伸縮計と地震計の併用による地震観測

京都大学理学部地球物理学教室 西村 敬一・森井 亙・橋田 匡邦

(昭和 60 年 8 月 2 日受理)

Some Results of Seismic Observation Using a Linear Strain Seismometer in Combination with Pendulum Seismometers

Keiichi NISHIMURA, Wataru MORII and Masakuni HASHIDA

Geophysical Institute, Faculty of Science, Kyoto University

(Received August 2, 1985)

A seismic observation using an extensometer in combination with pendulum seismometers was carried out at the Osakayama Crustal Deformation Observatory, situated in the south-western part of Shiga Prefecture. The extensometer used for the observation is equipped with a differential-transformer transducer, the output signals of which were passed through an electronic device of automatic zero adjustment in order to minimize the effect of the earth-tide and secular strain signals that contribute 'noise' to observation of small seismic signals.

A detailed analysis of some good quality records obtained from recent earthquakes successfully demonstrated an agreement of theory and observation as to the directional response characteristics of the strain- and the pendulum seismometers, though the accuracy of the amplitude ratios of ground velocity to strain estimated from the record of the two instruments was not sufficient to provide the data for determination of phase velocity of surface waves from observation at the single station.

Comparison was made between the strain and the velocity records obtained from two Chilean and 1983 Japan Sea earthquakes and it was shown that seismic waves propagating along the minor or the major arc path of the great circle, such as SS- and SSS-coupled PL waves and some G waves, can be easily discriminated by taking into account the difference of directinal responses of the two instruments to seismic waves. Two examples of 'strain step' recorded from large regional earthquakes were characterized by a gradual change in strain rather than step-like one.

§1. はじめに

ひずみ地震計は BENIOFF (1935) による開発以来地震観測の有力な手段の 1 つと考えられ、特に 1960 年代には、その周波数帯域とダイナミックレンジの広さを生かして、表面波の群速度を求めるためにしばしば利用された [MAJOR *et al.* (1964); SAVARENSKII *et al.* (1966)]. ひずみ地震計の有用性は、これを振子型地震計と併用することによつて一層高められる。例えば、BENIOFF (1935) が指摘したように、一観測点における記録から各種地震波の見かけ速度を求めることができる。これはすでに MIKUMO and AKI (1964) によつて試みられ、実体波

昭和 59 年 10 月 11 日, 昭和 60 年 4 月 7 日発表

についての観測値と理論値の一致がかなりよいことが示された。両地震計の併用のもう 1 つの利点として挙げられるのは、両者の応答の方位依存性 (directional response characteristics) の違いを利用して、種々の波群の到来方向が識別できることである。これは SHOPLAND and KIRKLIN (1969) や FIX and SHERWIN (1970) などによつて試みられたが、必ずしも十分には活用されなかつた。この方法は、特に、大円径路の優・劣両弧回りの波群が混在するような記録の解析に有効性を発揮するように思われる。一方、強い地震動に伴つて “strain step” が観測されることがあるが、その原因について種々の見解があり不明な点も少なくないことを考えると、時間的分解能の高いひずみ地震記録を得ることは、この現象の解明にとつても重要な意味をもつと思われる。

筆者らは、以上のことを念頭において、逢坂山地殻変動観測所に設置した伸縮計と振子型地震計の併用による地震観測を試みてきた。1982 年以來得られた 200 個余りの地震記録の中から振幅が十分大きいものを選んで解析し、伸縮計をひずみ地震計として利用する可能性と問題点について検討した。この論文ではこれまでの検討結果を報告し、あわせていくつかの興味ある事例を示すことにしたい。

§ 2. 観測システム

今回の観測には、逢坂山地殻変動観測所に設置されている数種類の伸縮計のうちでひずみ地震観測に最も適していると思われる観測坑道沿い (N38°E) の成分のみを用いた。これは検出部に差動トランスが用いられているので、水平振子を用いた場合に生じる検出部自体の周期特性の影響を考えなくてよいからである。Fig. 1 に計器の配置を示す。伸縮計の基準尺は外径 30 mm、肉厚 2~3 mm、長さ 19 m の石英管であり、吊り糸式中間支持方式で設置されている。感度は、マイクロメータによる差動トランスの検定値から算出して、 5.5×10^{-9} mV である。この伸縮計による地球潮汐などの観測結果は、橋田・重富 (1984) が詳しく検討した。一方、振子型地震計は固有周期 10 秒、動コイル型 (勝島 PK101) 三成分であり、水平動成分は伸縮計と同じ N38°E 方向とそれに垂直な N52°W 方向に設置した。感度は、三成分とも weight-snatch 法で検定し、2.1 V/kine である。

