

安富観測坑で記録された山崎断層の地震(1984年 5月30日, $M5.6$)にかかわる地殻変動

渡 辺 邦 彦・尾 池 和 夫

CRUSTAL DEFORMATIONS RELATED TO THE YAMASAKI FAULT EARTHQUAKE ON MAY 30TH, 1984, $M5.6$, OBSERVED AT THE YASUTOMI OBSERVATION TUNNEL

By Kunihiro WATANABE and Kazuo OIKE

Synopsis

On May 30th, 1984, an earthquake of $M5.6$ occurred at the Yamasaki fault. Concerning to this earthquake, precursors, co- and post seismic phenomena of various kinds were observed. Among these, crustal deformations observed by extensometers and tiltmeters were analyzed. Both the strain and tilt steps were observed. Aftereffects of the ground strain were also recognized too.

We concluded that these are compound phenomena consisting of both the strain originated at the hypocentral region and the peculiar local strain effects around the observation site.

Besides, it can be regarded that fault zones or fractured zones are "windows for earthquake prediction", where the signals related to earthquakes frequently appear.

1. は し め に

山崎断層は地震予知のテストフィールドであり, 1975年11月, 安富観測坑において伸縮計による観測が開始されて以来, 種々の分野の観測・解析がなされている^{1), 2), 3)}. 1984年5月30日, 山崎断層系の暮坂峠断層⁴⁾(護持断層)を震源とすると考えられる $M5.6$ の地震(以下, 今回の地震という)が発生した⁵⁾. 山崎断層近傍で $M5$ を超える地震としては, 1973年以来, 11年ぶりのことであった。伸縮計の観測開始以来現在まで, 山崎断層の周辺に発生した $M4$ 以上の地震の分布を Fig. 1 に示す。この図によっても, 今回の地震が最近では特筆すべきできごとであったことが分る。

山崎断層の周辺に発生した $M4$ クラスのいくつかの地震について, その前兆や地震発生時あるいは地震後の, いわゆる, 直接的に地震にともなった変動が観測されたという報告がなされている^{6), 7)}. 特に地球化学的, 地球電磁気学的分野にこれら地震関連現象が認められた例が多い。しかし今回の地震は, その規模こそ $M5.6$ であったが, 安富観測トンネルから震源距離で約 20 km, 震中央距離で約 3 km と非常に近距離に発生したため, 同観測トンネル内の伸縮計・傾斜計もそれを捕えている可能性は非常に大きい。

安富観測トンネルは山層断層の破砕帯を横切るように掘削されている。断層破砕帯が地震予知のための, いわゆる“ツボ”と考えられることは以前より折にふれて議論されている^{4), 8)}. その意味で安富観測トンネルで今回の地震に係わる地殻変動現象が記録されているであろうことは充分期待された。反面, 安富観測トンネルはかぶり高が 4~8 m と非常に浅く, 気象や人為的ノイズの影響を受けやすいことも事実である。しかし通常の地殻変動観測では普通は除去に努められるこれらの影響も, 地震予知を目的とする立場に立てば,

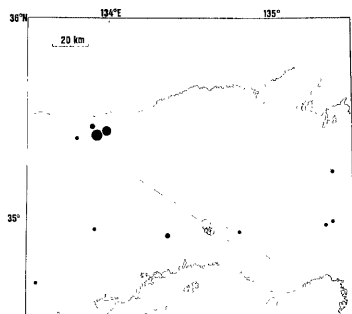


Fig. 1 The Yamasaki fault and distribution of earthquakes ($M \geq 4$, 1976. Nov.-1984. Dec.). Open circles denote the earthquake on May 30th, 1984 and its aftershocks.

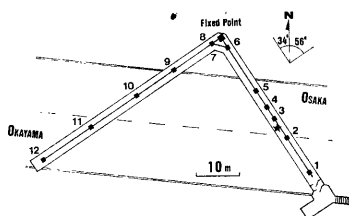


Fig. 2 Observation tunnel lying 4-8 meters below the Chugoku highway. Extensometers (nemerals) and tiltmeters (star) are settled in the tunnel.

