レーザーによる熱加工 —マイクロレンズの製作とセラミックスの割断—

上 田 隆 司*

1. 緒 言

近年、レーザーを使った新たな加工法が数多く考案され実用化されている。これらの新しい加工法には共通する特徴があり、一般に照射するレーザーエネルギーの大きさを高い精度でコントロールすることが要求されている。ここではその中からレーザーによるマイクロレンズの製作とセラミックスの割断を取り上げることにし、レーザーフォーミングやセラミックスの精密切断などについては別の機会にゆずりたいと思う^{1),2)}。

”マイクロレンズ”は多くの場合直径が1 mm 以下の小さなレンズを指しており、デジタルカメラや液晶プロジェクタ、光通信、などに広く用いられている。その製作には金型を用いるなど様々な方法があるが、ここではプラスチックにレーザー光を照射することで局所的な熱変形を引き起こし、表面にマイクロレンズを作製する方法について述べることにする。この方法によれば、特性の異なるレンズを簡便に製作することができ、多品種少量生産に適している³⁾。

一方、レーザーによる割断そのものは新しい技術ではなく、かなり以前から知られている加工法である。レーザー照射によって生じる熱応力を利用して亀裂を進展させ、材料を分割するため、理論的には取りしるをゼロにすることが出来るなど大変魅力のある加工法である。しかし、熱亀裂の発生などいろいろ問題点も多い。ここでは、割断中のレーザー照射部温度や亀裂進展に伴って発生する AE 波を測定することにより、熱的影響を最小限に抑えながら高精度の割断を行う方法について述べることにする^{4)~6)}。

2. マイクロレンズの製作

2.1 製作方法

レーザー照射条件を表1に、加工材料のプラスチックの物性値を表2に示す。波長2940 nmのEr:YAGレーザーを用い、焦点距離100 mmの集光レンズを用いて集光している。照射表面とレーザー光焦点位置との距離 D_f (デフォーカス)は焦点が材料内部5 mmにある場合を $D_f = -5$ mmと表記している。

表1 マイクロレンズの製作条件

Laser	Er:YAG
Wave length λ [nm]	2940
Spot diameter $2a$ [μ m] (at focal point)	200
Energy E [mJ/pulse]	19~42
Pulse duration τ [ms]	0.2
Frequency f [Hz]	2~20
Number of pulses N	480

表2 アクリル樹脂の特性

Transmissivity for visible light (JIS R 3106, $t = 3$ mm)	92%
Refractive index (JIS K 7105)	1.49
Pulling strength (JIS K 7113)	74 MPa
Bending strength (JIS K 7203)	120 MPa
Deflection temperature under load (JIS K 7207, A)	90°C
Expansion coefficient (JIS K 7197)	$7 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

図1 アクリル樹脂の分光透過特性

加工材料には、表2に示す可視光透過率92%、屈折率1.49を有するアクリル樹脂(厚さ:10 mm)を用いている。図1は波長2.5~25 μ mの範囲にわたって加工材料の赤外線透過率を測定した結果である。Er:YAGレーザーの波長2940 nmにおける透過率は厚み0.44 mmに対して約27%である。

2.2 マイクロレンズの特性

製作したマイクロレンズを図2に示す。加工材料を走査することでレンズを0.5 mm間隔で格子状に配列したマイクロレンズアレイを作っている。レンズの表面では照明光

* Ueda, Takashi
金沢大学 工学部
金沢市小立野 2-40-20 (〒920-8667)
2005.1.17 受理

図2 製作したマイクロレンズアレイ

が反射しており、レンズ表面が滑らかであることがわかる。

マイクロレンズの形状を触針式3次元粗さ測定機によって測定した結果を図3に示す。対称性に優れたレンズが作製されている。図4はレンズ断面形状であるが、レンズ表面の粗さが十分に小さくレンズの直径 $D = \text{約 } 400 \mu\text{m}$ 、サグ $S = \text{約 } 50 \mu\text{m}$ であることがわかる。

レンズ表面を球面と仮定し、図5のように曲率が一致する球面の半径 R を求めると、約 $260 \mu\text{m}$ である。近似球面とレンズ表面がよく一致する範囲は、レンズ中心部の $230 \mu\text{m}$ であり、これを有効径 De とする。すると、

$$F = \frac{R}{n-1}, F\# = \frac{F}{De} \quad (1)$$

で与えられることから、 R 、 De の値及び表2のアクリルの屈折率 $n = 1.49$ を式(1)に代入することにより、 $F = 530 \mu\text{m}$ 、 $F\# = 2.31$ が求まり、実用的なレンズが作られたことがわかる。

