

上宝における最近の地殻変動 (1984年12月まで)

土居 光・和田 安男・加藤 正明
和田 博夫・細 善信

GROUND DEFORMATION OBSERVED AT KAMITAKARA (UP TO DEC. 1984)

By Hikaru DOI, Yasuo WADA, Masaaki KATO,
Hiroo WADA and Yoshinobu HOSO

Synopsis

The results from observations of ground strains and tilts, and from electro-optical measurements made at Kamitakara up to 1984 are reported in the present paper. It was found from those observations that both the average strain rates and tilt rates are smaller than 3×10^{-7} /year during the last seven years.

In order to increase the reliability of observations, crustal strains have been routinely observed with plural detectors attached to each quartz-tube strainmeter. The results of comparison among them are also described.

No significant precursory changes in the observed strains and tilts prior to the Western Nagano earthquake of Sept. 14, 1984, have been detected.

1. は じ め に

京都大学防災研究所付属上宝地殻変動観測所 ($\lambda = 137^\circ 19' 38''$, $\phi = 36^\circ 16' 25''$) では、1966年以来、地殻変動連続観測を行なっているが、1977年にテレメータ・システムが導入され、1978年にはミニ・コンピュータが利用できるようになり、観測計器も増加しデータ数も以前と比べてかなり増えた。1975年までの結果は既に報告されている¹⁾。今回は1984年までの結果、特に蔵柱観測坑における伸縮歪および傾斜変動の観測結果について述べる。

2. 観測計器および解析システム

Fig. 1 は蔵柱観測坑内の計器配置図である。おもな計器の設置と記録方式の変遷を **Fig. 2** に示す。

Fig. 1 のうち、E' の基線長は 25 m で、E と同じ台石の上に検出部を設置し、トランスデューサにはアンブ内臓の差動トランス (SCHAEVITZ 製 050 HPD) を用いている。

EC はほぼ中間の所 (EC 1 : 12.45 m, EC 2 : 12.25 m, EC 3 : 12.27 m) でマグネセンサ (ソニー・マグネスケール社製セット B 2) で検出している。

なお現在は、E' のトランスデューサとしては

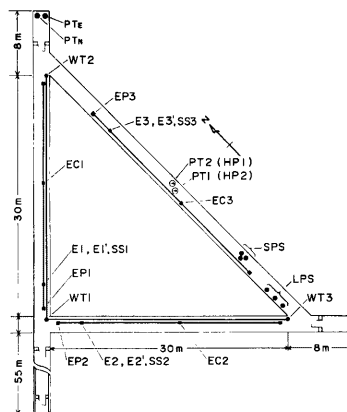


Fig. 1 Location of the instruments installed in the observation vault

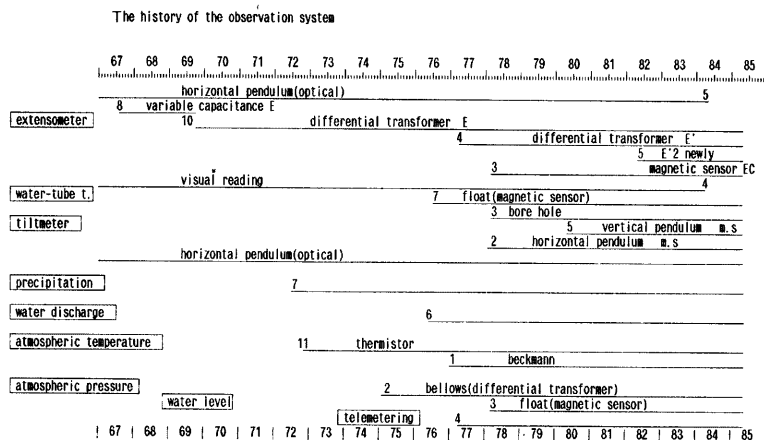


Fig. 2 History of the observation system at the Kamitakara Crustal Movement Observatory

SCHAEVITZ 製の差動トランス (050 HR) を用い、発振器に INTERSIL 製の ICL-8038 を使用した自作回路 (OP-07 を使用) を使用している。

読取り式水管傾斜計では、 $\pm 10 \mu$ 程度の読取り誤差は避けられない²⁾。さらに、これ以外に、人の入坑による人為的影響が加わる。これらの問題を解決するために、1976年には地球潮汐の観測にも十分に使用できるフロート型差動トランス水管傾斜計が設置された³⁾。差動トランスの精度は $10^{-2} \mu$ 以上、ドリフトは $0.3 \mu/\text{year}$ 以下⁴⁾ とされている。1977年以降は差動トランス水管傾斜計のみを使用している。読取り式水管傾斜計による観測 (最近数年間は2カ月ごとの読取り) は、必要が認められなくなったので現在中止している。