伸縮計・地震計ともその出力を直流増幅器、ベッセル型ローパスフィルタ、遅延装置を経てデータレコーダに収録した。ただし、伸縮計の出力から地震動に伴うひずみ記録を得るためには工夫を要した。それは、このひずみが地球潮汐などによるひずみに重畳しており、その大きさが後者と同等ないしそれ以下であるため、伸縮計の出力をそのまま増幅するだけでは高い増幅率が得られないかスケールアウトするという問題が生じるからである。検出部を動コイル型にして時間微分するのもひとつの方法であるが、ここでは伸縮計本来の観測を維持しながら地

Fig. 1. Installation of an extensometer and three-component pendulum seismometers.

Fig. 2. Block diagram of observation system. The block designated as 'shift' indicates an electronic device of automatic zero adjustment used for rejecting the earth-tide and secular strain signals that contribute 'noise' to observation of small seismic signals.

Fig. 3. A strain seismogram showing the effect of the automatic zero adjustment performed once an hour. Amplified seismic strain signals are recorded about the zero position.

震観測を行なうために、Fig. 2 に示すように、シフト回路を挿入して地球潮汐などによる超長周期のひずみ変化の影響を除くことにした。この回路は1時間ごとに伸縮計の出力電圧を測り、それと逆符号で絶対値の等しい電圧を加算することによって電圧をゼロにシフトさせるものである。Fig. 3 はこの回路の働きによって地震動ひずみがスケールアウトせずに増幅できることを示す一例である。なお、トリガー装置作動中はシフト回路が働かないようにして、地震記録が乱されるのを防いだ。時間微分の方式に比べて、この方式には超長周期のひずみ変化が完全には除去されないという難点はあるが、地震動に伴うひずみ変化がそのまま増幅できるので“strain step”の早送り記録が得られるという利点がある。実際の経験では、地震動の継続時間が数時間以内であれば超長周期のひずみ変化は大きくないので、次に述べる補正法によ

Fig. 4. Total frequency response characteristics of the linear strain and the pendulum seismographs. The seismograms shown in the following figures, except for those in Fig. 10, are matched by making use of two digital filters, the characteristics of which are equivalent, respectively, to that of the strain seismograph and to that of the pendulum seismograph.

つてその影響を除去することができた。

Fig. 4 に観測システムの総合特性を示す。ここで、伸縮計の検出部が原理的には固有周波数をもたないので、ひずみ地震計としての特性はローパスフィルタの特性で表わしているが、基準尺自体の振動はありうるので問題がないわけではなく、今後の検証が必要である。一般に、観測システムの特性に基く記録の補正はそれを地動に戻す形で行なうのが通例であるが、ここでは逆に、それぞれひずみ地震計および振子型地震計と同じ特性をもつ2つの数値フィルタを作り、両者の記録を互いに他の地震計の特性をもつフィルタに通すことによつて、結果的に振幅と位相に対するシステムの影響が等しくなるような補正を行なつた。それは、伸縮計の出力信号に残留する潮汐ひずみなどの超長周期成分を除去する必要があること、そして、システムの特性に応じて記録上の振幅が小さくなる周波数成分をひき上げる形で補正する場合、数値処理上の誤差の混入を避ける必要があることを考慮したからである。この補正法では解析の対象にしうる周波数帯域が狭まることになるが、両地震計の記録の比較という目的は達せられる。以下に示す記録には、最後の“strain step”の例を除いて、上述の補正が加えられている。

§ 3. 観測記録の解析

1982 年以來約 200 個の地震の記録が得られたが、まず検討しなければならないことは、伸縮計の記録が果して地震動に伴うひずみ変化をどの程度忠実に書いているのかという問題である。ここでは、それらを振子型地震計の記録と比較し、両者が理論的に導かれる関係をどの程度満たすかを調べることにした。BENIOFF (1935) によれば、地震波が平面波と見なしうるとき、水平方向のひずみと地動速度との間には次の関係が成り立つ。すなわち、P 波、SV 波、レーリー波など縦方向に振動する波に対しては、

$$\frac{\Delta x}{L} = -\frac{1}{c} \cos^2 \theta \frac{\partial u_L}{\partial t} \quad (1)$$

SH 波、ラブ波など横方向に振動する波に対しては、

$$\frac{\Delta x}{L} = -\frac{1}{c} \sin \theta \cos \theta \frac{\partial u_T}{\partial t} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta x/L$ は基準尺に沿う水平ひずみ、 c は波の伝播方向に沿う見かけ速度、 θ は波の伝播方向と基準尺とのなす角、 $\partial u_L/\partial t$ と $\partial u_T/\partial t$ はそれぞれ波の伝播方向およびそれに垂直な方

Fig. 5. Theoretical directional response characteristics of the linear strain- and the pendulum seismometers calculated for longitudinal apparent waves(a) and for transversal apparent waves(b).

