様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　元 年　６ 月 １４ 日現在

機関番号：８２６２６
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2015～2018
課題番号：１５Ｋ０５７７８

研究課題名（和文）電磁非破壊検査技術向上に向けた高度磁場解析技術の構築

研究課題名（英文）Construction of advanced magnetic field analysis technology for electromagnetic nondestructive inspection technology improvement

研究代表者

中住　昭吾（Nakasumi, Shogo）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：７０４５０６６６

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,800,000円

研究成果の概要（和文）：非破壊検査技術への応用を念頭に、2次元問題においてFEMメッシュ分割に依存せずに欠陥近傍の磁場を解析する計算手法を確立した。構造解析で研究が進められた拡張型有限要素法（XFEM）を磁場解析用に発展させた。具体的には、ポテンシャル流れ理論において非粘性流体の挙動を表す複素ポテンシャルを、解の局所的特徴を表す付加関数に設定し、さらにこれを等角写像を用いて、個々の欠陥形状に適した形態に写像し利用する定式化を構築した。
　その結果、構造物表面上の屈曲き裂、曲線き裂、そして構造物の内部き裂について、直交格子型のFEMメッシュでの解析が可能となり、また従来型のFEM解析よりも高精度な解を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義
　本研究の成果は、主に磁場情報を用いた非破壊検査技術において効果が期待できる。き裂の形状を推定するために計算機内部でFEM磁場解析を行う際に、本研究で開発した計算手法では、き裂の形状を反映したメッシュを準備する必要がなく、常に直交格子型のメッシュを使い続けることができる。このことは、事前に欠陥の形状を知ることができない非破壊検査では運用上、非常に大きな利点となる。発電所や橋梁等インフラの老朽化が進む状況の下、部材中の欠陥を探知する非破壊検査技術の向上は今後益々重要であるため、本研究の社会的意義は高いと考えられる。

研究成果の概要（英文）：For the purpose of application to nondestructive inspection techniques, a calculation method has been established to analyze the magnetic field in the vicinity of a defect without relying on FEM mesh division in a two-dimensional problem. The extended finite element method (XFEM), which was studied in structural analysis, has been developed for magnetic field analysis. Specifically, in potential flow theory, a complex potential that represents the behavior of inviscid fluid was used as the enrichment function that represents the local feature of the solution. Furthermore, a formulation was constructed in which the enrichment function is mapped to a form suitable for each crack shape, using conformal mapping. As a result, it became possible to analyze the problem of the kinked or curved crack on the surface, and the internal crack of the structure with the orthogonal grid type FEM mesh. In addition, more accurate solution was obtained than the conventional FEM analysis.

研究分野：計算力学、数値構造解析

キーワード：有限要素法　非破壊検査　磁場解析　き裂　欠陥　逆問題

１．研究開始当初の背景

発電所や橋梁等インフラの老朽化が進む状況下、部材中の欠陥を探知する非破壊検査技術の向上は今後益々重要である。非破壊検査では超音波、X 線、赤外線等様々な物理現象が利用されるが、構造部材は鉄鋼を始め磁性体が多く、その欠陥探知には磁気情報が利用可能である。すなわち検査作業段階で構造物表面を着磁して欠陥面上に磁荷を残留させ、それが誘発する漏洩磁束密度を磁気センサで検知する方法(漏洩磁束密度法)が基本原理となる。

簡便な非破壊検査では欠陥の有無の判別のみが行われるが、健全性診断・余寿命評価のためには欠陥の有無にだけでなく、欠陥の大きさや形状を具体的に求める必要がある。これは「結果」から「原因」を推定することに相当し、数理解析的には逆解析(逆問題)と呼ばれる。磁気情報を用いた逆解析では、数値解析手法として一般に欠陥面上の残留磁化を双極子で数理モデル化する磁気双極子法が用いられている。この方法は空間を離散化(メッシュ分割)する必要がなく簡便に磁場解析を行える利点がある一方、周囲の空間を真空として扱うという制約があり、鉄材等磁性体の透磁率の影響という現実に即しておらず、実用面で解析精度の低下を招いている。

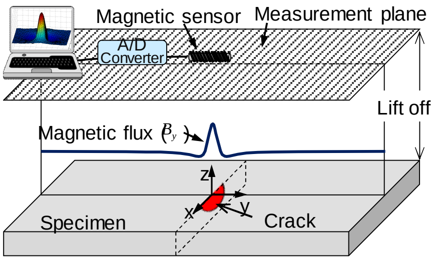


図 1　磁場による非破壊検査の概念

よって高精度化のためには、FEM の様に空間を離散化し物質定数を考慮できる解析手法が必要である。しかしながら現状では FEM を主軸とした静磁場逆解析手法が確立しているとは言い難い。その一因として FEM 解析では一般に任意形状の欠陥面をモデル化した FEM メッシュ作成がボトルネックになること、更には逆解析では欠陥面の形状が未知のため事前にそのメッシュを作成することが困難であることが挙げられる。

