

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820203

研究課題名(和文) ベイズ推定モデルキャリブレーション法の確立とその橋梁動的耐震設計への適用性検討

研究課題名(英文) Application of Bayesian model calibration to numerical modeling of existing bridges for seismic design

研究代表者

西尾 真由子(Nishio, Mayuko)

横浜国立大学・都市イノベーション研究院・准教授

研究者番号：00586795

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：既存橋梁の妥当な数値モデルを構築するには、経年変化の影響も含むモデルパラメータ、すなわち材料定数や境界条件の不確定性を考慮する必要がある。本研究ではこれに、振動等の計測データからベイズ推定にて得るモデルパラメータ事後確率分布を用いる有効性を示した。特に、既存橋梁の耐震補強設計で用いるモデルの不確定性評価、また老朽化する橋梁の性能評価計算に事後分布を活用できることを、実橋梁での検証と実験にて示した。

研究成果の概要(英文)：In the modeling of existing bridges, the uncertainties of model parameters due to deteriorations, seismic loading histories, and other factors during their operations must be considered to obtain validated numerical models for several applications, such as the seismic reinforcement design, the reliability analysis of existing bridges. In this study, the applicability of posterior distributions of model parameters, which were derived by the Bayesian inference by using measurement dynamic data, to those applications in the existing bridges was shown by several verifications with actual target bridges and the experimental study.

研究分野：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：既存橋梁 有限要素モデル 事後分布 ベイズ推定 モデルV&V 橋梁振動 計測

1. 研究開始当初の背景

既存橋梁の諸問題への検討に、数値解析のはたす役割が大きくなっている。例えば、地震が頻発する我が国では既存橋梁の耐震補強工事が進められており、現在の耐震設計基準では動的解析、すなわち設計地震動に対する時刻歴応答解析での応答による照査が求められている。このとき、対象となる既存橋梁の数値モデルの妥当性は、解析結果の妥当性を保障するために大変重要となる。

しかし我が国の既存橋梁は、その多くがすでに実環境下で数十年供用されてきているため、経年劣化や損傷、過去の地震履歴などにより、不確定性の高い構造変化が起きている可能性がある。よって、それらの数値モデル構築においても、材料特性や寸法、境界条件といった構造パラメータに対して、もともとのばらつき・不確定性に加え、劣化損傷などによる把握困難な不確定性を考慮する必要がある。実際に、コンクリートのひび割れや鋼材の腐食などによって材料定数（密度や剛性）が変化すること、また鋼製支承（境界条件を与える部材）では腐食等による機能低下が生じ、構造の境界条件が新設時から変化することが指摘されている。

現状では、このような既存構造物の数値モデルを作成する際には、実構造物で例えば固有振動数などの計測データが得られる場合、それに近づくよう構造パラメータを経験的に調整する方針がとられることが多い。しかし、その固有振動数にしても、寸法・材料定数・境界条件と複数の構造パラメータが影響因子であり、そして各々が不確定性を持つ。このような中で、現状の経験的にパラメータを調整する方法では、モデルの妥当性を保障することは非常に困難である。

さらに、既存橋梁の数値モデルを構築する際には、新設時の設計とは異なり、改めてモデル化の方針から検討しなければならないことが多い点も、無視できない。例えば、耐震設計において、設計地震動に対する時刻歴応答解析を行う場合、新設橋梁では梁要素による全橋骨組みモデルや、橋脚の質量集中モデルを用いることが一般的であり、設計基準である道路橋示方書等にも、それらによる照査方法が示されている。しかし、既存橋梁の時刻歴応答解析では、例えば腐食など局所的な状態変化を伴う場合、それが照査結果に影響を与える可能性も考慮してモデル化を行うために、シェル要素やソリッド要素の適用も検討する必要がある。

このように、既存橋梁の諸問題に対して数値解析による検討を行う際には、その解析目的に応じたモデル構築を行い、経年変化による不確定性を考慮した妥当なモデルを用いる必要がある。すなわち、数値解析の不確定性を定量的に取り扱い、品質保証を行う「モデル V&V (Verification & Validation)」が必要である。本研究の開始当初、機械工学や原子力工学分野では、このモデル V&V への検討

が既に始まっていた。しかし、土木構造工学分野ではモデルの妥当性や不確定性に関する検討で、V&V すなわち品質保証プロセスを構築するという観点での取り組みはなかった。さらに、モデル V&V において、既存構造物の不確定性に着目した研究は、国内外でも少ない状況であった。

