

セラミックスの寿命予測および寿命保証試験

解説

神谷 信雄*

Life Prediction and Proof Test in Ceramics

Nobuo KAMIYA

1. はじめに

セラミックスは一般的には、金属に比べて硬い、低比重である、高温強度に優れている、耐食性に優れているなどの優れた特性を持っている。そのため、金属では実現し得ない多くの用途を持っている。しかし、セラミックスを重要な構造用部品等に適用することはほとんど行われなかつた。この理由の一つは、セラミックスが“脆く”、このためある限界以上の応力が負荷されると、何の予告もなく瞬時に破壊してしまうことである。さらに、この限界の応力あるいは破壊に至る時間が、個々のセラミックスによつて大きく異なることも理由の一つと考えられる。

しかしながら、近年、セラミックスの破壊に関する研究が進み、セラミックスの寿命をある程度予測できるようになってきた。また、使用時に所定の寿命を持つセラミックスだけを選別する寿命保証試験に関する研究も進み、ある精度で選別できるようになってきた。これらにより、セラミックスの“脆さ”をかなり克服できるようになり、部品として利用され始めている。例えば、自動車用部品としてのグロープラグ¹⁾、ディーゼルエンジン副室²⁾、ターボチャージャロータは市販車に搭載されている。

以下、セラミックスの寿命予測および寿命保証試験について概説する。

2. 寿命予測

2.1 寿命予測の基礎

2.1.1 セラミックス中のき裂の伝播および強度に関する統計性

EVANS⁴⁾の研究によれば、一般にセラミックス中のき裂伝播速度 V は、応力拡大係数 K_I に対し Fig. 1 のように変化する。すなわち、領域 I においては、 $\ln V$ は $\ln K_I$ に従つて一定の割合で増加して、一定値となり、

さらに K_I が増加すると急激に増大する。領域 I ではき裂先端での応力腐食速度が V を律しており、領域 II では腐食成分のき裂先端への拡散速度が V を律している。領域 II の V は、腐食成分、濃度により異なるが $10^{-4} \sim 10^{-6}$ m/s である。ただし、窒化珪素あるいは炭化珪素などの一部のセラミックスでは、領域 I、II の表れないこともある。

セラミックスの疲労寿命を扱うには、き裂伝播速度の遅い領域 I のみを考慮すれば十分である。領域 I における $K_I - V$ の関係は次式で与えられる。

$$V = AK_I^n = AY^n \sigma^n a^{\frac{n}{2}} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 a はき裂長さ、 t は時間、 A は温度、湿度などに依存する常数、 Y は形状、負荷形式に依存する常数、 σ は応力、 n は $\ln V - \ln K_I$ 曲線の勾配である。 n の値は温度、雰囲気などに依存するが、15~120 と大きな値である。セラミックスのき裂伝播速度と応力拡大係数の関係を表す式は、(1)式以外にも提案されているが、後述するように、(1)式を用いることが解析上便利であり、

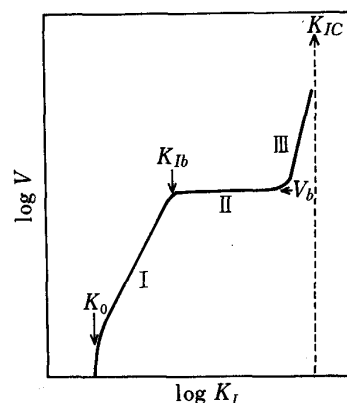


Fig. 1. Schematic representation of relation between stress intensity factor K_I and crack growth rate V in ceramics.

昭和 63 年 5 月 10 日受付 (Received May 10, 1988) (依頼解説)

* (株)豊田中央研究所研究 5 部 52 研究室 523 グループ グループリーダー 工博 (Toyota Central Research and Development Laboratories Inc., 41-1 Aza-Yokomichi Oaza-Nagakute Nagakute-cho Aichi-gun Aichi 480-11)
Key words : ceramics ; fatigue ; life prediction ; proof test ; slow crack growth ; fracture mechanics ; Weibull statistics.

この式が現在広く用いられている。

一方、金属材料の疲労におけるき裂伝播速度 da/dN は、応力拡大係数変動幅 ΔK_I の関数として(1)式と類似の次式⁵⁾で与えられる。

$$\frac{da}{dN} = A\Delta K_I^n \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 N は繰返し数である。(2)式における n の値は、金属材料により異なるが、2~8の範囲になり、セラミックスの15~120に比べて極めて小さい。これは、金属材料のき裂伝播速度の応力拡大係数に対する依存性がセラミックスのそれよりも鈍感であることを表しており、金属材料の一つの特徴と考えられる。

ところで、セラミックスの強度および寿命が統計的に広く分布していることはよく知られている。それゆえ、寿命予測もその統計性を考慮して行う必要がある。セラミックスの強度の分布は、つぎに示すワイブル関数⁶⁾を用いてよく表される。

$$F = 1 - \exp\left[-V_e\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right] \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 F は累積破壊確率、 V_e は有効体積、 σ は応力、 σ_0 は規格化常数、 m はワイブル係数である。セラミックスの m の値は、材料、仕上げ法などにより異なるが、5~20の値である。一例として、ワイブル係数が16.0のホットプレス窒化珪素の曲げ強度分布⁷⁾をFig. 2に示す。この材料の平均強度は98.3 kgf/mm²であるが、最小曲げ強度55.3 kgf/mm²、最大曲げ強度114.4 kgf/mm²と極めて広く分布している。

