

## 最近のレーザー加工技術の進展

沓 名 宗 春\*

## Progress in Laser Materials Processing

Muneharu KUTSUNA

## 1. はじめに

レーザー (LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) はその発生のメカニズムから「量子機械」と呼ばれ、現代の先端技術の一角を占めている。その発展過程を表 1<sup>1)</sup> に示すが、その端緒は 1900 年のマックス・プランクによる「エネルギーの量子

仮説」及び 1916 年のアインシュタインの「量子論による輻射の放出と吸収 (誘導放出の仮説)」にまでさかのぼることができる。C. H. TOWNES 教授の MASER の着想まで数 10 年を要するが、1960 年に T. H. MAIMAN がルビーレーザーを発振して以来、レーザー科学技術は約 25 年間に急速に発展した。レーザー光のもつ単色性 (それぞれのレーザーは固有の単一波長をもつ)、干渉性 (位

表 1 レーザー科学技術の発展

	レーザー科学の発達	レーザー加工技術の発達
1900	1900 ーマックスプランク:「エネルギーの量子仮説」 1916 ーアインシュタイン:「量子論による輻射の放出と吸収」(「誘導放出」の仮説)	
1950	1951 4ーC.H. TOWNES: マイクロ波による MASER の着想 1954 5ーC.H. TOWNES: 米物理学会誌に「分子マイクロ波発振器 (MASER)」を発表 1957 4ー西沢潤一:「半導体メーザ」の特許出願	
1960	1960 6ーT.H. MAIMAN: ルビーレーザー発振に成功 1960 12ーA. JAVAN: He-Ne レーザー発振 1961 ーガラスレーザー (SWITZER) 1964 ー1.72W CO <sub>2</sub> レーザー (PATEL) 1964 ーYAG レーザー (GEUSIE) 1966 ー色素レーザー (LEMPICKI) 1969 ーCW-化学レーザー (COOL)	1965 ーダイヤモンドの穴あけにルビーレーザーが使われた。 1967 ー8kW CO <sub>2</sub> レーザー装置 (Raytheon 社)
1970	1970 ー液体 Xe より紫外レーザー発振 (D.G. BASOV) 1972 ーエキシマーレーザー (J.J. ユーイング) 1976 ーX線リソグラフィ (SOR) の実験 (IBM)	1970 ー高速流型 CO <sub>2</sub> レーザー (Deutch, Tiffany) 1972 ー環流型 20kW CO <sub>2</sub> レーザー開発 (UTRC 社) 1973 ー10kW 級 CO <sub>2</sub> レーザー市販 (AVCO 社) ー自動車ギアハウジング焼入れ (GM 社) 1977 ーディーゼルエンジンシリンダーライナーの焼入れ (GM 社)
1980		1977 ー「超高性能レーザー応用複合生産システム」(～1985) (日本, 通産省大型プロジェクト) 1981 ー製鋼ラインのコイルの突合わせ溶接にレーザー適用 (川崎製鉄) 1983 ーレーザー切断 CAD/CAM システム稼動 (東芝) 1984 ー20kW CO <sub>2</sub> レーザー装置開発 (三菱電機) ー試作車のレーザーロボット切断 (トヨタ) 1985 ー20kW CO <sub>2</sub> レーザー装置開発 (日立製作所) 1987 ー1.4kW YAG レーザー装置開発 (東芝, NEC) ー欧州に 25kW CO <sub>2</sub> レーザー 2 基設置 (UTRC 社) 1988 ー3kW CO レーザー装置開発 (IRI-MHI)
1990		

昭和 63 年 11 月 22 日受付 (Received Nov. 22, 1988) (依頼技術資料)

\* 名古屋大学工学部講師 工博 (Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464-01)

Key words: laser materials processing; laser facility; laser welding; laser cutting; laser drilling; laser marking; laser surface processing; laser application; CO<sub>2</sub> laser; YAG laser.

相のそろった電磁波である), 指向性 (ビームは拡がり角度が数 m rad と小さく, 直進性大), 集光性 (光学系により集光した際の最小ビーム径は波長の約 10 倍程度である) 及び, 高エネルギー密度性 (焦点でのエネルギー密度が  $10^6 \sim 10^{12} \text{ W/cm}^2$  にも高められる) などの特性を有しており, 表 2 に示すように多岐にわたってレーザー技術が利用されている. 光ファイバー, レーザーディスク, レーザーメス, レーザー計測器, レーザー加工機などは身近なものとなっている. これら応用はますます

拡大されている. 本題であるレーザー加工技術分野について具体的な応用例, 研究例を表 3 に示す. 大別すると溶接・接合, 除去加工, 表面加工 (加熱, 溶融, 蒸発, 化学反応プロセス) などがあり, 更に新しい利用法が研究開発されている. 電気・電子機器産業, 自動車産業, 鉄鋼業はじめ, たばこ産業や食品産業においても, 金属から布に至るまで, 幅広くレーザー加工が普及してきた.

## 2. 各種加工用レーザー機器

加工に用いられる主なレーザーの種類と特性を表 4 に示す. 材料加工には  $\text{CO}_2$  レーザーおよび YAG ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  結晶体) レーザーが主に利用されている. 最近, 光ファイバー伝送を考えた CO レーザー及びよう素レーザー, あるいは紫外線領域の波長をもつエキシマーレーザーなどが開発され, その加工特性が明らかにされつつある.

### 2.1 $\text{CO}_2$ レーザー加工装置

レーザー出力 500 W 以上の加工には主に  $\text{CO}_2$  レーザーが用いられている. 大出力化が可能であり, 25 kW の装置も市販されている. 研究用には UTRC (United Technology Research Center, 米国) で 77 kW が開発されている. 我が国では通産省の大型プロジェクトで 20 kW が開発されている. これらはレーザー光軸方向, ガス流方向及び放電方向により表 5<sup>2)</sup> に示すように分類される. 同軸形は放電空間が大きくないので多重折り返し

表 2 レーザー技術の応用分野

レーザー特性	応用技術	対象分野
単色性 干渉性	通 信 計 測 情報処理	光通信用ファイバー, データ・画像伝送 動約合修正, 電流測定, 歪み計測, 光ウォッチ ホログラフィ, 光コンピューター, パター ン認識, 光ディスク, レーザープリン ター, レーザーファイル
	光 化 学 そ の 他	同位体分離 (ウラン濃縮), 化学合成 (塩 化ビニール合成) 光学素子, 舞台効果 (レーザーショー)
指 向 性 集 束 性 (エネルギー源)	計 測 医 療	測離, 方向測定, 位置決め, 大気汚染分析 レーザーメス, レーザー砕石器, 殺菌用レ ーザー照射器
	材 料 加 工 軍 用 核 融 合 そ の 他	溶接・接合 除去加工 表面加工 新材料の製造, 破碎, 板曲げなど ミサイル誘導, レーザーレーダー, 起爆, 熱兵器 電力伝送, プラズマ生成, 高温高圧生成

表 3 レーザー加工法の種類とその用途

加工の種類		主な適用分野・目的	
溶接 接合・ ろう付け	溶接	鉄鋼製品加工ラインでの板継ぎ, 電子部品, 自動車部品 (モーターコア, プーリー等), 機械部品, 航空機部 品等の溶接	
	ろう付け	電気・電子部品のろう付け	
除去加工	切断 穴あけ 微細除去加工	鉄鋼材料, 非鉄材料, 非金属材料の切断, 形切断 たばこ紙の穴あけ, パネルの穴あけ, ダイヤモンドディスク・工具の穴あけ セラミックス基板のスクライビング, 抵抗トリミング, マスクのリペアリング, セラミックス基板や Si のレ ーザー励起エッチング	
	マーキング・彫刻 溶融切削成形 クリーニング	IC のパッケージ, 機械部品の刻印, 木材・プラスチックの彫刻 ネジ切り, ターニング, ミリング, 金型切削成形 酸化皮膜の除去	
表 面 加 工	ロ加 七熱 蒸発 スブ	変態焼入れ アニーリング 溶体化処理	
	溶融 プロセス	合金化 肉盛・クラディング	高 Si 化, 高 Cr 化, 高 Hf 化, 炭化, 窒化, 新合金の生成, チタン表面の窒化処理 タービンブレード, エンジンバルブ等の耐摩耗性・耐食性の向上
		表面 溶融	再溶融処理 溶接継手止端部処理 ダル加工 チル処理 グレーズング
	ロ蒸 七発 スブ	レーザー PVD 磁区細分化処理 衝撃硬化 乾燥処理	セラミックスのコーティング, 酸化物薄膜の形成 けい素鋼板の鉄損の改善 アルミニウム, 鋼の強度改善 印刷紙のインク乾燥
化 学 反 応	レーザー CVD レーザー光化学 レーザーリングラフイ めつき加速処理	半導体薄膜, ダイヤ薄膜, 金属膜, $\text{SiO}_2$ 膜の生成, Si のレーザー酸化, Si, GaAs のエピタキシャル成長 レーザー光分解 (有機物の切断・穴あけ), 熱分解 基板上への薄膜形成, 高分子膜の形成 めつきの反応速度の向上	
そ の 他	新材料の製造 レーザー接用切削成形 曲げ加工 切断, 破碎	セラミックスの合成 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ , $\text{SiC}$ , $\text{SiAlON}$ ), 微粒子生成, 超電導体, FRP, FRM の製造 超合金やチタンの加熱切削, 切削速度の向上 鋼板, 薄板の曲げ加工 ガラス板の切断や岩石の破碎	

表 4 各種加工用レーザーの特性と波長スペクトル

レーザーの種類	レーザー光の波長 (μm)	パルス幅 (s)	発振様式	平均出力	ピーク出力 (W)	効 率 (%)
固体レーザー	ルビー	0.6943	パルス Q <sub>SW</sub> CW	mW — 0.01W	10 <sup>6</sup> 10 <sup>10</sup> 10 <sup>-1</sup>	0.1%
	アレキサンドライト	0.7~0.815 (波長可変)	パルス Q <sub>SW</sub>	150W	—	3~5%
	Nd: YAG	1.06	パルス Q <sub>SW</sub> CW	400W — 1.8kW	10 <sup>5</sup> 10 <sup>5</sup> 10 <sup>4</sup>	3~5%
ガスレーザー	エキシマー ArF KrF XeCl XeF	0.193 0.249 0.308 0.350	パルス	100W	10 <sup>3</sup> — 10 <sup>8</sup>	1~4%
	よう素レーザー	1.3	CW	1000W	—	化学効率 40%
	CO レーザー	4.2~8.2	CW	3000W	—	27%
	CO <sub>2</sub> レーザー	10.6	パルス CW	1000W 25kW (77kW)	—	10~20%