そのような中で研究代表者は、既に既存橋梁のモデル V&V に関する研究を始めており、特にベイズ推定により構造モデルパラメータの事後確率分布をもとめ、実構造物の応答に基づく妥当なモデル構築を行おうとする研究を行ってきていた。ベイズ事後分布推定は、図 1 に示す流れで、対象橋梁の数値モデルパラメータの初期不確定性として与えられる事前確率分布に、実橋梁で得る計測データの尤度関数をかけることで、不確定性が低減された事後分布を得る。このベイズ事後分布推定によって、既存橋梁の劣化状態も考慮してモデルパラメータの不確定性を評価できれば、耐震補強設計でのモデル化など、既存橋梁の諸問題での数値解析検討に活用できると考えた。

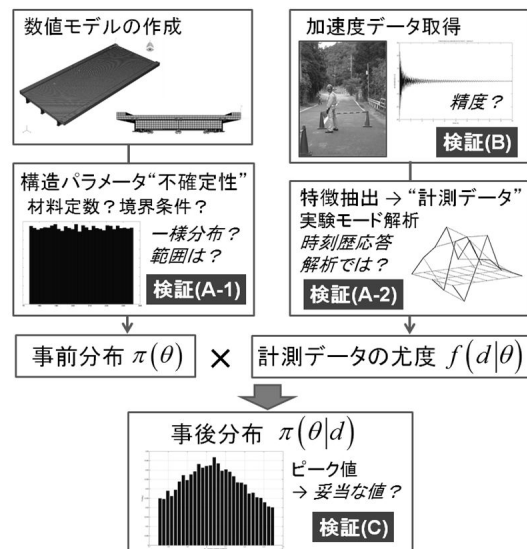


図 1: 既存橋梁モデルパラメータのベイズ事後分布推定の流れ

2. 研究の目的

以上の背景より本研究の目的は、特に経年劣化による不確定性の取り扱いに着目した、モデルパラメータのベイズ事後分布推定による既存橋梁モデル妥当性評価法の確立とした。さらに、数値解析が重要な役割を担う既存橋梁の諸問題、特に耐震補強設計で用いるモデルの V&V、および、既存橋梁の性能評価への展開を念頭に、事後分布の有用性を明確に示す研究を行うこととした。

3. 研究の方法

本研究では、実橋梁を対象とした検証と実験による検証を行った。実橋梁での検証は、各検証項目に合わせて計 3 つの橋梁を対象と

することができ、それぞれ橋梁管理者の協力を得て、主に加速度センサを用いた振動計測を実施し、ベイズ事後分布推定の計測データとして検証に用いた。さらに、各検証項目に応じて、設計図面を用いた有限要素モデル構築、劣化状況を考慮するための橋梁点検台帳の活用、そして耐震補強設計の計算書の活用も行った。実験は、実橋梁において劣化の促進を行うことはできなかったため、橋梁の桁桁と鋼支承の模型供試体を作製し、腐食促進実験を行い、構造物の劣化過程での逐次事後分布推定と、モデルの妥当性評価に関する基礎検証を行った。各検証の具体的な方法は、次の各検証成果の中で合わせて説明する。

4. 研究成果

(1) 既存橋梁モデルパラメータのベイズ事後分布推定における事前分布設定に関する検証

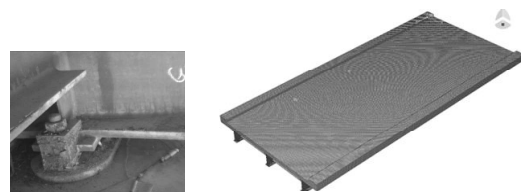
一般的にベイズ推定は、事前分布の設定が事後分布推定結果に影響を与える。本研究での事前分布は、既存橋梁の経年変化に対する不確実性を含めて表すが、ただ不確実性が大きいからと無情報一様分布にすることは適切ではない。この検証では、橋梁モデルパラメータにおける事前分布の設定が、事後分布推定結果に与える影響を明らかにし、既存橋梁の劣化損傷に対して、どのように事前分布を与えることが適切であるか、明らかにすることとした。

