

免震建物に設置してあるケガキ式変位計の時間特性を補充する加速度 センサマイコンボードの開発と高知県内の免震建物への実装

上田真也^{*1}・池田雄一^{*2}

Development of an Acceleration Sensor microcontroller board to Supplement Time Characteristics of a scribe-needle displacement recorder and Its Implementation in a Seismic Isolated Building in Kochi Prefecture

Shinya UETA, Yuichi IKEDA

SUMMARY

We developed an acceleration sensor microcontroller board that can complement the time characteristics of a scribe-needle displacement recorder. Shaking table tests of the developed microcontroller board were conducted to confirm measurement accuracy. The board was installed in 10 seismically isolated buildings in Kochi Prefecture, and field tests were started.

1. はじめに

令和6年8月8日、宮崎県日向灘を震源とする最大震度6弱の地震が発生し、気象庁から「南海トラフ地震臨時情報（巨大地震注意）」が発表されるなど、大規模地震への関心が高まっている。

地面から建物を絶縁した構造である免震建物は、大きな地震が起こった際でも建物の揺れを大幅に抑えられる。免震建物の地震応答特性の観測記録を取得する場合、地震計や加速度計を設置し、強震観測や建物のモニタリングを行うことが一般的であるが、実際に地震計を設置している免震建物はほとんどない。この大きな1つの要因は、高額なコスト（機材費や設置工事費、継続的な維持管理費）が必要になるためである。そのため簡易的に免震建物の地震応答軌跡が取得可能となるケガキ式変位計（図1）が設置されている例が多い。ケガキ式変位計は地震時に免震層の床面に取り付けたケガキ板に、建物に設置したケガキ針で傷を付け水平方向の変位を機械的に記録できる。しかし、時間に関する時間特性を観測することはできない。そのためケガキ式変位計によって、地震時、免震建物の挙動を捉えることができたとしても、繰り返す余震によって免震建物が再度揺れると、先の揺れによる変位応答軌跡と余震による変位応答軌跡が輻輳されてしまい、挙動

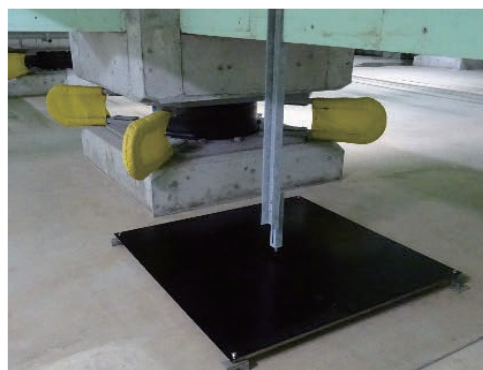


図1 ケガキ式変位計

^{*1} 高知工業高等専門学校 教育研究支援センター 技術専門員

^{*2} 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 まちづくり防災コース 准教授

の区別ができなくなる問題が生じてしまう¹⁾。また、東日本大震災ではケガキ式変位計そのものがうまく機能しなかった例も報告されている²⁾。

そこで本研究では免震建物に設置してあるケガキ式変位計の時間特性を補完計測することのできる安価な加速度センサマイコンボードを開発し、振動台を用いて加振実験を行い、その結果をふまえ加速度センサマイコンボードの計測誤差の妥当性を検討した。その後、加速度センサマイコンボードを実免震建物に設置した。

2. 計測方法の概要

2.1 加速度センサマイコンボードの構成

図2に開発した加速度センサマイコンボード（以下「本ボード」と記す）を用いた計測方法の概要を示す。地震時の振動を免震建物の下部構造（免震層下）と上部構造（免震層上）に設置した2個のMEMS（Micro Electro Mechanical Systems）型加速度センサでそれぞれ計測し、水平方向の加速度波形を2回積分して各層の変位波形を算出する。各層変位波形の差分から算出した層間変位より建物の損傷有無や応答特性、強震動の方向性・強弱の情報を把握することができる。

