

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420023

研究課題名(和文) 3次元き裂伝ば解析に基づくレーザープレーニング機序の解明と実用化

研究課題名(英文) Elucidation and realization of laser planing technique based on 3D crack growth analysis

研究代表者

才本 明秀 (SAIMOTO, Akihide)

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号：00253633

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：レーザープレーニングとはガラスやセラミックなどのぜい性材料の最新の加工法の一つである。この工法では、材料の表面損傷をとり除くことができ、その結果材料の強度を回復することができる。本研究課題では、まず最初に、レーザープレーニングの力学的機構を明らかにするために単純化したモデルについての解析を実施した。

本現象は自由縁を有する半無限領域の問題として扱われた。この領域において、移動熱源がつくる準定常熱弾性場を、自由表面と平行に伝ばする半無限き裂の問題として議論した。数値解析の結果、き裂の先端は熱源のわずかな前方にあることが示された。実験事実と解析における予想との差を説明するためには更なる研究が必要である。

研究成果の概要(英文)：A laser planing is one of the up-to-date processing technique for brittle materials like glass and ceramics. This technique removes the damaged skin to recover the original strength of the material. In the present study, to begin with, a simplified model for laser peeling is studied to understand the physical background.

For simplicity, a treated domain was modeled as a semi-infinite region with free edge. In this domain, a stability of crack propagation parallel to the free edge under the influence of quasi-static thermal stress due to moving point heat was discussed. It was found from numerical analysis that the tip of the propagating crack locates infinitesimally ahead of the heating point. In order to explain the differences between analysis and observation, further study is required.

研究分野：機械材料・材料力学

キーワード：き裂伝ば ぜい性破壊 レーザ加工 破壊じん性

## 様式 C-19、F-19、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

携帯型端末の情報表示・入力部に使用されている強化ガラスや、電子デバイスの基盤となるシリコンウエハーなど、「硬く」、「もろい」性質を有する脆性固体は、その固片化や表面処理(仕上げ加工)に多くの技術的課題を残している。種々のレーザ加工技術が格段に進歩した今日においても、高ぜい性材の加工法の主力は研磨や研削などの機械的接触工法であり、レーザ加工技術の実用化には(1)加工エネルギー効率の各段の向上、(2)加工精度の向上、(3)タクトタイムの大幅短縮、(4)高密度レーザ光による熱損傷の回避などの難問が山積している。

このような状況の中、板ガラスを用いたフルボディレーザ切断(レーザ照射に基づく熱応力で材料内のき裂を制御進展させて薄い板材を二分化する加工法)の実施中に、ガラス表面から薄く「皮がむける」現象が報告された(図1参照)。加熱条件を揃えれば本現象は再現し、はがされた薄い膜状のガラスが、あたかも鮑(かな)で削り取られた木材の薄皮のようにクルクルと巻き取られる。本現象は移動速度が比較的大きい熱源が材料表面近傍に形成する熱応力場の中を、表層のごく内側に生じたき裂が安定的に進展する結果であると理解される。しかし本現象がなぜ起こるのかを説明する理論や学術論文等は皆無であった。そこで本課題では、レーザブレイニング現象の力学的背景を明らかにし、産業化に繋げることを目標に基礎研究を実施した。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ガラスやセラミック又はシリコン電子基板などの高ぜい性材の表面に、ある条件を満たしたレーザ光を高速移動させながら連続照射することにより、まるで木材を「かながけ」するように、材料表層から一定厚みの薄膜を連続的に取り去り、表面の微細傷を完全に除去する新しい

