

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

供用中の橋梁の劣化や損傷は進行することを考えると長期にわたる変化に着目するアプローチは有効であり、長期モニタリングが注目され始めている。一方で、長期モニタリングにおいては、温度変化などによる振動特性の季節変動が生じることが報告されているが、季節変動を考慮した長期モニタリングの枠組みの提案がほとんどないことが研究開始当初の状況であった。特に、実橋の長期モニタリングデータを見ると、気温などの外部因子と観測値の確率変数間には非線形的な相関関係が多く観察される。また長期にわたり逐次更新される連続モニタリングデータの分析には逐次分析による異常診断を行う必要があるが、長期橋梁ヘルスマニタリングの逐次異常診断には至っていないのが現状であった。

本研究は、これまで行った長期橋梁モニタリング関連研究の知見を活かせば、長期モニタリングの実用性を高めることができるとの確信から提案された研究である。また損傷による橋梁振動特性の変化をより強調できる統計空間でのモニタリング指標も有効であると考えた。さらに、異常仮説と健全仮説の確率の尤度比に着目しベイズ更新を行えば異常に関する事前情報を必要としない異常診断法は実現できると考えた。

### 2. 研究の目的

長期橋梁ヘルスマニタリングにおける気象状況・構造物の運用状況などの外部因子の影響や計測データを逐次に分析できる異常診断法の構築を目的とする。長期観測値の外部因子による変化と損傷による変化を区別し損傷による観測値の変化を強調させるための回帰モデルを提案する。異常診断には、逐次ベイズ異常診断法を提案する。異常検知手法の妥当性検証のために、模型橋と実橋での損傷および破壊実験を行う。具体的には以下の項目について検討を行う。

- (1) 外部因子による観測値の変化を精度よく区別できる回帰法の構築
- (2) 損傷に敏感で抽出しやすい新しい特徴量の開発
- (3) 長期橋梁ヘルスマニタリングによる逐次異常診断手法の提案
- (4) 模型橋および実橋での損傷実験による提案手法の妥当性と実用性の検証

### 3. 研究の方法

研究目的を達成するために、以下のように3ケ年にかけて研究を行なった。

初年度の平成28年度には、長期モニタリングにおける外部因子と観測値の非線形的相関を考慮できる回帰法と逐次ベイズ異常診断法を開発する。具体的な研究方法を以下にまとめる。

- 外部因子と観測値の多変量確率変数間の非線形性までを考慮する回帰モデルの構築
- 逐次更新の長期モニタリングデータに適合する逐次回帰法の構築
- 構造同定手法の整備と無事前情報異常検知法の開発
- 妥当性検証のための模型桁整備と実橋長期モニタリング用の機器整備

平成29年度以降は、実験による妥当性の検証と逐次更新による逐次ベイズ異常診断法を提案する。特に、実際の鋼桁橋とPC桁橋を対象とした実橋梁損傷実験を実施した。具体的な研究方法を以下にまとめる。

- 平成28年度開発の異常検知法の妥当性検討のための実橋梁実験および模型橋梁実験
- 初年度開発の異常検知法の改良
- 損傷実験のためのモデルアップデートと損傷シミュレーション
- 成果発表と実用化のための問題点分析

最終年度の平成30年度には、平成29年度の研究で実施した実橋梁の損傷実験データを用いて異常検知可能性について検討を進めてきた。また、逐次ベイズ異常検知法で提案している損傷位置や損傷度の大きな検知精度の向上のために、逐次ベイズ異常検知法の情報行列から各センサー情報だけを抽出する局所ベイズ異常検知法の開発を行う。

### 4. 研究成果

本研究で得られた第1の成果は、事前情報を必ずしも必要としない仮説の尤度比に着目した逐次ベイズ異常診断の基礎理論の提案の成功である。第2の成果として、長期振動モニタリングにおける環境の影響を適切に考慮できる数理モデルとして、ARIMA (Autoregressive, Integrated and Moving Average) モデルの有用性を明らかにしている。第3の成果として、振動特性に着目した桁橋の損傷検知の場合、曲げ1次モード振動数より曲げ2次振動数の方が損傷に敏感に反応することを明らかにしている。



