地震発生に関連した前兆的地殻変動

名古屋大学理学部地震火山観測地域センター* 山内 常生

Precursory Ground Strains and Tilts Related to Earthquake Occurrence

Tsuneo YAMAUCHI

Research Center for Seismology and Volcanology, School of Science, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01, Japan

(Received September 2, 1991; Accepted November 5, 1991)

Crustal movement observations for earthquake prediction research in and near fractured zones have attracted the attention of many researchers in recent years. Data obtained from fractured zones sometimes shows abnormal variations in relation to earthquake occurrence. Tectonic stress over a wide area tends to be concentrated in and near the fractured zone and anomalies were observed at sites situated far from the focal region. Tectonic stress over a wide area may provide more useful data than information from tectonic stress in a limited focal region. Data obtained at the same sites showed that anomalies preceding events sometimes resemble each other. It seemed that tectonic stress may show similar patterns in directly influencing such activities. One typical example of this was seen in data obtained at the Mikawa Crustal Movement Observatory (Aichi, Japan). Anomalies seemed to be related to the occurrence of nearby earthquakes within a specified region around the observatory.

Key words: Precursor, Earthquake prediction, Fractured zone, Abnormal variation, Elastic after-effect.

§ 1. はじめに

伸縮計や傾斜計は震源域あるいはその周辺において歪が蓄積する過程を直接測定できるため地震予知にとって重要な役割をになっている。地震予知研究計画が発足してから四半世紀が経過し、計測技術の向上とともに観測地点の増加によって、前兆的地殻変動が複数の地点でなされるまでになった [MIURA *et al.* (1990)]. 今までに蓄積した資料 [山内 (1985)] から判断すると、破碎帯もしくはその近傍にある観測点の方が通常の観測点よりも地震の前兆的变化を観測しやすい。ここでは震源域とその周辺に作用する広域の地殻応力に着目して、地震に関連した前兆的現象の発生するメカニズムについて考察してみる。

§ 2. 地震前後における異常な地殻変動

Fig. 1 は 1983 年の日本海中部地震 ($M=7.7$) 前後に

おいて東北大学理学部の地殻活動総合観測線で観測された地殻変動の記録と潮位計の記録を示したものである [MIURA *et al.* (1990)]. この地震の前には男鹿と仁別観測点で同時に前兆的地殻変動が観測された。この変化にやや先行して男鹿と深浦の潮位計にも変動が記録されている。地殻変動の観測網は以前よりも充実してきており、今後は、この例のように異常変化が複数の地点で観測される機会が増えるであろう。MIURA *et al.* (1990) は仁別で観測された地震の数年前からの伸縮変化を説明するモデルとして断層のプレスリップを考えた。

山崎断層付近で発生した 1984 年 5 月の地震 ($M=5.6$) の場合は、京都大学防災研究所の山崎断層観測室と京都大学理学部の生野観測室で前兆と思われる変化が観測された。WATANABE (1991) の報告によると山崎断層観測室では地震の発生の 7 ヶ月ほど前から伸縮計の記録が急変した (Fig. 2)。藤森・他 (1984) は、生野観測室において凝灰岩と流紋岩の接触面 (もしくは断層) をまたいで設置してある伸縮計で地震の発生の 7 日ほど前

* 〒464-01 名古屋市千種区不老町

Fig. 1. Crustal deformation data before and after the 1983 Japan Sea earthquake. Maximum shear strain, NS and EW tilt components at OGA and NIB station, daily precipitation, and difference in monthly mean sea level between FUKT and NEZT and between OGAT and NEZT (filtered by 24 months running mean) (after MIURA *et al.*, 1990).

から異常な変動を観測したと報告している (Fig. 3). 同じ地震でありながら山崎断層観測室と生野観測室とでは前兆的変動の現れる様子が違っていた。

三河地殻変動観測所の場合は観測所の近傍で地震が発生するとき、その前後で降雨に対する地殻歪レスポンスが異常になる。通常は降雨に対する地殻歪レスポンスは均一で、方位が同じであればどの検出部の変化も似ている。また、この地殻歪レスポンスは流出解析で用いられるタンクモデルを適用するとよく近似できる [山内 (1981)]。ところが、観測所の近傍で地震が発生する場合には観測される変化と予測値は一致せず、観測坑も不均一な変動をする。Fig. 4 にその一例を示す。1976 年 10 月 12 日の地震 ($M=3.2$) の前の伸縮計の動きはモデルにより推定した変動と違っている。さらに、同じ伸縮計の 20 m と 40 m の位置に取り付けた検出部の差

