

ガラスのレーザスクライブにおける亀裂湾曲メカニズムの解明と亀裂形状の推定

八幡 恵輔*, 大村 悦二*, 清水 政二**, 村上 政直**

*大阪大学大学院工学研究科
(〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

**三星ダイヤモンド工業株式会社
(〒566-0034 摂津市香露園 32-12)
kyahata@mitsuboshi-dia.co.jp

Clarification of Crack Curvature Mechanism and Estimation of Crack Shape in Laser Scribing of Glass

YAHATA Keisuke, OHMURA Etsuji, SHIMIZU Seiji and MURAKAMI Masanao

(Received December 25, 2012)

Laser scribing generates a shallow crack on a glass surface as a pre-processing for division. It utilizes thermal stress caused by heating with the laser beam and by cooling with the water jet. In the laser scribing, a crack curves when there is a gap along the scribing line between the centers of the heated area and cooled one. In this study, we conducted some experiments of laser scribing under such asymmetric processing conditions and observed the cross-sectional crack shapes. As a result, it was found that the crack propagates quasi-steadily even in asymmetric stress distribution. We proposed a crack propagation analysis method for such quasi-steady crack propagation using a boundary element method. The present analysis needs only static stress distribution at a quasi-steady state. The entire crack shape was obtained by repeating a calculation with a constant and small number of elements. The crack shape obtained from the analysis agreed relatively well with the experimental results. Therefore, the validity and usefulness of the analysis method were verified.

Key words : laser scribing, glass, thermal stress, mixed mode crack propagation, boundary element method

1. 緒 言

近年, ノートパソコンや携帯電話等, 薄型ディスプレイ (FPD) を搭載した電子機器が普及している. 多くの FPD にはガラス基板が用いられ, 製造には大きな基板から製品を取り出すための分断工程が不可欠である. ガラス等の脆性材料は, 基板表面に形成した浅い亀裂を起点として分断できる. 亀裂を形成する工程をスクライブという. ガラスのスクライブ法の一つとして, CO₂ レーザによる加熱とウォータージェットによる冷却によって生じる熱応力を利用する方法¹⁾がある. 基板表面を加熱した直後に冷却する際に大きな引張応力が生じ²⁾, 加工開始位置に形成した初期亀裂がレーザ走査線に沿って進展する. 加工中にパーティクルが発生しないため³⁾, 高いエッジ強度が得られ, FPD 用ガラス基板の分断に適した加工法である. 一般に, 直線加工を行う場合は, レーザビームおよびウォータージェットの強度分布を加工線に対して対称にし, 真っすぐな亀裂を形成するのが望ましい. しかし, 加熱位置と冷却位置のわずかなずれによって亀裂が板厚方向に対して湾曲する場合がある. このような加熱位置と冷却位置のずれによって亀裂がどの程度湾曲するかについて理論的に明らかにした報

告は見当たらない.

本研究では, 加熱位置と冷却位置がずれた場合の亀裂進展現象を予測することを目的とし, まず, 実験によってどの位置にどのような亀裂が形成されるかを調べた. 続いて, 実験結果に基づき, 基板中央付近での亀裂進展を対象とした三次元解析を行った. このとき, 基板端からの亀裂の成長を過渡的に解析すれば任意の位置での現象を把握できるが, 結果を得たい領域以外の解析に多くの時間が費やされ, 効率的ではない. そこで, 本研究では, 基板中央付近の静的熱応力場のみを用いる解析方法を提案した. また, 湾曲した亀裂を正確にモデル化するには, 亀裂の曲率に合わせて要素サイズを決める必要があり, 一般に多くの要素が必要である. 応力集中問題においては, 境界要素法によって有限要素法と比べて少ない要素数で高精度の解が得られることが報告されている⁴⁾. そこで, 有限要素法による熱応力解析結果を用い, 境界要素法による亀裂進展解析を行った. 解析結果と実験結果を比較し, 解析方法の妥当性と有用性を検討した.

2. 実験方法および実験結果

2.1 実験方法

2.1.1 レーザスクライブ実験

まず、レーザスクライブで形成される亀裂形状を調べるため、板厚 700 μm、スクライブ方向の基板長さ 230 mm のソーダライムガラスに対してスクライブ実験を行った。

Fig. 1 に実験装置の概略を示す。光学系や加工方法は著者らの既報^{5), 6)}と同様である。ここでは、既報と異なる点のみを説明する。本研究では、加熱域(レーザ照射領域)と冷却域(ウォータージェット照射領域)の位置が加工方向に対して垂直方向にずれた状態で実験を行った。Fig. 2 に、加熱域、冷却域、初期亀裂の位置関係および座標系を示す。以降、特に断らない場合、加熱域の中心を x 方向の基準とする。また、基板の深さ方向を z とする。加熱域中心に対する冷却域中心の x 方向変位を冷却ずれ量 x_{gap} とおく。冷却域に生じる引張応力によって亀裂が成長する^{2), 5), 6)}ため、初期亀裂位置に大きな引張応力が生じるよう、初期亀裂位置と冷却域中心の x 座標を一致させた。この位置関係を保ったままレーザ光とウォータージェットを y 方向に走査させ、スクライブを行った。実験条件をまとめて Table 1 に示す。加熱域および冷却域のサイズ、レーザ出力、走査速度を一定とし、 x_{gap} を様々に設定して実験を行った。

2.1.2 加熱域中心と亀裂位置の測定

本研究では、レーザスクライブ後、基板表面での亀裂の位置および基板内部での亀裂形状を調べ、どのような亀裂が形成されたかを特定する。まず、亀裂位置の測定について説明する。

