので、焦点の軌跡は F_1 、 F_2 を通る円となる。連続発振のレーザーを使えば、くり抜き切断穴あけができるし、パルス発振のレーザーを使えば円周上に多数の穴をもつ加工ができる。

諸外国の穴あけの実用例として、このほかにいろいろと報ぜられている。コンタクトレンズの中央部に径0.1mmの穴を毎秒1個の割合であけた

Fig. 9 特殊な穴あけ加工方式

り、紙煙草のフィルタ部の外側から2個の穴をあけたり、畑や芝生の撒水用プラスチックチューブに穴をあけたり、自動車工業用ゴムや哺乳瓶用吸口ゴムに穴をあけたりすることが実用化されている。またジェットエンジン用ノズルガイドペーンの N_i ベース合金1~4mm厚部に穴径0.35~0.45mmの穴を毎秒1個の割合で加工する機械が稼動しており、歩留まり99%に達しているという。⁸⁾

3. レーザー加工による切断

Fig. 10は最近の CO_2 レーザー加工機の一例である。これはチューブを3本に分け、Z字形に配列した折り返し形であって出力375Wである。 CO_2 レーザーは波長が長いので、金属表面

Fig. 10 CO_2 レーザー加工機（東芝製300型）

(a) 構造

ガスジェットなし

ガスジェットあり

(b) 効果

Fig. 11 CO_2 レーザー切断装置のビームベンダー

での反射率が大きく、加工能率が悪いが、 O_2 ガスを吹きつけながら加工すると、きわめて高能率の加工ができる。非金属材料加工のときも、各種ガスの吹きつけは効果大きい。そこでFig. 11に示すように、水平方向に発射されたレーザー光を45°傾斜している鏡で垂直方向に曲げ、集束レンズで加工物表面に集束させるとともに、側面からガスを入れてやり焦点位置に向かって噴出させるようにする。このようにすると、加工能率が大きいだけでなく、加工くずをよく吹きとばし、切断面もきれいになり、またレーザー光照射側における縁のだれも少ない。このほか、切断幅が少なく、熱影響層も少ないなど多くの利点を持っている。

Table 2.は各種金属材料の切断結果をまとめたものである。またTable 3.はガラス類の切断結果であり、水晶管やガラスアンプルの切断は実用化されている。注射液用ガラスアンプルは50Wの CO_2 レーザーを用いれば、アンプルを回転しながら5秒で切断できるといい、切口も大変きれいだである。ガラス管切断の一例をFig. 12に示す。