Note \* Q<sub>SW</sub>=Q スウィッチ CW=Contineous Wave 連続発振

レーザー波長スペクトル

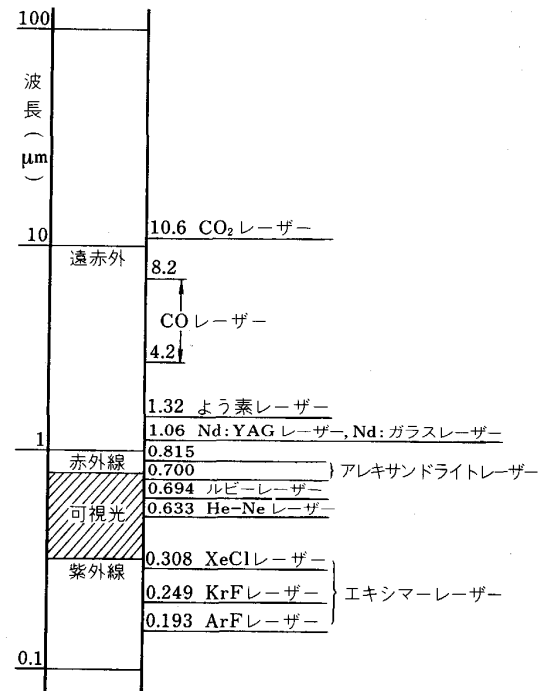


表 5 CO<sub>2</sub> レーザー装置の放電チャンネルによる分類とその例<sup>2)</sup>

	レーザー光軸方向 (X方向とする)	ガス流方向	放電方向	装 置 例				
				メーカー	放電方式	放電条件		
						ガス圧	流 速	ギャップ
同軸型	同軸型 (Coaxial) または軸流型 (Axial-flow)	X方向	X方向	Photon Sources (1 kW)	DC { 棒状電極 ホロー型陰極 分割並列放電 }	20~30 torr	<1 m/s (低流速)	≥1.5 m
				Control Laser (2 kW) BOC (2 kW)		40~45 torr	>100 m/s (高流速)	~1 m
				ダイヘン		80~140 torr	>200 m/s	70 cm
				Messer Griesheim		40 torr	>100 m/s	~80 cm
				Rofin Sinar	RF (27 MHz)	—	—	—
2軸直交型 (Cross beam)	X方向	螺旋 X方向	X方向	Photon Sources (3.5 kW)	DC	—	高流速	~1 m
				東 芝 (1~10 kW)	DC	35~40 torr	>100 m/s	~50 cm
3軸直交型 (Cross flow) または環流型 (Transverse flow)	X方向	Y方向	Y方向	UTRC (27 kW)	DC+RF (70%) (30%) (分割型陰極 (タングステン棒) バイブ状陽極) RF: Radio Frequency	30 torr	130 m/s	65 cm
				Culham Inst. (11 kW)	DC	30~40 torr	>50 m/s	~5 cm
				Spectra physics (5 kW)	DC (分割型陰極 (タングステン棒) バイブ状陽極)	30~45 torr	50 m/s	~3 cm
				三菱電機 (9 kW)	DC+SD SD: 無声放電 (100 kHz)	100~300 torr	30 m/s	~7 cm
AVCO (15 kW)	DC+EB 補助 (陰極は EB 透過膜を兼ねる)	76 torr	120 m/s	~5 cm				

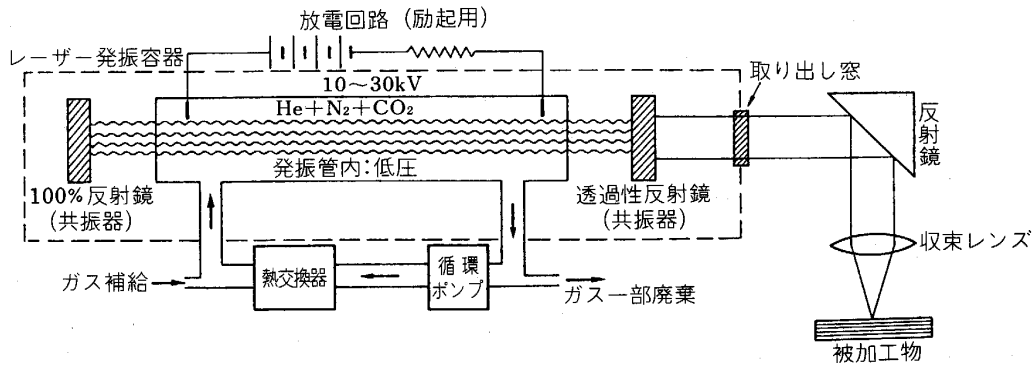


図1 軸流型CO<sub>2</sub>レーザー装置の構成図<sup>3)</sup>

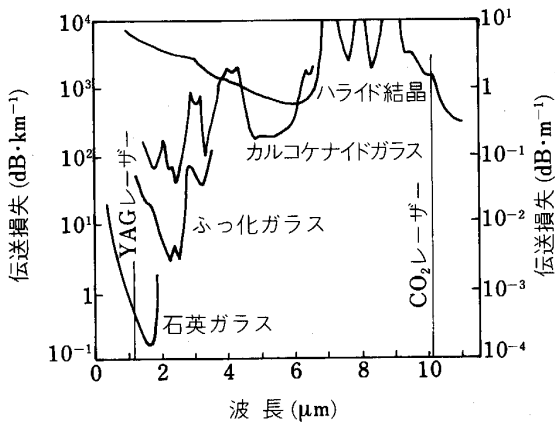
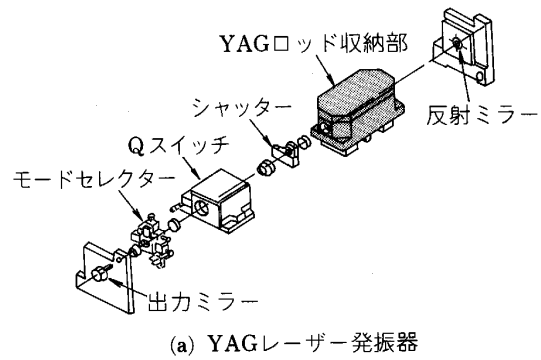
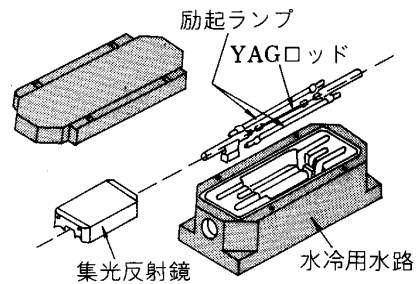


図2 各種光ファイバーの伝送損失スペクトル<sup>4)</sup>



(a) YAGレーザー発振器



(b) YAGロッド収納部の詳細図

図3 YAGレーザー発振器の主な構成要素<sup>5)</sup>

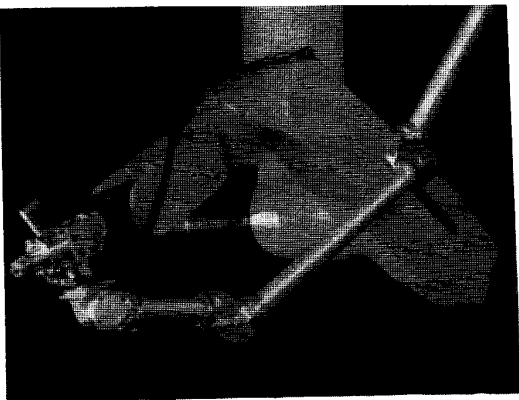


写真1 フレキシブルビームガイド

高速軸流型においても4~6kWが最大出力である。他方2軸直交形及び3軸直交形は放電空間が大きく、かつレーザー光軸に垂直にレーザー発振が起こるため、5~25kWの大出力を得ることができる。

CO<sub>2</sub>レーザー加工装置は通常、図1に示すように<sup>3)</sup>、発振管あるいは放電チャンネル、共振器、レーザーガス(CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Heの混合ガス)循環・排気系、加工光学系

により構成される。各種レーザー加工には加工光学系も重要で、通常、ZnSe, KCl, あるいはGaAsなどのレンズ、または銅、モリブデン、タングステンまたそれらに金めつきした金属ミラーが利用される。また、ビーム伝送にはYAGレーザーでは石英ガラスの光ファイバーが用いられているが、CO<sub>2</sub>レーザーは波長が長く(10.6μm)、光ファイバー伝送では図2<sup>4)</sup>に示すように伝送損失が大きく、研究開発段階である。そこで、ビーム伝送には写真1に示すようなフレキシブルなビームガイドや通常のビームガイドが用いられている。

近年、加工装置の改善が進められ、ビーム出力の安定性の向上、パルス発振と連続発振の切換え、数千時間連続操業の信頼性、CNC制御、5軸、6軸ロボットの出現など著しく進歩し、オプトメカトロニクス、FA時代

の「ツール」として着実に成長している。

2.2 YAGレーザー加工装置

YAG (Yttrium Aluminium Garnet) レーザー加工装置の基本構成の1例を図3<sup>5)</sup>に示す。直径4~10 mm, 長さ75~150 mmのYAGロッド及びそれを励起するフラッシュランプ (Xe, Kr ランプ) を集光反射鏡の中に純水とともに配置している。この発振器を六つ連結し, Kr アークランプを用いた世界最大級の1.4~1.8 kW YAG レーザー装置が, 国内の主要メーカーである東芝, NEC の両社で開発された<sup>6)7)</sup>。表6にこれら装置の発振形態と加工の種類を示す<sup>8)</sup>。さまざまな発振形態が得られること, また, 光ファイバーを用いて, 図4に示すようにビームを多分岐して利用できることも大きな特徴である。

2.3 その他加工用レーザー

ここ3~5年間に新しい加工用レーザーが開発され, 実用化の段階に入ろうとしている。その一つがエキシマー (Excimer) レーザーである。励起された二量体 (Excited Dimer) が励起状態から基底状態に落ちる時に生ずるレーザーで, 1970年にソ連のD. G. BASOVらにより液体Xeを電子ビームで励起して172 nmの光を発

表 6 YAG レーザーの加工種別とさまざまな発振形態<sup>8)</sup>

出力波形	加工の種類	競合手段	応用分野 (例)
連続 (Qスイッチパルス) 1~50 kHz	トリミング マーキング	機械的手段	水晶振動子トリミング 抵抗トリミング 超硬工具へのマーキング 機械部品へのマーキング
高速パルス (~200 pps)	連続(シーム)溶接 切断	抵抗溶接 アーク溶接 電子ビーム溶接 ろう付け アーク切断	リレー, ケース, 部品製造 電算機部品 電子管外筒器
低速パルス (~100 J/p)	穴あけ スポット溶接	機械的手段 接着剤 電子ビーム溶接 抗溶接	ダイヤモンドダイス軸受 ルビー 電算機部品, 電子管部品 磁気ヘッド, 原子灯燃料 ピン メリヤス針, 自動車部品
連続	はんだ付け ろう付け 切断	はんだごて 機械的手段	フラット IC 電算機部品 金属薄板

