

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02225

研究課題名(和文) 構造ヘルスマonitoringの高度化のためのベイズ型構造同定と情報融合の提案

研究課題名(英文) Bayesian System Identification and Information Integration for enhancement of structural health monitoring

研究代表者

金 哲佑 (Kim, Chul-Woo)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：80379487

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：不確定性を考慮した構造ヘルスマonitoring (SHM) の同定精度向上と情報融合によるSHMの高度化のため、ベイズ構造同定・異常検知法の構築と情報融合によるベイズ健全度推定について検討を行った。室内実験と実橋での計測を行い、提案手法の妥当性を検証した。得られた主な成果は、「時間領域ベイズ構造同定法とベイズ仮説検定による異常検知法」の提案である。また、ベイズ有限要素モデルアップデートによる橋梁の健全性評価の検討を行い、数少ない振動センサ情報を用いた有限要素モデルアップデートによる橋梁の健全性評価には限界があり、代替モデルや異なるセンサの組み合わせによるスパース性の低減が必要であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、今までのモード特性の変化に着目した損傷検知の限界を乗り越えるべく提案として、なるべく多いモード情報を含む損傷指標の提案と計測やデータ処理または理論の不完全性のような不確定性を考慮するベイズ理論に着目している新しいパラダイムの提案であり、関連分野への波及効果も大きく、学術的にも意義のある成果を示している。実橋を対象とした実践的な検討も行っており、ベイズ仮説検定を行うことで高い確率で異常検知が可能であることを示している。少なくとも目視点検と併用し、点検効率の向上につながることを示している。本研究の成果は、橋梁維持管理の合理化につながる重要な役割を果たすことができ、その社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：To improve the identification accuracy of structural health monitoring (SHM) considering uncertainties and to upgrade SHM by information fusion, a Bayesian structural identification and anomaly detection method and Bayesian structural integrity estimation were investigated. Laboratory experiments and measurements on real bridges were conducted to verify the validity of the proposed method. The major outcomes obtained are the proposal of a 'time-domain Bayesian structural identification and anomaly detection method based on Bayesian hypothesis testing'. The integrity assessment of bridges by Bayesian finite element model updating was also investigated. It was found that the integrity assessment of bridges by finite element model updating using only a few vibration sensor information has limitations, and that it is necessary to reduce sparsity by using meta models and different sensor combinations.

研究分野：構造力学

キーワード：構造ヘルスマonitoring 長期モニタリング ベイズ異常検知 情報融合 高度化

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

社会基盤施設の維持管理に係る人的・経済的な労力の軽減への期待から、構造ヘルスマニタリング（SHM：Structural Health Monitoring）の研究や技術開発が国内外で行われている。今までの構造ヘルスマニタリングは、振動データから特徴量として振動特性を同定し、その振動特性の変化を観察することで対象構造物の劣化や損傷を検知しようとするのが基本的な考え方である。一方で橋梁のような巨大な土木構造物は、損傷や劣化による同定振動特性の変化が小さく、また気温や交通量の変動などの外部因子の影響により同定振動特性が大きくばらつくことから、同定精度向上と確率論的アプローチの必要性が指摘されている。確率論的アプローチによる同定精度向上について周波数領域のベイズ同定法が提案されているが、同定対象の振動数帯域を事前設定する必要があり自動化に向いてない。このように、土木構造物の構造ヘルスマニタリングに適し、さらに自動化にも適する確率構造同定法の開発が喫緊の課題である。また、構造ヘルスマニタリングによる情報と構造物の健全度との関連性が未解明のままで、構造ヘルスマニタリングに基づく健全度評価までには至っていないのが現状である。これが構造ヘルスマニタリングの実践的適用を躊躇う原因となっている。期待されながらも実用化に難航している構造ヘルスマニタリングの実践力を高めるための解決すべき点は何か、またどのように解決すべきか、という疑問が当初の本研究の背景である。

2. 研究の目的

本研究は、従来の構造ヘルスマニタリング技術の問題点である「不確定性の高い橋梁ヘルスマニタリングデータによる構造同定精度の向上」と「損傷に敏感な特徴量開発の必要性、判定手法の不足、構造ヘルスマニタリング情報と構造物の健全度との関連性の不明」を解決すべく、構造ヘルスマニタリングの高度化のためのベイズ型構造同定と情報融合について検討を行い、関連方法の提案を目的とする。具体的には、不確定性の高い橋梁ヘルスマニタリングに特化した時間領域ベイズ構造同定法の構築、橋梁システム行列の確率分布から導いた特徴量によるロバストベイズ異常検知の提案、構造ヘルスマニタリング情報と他の情報との融合によるベイズ健全度評価と実証実験による妥当性検証を行う。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために3カ年にわたり研究を行った。研究方法を以下のまとめる。

(1) 橋梁モニタリングに特化した時間領域ベイズ構造同定法の構築

構造ヘルスマニタリングにおける同定精度は、異常検知や健全度評価の精度に影響を及ぼす。本研究では、不確定性が高い土木構造物に特化した時間領域でのベイズ構造同定法の構築を行った。具体的には、複数の加速度センサから計測される振動データを用いて、多次元自己回帰モデルを構築する。ただし、計測における不確定性や多自由度の動的システムをモデル化する際には不確定性（偶然的な不確定性：Aleatory uncertainty と認識論的不確定性：Epistemic uncertainty）が存在することから、ベイズ理論を適用し、多次元自己回帰モデルの係数行列の事後確率分布を同定する方法を検討する。また、多次元自己回帰係数行列の事後確率分布から固有値解析を行うことで、振動数、モード減衰、モード形状の事後確率分布を同定する。

