

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

Research of Baseline-less Structural Diagnosis based on Chaotic excitation

野村泰稔*・中津功一郎**・古田均**・日下貴之*

Yasutoshi Nomura, Koichiro Nakatsu, Hitoshi FURUTA and Takayuki Kusaka

*博士 (情報学) 立命館大学助教 理工学部機械工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

**博士 (情報学) 関西大学総合情報学研究センター (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1)

**工博 関西大学教授 総合情報学部総合情報学科 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1)

*博士 (工学) 立命館大学教授 理工学部機械工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

In this study, an attempt is made to develop a baseline-less structural diagnosis system that can detect the abnormal section with ease, using the data collected from the vibration measurement. In order to investigate the damage state, it is necessary to measure the intact state of the structure in advance. However, there are many existing structures which have no such data. Thus, it is very useful to develop a new abnormality detection method without using the baseline data. The proposed system can identify the location of abnormal section without using the baseline data. Based upon the chaos excitation, it is possible to perform the abnormality detection by paying attention to the chaos characteristics of structural response. Several numerical examples are presented to demonstrate the applicability of the proposed method.

Key Words: baseline-less structural diagnosis, chaotic excitation, attractor,

キーワード: 異常診断, カオス, アトラクタ

1. はじめに

わが国では、高度経済成長期に建設された橋梁や道路等に代表される社会基盤施設の適切な維持管理が重要な課題である¹⁾。適切に社会基盤施設の維持管理を行う上で最も重要となるのが健全性の評価であり、現在までに破壊・非破壊検査等、多くの構造ヘルスマonitoringに関する研究が実施されている。長期的な視野で、ライフサイクルコスト最小化を目指す社会基盤施設の維持管理計画を策定するためには、高度な技術を要する破壊・非破壊検査を実施する前に、診断対象の全体構造の健全性を把握し、更なる詳細調査が必要な損傷箇所を的確に特定することが重要である。このような背景から、振動応答計測に基づく構造ヘルスマonitoring手法が数多く提案されている²⁾³⁾⁴⁾。これらは計測自体の簡便さ、振動応答は構造物の性能に直接関係していることから、高度な破壊・非破壊検査による詳細調査の事前調査として有効だと考えられる。一般的に損傷に起因する構造特性の変化は、周波数特性、モード形状、減衰特性などを観察することで把握されるが、これらは損傷に対する感度が低く、損傷箇所の特定はそれほど容易ではない。また、これまでに有用性が確認されている先駆的な手法として、構造物の応答から損傷の指標となる層剛性を逆解析により直接同定する方法⁵⁾⁶⁾や自己回帰モデルを用いた方法⁷⁾⁸⁾、Wavelet 解析⁹⁾¹⁰⁾を用いたものなど、多くの手法が提案されている。さらに、近年、新たな構造

ヘルスマonitoring手法として、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¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾。これらは構造物にカオス信号を入力し、その応答アトラクタのもつ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、文献¹²⁾では診断対象の損傷に起因するモード形状や固有振動数の変化と比較して、カオス特徴量の変化の方が大きいことを数値的・実験的に明らかにしている。また、佐藤ら¹⁴⁾は3次元フレームモデルを診断対象として、損傷前後での応答データのカオス特徴量の比較により損傷を有する要素を特定することに成功し、さらにはノイズに対して高いロバスト性を有することを明らかにしている。ただし、前記した先駆的な方法⁵⁾¹⁰⁾を含め、これまでに提案されているカオス信号入力に基づく方法¹¹⁾¹⁴⁾は全て損傷箇所を把握する際、健全時の損傷指標となる基準データ (Baseline データ) が必要であり、損傷前後で何らかの特徴量の変化から健全性を評価する以上、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できない。また Baseline 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 Baseline 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。そこで本研究では、事前に Baseline データを取得していない構造物を対象として、数値実験を

通じて Baseline-less 型異常診断法の実現可能性を検討する。ただし、この場合、健全時のデータとの比較を行わないので、診断対象の健全性評価は原理上不可能である。本研究の目標として、健全時の Baseline データを参照せずに、まさにカオス信号を入力するのみで異常性を有する箇所を全体構造から検出することを目指す。また、非破壊検査等により、損傷の程度や種類など診断対象の健全性は把握できるとし、本研究では異常性検出について健全性評価を実施すべき箇所の絞り込みとして定義する。具体的には、軸対称構造物を診断対象として考え、任意の部材に曲げ剛性低下を損傷として与え、カオス性を有する振動応答からアトラクタを再構成し、その局所領域のばらつきを評価することで、損傷部材を何らかの異常性を有する箇所として特定可能か検討する。

以下では、振動応答がカオス的挙動を示すための入力カオス信号の調整方法を明らかにし、カオス信号を適切に構造物に入力するとその応答が入力信号の波形構造と一致することを確認する。そして、応答変位を定量評価する指標として再構成アトラクタの局所領域のばらつきを説明し、1つおよび複数の損傷が発生する状況を想定した4ケースの損傷シナリオに基づく数値実験を行い、提案手法の有用性を確認する。

2. カオス信号入力とその応答の関係

診断対象の振動特性に従うカオス信号を入力することで、その応答変位が決定論的カオス性を示し、そのカオス特徴量の評価に基づいて損傷診断が可能となる。カオス入力を利用する構造ヘルスモニタリングで重要となるのが、

