

1. はじめに

建物の耐震安全性を確保することは地震による被害の抑制において重要である。これは国民一人一人の防災・減災意識もさることながら、建築実務者、とりわけ構造設計者の采配による部分も大きい。構造設計者は、建物や地盤の振動性状を理解していることはもちろん、近年は免震、制振技術の普及に加え、長周期地震動の問題等、設計をするにあたり耐震工学や振動論についての理解が益々必要になってきている。さらに耐震性能について、意匠設計者や施工主等、誰にでもわかるように伝えることも重要である。また、構造系専門でなくとも、建築・建設にかかわる技術者や実務者が振動現象の本質を理解していることは必要であり、建築系の大学や高等専門学校等でも振動教育の重要性が高まっている。しかし、地震のような振動現象は時間変動を伴う動的な現象を扱うため、紙面上では数式やグラフが実際の振動現象に結び付きづらく、理解しづらいという課題が挙げられる。解決策として、大学等では、模型教材や e-learning 教材を開発し、理解をサポートしている場合もあり、学習効果に有効性が示されている<sup>2)3)</sup>。

模型のようなモノを使った教材（以下、模型教材と呼ぶ）は、手軽さと分かりやすさが利点であり、実際に利用者自身が模型等を揺らすことによって、地震時挙動のイメージ

が付きやすく、直感的な理解に繋がりがやすい。一方で、PCやスマートフォンで使用するような Web 上で使用する教材（以下、Web 教材と呼ぶ）は、利用者が時や場所を選ばず使用できることと、理論通りの振動現象を示せることが利点である。また、2020年に蔓延し始めた新型コロナウイルス感染症（COVID-19）流行拡大の影響によって、リモートワークやオンライン授業が増加したことで IT 化が急激に進み、今後は Web 教材のニーズがさらに高まると予想できる。

本研究では、模型教材と Web 教材を組み合わせることで、動的な振動現象を、感覚的な理解にも理論上の理解にもつながる教材の開発を行う。様々な振動現象をリアルタイムで「見える化」することで、一般社会には防災意識の向上を、建築に携わる人には耐震安全性に関する意識の向上を図り、それによって建物の耐震化を促進することを目的とする。

2. Web ツールシステムの開発概要

Web 上で手軽に学べる建築振動論、防災啓発用の教材として、利用者が地震に見立てて加振した振動とその時の建物の挙動をリアルタイムでのモニタリングをできるように開発する。図1に使用イメージを示す。教材として普及させるため、現在幅広い年代で普及率の高いスマートフォンに内