(2) システム行列の確率分布から導いた特徴量によるベイズ異常検知法の提案

従来の振動特性の変化に着目した構造ヘルスマニタリングは、損傷実験などを事前に実施しない限り損傷に敏感な振動モードの把握が極めて難しい。そのためになるべく多い振動モードを対象に損傷検知を行う必要があった。しかしながら、一つ一つの振動モードについて異常検知を行うのは極めて非効率的である。異常検知を目的とするなら、多くの振動モードの振動特性を一つの指標に集約できれば有効である。3(1)で提案する「橋梁モニタリングに特化した時間領域ベイズ構造同定法」を活用し、多次元自己回帰係数行列を特徴量とする事前検討を必要としない特徴量と異常検知法を提案する。

(3) 構造ヘルスマニタリングと他の情報との融合による健全度推定

今まで蓄積された橋梁維持管理情報のほとんどは目視点検であるが、構造ヘルスマニタリング技術については蓄積された情報が少なく、構造ヘルスマニタリング情報と構造物の健全度との関連性が未解明のままである。構造ヘルスマニタリングによる健全度評価を可能にするために、構造ヘルスマニタリングと有限要素解析との融合を提案する。すなわち、構造ヘルスマニタリング情報（振動特性などのセンサ情報）を先験情報とし、対象橋梁の有限要素モデルの構築とアップデートを行う。

構造ヘルスマニタリング情報を活用しアップデートした有限要素モデルを用い、新たに観測されたモニタリングデータを再現できるように有限要素モデルをアップデートし、初期の有限要素モデルによる構造物の剛性と、新たにアップデートされた有限要素モデルによる剛性を比較することで耐荷力の低下や健全度を推定する。ただし、実橋梁の有限要素モデルは複雑で、高い自



図 4-1-1 対象橋梁の写真とセンサ設置位置

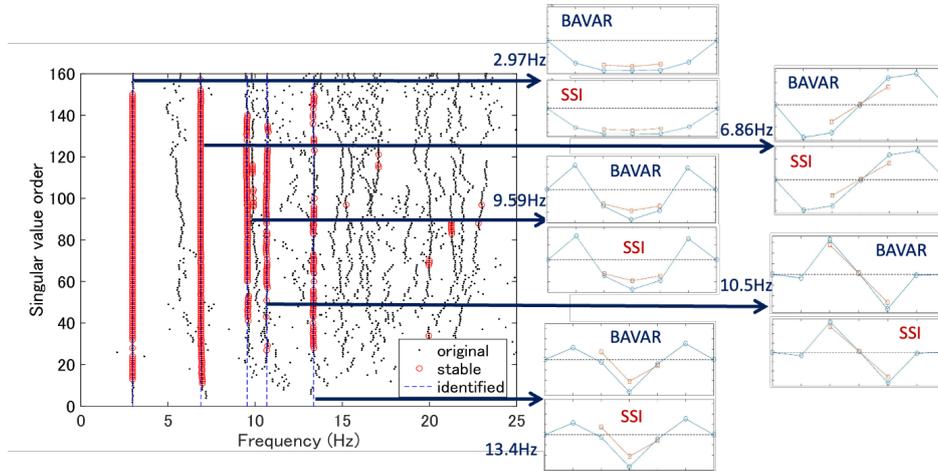


図 4-1-2 対象橋梁の振動モードとセンサ設置位置

自由度（場合によっては数十万）を持つことから、数少ないモニタリング情報で高い自由度の複雑な有限要素モデルをアップデートするのは難しいことが予想される。しかしながら既往の研究は、簡単な梁モデルや実験室での検討がほとんどで、維持管理へ適用できる知見として活用できないレベルである。本検討では、構造ヘルスマニタリング情報を活用しアップデートした有限要素モデルによる健全度評価を可能にするために解決すべき点を明らかにする。最適化の効率向上のために Transitional Markov Chain Monte Carlo 法を導入する。また、モデルクラスを導入したモデルアップデートを検討する。

(4) 実橋梁および模型橋梁による妥当性検証

研究初年度に整備した模型橋梁および実橋での長期モニタリングデータを用いて、時間領域のベイズ構造同定法の精度検証、ベイズ異常検知の妥当性検証、ベイズ健全度推定の妥当性検証、異なるセンサ情報の融合が健全度評価に及ぼす影響について検討を行う。

4. 研究成果

(1) 時間領域のベイズ構造同定

橋梁の実稼動モード解析は、常時振動データを用いて橋梁の振動特性を推定する手法で、橋梁構造物のように交通規制が容易でない土木構造物には有効で実用的な方法である。ただし、常時振動に潜んでいる不確かさをどのように定量化し、低減するかが課題となり、不確かさの定量化のためには、確率システム同定法の開発が重要で、確率システム同定法の開発を行った。また、実橋モニタリングデータを用い、提案手法の妥当性検証を行った。以下の妥当性検証の一例をまとめる

