

機関番号：57301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560884

研究課題名(和文) レーザ熱によるせん断応力型き裂進展を利用した脆性材料の高速非接触除去加工技術開発

研究課題名(英文) Development of High-Speed Non-Contact Removal Processing Technology of the Brittle Material by Crack Propagation used Shear Stress by Laser

研究代表者

森田 英俊 (Morita, Hidetoshi)

佐世保工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：40332100

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：ガラス表面にある条件でレーザを走査させると、切削屑のようなガラス片を伴いながらガラス表面にほぼ鏡面の溝が発生する現象がある。発生した溝の中央部では、滑らかな鏡面になっている。これまでの研究では、鏡面部は熱応力によるき裂の誘導が起きており、剥離部は、ガラスが熱収縮してカールする際にはがされていく領域ではないかと考えている。

本研究では、この現象を利用して非接触平面研削や面取り加工に相当する新しい除去加工技術の開発を行っている。また、薄板ガラスによる除去加工実験や、熱応力解析から応力拡大係数を求め、それらの結果からメカニズムの解明や形状修正の方法について検証を行った。

研究成果の概要(英文)：Now, glass has been used for various industrial products. Industrial fields call for more efficiency processing method than the conventional method, because it is expected that its materials are used more in the future. Currently glass is processed by grinding wheel. In this method, however, chipping and crack are likely to occur since glass is a hard brittle material. So, there is a limit to the production efficiency of grinding wheel. The authors have found out when the laser is radiated to glass, a mirror surface groove on glass is generated. Then the authors research the new removal processing method using this phenomenon. The method enables to process glass without direct contacts, so this method can solve negative points of grinding wheel. And the production efficiency improves because quantity of removal is large. In this paper, the authors summarize the result of the slicing processing experiment, consideration of crack propagation, and the practical processing method.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：レーザ加工 熱応力加工 脆性材料 き裂進展 熱応力

1. 研究開始当初の背景

ガラスは、建物や自動車の窓ガラス、カメラレンズなど、日常生活に必要不可欠な材料である。また、現在では、テレビやスマートフォンのディスプレイや太陽電池のパネルなど様々な分野で利用されている。今後も広く利用されていくことが見込まれており、さらに効率の良い加工技術が求められている。

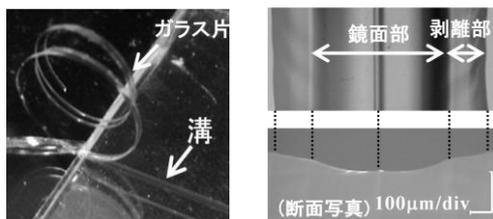
現在、ガラスの除去加工には、砥石による研削加工が主に用いられている。しかし、ガラスは脆性材料であるため研削加工において欠け・割れ・ひびなどが発生する恐れがあるため、切り込み量や送り速度などの加工条件が制限され、ガラスの研削加工の生産効率には、ある程度の限界があると考えられる。

一方、ガラス表面にある条件でレーザーを走査させると図 1(a)のように延性材料の切削屑のようなガラス片を伴いながらガラス表面にほぼ鏡面の溝が発生する現象がある。図 1(b)は、発生した溝を光学顕微鏡で観察したものであり、中央部は滑らかな鏡面になっていた。本現象のメカニズムについては明らかになっていないが、これまでの研究で、鏡面部は熱応力によるき裂の誘導が起きており、剥離部は、ガラスが熱収縮してカールする際に、はがされていく領域ではないかと考えている。

2. 研究の目的

本研究では、この発生メカニズムの解明と、本現象を利用して、平面研削やスライシング加工に相当する新しい除去加工技術を開発を目的としている。そのため、本研究期間では以下の内容について明らかにする。

(1) ガウスモード以外(フラットトップモード)



