

和歌山における局所地震前後の 微細土地変動の研究 (第6報)

田 中 寅 夫

STUDY ON RELATION BETWEEN THE LOCAL EARTHQUAKES AND THE MINUTE GROUND DEFORMATION AT WAKAYAMA (PART 6)

By *Toraō* TANAKA

Synopsis

Results from the data obtained by means of tiltmeters and extensometers at two stations in Wakayama City are presented and discussed with particular emphasis on the secular and annual changes. Gradual north-westward inclination of the ground is seen at the Oura station and similar tendency is also discernible at Akibasan. It is shown that the annual changes observed are due to the thermal deformation of the ground by the temperature change on the surface and that their wave lengths and mode are nearly equal to those of the daily changes, depending mainly on the local topography near the stations. Drift that might be caused by the initial disturbances on the instruments and their surroundings lasted for several years on the record at Akibasan, which suggests that every discretion is required as to the interpretation of secular changes from tiltmetric or extensometric results. From a concurrent observation by using of two tiltmeters of the horizontal pendulum type, it is ascertained that tiltmeters of this type may be used for observations of secular tilting motions with certain qualifications.

1. 緒 言

1960年より、和歌山市大浦および秋葉山において、地殻変動の連続観測を実施してきたが、その本来の目的は、同地方に頻発している局所地震と地殻変動との関連性を究明しようとするものであった。しかしながら、このような規模の小さい地震の発生に関係して地殻変動が生ずるとしても、それは小さい量であろうと想像され、実際、記録を一目見て、直接に局所地震と結びつけられるような異常変動は、現在までのところ見出されていない。したがって、さらに微小な変動を検出しようとするれば、それを妨げる海洋潮汐とか気象変化などによって惹起される変動を調べて、これらを取除くことが必要であると考えられ、また、このような変動の定量的な考察がなされてのち、はじめて、さらに高感度な計測器による観測が意味をもつことになると言えよう。そこで前報までは、主として数日間以内の比較的短い変動のみに着目して、気象変化などの、観測に及ぼす影響について調べてきたのであるが¹⁾、今回は、1965年4月に、やむを得ぬ事情から観測を中止した秋葉山観測所の結果の報告をも兼ねて、7年に及ぶ観測の一応のまとめとして、いわゆる永年変化について述べてみたい。ただし、両観測所の傾斜計、伸縮計とも、微小変動を検出する目的で、浅い地下観測室という条件にはやや欲ばった高い感度で観測を続けてきたため、激しい雨の際の scale out などによる欠測がかなり多く、永年変化を詳細に論じるには、かなり無理な点があることはいなめない。本稿にお

いては、このことを考慮しつつ、許される範囲内での検討を進めて行きたい。

2. 大浦観測所における観測結果

大浦観測所に設置した傾斜計、伸縮計および同地下観測室内の温度計により得られた観測結果を Fig. 1 に示す。 A_0 と B_0 は東西および南北方向の傾斜変化であり、それぞれ東下りおよび南下りの傾斜変化を、正の方向として表わしてある。 E_{e0} と E_{n0} は、同様に、それぞれ東西および南北方向の伸縮変化であり、正方向のふれは、ともに伸びを示す。 T_0 は、bimetal 温度計で光学記録された、地下観測室内の温度変化である。図を一見して明らかなように、南北方向の傾斜計 B_0 および 2 成分の伸縮計、 E_{e0} と E_{n0} の記録は大きい年変化を示している。傾斜変化の振幅は約 $6''$ にも及び、伸縮変化のそれも 5×10^{-6} を超えるようである。東西方向の傾斜 A_0 には、はっきりとした年変化は見られないが、不規則な変化は、他の成分の傾斜変化および伸縮変化に見られるものと同じく、主として降雨によって生じた変動である。