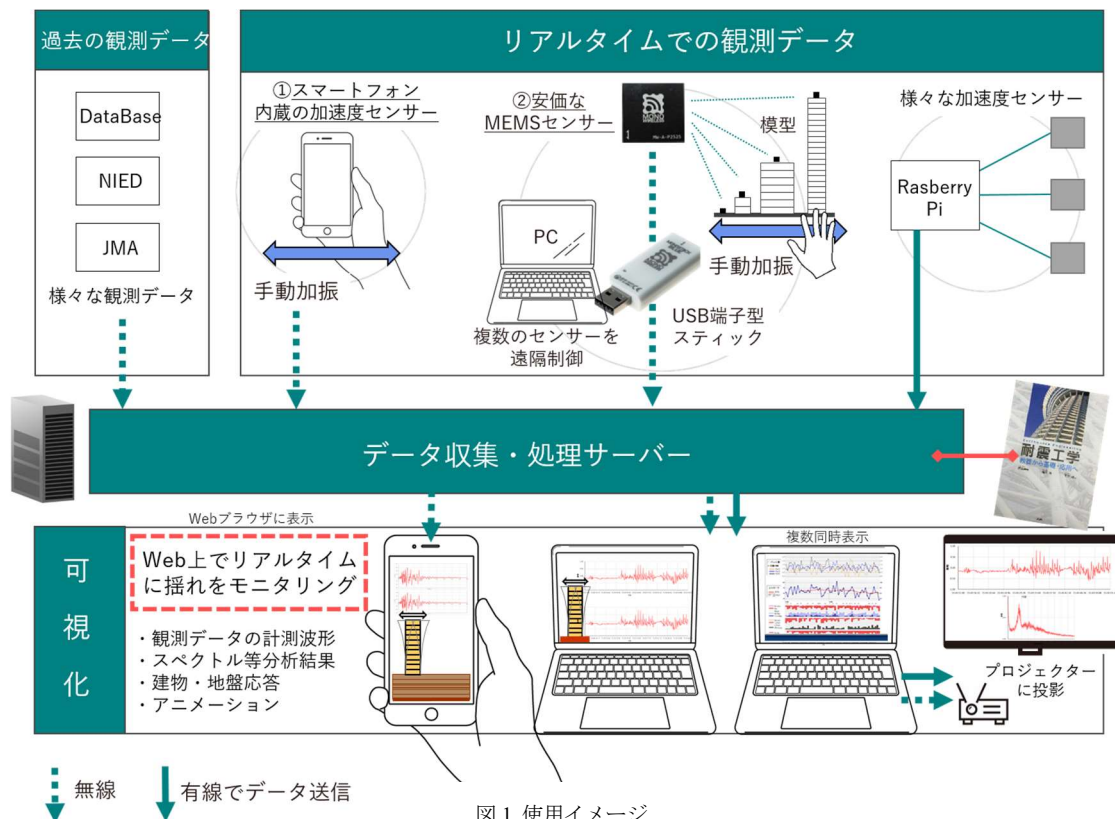


図1 使用イメージ

蔵されている加速度センサーと、廉価で十分な精度を持つ MEMS センサーを活用する。これらは、一般向けの防災対策促進用のツールとしても、建築実務者や学生向けの建築振動教育用のツールとしても利用できるように、それぞれの理解にできるだけ合わせた内容とした。スマートフォン端末、もしくは、MEMS センサーを設置した模型を加振すると、Web ブラウザ上でほぼ同時刻にセンサーで計測した加速度波形や、建物モデルが揺れるアニメーションなどを表示し、地震時挙動の理解や解説だけでなく、技術者が波形の確認など簡易な解析にも使用できるようにした。さらに、過去の計測データや地震動記録等、すでに計測されているデータを使用することで、エルセントロ波やタフト波といった著名な地震動の特性や多様性についても学習できる。また、建築振動教育用の Web 教材としてだけでなく、性能的には本格的な地震計に及ばなくとも、導入が容易な身近な計測機器として、簡易な振動実験のツールとしての利用もできるようにしている。図 2 に、Web ツールシステムのサイト画面と利用時の流れを示す。

### 3. 加速度センサーの特性

#### 3-1. スマートフォン内蔵の加速度センサー

スマートフォンに内蔵されている加速度センサーの仕様には、非公開の点が多く、本 Web ツールの計測機器として使用できるほどの性能を有しているか不明であった。ゆえに計 9 台のスマートフォン、タブレット端末と、比較対象としての微動計を使用して振動実験を行い、その性能特性について検討した。図 3 (a) に兵庫県南部地震（鷹取駅）、(b) に熊本地震本震（KiK-net 益城地表）の縮小波形を加振波としたときの、各端末と微動計で計測した各加速度波形を、表 1 に計測に使用した端末の一覧を示す。微動計ほどの再現性はないが、計測加速度波形はおおまかに一致していることが分かる。また、図 4 (a), (b) に各地震波で加振した時のフーリエスペクトルを、図 5 にホワイトノイズ（振動数 0.1 Hz~10 Hz の範囲で加速度パワースペクトル一定の乱数位相によるものとし、加速度の 2 乗平均平方根で  $100 \text{ cm/s}^2$ ,  $20 \text{ cm/s}^2$ ,  $4 \text{ cm/s}^2$  となるように作成し、480 秒間計測を行った）で加振時のアンサンブル平均のフーリエスペクトルを示す。地震波の縮小波形のスペクトルからは、いずれもスマートフォン、タブレット端末と、微動計による結果はおおまか

