

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月22日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560105

研究課題名（和文） 圧電セラミックスの電界誘起損傷メカニズムの解明

研究課題名（英文） Study on Electric-Induced Damage in Piezoelectric Ceramics

研究代表者

楠川 量啓（KUSUKAWA KAZUHIRO）

高知工科大学・工学部・教授

研究者番号：60195435

研究成果の概要（和文）：チタン酸ジルコン酸鉛分極材における、部分電極の縁に存在する微小き裂の繰返し電界負荷に伴う進展挙動を調査した。電界の繰返し負荷直後より、き裂は進展を開始するが、その後進展速度を低下させながら最終的に停留き裂に至ることがわかった。繰返し電界幅および温度・湿度環境がき裂進展挙動および停留き裂長さに影響を及ぼすことを示した。

研究成果の概要（英文）：Small crack growth behavior in poled lead zirconate titanate was investigated under cyclic electric loadings. The crack located at partial electrode edge grew along the boundary of electrode during the loading. The crack growth rate decreased with increasing crack length and non-propagating crack was reached. The growth rate and crack length of non-propagating crack were affected by amplitude of the electric loadings and environmental temperature and humidity.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料工学

キーワード：圧電セラミックス、部分電極、き裂進展、繰返し電界、環境

1. 研究開始当初の背景

（1）種々のエネルギー間の相互変換が可能な材料は知能材料としての応用が期待されている。これらの中で圧電材料は比較的効率の高い機械－電気エネルギー変換機能を有することから、各種知能化システムへの応用に関する研究が盛んに行われている。

（2）圧電材料を応用したシステムの実用化に向けては長期使用における信頼性の確保が重要である。

（3）圧電材料は長期使用中に機械的負荷に

加えて電界などの電氣的負荷を繰返し受けるため、このような環境下での損傷、劣化挙動を明らかにしておくことが重要である。

2. 研究の目的

本研究では、上記背景に鑑み、繰返し電界負荷による圧電セラミックスの疲労・損傷挙動を調査する。具体的に対象とするのは、もっとも典型的な圧電セラミックスであるチタン酸ジルコン酸鉛（PZT）で、材料中の電気弾性場が集中する部分において微小き裂

の電界誘起進展挙動，ならびにこれに及ぼす使用環境の影響を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 圧電特性劣化挙動：

①材料および試験片

厚さ 1 mm の市販の PZT 分極材から 5×5 mm の正方形板を加工し，正極側表面の中央部幅 2 mm の部分電極を有する試験片を準備。試験片の概略を図 1 に示した。

②電界負荷

上記部分電極と裏面全面電極間に正弦波状交流電圧をかけた。周波数は 200, 400 および 500 Hz の 3 種類，電圧幅は±400 および±500V の 2 種類，およびこれにバイアス電圧+400 および−400V を重畳させた条件とした。

③静電容量，圧電定数変化の測定

交流電圧を負荷しながら，適当な時間間隔で試験片の静電容量 C_p ，誘電損失 D および圧電定数 d_{33} をそれぞれ LCR メータおよび d_{33} メータにより測定した。電圧負荷開始前の値からの変化割合を求め，これら特性の劣化挙動を調べた。

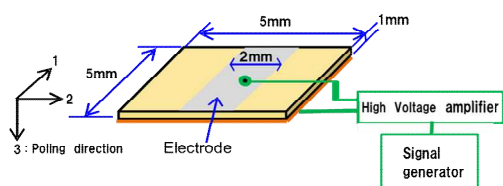


図 1 圧電特性劣化試験における試験片

(2) き裂進展試験：

①材料および試験片

項目 (1) における試験片と同じ形状のものを準備し，正極側表面の 1/2 部分のみ電極を付けた。試験片中央，部分電極の縁に沿ってビッカース圧子を圧入し微小予き裂を導入した。

②電界負荷

400Hz の正弦波状交流電圧を±200 から±600V の範囲で変えて負荷した。一部，正および負のバイアス電圧を重畳させた片振り交流電圧の条件も採用した。

③き裂長さ測定

交流電圧を負荷しながら，適当な時間間隔

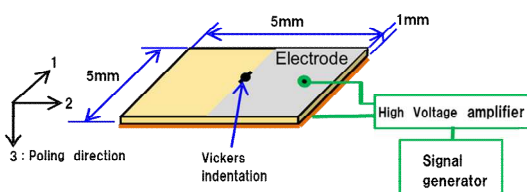


図 2 き裂進展試験における試験片

ごとに光学顕微鏡を用いて表面でのき裂長さを測定し，単位時間当たりのき裂長さ増分をき裂進展速度として定義し，これを評価した。試験環境として恒温恒湿器を用いて，温度 20℃ および 40℃，相対湿度を 40%，60% および 80% の各条件に制御して実験を行った。