観測点近傍の場の状態を反映するインジケーターとして有効に利用され得ることが考えられる。我々が得る観測記録は、種々の信号が混在したものであって、その中から地震に係わる信号を弁別しながら抽出することは困難な問題であるが、知識とデータの集積によって徐々に可能となりつつある。本稿では観測事実を正確に把握・解釈することに主眼をおき、その理論的解析は次の機会に譲った。以下の章で、伸縮計と傾斜計で得られた観測結果について述べる。Fig. 2 に安富観測トンネル内における伸縮計と傾斜計の配置を示す。

2. 伸縮計による観測結果

2.1 伸縮の経年変化

Fig. 3 に1975年に伸縮計による観測が開始されてより、1984年12月末までの伸縮変化を示す⁹⁾。図中の成分の数字は、Fig. 2 に示したその番号のセンサー設置点と固定端との間の歪を表す。観測坑のかぶりが浅いため、外気温の影響による年周変化が重畳している¹⁰⁾が、これを除去して考えると、数年程度の時間間隔で経年変動の傾向の変化がある。この傾向が変化する時期は、伸縮計の各成分によって多少のずれがあるが、最初のそれは78—79年ごろである。それまで大体において伸びの傾向にあったものが、この頃を境にしてその傾向が減少、あるいは縮みに転じた。次の傾向変化は81—82年頃である。この時期を境にして縮み傾向から伸び傾向に変わった。それが84年の冬に至り、また縮み傾向に変わったようである。この最後の傾向の変化には、今回の地震によるストレイン・ステップ（後述）が重なっているが、かなり急激な変動のようである。

上に、外気温の変動の影響による年周変化が伸縮の年周変化として重畳していると述べた。そうすると当然、外気温の経年変動の影響も伸縮の経年変動に反映されていると考えられる。Fig. 4 に大阪における毎日の最高・最低気温から求めた各月平均の最高・最低気温を示す。伸縮変化とその傾向が非常によく一致していることが認められる。しかし、84年からの伸縮傾向変動はストレイン・ステップを差し引きしても非常に大きく、気温変化のみでは説明できないと思われる。しかしこの傾向変化は最近1年ほどのことであり、今後しばらくその動向を見る必要がある。

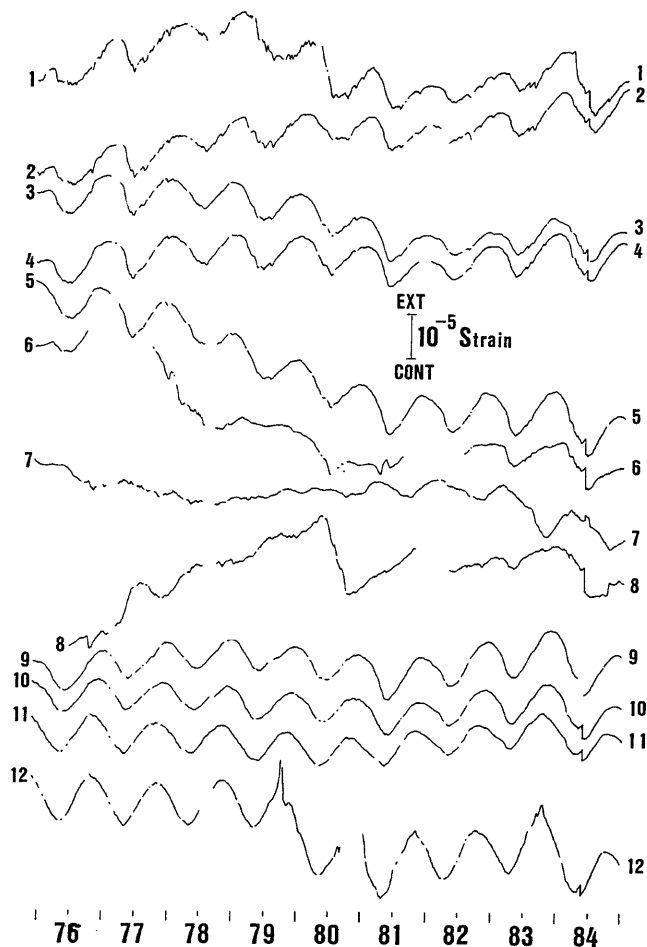


Fig. 3 Secular variation of the ground strain. Each numeral denotes the strain component between the point of that number and the fixed point.

