

山崎断層^{うすづく}安富春基線網における精密測地測量成果

大塚 成昭・藤森 邦夫・中村佳重郎
大村 誠・田中 豊

PRECISE GEODETIC MEASUREMENTS AT THE YASUTOMI-USUZUKU BASE LINE NET ACROSS THE YAMASAKI FAULT

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

Synopsis

In order to investigate the behavior of the active Yamasaki fault, a pentagonal base line net was set up across the fault at Yasutomi-Usuzuku (Hyogo prefecture) in July 1975. Since then, precise geodetic surveys have been carried out every year in November or December.

The methods employed in the survey are horizontal and vertical angle measurements using a theodolite Wild T3, and precise base line measurement using several base line tapes. The angle measurements have been done at night for being freed from fluctuations of target images. The accuracy of the present observations is of the same degree as that for first order triangulation, consequently relative horizontal and vertical displacements of 1 mm would be detected.

In this report, the outline of the observational method and a part of the results from 1975 to 1986 are described.

1. は じ め に

山崎断層は兵庫県南西部に位置し、北西－南東の走向を持ち、総延長約 80 km で、西南日本でも屈指の左横ずれの活断層である (Fig. 1)。活断層は1960年代に日本でも数多く確認され、地震予知の観点からも注目された¹⁾。特に、日本の内陸の水平ずれ活断層が、大地震の発生に際してのみ活動するのか、それともサン・アンドレアス断層などのトランスフォーム断層のように、常時少しずつ動いているのか調べることは重要であった。そこで藤田和夫 (当時、大阪市立大学理学部)、杉村 新 (当時、神戸大学理学部)、岸本北方 (京都大学防災研究所) および田中 豊 (京都大学理学部) らは、山崎断層において活断層周辺の地殻歪分布とその時間変化および断層の変位様式の解明のために、次のような観測を計画した^{2), 3)}。

- ① 断層周辺に配置した測量基準点 (以下、測点と略す) からなる精密基線網の繰り返し測量。
- ② 断層を斜めに跨ぐ伸縮計による連続観測⁴⁾。

この報告では、①の測地測量についてその実施方法、測量精度および観測開始から最近までの成果の概要を述べる。

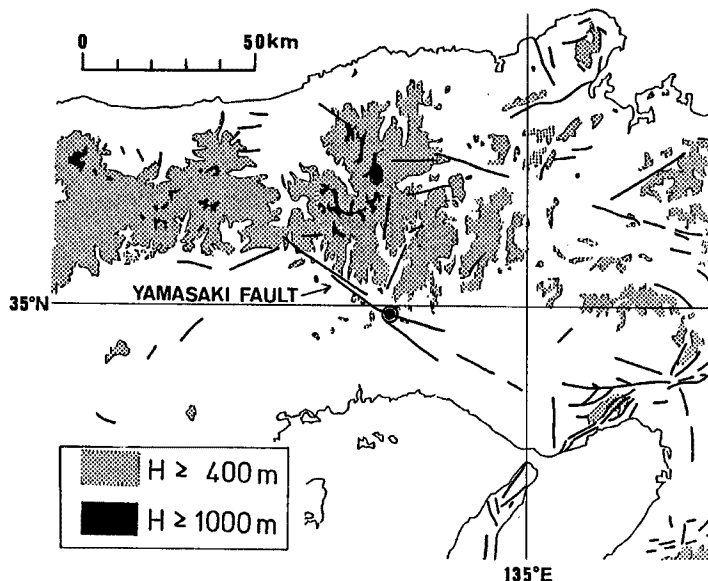


Fig. 1. Locations of the Yamasaki fault and the Yasutomi-Usuzuku base line net (●).

基線網は兵庫県栗東郡安富町^{うすつく}に1975年7月に設置された。その年の8月に予備観測, 12月に第1回観測を実施した。以来, 毎年11月下旬(第1回~第3回のみ12月上旬)に測量を実施してきた。1975年頃から山崎断層周辺で種々の地球物理学的, 地球化学的観測が行われるようになった。1978年度から山崎断層テストフィールド(代表者・岸本兆方)が地震予知計画に取り上げられ⁹⁾, 以後, 測地測量もこれらの観測と共にこの計画の一環として継続実施されてきた。