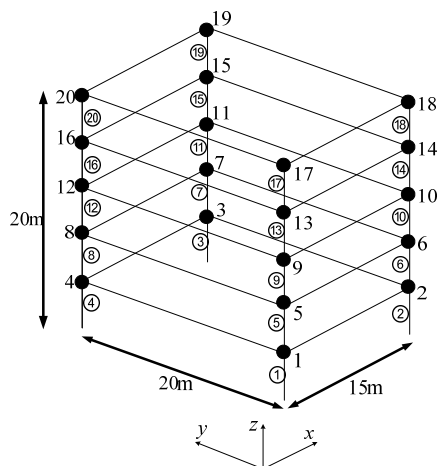


図-1 軸対称構造物モデル

表-1 構造諸元

Moment of inertia $I_{y,z}$	0.0108 m ⁴
Young's modulus E	210GPa
Weight/m	27.68kN/m
Poisson's ratio	0.25
Damping ratio for the 1st and 2nd mode	0.01
1st-2nd Natural frequency (Hz)	1.42(y axis, bending) 1.56(x axis, bending)

構造物の応答変位がカオス的挙動を示すための入力カオス信号の生成である。文献¹⁵⁾では、構造物のリアプノフ指数に応じたカオス信号を入力することで、構造物の応答がカオス的挙動を示し、さらに応答のカオス特徴量の1つであるフラクタル次元¹⁶⁾を制御できることを明らかにしている。また、筆者らのこれまでの研究¹⁷⁾により、構造物の1次固有振動数より低帯域のカオス信号を入力することで、構造物の応答は入力信号の波形構造と一致することを明らかにした。ここでは、2つのカオス信号を設定し、カオス入力信号と構造応答の波形構造の一致を確認する。図-1に本研究で対象とする120自由度3次元軸対称構造物モデルを示し、表-1にその諸元を示す。

構造物の応答がカオス的挙動を示すためには、まず構造物の1次固有振動数を調査し、それより低い振動数帯域を持つカオス信号を生成する必要がある。そこで、この条件を満足するカオス信号を入力とした際の構造物の応答がカオス性を示すことを明らかにするために、動的解析を実施する。健全な構造物として、本研究では、各層各要素の質量、剛性は同一とし、粘性減衰については、1次、2次の減衰定数を0.01として、質量・剛性比例型で計算する。本研究では、入力カオス信号として式(1)に示す3変数常微分方程式であるローレンツ方程式¹⁸⁾を用いることとし、第1変数である z_1 の振動波形を構造物に入力する。

$$\begin{aligned}\eta^{-1} \frac{dz_1}{dt} &= -\alpha(z_1 - z_2) \\ \eta^{-1} \frac{dz_2}{dt} &= \beta z_1 - z_2 - z_1 z_3 \\ \eta^{-1} \frac{dz_3}{dt} &= z_1 z_2 - \gamma z_3,\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 η は入力信号の速度を変えるパラメータであり、 η を変えることで、カオス信号のリアプノフ指数と周波数帯域を調整することができる。また、サンプリング間隔を0.01sとして、100秒間計算する。加振方法としては、構造物の頭頂部の4つのノードに x 軸方向に加速度としてカオス信号を入力する。入力カオス信号と構造物の応答の関係を明らかにするために、ローレンツ方程式のパラメータ ($\alpha=16, \beta=40, \gamma=4$)、初期値 ($z_1=0, z_2=5, z_3=10$) を固定し、さらに $\eta=1.0, 0.1$ のパターンを用いて、2つのカオス信号を作成する。それらをそれぞれ、No.1, No.2 とし、入力カオス信号とそのパワースペクトル密度を図-2, 3に示す。構造物の1次固有振動数と入力カオス信号の振動数帯域から、図-2(2)の $\eta=0.1$ を用いた際のカオス信号 No.2 が条件を満足しており、構造物の応答変位がカオス性を呈すると考えられる。2種類のカオス信号を構造物に入力する際の頭頂部に位置するノード20の応答変位を図4に示し、それぞれのパワースペクトルを図5に示す。 $\eta=1.0$ の場合、入力カオス信号は広い帯域を含んでおり、図4(1)に示されるように、応答変位と入力カオス信号の波形の構造は全く異なり、さらに構造物の複数の振動モードが卓越していることが確認できる(図5(1))。そして、 $\eta=0.1$ のカオス信号 No.2 を構造物に入力する場合、構造物のノード20の応答変位は