木材がレーザーで切断できるのも大きな利点である。従来から用いられていた木材のノコ切

Table 2 O₂ガス併用のCO₂レーザーによる各種金属材料の切断結果

材 料	板厚 (mm)	切断 速度 (mm/min)	切断幅 (mm)	レーザ 出力 (KW)	メーカ 文 献
軟 鋼	0.5	635	—	0.2	BOC
	1.0	3000	0.1	0.23	Messer
	1.2	4600	0.2	0.4	Culham
	1.5	1700	0.13	0.3	OIP
	1.6	2500	—	0.5	PERA
	2.0	5000	—	2.0	BOC
	2.2	2200	0.3	1.0	AVCO
	3.0	900	0.4	0.35	Ferranti
	3.0	600	0.2	0.23	Messer
	3.2	560	1.0	0.2	CRL
	4.0	450	0.15	0.3	OIP
	4.7	625	—	0.2	BOC
	6.4	500	—	0.5	PERA
	6.4	2300	1.0	1.5	AVCO
工 具 鋼	3.0	1700	0.2	0.4	Culham
マレージング鋼	4.8	70	—	0.5	PERA
超硬合金	1.5	15	—	0.3	PERA
ステンレス 鋼	0.1	3660	—	0.3	BOC
	0.1	5330	—	0.5	PERA
	0.3	3700	—	0.5	PERA
	0.5	2600	—	0.2	BOC
	0.7	2700	0.15	0.3	OIP
	1.0	1500	0.1	0.23	Messer
	1.0	2100	0.12	0.3	OIP
	1.0	7700	—	2.0	BOC
	1.2	580	—	0.2	BOC
	1.3	750	0.5	0.17	CRL
	1.3	4600	0.2	0.4	Culham
	1.5	1400	0.13	0.3	OIP
	1.5	585	—	0.25	a)
	1.6	1900	—	0.5	PERA
	1.8	600	—	0.25	BOC
	2.0	500	0.14	0.3	OIP
	2.5	1270	0.25	0.4	Culham
	2.8	875	—	0.35	W. I.
	3.0	300	0.4	0.3	OIP
	3.0	3000	—	2.0	BOC
	3.2	1150	0.25	0.4	Culham
ステンレス 鋼	3.3	900	0.35	1.0	AVCO
	4.8	1300	2.0	20.0	AVCO
	6.4	500	—	0.5	PERA
	6.5	2000	—	2.0	BOC
	6.5	600	—	1.0	BOC
	7.0	1000	—	2.0	BOC
	8.9	760	2.3	8.0	AVCO
ステンレス 鋼	12.0	900	—	2.0	BOC
	12.7	1250	—	10.0	AVCO
	12.7	2540	2.3	20.0	AVCO
	20.0	1270	3.3	20.0	AVCO
	22.0	540	—	4.0	BOC
	2.3	1100	—	0.5	PERA
高 速 度 鋼	3.4	600	—	0.5	PERA
	4.2	400	—	0.5	PERA
	5.2	300	—	0.5	PERA
	7.1	70	—	0.5	PERA
	0.6	3050	—	0.25	b)
高抗張力鋼	1.6	1780	—	0.25	
	3.2	760	—	0.25	
ニッケル合金 Rene 41 Hastelloy X	0.5	1520	—	0.25	b)
	1.3	510	—	0.25	
	1.6	380	—	0.25	
コバルト合金	1.6	380	—	0.25	
タ ン タ ル	0.1	76	—	0.23	BOC
モリブデン	0.06	400	—	0.5	PERA
ニオブウム	0.1	125	—	0.2	BOC
	3.2	200	—	0.5	PERA
ジルコニウム	0.3	920	—	0.2	BOC
チ タ ン	0.5	14000	—	0.14	CRL
	0.8	1900	0.2	0.3	OIP
	0.8	6900	—	0.8	W.I.
	1.0	7500	0.5	0.6	Culham
	3.0	5100	—	0.5	Culham
	6.4	2800	1.0	0.25	CRL
	6.4	3600	—	0.5	PERA
	10.0	2520	1.7	0.25	CRL
	15.4	990	—	0.25	a)
	0.6	6860	—	0.25	b)
チタン合金	1.2	12000	—	2.0	BOC
	1.3	7500	—	0.2	CRL
	1.5	2400	0.4	0.3	Ferranti
	2.0	18000	0.2	0.23	Messer
	2.3	5330	—	0.25	b)
	4.6	3560	—	0.25	b)
	5.0	3300	0.4	0.85	Ferranti
	5.0	4000	0.1	1.0	AVCO
	6.3	2750	—	0.25	CRL
	8.9	1520	—	0.25	b)

材 料	板厚 (mm)	切断 速度 (mm/ min)	切断 幅 (mm)	レーザ 出力 (KW)	メーカ 文 献
チタン合金	10.0	2800	1.5	0.23	Messer
	40.0	500	3.5	0.23	Messer
Nimonic 75	0.6	2500	—	0.5	PERA
	1.0	7900	—	2.0	BOC
	1.2	1300	—	0.5	PERA
	2.0	800	—	0.5	PERA
Nimonic 90	1.0	2800	—	1.0	AVCO
	1.0	2300	—	0.5	PERA
	1.3	2280	—	0.6	W.I.
	1.4	600	—	0.25	W.I.
アルミニウム	12.7	2540	—	10.0	AVCO
	12.7	2300	1.0	15.0	AVCO

この表の諸数値に見られるとおり、メーカ、文献によって切断データには、相当のバラツキがある。

a) C. A. Pippin: Manufacturing Engineering, 76. 1, 1976—1.

b) S. Trink: SME EM73-214.

