

## 鋸山地殻変動観測所において観測された異常地殻変動

柳澤 道夫・石井 紘・高橋 辰利

東京大学地震研究所

(1991年12月27日受理)

### *Abnormal Crustal Movements Observed at Nokogiriyama Crustal Movement Observatory*

Michio YANAGISAWA, Hiroshi ISHII and Tatsutoshi TAKAHASHI

Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

(Received December 27, 1991)

#### Abstract

An abnormal crustal movement for the first time in 30 years was observed at Nokogiriyama crustal movement observatory during the period from July 31 to August 12, 1990. Continuous observation instruments like extensometers, water-tube tiltmeters and an underground water level meter recorded an abnormal variation of a simple type. The maximum amplitude reached  $1.7\sim 3.4\times 10^{-6}$  of strain, 0.16~0.27 second of tilt and 1.7 meter drop of water level. The details of the phenomena are described though the cause of the abnormal crustal movements is not known yet.

#### 1. まえがき

鋸山地殻変動観測所(千葉県富津市金谷 3547)において1990年7月31日~8月12日頃にわたって、異常な地殻変動が観測された。この観測所は1959年1月より観測を開始し現在も観測を継続しているが、この時点までこのような大規模で異常な地殻変動を観測したことはなかった。

鋸山観測所の観測坑内の主設備は、読取型と連続記録型の水管傾斜計(長さ25m, E-WとN-Sの2成分)、伸縮計(長さ25m, E-W, N-SとNW-SEの3成分)であるが、そのすべてに異常が記録されている。そのほか、伸縮計には中間観測点が各成分ごとに12個付加されて、伸縮計3成分あわせて36個を数えることができ、すべての測定点で異常が観測されている。このほか観測坑内にはボアホール型歪計と歪ゲージ歪計もあるが、そのいずれにも異常が記録された。これらの歪ゲージをセンサとした歪計のデータに関しては別の機会に発表をしたいと考えている。しかし、観測坑内に設置された水晶温度計(分解能1/1000°C)、高感度白金抵抗温度計(分解能4/1000°C)と多数のサーミスタ温度変化計(分解能4/1000°C)には変化がまったく見られなかった。このことからこの期間に観測坑内の温度変化は生じなかったと思われる。

さらに、観測坑から西南西方向に約150m離れた位置にある地下水位計(圧力型とフ

ロート型)にも同様な異常記録が表れている。特徴的なことは観測坑内に置かれた各種の傾斜・歪計の異常変化より、水位の異常変化の開始時刻が数時間程度遅れていることである。

異常変化が最大時の変化量は傾斜・歪とも  $10^{-6}$  のオーダーである。また水位の変化は最大時で、1.7m 程度低下した後、変化前から 50cm 低下した状態までしか回復していない。降雨は7月中旬と8月10日にややまとまった降雨があったのみである。このため当時の房総半島一帯は異常な渇水に悩まされていた。

本論文はこの異常な地殻変動の観測記録データの詳細な報告を行ないたいと思う。

## 2. 観測所の位置と観測設備

鋸山観測所は東京から南方へ約 55 km、千葉県房総半島の西海岸にある (Fig. 1)。この観測所の位置・周辺の地質と、設置されている主な観測設備などについてはすでに詳細な発表が行なわれている (柳澤, 1983, 1990a)。Fig. 1 に示されているように鋸山観測所は東京湾に続く浦賀水道をはさんで、対岸の三浦半島にある油壺地殻変動観測所と 20 km 離れており、両観測所は地殻変動の比較研究のために重要な役割を果たしており密接に連携している。

鋸山観測所は鋸山 (標高 329 m) の北側山麓にあり、観測坑から西方約 900 m に南北に伸びる海岸線がある。観測所周辺の地形図を Fig. 2 に示す。図中で観測坑平面を点線で表わしてあるが、坑はほぼ東西に発達した尾根の南斜面に掘削されている。この坑の東西成分に沿って、すぐ南側を谷川が流れている。観測坑から西南西に距離約 150 m の場所 (Fig. 2 中の×印の点) に観測所の庁舎があり、ここに地下水位変化を測定するため深さ 64 m の深井戸があり、平均的な水面は地表面から 5 m の位置にある。この井戸はかつて深井戸用の地震計を設置するために作られたもので (高野・萩原, 1966)、これを利用している。

