速 度 型 強 震 計 の 製 作

岐阜大学教育学部地学教室 村 松 郁 栄

(昭和 52 年 7 月 7 日受理, 7 月 14 日再受理)

A Velocity Type Strong Motion Seismograph with Wide Frequency Range

Ikuei MURAMATU

Department of Earth Science, Faculty of Education, Gifu University

(Received July 7, Revised July 14, 1977)

Upper boundaries of the strong earthquake motions recorded until now indicate almost constant value of 20-30 kins (cm/sec) over the period range from about 1 second to 20 seconds. Accordingly, it may be thought that a velocity seismometer is suitable to observe the strong earthquake motion. Weak ground motions which occur frequently are also valuable to research the properties of strong earthquake motions. Therefore, the author made a velocity type seismograph which can record the earthquake motions of 100 kins to 0.01 kins with high fidelity in the period range from 0.05 seconds to 40 seconds.

The main part of this seismograph has a coupled pendulum which was designed by T. MATUZAWA in 1938 and was improved by the author. The whole system of the coupled pendulum is immersed in high viscous silicon oil. The relative displacement of the pendulum is transformed to electric voltage by means of magnetic flux to which a temperature compensating circuit with a thermistor is connected.

§1. ま え が き

被害を生ずる地震動の記録はまだ不十分であり、とくにその長周期成分 (1 秒以上) についての情報は極めて乏しい。これまでに得られている大地震動の記録を整理してその振幅と周期の範囲を調べてみると、前に (村松, 1976) 報告したように (Fig. 1 参照) 震度 5 ないし 6 に近い大地震の地震動は 1 秒前後から 10 秒前後の範囲で 20~30 kine (cm/sec) という値を持ち、地動速度で見ると一定のレベルを有するように見える。さらに、個々の地震動記録 (Fig. 1 の同じ印の群) について見てもその周期範囲の成分がほぼ一定の速度振幅を示しているように見える。したがって、このような大地震の観測には速度計が適していると考えられる。なお、大地震動の発生は稀であり、その場合の地震動を推定するために頻繁に発生する弱い地震動を観測することも大切である。それらから震源、経路および地盤の特性を調べ大地震の場合を推定する方法も有効だからである。

昭和 52 年 5 月 12 日発表

Fig. 1. Upper boundary of earthquake ground motions.

- ⊙ Nagoya (1891, 10, 28) $I=6$, $M=8.0$
- Tokyo (1923, 9, 1) 6, 7.9
- Niigata (1964, 6, 16) 5, 7.5
- ⊙ Matsushiro (1965, 5, 28) 5, 4.9
- Hachinohe (1968, 5, 16) 5, 7.9
- El Centro (1940, 5, 18) (6), 6.9
- ▲ Parkfield (1966, 6, 27) (6), 5.6
- × Pacoima dam (1971, 2, 9) 6, 6.6
- ⊗ Strength of JMA strong seismograph,
- ⊠ Strength of SMAC-B2

したがって、ここでは $M=8$ クラスの大地震の震源域における地震動を記録するとともに震度 1 の地震動をも記録することを目的とした速度型強震計を製作した。

§2. 目的とする記録範囲

Fig. 1 には前報の図に 14 sec, 40 cm の値を付加した。これは関東地震の東京本郷におけるユーイング地震計の記録から森岡 (1976) が求めた値である。渡辺 (1974) は最大振幅の周期と地震の M との関係を求めたが、それから $M=8$ では周期 20 秒の最大変位振幅が推定される。また、太田 (1976) は観測された地震動のスペクトルからも、また断層震源理論からも $M=8$ では約 20 秒までの速度振幅が卓越することを示している。短周期成分については、これまでの被害経験から 0.1 秒までは必要であり、やはり 20~30 kine の振動は予想される。したがって、周期範囲としては 0.1 秒~20 秒に忠実な速度計とする。

振幅は Fig. 1 に見られるように 100 kine の地動が存在するのでそこまで記録しうるものとする。加速度も Fig. 1 に 1000 gal が存在するのでそこまでを目標とする。なお、Fig. 1 に

は気象庁 1 倍強震計および SMAC-B2 の強度テストを行なつた結果をも示した。⊗印は気象庁 1 倍強震計を大振動台に固定して正弦波入力による振動を行なつたときに振子の支点である主バネが折れた値であり、これより小さな振動ですでに電磁式減衰器が外れた。⊠印は同じく SMAC-B2 を振動させたときペンの移動を生じた値である。したがつて、1000 gal に充分耐える構造であることは重要な目標となる。大地震の場合には他成分の影響も問題となる。記録しうる下限としては、震度 1 の地震動の速度振幅は大体 0.1 kine であるから、0.01 kine まで記録しうることを目標とする。

§ 3. 速度型強震計の設計・製作

3-1. 設計目標

設計目標をまとめると次の 4 項となる。

- ① 忠実に記録しうる地動速度の周期範囲を 0.1 秒～20 秒とし、振幅範囲を 100 kine～0.01 kine とする。
- ② 強度は 1000gal に充分耐える。
- ③ 他成分の影響を受けない。
- ④ 小型である。

