大出力炭酸ガスレーザの熱源的研究(第2報)*

—金属材料による炭酸ガスレーザビームの吸収特性—

荒田 吉明** 宮本 勇** 山田 猛***

Studies of High Power CO₂ Gas Laser as a Heat Source (Report 2)*

by Yoshiaki Arata**, Isamu Miyamoto** and Takeshi Yamada***

Abstract

Absorptance of various metals in polished surface condition at wavelength 10.6μ was evaluated at both room and fusion temperature, and as the results it was emphasized that the absorptance was too low. The authors proposed to improve the absorptance by the surface treatment. The surface treatments were divided into four groups; (a) roughened, (b) coated with non-metallic thin layer, (c) coated with fine powder and (d) created by the focused laser beam heating.

Conclusions obtained may be summarized as follows:

- (1) The absorptance of metal sheet in the surface condition supplied by a commercial vender, which was highly polished, was proportional to a square root of the dc resistivity and agreed well with the theoretical values calculated from Hagen-Rubens's equation at both room and fusion temperatures.
- (2) Surface treatments such as superficial roughening or coating having a material of lower boiling point than base metal had little effect on the absorptance.
- (3) When the focused laser beam impinged upon the aluminium specimen in the surface condition (b) or (c) for a long time, a part of the surface-treated layer remained so as to keep the considerably high absorptance. However, in the case of SUS27 stainless steel specimen absorptance decreased with beaming time, at last down to the polished one due to complete removal of the surface-treated layer.
- (4) In the case of SUS27 there was large difference between the absorptance in different surface conditions, and coating with non-metallic fine powder had the largest effect on the absorptance. On the other hand, in the case of Al there was little difference between the absorptance in different surface condition except for coating with a material of very low boiling point.
- (5) Though, in polished surface condition, Al was very difficult for CO₂ laser processing in comparison with SUS27, surface treatment made the processing easier for Al than SUS27.
- (6) In general, the absorptance of metal had a tendency to increase with increasing the traveling velocity of the laser heat source and decreasing its power level in the surface conditions (b) and (c), but the tendency was completely contrary in the surface condition (d).

1. 緒 言

炭酸ガスレーザを金属材料の溶融・切断などの加工熱源として利用する場合、金属材料のビーム吸収率が加工性能に与える影響は非常に大きい。金属は一般に良導体であるためにその研摩面における赤外線波長領域でのビーム反射率は非常に高く、たとえば金・銀などでは常温での反射率は100%に近い値になり、炭酸ガスレーザの共振器の反射鏡としても利用されている。したがってこのような反射率の高い金属材料のレーザ熱加工は大きな

困難をとまう。しかしながらこのような金属材料も表面状態のいかんによってはビーム吸収率も大きくなり、これを活用することによってレーザビームによる熱加工性を大幅に改善することができる。したがってレーザビームを熱源として利用する場合、まず被加工材料の種々の表面状態におけるビーム吸収特性を明らかにする必要がある。

従来金属材料に対するビーム吸収の研究はよく研摩された金属表面あるいは NaCl, KCl などの単結晶の清浄な劈開面に蒸着された金属膜などに関するものであり、特に常温、高真空中での研究^{1)~4)}が多い。しかしレーザビームを金属材料の加工熱源として用いる場合、実際に必要なものはこのような特殊な場合の吸収率ではなく、各種表面状態での吸収率であり、また熱加工中での吸収

* 原稿受付 昭和46年6月2日 (45年度秋季全国大会に発表)

** 正 員 大阪大学工学部 Member, Osaka University.

*** 正 員 川崎重工業(株) Member, Kawasaki Heavy Industries Co., Ltd.

率あるいはその変化特性である。しかしながらこのようなビーム吸収特性は従来、ほとんど明らかにされていない。

表面処理した金属材料に集光レーザビームを照射した場合、ビームのエネルギー密度がある程度大きくなると、その照射領域内の表面処理層の一部は蒸発によって変化するのでその結果、ビーム吸収率は当然変化する。したがって、一般に強力なレーザビームを照射したときのビーム吸収率は定常的なものではなく、ビーム強度、表面処理方法とその程度、金属材料の光学的ならびに熱的性質などの影響により時間的に変化するものであると考えられる。

エネルギー密度がさらに高く、ある程度以上になるとビーム照射域は瞬時に蒸発し、いわゆるレーザビームの多重反射現象を伴うことによって穿孔作用をおこし、電子ビームと同様の深溶けこみの溶融層を形成する。このような場合の吸収率はきわめて高く、100%近くになり、材料自身の光学的性質にほとんど無関係になる。ここでは、このような穿孔作用の影響が無視される範囲のレーザビームの吸収性について論ずることとする。

2. 実験方法

(1) 炭酸ガスレーザビームの出力測定

レーザ出力の一般的な測定をおこなう場合には、応答性がよいこと、正確な校正が可能であること、測定範囲が広いことなどが必要な条件であるが、一般にこのような条件を同時に満足することは困難である。そこで炭酸ガスレーザの熱源的性質を調べる一連の実験においては、応答性を必要とする測定には光伝導セル (Ge: Au) を、またレーザ出力の絶対値の測定にはカロリメトリックな原理によるパワーメータをおのおの併用した。

炭酸ガスレーザビームの吸収特性を調べる本実験においては、レーザ出力は一定に保って測定をおこなったので、応答性をあまり必要としないため、その測定には Fig. 1 に示すパワーメータを用いた。パワーメータのビーム照射面は薄い銅板 (0.3 mm) であり、ビームの反射を減ずるために表面は均一に化成処理をおこなった。銅板の裏面は一定流量の水で冷却し、パワーメータの入口と出口の水温差を測定し、レーザ出力を求めた。温度差の測定にはサーミスタを用いた。測定系外への熱の損失を考慮したパワーメータによる正味の吸収熱量は、組こまれたヒータに既知の電力を与えた場合のブリッジ電圧を比較することにより校正され、求められた。ヒータに与えられた電圧とブリッジ電圧はじゅう分比例した。

一般にビーム照射面のレーザビーム吸収率を 100% に

Fig. 1 Schematic diagram of power meters.

