

令和元年6月19日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05982

研究課題名(和文) き裂の3次元制御進展による超高強度平滑面の創成

研究課題名(英文) Development of super strong planar surface by controlling a 3D crack propagation

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) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではまず、通常の境界要素分割を用いることなく3次元き裂伝ば問題をメッシュフリー解析できるよう拡張した体積法を開発した。次に開発したシステムによりシリコン内部にレーザーを集光させて作成した微小き裂群の伝ば・拡大の様子を解析した。その際、シリコン内部におけるレーザー集光特性を考慮し、熱物性値の温度依存性を考慮した伝熱・熱応力問題を考察した。最終年度はこれらの知見を総合して、き裂の進展を制御し、シリコン内部に超高強度平滑面を創るためのレーザー加工シミュレーションシステムを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

移動最小二乗法近似を体積法の密度関数の未知の分布に適用することで、メッシュフリー体積法(MFBFM)を提案した。MFBFMによる任意の平面き裂問題の解析は、き裂前縁の位置を表す節点データのみを提供することで解析でき、そのき裂前縁近傍の応力状態から新しいき裂前縁を決定することで容易にき裂伝ばの解析を実施できることを明らかにした。また、平面き裂のみならず、曲面的なき裂問題にも適用できることを示した。本研究で得られた成果により、例えばレーザーを用いてシリコンなどのぜい性固体を精密加工する際の最適加工条件を見積もることが可能になる。

研究成果の概要(英文)：Firstly, a mesh-free body force method (MFBFM) which enables the highly efficient 3D crack analysis system was developed. MFBFM can be used for not only calculating a SIF distribution but also for the simulation of 3D crack coalescence problems. Next, the crack extension behavior in the vicinity of heating zone was analyzed. In the later analysis, the temperature dependence of the material properties such as thermal conductivity, density, specific heat and fracture toughness were assumed to be a function of temperature. In the final year 2018, all research fruits are combined to realize a simulation system for laser processing simulation for highly brittle materials.

研究分野：材料力学、破壊力学、計算力学

キーワード：応力解析 3次元き裂 メッシュフリー解析 き裂進展 レーザ加工

様式 C-19, F-19-1, Z-19, CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

レーザー光を電子基板材となるシリコンウエハや IT デバイスの表示・入力素子に用いられる強化ガラス基板の内部に集光させることで破壊起点となる欠陥を発生させ、その欠陥の近傍に適切な光エネルギーを与えてき裂進展を制御し、超高強度かつ超平滑な新生面を所望の位置に創成する独自のレーザー加工技術を構築するための技術開発が本研究の究極の目的である。すなわち、アブレーションや表面変質層の生成ではなく、内部欠陥生成技術と き裂進展を高度に利用することで、刃物や工具を用いることなく、ぜい性固体を光エネルギーの制御のみで所望の平面や曲面形状に仕上げる、革新的なレーザー加工エンジンの開発を最終目標と位置づけて研究を開始した。その中で 3 次元き裂の形状が動的に変化し、かつ、き裂面が平面的ではない一般の場合を扱う必要が生じ、解析方法自体にも大きなブレークスルーが求められた。そこで任意複雑形状のき裂の動的な成長(形状変化)を、できるだけ少ない情報で扱うことを目途として、メッシュフリー体積力法(Mesh-Free Body Force Method, MFBFM)の開発を最初の研究課題に設定した。MFBFM では 3 次元き裂問題を扱う際に、き裂前縁を表す閉曲線上の点列と、き裂面を規定する離散点群の 3 次元座標のみで、き裂面の形状関数と内挿関数の両者を局所最小二乗近似的に近似する新しい体積力法である。開発した MFBFM を用いて種々のレーザー加熱条件を逐一数値的に検討し、所望の加工を実現する加熱条件を探索すること、および、その実験的な再現により独自のレーザー加工技術を構築することが極めて重要であると考えた。

