

MEMS 地震計を利用した地震教材の開発

鶴岡 弘^{*†}

Development of earthquake educational materials using MEMS seismometers

Hiroshi TSURUOKA^{*†}

Abstract

A compact, AC power free earthquake educational materials was developed. It can be used anywhere, utilizing a small seismometer combining single-board computer (SBC) of Raspberry Pi Zero 2W with an ADXL355 MEMS sensor. This system enables real-time waveform monitoring and allows comparison of real-time waveforms from multiple MEMS sensors. It also stores waveform data and enables plotting of arbitrary time segments. I plan to make this educational material available for shared use of ERI.

Key words : MEMS, seismometer, education, WIN system, MQTT

はじめに

地震を理解するためには、まず地震による揺れを観測することが重要である。さて、地震を観測するためには、地震計が必要となり、その仕組みを理解することも必要となる。そのため、地震教育においては、身近な素材を用いて地震計を作成することから始めるのが王道であると思われる。そして、そのような報告が多数存在する（岡本（1997）など）。地震学会などでも親子教室などのセミナー（地震学会 2024 年度地震の教室）などが開催されて、地震計に触れる機会がたくさんある。一方、地震計については 1 点の観測による体験等がほとんどであり、小中学校等の子供たちを想定した場合において、複数の地震計を用いてのセミナーや授業はあまり多くない。本報告では、通常の観測でも利用されている MEMS 地震計を用いて、地震の揺れを理解させるためのコンパクトかつ 100V 電源を必要としない教材を開発したので報告する。この教材は平田名誉教授が開催した 2 回の地震に関する授業で実際に利用された教材を元とし、さらに授業において明らかとなった問題点や改善点等を改良したシステムで、その詳細について報告する。

授業の内容について

授業の内容については、地震学一般の項目もあるが、揺れを体験（観測）するためのおおまかな要請は以下となる。複数の班に分かれて地震計により揺れを観測して、

- (1) 揺れの元（震源）から遠くなるほど揺れの振幅が小さくなり波形が変わること
- (2) 揺れの元（震源）から遠くなるほど揺れの到着までの時間が長くなること
- (3) 複数の地震計からの検測により揺れの元（震源）を決定できること

3 番目の項目は、震源と観測点の距離が短い教室内の場合には計測が難しいので、1 番目と 2 番目が少なくとも実現できることが必要である。さらに、(1) の観測では、波形の距離による変化、周波数成分の変化を観察することができる必要がある。つまり、センサーについては、実際の研究で用いるような周波数帯域とダイナミックレンジで、実際の波形が観測できるものが望ましい。

地震教材の変遷

教育に利用するための地震計システムの要件をまずは列挙する。なお、授業は 6 班に別れて、小型地震計（センサー）を利用するが、予備のセンサー 2 台が動作することも確認するため、センサーを合計 8 台準備する。

1. 小型地震計（センサー）を同時に 8 台動くようにする。
2. 8 台を一つのモバイルルータに繋いで、データを取得

2025 年 10 月 30 日受付, 2026 年 1 月 7 日受理.

[†] tsuru@eri.u-tokyo.ac.jp

* 東京大学地震研究所日本列島モニタリング研究センター

* Research Center for monitoring Japan Arc, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

する。モバイルルーターは、予備を2台（計3台）用意する。実験開始時に、8台のセンサーが1台のモバイルルーターと通信できることが容易に確認できるようにする。

3. 頻繁（2から3分間隔）に、8台のデータを取得する。
4. 3のデータを、一画面に表示する。ブラウザでその画面を見えるようにする。各地震計の記録の時間軸をそろえ、到着時刻、振幅を比較できるようにする。
5. 教室の片隅で、振動させて、それを、6カ所の机で観測する。距離によって、振幅や波形が異なることを理解させる。できれば、到着時間が異なることを理解させる。一画面で1分間と、10秒間の2種類が表示できること。1分画面でどの10秒かを指定して、10秒分を表示できること。

小型地震計（センサー）は、これまでに Hirata et al. (2023), 平田他 (2023) が開発した「コンセント差し込み方式小型地震計」と同様な機能と観測時の簡便さをもっていることが望まれる。ただし、平田他 (2023) のシステムでは、センサーからのデータをインターネット経由でデータサーバーに送るため、大規模・広域の観測網には適しているが、教室で使用する比較的小規模なシステムとしては大がかりで複雑すぎるので、本研究で新たなシステムを開発した。Hirata et al. (2023) のシステムの概要を図1に示す。

