

山崎断層破碎帯付近の地殻変動と地震活動との関係

藤森 邦夫・大塚 成昭・中村佳重郎
大村 誠・田中 豊

CRUSTAL MOVEMENTS RELATED TO SEISMIC ACTIVITIES IN THE VICINITY OF THE FRACTURED ZONE OF THE YAMASAKI FAULT

By Kunio FUJIMORI, Shigeaki OTSUKA, Kajuro NAKAMURA,
Makoto OMURA and Yutaka TANAKA

Synopsis

In order to monitor fault movements, precise geodetic measurements have been repeatedly carried out at the Yasutomi-Usuzuku base line net across the active Yamasaki fault since 1975 once a year.

The following modes of crustal movements were observed in common before and after the two earthquakes of magnitude 3.7 and 5.6, which took place in the vicinity of the net in September 1977 and May 1984 respectively.

1. As to horizontal movements, the areal strain of the net begins to show the contraction in one or two years before earthquake occurrence and turns to expand at the time or just after it.

2. As to tilting movements, the ground begins to tilt towards the opposite direction of the epicenter in one or two years before earthquake occurrence and amounts of this tilt are recovered within one year after.

On the other hand, no significant change could be observed as to the earthquakes having epicentral distances of about 15 km and over.

1. は じ め に

活断層付近の歪状態とその変化および変位様式を微細に捉えることは、地震に伴う断層運動と地震予知の研究の上で、極めて重要な課題である。これらの調査のため、山崎断層うすづく基線網（以下網と記す）は1975年7月に設置された¹⁾(Fig. 1, Fig. 2)。1975年12月以降、毎年11月下旬（初期の3回は12月上旬）に年1回の測量が行われており、1986年11月の測量まで12回、11年間の測量結果が得られている。

この間山崎断層には中・小の地震が幾つか発生している。特に1977年9月30日の地震（M3.7）と1984年5月30日の地震（M5.6）は、山崎断層テストフィールドとして諸観測の行われている地点の近くで発生したものであり、地震と関連した異常現象が多く報告されている^{2), 3), 4)}。また山崎断層では、この60年間、中地震（M5～6）の活動は11～13年間隔で発生しており、前回の活動期は1973年のM5.1を主震とするものであり、1984年のM5.6を主震とするものが最新の活動である⁵⁾。

このように、11年という測量期間は、山崎断層の平常の地震活動（大規模地震を含まない）のほぼ1周期を経過したと考えられ、山崎断層の歪変化を考察しうる最短の期間に達していると思われる。

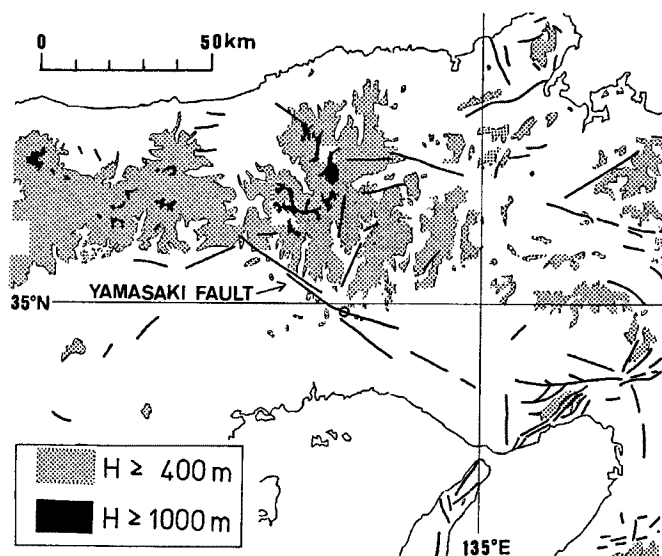


Fig. 1. Location of the Yamasaki fault. Open circle denotes the Yasutomi-Usuzuku base line net.