鋸山観測所の観測坑内の観測設備は Fig. 3 に示すようになっている。その主設備は水

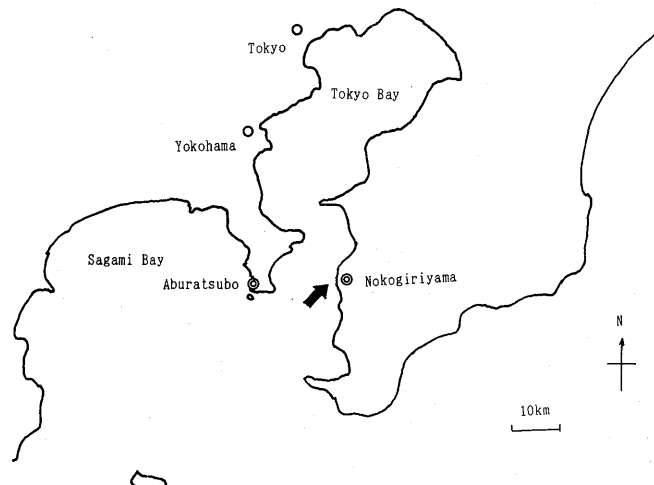


Fig. 1. Location map of Nokogiriyama Crustal Movement Observatory.

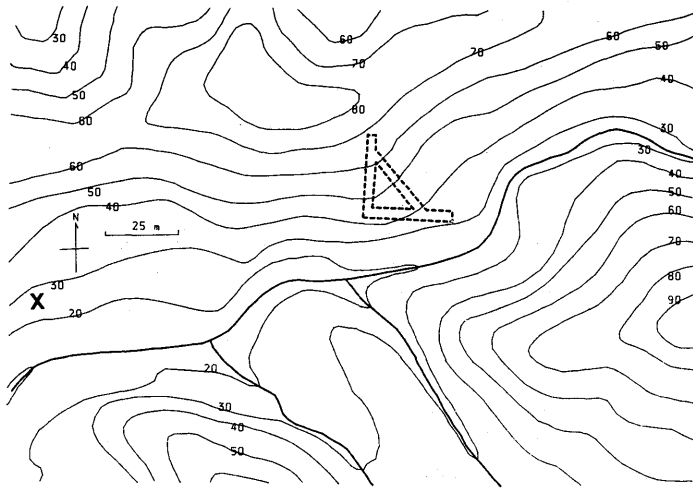


Fig. 2. Location and plan of the observation vault of Nokogiriyama Crustal Movement Observatory with contour line of topography (in meters). The mark X indicates the location of underground water level meter.

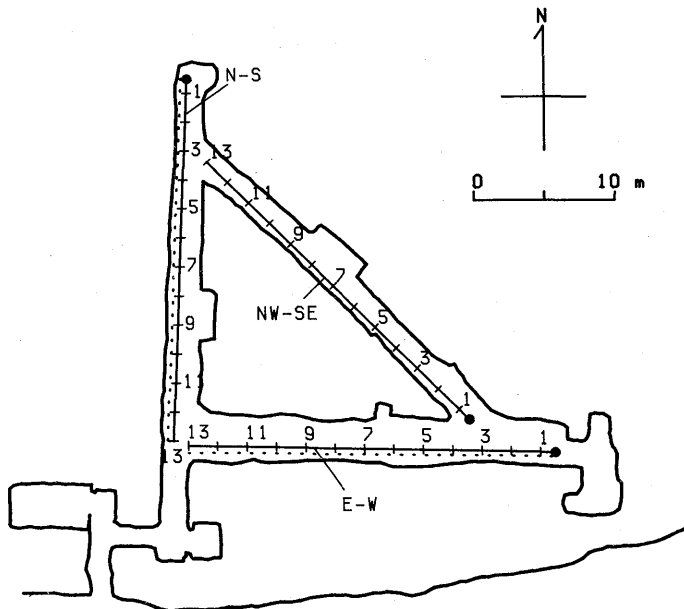


Fig. 3. Plan of observation vault of Nokogiriyama Crustal Movement Observatory. Solid and broken lines denote extensometers and water-tube tiltmeters, respectively.

