

実稼働データを用いた機械のヘルスマニタリング

Structural Health Monitoring Based on Operational Data

精密工学専攻 47号 松原和茂

Kazushige Matsubara

1. 緒言

近年、機械のメンテナンスを自動化する技術が着目されている。現在の保守点検や故障診断の多くは人による目視や聴診棒によるものが多い。しかしこの方法は機械に人が近づくため危険が伴う。例えば風力発電機のメンテナンスでは人が登る必要があり、高速道路の標識では人が道路に近づかなければならない。今まで人力で行われてきたこれらの作業をセンサに置き換え、センサの実稼働データを用いることで人が直接機械に向かわなくてもコンピュータを用いて故障を診断することができる。それを実現するためにセンサの実稼働データを用いた遠隔モニタリングの研究が盛んに行われている。そこで本研究では回転機械の教育用キットとアクリル製の道路標識モデルを用いて故障の再現を行い、実稼働データを用いた故障検出を行う。

2. 方針

機械の対象として回転機械と道路標識と分け、センサの実稼働データを用いて故障検出を行う。回転機械の故障診断の問題点は小さい故障信号がノイズに埋もれて早期の故障検出が困難なことである。そこで本研究では、機械の共振に着目して故障信号を増幅する。また、歪ゲージ応答を利用したモード解析が報告されており⁽¹⁾、従来故障診断に用いられていたマイクロフォン、加速度ピックアップに加えて歪ゲージの3種類のセンサを用い、各故障信号に適したセンサを選定する。一方、道路標識の故障診断の問題点は加振源が環境加振のため、入力情報が不明であることである。したがって加速度ピックアップの実稼働応答データの変動を用いて故障診断を行う。環境加振による故障診断では固有振動数の変化によるもの⁽²⁾や、モード減衰比の変化によるもの⁽³⁾が報告されているが本研究では3方向の固有ベクトルの変化に着目する。

3. 回転機械の振動音響特性の実験把握

本章では、回転機械の振動モードおよび音響モードの実験把握、有限要素法による解析モデルを示す。回転機械は Fig.1 の Machinery Fault Simulator(SpectraQuest 社製)を用いて行う。モーターと電磁ブレーキを搭載しており、負荷トルクを発生した状態で動作が可能である。また、回転機械と定盤の間は空気ばねで支持している。力の計測にはロードセル、加速度の計測は小型加速度ピックアップを使用する。歪ゲージは動歪が測定可能な圧電歪センサを使用する。音圧測定は半無響

室で行い、機械にアクリルボックス(1100×600×600mm, 厚さ10mm)を被せて音圧を1/2マイクロフォンで測定する。

回転機械の故障信号を共振に着目して増幅する。そこで実験モード解析と理論モード解析を行い、機械の固有振動数と振動モードを求める。MFSをハンマリングによって実験モード解析し Driving point FRF を測定した結果を Fig. 2 に示す。また Fig. 3 には計算された4次の130Hzの振動モードを示す。実験結果と解析結果を比較すると比較的解析精度が高いことを確認した。

