The Society of Materials Science, Japan

325 長繊維複合セラミックスの破壊確率評価法の検討

香川大学　正　○平田　英之

1．はじめに

近年化石燃料の大量使用に伴い重要な環境問題が山積してきている。このような背景から高温化による効率向上および大気汚染防止のために、複合発電用高温ガスタービンへのセラミックス適用研究が積極的に行われている。著者らは１３００℃級セラミックガスタービンの高温部材へのセラミックス適用研究を行い、強度信頼性設計にとって極めて有益なセラミックス強度の統一的評価法の開発に成功してきた。最近では、耐熱性や高温強度特性に優れるセラミックス特性に更に損傷許容性や多機能な傾斜組成を付加した材料設計が期待できるＳｉＣ長繊維を用いた長繊維複合セラミックスの開発・適用が注目されるようになってきた。

しかしながら、これらの材料の強度評価法に関しては、繊維と母材の組み合わせや繊維の配向方向、充填率、繊維と母材界面などの多くの要素に強度特性が影響を受けるため、その統一的な取り扱いが困難であった。本研究では、セラミック長繊維とセラミック母材の複合材料に対して、その破壊強度を確率論的に決定するため、モノリシックセラミックスの強度評価法として確立している統一的評価法の適用の可能性について検討した。

2．モノリシックセラミックスの破壊強度の統一的評価

著者らは、窒化珪素や炭化珪素などのモノリシック系のセラミックスの強度特性に対して統一的評価法を提案した。これは曲げや引張による即時破壊、あるいは、疲労やクリープ曲げや引張による即時破壊、あるいは疲労やクリープなどの各種破壊試験データを SCG(slow crack growth)に基づく時間依存型の遅れ破壊として統一的に評価する方法である。この統一的評価法によれば、曲げや軸荷重による各種破壊試験データに対して、各試験データでの有効体積Ｖｅｆｆおよび有効負荷時間ｔｅｆｆを、

$$V_{eff}=\int_v (\sigma/\sigma_{max})^m \quad dV \qquad (2\text{-}1)$$

$$t_{eff}=\int_0^{t0} (\sigma/\sigma_{max})^n \quad dt \qquad (2\text{-}2)$$

ここで、ｔ０は、即時破壊試験の場合：破壊に至るまでの時間ｔｆ
繰返し疲労試験の場合：応力サイクルの周期

のように計算し、全試験データに対して

$$\sigma_f\tilde{} = \sigma_f (N_f t_{eff})^{nf} V_{eff}^{1/m} \qquad (2\text{-}3)$$

のようにＶｅｆｆ=1mm３，Ｎｆｔｅｆｆ=1secの場合の強度σｆに基準化すれば、このσ$_f$~に対して、２母数ワイブル分布を仮定し、最尤法による統計解析を行ない、母数 $\hat{m}$，$\hat{\sigma}_0$を推定すると、

$$\sigma_f (N_f t_{eff})^{nf} = \hat{\sigma}_0 \sqrt[\hat{m}]{\ln(1-P_f)^{-1}/V_{eff}} \qquad (2\text{-}4)$$

のように、任意の有効負荷時間 teff を有する変動応力σ(t)を有効体積 Veff のセラミック部品が受けるときの強度に対して、破壊確率論的な評価に適用できる。

3．長繊維複合セラミックスの破壊モデルと統一的評価法適用の検討

以上のように、モノリシック系のセラミックスの破壊は、初期的な存在欠陥とき裂進展を考慮することにより、ワイブル統計の最弱環理論を用いて確率論的に評価することが可能である。一方、長繊維複合セラミックスの場合、繊維と母材の界面の劣化状態に破壊の形態が強く依存するものの、繊維と母材の界面で滑りや剥がれなどの特性が良好に保たれるならば、母材に初期破壊（初期き裂）が発生しても、部材全体が直ちに分離するような破断には至らず、繊維の引き抜けの効果などによって、破壊が徐々に進行する。

従って、長繊維複合セラミックスの破壊に対しては、部材全体に対して、最弱環理論に基づくような確率論的な評価は、直ちには適用できない。そこで、本研究では、長繊維複合セラミックスの破壊を下記のような３段階に分け、それぞれの破壊モデルと強度評価法を検討することにする。

3.1 母材の初期破棄評価

母材に初期き裂が発生するまでの強度評価法は、

NII-Electronic Library Service

基本的にモノリシック系のセラミックスの破壊強度の統一的評価法がそのまま適用できるものと考えられる。ただし、母材に発生する応力は、繊維の存在によって複雑に分布するので、ミクロ構造を考慮した応力解析により、母材の応力分布を解析し、その応力分布σ(v)と応力の時間変化σ(t)とから、式(2-1)，式(2-2)のように有効体積Veffと有効負荷時間teff を計算し、式(2-4)により初期き裂発生強度・寿命を確率論的に求める。

