大出力炭酸ガスレーザの熱源的研究(第4報)*

—集光レーザビームと金属材料の相互作用—

...宮田吉明** 宮本 勇**

Studies of High Power CO₂ Gas Laser as a Heat Source (Report 4)*

—Interaction between Focused Laser Beam and Metal—

by Yoshiaki Arata** and Isamu Miyamoto**

Abstract

Interaction between focused CO₂ laser beam and metallic specimen was discussed based on the heat conduction theory and observation using high speed camera. The laser beam absorption characteristics under various surface conditions were analyzed from these results.

Conclusions obtained may be summarized as follows:

- (1) A CO₂ laser-weldability under several hundred watts was the best in titanium, zirconium, type 304 stainless steel etc., and it was the worst in silver, copper etc. When the absorptance was enhanced sufficiently, aluminium sheet was the most suitable metal for high speed welding.
- (2) When melting point of the thin surface layer coated on the base metal was higher than the metal's one, the layer can remain on the surface of metal in molten state to enhance the absorptance.
- (3) The absorptance of sheet metal having higher thermal diffusivity and lower melting point can be effectively enhanced by the surface treatment but depends hardly on the kind of the surface treatment.
- (4) An evaporation during laser heating was violent in the case of the specimen coated with non-metallic finepowder. The reaction of the evaporation induced an appreciable convection in the liquid metal, and affected the shape of fusion isotherm in the case of low thermal diffusivity metal such as type 304 stainless steel.
- (5) Under sufficient laser power, a deep penetration is obtained as well as the case of electron beam. But when the laser was excited with ac (60Hz) electric power supply, the deep penetration may be considerably suppressed.

1. 緒 言

第2報¹⁾では種々の表面処理をおこなった金属材料のレーザビーム吸収性を実験的に明らかにすると共に、その表面処理の効果は金属材料の熱伝導性および、その表面からの蒸発状況と関連があることを述べた。このようなレーザビームの吸収性質を明らかにするには、金属試料の表面における温度分布を知ることが重要である。

ここでは表面処理した金属試料にレーザビームを集光照射しているときの温度変化を熱伝導理論に基づいて計算し、ビーム吸収率との関連性を検討する。また、同時にビーム照射時の試料の表面状況を高速度カメラで撮影し、併せて検討した。レーザ加熱における熱伝導問題ではレーザビームを強度が時間的に変動する不均一表面分布熱源として取扱うが、その熱伝導理論の妥当性は前

報²⁾で実証した。さらに、金属材料の光学的性質と熱伝導性質から各種金属材料のレーザ溶接性を評価した。本研究に用いた程度のレーザビーム強度の場合、表面熱源として扱ってよいが、ビームが強くなると熔融金属の対流作用が著しくなり、さらには電子ビーム同様の穿孔作用を伴うようになるが、そのような場合の加熱状況をモデル実験により明らかにする。

2. 各種金属材料のレーザ溶接性

金属材料はその種類によって光学的性質および熱伝導性質が異なるため、レーザビームに対する熱加工性にかんがりの差異がある。そこで、各種金属材料の炭酸ガスレーザによる熱加工性、とくに溶接性に対する目安を与えるために、半無限板の表面に熔融池を形成するに要する最小レーザパワーを計算する。

金属材料によるビームの吸収率は、その表面状態によって異なるが、一般にビーム吸収率 A の半無限板の表

* 原稿受付 昭和46年7月30日(昭和46年春季全国大会に発表)

** 正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka University

面にガウス分布をなし, そのパワー (一定) が Q_0 のビームを照射したとき, 加熱中心軸上の表面から z の距離における定常状態 ($t \rightarrow \infty$) での温度上昇は次式²⁾で与えられる。

$$\theta(0, z; \infty) = \frac{AQ_0}{2\sqrt{\pi ka}} \exp\left(-\frac{z^2}{a^2}\right) \cdot \operatorname{erfc} \frac{z}{a} \quad \dots\dots(1)$$

ただし, a はガウス分布曲線において, 中心の $1/e$ となる半径, k は金属材料の熱伝導率, また

$$\operatorname{erfc} X = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_X^\infty \exp(-v^2) dv$$

である。表面, $z=0$ においては,

$$\begin{aligned} \theta(0, 0; \infty) &= \frac{AQ_0}{2\sqrt{\pi ka}} \\ &= \frac{\sqrt{\pi}}{2} A\theta_m. \quad \dots\dots(2) \end{aligned}$$

