

跡津川断層，上宝および中央構造線における光波測量

田中寅夫・細 善信・土居 光・小泉 誠
和田安男・加藤正明・和田博夫・三雲 健

ELECTRO-OPTICAL MEASUREMENTS ON THE ATOTSUGAWA FAULT, IN THE KAMITAKARA REGION AND ON THE MEDIAN TECTONIC LINE

By Torao TANAKA, Yoshinobu HOSO, Hikaru DOI, Makoto KOIZUMI,
Yasuo WADA, Masaaki KATO, Hiroo WADA and Takeshi MIKUMO

Synopsis

The results of the electro-optical measurements of base-line lengths in two networks on the Atotsugawa fault, three on the Median Tectonic Line and one in the region near Kamitakara Crustal Movement Observatory are summarized. The accuracy of our survey is also discussed. If a change in some base-line length is detected over $10\text{ mm}+2\text{ mm/km}$, then it may be considered real with a reliability higher than 90 per cent. Two base-lines in the Atotsugawa network show a decrease of their lengths close to the above-mentioned limit of the observational error, which is consistent with the right-lateral displacement of the fault.

1. ま え が き

光波測量は比較的簡単に行える距離測量の一つであり，地殻変動の観測にもよく用いられてきている。われわれは飛騨山地北部を走る跡津川断層の動きを調べるため，この断層のほぼ中央，岐阜県吉城郡神岡町西漆山付近に光波測量のための基線網（跡津川）を作り，1971年から測量を繰り返してきている。そのうち，1976年までの結果については既に報告した¹⁾が，その後も測量を続けると同時に同断層上にもう一個所（天生）基線網を増設し，測量を開始した。天生付近は跡津川基線網の位置する断層中央部に比べて地震活動度が高い²⁾。

この跡津川断層の南東約 15 km には上宝地殻変動観測所があり，同蔵柱観測室では1966年以来精密な地殻変動の連続観測が続けられてきている³⁾。ここでは，地下観測室で観測される地殻変動の空間的な広がりを検討して，跡津川断層の運動を含めた広域に亘る地殻変動との関連性を明らかにしていく目的で基線網（上宝）を設け，1977年から測量を行なってきている。

一方，近畿地方南部および四国北部を横断している中央構造線はわが国最大の活断層であり，この断層運動を究明することは地震予知の観点からも極めて重要である。そこで，和歌山県に1個所（粉河），四国に2個所（阿波池田および川之江），計3個所に基線網を設定して，1979年末までに2回の測量を実施した。なお，中央構造線の運動を調べるため，国土地理院によって四国では「阿波地区」と「池田地区」で精密変歪測量が行なわれている⁴⁾が，われわれの阿波池田基線網は「阿波地区」の東側に，川之江基線網は西側に位置している。この地域は中央構造線沿いで，もっとも断層変位地形の明瞭なところである⁵⁾。

本報告ではこれらの測量結果をとりまとめて紹介するとともに，われわれの測量の精度について若干の検討を試みる。

2. 基線網と測量結果

ここで述べる6基線網の所在地は下記の通りである。**Fig. 1** にそれらの概略の位置を示す。

跡津川 基線網：岐阜県吉城郡神岡町西漆山付近

天生 “：” 河合村天生 “

上宝 “：” 上宝村 “

粉河 “：和歌山県那賀郡粉河町 “

阿波池田 “：徳島県三好郡池田町 “

川之江 “：愛媛県川之江市 “

測量には、跡津川基線網の初期の測量を除いて、AGA ジオディメーター 6 BL (No. 63194) を使用し

た。測量のやり方、気象補正等の方法は前報¹⁾と全く同じであるので、ここでは省略する。基線の配置と測量結果を **Figs. 2~8** および **Tables 1~6** に示す。表中の誤差は1回の測量における10個の測定値の標準偏差を、 ΔD は第1回目の測量結果からの変化を表わしている。なお、**Table 3** の ΔD の値のうち括弧内の数字は、測量後に気圧計の故障が見出されたため、気圧値を適当に推定して求めた変化である。上宝基線網 (**Fig. 5**) では多数の基線を設けているが、これは標石の破損などを考慮して、できるだけ長期間に亘って観測を続けること、多数の重複した網によって測量結果

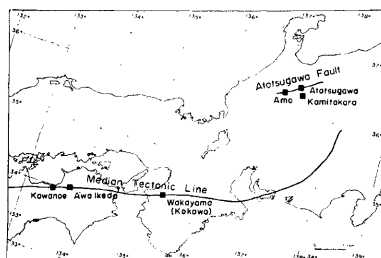


Fig. 1. Location of the networks for electro-optical distance measurements.

