

機関番号：57301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760595

研究課題名（和文）レーザ加熱による剥離現象を利用した脆性材料の高速非接触除去加工技術の開発

研究課題名（英文）High-Speed Non-Contact Removal Processing Technology of Brittle Materials Using a Exfoliation Phenomenon by the Laser Heating

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

研究成果の概要（和文）：ガラスに CO₂ レーザを、ある速度で走査させると、延性材料の切削屑のようなガラス片を伴いながら、母材側に溝が発生する現象がある。このとき、溝中心付近の表面は、なめらかな鏡面となっていた。このため、この現象を応用することで、砥石研削に代わる新しい非接触除去加工が可能であると考えた。

そこで本研究では、鏡面の溝が発生するメカニズムの解明を目指し、微小幅のガラスにレーザを照射し走査する実験と、加工時の応力分布の観察を行った。さらに、溝が発生する条件においてき裂を導入した2次元熱応力解析を行い、その発生原理について考察を行った。

研究成果の概要（英文）：When the CO₂ laser is scanning a soda-lime glass under the specific condition, the phenomenon that a smooth groove and the continuous glass chip occur on the glass surface has been discovered. Now, it is expected that this phenomenon can be applied to the new non-contact removal processing method of the brittle material. The purpose of the present research is to elucidate the mechanism of this phenomenon.

In this research, laser irradiation experiments were carried out to the side glass under several conditions. Moreover, FEM analysis was performed under the condition this phenomenon occurs. From the results, the mechanism of this phenomenon was found.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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, 除去加工

1. 研究開始当初の背景

近年、ガラスやシリコン等の脆性材料は多くの工業製品に利用されている。これに伴い、産業界において歩留りの高い脆性材料の加工技術が求められている。一般にガラスの除去加工では、砥石による平面研削など外力によるものが主な手法である。しかし、ガラスは脆性材料であるため、材料が脆性破壊を生じない範囲で加工する必要があり、加工条件の設定が困難である。

一方、ガラスに CO₂ レーザを、ある速度で走査させると、図 1(a)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、母材側に溝が発生する現象がある。このとき、母材側に発生した溝を図 1(b)に、その断面図を図 1(c)に示す。中心付近に、3 μ m 程度の突起があるが、図中の A に相当する部分の溝表面は、なめらかな鏡面となっていた。そこで、この現象を応用することで、従来の脆性材料の除去加工法である砥石による研削加工に相当する新しい非接触除去加工ができること考えた。

2. 研究の目的

これまでに本研究室では、ガラス平面にレーザを照射し、走査する実験を行い、本現象が発生する範囲について調査をおこなった。そして、このような溝の発生には、速度と出力による適切な発生領域があることを報告した。溝が発生する領域を図 2 に示す。また、レーザ出力 50W、ガウス半径 0.97mm で走査速度を変化させた場合の最大深さ d_1 を図 3(a)に、最大溝幅 b_1 を図 3(b)に示している。これらの溝幅や深さは、速度上昇による単位入熱量の減少に伴い、それぞれ減少していく傾向にあることが確認されている。溝の幅や深さは加工における除去量に相当し、本現象を用いた加工法による除去量が、通常の研削加工等における単位時間当たりの除去量と比較して優れている点から、加工技術としての有用性を報告した。

そこで本研究では、鏡面の溝が発生するメカニズムの解明を目指し、微小幅のガラスにレーザを照射し走査する実験と、加工時の応力分布の観察を行う。さらに、溝が発生する条件においてき裂を導入した 2次元熱応力解析を行い、その発生原理について考察する。

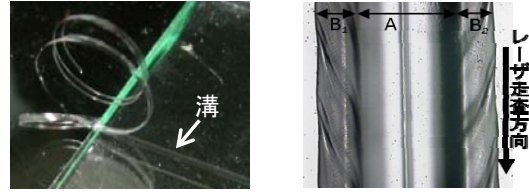
3. 研究の方法

(1) 実験方法の概要と実験装置

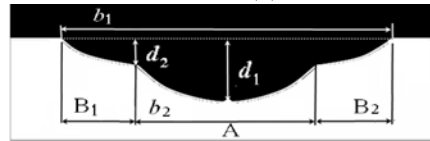
実験は定格出力 40W の CO₂ レーザを使用する。レーザの仕様を表 1 に示す。実験装置において、CO₂ レーザから発生したレーザビームは、2枚の金コートミラーを介して、発生したガラス片に照射させないために、約 56° 斜め方向に傾けて集光レンズを通過させる。集

