

天ヶ瀬地殻変動観測所における地殻変動観測 (第3報)

高田理夫・古沢 保・竹本修三・山田 勝

ON THE OBSERVATION OF THE CRUSTAL DEFORMATION AT AMAGASE OBSERVATORY (3)

By *Michio TAKADA, Tamotsu FURUZAWA, Shuzo TAKEMOTO*
and *Masaru YAMADA*

Synopsis

The telemetry recording system for crustal deformations set up at Amagase Observatory in April, 1977, is described. The results of observations of ground-strain and -tilt since 1967 show that the linear trend of secular variations for the period from 1970 to 1975 has changed slightly after 1976. In addition to these observations, the electro-optical measurements by an AGA Geodimeter have also been carried out since 1970. The mean values of secular ground-strain obtained from electro-optical measurements are similar within the measurement uncertainties to those from extensometers.

1. はじめに

天ヶ瀬地殻変動観測室は宇治市槇島槇尾山 (135°50'E, 34°53'N) の関西電力株式会社の旧志津川発電所の導水隧道を改修したもので、1967年6月から観測を開始した。観測室の詳細並びに1973年までの観測結果については既に報告されているが^{1),2)}、その後一部観測計器が変更されたり、増設されたりしている。さらに1977年4月より公社回線利用の有線テレメーターシステム (FATEC 130, 富士通株式会社製作) が設備され、約5km離れた防災研究所本館までデータが伝送されるようになった。また、本観測室で行なっている地殻変動の連続観測、特に伸縮計による観測の結果と数km程度の拡がりを持つ領域の歪変化を比較するため、隧道内に4個の光波測量の基点を設定して適時光波測量を実施している。

今回は1967年以来連続して観測されている伸縮計と水平振子型傾斜計の観測結果と光波測量の結果並びにテレメーターシステムについて述べる。

2. テレメーター観測システム

現在天ヶ瀬地殻変動観測室に設置されている観測計器の種類を Table 1 に、その観測隧道内での配置図を Fig. 1 に示す。観測隧道内の各種計器及び地震計室 (S.R.) 内の短周期・長周期地震計各3成分からの出力は記録室 (R.R.) に集められ、テレメーターシステムで送信されるものについては端子盤を通してケーブルで入口の送信室 (T.T.R.) に送られる。今の所テレメーターシステムで送信されているのは、短周期地震波 (SP) 3成分、長周期地震波 (LP) 3成分と、佐々式スーパーインヴァール線伸縮計 (E-2) 1成分、水管傾斜計1成分の両端の2台のセンサー (WT-1, WT-2)、水平振子型傾斜計2成分 (1-A, 1-B) の計5成分の地殻変動成分である。テレメーターシステムとしては最大15成分までの地殻変動成分の送信が可能であるので、今後センサーの準備が整い次第、ローラー型スーパーインヴァール棒伸縮計7成分 (E-1 及び 1~6) とレーザー伸縮計2成分 (L-1, L-2) も合わせて搬送する予定である。

Table 1. List of observing instruments.

Observing Instrument	Mark	Azimuth	Span or Period	Sensitivity
Super-Invar-Bar Extensometer	E-1	N72.5°W Horizontal	40.24 m	$6.09 \times 10^{-9}/\text{mm}$
Super-Invar-Bar Extensometer (6 Component)	1	Vertical	5.80	$3.59 \times 10^{-8}/\text{mm}$
	2	N62.5°E Horizontal	5.54	3.84 "
	3	N27.5°W Horizontal	5.54	3.84 "
	4	N62.5°E Dip-55°S	8.10	2.51 "
	5	N27.5°W Dip-55°S	8.10	2.50 "
	6	N72.5°W Horizontal	8.15	2.79 "
Super-Invar-Wire Extensometer (Sassa Type)	E-2	N72.5°W Horizontal	40.24	$2.41 \times 10^{-9}/\text{mm}$
Tiltmeter with Horizontal Pendulum of Zöllner Suspension Type	P.T.1-A	W	30.54 sec	$1.18 \times 10^{-2}"/\text{mm}$
	P.T.1-B	S	30.68	1.18 "
	P.T.2-A	W	29.76	1.25 "
	P.T.2-B	N	29.74	1.28 "
Water-tube Type Tiltmeter	W.T.-1, 2	N72.5°W	84.9 m	$1.54 \times 10^{-4}"/\text{digit}$
Laser Extensometer	L-1	N72.5°W	16.0 m	$1.0 \times 10^{-9}/\text{digit}$
	L-2	N17.5°E	3.2	5.0 "
Short-period Seismograph		Z	1.0 sec	$1.9 \mu\text{kine}/\text{digit}$
		NS	"	"
		EW	"	"
Long-period Seismograph		Z	20. 0 sec	$0.3 \mu\text{m}/\text{digit}(20\text{sec})$
		NS	"	"
		EW	"	"