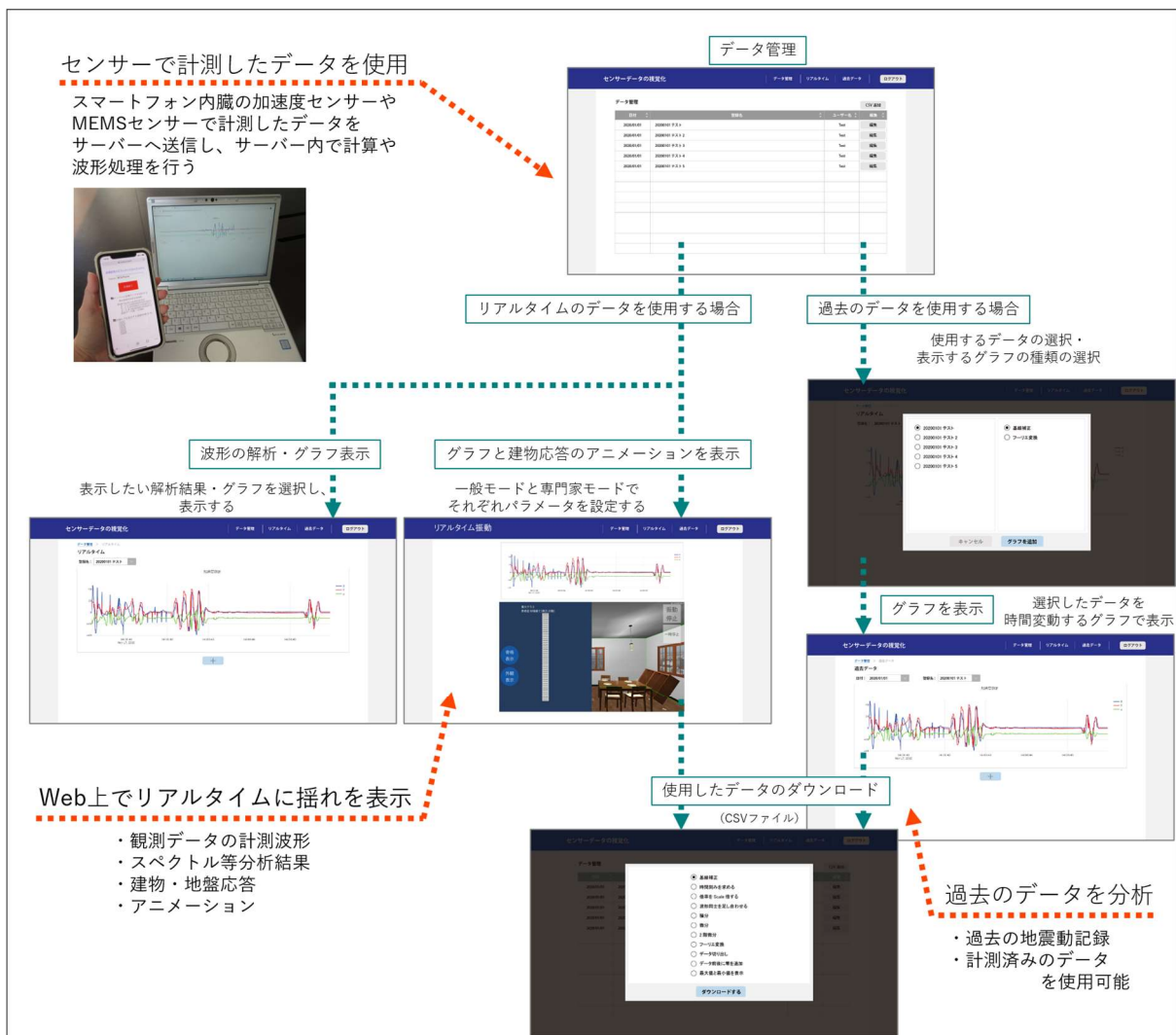
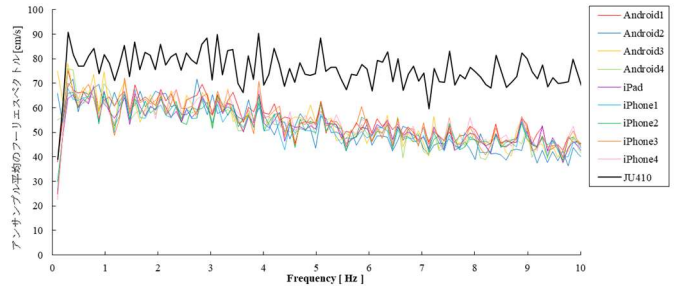


