

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K06235

研究課題名(和文)低次元化モデルを併用した連結走行体と走行路の耐震性能向上技術の開発

研究課題名(英文)Technology Development of Upgrading Seismic Capacity of Connected Vehicle and Running Road using Reduced-order-model

研究代表者

新谷 篤彦 (Shintani, Atsuhiko)

大阪公立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90295725

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)：1車両を21自由度でモデル化し、10車両で計210自由度の連結走行体モデルを作成した。また、上下左右前後各1自由度の走行路モデルを作成した。この走行体・走行路連成系に対してスパースモデリングの考え方を利用して連結車両の低次元化モデルを作成した。車両ごとの質量変化を考慮した連結車両ではおおよそ30-40モードの低次元化モデルで、転倒の指標や車両の主な変位は概ね表現できることが分かった。その他の車両の詳細な振動状況はオリジナルモデルでの検討が必要と分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スパースモデリングの考え方を走行路と連結走行体の耐震性解析に導入し、モデルの低次元化を図ることと、走行路と走行体の相互作用の検討を行うことが新しい。低次元化モデル、オリジナルモデルをうまく使い分けることにより、効率の良い地震応答解析を行い、実際の走行路建設前に連結走行体の安全性を検討できる点は大変重要である。また本研究で得られた低次元化の方法を、走行体以外の様々な大規模構造物のモデル低次元化にも適用できる。

研究成果の概要(英文)：A vehicle model is described by 21 degree of freedom model. And totally 210 degree of freedom model for 10 connected vehicles was made for the connected vehicle. In addition, a running road model with one degree of freedom each for vertical, horizontal and longitudinal directions was made. A reduced-order-model of the connected vehicle was created using the concept of sparse modeling for this vehicle-road coupled system. It was found that the 30-40 mode reduced-order-model of the connected vehicle considering the mass change for each vehicle can express the overturn index and the main displacements of the vehicle. It was found that it was necessary to examine the other detailed vibrational behaviors of vehicles using the original model.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：機械力学・制御 交通工学・国土計画 地震 減災 耐震

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

世界的動向として、経済効率の追求は益々加速し、それに伴ってあらゆる物資や人の輸送速度は高速化する傾向にある。そのため列車の速度は 500km/h の超高速に突入しようとしている。また、輸送量増加のため車両は連結され長大化していく。一方、近年巨大地震が多発するとともに、地球温暖化の影響により台風やハリケーンの規模も巨大化しつつあり、地震外力や風荷重が巨大化しつつある。従って、連結走行体が巨大外力を受けることにより、脱線、転覆する危険性が增大しつつあると言え、甚大な被害の発生が懸念されている。事実、新潟県中越地震では走行中の新幹線が脱線を起こし、大きな被害が発生した。このような社会状況の中、大事故を未然に防ぐためには、走行時の連結走行体が地震を受ける時の動的な安定性解析が重要となると言える。また、連結走行体は橋梁上や柔らかい地盤上を通行する際に地震入力を受けた場合、その地震応答は大きく変化する可能性がある。そのため走行体の地震応答を検討する際、走行路の影響を考慮する必要がある。

従来、高速走行体の安定性に関わる研究は、地震力は検討されているが、連結車両については検討されていない。58 自由度系の複雑な車両モデルで正弦波加振時の車両の振動挙動について検討している研究もあるが、自由度の大きいモデルはパラメータによる影響が複雑になり、挙動の特徴を把握することが難しくなる。海外でも同様な研究が行われているが、連結走行体の大規模な地震時の動的応答に関するものは見られない。また、走行体の地震応答解析における走行路の影響はほとんど考えられていない。

