

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K11341

研究課題名(和文)XFEMの異種材界面を横切るき裂進展問題への適用

研究課題名(英文)Crack propagation analyses of crossing dissimilar interface by the extended finite element method

研究代表者

長嶋 利夫(NAGASHIMA, Toshio)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：10338436

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：ヘビサイド関数だけを拡充した三次元レベルセット拡張有限要素法(XFEM)(コード名：NLXFEM3Dstruct)とその実行を制御するき裂進展解析システム(Sim2d)を開発し、異種材界面を含む構造物のき裂進展解析を実施する方法を開発した。開発手法においては、有限要素モデルと独立に定義されるき裂前縁形状の評価点の応力拡大係数とパリズ則を用いてき裂形状を進展させ、3次のベジェ曲線を用いてその形状を平滑化する。このような手法を用いて、クラッド付きCT試験片の疲労き裂試験解析を実施し、実際の試験で得られる幅方向に非対称なき裂進展形状が再現できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子炉圧力容器においては耐食性、防錆性を向上させるため、腐食に強い材料がクラッドとして表面に肉盛溶接されて使われる。このようなクラッド鋼材からなる構造物の保全においてき裂が検出された場合、一定運転期間後のき裂の進展量を予測することが重要となる。しかしながら、クラッド鋼材は異種材界面を含むので、接合の方法および組み合わせ材料の機械的性質の差異によりき裂の進展挙動を解明することが困難である。本研究は、このような現象を数値シミュレーションにより解明するための基礎となるものであり、原子力発電プラントにおける安全評価、とりわけ原子炉圧力容器の構造健全性評価の高度化に資することができる。

研究成果の概要(英文)：The stress analysis code based on a three-dimensional level set extended finite element method (XFEM) using only the Heaviside function referred to as NLXFEM3Dstruct and the crack propagation analysis system referred to as Sim2d, which controls executions of the XFEM code, were developed to perform crack propagation analyses of structures having a dissimilar interface. The developed system extends crack front geometry, which can be modeled independently of finite elements, using stress intensity factors evaluated at the crack front and Paris' law and smooths the geometry using the 3rd-order Bezier curve. The method was applied to the fatigue crack propagation test analyses of CT test specimens with cladding, and asymmetric crack propagation behavior in the specimen's thickness width direction, which was also observed by the experiment, was simulated.

研究分野：計算力学、破壊力学

キーワード：計算力学 異種材界面 J積分 XFEM 領域積分法 クラッド鋼

## 1. 研究開始当初の背景

低合金鋼からなる原子炉压力容器の内面には、耐食性の向上を目的にステンレス鋼による肉盛溶接(クラッド)が施されている。炉容器にき裂を想定し、その構造健全性を評価する場合のクラッドの扱いについては、日本機械学会発電用原子力設備規格維持規格の解説 E-5 にその考え方が示されている。しかしながら、より現実的な評価を実施するにあたり、クラッドがき裂進展挙動にどのような影響を与えるかについては、十分な知見が得られているとは言い難い。また、炉容器とクラッドとの異材界面近傍におけるき裂進展は複雑な挙動を示すことが予測されるため、数値シミュレーションによるき裂進展解析を実施するにあたっては、き裂と有限要素メッシュを独立に定義できる拡張有限要素法 (the eXtended Finite Element Method: XFEM) の適用が有用であると考えられる。

XFEM においては解析領域における変位場  $u^h$  を次式のように近似する。

$$u^h(\mathbf{x}) = \sum_I N_I(\mathbf{x})(u_I + \mathbf{a}_I f(\mathbf{x}))$$

ここに、 $N_I$  は通常の FEM で用いられる節点  $I$  に関する内挿関数、 $f(\mathbf{x})$  は局所的に導入される関数であり拡充関数と呼ばれる。また、 $u_I$ 、 $\mathbf{a}_I$  はそれぞれ通常の内挿関数および拡充された内挿関数についての節点自由度である。事前に解の特性を表す関数が既知であれば、その関数を拡充関数として用いることができる。

