

セラミック構造体の強度評価法について

三上 隆男 *

Mikami Takao

竹上 弘彰 **

Takegami Hiroaki

松田 昌悟 ***

Matsuda Masanori

セラミックスは金属材料と比較して、多くの優れた特徴を有している。資源の乏しい我が国ではセラミックスの機械・構造用材料への適用が期待され、過去に旧通商産業省（現経済産業省）がセラミックスに関する数件の研究開発プロジェクトを主導した。

脆性材料であるセラミックスの強度評価手法は鉄鋼材料のそれと比べて異質なものである。この強度評価手法について解説した後、先に、独立行政法人 日本原子力研究開発機構が実施した「セラミック構造体の破壊試験」の評価に適用した事例について紹介する。

キーワード：セラミックス、破壊強度、ワイブル統計、最弱環理論、有効体積

1. はじめに

セラミックスは金属材料と比較して、耐熱性、耐食性、耐摩耗性に優れている上に、軽量である。資源の乏しい我が国ではセラミックスの機械・構造用材料への適用が期待され、昭和 56 年から平成 11 年までの間、旧通商産業省（現経済産業省）が「ファインセラミックスの研究開発」、「セラミックガスタービンの研究開発」などのプロジェクトを主導してきた。これらのプロジェクトには多くの民間企業と国立試験研究機関が参加した。IHI は企業側の主導的な立場で本研究開発に参加し、脆性材料であるセラミックスを構造用材料として

適用する際の強度評価手法の開発など多くの研究成果を残した。^{(1)~(8)}

この強度評価手法は鉄鋼などの延性材料のそれと比べて異質なものであり、本稿ではこれについて解説した後、先に、独立行政法人 日本原子力研究開発機構（以下 JAEA と略す）が実施した「セラミック構造体の破壊試験」の評価に適用した事例について紹介する。IIC は、この試験の実施とその評価を担当した。

2. ワイブル分布と最弱環理論による強度評価⁽²⁾⁽⁴⁾

ワイブル分布は、物体の体積と強度との関係を定量的に記述するための確率分布としてスウェー

* 技師長 博士（工学）、技術士（機械部門）、環境計量士（騒音・振動関係）、一般計量士

** 独立行政法人 日本原子力研究開発機構 原子力水素・熱利用研究センター
水素サプライチェーン研究開発グループ 博士（工学）

*** 計測事業部 計測技術部 次長

デンの物理学者 W. Weibull により 1939 年に提案された。一般には、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（最弱環理論：Weakest link theory）として理解されている。

ワイブル分布は確率分布関数（累積破壊確率） P または確率密度関数 F で表現される。 x を変数とすれば、2 母数ワイブル分布の確率分布関数 P は次式で与えられる。

$$P = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^m} \quad (1)$$

ただし、 η ：尺度パラメータ、 m ：形状パラメータ（ワイブル係数）

確率密度関数 F は (1) 式を微分したものであり、(2) 式で与えられる。

$$F = \frac{m}{\eta} \left(\frac{x}{\eta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^m} \quad (2)$$

F は m の値により種々の形になる。 $m < 1$ の場合は逆 J 字型曲線、 $m = 1$ で指数分布、 $1 < m < 3.6$ で分布が左側に片寄り、 $m \doteq 3.6$ で釣鐘型の正規分布、 $m > 3.6$ で右側に片寄った分布形になる。

粉体を焼結して製作するセラミックスの中には種々の大きさの多数の欠陥が存在する。セラミックスの強度モデルを構築するにあたり、これらの欠陥をクラックに置き換えて考える。なお、応力場としては単軸応力場を考える。