最大支間長 59.2m、支間重量約 936kN、設計荷重 14tf の下路式単径間鋼ワーレントラス橋を対象に振動計測を行い、時間領域のベイズ構造同定法の妥当性検証を行った。図 4-1-1 に対象橋梁の写真を示す。橋梁の振動は 8 つの計測点に鉛直方向の加速度計を設置し、サンプリング周波数 200Hz で計測した。8 点の加速度から多次元自己回帰モデルを構築し、自己回帰係数の固有値の極の事後分布の分散の算出し、相対的に不確かさの低い振動モードの自動抽出を試みた。図 4-1-2 に対象橋梁で同定した振動数と振動モードを示す。ここで、BAVAR (Bayesian Vector Autoregressive) ^[1] が本研究で提案した時間領域のベイズ構造同定結果である。SSI (Stochastic Subspace Identification) は、実稼動モード解析手法の代表的な手法であり、提案手法である BAVAR の検証のために参照同定結果として取り入れた。図 4-1-2 に示すように、BAVAR の同定精度は SSI と同じである。ただし、BAVAR は事後分布の分散が小さい極を自動的に検出し同定を行っているが、SSI はモデル次数による卓越振動の変化を Stabilization Diagram (図 4-1-2 の左の Frequency と Singular value order の関係を示すグラフ) で確認し、物理的に意味のある振動数を決める煩雑な作業を必要とする。

(2) ベイズ仮説検定によるベイズ異常検知

橋梁モニタリングに特化した時間領域ベイズ構造同定法^[1]を活用し、多次元自己回帰係数行列を特徴量とし、ベイズ仮説検定を適用する異常検知を行った。ベイズ仮説検定は、帰無仮説(健全仮説)

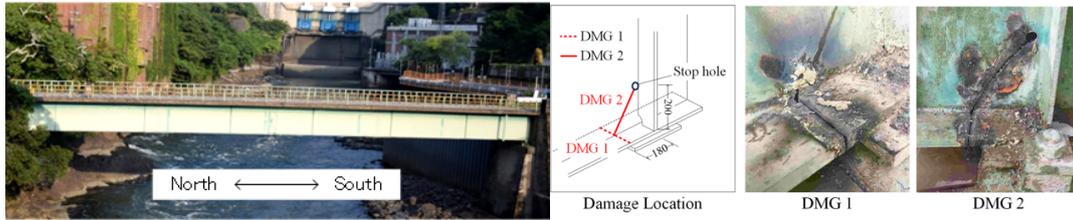


図 4-2-1 検討対象の鋼鉄桁橋の写真と人工損傷

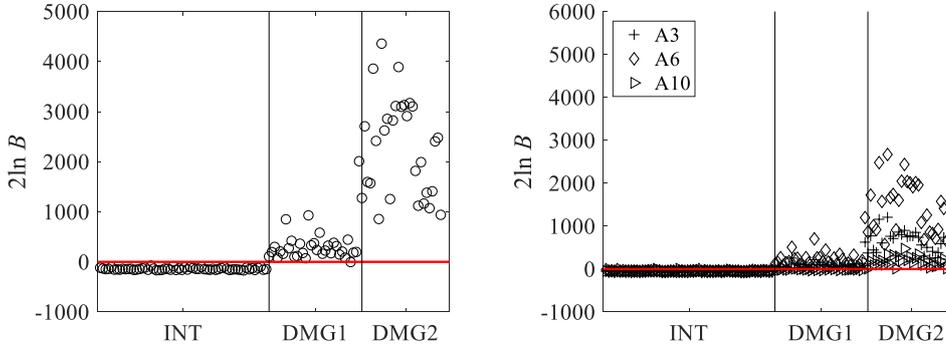


図 4-2-2 センサ最適化によって選別された 3 つのセンサ情報を用いた鋼鉄桁橋のベイズ異常検知 : a) 3 つのセンサ情報を集約しグローバルベイズ因子, b) 個々のセンサ情報を用いたローカルベイズ因子

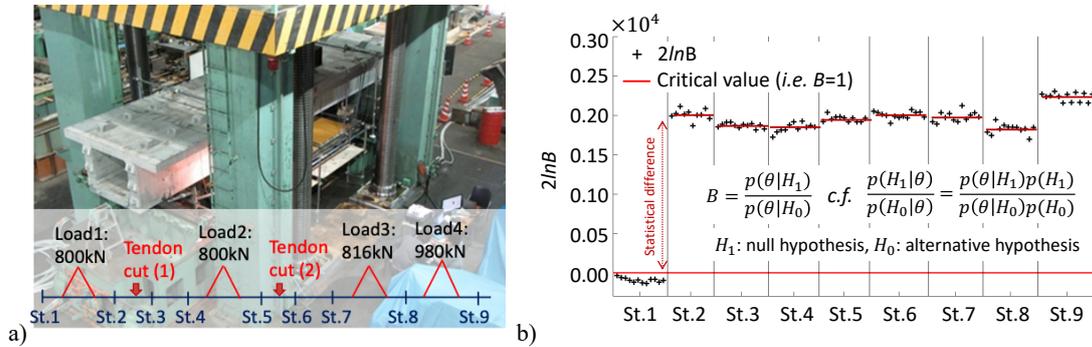


図 4-2-3 PC 箱桁の耐荷性能変化とベイズ異常検知 : a) グローバルベイズ因子

の事後確率と対立仮説（異常仮説）の事後確率の比であるベイズ因子（Bayes Factor）を用いる。妥当性検証のために、鋼鉄桁橋の損傷実験データ^[2]（図 4-2-1 参照）、PC 箱桁の破壊実験^[3]（図 4-2-3 参照）、PC 桁橋の破壊実験データ^[4]を用いて検証を行った。全ての実験において耐力力の低下に伴い Bayes Factor が増加し、異常である仮説を支持する結果を確認している^[2,3]（図 4-2-2 と図 4-2-4b）。（センサ数の最適化を行い、少ないセンサ数での鋼鉄桁橋の異常検知を行った結果を図 4-2-2 に示す。センサ最適化にはモード形状に着目したセンサ最適化手法である「Effective Independence Method (EFI)」^[5]を適用した。3 つでセンサでも異常検知が可能であることが確認された。

