

三次元き裂問題のメッシュフリー高精度解析法の開発

長崎大学大学院工学研究科
園部 陽平

持続可能な社会活動を行う上で、限りある資源を有効に、そして、正しく利用することが求められている。例えば、安全で、安心な機器や装置を設計・製作することは重要であるが、過剰に大きく、大重量の装置を作れば装置価格やランニングコストが膨大となってしまう。従って、材料に作用する無理（外力）を正確に把握し、無理の強さが材料固有の抵抗値（強度）を超えることのないように機器を設計し、運用することが大切であり、機械工学分野の中でも主要4力学の一つとされている材料力学は、上記背景をもとに発展してきた。材料力学を基礎とし、特にき裂の力学挙動を扱う体系として、20世紀後半に破壊力学が誕生した。線形破壊力学では、き裂先端からの距離の平方根に反比例する応力場の厳しさ（特異性）の尺度として応力拡大係数が導入されている。そして、応力拡大係数の正確な把握は、未来におけるき裂の挙動を正確に推定することを可能にする。二次元き裂問題では、数学的に厳密な多数の解析解が存在するものの、三次元問題では、厳密解はほとんど知られていない。特に、非平面状三次元き裂では、その傾向が顕著である。

三次元的なき裂成長挙動を正確に予測するために、種々の数値解析手法が開発・適用されてきたが、要素分割に関連する問題や、き裂先端の応力特異性に起因する問題により正確な応力拡大係数を求めることは困難な場合がほとんどである。このような状況の中、1967年に西谷が開発した体積法は、種々の単純形状のき裂問題に対して、信頼性の高い数値解を得ることに成功してきた。しかしながら、き裂の形状が複雑になれば、体積法であっても解析精度を高めることは困難である。それは、主として複雑形状のき裂を、要素理論を用いて離散数学的に取り扱うことの困難に起因するものである。そこで本論文では、要素分割なしに三次元き裂問題を解析できないかを検討し、移動最小二乗法を導入することで要素を必要としないメッシュフリー体積法を開発した。メッシュフリー体積法では、仮想境界に節点を配置するだけで、弾性解析が実行できる。この新しい解析法を種々の三次元き裂問題に適用し、その有効性を検討したものが本研究の中核をなしている。

本学位論文は、以下に示す全6章で構成される。

第1章では、研究背景、研究目的および学位論文の構成について述べた。また厳密解の知られているいくつかの三次元き裂問題についてそれらの特徴をまとめ、後に数値解と比較する準備を行った。

第2章では、三次元き裂問題に対するメッシュフリー体積法を提案した。前半は体積法によるこれまでの三次元き裂解析の歴史、基本原理や特徴について述べた。特に、既知のき裂上下面の相対変位の特性に基づく基本密度関数の導入が、精度良くき裂前縁の応力拡大係数を求める上で極めて重要な役割を果たしていることを説明した。また後半では、移動最小二乗法を導入することで、未知なる体積力対の重み関数の分布を節点における関数値で代表させることができる内挿（形状）関数が半自動的に定義できることを示した。そして、き裂面に配置された節点のみで、三次元き裂解析が可能なメッシュフリー体積法を提案した。特に、移動最小二乗法の特性と移動最小二乗法を未知の重み関数へ導入する方法について詳述した。また、厳密解が存在する円板状き裂の応力拡大係数解析を実施し、従来の要素分割を伴う体積法と比較して、提案手法の有効性及び解の収束性や計算精度について論じた。

第3章では、き裂前縁に配置した点列のみの入力データで任意形状平面き裂問題の応力拡大係数が解析可能であることを示した。無限体中の平面き裂群の応力拡大係数の解析を実施し、厳密解や信頼できる数値解と比較することで提案手法の有効性と適用限界を論じた。また、き裂先端の節点群のみで、平面き裂群の解析が可能であるという特徴を活用して、同一平面上の平面き裂群が合体しながら成長していく過程をシミュレートした。

第4章では、半無限体の自由表面に垂直な、縁平面き裂問題に対するメッシュフリー体積法の適用方法を説明した。また、部分円板状き裂問題を解析し、き裂前縁の実用的に正確な応力拡大係数の分布やその特徴をまとめた。

第5章では、正規化座標系を定義し、正規化座標上でメッシュフリー体積法に基づいた曲面き裂を取り扱う高精度解析法を提案した。この方法では、曲面に沿った三次元き裂問題を効率的に扱うことができる。本法の有効性や精度を検証するために、静水圧を受ける部分球面状き裂の応力拡大係数を解析し、厳密解と比較した。

第6章では、本学位論文のまとめおよび今後の展望について述べた。