

地殻応力，地殻応力変化と地殻変動 ——周期性地殻変動と地震活動の交代性——

田 中 豊

CRUSTAL STRESS, CRUSTAL STRESS CHANGES AND CRUSTAL MOVEMENTS —— GRADUAL CRUSTAL MOVEMENTS WITH QUASI-PERIODICITY AND ALTERNATION OF SEISMIC ACTIVITIES ——

By Yutaka TANAKA

Synopsis

The tiltmetric observation from 1938 to 1984 using the Silica tiltmeter at the Kamigamo Geophysical Observatory shows periodical changes of around 10 years. The change is particularly remarkable in the S45°-N45° component.

During the 5 years of tilting from NW towards SE direction, a number of earthquakes occurred in the depth between 40km to 100km at the leading edge of the Philippine Sea Plate just under the central part of the Kii Peninsula.

In addition, during this period that the ground tilts from NW towards SE and then from NE towards SW, the alternation of seismic activities are seen between NE-SW and NW-SE fault systems in the Northern Kinki district. This phenomenon is attributed to the existence of the azimuthal rotation of the principal stress, which is related to the interaction among 3 plates, especially the activity of the Philippine Sea Plate.

1. 緒 言

測地測量や第四紀研究から推定される地殻変動の変化量が小さく，地震活動も低い地域であるにもかかわらず，地殻絶対応力の測定結果から，平均絶対応力値がかなり高い地域が見出されている。一例は岡山市¹⁾であり，古生層の丹波地塊などもおそらく地殻応力値はかなり高いであろう。カナダの先カンブリア紀の楕円状地でも実際に応力測定が行われており，平均応力値およびその深度勾配は日本列島よりはるかに大きい。地震活動や地殻変動はほとんど認められない。これに対し，日本列島は平均的に絶対応力値が低いが，地殻活動はきわめて激しい。

地殻変動が小さく，地震活動度も小さい，すなわち，地殻活動度の低い地域で絶対応力値が高いということは，一つには，平均応力値は大きい剪断応力値が低い（平均応力に対する剪断応力の比 μ_m が小さい）かあるいは，岩石の破壊強度が高い，剛性率が大きい（粘性が低ければ，地殻変動は大きくなる）地域であるということの他に，地殻応力変化が小さい地域である，すなわち，高応力なりに安定した地域であるということができる。

一方，地震活動や地殻変動など地殻活動の活発な地域で，地殻応力値が全般に低いのは，地殻応力値が高くなると地殻歪エネルギーは，粘性が低い場合は地震を伴わない非回復性地殻変動として，破壊強度の低い場合は微小地震活動として，弾性が大きく，破壊強度の高い場合は大規模地震の発生として，変形と波動と熱のエネルギーとして消費されて，応力値は地域差はあるとしても，ある応力値の範囲を越えず，ある幅の

中で増減しているためであろう。

応力が常に一定速度で増加する場合でも、応力値の増減は地震あるいは地震活動による stress drop によっても起こるであろう。しかし、地殻変動の観測や地殻応力の測定が行われている陸側 Plate 内の広域の応力変化は、その Plate 内部に原因があることは少なく、主として海洋 Plate の運動の圧縮力の変化によるものであろう。Plate が水平に運動している時は、その慣性の大きさ、運動量変化の小ささからみてほぼ一定速度と考えられるが、Plate の沈み込み部分、すなわち、Slab は陸側 Plate の摩擦抵抗あるいは Asthenosphere の粘性抵抗のため一定速度では沈み込めず、Plate 運動にゆらぎを生ずる。これは Slab-pull の場合でも Ridge-push の場合でも、Plate 運動の原動力如何にかかわらず起こるであろう。もし、Slab の受ける抵抗力、Plate 間のすべり破壊強度が一定で、水平に動く海洋 Plate の運動速度も一定であれば、Slab のゆらぎは、水平に動いている時の速度に反比例し、抵抗力に比例するその Plate 固有の周期性を持つはずである。この場合、海洋 Plate から圧縮力の変化を受ける陸側 Plate 内の地殻応力も同じ周期で（移動性があるなら内陸ほど位相が遅れて）変化するはずである。