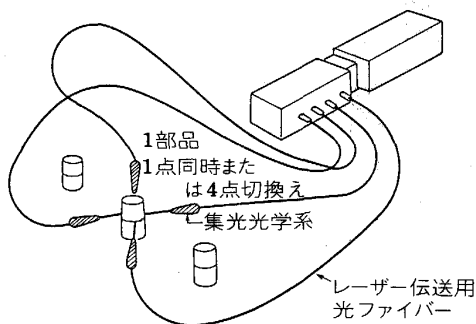


図 4 4分岐光ファイバー光学系

振したことに始まる。現在は放電励起方式 (図5参照)<sup>9)</sup> が普及している。レーザーの種類と発振波長を表7に示す<sup>10)</sup>。波長が紫外域にあるため, レーザーの光子エネルギーは高く, 図6に示す<sup>10)</sup> ように有機物の結合エネルギーより高ければ, 各種側鎖を切ることもできる。R. SRINIVASANら (米国) はポリカーボネート樹脂をArF, KrF, XeCl レーザーでエッチングし, そのエッチング深さを測定している<sup>11)</sup>。最大出力は100 W程度で, パルス幅は約 $10^{-8}$  s, 最大繰返し周波数は約200 Hzである。金属の合金化, セラミックス膜の形成, ポリマーの除去加工など光化学的または熱的加工として実用化されている。

COレーザー及びよう素レーザーの大出力化が我が国で進んでいる。昭和63年秋には工業開発研究所レーザー研究センターと三菱重工業により, 3 kW及び5 kWのCOレーザー装置が共同開発された。3 kWの装置を用いれば40 mm厚さのステンレス鋼板を50 mm/s

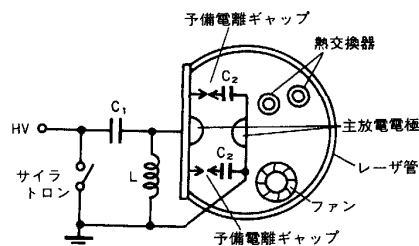


図 5 エキシマーレーザー装置の構造<sup>9)</sup>

表 7 ガスの組合せと発振波長・光子エネルギー<sup>10)</sup>

	F	Cl
Xe	350 nm( 81 kcal)	308 nm( 92 kcal)
Kr	249 nm(114 kcal)	222 nm(128 kcal)
Ar	193 nm(147 kcal)	175 nm(162 kcal)
F	157 nm(180 kcal)	

( ) 内は光子エネルギー,  $E (=h\nu)$

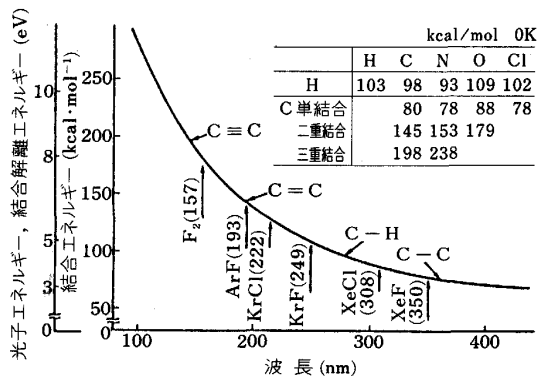


図 6 レーザーの光子エネルギー及び分子の結合解離エネルギーと波長の関係<sup>10)</sup>

表 8 CO レーザーと CO<sub>2</sub> レーザーによる切断能力の比較 (出力一定: 3 kW)<sup>12)</sup>

板厚 (mm)	最大切断速度 (mm/s)	
	CO レーザー	CO <sub>2</sub> レーザー
6	4 500	3 500
10	2 600	1 000
20	400	切断不可能
40	50	切断不可能

の速度で切断できることが報告されている<sup>12)</sup> (表 8 参照)。また、石川島播磨重工業は 3.1 kW で発振効率 25.1% の CO レーザー装置を開発するとともに、100 W での光ファイバー伝送の可能性を確認している。今後、-120°C までの冷却系の改善、低価格化、CO ガスの安全性などの課題が解決され、数 kW の大出力化が計られると工業的に重要なレーザーとなろう。この他に、波長 0.7~0.815 μm のアレキサンドライトレーザー (BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> に Cr<sup>3+</sup> をドープした結晶体による) が波長可変レーザーとして、開発されている。穴あけ特性が非常に優れており、穴あけをはじめ、アニーリング、化学反応にも利用されている。よう素レーザー (波長: 1.32 μm) もすでに 1 kW が前述のレーザー研究センターと川崎重工業とで開発され、今後、実用化に向けて、研究が進められることであろう。

### 3. レーザー加工法の特徴

物質はそれを構成する分子、原子、電子により、それぞれ固有の波長の光を吸収するので、レーザーの種類によっても吸収率は異なる。通常、金属表面での光の吸収率はレーザーの波長に依存し次式で示される。

$$\text{吸収率} = 1 - R = 2\sqrt{\frac{c}{\lambda\sigma_0}}$$

ここで、R = 反射率、c = 光の速度、λ = レーザーの波長、σ<sub>0</sub> = 物質の直流電気伝導度である。よつて CO<sub>2</sub> レーザー (波長: 10.6 μm) よりも YAG レーザー (波長: 1.06 μm) の方が金属に吸収されやすい。しかし逆に、セラミックスは波長の長いレーザーの方が吸収されやすいことが確認されており、加工対象物により適したレーザーを選択することが肝要となる。

さて、レーザーによる材料加工は、他の加工法と比べて一般的にどのような特徴があるか、主な点を挙げる。

- (1) 高いパワー密度をもつ熱源である (図 7 参照)。
- (2) 質量・慣性をもたない瞬間移動できる熱源である。
- (3) 非接触加工である。非摩擦工具となる。
- (4) 微細で精密な熱加工ができる。
- (5) 大気中で、磁気偏向や X 線の発生なく加工できる。
- (6) ビームの吸収率は表面状態やビーム孔の形成などに著しく左右される。
- (7) 静かで、騒音の少ない FA 化に適する加工法で

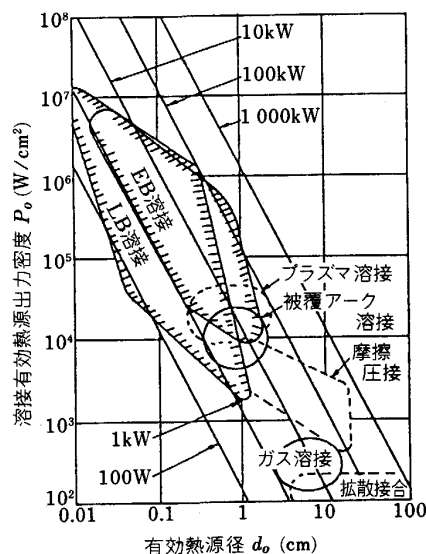


図 7 各種溶接法の溶接熱源出力密度

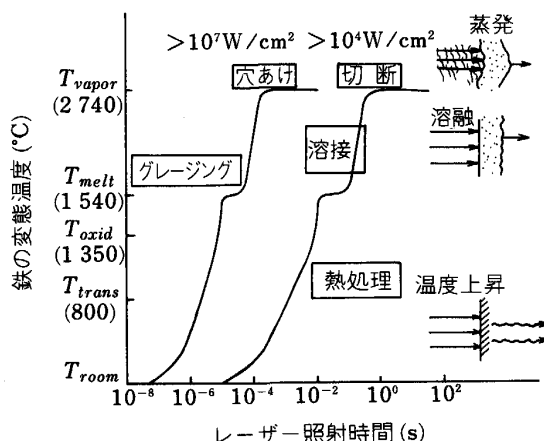


図 8 レーザー光を集光照射した材料の温度上昇と照射時間の関係<sup>13)</sup>

ある

(8) 化学的にクリーンな熱源である。

これらの特徴を活かして、従来不可能であった材料加工法が数多く開発されつつある。

### 4. 各種レーザー加工法

図 8 に示すように、材料にレーザー光が吸収されると、材料が加熱・溶融・蒸発と変化を受ける。この現象を利用して、表面加工、溶接、除去加工などが行われる<sup>13)</sup>。表 3 に示したレーザー加工法が開発され、表 9 に示すように各分野で利用されている。この中では主な加工法について述べる。

#### 4.1 溶接・接合加工 (Laser Welding)

レーザーはパワー密度が 10<sup>4</sup>~10<sup>6</sup> W/cm<sup>2</sup> のとき、溶融池にビーム孔を形成し、深溶込みの溶接ができる。図

表 9 レーザー加工の応用分野と加工例

産業分野	加工法	溶接・接合加工	除去加工	表面加工
電気機器産業		<ul style="list-style-type: none"> <li>リチウム電池, リレーの溶接, 扇風機のろう付け</li> <li>電気部品のシール溶接</li> <li>TV 電子銃の点溶接</li> <li>制御盤パネルの点溶接</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>トランスパネルの切断</li> <li>プラスチック被覆鋼線の切断</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>冷蔵庫用モーターシャフトの PVD</li> </ul>
電子産業		<ul style="list-style-type: none"> <li>IC のリードの接合</li> <li>電算機部品の接合, シール溶接</li> <li>フラット IC のはんだ付け</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>抵抗トリミング, ウェハーのスクライピング</li> <li>IC のマーキング</li> <li>マスクリペアリング</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IC のアニーリング</li> </ul>
自動車産業		<ul style="list-style-type: none"> <li>トランスミッションギヤの溶接</li> <li>エアコン用クラッチ板の溶接</li> <li>アンダーボディーの溶接</li> <li>AT 部品の溶接</li> <li>ヒーター・モーター・ヨークの溶接</li> <li>モーターコアの溶接</li> <li>プーリーの溶接</li> <li>フライホイールカバーの溶接</li> <li>燃料タンクの溶接</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>カムシャフトの油穴あけ</li> <li>ガラス繊維入りポリエステル樹脂の切断</li> <li>プレス鋼板の3次元トリミング</li> <li>ホーン用ダイヤモンドの穴あけ</li> <li>ダッシュパネル/バンパーの穴あけ</li> <li>車台番号のマーキング</li> <li>エグゾースト・チューブの穴あけ</li> <li>トルクコンバータのスリット加工</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ピストンリング溝の焼入れ</li> <li>ギヤハウジングの内面焼入れ</li> <li>ディーゼルエンジンシリンダーの内面焼入れ</li> <li>AT 部品の焼入れ</li> <li>バルブガイドの内面焼入れ</li> <li>ターボチャージャーシャフトの硬化</li> <li>クランクシャフトの焼入れ</li> <li>エンジンバルブの肉盛</li> <li>タレット内面の焼入れ</li> </ul>
鉄鋼業 (素材産業)		<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼板の板継ぎ</li> <li>パイプの突き合わせ溶接</li> <li>チタン製及び鋼製かんの溶接</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>鮮映性鋼板用ロールのダル加工</li> <li>鋼材切断</li> <li>鋼板・パイプのマーキング</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>けい素鋼板の磁区細分化</li> </ul>
産業機械		<ul style="list-style-type: none"> <li>鋸歯, チェンソーの溶接</li> <li>雷管のハーメチックシール</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>切屑の切断, ダイヤモンドダイスの穴あけ</li> <li>超硬工具のマーキング</li> <li>モーターのバランスング</li> <li>機械部品のマーキング</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>工作機械摺動面の焼入れ</li> <li>鋸歯の硬化</li> </ul>
造船・重機		<ul style="list-style-type: none"> <li>管と管板の溶接</li> <li>タービンエンジン用熱交換器 (インコネル合金) の溶接</li> <li>蒸気タービン仕切りの溶接</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>タービンブレード穴の穴あけ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ディーゼルエンジンシリンダーライナー及びピストンリング溝の焼入れ</li> <li>発電用タービンブレードの肉盛</li> <li>原子力燃料棒の肉盛</li> </ul>
精密機械産業			<ul style="list-style-type: none"> <li>水晶振動子の周波数トリミング</li> <li>水晶, 液晶, ルビーの除去加工</li> </ul>	
航空産業		<ul style="list-style-type: none"> <li>ハニカム構造材, 薄肉チューブ, ベローズの溶接</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>タービンブレードの穴あけ</li> <li>ハニカム材, チタン合金, 複合材料のトリミング</li> <li>アルミニウム合金の切断</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>タービンブレードシュラウドの肉盛</li> <li>エンジンシリンダーの焼入れ</li> </ul>
軽工業			<ul style="list-style-type: none"> <li>コンタクトレンズの穴あけ, タバコのペーパー穴あけ</li> <li>エアゾールバルブの穴あけ, 布の切断</li> <li>ビニールホースの穴あけ, ダイボードの切断</li> </ul>	
その他		<ul style="list-style-type: none"> <li>コーヒーパーカレーターの溶接</li> <li>ボールペンカートリッジの溶接</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>被覆線の皮むき</li> <li>哺乳びん用乳首の穴あけ</li> </ul>	

