

平成 13 年度 卒業論文

PZT 圧電セラミックスの静疲労微小き裂伝ば挙動

高知工科大学工学部知能機械システム工学科

宝田 雅樹

目次

1 .	緒言	1
2 .	試験片及び実験方法	
2 - 1 .	試験片	2
2 - 2 .	実験方法	5
3 .	実験結果及び考察	8
4 .	結言	19
5 .	謝辞	19
6 .	参考文献	19
7 .	付録	20

1. 緒言

近年、世界的に「スマートストラクチャー」に関する研究が盛んに行われている。このスマートストラクチャーとは、構造部材にアクチュエータなどの機能を持つ材料を組み込んだり貼り付けたりする事によって、部材と一体化させこれらが機能的に完結した状態の構造を意味する。これを実用化するためには高性能で使用が容易なアクチュエータの開発が重要な課題である。アクチュエータとは、何らかの稼働エネルギーを機械的な変位もしくは応力に変換するトランスジューサを意味している。形式的には、空気圧式・油圧式・電気式・固体変位式など様々な形式のものがあるが、構造部材と一体化させることを要するスマートストラクチャーにおいては、固体変位型のアクチュエータが有望視されている。

固体変位型のアクチュエータについては現在、材料の形状記憶効果や磁歪効果・圧電効果・電歪効果・相転移現象を利用するものが知られている。この中で発生力が大きく応答性に優れ、制御回路と同じ電気による駆動が可能である観点から圧電及び電歪セラミック製アクチュエータがスマートストラクチャー用材料として有望視されている。

圧電セラミックス素材とは、チタン酸バリウム (BaTiO_3) に代表されるように、結晶構造中のイオン配列が非対称性を有する。このような結晶においては外部から機械的な圧力を加えて歪めると結晶表面に電荷が発生する。この現象は圧電気現象 (piezoelectricity) と呼ばれ、逆に電荷を印加すると形状が変化する現象を圧電気現象の逆現象と呼ばれ、これら二つの現象は総称して一般に圧電効果と呼ばれている。圧電現象を模式的に Fig.1 に示す。圧電セラミックアクチュエータは、主に結晶の圧電気現象の逆効果をアクチュエータ原理として利用しており、電気エネルギーを変位や応力などの機械エネルギーに直接変換することによって動作している。⁽¹⁾

圧電セラミックスは、任意の形状の製品を安価で量産可能であり、水晶に比べて圧電定数が圧倒的に大きい。そのため現在では単結晶でない不都合を生じる場合を除き、圧電センサーや超音波振動子、アクチュエータなどのデバイス材料として広範囲で利用されている。

圧電セラミックスについては、焼結したままの状態では結晶内の自発分極 (ドメイン) の方向がバラバラであることから圧電性は示さず、焼結体に 2 ~ 3 KV/mm 程度の非常に高い電界を短時間印加して分極の方向を揃えることによって初めて圧電素子として使用可能となる。この工程を分極処理と言う。結晶はドメインの集合体からなっている。

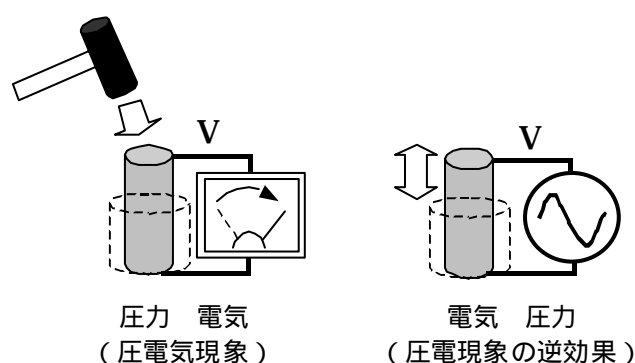


Fig.1 圧電効果

圧電セラミックス素材としては、 BaTiO_3 系、 $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ (PZT)系、PZT 三成分系、その他が知られているが、電気機械結合係数 (電気エネルギーと機械エネルギーの変換効率の目安) が大きく、通常の使用温度範囲において結晶が相転移しないという理由から、PZT 系と PZT 三成分系が圧倒的に用いられている。

PZT 圧電セラミックスは強誘電特性を示す鉛系の酸化物を高温で焼き固めたもので、一般に大きな比誘電

率と 300～400 程度の高いキュリー点を有している。キュリー点温度に達した物質は、結晶構造が変化し電氣的、機械的性質が急激に変化を起こす性質を持つ。

PZT 系圧電セラミックスをスマートストラクチャーとして使用した場合、この材料は機械的な負荷と電氣的な負荷の両方を受ける事になる。したがって、信頼性を確保するために不可欠な強度評価においては、従来の構造材料と異なり電気 機械の相互作用及び強度特性を考慮した評価が必要である。しかし、PZT 圧電セラミックスの使用上重要と思われる静疲労き裂伝ばに関してこれに及ぼす電界の影響を定量的に検討した報告が少ない。昨年度の卒業研究⁽²⁾では三点曲げによる PZT 圧電セラミックスの二次元貫通き裂の静疲労き裂伝ば速度に及ぼす正電界負荷の影響が調査された。本年度の研究では更の負電界の影響について調査し、さらにセラミックスの実際の使用で重要である微小表面き裂の静疲労き裂伝ば挙動についても実験を行い、これらを応力拡大係数と静疲労き裂伝ば速度の関係を用いて、静疲労き裂伝ば挙動に及ぼす電界負荷の影響を考察する。

2 . 試験片及び実験方法

2-1 . 試験片

本研究の実験に試験片は、市販の PZT 圧電セラミックス（フルウチ化学株式会社製）を用いた。（現在の圧電セラミックスの主流はこの PZT 系及び PZT 3 成分系である。）PZT に代表される圧電セラミックスは、モルフォトロピック相境界(Morphotropic Phase Boundary : MPB)組成が利用されている。それは MPB では結晶構造が可变的になり、その圧電特性が極大になるからである。この PZT 圧電セラミックスは正方晶系のチタン酸鉛 (PbTiO_3) と、斜方晶のジルコン酸鉛 (PbZrO_3) の固溶体である、 $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ 化合物を意味している。今回本実験で使用した PZT 圧電セラミックスのジルコン (Zr) とチタン (Ti) の原子比率は、52 : 48 で、0.3wt% のニオブ (Nb) を添加剤として加えられ、板厚方向に 2 . 5MV/m の電界をかけて分極処理を既に行われたものを使用した。分極材の主な材料特性を Table 1 に示す。

Table 1 試験片の材料特性

コンプライアンス [$10^{-12} \text{ m}^2 / \text{N}$]	$s_{33} = 15.5$
圧電ひずみ定数 [10^{-12} m/V]	$d_{33} = 240$ $d_{31} = 110$
電圧出力係数 [10^{-3} Vm/N]	$g_{33} = 24$ $g_{31} = 10$
電気機械結合定数	$k_{33} = 0.61$ $k_{31} = 0.28$
密度 [g/cm^3]	7.6

納入材は直径 42mm、厚さ 10mm の円柱形状のペレットである。それをダイヤモンドブレードカッターにより所定の寸法、形状（二次元貫通き裂は Fig.2 - 1、微小表面き裂は Fig.2 - 2 に示す）に切り出した。分極材は試験片長手方向を分極方向と一致させた。したがってき裂伝ば方向は分極方向に垂直な方向となる。また、き裂観察面はダイヤモンド研磨シートを 1500 番、2000 番、3000 番の順で使用し活性剤としてダイヤモンド

コンパウンド用薄め液 (LUBRICANT) を用いて研磨を行った。

研磨時に試験片上部に掛ける圧力に注意を要する。これは高圧力で研磨をした際、試験片表面から多数の箇所において粒子が剥がれ落ちる現象が確認されたためである。ダイヤモンド研磨シートによる研磨の後 $1\mu\text{m}$ のダイヤモンドペーストによりバフ仕上げを行った。

