

教材用地震観測システムの開発

岡本 義雄*

1. はじめに

かすかな大地の鼓動をすず紙に記録していく地震計は筆者の幼い日の憧れであった。何度かその試作に挑戦したが、回転ドラムが難しく実用にはならなかった。当時、地震計のシンボルであった麦わらの描針やすず紙に時計装置という機構も、やがてセンサー→電気信号→記録システムという洗練された計測器一般の進歩の前に色あせてしまった。

さらに最近、地震予知対策に伴う微小地震計測の高精度化がめざましく、各観測所の地震計からの信号をテレメータで中央の処理センターに集中し、大型計算機によるリアルタイムの地震検知や、震源決定などを行う地震観測網が整備されてきている¹⁾。

そんな流れの中で教育現場では、意外に地震観測が話題となることは少なかった。教材用の優れた地震計が市販されていないことや、専門家用の機器を流用しようとしても、皮肉なことに自動化・高精度化による高価格と、“ブラックボックス”化された構造が大きなネックとなっていた。

一昨年、筆者は安価なセンサーと最近普及が著しいパーソナルコンピュータを組み合わせることで教材用の地震計測システムの試作にこぎつけた²⁾。教室内での地震計の原理の解説のほか、実習用の地震波形記録を得ることが当初の開発目的であった。

その後、実際に観測に使用しながら、学校の片隅や人家の庭先での手軽な地震観測システムとしての活用を念頭において改良を続けてきた。

ここでは改良点を含め、地震計と観測システムの製作について詳述したい。

2. システムの概要

システムの開発にあたっては、i) 地震計の原理が解りやすい構造 ii) 地動のリアルタイム表示 iii) 地震波形の保存 iv) 波形の教材化のためのデー

タ処理、を基本的な軸と考えた。

また、できるだけ手に入りやすい材料を用い、安く手作りできるようにも心がけた(金属工作の難易度は工具にもよるが反射望遠鏡の自作程度、電子工作は、ICやトランジスタのはんだ付けの経験があれば可能と考える)。

そこで、換振器(感震器とも書く)のセンサーには廃品のスピーカーを解体して加工し、記録システムには自作拡張ボードを組み込んだ NEC 製パーソナルコンピュータ PC-9801F2 を使用した。観測システムのブロック図を図1に示す。

センサーのコイルに発生する地動速度**に比例する信号は i) 換振器に組み込まれたヘッドアンプで増幅 ii) 拡張ボード内の A/D (アナログ/デジタル) 変換 IC で数値化 iii) コンピュータ内部のメモリーに記憶されると同時に CRT (ディスプレイ) 画面に波形として表示 iv) 画面一杯になった時点でトリガーレベル***を越えていたかどうかの

