セラミックスのレーザ切断におけるき裂発生位置の解析的検討*

鶴 来 昌 樹^{*1}, 町 ・ 田 隆 志^{*1}
井 本 克 之^{*2}, 澤 田 篤^{*3}Analytical Study on Crack Initiation Position in Laser Beam
Cleaving of CeramicsMasaki TSURUKI^{*4}, Takashi MACHIDA,
Katsuyuki IMOTO and Atsushi SAWADA^{*4} Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi Ltd.,
502 Kandatsu, Tsuchiura-shi, Ibaraki, 300-0013 Japan

Laser cleaving is expected to become a new method for cutting inorganic brittle materials such as ceramics and glasses without generating particles or microcracks. However, an initial crack caused by this method often occurs at a short distance from a cutting line. By using computer simulation, we investigated the dependence of crack-initiation behavior on cutting conditions such as beam radius, beam movement velocity, and beam-injection position. The simulation shows that we can reduce the distance between the cutting line and an initial crack by selecting appropriate cutting conditions. When the beam-injecting position is fixed, positioning the injection near the plate edge effectively reduces the distance between the cutting line and the initial crack, while beam radius does not significantly affect the distance. On the other hand, when the beam-injection position is moved during cutting, reducing beam radius and starting the injection at the plate edge or outside of the plate are effective in reducing the distance.

Key Words: Finite Element Method, Ceramics, Thermal Stress, Brittle Fracture, Alumina, Laser Beam Cleaving, Crack Initiation, Point Heat Source

1. 緒 言

セラミックスやガラスなどの無機脆性材料の切断加工技術としては、ダイヤモンド砥石による砥粒加工やダイヤモンドスクライバなどによりき裂を発生させたのちに、曲げ荷重を負荷して切断するスクライブ加工、レーザにより部材を溶融させるレーザ溶融加工、ワイヤ放電加工などが一般的である。しかし、これらの加工方法は、(1)マイクロクラックなどの加工損傷の発生、(2)切り屑の発生、(3)研削液の使用、(4)加工面近傍の熱的変質などの欠点がある。清浄な環境が要求される、半導体ウェハなどの加工においては歩留り向上のために、上記課題の克服が求められている⁽¹⁾。

レーザ切断は、レーザをビーム状に小さく絞って照射し、部材に急激な温度分布を形成することにより局所的に発生する大きな熱応力を利用して、き裂進展により部材を切断する加工方法であり⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾、上記課

題を克服できる無機材料加工技術として、半導体やディスプレイなどの分野で期待されている。しかし、熱応力によるき裂進展を利用するため、初期き裂の発生方向がレーザの進行方向に対して偏向する課題がある。

図1にレーザ切断における初期き裂の偏向の例を示す。本例は、アルミナ基板 50mm×50mm×1.5mm の1辺の中央端から 8mm の位置にレーザを静止照射したときのき裂の発生状況の1例である。写真は、き裂を可視化するためにインクで染色している。き裂は基板端から発生し、レーザ照射位置に向かって進展している。き裂のほぼ先端がレーザの照射位置である。期待したき裂発生位置は、レーザ照射位置から基板端に垂線を下ろした交点(図中点 A)であるが、実際に発生した位置は若干右に偏向している。レーザ照射位置から基板端への垂線と、レーザ照射位置とき裂発生位置を結ぶ線分とのなす角度を偏向角と定義すると、本例では偏向角は約 5° である。き裂近傍に広がる陰はインクののにじみである。

* 原稿受付 2001 年 5 月 14 日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所機械研究所(☎ 300-0013 土浦市神立町 502)。^{*2} 日立電線(株)オプトロニクス研究所(☎ 319-1414 日立市日高町 5-1-1)。^{*3} 日立電線(株)土浦工場(☎ 300-0026 土浦市木田余町 3550)。

E-mail: turu@merl.hitachi.co.jp

初期き裂の発生方向の偏向を防止するためには、部材に予き裂を与える方法が一般的であり、従来から、点熱源により部材に生じる温度分布やき裂の進展挙動などが解析および実験的に検討されている⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

しかし、予き裂を与えることは加工工程の増加となり望ましいことではない。そこで著者らは予き裂を与えずに、初期き裂の発生方向の偏向を低減することを目的に、(a)レーザ照射位置、(b)レーザビーム径、(c)レーザ移動速度などの加工条件がき裂発生位置に及ぼす影響について熱応力解析により検討した。

