地震の時の地殻の急速なひずみの観測より 求めたひずみエネルギーの変化*

京都大学理学部地球物理学教室 小 沢 泉 夫

(昭和 39 年 8 月 31 日受理)

On the Observations of the Change of the Elastic Energy in the Crust during the Remarkable Earthquakes

Izuo OZAWA

Geophysical Institute, Faculty of Science, Kyoto University

(Received Aug. 31, 1964)

We have sometimes found sudden changes of the crustal deformation in the observations with extensometers during the remarkable earthquakes. We can hard to decide that the leaps of the observed curves are not others than sudden changes of the crustal strain. But, it is rich in sincerity.

The present author has observed with extensometers the sudden changes of the crustal extensions during the earthquakes of Ryūjin, Ise-Bay, Off C. Shiono-misaki, Hidakagawa, Fukui, Yoshino, Ōdaigahara, Kitamino and Off C. Echizen-misaki at Osakayama Observatory. These observed leaps of extensions are comparable to the magnitudes of the every earthquake. Using these leaps, he calculated the energy-changes in the crustal strains. According to his calculations, the every strain-energy changes are proportionable to the corresponding energies which are estimated from the magnitudes (M) of the every earthquake. And also, he has calculated the variations of the extensional leaps at the observatory against the azimuth in the cases of the earthquakes of Ōdaigahara, Kitamino and C. Echizen-misaki.

§ 1. 序

伸縮計や傾斜計で地盤のひずみの観測をしていると震度Ⅲ以上の地震のときには大抵急速な段違いの伸縮あるいは傾斜変化が観測される。現在の伸縮計や水平振子型傾斜計は大きな加速度振動により故障を起し易い欠陥はあるが、同じ成分の異つた型の伸縮計に伸び縮みの向きだけでなくその量も同様に現れ、機械、観測室の違いよりも成分による相違を明らかにしていること、また長週期地震計の記録がその振子や電流計の固有週期よりもはるかに長い時間をかけて過減衰曲線的变化を示すことなど(長週期地震計の観測あるいは、H. Berckhemer and G. Schneider, 1964)から考えると、伸縮計などに現れる変化には器械的变化である疑いはあるが、何か事実に近いものを示していると思われる節も多分にあるので、以前に2, 3の地震の場合について言及したことがあるが(小沢泉夫, 1949), 再びこれらも合せて1947年以降逢

* 昭和 39 年 5 月 9 日地震学会で発表。

坂山で観測した 10 個の地震のときの土地の段違いひずみの変化をしらべ、これからそれぞれの地震のときの地殻のひずみエネルギーの変化量を推算した。

§ 2. ひずみエネルギーの変化量

今、観測点は地表からごく浅い所にあるから深さのために考えなければならない定常時のひずみ力は考えないことにする。また実際の観測では年変化のような大きい変化はあるがこれらは波長は短く地表面に限られた変化であり、また観測点附近はすでに弾性限界を越えた塑性的変形をしているものとも考える。したがって段違いひずみ e_i による単位体積当りのエネルギーの変化 E は e_i の自乗およびそれらの相乗に比例したものの一次結合と見て差支ないであろう。すなわち、その段違いの主ひずみを e_1, e_2, e_3 、剛性率を μ 、ポアソン比を σ とすれば、そのエネルギーの変化量は

$$E = \mu \left[\frac{1-\sigma}{1-2\sigma} (e_1 + e_2 + e_3)^2 - 2(e_2e_3 + e_3e_1 + e_1e_2) \right] \quad (1)$$

で求めて大差はない。

今、 $\sigma = 0.25$ とし、主ひずみの中で絶対値の一番大きいものを $e_{\max}$ とすると、(1) より

$$E = (1.5 \sim 7.5) \mu e_{\max}^2 \quad (2)$$

となり $e_{\max}$ の絶対値が他の 2 つの主ひずみよりいくらか大きければ () の中の値は 7.5 からほとんど 1.5 に近くなる。したがって概算としては E の値は $e_{\max}$ の 2 乗にその附近の剛性率を掛けたものと考えても大差はない。

一方この段違いひずみの分布は概して震源距離 r の 2 乗に反比例するものであろうから、この段違いひずみの変化の分布は震源のごく近傍を除いては

$$E = k' r^{-4} \quad (3)$$

の形で与えてよい。また地殻内部で変化し得るひずみの極限は 10^{-4} と考えられている (C. Tsuboi, 1933) から、変化し得るひずみエネルギーの極限も 10^4 erg./cm^3 程度となる。

