



レーザー熱加工

丸 尾 大*

はじめに

つい昨日といえるほどの僅か数年前、日本の「天府」式腕時計の品質・精度は極めて高い評価をうけていた。充分に温度補償された「天府」の振動にはじまる歯車群の回転を、天賦の器用さで組立て、一日に数秒の誤差内に収めるように調整していたのであるから、人の技能というには余りにも繊細巧緻な作業であったと想像する。

「天府」を水晶片に換えた時計は容易に一日に数分の一秒の精度を保証する。もはや正確な時計をではなく、時計は正確になってしまったその代り、時計の実体は微少な集積回路と水晶グ、片、ボタン電池、それに特殊なステッピングモータと指針または液晶の表示素子に換ってしまつて、歯車は分周回路に吸収されている。換骨奪胎というには余りにも完全で、これをもつて時計の進歩と評するには、少し異和感が残る。よつて立つ技術が異質であるからである。

ところで、もっと精度の高い時計は、分子や原子の振動を周波数標準にする。1953年コロンビア大のC. H. タウンズの発見したメーザーの原理によつて創られたアンモニア・メーザーはその振動数は一年間に百億分の一も狂わない。セシウム、ルビジウムを使つて更に高精度の原子時計が作られているが、量子エレクトロニックスの扉がメーザーによつて開かれた輝かしい業績といえる。¹⁾

メーザーがマイクロ波の増巾を意味するだけに止まらず、さらに短波長の光波域でも、同じような発振機構で光の増巾が可能であることが1958年同じくタウンズらによつて理論的に解析され、1960年ヒューズ航空社のメイマンによつ

てピンク・ルビーからレーザー光線が取り出された。0.05%のクロームを加えた酸化アルミニウムの単結晶の中で、準安定状態に励起されたクローム原子が基底状態に転移するとき6943 Åの波長の深紅の光が、同波長同位相の光子の放出を増巾して単結晶の一端から出てきたのである。レーザー光の波長はレーザー物質の準位間の共鳴によつて決まってしまう。新しいレーザー物質一適当なエネルギー準位と分布密度を実現する材料一の獲得が新しいレーザーの開発になるのであるから、以後のレーザーの開発は多種多様であつた。ヘリウム・ネオンレーザー、アルゴンイオンレーザー、炭酸ガスレーザーなどの気体レーザー、YAG レーザー、ガラスレーザーなどの固体レーザー、プラスチックレーザー等、現在では2000種を超える。

1. レーザーの特長と熱加工

白熱電灯や蛍光灯の光は、自然放出による光で、それぞれの原子が出す光は波長も異なれば方向も不規則というわけである。これに対し、レーザーは励起された原子から同じ位相、同じ波長で放出された光で、きわめて指向性がよい。

平行平面形共振器からのレーザー光の開き角 θ は、波長 λ 、ビーム径 D とすれば

$$\theta = 2.44\lambda/D[\text{rad}] \quad \dots\dots(1)$$

で示される。これを収差のない、焦点距離 f のレンズで集束すると、焦点面におけるビーム径 d は

$$d = f\theta = 2.44\lambda \frac{f}{D} \quad \dots\dots(2)$$

となる。レーザー光の出力を P [W] とすれば焦点におけるパワー密度は次式で算定できる。

$$I = \frac{\pi}{4} \frac{D^2}{\lambda^2 f^2} P [\text{W/cm}^2] \quad \dots\dots(3)$$