実際の機能から、上記の3にあたる部分を新たに開発する必要があること、また、クラウドから30分未満におけるデータダウンロードについては、経験上うまく取れないチャンネルが出てくるといことがあり、以下に述べるLinuxベースのシステムを提案して1回目の授業を迎えた。Linuxベースのシステムにおいては、私とその講師の一人として担当し、2010年から実施されていた気象庁における業務支援研修において使用したシステムを活用した。リアルタイム波形表示には、鶴岡 (2003) を使用した。図2にそのシステム概要図を示すとともに、実際の機材例を図3に示した。この授業後のさらなる改善点は以下となる。

- RJ45 ケーブルでの配線・接続は大変であるので、無線LANで接続できないか
- Linuxベースのシステムではなく、WindowsベースあるいはWebベースにできないか
- PCにUSB型のセンサー（加速度計）を接続した構成となっているが、さらに小型化ができないか
- 揺れのデータを保存して任意の時間を切り出すことができないか

これらの意見のもとに、次に開発したシステムの概要図を図4に示す。ここで、シングルボードコンピュータ（SBC）として、Raspberry Pi Zero 2 Wを、センサーとしてMEMS加速度計を用いた。Raspberry Pi Zero 2 Wと加速度計はテレメトラ (<https://telemetry.jp>) から購

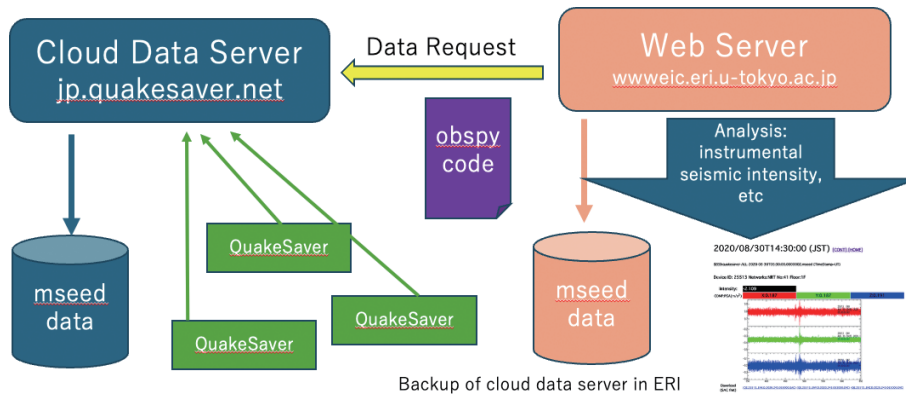


図 1. コンセント差し込み方式小型地震計システム概念図。

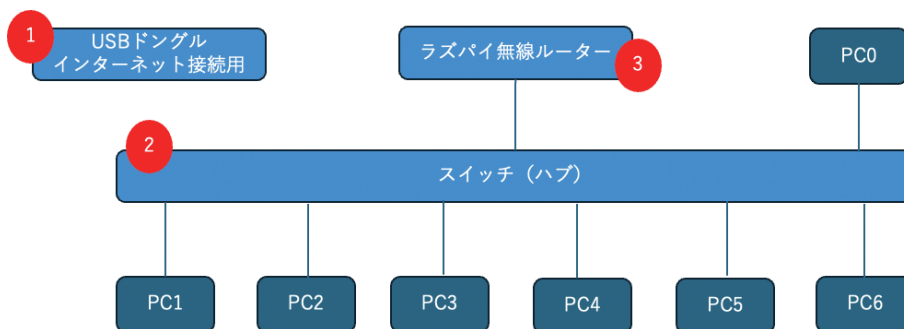


図 2. 1 回目授業時のシステム概要図。(①から③は、電源を入れる順番を示している)



図 3. 1 回目授業時の実際のシステムのスナップショット.