2. 研究の目的

本研究の実現により、複雑形状の 3 次元き裂問題を解析するためのツールとして、MFBFM が利用可能になる。この方法では、き裂面の要素分割が不要なので、任意形状き裂の解析が極めて容易になる。また、高ぜい性材のレーザー加工技術は Si や SiC などを基盤とする MEMS 用の部材や、電子デバイスを量産する上で欠くことのできない基幹技術である。従って、刃物や工具を用いないレーザー加工技術でぜい性固体を任意に加工し、高品質の面を創成可能にすることは、エレクトロ産業のさらなる発展を下支えする意義がある。以上のような学術的ならびに産業的な課題を解決することを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

2016 年度は、任意形状 3 次元き裂問題の 3 角形平面要素を用いた離散化を基礎とする体積力法の計算方法に加え、3 次元き裂問題をメッシュフリーで解析する計算プログラムの開発を実施した。MFBFM はき裂前縁を表す閉曲線上の 3 次元の点列と、き裂面上に配置する離散点の座標のみを与えることで、き裂の形状と、未知関数となる体積力対の密度を内挿する体積力法である。例えば円板状き裂を解くためには、き裂前縁を表す円周上の節点列の座標と、き裂面上に置いた任意個数の節点座標を入力して境界条件を指定するだけで良く、与えられた節点同志を局所最小二乗的に補間することで、形状関数を内挿する。また、き裂面上の点から測ったき裂前縁までの距離の平方根に比例する基本密度関数(き裂先端の特異性を考慮し、開口特性を表す関数)を自動的に取り込んだ体積力対の分布を考えることで、高い解析精度を保證するものである。

2 次元のき裂問題では、き裂の両先端を意味する 2 つの節点座標と、これらの節点を結びき裂の形状を規定する内部節点群の座標を与えることで形状関数と内挿関数を局所最小二乗的に定義し、別途与える境界条件を満たすように体積力対の分布密度を決定することができる。このことをヒントとして 2016 年度末までには、3 次元き裂が MFBFM により解析できるシステムを構築し、任意のレーザー加熱を想定した熱応力下で、き裂前縁に沿った応力拡大係数の正確な分布が求められるようになった。なお、一般にメッシュフリー解析では入力データが省力化できる分、計算アルゴリズムが複雑になって計算量が増える。そのため、3 次元き裂問題を対象とした MFBFM 計算システムの実現にあたっては、複数コアの CPU で並列演算が実行できる並列計算機システムの導入が必要であった。また、シリコンを想定したレーザー加熱条件を考慮する際には熱物性値の温度依存性を無視することはできない。当初熱物性値の温度依存性を考慮した熱応力計算には、商用の有限要素法解析システムを利用する予定であったが、ソフトウェアの価格が予定を上回ったため差分法に基づく自作コードにより熱弾性解析を実施した。以上のようにしてレーザーを用いてシリコンなどのデバイス材料に「超高強度平滑面」を生成するためのシミュレーションシステムの構築は実現したが、実際のレーザー加工実験による加工条件の確認作業を行うまでには至っておらず、今後の課題として残っている。

4. 研究成果

(1) MFBFM の開発に関する成果

今日の計算機の発展に伴い、有限要素法などの数値解析手法によって様々な 3 次元き裂の解析が実施されてきた。しかしながら、3 次元き裂が伝ばおよび合体しながら拡大していく様子を正確に解析することは依然として困難である。き裂前縁には応力特異性が存在するため、解析するにはき裂の特異性を考慮した特殊な要素分割を必要とする。き裂の伝ばを正確に解析するためには、このような要素分割を繰り返し行う必要がある(図 1)。そのため、き裂前縁の特異性を容易に考慮でき、き裂面の要素分割のみでき裂の解析が可能な境界型応力解析手法の体積力法(BFM)は 3 次元き裂伝ば裂解析に適している。近年、メッシュ分割を一切必要としないメッシュフリー解析手法が提案され、その実効性が認められている。移動最小二乗(MLS)近似はメッシュフリー解析手法の中で重要な役割を果たしている。MLS 近似を体積力法の密度関数の未知の分布に利用することでメッシュフリー体積力法

