レーザスクライブ線に沿ったレーザ照射による ガラスの亀裂伸長*

山本幸司** 羽阪 登*** 森田英毅*** 大村悦二**

Crack Extension in Glass by Laser Irradiation along Laser Scribed Line

Koji YAMAMOTO, Noboru HASAKA, Hideki MORITA and Etsuji OHMURA

A mechanical breaking process after laser scribing is indispensable to complete the separation of glass substrate since the crack depth induced by the laser scribing is limited. Laser irradiation along the laser scribed line is introduced in this paper as a crack extension method in depth direction after the laser scribing of a relatively thick glass in order to make the mechanical breaking easier. Since the separating load decreases by extending the scribed crack deeply, it contributes to the inhibition of glass particle generation. The target of this research is to clarify the mechanism of crack extension by the laser irradiation along laser scribed line. Two-dimensional thermal elasticity analysis was conducted by a finite element method based on the experimental results in order to theoretically estimate the laser irradiation condition which extends crack. The following results were obtained. Compressive stress is generated on the glass surface and tensile stress is generated inside the glass by the laser irradiation along the laser scribed line. The tensile stress concentrates at the crack tip induced by the laser scribing, and the crack penetrates into the depth direction. The condition of crack extension can be estimated from the maximum surface temperature and the maximum tensile stress of the crack tip in practical processing velocity (200 or more mm/s).

Key words: laser scribing, glass, crack extension, thermal stress, finite element method

1. 結 言

ガラス基板に CO₂ レーザを照射し、加熱直後を冷却するレーザスクライブ法を用いると、機械的なガラス分断方法と比べて、パーティクルの発生が減少するとともに、ガラスエッジ強度が向上する¹⁾²⁾。レーザスクライブ法は、パーティクルの抑制と、ガラス基板強度の維持というフラットパネルディスプレイ製造工程の要求を満たす有効なガラス加工法である。

著者ら³⁾⁴⁾は、レーザスクライブ実験によるき裂(以下、亀裂と書く)深さと亀裂形状の結果を踏まえて、有限要素法による熱弾性解析を行い、レーザスクライブ機構を提唱した。また、レーザスクライブ亀裂の深さには限界があることを示した。亀裂深さに限界があることから、レーザスクライブ後のガラス基板を分断するためには、スクライブ線に沿って曲げ応力を加えるなどの分断工程が不可欠である。

曲げ応力を加える機械的な分断方法に対して、ガラス基板の表面に機械的なスクライブ線を形成し、スクライブ線に沿って、表面、または、その裏面からレーザ照射し、ガラス基板を分断する方法が研究されている^{5)~11)}。これらは、レーザ照射により非接触でガラス基板を分断するので、機械的な分断方法と比較すると、分断時に発生する欠けなどの欠陥が生じにくい。それにより、パーティクルの減少が期待できる。しかし、機械的なスクライブであるため、スクライブ線に微細な亀裂が存在する。レーザ加熱されて、これらの亀裂がさらに成長した場合、ガラスエッジ強度の低下が懸念される。

一方、図 1 のように、レーザスクライブ法で形成したスクライブ線に沿って、再びレーザ照射することにより、レーザスク

ライブ亀裂を深さ方向に伸長させてガラス基板を分断する方法がある¹²⁾。レーザスクライブ線に重ねてレーザ照射するので、以後、この方法をレーザ重ね照射と呼ぶ。レーザスクライブ法は、非接触加工なので、スクライブ線に微細な亀裂が発生しにくく、レーザ加熱により微細な亀裂が成長することがないので、機械的なスクライブ線と比較して、ガラスエッジ強度の低下を抑制できると考えられる。また、レーザ重ね照射でガラス基板が分断に至らない場合でも、レーザスクライブ亀裂が伸長し、深い亀裂を形成できる。これにより、レーザスクライブされたガラス基板の分断荷重や分断の衝撃を小さくできるので、分断時に発生する欠けや欠陥が生じにくくなる。

しかしながら、レーザ重ね照射によりレーザスクライブ亀裂が深さ方向に伸長する現象を解析した報告はなく、加工条件や加工メカニズムが明らかでないのが現状である。

そこで、本研究では、レーザ重ね照射によりレーザスクライブ亀裂が深さ方向に伸長する条件をレーザ照射実験により求めた。次に、実験結果に基づいた有限要素法による二次元熱弾性解析を行って、レーザ重ね照射によるレーザスクライブ亀裂の伸長機構と亀裂が伸長する条件を検討した。