破壊力学に基づき、き裂を含む構造物の構造健全性を評価するために、応力解析結果を用いてき裂先端あるいは前縁の応力拡大係数や  $J$  積分を計算する必要がある。XFEM 解析の結果を用いる場合には、通常、領域積分法が用いられる。しかしながら、積分領域内部の物性値が均質でないと、 $J$  積分の経路独立性が保証されず、 $J$  積分の破壊力学パラメータとしての意味が失われてしまう。

## 2. 研究の目的

本研究は、異種材料を接合した界面を含む構造物のき裂進展問題に XFEM を適用するための妥当な方法を確立することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) ヘビサイド関数だけを拡充した三次元 XFEM の開発

異種材界面き裂において、き裂先端近傍の応力場、変位場は、均質な等方性材料のものとは異なる。したがって、従来の XFEM で用いられているき裂先端近傍の変位場の漸近解を再構成する基底関数を拡充することは適切ではない。また、材料特性が線形弾性ではなく弾塑性の場合、等方性ではなく異方性の場合にも同じことが言える。そこで、本研究ではヘビサイド関数だけを拡充した三次元 XFEM を開発して用いる。

### (2) XFEM を用いた疲労き裂進展解析システムの開発

XFEM を用いることにより、き裂前縁形状を有限要素分割と独立に定義し、応力解析の実施、その結果を用いた破壊力学パラメータである  $J$  積分や応力拡大係数  $K$  の評価が可能になる。さらに、得られた  $K$  値とパリズ則を用いてき裂進展速度を評価し、き裂前縁形状を更新することができる。以上のように、停留き裂進展解析とき裂進展量評価を繰り返すことにより疲労き裂進展解析が実施可能となる。この手順を自動的に実行するための制御プログラムを開発する。

### (3) クラッド鋼材 CT 試験片の疲労き裂進展解析

開発した XFEM プログラムおよび制御システムを用いて、クラッド付き CT 試験片の疲労き裂進展解析を実施する。

## 4. 研究成果

### (1) ヘビサイド関数だけを拡充した三次元 XFEM の開発

異種材界面を有する構造物のき裂解析にも適用可能な、三次元 XFEM 解析プログラム (NLXFEM3Dstruct) を開発整備した。ここで用いる XFEM は、レベルセット法によりき裂面形状の定義し、拡充関数としてヘビサイド関数だけをを用い、8 節点六面体ソリッド要素を用いた解析モデルに対して、要素形状と独立にき裂面を定義できる。線形弾性問題だけではなく弾塑性解析も実行可能である。開発プログラムは、標準的な C 言語で記述されており、Windows および LINUX で実行可能である。NLXFEM3Dstruct の仕様を表 1 に示す。

NLXFEM3Dstruct を用いて、図 1 に示すような一様引張り荷重を受ける半楕円表面き裂つき平板の応力解析を実施し、き裂前縁における拡大拡大係数を評価し、従来の漸近解基底を拡充した XFEM と従来の FEM による結果と比較する。FEM 解析および XFEM 解析に用いた有限要素モデルを図 2 に示す。また、XFEM 解析モデルにおけるき裂前縁近傍の拡充節点分布を比較して図 3 に示す。FEM 解析および XFEM 解析 (H:ヘビサイド関数だけを拡充, HA:漸近解基底を拡充) の結果か

ら得られるき裂前縁における応力拡大係数分布を参照解と比較して図4に示す。提案する XFEM は、従来の XFEM や FEM, そして参照解と良く一致した妥当な結果を与えている。

表 1 NLXFEM3Dstruct の仕様

Code	NLXFEM3Dstruct
Latest version	1.230207
Development language	ANSI-C
Discretization method	eXtended Finite Element Method
Analysis type	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Elastic Static Analysis</li> <li>● Elastic-plastic Static Analysis</li> </ul>
Element type	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 8-node hexahedral element</li> <li>● 8-node interface element considering cohesive zone model</li> </ul>
Material type	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Isotropic</li> </ul>
Enrichment type	Heaviside function
Method use to solve the system equation	Direct method: <ul style="list-style-type: none"> <li>● Skyline method</li> <li>● Pardiso (Intel Math Kernel Library)</li> </ul>
Evaluation J-integral and SIF	Domain Integral Method

