

## ウイーヘルト地震計と等価な地震観測装置

梅田 康弘・伊藤 勝洋・斎田 市三

### SEISMIC OBSERVATION SYSTEM EQUIVALENT TO THE WIECHERT SEISMOGRAPH

By Yasuhiro UMEDA, Katsuyoshi ITO and Ichizo SAIDA

#### Synopsis

Wiechert seismograph was designed by Professor Wiechert in the early this century. Vertical and two horizontal components were installed in 1930 at Abuyama Seismological Observatory, Kyoto University. We observed many earthquakes by this seismograph for the period over the half century. The instruments are, however, old and decrepit nowadays.

The observation system equivalent to the wiechert seismograph was developed. New system is constructed from servo-type seismometer, analogue electric circuits and recording systems. The servo-type seismometer responses to the ground velocity for wide frequency range. The ground displacement, resonant frequency, damping ratio equal to those of the wiechert seismograph are obtained by the analogue computing circuits which solve a second linear differential equation.

Two kind recording systems are adopted, namely digital and pen-writing system. The former is trigger-compile system and the latter is drum-type one which can record continuously four days per one sheet.

#### 1. はじめに

ウイーヘルト地震計は今世紀始めにドイツで作られた機械式地震計である。振子型地震計に初めて制振器(ダンパー)が取り付けられ、当時理論上でしか知られていなかった縦波・横波が初めて明瞭に記録された。波の種類が判別されたことによって、地球内部構造の研究は急速に進歩した。

阿武山観測所では設立当時の1930年にこの地震計が設置され、以来60年地震記録をとり続けてきた。同じ地震計で観測を続けることは地震学上貴重なことであるが、近年地震計自体の老朽化や研究体制の変革などのため、この地震計による長期観測維持は困難になってきた。このため、当地震計に代わる新しい地震観測システムを構成し、1991年から定常観測を開始した。

新観測システムは安定の良い小型地震計、ウイーヘルト地震計と同じ特性を持たせる積分増幅器および記録装置で構成されている。記録装置はトリガー式デジタル収録とペン書連続記録の2種を併用している。

#### 2. ウイーヘルト地震計の概要

水平動は重さ 1000 kg の鉄製質量を、倒立振子として用いている。振子は水平面内で自由に動くことができ、1つの振子から東西方向・南北方向の2成分を取り出している。拡大機構はすべて機械的な挺子を用い

ており、ダンパーはピストン—シリンダー型の空気制振器である。

上下動は鉄製の箱に鉄屑を入れたものを質量として用い、この鉄箱を太い8本の弦巻バネで吊り下げている。拡大機構と制振器は水平動のそれらと同じであるが、上下動には周期を延ばす補助機構と温度保障機構が付加されている。地震計の機構については中村左エ門太郎著「地震学」<sup>1)</sup>に詳しい。地震計の地動変位に対する振動特性を Fig. 1 に示すと共に、地震計の3つの基本定数を同図内の表に示した。地震計自体は大型で、地面の基礎に固定設置されているので、振動台等によるダイナミックな検定はできない。周期と幾何倍率は比較的精度良く決められるが、ダンピング比は毎回ばらつきが大きい。小振幅では固体摩擦があり、大振幅ではやや非線形の挙動をするようである。Fig. 1 の振動特性は平均的なダンピング比を5:1 ( $h=0.45$ ) として描いたものである。

