

ガラスのレーザスクライブにおける亀裂進展解析*

八幡恵輔^{*1}, 山本幸司^{*2}, 大村悦二^{*3}

Crack Propagation Analysis in Laser Scribing of Glass

Keisuke YAHATA^{*4}, Koji YAMAMOTO and Etsuji OHMURA

^{*4} Division of Materials and Manufacturing Science, Osaka University
2-1, Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

In the laser scribing of a glass sheet, a crack propagates across as the surface is locally quenched down immediately following CO₂ laser beam irradiation. In this process, the crack depth and scribable conditions are influenced by various parameters such as the laser power, the scribing velocity, and the distance between the heating area and the cooling area. Therefore it is important to examine the laser scribing phenomena by analysis of these parameters. We analyzed crack propagation phenomena by a finite element method, using a two-dimensional model with a pre-crack. The crack depth was evaluated by calculating the stress intensity factor. The obtained conclusions are as follows: The depth of the crack caused by the laser scribing can be estimated by giving a dynamic threshold of the stress intensity factor, K_{Dth} in the two-dimensional crack propagation analysis. The scribable maximum velocity for each laser power can be estimated by giving a static threshold of the stress intensity factor, K_{StH} . As a result, the suitable scribing conditions in the laser scribing for the practical use can be selected.

Key Words : laser scribing, glass, CO₂ laser, thermal stress analysis, crack

1. 緒 言

近年, 薄型テレビ, ノートパソコン, 携帯電話等が急激に普及し, それらに使用される液晶ディスプレイ (LCD) やプラズマディスプレイ (PDP) パネルの需要も拡大している. LCD, PDP パネルを製造するためには, ガラス基板を分断する工程が不可欠である.

現在主流の分断方法は, スクライビングホイールによるスクライブ後に曲げ応力を加えて分断する方法である. この方法は機械的加工であるため, パーティクルの発生が避けられない. また, 分断エッジにマイクロクラックが発生し⁽¹⁾, それを起点としてガラスが割れやすくなる. 特に携帯機器では高い曲げ強度が求められるため, マイクロクラックの発生を抑える必要がある.

1993 年に, CO₂ レーザ照射直後をウォータージェットなどで冷却して亀裂を進展させるレーザスクライブ方法が考案された⁽²⁾. 図 1 にレーザスクライブの原理⁽³⁾

を示す. レーザ照射によってガラス表面が加熱され, 表面から内部へ熱が伝わる. その直後にガラスはウォータージェットによって急冷され, 表面に引張応力がはたらく. 表面だけが冷却されるので, ガラス内部には高温領域が残存する. これが圧縮応力場となり, 表面の引張応力が助長され, 亀裂が成長する. このレーザスクライブ法を用いることにより, パーティクルが減少するとともに, ガラスエッジの強度が向上することが報告されている⁽⁴⁾.

このような利点から, レーザスクライブは LCD, PDP パネルのガラス基板分断に適しており, 熱応力解析によって加工メカニズムが検討されている⁽⁵⁾. しかし, 破壊力学に基づく解析は行われておらず, レーザスクライブにおける亀裂深さを推定した研究はない. そこで本研究では, ガラスのレーザスクライブにおける亀裂深さを予測し, 最適なスクライブ条件を簡易に

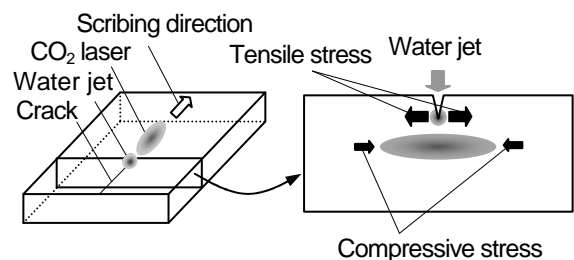


Fig. 1 Principle of laser scribing

*原稿受付 2009年06月10日

^{*1} 正員, 大阪大学(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1) (現在 三星ダイヤモンド工業(株))

^{*2} 正員, 三星ダイヤモンド工業(株) (〒564-0044 大阪府吹田市南金田1-4-37)

^{*3} 正員, 大阪大学(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: kyahata@mitsuboshi-dia.co.jp

推定することを目的として、破壊力学に基づいた二次元熱弾性解析を行った。解析には汎用有限要素法解析ツール ANSYS を用いた。解析モデルに予亀裂を導入し、応力拡大係数を評価することで亀裂進展現象を考察した。

2. レーザスクライブ実験

2.1 亀裂深さの測定 レーザスクライブによって形成される亀裂深さを調べるため、板厚 $700\ \mu\text{m}$ 、サイズ $230\ \text{mm} \times 360\ \text{mm}$ のソーダガラスにレーザスクライブを行った。図2に実験装置の概略を示す。試料を真空吸着ステージに固定し、スクライビングホイールにより試料表面のスクライブ開始端に初期亀裂を形成した。2枚の金コートミラーと2枚のレンズにより公称出力 $250\ \text{W}$ の CO_2 レーザを楕円形状にビーム成形し、試料表面に照射した。同時に、レーザ光の長軸延長線上の1点をウォータジェットにより冷却した。以降、レーザ光の中心から冷却域の中心までの距離を冷却点距離と呼び、 d と書く。レーザ光からウォータジェットの方向にステージを一定速度で動かすことで、レーザ光およびウォータジェットを試料に対して速度 v で走査させた。実験条件をまとめて表1に示す。