陸側 Plate が一つの海洋 Plate だけからの圧縮力を受ける場合、地殻応力値は変化するが、地殻の水平主応力方向は変化しない。陸側 Plate が 2 つの海洋 Plate の周期的に変化する圧縮力を受ける場合は、応力値と同時に主応力方向も複雑な変化をするはずである。海洋 Plate の圧縮力による応力変化は当然地殻変動となっても現れるが、Plate 境界から離れるに従って、変化の振幅は減少し移動性地殻変動のように位相も遅れる場合がある。十分遠い内陸部では応力変化は小さくなり、ほとんど一定となることが考えられる。日本列島内では、剛性が高いために歪変化が少ない地域他に、Plate 境界から十分な距離があるため応力変化の振幅が減衰して変化のない地域もあるかも知れない。一方、3 つの Plate の相互作用のため陸側 Plate 内の応力変化は 2 つの周期と振幅の合成の結果きわめて複雑な応力値、主応力方向の変化をする地域と、一方の Plate による応力変化は距離が遠いため減衰して、一定応力になっているが、他方の Plate による応力変化はかなり大きく、両 Plate による圧縮応力の合成として応力値が変化すると同時に主応力方向が、ある角振幅をもって周期的に回転している地域も存在するであろう。絶対応力の変化として、これを観測した確実な例は未だない。しかし、周期的な地殻変動は例えばペルーにおいても見出されているし、移動性地殻変動は東北、関東地方、ペルー南部において観測されている。その原因としては海洋 Plate による圧縮力の変化、換言すれば、沈み込み速度の変化を考えざるを得ない。

2. 周期的地殻変動

地殻の長期変動に周期性のあることは、1972 年、76 年に指摘した^{2), 3)}。これを気象的（とくに降雨）変動による周期性である可能性を検討しなければならないという指摘もある⁴⁾。その後、降雨のほとんどないペルーの傾斜変動にも 10 年周期の地殻変動が観測された⁵⁾。上賀茂地学観測所の堅坑の Silica 傾斜計により観測された長期変動は 1959 年に初めて報告されている⁶⁾。その後の観測結果をまとめて、1938 年から 1984 年まで 45 年にわたる変化を Fig. 1 に示す。1984 年に上賀茂の堅坑も地殻活動総合観測線上の一観測点としてテレメーター化されたため、Silica 傾斜計は差動トランス式鉛直振子傾斜計と取り替えられ、Silica 傾斜計による観測は終了した。鉛直振子型傾斜計の観測結果が Silica 傾斜計の観測結果に連続するかどうかは今後の問題である。

Fig. 1 の傾斜変化には大きな年周変化が現れている。これは Silica 傾斜計の設置場所が、比高 80m の古生層の丘の頂上付近の深さ 8m の堅坑の底であり、雨の影響は地下水が下方に急速に浸透するため、雨後比較的早く回復するが、しかし、丘の南面への日照量の年変化など熱伝導による熱膨張と熱弾性歪のため西北西—東南東方向の大きな傾斜の年変化が現れるためである。

この年変化より大きな振幅をもつ周期的な変動が、とくに N45° W-S45° E 方向の傾動変化に顕著に現れている。なお、1943 年前後 1 年の乱れは明らかに鳥取地震によるものである。また、1976 年 S45° E 成分の

