

一般財団法人新潟県建設技術センター  
令和7年度 研究助成事業報告書

IoT 技術を活用した建築物の健全性診断技術に関わる事業

新潟工科大学 涌井将貴 神奈川大学 落合努

## 1. 本事業の背景と目的

令和6年能登半島地震では、石川県を中心に新潟県内においても地震、津波被害が発生した。その際、新潟県内では例年よりも少雪であったが、平年並みあるいはそれ以上の降雪があった場合、より多くの建物に被害が生じていた可能性がある。このような背景から豪雪地帯の被災地においては、被災者の人命および生活を守り、迅速な復旧・復興を目指すため、震災直後に避難所となる鉄骨造体育館などはもちろん、住宅の被害状況の把握は急務となる。令和6年能登半島地震において新潟工科大学も被災し、特にN棟塔屋では内外壁が剥落し、鉄筋の損傷が確認された。その結果、耐震補強工事の一環として、N棟3階階段室には鉄骨ブレース平面骨組が設置された。設計上、ブレース接合部はピン接合として構造計算されているものの、実際にはある程度の剛性を有していることが想定されることから、耐震補強効果を詳細に検証することは被災後の健全性評価や応急復旧工事の効果検証に重要な指標となる。

また新潟県だけでなく全国的に、人口減少、都市部への人口集中などを背景に空き家が急増している。国や地方自治体は、空き家対策特別措置法や各種の補助金、税制上の優遇などにより、空き家を解体・改修して利活用する動きを促進している一方、空き家の活用にあたっては、建物の健全性が不明瞭という問題が存在する。特に築年数の古い木造住宅は、図面が残っていない場合があり、耐震診断・改修工事には多額の費用を要することが多い。その結果、改修工事が実施されず、耐震性が不十分なまま居住が継続されるという現状がみられる。また、仮に高い費用をかけて改修工事を行ったとして、費用に見合った結果を得られなかったか把握できないのも改修工事の実施に踏み切れない要因であると考えられている。また、新潟県のような豪雪地帯の場合、地震だけでなく、冬期の大雪によって建物の損壊・倒壊が発生することが危惧される。

こういった問題に対して、調査における人的なリソース不足、調査時間、調査中の安全性、耐震性能や屋根雪荷重の評価精度などが大きな課題となる。そこで、これらの調査をIoTモニタリングシステムにより代替あるいは補助することで自動化できるシステムの開発が望まれる。既往研究において、実建物を対象とした長期間の実測データの収集と分析を行い、鉄骨造体育館を対象とした地震時における建物の健全性診断に活用できること<sup>例え1)</sup>や、冬期中

の木造建物を対象とした屋根雪荷重の推定方法を提案し、その有用性を示してきた<sup>例え2)</sup>。これら実建物で運用している計測システムは、IoT技術を活用することによって低コストで実装可能なため、導入するハードルが低く、より多くの建物に普及できる可能性がある。

一方、これまでの研究では、建物自体に計測器を設置していたものの地盤までは計測対象としていなかった。地震時において各地域の被害状況を迅速に把握、想定するために震度速報は非常に有益であるものの、あくまでも計測器が設置されている地点のみの情報であり、設置されていない地域についても震度を迅速に把握するには限界がある。そこで、建物自体だけでなく、地盤にも計測器を設置することができれば、より高密度に震度分布を把握できると考えられる。また、建物自体に計測器を設置する場合にもこれまでは建物内からアプローチする必要がある小屋梁や床梁などに設置してきた。しかしながら、メンテナンス性を考えると建物内に入らずに計測器を設置できることが望ましい。

そこで本事業では建物の損傷度評価や健全性診断に向けたIoT技術を活用したモニタリングシステムの開発と実建物への運用を目指した検証を行った。特に外部設置した場合の耐久性や計測精度にも着目した。計測する対象は木造建物や新潟工科大学N棟の耐震補強骨組、被災時の機能維持や事業継続性が求められる避難所としての鉄骨造体育館とする。柏崎市内のコミュニティセンター、新潟工科大学においては、地盤アレイ計測を実施したうえで、地震時の震度分布を把握できるように地盤計測用に加速度計を設置する。

## 2. 計測システム概要

### 2.1 計測システムの構成

計測システムの概要を図1に示す。1つの建物ごとにデータ集積、分析用サーバを1台置く。サーバはRaspberry pi 4B、あるいはRaspberry pi 5とし、計測データ量が多い場合はデータ保存用に外付けHDDを設置する。また、計測用のセンサユニットは、1つのRaspberry Pi Zero WH、Raspberry Pi zero 2 WH、あるいはESP32とMEMS加速度センサ、あるいはひずみセンサが接続されている。計測データは、各センサユニットからWi-Fi経由でMQTTプロトコルを通じて、タイムスタンプとともにサーバに随時送

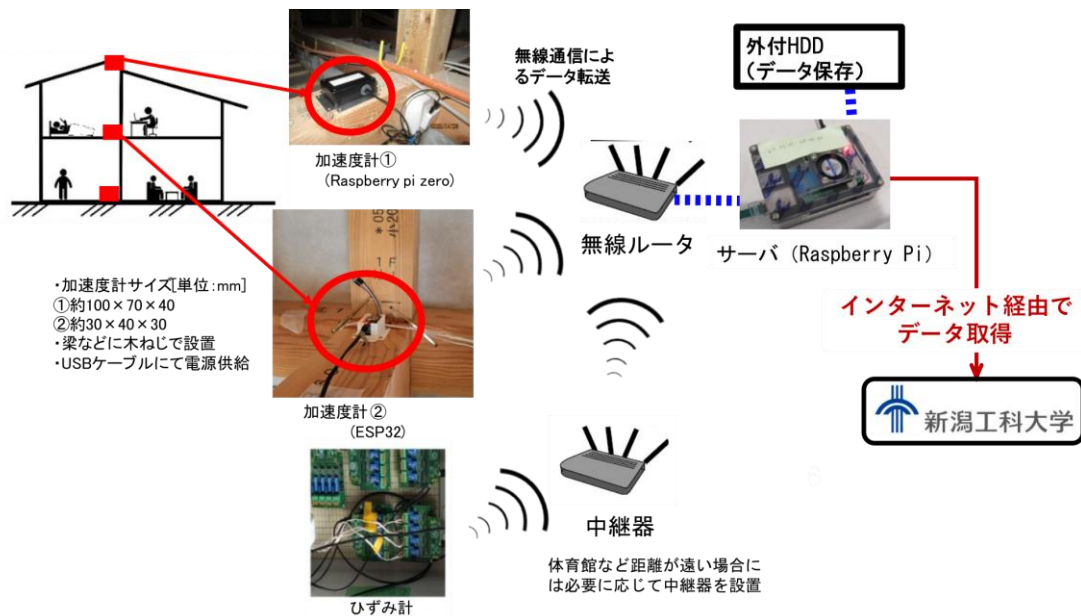


図1 計測システムの概要

信される。各加速度計およびひずみ計は NTP クライアントが作動し、各ユニットの時刻は同期されている。

### 2. 2 加速度計の概要

加速度計は 3 軸計測可能な MEMS 加速度センサ ADXL355 を取り付けた基板を Raspberry Pi Zero WH, Raspberry Pi Zero 2 WH, あるいは ESP32 に SPI で接続している。ADXL355 はサンプリング周波数として 62.5, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000Hz, 計測レンジとして  $\pm 2.0G$ ,  $\pm 4.0G$ ,  $\pm 8.0G$  を選択可能である。今回の計測では、データ取得の安定性と計測範囲から、サンプリング周波数を 125Hz, 計測レンジを  $\pm 2.0G$  とした。サーボ型加速度センサと比べると計測精度は劣るが、小型・軽量・安価であることから実建物の実測に適したセンサである。

