

静岡県相良町における長距離水管傾斜計 による地殻傾斜観測について

遠山忠昭*・長谷川 靖**

Analysis of Tilt Observation with the Long-Distance Water Tube
Tiltmeter at Sagara-Cho, Shizuoka Prefecture

Tadaaki TŌYAMA* and Yasushi HASEGAWA**

A long-distance water tube tiltmeter (L.W.T.T.) was established in 1983 at Sagara-cho, Shizuoka Prefecture in order to predict Tokai earthquake. The observation started in June, 1983. The data during the period between June, 1983 and June, 1985 were analyzed in the present investigations.

The observatory has been built on the Quaternary Makinohara Gravel Bed. Each observation room has a hole about two meters deep. Granite blocks have been set firmly on the concrete foundation, and the water tank has been set on it. The L.W.T.T. with a length of 365m was set in the direction of approximately NW-SE. It is the longest water tube in the tiltmeter in Japan and can detect the tilt to 1×10^{-9} rad. The tube is made of lead. The difference of water levels, temperature and atmospheric pressure are recorded at the observatory. They are converted to electric signals and sent to Shizuoka University through telephone lines.

The water volume both in the tanks and the tube must be constant. But the variation of temperature makes the water volume variable, and its ratio is 13cc/°C. It can be explained from the difference in the expansion coefficients between water and lead.

The variation of temperature also influences the water level difference. When the temperature rises, the water tanks and the granite blocks expand with heat, and the buoyancy of the floats in the tanks decreases with the decrease of water density. By taking account of the factors mentioned above, the difference of water levels between the maximum and the minimum temperature is estimated to be about 3×10^{-7} rad (0.1mm/365m).

When the underground water level rises, the pore water pressure increases, and the crustal tilt at the observatory may be influenced. A suitable tank model has been introduced to estimate the underground water level from rainfall. The water level which was calculated with the model has shown a good correspondence with the tilt values obtained by the L.W.T.T. From these results, it has been made clear that the volume of under-

1986年3月24日受理

* 静岡地方気象台 Shizuoka Local Meteorological Observatory, Shizuoka, 422.

** 静岡大学理学部地球科学教室 Institute of Geosciences, School of Science, Shizuoka University, Shizuoka, 422.

ground water influences intensely the variations of tilt.

As the observatory is only 1.5km from the beach, and the tilt values by the L.W.T.T. is much influenced by the ocean tide. For the variation of the tilt values, the corrective coefficient of about 2.8×10^{-9} rad/cm is obtained.

In order to check the tilt values, the levelings between the two observation rooms have repeatedly been carried out. The results show that the tilt values obtained by the L.W.T.T. correspond well with the real tilt change at these points.

The other levelings have also been repeatedly carried out along the route between the observatory and the bench mark settled by the Geographical Survey Institute. The bench mark is 1.4km from the observatory in the direction of approximately NW-SE. As a result it has been found that the crustal tilt obtained by the L.W.T.T. is inversely correlated with the regional movement.

1. 序 論

駿河湾を震源とする大規模な地震が近い将来起こるであろうと指摘されて久しい。静岡県ではこの地震の予知を目的として、1983年3月に、静岡県榛原郡相良町鬼女新田に長距離水管傾斜計を設置し、同年5月より観測を始めた。その後現在に至るまで、途中で若干の欠測があるが、ほぼ良好な記録が得られている。

本研究では、この長距離水管傾斜計の観測開始から1985年6月までの記録をもとに、真の地殻変動を知るために、記録に対する様々な擾乱源を定量的に見積り、さらに、これまでの水管傾斜計の記録と水準測量の結果を比較して、この地域の地殻変動について考察し、傾斜計の広域な変動に対する有効性について検討してみる。

2. 観測システム

今回設置した傾斜計は、図1に示すように、牧ノ原台地上の東経 $138^{\circ}11'0''$ 北緯 $34^{\circ}40'30''$ 標高106.50mに位置し、御前崎の先端から北へ約8km、海岸線からは約1.5km離れたところにある。水管の設置方位は $N60^{\circ}W$ で、海岸線とほぼ直交している。本論文では、南東側に水槽が設置されている観測室を観測室A、北西側のそれを観測室B、そして、それらの中間点を中間点Cと呼ぶことにする。

A, B 観測室は地下を約 2m 掘り下げ、底をコンクリートで固めた上に花崗岩の基台をのせ、その上に水槽が設置されている。水槽の内径は 150ϕ あり、内径 25ϕ の鉛管で連結してある。2つの水槽の距離は 365m あり、現在日本国内に稼働している水管傾斜計の中では最も長い。このため、分解能も高く 365m にたいして $4 \times 10^{-4} \text{mm}$ ($1 \times 10^{-9} \text{rad}$) の変化が検出できる。

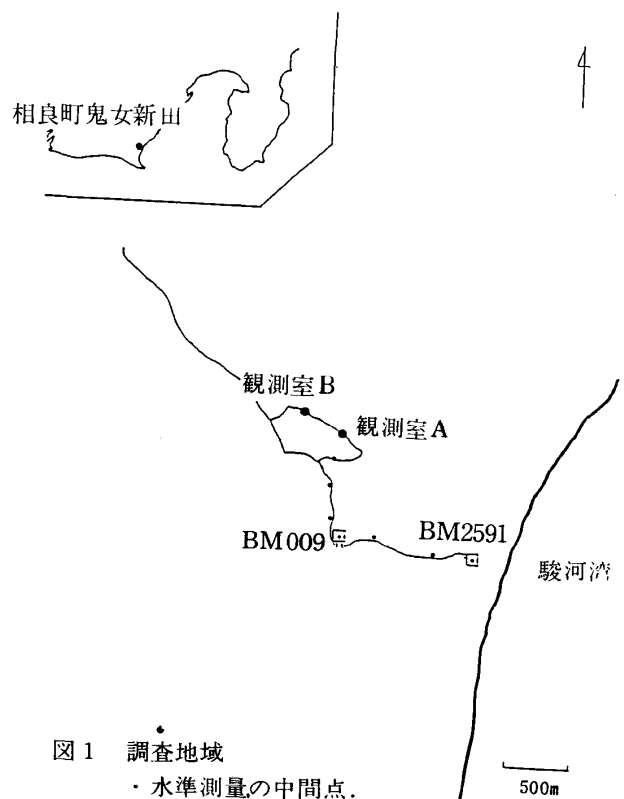


図1 調査地域
・水準測量の中間点.

