

令和元年6月18日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04231

研究課題名(和文) レーザーピーニングと自己き裂治癒によるセラミックスの高温域における信頼性向上

研究課題名(英文) Improvement of reliability of ceramics by laser peening and crack-healing

研究代表者

高橋 宏治 (TAKAHASHI, Koji)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：90334630

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではレーザーピーニングにより、セラミックスの強度と信頼性を向上させる新たな表面改質手法を提案することを目的とした。窒化ケイ素に種々の条件でレーザーピーニングを施した後、残留応力、表面粗さ、曲げ強度を測定した。これらの結果から最適なレーザーピーニングの条件を選定した。最適な条件でレーザーピーニングを施工した場合には、表面から深さ60 $\mu\text{m}$ 程度まで圧縮残留応力を導入することができた。圧縮残留応力の効果により窒化ケイ素の曲げ強度を向上させるとともに、曲げ強度のばらつきを低減することができた。したがって、レーザーピーニングはセラミックスの強度と信頼性を向上するために有効な表面改質技術である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

セラミックスは耐熱性、耐摩耗性に優れているために、高温エネルギー機器等の高温構造材料への適用が期待されている。しかし、セラミックスは破壊靱性値が低いために、加工時や使用中にき裂が発生した場合には、強度と信頼性が大幅に低下する可能性がある。本研究では、セラミックスにレーザーピーニングを施工することにより、曲げ強度と信頼性を向上できることを新たに見出した。難切削材のセラミック工具や、人工関節用のセラミック部材、高温エネルギー機器等、種々のセラミック部材に対してレーザーピーニングを適用することにより、強度および信頼性を向上できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to improve the strength and reliability of ceramics by laser peening. We applied laser peening to silicon nitride and investigated its properties such as the surface roughness, bending strength, residual stress, hardness, and fracture toughness. Based on the evaluation results, the optimum laser peening conditions were selected. Compressive residual stress was induced by laser peening up to a depth of 60  $\mu\text{m}$ . By the effect of the compressive residual stress introduced by laser peening, the bending strength of silicon nitride was improved, and the scatter of the bending strength was reduced. Thus, laser peening is effective to improve the strength and reliability of ceramics.

研究分野：材料強度学

キーワード：レーザーピーニング 残留応力 セラミックス 曲げ強度

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

セラミックスは耐熱性、耐摩耗性に優れているために、次世代の高温エネルギー機器等の高温構造材料への適用が期待されている。しかし、セラミックスは破壊靱性値が低いために、加工時や使用中にき裂が発生した場合には、信頼性が大幅に低下する可能性がある。セラミックスに対してショットピーニング(SP)を行うことにより、表面に圧縮残留応力を導入し、見かけの破壊靱性値を向上できる<sup>1)</sup>。しかし、SPにより表面き裂の発生を誘発してしまうという課題がある。この課題を克服するため、高橋らは、SP後にき裂治癒を行う新たな表面改質手法を提案した<sup>2)</sup>。この手法は、SPにより導入された圧縮残留応力を保持しつつ、機械加工やSPにより導入されたき裂を完全に治癒できるという特徴がある。その結果、静的な曲げ強度、静的接触強度および転がり疲労強度等を未処理材の2倍程度にまで向上させることに成功した。しかし、セラミックスにSPを適用する上で、以下の2つの課題が残されている。

- (a) SPでは投射材と基材が直接衝突するため、投射条件によっては基材に剥離が生じる。剥離は強度のばらつきの要因となるため、重要機器や精密機械部品への応用には課題がある。
- (b) SPで導入される圧縮残留応力の深さは最大で30 $\mu\text{m}$ 程度と浅い。稼働中の信頼性を向上させるには、より深い圧縮残留応力が導入できる手法が望まれている。

### 2. 研究の目的

上記の課題を克服するために、本研究では、先進的ピーニング技術であるレーザピーニング(以降、Laser Peening: LP)に着目する。LPの特徴は、投射材と基材が直接接触しないことと、大きくて深い圧縮残留応力を導入できる点である。これらのLPの特徴を活用することにより、セラミックスの高温域での強度および信頼性を大幅に向上させる新たな表面改質手法を提案することを本研究の目的とする。

### 3. 研究の方法

供試材は市販の $\text{Si}_3\text{N}_4$ である。曲げ試験用として寸法 $3\times 4\times 19\text{ mm}$ の試験片を作製した。この試験片の片面は鏡面加工されており、これを「平滑材」と呼ぶ。また、Nd:YAGレーザの第二高調波を水中で照射してLP施工した試験片を「LP材」と呼ぶ。LP条件として、パワー密度は $3\text{ GW/cm}^2$ 、スポット径はすべての条件で $0.5\text{ mm}$ とした。これらのLP条件は予備試験の結果を参考にして選定した。パス数(施工範囲にピーニングする回数)は1パスと2パスの2条件とし、一部の試験片にコーティングを付与した。コーティングを付与した試験片をLPC、コーティングを付与していない試験片をLPwCと呼ぶ。これらの記号の後ろに、パス数を表記して、試験片を区別する。