セラミックスの強度がその体積に依存することも特徴の一つである。強度の体積効果も(3)式から導かれて、次式で与えられる。

$$\frac{\bar{\sigma}_{f2}}{\bar{\sigma}_{f1}} = \left(\frac{V_{e1}}{V_{e2}}\right)^{\frac{1}{m}} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\bar{\sigma}_{f1}$ および $\bar{\sigma}_{f2}$ は有効体積が V_{e1} および V_{e2} に

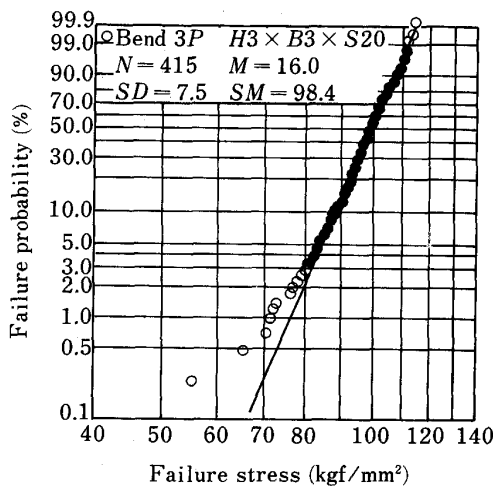


Fig. 2. Weibull distribution of bending strength in hot-pressed silicon nitride⁷⁾.

対応する平均強度である。ホットプレス窒化珪素についての強度と有効体積の関係⁸⁾をFig. 3に示す。

セラミックスの強度 σ_f は、初期き裂長さ a_i と破壊靱性値 K_{IC} を用いてつぎのように表される。

$$\sigma_f = K_{IC} Y^{-1} a_i^{-1/2} \dots\dots\dots (5)$$

(5)式を(3)式に代入することにより、破壊起点となる初期き裂長さ a_i の分布が次式で与えられる⁹⁾。

$$F = 1 - \exp\left[-V_e\left(\frac{a_i}{a_0}\right)^{-\frac{m}{2}}\right] \dots\dots\dots (6)$$

$$\left(a_0 = \left(\frac{K_{IC}}{Y\sigma_0}\right)^2\right)$$

(6)式は、セラミックスの破壊に関与する初期き裂の長さ a_i の分布も、一種の“変形されたワイブル統計”に従っていることを示している。

2.1.2 機械的応力が作用する場合の寿命

セラミックスに一定の機械的応力 σ_{MS} が作用する場合の静疲労寿命 L_M は、(1)式に σ_{MS} を代入して積分すればよい。

$$a_i^{(2-n)/2} - a_c^{(2-n)/2} = \frac{n-2}{2} A \sigma_{MS}^n \int_0^{L_M} Y^n dt \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 a_c は $K_{IC} = Y\sigma_{MS} a_c^{1/2}$ を満足する a の値である。(7)式において、 Y は a の関数であるため積分を実行することは容易ではない。しかしながら、セラミックスにおいては K_{IC} が小さいことから a_c も極めて小さく、そのため Y を一定とみなして(7)式の積分を実行することができる。また、 $a_i < a_c$ 、 $n > 10$ であるために、 $a_i^{(2-n)/2} \gg a_c^{(2-n)/2}$ となり $a_c^{(2-n)/2}$ を省略することができる。その結果、(7)式は次式のように近似できる。

$$a_i^{(2-n)/2} \doteq \frac{n-2}{2} A Y^n \sigma_{MS}^n L_M \dots\dots\dots (8)$$

(8)式はセラミックスの静疲労寿命が負荷応力 σ_{MS} と初期き裂長さ a_i によつて支配されていることを表している。

統計的性質を考慮した寿命分布は、(8)式を(6)式に

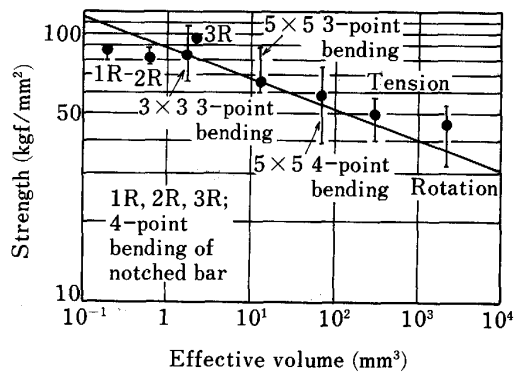


Fig. 3. Dependence of strength on effective volume in hot-pressed silicon nitride⁸⁾.

