87%Al₂O₃ セラミックスのレーザ溶接によるビード特性 と継手強度*

—高出力 CO₂ レーザによる87%Al₂O₃ セラミックスの溶接 (第1報)—

富江 通雄**, 阿部 信行***, 野口 修一****, 荒田 吉明*****, 小田 辰春*****

Characteristics of Weld Bead and Strength of Joint by Laser Welding of 87%Al₂O₃ Ceramics*

—High Power CO₂ Laser Welding of 87%Al₂O₃ Ceramics (Report 1)—

by Michio Tomie**, Nobuyuki Abe***, Shuichi Noguchi****,
Yoshiaki Arata***** and Tatsuharu Oda*****

Fundamental characteristics of high power CO₂ laser welding of 87%Al₂O₃ ceramics were investigated with an intention to develop a joining technique for thick ceramics. It was found that a penetration depth of 20 mm is possible at a welding speed of 6.5 mm/sec and a laser power of 10 kW. The porosity ratio was lower at lower input powers, and there was a tendency that the porosity ratio decreases with decreasing the welding speed at the same input power. The bending strength decreased as the porosity ratio increased. Porosities, in particular large porosities at bead center, were found to greatly influence the bending strength of welded joints of alumina ceramics. The root bending strength of butt weld of 4 mm thick plate had the same value as the base material.

Key Words: High Power CO₂ Laser, Laser Welding, Coaxial Shield Gas Nozzle, Alumina Ceramics, Penetration Depth, Full Penetration, Underfill, Bending Strength, Porosity

1. 緒 言

新素材としてのセラミックスは、耐熱性、耐食性、耐摩耗性など、他の材料に比べて非常に優れており、これからの技術革新の担い手として、金属やプラスチックに次ぐ第三の素材として期待されている。近年、セラミックスの製造技術は著しく進歩し、各種高性能なセラミックスが次々と開発されている。しかし、セラミックスは硬くて脆いという性質を持っているため、金属材料に比べ加工性が悪く、その加工技術は材料開発に対して十分追いついていないのが現状である。特に、接合技術は大きく立遅れており、そのため材料の利用範囲が大幅に制限されている場合もある。セラミックスの接合法としては、これまでに各種方法が開発および研究されているが、接合強度、耐熱性、気密性、生産性に優れ、すべてのセラミックスに適用できる接合法はいまだ開発されていない。セラミックスは一般に高融点であるため、熱加工に用いうる熱源としては電子ビーム¹⁾、レーザ²⁾などの高エネルギー密度熱源に限定され、これらの接合法のひとつにレーザによる溶融溶接法³⁻⁹⁾がある。これはごく単純に考えれば、金属材料と同様に溶融溶接ができれば、接

合部が母材と連続であり、適用範囲が限定されず、接合能率が極めて高いなどの点からは理想的な接合方法といえる。

本研究では、厚板セラミックス(数mm~20mm)を溶接構造材料として取り扱うことができるような接合技術の確立を目標として、広範囲の溶接条件に対応するため、高出力CO₂レーザを用い溶接施工を行いビード特性を調べた。さらに、溶接パラメータがポロシティに与える影響を明らかにするとともに、溶接継手強度に与える影響について検討を行った。

2. 実験方法および供試材

セラミックスのレーザ溶接は、定格出力15kWのCO₂レーザ装置(ビーム外径:約70mm, M値(ビーム外径/ビーム内径):1.5)を用い、アラタレーザ収束システムA型¹⁰⁾(F10, スポット径:約0.8mm)を使用して、 α_0 値0.997および1.006で溶接を行った。溶接用ノズルは、プラズマ除去の効果は少なくなるが、レーザビームをセラミックスの蒸気およびガスからシールドするため同軸にガスを吹き付ける同軸シールドガスノズルを用い、従来の金属の溶接によく使われ、プラズマを除去するために溶融池後方より真横にガスを吹き付けるアシストガスノズル¹¹⁾を用いた場合と比較検討を行った。アシストガスの流量は0.18 l/secで、同軸シールドガスおよびアシストガスとしてはどちらもHeガスを使用した。

