

# まるで実験?! セラミックス強度の ばらつきの数値解析手法の開発

バーチャルテストを活用した高信頼性材料の開発へ向けての第一歩

## 本研究のポイント

- ・セラミックス強度のばらつきを数値解析にて予測し、評価することに成功
- ・材料の微視的な組織情報と関連付けた構造部材の破壊強度の予測は世界初
- ・高信頼性セラミックスの開発における時間とコストの大幅な削減が期待

## 【研究概要】

横浜国立大学工学研究院 尾崎 伸吾准教授らと NIMS 高強度材料グループ 長田 俊郎主任研究員らの研究グループは、脆性材料であるセラミックスを安全に使用する上で、最大の障害であった強度のばらつきを、数値シミュレーションにて再現することに成功しました。強度のばらつきを内在する微小欠陥や組織の情報から予測したのは**世界初**の成果です。本手法により、これまで膨大な時間と工数を費やし、実験的に取得してきた強度をバーチャル空間で高精度かつ短時間で評価することが可能になります。本研究成果は、米国のセラミックス専門誌「Journal of the American Ceramic Society」(2月14日付 online 上)に掲載されました。なお、本研究成果は JST ALCA 実用技術化プロジェクト(中尾 Gr)の一環として実施されました。

## 【研究成果】

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する数値解析手法を提案した。これより、ワイブル統計(1)などの情報をコンピュータ上で高精度かつ短時間で取得でき、また材料設計条件へと容易にフィードバックできる。

## 【実験手法】

組織観察から得られる欠陥分布などの情報を、破壊力学モデルを介してマクロな情報へとスケールアップさせることで、有限要素法に基づく強度解析を可能としている。また、各種確率分布関数を用いることで同ロットを想定したバーチャルテストを可能とした。

## 【社会的な背景】

セラミックスは、次世代航空機エンジン部材をはじめ、高度な安全性が要求される高温部材への実用化が期待されている。しかし、脆性材料であるセラミックスは確率的な破壊挙動を示すため、更なる高信頼性化が課題となっている。したがって、作製プロセスで生じる材料の欠陥分布や組織情報を反映した強度ばらつきの予測手法は重要な役割を担う。