ボア・ホール型傾斜計 (キネメトクリス社製) による観測は、跡津川断層上の西天生観測室における観測と比較するために、蔵柱観測坑道内に床面より 1.5 m の堅穴を掘削し埋設して行っているが、地球潮汐観測用にはやや分解能が不足しているようである⁵⁾。

HP (差動トランス水平振子傾斜計) は、その周期を約5秒と低く設定し、出力を電氣的に増幅して記録させる方式をとっている。この方式により地球潮汐を高感度で記録でき、ドリフトも少なく安定している³⁾。

VP (鉛直振子傾斜計) は器機的には最も安定した構造⁶⁾ を持つが、電氣的増幅にすべてを依存しているため、変位に対する出力電圧が極めて大きいことが要求される。地球潮汐の検出の可能性をテストするため、2台の HP のうちの1台を VP に置き換えて観測を開始している。

湧水量の測定は、坑道内の入口から 50 m 入った所で天井からの漏れ水を転倒マスでうける方式で行っているが、坑道内から湧出する全体の量を必ずしも反映しているとは言えない。さらに、入口から 33 m の所に約 1 m ぐらいの深さの穴を掘削し、たまった水の水位をフロート型水位計によって測定している。

上に述べた以外に磁気偏角、気圧、温度の光学記録が観測坑の開設以来続けられている。

テレメータ・システムについてはすでに報告されている⁷⁾。その後1981年に蔵柱観測坑から上宝観測所への伝送を20成分から22成分に、上宝観測所から宇治防災研究所への転送を7成分から12成分に増設している。1979年には U-100 に 10 M バイトの固定ディスクが増設され、蔵柱観測坑からテレメータ・システム

により送られ一旦紙テープに出力された毎時のデータは、ディスクあるいはカセット・テープにためこんで解析・処理されている。

3. 観 測 結 果

Fig. 3 には地殻歪観測量の各成分間の比較も出来るようにこれら全成分の月平均値を並べてしめしてい

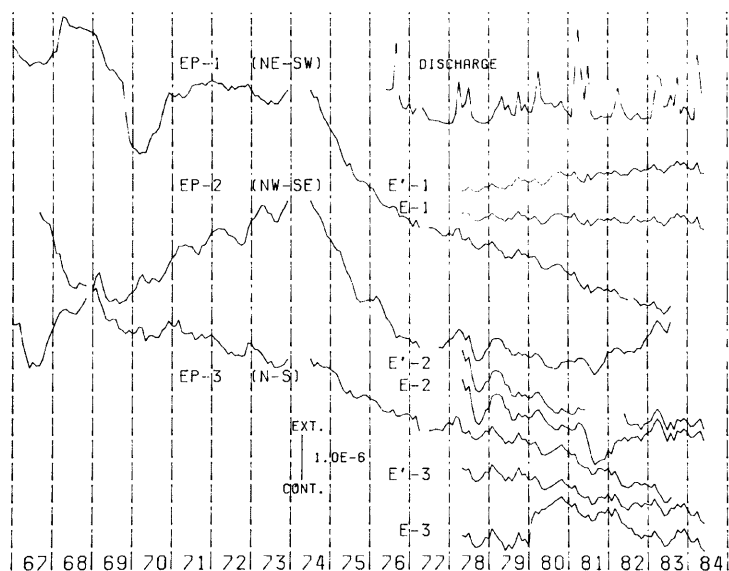


Fig. 3 Secular strains observed by EP, E' and E

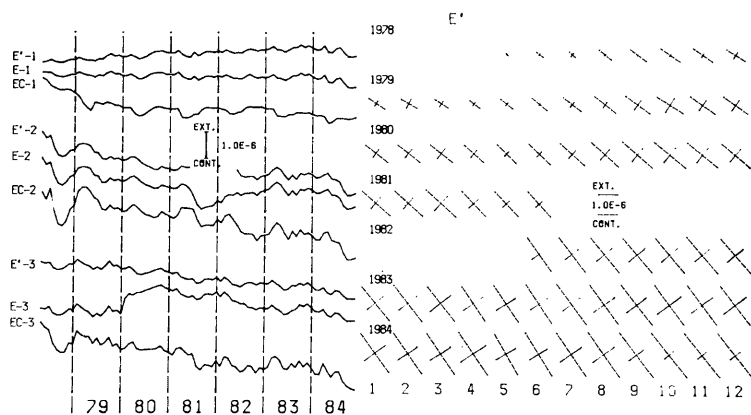


Fig. 4 Secular strains observed by E', E and EC, and principal strains by E'