* 丸尾 大 (Hiroshi MARUO), 大阪大学工学部, 溶接工学科, 教授, 工学博士, 溶接工学

試みに、筆者の研究室に設置されている G. T. Sylvania 社製 1.5 kw 炭酸ガスレーザー ($\lambda=10.6\mu$) で、 $D=2[\text{cm}]$ 、 $f=10[\text{cm}]$ の数値を入れると、 $I \approx 4.2 \times 10^7 [\text{W}/\text{cm}^2]$ となる。実際のレーザービームの強度分布はガウス分布をしているから、集光した場合のパワー密度はさらに高くなる。このように高いエネルギー密度は電子ビーム加工機のそれに匹敵するもので、レーザー熱加工は、このような高いエネルギー密度を利用して、加熱、溶融、蒸発のいずれかによって材料加工する方法である。用いるのはレーザー光であるから、1) 金属、非金属を問わず、高融点材料、耐熱材料、高硬度物質の材料に適用できる、2) 材料に非接触状態で加工できる、3) 電子ビーム加工のような真空容器を要しない、4) X線の発産がない、5) エネルギー密度が高いため加工時間が短時間である、6) 加工に伴う歪や熱変形が小さい、などの特長がある。

レーザーの種類が非常に多いと先に述べたが熱加工を想定するとき、ルビーレーザー、YAGレーザー、炭酸ガスレーザーの三種ぐらいに限定される。前二者はパルス発振で用いられることが多く、連続でしかも大出力が得られる炭酸ガスレーザーが、レーザー熱加工にはすぐれている。レーザーも光であるから、金属表面での反射があり、表面処理によってレーザーの吸収を高める配慮が要る。以下、レーザー熱加工の代表例として、表面熱処理、溶接、切断について、主として炭酸ガスレーザーによる結果を述べることにする。

2. レーザー焼入れ

図1はレーザーのパワー密度と作用時間の組合せによって施工できる熱加工の領域を示したもので²⁾、相変態を利用する焼入れでは、余り高いエネルギー密度を要しない。したがって図2に示すようにレンズの焦点を外したデフォーカスビームとし、鋼材表面を加熱し、オーステナイト域から、材料自体の熱伝導による冷却によって変態硬化させる。表面のごく薄い層をほとんど歪なしに硬化させることができる。また局部的に焼入れすることができるので、例え

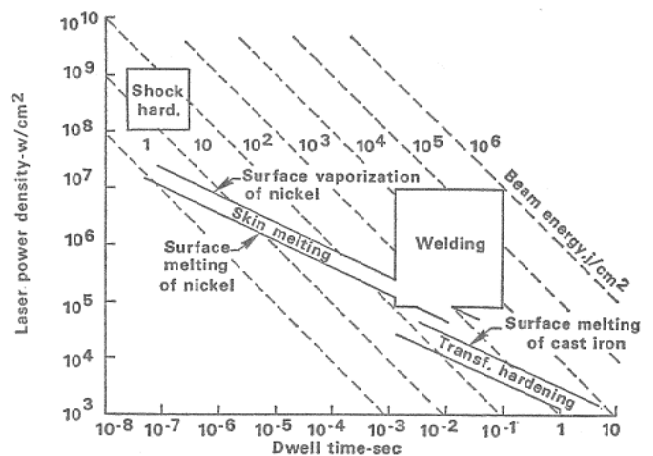


図1. レーザー熱加工のエネルギー密度と作用時間

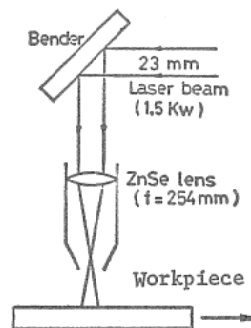


図2. レーザー硬化処理における光学系

ばピストンリング溝だけの焼入れを行なうなどの特殊な熱処理も可能となる。

2. 1. レーザー焼入れの熱伝導

デフォーカスしたレーザービームを分布熱源として近似するとき(a)ガウス分布熱源(b)矩形熱源および(c)矩形ガウス分布熱源の三種が考えられる³⁾。図3はこれを図解したもので、半無限板の表面 ($Z=0$) にこのような熱源があって X軸方向に U の速度で移動するとき、定常状態の温度分布は、たとえば(c)の近似では

$$\theta^* = \sqrt{\frac{4}{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{a^{*2} + t^{*2}}} \exp \left[-\frac{(2x^* + v^{*2})}{4(a^{*2} + t^{*2})} \right] - \frac{z^{*2}}{t^{*2}} \left. \operatorname{erf} \frac{y^* + b^*}{t^*} \right] dt^* \quad \dots\dots(4)$$