### 2. 3 ひずみ計の概要

ひずみ計は AD 変換に HX711 を用いている。HX711 はホイートストブリッジを用いた差分電位の計測を主目的としたマイクロチップである。安定性や計測精度については市販の動ひずみ計には劣るものの、極めて安価であることから実建物の実測において低価格での多点計測が可能となる。サンプリング周波数はひずみ計のクロック周波数によって決まっており、ユニットごとに若干の違いはあるが、87Hz 程度のサンプリング周波数で安定して計測される。

### 3. 対象建物

#### 3. 1 柏崎市内のコミュニティセンター

図 2 に示すように柏崎市内には全 27 棟のコミュニティセンターが設置されており、災害時には避難所として使用される。そのうちの 3 棟については、過去の助成事業などにおいて計測システムを導入し、現在まで運用している<sup>3)</sup>。本事業では既設置の 3 棟以外の 24 棟について、地盤振動を計測するための加速度計を設置することで、地震時におけるリアルタイムでの震度分析を把握できるシステム構築を目指す。気象庁などによる震度計測点は刈羽村を含め

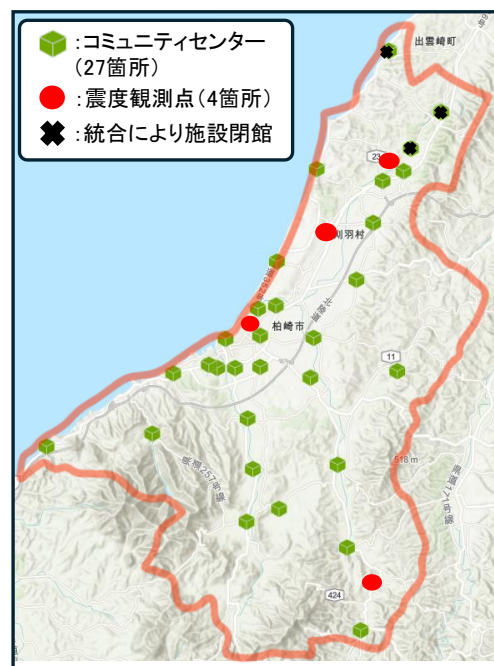


図2 コミュニティセンター位置

図中の赤丸の 4 か所であり，本システムを運用することで，より高密度に震度分布を把握し，詳細な被害分析や避難所の安全性評価に活用できる．また，コミュニティセンター敷地内においては，4 章で後述する地盤アレイ計測を行い，地盤性状を把握することで，地震時の計測記録との比較検証できることを目指す．

### 3. 2 新潟工科大学校舎

令和 6 年能登半島地震において被災した新潟工科大学 N 棟は，耐震補強工事の一環として鉄骨ブレース平面骨組が設置された．ブレース接合部の詳細なひずみ分布を検討するため，高密度なひずみ計測を実施することで，耐震補強の性能を評価できるか検討する．また，コミュニティセンターと同様，大学敷地内の地盤アレイ計測を実施する．

### 3. 3 木造建物

1 章で述べたように既往研究において，木造住宅などを対象とした加速度計測による屋根雪荷重の推定手法の有用性を示してきた<sup>2)</sup>．その際，加速度計の設置位置は，建物内部からアプローチする必要がある小屋梁などを対象としてきた．一方で，計測器のメンテナンス作業において，建物内に立ち入る必要があることはシステム導入のハードルとなることが想定される．そこで，本事業では，計測器を外壁に設置した場合と同様に屋根雪荷重を推定できるかを検証する．また，中古住宅を対象とした耐震補強工事前後の振動計測を行うことで振動特性の評価を実施する．

## 4. 地盤アレイ計測

### 4. 1 計測地点と概要

地盤アレイ計測は，前述した柏崎市内の 27 棟のコミュニティセンター付近に加えて，強震観測地点である K-NET 柏崎と新潟工大敷地内（8 か所）（計 36 か所）で実施した．調査地点の分布を図 3 に示す．図は後述する既往データ（ボーリングデータ<sup>4)</sup>，微動データ<sup>5)</sup>）との比較地点（赤塗りつぶし）が分かるように表記している．

微動アレイ探索は，文献<sup>6)</sup>の方法に従い実施した．観測は半径 0.6m と 10-15m の 2 つのサイズでの同時計測を基本とし，いくつかの地点については 30m 程度のアレイを追加している．観測記録から位相速度を算出し，文献<sup>7)</sup>を参照して AVS30（地表から 30m までの平均 S 波速度）を推定した．図 4 に，AVS30 が比較的大きな 300m/s（地点

19）と比較的小さな 150m/s（地点 24）の例を示す．また，並行してアレイ中心の微動記録から水平上下スペクトル比（MHVR）も算出している．

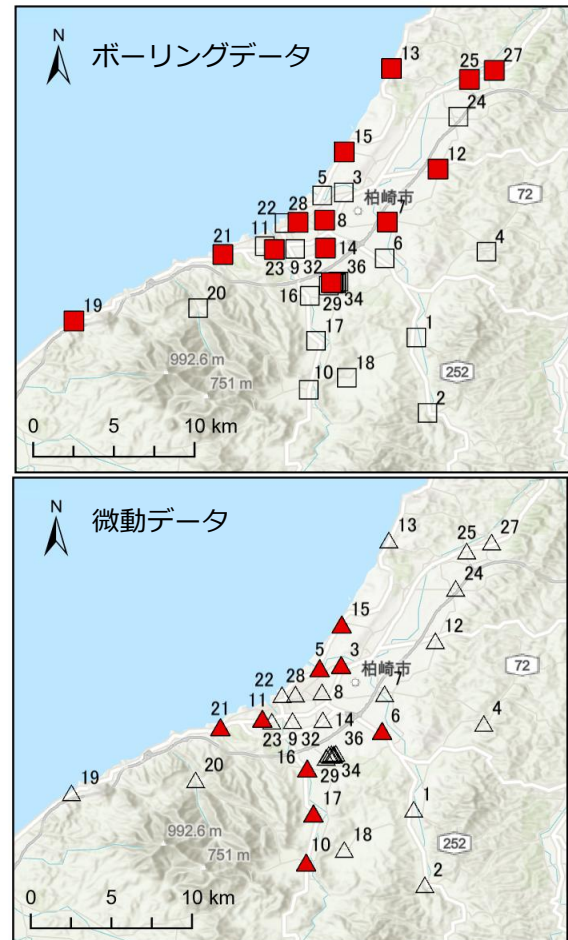


図 3 対象地点と既往データ  
(赤ハッチ：既往データあり)

