

跡津川断層付近におけるボア・ホール型 傾斜計による観測 (1)

加藤 正明・土居 光・和田 安男
三雲 健・田中 寅夫・津嶋 吉男
小泉 誠

OBSERVATION OF GROUND TILTS NEAR THE ATOTSUGAWA FAULT WITH BOREHOLE TILTMETERS (1)

By *Masaaki KATO, Hikaru DOI, Yasuo WADA, Takeshi MIKUMO,
Torao TANAKA, Yoshio TSUSHIMA and Makoto KOIZUMI*

Synopsis

In order to monitor possible crustal movements directly related to the Atotsugawa fault, one of the first-class active geological faults in Japan, an observation with a biaxial borehole tiltmeter has started since 1978 in the Amo area located at the southwestern end of the Atotsugawa fault. The tiltmeter was set at a borehole with a depth of 3 m.

A tilt step preceded by an anomalous gradual tilt was observed at the time of a local earthquake ($M=3.6$, $d=7$ km). They might be interpreted as preseismic creep and coseismic tilt step, respectively. However, a sudden rainfall just before the event might have caused the apparent preseismic phenomenon. The observed tilt step does not agree with the tilt change theoretically calculated from the fault model.

Another tiltmeter of the same type has also been installed in the observation vault of the Kamitakara Crustal Movement Observatory. The result shows that the instrumental drift of the tiltmeter itself is small enough to monitor crustal movements under favorable conditions, but its resolution limit is not sufficient for precise earth tidal observations.

1. ま え が き

最近のいくつかの理論的研究は、ある空間的範囲の地殻の弾性率がダイラタンシー（非弾性的体積増加）によって相当程度変化すれば、地震波速度に変化を生ずると同時に、従来はある一定期間でほとんど一定と考えられていた地球潮汐歪・傾斜振幅に観測可能な変化を生ずることを示唆している^{1),2)}。すでに、1969年岐阜県中部地震 ($M=6.6$) に関連して、地球潮汐歪³⁾および地震波観測結果⁴⁾の解析が行なわれており、今後の研究に1つの見通しが得られている。

しかしながら、これらの解析はごく少数の観測点に対するもののみであって、この方法の確立・研究の進展のためには多点での比較観測が必要不可欠である。また最近の地震発生機構の研究は、内陸部の多くの地震が既存の活断層の運動によって起こることを示している。従って、将来地震発生が予想される活断層付近でのこれらの同時観測は、地震予知に関する1つの有力な手段と考えられる。

上宝地殻変動観測所の北西約15kmには、平均走向N60°E延長70kmにおよぶ第一級の活断層といわれる跡津川断層が走っており、この周辺ですでに微小地震観測⁵⁾と光波測量⁶⁾による断層変位の測定が行なわれている。今回新たに断層運動に直接関係する地殻変動を連続的に監視することを目的として、断層南西端の天生 (Fig. 2 参照) において1978年6月よりボア・ホール傾斜計による観測を開始した。

また比較のため、上宝観測所・蔵柱観測坑道内でも1978年3月より同様の観測を開始した。

2. 計器の概要

観測に使用しているボア・ホール傾斜計は、米固キネメトリクス社製 (TM-1B型) で、直交2軸方向の傾斜を同時に電気出力として取り出せるようになっている。

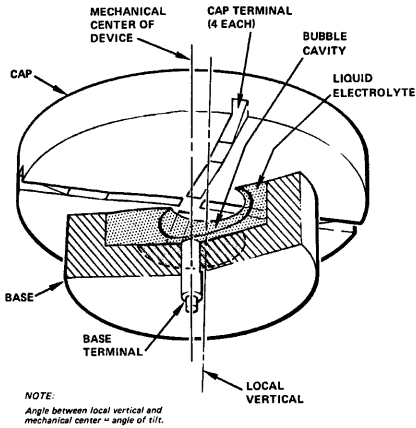


Fig. 1. Sensor assembly of a biaxial borehole tiltmeter (TM-1B, KINEMETRICS).