(a)カールしているガラス片と溝 (b)母材側の溝形状

図 1 発生した鏡面溝とカールしたガラス片

表 1 CO₂ レーザの仕様

波長 [mm]	定格出力 [W]	ビーム品質 M ²	ビーム半径 [mm]
10.56~10.63	40W	1.1±0.1	2.0

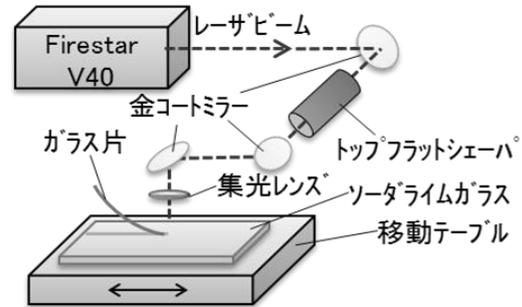


図 2 実験装置概略図 (溝加工)

のプロファイルで実験を行い、溝の断面形状とプロファイルの関連性について明らかにする。

(2) 2次元で現象をとらえるために、スライシング加工に相当する実験を行い、鏡面部のメカニズムについて検証する。併せて熱応力解析も行い、検証の材料とする。

(3) 加工法として活用する場合に問題となっている端部の形状不良について、その原因究明と、修正方法について検討する。実験と熱応力解析の両面から検証する。

3. 研究の方法

(1) トップフラットモードのレーザープロファイルによる実験

今までの研究では、レーザーのプロファイルがガウスモードで実験を行っており、その結果からビームのプロファイルに対応した溝形状が得られると予測している。つまり、ガウスモードとは異なるプロファイルで溝加工し、そのプロファイルに対応する断面形状が得られれば、前述の内容が確認できると考えられる。そのため、フラットトップシェイパにより、レーザープロファイルをフラットトップモードに変更して溝加工実験を行う。フラットトップモードでは、ガウスモードよりも照射点前

方・側方部が急加熱でき、またエネルギーが空間的に均一であるため、剥離部の除去のみならず、溝の形状を平面に除去できるのではないかと予測している。本実験で使用する装置の概略図を図2に示す。使用したCO₂レーザの仕様を表1に示す。

(2) 2次元解析のためのスライシング加工実験と熱応力解析

剥離部分の解析は困難なため、まず鏡面部分の中心付近におけるメカニズムについてのみ検証を行うため、図3のようにt0.7mmの薄板ガラスを鉛直方向に立てて、つまりガラスの薄い側面部分に対してレーザを走査させ、剥離部の無いスライシング加工に近い実験を行った。このとき、ガラスの板厚は、レーザの照射点直径よりも小さいものとした。なお、ガラスがスライシングされると、分離したガラス片はカールし、レーザの照射を妨げることがあるため、傾斜をつけて照射している。

次に、実験条件に合わせて熱応力解析を行った。スライシング加工が成立する条件を明らかにした後、FEMによる熱応力解析を行い、スライシング加工中の熱応力が加工に及ぼす影響について検証した。図4(a)に解析モデルを示す。モデルサイズは35×0.7×20mm、要素数は6645、メッシュサイズはモデル上部を細分化し10μm×20μmとした。解析条件はスライシング加工実験の成功条件より出力30W、走査速度50mm/s、ビーム直径は0.74mm、プロファイルはフラットトップ型である。表2に熱応力解析で用いたガラスの

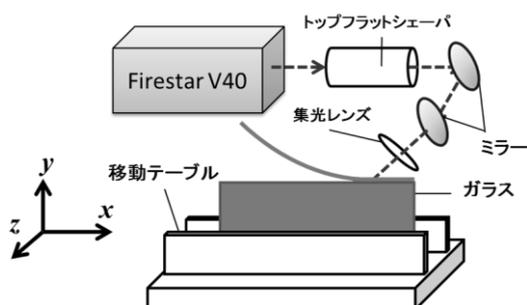


図3 実験装置概略図 (スライシング加工)

表2 ガラスの物性値 (20°C)

