

# 大出力炭酸ガスレーザーによるアルミナセラミックスの 溶接

## *High Power CO<sub>2</sub> Laser Welding of Alumina Ceramics*

野口修一\* 阿部信行\*\*

Shuichi Noguchi Nobuyuki Abe

(1999年9月6日 受理)

Fundamental characteristics of high power CO<sub>2</sub> laser welding of 87% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics were investigated in order to develop a joining technique for thick ceramics. It was found that a penetration depth of 20 mm was 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 power, and there was a tendency for the porosity ratio to further decrease as the welding speed decreased 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 influence greatly the bending strength of welded joints of alumina ceramics. The root bending strength of butt weld of the 4 mm thick plate had the same value as the base material.

キーワード：大出力炭酸ガスレーザー，レーザー溶接，同軸シールドガスノズル，アルミナセラミックス，溶込み深さ，貫通溶接，アンダーフィル，曲げ強さ，ポロシティ

### 1. 緒言

セラミックスは、耐熱性、耐食性、耐摩耗性などの点で、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。しかし、セラミックスは硬くて脆いため、金属材料に比べ加工性が悪く、その加工技術は材料開発の進展に対して十分追随し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、こうした熱加工に用いる熱源としては電子ビーム<sup>1)</sup>、レーザー<sup>2)</sup>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ーによる熔融溶接法<sup>3-9)</sup>がある。この方法により、金属材料と同様に熔融溶接ができれば、接合部が母材と連続であり、適用範囲も限定されず、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、厚板セラミックスを溶接構造材料として扱うことのできる接合技術の確立を目的として、大出力CO<sub>2</sub>レーザーを用い溶接ビード特性を調べた。

### 2. 実験方法および供試材

溶接には、定格出力 15kW の CO<sub>2</sub> 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、アラタレーザー収束システム A 型<sup>10)</sup>（F10，スポット径：約 0.8mm）を使用して、a<sub>0</sub> 値（=試料位置/焦点位置）0.997 および 1.006 で溶接を行った。溶接用ノズルには、プラズマ除去の効果は少なくなるが、レーザー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主として用いたが、溶接ビード特性を調べる実験では、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<sup>11)</sup>を用いた場合との比較検討も行った。アシストガスの流量は 0.18l/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ー溶接する場合、全く予熱せずに溶接を行ったり、予熱温度が低すぎると、レーザーを照射した瞬間

\* 生産技術部レーザー加工グループ

\*\* 大阪大学接合科学研究所

に熱衝撃により割れが生じる。そこで、図1に示すように、炉の側面より挿入したガスバーナで試料裏面を加熱することにより、レーザを照射しても割れの発生しない温度( $T_p=1300K$ )<sup>9)</sup>まで試料を均一に予熱し、炉中溶接を行った。なお、ノズルが炉の中を走行できるように炉の上部は開放構造になっている。溶接終了後、試料を1300Kに保持しながら溶接炉から電気炉に移し換え、1300Kで1時間保持した後、1時間に100Kの割合で室温まで徐冷した。

本実験に用いたセラミックスは87%  $Al_2O_3$ セラミックスで、その組成を表1に示す。試料の寸法は、炉の大きさによる制約のため、長さ80mm、幅40mmで、板厚は4~20mmのものを用いた。また、突合わせ溶接には、幅20mmのものを2枚突き合わせて溶接を行った。

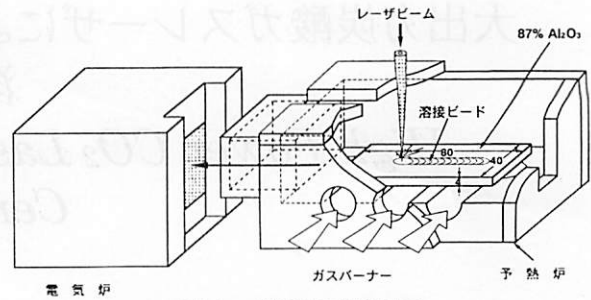


図1 装置の概略図  
Schematic diagram of welding system

表1 供試材の化学組成  
Chemical composition of 87%  $Al_2O_3$ .