本件に関するお問い合わせ先

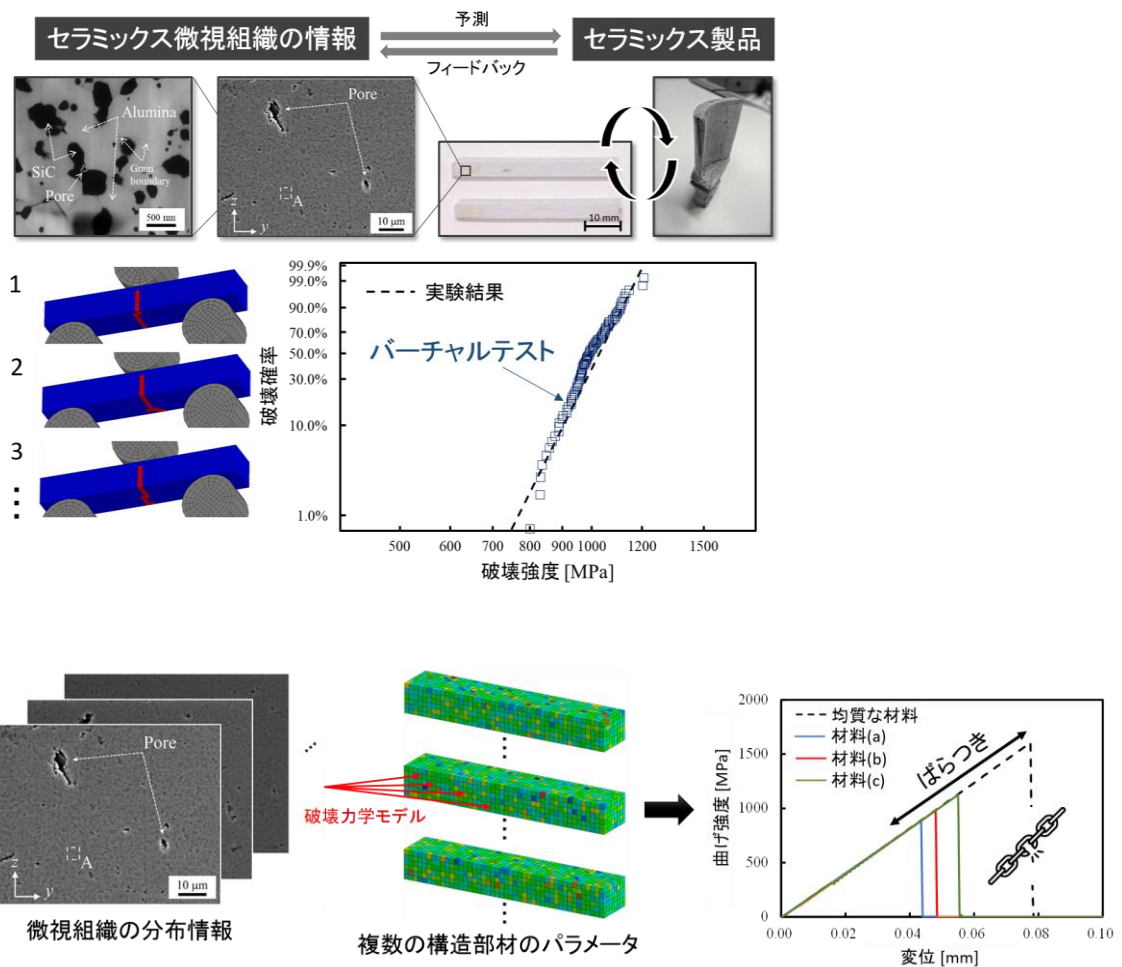
横浜国立大学 大学院工学研究院 准教授 尾崎伸吾

TEL : 045-339-3881 mail: s-ozaki@ynu.ac.jp

**【今後の展開】**

開発したバーチャルテスト手法により、強度のばらつきのみならず、これまで設計者を悩ませてきたサイズ依存性の評価も併せて可能となる。更に本手法は、自己治癒セラミックスや長繊維強化セラミックス複合材の設計にも活用できるため、先進セラミックスの設計および耐熱部材への実用化までの期間を大幅に短縮できると期待される。

**【参考図】**



**【詳細情報】**

近年、イノベーションを継続的に創出するための新たな統合型材料開発スキームとして、マテリアルズインテグレーション (2) が注目されている。これを可能にしているのは、実験観察技術の高度化や膨大なデータベースの構築、更には先進的な AI 技術の活用に加え、各種スケールでの数値解析、いわゆるバーチャルテスト（仮想数値実験）の存在である。

セラミックス基複合材は、軽量であることに加え、耐熱性・耐酸化性に優れるため、各種高温部材に活用されている。現在、GE Aviation がジェットエンジン部材に対してセラミックス複合材(SiC/SiC)の適用を進めており、低炭素社会の実現に向けたセラミックスの社

会的ニーズは、今後、一層高まることが予想される。エンジン部材のような高度な安全性が要求される構造部材に適用するにあたり、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克服することが望まれる。そのためには、上述のマテリアルズインテグレーションを活用した材料開発が不可欠となる。

これまで、セラミックスの微視組織（相対密度、欠陥、粒径など）の分布情報を直接反映し、数値シミュレーションで構造部材としての強度のばらつきを予測することは、例えばスパコンを用いても不可能と言われてきた。これは、微視組織がわかれば、その周辺部（鎖一つに対応）の強度は評価できるが、サンプルまたはロットごとの組織の分布特性が異なるため、構造部材（複数個の鎖に対応）としての予測は困難となるためである。加えて、部材の体積が異なる（大小様々な強度を持つ鎖の数が異なることに対応）と破壊に直結する欠陥の分布の確立が大きくなり、強度はサイズ依存性も示す）。そこで本研究グループでは、走査型電子顕微鏡による画像観察で得られた微視組織の情報を各種確率分布関数で表現し、破壊力学モデルを介して、数値シミュレーションで必要なパラメータへと間接的に反映する手法を提案した。また、乱数を用いることで複数（例えば、数十個～数千個）の解析対象における微視組織情報の確率的な分布を再現し、解析対象ごとに異なる破壊強度のばらつきを再現することに成功した。さらに、得られた強度を基にワイブル統計処理を行うことで、セラミックスの破壊統計を低コストかつ短時間で取得することができる、バーチャルテスト手法を開発した。コンピュータ上で実施されたバーチャルテストの結果は実際の実験と極めて良い一致を示すことも確認されている（参考図）。なお、画像観察の代わりに、これまで蓄積されている微視組織情報のデータベースを活用することも可能である。

