

氏 名（本 籍）	あら い こういちろう 荒 井 皓一郎（埼玉県）
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	甲第 1020 号
学位授与の日付	2019 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	有限変形弾塑性繰返し荷重問題に適用可能な 新しい J 積分と J 積分範囲 ΔJ

論 文 審 査 委 員	（主査）教授 岡田 裕
	教授 萩原 慎二 教授 早瀬 仁則
	准教授 高橋 昭如 教授 東平 光生
	教授 荒井 正行

論文内容の要旨

弾塑性破壊力学評価手法として J 積分は広く用いられている。J 積分はき裂進展に伴ってき裂長さが増大した際のエネルギーの解放を表し、任意の積分経路・積分領域を用いて評価が可能な経路独立性を有することが知られている。また、特定の試験片形状に対して実験結果等から得られる荷重－変位曲線を用いた簡便評価式が提案されており、実験による J 積分の評価も可能である。J 積分は線形・非線形弾性問題、もしくは全ひずみ理論が適用可能な弾塑性問題であることを仮定して導出される。そのため弾塑性繰返し荷重問題など、荷重経路に対する履歴依存性が生じる、いわゆる非比例負荷問題に対して適用することができない。このような問題に対して J 積分を適用した場合、経路独立性が失われることが知られている。同様に、有限変形を仮定した問題に対しても同様に経路依存性が失われることが知られている。本研究では、き裂面の面積が増大した際に、き裂前縁を含む有限な領域 V_0^0 の内部で散逸するエネルギーを評価する式として三次元 J 積分の再定義を行った。再定義された三次元 J 積分法は荷重経路に対する依存性が生じる問題や有限変形問題に対して常に経路独立性を有する。本論文では任意の荷重経路と有限変形問題を許容する新しい三次元 J 積分法の導出と、有限要素法のポスト処理プログラムとしての実装法について述べる。さらに数値解析例により、新たに提案した三次元 J 積分法が常に経路独立性を有し、非比例負荷問題に適用可能であることを示す。

また、J 積分の簡便評価法を繰返し荷重問題へ適用した J 積分範囲 ΔJ が低サイクル疲労問題など、繰返し荷重を受ける問題の評価に有効であることが知られている。J 積分範囲 ΔJ

は、 J 積分の簡便評価式を繰返し荷重問題の評価に適用した手法である。簡便評価式を用いた実験評価手法として提案された J 積分範囲 ΔJ を J 積分と同様の経路積分によって表した経路積分表示が提案されており、これを用いた数値解析例が行われている。 J 積分範囲 ΔJ の経路積分表示は J 積分同様、特定の問題に対して経路独立性を有することが示されている。しかし、多くの場合でこの仮定は成立せず、 J 積分範囲 ΔJ の経路独立性が成立する問題は限られる。また、有限変形問題への適用は行われておらず、その評価法については明らかではない。本研究では、著者らが提案した任意荷重経路と有限変形問題を許容する新しい三次元 J 積分法をもとに、有限変形弾塑性問題に適用可能な J 積分範囲 ΔJ の三次元領域積分表示の定式化を行った。本論文では有限変形弾塑性問題に適用可能な J 積分範囲 ΔJ の三次元領域積分表示の導出と、有限要素法のポスト処理プログラムとしての実装法を述べる。さらに、数値解析例により、新たに提案した J 積分範囲 ΔJ の三次元領域積分表示が、常に経路独立性を有し、簡便評価式を用いて導かれた J 積分範囲 ΔJ と近い値となることを示す。加えて、CT 試験片の繰返し負荷試験のトレース解析を有限要素法によって行い、これらの提案手法を用いた破壊力学的評価を試みる。これにより、大変形を伴う有限変形弾塑性繰返し荷重に対する提案手法を用いた評価例を示す。

本論文は第一章で緒言を示し、従来の J 積分・及び J 積分範囲 ΔJ と本研究の概要について述べる。第二章では破壊力学解析・評価手法を示す。ここでは破壊力学パラメータと従来の解析手法についての概要、二次元・三次元問題に対する J 積分の導出の詳細、続けて非比例負荷問題への適用例とその課題について示す。また、 J 積分の簡便評価手法と、二次元 J 積分の拡張手法である T^* 積分についても示す。さらに J 積分範囲 ΔJ の簡便評価式、及び経路積分、領域積分表示についても詳細に述べる。第三章では、任意の荷重経路と有限変形を許容する新しい三次元 J 積分法の導出と、その特性に関する考察を行い、有限要素法のポスト処理プログラムとしての実装法について述べる。さらに有限要素法を用いた数値解析例を示す。第四章では有限変形弾塑性問題に適用可能な J 積分範囲 ΔJ の三次元領域積分表示の導出、及び ΔJ の計算に使用する増分、範囲に関する物理量の生成方法と、有限要素法を用いた数値解析例を示す。第五章では一般社団法人日本溶接協会 原子力研究委員会 MFD 小委員会で実施された ICT 試験片の繰返し負荷実験に対して有限要素法解析を用いたトレース解析を行い、第三章、第四章で示した提案手法を用いた破壊力学的評価を行った結果を示す。第六章に結言と今後の展望について述べる。