ただし, $\theta_m = Q_0/(\pi ka)$ である。したがって, 半無限板の表面に溶融池を形成させるに要するビーム強度 Q_f は次式で与えられる。

$$Q_f = \frac{2\sqrt{\pi ka}}{A} \theta_f. \quad \dots\dots(3)$$

いま, よく研磨された金属について考えると, その溶融温度における直流の比抵抗の値を η_f とすると, 波長 λ のビームに対する吸収率 A_f は¹⁾,

$$A_f = 4\sqrt{\frac{\pi c \epsilon_0 \eta_f}{\lambda}} \quad \dots\dots(4)$$

で表わされるから, これを式 (3) に代入すると,

$$\theta_f = \frac{1}{2} ka \sqrt{\frac{\lambda}{c \epsilon_0 \eta_f}} \cdot \theta_f \quad \dots\dots(5)$$

ただし, c は光速, ϵ_0 は真空誘電率である。炭酸ガスレーザビームの場合, 波長 $\lambda = 10.6 \mu$ であるから, $c = 3 \times 10^{10}$ cm/sec, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14}$ farad/cm および実測したビームの集光半径 $a = 0.025$ cm³⁾ を用いると, 式 (5) は,

$$Q_f = 7.9 \times 10^{-4} \cdot \frac{k \theta_f}{\sqrt{\eta_f}}. \quad \dots\dots(6)$$

Fig. 1 に炭酸ガスレーザビームに対するビーム吸収率が研磨金属の溶融温度における値 A_f を有する場合の Q_f を計算した結果を示す。

また, 何らかの方法でビーム吸収率を 100% にした場合における Q_f は式 (3) から次のように与えられる。

$$Q_f = 2\sqrt{\pi ka} \eta_f \quad \dots\dots(7)$$

この場合の Q_f を Fig. 1 に斜線であらわした。研磨した金属の場合, チタン, SUS27 ステンレス鋼などが約 200 W で, また鉄, ギルコニウムが 300~400 W で溶融池を形成でき, これらがもっともレーザ溶接が容易である。一方, 銀, 銅などでは 9~10 kW ものレーザパワーが必要であり, もっともレーザ溶接が困難である。このように, 研磨した金属材料の熱加工性は金属の種類

Fig. 1 CO_2 laser weldability indicated by minimum laser power to melt various metals with semi-infinite thickness. η_f represents de resistivity at fusion temperature (constant power, Gaussian distribution).

によってその差は非常に大きく, いずれもビーム吸収率が低いためのかなりのレーザパワーを必要とする。しかしながら, 何らかの方法でビーム吸収率を 100% にすると, Fig. 1 の斜線に示すごとく, 金属の種類による差は少なく, ほとんどの金属材料は 200 W 以下で溶融池を形成することができ, アルミニウムなどの融点の低い金属の加工性はよくなる。これらのことは, Wiedemann-Franz の法則でよく知られているように, 純金属の電気伝導度とその熱伝導度に比例するために, 研磨した金属が式 (6) より $Q_f \propto k^{3/2}$ となるのに対し, 吸収率が 100% の場合は式 (7) より $Q_f \propto k$ となることより理解できる。

以上はレーザ出力が, 一定であると仮定して溶接性を評価したが, 本研究では交流励起電源によるレーザ発生装置を用いるため, パルス状の出力波形²⁾を示すが, その場合におけるレーザ溶接性を検討する。加熱条件として, 実際の出力波形とエネルギー分布 (ガウス曲線, $a = 0.25$ mm) を考慮して, 各種金属材料に対して与えられた厚さの板を所定の時間内に溶融させるに要するレーザビームの強度を計算した。Fig. 2 は板厚 0.3 mm の研磨した状態およびビーム吸収率が 100% のおのおの場合の金属試料に対する加熱時間と, 板裏面まで溶融させるに要するレーザパワーの計算例を示す。図の横軸はパ

Fig. 2 Full penetration power at each pulse of Gaussian source with actual waveform²⁾ for various metals with 0.3 mm thickness. (a) polished metal (b) 100% absorptance metal