図 2 Web ツールシステムのサイト画面と利用時の流れ

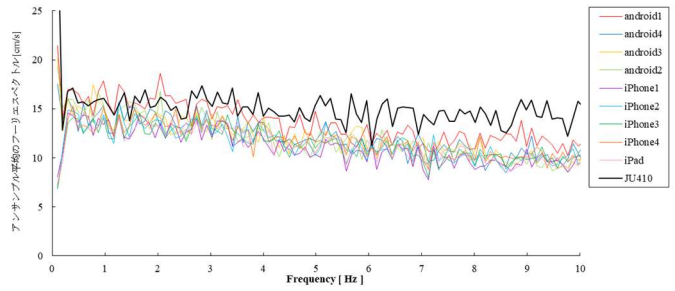
に一致していることが分かるが、低振動数での揺れは微動計の結果よりも感度が小さく、5 Hz 程度を超えたあたりからノイズの影響が大きくなっている。ホワイトノイズのアンサンブル平均のフーリエスペクトルからは、 $300 \text{ cm/s}^2$ 程度の大きな加速度に対しては感度が低く、 $30 \sim 100 \text{ cm/s}^2$ 程度の加速度に対しては微動計に近い結果を得られるが、 $30 \text{ cm/s}^2$ 程度の加速度に対しては端末の機種によっては、微動計よりもノイズによる影響が大きくなるということが分かる。また、サンプリング周期はスマートフォンやタブレットの機能上の理由によるものでデータが抜け落ちる部分があるため不等間隔となる。比較対象とした微動計では  $100 \text{ Hz}$  サンプリングの場合、1 秒間に必ず 100 個のデータを取得するのにに対し、iPhone 端末では平均 90 個程度、Android 端末では機種によるものの、60~80 個程度となる。以上より、本格的な地震計や微動計ほど十分な計測精度はなく、サンプリング周期に注意が必要なもの、おおまかに波形を表現する程度の性能は持つため、教材や簡易振動実験用のツールとしての利用は可能であると判断した。

表 1 計測に使用した端末の一覧

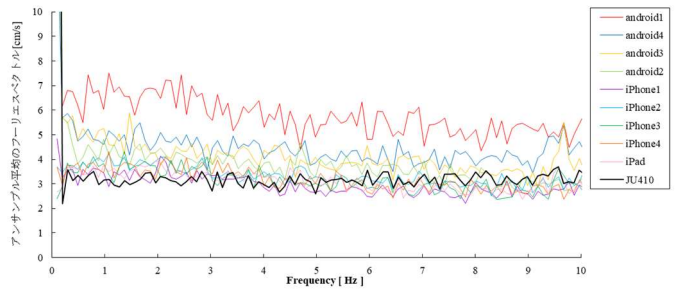
表示名	端末名称	製造メーカー	OS
iPhone1	iPhone7	Apple Inc.	iOS13.7
iPhone2	iPhoneXS	Apple Inc.	iOS14.1
iPhone3	iPhone11	Apple Inc.	iOS14.2
iPhone4	iPhone11	Apple Inc.	iOS14.2
iPad	iPadPro	Apple Inc.	iOS14.2
Android1	Galaxy S20 SC51A	Samsung Electronics Co. Ltd.	10
Android2	GalaxyA41 SC41A	Samsung Electronics Co. Ltd.	10
Android3	GalaxyA41 SC41A	Samsung Electronics Co. Ltd.	10
Android4	AQUOS sense3	Sharp Corporation	9



