

## 松代における地殻変動観測に関する諸問題について\*

浜田 信生\*\*・柏原 静雄\*\*\*

550.34:551.24

### Some Problems Related to Crustal Movement Observations at Matsushiro

N. Hamada

(*Seismological Division, J.M.A.*)

and

S. Kashiwabara

(*Seismological Observatory, J.M.A.*)

Some problems related to crustal movement observations at Matsushiro Seismological Observatory were discussed here. It is well known that observations of crustal movement in the vault contain various factors which are not directly related to the true crustal movement. These factors contain instrumental drift, coupling of instrument to the ground, meteorological effect (rain, temperature, pressure etc.), heterogeneity of the bed rock and effect of underground water.

For understanding the observations and finding weak preseismic or postseismic change in strain and tilt, it is necessary to reveal the influence of these factors upon the observations. Four-components (two components horizontal strain and two components tilt) of six components of ground strain tensor (five independent at the ground surface) were measured at Matsushiro. The measurement was made by some component instruments of different type and with different principle at different point in the vault. Comparative observations show that transducers of these instrument have enough stability and high resolution for analyzing the data. But difference of rock property, long term deformation of the instrument and difference in coupling to the ground yield the difference in result. The tidal strain and tilt differ more than 30% in amplitude at different point. Difference may be caused by the variation in elastic property of rock, crack distribution and cavity effect of the vault, so it is desirable to use an instrument of long span for averaging these influences.

Temporal variations in amplitude of tidal strain and tilt are studied during the period of prominent seismic activity for detecting the dilatancy in the crust if existence. More than 20% variations in amplitude of M2 constituent for the north-south strain was found prior to or after an earthquake in some case. In view of the gain stability of extensometers at time, it is difficult to say that these variations of tidal strain are generated by dilatancy effect or change in elastic property of the crust.

Analysis of recent data from the extensometer, water tube tiltmeter and bubble tiltmeter show that there is no correlation between variations in M2 constituent of them.

Temporal variations in amplitudes of tidal strain and tilt may be caused by missing data, contamination of atmospheric pressure influence and artificial disturbance during the measurement. If continuous and disturbance free data are available, more precise analysis will be possible.

Influence of atmospheric pressure upon ground strain and tilt can be well represented by

\* Received Sept. 5, 1980

\*\* 気象庁地震課

\*\*\* 気象庁地震観測所

Wiener filters determined by the method of least square.

The Wiener filters for strain and the north-south tilt show that two types of deformation are included in response of the ground to atmospheric pressure. One of them is an instantaneous deformation which is proportional to pressure and another one is a nonelastic gradual deformation with opposite sense. The nonelastic response seems to be related to behaviour of underground water.

The nonelastic response of ground should be studied in order to reveal other problems such as the strain step, tidal strain and secular crustal movement.

Secular strains and tilts observed by extensometer and water tube tiltmeter from 1970 to 1979 are consistent with those predicted as the after effect of the swarm activity around Matsushiro from 1965 to 1966. But some ambiguity is included in the result of strain measurement due to the instability of silica tube used. Geodetical survey around the Matsushiro area will be needed for further study.

Characteristics of strain steps are also studied. In many cases, the strain step occurred in the east-west extensometer records only.

Observed strain steps are comparable in order with steps predicted from the dislocation theory, but they are random in sense with the predicted steps. Most of strain steps may be generated by vibration and slip of interim hanger of silica tube. The suspension of the silica tube should be improved for more precise observation of strain steps.

## § 1. はじめに

地殻変動観測に用いられる棒状伸縮計や各種の傾斜計は、計測技術の進歩と共に改良されて今日に至っている。これらの観測器械は、長周期地震波、地球の自由振動、地殻潮汐、地殻の永年歪など地震計に比べ幅広い帯域の現象を記録できるために、様々の分野の研究観測に用いられている。しかし現実の伸縮計や傾斜計は、すべての周波数領域で必ずしも自然現象を忠実に記録できるわけではない。計器自体に由来する問題以外にも、岩盤との結合など環境に由来する問題を、いくつも抱えているのが実状である。今回は松代の気象庁地震観測所（以後単に松代と呼ぶ）に設置されている石英管伸縮計と併設されている傾斜計の資料を様々な角度から検討し、各周波数帯域に於ける伸縮計、傾斜計の動作、問題点、資料の信頼度について調査を行った。松代の地殻変動観測については既に山岸ら(1976)による紹介がある。今回は新に自記水管及び泡式傾斜計の資料を加えて定量的な解析を重視した。まず、観測壕の環境について考察し、次に伸縮計、傾斜計の構造に由来する問題点に検討を加え、降雨、気圧変化の影響を解析し、さらに経年変化、年変化、地殻潮汐、Strain Stepなど観測される現象についても調査を行って、性能の限界と資料を、解釈する上で、注意すべき点を明らかにすることに努めた。松代における観測成果は、群発地震終息期の地殻の活動を調べる上で貴重な資料であるが、資料を解釈する上でも計器の信頼度等に関する基礎的な検討は必要であろう。

## § 2. 松代の観測壕の状況

### 1) 環 境

松代の観測壕は総延長約 2600m で幅 100m、長さ 300m にわたり、断面積 10 平方メートル程度の坑道が、碁盤の目状に掘られている。そのうちの中央部の延べ約 300m が、種々の観測に使用されている。北側の坑道は岩屑により埋められているが、南側の坑道は通路などに利用されている (Fig. 2-1)。岩質は主として閃緑玢岩の貫入岩体から成り、東側で黒色の頁岩層に移り変っている (Fig. 2-2)。玢岩の部分には規則的な節理は認め難いが、頁岩には節理が著しい。しかし、その節理面の走向は場所によりまちまちで、規則性は示さないようである。いずれも、岩質は緻密であるが、頁岩は節理があるため比較的掘り易いのにに対し、玢岩の部分は固く電動ピックでは掘削困難な所もある。また、過去に地下水の通り道となっていたと思われる部分は、変質して軟らかくなっている事が認められる。

坑道の岩盤の性質については、南雲ら(1967)により、弾性波速度の測定が行われている。

今回は坑道の数ヶ所から厚さ 2cm の岩石サンプルを採集し、弾性波の速度を測定した。

それによれば、割目を含まない岩石の  $P$  波速度は、6 km/sec から 5 km/sec の間に分布し、また、場所によっては 5% 程度の速度の異方性が認められる (Fig. 2-2)。南雲らの測定した弾性波速度は、3.8 km/sec から 2.4 km/sec と、むしろサンプルの  $S$  波の速度に近い。

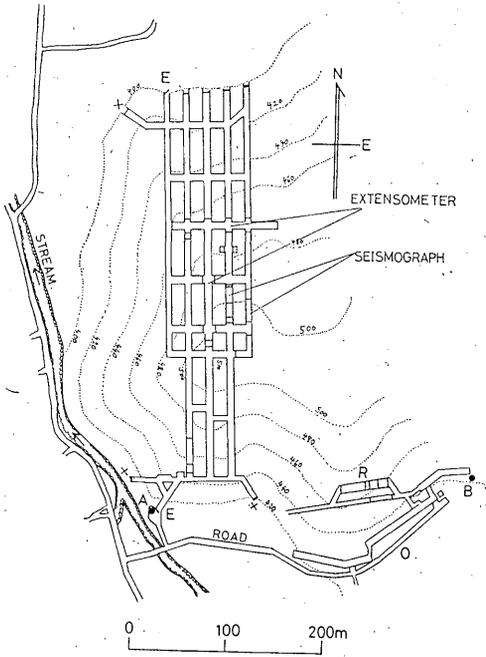


Fig. 2-1. Observational vault and topography around the Matsushiro Seismological Observatory.

- A, B: Sacks-Evertson type bore-hole strainmeter.
- E: Entrance of vault.
- R: Recording room.
- O: Office building of the observatory.

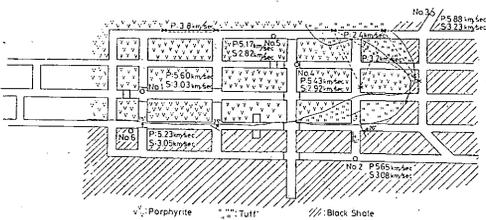


Fig. 2-2. Geological map of the vault. The velocities of elastic waves for different rock samples are given in the plot. The results of in situ velocity measurements (by dotted lines) are given by Nagumo et al. (1967). Dips and strikes of the crack in black shale are also given.

岩の部分に、また、自由端は頁岩の部分に設置されている。

しかし、岩石の弾性的性質にあまり差がないためか、岩質の違いによる観測への影響は認められていない。

2) 観測壕の密閉度と温度

観測壕は初めは防空壕として建設されたため多数の出入口が存在したが、そのほとんどは、封鎖され現在では、出入口2ヶ所と、多少の空気の入出が認められる部分が3ヶ所となっている (Fig. 2-1)。外気の微気圧変動、室温の変化は、観測に妨げとなる。また、浅い観測壕では、微気圧変動が水管傾斜計などにノイズとなって現われる場合も知られている。松代では風の強い日には、出入口のドアの錠をはずすとドアが風圧によって開くこともあり、密閉度が良いとはいえない。しかし、観測壕の容積が大きいために、観測条件は他の地殻変動観測所に比べ相対的には優れているようである。観測壕内の気圧傾度は自記式水管傾斜計にノイズとして認められるが、風の強い微気圧変化の大きい時でも  $10^{-8}$  ラジアンを越えない。

坑道内の温度は約  $13.0^{\circ}\text{C}$ 、伸縮計室内では  $13.5^{\circ}\text{C}$  である。山岸ら (1976) は、伸縮計室の室温が10年間で約  $0.8^{\circ}\text{C}$  上昇した事を報告しているが、原因は大部分が除湿機 (290W 3台) の運転によるものである。除湿機の運転は空気の対流などにより伸縮計に好ましくない影響を与えたと考えられたので、1976年10月以降運転を停止した。その結果、一ヶ月以内に室温が  $14.2^{\circ}\text{C}$  から  $13.5^{\circ}\text{C}$  へ下がっている。石英管の温度係数を考慮すれば、室温の変動は  $0.01^{\circ}\text{C}$  以下に保つ必要がある。最近の調査によれば、観測者が入室したりしない限り室温の変化は、 $0.01^{\circ}\text{C}$  以下に保たれている。また、伸縮計南北成分の南側の部分では坑道の高さが5m近くあり、上下の温度差が  $0.5^{\circ}\text{C}$  近く存在する。室内の温度を一定に保つには、水管傾斜計の読取りなど入室する日数の削減を含め、さらに工夫が必要であろう。

3) 水、湿度

地殻変動観測に使用される横穴の環境条件は様々であり、松代のように比較的乾燥した坑道もあれば、富士川、犬山、北信など定期的な湧水がある横穴もある。一般的には、湧水が存在する場合が多いようであるが、松代では年間平均降水量が820mmと内陸で少ない上、岩石が緻密であるためか定期的な湧水は存在しない。天井から雫の落ちる場所もあるが、岩石の隙間に吸収されてしまう。壕全体を見ると南側では湿り、北側は乾燥しており、伸縮計室の東端では、埃が立つ程の乾燥が認められる。

南雲らは破碎帯等を含む部分で速度が遅くなることを報告しているが、速度を20%小さくするには、約2%程度の有隙率を考えればよいことになる。

東西成分の伸縮計は、固定端及び、中間センサーは玢

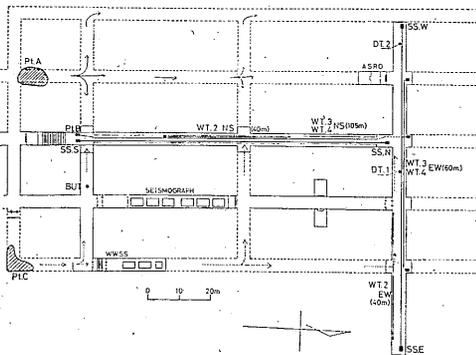


Fig. 2-3. The layout of instruments around the extensometer room. Hatched area shows the leaked water zone A by rainfall and old gushing water area C which was active in 1966.

伸縮計室では3ヶ所で湿度の測定が行われているが、85%から95%と場所によりかなり異なっている。降雨による水の坑道内への浸透は、山岸ら(1976)によりすでに報告されているが、その後の調査結果について4章で改めて触れることにする。湧水については、かつて群発地震最盛期の1966年9月頃、旧地震計室から多量の水が湧き出し、基盤の目状の坑道を伝わって伸縮計室に流れ込み、床が水浸しになった時期があった。その当時の出水箇所と水の流れを推定したものを Fig. 2-3 に示したが、地震活動が衰えると湧水も止み現在では痕跡すら認めら

れない。当時は伸縮歪計を守るために、地下水をポンプで坑外へ排水したようであるが、湧水量の変北や湧水管所等に関する資料が残っていないことは残念である。

当時は伸縮計の動作も安定せず、湧水による影響等も不明のままに終わっている。

### § 3. 観測計器

松代で1979年8月現在観測に用いられている測器の諸定数を Tab. 2-1. に示す。山岸ら(1976)により報告された測器のうち、水平振り型傾斜計は観測が中止され、試験観測用として泡式傾斜計およびフロート式自記水管傾斜計が新に導入された。そのほかに、気圧の変化を調べるための高分解能の気圧計を加え、また Sacks ら(1971)により試験観測に用いられた体積歪計も、一時期、他の資料との比較に用いた。

#### 1) 石英管伸縮計の構造、感度、直線性

石英管伸縮計の概要については、山岸ら(1976)の報告で述べられている。ここでは、観測結果を解釈するうえで必要となる計器の動作上の問題について議論する、

まず、石英管についてであるが、長さ2mの溶融石英管が50本接続され100mになっている。接続部分の構造を Fig. 3-1. に示す。最近では、石英管の接続は溶接で行なわれるようになったが、松代の伸縮計は1965年に設置され、接続にエポキシ系接着剤(エポキシレジン)が用いられた。接着剤は石英管の長さの方向には入らないように工夫が試みられたが、実際には、大部分の箇所て図

Tab. 2-1. Constants of instruments.

Instrument	Mark	Azimuth	Span	Sensitivity	Recording Device	Period of Observation
Silica Tube Extensometer	SS. N&E	N2W, E2N	100m	2.1×10E-9/mm 2.5×10E-11/Digit	Analogue Chart Recorder Digital Printer	1965. 8~1979. 11 1977. 7~1979. 11
	SS. E2 (DT 2)	E2N	45.4m	2.1×10E-9/mm 2.1×10E-11/Digit	Analogue Chart Recorder Digital Printer	1977. 9~1979. 11 1977. 9~1979. 11
	DT 1	E2N	4.5m	2.0×10E-8/mm	Analogue Chart Recorder	1979. 1~1979. 11
Water Tube Tiltmeter	WT2. N&E	N2W, E2N	40m	0.005"/μm	Manual Reading	1965. 10~Present
	WT3. N	N2W	105m	0.0019"/μm	Manual Reading	1978. 11~Present
		E2N	60m	0.0033"/μm	Manual Reading	1978. 11~Present
	WT4. N	N2W	105m	0.0005"/mm 0.000017"/Digit	Analogue Chart Recorder Digital Printer	1978. 11~Present 1979. 10~Present
60m			0.0005"/mm 0.000017"/Digit	Analogue Chart Recorder Digital Printer	1978. 11~Present 1979. 10~Present	
Bubble Biaxial Tiltmeter	BUT. N&E	N, E	1m	0.01"/mm 0.00002"/Digit	Analogue Chart Recorder Digital Printer	1978. 4~Present 1978. 4~Present
Barometer	ATM			0.003mb/Digit	Digital Printer	1979. 1~Present

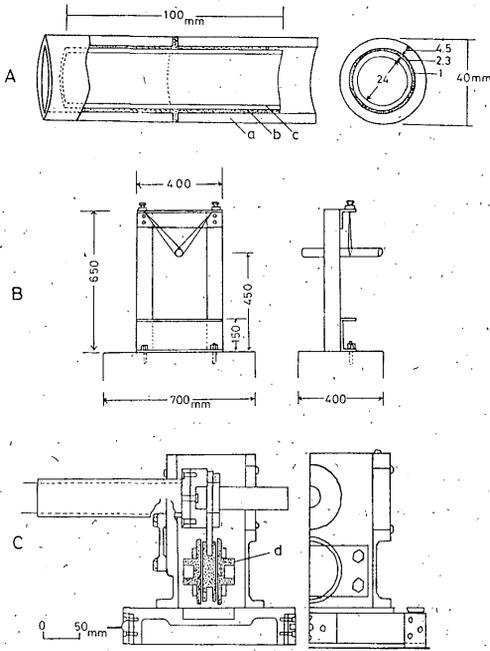


Fig. 3-1. A: Junction of silica tube. Epoxy-resin is filled between inner and outer tubes.  
 B: Interim hanger of silica tube.  
 C: Variable capacitance transducer at free end.

に示されるように接着剤がすき間に充填されている。接着剤の経年変化は、観測成果に、当然、影響するはずである。

石英管の中間支持の方法は幾つか考えられており、山田 (1973)、山内ら (1975) などに紹介されている。松代では、2本のステンレスワイヤーを用いるいわゆる2本吊りである。理想としては石英管に水平方向の力が加わらないように支持することが望ましいが、実際には石英管は50箇所の中間支持で何らかの水平方向の力を受けており、地震時にワイヤーがスリップする可能性がある。また、ワイヤーの伸びについても長期間の観測では、無視できない影響があると考えられる。その他の構造上の問題として、石英管の自由端に付けられた可変容量型のセンサーの重量がある。センサーは Fig. 3-1. に示される外形をもち、重量も石英管が1mあたり1kgであるのに比べ4.2kgと比較的重く、センサーの慣性により石英管がゆすぶられるという懸念もある。この問題については Strain Step に関係するので8章で改めて議論する。

伸縮計の地面との相対変位を計るセンサーとしては、先に述べた可変容量型のセンサーが用いられている。また、東西成分には1977年から1978年にかけて、2つの差動トランス型のセンサーが、Strain Step を調べるために取り付けられた。最近の計測技術の進歩により、差動トランスやマグネセンサーなどが、精度の点でも安定度の点でも地殻変動観測に十分使用可能な事は、Yamauchi (1976) や志知、岡田 (1979) により明らかにされているが、可変容量型のセンサーの長期間の使用例はほとんどなく、評価がむずかしい。また、最近の使用例では、Peterson et al. (1976) や佐藤 (1979) に見られるように、地震計や傾斜計の零点の検出に用いられる場合が多いが、容易に高感度が得られるが動作範囲が狭いという短所があるためと思われる。

松代のセンサーの回路と、出力特性を Fig. 3-2. に示す。センサーが旧式でコンデンサープレートの面積も50cm<sup>2</sup>と大きいためか、中点付近では直線性が崩れているので、片側の動作範囲のみで使用している。ダイナミックレンジが40μm程度であるのに対し、年間の変動量は10<sup>-6</sup>(100μm) 近くになるため、センサー部分(同調用可変コンデンサー)の調整が年に2, 3回必要である。また、アナログ記録器の記録レンジは、さらに20μmとせまいため、中間増幅器でバイアスを加えている。長期間の観測では、これらの調整によるデータの接続誤差が積算される。次に感度のチェックであるが、松代では伸縮計の検定には、ニッケル棒の磁歪効果を用いている(山岸ら, 1976)。コイルに流す電流は0.5%の精度で一定に保たれているが、磁歪効果が長期間安定する

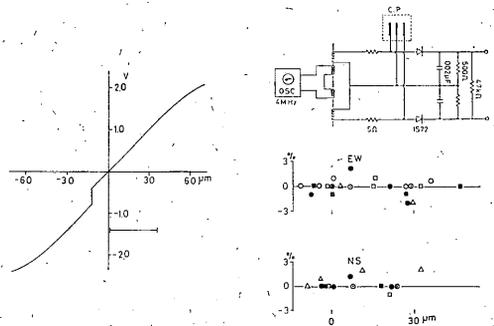


Fig. 3-2. Circuit of the variable capacitance transducer and relationship between displacement and output voltage of transducer. Non-linear parts were not used in routine observation. Results of linearity test were also shown.