速度計の感度は、振子の重心の相対変位を ξ 、地動速度を $\dot{x}$ とすると

$$\frac{\xi}{\dot{x}} = \frac{1}{2h\omega_0} \frac{1}{\sqrt{1 + \{(u^2 - 1)/2hu\}^2}} \quad (1)$$

ここで、 $\omega_0 = 2\pi/T_0$ 、 T_0 は固有周期、 h は減衰定数、 $u = T/T_0$ 、 T は入力の周期である。したがつて、 $T_0 \doteq 2$ 秒、 $h \doteq 40$ とすると大体目的の周期範囲に忠実となり、 $\dot{x} = 100$ kine のとき $\xi = 4$ mm となるから小型化も可能である。周期 20 秒、振幅 0.01 kine の地動は 0.003 gal という小さな加速度であるから固体マサツの影響は避けねばならない。したがつて、振子はバネ系だけで支えられねばならない。他成分の影響を受けない方法として連成振子によつてそれを打消した構造のものがすでにいくつかあるが、その中で松沢 (1938) の考案した“たすぎがけ振子”はバネ系だけで支えられているのでこれを利用する。この振子は他成分の影響も打消すので復元力は支点のバネだけとなり、小型で 1 秒以上の周期にすることも可能となる。この振子全体を粘度の大きいオイルに浸すことによつて、速度計として必要な減衰をうるとともに充分な強度をも得ることができる。

3-2. 松沢の連成振子の実用化

松沢の連成振子は Fig. 2 に示すような扇形の垂直振子と同形の逆立振子をリン青銅の薄い

Fig. 2. Matuzawa's coupled pendulum and its principle.

から問題はない。松沢は1つの振子の質量 3.57 kg, 回転軸・重心間の距離 36.2 cm を組み合せて約 20 秒の周期を得た。

そこで筆者は約 1/3 の大きさの扇形振子を作つて実験してみたところ、周期 3 秒は容易に得られたが、不安定であつた。その主な原因は逆立振子の自重が支点のバネに圧力となつてゐることであると思われる。

したがつて、ここでは松沢の振子を横にして使うこととした。その平面図を Fig. 3 に示したが、左右の振子は完全に対称である。扇形の弧面は支点を中心とした円の弧であるから、たすきがこの円弧の接線となつてゐる限り、振子の変位によるたすきの伸び縮みは生じない。したがつて、2つの振子の弧面を接する必要はなく、むしろ少し離しておいた方がよい。Fig. 3 に示した他成分の加速度 $\ddot{y}$ はたすきを引っ張り、その力是他方の振子に大きさ A の力を及ぼす。 $\ddot{y}=0$ のときは $A=0$ である。Fig. 3 の運動方程式は、左の振子について

$$I\ddot{\theta} = -k\theta - R\dot{\theta} + m\ddot{x}b \cos \theta + m\ddot{y}b \sin \theta - Aa, \quad (2)$$

右の振子について

$$I\ddot{\theta} = -k\theta - R\dot{\theta} + m\ddot{x}b \cos \theta - m\ddot{y}b \sin \theta + Aa, \quad (3)$$

両者は結合されているので、(2) と (3) から A を消去すると

$$2I\ddot{\theta} = -2k\theta - 2R\dot{\theta} + 2m\ddot{x}b \cos \theta \quad (4)$$

となり、他成分 $\ddot{y}$ の影響も消える。さらに、 x 方向に地盤の傾き (φ) が生じた場合には、(4) の $\ddot{x}$ に重力の水平分力 $g \sin \varphi$ を加えるだけでよく、運動方程式は

$$I\ddot{\theta} = -k\theta - R\dot{\theta} + m(\ddot{x} + g \sin \varphi)b \cos \theta \quad (5)$$

Fig. 3. Forces acted on a horizontal coupled pendulum (a ground plane).

ベルトでたすきがけに結んだものである。したがつて、重力による回転力は垂直振子と逆立振子とに等しい大きさで逆方向に働かし、たすきによる結合によつて両者は完全に打ち消される。 $\ddot{z}$ も重力の作用と全く同様であるから完全に打消される。 $\ddot{y}$ は固定方向である

Fig. 4. Structure of the vertical component seismograph composed of a coupled pendulum and forces acted on it.

となる。静止時には $\theta = \dot{\theta} = \ddot{x} = 0$ であるから

$$k\theta = mbg \sin \varphi \quad (6)$$

で定まる θ で釣合う。

この連成振子は左右の振子の働りが全く対称であるから、松沢方式に比べて理論的にも単純であり、実用的にもすぐれている。

この連成振子をさらに Fig. 4 の構成にすれば上下動振子となる。ただし、この場合の A には他成分の加速度だけでなく左の振子の自重の影響も加わっている。吊りバネを両方の振子に付けるのは却つてトラブルの原因になると思われるので片方だけにした。1本の吊りバネで両方の振子を対称に吊る方法も考えられるが、とにかくこれでテストすることとした。なお、吊りバネの下方にピアノ線を挿入してあるが、これは下方の取り付け部と吊りバネとの間に生ずるマサツを防ぐためである。以上の構造によつてこの連成振子の運動方程式は左の振子に対して

$$I\ddot{\theta} = -k\theta - R\dot{\theta} - m(g + \ddot{z})b \cos \theta + m\ddot{x}b \sin \theta + Aa, \quad (7)$$