水位変化の検出方式は、名古屋大学理学部の設計に基づいたフロート式のものをを用いている。これは、水位変化に伴うフロートの上下変化を、2枚の板バネで支えたアームに伝え、その変化をマグネセンサーを用いて電気信号に変えて検出するものである(志知他, 1980)。また、観測室 A, B および中間点 C には、半導体温度計を設置している。

観測室 A の上部は記録計室となっていて、傾斜変化にあたる両水槽の水位差の他に、水量変化にあたる水位和、これら3点の気温、気圧を打点式記録計で連続記録している。さらに、10分ごとの記録を1時間ごとに電話回線を使って静岡大学に送り、それらを、打点式記録計、プリンター、フロッピーディスクで記録収録している。

3. 観測結果

短周期の傾斜変化を、1983年6月上旬の記録を例にとって図2に示す。記録は、潮汐の影響を受けて周期的に変化している。また、図3は長周期の傾斜変化を示す。やはり周期的な変化がみられ、とくに、夏には南東側に傾斜し、冬には南東側が隆起している季節変化が特徴的である。

気温、気圧及び水量の長周期変化を図4に示す。気温、気圧に関しては、短周期の変化を消去するために、ここでは、次式のように気温については3日の重みつき平均、気圧は5日の重みつき平均で表わしてある。

$$\bar{T}(X) = [T(X-1) + 2 \times T(X) + T(X+1)] / 4$$

$$\bar{P}(X) = [P(X-2) + 2 \times P(X-1) + 3 \times P(X) + 2 \times P(X+1) + P(X+2)] / 9$$

ここで、 $T(X)$ 、 $P(X)$ は、 X 日の気温、気圧を示す。

結果を見ると、気温はほぼ外気温に匹敵するような変化が見られ、水量も数百 cc も変化していることがわかる。

そこで、次章では、これらをもとに傾斜変化観測の擾乱源やその影響について考えてみる。

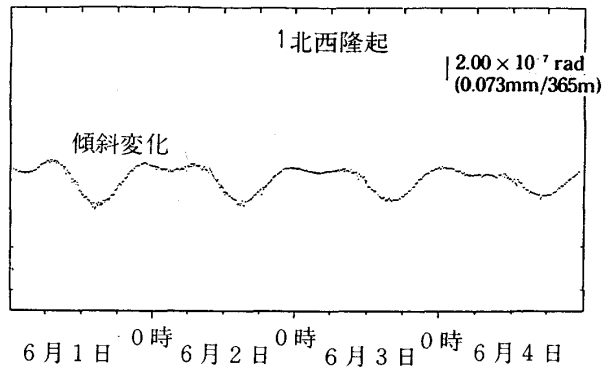


図2 短周期の傾斜変化。

4. 傾斜観測におよぼす擾乱源

4-1 坑内の気温、気圧

図4に示した観測室内での大きな気温の年周変化の原因は、水管の深さが地下約2mと浅く、長周期の気温変化がそのまま地中へ伝導することと、建物の断熱効果が予想よりも小さかったことが考えられる。また、観測室 A, B 間での気温差も大きい。とくに、1984年3月にはその差が8°Cにも達している。観測室 A の温度計が途中で故障してしまったため、1984年5月以降のデータが得られてないが、中間点 C の気温と観測室 B の気温差の結果からみると、両観測室間の気温差はあまり変わっていないと思われる。

水量は、水漏れがないかぎり一定値をとるはずであるが、実際にはかなりの水量変化を示した。図4で空白になっているところは欠測部分である。しかし、この水量変化と気温変化とを比べてみると、水量変化の原因の大部分は、温度変化にともなう水と鉛管の膨張、収縮によるものと考えられる。そこで、水量変化のデータに欠測のない1984年5月から1985年5月までの水量変化と、観測室 B と中間点 C の気温の平均について、気温変化1°Cに対する水量の補正係数を求めると、約13cc/°Cとなる。この値を用いて、気温の補正をした水量変化を図5に示す。比較のために、補正前の変化も同じスケールで示してある。水量の季節変化はかなり小さくなったが、他の擾乱源があるためかまだ若干のばらつきがみられる。また、水量は経年的にやや減少していて、若干の水漏れをおこしている可能性もある

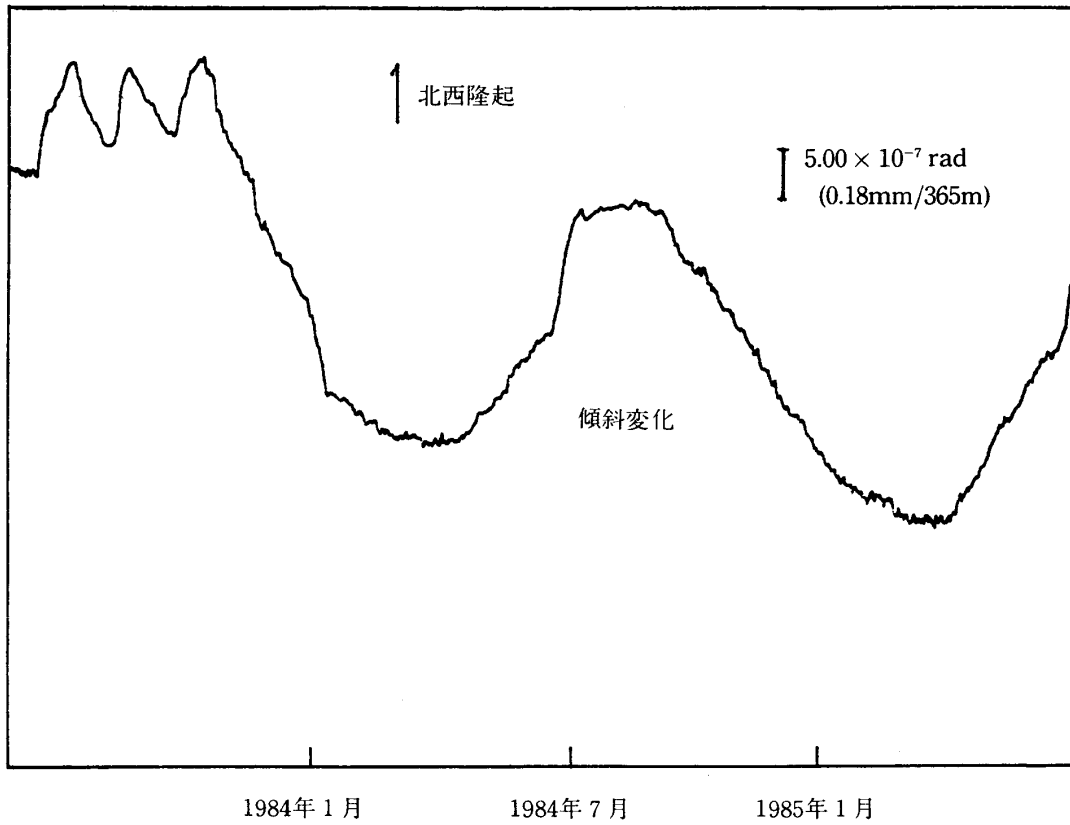


図3 長周期の傾斜変化.