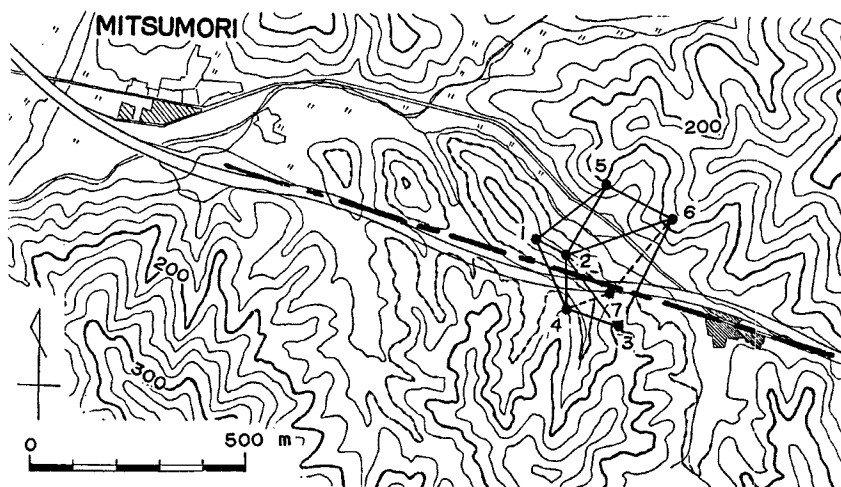


Fig. 2. The net and the topography in the vicinity. Dash-dotted line denotes the fault.

本稿では、測量結果およびそれから推定される地殻変動と地震活動の関係について報告する。なお、測量方法・内容については本誌別稿を参照されたい⁶⁾。

2. 測量結果

基線測量、三角測量および三角水準測量の結果を示し、測量精度とそれらにみられる変化の様相の特徴について述べる。

2.1 基線の長さ変化

基線測量の結果を各測点(1), (A), (B), (2)間の長さ変化として **Fig. 3** に示す。基線1区間(約 25 m)の測定(3~4本の基線尺を使用)値の標準偏差は毎回 0.05 mm 程度であり、三角測量の基準となる基線長((1)―(2), 75 m)の測量精度は約 0.1 mm である。なお、図中白丸で示されている値は、1984年の地震の約

1週間後の測定値である。

基線測量結果にみられる特徴は、次のようなものである。

I) (1)―(A) と (B)―(2) との変化の様相に逆相関がみられる。

II) (1)―(B) の変化と網の面積歪変化との様相に正の相関がみられる (Fig. 10)。

地震後の1984年6月の測定値がその前後の値に比べて大きい。特に (1)―(B) の変化は、地震時 (1983年11月～1984年6月) に大きい伸びが認められ、その後 (1986年6月以降) 一様な縮みとなっている。年周的变化の含まれている可能性はあるが、基線長の変化は地震時に伸びであると思われる。

2.2 網の歪変化

各測点間の歪変化を Fig. 4 に示す。三角測量の網平均により求められる辺長の標準偏差は最大のもので約 1 mm である。これは歪にして約 3×10^{-6} である。しかし、この網においては、測点(1), (5), (2)からなる三角形の閉合差が、ほぼ常に 1～2 秒少く観測される。これが災いして標準偏差が見かけ上大きく表れており、実際の測量精度は 1 mm の変化を充分検出しうる程度に達していると推定している。特定の三角形の

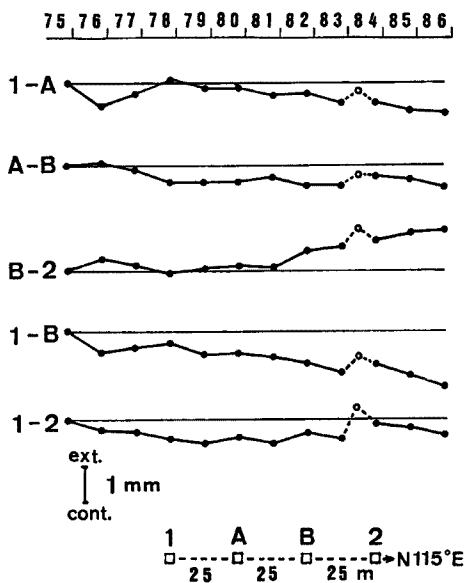


Fig. 3. Secular length changes of 75m base line and arrangement of stations of the base line. Open circles represent the values, which were measured in a week after the earthquake of M5.6 on May 30th, 1984. Several base line tapes have been used to measure the base line at all times.