断では、切断時の騒音やノコくずが公害の対象となり、それに代わる方法が探し求められていた。レーザー切断によると、ノコくずや騒音の発生がないばかりか、切断取り代が少なく、複雑な形状が自由に切断でき、切断面がなめらかであるなどの利点がある。しかも非接触加工であるので、工具摩耗のようなものはないし、加工物に働く力が少なくて済むなどの長所もある。Fig. 13はCO₂レーザーを用いて合板を切断した時の一例であって、図(a)はレーザー出力によってある板厚の合板がどのぐらいの速度で切断できるかを示しており、図(b)はステンレス鋼板切断の場合と比較したものである。Fig. 14は10mm厚のもみの木を400W CO₂レーザーで曲面切断したものであって、切断取り代は0.23mmに過ぎない。Fig. 15はボール紙工業で用いられるダイブロック(抜型)をCO₂レーザーで加工した例である。従来はこのような溝切りは熟練工が糸ノコによって行っていたが、その方法に比べ加工速度も10倍以上速いし、加工精度も高い。イギリスのB. O. C. 社では、4

Fig. 12 CO₂レーザーによるガラス管の切断例

(a) 板厚と切断速度との関係

(b) ステンレス鋼との比較

Fig. 13 CO₂レーザーによる合板切断

Fig. 14 木材のCO₂レーザー切断 Fig. 15 ダイブロック (18mm厚合板) のCO₂レーザー切断Table 3 CO₂レーザーによるガラス類の切断結果

材 料	板 厚 (mm)	ガ ス	切断速度 (mm/min)	レーザ 出 力 (W)
ガ ラ ス	0.2	空 気	5000	200
	1.6	空 気	380	200
	2.0	な し	2200	300
	3.0	な し	1800	300
	3.2	空 気	500	150
	4.0	空 気	100	200
シ リ カ	1.0		3000	600
	肉厚30mm,		3000	600
	肉厚 4mm		30 s	500
水 晶 溶 融 石 英	外径15mm 肉厚 1mm管	空 気	35	250
	1.0		36	100
	外径13mm 肉厚 1mm管		1 s	500
セ ラ ミ ッ ク	外径20mm管	空 気	1 s	800
	6.4	Ar, N ₂ 空 気	600	850
アルミナセラミック	0.6		6000	50
	0.8		20~25	250
マイカレックス 焼結カーボランダム	3.0		400	350
	1.6	空 気	760	200
アスベストセメント	6.3	空 気	25	200
ア ス ベ ス ト	3.0		1000	350
	7.5	空 気	24	100
	10.0		20	100
カーボランダム	1.6	空 気	760	200

m長出力200WのCO₂レーザーを用い、光学的ヘッドが原図パターン上を動くにつれて加工物にそのパターンどおりの溝加工ができるような加工機を製作し、1650×1140mmの大きさの加工

物を、18mm合板の場合200mm/minの速度で±0.13mmの精度で切断することができる。またアメリカのC. R. L. 社では250W CO₂レーザーで18mm合板を200mm/minの速度で、500W CO₂レ

Table 4. CO₂レーザーによる木材の切断結果

材 料		板厚 (mm)	ガ ス	切断速度 (mm/min)	切断幅 (mm)	レーザ 出 力 (W)
木 材	乾 燥	6.4		2775	—	240
		12.7		1160	—	240
		25.4		430	—	240
	湿 潤	6.4		2175	0.23	240
		12.7		900	0.30	240
		25.4		300	0.38	240
	松 し か ク チ	50.8		100	—	200
		17.2		200	—	200
		25.4		75	—	200
	も み	4.0	空 気	8200	0.30	300
		10.0	"	2500	0.23	400
		18.0	"	750	0.31	400
	アッシュツリー	9.5	"	1700	0.23	400
		18.0	"	500	0.48	400
		20.0	"	400	0.54	300
合 板	サザンパイン	12.7		500	—	240
		5.0	Ar, N ₂ , 空気 空 気	320	0.80	100
		6.0		550	—	150
		6.0		1500	—	350
		6.4		5400	—	850
		12.0		1300	—	800
		18.0		200	0.72	200
		20.0		200	—	150
		20.0		400	—	350