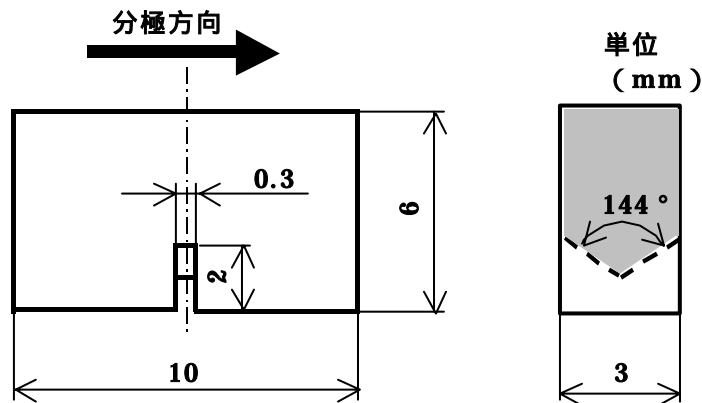


Fig.2 - 1 2次元貫通き裂の試験片の形状と寸法及び分極方向

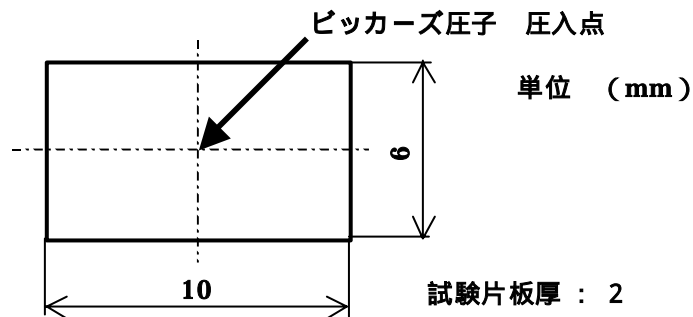


Fig.2 - 2 微小表面き裂の試験片の形状と寸法

二次元貫通き裂の試験片は、試験片研磨処理の事前に試験片中央部にシェブロンノッチを付けた。シェブロンノッチは伝ばするき裂前縁の長さが少しずつ大きくなるように工夫した切欠きである。これは、予き裂導入の際、き裂伝ば方向を揃えるためのものである。の伝ばの開始は三角形の頂点からであり、き裂が伝ばするにつれえその先端部は長くなるため、き裂が安定的に伝ばするのに適した形状である。

予き裂の導入は Fig.3 に模式的に示すように、試験片の一部に圧縮力を加えながらノッチにくさびを圧入する方法で行った。このための治具に試験片を取り付けこれを金属顕微鏡でモニターしながら行った。切欠き部を含めた予き裂寸法は $2.2\sim 2.8\text{mm}$ の範囲とした。

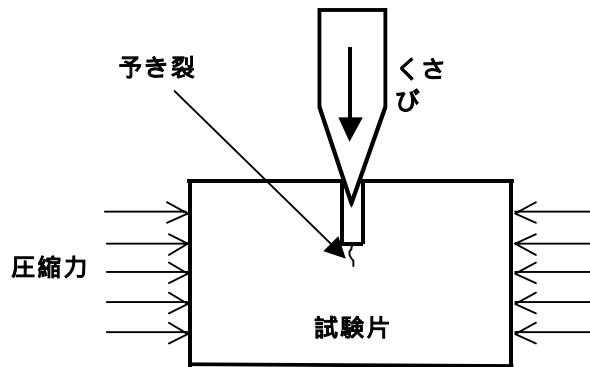


Fig.3 二次元貫通き裂試験片の予き裂導入の模式図

一方、微小表面き裂の試験片は試験片研磨処理の後、試験片にかかっていると考えられる残留応力を取り除くため、卓上マッフル炉（KDF P90）によって、200℃で1時間熱処理を行った。この際、炉の温度は200℃まで1時間かけゆっくと温度を増加させる。熱処理の後炉冷で冷却を行う。

熱処理後試験片中央部にビッカース圧子を圧入する。この時の負荷荷重は、9.8Nで一分間圧入とした。これは事前に0.98N・4.9N・9.8Nそれぞれ一分間圧入を行い、き裂の形状から9.8Nが適切であると判断したためである。微小表面き裂の模式図を Fig.4 - 1、微小表面き裂よき裂導入時の試験片き裂観察面の拡大図を Fig.4 - 2 に示す。

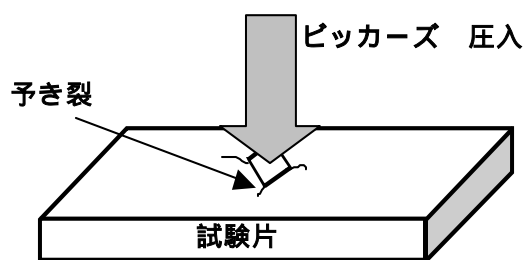


Fig.4 - 1 微小表面き裂の予き裂導入の模式図

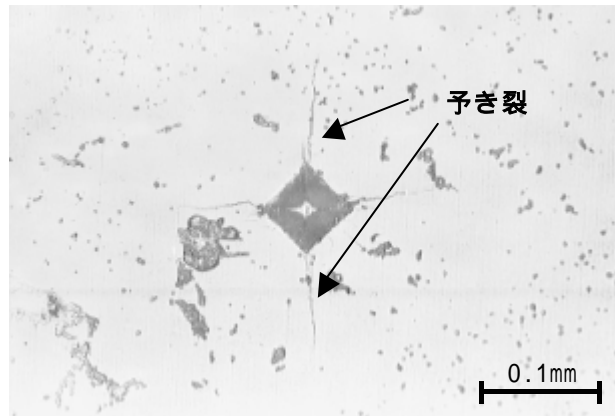


Fig.4 - 2 微小表面き裂よき裂導入時の試験片き裂観察面の拡大図

2 - 2 . 実験方法

2次元貫通き裂及び微小表面き裂の静疲労き裂伝ば試験は、両試験ともスパン 8 mm の三点曲げ負荷下で行った。試験機は自作のもので、てこを介しておもりにより一定荷重を試験片に負荷する。試験機全体の模式図を Fig.5 に示す。

試験機の三点曲げ支持負荷部は試験に合わせて改造を行った。2次元貫通き裂の三点曲げ支持負荷部の模式図を Fig. 6 - 1、微小表面き裂の三点曲げ支持負荷部の模式図を Fig. 6 - 2 に示す。二次元貫通き裂の三点曲げ支持負荷部は昨年度の卒業研究で使用されたものである。微小表面き裂の際の三点曲げ支持負荷部は今回新たに改良を行った。この三点曲げ支持負荷部の上部は、試験片との間に鋼球を取り付けることにより、試験片にかかる力が方当りとならないよう工夫し、バネは鋼球を介した上部との試験部が離脱することなく任意の角度をつけるためのもので、鋼球下にある空間はここからレプリカを採取するためのものである。試験片と接する支点はすべてムライトを使用した。微小表面き裂試験用三点曲げ支持負荷部の簡易図を Fig.7 に示す。

電界下の試験には高圧直流安定化電源（マクセレック製、定格 50kV、9mA）を用いて、分極方向（正電界）および逆方向（負電界）に 0.3MV/m をかけた状態で機械的な負荷をかけて行った。き裂長さの測定にはレプリカ法を用いた。レプリカ採取時には、無負荷状態とした。ローディングウエイトの荷重は任意の荷重からき裂の進行を観察しながら徐々に増加もしくは減少させ調整を行った。