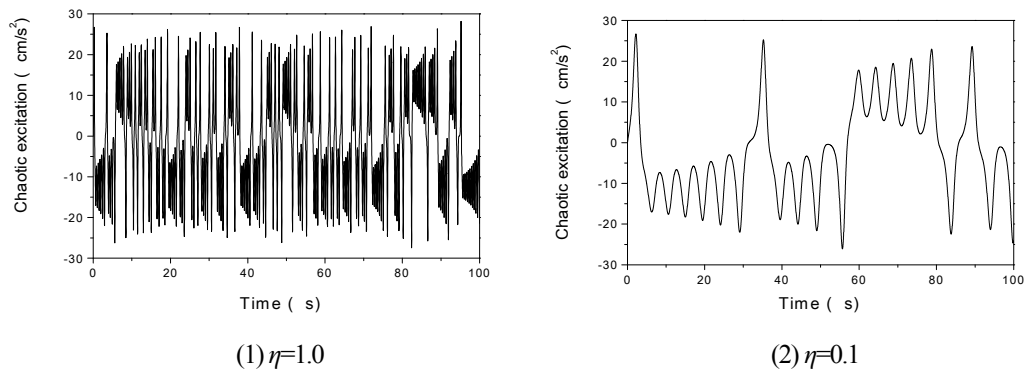


図-2 入力カオス信号

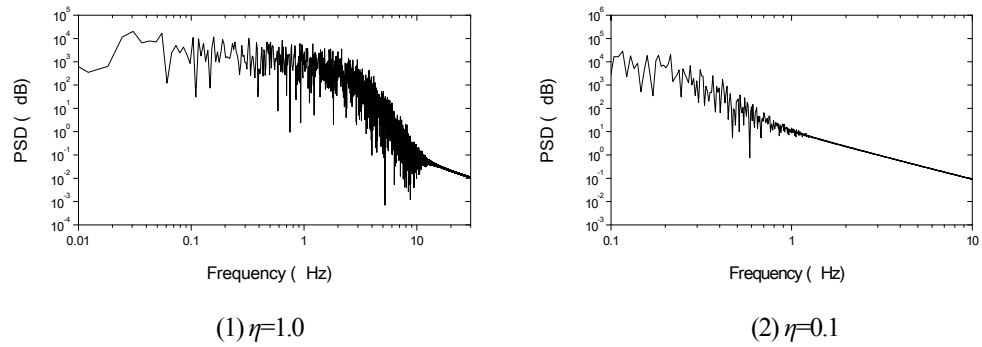


図-3 入力カオス信号のパワースペクトル

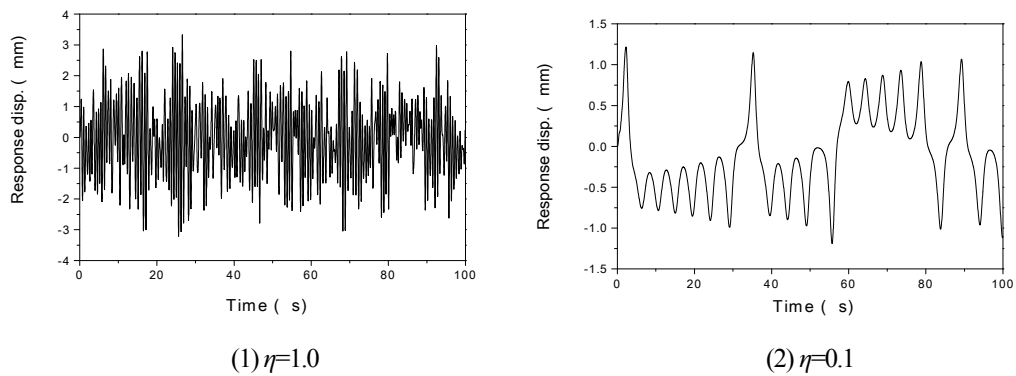


図-4 構造物の応答変位 (ノード20)

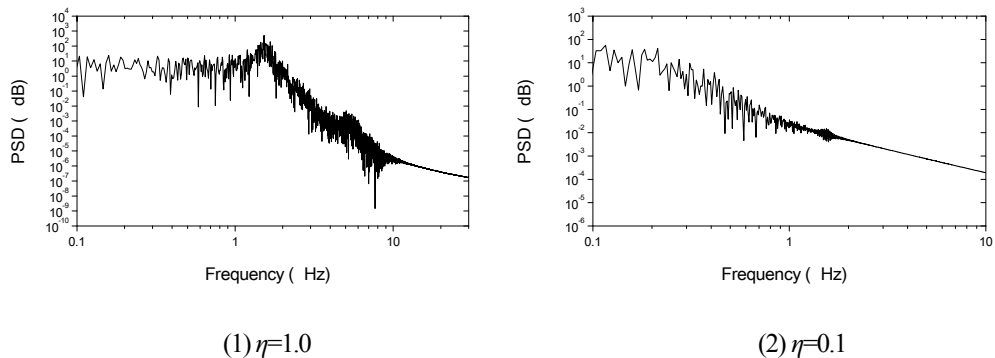


図-5 構造物の応答変位のパワースペクトル (ノード20)

入力信号の波形と非常に良く似た構造を示していることがわかる(図-4(2)). このように、診断対象の1次固有振動数より低帯域のカオス信号を入力すると、その応答変位は概ね入力信号の波形を保存し、図-5(2)から明らかなように構造物の1次モードのみが卓越することがわかる。

3. 異常診断アルゴリズム

前記したように、構造物の1次固有振動数より低帯域のカオス信号を入力すると、その応答変位は入力信号の波形構造を保存しカオス性を有することがわかる。異常性を診

断する際、このカオス性を有する応答変位から何らかの特徴量を抽出する必要がある。これまでにカオス応答の定量評価法として、リアプノフ指数解析やフラクタル次元解析などが提案されている。これらの方法は計測される時系列データからタケンスの埋め込み定理¹⁹⁾に基づき、アトラクタを再構成し、そのアトラクタから代表的なカオス特徴量である初期値鋭敏性や自己相似性を算出するものであり、アトラクタ全体の大域的な評価を行う。しかし、アトラクタの大域評価では、本研究で検討する構造物の固有振動数の変化から検出できない程度の異常に対して、有効に機能するとは考えにくい。そこで本研究では、損傷に起因する応答の変化はアトラクタの局所領域に現れると考え、異常診断を実施する際の特徴量として、アトラクタの局所領域のばらつきに着目する。アトラクタの局所領域のばらつきは J. Nichols ら¹²⁾によって、モード形状や固有振動数と比較して損傷に対する感度が高いことが明らかにされている。ただし、文献 12 では、損傷前後での比較を通じて、損傷の有無を調査するにとどまっており、Baseline-less 型を実現したものではない。そこで本研究では、J.Nichols ら¹²⁾によって定義されたばらつき(Average Local Attractor Variance Ratio, *ALAVR*)をアレンジした Variance of Local area of Attractor (*VLAA*)を定義する。以下に異常検出のプロセスを記す。

