

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04574

研究課題名（和文）橋梁を用いた振動発電タイプの走行荷重・劣化度評価モニタリングシステムの開発

研究課題名（英文）Development of a monitoring system to evaluate vehicle loads and slab deterioration using bridge vibration power generation

研究代表者

深田 宰史（Fukada, Saiji）

金沢大学・地球社会基盤学系・教授

研究者番号：10313686

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、磁歪式振動発電デバイスが効率よく振動発電する横構部材に着目した。横構に振動発電デバイスを設置したときの時間帯ごとの平均出力電圧を算出したところ、大きな出力電圧が記録され、本振動発電デバイスを橋梁に用いることでモニタリングデバイスの電力を賄うことができることを明らかにした。

また、試験車および一般車の走行により得られた床版たわみと様々劣化パターンを想定した有限要素モデルを用いた解析結果を比較することで、対象床版の劣化度を推定することができた。さらに、その劣化状況をモデル化した解析モデルを用いて弾塑性解析を行い、載荷荷重と床版変位の関係から対象床版の残存耐力を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

北陸地方の国県市道や高速道路における道路橋床版では、過積載車両の影響が懸念されることに加え、ASRや塩害および凍害などの要因による劣化が顕著に見られ、これらの床版の劣化度を適切に評価できる手法を開発することが求められている。また、近年、環境振動発電技術への注目が高まっており、これらの電力を利用してIoT向けのモニタリング機器の電源としてのニーズが求められている。

本研究成果として、実橋梁における振動発電による発電効果を確認されたことおよび実橋における床版の残存耐力を試験と解析から評価できたことは、学術的および社会的なニーズに貢献でき、意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study focused on the lateral bracing where magnetostrictive vibration power generation devices efficiently generate vibration power. A large output voltage was recorded when the vibration power generation device was installed in the lateral bracing. It was clarified that this vibration power generation device can be used for bridges to provide power for monitoring devices. The deterioration of the slab was estimated by comparing the slab deflections obtained by loading the test vehicle and the ordinary vehicle with the results of an analysis using a finite element model that modeled various types of deterioration. The analytical model was then used to perform an elasto-plastic analysis. The residual bearing capacity of the slab was evaluated from the relationship between the vehicle load and slab displacement.

研究分野：橋梁振動

キーワード：振動発電 モニタリング 橋梁振動 床版変位

### 1. 研究開始当初の背景

北陸地方の国県市道や高速道路における道路橋床版では、過積載車両の影響が懸念されることに加え、ASR や凍結防止剤 (NaCl) 散布による塩害および凍害などの要因による劣化が顕著に見られ、これらの床版の劣化度を適切に評価できる手法を開発することが求められている。

また、近年、周りの環境から未利用のエネルギーを収穫 (ハーベスト) して電力に変換する技術として、 $\mu\text{W}$ ~ $\text{W}$  程度のエネルギー変換技術への注目が高まっている。これらは再生可能エネルギーとは全く別の市場であり、IoT (モノのインターネット) 向けの自立電源からモバイル機器の電源としてのニーズが求められ、IoT 社会の実現のためにはエネルギー・ハーベスティングが必須となってきた。

### 2. 研究の目的

インフラ構造物の維持管理における問題と維持管理への IoT 技術の積極的な採用という時代背景のもと、本研究では、まず、凍結防止剤散布による塩害劣化が生じている橋梁を対象として、電源が容易に確保できない現場において、モニタリングデバイスの電力を賄うことができる橋梁振動を利用した振動発電技術を確立することにした。つぎに、試験車を用いた走行試験および一般車を対象とした走行荷重モニタリングを行い、橋梁上を走行する活荷重と床版変位との関係を明らかにするとともに、有限要素モデルを用いた弾塑性解析による耐荷力性能を求め、モニタリングで得られた走行荷重と床版変位の関係と比較することにより、劣化度を評価できるモニタリングシステムを開発することにした。

### 3. 研究の方法

#### 3. 1 対象橋梁

本研究で対象とした橋梁は4主桁の非合成鉄桁橋であり、現在、供用開始から43年が経過している(図-1)。有効幅員10m、アスファルト舗装厚75mm、床版厚220mmであり、床版に防水層は設置されていない。