代入することにより得られる。

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \doteq \frac{m}{n} L_M + m \ln \sigma_{MS} + \ln C_1 \quad (9)$$

$$\left(C_1 = V_e \left\{ \frac{(n-2)}{2} A \right\}^{\frac{m}{n}} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_0} \right)^m \right)$$

(9)式によれば、ある σ_{MS} での寿命 L_M の分布は $\ln \ln (1/1-F) - \ln L_M$ 図表上において勾配 (m/n) の一本の直線で表され、さらに異なる σ_{MS} に対しても同じ勾配をもつ直線で表される (Fig. 4). Fig. 4 に示した図表は、ある応力 σ_{MS} に対応する直線が得られれば、任意の応力に対して上記直線を平行移動することにより得られる。例えば、 σ_{MS} と σ'_{MS} に対応する直線の間隔は (9)式から容易に計算でき、 $\ln L$ 軸に沿って $n \ln (\sigma_{MS} / \sigma'_{MS})$ である。この図表の利用例は以下のようである。すなわち、セラミック部品の使用応力 (σ''_{MS}) および使用時間を設定すれば、そのときの累積破壊確率 (F''') を知ることができる。また、使用時間と累積破壊確率を設定すれば、使用応力を決定できる。このような方法でセラミック部品の使用応力、使用時間 (寿命)、累積破壊確率の関係を容易に把握することができる。それゆえ、同図表はセラミック部品の設計、管理において有用であり、今後のセラミックスの構造用部品への適用

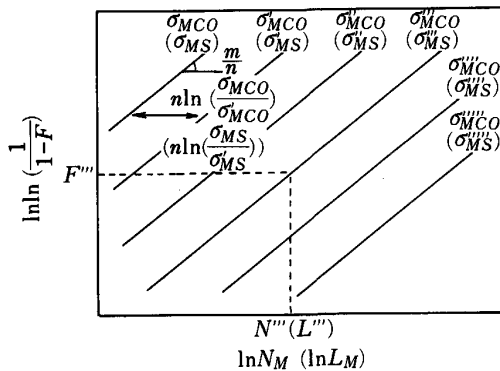


Fig. 4. Schematic Weibull distributions of static fatigue life L_M (cyclic fatigue life N_M).

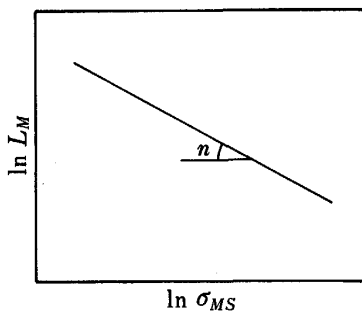


Fig. 5. Schematic representation of relation between static fatigue life L_M and stress σ_{MS} .

にとつて欠くことのできないものと考えられる。

(9)式において、 $F = F_0 (=一定)$ とすれば、次式が導かれる。

$$\ln L_M \doteq -n \ln \sigma_{MS} + \ln C_1' \quad (10)$$

$$\left(C_1' = \left\{ \frac{\ln(1/(1-F_0))}{C_1} \right\}^{\frac{n}{m}} \right)$$

(10)式は、 $\ln L_M$ と $\ln \sigma_{MS}$ の関係が勾配 ($-n$) の直線になることを表している (Fig. 5). n の値が既知ならば (10)式あるいは Fig. 5 を用いて、ある応力での寿命から異なる応力での寿命を容易に予測できる。ただし、(10)式が適用できるのは、寿命の平均値、中央値あるいは同じ累積破壊確率をもつ寿命に対してである。

繰返し応力 $\sigma_{MC}(t)$ が作用する場合の寿命も、上に述べたと同様な方法で導くことができる。すなわち、繰返し応力の最大値を σ_{MCO} とすると、 $\sigma_{MC}(t)$ をつぎのように表すことができる。

$$\sigma_{MC}(t) = \sigma_{MCO} g_0(t) \quad (11)$$

ここに、 $g_0(t)$ は最大値が 1 に規格化された同期 w の時間の関数である。(1), (6), (9)式から統計的性格を考慮した寿命分布がつぎのように与えられる。

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \doteq \frac{m}{n} \ln N_M + m \ln \sigma_{MCO} + \ln C_2 \quad (12)$$

$$\left(C_2 = V_e \left\{ \frac{(n-2)}{2} A \int_0^w g_0(t) dt \right\}^{\frac{m}{n}} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_0} \right)^m \right)$$

ここに、 N_M は寿命 (繰返し数) である。(12)式にて、 $F = F_0 (=一定)$ とすれば、 $\ln N_M$ と $\ln \sigma_{MCO}$ の間にはつぎの関係が成り立つ。

$$\ln N_M \doteq -n \ln \sigma_{MCO} + \ln C_2' \quad (13)$$

$$\left(C_2' = \left\{ \frac{\ln(1/(1-F_0))}{C_2} \right\}^{\frac{n}{m}} \right)$$

(12), (13)式は、静疲労寿命について導いた(9), (10)式と類似の形をしており、意味する内容もほぼ同じである。また、(13)式はセラミックスの疲労寿命も金属材料における S-N 曲線と同じ関係のあることを表している。一例として常圧焼結窒化珪素の回転曲げ疲労寿命¹¹⁾を Fig. 6 に示す。

2.1.3 熱応力が作用する場合の寿命

セラミックスに熱応力が作用する場合の寿命も、2.1.2 項で述べた機械的応力が作用する場合と同様な方法で導かれる⁹⁾。すなわち、セラミックスが材質も形状

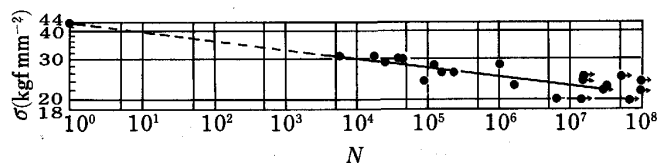


Fig. 6. Rotary bending fatigue life of sintered silicon nitride¹¹⁾.