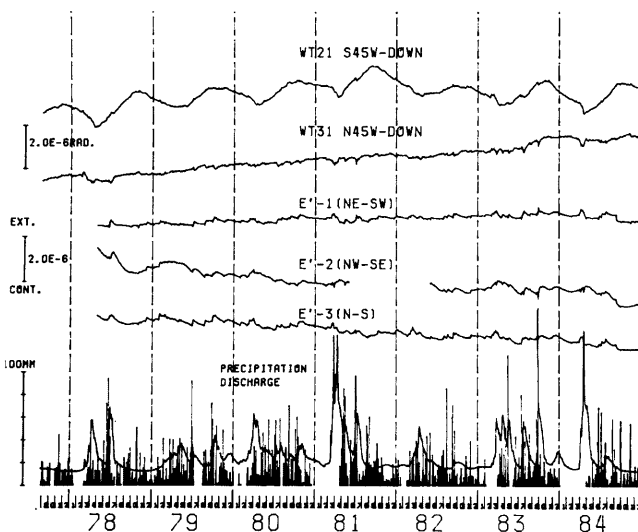


Fig. 5 Secular tilts and strains (daily means) and precipitation and water discharge (daily amount)

る。1975年までの結果はすでに報告されている¹⁾。1977年の欠測は、テレメータ化および E' 1, 2, 3 の増設工事によるもので、E' 2 の1981年から1982年にかけての欠測は差動トランスの故障によるものである。1982年からは差動トランスのタイプも変え、電気回路も E 1, 2, 3 で使われてきた位相検波方式から新方式に変更している（前述）。E 3 の1979年のはじめの急激な伸びは電気回路の故障によるものである。

EP 1, EP 2 にみられた1974年の坑内補修工事の後の大きな縮みの変動は1976年の後半から少なくなってきたが、その後の縮みの傾向は E 1, E' 1 では見られず、この傾向は EP 1 の固有な機械的なドリフトによるものと思われる。

Fig. 4 は1978年5月から1984年12月までの E', E, EC 各成分の月平均値と、1978年5月を基準とした主歪の大きさ及び方向の変化を E' について表している。

Fig. 3 でも見られるように短周期の変動は、同一方向の各成分間によく一致しているが、永年変化はわづかづつ傾向が異なる。E' と E の一致のよさから判断して1984年6月から EP 成分の観測は中断している。

Fig. 5 は1977年9月からの水管傾斜計によって観測された2方向の傾斜変動と、1978年5月からの E' による伸縮変化各成分の1984年12月までの日平均値を示している。冬の降雨量は積雪に支配され正確でないため、空白としている。

4. 異なるセンサによる伸縮変動の比較

上にも少しのべたが、ここでもう少し詳しく、同一水晶管に取り付けられた異なるセンサ間で得られた伸縮歪について比較する。**Fig. 3** および **Fig. 4** にも見られるように、降雨、特に雪解けの時期は湧水量が異常に増加するが、これに基因する歪の変動パターンは各成分間によく一致している。E と E' の振幅は等しいが、中間点にある EC の降雨等による影響は先端の方に取付けられたセンサ E, E' と比べると各方向で大きさが異なり、例えば EC 3 は E 3, E' 3 と比べて約2倍くらい大きい。次に永年変化に注目すれば、

Table 1 Comparison of the tidal strains among E', E, and EC by the least squares method during the period from May 18, 18h00m to July 14, 17h00m, 1983

	COMP.		COMP.		COMP.	
	AMP. $\times 10^{-8}$ PHASE		AMP. $\times 10^{-8}$ PHASE		AMP. $\times 10^{-8}$ PHASE	
	E1		E'1		EC1	
M2	0.456	76°.5	0.456	76°.8	0.522	71°.0
S2	0.292	-55°.4	0.292	-54°.2	0.266	-61°.4
K1	0.331	79°.1	0.325	80°.6	0.281	70°.1
O1	0.272	-54°.7	0.271	-55°.9	0.267	62°.3
	E2		E'2		EC2	
M2	0.900	35°.9	0.900	35°.7	1.086	34°.8
S2	0.410	89°.6	0.412	88°.4	0.521	87°.0
K1	0.625	-17°.7	0.623	-14°.8	0.642	-20°.6
O1	0.611	18°.3	0.621	18°.3	0.658	16°.8
	E3		E'3		EC3	
M2	0.869	46°.1	0.873	46°.7	0.900	44°.9
S2	0.464	-85°.5	0.462	-83°.8	0.473	-84°.6
K1	0.289	-52°.2	0.282	-44°.9	0.298	-43°.2
O1	0.328	-1°.7	0.324	0°.0	0.355	-2°.3