今このひずみエネルギーが極限に達する震源距離を r_0 とすると

$$r_0 = \sqrt[4]{\frac{k'}{E_0}} \approx 0.1 \sqrt[4]{k'} \quad (4)$$

ここに E_0 は単位体積内で変化しうるひずみエネルギーの極限值。

今、震源がごく浅く、震源の近傍 (震央距離 r_0 以内) では $E = E_0$ と考えると、地殻内部の段違いひずみによるエネルギー変化の総量 E_t は、式 (3), (4) など considering て

$$E_t \approx \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_{r_0}^\infty E r^2 \sin \theta' \cdot dr \cdot d\theta' \cdot d\varphi + \frac{2}{3} \pi r_0^3 E_0$$

$$\approx 4 \frac{2}{3} \pi r_0^3 E_0 \quad (5)$$

で与えられる。ここに φ, θ' は震央に原点をおいたときの方位角および俯角である。

§ 3. 観 測

この論文に関係した観測は逢坂山で行なつた。逢坂山には 1947 年 9 月 S38°W の方向に最初、佐々憲三、西村英一博士の指導により佐々式伸縮計（線型、三本吊り拡大装置 (K. Sassa, I. Ozawa and S. Yoshikawa: 1952)) が据え付けられ、その頃からこの器械で 10^{-8} /mm 前後の感度で観測を続けて来た（ここでは以後これを W_1 と呼ぶ）。この器械は大きい震度には弱い平均、震度IVの地震動には耐えられる。1952 年の吉野地震のときは破損したが 1948 年の福井地震では記録できた。1949 年には棒型のローラー型拡大装置のもの（以後 R_1, R_2 と略記する）が据付られ、吉野地震のときの W_1 の破損をカバーした。その後 1959 年には従来の観測点の両側に 59~150 m はなれた所に拡大装置に水平振子を使つた棒型の高感度の伸縮計（小沢泉夫、1960）が 1 成分当り 1 ないし 4 台ずつ（水平 S38°W 方向； L_3, L_2 , S52°E 方向； C_2 , 東西方向； E_1, E_3 , 南北方向； N_1, N_3 , 垂直方向； V_5, V_3, V_4 と略記）が据付られ、また一時、線型垂直成分伸縮計（ V_1, V_2 ）が据付られ、大台が原地震、姫路地震、北美濃地震、越前岬沖地震のときの階段状ひずみが観測された。これらによると、たとえば大台が原地震のときは水平成分は観測できた 7 台とも収縮方向の階段ひずみを記録し、垂直成分は観測できた 2 台とも伸びの階段状ひずみを記録していた。姫路地震は規模も小さく階段状変化も可測限界に近い小さな変化であつたが水平成分は大台が原地震のときと同様に水平成分はすべて収縮で垂直成分は伸びであつた。北美濃地震のときは水平成分は南東に大きく、南西に小さい伸張を示し、東西と南北にはその中間の大きさの収縮を示し、ことに垂直成分伸縮計のうち 2 台は棒型で他の 2 台は線型でどれも異つた型の拡大装置のものであつたが、4 台とも伸びを示していた。また越前岬沖地震のときは水平成分は南北方向では N_1, N_3 両方とも $40 \sim 50 \times 10^{-8}$ の階段状の伸びを示していたが、東西方向は E_1, E_3 の 2 台とも $4 \sim 5 \times 10^{-8}$ の小さい階段状収縮変化を示しているなど量的にも測定方向（成分）の相違による特性を示しており、器械、観測室による違いは比較的小さかつた。またいずれの場合も東西成分は、 E_1 は東の方に拡大装置があり、 E_3 は西の方に拡大装置がついている。したがつて傾斜変化の影響（伸縮倍率の 0.01 倍以下で無視できる）、変位の影響などであれば両者の間にそれぞれ大きさ、方向の相違が現れる筈であるがいずれの場合も問題になる影響は見られないからこれらの階段状変化は変位振動などによるものではないことがわかる。

Fig. 1 (a). Observed Records of Crustal Extensions before and after the Earthquakes of Ryūjin, Ise-Bay, Hidakagawa, Fukui and Yoshino at Osakayama.