Fig. 1 Schematics of laser scribing (a) and laser irradiation along the laser scribed line (b)

* 原稿受付 平成 20 年 1 月 25 日

** 正 会 員 大阪大学大学院工学研究科 (吹田市山田丘 2-1)

*** 三星ダイヤモンド工業(株) (吹田市南金田 1-4-37)

Fig. 2 Positional relationship among heating area and cooling area for laser scribing

Table 1 Laser scribing condition for experiment

Glass thickness	2.8 mm
Glass size	300 mm × 150 mm
v_1 Scribing velocity	18 mm/s
P_1 Laser power	14.7 W
$2x_0$ Minor axis of heating area	2.1 mm
$2y_0$ Major axis of heating area	22.0 mm
d Cooling point distance	12 mm
$2x_c$ Minor axis of cooling area	2.0 mm
$2y_c$ Major axis of cooling area	3.0 mm

Fig. 3 Positional relationship among heating area of laser irradiation along the laser scribed line and analysis model

Table 2 Experimental condition of laser irradiation along the laser scribed line

v_2 Scanning velocity	Variable mm/s
P_2 Laser power	Variable W
$2x_2$ Minor axis of heating area	2.1 mm
$2y_2$ Major axis of heating area	22.0 mm

2. 実験方法および結果

2.1 実験方法

実験は前報³⁾と同じ装置を用いた。まず、ガラスを真空吸着ステージに固定した。スクライブを開始するガラス端にスクライブの起点となる初期亀裂をカッターホイールで設け、CO₂ レーザをガラス表面で楕円形状となるようにビーム成形した。レーザ光をガラス表面に照射し、レーザ光とガラスに相対的な速度を与えて、スクライブ予定線上を加熱するとともに、レーザ光の後端付近をウォータージェットにより急冷した。このような方法によって、スクライブ方向に垂直亀裂を進行させ、レーザスクライブ線を形成した。図2にレーザビームの加熱域とウォータージェットによる冷却域の位置関係を示す。

試料には、板厚 2.8 mm、サイズ 300 mm × 150 mm のソーダガラス基板を用い、150 mm 辺を 30 mm 間隔でレーザスクライブした。表1にレーザスクライブ条件を示す。冷却域の大きさは、ノズル径と広がり角、および、ノズルとガラス表面の距離で決まる直径で示した。

Fig. 4 Photographs of separated surface by laser scribing ($P_1 = 14.7$ W, $v_1 = 18$ mm/s)

次に、図3のように、レーザスクライブ線に沿ってレーザ重ね照射を行った。実験では、レーザ重ね照射をスクライブの開始端から開始しても、終了端から開始しても、レーザ重ね照射により亀裂が伸長する条件はほぼ同じであったので、実験効率を考慮し、スクライブの終了端をレーザ重ね照射の開始端とした。表2に、レーザ重ね照射条件を示す。ビーム形状は、レーザスクライブにおけるビーム形状と同様にした。レーザ重ね照射のレーザ出力 P_2 と走査速度 v_2 を変えて、亀裂が深さ方向に伸長する条件を探索した。亀裂が伸長しなかった場合を不可とした。

レーザ重ね照射後、手でガラス基板を分断し、光学顕微鏡を用いて、分断面でレーザ重ね照射により伸長した亀裂深さを測定した。

2.2 実験結果

レーザスクライブ亀裂の深さを確認するため、スクライブ後、手でガラス基板を分断し、光学顕微鏡を用いて亀裂深さを測定した。分断面の写真を図4に示す。基板中央部の亀裂深さ D_c は 0.48 mm であるのに対して、基板の終了端では、 D_c が 1.6 mm と深くなっている。いずれの領域でも、分断エッジに微細な亀裂は見られない。