Silica 傾斜計の吊り糸が切断し，Super-invar 製振子に取り替えたため，それ以降は $S45^{\circ}E$ 方向へのドリフトが現れている。

3. 近畿北部の浅発地震活動の交代性

Fig. 2 は中央構造線より北側の近畿中北部に発生した， $M = 4.0$ 以上の比較的大きな地震の分布図であり，上賀茂の傾斜観測開始直後の 1940 年から 1988 年までの活動状況を示す。四辺形に区切った A，B の 2 領域は，A が山崎断層系と三峠断層の NW-SE 系の活断層周辺，B が六甲淡路断層系と花折断層など NE-SW 系の主要部分を含む代表的地域を示すものとする。この A，B 両地域における地震数の年毎の累積を Fig. 3 に示す。Fig. 3 には地震活動の変化と上賀茂の周期的傾斜変化の山谷を考慮して転換期を示す縦線を引いてある。A と B の地震活動の時間的変化を対比すると，1947 年頃までは B 地域が活動期にあるが，1947 年から 1952 年までは A 地域が活発化し，B 地域が静穏となる。また，1952 年から 1958 年までは B 地域が活発化し，A 地域は静穏となる。活発化する時期でありながら静穏であるのは B 地域の 1974 年から 1979 年までの期間のみであって，その他 8 期間については活発地域の交代性が成り立っている。区域と M をさらに適切に指定し，一つ一つの地震の発震機構を検討し，逆断層型のものを除き，地震の規模を考慮すれば交代性は一層明瞭になるかも知れない。

4. 紀伊半島直下のやや深発地震の活動

Fig. 4 は Philippine Sea Plate 先端部の深さ 40km から 90km までのやや深い地震の 1940 年から 1988 年までの活動を示す震央分布図である。領域 S は，その中で近畿北西部の NE 系，NW 系断層付近の地震活動と関係があると考えられる地域で，Philippine Sea Plate の一部を沈み込み方向およびそれと直角方向の四辺形をもって示したものである。この四辺形内に発生している地震の年毎の発生数の累積は Fig. 3 の下に S として，A，B と同じ方式で示してある。この図では，1947 年から 1952 年間は南海地震直後で例外的に活発であり，1980 年から 1984 年までは活動的ではあるが，1985 年からさらに発生数が急増していることから，この 2 つを考慮すれば，活発期と静穏期は平均各 5 年，48 年間に 5 回の活発期があり，その間の静穏期を入れると 10 年周期で活動期のあることがわかる。これを A，B の活動期と比較すると活動期，静穏期の開始時期は，1，2 年の誤差で一致することがわかる。

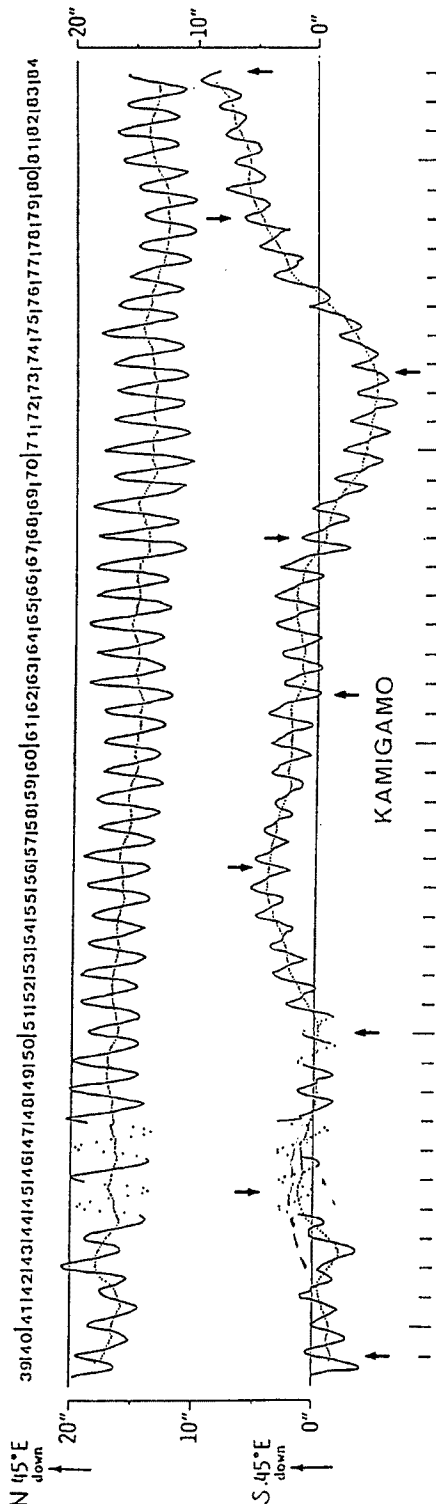


Fig. 1 Secular ground-tilting observed at Kamigamo during the epoch of 1939-1984.