密度 [kg/m ³]	ヤング率 [GPa]	熱伝導率 [W/mK]	線膨張係数 [K ⁻¹]
2520	78.0	1.03	8.7×10 ⁻⁶
比熱 [J/kgK]	ポワソン比	軟化点 [°C]	破壊靱性 [MPa√m]
730	0.23	720	0.76

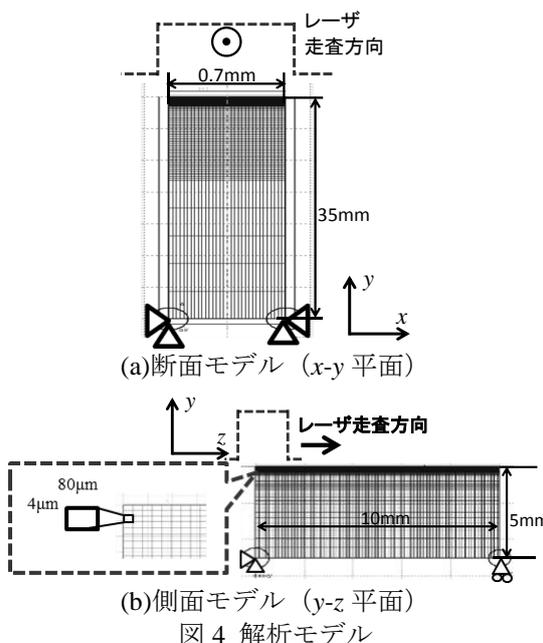
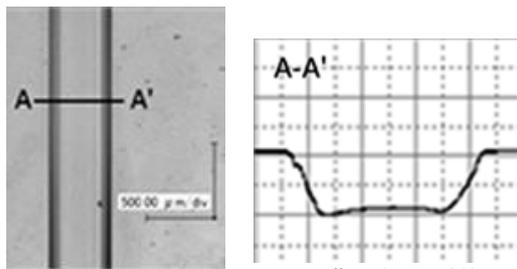


図4 解析モデル

物性値を示す。

(3) ガラスの端面形状の問題点と改善策の検討

(2)で行ったスライシング加工実験において、後の図10に示すように端部では、水平な加工とならず反っている。また、ガラスの終端部ではき裂の進展が止まり、ガラスの分離片が繋がったまま残るか、始端部と同様に沿った形状でガラス片が分離するかどちらかの状態となる。除去加工技術としては、一定の深さで、水平に除去加工が必要であるため、改善すべき問題点であると考えている。図4(b)にFEM解析に用いたモデルを示す。モデルサイズは、5.0×10×0.7mmであり、要素数は8706、メッシュサイズは4μm×80μmとなっている。この時の解析条件は、レーザ出力30W、走査速度1000mm/s、ビーム直径0.748mmである。この条件で熱応力解析を行い、原因の



(a)発生した溝 (b)溝の断面形状
図5 フラットトップモードにおける溝

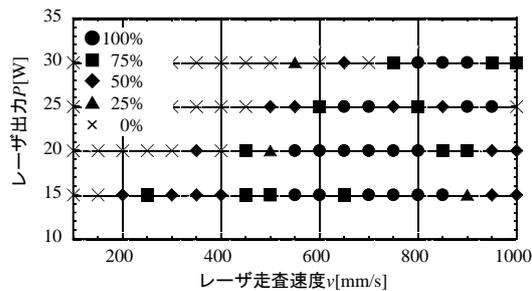
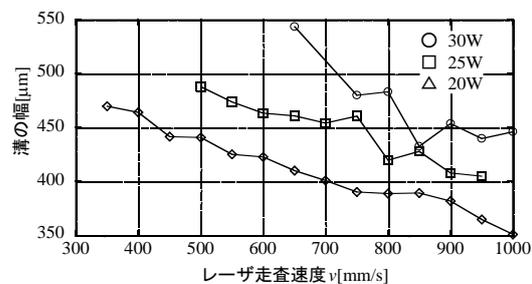
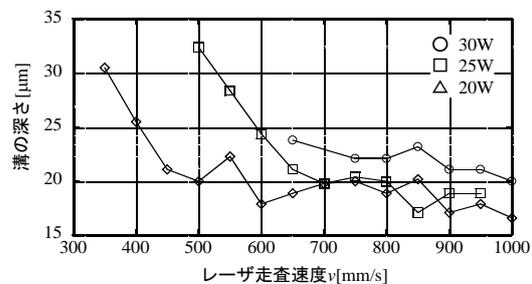