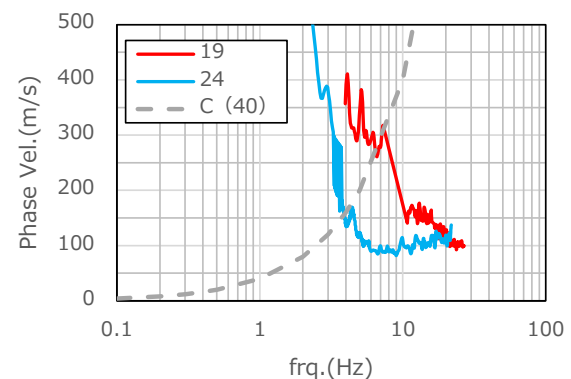


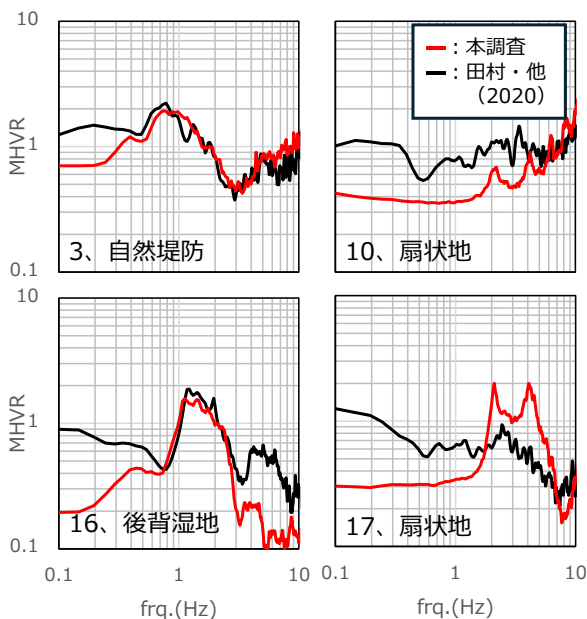
図 4 微動アレイ探索による位相速度の例

### 4. 2 既存データとの比較

微動データの妥当性確認のために，近接した地点（別時

期・別機器)のMHVRの比較例を図5に示す<sup>5)</sup>。図の(a)はよく一致している地点の例、(b)はやや乖離がある地点の例となる。全体として軟弱地盤(自然堤防や後背湿地)は整合が良く、やや硬質な地盤(扇状地など)はやや整合が悪い。これは、そもそもの微動の特性(軟弱地盤だと適用性が高い)と整合する。

また、近隣のボーリング柱状図から算出したAVS30とアレイ探査から推定したAVS30の関係を図6に示す<sup>4)</sup>。図にはJ-SHISで公開されている微地形から算出された結果も併記している<sup>8)</sup>。図より、ボーリングからの推定を正と仮定すると、微動アレイ探査でやや過少、J-SHISでは過大評価となっている。



(a) 一致が良い例 (b) 一致が悪い例

図5 MHVRの比較例

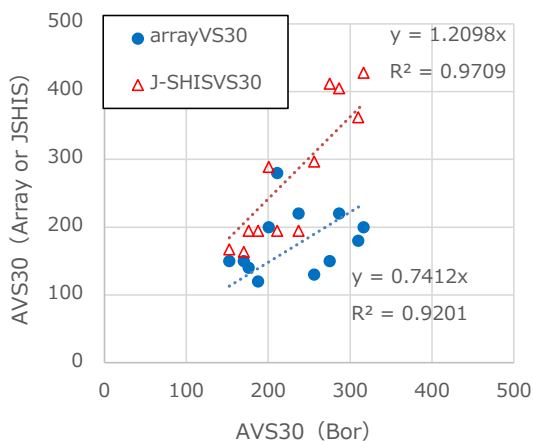


図6 AVS30の比較

#### 4. 3 地盤評価結果

微動アレイ探査結果から求めたAVS30の分布を図7に示す。図の背景はJ-SHISによるAVS30としている。図より、前記した結果と整合し微動アレイ探査によるAVS30の方がやや過少(地盤を悪く評価)している。特に内陸部の谷底低地部などで乖離が大きいことが確認できる。

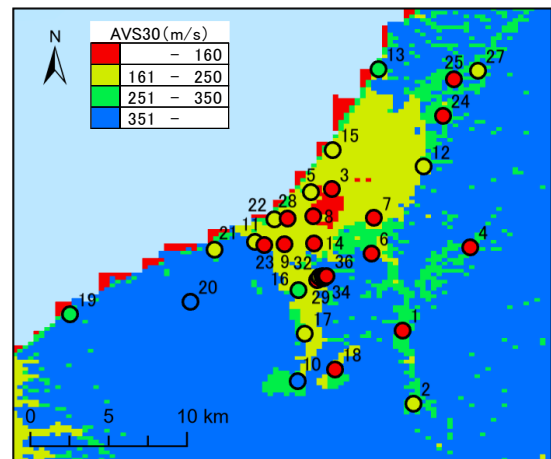


図7 AVS30の分布

#### 5. コミュニティセンターへの計測システムの導入

前述した柏崎市内27棟のコミュニティセンターのうち、過去の事業で設置した3棟を除く24棟について加速度計を1台ずつ新規に設置した。加速度計は他の計測建物と異なり、計測サーバは置かず、加速度計のSDカードに計測データを記録する形式としている。地盤の振動を計測するため、設置位置は屋外の地盤面とし、屋外への設置が難しい場合はできる限り地盤面に近い屋内の1階床レベルとした。24時間連続して計測を行い、気象庁震度階級の震度3相当以上の振動を計測した際に、加速度波形の画像ファイルと加速度記録のcsvファイルをメールで送信するプログラムを試行運用した。本事業期間中に当該震度相当の振動を観測することがなかったため、引き続き計測を実施し、地震時におけるメール送信プログラムの動作確認や、地盤アレイ計測結果との比較検証を行っていく予定である。

#### 6. 新潟工科大学校舎への計測システムの導入

##### 6. 1 計測概要

図8に耐震補強工事の一環として設置された鉄骨平面フレーム骨組の計測位置、部材リスト、各断面のひずみゲ

ージ貼付位置を示す。柱、梁、ブレースは H 形鋼であり、ブレースはガセットプレートに高力ボルトで接合されている。また、上段の梁 G1 は上フランジ、下段の梁 G2 は屋外側フランジ、柱 C1A は壁側のフランジがそれぞれエポキシ樹脂によって既存の RC 躯体に接着接合されている。

柱 10 断面、梁 3 断面、およびブレース 6 断面の計 19 断面 (th01~th19) に、各断面の軸力および強軸の曲げモーメントが計測できるよう H 形鋼に半導体ひずみゲージを複数枚貼付している。ブレース接合部のひずみ分布を詳細に把握することを目的とし、図中の破線で囲んだガセットプレートにもひずみゲージを 8 枚貼付した (GP1~8)。鉄骨フレームは左右対称であることから、フレームの左半分にひずみゲージを密に貼付している。相対変位を算出するた

め、GL, AL, BL に 1 台ずつの計 3 台の加速度計 (acc1~acc3) を設置した。

本研究では塔屋の屋根上に水平起振機 (ゆれるゾウ・YZ-2030: 旭製作所) を設置し、強制加振することでひずみ応答を計測した。

## 6. 2 解析概要

計測結果との比較を行うため、有限要素解析ソフトウェア Abaqus を用いて鉄骨フレーム部分の有限要素解析を行った。解析モデルを図 9 に示す。解析モデルの簡略化のため、ボルト接合部はモデル化せず、ガセットプレートとブレースは一体としてモデル化した。柱 C1A の外側フランジおよび柱脚部はエポキシ樹脂により既存 RC 躯体に接着されていることから、境界条件として外側のフランジと柱脚については変位を拘束している。上段の梁 G1 の上フラ