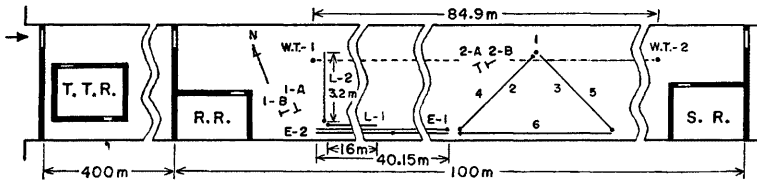


Fig. 1. Arrangement of instruments. (Marks: See Table 1.)

S.R.: Seismometer room, R.R.: Recording room, T.T.R.: Telemetry transmitter room.

テレメーター観測システムのブロック図を Fig. 2 に示す。図の上部は天ヶ瀬観測室、下部は研究所記録室に於けるシステムを示す。伝送路は電々社の特定通信回線 D-1 規格を使用し、PCM デジタルテレメーターを採用している。4800bits/sec の伝送速度によって、1word 12bits の構成 (データ 11bits + パリティ 1bit) をもつ SP 波を 1 秒 100 サンプル/CH の間隔で伝送することが可能となり、30Hz まで平坦な周波数特性を確保している。地震波の記録システムの詳細については別に述べるので³⁾、ここでは地殻変動

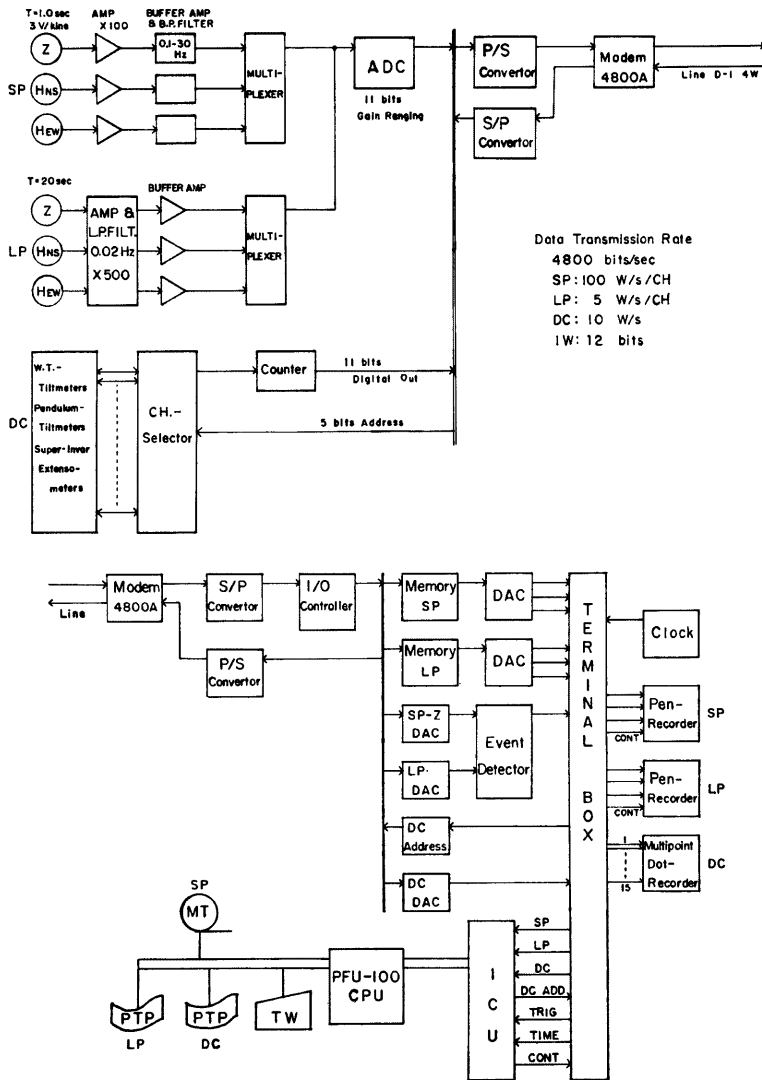


Fig. 2. Block diagram of the Amagase telemetry recording system for seismic waves and crustal deformations.

