

高架橋の健全性診断のための自立型センシングシステムの開発

関西大学 システム理工学部 機械工学科 教授 ○小金沢新治
 関西大学大学院 石井智丈

1. はじめに

わが国における交通インフラは高水準に整備されており、活発な経済活動を支え、豊かな暮らしをもたらす基盤となっている。そして、その保守点検は、おもにスキルを持った作業員による目視や打音検査などによって行われている。しかし、2013年度の国土交通白書によれば[1]、全国の2 m以上の橋梁の75%が市町村の管理下にあつて、人口の少ない市町村ほど作業人員や予算の不足などの理由から、点検・補修に手が廻っていないと報告されている。その一方で、2014年に国土交通省は「国土交通省インフラ長寿命化計画」を制定し、5年に一度の定期点検を新たに義務付けており、人手をかけた点検や補修によるインフラの保全が今後ますます困難となることは明らかである[2]。このため、センサやIoT技術を活用して、保守点検にかかる人手を削減しようとする研究が盛んに行われている。その中で、橋梁の振動特性の変化に着目した健全性の評価手法は、比較的簡単に観察できる上、重大な損傷の検知に効果的であることから、いくつかの研究が実用性検証の段階にある。ただ、それらシステムの電源を得るためには、大掛かりな電源配線工事や太陽光発電パネルを日射の方角や風向きを考慮して設置する必要があったり、数年に一度の電池交換が必要であったりと、設置自由度や作業量や費用の面から、多くの橋梁に簡単に設置するわけにはいかない。既存の橋梁にも健全性診断システムを簡単に導入するためには、電源の施設を容易にすることが必要である。

そこで本研究では、車両の通過時における橋梁の振動を利用して、システムを駆動する電力を得ながら、長期にわたりメンテナンスフリーで橋梁の固有振動数の変化をモニタリングするための自立型センシングシステムの構築を目指している(図1)。