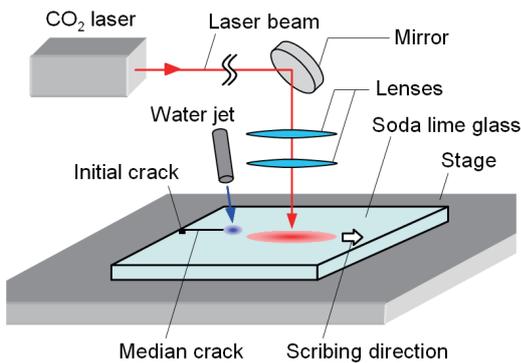


Fig. 1 Schematic of experimental setup

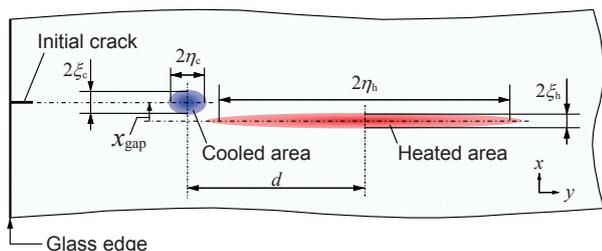


Fig. 2 Positional relation of heated and cooled areas and initial crack. x_{gap} is x -displacement from the center of the heated area to the center of the cooled area.

Table 1 Processing conditions in experiment

	Thickness of specimen	700 μm
	Processing velocity	100 mm/s
	Laser power	60 W
$2\xi_h$	Minor axis of heated area	1.2 mm
$2\eta_h$	Major axis of heated area	26.0 mm
d	y -distance between centers of heated and cooled areas	15.0 mm
$2\xi_c$	Minor axis of cooled area	2.0 mm
$2\eta_c$	Major axis of cooled area	3.0 mm
x_{gap}	x -gap of center of cooled area for center of heated area	0, ±200, ±300, ±400, ±600 μm

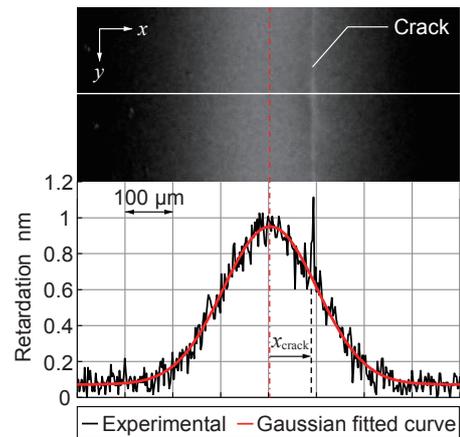


Fig. 3 Retardation distribution (upper) and x -line profile (lower) around heated area after the laser scribing in the case of $x_{gap} = 600 \mu\text{m}$. x_{crack} is x -displacement from the center of the heated area to the crack.

著者ら⁷⁾は、レーザスクライブ後、加熱域で複屈折現象が起こり、リタデーションが高くなることを報告している。そこで、加熱域の中心に対する亀裂の位置を特定するため、光弾性実験によるリタデーション測定を行った。Fig. 3 に、レーザスクライブ後の x - y 面のリタデーション分布と x 方向のラインプロファイルを示す。一例として、冷却ずれ量 x_{gap} が 600 μm の場合を示した。リタデーション測定結果に大きなノイズが確認されることから、基板表面での亀裂の位置を特定できる。一方、リタデーションが高い帯状の領域が加熱域である。本実験ではすべて、リタデーションのラインプロファイルはほぼ対称形であった。このため、亀裂部を除いた測定結果をガウス分布でフィッティングし、ガウス分布の中心を加熱域の中心と定義した。このようにして、各加工条件について加熱域の中心から亀裂位置までの x 方向変位 x_{crack} を求めた。以降、 x_{crack} を単に亀裂位置と呼ぶ。

2.1.3 亀裂形状の調査

続いて、基板内部での亀裂形状の測定方法を説明する。基板を亀裂に沿って分断すれば、亀裂形状を分断面形状の一部として測定できる。そこで、三鷹光器の非接触三次元測定装置 NH-3SP を使用し、分断面 (y - z 面) の形状を z 方向に光学的に測定した。測定結果の一例として、冷却ずれ量 x_{gap} が 300 μm の場合の結果を Fig. 4 に示す。 $z = 0$ がレー

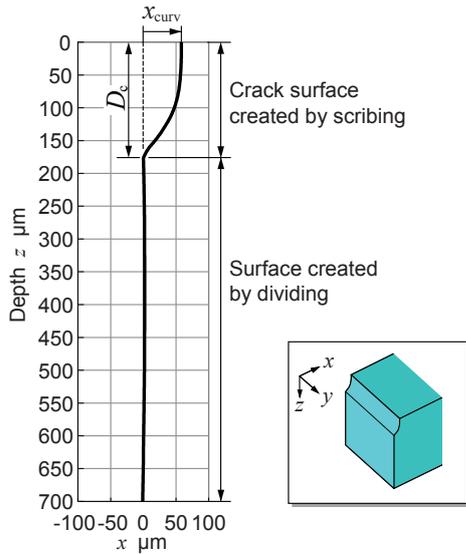


Fig. 4 Example of measured cutting surface profile in the case of $x_{gap} = 300 \mu\text{m}$. x -profile at the rear surface is 0. D_c is the maximum crack depth. x_{curv} is the maximum x -displacement from the crack tip to any point on the crack surface.

