

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560214

研究課題名(和文) 回転軸に発生するブリージングクラックの深さと位置を推定する振動診断法の開発

研究課題名(英文) Development of the identification method of both the depth and position of the breathing crack in the rotating shaft

研究代表者：

井上 剛志 (INOUE TSUYOSHI)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70273258

研究成果の概要(和文)：振動解析に用いることができる簡潔かつ高精度なオープンクラックの汎用モデリング手法を2種類開発した。そして、そのモデルに含まれるパラメータの定め方を実験的に考察し、このパラメータを支配する式を導出した。そして、オープンクラックが発生したロータ系の固有振動数と2倍周波数振動の解析手法を構築し、その妥当性を実証した。この解析法を逆問題に用いれば、オープンクラックの位置と深さに関する情報を得ることができる。最後に、オープンとクローズ状態を交互に繰り返すブリージングクラックのモデル化を行い、簡単な有限要素クラックロータモデルを用いた数値シミュレーションコードを開発した。

研究成果の概要(英文)：This study developed and improved the concise, accurate and general purpose oriented finite element model of an open crack in the rotating shaft. Two models of the open crack were developed, and the determining methods of the parameters involved in these crack models are discussed and proposed, and it is verified by investigating the natural frequencies in both static and rotating conditions experimentally. Furthermore, the theoretical analysis of the double-frequency vibration due to crack is performed. Both the theoretical and the experimental resonance curves of the double-frequency vibration are compared, and their quantitative agreement is confirmed. As the result, the accuracy of the developed crack model of the rotating shaft and the validity of the theoretical analysis are clarified. The information of both the depth and position of the open crack can be obtained by using these analyses inversely. Finally, the modeling of the breathing crack was performed, and the numerical simulation code for the simple FEM cracked rotor model was developed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：振動工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：回転機械, クラックロータ, 振動診断, モデリング, 解析手法

## 1. 研究開始当初の背景

回転機械では、長期間運転によるクラック(疲労亀裂)の発生は宿命的であり、しかも、一度発生すると数日～数週間で急速に進展

する。クラックによる機械設備の運転停止や事故の例は多数報告されており、浜岡原発や志賀原発におけるタービンブレードの損傷事故はまだ記憶に新しい。回転軸のクラック

のみでも新聞・学術誌だけで過去 40 年間に 30 件以上報告されている。

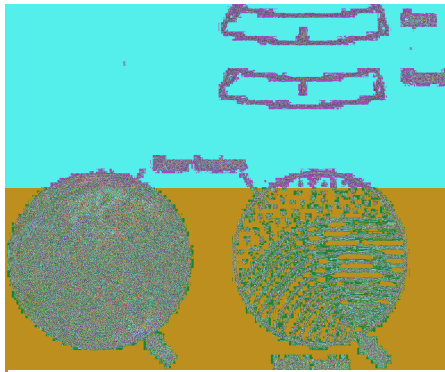


図 1 実クラックとそのモデル化

クラック発見の遅延は破滅的事故に直結するため、早期にかつ確実なクラック検出法が望まれている。しかし、従来の従来の検出法のほとんどは非常に単純化された線形の有限要素モデルを用いた近似的な研究であり、クラックに起因した振動現象を定量的に扱ったものはほとんどない。

## 2. 研究の目的

ロータのブリージングクラックをそのまま考慮し、その発生の有無およびその深さや位置を高精度かつ確実に検出できる方法の開発を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 平成 20 年度