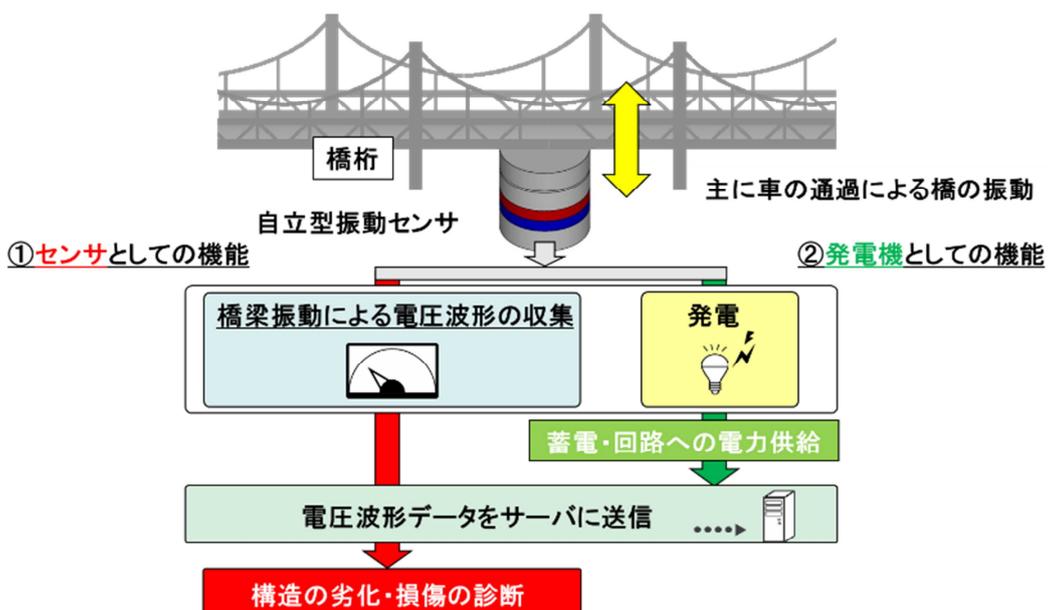


図1 橋梁の固有振動数の変化をモニタリングする自立型センシングシステムの概要

我々が開発している橋梁の健全性モニタリングシステムにおいて中心的な役割を担うものが、開発中の自立型振動センサ（以下では、単に振動センサと呼ぶ）である。開発中のシステムは、振動センサの発電電力を二次電池に蓄電しておき、システムの駆動電力として利用する。そして、一日に一から数回、短時間の間だけ二次電池に蓄えられた電力を利用して、振動センサの出力電圧波形を無線通信によってサーバに送信する。サーバでは、送信されたデータから橋梁の固有振動数を求め、データとして蓄積しておき、その変動を監視することで橋梁の健全性を診断する。このように、開発中のシステムは、支承付近の橋脚と橋桁の間に設置しておくだけで、既存の橋梁においても大掛かりな電気工事を必要とせず、構造健全性をモニタリングできるという大きな利点がある。このようなシステムを実現できるのは、この振動センサが、後述のように比較的大きな電力を発電することができるためである。

2. 自立型振動センサの構造と発電原理

橋梁の振動を利用した発電装置は、これまでに振動による慣性力を利用するものが数多く提案されている。これらは、発電装置に備えられた慣性質量（おもり）に橋梁の振動加速度が慣性力として働き、そのおもりの振動を利用して発電する。しかし、橋梁の振動の周波数は数ヘルツ程度と低く、振幅も大きくないため、大きな慣性質量を用いなければ大きな電力を発電しにくい。そこで、我々は、橋梁の低周波数・小振幅の振動であっても、橋梁の持つ振動エネルギーは非常に大きいことに目を付け、支承付近に設置する超磁歪型の振動センサを開発した[3]。この振動センサは、橋梁振動の変位によって超磁歪材料を歪ませることで、大きな磁束密度変化を発生させることが特徴であり、超磁歪材料の周りにコイルを巻けば大きな電力が得られる。また、発生した電圧は橋梁の振動速度に比例するため、発生電圧の時間軸波形を周波数分析することによって橋梁の固有振動数を検出することができる。

図2に試作した振動センサの構造を示す。また、表1に振動センサの設計仕様を示す。超磁歪材料には Galfenol を採用した。Galfenol の外形寸法は直径 10mm、長さ 25mm であり、この寸法であれば在庫品があり比較的安価に購入できたため使用している。（この寸法を変更した場合の見積金額は、とても購入できるような金額ではなかった。）このため、今回は、この Galfenol の寸法を制約条件として設計を行い試作した。

図3に発電原理図を示す。振動センサは橋桁と橋脚間に挟みこみ多少の与圧をあてて設置する。橋上を自動車が通過すると橋桁が振動するので、その振動がカバー部分に加えられ Galfenol に圧縮応力が加わる。すると、Galfenol 内の磁束密度が変化し、コイルに誘導電流が流れ、発電する仕組みである。