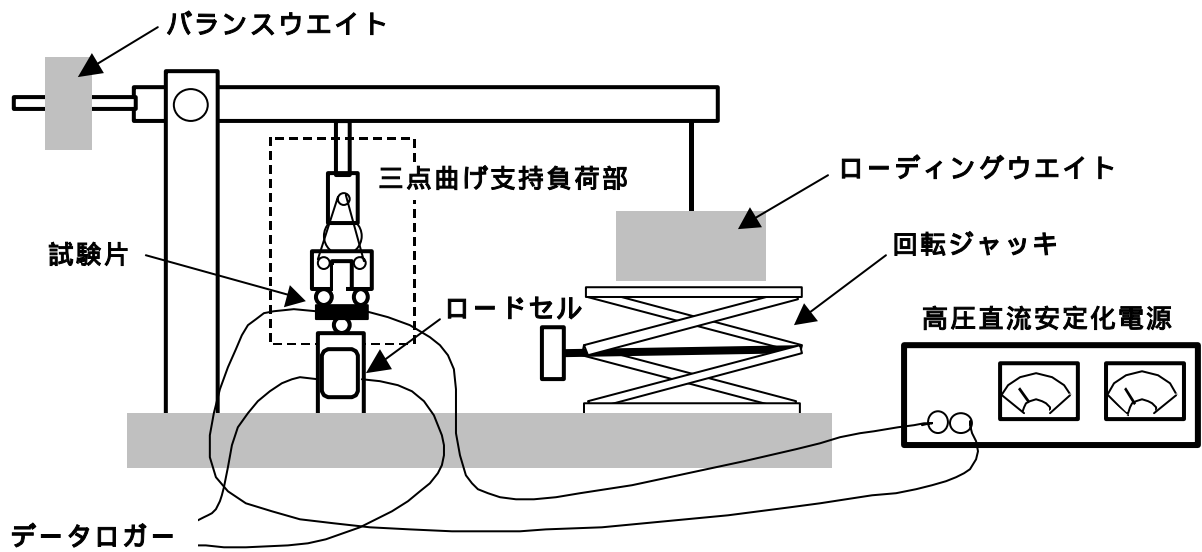


Fig.5 静疲労試験機の全体図（微小表面き裂伝ば試験）
 （三点曲げ支持負荷部は試験内容によって変更する。）

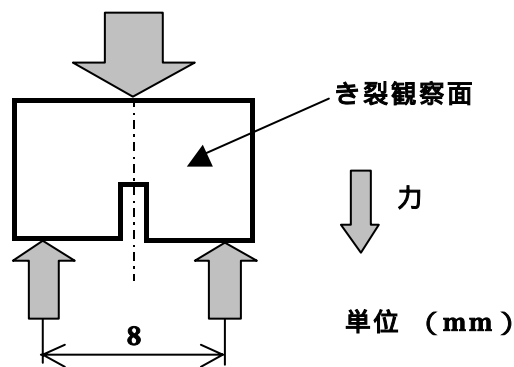


Fig.6 - 1 二次元貫通き裂の三点曲げ支持負荷部の前面から見た模式図

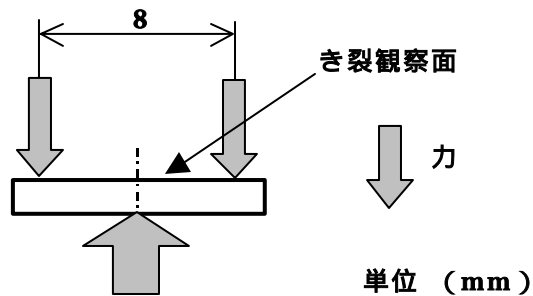


Fig.6 - 2 表面微小き裂の三点曲げ支持負荷部の前面から見た模式図

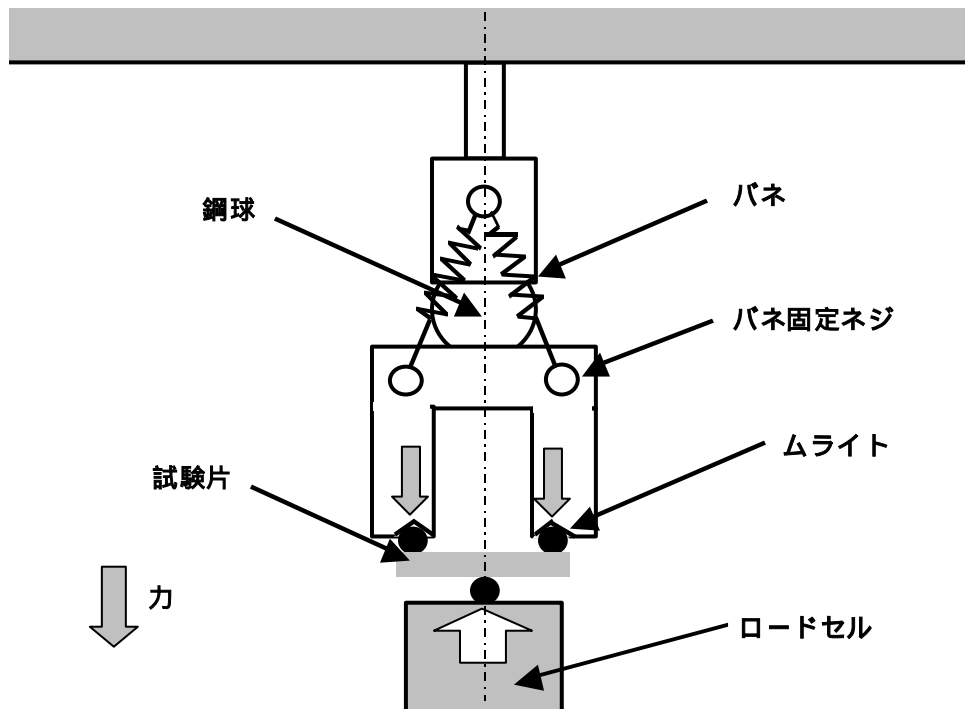


Fig.7 三点曲げ支持負荷部

本研究では静疲労き裂伝ば挙動に関して、二次元貫通き裂と微小表面き裂の二種類について調べた。二次元貫通き裂に関しては昨年度測定された電界負荷無し及び、正電界をかけた結果に新たに負電界における実験を行い昨年度のデータと比較した。表面微小き裂の研究については昨年度の二次元貫通き裂用に作られた、静疲労試験機を改造し使用した。

両き裂伝ば特性の評価には、応力拡大係数 (stress intensity factor) K と、き裂伝ば速度 (進行したき裂長さ / そのき裂が進行した時間) da/dt の関係として表した。

応力拡大係数は、き裂先端で考えた座標系に無関係なパラメータで、き裂近傍の応力場を一義的に記述でき、引張り応力 σ とき裂長さ a および材料の幾何学的条件によって決まる。⁽³⁾

応力拡大係数 K は (応力 $\times \sqrt{\text{き裂長さ}}$) で単位は $MPa\sqrt{m}$ となる。

$$K = F\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

二次元貫通き裂の際の応力拡大係数 K

応力拡大係数 K について、二次元貫通き裂の場合はき裂面変形様式 (mode of crack surface displacement) ではモード (開口モード, opening mode) となる。モード I の三点曲げ負荷による試験片の応力拡大係数 K は (2) 式より計算される。 S は試験片負荷部のスパン (mm)、 P は試験片への負荷荷重 (N)、 W は試験片のき裂観察面の短手方向長さ (mm)、 B は試験片厚さ (mm)、 a はき裂長さを示す。⁽⁴⁾

$$K = \frac{3 \cdot S \cdot P}{2 \cdot W^2 \cdot B} \sqrt{\pi a} \cdot F(\zeta) \quad (2)$$

$$\zeta = \frac{a}{W} \quad (3)$$

$$F(\zeta) = 1.09 - 1.735\zeta + 8.2\zeta^2 - 13.18\zeta^3 + 14.57\zeta^4 \quad (4)$$

微小表面き裂の際の応力拡大係数 K

微小表面き裂における応力拡大係数 K については二次元貫通き裂の場合の上記式 (2) とは異なり、式 (5) に示す式となる。 M_B^c (推定) は 1.06 とした。 σ_B は公称曲げ応力で、 a はき裂の深さ、 $E(k)$ は第二種完全楕円積分で式 (6) に示す。(4)

$$K = \frac{M_B^c \sigma_B \sqrt{\pi a}}{E(k)} \quad (5)$$

2c はき裂全体の長さで、 a/c は半楕円き裂としたときのアスペクト比である。

$$E(k) \cong \sqrt{1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65}} = \sqrt{1 + 1.464(1 - k^2)^{1.65/2}} \quad (6)$$

(0.1%以内)

本研究では a/c(アスペクト比)は 0.5 として計算を行った。

公称曲げ応力 σ_B は次の式 (7) で求まる。 M_0 は試験片にかかるモーメント、 t は試験片の厚さ、 2W は試験片の幅である。

$$\sigma_B = \frac{M_0 t}{2I} = \frac{3M_0}{Wt^2} \quad (7)$$

3 . 実験結果及び考察

実験によって得られた、二次元貫通き裂及び微小表面き裂における、き裂伝ば速度 da/dt と応力拡大係数 K の関係をそれぞれ Fig.8 ~ 15 に、各試験使用した試験片の寸法をそれぞれ Table 2 ~ 8 に示す。二次元貫通き裂の電界負荷無し及び電界 + 0.3MV/m時の実験データは複数の試験片において得られたものである。

図は両対数プロットとしたため、二次元貫通き裂及び微小表面き裂における、静疲労き裂伝ば速度 da/dt と応力拡大係数 K との関係は指数則で表すことが可能である。まず二次元貫通き裂の da/dt について、電界負荷の影響を見た Fig.11 から以下のことが分かる。同一の K で比較した場合、電界下での da/dt は電解無しにのそれに比べ加速する。また、この電界負荷の影響は極性にあまり依存せず、 $+0.3$ MV/m の電界下と -0.3 MV/m の電解下においては da/dt はほぼ差が見られない。一方微小表面き裂における、同様の比較 (Fig.15) においては、貫通き裂と同じような傾向にある。