センサー部の原理は、水準器に使用されている泡の原理と同じで、わずかな傾斜変化によって生じる泡の変位を利用している。センサー部 (Fig. 1 参照) には導電液体が封入されており、泡がキャップ内の4個の電極に接するようになっている。キャップ内の相対している2個の電極はマッチングがとられたペアーになっている抵抗を介して結ばれ、ブリッジ回路を構成している。泡が変位すると電極と泡との接触面積がそれぞれの電極に関して変化し抵抗値が変化するので、ブリッジ回路に不平衡を生じ、傾斜角に対してリニアな特性を持った電気出力を生ずる。センサーは外径5cm長さ107cmのステンレス・ケースに収められており重量は9kgである。メーカーの仕様によれば、分解能は0.008 μ rad、1カ月当りのドリフトは0.5 μ rad、感度は40mV/(μ rad)、最大出力 \pm 7Vとなっており、エレクトロニクス・モジュールに

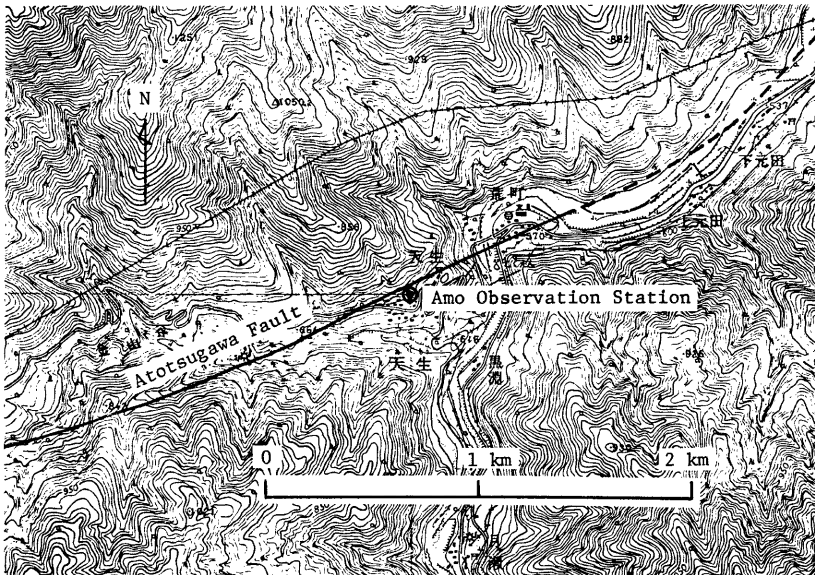


Fig. 2. Topographic map around the Amo observation station (36°16'05"N, 137°01'26"E).

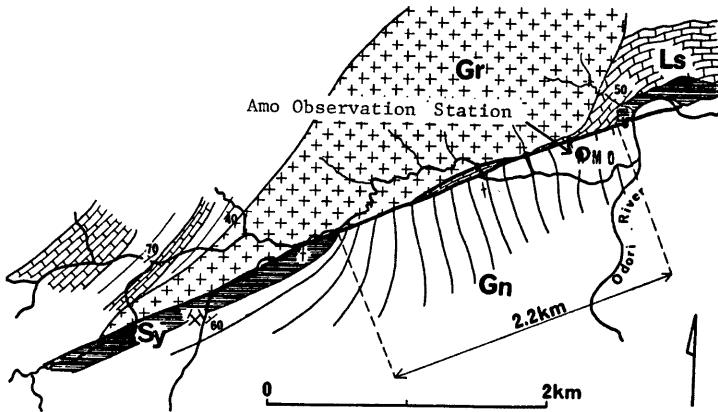


Fig. 4. Geologic map of the Amo area. The distribution of syenite-limestone complex suggests about 2km right-lateral displacement along the Atotsugawa fault.

Gn: gneiss, mainly hornblende-gneiss, Gr: granite, Ls: crystalline limestone, Sy: crystalline limestone and "syenitic rocks", including diopside-bearing mica syenite, partly pegmatitic, and biotite-muscovite diorite. All belong to the Hida metamorphics. Solid circles on the fault trace indicate localities of outcrops of fault.

Fig. 3. Geological map of the Amo area (after T. Matsuda, 1966).

は遮断周波数 0.008Hz と 1.6Hz のローパスフィルターが内蔵されている。なお、この傾斜計は地震計としての使用も可能になっている。

3. 計器の設置

天生では断層の南側数10mの河岸礫層に観測点を設定した。観測点付近の地形図を Fig. 2 に、地質図を Fig. 3 に示す。Fig. 4 に示すように地表より深さ 2 m、断面 1.5m × 1.5m のコンクリートの部屋を作り、底面よりさらに 2 m のボーリングを行ない、内径 15cm のエタニット石綿パイプでケーシングを行なっている。Fig. 5 に計器の設置断面図を示す。センサーは外径 8cm 肉厚 6mm のステンレスパイプの下部に固定され孔底に下ろされる。パイプの底面はピボット軸受構造になっており、孔底に