2.3 加工条件の影響

レーザーの周波数の影響を調べた結果が図6である。照射したパルス数 N 、レーザー出力 E 、デフォーカス Df を一定とし、パルス周波数 f を変化させることで、平均照射エネルギーを変化させてレンズを作製している。図6はその時のレンズ形状を調べた結果である。パルス周波数 f が高くなるほど直径の大きなレンズを作製することができる。しかし、高さは少し低くなる傾向にある。レーザーパルスの照射間隔が短くなることで周囲が加熱されて変形部が広くなり、その分高さの変形が小さくなるためと考えられる。しかし、いずれのパルス周波数においてもレンズの対称性は損なわれていない。

図3 マイクロレンズの3次元形状

図4 マイクロレンズのプロファイル

図5 マイクロレンズの曲率

3. セラミックスの切断

3.1 切断原理

図7はレーザーによる切断加工の原理を示したものである。レーザー光を加工物に照射するとき、照射部は急激な温度上昇とともに熱膨張して圧縮応力を生じ、その周辺には引張応力が生じる。この引張応力は照射部を中心として円周方向に働くため、引張応力場内にあるき裂先端はレーザー照射部中心へ向かって進展する。加工物に任意の送り速度を与えて照射位置を移動させると、き裂はレーザー照射部に追従して進展し、加工物を分断することができる。

3.2 実験装置

図8に実験装置の概略を、表3に実験条件を示す。図はSiウエハを加工している様子を示しているが、照射開始点にはビッカース圧子を押込んで初期き裂を導入している。Nd:YAGレーザーを10 pulse/sで照射しながら、加工物を一定速度 V で移動させて切断を行っている。加工物上のレーザー照射領域(スポット半径)は約 0.9 mm である。

レーザー光照射部の温度を測定するため、筆者らの開発した光ファイバ型2色温度計を用いている⁷⁾。赤外線を受光する光ファイバは加工物が移動しても常に照射部中心に一致するよう固定されている。レーザー照射部から輻射される赤外線を光ファイバによって受光し、積層型光電変換

図6 マイクロレンズの形状に及ぼすレーザー周波数の影響

図7 セラミックスのレーザー切断原理

素子に伝達されて電気信号に変換される。2つの素子の出力比を求めることで温度が得られる。

図8に示すように、加工物上にAEセンサーを取り付けており、切断加工中のき裂進展を監視している。照射部温度と同時に測定することにより、き裂進展に及ぼす照射温度の影響を調べることが出来る。使用したAE測定システムを表3に示す。

3.3 レーザー照射面の加工損傷

図9は、加工後の切断部を観察した例である。Case 1はレーザーの照射エネルギーが小さく照射部温度が260℃

図8 レーザー切断加工の実験装置

表3 実験条件

Workpieces (Si wafer) mm		10×20×0.5
Nd : YAG laser : Beam radius	$w \text{ } \mu\text{m}$	900
Peak power	$Q \text{ W}$	109~809
Pulse duration	$\tau \text{ ms}$	1.0~3.0
Pulse cycle	$f \text{ s}^{-1}$	10
Feed rate $V \text{ mm/s}$		3.3~36.7
InSb-MCT two-color pyrometer : NTEC chalcogenide fiber $\phi 300 \text{ } \mu\text{m}$ Measuring distance $t = 5 \text{ mm}$		
AE measuring system	Sensor	
	Size : $\phi 5 \times 3.2 \text{ mm}$	
	Frequency band : 1 - 4 MHz (- 10 dB)	
	Preamplifier	
	Gain : 40 dB	
	Frequency band : 100~20 MHz (- 3 dB)	
	Discriminator	
	Gain : 60 dB MAX	
	Frequency band : 20 k~2 MHz (- 3 dB)	

と低く、Case 2は照射エネルギーが大きく照射部温度が350℃と高い。いずれの切断面にも(b)に見るように亀裂進展を表す規則的な縞模様が観察出来る。しかし、(c)のプロフィールに見るようにCase 1の場合の粗さをはるかに小さい。また、(a)のレーザー照射面を比較すると、温度の低いCase 1では照射痕を残さずに切断することができる。Case 2では照射エネルギーが大きいため、照射痕が残っている。従って、精密な切断を行うにはレーザー照射部を230~260℃に加熱する条件を選ぶべきであるといえる。

3.4 AE波観測によるき裂発生 の監視

き裂の進展時に発生するAE波を観測することによって

Case 1

$Q=215\text{W}$, $V=3.33\text{m/s}$, $\tau=2\text{ms}$,
Temperature is 260°C (a little higher than θ or 230°C)

Case 2

$Q=449\text{W}$, $V=3.33\text{m/s}$, $\tau=2\text{ms}$,
Temperature is 350°C (much higher than θ or 230°C)