ルス数であり、1パルスは1/120秒に相当する。熱伝導率の大きい金属は定常状態では Fig. 1 に示したように熱加工性が悪かったが、数パルス以内の短時間に対しては逆に熱加工性はよくなる。ビーム吸収率が100%の場合、数パルス以内の熱加工性は熱伝導率が大きく、融点の低いアルミニウムがもっともよく、長時間加熱の場合は熱伝導率の小さい SUS 27 ステンレス鋼などがよい。したがって、高速溶接などの熱加工をおこなうと

きは、SUS 27 ステンレス鋼よりむしろアルミニウムの方が効果的であることがわかる。

以上は静止加熱の場合であるが、Fig. 3 はビーム強度が一定の場合の移動速度と厚さ 0.3 mm の板の裏面まで溶融させるに要するレーザービームの強度の関係をアルミニウムおよび SUS 27 ステンレス鋼について計算したものである。低速の場合は SUS 27 ステンレス鋼の方が加工しやすいが、約 150 cm/min 以上の速度では逆にアルミニウムの方が加工しやすくなる。これは Fig. 3 の傾向と一致する。これは熱源の移動速度を無次元表示して v^* で表わすと

$$v^* = av/2k_D \quad \dots\dots\dots (8)$$

となり、 v^* が熱拡散係数 k_D に逆比例するためである。

Fig. 3 Traveling velocity vs. effective power of full penetration for 0.3 mm thick plate.

3. 表面処理した金属試料とレーザービームの相互作用

(1) 集光レーザービームによる金属試料の加熱

一般に金属材料に対する炭酸ガスレーザのビーム吸収率は、その表面がよく研磨されていると非常に低く、これを適当な表面処理することにより吸収率を高くすることができることは第2報¹⁾ですでに述べた。また、表面処理した金属材料に集光レーザービームを照射すると、表面処理層は溶融・蒸発・スパッタリング等起しているものと考えられるが、ビーム吸収に関するこれらの実験から、熱伝導率・溶融温度などの異なる金属材料を比較すると、ビーム吸収性質がかなり異なることがわかった¹⁾。一般に表面処理層の熱伝導性は非常に悪いので、その層の厚さが薄くてもある程度の温度勾配があると考えられるが、金属基板と接する部分は、ほぼこれと同じ温度であると考えてさしつかえない。したがって、金属基板の表面温度が表面処理層の状態にかなりの影響を与えることが十分に考えられる。そこで試料の表面温度とビーム吸収率の関係を検討するために、表面処理した金属材料のビーム照射後における温度変化を熱伝導論によ

って計算することにする。また、試料の表面状況を高速度カメラを用いて撮影し、あわせて検討した。撮影には回転プリズム式高速度カメラを用い、駒速度500~1,000駒/秒、シャッター速度1/2,500~1/5,000で、撮影角度は試料平面に対して約15°とした。

計算に際しては、表面処理した金属試料にレーザビームを照射したときの温度変化については第3報²⁾で述べた熱伝導の理論を用いることができる。その場合、金属試料に与えられる有効吸収熱量 $Q(t)$ は、ビーム照射中の各時間における試料に入射するビーム強度と、その時間におけるビーム吸収率の積 $Q(t) = A \cdot Q_0$ の形であらわされる。ただし、 A は時間の関数である。以下、表面処理した SUS 27 ステンレス鋼 (硫化処理) およびアルミニウム (陽極酸化) と集光レーザビームの相互作用を検討するが、それらのビーム吸収特性は第2報¹⁾の実験で測定した値を用いた。レーザ励起には 60 Hz の交流電源を用い、そのレーザ出力波形²⁾ および焦点におけるエネルギー分布³⁾ についても実測値を用いた。