Fig. 4 に見られるように EC 1 の1978年から1979年を除いて E, E', EC はよく一致している。しかし EP 成分, 特に EP 1 と E' 1, E 1 の間にはかなり大きな差がみられ (Fig. 3), これは EP の拡大装置に用いているツェルナー吊り振子に基因するドリフトであると思われる。

我々はさらに地球潮汐の半日, 一日潮の周波数帯での E', E, EC 間のレスポンスの相違を調べた。これに先立ち, E と E' の相対感度を検定するため, 固定端の台石にジャッキをかまして地球潮汐歪に相当するような変位を与えた。この方法は基準尺に直接, 変位を与えるのではないから, 地面と基準尺は場所によって複雑な相対的変位を生じ, センサが同じ基線長の場所になれば必ずしも正確な検定にはならない。ここではこの方法を E' と E の相対感度の検定に用いた結果を Table 1 に示してある。先に述べたような方法で求めた E' に対する E の感度を用いると, 当然のことながら各分潮とも, 同じ台石に設置された E' と E は振幅, 位相ともに非常によくあっている。しかし E', E と中間点に設置された EC とは10%前後振幅が異なっており, 感度の差の問題も残るが, 非常にローカルな地殻物性の違いや地形の影響等の場所による違いを反映していると考えられる。

5. 気圧の伸縮計に及ぼす影響

気温及び気圧の測定としては, 蔵柱観測坑内の2点でサーミスタを用いた気温の測定, 及び観測坑の入口付近にある送信室で, ベローズの変位を差動トランスで検出して気圧の連続観測を行っているが, 特に短周期の微小気圧変動と坑内の温度変化がよく対応し, 同時に伸縮変化にも対応しているのが見られる。

そこで伸縮計に及ぼす気圧の影響をもう少し詳しく調べるために気圧計の感度を従来の約3倍に上げて観測した。Fig. 6 は上から140日間の気圧変化, E' 1, 2, 3 の3成分の値, 湧水量と降雨量を示し, 下図に上の期間とオーバーラップする期間, 約341日間の E' 1, 約85日間の気圧のスペクトルを示す。数日にわたる気

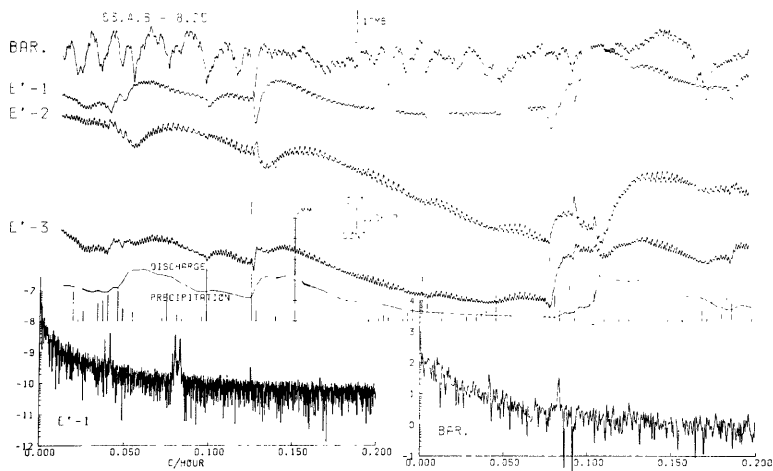


Fig. 6 An example of measurements by barometric changes and strains by E'1, E'2 and E'3 (hourly values), water discharge and precipitation (daily amount), and fourier spectra of E'1 and barometric changes

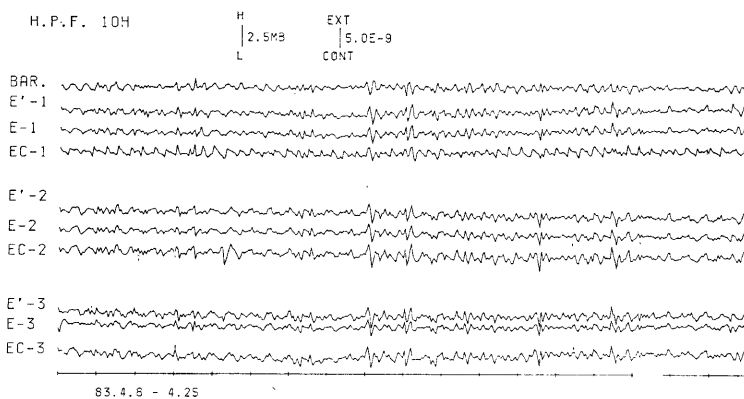


Fig. 7 High-pass filtered results with a cut-off period of 10 hours of barometric and strain changes

