

# レーザーによる表面改質加工



森 一 平\*

## Laser Surface Modifications

Kazuhira MORI

### 1. はじめに

今日までに発明されたレーザーの種類は百種類以上になるといわれているが、加工用に用いられるレーザーは大出力が必要であり、数種類に限定される。表1に加工用レーザーの種類と主な用途を示すが、国内で今日生産に実用されているものはほとんどが YAG レーザーか CO<sub>2</sub> レーザーである。59 年度の国内におけるレーザー加工機の出荷台数は約 1450 台<sup>1)</sup>、年率 50% 強の伸びを示しているが用途はマイクロ除去、穴あけ、切断、溶接が主で表面改質への用途はほとんど見られない。

しかし最近では高繰返しパルスの大出力エキシマレーザーの研究も活発で、平均出力 200 W 級が開発され<sup>2)</sup>、半導体プロセスの光化学的表面処理加工が研究されている。また CO<sub>2</sub> レーザーは連続発振で出力 26.7 kW の開発もなされ<sup>3)</sup>、大出力を必要とするレーザー熱処理加工への期待も高まっている。米国では既に自動車産業をはじめとして生産ラインにてレーザー焼入れ、クラッディングが実用されており、国内でも今後急速に普及しは

じめると考える。ここではレーザー加工のこれからの応用分野として期待されている材料の表面改質加工について紹介する。

### 2. レーザー表面改質加工の原理

#### 2.1 熱的加工の原理

エネルギーを熱として利用するレーザーは波長が比較

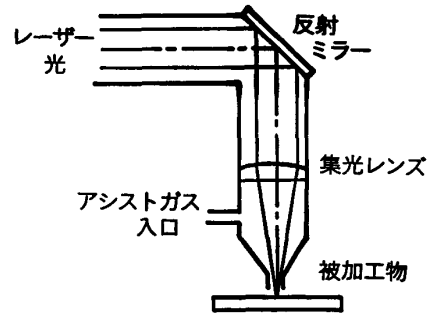


図 1 熱的加工に用いられるレーザー加工ヘッドの構造

表 1 加工用レーザーの特性と用途

レーザーの種類	波長 (μm)	発振形式	平均出力 (W)	励起方式	用途	
固体	ルビー	0.694	単一パルス		キセノンランプ (穴あけ・スポット溶接)	
	YAG	1.06	連続・繰返しパルス ジャイアントパルス	~600	キセノンランプ クリプトンランプ	トリミング・スクライビング・マーキング 穴あけ・溶接・はんだ付け・切断
固体	ガラス	1.06	単一パルス		キセノンランプ	スポット溶接・穴あけ
	アレクサンドライト	0.70 ~0.82	繰返しパルス ジャイアントパルス	~70	キセノンランプ クリプトンランプ	穴あけ
気体	CO <sub>2</sub>	10.6	連続・繰返しパルス	~20000	放電 電子ビーム (制御)	切断・溶接・表面熱処理 微少除去加工
	Ar	0.488 0.514	連続波	~18	放電	半導体加工 製板
エキシマ	ArF	0.193	パルス	40	UF 予備励起放電 電子ビーム (直接) 電子ビーム (制御)	材料の高純度精製 半導体の表面処理 材料合成
	KrF	0.248		200		
	XeCl	0.308		60		
	XeF	0.351		15		

昭和 60 年 11 月 14 日受付 (Received Nov. 14, 1985) (依頼解説)

\* 三菱電機 (株) 名古屋製作所 レーザー技術部品品質保証課課長 (Quality Control Section, Raser Engineering Dept., Nagoya Works, Mitsubishi Electric Corp., 5-1-14 Yadamnami Higashi-ku Nagoya 461)