## (2) XFEM を用いた疲労き裂進展解析システムの開発

開発した三次元 XFEM 解析プログラム NLXFEM3Dstruct の実行を制御するプログラム (Sim2d) を開発し、異種材界面を含む構造物の疲労き裂進展解析が実行可能な解析システムを構築した。開発した解析システムは XFEM に基づいているため、1 種類の有限要素モデルを準備するだけで良い。また、材料毎に異なる疲労き裂進展則 (パリソ則) を与えることができる。さらに、領域積分を実施するための積分領域が異種材界面に重ならない範囲で、それぞれの単一材料領域において応力拡大係数 (K 値) を算出し、それらの値を外挿することによって、異種材界面近傍における応力拡大係数 (K 値) を評価する。開発プログラムは、python で記述されており、Windows および LINUX で実行可能である。Sim2d システムの概要を図5に示す。

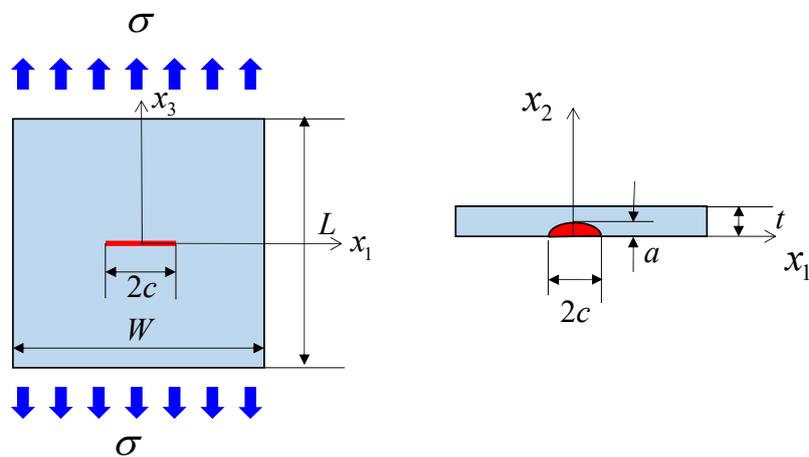
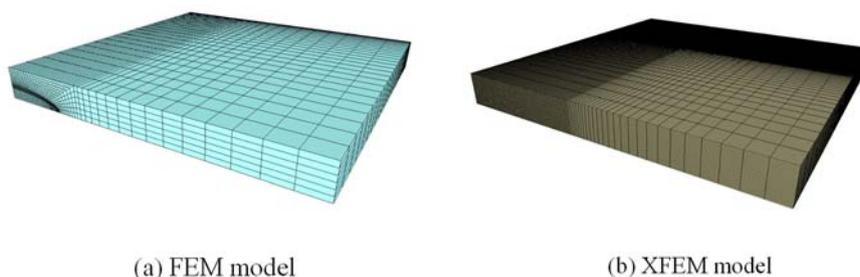


図 1 一様引張り荷重を受ける半楕円表面き裂つき平板



(a) FEM model

(b) XFEM model

図 2 有限要素モデル

● Enriched with asymptotic basis    ● Enriched with Heaviside function



(a) XFEM (H)



(b) XFEM (HA)