圧の変動には、雨をともなった低気圧による場合を除けば伸縮変化と明瞭な相関は見られない。

次に短周期の相関を調べるため、同じ期間のデータに10時間以内の変動を抽出する high-pass-filter を適用し、Fig. 7 にこの結果を示す。これから短周期の微気圧変動と伸縮計の変化がよく対応していることが見られ、気圧が高くなった時、気温が上がり水晶管が熱膨脹して見かけ上土地の縮みとなって現れている。このことは気圧変化により坑内の温度変化が断熱的に生じるためと考えられる⁸⁾。

Fig. 6 の E'1 のスペクトルの 1/3 日周期のピークは他の全成分にも見られるが、以上のことと同じ現象

であると考えられる。ただし気圧の方は解析期間が短く分解能が良くないので上のような対応関係は明瞭ではない。

潮汐の解析に重要な周波数帯である半日、一日ぐらいの周期帯でどれぐらいの気圧の影響があるかを調べることは今後の研究課題である。

6. 長野県西部地震の前後について

1984年9月14日8時48分に長野県西部地震 ($M=6.8$, $d=55$ km) が発生した。観測開始以来、上宝観測所の周辺で発生した大きな地震には岐阜県中部地震 (1969年9月9日, $M=6.6$, $d=55$ km) があるが、これに関連した地殻変動については、すでに報告されている^{1),9)}。

Fig. 8 に水管傾斜計と伸縮計 (E') より得られた1984年7月から12月までの傾斜および歪変化の毎時の値、および降雨量と湧水量の日単位の値を示す。地震の発生を境にして WT 21 が折れ曲ったようにも見えるが、年周変化のピークが毎年9月ごろ表れるので、我々は、この折れ曲りはこのピークに相当していると考えている。地震の後、わずかに湧水量の増加が見られる。ここには載せていないが、水位計の記録には地震後、数日の間、水位の上昇が明瞭に見られた。

Fig. 9 に、9月1日から9月29日までの E' の毎時の値と、それから潮汐成分を引き去った値を並べて示している。図の下には、9月14日8時からの歪主軸のパターンの変化を、潮汐成分を引き去った値を用いて

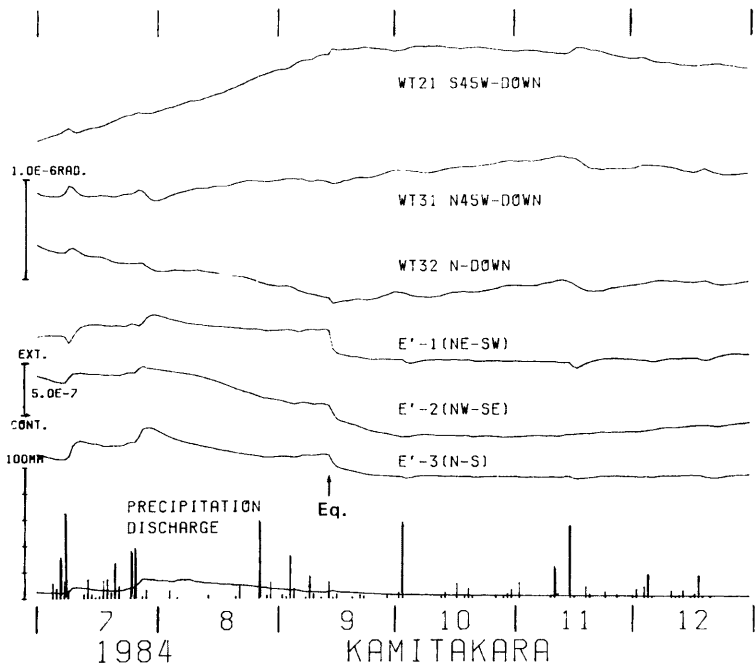


Fig. 8 Daily tilts, strains, water discharge and precipitation for the period from July 1 to Dec. 31, 1984

表している。図にはこの地震の最大余震（9月15日7時12分、 $M=6.2$ ）の時のステップもみられる。この図は1時間間隔の値であるからステップ状に見える部分は、コサイスミックなステップと地震直後から始まった同じセンスの大きな余効との両方を含んでいる。また打点式記録（30秒サンプリングデータ）からもコサイスミックなステップと余効変動の区別は、特に本震の場合はつけられなかった。

