

TiO₂セラミックスの YAG レーザー切断加工とその機械的特性

堀口勝三*¹・森山実*²・三尾敦*³

YAG-laser machining of TiO₂ ceramics and its mechanical property

HORIGUCHI Katsumi, MORIYAMA Minoru and MIO atsushi

Single-shot processing and cutting processing were performed on both CIP and HIP-treated TiO₂ ceramics using YAG laser, and the basic mechanical properties by the processing were investigated.

Increasing the pulse height and pulse width of the machining shot pulse increases the laser beam power and energy, and basically increases the diameter and depth of the beam hole. This relationship holds true for CIP-treated TiO₂, but it is not always true for HIP-treated high-density products, which sometimes cracked.

In cutting processing, the hardness of the machined surface was maintained at about 80% of that of the non-machined surface. The surface roughness of the machined surface was greatly deteriorated.

キーワード : TiO₂, YAG laser, machining, mechanical property

1. 緒 言

セラミックスは、一般に融点や結合力が高く、高硬度、低破壊靱性を有する難加工性の材料である¹⁾。もし、レーザーを用いて加工できるならば、加工に要する時間は大幅に短縮でき、また、任意の形状に加工できるので、経済性に加えて工業的用途も大きく拡大できると予想される。実際のセラミックス加工例は、延性材料である金属関係が圧倒的に多いが、脆性材料であるセラミックス関係では、ZrO₂, Al₂O₃, Si₃N₄, 水晶など一部のセラミックスが行われている。

レーザー加工^{2)~9)}は、比較的高いエネルギーを必要とすることから、工業的には一般に炭酸ガス(CO₂)レーザー、YAG レーザー、ファイバーレーザー、エキシマレーザーが用いられている。また、レーザー加工は、溶接、切断、穴あけ、マーキング(印字)などができる^{3) 4)}。

本研究では、セラミックスについてのレーザー加工のうち、YAG レーザーによる TiO₂(チタニア)セラミックスの切断加工に的を絞る、自作の CIP(Cold

isostatic pressing, 冷間等方圧)処理した TiO₂ 常圧焼結体(CIP-TiO₂)、および、市販されている HIP(Hot isostatic pressing, 熱間等方圧)処理した TiO₂ 高密度焼結体(HIP-TiO₂)の 2 種類について、加工特性を調査した。TiO₂セラミックスに関する YAG レーザー加工の詳細については、報告例が見当たらない。

2. 実 験

2-1 試料の作製

まず、自作した CIP-TiO₂ 試料の製作工程は、以下の通りである。TiO₂ 主原料粉末は、平均粒径 0.25 μ m の石原産業製 PT-201、焼結助剤として、平均粒径 0.4 μ m の住友化学工業製易焼結 Al₂O₃ 粉末 AES-12 を用いた。

表 1 に示すように、TiO₂ を 98mol%、Al₂O₃ を 2mol%含む計 400g の粉末を計量し、ナイロン製ポットに入れ、さらに蒸留水 280g と 2 種類の水系バインダー(中京油脂製セルナ WF-610 を 40g および WF-804 を 32g)を加えて、ボールミル装置により 24 時間混合・粉碎し、スラリーを作製した。スラリーを約 1 週間自然乾燥後、乳鉢を用いて粉碎し、ふるいを通して、直径 70~100 μ m 程度の顆粒(granule)を作製した。

試料を所定量金型に詰め、98MPa(プレス全圧は 48.3 \times 36.1mm の加圧成形面に対して 171kN)でハン

*1 工学科機械ロボティクス系教授

*2 長野工業高等専門学校名誉教授

*3 技術支援部 技術長

原稿受付 2023 年 5 月 19 日

表 1 CIP-TiO₂の主原料, 焼結助剤の含有量と粉末量

含有量[mol%]		含有量[mass%]		粉末量[g]	
TiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Al ₂ O ₃
98.00	2.00	97.46	2.54	389.84	10.16

表 2 CIP-TiO₂ 試料の成形と焼成に関する主要項目

理論密度 [kg/m ³]	複合体系理論密度 4242.98kg/m ³ *1 (組成: 98mol%TiO ₂ +2mol%Al ₂ O ₃)
金型形状 と体積 予備成形	形状① (単発ショット加工用) 4.0×48.3×36.1 (4.0×40×30)*2 mm 体積 6974.5 mm ³ 成形圧 98MPa (全圧 171kN) 粉末量 29.592 g/個 作製数 4 個
	形状②(切断加工, 曲げ強度測定用) 7.2×48.3×36.1 (7×40×30)*2 mm 体積 12554.1 mm ³ 成形圧 98MPa (全圧 171kN) 粉末量 53.266 g/個 作製数 2 個
CIP 処理	CIP(冷間等方圧成形) 200MPa
常圧焼結	大気中 1500°C×60min,
供試験片	約 4×4×30(単発ショット加工用) 約 7×4×30(切断加工用, 曲げ強度試験用)

*1: TiO₂: の理論密度 4250(ルチル型), Al₂O₃: の理論密度 3990(コランダム型)として複合則より算出した。

*2: ()内は, 焼成後の概略寸法を示す。

表 3 HIP-TiO₂ 試料(日本セラテック製ポアフリー-HPF)の特性(カタログ値)

密度 4200kg/m ³ , 焼成体寸法 4×40×40 mm/枚 2枚 試験片切出し寸法 4×4×40 特性 硬度 Hv10GPa, 曲げ強度 300MPa ヤング率 330GPa, 破壊靱性値 3.0MPa・m ^{1/2} 電気伝導度 10.0S/m
--