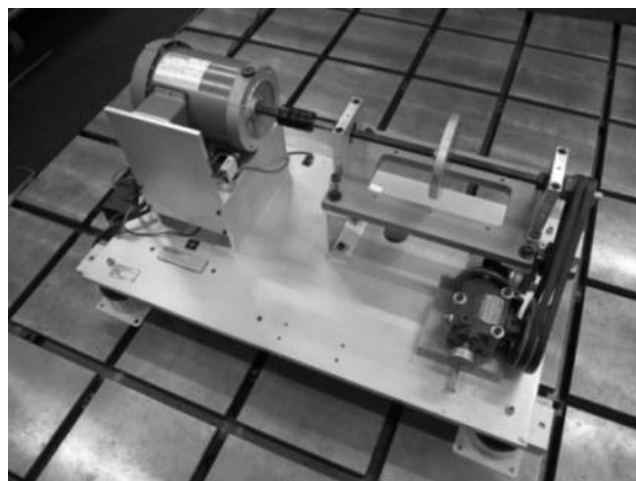


Fig. 1 Setup for rotating machine

次に解析モデルを使用し、歪モードの解析を行った。さらに剛壁モデル(1100×600×600mm)を作成し、音響モードを解析した。

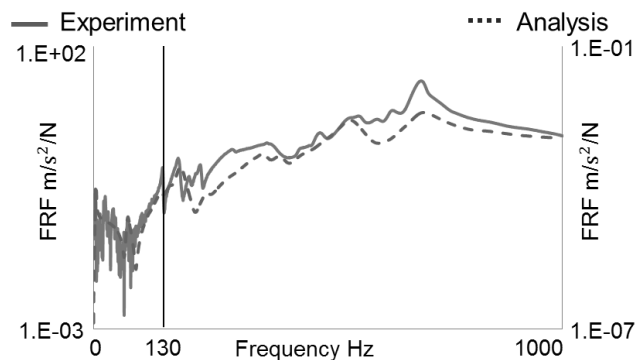


Fig. 2 Driving point FRF experiment&analysis

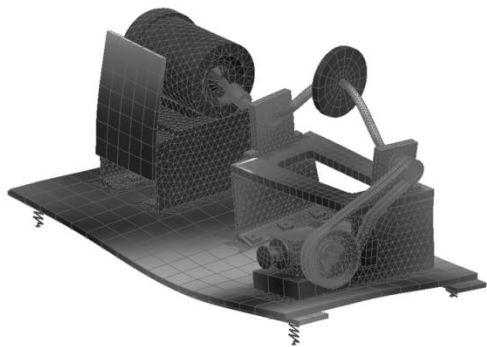


Fig. 3 Calculated mode shape (130Hz)

4. 故障に対するセンサの最適な種類と設置位置の検討

本章では、実験結果と解析結果より得られた振動モードおよび歪モード、音響モードを元にマイクロフォンと加速度ピックアップと歪ゲージを用いてミスアライメント、ベアリング外輪傷、アンバランスの検出を行い、各故障に対する適切なセンサを選定する。

4.1 ミスアライメント検出

始めに、軸継手のタイプを変えてミスアライメントの検出を行う。Fig. 4のようにFlexible couplingとSolid couplingを交換してミスアライメントの発生させる。Flexible couplingは柔らかいバネを持つため、軸同士の心ズレや面ズレをある程度吸収するが、Solid couplingは軸同士を硬いバネで接続するため、ミスアライメントが発生する。