2. 必要な観測精度と選点作業

山崎断層の平均変位速度は, 当初, 約 1 mm/年と推定された(その後, 地形・地質学的研究により, 約 0.3 mm/年と推定されている⁹⁾)。したがって数年程度の観測でこの断層の挙動を検出するためには, 基線網の各辺長さなわち測点間の相対位置決定は 1 mm 以内の誤差で行われなければならない。このような精度の三角測量を実施しうるかどうかを以下に考察する。Fig. 2 に示す三角形(1)(2)(3)において, 辺(1)-(2)は基線尺による直接測定, 他の2辺は経緯儀による水平角観測により決定し, さらに測点(1)を不動点, (1)-(2)方向固定として, 各測点間の距離を誤差 1 mm 以内で決定することを試みる。基線(1)-(2)の長さ L の測定誤差 $|\Delta L|$ は, インバール基線尺を用いるならば 0.1 mm 以下にすることができる。次に, 角 θ ($\angle(2)(1)(3)$) の測定誤差を $\Delta\theta$ とすると, 測点(3)の位置決定の誤差 Δl は $\Delta l = l \Delta\theta$ である。したがって $|\Delta l| < 1 \text{ mm}$ となるためには, $|\Delta\theta| < 1/l$ であるので, 例えば,

$$l=100 \text{ m} \quad \text{の場合} \quad |\Delta\theta| < 2.1''$$

$$l=300 \text{ m} \quad \text{の場合} \quad |\Delta\theta| < 0.7''$$

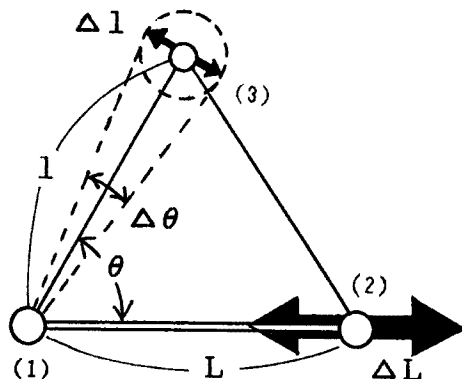


Fig. 2. Schematic diagram showing the error of the position, which are caused by observational errors in base line and angle measurements.

でなければならない。一方、一等三角測量に使用される精密級経緯儀（最小目盛値，0.2秒）を用い、「角観測法」による水平角観測を行えば $|4\theta| < 1.0''$ とすることは可能である。

以上に述べてきたように、辺長が約 300 m 以内の基線網に対して一等三角測量で用いられている測器と観測法を採用すれば、測点間の相対位置を誤差 1 mm 以内で測定することが可能である。

基線網の設置場所の選定に当たっては、上記のことを念頭に置いて以下の3項目を選定の条件とした。

- ① 地形学的、地質学的に横ずれ変位が明瞭な場所であること。
- ② 一辺が 300 m 以下の有心五辺形の基線網が設置可能であること。
- ③ 伸縮計による連続観測のための観測坑の近くであること。

調査選点作業は、1973年12月、1974年4月および1975年4月に、当時、大阪市立大学理学部地質学教室の藤田和夫、京都大学防災研究所微小地震部門の岸本兆方、京都大学理学部地球物理学教室の田中 豊、藤森邦夫、大塚成昭、工業技術院地質調査所地質部の垣見俊弘、衣笠善博および同技術部の岩崎一雄らによって行われた。日本道路公団および地元安富町の協力を得て、兵庫県安富町^{うすづく}に山崎断層系安富断層（以後、これを山崎断層と呼ぶ）を跨ぐ有心五辺形の基線網が設置された（Fig. 1）。

3. 基線網の概要

測点の配置を Fig. 3 に示す。測点(1)～(6)が主要な測点であり、有心五辺形の基線網を構成している。基線網の形状は地形の制約を大きく受けており、測量精度に関係する「網の強さ」が十分でない面はあるがやむを得ない。測点(1)、(2)は主断層のすぐ北側の横ずれにより屈曲した尾根上にあつて、約 75 m の基線の両端である。基線(1)～(2)の間には約 25 m ごとに、基線測量のための中間測点(A)、(B)が設けられている。測点(3)、(4)は主断層破砕帯の南側の尾根上に、測点(5)、(6)は断層谷の北側の山腹にあり、主断層破砕帯の外にそれぞれ設けられている。また、地殻変動連続観測が行われている安富観測坑入口の屋上には補助測点(7)が設けられており、測点(2)、(4)、(6)および(7)でも基線網を構成している。