管傾斜計 (E-W, N-S の 2 成分それぞれ 25 m, 図中においては点線で表わしてある) で、読取型と連続記録型の両方が同一台石上に併置してある。さらに、同じく主観測設備として溶融石英管伸縮計 (E-W, N-S, NW-SE の 3 成分それぞれ 25 m, 図中においては実線) と、それに各成分ごとに中間観測点を 12 個ずつ計 36 個を増設してある。このよう

に主観測設備の観測値は、水管傾斜計が読取型と連続記録型で各2組、伸縮計について1成分が測定端と中間観測点(12個)で合計は各13組で計39組があることになる。

このほかの観測坑内設備として、歪ゲージ歪計が多数設置してある(柳澤, 1987, 1990a)。このほかに、石井ほか(1985)による小型ボアホール歪計と、柳澤(1990b)による歪ゲージを用いたボアホール用3成分歪計も埋設されていた。これらのすべてに、今回の異常な地殻変動が記録されている。また、坑内には坑内温度変化測定のために、水晶温度計(分解能  $1/1000^{\circ}\text{C}$ 、安定度  $1/1000^{\circ}\text{C}/\text{Year}$  以上)が2台、特別仕様の高感度白金抵抗温度計(分解能  $4/1000^{\circ}\text{C}$ 、安定度  $1/1000^{\circ}\text{C}/\text{Year}$  以上)が1台とサーミスタ温度変化計(分解能  $4/1000^{\circ}\text{C}$ 、安定度  $4/1000^{\circ}\text{C}/\text{Year}$  以上)が15個設置してある。

地下水位観測用の深井戸には、細井戸用フロート型地下水位計(分解能  $\pm 0.5\text{ cm}$ )と圧力型地下水計(分解能  $1\text{ mm}$ )が設置してある。このほかに白金抵抗型の地下水温計(分解能,  $0.1^{\circ}\text{C}$ )も付属している。観測所庁舎内には大気圧測定のためのペロース式気圧センサ、庁舎の近くに転倒弁式の降雨計( $0.5\text{ mm}/\text{Count}$ )が設置してある。

このほかの地球物理的または気象関係の測定器がかなり設置されているが、これらについては本報告と関係がないので省略する。

### 3. 地殻変動と地下水位の観測

1990年7月8日~8月25日間の観測坑内の伸縮計(測定端のみ)・水管傾斜計(読取, 連続記録)と坑内温度(白金抵抗型), 観測所庁舎にある大気圧・降雨計と地下水位(フロート型)の観測記録をまとめて Fig. 4 に示す。この測定値は毎時0と30分にカセット・テープ・レコーダに記録されているものである。図の上部よりそれぞれ伸縮計のE-W, N-SとNW-SE成分, 水管傾斜計のE-W, N-S成分のそれぞれ読取型と連続記録型である。さらに、観測坑内の高感度白金抵抗温度計, 観測所庁舎にあるペロース式気圧センサ, 降雨計とフロート型地下水位計の順になっている。

上記の期間内に比較的量の多いまとまった降雨は7月12~13日に合計58mmと8月8~9日に合計65mmの2回が数えられるのみである。この1990年は梅雨期にも降雨が極端に少なく、房総半島一帯の市町村は異常渇水で困窮していた。伸縮計の記録をみると、降雨の影響はE-W成分に大きく表れていることが分かる。この影響を除いて3つの成分共に7月31日頃より変化が始まり、8月12日頃にその変化が一応終了しているようである。その最大の変化量はE-W成分が  $3.4 \times 10^{-6}$  Strain の伸張, N-S成分が  $1.7 \times 10^{-6}$  Strain の圧縮, NW-SE成分が  $2.7 \times 10^{-6}$  Strain の圧縮となっている。この観測期間中, NW-SE成分を除いて, E-WとN-S成分には変化後の回復が十分ではなく, まだ変形が残っているようである。

