

京都大学 学生員 ○平手 佑季 京都大学大学院 学生員 尾中 貴輝  
 京都大学大学院 正会員 金 哲佑

1. 序論

橋梁維持管理の効率化を図り、振動特性の変化に着目する構造ヘルスマモニタリングが検討されている。特に、長期にわたる振動特性の変化に着目する長期モニタリングも実践的橋梁ヘルスマモニタリング方法として注目されている。ただし、長期モニタリングにおける気温の変化などの影響で振動特性に季節変動が起こることが報告されている<sup>1)</sup>。本研究では、温度変化が橋梁の振動特性に及ぼす影響を検討するために、単純支持 H 型鋼桁の模型橋梁を用いて車両走行実験を行った。また、運動方程式のシステム行列を特徴量とし、ベイズ因子 (Bayes Factor : BF) を用いて異常検知を行うベイズ異常検知が報告されており<sup>2)</sup>、温度変化が BF に与える影響について検討を行う。

2. ベイズ異常検知法の概要

ベイズ統計においては統計的モデルのパラメータを確率分布として扱うため、パラメータの推定の不確かさを直接的に評価することが可能となる。この性質を利用し、橋梁が健全である場合と何らかの異常が生じている場合のそれぞれについて統計的モデルパラメータの分布を仮定して、それぞれの分布に対応して尤度の比である BF を算出することが可能となる<sup>2)</sup>。BF は式(1)に示すように、観測値を得たうえでどちらの仮説が相対的に尤もらしいかを評価する指標であり、橋梁の健全性を評価する実用的な基準となりうる。

$$BF = \frac{p(D|H_1)}{p(D|H_0)} \quad (1)$$

ここで、 $p(\cdot | \cdot)$  は条件付き確率密度関数を表す。また、 $D$  は特徴量の観測データ、 $H_0$  と  $H_1$  はそれぞれ対象橋梁が健全である仮説と何らかの異常が生じている仮説を表す。

3. 模型橋梁車両実験および同定振動特性

本実験では、Fig.1 に示す、橋長 5600mm、支間長 5400mm、有効幅員 287mm、桁高 66mm の単純支持 H 型鋼桁に対して車両走行実験を行った。支承部は、Ab1 がピン支承で Ab2 がローラ支承である。損傷シナリオは、桁中央部付近のフランジの 3 か所に高さの半分の亀裂を与えた場合を DMG1、桁端部付近のフランジを三角形に削り取った場合を DMG2、両損傷に補強鉄板を取り付けた場合を DMG0、DMG0 から全ての補強鉄板を外した場合を DMG12 とする。温度シナリオについては、ラバーヒーターを用いて桁の表面温度を上昇させ、約 25°C、約 35°C、約 45°C、約 55°C (以下 T25,T35,T45,T55 とする) の状態で走行実験を行った。また、車両重量約 135N (質量 13.77kg)、車両速度 0.84m/s、サンプリング周波数 200Hz、片道を 1 試行として、各シナリオ 20 試行の計測を行った。なお、Fig.1 に示すように、ローラ支点での橋軸変位計測のためにレーザー変位計を 2 点、模型橋梁の鉛直加速度計測のために加速度計を 5 点、模型橋梁表面の温度計測のために熱電対を 6 点、支間中央の鉛直変位計測のために接触型変位計を 1 点設置した。

