

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月18日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560238

研究課題名（和文）

不確定数学モデルの利用によるモデルベース診断のロバスト性向上に関する研究

研究課題名（英文）

Improvement of diagnosis robustness of model based diagnosis method using modified mathematical model

研究代表者

河村 庄造（KAWAMURA SHOZO）

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00204777

研究成果の概要（和文）：機械・構造物の数学モデルに基づくモデルベース異常診断においては、数学モデルの精度が診断結果に大きな影響を与えるという問題がある。本研究では、正常状態での実測値と数学モデルの差異を積極的に診断プロセスに取り込むことで、モデルベース診断のロバスト性を向上させる手法を構築した。そしてはり構造物、回転機械を診断対象として、数値的および実験的に検証し、提案手法の有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：In the model based diagnosis approach, the accuracy of the mathematical model has much influence on the diagnosis result. In this study, modified mathematical model considering the difference between the measured and simulated responses are constructed to improve the diagnosis robustness. The proposed method is checked in the beam structure and rotating machinery, then the validity and applicability are shown by numerical examples and experiment.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：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：振動試験，異常診断，モデルベース診断，外力同定，モデル修正，正則化，はり構造物，回転機械，クラック，非線形振動

## 1. 研究開始当初の背景

機械力学(振動工学)を援用する機械や構造物の異常診断は、学会、産業界において、また国際的にも国内的にも重要で注目されている分野である。

異常診断手法の一つの分野として、診断対象物の数学モデルに基づく「モデルベース診

断」があり、研究代表者は既に独創的手法を提案している。

一般にモデルベース診断には、数学モデルの精度が診断結果に大きな影響を与えるという問題があり、その問題を解決することで、診断のロバスト性向上が期待できる。

## 2. 研究の目的

- (1) 正常状態での実測データと数学モデルから得られるデータの差異を診断プロセスで考慮する手法の確立を行う。
- (2) 提案手法をばり構造物に対して数値的、実験的に検証する。このときは線形的な応答変化を生じる異常原因を想定する。
- (3) 確立した手法を回転機械に適用し、診断精度を検証する。線形的な応答変化を生じる異常原因を想定する。
- (4) 確立した手法を、非線形的な応答変化を生じる異常原因を想定したばり構造物に適用し、診断精度を検証する。具体的にはブリージングクラックの診断を行う。
- (5) 研究の過程で必要な技術改良を行う。

## 3. 研究の方法

- (1) 静止構造物の場合、振動試験はランダム加振が採用できるので、周波数応答関数を容易に得ることができる。一方、構造物の設計データから有限要素法で運動方程式を構築し、加振点と測定点の間の伝達関数を計算する。その結果と実測結果が一致するように数学モデルのモデル修正を行う。モデル修正を行ったとしても、シミュレーション結果と実測結果がすべての振動数で完全に一致することはない。そこで加振振動数ごとに、シミュレーション結果と実測結果の比率を求め、数学モデルの修正量とする。異常発生状態でも、正常状態と同じ比率で実測結果とシミュレーション結果がずれると仮定し、実測結果に適合するように数学モデルを修正し、異常発生位置および異常原因と程度の推定を行う。
- (2) 一般的な機械・構造物は三次元構造をしているが、構築した手法の妥当性、適用性を検討するため、単純なばり構造物を取り上げる。また異常原因も、線形的な応答変化を生じる質量付加とする。適当な位置に異常原因としての質量を付加し、正常状態と異常状態の応答の差から異常発生位置を推定する。数値シミュレーションでは応答に誤差を含めずに診断を行い、十分な精度で診断が可能であることを示す。実際の適用性は実験データを用いて検討する。均質一様ばりの中央を動電型加振器で加振する実験装置を用い、最初に正常状態で伝達関数を測定して数学モデルを構築し、シミュレーション結果と実測結果の比率を求めておく。異常状態の実験を行い、正常状態と異常状態の応答の差から、提案手法を用いて異常発生位置を推定する。ランダム加振の特徴を生かし、着目する周波数範囲の多くの振動数で異常発生位置の推定を行い、最終結果はそれらを平均して求める。
- (3) 構築した診断手法を回転機械へ適用する。回転機械では、不つり合いを完全になくすことはできないので、常時加振試験を行って