非常に薄いオープンクラック軸を作成し、その有限要素モデルを開発した。そして、その妥当性を実験的に調べた。

- ① さまざまな位置や深さのクラックを入れた軸を複数作成 (図 2) し、その固有振動数を測定した。

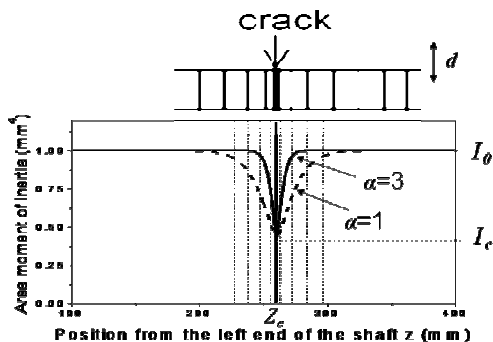


図 2 提案したクラックのモデリング

- ② オープンクラック軸の断面 2 次モーメントの表現を図 3 のように考えるモデルを 2 種類考え、そこに含まれるパラメータ

$\alpha$ 、あるいは  $l_{wc}$  を実験的に求めた。

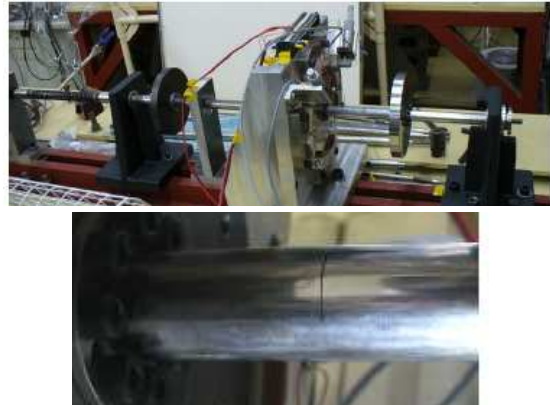


図 3 実験装置とクラック

- ③ このクラックモデルを組み込んだ有限要素ロータモデルを用いて固有振動数の解析を行い、静止中 (図 4) および回転中 (図 5) の固有振動数の実測値と比較した。そして、モデル化の妥当性を示した。

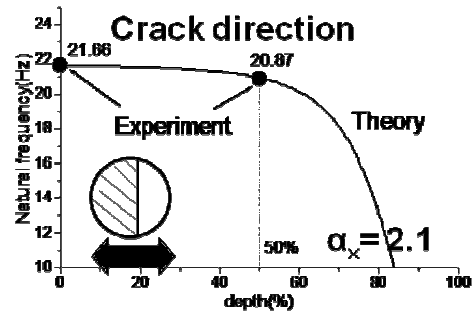


図 4 クラックモデルの妥当性検証 (静止時の固有振動数の比較)

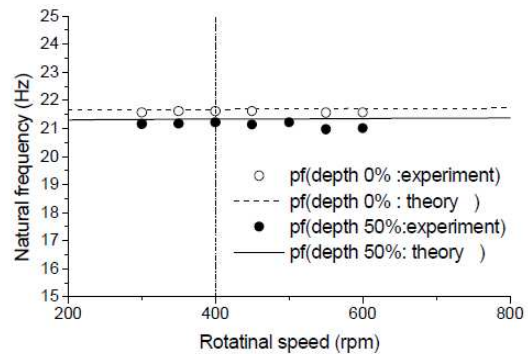


図 5 クラックモデルの妥当性検証 (回転時の固有振動数の比較)

### (2) 平成 21 年度

初年度に開発したクラックロータモデルを用い、クラックに起因する 2 倍周波数振動の解析手法を開発した。また、クラックのモデルを表すパラメータ  $\alpha$  と  $l_{wc}$  を支配する式を実験的に導出した。

- ① クラックに起因する 2 倍周波数振動について、まず軸受の剛性が等方性である場合について解析を行い、回転速度に対し

て振幅を求めた．そして，実際に実験を行い，その妥当性を示した（図 6）．

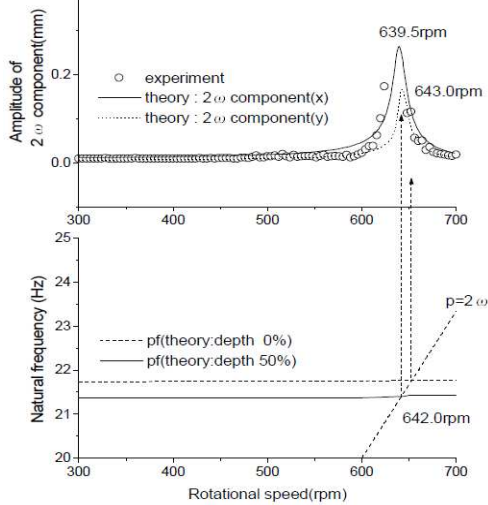


図 6 クラックに起因する 2 倍周波数振動の理論解析と実験による検証（軸受が等方性支持の場合）

② クラックのモデル化に用いるパラメータ  $\alpha$  と  $l_{wc}$  を，様々な軸半径  $r$  やクラック深さ  $d$  に対して求めた．その結果は図 7, 8 のように得られ，これらの値からクラックのパラメータ値を求める式を実験的に導出した．

