

# G03-P02 Main Poster

English Version: P4, P2-P3: Supplements

2ページ, 3ページに追加資料が続きます。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1 Seismometer Specification									
2 Mount base L[cm] Pendulum L[cm] Mass [kg]	42	23	0.7	3200	L in natural	L in suspension	L in initial	F0: initial tension	
3 Impala_II	42	24	0.6	3200	Spring L0 [cm]	Spring L0 [cm]	Spring L0 [cm]	Spring F0 [kg]	F=2.4+0.26x
4 V									
5 H									
6 Kodu_II	50	33	1.35	3200			31.515-11.8=3.2	F=2.0+0.17x	
7 V									
8 H	50	33	1.03	3200					

# 3Dプリンタ印刷パーツで製作する学校教材用地震計 (ePoster)

School Seismographs Made with 3D Printed Parts (ePoster)

○岡本 義雄 Yoshio OKAMOTO

<http://www.yossi-okamoto.net/> [yossi.okamoto@gmail.com](mailto:yossi.okamoto@gmail.com)



## 1. 背景

筆者は20年前から、学校で観測と教材の両方の目的で用いることのできる地震計の開発を続けてきた(端緒は岡本, 1991)。

近年優れたマイクロコントローラArduinoと、超強力Neodym磁石のおかげで、比較的安価に、かつ十分に実用的な教材用地震計に改良した(Okamoto, 2015, 2018, ⇒本ポスター2ページ資料)。しかしこの地震計は筐体のアルミ材などの工作に金属工作のスキルを必要とし、材料の入手も困難であった。一方で、学生生徒でも製作可能な、身近なパーツで構成する振り子とセンサ製作の試みも公表した(岡本, 2015, 2016), ⇒同じく3ページの資料を参照。

ただこの振り子は構造上、安定性に欠け、教室デモ用としては優れているが、観測用としては心もとない。そこで近年性能向上が著しく、安価な3Dプリンタによる印刷パーツで、従来の金属製の筐体や振り子を置き換え、開発工程を短縮、かつ安価に誰でも製作可能な方向に改良を続けている。

## 2. 製作の概要

製作のベースとした、従来機の振り子の形状は、上下動がKirnos型、水平動がSwing Gate (Paschwitz) 型 (Fig. 4) で、いずれも固有周期を5秒程度に設計している。これは古い気象庁59型地震計の仕様と拠った。ブロック図、振り子の構造などは資料1に添付したものと同一である。新旧の上下動地震計をFig. 2に並べて示す。

ここで3Dプリンタパーツの使用のメリットは、

- 1) 材料が安価であること。
- 2) 設計図にあたるSTLファイルを公開すれば、誰でも簡単にそれを用いて、同じ機能のパーツを製作しうる。
- 3) 振り子の支点バネのかなり込み入った形状なども、3D印刷パーツでプラモデルを組み立てるように実用化できる。

などである。全体像をFig. 1に示す。さらに製作方針として、できるだけ特殊な作業を必要としない、既存品を流用して製作することにした。架台も現在は2x4用の安価な木材で仮固定している。下に写真を示す。次に各部を詳述する。

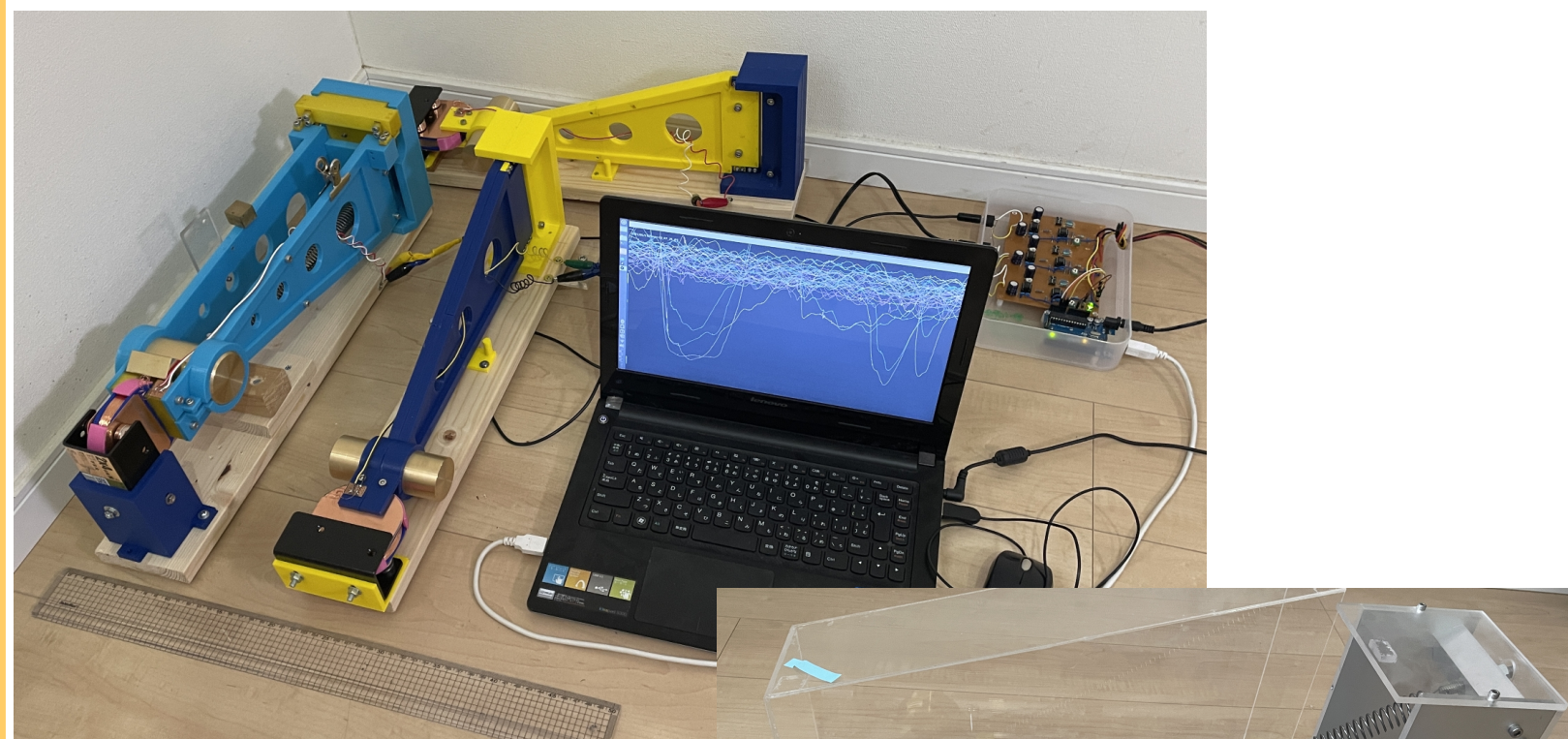


Fig.1 Overview of our system

Fig.2 Comparison of two seismo-meters: total weights are 8.1kg(old one) and 3.7kg(new one)

## 3. 電磁センサ部

- 1) コイル: 3Dプリンタで印刷したボビンに、0.25mm径のウレタン線を3200回程度巻く。巻く作業には卓上旋盤を使用。
- 2) 磁石: 安価で強力なネオジウム磁石(直径2cm, 厚さ2mmから5mm)を適宜重ねて使用。(ネットショップなどで購入)
- 3) 磁気回路: 2x4 DIY用の金具を使用。これに、都合4個の磁石を2組下図のように組み合わせる。誘導電流はコイルの両側で生じることに注意。コイルボビンと磁石間の隙間は重要であり、この調整が可能なように工夫。コイルには制動用の銅板(0.5mm厚, 下図)をかぶせる。

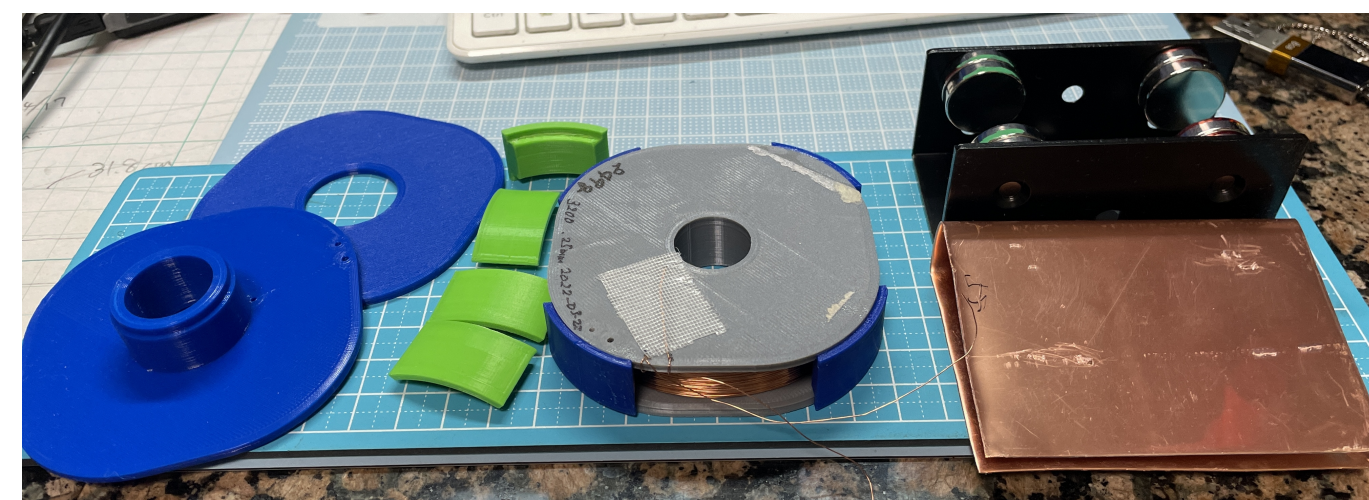


Fig.3 Bobbin, coil, copper damper and magnetic circuit

## 4. 振り子部

- 1) 錘: 真鍮丸棒を卓上旋盤で加工。
- 2) 振り子部: 3Dプリンタで印刷し、接着した。フィラメントは一般用のPLA, PLA+を使用。強度の高いPETGは反るなど難しい。
- 3) 板バネ: 0.1mm厚リン青銅板をネットショップで購入。はさみで切って使用。上下動用は2枚を組み合わせて、十字バネ (Fig. 4) を構成する。いずれも、引張応力下での使用となることに注意。構造など、詳しくは次ページ資料の, Fig. 6を参照。

4) 上下動用の主バネ: 1.8mm径のピアノ線を直径20mmに巻いたものを、長さ15cm程度にワイヤカッターで切断して使用。長周期の振り子を作るには、このバネの吊り方とバネの特性が非常に重要。専門家用の機械では初期長が短い、いわゆる「長さ0」のバネに近い特性のものや恒温性を有する、インバル系合金を使用。本開発では入手が簡単で安い、普通のピアノ線で後述の業者に製作を依頼。

このバネと振り子の形状の選択は、長周期の地震計(とくに上下動)における設計の一番の難所。詳しくは、参考文献や筆者Webサイトに上げる関連記事を参照してほしい(学会後にアップロード予定)なお、愛知県で大変親切な、ばね製作者を見つけたので謝辞を参考にしてほしい。