まず、レーザ重ね照射によりレーザスクライブ亀裂が伸長したレーザ出力 P_2 と走査速度 v_2 の関係を図5(a)に示す。×以外の記号が、亀裂が伸長したことを示す。この場合は、レーザ重ね照射の開始端に深い亀裂が存在するので、亀裂の伸長に影響を及ぼすことが懸念された。一方、次章で述べる二次元熱応力解析では、開始端の亀裂深さを考慮できないので、実験と解析の条件を一致させることができない。そこで、スクライブの終了端から 15 mm の位置を裏面側からカッターホイールを用いてガラス基板を分断して、レーザ重ね照射の開始端で一定の亀裂深さ ($D_c = 0.48$ mm) となるようにした。この状態でレーザスクライブ亀裂が伸長するレーザ重ね照射条件を探索した。その結果を図5(b)に示す。ここでも×以外の記号が、亀裂が伸長したことを示す。

図6に、レーザ重ね照射によりレーザスクライブ亀裂が伸長したときの分断面を示す。図6(a)の写真の上側がレーザ照射面である。レーザスクライブで形成された亀裂 D_c の下に、レーザ重ね照射により伸長した亀裂 D_{c2} が観察される。分断面のエッジ部を拡大して観察すると、図6(b)に矢印で示すように、レーザ光が照射されたガラス表層で帯状の模様が観察される。この帯

(a) With deep crack at start edge of laser irradiation along the laser scribed line

(b) With crack of constant depth at start edge of laser irradiation along the laser scribed line

Fig. 5 Domain of laser irradiation conditions along the laser scribed line obtained by combinations of scanning velocity and laser power; Crossing marks of high velocity represent conditions that scribed crack was not able to grow, and crossing marks of low velocity represent conditions that glass surface was damaged by laser heating

状の模様は通常のレーザスクライブ亀裂の表面では観察できないことから、レーザ重ね照射時に生じたと考えられる。しかし、ここでも分断エッジに微細な亀裂は認められず、分断面品質に問題はない。これに対して、図 6 (c)に矢印で示すように、エッジに凹凸が生じており、分断エッジに熱的なダメージを受けている。以下では、熱的なダメージが生じるとガラスエッジ強度の低下が懸念されることから、このような条件を不適切と判断した。

図 5 において、高速側の×印はレーザスクライブ亀裂がレーザ重ね照射によって伸長しなかった条件を表している。低速側の×印は、図 6 (c)のような熱的なダメージが分断エッジに生じた条件を表している。

レーザスクライブ亀裂が伸長可能な条件は、レーザ出力 P_2 が増加するにつれ、走査速度 v_2 が高速になる傾向がある。図 5 (a) のレーザ重ね照射の開始端に深い亀裂が存在する場合と、図 5 (b) の一定の深さの亀裂が存在する場合を比較すると、分断エッジに熱的なダメージが生じる条件 (低速側の×印) には差異はなかった。ところが、図 5 (a) の開始端に深い亀裂が存在する方が、高速側で亀裂が伸長した。また、レーザ出力 $P_2 = 39.5$ W において、図 5 (a) では、亀裂が伸長したが、図 5 (b) では、亀裂は伸長しなかった。これらのことから、レーザスクライブ亀裂が伸長する条件は、レーザ重ね照射の開始端に存在する亀裂深さに影響されるといえる。

図 5 (b) において、レーザ重ね照射により伸長した亀裂深さ D_{c2} の測定結果を図 7 に示す。各レーザ出力に対する伸長した亀裂深さ D_{c2} は、深い側がレーザ重ね照射の走査速度 v_2 の低速の条件に、 D_{c2} の浅い側が高速の条件に対応している。

(a) Crack depth D_c of laser scribing and crack depth D_{c2} of laser irradiation along laser scribed line ($P_2 = 91.5$ W, $v_2 = 300$ mm/s)

(b) Belt-shaped mark of the laser scribed crack surface generated by carrying out laser irradiation along laser scribed line ($P_2 = 91.5$ W, $v_2 = 300$ mm/s)
(c) Heat damage generated at scribed edge by laser irradiation along laser scribed line ($P_2 = 91.5$ W, $v_2 = 200$ mm/s)

Fig. 6 Photographs of separated surface of laser irradiation along laser scribed line

Fig. 7 Relationship between crack depth D_{c2} by laser irradiation along laser scribed line and Laser power P_2 ; Deep crack depth side corresponds to the low velocity condition. in Fig. 5 (b)