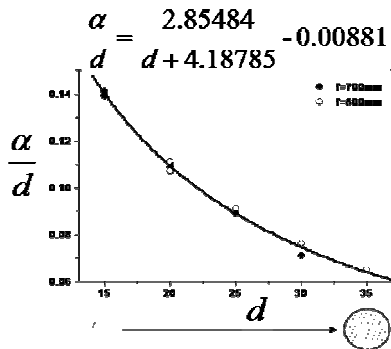


図 7 軸半径に対するクラックモデルのパラメータ  $\alpha$  の変化とその支配式の導出

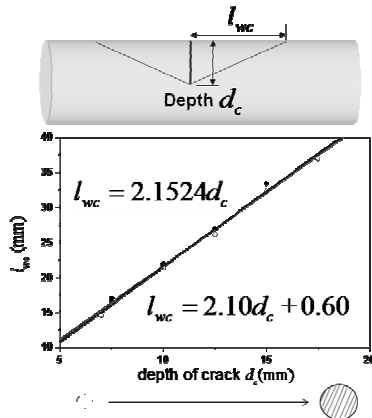


図 8 軸半径に対するクラックモデルのパラ

メータ  $l_{wc}$  の変化とその支配式の導出

### (3) 平成 22 年度

初年度，2 年度に開発し検討してきたクラックロータモデルを用い，一般的な回転軸系として軸受の剛性に方向差がある場合を考え，そのときの固有振動数解析とクラックに起因する 2 倍周波数振動の解析手法を行った．さらに，これまで開発してきたオープンクラックのモデルを発展させ，ブリージングクラックのモデル化を行った．

① 軸受の剛性に方向差がある場合のオープンクラックを有する回転軸系の固有振動数を解析し（図 9），実験的にその妥当性を示した．

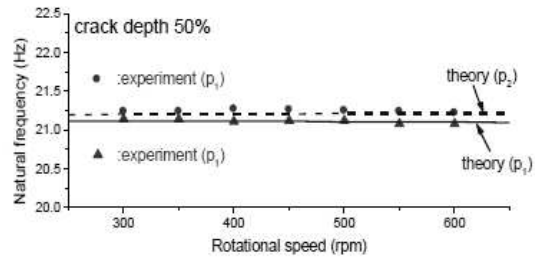


図 9 軸受の剛性に方向差がある場合のオープンクラックを有する回転軸系の固有振動数を解析と実験的検証

② 軸受の剛性に方向差がある場合のオープンクラック軸のクラックに起因する 2 倍周波数振動について解析を行い，回転速度に対して振幅を求めた．そして，実際に実験を行い，その妥当性を示した（図 10）．