図4-1-1 損傷実験橋梁と損傷シナリオ

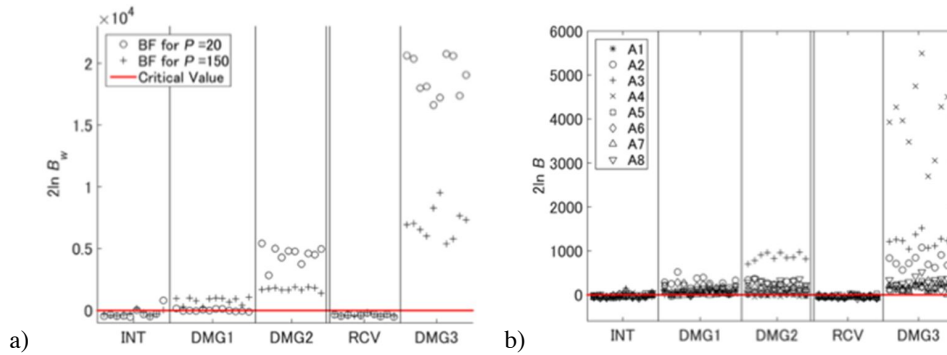


図 4-1-2 ベイズ損傷同定結果：a)グローバル損傷同定；b)ローカル損傷同定

#### 4-1 ベイズ異常検知の提案

本研究では、損傷に対する感度の低さが指摘された従来の特徴量であるモードパラメタの問題点を解決すべく、同定されるシステム行列から特徴量を提案し、さらにベイズ推論を導入した異常検知を提案した。すなわち既往研究において単変量 AR (Autoregressive) モデルの回帰係数により定式化されていた損傷指示指標を拡張し、多変量 AR モデルの回帰係数を用いて加速度時系列の空間的な相関関係を反映することで、振動特性の変動に対してより鋭敏に変化する指標を提案する。本提案手法の妥当性を検証するために鋼トラス橋の損傷実験を行った。図 4-1-1 に対象橋梁と損傷シナリオを示す。

本提案手法による 2 種類の損傷同定結果を図 4-1-2 にまとめる。橋梁に設置された全てのセンサー情報を集約し一つの特徴量としてまとめて行なった同定結果 (グローバル損傷同定) を図 4-1-2a) に示す。縦軸は、対数のベイズファクターを示しており 1 以下の場合、健全であるとの仮説を排除する根拠がないとの解釈ができる。それより大きくなった場合は、健全であるとの仮説を排除する根拠の確率が低くなるとの意味であり、異常の程度を定量的に評価できる可能性を示している。本ベイズ異常検知の枠組の中で、各センサーに相当する情報のみを抽出し、対数のベイズファクターとしてまとめたのが図 4-1-2b) である。本研究ではローカル損傷同定と呼び、損傷の位置同定に利用している。図 4-1-2b) からわかるように、損傷部材に近いセンサーのベイズファクター大きくなっており、異常個所の同定可能性を示している。

#### 4-2 実橋梁への損傷および破壊実験による新しい見解

提案手法の妥当性検討のために、実際の鋼板桁橋と PC (Prestress Concrete) 桁橋を対象とした実橋梁損傷実験と模型橋梁実験を実施した。鋼板桁橋の損傷実験の前に半年程度の長期モニタリングを行った後に、損傷実験を行なっている。計測には加速度の計測とともに橋梁の橋軸方向のたわみ計測、損傷によるひずみの変化を捉えるためのひずみ計測と橋桁の温度の計測を行った。