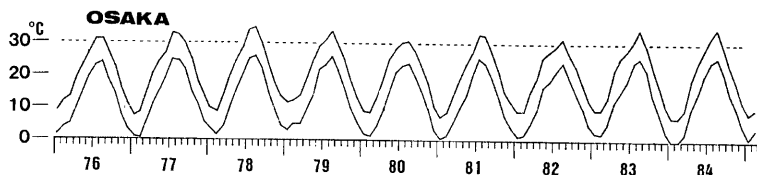


Fig. 4 Variation of atmospheric temperature at Osaka. Upper and lower curves denote maximum and minimum temperature respectively.

2.2 降雨レスポンスの変化

安富観測坑の伸縮計のばあい、降雨に対して縮み変化を示すことが多い。NW-SE 方向の伸縮計に関して降雨に伴う歪変化を、単位降雨量あたりの固定端と各センサー設置点の間の相対変位に換算して、その平均を年周変化の伸びの季節と縮みの季節にわけて示したものが Fig. 5 である。NW-SE 方向の場合、成分 1, 2, 3 ……の順に指数関数的に減少し、かつその係数には季節変化が認められるのが一般的である。NE-SW 方向の伸縮計の場合も縮み変化を示すことが多いが、その量はかなり小さい。これについては、降雨による観測坑南東側の山地からの側圧が減衰しながら周囲に伝播するモデルが考えられるが定かではなく、この仮説についてはこれ以上言及しない。しかるに84年になっての降雨レスポンスは、通常のように指数関数的には減衰せず、NE-SW 方向の伸縮計においてすらかなりの振幅を示している。Fig. 5 と同様の手法で NW-SE, NE-SW 両方向について今回の地震前4ヶ月程の降雨レスポンスを Fig. 6 に示す。距離(横軸)に対して相対変位量がほぼ直線的に変化していることは、各部分の歪が一定に近いことを意味する。また、通常は降雨に対してそれ程大きな振幅を示さないNE-SW 方向も、NW-SE 方向と同程度のレスポンスを示している。これらから、地震発生の数箇月前には降雨レスポンスが平素と異なって大きくなっていったことが認められる。84年秋の降雨量は非常に少なく、この降雨レスポンス異常の出現数期を同定することは困難であった。

地震発生前に降雨に対する伸縮変化の特性が変わる現象は尾池¹¹⁾および山内他¹²⁾によって報告されている。今回の地震についても降雨に対する伸縮変動の応答特性に変化が認められたことは、活断層の性質をこのような観点からさらに詳しく調べることの重要性を示している。

2.3 地震の際のストレイン・ステップとその解釈

5月26日の本震、および9個の余震の際にストレイン・ステップと思われる歪の不連続が記録された。本震によるステップ量は、伸縮計の成分相互間で多少ばらつきがあるが、 $2.5 \cdot 5 \times 10^{-6}$ strain であった。これらの歪不連続を、伸縮計の固定端を不動点と仮定してこの点に対する各センサーの相対変位になおして図示したものが Fig. 7 である。これによると、本震およびその直後の数時間の余震によるステップは、NW-SE, NE-SW 両方向の伸縮計とも、ほとんどの場合縮みを示し、断層方向(6-7成分)には伸びであった。次に、本震から3日余りの6月2日16時の余震(M4.5)によるステップは、本震と同じ方向であったが、その振幅は、本震直後、すなわち本震から、1時間および3時間後に発生した2個の M4.5 の余震によるそ

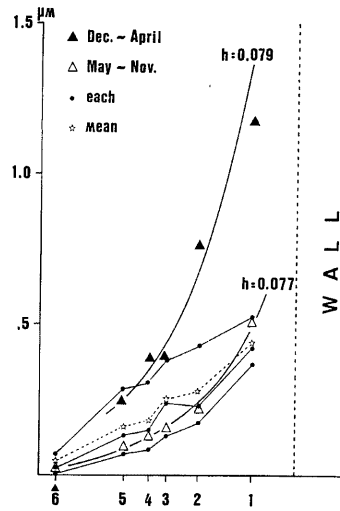


Fig. 5 Relative displacements per 1 mm of precipitations. Solid and open triangles distinguish the season of extension and contraction.