表 1 CO₂ レーザの仕様

波長 [μ m]	定格出力 [W]	M ²	ビーム半径 [mm]
10.56~10.63	40	1.1 \pm 0.1	2.0



(a) ガラス片と溝 (b) 鏡面溝と剥離部



(c) 溝の断面プロファイル

図 1 ガラスに発生するガラス片と溝

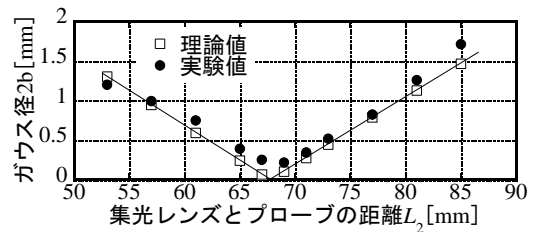
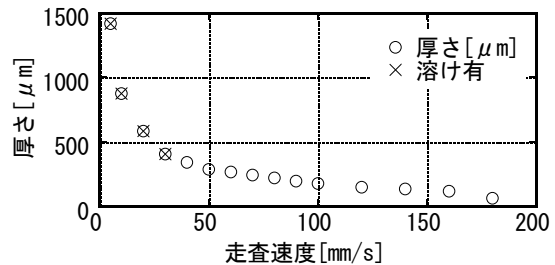
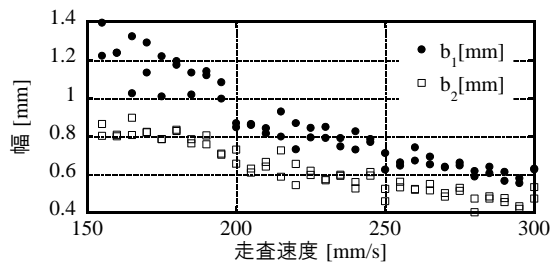


図 2 鏡面溝の発生領域



(a) レーザ走査速度と溝深さの関係



(b) レーザ走査速度と溝の幅の関係

図 3 鏡面溝の深さ・幅の測定結果
(ビーム半径 : 0.97mm)

光レンズの焦点距離は $f=67.5$ mm である。

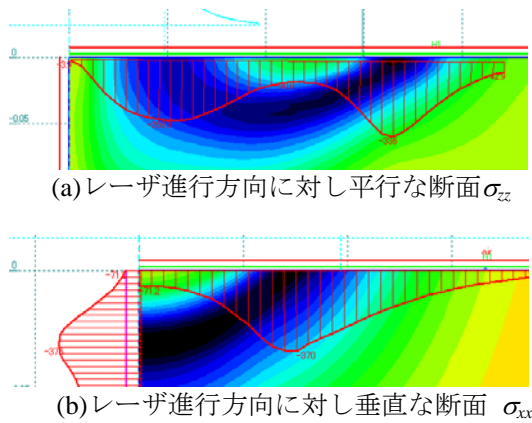
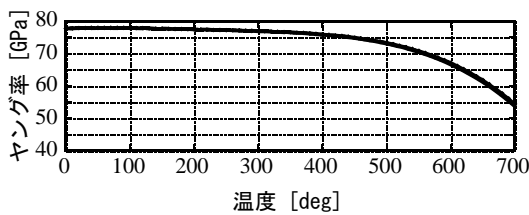
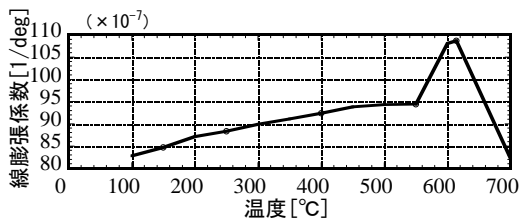


図4 2次元解析による応力分布
($v=155\text{mm/s}$, $P=50\text{W}$, $r=0.96917\text{mm}$)