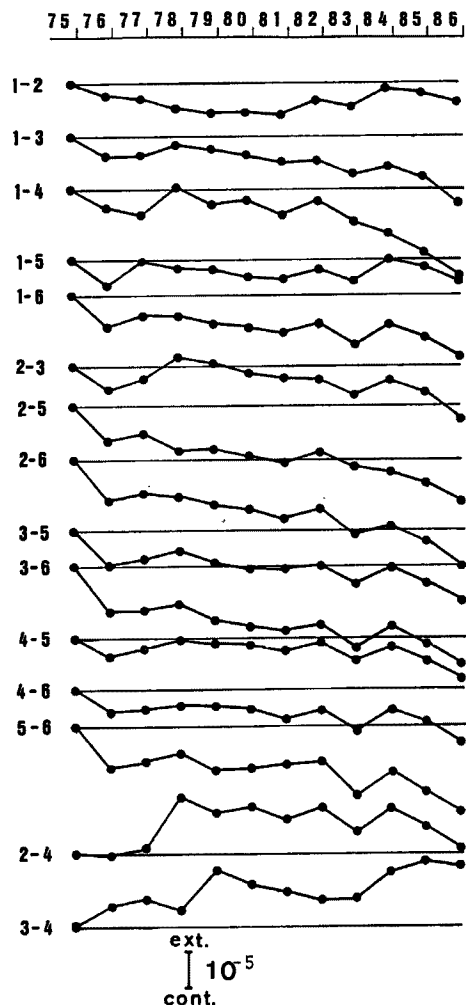


Fig. 4. Secular strain changes of each line. A theodolite WILD T3 has been used to measure the net by triangulation.

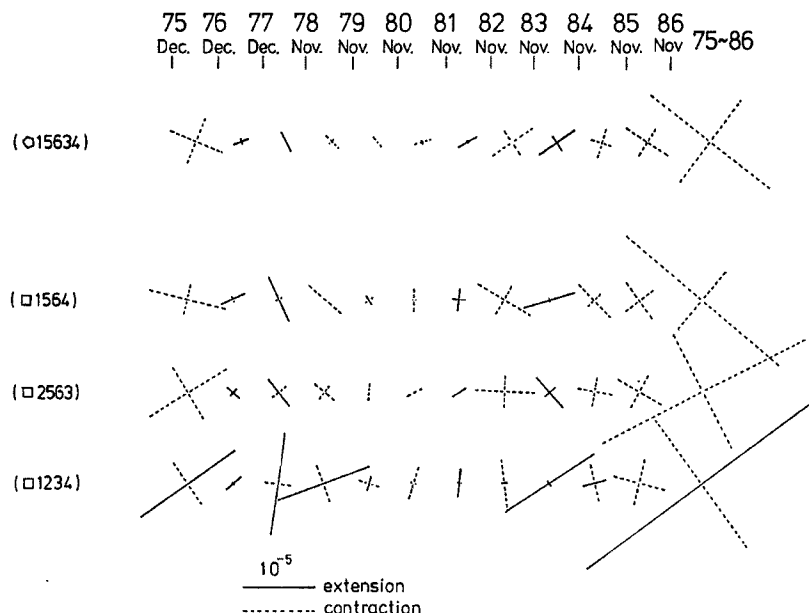


Fig. 5. Annual strain rates and accumulated strains (right) for a pentagon (top) and each quadrilateral in the net. The strains for the pentagon (1, 5, 6, 3, 4) were calculated using the measured values of only 5 diagonal lines.

閉合差がマイナスに観測される原因として、測線(1)―(5)が山際をかすめるように通っているために気象影響を受け、光路が水平方向にも屈折することが考えられる。

Fig. 5 には、網の各測量期間毎の歪変化とその累積歪変化（1975年～1986年）が主歪で示されている。図の上から、五辺形（1, 5, 6, 3, 4）の対角線（辺長；約 300 m）5本のみから計算される網全体の主歪変化、四辺形（1, 5, 6, 4）、四辺形（2, 5, 6, 3）および四辺形（1, 2, 3, 4）の主歪変化である。なお、五辺形において対角線のみから歪を求めているのは、辺長が長ければ測点固有の変動は相対的に（歪として）減少するためである。

網の歪変化にみられる特徴は、以下の通りである。

I) 多くの辺の歪変化には、基線(1)―(A)の長さ変化の様相と、伸びまたは縮みの傾向の差異はあるものの、類似の変化がみられる。

II) **Fig. 5** (右端) に示す 4 個の累積歪変化（1975年～1986年）は、主軸の方向がほぼ北東―南西と北西―南東である。その主歪の大きさは、北西―南東方向は概ね同じであるが、北東―南西方向は大きく異なる。また、1975年～1976年の歪変化がほぼ拡大されているようにみられる。

