

常時微動データのアトラクタに基づく鋼橋の 損傷検出に関する検討

加藤 証一郎¹・稲場 友也²・大滝 健¹

¹正会員 博（工） 株式会社クレアテック 技術部（〒101-0065 東京都千代田区西神田2-5-8）

²正会員 株式会社クレアテック 技術部（〒101-0065 東京都千代田区西神田2-5-8）

1. はじめに

近年、構造物の維持管理を効率的に行うことなどを目的とした構造ヘルスマニタリングに関する研究が進められてきている。国内の幾つかの論文^{1),2),3),4)}では、常時微動等の計測データによる橋梁の固有振動特性の検証や固有振動特性に着目した構造解析モデルの検証、また既設橋梁の損傷同定に関する研究などが報告されている。構造特性の把握方法としてはフーリエスペクトルなどのスペクトル分析手法が用いられることが多いが、構造物の応答から作成するアトラクタを分析する方法もある。構造物の応答からアトラクタを作り出して損傷前後でアトラクタの変化を比較することにより損傷検出を行う方法^{5),6)}（以降、アトラクタ検出法と称す）は構造ヘルスマニタリングにおいて利用できる。生理心理学の分野ではアトラクタによるヘルスマニタリングは1980年代から進められ、指尖容積脈波のデータから人のストレス状態を把握するなどの試み⁷⁾が行われているが、建設分野においてアトラクタ検出法はまだほとんど利用されていない。アトラクタ検出法は固有振動数を求めることはできないが、小さな損傷を検出できる感受性を有するという長所があるため、従来から行われている周波数特性の変化により損傷を把握する方法と並行して利用すれば効率的である。

一方、計測方法およびデータ整理の効率化も重要な課題である。身近なスマートフォンには加速度センサーが内蔵されており、人が橋の上で常時微動の加速度データを計測し、計測者がメール送信機能により特定のパソコンにデータ転送して管理者が一元管理するのは効率的なシステムの一つであると考えられる。現時点ではスマートフォンの加速度センサーの分解能は十分とは言えないが、研究成果⁸⁾により分解能等の高性能化が可能となっていることもあり、

スマートフォンを用いた計測システムの導入は検討に値する。

本検討では、スマートフォンにより計測した既設鋼橋の常時微動加速度データ（車両通行時を含む）を用いて作成するアトラクタを分析する。また、既設アーチ橋の振動特性に合わせた構造解析モデルを構築し、アトラクタに基づく鋼橋の損傷検出性について解析的に検討する。

2. 既設鋼橋の常時微動のアトラクタ分析

常時微動を計測した道路橋の概要を表-1 に示す。

表-1 計測対象橋梁

	橋梁形式	支間	幅員	竣工年
橋梁 A	鋼ローゼ桁橋	107m	15m	2001
橋梁 B	鋼ランガー桁橋	90m	11m	1972
橋梁 C	単純鋼桁橋	35m	9m	1961

常時微動の加速度データは加速度センサ内蔵のスマートフォン（iPhone 5c）により計測した。スマートフォンを橋梁スパン中央の手摺に固定して車両通行時の 20 秒間計測した加速度データ（原点補正データ）を図-1～3 に示す。

