

氏名	馬場 秀成
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工乙第179号
学位授与年月日	平成21年3月24日
学位授与の条件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	セラミックスの損傷許容性評価手法に関する研究 —多孔質セラミックスを用いた検討—
論文審査委員	委員長 教授 鈴木 章彦 委員 教授 荒居 善雄 委員 教授 加藤 寛 委員 准教授 池野 順一 委員 准教授 蔭山 健介

論文の内容の要旨

1) 研究の背景と目的

セラミックスはボールベアリング等の機械要素部品、各種フィルター、および電子回路基板等、工業界において幅広い用途を有している。しかしながら、強度部材への適用については、前述のボールベアリングや過給機タービン等の限られた製品にとどまっており、幅広い領域で利用されているとは言い難い。セラミックスの強度評価法に関する研究は、これまでに数々の国内外の国家プロジェクト等で実施されてきており、強度部材を設計する際の基準はほぼ確立されている。したがって、運転中のセラミックス部材に働く応力分布が事前に正確に把握できる場合は、その部材の設計は可能であると考えられる。しかし、基準に基づいて設計されたものでも、場合によっては破壊が生じることもある。その原因としては、実機においては設計段階で予期していない応力が発生することがあげられる。とくに接触、熱および異物による衝撃等の応力は、セラミックスが金属のような塑性変形をしないため、非常に大きなものとなる。この応力を評価するための境界条件を明確にすることは難しく、計算によって求めることが困難である。金属材料の場合、この応力は塑性変形による応力再配分によって緩和され、深刻な問題とはならない。しかし、セラミックスにおいては、破壊に対する直接的な影響をあたえ、その程度が安全率でカバーすることのできる範囲を超えることが多い。

一方で、脆性材料と分類されるセラミックスでも、クラック進展実験等で観察される上昇型のRカーブ挙動や圧痕の導入が即全体の破壊には結びつかない等、僅かではあるが損傷許容性を有している。しかしながら、それについて評価し、設計に反映するというアプローチは全く行われていないのが現状である。したがって、セラミックス部品の安全性を高め、破壊を防ぐためには、応力評価の精度を上げることに注意を払うと同時に、僅かではあるが材料自身が保有する非弾性変形能やRカーブ挙動に基づく損傷許容性、さらには部品全体系の構造的な応力緩和機構を考える必要がある。それにより、これまで強度部材としての適用が躊躇されてきたセラミックス等の脆性材料の使用を支援することができると考えられる。

以上のように、本研究は脆性材料にも備わる損傷許容性を検討するものであるから、その評価対象材料は、強度部材として用いられている炭化ケイ素、窒化ケイ素などの緻密質セラミックスにすべきである。しかし、

それらの非弾性挙動を実験から定量的に取得することは、試験機のコンプライアンス等の問題から難しい課題である。一方、多孔質セラミックスは、材料内部に無数の空孔があることにより、緻密質セラミックスに比べて大きな非弾性挙動を示すため、実験と解析との比較が容易であり、開発する評価法の妥当性を定量的に評価することに適している。このような背景から本研究では多孔質セラミックスを対象にし、以下のことを目的として研究を行った。

- ・材料が損傷許容性を有することが、それを用いた機器の信頼性向上に寄与することを明らかにする。
- ・脆性材料の損傷許容性を評価可能にする構成式を確立する。
- ・開発した構成式を用いて多軸応力場における脆性材料の損傷許容性評価を可能にする。
- ・損傷許容性評価を考慮した許容応力の設定に関する知見を得る。

2) 研究内容

本研究の内容は本文の第2章から第6章で構成されている。

まず第2章では、セラミックス部材の損傷許容性を評価するにあたり、その根源となる非弾性挙動を定量的に把握する。そのために、脆性材料ではあるものの、緻密質セラミックスよりも大きな非弾性変形挙動を呈する多孔質セラミックスの引張試験を行い、その応力と歪の関係を取得する。次に切欠き材と平滑材の静的引張試験、切欠き材と平滑材の4点曲げ疲労試験の結果を用いて、損傷許容性を持つ材料に対する切欠き、すなわち応力集中部の影響について考察する。その際、部材中に発生する最大応力での強度評価、および有効体積理論での強度評価との比較・検討を行う。

第3章では、第2章の引張試験により得られた応力と歪の関係における非弾性挙動を評価するための構成式を検討する。ここではまず、単軸応力場における構成式について検討する。また本構成式によって、前述の引張試験で計測された非弾性応力と歪との関係が評価可能か、その検討を行う。さらに、材料が持つ損傷許容性とそれによって製作された部材の信頼性について検討する。