二次元貫通き裂と微小表面き裂の結果 Fig.11 と Fig.15 を比較した場合、同ベクトル da/dt に対応する K の値は微小表面き裂の結果の方が二次元貫通き裂に比べ値が低くなった。微小表面き裂の K を算出するのにアスペクト比を一括 0.5 で一定の半楕円として計算を行っており、実際試験中の微小表面き裂の値 K は、き裂形状に敏感であり、アスペクト比は著しく変化している可能性があり、このことは K の算出に反映されておらず、今後の検討を要する。次に二次元貫通き裂と微小表面き裂の実験では試験片に作用する曲げモーメントがはたらく形状が異なり、試験片内部の応力勾配が同一条件ではないことも注目すべき点で、このことも Fig.11 と Fig.15 の結果の違いに現れたのではないかと考えられる。

正電界による強度低下の影響に関しては通常の破壊の場合にも多く見られる。Park ら⁽⁵⁾は CT 試験片を用いた分極方向に垂直なモード 破壊試験を行い、破壊荷重が正電界下で低下することを報告している。Tobin ら⁽⁶⁾の実験でも同様な結果が得られている。

静疲労においても負電界を受けたとき裂伝ば速度 da/dt が加速する結果が見られ、傾向は一致する。実験の際、試験片表面のき裂にも電界負荷無しの実験とは明らかな違いが見られた。電界負荷時のき裂を Fig.16 に示す。電解負荷をかけたとき図にあるように、試験片き裂観察面上のき裂近傍の結晶粒が欠損し微小な溝が形成されていた。この現象がき裂伝ば速度の加速と関連すると考えられるが、どの程度伝ば速度に影響を及ぼしたかどうかは現在のところ不明である。更に、ピッカ - ズ圧跡にも負電界負荷時は変化が見られた。負電界負荷時の圧跡を Fig.17 - 1、電界負荷無し時を Fig.17 - 2 に示す。図からも分るように、一定時間後で、負電界負荷時のピッカ - ズ圧跡には明らかに圧入時の圧跡とは違い、圧跡の周り結晶が欠落していることが観察できる。この結果に関しては通常の破壊で負の電界がき裂の伝ばを抑制するという文献に見られる実験結果とは異なる傾向にあり、静疲労での特徴と言える。本研究では PZT の電界下での静き裂伝ば挙動には表面微小き裂の方が電界の影響を受けやすいのではないかと考えられる。更に微小表面き裂実験の際、ピッカ - ズ圧跡からの予き裂ではない箇所からき裂が発生し、ピッカ - ズ圧跡から破壊を起こさないことが電界負荷を問わず多数発生したことから、このことについても今後、多くの実験を実施する必要がある。

いずれの場合も電界下における PZT のき裂伝ば挙動を力学的なパラメータである K のみで表現することは不可能で、圧電材料の特徴である電気 弾性の相互作用を考慮したパラメータの導入が必要であると考えられる。圧電セラミックスの破壊におけるクライテリオンとしてこの相互作用に基づくものがいくつか提案されている。例えば、Park ら⁽⁵⁾の機械的エネルギー開放率、Gao ら⁽⁷⁾の局所的エネルギー開放率あるいは Shen ら⁽⁸⁾のエネルギー密度クライテリオンなどがあるがいずれも静疲労き裂伝ばに直接適用することはできないようであり今後の検討が必要である。