検証では、図2(a)に示す、鋼製支承に腐食がみられ機能低下の可能性が認められた実橋梁を対象とした。有限要素モデル(図2(b))では、仮想バネの導入により支承機能低下を表現し、そのバネ定数事前分布範囲や確率分布形状が、事後分布推定結果に与える影響を調べた。実橋梁で取得した固有振動数を計測データとし、桁の材料定数および支承機能を表す仮想バネの事後分布をもとめた。このとき、モデル作成者がとりうる不確実性への認識について2つのシナリオを設定し、それぞれ事前分布設定において、同じ計測データを用いた際の事後分布推定結果を比較した。

その結果、各モデルパラメータ事前分布の設定に、既往の統計データや劣化損傷に関する知見、また支承機能低下と仮想バネ定数の関係に関する事前検討結果を反映させることで、より妥当な事後分布を導出できることを示した。図3に、事前分布を適切に設定した場合に得られた事後分布を示す。K2-G1/G2/G3が支承機能を表す仮想バネ定数の事後分布であり、高い値に頻度が偏る分布が得られていることがわかる。このことから、適切な事前分布の設定によって、可動支承の腐食による固着傾向を捉えることができた。

(2) 橋梁支承の腐食劣化過程を対象とした逐次事後分布推定法の確立

橋梁の定期点検において、損傷が多く認められる部材の1つが、(1)でも取り扱った



(a) 支承の腐食 (b) 有限要素モデル
図2: 事前分布設定に関する検証の対象橋梁支承部の様子と構築した数値モデル

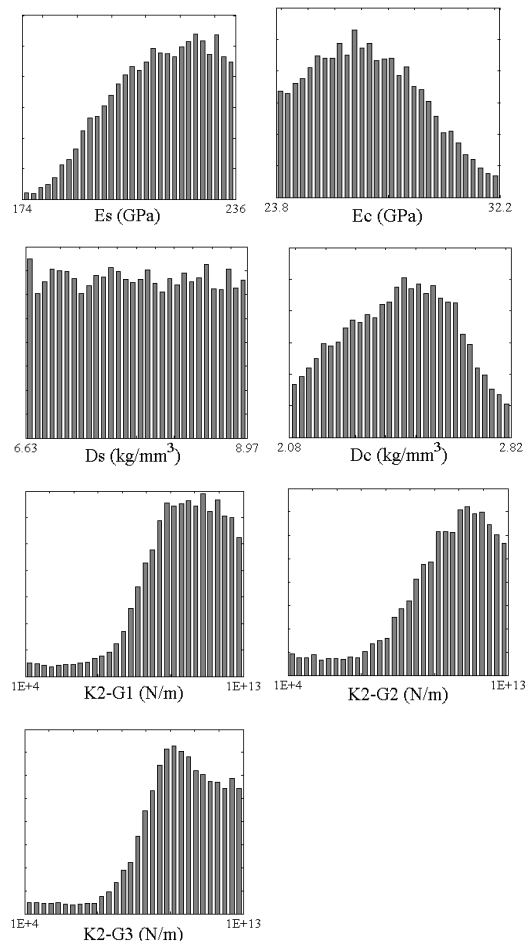


図3: モデルパラメータ事後分布推定結果(横軸範囲が事前一様分布範囲)

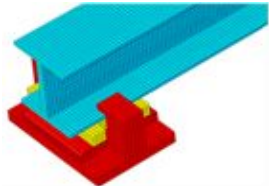
鋼製支承の腐食である。本検証では、支承での腐食進展により変化する、支承部構造パラメータの変化を適切に事後分布で評価するために、逐次事後分布推定法を提案し、その有効性を示すことを目的とした。具体的には、劣化進展の各時点で、逐次適切な事後分布推定を行うための、事前分布の設定方法を示した。図4に示す、鋼製支承とI桁からなる模型供試体を作製し、塩水噴霧による腐食促進を行った。そして供試体の有限要素モデルに腐食過程の各時点で取得した振動とひずみの計測データにより、事後分布推定を行った。