(a) ヤング率の温度依存性



(b) 線膨張係数の温度依存性

図5 ガラスの物性値における温度依存性

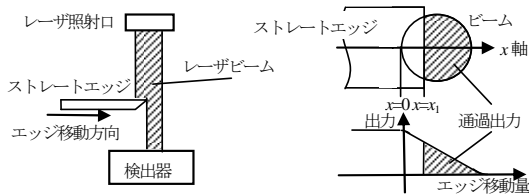


図6 ストレートエッジ法概略図

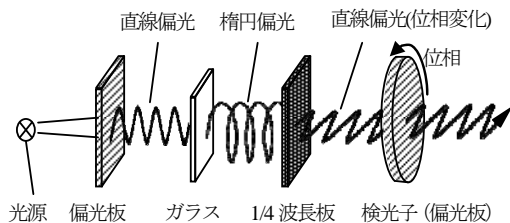


図7 セナルモン法の原理図

レーザー照射による内部熱応力状態を把握するため、FEMによる熱応力解析を行った。溝が発生する条件での解析結果を図4に示

す。図4において、 z 方向(レーザー進行方向)の応力 \cdot_{zz} および、 x 方向(レーザー進行方向に対し垂直)の応力 \cdot_{xx} において、他の方向の応力に比べ、圧縮応力圧縮が顕著に発生しているため、この \cdot_{xx} と \cdot_{zz} が分断面を発生させるメカニズムに大きく影響を与えていると考えられる。図4(a)では、圧縮応力が加熱中心の外側に最大値をもち、加熱中心での圧縮応力場が逆に低下している。図5(a)で示すヤング率の温度依存性により、温度上昇に伴いヤング率が低下し始め、加熱中心部の外側へと最大圧縮応力場が移動するため、ガラスが内部で分断され、円弧状の溝を生成する。そして、この溝の進展により鏡面の溝が発生すると考えられている。また、溝両端の非鏡面部分は、レーザーのプロファイルがガウス分布のため、エネルギー強度の弱い部分に相当するため、軟化のみが起こり、レーザー照射後の熱収縮によってカールする際に、剥離された部分であると考えられる。

図6にストレートエッジ法の概略図を示す。照射されるレーザーをストレートエッジによって片側から遮り、その出力変化を読み取ることでビーム径を算出する。全出力 $P(\infty) = \pi \cdot b^2 / 2$ に対する通過出力の割合をとると式(1)を得る。

$$F(2x_1/b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{2x_1/b}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \dots (1)$$

この F という関数は正規分布として値を与えられており、 $x_1 = -b$ のとき $F=0.977$ 、 $x_1 = b$ のとき $F=0.023$ となる。したがって、通過出力の割合が97.7%の位置から2.3%の位置になる間のエッジの移動距離より、ビーム直径 $2b$ を求めることができる。

セナルモン法は測定するガラスの複屈折率の変化量から、ひずみを定量的に評価する方法である。図7にセナルモン法の原理図を示す。通常、ガラスは光学的等方体であるが、ガラスにひずみが生じた場合、光学的異方性を示す。図において、光源からの光は、まず偏光板により一方向の振動成分をもつ光(直線偏光)となって通過する。この光がひずみを生じたガラスを通過すると、光学的異方性のため複屈折率が変化する。そのため、直線偏光であった光が楕円偏光となり、さらに、位相を $\pi/4$ だけ遅らせる1/4波長板を通過させると、元の光とは異なる振動方向を持つ直線偏光成分のみを透過させる。最後に検光子を通過させると、ひずみの大きさが位相差量となり、色の変化となって現れることから、ひずみを評価することができる。

(2) ガウス径の測定

加工点におけるレーザービームのビーム径はレーザー加工の結果に関わる重要な要素で

ある。そこで、予備実験としてストレートエッジ法を用いて実験に使用するレーザのガウス径の測定を行い、レーザの集光状態を評価する。レーザビームは出力を10Wに設定し、ミラー、集光レンズを介して検出器に照射する。集光レンズと検出器との間にプローブとしてストレートエッジを通すことでレーザを遮る。プローブはレーザと直角方向に移動させ、変化する通過出力の値を測定してガウス径を算出する。集光レンズとプローブ間の距離 L_2 を変化させ、ガウス径の変化から焦点位置を求め、理論値と比較する。