大きさ a のクラックに応力 σ が作用したときの応力拡大係数 K は、 C をクラックの形状係数として、次式で与えられる。

$$K = C\sigma\sqrt{a} \quad (3)$$

セラミックスの破壊が線形破壊力学に従い、 K の限界値を K_c として

$$K = K_c \quad (4)$$

を満足したときに生じると考える。

セラミックスは、上述の 2 母数ワイブル分布に従い、任意の一つのクラックにおいて (4) 式が満足されたときにセラミック部材全体が破壊すると思えば、応力 σ のもとでのセラミック部材の累積破壊確率 P は、部材中に (4) 式を満足する大きさ以上のクラックの存在確率に等しい。体積 V のセラミック部材中に大きさ a 以上のクラックの存在する確率が m 、 a_0 および V_0 を材料定数として

$$P = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{a_0}{a}\right)^2 \frac{V}{V_0}\right\} \quad (5)$$

と書けるものとするれば、応力 σ のもとでの累積破壊確率は

$$P = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \frac{V}{V_0}\right\} \quad (6)$$

と与えられる。ここで

$$\sigma_0 = \frac{K_c}{C\sqrt{a_0}} \quad (7)$$

である。(6) 式はセラミックスの強度分布を表す式として最も広く用いられる。ワイブル係数 m は強度のばらつき程度を表す指標であり、大きいほどばらつきが小さくなる。(6) 式や (5) 式中の材料定数は破壊実験の結果を (6) 式にあてはめることにより定められる。

具体的には、ワイブルプロットと呼ばれる以下の手法で解析する。

(6) 式を変形して、2 回対数をとると次式が得られる。

$$\ln\left(\ln\frac{1}{1-P}\right) = m \ln \sigma + \ln\left(\frac{V}{\sigma_0^m V_0}\right) \quad (8)$$

(8) 式から、 $X = \ln \sigma$ に対して $Y = \ln\left(\ln\frac{1}{1-P}\right)$ を

プロットすると直線になり、その傾きがワイブル係数 m となることがわかる。また、 Y 切片が $\ln\left(\frac{V}{\sigma_0^m V_0}\right)$ となる。この解析作業にはワイブル確

率紙を使用すると便利である。

なお、 P はサンプル数： n 個での実験結果から下記のように対称試料累積分布法またはメディアンランク法で計算するが、どちらを採用しても大差はない。

$$\text{対称試料累積分布法： } P = \frac{i - 0.5}{n} \quad (9)$$

$$\text{メディアンランク法： } P = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (10)$$

ここで、 i は応力 σ 以下で破壊したサンプルの累積数である。

サンプルを実験結果に基づいて破壊応力が低いものから高いものの順に並べる。 $n = 10$ の場合、(9)式を適用すると、最も低い応力で破壊したサンプル数は $i = 1$ で、 P は0.05 (5%)となる。2番目に低い応力以下で破壊したサンプル数は $i = 2$ で、 P は0.15 (15%)となる。以下同様にして、最も高い応力以下で破壊したサンプル数は $i = 10$ で、 P は0.95 (95%)となる。

参考までに、セラミックガスタービン用 Si_3N_4 (窒化ケイ素)製ブレードの破壊試験結果をワイブルプロットした例を図1に示す⁽⁹⁾。スピテスターを用いて供試ブレード1枚と金属製ダミーブレード1枚を装着した金属ディスクを供試ブレードが破壊するまで高速回転させ、その破壊回転数と累積破壊確率をプロットしている。▲印は高压段ブレード (サンプル数：21個)で、●印は低压段ブレード (サンプル数20個)である。回転によりブレード内に発生する遠心応力は回転数の二乗に比例するので、横軸は破壊回転数の二乗で表している。縦軸は累積破壊確率である。データの傾き (m)は最小二乗法で直線近似している。高压段と低压段の m は、ほぼ同じであることがわかる。