これまで、研究代表者らはこのテーマに関係する研究を始めており、基礎検討として 1 車両の半分をモデル化し、転覆危険率を主な指標として、動ストッパと呼ばれる支持構造の非線形特性を考慮した車両の地震時走行中の挙動を調べ、支持構造の影響が非常に大きいことを確認している。またその結果を受け、1 車体、2 台車、4 輪軸からなる計 21 自由度の 1 車両の高速走行体のモデル化並びに安定性の検討を行い、地震時に走行体がどのような挙動を示すかを調べ、1 車両モデルの基礎的な知見が得られた。これらの結果を発展させ、車両モデルの低次元化の検討をはじめつつある。しかしながら低次元化においては各モードの重要性を考えて試行錯誤的に次数を減らしているのが現状である。この手法をそのまま多車両モデルに導入することは難しく、多車両ではある程度簡便に低次元化されることが望まれる。

2. 研究の目的

日本では近年、大きな地震が多発している。鉄道車両の多くは旅客や品物を輸送するために超高速化、多車両化されてきている。そのような連結走行体が高速走行中に大規模地震を受けると大きな被害が予想される。また、連結走行体の自由度は非常に大きくなっており、そのままでは解析の見通しが立ちにくく、低次元化されたモデルが必要となる。さらに走行体の応答は走行路の影響を大きく受けるため、走行路の影響を検討する必要がある。低次元化モデルでの解析はオリジナルのモデルでの解析に比べ簡単になるが、近似しているため次元の小さい低次元化モデルでの解析結果はオリジナルのモデルでの解析結果とは異なる可能性がある。

そのため、連結走行体の低次元化モデルとオリジナルモデルをうまく使い分けて、走行路の影響を考慮した連結走行体の地震時の応答挙動を調べ、地震時走行安定性を向上することが緊急の課題である。

本研究では、(i) 連結体の特性を考慮した低次元化モデルの作成、(ii) 走行路のモデル化、(iii) 走行路を考慮した高速走行体の耐震性の検討、に的を絞り研究をすすめる。

3. 研究の方法

本研究は 6 か年で行った。

(i) 連結体の特性を考慮した低次元化モデルの作成 [平成 29 年度]

まず、連結車両のモード解析を行い、連結車両の運動、車両のパラメータや乗客の影響、刺激係数などを再検討する。さらに情報や学習の分野で用いられるスパースモデリングといわれる低次元化法を連結走行体に導入すると、さらなる低次元化、効率化が図れると推測される。また、安定判別図などを用いて、オリジナルのモデルでの解析と比較を行い、精度検証、適用範囲を検討する。

(ii) 走行路のモデル化 [平成 30 年度]

高速走行体の耐震性を調べるためには走行体の走行路の特性が大きな影響を与える。一番車両に近いレールの状態や橋梁などの特性さらには地盤の影響などをモデル化し走行路と走行体の相互作用を検討する。

(iii) 走行路を考慮した高速走行体の耐震性の検討 [令和元年度～4 年度]

(i)、(ii) でおおむね完成した(オリジナル・低次元化)走行体・走行路連成モデルを用いて地震時の応答を調べる。まずは走行体の低次元化モデルと走行路の連成モデルから種々の簡易検

討を行い、耐震性の傾向を知る。そのうち、オリジナルの走行体と走行路の連成モデルから低次元モデルで検討できない詳細な点の検討を行う。

4. 研究成果

(1) 連絡走行体のモデル化

本研究で用いた車両の解析モデルを図1, 2に示す。図1は車両モデルである。1車両モデルは1つの車体(Body), 2つの台車(Truck), 4つの輪軸(Wheelset)の計7剛体で構成される。本研究においては、車体は5自由度, 台車は4自由度, 輪軸は2自由度を有することになり、1車両当たりの自由度は21自由度となる。また、本研究では10両編成の編成車両を扱うため、編成全体の自由度は210自由度となる。また、車体と台車, 台車と輪軸は前後・左右・上下のばね・ダンパで接続され、レールは地面と一体として扱う。