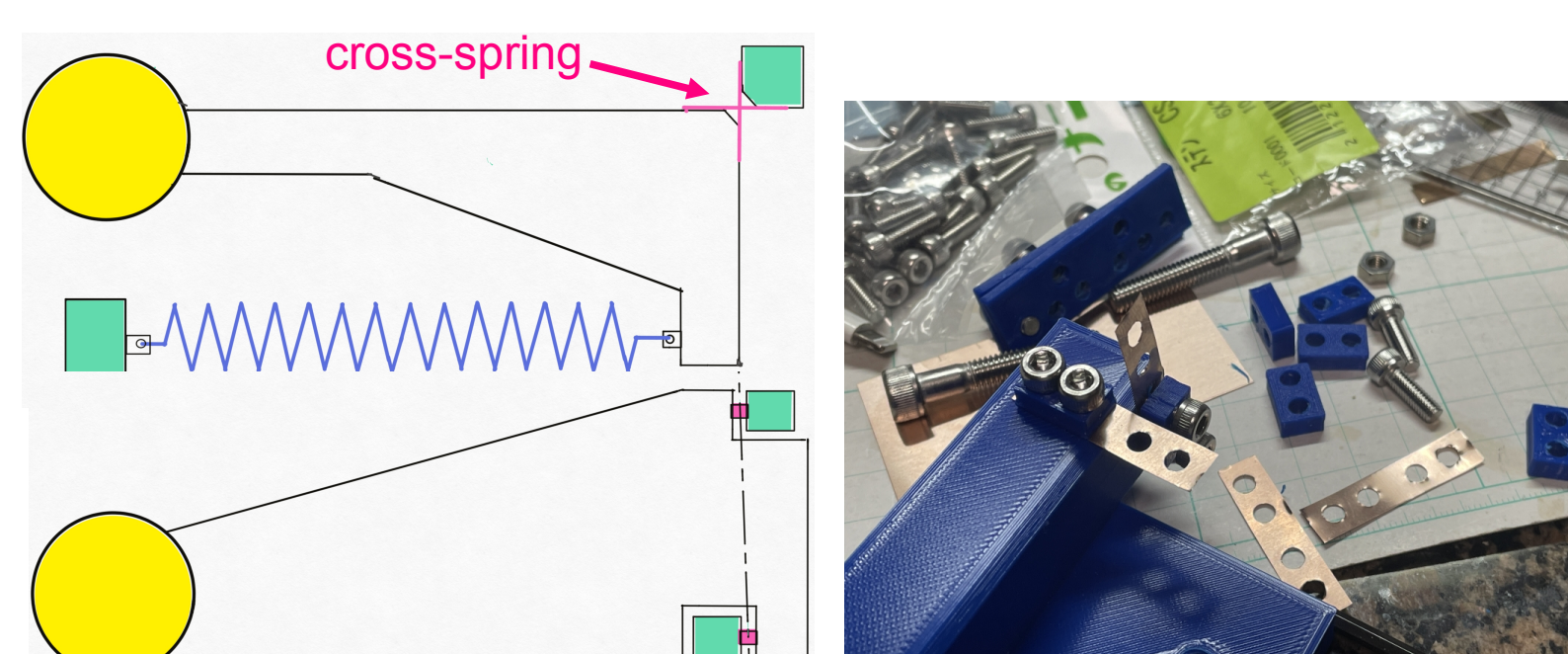


Fig.4 Pendulum structures and assembling cross-spring

## 5. 筐体

- 1) 振り子支柱と架台: 磁気回路支持台は3Dプリンタで印刷した。振り子などを載せる架台は、暫定的に1x4板材(18mm厚, 幅9cm)を用いているが、将来的には、PLA印刷かアクリル厚板, アルミ部材などに替えたい。
- 2) カバーは現在のところ不使用。しかしこれもエアコンが常用される夏場までには、製作したい。

## 6. 電子回路(次ページFig. 8参照)

### 1) 積分増幅アンプ

センサからの信号を、積分増幅、速度比例の信号を時定数以上の振動数で、変位に変換。時定数は6[sec]を通常のオフィス用, 60[sec]を低ノイズサイト用とした。後者が外国の地震などの観測には有利。固有周期(約5秒)以上の長周期については、振り子の応答特性上変位には直らない。

### 2) Arduino Uno: 信号のA/D変換とPCへのUSBの接続を担当。

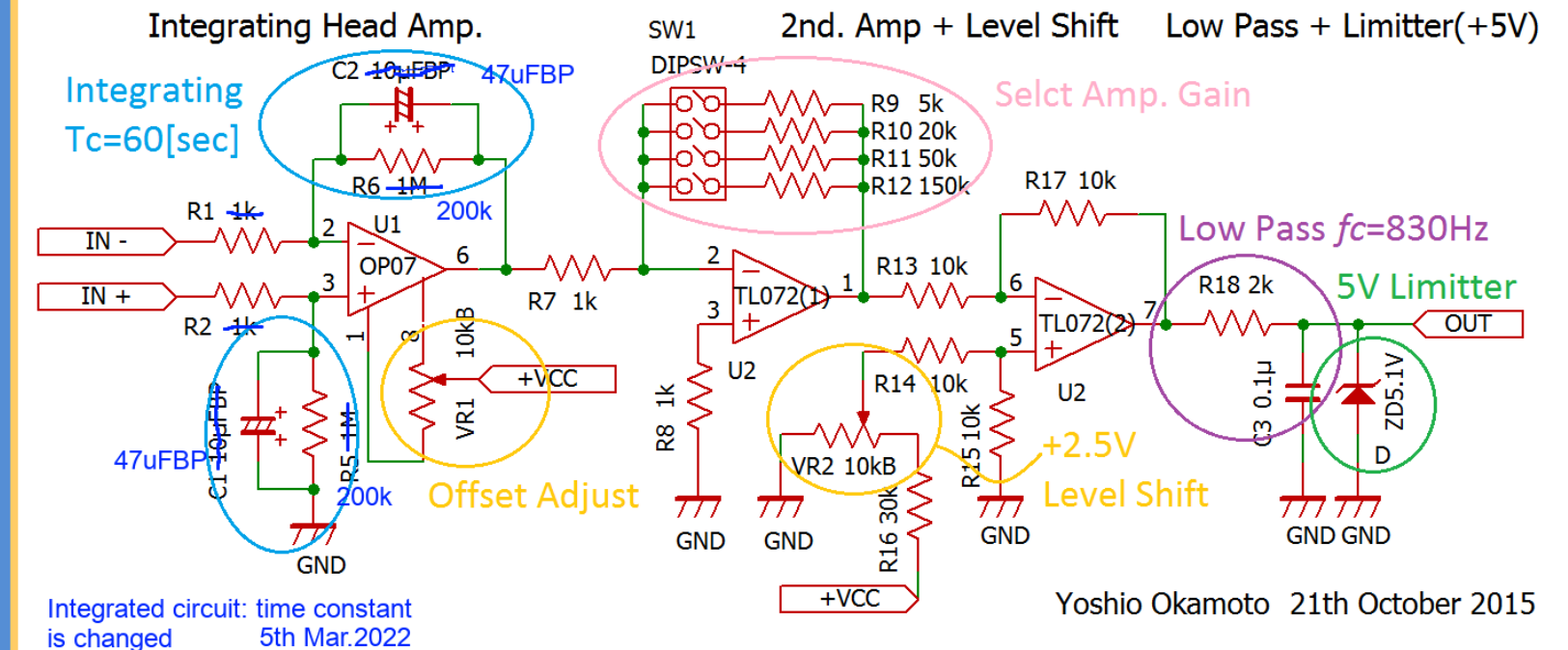


Fig.5 Integrating amplifier circuit (slightly modified from Okamoto, 2018)

## 7. 波形表示, 記録プログラム

次ページ資料の従来機で運用しているProcessing言語による自作ソフトを若干修正して用いている。OSはWindows Linuxいずれにも対処。電子回路と組んで、10年以上安定して運用されているソフトである。

## 8. 3Dプリンタ

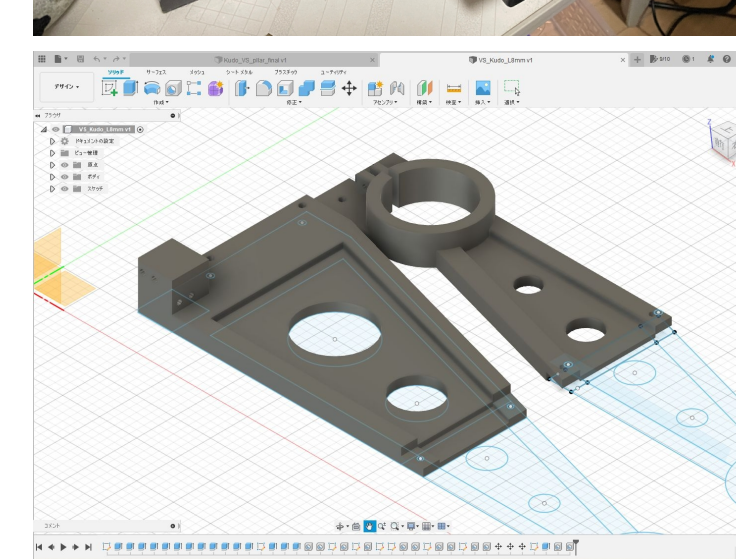
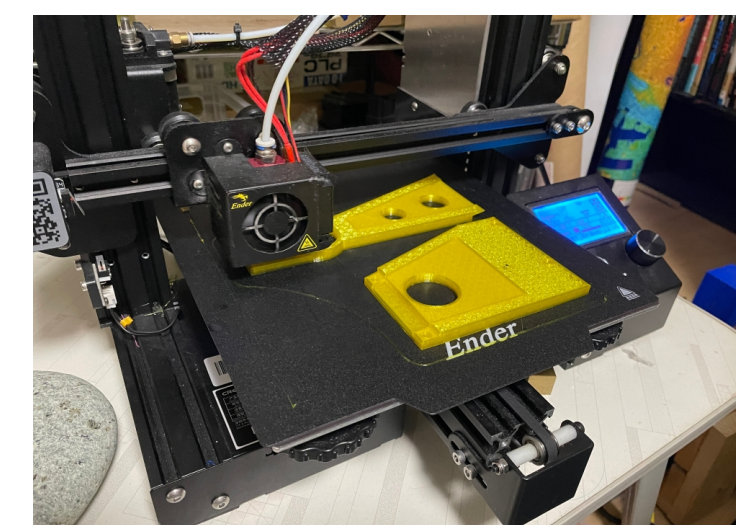
安価で業界で定評のある, Creality Ender3 Proを使用。フィラメントはPLA, PLA+を常用。

## 9. 3DCAD&スライサ

3Dプリンタでの印刷に必要なファイル作成は、業界ではグローバルスタンダードの「Fusion360」(AUTODESK社)を用いている。登録が必要であるが、無料の範囲内でも大変有用なソフトである。