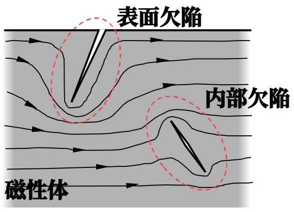


図 2　磁性体中の磁束の流れ

入力情報から未知の欠陥面形状を推定するためには、事前のメッシュ分割に依存せず、欠陥形状を陰的に定義・更新できる計算手法が効果的であり、FEM を発展させた計算手法である拡張型有限要素法(XFEM)がその有力な手段と考えられる。

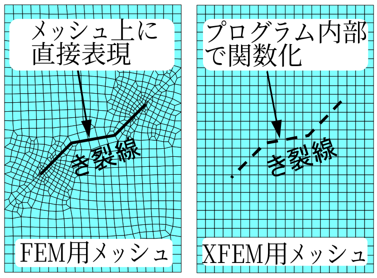


図 3　FEM 及び XFEM による
き裂線モデル化の違い

２．研究の目的

日本のインフラ老朽化が進行する中、非破壊検査技術の向上は重要な課題である。本研究では、磁場情報を用いた非破壊検査に関する数磁場解析技術の向上と、それを応用した電磁逆解析手法の構築を目的とする。

入力情報である磁場分布の計測値から未知の欠陥面形状を推定するためには、有限要素法（FEM）解析のメッシュ分割に依存せず、欠陥形状を陰的に定義・更新できる計算手法が効果的であると考えられることから、従来型の FEM を発展させた「拡張型有限要素法（XFEM）」が有力な手段になると考えられる。

研究代表者は構造解析の研究で培った XFEM 解析の技術を有しており、本研究でそれを磁場解析にも活用し、その具体的計算手法を確立させる。具体的には静磁場分布と非粘性流体の挙動の類似性に着目し、「複素速度ポテンシャル」を XFEM の付加関数に用いる理論的定式化を構築し、コード開発を行う。

３．研究の方法

FEM メッシュ分割に依存しない欠陥近傍の磁場解析手法として、拡張型有限要素法(XFEM)の定式化の構築、そしてプログラム作成を進める。重要な機能を持つ付加関数には、非粘性流体の挙動を表すポテンシャル流れ理論の複素速度ポテンシャルを利用し、さらにこれを複素平面上の等角写像を用いて加工する。複素速度ポテンシャルには「欠陥周辺の磁束の流れ」を表す効果を期待し、その具体的な形式を考えていく。

数学的側面とプログラミングの側面で検討を進める。計算結果の誤差を厳密に評価することに留意する。研究過程では、下記の観点につき例題による数値実験を重ねてデータを取得する。

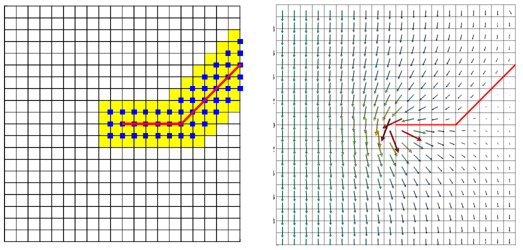
・【適切な座標変換】全体デカルト座標系、欠陥周辺の局所デカルト座標系、それを写像した曲線座標系等、複数の座標系で記述されるため、座標変換処理を適切に行う必要がある。

・【付加関数の設定領域】付加関数は解の局所的分布を表現するもので、その設定領域が広い程解析精度は向上するが、一方で計算量の増大につながる。よって解析精度と計算時間の兼ね合いより適切な設定範囲を明らかにする必要がある。

・【特異性の発生】付加関数により未知変数の近似能力は向上する。その一方、余分な自由度を持つことで連立方程式が一次独立性を失い、計算途中でゼロ割演算を生じさせる可能性がある。その可能性を理論及び数値計算の両面で検討し、発生する場合には回避方法を検討する。

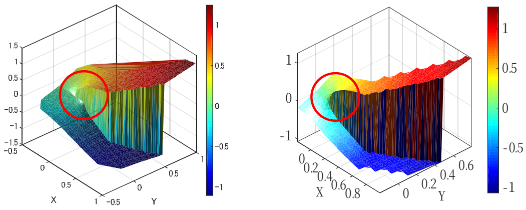
４．研究成果

工学的応用として非破壊検査（欠陥探傷）を念頭に、漏洩磁束の分布データ用いた非破壊検査に必要な XFEM 解析手法について、以下のように開発を進めた。



(a) FEM メッシュの例　(b) 解析結果の流束ベクトル

図 4 表面上の屈曲き裂の解析例



(a)修正前(ギャップあり)　(b)修正後(ギャップなし)