図9 割断されたシリコンウエハー

図10 レーザー割断中に観測された AE 波

加工過程を調べることができる。図10にレーザー照射時の AE 波観測例を示す。図(a)は、き裂が進展せず、ウエハを割断できない場合の AE 波形である。ノイズ程度の低い出力しか観測できない。これに対し、き裂が進展する場合には、図(b), (c)に示すように、高い出力の AE 波が観測される。(b)では、き裂が進展する際に放射される高いピークの AE 波を観測している。さらに、加工材料に照射されるエネルギーが大きい(c)になると、レーザー照射中、および照射後の冷却時に大きな出力の AE 波が観測されている。この第2の AE 波が、加工材料が受ける熱損傷を表している。すなわち、照射終了後に現れる第2の AE 波が観測されないような条件でレーザーを照射する必要があることになる。

3.5 割断例

表4に様々なセラミックスを割断加工した結果をまとめている。シリコンウエハーの他、各種構造用セラミックス、ガラスなど様々な材料を割断によって加工出来ることがわかる。

4. 結 言

レーザーの可能性は無限である。例えば、フェムト秒レーザーの出現によって、これまで考えられなかったような加工が可能になりつつある。また、医療の分野でも広く用いられるようになってきている^{(8),(9)}。これまでかえりみられなかった加工法も、見方を変えた取り組みで十分活躍出来る可能性を秘めている。レーザーは今後ますます多くの分野で活用されるものと考えている。

参 考 文 献

- 1) 上田隆司, 山田啓司, 及川志郎, 細川 晃: レーザーフォーミング加工に関する基礎的研究, 精密工学会

表4 種々のセラミックスの切断例

Work material Thickness (mm)	Silicon wafer 0.5	Silicon wafer 0.5	Silicon nitride 0.5	Alumina 0.5	Al ₂ O ₃ -TiC 1.2	Zirconia 0.5
Laser beam	Nd:YAG(pulsed)	Nd:YAG(CW)	Nd:YAG(pulsed)	CO ₂ (CW)	CO ₂ (CW)	CO ₂ (CW)
Average power (W)	—	60	—	50	40	30
Peak power (W)	328	—	987	—	—	—
Cleaving rate (mm/s)	6.66	5	1	8	3	10
Width of damage r_D (μm)	0	100	460	107	70	0
Roughness of fracture surface (μm)	0.7	0.7	20	1.3	0.7	0.64

- 誌, **67**(2), 300 (2001)
- 2) 古本達明, 舟田義則, 上田隆司: パルス YAG レーザ加工機を用いた超砥粒砥石の切断特性, 砥粒加工学会誌, **47**(1), 39 (2003)
- 4) 山田啓司, 西岡真吾, 細川 晃, 上田隆司: パルス YAG レーザによる脆性材料の切断加工—Si ウエハ切断における熱応力解析, 精密工学会誌, **69**(1), 120 (2003)
- 5) 山田啓司, 大磯桂一, 細川 晃, 上田隆司: パルス YAG レーザによる Si ウエハの切断機構に関する研究, 精密工学会誌, **67**(11), 1861 (2001)
- 6) Ueda, T., Yamada, K., Oiso, K. and Hosokawa, A.: *Thermal Stress Cleaving of Brittle Materials by Laser Beam*, CIRP, **51**(1), 149 (2002)
- 7) 上田隆司, 入山孝宏, 杉田忠彰: レーザ照射部のフラッシュ温度測定—光カプラ型 2 色温度計の適用, 精密工学会誌, **61**(2), 278 (1995)
- 8) 上田隆司, 山田啓司, 篠崎 道, 細川 晃: YAG レーザによる歯科治療に関する研究 (第 2 報) Nd:YAG レーザと Er:YAG レーザの比較, 精密工学会誌, **68**(12), 1580 (2002)
- 9) 山田啓司, 近川真一, 細川 晃, 上田隆司: レーザー歯科治療における分光分析による熱損傷モニタリング, 日本レーザー歯学会誌, **15**(1), 1 (2004)

会員の皆様へ

会員の意見交換のひろば

「ファウンテン・フロー」へ投稿下さい

『成形加工』誌では, 新たに, 会員の皆様が自由に意見を述べていただく「ファウンテン・フロー」というコーナーを開設しました。

開設の経緯については本誌第 15 巻第 7 号 (2003 年 7 月号) 471 ページを参照下さい。

<募集原稿>

1. 原稿内容; 成形加工に関する苦勞話, 失敗談及び新しい成形のアイデア, 理想の成形機など加工に関する内容や学会の運営・行事に関する意見, 学会誌に関する感想など。
2. 文章の長さ; A-4 半ページ~1 ページ程度。
3. 著者名; 所属・氏名を名乗らなくても, ペンネームも可とします。
4. 査読; 編集委員による査読は通させていただき, 適当でない表現は訂正をお願いすることもあります。学会誌の性格上ご容赦下さい。

皆さまからの原稿をお待ちしております。

「成形加工」編集委員長 鞠谷雄士