

# 鉄道駅仕上材の損傷モニタリングシステムの開発

山田 聖治\*      川崎 邦弘\*\*  
清水 克将\*      武居 泰\*\*\*

## Health Monitoring System for Finishing Materials of Station Facilities

Seiji YAMADA      Kunihiro KAWASAKI  
Katsuyuki SHIMIZU      Yasushi TAKEI

The damage of finishing materials used for station facilities occasionally becomes an obstacle of the train scheduling and the harm to passengers. Therefore we have proposed a damage detection algorithm using only output data of a vibration with the input of pressure variations at the time of the train passage. In addition, we have developed a vibration sensor utilizing material properties of a piezoelectric ceramics. In this paper, we show the results obtained by applying the proposed algorithm to a real-sized structure model, and also the results obtained when we installed the developed sensor at a real station.

キーワード：鉄道駅，仕上材，損傷検知，パターン認識，AR 係数

### 1. はじめに

駅舎等の鉄道建築物では、列車通過時の圧力変動を受けることで、仕上材の固定用ビスの緩みや仕上材隅角部の亀裂、下地材の溶接切れなどの損傷や劣化が生じることがある<sup>1) 2)</sup>。

このような仕上材の損傷や劣化が、建築物全体の崩壊に直結することは稀であるが、時として列車運行の障害となったり、旅客へ危害を加えたりする可能性があるため、早期の段階で変状を検知することが望まれる。

しかしながら、建築仕上材は部位や材料の種類が多く、施工方法や固定方法も様々であることから、例えばコンクリートのひび割れ幅のモニタリングのように、特定の物理量をモニタリングする手法を適用することで損傷程度を定量的に把握することは必ずしも容易ではない。そのため、仕上材の損傷をスクリーニングするためのモニタリング手法としては、加速度などの時刻歴データをデータ処理することで固有振動数等の動特性を算出し、その変動を見出すことで、損傷の有無を判定する手法が有効と考えられる。ただし、衝撃振動試験や打音検査等で既に実用化されているこれらの手法では、動特性を推定しやすくするための強制加振を与えるための機構が別途必要となる。しかしながら、線路上空や高所等の作業が容易ではない場所にも仕上材は多く設置されている。

\* 構造物技術研究部 建築研究室  
\*\* 信号通信技術研究部 通信研究室  
\*\*\* 構造物技術研究部 建築研究室(現 研究開発推進室)

また、仕上材そのものの剛性や耐力は、構造部材と比較して小さいものもあり、損傷モニタリングのための入力損傷を促進してしまう危険性もある。

そこで、上記した検査時等における意図的な入力を用いず、列車通過時の圧力変動を入力として利用し、その際の実出力データのみを利用するモニタリングシステムを検討することとした(図1)。その結果、測定出力データを用いた損傷検知アルゴリズムとして、時系列モデルとパターン認識手法を用いる方法を提案した。また、この中では、仕上材周辺の気温等の環境要因が仕上材の動特性に与える影響を低減することも考慮している。さらに、圧電効果によってひずみに応じた電圧を発生するピエゾ素子をセンサとして利用した、低消費電力な仕上材用振動センサを試作した。本報では、これらの基本的な考え方と検証結果について示す。