ザ照射面である。横軸は、裏面側 ($z = 700 \mu\text{m}$) の x を 0 としたときの相対的な x 座標である。 $172 \mu\text{m} \leq z \leq 700 \mu\text{m}$ の領域ではグラフがほぼ直線であり、 $z = 172 \mu\text{m}$ の位置でグラフの傾きが大きく変化した。これより、 $0 \leq z \leq 172 \mu\text{m}$ の範囲がレーザスクライブで形成された亀裂で、 $172 \mu\text{m} \leq z \leq 700 \mu\text{m}$ の範囲は分断によって形成された面であることがわかる。湾曲した亀裂の形状を定量的に調べるために、亀裂の最大深さ D_c と湾曲量 x_{curv} の二つのパラメータを定義した。 **Fig. 4** に示したとおり、 D_c はレーザ照射面から亀裂先端までの距離、 x_{curv} は亀裂先端から亀裂面上の任意点までの x 方向変位の最大値である。各加工条件について、 D_c と x_{curv} を測定した。

2.2 実験結果

2.2.1 リタデーション測定による亀裂位置の調査

まず、亀裂位置 x_{crack} の測定結果を説明する。 **Fig. 5 (a)** に、加工開始位置から基板中央にかけてのリタデーション分布の一例を示す。ここでも、冷却ずれ量 x_{gap} が $300 \mu\text{m}$ の場合を示した。加熱域および冷却域の中心をそれぞれ一点鎖線で示した。 **Fig. 5 (a)** 中の左端の初期亀裂が成長するにつれて、亀裂が加熱域の中心に近づいたことがわかる。そこで、この加工線上の様々な位置で x_{crack} を測定した。 **Fig. 5 (b)** に、初期亀裂先端からの y 方向距離に対する x_{crack} の変化を示す。結果の近似曲線を実線で示した。 x_{crack} は、初期亀裂先端からおよそ 10 mm 以内の領域で大きく変化し、その後は変化が小さかった。この結果から、初期亀裂先端から 10 mm 以上離れた領域では、応力場によって決まる特定の位置で亀裂が準定常的に進展したと考えられる。本研究では、この準定常亀裂進展現象に注目した。以降、 x_{crack} および亀裂形状の測定結果はすべて、初期亀裂先端から $100 \sim 150 \text{ mm}$ 離れた位置での結果である。

Fig. 6 に、冷却ずれ量 x_{gap} を様々に設定した場合の x_{crack}

の測定結果を示す。各 x_{gap} について 5 回ずつ加工と測定を行った。○は各測定結果、●は 5 回の測定結果の平均値である。 $x_{gap} = 0$ の場合、亀裂はほぼ加熱域の中心に位置した。 $x_{gap} \neq 0$ のいずれの場合でも、基板表面では亀裂が加熱域の中心と冷却域の中心の間に位置し、 $|x_{gap}|$ が大きいほど亀裂が加熱域の中心から離れた。

2.2.2 分断面形状測定による亀裂形状の調査

続いて、冷却ずれ量 x_{gap} を様々に設定したときの亀裂の最大深さ D_c と湾曲量 x_{curv} の測定結果を **Fig. 7** に示す。●は第 4 章で述べる解析結果である。ここでは△および▲で示す実験結果について説明する。△は 5 回の測定結果、▲はその平均値である。 D_c の測定結果から、 $|x_{gap}|$ が大きいほど亀裂が浅くなるのがわかる。また、 x_{curv} の測定結果からは、 x_{gap} の符号を反転させると、亀裂の湾曲する方向も反転することがわかる。 $200 \mu\text{m} \leq |x_{gap}| \leq 400 \mu\text{m}$ の場合は x_{curv} に顕著な差がみられなかったのに対し、 x_{gap} が $600 \mu\text{m}$ まで大きくなると $|x_{curv}|$ が小さくなった。

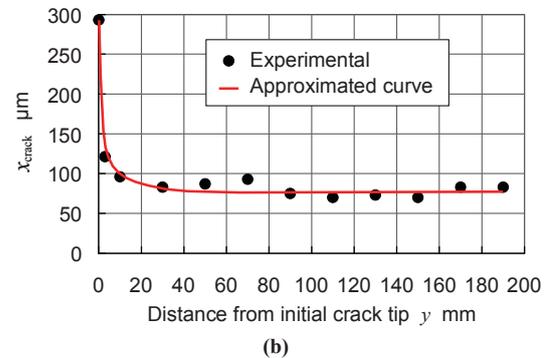
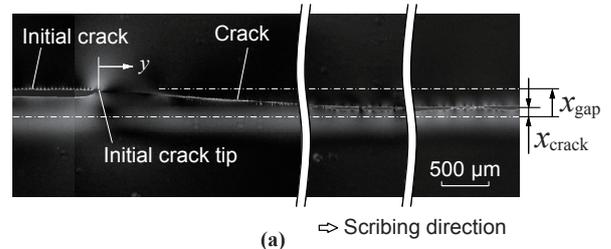


Fig. 5 (a) Variation of the crack location with the crack propagation seen from the retardation distribution and (b) variation of x_{crack} from the initial crack tip to the vicinity of the processing end in the case of $x_{gap} = 300 \mu\text{m}$.

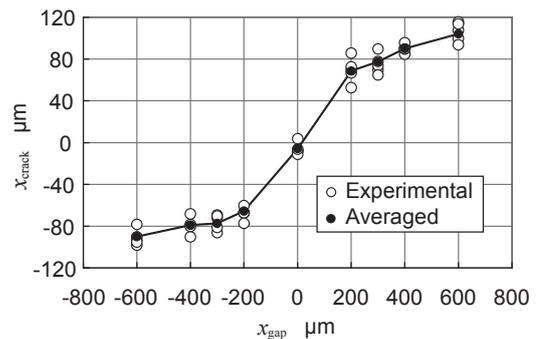


Fig. 6 Measured x_{crack} for each x_{gap} . White dots are results of five times of measurement. Black dots are the averaged values.