(2) 表面処理した SUS 27 ステンレス鋼について

硫化処理した板厚 0.3 mm の SUS 27 ステンレス鋼試料に数百ワット程度のレーザビームを集光照射したときのビーム吸収率は、ビーム照射開始後、急激に減少し、最終的には表面理層は全く失なわれ、研磨された状態の値にまで低下する¹⁾。測定したビーム吸収率の時間変化に関する測定結果を用いて、試料の表面および裏面の加熱中心軸上における温度変化の計算をおこなったが、その結果を Fig. 4 に示す。試料の表面温度は図にみるとく、レーザ出力波形の影響を受けてかなり変動する。本実験において得られるビードは規則正しいウロコ状の外観を呈する²⁾が、これは上に述べた表面温度の規則的な変化によるものと思われる。しかし、試料裏面におよぼすレーザ出力波形の影響は図示すごとく少なく、ほとんど無視できる程度の大きさである。試料表面の温度はビーム照射後の第1パルスにおいて最も高くなり、それ以後はレーザビームを連続的に照射しても有効吸収レーザビームの強度 $Q(t)$ が減少するため、表面温度は急激に低下する。熱伝導計算から得られる金属材料の融点以上の計算値は概略の値であって、あまり正確ではないが、少なくとも第1・第2パルスでは表面処理によって形成された Fe_2S_3 皮膜が蒸発するのに十分に高い温度であり、その後の各パルスにおける温度も十分に高いため、連続的に加熱すると Fe_2S_3 皮膜は試料表面に残存せず、全く失なわれてしまうことを示すもので、ビーム吸収率の測定結果¹⁾と一致するものである。

また、上記実験のビーム照射時における試料の表面状況を連続撮影したが、その結果を Photo. 1 に示す。こ

Fig. 4 Calculated temperature rise at location on the axis ($r=0$) due to focussed laser beam. Specimen: type 304 (SUS27) stainless steel coated with Fe_2S_3 (0.3 mm thick). (a) At top surface (b) At bottom surface

れによると、第1パルスで表面より明瞭な蒸発現象がみられ、第2パルスではそれはかなり弱くなり、第3パルス以降ではほとんど見られなかった。これは上記計算結果の傾向とよく一致し、第1・第2パルスで明瞭に観察される蒸発現象により Fe_2S_3 皮膜が急激に失なわれる。それ以後のパルスでは撮影結果からは観察できなかったが、徐々に皮膜が失なわれるものと考えられる。硫化処理した SUS 27 ステンレス鋼試料にある程度以上長い時間ビーム照射すると Fe_2S_3 皮膜の効果が全く失なわれ、母材金属の吸収率に収れんするが、それはビーム照射後の試料の表面温度が非常に高いためであるということが

Photo. 1 Irradiation of focused laser beam to type 304 stainless steel (SUS27) coated with Fe_2S_3 film (700 flames per sec).

1-6: first pulse 7-12: second pulse 13-18: third pulse ; Thickness: 0.3 mm
Velocity: 0 Laser power: 150 W

連続撮影の結果からも確かめられた。

Fig. 4 (b) に研磨した SUS 27 ステンレス鋼 (ビーム吸収率 $A_f=13\%$ 一定¹⁾) に対する裏面温度の計算結果も示した。硫化処理した場合の裏面温度は5~10パルス間に急激に上昇し、その後の温度上昇は非常にゆるやかになるが、研磨した場合の温度上昇はこれにくらべると非常にゆるやかな温度上昇を示し、両者の温度上昇はかなり異なった傾向を示した。硫化処理した場合の温度上昇は研磨状態のビーム吸収率 (13%) の定常的な加熱と、表面の Fe_2S_3 皮膜の効果による過渡的なビーム吸収による加熱の合成されたものであると考えられる。約10パルス加熱後、温度上昇が非常にゆるやかになるのは、前者による温度上昇と、後者の時間と共にビーム吸収率が低下することによる供給熱量の減少にともなう温度の低下が相殺したためであると考えられる。Fig. 5 はこの計算と同じ条件で板厚 0.3 mm の硫化処理および研磨した SUS 27 ステンレス鋼試料のおおのに集光レーザービームを照射したときにおける、試料裏面の加熱中心軸上における温度上昇の測定結果を示す。測定結果は計算値の傾向と大体一致した。

溶接等の熱加工に炭酸ガスをレーザーを用い、試料裏面まで溶融させる場合を考えると、SUS 27 ステンレス鋼のように熱拡散係数 k_D が小さい金属では、裏面温度の上

Fig. 5 Temperature records at location on the axis of the back surface (type 304 stainless steel, 0.3 mm thick).

昇の時定数が長くなるため、表面がビーム吸収率のよい状態を長く持続することが必要となる。そのため、表面皮膜はビーム照射後も長く残存していなくてはならない。また、 k_D が小さいために表面と裏面の温度差が大きくなり、その結果表面がかなりの高温状態になることは避けられず、皮膜が除去されやすくなる。

Photo. 2 は硫化処理した SUS 27 ステンレス鋼試料に集光レーザービームを照射して、移動加熱した場合の表面状況である。ビーム照射開始後の第1パルスにおいては、ビーム照射領域全体に Fe_2S_3 皮膜が存在するため

Photo. 2 Irradiation of focused laser beam to type 304 stainless steel (SUS27) coated with Fe_2S_3 film (500 flames per sec).