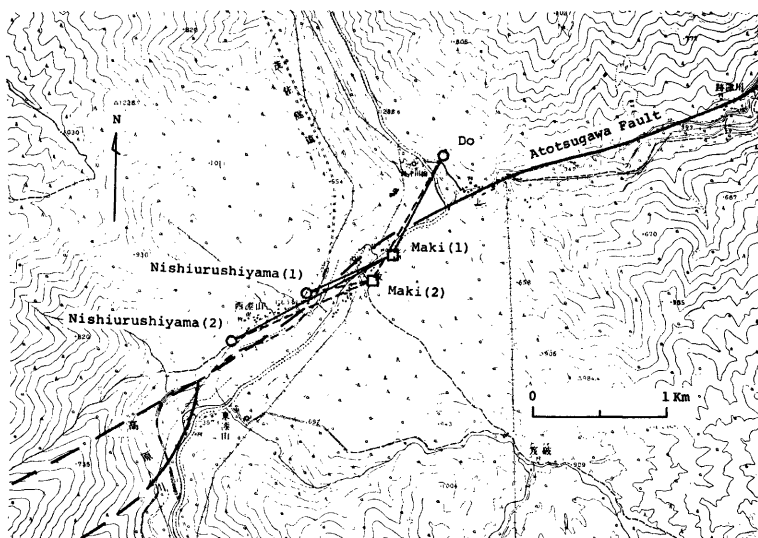


Fig. 2. The Atsugawa network.

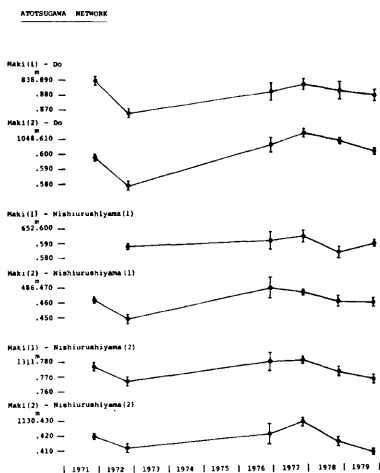


Fig. 3. Temporal changes of the measured baseline lengths of the Atotsugawa network. Vertical bars indicate the standard deviations of each measurement.

の信頼性を高めること，さらには，もし可能であれば，ひずみ蓄積の空間的不均一性を検出することを目指しているためである。

3. 測 量 の 精 度

次に，われわれの光波測量の精度を見積るために，測定された距離の差 dD をとりあげて少し考察を試みる。上に述べた6基線網を形成している基線の総数は47本であり，最長の基線は11.2 km，最短のものは486 m しかない。これらの基線は，跡津川基線網の初期を除いて，1976年以降大体1年の間隔をおいてほぼ同じ時期に改測している。そこで，ここでは6 BL (No. 63194)で約1年の間隔をあけて測定された78個の dD だけを用いることにする。まず， dD の観測個数を基線長に対してプロットしたものを Fig. 9 に示すが，4~5 km の基線長に対する個数が最も多く，長いものは相対的に少ない。次に dD の値の分布を描くと Fig. 10 のようになる。1年の間には地殻変動が全く無かったと仮定すれば，この結果は

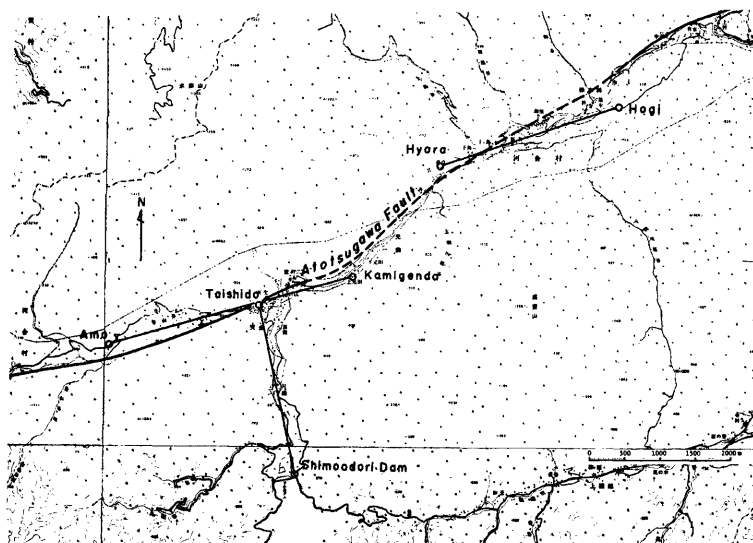


Fig. 4. The Amo network.