Fig. 1 An example of initial crack by laser beam cleaving

2. 解析モデル

本研究に用いたレーザ切断の模式図を図2に示す。本モデルでは、出力 P [W] の CO_2 レーザをアルミナ基板に照射する。レーザは基板からオフセット距離 L [mm] の位置に焦点を結び基板上では半径 r [mm] の円形状領域に照射される。また、レーザは基板端中央から対向する基板端に向かって、基板を2等分するように速度 v [mm/s] で移動することとする。これを有限要素法を用いた熱弾性解析により模擬した。図3に解析モデルを示す。アルミナ基板の形状は、 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ とし、解析は切断面を対称面とする1/2 対称モデルで行った。レーザによる入熱は、2次元正規分布の内部発熱を仮定した。アルミナ基板のレーザ照射側表面には板厚方向に要素1分割分のみを、厚さ 0.01mm の内部発熱要素として作成した。各要素の発熱量は、要素の重心位置の発熱量を与えた。熱的境界条件は、基板表面からの熱輸送として平板の自然対流冷却の熱伝達を仮定した。基板端からビーム照射領域の中心までの距離を照射位置 d [mm] とした。

要素分割寸法は、レーザ照射を模擬する内部発熱要素はレーザ移動方向及びその垂直方向には 0.25mm 、板厚さ方向には 0.01mm とした。それ以外領域ではレ

Fig. 2 Overview of laser beam cleaving

Fig. 3 Overview of analysis model

Table 1 Material properties used in numerical analysis

Young's modulus [GPa]	343
Poisson's ratio	0.25
Coefficient of linear thermal expansion [1/K]	7.1×10^{-6}
Thermal conductivity [W/m·K]	25.1
Specific heat capacity at constant volume [J/m ³ ·K]	3017

ーザ照射領域から離れるに従い、要素寸法を大きくし、最大要素の寸法は約 $4.5\text{mm} \times 4.5\text{mm} \times 0.4\text{mm}$ となるようにした。

解析に用いた物性値を表1に示す。物性値の温度依存性はないと仮定した。

3. 静止熱源解析

3.1 静止照射時の応力分布 まず、レーザを静止して照射した場合の基板内の発生応力について検討した。解析条件は、ビーム出力 46W 、ビーム半径 1.25mm 、照射位置は、ビームの照射領域の中心を基板端から 5.0mm とした。

ビーム出力は基板の強度を考慮して、以下の考え方で選定した。一般にアルミナの大気中の強度はおよ

そ 200MPa~450MPa である⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。予め予備解析を行い、ビーム出力を 46W とした場合、その他の解析条件を変動させた時に、多くの条件でアルミナ基板端に 200MPa~450MPa 以上の応力が発生することを確認した。また、実験的にもこの条件でき裂が発生することを確認した。

まず非定常解析の結果を示す。図 4 に、基板端中央上面に発生する温度と最大主応力の時間変化を示す。基板端中央上面にき裂を生じさせることを目的としているため、その位置の温度と応力に着目した。解析時間間隔は 0.01 秒とし、1 秒後まで解析した。

温度は、0.01 秒後には室温から 250℃に上昇し、0.05 秒後には 380℃を示し、定常時の約 95%となる。0.12 秒後には約 390℃に達し、以降定常となる。

最大主応力は、0.01 秒後には約 400MPa に達し、定常状態の 90%となる。0.04 秒後には 450MPa となり以降定常状態を示す。

温度、応力とも短時間で定常状態に達し、この状態で最大値を示すことから、以下では定常解の結果をもとに議論することとした。

図 5 に定常状態での温度分布、図 6 に最大主応力分布を示す。解析は 1/2 対称を仮定しているため、切断面を対称面とする 1/2 の部分図に表示した。ビーム照射領域中心での温度は 1000℃を超え、ビーム照射領域の外側では急激に温度が低下する。ビーム照射領域から最も遠い基板角部ではほぼ室温の状態である。また、ビーム照射領域に近い基板端中央では約 390℃を示した。

主応力の分布は、ビーム照射領域内は隣接する領域と比較して高温となるため、周囲の拘束により 3つの主応力とも圧縮を示し、圧縮応力場となるが、ビーム照射領域から離れると、温度の急激な低下に従い、

Fig. 4 Change of maximum principal stress at the center of plate

3つの主応力とも引張となり、引張応力場に転じる。最大引張応力はビーム照射領域に近い側の基板端中央に発生し、約 450MPaを示す。

初期き裂の発生方向の偏向とは、ビーム照射で想定する切断開始位置の基板端中央と初期き裂の発生位置が一致しないことであるから、基板端での応力分布に着目する。また、基板端での最大主応力の方向が基板端に平行であるので、基板端での初期き裂の発生については最大主応力で評価できる。