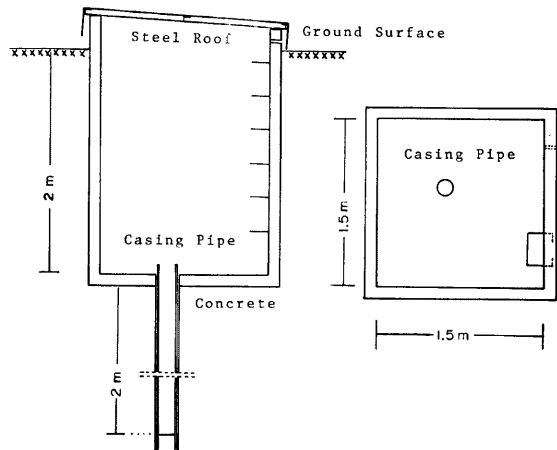


Fig. 4. Side and plan views of the observation room at Amo.

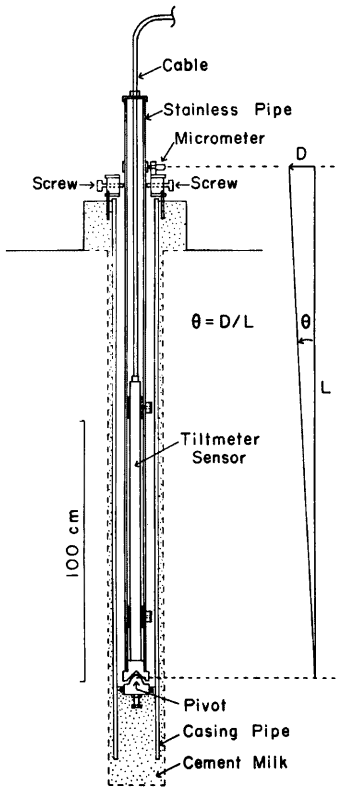


Fig. 5. Section of borehole and casing of the tiltmeter.

埋め込まれた先端が球状のステンレス製突起と密着して回転支点を形成する。上部の部屋の床面には4本のスクリーを持つ固定装置が設置されており、直交2方向に任意の傾斜を与えパイプを固定できるようにしてある。さらに、固定装置上部に検定装置が取付可能になっており、マイクロメータとそれに直交するガイドレールを使用して、直交2方向の感度検定を随時行なえるようにしてある。ステンレスパイプをマイクロメータで変位させることにより傾斜 $\theta = D/L$ を与えることができる (Fig. 5参照)。

Etaニット石綿パイプ内に温度センサー μ pc-616A (日本電気製) を吊り下げ温度計測もあわせて行なっている。信号はケーブルにて約100m離れた民家へ送られ、0~10 mV 打点記録計に記録されている。

上宝観測所・蔵柱観測坑道では、坑口より33m入った地点で床面より直接2mのボーリングを行ない、天生と同じ方法で傾斜計を設置した。

4. 上宝における観測結果と計器の感度検定

傾斜計を設置した場所は観測坑道の入口より33m入っており、気象擾乱を受けにくいという点では天生より格段に優れているので、感度を天生の10倍 ($4 \text{ mV}/(\mu\text{rad})$) に設定し、1978年3月19日より観測を開始した。Fig. 6 に落雷のため観測を中断した直前の6月20日までの観測結果を示す。

観測開始後、坑道に直交する成分にはノイズが多く現れたので、3月30日に計器設置方向を90°回転したが、やはり同じ方向にノイズが多く、坑道方向のノイズは小さいことが明らかになった。このことから、ノイズの現れ方の方向による違いは計器あるいは設置方法によるものではなく、実際の地面の短周期傾動によるものであると考えられる。

Fig. 7 に4月6日と7日の記録を示す。ノイズならびに地球潮汐の振幅とも、坑道に直交する成分の方が大きく記録されている。Fig. 6 で両成分ともにステップが現れているところは入坑の影響によるものである。(これ以外に NW 成分にステップが多いのは電気回路の接触不良によるものである。)

Fig. 6 には降雨および湧水量もあわせて記入してあるが、傾斜変化は湧水量とよく対応している。6月22日には落雷があり、両成分とも大きくステップしノイズレベルが極度に増大したので観測を中断した。計器の設置方向を変えた3月30日から6月20日までの坑道方向の傾斜変化は $0.5 \mu\text{rad}$ 南西下りで非常に安定しているが、坑道に直交する方向では $4 \mu\text{rad}$ 南東下りのやや大きな傾斜変化が観測されている。