ーザーで510mm/minの速度で、±0.5mm/300mmの加工精度で加工できる機械を製作販売している。1974年末には、B. O. C. 社製1900万円台3台、C. R. L. 社製250W2000万円5台および500W2760万円2台の販売実績がある。Table 4は木材の切断結果をまとめたものである。

このほか、紙、ボード類、じゅうたん、洋服地、皮革類など、CO₂レーザーできれいに速く切れる。アメリカの大手衣服メーカ Genesco 社では、250W CO₂レーザーを用い、電子計算機制御による裁断システムを導入実用化している。生地ロールから引出された生地はコンベアによって位置の下に移動した後、レーザーヘッドがNCによって所要形状に移動裁断していくものである。53~60m/minという高速で正確に裁断でき、省力化に役立つとともに、市場の需

要動向に応じて敏速に裁断パターンが変えられるという利点を持っており、ミシンの発明以後の衣服関係機械分野で最大の技術革新をもたらすものといわれている。同様に靴用皮革生地の切断にも使われている。

ゴム、プラスチック類へのレーザーの適用も今後が注目されている。蛍光灯カバーに用いられるプラスチックの切断に、従来丸ノコ切断が用いられていたが、ノコくずが静電気で付着して、傷を発生する原因となり易いというトラブルが多かった。この作業を、ある会社ではCO₂レーザーに置き換えて成功した。

最近大出力CO₂レーザーが開発され実用化されるようになってから、大寸法材料の切断への適用が試みられるようになってきた。Fig. 16は、Avco-Everett研究所で作られた10~15KW

Fig. 16 大出力CO₂レーザー加工機
(Avco-Everett研究所製 HPL-10型)

のCO₂レーザー加工機である。低炭素鋼に対して、O₂ガスを吹きつけながら切断したときの一例をFig. 17に示す。⁹⁾ さらに出力をあげていくと、10KWでアルゴン吹きつけでAl 12.5mm厚板を1 m/minの速度で、11KWでインコネル718の12.5mm厚板をHeガス吹きつけで1.25 m/minの速度で切断できる。切断面はいずれもなめらかで±0.25mm以内の平面度におさまっている。

Fig. 17 低炭素鋼のCO₂レーザー切断特性

4. レーザーによるスクライビング

トランジスタ、ダイオード、あるいはICやLSIなどの集積回路を製造するとき、数多くの素子を大きなウエハの上に作ることは、生産コストを大幅に引き下げるのに役立つ有効な方法である。そこでウエハの上に作られた沢山の素子を、各単体の素子に分割する工程が必要となり、これがスクライビングと呼ばれる。現在い

ろいろの方法が使われているが、歩留まり、精度あるいは生産性などに多くの問題点を内蔵している。というのは、素子を作るのに、非常に多くの工程を経ており、スクライビングでの歩留まりが生産コストに直接影響することになる。

Fig. 18は現在半導体工場で実用されているYAGレーザースクライバ装置の一例である。Siウエハに対しては、QスイッチつきYAGレーザーが最適であり、10⁶W/cm²以上のパワー密度が必要とされている。この装置を用い、スクライプした時、ウエハ送り速度と溝深さとの関係を示すとFig. 19のようになる。この場合の、溝幅は25~30μmであり、熱影響層は溝幅から片側10μmを超すことはない。スクライプされた断面はFig. 20に示すとおりで、0.32mm厚の約1/3深さまでレーザー光が入りこんでいるため、スクライプするときの歩留まり向上の寄与するところが大きい。スクライビングでもっとも多く使われているダイヤモンドスクライビングで90%の歩留まりを得るのはなかなか難しいとされ

Fig. 18 YAGレーザースクライバ装置
(東芝製LAY-506型)

ている。これに対し、レーザースクライビングでは、99%あるいはそれ以上の歩留まりが得られ、年間のコストダウンは大きく、ランプ寿命や電力費などを計算に入れても、優にレーザースクライバ装置の投資は1年で回収される。しかも、レーザースクライバでは往復で切断できるため能率向上も著しく、熟練も不要で、1人で多台持ちもできるなど数多くの利点を持っている。