図 4-2-1 対象 PC 橋と破壊実験光景

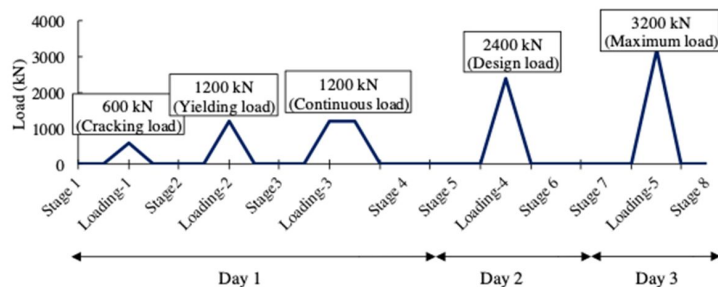


図 4-2-2 静的载荷 (Loading-1 ~ Loading-5) と振動実験 (Stage 1 ~ Stage 8) シナリオ

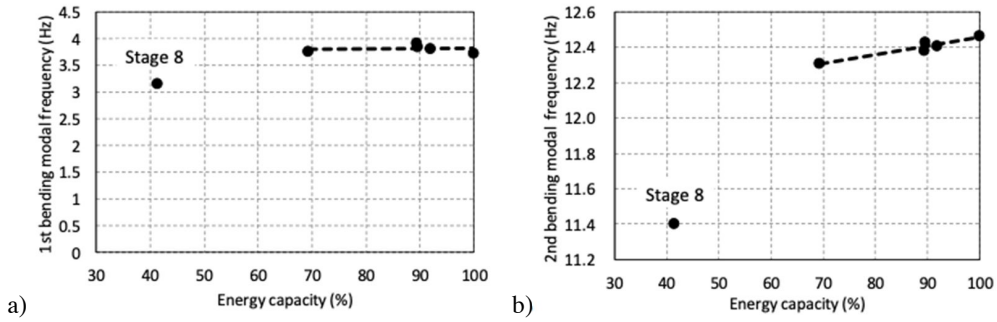


図 4-2-3 エネルギー吸収能と振動数の相関関係: a) 曲げ 1 次モード; b) 曲げ 2 次モード



図 4-2-4 対象橋梁とセンサー導入位置および人工損傷

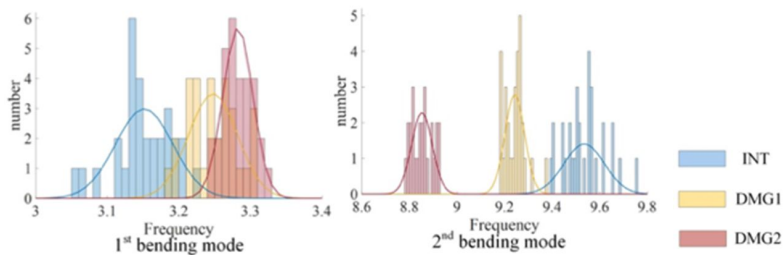


図 4-2-5 代表的な同定振動数のヒストグラムと損傷による振動数の変化

#### 4-2-1 PC 橋破壊実験

架橋状態にある PC 橋 (図 4-2-1 参照) を現地にて破壊まで段階的に静的載荷する実験に参画する機会を得たことから、架橋状態にある PC 桁の破壊まで各状態において、振動実験を行い、橋梁の力学的性能と振動特性の関係について検討を行った。静的載荷シナリオと振動実験のシナリオを図 4-2-2 に示す。振動特性と橋梁性能と相関を調べるために、本研究では、エネルギー吸収能に着目し、各載荷状態でのエネルギー吸収能の変化に関して考察を行う。エネルギー吸収能  $Z$  は式 (1) で表される。

$$Z_n = \left(1 - \frac{\Delta W_n}{W_n}\right) \cdot 100 (\%) \quad (1)$$

ここに  $\Delta W$ ,  $W$  は荷重-変位曲線より求められ、それぞれ消散エネルギー、ポテンシャルエネルギーを示す。消散エネルギーはコンクリートに生じたひび割れの進展と正の相関があり、ポテンシャルエネルギーは、各載荷時に蓄積された仕事量を表す。したがって、構造物が弾性変形挙動をしており、損傷がない場合には、エネルギー吸収能の値は約 100% となる。

代表的な振動特性の一つである固有振動数は、損傷による構造物の剛性の低下により減少するとされており、橋梁の損傷レベルとの関連性を把握するために、固有振動数を載荷実験から得られた結果と比較する。エネルギー吸収能の変化と固有振動数の変化を比較したものを図 4-2-3 に示す。Stage8 は、残留変形が生じた状態であり、終局状態に限りなく近い状態であるため、エネルギー吸収能と固有振動数の双方の値は小さくなると考えられる。よって、Stage8 を除いて、初期状態である Stage1 から設計耐力の荷重載荷を行った Stage7 までのデータに対して、最小二乗法を用いて近似直線を図中に描いた。この近似直線の傾きから、曲げ 2 次はエネルギー吸収能との相関があることが分かる。これは、室内 PC 桁損傷実験とも同様な傾向であり、曲げ 2 次の固有振動数が特徴量としての有用性があることを示唆している。

#### 4-2-2 鋼板桁橋損傷実験

鋼板橋の振動モニタリングによる異常検知の可能性を検討するために、実橋梁を対象に振動および損傷実験を行った結果を報告する。また橋梁の基本振動特性を把握するために構造同定を行った結果、損傷導入による従来の考えと異なる振動特性の変化を観測しており、そのメカニズムについて調査検討した成果をまとめる。

図4-2-4には対象橋梁と人工損傷を示す。損傷としては、桁端部支承部のベースプレートから発展する疲労亀裂を考慮する。損傷導入前後の計測振動から同定した振動数のヒストグラムを図4-2-5にまとめる。図4-2-5で特記すべき点は、損傷の進展に伴い、曲げ1次モード振動数が増加する結果である。損傷による剛性低下は振動数の低下につながるのが一般的には知見であるが、本実験ではその逆の傾向が観測された。一方で曲げ2次モード振動数は損傷の進展に伴い、振動数が減少する結果である。損傷の進展により、曲げ1次振動数が増加する理由として、損傷実験と健全実験の時間帯が異なることから温度による拘束条件の変化が考えられ、感度解析として、対象橋梁の有限要素モデルを作成し、拘束条件としてバネを導入し、バネ定数を変化しながら固有値解析を行った。その結果、曲げ1次振動数は支承部の拘束条件に敏感であるが、曲げ2次振動特性は、損傷による剛性の変化に敏感で拘束条件の変化には鈍いことがわかった。本研究の成果は、橋梁の振動ヘルスマonitoringにおいて重要な知見であり、PC桁橋に続く2次曲げ振動数の重要性を改めて確認することができた。