図2は連結車両を側面から見たときの連結器モデルである。連結器は前後・左右・上下方向のばね・ダンパで構成されており、前後の車両を接続するように設けられている。

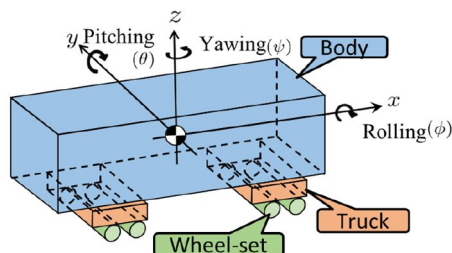


図1 車両モデル

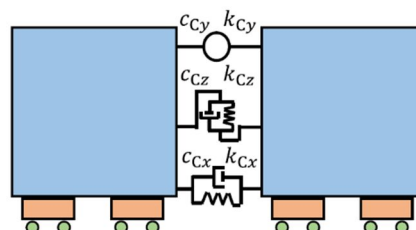


図2 連結器モデル

(2) 走行路のモデル化

図3は正面から見た走行路モデルである。本研究では走行路としてプレストレスト鉄筋コンクリート橋を考慮する。走行路モデルは前後・左右・上下の質量・バネ・ダンパで構成される。本研究では半径2500mの曲線軌道を想定した走行路モデルを取り扱う。これら車両モデル, 連結器モデル, 走行路モデルを連成させ、解析を行った。固有振動数は水平方向に2.7Hz, 鉛直方向に3.1Hzとして解析を行う。本研究では走行路を考慮しない場合と走行路を考慮する場合の両方について考える。地震波として新潟県中越地震(2004, 以下「新潟地震」と表現), 熊本地震(2016), 東北地方太平洋沖地震(2011, 以下「東北地震」と表現)の観測データを用いる。

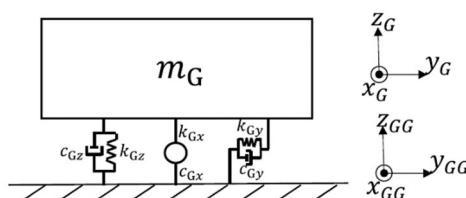


図3 走行路モデル

(3) スパース推定による低次元化モデルの作成方法

本研究では、モード抽出にあたり Lasso の推定法を用いる。(1)式のように目的関数 $R_\lambda(a)$ を定め、 $R_\lambda(a)$ が最小となるときの係数行列 $\{a\}$ を求める。

$$R_\lambda(a) = \frac{1}{2} \int_0^{t_{\max}} \|\{Y\}\{q(t)\} - \{Y\}\{a\}\|_2^2 dt + \lambda \|\{a\}\|_1 \quad (1)$$

調整パラメータ λ を小さくすると $\{a\}$ の 0 でない要素は増え、 λ を大きくすると $\{a\}$ の 0 でない要素は減るという性質があることから、 λ の値を徐々に小さくしていき、係数が 0 でないモードを順に抽出する。この手法により比較的簡便に低次元化ができる。

(4) 低次元化モデルの評価の方法

低次元化モデルがオリジナルモデルを再現出来ているかの指標として、ここでは図4に示すような転倒の指標である輪重減少率の時刻変化を用いる。低次元化モデルの輪重減少率の時刻変化が、オリジナルモデルのそれと良い一致をしていれば、車両の転倒の危険性を再現出来ているとみなす。また、低次元化モデルとオリジナルモデルが一致しているかを判断する基準として相関係数を用いる。一般的に、相関係数が 0.7 を超えていれば両者は良い相関を持つため、輪重減少率の相関係数が 0.7 を超えるモード数を調べる。

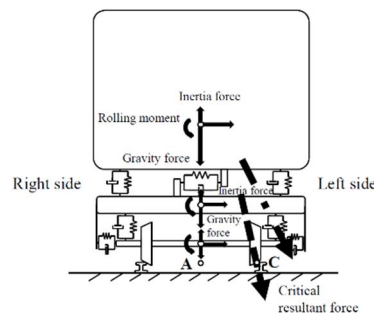


図4 輪重減少率 (転覆危険率)

(5) 車両質量分布の影響

車両ごとの質量の違いが低次元化モデルに及ぼす影響について検討する。ここでは、45.98[t]のモーター車と41.80[t]の付随車を考え、全車両が付随車である場合(以下、質量均一モデルと呼ぶ)と、1、10両目が付随車で残りがモーター車である場合(以下、質量不均一モデルと呼ぶ)について考える。編成内の全車両における輪重減少率の相関係数が0.7を超えるのに必要なモード数を表1に示す。ここでは質量均一モデルではモードの抽出を1つずつ行い、質量不均一モデルでは10モードずつ抽出を行う。