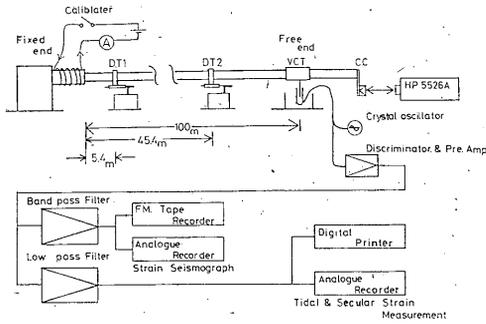


Fig. 3-3. Block diagram of the silica tube extensometer and its recording systems. Differential transformers (DT1, DT2) were only attached to east-west component.

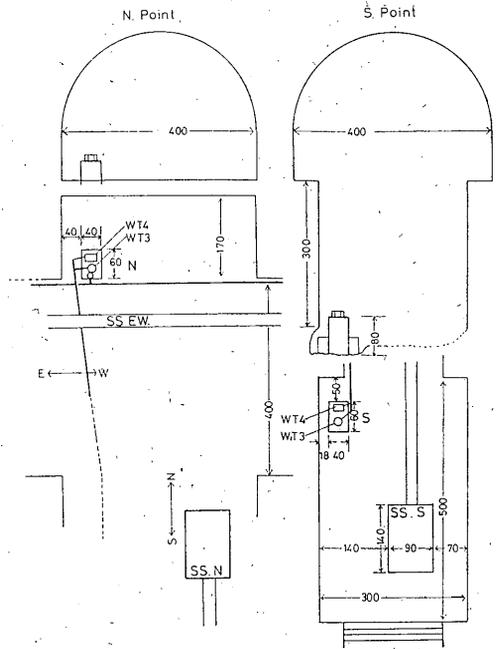


Fig. 3-4. Cross section of the vault and pedes of the water tube tiltmeters.

という保証はなく、絶対精度の検定も長らく不可能であった。最近になり、松代でレーザー干渉伸縮計の実験を進めていた工業技術院計量研究所の協力を得て、1976年8月と1978年3月に磁歪による変位を直接測定した。結果は電流 100 mA に対し NS 成分で  $2.4 \mu\text{m}$  と  $2.0 \mu\text{m}$ 、EW 成分ではそれぞれ  $3.1 \mu\text{m}$  と  $2.9 \mu\text{m}$  となる。過去の検定資料を検討した結果、この前後の10%にも及ぶ違いは、一時コイルに逆向きの電流を加えた結果によるものであることが判明した。EW成分に取付られた差動トランスと、可変容量型の二つのセンサーの出力が、当時、同時に10%程度変化したが、独立な二つのセンサーの感度が同時期、同じ量変化する事は考え難い。従って磁歪用のニッケル棒のヒステリシス効果のようなものが、電流を逆向きに流すことにより生じたと考えられる。1977年10月以後の検定結果は、検定電流に対する複数のセンサーの出力変化は5%以下に納まっている。従って過大な電流や逆向きの電流を流さない限り、磁歪効果は5%程度の安定性を持つと考えられ、可変容量型のセンサーの感度についても安定度は同様と考えられる。可変容量型センサーの分解能については、中間の増幅器の入力換算ノイズにより左右される。現在、使用中の増幅器の入力換算ノイズは、 $2 \mu\text{V}$  で歪量に換算して  $3 \times 10^{-10}$  となる。柏原ら (1979) による歪地震記録の解析から、実際の分解能は数百秒の周期については  $10^{-12}$  程度であることが明らかにされている。

2) 読み取り式およびフロート式自記水管傾斜計

読み取り式水管傾斜計 WT2 についての観測結果については山田 (1973)、山岸ら (1976) に報告されている。松代地震以降観測される変動量は年々減少し、1976年に以

降は、年  $0.1''$  前後となっている。最小読み取り単位は  $1 \mu$  つまり  $2.5 \times 10^{-8} \text{radian} \approx 0.005$  秒であるが、観測者の移動による影響や読み取り誤差を考慮すれば、読み取り精度は  $0.02''$  程度であるので、年変動量がいかに小さくなったかがわかる。WT2の問題点としては、台座のコンクリート台の片側が坑道の側壁と接していることが指摘される。

Harrison (1976) の指摘する Cavity 効果を考慮すれば、台座を傾けるような力が働くことが予想される。また、松代の坑道の側壁は周囲の岩盤との固着は十分とは言えず間に水が入れば傾斜計にその影響が出ることも予想される。

1978年11月から1979年2月にかけて新に設置された WT3 は、WT2 と同型であるが、スパンが 105 m(NS)、60 m(EW) と長くなり、また、花崗岩の台座が用いられている (Fig. 3-4)。WT2 と WT3 の比較は、上記の問題点を調べる上で必要であるが、十分な観測期間が得られていないので改めて報告する。一年たらずの観測結果の比較 (Fig. 3-5) では、観測精度の範囲であまり良い対応は認められない。1979年の2月から3月にかけて、WT2 の東西成分に現われた階段状の変化は、明かに有意であると考えられるが、WT3 にはそのような変化は

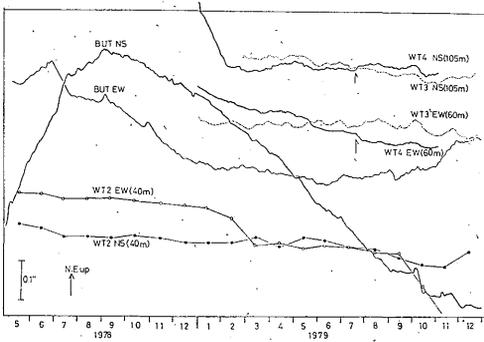


Fig. 3-5. Secular changes in tilt observed by several tiltmeters.

認められない。

WT2 と WT3 の違いは、側壁の効果、坑道内の局所的な変動、WT3 のエージング効果のいずれかで説明されるべきであろう。

台座のエージングについては、今までほとんど解明されていないが、WT3 の設置の際、一つの判断材料が得られた。WT3 の水管を通すために、WT2 の NS 成分の台座（高さ 30 cm、幅 40 cm、奥行き 30 cm）の中腹に直径 4 cm の穴を、水平にハンマードリルを用いて穿孔した。

ハンマードリルによる衝撃や、穴を開けた影響が WT2 に現われることを予想したが、観測結果にはほとんど影響が認められない (Fig. 3-5.)。設置から10年以上経過したコンクリート製の台座の安定性を示す一つの証拠になろう。

フロート式自記水管傾斜計 WT4 は、WT3 と時を同じくして設置され同じ台座に取り付けられている。名古屋大学から試験観測用に借用したもので、その性能については、志知ら (1979) により詳しく紹介されている。フロートの変位はマグネセンサーで電圧に変換され、分解能は 1/10000 秒角に達する。連続記録が得られるため、潮汐の調査にも利用できる。検定はマイクロメーター、および一定量の水を水管に加えることにより行われ、精度よく感度を校正できる。松代では、設置後 2 ヶ月間は大きなドリフトが認められたが、その後はドリフトは小さくなった (Fig. 3-5.)。初期ドリフトの原因として、計器を構成する材質の内部歪の解放や、再配置が考えられる。しかし、その後の落ついた変化は、読取り式水管 (WT2, WT3) の変化とそう変るものではない。地殻変動観測に用いられる測器の中で、読取り式水管傾斜計は、構造が単純でドリフトの入る余地が少ないので最も

信頼できる測器と考えられているが、志知らの開発したフロート式も、読取り式に近い安定度があると考えられる。

### 3) 泡式傾斜計

地中型の泡式傾斜計は1978年に試験観測のために松代に設置された。泡式傾斜計の国内での使用例はまだ少く、主に火山の観測に用いられているが、米国ではサンアンドレアス断層の周辺で、傾斜計の群列観測が行われている (Mortensen, Johnston (1975))。泡式傾斜計には地上型と呼ばれる三脚の上にセンサーを載せた型と、円筒の中にセンサーを組み込み浅い縦穴に設置出来るように作られた地中型がある。

地上型は設置が簡単で取扱い易いが、岩盤との結合の問題や、地震の時に加わる加速度に対する不安があり、縦穴に埋設出来る地中型の方が安定性が高い。松代では、坑道内の地震計室の脇に直径 15 cm、深さ 1.5 m の穴をボーリングし、ケーシングパイプに底ブタをつけた円筒管を入れモルタルで固定し、その中に傾斜計を設置した (Fig. 3-6.)。ケーシングと傾斜計の間には川砂を詰め、上部は湿気の侵入を防ぐためにモールドした。設置にセラミックパイプや珪砂のような高価な材料を用いることが望ましいと考えられるが、実際には観測環境の方が観測成果をより大きく左右する。入口から 200 m 以上入った坑道の奥に、さらに縦穴を掘るといふこの種の傾斜計にとっては、他に例を見ないような好条件のため、松代ではドリフトも少なくその変化率も一定してお

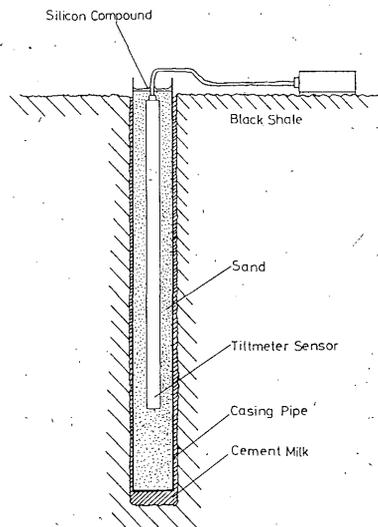


Fig. 3-6- Installation of the bubble biaxial bore-hole tiltmeter.

り、また明瞭な潮汐も記録している (Fig. 5-1.)。

泡式傾斜計の最大の問題は、感度およびドリフトを設置したまま測る方法がないことである。Johnston (1976) による詳細な感度、ドリフト量の推定、桜島火山に於ける観測結果 (浜田, 1979) などの経験をもとに、一応、感度の変化は5%以下、ドリフト量は0.1秒/月以下と見なして今回の調査に用いることにする。

#### 4) 観測者の荷重や空気の移動が傾斜計に与える影響

自記水管傾斜計や泡式傾斜計など隔測可能な傾斜計の開発により初めて、観測者が器械に近づくことなく観測を続ける事が可能になった。逆に読取式水管傾斜計に観測者が近付くときの影響についても、詳細な様子が明らかになった。この影響については、すでに志知、岡田 (私信) により明かにされている。

Fig. 3-7: に伸縮計室のドアの開閉、観測者の歩行、水管傾斜計台への荷重による水管傾斜計 WT4 の変化を示した。A はドアを開閉した時の変化である。伸縮計室の内外で微小な気圧差があり、ドアを開くと空気の移動が起るのである。B は観測者が水管傾斜計読み取りの

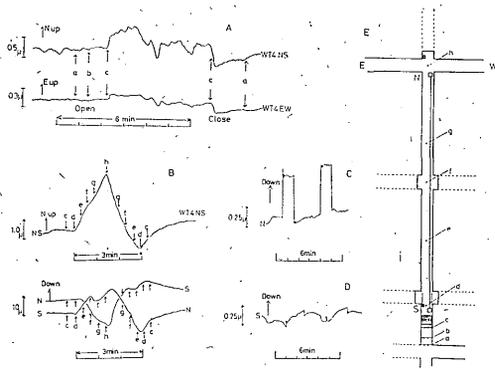


Fig. 3-7. Examples of artificial noises recorded by moving float type water tube tiltmeter.

A: Noise generated by opening and closing of the door. 'a', 'b' and 'c' indicate the moments when observer opens or shuts the door.

B: Noise generated by movement of observer. Observer enters the extensometer room from 'a' walks to north and reaches 'h', then returns to 'a'.

C, D: Subsidence of pedestals owing to the weight of 60 kg. Records show movement of pedestals when observer steps on and gets down the pedestal.

E: Position of observer and doors.

ために伸縮計室に入り北に進み、読み取りが済んだ後、南側の入口へ戻った時の両端のポットの水位変化とその差、つまり、傾斜を示したものである。また、C, D は観測者が直接花崗岩の台に上ったときの水位変化を示している。北側と南側の台の荷重による沈下量の差は、岩盤の固さの違いにより生じたものであろう。北側の台の基盤岩は、南側に比べ風化が進んでいる事が肉眼でも認められる。しかし、荷重による影響は、 $1\ \mu\text{m}$  に達せず、観測に与える影響は無視出来る。空気の動きによるノイズは  $5\ \mu\text{m}$  に達するので、読み取り式の水管傾斜計の精度も、その程度であると考えられる。

#### 5) 体積歪計、気圧計、雨量計

地殻変動観測には、出来るだけ多くの歪成分を測定する事が望ましいのであるが、松代には水平成分が二つと傾斜が二成分で、水平歪を記述するには一成分不足である。面積歪やそれと比例関係にある体積歪は、水平2成分の伸縮歪の和から推定できるが、もし独立に計る事が出来るなら、比較検討が可能である。松代でのサックス・ゴバートソン型体積歪計の実験観測については、Sacks et al. (1971) により、一応、報告されている。

しかし、松代に設置された体積歪計については、外気温の影響を受けていることが泉 (1978) により明かにされ、その原因はケーブルの静電容量変化にあると考えられた。この問題については、その後さらに検討を加え原因を明かに出来たのでエレクトロニクスを交換し、観測結果の一部を調査に用いた。Fig. 3-8. は、松代の体積歪計の回路図 (A)、今回改良した回路 (B)、東海、南関東地域で業務観測に用いられている回路 (C) の動作原理を模式的に現わしたものである。体積歪計の変位トランスデューサーとしては、コアの無い差動トランスが用いられている。コイルとエレクトロニクスの間はなるべく離さず使用するのが原則であるが、体積歪計ではコイルは地中、エレクトロニクス部分は地上にあるため数十mの距離がある。(A) 方式の欠陥は、2次コイルに励起された交流電圧を受ける整流回路の入力インピーダンスが  $100\ \text{k}\Omega$  前後と小さい事にある。2次コイル出力を整流回路に接続すると、振幅が小さくなり波形が歪む。したがって整流器と2次コイルの間のケーブルインピーダンスのわずかな変化が、影響として現われる事になる。

(B) 方式は2次コイル出力を高インピーダンス増幅器 (入力抵抗  $10\ \text{M}\Omega$  以上) で受けてから整流することにより、ケーブルのインピーダンス変化を無視できるようにしたものである。(C) 方式は、一次側を定電流発振

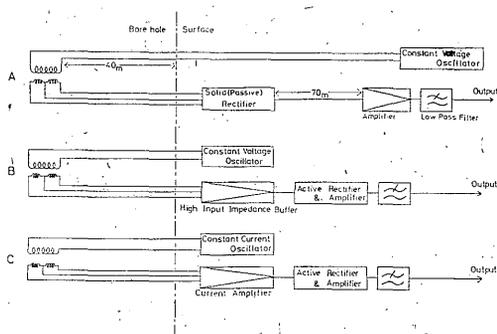


Fig. 3-8. Schematic circuit diagram for differential transformers used in Sacks Evertson type bore hole strainmeter.

A type circuit was first used for test observation at Matsushiro, but input impedance of solid rectifier was so low that effect of atmospheric temperature was shown on the record.

B type circuit was improved one designed for the present study. In place of low impedance circuit, high input impedance buffer and active rectifier were introduced.

C type circuit was used in routine observation for Tokai and South Kwanto regions. In place of voltage controlled circuit, current controlled oscillator and current amplifier and rectifier were used.

器で駆動し二次コイル出力電流を計る方式である。(B)方式は誘導性のパルスノイズを受け易いという短所があり、(C)方式は1次側コイルに100 mA 近い電流を流すので発熱が大きいという問題がある。(B)、(C)いずれの方式がより観測に適しているかは分解能の問題を含め検討の余地を残している。Fig. 5-2 及び Fig. 5-4 には(B)方式の回路を用いて得られた記録の例が示されている。ただし、感度は確認の方法がないので推定である。図から伸縮歪の東西成分と波形がよく似ていることがわかる。したがって、伸縮歪の水平2成分の和(面積歪)には比例していない。水平2成分をどのような比で加え合せると最も波形がよく一致するか計算しても、南北成分の伸縮歪1対東西成分の伸縮歪100程度の答が得られており、体積歪計には何らかの理由で、伸縮歪の東西成分に比例した量を記録しているのであろう。実験を行った体積歪計は松代のNo. 2 (#2)で黒色頁岩の中に設置されている。頁岩の節理、Cavityの効果や、割目を満たす地下水の動きなどに、東西成分の伸縮歪に比

例する要素があると考えられる。玢岩の中に設置されているNo. 1の体積歪計は、故障のため比較が出来なかった。

気圧が歪や傾斜に与える影響は少なからず、地殻変動観測には気圧の観測は不可欠である。松代では自己気圧計の空ごうに、マグネセンサーを取付けて気圧計として用いている。水銀気圧計との比較では良好な一致を示している。分解能については、精密な気圧計との比較を行っていないので確認されていないが、0.03 mb 前後ではないかと考えられる。

地下壕に侵透する降水については、他の地殻変動観測所に比べ量が少ないので、直接、電接雨量計で受け出力を分周して、日記紙に記録している。

#### 6) 記録システム

地殻変動の観測データのデジタル収録は、経年変化や潮汐の正確な解析には不可欠である。そのために、デジタルプリンターを製作し、1977年7月以降のデータ集録に用いた。今回の解析調査には、デジタルデータを主として用いた。記録精度は、伸縮歪計については $2.5 \times 10^{-11}$ /digit、泡式傾斜計0.02ミリ秒/digit、自記水管傾斜計0.07ミリ秒/digitそして気圧計0.003 mb/digitとなっている。また、サンプリングは30分毎を原則とし場合によっては10分毎、あるいは、1時間毎のデータを得た。製作したプリンターについては、檜皮ら(1980)により詳しく紹介されている。

#### § 4. 降雨の影響

降雨の地殻変動観測に与える影響については、今までに色々な調査が行なわれているが、統一的な解釈はなされていないようである。

地殻変動観測所の立地条件、環境が様々であって降雨の影響の現われ方が異なり、解釈がむづかしいことがその理由であろう。

過去には、降雨の影響は観測点付近の局所的な変化であって、地殻変動に対するノイズであるという考えが支配的であった。しかし、最近になり、尾池(1977)、山内(1977)は降雨と地震発生に関係ありとする説を発表している。

いずれにせよ、降雨の影響は歪量にして $10^{-7}$ のオーダーに達し、影響の継続時間も一ヶ月近くになるので、現象の詳細な分析が必要である。松代の場合については、降雨量と歪、傾斜の変化との対応を調べる前に、実際に降雨の際、観測壕にどのような現象が起っているかを吟味する必要がある。松代の特殊な事情とは、山岸ら(1976)

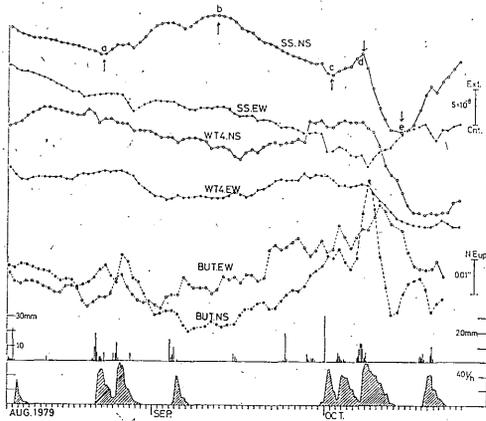


Fig. 4-1. Records of ground tilt and strain in rainy season of 1979.

North-south strain ordinarily shows extension in time of heavy precipitation as indicated in the period 'a' to 'b' and 'c' to 'd', but abrupt contraction as the period 'd' to 'e' was sometimes recorded after heavy rain fall.

Precipitation and amounts of leaked water (hatched part) into the vault were also indicated.