の記録システムについて述べる。

地殻変動の記録方式は光電変換装置によるデジタル方式⁴⁾が採用されている。すなわち、一定時間毎に一定速度で駆動される光電変換素子により伸縮計・傾斜計のミラーからの光点をとらえて信号をパルスとして

とり出し、基準点からの光点の位置を光电変換素子の移動の時間間隔として測定する方式である。この時間間隔は一定周波数のパルスカウンターで計数した 11bits のデジタル量として取り出され、そのまま 1 秒 10 サンプルの伝送速度で搬送される。光电変換装置の駆動は研究所記録室の CPU (PFU-100) より 4 分毎に出される、5bits のアドレス信号として搬送されてくる、成分切替信号によって行なわれる。したがって駆動される成分は 4 分毎に順次切替り、15 成分の場合に各成分のデータは 1 時間に 1 回のサンプリングになる。サンプリングされた各成分の値は 4 分間保持されていて、アドレス信号と共に搬送される。記録室では成分切替の 4 分信号送出の 2 分後に、成分アドレスに対応するデータを 1 点 CPU に入力し、メモリーに格納する。同時に 0 \pm 5V の電圧量に DA 変換されたデータが、打点式記録計に逐次記録される。CPU に格納されたデータは、BCD 4 桁の数値に変換されて、日報として翌日 0 時にタイプライターに印字されると共に紙テープにも出力される。

このテレメーター化されたデータはこれまでのプロマイド記録と質的に同じであり、従来の観測結果をそのまま継続した形で解析処理できる。

3. 伸縮及び傾斜変化

1967 年 6 月以降の伸縮計及び水平振子傾斜計の観測値と降雨量をプロットしたものを Fig. 3 に示す。

伸縮計は 1969 年から 1975 年までの 7 年間は各成分共縮みの傾向を示し、その変化は非常に安定した一様な勾配をもつ。しかしながら 1976 年以降は値かなながら相異が見られる。特に 6 成分伸縮計の隧道と 45° 方向の水平成分 (Fig. 3 の 2 及び 3) に於て縮みから伸びの変化に転じているのが注目される。隧道と平行方向の成分では、6 及び E-2 (佐々式) の歪量が非常に小さくなり殆ど変化が見られなくなっているのに対し、最も長い成分の E-1 は 1975 年以前の縮みの変化と全く同じ勾配の変化を示している。垂直成分 1 は縮みの変化がやや大きくなっている。斜めの成分 4, 5 は 1975 年以前と殆ど変りがないが、これは水平方向の伸びへ変化した分と垂直方向の縮みの変化が大きくなった分とが相殺されることによると考えられる。

水平振子型傾斜計についても 1970~1975 年の間は、ほぼ一様な南東下りの傾斜変化を示していたが、1976 年以降その変化の大きさが各成分共非常に小さくなり、傾斜の方向が時間と共に変化しはじめ、設置位置が 45m 離れた PT-1 と PT-2 では合致しなくなっている。これは Fig. 4 の傾斜変化のベクトル図を見ると一層明らかである。

1975 年までと 1976 年以降とは、降雨量や隧道内の温度等に特別な相異は見られない。したがって 1976 年以降の傾向の変化は気象の影響によるものではないと考えられる。

水管傾斜計については、1967 年観測開始時にはマイクロメーターの直読方式によって観測を行っていたが、パイプの継目からの水洩れ等のため 1973 年以降観測を中止していた。今回のテレメーター化を機会に基礎台から作り直して、パイプを透明アクリルに変更すると共に、フロートの動きを 2 本吊りのミラーの回転に変え、光电変換装置でデジタル量として取り出す方式に改めて 1977 年 4 月より観測を開始した。当初水面の変動が大きかったり、フロートが不安定だったりしたが、6 月末から良好な記録が得られるようになった。

