地震に伴う strain step の検出について

名古屋大学理学部附属三河地殻変動観測所 山 内 常 生・山 田 守
名古屋大学理学部地球科学教室 青 木 治 三

(昭和 50 年 1 月 7 日受理)

Detection of Strain Step Associated with Earthquake

Tsuneo YAMAUCHI, Mamoru YAMADA

Mikawa Crustal Movement Observatory, Faculty of Science,
Nagoya University
and

Harumi AOKI

Department of Earth Sciences, Faculty of Science,
Nagoya University
(Received January 7, 1975)

All the silicatube extensometers at Mikawa Crustal Movement Observatory are specially designed to detect strain steps associated with earthquakes with the use of two or three detectors for each silicatube. Various tests indicate that these instruments are sufficiently stable even for shocks as large as felt earthquakes. Since 1972, seven earthquakes have shown apparent strain steps, the minimum of which is as small as 5×10^{-10} . These strain steps are concordant with DAMBARA's formula (1966), who investigated the relation of magnitude to the radius of region where crustal deformation can be observed. If we assume that the strain step decreases with distance as $R^{-2.5}$, where R is the epicentral distance, the strain step at the distance defined by DAMBARA is found to be 5×10^{-6} .

§ 1. はじめに

三河地殻変動観測所で地殻変動の連続観測を開始してから 2 ヶ年近くが経過した。この間に多くの地震に伴う明瞭な strain step を観測した。設置してある石英管伸縮計は 3 成分で各々の成分には 2~3 個の検出部を設けてある。これにより地震時には各々の成分で複数の記録が得られるが、これらは方向だけでなく大きさも一致している。研究が進むにつれ地殻変動の連続記録に現われる strain step は震源での応力変化の反映であるとの考えが定着しつつあるが [竹本・高田 (1969), 地殻変動連続観測ネットワーク (1970)], 一方では計器や計器台の不安定さによる異常な step ではないかという疑問をもっている研究者もある。この strain step が震源での応力変化の反映であるのかどうかについて地殻変動研究者懇話会で活発な討論がな

Fig. 1. Interim hanger (right) and detector (left) of silicatube extensometer.

された。(昭和 45 年度地震学会秋期大会中に東北大学理学部青葉山地震観測所で開催)。この席上の議論を参考にして観測値の信頼性を高めるために石英管伸縮計に複数の検出部を設けることにした。石英管伸縮計は地震時にはかなり大きな力を受けるため計器の安定性を確かめておく必要がある。石英管伸縮計に対して行なつた種々の実験結果より地震時においても計器は安定に動作することがわかつた。

§ 2. 石英管伸縮計

石英管伸縮計の詳細についてはすでに報告したのでここでは簡単な説明にとどめたい。[山内他 (1974)]。伸縮計の設計にあたっては石英管等の基準尺に固体摩擦がかからないようにすることが望ましい。三河地殻変動観測所で使用している石英管伸縮計は 1.5 m 間隔で支持台に付属するつまみばねで全体をつりあげている。検出部分においても固体摩擦がかからないように無接触型の差動トランスを transducer として使用している。Fig. 1 に支持台および検出部の略図を示す。

観測坑と計器の配置は Fig. 2 のようになつている。検出部分は各成分の 20 m と 40 m の位置にあるが NS 成分のみは 50 m の位置にもあり合計 7 個所で伸縮変化を観測している。これらの検出部分は電子回路も含めてすべて同じ規格であり互換性がある。温度変化や電源電圧

Fig. 2. Observation gallery and arrangement of instruments.

Fig. 3. Illustration of the strain component at N 26° W. The notation of left side attached to each curve indicates the sensor shown in Fig. 2.