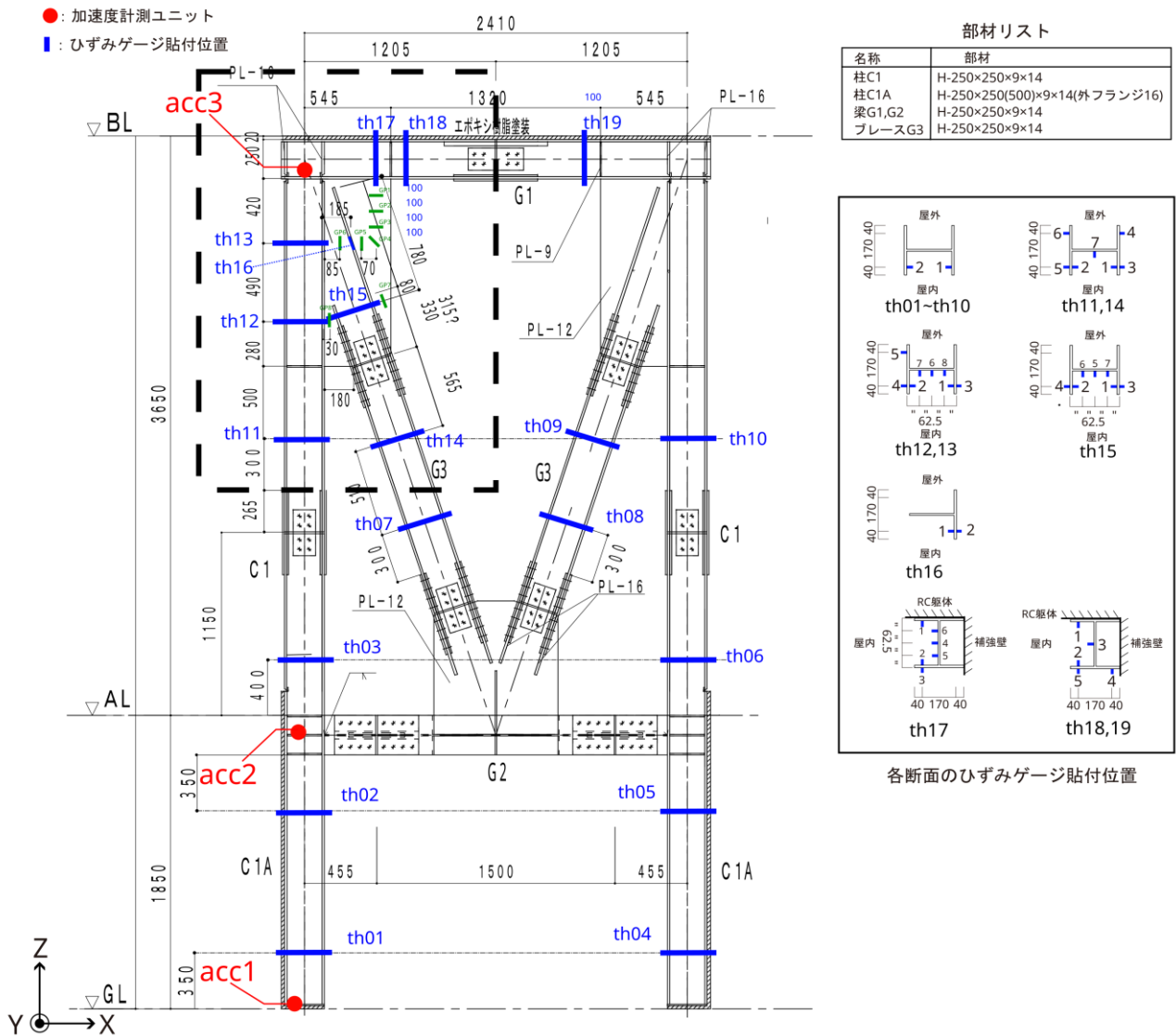


図 8 計測位置の概要

レンジに強制変位 1mm を与えることとし、上フランジの Y 方向変位を固定した場合と自由とした場合の 2 パターンで解析を行った。

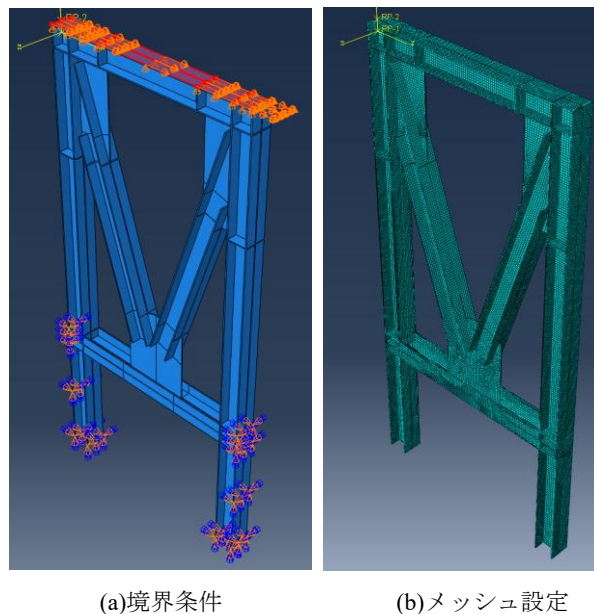
解析結果として、全体変形と Y 方向のひずみのコンター図を図 10 に示す。変形倍率を 1000 としている。また、ひずみゲージを高密度に貼付している左上の接合部分を拡大した結果を併せて示す。全体の変形として、Y 方向固定は Y 方向自由に比べてブレースに生じるひずみが大きく、柱に生じるひずみが小さい結果となった。Y 方向を自由とすると、柱の曲げ変形が大きくなり、ブレースが負担する軸力の割合が減少するためである。接合部に着目すると、ガセットプレートが柱や梁と接続している部分やスチフナが設置されている部分でひずみが大きくなる傾向にある。また、ブレース、柱ともにガセットプレートが接続されている範囲では、軸部に比べてひずみが小さくなることを確認できる。軸部から離れるに従ってガセットプレートが負担する応力の割合が増えていることがわかる。

### 6. 3 計測結果

強制加振実験によって得られたひずみ時刻歴波形をフーリエ変換し、卓越振動数におけるひずみ振幅を算出した。計測結果と解析結果から得られたひずみ分布の比較を図 11 に示す。赤が計測結果、青が Y 方向固定とした解析結果、緑が Y 方向自由とした解析結果であり、それぞれ最大のひずみ値で除すことで基準化している。黒色の破線は計測断面で、ひずみがゼロの位置を示しているため、この破線よりも離れるほどひずみが大きいことを示している。計測結果のみ、計測断面内の最も外側の計測位置における基準化したひずみの値を示している。