的長い赤外レーザーを利用する。太陽光線を虫めがねで集光し紙や木を燃やすことができるが、レーザーは太陽光線に比べ発散角の小さい平行光線であり、また色収差を生じない単色光なので、集光特性はるかに優れている。レーザーの波長と集光光学系のF番号（レンズへの入射ビーム径とレンズの焦光距離の比）などにより焦点のスポット直径は異なるが、YAGレーザーでは0.01mm CO<sub>2</sub>レーザーでは0.1mm程度までの小さな径に集光できる。また集光光学系入口でのビームのエネルギー密度が太陽光で0.1W/cm<sup>2</sup>、レーザーでは最大1000W/cm<sup>2</sup>と大幅に異なるので、同一口径の集光光学系を使用すれば焦点でのエネルギー密度は太陽光に比べ百万倍以上にも達し10<sup>8</sup>W/cm<sup>2</sup>の高エネルギー密度が得られる。被加工物表面に照射されるレーザーのエネルギー密度と照射時間を変化させることにより、蒸発、熔融あるいは変態温度以上に加熱などの各種熱加工が可能となる。レーザーは低いエネルギー密度で金属材料表面に照射すると大部分の光が反射されてしまうので、加工効率を高めるためには被加工物表面での反射を少なくする配慮が必要である。金属の熱処理加工では集光スポットビームの焦点径より幅の広い加工が要求され、ディフォーカスビームにして加工されることが多いので大出力のレーザーを用いないと照射面でのエネルギー密度が低くなり反射光が多くなってしまう。このような理由で今日金属の熱処理加工の用途に使われるレーザーは、工業的に最も大きな出力を連続的に発振できるCO<sub>2</sub>レーザーにほとんど限られている。

図1にレンズを用いた場合の代表的な加工ヘッドの構造を示す。ノズルからはレーザーと共にアシストガス（熱処理加工の場合Arや乾燥空気を用いることが多い）を吹き出す。アシストガスはレーザー照射部より発生するフェームや蒸発物を除去し、レーザーの被加工物への吸収を良くするとともにシールドガスとしての役割を果たす。

2.2 光化学的加工の原理

短波長の紫外域高出力レーザーは、光子のエネルギーが赤外レーザーに比べ20~50倍も大きく、材料を構成する分子結合を選択的に光子のエネルギーで直接切断す

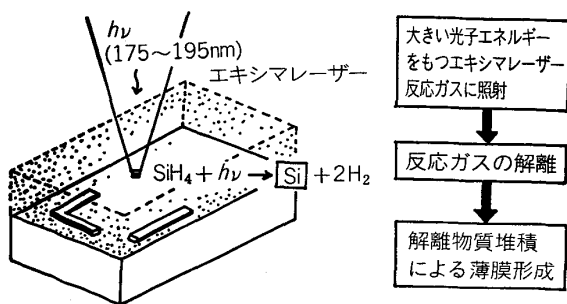
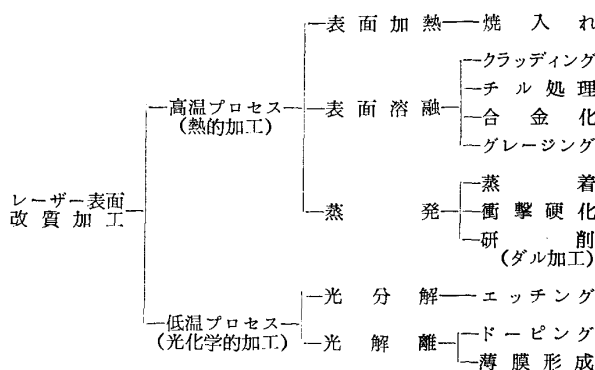


図2 エキシマレーザーによるレーザーCVDの原理

表2 レーザー表面改質加工の分類



ることができる。赤外領域のレーザーが被加工物の局所部を熱的に加熱、熔融、蒸発させて表面改質をおこなうのに対し、紫外領域のレーザーは光化学的な加工となり、材料の温度を上げることなく加工ができるのでプロセスの低温化が図られる。