Fig. 5にミスアライメントが発生した状態でマイクロフォンを用いて測定した結果3900rpm, 130Hzで大きな音圧応答が得られた。

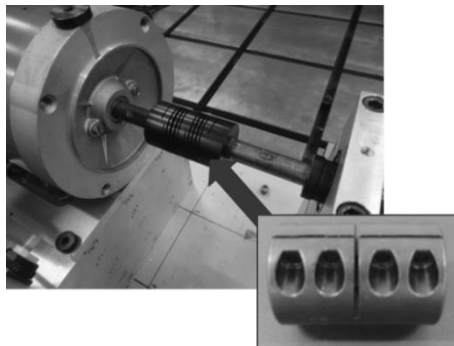


Fig. 4 Misalignment coupling

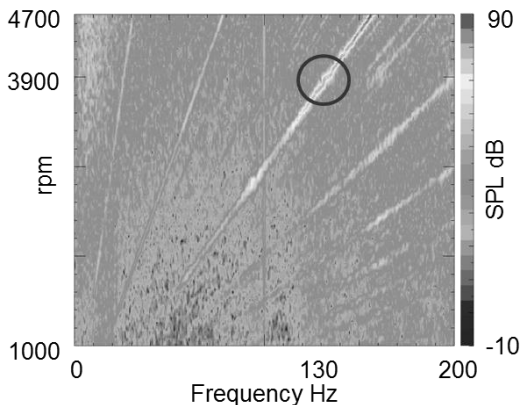


Fig. 5 Rpm map of misalignment SPL

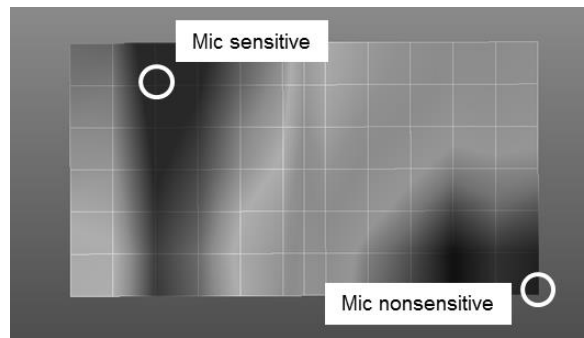


Fig. 6 ODS of SPL 130Hz

アクリルボックス内に Fig. 6 に示す 130Hz における SPL の ODS が大きい位置 (Mic sensitive) と小さい位置 (Mic nonsensitive) にマイクロフォンを設置した結果 Mic nonsensitive における正常時とミスアライメント時の音圧差が Fig. 7 のように 8dB となった。したがって、マイクロフォンは高周波において設置位置に関わらず検出精度が高いことがわかる。

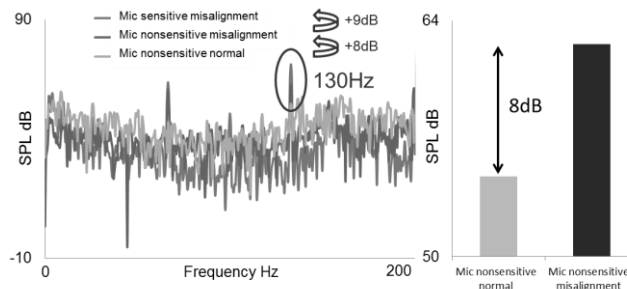


Fig. 7 Operational SPL misalignment

4.2 ベアリング故障位置検出

加速度ピックアップを用いてベアリングの故障位置検出を行う。右側(R)に外輪に傷が付いたベアリングを設置し、左側(L)に正常なベアリングを設置する。ベアリングそれぞれの直上に加速度ピックアップを設置し応答を測定した結果を Fig. 8 に示す。その結果ベアリングの故障信号である 200Hz の振幅が右側の加速度ピックアップよりも左側の方が大きくなった。したがって、故障箇所に近い箇所に設置した加速度ピックアップの応答の大きさを測定するだけでは、故障が左か右のベアリングで発生しているかは判別できなかった。そこで、機械の伝達関数と加速度ピックアップを用いて機械に発生する力を同定して外輪に傷が付いたベアリングの故障位置の特定を行う。

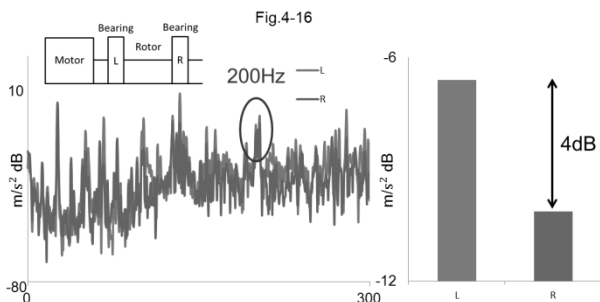


Fig. 8 Operational acceleration(right bearing fault)

構造物上の n 個の点における周波数応答関数行列を $[H_{nm}]$, 入力を $\{F_n\}$, 出力を $\{X_n\}$, とすると以下のように表される.

$$\{F_n\} = [H_{nm}]^{-1}\{X_n\} \quad (1)$$

式(1)を用いて右側のベアリングが故障時の力を同定した結果 Fig. 9 となり, 左側のベアリングが故障時は Fig. 10 となった. 加速度ピックアップは力の同定をすることで故障位置の特定に適していることを確認した.