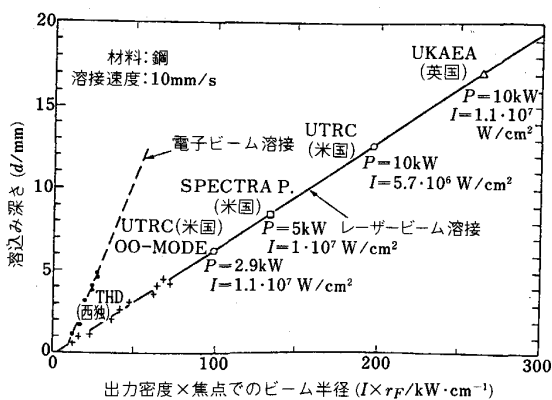


図 9 溶込み深さと出力密度及びビーム半径の関係<sup>14)</sup>

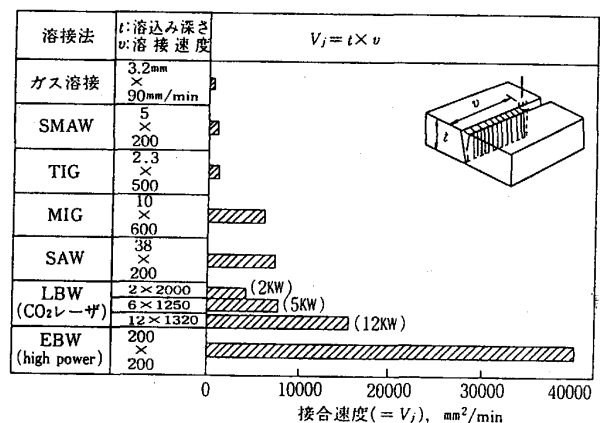


図 10 各種溶接法の接合速度の比較例 (材料: 炭素鋼)<sup>16)</sup>

9 は鋼をレーザー溶接した時の溶込み深さ (d) に与えるレーザー出力密度 (I) と焦点でのビーム半径 (r<sub>F</sub>) の積の影響を示す<sup>14)</sup>。直線関係にあるが、電子ビーム溶接の傾きよりもはるかに小さい。なお、UKAEA-Culham

研究所の報告によれば 11.3 kW で 5 mm/s の速度の時の 25.4 mm の溶込みが得られている<sup>15)</sup>。各種溶接法の接合速度 (V<sub>j</sub>) を図 10 に示す<sup>16)</sup>。5 kW の出力で、3 電極サブマージアーク溶接の接合速度に匹敵する。このこ

とはレーザー溶接が生産性も十分高い溶接法であることを意味する。また、歪みが小さいこと、溶加材を必要としないこと、精密で高速な溶接法であるなどの利点があり、実用化が進められている。

レーザー溶接が我が国の製鉄所の酸洗ライン入口で、コイルの板継ぎに1981年から利用されている<sup>17)</sup>。また、最近自動車産業での適用が拡大している。例えばプリーアの溶接、トランスミッションギヤの溶接、パワーステアリング部品の溶接、ステーター・コアの溶接など月産数万個の部品に適用され始めている。西独ティッセン製鉄会社では自動車アンダーボディの板継ぎにレーザー溶接を適用している。米国 General Motor 社は約300台のレーザー装置を稼働させている。我が国においても日本電装ではすでに60台のレーザー装置を導入している。その適用例を図11に示す<sup>18)</sup>。従来のアーク溶接やプロジェクション溶接に代わって、1.2kWのCO<sub>2</sub>レーザーによりステーター・コアを2.4m/minの速さで接合している。電機産業においても小物や薄板からなる部品を局部的に低歪みで精密に溶接するのに利用されている。約100台のレーザー装置(主にYAGレーザー)を配置した「レーザー 스트リート」をもつオランダのフィリップス社ではカラーTV電子銃部品の点溶接<sup>19)</sup>など、社内部品の10<sup>11</sup>点の抵抗溶接部をレーザーに置きかえつつある。加熱部を微小領域に限定でき、溶接変形を極小にできる利点を活かしている。

また、各種機械部品の組立溶接にレーザーが利用される。米国 AVCO 社 Lycoming 部門では M1 型戦車搭載用 AGT 1500 タービンエンジンの熱交換器のアンジュラーコア部品の溶接にパルス発振型 CO<sub>2</sub> レーザーを導

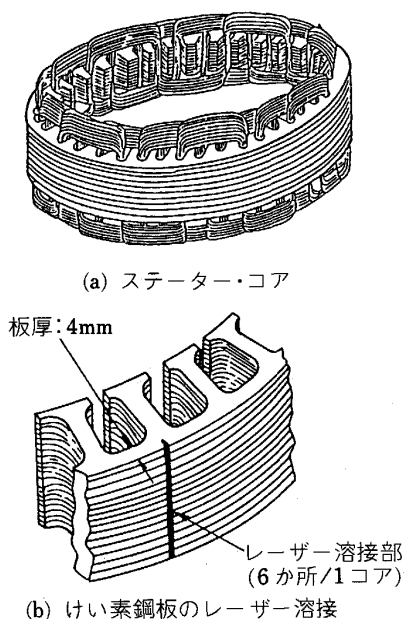


図11 自動車ステーター・コアへのレーザー溶接の適用<sup>18)</sup>

入し、2交替制で日産450ペアを溶接組立てしている。また最近、米国 Stoffel 溶接システム社は製缶用に写真2に示すような3交替・週7日制に耐える高速軸流型 CO<sub>2</sub> レーザー装置を導入し、製缶に用いている<sup>20)</sup>。自動車産業を中心に、重稼動に耐える装置が要求されている。そこで、米国、Control Laser 社では6000h(15か月)トラブルなしのシステムを提供している。

原子力産業においても原子炉制御棒<sup>21)</sup>、高速増殖炉 SPX2 の熱交換器の管板と管の溶接<sup>22)</sup>、ジルカロイの溶接<sup>23)</sup>、ステンレス配管の溶接、原子力発電プラント用レーザーロボット<sup>24)</sup>などが研究・開発されている。

他方、材料面からみると、炭素鋼、低合金高張力鋼<sup>25)~28)</sup>、機械構造用鋼<sup>29)</sup>、Snめつき鋼板<sup>30)</sup>、ステンレス鋼<sup>31)~34)</sup>、アルミニウム<sup>35)</sup>及びその合金<sup>36)37)</sup>、Ni基超合金<sup>38)39)</sup>、形状記憶合金<sup>40)</sup>、セラミックス<sup>41)42)</sup>、など多くの研究報告がある。

パイプ製造へのレーザー溶接の適用が検討されており、電縫鋼管の厚肉化に対処する検討例がある<sup>43)</sup>。レーザー溶接と他プロセスとの複合加工として注目される。また、レーザーろう付けもすでに各種電気接点のろう付け及び扇風機の FMS 生産ライン<sup>44)</sup>、フラットバック IC の搭載実装<sup>45)46)</sup>、微細リードのセラミックス基板上への接合などに実用化が進んでいる。これらは連続発振、あるいはパルス幅の広い YAG レーザーで行われている。接合に必要なろう材の体積計算などの解析も進んでいる<sup>47)</sup>。

## 4.2 除去加工

レーザービームを微小径に集光し、高エネルギー密度を得ることにより、金属をはじめ各種材料の切断、穴あけなどの材料除去加工が可能である。レーザー加工の応用はこの分野が70~80%を占めている。

### 4.2.1 切断・穴あけ (Laser Cutting and Drilling)

レーザー切断・穴あけは他の加工法に比べて、

(1) 高速で切断除去可能。熱歪み及び熱影響が少ない。

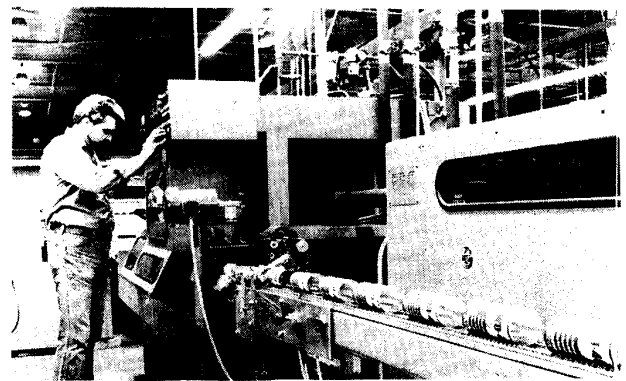


写真2 米国 Stoffel 溶接システム社に導入された製缶用高速軸流形 CO<sub>2</sub> レーザー装置<sup>20)</sup>



(2)非接触のため、脆性な薄板、剛性の低い物も切断、穴あけできる。摩耗する切断工具が不要。

(3)複雑な形状の高精度微細加工が可能。

(4)フレキシブルな三次元切断除去加工が可能。

(5)材料の歩留りが高い。カーフ幅が非常に狭い。

などの特長があり、現在、紙、布、プラスチック、金属、セラミックス、コンクリートなど広範囲の材料の切断、穴あけに利用されている。レーザー切断を大別すれば、燃焼(酸化)反応を伴う燃焼切断と反応を伴わない非燃焼切断とに分類できる。前者では切断ガスとして酸素または空気を、後者ではアルゴンまたは窒素ガスを用いる。表10は各種材料の切断条件と切断ガスを示す<sup>48)</sup>。