1-4: first pulse 5-8: second pulse 9-12: third pulse 13-16: fourth pulse

Thickness: 0.3 mm Velocity: 100 cm/min Laser power: 150W

に、もっとも明瞭な蒸発現象がみられるが、第2パルス以降では移動によって新たにビーム照射域に露出される部分がいはいは Fe_2S_3 皮膜はすでに前のパルスでかなり失われているため、主としてスポットの前の部分で蒸発がみられる。このように、ビーム照射によって短時間に皮膜が失われるが、移動速度が大きくなると、各パルスに対してビームスポット内における Fe_2S_3 皮膜の存在する面積が増大するため、吸収率が增大する¹⁾ことが説明できる。

以上の熱伝導理論に基づき考察および観察の結果より SUS 27 ステンレス鋼のように熱拡散係数 k_D の小さい金属の表面皮膜は、高温状態で長時間残存していることが必要条件であるといえる。Photo. 3 は通常の溶接棒用のフラックス粉末を塗布した試料に集光レーザビームを照射した場合の表面状況の連続写真である。第2報¹⁾で述べたように、SUS 27 ステンレス鋼の表面処理のうち、非金属粉末を表面に塗布した場合がもっとも吸収率がよかった。写真からわかるように、ビーム照射後の第1パルスでかなりのスパッタリングが見られるが、その後の表面からの蒸発現象は Fe_2S_3 皮膜を形成した場合とくらべてかなり長く見られる。蒸発現象の見られる間、フラックスは溶融して試料表面に付着し、皮膜となってビーム吸収に寄与していると考えられるが、この写真は表面に皮膜が存在する時間が長い表面処理は、ビーム吸収率が高いことを示すものである。

金属粉末を塗布した試料は硫化処理した試料よりも吸

収率が悪くなる¹⁾が、これはビーム照射後、金属粉末は蒸発ないしはスパッタリングでその一部が失われるが、残りは試料表面で溶融するとただちにビーム吸収に寄与しなくなるためであり、したがって吸収率が高いのは最初のごく限られた時間であるためと考えられる。

(3) 表面処理したアルミニウムについて

一方、陽極酸化したアルミニウム試料に数百ワット程度の集光レーザビームを照射した場合は、ビーム照射後吸収率は急激に減少するが、SUS 27 ステンレス鋼の場合と異なって、長時間ビーム照射しても約50%の高い吸収率が保たれた¹⁾。この吸収率のデータを基にして試料の温度変化を計算した。

Fig. 6 (a) は常温におけるビーム吸収率が100%である陽極酸化した板厚 0.3 mm の静止しているアルミニウム試料に対する表面および裏面の加熱中心軸上での温度変化の計算結果を示す。SUS 27 ステンレス鋼の場合と同様、表面温度は最初の1パルスにおいてもっとも高く、その後徐々に低くなるが、SUS 27 ステンレス鋼の場合と比較すると、定常状態になるのがかなり早い。しかしながら、アルミニウム基板の表面温度は、もっとも高い第1パルスにおいても計算値は 1600°C と Al_2O_3 皮膜の蒸発温度 (約 2000°C) よりも低く、数パルス後では約 1200°C とさらに低くなる。これらのことから陽極酸化したアルミニウムに集光レーザビームを長い時間照射しても、アルミニウム基板の表面温度が Al_2O_3 の蒸発温度より低いため、 Al_2O_3 皮膜が残存し、そのため高

Photo. 3 Irradiation of focused laser beam to type 304 stainless steel (SUS27) coated with non-metallic fine powder (500 frames per sec).

