

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏名 金 相沅

本論分は「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」をまとめたものであり、全体で 7 つの章からなる。その構成は以下に述べる通りである。

第 1 章は「序論」であり、本研究の背景と目的、論文の構成について述べた部分である。その全体的な流れを次にまとめておく。

圧電材料は、その力学的 - 電氣的連性特性からセンサーやアクチュエータなどとして様々な分野で用いられ、そのとき、中にき裂などの欠陥が存在する場合の強度的信頼性を確保するため、多くの研究が行われてきている。

まず、通常の方法を対象とするとき、き裂強度に関するパラメータとして用いていた応力拡大係数、 J 積分、エネルギー解放率が圧電材料に対しても拡張定義され、それらをパラメータにした破壊クライテリオンが適用が試みられてきたが、実際行われた破壊実験を説明することはできなかった。そこで、破壊は力学的な作用であることからエネルギー解放率の力学的成分のみをパラメータとしたクライテリオンも提案されたが、それも一部の破壊実験に対応するのにすぎないものであった。

また、上記のパラメータらは線形解析に基づいているという制約を持つものであり、圧電材料のき裂の周りで起こるのであろう電氣的降伏 (electric yielding) や分極反転 (Domain Switching, DS) を考慮する解析が必要であるということからローカルエネルギー解放率が提案され用いられることもあったが、可逆的な挙動が満たされないとき、その意味が曖昧になるなどの問題を抱えたままであった。

そういう中、通常の方法において構成則によらず一貫してひずみエネルギー面密度の意味を持つ CED（き裂エネルギー密度）が圧電材料に対し拡張定義された。その圧電材料に対する CED は力学的寄与分と電氣的寄与分の和として定義されている拡張ひずみエネルギー面密度の意味を持つ量であり、また、その関連量と線形問題におけるエネルギー解放率や J 積分との関係も明らかにされている。そして、エネルギー解放率や J 積分とは異なり、構成則に関係なく物理的な意味は一貫したものであるため、圧電体に対する統一的なパラメータになることが期待できる量である。

そこで、本研究の目的は、き裂を有する圧電材料の破壊問題において、線形問題から電氣的非線形性を考慮した問題まで一貫した物理的意味を持つ破壊パラメータとしての CED の評価法を確立し、その破壊問題への適用性に関する検討を行うことである。

第 2 章は「本研究に関連する基本事項」と題し、圧電材料に対して一般的に知られていることの中で本研究の次章以降の内容に参考となるものをまとめた部分である。

まず、圧電材料に対する基本的性質として基本用語や電界と電気変位との間のヒステリシスループについて定性的に説明した後、圧電体を連続体として扱う場合に対する支配方程式をまとめる。

次に、き裂を有する圧電材料に対する破壊パラメータとして用いられてきた、線形問題に対する応力拡大係数、また、そのときの特異解を与える方法をいくつか述べる。また、その他の破壊パラメータとして、 J 積分、エネルギー解放率、また、非線形問題を対象にローカル、グローバル J 積分の定義と限界を述べた後、構成則に依存しないパラメータとして定義されている CED の定義とその関連量と他のパラメータとの関係を述べている。

最後に、圧電材料の有限要素定式化について一般的に用いられている方法をまとめておく。

第 3 章は「線形問題を通じての CED 評価法の検討と確立」と題し、本論分で中心的なパラメータと考えている CED とその関連量の評価の基本となる部分に関し、線形問題を通じて検討する部分である。

まず、圧電材料の線形問題を解析する際用いる有限要素 (FEM) 解析プログラムを作成し、それが、第 2 章で示した理論から求めたき裂周りの特異解を十分評価できることでそのプログラムの妥当性を検証する。

次に、圧電材料に対する CED を精度良く求めるため次のような検討を行う。CED は圧電材料に対しては、通常の方法のときと同じように、定義項から評価する直接法と径路独立積分により評価する方法の両方が拡張定義されているのにもかかわらず、後者による評価のときに応力や電気変位などの値に対する微分値の評価が必要であったため、直接法による評価のみ行われてきたことを述べる。そこで、本研究ではそれを解決する方法を用いて、両方法での評価を行うことで CED の評価法を確立する。ここで、応力などの微分値は通常の方法では連続的な値として求まらないので、その微分値の評価ができなかったわけであるが、ここでは、通常の方法における吉川の方法を参考にし、要素内の各積分点での応力値などを元に場の関数として再定義する方法を用い、微分値の評価を行った。その結果、面積分項などを含めて径路独立積分として評価し、それから求めた値が直接法での評価と一致していることを示すことで CED の信頼性を確保することができた。