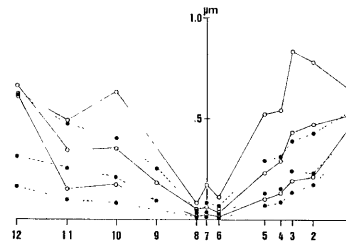


Fig. 6 Same as in Fig. 5. Extensometers of NE-SW direction (No. 8-12) show abnormally high amplitudes.

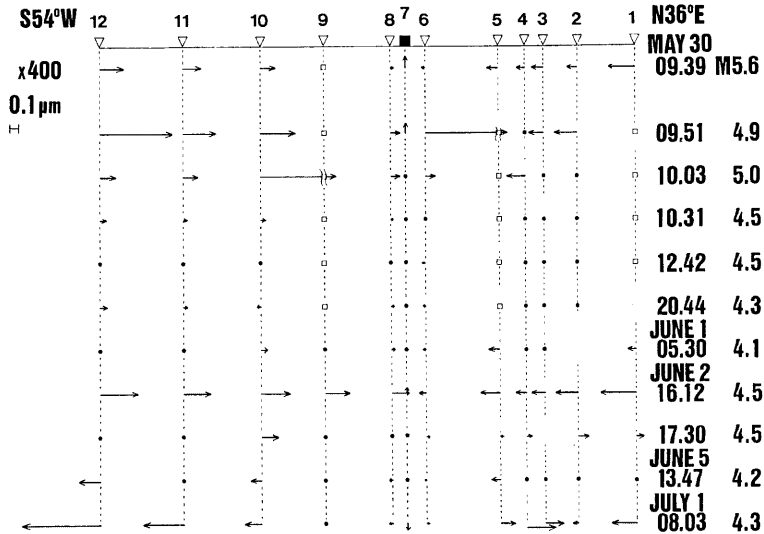


Fig. 7 Strain steps at the main shock and major aftershocks. Those are converted into relative displacement and illustrated with directions.

れより、ほぼ1桁位大きい。ところがこの6月2日16時の地震の1時間後の同日17時の $M4.5$ による変位は、1時間前のその数分の1の振幅であった。しかもこの地震のばあい、NW-SE 方向が全て伸びを示している。本震後3日余りたって初めて、本震と異なる方向のストレイン・ステップが観測されたことは注目する。

これらの事実は次のように考えると理解できよう。まず記録されたストレイン・ステップは震源における断層運動により解放された歪が観測点に伝播したものと、観測点近傍に局地的に貯まっていて地震の振動で解放された局所歪の和と考える。この局所歪は本震の際に解放されてしまったとすれば、本震直後の余震では解放されるべき局所歪はまだ蓄積されていない。ところがそれから数日経て再び観測点近傍に局地的な歪の集中が生じるとする。すると同じマグニチュードの地震が発生しても今回はこの局所歪が解放されるためステップ量が大きくなる。この局所歪の量、方向は観測点近傍の構造、地形、地質といった静的条件のほかに、テクトニックなストレス場あるいはその変化、気象要素などの動的条件によると思われる。数日という、考えようではかなりの短期間で歪が再び集中するというのは現段階では推測にすぎない。しかし例えば今回の地震の本震断層付近には本震直後は余震が極く少なく、本震発生後3日目頃から余震発生が見られると思われる (Fig. 8) ことから、妥当な解釈であろうと考える。

ステップの方向については、このあと、6月5日 $M4.2$ では、NE-SW 方向が伸びを示し、7月1日 $M4.3$ では、1, 2番点以外、NW-SE, NE-SW 両方向とも全て伸び、断層に並行方向が縮みで、本震と逆であった。2, 3番センサーの間に顕著な破砕帯が認められているが、これが断層の幅方向に縮んだと考えれば1, 2番点の縮みは理解できる。今回の地震の余震のように震源距離や発震機構がよく似ており、かつマグニチュードもほぼ同じ地震によるストレイン・ステップの振幅が1桁以上異なったり、その方向が逆転したり、あるいは、数 m 以内にある測点が互いに逆方向を示すことがあるという現象は、震源モデルの操

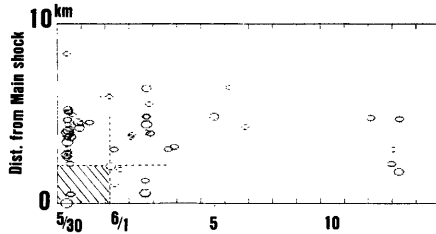


Fig. 8 Time versus distances from the main shock to aftershocks. Earthquakes of $M \geq 3.5$ (after Tottori Microearthquake Obs.) are shown. For 2 days just after the main shock, there occurred scarcely any earthquake in the area nearer than 2 km from the hypocenter. After 2 days had passed, earthquakes started to occur in that area.