このように、年変化および降雨による影響量がかなり大きいことは、周知の通り観測室の地表面から深くないことによるものであるが、これらの変化量が大きい割合には、一方的な永年変化量は小さい。伸縮変化については欠測が多いため何とも結論できないが、傾斜変化に関しての永年変化量は、 $0.7''/\text{year}$ 程度であり、ほぼ北西方向へのゆっくりした傾動を示している。このことは、深い観測室では年変化や気象影響が小さいかわりに永年変化が大きく、浅い観測室では逆に、前者が大で後者が小であるという、既に細山によって指摘されている一般的な傾向に一致している²⁾。

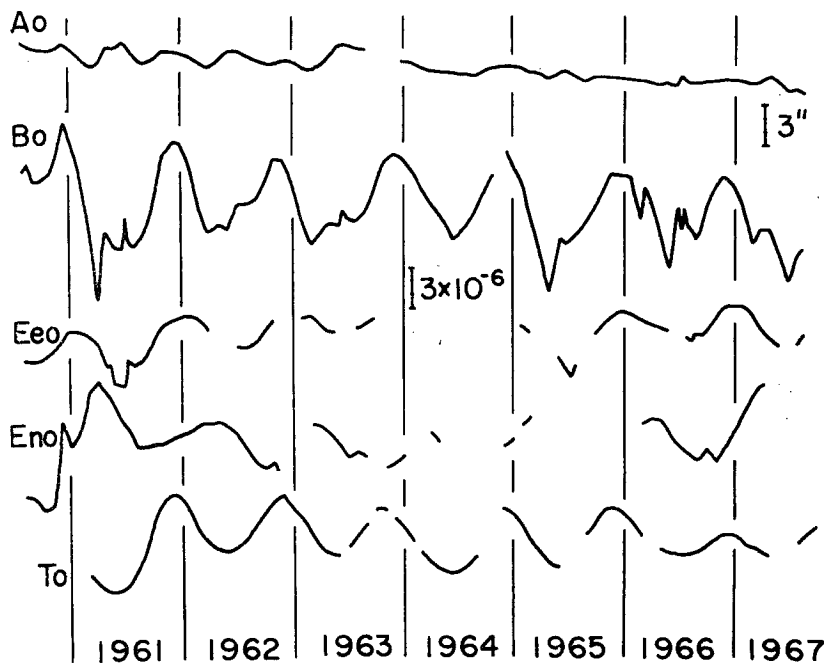


Fig. 1 Secular changes of the ground tilt and strain observed at the Oura station.

A_0 ; the E-W component of the ground tilt,
 B_0 ; the N-S component of the ground tilt,
 E_{e0} ; the E-W component of the ground strain,
 E_{n0} ; the N-S component of the ground strain,
 T_0 ; room temperature in the tunnel.

次に、観測室内の温度記録は、欠測がちながらも、規則的な年周変化を示している。温度計の検定精度が不足なため、現在のところ正確な目盛を記入していないが、その振巾は約 1°C 程度であると見積られる。図から明らかなように、温度の最高および最低は6月と11月に現われており、和歌山地方での月平均気温が観測室温度の約 15°C を過ぎる4月から5月にかけてと、10月から11月にかけての時期に、約1ヶ月遅れているといえる。南北成分の傾斜変化 B_0 に見られる、 $6''$ にも及ぶ著しい年変化は、その位相が殆んど室温のそれに一致していることから、主として観測室内の温度変化による変形がその大部分を占めているものと推定できる。これに対し、伸縮変化の東西成分 E_{e0} には、2月に伸びの極大、8月に縮みの谷が現われているようであり、これに直角な南北成分では、東西成分に約 90° 遅れた位相を示している。このことから、ひずみの年変化は直接に室内の温度変化によるものでなく、その位相がむしろ外気温の年変化に係属していることから、地表面における温度差により生じた変形によるものであると結論できよう。