(3) 溝の発生状況の確認

発生した溝の幅や深さについては、これまでに測定を行ってきたが、より詳細な断面形状の測定や表面の状態について詳細に観察を行うために、再度、溝を発生する実験を行い、溝の発生状況について把握する実験を行った。発生した溝の詳細な形状測定のために、レーザ顕微鏡を用いて、鏡面溝の中心付近の形状測定と表面粗さの測定を行い、また、溝の発生速度よりも速い走査速度の場合と遅い走査速度の場合の表面状態についても観察し、考察を行った。

(4) 微小幅ガラスにおける実験

発生メカニズムを考察するために、2次元の状態に近いモデルとして、0.7mm厚のガラス側面に、レーザを走査させる実験を行った。図8に実験装置図を示す。移動テーブルは、最大移動速度1000mm/s、移動可能範囲600mmであり、水平方向に移動する。実験に使用するガラスは一般的なソーダライムガラスを用いる。ガラスはサイズ23mm×90mm、板厚0.7mmである。ガラスの物性値は、表2に示すとおりである。また、ガラスはヤング率、線膨張係数における温度依存性を図5に示す。実験は出力を10W、20W、30W、40Wに設定し、各出力でレーザ走査速度を変化させて、ガラスの分離が起きる（ガラス片が生成される）条件について検証を行った。また、セナルモン法によってレーザ照射部の応力観察も行った。さらに、ガラス側面からガラス片が生成された場合、顕微鏡で剥離層を観察し、厚さの測定も併せて行った。ガウス半径は $r = 0.7413$ mmで行った。

(5) 熱応力解析

これまでの研究で、ヤング率の減少のため、最大圧縮応力場がガラス内部に発生し、この応力がガラスの分離に関わっていると推測された。そのため今回は、き裂先端と最大圧縮応力場の相対的な位置関係についてFEM解析により考察を行うこととした。解析は、ガラス側面に照射する実験を解析モデルとした。解析モデルのサイズは、長さ50mm×高さ

1.0mm×幅0.7mmであり、ガウス半径は $r=0.7413$ mm、レーザ出力35.4W、走査速度 $v=40$ mm/sである。き裂という要素をFEMで反映させるために、今回はき裂に相当する部分のメッシュを順次削除するという方法を利用した。ただし、き裂の成長速度はレーザの速度と同じとし、今回は水平方向におけるき裂先端の位置は最大圧縮応力場の位置に固定し、最大圧縮応力場と、き裂先端の深さ方

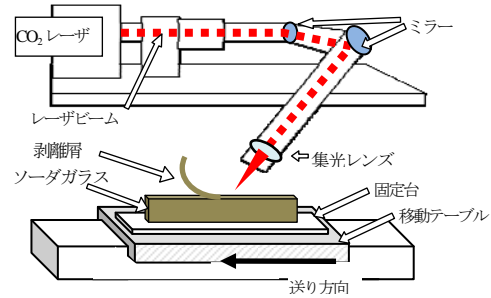


図8 微小幅ガラス実験装置概略図

表2 ソーダライムガラスの物性値

密度 [kg/m ³]	比熱 [J/kgK]	熱伝導率 [W/mK]	線膨張係数 [K ⁻¹]
2520	730 (20°C)	1.03	8.7×10 ⁻⁶ (20°C)
ヤング率 [GPa]	ポアソン比	軟化点 [°C]	破壊応力 [MPa]
78.0 (20°C)	0.23	720~ 730	49

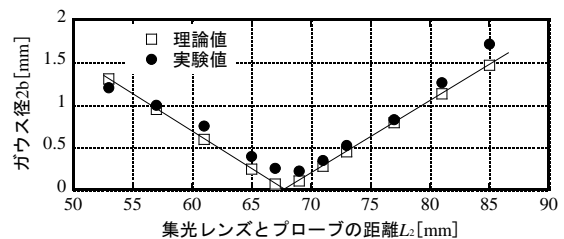
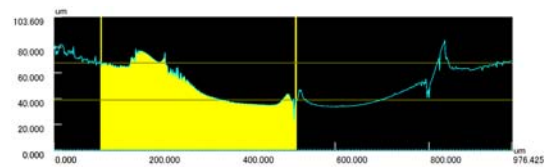
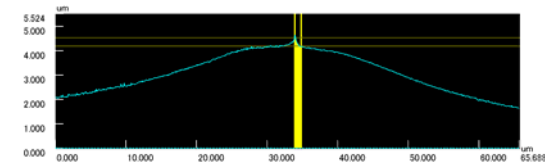