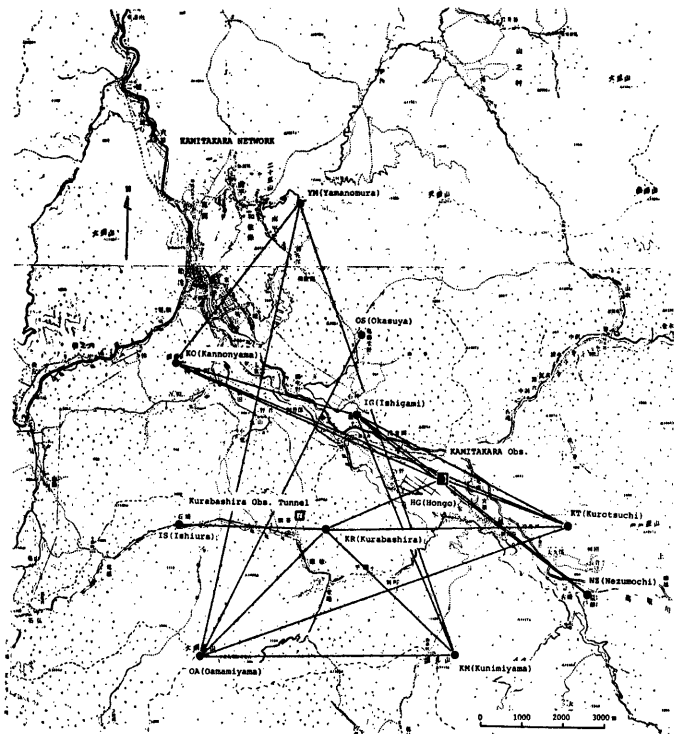


Fig. 5. The Kamitakara network.

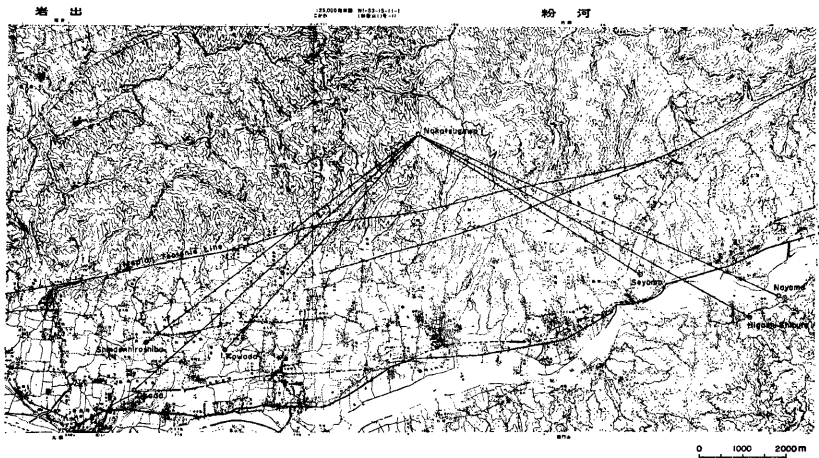


Fig. 6. The Kokawa network.

