101 圧電セラミックスに対する損傷発展式の定式化

Formulation of Evolution Equation of Damage Variable for Piezoelectric Ceramics

○学 本多 祥徳（名大院） 正 水野 衛（秋田県大）
加藤 弘志（小松製作所）

Yoshinori HONDA, Nagoya University, Chikusa-ku, Nagoya

Mamoru MIZUNO, Akita Prefectural University, Honjo-shi, Akita

Hiroyuki KATO, Komatsu.Ltd

Key words: Damage Mechanics, Piezoelectric Ceramics, Fatigue, Damage evolution law, PZT

1. 緒 言

圧電セラミックスは、機械的エネルギーを電氣的エネルギーに変換する正圧電効果や電氣的エネルギーを機械的エネルギーに変換する逆圧電効果を利用し、センサーやアクチュエーターに広く利用されている。しかし、機械的・電氣的繰返し負荷によって疲労損傷や疲労破壊が生じることから、その疲労寿命予測が必要となる。

例えば、代表的な圧電セラミックスである $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ (PZT) セラミックスは、金属酸化物 (PbO , ZrO_2 , TiO_2) の粉末を焼結して作られており、材料内には細孔が存在する。この PZT セラミックスに電界を加えたとき、材料の内部では細孔から多くの微小き裂が発生しているのが観察されている⁽¹⁾。また、PZT セラミックスに分極と反対方向の電界を加えると、電極付近で分域反転(domain switching)が生じ始め、その分域壁(domain wall)で高い応力集中が生じる。そのため、電極付近で微小き裂が発生し、大きなき裂へと発展することが明らかとなっている⁽²⁾。

このように、PZT セラミックスに機械的負荷や電氣的負荷を繰返し加えると、材料内部で細孔や分域壁の交差するところから微小き裂が生成・成長するため、材料内部が損傷状態にあり、これらの微小き裂が成長し、最終的な破壊に至る。

そこで本研究では、PZT セラミックス内に分布した微小き裂を連続体損傷力学における内部損傷と考え、その内部の損傷を表現するため損傷変数を導入し、PZT セラミックスに対する損傷発展式の定式化を行う。

2. 損傷発展式の定式化

圧電セラミックスの圧電特性を考慮した圧電構成式は、熱力学的ポテンシャルから求めることができ⁽³⁾、一般に式(1)のように表される。

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} - e_{mj} E_m \\ D_i = e_{ikl} \varepsilon_{kl} + a_{im} E_m \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 σ_{ij} は応力、 ε_{kl} はひずみ、 E_m は電界、 D_i は電束密度を表す。また、 C_{ijkl} は弾性係数、 e_{mj} は圧電定数、 a_{im} は誘電率である。

ここで圧電セラミックスの分極方向を正の方向とする。すなわち、分極方向と同じ方向にかかる外部電界を正の電界、反対方向にかかる外部電界を負の電界とし、PZT セラミックスに対する損傷変数 ω の発展式を次のように定式化する。

$$\frac{d\omega}{dt} = A \left[\frac{\alpha \sigma' + (1-\alpha) \sigma^{EQ} + \beta |D_{\max} - D_{\min}| + \gamma (-D_{\min})}{1-\omega} \right]^k \quad (2)$$

ここで、 σ' は最大主応力、 σ^{EQ} は相当応力、 $D_{\max}$ は最大電束密度、 $D_{\min}$ は最小電束密度であり、 $A, k, \alpha, \beta, \gamma$ は材料定数である。

一般に、セラミックスは圧縮やせん断強度に比べて引張強度が非常に弱いことから、応力状態による損傷の発達の違いを表現するために、式(2)の第1項、第2項のように損傷基準応力を最大主応力 σ' と相当応力 σ^{EQ} の線形和で表した。

圧電セラミックスは、電界と変形が線形関係を保つような低い電界で使用されるが、繰返し負荷を受けているうちに、内部に微小き裂が生じる。このき裂先端近傍では、電界が集中し分域反転が生じ、応力集中の原因となる^{(3), (4)}。また、圧電セラミックスに外部電界を加えると分域壁付近で内部応力が生じる⁽⁵⁾。これらの電界の効果を考慮し、損傷発展式(2)の第3項、第4項を定式化した。特に第4項は、Makino ら⁽⁶⁾が示した PZT セラミックスに正の外部電界を加えたときに発生する内部応力より負の外部電界を加えたときに発生する内部応力のほうが大きいという知見に基づき、分極と反対方向の負の電界を加えたときに発生する内部応力の効果を表す。

3. 疲労寿命予測結果

新たに定式化した損傷発展式(2)による疲労寿命予測の精度を検討する目的から、式(2)を用いたシミュレーション結果と Makino らの実験結果⁽³⁾との比較を行った。

