

論文の内容の要旨

論文題目 Study on Nonlinear Fracture Mechanics Based on Crack Energy Density Concept for Piezoelectric Materials

(き裂エネルギー密度概念に基づく圧電材料の非線形破壊力学に関する研究)

氏 名 劉 栄豊

近年、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その特有の圧電、誘電及び焦電性能のため、様々な電気部品に応用されている。すなわち、力を加えたときに、変形に加えて一定量の電荷と電圧が材料に生じる直接圧電効果、また、電荷と電圧を加えたときには、機械的応力と変形が生じる逆圧電効果のゆえ、センサーおよびアクチュエーター用材料として広く利用され、強度的信頼性への要求から、破壊過程の理解、破壊強度の評価が必要となり、電気 - 力学的破壊力学の開発・確立が望まれている。こうしたことから、この十数年、圧電材料の破壊力学につき、多くの研究者により様々な挑戦がなされてきたが、今日に至るまで基本的な方向は示されておらず、ある種の混乱状態にある。同材料の今後のさらなる応用範囲の広がり、また、同材料への期待を考えると、早急に解決されるべき問題である。

圧電材料は力学的にはぜい性材料であるが、電気的には降伏や、さらにはドメインスイッチングと呼ばれる分極方向の変化にともなう複雑な非線形挙動を示し、このような非線形性が破壊特性にも影響するだろうと考えられてきたが、ひとつには、そのような状況でも明確な物理的意味を持つき裂パラメーターが与えられていなかったこともあって、それらの現象も取り込んで、問題を具体的かつ定量的に扱った研究はなかった。すなわち、主に電界の存在が破壊に与える影響について数多くの研究が行われているにもかかわらず、破壊パラメーターとして何をを用いるのが妥当であるかの最も基本的な問題についても解決されていない状況にあったといえる。

このような背景の下、本研究は、通常材料において、構成則に制約なく統一的き裂パラメーターとなることが示されているき裂エネルギー密度CED(Crack Energy Density)理論に基づいて、圧電材料の、非線形挙動も考慮に入れた、破壊挙動評価法の開発を目指し、それによる実際の破壊現象のより良い理解を試みたものである。

第 1 章は「序論」であり、上のような背景を述べるとともに、構成則の如何にかかわらず一貫したエネルギー面積密度の意味を持つ CED を圧電材料の破壊特性を表すパラメーターとして採用すること、CED によれば、圧電体の非線形挙動も考慮に入れた破壊パラメーターとなり得るのではないかとの見通しのもとに行うことを述べた。また、圧電体の非線形破壊挙動は電氣的荷重条件にも大きく影響を受けるものとなる可能性

についてふれ、破壊実験においてはこのような点に十分注意する必要があること等についても言及した。

第2章、「線形圧電材料におけるCED」では、圧電材料の非線形挙動を考慮した上でCEDを考えるための準備として、Nam(2004)による圧電材料の線形CED理論についてまとめるとともにその再検討を行った。このため、線形有限要素解析プログラムを開発し、その妥当性・有効性を応力および電気変位について理論値と比較することにより確認した。それを踏まえ、エネルギー解放率、ParkとSun(1995)によって提案された力学的エネルギー解放率、Nam(2004)によって提案された力学的CEDに与える電界の影響を有限要素解析によって評価し、PZT-4を対象としたCT実験結果と比較して、エネルギー解放率は不適であるが、力学的エネルギー解放率と力学的CEDは、PZT-4材料の破壊挙動を定性的に説明できる可能性があることを確認した。