が報告した浸透水の現われ易い部分の存在である。Fig. 2-3 に A で示した部分に、浸透する水と降雨との間には、Fig. 4-1 で示されるはっきりした関連がある。多くの地殻変動観測所では、降雨の影響は坑道全体に湧水の増加等の形で現われる場合が多いようであるが、松代の場合は他の部分ではほとんど影響が認められない時に A 部分だけに、いわば、雨漏りのような形で現われる。坑道内に侵入した水がその後どうなるかについては、坑道の床が平均 40cm の厚さの岩屑でおおわれているためはっきりしなかった。最近になり、傾斜計の増設等のため数ヶ所て岩屑を取除き直接岩盤を観察できるようになり、不十分ながらも水の移動の様子が明らかになってきた。浸透した水が少ない時には、周辺の岩屑の間に吸収されてしまうが、多くなると坑道の床の勾配に従って北に流れ、一部は基盤の目状の坑道を伝わり伸縮計南北成分の設置された部分に流れ込む (Fig. 2-3)。この部分は、坑道が掘下げられ左右より低くなっている。降雨が始まってから数時間で A 点付近に浸透する事は、Fig. 4-1 に示されているが、雨量が多い場合にはさらに半日から 1 日のうちに、Fig. 2-3 の B 点に水が流れ込む。この変化は急で、乾いた B 点の岩盤が 1~2 時間の内に深さ 10~20 cm の水でおおわれてしまう。伸縮計室に

流下した水は北に進み、量が多い時は東西成分の設置されている部分に侵入するが、徐々に岩盤に吸収されて姿を消してしまふ。主として伸縮計の南北成分の周辺に止まる水の量は、多い時には室内の床の部分だけでも 30 トン近くに達するものと考えられる。山岸ら (1976) は伸縮計の南北成分に影響が現われるためには、降水量が最低 25 mm 以上必要である事を明らかにしたが、25 mm は A 点からの浸透水が B 点に侵入するに必要な雨量に近い。したがって伸縮計に降雨の影響が現われるのは、水が伸縮計室に流れ込むためであって、もし流れ込まないようにする事が可能であれば、歪や傾斜に現われる影響も違ってくる可能性がある。そこで、水の侵入を防ぐには、A 点と伸縮計室を連絡する通路に止水壁を設ければよいと考えられる。しかし、そのまえに、伸縮計室に流れ込む水を人為的に汲出すとどうなるか実験を行った。

B 点付近に流れ込む水を、ポンプで C 点付近へ送り排水した。吸水能力 100 cc/秒のポンプを用い、2 時間毎に 5 分から 15 分間欠的に運転した。降雨の間隔が長くなったり、量が少ないときにはポンプは空まわりしてしまう。Fig. 4-1 はポンプを運転した状態での降水量、A 点への浸透量、伸縮歪の両成分、フロート式自記水管傾斜計の両成分の約 3 ヶ月間の変化を示したものである。A 点への浸透量は、自記雨量計により天井から落下する水の一部を受けて測定した。実際に浸透する水の総量は、目測から測定された量の 10 倍程度と見積られる。

ポンプによる排水量は、適当な測定方法がなかったので表示していない。また、10 月の 9 日から 11 日にかけてポンプが故障したために、一時排水が止まった。Fig. 4-1 の中で 80 mm 以上の降水があったのは、8 月下旬および 10 月上旬の 2 つの時期であるが、伸縮計南北成分は異なる変化を示した。8 月下旬の場合は、南北成分は伸びを示しているが、10 月上旬の場合になると初めの時期は伸びを示すが、途中から急激な縮みに転じ、その後回復している。

山岸ら (1976) の Fig. 8 には 10 月上旬と同じパターンの変化が 2 例示され、ポンプを使用する以前には、このパターンが松代の降雨による歪変化の典型と考えられていた。しかし、8 月下旬の場合は Fig. 4-1 の d, e, f に相当する変化は、まったく現われていない。また、10 月上旬の場合も山岸ら (1976) の Fig. 8 に示される時と比較して変化の量、継続時間共に半分程度と変化が小さくなっているため、ポンプによる排水は南北成分の急激な縮みを防ぐ効果をもつと考えられる。もちろん、一ヶ所の水を汲み上げて排水する方法では限度があり、10

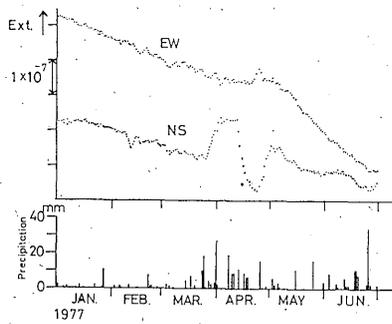


Fig. 4-2. Another example of large contraction by rainfall recorded in 1977.

月上旬の変化は総雨量が 100 mm を越え、8 月下旬の降雨の影響も残っていたために水が伸縮計室に多量に流れ込んだためであろう。Fig. 4-1 の a から b, c から d に相当する初期の伸びについては、1977 年の記録にも認められる (Fig. 4-2)。細かく検討してみると、その他の時期にも急激な縮み変化は認められないが、初期の伸びだけという例は多い。雨の影響の現われ方に 2 通りある事は、竹本 (1976) によっても報告されている。松代の場合は、伸縮計室の床に水が止まる程流れ込むかどうかにより影響の現われ方が異なるのであれば、伸縮計室へ流れ込む水を他へ排水すれば、雨の影響の現われ方も変わってくるのではないかと考えられる。

志知ら (1970 a) や山内ら (1970) は、降雨による歪変化は、多孔性媒質の間隙水圧の変化により発生すると考え、坑道の奥の破碎帯からの湧出量が歪変化と比例することを説明した。また、石井ら (1973) も同様の立場から降雨による歪の時間変化を表現する理論式を導いた。

間隙水圧の増加は縮みの歪変化を起すはずであるが、松代では逆に伸びを示しており、単に間隙水圧の変化だけでは説明できないように思われる。また、降雨量の多い時に現われる急激な縮みの原因は、坑道の床全体へ水が浸透する時の間隙水圧の増加、あるいは、水の荷重による床面の荷重変形などが可能性として考えられる。フロート式の WT4 には、南上りの影響が認められる。南側程流れ込む水の量も多いようであるから、南側の基台が間隙水圧により持ち上げられたという見方も出来る。WT4 に現われる雨の影響は、山岸ら (1976) の報告の結果に比べ小さいように思われる。古い WT2 は基台の片側が坑道の側壁に接しており、コンクリート側壁と岩盤の間隙に入る水の影響を受けるのかもしれない。Fig. 4-

1 には、泡式傾斜計の記録も参考までに示した。雨の影響らしきものは認められるが、水管傾斜計の変化とは異なっている。松代における降雨の影響やその機構を明らかにするためには、具体的に水の浸透の様子を詳しく調べる必要がある。現状では、常時湧水のある地殻変動観測所で得られた経験を、そのまま松代の例にあてはめることはむずかしい。また、降雨の影響と似た変化が降雨とは関係なく現われる事もあり、地下水位の変化なども変動の原因になっている可能性もある。したがって坑道内に、縦穴を設け地下水位をモニターする必要もあるように思われる。今回行ったように、人為的に排水したり、逆に注水したりすることも現象解明の一手段ではないかと考えられる。

以上、今回の降雨の影響に関する調査では、伸縮計南北成分に現われる大きな縮み変化は、いったん坑道のレベルまで浸透した雨水が、伸縮計室へ流れ込むことにより起ること、この流れ込みを防ぐことにより縮みの変化を除去、または、小さく出来ること、水が坑道周辺に浸透するために起る変化は伸縮歪の両成分共に伸びであり、雨量が 100 mm を超える場合でも、量としては  $5 \times 10^{-8}$  を超えないことなどが明らかとなった。松代のように内陸で降雨量の少ない場所では、前述の方法により雨の影響を小さくすることが出来れば、降雨の影響はデータ解析上問題になることは少ないと考えられる。

## § 5. 気圧変化と地殻変動観測

### 1) 松代で観測される気圧の影響とその補正方法

気圧変化による影響は、降雨による影響に比べ一般に小さく、あまり重要視されていないために、研究例も少ない。しかし、気圧変化には幅広い周波数成分が含まれ、また、定量的に計測可能な物理量であるので、気圧に対する歪、傾斜の応答を調べる事は、地殻の性質を理解するうえで有益であろう。また、松代のように内陸で降雨量が少なく、降雨の影響が現われる機会の少ない場所では、潮汐と気圧変化の影響が日常見られる現象の大半を占めており、相対的に気圧の影響は重要な要素である。

短周期の微気圧変動は歪や傾斜の観測より、むしろ地震観測に影響が顕著である。風の強い微気圧変動の大きい時には、長周期地震計の記録に一分程度の周期のノイズとして現われる。上下動成分には空気の浮力変化、つまり、気圧変化そのものが記録され、傾斜計でもある水平振子型の水平動成分には、地面の傾動が記録される。これら短周期の変化については地震計の場合、地中に埋

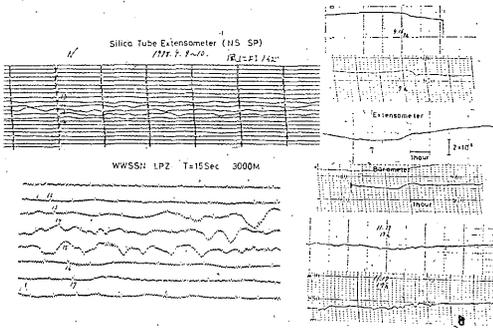


Fig. 5-1. Effects of atmospheric pressure upon the ground strain. Wind generating noise of short period was shown on the record of extensometer (upper) and on the record of vertical long period seismograph (lower). Weather fronts also causes change in strain when they pass over the observatory.

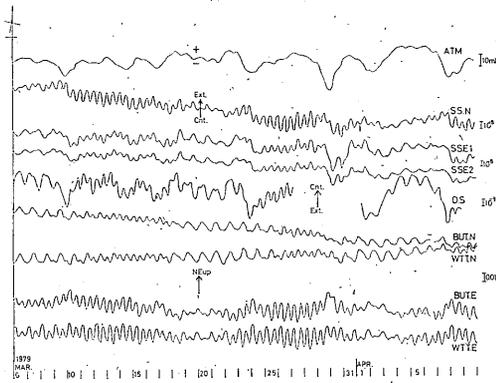


Fig. 5-2. Original records of several instruments. ATM: Atmospheric pressure, SS. N: North south strain obtained from silica tube extensometer, SS. E1: East-west strain, SS. E2: East-west strain by intermediate sensor, BUT: Tilt by bubble biaxial tiltmeter, WTT: Tilt by moving float type water tube tiltmeter, DS: Dilatation by Sacks-Evertson type bore hole strainmeter.

設置することにより影響を軽減できることが明かにされている (Peterson et al. (1976)). しかし、地殻変動観測では一部の地中型傾斜計や体積歪計を除き、地中深く計器を設置することは出来ないで、影響はまぬがれない (Fig. 5-1). やや周期の長い変動になると、地震計では影響を無視出来るようになるが、気象前線通過時



Fig. 5-3. Bandpass filtered (3 to 7 hours) records of strain and atmospheric pressure.

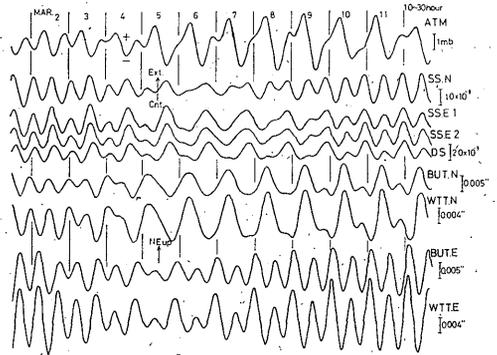


Fig. 5-4. Bandpass filtered (10 to 30 hours) records of strain and pressure. Records show tidal strain and tilts and semi-diurnal and diurnal variation of pressure.

の気圧変化なども歪計にはっきりと記録される (Fig. 5-1).

さらに、周期の長い変動については、潮汐変化、地殻変動の信号と気圧の変化による影響が混在するので分離がむつかしくなる。

今回は気圧の影響を、周期により分けて調べることにした。調査に用いた石英管伸縮計、水管傾斜計、泡式傾斜計、体積歪計の原記録を Fig. 5-2 に示す。Fig. 5-2 からは主として長周期の変動の様子を窺うことができる。体積歪計や伸縮歪計には、気圧の変化に対応した変化を見出す事ができる。また、泡式傾斜計や水管傾斜計の東西成分にも、気圧の影響らしきものが存在するが、南北成分については影響は認め難い。詳しく調べるために原記録に、帯域フィルターを通した波形を Fig. 5-3, 4, 5, 6 に示す。

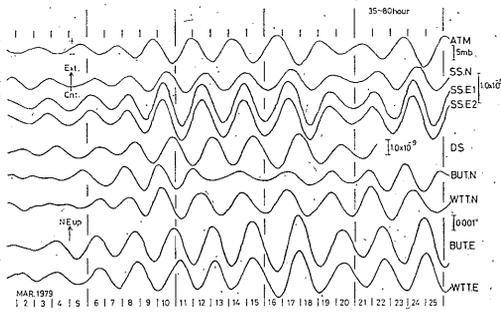


Fig. 5-5. Bandpass filtered (35 to 85 hours) records of strain and pressure. Large phase shift was observed between strain and pressure.

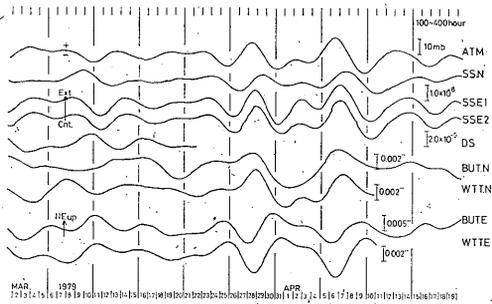


Fig. 5-6. Bandpass filtered (100 to 400 hours) records of strain and pressure.

使用したフィルターの特性の一部を Fig. 5-7 に示した。まず最も周期の短い帯域 Fig. 5-3 においては、気圧と各成分の相関がよいとは思われない。各成分とも変動の振幅が小さくなり、泡式傾斜計などは公称の分解能(約2/1000秒角)より小さい変化を示している。伸縮計の南北、東西成分の間には、共通した変動が認められる。10分毎のデータが得られる伸縮計、泡式傾斜計と気圧成分相互の相関係数を求めてみた (Tab. 5-1)。最も相関が高いのは、伸縮計の両成分である。次は、伸縮計と気圧の間の負の相関である。他の相関はいずれも小さい。伸縮計の直交2成分の相関が高い理由は、明らかでない。センサー、エレクトロニクスともに独立であるが、設置環境は共通している。

泡式傾斜計の両成分は、センサー、エレクトロニクスともに同じ筐体に納められているのに相関が小さい。計器から発生するノイズであれば、相互の相関はもっと高いのではないと思われる。結局、3~7時間の帯域では、伸縮歪は気圧の増加に対し縮みを示すが、その他の

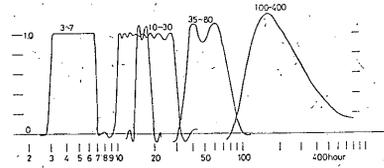


Fig. 5-7. Responses of the band pass filters used in the present analysis.

Tab. 5-1. Cross correlation coefficients for short period components of strain, tilt and atmospheric pressure.

	A. T. P	SS. NS	SS. EW	BUT. NS	BUT. EW
BUT. EW	-0.361	0.244	0.267	0.267	
BUT. NS	0.236	-0.258	0.296		
SS. EW	-0.497	0.819			
SS. NS	-0.371				
A. T. P					

成分については、気圧以外の原因による変動が大きく、気圧との相関は認め難いという結論が得られる。

次に地球潮汐を含む帯域 (10~30時間) には、気圧の日周期、半日周期成分、歪、傾斜の潮汐が記録されている (Fig. 5-4)。気圧の変化は晴天の時は日周成分、曇天や雨天の時には半日周期成分が卓越する。この帯域では、気圧と各成分の関係を、直接、求めることは困難である。

潮汐より周期の長い帯域では、気圧と各成分の変化の関係が明瞭となる (Fig. 5-5)。伸縮歪は、気圧変化にかけ上、先行して変化するように見える。また、南北、東西両成分の位相がずれている。傾斜の南北成分については気圧が増加すると遅れて北上りとなるが、泡式と水管では、やはり、位相のずれが認められる。

体積歪、泡式、水管傾斜計の東西成分には、気圧変化との位相のずれは認められず、気圧増加で縮み、西上りの傾斜を示す。もっとも周期の長い Fig. 5-6 に示す帯域では、伸縮歪と、気圧変化の位相のずれが大きくなり、気圧の増加で伸びを示すようになる。以上、示した図から傾斜の東西成分や体積歪のように、気圧変化に比例した変化を示す成分と、伸縮歪や傾斜の南北成分に見られるように周期により気圧に対する応答が変化する成分があることがわかった。また、原理の異なる2種類の傾斜計は、気圧変化に対し量は異なるが同質の変化を示

している。泡式傾斜計に気圧の影響が大きく現われるのは、基線長が短かいために坑道の Cavity による効果などで影響が増幅されるためであろう。気圧の変動による歪や傾斜については長谷川ら (1971), 松本ら (1973) により弾性論の立場から論じられているが、弾性論からは今回明らかにされたような位相のずれは考えられない。歪や傾斜には気圧より気圧傾度の時間的変化が影響を与えることも考えられるので、松代周辺における南北、東西方向の気圧傾度の変化を調べてみた (Fig. 5-8 a, b).

Fig. 5-8 には伸縮歪と傾斜の長周期成分を比較のために示したが、気圧変化ほどの対応は認められず、伸縮歪

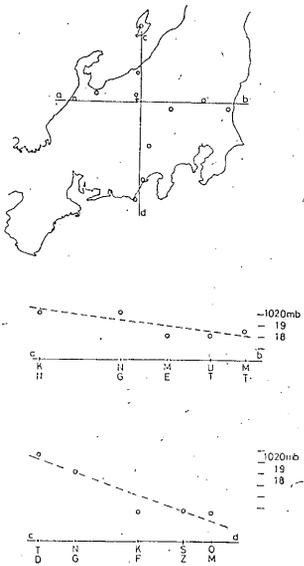


Fig. 5-8-a. An example of pressure gradient measured along the north south and the east west line around Matsushiro.

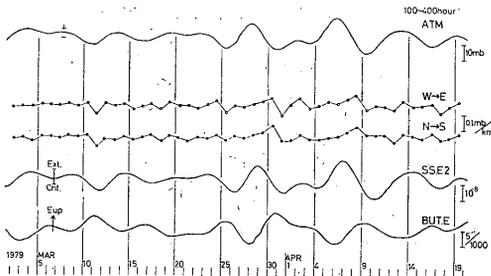


Fig. 5-8-b. Changes of pressure gradients and strain. No correlation was found between them.

の位相のずれは気圧傾度では説明できないことがわかる。

気圧変化と歪、傾斜の定量的な関係を求めるために、周期別に相互相関関数と、比例係数を求めた。気圧の時系列を  $A_i$ , 歪や傾斜の時系列を  $Y_i$  とすると、分散  $\sigma_A$ ,  $\sigma_Y$  と相互相関関数  $r(\tau)$  は (5-a) および (5-b) で現わされる。

$$\sigma_A^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i^2 \quad \sigma_Y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i^2 \quad (5-a)$$

$$r(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i Y_{i+\tau} / \sigma_A \sigma_Y \quad (5-b)$$

各成分は平均値が零になるよう予め補正した。  $r(\tau)$  の絶対値が大きい程高い相関を示し、  $r(\tau)$  の絶対値が最大になるときの  $\tau$  が時間差を示し、比例係数  $\alpha$  は (5-c) が現わされる。

$$\alpha = (\sigma_Y / \sigma_A) r(\tau) \quad (5-c)$$

通過帯域の狭い Gaussian フィルターを通した波形から、  $\alpha$ ,  $\tau$  を求めた例を Fig. 5-9 の (a) に示した。伸縮歪のように周期により  $\alpha$ ,  $\tau$  が変化する場合には、気圧に対する応答関数は、単純な形では表わせない。そこで、気圧と歪、傾斜の間に (5-d) 式の関係を想定し、 Fig. 5-9 に示した結果を最も良く表わす係数  $a$ ,  $b$ ,  $c$  を、最小自乗法を用いて計算した。

$$Y(t) = aA(t) + b \frac{dA(t)}{dt} + c \frac{d^2A(t)}{dt^2} \quad (5-d)$$

Tanaka (1969) は、気圧変化の歪、傾斜に与える影響を調べる方法として、2つの方法を用いた。まず、潮汐は、海岸に近い観測点では海洋潮位の変化に比例し、比例しない部分は温度および気圧の日変化によるものとして温度及び気圧に関する係数を求め、次に数分から1時間程度の周期の変化については傾斜、歪、気圧のフーリエ変換を行い振幅、位相の比較から 5-d 式の、  $a$ ,  $b$ ,  $c$  に相当する係数を求めた。松代は海岸から離れているので、初めに述べた方法を適用することは困難である。後に述べた方法と、今回用いた方法は原理的には同じであるが、対象とした帯域は異なっている。 Tab. 5-2 に求めた結果を示す。  $a$ ,  $b$ ,  $c$  の単位は歪については、それぞれ、  $10^{-8}/\text{mb}$ ,  $10^{-8}\text{mb}/\text{hour}$ ,  $10^{-8}\text{mb}/\text{hour}^2$  となり、傾斜については  $0.01''/\text{mb}$ ,  $0.01''/\text{mb}/\text{hour}$ ,  $0.01''/\text{mb}/\text{hour}^2$  となっている。また、傾斜や歪の潮汐変化の中ほどの程度の割合で気圧変化による影響が含まれているか (5-d) 式から推定できるので、潮汐変化に含まれる気圧変化の割合 (振幅比) も Tab. 5-2 に示した。水管傾斜計に現われる影響が最も少なく、地殻潮汐の解析には水

Tab. 5-2. Coefficients for formula (5-d) determined by the least square's method from cross correlation functions.