作や、一様均質な構造・媒質での議論では理解しがたい。特に安富観測坑の伸縮計や傾斜計のように、かぶりが浅く、しかも、破碎帯に設置されたトンネル内での観測の場合、観測されたストレイン・ステップは、震源過程のみを表わすものではなく、観測点近傍の局地的な構造、物理的状態、およびその時間的変化を強く反映していると考えべきであろう⁴⁾。

2.4 地震後の余効変動

(1) 時定数の短い余効変動

本震の際のストレイン・ステップに引き続いて、指数関数的にあるレベルに漸近する、いわゆる歪の余効的変動が記録された。全成分とも縮みで、断層に並行な成分の他は、本震の際のステップと同方向であった。ストレイン・ステップを取り除いた地震前後の歪変化を Fig. 9 に示す。地震後 9—11 日ごろの大きな縮みは、降雨によるものである。余効変動の時定数は 1—5 日と、成分によって異なった。もしこの余効的変動が、本震後の震源域での断層運動の反映とすれば、伸縮計各成分で、同じ歪波形が観測されねばならないが、実際には振幅、時定数とも成分相互間で異なっている。このことは、今回観測された余効的歪変化は、震源域での断層運動を表しているというより、むしろ、観測点近傍の局地的な歪状態の変化を反映しているものと考えられる⁴⁾。

(2) 時定数の長い余効変動

Fig. 10 に 1984 年 1 年間の伸縮計各成分の記録の上に、成分 4 と 10 の過去 2 年の記録を併せて示す。NE-SW 方向の成分 8—12 は、5 月 30 日のストレイン・ス

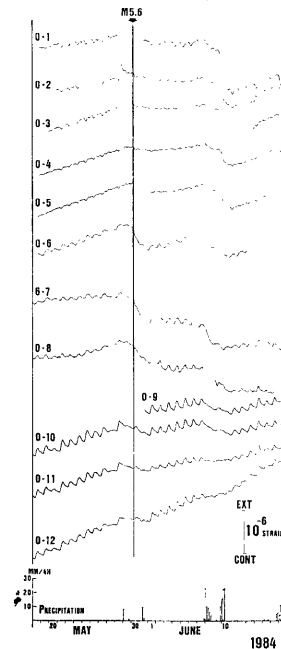


Fig. 9 Strain variation before and after the earthquake. After the main shock, strain reduced exponentially to a certain level with some relaxation time constants, however, these differed in each other.

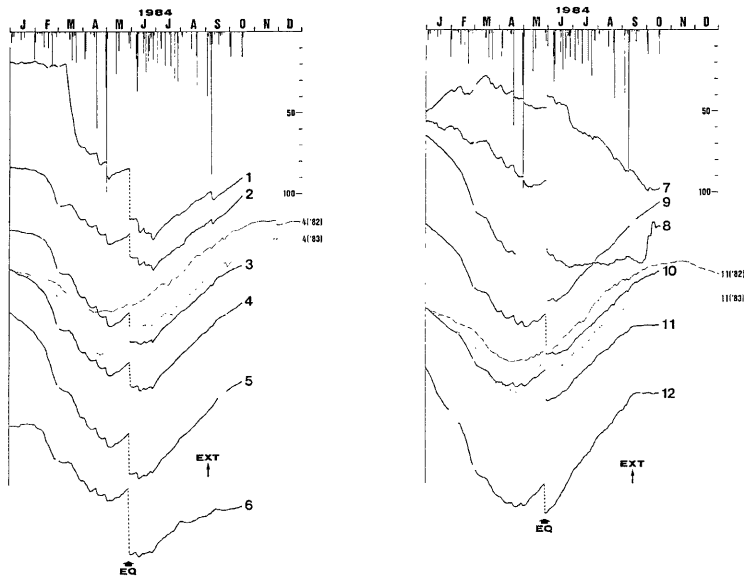


Fig. 10 Annual variation of the ground strain. Only in NW-SE direction, the contraction peaks appear around June in 1984, considered to be after effects of fault movement at the hypocentral region.