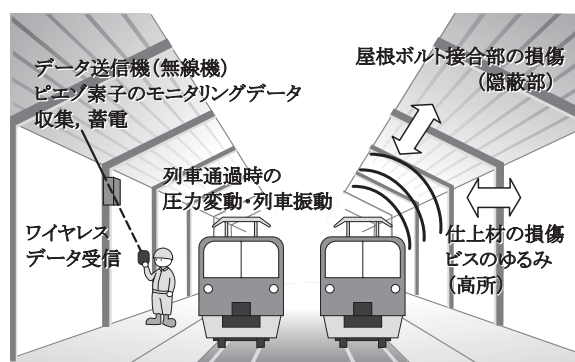


図1 モニタリングシステムのイメージ

特集：構造物技術

2. 損傷検知アルゴリズム

2.1 損傷検知アルゴリズムの基本的な考え方

構造部材のヘルスマニタリングでは、固有振動数の変動による損傷検知がしばしば用いられる。しかしながら、仕上材にセンサを設置した場合には、構造部材との連成の影響が振動波形に現れやすいことから、周波数分析の形状が複雑になり、振動モードの特定が容易ではない場合がある。また、出力データのみを用いる場合には、データ内に存在する入力の影響も考慮する必要が出てくる。以上を考慮し、損傷検知アルゴリズムに用いる指標は、出力データのみから算出可能な時系列モデルの係数とした。また、その指標に対してパターン認識手法を適用することで、損傷の検知を実施するものとした。以下にその概要を示す。

- (a) 出力データの時系列モデルとして以下のAR (Auto-Regressive) モデル<sup>3)</sup>を採用し、その係数(以下、AR係数)を最小二乗法等で推定する。

$$A(q)y_k = w_k \tag{1}$$

ここで、

$y_k$  : 出力データ

$w_k$  : ホワイトノイズ

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_mq^{-m}$$

$a_i$  :  $i$ ステップ前のAR係数

$m$  : モデル次数

$$q : \text{シフトオペレータ} \quad q^{-1}y_k \triangleq y_{k-1}$$

AR係数は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。AR係数を用いた多項式の極からは固有振動数や減衰定数が推定可能であり、ARモデルによって対象物の動特性を表している。なお、本提案では、入力データによる影響を極力低減することを目的として、応答出力のピーク後(入力にあたる圧力変動の値がほぼゼロ)における出力データを使用することにした。

- (b) 健全状態で推定されたAR係数の集合と検定対象AR係数に対して、パターン認識手法の一つである以下のマハラノビス距離<sup>4)</sup>を用いる。

$$D_M = \sqrt{(a_d - \mu_a)^T \Sigma_a^{-1} (a_d - \mu_a)} \tag{2}$$

ここで、

$D_M$  : マハラノビス距離

$a_d$  : 検定対象のAR係数

$\mu_a$  : 健全状態のAR係数の平均

$\Sigma_a$  : 健全状態のAR係数の共分散行列

マハラノビス距離は、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ある。

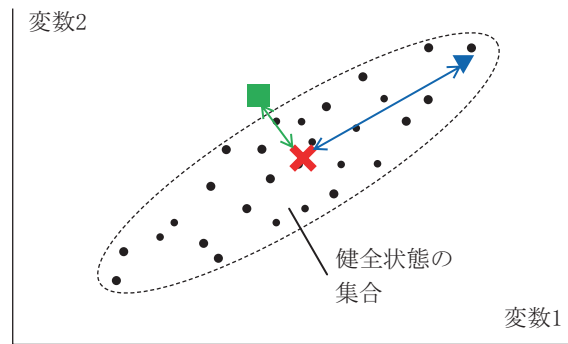


図2 マハラノビス距離の概念図

2変数の場合を例として図2の概念図で説明する。ここで、●が健全状態、×がその集合の平均値として、■と▼を検定対象とする。すると、横軸(変数1)あるいは縦軸(変数2)のどちらかの変数のみを用いた場合には、■の方が▼よりもそれぞれの軸における平均値に近いと判定される。また、集合の平均値(×)との平方距離(ユークリッド距離)を用いた場合においても■の方が▼よりも短いと判定されることがわかる。

しかしながら、健全状態の集合は、図中に破線で示す楕円状の範囲に分布していると考えられる。そのため、健全状態の集合への帰属という視点で判断した場合には、▼の方が■より距離が近いと判断されるべきであり、この判断にはマハラノビス距離が有効である。