も同一で、使用条件も温度差を除いて同じであるとき、セラミックスに作用する静的熱応力 σ_{TS} は、系の最低温度と最高温度の差 ΔT に比例する。すなわち、

$$\sigma_{TS} = k\Delta T \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 k は温度差 ΔT を熱応力に変換する常数である。

また、繰返し熱応力 $\sigma_{TC}(t)$ が作用する場合には、 $\sigma_{TC}(t)$ をつぎのように表して計算すればよい。

$$\sigma_{TC}(t) = k\Delta T f_0(t) = \sigma_{TO} f_0(t) \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 ΔT は熱衝撃温度差、 σ_{TO} は熱応力の最大値、 $f_0(t)$ は最大値が 1 に規格化された周期 w の時間の関数である。

(14)、(15)式を(1)式に代入し、さらに(3)式を用いることにより、統計的性格を考慮した寿命分布式が導かれる。静的な熱疲労寿命は次式で与えられる。

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \doteq \frac{m}{n} \ln L_T + m \ln \Delta T + \ln C_3 \dots\dots\dots (16)$$

$$\left(C_3 = V_e \left\{ \frac{(n-2)}{2} A k^n \right\}^{\frac{m}{n}} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_0} \right)^m \right)$$

ここに、 L_T は静的な熱疲労寿命 (時間) である。

また、繰返し熱疲労寿命に対しては、次式のように導かれる。

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \doteq \frac{m}{n} \ln N_T + m \ln \Delta T + \ln C_4 \dots\dots\dots (17)$$

$$\left(C_4 = V_e \left\{ \frac{(n-2)}{2} A k^n \int_0^w f_0^n(t) dt \right\}^{\frac{m}{n-2}} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_0} \right)^m \right)$$

ここに、 N_T は繰返し熱疲労寿命 (繰返し数) である。

(16)、(17)式によれば、 $\ln \ln (1/(1-F))$ と $\ln L_T$ (または $\ln N_T$) の関係は、機械的応力による疲労寿命の場合と同様に、勾配 m/n の直線で表される。また、温度差 ΔT と $\Delta T'$ に対応する直線間の $\ln L$ 軸に沿つての移動量は $n \ln (\Delta T/\Delta T')$ である。任意の ΔT に対する直線群からなる図表が得られれば、容易に寿命、温度差、累積破壊確率の関係を把握できる。

(16)、(17)式において $F = F_0$ (=一定) とすると、つぎの式がおのおの導かれる。

$$\ln L_T \doteq -n \ln \Delta T + \ln C_3' \dots\dots\dots (18)$$

$$\left(C_3' = \left\{ \frac{\ln \left(\frac{1}{1-F_0} \right)}{C_3} \right\}^{\frac{n}{m}} \right)$$

$$\ln N_T \doteq -n \ln \Delta T + \ln C_4' \dots\dots\dots (19)$$

$$\left(C_4' = \left\{ \frac{\ln \left(\frac{1}{1-F_0} \right)}{C_4} \right\}^{\frac{n}{m}} \right)$$

(18)、(19)式によれば、 $\ln L_T$ (または $\ln N_T$) と $\ln \Delta T$ の関係は勾配 $-n$ の直線で表される。それゆえ、ある温度差での寿命がわかれば、異なる温度差における寿命を容易に予測できる。

2・1・4 熱応力と機械的応力が重畳して作用する場合の寿命

セラミックスを高温構造用部品として使用する際、これらには熱応力だけではなく機械的応力も同時に負荷されることが多い。例えば、ディーゼルエンジン用副室には内外の温度差による熱応力と組付け、爆発などによる機械的応力が負荷される²⁾。また、セラミックロータには回転による遠心応力と温度差による熱応力が負荷される³⁾。それゆえ、寿命もこの両者を考慮して知る必要がある。

セラミックスに(15)式で表される繰返し熱応力 σ_{TC} と(11)式で表される繰返し機械的応力 σ_{MC} が作用する場合、(8)式はつぎのように書き換えられる。

$$a_i^{2-m/2} \doteq \frac{n-2}{2} A Y^n \int_0^{N_T w} (\sigma_{MC} + \sigma_{TC})^n dt \dots\dots\dots (20)$$

(20)式の右辺の $(\sigma_{MC} + \sigma_{TC})^n$ に二項定理を適用して、ある近似をすることにより熱疲労寿命分布が次式で与えられる¹²⁾。

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \doteq \frac{m}{n} \ln N_T + \frac{l m}{n} \ln \sigma_{MCO} + \frac{m(n-l)}{n} \ln \Delta T + \ln C_5 \dots\dots\dots (21)$$

$$\left(C_5 = V_e \left\{ \frac{(n-2)}{2} A (z \Delta l) k^{n-l} \int_0^w g_0^l f_0^{n-l} dt \right\}^{\frac{m}{n-2}} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_0} \right)^m \right)$$

ここに、 l はセラミックスに作用する熱応力と機械的応力の比で決まる常数であり、次式で与えられる。

$$\frac{l}{n-l} = \frac{\sigma_{MCO}}{\sigma_{TO}} = \frac{\sigma_{MCO}}{k\Delta T} \dots\dots\dots (22)$$