(i) 加速度の 2 乗平均平方根で  $100 \text{ cm/s}^2$

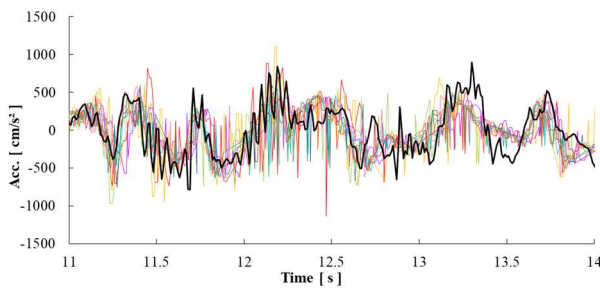


(ii) 加速度の 2 乗平均平方根で  $20 \text{ cm/s}^2$

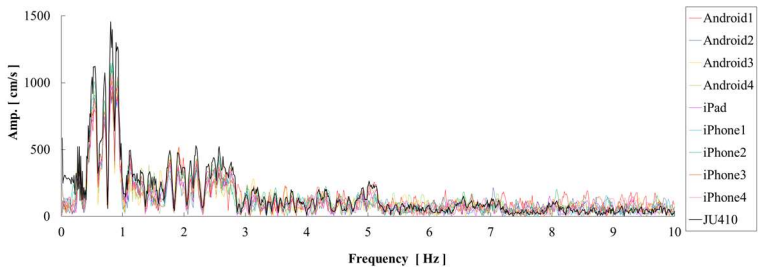


(iii) 加速度の 2 乗平均平方根で  $4 \text{ cm/s}^2$

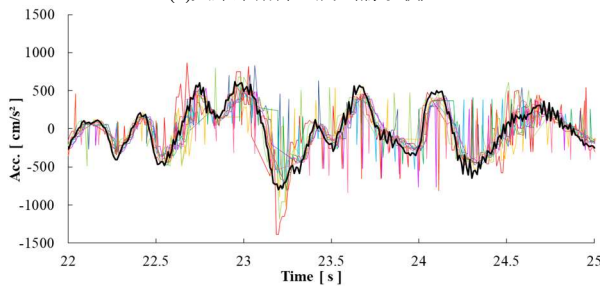
図 5 ホワイトノイズのアンサンブル平均のフーリエスペクトル



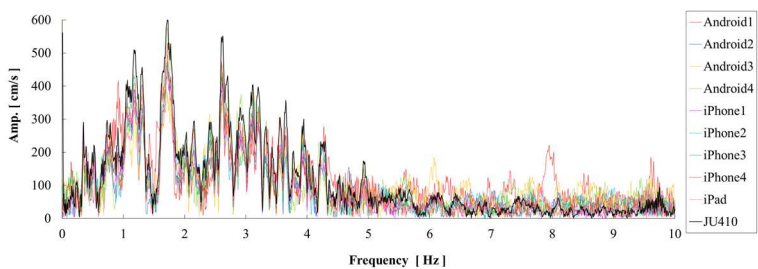
(a) 兵庫県南部地震 (鷹取駅)



(a) 兵庫県南部地震 (鷹取駅)



(b) 熊本地震本震 (KiK-net 益城地表)



(b) 熊本地震本震 (KiK-net 益城地表)

図 3 各端末による加速度波形の比較

図 4 各端末によるフーリエスペクトルの比較



### 3-2. MEMS 加速度センサー

模型に装着して使用する MEMS センサーは、モノワイレス株式会社の『TWELITE 2525A』<sup>4)</sup>を選定した。これは、3 軸の加速度センサー(ADXL343)と無線通信機が組み合わされているもので、サイズは 25×25×10 mm、重さは約 6.5 g と小型、コイン型電池(CR2032)を電源として動作する。USB 端子型のスティック (商品名: MONOSTICK) を PC 等に接続すると、複数のセンサーを同時に遠隔制御し、データの受信が可能となる仕様となっている。表 2 に加速度センサーADXL343 の仕様を、また、図 6 に加速度センサーとスティック (MONOSTICK) の使用時の様子を示す。このセンサーを選定した理由は、1 つ数千円とセンサーとしては比較的安価であり、最低 4gal から検出可能、最大 100Hz サンプルングで計測可能と、十分な分解能を持つためである。また小型で軽量かつ、無線で使用可能であり、今回の使用目的に適していると判断した。