右の振子に対して

$$I\ddot{\theta} = -k\theta - R\dot{\theta} - m(g + \ddot{z})b \cos \theta - m\ddot{x}b \sin \theta - Aa + k'(l' + \Delta l)c, \quad (8)$$

ここで、 l' は静止時の吊りバネの伸び、 Δl は運動による吊りバネの伸びであり、吊りバネの横方向への移動量 θ' は小さいので

$$\Delta l \doteq -c\theta \quad (9)$$

とすることができる。したがつて、全体としての運動方程式は

$$2I\ddot{\theta} = -2k\theta - 2R\dot{\theta} - 2m(g + \ddot{z})b \cos \theta + k'l'c - k'c^2\theta \quad (10)$$

となる。静止のときは、 $\theta = \dot{\theta} = \ddot{\theta} = \ddot{z} = 0$ として (10) から

$$0 = -2mgb + k'l'c. \quad (11)$$

これを (10) に入れ、かつ $\theta^2 \ll 1$ として

$$2I\ddot{\theta} = -(2k + k'c^2)\theta - 2R\dot{\theta} - 2m\ddot{z}b \quad (12)$$

となり、他成分の影響を受けず、復元力は支点のバネと吊りバネだけの振子となる。

3-3. 製 作

Fig. 5 は水平動振子の設計図であり、1つの振子の支点から弧面までの距離は 86.5 mm、弧面間を 1 mm 離してピアノ線 (0.2 mm ϕ) をたすきがけに張つてある。支点は十字バネ (厚さ 0.1 mm, 幅 3 mm, ベリリウム青銅) とし、振子に厚みを持たせることによつて y 方向の動きを固定する。この場合には、Fig. 5 の側面図に見られるように下の十字バネに振子の自重による圧力が働らくが、その圧力にはたすきによつて緩和されており、さらに十字バネ構造による緩和もあるので Fig. 5 の構造とした。自重が張力となる取り付け方もあるが、振子の回転軸が 2 つあるので、なるべく複雑な構造を避けた方が良いと考えられる。同様の趣旨でたすきも扇形の下方にのみとりつけた。 $\ddot{z} > g$ となる場合には自重は逆方向となるが、その場合のテスト結果 (§ 4 参照) では全く差支えなかつた。水平動振子の見取図を Fig. 6 に示した。

上下動振子の振子体は水平動振子と全く同形である。吊りバネ (ニッケルspan C) は垂直にし、とりつけ部にピアノ線を入れた。構造の要点はすでに Fig. 4 に示した通りである。振

Fig. 5. Design of the horizontal component seismograph composed of a coupled pendulum.

Fig. 6. Illustration of the structure of the horizontal component seismograph.

Fig. 7. Structure of the vertical component seismograph.

子の自重により、 $\ddot{z} < g$ のときはたすきにかかる力は左下から右上に張られたものだけであるが、 $\ddot{z} > g$ になつたときの作用は水平動振子の場合と異なるのでたすきは4本（2対）とも付けた。Fig. 7 に上下動地震計の写真を示した。

振子の相対変位をここではマグネセンサにより電圧としてとり出した。振子の重心の変位 ξ を 3 mm まで使用するため、センサの発磁体と検出ヘッドの間隔を 2.5 mm とした。このときの出力 e と ξ との比は、振子の支点からセンサ（間隙）までの距離が 21 mm、支点から重心までの距離が 56 mm であるから、1.5 Volt/mm となる。なお、1つの振子の重量は 386 グラムである。Fig. 8 は3成分をセットにした速度型強震計（換振器部）の外観である。

Fig. 8. Appearance of a set of three components of the velocity type strong motion seismograph.

§ 4. テスト結果

4-1. 予備テスト: オイルの粘度と感度特性

水平動振子の固有周期は約 1.7 秒, 上下動振子は 1.2 秒であつた. 水平動振子の 1 成分 (H1) にシリコンオイル KF96 10,000 cs を入れた場合の小振動台によるテスト結果を Fig. 9 に示す. H2 はオイルを入れない状態のテスト結果である. Fig. 9 のタテ軸は感度であるがここでは $\frac{v}{X}$ として記録紙上の振幅を用いたので任意スケールとしてある. H2 (減衰のない場合) の短

Fig. 9. Preliminary test on the damping constant and the characteristic curve.

周期入力に対する相対変位は台の変位に比例するから, そこでの測定値に接する 45° の直線の固有周期における値は $h=0.5$ の場合の感度を示す. そしてオイルを入れた場合の固有周期における感度は h に逆比例するから, H1 の減衰定数 h は Fig. 9 から約 40 と求められる. これは大体目的の値である. ここで用いた高粘度のシリコンオイルは化学的に安定であり電氣的絶縁もよく, 温度特性も広範囲 ($-30^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$) に亘つて安定であるからここでの目的に適している.