この後、検定装置を用いて感度検定を行なったが、Fig. 8 にその結果を示す。X(Y) 方向に傾斜を与えた時、Y(X) 成分の出力電圧は変化しないことが望ましいが、Fig. 8 に見られるように、約25%のクロストークが現れており、落雷のため計器に異常が生じたのかもしれない。そこでセンサーを地上に引上げ、差動トランスを利用した検定台⁹⁾を用いてさらに詳細な感度検定を行なってみた。その結果、メーカー指定の方向から15°回転させてセンサーを設置するとクロストークがほとんどなくなることが明らかになった。この時の感度曲線と、メーカーの検定表の値から求めた感度曲線を合わせて Fig. 9 に示したが極めてよく一致して

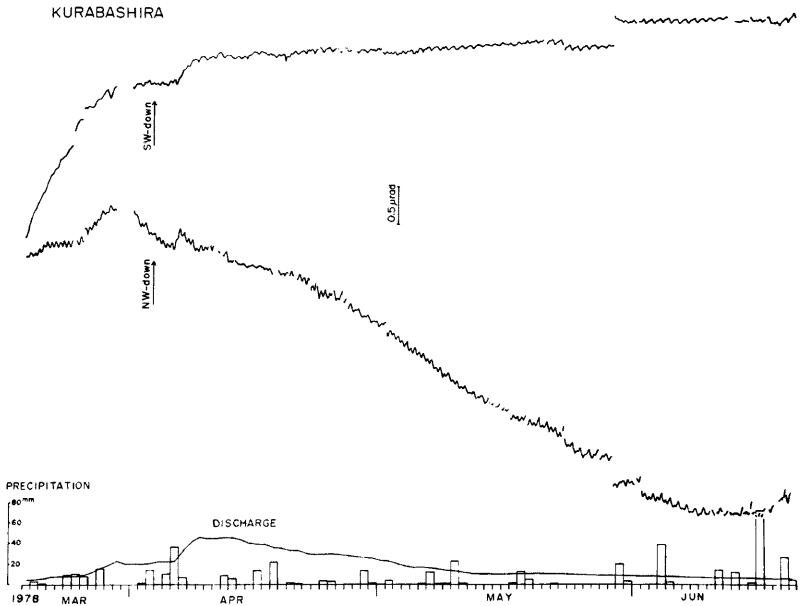


Fig. 6. Ground tilts observed at the Kurabashira station, with the amount of precipitations and water discharge.

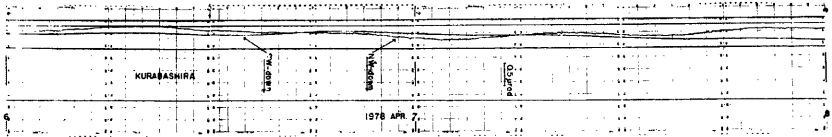


Fig. 7. Tilt record at the Kurabashira station.

Biaxial Borehole Tiltmeter System Serial No.296

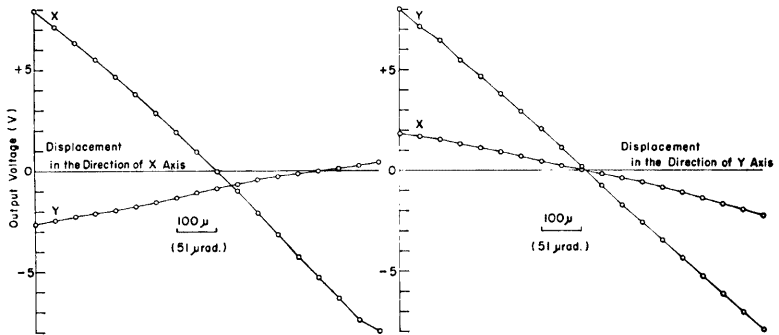


Fig. 8. Output voltage versus tilt (D/L). The displacement was give at the top of the casing pipe using a micrometer and sliding device. A cross-talk between X and Y appears.

Biaxial Borehole Tiltmeter System Serial No.296

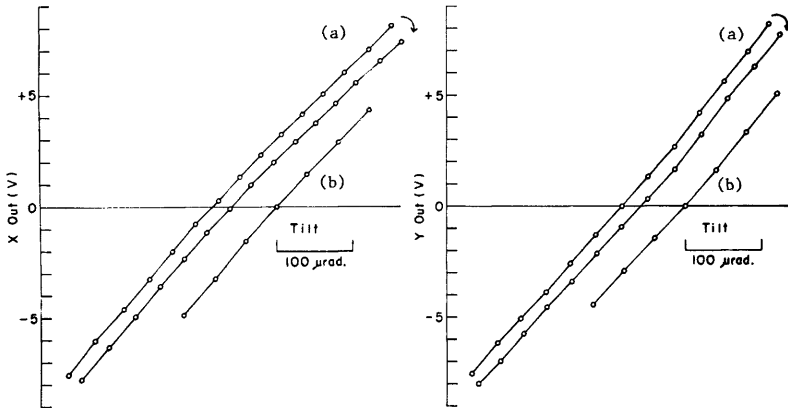


Fig. 9. Output voltage versus tilt.

