

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信  
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

# 駅建築仕上材の 損傷を知らせる

駅舎などの鉄道建築物では、列車通過時に圧力変動や列車振動を受けます。その結果、仕上材の固定用ビスが緩んだり、ボード隅角部に亀裂が生じたりすることがあり、時として列車運行に支障する可能性があります。そこで、列車通過時の振動データを活用した駅建築仕上材の損傷検知アルゴリズムを提案するとともに、仕上材用振動センサーのプロトタイプを製作していますので、その内容について紹介いたします。



**山田 聖治**  
Seiji Yamada  
構造物技術研究部  
建築研究室  
主任研究員  
[専門分野] 建築構造



**川崎 邦弘**  
Kunihiko Kawasaki  
信号・情報技術研究部  
ネットワーク・通信研究室  
室長  
[専門分野] 無線通信、  
EMC

## はじめに

駅舎などの鉄道建築物では、列車通過時に圧力変動(☞参照)や列車振動を受けており、近年の列車高速化と相まって、仕上材の固定用ビスの緩みやボード隅角部の亀裂、下地材の溶接切れなどの損傷や劣化が生じることがあります<sup>1)</sup>。このような仕上材の損傷や劣化は、建築物全体の崩壊には直結しませんが、時として列車運行の障害とな

ったり、利用者へ危害を加えたりする可能性があるため、早い段階で変状を検知することが望まれます。これまでは、目視による検査がなされてきましたが、建築仕上材は種類が多く、施工方法や固定方法もさまざまなため、固定用ビスの緩みやボード亀裂を直接モニタリングすることで損傷程度を把握することは必ずしも容易ではありません。そこで、仕上材の損傷をセンサーによって直接確認するのではなく、仕上材の応答加速度などの時刻歴データを処理することで経年変化を見出し、損傷を推定する手法の適用を考えました。イメージとしては、列車通過時の