レーザスクライブ後、スクライブ線に沿って試料を分断した。分断面を観察し、レーザスクライブの亀裂深さを測定した。図3に、冷却点距離 d を $10\ \text{mm}$ に設定し、レーザパワー P およびスクライブ速度 v を変化させたときの亀裂深さの測定結果 D_c を示す。各レーザパワー P において、低速側は試料表面に熱ダメージが生じるとき、または試料がフルカット（いわゆる、レーザ割断）される時スクライブ不可とした。また、高速側は試料の途中で亀裂の進行が停止するときスクライブ不可とした。図3には、スクライブ可能と判断した条件における D_c を示している。

2.2 亀裂進展の時間経過 レーザスクライブの亀裂が深さ方向へ進展する際の挙動を調べるため、スクライブ中に冷却水を止め、亀裂の進行を停止させた。その後、スクライブ線に沿って試料を分断し、分断面における亀裂先端の形状を観察した。図4に光学顕微鏡写真の一例を示す。レーザスクライブの亀裂は、おおむね図4のような先端形状を保ったまま進行していると考えられる。

図4の亀裂先端から距離 l 離れた位置において、亀裂は、スクライブ方向へ l 進行する t 時間に深さ方向へ $d_c(l)$ 進展したことがわかる。ここでは、亀裂がスクライブ方向へ進行する速度はスクライブ速度 v と等しいと考え、分断面上の様々な位置において $t (=l/v)$ と d_c の関係を求めた。図5に、様々なスクライブ条件

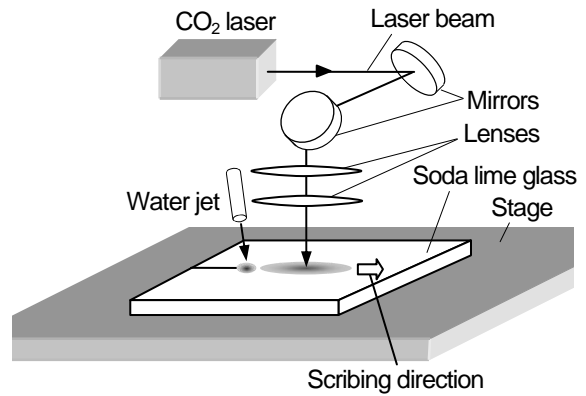


Fig. 2 Schematic of experimental setup

Table 1 Condition of experiment

v	Scribing velocity	40 mm/s ~ 400 mm/s
P	Laser power	30.4 W ~ 80.5 W
$2x_h$	Minor axis of heating area	2.1 mm
$2y_h$	Major axis of heating area	22.0 mm
d	Cooling point distance	8 mm ~ 26 mm
$2x_c$	Minor axis of cooling area	2.0 mm
$2y_c$	Major axis of cooling area	3.0 mm

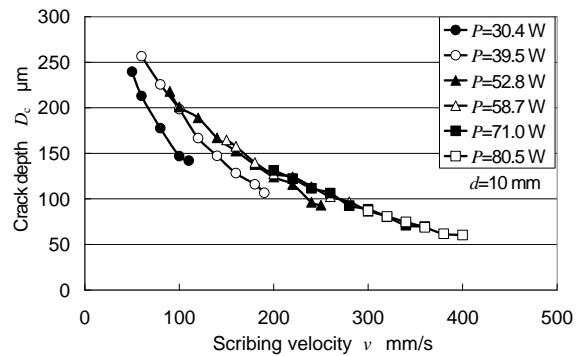


Fig. 3 Measured crack depth under scribeable conditions

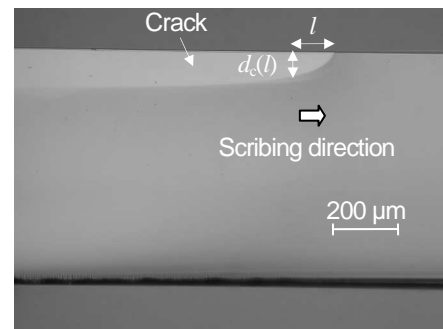


Fig. 4 Picture of cutting plane when crack propagation was stopped

において同様に求めた結果を示す。レーザスクライブ現象は準定常状態と考えられるので、図5は、各条件での任意の位置における亀裂深さの時間変化を表して

いると考えられる。したがって、グラフの傾きは亀裂が深さ方向へ進展する速度を表す。 $t=0$ (亀裂進展開始時)における亀裂進展速度はスクライブ条件によらずほぼ同じ値を示している。また、亀裂進展速度は亀裂の進展とともに遅くなるのがわかる。

3. 解析方法

レーザスクライブの亀裂は、図4のように試料表面をスクライブ方向に進行しながら深さ方向にも進展する。そのため、三次元解析を行う方が実際のスクライブ現象に近い。しかし、三次元解析を行うと多大な時間が必要となる。本研究においては、実用性を考慮し、深さ方向への亀裂進展現象をより簡易に取り扱うため、二次元解析を行った。