Fig. 19 ウェハの送り速度と加工溝深さ
(YAGレーザーによるスクライピング)

Fig. 20 Siウェハのスクライブ断面

5. レーザーによるトリミング

抵抗素子には、 $0.1 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 厚の蒸着膜による薄膜抵抗と、 $20 \sim 50 \mu\text{m}$ 厚の塗布焼成膜による厚膜抵抗とがある。それぞれ、セラミックあるいはガラス基板の上に形成させたものであるが、多くの場合目標の抵抗値に対して5~25%の誤差を生じてしまうのがふつうである。そこで膜抵抗の一部を取り去って許容抵抗誤差範囲内に調整するのが抵抗トリミングである。いろいろな方法が使われているが、生産性、加工精度、コスト、安定性などに問題点が多い。

Fig. 21は最近開発されたYAGレーザートリミング装置の一例である。抵抗値を測定しながら、Fig. 22に例示するようなLカットを行な

(a)

(b) 構成図

Fig. 21 レーザートリミング装置

Fig. 22 厚膜抵抗のレーザートリミング (Lカット)

う。電流方向に直角な溝加工で粗調整をして希望抵抗値付近にし、次に電流と平行方向の溝加工で微調整をして希望抵抗値にするものである。ふつう多く使われているサンドブラスト法では、トリミング速度 1 mm/s でトリミングされた抵抗

Fig. 23 微小回路修正用超小型YAGレーザー加工機

の精度は $\pm 1\%$ であるのに対し、レーザートリミングでは、 10mm/s の速度で $\pm 0.5\%$ 以内の精度が得られている。

Fig. 23は微小回路の修正用として作られた超小型のYAGレーザー加工機であって、卓上顕微鏡に組み込まれている。左上隅に示すパターンは、Al $1\mu\text{m}$ 厚であって、パターン幅およびパターン間隔がそれぞれ $10\mu\text{m}$ であり、2ヶ所レーザー照射による修正痕が見られる。

6. レーザーによる溶接

レーザーによる溶接のとき注意しなければならないことは、溶接部の温度をその材料の融点まで上昇しなければならないが、沸点まではあげてはならないことである。そのためには、溶接しようとする材料の材質、寸法、形状などに対して、レーザーの出力特性を適当に選んでやらないといけない。

微小溶接には、固体レーザーのパルス発振のものが多く用いられる。Fig. 24は、現在広く

Fig. 24 YAGレーザー溶接機（東芝製LAY-508型）

用いられているYAGレーザー溶接機の一例であって、Fig. 25に一例を示すような微小溶接に使われている。アメリカのアポロ宇宙船11号が月から岩石を持ち帰るKovar製容器をレーザー溶接した¹⁰⁾のも、高信頼性にもとづくものといわれている。

Table 5 CO₂レーザーによる溶接

	板厚 (mm)	溶接速度 (mm/min)	レーザー 出力(W)
軟 鋼	200	500	200
ス テ ン レ ス 鋼	0.1	4570	250
	0.12	9000	600
	0.4	4400	250
	0.8~1.0	760~1020	800
	2.0	2500	700
	3.0	800	1000
	6.0	5000	17000
	17.0	600	17000
Nimonic 90	0.25	1800	600
Ta	0.12	1200	600
Ti	0.13	3540	250
	0.50	1200	600
ポリエチレン樹脂 ポリプロピレン樹脂	0.12	4800	600

大出力CO₂レーザーによる溶接は、電子ビーム溶接と競合し、大寸法肉厚鋼板への適用が図られるようになってきている。Table 5は各種材料の溶接結果の一例である。Fig. 26に、304ステンレス鋼に対して、電子ビーム溶接とレーザー溶接との溶け込み深さの比較を示す。¹¹⁾溶接速度が速くなるにつれて両者の差は小さくなっている。最近アメリカのFord社は、United Aircraft社のHamilton Standard Div.製の6KW CO₂レーザー溶接機を導入して、生産ラインで車体溶接を行なうようになった。⁸⁾そのシステム構成は、Fig. 27に示すとおりであって、プレスされた部品は治具にとりつけられ、X軸方向に移動される。ビーム偏光、テーブル移動、ローディング、アンローディングは、すべてコンピュータ制御される。0.9mm厚の材料2枚を $170\sim 190\text{mm/s}$ の速度で溶接することができる。