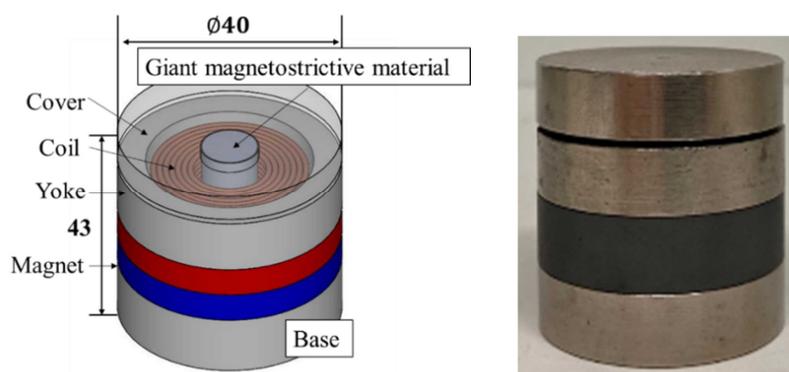


図2 自立型振動センサの構

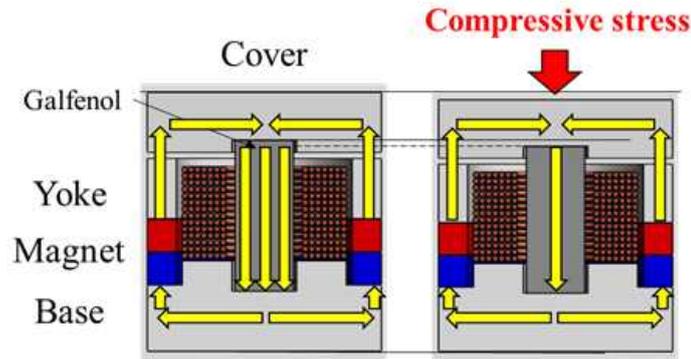


図3 発電およびセンシングの原理

表1 自立型振動センサの設計仕様

質量 [kg]	0.343
体積 [cm ³]	43.9
コイル抵抗 [Ω]	15.9
コイル巻数	1033

3. 圧縮応力に対する磁束密度変化の基礎実験

圧縮応力を受けた Galfenol 内部の磁束密度変化の大きさは、バイアス磁界と振動センサの磁気回路構成に依存する。はじめに、試作した振動センサを用いて、Galfenol に加えるバイアス磁界を変化させたときの、Galfenol を通過する磁束密度の大きさを測定した。バイアス磁界は Galfenol の周りに巻いたコイルに直流電流を加えることで与え、電流の大きさを変えることでバイアス磁界の大きさを変化させた。Galfenol を通過する磁束密度の大きさを測定は、別の検出用コイルを Galfenol に巻いておき、その電圧波形から求めることを試みたが、今回用いた加圧機で実現できる荷重の変化速度が遅く、大きな電圧が得られなかったことから、ギャップ間の磁束密度をガウスメータで測定し、漏洩磁束密度を十分小さいとして、Galfenol を通過する磁束密度を計算により求めた。その結果を図4に示す。

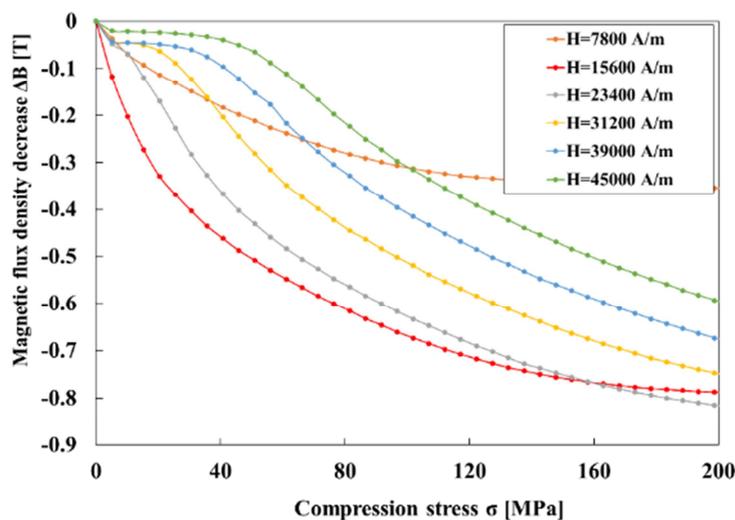


図4 圧縮応力に対する磁束密度の変化 (Galfenol)

図4より、設計したセンサでは、バイアス磁界 15.6 kA/m のとき、応力が 20 MPa 以下の範囲で、応力に対する磁束密度変化の感度が大きく得られることがわかる。感度が高いことは、軽量の車両の通過であっても、大きな電力を得ることに繋がるため好ましい。比較的小さなバイアス磁界の条件で高い感度が得られる傾向が見られるが、逆に 7.8 kA/m のように小さすぎると感度が落ちてしまうため、発電性能が著しく低下する。また、バイアス磁界が 20 kA/m 付近において、100 MPa の応力で 0.6~0.7 T の磁束密度を発生できる。この結果から、Galfenol に与えるバイアス磁界が、18330 A/m となるように磁気回路の設計を行った。一方、Galfenol の特性として、応力と磁束密度変化の間には強い非線形性が見られるため、固有振動数の測定においては、高調波が観測されることに注意を払う必要がある。

4. 実際の橋梁における実験

4. 1 実験方法

実際の橋梁に試作した振動センサを設置して、車両通過に伴う発電電圧波形を測定し、橋梁の固有振動数と発電電力の大きさを求めた。図5に実験のセットアップの概要を示す。また、図6に実験装置全体の写真と、自立型センサの設置を分かりやすく示すために3D-CAD モデルを示す。センサは、カバー部分を橋梁の橋桁下面に押し当てて固定されている。図5では、振動センサを強調して大きく描いているが、

