Nd : YAG レーザと KOH 液を用いたレーザアシストエッチングによるセラミックスのマイクロ形状加工*

小 薮 国 夫** 渡 辺 純 二**

Microfabrication of Ceramics by Laser-assisted Etching
using an Nd : YAG Laser and KOH Solution

Kunio KOYABU and Junji WATANABE

Laser-assisted etching (LAE) using an Nd : YAG laser and KOH solution has been carried out in microfabrication of ceramic materials. Three types of LAE have been considered depending on the laser beam conditions and materials conditions. The following results have been obtained. (1) Microfabrications resembling microcantilevers, 30 μm wide 1 000 μm long, were formed on thin ceramic substrates using a Q-switched single-mode beam. (2) Three-dimensional figures were formed on substrates comprising laminations of several kinds of ceramic sheets, applying the differences of appropriate beam power conditions to a variety of ceramic materials. (3) High efficiency, high accuracy microfabrications were achieved by using ceramic masks made by LAE.

Key words : laser-assisted etching, Nd : YAG laser, KOH solution, ceramics, ceramic mask, microfabrication, three-dimensional figures

1. は じ め に

機能材料として優れた特性を持つファインセラミックスを各種の部品へ応用しようという強い要望はあるが、これまでに比較的小さな寸法を対象とした適当な形状加工技術はなかった。特に、寸法 1 mm 以下を対象としたマイクロ形状加工は困難であった。このセラミックスに対して、Nd : YAG レーザと KOH 液とを組み合わせたレーザアシストエッチング (LAE) がマイクロ形状加工技術として有望であることを前報で報告¹⁾した。

そこで本報では、微細加工技術としての LAE のポテンシャルを高めるとともに、実用化の促進をねらい、LAE の特徴を活かしたマイクロ形状加工への応用例とその加工特性について述べる。

2. 実 験 方 法

本実験に使用した LAE 加工装置は前報と同じ構成

で、その加工部を図 1 に示す。加工はエッチング液の流れているジグの中に試料を固定し、石英ガラスの窓を通して試料表面にレーザビームを垂直に照射しながら、ビームの走査は XY ステージで試料を移動させて行った。マスクを用いる加工では、試料の上にマスクを重ね合わせ、マスクの表面を塗りつぶすようにビームを走査した。ここで用いるマスクは打抜き微細形状加工の結果として、LAE でセラミックス基板に作製したものを使用した。主な実験条件を表 1 に示す。

Fig. 1 Construction of laser-assisted etching apparatus

* 原稿受付 平成元年 5 月 16 日。昭和 60 年度精機学会秋季大会学術講演会 (昭和 60 年 10 月 14 日) および昭和 61 年度精密工学会秋季大会学術講演会 (昭和 61 年 3 月 29 日) にて発表

** 正 会 員 日本電信電話(株) (武蔵野市緑町 3-9-11)

Table 1 Experimental conditions

Laser	Nd : YAG ($\lambda=1.06 \mu\text{m}$) Type of beam ; CW, Q-switched + single-mode, Lens ; $f=25 \text{ mm}$ Spot size : $\sim \phi 50 \mu\text{m}$
X-Y stage	Speed ; 1.5-10 mm/min
Etching solution	KOH, Concentration ; 20 wt% Room temperature
Specimen	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$, PZT, Al_2O_3 Mn-Zn ferrite

3. 微細形状加工における LAE の特徴と課題

LAE の形状加工における特徴は、レーザ照射した領域だけが除去されるという点においてレーザ加工と基本的に同じである。除去加工における両者の大きな違いはレーザ加工の場合、材料の温度を沸点まで上げるため最低パワー密度が高くなり、レーザパワーも大きくしなければならないのに対して、LAE では材料がエッチングされるように材料の温度を上げるか、あるいは溶融または変質させればよいので、最低パワー密度が低くなり、レーザパワーを小さくできる。