	$Al_2O$	$SiO_2$	$MgO$	$CaO$
87% $Al_2O_3$	87	10	2	1

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 各種溶接条件によるビード特性 (ビードオンプレート)

大出力レーザによる溶接特性を調べるために、溶接速度( $v_b$ )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。図2は、アシストガスノズルを用いた場合の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6.7mm/sの場合、レーザパワー3.5~10kW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、ポンド部はかなり大きなポロシティが発生している。溶接速度13.3mm/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、10kWで

はアンダーフィルビードとなっている。また、溶接速度26.7mm/sの場合、ビード形状はくさび形で、スパッタ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。

図3は、アシストガスノズルを用いた場合の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6.7mm/sの場合、レーザパワー10kWで最大溶込み深さ20mm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にともないプラズマが発生し、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

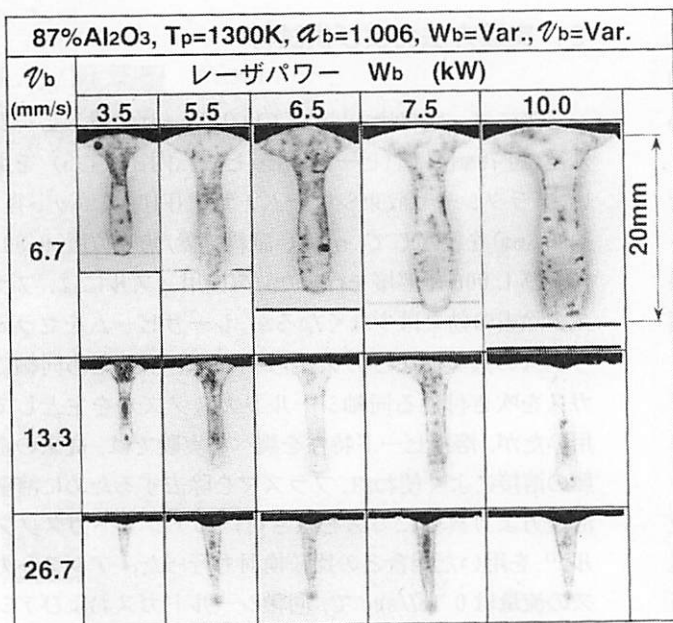


図2 部分溶込み溶接における溶接ビード特性  
Cross sections of partial penetration bead at various laser powers and welding speeds used assist gas nozzle.

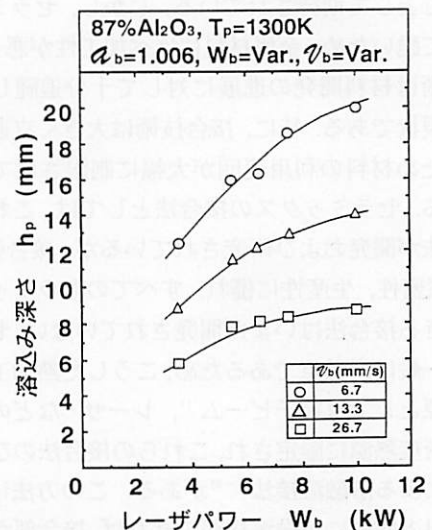


図3 各種溶接速度におけるレーザパワーと溶込み深さの関係

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

には増加せず、飽和する傾向にある。

図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4mmの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ー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40mm aq.である。レーザーパワーと溶接速度の関係はガスノズルの違いにかかわらず、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できる。まず、溶接速度に対してレーザーパワーが不足するため、板厚4mm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4mmを貫通するが、アンダーフィルが生じないビードになる領域(II)と、板厚4mmを貫通するには過大なレーザーパワーのため、スパッタなどが生じて、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なため、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り(I)の領域は高レーザーパワー側にずれる。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ーパワー側に広がることがわかった。