表1 相関係数が0.7以上となるモード数

| | Without motor car | With motor car |
|-----------------|-------------------|----------------|
| Number of modes | 9 | 40 |

表1に示す通り、質量均一モデルは、質量不均一モデルに比べて、オリジナルモデルの再現に必要なモード数が少ないことが分かる。このようになる理由として、2つのモデルのモード形状の違いが原因であると考えられる。

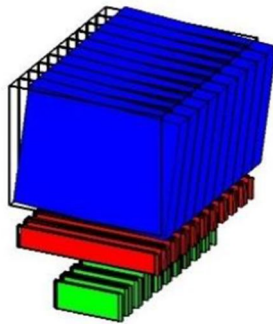


図5 質量均一モデルにおけるモード形状の一例

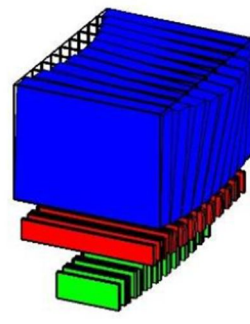


図6 質量不均一モデルにおけるモード形状の一例

図5に質量均一モデルのモード形状、図6に質量不均一モデルのモード形状の一例を示す。図5および図6は車体の下心ロールのモード形状であるが、質量均一モデルは10両全てが同じ方向に同じ量だけ変位しているのに対し、質量不均一モデルは車両によって変位量が異なることが分かる。質量均一モデルは10両全てが同じ方向に同じ量だけ変位するモードが存在し、一方で質量不均一モデルにはそのようなモードは存在しないため、質量が均一か不均一かでオリジナルモデルの再現に必要なモード数に差が出たと考えられる。モーター車無しモデルのように、全車両が同じ方向に同じ量変位するモードを持つモデルは、オリジナルモデルに必要なモード数は数モード程度になると考えられる。また低次元化により輪重減少率やそれに大きな影響を与える車両の主な変位は概ね表現できることが分かった。

(6) 走行路の影響

地震波を走行路(橋梁)下部に入力したときの走行路の応答を解析した。図7に一例として熊本地震の東西方向の加速度応答スペクトルを示す。図8に熊本地震の同方向の加速度を走行路に入力したときの走行路の加速度応答スペクトルを示す。走行路の固有振動数(東西方向:3.1Hz)付近の成分が特に増大したことが分かる。

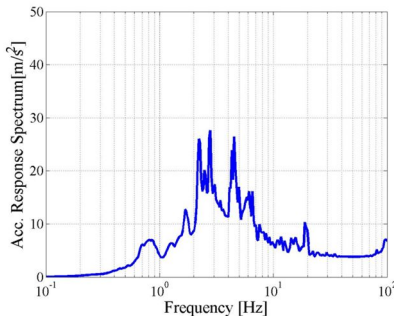


図7 熊本地震(東西方向)の加速度応答スペクトル

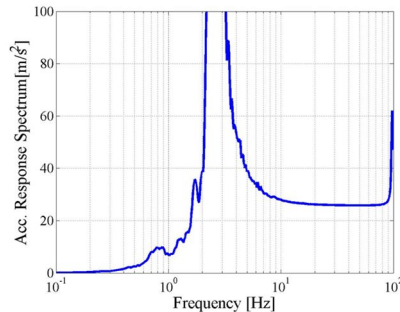


図8 走行路の加速度応答スペクトル(熊本地震(東西方向))

(7) 地震波ごとの低次元化モデルの最適モード数と応答精度

スパース推定により抽出されたモードをもとに地震波ごとに低次元化モデルを作成し、そのモデルの応答精度について検討した。指標として、車両転覆の危険の度合いを表す 輪重減少率を用いて、オリジナルモデルと低次元化モデルとの相関係数が、1～10 両目の平均値で 0.7 を超えていれば、オリジナルモデルを概ね再現できているとした。図 9、10 に地震波を車両下部に直接入力した場合、走行路を考慮した場合それぞれについて、低次元化モデルを構成するモードの数と、輪重減少率との関係を示す。

