

脆性材料内部を進展するステルスき裂を利用した 高速非接触ドライ割断加工技術の開発

佐世保工業高等専門学校 機械工学科
准教授 森田 英俊
(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017220)

キーワード：脆性材料，ガラス，熱応力，き裂誘導，割断加工，応力拡大係数

1. 研究の目的と背景

脆性材料であるガラスは、建物や自動車の窓ガラス、テレビやスマートフォンのディスプレイなど様々な分野で利用されている。現在、ガラスの割断には、図1に示すような、レーザ照射直後を水冷し、表面き裂（スクライブ）を誘導して割断するレーザスクライブ加工が主流である。この加工法は、切りしろがなく、断面が鏡面となるなどのメリットがある。しかし、水冷を伴わない場合、加工速度が極端に遅く、水冷を用いることで速度は飛躍的に向上するが、電子デバイスと一体になっているものには向かないことや、ウォーターマークが残るなどの欠点が存在する。

一方、本研究室で行っている鏡面溝加工の研究¹⁾において、セナルモン法を用いてき裂先端形状を底面側から観察したところ、図2のように溝を生成する水平き裂よりも前方に、縦き裂が先行している様子²⁾が確認された。これは、加熱時の引張応力によるものと考えられ、この現象を利用することで、高速で水冷の必要がない新しい割断加工技術になると考えた。

そこで本研究の目的は、この現象の発生メカニズムを解明し、高速で水冷工程のない新しい割断加工技術の開発を行う。

2. 理論

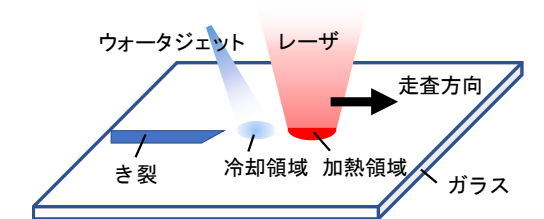


図1 レーザスクライブ加工の概略図

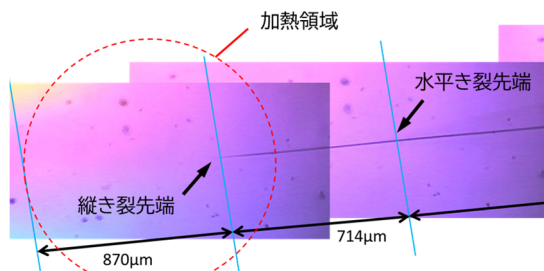


図2 セナルモン法による縦き裂と水平き裂の観察

本現象はレーザ誘起熱応力により、き裂を誘導することで発生していると考えられる。そこで、本研究では加工成立時の条件でFEMによる熱応力解析を行い、その後、応力拡大係数 K_I を求めることで、メカニズム解明を行う。つまり、応力拡大係数 K_I がガラスの破壊靱性値 K_{Ic} を超える領域が、き裂が開口できる条件であるので、これを満たす領域を求めることで、本加工の成立条件が予測可能である。そのため、ここでは、半無限き裂の内面に力が作用する場合のクラックモデル（図3）を用いて K_I を求める。ここで、 F_P は半無限クラックの内面に作用する集中力、 c はき裂先端から F_P までの距離である。ここで d_c は、き裂先端から熱源中心までの距離である。この時の応力拡大係数 k_I は(1)式のようになる³⁾。

$$k_I = \frac{2}{\sqrt{2\pi c}} F_P \quad (1)$$

ここで、 $F_P = \sigma(z) dz$ とすると、微小長さ dz における応力拡大係数 dK_I は、以下の(2)式のようになる。

$$dK_I = \frac{2}{\sqrt{2\pi c}} \sigma(z) dz \quad (2)$$

よって、これをき裂長さ a で積分すると、(3)式のようになる。

$$K_I = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^a \frac{1}{\sqrt{z}} \sigma(z) dz \quad (3)$$

