ジャイロスコープによる振動計測[†]

——長周期地震計測への応用——

金 原 昭 臣*・猪 瀬 善 郊*・黒 須 茂*

A Gyroscopic Vibrometer

—Application to the Long-Period Seismometry—

Akiomi KIMBARA*, Yoshihiro INOSE* and Shigeru KUROSU*

This work is concerned with a long-period vibrometer using a gyroscope, the experimental device having demonstrated periods of 46 seconds and longer. Several types of the gyro-transducer have previously been built and some of technical problems have been clarified.

The topics in this paper are summarized as follows: 1) The more compact gyro-transducer in arrangement is designed. 2) The sensitivity of the gyro-transducer is further improved. 3) The limitations imposed on the performance are considered. 4) The problem of how other components of input acceleration influences the output signal is discussed. 5) The observation can be carried out without being disturbed by long-term drift due to the thermal effects etc.

Key Words: long-period seismometry, gyro-transducer, gyroscopic pendulum

1. はじめに

地震計は機械振動の測定の代表例である。地震現象は広い周波数帯域をもつ点に特徴があり、何種類もの地震計を準備してこの広い帯域を分割して観測を実施している。短周期の振動に対しては、昔からの振り子型式で比較的簡単に測定しているが、巨大地震に伴う表面波や超高層ビルの自由振動などの長周期の振動に対しては、固有周期の長い振子が必要となる。振子の固有周期をのばす場合に、水平動振子は原理的に簡単に長くできるが、上下動振子はばねのドリフト、温

度、気圧の影響による安定性の問題があり、さらに取扱いも容易ではない。

現代の地震観測において、長周期 (10 s 以上) となるとわが国でもごく限られた観測地域しか設置されておらず、まだ十分とはいえない。さらに観測所における定常的な観測に比べ、おこなわれている分野としては、野外での長周期地震観測あるいは構造物の長周期振動の測定など、操作性がよく特性の優れた可搬型の振動計の開発を望む声が近年とくにたかまっている。

以上のような背景を踏まえ、本研究では比較的容易に長周期振子を構成するために、ばね-質量系からなる振り子型式から視点をかえて、高速回転しているロータの角運動量を利用したジャイロ振子の長周期性に着目し、ジャイロスコープを振動計測に応用することを目的としている。

筆者は振動入力 (上下動ならびに水平動成分) に対して、固有周期 30 s 以上の長周期振子の実現をねらってジャイロ換振器を試作し、その基礎実験を通して振動計としての実用性ならびに問題点を検討してきた^{1)~4)}。その結果、水平動成分計測用換振器と比べて上下動成分計測用換振器のほうが実用性の高いことが明らかとなった。

本論文では、いままでの理論解析、基礎実験を踏まえ、1) 小型化の実現、2) 感度の向上、3) 温度変化などによるドリフトの削減を目標にして、上下動成分計測用ジャイロ換振器を設計改造し、振動計としての実用性、性能の限界を検討している。

本論文の構成はつぎのとおりである。すなわち、2章で上下動成分計測用ジャイロ換振器の理論結果を整理し、振動計としての特性値を吟味し、換振器の理論的限界を与える。3章ではジャイロ換振器の性能目標、他成分を考慮した設置条件を述べ、さらに設計改造した換振器の特性評価実験を実施した結果について

[†] 工学における振動問題に関する国際会議で発表 (昭 61・6)

* 小山工業高等専門学校 小山市中久喜 771

* Oyama Technical College, Oyama
(Received May 10, 1988)

(Revised September 21, 1988)

述べる。4 章では実験室内における連続試験観測した地震波形の記録を示す。5 章では本研究によって得られた結果をまとめ、ジャイロ스코ープの振動計測への応用に関する展望を述べる。

2. 理論ならびに性能の限界

Fig. 1 に本研究で提案する上下動成分計測用ジャイロ換振器の構成を示す。ジンバル機構によってロータを支持し、空間に対して 2 自由度をもつ垂直ジャイロである。外部ジンバルに腕を介しておもりが取り付けられ、上下動の振動加速度によって生ずる慣性力をトルクに変換し、ロータのスピンのプリセッションによって生じた角変位（ピッチ角 ψ ）を出力として増幅検出するわけである。ここでおもりはばねによって吊られ、振子系とジャイロ系との二つの振動系が干渉して一つの振動系を構成している。この点において本換振器は Galitzin の電磁式地震計 (1907)⁵⁾ と類似性をもつ。電磁式地震計では振子の機械的変位を起電力に変換しているが、本換振器ではロータの角運動量を利用して回転角に変換している点で原理を異にしている。