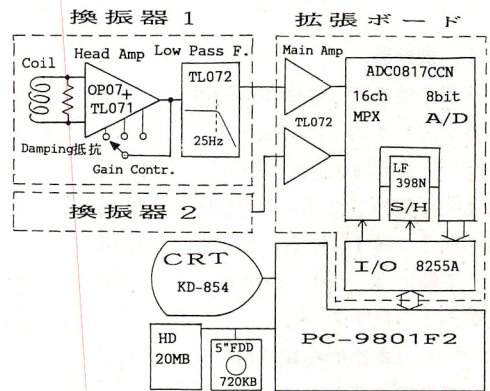


図1 システムブロック図

** 誘導電圧はマグネットの磁束を切るコイルの速度に比例する(変位ではないことに注意)。

*** 波形を記録するかどうかを設定した基準値のことで信号の最大値がこれを越えると処理を行う。

* 大阪府立横山高等学校

表1 換振器の仕様

換振器	N-1 V (上下動)	N-2 H (水平動)	N-3 V (上下動)
外形 (mm)	160×160×460	160×160×460	160×175×600
重量 (kg)	8 kg	8 kg	13 kg
振り子の形式	ばね振り子(変形Ewing型)	水平振り子(Paschwitz型)	ばね振り子(変形Ewing型)
振り子の支点	板ばね(燐青銅0.3mm厚)	板ばね(燐青銅0.1mm厚)	十字ばね(燐青銅0.1mm厚)
振り子の長さ	215 mm	255 mm	385 mm
重りの質量	1.5 kg (鉄)	1.5 kg (鉄)	1.6 kg (真中)
ばね(線径×直径×長さ)	1.5×16×75 (mm)	-----	2.0×22×120 (mm)
マグネット径	φ90 mm (カステル棚)	φ90 mm (オーヂィ棚)	φ120 mm (オーヂィ棚)
マグネットの厚さ(改造法)	1.5 mm (無改造)	3.5 mm (ホールソー)	4.5 mm (旋盤)
コイル巻き数(線径)	50回巻き(0.1mm)	200回巻き(0.12mm)	640回巻き(0.12mm)
コイルピン径(材料)	φ30 mm (7mm薄板)	φ30 mm (銅板1mm厚)	φ50 mm (7mm薄板)
アンプの総合増率(標準)	×30000	×10000	×5000
振り子の自然周期 T_0 [秒]	1.6秒	5秒に調整	2.6秒
減衰定数 h (タンピング抵抗)	約0.3(2Ω)	1.0以上(100Ω)	約0.5(200Ω)

判断 v) トリガーレベルを越えているとき波形データをディスクにセーブ, の手順で処理される。また, 波形表示の際, 1秒おきのタイムマーク(後述)が入るので, 時刻の読み取りが精度よく行える。コンピュータ内部の機能をできるだけ活用し, ソフトウェア処理にウエイトを置くことは“ハードウェア”はシンプルに, その分“ソフトウェア”は複雑に, という最近の計測器の流れを意識した結果である。このため信号処理の大部分は, 初心に反してブラックボックス化してしまったが, システムを手作りにしたことで教室での興味をひく解説が可能となった。次に各部に分けて説明する。

3. 換振器

狭義の地震計(seismometer)と呼ばれる部分であるが, 基本的には“振り子”とセンサー(動コイル型)と減衰器(追記1参照)から構成される³⁾。これまでに製作した3台の換振器の仕様を表1に, 写真を図2に示す。なお, 換振器は製作順にN-1 V(上下動), N-2 H(水平動), N-3 V(上下動)と呼ぶことにする。N-1 V, N-2 Hは試作機, N-3 Vは本格的な観測用として製作した。

(1) 振り子の設計

長い固有周期の振り子が“不動点”として地動を忠実に記録するのは, 地動の周期が振り子の周期に比べてはるかに短いときであり, 地動の周期が長くなるに伴い, 両者の相対運動は複雑になる⁴⁾。

真の地動は原理的には振り子の運動から計算できる⁵⁾わけであるが, 教材用としては, P波, S波, 表

面波などの形態の違いを観察し, また近地震だけでなく, 遠地震も観測したいため, できるだけ長周期の振り子とするに越したことはない。

小型で長周期の振り子は様々なタイプが考案されているが, 製作の容易さを考えて, ここではN-1 V, N-3 V(上下動)に“Ewing型変形タイプ”⁶⁾を, N-2 H(水平動)には“Paschwitz型水平振り子”⁷⁾を選択した。また, 振り子の支点には摩擦を考慮し試作機では板ばねを, N-3 Vでは“十字ばね”⁸⁾を製作し用いた。