その結果、目視による劣化状況や鋼部材の摩擦に関する知見を用い、さらに劣化過程の中で前時点での事後分布推定結果を踏襲する事前分布設定により、図5に示すように、

支承部の劣化進展過程を，支承部摩擦係数の事後分布で適切に把握でき，その事後分布の平均値・最頻値から各時点での適切なモデルを得ることができることを示した．

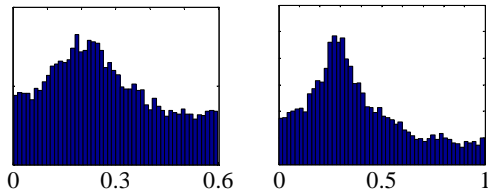


(a) 梁模型実験の様子



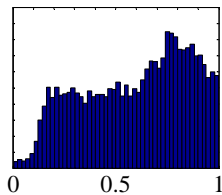
(b) 梁模型の有限要素モデル

図 4: 実験によるデータ取得の様子と数値モデル



(a) 腐食前

(b) 腐食第 1 段階



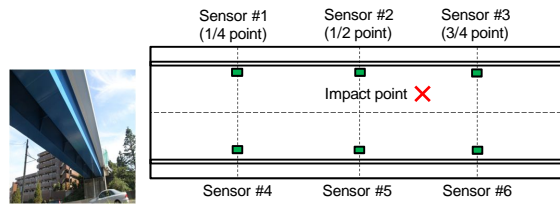
(c) 腐食第 2 段階

図 5: 上沓下沓摩擦係数の逐次事後分布推定結果

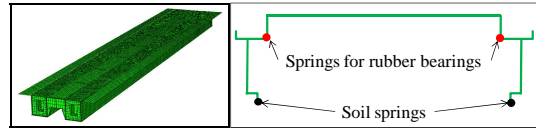
(3) モデルパラメータ事後分布推定におけるモデル化の影響に関する検証

研究の背景にも示したように，既存橋梁のモデル構築では，劣化を含む実際の状態と目的とする解析応答の関係を考慮して，多様なモデル化を検討する必要がある．この検証では，実際に耐震補強工事が行われた，図 6(a) に示す実橋梁を対象橋梁とした．図 6(b) に示すように，その耐震設計で実際に用いられた梁要素によるモデルと，シェル要素による詳細なモデルを作成し，同じ計測データを用いたときの事後分布推定結果を比較した．

梁モデルのパラメータは，道路橋示方書に示される換算式などによって決められており，ここには複数の特性値が用いられている．このような場合，各材料定数のばらつきなどを合成して考慮するために，不確定性の伝播による事前分布設定の方法を示した．その上

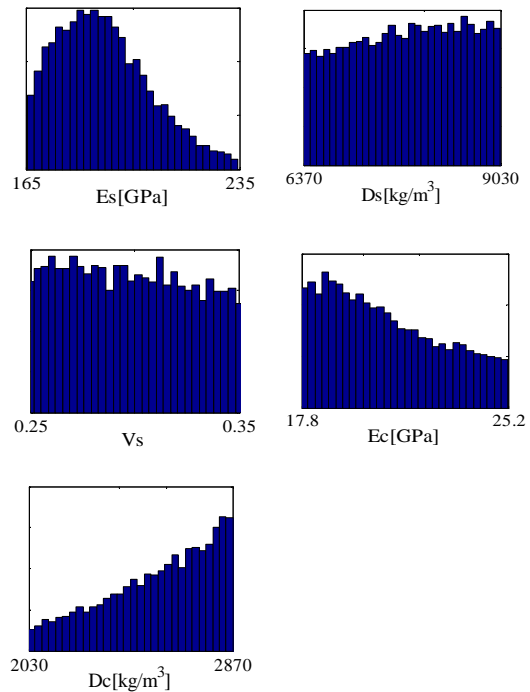


(a) 対象実橋梁での振動実験の概要

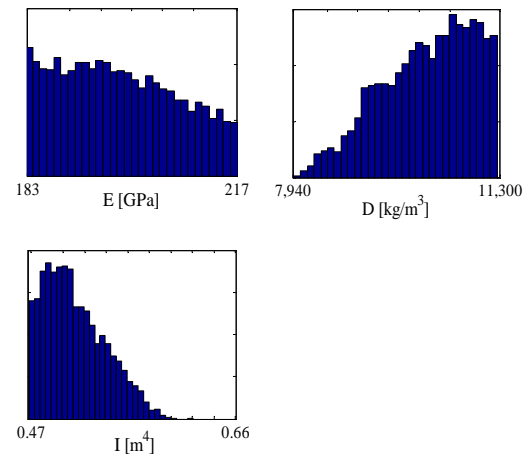


(b) 同一橋梁の異なるモデル化

図 6: 実橋梁検証における計測と数値モデル



(a) 詳細モデルでの事後分布 (桁ヤング率 E_s , 桁密度 D_s , 桁ポアソン比 V_s , 床版ヤング率 E_c , 床版密度 D_c)