作成したSTLファイルを、フリーソフトの「Cura」というソフトでスライスして、実際のプリンタに入力するgcodeファイルを作成する。(これらの詳細は割愛する)

Fig.6 3DPrinter Ender3 pro and Fusion360 workspace



## 10. 定量測定

- 定量的な議論のために、次の諸量を測定した。
- 1) バネ定数:  $F=2.4+0.26 \times x$  [kgw/cm]: 初期長: 8.8cm 測定にデジタルフォースゲージ (SHIMPO) を用いた
  - 2) 磁気回路の磁束密度: 測定値: 約200-270[mT] 測定にテスラメータ (佐藤商事) を用いた。
  - 3) 磁気回路計算: 上記測定値との比較のため、FEMM (磁界境界要素法計算ソフト) で磁束計算を行った (以上Fig. 7)。
  - 4) 減衰定数: 設計で重要な、振り子の制動の効き (減衰定数h) であるが、銅板による渦電流とアンプ初段の抵抗により  $h \sim 0.5$ 前後と推定。

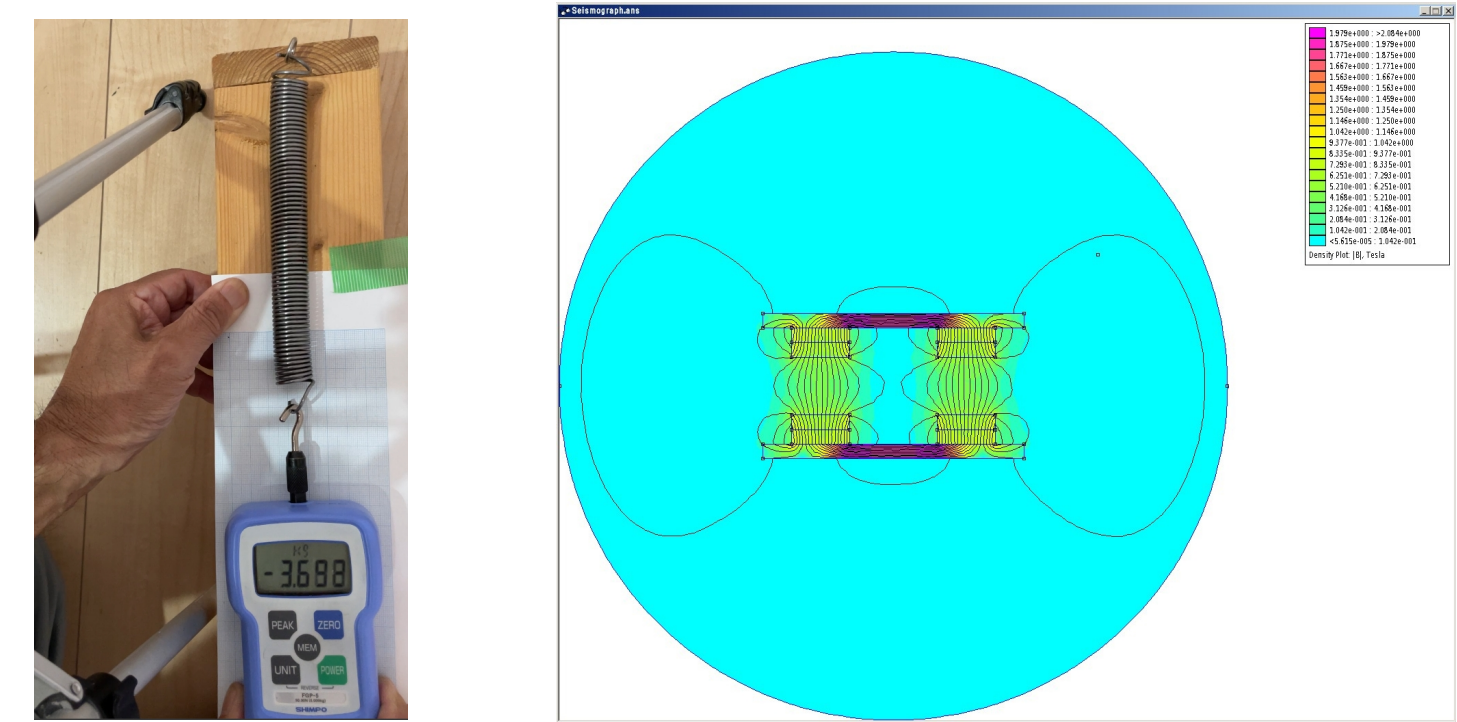


Fig.7 Spring calibration and magnetic field simulation by FEMM

## 11. 議論

- 現状での問題点をアルミ筐体のものと比較すると、
- 1) 筐体と振り子に金属ではなくプラスチックを用いることの、機械的強度の問題や、経年変化などがある。
  - 2) 3Dプリンタは条件次第で、印刷途中のトラブルや完成後の反りの問題、ネジの穴のつぶれなどがある。
  - 3) ネジに関しては、使用するCADソフト「Fusion360」にはネジ穴を設計する機能があるが、PLAを用いるかぎり6mm未満のネジ穴のネジはうまく印刷されず、従来どおり金属製タップで切るしかない。
  - 4) Processingソフトの運用で、PCの機種により、chの入力表示の順が、何らかの条件で変わってしまうことがわかった。
  - 5) 減衰定数 (h) の定量的測定に至っていない。
  - 6) プリント基板製作過程はタフな仕事 (現在外注を試行)。
- これらの点が今後監視、改良する問題点である。

### <謝辞>

観測に際して、西口治佳氏 (大成学院大学)、直木優一氏 (和泉市立信太中学校) にお世話になった。

また本機用のばねを、事情をよく汲んで試作を重ね、製作いただいた有限会社杉浦発条 (<https://s-spring.jp/>) の杉浦弘則氏に、感謝申し上げます。

### <文献>

萩原尊禮: 「振動測定」宝文館出版, ほか多数。  
筆者のものは次ページ以降の資料に。  
※本地震計に関する関連情報は筆者Webサイトで公開予定  
<http://www.yossi-okamoto.net/>  
※観測波形, 観測の詳細は夏のGeoSci EdIX (島根, 2022) で発表予定

教材用地震計黎明期(1991年から2000年代初頭)

岡本義雄: 教材用地震観測システムの開発, 大阪と科学教育 5, 9-14, 1991  
 Yoshio Okamoto: A Handmade Seismograph System and its Seismograms -Make Your Own Seismograph!-, GeoSciEdIII Sydney 2000 proceedings.

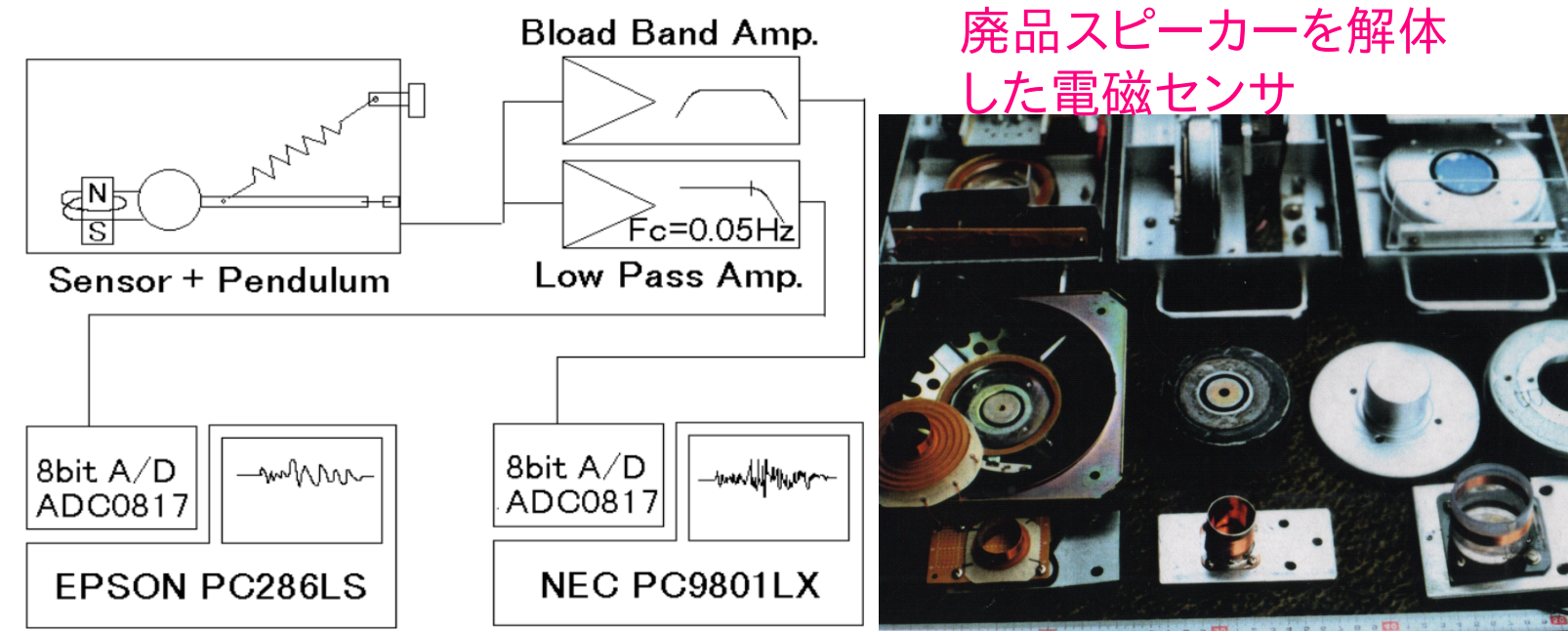


Fig.1 Block diagram of our system and sensors.