の変動などによる誤差が生じるとしてもすべての記録が同じ変化を示しその除去は簡単にできる。

strain step が観測されるような比較的大きな地震の場合、石英管伸縮計は大きな震動を受ける。地震時に伸縮計が安定に動作するかどうか確かめるために固定端、検出部、中間支持台を手で押してみた。地震時には固定端には特に大きな力が作用する。実験時の記録の一例として Fig. 3 に NS 成分の固定端を手で押した場合の記録を示す。NS 20, 40, 50 は同じような変動を記録しており変化量の大きさは加えた力とともに大きくなっている。記録より石英管は固定端ごと平行に変位し、力を取り去るともとの状態にもどることがわかる。NS 成分は固定端の計器台も含めて 180 Kg 程度あるから地震動に直した場合 50 gal 以上の力を加えたことにあたる。この程度の力であつても実験の前後ではほとんど異常変化は認められない。さらに石英管を上下、左右に動かす実験も行なつたが異常変化は認められなかつた。

石英管伸縮計が安定に動作していることを示す一例として Fig. 4 に 1974 年 8 月 11 日の地震に伴う歪地震動記録を示す。使用している記録計は横河電機製作所のスクラッチレコーダーである。記録感度は原記録上で NE 40, EW 40 が $2.5 \times 10^{-8}/\text{mm}$, EW 20 が 10.0×10^{-8} である。この記録は 20 秒から 150 秒までの周期を記録したものである。EW 成分の複数の記録はその振幅が 1:4 の比率で細部にいたるまでよく一致している。ここではのせなかつたが NS 成分の記録でも同様のことがいえる。各測定点では歪地震動を正しく検出しており石英管伸縮計は予想どおり安定であることがわかつた。

Fig. 4. Illustration of records of strain seismogram for the earthquake of Aug. 11, 1974.

§ 3. 地震に伴う strain step

Fig. 5a, b, c, d, e に地震前後の伸縮変化を示す。Fig. 5a は 1972 年 12 月 4 日の八丈島東方沖地震の記録である。NS 成分はそれぞれ伸縮計の span の長さに比例した step を示すが NE 成分は NE 20 と 40 がほぼ同じ大きさの step を記録している。予備観測中のために EW 成分の記録はない。なおこ

Fig. 5a. Ground strains observed before and after the earthquake of Dec. 4, 1972. (East off Hachijyo island).

Fig. 5b. Ground strains and atmospheric pressure observed before and after the earthquake of Feb. 10, 1974. (West part of Aichi prefecture).

Fig. 5c. Ground strains and atmospheric pressure observed before and after the earthquake of May 9, 1974. (Off Izu peninsula).

Fig. 5d. Ground strains and atmospheric pressure observed before and after the earthquake of Jun. 27, 1974. (Near Hachijyo island).

の予備観測期間中は感度の検定が十分ではなく感度は相対的にはほぼ等しいが絶対値は必ずしも正しくないことを附記しておく。Fig. 5b は 1974 年 2 月 10 日の愛知県西部地震の記録である。地震に伴って strain step が生じた成分は NE 成分のみで NE 20 と NE 40 の step はほとんど同じである。特異なこととして地震とともに NS 成分が急激に縮みはじめた。その大きさは span の長さに比例したものである。この弾性余効の変化はわずかではあるが EW 成分や NE 成分においても見出し得る。この変形に関する考察は別の機会に行ないたい。Fig. 5c は 1974 年 5 月 9 日の伊豆半島沖地震の記録である。この地震は strain step を伴った地震のうちでは三河地殻変動観測所での震度は最も大きかった。気象庁の資料より推定したところ震度は II~III である。NS 成分、EW 成分はともに伸縮計の span の長さに比例した step を記録している。NE 成分は前回の 2 回の地震と同様に NE 20 と 40 がほぼ同じ量の変化を記録している。

Fig. 5d は 1974 年 6 月 27 日の八丈島近海で起こった地震の記録である。すでに報告したように [山内他 (1974)] 気圧が急変すると伸縮変化にその影響が現われるがこの地震の場合たまたま気圧の影響が重なり strain step の有無は判別できない。これは観測条件の悪い例で

Fig. 5e. Ground strain observed before and after the earthquake of Aug. 4, 1974. (Southeast part of Ibaragi prefecture).

Fig. 6. Distribution of epicenters investigated in this study (after J. M. A.). Numbers indicated in each epicenter correspond to those in Table 1. M indicates the location of Mikawa Crustal Movement Observatory.