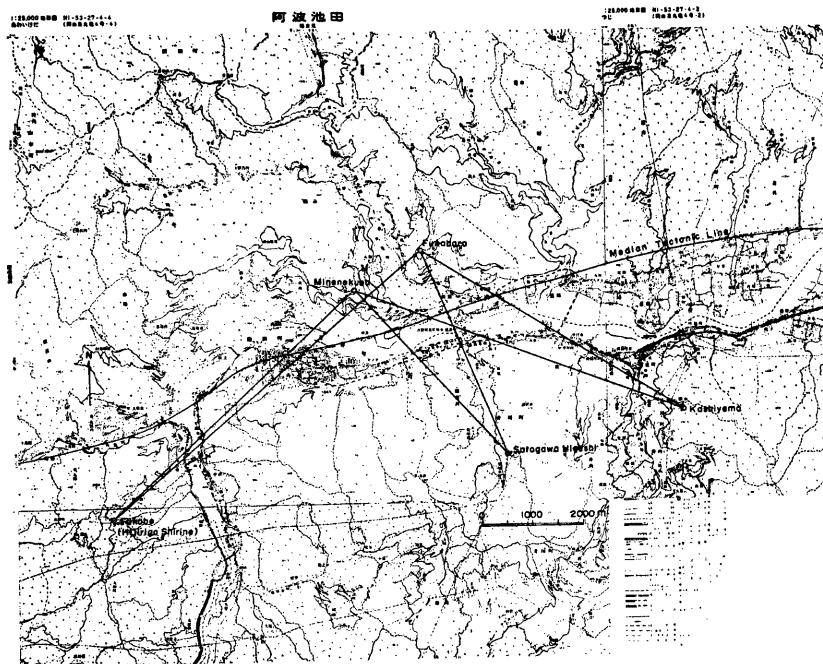


Fig. 7. The Awa Ikeda network.

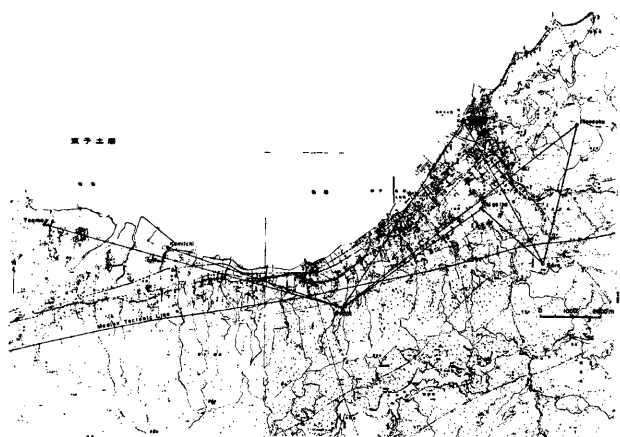


Fig. 8. The Kawanoc network.

Table 1. Result of the Atotsugawa network. ΔD is the difference from the first measurement. The error is the standard deviation of 10 observations in one set measurement.

(a) Maki (1) Network

Base Line			Do		Nishiurushiyama (1)		Nishiurushiyama (2)	
No.	Date		D (m)	ΔD	D (m)	ΔD	D (m)	ΔD
1*	Oct. 07, 1971		838.890 $\pm$ 3 ^{mm}	0 ^{mm}			1311.777 $\pm$ 3 ^{mm}	0 ^{mm}
2*	Oct. 19-20, 1972		.868 $\pm$ 3 ^{mm}	-22 ^{mm}	652.588 $\pm$ 2 ^{mm}	0 ^{mm}	.767 $\pm$ 3	-10
3	Nov. 16-17, 1976		.883 $\pm$ 6	- 7	.592 $\pm$ 6	4	.780 $\pm$ 6	3
4	Oct. 26, 1977		.888 $\pm$ 4	- 2	.595 $\pm$ 4	7	.781 $\pm$ 3	4
5	Nov. 08, 1978		.884 $\pm$ 6	- 6	.584 $\pm$ 4	- 4	.772 $\pm$ 3	- 5
6	Oct. 30, 1979		.881 $\pm$ 4	- 9	.590 $\pm$ 2	2	.767 $\pm$ 3	-10

*AGA Geodimeter Model 6

(b) Maki (2) Network

Base Line			Do		Nishiurushiyama (1)		Nishiurushiyama (2)	
No.	Date		D (m)	ΔD	D (m)	ΔD	D (m)	ΔD
1*	Oct. 06, 1971		1048.598 $\pm$ 2 ^{mm}	0 ^{mm}	486.462 $\pm$ 2 ^{mm}	0 ^{mm}	1130.420 $\pm$ 2 ^{mm}	0 ^{mm}
2*	Oct. 18-19, 1972		.579 $\pm$ 3	-19	.449 $\pm$ 3	-13	.412 $\pm$ 3	- 8
3	Nov. 16, 1976		.607 $\pm$ 5	9	.470 $\pm$ 7	8	.421 $\pm$ 7	1
4	Oct. 26, 1977		.615 $\pm$ 3	17	.467 $\pm$ 4	5	.429 $\pm$ 3	9
5	Nov. 08, 1978		.610 $\pm$ 2	12	.460 $\pm$ 4	- 2	.415 $\pm$ 3	- 5
6	Oct. 30, 1979		.603 $\pm$ 2	5	.459 $\pm$ 3	- 3	.408 $\pm$ 2	-12

*AGA Geodimeter Model 6

Table 2. Result of the Amo network.