### 4. サーバー上での処理

利用者が地震に見立てて加振した振動と、その時の建物の挙動をリアルタイムでモニタリングするには、サーバー上で行う計算の処理に即時性が求められるため、逐次的に計算できること、十分な計算速度を持つこと、といった要求を実現させるための計算手法の検討を行った。また、端末からはデータを送受信するのみで、計算処理は全てサーバー上で行うことで、機種によるスペックの影響の差をできるだけ小さくし、Wi-fi 環境さえあれば簡単に使えるような仕様とした。

リアルタイムでノイズを除去するため、6 次バターワースフィルタフィルターを掛け、目的の周波数帯域の振動数成分のみを抽出し、加速度を変位に変換した。建物の応答解析プログラムでは、建物を 1 質点系もしくは多質点系モデルとして、質点の数、各層の重量、剛性、減衰定数をパラメータとして設定し、地盤の応答解析によって出力された基盤面での加速度とともに、Newmark の  $\beta$  法を用いて応答解析を行い、建物モデルの地震時応答解析を行う。地盤の応答解析プログラムでは、成層地盤モデルとして層数、各層の厚さ、S 波速度、密度、減衰定数をパラメータとして設定し、成層地盤を連続体として捉え、波動方程式を重複反射理論に基づいて応答解析を行う方法と、地盤を非連続体として捉え、多質点系として運動方程式をニューマークの  $\beta$  法を用いて応答解析を行う方法で、本研究で開発している Web 教材に適しているか比較すると、どちらも逐次計算が可能で十分な計算スピードを有しており、適しているという結果となった。表 3 に 1 つの加速度値に対する計算の所要時間の比較を示す。

表 2 加速度センサーADXL343 の性能<sup>4)</sup>

軸数	3 (X,Y,Z)
サンプリングレート	最大 100 Hz
計測範囲	-16 G ~ +16 G <sup>1)</sup>
加速度分解能	最大 4 mG
無線送信レート	最大 33 Hz
ノイズレベル	RMS 4.4 cm/s <sup>2</sup> ( $\pm 2$ G で計測した場合)



図 6 MEMS センサー使用時の様子

表 3 1step あたりの所要時間 / 10<sup>-5</sup> s

条件	① 重複反射理論	② Newmark の $\beta$ 法
2 層地盤	2.34	6.41
3 層地盤	2.32	12.4
4 層地盤	2.37	8.73
5 層地盤	2.32	8.76
10 層地盤	2.32	14.00

### 5. まとめ

本研究では、幅広い世代で普及率の高いスマートフォンに内蔵する加速度センサーと、比較的安価で十分な分解能をもつ MEMS センサーを活用し、様々な振動現象をリアルタイムで「見える化」できる Web ツールシステムを開発した。利用者がスマートフォン、または、MEMS センサーを地震に見立てて加振すると、その振動挙動をモニタリングすることができ、建築振動教育用の教材としても、簡易な振動実験にも使用可能となっている。本論では、開発時に行った検討として、開発概要、各センサーの特性、サーバー上で行うリアルタイムでの計算処理について概説した。今後はより効果的な教材、利便性の高い Web ツールシステムとして、アンケート調査等を行いながら内容を充実させていきたいと考える。

### 参考文献

- 1) 福和伸夫, 小出栄治, 原徹夫, 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 年
- 2) 何庸, 市之瀬敏勝: 一質点系の弾性振動を対象とした教育ソフトウェアの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.655-656, 2006 年
- 3) 辻原治, 中谷優一, 山村猛: 揺れに対する感覚的理解を支援する卓上振動実験装置の開発, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.4 (地震工学論文集第 33 巻), 1\_1052-1\_1060, 2014 年
- 4) MONO-WIRELESS.COM - 加速度センサー無線タグ TWELITE 2525A-トワイライトニコニコ, 2020 年 12 月 3 日時点, <https://mono-wireless.com/jp/products/TWE-Lite-2525A/>

<sup>1</sup> G は標準重力加速度を示し, 9.80665 m/s<sup>2</sup> に等しい