3・1 熱伝導解析 レーザ光の短軸方向を x 軸、スクライブ方向を y 軸、板厚方向を z 軸とし、 $x-z$ 面に有限要素モデルを設け、二次元熱伝導解析を行った。図6に熱伝導解析に用いた有限要素モデルを示す。対称性を考慮して1/2モデルを用い、レーザ通過側をより細かく要素分割した。最小要素は $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ の正方形要素とした。総節点数は 18716、総要素数は 18324 となっている。

図7に解析における加熱域と冷却域を示す。レーザによる加熱は、楕円ガウス分布の熱流束 q をレーザ照射面 ($z=0$ 面) 上に与え、 y 方向に速度 v で移動させることでモデル化した。表1に示す x_h と y_h を各方向の $1/e^2$ 半径とし、式(1)により q を計算した。ただし、光学系の減衰率とガラスの反射率を考慮し、実際の入熱量 P' を $0.80P$ とした。

$$q = \frac{2P'}{\pi x_h y_h} \exp\left[-2\left(\frac{x^2}{x_h^2} + \frac{y^2}{y_h^2}\right)\right] \quad (1)$$

ウォータージェットによる冷却は、 $z=0$ 面上の加熱域中心から距離 d 離れた位置に、 y 方向に速度 v で移動する楕円ガウス分布の熱伝達率 α を与えることでモデル化した。表1に示す x_c と y_c を各方向の $1/e^2$ 半径とし、式(2)により α を計算した。ただし、ノズル径および冷却水流量から冷却域中心における熱伝達率 α_{\max} を計算し、 $\alpha_{\max} = 1.0 \times 10^5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ とした⁽⁵⁾。

$$\alpha = \alpha_{\max} \exp\left[-2\left(\frac{x^2}{x_c^2} + \frac{y^2}{y_c^2}\right)\right] \quad (2)$$

加熱域および冷却域を除くモデルの境界はすべて断熱とした。加熱域および冷却域が $125\mu\text{m}$ 進む時間を時間ステップとし、表2に示すソーダガラスの物性値⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾を与えて解析面内の温度変化を計算した。

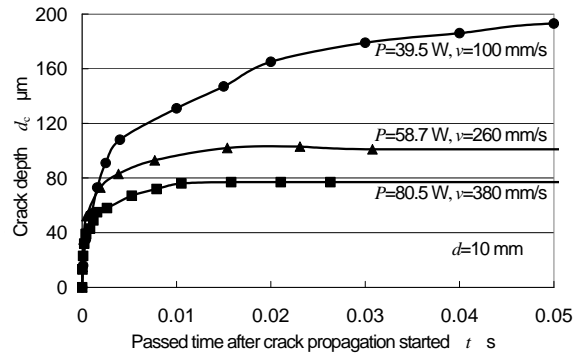


Fig. 5 Measured crack depth versus passed time after crack propagation started

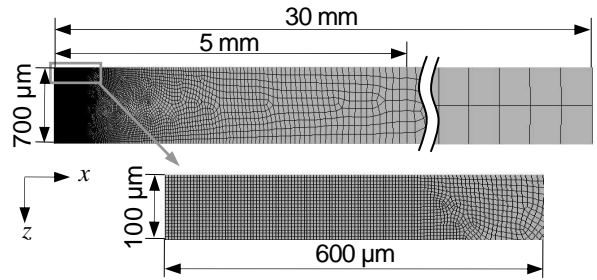


Fig. 6 Mesh geometry for thermal analysis

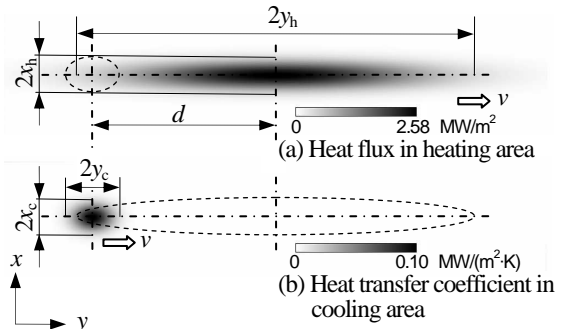


Fig. 7 Heating area and cooling area in thermal analysis

Table 2 Physical properties of soda lime glass

Density	2520 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

3・2 予亀裂導入モデルを用いた熱応力解析 熱伝導解析で得た温度分布に基づき、平面ひずみ問題として二次元熱応力解析を行った。図8に示すように、熱応力解析においては、モデルに深さ d_p の予亀裂を与え、亀裂先端には特異要素^{(9),(10)}を配した。特異要素とは、亀裂先端における特異応力場を表現するための要

素で、各辺の中心からずれた位置に中間節点が置かれている。対称線($x=0$)上において、亀裂部以外の節点は x 方向の変位 u_x を0に拘束し、亀裂部の節点は必ず $u_x \geq 0$ となるように拘束することで亀裂をモデル化した。また、 $x=30\text{ mm}$ 上の節点は x および z 方向の変位を0に拘束した。総節点数は60296、総要素数は19752となっている。