Fig.2 Three comp. Seismographs + PC-based logger



Fig.3 Observation site (my house beside a forest)

廃品スピーカーを解体した電磁センサ

フロッピーベース 手動工具時代

自作はんだ付け A/D, I/Oボード

和歌山県橋本市の山林に隣接の新興住宅地。基盤は和泉層群で硬く、地震観測に適した場所。和歌山市内の群発地震のほか、1995年兵庫県南部地震の本震と余震が数多く観測できた。

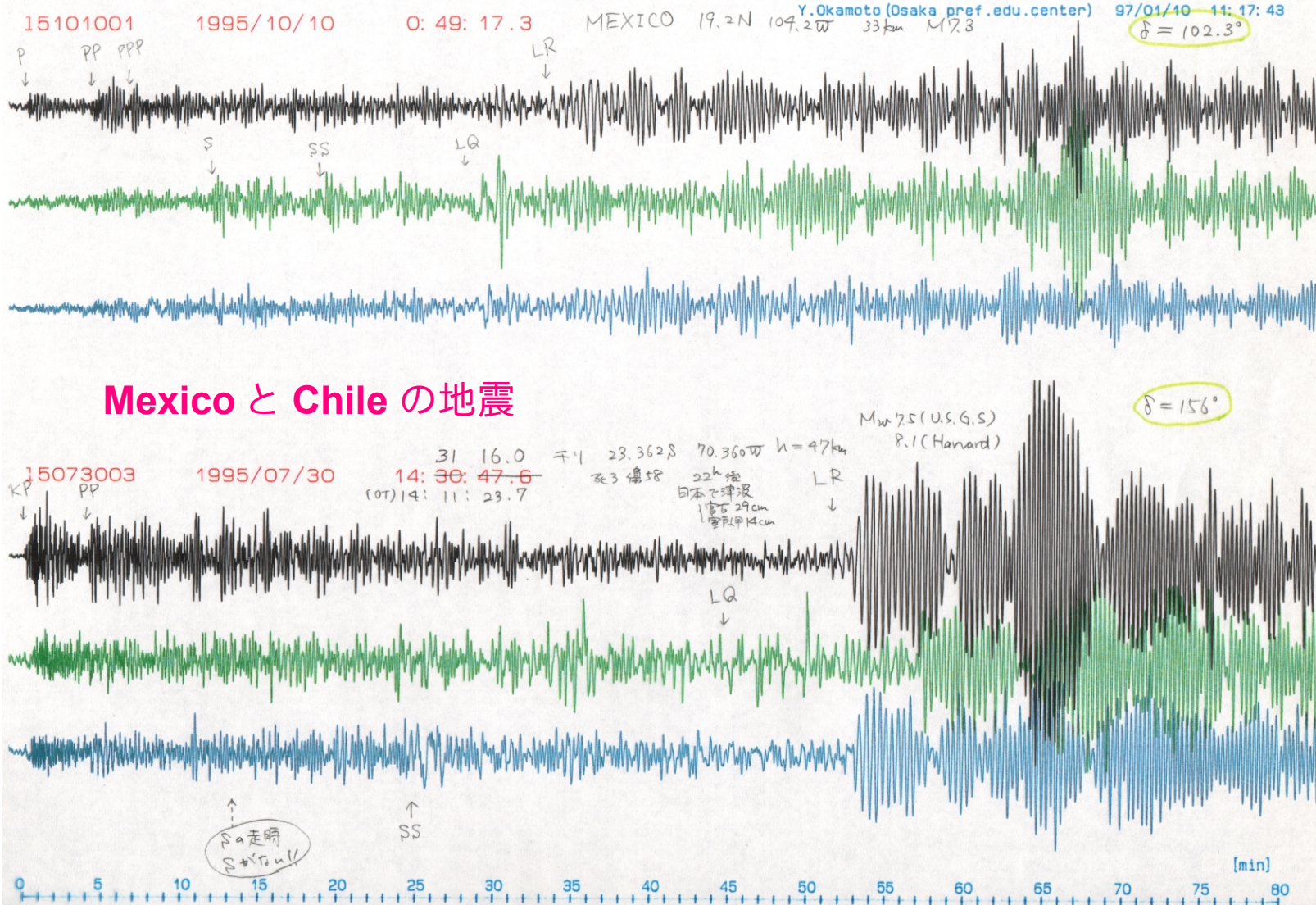
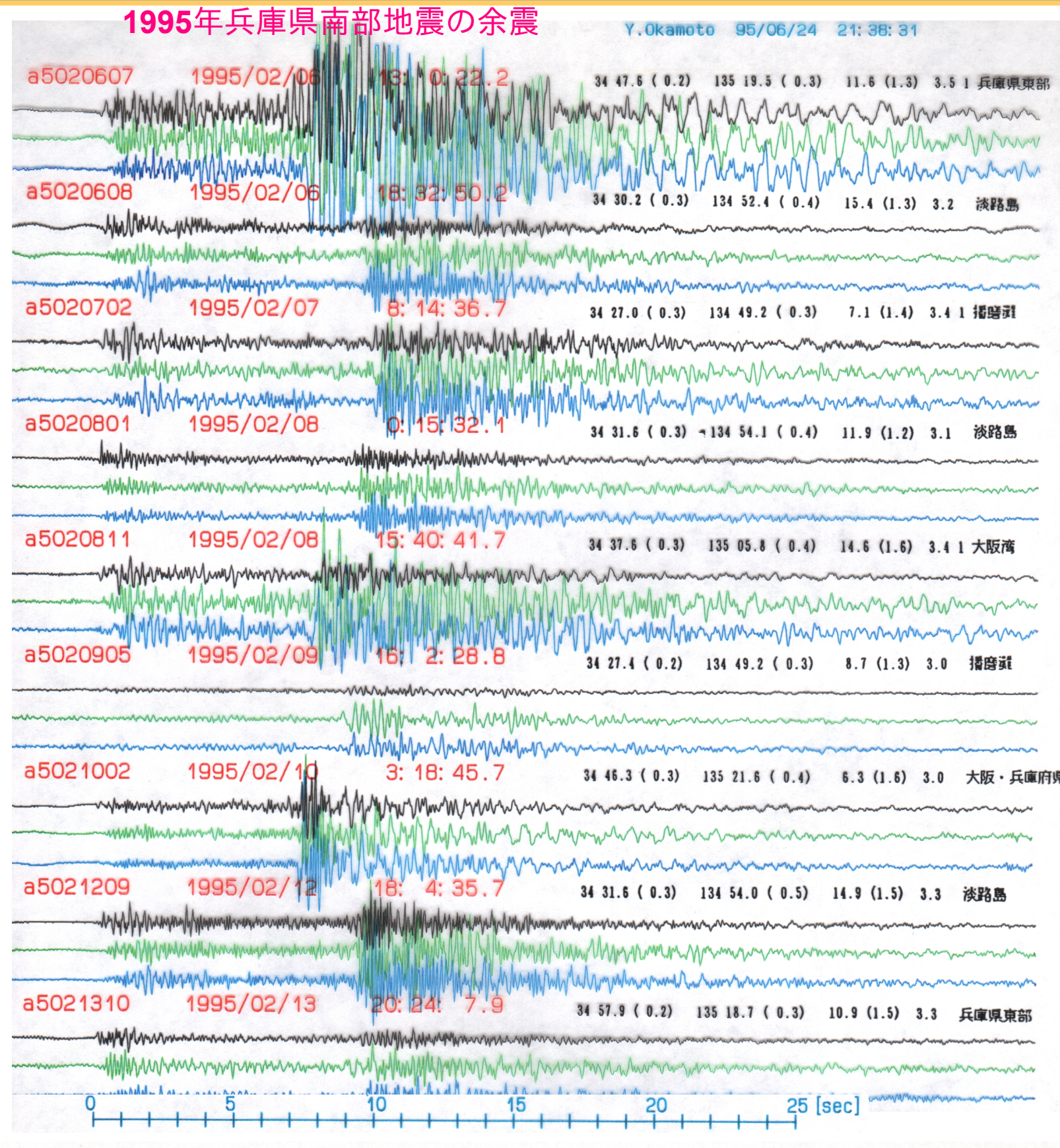


Fig.4 Seismograms of local and foreign earthquakes

教材用地震計発展期(2010年代)