セラミックスをレーザ溶接する場合、全く予熱せずに溶接施工ならびに予熱温度が低すぎると、レーザを照射した瞬間に熱衝撃により溶接試料が破損し、溶接が不可能となる。そこで、Fig. 1に示すように、炉の側面より挿入したガスバーナーで試料裏面を加熱し、レーザを照射しても割れの発生しない温度($T_p=1300\text{ K}$)⁹⁾まで試料を均一に予熱し、炉中溶接を行った。また、炉の上部は開放になっており、ノズルが炉の中を走行できる構造に

*原稿受付 平成6年2月28日 平成6年2月 高エネルギービーム加工研究委員会で作表

**正 員 大阪大学溶接工学研究所(現:近畿大学) Member, Welding Research Institute, Osaka University (Present Address: Kinki University)

***正 員 大阪大学溶接工学研究所 Member, Welding Research Institute, Osaka University

****正 員 大阪府立産業技術総合研究所 Member, Osaka Prefectural Industrial Technology Research Institute

*****正 員 近畿大学 Member, Kinki University

*****非 会 員 Non-member

Fig. 1 Schematic diagram of welding system.

Table 1 Chemical composition of 87%Al₂O₃ used.

	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	CaO
87%Al ₂ O ₃	87	10	2	1

なっている。溶接終了後、試料を1300 K に保持しながら溶接炉から電気炉に移し換え、1300 K で1時間保持した後、1時間に100 K の割合で室温まで徐冷を行った。

本実験に用いたセラミックスは87%Al₂O₃ セラミックスで、その組成を Table 1 に示す。試料の寸法は、炉の大きさの制約のため、長さ80 mm、幅40 mm で、板厚は主として4 mm のものを用いた。また、突合わせ溶接には、幅20 mm のものを2枚突き合わせて溶接を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 各種溶接条件によるビード特性(ビードオンプレート)

高出力レーザによる溶接特性を調べるために、溶接速度(u_b)とレーザパワー(W_b)を変化させ、部分溶込み溶接を行った。Fig. 2 は、アシストガスノズルを用い、各溶接速度におけるレーザパワーに対するビード断面を示す。溶接速度6.7 mm/s の場合、レーザパワー3.5~10 kW の範囲内では、ワインカップビードで余盛りビードを形成しているが、ボンド部にかなり大きなポロシティが発生している。溶接速度13.3 mm/s の場合、レーザパワーの増加とともに余盛りは生じなくなり、レーザパワー10 kW ではアンダーフィルビードとなっている。また、溶接速度26.7 mm/s の場合、ビード形状はくさび形で、スパッターが多く発生するため、すべてのビード表面にアンダーフィルが発生している。

Fig. 3 は、アシストガスノズルを用い、各溶接速度における、レーザパワーと溶込み深さ(h_p)の関係を示す。溶接速度6.7 mm/s の場合、レーザパワー10 kW で最大溶込み深さ20 mm が得られた。また、それぞれの溶接速度において、レーザパワーの増加とともにプラズマが発生し、その発生したプラズマがレーザパワーを吸収する作用が増大すること、および、ビームホール壁面にレーザ熱エネルギーが吸収されることの2つの作用によって穿孔に必要なエネルギーが減少するために、溶込み深さは直線的には増加せず、飽和する傾向にある。

Fig. 4 は、アシストガスノズルおよび同軸ガスノズル各々を用いた場合の、板厚4 mm ビードオンプレート溶接におけるビード形状に及ぼすレーザパワーと溶接速度の関係を示したものである。なお、同軸ノズルのガス圧(P)は40 mm aq. である。ガスノズルの違いによらず、得られたビード形状によって3つの領域に分けることが

Fig. 2 Bead cross sections of partial penetration bead at various laser powers and welding speeds used assist gas nozzle.

