

## 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 28日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010 ～ 2011

課題番号：22760350

研究課題名（和文） カオス信号入力に基づく構造物の異常診断法の開発

研究課題名（英文） Structural diagnostic system based on chaotic excitation

研究代表者

野村 泰稔（NOMURA YASUTOSHI）

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号：20372667

研究成果の概要（和文）：

カオス信号入力に基づく構造物の異常診断法の開発を試みた。健全性を評価する際に、事前に基準データを必要とせず、既設構造物への即時診断が可能な「リファレンスレス異常診断法」の実現可能性を調査した。健全時の情報を保持する場合、損傷前後での比較を通じて、構造物の損傷位置を同定することに成功した。また、診断対象の構造形状によっては、健全時の情報を必要とせず、損傷の位置を同定できることを数値的に明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Attempts were made to develop a vibration-based damage detection method using chaotic excitation and to investigate the feasibility of damage detection method with no reference data. It was observed that the proposed system could detect damage location through comparisons with attractor obtained before or after the damage. Numerical results also demonstrated that the proposed method can make it possible to detect the damage location without using any reference data under some conditions of the observed structures.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：異常診断，信号処理，カオス，アトラクタ，常時微動

## 1. 研究開始当初の背景

近年，新たな振動応答評価に基づく異常診断法としてカオス応答アトラクタの定量評価に基づく方法が開発されている。この方法は診断対象にカオス信号を入力し，その応答アトラクタのもつカオス特徴量を損傷前後で比較することで損傷の有無を検知するも

のであり，損傷に起因するカオス特徴量の変化はモード形状や固有振動数の変化と比較して大きいことが数値的・実験的に明らかにされている。応答アトラクタを適切に評価することで，損傷検出に対する感度が大幅に向上するが，全体構造からの損傷位置同定が可能かどうかを検討する必要がある。また，通

常、損傷判定には健全時の損傷指標となる参照データが常に必要であり、古い既設構造物のように完成時の状態が不明の場合は適用困難となる。また、一般的には参照データを事前に取得している構造物は多くないのが現状である。今後の診断対象の増加を勘案すると、健全時の参照データを必要とせず社会基盤施設の即時診断が可能で、全体構造から更なる詳細調査が必要な箇所を特定する技術の開発は、健全性評価の効率化の観点からも重要な課題であり、その実現可能性を調査することは極めて重要と考える。

## 2. 研究の目的

本研究では、損傷に対する感度が高いカオス応答アトラクタの定量評価に基づく異常診断法に着目し、数値実験・模型実験を通じて、損傷位置同定アルゴリズムを確立するとともに、健全時の損傷判定基準を必要としないリファレンスレス型異常診断法の開発を試みた。具体的な目的を以下にまとめる。

### (1) 損傷に対する特徴量の感度解析と入力信号の影響

損傷発生の検知について、その推定精度に大きく寄与するカオス特徴量の感度を数値実験・模型実験を通じて明らかにすることを目的とする。また、入力信号の波形構造の違いにより異常箇所の検出精度に与える影響を調査する。

### (2) 損傷位置同定アルゴリズムの確立

健全時の特徴量との比較を通じて損傷位置を同定するリファレンス型および健全時の情報を必要としないリファレンスレス型での損傷位置同定アルゴリズムを確立することを目的とする。

### (3) 常時微動のアトラクタ評価による損傷位置同定法の確立

応答のカオス性の有無に影響を受けず、アトラクタを再構成し評価することで、異常箇所を特定することが可能か否か検討する。この位置づけとしては、常時微動評価において有用性が確認されれば、まさに応答を評価するのみでリファレンスレス異常診断が可能となる。この実現可能性を模型実験により調査する。

## 3. 研究の方法

本研究では、数値・模型実験としては、塔状フレーム構造物を想定し、損傷同定実験を行う。以下に具体的な研究方法を示す。

### (1) 損傷に対する特徴量の感度解析と入力信号の影響

本研究では診断対象に与える損傷は、部材

剛性の低下を考える。診断対象に任意に損傷を与え、損傷レベル・箇所に対するカオス特徴量の変化を確認し、損傷レベルの推定を目指す。本研究では、構造物の頭頂部へカオス信号だけでなく、調和振動を入力し、その振動応答からアトラクタを再構成し、その特徴量として、リカレンスプロット、交差予測誤差率、リアプノフ指数、相関次元などを特徴量として検討する。

### (2) 損傷位置同定アルゴリズムの確立

リファレンス型損傷診断法としては、損傷前後での特徴量の比較を考え、リファレンスレス型損傷診断法では、入力と応答のアトラクタの比較、および応答のアトラクタの特徴量を各層で相対比較することを試み、任意に与える損傷の箇所を同定できるかどうか確認する。また、模型実験時の損傷として、各層4本の柱部材で構成されるフレーム構造物から、任意の層に1本の柱部材を除去した状況を検討する。