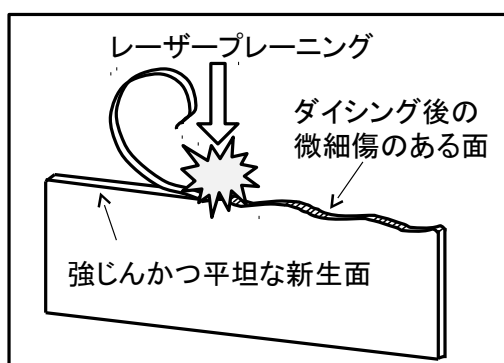


図1 薄板のレーザブレイニング概念図

加工技術(レーザブレイニング)の理論的背景を材料力学の見地から明らかにすることであった。

例えば機械的切断方法によりカットした高ぜい性材には切断面に何らかの微細傷が残って強度低下を引き起こす原因となり得る。しかし、機械加工後に微細傷を有する面にレーザブレイニングを施せば、表層の微細傷が完全に除去されて極めて高強度の新生面を得ることが可能になると予測される。研磨によっても同様の表面仕上げは可能であるが、レーザブレイニングは非接触で、冷却液などを用いることなく表面層を削ることができるはずであり、電子回路が予めプリントされたシリコンウエハーなどの電子デバイスの加工に極めて有用で、世界でも例を見ない極めて独創性の高い最新加工技術になり得ると考えられる。

そこで本研究課題では、加工対象となる材料の機械的特性に応じた最適レーザブレイニング条件を明らかにすることを目的として、熱弾性解析とき裂の伝ば解析、ならびに実際のレーザブレイニング試験を実施した。

### 3. 研究の方法

本研究の実施にあたり、移動温度荷重をうける3次元固体の表層近傍を伝ばするき裂が、なぜ安定的に進展することができるのか、どのようなき裂前縁形状で進展しているのか、き裂面が表面とほぼ平行に成長するために必要な力学的条件は何かなど、多くの知見を数値き裂進展シミュレーションの結果から見出す必要がある。また、本現象に最も寄与している力学的要因が何であるのかを明らかにすることが必要である。そこで最初に本現象を2次元な熱弾性現象であると想定し、移動熱源が2次元半平面の表面に作用する状態を想定して、熱弾性解析を実施した。すなわち、2次元半平面表面に作用する移動熱源のつくる熱弾性場を直進するき裂の問題と本現象を捉えることにより、移動熱源とそれを追従するき裂の先端の相対位置をコンピュータシミュレーションによって予測可能であるのかについてまず検討することとした。その後、3次元形状のき裂がその面内を伝ば・拡大する様子を高精度にシミュレートすることができる解析システムを体積力法に基づいて開発し、その解析システムが並列計算機上で効率的に稼働するようチューニングした。また、熱弾性解析の結果を踏まえて、表面はく離を連続的に起こさせるためのレーザブレイニング条件を提案するとともに、条件の妥当性を実験的に確認した。

#### 4. 研究の成果

本章では、最初にとりかかった2次元熱弾性解析の方法と、その成果について詳述する。熱源はガウス分布形状の拡がりを持つと想定し、半無限板の表面上を等速度  $V$  で  $x$  軸正方向に移動する準定常状態を考えることとした。熱源中心を原点とする相対移動座標において、位置  $(X, y)$  に生じる温度上昇  $T$  ならびに熱応力の成分  $\sigma_{ij}$  は次のように求められる。

$$T = \frac{Q_0}{2\pi\lambda \int_{-r_0}^{r_0} e^{-a_0\xi^2} d\xi} \times \int_{-r_0}^{r_0} e^{-a_0\xi^2} \left[ \int_0^\infty \frac{1}{u} e^{-g(u)} du \right] d\xi \quad (1)$$

$$\sigma_{xx} = \frac{\alpha EQ_0}{2\pi\lambda \int_{-r_0}^{r_0} e^{-a_0\xi^2} d\xi} \times \int_{-r_0}^{r_0} e^{-a_0\xi^2} \left[ \int_0^\infty \left\{ -\frac{1 - e^{-g(u)}}{2g(u)} + G(u) \frac{y^2}{(X - \xi + uV)^2 + y^2} \right\} \frac{du}{u} \right] d\xi \quad (2)$$

