

鋼鉄道橋における部材の振動発電を利用したモニタリングシステムの構築

財団法人 鉄道総合技術研究所
東京大学

正会員○吉田善紀, 正会員 小林裕介
正会員 内村太郎

1. はじめに

近年、無線センサネットワークを利用した構造物のモニタリングが注目されている⁽¹⁾。このセンサネットワークでは多くの場合、各センサへの電力供給にバッテリーを使用するが、システムの運用がバッテリー寿命による制約を受けることが課題となる。また、構造物から基地局への遠隔送信については、携帯電話等が別途使用されるが、システムが大掛かりとなるなどの課題がある。

本研究では、鋼鉄道橋における鋼部材の振動発電を利用して、走行列車を介したデータ伝送を行うモニタリングシステムを構築した(図1)。本システムは、鋼部材に貼り付けた圧電素子の自己発電により各センサに対し恒久的に電力を供給するため、バッテリー寿命による制約を受けない。各センサに対して電力が供給されると、センシング結果が自動で無線送信され、走行列車がこれらのデータを受信して基地局まで運ぶ仕組みとなっている。携帯電話の設置が不要となるうえ、圧電素子自体がトリガとなることで列車検知の機構も兼ねることから、大変シンプルなシステムの構築が可能である。また、列車までの無線送信であり通信距離が短いことから、消費電力の小さい1mWの特定小電力無線の使用が可能であり、発電量の小さい振動発電でも動作することに特徴がある。なおアプリケーションとして、例えばき裂検知塗料⁽²⁾のようなセンサを導入することで、鋼橋における疲労き裂の発生を監視するシステムの構築が可能である。受信機を搭載した列車を月1～2回程度走行させることで、2年に一度の定期検査を十分補間することができ、疲労き裂の早期発見により、適切なタイミングで補修・補強が可能になる。

本研究では、開床式下路トラス橋において現地測定を行い縦桁各部材に設置した圧電素子の発電特性を調査したうえで、実走行列車に対する通信試験を実施することで、本システムの適用性を検討することとした。

2. 振動発電を利用した電源システムに関する検討

圧電素子の発生電圧は、整流回路を通じてコンデンサにためこまれることで、送信機の動作に必要な平滑な電圧が得られる(図2参照)。本システムでは鋼部材の振動を利用するため、発電量は部材の種別に大きく依存するうえ、圧電素子の大きさや整流回路によっても左右される。ここでは、実橋りょうにおける現地測定を基に、これらの影響を検討した。なお、通過列車は全て10両編成、平均速度約80km/hであり、電圧測定については、入力抵抗1MΩのオシロスコープを直接つないで行った。

(1) 部材による発電特性の違い

図3に、各部材に生じたひずみの波形と、設置面積が80x80mm²で厚さ1.0mmの圧電素子の発生電圧波形を示す。ひずみと電圧は同様の波形を示しており、電圧がひずみに応じて発生している様子が確認できる。下フランジと腹板では、ひずみの振幅は同程度であったが、腹板が下フランジの約6倍の電圧を発生した。これは、発生電圧がひずみ速度に大きく依存するためであると考えられる。補剛材上端では、車軸通過時に振幅が大きく鋭敏なひずみを生じることから、比較的大きな電圧を発生した。しかし、電圧が単発であり波数が少ないため、整流処理による電気エネルギーの収集を考慮すると、腹板のように電圧の波数が多くなる部材の方が有利である。また、レール継目の有無による比較を行ったところ、レール

連絡先 東京都国分寺市光町2-8-38 財団法人 鉄道総合技術研究所鋼・複合構造研究室 TEL042-573-7280
キーワード 圧電素子, 振動発電, 無線送信, センサネットワーク, 疲労き裂, 導電性表面材料