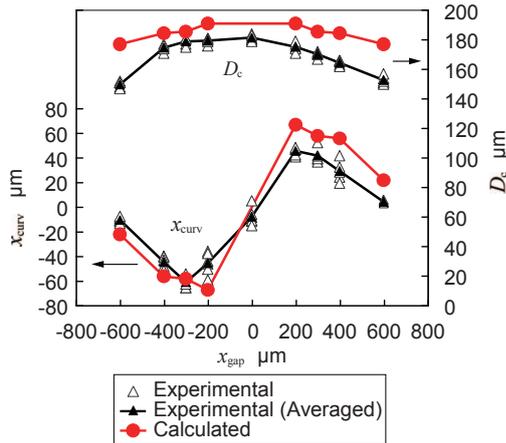


Fig. 7 Experimental and calculated results of D_c and x_{curv} for each x_{gap} . White triangles are the results of five times of measurement. Black triangles are the averaged values.

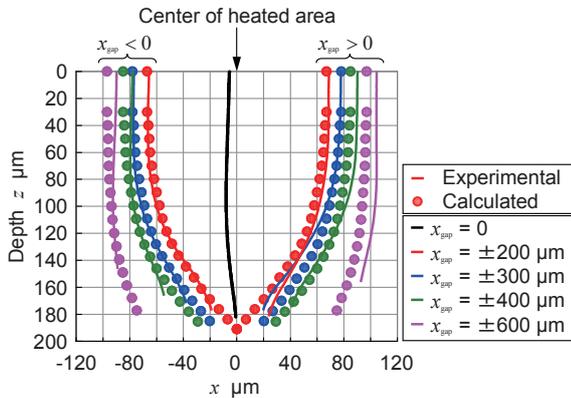


Fig. 8 Experimental and calculated results of $x-z$ sectional view of the crack shape. $x = 0$ means the center of the heated area.

各 x_{gap} での 5 回の亀裂形状の測定結果のうちの一つを Fig. 8 に実線で示す。ここでは、亀裂部 (Fig. 4 の D_c 部) の結果のみを示した。図中の●は解析結果であり、ここでは測定結果について説明する。測定結果を図示する際は、それぞれの x_{gap} の場合について、Fig. 6 に示す x_{crack} の平均値を参照して、 $z = 0$ での亀裂座標をその位置に合わせた。 x_{crack} は加熱域の中心に対する基板表面での亀裂位置であるため、Fig. 8 における $x = 0$ は、加熱域の中心を意味する。このようにして、 x_{crack} と亀裂形状の測定結果から、どの位置にどのような形状の亀裂が形成されたかを特定した。 x_{crack} , D_c , x_{curv} の平均値に対する絶対誤差の最大値は、それぞれ $17 \mu\text{m}$, $4.2 \mu\text{m}$, $14 \mu\text{m}$ であった。測定結果にこの程度のばらつきはあったが、一般に、亀裂は加熱域の中心側へ湾曲することがわかった。

3. 解析方法

3.1 有限要素法と境界要素法の組み合わせ

本研究では、加工中の熱応力下における応力拡大係数に基づいて三次元亀裂進展解析を行う。著者ら⁶⁾の既報と同様に、応力拡大係数は重ね合わせの原理に基づいて計算す

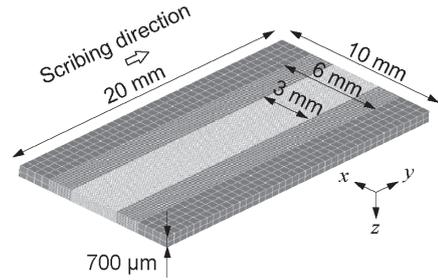


Fig. 9 Mesh geometry for FEM analysis.

Table 2 Physical properties of soda lime glass

Density	2,520 kg/m ³
Specific heat	800 J/kg K
Thermal conductivity	1.03 W/m K
Thermal expansion coefficient	$8.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Young's modulus	71.6 GPa
Poisson's ratio	0.23

る。まず、有限要素法によって亀裂のない弾性体にはたらく熱応力を求める。続いて、得られた熱応力から亀裂面にはたらく分布力を求め、境界要素法によって応力拡大係数を計算する。市販のソフトウェアを使用し、有限要素解析には ANSYS、境界要素解析には BEASY を用いた。

3.2 有限要素法による熱応力解析

有限要素解析は山本ら⁸⁾および著者ら⁶⁾の既報と同様であるため、解析方法の詳細は省略する。Fig. 9 に解析モデルを示す。モデルサイズを $10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 700 \mu\text{m}$ とした。加熱域の中心を 10 mm 辺の中央 ($x = 0$)、冷却域の中心を $x = x_{gap}$ とした。 $x = 0$ 周辺をより細かく要素分割し、最小要素を $100 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ の直方体とした。

レーザ加熱およびウォータージェットによる冷却は、モデル表面 ($z = 0$) にガウス分布の熱流束および熱伝達率を与えてモデル化する。加熱域および冷却域の大きさは、Table 1 に示す値と一致させた。時間ステップ間隔を 0.002 s として加熱域および冷却域を y 方向に移動させ、温度分布の時間変化を求めた。ただし、光学系によるエネルギーの減衰と基板表面でのレーザ光の反射を考慮し、入熱量をレーザ出力の 64% とした。冷却ノズル径および冷却水流量から冷却域中心の熱伝達率を計算し⁹⁾、 $8.1 \times 10^4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ とした。

得られた温度分布を基に熱応力解析を行う。拘束条件として、 $x = 0$ 面の x 方向変位と、 $x = \pm 5 \text{ mm}$ かつ $z = 700 \mu\text{m}$ 上の y および z 方向変位を 0 とした。用いたソーダライムガラスの物性値^{10)~12)}を Table 2 に示す。

本研究では、加工開始位置から十分離れた位置での準定常亀裂進展を扱う。本解析において、冷却域がモデル中央付近を通過する間、冷却域周辺の引張応力場は準定常的に推移した。そこで、冷却域の中心が有限要素モデルの中心にある時刻の静的熱応力場を用いて亀裂進展解析を行う。

3.3 境界要素法を用いた亀裂進展解析

3.3.1 亀裂進展解析の概要

はじめに, 亀裂進展解析の方針を概説する. 混合モードの亀裂進展の基準として, 伊藤ら¹³⁾および Sih ら¹⁴⁾が用いている有効応力拡大係数

$$K_{\text{eff}} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \quad (1)$$

を採用する. ここで, K_I および K_{II} は, モード I およびモード II の応力拡大係数である. ここでは, 節点 A における応力拡大係数を $K_I(A)$ のように書くことにする.