Makino ら⁽³⁾は PZT セラミックスに機械的負荷と交流電界を同時に加える4点曲げ疲労試験を行っており、機械的負荷は応力比が $\sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0.1$ 、周波数 $f=350\text{Hz}$ とし、交

流電界もそれと同調するように $f=350\text{Hz}$ である。機械的負荷、電界とも $\sin$ 波で与えており、交流電界は、(最大+1.0MV/m, 最小0.0MV/m), (最大+0.75MV/m, 最小-0.25MV/m), (最大+0.5MV/m, 最小-0.5MV/m)の3種類の電界である。これにより monopolar(+1.0 $\leftrightarrow$ 0.0MV/m)と bipolar(+0.5 $\leftrightarrow$ -0.5MV/m)の違いが疲労寿命に及ぼす影響が検討されている。その結果、電界の大きさは monopolar より小さいが正と負の電界を交互に加えている bipolar のほうが疲労寿命が短くなることが示されている (Fig. 2 参照)。

シミュレーションに用いた損傷発展式(2)中の材料定数は、Makino ら⁽³⁾の4点曲げ疲労試験と Tanimoto ら⁽⁷⁾圧縮疲労試験より決定し、以下の値を用いた。

$$A = 4.0 \times 10^{-102}, k = 50.6 \quad (3)$$

$$\alpha = 0.83, \beta = 1.0 \times 10^7, \gamma = 3.0 \times 10^9$$

このときの機械的負荷による損傷の発展の様子を Fig. 1 に示す。Fig. 1 からわかるように、サイクル中は損傷がほとんど発達せず寿命末期に損傷が急激に発達しており、脆性材料であるセラミックスの特徴をよく表している。

また、疲労寿命の計算値と実験値との比較を Fig. 2 に示す。Fig. 2 からわかるように、シミュレーション結果では monopolar の電界をかけた場合(■印)は機械的負荷だけを加えたとき(●印)より疲労寿命が短くなる実験結果を予測できている。さらに、分極と反対方向の負の電界を加えたときに発生する内部応力の効果を損傷発展式に組み込むことによって、bipolar の電界を加えた場合(◆印)に monopolar の電界を加えたとき(■印)よりさらに疲労寿命が短くなる傾向も表現できている。

また、(最大+1.0MV/m, 最小0.0MV/m)の交流電界を加えた場合(■印)の実験データを線形近似した直線の傾きは、機械的負荷のみ加えた場合(●印)とほぼ同じ傾きになっており、シミュレーション結果も実験と同じ傾きの疲労寿命を予測している。しかし、(最大+0.5MV/m, 最小-0.5MV/m)の交流電界を加えた場合(◆印)は、実験では機械的負荷をかけた場合の傾きより小さくなっているが、シミュレーション結果では、ほぼ同じ傾きで疲労寿命が短くなっている。これはPZTセラミックスの内部損傷による圧電定数などの材料定数の変化を圧電構成式(1)で考慮していないためであり、材料定数に損傷変数 ω の効果を導入することで、この傾向の違いを表現できると考えられる。

参考文献

- (1)Z. Wang, Q. Jiang, G.S. White and A.K. Richardson, "Processing flaws in PZT transducer rings", Smart Mater. Struct., 7, pp. 867-73, 1998
- (2)D. Wang and G.P. Carman, "Combined electrical and mechanical fatigue of piezoelectric ceramics undergoing polarization switching for large displacement actuation", Smart struct. mater., 3329, pp. 210-221, 1998
- (3)H. Mkino, N. Kamiya, "Electromechanical Fatigue of Lead Zirconate Titanate Ceramics", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 37, pp. 5301-5305, 1998

- (4)K.D. McHenry, B.G. Koepke, "ELECTRIC FIELD EFFECTS ON SUBCRITICAL CRACK GROWTH IN PZT", Fracture Mech. Ceramics, 5, pp. 337-352, 1978
- (5)Y. Fotinich and G. P. Carman, "Modeling of Polarization Switching in Piezoceramics", SIPE Vol. 3323(1998), pp. 96-108
- (6)H. Mkino, N. Kamiya, "Effects of dc Electric Field on Mechanical Properties of Piezoelectric Ceramics", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 33, pp. 5323-5327, 1994
- (7)T. Tanimoto, T. Yamamoto, "MECHANICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF PIEZOELECTRIC CERAMICS UNDER REPEATED COMPRESSION FATIGUE TESTS", 1990 IEEE 7th International Symposium on Applications of Ferroelectrics
- (8)浜野健也, ファインセラミックスハンドブック, 朝倉書店

Fig. 1 損傷の発展の様子

Fig. 2 4点曲げ疲労試験の実験値と計算値との比較