

平成 30 年 6 月 2 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17995

研究課題名(和文) マルチボディ・有限要素の統合モデル化に基づくクラックのインテリジェント検出

研究課題名(英文) Intelligent Detection of Cracks Based on Integrated Modeling of Multibody and Finite Elements

研究代表者

安藝 雅彦 (AKI, Masahiko)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：60560480

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ロータ系に発生するクラックを検出するために、クラック発生時の振動特性を予測するための物理モデルの提案と有用性を検討した。物理モデルとしては、マルチボディ・有限要素統合モデルおよび伝達関数表現を扱った。両モデルとも現在広く用いられているクラック検出用力学モデルに比べて計算負荷を低減させるためのモデルである。これらのモデルを定式化して実験装置の力学的特性を表現した。また、クラック検出のために機械学習利用の検討を行った。その結果、提案する物理モデルの有効性を確認し、機械学習利用のための特徴量に関する知見を得た。

研究成果の概要(英文)：In order to detect cracks occurring in a rotor system, physical models for predicting the vibration characteristics were proposed. One is an integrated multibody - finite element model. Another is a transfer function procedure. Availability of these models for calculating the vibration characteristics of crack occurring were examined. Also, in order to detect cracks occurring in a rotor system, a utilization of machine learning was considered.

研究分野：機械力学・計測制御

キーワード：ロータダイナミクス クラック 異常検知 マルチボディダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

長期間運転する回転機械では疲労によるクラック発生(図1)は宿命的であり、早期クラック検知は重要な課題である。回転機械のクラックは大きな事故に直結する危険な故障であるが、機械の停止はコスト的に大きリスクが生じるため現状は高頻度では行われず、定期的な静的検査法では早期発見が困難である。このような技術的な課題から、現在は重要な機械ほど高頻度で監視している。しかし、現状の検出法は精度が低くクラックの有無の判別のみであり、初期クラックの検出およびクラック位置と深さまで検知することは難しいのが実情である。

高精度なオンライン異常検知を実現するため、欧米では国際的な産学連携により、斬新な監視・診断技術が提案されている。しかし、信号処理の研究が主流であり、力学的観点によるクラック検出の研究はほとんど無いのが現状である。

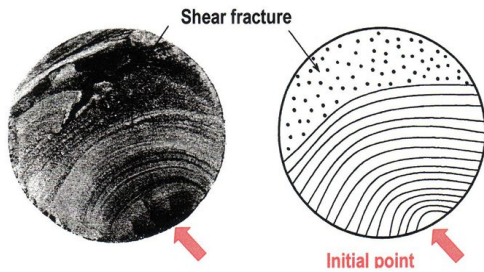


図1 クラック断面

2. 研究の目的

背景にて示された現状から、申請者は力学的観点に基づき、かつオンラインクラック検知技術の構築を目指した。そこで本研究の目的は以下の2点である。

(1) 低計算コストなクラック軸の力学モデルの提案

従来、クラック軸の動特性を表現するモデルとして、単純ロータを対象とした理論解析用モデル、または複雑な形状のロータを対象とした有限要素モデルが用いられてきた。前者のモデルは計算コストが小さいものの現実に運用されているロータには適用が難しく、後者のモデルは現実に運用されているロータへの適用が可能だが、計算コストが大きいことが問題である。そこで申請者は、図2に示すような回転軸にクラックが発生した状況において、低計算コストのモデルを目指してマルチボディモデルと有限要素モデルを組み合わせた統合モデル(図3)の提案、および伝達関数表現を構築する。

(2) 機械学習を援用したクラック検出予測技術の構築

近年、信号処理に基づく異常検知技術を機械学習に応用して以上検出が行われるようになってきている。これらの研究では、力学的な因果関係から演繹的に現象を説明する

のではなく、異常状態を含む十分な数のデータから帰納的に異常状態を判別するため、異常と判別された場合でも、異常の原因を現場に反映できない課題がある。そこで申請者は、機械学習でクラック検出を判別するために、教師データとして低計算コストなクラック軸の力学モデルを用いて検討されたクラック発生時の力学的な特徴を特徴量として用いることで、クラックの発生原因を探ることが出来るクラック検出予測技術の構築を目指す。