本文で使われるおもな記号はつぎのとおりである。

θ, ϕ : ロール軸 (X_e 軸) とピッチ軸 (Y_e 軸) まわりのオイラー角

H_0 : ロータのスピンの角運動量

A_0, B_0 : ロール軸とピッチ軸まわりの慣性モーメント

c_1, c_2 : ロール軸とピッチ軸まわりの粘性減衰係数

α : ロール軸におけるトルク発生器のピッチループのフィードバックゲイン

K, β : ピッチ軸におけるトルク発生器のピッチル

ープとロールループのフィードバックゲイン

m : おもりの質量

κ : ばねによるフィードバックゲイン

k : ばね定数

L, L' : ジャイロの支持中心からおもりの重心およびばねの取り付け点までの距離

A_{Xe}, A_{Ye}, A_{Ze} : ジャイロ換振器の支持台に固定した座標における X_e, Y_e, Z_e 方向の振動入力による加速度

ジャイロ換振器の動作方程式は、ロール軸ならびにピッチ軸について

$$\left. \begin{aligned} A_0 \ddot{\theta} + c_1 \dot{\theta} + \kappa \theta - H_0 \dot{\phi} - \alpha \phi &= m L A_{Ze} \\ B_0 \ddot{\phi} + c_2 \dot{\phi} + K \phi + H_0 \dot{\theta} + \beta \theta &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに

$$\kappa = k L'^2 \quad (2)$$

$$A_0 \doteq m L^2 \quad (3)$$

と書ける。(1) 式を初期条件を零として Laplace 変換して、 H_0 は十分大きく、 c_1, c_2 は微小、 $H_0^2 \gg (A_0 K + B_0 \kappa)$, $H_0^2 \gg 4(\kappa K + \alpha \beta) A_0 B_0$ と仮定して入力 $A_{Ze}(s)$ から出力 $\Psi(s)$ への伝達関数を求めると、

$$\frac{\Psi(s)}{A_{Ze}(s)} = - \frac{S_i P_2^2 \{s + (\beta/H_0)\}}{(s^2 + 2\zeta_1 p_1 s + p_1^2)(s^2 + 2\zeta_2 p_2 s + p_2^2)} \quad (4)$$

となり、ここに換振器の感度 S_i 、非減衰固有振動数 p_1, p_2 ならびに減衰係数 ζ_1, ζ_2 はそれぞれ

$$S_i = m L / H_0 \quad (5)$$

$$p_1 = \sqrt{\kappa K + \alpha \beta} / H_0, \quad p_2 = H_0 / \sqrt{A_0 B_0} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \zeta_1 &= (\alpha + \beta) / 2\sqrt{\kappa K + \alpha \beta} \\ \zeta_2 &= (A_0 c_2 + B_0 c_1) / 2H_0 \sqrt{A_0 B_0} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

と与えられる。

低周波モード (p_1) は A_0, B_0 に独立であり、通常のジャイロ計器では A_0, B_0 を無視して高周波モード (p_2) は速やかに減衰するように設計している。しかし、本換振器では (3) 式が示すように p_2 に影響する A_0 を無視するわけにはいかない。この事実があとで述べるように性能の理論的限界となる (注 1)。低周波モードの制動に対しては α, β が有効であることがわかる。

振動入力の角振動数を p として、(4) 式に $s = jp$ (j は虚数単位) を代入して周波数伝達関数を求めると、

(注 1) この事実は水平動成分計測用換振器²⁾ となると、 $A_0 = B_0 \doteq m L^2$ となって A_0, B_0 ともに大きくなり深刻となる。この結果、振動計としての実用性を低下させてしまう。

Fig. 1 Construction model for measuring vertical motion

$$\frac{\Psi(jp)}{A_{ze}(jp)} = - \frac{(S_i/p)\nu^2\{j+(\beta/H_0p)\}}{\{(\eta^2-1)+j(2\zeta_1\eta)\}\{\nu^2-1)+j(2\zeta_2\nu)\}} \quad (8)$$