この式に、FEM で求めた応力を代入し、台形法によって数値積分することで K_I を求めた。

3. 実験と解析

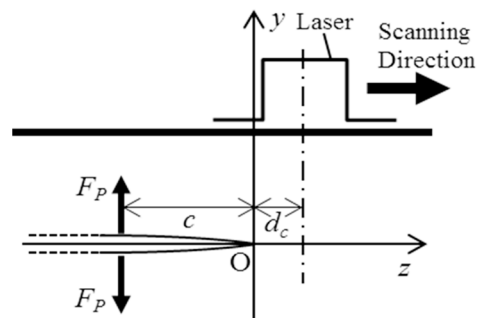


図3 半無限き裂内面に力 F_P が作用するクラックモデル

3-1 実験装置

これまでの実験装置は、熱源形状が円の場合しかプロファイルフラットトップにすることが出来なかった。本研究では、熱源形状を矩形や楕円に変えた場合に、水平き裂や鉛直き裂にどのような影響を与えるかを検証する為、熱源形状が楕円でもフラットトップとなるよう光学系の再設計を行った。また、レーザの2点照射実験が行えるようにレーザをもう1台配置した。装置概略図を図4に示す。レーザ発振器から照射されたレーザは、4枚のミラーを介してコリメータに入射され、平行光となる。平行光とした後、ホモジナイザレンズによって、ホモジナイズし、マスクに照射して所望の形状とした後、再びコリメートレンズで平行光とし、結像レンズで集光するような光学系とした。これにより、楕円や矩形のような形状であってもフラットトップで実験が行えるようになり、2点照射での実験も行えるようにした。

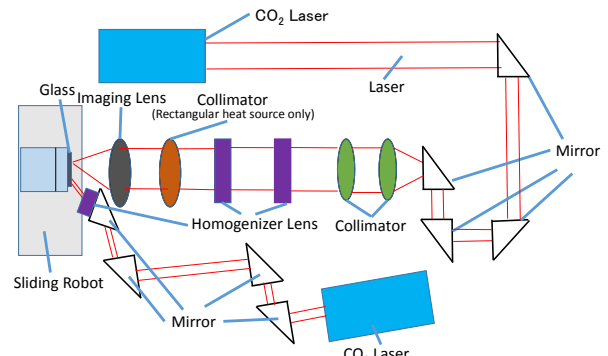


図4 実験装置概略図

3-2 円形2点照射による解析

先行研究において、レーザをガラスに同方向に3回走査させたところ、ガラスをドライ割断に成功した。しかし、全行程を走査させた後に、重畳して走査させなくても、熱源を小刻みに前進、後退させることで、部分的に3回走査と同じ状況をつくることでも、き裂が進展して割断に成功するのではないかと考えた。実験条件は、レーザ出力 $P=14.5\text{ W}$ 、速度 $v=100\text{ mm/s}$ で、熱源が 4 mm 進んだあと、 2 mm 戻るよう単軸ロボットをプログラムして走査を行った。往復の戻り幅等を変えて実験を行ったが、加工できる条件は発見出来なかった。そこで、この実験条件で FEM による3次元解析を行い、原因について検証を行った。

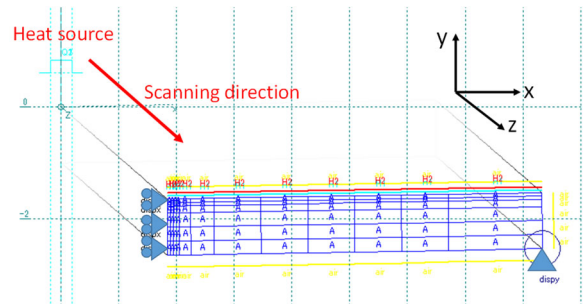


図5 FEM 解析モデル

解析モデルを図5に示す。解析モデルは対象問題とし、拘束条件は、底面の端部のみを固定したモデルで熱応力 σ_{xx} を求めた後、(3)式を台形法による数値計算により求めることで K_I を算出した。ガラスは $76 \times 26 \times 1.0\text{ mm}$ の白板ガラス (SCHOTT 社 B270) を用い、その物性値⁴⁾⁶⁾を表1に示す。なお、ヤング率、比熱伝導率、線膨張係数、ガラスの破壊靱性値は温度依存性⁷⁾を考慮した。図6は、レーザ出力 $P=14.5\text{ W}$ 、速度 $v=100\text{ mm/s}$ で熱源を 4 mm 前進させて、 2 mm 後退させながらレーザを走査させたときの応力分布である。図には、 2 mm 後退中の応力分布を示しており、レーザ熱源後方には圧縮応力が発生してしまう為、熱源の後退時の加熱による圧縮応力場が、次の前進時に働く引張応力を妨害していることが分かった。しかし、この解析から、レーザを2点照射することで、1点目の加熱後