図6 溝の発生領域



(a)発生した溝の幅と走査速度



(b)発生した溝の深さと走査速度

図7 フラットトップモードにより発生した溝の幅と深さ

究明と修正法の検討を行った。

4. 研究成果

(1)フラットトップモードのプロファイルで溝加工実験を行った。レーザのプロファイルは、アクリルによるバーンパターン法により確認し、その照射点における直径は 0.74mm であった。

実験で発生した溝とその断面形状

を図5に、溝が発生した際のレーザ走査速度と出力の関係を図6に示す。実験は再現性確認のため4回ずつ行い、その発生率を図中に示している。

図5に示す断面形状は、バーンパターンから得られた形状と対応しており、溝の断面形状とレーザのプロファイルが対応することが確認された。

また、図6では、レーザ出力が大きくなるにつれ、走査速度の高速な領域で溝が発生していることが明らかになった。

また、発生した溝を観察すると、ほぼ鏡面な溝のみが発生したものや、剥離部が発生したものもあった。しかし、ガウスモードの場合と比べて、その剥離領域は非常に小さくなる傾向にあった。

図7に、実験で発生した溝の幅、深さと走査速度の関係を示す。図7(a)によると、レーザ走査速度が増加するにつれて、どの出力においても溝の幅は減少する傾向にあることがわかる。また、図7(b)も同様に、いずれの出力においてもレーザ走査速度が増加するにつれ、溝の深さが減少する傾向にあることがわかる。これらは、ガラスに入射される単位時間当たりの入熱量がレーザ走査速度上昇によって減少し、発生する応力場が浅く狭い領域となるためであると考えられる。

スライシング加工の成功条件を図8に示す。プロット点は成功、不連続、失敗の3種類を表している。板幅がレーザ直径よりも小さい場合における成功範囲は、レーザの出力にもよるが、およそ $50\text{mm/s} \sim 150\text{mm/s}$ の範囲であった。これまで、本研究室のガラスの溝加工では、 $400\text{mm/s} \sim 1000\text{mm/s}$ の速度領域で発生していたが、図8から分かるように、スライシング加工における発生速度領域は、平板

における溝加工に比べてかなり低い領域で発生することが明らかになった。

レーザ走査速度とスライシングされたガラス片の厚さの関係を図 9 に示す。走査速度が上昇すると、それに伴いガラス片の厚さも減少していく傾向にある。これは、溝加工の場合と同様に、単位時間にガラスに与えられる入熱量が減少し、レーザ加熱により発生する応力場が浅い位置に現れるためである。

次に、スライシング後の加工断面形状について観察を行った。その結果を図 10 に示す。図 10(a)は、レーザ走査方向に対して正面から見た場合の断面形状であり、プロファイルは水平な形状であるにもかかわらず、端部は上斜め方向へ円弧状に反っている。また、図 10(b)のように、加工が始まる始端部の形状を、レーザ走査方向に対して側面方向から観察すると、図 10(a)と同様に反り上がるような形状となっている。これは終端部でも同様な結果となっている。ただし、終端部の場合は、最後までスライシングされずにガラス片が付いたままになることも多かった。