水管傾斜計の読取式の観測は平常は週に1回であるが、異常変動に気づいてからはできるだけ観測の回数を増加するような努力をした。読取型と連続記録型ともに同一台石上に設置してあるため、その変化量は同じである。E-W成分の最大の変化量は  $0.27''$  の西下がり, N-S成分のそれは  $0.16''$  の南下がりであり、両者ともにまだ変化が残っているようである。この期間の観測坑内の温度変化はほとんど認められないが、7月8~10日頃の変化は6~7日にかけて観測坑内で小工事を行なったための影響である。さらに、8月9日の降雨に際して  $0.02^{\circ}\text{C}$  程度の影響があったことが分かる。

地下水位の変化の期間と形状は、地殻変動の各成分の変化とかなりよく似ていること

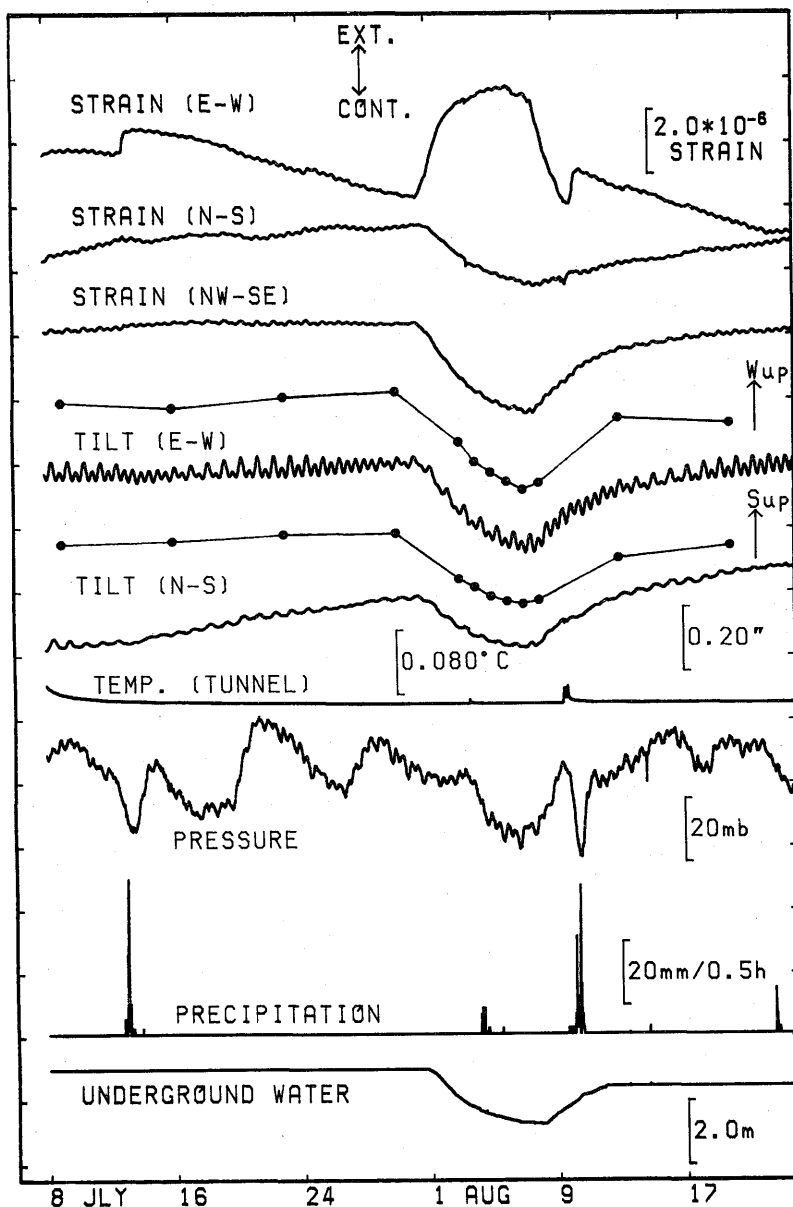


Fig. 4. Records of abnormal crustal movements observed for the period from July 31 to August 12, 1990.