まず、カオス性を有する外力を入力として、構造物の応答変位を式(2)のように計測する。その時系列データを *Test Data Set* (X)として観測する。ここで、 $x_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, Nr$)は計測した応答変位である。 Nr は測定点の数であり、本研究では構造物のノード数に対応する。次にタケンスの埋め込み定理により各測定点の応答データ $x_i(t)$ から式(3)に示す通り、適切な遅れ時間をとって、状態ベクトル $\mathbf{x}_i(t)$ を多次元空間上にプロットし、アトラクタを再構成する。

$$\text{Test Data Set} = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_{Nr}(t)\} \quad (2)$$

$$\mathbf{x}_i(t) = \{x_i(t), x_i(t-\tau), \dots, x_i(t-(m-1)\tau)\} \quad (3)$$

ここで、 τ と m はそれぞれ遅れ時間と埋め込み次元である。本研究では、遅れ時間については平均相互情報量を入力カオス信号から計算し、第一番目の最小値を与える時間ステップを全ての応答変位に設定する。埋込み次元については、応答変位と入力カオス信号の波形構造が一致することから、入力カオス信号の次元である $m=3$ とする。以上により、各ノードで計測される応答変位からアトラクタを再構成する。これらの再構成されたアトラクタから任意の状態ベクトルをランダムに $N(j=1, \dots, N)$ 個設定し(以下、着目ベクトル: $\mathbf{x}_i(\text{index_}j)$ と称す)、その各々の着目ベクトルに対し、近傍ベクトル $\mathbf{x}_i(nb_j(p))$ をユークリッド距離から $N_b(p=1, \dots, N_b)$ 個探索する。つまり、 $nb_j(p)$ は応答波形の時間ステップ t のいずれかである。このランダムに設定される着目データベクトルのインデックス $\text{index_}j$ は各ノードで再構成されるアトラクタで統一する。次に、各々の着目ベクトルに対する近傍ベクトルの平均値(平均ベクトル)を計算し、

$\text{Ave_}\mathbf{x}_{i,j}$ とする。そして、着目ベクトルと近傍ベクトルのユークリッドノルムを式(4)により計算し、式(5)により統計処理し、アトラクタの局所領域のばらつき *VLAA*を算出する。

$$\text{norm}_{i,j} = \sum_{p=1}^{N_b} (\mathbf{x}_i(\text{index_}j) - \mathbf{x}_i(nb_j(p)))^2 \quad (4)$$

$$VLAA_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (\text{norm}_{i,j} - N_b \cdot \text{Ave_}\mathbf{x}_{i,j})}{N_b - 1}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} DVLAA_{1st(\text{node } 1, 2, 3, 4)} &= VLAA_{1st(\text{node } 1, 2, 3, 4)} \\ DVLAA_{nth(\text{node no.})} &= VLAA_{nth(\text{node no.})} \\ &\quad - VLAA_{(n-1)th(\text{node no.})} \end{aligned} \quad (6)$$

剛性低下により部材の応答は健全部材の応答と比較して大きくなり、再構成されるアトラクタの領域も大きくなると考えられる。ゆえにアトラクタ上で選択された任意ベクトルとその近傍ベクトル間の領域も拡大し、結果として、ベクトル間のばらつきは大きくなると考えられる。このことがアトラクタの局所領域のばらつきを評価する理由である。

次に、各ノードで計算される *VLAA* の差分である Difference of *VLAA* (以下、*DVLAA*)を式(6)に基づき計算する。本研究では都市部に集中して存在する各層で同一の構造部材を有する塔状構造物を対象としており、振動応答の1次モードが卓越する場合、各層の応答は下位の層から上位の層に概ね線形に大きくなることは容易に判断でき、それに伴って *VLAA* も同様に下位の層から上位の層に大きくなると考えられる。また、筆者らのこれまでの検討¹⁷⁾により、下位の層で生じる損傷は上位の層の応答に影響を与え、たとえ健全であっても、上位の層で計算されるカオス特徴量は下位の健全な層のものよりも大きな値を示すことが確認された。そこで本研究では、これらの影響を除去するため、各ノードで計算される差分情報 *DVLAA* を異常性判定のための指標として用いる。

4. 数値実験

本研究の目的は、健全時の基準となる Baseline データを必要とせず、まさにカオス信号を診断対象に入力するのみで、即時に異常性を有する箇所を特定する Baseline-less 型診断法を開発することである。まず、本研究でのカオス特徴量およびその導出過程の特性を損傷前後での比較結果を通じて調査し、Baseline-less 型異常診断に有効に機能することを明らかにする。その後、Baseline-less 型異常診断法について観測ノイズおよび起振機に発生するノイズを考慮した数値実験を行い、提案手法の有用性を確認する。