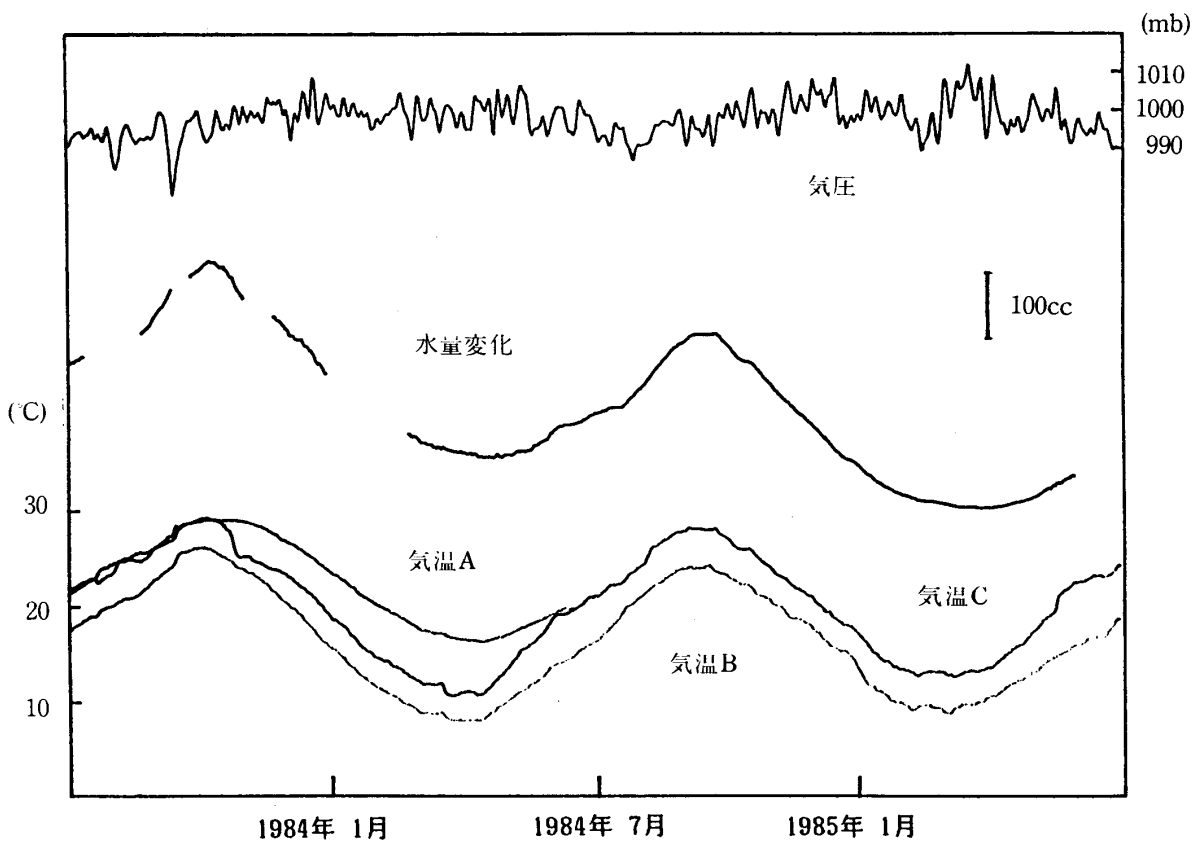


図4 気温・気圧・水量変化.

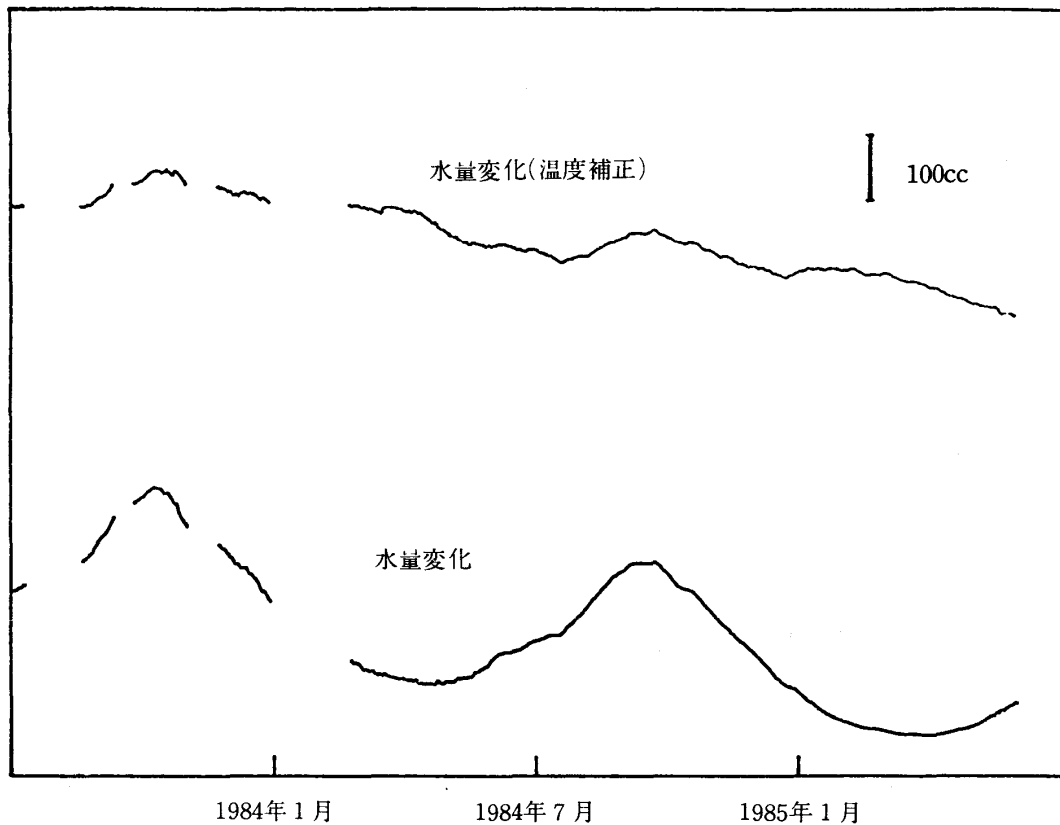


図5 水量変化の温度補正.

ので、今後検討していかなければならない。

つぎに、観測室 A, B 間の気温差が最大 8°C もあることが、水位差、つまり傾斜変化に影響を及ぼすと考えられるので、それに関していくつかの要素について影響量を見積ってみた。

まず、2つの水槽の水温が異なるためにフロートにかかる浮力も変わり、傾斜観測に影響がでることが考えられる。これによると、気温差 8°C の時、観測室 B が約 0.04mm 高く検出されてしまう。水槽はアクリルでできているので、気温変化によって断面積が変わってくる。これによると気温差 8°C の時、観測室 A が約 0.07mm 高く検出される。また、基台の花崗岩の膨張により、やはり気温差 8°C の時、観測室 A が約 0.07mm 高く検出される。このほか、水位の上下に伴うバネの力の影響を考慮すると、観測室 A が 1 年に 12°C 、観測室 B が 18°C の気温変化をし、気温差が最大で 8°C とした時、観測室 A が約 0.025mm 高く検出されることになる。

これらの影響量をすべて見積ると、観測室 A の気温が観測室 B に対して 8°C 高い時、観測室 A が実際

より 0.1mm 、角度にして $3 \times 10^{-7}\text{rad}$ 高く観測されることになる。しかしこの値は、温度差が最大の時の値であるので、1 年に 1mm 以上変化する傾斜変化に対してはそれほど大きな影響はない。