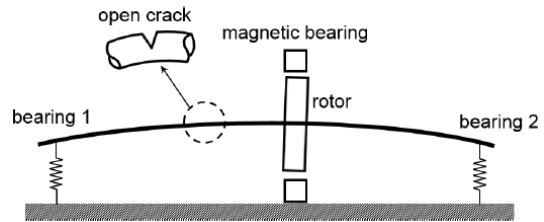


図2 回転軸に発生したクラックの概念図

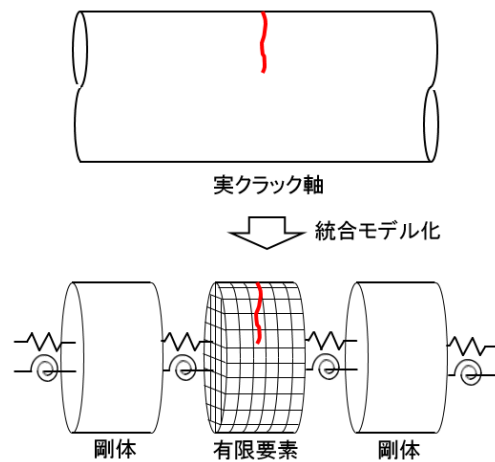


図3 マルチボディ・有限要素統合モデル概念図

3. 研究の方法

前項で示した2つの目的に対して、以下のような検討を行う。

(1) 低計算コストなクラック軸の力学モデルの提案

マルチボディ・有限要素統合モデル

モデル化の前提として、ロータダイナミクス分野で用いられている1次元はり有限要素モデルを適用する。クラック発生場所付近にこの有限要素を組み込んだマルチボディ・有限要素統合モデルは複数の剛体と有限要素がジョイントで結合されたモデルとする。図4に提案する統合モデルを示す。ロータの両端は玉軸受で単純支持されており、回転軸には複数の円板が取り付けられている。提案モデルは、この回転軸と円板を複数の剛体とそれらをつなぐジョイントとばね、およびクラック発生箇所付近を有限要素によって表現する。

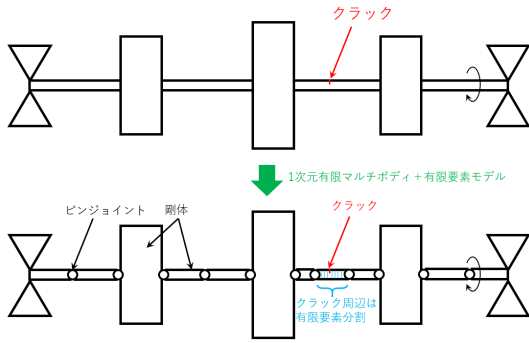


図4 1次元マルチボディ・有限要素統合モデル

上記のマルチボディ・有限要素統合モデルの動力学シミュレーションを行うにあたり、マルチボディダイナミクスで用いられる微分代数型運動方程式

$$\begin{bmatrix} M & 0 & \Phi_V^T \\ 0 & J' & \Phi_\Omega^T \\ \Phi_V & \Phi_\Omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}' \\ \dot{\Omega}' \\ A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ N' - \tilde{Q}'J'\Omega' \\ A \end{bmatrix} \quad (1)$$

を用いる。このようにして統合モデルを計算すると、表1のような計算性能が得られると予測される。

表1 各種クラック軸モデルの特徴の予測

	剛体マルチボディモデル	有限要素モデル	マルチボディ・有限要素統合モデル
自由度	少(◎)	過多(×)	少(◎)～中(○)
計算速度	速(◎)	遅(×)	速(◎)～中(○)
動的挙動再現性	○	◎	◎～◎

#### 伝達関数表現

ロータダイナミクスの研究分野に様々なロータ系の伝達表現の導出がある。伝達関数表現にすると、数値シミュレーションをする際に数値積分する必要がなくなるため、低計算コストのモデルが実現できる。本研究では、オープンクラックと支持剛性の異方性の相互作用を考慮した伝達関数表現の構築を目指す。ロータ系の伝達関数表現をするにあたり、ロータ系の係数励振特性に着目し(図5)、モデル化を行う。

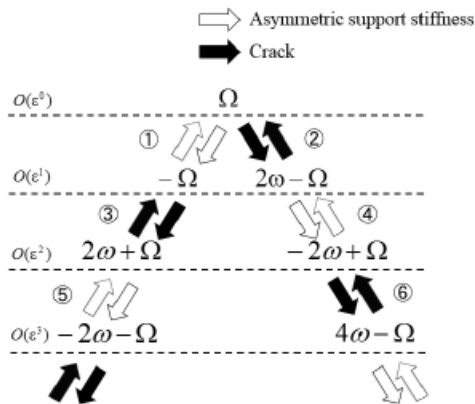


図5 クラック軸に発生する角振動数成分

#### (2) 機械学習を援用したクラック検出予測技術の構築

様々なクラックの位置・深さを変えた回転軸を複数本用意し、回転試験を実施することで、各回転速度におけるロータの軸変位を計測する。ここで得られた計測データを機械学習の教師データに用いる。