一連の熱疲労寿命のデータから n 、 l が決まれば、(22)式を用いて熱応力 σ_{TO} も推定できる。

(21)式は、 σ_{MCO} あるいは ΔT が一定の条件下で、 $\ln \ln (1/(1-F))$ と $\ln N_T$ の関係が勾配 m/n の直線となることを示している。さらに、その直線は異なる ΔT 、 σ_{MCO} に対して平行移動の関係にある。

(22)式において、 $\sigma_{MCO} = 0$ とすると $l = 0$ となる。これらを(21)式に代入して整理すると、2・1・3項で述べた熱応力だけが作用する場合の寿命分布式 ((17)式) と一致する。また $\Delta T = 0$ とすると $n = l$ となり、(21)式は機械的応力だけが作用する場合の寿命分布式 ((12)式) と一致する。それゆえ、(21)式はセラミックの寿命分布の基礎方程式と考えられる。

σ_{MCO} =一定で ΔT を変える場合、 ΔT =一定で σ_{MCO} を変える場合、寿命分布は(21)式から次式で与えられる。

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \doteq \frac{m}{n} \ln N_T + \frac{m(n-l)}{n} \ln \Delta T + \ln C_5 \dots\dots\dots (23)$$

$$(\sigma_{MCO} = \text{一定})(C_6 = C_5 \sigma_{MCO}^{lm/n})$$

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \doteq \frac{m}{n} \ln N_T + \frac{ml}{n} \ln \sigma_{MCO} + \ln C_7$$

..... (24)

$$(\Delta T = \text{一定})(C_7 = C_5 (\Delta T)^{\frac{m(n-l)}{n}})$$

(23)式は一定の機械的応力の下での異なる ΔT に対する寿命分布を、(24)式は一定の ΔT の下での異なる σ_{MCO} に対する寿命分布を与える。

Fig. 7 に、56 MPa の機械的曲げ応力を負荷したムライト棒の水中急冷による熱疲労寿命分布¹³⁾を示す。異なる ΔT に対する実測値はほぼ直線で表され、また勾配もほぼ等しく、(25)式を満足していることがわかる。

(23), (24)式において、 $F = F_0 (= \text{一定})$ とすることにより、寿命の平均値、中央値に対して成り立つべきの式が導かれる。

$$\ln N_T \doteq -(n-l) \ln \Delta T + \ln C_6' \quad \text{..... (25)}$$

$$(\sigma_{MCO} = \text{一定}) \left(C_6' = \left\{ \frac{\ln \left(\frac{1}{1-F_0} \right)}{C_6} \right\}^{\frac{n}{m}} \right)$$

$$\ln N_T \doteq -l \ln \sigma_{MCO} + C_7' \quad \text{..... (26)}$$

$$(\Delta T = \text{一定}) \left(C_7' = \left\{ \frac{\ln \left(\frac{1}{1-F_0} \right)}{C_7} \right\}^{\frac{n}{m}} \right)$$

(25)式によれば、 $\ln N_T$ と $\ln \Delta T$ の関係は、勾配 $-(n-l)$ の直線で表される。先に述べたように、熱応力だけが作用している場合の $\ln N_T$ と $\ln \Delta T$ の関係を表す直線の勾配は $-n$ であつた ((19)式)。熱応力に機械応力が重畳して負荷されることにより、 $\ln N_T \sim \ln \Delta T$ の関係を表す直線の勾配が $-(n-l)$ に増加することになる。また、(26)式は、 $\ln N_T$ と $\ln \sigma_{MCO}$ の関係が勾配 $-l$ の直線と与えられることを示している。

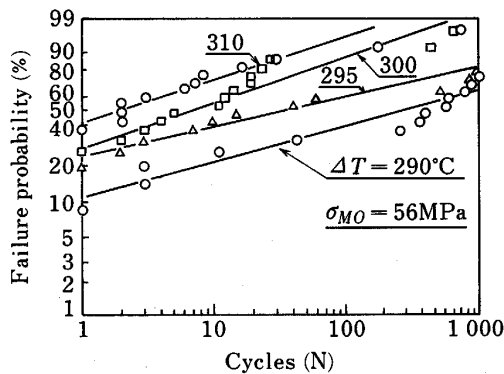


Fig. 7. Thermal fatigue life of mullite under a constant mechanical stress (56 MPa) for various thermal shock severity.

2.2 寿命予測の例

2.2.1 促進試験から予測する方法

2.1 節で述べたように、 $\ln \ln (1/(1-F))$ 軸と $\ln L$ (または $\ln N$ 軸) からなる図表上において、一本の寿命の分布を表す直線が与えられれば、異なる応力下での寿命はこの直線を所定量平行移動することにより予測できる。すなわち、まず、セラミック部品を使用時よりも厳しい応力条件下 (三水準以上が望ましい) で促進試験を実施して寿命を求める。これらの寿命を $\ln \ln (1/(1-F)) \sim \ln N$ (または $\ln L$) 図表にプロットして回帰直線を決定し、その直線の勾配から m/n を求める。また直線の間隔から n を求める。 n, m を用いて、使用応力に対応する直線までの移動量を計算し、使用時の寿命分布を表す直線を決定する。