金属材料の切断では薄板の高品質で、ドロスフリーの切断が適正なパルス条件で可能となっている。ステンレス鋼、アルミニウム合金、チタン合金はドロスが付着しやすいため、ドロスフリーの高品質切断の研究が行われている<sup>49)~53)</sup>。図12はドロス付着量に及ぼすパルスデューティの影響を示す<sup>54)</sup>。パルス切断では加工条件には連続発振レーザー切断条件に加え、ピーク出力、周波数、デューティ(=パルス時間/サイクル時間)などの条件があり、切断面粗さやドロス付着量をより適切に

表 10 各種材料のレーザー切断条件 (CO<sub>2</sub> レーザー)<sup>48)</sup>

材 質	厚さ (mm)	切断速度 (m/mm)		補助ガス	
		出力 400 (W)	出力 1 000 (W)		
軟鋼	鋼	1	~3~	~4.5~	O <sub>2</sub>
軟鋼	鋼	4	~1~	~1.5~	O <sub>2</sub>
軟鋼	鋼	6	—	~1.0~	O <sub>2</sub>
ステンレス	ステンレス	1	~1.2~	~2.5~	O <sub>2</sub>
ステンレス	ステンレス	3	~0.4~	1	O <sub>2</sub>
ステンレス	ステンレス	4	—	~0.5~	O <sub>2</sub>
アルミニウム	アルミニウム	1	~0.4~	~1.0~	O <sub>2</sub>
アルミニウム	アルミニウム	1	~1.5~	~5~	O <sub>2</sub>
エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	0.5	~3~	~10~	N <sub>2</sub> または Air
セラミック	セラミック	0.5	~0.5~	~0.8~	Air または O <sub>2</sub>
木材	木材	10	~1.5~	~5~	N <sub>2</sub>
皮革	皮革	4	~2.5~	~10~	N <sub>2</sub>
アクリル樹脂	アクリル樹脂	8	~1~	~10~	N <sub>2</sub> または Air

(注)上記データは、切断の最適値を示したものであり、集光レンズ、補助ガスの圧力等により多少変化します。

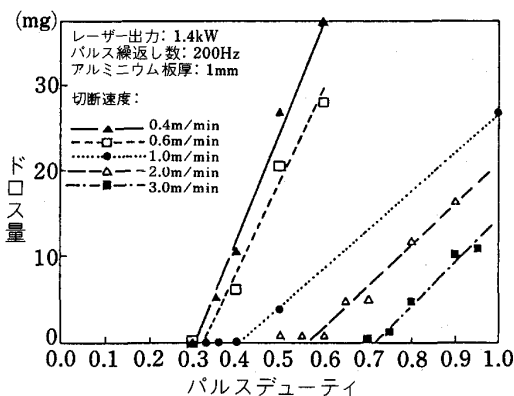


図 12 アルミニウム合金 A5052 (1 mm 厚さ) のパルス炭酸ガスレーザー切断結果<sup>54)</sup>

制御できる<sup>55)</sup>。また、精密切断の部材先端部の切断で、ダレを防止する方法として、先端部で切断速度を変化させるとともに、ある臨界の速度以下では連続発振からパルス発振に切り換える制御法が開発されている<sup>56)</sup>。他切断法との比較を表11に示す<sup>57)</sup>。

非金属材料のレーザー切断例として、コンクリートの切断<sup>58)</sup>、石英ガラスの切断<sup>59)</sup>、セラミックスの切断<sup>60)</sup>、ダイボードの切断<sup>52)</sup>などがある。

最近、自動車産業を中心に、プレス加工品やポリマー部材の切断・穴あけに、三次元切断システムが稼働している。ロボットを用いたもの、ガントリー形5軸または6軸制御のもの、光ファイバーとレーザーロボットを結合したシステムなどがある。三次元切断の場合、加工ヘッドノズル先端と被加工物との距離を一定に保つ必要があるが、5軸制御ではティーチング作業に多大な時間を要

表 11 各種熱切断法の比較<sup>57)</sup>

比較項目	切断法	プラズマ		ガス	
		従来形	エアプラズマ		
熱源	レーザー	アーク		酸化反応	
エネルギー密度	光	中	中	低	
装置コスト	高	中	低	極低	
ランニングコスト	中	高	低	中	
切断ガス	酸素	アルゴン+窒素 アルゴン+水素	エ ア	酸素+アセチレン 酸素+プロパン	
切断性能	非鉄 (アルミニウム) (ステンレス)	◎ (薄板のみ)	○	△	(不可能)
	鉄 (6mm以下)	◎	△	○	△
切断溝形状 (例)軟鋼6mm厚		0.3mm	2mm	1mm	3mm
	切断速度	高	高	中~低	低
	手動操作	×	△	◎	◎

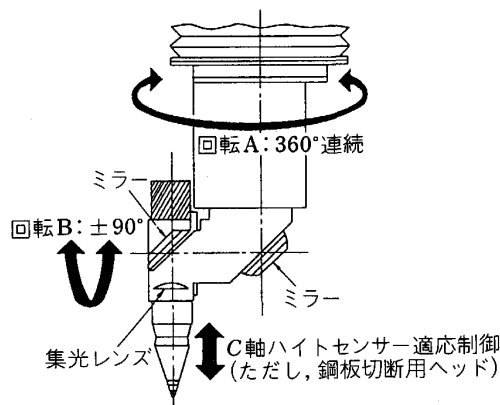


図 13 XYZ 3 軸テーブルに付けられる 2 軸回転ヘッド及び適応制御される C 軸<sup>61)</sup>

する。そこでこの相対的位置関係を一定に保つため、図13のようにイタリアのPRIMA Industrie社では6軸目のC軸にハイトセンサーを付け、適応制御を適用している<sup>61)</sup>。原子力関係では核燃料集合体のレーザー切断(解体)システムの開発<sup>62)</sup>及び、解体切断として、新しいCOレーザーとKrFレーザーを同時に用いたステンレス鋼(6mm厚)の切断例<sup>63)</sup>もある。また、CAD/CAMを導入したシステムやパンチプレスとレーザー切断を結合した例、FMSの中に数台のレーザーを導入した例など、メカトロニクスとレーザー加工技術が融合したオプトメカトロニクスが開発され、今後、情報化社会の要求である多品種少量生産に、ますます利用されようとしている。

穴あけ技術ではNimonic合金製ガスタービン部品の穴あけ、ダイヤモンド等硬質材の穴あけ、コンタクトレンズの穴あけ、紙巻タバコのフィルター部のチップペーパーの穴あけなど行われている。最近注目されるエキシマーレーザーによるポリマーの穴あけの例を写真3に示す<sup>64)</sup>。YAGレーザーやCO<sub>2</sub>レーザーによる熱加工ではポリマーが変質するが、エキシマーレーザーでは変質なしに光分解により穴あけが可能である。また、アレキサンドライトレーザー(中心波長755nm)はYAGレーザー(波長1063nm)やルビーレーザーより発振しきい値が低く、エネルギー蓄積形であるので高ピーク出力を必要とする金属の穴あけに適しており、銅(5mm厚まで)、黄銅(7mm厚まで)、純アルミニウム(8mm厚まで)の穴あけが可能である<sup>65)</sup>。

#### 4.2.2 微細加工(Laser micro-processing)

半導体産業における微細加工(トリミング、スクライビング、マーキング、リペアリング、バランスィング、マイクロソルダリングなど)に現在レーザーが適用されている<sup>66)</sup>。微細除去加工として、HIC(混成集積回路)、抵抗ネットワーク、チップ抵抗、水晶振動子などの電気抵抗を設計値に調整するため、抵抗体の1部をレーザーで除去するトリミング、IC、LSIなどのシリコン基板

及びHICなどのアルミナセラミックス基板を素子製造後分離するためにレーザーで断続的な穴あけを行い切込みを入れるスクライビング、ホトマスク製造時に発生する残留欠陥を効率良く修正するレーザーリペアリング、およびマイクロモーターなど回転体のダイナミックバランスィングがあり、主に、YAGレーザーが用いられている。LSIのレジストレスのパターン転写エッチングにはArFエキシマーレーザーが検討されている<sup>67)</sup>。

#### 4.2.3 マーキング(Laser marking)

CW及び高速パルスYAGレーザーによるスキャンニング方式マーキングとTEA(Transverse Excited Atmospheric)CO<sub>2</sub>レーザー及びパルスYAGレーザーによるマスク方式マーキングが近年実用化され、急激にその適用範囲が拡大している。前者は主に金属へのマーキング、後者は主に非金属のマーキングに利用されている。米国では社会的要請、例えば化粧品の東南アジア地域での偽造防止、食料品の保管管理、製品の追跡調査、などのため、マーキングの必要性が増大している。また西独でもビール製造直後のナンバーリングの義務のためレーザー・マーカで缶やビンのラベルにマーキングされている。また、多品種少量生産にバーコードを活用するニーズが予測されるが、既に国内で鋼板の管理にレーザーマーキングを検討している<sup>68)</sup>。従来のインク方式では線径が100µmであつたものが、レーザーにより20~30µmと細く、微細で、非接触でしかも高速にマーキングできる。図14にマーキング方式を<sup>69)</sup>、図15に1パルスでマーキングできる面積の比較を示す<sup>65)</sup>。アレキサンドライトレーザーも今後利用されよう。

#### 4.3 表面加工(Laser surface processing = LSP)

既に表3に示したように、レーザー表面加工は大別して加熱、溶融、蒸発及び化学反応プロセスに分けられる。近年、この分野の研究開発は米国、日本を中心に各国で活発に行われている。なぜなら、従来の熱源に比べて、化学的には完全にクリーンであり、表面処理には理想的な特性をもち、騒音もなく自動化に適しているからであ