節点 A で $K_{\text{eff}}(A)$ が応力拡大係数のしきい値 K_{th} を超えると, 亀裂面に対して角度 $\theta(A)$ だけ傾いた方向に亀裂が進展すると考える. 以降, θ を亀裂進展角度と呼び, Erdogan ら¹⁵⁾の方法に従って,

$$\theta(A) = 2 \tan^{-1} \left\{ \frac{1}{4} \left[\frac{K_I(A)}{K_{II}(A)} \mp \sqrt{\left(\frac{K_I(A)}{K_{II}(A)} \right)^2 + 8} \right] \right\} \quad (2)$$

によって求める.

本研究では, 有限要素解析で得られた非対称静的熱応力場内における亀裂形状を求める方法を提案する. 解析の過程を Fig. 10 に模式的に示す. Fig. 10 の下半分は, 解析の進行に伴う亀裂形状の変化を表す. 求めるべき亀裂形状を赤の点線で示した. 既報^{5), 6)}から, 加工中の亀裂は, その先端が引張応力場内の基板表面にあり, y の負の方向に次第に深くなることが予想される. レーザスクライブでは亀裂がある深さまでしか進展しないことから, 加工中の亀裂前縁は $K_{\text{eff}} = K_{\text{th}}$ となる位置にあると考えられる. そこで, Step 1, Step 2, ... と亀裂を段階的に進展させてこの準定

常亀裂形状を求める. 以下, Fig. 10 を用いて解析方法を詳述する.

3.3.2 初期亀裂の設定と亀裂形状更新方法

Step 1 において, $y-z$ 面に平行で一定深さ a_{ini} の表面亀裂を初期亀裂として設定する. このとき, Fig. 6 の亀裂位置 x_{crack} の平均値を参照して, 初期亀裂の x 座標を定める. Fig. 10 において最も濃く塗られている領域が解析領域であり, 各 Step では亀裂の一部を解析対象とする. この理由および解析領域の設定方法については 3.3.3 項で説明する.

このように設定した初期亀裂形状下で得られる K_{eff} を Fig. 10 上部に模式的に示す. 加工中の亀裂先端(すなわち Fig. 10 の解析領域)は冷却域中心の前方にある⁶⁾. 冷却域中心から遠ざかる (Fig. 10 において y が大きい) ほど引張応力が低下し, それに伴って K_{eff} が小さくなると考えられるため, K_{eff} の傾きを負で図示した. Step 1 において, $K_{\text{eff}} = K_{\text{th}}$ となる節点を A_1 とし, $K_{\text{eff}} > K_{\text{th}}$ である領域で亀裂を進展させて Step 2 に進む. このとき, すべての節点の亀裂進展角度 θ と亀裂進展距離 Δa を一定とする. その理由は, 亀裂が準定常的に進展していることを考慮し, Step 2 における亀裂の $x-z$ 断面形状が y に依存しないようにするためである. また, Step 1 における亀裂前縁上の節点のうち, A_1 は求めるべき亀裂前縁(赤線)上の節点であるが, 他はその上にない. このため, ここでの亀裂進展角度 θ は, $K_I(A_1)$ および $K_{II}(A_1)$ から式(2)によって計算した $\theta(A_1)$ とする.

同様に, Step k では, k 段目の深さにある亀裂前縁上で $K_{\text{eff}} = K_{\text{th}}$ となる節点 A_k と進展角度 $\theta(A_k)$ を求める. そして, $K_{\text{eff}} > K_{\text{th}}$ であるすべての節点を $\theta(A_k)$ の方向に Δa だけ進展させて Step $(k+1)$ へ移行する. このようにして $K_{\text{eff}} > K_{\text{th}}$ である領域で亀裂を進展させていくと, Step を進めるにつれて K_{eff} が K_{th} に次第に漸近する. なぜなら, レーザスクライブでは基板表面からの距離が大きいほど引張応力が低く^{2), 5), 6)}, 亀裂を進展させると応力拡大係数 K_{eff} が次第に低下すると仮定できるからである. 本解析方法に従えば, 最終的には, 実験結果と同様な一定深さの準定常亀裂が得られる.

3.3.3 解析領域の設定方法

このように, 各 Step では節点 A_k の位置と $\theta(A_k)$ のみを求めればよいので, 解析時間を短縮するため, 解析領域の大きさを $L_x \times L_y \times L_z$ に限定する. Fig. 10 中 Step 3 のように, Step k の解析領域内に A_k が含まれない場合 (Step 3-1) には, 解析領域を $-y$ 方向に $L_y/2$ だけ移動させ, 新しい解析領域内で K_{eff} を求める (Step 3-2).