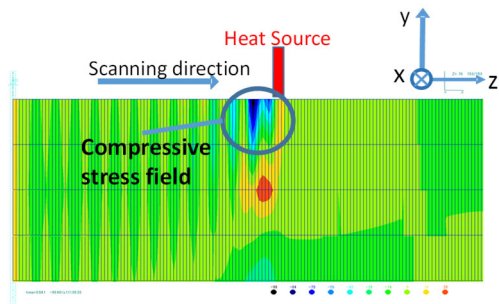


図6 複数走査実験における応力 σ_{yy} 分布

に発生する引張応力場と、2点目の加熱点前方の引張応力場を重複させ、比較的長い引張応力場を発生させることができることを FEM 解析から発見した。これまでの先行研究より、割断には大きい引張応力を発生させることよりも、加工方向に長く安定した引張応力を発生させる方が有利だと考えられるため、レーザを2点照射することで、長い引張応力が発生し、割断に有利に働くのではないかと考えた。

そこで、まず前述した解析条件で、2点照射の解析を行った。2点照射する場合、1点目の熱源はガラスにあまり影響を与えず、2点目でき裂を開口させるための余熱として利用したい為、1点目の出力を落とし、1点目と2点目の出力の比を $1:2$ とし、熱源間隔を $\Delta d=10, 20, 30, 35, 40, 45, 50\text{ mm}$ という条件で解析を行った。図7は、2点目の熱源からの距離 d_c と引張応力 σ_{xx} との関係を深さ毎に表している。そして、それぞれ深さ毎に最大引張応力 σ_{xx} と2点照射により発生した引張応力の幅との関係を図8に示す。解析の結果、どの深さにおいても、1点目と2点目の

表1 ガラスの物性値(20°C)⁴⁾⁶⁾

| 密度 [kg/m ³] | 比熱 [J/kgK] | 熱伝導率 [W/mK] | 線膨張係数 [K ⁻¹] |
|----------------------------|---------------|----------------|---------------------------------|
| 2550 | 730 | 1.03 | 8.2×10^{-6} |
| ヤング率 [GPa] | ポアソン比 [-] | 軟化点 [°C] | 破壊靱性値 [MPam ^{1/2}] |
| 71.5 | 0.219 | 724 | 0.76 |

熱源間隔が $\Delta d=45, 50$ mm 付近で引張応力の幅が広いことが明らかになった。

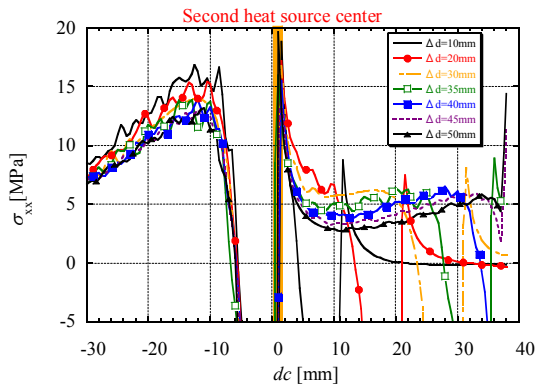


図7 Δd 毎の引張応力と熱源位置からの距離 d_c の関係 ($y=0, \Delta d=10, 20, 30, 35, 40, 45, 50$ mm)