することは困難であるが、受光面を入射ビームに対して傾け、パワーメータ内で多重反射を起させることにより反射損失をほとんどなくすることができる。Fig. 1(b) はこのようにして得られたビーム吸収率が 100% のパワーメータである。この欠点は大型になるため測定の時定数が 3 ~ 5 秒と比較的長いことである。Fig. 1(a) は受光面が入射レーザビームに対して垂直なパワーメータである。このタイプのパワーメータである。このタイプのパワーメータは小型にできるので測定の時定数は 1 秒以下にすることができる。このパワーメータの受光面のビーム吸収率は Fig. 1(b) のパワーメータを用いて校正された。本実験では主として Fig. 1(a) のパワーメータを用いた。

(2) 室温における各種金属材料に対する炭酸ガスレーザビーム吸収率の測定法

室温における各種金属材料に対する炭酸ガスレーザビームの吸収率は Fig. 1(a) に示したタイプのパワーメータのビーム照射面を吸収率被測定試料と取換え、これに既知の強度の炭酸ガスレーザビームを照射することにより測定される吸収熱量から求めた。レーザビームは集光しないで発振ビームがそのまま試料面に入射 (ビーム直径 = 15 mm) し、また試料裏面が水冷されているので試料表面の温度は上昇せず、ほぼそのまま室温に保たれる。なお試料には板厚 0.3 mm の薄板金属を用いた。

(3) 溶融状態における各種金属材料に対する炭酸ガスレーザビーム吸収率の測定法

試料に集光レーザビームを照射すると、ビーム強度がある程度以上高ければ溶融池を作ることができるが、

Fig. 2 はこのような溶融池のビーム吸収率の測定原理図である。試料に与えられた時間レーザービームを集光照射し、これをただちに Fig. 3 に示すカロリメータに投入することによって吸収熱量が求められる。この場合、カロリメータの水をモータ駆動のスクリーにより一定条件で攪拌するとともに、ヒータを用いて Fig. 1 のパワーメータと同様の方法で校正することによって正味吸収熱量を求めることができる。試料とその支持台の間は熱絶縁されているが、それでもビーム照射されて後カロリメータに投入されるまでの時間に試料に吸収された熱がいくぶん失われる。Fig. 4 は 200W のレーザービームを 0.2 秒間試料に照射したときのカロリメータに投入するまでの放置時間に対する吸収熱量の測定例を示す。たとえば 10 秒間放置すると約 30% 近くの熱が失われ、

Fig. 2 Experimental setup for measuring the beam absorptance of the molten metal.

Fig. 3 Schematic diagram of calorimeter.

Fig. 4 Output voltage of calorimeter vs. standing time (beaming time=0.2 sec).

測定誤差が大きくなるが、本実験ではビーム照射開始後 0.5~1.0 秒以内に試料はカロリメータに投入されるので、熱損失は無視してさしつかえないと考えられる。ビーム吸収率はビーム照射時間に対する吸収熱量曲線をプロットし、これを時間微分することにより各時間における値を求めた。

吸収率の時間変化の大きい場合には、裏面温度の測定により、吸収率を求める方法を併用した。急激な吸収率の時間変化を測定するためには応答性のよい温度測定が必要であるが、本実験では試料裏面のビーム中心軸上に細いクロメル線をパーカッション溶接し、試料とクロメル線の間に生ずる熱起電力を測定した。裏面温度の測定には板厚 0.3 mm の試料を用いたが、これによると応答性のよい測定が可能で、120 Hz で発振するレーザービームを照射した場合のこれに対応する温度変化が測定できた⁸⁾。また前述のカロリメータを用いて裏面温度と吸収熱量の関係を求めた。

3. 研摩した金属材料による炭酸ガスレーザービームの吸収率

(1) 金属によるビーム吸収機構の概要⁵⁾

光と相互作用している金属内の 1 個の価電子は有効質量 m^* をもった 1 個の自由電子と特定の固有振動数をもった一定数の調和振動子の系の等価であるが、赤外線波長域では自由電子によって吸収する伝導吸収が支配的である。

よく知られているように導体の場合の全電流は、電界、誘電率、導電率をおのの E, ϵ, σ とした場合、不導体にくらべて変位電流 $\epsilon(\partial E/\partial t)$ の他にオーム電流 σE が付加される点異なる。したがって周波数 ω の周期的電場に対しては、不導体に対する実数の ϵ を次式で示す複素数の $\tilde{\epsilon}$ で置きかえればよい。

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon + i \frac{\sigma}{\omega} \quad \dots\dots\dots (1)$$

