

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：57301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420067

研究課題名(和文) レーザによる急加熱部近傍で発生する引張応力を利用した脆性材料の新しい除去加工技術

研究課題名(英文) New Removal processing technology of Brittle materials using a tensile stress generated in the vicinity of rapidly heated region 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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ある条件でガラス表面にレーザを走査させると、溝のような形状のき裂がレーザ誘起熱応力によって誘導され、カールしたガラス片と鏡面の溝が発生する現象がある。本研究の目的は、この現象のメカニズムを解明し、脆性材料の砥石研削に代わる新たな除去加工技術へと応用するための指針を得ることである。特に本研究期間では、レーザ照射領域よりも狭いガラスに対して本現象を適用し、そのき裂の深さと先端の位置関係を、FEM解析から評価した応力拡大係数の分布と比較・検証し、そのメカニズム解明に取り組んだ。また、最低限必要な初期き裂の形状や寸法についても応力拡大係数から予測した。

研究成果の概要(英文)：When the laser is scanned on the glass surface under certain conditions, there is a phenomenon that mirror surface grooves and curled glass pieces are generated on the glass substrate. This phenomenon is thought to occur by the horizontal crack progressed using thermal stress by laser. In this research, we clarify the mechanism of this phenomenon and aim to develop new removal processing technology of brittle material. In this research period, first, we experiment a processing to apply this phenomenon to a glass surface narrower than the laser heating area, and measure the crack depth and tip position. Then, we compared the distribution of stress intensity factors obtained by FEM analysis and experimental results. And, this mechanism was discussed from these results. Finally, the optimal shape and minimum dimensions of the initial crack were predicted from the stress intensity factor.

研究分野：レーザ加工

キーワード：レーザ加工 熱応力加工 脆性材料 応力拡大係数 非接触加工 除去加工

### 1. 研究開始当初の背景

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、ガラスをはじめとする脆性材料の除去加工には、主に砥石による研削が用いられている。しかし、ガラスのような脆性材料の砥石による接触加工では、割れや欠けの発生を防ぐための加工条件が厳しく制約される。そのため、さらに効率の良い加工技術が求められている。

一方、ガラス表面にある条件でレーザを走査させると、図1のように延性材料の切削層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<sup>1)</sup>。図2は、発生した溝を観察したものであり、中央部が鏡面となっていることがわかる。これまでの研究により、鏡面部は熱応力によるき裂の誘導により発生した領域であり、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と考えている。

また、図3に示すように、始端部に切り残しが発生する問題点もある。そのため、本現象を加工技術として利用するためには、この始端部に残る切り残し部の除去方法について検証する必要がある。

### 2. 研究の目的

研究期間全体の研究目的は、この現象の発生メカニズムを破壊力学的観点から解明し、本現象を利用した面取りや平面研削、スライシング加工に相当する新しい除去加工技術へ応用するための指針を得ることである。そのため本研究期間内に以下の具体的目的について明らかにする。

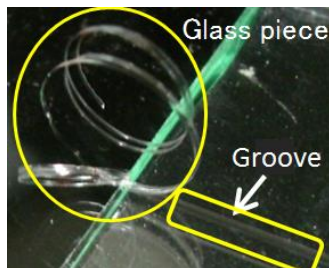


図1 ガラス基板上的溝とカールしたガラス片<sup>1)</sup>

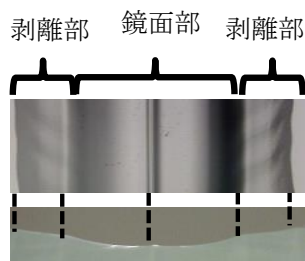


図2 溝の鏡面部と剥離部



図3 始端部の切残し部

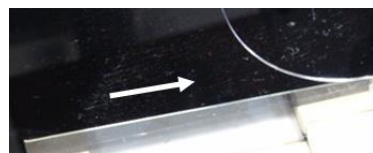


図4 スライシング加工

#### (1) スライシング加工実験と応力拡大係数の検証

メカニズム解明のため、図4のようなレーザ照射領域よりも細いガラスに対して適用した実験（スライシング加工実験）を、レーザ出力、走査速度、照射点半径を変えて行い、その時のき裂深さ、き裂先端位置を得る。さらに、実験と同条件でFEMによる熱応力解析を行い、応力拡大係数 $K_I$ を算出する。そして、 $K_I$ が破壊靱性値 $K_{IC}$ を超える領域を求め、実験結果と比較し、メカニズムを検証する。