2.3 高さ変化

三角水準測量により求めた高さ変化を、測点(1)を不動点として **Fig. 6** に示す。白丸で示されている値は基線測量のときと同様に地震後の測定値である。なお測量誤差は約 1 mm である。ちなみに、この測量における折光係数(k)の値は平均的に 0.31 となる。

上下変動を考察するには、地面の傾動変化として表すほうが理解し易い。そのため、網全体が一様に傾動すると仮定して傾動ベクトルを求め⁷⁾、その傾動ベクトル図を **Fig. 10** (下) に示す。**Fig. 7** には傾動量の方位分布の 1 例（1975年～1986年）が示されている。なお、傾動ベクトルを求めるに際しては測点(A), (B)を除いている。

網の高さ（傾動）変化にみられる特徴は、**Fig. 10** においてより明瞭であるが、水平歪変化が大きく縮む

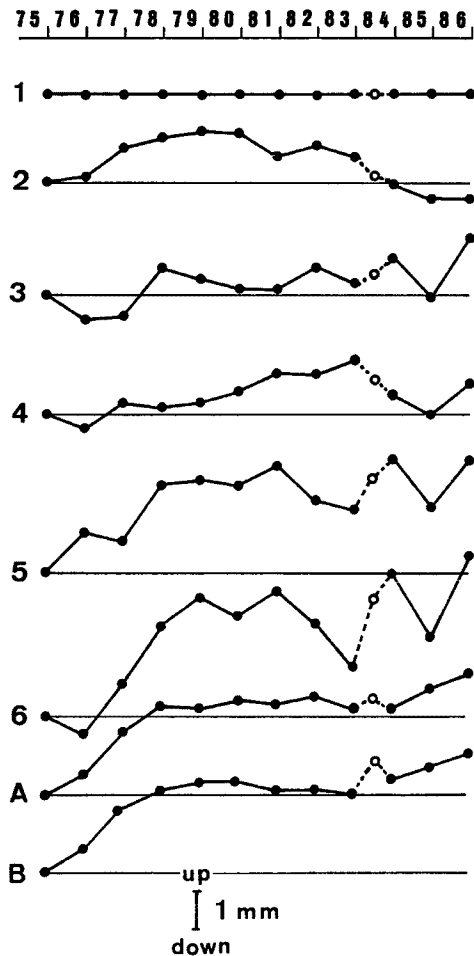


Fig. 6. Relative height changes of each station to No. 1. Open circles are the same as in Fig. 3.

には、測量結果は地殻変動を反映していると思われる。

一方、網内の歪分布は、北側では北東—南西方向に縮み、南側では同方向に伸びと対称的である (Fig. 8)。これは測点(2)の変動に主に起因しており、この測点が異常とも見なせる。しかし、断層近傍における地殻変動連続観測 (例えば、大月断層、安富断層) 結果においても、断層破砕帯では伸縮計の設置場所が異なると同方向の歪でも伸び・縮みと逆センスを示すことが報告されている^{8),9)} (Fig. 9)。特に大月断層では、地球潮汐歪も逆センスになる地点がある¹⁰⁾。これらのことは、断層破砕帯における歪分布が本質的に不均質であることを、明示するようにも思われる。このような断層破砕帯近傍の歪状態の調査は今後も継続される必要がある。

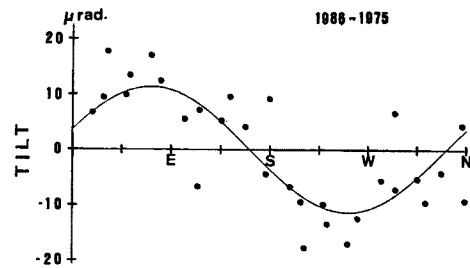


Fig. 7. Amounts of tilt which were calculated from the height changes corresponding to azimuth.

測量期間と伸びとなる期間には、上下変動も大きく変化していることである。これは水平変動と上下変動が同時に生じるといふ点において興味深いことであり、またその変化の量も同桁である。

3. 測量結果と地殻変動

測量結果には、測量誤差とともに、測点固有の動き、気象影響および地形の影響によるものも含まれていると思われる。これらのことは、測量結果から地殻変動を考察する上で、いかなる測地測量においても多少は付随する問題であるが、1 mm 程度の精度を要求される場合は特に厳しい。しかも、年1回の測量であることおよび測点数が少ないことから、これらの影響を分離することは困難である。

