

1. はじめに

本研究は、圧電セラミックスであるPZTおよびBaTiO₃の静的圧縮・圧縮疲労特性ならびに疲労劣化過程に対する信頼性工学的考察を行なったものである。静的圧縮試験および圧縮疲労試験は、3種類の電氣的に異なる条件下（BaTiO₃は2種類）で実施した。さらに、圧電セラミックスの疲労劣化過程について信頼性工学的観点から、理論的モデル化を試み、実験値との比較により、理論モデルの妥当性を検討した。

2. 供試材

本研究に用いた圧電セラミックスは、市販のPZT（第3成分を含む）およびBaTiO₃である。試験片寸法は、PZTがφ5×10mmの円柱であり、BaTiO₃は5×5×10mmの角柱である。圧縮試験においては両端の平行度が特に重要であるため、両端面を平行になるように研磨した。

3. 実験方法

静的圧縮および圧縮疲労試験は、図1に示すように、電氣的絶縁条件下における分極試験片の圧縮、電氣的に短絡された条件下における分極試験片の圧縮および未分極試験片の圧縮の3種類の条件で行なった。ただし、BaTiO₃試験片については未分極試験片は用いなか

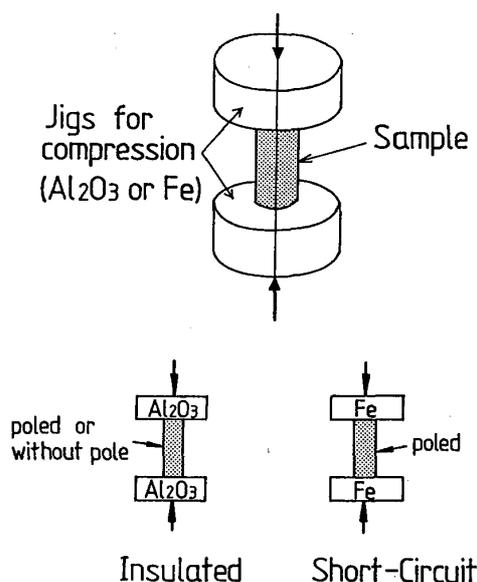


図1 静的圧縮および圧縮疲労試験

疲労試験は、電気油圧サーボ式疲労試験機を用い、応力比 R ($\sigma_{max}/\sigma_{min}$)を10で一定とし、繰返し速度30Hzの正弦波で行なった。

4. 実験結果および考察

4-1 PZTの疲労劣化過程

(1) 静的圧縮強度 図2は電氣的に異なる3種類の試験条件に対するPZT試験片の圧縮強度およびその分布を比較したものである。ワイブル確率紙上にデータをプロットし、ワイブル分布の母数推定を最小二乗推定法により実施した。2母数ワイブル分布に基づく理論分布を図中実線で示している。全体的に極めて直線性がよく、傾きが大きいことからデータのばらつきは小さい。アルミナ治具間における分極および未分極試験片の圧縮強度は、ほぼ同一線上に乗っており、強度およびその分布には両条件間の差異は認められない。また推定された分極試験片の形状母数は、32.37と非常に大きい。一方、鉄治具間（短絡）における分極試験片の圧縮強度は、アルミナ治具間よりも低く、また分布直線の傾きが小さい（形状母数19.60）ことから、データのばらつきも大きくなっている。しかしながら、セラミックスの強度データとしてはそれほど大きなばらつきではない。

(2) 圧縮疲労特性 図3に3種類の試験条件に対するPZT試験片の疲労試験結果を示す。疲労試験結果においても、分極および未分極試験片のアルミナ治具間における疲労寿命曲線にはほとんど差がみられないが、長寿命域になると分極試験片の方が疲労寿命は長くなる傾向がみられる。また分極試験片の鉄治具間に