る状態である。十分につり合いがとれた状態を正常状態とし、意図的に不つり合いおもりを円板に付加して、異常状態を作る。そして提案手法によって異常発生位置、程度の同定を行う。また実際に発生しうる異常のもう一つの例として接触を取り上げ、発生位置の診断を行う。

- (4) 非線形的な応答変化を生じる異常原因の一例としてブリージングクラックを取り上げる。ブリージングクラックはオープンクラックと異なり、振動の一周期の間に特性が変化するので、加振振動数の二倍の高調波成分が発生する。さらに加振振動数が共振振動数の約半分の時、高調波成分が共振する。したがってそのような振動数で加振実験を行い、外力同期成分と二倍の高調波成分の両方を利用して異常発生位置の同定を行う。数値例と実験で手法の検証を行う。

- (5) 本研究で採用している異常診断手法の特徴は、異常による応答の変化を仮想的な外力の付加と考え、仮想外力の同定から異常発生位置を推定するところにある。したがって外力の同定手法、あるいは仮想外力の未知変数の設定について、新しい考え方が提案できる。

外力同定については、対象物を有限要素法で離散化した後の多自由度振動系の外力成分を未知数とするのではなく、構造物に作用する分布力を少ない未知数で近似的に表現し、有限要素法の形状関数を利用して外力を離散化する手法を提案する。数値例と実験によって提案手法の有効性を検証する。

次に仮想外力の未知数については、一般には動変数と同じ数が必要となるが、このことは測定点数の増加を必要とする。そこで、一つの要素内の一点に調和外力が作用する考え、仮想外力の未知数を一つに減らす手法を提案する。数値例と実験によって提案手法の有効性を検証する。

## 4. 研究成果

- (1) 図1に示すような自由支持ばりを取り上げ、数値例と実験で検証する。質量9.5gのおもりを付加した場合を異常状態とし、ある加振振動数で振動試験を行い、従来手法と提案手法で異常発生位置を同定した結果を図2に示す。図から提案手法の結果が正しい位置を推定していることがわかる。他の振動数でも推定を行い、結果を図3にまとめる。平均値、結果のばらつきとも提案手法が優れていることがわかる。

- (2) 回転機械の異常診断においては、図4に示す実験装置を用いて検証した。軸中央(数学モデルでは要素番号10)に円板を取り付け、その位置に意図的に不つり合いおもりを付加した場合の診断結果を図5に示す。正しい異常発生位置が同定できることがわかる。そして不つり合い量の同定も行い、正しく同定

できることを確認した。さらに円板が二枚ある場合に、一方の円板のみに許容値を超える不つり合いが発生した場合の診断も行い、正しい結果が得られることを確認した。別の異常原因として、軸に定常的な接触が発生した場合の診断も行い、正しい診断結果が得られることを確認した。