Base Line			Kamigenda - Amo		Hyoma - Hagi		Shimoodori Dam - Taishido	
No.	Date		D (m)	ΔD	D (m)	ΔD	D (m)	ΔD
1	Oct. 25, 1977		3549.515 $\pm$ 4 ^{mm}	0 ^{mm}	2694.431 $\pm$ 3 ^{mm}	0 ^{mm}	2399.998 $\pm$ 8 ^{mm}	0 ^{mm}
2	Nov. 07, 1978		.501 $\pm$ 2	-14	.429 $\pm$ 5	- 2	.994 $\pm$ 2	- 4
3	Oct. 31, 1979		.501 $\pm$ 7	-14	.431 $\pm$ 4	0	.995 $\pm$ 2	- 3

Table 3. Result of the Kamitakara network. One barometer had a breakdown in the measurement in 1978. The ΔD 's in the parentheses are the values estimated from assumed atmospheric pressure.

Base Line		July 21-27 1977		July 20-29 1978		July 21-27 '79 *Nov. 01 '79	
		D (m)	ΔD	D (m)	ΔD	D (m)	ΔD
HG	- KT	3292.983 $\pm$ 3 ^{mm}	0 ^{mm}	3292.982 $\pm$ 4 ^{mm}	- 1 ^{mm}	3292.967 $\pm$ 3 ^{mm}	-16 ^{mm}
HG	- KR	3023.960 $\pm$ 4	0	3023.966 $\pm$ 5	6	3023.969 $\pm$ 3	9
HG	- KO	7149.590 $\pm$ 3	0	7149.592 $\pm$ 6	2	7149.611 $\pm$ 7	21
HG	- NZ	4587.736 $\pm$ 6	0	4587.727 $\pm$ 3	- 9	*4587.725 $\pm$ 6	-11
HG	- IG	2572.682 $\pm$ 4	0	2572.671 $\pm$ 3	-11	2572.663 $\pm$ 4	-19
OA	- YM	10851.693 $\pm$ 5	0	10851.667 $\pm$ 9	-26(- 9)		
OA	- KM	6199.254 $\pm$ 4	0	6199.229 $\pm$ 3	-25(-14)	6199.235 $\pm$ 3	-19
OA	- KT	9499.474 $\pm$ 7	0	9499.470 $\pm$ 4	- 4(15)	9499.475 $\pm$ 7	1
OA	- OS	8608.461 $\pm$ 6	0	8608.420 $\pm$ 7	-41(-24)	8608.402 $\pm$ 3	-59
OA	- KR	4255.149 $\pm$ 3	0	4255.137 $\pm$ 8	-12(- 4)	4255.143 $\pm$ 2	- 6
IG	- KT	5812.173 $\pm$ 4	0	5812.153 $\pm$ 5	-20	*5812.141 $\pm$ 3	-32
IG	- KO	4673.147 $\pm$ 7	0	4673.147 $\pm$ 5	0	4673.141 $\pm$ 3	- 6
KT	- KR	5926.486 $\pm$ 3	0	5926.454 $\pm$ 6	-32(-28)	5926.454 $\pm$ 3	-32
KT	- KO	10457.789 $\pm$ 4	0	10457.796 $\pm$ 2	7(10)	10457.794 $\pm$ 4	5
KM	- IG	6122.935 $\pm$ 4	0	6122.917 $\pm$ 6	-18(- 8)	6122.941 $\pm$ 3	6
KM	- KR	4284.347 $\pm$ 2	0	4284.332 $\pm$ 6	-15(- 8)	4284.334 $\pm$ 5	-13
YM	- KO	4621.198 $\pm$ 5	0	4621.208 $\pm$ 4	10(13)	4621.205 $\pm$ 3	7
YM	- KM	11216.124 $\pm$ 4	0	11216.114 $\pm$ 5	-10(- 4)		
NZ	- IG	7145.667 $\pm$ 6	0	7145.681 $\pm$ 5	14	7145.663 $\pm$ 3	- 4
IS	- KR					3589.463 $\pm$ 4	0

Table 4. Result of the Kokawa network.