Fig. 3 Relation between penetration depth and laser power in various welding speeds used assist gas nozzle.

できる。まず、溶接速度に対するレーザパワー不足のため、板厚4 mm を貫通できずに部分溶込み溶接となるのが領域(I)である。次に、板厚4 mm を貫通し、アンダーフィルのできないビードになる領域(II)と、板厚4 mm を貫通するには過大なレーザパワーのため、スパッターなどが生じるため、表ビードがアンダーフィルになる領域(III)に分けることができる。これらの領域について、アシストガスノズルと同軸ガスノズルを用いた場合を比較すると、同軸ガスノズルを用いた場合、プラズマ除去が不十分のため、アシストガスノズルを用いた場合に比較して、溶込み深さが少し浅くなるため(I)の領域は高レーザパワー領域にずれる。また、アンダーフィルのないビードの得られる領域(II)は、溶接速度の低速域で高レーザパワー領域に広がるのがわかった。

Fig. 4 Bead shape regions determined by the welding speed and laser power.

Fig. 5 Full penetration bead cross sections at various laser powers and welding speeds used coaxial shield gas nozzle.

Fig. 5 は、同軸ガスノズルを用いた場合の、溶接速度とレーザパワーを変化させ、Fig. 4 における (II) のアンダーフィルの生じない貫通ビードの得られる領域で得られる溶接ビードの横断面を示したものである。溶接速度が速く、レーザパワーが高い場合、溶接ボンド部近傍にみられるポロシティの他に、ビード中央部に引け巣状の大きなポロシティが見られる。このビード中央部に生じる引け巣状の大きなポロシティは、溶接速度が遅くレーザパワーが低くなるにつれ発生しなくなり、ボンド部近傍にも大きなポロシティは発生していない。

Fig. 6 は、Fig. 4 における (II) のアンダーフィルの生じない貫通ビードの得られる領域で形成された溶接ビードの溶接欠陥 (ポロシティなど) の発生率 (= ビード横断面におけるマクロ的に見える溶接欠陥の総断面積/溶融断面積) について調べた結果を示したものである。計測方法は、ビード横断面を実体顕微鏡 (倍率 3 ~ 20 倍)

により観察し、コンピュータに画像を取り込み、画像処理をおこなったため、マクロ的に見える溶接欠陥のみ計測を行った。従来のアシストガスノズルを用いた場合には、ポロシティ発生率 (R_{sp}) が 10% 以上と大きな値を示しているが、これは炉中溶接という構造上の制約のため、アシストガスの溶融部への巻き込み現象が生じたため、このようにポロシティ発生率が大きくなっていると思われる。一方、同軸ガスノズルを用いた場合、ポロシティの発生は少なくなっており、入熱量を少なくするほどポロシティ発生率は小さくなっている。さらに、同じ入熱量でも溶接速度が遅いほどポロシティの発生率は小さくなる傾向にあり、今回の実験範囲ではポロシティの発生率を 4.5% まで抑えることができた。

3.2 溶接継手の曲げ強度に及ぼす溶接欠陥の影響

溶接部の強度評価を行うために、曲げ強度試験を JIS R 1601 に準拠し 4 点曲げ試験を行った。厚さ 4 mm の試

験片を用いて板幅40 mmの中央部に溶接を行い、溶接スタート部およびクレータ部等を除いて幅4 mm×長さ40 mmの曲げ試験片をダイヤモンドカッターで切り出した。切りだした試験片の上下面(ビード表面および裏面)は、平面になるように余盛りビードを研磨し、試験片の稜は丸めた。なお、試験はビード形状、ポロシティの分布状態を考慮し、表曲げ試験および裏曲げ試験を行った。

Fig. 7は、溶接速度10 mm/sおよび20 mm/sにおけるポロシティ発生率と曲げ強度(σ)の関係を示す。母材強度は200~300 MPaで、実線で示されている曲線は、焼結アルミナセラミックスにおいて一般的に用いられているDuckworthの実験式^{12,13)} ($\sigma = \sigma_0 \exp(-bR_{Sp})$; $R_{Sp} =$

Fig. 6 Bead cross section porosity ratio at various input powers and welding speeds.