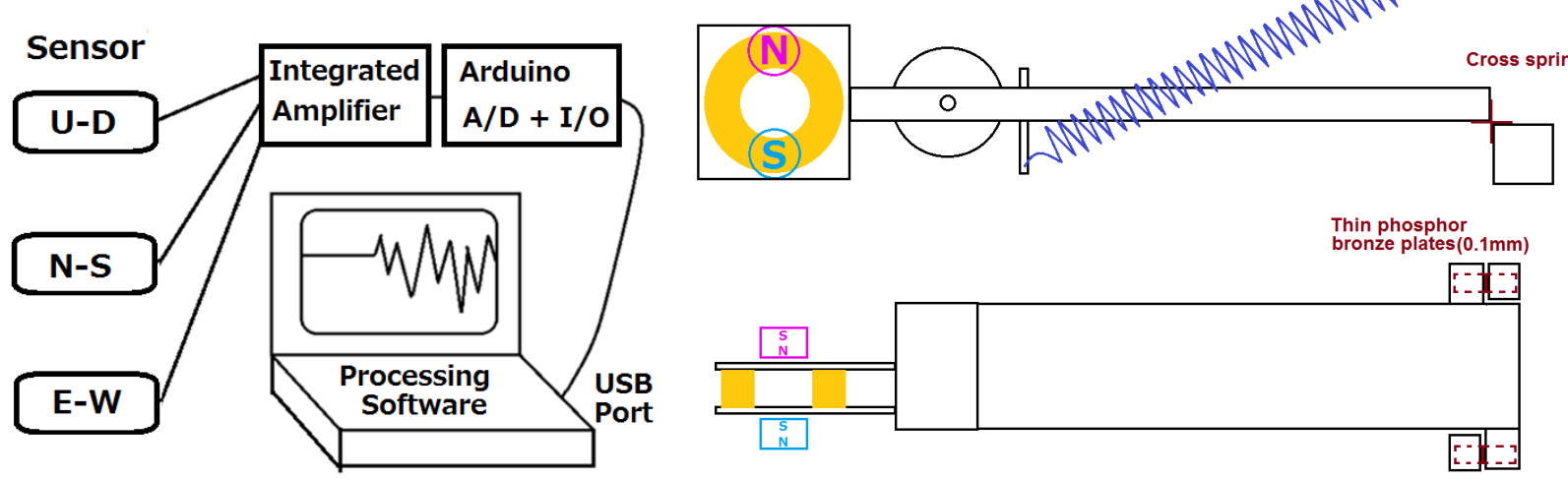


Fig.6 Block diagram and Pendulums

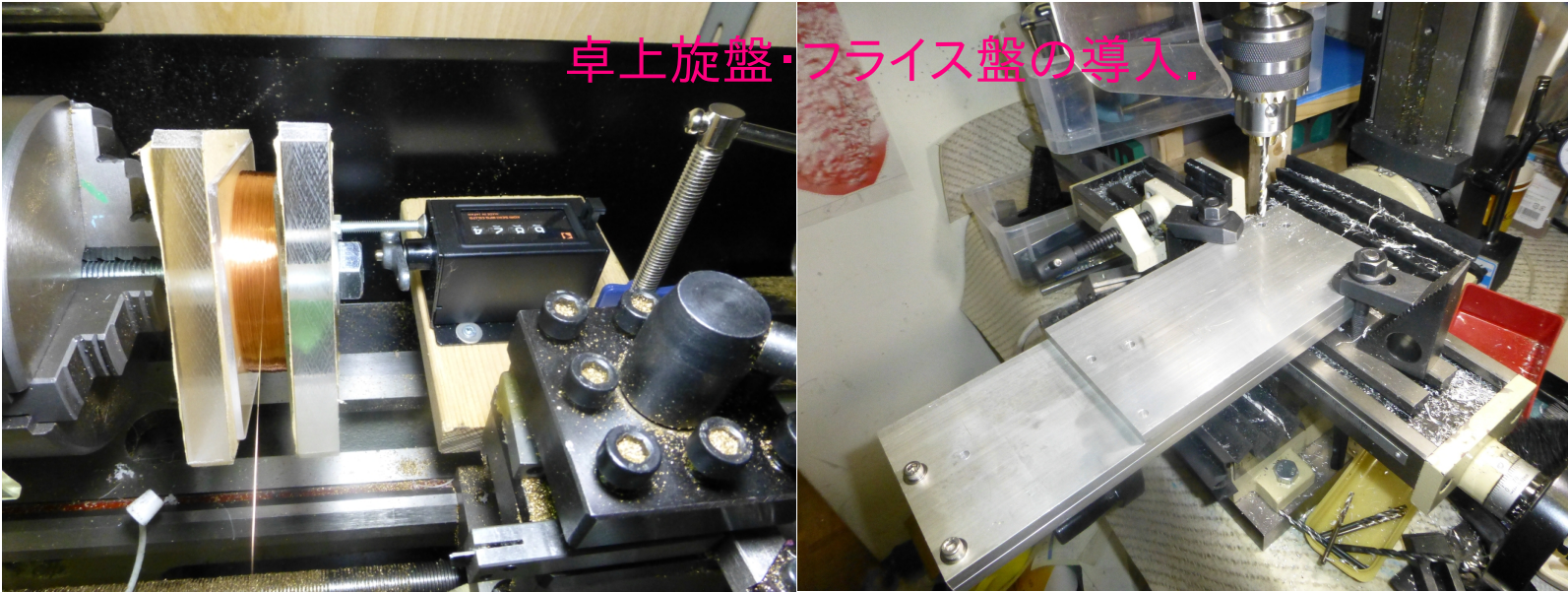


Fig.7 Coil winding and Metal processing

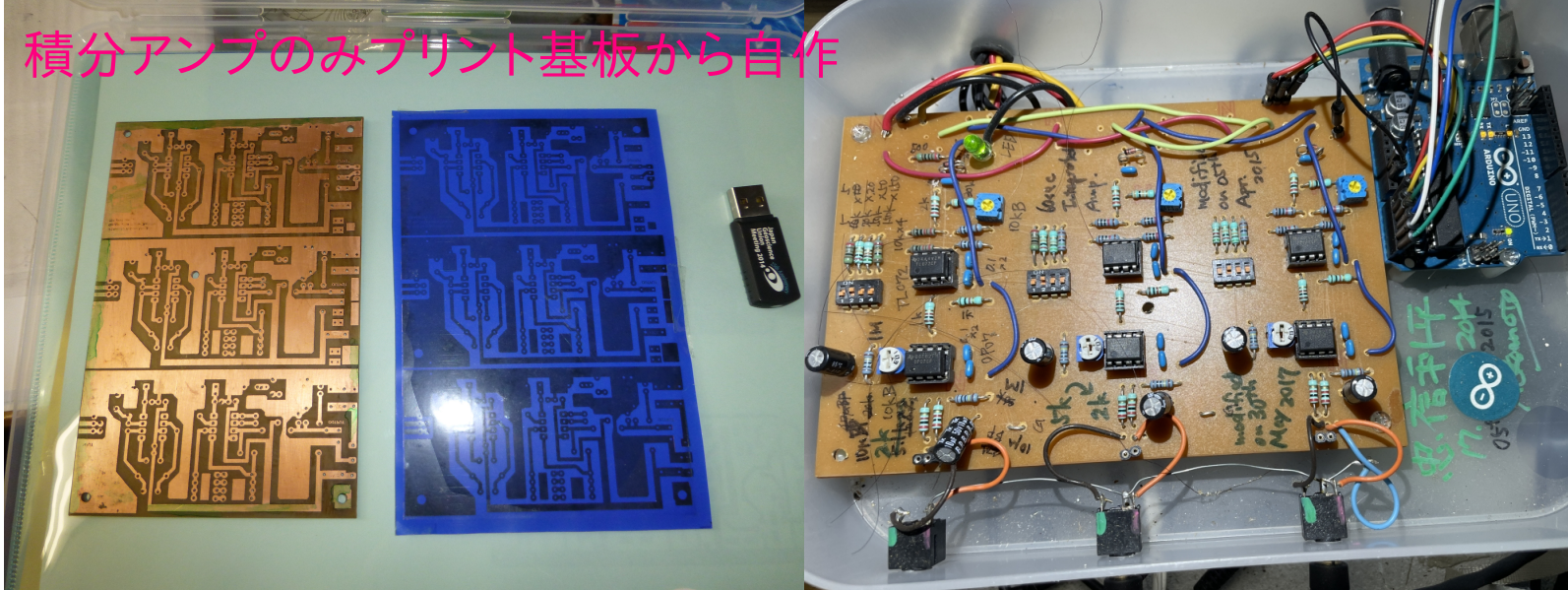


Fig.8 Circuit board (making + operating) Arduinoの使用

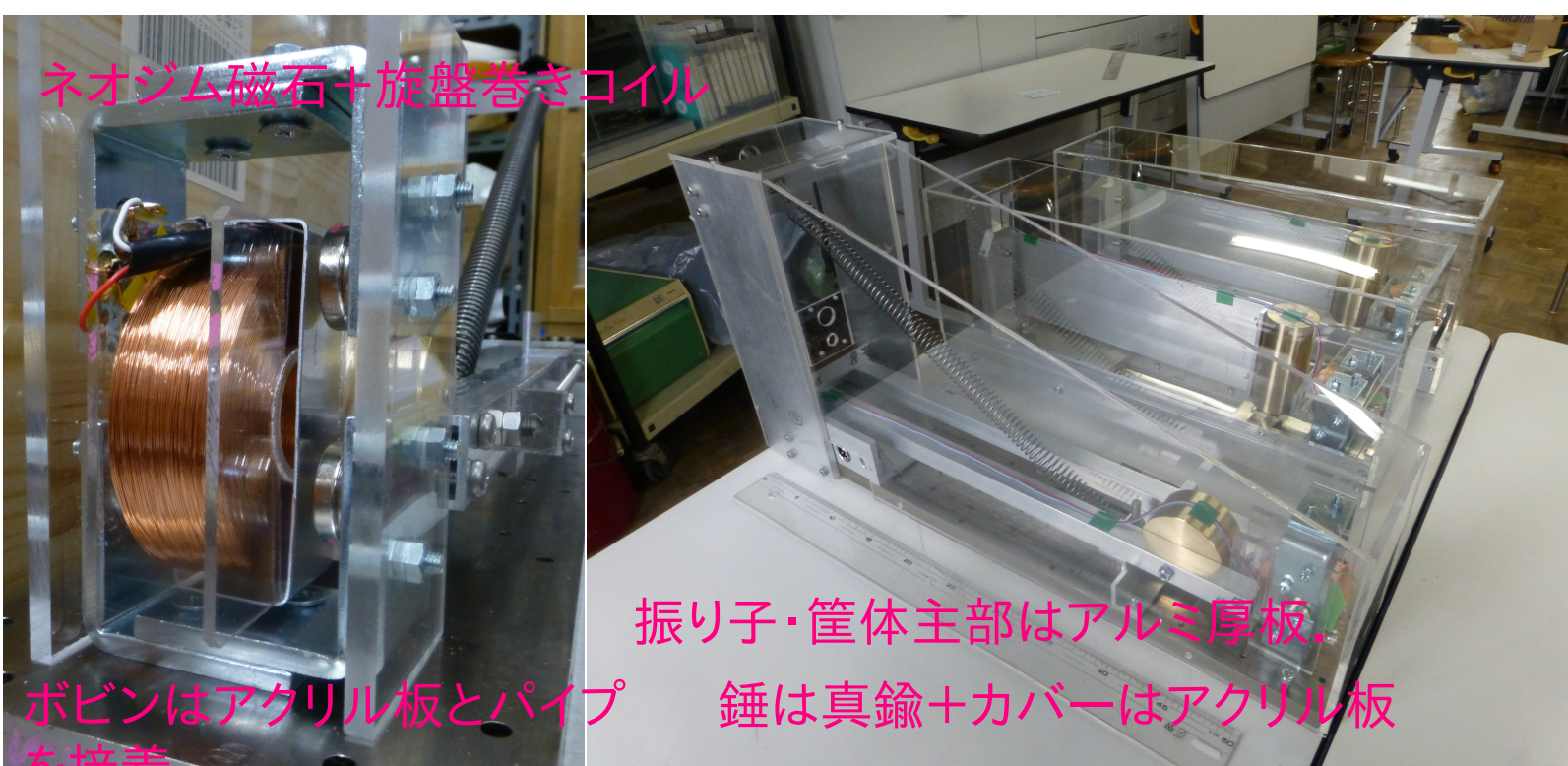


Fig.9 magnet + coil, Seismographs with acrylic covers

<文献>

岡本義雄: やや本格的な教材用地震計の製作, 日本地学教育学会第69回全国大会福岡大会講演予稿集, 2015  
 Yoshio Okamoto: "A School Seismograph System at KVIS, Thailand"-A new construction and its seismograms-, GeoSciEd VIII Campinas, 2018 Abstract

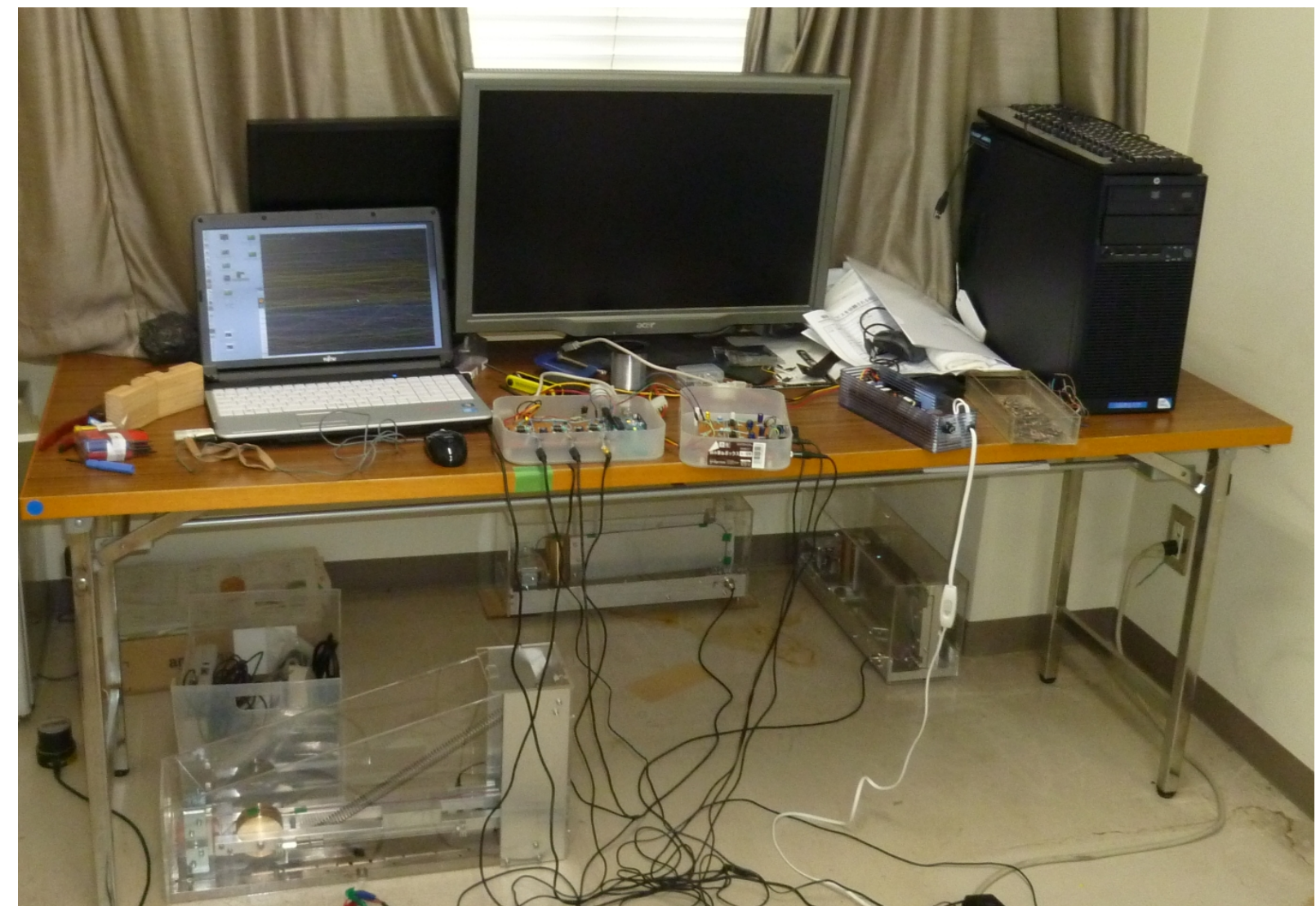


Fig.10 Operating at Osaka-Kyoiku University (2015-17)