測量結果は、これまでに指摘し、また Fig. 10 にまとめて示されているように、基線(1)―(B)と網全体の面積歪の変化はほぼ相似的であり、また網全体の水平変動と上下変動とが関連しているようである。網全体として考える場合

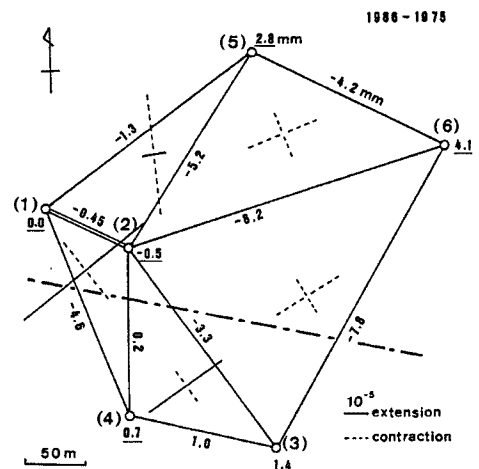
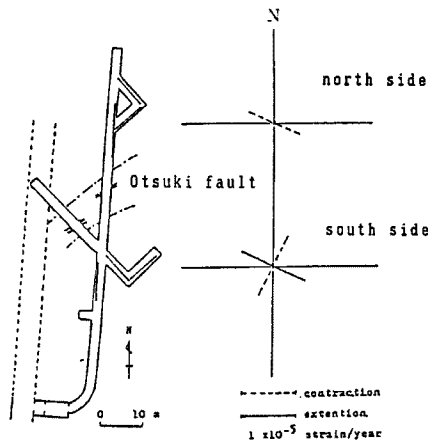


Fig. 8. Strains, height changes and line length changes in 1975~1986.

ROKKO (OTSUKI FAULT)



YAMASAKI (YASUTOMI FAULT)

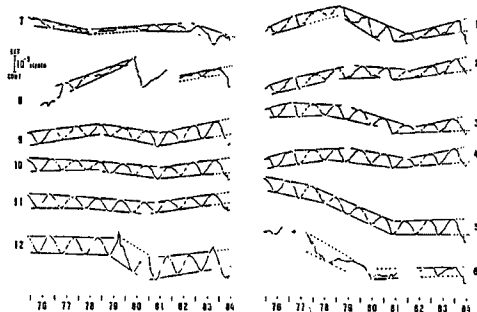


Fig. 9. Upper; Annual strain rates at each side of the Otsuki fault (After Otsuka et al., 1982)⁸⁾. Lower; Secular strain changes at the Yasutomi fault in 1976~1984 (After Watanabe et al., 1985)⁴⁾.

4. 山崎断層の地震活動

初めにふれたように、測量期間(1975年12月~1986年11月)内に、山崎断層では中・小の地震が幾つか発生している。特に地震活動が活発だったのは、1979年~1980年と1984年である⁵⁾。先の活動期は、1979年12月に山崎町付近に発生したM4.9と1980年1月に福崎町付近のM4.6の地震を中心とするものであり、地震活動域は網から東西に約20 km 離れているところである。網近傍には目だった地震は発生していない。後の活動期は、1984年5月のM5.6を主震とした山崎断層としては最大級の地震活動である。震源は、網の設置されている安富断層の南側にある暮坂峠断層の直下約20 km であるが、震央距離は網の南南西約3 km と近く、ほぼ網の直下とみなせ、網の地殻変動に何等かの影響を与えるであろうと思われる。網近傍の地震活動は、以前に1度あり、1977年9月30日のM3.7を主震(網の北北西約3 km、深さ約17 km)とするものである。

5. 測量結果と地震活動の関係

測量結果と網近傍の地震発生を示したものが Fig. 10 である。図の上から、基線 (I)~(B)、50 m) の歪変化、網の歪変化 (maximum shear strain, dilatation, principal strains) と傾動ベクトル図である。地震発生時は、歪の時間的変化図には一点鎖線で、傾動ベクトル図では四角印で示されている。

この図において、地震発生を含む測量期間およびその前年の変動様式には、2回の地震発生に対して、共通性がみられる。即ち、歪変化においては、地震発生前に面積歪が減少し、地震発生時に増大するようであり、傾動変化においては、地震発生前に震央方向が上昇し、地震発生時に下