5. 上賀茂の周期的傾動と地震活動の関係

Fig. 1 と Fig. 3 を比較すると、矢印すなわち傾動の極点と地震活動交代期を示す図中の縦線は、1, 2 年のずれがある場合もあるが、きわめてよく一致している。まず、Fig. 3 のやや深い地震の活動において、1940, 1952, 1963, 1973, 1984, の活発化開始時期は、Fig. 1 のように上賀茂の地盤がもっとも $N45^{\circ}W$ 方向に傾斜し、逆転して $S45^{\circ}E$ 方向への傾斜を開始する時期（上向きの矢印）と一致する。すなわち、紀伊半島のやや深い地震とくに S 地域の地震活動が活発化すると、上賀茂では南東方向への傾動を開始する。

この解釈として次のことが考えられる。すなわち、Philippine Sea Plate の沈み込んだ先端部は、緒言に述べた様に、沈み込み速度に変化があり、Plate 上面と先端部の地震発生を伴いながら加速する。Plate の沈み込み運動の加速は紀伊半島の北西方向への水平圧縮応力を増大させ、近畿北西部にまで及ぶ。北西方向へのこの圧縮応力の増大により、上賀茂の地盤あるいは山体は南西方向に傾動を開始する。

次に、この圧縮応力の増大と同時に NE-SW 断層系の地震活動が活発化する。逆に、NW-SE 系断層では地震活動が静穏化する。その解釈としてすでに報告したように⁷⁾、主応力方向の回転が考えられる。これについては次章に述べる。

6. 地震 P 軸の方位

Fig. 5 は縦軸に緯度を取り、その緯度に発生した地震 P 軸方向の水平面投影の時間的变化を示したもので、縦線は Fig. 3 と同じである。下方に網目を施した部分は Fig. 3 のやや深発地震の活発期に相当する。Fig. 5 には 50 個の P 軸が、地震発生の緯度と時を座標として示されているが、この P 軸が東西より左回転しているものが 50 個のうち 20 個ある。その 20 個のうち 15 個は図中網目のない期間すなわち、紀伊半島のやや深い地震 (S) の静穏期に起こっている。例外が 5 個あるがこのうち 3 個は逆断層型の地震であるから、横ずれ型でありながら静穏期でない時期に発生した P 軸の左旋した地震は、17 個のうち 1963 年から 1967 年までに発生した 2 個に過ぎない。

すなわち、紀伊半島のやや深い地震が活発化することにより北西方向への圧縮応力が増大し、NE-SW 系の活断層付近の地震活動が活発化する。その時、ここに発生する地震の P 軸は東西よりも右回転し NW-SE 方向に偏している。つまり、主応力方向が回転して活断層系と $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ の角度になった時、この断層は右横ずれ型すべり破壊が発生しやすくなり、地震活動が活発となり当然 P 軸もその方向を向いていることに