図 7 に、基板端中央 (1/2 対称面) から基板端に沿った最大主応力分布を示す。最大主応力は基板端中央

Fig. 5 Distribution of temperature

Fig. 6 Distribution of maximum principal stress

Fig. 7 Distribution of maximum principal stress at the plate edge

で引張の最大値を示し、中央から離れるに従い低下し、圧縮応力となる。

初期き裂は基板端中央に生じる最大主応力が高いほど基板端中央に生じ易くなる。また、き裂は引張応力場で生じると考えられるので、基板端中央近傍の引張応力場となる領域が小さいほど初期き裂の発生する位置は基板端中央に近づいていく。以上から、基板端中央の応力は高く、その周囲では、基板端に沿って急峻に応力が低下する最大主応力分布を形成することが初期き裂の偏向を抑止するのに有効であると考えられる。

本章では、静止照射の場合のビーム照射位置とビーム径が初期き裂の発生方向の偏向に及ぼす影響について検討した。

3.2 レーザ照射位置の影響 ビーム照射位置を基板端からそれぞれ 1.75mm, 3.75mm, 5.0mm 内部とした解析を行った。レーザの出力は 46W, ビーム径は 1.25mm である。図 8 に基板端中央から基板端に沿った最大主応力分布を示す。横軸は基板端中央 (1/2 対称面) から基板端に沿った距離を示し、縦軸は発生する最大主応力を示す。照射位置が基板端に近いほど発生応力が高くなるとともに、急峻な分布となる。したがって、初期き裂発生時の偏向を抑止するためには照射位置を基板端に近づける方が良いことがわかる。

Fig. 8 Distribution of maximum principal stress for different beam positions

3.3 レーザビーム径の影響 ビームの出力を 46W に固定し、ビーム径を 1.25mm に加えて、1.00mm, 0.75mm とした場合について解析を行った。照射位置は基板端から 3.75mm の位置とした。図 9 に、ビーム半径を 0.75mm, 1.00mm としたときの温度分布を示し、図 10 に、ビーム半径が 0.75mm, 1.00mm, 1.25mm それぞれの場合の基板端中央 (1/2 対称面) から基板端に沿った最大主応力の分布を示す。

図 5 および図 9 より、ビーム半径を小さくするとビーム照射領域中心の最高温度は高くなり、ビーム半

径が 0.75mm の場合は最高温度が 1600℃を超える。これは同じ出力のビームがより狭い領域に入射することによる。

しかしながら、図 10 の基板端に沿った最大主応力の分布は、各ビーム半径ともほとんど重なっており、基板端に発生する引張応力の大きさ、分布は、ビーム半径が 1.25mm から 0.75mm と小さくなくてもあまり変わらないことがわかる。これは、基板端に発生す

Fig. 9 Distribution of temperature for different beam radii

Fig. 10 Distribution of maximum principal stress for different beam radii

る熱応力は、最高温度よりも基板全体の温度分布に起因しており、本解析では、ビーム出力が等しいこととビーム半径の変化量が基板寸法や基板端から照射位置までの距離に比べ小さいために、基板全体としての温度分布には大きな差が生じなかったためと考えられる。したがって、ビーム径が大きく変化しないならば、ビーム径の初期き裂の発生に及ぼす影響は小さいと考えられる。

以上まとめると、レーザを静止して照射する場合、ビームの照射位置が基板端に近いほど初期き裂の偏向を抑止する効果がある。また、ビーム径の影響は小さいことがわかる。

4. 移動熱源解析

4.1 移動照射時の応力分布 次にビームの移動を考慮した移動熱源による非定常解析を行った。ビームを基板外から基板内へ移動させて照射していく場合の典型的な温度と応力分布の変化について検討した。ビーム出力は 46W、ビームの移動速度は 5.0mm/s、ビーム半径は 1.25mm とした。レーザ照射開始より 1 秒後までを、時間間隔を 0.05 秒、解析ステップ数を 20 ステップで解析した。

図 11, 12 に、代表的な時刻での温度分布と最大主応力分布を示す。温度は基板端中央近傍がレーザの入射とともに急激に上昇し、0.25 秒後には 1016℃に達する。その後、レーザの移動にともない最高温度の位置は少しずつ前方に移動しながら温度上昇をつづけ、0.4 秒後には 1300℃になる。高温領域も徐々に広がり、ほぼレーザのビーム径に一致する。0.5 秒後にはビームがすべて基板内に入射し、ビーム移動につれて照射領域の最高温度は若干低下しながら移動していく。最低温度は基板隅で室温程度である。