Table.2 二次元貫通き裂 電界負荷無し試験片寸法

E = 0 MV/m (電界負荷無し)	W (mm)	B (mm)
	6.32	2.855
	5.98	3.4

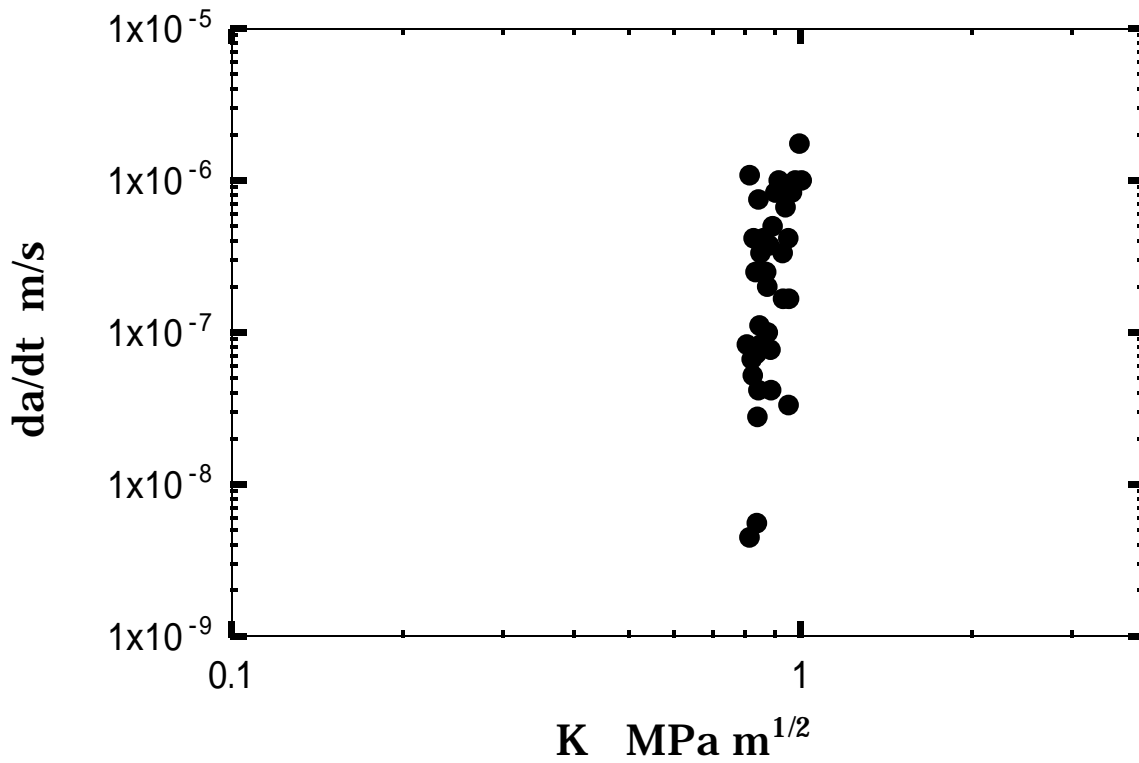


Fig. 8 二次元貫通き裂 電界負荷無しなき裂伝ば速度 da/dt と応力拡大係数 K の関係

Table.3 二次元貫通き裂 正電界負荷 0.3 MV/m の試験片寸法

E = +0.3 MV/m (正電界負荷)	W (mm)	B (mm)
	6.152	2.861
	6.175	3.185
	5.982	2.955

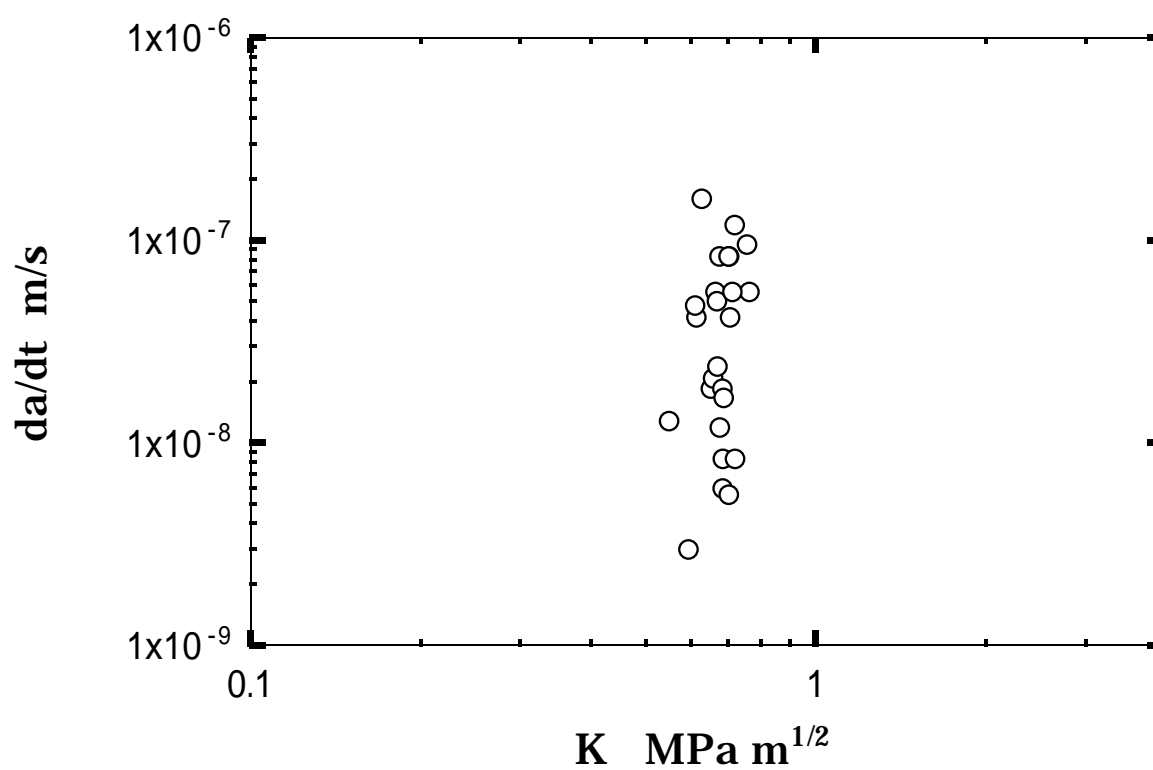


Fig. 9 二次元貫通き裂 正電界負荷 (+ 0.3 MV/m) 時のき裂伝ば速度 da/dt と応力拡大係数 K の関係

Table.4 二次元貫通き裂 負電界負荷 0.3 MV/m の試験片寸法

E = - 0.3 MV/m (負電界負荷)	W (mm)	B (mm)
	5.783	3.385

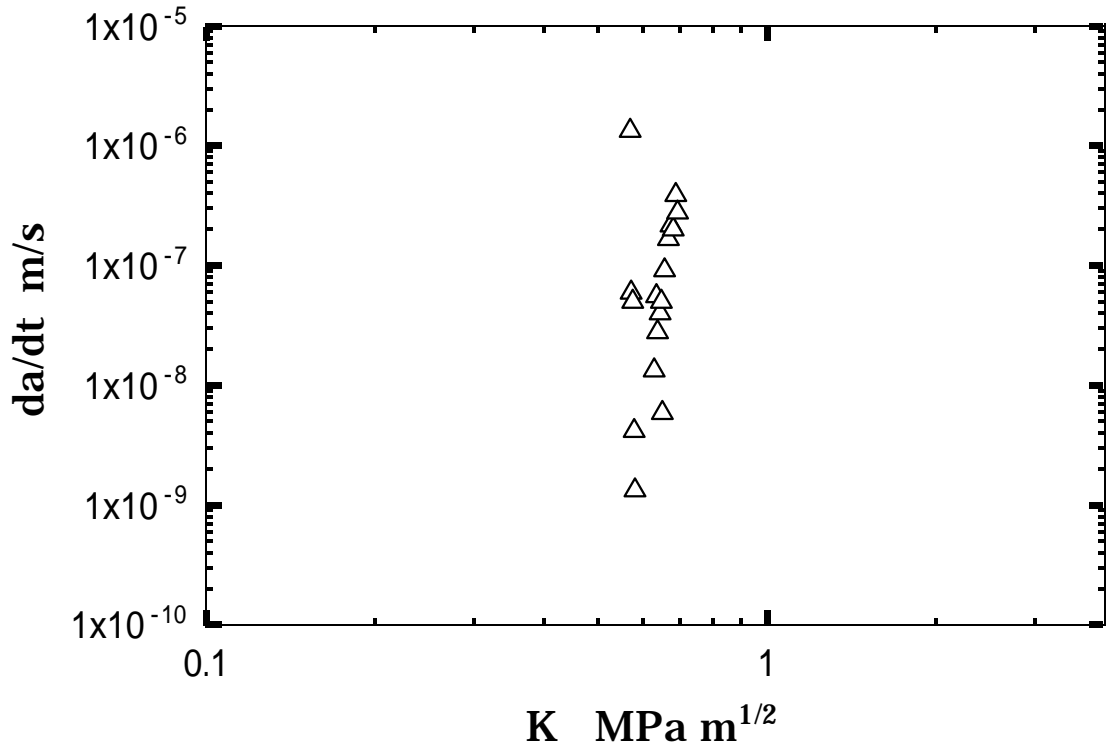


Fig.10 二次元貫通き裂 負電界負荷 (- 0.3 MV/m) 時のき裂伝ば速度 da/dt と応力拡大係数 K の関係

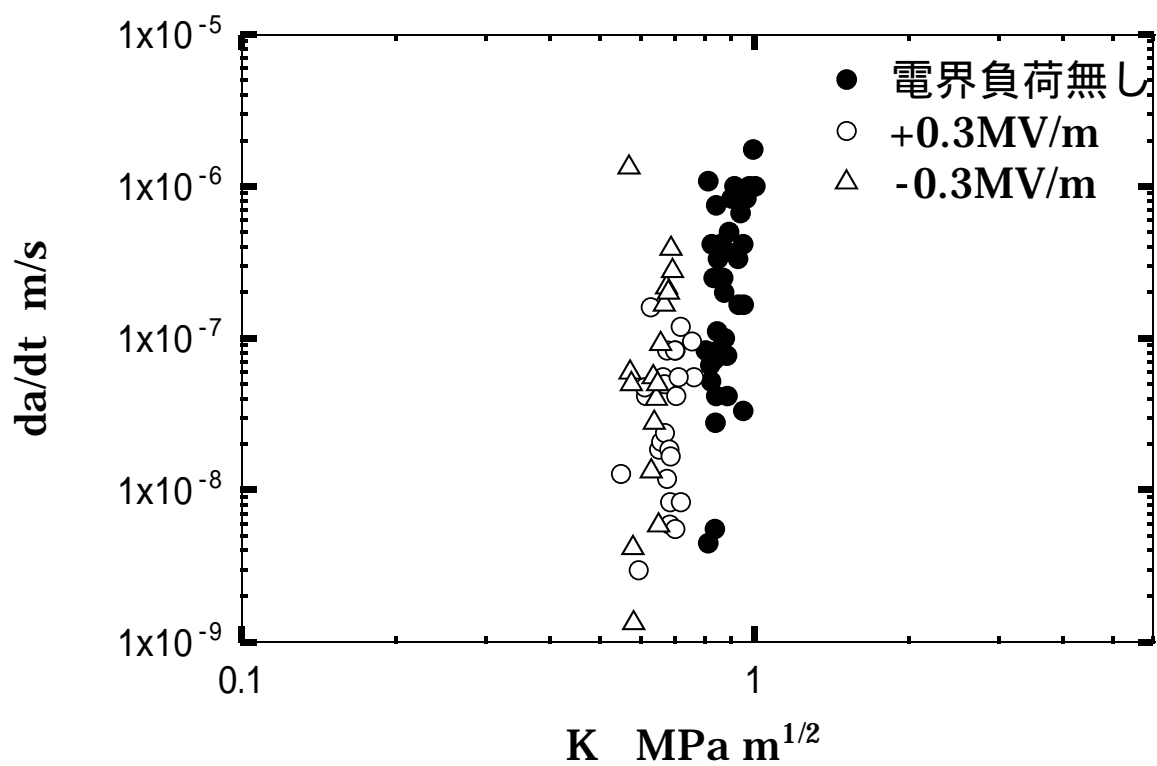


Fig.11 二次元貫通き裂 電界負荷及び電解負荷無しの際のき裂伝ば速度 da/dt と応力拡大係数 K の関係

Table.5 微小表面き裂 電界負荷無し試験片寸法

E = 0 (電界負荷無し)	W (mm)	B (mm)
	6.3	2.1

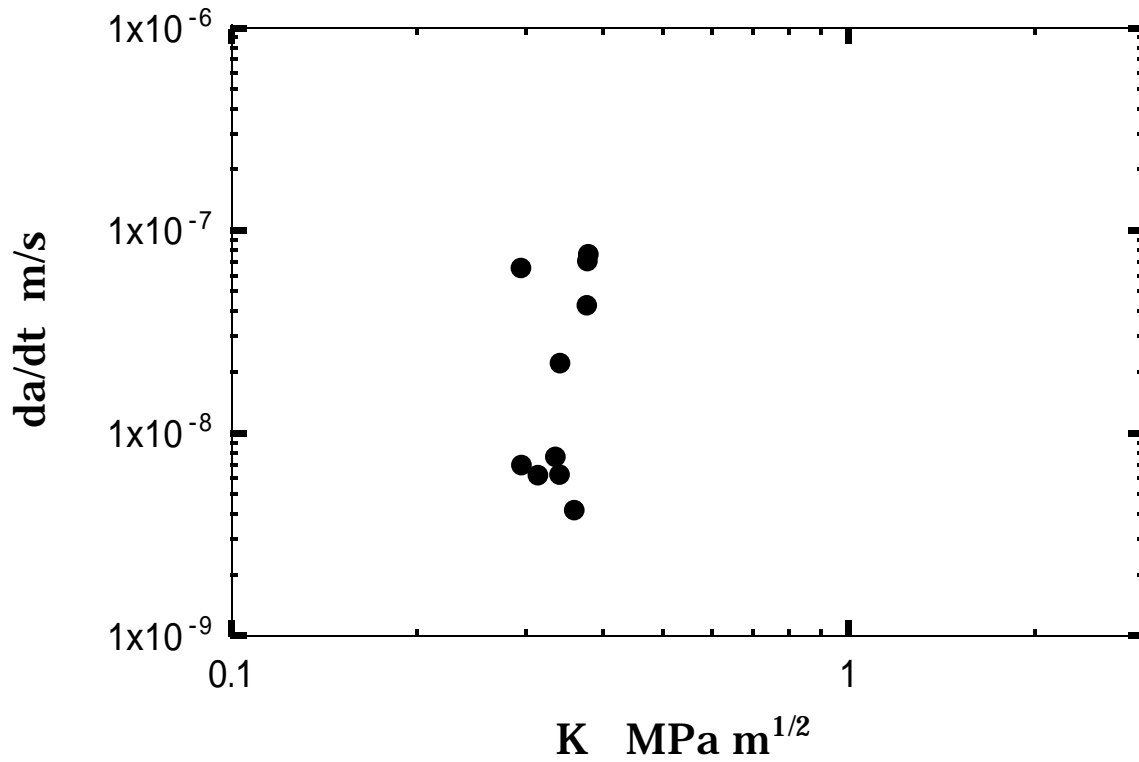


Fig.12 微小表面き裂 電界負荷無しなき裂伝ば速度 da/dt と応力拡大係数 K の関係

Table.6 微小表面き裂 正電界負荷 0.3 MV/m の試験片寸法

E = +0.3 MV/m (正電界負荷)	W (mm)	B (mm)
	5.9	2.05

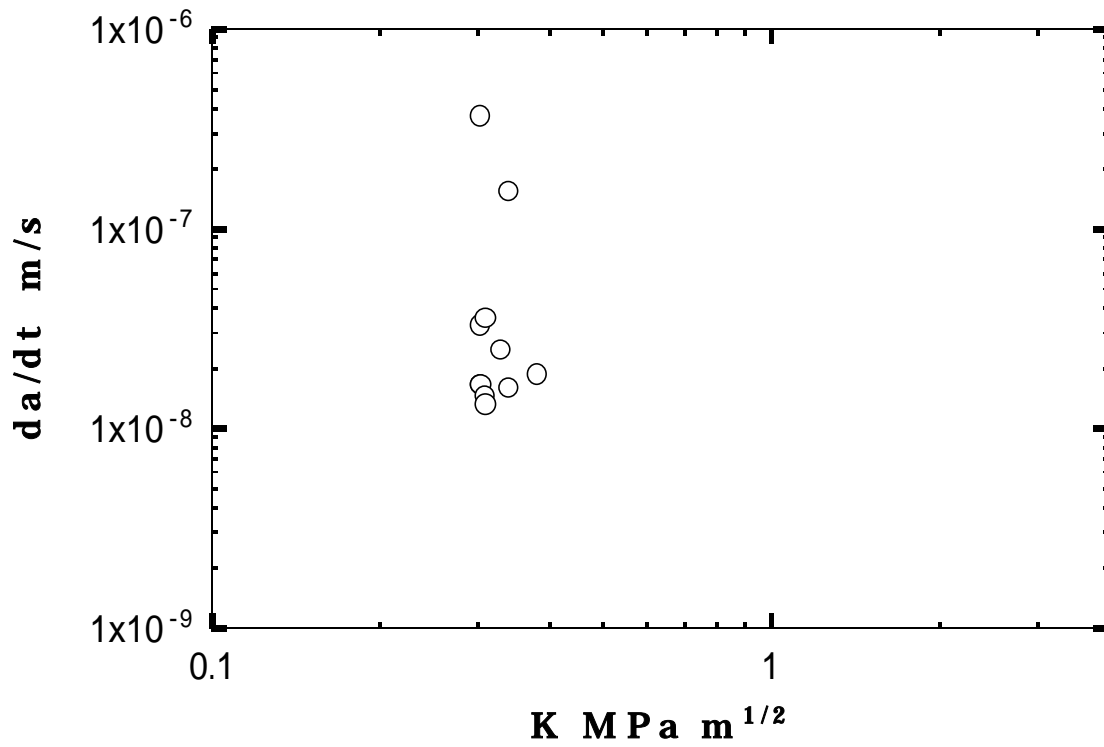


Fig.13 微小表面き裂 正電界負荷 (+ 0.3 MV/m) 時のき裂伝ば速度 da/dt と応力拡大係数 K の関係

Table.7 微小表面き裂 負電界負荷 0.3 MV/m の試験片寸法

E = - 0.3 MV/m (負電界負荷)	W (mm)	B (mm)
	6.05	2.1

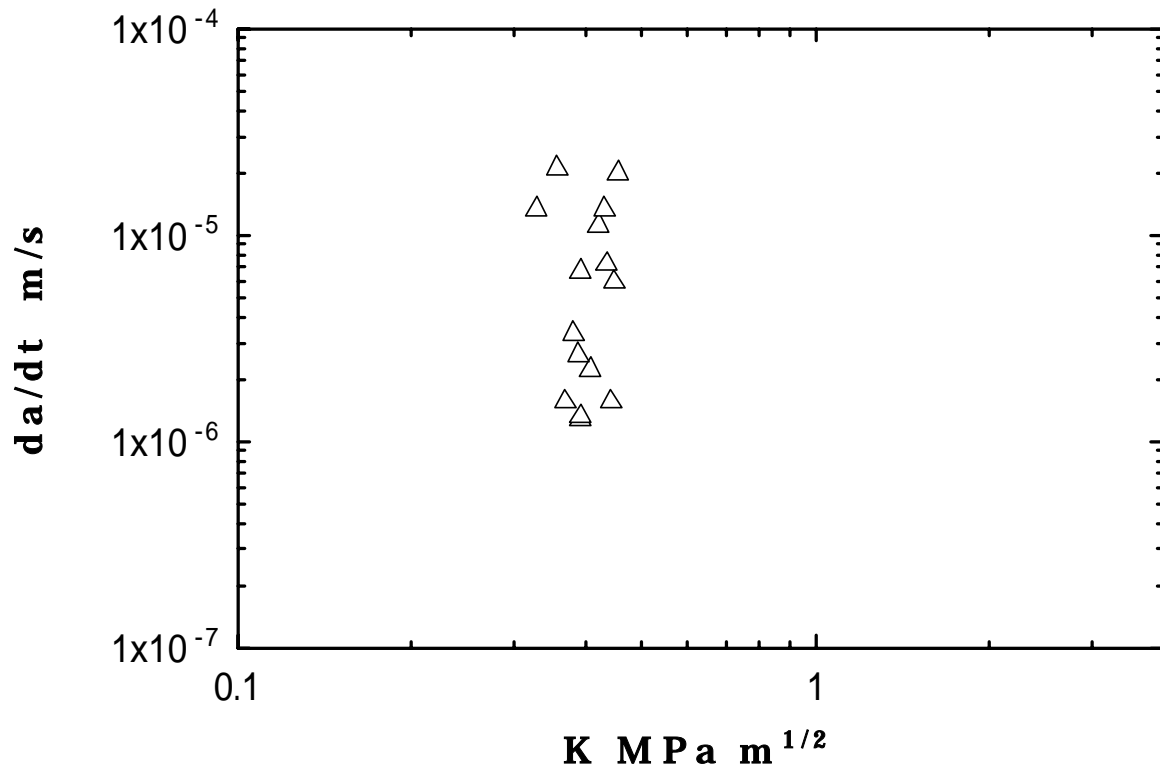


Fig.14 微小表面き裂 負電界負荷 (- 0.3 MV/m) 時のき裂伝ば速度 da/dt と応力拡大係数 K の関係