図9 ガウス径測定結果



(a) 溝全体



(b) 中央の小さな山部分拡大図

図10 鏡面部の断面プロファイル

向における相対位置関係について検証を行った。

まず、各条件におけるき裂先端の水平位置や、最大圧縮応力場の位置について確認するため、き裂を導入しない場合の解析を行った。

次に、走査速度と最大応力点から、熱源間までの距離を算出し、き裂が発生する時間 t を求め、レーザー照射部中心から t 秒後のメッシュを削除していく設定を行い、ガラスの分離が発生している状態での応力解析を行う。き裂に相当する部分のメッシュの幅は、 $4 \cdot \mu\text{m}$ となっている。き裂の深さ位置を、最大圧縮応力場の中心付近から深さ方向に上下 5 箇所を設定し、き裂先端部分の応力状態について検証を行った。

4. 研究成果

(1) ガウス径測定

図 9 にガウス径測定結果を示す。レーザーの発散角を考慮した光路計算より求めた理論値と、実験により求めたガウス径を示す。ここで、ガウス径が 0 であるときの L_2 値が焦点位置となるので、理論上の焦点位置は図 9 より、 67.8mm である。実際の焦点位置は、実験値でビーム径が最小値となるときの L_2 値であるため、 $67 \sim 68\text{mm}$ 程度であると考えられる。これは、理論計算により求めた焦点距離とほぼ同じ値である。しかし、実際には焦点付近でビーム半径が 0 になるわけではない。これは、レンズを用いた光学系の集光限界のためであると考えられる。そこで、最小スポット径の理論計算値を公式より算出し、最小スポット径 $D_{\text{min}} = 0.1490\text{mm}$ を得て、これを実験値の最小値と比較すると、最小径はほぼ一致するという結果を得た。

このように、ストレートエッジ法を用いてガウス径を正確に測定し、理論値との一致を得て、集光状態を評価した。昨年度まで使用していたバーンパターン法によるガウス径は、アクリル蒸発痕内部表面でのレーザーの反射による誤差があるため、今後は本実験で求めたガウス径を用いる。

(2) 溝加工の発生状況の確認

レーザー顕微鏡による溝形状の測定結果を図 10 に示す。形状は溝中心部に小さな山のある ω 型の溝形状となっている。小さな山となっている部分の算術平均粗さは $Ra = 0.013 \mu\text{m}$ 、最大高さ $Rz = 0.143 \mu\text{m}$ であった。また、ガラス母材表面の粗さは $Ra = 0.094 \mu\text{m}$ 、 $Rz = 1.873 \mu\text{m}$ であった。溝形状が ω 型となるのは、レーザープロファイルがマルチモードであるためだと考えられる。これは、外部機関でシングルモードのプロファイルで行った実験では、きれいな円弧状になったことから推測できる。鏡面部分と剥離部分の境界の尖った部分は、低倍率で測定したこ