3・2・1 亀裂深さを一定に保った熱応力解析(静的解析)

以上のモデルを用い、亀裂深さを一定に保って各時刻の応力、変位、応力拡大係数 K_I を計算した。 K_I は、亀裂部節点の x 方向変位 u_x から、式(3)の変位外挿法⁽¹⁾を用いて計算した。 G は横弾性係数、 ν はポアソン比、 r は亀裂先端からの距離である。

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{Gu_x}{2(1-\nu)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \quad (3)$$

本研究では、このような亀裂深さを一定に保った熱応力解析を静的解析と呼ぶ。

3・2・2 亀裂進展解析

解析によってレーザスクライブの亀裂深さを求めるため、亀裂が進展する熱応力解析を行った。深さ d_p の予亀裂を与えて解析を開始し、各時刻の応力拡大係数 K_I を計算した。応力拡大係数のしきい値を設定し、 K_I がしきい値を超えるたびに亀裂を Δz ずつ進展させた。

前述したように、実際のレーザスクライブの亀裂は、スクライブ方向に進行しながら深さ方向にも進展する。そこで、二次元解析において、亀裂進展の開始時と開始後で異なるしきい値を設定し、亀裂進展開始時のしきい値を静的しきい値 K_{Sth} 、亀裂進展開始後のしきい値を動的しきい値 K_{Dth} とした。つまり、第一段階目は $K_I \geq K_{Sth}$ となれば予亀裂を Δz 深くし、その後は $K_I \geq K_{Dth}$ となるたびに亀裂を Δz ずつ深くした。なお、静的しきい値および動的しきい値は、本論文で新たに定義した用語である。ここでの静的、動的という語は、静的破壊靱性、動的破壊靱性を論じるときの静的、動的の意味ではない。

亀裂を進展させる際は、解析領域をリメッシュし、 Δz 深くなった亀裂先端に改めて特異要素を配した。また、 $x=0$ 上において、亀裂部の節点は $u_x \geq 0$ 、亀裂部以外の節点は $u_x = 0$ となるように拘束条件も与えなおした。さらに、亀裂を Δz 深くする際、再度同じ温度分布で K_I を計算することで、亀裂が同一時刻に複数回進展できるようにした。

解析中の亀裂深さを \tilde{d}_c とし、亀裂進展が終了したときの \tilde{d}_c を解析によるレーザスクライブの亀裂深さ \tilde{D}_c とした。ただし、 K_I が K_{Sth} を超えないときは $\tilde{D}_c = 0$

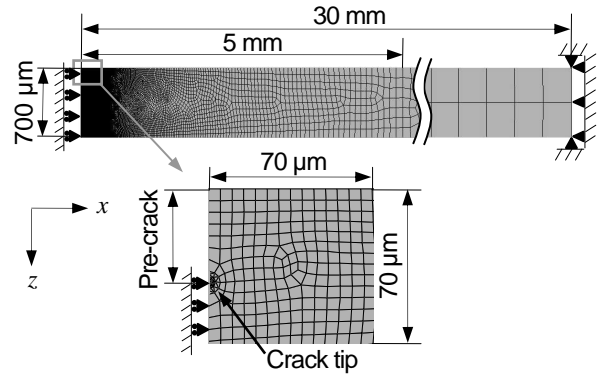


Fig. 8 Mesh geometry for thermal stress analysis

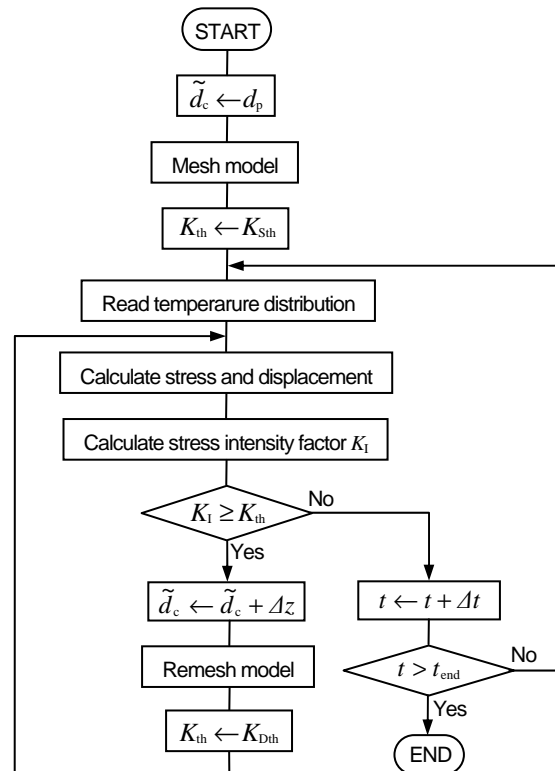


Fig. 9 Flowchart of crack propagation analysis

した。ここでは、 $\Delta z = 5\mu\text{m}$ として \tilde{D}_c を求めた。図9に解析のフローチャートを示す。本研究では、このような解析を亀裂進展解析と呼ぶ。