4-2 降雨, 地下水

多量の雨によって地表近くが一時的に膨張したり、地下水となった雨水が水圧をかけることによって、地殻は隆起するので、得られた傾斜変化に雨の影響が含まれていることは十分考えられる。そこで、雨が降った直後に傾斜変化があるかどうかを調べてみた。雨量は、観測所から約 12km 離れた気象庁の牧ノ原 AMeDAS の記録を用いた。

1 日数百 mm 以上の雨が降ると、その後 1~2 日遅れで必ず南東に傾斜している。その量は、日雨量 $100\sim 200\text{mm}$ で 0.5mm 、日雨量が 200mm 以上になると 0.9mm の変化を示す例もあった。1983 年 8 月の降水量と、傾斜変化の結果を図 6 に示す。

1 日数十 mm の雨量では、傾斜変化に影響のある場合と全く影響のない場合とがあった。しかし、こ

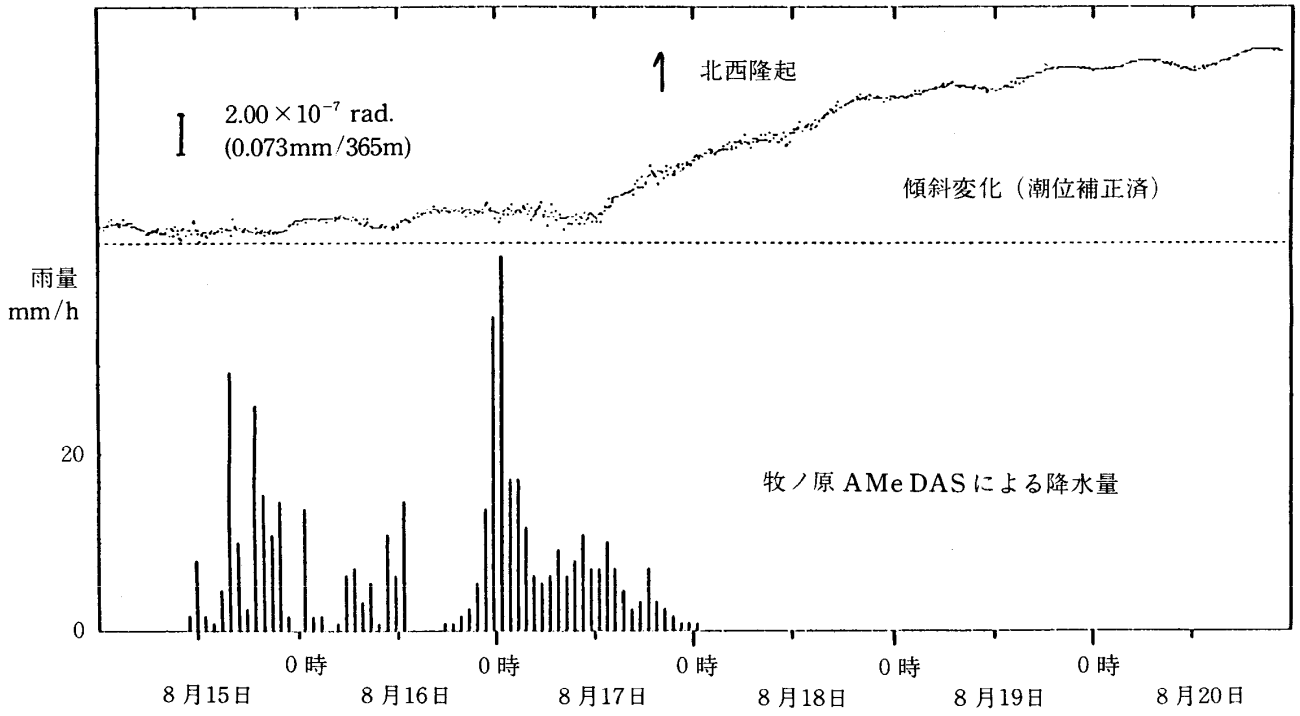


図6 短周期傾斜変化と降水量の関係.

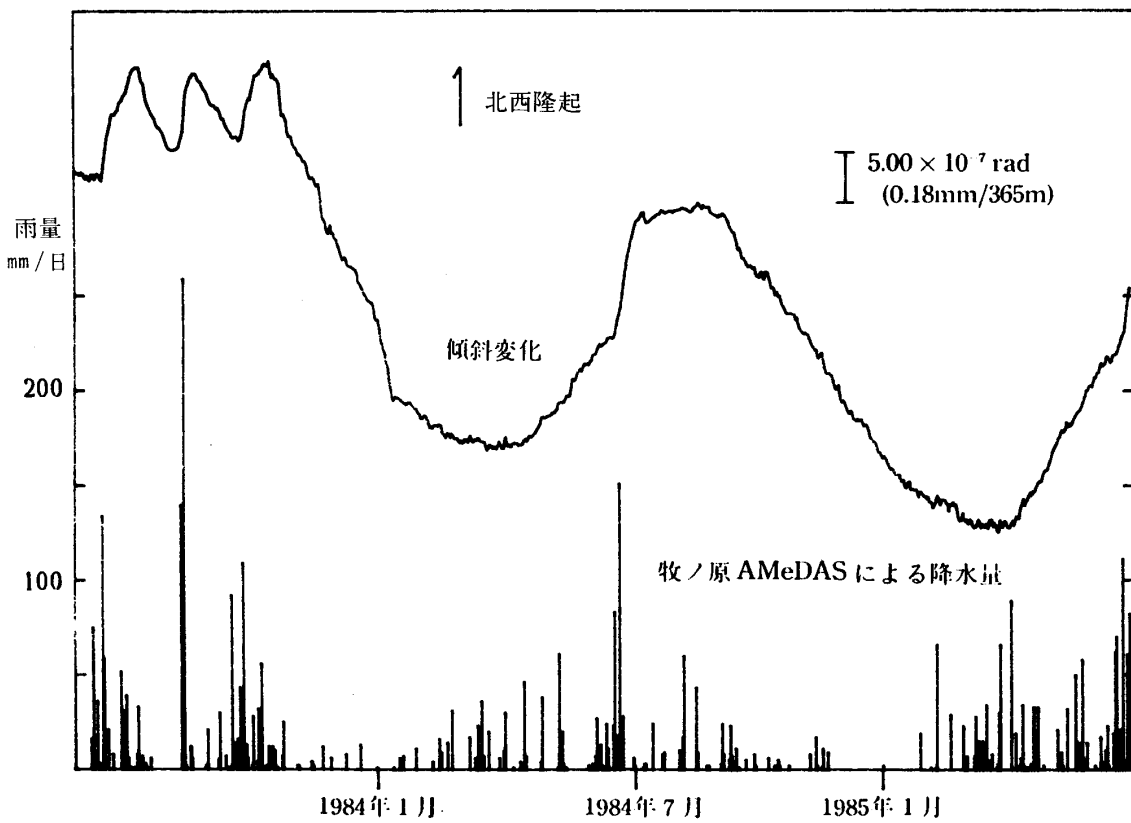


図7 長周期傾斜変化と降水量の関係.