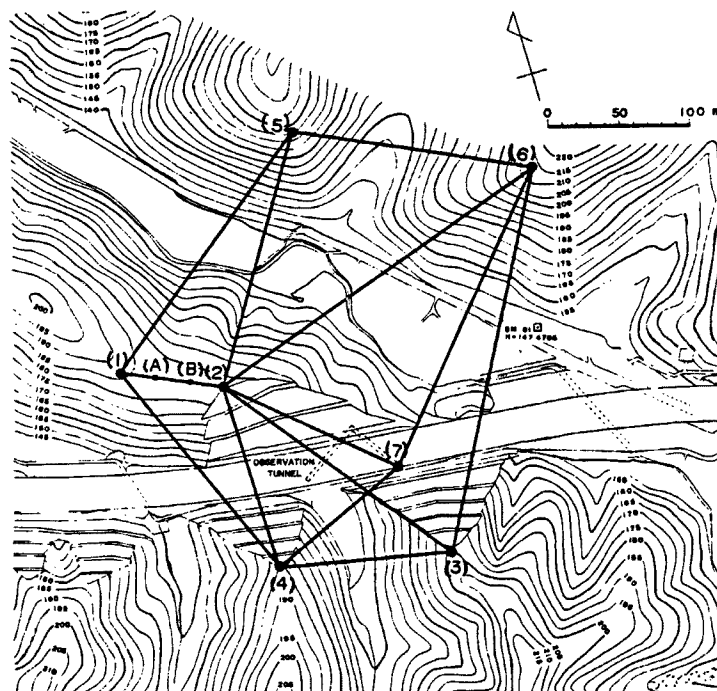


Fig. 3. Arrangement of stations and the topography in the vicinity of the net.

測定の基準となる測量台の形状を Fig. 4 に示す（補助測点(7)を除く）。測量台は 40 cm 角（中間測点（A）,（B）は 30 cm 角）、高さ 80 cm の鉄筋コンクリート製である。基礎部分は 1 m 角（（A）,（B）は 0.7 m 角）で深く地盤中に入っているが表土が厚く、測点(5)を除き堅い岩盤までは届いていない。

測量台の上面には中心に 16.5 mm ϕ の円孔のある直径 20 cm（（A）,（B）は 15 cm）の真鍮製の円盤が埋め込まれている。この円孔は致心球により基線測量用指標、経緯儀および標的を常に誤差 0.1 mm 以下で据え付けることを可能にするためのものである。

4. 観測項目と観測実施方法

4.1 基線網の位置および方位

基線網の経緯度および方位は、近くにある三森三等三角点（北緯 $34^{\circ}59'31.045''$ 、東経 $134^{\circ}37'21.203''$ ）から次のように誘導した。測点(1)の経緯度と基線(1)-(2)の方位角を求めるために、1975年8月の予備観測および同年12月の第1回観測の際に、以下の3項目の観測を実施した。

- ① 測点(2)における、北極星を用いた天文方位角観測。
- ② 測点(3)における、三森三角点と測点(2)との夾角観測。
- ③ 測点(3)と三森三角点間の光波測距。

次に、標高については予備観測の際に一等水準測量を実施し、道路公団の水準点 BM-91 (147.4785 m) と測点(1)とを結合した。その他の測点の標高は三角水準測量によって求めた。

これらの観測により求められた測点(1)の経緯度（北緯 $34^{\circ}58'48.298''$ 、東経 $134^{\circ}36'49.893''$ ）、標高(187.9843m)および基線(1)-(2)の方位角($114^{\circ}24'4.597''$)を固定値とし、第2回以後の測量においては基線測量、水平角観測および鉛直角観測により、その他の測点の位置決定がなされている。

4.2 基線測量

基線測量は 25 m のインバール基線尺 3～4 本を使用し、一等三角測量の精密基線測量と同じ要領で実施している。基線尺は少なくとも 2 本が直前に日本測量協会により検定されている。75 m の基線を 3 区間に分けて測定しているが、各区間の測定値の標準偏差は ± 0.05 mm 以下であり、75 m の基線長の標準偏差は ± 0.1 mm 以下に十分収まっている (Table 2)。

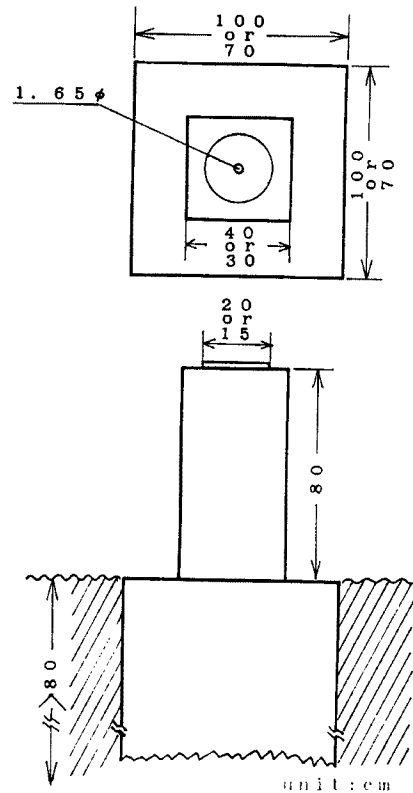


Fig. 4. Sketches of a station mark.