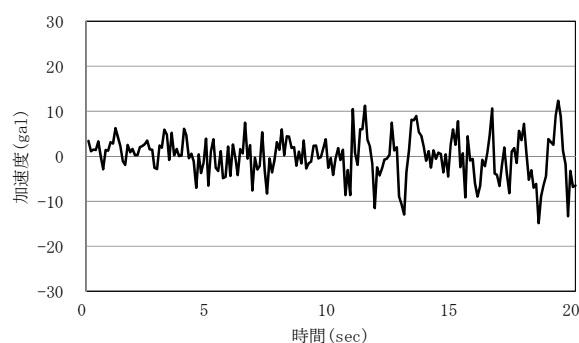


図-1 橋梁 A の常時微動加速度データ

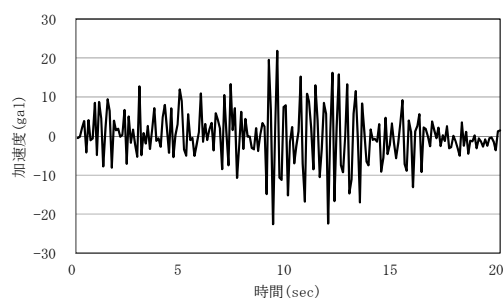


図-2 橋梁Bの常時微動加速度データ

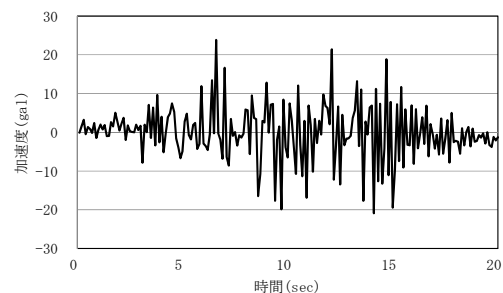


図-3 橋梁Cの常時微動加速度データ

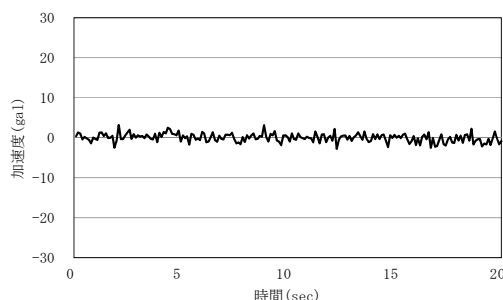


図-4 振動の少ない室内における加速度データ例

図-4 に示す振動の少ない室内における加速度データ例と比べると、図-1～3 の既設鋼橋の常時微動は比較的大きな加速度振幅であることがわかる。このことから、既存のスマートフォンの計測精度は十分とは言えないが、振動特性の一次的な傾向把握はできるものと考えてアトラクタ分析を行うこととした。計測加速度データを横軸 Az1、また計測データを 0.1 秒間遅らせたデータを縦軸 Az2 として作成したアトラクタを図-5～7 に示す。橋梁 A～C のアトラクタはそれぞれ固有の形状を呈していることがわかる。各図には、Az1-Az2 平面における原点からの距離が大きい主要 20 点をプロットし、またこれら 20 点の距離の平均値を半径とする円を示した。主要 20 点の原点からの距離を半径とし、平均半径、標準偏差、および変動係数を求めた。表-2 に示す変動係数は主要点の平均半径からのばらつき具合を表している。この変動係数はアトラクタの形状特性を定量的に表す一つの指標と考えられ、本検討におい