で与えられる。 θ^* 、 V^* 、 X^* 、 Y^* 、 Z^* 、 a^* 、 b^* 、はそれぞれ無次元量で次のように定義されている。

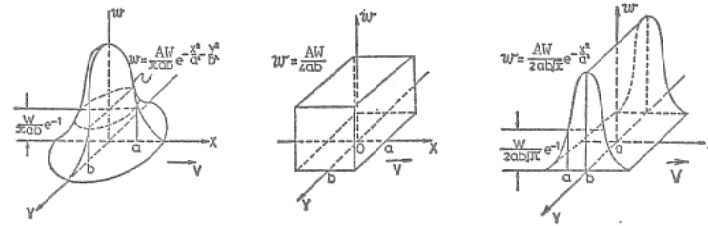
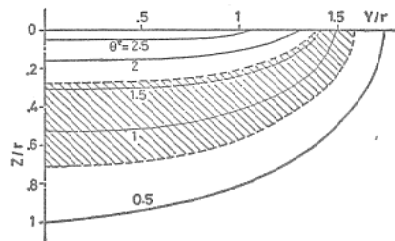


図3. レーザー熱源の近似モデル

(a) ガウス分布熱源

(b) 矩形熱源

(c) 矩形ガウス分布熱源

図4. 矩形ガウス分布熱源による等温線
($V^* = 4$)

$$\theta^* = 16\sqrt{\pi}kr\theta/wA,$$

$$v^* = vr/2K_D,$$

$$x^* = \frac{x}{r}, \quad y^* = \frac{y}{r}, \quad z^* = \frac{z}{r},$$

$$a^* = \frac{a}{r}, \quad b^* = \frac{b}{r}, \quad \dots\dots(5)$$

$$r^2 = ab.$$

これによって等温線を描くと、図4のようになる。

2. 2 ビーム吸収率

表面が平滑な金属の炭酸ガスレーザービームの吸収率は、たかだか15%ぐらいで、これを改善するため、試料表面に $Zn_3(PO_4)_2$ 皮膜を化

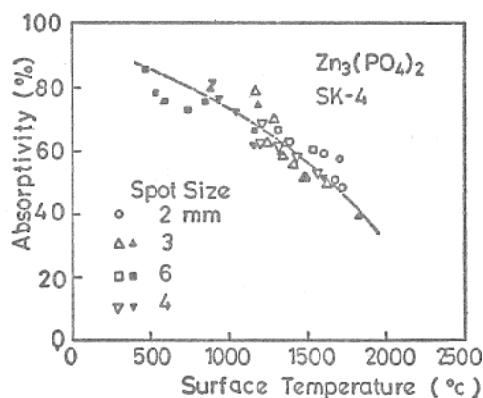
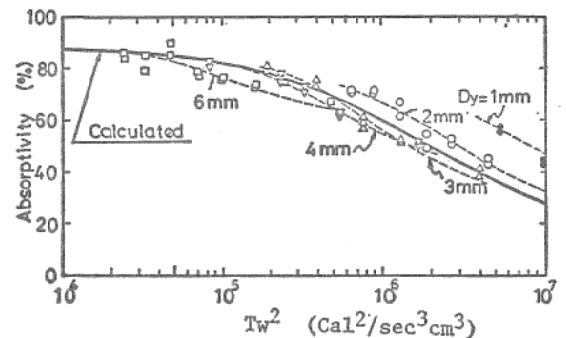


図5. SK-4 鋼の表面温度と吸収率の関係

図6. 吸収率と Tw^2 (T : 作用時間, w : パワー密度) の関係

学処理によって形成させる。この皮膜をつけた材料の吸収率は、表面の温度と共に、図5のように変化する。表面の温度はパワー密度と相互作用時間によって変わるので、一次元熱伝導近似を使って整理すると図6のようになり、吸収率は Tw^2 (T は相互作用時間 $T=2a/v$, w はパワー密度) の関数で与えられることになる。図中の実験値はスポット径が 1mm の場合をのぞき、ほぼ計算値に近い⁴⁾。