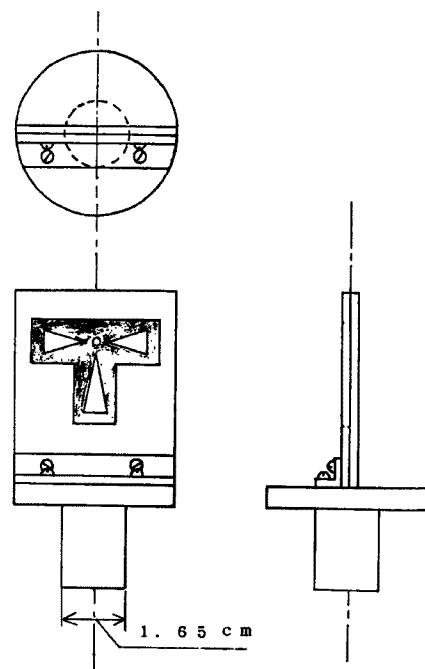


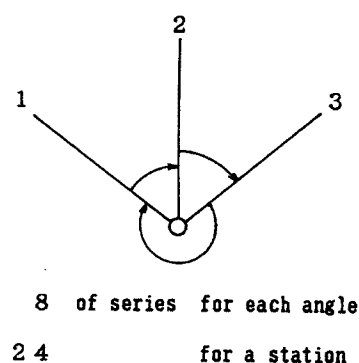
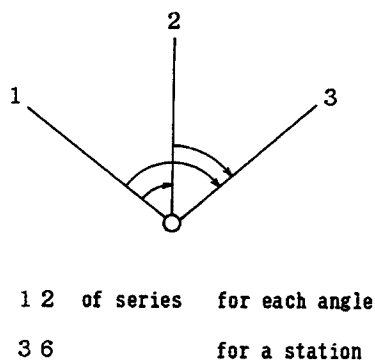
Fig. 5. Sketches of a target.

4.3 水平角観測および鉛直角観測

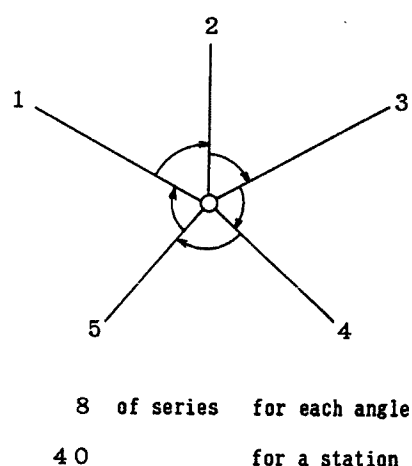
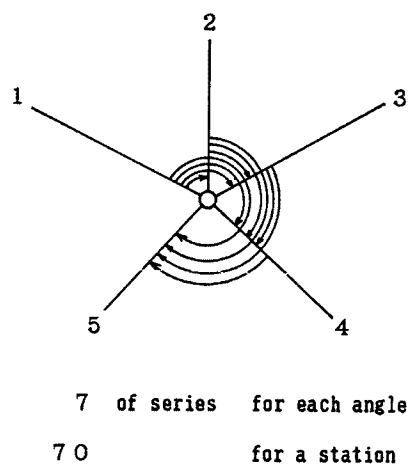
水平角の観測には、精密級経緯儀 Wild T3、致心用心球および近距離角観測専用の精密標的 (Fig. 5) を用い、陽光によるシンチレーションを避けるため夜間に実施している。標的は3種類の異なる大きさのものを作製しており、観測距離に応じて最も適切なものを使用している。角観測の方法については、通常、一等三角測量では「角観測法」(Fig. 6 (a)) が採用されているが、ここでは簡略化した「分離角観測法」(Fig. 6 (b)) を採用している。また、角観測対回数も若干減らして作業の迅速化を図っている。しかし、一等三角測量に準じた精度を維持するためには、Table 1 に示すような観測の制限条件を満たさねばならず、誤差が条件を超える場合は再測を行っている。