このため微細形状加工へ応用する場合の LAE の特徴として、低パワーのビームで加工される溝幅は狭く基板への熱影響も小さくなるため、複雑で微細な形状の加工に有利であること、および材料によって異なるレーザ吸収率の差あるいはエッチングされるための温度差や溶融、変質等の状態変化が材料によって異なることを利用した材料選択性、が挙げられる。

しかし、レーザパワーを小さくすると、体積除去量が減少し、1 回のビーム走査で加工できる溝の深さや幅が小さくなるため、打抜き加工において基板の厚さが制限されたり、ビームの塗りつぶし走査による形状加工では加工時間が長くなる、等の問題が起きる。

4. 実験 結果

4.1 打抜き微細形状加工

CW ビームを多重走査して形成した溝幅と深さの関係を図 2 に示す。1 回の走査で幅 $100 \mu\text{m}$ 、深さ $15 \mu\text{m}$ の溝が形成される低パワービームを繰り返し走査すると、深さが $100 \mu\text{m}$ になるまでに溝幅はわずか $20 \mu\text{m}$ しか増加していない。Qsw ビームの場合にも同じ傾向が得られることから、多重走査は微細形状加工に有効であることがわかる。

次に、微細片持ちはりの加工において、形成可能な最小のはり幅とビームパワーの関係を図 3 に示す。斜線部がはりの形成可能領域で、ビームパワーの低下と

Fig. 2 Relation between depth and width of grooves formed by repeating of beam scanning

Fig. 3 Relation between Q-switched beam power and microcantilever width

ともにはりの最小幅が小さくなる傾向がみられる。基板の厚さが $180 \mu\text{m}$ の場合、ビームパワー 1.8 W で幅 $70 \mu\text{m}$ のはりが加工されており、これ以下のパワーでは多重走査を行ってもビームは基板を貫通しない。しかし、基板厚さが $90 \mu\text{m}$ になると、 1.3 W のビームで幅 $30 \mu\text{m}$ のはりが形成できており、ビームパワーとのはりの寸法との間には強い相関のあることがわかる。

図 4 は厚さの異なる基板に対し、ビームパワーを固定して片持ちはりを加工したときの、はりの幅と長さの関係を示したものである。はりの長さが長くなるにつれて、はり幅の最小値も増大しているが、幅寸法の $30 \sim 40$ 倍の長さをもつはりが形成できているので、はりの幅と長さの関係は微小はりの形成において重要な要因とはならない。

このことは加工中におけるはりの破壊に対する実験結果からも言える。すなわち、加工中にはりが壊れる場合の特徴は、長さの短いはりよりも長いはりの方が壊れやすく、同じ寸法のはりでもその壊れる位置は決まっていないこと、さらに研削による条痕等の傷や材料自体に欠陥が存在し、そこにビームが当たるとその

Fig. 4 Relation between length and width of microcantilever formed by identical beam conditions

(a) Microcantilever ($1000 \times 90 \times 30 \mu\text{m}$)

(b) Microfigure

Fig. 5 Examples of micromachining by LAE

位置ではりが壊れることが多い。これははりの長さが長くなるほど、ビームがこのような欠陥に当たる確率が大きくなるためと考えられる。

次に、Qsw+single-mode ビームの多重走査による打抜き微細形状加工の具体例を図5に示す。(a)はPZT基板上に形成した寸法 $1000 \times 90 \times 30 \mu\text{m}$ の微小片持ちはりで、(b)は $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 基板から打ち抜いた微小形状加工の一例である。どちらも加工側壁がほぼ

Fig. 6 Three-dimensional figure on substrate comprising laminations for different kinds of sheets

垂直になっているので形状品質に優れており、高い寸法精度が得られている。

4.2 複合積層基板への立体微細形状加工

四層積層基板を用いた加工例を図6に示す。この加工では前記の打抜き加工と同じ方法により、第1層目の $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ と第2層のSUS304をこの順序で、次に第3層目のPZTに対して所定の微細形状を加工することにより、目的の立体微細形状を形成した。ビーム条件の設定は上部から下層へ移るにつれて、パワー密度が大きくなるようにビームのパワーまたは走査速度を調整した。