図3 XFEM 解析モデル

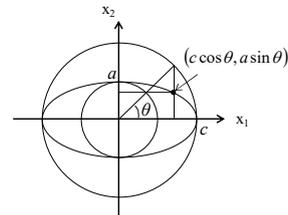
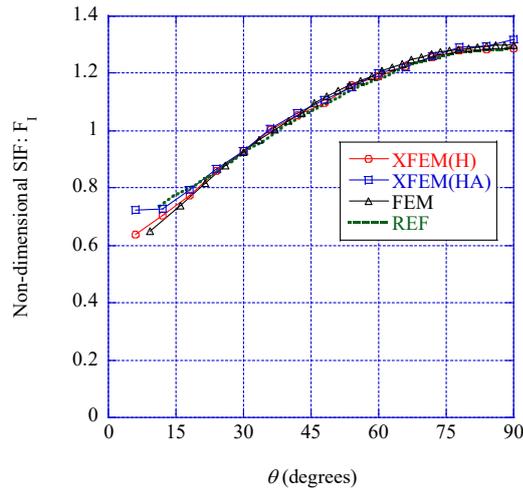


図4 き裂前縁の応力拡大係数分布

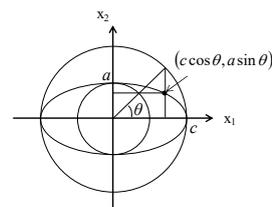
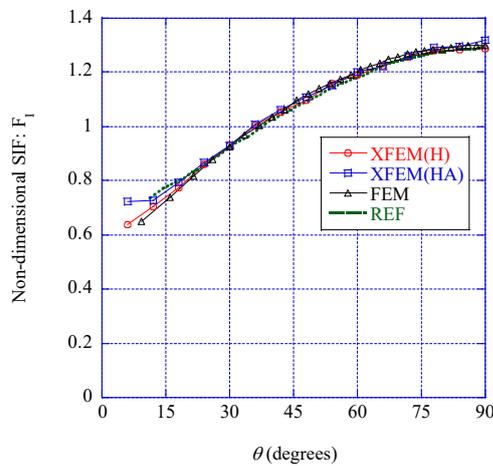


図5 疲労き裂進展解析システム (Sim2d) の概要

### (3) クラッド鋼材 CT 試験片の疲労き裂進展解析

本システムを用いて、異種材界面を含まない低合金鋼、クラッド材、および異種材界面を含むクラッド鋼材の CT 試験片についての疲労き裂進展解析を実施した。クラッド鋼材の CT 試験片の有限要素モデルを図6に示す。対称性を考慮して1/2モデルを用いる。Sim2dを用いて、開発コードNLXFEM3Dstructを繰り返し実行することによりき裂進展解析を実施する。パリス則の係数は、実測値を用いた。XFEM解析において領域積分法によるJ積分、さらにはK値を評価するが、積分領域が均質でなくなる場合には、その値を直接用いず、外挿して求めた。繰り返し荷重を与えた場合の、き裂前縁形状の推移を図7に示す。き裂前縁形状は、試験片の幅方向に非対称となる結果が得られた。この結果は、実験結果と概ね整合する結果となっている。

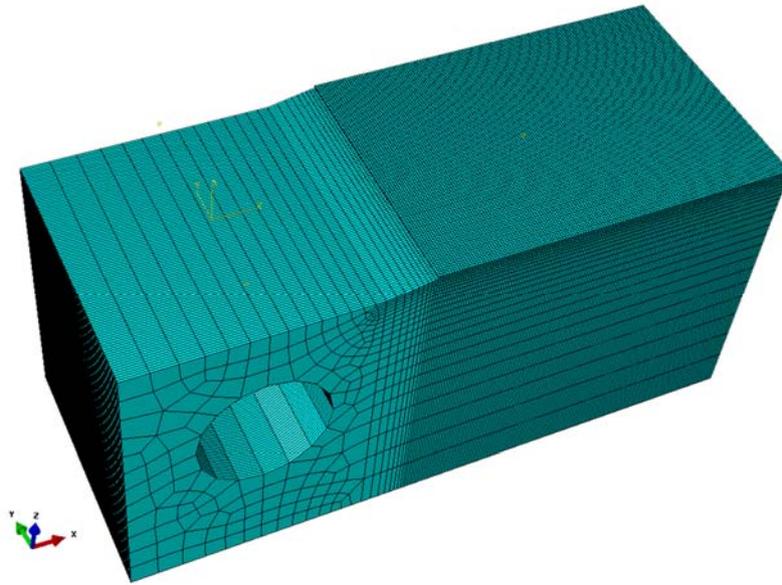


図6 クラッド鋼材のCT試験片の有限要素モデル (1/2モデル)