の程度の雨による傾斜変化は、1日で大きくてA-B間で0.2mm位であり、長周期の傾斜変化を考える上では影響はない。

図7に示すように傾斜の長周期変化と牧ノ原 AMeDAS の日降水量の関係を見ると、1983年7月、8月、10月の3つのピークとそれに対応する降雨や、降水量の全体的な増減と傾斜の変化との関係は、若干の時間的なずれがあるにしても、非常によく一致している。つまり、降雨及びそれに伴う地下水の変化と傾斜変化とに何か関係があると考えられる。そこで、地下水の影響とそれによる傾斜変化のメカニズムについて考察してみるために、傾斜計設置地点でのタンクモデルを考えてみた。モデルを作るにあたっては、菅原(1972)を参考にした。

タンクに入れる水(降雨)は、地質構造の関係より、牧ノ原方面での記録が最も効くと考えられるので、牧ノ原 AMeDAS の日降水量を使用した。降雨と水位増加の間の位相を遅らせる必要があるので、モデルとして二段式タンクを使用した。雨が降ると、それはまず一段目のタンクに入れられる(図8のR)。そして、その水は溜られた水の高さに比例して二段目に水を流し(図8のF1)、さらに二段目のタンクに溜られた水はこの高さに比例して放出される(図8のF3)。雨が降っても二段目のタンクに水がすぐ流れないように、一段目のタンクの出口にある高さをつけた(図8のH1)。このほか、多量の雨が降った場合の余剰の雨

水のはけぐちとして、タンクの横に出口をつけた。また、蒸発量やタンクの高さなども考慮した。

以上の条件で、傾斜変化にあうモデルを考えた。そのモデルから計算したタンクの水位の結果を図9に示す。縦軸は二段目のタンクの水位であり、これは地下水が地盤におよぼす水圧に相当すると考えられる。図9を見ると傾斜と水位とは、ほぼ似た変化をしているが、1985年にはいつてからは、やや水位が上がりすぎる結果となった。

図10は、観測室設置前の1982年7月に、観測室A、B地点でおこなわれたボウリングの資料である。この時観測室Bの地点では9.5mの孔内水位が観測されているが、観測室Aの地点では約15mまで孔を掘ったが、地下水は見られなかった。また、観測室Bより約200m北西にある民家の井戸の水位が地下約7~8mであることから、地下水の不透水層となっているのは、観測室Bの地点では13.8mの深さにあるシルト層であるといえる。

以上のことから、傾斜変化と地下水は次に示すような関係にあると考えられる。

観測室が建てられた時の荷重による地盤の一次的沈下は、設置時点で短期間に進行したといえる。しかし、地下水が含まれる砂層には水圧が働いていたので、沈下はそれほど起こらなかった。その後、地下水位の低下とともに水圧も低下し、観測室B(北西)側は沈下しはじめた。これが、1983年9月から