向の地動速度である。(1), (2) 式は地震動に伴うひずみと地動速度の比が波の伝播方向とみかけ速度の関数になることを示す。このうち、波の伝播方向に対する依存性は **directional response characteristics** と呼ばれ、Fig. 1 の計器の配置に当てはめると Fig. 5 のようになる。この図は、同じ振幅の地震波が到来しても、ひずみ地震計およびそれと同方向の水平動地震計で記録されるひずみおよび地動速度の振幅・位相が、波の到来方向に依存することを示す。a は縦方向に振動する波が「押し」の向きに振れるとき、b は横方向に振動する波が伝播方向に対して「右向き」に振れるときに対応する。Fig. 6 は、この **directional response characteristics** の関係が成り立っているかどうかを調べるために、震央方向の異なる3つの地震について伸縮計と振子型地震計の記録を比較したものである。まず、チャゴス群島の地震とカムチャッカ東方の地震については、両記録の波形の対応がよいことは明らかであり、さらに、位相の関係を見ると前者では **in phase**、後者では **out of phase** になっていることがわかる。一方、トルコの地震では、振子型地震計の記録に見られるラブ波もレーリー波も伸縮計にはほとんど記録されていない。これらの結果は、Fig. 5 から予想される関係を満たしている。

理論的に予想されるもう1つの関係は、地動速度とひずみの振幅比が各波群の見かけ速度と一致するはずであるということであり、これは記録振幅の絶対値の吟味に利用できる。ここでは、記録振幅が十分大きい基本モードのレーリー波について、地動に換算したときの振幅比が日本列島下部における位相速度 [KAMINUMA and AKI (1963)] と等しくなるかどうかを調べた。解析には震央距離 3000 km 以内、(1) 式の θ が 30° 以下の12個の地震記録を用い、

Fig. 6. Examples of strain and velocity records demonstrating a good agreement, as to directional response characteristics of the instruments, between observation and theoretical prediction. A—Chagos Archipelago earthquake of Dec. 1, 1983. The waves propagating from the south-west direction are in phase on the two records. B—East Kamchatka earthquake of Aug. 17, 1983. The waves propagating from the north-east direction are opposite in sense on the two records. C—Turkey earthquake of Oct. 30, 1983. Love and Rayleigh waves observed on the velocity records are not observed on the strain record, since they propagate in the direction perpendicular to the rod of the strain seismometer.

Fig. 7. Comparison of velocity records (solid lines) with strain records (broken lines) from two Chilean earthquakes, and discrimination of wave train propagating along the minor arc path (marked by suffix 1) and those propagating along the major arc path (marked by suffix 2).

レーリー波がほぼ大円径路沿いに振動することを確かめ、 θ の影響を補正した。しかし、この点では残念ながら満足すべき結果は得られなかつた。すなわち、いずれの地震についても、周期 20 秒から 50 秒の間で正分散の傾向を示すものの、比の値は位相速度の約 2 倍になつた。この食い違いの原因としてまず第 1 に考えるべきことは感度の問題であるが、少くとも前述の方法で繰り返し行なつた検定では測定値のばらつきが 10% を越えることはなく、上記の食い違いは説明できない。しかし、感度検定値が観測時の微小振幅領域にまで線型性を保っているかどうかは今のところ明らかでない。一方、両地震計の記録の振幅比からみかけ速度を求める試みが MIKUMO and AKI (1963) によつて行なわれ、実体波 (S, SS, SSS) については観測値と理論値との対応が比較的良好で、表面波では食い違いが大きかつたことを考えると、実体波についても調べてみる必要はあるが、振幅の大きい孤立した実体波の記録が少ないため今回は調べられなかつた。これらの問題は今後の課題である。

以上の検討の結果、記録振幅の絶対値について未解決の問題が残つたが、両地震計の記録の波形の対応がよく、directional response characteristics の関係も満たされているので、定性的には伸縮計の記録をひずみ地震記録と見なすことができると判断した。以下、この判断に基いて 2, 3 の興味ある事例を示すことにしたい。