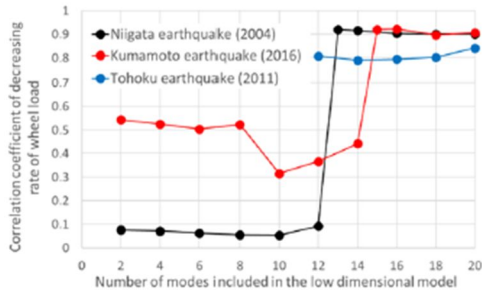


図 9 輪重減少率の相関係数 (走行路を考慮しない場合)

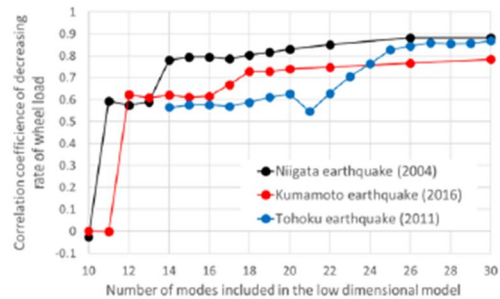


図 10 輪重減少率の相関係数 (走行路を考慮する場合)

地震波を車両に直接入力することを考えた場合、図 9 より、新潟地震では 13 モード、熊本地震では 15 モード、東北地震では 12 モードあれば、相関係数が 0.7 以上となり、転覆の危険性について概ねオリジナルモデルを再現できていると考えられる。

走行路として橋梁の上を車両が走行することを考えた場合、図 10 より、新潟地震で 14 モード、熊本地震で 18 モード、東北地震で 23 モードあれば、相関係数が 0.7 以上となり、転覆の危険性について概ねオリジナルモデルを再現できていると考えられる。また、地震波を車両に直接入力した場合と比較して、オリジナルモデルを再現するために必要なモード数は増加傾向にあることが分かった。その原因として、走行路の固有振動数付近で振動が強調されることで、振幅や加速度が増大したことで、振動が長時間続いたことが挙げられる。

(8) 共通の低次元化モデルの提案

解析結果より、モデル低次元化において、走行路の有無にかかわらず概ね 8 割前後のモードが、地震波が異なっても共通して抽出されるモードであった。これまでは、地震波ごとに最適な低次元化モデルを作成してその応答精度を検討してきたが、現実的にはそれは難しい。ここでは、1つの低次元化モデルを用いて、3つの地震波をそれぞれ入力した場合の応答精度について検討する。図 11 に低次元化モデルを構成するモードの数と、輪重減少率との関係を示す。なお、共通モデルを構成するモードは、地震波を直接車両下部に入力した場合について解析を行った。

図 11 より、すべての地震波に共通の低次元化モデルを用いた場合でも、従来の低次元化モデルと同様の再現性が得られることが分かった。特に、新潟地震と熊本地震の場合では、従来の低次元化モデルよりモード数が少ないが、転覆危険性についてオリジナルモデルを概ね再現できていた。このことから、共通の低次元化モデルで転覆危険性を評価できる可能性が考えられる。

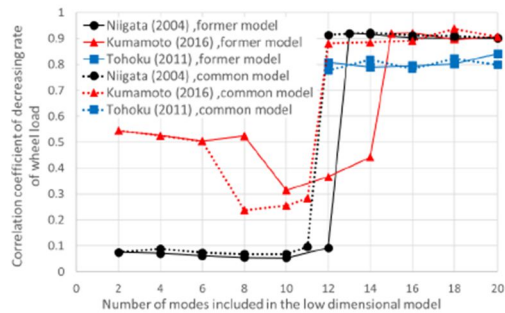


図 11 輪重減少率の相関係数 (共通モデルに基づく)