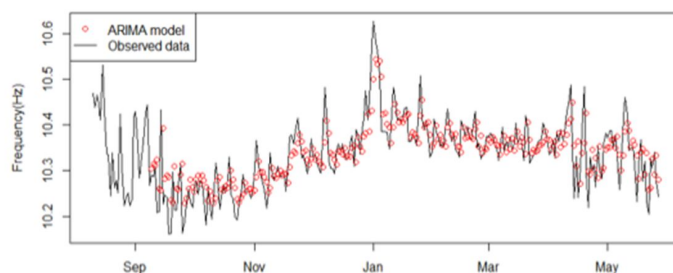


図 4-3-1 ARIMA モデルによる季節変動の回帰結果

#### 4-3 長期振動モニタリングにおける季節変動の数理モデル

長期橋梁モニタリングの観測データ（指標）の外部因子による変化と橋梁の損傷による変化を区別するとともに損傷による変化をより明確にするため、まず外部因子の観測値への影響を線形回帰、非線形回帰、ARIMA でモデル化し、橋梁の長期モニタリングに適したモデルの検討を行なった。長期振動モニタリングにおける季節変動の数理モデルに関する検討で、ARIMA モデルのような時系列モデルが橋梁の長期モニタリングにおける季節変動のモデル化に適するとの結果になった（図4-3-1）。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計16件）

1. 三増拓也・金哲佑・五井良直：実鋼板桁橋の損傷前後における振動特性に関する考察，土木学会論文集 A2（応用力学）Vol.74, No.2, pp.I\_513-I-I\_522, 2018.
2. C.W. Kim, et al.: Long-term bridge health monitoring and performance assessment based on a Bayesian approach, *Structures and Infrastructure Engineering*, 14(7): 883-894, 2018.
3. 五井良直・金哲佑：橋梁振動の多変量自己回帰モデルのベイズ推定に基づく異常検知，材料，日本材料学会，Vol.67, No.2, pp.143 - 150, 2018. 2.
4. Y. Goi and C.W. Kim: Damage detection of a truss bridge utilizing a damage indicator from multivariate autoregressive model, *J of Civil Structural Health Monitoring*, 7(2): 153-162, 2017.
5. O.S. Luna Vera, C.W. Kim, Y. Oshima: Energy dissipation and absorption capacity influence on modal parameters of a PC girder, *J. of Physics: Conf. Series* 842, 2017.

その他 11 件

〔学会発表〕（計54件）

1. Y. Goi, C.W. Kim: Investigation of Bayesian damage detection method for long-term bridge health monitoring, In: Proc. IALCCE2018, Ghent, Belgium, pp.1215-1222, 2018.
2. T Mimasu, C.W. Kim, Y. Goi: Structural health monitoring of a steel girder bridge utilizing reconstructed sparse-like system matrix, In: Proc. IALCCE2018, Ghent, Belgium, pp.1231-1238, 2018.
3. X. Ma, Y. Goi, C.W. Kim: Long-term vibration and temperature monitoring on a steel plate girder bridge, In: Proc. 7WCSCM, July 22-25, 2018, Qingdao, China, pp.1732 - 1742.
4. Y. Goi, C.W. Kim: Bayesian Hypothesis Testing for Bridge Health Monitoring, In: Proc. 7WCSCM, July 22-25, 2018, Qingdao, China, pp.1743 - 1752.
5. C.W. Kim, et al.: Vibration monitoring and damage experiment on an actual steel plate girder bridge, In: Proc. 6ISRERM, pp.815-8120, 31 May - 1 June 2018, Singapore.

その他 49 件

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況（計 0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://infra.kuciv.kyoto-u.ac.jp/kaken.html>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：野村 泰稔  
ローマ字氏名：Nomura, Yasutoshi  
所属研究機関名：立命館大学  
部局名：理工学部  
職名：教授（申請当時は講師）  
研究者番号（8桁）：20372667

研究分担者氏名：橋本 国太郎  
ローマ字氏名：Hashimoto, Kunitaro  
所属研究機関名：神戸大学  
部局名：工学研究科  
職名：准教授  
研究者番号（8桁）：40467452

研究分担者氏名：張 凱淳  
ローマ字氏名：Chang, Kai-Chun  
所属研究機関名：京都大学  
部局名：工学研究科  
職名：講師  
研究者番号（8桁）：50751723

研究分担者氏名：吉田 郁政  
ローマ字氏名：Yoshida, Ikumasa  
所属研究機関名：東京都市大学  
部局名：工学部  
職名：教授  
研究者番号（8桁）：60409373

(2)研究協力者

研究協力者氏名：大島 義信  
ローマ字氏名：Oshima, Yoshinobu

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。