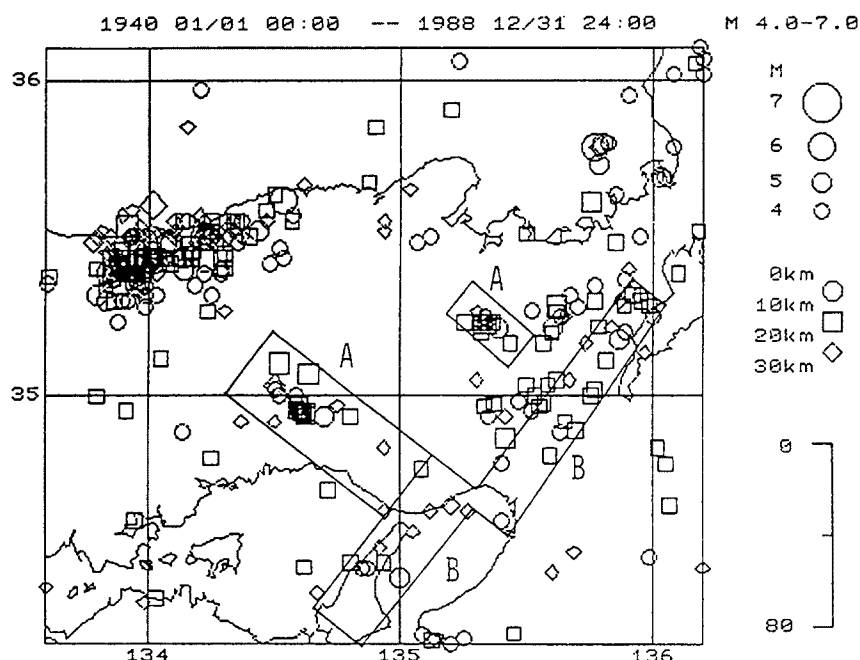


Fig. 2 Distribution of epicenters from 1940 to 1988 in Northern Kinki ($M \geq 4$, $H \leq 30$ km).

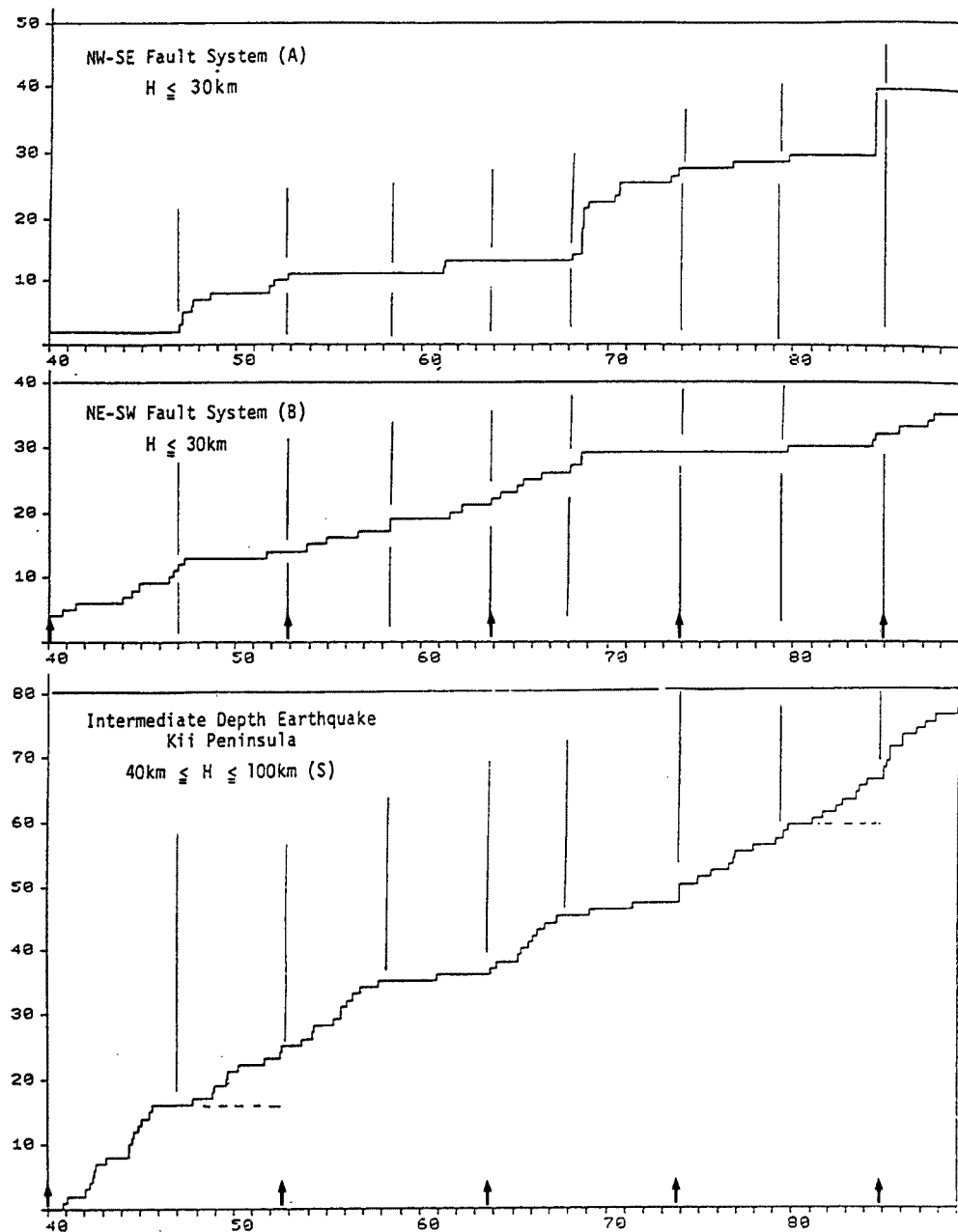


Fig. 3 Cumulative numbers of earthquake in A-, B- and S-regions (Ref. Fig. 2 and Fig. 4).