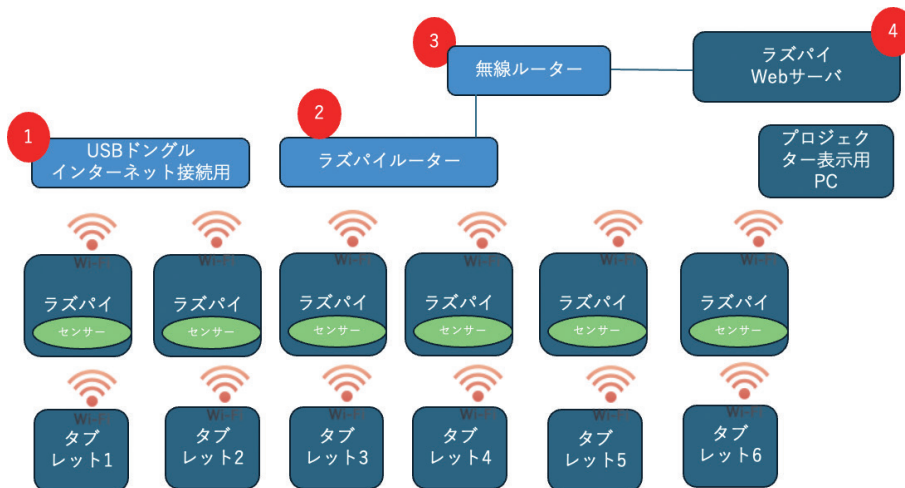


図 4. 2 回目授業時のシステム概要図.

入した ADXL355 基盤を組み合わせた MEMS 地震計を作成した。図 5 に示すようにかなりの小型化が実現された。また、この MEMS 地震計の電源供給については、容易に場所を移動できるようにモバイルバッテリーを使用した。また、地震計からの揺れのデータ（連続波形データ）は鶴岡（2025）のシステムを採用してリアルタイム表示を実現した。また、表示させる端末にはタブレット端末を採用し、地震計と一緒に移動ができるようにした。これらのシステムが 2 回目の授業に利用された。2 回目の授業のスナップショットを図 6 に示した。

開発された MEMS 地震計地震教材

最終的に開発した地震教材のスナップショットを図 7 に示す。地震教材においてのデータの送受信は、機械同士が



図 5. 2 回目の授業で使用された MEMS 地震計 (W D H 75 mm 40 mm 32 mm)

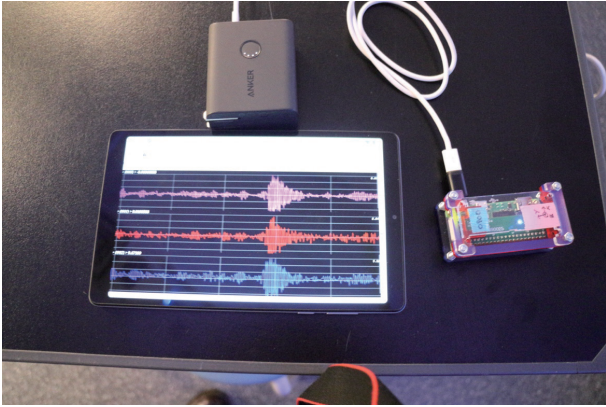


図 6. 2 回目授業時のスナップショット (タブレットにより MEMS 地震計からの揺れの 3 成分 (X, Y, Z) が表示されている).

通信を介して情報をやり取りする M2M や家電, 自動車など多種多様なモノがインターネットにつながりお互いに情報をやりとりする IoT においてよく利用されているプロトコルである MQTT を活用している. このプロトコルはシンプル, 軽量, 省電力という特徴をもち, パブリッシュ/サブスクライブ型モデルを採用している. また, 実際の教材におけるネットワーク設計は, MEMS 地震計群, 表示部, データ制御・蓄積部は, 二つのネットワーク構成で結合した. 1 つめはインターネット接続のためのネットワークで, 2 つめは地震計群から表示部とデータ蓄積部へのデータ配信のためのローカルネットワークである. ネットワークの概要を図 8 に示す. 次にそれぞれの機器の設定情報等を説明する. 説明の順番は電源を入れる順となって