(9) 結言

1 車両を 21 自由度でモデル化し、10 車両で計 210 自由度の連結走行体モデルを作成した。また、上下左右前後各 1 自由度の走行路モデルを作成した。この走行体・走行路連成系に対してスパースモデリングの考え方を利用して連結車両の低次元化モデルを作成した。車両ごとの質量変化を考慮した連結車両ではおおよそ 30-40 モードの低次元化モデルで、転倒の指標や車両の主な変位は概ね表現できることが分かった。その他の車両の詳細な振動状況はオリジナルモデルでの検討が必要と分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 宮本浩希, 新谷篤彦, 中川智皓 |
| 2. 発表標題 乗客モデルを考慮した連結走行体の地震時応答挙動の検討 |
| 3. 学会等名 日本機械学会 関西支部 第98期定時総会講演会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 林田 佳恭、新谷 篤彦、中川 智皓 |
| 2. 発表標題 連結走行車両のモデル低次元化時の抽出モードにおける入力波の特性の影響 |
| 3. 学会等名 日本機械学会 関西支部 第98期定時総会講演会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 宮本浩希, 新谷篤彦, 中川智皓 |
| 2. 発表標題 連結走行体の低次元化モデルにおける車両特性が及ぼす影響 |
| 3. 学会等名 日本機械学会 2022年度年次大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 林田 佳恭、新谷 篤彦、中川 智皓 |
| 2. 発表標題 連結車両のモデル低次元化における地震波の違いや走行路の有無による影響の検討 |
| 3. 学会等名 日本機械学会 2022年度年次大会講演論文集 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 鶴瀬順大, 新谷篤彦, 中川智皓 |
| 2. 発表標題 スパース推定を用いた高速連結車両の地震時応答解析 |
| 3. 学会等名 日本機械学会 2021年度年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 鶴瀬順大, 新谷篤彦, 中川智皓 |
| 2. 発表標題 高速走行体の地震時応答挙動におけるスパース推定を用いた低次元化に関する検討 |
| 3. 学会等名 日本機械学会 2020年度関西学生会卒業研究発表講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 R. Imai, A. Shintani, C. Nakagawa, and T. Ito |
| 2. 発表標題 Study on the Influence of Vibration Mode of A High-Speed-Moving Vehicle Considering Running Road Subjected to Seismic Input |
| 3. 学会等名 the 6th Korea-Japan Joint Symposium on Dynamics and Control (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 今井峻太, 新谷篤彦, 伊藤智博, 中川智皓 |
| 2. 発表標題 車両ごとの特性を考慮した走行路上の連結高速走行体モデルの地震応答挙動および低次元化に関する検討 |
| 3. 学会等名 日本機械学会 関西支部第95期定時総会講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 今井峻太, 新谷篤彦, 伊藤智博, 中川智皓 |
| 2. 発表標題 走行路を考慮した連結高速走行体の地震応答挙動およびモデルの低次元化に関する検討 |
| 3. 学会等名 日本機械学会Dynamics & Design Conference 2019 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 R. Imai, A. Shintani, T. Ito, C. Nakagawa |
| 2. 発表標題 Study on the Vibration Response Behavior of A High-Speed-Moving Vehicle on the Running Road Subjected to Seismic Input |
| 3. 学会等名 The 2nd Joint Symposium on Advanced Mechanical Science & Technology (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 今井峻太, 新谷篤彦, 伊藤智博, 中川智皓 |
| 2. 発表標題 走行路を考慮した連結走行体の地震応答挙動に関する検討 |
| 3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 今井峻太, 新谷篤彦, 伊藤智博, 中川智皓 |
| 2. 発表標題 走行路を考慮した連結高速走行体モデルの低次元化に関する検討 |
| 3. 学会等名 日本機械学会関西支部第94期定時総会講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 今井 峻太, 新谷 篤彦, 伊藤 智博, 中川 智皓 |
| 2. 発表標題 走行路を考慮した高速走行体の地震時応答挙動に関する検討 |
| 3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会学生員卒業研究発表講演会 講演前刷集 |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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 | 中川 智皓 (Nakagawa Chihiro) (70582336) | 大阪公立大学・大学院工学研究科 ・准教授 (24405) | |

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 |
|---------|---------|