3. 熱応力解析方法

レーザ重ね照射実験の結果に基づいて、汎用プログラム (Quick Welder) を使い、有限要素法による非定常状態で、二次元熱弾性解析を行った。ガラスの物性値は、前報³⁾と同じ値を用いた。図 8 に有限要素モデルを示す。対称性を考慮して 2.8 mm $\times$ 30 mm の領域を解析対象とした。ガラスのレーザ照射面に $x-y$ 座標をとり、 y 軸方向をレーザビームの走査方向とし、 z 軸方向を板厚方向とした。 $y = 0$ の $x-z$ 面に有限要素モデルを設けた (図 3)。レーザスクライブの亀裂深さが 0.48 mm であるので、それとほぼ同じ深さ 0.481 mm の接触要素を配して亀裂と見立てた。図 8 に、配した接触要素を模式的に示す。

x 軸方向 (ビーム幅方向) の分割の最小値を 29.3 μ m とし、 z 軸方向 (板厚方向) の分割の最小値を 17.2 μ m とした。総節点数は 2099、要素数は 2023 である。時間ステップは、 0.25 mm を

Fig. 8 Mesh geometry for FEM analysis

走査速度 v_2 で除した時間, すなわち, $0.25 \text{ mm}/v_2 [\text{s}]$ とした. レーザビームの大きさには表 2 の値を用い, その強度分布をガウス分布と仮定し, 加熱域の大きさには長径 $1/e^2$, および, 短径 $1/e^2$ を用いた. ガラスへの入熱量は, 光学系の減衰率を計算したところ 0.9793 % となったので, ガラスの反射率の測定値 18.5 % を考慮して, $0.798 P [\text{W}]$ とした. 放熱条件は断熱とした.

$x-z$ 面の二次元熱伝導解析では, レーザビームの中心を $y = -15 \text{ mm}$ の位置から y 軸方向に走査させた. すなわち, 図 8 の有限要素モデルに対して, レーザビームを紙面の奥から手前に走査させ, 加熱条件を時間とともに変化させた. 次に, 得られた温度場を用いて, $\sigma_{yy} = \tau_{yx} = \tau_{yz} = 0$ と仮定した平面応力問題として $x-z$ 面の二次元熱応力解析を行った. レーザ照射側端を x 軸方向に, 他端を x 軸, および, z 軸方向に, それぞれ拘束した. 亀裂は引張応力に対して垂直に生じるので, ここでは, 亀裂伸長に関わる主な応力 σ_{xx} に着目した. また, エッジに熱的なダメージが生じたので, レーザスクライブ亀裂の先端だけでなく, 表面にも注目した.

4. 結果と考察

実験結果と解析結果を比較して, レーザスクライブ亀裂が伸長する条件を考察した. ここでは, 実験と解析の条件を一致させるため, 一定のレーザスクライブ亀裂深さとしてレーザ重ね照射を行った実験結果 (図 5 (b)) を解析した.

4.1 レーザ重ね照射によるレーザスクライブ亀裂伸長機構

レーザスクライブ亀裂が伸長したレーザ出力 $P_2 = 71.0 \text{ W}$, 走査速度 $v_2 = 200 \text{ mm/s}$ のレーザ重ね照射条件を解析した. 図 9 に, 表面温度 T_{surf} $^{\circ}\text{C}$ と亀裂先端の温度 T_{tip} $^{\circ}\text{C}$ の時間変化を示す. 時刻 $t = 75 \text{ ms}$ がレーザビームの中心位置に対応している. 表面温度 T_{surf} は, レーザ加熱直後から急激に上昇し, ビーム中心やや後方で最大値に達する. ガラス表面の最高到達温度を $T_{\text{surf max}}$ $^{\circ}\text{C}$ とする. 亀裂先端の温度 T_{tip} は, レーザ加熱の影響を受けにくく, ほぼビーム中心からなだらかに上昇している. 図 10 に, $T_{\text{surf max}}$ 発生時の $x-z$ 面と z 軸上の温度分布を示す. 表層だけが加熱され, 亀裂先端まで熱が伝わっていないことがわかる.