ドプレス成形した。次に, プレス成形後の試料をビニール袋に真空パックし, 200MPa の圧力で CIP(冷間等方圧成形)成形をした。その後, 電気炉を用いて, 大気中で 600°Cまで 10 時間かけてゆっくり加熱し, 脱バインダー処理を行なった。

焼成は, 箱形電気炉を用いて, 大気中 1500°Cで 1 時間保持し, 常圧焼結した。このとき, 試料は, 粗粒の Al₂O₃粉末中に埋め, 温度のむらが生じないように配慮した。ダイヤモンドカッター式切断機を用いて板状試験片から厚さ約 4mm にスライスし, レーザースポット加工用, レーザー切断加工用および曲げ強度測定用の供試験片とした。試験片表面の研磨には, 粒径約 1μm のダイヤモンドスラリーを用いた。以上, 表 2 に, CIP-TiO₂ の試料作製に関する主要項目を記す。

HIP-TiO₂ の試料に関しては, 4×40×40mm サイズの高密度焼成品板材を入手し, これを厚さ 4mm にスライスし, CIP-TiO₂ の場合と同じく, レーザー加工用および曲げ強度測定用の供試験片とした。表 3 に,



図 1 YAG レーザ加工装置(住友重機械製 JK702H 型)

表 4 住友重機械工業製 YAG レーザー JK702H 型

基本動作	スポット溶接, 高速シーム溶接, 切断, 穴あけ加工
レーザー発振機	波長 1.06μm (近赤外線領域) パルス発振機 最大平均出力 350W, 最大ピーク出力 4.5kW パルス波 最大繰返し数 500pps, パルス幅 0.5~20ms
加工の目安	①板厚 1mm の鋼, SUS 鋼板の スポット及びシーム溶接 ②板厚 0.5~5mm の鋼, SUS 鋼板の 切断加工及び穴あけ ③板厚 1mm の構造用セラミックスの切断

主要項目を示す。

2-2 YAG レーザー加工条件

YAG(Yttrium-Aluminium-Garnet) レーザー (laser: light amplification by stimulated emission of radiation)は, 固体のイットリウム・アルミニウム・ガーネット単結晶にネオジウム (Nd³⁺) をドープしたもので, 外部から強い光で励起して位相の揃った強いレーザー光を発振させる。実験に用いた YAG レーザー加工装置(住友重機械製 JK702H 型)の外観と性能の概略を図 1 および表 4 に示す。加工ガスは, Ar 不活性ガスを用いた。

レーザー加工は, 図 2 に示すように, YAG レーザービームを材料にパルス状に照射して微細な穴をあけ, 単パルスによる単発レーザーショット加工や複数連続パルスによる連続レーザーショット切断加工を行った。

加工平均出力 P_{av} は, 1 秒当たりに放出されるエネルギーの総和で表し, 次式で示される。

$$P_{av} = R \cdot E \quad [W] \quad (1)$$

ここで, E はパルスエネルギーで, 1 パルスあたりに放出されるエネルギー [Joule/pulse] であり, 縦軸に電力, 横軸に時間で表した場合, 図 2 中の橙色の面積(出力電力 P_k [W] × パルス照射時間 N [sec])に相当するエネルギー量となる。出力電力の高さ P_k は, Pulse

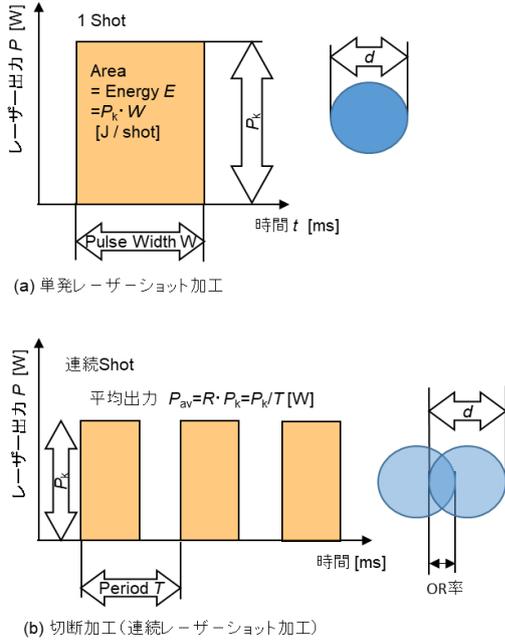


図2 パルスレーザー加工

表5 単発ショット加工のYAGレーザー照射条件

実験記号	Pulse Height [%]	Pulse Width [ms]	R (Rate) [Hz]	Shot 数	Output Power [W]	Energy [J]
H-1	43.0	2.0	25	1	20	0.83
H-2	45.5	2.0	25	1	40	1.65
H-3	46.8	2.0	25	1	60	2.40
H-4	48.1	2.0	25	1	80	3.25
PW-1	46.8	2.0	25	1	60	2.45
PW-2	46.8	2.2	25	1	83	3.36
PW-3	46.8	2.4	25	1	102	4.10
PW-4	46.8	2.6	25	1	112	4.46
S-1	46.8	2.0	25	1.2.3.4	60	2.45
S-2	46.8	2.5	25	1.2.3.4	110	4.30

表6 連続ショット切断加工のYAGレーザー照射条件
(共通条件: Pulse Height 46.8%, Pulse Width 2.0ms)

No.	OR [%]	R (Rate) [Hz]	連続 Shot 数	Output Power [W]	Energy [J]	送り速度 [mm/min]
Cut90	90	25	1	約60	2.40	22.5
Cut80	80	25	1	約60	2.40	45.0
Cut70	70	25	1	約60	2.40	67.5
Cut60	60	25	1	約60	2.40	90.0