次に、(6)式が微小体積 dV に対しても成り立つと考え、最弱環モデルを適用すれば、応力分布が

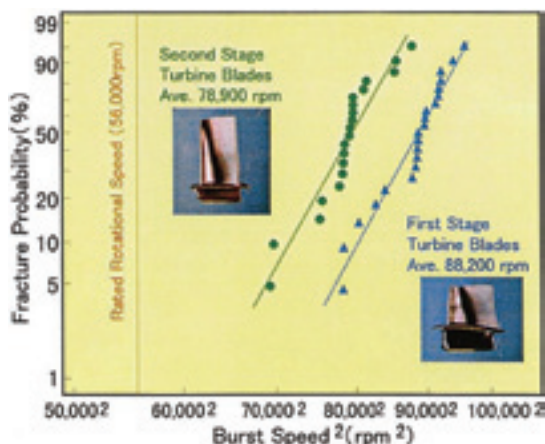


図1 セラミックブレードの破壊試験結果⁽⁹⁾

ある場合にも適用できる式として

$$P = 1 - \exp \left\{ - \int \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \frac{dV}{V_0} \right\} \quad (11)$$

が導かれる。

以上は応力存在下でのクラックの進展を無視しているが、単軸応力場での即時破壊に対して適用できる理論である。

実際のセラミック部品は一般に、多軸応力状態であり、かつ、応力分布が存在するので、確率分布関数 P は即時破壊条件においては(11)式を拡張して

$$P = 1 - \exp \left\{ - \int \left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0} \right)^m + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_0} \right)^m + \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_0} \right)^m \right] \frac{dV}{V_0} \right\} \quad (12)$$

と与えられる。ここで、 σ_1 、 σ_2 および σ_3 は3つの主応力である。

セラミックスの強度には体積依存性があり、一般に大きいほど強度が低い。これを評価するために有効体積と呼ばれる概念がある。(11)式を部材中の代表応力 σ_N を用いて書き改めると

$$P = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma_N}{\sigma_0} \right)^m \frac{V_E}{V_0} \right\} \quad (13)$$

$$V_E = \int \left(\frac{\sigma}{\sigma_N} \right)^m dV \quad (14)$$

となる。(14)式は体積の次元を持つ量で、有効体積と呼ばれ、(13)式との比較で明らかのように、体積 V の部材の分布応力 σ のもとでの破壊確率は、体積 V_E の部材の一樣応力 σ_N でのそれと等しい。すなわち、任意の応力を受ける部材の強度は有効体積 V_E の部材の引張り強度で評価されることになる。

(13)式より平均強度 $\overline{\sigma_N}$ を求めると

$$\overline{\sigma_N} = \sigma_0 \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right) \left(\frac{V_0}{V_E} \right)^{\frac{1}{m}} = \sigma_0 \left(\frac{1}{m!} \right) \left(\frac{V_0}{V_E} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (15)$$

となる。ただし、 Γ はガンマ関数。したがって、部材 1 と部材 2 の平均強度の比は

$$\frac{\overline{\sigma_{N2}}}{\overline{\sigma_{N1}}} = \left(\frac{V_{E1}}{V_{E2}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (16)$$

で与えられる。これが強度の体積効果を与える式であり、実験結果と良く一致する。ここで注意すべきは、代表応力 σ_N の選び方により、(14)式で表される V_E の値が変わってしまうことである。通常は部材中の最大引張応力 σ_{\max} を代表応力として選ぶ。

3. ワイブル理論の適用例

3.1 概要

JAEA は 1997 年から高温ガス炉 (HTTR) の熱 (約 1000℃) と化学反応を利用した大規模水素製造法である IS プロセス法の研究開発を推進中である。本研究では、大型 SiC (炭化ケイ素) 熱交換器を用いた硫酸分解器の開発が必要とされている。この大型 SiC 熱交換器を設計する場合、SiC 構造体の強度評価技術が不可欠である。そのため、熱交換器伝熱管を模擬した SiC 小型配管モデルを試験体とし、内圧を負荷する方法により発生する応力

(ひずみ) の測定と破壊試験を行った。IIC は本試験の実施を担当した。この試験は、セラミック構造体の応力測定法を検討することに主眼を置いているため、破壊試験のサンプル数は 2 体と少ないが、その強度評価に前項で解説したワイブル理論を適用した。