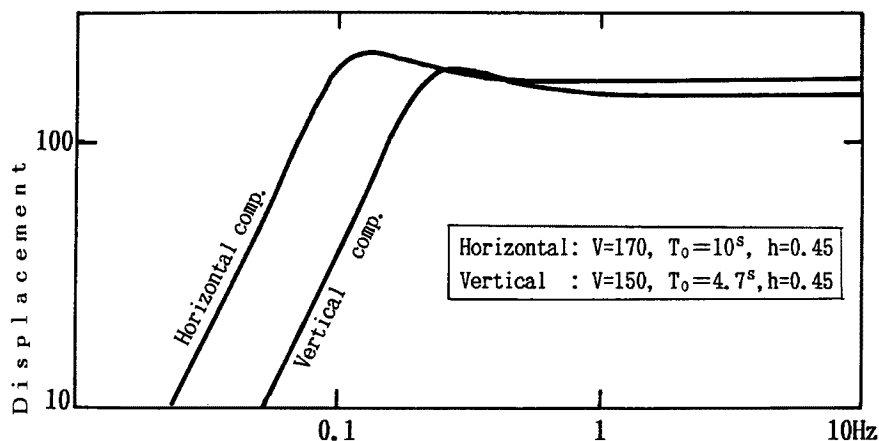


Fig. 1. Frequency response of wiechert seismograph.

記録方式は、白紙に石油またはプロパンガスの不完全燃焼による煤を掛け、その上を細い針（ペン）がひっかくという、いわゆる煤書き方式である。2枚の白紙を張り合わせ、リング状にして1周180cm、1分間3cmの記録紙送り速度で1周が1時間、1日24周としている。地震計には電気を使用していないので、記録紙の駆動は別途の重りを巻き上げ、その位置エネルギーを利用している。重りの巻き上げも1日1回で人力で行なう。

摩擦を少なくするため、拡大機構部は軽量で繊細な仕組みになっている。またペンと記録紙との摩擦も少なくするためペンの反対側にカウンターバランスが取り付けられている。これらのことが災いして、有感地震では必ずと言ってよいほどバランスがくずれ、ペンは記録紙から外れてしまう。水平動は傾斜感度2cm/1"があり、降雨や建物への日照変化による土地傾斜も記録するので、ゼロ線がずれ、線と線が交叉したり、時にはペンが記録紙から外れることも少なくない。

### 3. 地震計

ウィーヘルト地震計は機械式なので、その振動特性は2階微分方程式で表される。新方式では地震計とアナログ積分増幅器を別々に採用し、総合特性がウィーヘルト地震計と等価になるようにしたが、それぞれの振動特性はいずれも2階微分方程式で表されるように設計した。地震計と積分増幅器は完全に独立しており、互いに他の特性を歪ませることはない。このように完全に分離させたことにより、地震計と積分増幅器はそれぞれ独立の特性を持たせることができ、組み合わせ次第で特徴ある地震観測システムを構成することが可能である。

採用した地震計は東京測振社製のサーボ型地震計 (VSE)<sup>2)</sup> である。この地震計の動作原理を Fig. 2 に示す。このような系で振子の運動方程式は以下の (1) ~ (4) で表される。

$$m\ddot{X} + D\dot{X} + KX = -m\ddot{Y} - GI \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$I = \frac{S \cdot A \cdot R \cdot C}{Ra} \dot{X} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\ddot{X} + \left( \frac{D}{m} + \frac{S \cdot A \cdot R \cdot C \cdot G}{m \cdot Ra} \right) \dot{X} + \frac{K}{m} X = -\ddot{Y} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\ddot{X} + 2\epsilon\dot{X} + \omega_0^2 X = -\ddot{Y} \quad \dots\dots\dots (4)$$

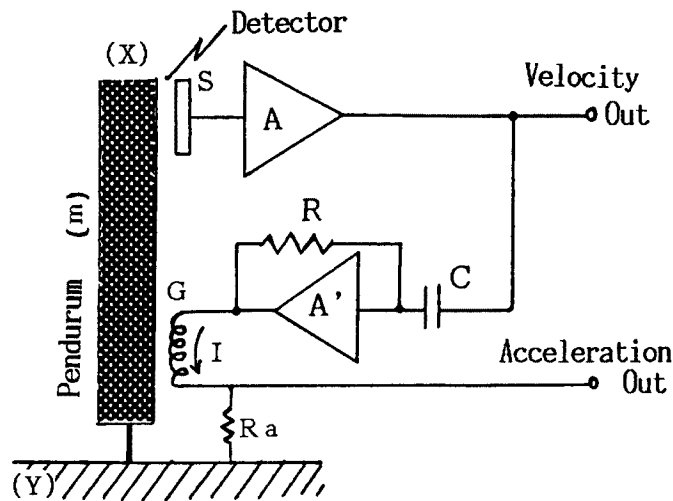


Fig. 2. Principle of servo-type seismometer.