(3)FEM による熱応力解析から得られた垂直応力 σ_{yy} の分布を図 11 に示す。ガラス中央の付近にガラスの平均破壊応力(49MPa)よりも大きい 54.5MPa の引張応力発生していた。また、ガラス端部は引張応力場から圧縮応力場となっていることから分かった。つまり、引張応力による開口モード（モード I）によってき裂進展が起こっていると考えられる。また、圧縮応力場の存在が、き裂を上方へ反らしていると考えられる。

次に、この引張応力でき裂が進展するために必要な応力 σ_c について概算した。モード I の応力拡大係数は、き裂の面積(area)を用いて式(1)から求めることができる。

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi \sqrt{\text{area}}} \dots \dots \dots (1)$$

これに、ガラスの破壊じん性である 0.76 MPa \sqrt{m} と、き裂の投影面積 area を代入する

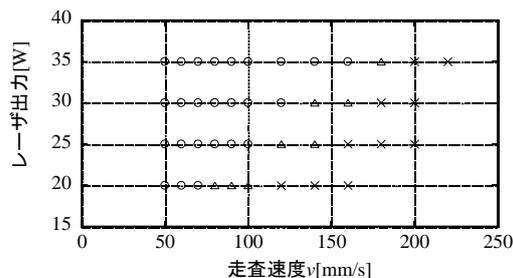


図 8 溝の発生領域

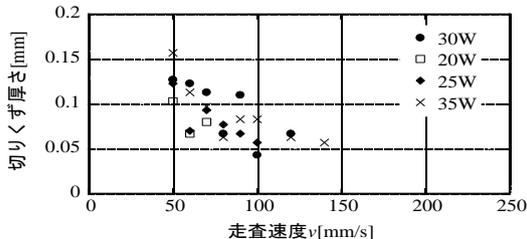
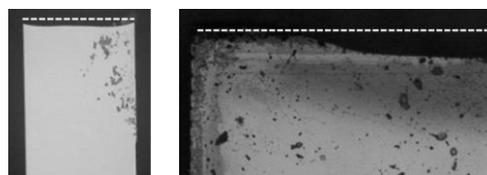


図 9 ガラス片の厚さと走査速度



(a)断面形状 (b)側面端部
図 10 スライシング後の端部形状

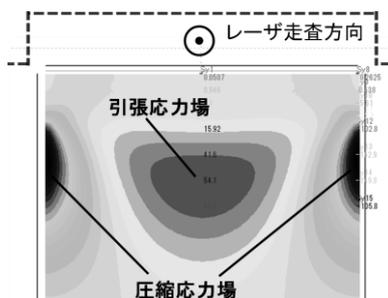


図 11 応力分布(σ_{yy})