紫外域高出力レーザーとしてはアルゴンイオンレーザー、窒素レーザー、ハロゲン分子レーザーなどもあげられるが、エキシマレーザーが効率、出力の点で最も優れている。エキシマレーザーはまだ工業用として使用するには出力が小さい、出力パルスの繰返し数が小さい、寿命が短いなどの問題があり実用の段階にはいたっていないが、短波長でありミクロン程度の集光も可能で高集積度を必要とする半導体プロセスの加工用として大に期待されている。

図2にエキシマレーザーをもちいシランガス(SiH<sub>4</sub>)雰囲気中でシリコン半導体薄膜合成の例を示す。セラミックスなどの母材をシランガスに満たされた反応室に供給し、シリコン膜を成膜したいところにレーザーを照射することにより、照射された個所だけガスが解離しシリコンが母材表面に堆積して膜が形成される。今日までにレーザーCVD (Chemical Vapor Deposition) として

ビームモード	発振器出口のビーム断面形状	ビームのエネルギー分布	出力範囲
シングルモード	単一の円形スポット	単一の鋭いピーク	2kW以下
マルチモード	同心円状のスポット	複数の幅広いピーク	10kW以下
アニュラーモード	同心円状のスポット	複数の鋭いピーク	5~20kW

図3 CO<sub>2</sub>レーザーの各種ビームモード

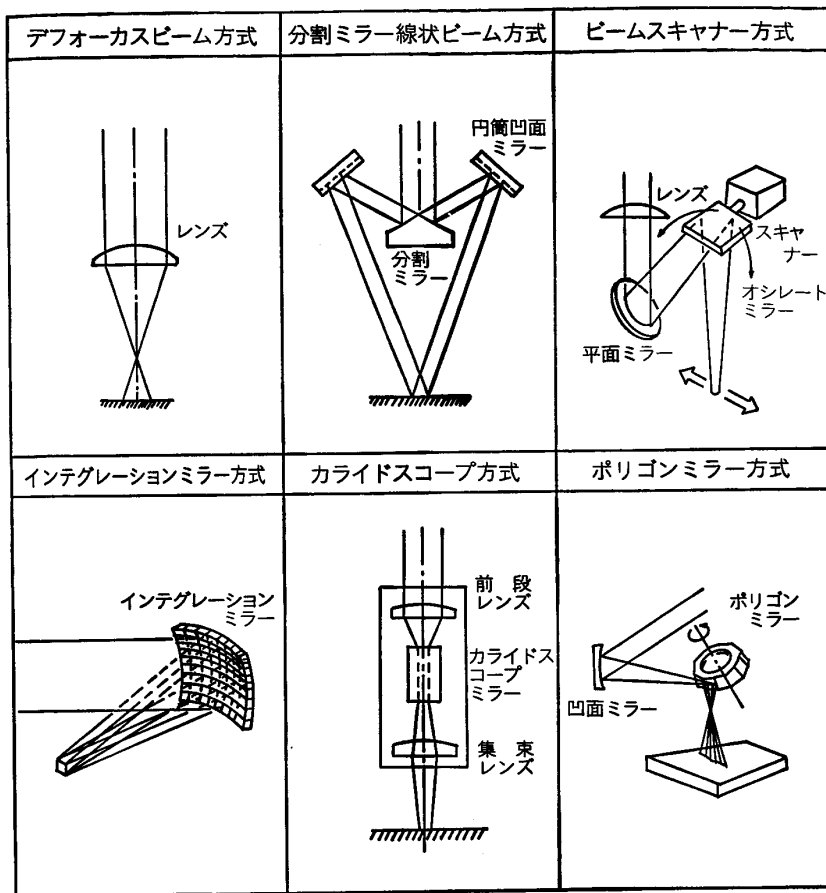


図 4 熱処理加工用各種レーザーヘッド方式

SiO<sub>2</sub>, InP<sup>4</sup>, Al<sup>5</sup>などの膜形成に成功している。

### 3. レーザー表面改質加工の分類と特徴

レーザーによる表面改質加工は、レーザー照射によって、材料表面に熱を加えて加工する高温プロセスと、低温で光化学反応をおこさせる低温プロセスに分けられる。表 2 に実験的に可能性が確認された各種の加工法を示す。レーザーはランニングコストが高いので単に従来