1-3: first pulse 5-7: second pulse 9-11: third pulse 13-15: fourth pulse
Thickness: 0.3 mm Velocity: 0 Laser power: 150 W

Fig. 6 Calculated temperature rises on the axis ($r=0$) of aluminium sheet, 0.3 mm in thick. (a) Measured absorptance in case of aluminium specimen coated with Al_2O_3 film (b) Constant absorptance (55%)

いビーム吸収率が維持されるということが、計算から明らかにされた。

試料の裏面温度もまた、最初の1パルスで最高温度に達する。また、パルスの休止時においては表面および裏面の温度差はほとんどなく、両者とも完全に凝固温度になり、ビーム照射域は溶融、凝固をパルス毎に繰返しているものと考えられる。アルミニウムの場合、SUS 27 ステンレス鋼と異なり、熱拡散係数 kn が大きいので裏面にまでパルス加熱の影響がおよんでいる。

Photo. 4 はビーム照射後のその表面状況を連続撮影した結果であるが、第1・第2パルスが非常に明るく、このあいだに Al_2O_3 皮膜の表層部が失われることを示している。また、パルスの休止時では完全に凝固していることが明らかにわかるが、これらの傾向は計算値とよく一致する。

Fig. 6 (b) はビーム吸収率が一定 (55%) である試料にレーザビームを照射した場合の裏面温度の計算結果を示す。Fig. 6 (a) の裏面温度の計算結果と比較すると、温度上昇はかなりゆるやかであるが、Fig. 4 に示す SUS 27 ステンレス鋼の吸収率一定の場合と比較すると、はるかに温度上昇の時定数は小さい。したがって、表面処理の効果は SUS 27 ステンレス鋼などと比較すると、ごく短時間でよいということになる。

Fig. 7 は板厚 0.3 mm の陽極酸化したアルミニウム試料に、集光レーザビームを照射した場合の裏面温度の

Photo. 4 Irradiation of focused laser beam to anodized aluminium (1000 frames per sec).
1-8: first pulse 9-16: second pulse 17-24: third pulse Thickness: 0.3 mm
Velocity: 0 Laser power: 150 W

Fig. 7 Temperature records at location on the axis of the back surface in case of anodized aluminium sheet, 0.3 mm in thick (velocity=0).

測定結果を示す。この測定には、常温で100%のビーム吸収率を有する試料を用い、同一ヶ所に200 msec づつ4回ビーム照射し、そのおのおのの場合の裏面温度を測定した。図における1~4の数字は第1回目~第4回目の照射をあらわす。したがって、各ビーム照射時における吸収率は、第1回目の照射時には前述したごとく急激な変化特性を示す¹⁾のに対し、第2回目以降は照射時間にかかわらず一定値(55%)を示す²⁾ものである。これらの測定結果によると、第1回目のビーム照射の際にはFig. 6 (a) 同様第1パルスにおいてもっとも高い温度上昇を示した。また、第2回目~第4回目の照射では最初のごく短時間を除いて、ほぼ同じ温度上昇を示し、いずれも第1回目にくらべるとかなり緩やかであった。これらの各温度上昇曲線を比較すると、最初のごく短時間における温度上昇が異っているのは、加熱開始時におけるレーザ出力のパルス位相が一定とならないためである。第2回目以降も計算結果とよく一致しており、またこの実験はある程度長い時間ビーム照射すると、吸収率が一定となる³⁾事をも裏付けるものである。

アルミニウムは熱拡散係数 kn が大きいので、この程度の板厚に対しては上記のように裏面においても温度上昇の応答性がよく、そのため、ビーム吸収率のよい状態を長く維持できないような表面処理方法でも、じゅう分にその効果があると考えられる。アルミニウム粉末を塗布した場合は、粉末が溶融した後ただちにビーム吸収に寄与しなくなるにかかわらず、陽極酸化処理と同じぐらいの効果がある¹⁾のはこのためである。

4. 溶融池内における対流の影響

一般に金属材料に数百ワット程度の集光レーザビームを照射した場合、その溶けこみ形状は熱伝導型であり、不均一表面分布熱源に対する熱伝導理論による計算値とよく一致することは第3報²⁾で明らかにした。しかし、例外的に SUS 27 ステンレス鋼に非金属粉末を塗布した場合の溶けこみ形状は、熱伝導計算による等温線と比較すると、Photo. 5 にその例を示すごとく、中央部にやや溶けこみ深さを増す不連続な溶融線がみられる。この程度の状態では計算値からのずれは無視してもさしつ

Photo. 5 Bead cross section of type 304 stainless steel coated with non-metallic fine powder.