容量型変位検出器 (S) によって振子との相対変位を検出する。これを回路ブロック CRA' で 1 回微分し、動コイルに帰還 (フィードバック) させる。動コイルは振子に付いており、帰還電流 ( $I$ ) が大きいほど振子は大きな制動を受ける。(3) 式で言えば左辺第 2 項のカッコ内、速度に比例したダンピングの項が大きくなり、振子は広い周波数帯域で地動速度に比例した運動をする。このことから、アンプ A の出力は通常、速度出力あるいは簡単に速度計と呼ばれている。また動コイルからの出力は地動加速度に比例し、加速度計とも呼ばれる。しかしこれらはある周波数範囲で言えることであり、厳密には (4) 式で表される振動特性をもっている。VSE の場合、固有周波数は 1.5 Hz、ダンピング ( $2\epsilon$ ) は 40 である。地動速度あるいは加速度に比例した出力が得られる周波数帯域は 0.025~70 Hz である。

#### 4. 積分増幅器

2 階微分方程式 (5 式) を解くアナログ回路を構成した。原理図は Fig. 3 に示すものであり<sup>3)</sup> 回路左側の  $\ddot{e}$  を積分増幅器 ( $A_1$ ), ( $A_2$ ) で積分し、 $\dot{e}$ ,  $e$  を出力させる。目的とするダンピング ( $-2\epsilon$ ) と固有角周波数 ( $-\omega_0$ ) を作り掛算器でそれぞれに  $\dot{e}$ ,  $e$  に掛ける。2 つの掛算器の出力と外部入力 (5 式に準ずるならば加速度入力) の和は (6) 式の右辺であるから、これが左辺の  $\ddot{e}$  に等しい。すなわち足算器 ( $A_3$ ) の出力は回路左側の  $\ddot{e}$  に等しいわけで、回路左右両端を結合すれば (5) 式を解く演算回路ができる。このような回路は別名バйкаッドフィルター<sup>4)</sup> と呼ばれ、振動特性は (7) 式で表される。

$$\ddot{e} + 2\epsilon\dot{e} + \omega_0^2 e = \ddot{y} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\ddot{e} = -(2\epsilon\dot{e} + \omega_0^2 e) + \ddot{y} \quad \dots\dots\dots (6)$$

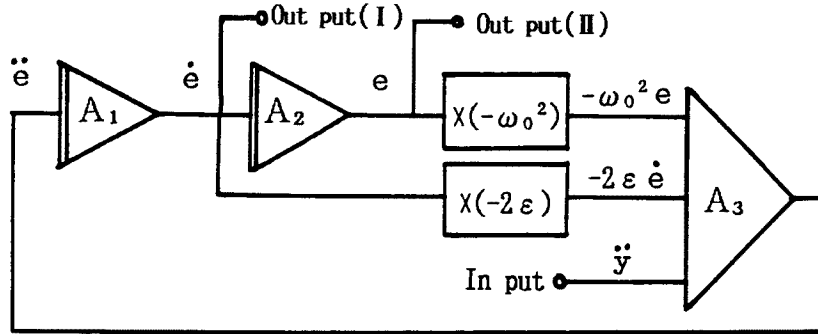


Fig. 3. Analogue circuit for solving a second linear differential equation.