この予測法の長所は、促進試験の環境が使用時のそれとほぼ同じであるため、 n, m, l などが正しく与えられ寿命予測の精度が高くなることである。一例として、ソーダ石灰シリカガラス棒の水中急冷による熱疲労寿命から決定した n, m, l を用いて、熱衝撃温度差の低い条件での熱疲労寿命の予測値¹²⁾を Fig. 8 に示す。

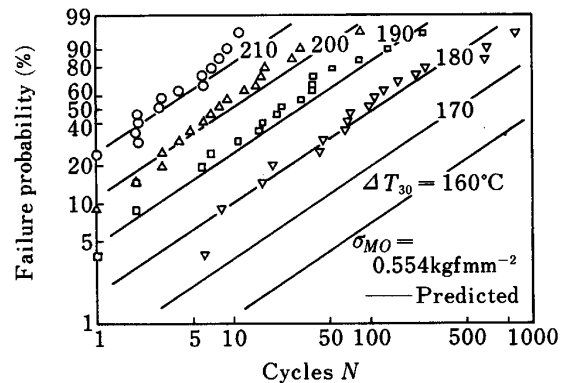


Fig. 8. Thermal fatigue life predicted from experimental in accelerated test for soda-lime-silica glass¹²⁾.

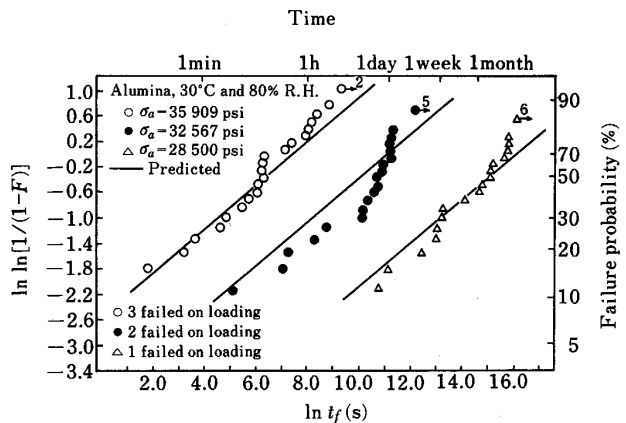


Fig. 9. Static fatigue life predicted from parameters of $n, A, m, \text{etc.}$ for alumina¹⁴⁾.

2.2.2 n, m, l, A, K_{IC}, V_e などのパラメーターから予測する方法

セラミックスの寿命は, n, m, l, A, K_{IC}, V_e などの常数と使用応力, 環境などの使用条件が決まれば, これらを 2.1 節で述べた式に代入して計算すれば求めることができる. 例えば, n は $K_I - V$ 曲線あるいは強度の負荷速度依存性から, m は試験片あるいは実部品の強度分布から決定できる. また, 使用応力は FEM による計算あるいは歪みゲージを用いることによつて決定できる.

RITTER ら¹⁴⁾によるアルミナの静疲労寿命についての予測値と実測値を Fig. 9 に示す. Fig. 9 から明らかなように, 予測値と実測値は良く一致しており, 寿命予測がかなり精度よくできることを示している.

ただし, n, m, A などの値は, 温度, 湿度, 負荷形式などに依存して変わることもある. それゆえ, 寿命予測に用いるパラメーターは, できる限り使用条件に近い状況で測定することが必要と考えられる.

3. 寿命保証試験

3.1 原理, 効果

セラミックスの強度, 寿命は, 先に述べたように, 統計的に広く分布している. それゆえ, セラミック部品を使用するとき, 特別な選別なしで用いると, 使用に耐え得ない部品がある割合で出現する. これを防ぐための選別手法の一つが, 寿命保証試験である. この方法では, セラミック部品の使用に先立つて, ある値の応力 (保証応力 $= \sigma_P$) を負荷し, 所要の強度, 寿命をもたない部品を破壊して取り除く.

寿命保証試験は, i) セラミックの破壊が, 潜在き裂が応力下で伝播して生ずる, ii) このき裂伝播が応力

拡大係数の関数となつている (Fig. 1), iii) き裂伝播速度が臨界応力拡大係数 ($= K_{IC}$) で急に大きくなる, の三点を利用することにより成り立っている.

上記 ii) の関数形を (1) 式のように仮定すると, 保証応力 σ_P は, 使用応力 σ_a で必要とされる寿命 (最小寿命) t_{min} に対し, つぎのようにとればよい.

$$\sigma_P \geq \left\{ \frac{(n-2)}{2} AY^2 K_{IC}^{n-2} \sigma_a^n t_{min} \right\}^{\frac{1}{n-2}} \dots \dots \dots (27)$$

上記 iii) の K_{IC} でのき裂伝播速度が無限大である場合には, (27) 式の等号を採用して計算した σ_P を負荷すれば, 寿命保証試験を通過したセラミックスはすべて, t_{min} より長いものばかりとなる.