3.2 試験体の形状と物性値

図 2 に SiC 配管モデルの形状を示す。表 1 に配管材料の SiC (常圧焼結炭化ケイ素) の物性値を示す。

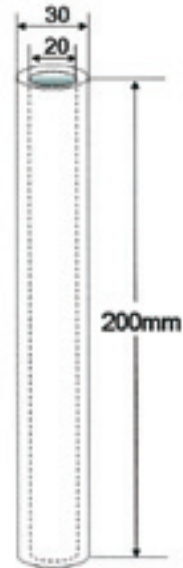


図 2 SiC 配管モデル形状

表 1 常圧焼結 SiC の物性値

密度 (g/cm^3)	3.1
曲げ強度 (MPa) ^{†1}	490
ヤング率 (GPa)	430
ポアソン比	0.16
線膨張係数 ($\times 10^{-6}/K$) ^{†2}	4.5
熱伝導率 ($W/(m \cdot K)$)	160
破壊靱性 ($MPa \cdot m^{1/2}$)	3.5~4.5

3.3 試験方法

図3に示すように、配管モデルに内圧を負荷する方法を採用した。この方法によれば、内圧を受ける厚肉円筒理論により発生する応力を容易に解析できる。試験中は、図4に示すように、高さ方向3箇所に貼り付けた5枚の2方向ひずみゲージ（円周方向と軸方向）により、ひずみ量をモニタリングした。