触針式粗さ計で、試験片長手方向の算術平均粗さ $R_a$ を測定した。X線残留応力測定により、試験片長手方向および幅方向の表面残留応力と深さ方向の分布を測定した。見かけの破壊靱性値 $K_C$ は、IF(Indentation Fracture)法により評価した。スパン長さ $16\text{ mm}$ 、クロスヘッド速度 $0.5\text{ mm/min}$ の三点曲げ試験によって曲げ強度を測定し、破面をSEMによって観察した。曲げ強度はWeibull分布で評価し、形状母数 $\alpha$ と尺度母数 $\beta$ を用いて評価した。

### 4. 研究成果

#### 表面粗さ

図1に各試験片の表面粗さを示す。コーティングを付与したLPCの場合、 $R_a$ は平滑材に比べ増加しなかった。一方、コーティングなしのLPwCでは、 $R_a$ は最大で $0.23\text{ }\mu\text{m}$ まで増加した。 $R_a$ が増加は、表面のアブレーションの増加によるものと考えられる。

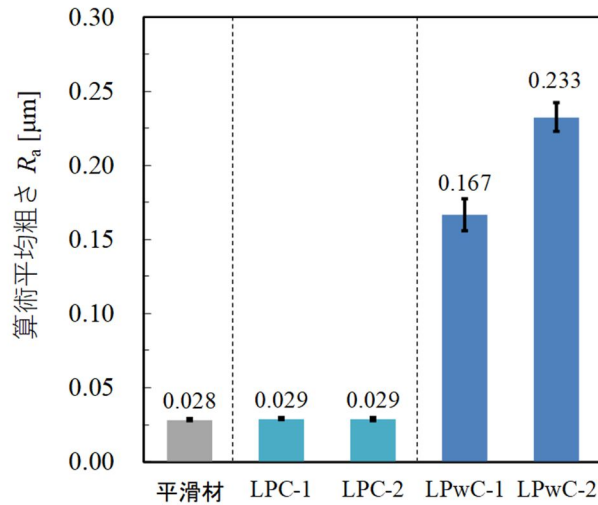


図1 LPが表面粗さに及ぼす影響

### 残留応力

図2にLP材の表面の残留応力を示す．LPによって圧縮残留応力が導入されていることが確認できた．特に，コーティング無しのLPwCの試験片では，200 MPa以上の圧縮残留応力が導入されていた．図3にLPwC-1の深さ方向の残留応力分布を示す．平滑材は表面の圧縮残留応力が28 MPa，導入深さが約20  $\mu\text{m}$ であったのに対し，LPwC-1は表面の圧縮残留応力が230MPa，導入深さが約60 $\mu\text{m}$ であり，LPにより深くまで圧縮残留応力が導入されていた．