となり、ここに

$$\eta = p_1/p = T/T_1, \quad \nu = p_2/p = T/T_2 \quad (9)$$

であり、 T, T_1, T_2 は振動入力周期ならびに低周波モード、高周波モードの固有周期である。 p の範囲を

$$p_1 < p < p_2 \quad (\text{または } \eta < 1 < \nu) \quad (10)$$

と限定して考えると、(8)式は

$$\frac{\Psi(jp)}{A_{ze}(jp)} = \frac{S_i}{jp\{(\eta^2-1)+j(2\zeta_1\eta)\}} \quad (11)$$

と簡単化される。つまり、 $\eta < 1$ ならば振動速度を正確に検出しているとする前稿¹¹⁻¹³までの議論は妥当性をもつ。

(10)式が本換振器の振動計としての可感帯域幅を与えている。 H_0 を大きくとり p_1 を低く、逆に p_2 を高くとれば、長周期振子が実現でき、可感帯域幅は広がる。特性値間の関係(5)、(6)式より

$$p_1 \propto S_i \propto 1/p_2 \quad (12)$$

$$p_1 p_2 = \sqrt{\kappa K + \alpha \beta} / \sqrt{A_0 B_0} \quad (\text{定数}) \quad (13)$$

であり、(13)式は p_1 と p_2 との積が力学量によって定まる定数となることを意味している。原理的には p_1 を低く、 p_2 を高くできるが、(12)式より p_1 を低く(長周期化)すれば S_i の低下をもたらす。 S_i を高めるためにペンジュロシティ (mL) を大きくすれば、(3)式より p_2 が低くなり可感帯域幅を狭めることになる。

本換振器では S_i をどの程度に設定するかということが設計上重要な指標となり、使用するジャイロの性能に対して、おもりの大きさ、腕の長さによって感度 S_i が決まると、換振器の理論的限界まで決定されることになる。

3. 製作ならびに特性評価試験

以上の理論をもとに、ジャイロ換振器を改造設計し、振動計としての特性評価試験を行う。

3.1 性能目標

(1) 固有周期(角振動数)ならびに可感帯域幅
低周波モード：

$$T_1 > 30 \text{ s } (p_1 < 0.2 \text{ rad/s})$$

$$\zeta_1 = 0.4 \sim 0.7$$

高周波モード：

$$T_2 \ll 1 \text{ s } (p_2 \gg 6.3 \text{ rad/s})$$

可感帯域幅：

$$1 < T < 60 \text{ s } (0.1 < p < 6 \text{ rad/s})$$

換振器の固有周期の目安として、現在東大地震研筑波観測所で稼動している Press-Ewing の長周期地震計(固有周期 15 s)を根拠にしている⁶⁾。

(2) 振子系の固有周期： $T_s < 5 \text{ s}$

短周期にすれば、ばねの製作も容易となり小型化できるが、換振器全体として固有周期も短くなるので、極端に短周期にすることは避けている。

(3) 検知可能な振動速度： 10^{-4} m/s 以下

実際の地震動ダイナミックレンジによると、数 μm ～数 cm/s とかなり広範囲にわたっている⁷⁾。この最小検知可能な振動速度から感度 S_i が決定され、使用するジャイロの性能に対して換振器の諸元が決定される。

3.2 他成分の影響を考慮した設置条件

振動入力には計測すべき上下動成分 A_{ze} のほかに、水平動成分 A_{xe} 、 A_{ye} が混入して印加されるのが通常である。とくに地震計の場合に震源と観測地点が比較的遠いとき、 A_{xe} 、 A_{ye} が A_{ze} の数倍以上であるといわれている。ここで水平動成分の影響について述べることにする。