試験装置および計測システムの概要を図5に示す。

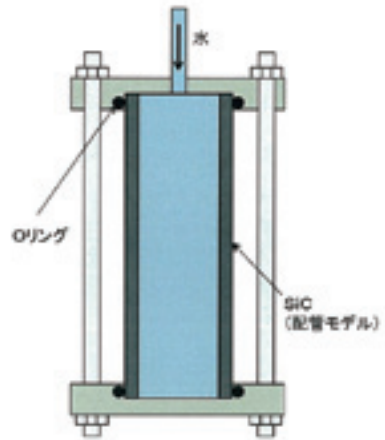


図3 SiC 配管モデルの内圧負荷試験

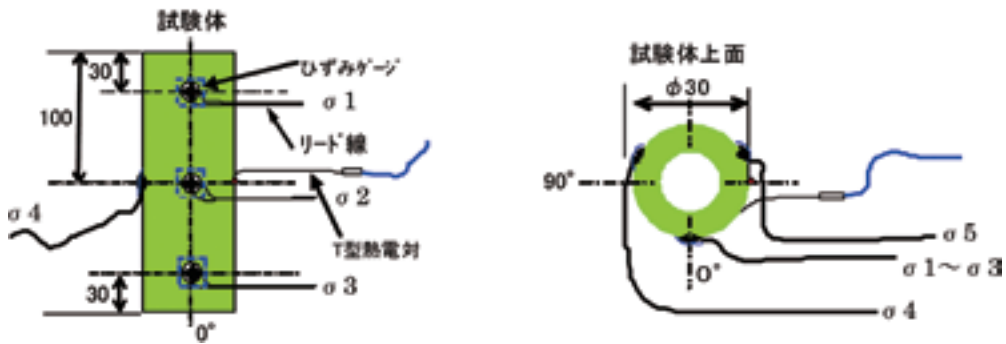


図4 ひずみゲージおよび熱電対の設置位置

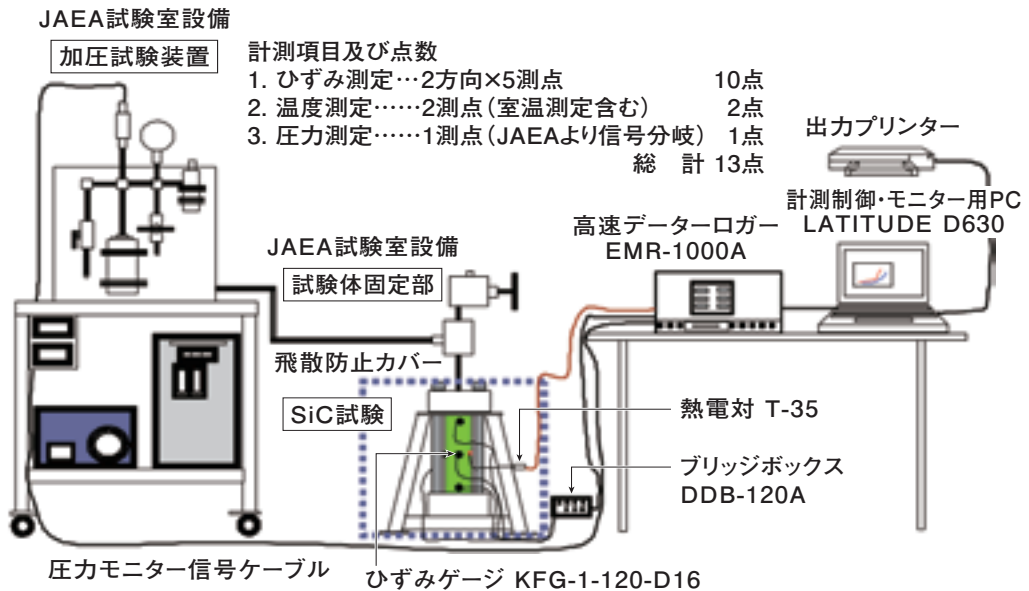


図5 試験装置及び計測システムの概要

3.4 配管モデルの有効体積計算⁽¹⁰⁾

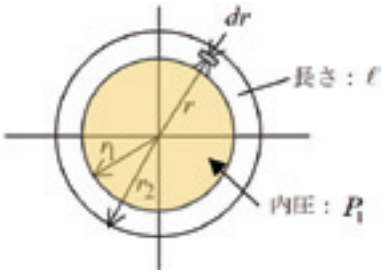


図6 内圧を受ける厚肉円筒

図6に示す厚肉円筒に内圧： P_1 が作用するとき、発生する円周方向応力： σ_t は

$$\sigma_t = \frac{r_1^2 P_1}{r_2^2 - r_1^2} \left(\frac{r_2^2}{r^2} + 1 \right) \quad (17)$$

最大円周方向応力： $(\sigma_t)_{\max}$ は内周部に ($r = r_1$) 生じ

$$(\sigma_t)_{\max} = \frac{r_1^2 + r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} P_1 \quad (18)$$

また、外周部の円周方向応力： $(\sigma_t)_{r=r_2}$ は

$$(\sigma_t)_{r=r_2} = \frac{2r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} P_1 \quad (19)$$

有効体積： V_E は、(12)式より以下の式で表せる。

$$V_E = \int_{r_1}^{r_2} \left[\frac{\sigma_t}{(\sigma_t)_{\max}} \right]^m dV \quad (20)$$

ここで、 $dV = 2\pi r dr \ell$ と(17)、(18)式を(20)

式に代入し、かつ、 $a = \frac{r_1^2}{r_1^2 + r_2^2}$ 、 $b = r_2^2$ とおくと

$$\begin{aligned} V_E &= \int_{r_1}^{r_2} \left[\frac{r_1^2}{r_1^2 + r_2^2} \left(\frac{r_2^2}{r^2} + 1 \right) \right]^m 2\pi r \ell dr \\ &= 2\pi \ell a^m \int_{r_1}^{r_2} \left(1 + \frac{b}{r^2} \right)^m r dr \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 $\left(1 + \frac{b}{r^2} \right)^m$ を級数展開して(21)式に代入すると