テップを差し引きすれば、縮みのピークは例年の年周変化と同じ4～5月であり、特にピーク時期のずれは認められない。しかし NW-SE 方向の成分1～6は、ストレイン・ステップを差し引きすれば、一旦例年と同じ4～5月ごろにピークが現われながら、地震後再び縮みに転じ、6～7月にピークになっている。このようすを模式的に示したのが Fig. 11 である。点線は例年の年周変化の傾向を示す。NW-SE 方向（図のA方向）のみに数10日の時定数をもった余効的伸縮変化が認められ、NE-SW 方向（図のB方向）はステップを除いては例年どおりである。この伸縮変化の振幅・時定数は前述の短周期の余効的伸縮変化に比して、成分相互間で比較的そろっている。これらから推測するに、この伸縮変化は震源域の断層運動の時間的变化を反映している可能性がある。本震の断層面を仮に暮坂峠断層方向とすれば、A方向の伸縮計はこの断層面に立てた垂線方向にあって、断層面にほぼ平行である。この方向のみに余効的伸縮変化が認められたことは、震源域での現象をさらに詳しく分析するために役立つ重要な観測結果である。

3. 傾斜計による観測結果

3.1 経年変化にみられる傾斜の傾向

差動トランスを用いた鉛直振子2成分型傾斜計による観測が1981年11月より行われている。設置点は Fig. 2 に示すように、特に種々の影響が現われやすいと考えられる、破壊帯近くとした（一部の論文でテスト観測中の設置点と混同したものがありました。訂正します）。Fig. 12 によるティルト・ステップ分を補正した傾斜変動を点線で示した。伸縮計の場合と同様に、外気温の影響による年周変化が認められる。その振幅はおよそ 4×10^{-5} rad. 程度であるが、1983年の夏頃より N, E 方向への傾斜が加速された。NS 方向に

ついて見れば、地震より半年以上前からのこのN方向への傾斜の増大が地震直前の5月には前2年の傾向から予想されるレベルにまでもどり、しかる後に地震の発生を迎えている。すなわち地震の直前にはNS方向には特に傾斜歪は貯まっていなかったとも思われる。また地震の際には約 1×10^{-5} rad. ほどS方向にステップ状に傾斜したが、その後85年冬に至り地震前2年の傾向を延長したレベルに達している(傾斜量は図中のA)。すなわち、地震後半年を要して地震の際のステップ量を解消したとも考えられる。これに対してEW方向は、地震直前の5月には例年の予想レベルには戻っていないまま地震の発生に至り、約 2×10^{-5} radのステップを示した。しかしその後9カ月の傾斜変動を見ると、年周変化の量は例年とはほぼ同じの約 4×10^{-5} rad, である(図中のB)。以上をまとめると、NS方向は地震前には特に傾斜歪は貯まっておらず、地震後半年で徐々に地震の際のステップ量を解消してゆき、いまでは例年の傾向を延長したレベルに戻っている。これに対しEW方向は地震前に少し傾斜歪が貯まっていたが、地震時のステップ量はこれを解消する方向でそれ以上に大きく、地震後は余効の変動はなく、直流成分のずれが残った。伸縮の場合の余効の変動出現の方向性と同様に、傾斜についても余効の変動に方向性が認められたことは非常に興味深い。

3.2 地震時および地震後の傾斜変動

Fig. 13 に今回の地震の前後約2カ月の傾斜変化を

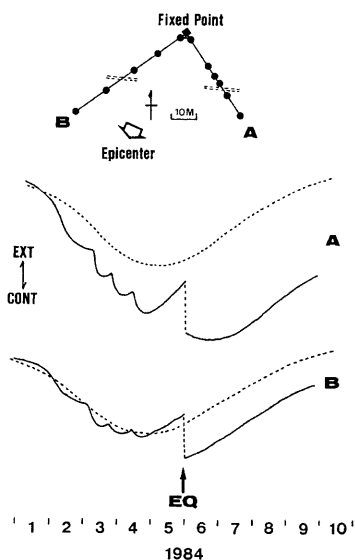


Fig. 11 Variation of the ground strain in 1984. Dotted lines denote the schematic shape of the variations in ordinary years.

