レーザー誘起熱応力を利用した板ガラスの分断加工のシミュレーション

八幡 恵輔, 清水 政二, 村上 政直

三星ダイヤモンド工業株式会社(〒566-0034 大阪府摂津市香露園32-12)

Analysis of Cutting Glass Sheets by Laser-Induced Thermal Stress

Keisuke YAHATA, Seiji SHIMIZU, and Masanao MURAKAMI

Mitsuboshi Diamond Industrial CO.,LTD., 32-12 Koroen, Settsu, Osaka 566-0034

(Received August 13, 2016)

Scribing, or the full-body cutting of glass substrates, can be achieved by thermal stress that is induced by laser heating. In such processing, the substrate's temperature distribution is controlled by scanning the heat source or a pair of heat and cooling sources for generating sufficiently high tensile stress to propagate a crack. As a result of crack propagation that follows the laser beam, the substrate can be divided along the laser beam scanning path. By analyzing the temperature and the thermal stress in the numerical simulations, we can estimate suitable processing conditions. How the crack propagates can also be estimated by analyzing the stress intensity factors. Numerical simulations supported clarifying the mechanism of crack propagation and devising new processing methods for controlling crack propagation.

Key Words: Laser, Thermal stress, Glass, Cutting

1. はじめに

電子部品やディスプレイなどの製造にはガラス基板を分断する工程が不可欠である。ガラスのような脆性材料は、分断予定線に沿って表面に亀裂を形成した後、亀裂に沿って応力を加えることで分断できる。亀裂を形成する工程をスクライプといい、この加工後に分断する工程をブレイクという。このようなスクライプ・ブレイク方式の他に、基板の厚さ方向に貫通した亀裂を分断予定線に沿って成長させる、フルカット加工もある。フルカット加工ではブレイク工程は不要である。

レーザー加熱によって生じる熱応力を利用してガラス基板に亀裂を形成できる。このときの温度分布の違いによってスクライプ加工^{1,2)}かフルカット加工^{3,4)}かが決まる。熱応力を利用したガラスの分断加工は、分断された基板の高い端面強度が保たれる点に大きな利点がある。この加工における亀裂進展現象は、有限要素法や境界要素法を用いた解析によって理論的に説明されている。スクライプ加工については、山本ら²⁾によって加工原理の説明がなされ、著者ら^{5,6)}は亀裂の深さや形状を予測する研究を行ってきた。フルカット加工については、Tsaiら⁴⁾によって加工原理の説明がなされ、Miyashitaら⁷⁾および本村ら⁸⁾によって分断経路を予測できることが示されている。本稿では、熱応力を利用したガラス基板の分断に関する解析の事例を解説する。

2. 熱応力を利用したガラス基板の分断加工

熱応力によるガラス基板の分断法の模式図をFig. 1に示す。スクライプ、フルカット加工のいずれも、まず加工開始位置にガラスカッターなどで小さな初期亀裂を形成する。次に、スクライプ加工では、CO₂レーザー(波長9.2~10.8 μm)とウォータージェットを対にして分断予定線に沿って走査させる。CO₂レーザー光のガラスに対する消衰係数は0.1~1程度であり⁹⁾、CO₂レーザー光はガラス基板の表面近傍で吸収される。その後、熱伝導によって基板が表面から内部にかけて加熱される。その直後に基板表面が冷却される結果、基板表面は内部に対して低温となる。このようにして基板の厚さ方向に温度勾配が形成され、基板表面に引張応力が生じ、レーザー走査経路に沿って初期亀裂が成長する²⁾。ガラス内部には圧縮応力が生じ、亀裂は基板の厚さ方向に貫通することなく、一定深さで形成される。スクライプ加工では、加

Fig. 1 Schematics of crack propagation processing by laser-induced thermal stress.

工速度が速い場合でも基板の内部まで加熱されるよう、Fig. 1(a)のようにレーザー光を楕円形に成形することが多い。

フルカット加工では、初期亀裂を形成した後、加熱源であるレーザー光のみを分断予定線に沿って走査させる。基板が局部的に加熱され、レーザー照射面内で温度勾配が生じ、レーザー照射位置の周囲に引張応力がはたらく。その結果、初期亀裂がレーザー光に追従するように進展して分断線が形成される⁴⁾。フルカット加工では、基板の表面から裏面まで十分に加熱する必要がある。CO₂レーザーやYAGレーザー(波長1.064 μm)が用いられる。CO₂レーザーの場合、レーザー光はガラスの表面近傍で吸収されるため、レーザー照射面の温度が裏面に比べて高くなる。これに対してYAGレーザーの場合は、ガラスに対する消費係数が0.5~1×10⁻⁷程度であり⁹⁾、ガラスを透過しながら一部のエネルギーが吸収されるため、表面と裏面の温度差が比較的小さくなる。基板が厚い場合など、基板表面の過剰な温度上昇を抑えて裏面まで十分に加熱するには、CO₂レーザーよりYAGレーザーの方が適している。