#### (2) 最適初期き裂条件の解析

始端部の切り残しをなくすために必要な初期き裂の最適形状と寸法について、応力拡大係数から予測を行う。

#### (3) 溝加工実験におけるき裂先端位置の観察と応力拡大係数の評価

き裂先端位置を観察するために、底面側から観察できる実験装置を製作し、クロスニコルとセナルモン法により観察する。また、応力拡大係数が破壊靱性値を超える領域と観察で得られたき裂先端位置の関係について比較・検証を行い、メカニズムについて詳細に検証する。

### 3. 研究の方法

#### (1) スライシング加工実験における加工深さの測定とき裂先端位置の観察

図5に実験装置を示す。定格出力40WのCO<sub>2</sub>レーザから出力された光は、2枚の金コートミラーで反射後、ホモジナイザレンズに入射し、フラットトップモードのプロファイルに変換される。このホモジナイザレンズの焦点におけるビーム径は約0.7mmであるが、本実験ではガラスの厚みよりも大きな加熱点で実験するために、デフォーカスして照射しているため、プロファイルはガウス型に近い分布となっている。

また、これまでの解析では、熱源中心近傍にき裂先端が存在すると推測されているが、これを実

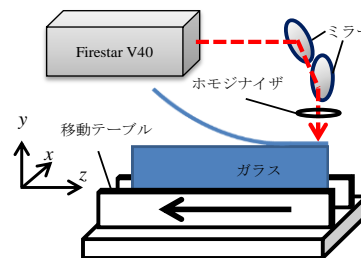


図5 実験装置

験で確認するため前述の実験条件でき裂が進展する様子を観察する実験を行った。観察はガラス側面方向から動画マイクロスコープを用いて行った。フレームレートは500fpsで行った。

#### (2) スライシング加工中の応力拡大係数

表 1 ソーダライムガラスの物性値 (20°C) <sup>2)</sup>

Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Specific heat [J/kgK]	Thermal conductivity [W/mK]
2520	730 (20°C)	1.03
Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio [—]	Softening point [°C]
78.0	0.23	720~730
Thermal expansion coefficient [K <sup>-1</sup> ]	Fracture toughness <sup>3)</sup> [MPa√m]	
8.2×10 <sup>-6</sup>	0.76	

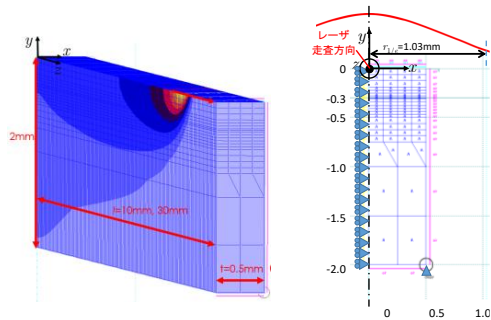


図 6 FEM 解析モデル

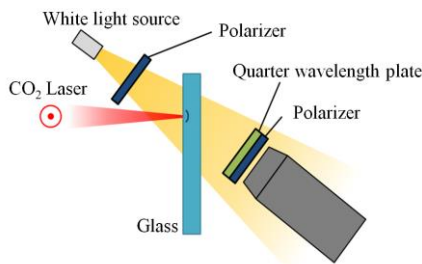


図 7 き裂観察実験装置

観察されたき裂先端と解析による先端が異なる原因を究明するために、FEM による熱応力解析を行った。表 1 にソーダライムガラスの物性値 <sup>2)</sup>を示す。また、FEM 解析モデルを図 6 に示す。なお、メッシュサイズは、一定ではなく、加工深さである  $y=-0.3\text{mm}$  付近を最も詳細に区切っており、その大きさは  $0.03 \times 0.125\text{mm}$  である。また、ヤング率、比熱、熱伝導率については温度依存性 <sup>3,4)</sup>を、レーザ光の吸収率についても速度依存性を考慮した <sup>5)</sup>。

次に有限長さの外側クラックモデルを用いて  $K_{Iz}$  (単位厚さあたり) を求める。ここで、微小長さ  $d$  あたりの応力拡大係数  $dK_{Iz}$  は以下の式となる <sup>6)</sup>。

$$dK_{Iz} = \frac{2}{\sqrt{\pi a} \sqrt{1-(z/a)^2}} F(z/a) \cdot \sigma(z) dz$$

ここで、 $a$  はクラック長さ、 $\sigma$  は応力、 $F$  は補正関数である。これらなき裂長さの範囲について、台形法で積分することで  $K_{Iz}$  を求めた。