ところで、大浦観測所においては、時折、地下水の影響によるとみなされる数時間程度の室温変化が観測されるが、これに伴って起こされる記録の乱れは、既に第1報において報告したように、室温の上昇に対して、東西成分の傾斜計 A_0 と伸縮計 E_{e0} は西下りおよび縮み、同じく南北成分の B_0 と E_{n0} は南下りおよび縮みを示す⁹⁾。伸縮変化については、この傾向と、室温に対する上述の年変化の現われ方が正反対であり、このことから、年変化として観測されているひずみは、直接に室内温度に関係していないことがうかがえる。これに対して、傾斜の南北成分 B_0 は、その傾向が年変化の場合に一致しており、かつ、その大きさも order としては説明ができることから、やはり室温が大きく関与していると考えられる。Fig. 5に、年変化を含めたままの傾斜変化の vector diagram を各年毎に分けて示した。この図においては、60年8月の値を原点にとってある。当然のことながら、みかけの年変化は南北方向に長い形をしていることになる。

3. 秋葉山観測所における観測結果

1960年7月の観測開始時より、65年4月の中止に至るまでの観測結果をまとめて Fig. 2 に示す。図中、 A_a と A_a' および B_a と B_a' は、それぞれ傾斜の東西方向成分と南北方向成分を表わし、正方向を東下りあるいは南下りの傾斜としている。 E_{ea} と E_{na} は、同様に、ひずみの東西成分および南北成分を示し、正方向がのびを表わしている。ここでは、4台の傾斜計、 A_a 、 A_a' 、 B_a および B_a' は同一のコンクリート台上に設置されており、 A_a と A_a' および B_a と B_a' は、それぞれ振子の向きが互いに逆になるよう吊っている。したがって、原記録上では上の各組の傾斜計は、ある傾斜に対して逆向きの変化を記録することになるが、Fig. 2 においては、 A_a' と B_a' の結果はそれぞれ A_a と B_a の方向に揃えて示してある。大浦と同様に、秋葉山地下観測室内においても bimetal 温度計による連続観測を続けてきたが、この観測値を T_a にて示してある。

この結果を眺めてみるに、まず著しい特徴は、温度の長期間にわたる上昇である。年変化としては 1°C に及ばない程度の値らしいが、観測の初期より5年後の中止時までにも続いている指数函数的な室内温度の上昇が実際に起ったとは、ちょっと考えにくいようでもあり、あるいは、温度計自体の誤差、例えば bimetal とか吊線などの drift によって生じたものかも知れない。しかしながら、傾斜計の東西成分 A_a と A_a' 、あるいは伸縮計の南北成分 E_{na} の結果を見るに、この室温の変化曲線と非常に良く似た変化を示しており、この点を考え合わせると、単純にこの現象を温度計の機構上生じた見かけの drift に過ぎないと断定するのは早計であるとも言えるようである。ところで、1965年2月に、秋葉山観測所入口の二重扉が、いたずらでこわされ、そのために観測室内の温度に急変を生じるという事故があった。この時の室温の低下に伴って、傾斜計の東西成分 A_a 、 A_a' および南北成分 B_a 、 B_a' はそれぞれ、東下りおよび北下りの変化を示し、伸縮計は両成分 E_{ea} 、 E_{na} とも縮みを示した。ただし、傾斜については、その量が A_a' は A_a の、 B_a' は B_a の約10倍に達しており、このことは、傾斜計 A_a' と B_a' がコンクリート台の両端に位置していることから、室温変化によるコンクリート台の変形は端の方ほど大きくなっていることを表わすものと言えよう。また、これと全く同じ現象が、その大きさは今の例に較べて小さいけれども、記録取替のための入坑の際に見られ