## ☞ 圧力変動

流体の内部の一つの面を流体が垂直に押す力の単位面積当たりの値を「圧力」と言い、圧力が時間的に変動することをいいます。

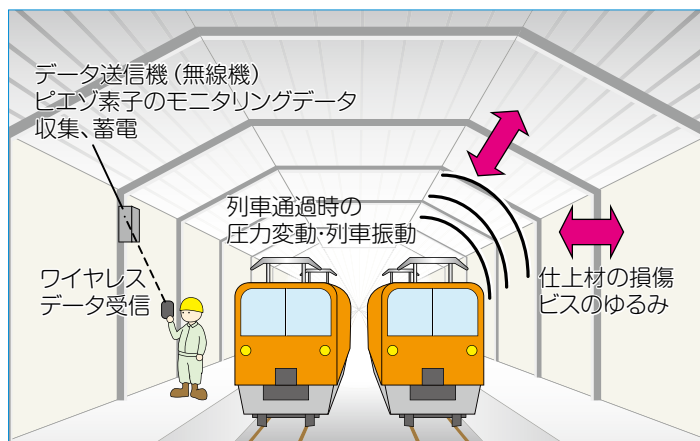


図1 モニタリングシステムのイメージ

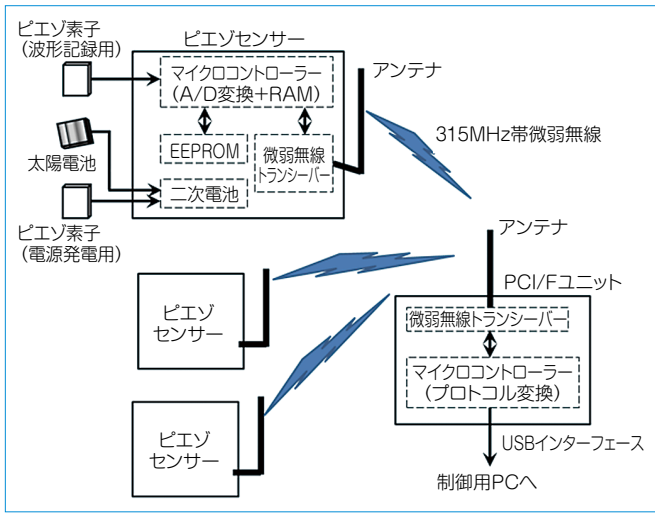


図2 システムのブロック図

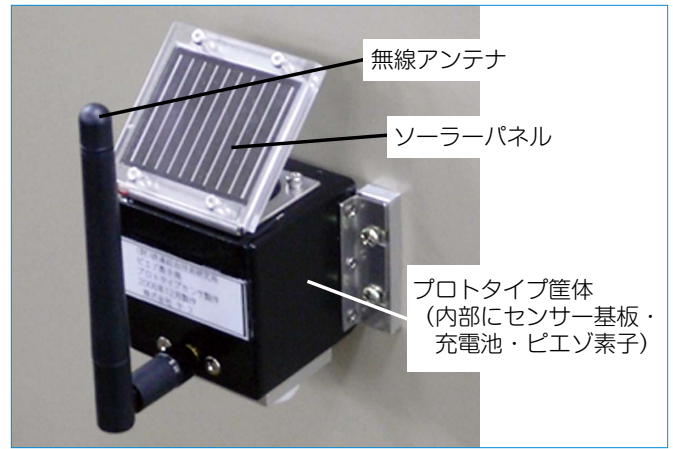


図3 センサーのプロトタイプ

圧力変動や振動を入力源として利用した図1のようなモニタリングシステムを検討しています<sup>2)</sup>。具体的には、圧電効果(☞参照)を持つピエゾ素子を利用した仕上材用振動センサーを開発し、得られた振動データを用いた損傷検知アルゴリズムの提案を行っていますので、以下で紹介します。

## センサー開発

### センサーの要件と開発方針

センサーを設置する仕上材は、柱や梁などの構造部材に比べて耐力や剛性が低く、また設置数量が非常に多くなります。そのため、電源供給やデータ伝送を有線とするのは、配線計画や意匠上の理由から必ずしも容易ではない上に、軽量化も要求されます。小型のセンサーとしては、近年MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)センサーなどが開発されてきており、演算機能を実装したマイクロコンピュータを組み込んだセンサーも開発されてきています。これらにはさまざまな特徴があり、例えば演算機能を持つセンサーでは、計測した生データを演算することでデータ量の伝送量を小さくし、データ伝送における消費電力を抑制す

ることが可能です。ただし、このような機能を付加することはセンサーにおける消費電力上昇につながる場合があります。さらに、センサーからのデータ伝送の方式(タイミングやデータ量)によっても消費電力に違いが生じます。

以上のようなさまざまな要因を考慮した結果、今回の開発では機能を優先せず、軽量かつ低消費電力で無線伝送可能なセンサーを開発することを目標としました。まず、センシングにおける消費電力を低減するために、ピエゾ素子の圧電効果をそのまま利用しています。つまり、計測対象に貼り付けたピエゾ素子が、計測対象のひずみや振動に対応して圧電効果によって発生する電圧を直接測定しています。次に、センサーに高度な処理機能を所有させていません。具体的には、制御用PCから複数のセンサーに対して読み出し要求を行い、要求を受けたセンサーが動作することで、各センサーの蓄積データを収集する方式とし、センサーに所有させる機能・動作を必要最低限にしています。また、制御用PCを移動させながらデータ回収する方式とし、センサーからの伝送距離が短くなるようにしています。

### 主な機能

開発したモニタリングシステムのブロック図を図2に示します。本システムの中核となるセンサー部の基本機能

は以下のとおりです。

- (1) 通常時はスリープ状態となり、ピエゾ素子の発電電圧の入力を待ちます。
- (2) ピエゾ素子の発電電圧がトリガーレベルを超えると、自動的に一定長さの振動波形を記録します。
- (3) 波形記録が終わると、EEPROM(電源が切れても内容が消えないメモリー)に記録開始年月日・時刻と振動波形データを保存し、(1)に戻ります。
- (4) 制御用PCからPCI/Fユニットを経由してデータ送信要求のコマンドを受けると、要求された記録回数分の振動波形データを無線で制御用PCに送信します。このとき、最新の振動波形データから送信します。

本センサーは、長期間にわたり電池交換せずに動作することを目標としているため、消費電力を極力抑えることを目指しています。そこで、プロトタイプでは、低消費電力のマイクロコントローラとEEPROM、微弱無線のトランシーバーユニットを組み合わせ構成しています。電源には二次電池を使用していますが、太陽電池と電源発電用ピエゾ素子による発電電力を利用して常時充電を行い、バッテリー寿命を延伸しています。試作したピエゾセンサー部のプロトタイプの外観を図3に示します。