(3) ガラス始端部の応力拡大係数解析と最適初期き裂形状の予測

ガラスのレーザスクライブ加工等で用いられるように、初期き裂を導入する対策について、応力拡大係数を利用して検証した。ここでは、有限き裂長さモデルで、初期き裂長さ  $a_0$  と  $K_{I1}$  の関係を求め、最低限必要な初期き裂の長さや形状についての条件を検証する。そのため、ガラスの長さ  $30\text{mm}$  のガラスの始端部について 3 次元熱応力解析を行った。

また、FEM による熱応力解析から求めた応力結果を用いて、 $x=0, 0.125, 0.25, 0.375, 0.5\text{mm}$  の位置におけるき裂長さ  $a_x$  毎の応力拡大係数を算出し、 $x$  の位置ごとに最低限必要き裂長さを求める。

次に、ガラスの幅方向のき裂長さ  $a_x$  と  $K_{Ix}$  (単位厚さあたり) の関係について考察するため、 $K_{Ix} > K_{Ic}$  となるき裂長さ  $a_x$  の条件について検証する。

ここで、平面内部のき裂に応力  $\sigma(x)$  が、微小長さ  $dx$  に作用する場合の  $K_{Ix}$  は、以下の式となる <sup>6)</sup>。

$$dK_{Ix} = 2 \frac{1}{\sqrt{\pi a_x}} \int_0^{+a_x} \frac{\sigma(x)}{\sqrt{a_x - x}} \cdot dx$$

得られた応力とこの式から  $a_x-K_{Ix}$  の関係を求め、先の  $a_x-K_{Ic}$  の結果と合わせて、最低限必要な初期き裂形状を予測する。

(4) 溝加工中のき裂先端位置の観察と応力拡大係数の評価

動画マイクロスコープを用いた観察においてき裂の開口が極めて微小であったと推測されるため観察することが出来なかった。そこで、熱源直下にある中心部の僅かなき裂を観察するため、

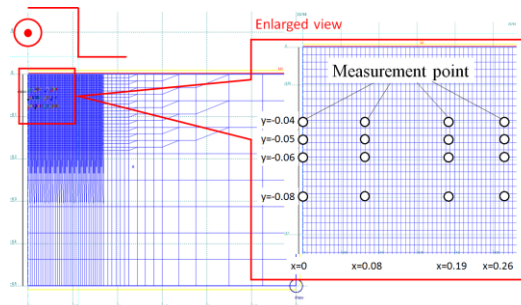


図 8 溝加工の解析モデル

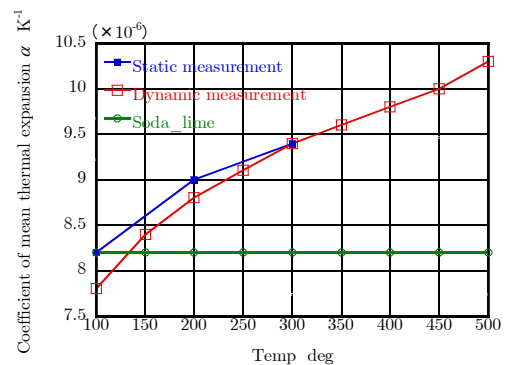


図 9 線膨張係数の温度依存性 <sup>7)</sup>

溝加工中を底面側からセナルモン法によって観察する実験を行った。実験装置を図 7 に示す。実験条件は、レーザ出力 22W, 走査速度 120m/s, レーザプロファイルはフラットトップで直径 1.12mm である。動画マイクروسコープの倍率は 17.5 倍, フレームレートは 500fps である。

次に, 前述の溝加工条件で, 応力拡大係数の評価を行った。解析モデルを図 8 に示す。本解析では, ガラスの線膨張係数<sup>7)</sup>と破壊靱性値の温度依存性<sup>8)</sup>を考慮した。これは, スライシング加工と比べて加工深さが半分以下になり, より急加熱の条件になったためである。レーザのように急加熱される場合の線膨張係数の温度依存性についてはこれまで明らかになっておらず, 他の類似する研究に習い, これまでは温度依存性を考慮せず一定値で解析を行っていた。しかし, より正確な解析モデルを構築するために, 線膨張係数の温度依存性<sup>7)</sup>を考慮した場合の変化について理解する必要があると考え, 図 9 に示す線膨張係数を用いて解析を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) スライシング加工実験における加工深さの測定とき裂先端位置の観察