論文審査の結果の要旨

本論文は、三次元 J 積分と J 積分範囲 ΔJ に関する、厳密かつ新規な内容を提案するものである。

弾塑性破壊力学評価手法として J 積分は広く用いられてきた。 J 積分は単位面積あたりのき裂進展に伴い自由表面生成のために散逸するエネルギーを表現する。これをエネルギー

ギ解放率という．任意の積分経路や積分領域を用いても計算結果が不変である．いわゆる経路独立性を有することが知られている．また，特定の試験片に対して実験結果から得られる荷重－変位曲線に基づく簡便評価式が提案されており， J 積分の実験的評価も可能である．厳密には， J 積分のエネルギー解放率としての物理的意味と経路独立性は，線形または非線形弾性体，または全ひずみ理論が適用可能な弾塑性体に対してのみ有効である．弾塑性繰返し荷重問題のように，前述の仮定が成立しない場合は J 積分の適用は不可能とされてきた．また，弾塑性有限変形問題でも J 積分の経路独立性が失われることが知られている．

本論文は，三次元 J 積分を，き裂進展に伴いき裂前縁の有限領域内部に散逸するエネルギーとして，仮想き裂進展に基づく領域積分法により再定義することを提案した．提案された三次元 J 積分法は，従来法では荷重経路に対する依存性が生じる問題や有限変形問題に対してでも経路独立性が保証される．本論文ではその導出方法，有限要素法のポスト処理プログラムとしての実装法，さらに数値解析例を示している．数値解析例では，提案手法により無条件に経路独立性が保証されることが実証されている．

一方， J 積分の簡便評価法を繰返し荷重問題へ適用した J 積分範囲 ΔJ が低サイクル疲労問題など，繰返し荷重を受ける問題の評価に有効であることが知られている．実験評価手法として提案された J 積分範囲 ΔJ を J 積分と同様の経路積分によって表した経路積分表示が提案され，これを用いた数値解析例が行われてきた． J 積分範囲 ΔJ の経路積分表示は J 積分同様，特定の条件下で経路独立性を有する．しかし，有限変形問題では経路独立性を保証することができない．そこで，本論文では，提案の再定義された三次元 J 積分法をもとに，有限変形弾塑性問題に適用可能な J 積分範囲 ΔJ の三次元領域積分表示の定式化を行った．本論文では有限変形弾塑性問題に適用可能な J 積分範囲 ΔJ の三次元領域積分表示の導出，有限要素法のポスト処理プログラムとしての実装法を提案した．更に，CT 試験片の繰返し負荷試験解析を有限要素法によって行い，提案の J 積分範囲 ΔJ により破壊力学的評価が可能かどうか検討を行ない，今後検討が必要であるが破壊力学的評価が可能であろうという結果を得た．

本論文は第 1 章で緒言として従来の J 積分・及び J 積分範囲 ΔJ とその問題点，さらに本研究の概要について述べている．第 2 章では既存の破壊力学解析と評価手法の概要を示す．ここでは破壊力学パラメータと従来の解析手法についての概要と，二次元と三次元問題に対する J 積分の導出を詳細に示し，非比例負荷問題への適用例とその課題について議論が行われている．また， J 積分の簡便評価手法と，二次元 J 積分の拡張手法である T^* 積分の詳細が示されている．更に J 積分範囲 ΔJ の簡便評価式，及び経路積分，領域積分表示についても詳細に議論が行われている．第 3 章では，任意の荷重経路と有限変形を許容する新しい三次元 J 積分法の導出と，その特性に関する考察を行い，有限要素法のポスト処理プログラムとしての実装法について示されている．さらに第 4 章で有限要素法を用いた数値解析例により，経路独立性に関する検証を行い，本研究で提案する三次元 J 積分法が無条件に経路独立であることが実証されている．第 5 章では有限

変形弾塑性問題に適用可能な J 積分範囲 ΔJ の三次元領域積分表示の導出が行われている。第 6 章ではその数値解析例に関する議論を、簡便評価式による解析結果との比較と経路独立性の観点から行い、そして、さらに一般社団法人日本溶接協会 原子力研究委員会 MFD 小委員会で実施された 1TCT 試験片の繰返し負荷実験に対して有限要素法解析を用いた破壊力学的評価を行った結果が示されている。最後に、第 7 章に結言として研究の成果とそのまとめ、さらに今後の展望が述べられている。

本論文は、三次元 J 積分と J 積分範囲 ΔJ に関する、厳密かつ新規な内容をまとめたものである。エネルギー機器をはじめとする、構造物の破壊力学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。