図 5 屈曲き裂の解析に用いる付加関数

本研究課題で磁場解析方法の中心となる拡張型有限要素法（XFEM）は、従来型の有限要素法（FEM）を発展させ、あらかじめ解の局所的特性が既知であるような問題に対し、その挙動や分布を表現する関数を解の近似公式に入れ込む解法である。これによって解析に必要なモデルである FEM メッシュに、き裂等の複雑形状を陽に作成する必要がなくなり、一般的な直交格子型メッシュでの解析が可能となるので運用面で解析プロセスの柔軟さが向上する、あるいは解析精度自体が向上することを期待できる。

静磁場の支配方程式はラプラス方程式で記述されることを利用し、複素関数論の等角写像に基づいた付加関数（エンリッチ関数）の導出法の確立を基本的な方針とした。具体的には、構造物表面上の「屈曲」と「曲線」き裂、そして構造物の「内部」き裂について、等角写像の観点から理論的・体形的に整理を行い、解析精度に与える影響を検討した。

(1) 構造物表面上の屈曲き裂

工学的見地から、折れ曲がり点を有する「屈曲き裂」が解析対象の欠陥として重要であるとの認識で、屈曲き裂への適用を検討した。その結果、複素数のべき乗関数が、頂角 α の扇形領域から頂角 β の扇形領域への等角写像となることを利用して、直線き裂を屈曲き裂に変換することができるようになった。

その際、原点を中心とする拡大率が、上半面と下半分で異なることにより、エンリッチ関数がき裂端で「食い違い」を生じる現象が発生した。これについては、拡大率を補正する処理によりこの食い違いを解消し、連続させることができた。これは工学的に非常に実用的な成果だと考えられる。

(2) 構造物表面上の曲線き裂

構造物の表面に生じる曲線状のき裂への適用方法を検討した結果、複素関数論で用いられるメビウス変換（又は一次変換）が複素平面上の直線を任意の曲線に写像する性質を利用し、定

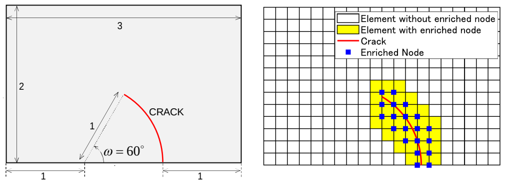
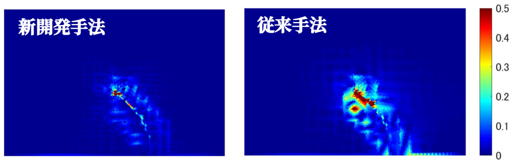


図 6　曲線き裂解析モデル(左)とその解析用メッシュ(右)



(a) 新開発手法　(b) 従来手法

図 7 曲線き裂解析の誤差の分布

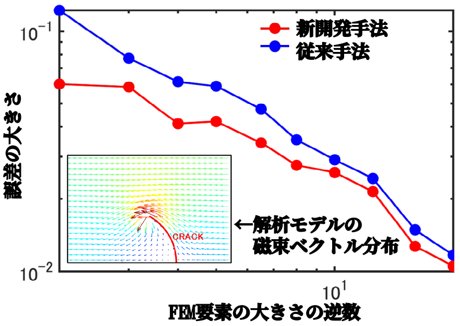


図 8 曲線き裂解析の誤差の収束状況

式化を構築することができた。

新規に開発した解析手法では、定式化中の数値積分のアルゴリズムを改良した。これにより従来方式よりも解析精度を向上させることが可能となり、FEM 要素サイズの変化に対し安定的に高精度な解析を達成することができた。

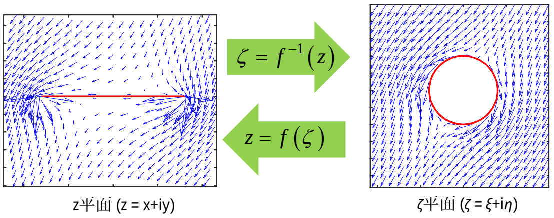


図 9 等角写像による内部き裂周辺の流束ベクトルの変換

(3) 構造物内部のき裂

構造物内部に存在する欠陥周囲の磁場解析を効率的に行う手法を開発した。この手法は、円柱回りの一様流れ場を、等角写像の一種である Joukowski 写像を用いて線分回りの流れ場に写像することにより達成される。

この手法の大きな特徴は、一要素で内部欠陥を完全にモデル化できるということである。メッシュが比較的粗くても FEM 解析が可能になるため、欠陥の形状と位置が未知の状態から FEM 解析の準備をする必要がある非破壊検査ではこの特性が運用上非常に大きな利点となる。