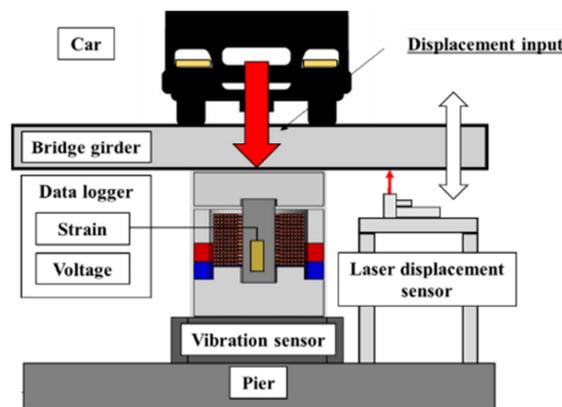


図5 実験装置のセットアップの概要

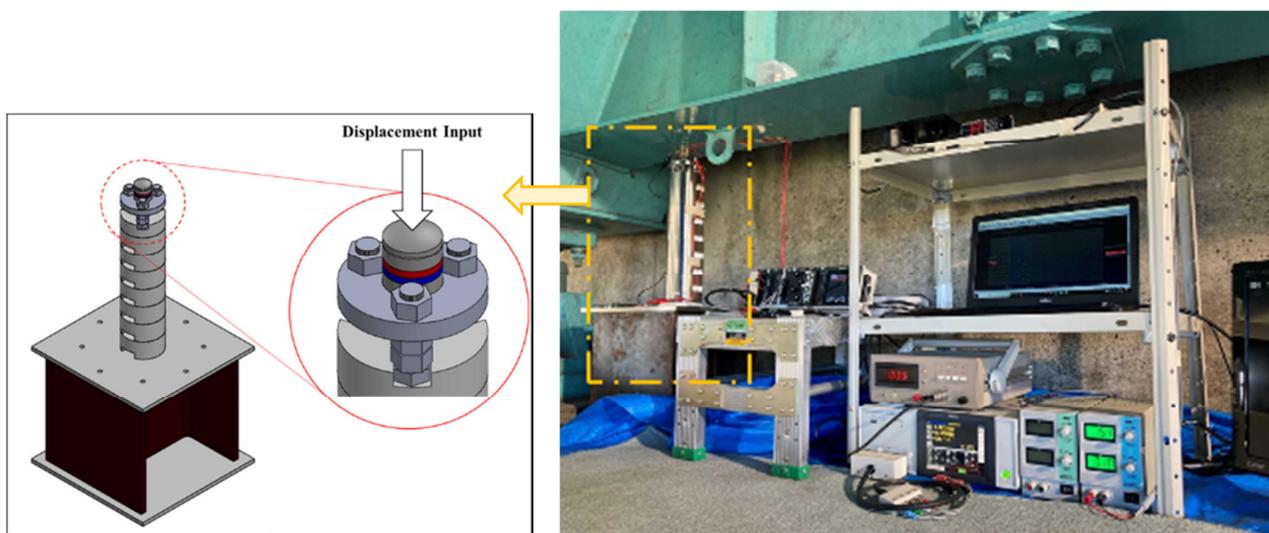


図6 実験装置のセットアップ

実際の振動センサの外形は、図6に示す通り非常に小型である（直径 40mm，高さ 43mm）．振動センサのコイルにはセンス抵抗を直列に接続し，センス抵抗の両端電圧を測定した．また，Galfenol には歪ゲージを貼り付け，歪みも同時に測定した．さらに，レーザ変位計を用いて橋桁の変位を測定した．これらの時間軸波形は，データロガーにより 1kHz のサンプリングレートで連続収集した．