三角水準測量には、水平角の観測に用いているものと同じ Wild T3 と精密標的とを使用し、水平角の観測と共に鉛直角観測を実施している。観測誤差を小さくするために視準回数を通常の2倍にしている。

Three directions



Five directions



(a)

(b)

Fig. 6. Methods used for measuring horizontal angles. (a) Method of measuring angles in all combinations. (b) Method of measuring the neighbouring angles. The former is generally used in first order triangulation and the latter is adopted in the present triangulation at the net.

Table 1. Tolerances on errors and misclosures adopted in the observation at the net

観測差 (Difference of observation) $\leq 2''$ *	
倍角差 (Double angle difference) $\leq 3''$	
測点条件 (Error of closure of station)	
1.6''	for three directions
2.1''	for five directions
三角形閉合差 (Error of closure of triangle)	
1.5''	for base line length ≤ 150 m
1.0''	for base line length ≥ 150 m
辺条件 (Side condition) ≤ 1 mm	
* 一等三角測量 (First order triangulation) では, 1''.	

4.4 その他の測定

以上の主たる諸観測の他に, 感度 $25''/\text{div.}$ の気泡管による観測台の傾斜測定を実施している。

また, 1978年2月, 1979年11月に光波測距儀 Mekometer ME3000による辺長測量を実施し, 三角測量の結果との比較を試みた⁷⁾。その後も, Tellurometer MA100などの光波測距儀による測量を試みてきたが, Mekometer ME3000による辺長測量のみが, 種々の補正を行えば, 角観測による測量精度に並びうるように思われる。

Table 2. Examples of lists of the results

December 1975						
Station (1)	Lat. 34°58'48".298	Long. 134°36'49".893	Misclosure		Precision of the base line (1)-(2)	
Station	Adjusted coordinates					
	x(m)	y(m)	h(m)	triangle	$\sqrt{[\delta\delta]/(n-1)}$ $= \pm 0.042$ mm	
(1)	0.00000	0.00000	187.9843	$W_1 - 0''.37$		
(2)	-30.86715	68.03712	183.2448	$W_2 - 1.68$		
(3)	-191.63790	189.01715	202.8889	$W_3 - 0.32$		
(4)	-166.33451	70.01452	185.4008	$W_4 - 0.05$		
(5)	129.33489	166.75244	198.6367	$W_5 - 1.59$	$r/L \times 0.6745 = 3.8 \times 10^{-7}$	
(6)	56.12160	321.60525	214.9531	around the station(2) $W_0 - 1.79$		
Line	Adjusted length	Measured length		$\pm \frac{\Delta s}{2}$	$\frac{\Delta s}{S}$	$ds = S - s$
	S	Crude mean s	Crude discrepancy Δs			
	m mm	mm	mm	mm	$\times 10^{-8}$	mm
0	74.711.65	711.65	0.00	0.00		0.00
1	180.469.40	469.69	0.02	0.01	11.1	-0.29
2	135.481.79	481.90	0.01	0.01	7.4	-0.11
3	121.663.01	662.94	0.01	0.01	8.2	+0.07
4	201.204.88	205.74	0.01	0.01	5.0	-0.86
5	281.006.01	007.24	0.02	0.01	7.1	-1.23
6	268.074.32	075.55	0.02	0.01	7.5	-1.23
7	171.288.00	288.68	0.01	0.01	5.8	-0.68
8	188.173.88	174.78	0.02	0.01	10.6	-0.90
9	211.030.54	031.90	0.02	0.01	9.5	-1.36

November 1986

Station (1)	Lat. 34°58'48".298	Long. 134°36'49".893	Misclosure		Precision of the base line (1)-(2)
Station	Adjusted coordinates				
	$x(m)$	$y(m)$	$h(m)$	triangle $W_1 + 0''.51$	$\sqrt{[\delta\delta]/(n-1)}$ $= \pm 0.062 \text{ mm}$ $r/L \times 0.6745 = 5.6 \times 10^{-7}$
(1)	0.00000	0.00000	187.9843	$W_2 - 0.47$	
(2)	-30.86504	68.03758	183.2443	$W_3 - 0.60$	
(3)	-191.63703	189.01051	202.8903	$W_4 - 0.85$	
(4)	-166.33268	70.00707	185.4015	$W_5 - 1.56$	
(5)	129.32981	166.75474	198.6395	around the	
(6)	56.11239	321.60091	214.9571	station(2) $W_0 + 0.04$	