第4章では、実際の構造物の利用環境に対応するため、第3章で開発した構成式を多軸応力場に対しても適用可能なものとするための検討を行う。そのために、直交する3軸それぞれを法線を持つ3つのクラックを有するマイクロな下部構造を想定し、それらが材料中に無数にある場合の応答モデルを構築する。その際、下部構造の応答とマクロな応答とを結びつけるためのモデルを構築する。このモデルを用いて、負荷形式の違う平滑材および切欠き材の強度試験結果と解析結果との比較・検討を行う。

さらに第5章においては、それまで一様と設定していた下部構造の初期クラック長さについてワイブル分布を仮定し、開発した構成式の評価精度の向上を図るとともに、平滑材の引張、3点曲げ、4点曲げ、および切欠き材の4点曲げについて、実験結果と解析結果との比較・検討を行う。

最後に第6章では、負荷形態の違いによる強度への影響について検討し、既存の脆性材料の評価法である有効体積理論との比較を通して、損傷許容性を考慮した強度評価について考察する。

3) 結論

本研究により得られた結論は以下の通りである。

- ・多孔質セラミックスの引張試験および曲げ疲労試験により、材料が損傷許容性を有すると応力集中による強度の低下がほとんどないこと、および有効体積理論からの予測よりも高い強度を有していることを示した。これにより損傷許容性を有すると部材の信頼性が向上することを実験的に示した。
- ・クラック進展挙動が上昇型のRカーブ特性を持つ脆性材料の構成式として微視クラック分散モデルを構築し、それによってセラミックスの非弾性挙動がシミュレートできることを示した。さらに、材料が

損傷許容性を有すると、強度のばらつきが小さくなり部材の信頼性が増すことを示した。またエネルギー散逸を考慮したネットワークモデルにより、エネルギー散逸を有することで材料の信頼性が向上することを示し、その傾向は応力集中部がある部材のほうがより顕著なことを示した。

- ・ 微視クラック分散モデルを多軸応力下においても適用可能にし、かつ初期クラック長さにワイブル分布を仮定したモデルを構築した。その結果、多孔質セラミックスの非線形挙動および破壊挙動を同時に記述できるモデルとなり、脆性材料の損傷許容性評価が可能となった。
- ・ 損傷許容性がもたらす強度への影響について、平滑材の3点曲げと4点曲げの強度比(=3点曲げ強度/4点曲げの強度)について検討した。その結果、本研究で用いた多孔質セラミックスでは強度比が1.27～1.31になり、有効体積理論から得られる強度比1.15とは異なることを示した。また円孔を有する平板の引張変形下での強度についても同様な検討を行い、損傷許容性を考慮することで、対4点曲げ強度比で、有効体積理論に基づく1.35よりも高い1.74を得ることを明らかにした。これにより、損傷許容性を考慮することで部材・機器の許容応力設定が合理化できることを示した。

論文の審査結果の要旨

本論文の発表会は2009年2月2日に行った。その発表も含めて学位論文の審査を行った。研究の概要は以下のとおりである。

セラミックスはボールベアリング等の機械要素部品、各種フィルター、および電子回路基板等、工業界において幅広い用途を有している。しかしながら、強度部材への適用については、前述のボールベアリングや過給機タービン等の限られた製品にとどまっており、幅広い領域で利用されているとは言い難い。

セラミックスの強度評価法に関する研究は、これまでに数々の国内外の国家プロジェクト等で実施されてきており、強度部材を設計する際の基準はほぼ確立されている。しかし、実機においては設計段階で予期していない応力が発生することあり、これにより破壊が生じる場合がある。これがセラミックスが強度部材として広く適用されない一つの理由として挙げられる。とくに接触、熱および異物による衝撃等の応力は、セラミックスが金属のような塑性変形をしないため、非常に大きなものとなる。この応力を評価するための境界条件を明確にすることは難しく、計算によって求めることが困難である。金属材料の場合、この様なピーク応力に分類される応力は塑性変形による応力再配分によって緩和され、深刻な問題とはならない。しかし、セラミックスにおいては、破壊に対する直接的な影響をあたえ、その程度が安全率でカバーすることのできる範囲を超えることが多い。したがって、セラミック部材の強度・信頼性を評価するためには上記のようなピーク応力に対する評価法を開発することが必須である。