がこの図より読み取ることができる。その水位の変化量は1.7mの水位低下で、地殻変動の各成分と同じように完全に元の水位まで回復してないことが分かる。地殻変動の各成分と地下水位のそれぞれの、変化開始時刻と、最大変化の量と時刻の詳細については後に述べることにする。

#### 4. 伸縮計の中間観測点における観測

鋸山観測所の伸縮計は各成分の中間観測点がそれぞれ 12 個あることを上述した。これらの詳細は柳澤 (1990a) に述べた、その観測点の配置をみるため Fig. 3 を再びみることとする。図中に示した各成分毎の数字はセンサの番号であり、小さな○は固定端の位置を表わしている。したがって、それぞれの測定値は固定端とその中間観測点との間の変位を測定していることになる。特に、この中の⑬は測定端で、Fig. 4 の中に示した伸縮計の値と同じものである。

Fig. 5 に示した観測結果は Fig. 4 と同一期間のものを、2 分間隔でパーソナル・コンピュータ PC-9801XA のハード・ディスクに記録したものである。この Fig. 5 は、伸縮計の各成分の観測値を並べて、各点の観測値を固定点からの距離で除した歪値として示した。この図は異常変動の観測坑内における分布を表わすものと考えられる。この図と同様な形で大気圧変化による観測坑内歪変化についてはすでに報告した (柳澤, 1990a の Fig. 7.1 参照)。比較に便利のように今回もこれと同じ処理をして示している。

Fig. 5 の E-W 成分をみると、③、④と⑬の付近の変動が大きい、これは大気圧の変化による影響とは少し異なった変化である。なお、⑬の観測記録が示されていない部分は振幅が記録のレンジを超えてしまったための欠測である。Fig. 5 の N-S 成分については、成分全体に歪変化が小さいが、⑫と⑬付近が割に大きな歪変化をしているようである。このことは E-W 成分の⑬と、N-S 成分の⑫と⑬の位置は近いのでこの部分において歪変化が大きいことが分かる。Fig. 5 の NW-SE 成分は、③と④付近の変動が大きいことが分かる。これは E-W 成分の③と④の変動が大きいことと関係があると思われる。また、②のセンサは当時故障を起こしていたための欠測である。

なお各成分とも①の観測点は固定端からの距離が 1 m と極めて短いため S/N 比が良くないので割愛した。

#### 5. 観測結果に対する検討

これらの観測記録から、各観測設備と成分別に異常変化の開始時期、最大変化の量と時刻を Table 1 にまとめる。異常変化の開始時刻を決めるときに、地球潮汐が重なっているために、その分離が困難であった。地下水位の場合は大気圧変化も加わるため時刻の決定にさらに困難さを増した。このことから今回は±30分程度の誤差を含むと思われる。傾斜・伸縮計の異常変動が開始されたのは 7 月 31 日 10:00~12:30 頃であるが、地下水位の変化は同日の 18:00~18:30 と 8 時間も遅れている。異常変化の最大量と時刻は成分によって異なっていることが分かる。

最大傾斜の方向と大きさと、最大歪の方向と大きさを調べることにする。このために 7 月 29 日の 0 時を基準にして、24 時間間隔に調べることにして Fig. 6 に示す。最大傾斜は 8 月 6~7 日の間であるが、最大歪は 8 月 5~6 日の間に表れている。これに対して、地下水位変化は 8 月 8 日である。このような差がある原因については今のところよく分からない。

Fig. 6 をみるとこの異常変化が、傾斜で 8 月 12~13 日、歪で 8 月 15 日頃にその変化の方向が変化していることの原因についても調べる必要があるようである。これらの異常変化の直接の原因がかなりの範囲について、例えば観測所を中心として 0.5~1 km 程度の、地下水位の異常に起因するのではないかと考えた。その理由は、このような異常