(3) 電界による部分電極縁き裂の変形解析

図 3 に示すような，電極縁に表面き裂を有する圧電材料をモデル化し，有限要素法により部分電極に正および負の電圧を負荷した時のき裂付近の変形状態を解析した。

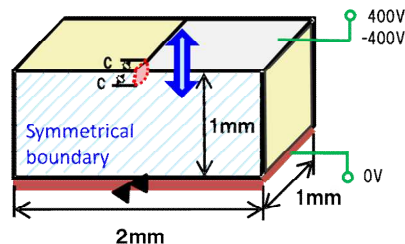


図 3 有限要素解析モデル

4. 研究成果

(1) 繰返し電圧負荷による特性変化

±400V の交流電圧を負荷した時の圧電定数 d_{33} の変化に及ぼす周波数の影響を図 4 に示す。縦軸に d_{33} の試験前の値 $d_{33,0}$ で標準化した値を，横軸に電圧繰返し数をとっている。500Hz の場合， d_{33} の変化はほとんど見られないが，周波数が低くなると電圧負荷の繰返しに伴い値が低下することが分かった。400Hz で 8 時間の負荷後に表面を光学顕微鏡により観察した結果，電極境界に沿って結晶粒が欠落した跡が見られ，電気弾性場の集中により機械的損傷も生じていることがわかった。しかしながら静電容量および誘電損失に関しては，いずれの周波数においてもその変化は確認できなかった。

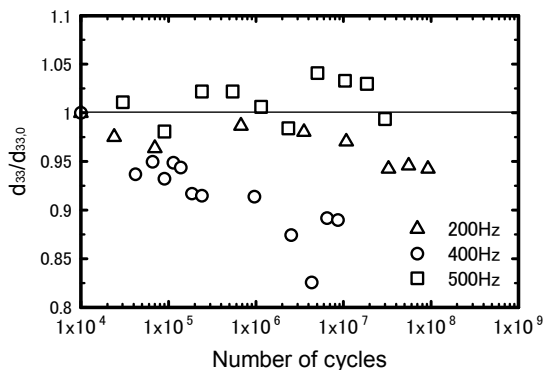


図 4 繰返し電圧負荷に伴う圧電定数 d_{33} の変化に及ぼす周波数の影響

(2) き裂進展挙動

±400V および ±600V の交流電圧を負荷した時の部分電極縁における微小き裂の長さを測定した結果を図5に示す。電圧負荷開始直後よりき裂は進展し始めるが、その後き裂長さ増加割合は徐々に減少し、最終的に停留き裂に至ることがわかった。き裂の進展速度 dc/dt を求め、き裂長さ $2c$ に対してプロットした結果を図6に示す。き裂進展挙動に及ぼす電圧幅の影響は顕著であり、±600V の場合 ±400V と比べて進展速度は増大し、値が大きくばらつくとともに停留き裂長さも2~3倍程度長くなった。また±200V においては、き裂は進展しなかった。

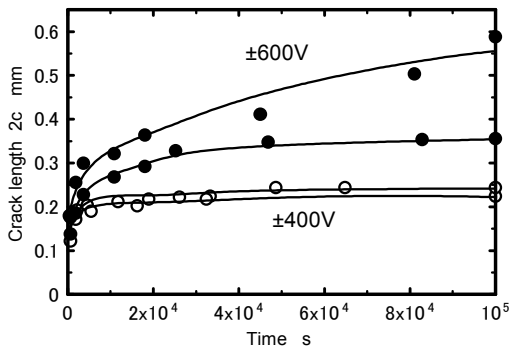


図5 電圧繰返し時間とき裂長さの関係

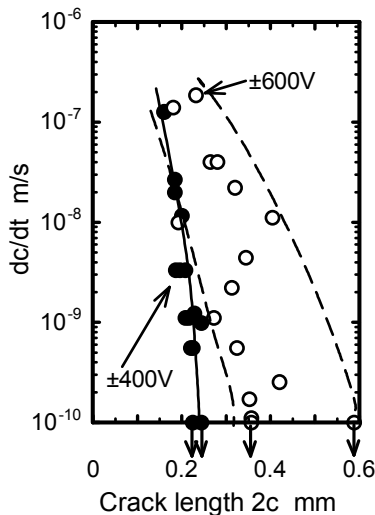


図6 き裂進展速度とき裂長さの関係に及ぼす電圧幅の影響

交流電圧に正および負の直流バイアスを重畳させ、片振りの電圧負荷した時の同様の $dc/dt-2c$ 関係を図7に示す。実線で示した ±400V における結果と比較すると、正のバイアスを与えた場合き裂進展挙動にあまり差異は見られなかったが、負のバイアスの場合、 dc/dt に大きなばらつきが見られた。交流を

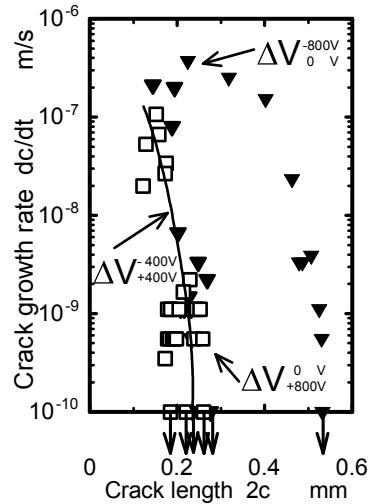


図7 き裂進展速度とき裂長さの関係に及ぼすバイアス電圧の影響

与えた場合の実際の変位振幅を測定することで、電圧幅が大きい場合および負のバイアスが重畳した場合の特異なき裂進展挙動が材料中に生じた分極反転によるものであることを明らかにした。