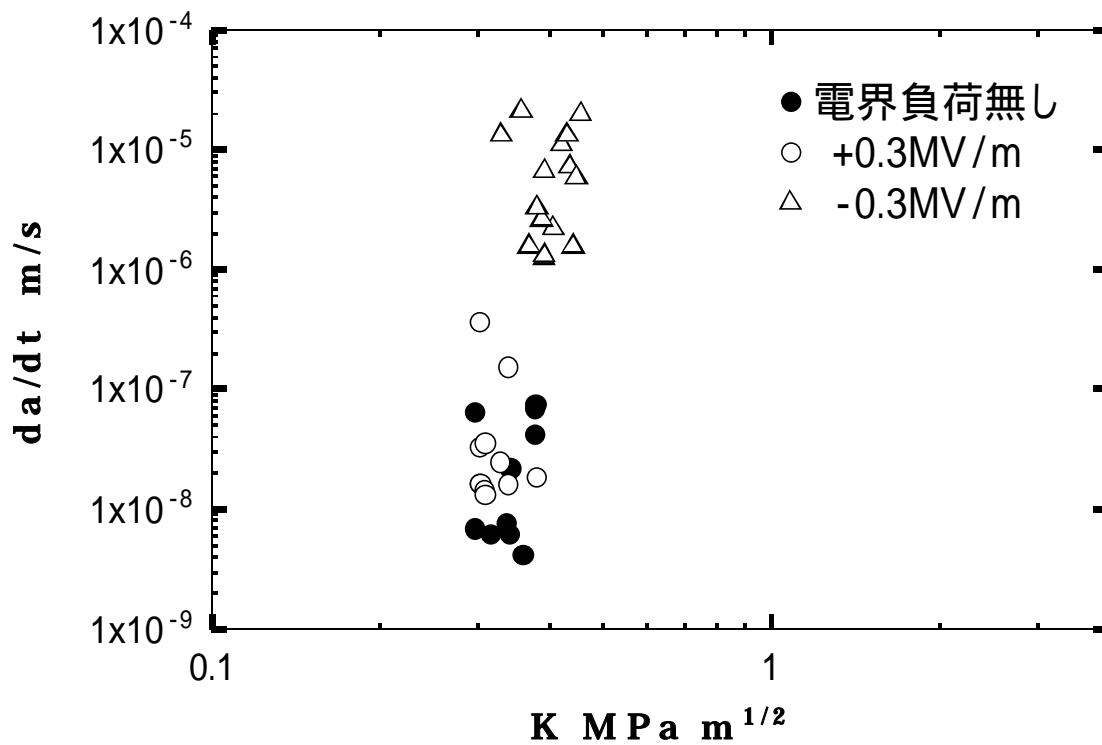
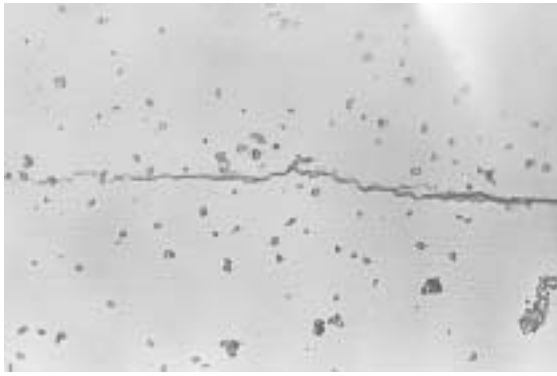
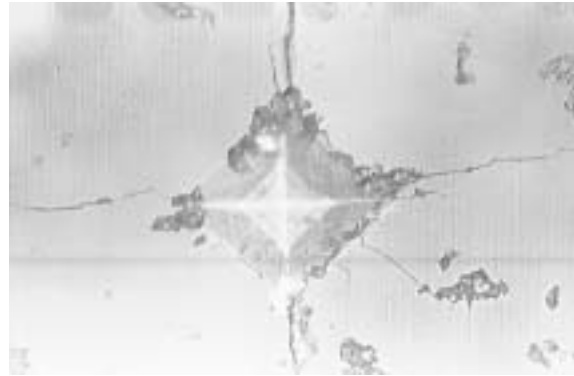
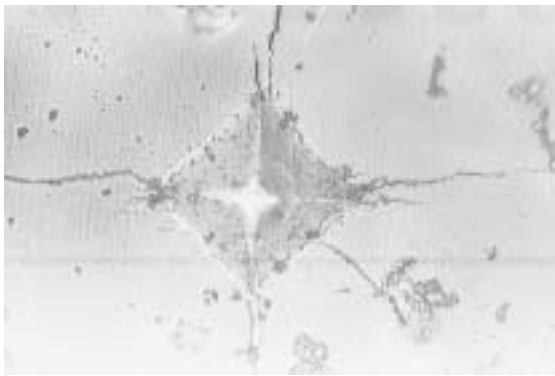


Fig.15 微小表面き裂 電界負荷及び電解負荷無しの際のき裂伝ば速度 da/dt と応力拡大係数 K の関係



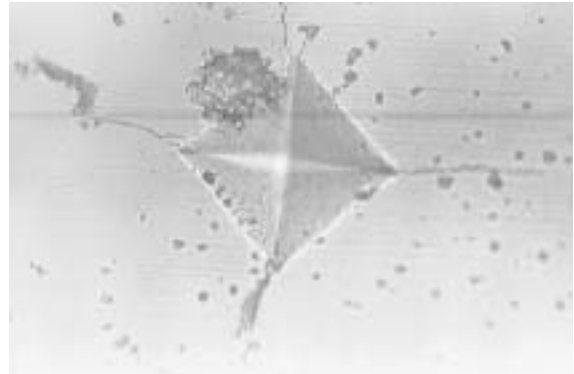
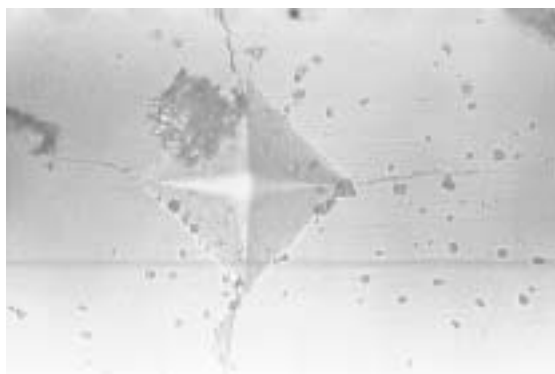
0.1mm

Fig.16 負電界負荷のき裂（左）と、正電界負荷のき裂（右）



0.1mm

Fig.17 - 1 負電界負荷時の初期のピッカ - ズ圧跡（左）と、一定時間後の圧跡（右）



0.1mm

Fig.17 - 2 電界負荷無し時の初期のピッカ - ズ圧跡（左）と、一定時間後の圧跡（右）

4 . 結言

- (1) き裂伝ば速度 da/dt に及ぼす電界負荷の影響では、正負いずれの電界負荷もき裂伝ば速度を加速させる効果があった。
- (2) 負電界負荷のき裂伝ば速度 da/dt に及ぼす影響は、二次元貫通き裂試験より微小表面き裂試験の方が顕著に表れた。

5 . 謝辞

本研究及び卒業論文作成にあたり、御指導くださいました楠川助教授に感謝の意を表します。

6 . 参考文献

- (1) Intelligent Materials Vol.11 No.1 楠本 慶二 他
社団法人 未踏科学技術協会 (2001)
- (2) 平成 12 年度 高知工科大学 知能機械システム工学科
材料強度学研究室 卒業論文 有馬 誠 (2001)
- (3) 破壊力学 小林 英男 著 共立出版 (1993)
- (4) 破壊力学実験法 国尾 武 他 3 名編著 朝倉出版 (1984)
- (5) S.Park and C.Sun, Jour. of the Am. Ceram. Soc., 78, 6, 1475 (1995)
- (6) A.G.Tobin and Y.E.Pak, SPIE Vol.1916, 81 (1993)
- (7) H.Gao et al., Ferroelectrics, 166, 11 (1995)
- (8) S.Shen and T.Nishioka, Theo. Appl. Fract. Mech, 33, 57 (2000)

7. 付録

二次元貫通き裂 電界負荷無しの際の結果

P (N)	t (s)	a (m)	da (m)	da/dt (m/s)	K (MPa·m ^{1/2})