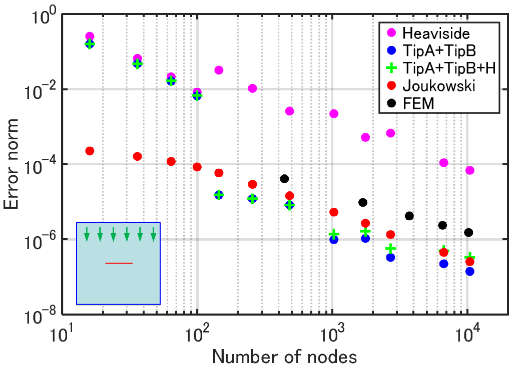


図 10 内部欠陥解析の誤差の収束状況

この手法の厳密な精度評価を実施し、従来型の FEM に対して精度の大幅な向上と、メッシュ粗密に対する安定性があることを示すことができた。

【応用展開・波及効果】

XFEM 解析の工学的応用として、エンリッチ関数の効果を用いて解析精度を向上させるという発想の応用展開を探った。具体的には「集中荷重を受ける弾性体への適用」可能性について検討を行った。「集中荷重を受ける弾性体」の変位場には理論解が存在することを利用し、これをエンリッチ関数に用いた XFEM 解析手法について取り組み、解析精度を向上させる効果があることを確認した。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計　2 件）

① 中住 昭吾、鈴木 隆之、磁気特性に基づく欠陥形状評価及び寿命予測ツールの開発、AEM 学会誌、査読有、Vol.23、No.4、2015、pp.671-676
DOI: https://doi.org/10.14243/jsaem.23.671

② Shogo Nakasumi、Marc Alexander Schweitzer、Efficient modeling of internal cracks for Laplace problem by XFEM using Joukowski mapping、INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING、査読有、Vol.119、 No.1、 2019、 pp.1-17
DOI: https://doi.org/10.1002/nme.6039

〔学会発表〕（計 12 件）

① 中住 昭吾、Magnetostatic XFEM analysis for internal discontinuity under uniform flux based on Joukowski transform、 eXtended DiscretizationMethodS (X-DMS2015)、Ferrara、Italy、2015/09/11

②中住 昭吾、Joukowski 写像を用いた静磁場 XFEM 解析による微小欠陥モデルの精度検討、第 21 回計算工学講演会、新潟市、2016/05/31

③中住 昭吾、Marc Alexander Schweitzer、Magnetostatic XFEM Analysis for Internal Multiple Cracks based on Joukowski Mapping、12th World Congress on Computational Mechanics (WCCM12)、Seoul、 South Korea、2016/07/25

④中住 昭吾、原田 祥久、磁性体材料の磁場解析における等角写像を活用した欠陥モデリング手法、日本機械学会 2016 年度茨城講演会、茨城県日立市、2016/08/26

⑤中住 昭吾、原田 祥久、複素べき乗関数による XFEM 磁場解析の屈曲き裂問題への適用、日本機械学会 第 29 回計算力学講演会（CMD2016）、名古屋市、2016/09/22

⑥中住 昭吾、原田 祥久、集中荷重問題に対する XFEM の検討、第 22 回計算工学講演会、さいたま市、2017/05/31

⑦中住 昭吾、原田 祥久、複雑形状不連続線を有する２次元ラプラス問題における XFEM 解析、日本機械学会 2017 年度茨城講演会、茨城県日立市、2017/08/29

⑧中住 昭吾、原田 祥久、電磁非破壊検査及びその支援磁場解析技術、日本機械学会 2017 年度年次大会、さいたま市、2017/09/04

⑨中住 昭吾、原田 祥久、一次変換による XFEM 磁場解析の曲線き裂問題への適用、日本機械学会第 30 回計算力学講演会(CMD2017)、大阪府東大阪市、2017/09/18

⑩中住 昭吾、原田 祥久、メッシュ解像度に対する安定性を有した２次元内部欠陥に対する静磁場解析、第 26 回 MAGDA コンファレンス in 金沢、金沢、2017/10/27

⑪中住 昭吾、Application of XFEM Magnetic Field Analysis using Conformal Mapping to Kinked and Curved Crack Problem、13th World Congress in Computational Mechanics (WCCM2018)、New York City、 USA、2018/07/23

⑫ 中住 昭吾、一次変換を用いた XFEM 解析による 2 次元ラプラス場中の曲線き裂の精度評価、第 24 回計算工学講演会、さいたま市、2019/05/29

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕
○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

６．研究組織

(1)研究分担者
研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8 桁）：

(2)研究協力者
研究協力者氏名：SCHWEITZER, Marc Alexander

研究協力者氏名：山東　篤
ローマ字氏名：SANDO, Atsushi

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。