2. 3 焼入れパターンの実測値

図7はSK-4 工具鋼の焼入れ試片の断面である。先に示した等温線図と略一致する硬化部が生成していることが分る。焼入れ部の硬さは VHN 850 で図8のように母材の非硬化部との

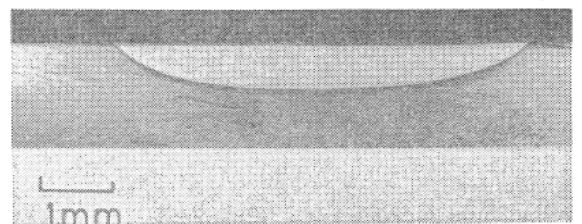


図7. レーザー焼入れ試片の断面。(SK-4 鋼, 1.25kw, 40cm/min)

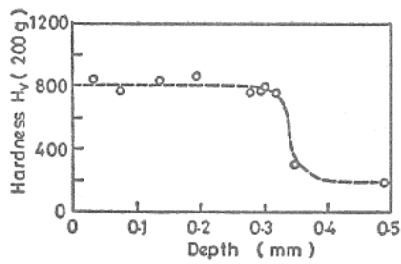


図8. レーザー焼入れ部の硬さ分布

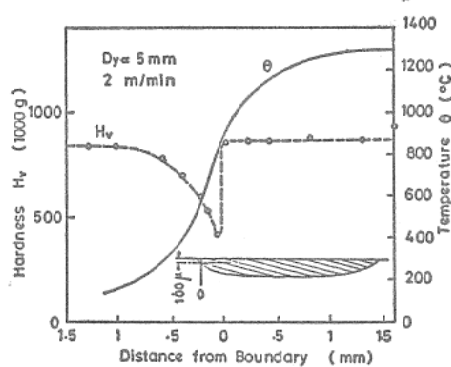


図9. レーザー焼入れ時の焼戻し効果

遷移は 50μ 程度で非常に狭い。ただし広い領域を焼入れしようとするとき、用いたレーザーパワーの出力が限定されているため、重ねて焼入れする必要がある。このとき前に焼入れした部分は焼戻し効果をうける。その巾は図9のように約0.5mmで、焼戻しされた部分の硬度はVHN450位に低下する。

3. レーザー溶接

1. 項で記したごとく $\sim 10^7 [W/cm^2]$ のエネルギー密度をもつレーザーでは、電子ビーム溶接と同じように、深溶け込み溶接が可能となる⁵⁾。

金属表面での吸収率は低いから、一たん穿孔されると、ビーム孔内部での多重反射によって、実効的に吸収率が高まるからである。ただし、低速度での溶接では、ビーム孔の周囲の材料が過熱され、その噴出蒸気が過熱されてプラズマ化し、ビームのエネルギーはむしろプラズマに吸収されてしまう。そこで低温のガスを吹きつけて、そのプラズマを除去すると再び溶融が進行する。吹きつけるガスも不活性ガスが望ましいが、アルゴンよりも、ヘリウムの方が好結果が得られる。電離電圧が高いためであると思われる。

与えられたレーザーパワーで、深い溶け込みを得るには、上記のプラズマの除去と、焦点位置の調整が必要である。図10はステンレス鋼板の溶接ビードの断面の一例で、1KWのレーザー出力で、4.8mmの溶け込み深さを得ている。しかしながら一般に電子ビーム溶接に比較すれば、浅い溶け込みとなっている。図11はその一例で、特に低速域でその傾向が強い。

もしそうならば、アメリカのフォード社が意欲的に導入を計った薄板構造の高速曲面溶接のねらいは、自動車車体へのコンピュータ制御溶接で、治具の問題で完全に成功していないとしても、当を得たものであった。図12のように任意の角度、任意の方向にビームをあて、しか