なる。

これに対し、やや深い地震の静穏期は圧縮応力が減じ、主応力方向が東西方向よりも左回転、つまり ENE-WSW に偏し、山崎断層や三峠断層と $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ の角度となり、この NW-SE 系の断層で地震が発生しやすくなるということを意味している。

7. 絶対応力測定から推定される主応力方向の回転

兵庫県南東部神戸市の北方約 25km にある平木鉱山では 1978 年以來 5 回の絶対応力測定が行われてい

る⁷⁾。この中で、1989年4月に実施された測定は測定深度が25mと浅く応力値は落ちている上、精度も余りよくない。Fig. 6はこの5回の測定結果を示す。図中、 μ_m は水平面内平均応力に対する剪断応力の比であるが、徐々に増加していることは明らかで、すべり破壊の危険性に近づいていることとなる。図の上は水平面内最大主応力の方位を示したもので、測定誤差はかなり大きい、もし上賀茂の傾斜変動と同じ10年程の周期で振動して

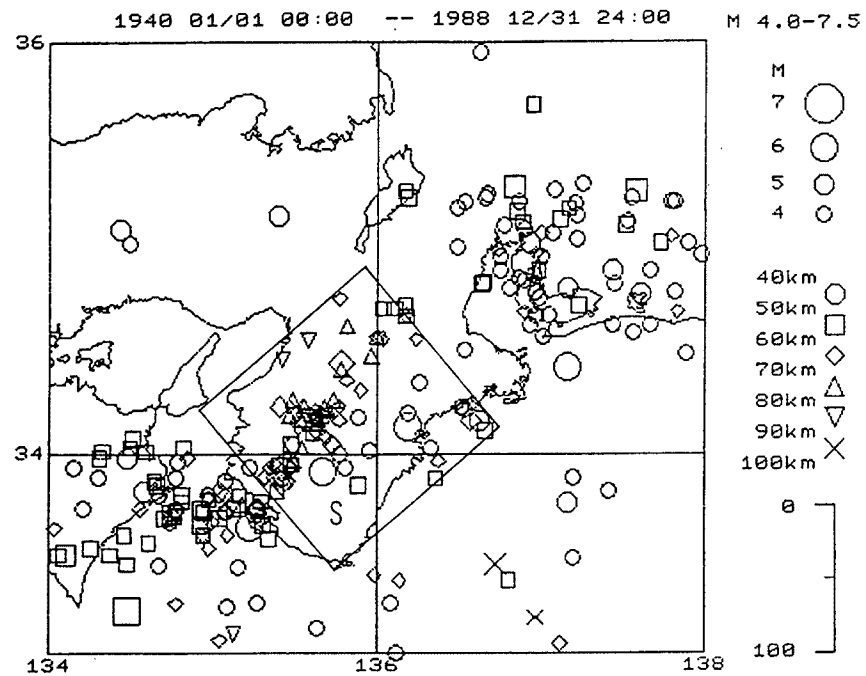


Fig. 4 Distribution of epicenters from 1940 to 1988 along the Nankai Trough ($M \geq 4$, $40 \text{ km} \leq H \leq 100 \text{ km}$).