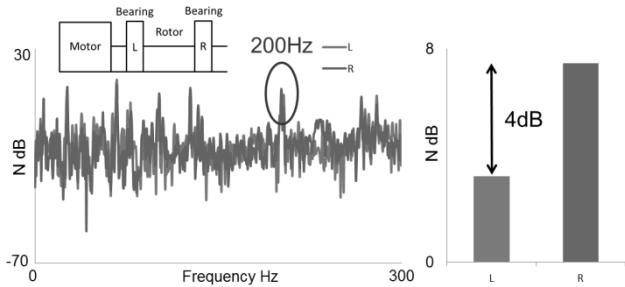


Fig. 9 Operational force(right bearing fault)

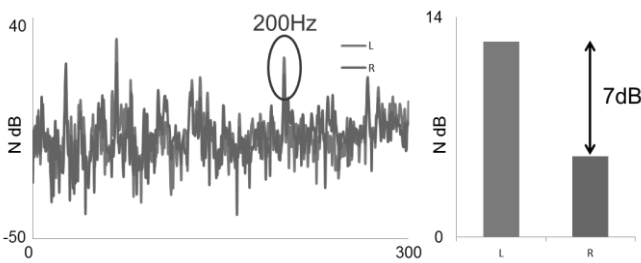


Fig. 10 Operational force(left bearing fault)

4.3 アンバランス検出

次に歪ゲージを用いてアンバランスの検出を行う. 歪は加速度や音圧に比べて低周波の感度が高い特性があり, これを利用してアンバランスの早期検出を図る. 解析結果より求めた歪モードより歪が大きくなる箇所に歪ゲージを取付け, また, 同様に加速度が大きくなる箇所に加速度ピックアップを設置した. 正常状態と小さなアンバランスが発生している状態の応答を比較すると加速度が 9dB 差, Fig. 11 のように歪が 12dB 差となり, アンバランスのような低周波域の故障信号には歪が適していることを確認した.

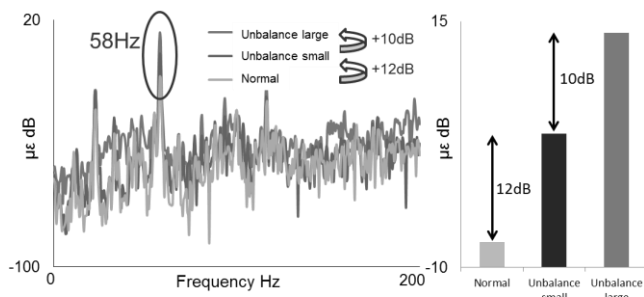


Fig. 11 Operational strain

5. 環境加振による道路標識モデルのヘルスマニタリング

本章では, 入力信号を回転数でコントロールできる回転機械とは異なり, 入力信号が不明な環境加振における故障検出を行う. 道路標識モデルを作成し, 環境加振による応答のみを利用して道路標識のボルトの緩み箇所を特定する.

5.1 道路標識モデルの実験結果と解析結果の比較

Fig.12 にアクリル製道路標識(W300× H340×D200mm)の有限要素モデルを示す. ボルト結合を A~D のバネ要素で表している.