研究代表者は平成28年度より所属機関を異動したことにより、当初の計画であった機械学習用教師データを作成することが困難になったため、実験データは平成27年度に計測したデータを解析し、機械学習の適用の可否を判断する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 低計算コストなクラック軸の力学モデルの提案

###### マルチボディ・有限要素統合モデル

図3に示された回転軸と円板を複数の剛体とそれらをつなぐジョイントとばね、およびクラック発生個所付近を有限要素によってマルチボディ・有限要素統合モデルを構築した。その統合モデルを用いて数値シミュレーションを行った結果、以下の知見が得られた。

- ・複数の剛体への分割の仕方、剛体間をつなぐばね剛性のパラメータ同定の仕方によって計算精度に大きな影響がある。
- ・運動方程式の数値解を得るための微分代数型運動方程式の数値積分法によっても計算精度が左右される。
- ・クラック検出のために、様々な位置にクラックが発生した状況を考慮するには、計算コードの汎用化が必要である。

#### 伝達関数表現

運動方程式(2)を各角振動数の振れまわり加振力に対する運動方程式(3)-(7)に変形する。

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c & i_p \omega \\ -i_p \omega & c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -\Delta k_b & 0 \\ 0 & \Delta k_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} + \Delta k_c \begin{bmatrix} \cos 2\omega t & \sin 2\omega t \\ \sin 2\omega t & -\cos 2\omega t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$m\ddot{z} + (c - j i_p \omega)\dot{z} + kz + \varepsilon \Delta k_b \bar{z} + \varepsilon \Delta k_c e^{j2\omega t} \bar{z} = g \quad (3)$$

$$m\ddot{\bar{z}} + (c + j i_p \omega)\dot{\bar{z}} + k\bar{z} + \varepsilon \Delta k_b z + \varepsilon \Delta k_c e^{-j2\omega t} z = \bar{g} \quad (4)$$

$$m e^{j2\omega t} \ddot{\bar{z}} + (c + j i_p \omega) e^{j2\omega t} \dot{\bar{z}} + k e^{j2\omega t} \bar{z} + \varepsilon \Delta k_b e^{j2\omega t} z + \varepsilon \Delta k_c z = e^{j2\omega t} \bar{g} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 & me^{-j2\omega t} \ddot{z} + (c - j i_p \omega) e^{-j2\omega t} \dot{z} \\
 & + ke^{-j2\omega t} z + \varepsilon \Delta k_c \bar{z} = e^{-j2\omega t} g
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 & me^{j2\omega t} \ddot{z} + (c - j i_p \omega) e^{j2\omega t} \dot{z} \\
 & + ke^{j2\omega t} z + \varepsilon \Delta k_b e^{j2\omega t} \bar{z} = e^{j2\omega t} g
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

角振動数  $\Omega$  , 角振動数  $-\Omega$  , 角振動数  $2\omega - \Omega$  , 角振動数  $2\omega + \Omega$  , 角振動数  $-2\omega + \Omega$  に関するもので整理し, 伝達関数行列  $H$  を導出する. 回転速度  $\omega = 1000$  rpm の定格運転条件における伝達関数行列の成分  $H_{11}$ ,  $H_{12}$ ,  $H_{13}$ ,  $H_{14}$ ,  $H_{15}$  の周波数応答を図 6, 図 7, 図 8, 図 9, 図 10 に示す.