Fig. 9 では固有周期より長い所で感度の低下が現われているが、この原因は固体マサツに類したある力のためと考えられる。

4-2. 振子の相対運動に関する抵抗力の吟味と改良

固体マサツの影響については、萩原 (1933) が変位計について、PERLS ら (1956) が加速度計について厳密な計算を行なっており、それらの結果はそのまま速度計にも適用されるが、ここでは略算によつて検討する。

固体マサツのある場合の運動方程式は

$$m\ddot{\xi} + R\dot{\xi} + K\xi = -m\ddot{x} \pm F \quad (13)$$

で、加速度計の場合には左辺の $K\xi$ のみを、変位計の場合には $m\ddot{\xi}$ のみを、速度計の場合には $R\dot{\xi}$ のみを考えればよく、さらに正弦波入力に対する最大振幅を考える場合には固体マサツによる感度低下の様子は

加速度計については

$$\xi/\ddot{x} = \frac{1}{\omega_0^2} \left(1 - \frac{a_0}{\ddot{x}} \right), \quad a_0 = F/m \quad (14)$$

変位計については

$$\xi/x = 1 - \frac{\rho}{x} \cdot \frac{\omega_0^2}{\omega^2}, \quad \rho = a_0/\omega_0^2 \quad (15)$$

速度計については

$$\xi/\dot{x} = \frac{1}{2h\omega_0} \left(1 - \frac{\rho\omega_0}{\dot{x}} \cdot \frac{\omega_0}{\omega} \right) \quad (16)$$

となる。したがつて、加速度計の感度低下率は周期に無関係な一定値であり、変位計の感度低下率は、 $\omega_0/\omega = T/T_0 < 1$ の場合に注目するので小さな値となるが、速度計の場合には、例えばここでのように $T/T_0 > 10$ までを用いようとするのであるから、長周期入力に対する固体マサツの影響は重大となる。事実、Fig. 9 にはその影響が明瞭に現われており、不満である。そこでいま、Fig. 9 の H1 について固体マサツ力 a_0 の値を求めると、ここには省略したがそのテスト入力の値を (16) (または (14) でもよい) に入れて、 $a_0 = 0.2 \sim 0.8 \text{ gal}$ となり、H2 の a_0 は $0.05 \sim 0.1 \text{ gal}$ となる。

しかし、この連成振子はすべてバネ系で支えられているので固体マサツの入る余地はないはずである。それで、振子の相対運動によつて生ずる抵抗力を一般的な形で吟味してみよう。その抵抗力は

$$F/m = f(\xi, \dot{\xi}) = f_a(\xi) + f_b(\dot{\xi}) \quad (17)$$

のように分けられ、 $f_a(\xi)$ はバネ系のみによるもの、 $f_b(\dot{\xi})$ はオイルのみによるものと考えてよいであろう。

Fig. 10. Dimension on the movement of the pendulum through viscous fluid.

オイルの抵抗力について:

$$f_b(\dot{\xi}) = b_1 \dot{\xi} + b_2 \dot{\xi}^2 \quad (18)$$

としてよいであろう. 右辺の第1項は粘性流体中の物体の運動における粘性項に相当し, 第2項は慣性項に相当する. ここでレイノルズ数

$$R = \frac{Ul}{\nu} \quad (19)$$

の値は Fig. 10 に示したディメンジョンにより

$$U = \dot{\xi}_{\max} = \ddot{x}_{\max} / 2h\omega_0 = 1000 \text{ gal} \div 2 \div 40 \times 1.7 \text{ sec} \div 2\pi \div 3.4 \text{ cm/sec}$$

$$l \div 1 \text{ cm}$$

$$\nu = 100 \text{ cgs}$$

$$\therefore R \div \frac{10}{100} \ll 1 \quad (20)$$

したがって, l を普通のダンパーのように小さくしなくとも, 慣性項は粘性項に比べて無視でき. かつ渦の発生も心配する必要がない.

バネ系の抵抗力について:

$$f_a(\xi) = a_0 + a_1 \xi + a_2 \xi^2 + a_3 \xi^3 + \dots, \quad (21)$$

ここで $a_1 \xi$ のみ存在する場合が理想的な復元力であるが, 他の項の存在は次のように自由振動テストによつて確めることができる.

1) a_0 の求め方: 萩原 (1945) によつて次の方法が示されている. 振子の減衰 (h) およびマサツ値 (ρ) が小さい場合には, 自由振動の m 個おきの振幅を $\bar{y}_n$ とし, $\bar{y}_{n+1} - \bar{y}_n = 4\bar{y}_n$ とすると, $4\bar{y}_n$ と $\bar{y}_n$ との関係は

$$-4\bar{y}_n = 2\pi h m \bar{y}_n + 4m\rho, \quad \rho = a_0/\omega_0^2 \quad (22)$$

故に $-4\bar{y}_n$ と $\bar{y}_n$ とのグラフを画くことによつて ρ の値を求めることができる.

2) a_2 以上の項が存在する場合には振幅によつて振動周期が変化する. 実際, ある振幅以上になると不連続的に周期の長くなることが認められた. この原因はたすきとして用いた薄いリボンにあり, これをピアノ線に変えバネ系の取り付け方を注意深く行うことによつて (振子を固定して取りつけると良い) 解消した. リボンをたすきに用いる悪影響はオイルに浸したときさらに大きくなる. なお, 松沢はその論文の大半をたすきに用いた薄板 (リボン) の変形に費しているが, その問題も解消されたと思われる.

Fig. 11. Free oscillation of the vertical component coupled pendulum.