2.2 仕上材の動特性と環境要因の依存性

前節で示した損傷検知アルゴリズムは、健全状態の集合と検定対象の距離を用いる手法である。健全状態の集合の大きさは、健全状態の推定結果におけるバラつきに依っているが、測定ノイズやモデル化誤差による影響の他に、環境要因による推定値の変動が想定された。そこで、環境要因の依存性について以下の検討を行った。

2.2.1 環境要因の影響低減

仕上材の動特性の環境要因に対する依存性の低減手法として、本論文では主成分分析<sup>4)</sup>を用いることとした。具体的には、出力データから推定されたAR係数に主成分分析を適用するものである。つまり、AR係数の推定値で構成された行列Aを、

$$S = TA \tag{3}$$

となる行列Tによって環境要因を主成分とした空間上に射影する。ここで、SはTによって射影されたAR係数の集合である。この空間では、その主成分(環境要因)の変動が、その軸に対して無相関となるため、主成分ではない要因(損傷)による変動と分離することが可能となる。



図3 模擬駅舎と実験対象位置

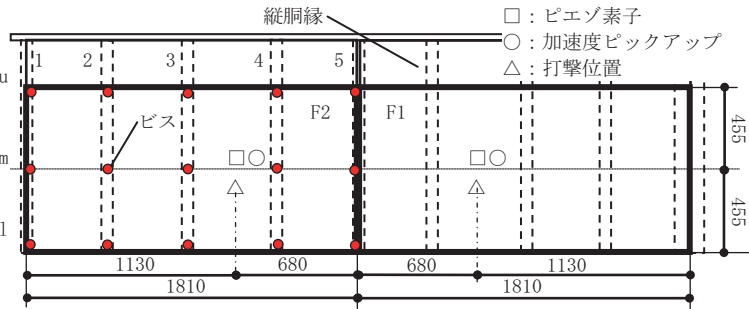


図4 試験体図

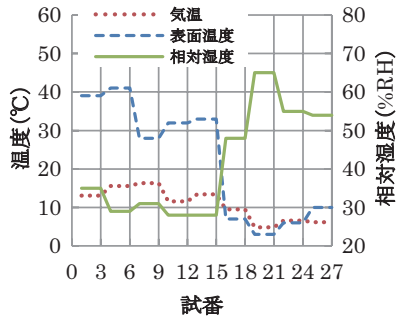


図5 環境要因の変動

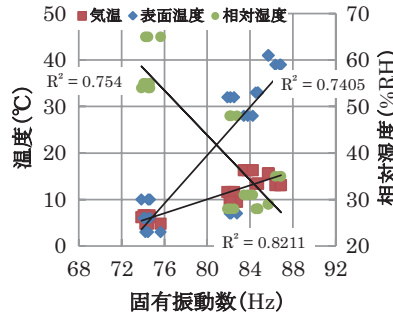


図6 環境要因と固有振動数の相関

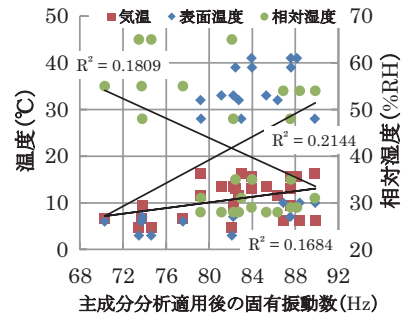


図7 環境要因と主成分分析適用後の固有振動数の相関

2.2.2 環境要因との相関に関する実験

(1) 実験概要

図3に示す実物大の模擬駅舎（S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、 $t=6\text{mm}$ ）を対象に実験を実施した。測定対象の外壁の状況を図4に示す。