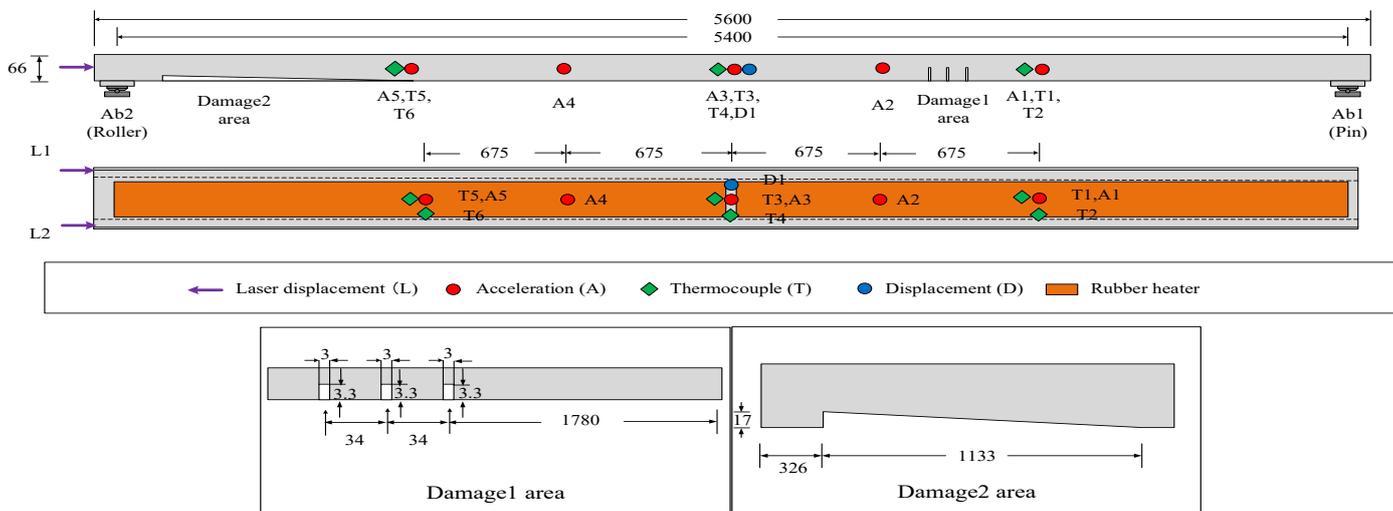


Fig. 1 Model bridge with sensor deployment and damage model [unit: mm].

走行振動実験の各シナリオで得られた加速度に対して、確率部分空間法<sup>3)</sup>を用いて、橋梁の卓越振動数を同定する。温度25°Cでの曲げ1次から3次までの同定振動数を Table 1 に示す。紙面の制約上示していないが、他の温度シナリオでも、損傷シナリオに対する同定振動数変化の傾向は Table 1 と同様であった。特記すべき点は、DMG0 状態から DMG1 の損傷状態に変化することによって、曲げ1次モードの振動数が上昇する結果となった。梁の境界条件が変化することで、損傷が導入されても振動数が増加することは考えられる<sup>4)</sup>。しかしながら、Fig.2 の曲げ1次モードの固有振動数帯の PSD からわかるように、曲げ1次モードの固有振動数帯の PSD にピークが複数あり、損傷シナリオによる PSD のパワーの変化はあるものの、ピーク振動数の違いは見当たらない。近傍の異なる振動モードを抽出したことで、曲げ1次モードの振動数が上昇したと考えられる。関連して、DMG0 状態から DMG1 状態に変化することによって、橋軸方向変位や鉛直変位計から算出した曲げ剛性の増加は確認できなかった。

このように、振動モードによっては着目すべき振動数に大きなばらつきが生じること、またどのような振動モードに着目すべきかをあらかじめ決めるのは容易ではない。以上の理由で、運動方程式のシステム行列を特徴量とし、参照状態(健全状態)の特徴量の確率分布と点検時の特徴量の確率分布を比較し異常検知を行う。

#### 4. ベイズ異常検知

温度や橋梁損傷状態を変化させたときの特徴量の確率分布の比である  $BF$  (Bayes Factor) の変化について考察する。本研究では、式(1)の両辺の自然対数を取り2倍したものを異常検知指標として用いる。損傷有無を決める閾値を0とし、 $2\ln BF > 0$ は、「橋梁が健全な状態である」という仮説を棄却する根拠が「非常に強い」と判断する。

