

論文の内容の要旨

論文題目 き裂エネルギー密度理論に基づく圧電材料の破壊力学

氏名 南 秉群

最近、様々な分野でいわゆる知的材料(**smart material**)と呼ばれるものの工学的応用が試みられ、その多様な物理的な現象と材料特性を利用した技術がもはや成熟段階に至っている。その中、電気-力学的連成関係の代表的な材料としての圧電材料は、電場と機械的変形との間に固有の連成効果を有し、誘電分極とは別に機械的応力によって分極を起こす物質であるため、センサおよびアクチュエータ用材料として利用され、様々な応用が進められている。また、材料の内部に圧電材料を埋め込むことが試みられており、センサ、プロセッサおよびアクチュエータ機能を有する材料システムの設計が注目を集め、振動および音響制御などへの応用が進められている。多くの圧電材料は元々セラミックス材料として大きな電界が印加され、大きなひずみが誘起されてかなりの機械的応力および変形を発生している。このため、圧電材料システムの機械的強度の解明と破壊過程の理解が必要となり、電気-力学的破壊力学の系統的な解析および破壊靱性、疲労実験方法などの開発が望まれている。圧電材料システムの設計・開発および信頼性・安全性評価を対象とするとき、従来の破壊力学の手法では不十分であり、電気弾性相互干渉を詳細に検討し、これに基づくいわゆる電気破壊力学的研究が必要となる。しかし、圧電体の破壊問題については種々の試みがなされてきているものの、研究者によって破壊実験の結果が異なるという問題を始め、まだ曖昧な点がたくさん残っている。すなわち、主に電界の存在が破壊に与える影響を解明するため数多くの研究が行われているが、破壊パラメータや電氣的境界条件としては何をを用いるのが妥当であるかの最も基本的な問題からも解決されていない。しかも、このこともあつてかき裂の捩れ現象などの混合モード破壊に対応できる破壊パラメータなどに関する研究はほとんどない。

本研究はき裂エネルギー密度理論(**Crack Energy Density**)に基づいて上述の未解明の問題点を解決しようとする試みの一環として、最終的には CED による圧電体の破壊力学体系を構築することを主目的としている。全体的に、CED 本来の破壊パラメータとしての役割と圧電材料の破壊に対する問題点を踏まえて、CED は圧電体の破壊に対しても諸現象を統一的記述し諸問題点を克服し得るパラメータとなり得るのではないかとの見通しのもとに行うものである。つまり、本論文は、欠陥を有する圧電体の破壊に及ぼす電界の影響を中心に据えて様々な問題点を提起し、それらを CED 概念を導入し、電気-力学的線形破壊力学の範囲で克服しようとしたものである。

はじめに、最も基礎となる圧電体のエネルギー保存則から出発して破壊パラメータとしての CED を提案し、それが従来の破壊パラメータにおける問題点を克服できる有効なものであることを確認した。なお、欠陥を有する圧電体を電氣的含有物問題として取り扱い、欠陥面での電氣的境界条件は正確な境界条件の立場から判断すると不浸透性条件と浸透性条件はそれぞれ過大あるいは過少評価するものとなることを示した。さらに鋭いき裂モデルはこのような電氣的含有物問題には適していないことを明らかにし、その対して CED は本来有限な幅を持つ切欠きから定義されているのでこのような問題に特に有効なものとなることを示した。また、任意方向 CED を定義してき裂の捩れ現象を扱う方法を示し、CED の力学的寄与分のモード I 成分は混合モード破壊パラメータとして十分可能性のあるものであることを示した。次に、圧電体の破壊現象は電気-力学的荷重条件にも大きく影響を受けるものとなることを示し、破壊実験を行うときこのような点に十分注意する必要があることを述べた。本論文から得られた具体的な結果を以下に整理する。

第 2 章では、誘電体と圧電セラミックスの特性に関する基本的な事項を示し、またき裂の電気弾性特異解を紹介し、かつ電気-力学的連成関係の有限要素法をまとめて示した。次に、圧電材料の従来の破壊パラメータに関する検討を行って、それぞれの破壊パラメータとしての問題点と限界を指摘した。通常の CED に関する概念を、その定義からはじめて他の破壊パラメータとの関係、評価法などを具体的に示した。