Table 2 では、地震時から、初期の大きな余効変動のおさまりかけた約2時間近くの間の変動量をステップとしている。余効変動は約2週間後にはほぼおさまり、最終的には震央方向に近い NNW-SSE の方向に

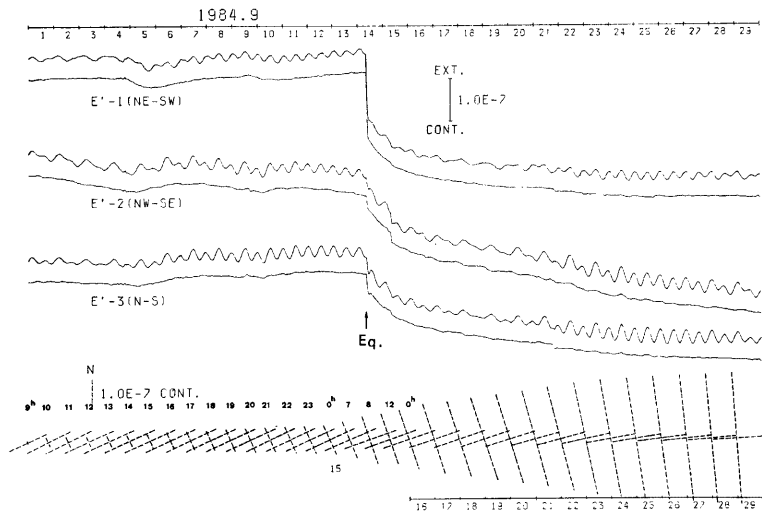


Fig. 9 Hourly strains, those residuals removed tidal components and time variation of principal strains from Sept. 14, 08h

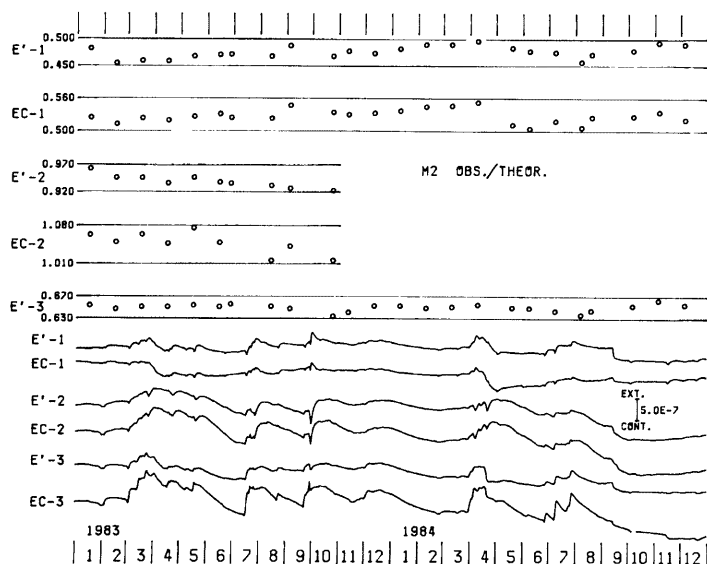
Table 2 Recorded strain steps related to the W. Nagano earthquake
MAIN SCHOK $M=6.8$

E'1	-1.5×10^{-7}	E'2	-1.2×10^{-7}	E'3	-0.5×10^{-7}
E1	-1.6	E2	-0.9	E3	-0.5
EC1	-2.3	EC2	-1.9	EC3	-1.1
WT21	-0.30	WT31	-0.03	WT32	-0.19

AFTER SCHOCK $M=6.2$

E'1	-0.04×10^{-7}	E'2	-0.22×10^{-7}	E'3	-0.06×10^{-7}
E1	-0.03	E2	*	E3	-0.06
EC1	-0.05	EC2	-0.20	EC3	-0.07
WT21	-0.05	WT31	-0.04	WT32	-0.01

Upper; main shocks ($M=6.8$, Sept. 14, 1984).
Lower; the largest after shock ($M=6.2$, Sept. 15, 1984).