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	AP. C/T. A
SS. NS	-0.0039 ± 0.0011	-0.628 ± 0.030	0.815 ± 0.056	0.082
SS. EW1	0.0646 ± 0.0026	-1.142 ± 0.050	1.610 ± 0.126	0.14
SS. EW2	0.0589 ± 0.0023	-1.117 ± 0.039	1.220 ± 0.111	
D. S	-0.0243 ± 0.0011	0.0037 ± 0.001	-0.034 ± 0.006	0.10
WTT. NS	0.0079 ± 0.0008	-0.022 ± 0.001		0.007
BUT. NS	0.0090 ± 0.0002	-0.0904 ± 0.005		0.017
WTT. EW	-0.0220 ± 0.0002	0.063 ± 0.004	0.052 ± 0.009	0.015
BUT. EW	-0.0497 ± 0.0008	-0.0306 ± 0.004	0.183 ± 0.037	0.048

$$y(t) = aP(t) + bP'(t) + cP''(t)$$

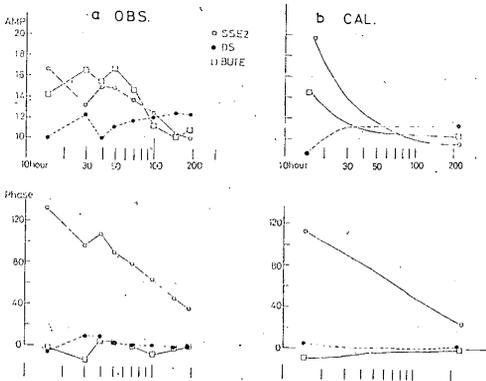


Fig. 5-9. Examples of frequency responses of strain and tilt to atmospheric pressure. 'a' shows the response estimated by cross correlation function and 'b' the one calculated by optimum coefficients of formula (5-d).

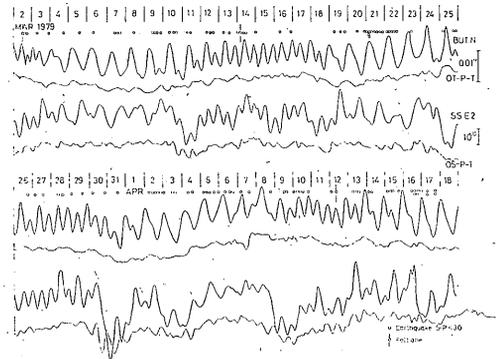


Fig. 5-10. Original and corrected records of strain and tilt. Correction was made by using formula (5-d) and by removing the tidal strain and tilt from the original records. Local seismicity was also shown by small open circles.

管傾斜計が適していることが明かであろう。(5-d)式で表わされる気圧の応答関数の例を、Fig. 5-9bに示した。

Fig. 5-9a と比較すれば、5-d 式が気圧の応答を良く表わすことがわかる。(5-d)式を用いて観測された歪や傾斜から気圧の影響を除去し、地殻変動をより詳しく調べる事が可能と思われるので、泡式傾斜計の南北成分と、伸縮計東西成分の中間出力について補正を試みた(Fig. 5-10)。潮汐は主要4分潮 ( $M_2, S_2, K_1, O_1$ ) の振幅、位相を最小自乗法により求め、求めた位相、振幅を合成して除いた。松代周辺で発生した微小地震の数および原記録、気圧および潮汐の影響を除いた結果が示されている。

補正後の記録から原記録ではわからない微細な伸縮、傾斜変化を認めることが出来る。

伸縮歪に現われる大きな変化は、観測者の入坑など人為的な影響である。地震活動は低調で、歪や傾斜変化との関連は認め難い。

以上、気圧の歪や傾斜変化に与える影響は、(5-d)式を用いることにより、かなり良く表わされることが明らかとなり、実際に気圧変化を補正することも可能となった。しかし、まだ幾つかの問題が残っている。まず(5-d)式の物理的な解釈の問題がある。係数 *a* は弾性変化を示すと考えられる。しかし、伸縮歪の両成分で符号が逆になっている。係数 *b* について Tanaka (1969) は、気圧の傾きによる影響を考えている。確かに、潮汐による気圧変化は、西向きに定速で進むので、気圧の時間変化量と空間的な気圧の勾配の間で一定の関係が成立つ。しかし、潮汐以外の気圧変動については、変化の方向や

速度は一定であるとは限らない。したがって、係数  $b$  が、空間的な気圧の勾配に結びつくとは限らない。  $c$  に至っては、どのような物理的な意味を持たせるべきかわからない。もう一つの問題は、(5-d) 式のあてはまる帯域が限られることである。10時間以下の周期については、(5-d) 式の2, 3項が大きくなり、実際の現象にあてはまらなくなる。近似式として(5-d)式は有効であるが、気圧の影響を(5-d)式の形に仮定することは不自然である。次の段階として特別な仮定を置かずに、歪や傾斜の気圧に対する応答を求めることを考えた。

## 2) 傾斜と歪の気圧変化に対する応答関数

いま、気圧を入力とし、歪や傾斜変化を出力とするフィルターを考える。フィルターの形については、(5-d) 式のような仮定をせず、入力と出力から直接求めることを考える。フィルターのインパルス応答を  $a(i) (i=0, \dots, M)$  とすると次(5-e)式が成立つ。

$$Y(t) = \sum_{i=0}^M a(i)A(t-i) + u(t) \quad (5-e)$$

$(t=0, 1, \dots, N)$

$M$  はフィルターの長さを示し、 $u(t)$  は傾斜や歪の気圧と無関係な変動を表わす。潮汐変化や地殻変動、雨の影響などが  $u(t)$  に含まれる。 $u(t)$  がホワイトノイズであれば、最小自乗法を用いて有限のデータから  $a(i)$  を推定できる。潮汐による歪や、傾斜と気圧の日変化、半日変化の間のコヒーレンスは見かけ上大きいので、 $Y(t)$  と  $A(t)$  から潮汐変化を取除けば、 $u(t)$  はホワイトと見なせる。そこで、潮汐変化を除去した  $Y(t)$  と  $A(t)$  について、次式を最小にする  $a(i)$  を考える。

$$\text{Res}_M = \sum_{t=0}^N (Y(t) - \sum_{i=0}^M a(i)A(t-i))^2 \quad (5-f)$$

$\text{Res}$  が最小となる  $a(i)$  を求めることは、結局、 $A(t)$  の自己相関関数と  $A(t)$ 、 $Y(t)$  の相互相関関数を係数とする正規方程式を解く問題に帰着する。具体的な計算方法として相関関数と  $a(i)$  を同時に求めて行く方法と、相関関数を計算した後に、正規方程式を解く二通りの方法がある。菊地(1977)は Maximum Entropy Method の Burg の方法を応用し、相関関数と  $a(i)$  を同時に求める方法を示した。相関関数を先に計算し、正規方程式を Levinson の方法を用いて解く手順については、例えば Wiggins, Robinson (1965) などに紹介されている。フィルターの長さ  $M$  については(5-g)式を最小にする  $m$  を用いる。

$$c_m = \frac{\text{Res}_M}{N-m} \frac{\sum_{t=0}^N Y(t)^2}{N-1} \quad (5-g)$$

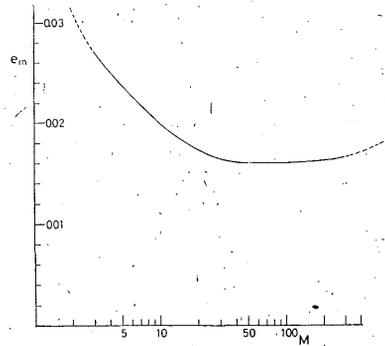


Fig. 5-11. An example of relative output error  $e_m$  vs. filter length  $M$ . It is difficult to determine the optimum filter length.

実際に計算を行ってみると、 $M$  は用いるデータの長さによって変わってくる。また、 $e_m$  はデータが長くなる程減少、増大がゆるやかになり、 $M$  を決めにくくなる。 $e_m$  と  $m$  の計算例を Fig. 5-11 に示す。今回は Levinson の方法を用いて計算した。計算の手順としては、1時間、または30分毎にサンプリングされた約3400時間分のデータから、ドリフトおよび周期400時間以上の周波数成分をフィルターにより落とし、次に潮汐の各分潮の振幅を最小自乗法により求めた。分潮として主要4分潮の他に、 $P_1$ 、 $S_1$  の2分潮を加えた6分潮を仮定した。各分潮の振幅と位相から潮汐を合成し、差をとることにより、潮汐を除去した記録を得て計算を行なった。まずフィルターの長さについては、傾斜の両成分および伸縮歪の東西成分では、フィルターの長さが60時間から80時間の時、(5-g)式が最小となる。伸縮歪の南北成分で、125時間程度となるが、いずれの場合も Fig. 5-11 で示されるように、 $e_m$  が最小になる  $m$  を、一義的には決めにくい。実際の計算に用いたフィルターの長さは、水管傾斜計は60時間、泡式傾斜計は75時間、そして伸縮歪は125時間である。計算により求められたフィルターの係数  $a(i)$  は、フィルターのインパルス応答を示し、フーリエ変換を行うと、周波数応答が求められる (Fig. 5-12)。傾斜の2種類の東西成分は、いずれも周期にかかわらず位相が一定しており、今までの結果と調和する。また、伸縮歪、傾斜の南北成分は周期により位相、振幅が変化しており、周期によって位相のずれや、極性の変化があることを示している。20時間から40時間の間では、周波数応答が各成分ともなめらかでない。おそらく、潮汐の取扱いに不適切な点があったため、本来はもっとなめらかに変化しているのであろう。 $a(i)$  からステップ応答を求めることも

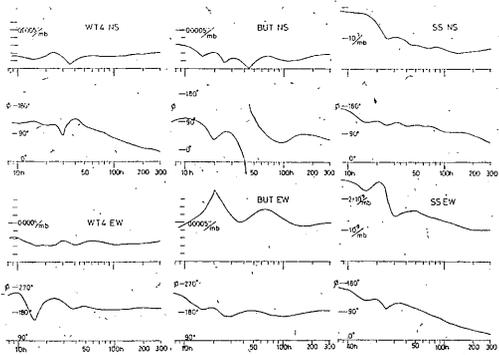


Fig. 5-12. Examples of frequency response of optimum Wiener filter which represents the influence of atmospheric pressure upon the ground strain and tilt.

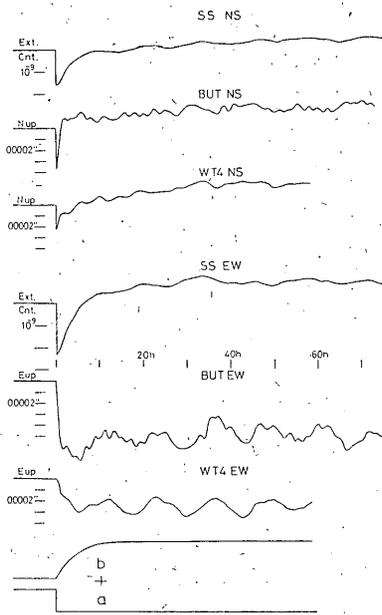


Fig. 5-13. Step responses of optimum Wiener filters. They indicate the change of strain and tilt at pressure increase of 1 mb. Influence of atmospheric pressure will be represented by the sum of elastic (a) and non elastic (b) deformation of the ground. Physical meaning of non elastic deformation is not known.

伸縮歪の両成分と傾斜の南北成分の、特異な変化の様子が良く示されている。一部の成分に認められる日周変化は、潮汐の除去が不十分であるためと思われる。Fig. 5-13に見られる変化は、気圧の変化に対する2種類の異なる性質を持つ応答(Fig. 5-13の a, b)の重ね合せられたものと解釈することが出来る。aはいうまでもなく弾性変形であるが、bは広い意味での非弾性的な応答と考えられる。気圧の変化に伴う地下水位の変動や、間隙水圧の変化などが、bと関係している可能性がある。

また、bが気圧による応力変化に限って現われるとは考え難い。潮汐や地殻変動、地震による応力変化に対して、同様の応答を示すことは、十分に考えられる。したがって地殻変動観測の結果を弾性論のみを用いて解釈することは、誤まった結論を導く恐れがある。bで表わされる応答が、時間的に不変であるかどうか、興味ある問題である。例えば、地下水位の変化などによりbの時定数、振幅などが変化すれば、地殻潮汐の振幅や位相も変るはずである。この問題を調べることは、精度の点でかなり困難であるが、すべての現象に関連するだけに重要である。

最後にインパルス応答  $a(i)$  を用いて予測した歪、傾斜変化の例を Fig. 5-14, 15に示す。1979年9月から10月には、2つの台風が松代の近くを通過し、40 mbに近い気圧変化があった。予測値、観測値共に、潮汐成分は除いてある。

歪は両成分共に、予測と結果が良く一致しているが、傾斜の南北成分については、泡式、水管のいずれも、あまり一致していない。

原因としては、当時は降雨の影響も大きかったこと、気圧の変化が小さい時と大きい時、あるいは時期により応答  $a(i)$  が変化することなどが、原因として考えられる。インパルス応答を用い方法は、2時間から400時間までの広い周波数帯域の変動に適用できるので、(5-d)式を用いる方法より有用である。今後は、応答の発生機構の解明、時間変化の有無の確認、潮汐の影響を分離する方法の改良が必要であろう。また、短周期の気圧変化による影響の解明も、今後に残された問題である。短周期の気圧変化は、坑道内での気圧の傾きを伴うことも予想される。また、微気圧変動により、断熱変化が起っている可能性もある。断熱過程における気圧と温度の間には、(5-h)式の関係があり、0.1 mbの気圧変化は、気温13℃前後で0.008℃の温度変化を伴う。精密な温度測定により、坑道内で断熱変化が起っているか確認する必要がある。

可能であり、気圧が1 mb ステップ状の上昇を示した時の応答を Fig. 5-13 に示した。

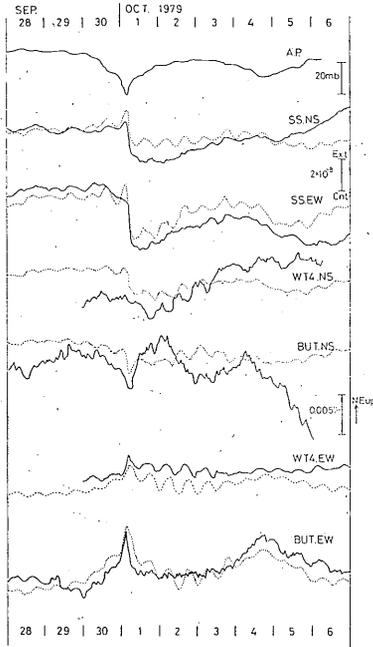


Fig. 5-14. Observed (solid lines) and calculated (dotted lines) strain and tilt when typhoon passed over the observatory. Tidal components were removed from the both records.

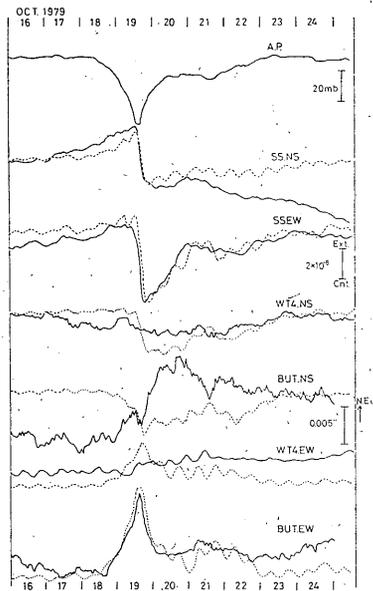


Fig. 5-15. Other examples of records of strain and tilt at typhoon.

$$\frac{\Delta T}{T} = \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma} \right) \frac{\Delta P}{P}, \quad (5-h)$$

$T, \Delta T$ : 絶対温度と変化,

$P, \Delta P$ : 気圧とその変化,

$\gamma$ : 比熱比 (空気は約 1.403)

## § 6. 歪, 傾斜の経年変化

### 1) 群発地震終息後の傾斜, 歪変化

松代に於ける地殻歪の経年変化については, 山岸ら (1976) により1975年までの結果についてすでに報告されているので, 今回は地殻活動との関連と計器の信頼度に由来する問題を考察する. まず, 群発地震当時の地殻変動については, 水準測量, 光波測量, 断層と地割れに関する調査が, 東京大学地震研究所を中心として行われ, 詳細な様子が明かにされている. それらによれば, 皆神山北東側が隆起し, 北東側に推定された北西, 南東の走向を持つ左横ずれ断層が活動し, 多くの地割れや湧水現象が観察された. そして, 地殻の変動と地震活動は, よい一致を示し, 地震観測所坑道における傾斜観測の結果もそれらと調和した変化を示したといわれている. 群発地震活動は, 1966年9月を境として衰え, 水準測量, 光波測量の結果も同時に隆起から沈降に変わり, 南北方向の測線もそれまでの伸張から収縮に転じた事が報告されている. 活動最盛期には, 最大隆起量が 70cm, 皆神山可候測線の伸張が 116cm, 皆神山象山測線の収縮が 22cm であった事は, Kasahara (1970), 井筒屋 (1975) などによりまとめられている. また, 山田 (1973) によれば, 水管傾斜計は25秒角に及ぶ東南東上りの変化を示し, 活動が衰えると南西上りに転じその傾向は現在に至るまで続いている. また, 地震観測所付近の水準点 ERI9 は, 大竹 (1976) による水準測量結果の再検討によれば, 最大降起量は 26cm 程度と見積られている. これらの結果から観測所付近の歪変化を推定すると, まず東西の伸縮歪は, 皆神山測線の収縮でそのまま類推出来るとすれば, 約  $90 \times 10^{-6}$  の収縮が期待されよう. 南北成分の伸縮歪については皆神山, 可候測線の伸張は, 断層を跨いだ観測結果であり, 観測所の位置する断層南西側のブロックの内部歪に結びつける事は困難である. しかし, 地震の発震機構からは東西圧縮, 南北伸張の動きが予想されるので, 観測所付近の南北の伸縮歪は伸びであった可能性が強い. 一方, 傾斜については, 水準測量の結果から 2 km あたり 10cm の北東上りの傾斜が期待される. 傾斜量に換算すると  $5 \times 10^{-5}$  ラジアンとなり, 山田 (1973) の観測した  $13 \times 10^{-5}$  ラジアン

量とオーダーは一致するが観測された傾斜の方向は東南東と45°以上異なっている。

食い違いの理由は、水準測量の基準点の間隔が、局部的な地形変化を現わすには広すぎるためであろう。一方、1966年9月以降の余効的な変化により観測所付近で期待される歪変化は次のようになる。まず隆起部分の沈降により北東下りの傾斜が期待されるが、山岸ら(1976)による結果と一致する。特に水準変化は1970年までに約50%回復したことが井筒屋(1975)により報告されているが、1966年9月から1970年までの傾斜変化量も10秒角前後と約半分の変化量を示しており、傾斜観測と水準測量の結果は、終始よく調和していたといえることができる。伸縮歪については、皆神山、象山測線の終始収縮を示していた事実から、東西成分は縮みであると考えられる。南北成分については、伸びであるか縮みであるべきか判断する材料に乏しい。観測所北東側の沈降は縮む方向に作用すると思われるが、地震の発震機構は依然として東西圧縮、南北伸張の応力が働いていることを示している。以上の状況を考慮して1970年以降の傾斜、歪変化を検討した。

Fig. 6-1に1970年以降の歪、傾斜を示す。傾斜は南西上りを示し、年々変化量が小さくなっており、1973年頃までは群発地震後の余効変動と見なせるが、その後は余効変動とは独立した傾動であるという見方も出来る。伸縮歪については両成分とも縮みを示し、1974年前後には

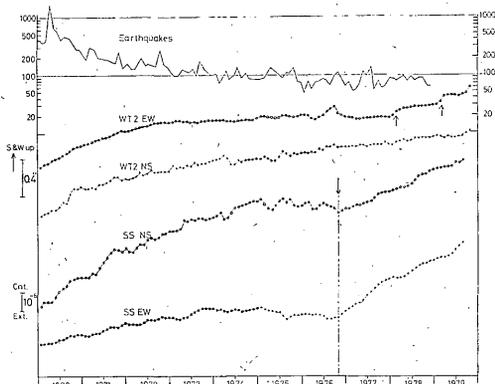


Fig. 6-1. Secular change of strain and tilt from Jan. 1970 to Oct. 1978. Defumidifiers operated until Oct. 1977 (indicated by arrows) were removed from the vault for the fear of undesirable influence upon the observation. Strain change became larger since then.