ここでは, 解析領域サイズを $L_x \times L_y \times L_z = 2 \text{ mm} \times 600 \mu\text{m} \times 700 \mu\text{m}$, 1 回の亀裂進展距離 Δa を $10 \mu\text{m}$ とした. Fig. 11 に要素分割の例を示す. Fig. 10 の模式図のように, A_k 近傍の節点を一気に Δa 進展させて, 亀裂深さを極端に変えると, 応力拡大係数が求まらない場合が生じる. そこで, Step $(k+1)$ の亀裂形状を決定する際は, Fig. 11 の下半分に例示するように, A_k から $-y$ 方向に $40 \mu\text{m}$ の領域で亀裂

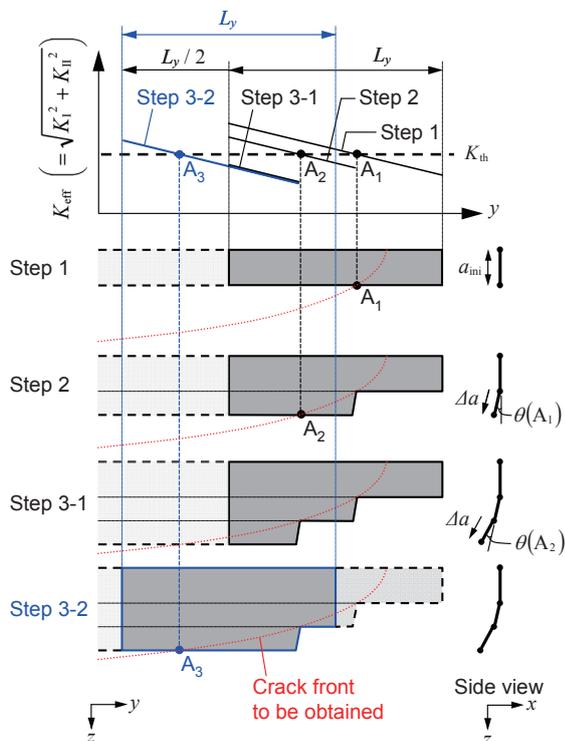


Fig. 10 Schematic of variation of K_{eff} (upper) and the crack shape (lower) with the analysis progression. Each K_{eff} is obtained under the crack shape with the same step number.

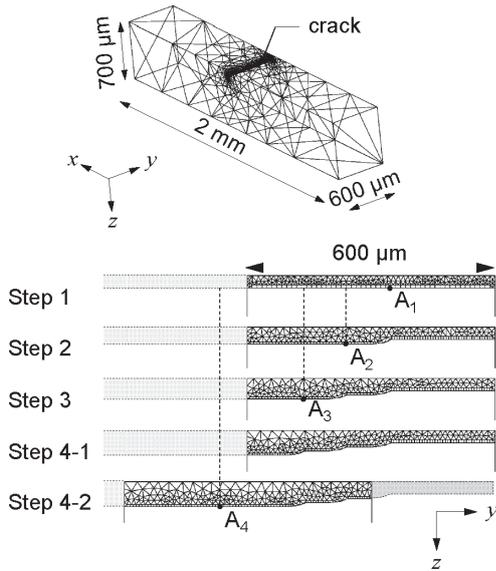


Fig. 11 Example of mesh geometry for BEM analysis. The upper is a whole model for one step. The lower is the variation of the crack meshing with the progression of the analysis.

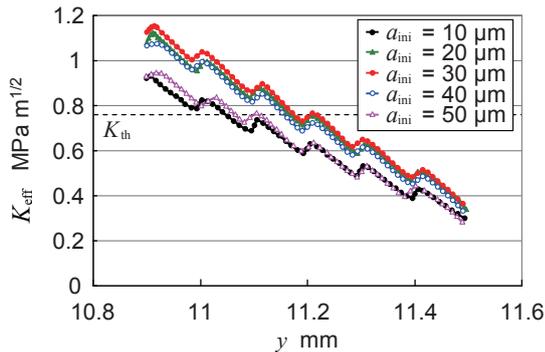


Fig. 12 K_{eff} at Step 1 under a variety depth of the initial crack in the case of $x_{gap} = 600 \mu\text{m}$.

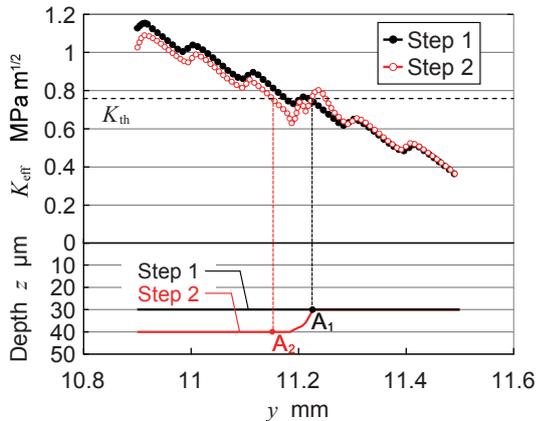


Fig. 13 K_{eff} (upper) and crack shapes (lower) at Step 1 and 2 in the case of $a_{ini} = 30 \mu\text{m}$ and $x_{gap} = 600 \mu\text{m}$.

前縁を滑らかに設定した。

4. 解析結果と考察

著者ら⁶⁾は、対称加工条件下でのレーザスクライブに対

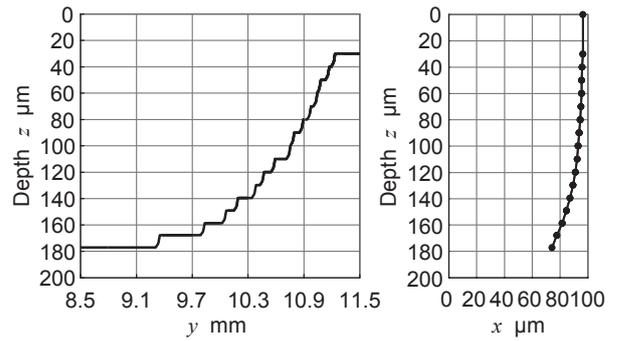


Fig. 14 Analysis results of the crack shape in the case of $x_{gap} = 600 \mu\text{m}$. The left is $y-z$ projection, while the right is $x-z$ one.