### ☞ 圧電効果

圧力を加えることで、電圧を発生する現象のことをいいます。

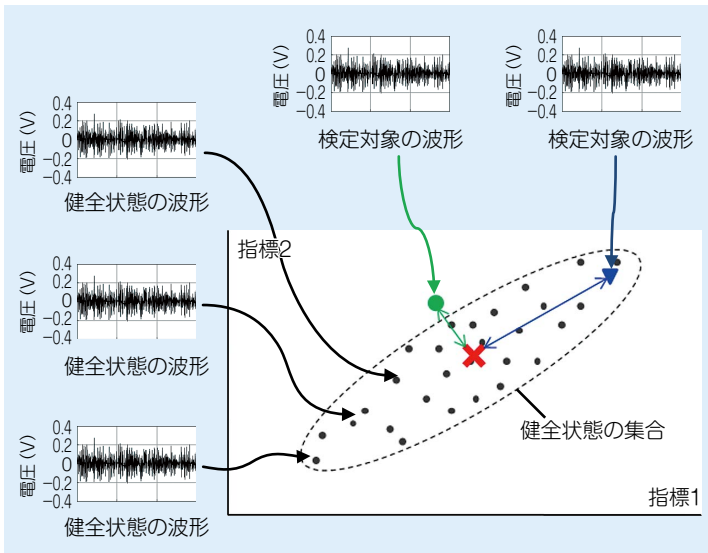


図4 損傷評価方法のイメージ

### プロトタイプを試用

開発したピエゾセンサーのプロトタイプを実験の壁面に仮設し、列車通過時の振動波形を記録・送信させる実験を行いました。実験周辺の電波環境からセンサーと制御用PC間の無線伝送距離において本来の伝送性能を発揮することはできませんでしたが、プロトタイプでも駅の壁面の振動を記録・収集できることが確認できました。電波環境への対応や伝送距離の延伸は今後の課題です。

### 仕上材の損傷評価アルゴリズムの提案と検証

#### 損傷評価方法

振動センサーから得られるデータはランダムな波形となります。一般建築物の構造部材の損傷評価でランダム波形を用いる場合、FFTなどの周波数分析を用い、振動モードと呼ばれる特性を推定することで損傷評価する方法がよく使用されます。しかしながら、仕上材の場合、周囲からのさまざまな影響を受けやすく、実験での測定結果からは、周波数分析の形状が複雑で、振動モードの特定が容易ではない場合も見られました。そこで、損傷評価方法として、振動モードを用いない方法を提案しています。

まず、測定データを時間軸上に並べた時系列モデルから、過去の出力が現在の出力に与える影響を示す係数である自己回帰 (AR) 係数<sup>3)</sup>を推定します。

次に、健全な状態の仕上材から推定したこの係数を集めます。そうすることで健全状態で推定された係数の集合が出来上がります。ちなみに、周囲の環境に変動がなく計測に誤差がなければ、健全状態の係数は必ず同じになりますが、実際にはばらつきがでます。

さらに、パターン認識(☞参照)手法として、マハラノビス距離<sup>4)</sup>を適用します。マハラノビス距離とは、多変数間のデータの相関を考慮した統計的指標であり、検定対象測定値の母集団に対する関係性をその類似性によって明らかにできるものです。

マハラノビス距離を用いた評価方法についてわかりにくいと思いますので、指標を2つとした場合のイメージを図4を用いて説明します。この図で●が健全状態、黒い破線が健全状態の集合であり、×がその集合の平均値を示しています。そして、検定対象として●と▼の2つを考えてみます。すると、

#### ☞ パターン認識

様々な情報の中から、意味のある情報を抜き出すことをいいます。

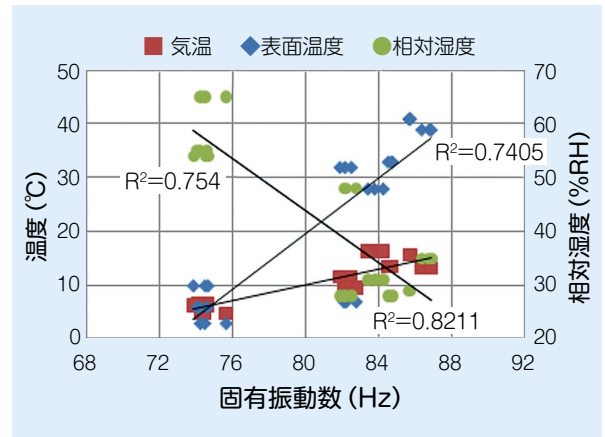


図5 環境要因と固有振動数の相関

横軸や縦軸のどちらかの指標のみで判定した場合は●の方が▼よりも平均値に近くなります。また、平均値との直線距離でも●の方が▼よりも短いことがわかります。また、健全状態のばらつきの最大値と最小値の間にあるため、▼・●の両方ともが健全で、しかも●の方が▼よりも健全であると判断される可能性があります。しかし、健全状態の集合は、図中に破線で示すような範囲に分布していることがあらかじめ推定されていますので、この分布に入っていない●は健全ではなく、中に入っている▼の方がより健全であると評価しています。

#### 環境要因が仕上材に与える影響を考慮した損傷評価方法

前述のように仕上材の場合、周囲からの影響を受けやすい傾向があり、気温などの環境要因に対しても特性が変動することがわかっています。図5は実験結果の一例です。固有振動数との相関に関して、気温・表面温度の減少または相対湿度の上昇に対して固有振動数が減少する傾向があり、環境要因と固有振動数に相関のあることが確認できます。