4. 解析結果と考察

4・1 熱伝導解析結果

熱伝導解析結果の一例として、図10に、 $P = 58.7\text{ W}$ 、 $\nu = 200\text{ mm/s}$ 、 $d = 10\text{ mm}$ の場合を示す。冷却域が解析面に到達する直前に表面の節点が最高温度 T_{max} をとる。その後、冷却域通過中に表面が急冷され、内部に高温域が残存する。

レーザパワー P が一定のとき、スクライブ速度 ν が小さいほど T_{max} は高くなる。図3に示すスクライブ可

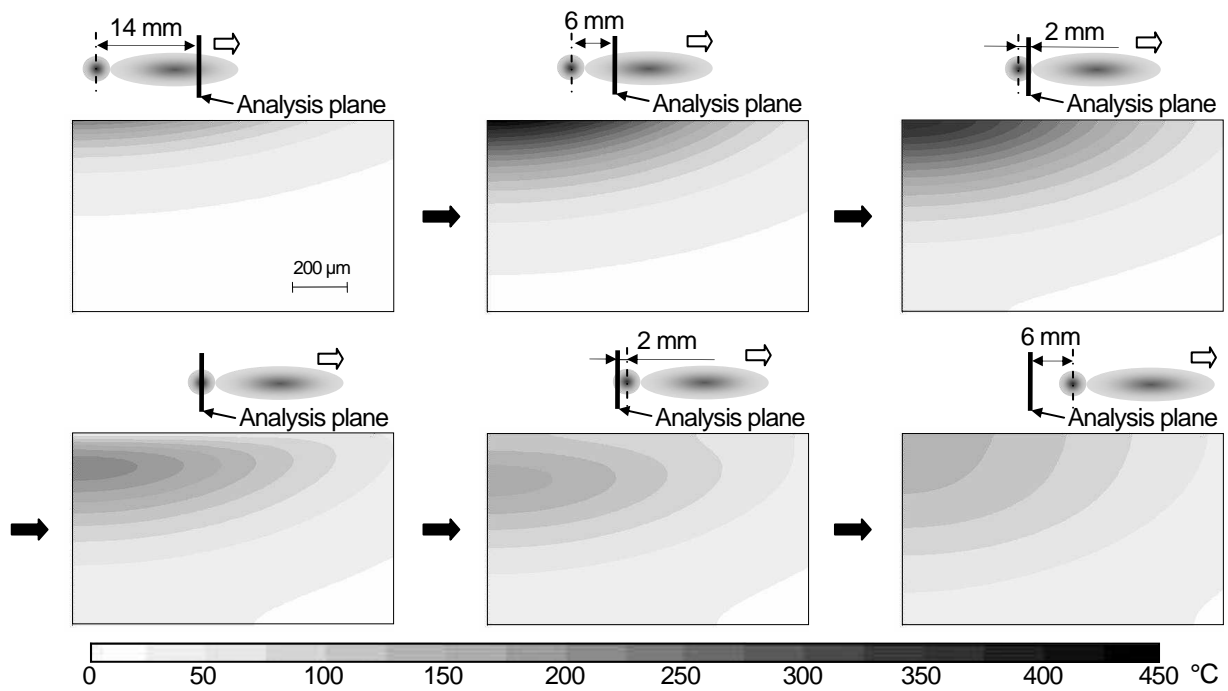


Fig. 10 Result of thermal analysis in $P=58.7\text{ W}$, $v=200\text{ mm/s}$, $d=10\text{ mm}$

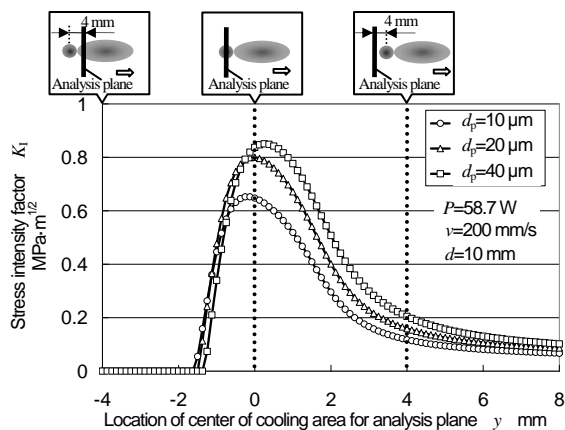


Fig. 11 Stress intensity factor versus location of center of cooling area when pre-crack depth is varied

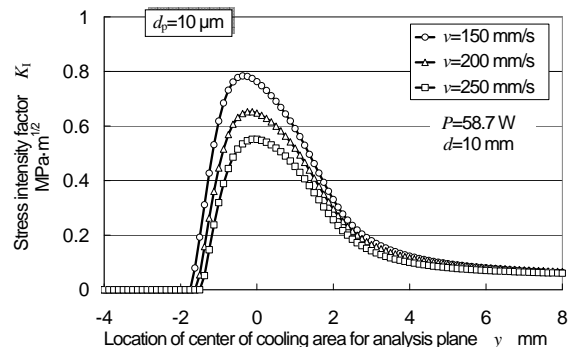


Fig. 12 Stress intensity factor versus location of center of cooling area when scribing velocity is varied