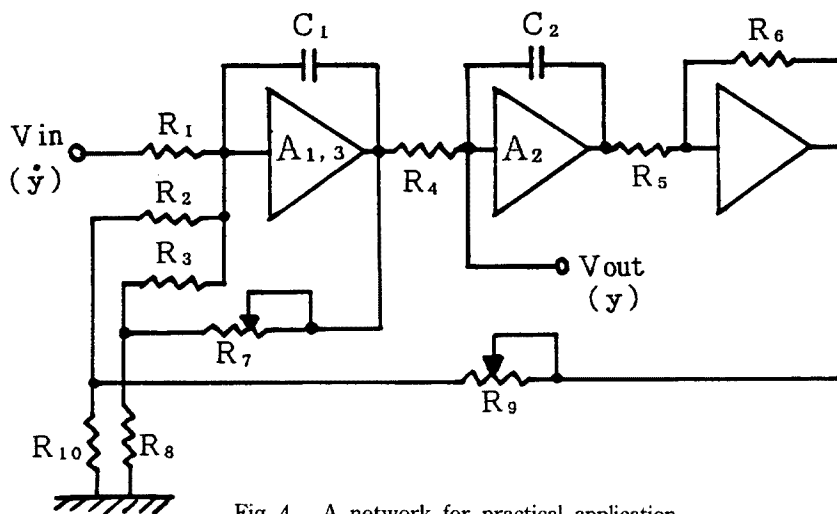


Fig. 4. A network for practical application.

$$V_{out}/V_{in} = -\omega_0^2 / (\omega_0^2 - \omega^2 + 2\varepsilon\omega j) \quad (7)$$

人力が地動加速度 ( $\ddot{y}$ ) の場合は、固有周波数 ( $\omega_0/2\pi$ ) より高周波側で Out put (II) から地動変位に比例した出力が得られる。また人力が地動速度 ( $\dot{y}$ ) の場合は Out put (I) から地動変位に比例した出力が得られた。後者の場合を式で言えば (5) 式の両辺を 1 回積分したものと同一であり、固有周波数とダンピングは前者のそれと変わらない。このように人力の種類と出力端の組み合わせによって目的に合ったシグナルを取り出すことができる。今回は地震計からの人力を地動速度にした。

実際に採用した回路は Fig. 4 である。振動特性は (8) (9) 式で表される。これらと (7) 式を比べて直ちに (10) 式が得られる。

$$V_{out}/V_{in} = -(RCK_2)^{-2} / \{(j\omega)^2 + j\omega(RCK_1)^{-1} + (RCK_2)^{-2}\} \quad (8)$$

$$K_1 = (R_7 + R_8)/R_8; \quad K_2^2 = (R_9 + R_{10})/R_{10} \quad (9)$$

$$2\varepsilon = (RCK_1)^{-1}; \quad \omega_0^2 = (RCK_2)^{-2} \quad (10)$$

ダンピングと固有周波数を決める掛算器は実際には  $R_7, R_8$ , 及び  $R_9, R_{10}$  で構成される簡単な抵抗回路である。定数はまとめて Table 1 に示した。表の上から 4 行まではウーヘルト地震計の、すなわち目的とする定数であり、5 行以下が選定した部品の定数である。ウーヘルト地震計の固有周期は上下、水平動それぞれ 4.7 秒、10 秒なので、積分定数をさめるコンデンサの容量 (C) は  $0.47 \mu\text{F}$ ,  $1.0 \mu\text{F}$  を選んだ。これにより他の定数は簡略化され、かつ上下、水平動とも同じ定数となる。このようにして最終的にダンピング

と固有周期を決める抵抗  $R_7$ ,  $R_9$  が Table 1 の下 2 行のように決定された。

### 5. 総合特性と記録方式

サーボ型地震計と積分増幅器との総合特性を Fig. 5 に示した。これはウーヘルト地震計の理論特性と完全に一致している。図中、黒丸、白丸、三角印は 3 成分の振動台によるテスト結果であるが、0.07 Hz 以下で実測値が乱れているのは振動台による良好な波形が得られなかったためである。これとは別に、地震計に付属している検定コイルを利用したテストでは理論値と良く一致した。積分増幅器には前節で述べた特性を作る回路の他に、総合感度を検定する回路、時刻を信号に重畳させる回路が組み込まれている。また出