76.5	0	0.00241			
	7800	0.002445	3.5E-05	4.48718E-09	0.812349774
	900	0.00251	6.5E-05	7.22222E-08	0.83533927
	900	0.002515	5E-06	5.55556E-09	0.837146469
	180	0.00252	5E-06	2.77778E-08	0.838959368
	240	0.00253	1E-05	4.16667E-08	0.842602391
	90	0.00254	1E-05	1.11111E-07	0.846268601
	120	0.00255	1E-05	8.33333E-08	0.849958263
	60	0.002575	2.5E-05	4.16667E-07	0.859286767
	100	0.0026	2.5E-05	2.5E-07	0.868767737
	50	0.00261	1E-05	2E-07	0.872603779
	50	0.002615	5E-06	1E-07	0.874531295
	40	0.00263	1.5E-05	3.75E-07	0.880352243
	130	0.00264	1E-05	7.69231E-08	0.884265233
	120	0.002645	5E-06	4.16667E-08	0.886231544
	30	0.00266	1.5E-05	5E-07	0.892170172
	30	0.002685	2.5E-05	8.33333E-07	0.902202414
	30	0.002715	3E-05	1E-06	0.914468823
	30	0.00274	2.5E-05	8.33333E-07	0.924886185
	30	0.00275	1E-05	3.33333E-07	0.929104034
	30	0.002755	5E-06	1.66667E-07	0.931224025
	30	0.002775	0.00002	6.66667E-07	0.939778689
	60	0.0028	2.5E-05	4.16667E-07	0.950643131
	30	0.002801	1E-06	3.33333E-08	0.951081728
	30	0.002806	5E-06	1.66667E-07	0.953279405
	30	0.002831	2.5E-05	8.33333E-07	0.964386311
	30	0.002861	3E-05	1E-06	0.977980933
20	0.002896	3.5E-05	1.75E-06	0.994220306	
20	0.002916	0.00002	0.000001	1.003688681	