次に、上記までは荷重履歴に関係ない、正確に言えば、力学的、電氣的荷重が同じ比率で増していった負荷状態である、いわゆる、比例負荷を想定した解析手法を用いて、今までの研究で線形問題として扱ったすべての解析はこの負荷条件の下で行われている。しかし、実際今まで圧電材料に対して行われた破壊実験では電氣的負荷を先にかけるか、

力学的負荷を先にかける場合であり、解析が実験に対応していなかった。そこで、本研究では負荷順序を考慮した解析を重ね合わせ法を用いて、線形でもそれを考慮した解析を行えるようにした。その結果、線形問題として扱った場合において、CEDの全体量や電気エンタルピー密度は負荷順序に関係なく最終状態のみに依存する量であるが、力学的CEDと電氣的CEDは、線形問題であっても、負荷順序に依存するものとなり、CEDの各量を評価する際には負荷順序の考慮は必要不可欠なものであることが分かった。また、この解析を通じて、力学的CEDを破壊パラメータとして用いれば一部の破壊実験を説明できるとした今までの研究と異なり、その力学的CEDは電界の影響をほとんど受けないという結論が得られた。そこで、圧電材料の破壊問題を取り扱うには電氣的降伏や分極反転(DS)といった電氣的非線形成を考慮しなければならないと考えられる。

第4章は「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」であり、次のようなことを述べている。

まず、圧電材料に起こる電氣的降伏を扱うモデルとしてSzeの完全降伏モデルについて述べる。それは、圧電材料に強い電界を加えるとそれによる電気変位の伸びはだんだん小さくなる現象に注目したもので、Szeはそれが通常の材料における降伏と類似していることから電氣的な完全降伏モデルを提案している。しかし、本来、マイナス降伏はDS後に起こるものであるため、本研究ではプラス電界による降伏だけを考えた。

次に、完全降伏より実験での圧電材料の挙動に近い、通常材料の降伏における硬化と類似したものを考慮したモデルを考えた。そのときの構成関係は既知である線形と完全降伏の場合の構成則に硬化指数を導入することで与えている。

最後に、上記のモデルを用いて、そのとき、降伏がCEDに与える影響について調べた。その結果、線形問題と同じように、降伏を考えたモデルにおいても、CEDは直接法と径路独立積分法を用いて評価できることと、そのとき、降伏の影響により力学的CEDを破壊パラメータと用いた場合も電界が破壊荷重に影響を及ぼすことを示し、そのとき、荷重履歴や硬化指数などの影響を検討した。

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、次のようなことを述べている。

まず、圧電材料が繰り返し負荷される電界により電界と電気変位との間にヒステリシスループを描くことはよく知られていることであるが、その詳細なデータは一般的には与えられていない。そこで、既存の研究ではそのDSの途中過程を無視したモデルなどが用いられていたため無理が生じていた。本研究では、それを克服するために、DSの途中過程における構成則を、できる限りの情報の元で与えるために、直線で近似する方法を取り入れたモデルを用いた。

次に、そのとき、一様なモデルを用い、想定している関係が得られることを示し、そのとき、線形問題や降伏を考慮した問題と同じようにCEDを評価できることを示した。

最後に、上述したDSモデルを用いて、そのとき、DSがCEDに与える影響に対する検討

を行い、また、そのとき、荷重履歴や硬化指数などの影響を調べた。そのとき、線形問題と電氣的降伏を考慮した場合と同じように、直接法と径路独立積分法から求めた CED は一致し、マイナス電界を印加したときに DS の影響により各 CED 量は電界が増加するにつれ大きくなることを示した。

第 6 章は「CED の破壊パラメータとしての適用性に関する検討」であり、次のようなことを述べている。

まず、圧電材料に対し行われてきた破壊力学実験、Park らの CT 試験に加え渡邊研究室で行った西, Na, 柴田による 3 点曲げ試験から得られた実験結果を整理した。

次に、上記の実験結果を、CED をパラメータとした破壊クライテリオンで説明できるかを調べた。その結果、破壊実験結果と最も近い値を示しているパラメータは力学的 CED であり、それをパラメータとしてのクライテリオンを用い、他の実験での結果と比べた結果、Park らの実験結果を除いては、他のすべての実験結果で現れているプラス、マイナス電界により破壊荷重が低下する傾向に対応する結果が得られた。特に、マイナス電界により破壊荷重が低下するということは従来の研究での解析では説明できなかった部分である。これで、力学的 CED が圧電材料に対する破壊パラメータとして最も有効なものではないかと考えられる。

第 7 章は「結論」であり、本研究の内容をまとめた部分である。