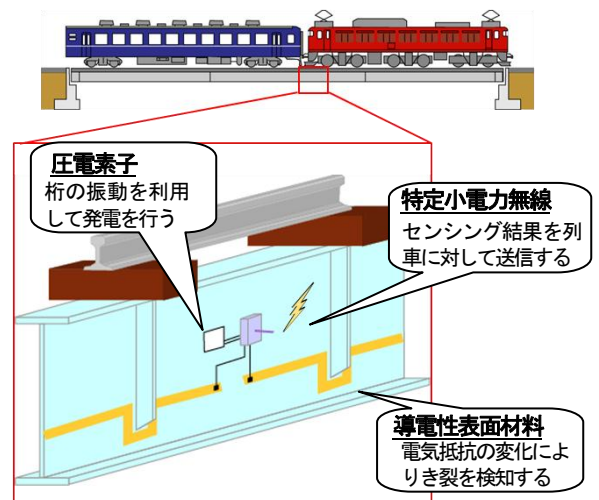


図1 システムの概要

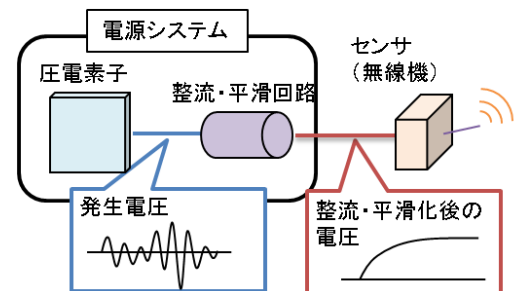


図2 電源システムの概要

継目の効果により腹板の発生電圧は4倍程度の差が生じることがわかった。これらの結果から、圧電素子の設置場所は、腹板のように固有振動数が高く、レール継目による衝撃の影響を受けやすい部材が望ましいといえる。

(2) 圧電素子の面積による影響について

ここでは、圧電素子の面積が、発生電圧ならびに整流・平滑化後の出力電圧に及ぼす影響を分析する。図4に、レール継目直下の腹板中央における面積の異なる圧電素子について、先頭の一台車通過時における発生電圧と、全波整流回路による整流を行い静電容量 $47\mu\text{F}$ のコンデンサにより平滑化した電圧の最大値を示す。図4の結果から、本試験において圧電素子の発生電圧は面積 1600mm^2 で頭打ちとなっているが、整流・平滑化後の電圧は素子の面積に応じて大きくなっている。これは、整流・平滑化後の電圧が、圧電素子から得られる電流にも依存しているためである。なお、整流・平滑化後電圧は、整流回路や平滑回路の種別にも大きく依存する。本研究ではこれらに関する検討も行ったが、紙面の都合から別途報告することとする。

3. 鋼部材の振動による発電を利用した通信試験

通信システムの適用性を検討するため、出力 1mW の特定小電力無線ならびにセンサ、整流・平滑回路を内蔵した無線送信モジュールを作製し、実橋りょうにおいて走行列車に対する通信試験を行った(図6)。なおセンサについては、前述の疲労き裂センサと同様に抵抗を検知する方式の光電センサを使用した。電源システムの仕様については前章までの検討から、レール継目直下の縦桁腹板中央に $80\times 80\text{mm}$ の圧電素子を設置し、整流回路に全波整流回路を使用した。

7本の通過列車(平均速度約 80km/h 、10両編成)に対して通信試験を行った結果、列車一本あたり平均5回の送信を行い、最後尾車内に受信機を持って乗車してセンシング結果を平均3.7回受信することに成功した。この結果から、振動発電を利用した電源システムにより無線送信とセンシングを行うのに十分な発電量が得られることを示し、また走行列車に対して通信が確立できることを確認した。なお、センサについては実橋りょうに存置しており、耐久性についても確認している。

4. まとめ

鋼鉄道橋の部材振動による圧電素子の発電を利用して、センシングならびにセンシング結果の無線送信を行い、これを走行列車で回収するモニタリングシステムを構築した。本研究では、実橋りょうにおける現地測定を基に電源システムに関する各種の検討を実施したうえで、実走行列車に対する通信試験を行うことで、本システムの適用性を示した。