Hight[%]で調整する。Pulse Width (パルス幅) W は1パルスの継続照射時間[sec], R はパルス繰返し数(Rate)で、1秒当たりのパルス数[Hz]である。(b)に示すように、連続パルスによる切断加工の場合、パルス周期を T [sec]とすると、 $R = 1/T$ [Hz]の関係がある。

2-2-1 単発レーザーショット加工

2種類のTiO₂素材に対して、以下の①～③の加工を行い、加工に伴う基礎的データを調べた。表5に、単発レーザーショット加工の試験条件一覧を示す。

①Pulse Height (パルスエネルギー) の影響(表5の

H-1～H-4)

Pulse Width は 2.0ms で一定のまま Pulse Height [%]を4段階に設定して1ショット分照射し、ビーム加工穴径、加工深さを測定した。ビーム断面形態も光学顕微鏡や走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて観察した。

②Pulse Width の影響(表5のPW-1～PW-4)

Pulse Height を 46.8%(H-3の条件)で一定にし、Pulse Width を4段階に設定して1ショット分照射し、ビーム加工穴径、加工深さを測定した。ビーム断面形態も光学顕微鏡などを用いて観察した。

③Shot 数の影響(表5のS-1～S-2)

Pulse Height 及び Pulse Width を一定とし、ショット数を変えて同じ位置に繰返し照射して、ビーム加工穴径、加工深さを測定した。ビーム断面形態も光学顕微鏡などを用いて観察した。

試験片1本に対して、同一条件で2～3箇所位置を変えて照射し、すべて4mmの厚さ方向に向けてビームをショットした。

2-2-2 連続レーザーショット切断加工

切断加工の場合は、1秒間に25回のパルスを繰返し発信して単発レーザーショット加工を行いながら、それと同時に材料テーブルを速度 V で移動させ、連続レーザーショット加工による切断加工を行う。図2(b)に示すように、直径 d の加工穴が次々と繋がり、材料を切断できる。オーバーラップ率 OR は、隣合う直径 d のビームの重なり部分の長さを直径 d に対する割合[%]で示し、 OR 率が0%のとき隣合うビーム穴どうしは接する状態、100%のとき穴どうしが完全に重なる状態となる。テーブル移動速度 V は、基本的に OR 率により決まり、次式に示す関係がある。

$$V = 60 \cdot d \cdot R \left(1 - \frac{OR}{100}\right) \quad [\text{mm/min}] \quad (2)$$

ただし、 V : テーブル速度[mm/min], d : レーザービーム径(通常0.15mmと仮定), R : (Rate, ショット繰返し周波数)[Hz](25Hz), OR : オーバーラップ率[%]である。

実験では、表6に示すように、それぞれのセラミックスについて、最適加工レーザービーム条件で連続加工した。 OR (Overlap)率を90から60%まで変えて、切断加工を行った。

特性は、加工面のビッカース硬度、曲げ強度、表面粗さ、電気伝導度(体積電気伝導度)を測定した。

2-3 特性測定

密度は、試験片の体積と質量をマイクロメータと電子天秤を用いて計測し、質量/体積の値を求めて算

出した。

ビッカース硬度は、対面角が 136 度のダイヤモンド四角錐圧子を用い、試験面に圧痕をつけたときの試験荷重と圧痕の対角線長さから次式を用いて算出した。

$$Hv = \frac{1.8544}{d^2} P \quad [\text{Pa}] \quad (3)$$

ただし、 Hv : ビッカース硬度[Pa], P : 試験荷重[N] (0.49N), d : 圧痕の対角線の長さの平均値[m]である。各試料それぞれで 10 点ずつ測定し、各々の平均値をビッカース硬度とした。

曲げ強度は、JIS R 1601 に準じて、3 点曲げ強度試験(抗折強度試験)を行い、次式より曲げ強度を求めた。

$$\sigma_{B3} = \frac{3PL}{2WH^2} \quad [\text{Pa}] \quad (4)$$

ただし、 P : 荷重[N], L : 下部支点間距離[m], W : 試験片の幅[m], H : 試験片の高さ[m]である。

表面粗さは、触針式表面粗さ計(ミツトヨ製サーフテスト SV-400)を用いて平均粗さ Ra を測定した。

電気伝導度は、4 端子法¹⁰⁾を用いて、次式より体積電気伝導度を求めた。

$$\sigma_E = \frac{1}{\rho} = \frac{l}{RA} = \frac{Il}{VA} \quad [\text{S/m}] \quad (5)$$

ここで、 σ_E : 電気伝導度[S/m], ρ : 体積抵抗率[Ωm], I : 電流値[A], V : 電圧値[V], A : 試験片断面積[m²], l : スパン長[m]である。

加工径と加工深さは、光学顕微鏡を用いて、試料表面の穴径、試料断面の加工穴径及び加工穴深さを測定した。

加工表面および断面組織の観察は、超音波洗浄後走査型電子顕微鏡(日本電子製 JSM-5200 型)により行った。

3. 結 果

3-1 焼結体の基本的特性

CIP-TiO₂ の密度は、98mol%TiO₂+2mol%Al₂O₃ 組成の複合体理論密度 4242.98kg/m³ に対し、嵩密度 3955±5.6kg/m³, 相対密度 93.2±0.13[%]であった。HIP-TiO₂ は嵩密度 4179±38.1 kg/m³ であり、組成が明示されていないが、複合体理論密度も同じ値と仮定すると、相対密度は 98.5±0.90%となる。