(3) 構造ヘルスマニタリングと他の情報との融合による健全度推定

耐力力の評価可能性を検討するために、モニタリング情報と構造解析の融合を提案する。すなわち、モニタリングデータから構造解析モデルをアップデートし構造解析を行う方法と、健全時橋梁のモデルアップデートによる FE 解析と異常時の橋梁のモデルアップデートによる FE 解析結果を比較することで、相対的な耐力力の変化を検討しようとする方法の有効性について検討を行った。

適用例として、図 4-1-1 の橋を対象にモニタリングとモデルアップデートによる橋梁の耐力力変化検知について検討を行った^[6]。図 4-3-1 に FE モデルアップデートによる耐力力推定に適用したアップデート対象区間モデル（モデルクラス）を示す。対象橋には、損傷実験を行っており、A3 センサ設置地点の鉛直部材を半分切断した損傷(DMG1)と全断面切断(DMG2)、損傷部を溶接で補強した後に A5 センサ設置地点の鉛直部材を切断した損傷(DMG2)を導入し、振動計測を行った。耐力力推定においてアップデート対象のモデルクラスを導入した理由は、アップデートの先験情報として使える情報量が少ないことと、モデルアップデートにかかる膨大な計算時間を減らすためである。図 4-3-1 は、アップデート対象を 10 区間のモデルクラスに分けられている。モデルクラスの決め方については、確立された方法がなく、本研究では感度解析などの事

前解析で決めている。

図 4-3-2 に DMG 耐荷力推定結果の一例を示す。図から分かるように、損傷によって損傷を導入した部材を含む SSS400_DM 区間の剛性が減少していることがわかる。関連して、隣接の SSS400_DP1 区間の剛性も減少する結果となった。

図 4-2-3 に示す PC 箱桁を対象にも振動特性同定によるモデルアップデートを行った。振動特性を最適化対象とする場合、支承をバネでモデル化し、支承のバネ定数もモデルアップデートの対象にすると、FE モデルによる解析振動特性は計測振動特性と整合しやすいことが知られており、同様の結果が得られた。一方で、振動特性を最適化対象としアップデートした FE モデルによる荷重—変位曲線（図 4-3-3a）と実験の荷重—変位曲線を比較すると、支承をバネとしてモデルしないと振動数の再現精度は若干劣るものの荷重—変位曲線の精度が向上する結果（図 4-3-3b）となった。このように、モデルアップデートによる耐荷力の検討のためには、体系化された研究が必要であることが明らかになった。

以上のように、モニタリング情報と構造解析の融合による耐荷力変化の推定可能性を確認できた。しかしながら、一般性のある適用のためには、モデルアップデートの計算時間の短縮と全体最適解への到達性能を確保する必要がある。センサ数の増加、代替モデル (Meta Model) が必要になる。

【参考文献】

- [1] 五井 良直・金 哲佑：ベイズ推論を用いた橋梁の振動特性推定に伴う不確実性の定量化手法の提案，土木学会論文集 A2（応用力学）Vol.75, No.2, pp.I_647-I-I_657, 2019. (https://doi.org/10.2208/jscejam.75.2_I_647)
- [2] Yoshiki Onaka, Yoshinao Goi, Chul-Woo Kim, Daigo Kawabe: Influence of number of sensors on Bayesian hypothesis-based damage detection of steel bridges, SHMII2021, June 30 – 2 July, 2021 Porto, Portugal.
- [3] 竹村光平, 林 徹, 金 哲佑, 吉田英二：グラウト未充填と PC 鋼材破断を模擬した PC 箱桁の耐荷性能と振動特性の変化に関する実験的検討，構造工学論文集 Vol.67A, pp.195-207, 2021. (<https://doi.org/10.11532/structcivil.67A.195>)
- [4] 近藤洋佑・林 徹・大島義信・金 哲佑：現地載荷試験に基づく PC 橋の橋梁性能および振動モニタリング，土木学会論文集 A2（応用力学）Vol.75, No.2, pp.I_51-I-I_62, 2019. (https://doi.org/10.2208/jscejam.75.2_I_51)
- [5] Michael I. Friswell, Rafael Castro-Triguero: Clustering of Sensor Locations Using the Effective Independence Method, AIAA Journal Vol. 53, No. 5, 2015.
- [6] X. Zhou, C.W. Kim, F. Zhang, K.C. Chang: Vibration-based Bayesian model updating of an actual steel truss bridge subjected to incremental damage, Eng. Str. 260: 114226, 2022. (<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114226>)