### (3) 常時微動のアトラクタ評価による損傷位置同定法の確立

常時微動を生成するために、数値実験においては、診断対象の構造物にホワイトノイズを入力し、模型実験においては、インパルスを与え、診断対象の複数の振動モードが励起される状況を考える。これらの設定において、損傷位置同定が可能かどうか検討する。

## 4. 研究成果

### (1) 平成22年度の成果

数値実験を通じて、診断対象への入力信号としてカオス信号だけでなく、調和振動やホワイトノイズを用いた場合でも、振動応答のカオス性の有無に関係なく、適切にアトラクタを再構成しそれを評価することで診断対象の構造形状によっては異常診断が可能となることを確認した。特に、診断対象の共振を避ける低帯域のカオス信号を入力することが有効であることが分かった。アトラクタの評価としてRecurrence Plotおよび交差予測誤差を計算し、それらを評価指標とすることで異常箇所を特定することに成功した。

損傷・異常の検出感度を客観的に評価するため、損傷前後での交差予測誤差と層間変位のRMSの変化率を比較した結果、交差予測誤差率の変化がRMSの変化と比較して、大幅に大きくなることが明らかとなり、応答からアトラクタを再構成し、それを評価することで、損傷に対する感度が向上することが確認できた。また、同層に位置する要素の構造諸元がすべて同一という軸対称構造物では、損傷を仮定した要素を上記のアトラクタの評価により、全体構造から何らかの異常性を有する箇所として特定可能であることが分かった。

た．このことは診断対象の構造形状によっては，健全時の状態量を必要とせず，まさにカオス信号を入力するのみで異常診断が可能となることを示すものである．

(2) 平成 23 年度の成果

損傷推定への特徴量算出方法の感度の実験的検証

各層 4 本の柱部材を有する 4 層塔状構造モデルおよび小型起振機を用いてリファレンス型およびリファレンスレス異常診断を実施した．任意の層の 1 本の柱を除去した状況を損傷として考え，損傷位置同定実験を行った．模型実験を通じて，適切にアトラクタを再構成しそれを損傷前後で評価することで診断対象の損傷位置を特定できることを明らかにした．特に，模型実験においてもアトラクタの評価として，損傷前後での交差予測誤差およびリカレンスプロットの定量評価手法である %recurrence が有効であることを確認した．健全時の情報を必要としないリファレンスレス型においては，カオス入力信号と応答のアトラクタを評価したが，各層に一つセンサを配置するだけでは損傷位置同定は困難であることが明らかとなった．

常時微動のアトラクタ評価に基づく異常診断法の開発

供用中橋梁など診断対象によってはカオス信号を入力する強制加振が困難となる状況が発生する．上記の構造モデルを対象として，複数のモードが励起されるインパルス応答を常時微動と想定し損傷位置を同定できるかどうか確認した．インパルス応答の 1 次モード相当のウェーブレット係数の時刻歴からアトラクタを再構成し，損傷前後で %recurrence を評価することで 1 本の柱部材を除去した層を特定できる可能性を示した(図-1:2 層の柱部材 1 本を除去した状況での %recurrence の結果)．損傷前後で応答波形の異なる常時微動においてもアトラクタを評価することが有効であることが確認された．

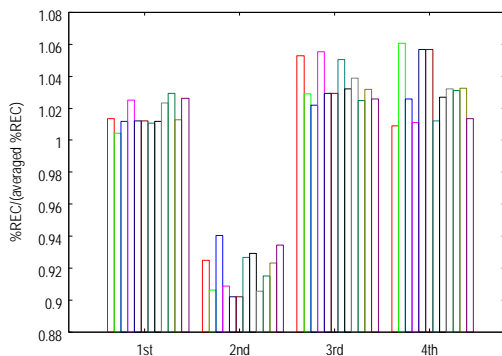


図-1：2 層の柱部材を 1 本除去した場合の各層の %リカレンス

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)

著者名:野村泰稔,日下貴之,森本大貴,  
論文表題:応答アトラクタの交差予測に基づく構造異常診断法の開発とBaseline-less型への適用可能性調査,雑誌名:構造物の安全性と信頼性(JCOSSAR2011論文集),査読:有,巻:7,発行年:2011,ページ:230-235

著者名:服部洋,古田均,野村泰稔,中津功一郎,石橋健,論文表題:Adaboostによる振動予測を用いた橋梁ヘルスマニタリングシステムの構築に関する実験的研究,雑誌名:土木学会論文集A2(応用力学論文集),査読:有,巻:67(14),発行年:2011,ページ:825-832

著者名:中津功一郎,古田均,野村泰稔,高橋亨輔,石橋健,三好紀晶,論文表題:GAによる実用化を目指した長期的な橋梁維持管理計画策定,雑誌名:日本知能情報ファジィ学会誌,査読:有,巻:23(4),発行年:2011,ページ:95-105

著者名:野村泰稔,中津功一郎,古田均,日下貴之,論文表題:カオス信号入力に基づくBaseline-less型構造異常診断法の基礎的研究,雑誌名:応用力学論文集,査読:有,巻:13,発行年:2010,ページ:977-984