Fig. 11 には上下動振子の自由振動記録を示した。これより萩原の方法でマサツ値を求めると、Fig. 12 のグラフとなり、 $\Delta \bar{y}_n$ 軸との交点は 0.05 mm 弱となり、記録の倍率 $V (=124 \text{ mm}/4.4 \text{ mm})$ および $m (=5)$ の値を入れて

$$\rho \leq 0.05 \text{ mm} \times \frac{1}{4mV} \doteq 0.00009 \text{ mm}, \quad (23)$$

したがって、固体マサツ（に相当した）力は

$$a_0 = \rho \omega_0^2 \leq 1.5 \times 10^{-4} \text{ gal} \quad (23')$$

となり、一応目標は満足された。この値はさらに向上しうる見込みである。

4-3. 大振動台テスト

3成分ともに KF96 30,000 cs のシリコンオイルを入れて、感度特性および他成分の影響を調べるための大振動台テストを行なった。

この振動台の能力は変位 10 cm 、速度 30 kine 、加速度 1 g 以上であり、 50 秒 から 0.1 秒 までの正弦波振動を入れた。このときの入力を Fig. 13a に示す。その後さらに、オイルを $10,000 \text{ cs}$ に変えて Fig. 13b の入力で3成分のテストを行なった。これらの記録の一部を Fig. 14, Fig. 15a および Fig. 15b に示す。Fig. 14 は周期 50 秒 および 33 秒 の入力に対する3成分の記録である。Fig. 15a および Fig. 15b は入力と3成分の同時記録であり、他成分の影響を

Fig. 12. Graph to examine the solid friction from the free oscillation record shown in Fig. 11.

Fig. 13a. Motions of a great shaking table used to test the oscillating characteristics of the seismograph. (KF96 30,000 cs, at about 7°C) ● H1, ○ H2, × V.

Fig. 13b. Motions of the great shaking table (KF96 10,000 cs, at about 10°C)

Fig. 14. Responses of the velocity seismograph to the long period vibrations.

Fig. 15a. Simultaneous records of three components and the shaking table (for 30,000 cs, at 7°C)

Fig. 15b. Simultaneous records of three components and the shaking table (for 10,000 cs, at about 10°C)

も調べたものである。

他成分の影響:

Fig. 15a および Fig. 15b に見られるように他成分の影響は入力に 30 kine または 1 g に近ずくと目立ってくるが、その影響は 10% には達しない。表 1 には最も影響の大きいものについて、加振方向の成分の出力電圧に対する他成分の出力電圧の値を示した。

振動台に他成分の発生している可能性もあるので、真の影響は上記の値より小さい。なお、Fig. 15a および Fig. 15b の入力に付した数値は測定時の目安であるから厳密な値は記録振幅から読みとらねばならない。

感度特性:

感度特性 (出力電圧/入力速度) は Fig. 16 のようになり、30,000 cs のオイルを入れた場合は 0.1 秒から 50 秒までほとんど平らな特性が示された。入力の大きさと出力電圧との関係も完全に比例している。

Fig. 16 の感度からそれぞれの場合の減衰定数を次のようにして求めることができる。

$$\frac{e}{\dot{x}} = (e/\xi) \cdot (\xi/\dot{x}) \quad (24)$$

$$\xi/\dot{x} = 1/2h\omega_0 \quad (25)$$

ここでは各成分とも $e/\xi = 1.5 \text{ V/mm}$ であり、たとえば水平動 H1 については $T_0 = 1.65$ 秒で

Table 1. The maximum effect of other components

Fig. 15a	$\Delta H2/V=0.08,$	$\Delta H1/V=0.06$
Fig. 15b	$\Delta H1/V=0.08,$ $\Delta H1/H2=0.015,$ $\Delta V/H1=0.02,$	$\Delta H2/V=0.08$ $\Delta H2/H1=0.005$ $\Delta V/H2=0.006$

denominator; output voltage of shaking component seismograph,
numerator; output voltage of other component seismograph.

Fig. 16. Sensitivity characteristics of the velocity type strong motion seismograph and the effect of viscosity of damping oil on it. ● H1, ○ H2, × V.

あるから、10,000 cs, 25°C で $e/\dot{x}=0.04$ V/kine という測定値から $\xi/\dot{x}=0.032$ mm/kine および $h=41$ が求められる。この h の値は Fig. 9 から求めた値とほぼ一致する。同様に Fig. 16 の感度からそれぞれの h が求められ、一方シリコンオイルの粘度と温度との関係は Fig. 19 の実線によつて与えられているので、測定時の温度、 $h \propto \nu$ の関係および $\nu=10,000$ cs のとき $h=41$ という結果を使つてそれぞれの h を求めることができる。測定時の温度はやや不正確であるが、両者の結果はほぼ一致している。

§ 5. マグネセンサの特性および影響

振子の相対変位を記録する方法としてマグネセンサを用いたので、その影響について調べておく。ここに用いたマグネセンサ (SET-B2, ソニー製) の仕様および感度特性は表 2 および表 3 のようである。マグネセンサの感度特性を調べて見た結果は Fig. 17 のようになり、

Table 2. Specification of magnesensor SET-B2

Power requirements	DC 12 V $\pm$ 5%, 40 mA.
Operating temperature	-10°C to 50°C.
Drift with temperature	smaller than 0.033 V/10°C.
Sensitivity for magnetic flux	10 Gauss/1 V

Table 3. Sensitivity characteristics of magnesensor SET-B2

Clearance*	Sensitivity	Maximum displacement in linearity 1%
0.2 mm	1.8 V/0.1 mm	
0.5	1.5	0.25 mm
1.0	1.1	0.35
1.5	0.7	
2.0	0.5	0.45-0.5
2.5	0.4	0.6

* Gap between the magnet and the head of detector.