(1) スピン軸の偏位による影響

平衡状態においてスピン軸がロール軸、ピッチ軸に θ_e 、 φ_e だけ偏位しているさいに振動入力印加されたとき、この偏位角によってロール軸のまわりにトルクを生ずる。ロール軸まわりの慣性トルク S_r を求めると、

$$S_r = mL(A_{ze} \cos \theta_e - A_{ye} \sin \theta_e) \quad (14)$$

となる。主成分 (A_{ze}) と干渉成分 (A_{ye}) によるトルクの相対的比率 ε_e を求めると、

$$\varepsilon_e \doteq |A_{ye} \theta_e / A_{ze}| \quad (15)$$

となり、これより換振器を水平に設置し、 $\theta_e \rightarrow 0$ に保持することが重要となる。

(2) 取り付けミスアライメントによる影響

おもりの重心が垂直方向に微小量 δ だけ偏位して取り付けられた場合にも、振動入力によってロール軸のまわりにトルクを生ずる。ロール軸まわりの慣性トルク S_r を求めると、

$$S_r = m(LA_{ze} + \delta A_{ye}) \quad (16)$$

となる。主成分 (A_{ze}) と干渉成分 (A_{ye}) によるトルクの相対的比率 ε_m を求めると、

$$\varepsilon_m = |\delta A_{ye} / LA_{ze}| \quad (17)$$

となり、これより (δ/L) をある限度内に抑えることが重要となる。

このほかにロータの重心の偏位による影響が考えられるが、偏位量といっても数 μm のオーダーであり、これによる誤差トルクはほとんど問題とはならない。

3.3 ジャイロ換振器

(1) ジャイロ換振器の製作

本研究で使用するジャイロ本体は漁船のアンテナ姿勢制御用に開発された垂直ジャイロで、前稿¹⁾に比べて H_0 は同じであるが、回転数を 2 倍にしロータを小型化している(注 2)。角変位センサは感度の高いマイクロシンに変更している。ジャイロの諸元は Table 1 に示すとおりである。

前稿¹⁾では、温度変化によるドリフトによりひん繁に零点調整を必要としたのでコイルばねは熱膨張の小さなエリンパー線を用いて製作し、塩浴中 580°C で 2 分間の焼なましを施行している。おもりの吊り方はジャイロ系に余計な不平衡トルクがかからぬように、斜め吊りを避け鉛直吊りにしている。振子系の諸元を示したのが Table 2 である。Table 2 より $A_0 \approx 0.0731 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ が得られ、(6)式を用いて p_2 を求めると、 $p_2 = 33 \text{ rad/s}$ ($T_2 = 0.2 \text{ s}$) となる。

製作したジャイロ換振器の外観を示したのが Photo. 1 である。本換振器はロータの角運動量を利用して長周期振子を構成しているので、従来の振り子型式に比べて小型化できる点に特長があるが、ばねに初張力をもたせた LaCoste 振子をつくることの困難さにより、ばねがかなりの空間を占有している。最近話題となっている Leaf-spring 長周期地震計のような高精度の平ばねが利用できれば、さらに小型化が期待できる³⁾。

Table 1 Constants of gyroscope

Spin angular momentum	0.23 kg·m ² /s
Rate of spin	24,000 rpm
Mass of rotor	0.345 kg
Moment of inertia	0.24 × 10 ⁻² kg·m ² (roll-axis) 6.65 × 10 ⁻⁴ kg·m ² (pitch-axis)
MTBF*	3,000~4,000 h
Free drift rate	6 deg/h
Sensitivity of sensor	2 V/deg

* MTBF: meantime between failure

Table 2 Constants of pendulum-system

Mass of pendulum m	0.44 kg
Distance to center of mass L	0.4 m
to center of spring supported L'	0.3 m
Spring constant k	10 N/m
Proper period T_s	1.8 s

Photo. 1 Overall view of gyro-transducer

(2) 自由応答によるフィードバックゲインの決定
換振器の性能目標である固有周期 T_1 と減衰係数 ζ_1 からトルク発生器の可変ゲイン α , β , K を決定しなければならない。トルク発生器単体として性能の検定はできるが、換振器全体としての性能から実験的にゲインを探索するほうが实际的である。そのために、おもりに微小な初期変位を与えて自由応答をとる。自由応答から T_1 , ζ_1 を推定するには、出力を有限時間にわたって測定し、最小 2 乗法を用いてコンピュータよりオンラインで推定する方法をとる⁹⁾。