Fig. 1 (b). Observed Records of Crustal Extensions before and after the Earthquake of Ōdaigahara at Osakayama and Kishu.

Table 1. Energy of Crustal Strain by Sudden Change during Earthquake.

Date of Earthquake	Epicenter		Magnitude of Earthquake	Hypo-central Distance	Magnitude of Observed Leap of Extension	Absolute Mean of the Leap in Horizontal Component $\times 10^{-8}$	r_0	$\log E_t$ (erg.)	$\log E_M$ (erg.)	$\log k'$
	Region	Location								
1947, 12, 18	Ryūjin-mura	33.8° N 135.3° E	5.4	km 150	$\times 10^{-8}$ -0.4 in S38°W	0.4	km 0.94	20.09	19.90	23.91
1948, 3, 10	North p. of Ise	34.8° N 136.7° E	5.3	75	-1.5 in S38°W	1.5	0.92	20.07	19.75	23.85
1948, 4, 18	Southward of C.Shionomisaki	33.1° N 135.6° E	7.2 MG=7.3	200	-23.0 in S38°W	23.0	9.60	23.19	22.60 (22.75)	27.93
1948, 6, 15	R. Hidakagawa	33.8° N 135.5° E	7.0 MG=6.9	150	-7.4 in S38°W	7.4	4.08	21.99	22.30 (22.75)	26.44
1948, 6, 28	Fukui	36.1° N 136.3° E	7.3	150	-22.4 in S38°W	22.4	7.28	22.75	22.75	27.41
1952, 7, 17	Yoshino	34.4° N 135.8° E	7.0	80	13.7 in S38°W (R 1) 142.4 in S86°W	78.1	7.07	22.71	22.30	27.40
1960, 12, 26	Ōdaigahara	34.2° N 136.2° E	6.0	94	-1.89 in S38°W (L 3) -1.08 in S38°W (W 1) -0.79 in S52°E (C 1) -5.70 in S29°E (29) -3.77 in North (N 1) -27.5 in North (N 3) -5.65 in East (E 1)	7.19	2.52	21.37	20.80	25.61

1961, 5, 7	Himeji	35.1°N 134.4°E	5.9	115	-5.50 in East (E 3) 28.1 in Vertical (V 3) 45.6 in Vertical (V 4) -0.30 in S 38°W (L 3) -1.95 in S 38°W (L 2) -0.60 in S 38°W (W 1) -1.02 in North (N 1) < -0.24 in East (E 3) < -1.5 in S 29°E (29) 5.80 in Vertical (V 3)	<1.00	1.15	<20.23	20.64	24.24
1961, 8, 19	Kitamino	36.1°N 136.8°E	7.0	140	25.4 in S 52°E (C 1) -1.29 in North (N 1) -13.7 in North (N 3) -3.45 in East (E 1) -26.5 in East (E 3) 0.60 in S 38°W (L 3) 1.25 in Vertical (V 3) 2.6 in Vertical (V 2) 2.35 in Vertical (V 1)	11.82	4.84	22.22	22.30	26.74
1963, 3, 27	Off C. Echizen- misaki	35.9°N 135.9°E	6.9	106	-7.42 in S 38°W (L' 3) -2.02 in S 52°E (C 1) 39.10 in North (N 1) 51.8 in North (N 3) -5.12 in East (E 1) -4.49 in East (E 3) > 0 in Vertical (V3, V4)	18.33	4.54	22.14	22.24	26.63

Fig. 1 (c). Observed Records of Crustal Extension before and after the Earthquake of Kitamino at Osakayama.

Fig. 1 (d). Observed Records of Crustal Extension before and after the Earthquake off C. Echizen-misaki at Osakayama.