とによる光量不足によるエラーであり、高倍率だと滑らかになることを確認している。また、(b)の突起部の形状は、マルチモードが

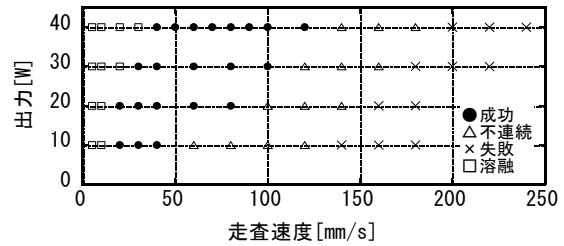


図 11 スライス加工実験結果

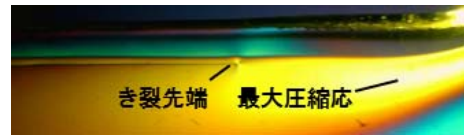


図 12 セナルモン法による歪の観察結果

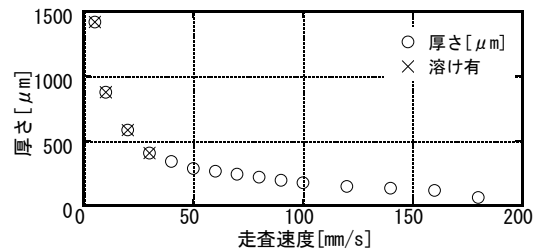


図 13 走査速度とガラス片の厚さ

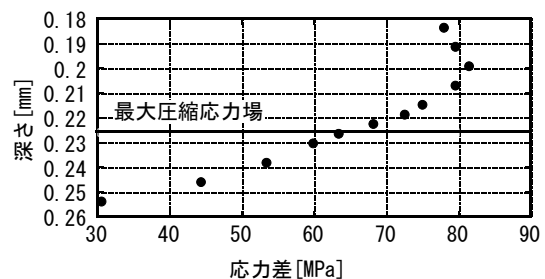


図 14 き裂の深さ位置と応力差 (FEM 解析)

原因とすると、最大圧縮応力場は、レーザーのプロファイルに対応して、突起部左右の溝最深部にあり、ここを起点にき裂が進展するために、このような形になったと類推される。

(3) 微小幅ガラス加工実験

図 11 に微小幅のガラスを分離させる実験の結果を示す。横軸はレーザー走査速度、縦軸はレーザー出力である。実験は同一パラメータで 3 回ずつ行い、再現性の高さを比較し、4 段階に分けて評価した。結果より、出力と速度条件により、連続した剥離層が安定して発生する領域があることが確認できる。各出力において、低速の条件のもとでは剥離層上面に溶融が起こる。これは、低速のため、単位

入熱量が大きすぎるために熔融したものである。一方、高速の条件下では剥離発生が不安定となっている。これは、単位入熱量の減少によりき裂発生に必要な熱応力が得られなかったために、安定しなかったと考えられる。

図 12 にセナルモン法による応力観察写真を示す。観察は、CCD カメラの撮影速度を考慮し、低い走査速度領域で行った。実験条件は、走査速度 $v=1\sim 10\text{mm/s}$ 、 $P=16.5\text{W}$ 、 $r=5\text{mm/s}$ である。

図 12 において、最大圧縮応力場は、き裂よりも僅かながら下側に表れている。また、き裂先端部分の上下で、急激に圧縮ひずみから引張ひずみへと変化しているのがわかる。このことから、き裂下部に発生した強い圧縮応力場によって発生するせん断応力によって、き裂がレーザ走査方向に誘導していると考えられる。

(4) 熱応力解析

図 14 に FEM 解析結果によって得られた、仮定したき裂深さの位置とき裂前後における応力差の関係を示す。き裂先端部では、き裂上下で熱伝導しないため、大きな応力差が生まれると考えられる。つまり、ガラス先端部には、せん断応力が発生しており、これがき裂を成長させていると考えられる。また、最大圧縮応力場よりも浅い部分に応力差の最大値が存在していることが分かる。また、全体的にガラスの平均破壊応力値である 49MPa よりも大きい値を示している。

(5) まとめ

本研究で提案した、レーザによる熱応力を利用した脆性材料非接触除去加工技術について、その発生メカニズムについて考察するための実験やき裂を導入した場合の熱応力解析を行い、レーザ熱により発生するせん断応力が、き裂を成長させていることと推測した。つまり、鏡面溝部分は円弧状のき裂が、せん断応力によりレーザ走査方向に誘導されるために起こる現象であると、本研究により推測された。

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、レーザによる熱応力を利用したガラスの非接触鏡面溝加工技術に関する研究、佐世保工業高等専門学校研究報告、47(2011)pp. 15-22. (査読無)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 朝長和也、森田英俊、原要一郎、せん断応

- 力型き裂誘導による鏡面スライス加工の可能性、日本機械学会、第 42 回学生員卒業研究発表講演会 (2011 年 3 月) 大分高専
- ② 野崎亮太、森田英俊、原要一郎、レーザ熱により発生するガラスの鏡面溝生成メカニズム、日本機械学会、第 42 回学生員卒業研究発表講演会 (2011 年 3 月) 大分高専
- ③ 森田英俊、野崎亮太、朝長和也、原要一郎、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、日本機械学会九州支部第 64 期総会講演会 (2011 年 3 月) 九州大学
- ④ 久田 周平、森田 英俊、原 要一郎、レーザ熱によるガラスの新しい非接触除去加工技術の可能性日本機械学会、九州学生会第 4 1 回学生員卒業研究発表講演会 (2010 年 3 月)、宮崎大学

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：