振り子および“十字ばね”の構造を図3に示す。

(2) 本体フレーム, 振り子部の材料

鉄L字アングル, 鋳鉄もしくは真鍮円筒(赤道儀用重錘で代用可)を加工し, マグネット周りはアルミ材など磁力の影響を受けないものを使用する。

(3) 吊りばね

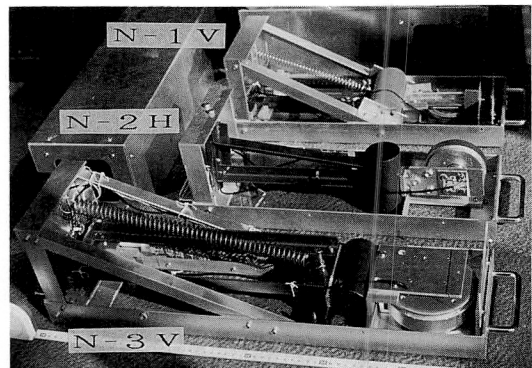


図2 製作した3台の換振器の外観

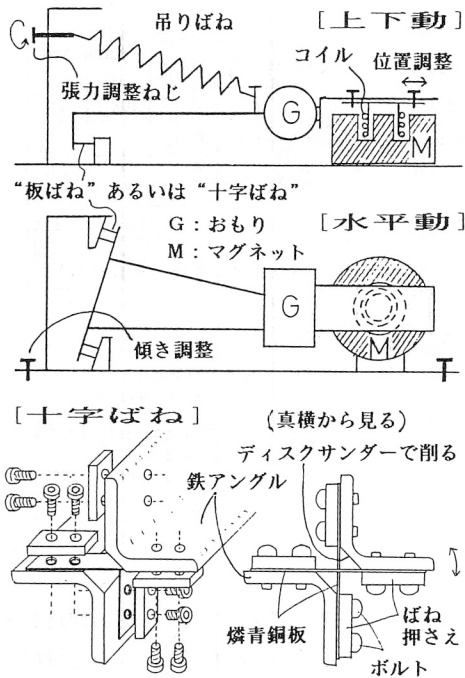


図3 振り子の構造と“十字ばね”の製作

N-1 Vでは日曜大工用、N-3 Vではばね専門店で購入したものを使用した。共に材質は通常のピアノ線のようなものである（温度変化の少ないインバール系のばねを使いたいのだが入手が困難）。なお、ピアノ線でも熱処理を施したもの（表面が茶色味を帯びる）が手に入れば弾性限界が大きく好都合であるが、筆者は通常のものを使用している。

(4) コイルとマグネット

いずれも廃品のスピーカーを解体して加工する。3種類のコイルとマグネットの写真を図4に示す。

[N-1 V] : マグネットとコイルを無改造で用いた。マグネットの溝が狭いため、コイルが接触しないよう気をつけて調整する。

起電力が低いため、アンプのゲインを上げる、ダンピング抵抗を下げるなどの工夫が必要だが、工作が簡単で十分実用となる（1年間観測に使用）。

[N-2 H] : 上記の無改造のもの欠点を解消するため銅板を丸く巻いてはんだで接着したボビンにウレタン線（エナメル線の一種、線径0.12mm）を巻いた。また、マグネットの溝はφ31mmのホールソーをボール盤に装着し、最低速で油を注ぎながら削り、

拡大した。その後、強力な磁力のため溝を埋めた切り粉をドライバーの先などで丹念に取り除いた。

銅板に発生する渦電流のため、ダンピングが効きすぎる傾向にあるがコイルの接触の心配は解消した。[N-3 V] : ボビンは、1mm厚アクリル板を沸騰した湯の中で軟化させ、素早く取り出して丸く成型したものを接着して作った。この方法は火傷に注意する必要があるが、良い形になるまで何度もくりかえすことができ、アクリル板を加工するには便利である。マグネットは中型のオーディオ用スピーカーのものをを用いたが、これはマグネットとヨーク（磁極になる部分）が分解できたため、ヨークの芯を旋盤で削り、溝を拡大した、アマチュア的な製作方法ではこの辺りが限界であろう。

(5) 工作上的注意など

- i) 鉄アングルの切断加工には、電動のこ（鉄材用の刃を装着）、ディスクサンダーが便利であるが怪我に注意（防護めがねを使用）すること。
- ii) 各部に厚い材料を用い、組み立ては、六角穴ボルト等で強く締めつけ、寄生振動を防止する。
- iii) コイル、吊りばねの取り付け部は位置調整機構を工夫する（コイルの接触、気温によるばねの長さ変化を調整）。また、吊りばねは荷重をかけた後、ゆっくりとした伸び（クリープ）が止まるまで1ヶ月近くかかるので注意を要する。
- iv) 野外でも使用できるよう錆止め、塗装は厳重に行う。また、風の影響、電気ノイズをシールドするため必ずカバーをかぶせる。