図 7. 最終的な地震教材のスナップショット

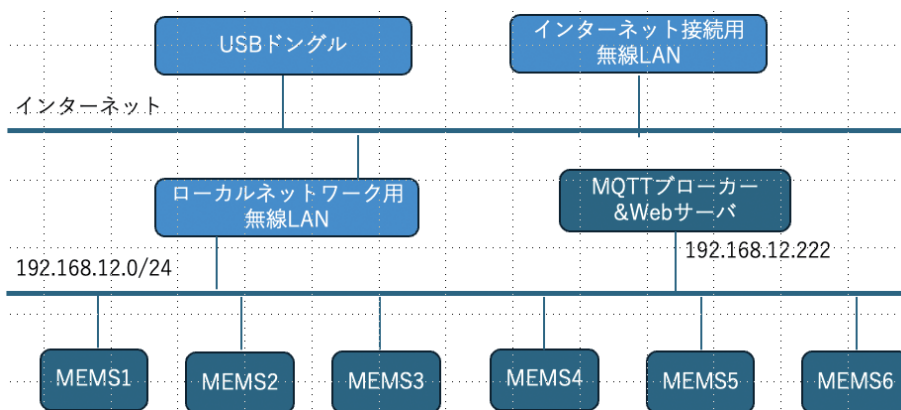


図 8. ネットワーク構成概要図

いる。

(1) USB ドングル

データ用 SIM カードをセットする。インターネットに接続するためのドングルになる。地震計と制御部の時計を制御するための NTP (Network Time Protocol) を利用するために、インターネットを利用する。NTP を利用するため、時刻精度は数ミリ秒から数十ミリ秒となる。

(2) インターネット接続用無線 LAN ルーター

USB ドングルに WiFi で接続し、ローカルネットワーク用無線 LAN ルーターと RJ45 ケーブルで接続し地震計群をインターネットに接続できるようにする。

(3) ローカルネットワーク用無線 LAN ルーター

MEMS 地震計および MQTT ブローカーおよび Web サーバがこの無線 LAN に WiFi 接続するための無線 LAN ルーターである。

(4) MQTT ブローカーおよび Web サーバ

MEMS 地震計のデータを受信するサーバであり、Rasp-

berry Pi 4 に最新の OS (64 bit) をインストールし、WIN システム、Web サーバ (apache) および MQTT ブローカー (mosquitto) をインストールした。表 1 に示すコマンドを `_win` に設定し、常時これらのプログラムが起動している。

(5) MEMS 地震計

表 2 に示すコマンドを `_win` に設定し、センサーからのデータを (4) のサーバに送信している。

なお、(4) と (5) は OverlayFS 化状態で稼働するようにしており、OS のブート時を除けば microSD への書き込みが行われないようにしている。つまり、起動後においては shutdown コマンドによる電源断処理をしなくてもよいようにしている。(4) を起動後の `http://192.168.12.222` にアクセスした際のウェブのスナップショットは、図 9 である。各 MEMS 地震計のリアルタイム波形表示の例は図 6 にすでに示しているが、データ長は 5 秒分で auto スケールとなっている。また、MEMS 地震計 6 台分の表示については、上下動のみが、auto スケールおよび最大最小が

表 1. MQTT ブローカーおよび Web サーバにおいて `_win` に設定したコマンドリスト。

```
mq2raw -u win -P XX 192.168.12.222 11 2048 /dat/log/mq2raw.log &
raw2mq -u win -P XX-L ./ch.tbl -n -aj 11 -t win localhost /dat/log/raw2mq.log &
order -aB -l 13:512 11 12 512 20 /dat/log/order.log &
wdisk 12 /dat/raw 1440 /dat/log/wdisk.log &
```

表 2. MEMS 地震計の `_win` に設定したコマンドリスト。

```
sudo /home/pi/telemetry/w355 100 0900 11 100 &
raw2mq -u win -P XX 11 192.168.12.222 log/raw2mq.log &
```