4. 2 実験結果と考察

図8に路線バスが通過した際の橋桁の変位及び Galfenol の変形量，図9に発生電圧を示す．図7に示す路線バスの通過により，橋桁が 180 μm 変位し，それに応じて Galfenol は 28 μm 圧縮変形した．このとき Galfenol に加えられた圧縮応力は 81 MPa であり，疲労限度に対して十分小さな応力で収まっていた．図8における時刻 0.3 秒と 0.9 秒において，それぞれ約 50 μm ，130 μm の急激な変位が確認できるが，これらは路線バスの前輪と後輪の通過に伴って支承が変形し，橋梁が降下したことをあらわしている．その後，橋桁の高さは振動しながら緩やかに復元しているが，これは，車両が移動しているため，振動センサ付近の支承にかかる荷重が徐々に小さくなってゆくと，支承の剛性により橋桁の高さが徐々に元に戻っていくためである．

図9は図8と同時刻の振動センサの出力電圧の波形である．橋梁が急激に変位するタイミングで大きな電圧が発生している．時刻 0.9 秒で路線バスの後輪が橋梁に差し掛かったときに発生電圧は 1.03 V と最大値となった．Galfenol の内部を通過する磁束密度の変化は，次式のように電圧波形を積分することで計算することができる．

$$\Delta B = - \int \frac{V(t)}{nS} dt$$

ここで， n はコイルの巻き数， S は Galfenol の断面積である．上式に従い，路線バスの通過に伴う磁束密度変化を求めると， $\Delta B = 0.52 \text{ T}$ と算出された．これは，設計値に近く，Galfenol へのバイアス磁界が適切に与えられていることを示している．得られた電圧波形より，インピーダンスマッチングを想定して発電量を算出した．路線バスの通過では，後輪通過時に発生した瞬時の最大電力は，16.7 mW であった．また，平均的な発電電力を求めるため，一時間に亘り電圧波形を取得し発電電力を求め積算した．結果を図9に示す．実験を行った時間帯は 13 時～14 時の間であり，朝や夕方と比べて交通量は多くはないものの，一時間で 30.6 mJ の電力を得ることができた．

我々のこれまでの実験結果から，十分な分解能で橋梁の固有振動数を求めるのに必要な電圧波形のデータサイズは約 4MB であり，そのデータを一日に一回 BLE (Bluetooth LE) によって無線通信するための電力は 522mJ と見積もっている．つまり，一日の発電電力として 522mJ が所要電力である．この所要電力は，今後見直す余地があるが，現状ではそれを目標値として開発を行っている．その目標値と比べて現状