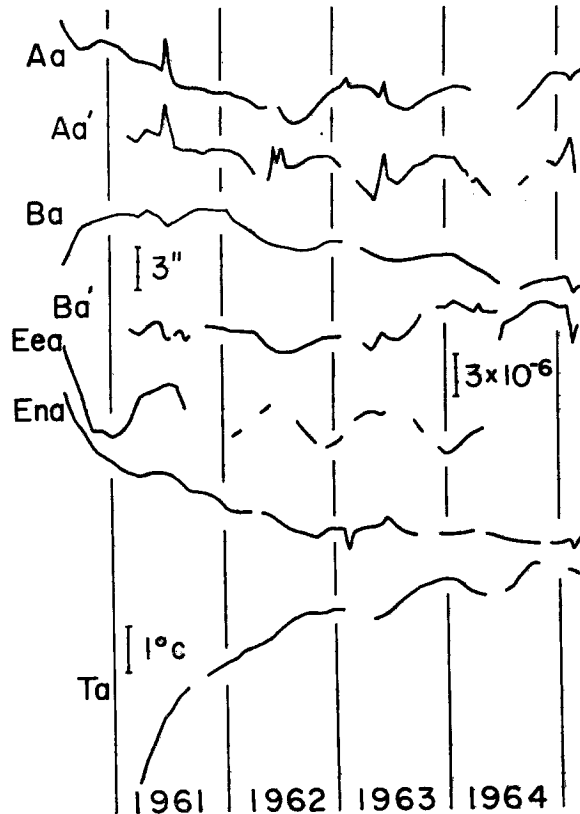


Fig. 2 Secular changes of the ground tilt and strain observed at the Akibasan station.

A_a , A_a' ; the E—W component of the ground tilt,
 B_a , B_a' ; the N—S component of the ground tilt,
 E_{ea} ; the E—W component of the ground strain,
 E_{na} ; the N—S component of the ground strain,
 T_a ; room temperature in the tunnel.

る室温変化によっても現われている。傾斜計 A_a および A_a' の変化はともかく、伸縮計 E_{na} の指数函数的な縮みは、この短期間の温度変化による影響とは正反対の傾向であり、単なる室温の上昇によって生じたとも決めつけ難いようでもある。伸縮計あるいは傾斜計を新設して観測を開始するとき、その後1年足らずの期間においては、器械などの drift のため指数函数的に減少する変化が見られるのは周知の如くであり、例えば、現在の結果において南北方向の傾斜計 B_a の記録に見られる1961年の終り頃までの変化などは、この種の初期の drift である。しかしながら、このように数年にも及ぶ大きい影響が観測された例は、筆者の知る限りでは見当らず、その原因についての議論は一応さしひかえたい。ただ、もしもこのような長期間にわたる初期の乱れが現われることがあり得るとするならば、地殻変動の連続観測について、以前から言われてきた、ほぼ1年を経過すれば初期の drift が無視できる程度におさまってしまうという考え方を訂正しなければならず、あるいは10年程度にも達する影響が残り得るという可能性を考慮して観測結果を解釈しなければならぬことになると言えよう。

さて、次に傾斜および伸縮変化に現われている年変化について少し検討してみよう。

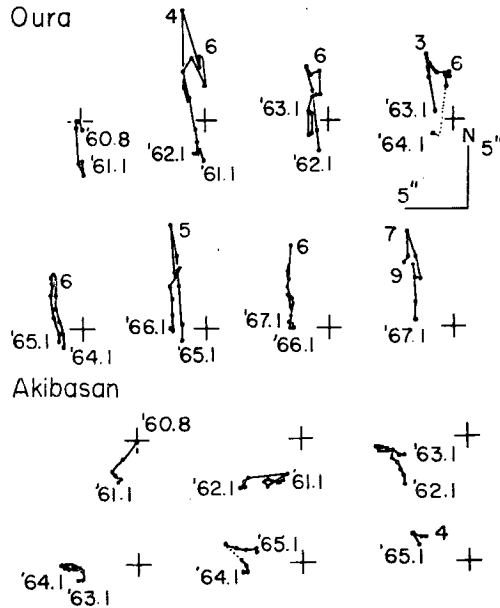


Fig. 3 Vector diagrams of the ground tilts at Ooura and Akibasan. In this figure, the vector diagrams at Akibasan have been composed by using of the results of A_a and B_a in Fig. 2.