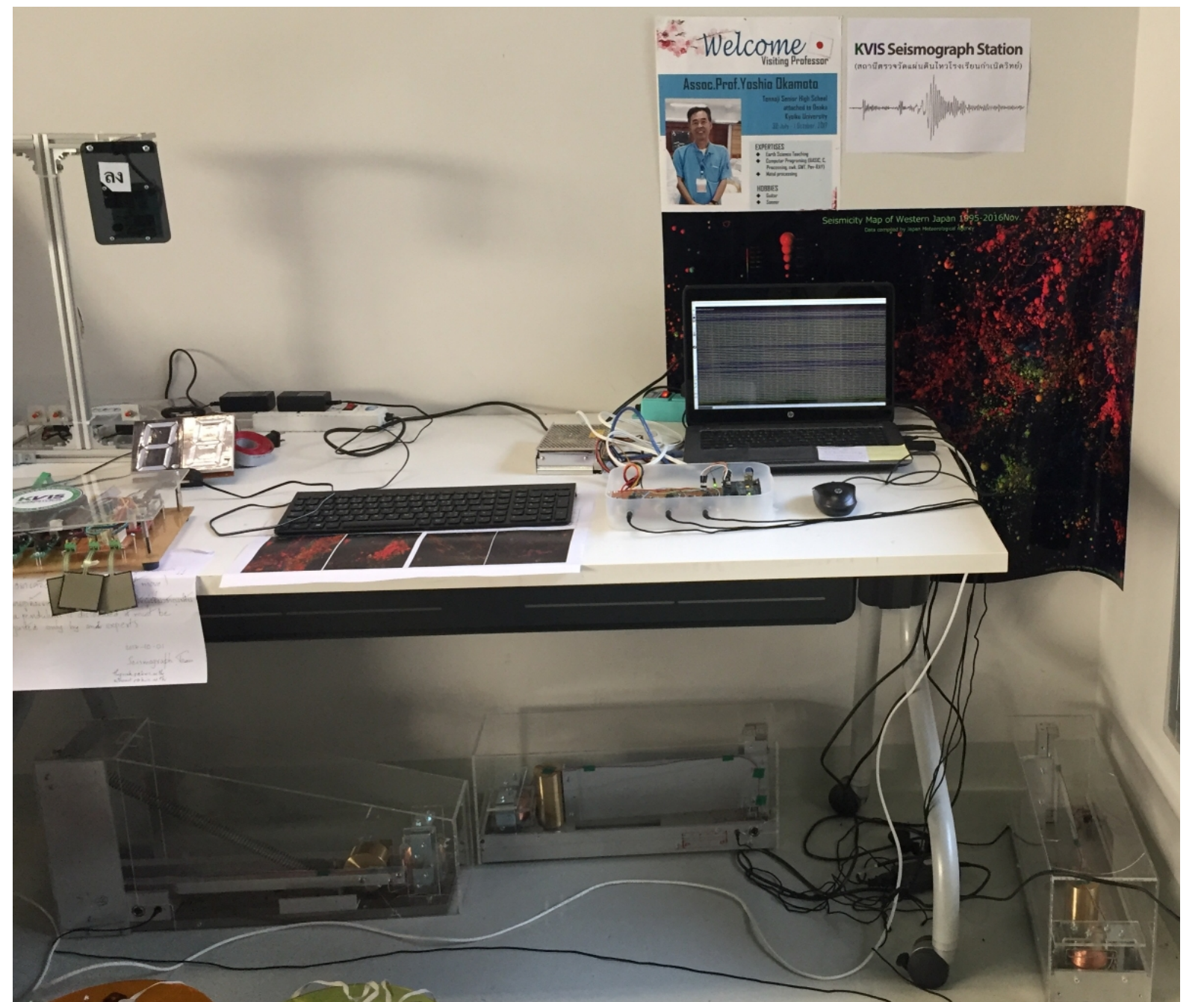


Fig.11 Operating at KVIS, Thailand (2017-)



Seismometer	Specification	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	Mount Base L[cm]	Pendulum L[cm]	Mass [kg]	Coil 0.25mm [turn]	L in natural Spring Ln [cm]	L in suspension Spring Ls [cm]	L in initial Spring L0 [cm]	F0: initial tension Spring F0 [kg]-K[kg/cm]		
Impala_II	42	23	0.7	3200						
V	42	24	0.6	3200						
Kudu_II	50	33	1.35	3200			22.5:12-9:2=3.2	F=2.4+0.26x		
V	50	33	1.35	3200			31.5:15-11.8=3.2	F=2.0+0.17x		
H	50	33	1.03	3200						

○ Yoshio OKAMOTO

[http://www.yossi-okamoto.net/index\\_e.html](http://www.yossi-okamoto.net/index_e.html)

yossi.okamoto@gmail.com

## 1. Background

We have been developing school use seismograph system since 20 years ago (started at Okamoto,1991). With the innovation of the microcontroller Arduino and super strong Neodymium magnet, our prototypes improved as more sophisticated and made at low cost(Okamoto,2015,2017). However, this version needs high metal processing skills. Obtaining material is hard, so we developed a more simplified version(Okamoto,2015,2016), which we use daily materials and can be easily made by students. This version is useful for classroom demonstration; however, it is not suitable for practical observation due to the lack of pendulum stability. Therefore, we are improving the second version by replacing the metal pendulum and enclosures with the 3D printed parts, shortening the development process, and making it possible for anyone to make at a low cost.

## 2. Outline of the making

The pendulum type of the previous one was based on the Kirnos type for vertical motion and the Swing Gate (Paschwitz) type for horizontal motion, both of which are designed for about 5 seconds period(Fig. 3), mimicking the old JMA Type 59 seismograph. The block diagram and the pendulum structure are the same as those attached in Reference 1(page 2). The old and new vertical motion seismographs are side by side in Fig. 2.

### The advantages of using 3D printer parts are as follows.

- 1) Inexpensive materials.
- 2) If the STL files are prepared, anyone can easily manufacture parts with the same functions using these STL files.
- 3) The intricate shape of a pendulum's leaf spring as a pivot can be assembled like a "plastic model" using 3D printed parts.

The overall image is shown in Fig. 1.

Furthermore, as a production policy, we use items not requiring exceptional work as much as possible. The base is currently made of inexpensive 1x4 wood. Their operation is shown below.

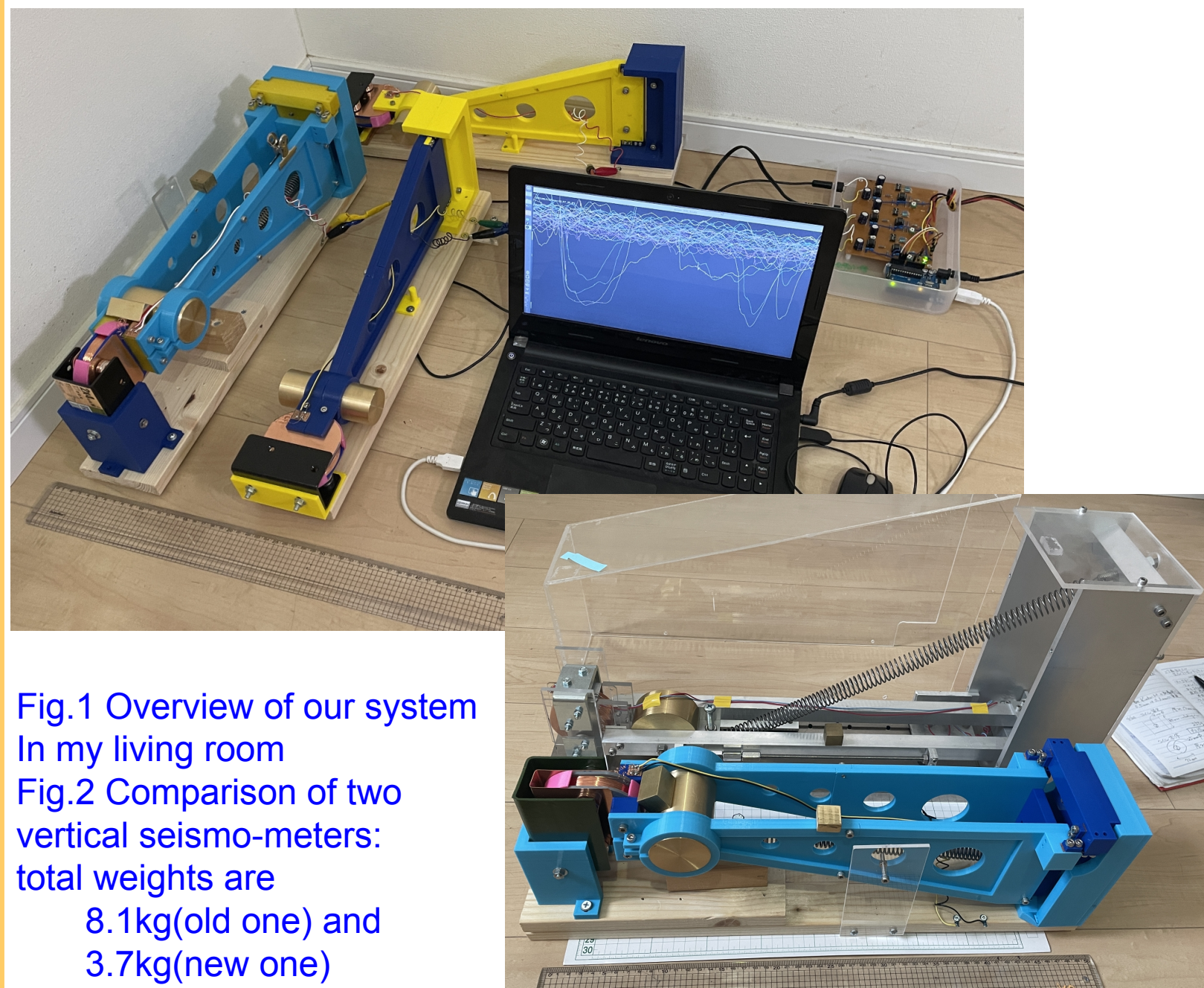


Fig.1 Overview of our system  
In my living room  
Fig.2 Comparison of two vertical seismo-meters:  
total weights are  
8.1kg(old one) and  
3.7kg(new one)

## 3. Electromagnetic sensor

- 1) **Coil:** A 0.25-mm-diameter urethane wire is wound about 3,200 times around a bobbin printed by our 3D printer. A bench lathe used for winding.
- 2) **Magnets:** Inexpensive, super strong neodymium magnets (2 cm in diameter, 2 mm to 5 mm thick) are used as multi-piled. (purchased at online stores).
- 3) **Magnetic circuit:** 2x4 fitting iron is used. The induced current from both magnets is doubled. The gap between the coil bobbin and the magnets is critical, so the magnet holder is designed to adjust this gap. Wrap the coil bobbin with a copper plate (0.5 mm thick) for the necessary damping.