4.3 マスクを用いた微細形状加工

図7にマスクを用いた微細形状加工の例として、PZTマスクとCWビームを用いてこのマスクパターンを $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 基板上に転写したパターンの形状を示す。この転写パターンには、パターンの側壁がなだらかに傾斜し、底面にはビームの走査ピッチに依存して、その痕跡としての凹凸が残しやすい傾向がある。

この加工で使用するビーム条件は、マスクを加工しないように低パワービームを使うこと以外はほとんど制限を受けない。そこでビームの発振条件や走査条件を変えるだけで、パターンの深さや側壁形状を容易に変えることができる。例えば、図8はQswビームを用いて、Mn-Znフェライトに形成したボタン形状で、CWビームに比べ加工側壁がほぼ垂直に立ってシャープな形状が得られている。この場合、ビーム走査ピッチが著しく小さくなるため、CWビームに比べて5~10倍程度加工時間が長くなり、またパターンの底面が荒れるという欠点がある。また、焦点を外した高パワーのビームを用いると、深さの浅いボタンが能率良く加工でき、CWビームを多重走査すると深くて底面の平坦なボタンが形成できる。

一方、転写パターンの寸法精度はビーム照射条件およ

(a) PZT mask formed by LAE

(b) Transferred patterns on $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$

Fig. 7 Micropatterns on ceramics formed by LAE using a mask

Fig. 8 Transferred patterns on MnZn-ferrite formed by Qsw-single mode beam

びビームの走査距離に対応したマスクパターン寸法の影響を受ける。この関係を図9に示す。(a)からビームのパワーと走査ピッチを一定にして、寸法の異なるマスクパターンを基板上に転写すると、マスクパタンの寸

法が $200\text{ }\mu\text{m}$ 以下では、寸法が小さくなるにつれて転写パタンの寸法も小さくなる傾向がみられる。そして一定寸法のパターンについてみると、ビームパワーが大きくなるにつれて転写パタンの加工寸法も増大している。図9(b)はビームパワーを一定にして、走査ピッチを変えたときのマスクパターンに対する転写パタンの寸法精度の関係を示したものである。マスクパターン寸法が同じで走査ピッチが変わったとき、あるいは一定の走査ピッチに対してマスクパターンが変化するときのマスクパターン寸法と転写パタンの寸法精度の関係は、(a)の場合と同じ傾向が現れている。

このようなマスクパタンの寸法に依存して加工寸法精度が変化する傾向は、加工深さに対しても同じように現れる。図10は図9(a)と同じ条件で加工したときのマスクパターン寸法と加工深さとの関係を示したものである。一定パワーのビームに対し、マスクパターン寸法が $300\text{ }\mu\text{m}$ 以上ではパターン寸法に関係なく加工深さはほぼ一定であるが、これ以下の寸法ではマスクパ

(a) Affection of beam power

(b) Affection of beam scanning pitches

Fig. 9 Accuracy of transferred patterns to mask patterns depending on beam conditions and mask pattern sizes

Fig. 10 Dependency of etching depth on beam powers and pattern sizes

タン寸法の減少とともに加工深さも浅くなっている。またパタン寸法が一定の場合、ビームパワーの増大とともに加工深さが深くなっており、図9の加工寸法精度と同じ傾向が現れている。

以上の結果から、マスクを用いた微細形状加工では転写パタンの形状はビーム照射条件によって変化し、加工寸法精度はビーム照射条件だけでなくマスクパタンが一定寸法 (200~300 μm) 以下では、その寸法にも依存することがわかる。

5. マスクを用いた微細形状加工における転写パタン加工精度の考察

5.1 転写パタン加工精度のビーム条件依存性

光学レンズで集光したビームでマスク上を走査したとき、マスクを透過して基板上に照射されるパワー密度分布と転写パタン寸法の関係を図11(a)に示す。ビームが一定速度でマスク上を移動するとき、ビーム中心がマスクパタンの端からビームの半径と等しい位置に達したとき、ビームの一部が基板を照射するようになり、ビームの移動とともに基板を照射するパワーは増大していく。そしてビーム中心がパタンの端から距離 R の位置へ移ると、ビームはマスクによってカットされなくなり、最大パワーとなって距離 S の間、基板を一樣に照射する。この後、ビームがパタンの端から R の位置に達すると、ビームの一部がマスクによって再びカットされるようになり、照射パワーは減少していく。このときのパワー密度分布を図の