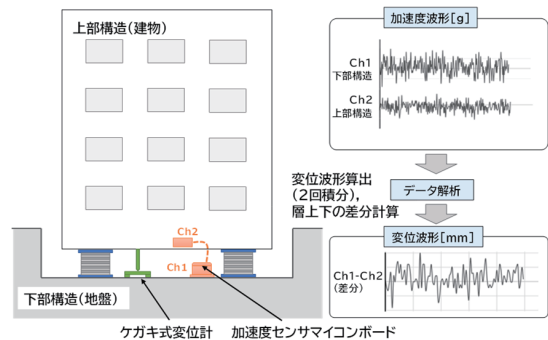


図2 加速度センサを用いた計測方法概要

下部構造に置かれた本ボードが三軸合成加速度 100cm/s^2 以上の加速度を計測した場合、閾値信号を発生させることで下部および上部構造両方のデータ記録を可能としている。計測最大レンジは $\pm 2\text{G}$ (1961cm/s^2)、分解能16bit、サンプリング周波数100Hzにて、全150秒間（閾値検知前50秒から検知後100秒）の加速度データを取得し、RTC（リアルタイムクロックIC）からの時刻情報を付加して、MicroSDカードに記録する仕組みとなっている。停電など電源喪失時には、装置底部にある電池からの電力供給に切り替わり、約24時間は連続稼働が可能となっている。

図3に本ボードのブロック図を示す。本ボードのCPUには非常に低価格（\$8）で入手性が高く、ソフトウェア開発費用が不要という費用面のメリットから市販のRaspberry Pi Pico Wを採用した。このCPUボードはマイクロコントローラに32-bit dual ARM Cortex-M0+、264KBの内蔵SRAM、2MBのフラッシュメモリ、UART×2、SPI×2、I²C×2、PWM×16のインターフェース、またWi-FiやBluetoothなどの無線通信機能を標準で備えている。本ボード全体の消費電力は約0.3W、推奨動作温度条件は $-20^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ である。

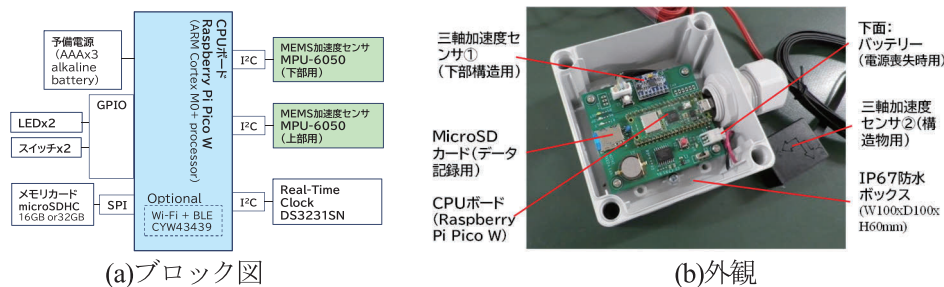


図3 加速度センサマイコンボード構成

MEMS型加速度センサには、三軸加速度および三軸ジャイロ스코プが計測可能なMPU-6050 (TDK InvenSense製) を採用した。このセンサは一般的な静電容量検出方式で姿勢制御などに広く採用されている。発売から十数年が経過していることもあり、非常に安価（\$ 3）で入手できるもののインターフェースはI²C (Inter-Integrated Circuit) シリアルバスのみといった制約や、ノイズ密度が $400 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ と近年の加速度センサと比較して大きめであることに留意が必要である。

2.2 センサノイズの影響

地震時、記録されるデータには広い周波数帯域にさまざまな強度を持つノイズ成分（ホワイトノイズ）が含まれることが予測される³⁾。ノイズ成分は変位波形を求める際に、ノイズレベルに応じて変位波形に誤差を生じる。取得したデータには、バンドパスフィルタBPFを適用し、低域遮断周波数 f_L 以下および高域遮断周波数 f_H 以上の周波数成分を減衰させる。免震建物の弾性周期及び塑性周期の周期帯を考慮し $f_L=0.1\sim f_H=50[\text{Hz}]$ とした。図4に本ボードで記録した静止状態での加速度波形および当該波形のスペクトルの一例を示す。本ボードで使用しているMEMS型加速度センサのノイズレベルは最大で 10cm/s^2 程度、RMS（2乗値の平均の平方根）値で 3cm/s^2 程度である。また広い周波数帯域ではほぼ同じ振幅が存在している（図4 (b)）ことを示しており、0 Hzの振幅は実際の加速度ではなく、A/D変換器の特性や温度ドリフト等によるDC（直流）オフセットであると考えられる⁴⁾。

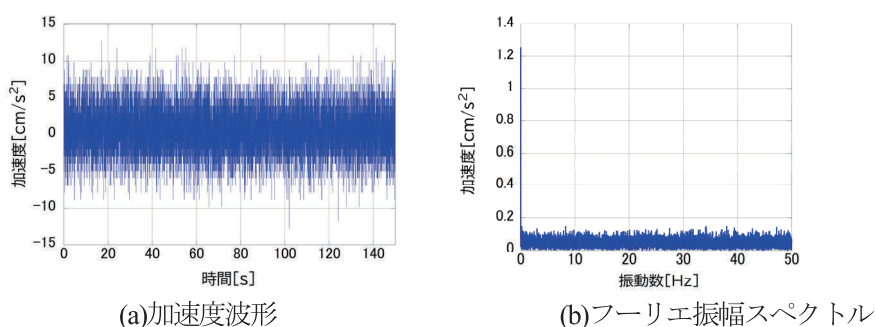


図4 静止状態の記録データ例（ノイズ波形）

3. 振動台を用いた実験による観測精度の検証

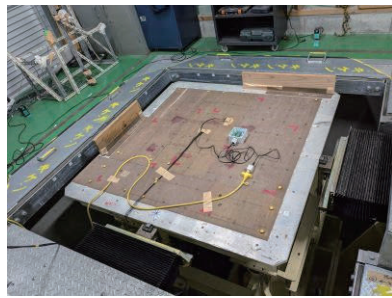
本ボードについて本校の振動台を用い、加振実験による観測精度の確認を行った。

3.1 実験概要

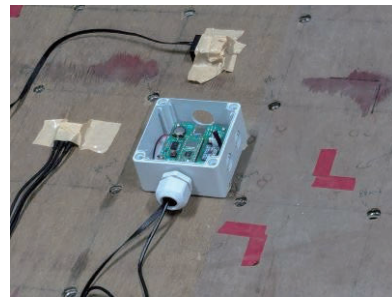
図5に本校振動台による加振実験方法の概要を示す。本ボードは振動台中央に両面テープで固定し、上部構造用加速度センサおよびメーカー製加速度センサ（東京測器小型高応答3軸加速度計ARJ-A-T）は10cm程離れた場所にテープで固定、水平2成分の方位は一致させる。

振動台周囲にはレーザー変位計（KEYENCE社製IL2000）および巻込型変位計（東京測器社製DP-1000E）を設置し、変位波形を直接的に記録するとともに、メーカー製加速度センサの加速度値の記録も並行して行う。本ボードで計測した加速度値とメーカー製加速度センサを比較、また積分し算出して求めた変位とレーザー変位計の計測変位を比較することにより精度を確認する。

振動台の入力震動は、2024年1月1日に発生したM7.6、最大震度7能登半島地震で観測された鳳珠郡穴水町・珠洲市内・珠洲市正院町の強震波を用い、本校振動台の最大可動水平変位に振幅を合わせて加振を行った。



(a)実験全景

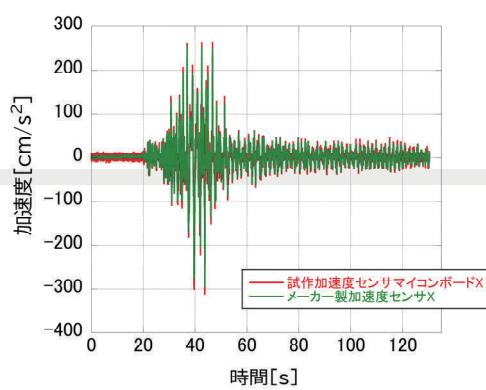


(b)加速度センサ設置近影

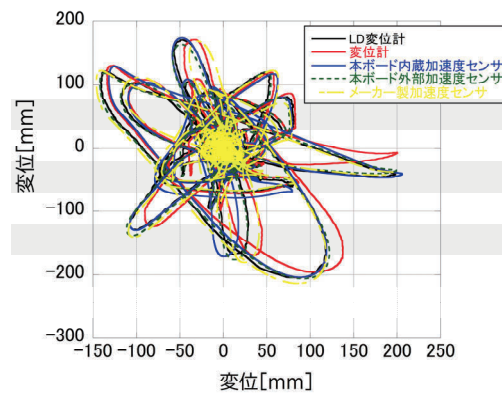
図5 振動台による加振実験の概要

3.2 実験結果

メーカー製加速度センサと本ボードの記録波形の比較を図6(a)～図8(a)、変位応答軌跡を図6(b)～図8(b)に示す。加速度波形の時間軸はメーカー製加速度センサと本ボード間では時刻同期されていないため、相互相関関数を用いて両波形の同期を行っている。

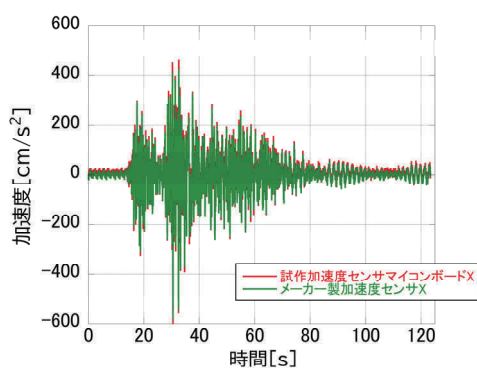


(a)加速度波形

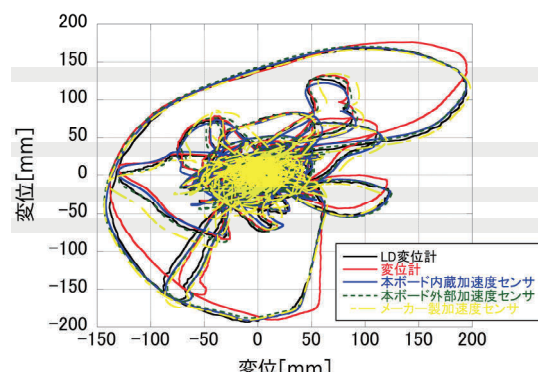


(b)変位軌跡

図6 2024年能登半島地震－鳳珠郡穴水町の強震動



(a)加速度波形



(b)変位軌跡

図7 2024年能登半島地震－珠洲市内の強震動

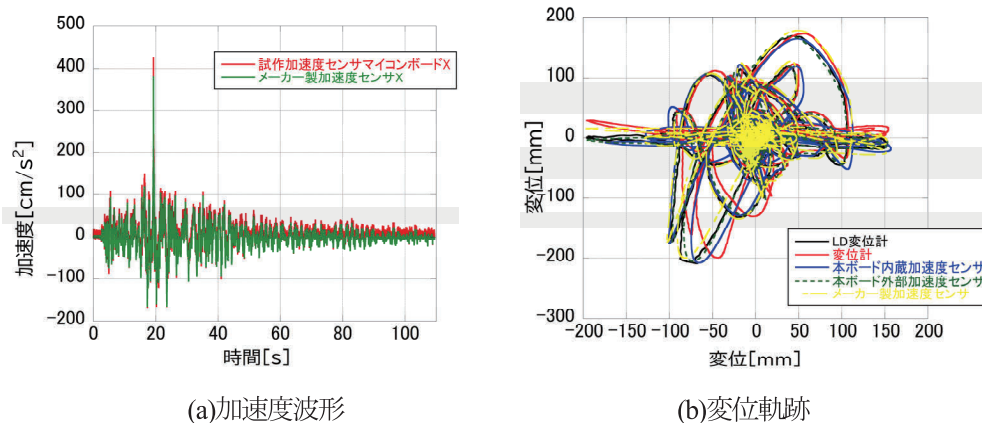


図8 2024年能登半島地震－珠州市正院の強震動

2.2節で述べたとおり加速度波形の記録データ図6(a)～図8(a)にはノイズ成分が混在するものの、全体としては良好に計測できていることがわかる。図8(a)の加速度波形（緑：本ボード記録波形）においては 5 cm/s^2 程度、基線が上方に振れているように見受けられる。計測開始時に各軸でキャリブレーション（移動平均によるオフセット）が行われるプログラムを組み込んでいるが、繰り返す加振実験によって初期位置が変化したためだと考えている。この成分は後のフィルタ処理によって削除されるため変位軌跡には影響しないことを確認している。

図6(b)～図8(b)の変位軌跡についても、応答変位を概ねとらえていることがわかる。ノイズ波形による層間変位振幅の誤差は、佐田・岸本・藤野・野村(2018)「ノイズレベルと解析精度の関係評価」で検討されており、この方法を用いて、本実験のフィルタ設定値 $f_L=0.1\text{ Hz}$ および本ボード搭載センサのノイズレベル（RMS値 $=3\text{ cm/s}^2$ ）を適用した場合、平均値で $\pm 6\text{ mm}$ 、最大値で $\pm 12\text{ mm}$ 程度になること推定される³⁾。本ボードが取得した加速度記録データから算出した変位と、レーザー変位計の計測変位の差異を比較すると、平均値では $6.0\sim 7.0\text{ mm}$ と推定値と概ね良好に適合しているが、最大値では $19.9\sim 29.3\text{ mm}$ と推定値より1.5～2倍程度の差がみられた。

最大変位は強震記録の低周波数帯域に関連した指標ではあるが、加速度記録データから求めようとした場合、それらに含まれる長周期成分ノイズが大きく影響するため、振動特性を損なわない範囲内で適切に減衰させる必要がある。

解析精度の向上は今後の検討課題ではあるが、免震建物の免震構造設計においては、レベル2地震動では、 $30\text{ cm}\sim 40\text{ cm}$ 程度の免震層変位応答量を想定している。免震層応答変位が最大 29 mm の相違は、設計で想定している免震層最大変位応答量の約7～10%である。また、レベル2を超える強震動が免震建物に入力された場合、免震層最大変位応答量は、 $50\text{ cm}\sim 60\text{ cm}$ となる可能性がある。この場合最大 29 mm の相違は、免震層最大変位応答量の約5～6%となる。

本研究において開発した加速度センサマイコンボードでは、免震建物の地震時の最大免震層変位応答量が、ケガキ式変位計に正確に記録されていることを想定している。本ボードが取得した加速度記録データから算出した免震層最大変位応答量は、ケガキ式変位計の時間特性や免震建物の変位応答特性を補完・補充する役割することを想定している。そのため、本ボードを用いて、ケガキ式変位計の時間・変位特性を補充という目的においては、充分活用可能であると、著者らは考えている。

4. 高知県内免震建物への実装

振動台の加振実験により、加速度センサマイコンボードの観測精度が確認できたため、高知県内にある実免震建物への設置を行い、フィールドテストにより詳細に検討を重ねる。高知県内には

2022年末現在57棟の免震建築物⁵⁾があり，その内の10棟（24年9月1日現在）（図9）に本ボードの設置許可をいただくことができたため，事前に現地調査の上，免震層において電源確保が容易な場所から設置作業を行い，実地試験を開始した．設置例を図10～16に示す．設置に使用した加速度センサマイコンボードは開発中の旧型・新型が設置時期により混在しており，外見は異なるが基本的なシステムは同一である．加速度センサの設置は建物軸に合わせており，必ずしも東西南北と一致しないが水平2成分が記録されていれば，方位変換は容易である．

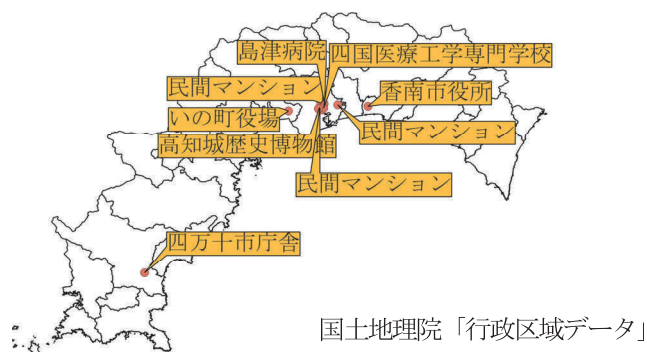


図9 開発した本ボードの高知県内への設置状況

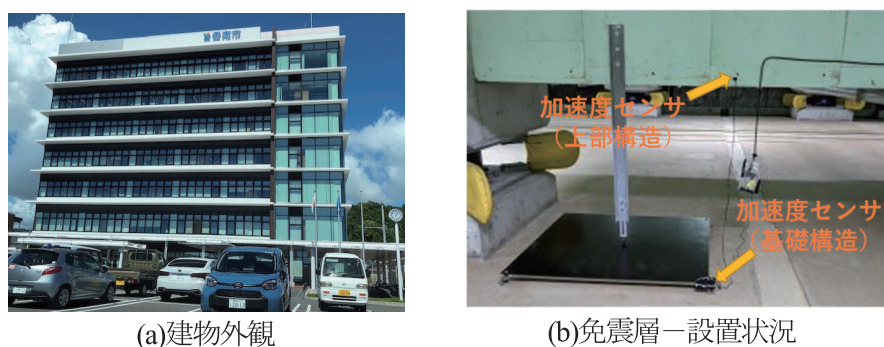


図10 香南市役所

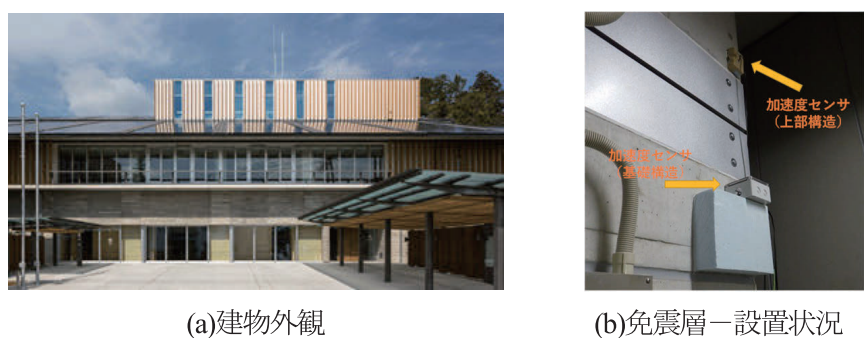


図11 いの町役場



(a)建物外観



(b)免震層一設置状況

図12 高知県立高知城歴史博物館

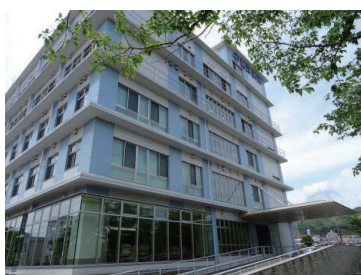


(a)建物外観



(b)免震層一設置状況

図13 土佐中学校・高等学校



(a)建物外観



(b)免震層一設置状況

図14 島津病院



(a)建物外観



(b)免震層一設置状況

図15 四国医療工学専門学校

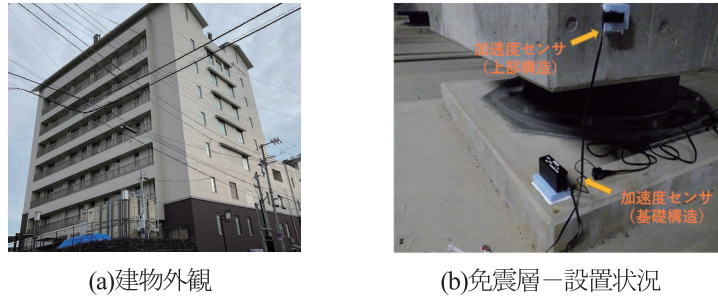


図16 四万十市庁舎

5. まとめ

安価なMEMS式三軸加速度センサを用いた加速度センサマイコンボードの開発を行い、地震応答の観測精度を確認するため、振動台による加振実験を行った。試作した加速度センサマイコンボードから算出した応答変位と、変位計およびメーカー製加速度計から算出された変位軌跡はおおむね一致する。よって免震建物の地震時のケガキ式変位計の時間特性を補完することは十分可能であると考えられる。応答変位量誤差に関してはバンドパスフィルタ (BPF) で用いるパラメータのさらなる追求や、コスト増とはなるがMEMSセンサの中では高価な超低ノイズ型三軸加速度センサを用いれば、より誤差の少ない観測精度が得られる可能性がある。

実免震建物への実証実験では、地震時のデータ収集と免震層内での長期間の動作試験を開始した。特に時刻同期に関しては高精度RTC (誤差 2 ppm) を用いているが、年単位の運用では時刻誤差が無視できなくなる可能性があり、GNSS (Global Navigation Satellite System) やNTP (Network Time Protocol) の利用を検討する必要がある。安価な加速度センサマイコンボードは、費用の制約が厳しい個々の免震建物へ普及可能な計測方法の実現が期待できると考えられる。

謝辞

本研究を実施するにあたり、(一財)日本建設情報総合センター研究助成および(一社)四国クリエイト協会研究助成の一部を使用いたしました。本マイコンボードの設置においては、香南市役所・四万十市役所・いの町役場・土佐中高等学校・四国医療工学専門学校・高知城歴史博物館・民間マンションの関係各位にご協力いただきました。諸機関に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 森田慶子, 高山峯夫, 大野敦弘, 石橋宏一郎: 免震建物の地震時挙動に関する研究 その2 熊本市内免震建物のけがき記録, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.763-764, 2020. 9
- 2) 森田慶子, 高山峯夫, 荻野伸行, 和田章: 2021年福島県沖の地震 (M7.3) による免震建物に関する調査報告 その2 けがき式変位計による免震層変位の確認, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.659-660, 2021. 7
- 3) 佐田貴浩, 岸本和貴, 藤野崇史, 野村建太郎: MEMS加速度センサによる住宅構造診断システム, Panasonic Technical Journal Vol.64 No. 2, pp.42-47, 2018.11
- 4) 小野測器 計測コラム: 第15回「周波数軸微積分と低周波ノイズ」, emm194号, 2017, https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/eMM_back/emm194.pdf
- 5) 一般社団法人日本免震構造協会: 免震建築物等の計画推移, pp. 6, 2024. 6