

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14111

研究課題名(和文) 自己治癒セラミックスの構成モデルの構築と「損傷 自己治癒過程」の有限要素解析

研究課題名(英文) Proposal of constitutive model for self-healing ceramics and its application to FE analysis of damage-healing process

研究代表者

尾崎 伸吾 (Ozaki, Shingo)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：20408727

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、自己治癒セラミックスのバックキャスト型材料設計での活用を目的とした有限要素解析手法の構築に取り組んだ。まず、損傷の発生から自己治癒までを一貫してシミュレートするための構成モデルを構築した。また、構成モデルを有限要素法に実装し、実験結果との比較を行うことでその妥当性を検証した。次に、セラミックスの破壊統計を予測するために、微視組織情報を用いて破壊強度のばらつきを予測するための有限要素解析手法を提案した。提案手法により作成したワイブル分布は実験結果との良い一致を示すことが確認された。

研究成果の概要(英文)：In this study, we proposed a finite element analysis method aimed at utilizing in backcasting type material design for self-healing ceramics. First, we formulated the constitutive model to consistently simulate from damage propagation to self-healing. In addition, we implemented the proposed constitutive model to the finite element method. We then compared the numerical results with the experiment to verify its validity. Next, to predict fracture statistics of ceramics, we proposed a finite element analysis method for predicting the variation of fracture strength using microstructure information. It was confirmed that the Weibull distribution created by the proposed method shows a good agreement with the experimental result.

研究分野：機械材料・材料力学

キーワード：自己治癒材料 構成モデル 有限要素法 数値解析 セラミック基複合材 破壊統計

## 1. 研究開始当初の背景

近年、国内外の研究機関において、自己治癒性を有するポリマー、コンクリートおよびセラミックスの開発が取り組まれている。次世代のスマート材料の本命とされるこれらの材料は、損傷（微小き裂）発生時に、化学反応を積極的に活用することで微小き裂を再結合し、健全な状態へ自律的に回復できる。中でも、酸化物系自己治癒セラミックス基複合材は比強度、耐熱性、耐腐食性に優れているため、Ni 基超合金の代替材料として、次世代航空機エンジンタービン翼への適用が期待されている。しかしながら、自己治癒材料イノベーションは、これまでの技術体系の延長線上には存在しないため、最終製品の要求パフォーマンスを明確にしたバックキャスト型材料設計が不可欠となる。その実現には、損傷の発生と自己治癒の両方を記述できる構成モデルの構築ならびにそれを実装した有限要素解析手法の確立が求められる。

また、高度な安全性が要求される構造部材に自己治癒セラミックスを適用するにあたり、欠陥感受性の強いセラミックス特有の確率的な破壊挙動を把握、あるいはコントロールする必要がある。セラミックスの確率的な破壊挙動は、内在する“欠陥（キズ）”を起点に脆性破壊を生じること起因する。したがって、試験片や製品ごとに破壊強度のばらつきが生じ、高信頼性が必要な工業製品としての活用の最大の障壁となっている。また欠陥分布は、対象とする部材のサイズに応じて異なり、一般の金属材料のような『規格化された材料試験 構造設計』の手順をそのまま踏襲することができない。そのため、セラミックスの強度評価においては、ワイブル分布に基づく統計的な手法が採用されてきた。しかし、ワイブル分布の作成には、多くの試験を要し、コストと時間がかかるため、セラミックスの破壊統計に関する数値解析スキームの構築が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究では、代表的な自己治癒セラミックスの一つであるアルミナ/SiC 粒子分散型セラミックス複合材を対象に、損傷のみならず自己治癒挙動を記述するための構成モデルを提案する。具体的には、セラミックスの自己治癒挙動はき裂発生をトリガーとし高温酸化反応により自律的に生じるため、これを適切に記述し得る状態変数の発展則を規定する。なお、酸化反応速度論に基づき発展則を規定している点は、他の研究には見られず、極めて高いオリジナリティを有していると考えられる。提案モデルにより、セラミックスの脆性破壊挙動のみならず、き裂の自己治癒挙動、さらにはそれらの競合関係を連続体力学の枠組みの中で合理的に記述できるようにすることが本研究の目的の一つである。

次に、提案モデルを有限要素法に実装することにより、損傷 自己治癒 損傷の一連の過程をシミュレートする解析手法を確立する。また、ピッカーズ圧子による損傷の導入、自己治癒過程および三点曲げによる強度回復評価の一連の過程を模擬した有限要素解析モデルを作成し、実験結果との定量的な比較を行うことで、提案手法の妥当性を検証する。