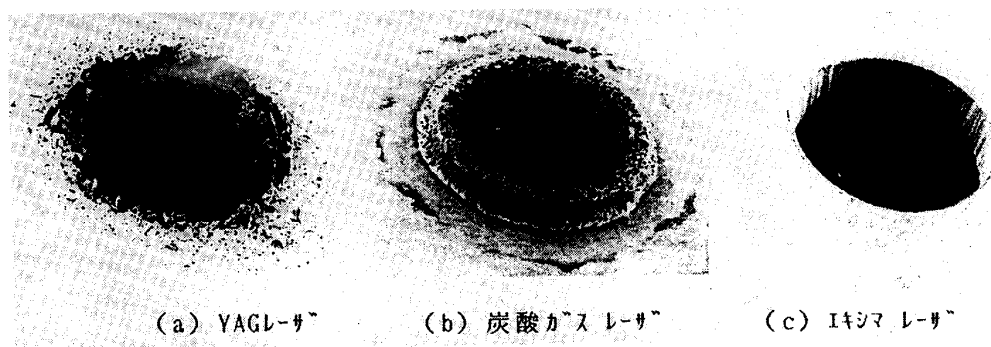
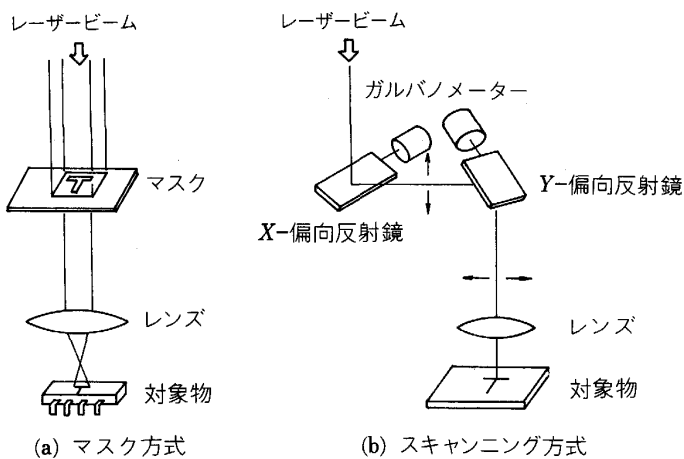
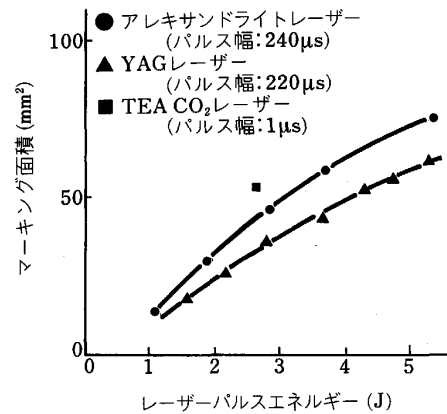


写真3 板厚75mmのポリマーの各種レーザーによる穴あけ状況(穴径300ミクロン)<sup>64)</sup>

図 14 レーザーマーキングの方式<sup>69)</sup>図 15 異なるレーザーによるマーキングにおける 1 パルスでマーキングできる最大面積の比較 (同一エネルギー)<sup>65)</sup>表 12 レーザー焼入れの部品への適用例<sup>73)</sup>

部 品	材 料	レーザーパワー (kW)	ビーム形状 (mm)	移動速度 (mm/s)	吸 収 剤	硬化深さ (µm)	硬 度 (HRC)
スパーサ	マリアブル鉄	15	12.7×12.7 角	—	黒 鉛	305	58
ピストンリング溝	ねずみ鉄	3	12.7×12.7 角	—	黒 鉛	381	—
バルブシート	鉄	6	—	—	—	762	—
カムシャフト	ダクタイル鉄	10	—	—	—	1016	60
シャフト	AISI 4140H鋼	10	—	12.7	—	381	55
スプラインギヤ	—	10	—	12.7	—	381	—
クランクシャフトのフィレット	ダクタイル鉄	13	—	4 s/rev.	—	1015	55-62
シリンダー (φ25.4 mm)	AISI 4140H鋼	3.5-7.5	—	1300 rev/min	ブラックペイント	1523-2032	45
カムシャフト	ダクタイル鉄	9	23×25 矩形 (オシレーション)	12.7	りん酸マンガン	560	50-55
ギヤの歯	AISI 1045 鋼	8.8	12.7×12.7 角 (ビームスプリット)	8.5	ブラックペイント	1165-1132	59-60
シャフト(φ9.5 mm)	AISI 1060 鋼	0.5	処理量 97 mm <sup>2</sup> /s	—	—	508	62-64
スプラインギヤ	AISI 1050 鋼	0.5	54 mm <sup>2</sup> /s	—	—	381	60
カッティングブレード	AISI 1050 鋼	0.5	43 mm <sup>2</sup> /s	—	—	635	60-64
シリンダーライナー	ねずみ鉄	1.5	108 mm <sup>2</sup> /s	—	—	—	55-60
ベアリング部品	ねずみ鉄	1.5	—	—	—	457	—
パワーステアリング	フェライト系	1.0	リングモート (φ1.8 mm. TEM <sub>01</sub> )	42	りん酸マンガン	254-356	—
ギヤハウジング	可鍛鉄	—	—	—	—	—	—
クラフトペーパー用ロール(27501b)	—	1.2	—	—	—	1016	60-63
海軍艦船用のカットアウトカム	AISI 4340 鋼	1.2	—	—	カーボン	381-432	—
戦車用のエンドコネクター	AISI 4140 鋼	4	—	5	Krylon 1602	305	55
タイヤライタ用インターポーター	—	1.2	—	—	コロイダルグラファイト	1016	—
シリンダーライナー	鉄	5	φ19 mm ビーム	—	ブラックコーティング	635	—
バルブガイド	ねずみ鉄	0.4	φ19 mm ビーム	4.2	—	—	—

る。主な表面加工法についてトピックス的に述べる。

#### 4.3.1 加熱プロセス

##### (a) 変態焼入れ (Laser transformation hardening)

1974年に米国 GM社で自動車のギヤハウジングの内面焼入れにレーザーが適用されて以来、エンジンシリンダーライナーの内面焼入れ (GM, 三菱重工), NC 施盤用ベッドの摺動面の焼入れ (富士ファナック), ピストンリング溝の焼入れ (川崎重工<sup>70)</sup>, ヤンマー<sup>71)</sup>, クランクシャフトコーナー部の焼入れ<sup>72)</sup>, 自動車のセラミックス製ターボチャージャーのシャフトおよびクラッチドラムの焼入れ (日産)<sup>72)</sup> など多くの適用例を見るに至った。表 12 にレーザー焼入れの適用状況を示す<sup>73)</sup>。炭素鋼, C-Cr 鋼の焼入れ<sup>74)</sup>, 過共析鋼の焼入れ<sup>75)</sup>, 鉄の焼入れ<sup>76)~78)</sup> など, 各種材料にレーザー焼入れが

適用されたとの報告がある。

レーザー出力のアップとともに, 単位時間当たりの焼入れ面積が増してきたが, 今後は狭あい部分, 複雑形状部品, 内面などの焼入れにも適用されよう。

##### (b) アニーリング (Laser annealing)

半導体素子の Si や Ge に As, B または P をイオン注入すると表面層に非晶質層や転位ループが生じ電気的特性が劣化する。そこでこれらを結晶化し, 転位をなくす処理が行われ, この処理をアニーリングと呼んでいる。レーザー照射により欠陥クラスターや転位ループを減少できる。また, 超電導材 Nb<sub>3</sub>(Al, Ge) でテープを作成するのに, 焼結されたこの材料に CO<sub>2</sub> レーザー照射することにより, 遷移温度 (T<sub>c</sub>) を 18.6 K (Nb<sub>3</sub>Al) 及び 20.1 K (Nb<sub>3</sub>(Al, Ge)) とすることに成功してい

る<sup>79)</sup>。

(c) ステンレス鋼の表面溶体化処理 (Solution treatment)

ステンレス鋼溶接継手のウェルド・ディケイ (Weld decay) は粒界にクロム炭化物が析出するため生ずるが、この部分をレーザーにより 1100~1300°C に短時間加熱することにより、炭化物が分解・再固溶し、耐食性劣化を防止できることが報告された<sup>80)81)</sup>。表面層を急熱・急冷できるため、隣接部の炭化物析出を抑え、表面のみ溶体化できる。

4.3.2 溶融プロセス

(a) 合金化 (Laser alloying)

金属表面に新しい合金層、化合物層を作る方法で、多くの研究があるが、実用化された例は少ない。合金層としては急熱・急冷プロセスのため、過飽和な、非平衡相を均一微細組織として得ることもできる。炭素鋼表面にグラファイトを塗布し、レーザー表面溶融すると溶融部の炭素量は図 16 のように増し、その硬さも増大する<sup>82)</sup>。炭化、窒化<sup>83)</sup>、鋼管内面のチタン被膜生成<sup>84)</sup>、タングステン合金化<sup>85)</sup>、高 Cr 化、TiAl<sub>6</sub>V<sub>4</sub> 合金への TiN 被膜生成<sup>86)</sup>、Ni-Cr 合金へのクロム炭化物被膜生成<sup>87)</sup>、Al-Si 鋳物表面の鉄合金化による硬化処理<sup>88)</sup> など興味ある報告がある。また、レーザー合金化の研究例を 101 件整理した報告もある<sup>89)</sup>。

(b) 肉盛 (Laser cladding)

レーザー肉盛は局部的な肉盛に実用化されている。ロールスロイス社ではタービンブレードシュラウドのレーザー肉盛を実用化している。トヨタ自動車はエンジンバルブにステライト #32 をレーザー肉盛する加工法を実生産ラインに導入した。図 17 は木材切削刃物の刃先をレーザーにより軟鋼に高速度鋼粉末と 40% の VC

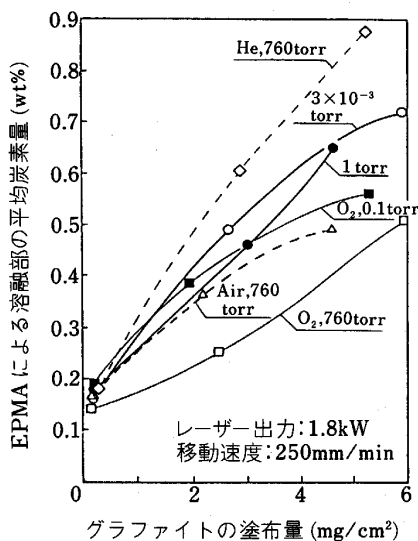


図 16 グラファイト塗布量と溶融部の炭素含有量の関係<sup>82)</sup>

粉末を肉盛して作り、それを摩耗試験した結果を示す。40% の VC を添加し、大きな炭化物を均一に分布させることにより、高速度鋼に比べて、約 10 倍の寿命を得た<sup>90)</sup>。最近レーザー肉盛作業標準も作られた<sup>91)</sup>。

(c) 表面溶融 (Laser surface melting)

表面溶融には、従来のアーク溶接部と同程度の凝固速度の通常凝固プロセス、組織の微細化、準安定相の生成、均質化が十分期待できる急速凝固プロセス及び非晶質化まで可能なほど速い超急速凝固プロセス (Laser glazing) がある。

ステンレス鋼の表面溶融では、得られる顕微鏡組織が従来のシェフラー状態図で推定されるものと著しく異なり<sup>92)</sup>、耐食性<sup>93)</sup> および耐酸化性が向上すること<sup>94)</sup> も見出されている。また、溶射層の気孔率の低減と均質化を図るレーザーコンソリデーション<sup>95)</sup>、自動車用鮮映性鋼板を生産する圧延ローラーのダル加工<sup>96)</sup>、および高張力鋼溶接継手の止端部再溶融による疲れ強さの改善 (図 18 参照)<sup>97)</sup> など、最近興味深い開発がなされてい