Curve (a) is the result from forward- and backward-tilting experiment. The tiltmeter was tilted using a calibration table specially assembled for this experiment. Curve (b) is from data given by the manufacturer.

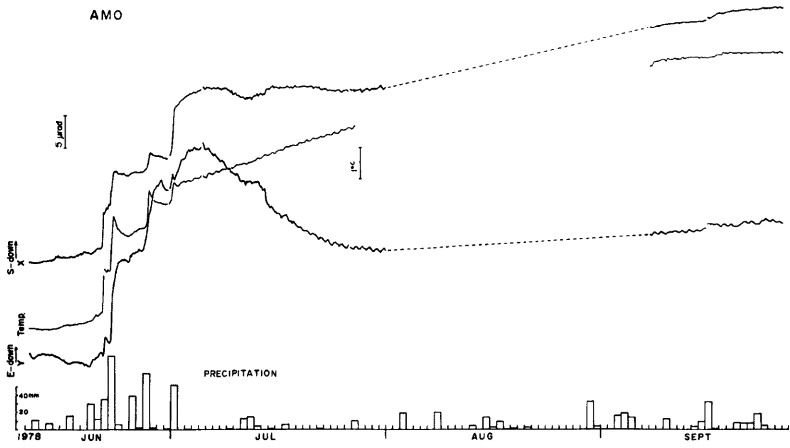
この後、上の傾斜計を蔵柱坑道のケーシングパイプの中に設置し観測を再開し、傾斜計から 80cm 離れてフロートによる水位観測を開始した。この後もかなり大きいノイズが記録されたので、1979年4月にエレクトロニクス・モジュールを交換し、以後はほぼ順調に観測を継続している。今後、記録を蓄積し、同じ坑道内に設置されている水平振子ならびに水管傾斜計の記録と比較してみる予定である。

5. 天生における観測結果

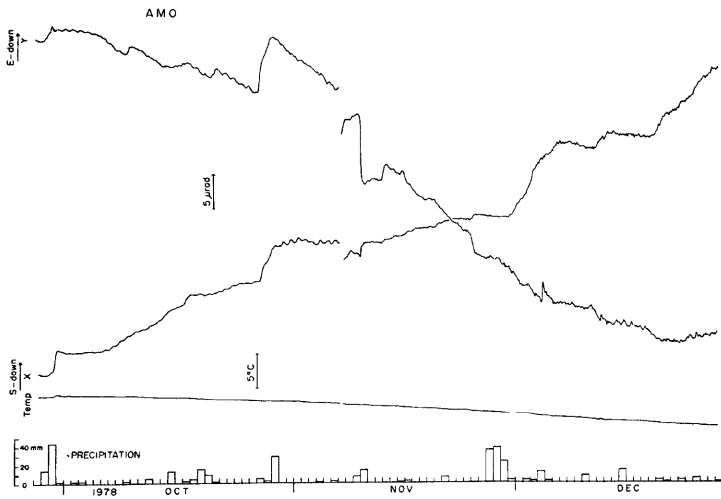
1978年6月9日に検定装置を用いて感度検定を行ない、メーカーの検定表にのっている値とよく一致することを確認し感度を $0.4 \text{ mV}/(\mu\text{rad})$ に設定し観測を開始した。12月28日までの観測結果を Fig. 10 に示す。これら図中の雨量のデータは、観測室より 2.5km 南方の下小島ダムで得られたものを、関西電力の御厚意により借用させていただいた。Fig. 10(a)においては8月1日から9月7日まで欠測があるが、これは信号ケーブルを切断されたことによるものである。その後11月7日に信号ケーブルを従来の塩化ビニールシールドケーブルから鋼帯外装ケーブル CPEV-DLTZE (大日本電線製) に交換し、観測を続行している。その時観測室に入った影響がステップとして記録されている。

Fig. 10 に見られるように、傾斜に及ぼす降雨の影響はかなり大きく、その現れ方も一様ではないが、50 mm の降雨に対して約 $1''$ 程度の影響が現れている。これはセンサーが地表下 3 ~ 4 m の浅い所に設置されているため、観測点のごく近傍での降雨が傾斜変化を誘起していると考えられる。梅雨期には、降雨に伴って気温がかなり変動しているように見えるが、この期間は温度センサー自体に問題があったので、そのための影響が一部含まれている恐れがある。気温日変化の複振幅は約 0.1°C でこれは地表での値のほぼ 1/100 に相当する。年変化の複振幅は約 11°C で地表での値の半分以下に減少しており、位相が約 2 カ月遅れているように見える。これらの値は、地表での周期的温度変化の地下への伝導のしかたを熱伝導方程式を用いて計算した結果⁹⁾とよく調和している。