したがって屈折率も複素数となり、次式のようなになる。

$$\tilde{n} = \sqrt{\frac{\tilde{\epsilon} \mu}{\epsilon_0 \mu_0}} = n(1 + ik) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし μ, μ_0 は金属および真空の透磁率で、 ϵ_0 は真空誘電率である。ここに導入した実数 n, k はおのの金属の光学定数であり、屈折率、減衰係数である。完全に平面な金属表面に垂直にビームが入射した場合の反射率 R は、Fresnel の公式により次のようになる。

$$R = \frac{|\tilde{n} - 1|^2}{|\tilde{n} + 1|^2} = \frac{(n-1)^2 + n^2 k^2}{(n+1)^2 + n^2 k^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

光学定数 n, k は式 (2) から電定数を用いて次のように表わされる。

$$k = -\frac{\omega\epsilon}{\sigma} + \sqrt{\left(\frac{\omega\epsilon}{\sigma}\right)^2 + 1}$$

$$n^2 k^2 = \frac{1}{2} \left\{ -\frac{\epsilon}{\epsilon_0} + \sqrt{\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}\right)^2} \right\} \dots\dots (4)$$

反射率 R は, 式 (4) の n, k を式 (3) に代入し, 得られるが, 一般に導電率 σ は周波数 ω の関数で, これは電子の運動方程式に関する Drude の方程式から求めなくてはならない. しかし, ビームの波長がじゅう分に長く, その振動電場を静電場と考えるときは, 金属内部に生ずる電流は電場の強さに比例した定常電流となるので, σ を静電場の導電率 σ_0 でおきかえることができる. 炭酸ガスレーザビームの振動電場を静電場と仮定すると, この場合 $\omega = 1.78 \times 10^{14} \text{ sec}^{-1}$ であるので $\sigma_0/\omega\epsilon_0 \gg 1$ であつ, $\epsilon/\epsilon_0 = 1$ の程度としてよいので, 式 (4) は次のように近似される.

$$k = 1$$

$$n^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_0}{\omega\epsilon_0} \dots\dots\dots (5)$$

したがって金属材料による炭酸ガスレーザビームの吸収率は, これを式 (3) に代入して

$$A = 1 - R$$

$$= \frac{2}{n} = 2 \sqrt{\frac{2\omega\epsilon_0}{\sigma_0}} \dots\dots\dots (6)$$

となる. そこで $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14} \text{ farad/cm}$ および炭酸ガスレーザの $\omega = 1.78 \times 10^{14} \text{ sec}^{-1}$, $\eta_0 = 1/\sigma_0$ (直流比抵抗) を用いると, 式 (6) は次のようになる.

$$A = 112.2 \sqrt{\eta_0} \dots\dots\dots (7)$$

これは Hagen-Rubens の式とよばれている.

(2) 研摩された金属のビーム吸収率

金属のビーム吸収率は表面状態や酸化などの程度によって大きな影響を受けるので, その測定には慎重な取扱いが必要であるが, Benett ら^{3),4)} はじゅう分な平面度と清浄な面をもった石英板に高真空中 (10^{-6} torr) で真空蒸着された金属の赤外線波長域でのビーム吸収率を測定している. それによれば波長 10.6μ に対して金・銀・アルミニウムでおのおの 0.006, 0.0046, 0.013 と報告されている. この値は式 (7) から計算した値よりも低い. 一般に σ_0 の小さい金属ほど式 (7) が成立する波長は短波長側に移動し, 水銀では炭酸ガスレーザビームの波長 10.6μ よりもはるかに短波長の 2μ ですでに成立している. しかし, 上記の σ_0 の大きい金属では波長 10.6μ に対しても式 (7) からのずれが大きくなる.

しかしながら, 炭酸ガスレーザによる金属材料の熱加工を考えた場合, このような厳密な表面状態を得ることは困難であり, むし興味あるのは実際の熱加工に供せられる市販の材料の表面状態におけるビーム吸収率である. 種々の金属材料のビーム吸収率を一定の表面状態に

について比較するために, パフ研摩 (酸化クロム) した金属材料のビーム吸収率を測定したが, 市販の圧延材に対するビーム吸収率とほとんど差異が見られなかった. このような表面状態は Benett らの実験にくらべて表面粗さ, 清浄さ, 残留ひずみなどの点でじゅう分ではないが, 市販の圧延材料およびパフ研摩した材料をいずれもここでは “研摩した材料” とよびことにする.

一般に金属材料の比抵抗は高温になると大きくなるので, ビーム吸収率もそれにつれて大きくなる. Fig. 5 は各種金属材料の各温度における直流の比抵抗の値から, Hagen-Rubens の式を用いて求めたビーム吸収率の計算値を示す. Fig. 6 は常温ならびに熔融状態において測定した種々の研摩金属材料のビーム吸収率の測定結果を示す.

Fig. 5 Absorbance calculated from dc resistivity.

Fig. 6 Absorbance of metals at room temperature and fusion temperature. Absorbance at fusion temperature is marked with *.