P (N)	t (s)	a (m)	da (m)	da/dt (m/s)	K (MPa·m ^{1/2})
77.7	0	0.002925			
	300	0.00295	2.5E-05	8.33333E-08	0.804082267
	60	0.003015	0.000065	1.08333E-06	0.812878524
	750	0.003065	5E-05	6.66667E-08	0.819580231
	480	0.00309	2.5E-05	5.20833E-08	0.822910486
	60	0.003115	2.5E-05	4.16667E-07	0.82622723
	200	0.003165	5E-05	2.5E-07	0.832820831
	100	0.00324	7.5E-05	7.5E-07	0.842613851
	150	0.00329	5E-05	3.33333E-07	0.849079357

二次元貫通き裂 正電界負荷 (0.3MV/m) の際の結果

P (N)	t (s)	a (m)	da (m)	da/dt (m/s)	K (MPa·m ^{1/2})
58.6	0	0.00265			
	2700	0.0027	5E-05	1.85185E-08	0.651502696
	2400	0.00275	5E-05	2.08333E-08	0.65749898
	900	0.0028	5E-05	5.55556E-08	0.663440766
	2100	0.00285	5E-05	2.38095E-08	0.669329506
	600	0.0029	5E-05	8.33333E-08	0.675166587
	1800	0.002975	7.5E-05	4.16667E-08	0.683828239
	600	0.00298	5E-06	8.33333E-09	0.684401762
	1800	0.00313	0.00015	8.33333E-08	0.701388056

P (N)	t (s)	a (m)	da (m)	da/dt (m/s)	K (MPa·m ^{1/2})
67.7	0	0.00214			
	2100	0.00224	0.0001	4.7619E-08	0.611320569
	780	0.002365	0.000125	1.60256E-07	0.628125782
58.6	3900	0.002415	5E-05	1.28205E-08	0.549405473
	22680	0.002415	0	0	0.549405473
63.1	8400	0.00244	2.5E-05	2.97619E-09	0.594645697
	1800	0.00244	0	0	0.594645697
67.7	9300	0.00244	0	0	0.637995462
72.2	4200	0.002465	2.5E-05	5.95238E-09	0.683875236
76.7	2100	0.002665	0.0002	9.52381E-08	0.755358067
	900	0.002715	5E-05	5.55556E-08	0.762401257

P (N)	t (s)	a (m)	da (m)	da/dt (m/s)	K (MPa·m ^{1/2})
67.9	0	0.00214			
	3000	0.00229	0.00015	0.00000005	0.668162304
	4200	0.00234	5E-05	1.19048E-08	0.675408306
	2700	0.00239	5E-05	1.85185E-08	0.682577013
	1500	0.002415	2.5E-05	1.66667E-08	0.68613314
	1200	0.002515	0.0001	8.33333E-08	0.700176136
	900	0.00252	5E-06	5.55556E-09	0.700870861
	600	0.002545	2.5E-05	4.16667E-08	0.704334153
	900	0.002595	5E-05	5.55556E-08	0.711209873
	420	0.002645	5E-05	1.19048E-07	0.718019396
	480	0.002649	4E-06	8.33333E-09	0.718561354

二次元貫通き裂 負電界負荷 (- 0.3MV/m) の際の結果

P (N)	t (s)	a (m)	da (m)	da/dt (m/s)	K (MPa·m ^{1/2})
61.4		0.002635			
	30	0.002675	4E-05	1.33333E-06	0.569991771
	420	0.0027	2.5E-05	5.95238E-08	0.572645164
	600	0.00273	3E-05	5E-08	0.575813
	8400	0.002765	3.5E-05	4.16667E-09	0.579486792
	15000	0.002785	2E-05	1.33333E-09	0.58157562
66	3000	0.002825	4E-05	1.33333E-08	0.629612903
	900	0.002875	5E-05	5.55556E-08	0.635151553
	900	0.0029	2.5E-05	2.77778E-08	0.637902732
	1500	0.00296	6E-05	4E-08	0.644457341
	600	0.00299	3E-05	5E-08	0.647709612
	5100	0.00302	3E-05	5.88235E-09	0.650945528
	600	0.003075	5.5E-05	9.16667E-08	0.656836365
	600	0.003175	1E-04	1.66667E-07	0.667412891
	300	0.00324	6.5E-05	2.16667E-07	0.674198055
	300	0.0033	6E-05	2E-07	0.680400806
	180	0.00337	7E-05	3.88889E-07	0.687566123
	180	0.00342	5E-05	2.77778E-07	0.692638493

微小表面き裂 電界負荷無しの際の結果

P (N)	t (s)	a (m)	da (m)	da/dt (m/s)	K (MPa·m ^{1/2})
74.51904	0	0.00124			
	3660	0.00148	0.00024	6.55738E-08	0.294216659
	28680	0.00168	0.0002	6.9735E-09	0.294577528
79.17648	54720	0.00196	0.00034	6.21345E-09	0.313524629
84.4161	15660	0.00214	0.00012	7.66284E-09	0.334639445
85.58046	41580	0.0024	0.00026	6.25301E-09	0.339791664
	9000	0.0026	0.0002	2.22222E-08	0.340203783
90.2379	28680	0.00272	0.00012	4.1841E-09	0.35897875
93.73098	34500	0.0042	0.00148	4.28986E-08	0.376195591
	4800	0.00454	0.00034	7.08333E-08	0.376954366
	7320	0.0051	0.00056	7.65027E-08	0.378200794

微小表面き裂 正電界負荷 (3 MV/m) の際の結果

P (N)	t (s)	a (m)	da (m)	da/dt (m/s)	K (MPa·m ^{1/2})
75.6834	0	0.00084			
	3600	0.00218	0.00134	3.72222E-07	0.300094614
	3600	0.0023	0.00012	3.33333E-08	0.300313634
	10800	0.00248	0.00018	1.66667E-08	0.300641866
	14400	0.00272	0.00024	1.66667E-08	0.301078951
76.84776	16260	0.00296	0.00024	1.47601E-08	0.306154102
	7200	0.00322	0.00026	3.61111E-08	0.306633476
	27000	0.00348	0.00036	1.33333E-08	0.307112102
81.5052	14400	0.00384	0.00036	0.000000025	0.326426531
83.83392	3600	0.0044	0.00056	1.55556E-07	0.33687245
	11100	0.00458	0.00018	1.62162E-08	0.337231483
94.31316	14820	0.00486	0.00028	1.88934E-08	0.380012872

微小表面き裂 負電界負荷 (- 0.3 MV/m) の際の結果

P (N)	t (s)	a (m)	da (m)	da/dt (m/s)	K (MPa·m ^{1/2})
75.10122	0	0.000136			
	1800	0.000174	0.000038	2.11111E-05	0.356830931
	1500	0.000194	0.00002	1.33333E-05	0.328489498
80.34084	19200	0.000224	0.00003	1.5625E-06	0.368559159
87.90918	33300	0.000276	0.000052	1.56156E-06	0.441769463
	14400	0.000308	0.000032	2.22222E-06	0.406928154
	8400	0.00033	0.000022	2.61905E-06	0.388337037
	18900	0.000354	0.000024	1.26984E-06	0.392125781
	3600	0.000378	2.4E-05	6.66667E-06	0.392125781
	3600	0.000418	4E-05	1.11111E-05	0.421210656
	5400	0.000436	1.8E-05	3.33333E-06	0.380646433
	18120	0.00046	0.000024	1.3245E-06	0.392125781
	96.64188	3600	0.000486	0.000026	7.22222E-06
5400		0.000518	0.000032	5.92593E-06	0.447351481
7500		0.00071	0.000192	0.0000256	0.697146931
1800		0.000746	3.6E-05	0.00002	0.455269821
1800		0.00077	2.4E-05	1.33333E-05	0.431078673
1800		0.001072	0.000302	0.000167778	0.826174049
1800		0.001326	0.000254	0.000141111	0.772525993