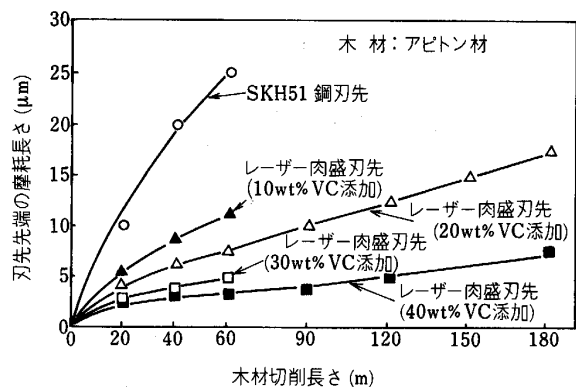


図 17 VC 混合金属粉末のレーザー肉盛刃先の摩耗試験結果<sup>90)</sup>

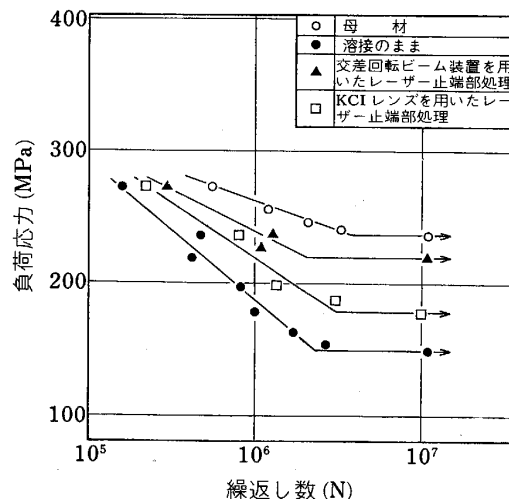


図 18 SM50 鋼溶接継手のレーザー止端部処理による疲れ強さの改善<sup>97)</sup>

る。鑄鉄のチル処理により、表面改質し、耐摩耗性を向上できる<sup>98)</sup>。レーザーによる金属の加熱速度および冷却速度は非常に早く、それぞれ数万°C/s、数千~数万°C/sの値を得ることもでき、金属表面をアモルファス化することも可能である<sup>99)</sup>。広い表面をアモルファス化できる。

#### 4.3.3 蒸発プロセス

(a) レーザー物理蒸着 (Laser physical vapour deposition)

レーザー PVD 法を用いて、レーザー光吸収体 (Mo 基板) 表面に BN 薄膜を蒸着した例、アルミニウム基板に Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜を蒸着した例<sup>100)</sup> が報告されている。冷蔵庫の圧縮機用モーターシャフト (アルミニウム合金) へのセラミックス膜蒸着が実用化されている<sup>100)</sup>。

(b) その他蒸発プロセス

3% けい素電磁鋼板の表面に張力皮膜をつけ、パルスレーザーでこの皮膜を蒸発させるとき生ずる衝撃波で鋼板表面に微小歪みを誘起し、磁区を細分化し、鉄損を約 10% 低下させるレーザー加工がわが国製鉄所で実用化されている<sup>101)</sup>。また、アルミニウム合金や SUS316 鋼の表面に水または石英を塗布し、レーザーでこの皮膜を蒸発させ、5 GPa 以上の圧力を材料に与え硬化する衝撃硬化 (Laser impact hardening) も研究されている。

#### 4.3.4 化学反応プロセス

(a) レーザー化学蒸着 (Laser chemical vapour deposition)

最近、レーザー CVD やレーザーエッチングなどレーザー光化学反応を利用したプロセスが注目されている。低温で薄膜形成が可能で、膜成長速度、膜厚をレーザー出力で制御できる。Ar イオンレーザーによるシリカガラス基板への鉄の蒸着 (Fe(CO)<sub>5</sub>→Fe)<sup>102)</sup>、ArF レーザーによる Si または SiO<sub>2</sub> 基板への TiSi<sub>2</sub> の蒸着 (SiH<sub>4</sub> + TiCl<sub>4</sub>→TiSi<sub>2</sub>)<sup>103)</sup>、ArF レーザーによる SiO<sub>2</sub> 基板へのタングステンの蒸着 (WF<sub>6</sub> + H<sub>2</sub>→W)<sup>104)</sup>、Si 基板上へのダイヤモンド薄膜の成長、及びその他金属膜の蒸着などのレーザー CVD がある<sup>105)</sup>。レーザー励起エッチング (Laser assisted etching) は光エネルギーで反応性ガスや液を材料と反応させエッチングする方法で、高能率である。Si、GaAs などの基板に対する損傷が少ない。新日本製鉄では最近、硝酸系溶液中につけたステンレス鋼にパルスレーザーを照射し、酸化被膜の厚みを制御し、青、金、緑など7色を同時に着色できる加工法を開発した。CAD との組合せで色模様を出すことができ、経済性が極めて高い。

その他、レーザーリソグラフィによる高分子膜の形成、めつき加速処理 (めつき反応速度の向上) などが研究開発されている。

#### 4.4 その他

以上述べたレーザー加工法以外に、新しい加工法が開

表 13 各種レーザー装置の需要現状 (1986 年) と予測 (1991 年)<sup>113)</sup>

分類	光製品	単位	1986年度	1991年度
光 部 品	半導体レーザー	個		
	長波長帯 (1.55 μm 帯)	個	1 300	4 500
	長波長帯 (1.30 μm 帯)	個	24 000	120 000
	短波長帯 (0.85 μm 帯)	個	600 000	2 900 000
	可視域 (0.78 μm 帯)	個	8 100 000	97 000 000
	気体レーザー			
	ヘリウムネオンレーザー	台	67 000	86 000
	アルゴンレーザー	台	1 100	2 600
	炭酸ガスレーザー	台	700	2 500
	エキシマーレーザー	台	50	680
	固体レーザー			
	ルビーレーザー	台	8	8
	ガラスレーザー	台	2	2
YAG レーザー	台	750	2 900	
光 機 器 ・ 装 置	レーザー応用生産装置			
	炭酸ガスレーザー	台	240	720
	除去加工装置	台	30	130
	接合加工装置	台	50	610
	レーザーマーカ	台	15	370
	表面処理装置	台	45	150
	スクライビング装置 (セラミック用)			
	YAG レーザー			
	除去加工装置	台	30	100
	接合加工装置	台	200	840
	レーザーマーカ	台	110	1 100
	表面処理装置	台	10	45
	スクライビング装置 (半導体用)	台	5	30
半導体トリミング装置	台	330	1 000	
半導体パターン処理				

発され、実用化が検討されている。それを次にあげる。

(i) 新材料の製造法: 微粒子の生成<sup>106)</sup>、FRM の製造<sup>107)</sup> など

(ii) レーザー切削成形法<sup>108)</sup>

(iii) 金属板の曲げ加工<sup>109)110)</sup>

(iv) ガラスや岩石の割断および破砕

## 5. あとがき

レーザー加工技術は米国、日本、西独を中心として、工業先進国で急速に実用化が進んでいる<sup>111)112)</sup>。我が国も 80 年代に入り、電気・電子産業、自動車産業、鉄鋼業を中心に実用化が進み、表 13 に示すように<sup>113)</sup>、1986 年には CO<sub>2</sub> 及び YAG レーザー合わせて 1 450 台の需要実績となり、1991 年には 5 000 余台が予測されている。今後、①新加工用レーザーの開発、②加工光学系及びビーム伝送技術の発展、③新しいレーザー加工法の開発、④FA・FMS への導入システムの開発などにより、ますます、レーザー加工技術が近代工場で不可欠の「熱加工工具」として利用されるであろう。

## 文 献

- 1) 沓名宗春: 溶接技術, 35 (1987) 1, p. 60
- 2) 益本 功, 沓名宗春: 機械の研究, 36 (1984), p. 459
- 3) 益本 功, 寺井精英: 溶接技術, 29 (1981) 9, p. 17
- 4) 坂口茂樹, 高橋志郎: 第 22 回東北大通研シンポジウム論文集 (1986), p. 1
- 5) 小松 巖, 末永直行: 溶接技術, 35 (1987) 8, p. 62
- 6) 木村博一: 溶接技術, 36 (1988) 8, p. 66
- 7) K. OKINO and H. TAKENAKA: KIEE Annual Conf. Seoul, Korea (1988 年 11 月)