4.1 損傷前後でのカオス特徴量の比較

本研究では対象構造物として図-1、表-1 で示した軸対称モデルを用いる。ここでは、損傷として3層に位置する柱

部材の要素⑨の曲げ剛性が 10%低下する状況を検討する。柱要素の応答は要素番号と同番号のノードで計測される。カオス信号入力としては、構造物の応答変位が入力信号の波形構造を保存していた No.2 の信号を用いることとし、構造物モデルの最上階に位置する 4 つのノードに x 軸方向に加速度として入力する。表-2 の計算パラメータを用いて、アトラクタ上の N 個の着目ベクトルは損傷前後で統一し、それらの局所領域のばらつきを計算した。表-3 に各ノードから算出される $DVLAA$ を示す。損傷前後で特徴量を比較すると、柱部材の剛性低下はその部材の応答を計測する上位ノード（要素番号と同番号のノード）の $DVLAA$ に違いが生じており、何らかの異常性を有する可能性を示唆している。前記したようにカオス特徴量は変位応答から計算され、損傷を曲げ剛性低下と仮定すると、損傷部材から得られるカオス特徴量は、健全時と比較して大きな値を示すことがわかる。ただし、加振方向 x に一致して存在する要素⑩の応答を計測するノード 10 の特徴量も同様に健全時と比較して大きな値を示している。この理由は佐藤ら¹⁴⁾により明らかにされているが、中間に位置するはり要素の圧縮と加振方向が一致し、鋼部材のはり要素は圧縮に対して剛であることから、ノード 9,10 の挙動が変わらず、同程度のカオス特徴量が得られたと考えられる。この時点では要素⑨、⑩のどちらが異常性を有するのかわからないが、加振方向を変えることで特定できると考えられる。このことは Baseline-less 型での実験で明らかにする。

また、ここでの実験結果で注目すべき点として、健全時の同層に位置する各要素の応答から得られるカオス特徴量は全て同値であり、さらに損傷を有する層の健全な要素の応答、例えば 3 層のノード 11,12 から得られるカオス特徴量は損傷の影響を受けず、損傷前後で大きく変化しない。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、同層に位置する各部材のカオス特徴量の大小関係から何らかの異常を有する箇所を特定できる可能性を示している。

表-2 $DVLAA$ の計算パラメータ

Delay time, τ	108
Embedding dimension, m	3
Neighborhood points, N_b	50
Calculation time, N	500

表-3 健全時および損傷時の $DVLAA$ の比較

	$DVLAA$ in intact condition				$DVLAA$ in damage condition			
1st story (node 1,2,3,4)	0.01885	0.01885	0.01885	0.01885	0.01885	0.01884	0.01886	0.01886
2nd story (node 5,6,7,8)	0.03650	0.03650	0.03650	0.03650	0.03647	0.03649	0.03651	0.03651
3rd story (node 9,10,11,12,)	0.04132	0.04132	0.04132	0.04132	0.04161	0.04158	0.04133	0.04133
4th story (node 13,14,15,16)	0.04102	0.04102	0.04102	0.04102	0.04102	0.04104	0.04103	0.04103
5th story (node 17,18,19,20)	0.03528	0.03528	0.03528	0.03528	0.03529	0.03528	0.03529	0.03529

4.2 Baseline-less 型異常診断実験

本節では入力カオス信号および測定ノイズを考慮した Baseline-less 型異常診断実験を行い、提案手法の有効性を確認する。入力カオス信号および各測定点間の応答変位の標準偏差に対して 3%の大きさのホワイトノイズをそれぞれ付加する。ただし、応答変位に対してはノイズの影響を除去するため 50 個の移動平均をとる。そして、損傷シナリオに関しては、表-4 に示す 3 ケースについて検討する。本損傷シナリオにおいて最も小さな 10%の曲げ剛性低下とは固有振動数などで変化が捉えにくい程度の損傷である。例えば、損傷シナリオ No.1 の場合（第 1 層の要素①の柱部材の曲げ剛性が 10%低下する）、固有値解析の結果、20 次までで最も固有振動数の変化が大きいのは第 18 モードであり、それらの変化は健全時 16.95Hz に対し、損傷時 16.90Hz であり、変化の比率はおおよそ 0.3%と小さいことが明らかとなった。この程度の剛性低下は補修しなくても構造物の使用性に問題のないものと考えられるが、ここでは損傷を小さな状態から把握することで、効率的な補修・補強戦略を立案することが可能となると考え、10%の剛性低下を検討することとし、20%の部材剛性の低下がアトラクタの局所領域のばらつきの変化に与える影響を確認する。

まず、損傷シナリオ No.1 の第 1 層に位置する要素①の曲げ剛性が 10%低下する状況を考える。各ノードから算出される $DVLAA$ を図-7 および表-5 に示す。縦軸は各層における各ノードから計算される $DVLAA$ を示し、横軸の 4 つのヒストグラムは、同層に位置する各ノードから計算される $DVLAA$ の大きさを示している。また、図-7 中の std.は同層に位置する各々 4 つのノードから計算された $DVLAA$ の標準偏差を意味する。まず、 x 軸方向に加振する場合の結果（図-7(1)）を調査する。各層間で $DVLAA$ の標準偏差を比較すると、損傷を仮定した要素が位置する第 1 層が最

表-4 損傷シナリオ

Scenario Number	Deterioration and damage location
Damage sce. 1	10% deterioration of $EI_{y,z}$ at element ① below node 1. (1 st story)
Damage sce. 2	20% deterioration of $EI_{y,z}$ at element ⑩ below node 19. (5 th story)
Damage sce. 3	10% and 20 % deterioration at elements ⑧ and ⑭ below node 8 and node 14. (2 nd and 4 th stories)

も大きな値を示しており、何らかの異常性を有する可能性を示している。そして、第1層において各ノードの応答変位から算出される *DVLAA* を相対比較すると、表-5 より明らかに、ノード1とノード2の *DVLAA* が他のノード

の *DVLAA* より大きな値を示している。ノード1とノード2は要素①および要素②の応答を計測しており、要素①および要素②が何らかの異常性を有すると推測される。ただし、この段階で要素①、要素②のどちらが損傷している