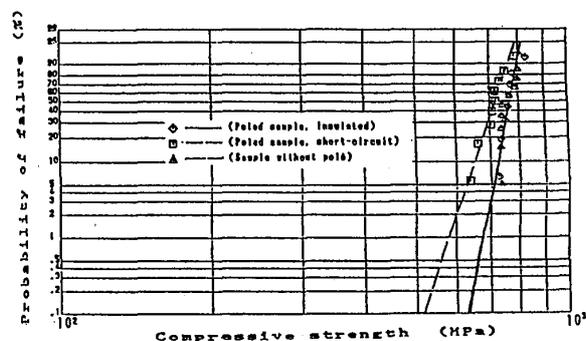


図2 PZTの圧縮強度分布

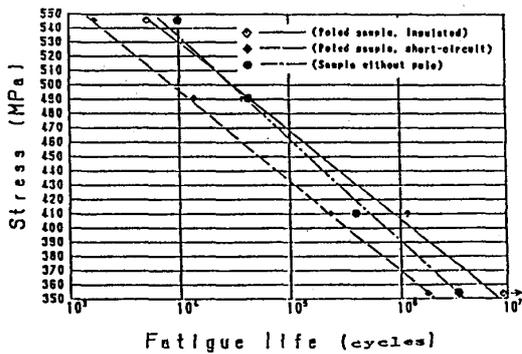


図3 PZTのS-N線図

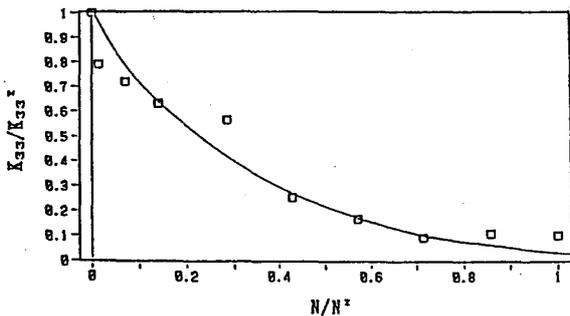


図4 圧電定数 k_{33} の疲労劣化過程

おける疲労試験結果は、静的圧縮強度の場合と同様、アルミナ治具間よりも疲労寿命は明らかに短くなることを示している。SEMによる破面観察の結果、未分極試験片の破壊は粒内破壊であるのに対し、アルミナ治具間における分極試験片の破壊は粒界破壊が支配的であることが確認された。

アルミナ治具間における分極PZTの疲労試験中の圧電定数の変化を測定した結果、疲労S-N線図における応力レベルの範囲では、繰返し直後に共振周波数は消滅することが判明した。そこで $\sigma_{min}=150\text{MPa}$ という機械的には疲労しない応力で繰返しを加えた後、繰返し数の増大に伴う圧電定数の変化を測定した。その結果、図4に示すように結合係数 k_{33} は疲労繰返し数の増大につれ指数関数的に低下することが明らかとなった。

(3) 残留強度劣化過程の理論的モデル化 材料の初期静強度や疲労寿命は言うに及ばず、ある時点における残留強度もまた、画一的に決定できる類のものではなく、変動性を有するものであるから、これらは確率変数として取り扱わなければならない。本稿ではこれらをゴシック体で表わすこととする。

さて、応力繰返しに伴う残留強度劣化過程は、残留強度の減少していく割合が繰返し数の小さい場合（言い換えると残留強度が大きいとき）ほど大きいものと考え、次式の形をとるものと仮定する。

$$\frac{dR(n)}{dn} = -f(s) \cdot R(n) \quad (1)$$

ここで、 $f(s)$ は負荷応力の関数である。式(1)を繰返し数 n_0 から n_1 まで積分すると、

$$\ln R(n_1) - \ln R(n_0) = -f(s)(n_1 - n_0) \quad (2)$$

もしくは、

$$R(n_1) = R(n_0) \exp[-f(s)(n_1 - n_0)] \quad (3)$$

となる。さらに、 $n_0 \equiv 0$ 、 $n_1 \equiv n$ においてこれを一般化すれば、

$$R(n) = R(0) \exp[-f(s) \cdot n] \quad (4)$$

と書き表される。すなわち、この関係式は、繰返し応力 s を n 回受けたときの残留強度 $R(n)$ は、材料の初期静強度 $R(0)$ から、繰返し数の増加と共に指数関数的に減少していくことを表わすものである。