Fig. 7 は 2 つのチリー地震の記録の一部を示す。実線が $N38^{\circ}E$ 方向の地動速度、破線が同じ方向のひずみの記録であり、前述の補正ののち、両者とも長周期の波群を見るために数値的に 100 秒ローパスフィルタを通してある。これらの記録の特徴は、劣弧沿いと優弧沿いの震央距離が比較的近いため (a の地震では、ISC の震源データから計算して、それぞれ 17322 km と 22696 km, b の地震では USGS のデータからそれぞれ 17405 km と 22613 km)、伝播方向の異なる種々の波群が次々と到来し、時として重なり合い、あたかも 1 つの波群のように見えることもあることである。このような場合、地動速度の記録とひずみの記録とを対比すると、各波群の到来方向を容易に識別することができる。すなわち、これらの地震の場合には、両者の位相の関係が out of phase になつている波群は劣弧沿いに、in phase になつている波群は優弧沿いに、それぞれ伝播してきたことがわかるのである。到来方向の識別に基いて走時と振動様式を調べ、記録上の主な波群を同定した結果を図に記した。ここで、各相のあとに付けた添字は“1”が劣弧沿い、“2”が優弧沿いのものを示す。なお、SS 波および SSS 波と PL 波とのカップリングによる PL (SS) および PL (SSS) の同定は、CHANDER *et al.* (1968) に従つて、それぞれ Fig. 8 の斜線部をこれらの波として伝播したと考えればその走時が説明できること、そして、振動様式が prograde elliptical であることに基いている。

Fig. 9 に、1983 年日本海中部地震の記録の発震時から 2 時間半ほど経つた部分を示す。これも前述の補正ののち数値的に 100 秒ローパスフィルタを通してある。ひずみあるいは地動速度の記録のどちらか一方を見ただけでは単一の波群のように見えるが、両者を対比してみると、伝播方向の異なる 2 つの波群が含まれていることがわかる。すなわち、記録の前半の位相の関係が in phase になつている部分は南西方向から、後半の out of phase になつている部分は北東方向から、それぞれ伝播してきた波群である。図には、CHOY and McCAMY (1973) の polarization filter を応用して両波群を分離した結果を示した。走時から判断して、これらの波群がそれぞれ G_2 波と G_3 波であることは間違いないと思われる。しかし、この地震の震央の azimuth (24.6°) が観測坑道の方角 ($N38^{\circ}E$) に近いことを考慮すると、この方向の成

Fig. 8. Great circle paths from two Chilean earthquakes, hatched zones indicating the portions of the paths travelled by shear-coupled PL waves as identified in Fig. 7.

Fig. 9. First two traces show parts of velocity (upper) and strain (lower) seismograms of Japan Sea Earthquake, May 26, 1983. Last four traces show G2 and G3 wave signals on velocity (upper two) and strain (lower two) records extracted by using a polarization filter that passes only energy polarized to be in phase or out of phase between strain and velocity records.

Fig. 10. Extensometer records of 'strain step' obtained from two regional earthquakes, exhibiting a gradual change in strain rather than step-like one.

分にG波が記録されたことについては検討が必要である。そのためにはこれらの波群の振動様式を調べなければならないが、あいにく他の二成分の地震計が主要動の大振幅でクリップされて記録が得られなかつたので、京大防災研究所天ヶ瀬観測室の長周期地震計の記録を調べさせて頂いた。この観測室から見た震央の azimuth は 24.2° である。水平動二成分 (NS と EW) の記録から地震計の特性の違いを考慮して合成した $N38^\circ E$ 方向の記録と、逢坂山における同方向の記録との波形の一致が良いことを確めた上で、particle motion を調べた。その結果、上述の両波群とも主に水平面で振動しているが、その振動方向は大円に対して完全には transversal にならず、ともに反時計回りに 20° ほど回転した方向に振動していることがわかつた。ところが、この地震の余震 (6 月 9 日) からの SH 波の振動は大円に対してほぼ transversal になつており、逢坂山の $N38^\circ E$ 成分にはほとんど記録されなかつた。したがって、本震からのG波が $N38^\circ E$ 方向の伸縮計と地震計に記録されたのは、その振動方向が大円に対して transversal でなかつたためであると考えられる。これは、観測点付近の局所的な構造の影響ではなく、地殻・マントルの構造の不均質性に起因する伝播経路の大円からのずれと関係するのではないかと思われるが、今後の検討が必要である。なお、G波の振動方向が大円に対して transversal にならないという事例は FUKAO and KOBAYASHI (1983) によつても見い出されているが、その場合には、G波の振動方向の傾き方が劣弧回りと優弧回りとでは互いに逆になつている点が、上述のものと異つている。