6 月から 12 月までの半年間の毎日 0 時の観測値をプロットしたものを Fig. 5 に示す。図の 1, 2 は Fig. 2 の WT-1, WT-2 に相当し、同じ水管の両端に於ける水面の変動記録である。したがって 1 と 2 は土地の傾斜変化に対しては逆方向の変化を示さなければならないが、Fig. 5 では同じ方向のドリフトを示している。これは水の蒸発による水面の低下によるものと考えられるが、時間の経過と共に小さくなって安定化の方向へ向っている。2-1 は 1 と 2 の差を表わし、水面の低下、気圧変化による水面の変化等を取り去った傾斜変動と考え得る。10 月の初めに 2 に大きな変動があり、その影響が 2-1 にも出ているが、これを除いた期間は一様な東下りの傾斜を示している。その傾斜量は非常に小さく 0.05''/year 以下の割合である。10 月初めの 2 週間に示される 0.1'' という急激な変動の原因は、この時期には降雨が全く無くて天候が非常に安定していた上、天ヶ瀬付近に特に目立った地震も見られず、計器も安定に動作していた故に目下のところ不明である。

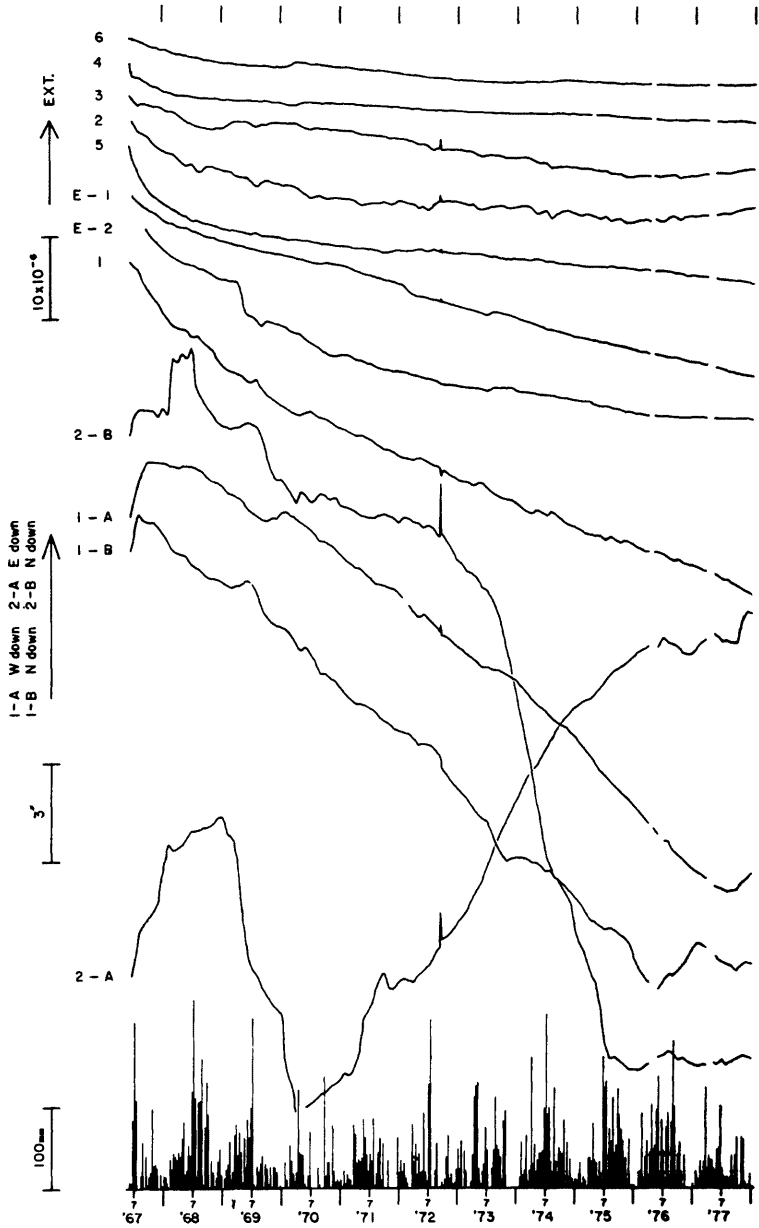


Fig. 3. Variations of ground-strain and ground-tilt observed at Amagase.