図7 大きな出力が得られた路線バスの通過

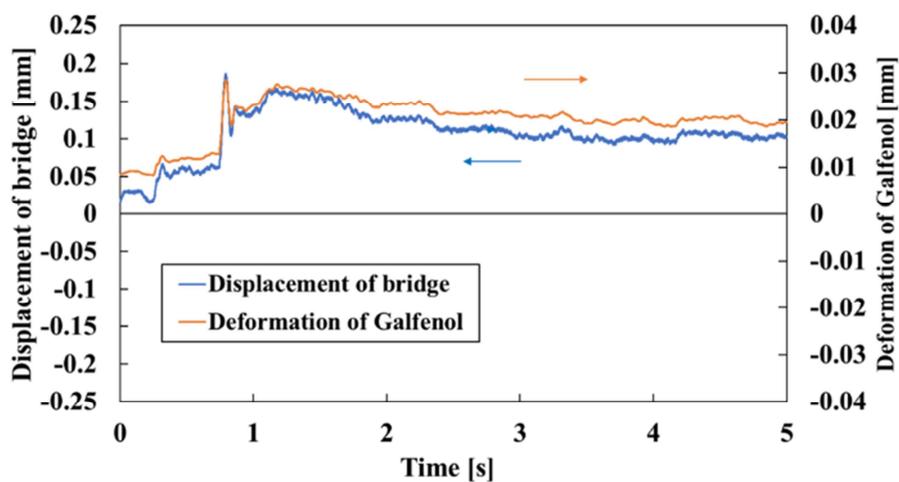


図 8 橋桁の変位と Galfenol の変形量

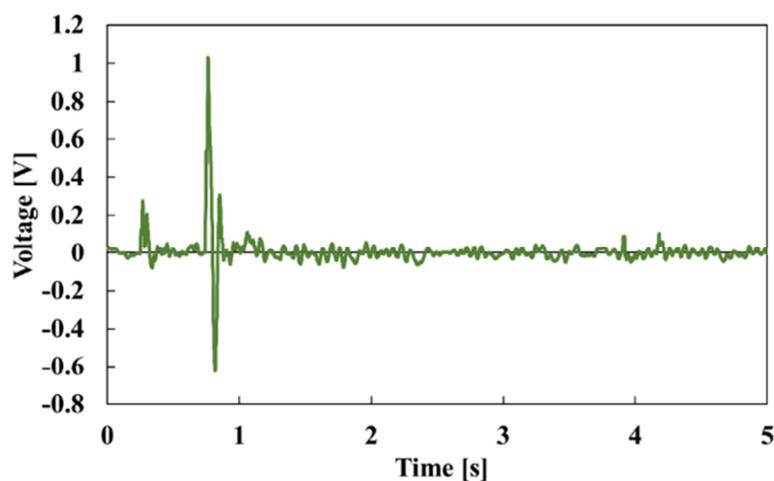


図 9 振動センサの出力電圧波形

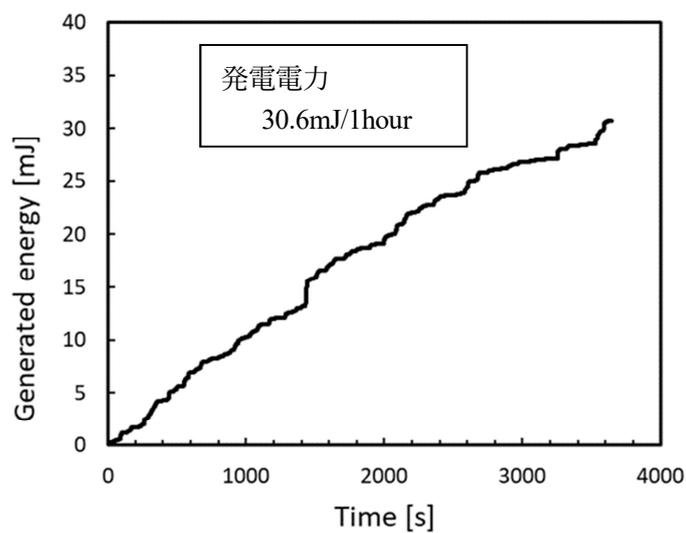


図 10 一時間の発電電力

の発電性能 (30.6 mJ/1 hour) では 17 時間が必要となる。17 時間同じ交通量が得られれば目標値に達するが、交通量の多寡にばらつきがあることを考えれば、2 倍程度の発電性能を実現したいと考えている。これについては、今後もさらに改善を目指す。

図 1 1 にセンサの出力電圧と、レーザ変位計で測定した橋桁の速度を F F T 解析した結果を示す。図 9 に示すように、電圧波形は車両の前後輪の通過タイミングでインパルス状の出力波形となるので、固有振動数の解析に適した波形でなく、残留振動波形のみを用いて解析した方がより精度よく解析できる。しかし、今回は試みとして、全時間軸波形から 100 秒の長さのデータを切り取り、50%オーバーラップの平均化処理を行うだけの単純な処理で F F T 解析を行った。従って、周波数分解能は 1/100 Hz である。

図 1 1 の青線は橋桁速度、緑色の線はセンサ出力のフーリエスペクトルを表している。橋桁速度は、レーザ変位計で測定された橋桁変位を微分して求めたものである。両者は、原理的に比例関係があるが、両者のフーリエスペクトルはそれをよく表していることがわかる。1.92 Hz, 2.39 Hz, 3.08 Hz, 3.81 Hz に、橋梁構造の四つの固有振動数が非常に鋭いスペクトルとして観察できている。すなわち、車両による間欠的な入力であっても、振動センサの出力電圧を単純に F F T 解析することにより、橋梁の固有振動数を高い周波数分解能で検知できるといえる。なお、各周波数に見られる固有振動の振動モードについては、今回は測定していないが、このセンサを複数個用いて同時測定すれば、モード形状の同定ができる。これは、今後の課題としたい。