傾斜の日変化複振幅は約 $0.1''$ で、佐藤・吉村¹⁰⁾によって得られている値の 6 分の 1 である。観測開始以来 12 月末までの傾斜変化は、X 成分で $80 \mu\text{rad}$ 南下り、Y 成分で $20 \mu\text{rad}$ 西下りとなっている (Fig. 10 参照)。



(a)



(b)

Fig. 10. Ground tilts observed at the Amo station, with temperature within a casing pipe and the amount of precipitations at the Shimoodori dam site 2.5km south of the Amo station.

(a) : 1978. June 10—1978. Sept. 27. (b) : 1978. Sept. 27—1978. Dec. 28.

その後、1978年3月末までに X 成分で $60\mu\text{rad}$ 南下り、Y 成分で $30\mu\text{rad}$ 西下りの傾斜が観測されている。

6. 局地地震に伴った傾斜変化に対する一考察

上に述べた観測期間中、1978年9月16日04時55分36.7秒に、天生観測室から北西約 7 km 離れた牛首峠付近にやや大きい地震が発生し、ボア・ホール傾斜計にこの地震による傾斜変化(ティルト・ステップ)が記録された(Fig. 11 参照)。上宝地殻変動観測所管下の3地震観測点で観測された P 波到着時と S-P 時間から決めたこの地震の震源位置は $136^{\circ}56'37''\text{E}$, $36^{\circ}18'27''\text{N}$ 、深さ 6.8 km、マグニチュードは 3.6 である。また第11図から明らかのように、このステップ変化の約 2 時間前(9月16日03時頃)から南東方向下りの緩やかな傾斜変動が見られ、地震との関連性が注目される。ここではこれらの変化がどのような原因によるも

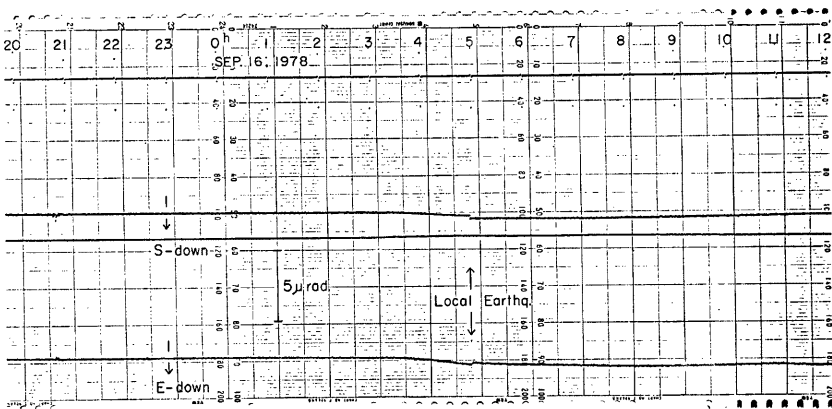


Fig. 11. Tilt record at the time of a local earthquake ($M=3.6$) that occurred about 7 km northwest of Aino. Gradual tilts preceding the earthquake, and coseismic tilt steps can be seen clearly.

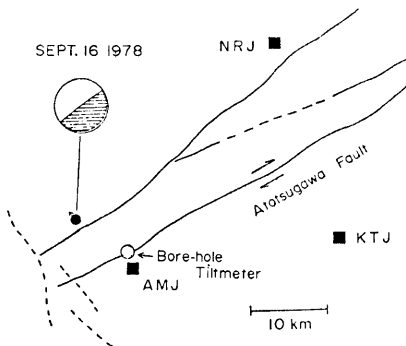


Fig. 12. Epicenter and the focal mechanism of the earthquake of Sept. 16, 1978.