3 点曲げ強度は、CIP-TiO₂: 159.6±28.9MPa, HIP-TiO₂: 232.7±34.9MPa であった。

電気伝導度は、CIP-TiO₂: 1.2×10⁻⁵S/m, HIP-TiO₂: 197.6±4.01S/m であった。両者にかかなりの差があり、HIP-TiO₂ は導電性と言える。

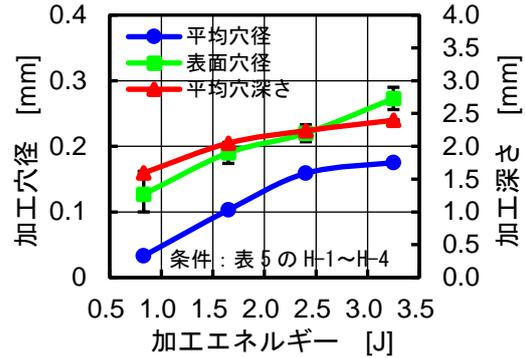


図3 CIP-TiO₂における Pulse Hight の影響

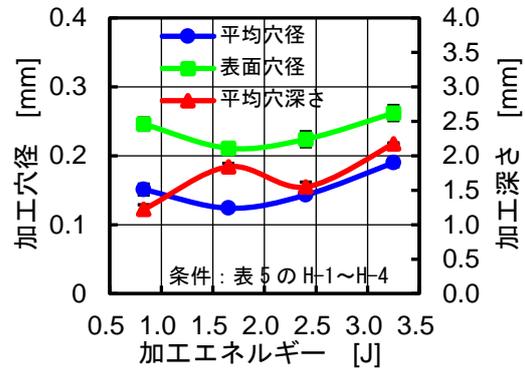


図4 HIP-TiO₂における Pulse Hight の影響

3-2 単発レーザーショット加工

2-2 節および表 5 に示す単発レーザー加工に基づく結果について示す。

①Pulse Hight の影響(表 5 の H-1~H-4)

CIP-TiO₂ および HIP-TiO₂ における Pulse Hight の影響を、図 3 および図 4 に示す。横軸は、Pulse Height に比例した量である加工エネルギーで示した。Pulse Width が 2.0ms で一定なとき、Pulse Height が大きくなるほど出力電力(Output Power)及びビームエネルギーは大きくなり、エネルギーに比例して、加工表面の穴径、素材中の加工平均穴径、および、平均加工穴深さも増加した。平均穴径はエネルギーにより変わるが、およそ 0.15~0.20mm である。加工穴深さは、エネルギーと直線的な比例関係にあるのではなく、むしろエネルギーの平方根に比例する特性に近い。特に HIP-TiO₂ においては、比例関係があるとは言えない特性であった。

②Pulse Width の影響(表 5 の PW-1~PW-4)

Pulse Width の影響を、図 5 および図 6 に示す。Pulse Height を一定とし、Pulse Width を変化した場合も Output Power やエネルギーが変わるが、CIP-TiO₂ の場合、加工穴径と加工深さはエネルギーに比例して増加傾向を示した。一方、HIP-TiO₂ の場合、