Line	Adjusted length	Measured length		$\pm \frac{\Delta s}{2}$	$\frac{\Delta s}{S}$	$ds = S - s$
	S	Crude mean s	Crude discrepancy Δs			
	m mm	mm	mm	mm	$\times 10^{-7}$	mm
0	74.711.20	711.20	0.36	0.18		0.00
1	180.464.82	464.91	0.42	0.21	23.3	-0.09
2	135.481.95	482.25	0.32	0.16	23.6	-0.30
3	121.664.00	664.75	0.28	0.14	23.0	-0.75
4	201.201.59	202.62	0.47	0.24	23.4	-1.03
5	280.998.21	000.02	0.66	0.33	23.5	-1.81
6	268.066.11	067.50	0.63	0.32	23.5	-1.39
7	171.283.76	284.44	0.40	0.20	23.4	-0.68
8	188.168.72	169.27	0.44	0.22	23.4	-0.55
9	211.029.25	030.28	0.50	0.25	23.7	-1.03

(Line numbers 0~9 and triangles $W_1 \sim W_5$ are shown in Fig. 7.)

5. 測量成果の概要

測量成果については、これまでも何度か報告をしてきた^{5), 8), 9)}。ここでは成果表の一例を **Table 2** に示す。この成果表に見られるように、“生”の観測角による辺長較差には 1 mm を超えるものはない。これは観測が所期の精度で行われていることを示している。ところが“生”の観測角による辺長と最小二乗法による網平均結果の辺長との差を見ると、ほぼ常に網平均決定辺長が短く、一部の辺で差が 1 mm を超えるものもある。また、この表には示されていないが、網平均の際の辺長の標準偏差にも 1 mm を超えるものが少しある。このように野外点検では観測誤差 1 mm 以内であると思われるにもかかわらず、網平均結果では一部の辺長で 1 mm を超える標準偏差が生ずる原因は、特定の三角形 ($\triangle(1)(2)(5)$) の閉合差が 1~2 秒小さく観測されるためと思われる。この三角形に限り常に閉合差が大きい負の値をとる。これは観測誤差（視準の誤り）ではなく、光路が水平方向にも屈折しているためと考えられる。その理由としては、測線(1)-(5)

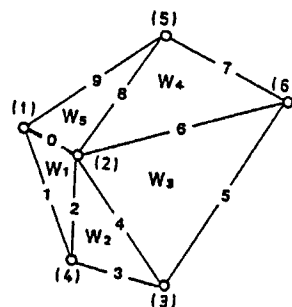


Fig. 7. Diagram showing the lines numbered 0~9 and the triangles named $W_1 \sim W_5$ in the net.

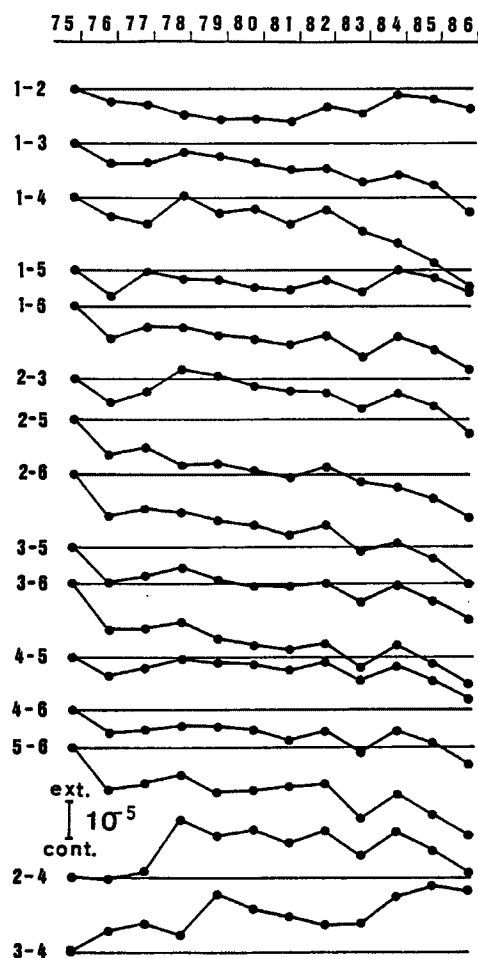


Fig. 8. Secular strain changes of each line.