図4中のF1を対象に、温度・相対湿度が異なる9条件下で、それぞれ3試番ずつの計27試番で加振した。加振方法は、加振力を一定とするためにゴム球の自由落下による打撃加振とし、図4に示すフレキシブルボード中央付近を打撃している。測定対象は、フレキシブルボード上に設置したピエゾ素子（チタン酸ジルコン酸鉛（PZT）系セラミックス、 $H20\text{mm} \times W20\text{mm} \times t1\text{mm}$ ）の出力電圧波形と圧電型加速度ピックアップによる加速度波形とし、サンプリング周波数2kHz、バンドパスフィルタ10-500Hz、1サンプルあたりのデータ時間長0.4secとした。なお、ここでピエゾ素子を使用しているのは、3章で示すセンサ開発の基礎データを得るためである。

打撃加振直前には、模擬駅舎近傍の百葉箱において温度・相対湿度を測定し、また放射温度計を用いて試験体の表面温度を測定した。

(2) 実験結果

環境要因（温度・相対湿度・表面温度）の変動を図5に、主成分分析せずにピエゾ素子の発生電圧波形から推定した固有振動数（ARモデルの次数24）との関係を図6に示す。実験を秋季から冬季にかけて実施したため、気温の変動は4.8～13.1℃とあまり大きくなく、相対湿度

で28～65%RH、表面温度で3～41℃の変動があった。固有振動数との相関に関して、それぞれの環境要因と比較すると、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上昇する傾向があった。フレキシブルボードは温度や相対湿度にあわせて伸び縮みする<sup>5)</sup>ため、気温の上昇にあわせて見かけ上の剛性が上昇し固有振動数も上昇すると予想された。本実験では気温や相対湿度が一定ではないためにこのような性状を示していないが、相対湿度が比較的一定なデータ（試番1～15）を用いた場合には、気温の上昇に対して固有振動数が上昇した。

主成分分析を適用した後、行列Tの逆射影によって算出したAR係数を

$$A_p = T^T S \tag{4}$$

の関係から推定し、固有振動数に相当する値を求めた場合の環境要因との関係を図7に示す。射影の影響で固有振動数は元の値から変化しているものの、図6において大きかった環境要因との相関関係が、全ての要因において低減していることがわかり、主成分分析による手法の有効性が確認できた。

2.3 環境要因への依存性を考慮した損傷検知アルゴリズム

2.3.1 損傷検知アルゴリズム

以上を踏まえ、本論文で提案する損傷検知アルゴリズムの詳細は、以下ようになる。

- (1) 出力データからAR係数を推定（式(1)）

特集：構造物技術

(2) 主成分分析を適用して環境要因による影響を低減したAR係数を推定(式(3)および(4))

(3) マハラノビス距離を適用して損傷を検知(式(2))

2.3.2 実験による検証

(1) 実験概要

図4のフレキシブルボード2枚(F1, F2)を対象に模擬損傷を与え、検知可能かについて実験を行った。仕上材の状態は、表1のように実験開始時を健全状態、7回目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F2のみ段階的にビスを緩めた。また、最後には全てのビスを締め直した。加振方法・回数、測定方法は前章と同じである。なお、損傷検知実験では温度・相対湿度・表面温度を計測していないが、約3か月にわたってランダムに実験日時を選定しており、環境要因にばらつきがあったと想定される。

(2) 実験結果

健全状態(試番1~18)の測定データのみから行列Tを計算し、健全・損傷両状態の $A_p$ を推定した。そして、健全状態の $A_p$ の集合と、各試番の $A_p$ のマハラノビス距離を求めることで損傷程度を検定した。

主成分分析を適用していない時の結果を図8に示す。なお本報では、健全状態と損傷状態の閾値を、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%)と設定した。閾値を図中の波線で示す。この図から、損傷がすすむにつれてマハラノビス距離が大きくなり、閾値を上回る傾向を確認できる。しかし、軽微な損傷を想定した損傷1,2(試番19~28)を全て健全と判定しており、損傷による変動と環境要因などその他の要因による変動を区別しきれていないと考えられる。