(MFBFM)を提案した(図 2)。

MFBFM による任意の平面き裂問題の解析では、き裂前縁の位置を表す節点データのみを提供することで解析でき、そのき裂前縁近傍の応力状態から新しいき裂前縁を決定することで容易にき裂伝ばの解析を実施できる。

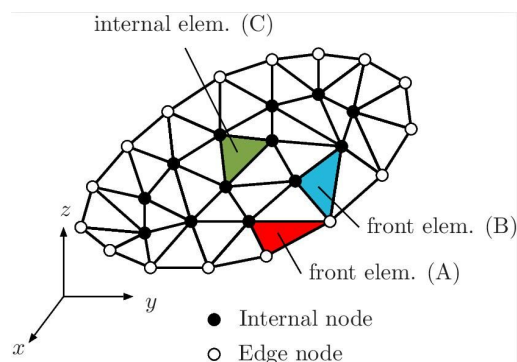


図 1 従来の体積法に用いられたき裂面の3角形要素分割

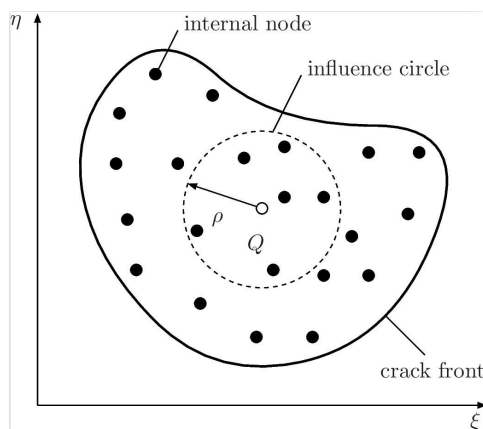


図 2 MFBFM による平面き裂の表現

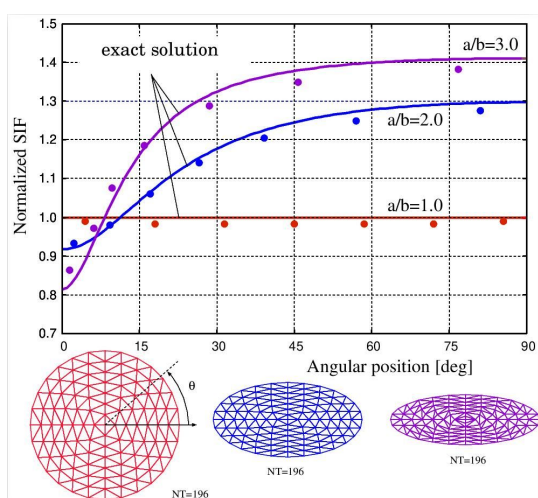


図 3 従来の体積法を用いた円板状き裂の解析例

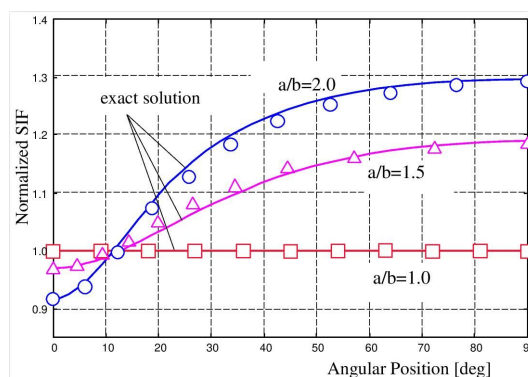


図 4 MFBFMを用いた円板状き裂の解析結果

MFBFM を用いて無限遠方から一様引張応力を受ける同一平面の2つの平面き裂が伝ばしながら合体していく様子をシミュレートした結果を図 5 に示す。図中の破線は初期き裂を表しており、実線はそれぞれ 2 回目、3 回目、15 回目のき裂伝ば解析終了時の形状を示している。なお、縦軸と横軸はそれぞれ座標値を寸法 a (向かって左側の円形き裂の半径) で除して無次元化したものである。また、き裂の伝ば方向はき裂前縁の法線方向とし、ステップごとのき裂の進展長さは応力拡大係数に比例するとしてき裂の合体を模擬した。