先ほど示した損傷評価方法を用いれば、この影響があっても評価することが可能ですが、あらかじめ除去するこ



図6 模擬駅舎と実験対象位置

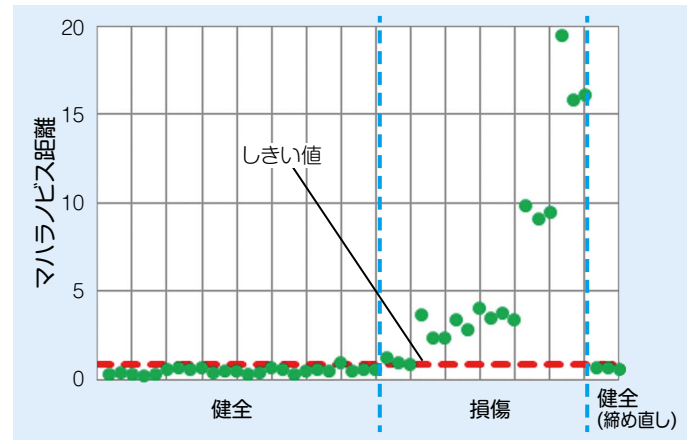


図8 損傷判定結果

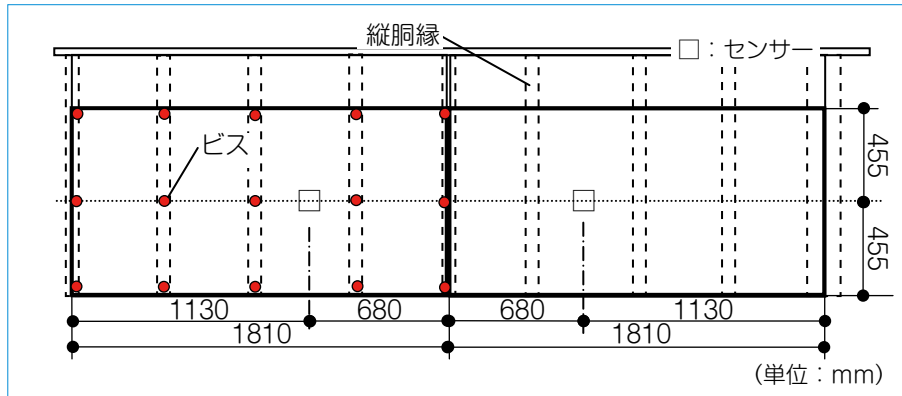


図7 試験体図

とができれば評価精度を高めることができます。そこで、先ほど示した損傷評価方法において、測定データからAR係数を求めた後、環境要因を主成分とした主成分分析<sup>4)</sup>を適用することとしました。これにより、環境要因と損傷による係数変動を分離することを狙っています。

#### 損傷評価方法の検証

図6に示す実物大の模擬駅舎(鉄骨造2階建て、平面形状約15m×約15m、高さ約10m)の外壁(フレキシブルボード、厚さ6mm、図7)を対象に模擬損傷を与え、その程度を評価する実験を行いました。仕上材の状態は、実験開始時を健全状態とし、途中からは列車通過時の圧力変動などによる疲労損傷状態を想定して片方のボードのみ段階的にビスを緩めました。また、最後には全てのビスを締め直しました。

健全状態の測定データのみから推定したAR係数の集合と、各試番のAR

係数のマハラノビス距離を損傷評価指標として損傷状態を判定した結果を図8に示します。ここでは、健全状態と損傷状態のしきい値を、健全状態の平均と標準偏差から「平均+2.58×標準偏差」(信頼区間99%)と設定しており、図中の赤い破線で示しています。損傷程度が大きくなるにつれてマハラノビス距離が大きくなっており、健全と損傷が判定できていることがわかります。また、締め戻した後は健全と判定されています。

#### まとめ

ピエゾ素子の特性を活かした低消費電力のセンサーを開発し、モニタリングシステムを構築しました。また、振動データを用いた損傷評価方法を提案し、実験レベルで良好な結果を確認しました。現時点ではまだ検討事例や実験条件も多くはなく、さらなる検討が必要ですが、今後は実用化に向けたセ

ンサー本体の耐久性・信頼性の向上を目指すとともに、損傷評価方法の検証を深度化し、システムの高性能化を目指していきたいと考えています。RRR

#### 文献

- 1) 山田真左和, 大迫勝彦, 中澤真司, 中島英一: シェルター状駅建物における内壁仕上げ材の劣化に関する研究 その1, 日本建築学会学術講演梗概集, p.495-496, 1998
- 2) 山田聖治, 川崎邦弘, 清水克将, 武居泰: 鉄道駅仕上材の損傷モニタリングシステムの開発, 鉄道総研報告, Vo.26, No.4, pp.47-52, 2012
- 3) 足立修一: ユーザのためのシステム同定理論, 社団法人計測自動制御学会, コロナ社, 1993
- 4) 田中豊, 垂水共之: 統計解析ハンドブック 多変量解析, 共立出版, 1996