参考文献 1)小林, 平井: センサネットワークで構造物を監視する, RRR, 2009

2)坂本, 田中, 江成, 鈴木, 井上, 長瀬: き裂検知可能な導電性表面材料の開発, 土木学会年次講演会, 2006

3)高村: コッククロフトウォルトン回路の入力波形に対する動作, 電気学会論文誌C 108(4), 1988

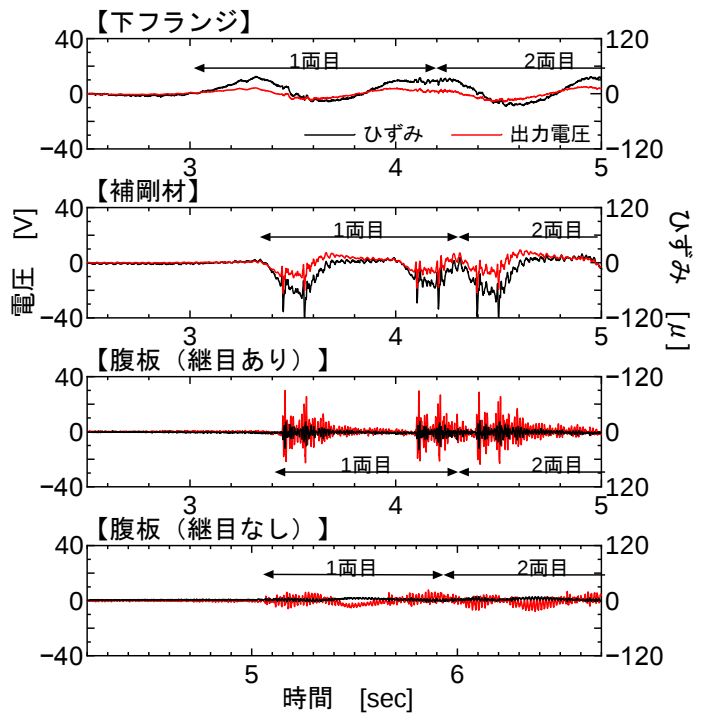


図3 部材ごとの発生電圧・ひずみ波形

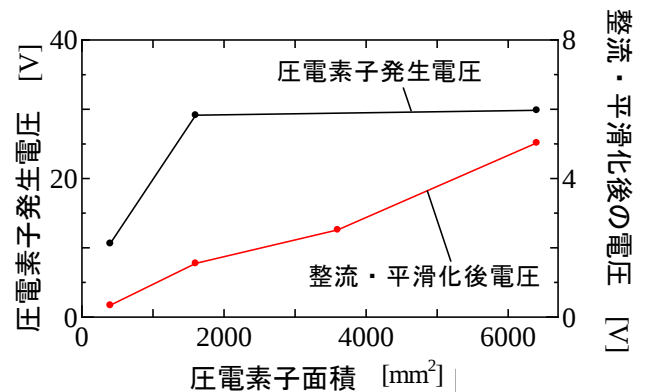


図4 発生電圧および整流・平滑化後電圧

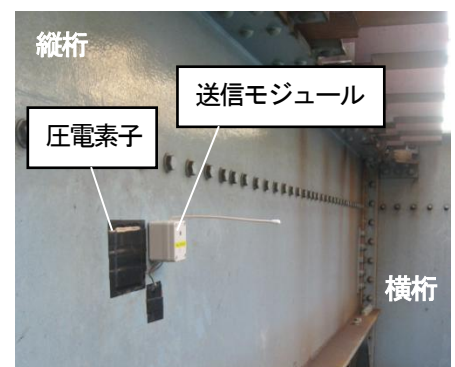


図5 通信試験の設置概要

表1 通信試験結果

1列車通過あたりの送信回数	最後尾車内での受信回数
平均 5 回	平均 3.7 回