次に、主成分分析を適用した時の結果を図9に、縦軸を図8と同じ幅に拡大した結果を図10に示す。これらの図から、センサから離れたビス(図4中のu1)のみを緩めた損傷1の5つの試番(試番19, 20, 22~24)を除けば、全ての試番で損傷と判定できている。また、主成分分析を適用しない場合と比較してマハラノビス距離が大きくなっており、健全と損傷の判定精度(判定しやすさ)が向上していると言える。さらには、締め直しを実施した試番43~45を全て健全と判定できている。

損傷1の場合で損傷の検定精度が良好でなかった理由としては、緩めたビスがセンサから遠かったことだけでなく、センサ周囲のビスが全て固定された健全に近い状態であったことが想定され、実験前から予想された結果であった。実構造物への適用にあたっては、1センサあたりで推定可能な範囲や設置できない範囲の補間方法について、さらなる検証が必要である。また、損傷2の一部(試番25~27)では、損傷と判定されているものの、その値が閾値と非常に近く、閾値の設定にも検討の余地がある。

表1 実験条件

日	打撃試験	試番	仕上材の状態		備考
			F1	F2	
1	1回目	1,2,3	健全	健全	
2	2回目	4,5,6			
3	3回目	7,8,9			
4	4回目	10,11,12			
5	5回目	13,14,15			
6	6回目	16,17,18			
7	7回目	19,20,21	健全	損傷1	ビス1本抜け(u1)
	8回目	22,23,24		損傷2	ビス2本抜け(u1,u3)
8	9回目	25,26,27		損傷3	ビス4本抜け(u1,u3,u4,m3)
	10回目	28,29,30		損傷4	ビス6本抜け(u1,u3,u4,m3,l3,l4)
9	11回目	31,32,33	健全	健全	ビス締め直し
	12回目	34,35,36			
10	13回目	37,38,39			
	14回目	40,41,42			
	15回目	43,44,45			

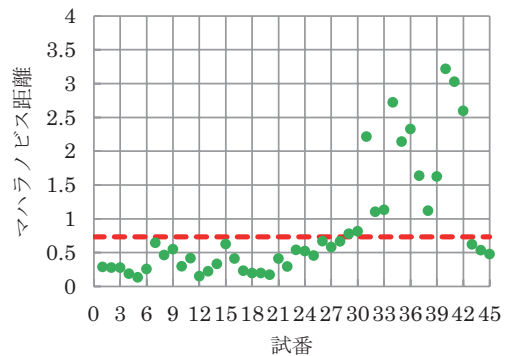


図8 損傷判定結果(主成分分析なし)

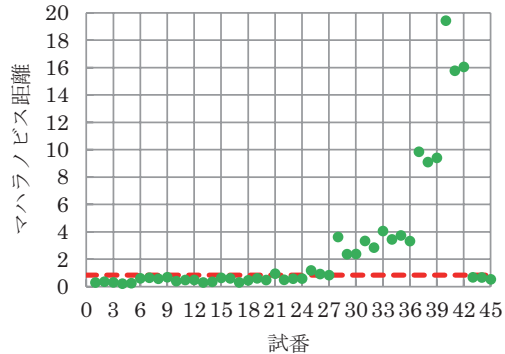


図9 損傷判定結果(主成分分析あり)

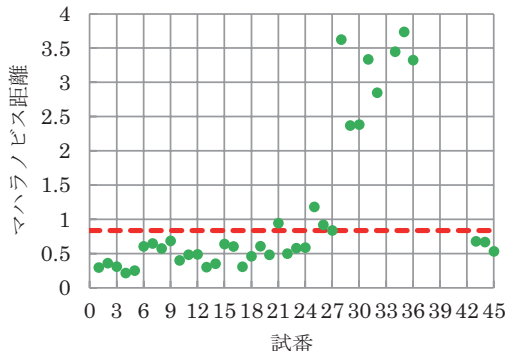


図10 損傷判定結果(主成分分析あり, 図9の縦軸拡大)