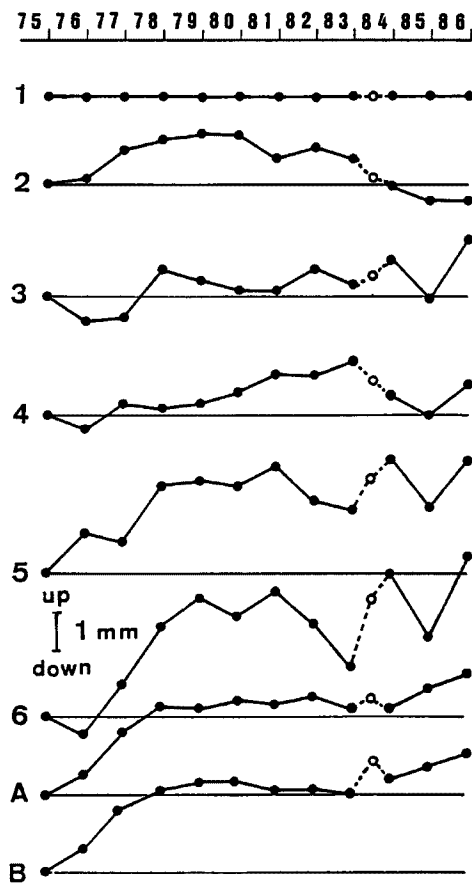


Fig. 9. Relative height changes of each station to No. 1.

の途中に一部山際を通過する場所があることが挙げられる。このように、網平均結果の標準偏差では見かけ上 1 mm を超える辺が一部あるが、実際は 1 mm の辺長変化を検出できる測量精度に達していると思われる。

1975年から1986年までの合計12回の観測成果をもとに計算した各辺の歪変化を Fig. 8 に示す。標準偏差は最大のものでも 5×10^{-6} 以内であり、大部分は約 1×10^{-6} である。したがって、1975年～1977年および1982年～1984年に、大部分の辺に見られる歪変化は測点間の有意な相対変位を表していると考えられる。

次に、各測点の高さ変化を Fig. 9 に示す。各観測の往復差は約 1 mm である。歪変化と同様に1975年～1977年および1982年～1984年に大部分の測点が大きく高さ変化をしているが、これも有意な変化である。

このように各辺の歪変化と測点の上下変化の両方に同じ時期に観測された変化は基線網の近くで発生した地震に関係すると思われるが、これについては稿を改めて詳細に述べる¹⁰⁾。

1975年から1986年までの11年間の累積歪、累積辺長変化および累積上下変動を Fig. 10 に示す。累積歪は、各三角形ごとに、辺長変化から求めた主歪として示す。

主歪の分布に見られる特徴は、以下の通りである。

- ① 主軸の方向はほとんどの三角形で一致しており、北東—南西（北西—南東）である。
- ② 主歪のうち、北東—南西方向のものは三角形によって伸縮が逆のものがある。すなわち、 $\triangle(1)(2)$

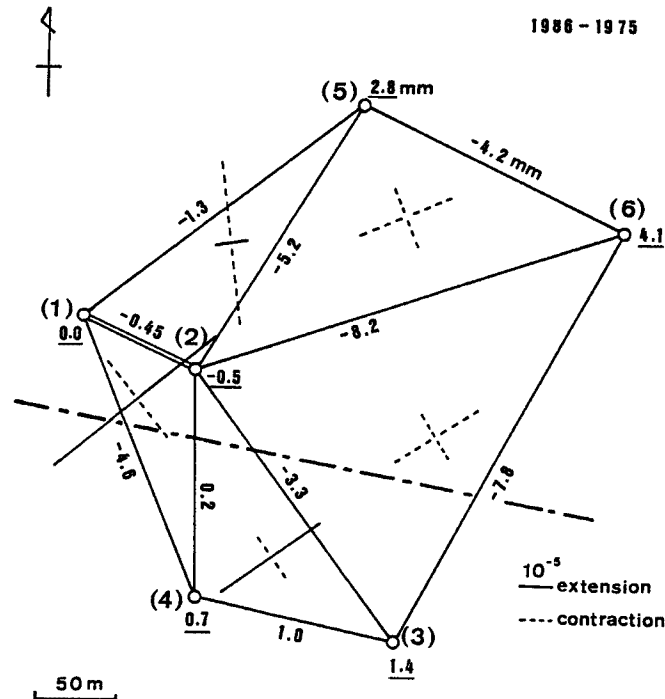


Fig. 10. Principal strains, line length changes and height changes in 1975~1986.