いるとすると、図中点線のような主応力方位の周期的変動がないとは言えない。ここでは、上賀茂の2回の極点1979年と1984年に、平木の主応力方位の変化にも極点があったと仮定してある。この曲線を現在まで延長して画くと1989年末と1993年末頃に極点があると推測できる。

大阪管区気象台の管内地震活動図(断面図)を見ると、1992年までは Philippine Sea Plate 上面の地震は

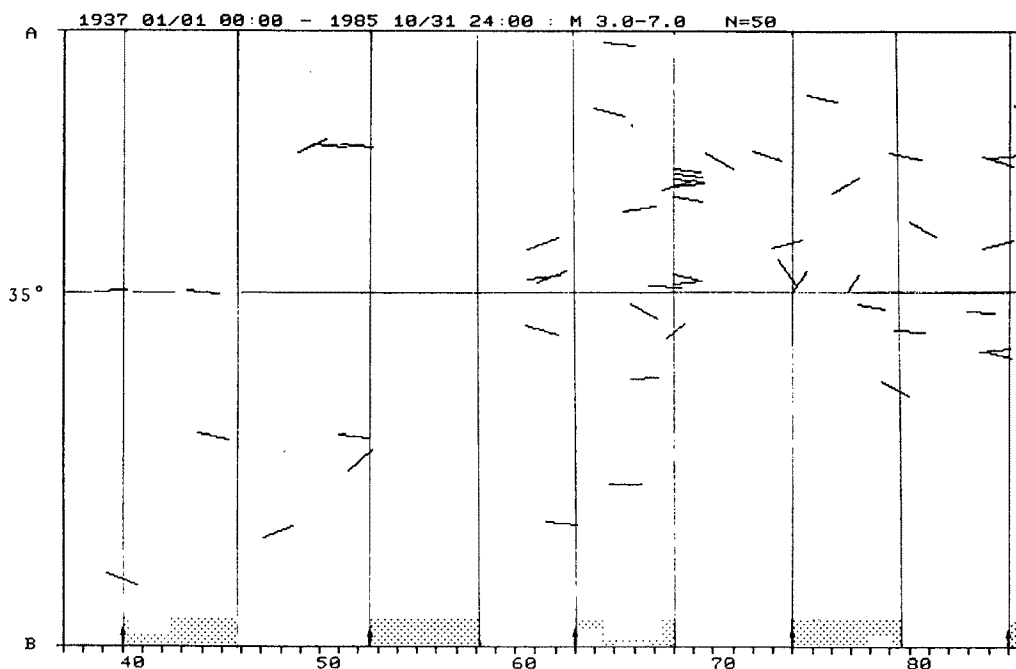


Fig. 5 Time variation of azimuths of P-axis in Northern Kinki from 1937 to 1985.

かなりまばらであったが、1993年では地震はPlate上面に深さ20kmから70kmまでの全面に発生している。また、紀伊半島沖の南海Trough付近で、沈み込みを始めるPlateの下端で圧縮応力の働いている部分に、珍しくTrough沿いに深さ50kmの4つの地震が発生している。これは1993年からPlateの沈み込みが加速されたためと考えられ、1993年を平木における主応力方位回転の極点と予想したことを支持するものであろう。

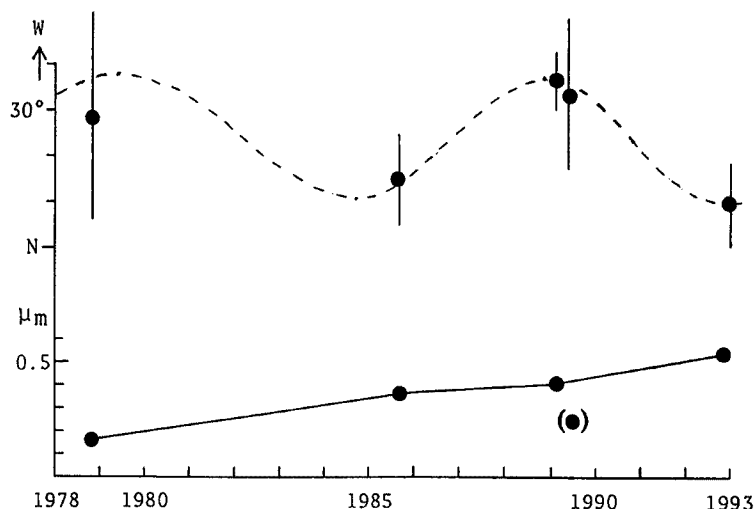


Fig. 6 Azimuthal variation of max. horizontal stress and change of $\mu_m = (\sigma_{h1} - \sigma_{h2}) / (\sigma_{h1} + \sigma_{h2})$ with time measured at the Hiraki Mine.