能条件のうち、各レーザーパワー P での最低速度条件において T_{\max} を計算すると、それらの平均値は 496°C であった。ソーダガラスの場合、 T_{\max} が約 500°C を超えると試料に熱ダメージが生じることが報告されている⁽⁴⁾。したがって、ここでも約 500°C がソーダガラスのスクライブ可能条件における表面最高到達温度 T_{\max} の上限値といえる。このため、 T_{\max} を調べることでスクライブ可能な最低速度を推定できる。

4・2 熱応力解析の結果と考察

4・2・1 予亀裂深さの決定 様々な深さの予亀裂を与えて静的解析を行った。結果の一例として、図 11 に、 $P=58.7\text{ W}$ 、 $v=200\text{ mm/s}$ 、 $d=10\text{ mm}$ におい

て、冷却域が解析面を通過するときの応力拡大係数 K_I の変化を示す。横軸には解析面に対する冷却域中心の y 座標をとっている。 $y < 0$ は冷却域の中心が解析面を通過する前、 $y > 0$ は冷却域の中心が解析面を通過した後を表している。 K_I は、冷却域が解析面に近づくにつれて急激に上昇し、冷却域の中心が解析面を通過するあたりで急激に低下する。このときの K_I の最大値を K_{\max} とする。 K_{\max} は予亀裂深さ d_p によって変化することがわかる。

次に $d_p=10\text{ }\mu\text{m}$ とし、スクライブ速度 v を変化させて、冷却域が解析面を通過するときの K_I の変化を調べた。結果を図 12 に示す。 v が大きいほど K_{\max} は小さくなることがわかる。このため、図 3 の各レーザーパ

ワー P において、スクライブ可能な最高速度条件で K_{\max} はいずれも最小となる。スクライブ可能な最高速度条件は、換言すれば、亀裂が進行する限界速度条件であるので、図3の各 P における K_{\max} の最小値は亀裂進行のしきい値となり、いずれも等しいと考えられる。

そこで、図3の各 P に対する六つの最高速度条件において、予亀裂深さ d_p をさまざまに設定して K_{\max} を計算した。結果を図13に示す。 $d_p \geq 20 \mu\text{m}$ においては、 d_p が大きいほど K_{\max} が大きくなる。これに対し、 $d_p \leq 15 \mu\text{m}$ においては K_{\max} のばらつきが比較的小さく、 $d_p = 10 \mu\text{m}$ のとき K_{\max} の標準偏差が最小となった。このため、以下の解析では予亀裂深さ d_p を $10 \mu\text{m}$ とした。

4・2・2 静的しきい値の決定 実際のレーザスクライブにおいて亀裂が進行していくことは、亀裂進展解析においては、亀裂進展が開始することに相当すると考えられる。したがって、上で述べた亀裂進行のしきい値は亀裂進展解析における静的しきい値 K_{sth} に等しく、図13の $d_p = 10 \mu\text{m}$ における K_{\max} の範囲内で K_{sth} を決定すればよい。この K_{\max} の範囲の最大値を K_{sth} とすれば、解析上のスクライブ可能な速度範囲が過大に評価されにくくなる。このような考えから、ここでは静的しきい値 K_{sth} を $0.50 \text{ MP} \cdot \text{m}^{1/2}$ とした。

4・2・3 動的しきい値の決定 動的しきい値 K_{Dth} を決定するため、 K_{Dth} を様々に設定して亀裂進展解析を行い、亀裂深さ \tilde{D}_c を求めた。図14に、三つのスクライブ条件における結果を示す。各条件での亀裂深さの測定結果 D_c を破線で示している。それぞれのスクライブ条件において、 K_{Dth} が大きいほど \tilde{D}_c は小さくなり、 \tilde{D}_c と D_c がよく合う K_{Dth} が存在する。しかし、すべての条件で \tilde{D}_c と D_c がよく合うような K_{Dth} は存在しないことがわかる。

そこで、 D_c に対する \tilde{D}_c の相対誤差 ε がすべての条件で比較的小さくなる K_{Dth} を求めた。まず、図3に示すスクライブ可能条件のうち、六つのレーザパワー P に対してそれぞれ3条件ずつ、計18条件を選択した。 K_{Dth} を様々に設定し、各 K_{Dth} において、これらの18条件で \tilde{D}_c を求めて、式(4)により ε を計算した。

$$\varepsilon = \frac{|\tilde{D}_c - D_c|}{D_c} \times 100 \quad (4)$$

図15に、各 K_{Dth} における18個の ε の平均値 $\bar{\varepsilon}$ を示す。 ε の標準偏差をエラーバーで表している。 $K_{\text{Dth}} = 0.37 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ のとき $\bar{\varepsilon}$ が最小となった。以上より、動的しきい値 K_{Dth} を $0.37 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ と決定した。