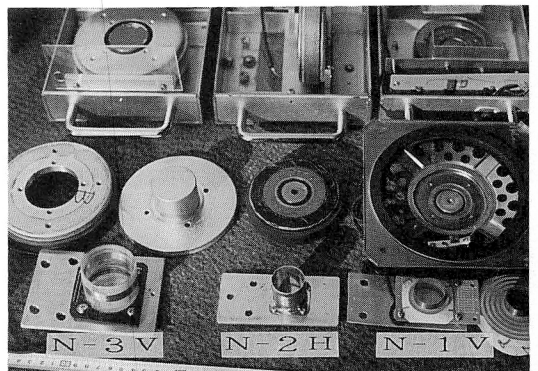


図4 コイルとマグネット（マグネット・コイルは同型のもので製作中の各段階を示す）

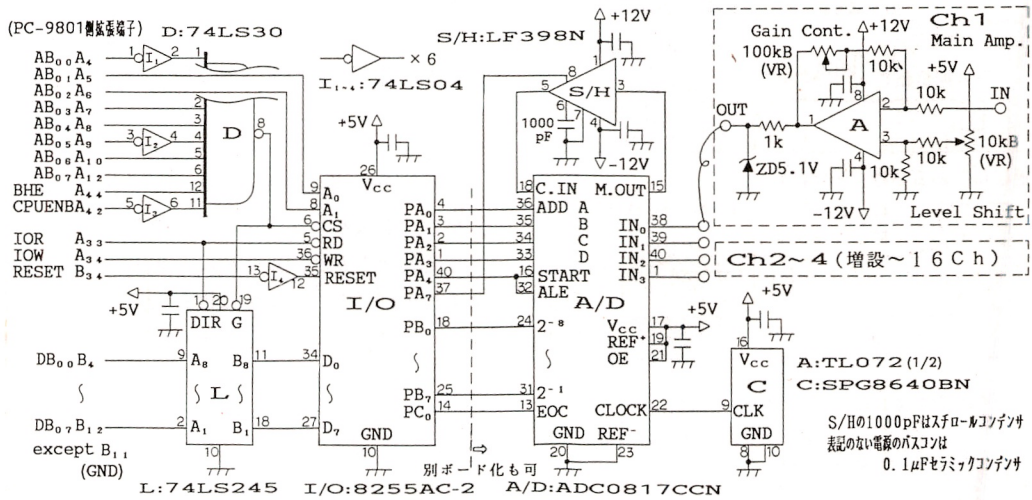


図5 I/O、A/D拡張ボード回路図

4. 記録系

(1) ハードウェア

アナログ信号をパーソナルコンピュータに取り込むためのA/D変換部とI/Oインターフェイス部とからなる。この部分は市販品を用いてもよいし、解説の文献⁹⁾も出ているので要点のみを記す(単に波形を見るだけならオシロスコープでも可能)。

これまで文献⁹⁾の回路をデッドコピーした基板と、それに少し手を加えたものとの2セットを製作したが、新しい方の基板の回路図を図5に、その写真を図6に示す。基本的には文献⁹⁾の回路と同じであるが、細部を変更している。

【変更点】

- i) A/D変換ICをADC0809からADC0817に変更(多チャンネル化に対応)
- ii) I/O部では、データバスライン補強用のラッチIC: 74LS245を接続¹⁰⁾(省略可能)
- iii) I/O用IC8255Aのポートの接続を変更(A: 出力, B, C: 入力→ソフトウェアも変更)

【製作上の注意】

PC-9801用拡張基板にA/D、I/O共に組み込んだが、始めて作る場合は、両者を分けたほうが、誤配線の点検などに便利である。

なお、筆者は上記基板を拡張スロットに挿入後、基板内部の半固定抵抗を調整中に、あやまって、PC-9801F2内部の5V電源(?)を一瞬ショートさ

せ、コンピュータがダウンしたが、保護回路が入っているようで、電源を入れ直しことなきを得た。ただ、誤配線でコンピュータが壊れるという話も聞くのでくれぐれも注意が必要である。

次に、センサーに組み込んだヘッドアンプであるが、この増幅度はコイルの発電能力と、観測地のノイズレベルを考慮し可変とする。また、カットオフの低いローパスフィルターは必須であり、これを省略すると音波などのノイズに悩まされる。ヘッドアンプの回路図は文献¹¹⁾を参照していただきたい。

(2) ソフトウェア

i) 地動のリアルタイム表示

A/D変換データはコンピュータ内部のメモリに記憶され、同時にオシロスコープの様に波形がCRTにリアルタイム表示される(図7)。その際、波形にコンピュータ内部のカレンダー時計によるタイム

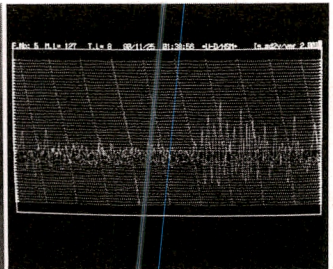
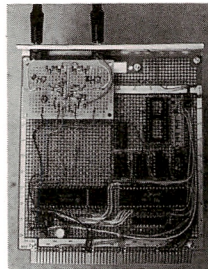