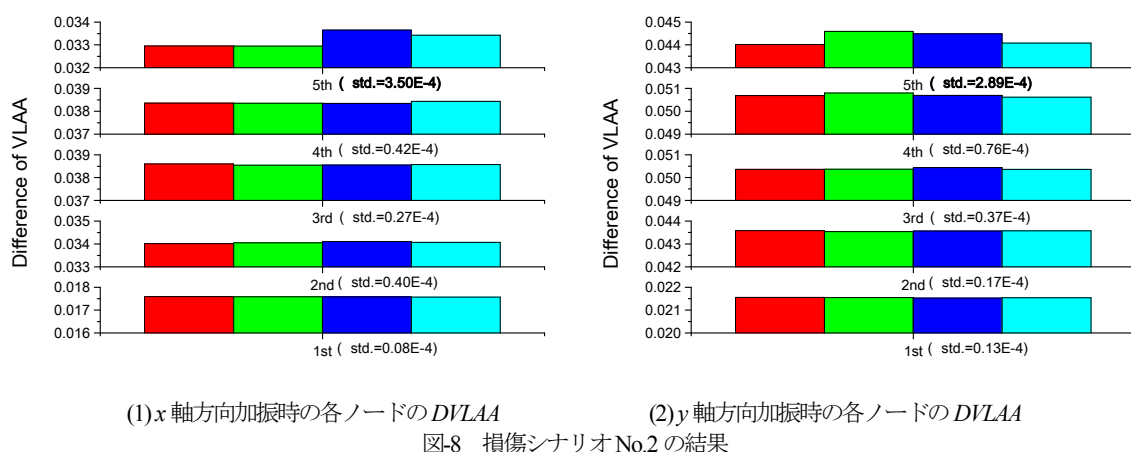
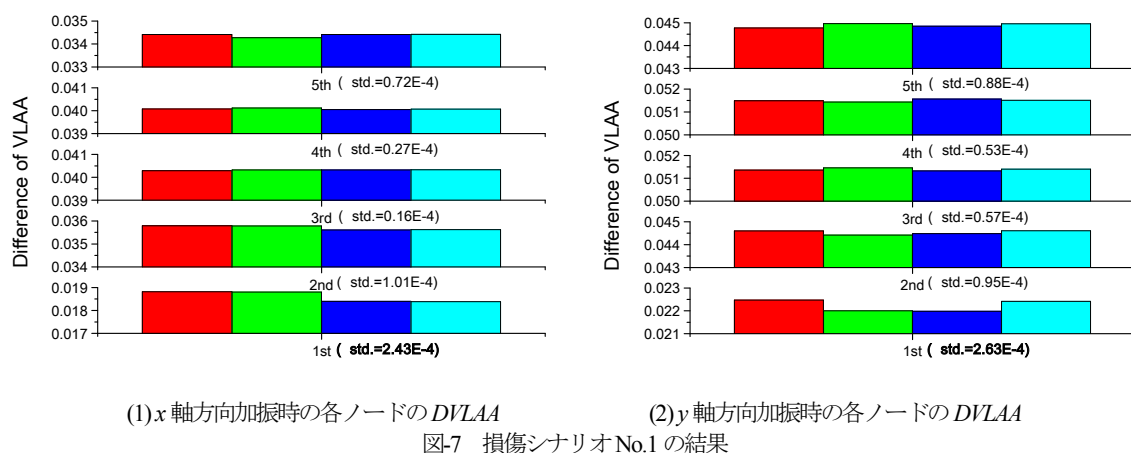
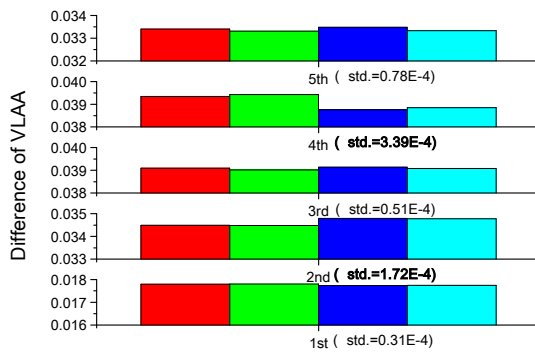


表-5 損傷シナリオ No.1 の結果 (*DVLAA* の詳細)

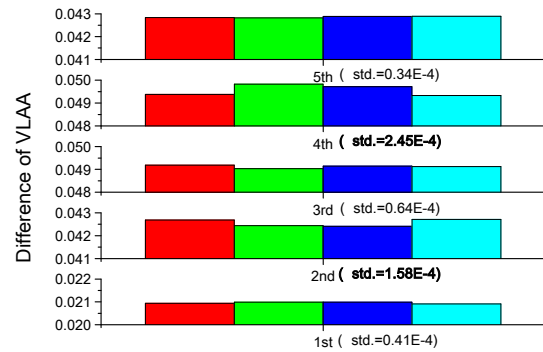
	x direction				y direction			
1st story (node 1,2,3,4)	0.01881	0.01881	0.01840	0.01838	0.02247	0.02200	0.02199	0.02242
2nd story (node 5,6,7,8)	0.03580	0.03579	0.03561	0.03562	0.04461	0.04442	0.04448	0.04461
3rd story (node 9,10,11,12,)	0.04029	0.04032	0.04032	0.04033	0.05136	0.05146	0.05133	0.05141
4th story (node 13,14,15,16)	0.04008	0.04011	0.04005	0.04007	0.05149	0.05144	0.05156	0.05151
5th story (node 17,18,19,20)	0.03441	0.03427	0.03441	0.03442	0.04478	0.04496	0.04485	0.04496

