

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11855

研究課題名(和文)固有振動モードの逆解析によるき裂同定とセンサ配置最適化

研究課題名(英文)Inverse crack identification and optimal sensor placement for mechanical structures based on normal modes of vibration

研究代表者

齋藤 彰(Saito, Akira)

明治大学・理工学部・専任准教授

研究者番号：40581442

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：機械構造物のき裂をその固有振動数・振動形状の変化から同定する手法の構築を目的として、き裂を有する鋼板を対象に、き裂検出に適したモード選択法・振動計測用センサの配置法の構築、および振動の計測データとき裂を定量的に対応付ける方法の開発を行った。その結果、提案手法では、き裂により振動形状の変化の大きい板のエッジ部分に集中的にセンサが配置されることが明らかとなった。また、き裂と振動データを対応付ける手法として損傷を表現する自由度の高いトポロジー最適化を試用した結果、損傷特定精度を向上することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、機械構造物のき裂・損傷の状態を効率的な方法で検出することが可能な固有振動モード選択法・センサ配置手法と、き裂を検出する逆解析アルゴリズムを用いることで、計測された固有振動モードからき裂の場所と程度を自動的に決定する事である。本研究の社会的意義は、振動データを用いたき裂検出手法の機械構造物のヘルスマニタリングへの応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to develop a methodology to efficiently identify damages of mechanical structures based on the changes in their natural frequencies and the corresponding mode shapes. To this end, we have conducted the following: development of optimal sensor placement and mode shape selection methods and development of an inverse analysis method that can quantitatively relate measured vibration data with damages in the structure. As a result, with the proposed optimal sensor placement method, it was found that many sensors tend to be placed along the edges where crack is expected to be generated. Moreover, by utilizing the concept of topology optimization, it was found that the accuracy of the proposed damage identification method can greatly be improved.

研究分野：機械力学

キーワード：損傷同定 振動解析 逆問題

# 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

機械構造物は、その内部、または表面にき裂を生じることがある。き裂を発生初期段階で検出し、対処ができれば、様々な機械・社会インフラの長寿命化につながる。このため、機械のき裂検出に対する社会的ニーズは高い。き裂検出においてき裂の場所と程度を同定することが必要である。機械構造物の硬さや密度などの機械的特性はき裂の場所と程度によって変化する。このため、き裂の状態が変化することによって振動状態が変化する。この関係を利用し、機械構造物の固有振動を発生させ、その固有振動数・振動形状(以下固有振動モード)の変化から損傷を検出する共振法がある。固有振動モードは、機械構造物の機械的特性により決定され、構造物に固有である。き裂によりそれらの条件が変化するため、固有振動モードは変化する。よって、固有振動モードの変化をき裂の状態と定量的に結びつけることができれば、き裂状態を特定できる。

## 2. 研究の目的

本研究では、長方形鋼板を対象とし、以下の2点を明らかにすることを目的とする。

- (1)き裂検出に適した振動計測用センサの配置法の構築
- (2)振動の計測データとき裂を定量的に対応付ける方法の開発

## 3. 研究の方法

- (1)き裂検出に適した固有振動モード選択法と振動計測用センサの配置法の構築

有限要素解析、および実験解析で供試体の振動解析を実行する。この時、センサを配置し、加速度を計測する。得られた計測データから、固有振動モードを抽出する。そして、抽出したものの中から、き裂に対して変化の割合が大きい(=感度が高い)ものを抽出し、それらの特性を明らかにする。同時に、それらを最も効率的に計測できる最適センサ配置方法の検討を行う。

- (2)振動の計測データとき裂を定量的に対応付ける方法の開発

最適化手法を使用し、固有振動モードからき裂を検出手法の構築を行う。有限要素モデル上でき裂の発生する位置・長さをパラメータで表現する。得られた計測データ、ならびに実測データを参照し、有限要素モデルの固有振動数・振動形状がき裂の入った板のものに一致するようにパラメータを自動調整する。このとき、固有振動数・振動形状とき裂の場所・程度が1対1に対応するとは限らないため、自動調整が常に成功するとは限らないため、最適化手法の精査により、限りなく1対1対応に近い高精度き裂検出手法を実現する。

## 4. 研究成果

- (1)き裂検出に適した振動計測用センサの配置法の構築

図1(a)に示す片持ちの鋼板を用いて振動計測用センサの配置法構築を行った。き裂がある場合の振動分布を図1(b)に示す。図からわかる通り、本来き裂が無ければ左右対称な振動分布を示すが、板がき裂を有することにより左右非対称な形状となることがわかる。特に、き裂近傍に