縮む傾向は頭打ちとなっているが、1976年以降直線的な縮み変化を示している。

この部分の変化については、計器の信頼度にかかわる重要な問題を含んでいるので、改めて次節で検討する事にし、一応観測された値をそのまま用いる事にする。1970年以降の傾斜は10年間で1秒角前後、伸縮歪については、 $5\sim 10 \times 10^{-6}$ 前後の変化があった事になる。いずれも群発地震当時の変化量に比べ極めて小さく、傾斜については3~4%前後となる。もし、1970年までの傾斜と水準測量の結果の調和が、1970年以降もすべての変化について成立すれば、現在の状況は次のようになるであろう。東西成分の伸縮歪は、皆神山、象山測線の縮み変化との比から $3 \times 10^{-6}$ 前後となり、観測結果と一致する。また、皆神山北東側の隆起は最大で70cm前後、1970年までにその半分の量が沈降により回復し、以後10年間で2~3cmさらに沈降した事になる。1970年以降の変化は、測量の精度から考えると検出することは可能と思われるので、近い将来に改測を期待したい。

## 2) 伸縮歪計の長期安定度について

Fig. 6-1から伸縮歪計の1976年10月以降と以前では、はっきりとした変化のパターンの違いが認められる。南北成分に見られる短周期の変動は、主として降雨の影響であって東西成分より影響が大きく現われているが、1976年10月以降は、降雨の影響が以前に比べ小さくなっている。東西成分については降雨の影響が小さく、1976年10月以降と以前に差は認めたい。もし、この長周期変化が地殻の歪を忠実に反映しているとすれば、最近、関心が集まっている広域地殻変動、あるいは、移動性地殻変動との関連が注目される。しかし、計器の動作を検討してみると、この変化は真の変化とは考えられない。というのは、1976年10月にそれまで使用していた3台の除湿機の使用を停止したからである。除湿機の停止により坑道内の気温は0.7~0.8℃低下し、湿度は数%上昇した。したがって、この環境の変化に原因がある可能性が大きい。環境の変化は、岩盤、センサーエレクトロニクス、基準尺である石英管に、それぞれ影響すると考えられる。Fig. 6-2は東西成分の3つのセンサー出力を比較したもので、いずれも歪量に換算してある。基線長の短かい成分は分解能が低い、並行した変化を示す。原理の異なる独立したセンサーから、一致した変化が見られることは、センサーの動作からは上に述べた問題は起り得ないことを示している。残された可能性は基準尺の伸縮、もしくは、岩盤の変化であるが、松代の伸縮計の基線が100mと長い事を考えれば、岩盤がわずかな温度や

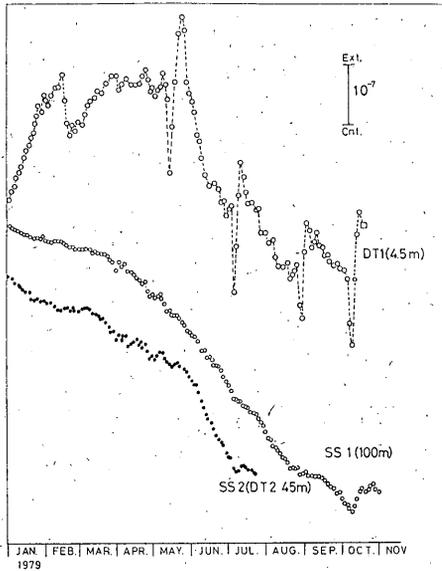


Fig. 6-2. Comparison of 1 year records obtained from three transducers on the same silica tube rod of east-west extensometer.

湿度の変化でその性質を変える事は考え難いし、もしそうであるならば、すべての横穴式地下塚における観測は意味がなくなってしまう。したがって基準尺に問題がある可能性が強い。特に、石英管の接続に接着剤を用いている事が疑われる。エポキシ系の接着剤は、水分を吸収し膨脹する性質があるといわれている。接着剤の変化により基準尺が伸張すれば、縮み変化として観測されるはずであり、接着剤の経年変化が温度や湿度条件により若干変った可能性が現時点では最も大きいと思われる。基準尺の伸張があったとするならば、1967年以降の伸縮変化は、考え直さなければならない。南北、東西両成分とも実際に縮んだ量は小さいか、あるいは逆に伸びであった可能性がある。以上、最近10年間の伸縮、傾斜の変化は、群発地震の余効変化と調和しているが、伸縮については、計器の特性に由来する疑問点が存在する。

### 3) その他の微小変化

Fig. 6-1の伸縮、傾斜に見られる短周期変化は、降雨の影響であることはすでに述べた。山岸ら(1976)は、年周変化として歪で $10^{-7}$ 、傾斜は0.03秒角前後であることを明らかにしたが、そのほとんどは降雨の年周変化によるものであると考えられる。降雨以外の原因によると考えられる変化は、1976年の8月、1978年の1月、1979年の2月頃に水管傾斜計の東西成分に現われている。東西成分の傾斜計WT2は、坑道のもっとも奥に置

かれており、人為的な要因も見あたらない。クリープのような現象と思われるが、群発地震の余効的な変動がほぼ収まった1975年以降に発生していることに興味を持たれる。しかし、地震活動や他の成分の変化との関連は認められず、局所的な変動である可能性も強い。WT3との比較観測を今後しばらく続けることにより、現象を究明する必要がある。

## § 7. 地殻潮汐に関する調査

### 1) 松代で観測される潮汐現象

地殻や重力の潮汐変化は、地球の弾性的性質を調べるために、古くから研究が行われている。これらの潮汐変化は海洋潮汐の影響を含んでおり、海洋潮汐の影響を地殻の潮汐から分離する試みも数多く報告されている。最近では、田中(1972)、Beaumont et al.(1975)などによる詳しい議論がある。

重力の潮汐については、海洋潮汐の影響以外には、潮汐の位相、振幅に影響を与える要素は少ない。しかし、地表付近で行う伸縮計や傾斜計による潮汐の観測に、地表の地形、地下構造の不均一性、観測壕の形状、計器の特性など様々の要素が影響することが最近次第に明らかにされてきた。破碎帯周辺の伸縮歪の観測では、ごく近接した場所で潮汐の振幅が変化したり、位相が反転する場合があることが、尾池ら(1977)や田中ら(1972)により報告されている。また、坑道のCavity効果により傾斜計に伸縮歪がクロストークとして入ってくることも、Harrison(1976)が明らかにしている。また、今回の気圧に対する応答の調査で明らかになった地殻の非弾性的性質も、潮汐の振幅や位相を変化させ得る。地震活動との関係については、いわゆるダイラタンシーモデルから地震発生の前兆として、地殻内部の弾性常数変化が予想され、地震の前後に潮汐の振幅や位相が変化する可能性も検討されるようになった。伸縮歪計や傾斜計の基線長はたかだか100mに過ぎず、上に述べた様々の要素が、観測される潮汐に含まれている。今回は、観測値に含まれる様々の要素および、潮汐の振幅の時間変化について若干の考察を行った。松代で観測される潮汐変化は、Fig. 5-4にその例が示されている。泡式傾斜計は潮汐の調査には、やや分解能不足といわれているが、30分毎のデータを用い、それぞれのデータは、デジタル的に一分間の平均をとっているため水管傾斜計で得られたデータに比べ、大きな差は認め難い。体積歪計に記録される潮汐変化は、伸縮歪計東西成分と波形がほとんど完全に一致しており、また、長期間の観測データが得られ

ていないので、詳しい解析には用いていない。

Fig. 5-4 で示された潮汐変化の特徴として、次のような点があげられる。伸縮歪、傾斜共に、直交する成分間の波形の違いが著しい。伸縮歪の南北成分と傾斜の東西成分では、半日周期の変化が卓越するが、直交するそれぞれの成分では1日周期の変化が半日周期の変化より大きい。また、直交する成分の間で半日周期の変化の位相は、だいたい一致している。傾斜と歪の間では位相は $90^\circ$ ずれているように見える。2種類の傾斜計に記録される潮汐、伸縮歪計の中間出力、先端出力の波形はよく似ている。特に傾斜計は、その基線長、計器の原理の違いを考えれば、非常に良く似ているというべきであろう。少なくとも松代では、観測壕の Cavity の効果や微細な岩盤の不均一により、場所や計器を変えると観測される潮汐変化が著しく違ったものになることは、起りそうにないことが察せられる。

Fig. 5-4 と同時期の固体潮汐の理論値を Fig. 7-1 に示す。理論値は Love 定数を  $h=0.06$ ,  $k=0.24$ , 志田定数を  $l=0.08$  と仮定して、小沢 (1974) の式により求めたものである。伸縮歪については両成分共に、振幅は異なるが、観測結果と波形は一致している。一方、傾斜については、南北成分に位相のずれが認められ、含まれる分潮の振幅も異なっているのに対し、東西成分は、振

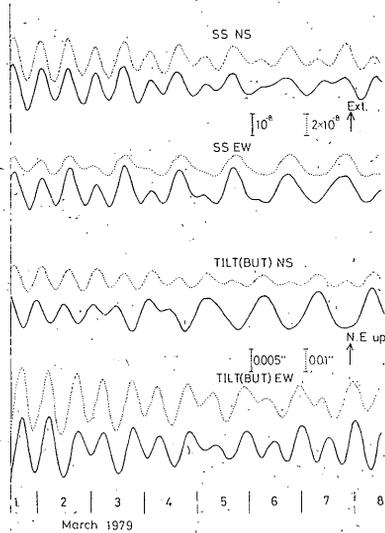


Fig. 7-1. Observed tidal strain (solid line) recorded at Matsushiro in March 1979 and the corresponding theoretical tidal strain. Tidal constants were assumed as  $h=0.60$ ,  $k=0.24$  and  $l=0.08$  for calculation.

幅を除き波形は良く一致している。

観測された各成分のスペクトルを Fig. 7-2 に示す。いずれも 30 分毎、または 1 時間毎の半年から一年分のデータを用いてゲルツェル法、もしくは、フーリエ積分により求めた。潮汐の分潮として  $S_2$ ,  $M_2$ ,  $N_2$ ,  $K_1$ ,  $P_1$ ,

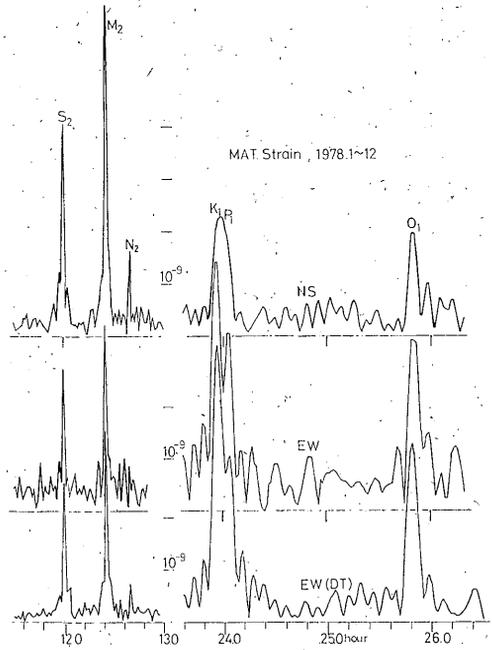


Fig. 7-2-a. Spectra of silica tube extensometers (SS).

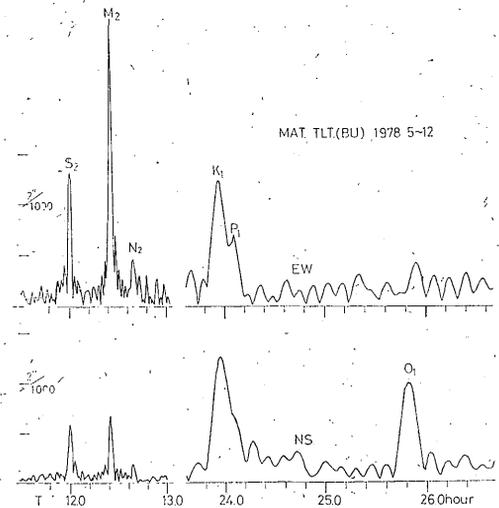


Fig. 7-2-b. Spectra of bubble biaxial tiltmeters (BUT).

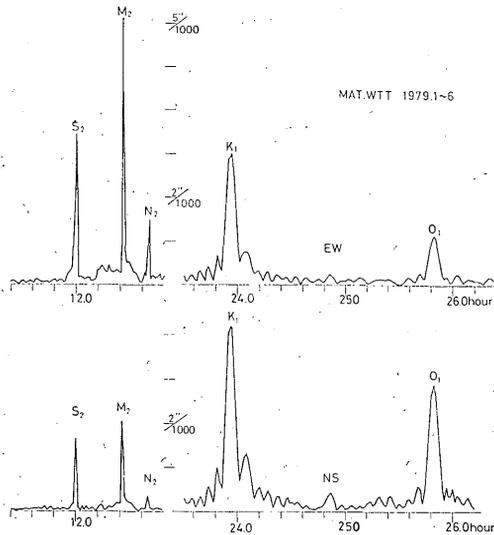


Fig. 7-2-c. Spectra of moving float type water tube tiltmeters (WTT). Records for one year were analyzed.

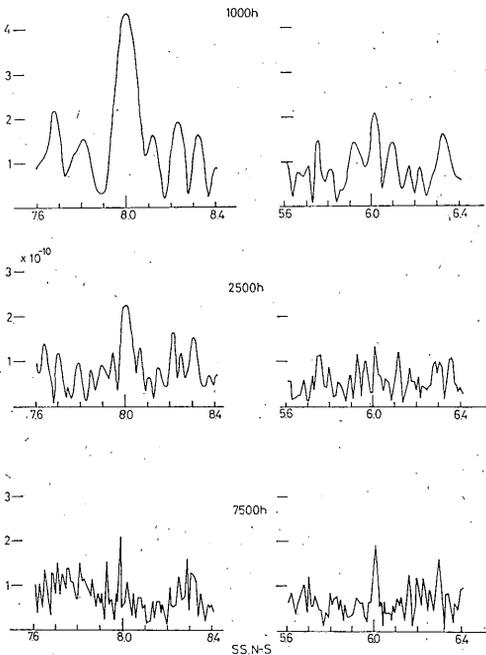


Fig. 7-3. Spectra of extensometers for the period of 8 and 6 hours. Prominent peaks around 8 and 6 hours suggest some influence of atmospheric pressure upon the ground strain. Difference in spectra due to the different record lengths were also shown.

$O_1$  などが分離されている。24時間周期周辺の  $K_1$ ,  $P_1$ , および気圧の日周変化による  $S_1$  は、あまり分離は良くない。伸縮歪の東西成分ではかろうじて  $P_1$  と  $K_1$  のピークが分離しているようであるが、他の成分では、 $K_1$  とも  $P_1$  ともいえない所にピークを示す。有力分潮と思われた  $Q_1$  (26.8時間) は、Fig. 7-2 の範囲外となるが、計算の結果でははっきりしたピークを示さない。また、気圧の影響により  $S_3$  (8時間),  $S_4$  (6時間) のピークが現われることが予想されるが、伸縮歪にはそれらのピークが認められる (Fig. 7-3)。Fig. 7-3 は計算に用いたデータの長さによる計算結果の違いも示している。データが長い程ピークは鋭くなり、1000時間程度の長さのデータでは、ピークの周期を正確に求めることが困難であることを示している。

## 2) 潮汐の振幅と位相を求める方法

潮汐の分潮の振幅、位相を求める方法は、古くから色々な方法が、考案され用いられてきた。電子計算機のなかった時代には、計算量を少なくして精度の良い結果を得るために、様々な工夫が考えられた。最近では、計算機の発達により計算量をあまり気にする必要がなくなり、フーリエ変換や、最小自乗法を用いる場合が多い。地殻変動観測のデータにはドリフトが必ず含まれているので、解析の前にドリフトを除く必要がある。ドリフトを除去する方法は、中川 (1961) により紹介されている。今回は、いわゆる Pertzев の方法を主として用いた。中川が (bde) と呼んだ方法は Pertzев の方法よりも優れ、気圧変化の影響を調べる時に用いた矩形フィルター (Fig. 5-7) は、解析する区間の前後に余分のデータを必要とするが、さらにすぐれた特性を持っている。ドリフトの影響は、用いるデータの質によっても異なり、例えば、雨の影響により急激に記録が変化した区間では、どのような方法を用いても、あまり良い結果は得られない。逆に、松代の伸縮歪計の場合、ドリフトが一定している区間では、単にドリフトを一次直線で近似して取除くだけでも、Pertzев 方法によりドリフトを除去した場合と、求めた各分潮の振幅は、2~3%の違いしか示さない。

潮汐の各分潮の振幅、位相を求める方法とその結果の比較については、中川ら (1966)、白木ら (1969)、田中ら (1966) などにより詳しく調べられている。それらによればフーリエ変換によっても、最小自乗法によっても、結果や精度は変わらないといわれている。今回は、途中のデータに欠測があっても適用可能な、最小自乗法を用いた。最小自乗法には、仮定する分潮の種類と数に任

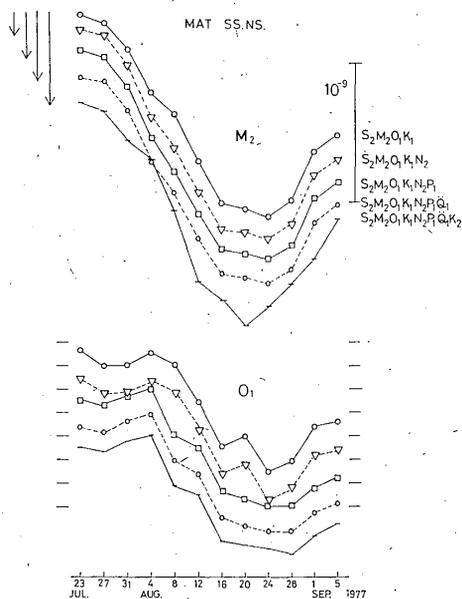


Fig. 7-4. Difference in amplitude of  $M_2$  for the north-south strain determined by the least square's method with different combinations of tidal constituents. Each point was determined by successive 696 hourly data. The results are arbitrarily shifted for convenience as shown by arrows at left side. Variation of  $M_2$  seems to be independent to the number of assumed constituent.