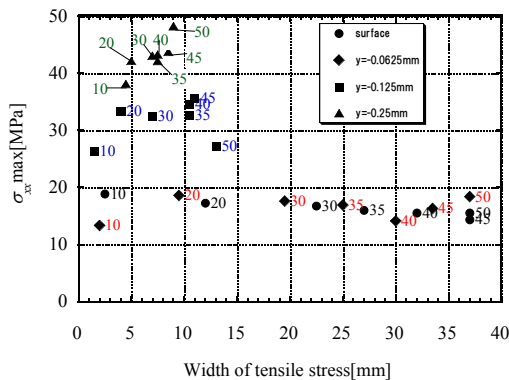


図8 深さ毎の引張応力場 σ_{xx} の長さとも最大引張り応力

3・3 円形2点照射による実験

前述の解析結果から熱源間距離 $\Delta d=45$ mm, レーザの1点目の出力 $P_1=16$ W, 2点目の出力を $P_2=32$ W で, 速度 $v=50$ mm/s から 1000 mm/s まで, 50 mm/s 間隔で走査実験を行い, その後3点曲げを行った。実験はそれぞれ2回ずつ行った。しかし, どの速度においても, 反りのない割断を行うことはできなかった。

次に, 1点目の出力を $P_1=21$ W にして実験を行った。図9に結果を示す。熱源間距離が 45 mm の場合, 速度が $v=50$ mm/s で割断に成功した。しかし, 1点目の出力が 16 W の場合よりも, 21 W の場合の方が, 反りが小さくなった。そのため, 出力を $P_1=21$ W とし, 熱源間距離を 20 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm で実験を行い, また, レーザを $P_2=32$ W の熱源1点のみの実験も行った。実験の結果, 熱源間距離が 20 mm と 35 mm で最も割断に成功し, その間の領域も比較的良好な結果を示した。熱源間距離が 40 mm 以上では成功率が下がった。速度を上げた場合にも成功率は下がり, $v=80$ mm/s 以上では図10(a)のように反りを伴う割断となった。また, 1点照射においては, どの速度でも割断を行うことが出来ず, 図10(b)のように反り

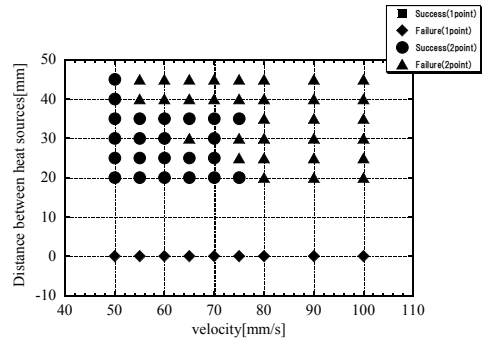
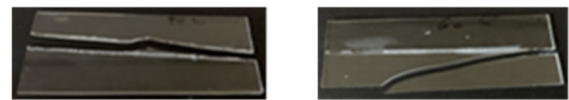


図9 走査速度と2点間距離における加工成立領域 ($t=1.0$ mm)



a) 2点照射の場合 (b) 1点照射の場合

図10 反りが発生し失敗した場合の試験片

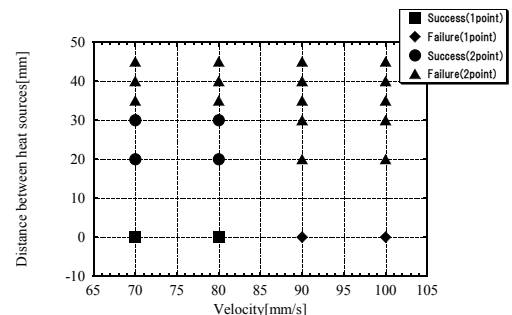


図11 走査速度と2点間距離毎における加工成立領域 ($t=0.5$ mm)

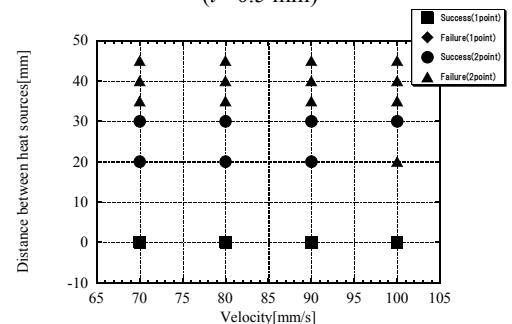


図12 走査速度と2点間距離における加工成立領域 ($t=0.3$ mm)