熱応力を利用して形成されたガラス基板の分断面をFig. 2に示す。Fig. 2(a)は、スクライブ加工後にブレイクして形成された断面である。スクライブ加工で一定深さの亀裂が形成された痕が図中矢印部分に見られる。Fig. 2(b)はフルカット加工で形成された断面であり、スクライブ加工の場合のような亀裂の痕は見られない。いずれの加工も加工部に欠陥が発生せず、分断された基板の端面強度が高く保たれる。スクライブ加工には楕円形のレーザー光が使用されるため、曲線状の分断には不向きであるが、1000 mm/s程度の速い加工速度と高い加工精度が得られる点で、直線状の分断に適している。フルカット加工は、レーザー光を曲線状に走査させることで曲線状の分断が可能である点に利点がある。

3. 数値解析による亀裂進展の評価

3.1 応力拡大係数による亀裂進展の評価

熱応力を利用したガラス基板の分断は、基板内で亀裂を進展させる加工である。破壊力学の考えに基づけば、亀裂の進展は応力拡大係数 K によって決定される。 K は曲率半径が限りなく0に近い亀裂の先端近傍の応力場を記述するためのパラメータであり、亀裂形状および作用

Fig. 2 Cutting planes of glass sheets created by thermal stress processing.

する応力から求められる。亀裂に作用する応力が大きいほど K が増加し、 K が破壊靱性 K_c を超えると亀裂が進展する。Fig. 3のような座標系をとるとき、亀裂面に対する垂直応力(x_2 方向応力)による亀裂の進展はモードIの応力拡大係数 K_I によって、亀裂面に対するせん断応力(x_1 方向応力)による亀裂の進展はモードIIの応力拡大係数 K_{II} によって評価される。亀裂面に垂直応力とせん断応力が同時に作用する場合、

$$K = (K_I^2 + K_{II}^2)^{0.5} \geq K_c \quad (1)$$

であれば亀裂が進展する¹⁰⁾。このとき、せん断応力は亀裂を湾曲させるはたらきを持ち、

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

によって計算される方向へ亀裂が進展する¹¹⁾。なお、 $K_{II} = 0$ の場合、亀裂は湾曲せずにまっすぐ進展する。

3.2 数値解析による応力拡大係数の計算

長さ a の直線状の亀裂に一樣な引張応力 σ_0 が作用する場合、

$$K_I = \sigma_0 \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

と表わされる¹⁰⁾。しかし、応力分布が不均一な場合や亀裂が湾曲する場合などは、応力拡大係数を簡単に求められず、有限要素法や境界要素法による計算が試みられ、その有効性が示されている¹²⁻¹⁸⁾。数値解析による応力拡大係数の計算方法の一つに、変位外挿法がある。Fig. 3において $\theta = +\pi$ を満たす亀裂面上の任意点の変位(u_{x1} , u_{x2})は、

$$u_{x1} = \frac{K_{II}}{2G} \sqrt{\frac{|x_1|}{2\pi}} (\kappa + 1) \quad (4)$$

$$u_{x2} = \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{|x_1|}{2\pi}} (\kappa + 1) \quad (5)$$

ただし、

$$\kappa = \begin{cases} 3 - 4\nu & \text{平面ひずみ} \\ (3 - \nu)/(1 + \nu) & \text{平面応力} \end{cases}$$

と表わされる¹⁰⁾。なお、 G は剛性率、 ν はポアソン比である。すなわち、解析によって変位場(u_{x1} , u_{x2})が求められれば、応力拡大係数 K_I , K_{II} を求められる。

熱応力を利用したガラス基板の分断加工については、まずレーザー加熱やウォータージェットでの冷却を受けた基板の温度分布の時間変化を求め、次に温度分布を基に基板のひずみ、および熱応力分布を求め、その後応力拡

Fig. 3 Coordinate system around a crack tip.