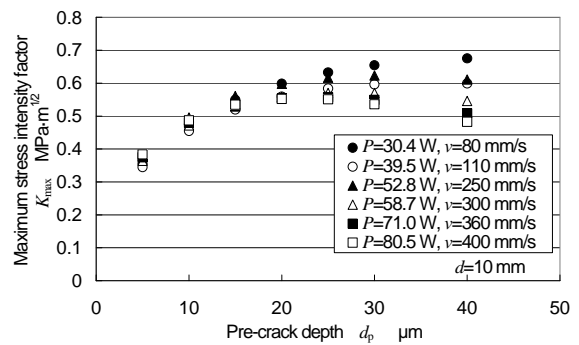


Fig. 13 K_{\max} at scribable maximum velocity when pre-crack depth is varied

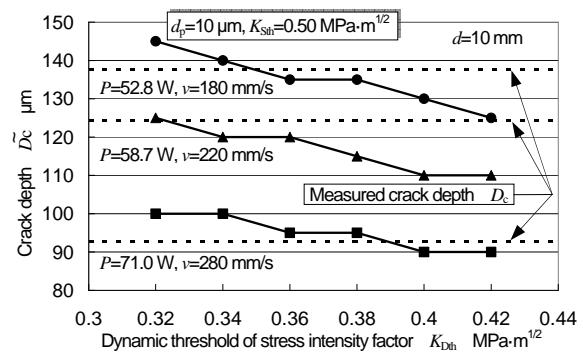


Fig. 14 Analyzed crack depth versus dynamic threshold of stress intensity factor

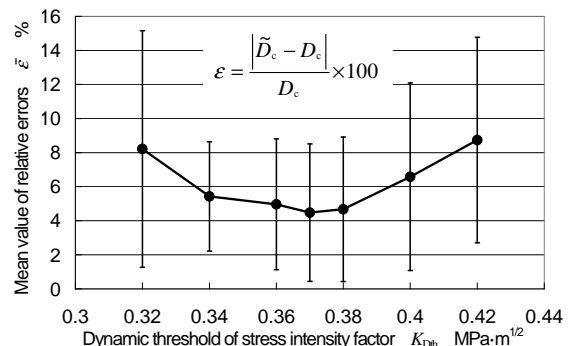


Fig. 15 Mean value of ε versus dynamic threshold of stress intensity factor

4・2・4 二つの応力拡大係数のしきい値の有用性

図16に、 $d = 10 \text{ mm}$ におけるスクライブ可能条件のうち $P = 39.5 \text{ W}, 52.8 \text{ W}, 71.0 \text{ W}$ の場合について、亀裂進展解析により求めた亀裂深さ \tilde{D}_c と亀裂深さの測定結果 D_c を示す。 $K_{\text{Dth}} = 0.37 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ としたことで、ほぼすべての条件において \tilde{D}_c と D_c がよく一致している。また、 $K_{\text{sth}} = 0.50 \text{ MP} \cdot \text{m}^{1/2}$ とし、亀裂進行のしきい値を設定したことで、解析上のスクライブ可能な最高速度も実験結果とよく一致している。

図17に、 P および v を一定とし、冷却点距離 d を変化させた場合のスクライブ可能条件における \tilde{D}_c お

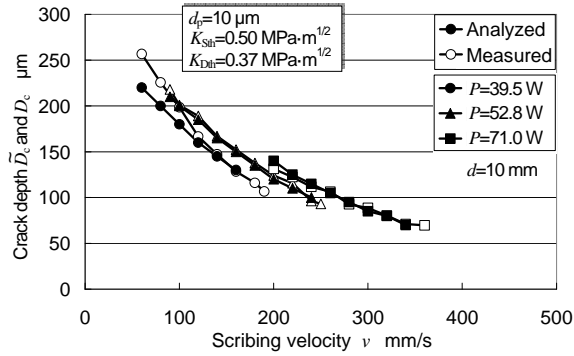


Fig. 16 Comparison of measured and analyzed crack depth when cooling point distance is 10 μm

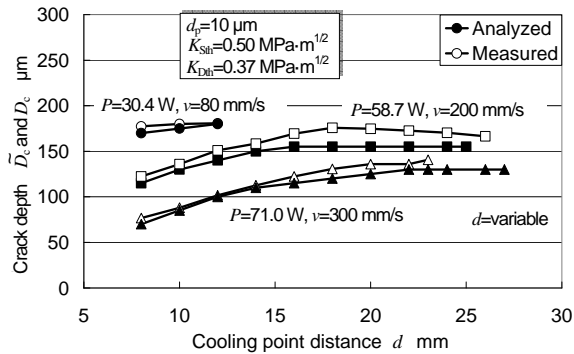


Fig. 17 Comparison of measured and analyzed crack depth when cooling point distance is varied

および D_c を示す。 \tilde{D}_c は、 $K_{\text{Sth}} = 0.50 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 、 $K_{\text{Dth}} = 0.37 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ として求めた。ここでも、解析上の亀裂深さは実験結果と比較的よく一致している。これより、 $d = 10 \text{ mm}$ の条件を用いて決定した K_{Dth} を $d \neq 10 \text{ mm}$ の場合にも適用できることがわかる。

図 17 において、解析上のスクライブ可能な最大冷却点距離は実験結果と比較的よく一致している。実験において、 P および v を一定とし、冷却点距離 d を大きくすると、亀裂の進行が停止してスクライブ不可となる。このことから、 $d = 10 \text{ mm}$ の条件を用いて決定した K_{Sth} を、 d を変化させた場合でも亀裂進行のしきい値として適用できることがわかる。