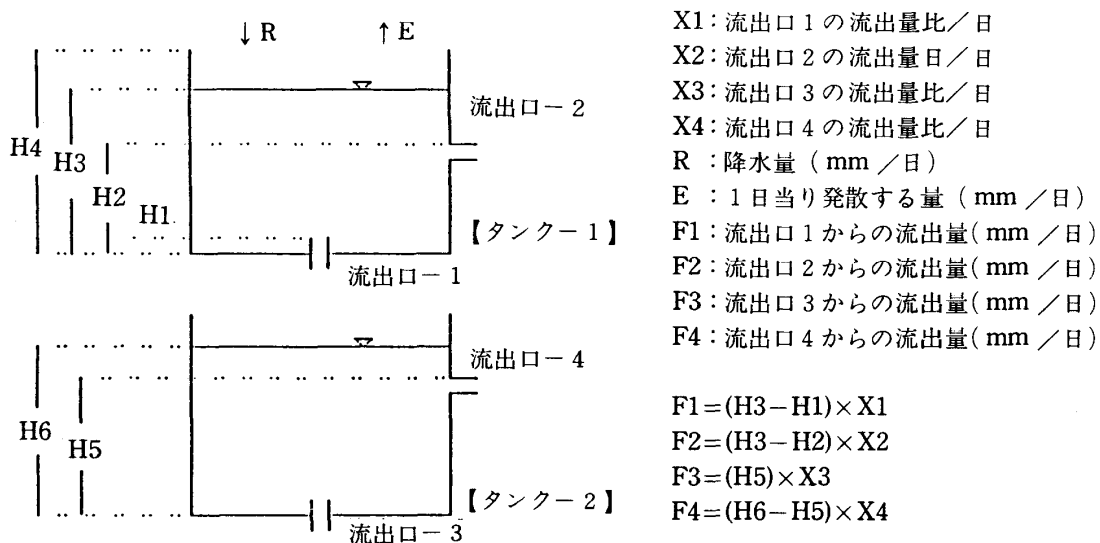


図8 地下水変化のタンクモデル。

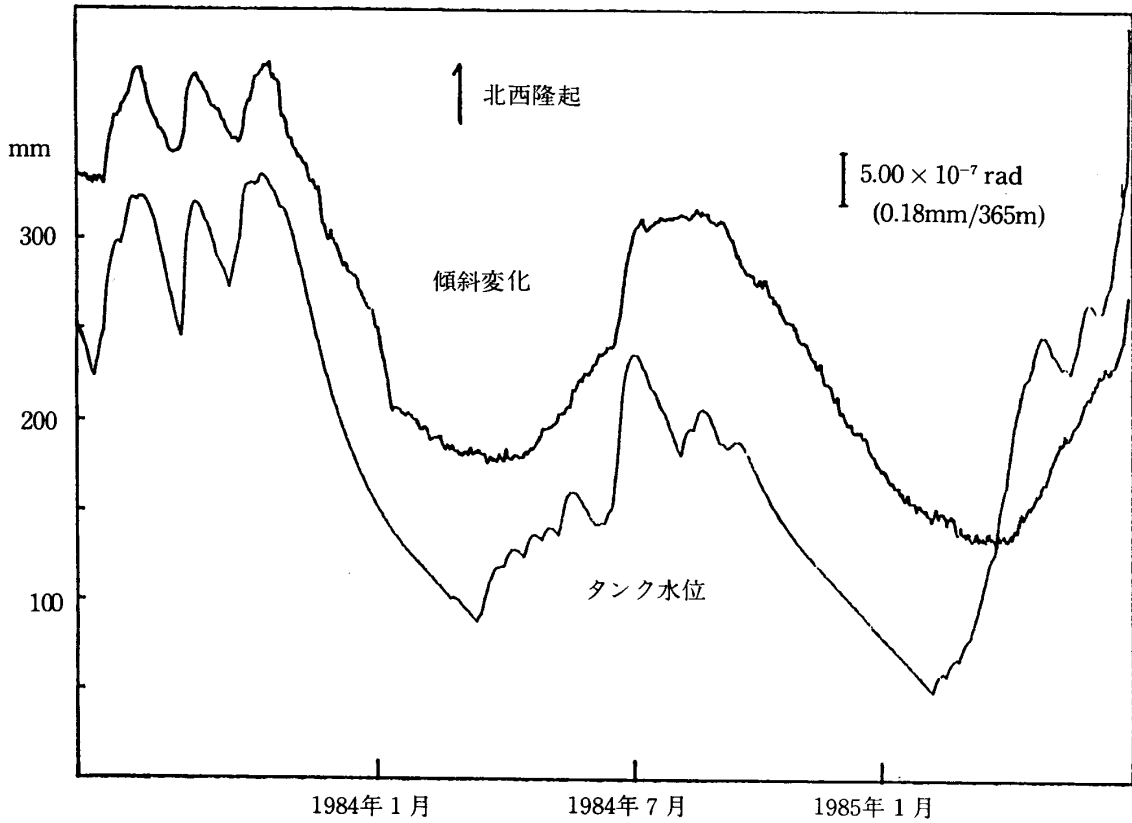


図9 タンクモデルによる地下水計算値.

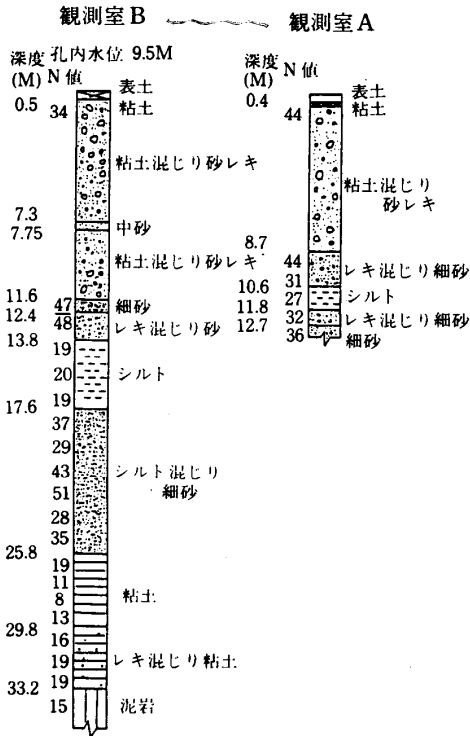


図10 両観測室でのボーリング資料

1984年1月にかけての急激な北西傾斜である。この地下水が完全になくなると、建物による荷重が砂層そのものに効いてくることになる。そのため、砂層はもっと安定な状態になるために、間隙をせばめるようにして圧縮され、沈降していく。これが1984年1月から3月にかけての、ゆるやかな沈降である。その後、4月から7月にかけては、地下水の増加ともなって水圧も上がり、その圧力で観測室B(北西)側が上昇していったと考えられる。その後についても同様に解釈される。

傾斜変化を図9に示したタンクモデルによる地下水水位で補正をしてみた。その結果を図11に示す。大きかった傾斜変化がある程度落ち着いたが、1985年2月以降、急に変化している。これは、モデルがまだ正確でないために起こっているのか、観測室が設置されて2年近くたったために、地盤が落ち着き地下水の影響が効きにくくなって来たのか、それともまったく違う原因により傾斜変化が起きたのかは、今のところはっきりしてない。

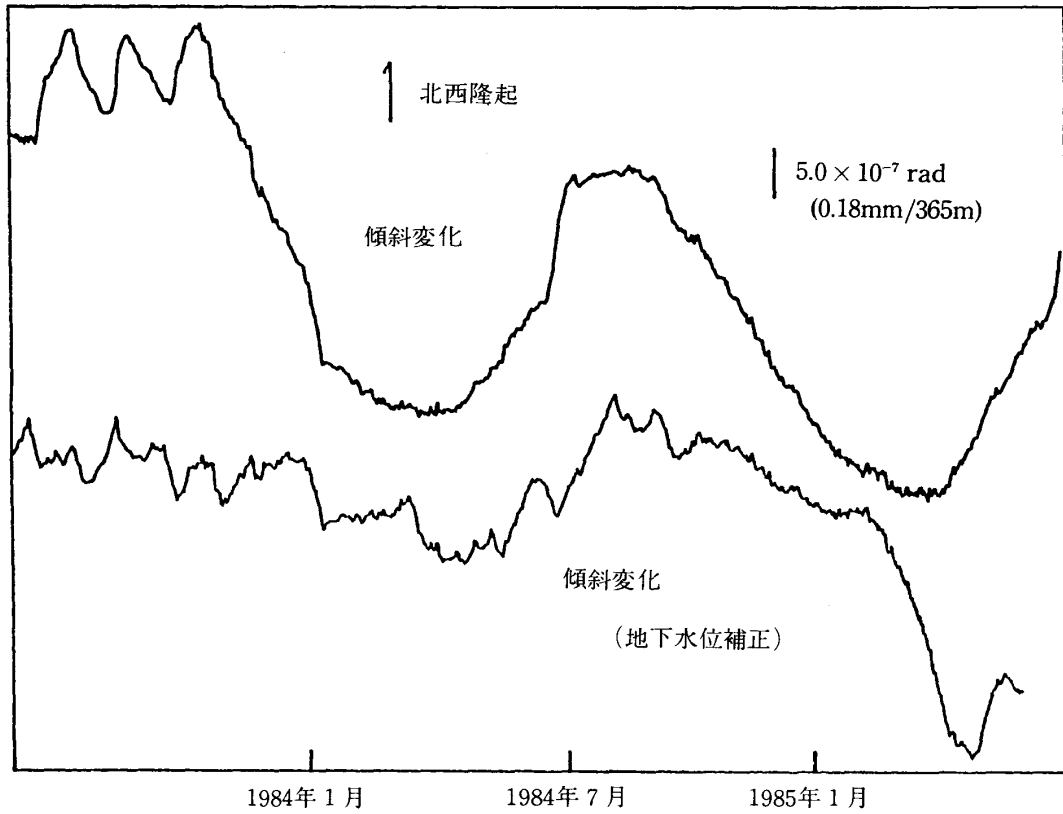


図11 傾斜変化の地下水位補正.