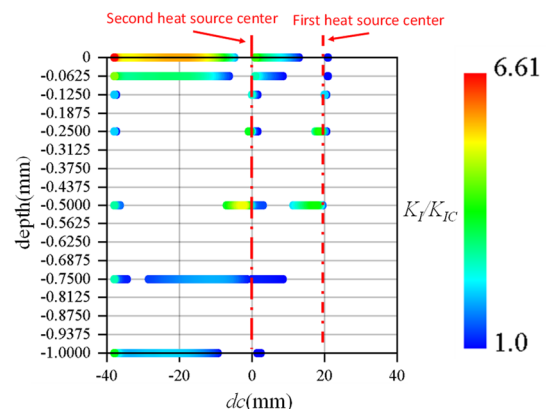


図13 熱源中心からの距離と深さにおけるき裂開口領域

も大きかったため、まったくき裂を誘導できないなかった。また、2点照射であっても、熱源間距離が広がると、図10(b)の場合のように、大きく反りが発生し、まったくき裂が誘導できていなかった。

次に、厚みが異なる $t=0.5\text{ mm}$ 、 $t=0.3\text{ mm}$ のガラスでも実験を行った。 $t=0.5\text{ mm}$ 、における結果を図11に示す。実験の結果、ガラスの厚さが $t=0.5\text{ mm}$ の場合、 $t=1\text{ mm}$ のガラスでは割断に成功しなかった $v=80\text{ mm/s}$ でも割断に成功することが出来たが、熱源間距離が 35 mm 以上では割断することが出来ず、割断に成功する熱源間距離の幅が狭まった。また、低速の場合、1点照射でも割断を行えた。

次に、ガラスの厚さが $t=0.3\text{ mm}$ で実験した結果を図12に示す。図より、 $v=90\text{ mm/s}$ 以上の更に高速域でも割断が可能になった。しかし、このガラスでは、速い速度の場合でも、1点照射で割断が可能であった。これらの結果から、薄いガラスでは1点照射による割断が可能な条件しか見いだせなかったが、ガラス厚が $t=1\text{ mm}$ の場合で2点照射にすることで成立する条件も発見できている為、さらに成立条件を検証する必要があると考えられる。

次に、これらの実験結果を考察するために、応力拡大係数解析を行った。割断に成功した条件である1点目の出力 $P_1=21\text{ W}$ 、2点目の出力 $P_2=32\text{ W}$ 、ガラスの厚さ $t=1\text{ mm}$ 、熱源間距離 20 mm 、走査速度 $v=70\text{ mm/s}$ で解析を行い、応力拡大係数 K_I を求めた。 K_I がガラスの破壊靱性値 K_{Ic} を超えると、き裂が開くことができる為、 K_I/K_{Ic} が1より大きい領域を図13に示した。図は横軸に2点目の熱源からの距離 dc 、縦軸にガラスの深さをとっており、 K_I/K_{Ic} が1より大きい領域をガラスの深さ毎にプロットしている。解析の結果、ガラスの表面から底面までき裂は開口可能であり、ガラスはフルカットされると考えられる。しかし、実験では、フルカットではなく3点曲げにより割断している。これは、1点目の熱源によって表面に微細なき裂が発生し、2点目の照射による熱が、この微細なき裂によって拡散し、深いところまで伝わるのを阻害していると考えられる。その為、今後は表面の微細なき裂を抑えるため、熱源形状を楕円にして実験を行うなどの対策が必要である。また、レーザ走査中のき裂先端位置を、クロスニコル法等を用いて確認する必要がある。

3・4 楕円と円形の2点照射による実験

前述の実験では、1点目の加熱点でガラス表面に剥離が生じ、2点目の入熱が安定しなかったため、厚さ $t=0.5\text{ mm}$ のガラスでは、 80 mm/s までしか成功できなかった。そこで、剥離を抑制するため、急加熱とならないよう1点目の熱源形状を楕円とした場合の割断加工した場合について検証を行う。図4の光学系の最終段にシリンドリカルミラーを追加することで1点目を楕円となるよう光学系を変更した。