(3) 図6にブリージングクラックの開閉の様子を示す。図1と同様のはりにブリージングクラックを発生させ、数値例で周波数応答を

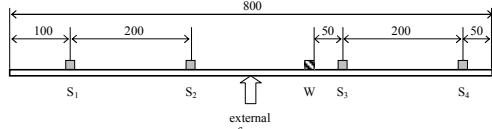


図1 診断対象の自由支持はり

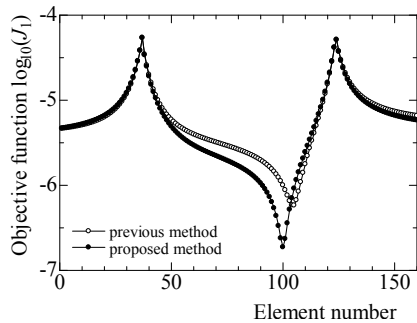


図2 異常発生位置同定のための評価関数

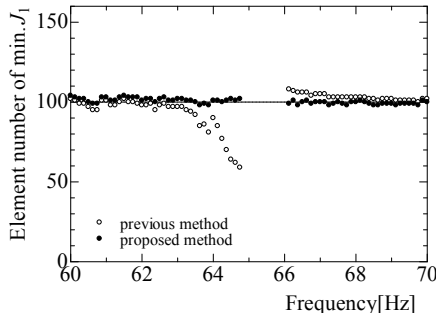


図3 種々の加振振動数における異常発生位置

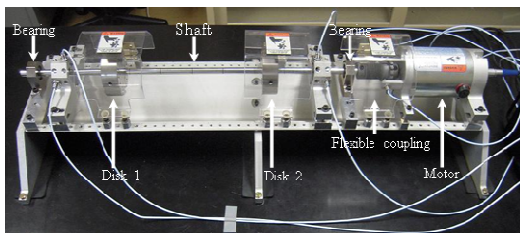


図4 回転機械の実験装置

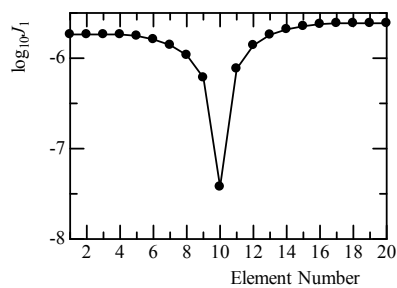


図5 異常発生位置同定のための評価関数

求めると図7のようになる。主共振の約半分の加振振動数で、二次の高調波成分が共振している。その振動数のデータを用いて異常発生位置の推定を行った結果を図8に示す。二つの振動数で正しい結果を得ることができる。次に実験的に検証した。図9は特徴的な振動が現れる加振振動数における応答の周波数分析結果である。正常状態では見られなかった二倍の高調波成分が確認できる。両者の差に基づいて異常発生位置を推定した結果が図10である。実際のクラックは69番と70番要素の間の節点に作られているが、同定結果は、69番と70番要素の評価関数が有意に小さくなっており、正しく同定できていることがわかる。

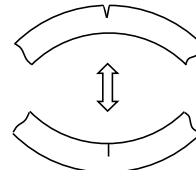


図6 ブリージングクラックの開閉

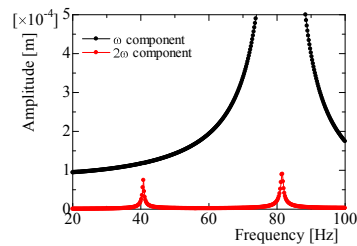


図7 周波数応答の一例

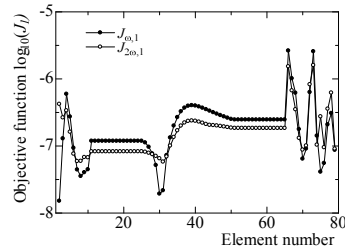


図8 異常発生位置同定のための評価関数

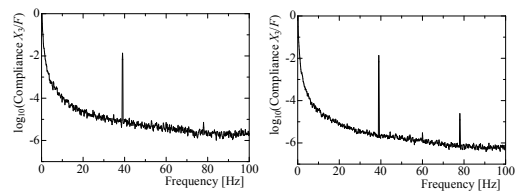


図9 実験による正常状態(右図)と異常状態(左図)の応答の周波数分析結果

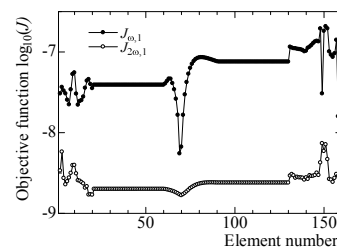


図10 異常発生位置同定のための評価関数

(4) はり構造物や回転機械の軸ははり要素で離散化するが、実際の三次元構造物の場合は、自由度の多い要素で離散化する必要があり、外力の未知数の増加、必要なセンサー数の増加を導く。そこで図 11 に示すように、一つの要素内で集中的に仮想外力を作用させる新しい手法を提案した。実験データを利用して異常発生位置を同定した結果を図 12 に示す。従来法では、外力の未知数が四つあり、特異値分解によって一つあるいは二つまで採用して評価関数を求めるが、提案手法では特異値が一つに絞られている。両者を比較すると、提案手法は従来法において特異値を一つ採用した場合に相当することがわかった。また正しい異常発生位置を同定できることがわかった。