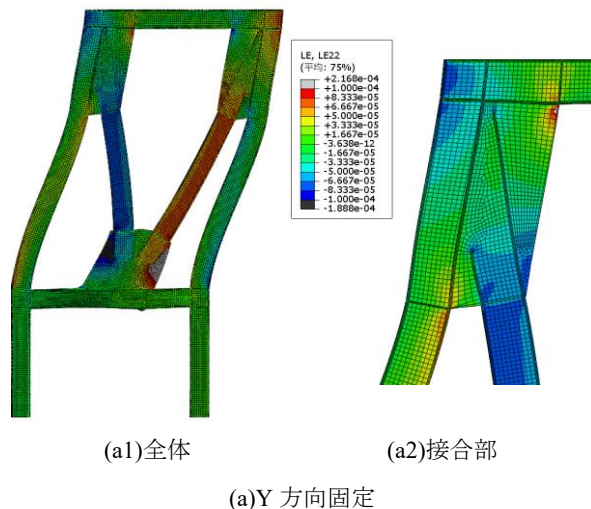
Y 方向自由とした場合の解析結果における柱とガセットプレート、ブレースについては概ね計測結果と同様の傾向を示している。一方で、梁からガセットプレートにかけてのひずみ分布は正負が逆転した結果となった。梁の上フランジにおいて、解析結果ではひずみがゼロであるのに対して、計測結果を 0.3~0.5 程度となっている。実状では梁の上フランジは既存 RC 躯体に接着接合されているため、接着面から伝達されるせん断力によって上フランジにもひずみが生じているものと考えられる。しかし、解析モデルでは鉄骨平面フレームのみをモデル化し、強制変位によって解析を行ったため、上フランジにはひずみが生じていない。より実状に則した解析を行うには既存 RC 躯体をモ

デル化するとともに、適切な接着力の評価が必要となる。今回の計測によって、安価な計測システムによる高密度

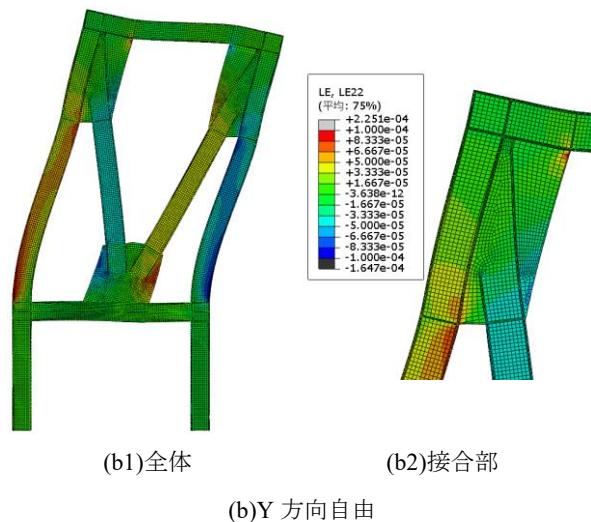


(a)境界条件 (b)メッシュ設定

図 9 解析モデル



(a1)全体 (a2)接合部  
(a)Y 方向固定



(b1)全体 (b2)接合部  
(b)Y 方向自由

図 10 ひずみ分布の解析結果

ひずみ計測は十分な精度でひずみを計測できていることが確認されたものの、解析モデルはより実状に則したモデルとなるよう改善が必要である。

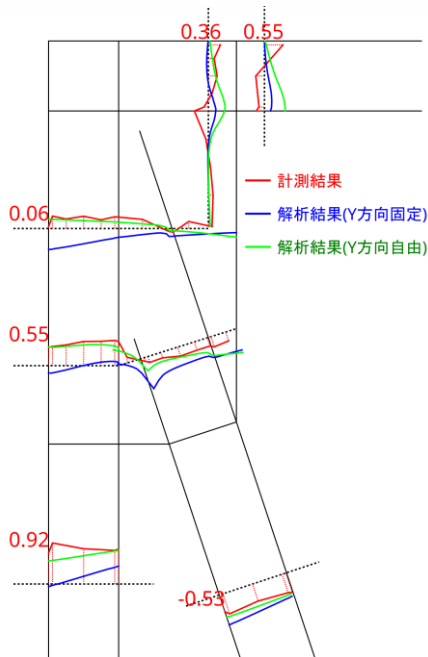


図 11 ひずみ分布の比較

## 7. 木造建物への計測システムの導入

### 7. 1 木造車庫を対象とした検証

対象建物は図 12 に示す小千谷市に位置する木造車庫で、長辺方向が 5.52m、短辺方向が 3.70m で床面積は 20.42m<sup>2</sup>、屋根面積は 28.34m<sup>2</sup>、軒下までの高さが 4.7m となっている。入口と反対方向に 1 階床面積の半分程度の中二階を持つ。建物の固有振動数を算定するための加速度計 (acc3) は、メンテナンス作業を考慮し、図 12 に示すように外壁に取り付けた。屋外に設置するにあたり、防水対策としてケース内は電気用防水ジェルで満たし、電源用 USB ケーブルの接続部分はパテで充填している。また、中二階 (acc2) と 1 階土間 (acc1) にも 1 台ずつの計 3 台の加速度計を設置している。また、データ収録および分析用に計測サーバ 1 台を設置した。

外壁に取り付けた加速度計 (acc3) の計測結果から算出した冬期間 (2025 年 11 月 26 日～2026 年 2 月 28 日) の固有振動数の変化を図 13 に示す。上段は X、Y 方向の固有振動数の変動、下段には X 方向と Y 方向での固有振動数の変化を比較するため、各方向の基準振動数  $f_0$  との比  $f_1/f_0$  を示す。なお、基準振動数  $f_0$  は降雪開始前の 11 月 30 日～