劣化状況として、対象橋梁の床版下面には疲労によるひび割れは見られなかったが、白色析出物が散在していた(写真-1)。冬期には凍結防止剤を散布するため、凍結防止剤に含まれる塩化ナトリウム (NaCl) が路面水に溶け、床版コンクリート内に浸透している可能性が考えられる。

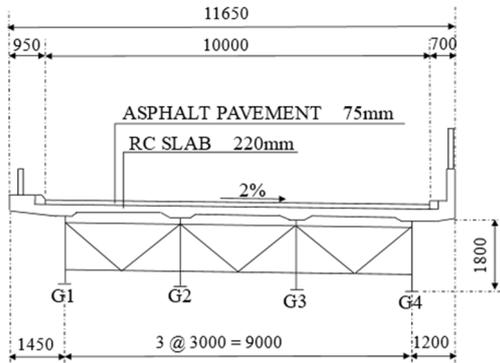


図-1 対象橋梁の断面図[単位: mm]



写真-1 床版下面の白色析出物

#### 3. 2 試験概要

対象橋梁において一般車を対象とした床版たわみの計測と一般車の走行荷重計測を実施するための換算係数の作成を目的とした試験車走行試験を実施した。なお、対象橋梁では交通規制を行うのが難しかったため、一般車が走行するなかで試験車を走行させて計測を行った。試験車は図-2 に示すエア式サスペンションを有する3軸トラックを使用した。表-1 に試験車の各軸重および総重量をまとめた。

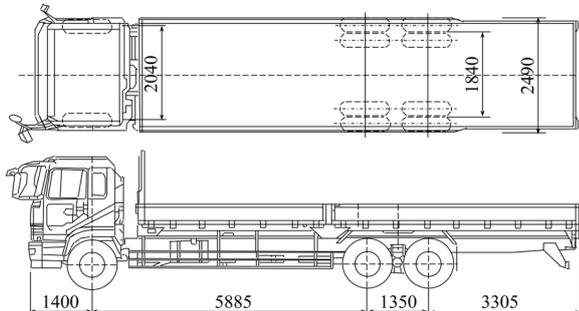


図-2 解析モデル

表-1 試験車重量 [単位: kN]

軸重				総重量
前輪	後輪 前軸	後輪 後軸		
53.56	96.78	90.75	241.08	

本試験での計測項目は、橋軸直角方向の床版ひずみと鉛直方向の床版変位とした。床版ひずみは本橋梁における車両の走行位置の確認のために使用した。床版下面に白色析出物が発生していた箇所付近の対傾構を3本選定し、その対傾構位置の床版断面をそれぞれ断面①、断面②、断面③とした。各断面のG2-G3間中央と、

中央から G2 側と G3 側にそれぞれ 500mm 離れた位置に変位計を設置し、対傾構上支材との相対変位を計測した。測点配置図を図-3 に示す。断面①、断面③の付近には断面②付近に比べて白色析出物が多く発生しており、劣化が著しいことから、断面①、断面③のたわみが大きくなると予想される。ひずみゲージは、断面②の図-4 に示すように橋軸直角方向に 5 か所設置した。なお、サンプリング周波数は 200Hz として計測を行った。

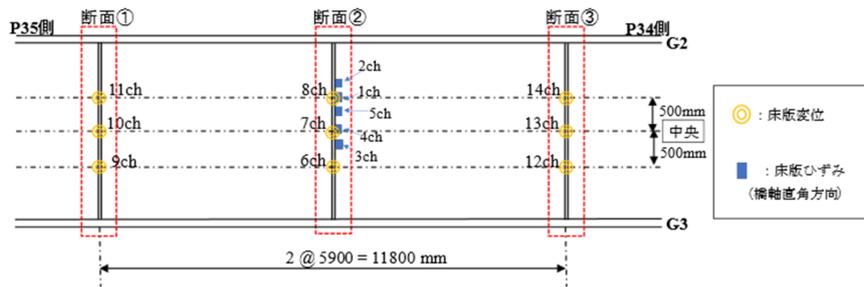


図-3 測点配置図

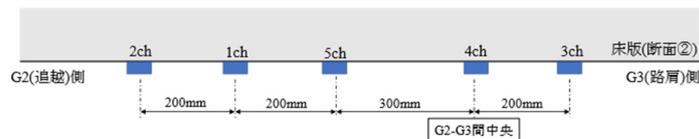


図-4 ひずみゲージ設置位置（上図 1ch～5ch の詳細図）

### 3. 3 解析概要

解析モデルは、振動発電デバイスの橋梁への設置位置の検討を目的とした全体モデルと RC 床版の剛性と耐荷力を評価するための床版モデルに分け、汎用系解析ソフト DIANA10.4 を用いた数値解析を実施した。