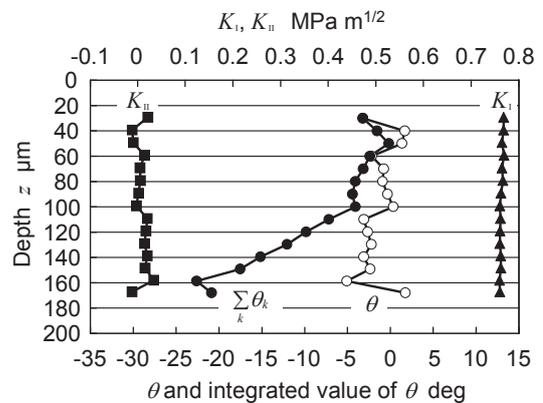


Fig. 15 $K_I(A_k)$, $K_{II}(A_k)$, and $\theta(A_k)$ at Step k in the case of $x_{gap} = 600 \mu\text{m}$. The vertical axis means z -coordinate of A_k . Black dots are integrated values of $\theta(A_k)$, which means the crack front angle for z -axis at step $(k+1)$.

する三次元亀裂進展解析について報告をしている。モード I の応力拡大係数 K_I と K_{th} を比較して亀裂を進展させた結果、 $K_{th} = 0.76 \text{ MPa m}^{1/2}$ の場合に亀裂深さの解析結果が実験結果と最もよく一致した。そこで、本研究でも K_{th} を $0.76 \text{ MPa m}^{1/2}$ として解析を行った。

4.1 初期亀裂深さの決定

まず、適切な初期亀裂深さ a_{ini} を決定するため、 a_{ini} を様々な設定して Step 1 での有効応力拡大係数 K_{eff} を求めた。以降の Step における亀裂進展距離 Δa に対応させて、 a_{ini} を $10 \mu\text{m}$ ずつ変えて K_{eff} を求めた。その結果を Fig. 12 に示す。3.3.2 項で述べたように、本解析方法では、亀裂進展するほど K_{eff} が低下するという仮定に基づいて、 $K_{eff} > K_{th}$ である領域で亀裂を進展させる。Fig. 12 を見ると、 $a_{ini} > 30 \mu\text{m}$ では亀裂が深いほど K_{eff} が小さいものの、 $a_{ini} < 30 \mu\text{m}$ の場合は亀裂が深いほど K_{eff} が大きい。例えば、 a_{ini} を $10 \mu\text{m}$ とした場合、亀裂を進展させて深さが $20 \mu\text{m}$ になると、 K_{eff} が K_{th} からさらに遠ざかり、上記仮定に矛盾することになる。そこで、ここでは初期亀裂深さ a_{ini} を $30 \mu\text{m}$ とした。

4.2 解析の進行に伴う亀裂形状と応力拡大係数の変化

以下、冷却ずれ量 x_{gap} が $600 \mu\text{m}$ の場合を例に挙げて、解析結果を詳しく説明する。まず、Step 1 および Step 2 での K_{eff} および亀裂形状を Fig. 13 に示す。Step 1 において、 $y = 11.228 \text{ mm}$ の位置で $K_{eff} = K_{th}$ であった。この位置が

Fig. 10 中の点 A_1 に対応する, $y < 11.228$ mm の領域で亀裂を進展させた結果, Step 2 ではほとんどすべての節点において, K_{eff} が Step 1 のときより低下した. しかし, 節点 A_1 で亀裂前縁形状が滑らかでないため, その近傍のいくつかの節点では, 図のように, K_{eff} が Step 1 のときより大きくなった. このように本解析では, Step k において, 節点 A_1 から A_{k-1} で亀裂前縁が滑らかでないことに起因して, それらの近傍で応力拡大係数が適切に求まらない. そこで, それらの K_{eff} は無視して, K_{eff} が前 Step の値に比べて十分低下した領域において $K_{\text{eff}} = K_{\text{th}}$ となる位置を A_k とした. **Fig. 13** における節点 A_2 はこのようにして求めた.

こうして解析を Step 16 まで進めたときの亀裂形状を **Fig. 14** に示す. Step 16 において, $y \leq 9.3$ mm の領域では K_{eff} が K_{th} を超えなかったため, Step 16 で解析を終了した. **Fig. 14** の左図のように, 最終的な亀裂前縁には複数の段差が生じる. 1 回の亀裂進展距離 Δa を小さくすれば段差を小さく抑えられるが, 最終的な亀裂深さまで到達するのに必要な Step 数が増加する. したがって, 解析のコストと精度を考慮して Δa を決定すればよい. ここでは $\Delta a = 10$ μm とした結果, 亀裂前縁形状を比較的滑らかに補間できる程度に段差を小さくできたといえる.

Step k ($1 \leq k \leq 15$) における $K_I(A_k)$, $K_{II}(A_k)$ および $\theta(A_k)$ を **Fig. 15** に示す. 縦軸は A_k の z 座標である. $z = 30$ μm ($=a_{\text{ini}}$) が Step 1 の A_1 での結果であり, z が大きいほど Step が進んだ状態である. 亀裂進展角度 θ は, 各 Step の亀裂面に対する角度であるため, $\theta(A_1)$ から $\theta(A_k)$ までを積算することで, Step ($k+1$) での亀裂前縁の z 軸に対する角度が得られる. **Fig. 15** に θ の積算値も併せて示した. 各 Step において $K_{II}(A_k)$ は 0 に近い値をとり, その結果, $|\theta(A_k)|$ は最大で 5.1° であった. ほとんどの Step で $\theta(A_k) < 0$ となったため, Step が進むにつれて亀裂面の z 軸に対する傾きが次第に大きくなり, Step 16 では -21° となった.

