

圧電セラミックスの繰返し電界によるき裂進展挙動

Crack propagation behavior of piezoelectric ceramics under cyclic electric field

知能機械システム工学コース

機能的材料工学研究室 1205030 有藤 太亮

1. 緒言

圧電セラミックスは、機械的エネルギーと電気的エネルギーの相互変換が可能な材料でセンサ、アクチュエータに広く使用されている。中でも PZT(チタン酸ジルコン酸鉛)は、圧電定数、キュリー温度が高く、温度特性も安定しており、圧電セラミックスの代表的な材料である。

PZT 分極材に繰返し電界が負荷される場合、材料中にき裂が発生したり、これが進展したりすることが知られている。脆性材料である圧電セラミックスでは、微小な欠陥からのき裂進展が致命的な破壊につながるため、その挙動を定量的に把握しておくことが重要である。これまでに研究室では、切欠きを有する PZT 分極材に正弦波状の繰返し電界を負荷した時、切欠き底より発生するき裂の進展挙動について調査を行った。その結果、繰返し電界の大きさによって進展挙動が大きく異なることが分かった。これは、電界が大きくなると材料内部で分極反転が生じ、これがき裂進展に影響を及ぼすためであった。

本研究では実際の圧電アクチュエータ駆動時に負荷されることが多い矩形波状や台形波状の繰返し電界を負荷した時のき裂進展挙動を調査し、正弦波における結果と比較した。また PZT と圧電特性の異なる PNN-PZT(ニッケル酸ニオブ酸-チタン酸ジルコン酸鉛)についても調査し、PZT との比較を行った。

2. 材料及び実験方法

2.1 材料

実験には、日本セラテック社製の PZT 分極材(5×5mm)と自作の PNN-PZT 分極材(5×5mm)を用いた。表 1 に材料特性を示す。ダイヤモンドカッターにより板厚中央にスリットを入れ、剃刀、研磨剤を用いて長さ約 2mm の切欠きを導入し試験片とした。また、側面を鏡面状に加工し、この面でき裂長さの測定を行った。

2.2 実験方法

き裂進展試験として、シリコンオイルで満たした油槽中に浸漬した試験片に信号発生装置からの信号を高電圧高速電力増幅器により増幅させ、電圧を印加した。き裂進展試験の状態を図 1 に模式的に示す。繰返し電界の条件を表 2 に、また 3 種の波形条件を図 2 に示す。平均電界は 0V/mm、周波数は 5Hz とした。また PZT、矩形波、±500V/mm では図 2 の破線のようにデューティ比(正電界と負電界の負荷時間の比)3:1 の条件でも実験を行った。き裂長さは金属顕微鏡を用い、進展に応じて適宜定めた時間間隔で測定した。き裂進展速度は、繰返し電界 1 サイクル当たりのき裂長さの増分と定めた。48 時間電界を負荷した後もき裂進展が確認されなければき裂が停留したとみなし、実験を打ち切った。

Table 1 Properties of materials

	PZT	PNN-PZT
Piezoelectric constant d_{33} [pC/N]	797	606
Dielectric constant ϵ_{33}	4661	6243
Coercive field E_c [V/mm]	808	809
Remanant polarization P_r [C/m ²]	0.705	0.566

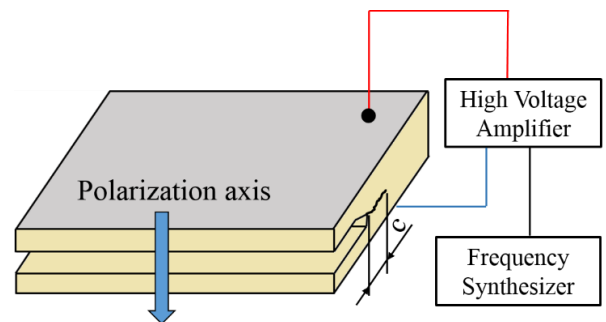


Fig. 1 Schematic illustration of crack growth test

Table 2 Experimental conditions

materials	Electric field [V/mm]	
PZT	Square	±700
		±600
		±500
		±400
		±300
PNN-PZT	Sine	±1000
		±900
		±800
		±600
		±400
PNN-PZT	Square	±600
		±500