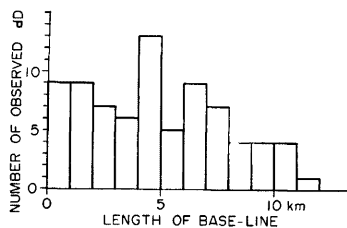
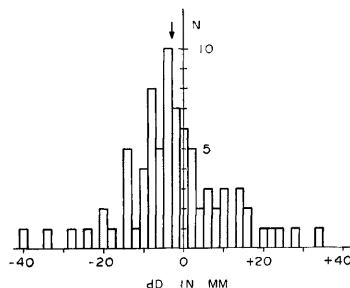
Base Line	Feb.14-16 1979		Dec.18-19 1979	
	D(m)	Δ D	D(m)	Δ D
Nakatsugawa - Okada	8634.116 $\pm$ 5 ^{mm}	0 ^{mm}	8634.096 $\pm$ 2 ^{mm}	-20 ^{mm}
Nakatsugawa - Shinden Hiroshiba	7743.710 $\pm$ 4	0	7743.669 $\pm$ 3	-41
Nakatsugawa - Kowada	6551.140 $\pm$ 3	0	6551.131 $\pm$ 3	-9
Nakatsugawa - Seyama	5977.769 $\pm$ 7	0	5977.758 $\pm$ 2	-11
Nakatsugawa - Higashishibuta	8582.917 $\pm$ 5	0	8582.907 $\pm$ 4	-10
Nakatsugawa - Nayama	9018.088 $\pm$ 4	0	9018.079 $\pm$ 4	-9

Table 5. Result of the Awa Ikeda network.

Base Line	Dec.01'78 Jan.09'79		Dec.10-11 1979	
	D(m)	Δ D	D(m)	Δ D
Hijirigo - Minenokubo	6467.279 $\pm$ 5 ^{mm}	0 ^{mm}	6467.294 $\pm$ 1 ^{mm}	+15 ^{mm}
Hijirigo - Funabara	7961.997 $\pm$ 4	0	7961.997 $\pm$ 4	0
Minenokubo - E.Satogawa	4353.231 $\pm$ 8	0	4353.229 $\pm$ 5	-2
Minenokubo - Kashiya	6892.909 $\pm$ 6	0	6892.911 $\pm$ 3	+2
Funabara - E.Satogawa	4282.328 $\pm$ 5	0	4282.337 $\pm$ 4	+9
Funabara - Kashiya	6044.069 $\pm$ 4	0	6044.078 $\pm$ 2	+9

Table 6. Result of the Kawanoe network.

Base Line	Nov.30'78 Jan.10-11'79		Dec. 11-12 1979	
	D(m)	Δ D	D(m)	Δ D
Gujo Obs. - Tenma Doi	10260.385 $\pm$ 11 ^{mm}	0 ^{mm}	10260.418 $\pm$ 9 ^{mm}	+33 ^{mm}
Gujo Obs. - Kamichi	6116.228 $\pm$ 4	0	6116.250 $\pm$ 4	+22
Gujo Obs. - Koigaike	5600.898 $\pm$ 2	0		
Gujo Obs. - Shiroyama	7265.512 $\pm$ 4	0	7265.536 $\pm$ 6	+24
Gujo Obs. - Ikenooku	9710.657 $\pm$ 4	0	9710.684 $\pm$ 4	+27
Sare - Koigaike	2668.880 $\pm$ 3	0	2668.877 $\pm$ 3	-3
Sare - Ikenooku	4654.328 $\pm$ 2	0	4654.328 $\pm$ 3	0

Fig. 9. Number of dD (difference in the length observed by Geodimeter 6BL No. 63194 at an interval of about one year between 1976 and 1979) versus the length of base-line.Fig. 10. Distribution of dD . The arrow shows the mean value.