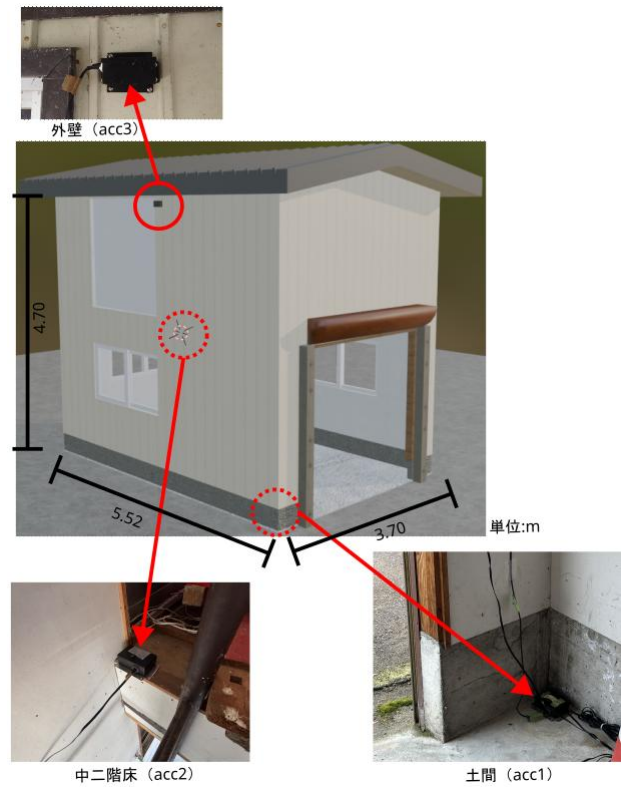


図 12 対象建物と加速度計の設置位置

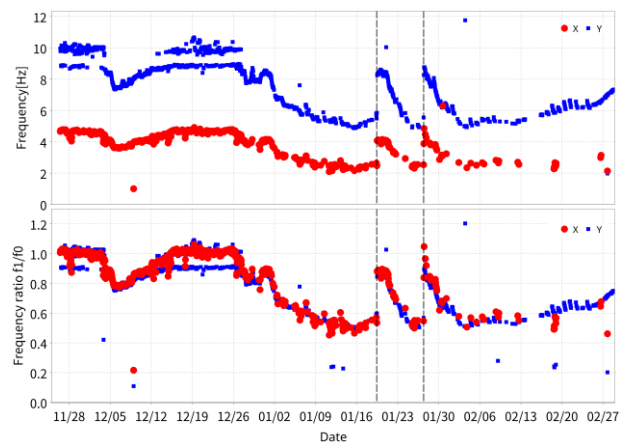


図 13 固有振動数の変化

12 月 3 日までの平均値とした。図中の破線は雪下ろしが実施された日時を示している。

屋根に雪が積もっていない状態での建物の基準振動数は X 方向が 4.7Hz 程度、Y 方向が 9.8Hz 程度であった。Y 方向の基準振動数が X 方向よりも大きいのは Y 方向が長手方向であり、壁量大きいことが原因と考えられる。振動数の変化を見ると、どちらの方向も降雪によって固有振動数が減少し、雪下ろしが実施されると基準振動数近くまで戻っていることが確認できる。振動数比をみると、X、

Y方向の固有振動数の変化は同様の傾向を示している。なお、2月28日時点でも屋根雪が残っているため、固有振動数は1.0まで戻っていない。X方向はY方向に比べるとスペクトル上で明確なピークが観察されない時間帯が多くなり、2月以降のプロット数が減少している。現時点で明確な原因は不明であるものの、X方向である短手方向は建物脇の地上積雪量が多くなっているため、積雪による側圧によって建物の応答が小さくなった可能性が考えられる。

上記の加速度計測結果から屋根雪荷重を推定するには、建物質量が必要となる。ここでは文献9)に示されている標準的な木造住宅の各部位における固定荷重を用いて算定する。この固定荷重は、壁や床を構成する部材種別ごとに、床面積1m<sup>2</sup>あたりの均し荷重として数値が設定されている。算定した建物質量は3266kgであり、この値を用いて屋根雪荷重を推定する。屋根雪荷重の推定結果を検証するため、2025年1月27日に実施された2度目の雪下ろしの際にスノーサンプラーを用いて、屋根雪の積雪深と質量を計測した。計測は2箇所で行い、計測結果と平均値を表1に示す。積雪深は1mを超えており、密度は概ね200kg/m<sup>3</sup>程度であった。

屋根雪荷重の推定結果を図14に示す。図中の破線は雪下ろしの実施日時で、黒色のプロットがスノーサンプラーで計測した屋根雪荷重の平均値である。X方向はY方向に比べてばらつきが大きい傾向があるものの、概ね屋根雪の状況に応じた推定結果となっている。また、計測回数が1度ではあるものの、スノーサンプラーの計測結果と推定値は同程度の値となっており、十分な精度で推定可能である。また、屋外に設置した加速度計は長期間の計測において問題なく動作しており、屋内に設置した場合と同様に計測が可能であった。

## 7. 2 木造家屋を対象とした検証

対象建物は図15に示す新潟県長岡市に位置する木造2階建て住宅である。1階床面積は150.72m<sup>2</sup>、2階床面積は65.14m<sup>2</sup>、延べ床面積は215.86m<sup>2</sup>である。部分2階建てで屋根は棧瓦葺の切妻屋根となっている。築58年を経過しており、対象建物は簡易耐震診断を受けた際に上部構造評点0.38と診断され、現行の耐震基準に照らして十分な耐震性能を有していないことが確認されている。これを踏ま

表1 屋根上積雪量の計測結果

計測点	積雪深(m)	密度(kg/m <sup>3</sup> )	雪荷重(N/m <sup>2</sup> )
1	1.25	183.3	2245.7
2	1.30	208.4	2616.6
平均値	1.28	202.8	2533.3

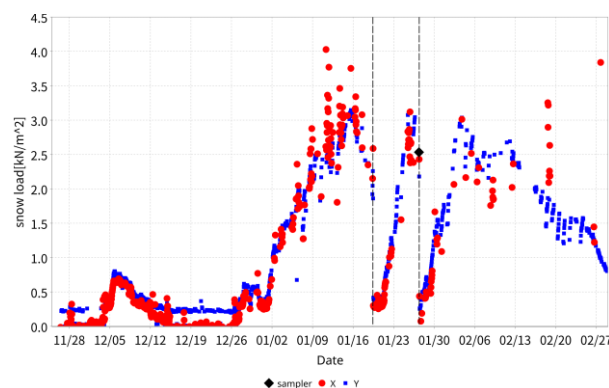


図14 屋根雪荷重の推定結果

えて部分的な耐震改修が実施されている。不足している水平耐力に対して、鉛直ブレース骨組を建物重心付近のX方向、Y方向それぞれに新設している。鉛直ブレース骨組は溝形鋼 [-150×75×6.5×10]を横架材、山形鋼 L-75×75×6を柱材およびブレース材として構成しており、横架材および柱材はそれぞれ既存の梁と土台および柱にコーチスクリューで緊結されている。また、2階床面に構造用合板厚さ24mmを敷設して水平構面の剛性を高めることで、1階に新設した鉛直ブレース骨組へ効率的に地震力を伝達できる構造としている。耐震改修工事は2025年5月5日頃から2025年8月9日までの期間に実施された。図15に示すように加速度計は1階土間(acc1)、北東の2階床(acc2)、南西の2階床(acc3)、小屋梁(acc4)、1階柱(acc5)、および下屋梁(acc6)の計6台設置した。加速度計の設置台数が多いことから、計測サーバと外付けHDDを設置している。

ここでは小屋梁に設置した加速度計(acc4)の計測結果から算出した固有振動数の推移を図16に例示する。赤色のプロットがX方向、青色がY方向をそれぞれ示す。図16(a)の2025年4月1日～2026年2月28日の期間で見ると、X、Y方向ともに概ね同様の傾向を示しており、7月上旬から8月上旬にかけて、固有振動数が一時的に減少した後、再び上昇する傾向が観察された。図16(b)に示す期間中において耐震改修工事が進んでおり、7月1日に台所

および和室の壁・床が撤去され、建物の剛性が一時的に低下し、特に X 方向においては改修前と比較して固有振動数が約 5.2%低下したと推測できる。その後、7月24日には鉛直ブレース骨組が梁や柱に緊結され、改修前と比較して固有振動数は約 5.7%上昇した。質量の変化を無視した場合の剛性に換算すると約 11.7%の増加に相当する。ただし、Y 方向は X 方向に比べると振動数の変化が小さい結果となった。また、図 16(c)に示す 12月1日以降の冬期においては、計測方向によらず降雪に応じた急激な固有振動数の低下が確認された。冬期間であるため降雪によって屋根上に積雪が生じ、建物全体の重量が増加したことによる影響と考えられる。固有振動数は最大で 2.7Hz 程度まで減少しており、基準振動数が 4.3Hz 程度であることを考えると、屋根雪によって 40%程度も低下している。また、破線で示した時点では雪庇や屋根全体の雪下ろしが実施されており、固有振動数が増加していることが観察された。

さらに、計測開始から 2025 年 9 月末までに震度 1 以下の小地震が計 13 回計測された。ここでは、耐震改修工事前後での振動特性を比較するため、1 階土間における PGA が同程度である 2 つの地震記録について例示する。地震時に土間に対する小屋梁と 2F 床それぞれの相対加速度時刻歴波形、相対加速度フーリエ振幅スペクトルおよび位相差分スペクトルを図 17 に示す。フーリエ振幅スペクトルは