て提案するものである。変動係数を比べると、アーチ橋の橋梁 A や橋梁 B よりも単純桁橋の橋梁 C はばらつきが小さい形状特性を示していることがわかる。

表-2 主要 20 点のデータ分析結果

	平均半径	標準偏差	変動係数
橋梁 A	13.27	1.93	0.145
橋梁 B	20.17	2.77	0.137
橋梁 C	20.69	2.17	0.105

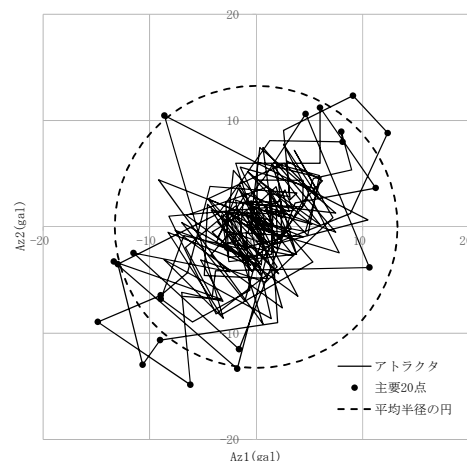


図-5 橋梁Aのアトラクタ

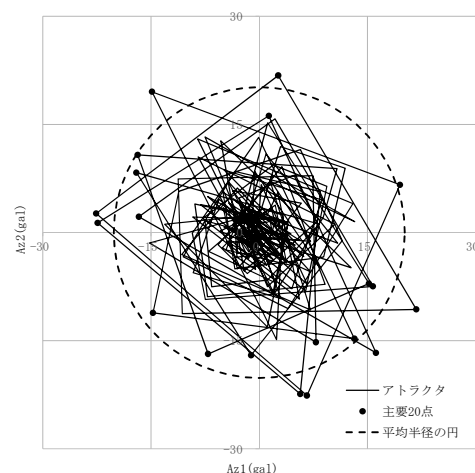


図-6 橋梁Bのアトラクタ

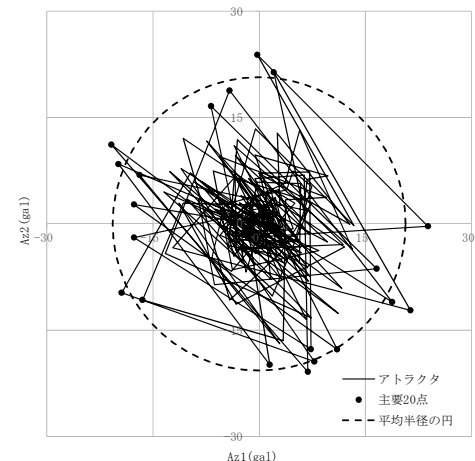


図-7 橋梁Cのアトラクタ

3. 鋼橋の損傷検出性についての解析的検討

スマートフォンにより計測した実現象を参考に解析によるシミュレーションを試みた。

(1) 解析方法

解析ソフトは、midas Civil⁹⁾を用いた。図-8にアーチ橋の橋梁Bに模した解析モデルを示す。橋梁Bの詳細は分からないため、実測の固有振動数と解析モデルの一次鉛直振動モードの固有振動数が概ね一致するように部材剛性等の構造特性を調整した。鋼材のヤング係数は200GPa、ポアソン比は0.3、また単位体積重量は77kN/m³とした。そして、車両通行を模擬した解析を行うにあたり、モード法による時刻歴応答解析を行った。解析時間は10秒間とし、微小時間増分量は0.001秒とした。車両の移動荷重は、図-9に示すように幅員中心の節点に左から右に順番に載荷し、200kNの集中荷重を時速60km/hで移動するように設定した(図-10)。なお、減衰はひずみエネルギー比例減衰とし、減衰定数は2%とした。

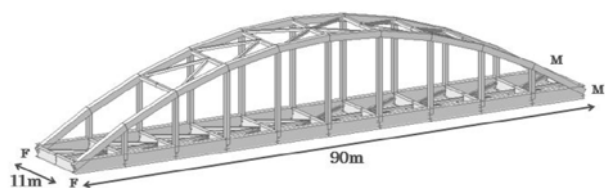


図-8 解析モデル

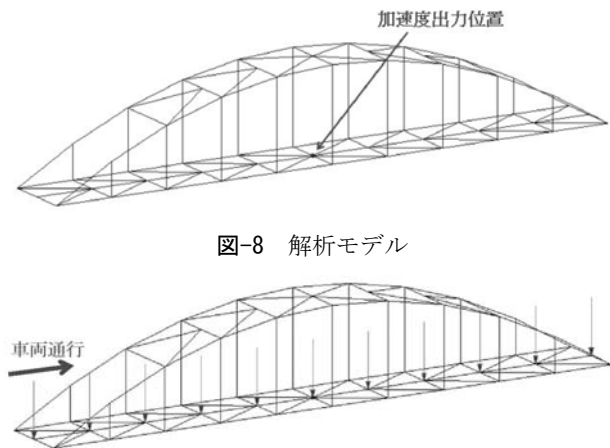


図-9 移動荷重の設定

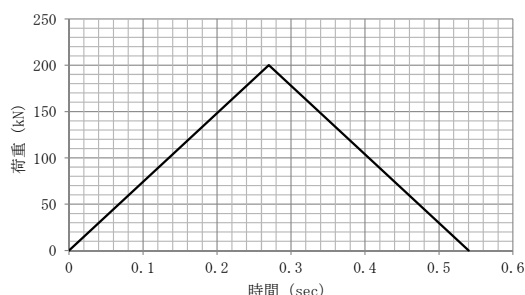


図-10 各節点における移動荷重の時間変化

(2) 固有値解析結果

モード図を図-11に示す。モード5は一次鉛直振動モードであり、固有振動数は2.75Hzである。図-12はスマートフォンによる橋梁B実測値の加速度フーリエスペクトルであり、固有振動数は概ね2.75Hzであることから、解析の固有振動数が実測値と合うように調整されていることがわかる。また、一次鉛直振動数2.75Hzは経験的にこの規模の橋梁としては妥当な範囲にあるため、スマートフォンによる計測データが一次的には妥当であると考えられる。