(27) 式の計算をその都度行うのは面倒であるので, 通常 (27) 式の等号を採用して得られる σ_P を σ_a との比で表し, これと t_{min} との関係をプロットして利用する¹⁵⁾ (Fig. 10). この図表を利用することにより, 寿命の最小保証値を容易に設定しうる. 利用法を Fig. 10 で, $\sigma_a = 13 \text{ MPa}$, $t_{min} = 40$ 年の例 (磁器) について示す. 上記使用条件を満足させるために必要な保証応力と使用応力の比 (σ_P/σ_a) は, 2.5 であることが Fig. 10 から容易に推定される. すなわち, 33 MPa の保証応力で保証試験を実施して生き残つたセラミックスは, 使用応力 13 MPa で 40 年の寿命が保証されることになる.

また, 保証試験を通過したセラミックスは, 保証応力以上の強度をもつので, 強力なセラミックを選別するのにも有効である. その一例を窒化珪素¹⁶⁾について Fig. 11 に示す. 一方, 熱応力による保証試験によつて, 高い耐熱衝撃温度差をもつセラミックの選別も可能である. 一例をリーダ石灰シリカガラス¹⁷⁾について Fig. 12 に示す.

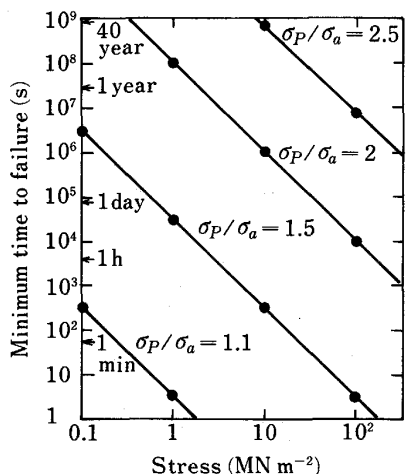


Fig. 10. Schematic representation of relation between minimum time-to-failure and applied stress for porcelain¹⁵⁾.

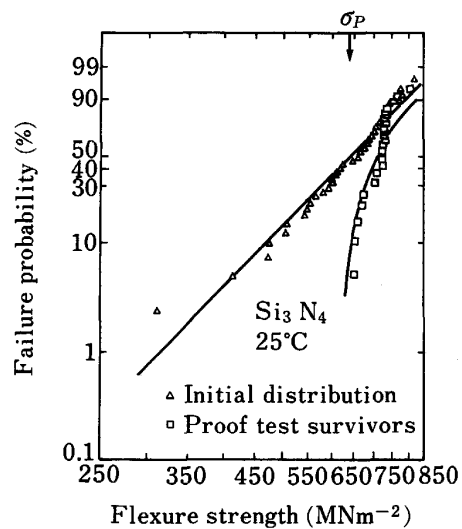


Fig. 11. Bending strength of silicon nitride before and after mechanical proof test¹⁶⁾.

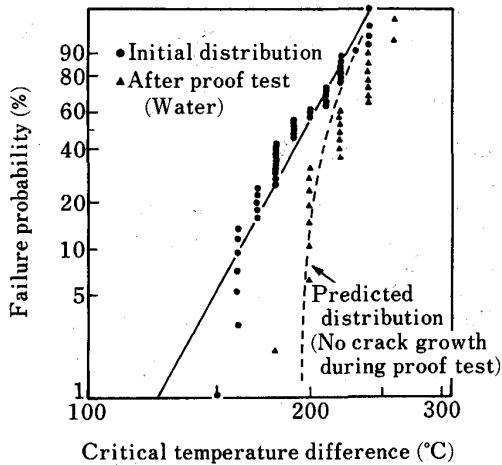


Fig. 12. Critical temperature difference of soda-lime-silica glass before and after thermal proof test¹⁷⁾.

3.2 保証試験実施に際して注意すべき点

3.2.1 保証試験実施時の環境

保証試験は、 K_{IC} でのき裂伝播速度が K_{IC} よりも低い K_I でのき裂伝播速度に比べて著しく大きいことに基礎を置いている。ガラス、アルミナ等のき裂伝播速度は湿度の影響を強く受け、高湿度下ではき裂伝播速度は速くなる。このため、保証応力の除荷中に、き裂の伝播する距離が長くなり、保証試験の効果が減少する。それゆえ、き裂伝播速度を速くする因子を取り除いた環境下、例えば、低湿度、低温の環境で実施することが必要である。

非酸化セラミックスは、高温にて酸化あるいは軟化するため、破壊原因あるいは強度分布が室温でのそれらとは異なることがある。そのため、室温で保証試験を実施したセラミックスを、高温下で使用すると、室温での保証試験の効果が無くなることもある。

3.2.2 保証応力の印加法

保証応力の印加時間および応力除荷時間は、できる限り短いことが望ましい。応力印加時間を短くすることは、保証試験での部品の破壊する割合を減少させる。また、除荷時間を短くすることは、保証試験を通過した部品の使用中破壊の確率を小さくする効果がある。除荷時間が長いと、除荷中のき裂成長によつて、寿命あるいは強度が低下して、保証試験がかえつて有害なものとなることがある。

リーダ石灰シリカガラスについて除荷速度が遅い保証試験を通過したガラスの曲げ強度の結果¹⁸⁾を Fig. 13 に示す。同図から、除荷速度が保証試験を通過したセラミックスの寿命、強度に大きな影響を与えることがわかる。