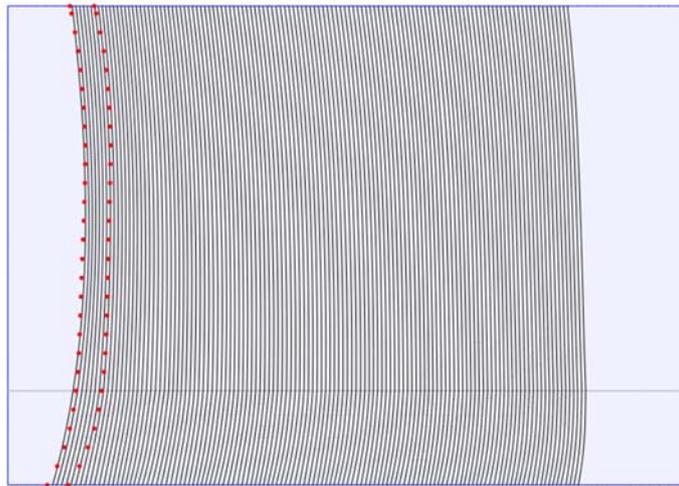


図7 き裂前縁形状の推移

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nagashima, T., Wang, C.	4. 巻 19-2
2. 論文標題 XFEM analyses using two-dimensional quadrilateral elements enriched with only the Heaviside step function	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Computational Methods	6. 最初と最後の頁 No. 2150063
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/S0219876221500638	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Toshio Nagashima	4. 巻 7
2. 論文標題 Three-dimensional crack analyses under thermal stress field by XFEM using only the Heaviside step function	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.20-00098	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Toshio Nagashima
2. 発表標題 Thermal Stress Analyses by XFEM enriched with only Heaviside step function
3. 学会等名 ECCOMAS Congress 2020 and 14th World Congress in Computational Mechanics (WCCM) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshio Nagashima
2. 発表標題 Development of Three-dimensional Thermal Stress Analyses System by XFEM using only Heaviside step function
3. 学会等名 COMPSAFE 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長嶋利夫
2. 発表標題 ヘビサイド関数だけを拡充したXFEMによる三次元熱応力解析
3. 学会等名 第25回計算工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nagashima, T.
2. 発表標題 Benchmark Analysis for Ductile Fracture Simulation -Analysis by Sophia University,
3. 学会等名 APCOM2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長嶋利夫
2. 発表標題 XFEMによる三次元熱応力解析ソフトウェアの開発
3. 学会等名 第32回計算力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nagai, M., Miura, N., Nagashima, T.
2. 発表標題 Non-uniform Fatigue Crack Propagation Test Crossing Interface in Cladded Plate
3. 学会等名 25th Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 25) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長嶋利夫
2. 発表標題 対称性を考慮したFEMモデルへの結合力モデルの導入
3. 学会等名 第31回計算力学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nagashima, T.
2. 発表標題 Development of stress analysis system using XFEM to evaluate strength of composite structures,
3. 学会等名 WCCM2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nagashima, T.
2. 発表標題 Application of XFEM to structural analyses of composites,
3. 学会等名 ICCM2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 李炎龍, 長嶋利夫
2. 発表標題 XFEM に基づく疲労き裂進展解析システムの開発とその検証
3. 学会等名 第27回計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Li, Y., Nagashima, T.
2. 発表標題 Development of XFEM-based system for fatigue crack propagation analysis and its verification
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM) & 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李炎龍, 長嶋利夫
2. 発表標題 XFEM によるクラッド 付きCT試験片の疲労き裂進展解析
3. 学会等名 第35 回計算力学講演会,
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関