Table 1. Constants of seimograph and electric parts

|                                | Horizontal        | Vertical           |
|--------------------------------|-------------------|--------------------|
| $T_0$                          | 10.0 <sup>s</sup> | 4.7 <sup>s</sup>   |
| $h$                            | 0.45              | 0.45               |
| $\omega_0 = 2\pi/T_0$          | 0.628             | 1.34               |
| $2\varepsilon = 2h\omega_0$    | 0.565             | 1.20               |
| $C = C_1 = C_2$                | 1.0 $\mu\text{F}$ | 0.47 $\mu\text{F}$ |
| $R = R_1 = R_2 = R_3 = R_4$    | 510 k $\Omega$    | 510 k $\Omega$     |
| $R_5 = R_6 = R_8$              | 10 k $\Omega$     | 10 k $\Omega$      |
| $R_{10}$                       | 2 k $\Omega$      | 2 k $\Omega$       |
| $K_1 = (2\varepsilon RC)^{-1}$ | 3.47              | 3.47               |
| $K_2 = (\omega_0 RC)^{-2}$     | 9.75              | 9.75               |
| $R_7$                          | 24.7 K $\Omega$   | 24.7 K $\Omega$    |
| $R_9$                          | 17.5 K $\Omega$   | 17.5 K $\Omega$    |

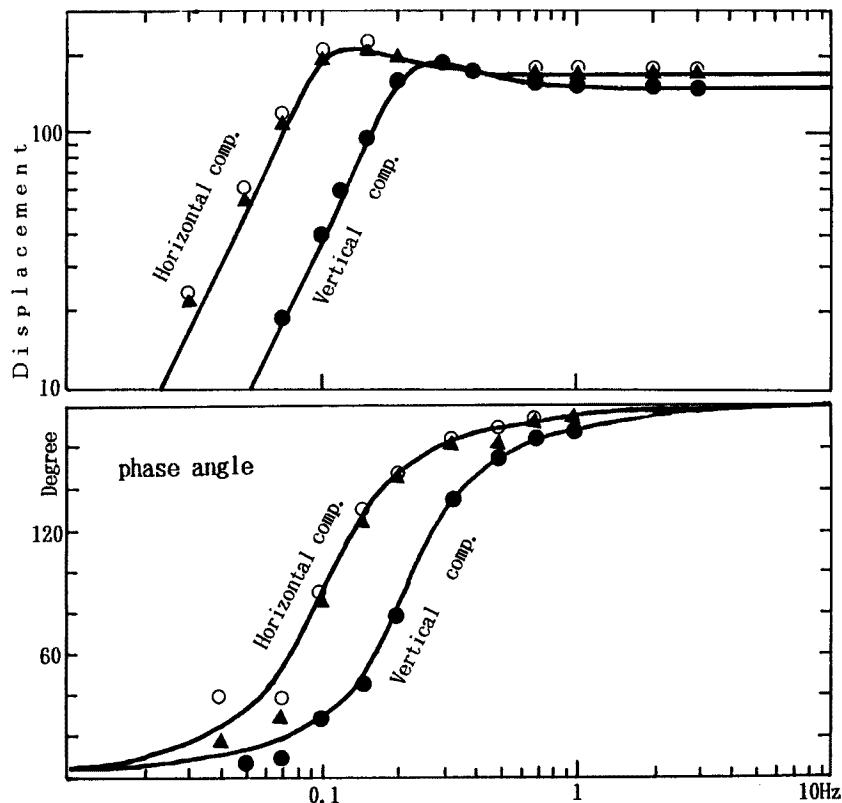


Fig. 5. Frequency response for ground displacement and phase angle. Open, solid circles and triangles are the calibration results by the shaking table.