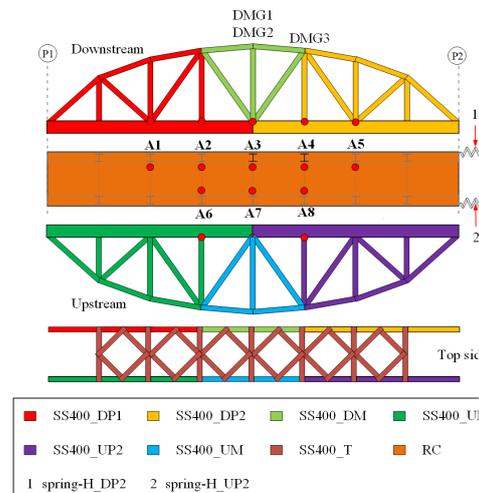


図 4-3-1 対象橋の耐荷力推定におけるモデルアップデート対象区間

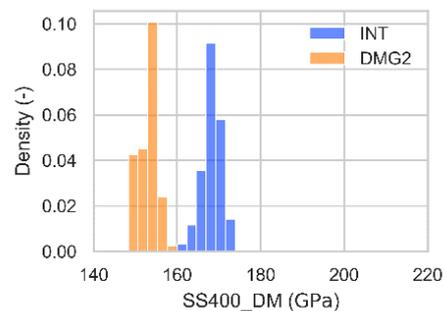


図 4-3-2 耐荷力推定結果 (SS400_DP1 区間の剛性変化)