測定誤差としてゼロのまわりに分布する筈である。平均値を求めてみると、図中に矢印で示したように、 -2.6 mm (標準偏差は 12.7 mm) となり、あたかも基線長が全般的にいて縮んでいるかのように見える。ジオディメーターの発振周波数が変化すると、直接測定値に影響が現われるが、1980年1月29日現在の周波数は 29970.024 kHz であり、購入当初 (1976年) のメーカーの検定値 29969.987 kHz に比べ 1.2×10^{-6} の増加を示している。これは4年間に亘っての変化であり、1年間の変化としては距離変化に換算して無視できる値になり、しかも、周波数の増加は測定距離のみかけの増加をきたすことになるから、これが平均値のマイナス方向へのずれの原因であるとは考えられない。今仮りにこの結果を、平均値ゼロ、標準偏差

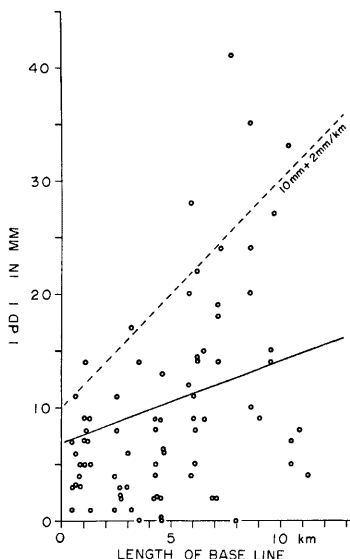


Fig. 11. Distribution of the absolute values of dD against the length of base-line. The solid line is the mean square error given by the maker.

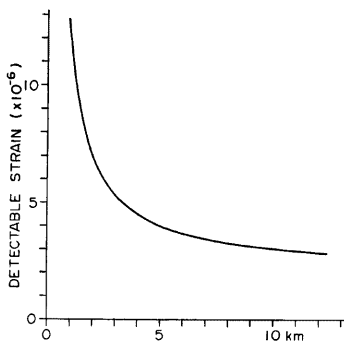


Fig. 12. Detectable strain versus the base-line length obtained from the dotted line in Fig. 10.

12.7 mm なる正規母集団から78個の標本を抽出するに際しての平均値のずれであると仮定すれば、その発生確率は0.07となり、約14回に1回の割合で起ることとなって、 -2.6 mm 程度の平均値のずれは偶然生じたものである可能性が強い。

次に、 dD の絶対値を基線長に対してプロットした結果を Fig. 11 に示す。点がほぼ一様に分布しているとみなされる上限を試みに描いたのが点線であり、これは $10 \text{ mm} + 2 \text{ mm/km}$ に相当している。この点線を越えている点は78個中の6個であり、したがって測量結果が $10 \text{ mm} + 2 \text{ mm/km}$ を越える距離変化を示すならば、90%以上の確率をもってその変化は有意であると考えてよい、ということができよう。この点線をひずみに引き直したものが Fig. 12 である。現在の測量の方法では、10 km を越える基線長を採用しても検出可能なひずみ変化は 3×10^{-6} 程度であり、6 BL による測量作業の容易さを勘案すれば 7~8 km の基線長を使用することが望ましいと考えてよからう。他方、メーカーによれば 6 BL の精度として、測定値の平均自乗誤差が $5 \text{ mm} + 1 \text{ mm/km}$ と与えられている。測定値の差をとって dD を求めると、その平均自乗誤差は $\sqrt{2}$ ($5 \text{ mm} + 1 \text{ mm/km}$) であり、これは Fig. 11 の実線で与えられる。これを越えていない点の数は50個であり、 $50/78 = 0.64$ となって正規分布のときの値0.68にほぼ等しく、したがってわれわれの測量はメーカーの指定した測定精度で行なっていると結論できる。そこで、次にこれらの測定精度を考慮に入れて、2. に示した測量結果を少し検討してみる。

4. 測量結果の検討

4.1 跡津川基線網 (Figs. 2, 3 および Table 1) この基線網は長さが短く、最長のものでも 1311 m

しかない。したがって気象的な影響としては1℃の温度変化でも1mmにしか過ぎず、Fig. 3にみられる測定値のばらつきはほとんどが器械的な原因によるものと考えられる。6本の基線のうち4本は測量の誤差を越える変化を示していないが、牧(1)―西漆山(2)および牧(2)―西漆山(2)の変化は1971年の値を基準とすれば-10および-12mmとなっており、10mm+2mm/kmの線に近い。1972年の値を初期値にとれば変化しないということになるが、1976年以後の結果にも大体縮みの傾向が現われていることも考え合わせると、この両基線は1年に1mm程度の割合で縮んでいる可能性がある。この短縮の方向は、Fig. 2から分るように、地形的に明瞭な跡津川断層の右ずれ運動と一致するものであり、事実とすれば非常に興味深い。ただし、これが仮りに断層面上でのクリープ的な運動であるとすれば、他の基線長にもその長さにかかわらず変化が現われ、牧(1)、(2)―西漆山(1)では同じく縮み、牧(1)、(2)―土ではのびが観測される筈であるが、Fig. 3からはそのような変化は読みとれない。したがって、断定的な結論を下すことはまだ危険であり、今後の測量結果を注目していく必要がある。