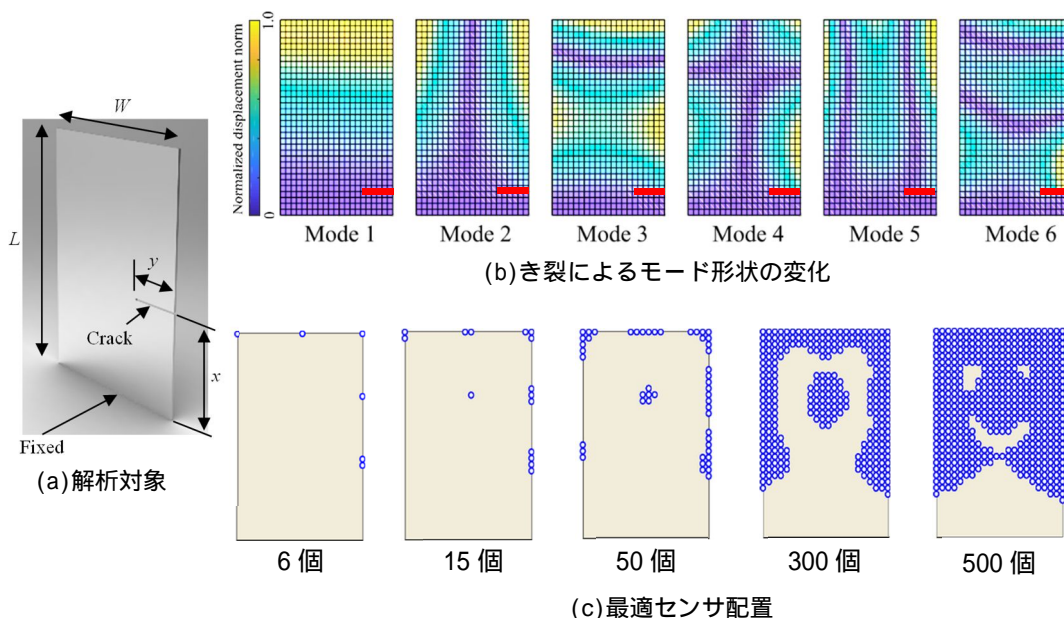


図1. き裂によるモード形状の変化と得られたセンサ配置結果

振動の腹があるような高次の振動モードがき裂に対して変化量が大きい(感度が高い)ことがわかった。また、右辺上のき裂の位置と深さを 27 通り仮定し、その場合の振動形状全てを使用し、センサから得られる測定結果の線形独立性が最も高くなるようなセンサ配置を行った結果を図 1(c)に示す。図からわかるように、き裂により振動形状の変化の大きい板のエッジ部分に集中的にセンサが配置されることが明らかとなった。

## (2)振動の計測データとき裂を定量的に対応付ける方法の開発

研究開始当初は、き裂を直線形状と仮定し、その位置と長さを変数とした逆問題を解く事を想定していたが、損傷を表現する自由度の低さから、精度向上が困難だった。そこで損傷を表現する自由度の高いトポロジー最適化を試用した結果、損傷特定精度を向上することができた。以下にその試行結果を示す。なお、アルゴリズム検討の際には、同定難易度の高いき裂は避け、矩形切り欠きを使用することとした。図 2(a)に、使用した供試体を示す。供試体は長方形の板状構造物であり、下辺の中央部には、損傷を模した矩形切り欠き部を有することとした。材料はアルミニウム合金(A2017)を使用した。板厚は 5mm とした。左端から 35mm の領域全面を固定した。そして、インパルスハンマの打撃によるハンマリング試験を実施し、加速度の周波数応答関数を取得した。得られた周波数応答関数を用いて、最適化問題を解くことで損傷同定を実施した。この際、材料分布を変数としたトポロジー最適化を実施した。また、正則化と呼ばれるプロセスを含めることで損傷の誤検知が減ったことから、図 2(b)に、正則化を適用しなかった場合、図 2(c)に正則化を適用した場合の解析結果を示す。図からわかる通り、正則化を使用しない場合、実際には存在しない損傷領域が生成されている事がわかる。すなわち誤検知されていることがわかる。他方、正則化を使用した場合は、多くの誤検知が無くなり、実際に損傷している領域近傍において材料分布が 0 に近づいていることがわかる。図 3 には、周波数応答関数の比較を示す。最適化のプロセスにより、高周波数帯で顕著だったモデルと解析対象の差異が、正則化の有無にかかわらず、減少することがわかる。以上より、提案手法により、損傷を模した切り欠きを検出できることが明らかとなった。