$$\begin{aligned} V_E &= 2\pi \ell a^m \int_{r_1}^{r_2} \left[r + \frac{mb}{r} + \frac{m(m-1)b^2}{2r^3} + \dots + \frac{m(m-1)\dots(m-p+1)b^p}{p!r^{2p-1}} \right. \\ &\quad \left. + \dots + \frac{m(m-1)\dots 2}{(m-1)!} \frac{b^{m-1}}{r^{2m-3}} + \frac{b^m}{r^{2m-1}} \right] dr \\ &= 2\pi \ell a^m \left[\frac{r^2}{2} + mb(\ln r) - \frac{m(m-1)}{4} b^2 \frac{1}{r^2} + \dots + \frac{m(m-1)\dots(m-p+1)}{p!(2-2p)} b^p \frac{1}{r^{2p-2}} \right. \\ &\quad \left. + \dots + \frac{m(m-1)\dots 2}{(m-1)!(4-2m)} b^{m-1} \frac{1}{r^{2m-4}} + \frac{b^m}{2-2m} \frac{1}{r^{2m-2}} \right]_{r_1}^{r_2} \end{aligned} \quad (22)$$

配管モデルの形状は、 $r_1 = 10\text{mm}$ 、 $r_2 = 15\text{mm}$ 、 $\ell = 200\text{mm}$ 、 $a = 0.308$ 、 $b = 225$ であるから、これらを(22)式に代入し、3.5項に対応して $m = 16$ と8のケースについて計算すると

$m = 16$ の場合、 $V_E \doteq 6,576\text{mm}^3$ (配管モデルの体積の8.4%)

$m = 8$ の場合、 $V_E \doteq 18,064\text{mm}^3$ (配管モデルの体積の23.0%)

となる。 V_E は応力集中部まわりのある限られた

範囲の体積に関する積分と同等になる。応力集中が著しいほど、また、 m の値が大きいほど V_E の値は相対的に小さくなる。

なお、このように V_E を容易に計算できるような事例は稀であり、多くの場合、部品形状や応力分布が複雑なため専用の計算プログラムを開発するか、MSC/NASTRANやANSYSなどの汎用構造解析プログラムを利用して(12)式も併せて計算/出力できるようにすることが必要である。

3.5 配管モデルの平均強度推定

配管モデルの材質はSiCで、表1からJIS3点曲げ試験による平均強度： $\bar{\sigma}_{3P}$ は490MPaである。

3点曲げ試験片の有効体積は $V_{E3P} = 0.5(m+1)^{-2}V_T$ で与えられる。ただし、 V_T は試験片の体積(3mm × 4mm × 30mm = 360mm³)である。この3点曲げ試験では表1に示すように $m \approx 16$ が得られているので、 $m = 16$ の場合とその1/2の $m = 8$ の場合について計算すると

$$m = 16 \text{ の場合、 } V_{E3P} \approx 0.62 \text{ mm}^3$$

$$m = 8 \text{ の場合、 } V_{E3P} \approx 2.22 \text{ mm}^3$$

となる。

したがって、配管モデルの平均強度： $\bar{\sigma}$ は(16)式から以下のように推定される。

$m = 16$ の場合、

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_{3P} \left(\frac{V_{E3P}}{V_E} \right)^{\frac{1}{m}} = 490 \left(\frac{0.62}{6576} \right)^{\frac{1}{16}} = 490 \times 0.56 = 274.4 \text{ MPa}$$

$m = 8$ の場合、

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_{3P} \left(\frac{V_{E3P}}{V_E} \right)^{\frac{1}{m}} = 490 \left(\frac{2.22}{18064} \right)^{\frac{1}{8}} = 490 \times 0.325 = 159.3 \text{ MPa}$$

3.6 破壊試験結果

破壊試験は試験体NO.1とNO.2の2体について実施した。

一例として、NO.1試験体の結果を図7に示す。試験体表面の5箇所(σ1, σ2, σ3, σ4, σ5)に貼り付けたひずみゲージによる応力の測定値は円周方向、軸方向とも場所によらずほぼ一致しており、内圧を受ける厚肉円筒理論に合致している。図7によると、円周方向応力は内圧に対して直線的に増加し、 $P_{1\max} = 71.1\text{MPa}$ で強度限界に達して破壊している。鉄鋼材料では一般的に観察される塑性変形挙動がなく、典型的な脆性破壊である。この $P_{1\max}$ を(19)