力はウーヘルト地震計と同じ特性の変位出力の他、3 節で述べた地震計の速度及び加速度出力もある。積分増幅器 (AV-200T) の外観と以下に述べるペン駆動装置 (MC6625) を Photo. 1 に示す。

記録はデジタル記録とペン書可視記録の 2 方式を同時に採用し、両方の並列観測を行っている。前者は従

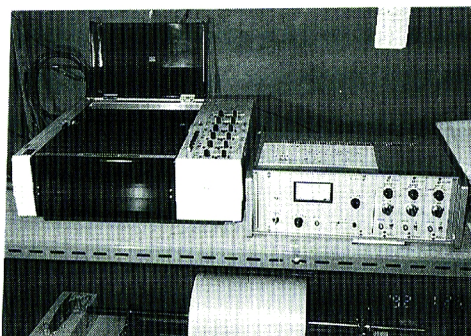


Photo. 1. Right: Integration amplifier (AV-200T).  
Left: Multicorder (MC6625).

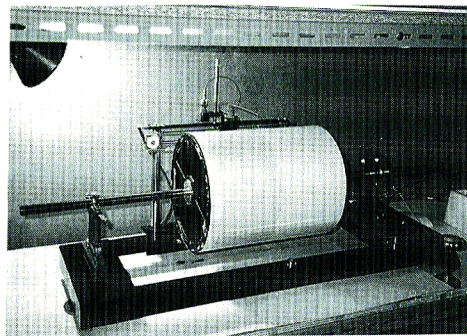


Photo. 2. Pen-drum recorder.

来から観測されている微小地震観測網の空チャンネルを利用したもので、サンプリングやトリガーレベルは微小地震のそれに依存している。従って、やや遠い地震でP波の立ち上がり振幅が大きい場合はトリガーがかかりにくいし、遠地の大地震のように振動が長時間継続するものについては波形後部が記録されない恐れもある。近年ではペン書記録装置はデジタルのそれよりも高い製作費を必要とする。しかし、上述のような事情もあってペン書記録装置も製作し、併用することにした。

ペン書記録装置には旧来より使用されてきたドラムレコーダを改裝した。グラフテック社製マルチコーダ (MC6625) の本体からペン摺動部を取り外し、ドラムレコーダの後部に設けた支持台に取り付けた (Photo. 2)。記録紙の送り速度はウーヘルト地震計と同じ 30 mm/min. とし、ドラム送りピッチは 1 mm または 2 mm で、1 mm の場合は 1 枚の記録紙 (幅 300 mm, 長さ 720 mm) で 4 日間連続記録できる。5 cc インクポットを別の支持台にセットし、シリコンチューブでインクをペンに供給している。別の支持台にしたのはポットの高さを可変にし、インクの出具合を調節するためである。ペン先に付いていたファイバー部は切り落とし、代わりに注射針の先をハンダ付けした。先端は砥石でさらに細く削っている。ウーヘルト地震計のペンは半径 40 mm の円弧書きであるが、新方式は直線書きである。ペンの可動範囲は前者が 100 mm 程度に対し後者では 300 mm ある。但し、ドラムの端にペンがあるときに大振幅の波形があるとペンがドラムから外れることがある。

## 6. 比較観測

ウーヘルト地震計と新観測システムとの比較観測は10カ月余り行った。比較の記録例を Fig. 6-a, 6-b に示した。ウーヘルト地震計の上下動はセンスが逆 (Down/Up) であったが、新方式では地動の上向きが記録紙の上方になるようにした。振幅を比較すると、小振幅では両者良く一致しているが、記録紙上で 30 mm 以上になると合わない場合がある。原因を確かめることはできなかったが、第2節でも述べたように、ウーヘルト地震計は振幅が大きくなると非線形の挙動をすることに起因するらしい。

