

審査の結果の要旨

氏名 劉 栄 豊

本論文は「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)」と題し、本文6章からなる。

圧電材料は、その特性である電気 - 力学連成挙動の故、センサやアクチュエータ等の材料として様々な分野で用いられ、その強度的信頼性への要求も高まっていることから、近年、破壊力学的立場からの強度評価研究も活発に行われて来ている。これまで通常材料を対象に成功した応力拡大係数やエネルギー解放率、 J 積分等のパラメータの圧電材料への拡張が試みられ、それらパラメータを用いて破壊現象を説明することが試みられて来たが、何れも実験事実としての圧電材料の電界強さ依存性を説明することができずにいた。このような状況にあって、最近、通常材料を対象に、き裂の挙動を材料の構成則に関係なく統一的に取り扱うことを可能にするパラメータとして提案されているき裂エネルギー密度 CED が圧電材料に導入され、線形的扱いの範囲で一部の圧電材料(例えば PZT-4)の破壊挙動はほぼ説明できることが示された。しかし、負電界の下であまり電界の影響が現れないタイプの圧電材料(例えば C2)についてはその破壊挙動は説明できていない。本研究はその主たる原因は圧電材料に現れる電氣的降伏、ドメインスイッチングといった非線形特性が考慮されていないことにあるのではとの視点から、そのような非線形挙動を取り込み、線形的扱いも包含する CED を中心とした圧電材料非線形破壊力学ともいべきものの構築を目指し、その方法論を具体的に与えるとともに有効性を実証しようとしたものである。

第1章は「Current Work and Motivation」であり、本研究の背景、目的・意義、および本論文の構成について述べている。

第2章「On the Crack Energy Density for Linear Electro-elastic Piezoelectric Materials」では、これまでに線形の範囲で知られている圧電材料の CED に関する知識をまとめるとともに、所要の有限要素法プログラムを新たに開発し、線形の範囲でほぼ破壊挙動が説明できるとされた PZT-4 と特に負電界の下での挙動が説明できないとされた C2 の破壊実験結果を改めて解析し、これまでに得られているように前者についてはほぼ CED の力学的寄与分(力学的 CED)をパラメータとしたクライテリオンによりほぼ実験結果を説明できるが、C2 についてはやはり負電界の下での挙動は説明できないことを確認している。

第3章「Discontinuous Model for Piezoelectric Material and its Applicability to CED Evaluation」は、圧電材料の電氣的降伏の効果を評価する一つのモデルとして拡張 Dugdale モデルともいべきものが提案されているが、これをさらに拡張し一般化した圧電材料の非連続モデ

ルともいべきものを提案し、このモデルの電氣的降伏を考慮した上での CED 評価への有効性、力学的 CED をパラメータとした破壊クライテリオンの適用性を検討したものである。すなわち、拡張 Dugdale モデルはき裂の理論解が存在する場合にのみ適用できる性質のものであるが、これを理論解が存在しない一般的な問題でも有限要素法により拡張 Dugdale モデルの解に相当する解が得られるようにしたものであり、このモデルにおける CED およびそれに関連する諸関係を導いた上で有限要素定式化を行い、PZT-4 と C2 の実験結果の解析を通じて、電氣的降伏を考慮することによる破壊解析への影響を検討している。結果として線形解析に比べより実験結果を説明する改善効果が現れるが、C2 についての負電界の挙動を説明できるものとはならないことを示している。

第 4 章「Electric Yielding Effect of Piezoelectric Materials on Crack Energy Density」では、前章は圧電材料の電氣的降伏効果をき裂面での電位や変位の非連続性を想定した特殊な非連続モデルにより評価したものであるが、これを通常の連続体モデルで電氣的降伏効果を評価できるように定式化し、電氣的降伏の CED に与える影響をより一般的な形で検討している。ここでも PZT-4 と C2 の実験結果に適用し、当然ではあるが前章の結果と同じく、力学的 CED による破壊クライテリオンの下、より実験結果を、特に正電界の下での実験結果を説明する上での若干の改善が見られるが、C2 についての負電界下の挙動を説明できるものとはならず、これを説明するためには電氣的降伏を考慮するだけでは不十分であることを明らかにしている。

第 5 章は「Non-linear Analysis of Piezoelectric Solids Considering Polarization Switching and CED Evaluation」であり、ここでは電氣的降伏に加え、圧電材料特有のドメインスイッチングと呼ばれる非線形挙動の効果も取り込める定式化を行いその影響を検討している。すなわち、ドメインスイッチングとは、ある条件が満たされるとその箇所における分極方向が変化するというものであるが、この効果も取り込んだ定式化に基づく有限要素プログラムを開発し、再び PZT-4 と C2 の実験結果に適用し、力学的 CED による破壊クライテリオンにより実験結果が説明できるかを検討したもので、ここにおいてはじめて、C2 についての負電界下の挙動も含め、両材料とも全体的にその破壊挙動が説明できるようになることを示している。

第 6 章は「Conclusions」であり、本論文の成果がまとめられている。

以上要するに本論文は、圧電材料の破壊力学的取り扱いに関連して、CED を中心にすえて圧電材料の非線形挙動を考慮した新たな方法論を作り上げ、これにより圧電材料破壊力学の現状を打破し、さらなる展開への可能性を示したもので、今後益々適用範囲が広がると考えられる圧電材料の強度信頼性の向上に寄与するところが大きいものと考えられる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。