NE40-NE20 は直線ではなく、降雨に対する地殻歪レスポンスが不均一であったことが分かる。わずかではあるが 11 月 25 日と 28 日の地震の前にも異常が見られる。地震の発生に関連した応力の影響で観測坑近傍の岩盤中の透水係数が変わり、降雨に対する地殻の応答が異常になると思われる。詳細については YAMAUCHI (1987) を参照されたい。

§ 3. 観測された前兆的地殻変動の性質

日本国内において地震の前兆と見なされるとして報告された伸縮変化や傾斜変化をまとめて Table 1 に示した。対象とした地震は 1973 年 1 月以降に発生したものである。破碎帯近傍における観測例は通常の観測点の場合よりも多いことが Table 1 から分かる。三河地殻変動観測所の場合は破碎帯をはさむ部分で異常が観測される

Fig. 2. Time series of earthquakes and their accumulated number in the surrounding area. The schematic diagram of the strain change normal to the Yasutomi fault zone (after WATANABE, 1991).

Fig. 3. Strain changes observed at Ikuno station before and after an earthquake of $M=5.6$ occurred at the epicentral distance 31 km (after FUJIMORI *et al.*, 1984).

ことが多い。論文に記述されたデータによると、異常変動の大きさ、現れ方、継続時間等は個々に違っており共通する性質はほとんどない。しかし、多くの観測地点で pre-seismic な地殻変動が co-seismic あるいは post-seismic な地殻変動と同等かもしくはそれよりも大きい。

Fig. 5 は三河地殻変動観測所付近で 1974 年 1 月から 1984 年 12 月までの 11 年間に発生した地震 ($M \geq 3.5$) の震央をプロットしたものである。範囲は東経 $136^{\circ}30'$ から $138^{\circ}20'$ 、北緯 $34^{\circ}20'$ から $35^{\circ}30'$ である。使用した資料は気象庁の地震月報で震源の深さは 60 km よりも浅い。なお、図の下方にあたる北緯 $34^{\circ}20'$ から 34°

$30'$ の間にはこの期間中に地震は発生しなかった。異常変化を伴った地震は●、異常変化を伴わなかった地震は○、異常の有無を判断できなかった地震は△で示した。異常の有無を判断できなかった場合は降雨がないか降雨があっても降雨量が少なくてその影響が観測されなかったときである。Fig. 5 から分かるように異常な変化を伴った地震の震源は観測所の周りの破線で囲んだブロックの中に限られている。山崎・大井田 (1985) は微小地震の分布からフィリピン海プレートの北端部が、Fig. 6 で示すように 3 個のスラブに分かれていることを見出した。Fig. 6 の中央部の東海スラブの形状は Fig. 5 で示したブロックの形状とほぼ一致する。

Fig. 4. An example of abnormal strain responses of N19°E components to rainfalls before and after the occurrences of earthquake.

NE40-NE20 indicates the strain difference of the sensor NE40 and NE20. Upper curve shows output of a tank model.

Table 1. List of earthquakes preceded by precursors.