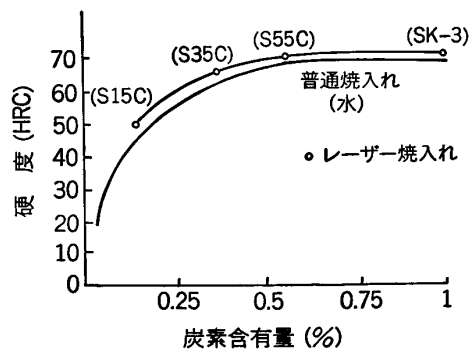


図 6 レーザー焼入れと水焼入れの最高硬さの比較

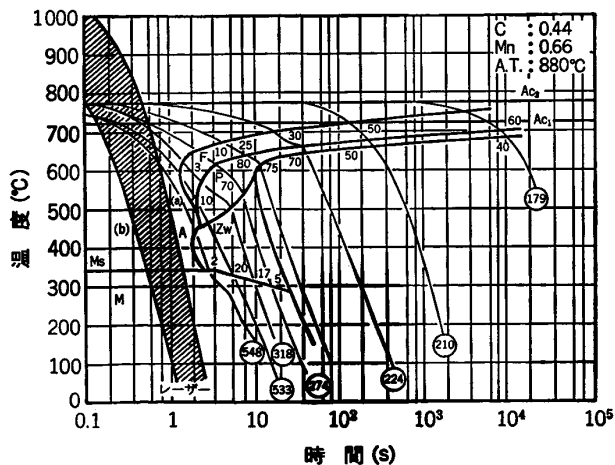


図 5 CCT 曲線上におけるレーザー焼入れの冷却曲線<sup>7)</sup>

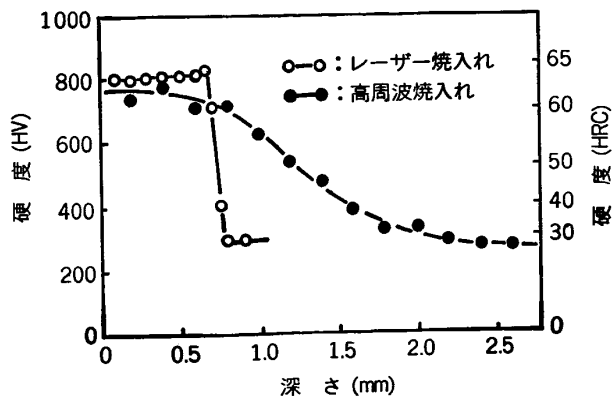
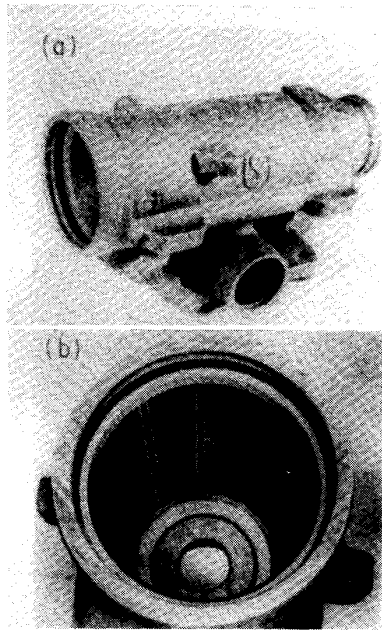