ウィンドウ幅 0.2Hz の Parzen ウィンドウで平滑化している。Rel.acc4 は小屋梁 acc4, Rel.acc3 は 2 階床 acc3, Rel.acc2 は 2 階床 acc2 と 1F 土間 acc1 との相対加速度をそれぞれ示している。図中の相対加速度フーリエ振幅スペクトルと位相差分スペクトルにおける縦の破線は、Rel.acc4 がピークとなっている振動数を示している。X 方向では改修工事前後においてどちらも、3Hz, 4Hz, および 6.5Hz 付近でピークが観察されている。最も振幅が大きい 4Hz 付近のピークでは、改修工事前後で 3.84Hz から 4.21Hz と常時微動計測と同様、振動数が増加していることが確認できる。一方、常時微動計測結果では応答が小さく確認しにくかった 3.0Hz と 6.5Hz 付近のピークにおいては、改修前後でそれぞれ 2.80Hz から 2.74Hz, 6.45Hz から 6.54Hz と大きな変化は観察されなかった。Y 方向においては、4Hz, 5.8Hz, および 6.4Hz 付近にピークが観察された。X 方向と同様、最も振幅が大きい 4Hz 付近のピークは改修前後において 4.07Hz から 4.34Hz に振動数が増加している。一方、改修前に観察された 5.79Hz のピークは改修後では観察されなくなった。また、6.4Hz 付近のピークは改修前後で 6.43Hz から 6.35Hz と変化しており、若干であるが振動数が低下している。さらに、X, Y 方向ともに 3~5Hz の範囲における位相差分スペクトルは、どちらの計測位置でもほぼゼロとなっており、小屋梁と 2 階床は同位相で振動しているこ

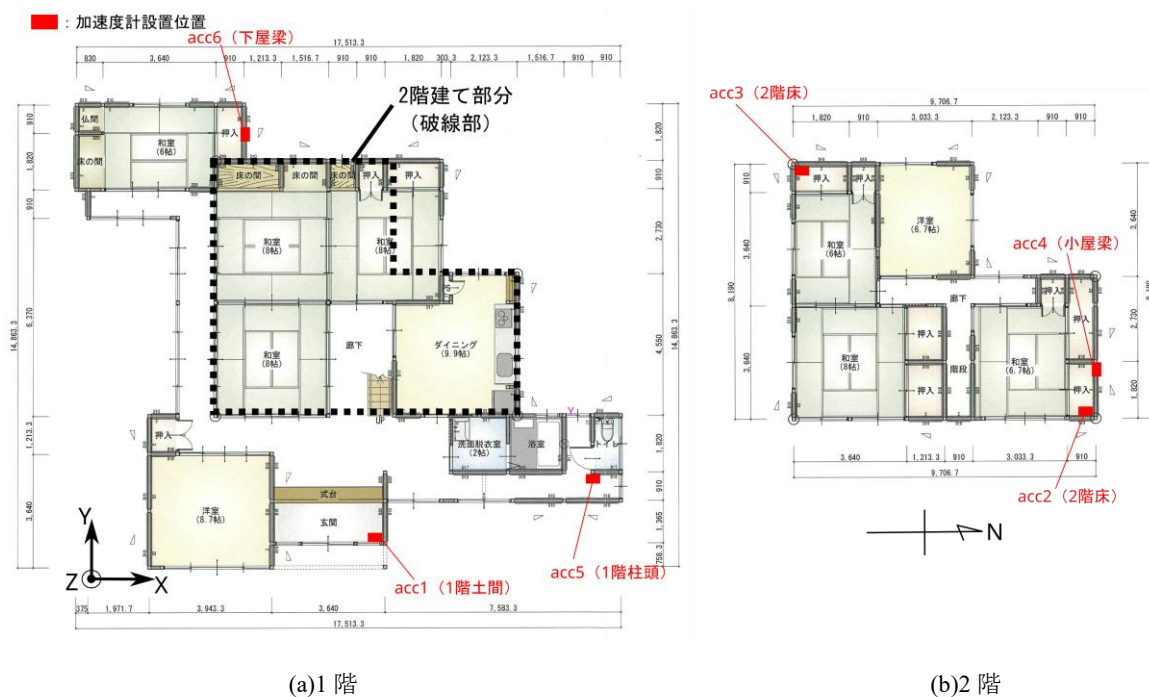


図 15 平面図

とがわかる。改修工事前後で同様の傾向を示しており、改修工事による影響は観察されなかった。一方で、5Hz以上の範囲においては、改修工事前後のどちらも位相のばらつきが大きい傾向が観察された。

図17に示した相対加速度スペクトルからX、Y方向における卓越振動数ごとに算出した平面の固有モードを図18に示す。破線が1階平面、実線が2階平面、黒丸が加速度計の設置位置、赤丸が固有モードであり、黒丸と赤丸を赤色の点線で結んでいる。また、黒と赤の実線は2階床の加速度計であるacc2とacc3の位置を結び、2階床の移動方向を示している。なお、各変位は最も振幅が大きい変位を1として基準化している。X方向におけるモード形状は、Y方向のスペクトルでピークが観察されなかったことから、X方向の並進モードと考えられる。改修工事前後ではモード形状や固有振動数に変化が観察されなかった。Y方向のモード形状は、耐震改修工事前後で直交する方向が変化しているものの、斜め方向の振動モードであることは同様であった。常時微動計測の卓越振動数からも、対象建物は斜めの振動モードが卓越しやすい傾向にあることがわかった。

とがわかる。改修工事前後で同様の傾向を示しており、改修工事による影響は観察されなかった。一方で、5Hz以上の範囲においては、改修工事前後のどちらも位相のばらつきが大きい傾向が観察された。