ある。Fig. 5eは1974年8月4日に茨城県南西部に起こった地震のNS 40の記録である。この地震の2日前に記録部分を改良して高感度アナログ記録が得られるようにした。わずかではあるが strain step が認められる。条件さえ良ければ高感度化したNS 40, EW 40, NE 40については 5.0×10^{-10} 程度の strain step を読み取ることができる。

観測を開始してから1974年10月までに strain step を伴った地震は7例あった。それらの震央をFig. 6に示す。三河地殻変動観測所の位置を(M)で示した。資料のうちで3例は同一成分の複数の記録が同じ方向の step を記録し観測値は信頼できる。三河地殻変動観測所では観測坑内の湧水量と地下水圧の測定を常時行なっているが地震の影響で特に変化することはない。このため犬山地殻変動観測所の場合のように地下水圧の変化に伴う二次的な影響[志知他(1970)]は含まれていないと考えられる。

すでに述べたように石英管伸縮計はかなり大きな震動を受けても安定で、計器は岩盤の変動を正しくとらえていると考えてよい。

い。地震とともに strain step が発生することは確実に岩盤はほぼ均一な変形をする。より詳細に考えれば同じ方向であつても、strain step の生じやすい部分と生じにくい部分が存在すると考えられる。たとえば固定端とNE 20の間の strain step はNE 20とNE 40の間に較べて大きい。全国的なネットを用いた場合でも同じ地震の記録でありながら観測点ごとに strain step のばらつきが大きく、変位の方向が逆転している例が報告されている[地殻変動連続観測ネットワーク(1970), 笠原(1973), 岡田(1974)]。計器を設置した場所によつて大きな strain step が観測されることもあれば strain step が小さいこともあり、場所によつては地

下水圧の変化に伴うような二次的な変化が大きく影響しその方向が見かけ上逆になることがあるかも知れない。

§ 4. strain step と地震との関係

観測される strain step は震源からの距離 R が大きくなると減少する。1969 年の岐阜県中部地震の結果 [地殻変動連続観測ネットワーク (1970)] によると第 1 次近似として dislocation theory から期待されるように震源からの距離 R の 3 乗に逆比例していると推定されている。一方、竹本・高田 (1969) は多くの地震に伴う strain step の観測記録より R の 2.4 乗に逆比例する結果を得ている。このことと関連することで TAKADA (1959) は 1951 年の吉野地震に伴う異常なひずみが R の 2.55 乗に逆比例することを示している。また田中 (1972) は海洋潮汐の影響は R の 2.4 乗に逆比例することを指摘し、同時にこの値が地表近くに生じた地殻変動の減衰の割合として妥当な値であることを示している。いずれにしても strain step が震源に近づくにつれて一定の割合で増加し震源近傍でもこの関係が成立つとすれば——以下では R の 2.5 乗に逆比例するものとして考察をすすめる——震源距離がわかればその距離における strain step を求めることができる。

ところで震源域では地震とともに地殻変動が生じるが檀原 (1966) は水準測量の結果を用いて地殻の上下変動域の半径 r と地震のマグニチュードとの間に

$$\log r^3 = 1.53M + 8.18 \quad (1)$$

なる関係式が成り立つと述べている。観測資料として檀原が使用している水準測量の結果は傾斜量にして $1.0''$ (約 0.5×10^{-5} ラジアン) 程度である。strain step と震源距離との関係を用いて (1) 式で定義される半径 r の位置における strain step を求めてみると $0.2 \sim 2.0 \times 10^{-5}$ となる。上下変動が傾斜量に直して 0.5×10^{-5} ラジアン程度生じる地域では strain step も 0.5×10^{-5} 程度生じることがわかる。Fig. 7 に各地震のマグニチュードと 0.5×10^{-5} の strain step が生じると思われる震源距離 R の関係を示す。図中の破線は檀原の式である。図からわかるように strain step より求めた震源距離 R とマグニ

Fig. 7. Earthquake magnitude versus radius of assumed crustal deformation region. Broken line indicates the DAMBARA'S formula.

Table 1. List of earthquakes, strain steps and estimated range of crustal deformation.