降するように思われる。

このような面積歪・傾動の変化は、地震発生前(約1~2年)の応力増加と地震活動時の応力解放を反映している、と考えられる。しかし、地震時における歪・傾動の変動量は弾性理論から期待されるものと大きく異なる。また、経年的変動も 10^{-6} を超えており変動量は大きい。これらのことは、断層破砕帯の弾性定数が周辺より小さい、または断層周辺に応力集中が生じている、と考えれば、当然のことかも知れない。

一方、約20 km 離れた地域での地震活動時(1979年~1980年)には、あまり変動がみられない。このことから、数 km 以上離れたM4程度の地震による影響は、測地測量では検出されないほど小さいと思われる。

現在のところ、網近傍での地震発生は2例であり、上記の内容は今後の地震で検証される必要がある。また、1984年の地震以後(1984年~1986年)、歪変化は大きく縮みの傾向を示し、傾動は東西に大きく変化している。その解釈も今後の課題である。

6. おわりに

11年間の測量結果から推定される網近傍の安富断層の変動は、近傍の中地震程度ではずれ変位をせず(最

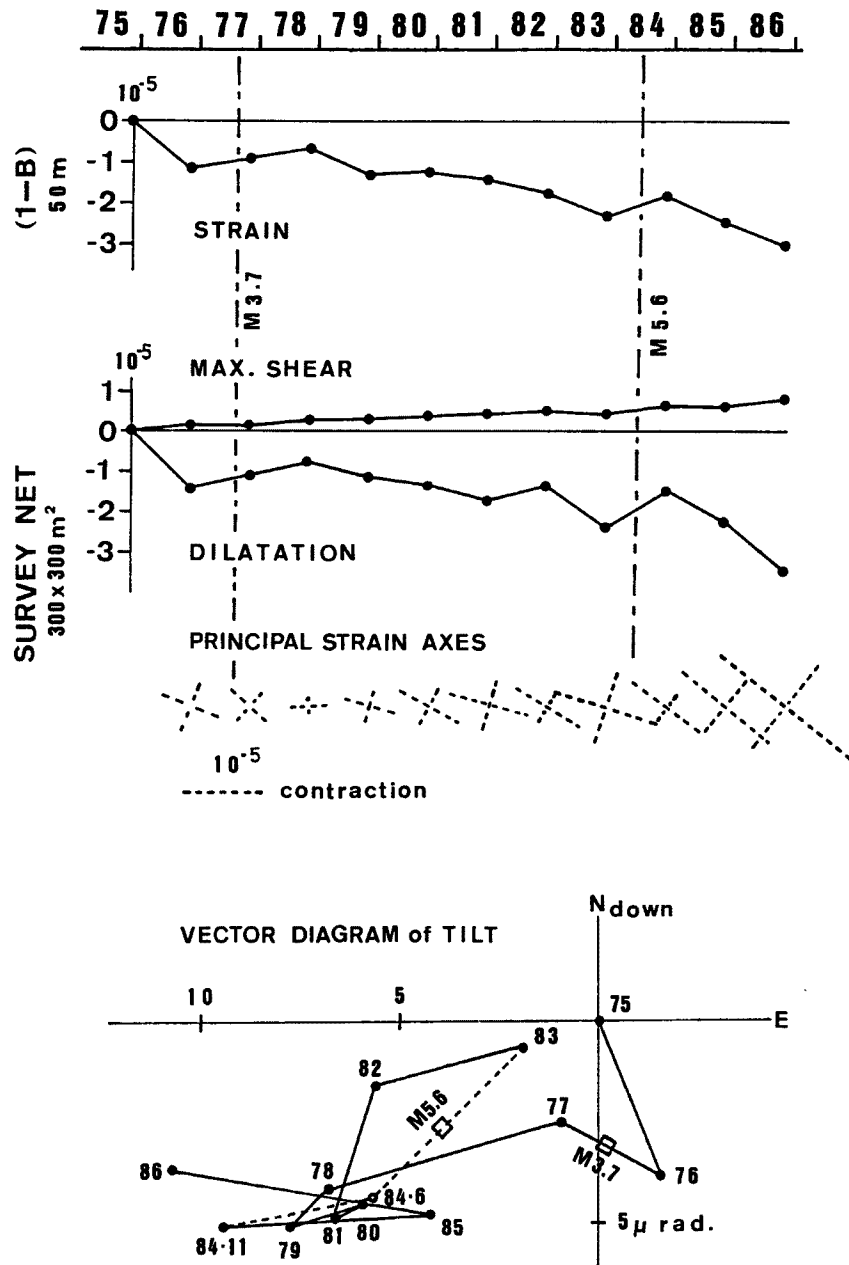


Fig. 10. Secular length change of the base line (1-B), maximum shear strain change, areal dilatation change, accumulated strains and vector diagram of tilt of the net. Dash-dotted lines and squares indicate the occurrence of the earthquakes in the vicinity of the net. Open circle is the same as in Fig. 3.