Thickness: 0.3 mm Velocity: 20 cm/min
Laser power: 170 W

かえない程度ではあるが、これは、溶融池内部での対流によるものと考えられるが、SUS 27 ステンレス鋼の他の表面処理およびアルミニウムのどのような表面処理の場合に対しても見られなかった。

対流の原因としては、表面張力流、蒸発の反動力などが考えられるが、硫化処理などの他の処理方法は溶けこみの形状が熱伝導論による計算値とよく一致することから、前者による対流作用は無視してさしつかえないと考えられる。しかし、Photo. 3 に示したように、非金属粉末を塗布した試料に対しレーザビームを集光照射した場合、蒸発およびスパッタリングは他の表面処理にくらべて特に激しく、このことから、蒸発の反動力によって溶融池内部にビーム照射方向に対流の駆動力が働いたためと考えられる。しかし、アルミニウムにフラックス粉末を塗布した場合には、表面から激しい蒸発が生じているにもかかわらず、溶けこみ形状に対する対流の影響はあらわれなかった。

このように、表面処理方法のほかに材料の種類によっても異った現象がみられたが、溶融池内部の対流状況を調べるために、SUS 27 ステンレス鋼およびアルミニウム試料の表面に、異種金属粉末を混合塗布して、ビーム照射することによってその異種金属の溶融池内部における分布をX線マイクロアナライザにより測定した。SUS 27 ステンレス鋼の場合、銅粉末を混合塗布したが、その結果を Fig. 8 に示すように、銅は溶けこみ深さ全域にわたって分布しており、しかも溶融池底部の方がむしろ表面より銅の量は多かった。これは明らかに対流作用によるものである。また、これと同一場所における非金属粉末の主成分であるシリコンの分布を測定したが、溶融部と非溶融部の差はほとんどなかった。このことから非金属粉末は溶融池内部にはまきこまれず、ほとんど蒸発するか、溶融して表面に付着しているものと考えられ

Fig. 8 Concentration distribution of Cu and Si in case of type 304 stainless steel, 0.3 mm in thick. (Cu powder+flux) Velocity=70 cm/min Laser power=250 W.

る。したがって非金属粉末の溶融池への巻きこみはないと考えてよい。

アルミニウムの場合、非金属粉末に亜鉛粉末を塗布したが、Fig. 9 に示すように、亜鉛は溶けこみ深さの約半分の領域に限られた。これより、対流作用は溶融池底部にまでおよんでおらず、そのため溶融等温線にほとんど影響がなかったと考えられる。

Fig. 9 Concentration distribution of Zn in case of aluminium, 0.3 mm. (Zn powder+flux) Velocity=250 cm/min, Laser power=200 W.

このように、同じ程度の溶けこみ深さに対して SUS 27 ステンレス鋼の方がアルミニウムより対流が顕著であることがわかったが、その原因としては次の3つの点が考えられる。まず第1に、移動速度が異なるため、任意の着目点にビーム照射される時間はアルミニウムの方が短かったこと。すなわち、アルミニウムの場合、約2パルス、SUS 27 ステンレス鋼の場合5~6パルスの間、各着目点で加熱されていたことになるが、SUS 27 ステンレス鋼の方が対流を起す時間が長かったため、その影響が深い領域におよんだものと考えられる。第2に、アルミニウムは前述のごとくビーム照射中、各パルス毎に凝固が完了するので、1パルスの間に十分な対流が起らないが、SUS 27 ステンレス鋼では、各パルス毎に凝固は完了しないので、対流を起す時間がじゅう分にあること。第3に、アルミニウムの熱拡散係数が大きいので、熱輸送には熱伝導が支配的となり、対流は無視できること。

SUS 27 ステンレス鋼の場合でも Photo. 5 に示したように、溶融等温線に与える対流の影響がそれほど大きくなかったが、それは蒸発現象が間欠的であるため、溶融金属を対流させる駆動力が持続しなかったためと考えられるが、レーザビームの強度をさらに強くすると、蒸発現象がさらに激しくなり、対流の影響も顕著になると考えられる。

5 レーザビームによる穿孔作用

レーザビームの強度の強い場合の状況を知るために、対流現象を容易に起しうする物質に集光ビームを照射するモデル実験をおこなった。この実験には観察を可能にするために被照射物質としてはガラス容器に入った水を用い、その水面にレーザビームを集光した。観察を容易に