Fig. 10 Time variations in the amplitude of M_2 and daily strains

縮みの主軸が卓越した。

次に地震前後の潮汐歪の時間的な振幅変化を調べた。Fig. 10 に1983年1月から1984年12月までの M_2 分潮についての観測振幅と理論振幅の比を、永年変化の日平均値とともに示す。

解析方法は、観測データにペルチェフのフィルタを適用し、主要9分潮を仮定し最小2乗法により各分潮を求めた。1区間に対する解析期間は30日間で降雨等の影響で記録が乱れている所は避けながらも1か月ごとに求めた。

一方、18.6年周期や解析による誤差を小さくするため、同じ区間に対する理論的な地球潮汐歪を求め、同じ処理を行なって、それらの振幅比をもとめ、図示している。この図から明らかなようにこの期間に特に有意な変化は見られなかった。なお NW-SE 方向の歪の観測については、E 2 のセンサ部において、1983年の末期から、コアとコイルが接触していたことが後で分った。その影響は、永年変化や降雨時には余り現れていないように見えるが、潮汐歪に関して、特に E 2 では、振幅比が半分近くに減少しているので、ここでの議論から除外した。

7. 光 波 測 量

我々は1977年から上宝地殻変動観測所の周辺で、地殻変動連続観測あるいは測地測量によるデータとの関連性を調べるため、20測線の光波測量を毎年7月頃行ってきた。この間、除雪のため標石の破損（1983年 K T）、標石の移動（K O、そのために K O-K M 測線が可能となった）等による欠測があるが、現在、21測線の観測が続けられている。Fig. 11 にその結果を示す。光波測量では光路に沿う気温の補正が重要な問題であり、地上近くの温度と実際の光路に沿う温度分布の関係は数多く調べられている¹⁰⁾。田中は上宝周辺、その他で測定時刻による測線長の変動の傾向を問題にし、地上および地上からの高さによる気温の減衰を考慮

KAMITAKARA NETWORK

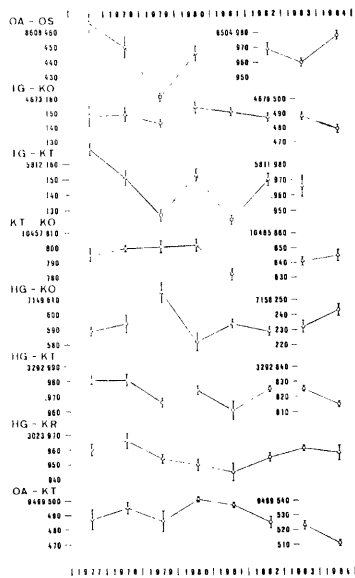
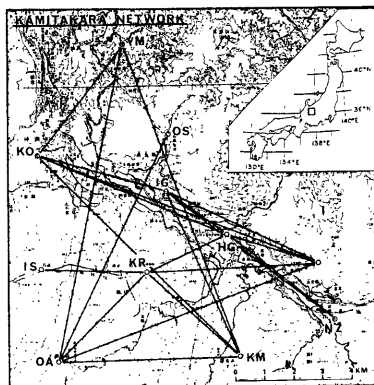
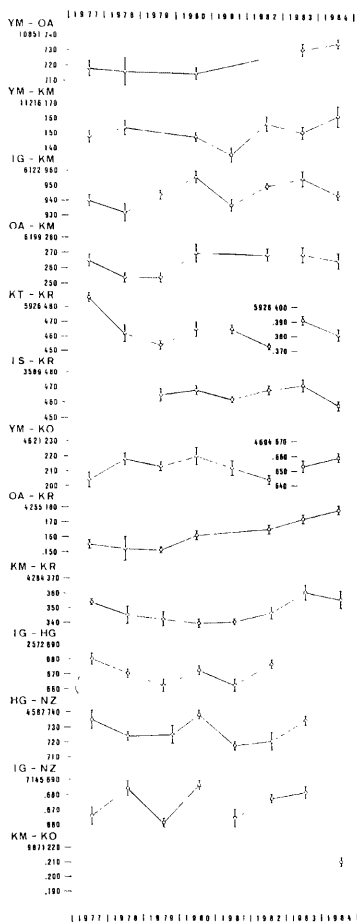


Fig. 11 Results of electro-optical distance surveys at Kamitakara

し、時間的、空間的な温度分布のモデルを用いる事によって観測精度を上げる試みを行った¹⁾。

我々も同一測線での連続観測を行い、このモデルを適用し、パラメータおよびモデルの改良を試みている。

今回の結果は従来どおり、測線の両端で地上から 4~5 m の高さの気温の平均値をとることによって光路の平均温度の代りとしている。この値は光路に沿う実際の平均気温と、大きい時で 2~3 °C は異なる事もありうると推定され、さらに計器本体 (AGA 6 BL) に由来する ± 5 mm の誤差もあることを考慮すれば、測

定誤差は全体として、歪に換算して $2\sim 3\times 10^{-6}$ を越える可能性がある。**Fig. 11** の各測線長の変化には、この測定誤差を明らかに越えるものは無く、したがって、特に有意な変動や傾向があるとは結論出来ない。