図6 拡張ボード

図7 CRT画面上の波形

```

*START: LINE COLOR=GREEN
PAST TIME$=time$
for I=1 to 32000
  out PORT A,SAMPLE&HOLD PULSE
  out PORT A,A/D CONVERT START PULSE
  DATA=inp(PORT B): poke I,DATA
  if time$>PAST TIME$ then
    TIME MARK: PAST TIME$=time$
    gosub *WAVE PLOT
  if DATA>TRIGER LEVEL then
    LINE COLOR=YELLOW
next I
if LINE COLOR=YELLOW then *DATA SAVE
else *START
    
```

図8 プログラム主要部 (概念リスト)

マークを入れることで、波形記録より地震波諸位相を1/10秒精度で読み取ることが可能となる。

ii) 波形データの保存

波形を表示中に地震など大きなレベルの信号の入力があると、波形記録線の色が緑から黄色に変化し、トリガーが引かれた事を表示すると共に、記録が画面一杯になるのを待って(約8分間)、フロッピーあるいはハードディスクにデータがセーブされる。このため、ディスクの容量に空きがあるかぎり長期にわたる自動観測が可能になる。セーブされるデータは、表示画面のVRAM (GREENとTEXT)データと8ビット数値データ(0~255)である。前者は、波形の初動など諸位相の時刻を読み取るのに用い、後者は、波形をプロットしたり、数値積分(これで速度波形を変位波形に直す)や、FFT(高速フーリエ変換)などの数値処理に使用する。

iii) 使用言語

プログラムはすべてMS-DOS版N88BASICで書

かれており、サンプリング速度は筆者の旧型PC-9801F2ではコンパイルして約64Hz(2ch観測時)に調整しているが、最新のコンピュータは処理速度が数倍に達し得るので、インタプリタでも充分であろう。プログラム主要部の概念的な流れを図8に示す。なお、コンピュータ内蔵のカレンダー時計は、毎日1回NTT時報により、キーボードよりリセットを掛け較正しているが、夏冬では1日に最大±1秒弱の狂いが生じるため(気温の影響)、精密な研究目的には、この内部時計の自動較正等の改良が必要と