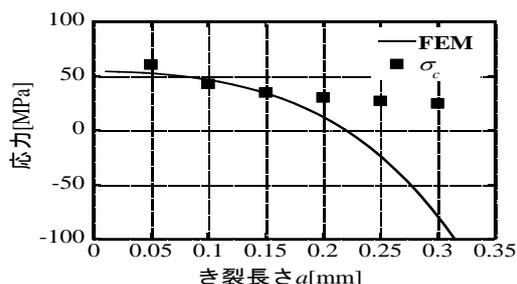


図 12 き裂長さと応力値（深さ 0.4mm）

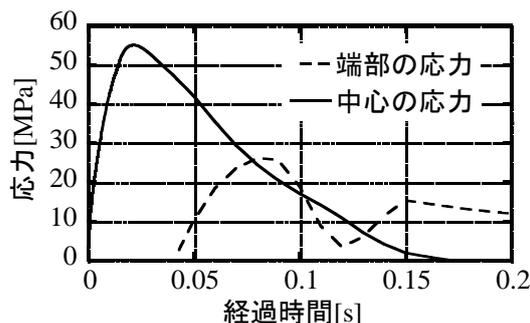


図 13 熱源位置と応力場の関係

ことで σ_c を求めることができる。この時、き裂幅に対して求めた σ_c と、熱応力解析で求めた応力値を比較し、き裂が進展するに足る応力があることを検討した。図12にき裂長さ a とFEMによる応力値の関係を示す。ここで、き裂長さ a はき裂幅の半分の値である。この解析では、幅方向のき裂長さ a は、0.15mm以内の幅まで進展できることが分かる。つまり、端部では開口するに足る応力が発生していないことになる。図13に、図12の中心部と端部における応力 σ_{yy} の時間変化を示す。引張応力は、中心付近では十分な大きさを示すが、同時刻における端部では圧縮応力場となっている。その後、遅れて引張応力が発生し、き裂が進展するものと考えられる。

(4)加工始端部における熱応力解析の結果を図14に示す。応力場は、図14に示しているように、レーザ入射時はガラスの表面上に現れるが、徐々に深い方へと移動していった。その後、この分布を保ったままレーザ光とともに右方向へ移動していった。終端部も、始端部と同様な応力分布となることが明らかになった。この軌跡とスライシング加工の際の形状が一致したため、

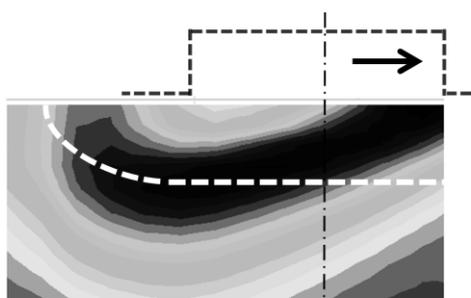


図14 始端部の応力分布

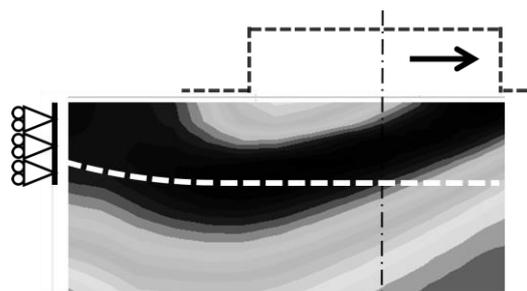


図15 始端部に拘束を加えた場合の応力分布

この応力分布が端部形状を決定していると考えられる。

この原因は、端部の水平方向の応力を抑えるための拘束が存在しないためだと考えられる。そこで、始端部に拘束を加えた解析を行った。結果を図15に示す。図が示す通り、応力場は、水平面上からではなく、鉛直面上から広がるような分布となった。そのため、端面形状を修正する効果が多少なりともあらわれると思われる。

最後に、加工面粗さについて計測した結果について述べる。鏡面溝の中央部と、未加工のガラス表面の粗さを比較のため測定したところ、ガラス表面の粗さは、最大高さ $Ry=1.015\mu\text{m}$ 、算術平均粗さ $Ra=0.157\mu\text{m}$ であった。また鏡面溝中央部は $Ry=0.195\mu\text{m}$ 、 $Ra=0.031\mu\text{m}$ であった。このことから、本現象によるガラス表面の除去加工技術は、研磨工程を必要としない画期的な除去加工となる可能性があることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計2件)

- ① CO₂レーザによる熱応力を利用したガラスの鏡面溝加工の可能性(Flat Top型プロファイルによる実験), 永田紀一郎, 森田英俊, 原要一郎, 白髭幸治, 日本機械学会九州支部 第66期総会・講演会, 2013年3月.
- ② レーザ加熱によるせん断応力型き裂進展を利用したガラスの新しい非接触分断加工技術, 白髭幸治, 森田英俊, 原要一郎, 朝長和也, 野崎亮太, 園田剛, 日本機械学会九州学生会第43回卒業研究発表会, 2012年3月.

6. 研究組織

(1)研究代表者

森田英俊 (MORITA Hidetoshi)

佐世保工業高等専門学校・機械工学科・
准教授

研究者番号：40332100