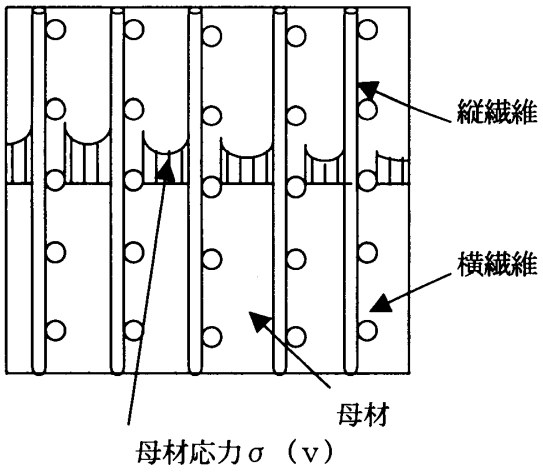

図1　母材初期き裂発生前のミクロ応力分布

3.2　母材初期き裂発生後の破壊モデル

図 2 に、母材への初期き裂発生後ミクロ構造を示す。図に示すようにき裂に直交する方向の繊維が、き裂進展の抵抗となっていることがわかる。この段階の破壊に対しては、繊維によってき裂面に作用するき裂閉口力を考慮しながらき裂先端の応力拡大係数を評価することにより、破壊力学的な評価が可能となる。

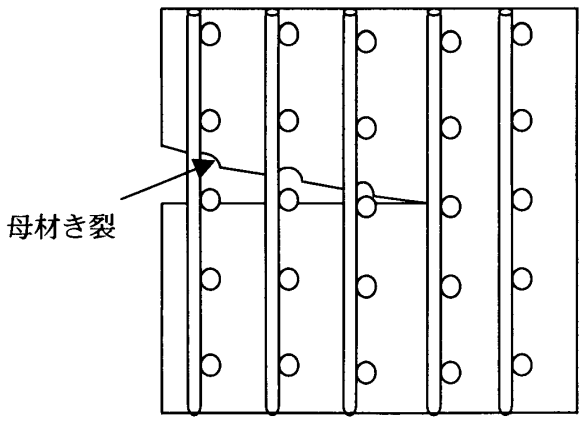

図2.　母材き裂の進展モデル

3.3　最終破断の破壊モデル

図 3 に、母材き裂が貫通した後のミクロ構造を示す。図に示すようにこの段階では、き裂に直交する方向の繊維のみが強度を分担する。従って、繊維全体の強度を確率論的に評価すれば、それが最終破断強度となる。すなわち、繊維個々の応力を求め、いずれか１本の繊維が破壊に至る強度を最弱環理論により確率論的に評価すればよい。これは、繊維の全体の体積を考えて有効体積を評価することと計算上同じであり、統一的評価法と同じ評価が適用できる。

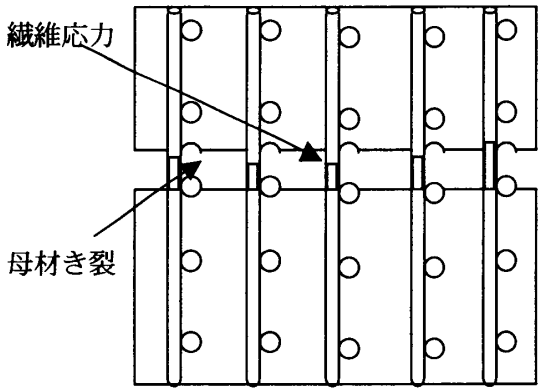

図3　母材き裂貫通後の進展モデル

4.　まとめ

本研究では、セラミック長繊維とセラミック母材の複合材料に対して、その破壊強度を確率論的に決定するため、モノリシックセラミックスの強度評価法として確立している統一的評価法の適用の可能性について検討した。

モノリシック系のセラミックスの破壊は、初期的な存在欠陥とき裂進展を考慮することにより、ワイブル統計の最弱環理論を用いて確率論的に評価することが可能であるが、長繊維複合セラミックスの場合、母材に初期破壊（初期き裂）が発生しても、部材全体が直ちに分離するような破断には至らず、繊維の引き抜けの効果などによって、破壊が徐々に進行する。このため、長繊維複合セラミックスの破壊に対しては、部材全体に対して、最弱環理論に基づくような確率論的な評価は、直ちには適用できない。そこで、本研究では、長繊維複合セラミックスの破壊を下記のような３段階に分け、それぞれの破壊モデルと強度評価法を検討し、母材の初期き裂発生、母材き裂の進展および最終破断に対して、それぞれ破壊モデルを提案した。

（参考文献省略）

NII-Electronic Library Service