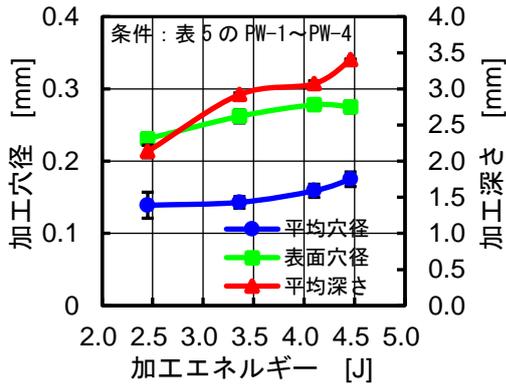


図5 CIP-TiO₂における Pulse Width の影響

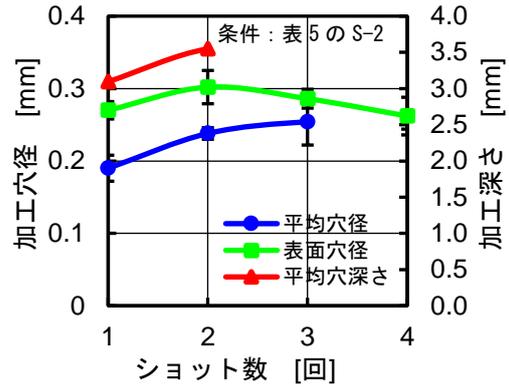


図9 CIP-TiO₂におけるショット数の影響

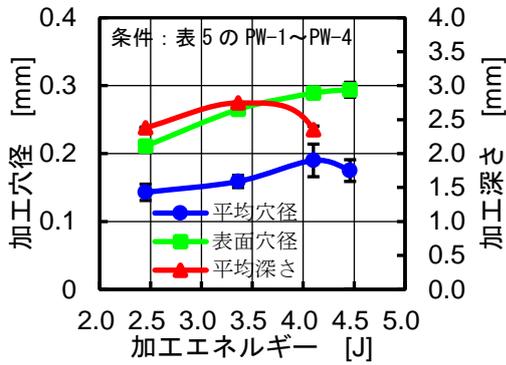


図6 HIP-TiO₂における Pulse Width の影響

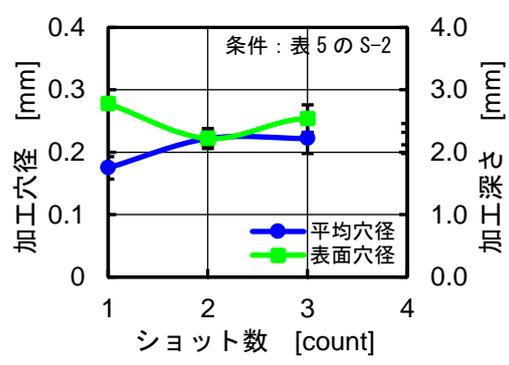


図10 HIP-TiO₂におけるショット数の影響

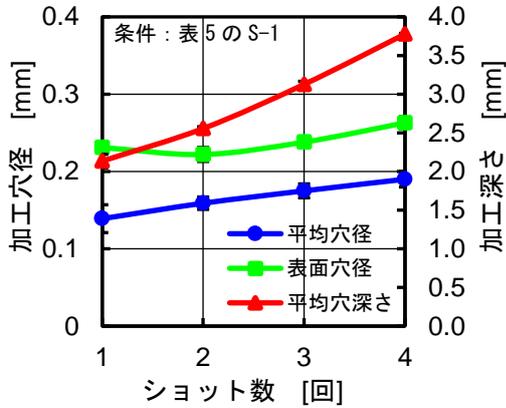


図7 CIP-TiO₂におけるショット数の影響

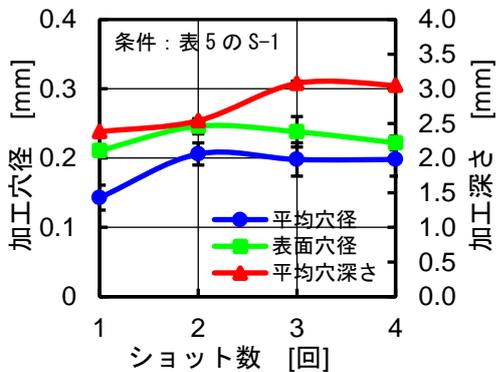


図8 HIP-TiO₂におけるショット数の影響

加工穴径は増加傾向にあったが、加工穴深さは、3.36[J]のとき 2.75mm で最高値を示した。

③ショット数の影響(表5のS-1～S-2)

同じ位置でショットを複数回重ねた場合、その影響を図7～図10に示す。図7と図8はS-1条件の場合で、Pulse Widthが2.0ms、エネルギーは2.45Jのショット、図9と図10はS-2条件の場合で、Pulse Widthが2.5ms、エネルギーは4.30Jのショットのときである。

S-1条件でCIP-TiO₂の場合、図7に示すように、ショット数に比例して加工穴径および加工穴深さは増加した。4ショットのとき、平均穴径は0.19mm、加工穴深さは3.79mmに達した。一方、HIP-TiO₂の場合、図8に示すように、ショット数に比例した特性は2あるいは3ショットまでで、その後は飽和に達する特性を示した。HIP処理した高密度品では、加工穴深さは3mm程度で飽和した。

S-2条件のハイパワービームの場合、図9に示すように、CIP-TiO₂では2ショットまでは加工できたが、3、4ショットでは割れなどが発生し、加工穴深さなどが測定不能となった。また、図10に示すように、HIP-TiO₂でも、割れやひびが発生し、加工穴深さは不明瞭になった。加工エネルギーが高すぎると、素材

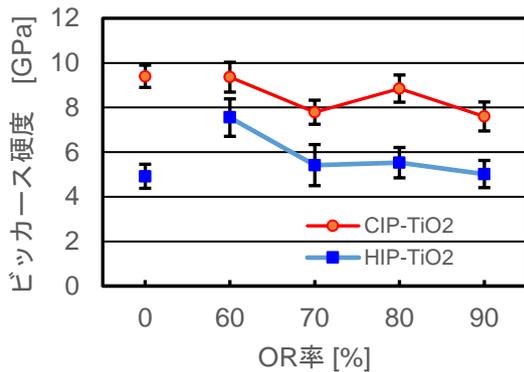


図11 連続ショット切断加工における加工面硬度の変化

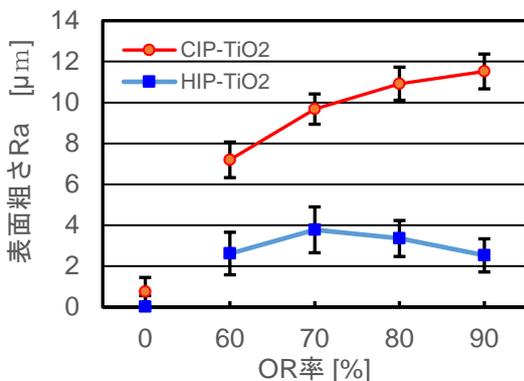


図12 連続ショット切断加工における表面粗さの変化

に割れが発生し易くなり、むしろ加工エネルギーを抑えた状態の方が適していることが分かる。

3-3 連続レーザーショット切断加工

表6に示すように、OR率を60、70、80、90%に設定して連続切断加工を行った場合の特性結果を以下に記す。

①硬度特性

図11に、ビッカース硬度の変化を示す。横軸はOR率で示したが、0%はレーザー加工を行っていない場合の特性値を示す。Rateが25Hzで一定の場合、加工送り速度は、60%では大きく、90%では小さくなる。ビッカース硬度は、CIP-TiO₂の場合が7.6～9.4GPaと全般的に高く、OR率による依存性は小さかった。OR率が低い方が、すなわち、加工送り速度が大きいほうが、若干高い硬度を示す傾向があった。HIP-TiO₂の場合、硬度が4.9～7.6GPaと全体的に低い値を示し、OR率による依存性も小さかった。

②表面粗さ特性

図12に表面平均粗さRaの変化を示す。表面粗さは、レーザー加工により大きな影響を受け、CIP-TiO₂では、加工前の0.75μmから、加工後の7.2～11.5μm