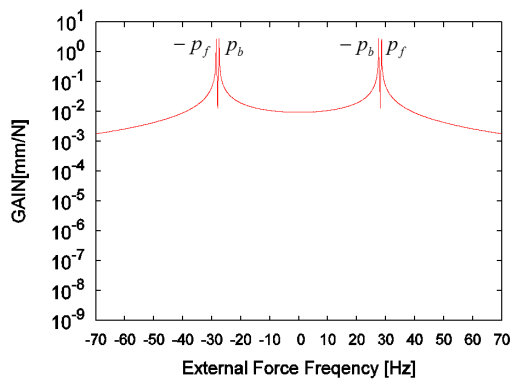


図 6 伝達関数  $H_{11}$  の周波数応答

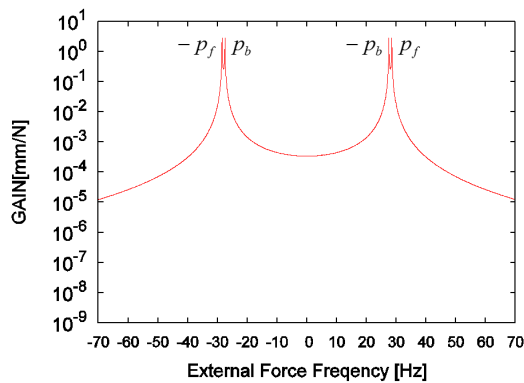


図 7 伝達関数  $H_{12}$  の周波数応答

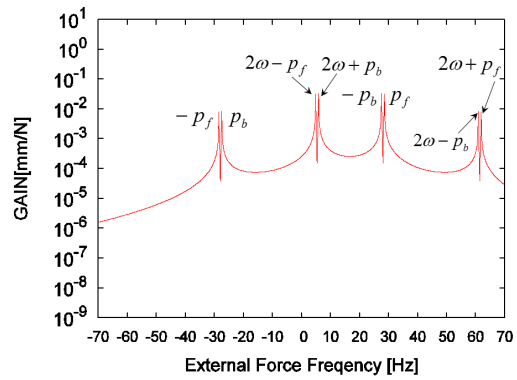


図 8 伝達関数  $H_{15}$  の周波数応答

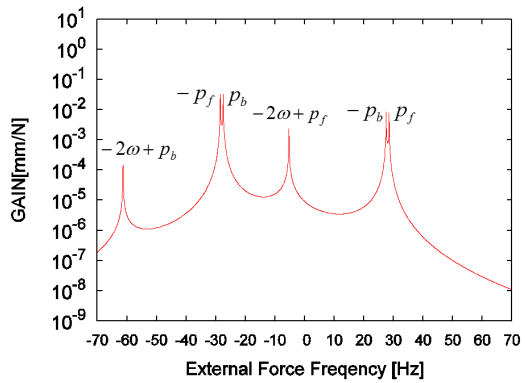


図 9 伝達関数  $H_{15}$  の周波数応答

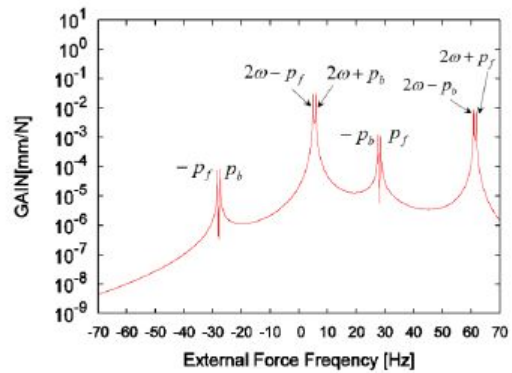


図 10 伝達関数  $H_{15}$  の周波数応答

## (2) 機械学習を援用したクラック検出予測技術の構築

クラック深さ 50% のクラック軸を用いて回転試験を行い, 円板の振動変位を計測した. その結果, 以下の知見が得られた.

- ・クラックに起因する振動成分は大きくないため, 時刻歴で観測するよりも周波数領域で観測する方が有効な特徴量となる可能性がある.

- ・今回は 1 つの軸位置, 2 方向の変位計測を行ったが, 教師データとしては複数の軸位置

のデータも併用することが有効である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

井上 剛志, 牛 憶恂, 安藝 雅彦, 高木 賢太郎, 姚 強, 中本 謙太, 加藤 祥典, 藪井 将太, 支持剛性に異方性を有しオープンクラックがある回転軸系の周波数伝達関数の定式化と実験的検証, 日本機械学会論文集, Vol.84, No.860, 17-00492, 2018 (査読有)

〔学会発表〕(計 1 件)

姚 強, 安藝 雅彦, 牛 憶恂, 井上 剛志, 高木 賢太郎, 藪井 将太, 支持剛性の異方性とオープンクラックを有するロータ系の伝達関数モデルの実験的検証, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2017 講演論文集, 359, 2017 (査読無)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mech.cst.nihon-u.ac.jp/studies/horiuchi/>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

安藝 雅彦 (AKI, Masahiko)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：60560480