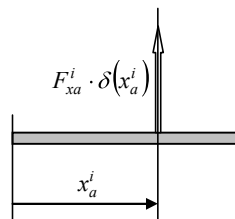


図 11 集中的に作用する仮想調和外力

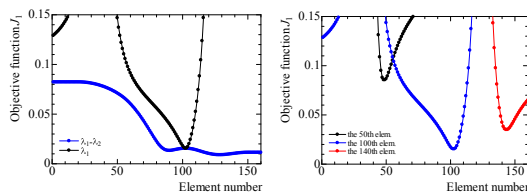


図 12 異常発生位置同定のための評価関数  
右図：従来法。正しい異常位置 100 番要素  
左図：提案手法。正しい異常位置 50, 100, 140 番要素

## 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 5 件)

① S.Kawamura, K.Niimi, Y.Kato, H.Minamoto, Stepwise diagnosis for rotating machinery using force identification approach, *Advances in Acoustics and Vibration*, 査読有, Vol.2012, (2012), on Web Site.

②河村庄造, 感本広文, 機械・構造物に作用する外力の同定に関する研究(分布力を未知数とする同定手法の提案), 日本機械学会論文集中編, 査読有, 第 76 巻, 第 763 号, (2011), pp.533-541

③S.Kawamura, J.Yamamoto, H.Minamoto, Model-based diagnosis approach for a beam structure using the modified mathematical model, *Journal of System Design and Dynamics*, 査読有, Vol.5, No.2 (2011), pp.306-319.

④S.Kawamura, J.Yamamoto, H.Minamoto, A regularization method for a stepwise primary diagnosis method of a beam structure using a force identification technique, *Journal of System Design and Dynamics*, 査読有, Vol.5, No.4 (2011), pp.612-623.

⑤ S.Kawamura, K.Sakai, Y.Suzuki, H.Minamoto, Proposition of a stepwise diagnosis method for a cracked beam using a force identification approach, *Journal of System Design and Dynamics*, 査読有, Vol.5, No.7 (2011), pp.1518-1530.

〔学会発表〕(計 5 件)

①河村庄造, 鈴木雄人, 感本広文, 外力同定を援用したモデルベース診断手法の改良と応用について, 日本機械学会第 10 回評価・診断シンポジウム講演論文集(No.11-49), pp.86-90, 2011.12.14, 大阪.

② S.Kawamura, Y.Suzuki, H.Minamoto, Development of a Stepwise Primary Diagnosis Method of a Beam and a Plate Structure Using a New Regularization Method, *Proceedings of the Asia-Pacific Vibration Conference 2011*, pp.1642-1651, 2011.12.6, 香港.

③河村庄造, 鈴木雄人, 感本広文, 外力同定を援用したはりのブリージングクラックの診断, 日本機械学会東海支部第 60 期総会講演会講演論文集(No.113-1), on CD-ROM, 2011.3.14, 豊橋.

④ S.Kawamura, K.Niimi, H.Minamoto, Proposition of a diagnosis method of rotating machinery using a force identification approach, CD-ROM *Proceedings of the 17-th International Congress on Sound and Vibration*, 2010.7.21, エジプト・カイロ.

⑤S.Kawamura, K.Sakai, H.Minamoto, A Primary Diagnosis Method of a Cracked Beam Using a Force Identification Approach, CD-ROM *Proceedings of the Asia-Pacific Vibration Conference 2009*, 2009.11.24, ニュージーランド・クライストチャーチ.

〔図書〕(計 0 件)

該当なし

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

該当なし

○取得状況(計 0 件)

該当なし

〔その他〕  
該当なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

河村 庄造 (KAWAMURA SHOZO)  
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：00204777

(2)研究分担者

感本 広文 (MINAMOTO HIROFUMI)  
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・准  
教授  
研究者番号：20273328

(3)連携研究者

該当なし