レーザ出力  $P=35\text{W}$ , 加工速度  $v = 20 \text{ mm/s}$ , ガウスモードプロファイルでガウス半径  $r = 1.03 \text{ mm}$ , 厚さ  $1.0 \text{ mm}$ , 長さ  $l = 30 \text{ mm}$  のソーダライムガラスの側面に対してスライシング加工を行った。この時の加工深さは約  $0.3\text{mm}$  であった。

動画マイクروسコープによる観察結果を図 10 に示す。昨年度までの解析結果に反して, き裂が熱源中心から約  $6.3\text{mm}$  後方の位置で開口している様子が観察された。しかし, 前方のき裂開口量, 長さとともに小さく, 内部にのみ発生しているため, 側面からの観察では困難であった可能性もある。

##### (2) スライシング加工中の応力拡大係数

次に, き裂長さ  $a_z$  に対する  $K_{Iz}$  の変化を求めた結果を図 11 に示す。中心部付近では, ガラスの破壊靱性  $K_{Ic}$  を大きく上回るが, 端部では  $5\text{mm}$  程度後方で破壊靱性値に近づいている。この解析結果を, 幅方向にあたる  $x$  座標毎に  $K_{Iz} > K_{Ic}$  となる領域についてまとめたものを図 12 に示す。中心部では, 熱源近傍で開口できるが, 端部は, 開口できない。逆に, 端部が開口できる熱源後方では, 中心部が開口できない条件となっている。そのため, 開口量は小さいが, 中心部分が先に開口し, 遅れて開口している部分が, 先の実験で観察されたのではないかと考えられる。

##### (3) ガラス始端部の応力拡大係数解析と最適初期き裂形状の予測

前述と同様の解析を, 始端部付近について行った。  $x$  の位置ごとに,  $K_{Iz} > K_{Ic}$  となる領域を求め, 最小限必要なき裂長さに時間ごとにまとめたものを図 13 に示す。この解析より, ガラスの幅は  $0.5\text{mm}$  に, レーザプロファイルをフラットトップモードの直径  $1.03\text{mm}$  に変更した。図より,  $x=0 \sim 0.125\text{mm}$  の熱源中心部付近では,  $1\text{mm}$  以下の非常に短いき裂長さで加工できることがわかるが,