集光レーザビームの試料面上におけるエネルギー分布は, 第1報でも述べたように, ガウス曲線で近似できるが, このビームにより金属試料に熔融池を形成させる場合, その分布のすその部分には熔融池は形成されにく

い。したがって、そのような場合のビーム吸収熱量には溶融池のみならず、溶融温度以下の領域でのビーム吸収率も含まれることになる。Fig. 7 は試料はビーム照射し、溶融池を形成したときの吸収熱量の測定例である。図にみるように、全入射ビームに対する溶融領域に含まれるビーム量の割合 γ は、ビーム照射開始後約 0.1 秒までに約 70% に増加するが、これより求められるビーム吸収率はほとんど一定である。したがってこの測定から得られるビーム吸収率は、溶融状態での吸収率としてもさしつかえないと考えられる。Fig. 6 からわかるように、常温ならびに溶融状態においても測定されたビーム吸収率は Hagen-Rubens の式とよく一致した。常温におけるビーム吸収率は SUS 27 ステンレス鋼、チタン、ジルコニウムなどが他の金属にくらべて高い値を示すが、溶融状態においては鉄もこれらの値とほぼ同じ値となった。しかし、一般に研摩した金属材料のビーム吸収率は、溶融後もその値は低い。

Fig. 7 Absorbed energy vs. beaming time. γ represents the beam fraction contained in melting zone (impinging laser power = 300 W).

4. 表面処理した金属材料による炭酸ガスレーザービームの吸収率

(1) 表面処理方法

前述のごとく研摩した金属材料のビーム吸収率は溶融状態になっても一般に低く、入射レーザービームの 85~90% は熱加工に寄与せず、表面からの反射によって失われる。これは炭酸ガスレーザを金属材料の熱工に用いる場合にもっとも大きな障害になる。しかしながらビーム吸収率は金属材料の表面状態によってかなりの影響を受けることはよく知られている。そこで、ビーム吸収率をよくするために金属材料を適当な方法で表面処理することが考えられ、種々の方法を試みたが、その結果表面処理の方法は次のように分類することができる。

(1) 金属表面に凹凸を形成し、多重反射をおこさせる。これにはグラインダやサンドペーパーなどの機械的処理および被加熱材が構成する幾何学的配置など

が挙げられる。

- (2) 金属表面に不導体皮膜を形成し、皮膜が吸収した熱を金属に伝導させる。これには熱酸化、陽極酸化、化成処理などにより薄い非金属層を形成する方法およびペイントなどを塗布する方法があげられる。
- (3) 金属表面に微粉を塗布する。これには金属微粉、非金属微粉を薄く塗布する方法が考えられる。
- (4) レーザビームを照射することにより、金属表面をビーム吸収率のよい状態にする。これには大気中でレーザ加熱することにより、金属表面に熱酸化皮膜を形成する方法および高エネルギー密度のビームの穿孔作用を利用する方法が考えられる。ただし、後者についてはここではふれない。

以下これらの表面処理をおこなった試料の常温ならびに溶融温度におけるビーム吸収特性について述べる。

(2) 表面に凹凸を形成した場合のビーム吸収率

金属材料の表面に凹凸を形成した場合のビーム吸収性を調べるためにもっとも実際的かつ広範囲の表面粗さが得られる方法として各種金属材料をサンドペーパーで処理し、その常温ならびに高温におけるビーム吸収率を測定した。Fig. 8 および Fig. 9 はその測定例である。

鉄および SUS 27 ステンレス鋼では図にみるごとく、ペーパー粗さが粗くなるにつれてビーム吸収率は増大する傾向にあるが、溶融状態における SUS 27 ステンレス鋼のビーム吸収率はペーパー粗さに無関係に一定で、溶融状態における研摩された場合の吸収率、約 13% と一致した。

これらの表面に形成された凹凸は集光ビームの直径にくらべて小さいので、ビーム照射によってごく短時間のあいだに溶融してなくなり、多重反射の効果がまったくなくなるものと考えられる。

一方、アルミニウムおよび鉛ではこの傾向とは異なり、常温での吸収率はペーパー #300~#500 で処理した場合に著るしいビーム吸収率の極大がみられた。その場合

Fig. 8 Absorptance of roughened metallic surface.

Fig. 9 Absorbance of roughened metallic surface.

のビーム吸収率は鉄および SUS 27 ステンレス鋼にくらべて非常に高く、アルミニウムに対しては約45% (研摩した場合の約20倍)、鉛では40% (研摩した場合の4~5倍) が得られた。しかしながら、アルミニウムおよび鉛のペーパー処理面は一般に黒く変色しており、ビーム吸収率が極大となるところでは変色が著しい。これは明らかにペーパー処理することにより、ペーパーの微粉が凹凸面に付着したためと考えられ、このために吸収率の増大があったものと思われる。

また、溶融状態におけるペーパー処理したアルミニウムのビーム吸収率は、図にみるごとく常温の場合とほとんど差異がなかった。SUS 27 ステンレス鋼の場合からわかるように、溶融後ただちに凹凸の効果が失われるので、これは表面に付着したペーパー微粉が溶融後も残存し、ビーム吸収に寄与するものと考えられる。

このようにアルミニウムおよび鉛に対してはペーパー処理によって形成される凹凸の効果を分離することはできなかったが、ペーパー処理によってビーム吸収率を高くすることができることが明らかになった。しかし、その効果は表面に形成される凹凸よりもむしろペーパー粉末によるものが支配的であると考えられるので、次に述べる表面皮膚の範ちゅうに属するものである。

このように、凹凸の効果はその大きさがビーム直径にくらべて非常に小さいときは溶融後その効果を失うが、たとえば平板試料を組合せてV型の溝を形成するなどの大きな凹凸の形成により、その効果は期待されるものと考えられる。