Date	Location	M	Depth	Distance	Reference
June 17, 1973	Off Nemuro peninsula	7.4	40	250	KASAKARA (1976)
Nov. 25, 1973	Central Wakayama pref.	5.9	60	43	OZAWA (1978)
Feb. 10, 1974	Western Aichi pref.	5.3	40	60	*YAMAUCHI (1987)
Feb. 24, 1974	Western Shizuoka pref.	4.6	0	37	*YAMAUCHI (1987)
Mar. 14, 1975	Aichi-Gifu border	5.3	50	85	*YAMAUCHI (1987)
Nov. 12, 1975	South coast of Aichi pref.	4.2	29	9	*YAMAUCHI (1987)
May 9, 1976	South off Shizuoka pref.	4.1	40	19	*YAMAUCHI (1987)
June 6, 1976	Nagano-Aichi border	4.0	10	55	*YAMAUCHI (1987)
Nov. 15, 1976	Eastern Aichi pref.	3.8	50	40	*YAMAUCHI (1987)
Dec. 27, 1976	Near Hamamatsu	3.5	40	27	*YAMAUCHI (1987)
Apr. 30, 1977	Western Shizuoka pref.	4.2	20	30	*YAMAUCHI (1987)
July 19, 1977	Southern Aichi pref.	3.5	40	26	*YAMAUCHI (1987)
Aug. 6, 1977	Western Aichi pref.	4.3	50	73	*YAMAUCHI (1987)
May 26, 1979	Aichi-Gifu border	3.7	40	21	*YAMAUCHI (1987)
Mar. 4, 1980	Southern Chubu	3.5	40	16	*YAMAUCHI (1987)
June 29, 1980	Izu peninsula region	6.7	10	14	*YANAGISAWA (1980)
Aug. 18, 1981	Southern Chubu	5.0	50	59	*YAMAUCHI (1987)
June 21, 1982	South coast of Chubu	4.9	40	39	*YAMAUCHI (1987)
Mar. 16, 1983	South coast of Chubu	5.7	40	14	*YAMAUCHI (1987)
Mar. 26, 1983	South coast of Chubu	3.5	42	25	*YAMAUCHI (1987)
Aug. 8, 1983	Kanto-Chubu border	6.0	22	31	*SATO <i>et al.</i> (1984)
May 26, 1983	W off N Tohoku	7.7	14	120	MIURA <i>et al.</i> (1990)
		7.7	14	80	(Nibetsu)
					MIURA <i>et al.</i> (1990)
					(Oga)
May 30, 1984	Northern Kinki	5.6	17	31	*FUJIMORI <i>et al.</i> (1984)
Mar. 18, 1987	Hyuganada region	6.6	48	62	OHYA (1988)

* Data observed at a site in and near a fractured zone.

Fig. 5. Epicenters located by JMA for $M \geq 3.5$ earthquakes near the observatory in the period from January 1974 to December 1984.

Closed circles, event preceded by precursors; open circles, event not preceded by any precursor; triangle, event at no rainfall or at precipitation of less than 15 mm.

Fig. 6. Distribution of earthquakes between 20 km to 80 km in depth for the period from April 1978 through March 1984.

Boundaries of descending slabs are shown by open circles (after YAMAZAKI and OOIDA, 1985).

§ 4. 震源域およびその周辺における地殻変動

震源域で生じた地殻変動の影響は遠方にゆくほど減少する。断層モデルでは、震源からの距離 R の 3 乗に逆比例するが、地表近くにおける観測結果からは R の 2.4 乗に逆比例することが知られている [竹本・高田 (1969),

田中 (1972)]。ここでは、その影響が R の 2.5 乗に逆比例すると考えて、観測値から震源領域の半径 r の地点での歪の大きさを逆算してみた。その結果を Table 2 に示す。この計算に用いた半径 r は檀原 (1966) が水準測量の結果から求めた地殻の上下変動域の半径

Table 2. List of earthquakes and estimated crustal deformations at focal regions.

Date	Location	M	Crustal deformation ($\times 10^{-5}$)
June 17, 1973	Off Nemuro peninsula	7.4	4.0
May 26, 1983	W off N Tohoku (Nibetsu)	7.7	2.2 (Nibetsu)
May 26, 1983	W off N Tohoku (Oga)	7.7	0.4 (Oga)
Mar. 14, 1975	Aichi-Gifu border	5.3	* 10
Nov. 12, 1975	South coast of Aichi pref.	4.2	* 15
Nov. 15, 1976	Eastern Aichi pref.	3.8	*600
Mar. 4, 1980	South coast of Chubu	3.5	*100
June 29, 1980	East off Izu peninsula	6.7	* 2.5
June 21, 1982	South coast of Chubu	4.9	* 17
Aug. 8, 1983	Kanto-Chubu border	6.0	* 2.0
May 30, 1984	Northern Kinki	5.6	* 8.0

* Data observed at the site in and near the fractured zone.

$$\log r^3 = 1.53 M + 8.18$$

である。 M は地震のマグニチュードである。 Table 2 の上部の 3 例によると、地震の発生の前に震源域で生じると推定される地殻変動は $1-5 \times 10^{-5}$ 程度である。これらの前兆的な地殻変動の大きさは地震時の変動と同じくらいで、震源域での変化としては大きすぎる。資料として破砕帯近傍における観測データを用いると、計算結果はさらに大きくなる。したがって、異常変動の出現する原因は、震源での応力変化によるものではなく別のメカニズムによると考えるべきである。以下では、先に述べた東海スラブを例にして前兆現象の観測されるメカニズ

ムについて考察してみる。

東海スラブにはフィリピン海プレートの沈み込みに伴う広域の応力が作用している。スラブを水平方向の応力の作用を受けているブロックとみなし、その中で地震が発生する場合を考える。単純化してブロックの変形の状態を Fig. 7 で示すように A から E に分ける。このブロックには多くの断層とか破砕帯が存在するものとする。▽で示した地点が観測点で、近くに破砕帯があると

A; ブロックに作用している広域の応力が変化し、ブロックの変形が始まる。

Fig. 7. Diagram showing the deformation stages of the Tokai slab.