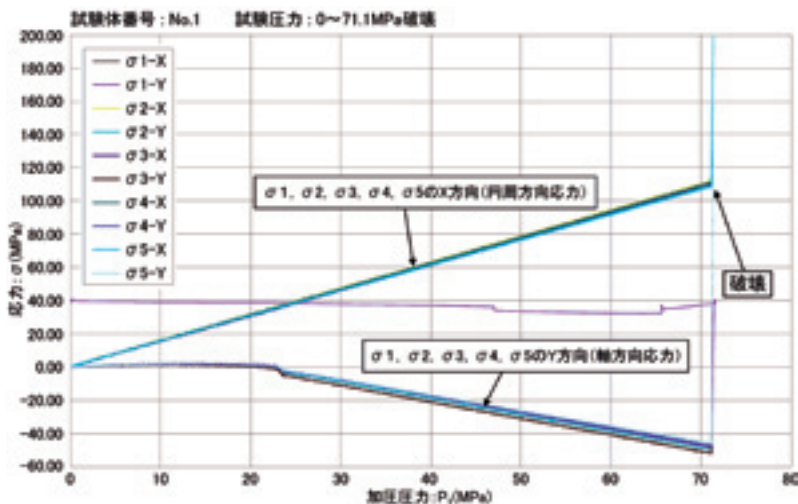


図7 NO.1試験体の破壊試験結果

式に代入すると、外周部の円周方向応力 $(\sigma_t)_{r=r_2} = 114\text{MPa}$ (解析) となる。一方、ひずみゲージによる測定結果は図 7 から $(\sigma_t)_{r=r_2} = 113\text{MPa}$ (測定) である。

NO.2 試験体の結果は同様に $P_{1\text{max}} = 51.8\text{MPa}$ 、 $(\sigma_t)_{r=r_2} = 83\text{MPa}$ (解析)、 $(\sigma_t)_{r=r_2} = 81\text{MPa}$ (測定) である。

このように、 $(\sigma_t)_{r=r_2}$ の解析結果 ((19) 式に $P_{1\text{max}}$ の測定値を代入したもの) と測定結果は非常に良く一致し、セラミック部材のひずみゲージによる応力測定法の信頼性を確認することができた。

内周部に生じる最大円周方向応力 $(\sigma_t)_{\text{max}}$ は当該部をひずみゲージで測定することが不可能なので、(18) 式を用いて解析する。NO.1 と NO.2 の $P_{1\text{max}}$ を (18) 式に代入すると、 $(\sigma_t)_{\text{max}}$ はそれぞれ 160MPa、114MPa となる。

以上の破壊試験結果と解析結果の一覧を表 2 に示す。

試験体	破壊時の内圧	外周部の円周方向応力: $(\sigma_t)_{r=r_2}$		最大円周方向応力: $(\sigma_t)_{\text{max}}$
	$P_{1\text{max}}$	解析	試験	解析
NO.1	71.1 MPa	114 MPa	113 MPa	160 MPa
NO.2	51.8 MPa	83 MPa	81 MPa	114 MPa

表 2 破壊試験の結果と解析結果

$(\sigma_t)_{\text{max}}$ を破壊応力とすると 2 体の平均強度は 137MPa となる。これを 3.5 項の予測結果 (材料試験結果から有効体積理論により実体平均強度を予測したもの) と比較すると、 $m = 8$ のときの 159.3MPa よりやや低く、SiC 配管モデルの m は 8 より若干小さいと推定される。

3.7 考察

今回の破壊試験のサンプル数ではワイブルプロットができないので、ワイブル係数 m の実験値を得ることはできない。しかし、上述のように有効体積理論によれば SiC 配管モデルの m は 8 より若干小さいと推定される。表 1 (常圧焼結

SiC の物性値) に示すように、SiC 材料の 3 点曲げ試験は 30 本について実施され、 $m \approx 16$ が得られている。本来、 m は材料定数であると言われているが、筆者の経験では実体試験では例外なく材料試験片レベルのデータよりも小さくなる。材料試験と実体試験とでは、有効体積や負荷形態が相違することが原因と考えられる。今回の試験でも m は実体試験時の値が材料試験時の値の 1/2 程度となった。実体破壊試験のサンプル数はコストの問題もあるが、できるだけ多いのが望ましい。