(2) 熱物性の温度依存性を考慮したシリコンの熱弾性解析に関する成果

本研究ではスティルスダイシング(以下 SD)と呼ばれる方法で導入されたシリコン内のき裂を制御進展させることで平滑面を生成することを究極の目的としている。SD に関する数値解析に関する研究例はいくつかあり、その中でも大村[1]は AID 法に基づく差分解析により、レーザを内部に集光させたときの材料の温度分布とその時間変化を検討した。また、温度変化による熱衝撃波についても言及している。しかし、この研究ではレーザ吸収率の温度依存性は考慮されているものの、その他の熱物性値は一定とされている。そこで本研究では熱伝達係数や密度、比熱などが顕著な熱依存性を有するとして SD 時の温度分布と、温度変化に伴う応力場を数値的に解析した。その結果を図 6 に示す。なお、温度解析における時間発展の処理にはクランクニコルソン法を適用した。

[1] 大村 悦二, 福満 憲志, 熊谷 正芳, 森田 英毅, “ ナノ秒レーザによる単結晶シリコンの内部改質層形成機構の解析 ”, 日本機械学会論文集 (C 編), 第 74 巻, 第 738 号, pp.446-452 (2008)

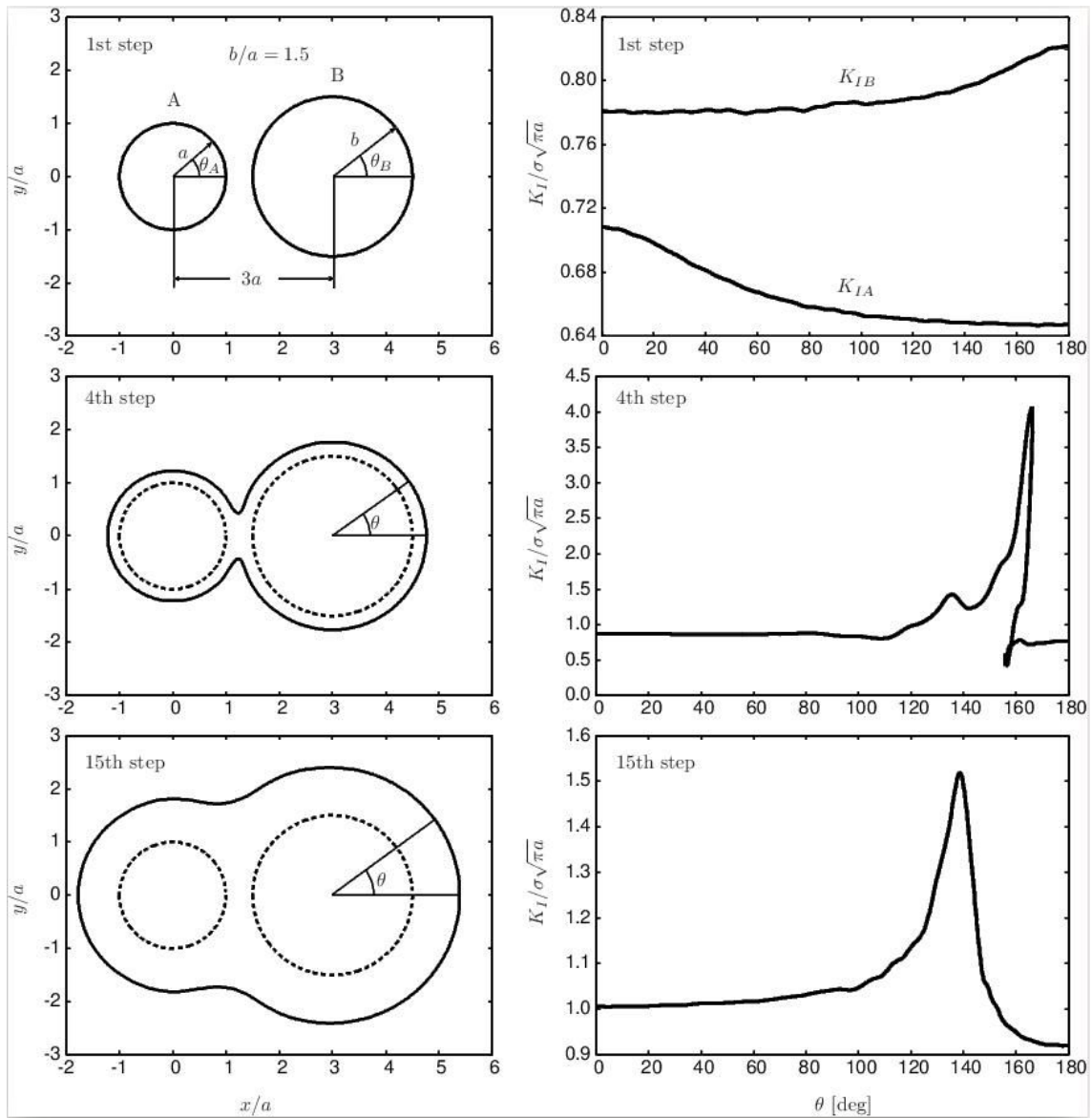


図5 2平面内にある2き裂の合体シミュレーション結果

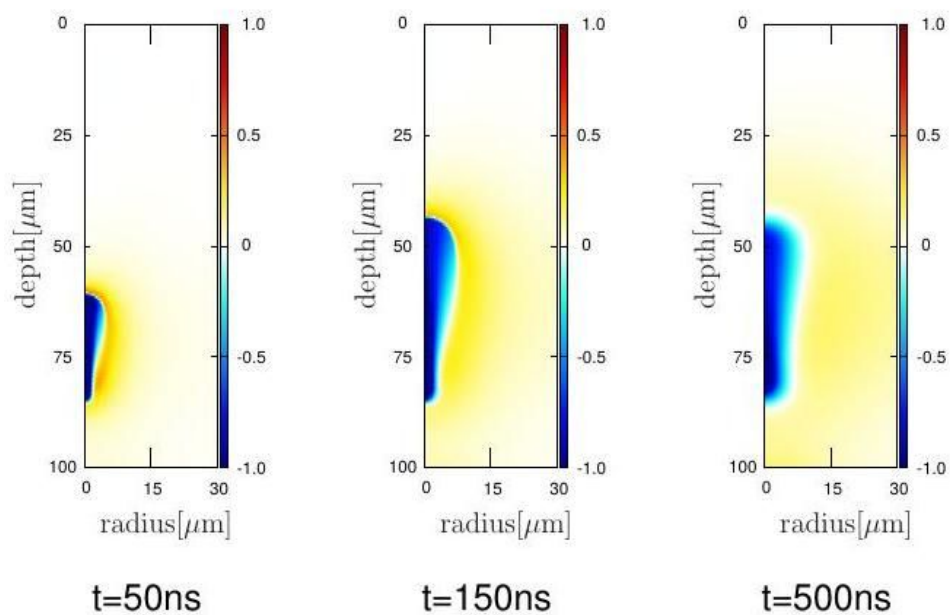


図6 シリコンのSDシミュレーション結果(レーザ加熱点近傍の hoop stress 分布)

図 6 はシリコン内部に集光したレーザー光をあてた際に生じる周方向応力成分(き裂面と垂直な方向の応力成分)の数値解析結果をコンター図で表したものである。モデル半径は 30um,モデル高さは 100um とし,半径方向と軸方向にそれぞれ 50nm のメッシュサイズの差分格子を配して解析した。レーザーの総エネルギーは 15uJ であり,レーザーの発信後 500ns までの時間における熱弾性場を数値解析した。レーザー照射中心は圧縮応力が分布しているが,照射領域の外側にき裂が発生・進展するドライビングフォースとなる引張応力場が形成されていることが分る。この引張応力場を適切に制御することで,所望のき裂進展面を形成することが可能と考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4 件)