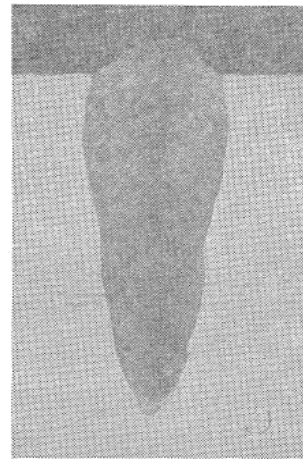


図10. SUS 304ステンレス鋼のレーザー溶接ビード。(溶け込み深さ4.8mm, 1KW, 30cm/min)

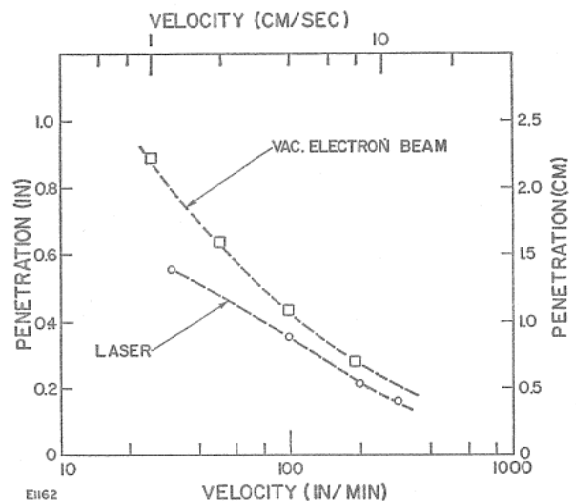


図11. 電子ビーム溶接とレーザー溶接の溶け込み深さの比較 (AVCO社, 10KW)

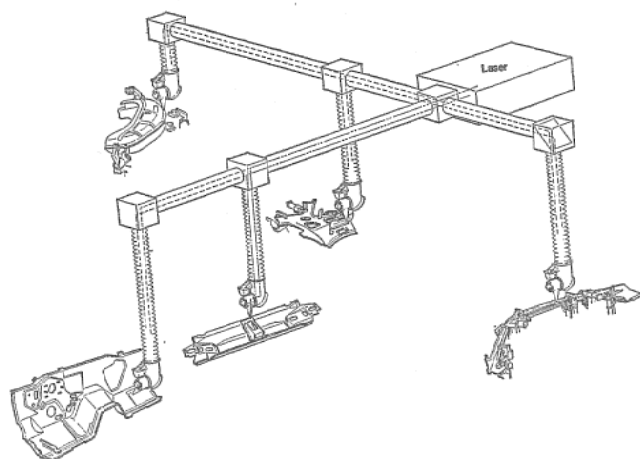


図12. 自動車ボディの溶接システム（時分割レーザー溶接）（UTRC 資料）

も光路の切替えによって時分割制御の作業が実施し得る。

同期歯車の隅肉溶接や、パイプとフランジの溶接（パイプ内面にプラスチックライニングがあるため、入熱をできるだけ低くおさえる要があった）あるいはパイプの内面の溶接など、注目すべき応用例が多く報告されている。

材料的に見てセラミックスの溶接はレーザー溶接の興味ある分野と思われる。セラミックス材は、融点が高く、しかも脆い材料であるから溶接に先だって予熱しておくことが不可欠である。でないと殆んど溶接部に割れが生じる。予熱温度はムライト磁器で850～900℃、アルミナでは～1400℃が望ましい。セラミックスのレーザー溶接では気孔の発生が殆んどの場合見られる。焼結によって消滅しなかった気孔が主因と思われるが、ムライト磁気では SiO_2 成分が多いため、溶融してもガラスのように粘性が高く、気泡の脱出が大きく阻害されているようである。しかも溶融部と母材との境界附近に残ることが多い。高純度アルミナでは気孔は少なく母材との境界に残ることはほとんどない。

図13はムライト磁器の隅肉溶接部で、貫通して、一層で溶接が完了している例である。

組織は分相ガラス、柱状晶等軸晶となるが、組成、溶接条件によって一定しない。

継手の機械的強度は溶接組織とビード形状によって変るが、母材の50～100%と見ておけばよい。熱衝撃、繰返し加熱による機械的性質の劣化はほとんど認められなかった。耐熱、熱遮