(3) 不導体皮膚を形成した金属のビーム吸収率

3-1) 不導体皮膚を形成した試料の常温におけるビーム吸収率

前述のごとく研摩した金属材料による炭酸ガスレーザビームの吸収率が低いのは、金属が良導体であることに

起因するので、不導体皮膚を金属表面に形成することにより、ビーム吸収率を上昇させることができる。非金属皮膚の形成は熱酸化、陽極酸化、化成処理などにより母材金属との化合物皮膚を形成する方法と、ペイントなどを塗布する方法が挙げられる。ペイントを塗布した場合、常温におけるレーザビーム吸収率は、ある程度以上の厚さ塗布することにより、金属基板の種類にかかわらず100%にすることができる。

前者の金属基板との化合物皮膚を形成する方法は、金属の種類によって種々の方法が考えられるが、形成される皮膚が金属基板表面に強固に付着し、ある程度以上の均一な厚さになることが必要である。種々の金属材料に対して金属基板との化合物皮膚を形成し、そのビーム吸収性質を調べたが、ここでは比較的容易にかつ均一な皮膚の得られる代表的なものとして、SUS 27 ステンレス鋼に対して硫化処理を施して Fe_2S_3 皮膚を、またアルミニウムに対して陽極酸化処理によって Al_2O_3 皮膚を形成し、これらの表面処理試料によるビーム吸収特性について述べる。

Fig. 10 は SUS 27 ステンレス鋼の硫化処理時間と室温でのビーム吸収率の関係を示す。ビーム吸収率は処理時間と共に上昇し、7~8分の処理時間で80%に達するが、それ以上は増大しない。硫化処理にともなう試料の重量変化を測定した結果、処理時間を8~10分よりも長くしても試料の重量変化は見られなかった。このことから形成された Fe_2S_3 皮膚がち密であるため、ある程度以上の膜厚になると、それ以上反応が進行しなくなったものと考えられる。これに対してアルミニウムの陽極酸化皮膚 (Al_2O_3) は多孔質であるために Fig. 11 に示すごとく吸収率が100%になるまで膜厚を厚くすることができる。陽極酸化は15% H_2SO_4 の電解質を用い、電流密度 1.2 A/dm^2 (約 20°C) で行なったが、この条件での Al_2O_3 皮膚の形成速度は Kissin²⁾ によって測定されており、Fig. 11 の横軸はこの値を用いた。図にみるよう

Fig. 10 Treatment time vs. absorbance at room temperature.

Fig. 11 Thickness of Al_2O_3 vs. absorbance at room temperature.

に室温におけるビーム吸収率は Al_2O_3 の膜厚が約 4μ で 100% に達する。

3-2) 不導体皮膜を形成した試料に集光レーザービームを照射したときの吸収率の変化

不導体皮膜を形成した試料に集光レーザービームを照射した場合の吸収性質を知るために、まず試料が静止している場合のビーム吸収率の時間変化を測定した。

Fig. 12 は室温で 82% のビーム吸収率をもつ SUS 27 ステンレス鋼の硫化処理試片にアルゴン雰囲気中で各時間レーザービームを照射したときの吸収熱量およびこれから計算されるビーム吸収率の時間変化をプロットしたものである。ビーム吸収率はビーム照射後はじめは急激に減少するが、その後は徐々に減少する。これはビーム照射後 Fe_2S_3 皮膜が蒸発などによって失われるためで、

Fig. 12 Relation between absorbance and beaming time for SUS27 stainless steel (0.3 mm thick).

さらに長時間加熱すると表面皮膜の効果は全くなくなり、研磨した試料の溶融状態における吸収率 (約 13%) に収れんするものと考えられる。

すなわち、Photo. 1 に示すように、40 msec ビーム照射後には硫化処理皮膜がまだ残留しているが、150 msec 後にはビーム照射域に皮膜はほとんどみられない。このような事実によって Fig. 12 のビーム吸収率の減少は硫化処理皮膜の消失によるものと結論される。また、Fig. 12 に裏面温度の測定から求められるビーム吸収率の測定結果から求めたビーム吸収率の時間変化を同時に示したが、カロリメータによる吸収率の測定結果とよく一致した。

Fig. 13 は陽極酸化したアルミニウム試料に約 150W

Photo. 1 Appearance of the surface irradiated by focused laser beam (SUS27 stainless steel with Fe_2S_3 film). Beaming time: (a) 40 msec (b) 150 msec.

Fig. 13 Relation between absorbance and beaming time for anodized aluminum (0.3 mm thick).

のレーザビームをアルゴン雰囲気中で集光照射したときの各照射時間に対するビーム吸収率の測定結果を示す。この実験では常温でのビーム吸収率が100%, 64%, 61%, 48%の4種類の試料を用いた。常温での吸収率が100%, 64%, 61%の各試料はビーム照射後吸収率は減少し, 50~60 msec 後に約55%になるが, それ以上長くビーム照射しても吸収率はほとんど変化しなかった。また, 常温でのビーム吸収率が48%の試料は, ビーム照射した後も吸収率は変化しなかった。これらの実験結果から, 約 150W の集光レーザビームを照射したとき, 常温でのビーム吸収率が55%以上の陽極酸化試料はビーム照射により吸収率が急激に減少し, 定常状態では約55%の吸収率の値を示し, また常温でのビーム吸収率が55%以下の場合にはビーム照射による吸収率の減少がないことがわかった。