大係数を求めることで、亀裂の進展を評価できる。

3.3 有限要素法と境界要素法

数値解析によって応力拡大係数 K を求める際、 K の精度は変位場および応力場の解析精度に依存する。有限要素法による K の計算手法は古くから研究され^{12,13)}、Bar-soumの特異要素¹⁴⁾など、亀裂先端近傍の応力場をより正しく求めるための方法が提案されている。ただし、三次元問題で亀裂サイズが大きい場合などは、亀裂先端周辺の要素を十分小さくすると要素数が増え、メッシュ生成および解析のコストが高くなる。特に、時間経過と共に亀裂が成長する過程を解析する場合は、メッシュ生成と K の計算を繰り返しながら解析を進める必要があり、解析コストが一つの課題となる。

メッシュ生成のコストを下げる数値解析法として境界要素法がある。境界要素法は、支配微分方程式を境界積分方程式に置き換えることで、モデル表面のみの要素分割によって解を得ることができる。つまり、面要素による三次元解析や線要素による二次元解析が可能となり、メッシュ生成が簡略化される。亀裂問題において最も重要なものは、モデル表面上に位置する亀裂先端の解であるため、表面の要素のみを扱う境界要素法は相性の良い解析手法といえ、多くの研究が行われている¹⁵⁻¹⁸⁾。

4. 熱応力を利用したスクライブ加工の数値解析

4.1 適正加工条件の推定

熱応力を利用したガラスのスクライブ加工の代表的な利点として、速い加工速度で高い端面強度が得られることが挙げられる。ただし、そのためには適切な加工条件を選択する必要がある。たとえば、レーザー加熱によって基板がガラス転移点以上に加熱されると、加熱域に残留応力が生じる。残留応力が大きすぎると欠陥が発生し、分断された基板の端面強度が著しく低下する。逆にレーザー加熱が不十分な場合には、亀裂が形成されず、スクライブ加工が成立しない。このようにして決まる適正加工条件は、ガラスの種類や板厚によって変わる。例として、厚さ0.7 mmのソーダライムガラスとアルミノシリケートガラスの適正加工条件をFig. 4¹⁹⁾に示す。▲は欠陥が生じた条件を、×は亀裂が形成されなかった条件を、●は欠陥の発生なく亀裂が形成された条件(適正

Fig. 4 Process window in thermal stress scribing for soda-lime glass and aluminosilicate glass.

加工条件)を意味する。Fig. 4に示した二種類のガラスの適正加工条件を比較すると、アルミノシリケートガラスは、走査速度が比較的遅い場合でも欠陥が発生しないこと、および、ソーダライムガラスは、走査速度が比較的速い場合でもスクライブ加工が成立することがわかる。

これらの実験結果を有限要素解析で求めた加工中の温度および熱応力と比較することで、以下の二点が明らかになった^{2,19,20)}。①加工中の基板温度が一定値を超えた場合、残留応力によって欠陥が生じる。②加工中の引張応力の最大値が一定値を下回った場合、亀裂が進展しない。これらを踏まえると、Fig. 4に示した適正加工条件の違いについて、以下のように説明できる。アルミノシリケートガラスはソーダライムガラスに比べてガラス転移点が高く、基板が高温まで加熱されても残留応力が生じにくい。走査速度が比較的遅くても欠陥が生じない。ソーダライムガラスはアルミノシリケートガラスに比べて線膨張係数が高く、基板を高温まで加熱しなくても大きな熱応力が生じるため、加工速度が速くても亀裂が形成される。熱物性および機械物性が既知の材料であれば、解析による適正加工条件の予測が可能であり、新たな材料に対する加工条件を選定する際の目安にできる。

4.2 亀裂深さおよび形状の推定

熱応力を利用したスクライブ加工において、Fig. 2(a)のように分断面を顕微鏡などで観察することで亀裂深さを測定できる。亀裂深さは加工条件によって変化し、その一例として、厚さ0.7 mmのソーダライムガラスに対して形成された亀裂深さの測定結果をFig. 5⁵⁾に示す。なお、本節で説明する有限要素解析による亀裂深さの予測結果も併せて示した。一般に、レーザー出力が高く走査速度が遅いほど、深い亀裂が形成される。このように変化する亀裂深さを予測するための解析のフローチャートをFig. 6に示す。このフローチャートは、第2章で述べたスクライブ加工の原理に基づく。亀裂は、その先端にはたらく引張応力によって進展し、基板内部にはたらく圧縮応力によって進展が抑制される。つまり、亀裂が浅い場合は応力拡大係数 K が大きく、亀裂が進展する。亀裂が深く進展するに伴って K が低下し、あるしきい値 K_{th} を

Fig. 5 Crack depth formed by thermal stress scribing.