さてここで、材料の初期静強度 $R(0)$ が2母数ワイブル分布に従うものと仮定する。このとき $R(0)$ の分布関数は、

$$\begin{aligned} F_{R(0)}(\sigma) &= P[R(0) \leq \sigma] \\ &= 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\beta}\right)^\alpha\right] \end{aligned} \quad (5)$$

で与えられる。一定応力レベル s の応力を繰返しうける場合、それを n 回うけたときの残留強度を $R(n)$ とすると、 $R(n)$ の分布は式(4)の結果を援用し、以下のようを求めることができる。

$$\begin{aligned} F_{R(n)}(\sigma) &= P[R(n) \leq \sigma] \\ &= P[R(0) \exp[-f(s)n] \leq \sigma] \\ &= P[R(0) \leq \sigma \cdot \exp[f(s)n]] \\ &= F_{R(0)}(\sigma \cdot \exp[f(s)n]) \\ &= 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma \cdot \exp[f(s)n]}{\beta}\right)^\alpha\right] \\ &= 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\beta^*(s)}\right)^\alpha\right] \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、

$$\beta^*(s) = \beta \cdot \exp[-f(s)n] \quad (7)$$

すなわち $R(n)$ の統計的分布は初期静強度と同じ形状母数 α をもち、尺度母数 $\beta^*(s)$ が式(7)で与えられる2母数ワイブル分布に従うことがわかる。なお、 $n=0$ のときには式(7)において $\beta^*(s) = \beta \cdot e^0 = \beta$ となつて、応力レベルには無関係に $R(0)$ の分布に帰着する。

(4) 理論モデルの実験的検証 信頼性工学のS-Rモデルの概念によれば、疲労試験中に破断しなかった材料の残留強度は、それまでにうけた繰返し応力値よりも大きいことが明らかである。圧縮繰返し最小応力が478MPaのときの残留強度劣化過程の実験結果と、S-Rモデルの概念を考慮した理論予測値との比較を図5に示す。また繰返し数比が0.2における残留強度分布の実験データと理論値との比較を図6に示す。残