このように長時間ビーム照射した場合の吸収率がアルミニウム自身の熔融状態における値(約3.7%)より非常に高い値になることは, Al_2O_3 皮膜がビーム照射後もある程度以下の厚さであれば, ほぼそのままアルミニウム表面に残存することができることを示している。ビーム照射後に残存する Al_2O_3 皮膜厚さとそのビーム吸収率の関係に Fig. 11 を適用すると, ビーム照射後に約 2.2μ の厚さの Al_2O_3 皮膜が残存すると推測できる。

これらの事を確かめるために, 種々の厚さに陽極酸化したアルミニウム試料のビーム照射前後の重量変化が測定された。ビーム照射後の重量変化はごくわずかであるので, 本実験では長さ 30 mm のビードが10本おかれた。この場合, レーザ出力は Fig. 13 の実験と同様 150 W で, 移動速度は 50 cm/min であった。Fig. 14 はその測定結果を示す。常温でのビーム吸収率が約50%以下の試料に対してはほとんど重量減少は認められなかったが, その吸収率の値, 50%は Fig. 13 においてビーム照射後の吸収率が一定値に収れんする値, 55%と大体一致した。

Fig. 14 Decreased weight vs. absorbance at room temperature (bead length=30 cm).

また, ビーム集光径 0.5 mm を幅として均一に Al_2O_3 皮膜が失なわれると考えると, 残存する皮膜の厚さを計

算することができる。常温での 100% の吸収率を示す試料としては Al_2O_3 皮膜の厚さ 4μ の試料を用いたが, ビード長さが 30 cm, ビーム照射後の重量減少が 0.75 mg であるので, Al_2O_3 皮膜の比重を 2.5 g/cm^3 とすると残存する皮膜の厚さは 2μ となり, Fig. 11 において示される55%のビーム吸収率に対する膜厚と大体一致する。これはビーム照射によって陽極酸化したアルミニウムの吸収率が低下するのは皮膜が蒸発等によって失なわれるためで, またビーム照射後もある厚さの皮膜が残存し, これがビーム吸収に寄与することを裏付けるものである。

このようなビーム照射後の吸収率がある照射時間以後, 一定になる現象は, レーザビームの強度が異なっても認められ, その吸収率の定常値はレーザビーム強度によって異なる。Fig. 15 はレーザビームの強度と定常状態におけるビーム吸収率の関係を示す。ビーム強度が高いほどビーム吸収率の定常値は低くなるが, これは残存する Al_2O_3 皮膜の厚さがビーム強度の高いほど薄くなるためであると考えられる。すなわち, ビームエネルギーはその波長程度の厚さの Al_2O_3 皮膜の内部に浸透しており, 一部は基板のアルミニウム面に達している。このような状態では, Al_2O_3 皮膜の一端はアルミニウム基板の表面と同一温度であり, 他端は沸点に達し, その内部には急激な温度勾配が存在すると考えられる。その結果, 沸点以上の温度に達した皮膜の部分は失なわれるが, 残存する Al_2O_3 皮膜の厚さはビーム強度が高いほど当然薄くなる。その厚さは皮膜に対して単位時間に与えられる熱量とアルミニウムに伝導する熱量が平衡に達したときの温度分布からきまる。

Fig. 15 Impinging laser power vs. absorbance of anodized aluminium ($v=0$) in steady state.

これらの実験結果から表面処理皮膜を形成したアルミニウムと SUS 27 ステンレス鋼を比較すると, 集光ビームに対する吸収特性に差異のあることが明らかになっ

た。

3-3) 不導体皮膜を形成した試料を移動加熱した場合のビーム吸収率

以上の実験では静止した試料のビーム吸収率を測定したが、溶接などの実際の熱加工にレーザービームを利用するときに必要となるのは、移動加熱試料の吸収率である。そこで陽極酸化したアルミニウムおよび硫化処理した SUS 27 ステンレス鋼に対してアルゴン雰囲気中でビードオンプレートテストをおこない、種々の移動速度およびレーザー出力に対するビーム吸収率をカロリメータを用いて測定した。

Fig. 16 はレーザー出力が一定の場合の移動速度とビーム吸収率の関係を示す。一般に移動速度が大きくなると、ビーム吸収率は大きくなる傾向にある。低速の場合、ビーム吸収率が低いのは、任意の着目点に対するビーム照射時間が長くなるため、Fig. 12, Fig. 13 で述べたと同じ理由で皮膜の失なわれる量が多くなるためである。高速の場合には照射時間が短くなるので皮膜の損失が少なく、それに応じて吸収率が增大するものと考えられる。また、移動速度がビーム吸収率に与える影響は、アルミニウム試料よりも SUS 27 ステンレス鋼試料の方が大きく、とくに低速の場合の変動は大きい。これは Fig. 12, Fig. 13 の結果が示するようにアルミニウム試料の場合、ごく短時間で定常状態の吸収率になるのに対し、SUS 27 ステンレス鋼試料の場合、その時間が長いためである。

Fig. 16 Effect of traveling velocity on the absorbance.

Fig. 17 は移動速度が一定の場合のレーザービーム強度とビーム吸収率の関係を示す。ビーム強度が大きいとき、吸収率が低下するのは蒸発によって失なわれる皮膜が増大するためである。

このように金属表面に非金属皮膜を形成した試料を移動加熱した場合の吸収率はレーザービーム強度が大きいほど低く、また移動速度が速いほど高い。また、静止加熱

Fig. 17 Effect of impinged laser power on the absorbance.