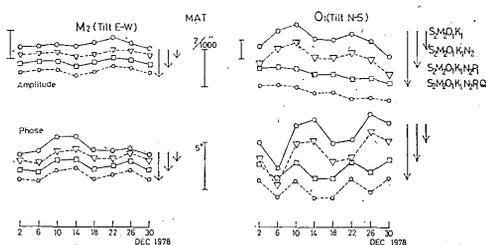


Fig. 7-5. Differences in amplitude of  $O_1$  for the ground tilt. Variation of  $O_1$  became smaller as the number of assumed constituent increased.

意性がある。松代の場合スペクトルで分離された  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  などを考慮しさらに成分によっては  $P_1$ ,  $Q_1$  などを入れる必要がある。分潮の仮定の仕方により結果がどのように変わるかを Fig. 7-4 に示す。

29日間の1時間毎のデータから、色々な分潮の組合せについて  $M_1$ ,  $O_1$  の振幅を求め、さらに4日ずつデータをずらして同様の計算を行ない、振幅の時間変化を調べている。値は矢印で示した量だけ見易くするためずらしてある。 $M_2$  は約  $6 \times 10^{-9}$ ,  $O_1$  は約  $4 \times 10^{-9}$  の振幅を持つので、29日間のデータを用いると分潮の仮定の仕方による値のばらつきは、 $\pm 3\%$  程度となる。振幅の時間変化については、分潮の仮定の仕方によらず、同じような変化を示している。したがって分潮の振幅の時間変化を調べるだけなら、分潮の仮定の仕方はあまり問題にならない。同様の調査を泡式傾斜計について行なった結果を Fig. 7-5 に示した。位相の変化についても示したが、傾斜計についても  $M_2$  の変化については、伸縮歪と同様

に、分潮の選び方は結果に影響しないように見える。 $O_1$  については、分潮の数が多い程変動幅は小さい。今回は、 $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  の5分潮に、成分によっては、 $P_1$ ,  $Q_1$  を加えて解析を行った。各分潮の振幅の精度は、解析するデータの長さ、分潮の振幅、近接する周期の分潮の大きさなどにより変わってくる。例えば、泡式傾斜計の場合南北成分の  $M_2$  は、 $O_1$  の半分程度の振幅しかなく、東西成分の  $M_2$  に比べて同じ長さのデータを解析しても精度は劣る。一般に  $M_2$  についての誤差は、データの長さが一ヶ月程度で5%、一年間で1%前後であるともいわれている。実際に計算を行ってみると、標準偏差は、ずっと小さくなるが、見かけ上の誤差は、フィルターをかけることにより小さくなるのであまり信用出来ないで、前記の値を目安として用いることにした。

### 3) 観測される地殻潮汐の地域代表性について

地殻変動観測所で得られる観測結果が、地域全体の地殻変動を代表するかどうかという点について、色々な問題があることは既に述べた。松代では、期間は短かいが、4種類の歪、傾斜について異なる器械による並行観測が行われたので、その結果について検討を加えてみる。その1つは、伸縮歪計東西成分の先端可変容量型センサーと、中間の差動トランス型センサーによる比較観測であり、もう1つは、計量研究所によって行われたレーザー干渉歪計（南北成分）の実験観測と伸縮歪計南北成分の観測結果の比較である。残る2つは傾斜2成分についての水管傾斜計(WT4)と、泡式傾斜計の観測結果の比較である。

特に伸縮歪の南北成分と、傾斜計についてはまったく原理の異なる計器による観測であることと、観測場所が比較的離れていることに意義がある。レーザー干渉歪計による一連の実験については、Ohishi et al. (1976),

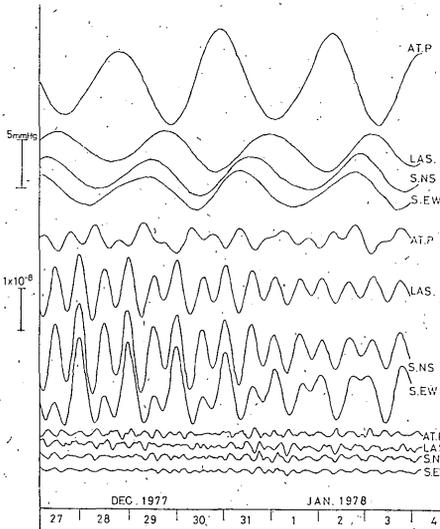


Fig. 7-6. Comparison of records obtained by the silica tube extensometers and the laser extensometer. Experimental observation of the laser extensometer was done at Matsushiro by the National Research Laboratory of Metrology. Signals were divided into three frequency bands. Long period components show the influence of atmospheric pressure upon the ground strain.

Tab. 7-1. Comparison of tidal constituent obtained from silica tube extensometer and laser extensometer.

	Tidal Amplitude			Phase
	Silica	Laser	L./S.	S.-L.
$M_2$	0.621	0.405	0.652	-1.38°
$O_1$	0.128	0.105	0.820	-5.96°
$S_2$	0.364	0.252	0.692	7.66°
$K_1$	0.227	0.156	0.687	4.90°
	unit : $\times 10^{-8}$		mean : 0.674	

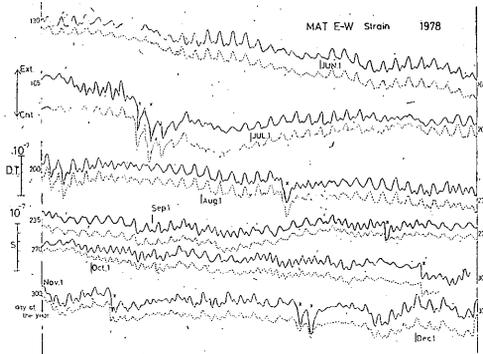


Fig. 7-7. Comparison of east-west strains recorded by the silica tube extensometer. Parallel records show output of free end transducer (solid line) and that of intermediate transducer (dotted line).

清野ら (1977), 大石 (1978) により報告されている。

比較に用いた1978年1月の観測結果を, Fig. 7-6 に示す. Fig. 7-6 では3つの周波数帯域に信号を分離して示したが, 潮汐の帯域での波形は良く一致しているが, 振幅がかなり異なることがわかる. 調和解析を行って分潮の位相, 振幅を比較した (Tab. 7-1). 30日たらずのデータから計算したので位相のずれは有意とはいえないが, レーザー干渉歪計で観測される分潮の振幅は, いずれも石英管歪計で観測された値の7割程度となっている. 3割の違いは, 明かに計器の違いによるものではなく, わずか100mばかり離れた岩盤の性質の差に原因があると考えられる. 岩質に差は認められないので, 割目の構造や間隙の状態により見かけの弾性常数が異なるのであろう.

$O_1$  分潮の振幅比は, 他の分潮の振幅比と異なっている.  $O_1$  は  $M_2$  の20%程度の振幅しかないのでこの差が有意であるとはいえない. しかし周期により岩盤の応力変化に対する応答が変わることは十分に考えられる. 例えば, Fig. 7-6 に示した長周期の成分は, 気圧の変動に

よるものであるが, レーザーの場合と石英管の場合では, 位相のずれが認められ, 明かに応答に差が認められる. 次に, 伸縮歪の東西成分について中間センサー, 先端センサーで得られた記録の例を Fig. 7-7 に示す. 潮汐の部分を示した Fig. 5-4 からも2つの出力が, 振幅波形共に良く一致していることが, 認められる. Tab. 7-2 には約1年間の記録から得られた調和解析の結果を示す.  $M_2$  の振幅の違いも有意であるが,  $M_2$  と  $O_1$  の振幅比も明らかに異なっている. レーザー歪計と石英管歪計ほどの違いが見られないのは, 2つのセンサーで一部分共通の歪量を測っており, センサーが近接した場所にあるためであろう. 石英管伸縮計の複数の中間出力の振幅比が異なることは, 既に山内 (1977) も報告している. 伸縮歪計は, 松代のように基線長が100mもある場合は少なく, 多くは40m前後であり, なかには5m前後の器械も用いられている. わずか数十m離れた地点で計ら

Tab. 7-2. Values of amplitude and phase for tidal strains and tilts. About one year records from Jan. 1 1979 were used in the analysis. The time origin of phase is taken at Jan. 1, 00h 00m 1979.

Constituent	SS. NS			SS. EW			SS. EW2 (DT2)			AE2/AE	$\phi_E - \phi_{E2}$
	AN	$\phi_N$	Ratio to $M_2$	AE	$\phi_E$	Ratio to $M_2$	AE2	$\phi_{E2}$	Ratio to $M_2$		
$M_2$	0.6679	310.3	—	0.459	303.7	—	0.3634	302.6	—	0.791	1.1
$K_1$	0.2104	48.9	0.315	0.511	2.5	1.113	0.449	359.1	0.24	0.879	3.4
$S_2$	0.4193	351.8	0.627	0.326	324.9	0.710	0.275	320.9	0.757	0.844	4.0
$O_1$	0.1704	337.7	0.255	0.387	305.0	0.843	0.333	298.6	0.916	0.860	6.4
$N_2$	0.1285	308.6	0.192	0.090	319.1	0.196	0.073	316.2	0.201	0.811	2.9
$P_1$	0.0965	6.5	0.014	0.229	338.0	0.449	0.203	336.8	0.559	0.886	1.2
$Q_1$	0.0319	2.2	0.048	0.057	315.0	0.124	0.040	303.9	0.110	0.701	11.1

Unit =  $10^{-8}$

Constituent	BUT. NS		WT4. NS		AW/AB	$\phi_B - \phi_W$	BUT. EW		WT4. EW		AW/AB	$\phi_W - \phi_B$
	AB	$\phi_B$	AW	$\phi_W$			AB	$\phi_B$	AW	$\phi_W$		
$M_2$	0.185	15.86	0.202	9.31	1.092	6.6	0.575	207.4	0.625	227.17	1.087	19.8
$K_1$	0.356	184.96	0.435	180.66	1.222	4.3	0.249	284.9	0.309	320.45	1.241	35.6
$S_2$	0.153	56.93	0.165	57.10	1.078	0.2	0.318	276.2	0.343	292.89	1.079	16.7
$O_1$	0.232	141.62	0.292	134.68	1.259	-6.9	0.082	206.4	0.121	280.19	1.476	73.8
$N_2$	0.034	24.82	0.036	17.46	1.059	-7.4	0.137	215.0	0.145	229.83	1.058	14.8
$P_1$	0.113	163.80	0.154	168.73	1.363	4.9	0.078	262.8	0.103	301.31	1.321	38.5
$Q_1$	0.052	158.63	0.062	154.71	1.192	-3.9	0.011	164.6	0.019	317.19	1.72	152.6

Unit = 0.01"

れた潮汐の振幅の絶対値が異なるだけでなく、各分潮間の振幅比までも変化することは、基線長の短い器械による観測結果によりその地域の歪変化を代表させることが、いかに危険であることを示唆している。基線が長ければ、岩盤の不均一性は平均化されるが、100m が不十分とするなら 1000m あれば、十分であるとも言えない。Berger (1976) は、伸縮歪について海洋潮汐の影響のみならず、地形や地質構造の不均一性についても有限要素法を用いて、その影響を観測値から補正し、理論値との比較を行なっている。1km のオーダーの基線長があれば、細かい不均一性は平均化されるので、そのような議論も有効になろう。泡式傾斜計については基線長が短いので、Cavity 効果がどのように現われるかが問題である。感度については、検定を行っていないので、水管傾斜計との比較は困難である潮汐の分潮の振幅比は Tab. 7-2 に示されている。泡式と水管の分潮の振幅比、位相の違いは伸縮歪東西成分の二つの出力間の違いに比べ、むしろ違いが少ないように思われる。したがって、

違いが Cavity の効果に由来するとは必ずしも言えず、岩盤の不均一性に由来するだけであるかもしれない。泡式傾斜計は、水管傾斜計に比べ気圧の影響が大きいことは、5章で明かにした。しかし、潮汐の振幅にはそれ程の差は認められない。この場合も、レーザー歪計と石英管の南北成分との間に見られた、周期による応力に対する応答の違いが存在すると考えられる。以上の比較観測結果から、次のような結論が得られる。松代のような玢岩、あるいは、緻密な頁岩で構成される岩盤内の坑道においても、わずか数十m の場所の違いや観測に用いる計器の違いにより、測定される地殻潮汐の振幅に 30% に及ぶ差が生じ、各分潮に対する振幅比についても 30% 近い違いがある。基線長がわずか 100m に満たない一点の歪、傾斜観測をもって、地域の平均的な地殻潮汐を代表させることはできない。しかし、破碎帯のような特殊な構造が観測点に近接していなければ、多少場所が違って似たような潮汐の波形が得られ、場所により位相が 90° 以上ずれたり、振幅が 50% 以上も変化するような事

は起り得ないと考えられる。

#### 4) 地殻潮汐の振幅の時間変化について

傾斜や歪の潮汐振幅の変化が注目されるようになったのは、比較的最近になってからである。もちろん月の黄道傾斜角の変化などによる潮汐の振幅変化は古くから知られているが、 $M_2$ 分潮などについては一年間に1~2%のオーダーであり、急激な変化はまず考えられない。一方、地球上で、海洋潮汐が変化して、その地殻へ与える影響が変化したり、観測点周辺の岩盤の見かけの弾性常数が、地下水位や間隙水圧の変化などにより変れば、観測される地殻潮汐が変化することは、十分考えられる。

Nur (1972) などにより提唱されたダイラタンシーモデルは、地震の前兆としてP波速度の低下、弾性常数 $\lambda$ の減少が地殻内部で発生することを予測した。Beaumont

(1974) は、有限要素法を用いて15%程度のP波速度の変化がある場合の潮汐の振幅変化を計算し、歪や傾斜の潮汐振幅が場所によっては50%以上変化することを示した。又Tanaka et al. (1974) は、海岸近くの海底でダイラタンシー現象が発生すれば、海洋潮汐の地殻へ与える影響も変り、海岸近くの観測点では検出可能であることを示した。ダイラタンシーモデルについては、否定的な意見も多く、実際に地震の震源付近で、地殻の弾性常数変化が発生するかどうかは明らかではない。しかし、色々な要因により、地殻潮汐の振幅が変化するかどうかを確認することは意義がある。すでに国内でもMikumo (1976), Mikumo (1977), 山内 (1977), Kato (1979) などにより、実際の観測データから潮汐の振幅変化を検出する試みが行われている。しかし、分解能の高い計器が、地殻潮汐の観測に用いられるようになってから日が浅く、解析に用いられたデータの長さや質は必ずしも十分とはいえない。地震の発生と潮汐振幅の変化の関連を明らかにするには、さらに多くの観測資料の解析が必要である。松代の観測資料として、まず、1977年以降の伸縮歪、傾斜を調べることにした。1977年の8月以降は、伸縮歪計のエレクトロニクス部分が安定しており、30分毎のデジタルデータが得られている。泡式傾斜計については1978年5月以降、フロート式自記水管傾斜計(WT4)は1978年12月末から資料が得られている。水管傾斜計については、大半は1時間毎の値を記録紙から読み取り、他の成分はすべて30分毎のデジタルデータを計算に用いた、解析には29日間のデータを用い、最小自乗法により各分潮の振幅、位相を求めた。Fig. 7-8, Fig. 7-9 は29日間の解析区間を4日、または6日ずつずらしながら求めた $M_2$ ,  $O_1$ の振幅の推移を示す。3種類の器

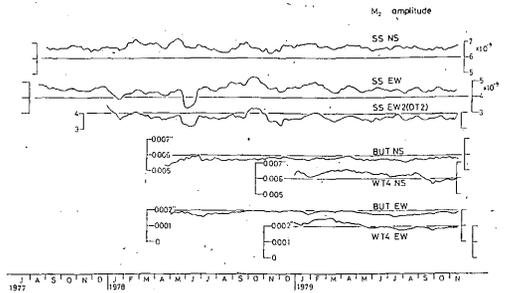


Fig. 7-8. Result of successive analyses for  $M_2$  amplitude of strains and tilts. Amplitude was determined by the least square's method from successive 696 hourly Pertzef filtered data.

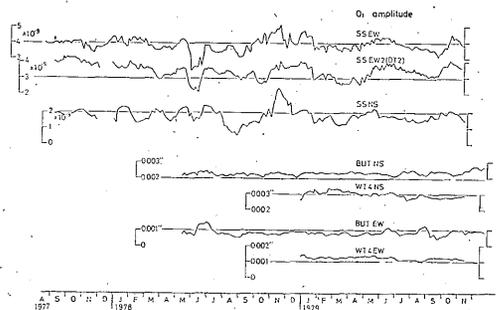


Fig. 7-9. Results of successive analyses for  $O_1$  amplitudes of strain and tilt.

械の中では、泡式傾斜計から得られた分潮の振幅変化が、もっとも少なく $M_2$ では $\pm 3\%$ の範囲に入っている。一方、伸縮歪計については変動が大きく、1978年中に特に変化が激しく、しばしば10%以上の変動を示している。伸縮歪東西成分の2つのセンサーは、 $M_2$ ,  $O_1$ 分潮について並行した振幅の変化を示しており、明らかにセンサー部分の動作不安定によるものではない。

1978年当時の伸縮歪の記録の例は、Fig. 7-7に示されているが、当時傾斜計増設のために工事が行われ、人為的な擾乱がしばしば記録に現われている。大きな変動のある部分は、データを解析から除外したので、実質のデータの長さは29日よりも短くなっている。大きな振幅変化が認められる1978年6月の伸縮歪東西成分の $M_2$ 分潮について、解析区間を15日から29日間まで変えて振幅を求めてみた (Fig. 7-10)。解析区間の長さが短い程、振幅の変動が大きく、長くなるに従い変動が平均化されることがわかる。しかし、振幅変化の全体としての傾向は変わらないように見える。解析区間を短くした時

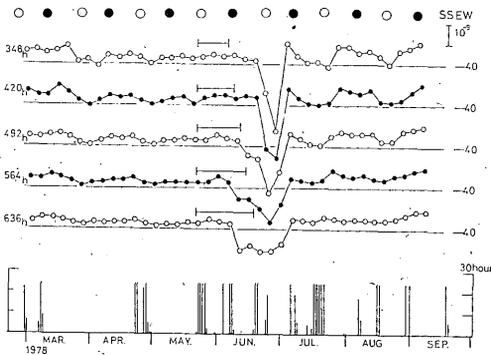


Fig. 7-10. The results of analyses for  $M_2$  amplitude from various data lengths. Lack of data indicated below causes unstable results. Some interpolation seems necessary for missing data to determine tidal amplitude from short data.