表3の値はほぼ満足されている。なお、＋－で感度特性の相違が僅かに認められる。

外部磁場の影響について実験した結果は次のようであつた。

1) 検出ヘッドに電線を近づけたときの最大出力は 0.05 V で、このときの電流は1アンペア、電線から検出ヘッドの中心までの距離は 3 mm であつた。したがつて磁場 H は

$$H(\text{ガウス}) = \frac{0.2I(\text{アンペア})}{a(\text{cm})} \quad (26)$$

から、 $H=0.7$ ガウスとなり、1 ガウス $\equiv 0.07\text{ V}$ となる。

2) 厚さ 1 mm の鉄板の箱に入れてマグネセンサの検出ヘッドをシールドしたところ、外部磁場の影響は約 $1/20$ となつた。

記録の上限について：

表3に示された直線性の限界値および感度に注目して、 $\pm 1\%$ の精度で記録される地動の上限を求めると表4のようになる。ここで、 s_m は表3に示されたセンサの直線性限界値、 ξ_{sm} はそれに対応した重心の変位で $\xi_{sm} = s_m \times 56 \div 21$ 、 e_{sm} は s_m に対応する出力、 $\dot{x}_{sm}$ は ξ_{sm} と ν とに対応した地動速度である。§4のテストは表4の①および③の場合について行なわれたものであり、入力は 30 kine までであつた。したがつて、直線性の限界内でありその結果には影響はないが、②または④の方が始めに掲げた目標に適している。しかし、記録の下限を考える場合には、 1 kine の地動に対する出力は ① 0.048 V 、② 0.024 V 、③ 0.016 V 、④ 0.044 V であるから、①または④が適している。

記録の下限について：

1) 表2に示された温度によるゼロ点のドリフトは 10°C の変化に対して 0.033 V 以下であ

Fig. 17. Sensitivity characteristics of the magnesensor.

Table 4. Upper limit of ground motion to be recorded by the velocity seismograph within the fidelity of the magnesensor of $\pm 1\%$

Clearance	S_m	e/S	ξ_{sm}	e_{sm}	ν	$\dot{x}_{sm}$	
2.5 mm	0.6 mm	4 V/mm	1.6 mm	2.4 V	10,000 cs	50 kine	①
"	"	"	"	"	20,000	100	②
"	"	"	"	"	30,000	150	③
1.0 mm	0.35	11	0.933	3.85	30,000 (25°C) 34,300 (18°C)	87.5 100	④

るから、表 4 の①または④であれば差支えない。ただし増幅する場合には Low cut filter を必要とする。

- 2) キャリヤのノイズが大きいが高周波 (100 kHz) であるから容易に除かれる。
- 3) 商用電源を使用する場合にはそこに含まれている数秒のノイズに注意する必要がある。
- 4) 外部磁場の影響：前記の測定により、その値は 1 ガウス = 0.07 V である。地動入力の下限をここでは 0.01 kine としているので、それに相当する外部磁場の値は表 4 の① (または④) では $7.0 (6.3) \times 10^{-8}$ ガウスとなる。これは設置場所の問題であり、たとえば付近に動力線が通っている場合には (26) より $H=7.0 (6.3) \times 10$ ガウスは $a=1 \text{ cm}$ で $I=3.4 (3.1) \times 10^{-2}$ アンペア、 $a=1 \text{ m}$ で $I=3.4 (3.1)$ アンペア等となる。マグネセンサを鉄板でシールドすると外部磁場の影響は上記の値の 1/20 となるので設置場所についての困難はない。第 1 号機は表 4 ①の特性で完成品とした。この場合、感度の直線性は 50 kine までは 1% 以内であるが、80 kine で 10%, 100 kine で 20% 近く低下する。

§ 6. 温度補償回路

感度に対する温度の影響が大きいのでこれを補償するため Fig. 18 の回路を付加する。シリコンオイル KF96 の温度特性は Fig. 19 に示したように半導体と同様の次式

$$\nu(T) = \nu_0 \exp(B_\nu/T). \quad (27)$$

で表わされる。ここで ν はオイルの動粘度、 T は絶対温度、 ν_0 はある基準温度における動粘度である。 B_ν は B 定数と呼ばれる。したがって、サーミスターを Fig. 18 のように演算増幅器の帰還回路に使用すれば、増幅器の出力 e_o は、 e をマグネセンサの出力とすると

$$e_o/e = R(T)/R_s, \quad (28)$$

さらに

$$R(T) = R_0 \exp(B_R/T) \quad (29)$$

および $h \propto \nu$ であることを考慮すると、(24), (25), (27), (28) および (29) から

$$e_o = \dot{x} \frac{1}{2h_0\omega_0} \cdot \frac{e}{\xi} \cdot \frac{R_0}{R_s} \exp[(B_R - B_\nu)/T] \quad (30)$$

となり、 $B_R = B_\nu$ のとき感度に対する温度の影響は消える。ここで h_0 および R_0 は基準温度

Fig. 18. Temperature compensating circuit by means of a compound thermistor and amplified output.