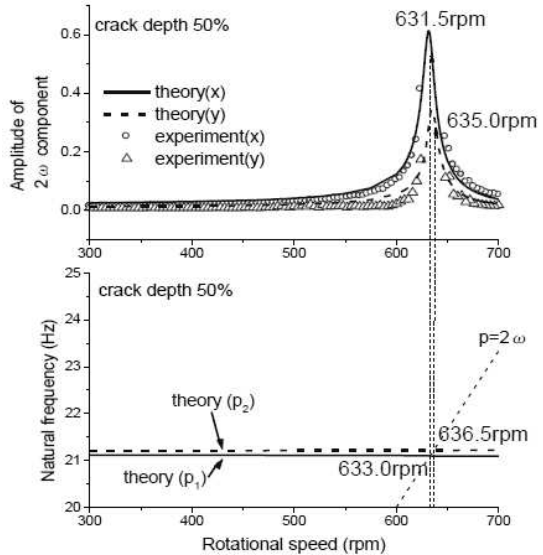


図 10 軸受の剛性に方向差がある場合のオープンクラック軸のクラックに起因する 2 倍周波数振動について解析を実験的検証

#### 4. 研究成果

- (1) 簡便でかつ高精度な解析を行うことができるオープンクラックの理論モデルを開発し、その妥当性を固有振動数とクラックに起因する2倍周波数振動について実験的に確認した。この開発したモデルを用いることにより、クラックに起因して発生する振動現象の様々な解析を高速で行うことが可能となった。
- (2) クラックの性質を表すパラメータの値を従来は実験的に求めていたためクラック軸の寸法が変わるたびに求めなおす必要があったが、このクラックモデルのパラメータを軸の寸法に関する値から求める式を実験的に導出した。この式を用いることにより、実際の軸を試作して実験することなくクラックモデルの構築が可能となった。
- (3) 上記2点の成果、すなわち、構築したクラックとそれを用いたクラックロータの振動解析手法を用いることにより、様々な状況におけるクラックに起因する振動現象の順准解析を高精度で行うことが可能となった。また、これらを用い、本研究以前にすでに開発した加振を用いた逆解析により振動現象からクラックの位置と深さを推定することが可能になると予想している。
- (4) 本研究で開発してきたオープンクラックのモデルを発展させて、ブリージングクラックのモデル化を行った。しかし、簡便な有限要素モデルを用いた数値解析の達成にとどまり、ブリージングクラックを持つ回転軸系の振動現象の高精度な理論解析手法の開発と実験的な検証にまでは至らなかった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① 井上 剛志, 永田 信博, 石田 幸男, オープンクラックを有する回転軸系の有限要素モデリング : クラックに起因する2倍周波数振動によるモデルの実験的検証, 日本機械学会論文集 C 編, (2010), 76(765), 1323-1330, 査読有り
- ② T. Inoue, M. Kato, N. Nagata, Y. Ishida, FEM Modelling and Experimental Verification of a Rotor System with an Open Crack, Journal of System Design and Dynamics, Vol. 4 (2010), No. 2, pp. 369-378, 査読有り
- ③ 井上 剛志, 加藤雅人, 永田 信博, 石田 幸男, オープンクラックを有する回転軸

系の有限要素モデル構築と実験的検証, 日本機械学会論文 C 編, (2009), 75(753), 1465-1472, 査読有り

[学会発表] (計5件)

- ① 井上 剛志, 永田 信博, 石田 幸男, オープンクラックを持つ回転軸系の有限要素モデリングと振動解析 (系の支持が異方性の場合について), 第60回 理論応用力学講演会, OS12-13, 2011-03-09, 東京工業大学
- ② T. Inoue, N. Nagata, and Y. Ishida, Concise and Accurate Modelling of the Open Crack in Rotor Systems, IFToMM - 8th International Conference on Rotor Dynamics, 2010-9-14, Seoul, Korea
- ③ T. Inoue, N. Nagata, Y. Ishida, FEM Modelling and Experimental Verification of a Rotor System with a Open Crack, ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences Computers and Information in Engineering Conference, 2009-09-02, San Diego, USA
- ④ 井上 剛志, 永田 信博, 石田 幸男, オープンクラックを有する回転軸系の有限要素モデリング : 固有振動数と応答曲線の実験的検証, Dynamics & Design Conference 2009-8-2, 137, 北海道, 北海道大学
- ⑤ 井上 剛志, 加藤雅人, 永田 信博, 石田 幸男, オープンクラックを有する回転軸系の有限要素モデル構築と実験的検証, Dynamics & Design Conference 2008-9-6, 214, 東京, 慶応大学

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

井上 剛志 (INOUE TSUYOSHI)  
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号 : 70273258

##### (2) 研究分担者

神谷 恵輔 (KAMIYA KEISUKE)  
愛知工業大学・工学部・教授  
研究者番号 : 50242821  
石田 幸男 (ISHIDA YUKIO)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号 : 10092991

##### (3) 連携研究者 なし