(a) 0.4φニクロム線と鋼板

(b) 0.03φと0.1φタングステン線

(c) ステンレスパイプ

(d) 半導体容器

(e) デュメット線のスポット溶接

(f) 28μmφステンレス鋼線の溶接

(g) 27μmφ線のステンレス鋼への溶接

Fig. 25 YAGレーザーによる溶接例

連続溶接できるので、溶接部強度が大きく、信頼性にすぐれている。またプログラムブルコントロールによるため、種々の型式の車にも容易に適用でき、大きな効果をあてている。

1970年のレーザー溶接機の売上げは400万ドル、電子ビーム溶接機は2800万ドルで7倍であ

った。1980年には、レーザーが7000万ドル、電子ビームが6000万ドルで、¹²⁾レーザー溶接機の共上げの方が大きくなることが予想されている。Fig. 27の装置も電子ビーム溶接機メーカーの製作したものであり、溶接分野におけるレーザーの今後の地位に注目する必要がある。

Fig. 26 電子ビーム溶接とレーザー溶接との溶け込み深さの比較

Fig. 27 Ford社で使われているレーザー溶接ライン

7. その他の加工への応用

パルス発振のレーザーによる除去作用を利用し、周波数標準発生チューナ、音叉や、ハーモニカやオルガンのリードについて、目標とする周波数からのわずかのずれを測定しながらレーザーを照射して調整する方法が実用されだしている。

また、タービンホイールやジャイロスコープ、マイクロモータなど高速回転体のアンバランス、あるいは時計用でんぶのアンバランスをとる方法も実用されている。

このほか、ゾーンメルティングや熱処理⁹⁾にも使われだしており、今後とも各方面にレーザーが用いられるようになることであろう。

Fig. 28 アメリカにおけるレーザー機器の売上げ。

1980年にはアメリカでのレーザー産業の売上げは15億8千万ドルにも達するであろうといわれている。その内訳は、産業用13億1500万ドル、防衛その他政府向けは2億6500万ドルと予想¹²⁾されている。産業用のうち、生産工程でのレーザーの利用が現在もっとも大きな分野を占めており、1980年まで年率約32%で伸びて2億ドルに達するといわれている。Fig. 28に示すとおりである。このうち、穴あけ、切断機が8500万ドル(1970年500万ドル)、溶接機が7000万ドル(1970年400万ドル)になると予想¹²⁾されていて、レーザー産業の将来は洋々たるものが約束されている。

注)

- 1) S. Lilley著, 小林秋男, 伊藤新一訳: 「人類と機械の歴史」 岩波, 1956. 7.
- 2) 精機学会編: 「改訂精密工作便覧」 コロナ社, 1970. 6.
- 3) F. Warshofsky著, 山高昭訳: 「21世紀の報告」 早川書房1969. 11.
- 4) 小林昭: 日本機械学会誌 **73**, 613, 1970. 2.
- 5) 小林昭: 精密機械, **38**, 9, 1972. 9.
- 6) A. KOBAYASHI and S. SHIMAKAWA: CIRP Annals, **19**, 1. 1971. 5.

- 7) 小林昭: 「レーザー加工」, 開発社, 1973. 3.
- 8) 島川正憲: 機械の研究, **26**, 6, 1974. 6.
- 9) M. Yessik and D. J. Schmatz: Metal Progress, 1975. 5.
- 10) A. J. Moorhead and P. W. Turner: Welding J., 1970. 1.
- 11) E. V. Locke and R. A. Hella: IEEE J. Quantum Electronics, **10**. 2, 1974. 2.
- 12) JETRO NEWS, No. 105, 1972. 11.