なお、実験を通して健全状態としたF1についても、F2と同様に試番1～18を健全状態として、試番19～45を検定対象としたが、閾値を超える試番は1つもなかった。

### 3. センサ開発

#### 3.1 センサの要件と開発方針

仕上材は構造部材に比べて耐力や剛性が低い。また、設置数量が多いため、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ない。

一方、小型のセンサとしては、近年MEMSセンサなどが開発されてきており<sup>6)</sup>、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も開発されてきている。これらには様々な特徴があり、例えば演算機能を持つセンサでは、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も可能である。ただし、このような機能を付加することはセンサにおける消費電力上昇につながる場合もある。さらに、センサ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る。

以上のような各種要因を考慮した結果、今回の開発では軽量かつ低消費電力で、無線伝送可能なセンサを開発することを目標とした。そのため、まず、センシングにおける消費電力を低減するために、 piezoelectric 素子の圧電効果をそのまま利用している。つまり、計測対象に貼付した piezoelectric 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る。また、センサに高度な処理機能を所有させていない。具体的には、データリーダーから複数のセンサに対してポーリングを行い、読み出し要求を受けたセンサが動作することで、各センサの蓄積データを収集する方式とし、センサに所有させる機能・動作を必要最低限にしている。

#### 3.2 主な機能と仕様

開発したモニタリングシステムのブロック図を図11に示す。本システムの中核となるセンサ（以下、piezoelectric センサ）部の基本機能は以下のとおりである。

- (a) 通常時はスリープ状態となり、piezoelectric 素子の発電電圧の入力を待つ。
- (b) piezoelectric 素子の発電電圧がトリガレベルを超えると、自動的に振動波形の記録を開始する。
- (c) 波形記録が終わると、EEPROM（不揮発性メモリ）に記録開始年月日・時刻と振動波形データを保存し、(a)に戻る。
- (d) 制御用PCからPC I/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に送信する。

このとき、最新の振動波形データから送信する。

- また、制御用PCからの制御により以下の動作も行う。
- (e) マニュアルによる即時波形記録およびデータ送信
- (f) センサ内部の設定（ID・リアルタイムクロック・トリガレベル）の変更、状態確認、リセット

piezoelectric センサは、長期間にわたり電池交換せずに動作する必要があるため、消費電力を極力抑えなければならない。そこで、プロトタイプセンサは、低消費電力のマイクロコントローラ（Microchip社製）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る。電源には二次電池を使用しているが、太陽電池と電源発電用 piezoelectric 素子による発電電力を利用して常時補充充電を行い、バッテリー寿命を延伸できる仕様とした。試作した piezoelectric センサ部のプロトタイプの外観を図12に、また主な仕様を表2に示す。

なお、無線伝送に微弱無線を用いていることから、無線伝送品質の劣化による誤動作の防止ならびにデータ損失の検知を確実にするため、伝送符号の冗長化と誤り検出符号の付加を行っているほか、送信データの到達チェックによる連送制御も行っている。

