

氏名（本籍） オマル タハ アブデル クーデル タバザ (Jordan)  
Omar Taha Abdel Qader Tabaza (Jordan)  
学位の種類 博士（工学）  
学位記番号 甲第1162号  
学位授与の日付 2023年3月19日  
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当  
学位論文題目 **Computational Methods for Fracture  
Parameter Evaluations in Finite  
Element and Isogeometric Analyses for  
Homogeneous and Functionally Graded  
Materials**  
(均一材と傾斜機能材料に適用可能な有限要素法解析やアイソジオメトリック解析を用いた破壊力学パラメータ計算法)

論文審査委員 (主査) 教授 岡田 裕  
教授 萩原 慎二 教授 高橋 昭如  
教授 東平 光生 教授 河野 守

## 論文内容の要旨

Accurate predictions of the residual lives of engineering structures are at most importance. To estimate the lives of cracked structures, accurate crack parameter evaluations are required. One important parameter is the energy release rate which is related to the Stress Intensity Factors (SIFs). SIFs characterize the stress field near the crack tip. The J-integral is a path independent integral that evaluates the energy release rate at the crack tip. The interaction integral method can be used to evaluate SIFs under mixed mode loading conditions. This dissertation discusses newly developed methodologies for the evaluations of SIFs using the J-integral or the interaction integral methods, for cracks in homogenous or functionally graded materials. The evaluations are carried out as post analysis

computations. Finally, A crack propagation scheme for IGA is proposed.

This dissertation deals with two major analysis methods. They are, the Finite Element Method (FEM), and the Isogeometric Analysis (IGA). First, utilizing FEM, discussions on the interaction integral method for Functionally Graded Materials (FGMs) are presented. Due to the spatial material property variation, various ways to deal with the spatial change of elastic constants can be considered. Five ways to set up the interaction integral that produces five formulations are discussed. Some of these formulations are discussed for the first time, making this work the only comprehensive investigation on the interaction integral method for FGMs. The tetrahedral finite elements are used for the model and crack generations. Some numerical challenges arise due to; 1) adopting the domain integral that is based on tetrahedral finite elements for FGMs and 2) the spatial material property change in the vicinity of the crack front. These challenges are addressed, and ways to overcome them are presented.

The second part of this work is a study of applying IGA to three-dimensional crack problems. This work is believed to be the first to utilize a geometrical representation of the three-dimensional crack front using NURBS based models for IGA analysis and SIF evaluations. Since IGA models are generated using B-spline/NURBS, it allows for an exact representation of the generated three-dimensional crack fronts. First, the singular patch method for two-dimensional IGA crack analysis is adopted and extended to the three-dimensional problem. A domain integral method suitable for IGA is developed for the evaluations of the J-integral and the interaction integral. In addition, an attempt to propose a crack propagation analysis scheme is presented.

Finally, conclusions and future recommendations are discussed.

## 論文審査の結果の要旨

構造物の余寿命評価を行うにあたり、き裂損傷の影響に対する力学的評価は大変重要である。そのためには、構造中のき裂損傷の定量的力学評価のためには、破壊力学パラ

メータを精度良く計算することが重要である。破壊力学パラメータとして応力拡大係数とエネルギー解放率がある。それらは互いに関係している。代表的なエネルギー解放率計算法に J 積分法があり、いわゆる経路独立積分として有限要素法解析結果から計算することが可能である。また、混合モード荷重下での応力拡大係数解析には相互積分法が多用される。博士論文では、混合モード荷重を受ける傾斜機能材料の応力拡大係数解析のための相互積分法に関する研究、アイソジオメトリック解析のための新しい J 積分や相互積分法の実装法の提案と精度検証、さらにその結果を応用するためのアイソジオメトリック解析を利用したき裂進展解析法を提案している。

博士論文は大きく分けて有限要素法を用いた解析とアイソジオメトリック解析に関する二つの部分から構成されている。はじめに、有限要素法解析結果から相互積分法を用いた傾斜機能材料の混合モード応力拡大係数解析に関する研究成果について述べている。傾斜機能材料は、材料中で弾性係数などの機械的性質が連続変化するものである。本論文は、領域積分法を用いた相互積分法解析中で弾性係数の連続変化を表現する積分項の表現に任意性があることを見出し、5 種類の定式化を示した。その中には文献中で既に報告されているものもあるが、本論文で新規に提案したものも含まれる。さらに、主として四面体有限要素の使用と弾性係数の連続変化の表現法に着目し、三次元有限要素法プログラムへの実装法を示した。続けて、種々の数値解析例による 5 種類の定式化の精度評価を行った。それらには、二次元無限弾性体中の貫通き裂問題に対する厳密解、文献中の数値解との比較が含まれる。それらの結果より、適切なプログラム実装法の下では、論文中で取り扱った 5 種類の実装法の解析結果に有為な差の無いことが示された。

次に、アイソジオメトリック解析を用いた破壊力学解析に関する研究成果を述べている。NURBS (非一様有理 B-Spline) 関数や B-Spline 関数だけでき裂形状とき裂の応力特異性を表現し、さらに、J 積分法や相互積分法を用いてアイソジオメトリック解析だけでき裂解析を行う初めての試みである。J 積分法や相互積分法解析のために、領域積分法の新しい実装法を提案している。き裂の応力特異性は二次元問題で提案された特異パッチ法を三次元問題へ拡張し、表現することに成功した。数値解析例からは、アイソジオメトリック解析に実装した J 積分法や相互積分法解析により高精度な応力拡大係数計算が可能なが示された。有限要素法を用いた場合と比較し、アイソジオメトリック解析では、き裂の形状表現に離散化誤差が発生しないため、き裂前縁曲線の曲率半径が非常に小さい場合でも高精度な応力拡大係数解析が可能である。さらに、それらの計算結果を応用したき裂進展解析手法を提案している。

博士論文は、第一章(緒言(Introduction))で研究の背景、関連の解析手法と研究目的を述べ、第二章(傾斜機能材料のための相互積分法(Interaction Integral Method for FGMs))では傾斜機能材料の応力拡大係数計算のための相互積分法定式化について示し、第三章(傾斜機能材料中のき裂問題に対する数値解析例(Examples Problems for Cracks in FGM))では数値解析例により提案手法の解析精度やそれらの間の相互比較

について議論している。さらに、第四章（アイソジオメトリック解析による破壊力学解析 (Fracture Mechanics Analyses using Isogeometric Analysis (IGA))）ではアイソジオメトリック解析による破壊力学解析手法を、第五章（アイソジオメトリック解析を用いたき裂解析例 (IGA based Crack Analysis Results)）ではアイソジオメトリック解析によるき裂問題解析結果を示し、その精度について検討している。第六章（結言 (Conclusions)）ではここまでの研究の総括を述べ、第七章（今後の研究と展望 (Future Research and Recommendation)）では、今後の研究展望について述べている。

本論文は、傾斜機能材料の破壊力学解析やアイソジオメトリック解析の応用について新規な内容をまとめたものである。エネルギー機器やガスタービン等動力機器をはじめとする、構造物の構造健全性評価の高度化に大きく貢献するものであり、博士（工学）の学位論文として十分に価値のあるものであると認める。