観測室内の温度の年変化は、断定的には言えないが、 1°C 以内であり、最高は11月、最低は5月頃とみなされ、殆んど大浦観測所の場合と位相が一致しているようである。他方、傾斜変化に見られる年変化は、 A_a と A'_a 、および B_a と B'_a について大体一致した傾向を示している。各組の傾斜計がほぼ同程度の振巾を示していることから、この年変化が短時間の室温変動の際に見られる変化とは異なっており、また、その位相が室内の温度の位相より、むしろ気温の位相に近いことからも見て、やはり地表面における温度差に起因するものであるとして支障なからう。さらに、東西方向の傾斜 A_a と A'_a を比較してみると、緩慢な永年変化を差引いて考えても、 A'_a の位相の方が進んでいるらしく、かつ、その振巾も A_a に較べてやや大きいようである。これは、先に報告した、気温の日変化によって惹起された傾斜の日変化について観測された、 A'_a の振巾が A_a に比して大きく、また位相も進んでいる⁴⁾という傾向と良く一致している。このことは、気温の変化によって生じる傾斜の年変化と日変化とが、いわゆる土地の変動の波長という言葉で表現するならば、当然のことではあるが、同程度の波長をもつものであり、その観測室付近の地表面の地形とか地質構造に依存して、非常によく似た機構によって生ずるものであることを示すものであろう。伸縮変化に関する年変化は、東西成分に E_{ea} かなり大きく現われているようであるが、欠測のため詳しい議論はできない。ただし、その極値はほぼ室温のそれに一致していることは、ほぼ間違いない。しかしながら、その変化は、室温の上昇に対して縮みとして現われており、前に述べた、短時間の室温変化に見られる傾向とは逆向きになっている。他方、南北成分 E_{na} においても、余り明瞭ではないが、やはり伸びの極大が4月、縮みの極小が10月頃に相当する年変化が現われているようである。二成分だけのひずみの観測結果からでは、ひずみについての正確な知識を得られないのは当然であるが、強いて言えば、東西方向の伸縮 E_{ea} の位相をつらせば、位相の相対的な関係が大浦の場合と殆んど同じ傾向になっているようである。大浦観測所が、ほぼ南南東から北北西に延びる背をもつ山の中腹に、秋葉山観測所も大体同様な背をもつ小丘のふもとに位置していることを考えると、ひずみの年変化も、上に傾斜変化の場合に推論したと同じ変形によって生

じたものであろうと想像される。

次に、同一コンクリート台上に並べて設置した二組の傾斜計から得られた結果の対比という観点から検討してみよう。

既に述べてきたように、局所性の日変化あるいは年変化では、多少異なった変化を示すが、緩慢な永年変化についても、Fig. 2に見られる通り、同一方向の2台の傾斜計が、完全に同じ変化を、いつも記録しているとは、欠測の関係上やや不明確ながら、言い切れないようである。例えば、東西成分の A_a においては、既に1962年9月頃から、西下りの傾動の速度が小さくなっているにもかかわらず、 A_a' では、翌年の中頃に至ってようやく西下りの速度が減少しているようである。南北成分についても、63年以降の変化は、 B_a では北下りの傾向が続いているのに対し、 B_a' は、欠測による不明確さを考慮に入れても、どちらかといえば南下りに近いようである。しかしながら、61年、62年頃の結果については非常に良く一致しており、上に挙げた程度の差異は、見方を変えれば小さく、局所的な変動ということを考えればむしろ当然であるともいうことができよう。従来より、永年変化の観測の際、同一場所に設置した水管傾斜計と水平振子型傾斜計から得られた結果が喰い違ふということに関して、いろいろ議論がなされてきている。その一つとして、水平振子型傾斜計は、長時間にわたる観測においてゼロ線の drift を生じるため、得られた永年変化は器械的な誤差を含むとする考え方もあるが、上述の結果を見るに、2台の傾斜計が量的にもほぼ同一の変化を記録していることから、少くとも器械的な drift が非常に大きいとは考えられず、やはり、水平振子型傾斜計の場合は、非常に短かい2点間の傾斜変化が対象となるため、波長の短かい、極く局所的な傾斜変化までを記録することになり、長い波長の変化を主として記録する水管傾斜計の結果と単純に比較するときには、異なった結果を得ることになるという解釈⁵⁾が正しいと結論できよう。そしてこのためにも、つけ加えていうならば、事情の許す限り、同一場所で少くとも2台以上の計測器によって比較観測を行なうことが望ましいということになる。