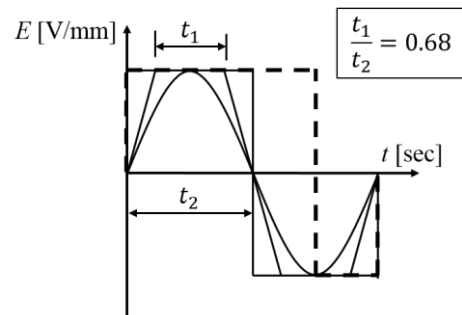


Fig. 2 Wave forms of electric field

3. 実験結果及び考察

3.1 波形の影響

PZT に矩形波及び台形波状の繰返し電界を負荷すると、正

弦波電界と同様にいずれの条件下でも切欠き底にき裂が発生し、その後進展を開始した。図3にき裂進展に対し、波形の影響が顕著であった ± 600 V/mm及び ± 500 V/mmの電界を負荷した時のき裂長さ c と電界負荷繰返し数 N の関係を示す。図中の矢印は、き裂がある程度進展した後に停留したことを表している。図3より、 ± 600 V/mmにおける結果を同じ繰返し数で比較すると正弦波、台形波、矩形波の順にき裂進展量が増加している。これより同じ最大電界であっても、1サイクル中で最大電界が負荷される時間が長いほど進展量が多くなることがわかる。本材料の抗電界は約800 V/mmであったが、き裂先端部など電界が集中する領域ではこれより低い負荷電界でも部分的に分極反転が生じる可能性がある。正弦波電界の ± 500 V/mm以下ではき裂進展量が極めて少ないことをあわせて考えると、比較的高い電界の負荷される時間がき裂先端の部分的な分極反転に影響を及ぼし、大きな繰返し応力が生じ、き裂進展を助長させたと考える。一方、デューティ比を変えた実験では1サイクル中で負の電界下におかれる時間が短く、反転が十分に進行していないため、若干き裂進展が抑制されたと考えられる。さらに、矩形波電界の ± 600 V/mmでは部分的な短絡により急激なき裂進展が生じた。この短絡は電界の急激な変化により生じたと考える。

図4に ± 600 V/mm及び ± 500 V/mmにおけるき裂進展速度 dc/dN とき裂長さ c の関係を示す。正弦波電界の場合、進展開始直後は進展速度が大きく進展と共に急激に低下した。しかし、矩形波電界の場合、進展速度が低下した後 10^{-10} m/cycle程度の進展速度でき裂が進展する挙動が見られた。このことは電界の大きさ、デューティ比の違いによる大きな差異はなかった。

3.2 材料の影響

PNN-PZTに正弦波及び矩形波状の繰返し電界を負荷した時のき裂の進展挙動はPZTと異なった。正弦波電界を負荷した場合、PZTは ± 400 V/mm以上でき裂が発生、進展したがPNN-PZTでは低い電界ではき裂が発生せず、 ± 1000 V/mm及び ± 900 V/mmの条件でのみき裂が発生、進展した。また、この条件下で複数回実験を行ったがき裂の発生、進展が生じたのは一回のみであった。矩形波電界を負荷した場合は、複数回の実験全てでき裂が発生し、その後進展を開始した。図5に矩形波電界の ± 600 V/mm及び ± 500 V/mmを負荷した時の二つの材料のき裂長さ c と電界負荷繰返し数 N の関係を示す。PNN-PZTはどちらの電界でもき裂の発生が遅く、 ± 600 V/mmではPNN-PZTの方が停留時のき裂長さが著しく短くなった。

本実験において実験終了後、分極方向を調査するとPNN-PZTの多くは全体的な分極反転が生じていたが、最もき裂が進展した矩形波電界の ± 500 V/mmでは全体的な分極反転は生じていなかった。このことから最もき裂の進展挙動には分極反転が大きく影響しており、部分的な分極反転がき裂進展を助長すると考える。