電圧負荷条件を ±400V 一定のもと、実験環境を相対湿度 40%、温度 20°C および 40°C と変化させたときの $dc/dt-2c$ 関係を図8に示す。温度が高い場合、き裂の進展速度が増加し、停留き裂の長さも長くなる。また温度 20°C および 40°C で湿度を変えたときの進展挙動を比較すると、20°C では湿度の影響は顕著でなかったが、40°C になると湿度の影響が顕著となり、高湿度環境において進展速度が増加し停留き裂長さも長くなる結果が得られた。

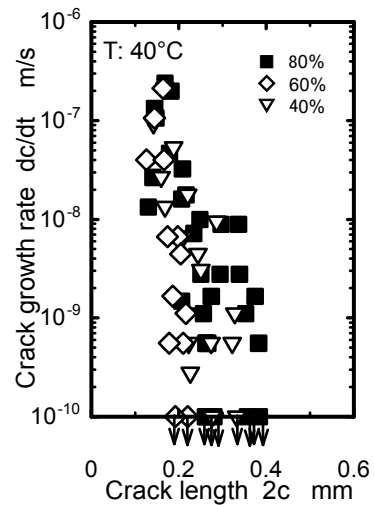


図8 き裂進展速度とき裂長さの関係に及ぼす湿度環境の影響

(3) き裂の電界誘起変形

半円状表面き裂を中央に有する 1×1 mm の圧電セラミックス部分電極材モデルに対する FEM 圧電解析により得られた、き裂先端位置を基準とするき裂縁の面外変位を図 9 に示す。本モデルでは、き裂を境界とする片側 $1/2$ 領域の表面を部分電極部としているが、この電極部に $+400V$ の電位を与えた場合 (分極と逆電界)、電極側のき裂縁では板厚が減少する方向に大きな面外変位が生じる。一方、逆の電位を与えると板厚が増加するような変形が生じるとともに、き裂面同士が接触するように変形するため、そこで摩擦力が作用し、結果としてき裂の両縁の相対変位は減少する。

種々のき裂長さおよびき裂面間の摩擦係数に対して解析を行い、面外相対変位から、面外モード応力拡大係数 K_{III} を評価した。その結果、 K_{III} にき裂長さ依存性は見られないものの、摩擦力が増加した場合、その値は顕著に低下することがわかった。すなわち、電極縁に存在するき裂が電界誘起変形による面外せん断モードで進展する場合、その進展に伴う破面間の拘束により停留き裂に至ることが明らかとなった。

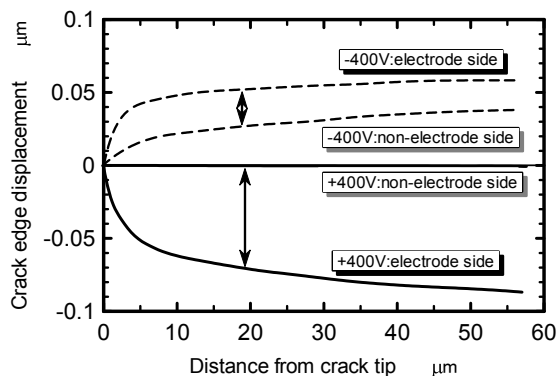


図 9 部分電極に電界を負荷した時のき裂先端を基準とするき裂縁の面外変位

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Kazuhiro Kusukawa, Electric-Field-Induced Crack Growth at Electrode Edge in Piezoelectric Ceramics, International Journal of Modern Physics: Conference Series, 査読有, Vol. 6, pp. 37-42 (2012) DOI No:10.1142/S2010194512002905

[学会発表] (計 4 件)

- ① 片山政輝, 楠川量啓, 高坂達郎, PZT 電

極縁微小き裂の電界誘起変形とき裂進展, 日本機械学会中国四国支部第 50 期総会・講演会, 2012. 3. 8, 広島

- ② 片山政輝, 楠川量啓, PZT 電極縁微小き裂の電界誘起変形とき裂進展, 日本材料学会四国支部第 9 回学術講演会, 2011. 6. 25, 徳島

- ③ 片山政輝, 楠川量啓, 高坂達郎, PZT 圧電セラミックスの部分電極部微小き裂進展におよぼす電界負荷の影響, 日本機械学会徳島講演会, 2010. 10. 16, 徳島

- ④ 耕地 猛, 楠川量啓, 静荷重下におけるバイモルフ素子 PZT のき裂伝ば挙動, 日本機械学会中国四国支部第 48 期総会・講演会, 2010. 3. 6, 広島

6. 研究組織

(1) 研究代表者

楠川 量啓 (KUSUKAWA KAZUHIRO)

高知工科大学・工学部・教授

研究者番号：60195435

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者