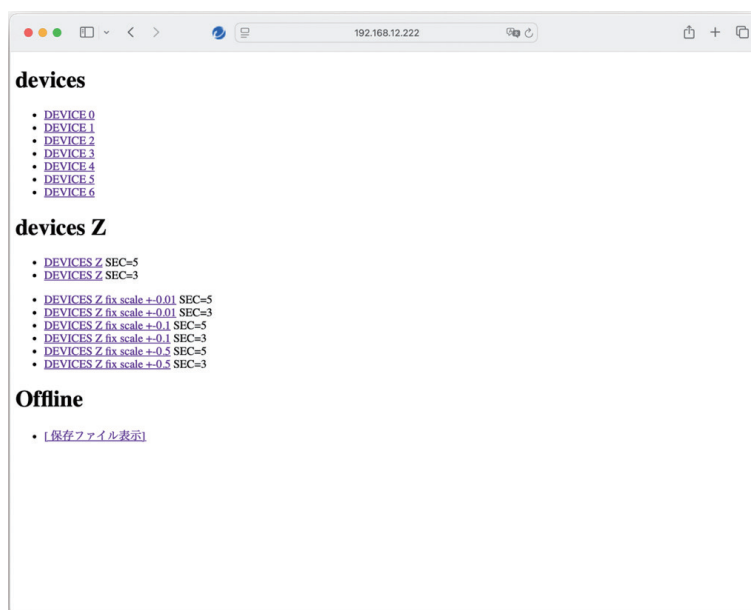


図 9. `http://192.168.12.222` にアクセスした際の Web のスナップショット

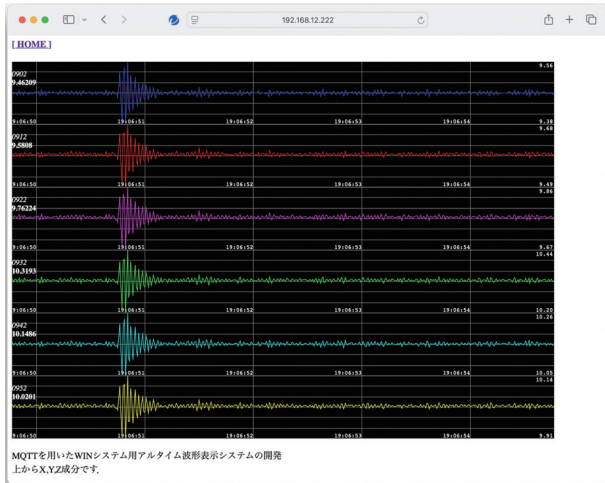


図 10. 6 台の MEMS 地震計の表示画面(この画面は auto スケール)