一方で、脆性材料と分類されるセラミックスでも、クラック進展実験等で観察される上昇型のRカーブ挙動や圧痕の導入が即全体の破壊には結びつかない等、僅かではあるが損傷許容性を有している。この損傷許容性によって上記のピーク応力感受性がどの程度緩和されるかを定量的に評価する手法を開発するのがこの論文の趣旨である。このようなアプローチはこれまでまったく行われていない。

以上のように、本研究は脆性材料にも備わる損傷許容性を検討するものであるから、その評価対象材料は、強度部材として用いられている炭化ケイ素、窒化ケイ素などの緻密質セラミックスにすべきであると考えられる。しかし、それらの非弾性挙動を実験から定量的に取得することは、試験機のコンプライアンス等の問題から極めて難しい。一方、多孔質セラミックスは、材料内部に無数の空孔があることにより、緻密質セラミックスに比べて大きな非弾性挙動を示すため、実験が比較的实施しやすく、開発する評価法の妥当性を定量的に評価することに適している。このような背景から本研究における定量的な検討は多孔質セラミックスの実験結果を用いている。

本論文で得られた主な成果は以下のとおりである。

- ・セラミックスが損傷許容性を持ち、非弾性変形をすることの実験的検証
- ・材料が損傷許容性を有することが、それを用いた機器の信頼性向上に寄与することの実証
- ・脆性材料の損傷許容性を評価可能にする構成式の開発
- ・開発した構成式を用いた多軸応力場における脆性材料の損傷許容性評価の実施
- ・損傷許容性評価を考慮した設計許容応力の設定

本論文は7章から構成されており、第1章では、本研究の背景と目的および学位論文の構成について述べられている。

第2章では、セラミックス部材の損傷許容性を評価するにあたり、その根源となる非弾性挙動を定量的に把握している。そのために、脆性材料ではあるものの、緻密質セラミックスよりも大きな非弾性変形挙動を呈する多孔質セラミックスの引張試験を行い、応力と歪の非弾性関係を実験的に取得している。次に切欠き材と平滑材の静的引張試験、切欠き材と平滑材の4点曲げ疲労試験の結果を用いて、損傷許容性を持つ材料に対する切欠き、すなわち応力集中部の影響について考察している。その際、部材中に発生する最大応力での強度評価、および有効体積理論での強度評価との比較・検討を行っている。これにより損傷許容性を有すると部材の信頼性が向上することを実験的に検証している。

第3章では、第2章の引張試験により得られた応力と歪の関係における非弾性挙動を評価するための構成式を検討している。ここではまず、単軸応力場における構成式について検討している。また本構成式によって、前述の引張試験で計測された非弾性応力と歪との関係が評価可能であることを示し、さらに、材料が持つ損傷容性とそれによって製作された部材の信頼性について検討している。

第4章では、実際の構造物の利用環境に対応するため、第3章で開発した構成式を多軸応力場に対しても適用可能なものとするための検討を行なっている。そのために、直交する3軸それぞれを法線を持つ3つのクラックを有するマイクロな下部構造を想定し、それらが材料中に無数にある場合の応答モデルを構築する。その際、下部構造の応答とマクロな応答とを結びつけるためのモデルを構築する。このモデルを用いて、負荷形式の違う平滑材および切欠き材の強度試験結果と解析結果との比較・検討を行っている。

さらに第5章においては、それまで一様と設定していた下部構造の初期クラック長さについてワイブル分布を仮定し、開発した構成式の評価精度の向上を図るとともに、平滑材の引張、3点曲げ、4点曲げ、および切欠き材の4点曲げについて、実験結果と解析結果との比較・検討を行っている。

第6章では、負荷形態の違いによる強度への影響について検討し、既存の脆性材料の評価法である有効体積理論との比較を通して、損傷許容性を考慮した強度評価について考察している。

第7章では本論文で得られた結論を述べている。

以上のように、本論文は脆性材料の信頼性解析に対して、これまでにまったく例のない損傷許容性という観点からの検討を試みたものである。これまで、延性・韌性材料を用い、脆性材料を避けるのが常識であった機械設計・製作の分野に、脆性材料の信頼性を損傷許容性の観点から定量評価し、それによりそれを強度部材として適用するための道を切り開いたという意味で画期的な論文である。本論文の主な成果は査読付の学術雑誌に3編の論文として発表されている。以上のように、本論文は工学的・工業的に極めて有用であり、博士の学位にふさわしいと判断される。