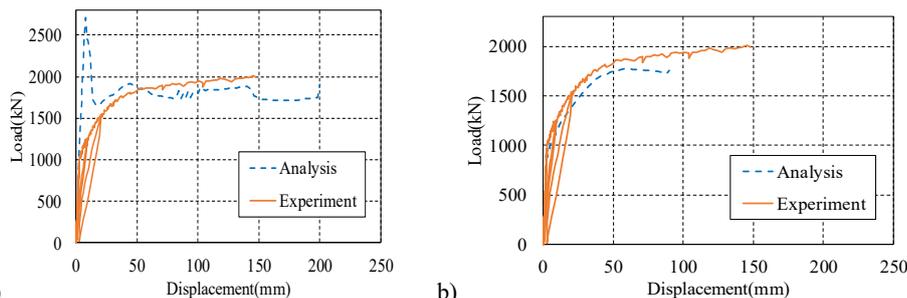


図 4-3-3 モデルアップデート後の FE モデルによる荷重—変位曲線の再現：a) 支弁バネモデル，b) 支弁バネなしモデル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22件／うち国際共著 12件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Jiang Wen-Jie、Kim Chul-Woo、Goi Yoshinao、Zhang Feng-Liang	4. 巻 8
2. 論文標題 Data Normalization and Anomaly Detection in a Steel Plate-Girder Bridge Using LSTM	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering	6. 最初と最後の頁 4021082
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1061/AJRUA6.0001203	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Cheema P.、Alamdari M. Makki、Vio G.A.、Zhang F.L.、Kim C.W.	4. 巻 491
2. 論文標題 Infinite mixture models for operational modal analysis: An automated and principled approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Sound and Vibration	6. 最初と最後の頁 115757～115757
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jsv.2020.115757	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Zhou Xin、Kim Chul-Woo、Zhang Feng-Liang、Chang Kai-Chun	4. 巻 260
2. 論文標題 Vibration-based Bayesian model updating of an actual steel truss bridge subjected to incremental damage	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Engineering Structures	6. 最初と最後の頁 114226～114226
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.engstruct.2022.114226	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 河邊大剛、五井良直、金 哲佑	4. 巻 43
2. 論文標題 供用下のPC橋梁におけるベイズ異常検知法の適用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 583-588
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 竹村 光平、林 徹、金 哲佑、吉田 英二	4. 巻 67A
2. 論文標題 グラウト未充填と PC 鋼材破断を模擬した PC 箱桁の耐荷性能と振動特性の変化に関する実験的検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集 A	6. 最初と最後の頁 195 ~ 207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.67A.195	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhang Feng Liang, Kim Chul Woo, Goi Yoshinao	4. 巻 28
2. 論文標題 Efficient Bayesian FFT method for damage detection using ambient vibration data with consideration of uncertainty	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Structural Control and Health Monitoring	6. 最初と最後の頁 112485
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/stc.2659	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kim Chul-Woo, Zhang Feng-Liang, Chang Kai-Chun, McGetrick Patrick John, Goi Yoshinao	4. 巻 26
2. 論文標題 Ambient and Vehicle-Induced Vibration Data of a Steel Truss Bridge Subject to Artificial Damage	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Bridge Engineering	6. 最初と最後の頁 4721002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001730	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhao Lei, Kim Chul-Woo, Goi Yoshinao, Takemura Kohei	4. 巻 7
2. 論文標題 Vibration-Based Damage Detection for a Prestressed Concrete Box Girder by Means of Subspace Analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering	6. 最初と最後の頁 4021056
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/AJRUA6.0001185	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Malekjafarian Abdollah, Kim Chul-Woo, OBrien Eugene J., Prendergast Luke J., Fitzgerald Paul C., Nakajima Syunsuke	4. 巻 25
2. 論文標題 Experimental Demonstration of a Mode Shape-Based Scour-Monitoring Method for Multispan Bridges with Shallow Foundations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Bridge Engineering	6. 最初と最後の頁 1~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001586	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y Zhang, CW Kim, L Zhang, Y Bai, H Yang, X Xu, Z Zhang	4. 巻 25
2. 論文標題 Long term structural health monitoring for old deteriorated bridges: a copula-ARMA approach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Smart Structures and Structures and Systems	6. 最初と最後の頁 285~299
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.12989/sss.2020.25.3.285	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Huseynov F., Kim C., OBrien E.J., Brownjohn J.M.W., Hester D., Chang K.C	4. 巻 135
2. 論文標題 Bridge damage detection using rotation measurements - Experimental validation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mechanical Systems and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 1~22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ymsp.2019.106380	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Luna Vera Oscar Sergio, Oshima Yoshinobu, Kim Chul-Woo	4. 巻 10
2. 論文標題 Flexural performance correlation with natural bending frequency of post-tensioned concrete beam: experimental investigation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Civil Structural Health Monitoring	6. 最初と最後の頁 135~151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s13349-019-00374-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ye Xiong-Fei, Kim Chul-Woo, Ogai Harutoshi	4. 巻 151
2. 論文標題 Fast damage detection using max-peak and max-peak-time for PC box girder in vibration experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Measurement	6. 最初と最後の頁 1~16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.measurement.2019.107178	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 林 巖、金 哲佑、杉浦 邦征、鈴木 康夫、日比 英輝	4. 巻 66A
2. 論文標題 材料物性値のばらつきを考慮したGFRP歩道桁橋の静的・動的応答評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 構造工学論文集 A	6. 最初と最後の頁 329~339
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.66A.329	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 廣岡拓海、林巖、金哲佑	4. 巻 28
2. 論文標題 局所的損傷と温度変化による鋼板桁橋の固有振動数変化に関する考察	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鋼構造工学シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 620~628
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Zhang, C.W Kim, J. Lin	4. 巻 19
2. 論文標題 Removing Environmental Influences in Health Monitoring for Steel Bridges Through Copula Approaches	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Steel Structures	6. 最初と最後の頁 888~895
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s13296-018-0170-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fitzgerald Paul C., Malekjafarian Abdollah, Bhowmik Basuraj, Prendergast Luke J., Cahill Paul, Kim Chul-Woo, Hazra Budhaditya, Pakrashi Vikram, O'Brien Eugene J.	4. 巻 19
2. 論文標題 Scour Damage Detection and Structural Health Monitoring of a Laboratory-Scaled Bridge Using a Vibration Energy Harvesting Device	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 2572 ~ 2572
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s19112572	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ye Xiong-Fei, Zhang Yi, Harutoshi Ogai, Kim Chul-Woo	4. 巻 189
2. 論文標題 Hierarchical probability and risk assessment for K-out-of-N system in hierarchy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Reliability Engineering & System Safety	6. 最初と最後の頁 242 ~ 260
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.res.2019.04.026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Cantero Daniel, McGetrick Patrick, Kim Chul-Woo, O'Brien Eugene	4. 巻 187
2. 論文標題 Experimental monitoring of bridge frequency evolution during the passage of vehicles with different suspension properties	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Engineering Structures	6. 最初と最後の頁 209 ~ 219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engstruct.2019.02.065	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 林 巖、五井 良直、金 哲佑、杉浦 邦征	4. 巻 65A
2. 論文標題 GFRP 下路トラス橋梁の振動特性評価および FE モデル構築に関する一検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 構造工学論文集 A	6. 最初と最後の頁 317 ~ 328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.65A.317	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 KONDO Yosuke, HAYASHI Gen, OSHIMA Yoshinobu, KIM Chul-Woo	4. 巻 75
2. 論文標題 RELATIONSHIP BETWEEN BRIDGE PERFORMANCE AND MODAL PROPERTIES BASED ON FIELD STATIC LOAD AND VIBRATION TESTS	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))	6. 最初と最後の頁 I_51 ~ I_62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.75.2_I_51	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 GOI Yoshinao, KIM Chul-Woo	4. 巻 75
2. 論文標題 UNCERTAINTY QUANTIFICATION OF ESTIMATED MODES OF BRIDGES USING BAYESIAN INFERENCE	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))	6. 最初と最後の頁 I_647 ~ I_657
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.75.2_I_647	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計52件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 33件)