図 11 に, 図 9 に対応した表面と亀裂先端の応力 σ_{xx} の解析結果を示す. ここで, 表面応力と亀裂先端の応力を, それぞれ $\sigma_{\text{surf}} [\text{MPa}]$ と $\sigma_{\text{tip}} [\text{MPa}]$ とする. 表面応力 σ_{surf} は, 加熱直後から

Fig. 9 Time variations of temperature of glass surface and crack tip ($P_2 = 71.0 \text{ W}$, $v_2 = 200 \text{ mm/s}$)

Fig. 10 Temperature distributions at the time of $T_{\text{surf max}}$ generating ($P_2 = 71.0 \text{ W}$, $v_2 = 200 \text{ mm/s}$); (a) Temperature distribution along the z -axis, (b) Temperature distribution on $x-z$ plane

圧縮応力となり, その圧縮の大きさは急激に増加し, ビーム中心やや後方で最大となる. 亀裂先端の応力 σ_{tip} は, 加熱直後から引張となつて, ビーム中心やや後方で引張応力が最大値に達する. この亀裂先端の最大引張応力を $\sigma_{\text{tip max}} [\text{MPa}]$ とする.

図 12 (a) に, $\sigma_{\text{tip max}}$ 発生時の z 軸上と $x-z$ 面の応力 σ_{xx} の分布を示す. また, 亀裂の有無の応力分布を比較するため, 図 12 (b) に亀裂の無い場合の解析結果を示す. 図 12 (a), (b) において, 亀裂の有無に関わらず, 表層では約 180 MPa と大きな圧縮応力が発生している. これより, 図 6 (b) のレーザスクライブ亀裂面に生じた帯状の模様は, 高温で表層に大きな圧縮応力が作用したことにより生じたと考えられる.

内部では, 表層の圧縮応力の影響を受けて, 逆に引張応力が発生する. 亀裂がない場合 (図 12 (b)) は, 表面から内部にかけて, 応力 σ_{xx} はなだらかに変化している. それに対して, 亀裂がある場合 (図 12 (a)) は, 応力 σ_{xx} は表面の圧縮応力の直下で零となつて, 亀裂先端近傍で引張応力が急激に増加している. また, 図 13 に, $\sigma_{\text{tip max}}$ 発生時における各節点の x 座標を求めた結果を示す. 約 $z = 0.15 \text{ mm}$ から亀裂先端 ($z = 0.481 \text{ mm}$) までの範囲で, 解析における亀裂は開いた状態 (変位の最大値は, $0.08 \mu\text{m}$) となる. この解析結果からも, 亀裂先端近傍で急激に引張応力が増加していることが理解できる.

以上の解析結果から, レーザ重ね照射によるレーザスクライブ亀裂の伸長機構を図 14 の模式図を用いて説明する. レーザ重ね照射により, ガラス基板の表層に大きな圧縮応力が生じ, その影響を受けてガラス基板内部に引張応力が発生する. 内部に

Fig. 11 Time variations of stress σ_{xx} of glass surface and crack tip corresponding to Fig. 9 ($P_2 = 71.0$ W, $v_2 = 200$ mm/s)

Fig. 12 Stress σ_{xx} distributions at the time of $\sigma_{tip\ max}$ generating ($P_2 = 71.0$ W, $v_2 = 200$ mm/s); (i) Stress σ_{xx} distribution along the z -axis, (ii) Stress σ_{xx} distribution on $x-z$ plane

発生した引張応力が亀裂先端に集中することによって、深さ方向にレーザスクライブ亀裂が伸長する。

4.2 レーザスクライブ亀裂伸長可能条件の推定

図 15 に、レーザ重ね照射によりレーザスクライブ亀裂が伸長可能であったレーザ出力と走査速度の実験条件 (図 5 (b)) のもとで熱弾性解析を行った結果を示す。図 15 (a) に、表面最高到達温度 $T_{surf\ max}$ と走査速度 v_2 の関係を示す。また、図 15 (b) に、それぞれのレーザ出力における亀裂先端の最大引張応力 $\sigma_{tip\ max}$ と走査速度 v_2 の解析結果を破線で示し、その線上に、亀裂が伸長した実験条件の解析結果を記号で示している。低速側の×印が、図 5 (b) でエッジに熱的なダメージが生じて不適切と判断した条件に対応しており、高速側の×印が、図 5 (b) で亀裂が伸長しな

Fig. 13 The x -coordinate of nodal points at the time of $\sigma_{tip\ max}$ generating ($P_2 = 71.0$ W, $v_2 = 200$ mm/s)