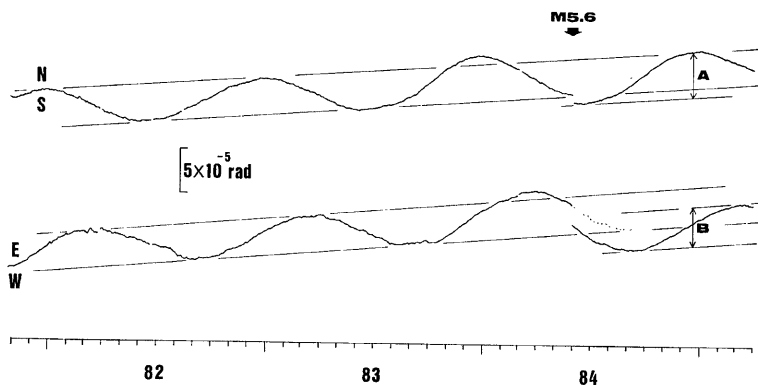


Fig. 12 (a) Secular variation of the ground tilt. In NS-comp., tilt step was reduced gradually, but in EW-comp., permanent change was recognized.

示す。併せて毎分サンプリング・データによる地震前後4時間の傾斜変動を示す。伸縮計の場合と同様に、降雨に対してはそれぞれ N, E 方向への傾斜変化を示すのが通常である。この図で見る限り、今回の地震を契機にして経年変化の傾向がそれぞれ N, E 方向に加速されたとの印象が得られるが、これは通常の経年変化で期待される方向でもあり、また降雨量も増えているので何とも結論づけられない。

今回の地震の際に、傾斜変動の不連続が記録された。これはおそらく、ティルト・ステップと思われる。その量は、傾斜角にして約 2.5×10^{-5} rad. でその方向は WSW であり、震央方向に近い。安富観測トンネルの周辺の基線測量網で基線角測量が行われているが、これで求められたティルト・ステップ⁴⁾と方向・振幅ともに比較的良く一致している。

また本震によるティルト・ステップの直後に、時定数数十分、振幅約 1×10^{-6} の余効傾斜変動が記録された。いずれもティルト・ステップと同方向である。伸縮計の短時定数の余効変動と比較すれば、振幅はよく一致しているが時定数が数十分と非常に短い。おそらくこの傾斜余効変動も観測点周辺の局地的な動きを表しているものであろう。

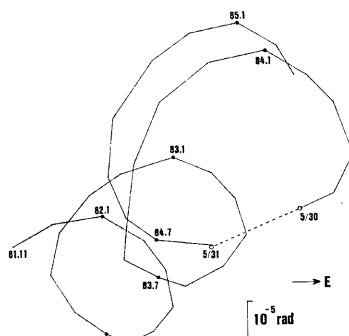


Fig. 12(b) Locus of the ground tilt.

4. 結 論

今回の地震は M 5.6 と、いわゆる中地震であったが、震源距離約 20 km という近距離に観測点があった

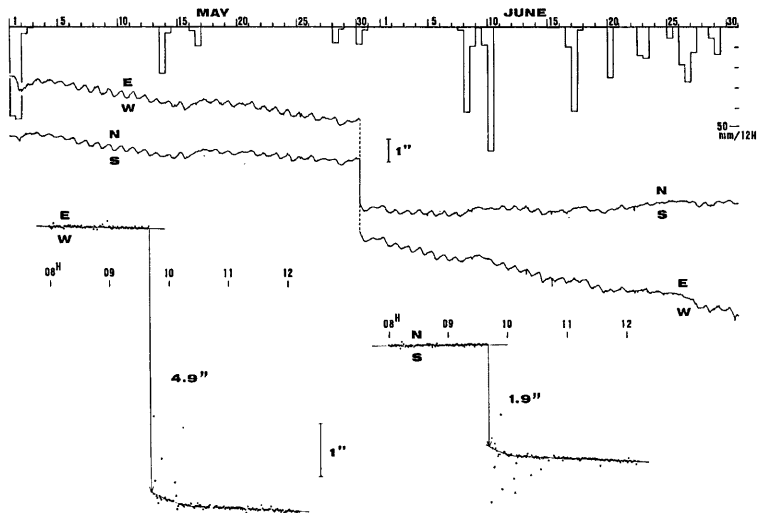


Fig. 13 Tilt variations (involving steps and aftereffects) of before and after the earthquake.