図 7 レーザー焼入れと高周波焼入れの硬度分布<sup>7)</sup>



(a) 外観  
(b) 線状の焼入れをおこなった内面

写真 1 内面部分焼入れされたフェライト可鍛鉄製のパワーステアリング・ギヤハウジング

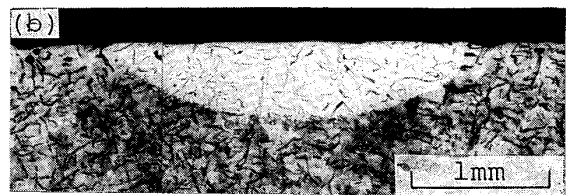
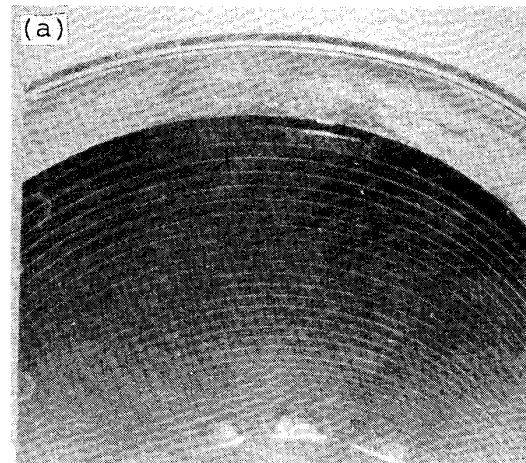
からある加工法を変更するだけでは採算が取れない。レーザーを用いたプロセスを採用するには、レーザー加工の特徴をよく理解し、従来の加工法では得られなかったメリットを取り入れなければならない。レーザー加工の特徴として下記の点がある。

- (1) 微小面積の薄い表層だけの加工が可能で入熱量を少なくでき材料の変形、変質が少なくなり面倒な後加工が軽減される。
- (2) 複雑な形状あるいは狭隘部のある部品でも形状的な制限を受けにくい。
- (3) 短時間で加工できオンライン処理が可能である。
- (4) 油、めつき液などの処理液を必要とせず無公害環境で加工できる。
- (5) エネルギーが精密にまた高速度に制御でき加工面積、深さが正確にコントロールできる。
- (6) ビームを分割したり光路切換が可能でマルチステーションの装置が容易に実現できる。
- (7) 発振効率が低くイニシャルおよびランニングコストが高い。
- (8) 金属材料に対してはレーザーの反射率の高いものが多く、反射防止処理を必要とするものがある。
- (9) 単位時間に加工できる面積が少ない。

以下米国で実用が始まっているレーザー熱処理加工について述べる。

#### 4. 熱処理加工用の各種加工ヘッド

熱処理加工に使用される CO<sub>2</sub> レーザーのビームは、



(a) 内面焼入れ状態 (b) 焼入れ部の断面マクロ

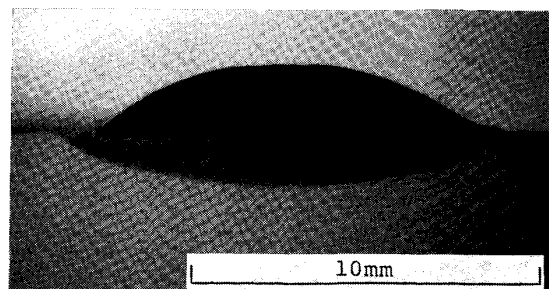
写真 2 ディーゼルエンジンシリンダーの内面焼入れ部

共振器構成により図3に示すごとき各種のモードのものがある。レンズあるいは凹面鏡で光を集光し、加工に必要なエネルギー密度が得られる適当なビーム径のところまで加工（デフォーカス法）すればよいが、ビームモードによりデフォーカス法だけでは必ずしも照射面でのエネルギー密度が均一にならない。また 10 mm 以上の幅の加工をおこなおうとすると 5 kW 以下の出力でデフォーカス法を採用した場合エネルギー密度が低くなりすぎ、反射が多くなって加工効率が下がるので、ビーム径を加工幅より小さくして、高いエネルギー密度のスポット径に必要な加工幅にビームを高速度（数百 Hz）に振つて加工するビームスキャナー方式が採用される。図4に各種熱処理用の加工ヘッドの方式を示す。