B; 断層とか破碎帯に応力の集中が始まり、応力の集中で生じたブロックの歪が、流動（破碎帯のすべり）や小破壊（微小地震）によって解放され始める。

C; 時間の経過とともに歪の解放と変形がすすみ、ブロックの安定化が始まるが、歪が解放できない場所が点在するようになる。

D; ブロック全体が安定化するのに呼応して特定の領域に応力が集中し、歪が極限まで蓄積し地震となる。

E; 震源域で余震等によって歪が解放されるとともにブロック全体で応力の再配分が進行する。

いままでに観測された異常変化の多くは、ブロックがCの状態にあり、震源域が形成される前後に出現したのではなかろうか。ブロックがこのような状態のときは震源域の位置には関係なく、特定の破碎帯の近傍では地殻変動が生じやすくなり近くに観測点があれば異常変化が観測されるであろう。ブロックがCの状態のときに生じた破碎帯近傍の異常な変化はすぐに消滅してしまうこともあろうし、ブロックがDの状態になるまで（すなわち、地震の発生まで）持続することもある。同じ地震に伴う地殻変動であっても観測地点の条件によってその現れ方が違い、先に示した山崎断層付近の地震に関連した地殻変動のように、異なった変化が観測されるのであろう。通常の観測点であってもその観測点がたまたま震源域の近くにあるときには MIURA *et al.* (1990) のように断層のプレスリップで説明できるような前兆的な変化が出現する。このように考えるといままでに観測された

地震前の異常な地殻変動をそれほど矛盾なく説明できる。

破碎帯等で異常が観測された場合、その異常は将来発生する地震の前兆ではなく、広域の応力に対してブロックが変形したために生じた現象であると考えべきである。ブロックがDの状態に移る頃にはブロック全体で歪の解放はおおむね終わっており、震源域にのみ歪が集中しその領域で地震が発生すると思われる。ブロックに作用する応力が小さい場合にはブロックの変形はBやCの状態で終わってしまうこともあろう。このようなときは微小地震あるいは小地震しか発生しないであろう。

Fig. 8 は三河地殻変動観測所で観測した地震前後のN26°W方向の伸縮変化である。東海スラブの中で発生した地震に伴う余効変化の場合は3方向の伸縮計のうちでN26°W方向の伸縮計の収縮が特徴に大きい。この方向は東海スラブの進行する方向とおおむね一致する。地震の発生の度にスラブ内での応力の再配分により、スラブ全体がわずかであるが沈降するのであろう。Table 3 は東海スラブの中で発生した地震に伴った strain-step と余効的な変動との比をとったものである。その大きさは10前後ではほぼ一定している。地震のマグニチュードが大きければ観測される strain-step は大きくなるが、それに対応してスラブの沈降する割合も大きくなると推測される。このモデルによればブロックがCの状態にあり、かつ、ブロックの中央付近に将来地震が発生する領域が生じるときには、地殻活動に関する種々の現象がその領域を取り囲むように発生し、ドーナツ現象が生じる。

Fig. 8. An example of the elastic after-effect observed with extensometer (NS component) in connection with the occurrence of nearby earthquake.

Table 3. The ratio of observed elastic after-effect to strain step.

Date	M	Elastic after-effect (10^{-8})	Strain step (10^{-8})	Ratio
Feb. 10, 1974	5.3	4.0	0.25	16
Mar. 15, 1975	5.3	7.5	0.25	30
Nov. 12, 1975	4.2	2.5	0.5	5.0
May 9, 1976	4.1	1.0	0.13	7.7
Apr. 30, 1977	4.2	2.0	0.1	20
Mar. 4, 1980	3.5	6.0	0.2	30
Aug. 18, 1981	5.0	8.0	1.3	6.3
Mar. 16, 1983	5.7	50	14	3.5

Fig. 9. Tilt variation in the direction of horizontal displacement near Makimine and the state of strain release caused by the crustal earthquake originated in the Hyuganada (after TANAKA, 1965).