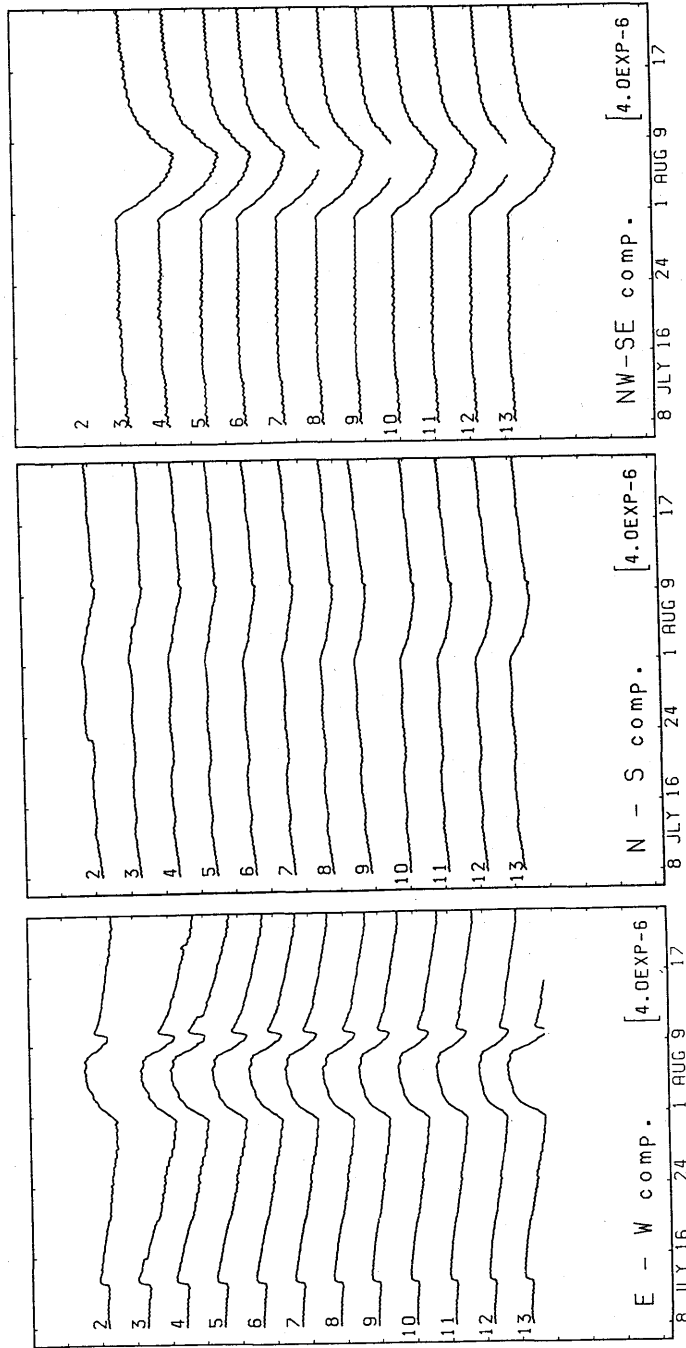


Fig. 5. Records of multi-sensored extensometers. Numerals indicate the sensor numbers.

Table 1. The start times and the maximum values of the event for various instruments.

Instrument	Component	Event Start time (date, h, m)	Maximum variation	
			Quantity	Time (date, h, m)
Extensometer	E-W	July 31, 11~11.30	$3.44 \times 10^{-6}$ (Strain)	Aug. 6, 3~3.30
	N-S	July 31, 12.30~13	1.72	Aug. 6, 5~5.30
	NW-SE	July 31, 10~10.30	2.68	Aug. 6, 5~5.30
Tiltmeter	E-W	July 31, 10.30~11	0.267 (Strain)	Aug. 6, 3.30~4
	N-S	July 31, 12~12.30	0.158	Aug. 6, 3~3.30
Under-water Level (float)		July 31, 18~18.30	1.67 (m)	Aug. 6, 12~12.30