- 8) (株)東芝技術資料「YAG レーザー」(1987年2月)
- 9) 浜松ホトニクス(株)技術資料 T-2000「エキシマレーザ」(1987年6月)
- 10) 村原正隆: 塑性と加工, 27 (1986), p. 934
- 11) R. SRINIVASAN: *Laser Processing and Diagnostics*, Springer Series in Chemical Physics, 39 (1984), p. 343 [Springer-Verlag]
- 12) S. SATO, K. TAKAHASHI, H. SAITO, M. SUGIMOTO and T. FUJIOKA: Proc. of ICALEO '88, Santa Clara, USA (1988年10月)
- 13) 池田正幸: 機械技術, 31 (1983) 4, p. 10
- 14) E. BEYER, G. HERZIGER and Ch. HÖLLT: Proc. of 2nd Intern. Conf. on Beam Technology, Essen (1985年9月)
- 15) A. S. KAYE, A. G. DELPH, E. HANLEY and C. J. NICHOLSON: UKAEA Culham Laboratory 技術資料, CLM-P705 (1983)
- 16) 沓名宗春: 実務展望 (1988) 126, p. 3
- 17) H. SASAKI, N. NISHIYAMA, A. KAMADA, E. YANAGISHIMA, K. FURUKAWA, T. YOSHIMOTO and S. TANGUCHI: Proc. of 3rd CIS-FFEL, Lyon, France (1983年9月)
- 18) Y. IWAI, N. OKUMURA and O. MIYATA: Proc. of LAMP '87, Osaka (1987年5月), p. 517
- 19) G. J. A. M. NOTENBOOM: *Laser* (1984), p. 36 [The Welding Institute]
- 20) C. M. SHARP: Proc. of LAMP '87, Osaka (1987年5月), p. 541
- 21) J.-L. BOUTES and L. MICOULET: Proc. of 4th CISFFEL, Cannes (1988年9月), p. 459
- 22) G. CAI, G. GHIRINGHELLO, G. PEROTTI and A. CHIASERA: Proc. of 4th CISFFEL, Cannes (1988年9月), p. 377
- 23) V. RAM, E. TSORY, G. KOHN and A. STERN: Proc. of 4th CISFFEL, Cannes (1988年9月), p. 451
- 24) M. CONTRE: Proc. of LAMP '87, Osaka (1987年5月), p. 129
- 25) E. A. METZBOWER, P. E. DENNEY, F. W. FRASER and D. W. MOON: *Weld. J.*, 63 (1984) 7, p. 39
- 26) M. N. WATSON and C. J. DAWES: *Metal Construction*, 17 (1985), p. 561
- 27) I. J. STARES, R. L. APPS, J. H. P. C. MEGAW and J. SPURRIER: *Metal Construction*, 19 (1987), p. 123
- 28) E. M. BREINAN and C. M. BANAS: WRC Bulletin NO. 201, Arctic Pipeline Steel (1975), p. 47
- 29) I. MASUMOTO, M. KUTSUNA and C. Z. XIAO: Proc. of JOM-3, Helsingør (1986年12月), p. 256
- 30) W. WADDELL, N. T. WILLIAMS and A. B. HABERTFIELD: *Metal Construction*, 19 (1987), p. 313
- 31) 山内信幸, 三浦 実, 高祖正志: 溶接学会全国大会講演概要, 37集 (1985), p. 298
- 32) S. KATAYAMA and A. MATSUNAWA: Proc. of ICALEO, 44 (1984), p. 60
- 33) R. K. HOLBERT, Jr., T. M. MUSTALESKI and L. D. FRYE: *Weld. J.*, 66 (1987) 8, p. 21
- 34) P. A. A. KHAN, T. DEBROY and S. A. DAVID: *Weld. J.*, 67 (1988) 1, p. 1-s
- 35) A. C. LINGENFELTER: Proc. of LAMP '87, Osaka (1987年5月), p. 211
- 36) M. J. CIESLAK, and P. W. FUERSCHBACH: *Metall. Trans. B*, 19 (1988), p. 319
- 37) 益本 功, 沓名宗春, 鈴木純也: 溶接学会全国大会講演概要, 37集 (1985), p. 300
- 38) J. A. MILLER and J. CHEVALIER: *Weld. J.*, 62 (1983) 7, p. 49
- 39) W. MAOCAL, J. ZHUJING and W. WEITAO: *Werkstoffe und Korrosion*, 38 (1987), p. 124
- 40) 荒木孝雄, 廣瀬明夫, 内原正人, 河野 涉, 本多啓三, 近藤光昇: 溶接学会全国大会講演概要, 43集 (1988), p. 132
- 41) 池田正幸: 溶接技術, 30 (1982) 8, p. 28
- 42) 丸尾 大, 宮本 勇, 片岡昌治, 荒田吉明: 溶接学会全国大会講演概要, 35集 (1984), p. 82
- 43) 中西伸介, 市古修身, 浜田直也, 南田勝宏, 水橋伸雄, 芳賀博世: 溶接学会全国大会講演概要, 43集 (1988), p. 290
- 44) 産報出版編集部: 溶接技術, 33 (1985) 8, p. 40
- 45) 三浦 宏: 溶接技術, 35 (1987) 8, p. 81
- 46) 土屋 均: 溶接技術, 36 (1988) 10, p. 17
- 47) S. NAKAHARA, M. TAKAOKA, S. HISHADA, T. FUJITA and K. SUGIHARA: Proc. of LAMP '87, Osaka (1987年5月), p. 231
- 48) 安村幹明: 溶接技術, 35 (1987) 8, p. 76
- 49) 高橋久志: 機械技術, 35 (1987) 14, p. 62
- 50) 安田耕三: 最近のレーザー加工技術に関する講習会テキスト (日本溶接協会 HPL 委員会編) (1986), p. 13
- 51) I. DECKER, J. RUGE and Y.-H. HAN: *Schweissen und Schneiden*, 37 (1985), p. 356
- 52) 西川和一, 大東達哉: *NEW WELTEC*, 4 (1988) 10, p. 29
- 53) I. DECKER and J. RUGE: Proc. of 2nd Intern. Conf. on Beam Technology, Essen (1985年9月), p. 85
- 54) 益本 功, 沓名宗春, 市川和利: 溶接学会全国大会講演概要, 42集 (1988), p. 270
- 55) 木谷 基, 金岡 優, 柴山耕三郎, 吉田寿男: 三菱電機技術報, 61 (1987), p. 468
- 56) M. MORIYASU, S. HIRAMOTO: Proc. of ICALEO (1985), p. 129
- 57) 原田章二, 浦井直樹: 溶接技術, 36 (1988) 11, p. 68
- 58) 浜崎正信, 勝村宗英, 内海明博: *高温学会誌*, 11 (1985), p. 226
- 59) 関 宏次, 森井 泰, 小林伸吾, 中井知章: 溶接学会全国大会講演概要, 41集 (1987), p. 340
- 60) 北側彰一: 最近のレーザー加工技術に関する講習会テキスト (日本溶接協会 HPL 委員会編) (1986), p. 27
- 61) アマダ(株)技術カタログ, *The Laser Robot*
- 62) B. S. WEIL: Proc. of LAMP '87, Osaka (1987年5月), p. 145
- 63) S. SATO, K. TAKAHASHI, H. SAITO, M. SUGIMOTO, T. FUJIOKA, S. SHONO, O. MATSUMOTO, S. BEPPU and K. MATSUDA: Proc. of ICALEO '88, Santa Clara (1988年11月)
- 64) T. ZNOTINS, D. POULIN and J. REID: Proc. of LAMP '87, Osaka (1987年5月), p. 581
- 65) 山田明孝, 今井信一, 石川 憲: *東芝レビュー*, 42 (1987) 7, p. 1
- 66) 吉川省吾: 塑性と加工, 27 (1986), p. 928
- 67) I. SPALDING: *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 201 (1987) B3, p. 165
- 68) 溶接新聞 (昭和63年10月17日号), p. 16
- 69) 藤岡康朝: *自動化技術*, 18 (1986) 11, p. 60
- 70) 安田耕三: 溶接学会全国大会講演概要, 40集 (1987), p. 21
- 71) Y. ASAKA, H. KOBAYASHI, S. ARITA: Proc. of LAMP '87, Osaka (1987年5月), p. 555
- 72) K. SHIBATA: *Seminar Handbook on Applications of Laser Proc. in Automobile Fab. and Related Industries*, Cambridge (1987年12月)
- 73) P. A. MOLIAN: *Surface Engineering*, 2 (1986), p. 19
- 74) J. R. BRADLEY and S. KIM: *Metall. Trans. A*, 19 (1988), p. 2013
- 75) W.-B. LI, K. E. EASTERING and M. F. ASHBY: *Acta Metall.*, 34 (1986), p. 1533
- 76) P. A. MOLIAN: *J. Eng. Materials and Tech.*, 109 (1987), p. 179
- 77) C. H. CHEN, C. P. JU and J. M. RIGSBEE: *Mater. Sci. Technol.*, 4 (1988), p. 161

- 78) J. COM-NOUGUÉ, E. KERRAND, B. GALLAND, M. BARRAL: Proc. of 4 th CISFFEL (1988 年 9 月), p. 581
- 79) H. KUMAKURA, K. TOGONO, K. TACHIKAWA, Y. YAMADA, S. MURASE, M. SASAKI and E. NAKAMURA: Proc. of LAMP '87, Osaka (1987 年 5 月), p. 607
- 80) 益本 功, 篠田 剛, 石山博之: 溶接学会全国大会講演概要, 35 集 (1984), p. 112
- 81) 中尾嘉邦, 西本和俊: 溶接学会論文集, 5 (1987), p. 445
- 82) 益本 功, 沓名宗春, 汐見一光: 溶接学会全国大会講演概要, 41 集 (1987), p. 342
- 83) M. FASTOW and M. BAMBERGER: Scr. Metall., 22 (1988), p. 183
- 84) 河内啓輔, 森重徳男: 溶接学会全国大会講演概要, 43 集 (1988), p. 308
- 85) T. H. KIM and M. G. SUK: Proc. of LAMP '87 (1987 年 5 月), p. 413
- 86) E. W. KREUTZ, H. W. BIELER, A. GASSER, M. SCHWARZ and K. WISSENBACH: Proc. of 4 th CISFFEL (1988 年 9 月), p. 635
- 87) T. PUIG, J. L. DEREPI, G. COQUERELLE and M. CONDAT: Proc. of 4 th CISFFEL (1988 年 9 月), p. 599
- 88) M. PIERANTONI, J. D. WAGNIERE and E. BLANK: Proc. of 4 th CISFFEL (1988 年 9 月), p. 681
- 89) C. W. DRAPER and C. A. EWING: J. Mater. Sci., 19 (1984), p. 3815
- 90) I. MASUMOTO and M. KUTSUNA: ZIS Mitteilungen, 27 (1985), p. 239
- 91) 日本溶接協会特殊材料溶接研究委: 溶接技術, 36 (1988) 11, p. 111
- 92) 松縄 朗, 片山聖二, 政所康博: 溶接学会全国大会講演概要, 35 集 (1984), p. 120
- 93) 中尾嘉邦, 西本和俊, 上野文義, 高祖正志: 溶接学会溶接法研究委員会資料, SW-1720-86 (1986)
- 94) 和出 昇, 細井祐三: 学振第 123 委員会研究報告, 24 (1984) 2, p. 341
- 95) S. DALLAIRE and P. CIELO: Metall. Trans. B, 13 (1982), p. 479
- 96) 川崎製鉄(株): 鐵, (1986) 134, p. 4
- 97) I. MASUMOTO and M. KUTSUNA: Proc. of 4 th CISFFEL (1988 年 9 月), p. 399
- 98) C. H. CHEN, C. J. ALTSTETTER and J. M. RIGSBEE: Metall. trans. A, 15 (1984), p. 719
- 99) A. MATSUNAWA, S. KATAYAMA, Y. OHMI and T. KUROKI: Proc. of 4 th CISFFEL, Cannes (1988 年 9 月), p. 563
- 100) 森田 毅, 平本誠剛: NEW WELTEC, 4 (1988) 10, p. 41
- 101) 高藤英生, 市古修身: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 1596
- 102) R. B. JACKMAN and J. S. FOORD: J. Appl. Phys., 59 (1986), p. 2031
- 103) A. GUPTA, G. A. WEST and K. W. BEESON: J. Appl. Phys. 58 (1985), p. 3573
- 104) A. SHINTANI: J. Appl. Phys., 61 (1987), p. 2365
- 105) 豊田浩一: 光学, 14 (1985), p. 256
- 106) A. MATSUNAWA and S. KATAYAMA: Trans. JWRI, 14 (1985), p. 397
- 107) 奥村光弘, 宇都宮真, 森田 毅, 平本誠剛: 溶接学会全国大会講演概要, 42 集 (1988), p. 154
- 108) レーザ加工技術実用マニュアル (小林 昭編) (1987), p. 380 [新技術開発センター]
- 109) K. MASUBUCHI, I. MASUMOTO and Members of HPL Committee: Proc. of 2 nd Inter. Conf. on Beam Technology, Essen (1985 年 9 月), p. 20
- 110) Y. NAMBA: Proc. of LAMP '87, Osaka (1987 年 5 月), p. 601
- 111) 沓名宗春: 塑性と加工, 27 (1986), p. 949
- 112) 沓名宗春: 機械技術, 35 (1987) 14, p. 26
- 113) 光産業技術振興協会: 溶接技術, 別冊 (1988), p. 58