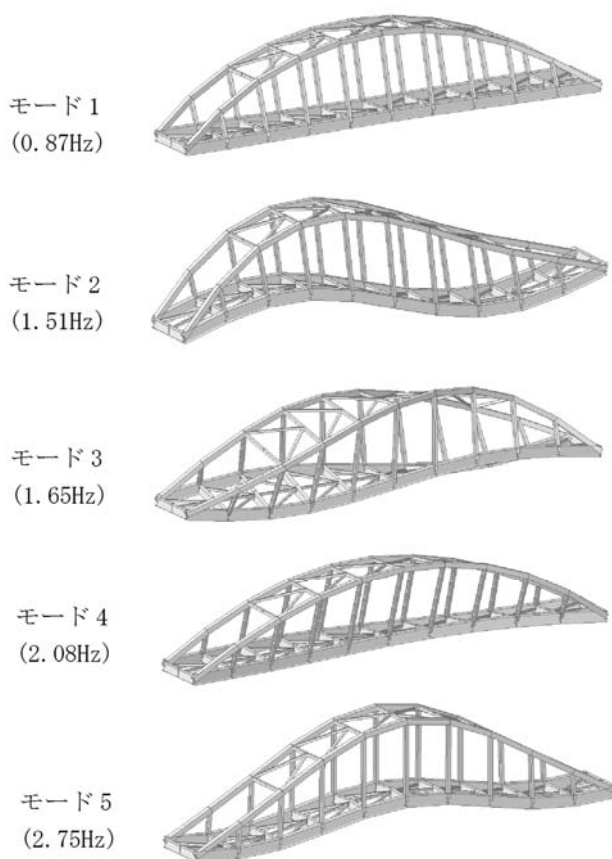


図-11 モード図

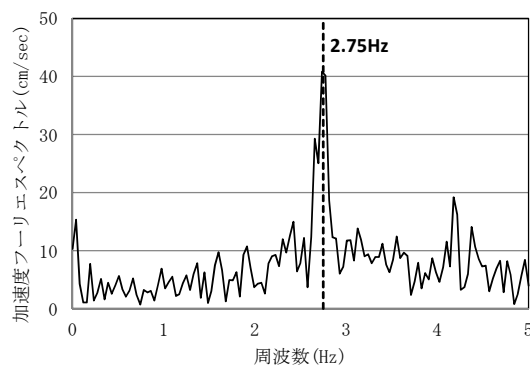


図-12 橋梁B実測値の加速度フーリエスペクトル

(3) 車両通行の解析ケース

解析ケースは表-3 に示す5 ケースである. 図 13 ~15 に示すように Case2~Case4 は特定箇所損傷を仮定した.

表-3 解析ケース

Case1	無損傷 (損傷仮定前)
Case2	支材 1 箇所のヤング係数を 50%低減
Case3	横桁 1 箇所のヤング係数を 50%低減
Case4	吊材 1 箇所のヤング係数を 50%低減
Case5	ヤング係数を全体的に 5%低減

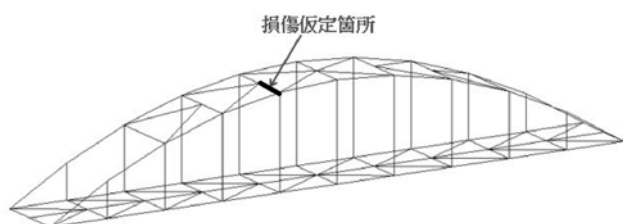


図-13 Case2 の損傷仮定箇所

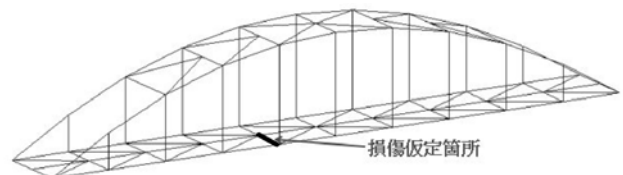


図-14 Case3 の損傷仮定箇所

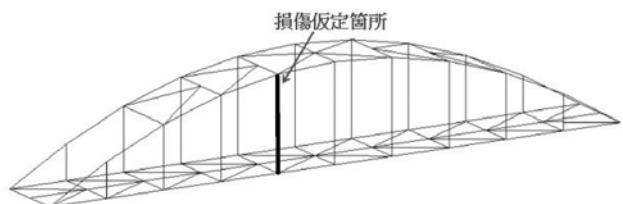


図-15 Case4 の損傷仮定箇所

(4) 車両通行の解析結果

スパン中央幅中心における Case1 の応答鉛直加速度を図-16 に示す. また, 図 17~20 に損傷前後のフーリエスペクトルを比較した結果を示す.