の場合と同様、SUS 27 ステンレス鋼試料よりもアルミニウム試料の方がビーム吸収率に与える表面皮膜の効果は大きかった。

しかしながら、表面皮膜が金属基板の融点よりも低い温度で蒸発するような物質であるとその効果はほとんど期待することはできない。たとえば、ペイント類を金属表面に塗布したときの常温におけるビーム吸収率は金属の種類にかかわらず、ほとんど 100% にすることができる。しかし、集光レーザービームを照射した場合、金属表面をごくわずかに溶融すると、Photo. 2 に示すように大部分のペイントはごく短時間に蒸発して失われ、ほとんどビーム吸収に寄与しない。

Photo. 2 Appearance of bead for SUS27 stainless steel with paint film.

以上述べたように、表面皮膜がビーム吸収率に与える効果は被加熱金属の熱伝導率およびその融点と関係があると考えられるが、これらに関するさらに詳しい検討は別稿⁹⁾でおこなう。

(4) 粉末を塗布した場合のビーム吸収性

金属ならびに非金属の微粉を金属試料の表面に塗布した場合の常温におけるビーム吸収率は、一般に非常に高く、いずれの場合もほとんど 100% であった。粉末には 200 メッシュ以下の微粉を用いた。

粉末はアルコールで試料表面に塗布し、乾燥さ

せて後にビーム照射した。金属基板に対するビーム吸収の効果をよくするには、粉末の塗布量を適当に選ばなくてはならない。Fig. 18 はフラックス粉末を SUS 27 ステンレス鋼に塗布した場合の塗布量に対する溶けこみ深さおよびビード幅の測定例を示す。フラックスには溶接棒の被覆剤を用いた。図にあるように塗布量が約 0.3 mg/mm² でもっともビーム吸収がよかったが、それよりも塗布量を多くすると急激に悪くなる。これは粉末に熱が奪われるためであると考えられる。なお、粉末としてはその他種々のフラックスを用いたが、ほとんど差異は認められなかった。

Fig. 18 Effect of the weight of powder.

フラックス粉末以外に金属粉末も用いたが、いずれも皮膜処理層にくらべてかなり厚くなる。これらの粉末を塗布した試料に集光レーザビームを照射すると、一般にその一部は蒸発などにより失われ、残りは表面に溶融ないしは粉末のままの状態で付着する。皮膜の場合はこれにくらべて非常に薄いため、皮膜自身が保有する熱量は無視してさしつかえないが、粉末の場合はレーザビームの照射条件によっては表面に残存する粉末、ないしはその溶融物による影響が大きくなることがあり、金属が吸収した熱量のみをカロリーメトリックに測定することは困難であった。粉末を塗布した場合のビーム吸収率は熱伝導論より求めなくてはならないが、これについては別稿⁸⁾で述べる。

(5) 大気中でビーム照射したときの吸収率(熱酸化の影響)

これまで述べた表面処理では、集光ビームを照射した場合のビーム吸収率は、いずれも常温の場合よりも低下した。これはレーザビーム照射によって表面処理層が失われるためであった。しかしながら、金属の種類によっては、大気中でビーム照射することにより形成される薄い酸化皮膜を利用して、吸収率を常温における値より大きくすることができる。鋼などのように酸化膜がち密でかつ強固に基板金属に付着する金属では、酸化をごく

表面に限定することができる。

Fig. 19 は SUS 27 ステンレス鋼試料を大気中でビーム照射したときのビーム吸収率の測定例を示す。移動速度がおそいとき、照射時間が長くなり、酸化が進行するので吸収率は高くなる。軟鋼 (SS 41) についても同様の測定をおこなったが、SUS 27 ステンレス鋼とほぼ同じ吸収率となった。また硫化処理した試料を大気中で加熱すると、図にみるごとく移動速度が約 50 cm/min で吸収率のピークがあらわれた。これは鎖線で示した Fe₂S₃ 皮膜の効果と、形成される酸化皮膜の効果が重畳されるためである。

Fig. 19 Effect of velocity on the absorbance (0.3 mm thick).

Fig. 20 は移動速度が一定の場合、SUS 27 ステンレス鋼を大気中でビーム照射したときのビーム強度と吸収率の関係を示す。レーザビームの強度が高くなると、表面温度が高くなり、その結果酸化が進行するのでビーム吸収率は高くなる。

Fig. 20 Effect of laser power on the absorbance.

(6) 各種表面処理の比較

以上の諸実験の結果から、表面処理した金属材料に集光レーザビームを照射し、移動加熱したときのビーム吸収率は、移動速度およびレーザビームの強度により変化することがわかった。ここでは各種表面処理がビーム吸

収に与える効果を比較するために、与えられた板厚の試料に対して、裏面まで溶融させるに要するレーザービーム

Fig. 21 Velocity vs. full penetration power (SUS 27 stainless steel).

Fig. 22 Velocity vs. full penetration power (aluminium).

Fig. 23 Velocity vs. full penetration power (SS41).