ため、地震に直接関係あると思われる現象が地殻変動以外にも種々認められた。これは、近地地震であったこと、観測点が断層破砕帯に設置されていたという二つの理由によるものと思われる。

断層や破砕帯域は地体ブロックの境界として、歪が集中する地域と考えられる。もしある地域に広範囲に応力が集中してくると、その範囲に含まれる断層や破砕帯域に特に歪が集中してくる。そして、振動（潮汐、地震から人為的振動まで）、降雨、温度などに対するレスポンスが通常の場合のそれとは異なってくることが考えられる。すなわち、地震の前兆現象としてこういったレスポンス異常の出現が期待される。今回の地震の数カ月前より降雨レスポンスが異常に大きくなったことはこの例と思われる。

伸縮計や傾斜計で観測された地震前後の種々の現象は、震源の断層活動を直接反映しているものと、観測点近傍の局地的な歪状態が地震によって変化したものとの合成物と考えられる。特に後者は、ストレイン・ステップの振幅が必ずしもマグニチュードに拠らず、むしろ時間的変化や観測成分相互間の差異すら存在し、また、余効的な伸縮、傾斜変動にも局地性が認められることなどから推測される。それほど大きくない遠地地震によってストレイン・ステップが観測された例は多々ある。しかもそのステップの方角が観測点近傍の局地的条件、たとえば年周変化の方向性などによって規定される場合が多い。こういった場合は、まさに上述の、観測点近傍の局地的な歪状態が地震動をきっかけとして変化したものを記録しているであろう。

本稿では今回の地震に係わると考えられる観測事実を述べ、これに対して幾分の定性的解釈を試みた。地殻変動の観測データの整理・解釈は観測に携わっている者でなければできない部分がまだ多くあり、定量的な解析は別の機会にゆずることとする。

謝 辞

“山崎断層研究グループ”代表である、京都大学防災研究所微小地震部門、岸本兆方教授を始めとする同グループ員各位、および、微小地震部門の松尾成光、古賀光子両氏には観測・解析にあたり種々の御指導、御助力を頂きました。また、日本道路公団福岡管理事務所および兵庫県安富町当局の方々、宇野琢也氏にはいろいろと御援助を賜りました。心より御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 尾池和夫・岸本兆方：地震予知テストフィールドとしての山崎断層，地震予知研究シンポジウム（1976年12月13日・14日・15日），1976，pp. 83-90.
- 2) 岸本兆方：山崎断層テストフィールドにおける地震予知実験，地震予知研究シンポジウム（1980），1980，pp. 133-142.
- 3) 尾池和夫・渡辺邦彦・中村佳重郎・谷口慶祐・岸本兆方：山崎断層地震予知テストフィールド連続観測システムについて，京大防災研年報，第24号 B-1，1981，pp. 29-49.
- 4) 活断層研究会編：日本の活断層——分布図と資料——，東京大学出版会，1980.
- 5) 山崎断層研究グループ：SYMPOSIUM 山崎断層，月刊地球，通巻67号，海洋出版株式会社，1985，pp. 4-62.
- 6) 山崎断層研究グループ：山崎断層テストフィールドシンポジウム資料集，1983.
- 7) 山崎断層研究グループ：山崎断層テストフィールドシンポジウム資料集1984年7月23，24日，1984.
- 8) 藤森邦夫：地殻変動観測における効率的な地震予知——いわゆる“つぼ”の存在とその物理的意味の一考察——，地震学会講演予稿集，No. 1，1985，pp. 265.
- 9) 渡辺邦彦・尾池和夫・中村佳重郎・岸本兆方：山崎断層安富観測坑における長周期伸縮変化の特徴，京大防災研年報，第26号 B-1，1983，pp. 87-94.
- 10) 渡辺邦彦：山崎断層観測坑の伸縮変化に見られる外気温の影響，日本測地学会第61回講演会要旨，

1984, pp. 81-82.

- 11) 尾池和夫: 降雨と地震発生との関係について. 京大防災研年報, 第20号 B-1, 1976, pp. 35-45.
- 12) 山内常生・山田 守・奥田 隆: 降雨に対する地殻歪レスポンスの異常と地震発生, 地震, 第2輯, 第34巻, 1981, pp. 301-310.