4.3 亀裂形状の実験結果との比較

Fig. 7 および **Fig. 8** に, 亀裂の最大深さ D_c と湾曲量 x_{curv} および亀裂形状の解析結果を ● で示す. 解析は $x_{\text{gap}} > 0$ の条件でのみ行った. $x_{\text{gap}} < 0$ の条件については, **Fig. 7** では $x_{\text{curv}} = 0$ について, **Fig. 8** では $x = 0$ についてそれぞれ対称に折り返して表示した. 実験結果と解析結果は比較的よく一致し, 2.2.2 項で述べた実験結果の特徴が解析結果にも現れている. 以上より, 加熱位置と冷却位置が x 方向にずれた加工条件下で準定常的に進展する亀裂の形状を推定できるといえ, 本解析の妥当性および有用性が示された.

一般に亀裂進展解析では, 解析が進むにつれて亀裂が長くなり, 要素数が多くなる. これに対し, 本解析方法では, 限定された解析領域を移動させながら繰り返し計算を行い, 最終的に準定常状態にある亀裂形状を求めることができる. 亀裂長さに依存せず各 Step の要素数を少数に抑えられるため, 効率的な解析法であるといえる.

5. 結 言

本研究では, ガラスのレーザスクライブにおいて, 加熱

域の中心と冷却域の中心がずれた場合に形成される亀裂の形状を予測することを目的とし, まず, 実験によって亀裂形状を調べた. リタレーション測定から基板表面での亀裂位置を, 分断面形状測定から基板内部での亀裂形状を調べ, どのような亀裂が形成されたかを特定した. その結果, 加工開始位置から十分離れた位置では亀裂が準定常的に進展することを明らかにした. このとき, 亀裂は加熱域の中心と冷却域の中心の間に位置し, 基板内部で加熱域の中心側へ湾曲する.

このような非対称応力場内での準定常亀裂進展現象を, 基板中央付近の静的熱応力場のみを用いて解析する方法を提案した. まず, 実験で測定した亀裂位置と同じ位置に浅い初期亀裂を設定し, 有効応力拡大係数 K_{eff} を求める. K_{eff} が応力拡大係数のしきい値 K_{th} を超える領域において, 亀裂面に対して角度 θ 傾いた方向に亀裂を進展させる. 新しい亀裂形状のもとで K_{eff} を求め, これを繰り返して亀裂を段階的に進展させる.

本研究では, 亀裂進展解析に境界要素法を用い, 湾曲した亀裂形状を比較的少ない要素数でモデル化した. この解析によって得られる亀裂形状は, 冷却位置のずれ量が異なる複数の条件において, 実験結果と比較的よく一致した. これにより, 解析方法と解析結果の妥当性および有用性が示された.

本解析方法では, 限定された解析領域を移動させながら繰り返し計算を行い, 最終的に準定常状態にある亀裂形状を求める. 亀裂長さに依存せず各 Step の要素数を少数に抑えられるため, 効率的な解析方法であるといえる.

謝 辞

本研究を行うにあたり, 亀裂形状の測定実験においてご協力いただきました大阪大学大学院工学研究科附属超精密科学研究センター山村和也准教授, 博士後期課程 永野幹典氏ならびに研究室の方々に深く感謝致します.

参 考 文 献

- 1) Kondratenko, V.S.: Splitting of Non-Metallic Materials, PTC WO 93/20015, (1993).
- 2) Yamamoto, K., Hasaka, N., Morita, H. and Ohmura, E.: Thermal Stress Analysis on Laser Scribing of Glass, J. Laser Appl., **20-4**, (2008), 193.
- 3) 三宅泰明: FPD ガラス基板の切断技術, 砥粒加工学会誌, **45-7**, (2001), 342.
- 4) Portela, A.: Dual boundary element analysis of crack growth, Computational Mechanics Publications, Southampton, (1993).
- 5) Yahata, K., Yamamoto, K., Ohmura, E.: Crack propagation analysis in laser scribing of glass, J. Laser Micro/Nanoeng., **5-2**, (2010), 109.
- 6) Yahata, K., Ohmura, E., Shimizu, S. and Murakami, M.: Boundary Element Analysis of Crack Propagation in Laser Scribing of Glass, J. Laser Micro/Nanoeng., **8-1**, (2013), 102-109.
- 7) Yahata, K., Ohmura, E., Shimizu, S. and Murakami, M.: Dominant Factors of Suitable Processing Conditions in Laser Scribing of Glass, Proc. of 6th Int. Conf. on LEM21, (2011),

- 3374.
- 8) 山本幸司, 羽阪登, 森田英毅, 大村悦二: ガラスのレーザースタ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), 233.
 - 9) 山本明: 切削液の伝熱性能について(第 2 報), 精密機械, **26**-307, (1960), 461.
 - 10) 日本機械学会: 日本機械学会 伝熱工学資料 改訂第 4 版 V. 物性編, (1986).
 - 11) Shand, E.B.: Glass Engineering Handbook 2nd ed., McGraw-Hill, New York, (1958).
 - 12) 山根正之, 和田正道, 寺井良平, 小川晋永, 安井至, 国分可紀, 近藤敬: ガラス工学ハンドブック, 朝倉書店, (1999).
 - 13) 伊藤洋茂, 木村和成, 村松正光: 応力腐食割れにおける分岐き裂効果の評価, 日本機械学会論文集 A 編, **55**-513, (1989), 1167.
 - 14) Sih, X.Q., Zhang, X.R. and Pang, J.H.L.: Determination of interface fracture toughness of adhesive joint subjected to mixed-mode loading using finite element method, Int. J. Adhesion Adhesives, **26**-4, (2006), 249.
 - 15) Erdogan, F. and Shi, G.C.: On the Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear, J. Basic Eng., **85**-4, (1963), 519.