同定の対象となる換振器をつぎのような 2 次系

$$X(s) = K \frac{s + \zeta_1 p_1}{s^2 + 2\zeta_1 p_1 + p_1^2} U(s) \quad (18)$$

で近似する。ここで入力 U は単位インパルスを考えて、 K は初期変位に依存するゲインである。(18)式はつぎのような離散時間系で書ける。

$$x(k) = a_1 x(k-1) + a_2 x(k-2) + b_0 u(k) + b_1 u(k-1) \quad (19)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= 2c \cos \beta \Delta T, \quad a_2 = -c^2 \\ b_0 &= K, \quad b_1 = Kc \cos \beta \Delta T \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

であり、ただし

$$\alpha = \zeta_1 p_1, \quad \beta = p_1 \sqrt{1 - \zeta_1^2}, \quad c = e^{-\alpha \Delta T} \quad (21)$$

である。 ΔT はサンプリング周期であり、1.4 s で実行した。実際に観測できる出力は $x(k)$ ではなく、雑音が重畳した形で

$$\phi(k) = x(k) + v(k) \quad (22)$$

のように与えられる。

Fig. 2 は自由応答 $\phi(k)$ と a_1 , a_2 の収束状況の一例を示している。種々の自由応答から、 $T_1 = 46 \text{ s}$, $\zeta_1 = 0.6$ なるトルク発生器の可変ゲインの組合せ (α ,

(注 2) 関東航空計器(株) 7900 EHRS 型。

Fig. 2 Example of identification process

β , K) を採用することを決定した。

この推定法では、高周波モード (p_2) を考慮してないので、高周波成分が顕著に現れると誤差を生ずるとともに同定不能となる。このためフィルタによって高周波成分をシャ断し、観測ノイズ $v(k)$ に含めて実施した。

3.4 特性評価試験

以下、特性評価試験の方法と結果について述べる。

(1) ノイズ特性

Fig. 3 は定常状態における換振器のノイズ特性を示している。この記録は換振器全体をアクリル板のケースで囲んで大気の流れをシャ断し、その外部を発泡スチロールで包んで温度変化の影響を少なくした状態

Fig. 3 Measurement noise level

で測定したものである。これより換振器のノイズレベル（分解能）は 10mV 以下と考えられる。大気中に放置した状態では、ピッチ角 ϕ のドリフト変動のピーク値が 0.3V にも達する。

(2) 強制応答による振幅特性

振動計としての性能を検定するために、換振器を振動台にのせて既知の振幅、周期で振幅特性をとる。振動台の振幅 1.4 cm, 周期 5~70 s の強制変位に対するピッチ角 ϕ の振幅を実測した結果を Fig. 4 に示す。

Fig. 4 Amplitude response

Fig. 5 Amplitude response to seismic velocity

Table 3 Performance of gyro-transducer

Sensible measurable range angular freq. (period)	$0.1 < p < 6 \text{ rad/s}$ ($1 < T < 60 \text{ s}$)
Sensitivity	$68 \text{ deg/m} \cdot \text{s}^{-1}$ $136 \text{ V/m} \cdot \text{s}^{-1}$
Resolution	0.05 deg
min measurable seismic velocity	$3 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

実線は(8)式によって算出した理論値であり、実測した振動周期の範囲では理論値とよい一致を示している。振動周期が長周期になると、出力も小さく、振動台の伝達軸の静止まさつなどの影響により波形が歪みを多少含んでいる。

Fig. 5 は振動速度入力に対する出力角変位になおしたものである。これより固有周期 60 s あたりまで振動速度を忠実に計測していることがわかる。

以上の実験を通して得られた換振器の性能をまとめると、Table 3 のようになる。

感度を従来の地震計と比較すると、Leaf-spring 長周期地震計 (1982) の 2400 V/ms^{-1} よりはるかに低いが、小型可搬長周期地震計 (PELS 型 1979)¹⁰⁾ の 50 V/ms^{-1} よりも高い。

(3) 水平動成分による振幅特性

つぎに、換振器を水平動振動台にのせて振幅特性を実測する。Fig. 6 に X_e , Y_e 方向の強制変位に対するピッチ角 ψ の振幅特性を

Fig. 6 Amplitude response to horizontal motion

示す。長周期の領域では、両成分とも Fig. 4 に示す理論曲線に近い特性をもつが、周期 10 s あたりでピーク値をもっている。この原因は、ジャイロ本体に起因するものではなく、振動台の加振方法にあると考えられる。前稿²⁾に述べたようにクランク機構を介して加振しているため、往復行程において回転力の方向のちがいににより振動台がわずかに傾斜する。この傾斜量は 0.1 mm 程度であるが、腕を介しておもりの取り付け位置で 2 mm にも増幅され、上下動方向に加振している事実を突き止めた。このことを考慮すると、周期 10 s 近辺で主成分に対する干渉成分の比率は 4 % 以下となって、振動計としては一応問題ないと考えられる。