1. 発表者名 横山拓海, 金哲佑, 斎藤隆仁, 池田大造
2. 発表標題 たわみを利用したBWIMによる橋梁異常検知の可能性検討
3. 学会等名 令和3年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高瀬和男, 河邊大剛, 金 哲佑
2. 発表標題 橋梁の健全度評価の必要性に関する一考察
3. 学会等名 土木学会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉岡延明, 濱田吉貞, 金哲佑, 北川慎治
2. 発表標題 常時微動の計測による河川内橋脚の固有振動数算出に関する研究
3. 学会等名 土木学会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹村光平, 金哲佑, 河邊大剛
2. 発表標題 画像解析を用いたボルトのゆるみ検知手法の開発
3. 学会等名 土木学会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Goi, C.W. Kim
2. 発表標題 Efficient time-domain modal identification of bridges based on uncertainty quantification
3. 学会等名 10th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 C.W. Kim, Y. Yoshitome, S. Kitagawa, M. Shinoda, H. Yao, Y. Hamada
2. 発表標題 Remote microtremor monitoring for scour assessment of railway bridge
3. 学会等名 10th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshiki Onaka, Yoshinao Goi, Chul-Woo Kim, Daigo Kawabe
2. 発表標題 Influence of number of sensors on Bayesian hypothesis-based damage detection of steel bridges
3. 学会等名 10th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chul-Woo Kim, Jia Qi, Shinji Kitagawa
2. 発表標題 Ambient vibration monitoring for scour assessment of a railway bridge
3. 学会等名 10th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Takemura K, C.W. Kim, G. Hayashi, E. Yoshida
2. 発表標題 Load carrying capacity and vibration characteristics of PC box girders with damage
3. 学会等名 Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xin Zhou, Feng-Liang Zhang, Kai-Chun Chang, Yoshinao Goi, Chul-Woo Kim
2. 発表標題 Bayesian model updating and damage detection of a simply-supported truss bridge based on dynamic responses
3. 学会等名 Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 W.J. Jiang , Y. Goi, X. Zhou, C.W. Kim
2. 発表標題 Ambient vibration based modal analysis and cable tension estimation for a cable-stayed bridge with Bayesian approaches
3. 学会等名 Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshinao Goi、Chul-Woo Kim
2. 発表標題 Investigation of Efficient Modal Identification of Bridges Using Bayesian Inference
3. 学会等名 XI International Conference on Structural Dynamics (EURODYN2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Chul-Woo Kim、Yosuke Kondo、Gen Hayashi、Yoshinobu Oshima
2. 発表標題 Changes in Modal Parameters and Performance of a Prestressed Concrete Bridge under Step-by-step Loading
3. 学会等名 Seventh Asia-Pacific Symposium on Structural Reliability and Its Applications (APSSRA2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Wenjie Jiang、Chul-Woo Kim、Yoshinao Goi、Fengliang Zhang
2. 発表標題 Regressions with Dummy Variable to Tackle with Environmental and Operational Influences on Long-term Bridge Health Monitoring
3. 学会等名 Seventh Asia-Pacific Symposium on Structural Reliability and Its Applications (APSSRA2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Wenjie Jiang、Chul-Woo Kim、Yoshinao Goi、Fengliang Zhang
2. 発表標題 Investigation on Temperature-Driven Pattern Recognition of Structural Health Monitoring: a Case Study
3. 学会等名 7th International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management (ISRERM2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshinao Goi、Chul-Woo Kim
2. 発表標題 Anomaly detection of bridges under varying temperature using Bayesian hypothesis testing
3. 学会等名 7th International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management (ISRERM2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹村光平、林巖、近藤洋佑、金哲佑、吉田英二
2. 発表標題 損傷劣化を模擬したPC箱桁の振動特性と耐荷特性の変化に関する実験的検討
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廣岡拓海、林巖、金哲佑
2. 発表標題 有限要素モデルを用いた局所的な損傷による振動数変化に関する考察
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近藤洋佑、林 巖、大島義信、金哲佑
2. 発表標題 現地耐力実験に基づくPC橋の振動特性と構造性能評価
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尾中貴輝、五井良直、金哲佑
2. 発表標題 ベイズ推論による橋梁の異常検知とセンサ数の影響
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村尾彩希、金哲佑、谷直彦
2. 発表標題 市民参画型の橋梁点検および意思決定に向けた検討
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹村光平、林 巖、近藤洋佑、金哲佑、吉田英二
2. 発表標題 PC箱桁におけるPC鋼材破断による振動特性と耐荷性能の変化に関する実験的検討
3. 学会等名 土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尾中貴輝、五井良直、廣岡拓海、金哲佑
2. 発表標題 ベイズ仮説検定による鋼鈹桁橋の局所損傷検知とセンサの数の影響
3. 学会等名 土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Qi Jia、金哲佑、吉留一博、濱田吉貞
2. 発表標題 Identification of soil stiffness of railway bridge pier from vibration monitoring and finite element update
3. 学会等名 土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廣岡拓海、林巖、金哲佑
2. 発表標題 局所的な損傷と境界条件の変化が鋼鈹桁橋の固有振動数に及ぼす影響
3. 学会等名 土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Hirooka, C.W. Kim, G. Hayashi and Y. Goi
2. 発表標題 Vibration monitoring of a real steel plate girder bridge under artificial local damage and varying temperature
3. 学会等名 The 16th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC16) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 A. Long, C.W. Kim, and Y. Kondo
2 . 発表標題 Detecting loosening bolts of highway bridges by image processing techniques
3 . 学会等名 The 16th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC16) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 C.W. Kim, T. Hirooka, Y. Goi, G. Hayashi, T. Mimasu
2 . 発表標題 Influence of local damage and change in boundary condition on frequency changes of a steel plate girder bridge
3 . 学会等名 PSSC2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Xin Zhou, Chul-Woo Kim, Yoshinao Goi, Gen Hayashi, and Haru Hiraide
2 . 発表標題 Vibration test and system identification of Gerber-type steel plate girder bridge