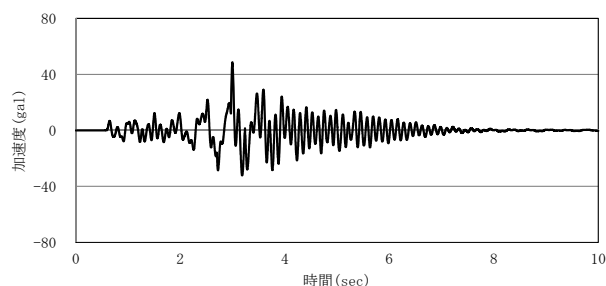


図-16 Case1 の応答鉛直加速度 (スパン中央幅中心)

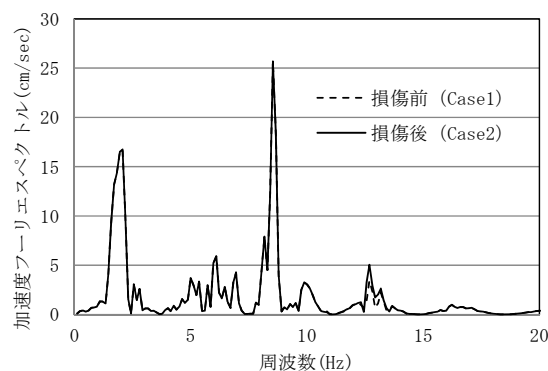


図-17 Case1 と Case2 の比較 (フーリエスペクトル)

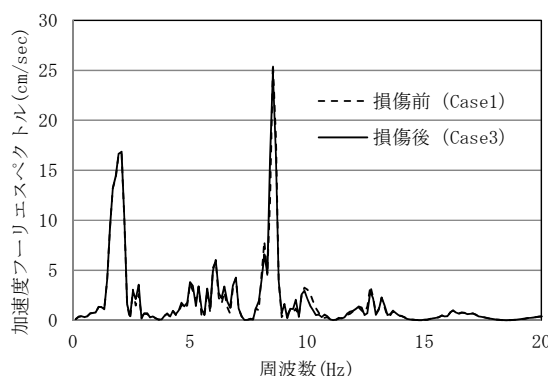


図-18 Case1 と Case3 の比較 (フーリエスペクトル)

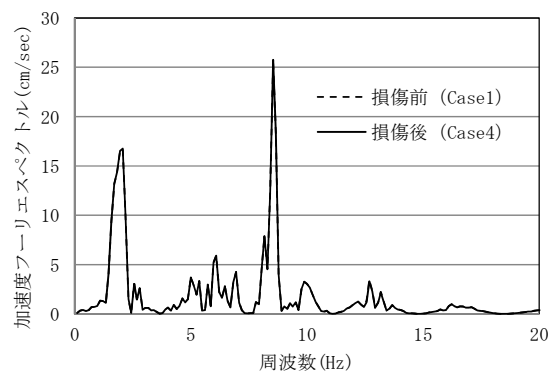


図-19 Case1 と Case4 の比較 (フーリエスペクトル)

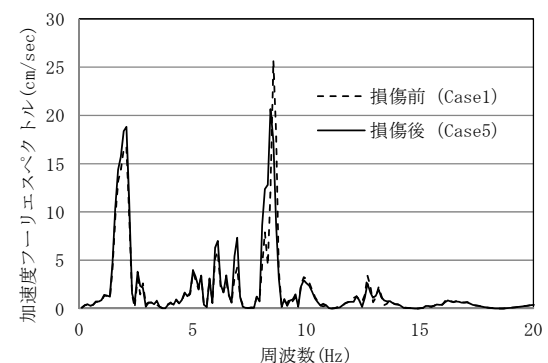


図-20 Case1 と Case5 の比較 (フーリエスペクトル)

図 17~20 の損傷前後のフーリエスペクトルの比較結果からは Case3 や Case5 の損傷検出は可能であるが Case4 では損傷前後の差がほとんどなく損傷検出は困難である。また、Case2 は辛うじて判別できる。