この地下水位による傾斜変化補正量を見積るにあたって、正確な地下水量を知ることが必要であるが、1985年10月より観測室 A に雨量計を設置して降水量の観測を行い、また、近くの民家の井戸水位を定期的に測定しているため、今後それらのデータをもとに、タンクモデルの改良を行ない、より実際に近い傾斜補正量を得られるようになっていくと考えている。

4-3 潮汐

観測室の位置が海岸線から約 1.5km と近いために、得られた傾斜の潮汐変化には海洋潮汐の影響によるものが大部分であると考え、傾斜変化と潮位との関係について考察してみる。

傾斜の記録と、御前崎での潮位記録の例を図12に示す。図を見ると2つの周期がよく一致していて、傾斜が海洋潮汐の影響を大きく受けていることは明らかであり、潮位が上がると海岸(南東)側に傾斜する傾向を示している。つまり、潮位が上がれば海水の荷重により海岸側が沈降すると考えられる。

潮位の潮汐変化の振幅と傾斜の潮汐変化の振幅

との関係を図13に示す。これは、ほぼ直線で近似でき、その傾きは $2.8 \times 10^{-9} \text{ rad/cm}$ となる。この値で傾斜の短周期変化を補正したものを図12に示す。

御前崎での潮位の長周期変化を、5日の重みつき平均で傾斜変化とともに図14に表わす。上記の値を用いて潮位の長周期変化が傾斜変化に与える影響を取り除くと、傾斜変化の年周変化が $2.7 \times 10^{-7} \text{ rad}$ だけ減少する。

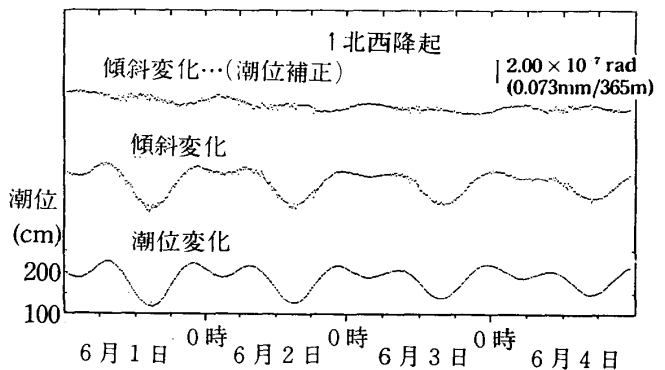


図12 傾斜と潮位の短周期変化と傾斜の潮位補正.

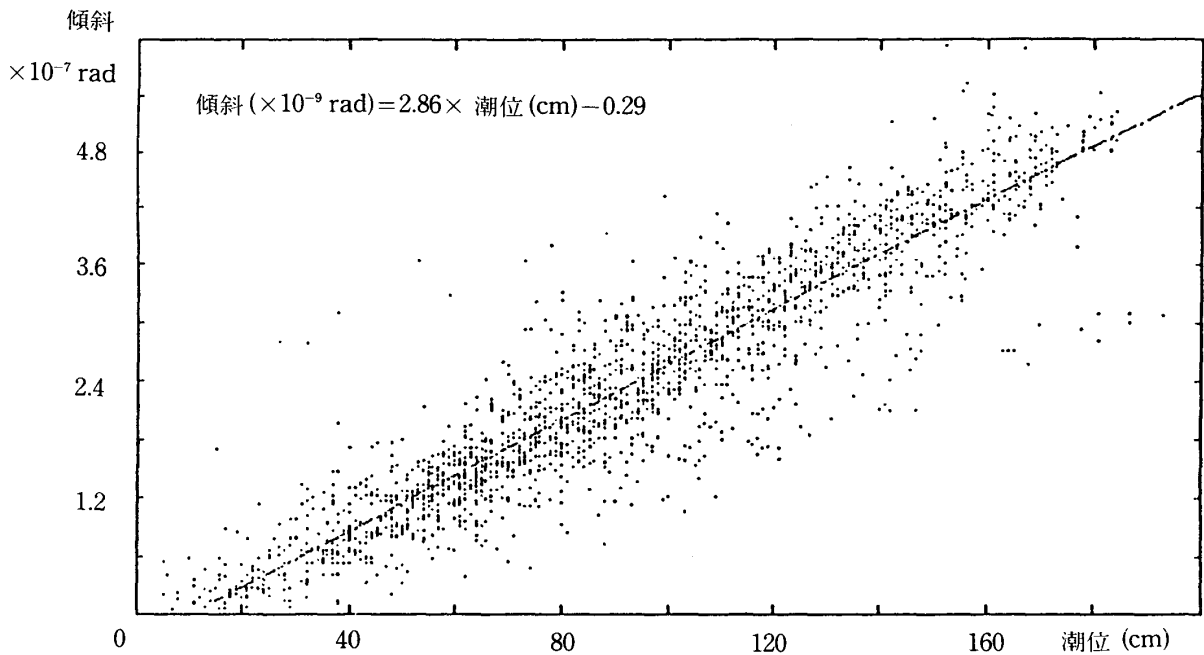


図13 潮位の潮汐変化の振幅と傾斜の潮汐変化の振幅との関係

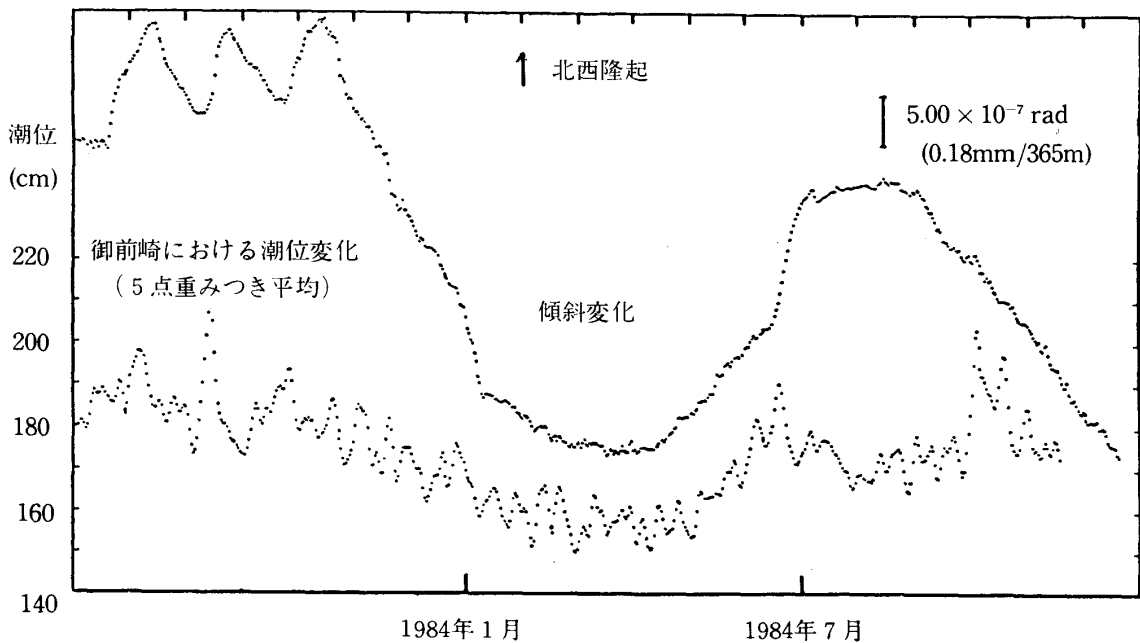


図14 傾斜と潮位の長周期変化。

5. 水準測量結果との比較

傾斜計の観測値がこの地域の真の地殻変動を示しているかどうかを調べるために、観測室A-観測室B間で水準測量を繰り返し実施し、両者の記録を比較した。水準測量には、カールツァイス社製のオートレベル NI002 を使用した。また、標尺には同社製