の変化は、データの欠測によく対応している。潮汐の振幅が大きくなる新月や満月の前後のデータが抜ければ、計算される振幅は小さく求められ、その中間の時期のデータが抜ければ、逆に大きく求められるのであろう。したがって最小自乗法を用いるにせよ、解析区間が短いときには、欠測部分の補間を行う必要があると考えられる。欠測の影響は潮汐に含まれる分潮の振幅比やバックグラウンドノイズによっても異なると考えられ、伸縮歪の南北成分や、傾斜の東西成分のように、 $M_2$ が他の分潮より十分に大きい時には、その影響が小さいと考えられるが、伸縮歪の東西成分や傾斜の南北成分ではより大きく影響する。また、 $O_1$ 分潮についてはいずれの成分についても変動幅が大きく、データの欠測がなくとも、短い区間の解析で10%以上の精度は期待出来ないと考えられる。泡式傾斜計に比べ一桁以上分解能が高い水管傾斜計で観測される潮汐の振幅変化が大きいのは、やはり観測者の入坑による影響と思われる。

各成分の分潮振幅の時間的変化の様子にはまったく相関は認められないことから、振幅の変化は、見かけ上のものであると考えられ、本質的には泡式傾斜計の  $M_2$  分潮のように、振幅の変化は±3%以下で安定しているのであろう。伸縮計や水管傾斜計は、泡式傾斜計と違い完全な隔測は困難である。しかし、観測者の入坑回数を減らしたり、観測データの丹念な補正を行えば、 $M_2$  分潮については、29日間の解析区間から±5%程度の精度を得ることは可能であろう。

以上、1977年8月以降の観測結果から、初めに可能性をあげた様々の要因による潮汐の振幅変化は、起らなかったと推定される。また、同時期の松代周辺の地震活動は、以前に比べ極めて低下しており、地震活動と潮汐の間に何らかの関連が存在するにしても検出は困難であろう。

#### 5) 地震活動と地殻潮汐の関連について

地殻潮汐の振幅変化を調べる事は、そう簡単ではないことが明かにされた。しかし、振幅の変化が大きければ、現在の観測水準でも、十分検出できるはずである。ダイヤタンスーモデルが松代群発地震にあてはまるか、あるいは、地殻の物性に大きな変化があったかどうかは、群発地震最盛期の1965年、1966年当時の地殻潮汐を解析すればよい。しかし、当時は、伸縮歪計の動作は不安定であり、また、1965年以前の水平振子型傾斜計の記録は分解能が低く、適当な資料が見あたらない。そこで、伸縮計の動作が落ち着き群発地震活動も多少の名残りが認められる、1970年から1976年にかけての期間の調査を行った。同時期には松代周辺でマグニチュード4.0前後の地震は、年2回程度発生している。平常は微小地震回数は1日5回以下であるが、マグニチュード4.0程度の地震には余震や前震と考えられる地震活動を伴う場合が多い。したがってそれぞれを、主震とそれに伴う地震活動と見ることも可能であろう。マグニチュード4.0程度の地震では、地震発生のための準備期間は、様々の研究により15日前後と見積られる。調査は、伸縮歪計の記録が比較的安定している時期に限定した。4)に述べた方法により  $M_2$ ,  $O_1$  の振幅を求め、参考のために地震の震源についても再決定を行った。

主震の他にも松代で有感であった地震は、2層構造を仮定し、松代と北信微小地震観測所(震研)の大峰、保科、上室賀それに長野地方気象台の5点のデータを用いて震源計算を行い震源分布を求めた。Fig. 7-11~Fig. 7-18にその結果を示す。松代および保科での日別の微小地震回数も参考のために示した。伸縮歪計の記録状態の良い所を選んで解析を行ったために、必ずしも両成分の解析結果が揃っているわけではなく、また、主震の前後の区間を十分に解析出来たわけではないが、地震と関係のありそうな変化が、1971年3月、1973年9月、1974年4月頃の例に認められる。その他の例についてはあまりはっきりした変化は認められない。1976年11月前後の振幅変化は調査した区間のなかでは、最も振幅の変動は少ない。新しい時期程、計器が安定してきたためであろう。地震と潮汐の振幅変化が関係ありそうな3例のうち、

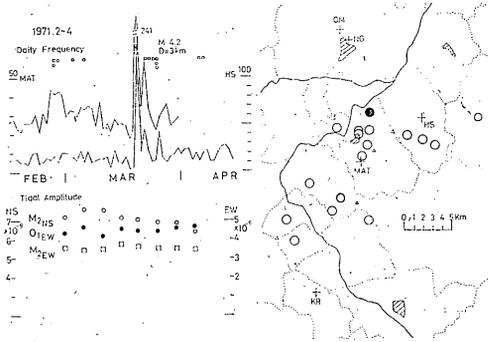


Fig. 7-11. Temporal variations in tidal strain amplitude in the period of prominent seismic activity near Matsushiro. Daily frequencies of local events observed at Matsushiro (MAT) and at Hoshina (HS) were also shown. Solid circle on the map represents the epicenter of the largest event and open circles show epicenters of felt shocks. Stations used in location are given on the map.

MAT: Matsushiro seismological observatory.

NG : Nagano Local Meteorological Observatory (J.M.A).

OM, HS, KR: Satellite stations of Hokushin Micro-earthquake Observatory of E. R. I. of University of Tokyo.

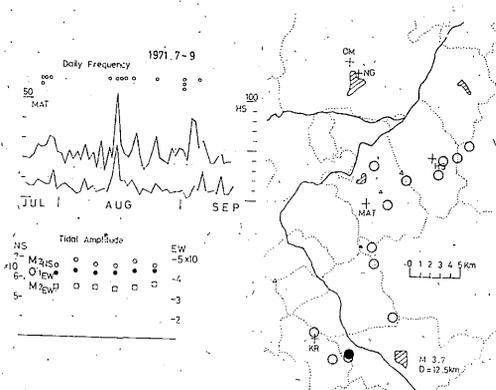


Fig. 7-12. Temporal variations of tidal strain amplitudes from July to Sept. 1971.

1973年9月の例については、南北成分の  $M_2$  分潮の振幅が短い区間しか求められていない。また、1971年3月の例は変動幅が小さい。1974年4月の例は、主震発生後

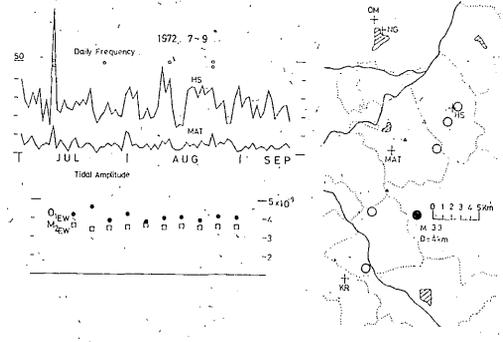


Fig. 7-13. Temporal variations of tidal strain amplitudes from Oct. to Dec. 1971.

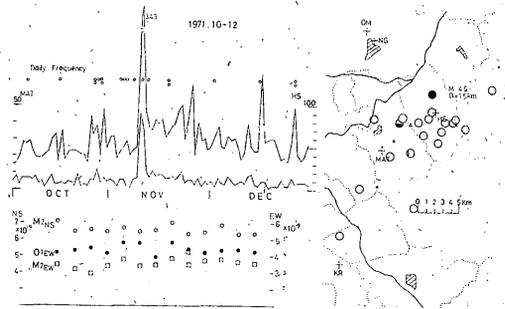


Fig. 7-14. Temporal variations of tidal strain amplitudes from July to Sept. 1972.

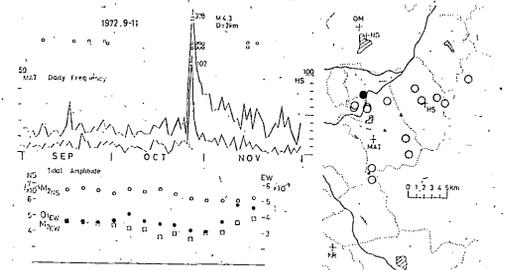


Fig. 7-15. Temporal variations of tidal strain amplitudes from Sept. to Nov. 1972.

の様子は、不明であるが、発生前に両成分の振幅に変化が認められ、変化量も大きく、有意ではないかと思われる。現在のように観測体制の整った状況で、同規模の地震が発生すれば、はっきり確認する事が可能であろう。1976年以前でも、マグニチュード5以上の地震が発生していれば、当時の観測精度でも検証できたのではないと思われる。なお、今回決定した震源の分布は、群発地震最盛期と大きな違いはなく保科付近を中心とする活動

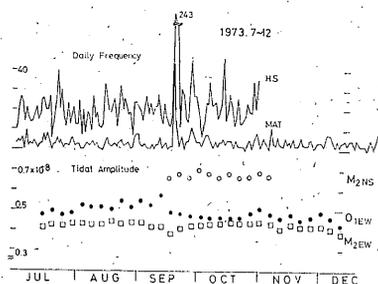


Fig. 7-16. Temporal variations of tidal strain amplitudes from July. to Dec. 1973.

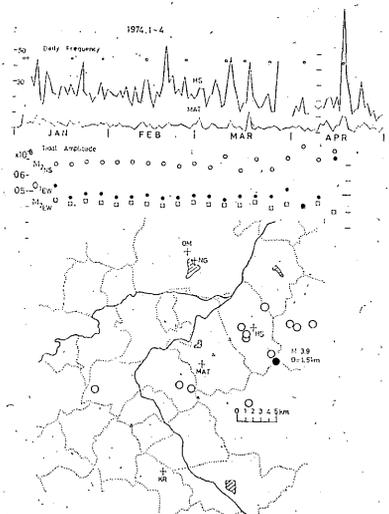


Fig. 7-17. Temporal variations of tidal strain amplitudes from Jan. to Apr. 1974.

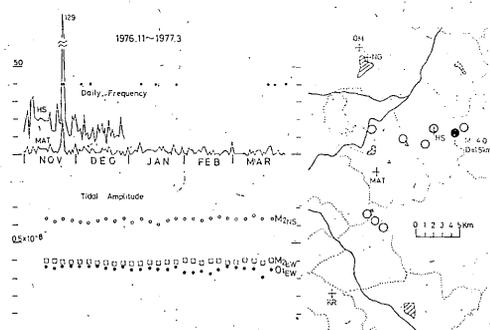


Fig. 7-18. Temporal variations of tidal strain amplitudes from Nov. 1976 to Apr. 1977.

精度を向上させる事が必要であろう。今回は、海洋潮汐の影響の調査は行わなかった。松代で観測される傾斜潮汐については、わずかに長宗、泉(1960)による海洋潮汐の影響の調査が行われているに過ぎない、当時とは比較にならない程観測体制が充実し、また、弾性体の荷重変形に関する理論の発展が見られる現在、改めて海洋潮汐の影響を検討する価値は十分にあると考えられる。

### § 8. Strain step に関する調査

#### 1) Step に関するこれまでの調査

地震の際に伸縮計や傾斜計で観測される記録の飛び(step)については、(1)計器の動作が不完全であるとする説、(2)地震によってトリガーされる観測点近傍の tectonic な応力変化であるとする説(志知ら(1970b))、(3)地震の震源パラメーターから期待される永久変位を示すという説、それぞれの立場から研究が行われている、しかし、現在の所、明確な結論が得られているとはいえず、大地震の震源パラメーターから予想される変化と観測値との対応は、極性すら一致しない場合が多いのが実状である(岡田(1975))。しかも、各地殻変動観測所の伸縮計、傾斜計はその設置条件や器械の構造がそれぞれに異なり、予測値と観測値がよくあう観測所とそうでない観測所があることも知られている。したがって Step の原因を明らかにするためには、まず、個々の計器の動作を吟味する必要がある。

通常観測所では、Step を伴う地震が少なく、Step の原因を調べるのは容易ではないが、松代では今日でも高いレベルの地震活動が残っており、観測例が多いので調査には好都合である。松代の伸縮歪計については、末広ら(1971)は、坑道の床を、掛矢でたたく実験でも

が盛である。発震機構なども変化していない事は、涌井(1976)によっても報告されている。

以上、松代で観測される地殻潮汐について、主として振幅の変化を調査したが、地殻活動に関連する変化は確認できなかった。今後は欠測部分の補間を行い、解析の

Stepが生ずること、および埋込式歪計にはあまり Stepが観測されないことから伸縮計の Stepの原因は、器械的な「ガタ」によると考えた。しかし、Stepの振幅は震源パラメーターから求めた理論値と同じオーダーである例も多く、すべての Stepが器械的「ガタ」であるかは疑問がある。

また、器械的「ガタ」であるとしても、器械的な遊びがあり、その部分が単に移動するのか、基準尺である石英管が全体的に移動するのか、あるいは、石英管自体が伸び縮みするのかは不明である。ここでは東西成分の複数のセンサー出力の比較を中心に原因の調査を行った。

2) 松代地震に伴う Stepの特徴

Fig. 8-1Aに1977年から1978年にかけて発生した観測成分毎の Stepの数を示す。大半の Stepは東西成分のみに観測される。また、Fig. 8-1Bに、Stepの振幅の頻度分布を示した。多くの Stepの振幅は  $5 \times 10^{-9}$  以下で、断層モデルから期待される変化量とはほぼ一致している。また、規模(歪地震動の最大振幅から推定)と Stepの観測される確率の関係を Fig. 8-1Cに示した。松代で有感の地震の大部分に Stepが観測されている。また、Stepの発生状況の時間的推移を Fig. 8-2 および Fig. 8-3に示した。Fig. 8-2には、歪地震動の振幅が、 $5 \times 10^{-9}$ 以上の地震の発生回数と、Stepの発生回数の変化が示され、Stepの観測される割合が、1977年の10月以降大きいことがわかる。Fig. 8-3は東西成分の Stepに

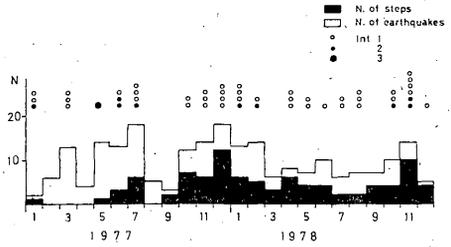


Fig. 8-2. Monthly number of local earthquakes of which amplitude exceeded  $5 \times 10^{-9}$  strain. Shaded areas show step events. Felt shocks were also indicated by circle (in J.M.A seismic intensity scale).

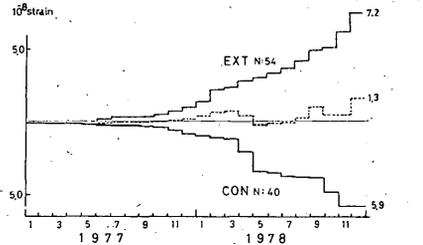


Fig. 8-3. Accumulated strain by steps from Jan. 1977 to Dec. 1978 at Matsushiro. Cumulative sum of extension is nearly equal to that of contraction, then the resultant strain is much smaller than the secular strain.

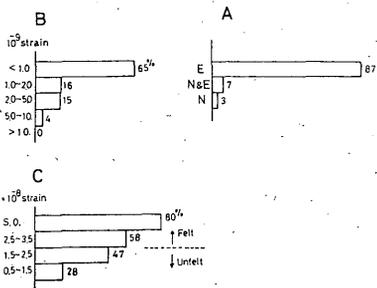


Fig. 8-1. A: Number of strain steps observed by silica tube extensometers. Most of steps were only recorded by the east-west component.  
 B: Amplitude distribution (in percentage) of observed strain steps.  
 C: Relationship between the probability of occurrence of strain step and its maximum amplitude of earthquakes recorded by strain seismograph.

よる伸び、および縮みの量を積算したものである。Stepが伸びまたは縮みであった回数および両センスの2年間の積算値は、ほぼ同じになる、Stepは伸縮が、互に相殺するように発生している。

また特に、縮みの積算値の場合は、1978年4、5、10、11月のようにある時期に集中して大きな変化をする傾向があり、ある程度の伸びの傾向が続くと、その動きを打ち消すように縮みに動くようである。積算値の変化自体も1978年4月頃から大きくなっており、Stepの発生状況に時間的変化が認められる。点線で示した伸びおよび縮みの積算値の差は、2年間で、 $1.3 \times 10^{-8}$ 程度で、永年変化の議論をする上では、問題にならない。以上に示された Stepの特徴は、Stepが地震の震源の情報を反映したものでなく、器械的な「ガタ」である可能性を強く示唆するものである。器械的「ガタ」の原因と内容を調べるには、山内ら(1975)、竹本(1971)らが行っているように、同じ基準尺に複数のセンサーを設け、結果を

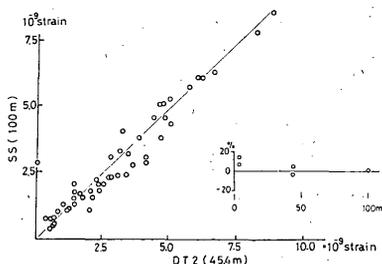


Fig. 8-4. Strain steps recorded at free end vs. steps recorded by intermediate transducer (DT2). Displacements of transducer seem to be proportional to the span, then the observed strain does not depend on the span of transducer.

比較する方法が必要であると考えられた。

2) 中間センサーによる Step の比較観測

中間センサーは、差動トランスを用い基準尺には、コアを吊下げる方式を用いた。先端センサーに比べ、はるかに軽量であるため基準尺の動作へ与える影響は小さいと考えられる。差動トランスの動作範囲は±50 μm、分解能 0.05 μm で、動作範囲、直線性については先端の可変容量型センサーより優れている。

Fig. 8-4は中間センサー(DT2)と先端センサー(SS)両地点で観測される Step 量の関係を示したもので、歪量に換算した値が示されている。実線は歪量が等しい場合を現わし、観測結果は、よく実線にのっている。これから Step の振幅が基線長に比例することがわかる。また、センスも一致している。DT1点は基線長が4.5mと短いために多くの Step は読取不能であった。辛うじて読取れた二つの Step について、3地点のひずみ量の比を図中に示した。値は先端センサーの観測値で基準化してある。結果は、やはり、基線長と Step 量が比例することを示す。

したがって観測される Step は石英管の平行移動や、センサー部分の遊びにより生ずるとは考えられないことが明かとなった。

3) 断層モデルとの比較

Step が単純な器械的「ガタ」とは考えられないことから、Step の振幅、極性が地震の断層モデルから期待される結果と、どの程度調和するか、一応、調査することにした。

半無限媒質中に埋められた有限断層モデルから期待される地表における歪パターンの算出には、松浦、佐藤(1975)の方法を用いた。

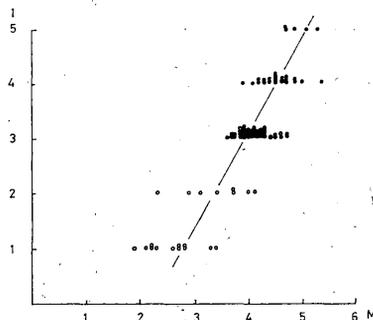


Fig. 8-5. Relation between J.M.A magnitude and seismic intensity measured at Matsushiro for local event. Solid circles show local events from Jan. to June 1966, and open circles show those from 1977 to 1979. Magnitudes of felt earthquakes seem to be larger than 2.8.

小さい松代地震について断層パラメーターを求めることは不可能であるので、以下の仮定を用いてパラメーターを推定した。

a 断層の走向、傾斜

松代地震の起震歪力の主圧軸方向は、ほぼ東西であることが、多くの調査により明かとなっており、主圧軸方向はその後もあまり変化していないことが、涌井(1976)により報告されている。また、皆神山の北東側に N55°W の左横ずれ断層が認められている Nakamura et al. (1976) ことなどから、個々の地震に N45°W の左横ずれ断層を仮定した。

b 断層の大きさと変位

Fig. 8-5に、松代地震の震度(I)とマグニチュード(M)の関係を示す。黒丸は1966年～1～6月、白丸は1977～1979年の資料による。図から松代で震度1の地震のマグニチュードは、 $M \approx 2.8$  と推定される。マグニチュードと断層の長さの関係には竹本・高田(1970)の式(8-1)を用いると、 $M=2.8$  で断層の長さ  $L=1$  km となる。

$$M = -8.4 + 2.2 \log L \quad (8-1)$$

その他のパラメーターとして断層の幅 0.5 km、変位量 2 cm、断層の深さ 2 km を仮定した。

c 震源

震源については、7章で用いた方法により再決定した。多くの震源は、松代の北東側約 5 km の保科付近に集中しており観測所は震源の南西側の象限に入る場合が多い。以上推定したパラメーターを用いて歪のパターンを計算し実際に観測された Step といっしょに Fig. 8-6 および Fig. 8-7 に示した。東西成分の Step は、

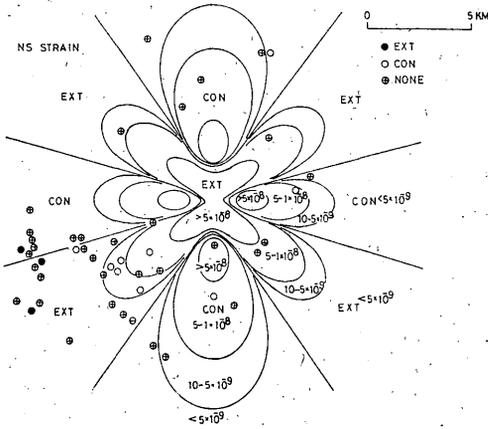


Fig. 8-6. North-south strain field expected from dislocation theory. Solid and open circles show observed extension and contraction, respectively. Events without strain step were indicated by open circles with cross.

Same source parameters (fault length = 1 km, width = 0.5 km, dislocation = 2 cm, fault depth = 2 km, N45W vertical strike slip, left lateral) were assumed for all the local event.

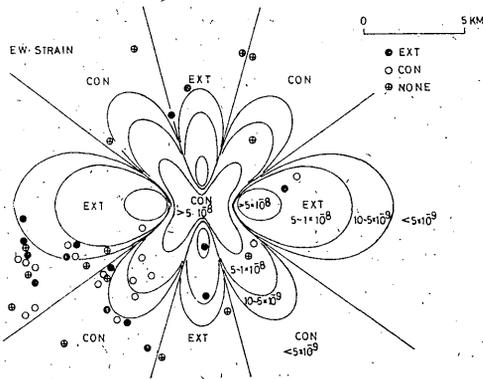


Fig. 8-7. East-west strain field expected from the dislocation theory for the same source parameters used in Fig. 8-6. It seems difficult to explain all the observed strain steps by the simple dislocation theory.