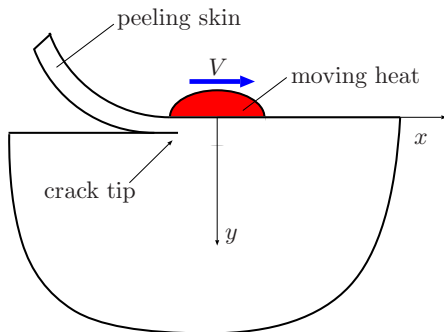


図2 2次元レーザブリーニングの解析モデル

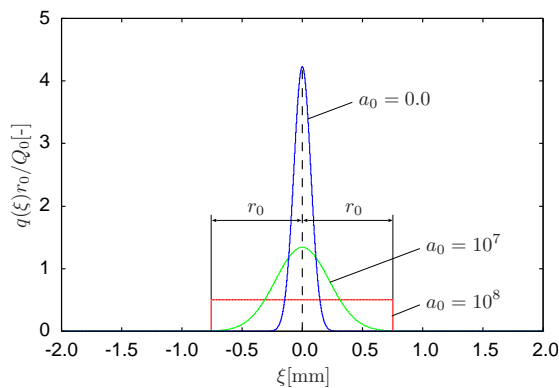


図3 熱源の分布プロファイル

$$\sigma_{yy} = -\sigma_{xx} - \frac{\alpha EQ_0}{2\pi\lambda \int_{-r_0}^{r_0} e^{-a_0\xi^2} d\xi} \times \int_{-r_0}^{r_0} e^{-a_0\xi^2} \left[ \int_0^\infty e^{-g(u)} \frac{du}{u} \right] d\xi \quad (3)$$

$$\sigma_{xy} = -\frac{\alpha EQ_0}{2\pi\lambda \int_{-r_0}^{r_0} e^{-a_0\xi^2} d\xi} \int_{-r_0}^{r_0} e^{-a_0\xi^2} \times \left[ \int_0^\infty G(u) \frac{(X - \xi + uV)y}{(X - \xi + uV)^2 + y^2} \frac{du}{u} \right] d\xi \quad (4)$$

$$g(u) = \frac{(X - \xi + uV)^2 + y^2}{4\kappa u} \quad (5)$$

$$G(u) = \frac{1 - e^{-g(u)}}{g(u)} - e^{-g(u)} \quad (6)$$

ここで  $\lambda$  [W/mK] は熱伝導率で、比熱を  $c$  [J/kgK]、密度を  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]、温度伝導度 (熱拡散係数) を  $\kappa$  [m<sup>2</sup>/s] とすると  $\lambda = c\rho\kappa$  という関係がある。また、 $\alpha$  [1/K] は線膨張係数、 $E$  [Pa] は縦弾性係数である。

分布熱源の形状は単位時間あたりの全熱量を  $Q_0$  [J/ms]、加熱される領域の半径を  $r_0$  [m] とすると式 (7) で表されると考えた。この式で  $a_0$  を変えることでトップ・ハット形状から点熱源に近い状態まで分布形状を変化できる。

$$q(\xi) = Q_0 e^{-a_0\xi^2} / \int_{-r_0}^{r_0} e^{-a_0\xi^2} d\xi \quad (7)$$

$y = 0$  (自由表面) において  $\sigma_{xy}$  は対称性から自動的に0となるが、 $\sigma_{yy}$  については値が残る。そこで  $x$  軸を自由表面にするために、式 (3) で  $x$  軸上に残留する  $\sigma_{yy}$  を打ち消すように半無限板の表面に分布荷重を加え、重ね合わせにより半無限板の熱弾性場を求めた。図4~7に、以上のようにして求めた熱源移動速度が 100mm/s の場合の温度上昇、および熱応力の分布を示す。

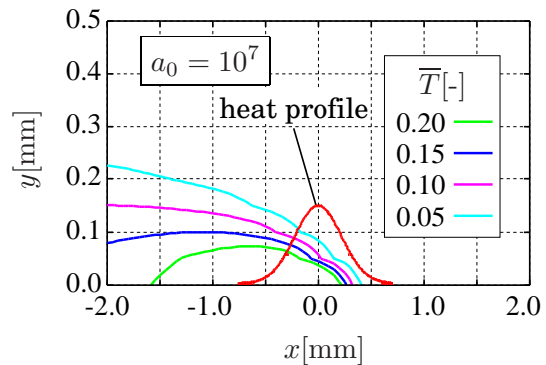


図4 無次元温度上昇分布図 ( $V = 100$ mm/s,  $a_0 = 10^7$ )