Fig. 11 Relations between transferred pattern sizes and beam conditions

(A) で表すと、ビームパワーだけ変えて他の条件は同じにしてビーム走査すると、低パワービームの照射パワー密度分布は(B)で、高パワービームは(C)となる。ここで加工最小パワーレベルを設定すると、それぞれのパワー密度分布がこのレベルで切り取られる長さが転写パタンの加工寸法と対応し、高パワーほど加工寸法の長くなることがわかる。

次に、ビームパワーを一定にしておいて、ビーム径 D や集光角 θ 、あるいはマスクの厚さ t が変わると転写パタンの加工寸法も変化する。たとえば、パワー密度分布(A)に対して D, θ, t のいずれかを大きくすると照射パワー密度分布は (A_1) となり、加工寸法は小さくなる。すなわちビームの一部がマスクによってカットされることの起きる距離 $R (= D/2 + t \tan \theta$: マスク面上のビーム半径に相当) が大きくなると最小パワーレベルで切り取られるパワー密度分布の長さが短くなり、 R が小さくなるとパワー密度分布におけるパワー密度変化領域の傾斜が急峻となって、加工寸法は大きくなる。

5.2 加工寸法のマスクパタン寸法依存性

またこの図から、照射パワー密度分布の中に一樣な最大パワー密度分布が存在する場合、マスクパタン寸法 L_0 が変化しても、その変化分は最大パワー密度分布長さの変化と等しいため、加工寸法のマスクパタン寸法依存性は無いことがわかる。

しかし、マスクパタン寸法 L_1 がマスク面上のビーム径 $2R$ より小さくなると、ビームはマスクによってその一部が常にカットされ、最大でも寸法 L_1 に相当する部分しかマスクを透過できない。すなわち、直径 L_1 のビームを照射したのと同じことになり、マスクを透過するパワー密度分布は図12の (L_1) に示すよ

Fig. 12 Relations between transferred pattern sizes and mask patterns

うに単一ビームのパワー密度分布と同じような形状になる。マスクパターンをさらに小さな寸法 L_2 にするとマスク面を照射しているビーム条件は同じでも、透過パワー密度分布 (L'_2) も (L'_1) より小さくなる。このパワー密度分布に対して、最小パワーレベルを設定すると、それぞれのパワー密度分布が最小パワーレベルで切り取られる長さを (l_1) および (l_2) とすれば、これがそれぞれの転写パターン寸法になる。このとき

(L_1) と (L_2) の最大値や形状が異なるため、マスクパターンの寸法差 $(L_1 - L_2)$ と転写パターンの寸法差 $(l_1 - l_2)$ は等しくならない。

以上より、マスクを用いた微細形状加工における転写パターンの加工寸法変化は、マスクパターン条件またはビーム条件の変化により、マスクを透過するパワー密度分布の変化することが原因と考えられる。

6. ま と め

Nd:YAG レーザと KOH 液を用いた LAE によるセラミックスの微細形状加工技術としての実用化促進をねらい、LAE の特徴を発揮した三つの微細形状加工の形態について検討し、次の結果から LAE が実用レベルに達したことを確認した。

- (1) 高品質の形状で寸法 $30 \times 90 \times 1000 \mu\text{m}$ の微小片持ちはりを打抜き加工で形成した。
- (2) 異種材料を積層した基板に、各層ごとの打抜きを行うことにより、立体微細形状を形成した。
- (3) マスクを用いた微細形状加工では、加工条件と転写パターン寸法との関係を明らかにし、多数の微細パターンを能率良く形成した。

参 考 文 献

- 1) 小藪国夫, 渡辺純二: Nd:YAG レーザと KOH 液による $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ セラミックスのレーザアシストエッチング, 精密工学会誌, 53, 7 (1987) 1027.