移動に伴い発生する応力は、ビーム入射初期には高温領域が基板端中央に集中しているため、基板端中央が圧縮応力場となり、基板端中央の下面側に最大引張応力が発生する。ビームの移動に伴い、圧縮応力場は前方に移動し、引張応力場もそれにともない下面から上面に拡大して、0.4 秒後には最大の引張応力の発生位置が基板端中央上面になり、0.5 秒後には最大応力は約 700MPa になる。

基板端中央上下面の応力の時間変化を図 13 に示す。基板上面では、レーザ入射当初は基板端が高温領域となるため、圧縮応力場となり、ビームの移動にともない高温領域が移動するにつれ、急激に引張応力に変わり、0.5 秒後に最大応力になり以後緩やかに減少する。基板下面はビーム入射当初より微小ながら引張応力が

発生し、時間とともに緩やかに増加し、1.0 秒後には上下面とも発生応力は等しくなる。

Fig. 11 Distribution of temperature for different beam radii

図 14 には、基板端上面の基板端中央から基板端に沿った最大主応力分布の時間変化を示す。ビーム入射直後は基板端中央が照射による最高温度点であるため、

Fig. 12 Distribution of maximum principal stress for different beam radii

Fig. 13 Change of maximum principal stress at the center of plate edge

Fig. 14 Distribution of maximum principal stress for different beam injection time

ビーム近傍を中心に圧縮応力場を示す。約 0.4 秒後には、ビームが移動して基板端中央近傍が最高温度領域から外れるため、当該部のみに引張応力が発生し、急峻な応力分布を示す。基板端中央がビーム照射領域外となる約 0.5 秒後に基板端中央に最大応力が発生し、その後極大値は小さくなりながら、引張応力場の領域は拡大していくことがわかる。

4.2 移動速度の影響 ビームの移動速度の影響を検討するため、移動速度が 5.0mm/s, 10.0mm/s, 15.0mm/s の場合の解析を行った。ビーム出力は 46W, ビーム半径は 1.25mm とした。

図 15 に各移動速度で、最大応力が発生した時刻の基板端上面の基板端中央から基板端に沿った最大主応力分布を示す。

最大応力の発生した時刻は各移動速度で異なる。5.0mm/s では、基板端から 1.25mm 離れた位置にビームが移動した 0.5 秒後に基板端中央上面で最大主応力が約 700MPa になる。10.0mm/s では基板端からの 1.25mm 離れた位置にビームの中心が移動した 0.25 秒

後に基板端中央上面で最大主応力が約 640MPa になる。15.0mm/s では、1.22mm 離れた位置にビームが移動した 0.1625 秒後に基板端中央上面で最大主応力が約 600MPa になる。いずれの場合も最大応力が発生している時刻は、前節で述べた、基板端中央がビーム照射領域外となる、ビームの中心位置が基板端から 1.25mm の位置に移動したときにほぼ一致した。

図 15 より、最大応力が発生する時刻の基板端に沿った主応力分布は、いずれの移動速度の場合もほぼ同一であるが、基板端中央に発生する最大応力の値は移動速度が低いほど高くなる。

以上より、ビームの移動速度は低い方が、切断は容易になるが、切断の速度は低くなる。また、引張応力場の分布には差がないので、初期き裂の発生方向の偏向にはあまり影響がない。

4.3 ビーム径の影響 ビーム径の影響を検討するために、ビーム径を 1.25mm, 1.00mm, 0.75mm とした解析を行った。ビーム出力は 46W, ビーム移動速度は 10mm/s とした。

図 16 に、それぞれのビーム径で最大応力が発生した時刻の、基板端上面の基板端中央から基板端に沿っ

Fig. 15 Distribution of maximum principal stress for different beam velocities

Fig. 16 Distribution of maximum principal stress for different beam radii

た最大主応力分布を示す。ビーム径が 1.25mm の場合は、0.25 秒後にビーム中心の位置が基板端から 1.25mm の位置に移動したとき最大応力が基板端中央上面に発生している。同様に、ビーム径が 1.00mm, 0.75mm の場合もそれぞれ 0.25 秒後、0.2 秒後に最大応力が発生する。最大応力が発生している時刻は、前節で述べたビームが基板内部に移動し、基板端中央がビーム照射領域外となる位置に移動したときにほぼ一致している。1 ステップ前後のずれは、解析による誤差と考えている。