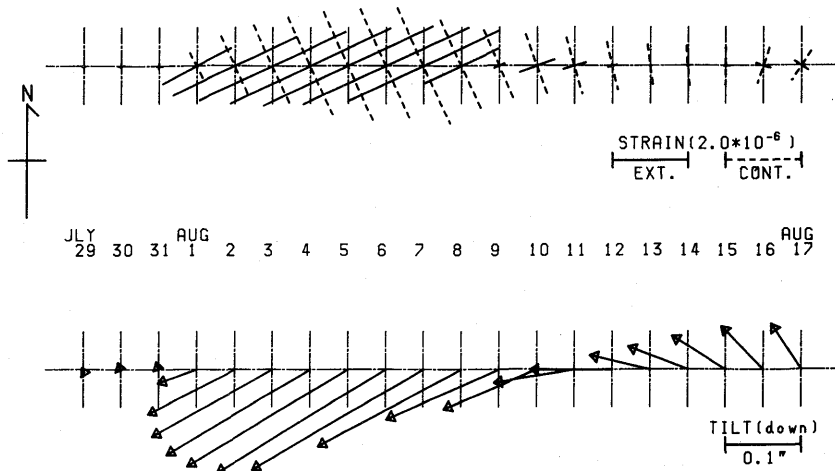


Fig. 6. Daily variation of maximum tilt downward vector and that of principal strain value.

変化は油壺観測所にまったく表れていないこと。それだけでなく鋸山観測所の周囲の約10km 離れている防災科学技術研究所の北岩井観測点や、そのほかの機関の地殻変動観測設備について調査してもこのような異常変動がみられないことである。したがって、鋸山観測所において観測された異常な変動は鋸山観測所周辺のごく限られた地域のみにおいて発生した現象であると思われる。

これらのことから発生時期が大渇水期の最中であり、観測所の周囲で地下水の汲み上げをしていないかと疑った。まず、富津市の水道などの関係者に問い合わせたが、そのような事実はないとのことであった。さらに観測所を中心として、10km の範囲について実地調査をしたが、そのような事実はまったく見つからなかった。

この異常変動の直接の原因は、Fig. 5 を見てもわかるように、大気圧変化や降雨の影響ではないようである。地下水の移動との相関が高く、それが原因である可能性が最も大きいようである。この問題はこれから解決してゆかなければならないものと考えられる。



この一つの解決として、異常変動の観測値の時間変化について以下のことを指摘したい。観測された変動をみると、特に水位変化や歪の N-E 成分に表れた単純な形が特徴的である。この変化の形を  $U(R/C)$  とすると

$$\begin{aligned} U(R/C) &= 0; & t \leq R/C \\ U(R/C) &= \cosh^{-1} \frac{C}{R} t; & R/C < t \leq R/C + a \\ U(R/C) &= \cosh^{-1} \frac{C}{R} t - \cosh^{-1} \frac{C}{R} (t-a); & R/C + a < t. \end{aligned}$$

として表わされる。これは石井・山崎 (1973) が地震波の理論波形を計算するのに震源の時間変化として用いた関数である。ここで、 $C = \sqrt{\mu/\rho}$  で S 波の速度、 $\mu$  は剛性率、 $\rho$  は密度、 $R$  は震源からの距離、 $t$  は時間、 $a$  はパルス幅である。また降雨による歪および傾斜変化の計算手法にも類似の時間変化がみられる。石井ほか (1973) によると雨水が多孔性媒質中を流れるときに生ずる面積歪の計算式として

$$\Delta(z, t) = -(2/\sqrt{\pi}) \cdot A \cdot \int_{z/\sqrt{Bt}}^{\infty} f(t-z^2/C) e^{-D} \cdot dD$$

を導いている。ここで  $f(t)$  が降雨の時間変化で、 $\Delta(z, t)$  は時刻  $t$  に深さ  $z$  の位置における歪変化である。 $A, B, C$  と  $D$  は多孔性媒質の媒質定数である。矩形型のパルスが入力されると、ここで観測されたと同じ形の変化が得られることは興味深いことである。同様に降雨による傾斜変化の場合を柳澤 (1980) が報告しているが、この手法も参考になると思われる。