Fig. 6 Flowchart to analyze how far a crack propagates in thermal stress scribing.

下回ると、それ以上進展しなくなる。そこで解析においては、初期亀裂深さを a_{ini} とし、 K が K_{th} を超えた場合は、式(2)によって計算される θ の方向へ Δa ずつ亀裂を進展させた。 K が K_{th} を下回った場合は、時刻を Δt だけ進め、次の時刻へ移った。加工終了時刻 t_{end} まで解析を進めたときの亀裂深さを、解析による予測値とした。この方法により、Fig. 5のように、実験と解析で亀裂深さの良い一致が得られることが示された。

熱応力を利用したスクライブ加工において、加熱位置と冷却位置のずれにより、亀裂が板厚方向に対して湾曲する場合がある。Fig. 7⁽⁶⁾は、加熱域の中心が $x=0$ であり、冷却域の中心が $x=600\text{ }\mu\text{m}$ にずれた状態でスクライブされた基板の分断面形状の測定結果である。 $0\leq z\leq 160\text{ }\mu\text{m}$ の領域がスクライブ加工で形成された亀裂であり、 $160\text{ }\mu\text{m}\leq z\leq 700\text{ }\mu\text{m}$ の領域はブレイク工程で形成された面である。亀裂面($0\leq z\leq 160\text{ }\mu\text{m}$ の領域)は $90\text{ }\mu\text{m}\leq x\leq 100\text{ }\mu\text{m}$ の領域に位置し、加熱域の中心($x=0$)と冷却域の

Fig. 7 Example of measured cutting surface profile.

中心($x=600\text{ }\mu\text{m}$)との間に亀裂が形成されたことがわかる。著者ら⁽⁶⁾は、このような湾曲した亀裂面の形状を推定するため、有限要素解析で求めた熱応力を基に境界要素解析で応力拡大係数を求め、亀裂進展を評価した。境界要素解析の進行過程の一例をFig. 8に示す。 $z=0$ は基板表面を意味し、レーザー走査方向は y が正の方向である。解析のフローチャートはFig. 6と同様である。なお、解析コストを下げるため、解析領域は細かく分割されている。まず解析領域Iを対象に解析を進め、Step4-1において解析領域Iの全域で $K<K_{th}$ となり、それ以上亀裂が進展しなくなった。そこでStep4-2として、解析領域IIへ移って解析を継続した。

スクライブ加工中、冷却域の中心が $y=10\text{ mm}$ の位置まで走査されたときの亀裂形状の解析結果をFig. 9に実線で示す。 $8.5\text{ mm}\leq y\leq 11.5\text{ mm}$ の領域が冷却域で、加熱域は $12\text{ mm}\leq y\leq 38\text{ mm}$ の領域である。なお、解析では、深さ $30\text{ }\mu\text{m}$ の初期亀裂を解析領域全域に設定した。この結果から、スクライブ加工中の亀裂は、Fig. 9左図

Fig. 8 Example of variation of crack meshing with the progression of the analysis.

Fig. 9 Example of crack shape obtained by analysis.

中の破線のような形状で y が正の方向へ進展すると推定された。Fig. 9の右図に示す亀裂の湾曲形状は、実測した亀裂面の形状(Fig. 7中 $0 \leq z \leq 160 \mu\text{m}$ の領域)とよく一致した。

以上のように、スクライブ加工で形成される亀裂の深さや形状を解析によって予測でき、所望する亀裂を形成するための加工方法を解析によって検討することができる。

5. 熱応力を利用したフルカット加工の数値解析

熱応力を利用したガラス基板のフルカット加工は、レーザー光を曲線状に走査させることで、基板を曲線形状に分断できる点に利点がある。ただしこの加工には、レーザー走査経路から少しずれた位置で基板が分断されるという特徴がある^{4,7,8,21)}。レーザー走査経路と亀裂進展経路の関係について、Fig. 10に模式的に例を示す。レーザー走査経路が直線であっても曲線であっても、亀裂進展経路のズレが生じる。ズレ量には再現性があり、レーザー出力および走査速度、基板サイズ、レーザー走査経路の曲率など、多くのパラメータが影響する。

このようなレーザー走査経路からずれた位置の亀裂進展についても、有限要素解析で応力拡大係数を評価することで理論的な説明がなされている^{7,8)}。Fig. 10の例はいずれも、レーザー走査経路の両側で基板の形状が非対称である。この場合、亀裂がレーザー走査経路上を進展すると仮定すると、せん断応力によってモードIIの応力拡大係数 K_{II} が0でなくなる。このとき、式(2)で計算される角度だけ湾曲して亀裂が進展するため、亀裂はレーザー走査経路上を進展できない。レーザー走査経路からずれた位置に K_{II} が0となる位置が存在し、亀裂はその位置を進展することが明らかにされている⁸⁾。