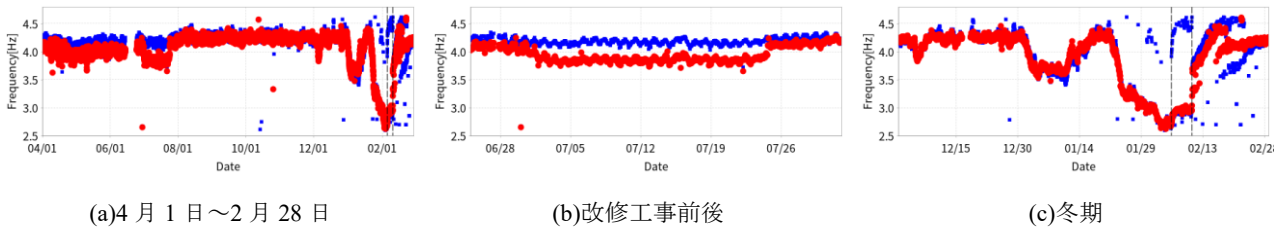


図16 固有振動数の推移（小屋梁）

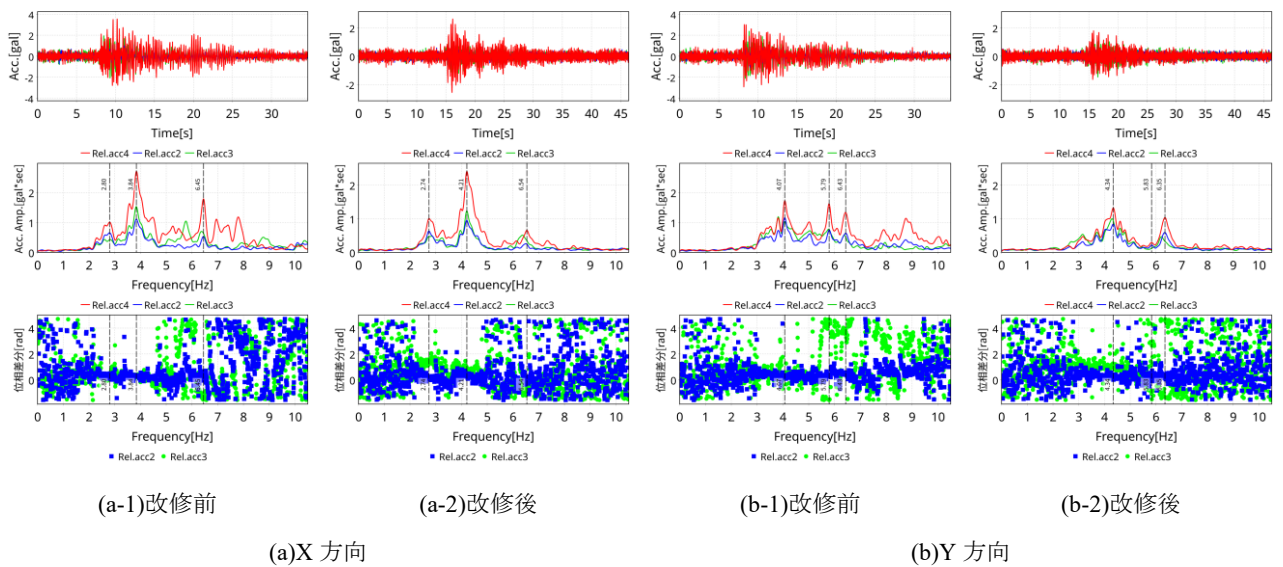


図17 小屋梁と2階床の相対加速度応答の比較

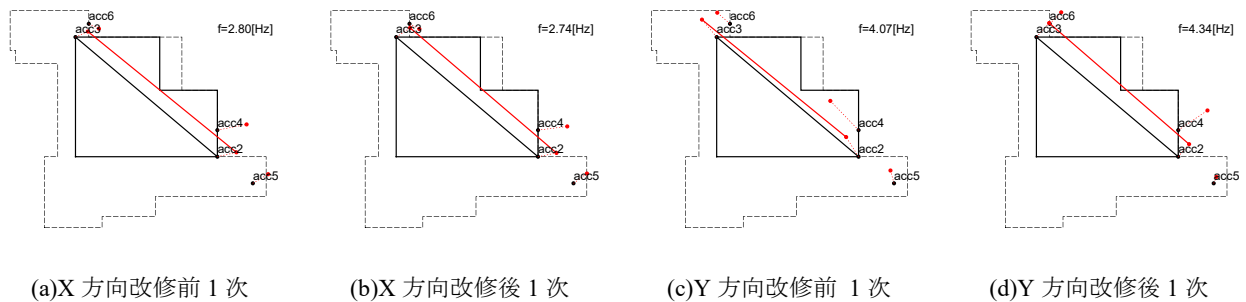


図18 固有モードの比較

本研究では、今後増加が予想される中古住宅の耐震改修について、耐震改修の定量的な効果検証方法の提案に向けた基礎データの取得を目的とし、実在木造住宅を対象とした耐震改修前後での加速度計測を実施した。今後の普及に向けて、計測システムはIoT技術を活用した安価なものであったが、常時微動および小地震を計測可能であり、耐震改修工事に伴う固有振動数の推移を追跡できた。一方で今回の改修工事による明確な固有モードの変化は観察されなかった。さらに、冬期中における降雪によって固有振動数が変化する傾向が観察された。なお、本節の内容の一部は2025年日本地震工学会大会にて発表している<sup>10)</sup>。

## 8. まとめ

本事業では、IoT技術を活用したモニタリングシステムを試験的に導入し、運用を開始した。実施状況と得られた知見を以下に示す。

- 微動アレイ探査結果から、柏崎市内コミュニティセンターの地盤震動特性としてAVS30での評価を実施した。内陸部の谷底低地で既往データとやや乖離が大きかった。また、地域防災に向けた地震時の高密度震度分布の把握を目的として、コミュニティセンター24棟を対象として新規に加速度計測システムの導入を行った。引き続き計測を継続し、計測結果を比較することで妥当性の確認やアラートシステムの改良を実施する予定である。
- 新潟工科大学の耐震補強鉄骨フレームを対象とした高密度ひずみ計測を実施し、ひずみ分布を詳細に把握可能であることを示した。
- 実在木造建物へ計測システムを導入し、加速度計を屋外に設置した場合でも固有振動数の変化から屋根雪荷重を推定可能であることを示した。
- 耐震改修工事を実施した木造家屋を対象とした加速度計測を行い、耐震改修工事前後や冬期における固有振動数の変化を追跡可能であることを示した。
- 一方で、建物によっては固有振動数にばらつきが生じており、よりばらつきが少なくなるような固有振動数の算出方法を検討する必要がある。

## 謝辞

本事業の実施にあたり、柏崎市内のコミュニティセンタ

一関係者の皆様、計測建物関係者の皆様、関係研究室の学生の皆様に多大なご協力をいただきました。また、田村良一氏（元新潟工科大学教授）より微動計測結果のデジタルデータをご提供いただきました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 涌井将貴, 白井佑樹, 伊山潤: 鉄骨造体育館のひずみ計測に基づく地震時のブレース挙動, 鋼構造年次論文報告集, 第29巻, pp.226-231, 2021.11
- 2) M. Wakui, J. Iyama: Estimation method of roof snow load using acceleration measurements: a case study on actual wooden building, Journal Civil Structural Health Monitoring, 2025.3, <https://doi.org/10.1007/s13349-025-00939-5>
- 3) 涌井将貴: 雪国の防災・減災を目指した屋根雪荷重のリアルタイム診断技術に関する事業, 一般財団法人新潟県建設技術センター, 令和元年度研究助成事業報告書, 2020.3
- 4) 国土地盤情報センター: 国土地盤情報データベース, <https://ngic.or.jp/>
- 5) 田村良一, 岩野武尊: 柏崎中心市街地における表層地盤と地震動の増幅, 新潟工科大学研究紀要, 第25号, 2020.
- 6) Tada, T., I. Cho, and Y. Shinozaki: New horizons in the utility of horizontal-motion microtremors, Proc. 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Center for Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2010.
- 7) 紺野克昭, 片岡俊一: レイリー波の位相速度から地盤の平均S波速度を直接推定する方法の提案, 土木学会論文集, No.647, 2000.
- 8) 若松加寿江, 松岡昌志: 全国統一基準による地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築とその利用, 地震工学会誌, No.18, 2013.
- 9) 日本建築防災協会, エドゥプレス, 木造住宅の耐震診断と補強方法 例題編・資料編, 2019.
- 10) 宮尾鈴太郎, 涌井将貴, 伊山潤: 加速度計測による既存木造住宅を対象とした耐震改修前後の振動特性評価, 2025年度日本地震工学会大会, 2025.12