ここでは、東海スラブという特定の領域での地震の発生と地殻変動との関係を論じたが、本稿で示した考え方は他の地域でも成り立つと思われる。田中(1965)は広域的な応力に着目し、西日本の各地で傾斜計による一連の異常変化と地震活動との関係を調べた。そして、観測された異常変動を3段階に分けその変化が出現するメカニズムについて論じている。Fig. 9は九州の楨峰における傾斜変動と日向灘の地震活動との関係を示したもの

である。Fig. 9より地震の発生と記録の変化とがよく対応していることが分かる。データが少ないこともあろうが、伸縮計や傾斜計で観測された一連の異常変化と、特定の地域における地震活動の関係を扱った論文は少ない。

§ 5. ま と め

地震予知研究計画の発足時には、広域的な応力変化は

測地測量で、時間的な変化は地殻変動連続観測で捕捉しようとの考えがあった。この考えには広域的な応力に対して地殻が均一な変形をするとの前提があったと思われる。しかし、我々が蓄積した資料から判断する限り、地殻の変形は不均一で断層もしくは破碎帯は広域の応力の影響を受けやすく、その近傍の観測点の方が前兆的な地殻変動を観測しやすい。このことは、地殻を均一な弾性体と考えるモデルでは前兆的变化に関する不十分な説明しかできないことを意味している。

本稿では、地殻の変形に際して流動や小破壊では変形できない領域が形成されるとき、その形成に呼応して破碎帯等で異常な変化が生じると推測した。このようなときには条件さえよければ、その領域から遠方の観測点であっても異常変化が観測できる。現在の知識では1箇所の観測点で異常な変化を観測したとしても、どの領域が地震を発生するまでに成長するか特定することは難しい。けれども、データが蓄積して複数の観測点で異常が観測されるようになれば、異常のパターンやそれが出現する時間などから地震が発生する場所をある程度しぼりこめるようになろう。詳しい解析をするためには、観測地点を増やしたり計器の開発を行って上質のデータを蓄積し我々の知見を深めるよりない。

本稿を書くにあたっては多くの方々の観測されたデータや論文を参考にさせていただいた。また、これらの方々と査読者から多くの貴重な助言をいただいた。この紙面を借りて厚くお礼申しあげる。

参考文献

- 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.
- 藤森邦夫・田部井隆雄・田中 豊, 1984, 1984年5月30日山崎断層地震前後の生野観測室における地殻変動, 地震学会講演予稿集, No. 2, 9.
- 笠原 稔, 1976, 1973年根室半島沖地震の前兆的地殻変動, 地震予知シンポジウム論文集(地震学会), 3-14.
- MIURA, S., S. NAKAO, T. SATO, K. TACHIBANA, M. MISHINA, H. ISHII and A. TAKAGI, 1990, Pre- and post-seismic crustal deformation associated with the 1983 Japan Sea earthquake, Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 5, **33**, 115-125.
- OHYA, F., 1988, Crustal movements related to the earthquake on March 18, 1987 in Hyuganada, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., **38**, 99-114.
- 小沢泉夫, 1978, 紀州鉾山における地殻変動の観測—伸縮計による観測—, 京大防災研究所年報, **21B**, 113-117.
- 佐藤春夫・立川真理子・大久保正, 1984, 山梨県東部の地震(1984年8月8日)に先行した異常な地殻傾斜変化, 地震 **2**, **37**, 197-205.
- 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.
- 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.
- 田中 豊, 1965, 地震に伴う異常の諸段階について, 京大防災研究所年報, **8**, 91-108.
- 山内常生, 1981, 降雨に対する地殻歪レスポンスのシミュレーション, 測地学会誌, **27**, 40-49.
- 山内常生, 1985, 地殻変動連続観測による地震予知, 測地学会誌, **31**, 59-72.
- YAMAUCHI, T., 1987, Anomalous strain response to rainfall in relation to earthquake occurrence in the Tokai area, Japan, J. Phys. Earth, **35**, 19-36.
- 山崎文人・大井田 徹, 1985, 中部地方におけるフィリッピン海プレート沈み込みの形状, 地震 **2**, **38**, 193-201.
- 柳沢道夫, 1980, 宇佐美臨時観測点における降水量と傾斜観測の関係, 測地学会誌, **26**, 187-199.
- WATANABE, K., 1991, Strain variation of the Yama-saki fault zone, southwest Japan, derived from extensometer observations, part 1 —On the long-term strain variations—, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., **41**, 29-52.