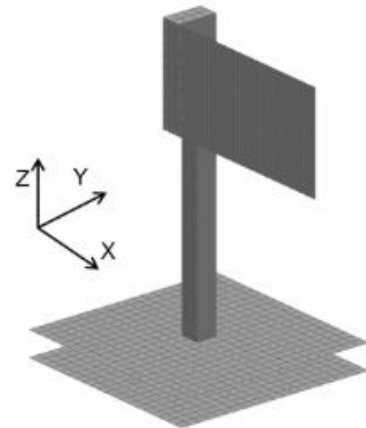


Fig. 12 FE model

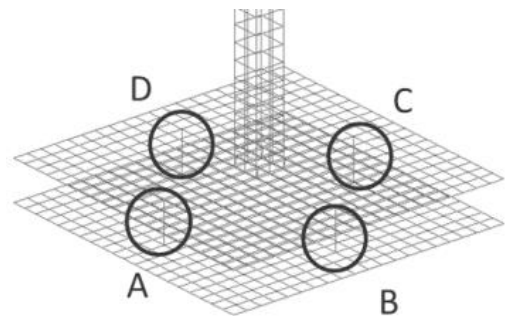


Fig. 13 Bolt position

有限要素モデルと同様のアクリル製標識を作製し, モードシェイプを測定した. 実験結果に基づいて解析結果のモデルアップデートを行った結果, Fig. 14 のように解析 5 次 155Hz, 実験 5 次 161Hz で似た振動モードが得られた.

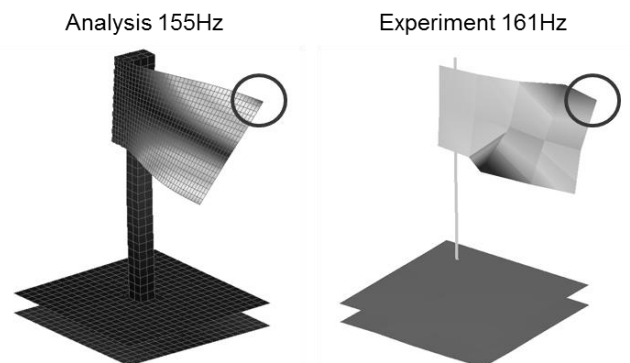


Fig. 14 Comparison of mode shape

5.2 環境加振による道路標識モデルの応答

実際の道路の環境加振による振動を3軸加速度ピックアップで測定し、その振動のデータを加振器に入力し、実際の応答を模擬して道路標識モデルを加振した。そして3軸加速度ピックアップをFig. 14の○印の位置に設置し、各ボルトA~Dを緩めた時の3軸加速度計応答を測定した。Fig. 15にY軸加速度応答の1/24オクターブバンドを示す。161Hzにおいて各ボルトに対して応答の変動が大きくなっていることがわかる。これはボルトが緩むことによって固有ベクトルが変化し応答が変化したためであると考えられる。

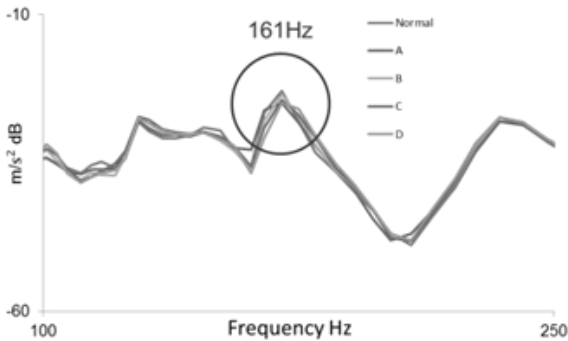


Fig. 15 Y axis response against ambient vibration

161HzにおけるX, Y, Z軸の応答を、Y軸を1として正規化し3次元ベクトル化する。そして正常状態およびA-Dが緩んだ時のそれぞれの3次元ベクトルを算出し、同じ3次元グラフに表示させた。そのグラフを正常状態の視点から比較した3次元グラフをFig. 16に示す。この結果より、正常状態のベクトルを基準として、A~Dのベクトルがそれぞれ異なっているため、どのボルトが緩んでいるか特定することができる。