Yohei Sonobe, Takuichiro Ino, Akihide Saimoto, Toru Takase, Atsuhiko Koyama and Giora Shatil, Accurate SIF Analysis of a Partially Cylindrical Side Crack Opened by Far-Field Tension, Key Engineering Materials, Vol.774, pp.583-588 (2018) 査読有

Yohei Sonobe, Takuichiro Ino, Akihide Saimoto, Md. Abdul Hasib, Atsuhiko Koyama, Giora Shatil, Analysis of Planar Crack Coalescence by Mesh-Free Body Force Method, Key Engineering Materials, Vol.754, pp.161-164 (2017) 査読有

Md A. Hasib, Y. Sonobe, A. Saimoto: Improvement of Stress Intensity Factor Analysis using Overall Defined Basic Density Function on Crack Face, Journal of Multiscale Modelling, Vol. 9, No. 1, pp.1750006-1-1750006-14 (2017) 査読有

Y. Sonobe, A. Koyama, A. Saimoto, Basic Research on Simulation for 3D Crack Growth by Mesh Free BFM, Key Engineering Materials, Vol. 713, pp. 5-9 (2016) 査読有

[学会発表](計 12 件)

園部陽平, 才本明秀, 3次元き裂伝ば解析の基礎研究,日本材料学会九州支部信頼積工学部門委員会合同講演会 (2018)

Yohei Sonobe, Akihide Saimoto, A Mesh-Free Analysis of Planar Crack under Thermal Stresses due to Heat Source, Proc. of 15th JSSUME (JSSUME2018) (2018)

Akihide Saimoto, Interference Effect among Parallel-aligned Planar Surface Cracks, Proc. of 15th JSSUME (JSSUME2018) (2018)

Y. Sonobe, A. Saimoto, T. Takase, A. Koyama and T. Ino, Analysis of thermal stress intensity factor of 3D crack by mesh free body force method, Proceedings of ACMFMS 2018, The 6th Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures, Eds. T.-C. Chiu and C. D. Chen (2018)

Akihide Saimoto, Yohei Sonobe, Giora Shatil, Comparison of Mesh-free and Mesh-based Analyses in 3D Crack Problems, Proc. Of the JSST2017 (2017)

東孝之, 才本明秀, 園部陽平, レーザ加熱をうけるだ円板状き裂の応力拡大係数, 日本機械学会九州支部 第 70 期総会・講演会 (2017)

Akihide Saimoto, Yohei Sonobe, Giora Shatil, An Introduction to the Mesh-Free Body Force Method as a Robust and Efficient Crack Growth Method, 14th ICAME (JSSUME2016)(2016)

Yohei Sonobe, Akihide Saimoto, Giora Shatil, Analysis of Planar Crack Extension by Mesh-Free Body Force Method, 14th ICAME (JSSUME2016) (2016)

Iko Miyanaga, Akihide Saimoto, Giora Shatil and Yohei Sonobe, Influence of Triangulation on The Accuracy of SIF for Planar Cracks, 14th ICAME (JSSUME2016) (2016)

Takayuki Higashi, Akihide Saimoto and Giora Shatil, Stress Intensity Factor of Planar Elliptical Crack under Thermal Stress Induced by Intermittent Laser Heating, 14th ICAME (JSSUME2016) (2016)

Y.Nara, K. Araki, A. Saimoto, H. Morita, In situ observation of peeling process in glass surface by CO2 laser, 17th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (2016)

A. Saimoto, Y. Nara, Y. Sonobe, H. Morita, Thermoelastic analysis of 3D solid with ellipsoidal cavity under SD induced thermal stress (2016)

6. 研究組織

なし

科研費による研究は,研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため,研究の実施や研究成果の公表等については,国の要請等に基づくものではなく,その研究成果に関する見解や責任は,研究者個人に帰属されます。