Fig. 3 に、大浦の結果と並べて、秋葉山における傾斜変化の vector diagram が示してあるが、これは、東西成分については A_a の、南北成分については B_a の値を使用した結果である。年変化の振巾は、大

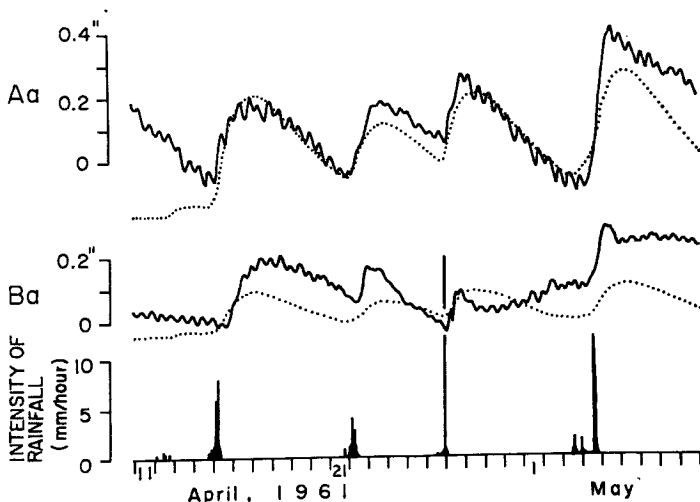


Fig. 4 An example of comparison of the observed ground tilt caused by rainfalls with calculated values (dotted lines) by convolving the impulse response obtained from Fourier spectra and intensity of rainfalls. In this figure a linear change has been reduced in A_a for the comparison.

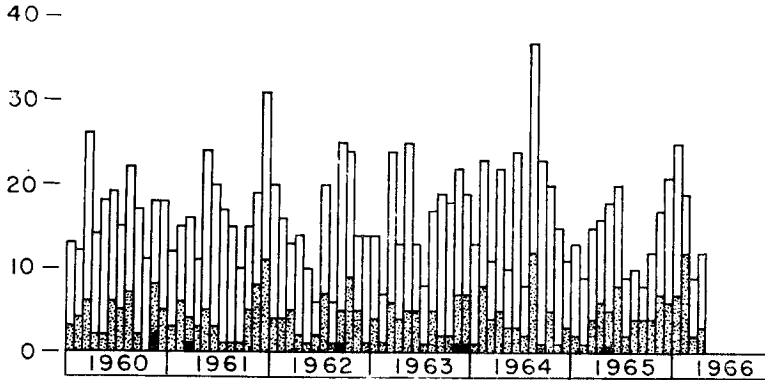


Fig. 5 Monthly numbers of earthquakes occurred near wakayama City reported on the Seismological Bulletins of the JMA.
 □; unfelt, ▨; felt, ■; small felt area.

浦のそれよりはるかに小さい値であり、また緩慢な永年変化は、ほぼ北西方向への傾斜となり、大浦の結果と、傾向、量とも大体一致しているようである。

最後に、1960年以降における和歌山市周辺の局発性地震の活動に関して、その大凡の目安を得る目的で、気象庁発行の地震月報に発表された地震回数を月毎にまとめた結果を Fig. 4 に示す。白柱および点をほどこした部分は、和歌山市およびその周辺における無感および有感地震の回数を、また黒色部分は、小区域と発表されている地震のうち、特に和歌山市に近い震源が与えられている地震の回数を示している。宮村他によれば、1953年以降において、同地方の地震活動はややおとろえる傾向にあると報告されているが⁶⁾、この図に関する限りでは、1960年より現在までの期間に取りたてて活動に著しい消長があるとはいえないようである。Fig. 3 に見られる、短かい急激な変動は、大浦の場合と同様、やはり降雨によるものであり、したがってこのような地震活動と永年変化との対比をおこなうには、まず年変化、降雨などによって生じる大きい擾乱だけでも補正しなければならず、この点については、また将来の機会にゆずりたい。