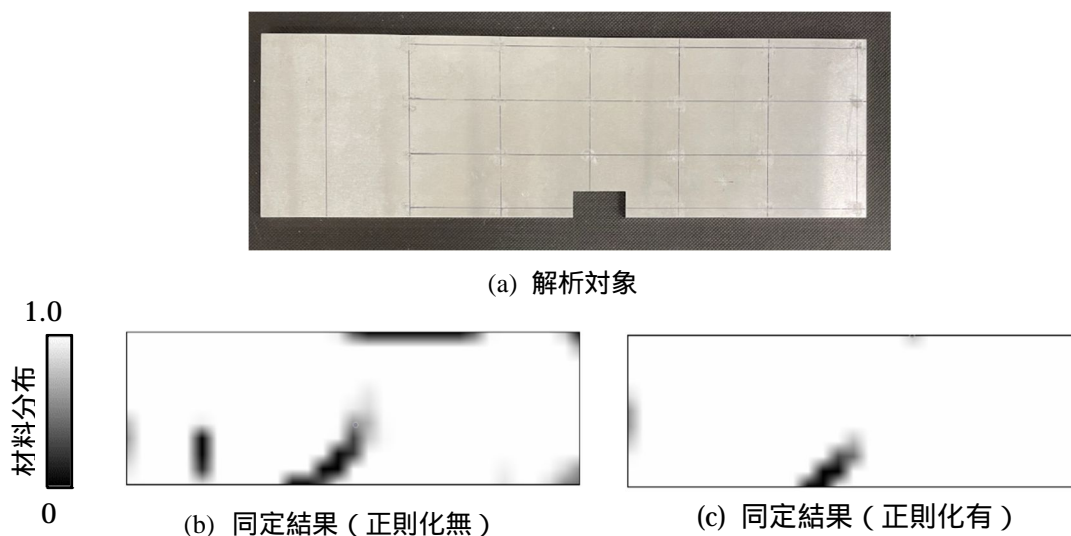


図 2. 解析対象と切り欠きの同定結果

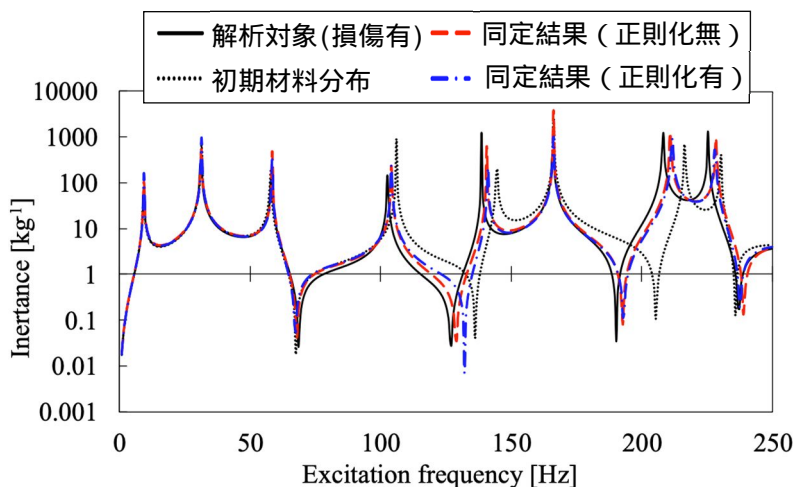


図 3. 周波数応答関数の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Saito Akira, Sugai Ryo, Wang Zhongxu, Saomoto Hidetaka	4. 巻 545
2. 論文標題 Damage identification using noisy frequency response functions based on topology optimization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Sound and Vibration	6. 最初と最後の頁 117412 ~ 117412
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jsv.2022.117412	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7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Zhongxu Wang, Akira Saito and Hidetaka Saomoto
2. 発表標題 Damage identification strategies using topology optimization and frequency response functions
3. 学会等名 Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (ACSMO) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akira Saito, Ryo Sugai, and Hidetaka Saomoto
2. 発表標題 Damage identification from noisy frequency responses using topology optimization and lasso regularization
3. 学会等名 World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jun Isshiki and Akira Saito
2. 発表標題 Effects of mode shapes on crack identification based on finite element model updating and inverse eigenvalue analysis
3. 学会等名 World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齋藤彰, 菅井稜, 竿本英貴
2. 発表標題 振動応答にトポロジー最適化と L1 正則化を適用し損傷を同定する手法の開発
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jun Isshiki, Ryo Sugai and Akira Saito
2. 発表標題 Development of Crack Identification Method based on Finite- Element Model Updating and Inverse Eigenvalue Analysis
3. 学会等名 Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (ACSMO) 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryo Sugai, Akira Saito and Hidetaka Saomoto
2. 発表標題 Damage Identification using Topology Optimization with Lasso Regularization
3. 学会等名 Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (ACSMO) 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryo Sugai, Akira Saito and Hidetaka Saomoto
2. 発表標題 Damage Identification using Static and Dynamic Responses based on Topology Optimization and Lasso Regularization
3. 学会等名 ASME 2020 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2020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
---------	---------