表-6 損傷シナリオ No.2 の結果 (*DVLAA* の詳細)

	x direction				y direction			
1st story (node 1,2,3,4)	0.01759	0.01759	0.01758	0.01757	0.02156	0.02155	0.02153	0.02155
2nd story (node 5,6,7,8)	0.03401	0.03404	0.03411	0.03407	0.04358	0.04354	0.04356	0.04357
3rd story (node 9,10,11,12,)	0.03860	0.03854	0.03855	0.03857	0.05036	0.05037	0.05044	0.05036
4th story (node 13,14,15,16)	0.03836	0.03835	0.03834	0.03843	0.05069	0.05081	0.05069	0.05062
5th story (node 17,18,19,20)	0.03296	0.03295	0.03365	0.03343	0.04401	0.04460	0.04449	0.04409



(1)x 軸方向加振時の各ノードの *DVLAA*



(2)y 軸方向加振時の各ノードの *DVLAA*

図-9 損傷シナリオ No.3 の結果

表-7 損傷シナリオ No.3 の結果 (*DVLAA* の詳細)

	x direction				y direction			
1st story (node 1,2,3,4)	0.01779	0.01780	0.01774	0.01775	0.02094	0.02099	0.02099	0.02091
2nd story (node 5,6,7,8)	0.03449	0.03448	0.03479	0.03478	0.04269	0.04245	0.04242	0.04272
3rd story (node 9,10,11,12,)	0.03909	0.03901	0.03914	0.03907	0.04918	0.04903	0.04915	0.04912
4th story (node 13,14,15,16)	0.03934	0.03942	0.03875	0.03885	0.04938	0.04983	0.04972	0.04933
5th story (node 17,18,19,20)	0.03340	0.03331	0.03348	0.03333	0.04284	0.04282	0.04288	0.04289

のか判断できない。このことは前記したように、加振方向がノード1とノード2の間に位置するはり部材の圧縮方向と一致し、そのはり部材は圧縮に対して剛であることから、2つのノードの応答が概ね一致し、*DVLAA* にも違いが表われなかったと考えられる。そこで、図-7(2)に示される *y* 軸方向へカオス信号を入力する場合の結果を調査すると、第1層の各 *DVLAA* の標準偏差 (std.) が他の層のそれと比較して、最も大きな値を示し、第1層が何らかの異常性を有する可能性が示唆される。そして、表-5の第1層に位置する各ノードから計算される *DVLAA* を比較すると、ノード1とノード4から得られる *DVLAA* がほぼ一致し、そして他のノードのものより大きな値を示している。このノード1とノード4から計算される *DVLAA* がほぼ同一の値を示す理由は前記した通りである。ただし、*x* 軸方向および *y* 軸方向に加振した場合のどちらにおいてもノード1の *DVLAA* は同層に位置する他のノードから得られる *DVLAA* より大きな値を示しており、ノード1の直下の要素①が何らかの異常性を有すると推測される。

次に、第5層に位置する要素⑯の曲げ剛性が20%低下する状況を検討する。図-8、表-6に各層、各ノードから計算される *DVLAA* を示す。図-8(1),(2)から明らかなように、第5層の各ノードの *DVLAA* の標準偏差(std.)が他の層と比較して最も大きな値を示しており、損傷の影響を受けていると予測される。また、第5層で、各ノードの *DVLAA* を比較すると、*x* 軸方向加振および *y* 軸方向加振のどちらにおいてもノード19から計算される *DVLAA* が大きな値を示している。*y* 軸方向加振時には、ノード18から計算

される *DVLAA* が最も大きな値を示しているが、これは付加したノイズの影響と考えられ、*x* 軸方向加振時には、ノード18の *DVLAA* はノード19,20から計算される *DVLAA* より明らかに小さい。ゆえに、損傷を仮定した要素⑯の応答が大きくなり、結果として、ノード19の計測データから再構成されたアトラクタの *DVLAA* が損傷の影響を受け、大きな値を示す。これらのことからノード19の直下の要素⑯が何らかの異常性を有すると予測される。

最後に、複数の要素に損傷を仮定した場合を検討する。第2層に位置する要素⑧および第4層に位置する要素⑭の曲げ剛性がそれぞれ10%、20%低下する結果を図-9および表-7に示す。図-9中 std.から明かなように、加振方向が *x*, *y* 軸のどちらの場合も20%の剛性低下を仮定した要素⑭(ノード14の直下)の位置する第4層の *DVLAA* の標準偏差が最も大きく、続いて、10%の曲げ剛性低下を仮定した要素(ノード8の直下)が位置する第2層の *DVLAA* の標準偏差が他の健全な層から算出されるものよりも大きいことが分かる。これらの理由は要素の剛性低下のレベルに従って、変位応答が大きくなり、結果としてアトラクタの局所領域のばらつきが拡大し、4層、2層の順に *DVLAA* の標準偏差が大きくなったと考えられる。そして、第4層および第2層に位置する各ノードから得られる *DVLAA* を確認すると、第4層においては、加振方向を *x* 軸、*y* 軸に設定する場合のどちらにおいても、共通して大きな *DVLAA* を示すのはノード14であり、損傷の影響を受けていると予測される。ゆえにノード14の直下の要素⑭が何らかの異常性を有すると判断できる。また、第2層においても同