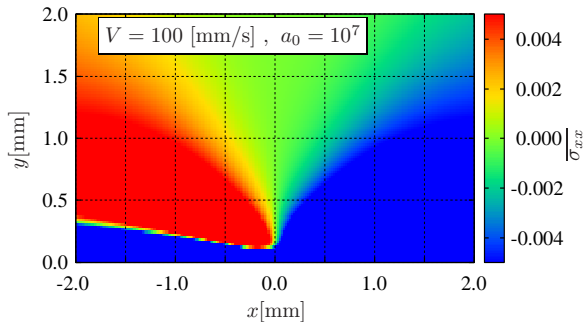


図5 無次元応力  $\overline{\sigma_{xx}}$  の分布 ( $V = 100\text{mm/s}$ ,  $a_0 = 10^7$ ,  $\overline{\sigma_{xx}} = \frac{2\pi\lambda}{\alpha EQ_0} \times \sigma_{xx}$ )

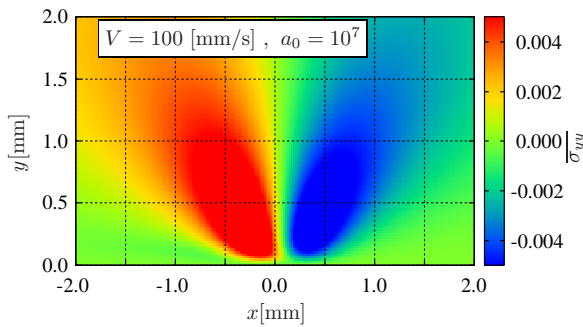


図6 無次元応力  $\overline{\sigma_{yy}}$  の分布 ( $V = 100\text{mm/s}$ ,  $a_0 = 10^7$ ,  $\overline{\sigma_{yy}} = \frac{2\pi\lambda}{\alpha EQ_0} \times \sigma_{yy}$ )

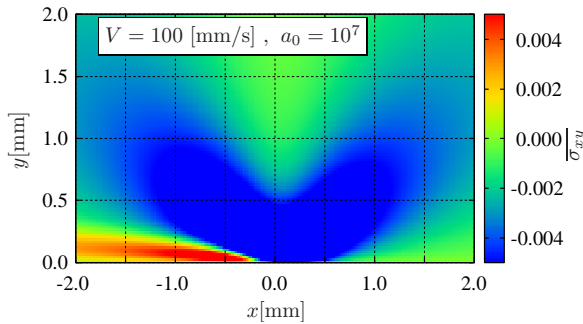


図7 無次元応力  $\overline{\sigma_{xy}}$  の分布 ( $V = 100\text{mm/s}$ ,  $a_0 = 10^7$ ,  $\overline{\sigma_{xy}} = \frac{2\pi\lambda}{\alpha EQ_0} \times \sigma_{xy}$ )

次に以上のような準定常熱弾性場において、熱源を追従して表面と平行に伝ばするき裂が存在し得るかを破壊力学的考えに基づいて判定した。すなわち、図5~7に示した熱弾性場に  $x$  軸と平行な半無限き裂が存在するときのき裂先端の熱応力拡大係数を求め、き裂が直進する条件である  $K_{II} = 0$  のもとで、破壊じん性値を超える  $K_I$  を生じるようなき裂先端が存在するかを解析した。解析結果を図8に示す。