図5は、貫通ビードが得られしかもアンダーフィルの生じない領域(II)において、溶接速度とレーザーパワーを変化させて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、レーザーパワーが高い場合、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

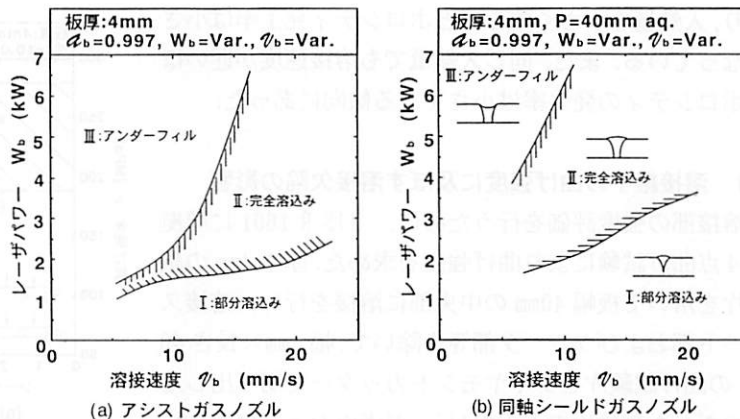


図4 アシストガスノズルおよび同軸シールドガスノズルを用いた板厚4mmの溶接ビード特性  
Bead shape regions determined by the welding speed and laser power.

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、溶接速度およびレーザーパワー共に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。

図6は、図5と同じ領域(II)において得られる溶接ビードについて、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)を示したものである。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

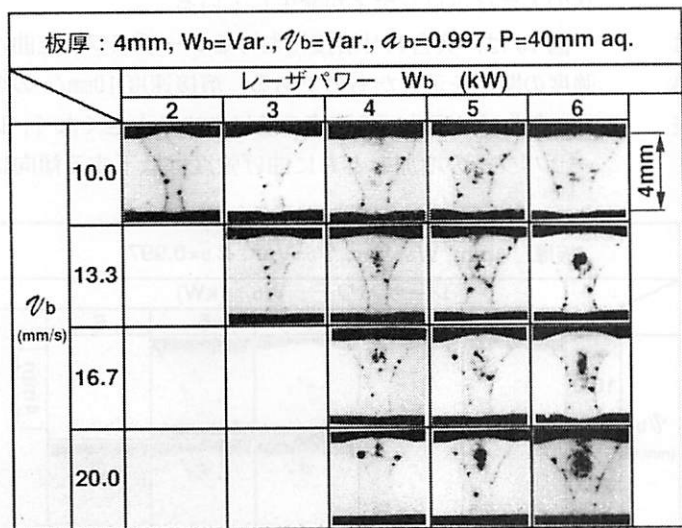


図5 板厚4mmの貫通溶接における溶接ビード特性  
Full penetration bead cross sections at various laser powers and welding speeds used coaxial shield gas nozzle.

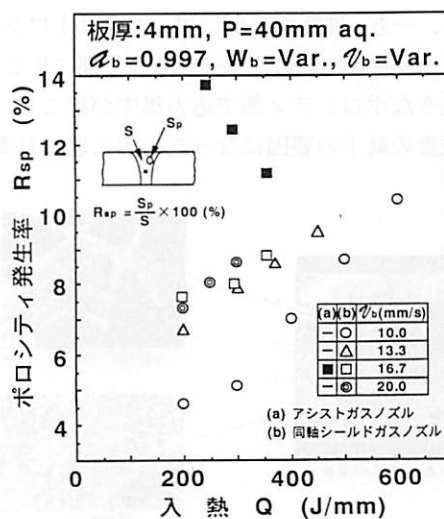


図6 入熱量とポロシティ発生率  
Porosity ratio at various input powers and welding speeds.