他方、自己治癒セラミックス材料のバックキャスト型材料設計スキーム（構造部材としての要求パフォーマンス 材料設計）の確立を目指して、セラミックスの破壊確率（強度のばらつきの）予測方法を提案する。一般に、セラミックスは焼結の結果、微視組織（欠陥分布）のばらつきにより確率的な脆性破壊挙動を示す。そのため、破壊強度のばらつきやサイズ依存性を適切に予測できる有限要素解析手法が必要となる。このような状況を踏まえ、本研究ではセラミックス構造部材特有の強度のばらつきを材料内部の欠陥分布情報と関連付けて予測し得る有限要素解析手法を提案する。

## 3. 研究の方法

まず、従来の有限要素法によるき裂進展解析を自己治癒セラミックスへも適用できるように、構成モデルの拡張に取り組む。具体的には、損傷モデルの内部状態変数の発展則を規定し、損傷 自己治癒構成モデルの定式化を行う。これにより、損傷（き裂）の進展のみならず自己治癒挙動についても、有限要素法の枠組みの中でシミュレートできるようにする。

また同時に、ミクロな破壊力学モデルを介して微視組織情報（相対密度、欠陥サイズ・形状、粒径サイズ）と損傷モデルのパラメータを関連付け、有限要素法の枠組みの中でセラミックスの破壊確率を予測する手法を提案する。これより、構造部材を想定した任意の境界条件の下で、任意のサイズや形状を有するセラミックス複合材の確率的破壊現象を微視組織情報と関連付けて評価できるようにする。

## 4. 研究成果

### (1) 構成モデルの構築と有限要素解析

損傷 自己治癒構成モデルの定式化にあたり、自己治癒に関する内部状態変数の発展則を規定した。本研究では、下記の二通りの定式化を提案した。

経験的な酸化反応速度論に基づく平均自己治癒速度を利用したバージョン  
ワグナーの重量増加モデルに基づく酸化物によるき裂充填モデルを利用したバージョン

両バージョンとも、自己治癒の時間依存性、温度依存性および酸素分圧依存性を記述できる。また、のバージョンでは変温環境下での自己治癒も可能である。

提案モデルについて、実験結果との比較による定量的な評価を行うため、本研究では、自己治癒セラミックスの実験を再現した有限要素解析モデルを作成した。ここに、粒子分散型セラミックス ( $Al_2O_3/15.vol\%SiC$ ) を対象としている。

有限要素解析と比較する自己治癒挙動の実験は以下の手順で行われた。

- 1) ビッカーズインデンテーション法による予き裂の導入
- 2) 規定された温度および酸素分圧条件下での自己治癒
- 3) 所定の治癒時間経過後に三点曲げ試験による強度評価

予き裂の導入位置およびサイズはコントロールされているため、本研究では 2), 3) の過程について有限要素解析を行った。図 1 に有限要素解析モデルを示す。試験片のサイズは実験と同じであり、インデンテーション法によって導入された予き裂を模した初期損傷領域を設けている。損傷の程度は、初期損傷領域で均一化し、実験のき裂開口幅を参照して設定した。また、自己治癒後の試験片の強度ばらつきを評価するために、実験における強度の最大値、最小値、平均値を参照して解析では試験片の強度を三種類に設定した。

図 2 に 3 種類の自己治癒条件 (温度と酸素分圧) 下における初期損傷領域の損傷変数のコンター図を示す。ここに、赤色から青色になるにつれて損傷変数が小さくなることを意味している。図から確認できるように、自