における値を示す。Fig. 19 の破線は市販の JIS 規格サーミスターの 1 つであるが、これに $1\text{ k}\Omega$ 2 ケと $25\text{ k}\Omega$ の固定抵抗を Fig. 18 に示したように π 型に接続すればその温度特性は Fig. 19 に●印で示した値となり、 -10°C から 50°C までの B_R を B_v にほぼ等しくすることができる。なお、(30) の R_0/R_s の値は増幅度となるが、ここではこれを 1 とし、Fig. 18 のように次段で 1 倍、10 倍、100 倍としそれぞれの端子を設ける。マグネセンサも演算増幅器も小型であるからこれらを換振器に付加した第 2 号機を製作した。その写真を Fig. 20 に示す。

Fig. 21 には温度補償を行なわない場合の感度特性を実線で、行なつた場合の感度特性を破線で示した。ここでは表 4 ④の場合を示

したが、その場合の温度と記録しうる地動最大値との関係は表 5 のようになるので基準温度を 18°C にした。Fig. 21 の破線が第 2 号機の感度特性である。

Fig. 21 の長周期における漸近線は

$$\xi = \ddot{x}/\omega^2 \quad (31)$$

Fig. 20. Velocity strong motion seismograph with the compensating circuit.

Fig. 19. Effects of temperature on the viscosity of silicon oil and on the resistance of some thermistor. real line; viscosity of silicon oil. broken line; resistance of thermistor. chain; resistance of a compound thermistor.

Fig. 21. Effect of temperature on the sensitivity of the velocity seismograph at long period. solid line; sensitivity curves expressed by the ground motion corresponding to the full scale of the record for the horizontal component seismograph. broken line; sensitivity curves corrected by means of the temperature compensating circuit.

Table 5. Relation between the maximum amplitude of ground motion and the temperature (for clearance 1mm, oil 30,000 cs)

T	ν	e_{sm}	$\dot{x}_{sm}$
25°C	30,000 cs	3.85 V	87.5 kine
18	34,300	"	100
-10	65,000	"	190
50	18,500	"	54

から求められるが、この α は傾きによる重力の水平分力がこの値になったときにゼロ点の移動がフルスケールとなることを意味している。地盤の傾き 1.36×10^{-3} ラジアンは地震計の設置条件として厳しくはない。ただし、電氣的に増幅する場合には Low cut filter を付けた方がよい。

§ 7. 有感地震常時観測用記録方式および記録例

ここに製作した地震計はおよそ極限と考えられる大地震動から都市の常時微動までを拾い上

Fig. 22. Block diagram of the velocity type strong motion seismograph for routine observation.

げてそれを電圧に変えるダイナミックレンジの広い換振器である。周期範囲も $M=8$ クラスの大地震による地震動を充分忠実に記録しうるものと思われる。それ故、有感地震の常時観測用として当面予定している記録方式を Fig. 22 に示し、Fig. 23 にこの場合の模式的な記録例を示した。

現在、東京都港区芝浦に加速度計による常時観測体制がありかつ空きチャンネルがあつたので、第1号機に10倍の増幅器を付けたものを加速度計と並べて観測しており、ここで得られた記録の1例をFig. 24に示した。Fig. 24の上段は速度計記録、下段は加速度計記録（遅延回路によつて3秒おくれている）であるが両者の対応はよい。Fig. 25に

Fig. 23. A schematic example of record in routine observation.

Fig. 24. Velocity seismograms and acceleration seismograms observed at Sibaura 1-1, Minato-ku, Tokyo, June 22 16h 11m, 1977. Earthquake: E off of Chiba Pref. $35^{\circ}21'N$, $140^{\circ}25'E$, Depth 40 km, $M=5.1$, $\Delta=80$ km.

Fig. 25. Fourier spectra of the seismograms shown in Fig. 24.

Fig. 26. Recording ability of various seismographs which are widely used nowadays. It is assumed there that the values of full scale of their records are all 30 mm.
 thick line; earthquake motions corresponding to full scale.
 thin line; amplitudes and periods of earthquake motions recorded frequently by each seismograph.
 oblique line; seismic intensity scale of Japan Meteorological Agency.

は両者のフーリエスペクトル (ともに 40 秒まで) を示した. この地震は $M=5.1$ であり, 東京の震度は 4 と発表されたが芝浦 ($L \div 80$ km) ではせいぜい 2 であつた. なお, この記録に用いられている加速度計は固有周期 0.2 秒, $h=10$ の動コイル型換振器である.

§ 8. 記録範囲について: 他の地震計との比較

Fig. 26 に現在広く用いられている 種々の地震計の記録範囲 (太実線: 記録紙上の Full Scale をすべて 3 cm と仮定し, それに対応する地動で示した) とそれらによつてよく記録されている地震動の例 (細実線で囲った範囲で, いくつかの記録から目立つた振幅とその周期を拾い出して plot としたもの) を示した.