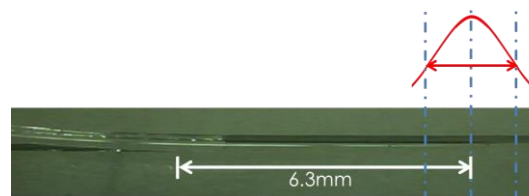


図 10 スライシング加工中のき裂先端位置

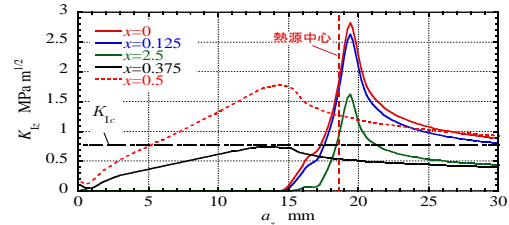


図 11 き裂長さ  $a_z$  と  $K_{Iz}$  の関係

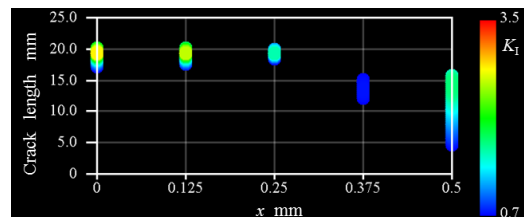


図 12  $x$  毎のき裂長さ  $a_z$  と  $K_{Iz}$  の関係

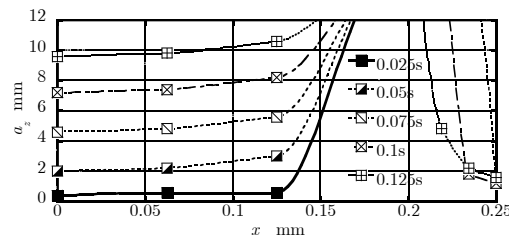


図 13  $a_z$  に対する  $K_{Iz} > K_{Ic}$  の領域から求めた初期き裂形状

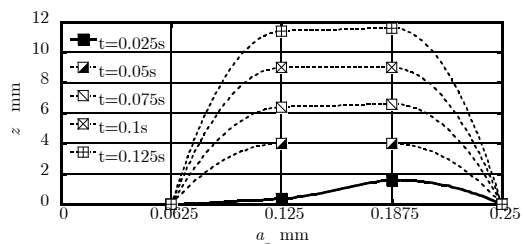


図 14 き裂長さ  $a_x$  と  $K_I$  の関係

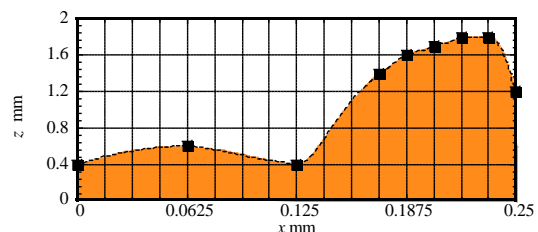


図 15 最適初期き裂形状

それよりも少し端部よりの  $x=0.2\text{mm}$  付近では, 開口できる条件が無くなるのがわかる。また, 最端部の  $x=0.25\text{mm}$  付近は, 中心部よりも遅れて  $0.1\text{s}$  以降に開口条件に至り, その長さは  $1.2\text{mm}$  程度であることがわかる。しかし, これまでの簡易的に初期き裂を導入して行った加工実験では, 1

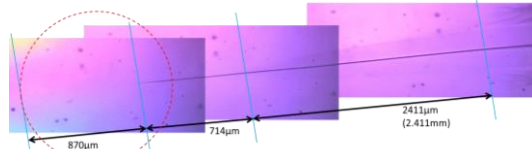


図 16 セナルモン法によるき裂の観察

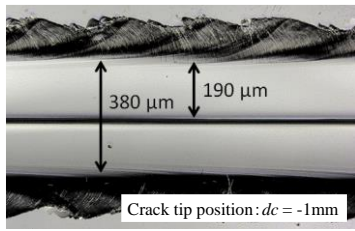


図 17 加工後の溝

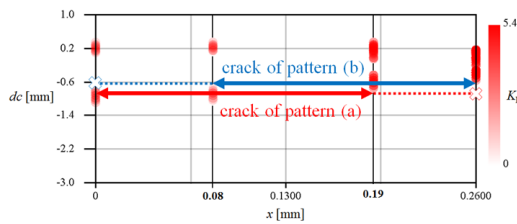


図 18 溝加工における  $K_I > K_{Ic}$  の領域

mm 程度の初期き裂があれば、切り残しなく加工できる場合があった。そのため、一度中心部でき裂が進展できれば、幅方向への進展も可能と考えた。そこで幅方向のき裂長さ  $a_x$  毎の  $K_{Ic}$  を経過時間ごとに求め、最小き裂長さを求めた。結果を図 14 に示す。図より、中心部が先に開口し、き裂が存在していれば、0.025s 後には、これまで開口できなかった  $x=0.2$  付近において 2mm 以下の初期き裂で開口できることがわかる。図 13, 図 14 より、最低限必要な初期き裂形状を予測したものを図 15 に示す。これにより、1.8mm 程度の初期き裂によって、切り残しなく加工できる可能性を示すことができた。

(4) 溝加工中のき裂先端位置の観察と応力拡大係数の評価

図 7 の実験装置を用いて、底面側からき裂を観察した結果を図 16 に、加工後の溝を図 17 に示す。ここで、図 16 の赤点線部分は、レーザー照射領域を表しており、図 17 で確認できる溝中心にできた微小な突起部分は、その熱源後方付近にその先端が存在することがわかる。また、熱源中心よりも約 1mm 後方に、溝となる水平き裂の先端が確認された。これは、スライシング加工の側面側から観察した場合と比べて、非常に熱源に近い位置にあることがわかる。また、実際に剥離を伴ってガラス片が起き上がってくるのは、実際の先端よりも約 2.4mm 後方であることもわかる。