に約1桁粗くなった。HIP-TiO₂の場合は、加工前の0.021μmから加工後の2.53～3.78μmに約2桁粗くなったが、Ra値そのものは、CIP-TiO₂の場合と比較して50%以下の値を示した。

4. 考 察

4-1 単発レーザーショット加工の組織観察

図13に、単発レーザーショット加工において共通の条件を持つH-3のケースについてSEM観察結果を示す。(a)～(d)はCIP-TiO₂に関する組織、(e)～(h)はHIP-TiO₂に関する組織を示し、(a)と(e)：加工前組織、(b)と(f)：レーザービーム断面組織（低倍率組織に注意）、(c)と(g)：加工穴表面組織、(d)と(h)：加工穴表面付近断面組織(上側＝加工穴)を示す。

CIP-TiO₂の場合、(a)に示すように、ポアを含むやや粗い粒の組織であるが、これにレーザービームを当てると、細いビーム加工穴が生成する。穴の断面を(b)に示す。素材の表面は左側で、組織断面像の左側から右側に向かって直径約100～200μm程度のビーム穴が形成された。ビーム径は一樣ではなく、入射側が太いもの、中央が太いものが観察された。表面の穴径、断面の平均径、ビーム穴の深さなどを計測した。(c)に示すように、ビーム穴の表面は非常に滑らかで、50～60μm程度の間隔でひび割れが発生していた。筋状の組織も一部で観察された。(d)は(c)に示すビーム穴表面付近の断面組織であるが、表面から内部に向かって結晶がスムーズにつながっているように見受けられる。

HIP-TiO₂の場合、表面組織は(e)に示すように、数μm以下の微細で非常に密な組織である。これにレーザービームを照射すると(f)に示すビーム断面組織が観察された。中央がやや膨らんだ穴であった。穴の表面組織は、非常に滑らかで、やはりひび割れが発生していた。ひびの幅はやや大きく、ひびの周辺部がやや持ち上がっていることが分かる。ビーム穴の横断面を(g)に示すが、ひびの表面層部分は、12μm程度の厚みで完全に剥離していることが分かる。レーザービームによる急激な加熱、熔融、蒸発の影響と思われるが、この他、HIP処理により高密度化されているため、応力の緩和が難しく剥離が生じ易いことも影響しているように思われる。

4-2 ショット数を増加したときの穴径及び穴深さの限界

表5のS-1およびS-2実験で複数回のショットを同じ穴位置に照射した際に、穴径及び穴深さが一定の上限值に近づく特性が測定されたが、これはレーザービームの焦点の影響によると推定される。レーザー