図8は熱源中心が原点にあるとき、種々のき裂先端位置の  $x$  軸と平行な半無限き裂を想定して得られ

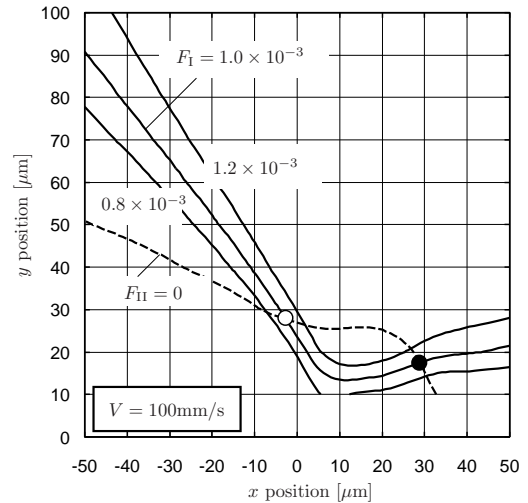


図8  $V = 100\text{mm/s}$  におけるき裂先端位置の推定

た熱応力拡大係数が同じ値をとる位置を結んで作った等高線図である。点線は  $K_{II} = 0$  となる位置を示し、この点線にき裂先端があればモードIIの応力拡大係数が0となるためき裂が直進することを意味する。無次元応力拡大係数が  $F_I = 1.0 \times 10^{-3}$  となる曲線と、 $F_{II} = 0$  となる曲線の交点を白丸と黒丸で示している。これらの丸の位置は破壊靱性を超えるモードIの応力拡大係数が得られると同時にき裂が直進する位置になっている。白丸のき裂位置は熱源より数ミクロン後方かつ、深さ方向に30ミクロン程度入った位置である。また、黒丸のき裂先端位置は熱源より30ミクロンほど先行し、かつその深さは20ミクロン程度である。ただし、白丸の位置は一旦き裂が熱源に遅れ始めると応力拡大係数が減少する傾向にあってますますその両者の距離が離れてしまうため安定な位置とは考えにくい。一方、黒丸の位置ではき裂が遅れると  $K_I$  が増加してき裂が加速し、逆にき裂が先行すると  $K_I$  が減少してき裂が停滞しやすくなる傾向を表しており、安定的にき裂先端が存在できると考えられる。以上の考察により、レーザブレイニングの結果、どれくらいの深さのかんがけが可能かを数値解析からある程度予測可能であることが分った。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- (1) Takuichiro Ino, Md Abdul Hasib, Toru Takase, Akihide Saimoto, Evaluation of Accuracy for 2D Elastic-Plastic Analy-

sis by Embedded Force Doublet Model Combined with Automated Delaunay Tessellation, Journal of Multiscale Modeling, 査読有, Vol.6, 2016, 1560012(13)  
DOI: 10.1142/S1756973715500122

- (2) Md. Abdul Hasib and Akihide Saimoto, Influence of Small Cavity Existing in the Vicinity of 3D Crack Front, Key Engineering Materials, 査読有, Vol. 665, 2016, 5-8  
DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.665.5
- (3) Md. Abdul Hasib and Akihide Saimoto, Analysis of 3D Planar Crack using Body Force Method, Key Engineering Materials, 査読有, Vol.627, 2014, 5-8  
DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.627.5
- (4) Takuichiro Ino, Shohei Ueno, Akihide Saimoto, Interference Analysis Between Crack and General Inclusion in an Infinite Plate by Body Force Method, Key Engineering Materials, 査読有, Vols.577-578, 2014, 1-4  
DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.577-578.1

〔学会発表〕(計 20 件)

- (1) 本多亮介, 才本明秀, 園部陽平, 富永小夏, メッシュフリー体積力法を用いた 2 次元き裂問題の解析, 日本機械学会九州支部第 69 期総会講演会, 2016, 熊本大学工学部 (熊本県・熊本市中央区黒髪)
- (2) 伊野拓一郎, 才本明秀, 中島進之介, 梶原啓司, 過大内圧を受けた円孔に生じる残留応力場の解析, 日本機械学会九州支部第 69 期総会講演会, 2016, 熊本大学工学部 (熊本県・熊本市中央区黒髪)
- (3) Md A Hasib, A Saimoto, 体積力法を用いた任意分布 3 次元き裂の解析日本機械学会九州支部第 69 期総会講演会, 2016, 熊本大学工学部 (熊本県・熊本市中央区黒髪)
- (4) 片瀬博昭, 才本明秀, 園部陽平, 2 次元メッシュフリー体積力法を用いたき裂と円孔の干渉問題の解析, 日本機械学会九州支部第 69 期総会講演会, 2016, 熊本大学工学部 (熊本県・熊本市中央区黒髪)
- (5) 東 孝之, 才本明秀, 園部陽平, 点熱源近くに存在する円板状き裂の熱応力拡大係数の解