階段状変化が地震動の始る前にできたか、後でできたかは現在観測されたものでは記録紙の送り最大 2.6 mm/hr. であるので詳細は分らないが多くの場合は階段状変化のある前に地震動があつたとしてもごく短時間で、ただ北美濃地震のときは階段状変化の始まる前にごく短時間ひずみ振動のあることが分かる。北美濃地震のときは約 3 時間前から比較的週期の長い脈動――

遠地地震の振動とも見分けのつかぬものが記録されていた。

次にこの階段状変化ができるのに要した時間は超長週期地震計などの記録とも考え合せると恐らく 10 数秒以上、数分程度と思われる。現在記録速度を大きくする努力をしているのでやがてはこれらのことも分るものと思う。

Table 1 に階段状ひずみを観測した地震の日時、震央位置、マグニチュード、階段状ひずみの大きさ、 r_0 , $\log E_t$, $\log E_M$, $\log k'$ などを示す。

§ 4. 整 理

地震の時に観測された階段状ひずみの大きさは計器がその観測を主要目的としていなかったために多少器械的な弱点がある。ことに垂直成分伸縮計 (V_3 , V_4) は水平振動に対してその弱点が大きいのので、ひずみエネルギーの計算からは除外した。また今の状態では絶対値最大の主ひずみを求めることには、測定器には時として器械的故障が含まれることなどを考えると多少の問題があるので、観測した水平成分の階段状ひずみ全部の絶対値の平均値 $|e|_{\text{mean}}$ を e_{max} の代りに用い、観測地附近の剛性率を 10^{11} c. g. s. の桁と見做して

$$E = 10^{12} |e|_{\text{mean}}^2$$

で単位体積当りのひずみエネルギーの変化を計算することにした。そうして式 (3) より k' , 式 (4) より r_0 , 式 (5) より E_t を求めた。

また Richter-Gutenberg (B. Gutenberg and C. F. Richter, 1956) のマグニチュードと地震のエネルギーとの関係式

$$\log_{10} E_M = 11.8 + 1.5M$$

を用いて $\log E_M$ を求め Table 1 に示した。

r_0 の値はここで取扱った中では潮岬南方の地震で 9.60 km, 福井地震で 7.28 km で予想したよりは多少小さい感じがするが、もつともらしい値と思う。これによると r_0 が約 1 km になると充分顯著地震としての要素があることを示している。

また階段状ひずみの変化から求めたエネルギーの大きさ (E_t) とマグニチュードから求めたエネルギー (E_M) とは同じ桁で $\log E_t$ と $\log E_M$ との関係を Fig. 2 に示す。取扱った地震の数はわずか 10 個で結果とまでは行かないが、ほぼ勾配 45° の直線の上に並んでおり、常数を a とすると

$$\log E_t = a + \log E_M$$

の関係に近い。

次に大台が原地震, 北美濃地震, 越前岬沖地震のときの階段状ひずみの大きさから水平ひず

Fig. 2.

みのエレメント ($e_{\theta\theta}$, $e_{\phi\phi}$, $e_{\theta\phi}$), 主ひずみの大いさ (e_1 , e_2) とその方向, ずりひずみの最大値 (γ) を求める. すなわち, 極座標 (余緯度: θ , 東径度: ϕ) を用いると

(1) 大台が原地震

$$e_{\theta\theta} = (-10.5 \pm 3.6) \times 10^{-8},$$

$$e_{\phi\phi} = (-1.8 \pm 4.0) \times 10^{-8},$$

$$e_{\theta\phi} = (5.9 \pm 14.4) \times 10^{-8},$$

$$e_1 = (-0.9 \pm 6.9) \times 10^{-8}; \quad N(69.8^\circ \pm 24.5^\circ)E,$$

$$e_2 = (-11.4 \pm 5.5) \times 10^{-8}; \quad N(159.8^\circ \pm 24.5^\circ)E,$$

$$\gamma = \pm (10.5 \pm 4.4) \times 10^{-8},$$

$$e_{\theta\theta} + e_{\phi\phi} = (-12.3 \pm 2.6) \times 10^{-8}$$

(2) 北米濃地震

$$e_{\theta\theta} = (0.6 \pm 8.1) \times 10^{-8},$$

$$e_{\phi\phi} = (-6.9 \pm 8.4) \times 10^{-9},$$

$$e_{\theta\phi} = (-56.9 \pm 39.9) \times 10^{-8},$$

$$e_1 = (25.5 \pm 20.6) \times 10^{-8}; \quad N(138.8^\circ \pm 44.7^\circ)E,$$

$$e_2 = (-31.8 \pm 20.6) \times 10^{-8}; \quad N(48.8^\circ \pm 44.7^\circ)E,$$

$$\gamma = \pm (57.4 \pm 39.6) \times 10^{-8},$$

$$e_{\theta\theta} + e_{\phi\phi} = (-6.3 \pm 5.8) \times 10^{-8}$$

Fig. 3. The Variations of the Crustal Extensions at Osakayama against Azimuth during the Earthquakes of (A) Ōdaigahara, (B) Kitamino and (C) Offing of Echizen-misaki.