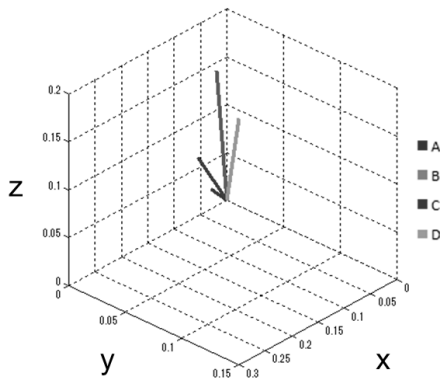


Fig. 16 Vector difference from normal due to A-D bolt fault

5.3 異なる環境加振によるボルト緩み箇所の特定

次に異なる環境加振におけるボルトの緩み箇所特定を行う。加振器に入力する振動の信号の一部を増幅し、道路でトラック等の大型車両が通った状態を再現する。この実験条件下においてもボルト緩み箇所を特定することができるか検討する。各ボルトが緩んだ時の3次元ベクトル同士のなす角

のグラフをFig. 17に示す。このグラフは100%に近いほどベクトルのなす角が小さいことを表しており、例えばボルトDが緩んだ場合に注目すると、Dが緩んだときは高くなり、それ以外が緩んだ時や正常状態の時は低くなる。これによりDが緩んでいることを判別できる。ボルトA,B,Cにおいても同様の傾向が得られた。このことより、異なる環境加振においても故障を判別することができることを確認した。

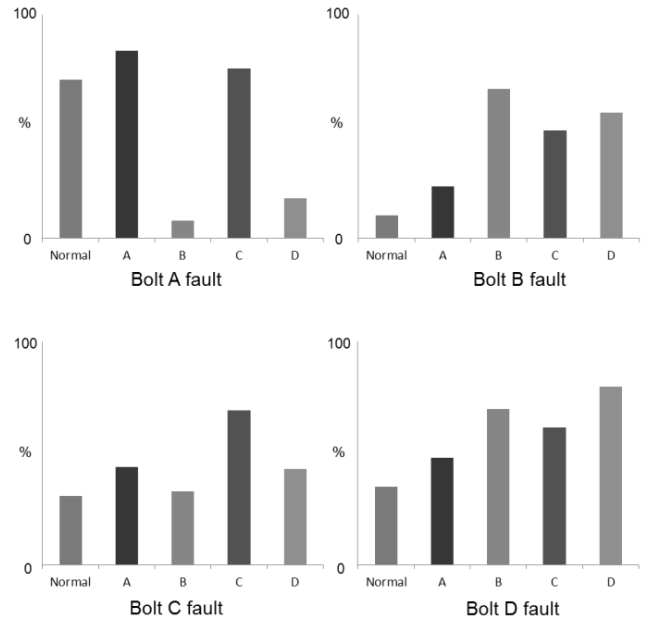


Fig. 17 Bolt fault identification

6. 結言

- (1)回転機械の故障検出では、マイクロフォンは設置位置に関わらず検出精度が高く、加速度ピックアップは故障位置を特定でき、歪ゲージは低周波の故障検出に適することを示した。
- (2)ボルトの緩みによる3方向の固有ベクトルの変動を応答のみのデータを用いて測定し、3次元ベクトルで評価することで道路標識モデルのボルト緩み箇所を特定した。

謝辞

Machinery Fault Simulator 提供に協力頂いた株式会社東陽テクニカに感謝する。

参考文献

- (1) 桑原広樹, 伊藤貴彦, 岩原光男, 近藤敦美, 長松昭男, 高橋政行, “歪ゲージ応答による実験・実稼動モード解析”, Dynamics & Design Conference 2007, (2007), pp. “631-1”- “631-6”
- (2) 金澤健司, “コンクリート系建物の固有振動数の日変動メカニズムの解明”, 日本建築学会構造系論文集, (2007), 第612号, 63-71
- (3) 長山智則, 阿部雅人, 藤野陽三, 池田憲二, “常時微動計測に基づく非比例減衰系の構造同定と長大吊橋への適用例”, 土木学会論文集, (2001), No. 689/ I -57, pp. “261-274”