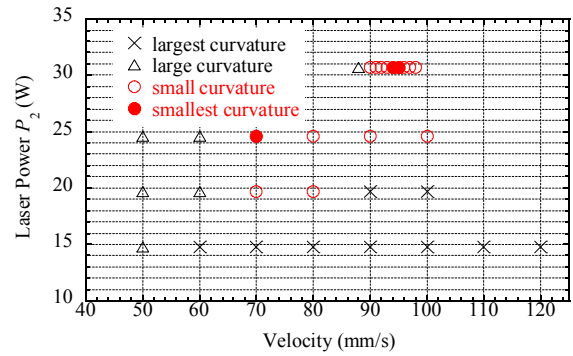


図14 走査速度と2点目のレーザ出力における加工成立領域



図15 ドライ割断したガラス

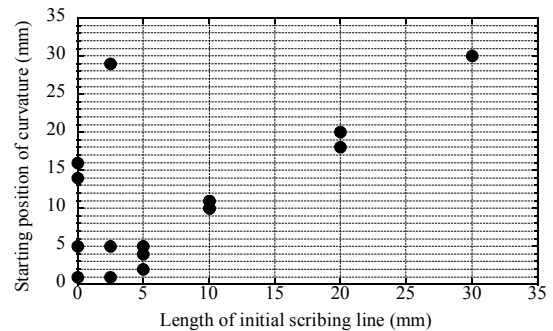


図16 初期き裂長さとの関係

まず、ガラスカッターを利用して初期スクライブ線長さが 10 mm 、 20 mm の場合で実験を行った。その結果を図14に示す。加工条件は、1点目の出力を 20 W で固定し、2点目のレーザ出力を $15, 20, 25, 30\text{ W}$ として、走査速度毎の成功領域を調査した。2点目の出力が低い場合に成功領域はなかったが、出力を上げると徐々にスクライブ可能な領域がみられた。

図16に割断したガラスを示す。今回の実験では、全て加工初期段階で図のような反りがみられたが、円形の2点加熱よりも反りは小さくなった。

次に、この反りの原因について考察するため、初期スクライブ線の長さを変えて実験を行った。加工条件は、レーザ出力がそれぞれ $P_1=20\text{ W}$ 、 $P_2=30\text{ W}$ 、走査速度 $v=95\text{ mm/s}$ である。その実験結果を図16に示す。初期スクライブ長さが $0, 2.5\text{ mm}$ の場合は、反りの開始位置はランダムであるが、 5 mm 以降は、その終端部から発生していることがわかる。これは、1点目の楕円熱源前方の引張応力場によって反りが発生し、その後、本来の目的である熱源間の強い引張応力場で進展したためと考えられる。

5. 結 言

これまでの研究から以下のことが明らかになった。

- (1) 円形 2 点照射実験から、1 点照射よりも高速化に有利であり、最高 $v=80$ mm/s でドライ割断することができた。また、熱源間隔は 20 mm から 35 mm の領域で成功率が高く、間隔が 40 mm 以上になると成功率が低下することが明らかになった。
- (2) 応力拡大係数解析から、レーザを 2 点照射させたガラスはフルカットになり得るが、実際の実験ではフルカットにはならなかった。これは、1 点目の照射によって発生した微細なき裂によって、2 点目が熱拡散した為と考えられる。
- (3) 前述の 1 点目の加熱点における問題を解決するために、1 点目を進行方向に長い楕円形に変更し実験を行ったところ、1 点目で発生していた剥離を抑制することができた。また、スクライプ加工の最高走査速度が円形状の場合より 20mm/s 向上した。
- (4) 1 点目を進行方向に長い楕円にした場合、反りの発生は、2.5mm 以下の場合ランダムな位置で発生し、それ以上の長さであれば、初期スクライプ先端部において発生した。今後は、この反りの発生と 2 点目の加熱点で発生する剥離を抑制する方法について、検証する必要がある。

参考文献

- 1) 森田英俊, レーザ誘起熱応力を利用した脆性材料の非接触除去加工技術の可能性, レーザ加工学会誌 22-1(2015).
- 2) 宇土誠一, 田平剛大, 平成 27 年度 佐世保高専卒業研究論文集(2015).
- 3) 岡本弘之, 線形破壊力学入門, 培風館(1976).
- 4) SCHOTT 社, B270 特性表.
- 5) 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).
- 6) O. V. Mazurin, Handbook of Glass Data, Elsevier Science Ltd 256(1983).
- 7) Dingyu Li, etc, Temperature dependence of the three-point bending fracture behavior of soda-lime-silica glass with surface scratch, Journal of Non-Crystalline Solids, 409(2015).