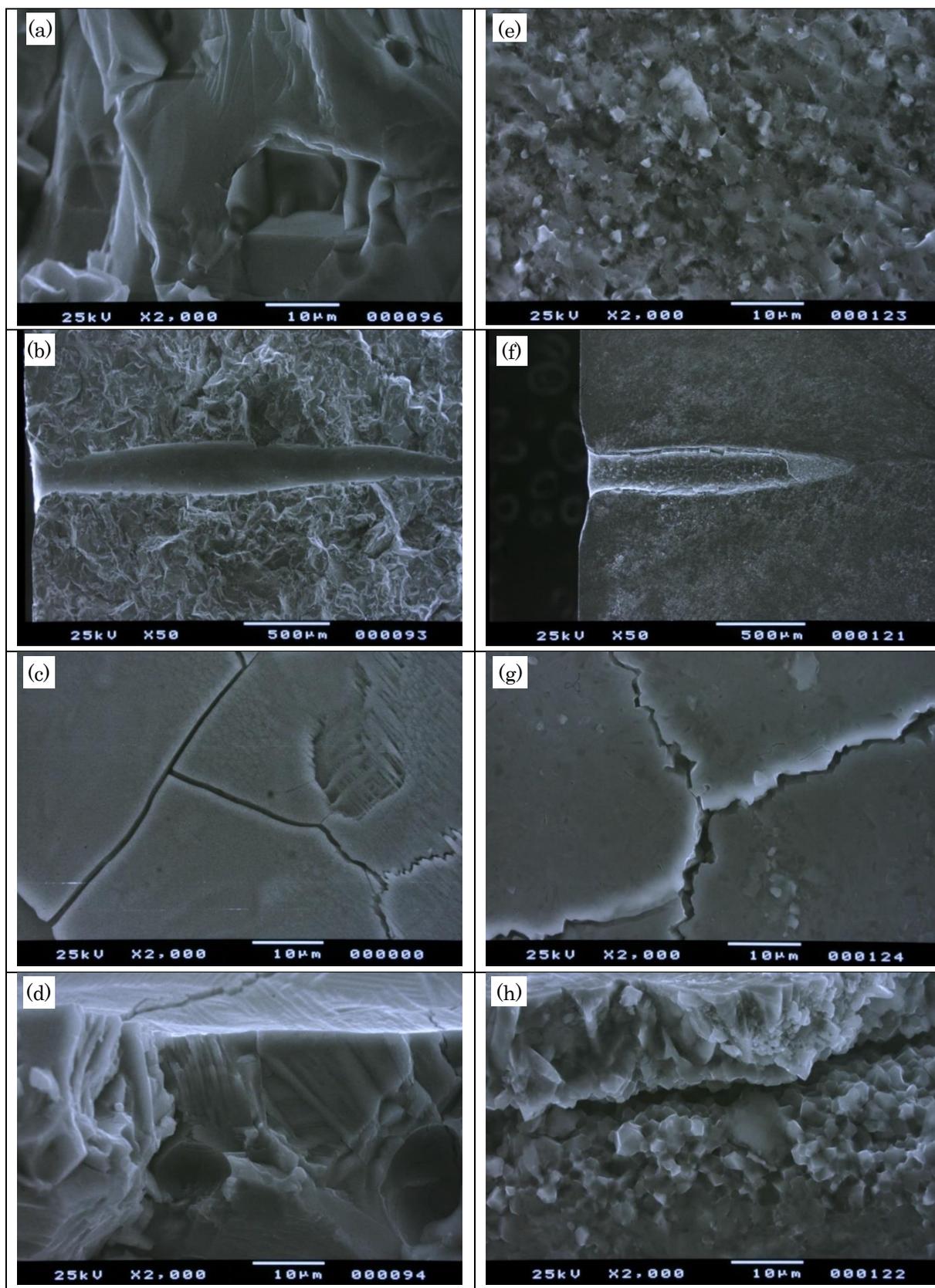


図13 単発レーザーショット加工のSEM観察結果
 CIP-TiO₂に関する(a)加工前組織, (b)レーザービーム横断面組織, (c)加工穴表面組織, (d)加工穴断面組織(上側=加工穴).
 HIP-TiO₂に関する(e)加工前組織, (f)レーザービーム横断面組織, (g)加工穴表面組織, (h)加工穴断面組織(上側=加工穴).
 試験条件: 表5のH-3 (Pulse Height 46.8%, Pulse Energy 2.40J)

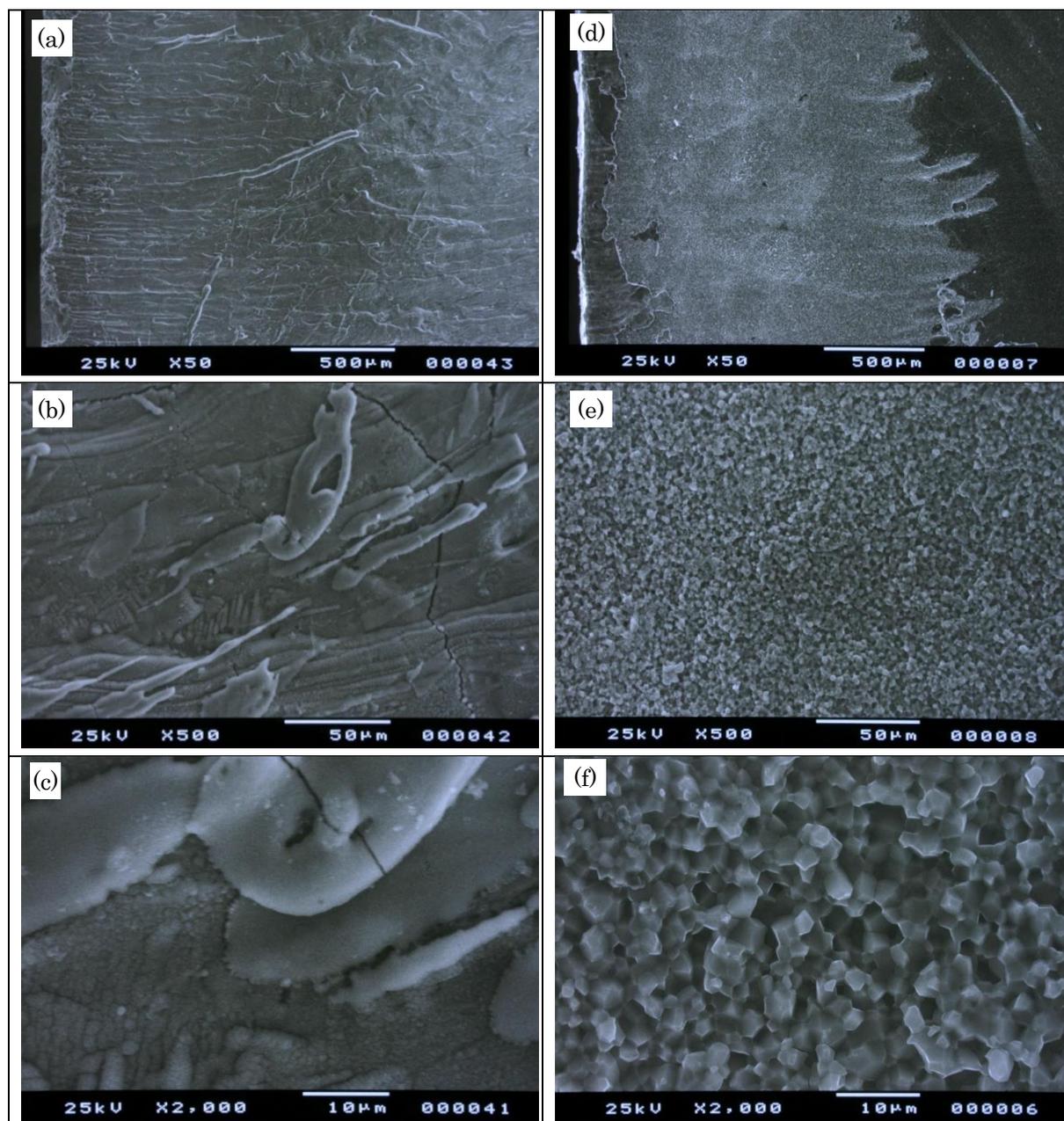


図 14 連続レーザーショットによる切断加工の組織

(a), (b), (c)は CIP-TiO₂に関するレーザービーム加工面の組織(それぞれ倍率異なる). (d), (e), (f)は HIP-TiO₂に関するレーザービーム加工面組織(それぞれ倍率異なる). 試験条件: 表 6 の Cut60 (OR 率 60%).