おり、入熱量を小さくするほどポロシティ発生率は小さくなっている。また、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った。

(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、JIS R 1601 に準拠し4点曲げ試験により曲げ強度を求めた。厚さ4mmの試験片を用いて板幅40mm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4mm×長さ40mm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削除し、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、表曲げおよび裏曲げ試験を行った。

図7は、溶接速度10mm/s および20mm/sにおけるポロシティ発生率と曲げ強度( $\sigma$ )の関係を示す。母材強度は190~280MPaで、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10mm/sの場合、裏曲げと表曲げとで強度の差はあまりなく、共に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る。一方、溶接速度20mm/sの場合、裏曲げと表曲げとでは大きな強度差が生じている。裏曲げの場合母材強度とほぼ同程度の強度が得られているが、表曲げでは裏曲げ強度の約半分程度の強度しか得られていない。

図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20mm/s、レーザパワー5kW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る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、金属の場合にみられるシュリンケージキャビティの壁面に類似している。一方、破断面下部には、大きなポロシティ等とはから、表曲げの場合、ビード断面上部に生じた引け巣状の大きなポロシティ部で応力集中が起こり、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

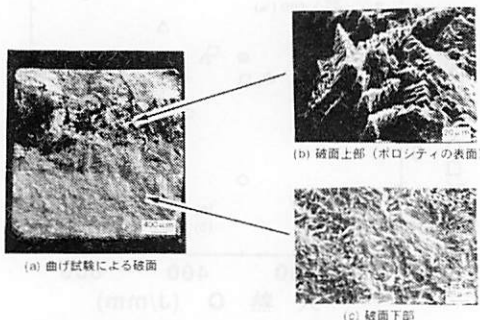


図8 曲げ試験による破断面のSEM写真  
SEM photograph of fracture surface caused by bending test.

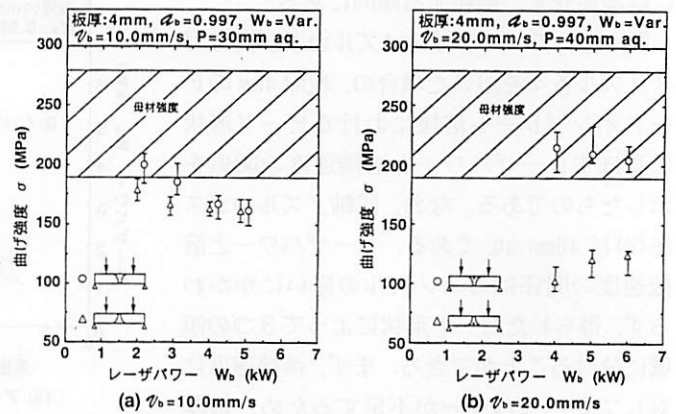


図7 ポロシティ発生率と曲げ強さの関係  
Relation between bending strength and porosity ratio used coaxial shield gas nozzle.

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) 突合わせ溶接による溶接特性

板厚4mmの2枚の板を、同軸ガスノズルを用いて突合わせ溶接を行った。図9は、溶接速度10mm/s および20mm/sにおいて、レーザパワーを2~6kW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、この条件範囲ではビードオンプレート溶接と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、同様にポンド沿いに見られる。また、溶接速度10mm/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20mm/sの場合は、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。

図10は、突合わせ溶接におけるレーザパワーと曲げ強度の関係を示したものである。溶接速度10mm/sの場合、表曲げと裏曲げの強度の差はあまり小さくなく、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

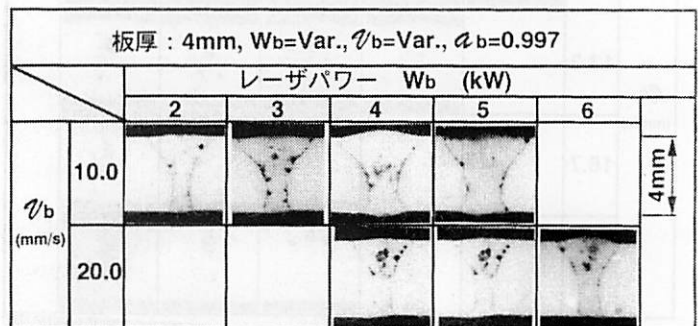


図9 突合わせ溶接におけるビード横断面  
Cross sections of butt weld bead used coaxial shield gas nozzle.