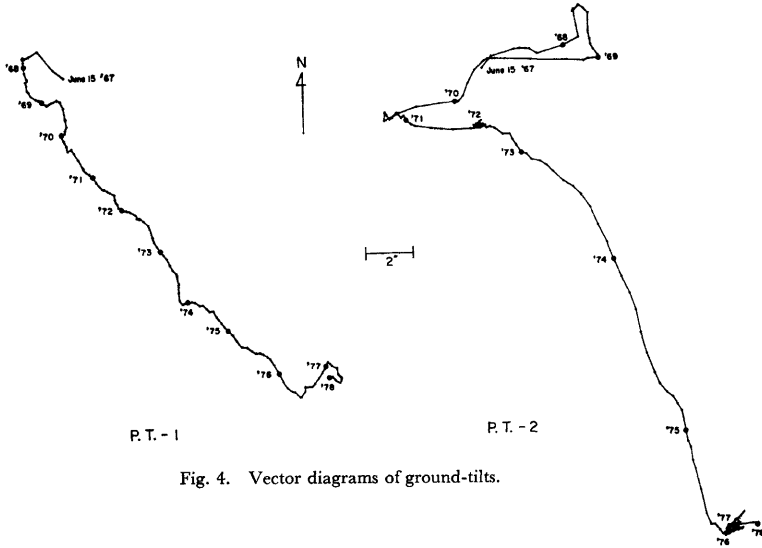


Fig. 4. Vector diagrams of ground-tilts.

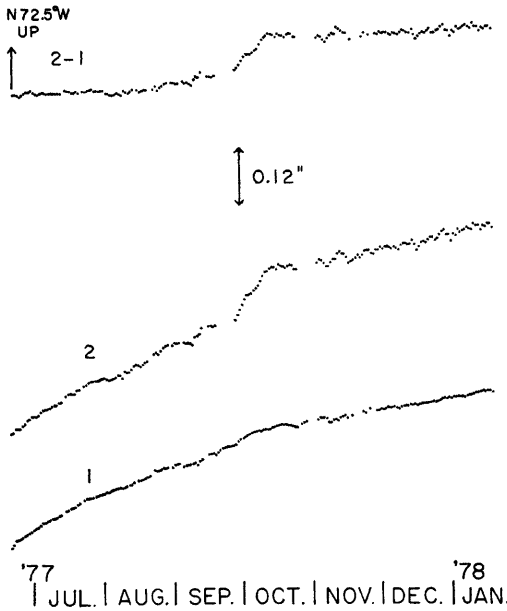


Fig. 5. Ground-tilts observed with water-tube type tiltmeter (W.T.-1, 2) from Jul., 1977, to Jan., 1978.

4. 光波測量によるひずみ変化

天ヶ瀬地殻変動観測室の隧道は全長 1830m、勾配 1/1300 のほぼ水平な直線隧道であり。断面は幅、高さ共 6.06m である。この隧道を利用して、伸縮計による連続観測の結果と比較することを目的に光波測量を行なうべく隧道内に 4 個の基点を設置して、AGA 社製 Geodimeter Model 6 を使用して 1970 年以来 反復測量を実施している⁵⁾。隧道内の温度変化は年間を通じて 0.1°C 以下であり、光波測量の結果に大きな影響を及ぼす気温補正による誤差が極めて小さい。したがってこの測線では非常に高精度の測定が期待でき、測定間隔を短くして反復実施することによって伸縮計の観測結果との比較だけでなく、Geodimeter の検定もできると考えられる⁶⁾。

Fig. 6 に隧道の断面と基点の位置及び測線の概略距離を示す。1970 年～1975 年までは B-0, B-1, B-2, B-3 の 4 基点、1976 年以降は C-0, C-1, C-2, C-3 の 4 基点から成る測線を用いている。据え付け誤差をなくするために、反射鏡の設置は基点に固定されたねじに直接取り付けを行なうようにしてある。本体の設置は B- 測線では B-0 に三脚を立ててその上に据え付けていたが、C- 測線では C-0 に基準台を作り、反射鏡同様直接固定できるようにした。また C-1, 2, 3 の基点は 3 点の反射鏡を同時に設置しておいても測定に影響がないようにそれぞれの高さを変えてある。これにより本体の方も据え付け誤差がなくなると共に、測定が非常に容易になり改測間隔を大幅に短くすることができた。1976 年 3 月～4 月に B, C 両測線の測定を行ない、それ以後は C- 測線のみで測定を行なっている。