著者名:中津功一郎,野村泰稔,古田均,足立渉,服部洋,論文表題:橋梁損傷度判定における複合特徴選択のためのアンサンブルシステムの構築,雑誌名:応用力学論文集,査読:有,巻:13,発行年:2010,ページ:957-964

[学会発表](計 13 件)

発表者名: Y.Nomura, H.Furuta, T.Kusaka, N.Motomura, D.Morimoto, 発表標題: Reference-less Structural Vibration-based Monitoring System using Cross Prediction of Attractor, 学会名等: The 2011 International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM'11), 発表年月日: 2011年9月21日, 発表場所: ソウル(韓国)

発表者名: T.Kusaka, Y.Nomura, T.Sakamoto, T.Fujii, 発表標題: Real-time crack monitoring system in concrete structures using non-contact displacement measurements, 学会名等:

International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011 (ATEM11), 発表年月日: 2011 年 9 月 20 日, 発表場所: 神戸国際会議場(兵庫県)

発表者名: T.Kusaka, Y.Nomura, T.Nakamura, S.Ito, 発表標題: Debonding detection system for CFRP-reinforced concrete structure based on evaluations of elastic wave propagation, 学会名等: International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011 (ATEM11), 発表年月日: 2011 年 9 月 19 日, 発表場所: 神戸国際会議場(兵庫県)

発表者名: T.KUSAKA, Y.Nomura, T.Sakamoto, T.Fujii, 発表標題: Crack growth monitoring system for concrete structures based on non-contact displacement measurements, 学会名等: The 8th International Workshop on Structural Health Monitoring -2011, 発表年月日: 2011 年 9 月 13 日, 発表場所: カリフォルニア(米国)

発表者名: 川野貴之, 野村泰稔, 日下貴之, 発表標題: 調和振動の入力と応答アトラクタの評価に基づく構造物の損傷診断法, 学会名等: 日本材料学会第 60 期学術講演会, 発表年月日: 2011 年 5 月 26 日, 発表場所: 大阪大学(大阪府)

発表者名: 安藤一樹, 古田均, 中津功一朗, 野村泰稔, 石橋健, 発表標題: 進化的アルゴリズムを用いた大規模構造物の損傷確率算定に関する研究, 学会名等: 日本材料学会第 60 期学術講演会, 発表年月日: 2011 年 5 月 26 日, 発表場所: 大阪大学(大阪府)

発表者名: 藤井俊史, 日下貴之, 野村泰稔, 発表標題: 非接触変位場計測に基づくコンクリート構造物のき裂進展モニタリング, 学会名等: 第 42 回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム(日本非破壊検査協会), 発表年月日: 2011 年 1 月 20 日, 発表場所: 大田区産業プラザ PiO, (東京都)

発表者名: N.Motomura, Y.Nomura, H.Furuta, K.Nakatsu, H.Hattori, 発表標題: Reference free structural health monitoring system using ambient vibration, 学会名等: The 23th KKCNN Symposium on Civil Engineering, 発表年月日: 2010 年 11 月 13 日, 発表場所: 台北, 台湾

発表者名: 中村豪志, 日下貴之, 野村泰稔, 発表標題: PZT 素子を用いた CFRP 補強コンクリートの剥離モニタリング, 学会名等: 第 54 回日本学術会議材料工

学連合講演会, 発表年月日: 2010 年 10 月 26 日, 発表場所: ハートピア京都(京都府)

発表者名: 坂本智寛, 日下貴之, 野村泰稔, 発表標題: 非接触変位場計測に基づくコンクリート構造物のき裂検出システム, 学会名等: 第 54 回日本学術会議材料工学連合講演会, 発表年月日: 2010 年 10 月 26 日, 発表場所: ハートピア京都(京都府)

発表者名: 元村尚幹, 野村泰稔, 古田均, 発表標題: アトラクタの局所領域の広がりに着目したカオス理論を用いた Reference free ヘルスモニタリングシステム, 学会名等: 第 26 回ファジィシステムシンポジウム, 発表年月日: 2010 年 9 月 14 日, 発表場所: 広島大学(広島県)

発表者名: H.Furuta, Y.Nomura, K.Nakatsu, H.Hattori, Y.Teramae, 発表標題: Reference-free health monitoring system using chaos theory, 学会名等: The 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS2010), 発表年月日: 2010 年 7 月 14 日, 発表場所: フィラデルフィア, 米国

発表者名: 野村泰稔, 古田均, 中津功一朗, 元村尚幹, 石橋健, 服部洋, 発表標題: 常時微動を用いた Reference free ヘルスモニタリングシステムの提案, 学会名等: 日本材料学会第 59 期学術講演会, 発表年月日: 2010 年 5 月 23 日, 発表場所: 北海道大学(北海道)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

野村 泰稔 (NOMURA YASUTOSHI)

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号: 20372667