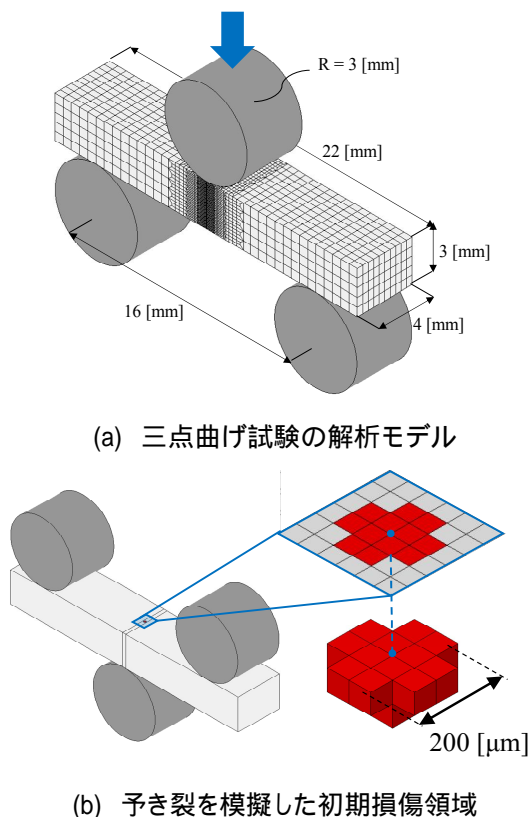


図 1 自己治癒セラミックスの実験を模擬した有限要素解析モデル

己治癒挙動の発展則の導入により経過時間とともに初期損傷領域が回復している。また、その回復速度は温度や酸素分圧が高いほど速くなっている。

図 3 に強度回復の自己治癒条件依存性について、有限要素解析結果と実験結果との比較を示す。グラフ内の白抜きプロットは実験結果を示している。また、三角のプロットは解析結果であり、近似曲線と併せて示してある。自己治癒時間と強度回復の関係を見ると、自己治癒時間の増加とともに三点曲げ強度が回復している様子がわかる。また、自己治癒時の酸素分圧条件の影響についても、有限要素解析結果が実験結果を精度よく再現できている。温度条件の影響についても同様に精度よく再現されていることから、酸化反応速度論に基づく損傷—自己治癒構成モデルの妥当性が認められる。さらに解析において試験片に強度の幅を持たせることで、実験の回復後の強度ばらつきを評価することができた。

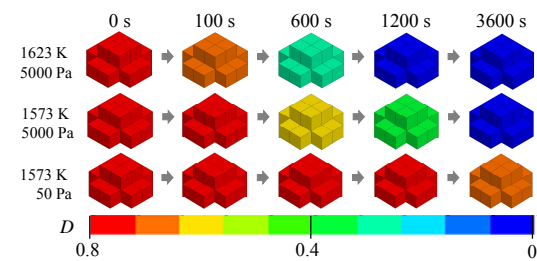


図 2 様々な温度・酸素分圧条件下での自己治癒過程のスナップショット (赤: 損傷大, 青: 損傷なし)

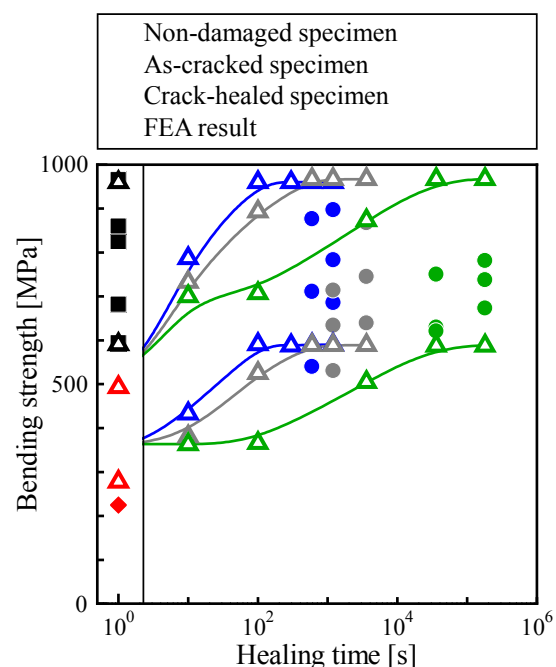


図 3 強度回復の時間依存性の実験結果との比較

## (2) セラミックスの破壊統計

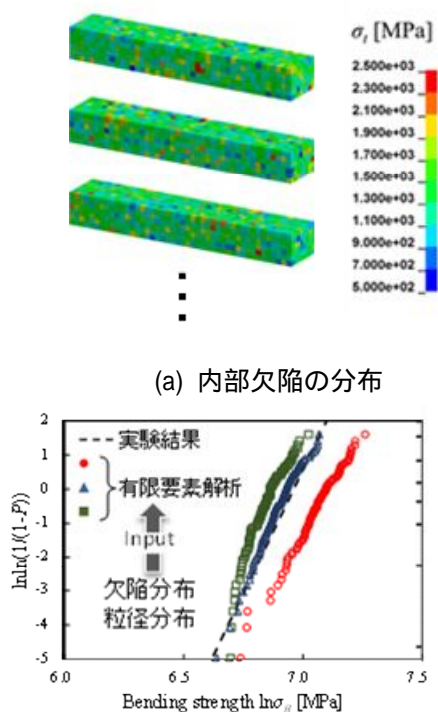
次に、セラミックスの破壊統計に関する有限要素解析について述べる。

図4に自己治癒セラミックスの三点曲げの解析結果の一例を示す。有限要素解析では、対象とするセラミックス複合材の組織観察を行うことで欠陥や粒径などの分布情報を取得し、乱数、確率密度関数および破壊力学モデルを介して各要素の物性値へ反映させる。

の作業を複数本の解析モデルに対して行い、試験数  $N$  本のバーチャルテストを実施する。

所定の境界条件の下、き裂進展解析を実施し得られた破壊強度をワイブルプロットで整理する。

図から確認できるように、提案手法により実験結果（右グラフ内の破線）を精度よく再現できている。なお、提案手法によると、破壊強度のサイズ依存性も自然に評価することができるため、複雑な試験片形状や境界条件に対する有効体積を予め見積もる必要が無いというメリットも有する。また、単相のセラミックスのみならず、長繊維強化自己治癒セラミックス複合材のような母材・界面層・繊維束から構成される複合材にも適用できる。