8. 結 語

以上述べてきたことを、これらの現象の原因から逆に考えてみると、Philippine Sea Plate は1940年頃から加速されて、紀伊半島直下の深さ40~100kmのPlate先端部および上面に激しい地震活動を伴った。その4、5年後に加速され十分に引きずり込まれた紀伊半島沖に1944年東南海地震、1946年南海地震が発生した。このPlateの加速により、内陸部まで圧縮応力が加わり、上賀茂の傾斜計は南東方向に傾動し始め、南海地震の発生と共に、圧縮応力は減少し傾動は北西方向に転じた。1952年の深さ60km、 $M = 6.8$ の吉野地震およびその系列の深い地震の活発化⁸⁾はPhilippine Sea Plateの加速に伴って始まり、上賀茂は再び南東方向に傾動を始めた。その北西方向への圧縮力の増大により、南海地震後、静穏であった近畿北部のNE-SW系の断層に沿う地震活動が活発となった。1958年頃吉野地震系列は終了するが、これはPhilippine Sea Plateの沈み込みが停滞し始めたことを意味すると考えると近畿北部の北西方向への圧縮応力が減少し主応力方向は東西から、左回転し、ENE-WSW方向となり、山崎断層系で地震が発生しやすくなり、1961年の兵庫県西部の群発地震活動を惹起する。以後、ほぼ10年周期でPhilippine Sea Plateの運動は活発となり、それに伴ってNE-SW系とNW-SE系の断層付近の地震活動の交代が起こる。これは、絶対応力測定結果による主応力方位の周期的回転によっても支持される。この原因については前論文⁷⁾の第10章「主応力方向の回転の原因」においてすでに述べた。平木の主応力方向の回転が逆方向であることによる。また、上賀茂の傾斜変動の方位がNW-SEであって、最大傾斜方向が回転しないのは、傾斜変化は本来、応力の変動する方向のみに起こるのであって、東西の強い変化しない圧縮力には影響されないためであろう。これは応力・歪テンソルと傾斜変化ベクトルの違いである。

地震活動の解析にはSEIS-PCを使用させて頂いた。

この論文は上賀茂地学観測所で初めて地球潮汐の観測をされた、地球物理学教室の創始者である故志田順教授と、同じくSilica傾斜計を設置し、地球潮汐の観測をされると同時に、その連続観測による地殻変動と地震の関係に着目された恩師故西村英一教授に捧げるものである。なお、上賀茂地学観測所今井 湊元技官はじめ歴代の助手、技官の御努力に敬意を表する次第である。

参考文献

- 1) 田中 豊：岡山市万成における地殻応力の深度勾配の測定（続報），京大防災研年報，第 35 号 B-1，1992，pp.421-431.
- 2) 田中 豊：地殻変動連続観測—長期変動と地震前駆変動—，地震予知研究シンポジウム（1972），1972，pp.35-44.
- 3) Tanaka, Y. and I. Naito: Gradual Crustal Movements with Some Periodicity and the Related Phenomena, J. Geod. Soc. Japan, Vol.22, 1976, pp.311-313.
- 4) Kasahara, M., R. Shichi and Y. Okada: On the Cause of Long-period Crustal Movement, Tectonophysics, Vol.97, 1983, pp.327-336.
- 5) 田中 豊：地殻変動の様式から推定される低角逆断層型地震の発生過程と前駆的地殻変動，月刊地球，Vol.16, No.6, 1994, pp.333-337.
- 6) Nishimura, E., Y. Kishimoto and Y. Tanaka: Observed Secular Tilting Motion of the Ground which Preceded the Occurrence of Several Destructive Earthquakes, Tellus, No.11, 1959, pp.130-134.
- 7) 田中 豊：近畿北部の地殻応力状態とその変化，京大防災研年報，第 36 号 B-1, 1993, pp.279-290.
- 8) Tanaka, Y.: Modes of Crustal Movements in Subduction Zones —Observed Results in the Kii Peninsula along the Nankai Trough—, J. Geod. Soc. Japan. Vol.35, 1989, pp.133-147.