

## 審査の結果の要旨

氏名 金 相 沅

本論文は「圧電材料における CED (き裂エネルギー密度) の評価法と破壊問題への適用性に関する研究」と題し、本文7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、何れも実験で観察されている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 が圧電材料に対して拡張定義され、その基本的性質、関連するパラメータ間に成り立つ関係等が示された。これまでのパラメータと異なり、CED およびその関連パラメータは電氣的降伏やドメインスイッチングといった非線形挙動の下でも一貫した物理的意味を持つものであり、圧電材料の破壊挙動を説明するパラメータとなり得る可能性がある。しかしその実証のためには、まず、電氣的降伏やドメインスイッチングを正しく反映する数値解析法を開発し、さらにそれを通じて CED やその関連パラメータを十分な精度で評価する方法を確立することが必要である。このようなことから、本研究は、これまで行われていない、硬化を考慮した電氣的降伏やドメインスイッチングをシミュレートする有限要素解析手法を開発して CED やその関連パラメータを実用上十分な精度で評価するための方法について検討し、さらに確立した方法によりこれまでに行われた破壊実験に対応する解析を行って、CED やその関連パラメータの実際の破壊問題への適用性についての検討も行ったものである。

第1章は「序論」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「本研究に関連する基本事項」では、圧電材料が示す特性、従来の研究におけるき裂パラメータとそれらの欠点、CED とその関連パラメータの定義、それらに係る基本的な関係、また圧電体の有限要素定式化の方法等、本研究を進める上で必要となる基本事項をまとめている。

第3章「線形問題を通じての CED 評価法の検討と確立」は、まず開発した有限要素プログラムの検証を行った後、基本であり、一部パラメータにおいては理論値との比較も可能

であることから線形問題の解析を行い、実用上十分な精度で CED 等を評価する方法について検討を行ったものである。有限要素解析結果から、CED 等をそれぞれの定義式と対応する径路独立積分表示により評価し、両者は良く一致すること、理論値との比較も可能なパラメータにおいては理論値ともよく一致すること、切欠き型き裂モデルでこれらのパラメータは定義されているが、き裂端曲率半径が小さくなるとこれらの値は曲率半径に依存しなくなる等、理論的に知られていた関係、事実を数値的に初めて実証すると共に、精度良くこれらのパラメータを評価するための条件を明らかにしている。また線形問題であっても荷重履歴への依存性は無視できないことも例題解析を通じて示している。

第4章「電氣的降伏を考慮した有限要素解析と電氣的降伏が CED に与える影響」では、これまで完全塑性に対応する電氣的降伏を考える解析しか行われていなかったが、降伏が進む間の硬化に対応する現象も考慮して扱える方法を示してこれに基づく非線形の有限要素解析、CED 等の評価を3章での知見を十分反映させながら行い、電氣的降伏がこれらパラメータに与える影響を明らかにしている。

第5章は「分極反転を考慮した有限要素解析と分極反転による CED への影響に関する検討」であり、ここでは、電氣的降伏に加え、有限要素解析で、実際の荷重履歴を追いながらドメインスイッチング挙動も扱える方法を示し、続いて電氣的降伏、ドメインスイッチング何れも考慮に入れた有限要素解析を行って CED 等を評価し、これらの非線形挙動がパラメータに与える影響を評価している。

第6章「CED の破壊パラメータとしての適用性に関する検討」では、これまでに行われている破壊実験結果を整理し、5章までに確立した方法により実際の実験に対応するシミュレーションを行って CED 等を評価し、これらパラメータの破壊問題への適用性を検討している。この結果、力学的 CED をパラメータにして破壊クライテリオンを仮定するとき、一つの結果を除いて、検討したすべての破壊実験における電界強さ依存性をほぼ説明でき、したがって力学的 CED が圧電材料中のき裂の挙動を表わすパラメータとして有望であることを示している。

第7章は「結論」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圧電材料の非線形挙動を考慮した新たな有限要素解析法また解析結果からの CED 評価法を提示し、実験に対応する解析を行って力学的 CED がき裂パラメータとして有効であることを示したものである。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といえ、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。