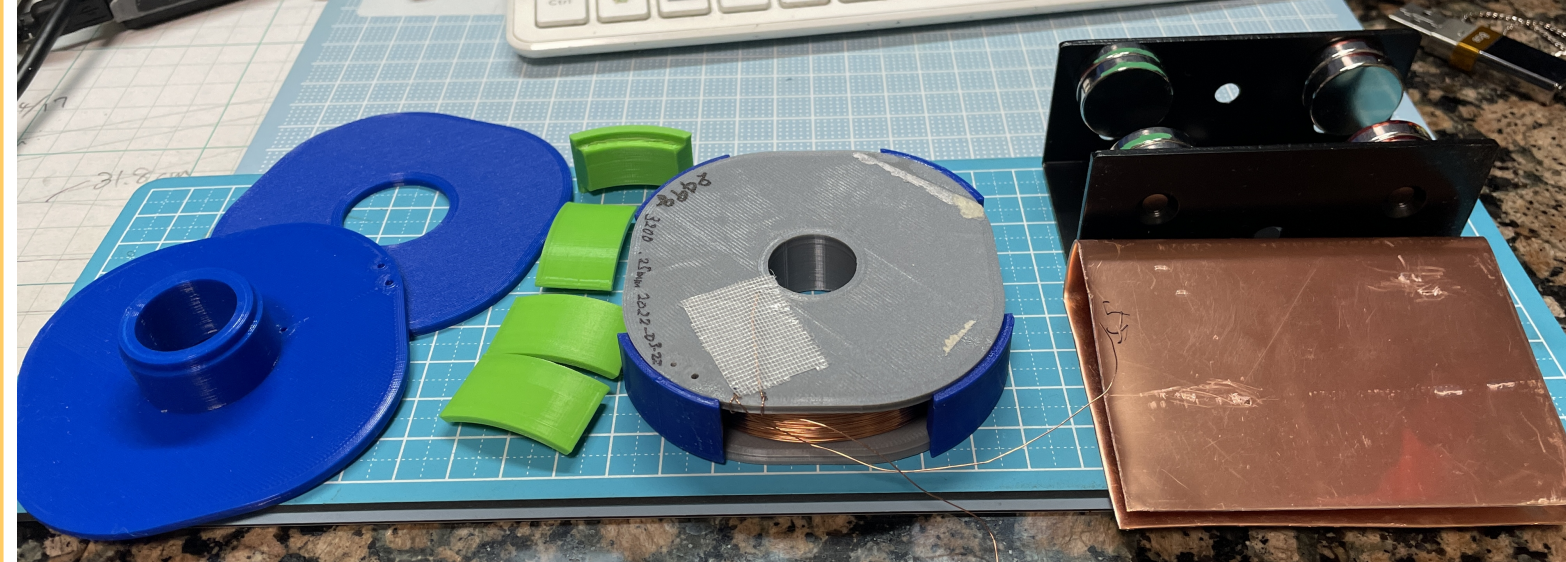


Fig.3 Bobbin, coil, copper damper and magnetic circuit

## 4. Pendulum and spring

- 1) **Pendulum's mass:** Brass cylindrical bar, machined on a table-top lathe.
- 2) **Pendulum and pillar:** Printed by a 3D printer and glued. PLA and PLA+ filaments for general purpose were used. While PETG, having tight hardness, is hard to use because of warping after printing.
- 3) **Leaf spring as pivots:** 0.1mm-thick phosphor bronze plates were purchased from a net shop. Cut with scissors. Two leaves are assembled as a cross spring for the vertical pendulum (Fig. 4). Note that both springs are used under tensile stress. See Fig. 6 on the page 2 for details.
- 4) **Main-spring for the vertical component:** 1.8-mm-diameter piano wire wound to 20 mm in diameter and cut to about 15 cm in length using a wire cutter. The suspension structure and spring characteristics are essential for making a long-period pendulum. Specialist's tool uses a spring with characteristics similar to so-called "zero-length" springs, which have a short initial length made from invar alloys with thermostatic properties. In our case, we used ordinary piano wire and asked the factory described below to fabricate the special arranging springs.

**The spring and pendulum structure is the most challenging part of designing a long-period seismograph (especially for the vertical pendulum).** Please refer to the references and related articles on the author's website (uploading after the conference).

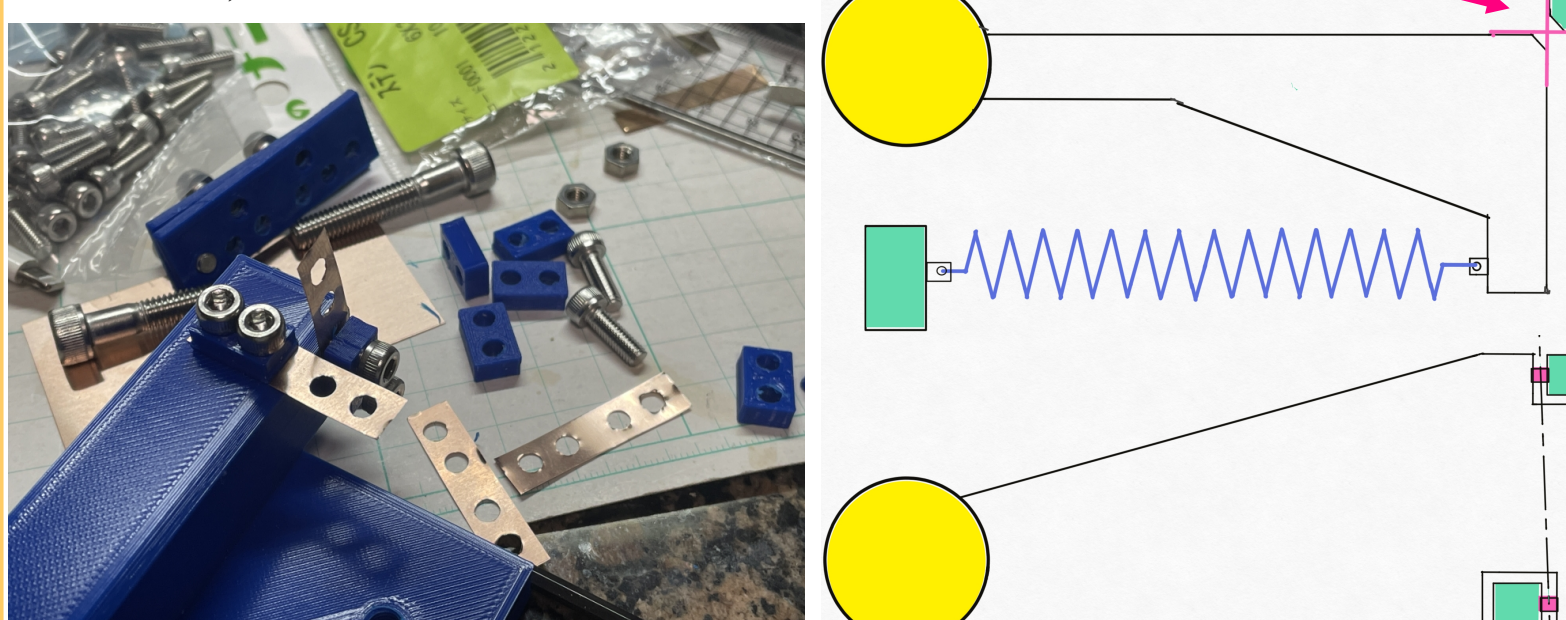


Fig.4 Pendulum structures and assembling cross-spring

## 5. Enclosure

- 1) A **3D printer** printed the pendulum pillar and the magnetic circuit support. The base for the pendulum is tentatively made of a 1x4 wood (18mm thick, 9cm wide), but in the future, we will replace it with a thick acrylic plate or an aluminum cast.
- 2) **The cover** is currently not used. However, we will make the cover when air conditioners are regularly used in the summer.

## 6. The electronic circuit (see Fig. 8 on page 2)

### 1) Amplifier with integrator

The signal from the sensor is integrally amplified, and the signal proportional to the velocity is converted into displacement at an oscillation frequency greater than the time constant. A time constant of 6[sec] was set for regular office use and 60[sec] for low-noise sites. The latter is suitable for foreign earthquake detecting. However, long-period signals longer than the natural period of the pendulum (about 5 sec) cannot be transformed correctly to real displacement due to the response characteristics of the pendulum.