光の焦点を試料の表面に合わせているために、穴が深くなるにつれ焦点が合わなくなり、加工穴が深さ方向に進まなくなるためと考えられる。対策として、照射時に焦点を調整する機能を持てば、もっと厚いものも加工可能となると思われる。

4-3 ショット数を増加した実験における試料破砕について

ショット数の影響(表 5 の S-1~S-2)実験で、複数回のショットを同じ穴位置に照射した際に試料が砕けたが、これはショット数を増やすことにより、熱エネルギーが増加し、熱膨張による応力に耐えられ

なくなり、破砕したと推定される。これを防ぐためには、総熱エネルギー量を一定以下に抑えるため、1ショットのエネルギーを極力抑え、割れが発生しないショット回数に留めることが有効と思われる。

4-4 連続レーザーショット切断加工の組織観察

図 14 に、CIP-TiO₂および HIP-TiO₂に関する OR 率 60% の場合の切断加工面の SEM 組織を代表として示す。(a)~(c)は CIP-TiO₂、(d)~(f)は HIP-TiO₂ の場合を示し、それぞれの組織は、倍率が大きく異なる。

(a)は、CIP-TiO₂ の場合、レーザービームが組織の左側より右側方向に向かって走り、かつ、時間と共に

徐々に下方にビーム移動した断面組織を示す。レーザービーム径を d 、オーバーラップ率を OR とすると、図2に示した隣どうしのビームの中心間隔 w は、 $w = d(1 - OR/100)$ となるので、 $d = 150\mu\text{m}$ と仮定すると、 $w = 60\mu\text{m}$ となる。(a)の組織を注意深く観察すると、上から下方向に向かっておよそ $60\mu\text{m}$ 間隔で波打っているところが観察される。(b)および(c)は、(a)の拡大組織であるが、表面はひび割れが発生していると共に、レーザーの熱エネルギーで溶融している様子が観察された。

HIP-TiO₂ の場合の加工面組織は、(a)と同様の見方で約 $60\mu\text{m}$ 間隔のレーザービームによる波打ちが観察され、(e)、(f)の拡大組織は、加工前の組織(図13の(e))と大きく変わっていない。詳細に観察すると、(e)ではひび割れが観察され、(f)には結晶粒の輪郭がはっきりした組織が観察された。

5. 総 括

YAGレーザーを用いてCIPおよびHIP処理したTiO₂セラミックスについて、単発ショット加工および連続ショット切断加工を行い、加工における基本的機械特性を把握した。

(1) 単発のレーザーショット加工において、加工パルスのPulse Height(高さ)やPulth Width(パルス継続時間)を増大させると、加工電力およびパルスエネルギーが増大し、加工穴径、加工穴深さも基本的には増加する。この関係は、CIP処理したTiO₂にはあてはまるが、HIP処理した高密度品においては必ずしも成り立たず、時には割れが発生した。

(2) 同じ位置に複数回ショット加工すると、ショット数に比例して加工穴径および加工穴深さが増大した。しかし、加工穴深さなどは飽和に達し、多くは試料が破砕した。レーザービームのエネルギーを抑えて加工する必要がある。

(3) HIP処理したTiO₂セラミックスにおいては、加工穴周囲に熱変質層が発生し、表面層剥離が生じた。熱変質層は厚さ約 $10\mu\text{m}$ 程度で、レーザービームによる熱溶融層と推定される。

(4) 連続レーザーショットによる切断加工において、加工面の硬度は、無加工面時の約80%は維持されており、大きく低下しなかった。加工面の表面粗さは大

きく低下し、平均粗さ値で示すと10倍以上の値となった。

(5) TiO₂セラミックスのYAGレーザー切断加工は、レーザービームのエネルギーを抑えた連続Shot加工により、任意の形状に能率よく加工可能と期待されるが、表面に熱変質層が生じた場合、この影響を除去する、または安定保持させる方法を開発する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 奥田博, 平井敏雄, 上垣外修己:「構造材料セラミックス」, pp.1-165, オーム社(1987.4)
- 2) 窯業協会編集委員会講座小委員会編:「セラミックスの機械的性質」, pp.25-58, 窯業協会(1979.5)
- 3) William M. Steen: "Laser Material Processing (Second Edition)", pp.103-271, Springer-Verlag (2001)
- 4) Bekir Sami Yilbas: "The Laser Cutting Process: Analysis and Applications", pp.149-297, Elsevier Inc. (2018)
- 5) 鷲尾邦彦: 加工用レーザー光源の現状と動向(レーザー加工技術と物理総合報告). 光学, Vol.36, No.8, pp.428-439(2007.8)
- 6) Narendra B. Dahotre, Sandip Harimkar: "Laser Fabrication and Machining of Materials", pp.67-206, Springer-Verlag (2007.11)
- 7) Girish Dutt Gautam, Arun Kumar Pandey: "Pulsed Nd:YAG laser beam drilling: A review", Optics & Laser Technology, Vol.100, pp.183-215(2018.3)
- 8) Pedram Parandoush, Altab Hossain: "A review of modeling and simulation of laser beam machining", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.85, pp.135-145(2014)
- 9) Nikita Levichev, Maria Rosaria Vetrano, Joost R. Dufloy: "Melt flow and cutting front evolution during laser cutting with dynamic beam shaping", Optics and Lasers in Engineering, Vol.161, No.107333(2023.2)
- 10) 中澤達夫, 藤原勝幸, 押田京一, 服部忍, 森山実: 「電気・電子材料」, pp.144-148, コロナ社(2005.1)