3 . 学会等名 The 32th KKHTCNN Symposium on Civil Engineering (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Ahmed Mohamed Waheed and C.W. Kim,
2 . 発表標題 Benefits of Implementation of Building Information Modelling (BIM) in Bridge Projects
3 . 学会等名 The 32th KKHTCNN Symposium on Civil Engineering (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Hirooka, C.W. Kim, G. Hayashi and Y. Goi
2 . 発表標題 Changes in Modal Frequencies and Structural Behavior at Supports on a steel plate girder bridge Caused by Local Damage and Varying Temperature
3 . 学会等名 The 32th KKHTCNN Symposium on Civil Engineering (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Yoshinao Goi and Chul-Woo Kim
2 . 発表標題 Vibration-Based damage detection of steel Bridges Using Bayesian Hypothesis Testing
3 . 学会等名 The 29th European Safety and Reliability Conference (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 C.W. Kim, Y. Goi, T. Mimasu
2 . 発表標題 Damage experiment on a steel plate girder bridge and local damage detection utilizing traffic-Induced vibration
3 . 学会等名 SMAR2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Kitagawa, M. Shinoda, H. Yao, C.W. Kim, Y. Goi, K. Yoshitome, Y. Hamada,
2 . 発表標題 Remote microtremor monitoring of railway bridge pier for scour detection
3 . 学会等名 SMAR2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 O.S. Luna Vera, Y. Kondo, C.W. Kim, Y. Oshima, S. Nishiyama
2 . 発表標題 vibration monitoring and damage experiment on a prestressed concrete bridge
3 . 学会等名 SEMC2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Kitagawa, M. Shinoda, H. Yao, C.W. Kim, K. Yoshitome,
2 . 発表標題 Vibration-based remote Scour monitoring for railway bridge
3 . 学会等名 SEMC2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 C.W. Kim, Y. Goi, M. Kawatani
2 . 発表標題 Damage experiment on a steel plate girder bridge and vibration based damage detection
3 . 学会等名 SEMC2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 C. W. Kim, T. Mimasu, Y. Goi, G. Hayashi
2 . 発表標題 Investigations on Increase and Decrease of Frequencies of a Steel Plate Girder Bridge due to Artificial Cracks
3 . 学会等名 SHMII-9 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Yoshitome, C.W. Kim, Y. Goi, S. Kitagawa, M. Shinoda, H. Yao and Y. Hamada
2 . 発表標題 Vibration-based long-term scour monitoring for an in-service railway bridge
3 . 学会等名 SMART 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Yosuke Kondo, Yoshinobu Oshima and Chul-Woo Kim
2 . 発表標題 Vibration monitoring on a PC bridge during a bridge collapse test
3 . 学会等名 SMART 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Chul-Woo Kim, Takumi Hirooka, Takuya Mimasu, Gen Hayashi and Yoshinao Goi
2 . 発表標題 Changes in modal frequencies of a steel plate girder caused by local damage and thermal expansion
3 . 学会等名 SMART 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Saki Murao, Yasutoshi Nomura, Hitoshi Furuta, Chul-Woo Kim
2 . 発表標題 Concrete Crack Detection Using UAV and Deep Learning
3 . 学会等名 13th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP13) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Chul-Woo Kim, Kazuhiro Yoshitome, Masaki Shinoda, Shinji Kitagawa, Masahiro Kondo, Siu-Kui Au
2. 発表標題 Feasibility investigations for vibration-based remote scour monitoring of railway bridges
3. 学会等名 13th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP13) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chul-Woo Kim, Oscar Sergio Luna Vera, Yousuke Kondo, Yoshinobu Oshima
2. 発表標題 Vibration monitoring on a PC girder bridge during a bridge collapse test
3. 学会等名 13th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP13) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xinda Ma, Yoshinao Goi, Chul-Woo Kim
2. 発表標題 Vector Autoregressive-based Structural Identification Method by Means of Bayesian Inference
3. 学会等名 13th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP13) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshinao Goi, Chul-Woo Kim
2. 発表標題 Bayesian Damage Detection for Bridges under Noisy Condition
3. 学会等名 13th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP13) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤 洋佑, 林 徹, 大島 義信, 金 哲佑
2. 発表標題 実PC橋の載荷実験に基づく耐荷性能と振動特性の推移に関する研究
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉留 一博, 金 哲佑, 五井 良直, 濱田 吉貞, 北川 慎治, 篠田 正紀
2. 発表標題 常時微動モニタリングによる鉄道橋の洗掘評価に関する検討
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤 洋佑・林 徹・大島 義信・金 哲佑
2. 発表標題 現地載荷実験に基づくPC橋の橋梁性能および振動モニタリング
3. 学会等名 第22回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 五井 良直, 金 哲佑
2. 発表標題 ベイズ統計を用いた橋梁の振動モード同定の効率化に関する検討
3. 学会等名 第22回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉留 一博, 金 哲佑, 五井 良直, 篠田 正紀, 北川 慎治, 濱田 吉貞
2. 発表標題 鉄道橋脚における振動モニタリングを用いた洗掘評価
3. 学会等名 第22回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣岡 拓海, 三増 拓也, 林 巖, 五井 良直, 金 哲佑
2. 発表標題 鋼鈹桁橋における橋梁桁端の模擬き裂による振動数変化に関する力学的考察
3. 学会等名 平成31年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

構造ヘルスモニタリングの高度化のためのベイズ型構造同定と情報融合の提案 (基盤B) http://infra.kuciv.kyoto-u.ac.jp/research/fund.html
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	五井 良直 (Goi Yoshinao) (30831359)	京都大学・工学研究科・助教 (14301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	張 凱淳 (Chang Kai-Chun) (50751723)	京都大学・工学研究科・講師 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	Tsinghua University	Harbin Institute of Technology, Shenzhen		
英国	University of Nottingham	University of Exeter	Queens University Belfast	
アイルランド	University College Dublin	National University of Ireland Galway		
ノルウェー	NTNU			
インド	Indian Institute of Technology, Guwahati			
オーストラリア	University of New South Wales			