(a) 内部欠陥の分布

(b) 破壊強度のワイブルプロット

図4 セラミックスの破壊統計の予測

## 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 4 件)

1. Ozaki, S., Aoki, Y., Osada, T., Takeo, K.,

Nakao, W., “Finite element analysis of fracture statistics of ceramics: Effects of grain size and pore size distributions”, J. Ame. Ceram. Soc. (2018), Vol.101, pp.3191-3204, doi.org/10.1111/jace.15468, 査読有

2. Nakamura, M., Takeo, K., Osada, T., Ozaki, S., “Finite element analysis of the self-healing and damage processes in Alumina/SiC nanocomposite ceramics”, technologies (2017), Vol.5, 40, pp.1-12, doi:10.3390/technologies5030040, 査読有
3. 長田俊郎, 尾崎伸吾, 中尾航, “自己治癒セラミックスにおける速度論モデルの最新動向 (特集 無機製品の歴史と経年劣化)”, 無機マテリアル学会誌, 2016 年, 第 23 巻, pp460-465, 査読無
4. Ozaki, S., Osada, T., Nakao, W., “Finite element analysis of the damage and healing behavior of self-healing ceramic materials”, Int. J. Solid Struct. (2016), Vol.100, pp.307-318, https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.08.026, 査読有

〔学会発表〕(計 12 件)

1. 尾崎伸吾, 長田俊郎, 自己治癒セラミックス複合材における損傷—治癒挙動の有限要素解析, 計算工学講演会, 朱鷺メッセ, 2016 年 6 月 1 日
2. 山本文司, 長田俊郎, 竹尾恭平, 尾崎伸吾, 酸化反応速度論に基づくセラミックス材料の損傷-自己治癒構成モデルの構築, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 九州大学, 2016 年 9 月 11-14 日
3. Nakamura, M., Osada, T., Takeo, K., Ozaki, S., Finite element analysis of damage-healing behavior in self-healing Alumina/SiC nanocomposites materials, APCFS2016, Toyama, September 19-22, 2016
4. Yamamoto J., Osada, T., Ozaki, S., Proposal of kinetics-based damage-healing constitutive model for self-Healing ceramic materials, APCFS2016, Toyama, September 19-22, 2016
5. 尾崎伸吾, 堀江祐太朗, 竹尾恭平, 長田俊郎, 自己治癒セラミックス複合材の有限要素解析 (第 1 報 線形破壊力学に基づく焼結性の確立的ばらつきへの導入), M&M 材料力学カンファレンス, 神戸大学, 2016 年 10 月 8-10 日
6. 中村茉莉香, 竹尾恭平, 長田俊郎, 中尾航, 尾崎伸吾, 自己治癒セラミックス複合材の有限要素解析 (第 2 報 参加反応速度論に基づく発展則への導入), M&M 材料力学カンファレンス, 神戸大学, 2016 年 10 月 8-10 日
7. Yamamoto, J., Osada, T., Ozaki, S., Application of kinetics-based damage-healing constitutive model to FE

- analysis of self-healing ceramic materials, ICSHM 2017, Friedrichshafen, June 25-28, 2017
8. Takeo, K., Nakao, W., Ozaki, S., Numerical analysis on competitive tensile test of self-healing fiber-reinforced ceramics, ICSHM 2017, Friedrichshafen, June 25-28, 2017
  9. Nakamura, M., Osada, T., Takeo, K., Ozaki, S., Finite element analysis of self-healing process in damaged alumina/SiC nanocomposite materials, ICSHM 2017, Friedrichshafen, June 25-28, 2017
  10. 竹尾恭平, 尾崎伸吾, 中尾航, 有限要素解析による自己治癒セラミックスの競合引張試験, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 埼玉大学, 2017 年 9 月 4 日
  11. 青木祐也, 竹尾恭平, 長田俊郎, 尾崎伸吾, 微視組織の確率的ばらつきを考慮したセラミックス複合材の有限要素解析, 第 30 回計算力学講演会, 近畿大学, 2017 年 9 月 16-18 日
  12. 中村茉莉香, 竹尾恭平, 長田俊郎, 尾崎伸吾, アルミナ/SiC 複合セラミックスにおける自己治癒過程の有限要素解析, M&M 材料力学カンファレンス, 北海道大学, 2017 年 10 月 7-9 日

〔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〕

プレスリリース(計 1 件)

[http://www.ynu.ac.jp/hus/koho/19762/34\\_19762\\_1\\_1\\_180226020400.pdf](http://www.ynu.ac.jp/hus/koho/19762/34_19762_1_1_180226020400.pdf)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

尾崎伸吾 (OZAKI, Shingo)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 20408727

### (3) 連携研究者

長田俊郎 (OSADA, Toshio)

物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・  
主任研究員  
研究者番号: 50596343