#### (1) 全体モデル

振動発電デバイスを橋梁のどこに設置すればよいのか検討するため、橋梁の固有振動特性を調べるための全体モデル（図-5）を作成した。床版、地覆および舗装は、8 節点ソリッド要素、主桁および補剛材は 4 節点シェル要素、対傾構および横構は梁要素、鉄筋は埋め込み鉄筋要素でモデル化した。

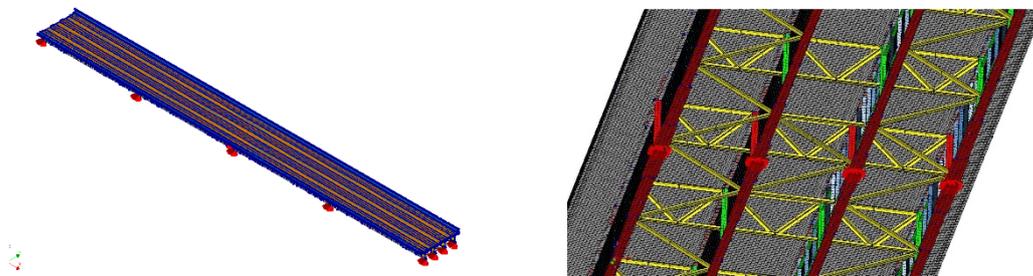


図-5 全体モデル（左図：全体、右図：拡大図）

#### (2) 床版モデル

RC 床版の剛性と耐荷力を評価するため、床版モデル（図-6）を作成した。モデル化の範囲は橋軸方向に床版パネル 2 枚分、橋軸直角方向は全幅とした。各要素モデルは全体モデルと同じである。材料の構成則として、コンクリートは圧縮側挙動に Thorenfeldt 式を採用し、引張側は JSCE 引張軟化式を用いた。ただし、引張強度および引張破壊エネルギーは、コンクリート標準示方書の式から推定した。また、ひび割れモデルは、全ひずみ理論に基づく回転ひび割れモデルを採用した。鋼材および鉄筋は、完全弾塑性体とし、アスファルト（舗装）は線形弾性等方性を適用した。

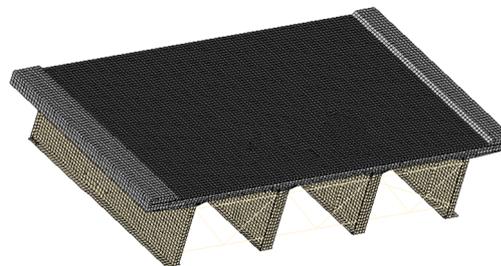


図-6 床版モデル

表-2 解析パラメータとモデル名

腐食状況 ヤング係数	腐食状況		
	腐食なし	下側鉄筋腐食	下側鉄筋腐食 かぶりコンクリート剥離
25.0 GPa (設計値)	A-1	A-2	A-3
20.0 GPa	B-1	B-2	B-3
15.0 GPa	C-1	C-2	C-3

塩害劣化している対象橋梁をモデル化するために、設計値のモデル以外に表-2 に示す塩害劣化を模擬した 9 つの劣化モデルを作成した。本研究では、鉄筋腐食については鉄筋断面の減少を考慮せず、鉄筋とコンク

リートとの付着の減少によって表現した。かぶりコンクリートの剥離した状態については、かぶり部分のコンクリートのヤング係数を1/1000に下げることによって表現した。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 橋梁振動による発電、蓄電できる振動発電デバイスと設置位置の検討

本研究で用いた振動発電デバイスは、写真-2に示す磁歪式振動発電デバイスとした。この構造はシンプルで、U字型のフレームに板状の鉄ガリウム合金(Fe-Ga合金)を積層(接合)し、これにコイルを巻き、中央に永久磁石を配置したものである。