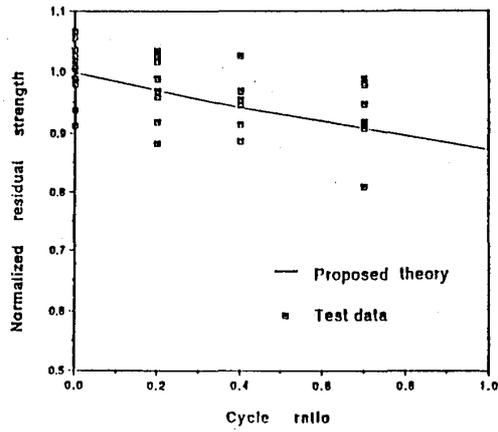


図5 PZTの残留強度劣化過程の実験値と理論値の比較

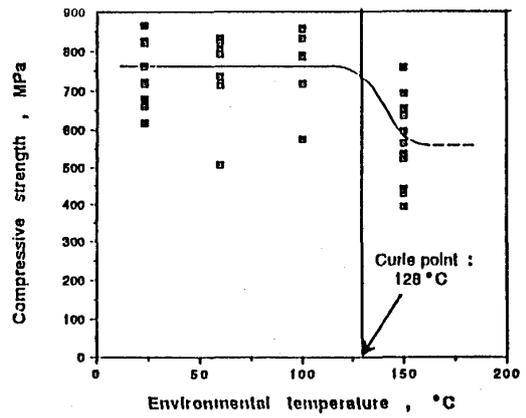


図7 BaTiO₃の圧縮強度に及ぼす雰囲気温度の影響

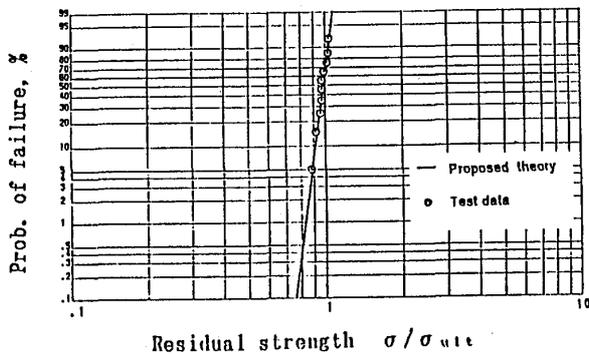


図6 PZTの残留強度分布の実験値と理論値の比較 ($\sigma_{min} = 478\text{MPa}$, $n/N = 0.2$)

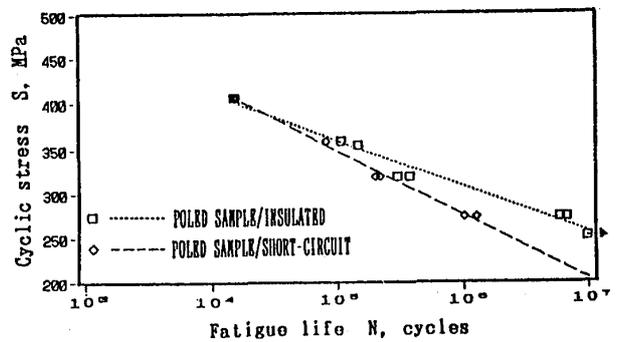


図8 BaTiO₃のS-N線図

留強度劣化過程および統計的分布特性とも、極めて良い一致がみられ、理論モデルの有効性が確認できる。

4-2 BaTiO₃の機械的特性

(1) 温度変化による相転移の影響 本研究で用いたBaTiO₃のキュリー点は128℃である。キュリー点前後で結晶構造は、正方晶から立方晶へ変化する。焼成後の冷却中に、キュリー点において立方晶から正方晶へと変換し、相変換や寸法変化により内部応力が生じると考えられる。そこで静的圧縮強度に及ぼす雰囲気温度の影響について検討した。図7に圧縮強度と雰囲気温度の関係を示す。キュリー点以下の温度では、温度が変化しても圧縮強度はほぼ一定の値を示す。しかしながらキュリー点以上の温度では、圧縮強度は大きく低下する。このような相違は、相転移により生じた内部応力の影響であると考えられる。

(2) 圧縮疲労試験 図8に2種類の電氣的に異なる条件下(絶縁と短絡)における疲労試験の結果を示す。図中の破線は実験データを最小二乗法により近似したものである。PZTの圧縮疲労試験結果と同様に、

低応力レベルにおいて絶縁状態の方が短絡状態に比べ、疲労寿命は長くなる傾向を示す。すなわち、BaTiO₃においても絶縁状態の方がより高い耐疲労性を有する。

5. おわりに

本研究では、圧電セラミックスであるPZTおよびBaTiO₃の静的圧縮特性、圧縮疲労特性ならびに疲労劣化過程に対する信頼性工学的考察を行なった。その結果、分極した試験片においては、電氣的に絶縁した状態の方が、耐疲労性は高いことが明らかとなった。また本稿で提案した残留強度劣化過程に対する理論モデルは、実験値と良い一致を示し、その有効性が認められた。さらにBaTiO₃の機械的特性は、雰囲気温度の変化による相転移の影響を大きく受け、静的圧縮強度はキュリー点前後で大きく変化することが明らかとなった。