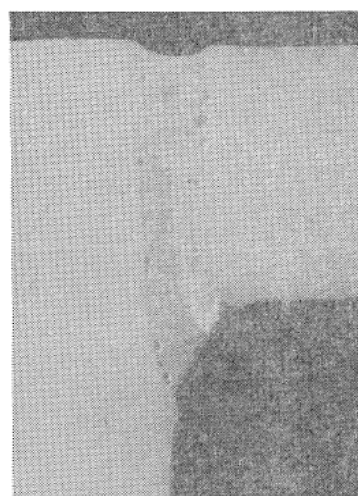


図13. ムライト磁器の溶接部断面組織、（炭酸ガスレーザー0.6KW, 60cm/min）

断を目的として高温材料にセラミック材料が次第に使用されていくことは、ほぼ確実である。その時にはレーザーが唯一の接合熱源として更めて注目されるのではないと思われる。

4. レーザー切断

レーザーの高エネルギー密度を、材料の蒸発に使って切断する、あるいは穿孔することができる。むしろ後者の目的に使われる事例が多いが、YAG レーザー、ルビーレーザーによる軸受けなどの微少穴あけ加工に早くから応用された。タービン・ブレードの冷却孔として0.5mm 径の穴を7秒であけ、所要コストは1セント以下という成功例も報告されている⁹⁾。電子部品ではセラミック基板の溝掘り（スクライビング）に多く用いられている。

金属材料の切断には、 O_2 ガスジェットを併

用するレーザーガス切断がすぐれた成果を収めている⁷⁾。使用するレーザーは連続炭酸ガスレーザーである。O₂ ガスジェットの効果は、
1) 表面酸化によるレーザー吸収率の上昇、

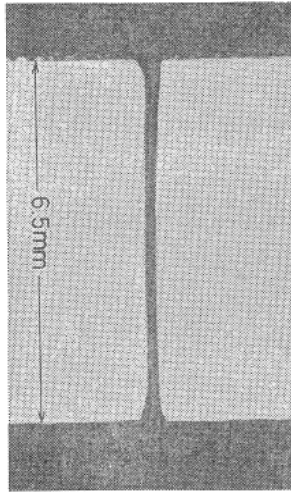


図14. 軟鋼板 (6.5mm厚) のレーザーガス切断部の断面 (900W, 2m/min)

2) レーザー照射下での酸化反応熱の寄与,
3) 溶融金属酸化物の除去などで、薄板の高速精密切断が実現できる。金属にかぎらず、繊維、合板、プラスチックガラスについても適用できる。