なお、降雨による土地の変動を推定する一つの試みとして、傾斜変化の spectrum と、降雨の強さ (mm/hour) の spectrum を比較して、impulse 型の降雨に対する傾斜変化の response を計算し、これから実際の降雨量を用いて、それによって生ずる傾斜変化を推定してみた⁷⁾。その結果と、実際に観測され傾斜変化とを比較した一例を Fig. 5 に示したが、この図に見られるように、適当な方法を用いることにより、降雨の際の変動も、かなり良い近似で推定することが可能であると考えられる。

4. 結 語

和歌山市大浦および秋葉山において、1960年より実施してきた、傾斜計、伸縮計などによる観測から、現在までに得られた結果をまとめ、若干の考察を試みた。その結果を要約すれば以下の通りである。

1) 大浦、秋葉山両観測所においては、地表面からの深さが余り大きくないため、傾斜および伸縮の年変化が観測されるが、これは主として気温の変化に起因するものである。また、その現われ方が、日変化の場合と良く似た点をもっていることから、両者の波長はほぼ同じ程度であり、地表面の地形と密接に関連していると推定される。

2) 両観測所とも、ほぼ北西下りの緩慢な傾斜変動を示している。

3) 秋葉山観測所の伸縮計に、恐らく観測開始の際の、初期擾乱による drift とみなされる変動が、指数函数的に減少してはいるものの、非常に長期間にわたって残っていることが明らかになった。このことは、従来まで言われてきた、観測開始後ほぼ1年程度で観測器械などによる drift が無視できる程に小さくな

る、という考え方には危険性があることを示唆している。

4) 同一コンクリート台上に設置した、4台の傾斜計による比較観測は、これらの水平振子型傾斜計が、永年変化を対象とする場合でも、器械的 drift なしに傾斜計設置個所の傾斜変動を忠実に記録していることを示している。

なお、今回は、局発性地震活動と地殻変動の関係について、検討するところまで進められなかったが、これについては将来、稿を改めて論じる積りである。

終りに臨み、御指導を給わった高田理夫教授、本観測のために御尽力戴いた岸本兆方教授、理学部地球物理学教室田中豊氏に深甚の謝意を表すると共に、観測のための協力を惜しまれなかった山田勝氏、現地での観測にたずさわって戴いた渡辺和夫氏、和歌山大学学芸学部地学教室の阪田堅一郎、永井伸、石村英勝、糸川敏の諸氏、資料の読取りなどを手伝って戴いた舟橋多津嬢、ほか多くの方々に心からお礼を申し上げたい。また観測について種々御便宜を計って戴いた東京大学地震研究所和歌山微小地震観測所、津村建四郎氏に感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 田中寅夫：和歌山における局所地震前後の微細土地変動の研究 (第5報)，京都大学防災研究所年報第10号A，1967，pp.149—155
- 2) Hosoyama K. : On the Observation of Secular Phenomena of the Tilting Motion of the Ground, *Memoirs of the College of Science, University of Kyoto, Series A, Vol. XXVIII, No. 3, 1957, pp.253—282*
- 3) 西村英一，岸本兆方，田中寅夫：和歌山における局所地震前後の微細土地変動の研究 (第1報)，京都大学防災研究所年報第5号A，1962，pp.44—56
- 4) Tanaka T. : Study on the Relation between Local Earthquakes and Minute Ground Deformation. Part 3, *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Vol. 16, Part 2, 1967, pp.17—36*
- 5) Hagiwara T. : Observation of Changes in the Inclination of the Earth's Surface at Mt. Tsukuba (Third Report), *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo University, Vol. 25, 1947, pp.27—29*
- 6) Miyamura S., M. Hori and H. Matsumoto: Local Earthquakes in Kii Peninsula (Part 5), *ibid.*, Vol. 44, Part 2, 1966, pp.709—729
- 7) Tanaka T. : Study on the Relation between Local Earthquakes and Minute Ground Deformation. Part 4, *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, (in Press)*