4. 地震観測記録

最後に実験室内にて連続試験観測した地震波形の記録の一例を Fig. 7 に示す。いずれの記録も、上に示した波形が従来の地震計 (水戸気象台, 固有周期 5 s, 倍率 100) の記録であり、下に示した波形がジャイロ換振器の記録である。実験室内での地震観測は、外乱も大きく地盤もよくないので観測には不適當である

(a) 20 Mar. '85 (14: 54) south-west of Ibaraki

(b) 17 Mar. '88 (5: 35) east of Tokyo (depth: 90 km, M=6.1)

Fig. 7 Comparison of seismographs registered by the present seismometer and those by the gyro-transducer

が、従来の地震計ではとらえることのできない長周期成分（8～20 s）を計測することができた。本換振器が長周期の振動測定に十分耐えられるものであることを実証した。

5. おわりに

本研究はジャイロ振子のもつ長周期性に着目して、振動計測に応用することを目的としてまとめている。従来からの振り子型式と比較し、本換振器の特長はつぎの点にある。

1) わずか数百グラムのロータとおもりを備えることにより従来の長周期地震計の固有周期を超える長周期振子を実現している。

2) 本換振器は原理的に振動速度を計測している。その結果、温度変化などのドリフトの影響をうけにくい。

3) トルク発生器のゲイン調整により、固有周期1分程度まで実現でき、振幅特性において理論値とよい一致を示している。

4) ジャイロ計器は本来航空機などかなり酷な環境下で使用されており、本換振器もジャイロ部分に関しては強い振動や取扱い方に対して堅牢性をもつ。

今後に応用への開発の宿題を残しているが、一連の基礎実験および観測を通じて、ジャイロスコープの振動計測への応用に対する目的の第一歩を果たしたと考えられる。

終わりに、筆者がご指導を賜っている慶応義塾大学

理工学部、佐藤 力教授、富沢 豁名誉教授またジャイロの製作に便宜をはかっていただいた田口喜一郎氏、宮田 昂氏、三ヶ尻一俊氏ならびに換振器の製作と測定にご協力いただいた小山工専機械工学科卒研究生酒沢正則君、田辺重之君、新井勝久君、塚田卓也君に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 黒須, 山田, 富沢: ジャイロスコープを応用した地震計の試作—地震動垂直成分の計測—, 計測自動制御学会論文集, **15**-1, 83/88 (1979)
- 2) 黒須, 山田, 富沢: ジャイロスコープを応用した地震計の試作—地震動水平成分の計測—, 計測自動制御学会論文集, **19**-1, 563/568 (1983)
- 3) 黒須, 猪瀬, 山田: マイコンによるジャイロ換振器の干渉成分の分離, 計測自動制御学会論文集, **20**-1, 1050/1055 (1984)
- 4) S. Kurosu, Y. Inose and J. Yamada: A Gyro-Scopic Long-Period Seismometer, Proc. of International Conf. on Vibration Problems in Engineering, Xian, China, 838/843 (1986)
- 5) 萩原尊礼: 振動測定法, 精密工学講座Ⅲ-6, 71/90, 日刊工業新聞社 (1957)
- 6) 笠原慶一: 地震予知と計測, 計測と制御, **8**-2, 125/133 (1969)
- 7) 南雲昭三郎: 地震計とデータ集録, 土と基礎, **26**-2, 63/70 (1978)
- 8) E. Wielandt and G. Streckeisen: The Leafspring Seismometer—Design and Performance—, Bull. Seis. Soc. Am., **72**, 2349/2367 (1982)
- 9) 中溝高好: 線形離散時間システムの同定方法 I. 最小2乗法による推定, システムと制御, **25**-8, 476/489 (1981)
- 10) 浅野, ほか: 小型可搬長周期地震計の開発 (その1), 東大地震研研究速報, **13**, 17/22 (1974)