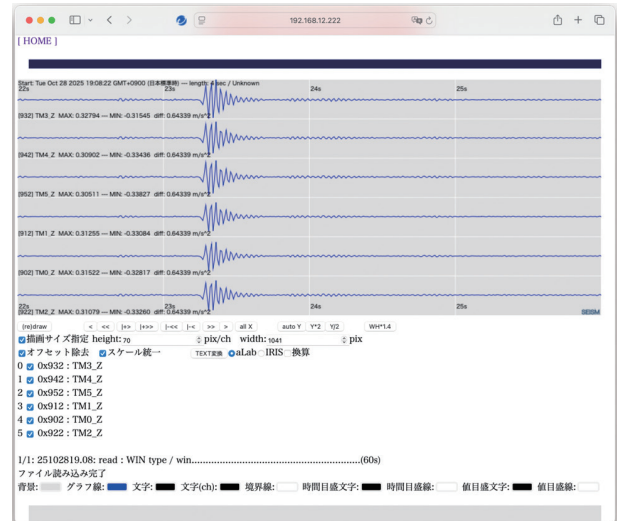


図 11. ディスクに保存された波形の切り出し表示のスナップショット

表 3. 機器リストおよび必要とされる機能

| 機器名 | 型番 | 必要とされる機能 |
|----------------------|---|---|
| USB ドングル | PIXELA PIX-MT110 | <ul style="list-style-type: none"> - USB 給電で動作する LTE 対応のドングルであること. - 無線 LAN IEEE802.11 b/g/n 対応であること. |
| インターネット接続様無線 LAN | tp-link AC750 Wi-Fi トラベルルーター TL-WR902AC | <ul style="list-style-type: none"> - 無線 LAN IEEE802.11 b/g/n 対応であること. - 動作モードとしてクライアントモードがあること. |
| ローカルネットワーク用無線 LAN | tp-link AC750 Wi-Fi トラベルルーター TL-WR902AC | <ul style="list-style-type: none"> - 無線 LAN IEEE802.11 b/g/n 対応であること. - 動作モードとしてルータモードがあること. - 同時 WiFi 接続数が 8 以上であること. |
| MQTT ブローカー & Web サーバ | Raspberry Pi 4 Model B / 8GB | <ul style="list-style-type: none"> - MQTT ブローカーである mosquitto および Web サーバの Apache が動作すること. - メモリとしては、2GB 以上であること. |
| MEMS 地震計 | ADXL355 | <ul style="list-style-type: none"> - 分解能は ADXL355 は 20 ビットであるが、地震教材としては 10 ビットあれば十分と考えられる. - 測定範囲が+2G はあること. |
| モバイルバッテリー 1 | Anker PowerCore Fusion 5000 | <ul style="list-style-type: none"> - 容量 5000mAh 程度 - USB-C 出力 5V=3A |
| モバイルバッテリー 2 | Anker PowerCore Fusion, 45W | <ul style="list-style-type: none"> - 容量 5000mAh 程度 - USB-C 出力 5V=3A |

固定された複数のスケールで表示できる. 表示のスナップショットを図 10 に示した. また, ディスクに保存されている波形データの切り出し表示のスナップショットを図 11 に示した. この表示は伊藤 (2018) のプログラムを利用した. 最後に, 地震機材に採用した機器のメーカーおよび型番と必要とされる最低限の機能を表 3 にまとめた.

結論および今後の展望

MEMS センサーとシングルボードコンピュータ (SBC)

を使用した非常に小型の (加速度) 地震計を作成し, それらの地震計を実際の地震観測網と同様にアレー化して揺れの振幅や時間差をリアルタイムおよびオフラインで確認できる地震教材を開発した. また, これらの機材はバッテリーのみで駆動することができるので, 授業を行う場所が柔軟に設定できることも特徴である. 必要な機材は, 市販の無線 LAN ルータ, USB ドングル, Raspberry Pi 4 により構築した Web サーバ (+MQTT ブローカー) およびモバイルバッテリーのみで, MEMS 地震計を除けば安価に調達

できる部材のみで開発を行うことができた。今後はこれらの地震教材を複数構築して地震研究所の共同利用での提供などを検討していく予定である。

謝 辞

本報告は、平田直名誉教授が2025年2月14日に講義をした鉢山中学校および2025年5月12日に子供科学館（こども科学センター・ハチラボ、渋谷区文化総合センター大和田）において実施された地震に関する授業において使用したMEMS地震計および関連機器を地震教材としてまとめたものである。平田直名誉教授には機器構成等において多くの意見と助言をいただきました。また、技術研究報告編集委員会と2名の匿名査読者には、有益なご指摘を頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

文 献

Hirata, N., D. Schorlemmer, H. Tsuruoka, T. Furuya (2023), Smart Sensor Deployments in the Tokyo Area : New Means of Communicating Earthquake Risk and Chances for Seismol-

ogy, Round-Table Workshop On Leveraging Low-Cost Seismic Networks In Building Resilient Cities & Infrastructure, Academia Sinica, Taipei, Taiwan.

平田 直, 古屋貴司, 鶴岡 弘, Danijel Schorlemmer, 2023, コンセント差し込み方式小型地震計による室内震度計測実験(2), 日本地震学会2023年秋季大会

鶴岡 弘, 2025, MQTT 対応 WIN によるリアルタイム表示システムの開発, 東京大学地震研究所技術研究報告, 31, 1-12.

鶴岡 弘, 2022, MQTT プロトコルを用いた WIN システム用リアルタイム波形表示システムの開発, 東京大学地震研究所技術研究報告, 28, 1-5.

伊藤貴盛, 2018, JavaScript による地震波形表示の試み, 日本地球惑星科学連合2018年大会, STT50-P09.

鶴岡 弘, 2003, WIN システム用波形モニターツールの活用, 東京大学地震研究所技術研究報告, 9, 14-19.

岡本義雄, 1997, 教室でできる地学実験 / フィルムケースで地震計をつくってみよう, 日本地震学会広報紙なるふる, No. 0, p5.

地震学会ウェブサイト, 2024年度地震の教室(親子向け), https://www.zisin.jp/org/organization_standing08_02_2024.html. (参照 2025-10-10)

テレメトラウェブサイト, Telemeta-1, <https://telemetra.jp>. (参照 2025-10-10)