セラミック部品を設計する際は、材料試験で得られた m に対してその 1/2 程度の値を仮定して有効体積や実体平均強度を予測するのが安全側の設計である。その後、実体が製作されたら破壊試験を実施し、その結果により m や有効体積を修正するという繰り返し計算を行うのが最良のプロセスと考える。

4. おわりに

セラミックス独特の強度評価法について解説し、本評価法を JAEA が実施した「セラミック構造体の破壊試験」の評価に適用した事例を紹介した。日頃馴染みのない破壊力学や統計に関する計算式の多い説明となったが、セラミックスという脆くて強度のばらつきが大きい材料を使って構造部品を設計する際の理論的背景を少しでも理解して頂ければ幸いである。

レアアースや (希土類) やレアメタル (希少金属) の確保が我が国の大きな課題となっている昨今、資源が無尽蔵に存在するセラミックスが機械・構造用材料として、広く適用されて行くことを期待している。本稿がその一助になれば幸いである。

参考文献

- (1) 三上 隆男、佐々 正、岡村 淳輔、小幡 正一、渡辺 健次、“Thermal Shock Testing of Corrosion-Resistant Ceramic Model Parts”、ファインセラミックス次世代研究の歩み、ファインセラミックス技術研究組合、pp.191-209 (1988)
- (2) 鈴木 章彦、「セラミックスの強度評価」、圧力技術 第29巻第4号、pp.34-45 (1991)
- (3) 三上 隆男、佐々 正、岡村 淳輔、上遠野 紘一、“Thermal Shock Testing”、ファインセラミックス次世代研究開発の軌跡と成果、ファインセラミックス技術研究組合、pp.2089-2113 (1993)
- (4) 鈴木 章彦、浜中 順一、「セラミックス部品の設計技術」、ファインセラミックス次世代研究開発の軌跡と成果、ファインセラミックス技術研究組合、pp.1997-2038 (1993)
- (5) 三上 隆男、田中 眞也、岡村 淳輔、田頭 浩一郎、西 正輝、「ハイブリッドロータ式セラミックガスタービンの研究開発」、日本ガスタービン学会誌、VOL.24、No.93、pp.61-66 (1996)
- (6) Takao Mikami、Shinya Tanaka、Masashi Tatsuzawa、Takeshi Sakida、“Status of the Development of the CGT301, a 300KW Class Ceramic Gas Turbine”, ASME 96-GT-252 (1996)
- (7) Takao Mikami et al. “Application of Ceramics to the CGT301, a 300KW Class Ceramic Gas Turbine, CIMTEC 98, Florence, Italy
- (8) Takao Mikami、Koichiro Tagashira、Masakazu Obata、“Fracture Strength of Ceramic Nozzle Blade Under Thermal Shock Conditions” , 10th International Conference on Fracture, 2001, Hawaii
- (9) Kohmura, Y. ほ か 3 名、“Evaluation of Rotor Blade Strength by cold Spin Tests for 300kW Class Ceramic Gas Turbine (CGT301)”、95-YOKOHAMA-IGTC-67 (1995)、Ⅲ -77-80
- (10) 鶴戸口 英善、川田 雄一、倉西 正嗣、「材料力学 下巻」第9版、裳華房



技師長 博士(工学)、技術士(機械部門)、
環境計量士(騒音・振動関係)、
一般計量士
三上 隆男
TEL. 03-3778-7965
FAX. 03-3778-7968



独立行政法人 日本原子力研究開発機構
原子力水素・熱利用研究センター
水素サプライチェーン研究開発グループ 博士
(工学)
竹上 弘彰
TEL. 029-266-7667
FAX. 029-266-7741



計測事業部
計測技術部
次長
松田 昌悟
TEL. 045-791-3518
FAX. 045-791-3542