最後に、これまでの観測期間中、伸縮計の記録に “strain step” が現れたのは、Fig. 10 に示した2つの事例だけである。“strain step” の早送り記録によつてその現れ方を詳しく調べ、“step” の原因と機構を明らかにするための手がかりを得ることが今回の観測の目的の1つであつたが、回路のダイナミックレンジが不足しており、また、奈良・和歌山県境付近の地震では短時間の間に起つた2つの地震が重なつてしまつたため、詳しい解析ができなかつた。しかし、これらの事例で注目されることは、“strain step” が文字通りのステップとしてではなく、ある継続時間を伴つて現れたこと、そして、奈良・和歌山県境の地震の場合、1つ目の地震のS波付近からゼロ線がずれ始めているように見えることである。これが一般的な現象であるかどうかの判断をするためには、観測システムの改良とデータの蓄積が必要である。

§4. ま と め

この論文では、伸縮計をひずみ地震計として利用する可能性と問題点を明らかにするために、振子型地震計との併用による地震観測を行ない、両者の記録が理論的に予想される関係をどの程度満足するかについて詳しく検討した。その結果、波形の対応や directional response characteristics などの定性的な関係については、理論的な予想と完全に一致することがわかつた。しかし、振幅の絶対値については、両記録の振幅比が予想の約2倍になり、今後、感度検定値が微小振幅領域まで線型性を保っているかどうかなどの問題を検討する必要があることがわかつた。

以上の検討結果から、定性的な議論は可能であると判断し、若干の事例をもとに、両地震計の directional response characteristics の違いを利用すれば、伝播方向を異にする波群の識別が容易になることを示した。

今後、伸縮計の増設とシステムの改良をはかり、観測記録の蓄積をまつて、より詳しい検討

を行ないたい。

謝 辞

この研究を進めるにあたって御指導・御援助を頂いた京都大学理学部和田卓彦助教授、重富國宏助手、防災研究所古澤保助教授、観測に御協力頂いた理学部地球物理学教室藤井伸蔵技官に厚く御礼申し上げます。なお、記録の解析には京都大学大型計算機センターを利用した。

文 献

- BENIOFF, H., 1935, A Linear Strain Seismograph, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **25**, 283-309.
- CHANDER, R., L.E. ALSOP and J. OLIVER, 1968, On the Synthesis of Shear Coupled PL Waves, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **58**, 1849-1877.
- CHOY, G. and K. McCAMY, 1973, Enhancement of Long-Period Signals by Time-Varying Adaptive Filter, *J. Geophys. R.*, **78**, 3505-3511.
- FIX, J. E. and J. R. SHERWIN, 1970, A High-Sensitivity Strain/Inertial Seismograph Installation, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **60**, 1803-1822.
- FUKAO, Y. and M. KOBAYASHI, 1983, Phase and Group Velocities and Q of Mantle Love and Rayleigh Waves of the First Two Modes and Their Azimuthal Dependences for the 1963 Kurile Island Earthquake, *Phys. Earth. Planet. Inter.*, **32**, 4-35.
- 橋田匡邦・重富國宏, 1984, 材質の異なる基準尺を用いた伸縮計の比較観測, *測地学会誌*, **30**, 264-273.
- KAMINUMA, K. and K. AKI, 1963, Crustal Structure in Japan from the Phase Velocity of Rayleigh Waves. Part 2. Rayleigh Waves from the Aleutian Shock of March 9, 1957. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **39**, 249-277.
- MAJOR, M. W., G. H. SUTTON, J. OLIVER, and R. METSGER, 1964, On Elastic Strain of the Earth in the Period Range 5 Seconds to 100 Hours, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **54**, 295-346.
- MIKUMO, T. and K. AKI, 1964, Determination of Local Phase Velocity by Intercomparison of Seismograms from Strain and Pendulum Instruments, *J. Geophys. Res.*, **69**, 721-731.
- SAVARENSKII, E. F., I. L. NERSESOV, R. M. KARMLEEVA, and L. A. LATYNINA, 1966, Long-Period Waves of the Aleutian Earthquake of 4 February 1965 Recorded by Quartz Extensometers, *Bull. (Izv.) Acad. Sci. USSR, Physics of the Earth*, No. 5, 297-303.
- SHOPLAND, R.C. and R.H. KIRKLIN, 1969, Application of Strain Seismographs to the Discrimination of Seismic Waves, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **59**, 673-689.