の強度の比較をおこなった。Fig. 21~Fig. 23 は板厚 0.3 mm の SUS 27 ステンレス鋼、アルミニウム、軟鋼 (SS 41) を種々の表面処理したとき、各移動速度に対して裏面まで溶融させるに要するレーザービームの強度をプロットしたものである。

SUS 27 ステンレス鋼の場合、ペイントを塗布した試料は研摩した試料とほとんど差異がみられず、その効果はほとんどなかった。これに対して、Fe₂S₃ 皮膜を形成した試料では、研摩した試料にくらべると、かなりの効果がみられ、移動速度が速いほど皮膜の効果は大きくなる。両者の相違は蒸発温度が異なるためである。

表面に粉末を塗布した場合も、粉末の種類によってかなりの差異があり、フラックスの微粉および金属の微粉(母材と同一の組成)を塗布した場合を比較すると、フラックスの方がビーム吸収に対してかなり効果があった。これは粉末が溶融したとき、フラックスの場合には不導体の皮膜となってビーム吸収に寄与するのにに対し、金属粉末の場合、溶融後その効果が失われるためであると考えられる。

研摩した試料を大気中で移動加熱したときには、低速においては他の処理方法にくらべて吸収性をもっともよいが、移動速度がはやくなると急速に吸収性は低下する。移動速度が 30 cm/min 以上では、フラックス粉末を塗布した場合がもっとも吸収性がよかった。

アルミニウムの場合、研摩した試料の反射率が非常に高いので、表面すらも溶融することができなかったが、これは研摩したアルミニウムでは、溶接などの熱加工がきわめて困難であることを示している。しかし、すでに述べたように、表面処理をおこなうことによりほとんどの場合、ビーム吸収性がきわめてよくなり、また表面処理の方法による差はほとんどなかった。このように、研摩した状態での熱加工性が SUS 27 ステンレス鋼にくらべて悪かったにもかかわらず、表面処理することにより逆にアルミニウムの方がよくなることがわかった。また、注目すべきことは、SUS 27 ステンレス鋼の場合とは異なって、金属粉末(アルミニウム微粉)を塗布した場合、フラックス粉末と同様の効果を示すことである。しかしペイントのうちに蒸発温度の低い皮膜は、SUS 27 ステンレス鋼の場合と同様、ほとんどその効果はなかった。

軟鋼 (SS 41) の場合も研摩した試料は、アルゴン雰囲気中でビーム照射すると表面を溶融することもできなかったが、大気中ではビーム吸収性はよくなり、低速の場合はフラックス粉末を塗布した場合よりも吸収性はややよかった。しかし、高移動速度では、フラックス粉末がもっとも吸収性がよかった。

5. 結 言

種々の方法で表面処理した金属材料の, 常温ならびに溶融状態における炭酸ガスレーザビームの吸収率を測定した。その結果, 本研究により得られた結果を要約すれば次のとおりである。

(1) 市販の圧延材程度の表面状態における金属材料の炭酸ガスレーザビーム吸収率は直流の比抵抗の平方根に比例し, ほぼ Hagen-Rubens の式と一致した。それらのビーム吸収率の値は一般に低く, 炭酸ガスレーザを金属材料の熱加工に利用する場合, もっとも大きな障害となる。

(2) 金属材料のビーム吸収率をよくする表面処理方法は次のように分類できる。(a) 凹凸を形成する (b) 不薄皮膜を形成する (c) 粉末を塗布する (d) ビーム加熱により熱酸化皮膜などを形成する。このうち (a) の方法 (ただし, 凹凸がビーム径にくらべて小さいとき) などのように, 金属の溶融により消失する処理は溶融加熱に利用するのには不適當である。

(3) 表面処理した金属にビーム照射したとき, SUS 27 ステンレス鋼ではある程度以上照射時間が長くなると, 表面処理層はほとんど失なわれるが, アルミニウムの場合には残存しうる。

(4) SUS 27 ステンレス鋼の場合, 溶接棒の被覆剤などのフラックス粉末を塗布した場合の吸収性をもっともよいが, 表面処理によってビーム吸収性はかなりの差異があった。アルミニウムでは陽極酸化がもっとも吸収

性がよいが, 特定の処理をのぞいてその差異はあまりなかった。

(5) 研摩したアルミニウムは SUS 27 ステンレス鋼にくらべて, 炭酸ガスレーザによる熱加工性が困難であるが, 表面処理することにより逆にアルミニウムの方が容易になる。

(6) 一般に (b), (c) などの表面処理をおこなった金属材料の炭酸ガスレーザによるビーム吸収率は, 移動速度が速くなると高くなり, またビーム強度が大きいと低くなる傾向にあるが, (d) の表面処理に対するビーム吸収率は, これと逆の傾向を示す。

参 考 文 献

- 1) E. Hagen and H. Rubens, Ann. Physik, Vol. 11 (1903), 873
- 2) L.G. Schulz, "An Experimental Confirmation of the Drude Free Electron Theory of the Optical Properties of Metals for Silver, Gold and Copper in the Near Infrared", JOSA Vol. 44 (1954), No. 7, 504-545
- 3) H.E. Bennett, M. Silver and E.J. Ashley, J. Opt. Soc. Am. Vol. 53 (1963), 1089
- 4) J.M. Bennett and E.J. Ashley, "Infrared Refractive and Emittance of Gold Evaporated in Ultrahigh Vacuum", Appl. Optics Vol. 4 (1965), No. 2, 221-224
- 5) B. Rossi, "Optics", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Massachusetts (1962)
- 6) Y.S. Touloukian, "Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials", Vol. 1, N.Y. Macmillan, (1967)
- 7) 中山, "アルミニウムの表面処理", 日刊工業新聞, (1969), 128
- 8) 荒田, 宮本, "大出力炭酸ガスレーザの熱源的研究 (第4報)", 投稿中