このデバイスでは、U字型フレームの先端に取り付けられた錘が振動源に共振できるように調整することが必要である。共振により錘が上下に振動することにより、磁歪素子(鉄ガリウム合金)の長手方向に圧縮力あるいは引張力が作用し、逆磁歪効果により磁束が変化する。磁束の時間変化に比例した起電力がコイルに発生し、ファラデーの電磁誘導の法則により時間変化する電磁場のため、鉄ガリウム合金に巻かれたコイルに電圧が発生し、振動エネルギーが電気エネルギーに変換される。

本デバイスは、対象とする橋梁の卓越振動周波数に応じてデバイスサイズを選定することができる。サイズが大きいほど大きな発生電力を得ることができるが、卓越周波数は低い。逆にデバイスサイズが小さいほど発生電力が小さいが、卓越周波数が高い。

そこで、対象橋梁の様々な場所に加速度計を設置し、一般車による走行を対象とした振動計測を行い、振動発電デバイスが効率よく振動する場所を検討した。その結果、横構にて大きな振動を得られることがわかった。図-7に示した横構で計測した加速度スペクトルから、12Hzおよび20Hz付近に卓越振動が見られた。これらの卓越振動数を明らかにするため、橋梁の全体モデルを用いて固有振動解析を行ったところ、12Hzはたわみ2次振動、20Hz付近は横構の振動が卓越することがわかった(図-8)。

この横構に振動発電デバイスを2週間設置したときの時間帯ごとの平均出力電圧を図-9にまとめた。その結果、9時~21時に大きな出力電圧が記録され、概ね0.04mW得られることがわかった。なお、橋梁振動は、交通量、車両重量、外気温などの影響により変動することに注意が必要である。

対象橋梁に本振動発電デバイスを設置した結果、低消費電力で起動できる低感度な加速度計をシステムに組み込むことで、加速度応答を計測できることが明らかとなった。しかし、本研究で対象としている床版変位を求めるためには、高感度な加速度波形を積分する必要がある。低感度な加速度計で計測した場合、十分な精度を有した床版変位を得ることができない。したがって、本振動発電デバイスで起動できる加速度計には限界があるため、積分により床版たわみを算出するのではなく、電池および外部バッテリーを用いることで、直接、床版ひずみとたわみを計測し、次節の劣化度評価を行うこととした。



写真-2 磁歪式振動発電デバイス

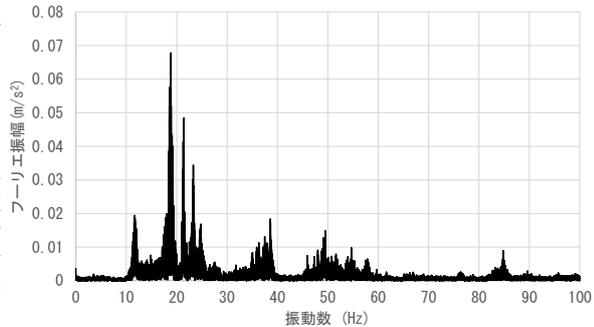
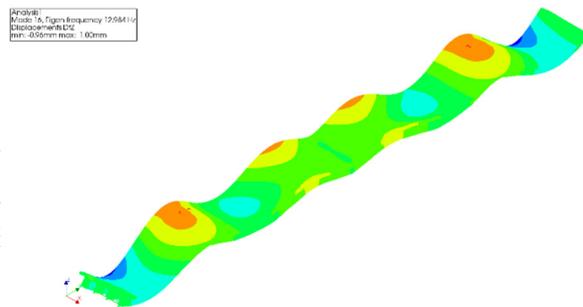
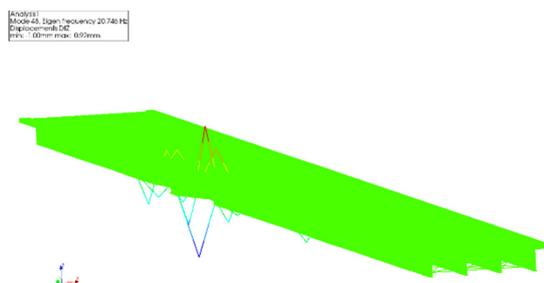