4.2 天生基線網 (Fig. 4 および Table 2) いずれの基線も測量精度を越える変化を示していない。

4.3 上宝基線網 (Fig. 5 および Table 3) 10mm+2mm/kmを越える変化を示している基線はHG―IG, OA―OS, IG―KT および KT―KR である。なかでもOA―OSの変化量は異常に大きく-59mmにも達している。1977～78年、78～79年とはほぼ等しい縮みを示していることから、実際に基線長が減少していると推定される。OS点は山際の軟弱な場所に標石を埋めており、局所的な移動を生じているのかも知れない。HG―IG, IG―KTの変化も、77～78年および78～79年と両年に亘って大体一様に縮みを示しているところからIG点の局所的な移動の疑いを生ずる。しかしながら、ほぼ同じ方向をもつIG―NZ, IG―KOについては上の変化と調和するような変化は認められない。KT―KRの結果にみられる-32mmの変化は77～78年に生じているものであり、78～79年には変化していないことから、77年の測量に誤差があったものと推定される。蔵柱観測室の伸縮計による観測結果との比較などは今後の問題である。

4.4 粉河・阿波池田・川之江基線網 (Figs. 6, 7, 8 および Tables 4, 5, 6) 中央構造線上のこれら三基線網はまだ2回の測量しか行っていないが、「粉河」の中津川―新田広芝および「川之江」の具定展望台―天満土居の78年と79年の差は測定誤差としては大きすぎる量である。これが実際の変動であるか、あるいは単なる測量誤差であるかの判定は今後の測量の反復にまたねばならない。

5. あとがき

跡津川基線網における光波測量は1971年に第1回目を実施して以来8年が経過しているが、その中に測量誤差の範囲(10mm+2mm/km)を越えそうな変化を示している基線があり、注目される。同じ中部地方の顕著な活断層である阿寺断層でも1966年以来目立った変化は観測されておらず⁶⁾、もしこれが跡津川断層の実際の変位を示すものであれば非常に興味深いものであるが、確定的な結論を得るためにはもう少し時間の経過を必要とする。その他の基線網については、現在はまだ初期資料の収集段階としてとらえるべきであり、断層運動、あるいは地殻変動の研究のためには今後も改測を継続していくと同時に、できるだけ誤差の少ない測量方法を検討し実行していくことが大切である。

終りに臨み、標石の埋設を快くお許しいただいた土地所有者並びに関係各位、測量実施に当り数々の御便宜、御協力を給った防災研究所徳島地すべり観測所の方々、測量に参加していただいた大学院生 石川有三、三上直也両氏に心よりお礼を申し上げる次第である。なお、この研究のうち中央構造線に関する3基線網の設置と測量は昭和53～54年度文部省科学研究費補助金一般研究(C)(課題番号354114)「光波測量による中央構造線の断層運動に関する研究」(代表者・田中寅夫)によって行われたものであること、および測量資料の整理は京都大学大型計算機センターの電子計算機によるものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 田中寅夫, 細 善信, 土居 光, 加藤正明, 小泉 誠, 和田安男: 跡津川断層における光波測量 (第1報), 京都大学防災研究所年報, 第20号 B-1, 1977, pp. 69-75.
- 2) 和田博夫, 三雲 健, 小泉 誠: 飛騨地方北部特に跡津川断層付近の地震活動と発震機構, 地震, 第2輯, 第32巻, pp. 281~296.
- 3) 土居 光, 加藤正明, 和田安男, 三雲 健: 上宝における地殻変動の連続観測, 測地学会誌, 第22巻, 1976, pp. 149-159.
- 4) 国土地理院 地殻調査部: 四国地方の精密変歪測量, 地震予知連絡会報, 第19巻, 1978, pp. 142-143.
- 5) 岡田篤正: 中央構造線の第四紀断層運動について, 中央構造線, 東海大学出版会, 1973, pp. 49-86.
- 6) 東京大学地震研究所 地殻変動移動班: 阿寺断層地域における光波測量 (1966年3月~1978年10月), 地震予知連絡会報, 第22巻, 1979, pp. 130-132.