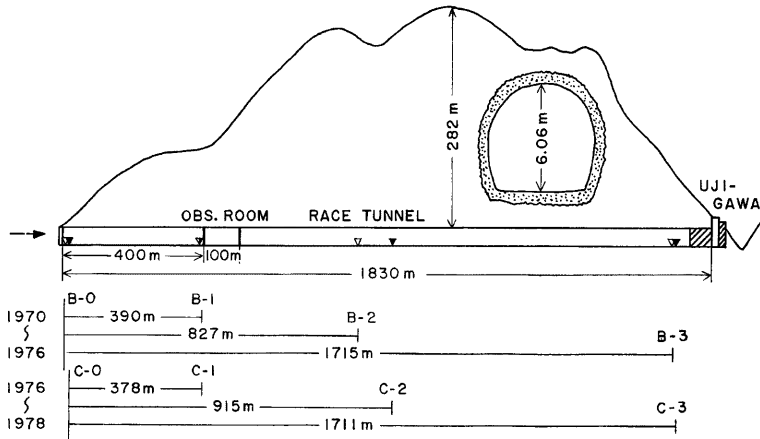


Fig. 6. Topographic profile along the observational tunnel and positions of station marks for electric-optical measurement.

B- 測線と C- 測線の基点は全て異なる位置に設けられているため、測線の長さも異なっている。それ故測定値そのままでは相互に比較することができない。しかしながら各測線の測定値の初回測定値に対する変化量と測線の長さから求めた歪変化量として考えるならば、B, C 両測線の (1-0), (2-0), (3-0) 各々の測線についての測定結果を連続させて考えることが可能となるであろう。このようにして求めた 1970～1977 年の各測線の測定結果を Fig. 7 に示す。図の最下段に隧道と平行方向の 40m 長のスーパーインヴァーナル棒伸縮計 E-1 成分の同じ期間の観測値を合わせて示す。

Fig. 7 では歪量におおしてプロットしてあるため、測線距離が短い程値のばらつきが大きく出ている。C-

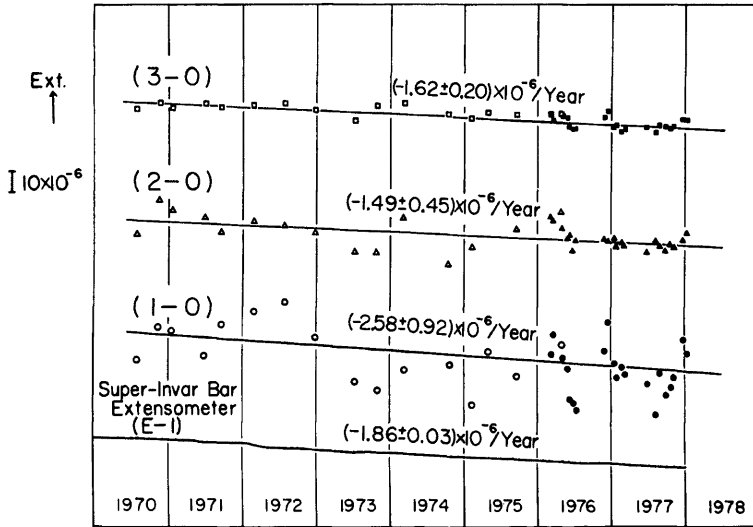


Fig. 7. Comparison of mean values of secular ground-strain obtained from electro-optical measurements and super-invar-bar extensometer (E-1).