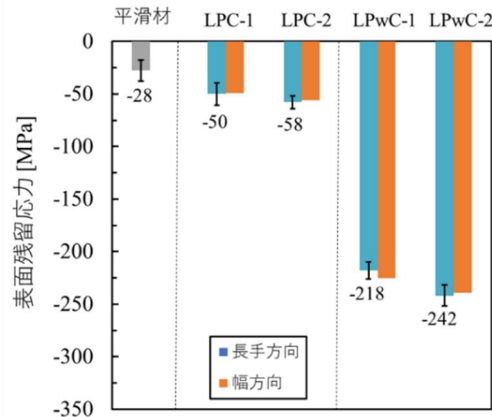


図2 各試験片の表面の残留応力

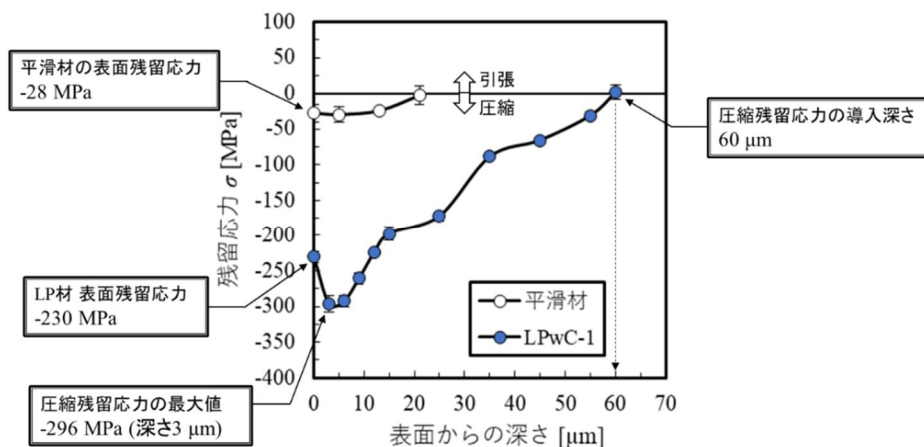


図3 LPwC-1および平滑材における深さ方向の残留応力分布

## 曲げ強度

圧縮残留応力の値と表面粗さの低さの観点からLPwC-1を選定して曲げ試験片を行った。平滑材とLPwC-1について各9本ずつの曲げ試験を行い、曲げ強度のワイブル統計解析を行った。その結果を図4に示す。ばらつきの度合いを示す形状母数(ワイブル係数) $\alpha$ は、平滑材では22.8であったのに対し、LP材では31.3となり大幅な上昇となった。すなわち、LPを施工することによって、曲げ強度のばらつきを低減することができた。さらに、累積破壊確率Fが63%になるときの曲げ強度を示す尺度母数 $\beta$ は、平滑材では1176 MPaであったのに対し、LP材では1276 MPaとなり、100 MPa(8.5%) 向上した。

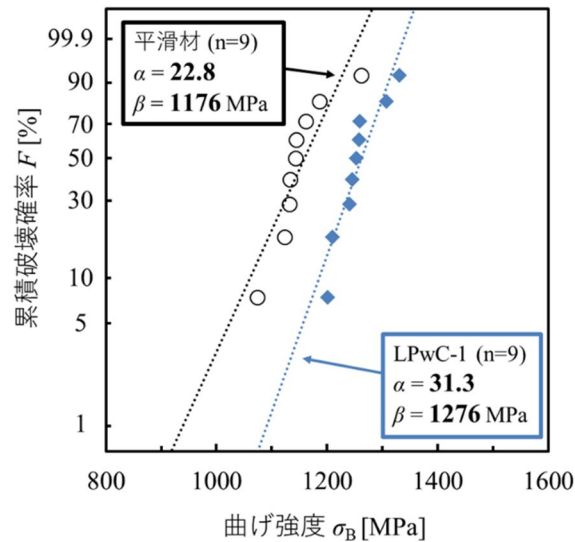


図4 LPwC-1および平滑材における曲げ強度のワイブル分布

## 破面観察

ワイブル分布を取得した平滑材とLPwC-1の試験片各9本に対し、破面観察を行った。表面の欠陥を起点として破壊が発生した試験片の数に注目すると、平滑材では表面起点が9本中5本であったのに対し、LP材では9本中2本となっていた。また、内部欠陥における破壊起点の深さは、平滑材が最も深い位置で約25  $\mu\text{m}$  であったのに対し、LP材では60  $\mu\text{m}$  より深い位置にも破壊起点が見られるようになった。これらは、LPによって導入された圧縮残留応力が表面からのき裂進展を抑制した結果、破壊起点がより内部に遷移したためと考えられる。

## < 引用文献 >

- 1) W. Pfeiffer and T. Frey, Strengthening of ceramics by shot peening, J. Eur. Ceram. Soc., 2006, 26, 2639–2645.
- 2) K. Takahashi, Y. Nishio, Y. Kimura and K. Ando, Improvement of strength and reliability of ceramics by shot peening and crack healing, J. Eur. Ceram. Soc., 2010, 30, 3047–3052.

## 5 . 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計1件)

Kazuya Saigusa, Koji Takahashi, Norihito Shibuya, Evaluation of Surface Properties of Silicon Nitride Ceramics Treated with Laser Peening, International Journal of Peening Science and Technology, 査読有, 2019, in press.

### 〔学会発表〕(計3件)

土屋奏海, 高橋宏治, 桑野文亮, 澁谷紀仁, レーザピーニングによるアルミナ炭化ケイ素複合材の曲げ強度向上, ショットピーニング技術協会 2019 年度学術講演会, 2019 .

Kazuya Saigusa, Koji Takahashi, Norihito Shibuya, Evaluation of Surface Properties of Silicon Nitride Ceramics with Laser Peening, 7th International Conference on Laser Peening and Related Phenomena, 2018.

三枝和也,高橋宏治,澁谷紀仁,レーザピーニングを施工した窒化ケイ素セラミックスの機械的特性の評価,日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス,2017.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名:三枝和也

ローマ字氏名:(SAIGASA, Kazuya)

研究協力者氏名:澁谷紀仁

ローマ字氏名:(SHIBUYA Norihito)

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。