- 2) **Arduino Uno:** Responsible for A/D conversion of signals and USB connection to PC. (see Fig. 8 on page 2)

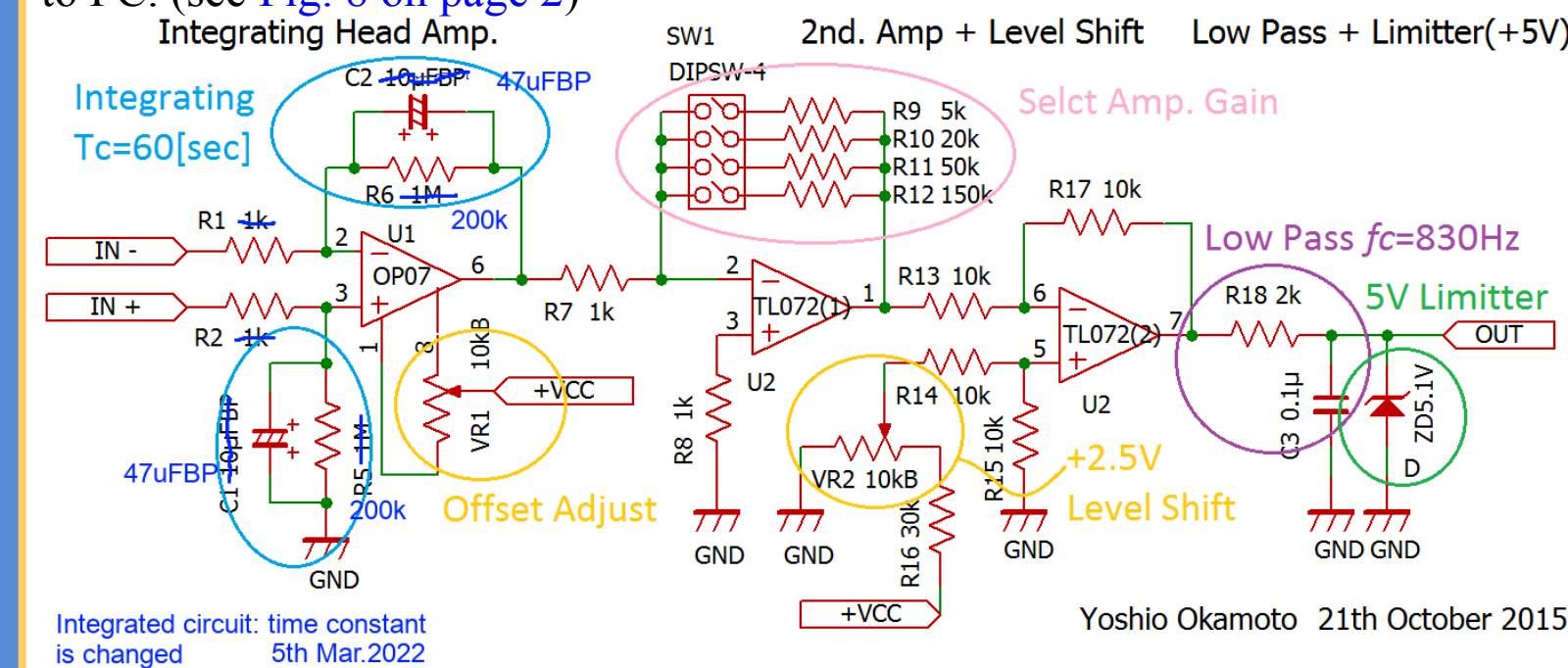


Fig.5 Integrating amplifier circuit (Slightly modified from Okamoto,2018)

## 7. Signal display and logging program

The program is a slightly modified the previous version written in the Processing language used in the previous model shown on the next page 2. This software has been used stably for more than ten years with our electro-circuits.

## 8. 3D printer and CAD software

**Creality Ender3 Pro**, which is inexpensive and has a good reputation, is used. **Fusion360** (AUTODESK), a global standard, creates a STL file of a 3D model. Although registration is required, Fusion360 is useful within the free-range. The Slicer is **Cura**, a free-ware, converting STL files to gcode for an input data of the printer. (These details are omitted.)

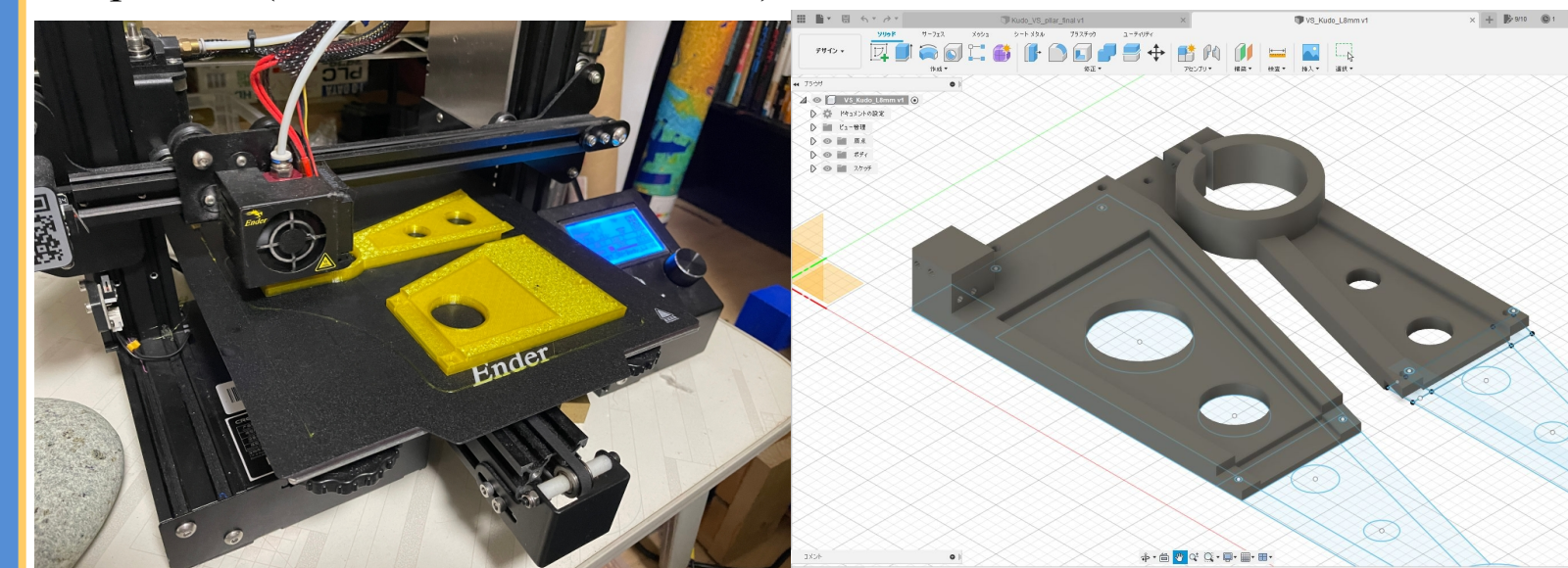


Fig.6 3DPrinter Ender3 pro and Fusion360 workspace

## 10. Quantitative measurements

The following quantities were measured for quantitative discussion.

- 1) **Spring constant:**  $F = 2.4 + 0.26x$  [kgw/cm]: Initial length: 8.8 cm (A "digital force gauge" was used for measurement.)
- 2) **Magnetic flux density** of magnetic circuit Measured value: Approx. 200-270[mT] (A "tesla meter" was used for the measurement.)
- 3) **Magnetic flux calculations** were performed using FEMM (magnetic field calculator with boundary element method) to compare with the above measured values (Fig. 7).
- 4) **Damping constants  $h$**  of the pendulums are estimated from the signal decay; to be about  $h \sim 0.3$  to 0.5 due to the eddy currents caused by the copper plate and the self-induced EMF of the first register of the amplifier.

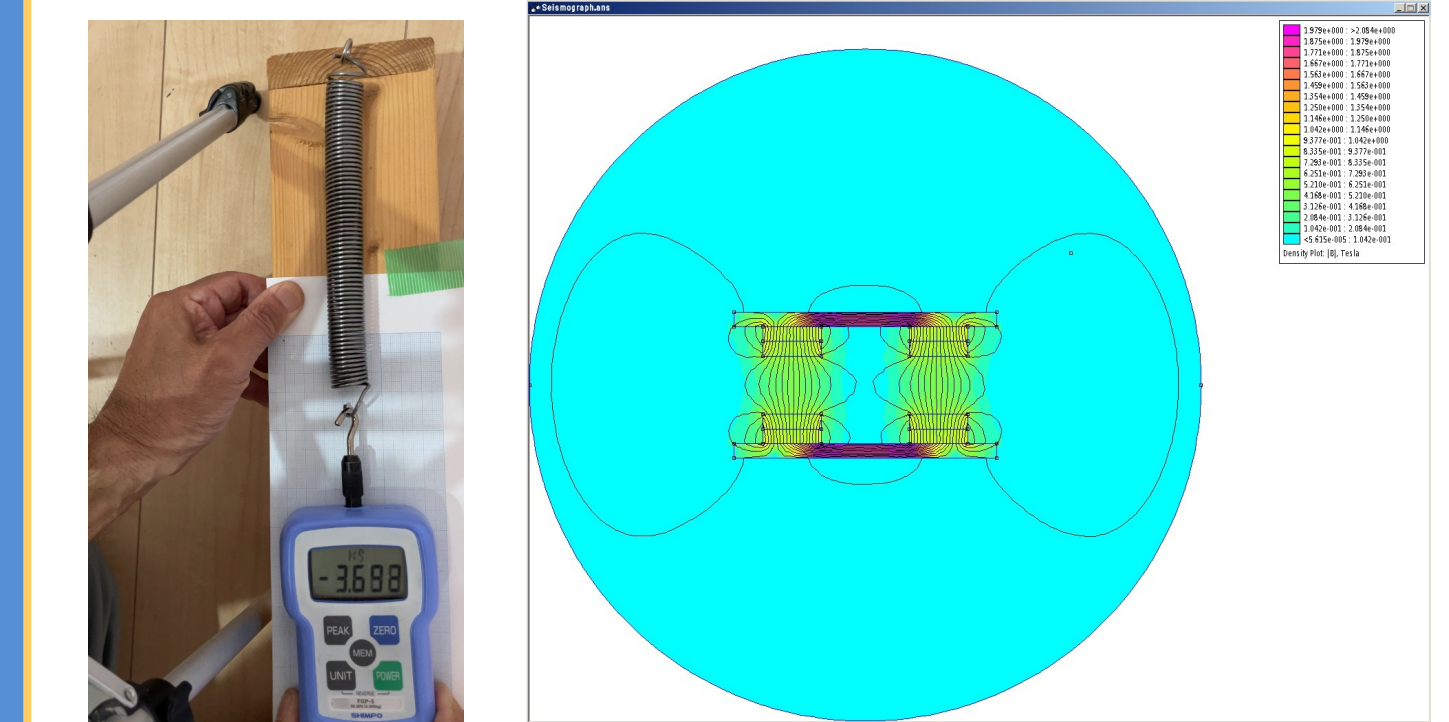


Fig.7 Spring calibration and a magnetic field by FEMM

## 11. Discussion

Compared with our previous version, the following problems can be identified.

- 1) The use of plastic(PLA) instead of metals for the enclosure and the pendulum causes mechanical strength problems and changes over time.
- 2) 3D printers have problems during the printing process, warping after completion, and crushed screw holes, depending on the conditions.
- 3) For screws, the CAD software "Fusion360" has a function for designing screw holes, but for PLA in use, the screw holes less than 6 mm will not be by printing but have to be cut using iron taps.
- 4) In the operation of the Processing software, it was found that due to an unknown problem sometimes causes the channel order changes.
- 5) For various reasons, quantitative measurement of the damping constant ( $h$ ) has not yet been achieved.
- 6) The PCB fabrication process is a tough job (we are currently trying to outsource the work).

These are the problems to be monitored and improved in the future.

### <Acknowledgments>

I am grateful to Ms. Haruka Nishiguchi (Taisei Gakuin University) and Mr. Yuichi Naoki (Shinta Junior High School, Izumi City) for their help in the observation.

Also, I thank to Mr. Tomonori Sugiura (Sugiura Hatsujo Limited, <https://s-spring.jp/>) for manufacturing the springs of our vertical seismographs after his numerous attempts.

### <References>

Takayoshi Hagiwara: "Vibration Measurement," Houbunkan Publishing Co. Other author's manuscripts are listed on pages 2-4. Other related materials will be uploaded on my web site soon. Also, **the seismographs and observation related to our system will be presented at GeoSciEdIX (Shimane,2022).**