3.3 部品への適用

3.3.1 ターボチャージャロータ³⁾

セラミックターボチャージャロータには、回転による

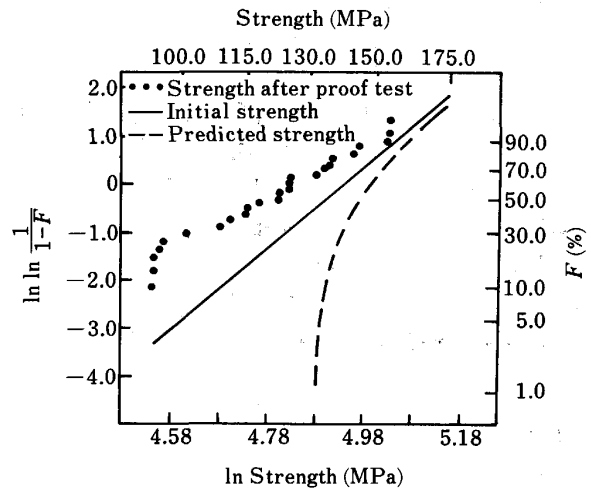


Fig. 13. Bending strength of soda-lime-silica glass before and after mechanical proof test. Unloading rate of proof stress was relatively slow¹⁸⁾.

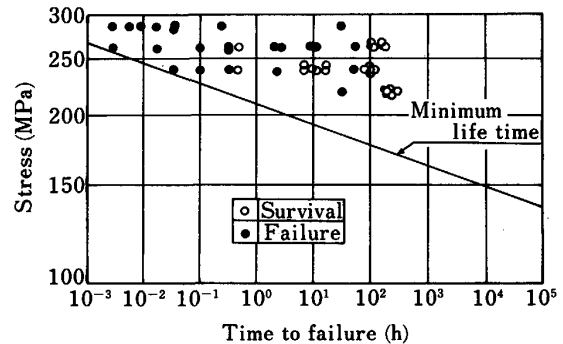


Fig. 14. Time-to-failure of ceramic rotor after proof test³⁾.

遠心応力と、高温の排気ガスに晒されることによる熱応力が負荷される。それゆえ、保証試験における保証応力は、両者の応力を考慮して決められている。保証応力と使用応力から予測した最小寿命と、保証試験を通過したセラミックロータの寿命の実測値を Fig. 14 に示す。実測値はすべて予測した最小寿命を上回っており、保証試験の有効性が確認されている。

3.3.2 ディーゼルエンジン用渦流室²⁾

セラミック渦流室には、渦流室内部と外周の温度差によつて生ずる熱応力、組付けによつて渦流室上端部に生ずる機械応力などが負荷される。熱応力に対しては、渦流室内部をバーナーで加熱すると同時に、渦流室外周を冷却して使用時に近い応力分布で、使用時より高い応力を負荷することにより保証試験が行われている。渦流室上端部に作用する熱応力に対しては、上端部に高応力が発生するように、渦流室内部に一様な圧力を印加して実施している。これにより、セラミック渦流室は、高い信

頼性を保持している。

4. お わ り に

セラミックスを安心して構造用部材に利用するには、まだ、確立すべき多数の技術があるように思われる。例えば、寿命予測の中ではき裂伝播特性などの諸特性に関する基礎データの蓄積、寿命保証試験においては応力負荷法の開発が必要と思われる。これらの基礎データの蓄積によつて、セラミックスの信頼性が高まり、構造用部品としての位置を確保していくことを確信している。

文 献

- 1) H. KAWAMURA and S. YAMAMOTO: SAE paper 830580 (1983)
- 2) S. KAMIYA, M. MURACHI, H. KAWAMOTO, S. KATO, S. KAWAKAMI and Y. SUZUKI: SAE paper 850523 (1985)
- 3) 渡辺重夫, 片山 薫, 松村良一: 日産技報, 21 (1985), p. 125
- 4) A. G. EVANS: J. Mater. Sci., 7 (1972), p. 1137
- 5) 岡村弘之: 線形破壊力学入門 (1976), p. 159 [培風館]
- 6) W. WEIBULL: J. Appl. Mech., 18 (1951), p. 293
- 7) 伊藤正治, 酒井清介, 伊藤 勝: 材料, 30 (1981), p. 1019
- 8) 松末勝利, 高原北雄, 橋本良作: 窯業協会誌, 90 (1982), p. 168
- 9) N. KAMIYA and O. KAMIGAITO: J. Mater. Sci., 14 (1979), p. 573
- 10) 上垣外修己: セラミックス, 12 (1977), p. 1040
- 11) H. N. KO: J. Mater. Sci. Let., 6 (1987), p. 175
- 12) N. KAMIYA and O. KAMIGAITO: J. Mater. Sci., 17 (1982), p. 3149
- 13) 神谷信雄, 上垣外修己: 窯業協会誌, 93 (1985), p. 275
- 14) J. E. RITTER and J. N. HUMENIK: J. Mater. Sci., 14 (1979), p. 626
- 15) A. G. EVANS and M. LINZER: J. Am. Ceram. Soc., 56 (1973), p. 575
- 16) S. M. WIEDERHORN and N. J. TIGHE: J. Mater. Sci., 19 (1978), p. 1781
- 17) N. KAMIYA and O. KAMIGAITO: J. Mater. Sci. (投稿中)
- 18) J. E. RITTER, P. B. OATES, E. R. FULLER and S. M. WIEDERHORN: J. Mater. Sci., 15 (1980), p. 2275