図-7 横構におけるスペクトル



(a) たわみ2次振動



(b) 横構の振動

図-8 振動モード

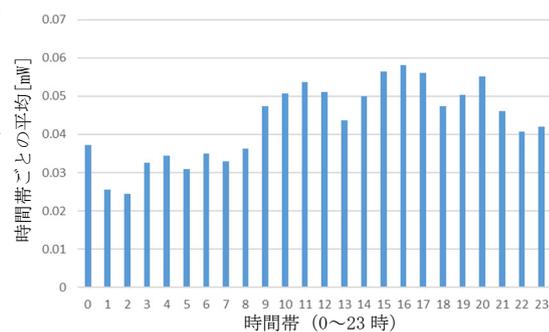


図-9 電力

## 4.2 劣化度評価

### (1) 床版たわみ

試験車両による走行試験で得られた床版たわみと解析結果との比較を図-10に示す。解析値との比較には3回行った走行載荷で得られたたわみのうちの最大値を試験値としてプロットしている。解析値は試験同様、対傾構に対する床版下面の相対たわみを計算した。

どの断面のたわみも、設計値を入力したA-1の解析結果に比べて、大きくなっていることからRC床版の版としての剛性は低下していることが推察される。断面ごとにみると、B-1、B-2が断面①、断面③のたわみ量に近い値を示しており、A-3、C-1、C-2が断面②のたわみ量に近い値を示していることが確認できた。

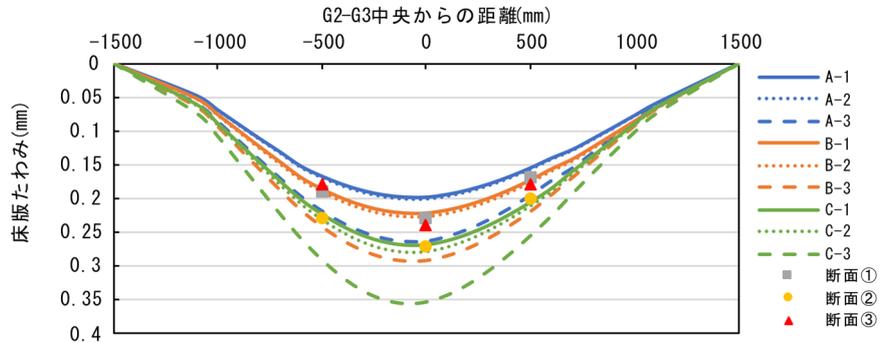


図-10 床版たわみの比較

### (2) 剛性および耐荷力評価

設計値を入力したモデルであるA-1、断面①と断面③の劣化状況を表していると判断したB-1、B-2、断面②の劣化状況を表していると判断したC-2について荷重増分法により解析を行い、載荷荷重と床版変位関係を算出した。図-11に弾性範囲に着目した解析結果、図-12に終局まで荷重を載荷した結果を示す。縦軸の載荷荷重は軸重（後輪1軸のとき）あるいは軸重和（後輪2軸のとき）、横軸は対傾構上支材と床版との相対変位で表している。また、これらの図にはそれぞれの解析結果に加え、走行荷重計測による一般車の軸重および軸重和を推定した結果とそれに対応する各断面の床版たわみの関係をプロットしている。