大剪断歪はほぼ一様に増加している (Fig. 10)), 断層破砕帯が, “ゆらぎ” を持ちつつ長期的には収縮し, 東北東方向が上昇するかのように傾動しているというものである。また, その“ゆらぎ” は近くの地震活動に関係するよう思われ, 断層破砕帯で観測される地殻変動が, 周囲の地殻活動の影響を拡大して反映していることを, 示唆するものと思われる。

なお、測量結果は、山崎断層の変位として地形より期待されるもの（左ずれ、北東側隆起）^{(11),(12)}と、傾動変化は一致するが、歪変化は異なる。過去80年間の広域測量結果^{(13),(14)}においても、近畿北西部は歪変化の小さい地域であり、山崎断層周辺も他地域と同程度の歪変化しか示さない。破碎帯の幅が約 500 m もあるような山崎断層の変位を高精度で調べるためには、現在の網はなお小さすぎる。1 km 程度の網を設置する必要はあろうが、断層地形であることを考えると、このような網の設置はかなり困難に思われる。

謝 辞

この基線網における測量は、50, 51, 52年度は自然災害特別研究（藤田、田中、岸本）として、53年度以降は山崎断層テストフィールドの一部として実施され、岩崎一雄（元地質調査所）、斎藤英二（地質調査所）および筆者等からなる山崎断層測量グループが行っている。測量には地球物理学教室の院生、学生が随時参加している。

毎年の観測実施については地元安富町及び道路公団福崎管理事務所の多大の協力を得ている。また地震の資料は鳥取微小地震観測所から頂いた。合わせて御礼申し上げる。

資料の解析には京都大学大型計算機センター課題番号A51553を使用したことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 藤森邦夫・田中 豊：基線網測量，月刊地球，Vol. 7, No. 1, 1985, pp. 20-26.
- 2) 岸本兆方：1977年9月30日の山崎断層の大地震に伴った諸観測の異常変化について，京大防災研年報，第21号B-1，1978, pp. 1-9.
- 3) 岸本兆方・尾池和夫：概論：山崎断層，月刊地球，Vol. 7, No. 1, 1985, pp. 4-8.
- 4) “概論：山崎断層”の後に各分野の報告が続く，月刊地球，Vol. 7, No. 1, 1985, pp. 9-65.
- 5) 佃 為成：山崎断層の地震活動，月刊地球，Vol. 7, No. 1, 1985, pp. 9-15.
- 6) 大塚成昭・藤森邦夫・中村佳重郎・大村 誠・田中 豊：山崎断層安富基線網における精密測地測量成果，京大防災研年報，第30号B-1，1987, pp. 67-76.
- 7) Miyabe, N.: Blocks in the Earth's Crust and their Movements. Part I, Bull. Earthq. Res. Inst., 1931, pp. 256-270.
- 8) 大塚成昭・田村良明・藤森邦夫・田中 豊：六甲鶴甲観測室における地殻変動観測(Ⅰ)，測地学会誌，第28巻，第3号，1982, pp. 134-151.
- 9) 渡辺邦彦・尾池和夫：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，京大防災研年報，第28号B-1，1985, pp. 99-109.
- 10) 田中 豊・林 守孝・加藤正明・藤田和夫：六甲断層破碎帯における地殻変動の連続観測（第一報），京大防災研年報，第15号B，1972, pp. 29-41.
- 11) Huzita, K., Y. Kishimoto and K. Shiono: Neotectonics and Seismicity in the Kinki Area, Southwest Japan, Jour. Geosci., Osaka City Univ., Vol. 16, Art. 6, 1973, pp. 93-124.
- 12) 福井謙三：山崎断層系の変位地形，地理学評論，第54巻，第4号，1981, pp. 196-213.
- 13) 国土地理院測地部：近畿西部地方の水平変動，地震予知連絡会会報，第23巻，1980, pp. 128-130.
- 14) 国土地理院測地部：中国地方東部の水平歪，地震予知連絡会会報，第24巻，1980, pp. 217-227.