のインバール標尺を使用した。傾斜計により得られた傾斜変化と、水準測量結果とを合わせて図15に示す。水準測量の結果は、往復の平均をとり、1983年11月の測定値を傾斜計の記録にあわせ、その点を基準として示してある。また、その往復差をエラーバーとしてつけてある。

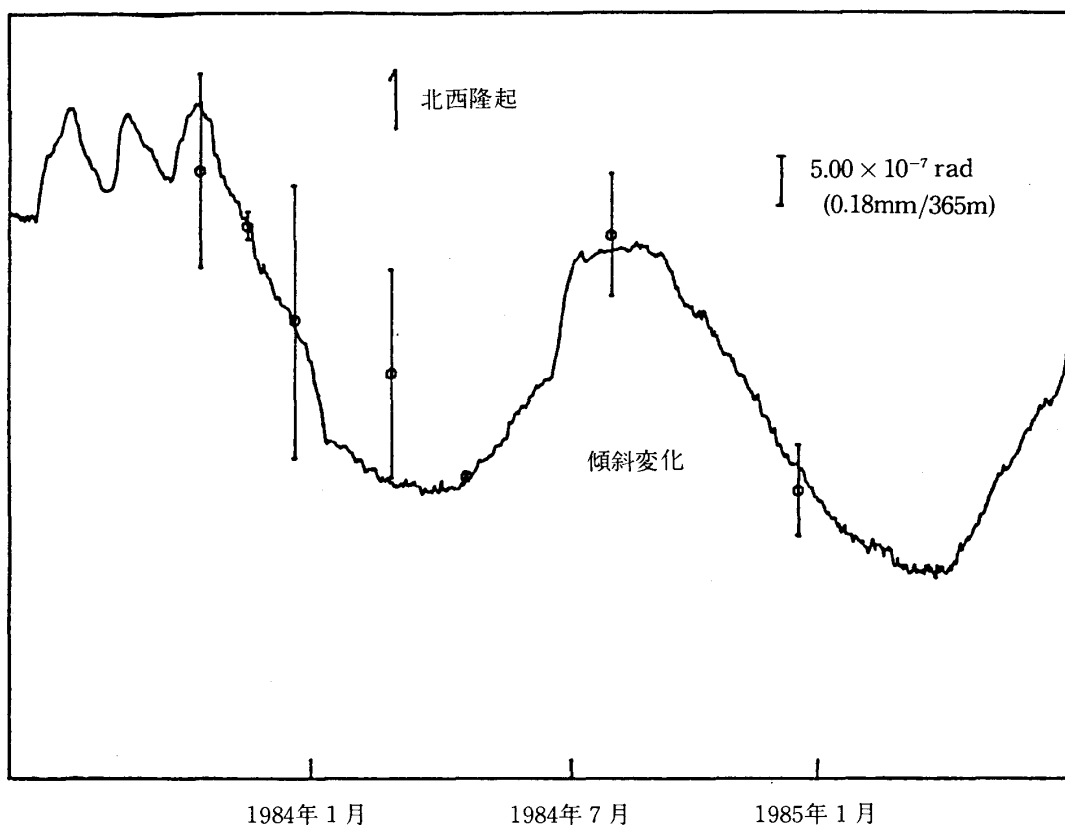


図15 傾斜の長周期変化と水準測量との比較.

水準測量の誤差を考慮すれば、傾斜計の結果と水準測量の結果とはたいへんよく一致している。このことは、傾斜計から得られた結果にとくに大きなドリフトもなく、この地域の地表の変動を書いているものと考えられる。

また、傾斜計による地殻活動観測は、局地的な影響をうけている可能性もあるので、より広域の地殻変動を水準測量によって調べ、傾斜計との記録と比較した。今回は、観測室Aを起点に、南東に約1.4km、路線距離で約2.8km 離れ、標高が約100m低いBM2591との間で水準測量を行なった(図1)。途中、コンクリート道路上に打ったびょうや木杭を用いて中間点を5点とり、また、1983年11月に設置したBM009も、設置後中間点として使っている。

図16に、観測室A-観測室B間と観測室A-BM2591間の水準測量結果を示す。この図から次の3点がわかる。まず第1は、南東(BM2591・海岸)側が、北西(観測室)側に対して、夏隆起、冬沈降であること、第2に、この傾向は、観測室A-B間の傾

向とは逆であること。そして第3に、観測年数が短いので、はっきりしたことは言えないが、観測室A-観測室B間では経年的には南東隆起傾向を示すのに対し、観測室A-BM2591間では北西隆起の傾向を示していることである。海岸線側が夏隆起し冬沈降する傾向は、御前崎-掛川間で行なわれている国土地理院(1985)の水準測量結果と同じである。

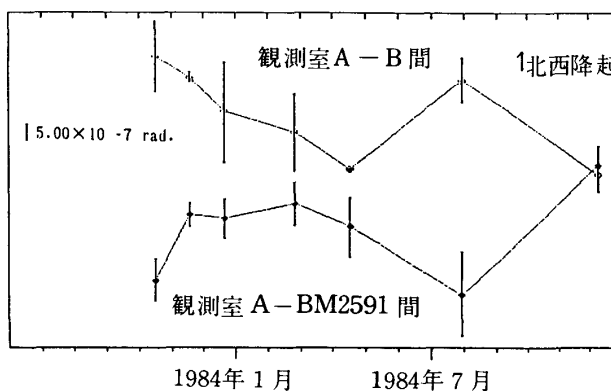


図16 観測室周辺の水準測量結果.

6. ま と め

静岡県相良町において、1983年5月より長距離水管傾斜計を用いて傾斜の連続観測を実施している。その結果は、地下水位や気温の影響と考えられる年変化が大きく、この地域の正確な地殻変動を知るためには、これらの影響についての見積りが必要である。今回すでに得られているデータを基にその量の見積りを試みたが、まだ不十分な面もあり、とくに地下水の影響については、今後さらに調査が必要である。

また、水管傾斜計の両端ならびにその周辺において、水準測量を実施した。水管傾斜計両端間の水準変化は、傾斜計による傾斜変化と良好な一致を示した。しかし、より広域の周辺の水準測量結果は、傾斜計により得られた結果と逆の関係を示した。

7. 謝 辞

本研究は静岡大学理学部地球科学教室の修士論文としてなされたものに新たなデータを付け加えたものである。この研究を進めるにあたり、静岡大学理学部の檀原 毅教授には、終始有意義な御指導をいただきました。また、同教養部の里村幹夫助教授には、適切な助言を多数いただきました。ここに記して感謝の意を表わします。

水準測量を行なうにあたっては、同理学部地球科学科の地殻物理学専攻の学生諸氏をはじめ、多数の方々にご協力いただきました。厚くお礼を申し上げます。

さらに、静岡県庁地震対策課の井野盛夫氏、岩田孝仁氏には、傾斜計機器のことでいろいろとお世話になりました。ここに厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 国土地理院(1985), 御前崎地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **34**, 274-283.
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制作. 測地学会誌, **26**, 1-16.
菅原正巳(1972), 流出解析法. 1-76, 共立出版.