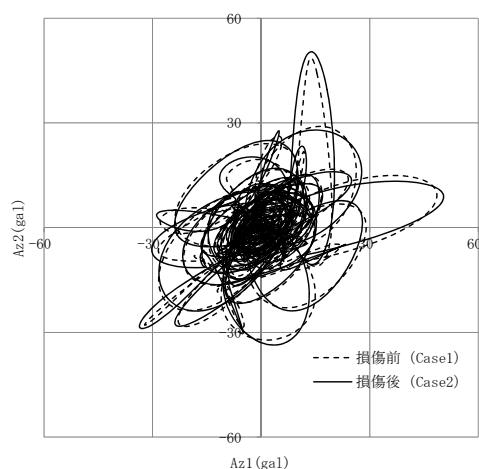


図-21 Case1 と Case2 の比較 (アトラクタ)

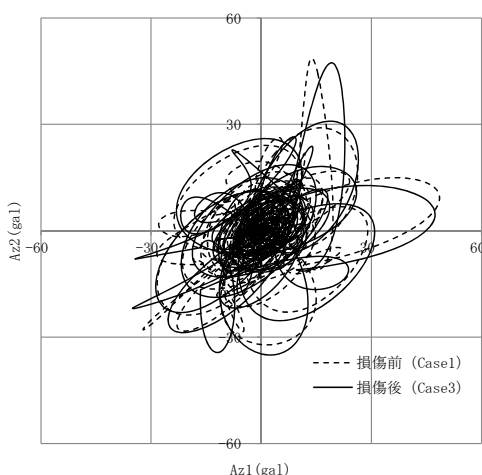


図-22 Case1 と Case3 の比較 (アトラクタ)

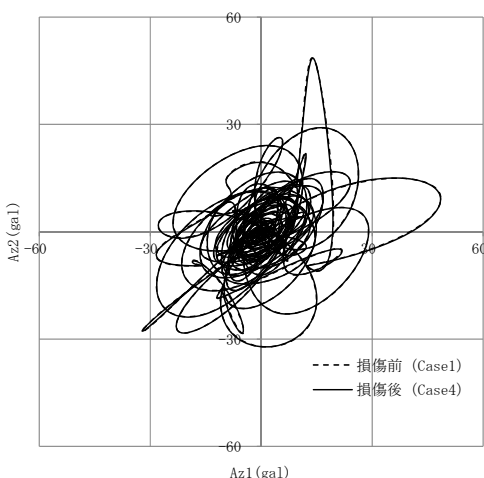


図-23 Case1 と Case4 の比較 (アトラクタ)

一方、図 21~24 に損傷前後のアトラクタを比較した結果を示す。アトラクタは応答鉛直加速度を横軸 Az1, また応答鉛直加速度データを 0.1 秒間遅らせたデータを縦軸 Az2 として作成した。Case3 や Case5 はフーリエスペクトル比較よりもアトラクタ比較の方が明らかに判別し易い。また、フーリエスペクトル比較では辛うじて判別できる程度であった Case2 についても明確に判別できる。このように、アトラクタ検出法は、固有振動数を求めることはできないが、フーリエスペクトルで比較するよりも損傷検出性に優れているため、フーリエスペクトル比較による方法を補完する形で利用すれば効率的であると考えられる。なお、Case4 では損傷前後の差がほとんどなく損傷検出は困難である。

Case2 において損傷前後の差が比較的小さかったのは、支材の剛性が比較的小さいことと分析する加速度を抽出した節点から損傷仮定箇所が比較的に離れていることが要因として挙げられる。

Case3 において損傷前後の判別が容易であったのは、横桁の剛性が支材などと比べて大きく、また分析する加速度を抽出した節点から比較的に近いことが要因として挙げられる。

Case4 において損傷検出が困難であったのは、この部分の吊材の影響が小さかったためと考えられるが、吊材の具体的な影響度については剛性などをパラメータとしたパラメトリックスタディが必要である。

Case5 において損傷前後の判別が容易であったのは損傷率が 5%と小さいものの損傷が全体に及ぶと仮定したためであると考えられるが、この結果から鋼部材の剛性が腐食等により橋全体で数%程度低下した場合でも異常検知され得る可能性が示唆された。

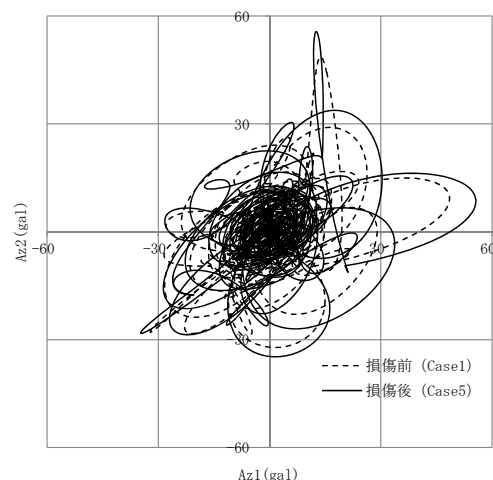


図-24 Case1 と Case5 の比較 (アトラクタ)