今回の異常変動のメカニズムについては稿を改めて発表したいと考えている。

## 6. おわりに

鋸山観測所において観測所開設以来最大の異常地殻変動を観測した。異常変動は 1990 年 7 月 31 日～8 月 12 日頃までの約半月にわたり、観測所に設置してある水管傾斜計 (読取型・連続記録型)・溶融石英管伸縮計 (測定端・中間観測点) と歪ゲージ歪計・ボアホール型歪計などすべての地殻変動関係の計測器において観測された。

異常変動の開始時刻についてはほぼ 7 月 31 日 10～12 時頃である。観測坑内に置かれた測定器により観測された変化と比較して、地下水位の変化が 8 時間程度遅れている。

異常変動の最大の値と時刻は;

- 1) 伸縮計が E-W, N-S と NW-SE 成分がそれぞれ 3.44, 1.72,  $2.68 \times 10^{-6}$  Strain, 8 月 6 日の 3～5 時頃であり,
- 2) 傾斜計が E-W と N-S 成分が  $0.267''$  と  $0.158''$  で、同日 3～4 時頃であり,
- 3) 地下水位が 1.67 m の低下で同日の 12 時頃であった。

当時は房総半島一帯の市町村は異常湧水が続いており、観測所の周囲 10 km の範囲において地下水の汲み上げなどを調査したが、そのような事実はなかった。

## 謝 辞

鋸山観測所の観測に協力していただいている東京大学地震研究所元講師島津 孝氏には、観測の強化と周辺の探索に協力していただいた、感謝の意を表したい。

## 参 考 文 献

- 石井 紘・山崎謙介, 1973, 傾斜層内におかれた SH 線源による反射波と先駆波の厳密解, 地震 2, 26, 142-159.
- 石井 紘・佐藤俊也・立花憲司, 1973, 秋田地殻変動観測所における地殻変動観測 (2) —降雨による地殻のひずみについて—, 測地学会誌, 19, 135-144.
- 石井 紘・柳澤道夫・鈴木喜吉・平田安廣・松本滋夫・加藤照之, 1985, 小型ボアホール歪計の試作と観測 (1), 地震学会講演予稿集, 104.
- 高野 敬・萩原尊禮, 1966, 深井戸地震計による観測 (第一報), 地震研究所彙報, 44, 1135-1148.
- 柳澤道夫, 1980, 宇佐美において観測された 1980 年伊豆半島東方沖地震前後の傾斜変化, 地震研究所彙報, 55, 1083-1089.
- 柳澤道夫, 1983, 鋸山地殻変動観測所とその周辺における観測データ目録 (1959~1981 年), 地震研究所彙報, 58, 243-264.
- 柳澤道夫, 1987, 歪ゲージによる地殻歪の測定 (III) —観測結果と伸縮計との比較—, 測地学会誌, 33, 245-256.
- 柳澤道夫, 1990a, 伸縮計および歪ゲージによる地殻歪の研究 —多測定点石英管伸縮計と歪ゲージ歪計の開発および鋸山地殻変動観測所における観測—, 地震研究所彙報, 65, 161-276.
- 柳澤道夫, 1990b, 歪ゲージを用いたボアホール用 3 成分歪計, 測地学会講演予稿集, 140-141.

## 要 旨

鋸山地殻変動観測所において地殻変動の観測が開始されてより, 30 年余が経過した。1990 年 7 月 31 日より 8 月 12 日にかけて大規模な異常地殻変動を, 伸縮計, 水管傾斜計と地下水位計によって観測した。それぞれの最大振幅は,  $1.7\sim 3.4\times 10^{-6}$  strain,  $0.16\sim 0.27''$  と 1.7 m の水位低下である。また水位変化は歪あるいは傾斜変化より約 8 時間遅れて開始した。これらの詳細な観測結果について報告する。