のかを検討する。

この地震の位置と、P波初動分布(20個のデータを含む)から推定されるメカニズム・ダイヤグラム⁵⁾を Fig. 12 に示す。これから 2 つの節面のうち何れが断層面かを一意的に決めることは出来ないが、牛首断層の走向に近い方を断層面と考え、この地震は南東側ブロック下りの高角逆断層によって起ったものと解釈出来る。この場合の断層面の走向は $N55^{\circ}\text{E}$ 、傾斜方向 $N35^{\circ}\text{W}$ 、傾斜角 86° である。またこの地震のマグニチュードは $M_L=3.6$ と推定されるが、この規模の地震に対応するパラメータは経験式^{11), 12)} から、地震モーメント $M_0=(1.1\sim 1.5)\times 10^{24}$ dyne-cm、断層の長さ $L=2.0\sim 2.5$ km、断層平均変位 $D=1\sim 3$ cm 程度と見積られる。しかしこれらのパラメータの推定にはかなりの幅があるので、モーメント

を一定とし、 L 、 \bar{D} 及び断層面の幅 W の組合わせについて次の4通りの場合を想定し、震源の深さについても誤差を考慮した。(1) $L=2.4\text{km}$ 、 $W=1.2\text{km}$ 、 $\bar{D}=2\text{cm}$ 、 $h=6.8\text{km}$ 、(2) $L=2.4\text{km}$ 、 $W=1.2\text{km}$ 、 $\bar{D}=2\text{cm}$ 、 $h=3\text{km}$ 、(3) $L=1.2\text{km}$ 、 $W=0.6\text{km}$ 、 $\bar{D}=8\text{cm}$ 、 $h=6.8\text{km}$ 、(4) $L=1.2\text{km}$ 、 $W=0.6\text{km}$ 、 $\bar{D}=8\text{cm}$ 、 $h=3\text{km}$ 。これから、これらのパラメータを持つ断層変位によって天生観測点で生ずべき傾斜変化量と方向を半無限弾性体中の静的 dislocation に対する理論式^{13)・14)}によって計算した。4通りのモデルに対する計算結果と、観測値は次の通りである。

	NS 方向	EW 方向	最大傾斜方向	
計算値	(1)~(4)	$(0.28\sim 0.44) \times 10^{-8}$	$-(1.01\sim 1.25) \times 10^{-8}$	$N68^{\circ}\sim 77^{\circ}W$
観測値	地震時	-2.0×10^{-7}	-1.6×10^{-7}	$S38^{\circ}W$
	地震前	-2.3×10^{-7}	5.2×10^{-7}	$S66^{\circ}E$

地震時に観測された傾斜変化は計算値より1桁以上大きく、傾斜方向もNS成分では逆向きである。このような差はこれ迄も例えば1969年岐阜県中部地震の際にも見られる¹⁵⁾。このことは観測されたストレイン・ステップやティルト・ステップが必ずしも弾性体中の断層運動から期待される歪・傾斜フィールドの変化を直接反映したものではなく、観測点附近の土地の震動による2次的な局地歪の変化あるいは観測計器自体の振動によるかも知れないことを示している。

一方、地震前の傾斜変動について見ると、SE下りの傾動方向は地震時の断層運動から期待されるNW下り方向とは逆センスであるので、この断層面に沿って起った地震時と同じ方向の preseismic な slip によるものとは考えにくい。一方、この地震が発生した前後にはこの地域でかなり激しい降雨があった。天生観測点から2.5km南方の下小鳥ダムでの測定による降雨量は9月15日14時より16日0時迄の間に9mm、16日0時-4時6mm、4時-5時3mm、5時-6時12mm、6時-9時11mmであった。このことを考えると、地震前に観測された傾斜変動は急激な降雨による観測点附近の地盤の傾きによる可能性が強い。しかしながら1時間あたりの降雨量の最も大きいのは地震後の5時-6時であって、この時間帯以後、傾動はむしろ回復する方向であり、降雨の影響を受けているとは思わず、地震時の傾斜変化がゆるやかに回復しつつあるように見える。このことから地震前の変動を降雨によると断定する見方にも若干の疑問が残る。

なお、天生観測点付近で地電流観測を行っていた岐阜県吉城高校の中山武教諭(私信)によれば、9月16日4時頃から断層方向に平行な成分に約70mの間で4.0mV程度の地電位変化を、また断層方向に直角な成分に約100mの間で地震直前か地震時に2.5mV程度の変化が観測され、現在詳しく検討中である。

上の傾斜変化、地電位変化の両方が若し降雨の影響によるものでなければ興味深い、これについては今後さらに検討を要する。

7. おわりに

ボア・ホール傾斜計による観測の計画段階では20mの深さにセンサーを埋設する予定にしていたが、実際にはボーリングとケーシングにかなりの費用を要すること、傾斜計の姿勢制御の困難さから、地表から深さ2mの観測室を掘き、その床面からさらに2mのボーリングを行ないセンサーを設置する方式を取った。天生での観測によれば、この程度の深さでも温度影響はかなり避けることができるが、降雨の影響は大きく残っており、この影響を低減するには10m以上の深さにセンサーを埋設することが望ましいと思われる。また、蔵柱における観測によればキネマトリクス社製の傾斜計は地球潮汐観測に用いるにはやや分解能が不足しているようである。また感度曲線が完全に直線でないという欠点も持っている。以上の経緯より、われわれは姿勢制御が容易で、かつ地球潮汐をも十分な感度で観測できるような鉛直振子傾斜計の開発に現在着手している。