(b) 梁モデルでの事後分布 (上部工梁ヤング率 E , 上部工梁密度 D , 上部工梁断面 2 次モーメント I)

図 7: 各モデル化による事後分布推定結果比較

で、実橋梁での振動試験で得た同じ固有振動数データを用いて、各モデルでパラメータ事後分布を推定し比較した。その結果を図7に示す。すると、桁の曲げ剛性に寄与するパラメータではどちらも高い値に頻度が高くなる事後分布が得られ、一方で桁の質量に関係するパラメータでは、事後分布が事前分布範囲の中で小さい値に頻度が偏る分布が、どちらのモデルでも得られた。

事前分布を不確定性の伝播を考慮して適切に設定することで、梁モデルと詳細モデルで整合性のある事後分布推定結果が得られることを示した。この不確定性の伝播による事前分布設定によって、さまざまなモデル化に対応して経年劣化等の不確定性を考慮し、事前分布設定が行えることを示した。

(4) 事後分布を用いた既存橋梁の耐荷性能評価への展開

本検証は、ベイズ事後分布推定を既存橋梁の性能評価に用いる有効性を示すことを目的として行った。検証で対象とした橋梁は、図8に示す6主桁の鋼鈹桁橋で、定期点検で支承部や桁への腐食と、床版のひび割れが確認されていた。この対象橋梁の詳細な有限要素モデルを構築し、定期点検データに基づきモデルパラメータの事前分布を設定し、実橋梁で取得した振動特性データを用いて、ベイズ事後分布推定を行った。得られた事後分布は図9に示す通りであり、これらは定期点検で得られていた知見、例えば各主桁での腐食度合いの違いが対応するものであった。

事後分布でモデルパラメータの不確定性が確率分布で与えられていれば、その不確定性のもとでの性能評価を、信頼性指標 β の計算から行うことができる。得られた事後分布をモンテカルロ計算にそのまま用いて、設計活荷重を作用させた際の桁端部での最大応力(図10)の分布をもとめた。比較のために、事前分布を用いた際の最大応力分布も求めた。図11中には、事前分布と事後分布をそれぞれ適用した際の、最大応力分布(対数正規分布)を重ねて示した。その上で、同じく図11中に示した鋼部材の降伏応力分布に対する信頼性指標 β を、事前分布・事後分布それぞれのケースで導出した。その結果、事後分布からの信頼性指標 β は、事前分布からの β 値よりも大きい値となり、不確定性を低減した事後分布を用いることで、過度に性能を低く評価しなかったことを示した。