析, 日本機械学会九州支部第 69 期総会講演会, 2016, 熊本大学工学部 (熊本県・熊本市中央区黒髪)

- (6) 井原 理, 才本明秀, 谷川翔平, 逆問題解析の効率化・高精度化の研究, 日本機械学会九州支部第 69 期総会講演会, 2016, 熊本大学工学部 (熊本県・熊本市中央区黒髪)
- (7) 岩崎俊, 才本明秀, 園部陽平, メッシュフリー体積力法による傾斜機能材料の応力解析, 日本機械学会九州支部第 69 期総会講演会, 2016, 熊本大学工学部 (熊本県・熊本市中央区黒髪)
- (8) 杵川貴史, 築地原豊, 才本明秀, 園部陽平, メッシュフリー体積力法を用いた二次元応力集中問題の解析, 日本機械学会九州支部第 69 期総会講演会, 2016, 熊本大学工学部 (熊本県・熊本市中央区黒髪)
- (9) 伊野拓一郎, 才本明秀, 中島進之介, 梶原啓司, 過大内圧を受けた円孔に生じる残留応力場の解析, 日本機械学会九州支部第 69 期総会講演会, 2016, 熊本大学工学部 (熊本県・熊本市中央区黒髪)
- (10) 伊野拓一郎, 才本明秀, 切欠き半径が塑性域形状に及ぼす影響, 日本機械学会年次大会講演会, 2015, 北海道大学工学部 (北海道札幌市北区)
- (11) 岩崎俊, 才本明秀, 伊野拓一郎, 材質傾斜円筒の半径方向き裂の解析, 日本機械学会年次大会講演会, 2015, 北海道大学工学部 (北海道札幌市北区)
- (12) 園部陽平, 才本明秀, 片瀬博昭, 熱源分布がレーザーかんなに及ぼす影響の解析, 日本機械学会年次大会講演会, 2015, 北海道大学工学部 (北海道札幌市北区)
- (13) Akihide Saimoto, Mechanical background of laser peeling of glass plates, 32nd Spanish Conference on Fracture and Structural Integrity (invited), 2015, サラマンカ (スペイン)
- (14) Hasib Md. Abdul and Akihide Saimoto, Versatile Analysis of Mixed-mode 3D Planar Crack, ACMFMS2014, 2014, 奈良新公会堂 (奈良市春日野町)
- (15) Hasib Md. Abdul and Akihide Saimoto, Interaction of Multiple Planar Cracks

under Mixed-mode Loading, 3rd International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering, 2014, Khuluna Institute of Technology (Bangladesh)

- (16) Hasib Md. Abdul and Akihide Saimoto, BFM Analysis of Planar Elliptical Cracks using Triangular Elements, 日本機械学会九州支部 総会講演会, 2014, 九州工業大学工学部 (福岡県戸畑区仙水町)
- (17) 伊野拓一郎, 才本明秀, 体積力法による切欠試験片の非線形弾性解析, 日本機械学会九州支部 総会講演会, 2014, 九州工業大学工学部 (福岡県戸畑区仙水町)
- (18) 才本明秀, 新しい三角形き裂先端要素の開発と単一モード平板き裂問題への適用, 日本機械学会九州支部 総会講演会, 2014, 九州工業大学工学部 (福岡県戸畑区仙水町)
- (19) Hasib Md. Abdul and Akihide Saimoto, Evaluation of 3D Crack Interection by BFM, 日本機械学会 第 26 回計算力学講演会, 2013, 佐賀大学理工学部 (佐賀県佐賀市本庄町)
- (20) Hasib Md. Abdul and Akihide Saimoto, 球かと円板状き裂の干渉の解析, 日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス, 2013, 岐阜大学工学部 (岐阜県岐阜市柳戸)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

才本 明秀 (SAIMOTO, Akihide)

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号：00253633