するために水は少し着色した。Photo. 6 はビーム照射域を高速度カメラで撮影した結果を示す。これからわかるように、ビーム照射により水面から約 1~1.5 cm の深さに細長い穿孔作用が生じ、その下方に気泡が下方方向に押やられるのが見られる。これは明らかに水の蒸発による反動のために水面が押し下げられ、その方向に対流が起っていることを示すものである。また、その反動力が大きいため、穿孔作用を伴うが、レーザ出力波形がパルスのため、穿孔された部分はパルスの休止時に平面にまで復帰しているのが観察される。そのために穿孔される深さは1パルスの間に形成される深さに限定される。しかし、レーザビームの強度がパルスのでなく、連続一定ならば、穿孔深さはさらに深くなると考えられる。これは連続一定強度のレーザビームによると、出力がある程度高ければ、電子ビーム同様の深とけこみのビードが得られることを示すものである。低沸点材料ではすでにこのような穿孔作用がみられる。Photo. 7 は

Photo. 7 Cross section of zinc coated with non-metallic fine powder.
Velocity: 0 Beaming time: 10 sec
Laser power: 200 W

Photo. 6 Irradiation of focused laser beam to water (500 frames per sec).
Laser power: 250 W

亜鉛に非金属粉末を塗布し、集光レーザービームを照射した場合の断面写真である。

7. 結 言

種々の表面状態を有する金属材料と集光炭酸ガスレーザービームの相互作用、ならびにそのビーム吸収性質を熱伝導理論および高速度カメラによる撮影結果から検討した。その結果、本研究より得られた結論を要約すると次のようになる。

1) 各種金属材料の静止した一定強度の炭酸ガスレーザービームによる溶接性は、銀、銅などがもっとも悪く、SUS 27 ステンレス鋼、ジルコニウム、チタニウムなどがもっともよい。ビーム吸収率が高いときは、短時間熱加工ではアルミニウムがもっともよい。

2) 表面処理した金属材料にレーザービームをある程度以上長い時間照射したのちも、表面処理層が残存し、ビーム吸収に寄与するのは、金属基板の表面温度が表面処理層の蒸発温度よりも低い場合である。

3) 金属試料のビーム吸収率に与える表面処理の効果は一般に、熱拡散係数 k_n が大きく、また融点 θ_f が低い金属ほど大きい。

4) k_n が大きく、 θ_f の低い場合、表面処理の種類によって、ビーム吸収率に与える効果はあまり変わらないが、 k_n が小さく、 θ_f の高い金属はその種類によってビーム吸収率はかなり異なり、表面に長時間残存しうる表面処理がよい。

5) 表面処理の方法によってビーム照射にともない、

激しい蒸発現象がおこり、その反動力で溶融金属は押し下げられ、その結果、溶融池内でビーム照射方向に対流がおこる。

6) 上記対流のために SUS 27 ステンレス鋼のように k_n の小さい金属は、ビード中央部にごく僅かであるが溶けこみを増す。しかし、アルミニウムのように k_n の大きい金属では熱伝導が支配的であり、実験に用いた出力範囲では、対流の影響は無視することができる。

7) レーザビームの強度が強く、蒸発が非常に激しい場合は、穿孔作用を伴ない、いわゆる深とけこみ型のビード形状が得られる。

8) パルス出力波形を示すレーザービームは、一定出力の場合にくらべて深とけこみは起りにくい。これは前者の場合、パルス休止時に蒸発の反動力が停止するために対流の駆動力が持続しないこと、押し下げられた液面を持続できず、平面に復帰することなどの理由による。またこの場合、 k_n が大きい金属ではパルス休止時に凝固が起るのでさらに起りにくい。

9) ビーム吸収率を高めるために表面処理した金属試料にレーザービームを照射した場合、表面処理層は表面に存在するか、もしくは蒸発し、溶融金属内部へ巻きこまれず、したがって内部に欠陥を形成しない。

参 考 文 献

- 1) 荒田、宮本、山田、"大出力炭酸ガスレーザーの熱源的研究、(第2報)"、溶接学会誌、第40巻(1971)、No. 12、1249~1260。
- 2) 荒田、宮本、"大出力炭酸ガスレーザーの熱源的研究、(第3報)"、溶接学会誌、第41巻(1972)、No. 2
- 3) 荒田、宮本、"大出力炭酸ガスレーザーの熱源的研究、(第1報)"、溶接学会誌、第39巻(1970)、No. 12、1307~1314。