Fig. 14 Schematic of extension of laser scribed crack by laser irradiation along the laser scribed line

(a) Relation between maximum temperature $T_{surf\ max}$ in heating area surface and scanning velocity v_2

(b) Relation between maximum tensile stress $\sigma_{tip\ max}$ of crack tip and the scanning velocity v_2

Fig. 15 Analysis results of maximum tensile stress, $\sigma_{tip\ max}$, and maximum surface temperature, $T_{surf\ max}$, at the laser scribed crack growth conditions by laser irradiation along the laser scribed line; Crossing marks of high velocity show the conditions that scribed crack was not able to extend, and crossing marks of low velocity show the conditions that glass surface was damaged by laser heating, corresponding to Fig. 5 (b).

かった条件に対応している。

図 15 (a) において、レーザ出力が一定のとき、走査速度が低速になると $T_{surf\ max}$ は増加する。走査速度 $v_2 = 100$ mm/s 以上では、

Fig. 16 Temperature distributions at $T_{\text{surf max}}$ generating position ($P_2 = 30.4$ W, $v_2 = 40$ mm/s); (a) Temperature distribution along the z -axis, (b) Temperature distribution on $x-z$ plane

$T_{\text{surf max}}$ の上限値は約 540 °C で、レーザ出力と走査速度に依存せずほぼ一定となった。この値は、前報³⁾のレーザスクライブ可能条件における表面最高到達温度の上限値の約 500 °C にほぼ等しい。したがって、この上限値以下では、レーザ重ね照射によって、図 6 (c) のようなエッジに熱的なダメージが生じないといえる。図 15 (b) のそれぞれのレーザ出力の亀裂先端の最大引張応力 $\sigma_{\text{tip max}}$ と走査速度 v_2 の関係は、 v_2 が 20~100 mm/s 付近の範囲では、 v_2 が低速になると $\sigma_{\text{tip max}}$ は減少している。これは、 v_2 が低速であるほど内部まで熱が伝わり、亀裂先端近傍の温度が上昇し、亀裂先端で熱応力が発生しにくくなることによると考えられる。

図 16 にレーザ出力 $P_2 = 30.4$ W、走査速度 $v_2 = 40$ mm/s の低速条件における $T_{\text{surf max}}$ 発生時の $x-z$ 面と z 軸上の温度分布を示す。 $P_2 = 71.0$ W、 $v_2 = 200$ mm/s の温度解析結果 (図 10) と比較して、 $v_2 = 40$ mm/s となると、内部まで熱が伝わって、亀裂先端近傍の温度が上昇していることがわかる。これより、図 15 (a) において、走査速度 $v_2 = 100$ mm/s 以下のとき、 $T_{\text{surf max}}$ が上限値の 540 °C 以下であるにも関わらず、レーザスクライブ亀裂が伸長しなかったことを説明できる。

図 15 (b) において、 $\sigma_{\text{tip max}}$ は、 $v_2 = 100$ mm/s 付近で最大となり、 v_2 が 100 mm/s 付近以上になると、 v_2 が高速になるほど $\sigma_{\text{tip max}}$ は減少している。これが、図 7 の実験結果において、レーザ重ね照射により伸長した亀裂深さ D_{c2} が走査速度 v_2 の高速側で浅くなった理由である。また、各レーザ出力における $\sigma_{\text{tip max}}$ の下限値は、レーザ出力が大きくなるのに伴って増加している。実際に加工を行う場合、走査速度が高速の方が加工時間を短縮できる。実用的な走査速度 $v_2 = 200$ mm/s 以上では、レーザ出力 P_2 と走査速度 v_2 に関わらず、レーザスクライブ亀裂が伸長する $\sigma_{\text{tip max}}$ の下限値をほぼ 40 MPa と見なすことができる。

これらのことから、200 mm/s 以上の実用的な走査速度において、熱弾性解析を行えば、ガラス表面の最高到達温度 $T_{\text{surf max}}$ の上限値と、亀裂先端の最大引張応力 $\sigma_{\text{tip max}}$ の下限値からレーザスクライブ亀裂が伸長するレーザ照射条件を推定できると考えられる。