No.	Date	Location	M	Distance (Km)	Strain step (10^{-6})	Seismic intensity (Hama- matsu)	RS (Km)	RV (Km)
1	1972. 12. 4.	East off Hachijyo island	7.2	380	5.0	II	24	25
2	1974. 2. 10.	West part of Aichi prefecture	5.3	70	5.0	I	4.4	2.7
3	1974. 5. 9.	Off Izu peninsula	6.9	120	11.0	III	10	18
4	1974. 8. 4.	Southeast part of Ibaragi prefecture	5.8	250	0.5	0	6.2	4.9
5	1974. 8. 25.	East off Hachijyo island	<u>6.3</u>	520	0.6	0	15	8.9
6	1974. 9. 27.	Off Boso peninsula	<u>6.5</u>	350	0.6	0	11	11
7	1974. 9. 27.	Off Nemuro peninsula	<u>7.3</u>	1200	0.6	0	37	28

Seismic intensity; the situation of Hamamatsu (JMA) is 25 Km (S. E. E.) away from Mikawa Crustal Movement Observatory.

RS; radius of the region where a strain step of 0.5×10^{-5} is expected.

RV; radius of earthquake volume defined by DAMBARA (1966).

チュードの関係は檀原の式とよく一致する。観測した strain step は震源での応力変化の反映であるとみなしてよいであろう。なお、ここで使用した地震のマグニチュードは気象庁発表の値である。気象庁によつてマグニチュードが発表されていない地震については三河地殻変動観測所の短周期地震計による記録や歪地震動記録の震動継続時間を用いて求めた値である。Table 1 でアンダーラインを附したものがそれである。

岡田 (1974) は 1974 年 5 月 9 日の伊豆半島沖地震の全国的な観測資料を使用して断層モデルを研究している。その結果によると三河地殻変動観測所で得られた記録は strain step の大きさとその方向が 3 成分共にモデルより期待される量とよく一致している。

§ 5. ま と め

石英管伸縮計で得られた strain step についてつぎのようなことがわかつた。

(i) 石英管伸縮計の固定端や検出部分に地震動に直して 50 gal 以上の力を加え地震時に計器が安定に動作するかどうか実験してみた。その結果地震時に計器が受ける程度の加速度では異常な step は生じないことが確められた。このことより少なくとも三河地殻変動観測所では、地震前後に生じる strain step は計器の不安定さによつて生じたものではないことがわかる。

(ii) 同じ成分に設置してある複数の検出部で strain step が検出された。複数の観測値は大きさ、方向がよく一致し観測値が信頼できる値であることを示している。

(iii) strain step の観測値と震源距離より震源近傍で期待できる strain step を求めてみた。その結果によると檀原 (1966) の式より求められる地殻の上下変動域内では 0.5×10^{-5} 以

上の strain step が生じていると推定される。

(iv) 観測坑内の strain step の分布より同じ方向の観測坑であつても strain step が生じやすい部分と生じにくい部分が存在することがわかつた。地殻に作用している応力の状態を知るためには局所変動を除く必要がある。局所的な影響を避けるためには地殻変動連続観測用の span は長いものが望ましく、地殻変動の検出部分も多数必要である。

文 献

- 檀原毅, 1966, 松代地震に関連した地殻の上下変動, 測地学会誌, **12**, 18-45.
地殻変動連続観測ネットワーク, 1970, 岐阜県中部地震—1969 年 9 月 9 日—による地殻歪の場, 震研彙報, **48**, 1217-1233.
笠原稔, 1973, 1973 年 6 月 17 日根室半島沖地震の際の strain step について, 昭和 48 年度地震学会秋季大会講演予稿集, p. 17.
岡田義光, 1974, 1974 年 5 月 9 日伊豆半島沖地震に伴つた strain step について, 昭和 49 年度地震学会秋期大会講演予稿集, p. 17.
志知竜一・飯田汲事・山内常生, 1970, 犬山で観測された岐阜県中部地震—1969 年 9 月 9 日—に伴う地殻歪に関する二, 三の考察, 震研彙報, **48**, 1241-1249.
TAKADA, M., 1959, On the Crustal Strain Accompanied by a Great Earthquake, Bull. Disas. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ., 29-46.
竹本修三・高田理夫, 1969, 地震に伴う strain step について, 測地学会誌, **15**, 68-74.
竹本修三, 1972, 1966 年 3 月 12 日, 台湾沖地震の際の strain step について, 地震 **2**, **24**, 354-362.
田中寅夫, 1972, 地球潮汐による傾斜, ひずみと海洋潮汐について (第 1 報), 測地学会誌, **18**, 49-57.
山内常生・山田守・青木治三, 1974, 豊橋における地殻変動の連続観測 (第 1 報), 測地学会誌, **20**, 45-56.