Fig. 7 Relation between bending strength and porosity ratio used coaxial shield gas nozzle.

S_p/S , $\sigma_0 = 250 \text{ MPa}$, $b = 5$)であり、ポロシティの増加とともに曲げ強度は低下している。溶接速度10 mm/sの場合、裏曲げと表曲げとの強度の差はほとんどなく、ポロシティの増加とともに曲げ強度は低下する傾向にあり、Duckworthの実験式の傾向に沿ったデータ分布を示している。一方、溶接速度20 mm/sの場合、裏曲げと表曲げとは大きな強度の差が生じている。裏曲げ強度はほぼ母材強度と同程度の強度が得られているが、表曲げ強度は裏曲げ強度の約1/2の強度しか得られていない。

Fig. 8は、4点曲げ試験を行った結果、ビード断面中央部で破断した破断面のSEM写真を示す。溶接条件は、溶接速度20 mm/s、レーザパワー5 kWである。破断面上部には、激しい湯の変動、蒸発・スパッタリング等により溶接凝固時の湯不足によって生じた、引け巣状の大きなポロシティの発生が見られる。その壁面は、金属の場合のシュリンケージキャビティの壁面とも類似している。一方、破断面下部には、大きなポロシティなどは見られず、欠陥のない緻密な組織になっている。このことから、表曲げの場合、ビード断面上部に生じた引け巣の大き

Fig. 8 SEM photograph of fracture caused by bending test.

Fig. 9 Bead cross sections of butt weld bead used coaxial shield gas nozzle.

Fig. 10 Bending strength of butt weld bead at various laser powers used coaxial shield gas nozzle.

なポロシティにより応力集中が起こり、これが表曲げ強度の低下の要因になったものと思われる。アルミナセラミックスの溶接継手強度にはポロシティ、特にビード中央部に生じる引け巣状のポロシティが大きく影響を及ぼしているものと考えられる。

3.3 突合わせ溶接による溶接特性

板厚 4 mm の 2 枚の板を、同軸ガスノズルを用い突合わせ溶接を行った。Fig. 9 は、溶接速度 10 mm/s および 20 mm/s において、レーザーパワーを 2 ～ 6 kW に変化させた場合に得られるビード横断面を示したものである。突合わせ溶接においても、ビードオンプレート溶接とほぼ同様のビード形状が得られ、アンダーフィルは生じていない。ポロシティの発生は、同様にボンド沿いに見られる。また、溶接速度 10 mm/s においては、ビード中央部に生じる引け巣状のポロシティは発生していないが、溶接速度 20 mm/s においては、ビードオンプレート溶接と同様にビード中央部に生じる引け巣状の大きなポロシティが発生している。

Fig. 10 は、突合わせ溶接におけるレーザーパワーと曲げ強度の関係を示したものである。溶接速度 10 mm/s の場合、表曲げと裏曲げの強度の差はほとんどなく、レーザ

パワーの増加とともに曲げ強度は低下する傾向にある。溶接速度 20 mm/s の場合、ビード断面中央上部に引け巣状の大きなポロシティが生じているため、表曲げではビード中央部に生じる引け巣状の大きなポロシティによる応力集中のため強度は大きく低下したと思われる。裏曲げでは欠陥のない溶接ビード下部に引張応力がかかるため、応力集中が起こらず母材強度と同程度の強度が得られたものと思われる。

87% Al_2O_3 セラミックスをレーザーによる溶融溶接を行っても、適正な溶接条件を選べば、母材強度と同程度の強度が得られることがわかった。すなわち、溶接欠陥特にビード中央部に生じる引け巣状の大きなポロシティの発生の有無が、溶接継手強度に大きく影響することがわかった。