第 3 章では、圧電材料におけるエネルギー保存則を考えて、はじめに圧電材料における CED を定義し、さらに CED は力学的寄与分と電氣的寄与分に分離されることを示した。また、CED の径路独立積分表示を与え、CED と J 積分などの他の破壊パラメータとの関係を示し、特に線形弾性圧電体の場合はエネルギー解放率と等しくなる関係を導き、その関係からき裂開口積分の形式で CED の具体的表現を示した。圧電体に関わる応力、電気変位など諸量の理論と有限要素法による評価の比較検討を通じて、本研究で開発した FEM プログラムの有効性を証明し、最大接線応力クライテリアは圧電材料の破壊パラメータとして適していないことを指摘した。有限要素法による CED の評価法を挙げ、その中、切欠き付近で十分細かいメッシュが保証されると直接法でも精度良い結果を得ることができることを示した。切欠き長さ l と曲率半径 R の比が 10^{-2} 以下のモデルを用いるとき裂モデルに相当する結果が得られる。理論および数値的検討から、CED の力学的寄与分は圧電材料の破壊基準となり得ることを明らかにした。

第 4 章では、楕円欠陥を有する圧電体の欠陥内部の電気解を考えると、まず内部電界は一般に電氣的含有物の誘電率と楕円形状比に大きく影響を受けるものであり、楕円の形状比が 10^{-2} 以上の場合には内部電界は近似的に誘電率に依存しなくなるといえ、正確な境界条件と不浸透性条件の差がほとんどなくなることを示した。また、き裂モデルによるエネルギー解放率を破壊パラメータとするときには、結果的に含有物が存在しないことに等しくなって正確な境界条件は常に浸透性条件と一致する不合理な結果が生じることを明らかにした。次に、電氣的含有物を有する圧電体に対する CED の径路独立積分表示を導き、有

限要素解析を通じて含有物の誘電率と切欠き曲率形状比が CED とその派生量に及ぼす影響を検討した。正確な境界条件の立場から見ると、ほとんどの電界の領域で不浸透性条件は電界の効果を過大評価し、電氣的浸透性条件は過少評価するものとなっていた。また、 10^{-2} 以上の比較的幅が大きい切欠きでは切欠き面で不浸透性条件が自然に満たされ、き裂になると切欠き面で浸透性条件が自然に満たされる。従来ほとんどの破壊パラメータは鋭いき裂という特殊な場合に対して定義されていてこのような電氣的含有物問題には適さない。一方、CED は本来有限な幅を持つ切欠きで定義され、鋭いき裂に拡張できるという性質のものであり、他のパラメータに比べてこのような問題に対して特に有効なものとなって来ると判断される。

第 5 章では、直進するき裂の CED 概念を拡張して、混合モード破壊を念頭において圧電材料の任意方向 CED を定義し、CED は力学的寄与分と電氣的寄与分に分離され、かつ各変形寄与分にも分離することができることを証明した。その後、切欠き内部が電氣的含有物で詰められていると想定して正確な境界条件の下で任意方向 CED の径路独立積分表示を導いた。電気-力学的線形弾性圧電体の場合、電氣的境界条件に関係なく任意方向 CED は任意方向エネルギー解放率と等しくなり、仮想き裂概念を用いて任意方向 CED の力学及び電氣的寄与分を各変形寄与分に分離して具体的に表した。任意方向 CED の力学的寄与分のモード I 成分は、陽の電界によって増加し陰の電界によって減少する破壊実験と一致する現象を見せ、さらに電界が強くなると水平切欠きの場合でも直進方向以外の方向に屈折進展するき裂振れ現象も表現できるパラメータとして、破壊基準となる十分な可能性を見せた。有限要素法を用いるとき、任意方向 CED を各変形寄与分に分離して評価する方法を挙げ、任意方向 CED の力学的寄与分のモード I 成分の破壊パラメータとしての可能性を再び数値的に確認した。最後に、切欠き付近の接線応力、接線ひずみと CED の分布は荷重条件によって大きく変わるものとなることを明らかにし、特に電界の方向が破壊に及ぼす影響などは完全に逆になるケースもあることを述べた。

最後に、今後の研究展望及び課題として、より綿密な計画と注意の上で、特に本研究から明らかになった欠陥面での電氣的境界条件と荷重条件の重要性を念頭において破壊実験を行う必要がある。そこから得られた結果と本研究の CED 理論について比較検討を行うことにより一般性ある破壊基準を見出すことができると期待される。本研究でのすべての解析は電気-力学的線形破壊力学の範囲で行われたが、実際の圧電材料はかなり広い範囲で電気-力学的に非線形性を見せる。CED は基本的に構成則になんら制約なく定義された破壊パラメータとして、圧電材料においてもそれぞれの場合における構成則さえ与えられると線形から非線形まで、さらに疲労およびクリープ問題まで拡張できるものである。したがって、電気-力学的線形以外の問題においても CED は圧電材料の破壊パラメータとして重要な役割を果たすと期待される。