第3章、「圧電材料に対する非連続モデルとそのCED評価への適用性」では、線形理論では実験結果を十分説明できない部分の解決を目指し、電氣的降伏を第1近似的に評価できる圧電材料に対する非連続モデルの開発を行った。まずは、通常材料に対するDugdale(1960)モデルを一般化した非連続モデルを圧電材料に対するものに拡張し、圧電材料の電氣的降伏問題に適用できるようにした。具体的には、圧電材料のき裂を含む面に非連続面を想定し、特性長さの概念を導入して、非連続面上下の相対変位、電気ポテンシャル差からひずみ相当量、電界相当量を定義し、連続体として扱う場合と類似な扱いが可能となる電氣的降伏を考慮した非連続面の構成則を導いた。続いてこれを用いての非連続モデル解析のための有限要素プログラムを開発し、それにより、非連続モデルに対するものに拡張したCEDを評価し、非連続面における降伏域の理論解析値と有限要素法解析の結果を比較して、適切な特性長さを見出した。さらに、得られた力学的CED評価結果は、電氣的降伏を考慮することにより、線形解析に比べ、実験結果をより説明する方向に改善されることを示した。

第4章、「圧電材料CEDに与える電氣的降伏の効果」では、第3章ではモデル中の非連続面でのみ電氣的降伏を考えるものであったが、そのような制約を取り除いた、一般的な電氣的降伏を考える有限要素法解析の定式化を行い、プログラムの開発を行って、電氣的降伏のCEDに与える影響を調べた。また、電氣的降伏モデルのためのCEDとその諸量を定義し、通常材料と同様に、圧電材料についてもJ積分の物理的意味と適用範囲がCED径路独立積分によって明らかとなることを示した。電氣的降伏過程とき裂近傍の電氣的降伏域についての基礎的な調査を行い、さらにCED評価結果と線形有限要素解析の結果を比較することによりCEDにおける電氣的降伏の影響を検討した。き裂近傍の降伏域は電氣的荷重の増加に従ってき裂面に沿って拡大することが分かった。この結果により一般化Dugdaleモデルにおいて非連続面のみで電氣的に降伏するとした仮定が合理的であることが確認された。また、得られた力学的CED評価結果は、電氣的降伏を考慮することにより、第3章における結果と同様、線形解析に比べ、実験結果をより説明

する方向に改善されることを示した。

第5章「ドメインスイッチングを考慮した圧電材料の非線形解析とCED評価」では、ドメインスイッチング現象も取り入れた有限要素解析のための定式化を行い、プログラム開発を行って、CED評価を行い、その破壊問題への適用性を検討した。ドメインスイッチングはバタフライ形の電界 - ひずみ曲線をもたらす要因である。これをマクロ力学の視点から構成則に取り込むため、電界 - 電気変位間の関係において、ドメインスイッチング条件を電気変位のみ関数と仮定した。180度のドメインスイッチングと残留分極のみを考慮し、90度のスイッチングと残留ひずみは無視した。スイッチングプロセスは極めて短時間のプロセスと仮定し、ドメインウォールの存在は無視した。スイッチした圧電力材料の構成則は新たな材料定数を採用することで得られる。この材料定数の中では圧電常数だけが変化する。ドメインスイッチングモデルに対応する有限要素プログラムの検証は一要素問題により行った。電気的および力学的負荷によるスイッチングと降伏域の挙動を調べた結果、それらはき裂面を沿って拡張することが分かった。き裂が分極方向と直交する場合と平行である場合の二条件についてCEDを評価した。前者の場合、破壊負荷のスイッチングモデルにより評価された力学的CEDによる予測は、PZT-4 のCT試験片とC2材料の3点曲げ試験片の実験結果にほぼ一致することが分かった。後者では、電界はCEDとその諸量に貢献しないということが分かった。すなわち、後者の場合、電界は破壊強度に影響しない。これらの結果はTobinとPark (1993) の実験結果と一致した。

第6章は「結論」であり、圧電材料の電気的非線形特性とそのCEDにおける影響を評価評価する方法を開発したこと、電気的非線形モデルは圧電材料の破壊を解釈する上で有効な手段となりうること、有限要素解析結果と実験結果の比較によって、ドメインスイッチングモデルは降伏モデルおよび線形モデルよりもより適切に圧電材料の破壊特性を説明可能なモデルとなること、CEDの概念を圧電材料の破壊力学へ導入することに成功し、力学的CEDが圧電セラミックスの破壊特性を支配する統一的な物理パラメータとなることを示した等、本研究の成果をまとめた。