様に、共通して大きな $DVLAA$ を示すノード 8 が損傷の影響を受けており、直下の要素⑧が何らかの異常性を有すると予測できる。以上の結果をまとめると、各ノードのカオス応答アトラクタの局所領域のばらつき $DVLAA$ を計算し、同層に位置する各ノードの $DVLAA$ の標準偏差から、異常性を有する層が特定され、さらに、特定された層から各ノードの $DVLAA$ を相対比較することで、仮定した損傷要素を何らかの異常性を有する箇所として予測できる。

5. 結論

本研究では、健全時の基準データを必要としない Baseline-less 型異常診断法の実現可能性を調査することを目的として、全体構造から異常性を有する箇所を検出するための定量評価手法として、アトラクタの局所領域のばらつきを評価し、軸対称構造物への異常診断を実施した。数値計算例を通じて、異常性を有する要素を適切に把握することに成功し、提案手法の有用性が確認された。特に、同層に位置する要素の構造諸元がすべて同一という理想的な軸対称構造物では、損傷を仮定した要素をアトラクタ局所領域のばらつきにより、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。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 Baseline-less 型異常診断が可能であることを示している。ただし、この場合、損傷前後での特徴量の比較を行わないので、このままでは健全性評価は行えない。今後、入力カオス信号と応答信号の波形構造が概ね一致する性質を積極的に利用し、損傷に起因して損失する情報量を調査し、損傷レベルの推定も含む健全性評価が可能な方法の構築を目指す予定である。また、数値実験を通じて Baseline-less 型異常診断が適用可能な診断対象の構造形状を明らかにするとともに、起振機を用いた模型実験を行い、提案手法の有用性を明らかにすることが今後の重要な課題である。

参考文献

- 1) 宮本文徳, 河村圭, 中村秀明: Bridge Management System(BMS) を利用した既設橋梁の最適維持管理計画の策定, 土木学会論文集, No.588/VI-38, pp.191-208, 1998.
- 2) Doebling, S.W., Farrar, C.R. and Prime, M.B.: A summary review of vibration-based identification methods, *The Shock and Vibration Digest*, Vol.30, No.2, pp.91-105, 1998.
- 3) Farrar, C.R., Duffey, T.A., Doebling, S.W. and Nix, D.A.: A statistical pattern recognition paradigm for vibration-based structural health monitoring, in: *Structural Health Monitoring 2000*, pp.764-773, 1999.
- 4) Verboven, P., Parloo, E., Guillaume, P. and Van, O.M.: Autonomous structural health monitoring: part I, modal parameter estimation and tracking, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.16, Issue 4, pp. 637-657, 2002.

- 5) Mita, A.: Distributed health monitoring system for a tall building, *Proc. of 2nd International Workshop on Structural Control*, pp.333-340, 1996.
- 6) 吉元怜毅, 三田彰, 森田高市: 振動モードとセンサ特性を考慮した構造物の並列処理型損傷同定, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.48B, pp.487-492, 2002.
- 7) Sohn, H., Farrar, C.R., Hunter, N.F. and Worden, K.: Structural health monitoring using statistical pattern recognition techniques, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 123, pp.706-711, 2001.
- 8) Bodeux, J.B. and Golival, J.C.: Modal identification and damage detection using the data-driven stochastic subspace and arma methods, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 17, Issue 1, pp.83-89, 2003.
- 9) Okafor, A.C. and Dutta, A.: Structural damage detection in beams by wavelet transforms, *Smart Materials and Structures*, Vol.9, No.6, pp.906-917, 2000.
- 10) Hou, Z., Noori, M. and Amand, R.St.: Wavelet-based approach for structural damage detection, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 126, Issue 7, pp. 677-683, 2000.
- 11) Nichols, J.M., Todd, M.D., Seaver, M. and Virgin, L.N.: Use of chaotic excitation and attractor property analysis in structural health monitoring, *Physical Review E*, Vol. 67, pp.016209 1-8, 2003.
- 12) Nichols, J.M., Trickey, S.T., Todd, M.D. and Virgin L.N.: Structural Health Monitoring through Chaotic Interrogation, *Meccanica*, Vol.38, pp.239-250, 2003.
- 13) Nichols, J.M., Virgin, L.N., Todd, M.D. and Nichols, J.D.: On the use of attractor dimension as a feature in structural health monitoring, *Mechanical System and Signal Processing*, Vol. 17, Issue 6, pp. 1305-1320, 2003.
- 14) 佐藤忠信, 田中庸平: 構造物のカオス応答アトラクタを用いた損傷検出法の開発, 土木学会論文集 A, Vol. 62, No.4, pp.915-924, 2006.
- 15) Nichols, J.M., Todd, M.D., Seaver, M., Trickey, S.T., Pecora, L.M. and Moniz, L.: Controlling system dimension: A class of real systems that obey the Kaplan-Yorke conjecture, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (PNAS), Vol.100, No.26, pp.15299-15303, 2003.
- 16) 合原一幸, 池口徹, 山田康司, 小室元政: カオス時系列解析の基礎と応用, 産業図書, 2000.
- 17) 野村泰稔, 古田均, 川谷充郎, 広兼道幸, 中津功一朗: カオス信号入力と交差予測誤差率による構造物の応答評価に基づく損傷診断法の開発, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.1, pp.30-41, 2009.
- 18) Lorenz, E.N.: Deterministic Nonperiodic Flow, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 20, pp. 130-141, 1963.
- 19) Takens, F.: Detecting Strange Attractors in Turbulence, In *Dynamical Systems and Turbulence, Lecture Notes in Mathematics*, edited by D.A. Rand and B.S. Young, Springer, Vol. 898, pp. 366-381, 1981.

(2010 年 3 月 9 日 受付)