ウーヘルト地震計の上下動は温度変化によって、また水平動は傾斜感度があるので、それぞれ Fig. 6-a に見るようにゼロ線がずれることがある。ゼロ線が大きくずれると円弧書きの場合は、同図の南北 (N/S) 成分のように地震記録が傾いてしまう。新システムではこのようなことは改善されたので、線と線が交叉することもなく、1枚の記録紙に連続4日間記録できるようになった。大振幅地震記録の1例が Fig. 6-b である。ウーヘルト地震計はペンが飛んでしまっているが、新方式のペン駆動のパワーは充分大きいので、かすれることなく最大 300 mm まで記録することができる。



South of Honshu Japan, 1990 September 24, 06:13(JST), M=6.3 Depth=40km

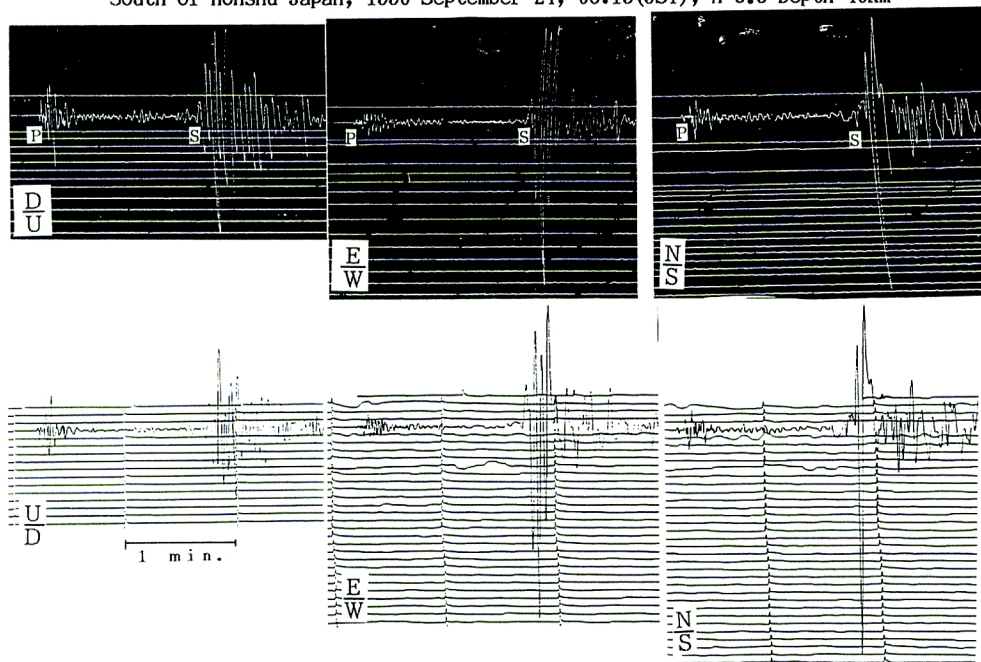


Fig. 6-a. Comparative seismograms recording by wiechert seismography (upper) and new system (lower).