伸びとなるべき領域および縮みが期待される領域に、伸びおよび縮みの Step が入り乱れて分布している。南北成分については、震源が近いと縮み、離れると伸びの Step が観測されるように見えるが何か意味があるのかもしれない。

震源パラメーター、特に断層の走向や震源の位置は、かなりの誤差を含むと考えられるが、Step が震源の情報も反映しているのであれば、もう少し良い対応がみられるはずである。Step の振幅については多くが  $5 \times 10^{-9}$  以下であり推定した震源パラメーターの大きさには矛盾しないが、現状では震源パラメーターと観測される Step は無関係と考えざるを得ない。

#### 4) Strain step に関する考察

これまでの調査から、松代地震に伴う Step は、単純な器械の遊びでもなければ、震源パラメーターを反映するものでもないことが、判明した。その他の可能性として志知ら (1970)、山内ら (1975) が指摘する、地震によりトリガーされる観測点付近の tectonic stress の変化が考えられる。この tectonic stress の変化の機構として志知らは、地震動による地下水の変動を考えている。松代の場合、坑道内が乾燥し湧水が存在しないことはすでに述べた。雨による浸透水も、東西成分の方が南北成分より影響が少なく、東西成分に多く現われる Step の原因を水の働きにすることは出来ない。

松代では伸縮歪計の他に、泡式傾斜計やフロート式水管傾斜計、あるいは体積歪計などが用いられているが、観測される Step は非常に少ない。例えば、泡式傾斜計では、1978年の4月から12月にかけての期間でわずか2例の Step を観測したに過ぎない。以上の結果を総合すると、Step 発生の原因は伸縮歪計自体に求めざるを得ない。振動により基準尺である石英管が全体として伸びたり縮んだりすると考えられる。特に可変容量型のセンサーが重いこと、石英管の支持位置が比較的高いこと、中間支持のピアノ線が Fig. 3-1 に見られるように、支持枠のウォームギヤに巻付けただけの構造で、全体的に振動に対する配慮が不十分である。実際に中間支持台 (2m おき) の基台側面を木づちでたたくと、ただ方向にかかわらず、同じセンスの Step を生ずる。Step の大きさは、たたく回数を重ねるに従い小さくなる。おそらくこれは、吊り糸が振動によってスリップしたり、吊り糸の支持がゆるむために、石英管の伸縮方向に加わる力が変化するためであろう。結果として石英管自体が伸び縮みし、観測結果と符合する。しかし支持台は、一分で50ヶ所あり、全体でどのように動くのか、明かにすることは困難である。吊り方を改良して、水平方向の力が石英管に加わらないようにしたり、吊り糸がスリップしたりゆるんだりしないような改良が必要である。また、変位トランスデューサーも、重量の小さい簡単な構造のものを用いる必要がある。

## § 9. ま と め

松代における最近の地殻変動観測の結果を要約すると次の結論が得られる。

1) 石英管伸縮歪計、泡式傾斜計、水管傾斜計に用いられている各種のトランスデューサーとエレクトロニクスは、地殻変動観測に必要な分解能と安定度を持っている。経年変化等を調査する上で生ずる問題の大部分は、機構部分の不安定性や、岩盤との結合に原因がある。

2) 石英管伸縮計は基準尺である石英管の接続に接着剤を用いたために、年々基準尺が接着剤の膨張により伸びる傾向が認められる。

接着剤の変化は温度、湿度条件によっても異なり、湿度が高い程早く膨張するものと考えられる。

3) 泡式傾斜計の年間ドリフトは1秒角/年以下であり、地殻潮汐による傾斜変化は、フロート式自記水管傾斜計から得られる結果とよく対応し短周期変化の観測に有効である。

4) フロート式自記水管傾斜計の年間ドリフト量は0.1秒角以下であり、同じ台に接置された読み取り式水管傾斜計の観測結果に良く対応している。したがって経年変化の観測にも用いることが可能である。

5) 平行した2つの読み取り式水管傾斜計の観測結果には、0.1秒角/年程度の食い違いが認められる。原因として、岩盤と計器の結合状態の違いが考えられる。

6) 降雨による観測への影響は、伸縮計の南北成分に顕著である。雨量が少ないときは伸び、多い時は縮みの変化を示す。降雨の影響の大部分は、観測壕に限られた部分に水が集中して流れ込むことに原因があると考えられる。流れ込む水を計器から離れた場所に排水することにより、影響を軽減することが可能である。

7) 気圧変化の影響はすべての成分に認められるが、特に至と南北成分の傾斜については、周期により位相や振幅比の変化が認められる。気圧の影響は、気圧変化とその時間微分量の組合せにより表現することが可能である。しかし、気圧を入力、歪や傾斜を出力とするウィナーフィルターを考慮することにより、より適切に表現できる。最小自乗法により求めたフィルターの特性を調べた所、気圧の影響は気圧変化に比例して現われる影響と、数時間から1日程度の時定数を持つ、ゆっくりした逆センスの変化の組合せであることが明らかにされた。時定数を持つ非弾性的な変化の原因は、おそらく地下水位の変化などが関係していると予想される。

8) 1970年以降の歪、傾斜の経年変化は、1965年から

1966年にかけての群発地震の余効変動として期待される地殻変動に量、センスとも調和している。1973年以降は余効変動も終息したと考えることも可能であるが、辺長測量や水準測量などが最近行われていないので詳細な点は不明である。

9) 複数の測器により坑道内の異なる場所で潮汐による歪や傾斜の比較観測を行った所、岩盤の不均一性やクラックの分布の違いにより潮汐の周波数帯域において、同じ成分について30%に及ぶ振幅の違いや位相のずれが認められた。したがって地殻潮汐の観測については、Cavityの効果や岩盤の不均一性から起きる結果のばらつきを避けるために、できるだけスパンの長い測器を用いることが望ましい。

10) 地殻潮汐の振幅変化について特に、 $M_2$ 、 $O_1$ 分潮の振幅変化を、連続した29日間のデータを用い最小自乗法により求めると、時により20%以上の振幅変化が認められた。また、伸縮計、泡式傾斜計、水管傾斜計から求められた $M_2$ 、 $O_1$ の振幅変化の間には、何らの関連も認められない。したがって振幅変化の原因は、データの欠測や、人為的なノイズが記録に含まれているためと考えられる。隔測により人為的な影響が最も少ない泡式傾斜計の場合潮汐の振幅は、最も安定している。潮汐の振幅変化を調べるためには、欠測部分の補間と人為的な影響の除去が必要である。

11) 1970年から1977年にかけて、松代付近で顕著な地震活動があり伸縮計の欠測が少ない時期を選び $M_2$ 、 $O_1$ 分潮の振幅変化を調べた。その結果、主震と考えられる地震の発生した時期に顕著な分潮の振幅変化がある場合が、いくつか認められる。しかし、伸縮計だけの資料によるものであり、当時の観測精度を考慮すると、振幅変化の原因がダライタンシー現象等による地殻の弾性変化によるとは断定できない。

12) 伸縮計に記録される Strain step を調べた所、次の事実が明かにされた。

Step による各トランスデューサーの変位量は、固定端からのスパンに比例する。東西成分の伸縮計と傾斜計には、ほとんど記録されない。Stepの量は変位理論から期待される量と同じオーダーであるが、センスはまったくランダムであり関連があるとは考えられない。

Stepの積算値は、伸びと縮みの量がほぼ均り合っているために、経年変化への寄与は小さい。中間支持台に人工的に衝撃を与えると、Stepが発生する。以上の事実から Stepの原因は、石英管を支持している吊糸がスリップ、またはゆるむことにより、石英管に加わって

る水平方向の力が変化することにあると考えられる。改善のためには中間支持の方法の改良，トランスデューサーの軽量化，石英管を水中に沈め見かけの荷重を減らす事などが必要である。

松代付近は，かつて活発な群発地震活動があり，地殻変動も激しかった地域である。現在でも周辺の地域に比べ，地震活動は活発である。地震観測所の岩盤と坑道は，国内の他の横穴式の地殻変動観測所と比較すれば，観測のための諸条件は優れていると考えられる。それにもかかわらず，群発地震活動の最盛期を除き，地震と地殻歪，傾斜の間には十分な関連が認められないのが実状である。その理由は，目的とする現象があまりにも小さく，各種のノイズに埋もれてしまったためではないかと考えられたので，ノイズの要因につき解析を行い除去する方法を検討した。しかし気温，気圧，雨，地下水等についての観測に依然として不十分な点が残っており，完全な解明は今後の問題として残された。今後は，特に地下水の影響を中心に調べる必要がある。また，今回の調査では，人為的なノイズ，欠測が予想以上に大きな障害となった。観測者が数時間坑道内で作業を行なうだけで，その日の伸縮計の潮汐変化はデータとして使用不可能となる。今回の調査では，不良データはすべて解析から除外したが，結果的に解析の方法や用いるデータの長さにより制約を受けることになった。業務的に欠測部分の補間を行うことを，今後実施すべきであろう。また，除湿機の動作による伸縮計への影響等は，予想外のことであったが，他にも同様な問題が気付かれずに残されている可能性がある。見学者の観測壕への入坑の制限は言うまでもなく，観測者の入坑回数も減らすなどして，坑道内の環境の維持に努める必要がある。

#### 謝 辞

今回の調査は，長年に亘り松代での観測に従事された，地震観測所現および旧職員の労力なしには行い得なかった。また，地震課や気象研究所地震火山研究部の多くの人の協力を得た。

特に，大量のデータの整理にあたられた親松竹子氏，計算の実行に協力された地震課の山本雅博，竹内新両技官，多くの文献について教示頂いた気象研究所の勝又護主任研究官に感謝します。また，気象庁外の人々の協力を得た。特にフロート式自記水管傾斜計の提供を快諾され，設置に指導頂いた名古屋大学の志知竜一助教授，地殻変動観測一般について教示された防災センターの岡田義光博士，岩石サンプルの弾性波測定に便宜をはかって頂いた東京大学理学部の松井和典博士，レーザー干渉計

による伸縮歪計の検定などに協力頂いた工業技術院計量研究所の大石忠尚氏，震源決定に必要な資料を頂いた北信微小地震観測所の方々にお礼申しあげます。

#### 参 考 文 献

- Beaumont, C. and J. Berger (1974) : Earthquake Prediction : Modification of the Earth Tidal Tilts and Strains by Dilatancy, *Geophys. J. Astr. Soc.*, **39**, 111-121.
- Beaumont, C. and J. Berger (1975) : An Analysis of Tidal Strain Observations From the United States of America : I. The Laterally Homogeneous Tide, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **65**, 1613-1629.
- Berger, J. and C. Beaumont (1976) : An Analysis of Tidal Strain Observations From the United States of America : II. The inhomogeneous Tide, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **66**, 1821-1846.
- 浜田信生 (1979) : 桜島有村における傾斜観測, *火山 II*, **24**, 9-17.
- Harrison, J.C. (1976) : Cavity and Topographic Effect in Tilt and Strain Measurement, *J. Geophys. Res.*, **81**, 319-328.
- 長谷川洋作, 浜野洋三, 坂田正治 (1971) : 台風通過と地殻の隆起, *地震学会春季大会予稿集*, 151.
- 松皮久義, 柏原静雄, 浜田信生 (1980) : 地殻変動データ収録のためのデジタル記録器について, *気象庁地震観測所技術報告*, **1**, 1-10.
- 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), *測地学会誌*, **19**, 135-144.
- 泉 末雄 (1978) : 松代における埋込式ひずみ計の観測について (第1報), *験震時報*, **42**, 11-17.
- 井筒屋貞勝 (1975) : 松代群発地震にともなう水準測量の改訂値, *地震研究所報*, **50**, 273-280.
- Johnstinn, (1976) : Testing The physical Parameters of Short Baseline Tiltmeters Intended For Earthquake Prediction, *U.S.G.S. Open File Report*, 76-556.
- Kasahara, K. (1970) : The Source Region of the Matsushiro Swarm Earthquakes. *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **48**, 581-602.
- 柏原静雄, 浜田信生, 山本雅博 (1979) : 1977年8月インドネシア・スンバワ島の地震による地球の自由振動, *Papers Met. Geophys.*, **30**, 153-165.
- Kato, M. (1979) : Observations of Crustal Movement by Newly Designed Horizontal Pendulum and Water Tube Tiltmeters with Electromagnetic Transducers (2), *Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, **29**, 83-97.
- 菊地正幸 (1977) : インパルス応答の推定方法とその応用, *地震 II*, **30**, 265-273.
- 松本憲治, 藤井和成, 中野正吉 (1973) : 気圧の移動が地殻変動におよぼす影響, *地震学会秋季大会予稿集*, 245.
- 松浦充宏, 佐藤良輔 (1975) : 断層モデルと地表変位のパターン, *地震 II*, **28**, 429-434.
- Mikumo, T. and M. Kato (1976) : Time Domain Analysis of Earth Tide Records, *Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, **26**, 71-81.
- Mikumo, T., M. Kato, H. Doi, Y. Wada, T. Tanaka, R. Shichi and A. Yamamoto (1977) : Possibility of Temporal Variations in Earth Tidal Strain Amplitudes Associated with Major Earthquakes, *J. Phys. Earth.*,

- 25, 123-136.
- Mortensen, C. E. and J. S. Johnston (1975) : The Nature of Surface Tilt along 85 km of the San Andreas Fault—Preliminary Result from a 14-Instrument Array, *Pageoph.*, **113**, 238-249.
- 長宗留男, 泉 末雄 (1955) : 松代における地殻潮汐の観測(1), *験震時報*, **20**, 7-13.
- 南雲昭三郎, 高橋 博, 長谷川淳 (1967) : 気象庁地震観測所坑内における弾性波速度測定, *防災科学技術総合研究速報*, No. 5, 49-55.
- 中川一郎 (1961) : 地球潮汐の観測資料よりドリフトを消去する方法について, *測地学会誌*, **6**, 121-135.
- 中川一郎, 佐藤泰夫 (1966) : 最小自乗法による重力変化資料の解析, *測地学会誌*, **12**, 71-76.
- Nakamura, K. and Y. Tsuneishi (1967) : Ground Cracks at Matsushiro Probably of Underlying Strike-slip Fault Origin, II—The Matsushiro Earthquake Fault, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **45**, 417-471.
- Nur, A. (1972) : Dilatancy, Pore Fluids and Premonitory Variations of  $t_S/t_P$  Travel Times, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **62**, 1217-1222.
- 尾池和夫, 岸本北方 (1976) : 山崎断層の挙動と地震予知 : テストフィールドとしての山崎断層, *地震予知シンポジウム*, 83-90.
- 尾池和夫 (1977) : 降雨と浅発地震, *自然*, **375**, 44-57.
- 岡田義光 (1975) : 八丈島東方沖地震—1972年2月29日, 12月4日に伴った Strain, Tilt Step について, *地震 II*, **28**, 387-413.
- Ohishi, T., S. Seino and Y. Sakurai (1976) : Laser Extensometer for Earth Strain Measurement, *J. Geod. Soc. Japan*, **22**, 288-289.
- 大石忠尚 (1978) : 光波干渉を用いた地かくひずみの精密測定, *計測と制御*, **17**, 9-17.
- 大竹政和 (1976) : 松代地震に伴った重力変化の再検討, *測地学会誌*, **22**, 45-52.
- 小沢泉夫 (1974) : 地球潮汐変化の分類と分布, *測地学会誌*, **6**, 111-135.
- Peterson, J., H. Butler, L. Holcomb and C. Hutt (1976) : The Seismic Research Observatory, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **66**, 2049-2068.
- Sacks, S., Suyehiro, D. Evertson and Y. Yamagishi (1971) : Sacks-Evertson Strainmeter, Its Installation in Japan and Some Preliminary Results Concerning Strain Steps, *Papers Met. Geophys.*, **22**, 195-208.
- 佐藤春夫, 高橋 博 (1978) : 地殻傾斜の群列観測 (その1), *防災センター研究報告*, **20**.
- 清野昭一, 大石忠尚, 桜井好正 (1977) : レーザー干渉を応用した地殻ひずみの測定, *計測自動制御学会論文集*, **13**, 174-179.
- 志知龍一, 松浦 宏, 飯田汲事 (1970-a) : 犬山における地殻変動の連続観測 (II) *測地学会誌*, **16**, 177-189.
- 志知龍一, 飯田汲事, 山内常生 (1970-b) : 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, *東京大学地震研究所彙報*, **48**, 1241-1249.
- 志知龍一, 木股文昭, 飯田汲事 (1973) : 犬山における地殻変動の連続観測 (IV), *測地学会誌*, **19**, 160-170.
- 志知龍一, 岡田義光 (1979) : 坑内における歪観測, *測地学会誌*, **25**, 101-134.
- 志知龍一, 奥田 隆, 吉岡茂雄 (1980) : フロート変位型自記水管傾斜計の製作, *測地学会誌*, **26**, 1-16.
- 白木正規, 中川一郎 (1969) : 重力計による地球潮汐の観測, *測地学会誌*, **15**, 42-52.
- 末広重二, 山岸要吉, 佐藤 馨, I.S. サックス, D. エバートソン (1971) : 埋込式歪計による観測, *地震学会春季大会予稿集*, 131.
- 竹本修三 (1976) : 京都岩倉における地殻変動観測 (I), *京都大学防災研究所年報*, **10A**, 157-164.
- 竹本修三, 高田理夫 (1970) : 近畿北部の中規模地震と Strain Step について, *地震 II*, **23**, 49-60.
- 竹本修三 (1971) : 1966年3月12日台湾沖地震の際の Strain Step について, *地震 II*, **24**, 354-362.
- 田中寅夫, 中川一郎, 三雲 健 (1966) : 地球潮汐資料の Fourier 解析, *測地学会誌*, **12**, 77-83.
- Tanaka, T. (1969) : Study on Meteorological and Tidal Influences upon Ground Deformation, *Spec. Contr. Geophys. Inst., Kyoto Univ.*, **9**, 29-90.
- 田中寅夫 (1974) : 地球潮汐による傾斜, ひずみと海洋潮汐について (第4報), *測地学会誌*, **20**, 36-41.
- Tanaka, T. and M. Kato (1974) : On the Change of Crustal Elasticity and Earth Tides, *J. Geod. Soc. Japan*, **20**, 125-132.
- 田中 豊, 林 守孝, 加藤正明, 小泉 誠, 藤田和夫 (1972) : 六甲断層破砕帯における地殻変動の連続観測 (序報), *京都大学防災研究所年報*, **15B**, 1-27.
- Wiggins, R.A. and E.A. Robinson (1965) : Recursive Solution to the Multichannel Filtering Problem, *J. Geophys. Res.*, **70**, 1885-1891.
- 涌井仙一郎 (1976) : その後の松代群発地震の活動について, *験震時報*, **41**, 21-30.
- 山田重平 (1973) : 水管傾斜計によって観測された地殻変動, *東京大学地震研究所研究速報*, **10**, 1-146.
- 山岸要吉, 泉 末雄, 相原奎二 (1976) : 松代における地殻変動の連続観測結果について, *験震時報*, **41**, 13-20.
- 山内学生, 志知龍一, 飯田汲事 (1970) : 地殻変動の連続記録に現われる降雨によるノイズについて, *測地学会誌*, **16**, 202-208.
- 山内常生, 山田 守, 青木治三 (1975) : 地震に伴う Strain Step の検出について, *地震 II*, **28**, 51-59.
- Yamauchi, T. (1976) : On the Stability of Electronic Circuits for Strain and Tilts meters, *J. Geod. Soc. Japan*, **22**, 295-296.
- 山内常生, 山田 守, 奥田 隆 (1977-a) : 豊橋において観測された地震に伴う異常な地殻変動, *地震学会講演予稿集*, **1**, 140.
- 山内常生 (1977-b) : 豊橋における地球潮汐ひずみの観測 (第一報) *測地学会誌*, **23**, 57-62.