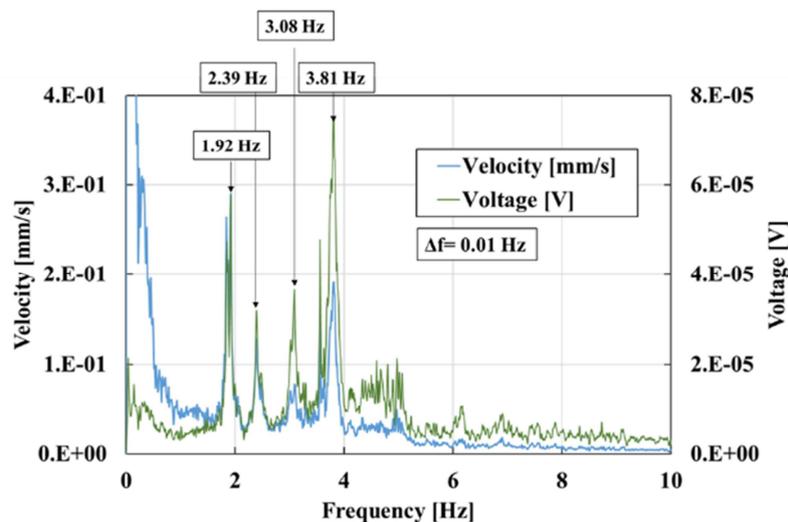


図 1 1 振動センサの出力電圧と橋桁の速度のフーリエスペクトル

5. 今後の展開

今回の振動センサの設計には Galfenol の寸法に制約があったが、次の設計では、Galfenol の寸法についても検討し、発電電力を最大化する設計を行う。これにより、大幅な発電電力の向上が期待できる。

また、実験結果からわかるように、開発したセンサは車両の前輪・後輪の通過するタイミングを検出することができる。車両のホイールベースの平均値と、前後輪の通過する時間間隔の平均値を用いれば、車両の通過速度の平均値を知ることができる。つまり、橋梁上の交通の円滑さや渋滞の有無を知るセンサとして応用できる。また、通過車両ごとの電圧波形を機械学習によって分類することで、通過車両の車種を知ることや、通過台数を知ることができるようになると考えられる。つまり、この振動センサだけで車両の通行台数を含めて橋梁の健全性を評価することができるようになる。このように交通状況や交通量調査への用途の拡大についても、今後検討していきたい。

6. 結論

橋梁の固有振動数を検知するための、超磁歪材料を利用した小型の自立型振動センサを開発した。外形寸法は、直径 $\Phi 40$ 高さ 43mm である。超磁歪材料には Galfenol を用いた。実際の橋梁における実験結果より、路線バスの通過により最大瞬時電力として 16.7mW が得られた。また、一時間の発電量は 30.6mJ が得られた。さらに、発生電圧の出力データ波形を FFT による周波数分析を行うことで、橋梁の固有振動数を高い周波数分解能で計測することができることを確認した。開発した自立型振動センサは、橋梁の固有振動数の測定だけでなく、橋上を通過する車両の台数や、通行の平均速度や渋滞の有無を検出するなどの交通状態をモニタリングするセンサとしての応用も期待できる。

謝辞

本研究は、キンキ道路（株）の全面的な協力を受けて行われた。この場を借りて感謝を申し上げたい。

参考文献

- (1) 国土交通省，“平成 24 年度 国土交通白書”，<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h24/hakusho/h25/>
- (2) 国土交通省，“令和 2 年版国土交通白書（国土交通白書全文第 3 章今後の国土交通行政が向き合うべき課題と方向性）”，<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r01/hakusho/r02/pdf/np103200.pdf>
- (3) 小金沢新治，振動発電装置，特願 2019-083757，2019 年
- (4) A.E.クラーク，江田弘，“超磁歪材料—マイクロシステム・アクチュエータへの応用”，1995，日刊工業新聞社，pp.144-145
- (5) Shinji Koganezawa, Tomotake Ishii, Hiroshi Tani, Renguo Lu, Norio Tagawa, “Development of Vibration Sensor Using Giant Magnetostrictive Material for Self-Powered Structural Health Monitoring System,” 2020 IEEE SENSORS, 25-28 Oct. 2020,
DOI: 10.1109/SENSORS47125.2020.9278840
- (6) 石井 智丈，小金沢 新治，多川 則男，谷 弘詞，呂 仁国，高架橋の健全性診断のための自立型振動センサの研究，”日本機械学会 IIP 部門講演会 IIP2021，3.8-9，[IIP1A1-1]