ただし、実際の加工では、レーザ重ね照射の開始端に深い亀裂が存在するので、亀裂先端の最大引張応力 $\sigma_{\text{tip max}}$ が図 15 (b) の $\sigma_{\text{tip max}}$ の下限値より小さくてもレーザスクライブ亀裂が伸長

する可能性がある。しかしながら、上記 $\sigma_{\text{tip max}}$ の下限値でレーザ照射条件を推定すれば、レーザスクライブ亀裂の伸長を安全側で推定できると考えられる。

結 言

レーザ重ね照射によりレーザスクライブ亀裂が深さ方向に伸長する条件を踏まえて、有限要素法による二次元熱弾性解析を行った。本研究で得られた結論は、以下の通りである。

- (1) レーザ重ね照射を行うと、ガラス基板の表層に大きな圧縮応力が生じ、その影響でガラス内部に引張応力が発生する。内部に発生した引張応力が亀裂先端に集中することによって、レーザスクライブ亀裂が深さ方向に伸長する。
- (2) レーザ重ね照射によりレーザスクライブ亀裂が伸長する条件では、表面最高到達温度 $T_{\text{surf max}}$ の上限値は、レーザ出力と走査速度に依存せずほぼ一定となる。また、実用的な走査速度 200 mm/s 以上の条件では、亀裂先端の最大引張応力 $\sigma_{\text{tip max}}$ の下限値も、レーザ出力と走査速度に依存せずほぼ一定と見なすことができる。
- (3) したがって、200 mm/s 以上の実用的な走査速度において、熱弾性解析を行えば、表面の最高到達温度の上限値 $T_{\text{surf max}}$ と亀裂先端の最大引張応力 $\sigma_{\text{tip max}}$ の下限値から、レーザスクライブ亀裂が伸長するレーザ照射条件を推定できる。
- (4) 実際の加工では、レーザ重ね照射の開始端に深い亀裂が存在するので、 $\sigma_{\text{tip max}}$ の下限値以下でもレーザスクライブ亀裂が伸長する可能性がある。しかしながら、この $\sigma_{\text{tip max}}$ の下限値でレーザ照射条件を推定すれば、レーザスクライブ亀裂の伸長を安全側で推定できると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 三宅泰明: FPD ガラス基板の切断技術, 砥粒加工学会誌, 47, 7, (2001) 342.
- 2) C. Hermanns: Laser Separation of Flat Glass, Proc. 63rd Laser Mater. Processing Conf., Jpn. Laser Processing Soc., (2005) 105.
- 3) 山本幸司, 羽阪 登, 森田英毅, 大村悦二: ガラスのレーザスクライブにおける熱応力解析, 精密工学会誌, 71, 9, (2005) 1157.
- 4) 山本幸司, 羽阪 登, 森田英毅, 大村悦二: ガラスのレーザスクライブにおける三次元熱応力解析, 日本機械学会論文集, C 編, 72, 724, (2006), 3927.
- 5) 渡部紀夫: ガラス工学ハンドブック, 朝倉書店, (1999), 392.
- 6) 松本文雄, 曾山幸男: ガラスパネルの割断方法, 公開特許公報, 特開平 5-185270, (1993).
- 7) 池田正幸, 柴田隆行, 牧野英司, 高橋義美, 小野 敦, 松本文雄: 板ガラスのレーザブレーキングに関する研究 (第 1 報), 精密工学会誌, 62, 3, (1996) 413.
- 8) 池田正幸, 柴田隆行, 牧野英司, 高橋義美, 越田 仁: ガラスのレーザブレーキングに関する研究 (第 2 報), 精密工学会誌, 66, 2, (2000) 213.
- 9) Tai C.H., Chen C.J.: Formation of the Breaking Surface of Alumina in Laser Cutting with a Controlled Fracture Technique, Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture 217, (2003) 489.
- 10) Tsai C.H., Lin B.C.: Laser Cutting of Silica Glasses by Using the Controlled Fracture Technique, Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, (2004) 2107.
- 11) Yamada K., Yamane Y., Sekiya K.: Proposal of Laser Cleaving Process Utilizing Temperature Gradient in Thickness Direction, Proceedings of the 4th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, (2007) 883.
- 12) 伊東 明, 上野 勉, 藤井昌宏: 脆性基板の加工方法及び装置, 公開特許公報, 特開 2001-130921, (2001).