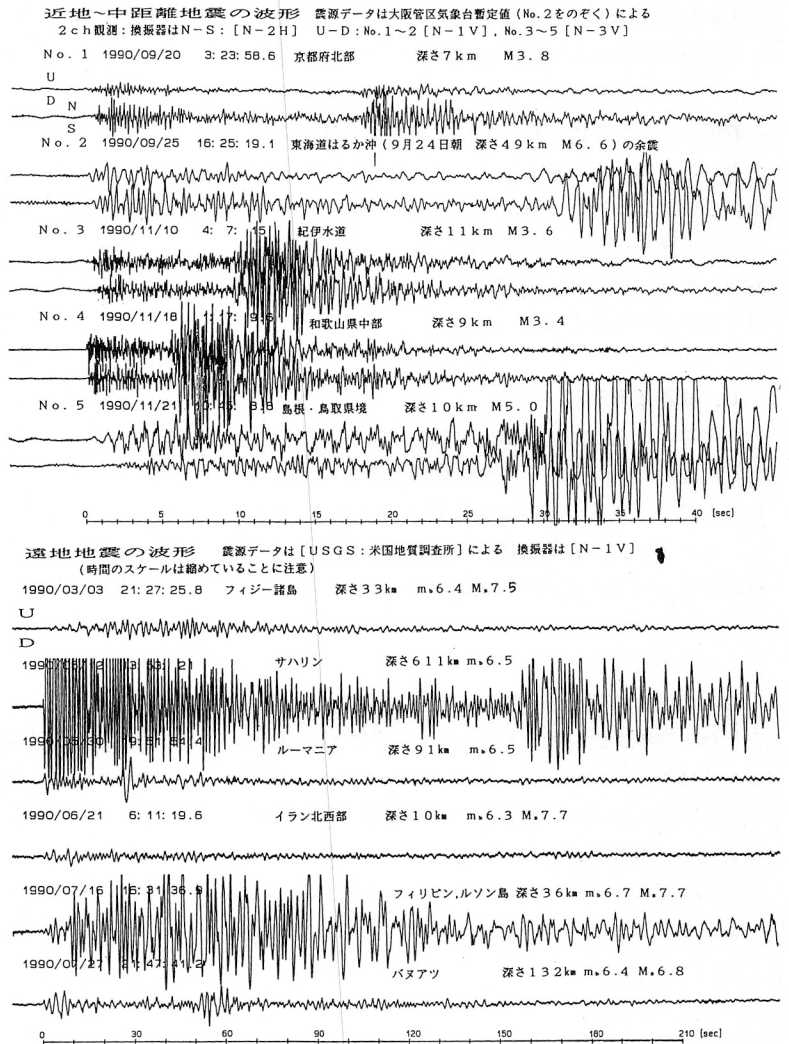


図9 観測波形例 (変位ではなく速度波形であることに注意)

なる。さらに、サンプリング速度は、プログラムのフリーランのループ速度に依存するため、コンピュータの機種により差がでると、大きな振幅の波形が入力されるとCRTの波形描画に時間がかかるなど、若干変動する。これについては、タイマーによる割り込みをハード・ソフト両面から検討中である。なお各種の波形処理・数値処理用ソフトウェアは現在開発中である。

5. その他システム使用上の留意点

- i) 気温変化による上下動のばねの伸び縮みの調整と、カレンダー時計の較正、ディスクの記録の移し変えが観測上の主なメンテナンスとなる。
- ii) 実際の観測では、車や生活振動などの“ノイズ”でトリガーされることが多く、自然地震との見分けに若干の経験が必要である [i), ii) の作業は理科クラブの活動などに最適]
- iii) この記録システムは、センサーの交換とソフトウェアの簡単な改良で地震観測以外の気温、湿度、風向、風速、地磁気、地電流等、各種の観測にも使用することが可能となる。

6. 観測波形例

換振器は筆者自宅（和歌山県橋本市北部の住宅地内）の庭のコンクリートテラスの上に置き、テスト観測を続けている。基盤は和泉層群（白亜紀）であり、ノイズレベルも低く観測には適した場所である。観測で得られた地震の波形記録例を図9に示す。

7. おわりに

数々の試行錯誤の末、初めて有感地震の波形をとらえた一昨年秋以来、1年余り、すでに300を越える自然地震の記録を得た。授業でのシステムの紹介や波形記録の実習への利用もさることながら、毎日の大地の“鼓動”の記録に最も感動し、興味深くのめり込んでしまったのは、ほかならぬ筆者自身であった。まだまだシステムは未完成であり改良の余地

を多く残すが、教育の場での利用の参考になれば幸いである。なお、紙面の都合で省略した細かい点を含めて不明な点は筆者宛問い合わせいただきたい。

謝 辞

この研究は、大阪府科学教育センター平成元年度及び2年度の高校理科専門研修の中で行われた。同センターの地学教室長室井勲先生には、終始懇切にご指導をいただきました。また、大阪管区気象台の竹内新氏からは震源データの提供を、京都大学防災研究所の竹内文朗助教授からは、数多くのご教示と暖かい激励をいただきました。共に厚くお礼申し上げます。なお、本研究には、平成2年度文部省科学研究費補助金〔奨励研究(B) 課題番号No.02916027〕の一部を使用しました。

引用・参考文献

- 1) 宇津徳治：地震学，共立全書（1984）p.39～41
- 2) 岡本義雄：第21回東レ理科教育賞受賞作品集（1990）p.54～57
- 3) 萩原尊禮：振動測定，寶文館（1945）355pp（最も詳しい地震計の教科書であるが現在品切れ）
- 4) 上記3) p.50～91
- 5) 上記3) p.95～98
- 6) 上記1) p.16および3) p.135
- 7) 上記1) p.16および3) p.127
- 8) 上記3) p.146
- 9) 平田邦男：パソコンによる物理計測入門，共立出版（1985）p.96～115，218
- 10) 小高輝真：プロセッサ Nov.1988，技術評論社，p.3

〔追記1〕地震計では振り子の自由振動を押さえるため制振(Damping)をかけるが、この効きぐあいを減衰(ダンピング)定数 h で表す。標準は $h=0.7$ 。電磁式地震計では、コイルの出力につなぐ抵抗(ダンピング抵抗)の値で調整する。