(4)と△(2)(3)(4)では約 $4 \sim 6 \times 10^{-5}$ の伸びであるのに対し、△(2)(5)(6)と△(2)(6)(3)では約 4×10^{-5} の縮みである。

③ 北西—南東方向の主歪はほとんどの三角形でほぼ一致しており、約 $1.5 \sim 3 \times 10^{-5}$ の縮みである。

④ △(1)(5)(2) (閉合差が常に大きい三角形) の主歪だけが他とやや異なっている。

これらの主歪分布からは、この付近全体としては圧縮されながら、主断層破碎帯部分は膨張しているように見える。あるいはまた主断層が右ずれ変位をしているようにも見える。

上下変化については、三角水準測量の誤差が約 1 mm なので有意な変化は測点(6)の 4.1 mm と測点(5)の 2.8 mm の上昇だけかも知れない。しかし、基線網全体として北東側が上昇し南西側が沈降する傾向があるようにも思われる。

このような歪分布および上下変化の観測結果からこの付近の地殻変動様式を推定するためには、さらに詳しい解析を必要とする。そのような試みの一部は藤森・他(1985)⁹⁾により行われている。

6. お わ り に

山崎断層テストフィールドで実施している測地測量の概要を述べた。山崎断層の挙動を把握するために、測点の位置決定誤差 1 mm 以内を目標として観測を始めたが、ほぼ所期の精度で観測が行われてきたと言える。

観測開始以来の11年間(12回)の測量結果から、活断層近傍の地殻歪状態およびその時間変化についての特徴が徐々に明らかになってきた^{9), 10)}。この11年間の測量結果を見る限り、山崎断層が常時地形に現れているような左横ずれ変位をしているとは言えない、しかし、別稿¹⁰⁾で述べるように、付近で発生するM4程度以上の地震に関係する地殻変動が検出されている。このことは地震予知研究の上で活断層上およびその近傍での観測が重要であることを支持していると思われる。

なお、この測量は昭和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してきた。毎年の観測は岩崎一雄（元地質調査所）、斎藤英二（地質調査所）および筆者らからなる山崎断層測量グループが担当し、京都大学理学部地球物理学教室の院生、学生の参加協力のもとに行ってきた。

謝 辞

この基線網の設置は、藤田和夫教授（当時、大阪市立大学理学部）、岸本兆方教授（京都大学防災研究所）、杉村 新教授（当時、神戸大学理学部）、垣見俊弘所長（地質調査所）、衣笠善博課長（同）、他の方々の御尽力と日本道路公団山崎工事事務所および地元安富町の御協力の賜である。また、観測用器材の製作は全て地球物理学教室の鉤 卯三郎技官にお世話になった。特に、岩崎一雄氏には測量の初歩から御指導を賜った。

毎年の観測実施に際しては、地元安富町および道路公団福崎管理事務所に多大の便宜をはかって頂いている。また、三森の古川きよ子夫人には、10年に亘って現地滞在中のお世話をしている。

これらの方々に厚い感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Huzita, K.: Tectonic Development of Southwest Japan in the Quaternary Period, Jour. Geosci. Osaka City Univ., 12, 1969, pp. 53-70.
- 2) 藤田和夫：日本の山地形成論，蒼樹書房，1983，pp. 88-92.
- 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) 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），1976，pp. 83-90.
- 5) 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.
- 6) 活断層研究会：日本の活断層一分布図と資料，東京大学出版会，1980，pp. 238-239.
- 7) 岩崎一雄・田中 豊・藤森邦夫・大塚成昭：局地基線網における精密三角測量と精密光波測量の比較検討，日本測地学会第50回講演会要旨，1978，pp. 26-27.
- 8) Fujimori, K., K. Nakamura, Y. Tanaka, S. Otsuka, E. Saito and K. Iwasaki: A Precise Geodetic Survey at the Yasutomi-Usuzuku Base Line Net across the Yamasaki Fault, Jour. Geod. Soc. Japan, Vol. 27, No. 4. 1981, pp. 317-319.
- 9) 藤森邦夫・田中 豊：基線網測量，月刊地球，Vol. 7, No. 1, 1985, pp. 20-26.
- 10) 藤森邦夫・大塚成昭・中村佳重郎・大村 誠・田中 豊：山崎断層破碎帯付近の地殻変動と地震活動との関係，京大防災研年報，第30号 B-1，1987，pp. 77-84.