(3) 越前岬沖地震

$$e_{\theta\theta} = (37.1 \pm 8.2) \times 10^{-8},$$

$$e_{\phi\phi} = (-13.1 \pm 8.5) \times 10^{-8},$$

$$e_{\theta\phi} = (-13.1 \pm 40.5) \times 10^{-8},$$

$$e_1 = (43.4 \pm 14.3) \times 10^{-8}; \quad N(161.6^\circ \pm 38.2^\circ)E,$$

$$e_2 = (-19.4 \pm 14.4) \times 10^{-8}; \quad N(71.6^\circ \pm 38.2^\circ)E,$$

$$\gamma = \pm (62.7 \pm 32.9) \times 10^{-8},$$

$$e_{\theta\theta} + e_{\phi\phi} = (24.0 \pm 5.9) \times 10^{-8}$$

となる。これらの値を用いて方位角と階段状ひずみとの関係を求め Fig. 3 (A), (B), (C) に示す。これによると大台が原地震のときは水平のすべての方向で収縮で、その大きい方の主ひずみの方向はほぼ震央の方向を向いている。北 美 濃 地 震の際は震央の方向と同じ象限では収縮で、それに直角な方向では伸びであつた。また逢坂山は初動分布が引きの象限にあつた。また越前岬沖地震の場合は主ひずみの方向と震央の方向とのなす角は約 30° であるが震央方向はほぼ伸びの象限にあり、それに直角な方向は収縮の象限になつている。また観測点は初動分布が押しの象限にあつたからどちらもたて波の初動の波のそ密関係とは合っていない。このことは多くの資料が得られれば研究してみたいと思う。

また主ひずみの大きい方の値と小さい方の値との絶対値にはどれも可成りの差があるから式 (2) の () の中の値は 1.5 としてよいようである。また、大台が原地震では $|e_3| > |e_1 + e_2|$

$\approx |\gamma|$ であるが、北美濃、越前岬沖地震とも $|\gamma|$ は $|e_1 + e_2|$ よりもかなり大きい。たま $e_1 + e_2$ と e_3 は 3 つの地震の場合とも異符号であるので、これらの地震の場合、最大応りの絶対値は体積ひずみの絶対値よりもはるかに大きい。

以上逢坂山で伸縮計を用いて 10 個の顕著地震のときの階段状ひずみを観測し、それからひずみエネルギーの変化量、震源域の半径を求めた。また 3 つの地震の場合のひずみの方向分布、主ひずみ、最大ずりひずみ、面積ひずみ、体積ひずみ等を求め、それらの相互関係をしらべた。

§ 5. 謝 辞

この研究を再びまとめる試みは 1949 年にこの研究の一部を報告した後で、恩師佐々憲三博士およびこの方面の権威の先生方から一方ならぬ御激励と御教示を賜ったことによるもので、さらに日米地震予知研究会が直接の刺戟となつたことによる。末筆ながら激励と御教示を賜った先生方に衷心より感謝いたします。

文 献

- Berckhemer, H. and Schneider, G., 1964, Near Earthquakes Recorded with Long Period Seismograms. *Bulletin of Seismological Society of America*, **54**, 973-985.
- Gutenberg, B. and Richter, C. F., 1956, The Energy of Earthquakes. *Journal of Geological Society of London*. **112**, 1-14.
- 小沢泉夫, 1949, 逢坂山における地殻の歪の観測. 財団法人防災研究所研究報告, **2**, 115-121.
- 小沢泉夫, 1960, 傾斜計を拡大装置に使つた高感度伸縮計とそれによる土地のひずみの観測. 測地学会誌, **6**, 1-5.
- Sassa, K., Ozawa, I. and Yoshikawa, S., 1952, Observation of Tidal Strain of the Earth (Part I). *Disaster Prevention Research Institute Bulletin*, **3**, 1-5.
- Tsuboi, C., 1933, Note on the Mechanical Strength of the Earth's Crust. *Bulletin of Earthquake Research Institute of Tokyo University*. **11**. 275-277.