開発したバーチャルテストにより、セラミックス強度のばらつきやサイズ依存性を予測できるだけでなく、得られたワイブル統計の結果と微視組織条件を関連付けることができる。そのため、構造部材として要求される性能（例えば、平均強度、ばらつきの幅など）を満足し得る微視組織条件をバックキャストすることも将来的に可能となる。開発手法を活用することで、産業界は新材料実用化のリスクやコストを低減でき、さらに学术界との連携より、実用化・標準化までの期間を大幅に短縮できると期待される。

### 【補足情報】

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によって起因する。セラミックスは焼結プロセスあるいはその後の加工プロセスにより、内部や表面に大小様々な欠陥を内包し、その分布特性は例え同一ロットの製品であっても異なる。そのため、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るため、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。

このような状況の下、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、ワイブル分布を得るためには、多くの試験を要し、コストと時間がかかる。加えて、得られたワイブル統計の結果を、より良い材料を作るための材料設計（微視的な組織条件：相対密度、欠陥分布、粒径分布など）へとフィードバックすることは困難であるため、試行錯誤的なアプローチが取られてきた。

### 【掲載論文】

題目： Finite element analysis of fracture statistics of ceramics: Effects of grain size and pore size distributions

著者： Shingo Ozaki, Yuya Aoki, Kyohei Takeo, Toshio Osada, Wataru Nakao

雑誌： Journal of the American Ceramic Society

掲載日時： 米国時間 2018年2月14日(Early View)

DOI: 10.1111/jace.15468

### 【研究者情報】

本研究は、横浜国立大学 大学院工学研究院の尾崎伸吾准教授・中尾航教授と、国立研究開発法人 物質・材料研究機構 構造材料研究拠点の長田俊郎主任研究員らの研究チームによって行われた。また、本研究は、JST 先端的低炭素化技術開発・実用技術化プロジェクト、JSPS 科研費補助金 挑戦的萌芽(No. 16K14111)、の支援を受けて行われた。

### 【用語解説】

#### (1) ワイブル統計

セラミックスのようなばらつきのある大きな部材の破壊強度の予測は統計的な手法によらざるを得ない。セラミックスの強度分布を表す極値分布関数として、スウェーデンの物理学者 W. Weibull により 1939 年に提案されたワイブル統計が広く用いられている。ワイブル統計に従ってプロットした破壊確率と破壊強度の関係（ワイブル分布）は、部材の体積と強度との関係を把握できる。ワイブル分布は、一般に、複数個の連結した鎖を引っ張る場合において最も弱い輪が破壊することにより、鎖全体が破壊したとする理論（最弱リンク説）として理解されている。

#### (2) マテリアルズインテグレーション (Materials Integration)

材料科学の成果を活用するとともに、理論、実験、解析、シミュレーション、データベースなどの全ての科学技術を融合して材料の研究開発を工学的な視点に立ち支援することを目指す統合的な材料技術ツールとして定義される。金属材料、高分子材料、セラミックス材料、複合材料などのあらゆる種類の材料や部材の実使用環境下でのパフォーマンスが対象となる。【 URL : <https://www.jst.go.jp/sip/k03/sm4i/project/project-d.html> 】

**【本件に関するお問い合わせ先】**

(研究内容に関すること)

横浜国立大学 大学院工学研究院  
准教授 尾崎 伸吾 (おざき しんご)

E-mail: s-ozaki@ynu.ac.jp

TEL: 045-339-3881

横浜国立大学 大学院工学研究院  
教授 中尾 航 (なかお わたる)

E-mail: nakao-wataru-hy@ynu.ac.jp

TEL: 045-339-4016

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 構造材料研究拠点 高強度材料グループ  
主任研究員 長田 俊郎 (おさだ としお)

E-mail: OSADA.Toshio@nims.go.jp

(報道・広報に関すること)

横浜国立大学 総務部広報・渉外課 渉外係

TEL: 045-339-3027

E-mail: koho@ynu.ac.jp

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室

TEL: 029-859-2026

E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp