

新たな建築振動教育の環境整備のための MEMS センサーの活用

名古屋大学 工学部 環境土木・建築学科
建築学プログラム 福和研究室 成澤恒星

1. はじめに

甚大な被害が予想される大地震の発生が迫る現在、防災・減災のために建物の耐震安全性の確保が必要である。そのためには、設計者・建築実務者が耐震工学の正しい知識と幅広い教養を持ち、振動現象の本質を理解することが重要である。その学習を学生のうちに行うことができれば、将来の日本の防災・減災力を向上させることにつながる。この点で、建築学生が、より振動現象の本質を理解できるようにするための教育環境を整備することは意義がある。

振動現象は時間変動を伴う動的な現象であるため、教科書の言葉・数式・図だけでは、実際の現象に結びつきづらい。そこで福和・他 (2003)¹⁾は、体感による学習ができる教材として、携帯手回し振動台「手回しぶるる」を開発した。開発の歴史の集大成として、図1に示す教材セットが現在開発中である。ただ建築学生は、直観的理解に留まらず、振動論を理解する必要がある。そのため、振動論の学習になり、また学習した内容の実践ができる、振動実験を通じた計測・分析が重要となってくる。そこで、本論文では、安価で小型の MEMS (Micro Electro Mechanical System) 型加速度センサーの振動教育への適用性について検討する。

2. 新たな建築振動教育の環境整備

これまでに開発されてきた教材に共通して、「実際に自分で体感すること」を重視し、「能動的な学習」を求めているという特徴がある。これを踏まえ、図2に示すような教

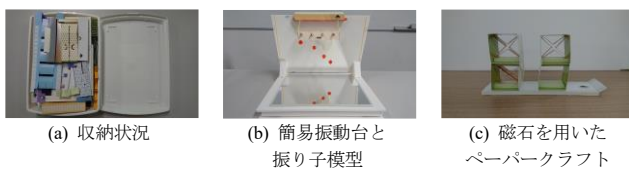


図1 開発中の模型教材セット

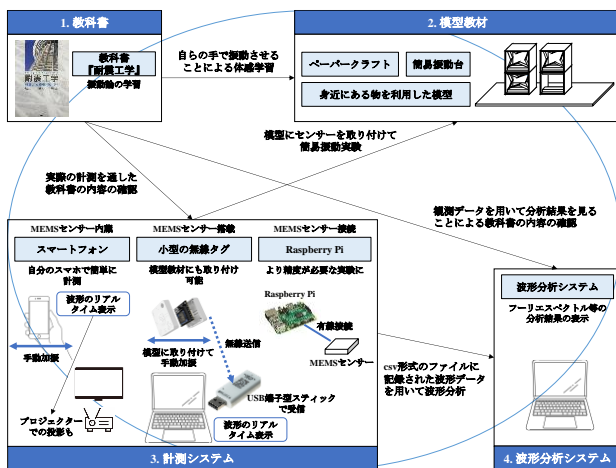


図2 整備を目指す建築振動教育環境の全体構成

科書²⁾、模型教材、計測システム、波形分析システムの4点セットからなる教育環境の整備を目指す。計測システムは、安価で小型の MEMS センサーを使用した3種類を想定している。1つ目は、誰もが持っているスマートフォンを用いた計測システムである。MEMS センサーが内蔵されており、計測のために新たに費用がかからないため、最も手軽である。2つ目は、MEMS センサーを搭載した小型の無線タグを用いた計測システムである。スマートフォンでは重くてできないような模型教材の振動を計測できる。3つ目は、MEMS センサーを接続した Raspberry Pi を用いた計測システムである。無線通信では欠測が生じやすいため、より精度を必要とする建築構造系大学院レベルの振動実験に対応する。

3. MEMS センサーを使用した計測システムの特徴

スマートフォンを用いた計測システムとして、Vieyra Software の無料アプリ Physics Toolbox Sensor Suite³⁾がある。このアプリでは、3軸の加速度波形のリアルタイム表示、csv形式での記録が可能である。ただし、サンプリング振動数を任意の値に固定することができないため、csv ファイルに記録されたデータは不等間隔となる。

MEMS センサーを搭載した小型の無線タグとして、モノワイヤレス株式会社の TWELITE CUE⁴⁾がある。コイン型電池 (CR2032) を挿入することで動作を開始してデータを無線で送信し、USB 端子型の制御用スティックを PC に接続して受信するシステムとなっている。MEMS センサーの加速度分解能は 4 cm/s^2 程度であるが、制御用スティックと合わせても5,000円程度と、学生個人で購入しやすい。ただし、10サンプル分の加速度データをためて、それを1つのパケットとして送信する仕組みとなっており、加速度ごとの時刻が不明であることから、時間刻みの決め方を検討する必要がある。また、無線通信による欠測を減らす対策として図3に示すように同じパケットを再送する機能がある。計測で用いる「グラフ描画スクリプト」⁵⁾によって作成される csv ファイルには、パケット欠測の有無が分かる続き番号「Sequence Number」の情報が含まれている。

4. 加振実験による MEMS センサーの性能検証

前章で示した2種類の計測システムについて、白山工業株式会社製の微動計 JU410 の上面にセンサーを固定した状態で、加速度レベル一定のホワイトノイズ (0.1~10 Hz) と地震動記録を入力して振動台を加振し、JU410 による加速度記録に誤差がないものとして比較することで精度を検証した。

Physics Toolbox Sensor Suite で得られた結果について、データの時間間隔の頻度分布をもとに、不等間隔データを200

Hz で線形補間して分析を行った。その結果, RMS 値で 3 cm/s^2 程度以上, 振動数は $0.1 \sim 10 \text{ Hz}$ の範囲であれば, 十分な精度があることが分かった。

TWELITE CUE については, 再送回数を最大の9回に設定して計測し, 図4の手順で波形データを作成した。欠測部分は線形補間を行うため, 欠測率 (欠測が生じない場合のデータ数の合計に対する欠測したデータ数の合計) と連続で欠測するデータ数の最大値が分析に大きく影響する。加振内容ごとに欠測率を求めると $0.45\% \sim 1.85\%$ となっており, 連続で欠測するデータ数は最大で2つであった。等間隔の波形データ作成の結果, 図5(a) に示すように JU410 による加速度記録と近い形になった。さらに, 10 Hz でハイカットフィルターをかけると, 図5(b) に示す通り, 波形がほぼ再現できることを確認した。また, ホワイトノイズについて, アンサンブル平均の加速度フーリエ振幅スペクトルを図6に示す。結果より, 欠測率1%台のとき, RMS 値で $10 \sim 30 \text{ cm/s}^2$ 程度以上, 振動数は $0.1 \sim 10 \text{ Hz}$ の範囲であれば, 十分な精度があることが分かった。

5. 結論と今後の課題

本論文では, 整備を目指す新たな建築振動教育環境の概要を示し, その整備に向けて MEMS センサーの活用の検討を行った。加振実験により, 振動数特性と, 加速度の大きさによる精度の違いが分かった。

無線タグについて, 今回分析に用いたデータは欠測率1%台であったが, 今後, 設定や環境によりどのように欠測状況が変化するかを定量化していく。また, 模型にセンサーを取り付けて計測を行う。

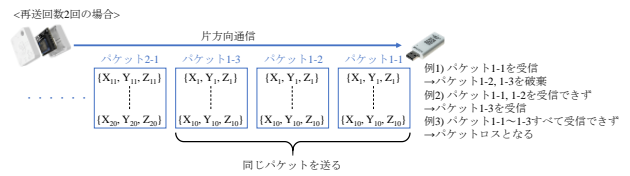


図3 TWELITE CUE によるパケット再送の仕組み

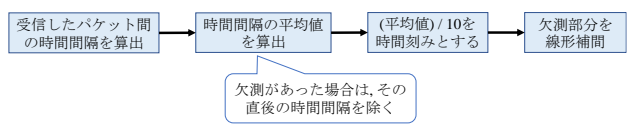


図4 TWELITE CUE による加速度記録から等間隔の波形データ作成手順

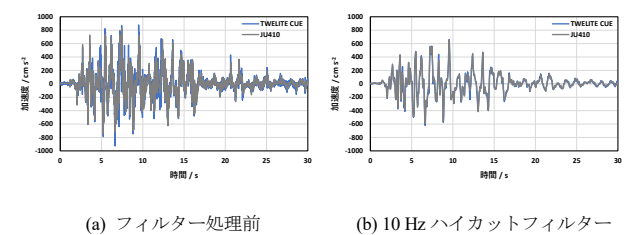


図5 JR 鷹取 (兵庫県南部地震) 加振時の加速度記録

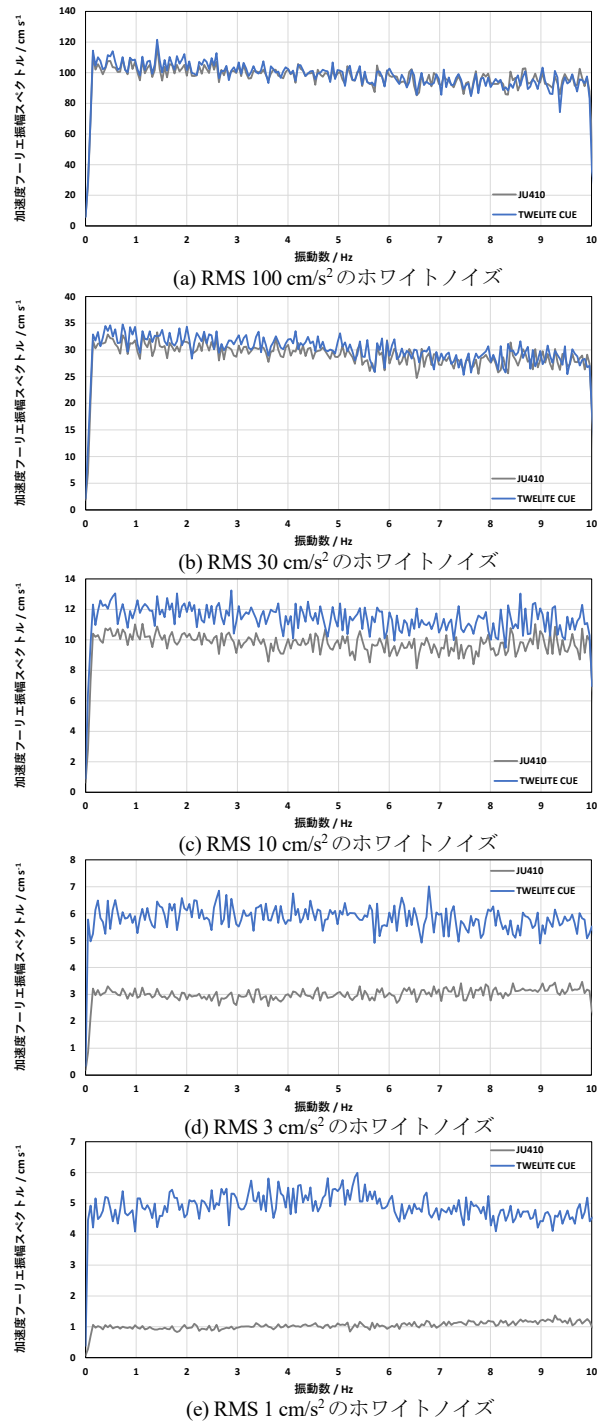


図6 アンサンブル平均の加速度フーリエ振幅スペクトル

参考文献

- 1) 福和伸夫, 原徹夫, 小出栄治, 生田領野: 携帯手回し振動台「ぶるる」の開発, 日本建築学会技術報告集, 第17号, pp.83-86, 2003.6
- 2) 福和伸夫, 飛田潤, 平井敬: 耐震工学 教養から基礎・応用へ, 講談社, 2019.3
- 3) Vieyra Software: Physics Toolbox <https://www.vieyrasoftware.net/> (2022.1.15 閲覧)
- 4) モノワイヤレス株式会社: 磁気・加速度センサー無線タグ TWELITE CUE <https://mono-wireless.com/jp/products/twelite-cue/index.html> (2022.1.15 閲覧)
- 5) モノワイヤレス株式会社: グラフ描画スクリプト <https://mono-wireless.com/jp/products/TWE-Lite-2525A/howtouse-graph.html> (2022.1.15 閲覧)