

光波による地殻変動観測の精度について

大谷 文夫・田中 寅夫

ON THE ACCURACY OF THE OBSERVATION OF CRUSTAL DEFORMATIONS BY ELECTRO-OPTICAL MEANS

By Fumio OHYA and Torao TANAKA

Synopsis

The accuracy of the electro-optical distance measurements by an AGA Geodimeter for the purpose of the observation of crustal deformations is statistically estimated from the measured values for 3 years. Standard error of final result L_m' is 5.62 mm which consists of random error 2.20 mm and systematic delay line error 5.17 mm. But revision of the calibration tables decreases the latter to 3.41 mm. It means that repeated revisions of the calibration table ensure the accuracy of $\pm (3-4)$ mm.

An approach to estimate temperature distribution on the topographic profile for the accurate meteorological correction is tried. It is suggested that the correction to the accuracy comparable to the machine error will be possible by the temperature measured on the ground.

Measurements with high accuracy in the crustal deformation observatory are also reported.

1. ま え が き

地殻変動観測は、地震の発生前後の地殻歪の変化とかテクトニックな地殻の運動等、地殻物理学、地震学に関する情報を得る手段として、非常に有効なものだと考えられている。水平変動に話をかざると、その最も主力をなしているのが坑道における $10\text{m} \sim 10^3\text{m}$ のスパンの伸縮計による連続観測である。一方測地測量においては三角測量を繰返し $10^4 \sim 10^5\text{m}$ 間隔の一等三角点の位置の変化から地殻変動を検出している。

近年、 10^3m オーダーの基線長の測定が光波測量により簡単に実施できる様になり、地殻変動観測の新しい手段として重宝されている¹⁾。これは測線長が連続観測と三角測量との中間に相当するだけでなく、三角測量が相当広い地域内で多くの夾角を測量して、網平均により辺長を計算する必要があるが、非常に手数がかかり頻度の多い測量が不可能であるのに対して、辺長を直接に短時間で測定可能という意味でも、連続、測地両観測の中間に位置するといえる。この光波測量の精度は、三角測量よりも幾分良いといわれているが²⁾、 10^{-10} にも達する連続観測の精度と比較することはできない。現在までに国内では松代群発地震地域³⁾ 国外では San-Andreas Fault 地域^{4), 5)} 等で、光波測量による地殻変動観測の成果があがっているが、両地域共、一般に地殻変動に興味を持たれ観測されている地域の中でも特に変動速度が大きい地域である。普通の地域での観測にあたっては、その測量結果の解釈の前に精度について十分な吟味が必要とされる。また反復測量の間隔を決定するにあたって、その地域の歪蓄積速度の予想と共に精度（分解能）が考慮されねばならない。

地震予知計測部門では AGA 社製ジオディメーター 6 型（器番 No. 6618）を使用して 1968 年以来、光波測量を実施しているが、上記の観点から今までの観測データを使用してその精度を検討してみる。又、地殻変動観測坑内で実施している高精度観測についても報告する。

2. ジオディメーターの原理⁶⁾ (Fig. 1)