参照データを T25 での DMG0 データとし、求めた異常検知指標 ( $2\ln BF$ ) を Fig.3 に示す。全ての温度下の DMG0 データを用いたときの異常検知指標を Fig.4 に示す。これらの結果から、損傷に比べ温度変化が  $BF$  に与える影響は小さいことがわかる。また、温度変化の情報を参照データに加えた方が損傷に敏感に反応することがわかる。

#### 5. 結論

本研究では、損傷状態の変化に伴う振動数の変化の仕方が振動モードによって異なる結果となった。これは、振動数の変化を基に損傷検知を行う際には、着目する振動モードをあらかじめ決める必要があることを意味し、現実的ではない。一方で、運動方程式のシステム行列を特徴量とし、 $BF$  を指標とした損傷検知では、着目する振動

モードをあらかじめ決める必要がないため、橋梁の異常検知に有効であると考えられる。損傷検知において  $BF$  を用いることは、何らかの振動特性に着目して損傷検知を行うよりも妥当な手法であることがわかった。また、温度変化の情報を参照データに加えることで、損傷がある橋梁の  $BF$  がより敏感に反応することが分かった。

Table 1 Identified frequency under T25scenario

	DMG0	DMG1	DMG2	DMG12
1 <sup>st</sup> bending mode (Hz)	3.5	3.7	3.5	3.4
2 <sup>nd</sup> bending mode (Hz)	9.7	9.5	9.6	9.4
3 <sup>rd</sup> bending mode (Hz)	23.2	22.8	22.6	22.5

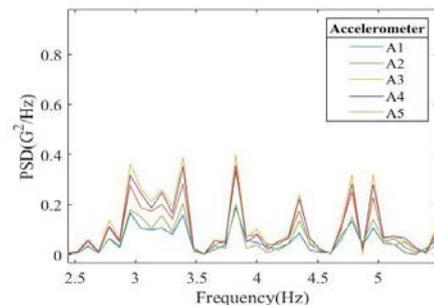


Fig. 2 PSD of Acceleration under DMG0 and T25 Scenarios.

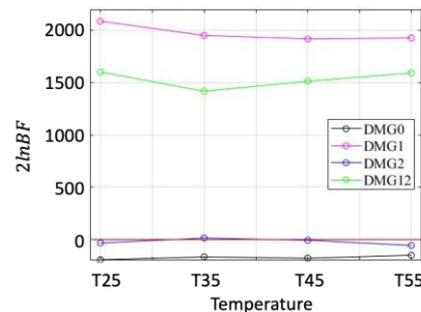


Fig.3 BF under DMG0 and T25 scenarios as a reference.

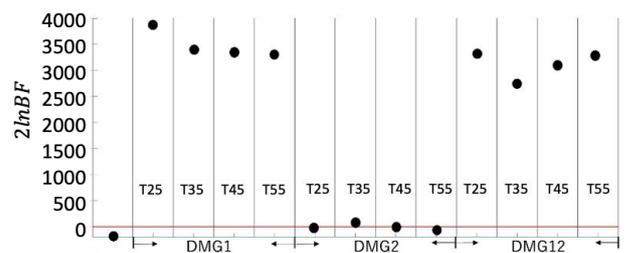


Fig. 4 BF under DMG0 and all temperature scenarios as a reference.

#### 【参考文献】

- 1) 金, その他 2 人: 温度および通行車両の影響を考慮した長期橋梁振動ヘルスマモニタリングのためのベイズ的アプローチ, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.70, No.2, p.I\_73-I\_80, 2014.
- 2) Goi & Kim: Bayesian outlier detection for health monitoring of bridges, Procedia Engineering, Vo.199, pp. 2120–125, 2017.
- 3)Van Overschee & De Moor.: Subspace identification for Linear Systems. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- 4) 金哲佑: 橋梁点検と構造ヘルスマモニタリング, 橋梁と基礎, Vol.54, pp.46-51, 2020.1.