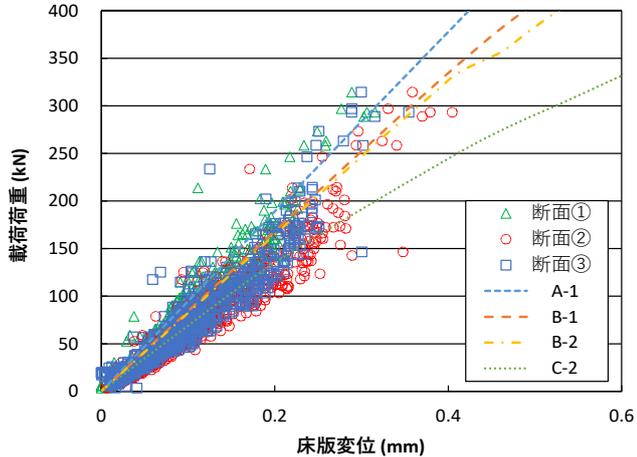


図-11 剛性評価

図-11について、一般車の荷重-変位のプロットだけでは傾向が掴みづらいため、そのプロットをもとに切片0の近似直線を断面ごとに作成した。どの断面の決定係数も0.96以上となっており、近似直線は各断面の傾向をかなり高い精度で表現できているといえる。この近似直線を見ると、試験車による載荷試験で得られた結果と同様に、一般車においても断面①、断面③に比べて断面②の床版たわみが大きい傾向にあることがわかり、断面②付近の剛性が低下していることが確認できた。また、解析によって算出した4つのモデルの載荷荷重-変位の関係と比較すると、3本の近似直線は概ねB-2（ $E=20\text{GPa}$ ，下側鉄筋腐食）とC-2（ $E=15\text{GPa}$ ，下側鉄筋腐食）の曲線の間分布していた。よって、対象床版の版としての剛性は $15\text{GPa}$ から $20\text{GPa}$ の範囲にあると考えられ、設計値と比較すると2~4割程度低下していることが予想される。

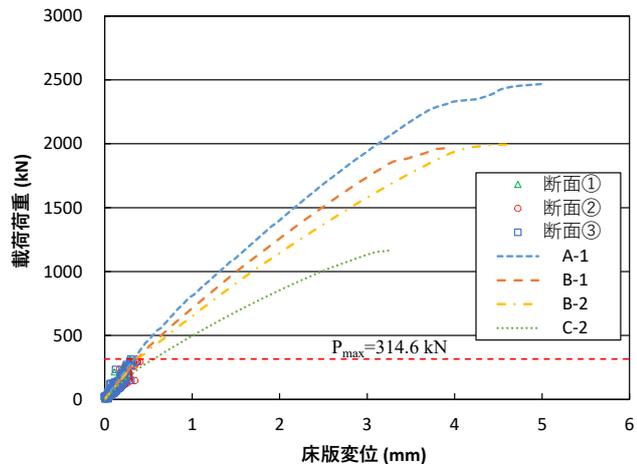


図-12 耐荷力評価

図-12より、どの解析モデルにおいても耐荷力は、今回走行荷重計測により推定された最大軸重（あるいは軸重和） $314.6\text{kN}$ を上回っていることを確認できた。しかし、設計値を入力したA-1のモデル（健全時）に対する低下率がB-2で約2割程度、C-2で約5割程度であったため、対象床版の耐荷力は2~5割程度低下していることが推察される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 橋本啓汰, N. L. H. Minh, 河尻留奈, 青山敏幸, 深田宰史, 鳥居和之	4. 巻 Vol.1, No.1
2. 論文標題 床版たわみ計測による塩害劣化したRC床版の耐荷力評価に関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会インフラメンテナンス実践研究論文集	6. 最初と最後の頁 pp.144-152
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 H. M. N. Le, T. M. Ha, S. Fukada, T. Ueno	4. 巻 Vol.10, No.4
2. 論文標題 Power Generation from Bridge Vibration under Ordinary Vehicle Load	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Structural and Civil Engineering Research	6. 最初と最後の頁 pp.165-171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18178/ijscer.10.4.165-171	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 H. M. N. Le, T. M. Ha, S. Fukada, T. Ueno
2. 発表標題 Power Generation from Bridge Vibration under Ordinary Vehicle Load
3. 学会等名 Proceedings of the 4th International Conference on Civil Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. M. Ha, S. Fukada, T. Ueno
2. 発表標題 Parametric numerical study on a novel energy harvester using iron-gallium alloy and dynamic strain response
3. 学会等名 CIGOS 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. M. Ha, S. Fukada, T. Ueno, D.D Ho
2. 発表標題 Practical Applications of Magnetostrictive Vibration Energy Harvester in Highway Bridge
3. 学会等名 ICSCEA 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. M. Ha, S. Fukada, T. Ueno
2. 発表標題 Performance of Magnetostrictive Low-cost Highperformance Vibration Power Generator for Practical applications
3. 学会等名 CSN2019 (国際学会)
4. 発表年 2019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	上野 敏幸  (Ueno Toshiyuki)  (30338256)	金沢大学・電子情報通信学系・教授   (13301)	
研究 分担者	北川 章夫  (Kitagawa Akio)  (10214785)	金沢大学・電子情報通信学系・教授   (13301)	

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
---------	---------