次に、得られたき裂先端位置の関係と解析から得られた  $K_I > K_{Ic}$  を満たす領域の整合性について検討を行った。結果を図 18 に示す。図中は、破壊靱性値を超えた部分のみを示している。図 17 の溝の発生形態は、図中のパターン(a)に相当しており、その溝幅の大きさやき裂先端位置をよく再現しているといえる。ただし、スライシング加工と比べると非常に浅い(スライシングの加工深

さの半分以下)ため、ガラスがレーザーによって急激に加熱される領域であることから、線膨張係数の値を 3 倍に仮定して評価したものである。今後は、この物性値について、実験等による評価を行う必要がある。

<引用文献>

- ① 森田英俊, レーザの熱応力を利用した脆性材料の非接触除去加工の可能性, レーザ加工学会誌, 22-1(2015), 30-36.
- ② Koji Yamamoto, Noboru Hasaka, Hideki Morita, Etsuji Ohmura, Thermal Stress Analysis on Laser Scribing of Glass, Journal of Laser Applications, 20-4(2008), 193-200.
- ③ 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).
- ④ Mazurin, O. V., Handbook of Glass Data, Elsevier Science Ltd. (1983).
- ⑤ 新井武二, レーザ加工の基礎工学, 丸善(2007).
- ⑥ 岡本弘之, 線形破壊力学入門, 培風館(1976).
- ⑦ SCHOTT, B270 Superwite Specification, Physical and Chemical Properties.
- ⑧ Dingyu Li, Weiguo Li, Ruzhuan Wang, Xu eliang Shen, Temperature dependence of the three-point bending fracture behavior of soda-lime-silica glass with surface scratch, Journal of Non-Crystalline Solids, 409(2015), 126-130.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 森田英俊, レーザの熱応力を利用した脆性材料の非接触除去加工の可能性, レーザ加工学会誌, 22-1(2015), 30-36.

[学会発表] (計 9 件)

- ① 松浦晋也, 森田英俊, 山口諒真, 松山史憲, レーザかな加工の最適初期き裂形状の検証, 日本機械学会九州支部第 70 期総会・講演会, 2017 年 3 月, 佐賀大学.
- ② 諸岡優, 松山史憲, 森田英俊, レーザを利用した脆性材料の除去加工技術開発(線膨張係数の温度依存を考慮した解析), 第 48 回 学生員卒業研究発表講演会, 2017 年 3 月, 琉球大学.
- ③ A. Saimoto, Y. Nara, Y. Sonobe, H. Morita, Thermoelastic analysis of 3D solid with ellipsoidal cavity under SD induced thermal stress, 17<sup>th</sup> International Symposium on Laser Precision Microfabrication, 2016 年 5 月, Wyndham Grand Xi'an South, Xi'an, China.
- ④ Y. Sonobe, Y. Nara, H. Morita, A. Saimoto, Two-dimensional analysis of glass surface p

eeling process using CW laser, 17<sup>th</sup> International Symposium on Laser Precision Microfabrication, 2016年5月, Wyndham Grand Xi'an South, Xi'an, China.

- ⑤ Y. Nara, K. Araki, A. Saimoto, H. Morita, In situ observation of peeling process in glass surface by CO<sub>2</sub> laser, 17<sup>th</sup> International Symposium on Laser Precision Microfabrication, 2016年5月, Wyndham Grand Xi'an South, Xi'an, China.
- ⑥ 山田享平, 松山史憲, 森田英俊, レーザを利用した脆性材料の除去加工技術開発(最適初期き裂条件の検証), 日本機械学会九州学生会第47回卒業研究発表講演会, 2016年3月, 鹿児島高専.
- ⑦ 竹里光世, 松山史憲, 森田英俊, レーザを利用した脆性材料の除去加工技術開発(定常状態におけるき裂先端位置の検証), 日本機械学会九州学生会第47回卒業研究発表講演会, 2016年3月, 鹿児島高専.
- ⑧ 家永龍之介, 森田英俊, 松山史憲, 才本明秀, 奈良康永, レーザを利用した脆性材料の新しい除去加工技術開発(熱応力による水平き裂の誘導), 日本機械学会九州支部長崎講演会, 2015年9月, 長崎大学.
- ⑨ 岩永駿介, 森田英俊, CO<sub>2</sub> レーザによる熱応力を利用したガラスの水平き裂誘導(応力拡大係数によるき裂先端位置及び深さの推定), 日本機械学会九州学生会第46回卒業研究発表講演会, 2015年3月, 北九州高専.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

## 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

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：

(4) 研究協力者

( )