### 5. 各種熱処理加工法

#### 5.1 表面焼入れ

レーザービームを利用した焼入れでは、処理すべき局



母材：S35C，パウダ：Co 基自溶合金  
レーザー出力：15kW，速度：0.5m/min

写真 3 レーザークラッピングの断面マクロ

表 3 レーザー焼入れに用いられる各種コーティング材と必要な性質

コーティング材料	コーティング材に要求される性質
りん酸マンガン りん酸亜鉛 グラファイト粉末 SiO <sub>2</sub> 粉末 黒色ペイント	光吸収率が高い 塗布が容易 レーザー照射によるフェーム発生が少ない 加工後の被膜除去が容易 耐熱性が高い 安価

部表面だけに高エネルギー密度のレーザーを短時間照射することで A<sub>1</sub> 変態点以上の温度にし、冷却はレーザーが通りすぎるとともに内部への熱拡散によつて起こる自己冷却により行われ、パーライト変態することなく硬いマルテンサイトにするのである<sup>6)</sup>。

レーザー焼入れの場合、局所的に 10<sup>3</sup> °C/s 程度の急速加熱がおこなわれ、そこから急速に自己冷却される。一般の焼入れのように炭素を十分拡散する時間がないので在来の連続変態曲線 (CCT 曲線) と同一には取り扱えないが、目安として S45C にレーザー焼入れした実験により得られた冷却速度を図 5 に示す<sup>7)</sup>。曲線 (a) は材料の表面、(b) は内部の温度を示すが硬化層内部では 1 s 以内に M<sub>s</sub> 点を通過し、フェライト変態開始線 (F) やパーライト変態開始線 (Z<sub>w</sub>) に交わらないで、臨界冷却曲線より早く完全マルテンサイト組織が得られることがわかる。

レーザー焼入れは水焼入れに比べても数倍以上も冷却速度が速く、炭素鋼の焼入れにおいて最高硬さはより高くなる。図 6 に 1.5 kW 出力のレーザーでビームスキャナー法にて 8 mm の幅の焼入れを 0.5 m/min でおこなった場合の 0.15~1.0% 炭素鋼の最高硬さを炉焼入れで得られたものとの比較で示す。レーザー焼入れでは焼入硬度は炭素の量および加工速度で決まり、他の添加元素の影響はほとんど受けない。炭素含有量 1.0% までのすべての領域で従来最も硬度が上がった水焼入れより高い硬度が得られている。図 7 に S43C 鋼の高周波焼入れとの比較で硬度分布を示す<sup>7)</sup>。高周波焼入れに比べて焼入深さは浅くなっているが、レーザー焼入れのほうが不完全焼入部が少なく、最高硬度が HV 硬さで 50 程度大きくなっていることがわかる。

CO<sub>2</sub> レーザーは焼入れに使用する 10<sup>3</sup>~10<sup>5</sup> W/cm<sup>2</sup> のエネルギー密度では、金属表面での反射率が 90% 程度と高いため、金属面のままでは効率よく加工できない。そのため 10.6 μm の光を良く吸収する表 3 に示すごとき各種の吸収剤を被加工物表面に被覆する。吸収率の向上、金属表面の溶融防止では効果が上がっているが、焼入後照射部にスラグ状のものが付着したり、表面粗さが悪くなり後処理で研削などが必要なものが多く今後より前後処理が簡単な吸収剤の開発が必要である。

レーザー焼入れの実用例では GM 社のパワーステアリングギヤハウジングの例は有名で 0.5~1 kW 出力

のレーザーを用いてフェライト可鍛鉄製ハウジング内面に幅 1.5~2.5 mm、深さ 0.25~0.35 mm の線状焼入れを 5 本形成することで、1.5 μm 以内の仕上代で済む耐摩耗性の高い焼入れがなされている<sup>8)</sup>。写真 1 にその例を示す。写真 2 は同じく GM 社がディーゼルエンジンのシリンダーの内面ライナーに 5 kW 出力のレーザーを用いて幅 2.5 mm、深さ 0.5 mm の局部焼入れをらせん状におこないピストンリングによる摺動摩耗を減少させた例である。