4. 結 論

厚板セラミックスの接合技術の確立を目的として、87% Al_2O_3 セラミックスの溶接への高出力 CO_2 レーザの適用を行い、各種溶接条件における溶接特性を調べた結果、次のことが得られた。

(1) 厚板下向溶接を可能にするためには、溶融ビード

を生成する必要がある、本研究ではレーザパワー10 kW、溶接速度6.7 mm/sにおいて溶込み深さ20 mmの溶融ビードが得られた。

(2) ポロシティの発生は溶接速度が低速で、入熱量の少ないほど少なく、また、ビード中央部に生じる引け巣状のポロシティの発生は、レーザパワーにあまり依存せず溶接速度が速いほど発生しやすい。

(3) 溶接継手強度に影響を及ぼす要因として、内部状態があげられ、特にビード中央部に生じる引け巣状のポロシティの大きさ、分布状態が強度低下の原因になる。

(4) 突き合わせ溶接において、裏曲げ強度はレーザパワーに関わらず、母材と同程度の強度が得られた。

(5) 継手強度を母材と同程度まで上げるためには、現在得られている4.5%のポロシティ発生率をさらに小さくする必要があり、そのためには、突き合わせ溶接部へのインサート材あるいは添加材などを開発し、ポロシティ等の溶接欠陥の発生を防止することが今後の課題となる。

参 考 文 献

- 1) N.A. Olshansky and V.M. Mesharekov: Electron-Beam welding of Ceramics, 2nd Inter. Conf. on Electron and Ion Beam Science and Technology (1966), 535-552.
- 2) J.G. Siekman and R.E. Morijn: The mechanism of Welding with a Sealed-off Continuous CO₂-Gas Laser, Phillips Res. Repts, 23 (1968), 367-374.
- 3) Y. Arata, H. Maruo, I. Miyamoto, S. Takeuchi: Dynamic Behavior of Laser Welding and Cutting, 7th Inter. Conf. on Electron and Ion Beam Science and Technology (1976), 111-128.
- 4) H. Maruo, I. Miyamoto and Y. Arata: CO₂ Laser Welding of Ceramics, 1st Inter. Laser Processing Conf. (1981).
- 5) 丸尾, 宮本, 上井, 荒田: セラミックスのレーザ溶接(第1報)ービード形状と溶接欠陥についてー, 本誌, 51-2(1982), 182-189.
- 6) 丸尾, 宮本, 井上, 荒田: セラミックスのレーザ溶接(第2報)ームライトセラミックス溶接継手の強度特性ー, 本誌, 51-8(1982), 672-679.
- 7) M. Tomie, N. Abe, T. Oda, S. Noguchi, Y. Arata: High Power CO₂ Laser Welding and Cutting of Ceramics, Trans. of JWRI, 18-1 (1989), 37-41.
- 8) 富江, 阿部, 小田, 野口, 荒田: 高出力CO₂レーザによるセラミックスの切断, 溶接(第1報), 高温学会誌, 16-2(1990), 99-104.
- 9) M. Tomie, N. Abe, T. Oda, S. Noguchi, Y. Arata: High Power CO₂ Laser Welding of Al₂O₃ Ceramics, Trans. of JWRI, 21-2 (1992), 173-179.
- 10) Y. Arata, N. Abe, T. Oda: Some Fundamental Beam Hole Behaviour during Ultra High Energy Density Beam Welding, IIW Doc., IV-374-84 (1984).
- 11) Y. Arata, N. Abe, T. Oda: Das Laser-Schweißen von Aluminium und Alu-Legierung, Trans. of JWRI, 16-2 (1987).
- 12) R.L. Coble and W.D. Kingery: Effect of Porosity on Physical Properties of Sintered Alumina, J. of the American Ceramic Soc., 39, 11 (1956) 377-85.
- 13) Discussion of Ryshkewith Paper by W. Duckworth: J. of the American Ceramic Soc., 36, 2 (1953).