天生での観測期間中に、観測点から7kmの近さで $M=3.6$ の地震が発生し、この地震に伴うティルト・ステップを観測したが、断層モデルから期待される傾斜変化とは、方向・量ともかなりの違いがあった。

またこの地震の2時間程前より観測されたゆるやかな傾斜変動は、地震前の断層の pre-slip によるものと考えるよりは、この時間帯の降雨による可能性が大きいのが、断定するにはなお疑問が残る。今後、より信頼できるデータを得るためには、設置方式をさらに完全なものにするとともに、断層をはさんで複数台の計器を設置することが必要である。

おわりにあたり、天生に観測点を設けるに際してお世話になった河合村ならびに記録計を置かせていただき、冬期における記録の取替をやっていたいただいた井之上豊秋氏に厚く感謝する。また、観測計器の設置、信号ケーブルの敷設などにあたり協力いただいた細 善信、和田博士の両氏に御礼申し上げる。

なお、本研究は昭和52～53年度文部省科学研究費補助金一般研究(B) (課題番号246032)「活断層付近における地殻ひずみおよび地震波観測による地震予知の研究」(代表者・三雲 健)によって行なわれた。

参 考 文 献

- 1) Beaumont, C. and J. Berger : Earthquake Prediction : Modification of the Earth Tidal Tilts and Strains by Dilatancy, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, Vol. 39, No. 1, 1974, pp. 111~121.
- 2) Tanaka, T and M. Kato : On the Change of Crustal Elasticity and Earth Tides, *J. Geod. Soc. Japan*, Vol. 20, No. 3, 1974, pp. 125~132.
- 3) Mikumo, T., M. Kato, H. Doi, Y. Wada, T. Tanaka, R. Shichi and A. Yamamoto : Possibility of Temporal Variations in Earth Tidal Strain Amplitudes Associated with Major Earthquakes, *J. Phys. Earth*, 25, Supplement Issue, 1977, pp. 123~136.
- 4) 三雲 健, 加藤正明, 土居 光, 和田博士, 細 善信, 和田安男, 小泉 誠 : 遠震の P 波走時偏差および地球潮汐歪振幅の時間的変化検出への試み(2), 地震学会昭和51年度春季大会講演予稿集, 1976, p 78.
- 5) 和田博士, 三雲 健, 小泉 誠 : 飛騨地方北部特に跡津川断層周辺の地震活動と発震機構, 地震第2輯, 第32号, 1979, (投稿中)。
- 6) 田中寅夫, 細 善信, 土居 光, 加藤正明, 小泉 誠, 和田安男 : 跡津川断層における光波測量 (第1報), 京都大学防災研究所年報, 第20号 B-1, 1977, pp. 69~75.
- 7) 松田時彦 : 跡津川断層の横ずれ変位, 東京大学地震研究所彙報, 第44号, 1966, pp. 1179~1212.
- 8) Kato, M. : Observations of Crustal Movements by Newly-Designed Horizontal Pendulum and Water-Tube Tiltmeters with Electromagnetic Transducers (1), *Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto University*, Vol. 27, Part 4, No. 252, 1977, pp. 155~171.
- 9) 島津康男 : 地球の物理, 基礎物理学選書11, 裳華房, 1971.
- 10) 佐藤 裕, 吉村愛一郎 : 地表傾斜の機動連続観測について, 地震学会昭和52年度秋季大会講演予稿集, 1977, p 85.
- 11) Ishida, M. : Determination of Fault Parameters of Small Earthquakes in the Kii Peninsula, *J. Phys. Earth*, Vol. 22, 1974, pp. 177~212.
- 12) Ohnaka, M. : Earthquake Source Parameters Related to Magnitude, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, Vol. 55, 1978, pp. 45~66.
- 13) Maruyama, T. : Static Elastic Dislocations in an Infinite and Semi-Infinite Medium, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Vol. 42, 1964, pp. 289~368.
- 14) Mikumo, T. : Faulting Process of the San Fernando Earthquake of February 9, 1971 Inferred from Static and Dynamic Near-Field Displacements, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 63, 1973, pp. 249~269.
- 15) Mikumo, T. : Faulting Mechanism of the Gifu Earthquake of September 9, 1969, and Some Related Problems, *J. Phys. Earth*, Vol. 21, 1973, pp. 191~212.