気象庁 1 倍強震計 (JMA 1 と記した) はその固有周期 6 秒より短い周期の地震動に対しては, 地動変位 3 cm 以下のものだけを記録し, それ以上のものは飽和する. SMAC-B1 は幾何倍率 16 倍であるから記録しうる地動変位は固有周期 0.1 秒より短い所では $3 \text{ cm}/16$ となり, 0.1 秒より長い周期の地震に対しては Full Scale は 750 gal となる. Fig. 26 で A と記した細実線の範囲は Fig. 1 に示した地震動であるが, Fig. 26 から分るように JMA1 では地動変位 3 cm 以上のものはすべて飽和してしまい, SMAC-B1 では周期 1 秒以下の震動が大きく記録されるため同時に含まれている長周期成分は其中に没してしまう. すなわち, いずれの強震計においても周期数秒以上の大震動はうまく記録されない. ここに製作された速度型強震計は VS1 と記したものであり, A の範囲の地震動を最もよく記録するはずである.

W は気象庁で長い間使われてきた Wiechert 地震計の記録範囲である (現在はほとんど 59 型 100 倍地震計におきかえられたがその特性はほぼ等しい). さらに参考のために, 現在広く用いられているいくつかの高感度地震計の記録範囲を示し, かつそれぞれの地震計によく観測されている地震動を示してみた. 細実線の B は気象庁 1 倍強震計 (JMA1) に見事に記録されている中規模地震 ($M=6.0 \sim 6.5$) の近地地震動で震源の研究に役立つている. C は最近 2 ケ年間の根室測候所における 59 型 100 倍地震計によく観測されているものであり, そこで飽和したものは JMA1 に小さいながら明瞭に記録されている. D は世界標準地震計 (WWSSN) によく記録される中規模地震の遠地地震動であり, E は日本における微小地震観測網の地震計 (MSN と記した) に頻繁に記録される震源距離 100 km 以内の微小地震の地震動である.

VS100 は VS1 に 100 倍の増幅器をつけたものであり, 発生頻度の高い震度 1~2 の地震動をよく記録するはずである. Fig. 26 の斜線は日本式震度であり, ground noise は地下鉄などの通っている都市の常時微動である.

§9. ま と め

地震動の破壊力を調べるという観点からみると、注目すべき地震動の周期範囲は 0.1 秒～20 秒であり、かつこの周期範囲で地震動の速度振幅がほぼ一定のレベルを持つているように見える。したがって、強震計としては速度計が適当であり、なお、弱い地震動も研究上重要であるから、ここに周期範囲 0.05 秒～40 秒、速度振幅 100 kine～0.01 kine の速度型強震計を製作した。この地震計の構造の要点はかつて松沢 (1938) の考案した“たすきがけ扇形連成振子”を改良したものであり、これを高粘度のシリコンオイルに封入して速度計とした。1g を越える入力の場合でも他成分への影響はほとんどない。この振子の相対変位はマグネセンサによって電圧としてとり出され、サーミスターを持つた温度補償回路と増幅器を通り、ここまでで広帯域かつ広いダイナミックレンジを持つた速度計換振器を構成している。寸法は 3 成分組で約 40 cm×30 cm×15 cm、重量は約 15 kg である。

謝 辞

この速度型強震計の製作に当られた東京測振 K.K. の有馬英司社長、横井勇氏その他の方々に感謝の意を表したい。共和電業 K.K. の黒沢信行氏にはいろいろと相談にのつて頂いた。大林組技術研究所の角田智彦氏および振動研究室の方々には振動台テストに協力して頂いた。地震動の常時観測およびその記録の解析は清水建設 K.K. 研究所の山原浩氏および横田治彦氏のお世話になつた。岐阜大学教育学部技術科の山名忠助教授には試作の段階で助言と協力を頂いた。製作費の一部を文部省科学研究費および建築研究所プロジェクト費に依つた。併せてここに感謝の意を表する。

文 献

- HAGIWARA, T., 1933, Influence of Solid Friction on Dynamical Magnification, Bull. of Earthq. Res. Inst., 11, 1, 14-24.
- 萩原尊礼, 1945, 振動測定, 宝文館.
- MATUZAWA, T., 1938, Ein Langperiodiger Seismograph für Starke Beben., Jour. Fac. Sci. (Tokyo Imp. Univ.), Sec. 2, 5, 59-67.
- 森岡敬樹, 1976, 1923 年関東大地震の地震動, 第 4 回地盤振動シンポジウム資料集, 日本建築学会, 39-48.
- 村松郁栄, 1976, 地震動の極値および振動継続時間について, 地震 2, 29, 223-232.
- 太田 裕, 1976, 耐震工学上考慮すべき周期の上限と振幅の下限, 第 4 回地盤振動シンポジウム資料集, 日本建築学会, 3-10.
- PERLS, T. A. and E. S. SHERRARD, 1956, Frequency Response of Second Order Systems with Combined Colomb and Viscous Damping, Journal of Research of the National Bureau of Standards, 57, 1, 45.
- 渡辺 晃, 1974, 近地地震のマグニチュード(第 3 報)—マグニチュードと最大振幅の周期との関係—, 地震 2, 27, 129-140.