8. ま と め

降雨あるいは湧水量の伸縮歪への影響は、伸縮計の中間点と自由端に近い点では、大きい成分で約2倍異なる。この差は潮汐歪については約10%、coseismic な strain step（長野県西部地震の余震）についても同程度である。永年変化についても、明らかな故障等によるものは別にして、setting や電気回路のドリフトも含めて、全般的に見れば、同一基準尺に取付けられた独立なセンサ間（E', E, EC）での違いは、10%以内におさまっていると考えられる。このことにより、広域な地殻の変動に対しては、観測坑付近の地形の影響等による site effect は、短周期から長周期まではば一定と考えられる。複数のセンサより得られた記録を比較することにより非常に信頼度を増していると考えられる。最近約7年間の伸縮歪の永年変化は、上のことを考慮しても大きい成分でも rate にして $3\times 10^{-7}/\text{year}$ 以下である。上宝観測所周辺で行なわれている光波測量の最近8年間の観測結果も、誤差を考慮すれば、地殻変動連続観測と調和的である。

水管傾斜計による傾斜変動の永年変化は、最近約7年間で rate にして $3\times 10^{-7}\text{ rad/year}$ 以下である。1982年ののはじめのころ、WT 21 にトレンドの変化が見られるが、これに対応する伸縮計の変化はみられない。なお WT 21 には、振幅 $0.08''$ の年変化が顕著に見られるが、これは地表が傾斜していることから生じる熱弾性傾斜によるものと考えられる¹²⁾。

長野県西部地震に関しては、余効的な現象は伸縮、傾斜、水位等で観測されたが、短期的、あるいは長期的な前兆現象は、上宝においては検出できなかった。

この研究をまとめるにあたり、終始ご指導をいただいた三雲健教授、田中寅夫助教授、計器の設計・製作にあたってこられた津嶋吉男技官、そのほか、なにかと御協力いただいた関係各位に深く感謝お礼申し上げます。なお、ここでの計算の一部に三雲教授、京都大学理学部の中川一郎助教授のプログラムを使用させていただいた。厚くお礼申し上げます。なお、解析の一部には京都大学防災科学資料センターの電子計算機を使用した。

参 考 文 献

- 1) 土居 光・加藤正明・和田安男・三雲 健：上宝における地殻変動の連続観測，測地学会誌，第22巻，第3号，1976，pp. 149-159.
- 2) 加藤正明・津嶋吉男：差動トランス型水管傾斜計の試作，京大防災研年報，第16号 B，1973，pp. 55-63.
- 3) Kato, M.: Observations of Crustal Movements by Newly-Designed Horizontal Pendulum and Water-Tube Tiltmeters with Electromagnetic Transducers (1), Bull. Disas. Prev. Inst., Kyoto Univ., Vol. 27, Part 4, 1977, pp. 155-171.
- 4) 志知龍一・岡田義光：坑内における歪観測，測地学会誌，第25巻，第2号，1979，pp. 101-134.
- 5) 加藤正明・土居 光・和田安男・三雲 健・田中寅夫・津嶋吉男・小泉 誠：跡津川断層付近におけるボア・ホール型傾斜計による観測(1)，京大防災研年報，第22号 B-1，1979，pp. 45-54.
- 6) 加藤正明・津嶋吉男・土居 光：鉛直振子傾斜計について，日本測地学会第58会講演会要旨，1982，pp. 91-92.
- 7) 上宝地殻変動観測所・地震予知計測部門：上宝地殻変動観測所の地殻変動・地震テレメータ・システム，京大防災研年報，第21号 B-1，1978，pp. 119-135.
- 8) 橋田匡邦・重富国広：材質の異なる基準尺を用いた伸縮計の比較観測，測地学会誌，第30巻，第4号，1984，pp. 264-273.

- 9) Mikumo, T., M. Kato, H. Doi, Y. Wada, T. Tanaka, R. Schichi and A. Yamamoto: Possibility of Temporal Variations in Earth Tidal Strain Amplitudes Associated with Major Earthquakes, J. Phys. Earth, Supplement Issue, 1977, pp. 123-136.
- 10) 木股文昭・山内常生：光波測距における温度補正，測地学会誌，第27巻，第3号，1981，pp.173-182.
- 11) 田中寅夫・細 善信・和田安男・土居 光：岐阜県上宝地域で行なっている光波測量への気象的影響，測地学会誌，第29巻，第1号，1983，pp. 10-18.
- 12) J.C. Harrison, Klaus Herbst: Thermoelastic Strains and Tilts Revisited, Geophysical Research Letters, Vol. 4, No. 11, Nov. 1977, pp. 535-537.