図 16 より、ビーム径が小さくなるほど、発生する最大応力が高くなる。これはビーム径が小さいほど発熱密度が高く、高温領域と基板端との距離も小さくなり、温度勾配が急峻になるためと考える。また、ビーム径が 1.25mm と 1.00mm の分布は形状はほぼ一致しているが、0.75mm ではビーム径の近傍で急激に応力が低下し、圧縮応力場に変化している。これは、ビームが最大応力発生位置、つまり基板端中央がビーム照射領域外となる位置に移動した時刻が、0.75mm の場合は早いため、熱伝導による熱拡散が進まず、ビーム照射領域近傍の高温領域の広がり、前者 2 ケースに比べ小さく、ビーム径の影響を強く受けた結果となるためである。

以上より、移動照射の場合は、ビーム径が小さいほどき裂の発生は容易になり、また、初期き裂の発生方向の偏向抑止に効果がある。

4.4 照射開始位置の影響 レーザの照射開始位置の影響を検討するために、照射開始時のビーム照射領域の中心の位置が、基板外、基板端から 1.25mm 内部、4.5mm 内部の場合を解析した。レーザ出力は 46W, ビーム径 1.25mm, 移動速度 5.0mm/s とした。

図 17 は基板端中央上面の最大主応力の時間変化を示す。基板外から照射したときは、入射当初圧縮応力を示すが、その後急激に引張応力に変わる。照射開始位置を基板端とビーム照射領域外周が一致するように、ビーム中心を基板端からビーム半径に等しい 1.25mm に設定すると、照射開始当初から基板端中央は引張応力となり、0.15 秒後に最大値 864MPa を示した後、緩やかに減少していく。さらに、照射開始位置を基板端から離すと、発生応力は低下する傾向を示す。

図 18 には、各照射開始位置条件で、基板端中央の最大主応力が最大値を示す時刻の基板端の応力の分布を示す。基板外から照射を開始した場合と基板端からビーム径に等しい 1.25mm だけ離れた位置から照射を開始した場合には応力分布はよく似た急峻な分布を示す。発生応力は基板端から 1.25mm の位置から照射を

開始した場合の方が高くなり、その結果、引張応力場の範囲も広がっている。基板端から 4.5mm はなれた場合の応力分布はより緩やかになる。

したがって、照射は基板外から基板端の位置で開始するのが効果的である。

以上をまとめると、レーザを移動させて照射する場合、初期き裂の偏向抑止にはレーザのビーム径を小さくすることおよび照射を基板端あるいは基板外から開始することが有効である。ビームの移動速度は低いほどき裂の発生が容易になるが偏向の抑止効果は小さい。

Fig. 17 Change of maximum principal stress at the center of plate edge for different beam starting position

Fig. 18 Distribution of maximum principal stress for different beam starting position

5. 結 言

アルミナ基板のレーザ切断において、初期き裂の偏向を抑止するためには、基板端中央の応力を高く、その周囲では基板端に沿って急峻に応力が低下する分

布を形成することが有効であると考え、レーザの照射条件をパラメータに熱応力解析を行い、初期き裂の発生方向の偏向抑制の効果について検討した。

(1) レーザを静止照射する場合、照射位置は基板端に近いほど偏向抑制の効果大きい。

(2) ビーム径は小さいほどき裂の発生は容易になるが、偏向抑制への影響は小さい。

(3) レーザを移動照射する場合、ビーム径は小さいほどき裂発生は容易になり、初期き裂の発生方向の偏向抑制に効果がある。

(4) 照射は基板外から基板端の位置で開始する方が効果的である。

(5) ビームの移動速度は低いほどき裂の発生は容易になるが、初期き裂の発生方向の偏向にはあまり効果がない。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、有意義な議論を頂いた日立電線株式会社 佐藤忍氏、於曾能啓一氏に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 沖山俊裕, 精密工学会誌, 60-2, (1994), 196-199.
- (2) 鈴木清, 機械と工具, 39-3, (1995), 42-45.
- (3) 黒部利次, 砥粒加工工学会誌, 39-1, (1995), 10.
- (4) 才本明秀・今井康文・本村文孝, 機講論(材料部門), (1998-11), 53-54.
- (5) 沢田博司・今井康文・才本明秀・本村文孝, 精密工学会誌, 64-11, (1998), 1638-1642.
- (6) A.Saimoto, Y.Imai and H.Sawada, Advances in Fracture Research, ICF9, (1997), 2095.
- (7) 山田啓司・上田隆司・細川晃・マフズアルフダ, 大磯桂一, 機講論, No.98-5(1998-11), 53-54.
- (8) W. Kriegel and H. Palmour III, Mechanical properties of engineering ceramics, Interscience publishers, (1961)
- (9) 川田雄一・河本実・横堀武夫・宮川松男編, 材料強度工学ハンドブック, 朝倉書店, (1977), 788-791.
- (10) H.Nakayama, CERAMICS STRENGTH DATABASE, 日本材料学会, (1996), 262.