ある。一方溶接速度 20mm/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部での応力集中のため強度は大きく低下したと思われる。これに対して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、応力集中は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。

以上で示したように、87%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>セラミックスをレーザーにより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ため、セラミックスの溶接にレーザーを適用するにけ、この引け巣状の大きなポロシティが発生しないようにしなければならない。そのためには、突合わせ溶接部へのインサート材あるいは添加材などの開発等を通じて、溶接欠陥をさらに防止していくことが今後の課題である。

#### 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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>セラミックスの溶接へ高出力 CO<sub>2</sub> レーザを適用し、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) レーザパワー10kW、溶接速度 6.7mm/s において板厚 20mm の溶融ビードの生成によって下向き溶接の可能性を示した。
- (2) ポロシティの発生は溶接速度が低く、入熱量が小さいほど少なく、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、レーザーパワーにはあまり依存せず溶接速度が速いほど発生しやす。
- (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) 突合わせ溶接において、裏曲げ強度はレーザーパワーに関わらず、母材と同程度の強度が得られた。

#### 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, 535-552 (1966)
- 2) J. G. Siekman and R. E. Morijn: The mechanism

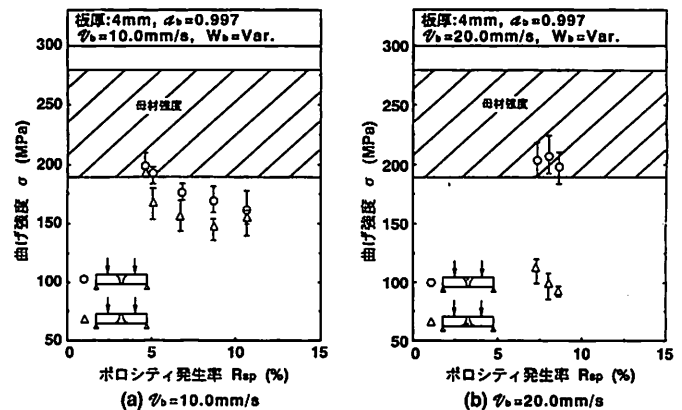


図 10 突合わせ溶接における曲げ強さ  
Bending strength of butt weld bead at various laser power used coaxial shield gas nozzle.

of Welding with a Sealed-off Continuous CO<sub>2</sub>-Gas Laser, Phillips Res. Repts, 23,367-374 (1968)

- 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, 111-128 (1976)
- 4) H. Maruo, I. Miyamoto and Y. Arata: CO<sub>2</sub> Laser Welding of Ceramics, 1st Inter. Laser Processing Conf. (1981)
- 5) 丸尾, 宮本, 井上, 荒田: セラミックスのレーザー溶接 (第 1 報) - ビード形状と溶接欠陥について -, 溶接学会誌, 51-2, 182-189 (1982)
- 6) 丸尾, 宮本, 井上, 荒田: セラミックスのレーザー溶接 (第 2 報) - ムライトセラミックス溶接継手の強度特性 -, 溶接学会誌, 51-8, 672-679 (1982)
- 7) M. Tomie, N. Abe, T. Oda, S. Noguchi, Y. Arata: High Power CO<sub>2</sub> Laser Welding and Cutting of Ceramics, Trans. of JWRI, 18-1, 37-41 (1989)
- 8) 富江, 阿部, 小田, 野口, 荒田: 高出力 CO<sub>2</sub> 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, 99-104 (1990)
- 9) M. Tomie, N. Abe, T. Oda, S. Noguchi, Y. Arata: High Power CO<sub>2</sub> Laser Welding of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramics, Trans. JWRI, 21-2, 173-179 (1992)
- 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 Aluminum und Alu-Legierung, Trans. JWRI, 16-2 (1987)