図14は板厚6.5mmの軟鋼板を900Wの炭酸ガスレーザーで切断した断面である。切断溝の巾は0.2~0.3mmで、熱影響部の厚みはきわめてうす

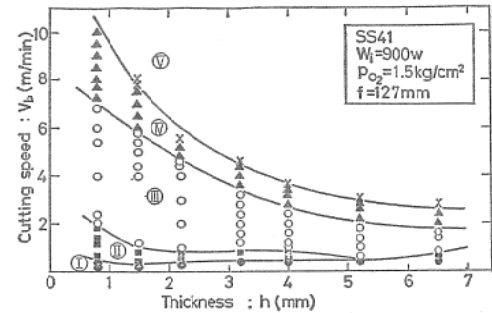


図15. 軟鋼板のレーザー切断性能

表1 種々の材料の切断例

材 料	板 厚 (mm)	切断速度 (m/min)	レーザー出力 (kW)	メーカ
軟 鋼	16.8	1.14	4.0	Hughes Aircraft
低 炭 素 鋼	5.1	2.16	1.0	GTE Sylvania
ス テ ン レ ス 鋼	20.0	1.27	20.0	AVCO
	22.0	0.54	4.0	BOC
高 速 度 鋼	7.1	0.07	0.5	Ferranti
マ レー ジ ン グ 鋼	4.8	0.07	0.5	"
工 具 鋼	3.0	1.70	0.4	Culham
高 抗 張 力 鋼	3.2	0.76	0.25	C. R. L.
超 硬 合 金	1.5	0.02	0.3	Ferranti
	10.0	2.52	0.25	C. R. L.
チ タ ン	50.8	0.51	3.0	Hughes Aircraft
	8.9	1.52	0.25	C. R. L.
チ タ ン 合 金	40.0	0.50	0.23	Messer
	12.7	0.76	5.7	United Technologies
ア ル ミ ニ ウ ム	12.7	2.54	10.0	AVCO
	12.7	2.30	15.0	AVCO
ジ ル カ ロ イ	12.9	0.99	YAG250W	Korad
チ タ ン	15.4	0.99	YAG250W	Korad

い。もとより切断条件によって、切断速度、切断部の品質形状は変る。図15はその一例で(Ⅲ)の領域が良質な切断面で得られる条件域である。各種の材料についての切断性能の報告をまとめると、表1のようになる⁸⁾。

NC制御機器と組合わせ、複雑な形状を高能率で切断する目的のために、各国で導入が進められつつある。

5. レーザー熱加工の将来

金属加工の分野におけるレーザー熱加工の代表例を概説したが、この他にも異種合金を添加

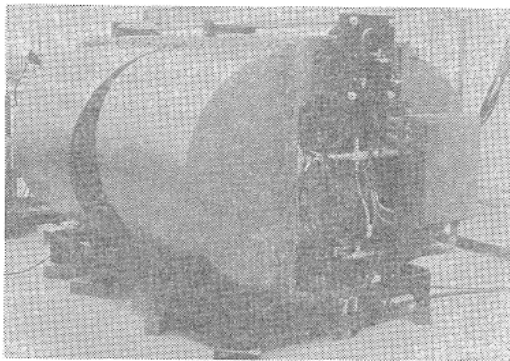


図16. G. T. Sylvania 社975型炭酸ガスレーザー (5 KW)

して合金層を表面に形成させる方法や、急激な熱膨張時の衝撃を利用する衝撃硬化法など緒についたばかりの応用例も少なくない。

レーザー装置の出力レベルも急速に上昇している。一、二年前は100Wのオーダーであったのが、現在は5~10KW級の実用機が市販されている。図16はその一例である。炭酸ガスレー

ザー装置の価格は20000円/ワットで必ずしも低廉とは云えない。これが10000円/ワットと半額になれば、急速に普及することは間違いない。日進月歩の技術であるから、その時期は予想より早くなると期待している。より高度な熱加工の拡大を計る上で。

- (1) 大出力で高信頼性のレーザー装置の開発
- (2) 集光、移送、振動などのビームの制御機器の開発と熱加工ソフト技術の最適化
- (3) レーザー熱加工の機作の解明
- (4) レーザー熱加工の複合技術の開発
- (5) レーザー熱加工の標準確立

などが当面の課題であろう。またレーザーの安全規準も確定しなければならない問題である。

参考文献

- 1) シヤウロー, ゴードン (谷川・中村訳) “レーザーとメーザー” 講談社 (昭48)
- 2) UNITED TECHNOLOGIES RESEARCH CENTER 資料: Industrial Applications of High Power Lasers (1976)
- 3) Arata, Maruo, Miyamoto: Application of Laser for Material Processing, I. I. W. Doc. IV-241-73 (1978)
- 4) 宮本, 丸尾, 荒田: 炭酸ガスレーザーによる焼入れ, 第1回レーザー熱加工研究会資料(1978)
- 5) 荒田, 丸尾, 宮本, 川端: 金属材料のレーザー溶接, 溶接学会昭和54年度全国大会講演概要No.24 (1979)
- 6) 小林 昭: 生産工程におけるレーザー応用技術, 機械の研究30, 5 (1978)
- 7) 荒田, 丸尾, 宮本, 竹内: 高温学会誌 Vol. 5, No. 2 (1979)
- 8) 小林 昭: レーザー応用技術研究会セミナー (1978)