4. まとめ

本検討において、以下の知見が得られた。

- (1) 既存のスマートフォンにより計測した常時微動加速度データは振動特性の一次的な傾向把握に利用できることがわかった。
- (2) 実測加速度データから作成したアトラクタが橋梁ごとにそれぞれ固有の形状を呈していることを確認した。
- (3) アトラクタの主要20点の原点からの距離を半径として求める変動係数に着目し、変動係数がアトラクタの形状特性を定量的に表す一つの指標になる可能性を示した。そして、このような変動係数によるアトラクタ分析の方法を常時微動計測に基づく構造ヘルスマニタリングにおける一手法として提案した。
- (4) 鋼アーチ橋の解析的検討において、アトラクタ検出法がフーリエスペクトル比較よりも損傷検出性に優れていること、またアトラクタ検出法をフーリエスペクトル比較による方法の補完として利用するのが効率的であることを確認した。
- (5) 解析結果から鋼部材の剛性が橋全体で数%程度低下した場合でも常時微動計測により異常検知される可能性があることがわかった。

考察および今後の課題を以下に示す。

- (A) 今回提案した常時微動アトラクタの変動係数を定期的に計測して過去のデータと比較すること、またアトラクタ形状の時系列変化を比較検討することが橋梁の異常検知につながるものと考えられる。本検討では、計測時間は20秒間と比較的短かったが、もう少し長時間、また複数回計測することにより統計的な分析を行うことが望まれる。なお、短時間計測でも固有のアトラクタ形状を確認できたのは影響の大きいバスなどの大型車両が通行する際に計測を行えたからであると考えている。また、計測は手摺に固定して行ったが鉛直振動計測のため手摺の柔性による影響は小さかったものと考えている。
- (B) 本検討における車両通行の解析では損傷前後において同じ重量の車一台が定速で通過する場合に限定している。交通規制をかけて同様な状態を再現できれば実際と整合するため、今回のようなシミュレーションを行うことにより損傷箇所の推定が可能になると考える。しかしながら、効率的な構造ヘルスマニタリングの観点では交通規制を伴わない方法が望まれる。よって、普

段の常時微動計測データから橋梁の異常検知ができるように、車両数、車両重量、および走行速度などをパラメータとしたパラメトリックスタディが望まれる。

- (C) アトラクタ検出法はノイズに対するロバスト性に優れるという長所もあると言われており³⁾、ノイズに対する検討も今後の課題である。
- (D) 損傷箇所の同定においてはGA¹⁰⁾（遺伝的アルゴリズム）などの手法を応用すると効率的であり、この種の研究をアトラクタ検出法とカップリングする形で進めるのも価値があると思う。

参考文献

- 1) 崔，堺，星隈：起振機実験および常時微動測定に基づく実鋼上路式アーチ橋の固有振動特性の検証，土木技術資料54-10, 2012.
- 2) 林，中本：鋼上路ランガー橋を対象とした固有振動解析と現場計測，駒井ハルテック技報 Vol.2, 2012.
- 3) 川端，古賀，高橋，中村，呉：生月大橋の常時微動計測による構造解析モデルの検証，鋼構造年次論文報告集，19, pp.13-18, 2011.
- 4) 白田，宮下，長井：構造ヘルスマニタリングのための既設鋼橋の損傷同定に関する研究，第27回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会，pp.24-27, 2009.
- 5) 佐藤，田中：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.
- 6) 加藤：カオス応答アトラクタ型による損傷検出性の差異，第18回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.371-376, 2015.
- 7) 胡，三好：脈波におけるカオス解析の技術開発と展望；中国における心理問題への対処法としての応用展開の可能性，大阪大学大学院人間科学研究科紀要.40 P.27-P.46, 2014.
- 8) <http://www.titech.ac.jp/news/2014/029271.html>
- 9) midas Civil, 2017.
- 10) 細川，何，林川，川谷，松本：交通振動応答を用いた橋梁損傷同定手法の適用可能性検証，土木学会北海道支部 論文報告集 第70号, A-54, 2014.