## 5.2 クラッキング

レーザークラッキングは普通鋼の表面に耐食性、耐摩耗性、耐熱性等にすぐれた合金材を粉末あるいはフィラーワイヤーなどの形で母材表面に供給し、レーザーにより溶融し肉盛りする。レーザーは母材表面をごくわずかだけ溶融させることができるので、0.1~0.2% の極低希釈率で実現でき、Co, Ni, Fe, WC, アルミナなどの実施例が報告<sup>9)</sup> されている。入熱量が少なすぎると (加工速度が速くなりすぎると) ビードが盛り上がり母材との接触角が大きくなり、層を重ねた際、ビードの継ぎ目に欠陥が出やすいので接触角が 30° 以下になるような形状のビードが好ましい。写真 3 に 15 kW の出力でクラッキングした断面を示す。

## 5.3 チル処理

铸铁表面をレーザーで溶融させ、自己冷却で急速に冷却凝固させることにより HV 600 以上の硬度を得ることができる。アーク熱源によるチル化に比べ入熱量が少なく変形が少ないメリットがある。しかし予熱なしでチル化をおこなうと冷却時に割れが発生する。硬度は少し低下するが、200°C 以上の予熱をすると割れの発生が防止できる<sup>10)</sup>。

## 5.4 合金化処理

合金化したい素材表面に粉末状、めつき、蒸着などによつて添加したい合金元素を配置し、レーザー光を照射すると部品表面の薄い層を容易に溶融できるので、短時間 (10<sup>-3</sup>~10 s) に元素が拡散して薄い合金層が得られる。まだ研究段階であるが、Cr, Ni, W, V, Mn, C など多くの元素を使った合金化の実験成功例がある<sup>11)</sup>。

通常の製造方法では作りだせない非平衡の合金相を局部的に形成できる特徴もあり、技術確立ができれば経済性に十分の用途も出てくるものと思われる。

## 6. 結 言

レーザーによる表面改質は半導体、自動車部品、一般産業機器の部品など広い分野への可能性を秘めている。

必要な個所だけを最少限のエネルギーを加えて局部的に処理することは、大幅な材料費の低減を実現できる付加価値の高い加工法であり、今後急速に普及するものと予想される。この解説がレーザー表面改質の実用化に多少とも参考になれば幸いである。

## 文 献

- 1) レーザー加工機市場の現状と今後のニーズ展望  
(矢野経済研究所編) (1985), p. 3
- 2) R. R. BUTCHER and T. S. FAHLEN: CLEO '84  
Technical digest (1984), p. 202
- 3) N. TABATA, H. NAGAI, H. YOSHIDA, M.  
HISHII, M. TANAKA, Y. MYOI and T. AKIBA:  
CLEO '84 Technical digest (1984), p. 54
- 4) V. M. DONNELLY, M. GEVA, J. LONG and R.  
F. KARLICEK: Appl. Phys. Lett., 44 (1984),  
p. 54
- 5) T. McGRATH: Solid State Technol December  
(1983), p. 168
- 6) 川澄博通: レーザ加工技術 (1985), p. 61
- 7) 菊池正夫, 久田秀夫, 森津和夫: 小松技報, 26  
(1980), p. 30
- 8) J. A. WINEMAN and J. E. MILLER: Metal  
Progress, 111 (1977), p. 38
- 9) D. S. GNANAMUTHU: Optical Engineering, 19  
(1980), p. 783
- 10) 大前 堯, 吉田康之, 広実常登: 溶接学会全国大  
会講演概要 33 (1983), p. 30
- 11) F. D. SEAMAN and D. S. GNANAMUTHU: Metal  
Progress, 108 (1975), p. 67