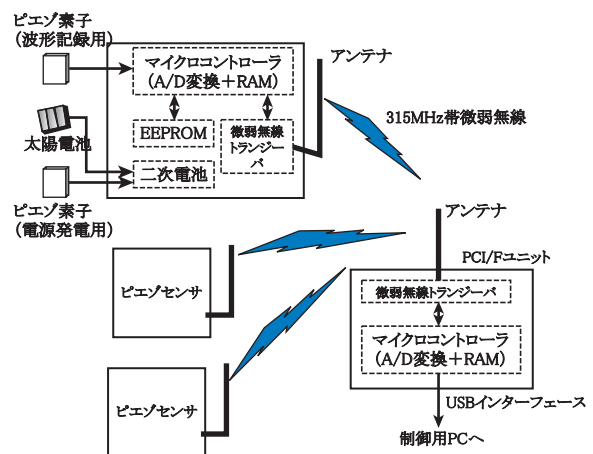


図11 システムのブロック図



図12 プロトタイプセンサ

表2 プロトタイプセンサの仕様

A/D変換	量子化ビット数・分解能	10bit・最小12mV
	最大入力電圧	±6Vまたは±60V ※内部で0～3Vに変換
	サンプリング周波数 fs	100Hz, 200Hz, 500Hz
波形記録	1回のトリガで記録可能な時間長	約6秒@ fs=100Hz, 約1.2秒@ fs=500Hz ※記録時間長は採用するマイクロコントローラの性能に依存
	記録内容	1) 電源投入後の全トリガ回数 2) 記録年月日および時刻 3) A/D変換結果
	記録可能なトリガ回数	90回分 ※90回を超えると最も古いデータから上書き
無線伝送	変調方式・伝送速度	OOK方式・19200bps
	搬送波中心周波数	315MHz
	送信出力	-42dBm ※電波法の定める微弱無線の規定に適合
	アンテナ	ヘリカルホイップ
電源	消費電流	待機時平均：0.5mA typ 波形記録時：6mA typ 無線送信時：10mA typ
	主電源	2次電池（ニッカド）
	補充電源	発電用ピエゾ+太陽電池

### 3.3 プロトタイプセンサの試用

開発したピエゾセンサのプロトタイプを実際の駅の壁面に仮設し、列車通過時の振動波形を記録・送信させた。無線回線設計上は5m程度となっているプロトタイプセンサと制御用PC間の無線伝送距離が、実験を行った駅構内においては約2m程度にとどまった。これは、同一周波数を利用する他の無線システムが使用されていたことが理由と考えられる。しかし、前節で述べた無線伝送制御により、混信や雑音混入による無線制御上の誤動作は全く発生しておらず、有線での測定結果とも整合していたことが確認できている。

(3) ピエゾ素子の特性を活かした低消費電力のセンサを開発し、実駅において試用した。その結果、無線距離に関しては設計より距離が短くなってしまったが、それ以外については基本的な性能が確保されていることを確認した。

上記のように、基本的な性能や適用性に関する成果が得られた一方で、実験数や実証事例についてはまだ十分とは言えない面もある。今後は、センサ本体の耐久性および信頼性の向上を目指すとともに、損傷検知アルゴリズムの検証の深度化を行い、実用化を目指していきたいと考えている。

## 4. まとめ

鉄道駅仕上材の損傷モニタリングシステムの開発を目的として、列車通過時の圧力変動を入力として利用し、その際の実出力データのみを利用するモニタリングシステムを検討した。成果として得られた内容は以下の通りである。

- (1) 出力データのみを用いた損傷検知アルゴリズムとして、ARモデルとマハラノビス距離を用いる手法を提案した。実物大模型に模擬損傷を施した実験によって、提案した手法で損傷程度の検定が可能となったことが確認できた。
- (2) 仕上材周辺の気温等の環境要因が、仕上材の動特性に影響を与えることを確認し、その影響を低減させる手法として、主成分分析を適用した。その結果、実物大模型における実験において、損傷検知精度が向上することが確認できた。

## 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(九州) 学術講演梗概集, A-1, pp.495-496, 1998
- 2) 海老名文隆, 在家善之, 岩崎和明, 山田聖治: 列車通過時の圧力変動を受ける駅内壁仕上げ材の劣化に関する研究, 日本建築学会(北陸) 学術講演梗概集, A-1, pp.425-426, 2010
- 3) 足立修一: ユーザのためのシステム同定理論, (社) 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
- 5) 小南和也: 繊維強化セメント板の温湿度による長さ変化について, 日本建築学会(東北) 学術講演梗概集, A-1, pp.405-406, 2000
- 6) 例えば, 倉田成人: センサネットワークによる構造モニタリング, 計測と制御, Vol.46, No.2, pp.137-140, 2007