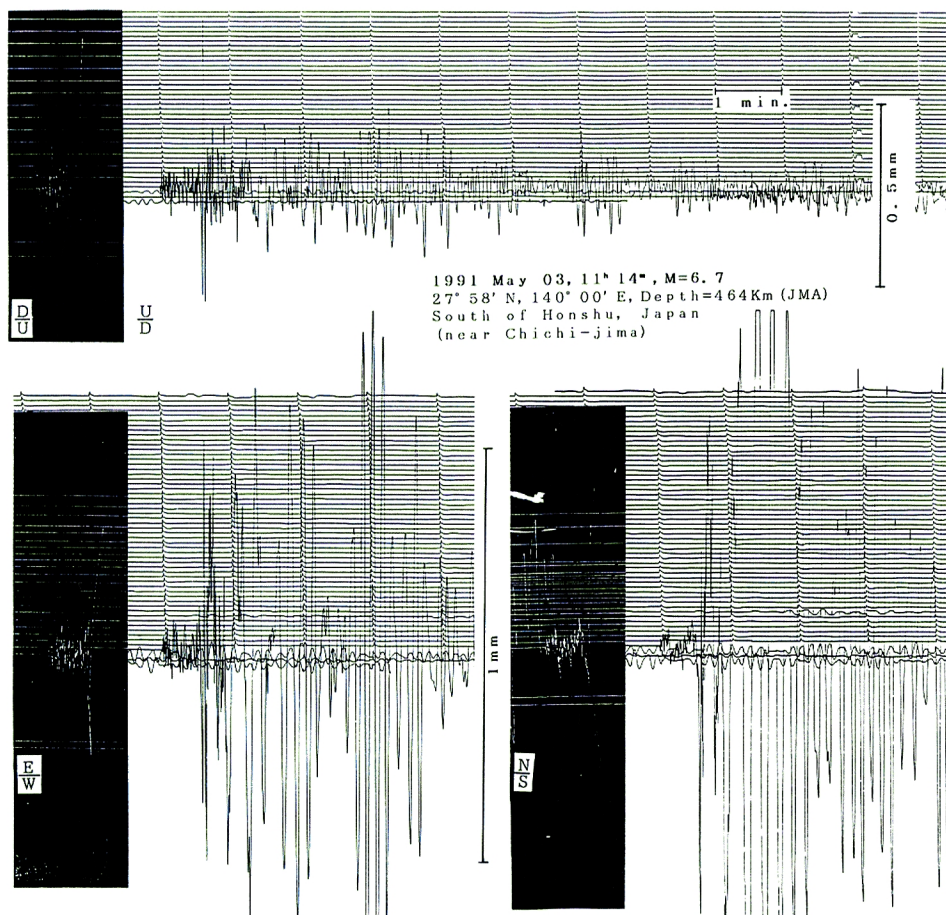


Fig. 6-b. Comparative seismograms recording by wiechert seismograph (black charts on left side of each component) and new system.

## 7. あ と が き

冒頭でも述べたように、理論上でしか知られていなかったP波、S波がFig. 6-aのように明瞭に記録されたことは当時画期的なことであった。この地震計は世界各地に設置され、各種の地震波走時曲線から多くの地球内部に関する情報を得たこともよく知られている。このように国際的にも広く活用され、また長期間同一の地震計の記録を生産することは地震学にとって非常に貴重なことである。

阿武山観測所でも1930年の観測開始以来、戦争中の1時期を除き、長期連続観測による多量の地震記録を生産してきており、ウイーヘルト地震計による観測の継続は各方面から寄せられた。なお、1930年から1960年までの記録はマイクロフィルムに納めており<sup>5)</sup>、フィルムは世界の多くの研究者に利用してもらえるよう、世界データセンターをはじめいくつかの機関に寄贈している。

長い年月にわたってウイーヘルト地震計の観測維持に尽力なされた先輩諸先生、並びに直接観測に携わってこられた多くの技術者の方々に深く敬意を表すると共に、ここに新しいシステムによる観測が開始されたことを報告します。

## 参 考 文 献

- 1) 中村左衛門太郎：地震学，内田老鶴圃出版，1954，pp. 65-69.
- 2) 横井 勇：サーボ型速度計，センサー技術，9巻，6号，1992，pp. 69-72.
- 3) 若山芳三郎・稲垣幸一：新訂入門アナログ計算機，啓学出版，1980，pp. 45-65.
- 4) 今田 悟・深谷武彦：実用アナログフィルタ設計法，CQ出版，1981，pp. 50-69.
- 5) Umeda, Y. and K. Ito: History of Seismological Observations, In: H. Miki (Editor), Microfilm of Historical Seismograms at Abuyama Seismological Observatory, 1987, pp. 1-16.