所望する経路に沿って基板を分断する方法の一つは、あえてレーザー走査経路を分断予定経路からずらすことである。レーザー走査経路をどの程度ずらすべきか、数値解析によって事前に予測することで、最適なレーザー走査経路の探索を簡略化することができる。また、レーザー光を長方形状に成形する方法や二つのレーザー光を用いる方法⁸⁾も提案されている。これらの方法は、温度分布および応力分布を分断予定経路に対して非対称にすることで、 K_{II} が0となる位置を分断予定線上に位置させ、亀裂進展経路を制御する。亀裂進展経路を制御するためのこのような新しい加工法の創出にも、数値解析が利用されている。

6. おわりに

レーザー照射によって誘起される熱応力を利用したガラスの分断加工は、基板の温度分布を制御し、その結果生じる熱応力を利用してガラス内に亀裂を形成する加工である。本加工は、ガラスの高い端面強度を保つことができる点で優れた加工である。この加工の多くの場合に

Fig. 10 Schematic of positional relation between laser scanning path and crack growth path.

において、亀裂は、応力拡大係数の評価によって予測される通りに進展する。応力拡大係数を求めるには有限要素法や境界要素法による数値解析が有効である。

基板の種類や厚さ、および分断形状によっては、意図した通りに亀裂を進展させることが困難な場合も存在する。このような場合には、数値解析が原因解明に貢献することが期待される。数値解析の応用により、亀裂を意図した通りに進展させるための新しい加熱・冷却方法が提案され、より自由度の高い分断加工が実現することに期待したい。

参考文献

- 1) V. S. Kondratenko: US Patent 5609284 (1997).
- 2) 山本 幸司, 羽阪 登, 森田 英毅, 大村 悦二: 精密工学会誌 論文集 **71** (2005) 1157.
- 3) R. M. Lumley: Am. Ceram. Soc. Bull. **48** (1969) 850.
- 4) C. H. Tsai and C. S. Liou: J. Manuf. Sci. Eng. **125** (2003) 519.
- 5) K. Yahata, K. Yamamoto, and E. Ohmura: J. Laser Micro/Nano-eng. **5** (2010) 109.
- 6) 八幡 恵輔, 大村 悦二, 清水 政二, 村上 政直: レーザ加工学会誌 **20** (2013) 46.
- 7) Y. Miyashita, M. Mogi, H. Hasegawa, S. Sujatanond, and Y. Mutoh: J. Solid Mech. Mater. Eng. **2** (2008) 1555.
- 8) 本村 文孝, 今井 康文, 才本 明秀: 精密工学会誌 **75** (2009) 1350.
- 9) R. Kitamura, L. Pilon, and M. Jonasz: Appl. Opt. **46** (2007) 8118.
- 10) 岡村 弘之: 線形破壊力学入門(培風館, 1976).
- 11) F. Erdogan and G. Sih: J. Basic Eng. **85** (1963) 519.
- 12) S. K. Chan, I. S. Tuba, and W. K. Wilson: Eng. Frac. Mech. **2** (1970) 1.
- 13) C. F. Shih, H. G. Lorenzi, and M. D. German: Int. J. Frac. **12** (1976) 647.
- 14) R. S. Barsoum: Int. J. Numer. Meth. Engng. **10** (1976) 25.
- 15) Z. H. Jia, D. J. Shippy, and F. J. Rizzo: Int. J. Numer. Meth. Eng. **28** (1989) 2257.
- 16) A. Portela, M. H. Aliabadi, and D. P. Rooke: Int. J. Comput. Struct. **46** (1993) 237.
- 17) D. Della-Ventura and R. N. L. Smith: Int. J. Numer. Meth. Eng. **42** (1998) 927.
- 18) Y. Xiangqiao: Appl. Math. Model. **34** (2010) 2272.
- 19) 山本 幸司, 羽阪 登, 森田 秀毅, 大村 悦二: レーザ加工学会誌 **15** (2008) 277.
- 20) K. Yahata, E. Ohmura, S. Shimizu, and M. Murakami: Proc. 31st Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, Anaheim, (2012) 1281.
- 21) C. H. Tsai and C. S. Liou: Int. J. Adv. Manuf. Technol. **18** (2001) 724.