以上より、静的しきい値 K_{Sth} を導入することでスクライブ可能な最高速度を、動的しきい値 K_{Dth} を導入することでレーザスクライブの亀裂深さを推定できるといえる。また、前述のように、スクライブ可能な最低速度は表面最高到達温度 T_{max} によって推定できる。そのため、本解析によって、様々なレーザパワーに対するスクライブ可能な速度範囲を推定できる。その結果、実用上は、スクライブ可能速度範囲の中心あたりの速度を用いることで安定したスクライブが可能になる。このとき、それぞれの条件での亀裂深さを推定できるため、さらに適切なスクライブ条件を絞り込むことが

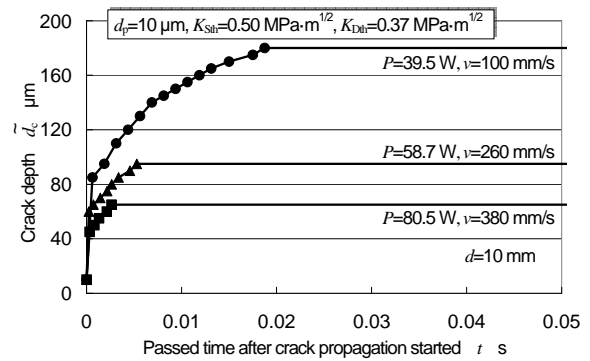


Fig. 18 Time variation of crack depth in crack propagation analysis

できる。

4.2.5 解析から得られる亀裂進展の時間経過 最後に、様々なスクライブ条件について、亀裂進展解析における亀裂深さ \tilde{d}_c の時間変化を調べた。結果を図 18 に示す。各条件において亀裂進展が開始した時刻を $t = 0$ としている。この解析結果は、実験から推測される亀裂進展の時間経過(図 5)と傾向が比較的よく一致している。これより、二次元解析でもレーザスクライブの亀裂進展の挙動を比較的よく再現できていると考えられる。

5. 結 言

本研究では、ガラスのレーザスクライブにおける亀裂深さを予測し、最適なスクライブ条件を簡易に推定することを目的として、破壊力学に基づいた二次元熱弾性解析を行った。解析において、応力拡大係数の静的しきい値 K_{Sth} と動的しきい値 K_{Dth} を導入して亀裂進展現象を考察した。その結果、以下の結論を得た。

1. 静的しきい値 K_{Sth} を用いることで、スクライブ可能な最高速度を推定できる。一方、スクライブ可能な最低速度は、表面最高到達温度 T_{max} によって推定できる。
2. 動的しきい値 K_{Dth} を用いることで、レーザスクライブにおける亀裂深さを推定できる。
3. 実用上は、解析で得られたスクライブ可能速度範囲の中心あたりの速度を用いることで、安定したレーザスクライブが可能になる。
4. このとき、それぞれの条件での亀裂深さが推定できるので、さらに適切なスクライブ条件を絞り込むことができる。

参考文献

- (1) Wang, S.C., Yeh, L.Y., Lin, C.C., Chen, M.S., and Gan, F.Y., Glass-strength Dependence of Cutting Conditions in Thin Laminated TFT-LCD, *Proceedings of the 14th*

- International Display Workshops* (2007), pp. 513-516.
- (2) Kondratenko, V.S., Splitting of Non-Metallic Materials, *PTC WO 93/20015* (1993).
 - (3) Yamamoto, K., Hasaka, N., Morita, H., and Ohmura, E., Thermal Stress Analysis on Laser Scribing of Glass, *Journal of Laser Applications*, Vol. 20, No. 4 (2008), pp. 193-200.
 - (4) Miyake, Y., Separation technology for FPD glass, *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology*, Vol. 45, No. 7 (2001), pp. 342-347. (in Japanese).
 - (5) Yamamoto, A., On the Heat Transfer Properties of Cutting Fluids (Part 2), *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 26, No.8 (1960), pp. 461-469. (in Japanese).
 - (6) The Japan Society of Mechanical Engineers ed., *JSME Date Handbook: Heat Transfer*, 4th Ed., (1986), pp. 321, The Japan Society of Mechanical Engineers. (in Japanese).
 - (7) Shand, E.B., *Glass Engineering Handbook*, 2nd ed., McGraw-Hill, (1958), 4.
 - (8) Yamame, M., Yasui, I., Wada, M., Kokubu, Y., Terai, R., Kondo, K., and Ogawa, S., *Glass Engineering Handbook*, Asakura Shoten, (1999), pp. 441. (in Japanese).
 - (9) Hibbitt, H.D., Some Properties of Singular Isoparametric Elements, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 11, Issue 1 (2005), pp. 180-184.
 - (10) Barsoum, R.S., Application of Quadratic Isoparametric Finite Elements in Linear Fracture Mechanics, *International Journal of Fracture*, Vol. 10, Number 4 (1974), pp. 603-605.
 - (11) Yoshimura, S., Lee, J.S., Yagawa, G., Automation of Analysis for Stress Intensity Factors of Three Dimensional Cracks, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A*, Vol. 61, No. 587 (1995), pp. 128-134. (in Japanese).