4. 結論

- (1) PZT分極材に矩形波状の繰返し電界を負荷した時、正弦波と比較して分極反転が生じやすくなり、小さな繰返し電界下でもき裂進展速度が速くなり、そのばらつきも大きくなる。 ± 500 V/mm以上でその傾向が著しくなる。
- (2) 矩形波電界を負荷する時、デューティ比がき裂進展挙動に影響する。負の電界が負荷される時間が減少するとき裂進展量が減少する。
- (3) PNN-PZT分極材に正弦波及び矩形波状の繰返し電界を負荷した時、PZT分極材と比較してき裂の発生、進展が生じにくく、矩形波電界の ± 600 V/mmでは停留時のき裂長

さは著しく短い。

- (4) 繰返し電界負荷によるき裂進展挙動には、分極反転が影響し、全体的な分極反転が生じる場合き裂の発生、進展が生じにくい。

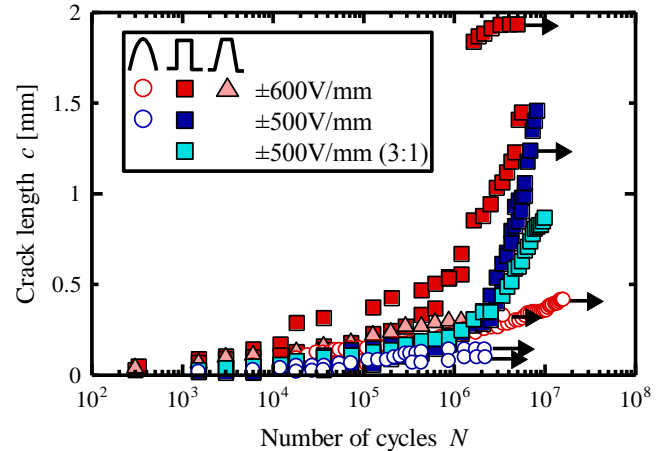


Fig. 3 Relationship between c and N of PZT

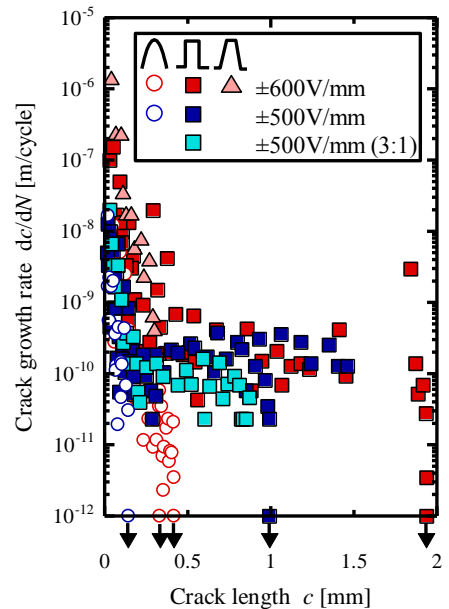


Fig. 4 Relationship between dc/dN and c of PZT

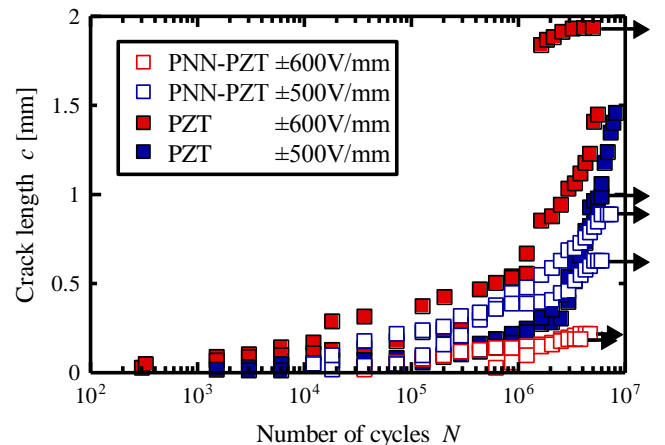


Fig. 5 Relationship between c and N of PNN-PZT and PZT

(文献省略)