この結果から、モデルパラメータのベイズ事後分布を性能評価に用いることで、対象橋梁の状態を適切に反映した性能評価を確率的に行えることを示した。

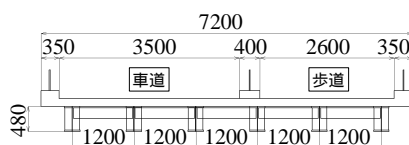


図8: 対象橋梁断面

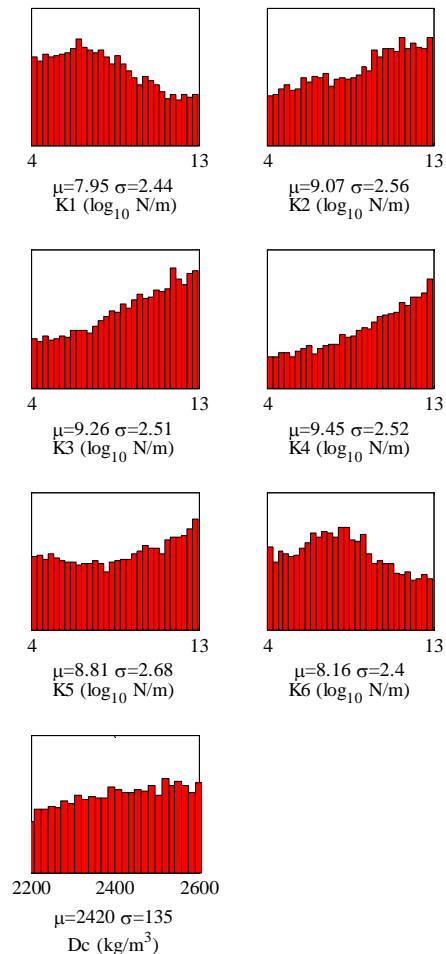


図9: 事後分布推定結果

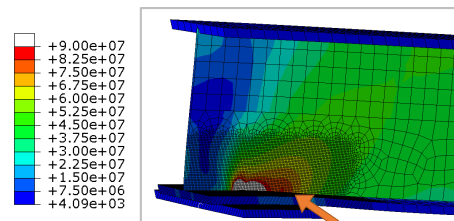


図10: 活荷重載荷時の桁端部ミーゼス応力分布

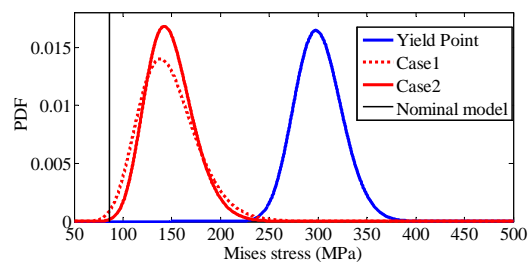


図11: 鋼降伏応力分布(青線)に対する設計活荷重載荷時の最大応力分布(赤実線:事後分布, 赤点線:事前分布)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

西尾真由子, 人見淳, 橋梁支承の腐食劣化過程を対象としたモデルパラメータ事後分布逐次推定に関する基礎研究, 土木学会論文集 A2, 査読有, Vol.71, No.2, I_99-I_108, 2015.

DOI: http://doi.org/10.2208/jscejam.71.I_99
西尾真由子, 水野圭太, 勝地弘, 山田均, "分布型光ファイバセンサを用いた橋梁支承モニタリングに関する基礎検討," 構造工学論文集, 査読有, Vol.60A, pp.484-492, 2014. URL:

https://www.jstage.jst.go.jp/article/structcivil/60A/0/60A_484/_article/-char/ja/

西尾真由子, 藤野陽三, "ベイズ推定による既存構造物数値モデルの不確定性定量化とキャリブレーション" 土木学会論文集 A2, 査読有, Vol.69, No.2, I_711-I_718, 2013.

DOI: http://ci.nii.ac.jp/lognavi?name=crossref&id=info:doi/10.2208/jscejam.69.I_711.

〔学会発表〕(計 6 件)

黒田璃紗, 西尾真由子, "既存鋼鈹桁橋のモデルパラメータ事後分布を用いた信頼性評価," 平成 28 年度土木学会全国大会第 71 回年次学術講演会, 2016 年 9 月。(発表予定)

西尾真由子, 川口裕士, 人見淳, 既存橋梁の諸問題に取り組むための数値モデル V&V に関する検討, 第 8 回構造物の安全性・信頼性シンポジウム, 2015 年 10 月.

Nishio M., Kwaguchi Y., "Uncertainty quantification and calibration of dynamic models of existing bridges considering difference of modeling strategy," IABSE conference, Nara, May 2015.

川口裕士, 西尾真由子, "モデル化の違いに着目した既存橋梁動解析モデルのベイジアンキャリブレーション," 平成 26 年度土木学会全国大会第 69 回年次学術講演会, I-533, 大阪, 2014 年 9 月.

Nishio M., Fujino Y., "Application of model uncertainty quantification to bridge condition assessment using dynamic test data," 6th World Conference on Structural Control and Monitoring, Barcelona, July 2014.

Nishio M., Onishi T., Katsuchi H., Yamada H., "Bayesian inference based model calibration for dynamic analysis of seismic isolated bridges," The 9th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA USA, September, 2013.

〔その他〕(計 1 件)

Mayuko Nishio, Charles Farrar, Francois Hemez, Chris Stull, Gyuhae Park, Phil Cornwell, Eloi Figueiredo, DJ Luscher, Keith Worden, "Feature Extraction for Structural Dynamics Model Validation," Los Alamos National Laboratory Report, LA-UR-16-20151, Los Alamos National Laboratory, Jan 2016.

URL:<http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-16-20151>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

西尾 真由子 (NISHIO, Mayuko)

横浜国立大学・大学院都市イノベーション

研究院・准教授

研究者番号：00586795