測線の 1976 年 8 月～11 月の間の空白とその前後の不連続は、Geodimeter の調子が悪くなったため一部の部品を交換の上、較正をやり直したことによる。なお較正表は 1970 年～1976 年 7 月は 1967 年 11 月に AGA 社が作成したものを、1976 年 11 月以降は我々が作り直したものを使用した。

1970 年～1977 年の 8 年間の変化を全体としてみれば、各測線全て縮みの傾向がある。この期間の伸縮計の結果はほぼ一様な縮みの変化を示し、傾向としては合致している。それ故、最小自乗法により各測線の年平均ひずみを求め、伸縮計の結果と比べてみた。結果は (3-0)、(2-0)、(1-0) の各測線についてそれぞれ $(-1.62 \pm 0.20) \times 10^{-6}/\text{year}$ 、 $(-1.49 \pm 0.45) \times 10^{-6}/\text{year}$ 、 $(-2.58 \pm 0.92) \times 10^{-6}/\text{year}$ となり、測定値のばらつきによる誤差を考慮すれば、伸縮計の $(-1.86 \pm 0.03) \times 10^{-6}/\text{year}$ の値とほぼ合致すると考えてよいであろう。

1976 年以降の高頻度の測定結果を見ると、測定毎のばらつきはかなり大きいのが、冬季と夏季の測定値に系統的な変化が存在しているようにも思われるが、今後測定を続けて検討する必要がある。しかしながら、このような変化が存在するとすれば、各回の測定値のばらつきをも考慮に入れると、年 1～2 回の光波測量の結果から短期間の変動を議論するのはかなり大きな変動が無い限り困難であろう。

5. ま と め

1977 年 4 月より導入された地殻変動テレメーターシステムはその順調に記録を続けているが、現在の 1 日 1 回のデータ出力形式では何らかの原因で CPU が止まった場合 1 日のデータが消去されてしまう恐れがある。これは長期間の連続記録を必要とする地殻変動観測のシステムとしては一考を要する点であろう。

天ヶ瀬地殻変動観測室の伸縮・傾斜変化は 1976 年以降やや異なる傾向を示しはじめている。即ち伸縮変化については 1975 年までの一様な縮みから、1976 年以降上下方向の縮みがやや大きく、隧道に直角方向が僅かながら伸びに転じはじめた。傾斜変化についても 1975 年までの一様な南東下りの変化が、1976 年以降変化量

が非常に小さくなっている。伸縮計の隧道方向の成分にはこのような変化は見られず、平均して -1.9×10^{-8} /year のような縮みを示している。この値は竹本によるレーザー干渉計による calibration の結果⁷⁾、かなり信頼できる値と考えられる。

1970年より行なっている光波測量の結果得られた年平均ひずみ量は、隧道全体にわたって伸縮計から得られた値と近いものとなっている。これは天ヶ瀬のように条件の整った所で長期間測定を続ければ、Geodimeter 6型によっても 10^{-8} オーダーの平均変化量が検出できることを示している。しかしながら短期間の変動については、かなり頻度の高い測定を行わなければ議論はできないと考えられる。

おわりに光電変換装置については屯鶴峯地殻変動観測所の尾上謙介氏から、光波測量については田中寅夫助教授及び大谷文夫氏から御協力と御助言を戴いたことを附記し、各氏に対し深く感謝いたします。また観測全般にわたって御協力下さった小林年夫技官及び広野秋男氏に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 高田理夫・尾上謙介・小林年夫・山田 勝：天ヶ瀬地殻変動観測所における地殻変動観測（序報），京都大学防災研究所年報，第11号 A，1968，pp. 213-220.
- 2) 高田理夫・古沢 保・竹本修三・山田 勝：天ヶ瀬地殻変動観測所における地殻変動観測（第2報），京都大学防災研究所年報，第17号 B，1974，pp. 47-56.
- 3) 古沢 保・赤松純平：局所地震の P～S 間に見られる顕著な phase について，京都大学防災研究所年報，第21号 B，1978，pp. 97-106.
- 4) 古沢 保・尾上謙介・高田理夫：屯鶴峯における光電変換装置による伸縮計のデジタル観測，測地学会誌，第19巻第2号，1973，pp. 76-84.
- 5) 高田理夫・田中寅夫・尾上謙介・山田 勝・藤田安良・大谷文夫：光波測量による地殻水平ひずみの観測（第1報），京都大学防災研究所年報，第14号 A，1971，pp. 33-40.
- 6) 大谷文夫・田中寅夫：光波による地殻変動観測の精度について，京都大学防災研究所年報，第14号 A，1971，pp. 15-31.
- 7) 竹本修三：レーザー干渉計を用いたスーパーインヴァーナル棒伸縮計について，測地学会誌，第23巻第4号，1977，pp. 233-241.