光波測距儀「ジオディメーター」の原理については多くの解説がなされている⁷⁾ が、しだいに改良されて

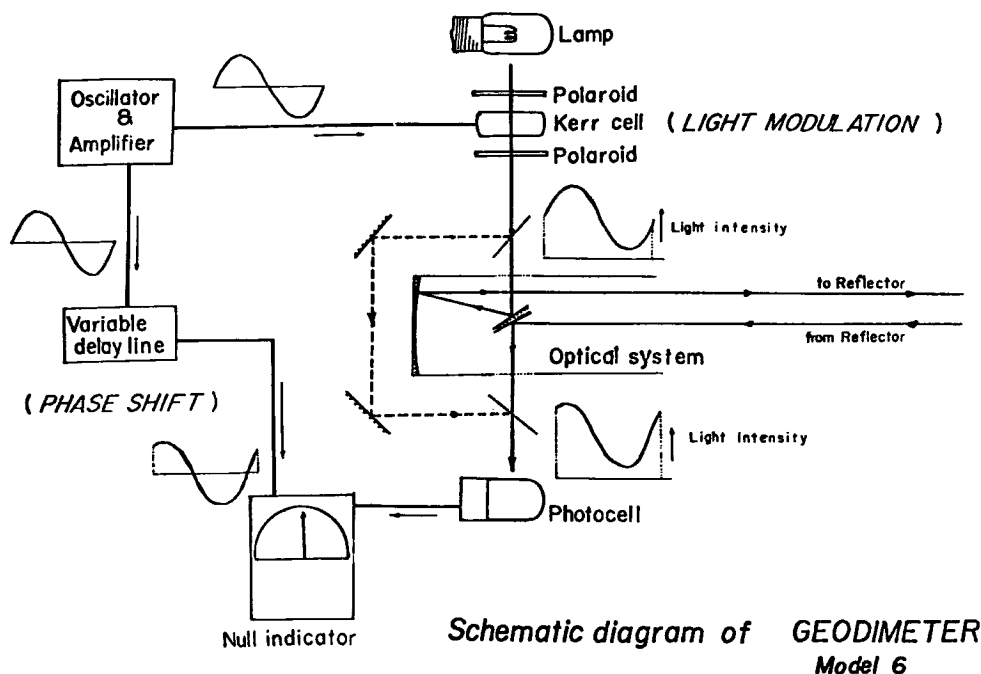


Fig. 1 Schematic diagram of Geodimeter Model 6.

形式により細部は異なっているので、後節の理解を助けるため6型の機構、原理を略説する。

Fig. 1 において右半分は光学系を、左半分は電気系を示す。ランプを出た光は互いに直交した偏光面を持つ2枚の偏光子にはさまれたカーセルに入射する、カーセルには水晶発振器から約 30 MHz の高周波電圧が加えられており、Kerr 効果により光は Cell 内部のニトロベンゼンを透過する時に加圧電圧に応じて複屈折をする結果、第2偏光子を出た光は、同じ周波数で変調されている。この光を光学系により測線の他端に設置した反射鏡に向け発射し、その反射光線を受光して光電管に導く。入射光は発射光に対して

$$\phi = \frac{\omega l}{C} \dots\dots\dots (1)$$

但し C: 光速

ω : 変調電圧の角周波数

l : 光路長

だけ位相がずれている。一方水晶発振器出力は同時に、環状コイルと単巻ループで構成された可変遅延回路（デレーライン）にも供給される。デレーラインでは手動調整により位相を任意にずらし、その出力は光電管出力と共に零指示器に入る。この指示器は2つの入力位相が一致している時、零指示をするので、デレーラインを調節してその出力位相を光電管の出力位相と一致させることができる。

実際の測定手続としては、零を指示している時のデレーラインの目盛りを読み取る。この値は別に用意された較正表により長さ R に換算される。一方 **Fig. 1** 中に破線で示した短絡光路についても、同様に測定し、短絡光路長 C を得る。この短絡光路は機械の内部に不変長で構成されており、 R と C とはレバーの切替えて交互に測定される。こうして得られる2つの値の差 $R - C$ が求めるべき長さである（短絡光路の基準点を起点とする）。

ところで変調光の波長は 10 m 前後なので、位相差 ϕ は 2π に比較して非常に大きく、デレーラインでは

2π の整数倍に対する端数 (ϕ_r) しか求まらない。

$$\phi = 2n\pi + \phi_r \quad \dots\dots\dots (2)$$

但し n : 整数, $0 \leq \phi_r < 2\pi$

この n を求めるために発振器は 3 つの周波数 ($F_1 \sim F_3$) を発振し, 各々の周波数に対する R 及び C ($R_1, \dots, C_3$) を求める。これらに対する位相差の端数を $\phi_{r1}, \phi_{r2}, \phi_{r3}$ と表わすと, (1) より $l = C\phi/\omega$ であるから

$$l = \frac{C(2n_1\pi + \phi_{r1})}{\omega_1} = \frac{C(2n_2\pi + \phi_{r2})}{\omega_2} = \frac{C(2n_3\pi + \phi_{r3})}{\omega_3} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで $C\phi_{ri}/\omega_i$ は $R_i - C_i$ として観測されているので $\omega_1: \omega_2: \omega_3$ が既知であれば, 整数値 n_1, n_2, n_3 も求まり, l が求まることになる。最終結果は各周波数に対して求まった 3 つの l の最確値に各種補正 (気象, 傾斜等) を施こして得られる。

3. 周波数検定

前節から明らかな様に, 光波測量の精度は光速 C の精度と共に周波数 $\omega/2\pi$ の精度によって直接に支配される。そこで周波数の経年変化の有無を調べるため周波数測定を行なったので, その結果を **Table 1** に公称値と共に示す。公称値の許容誤差 $\pm 2 \times 10^{-6}$ は周波数セッティングの誤差 1×10^{-6} と水晶振動子の老化による誤差 1×10^{-6} を合わせたものであるが, これは発振回路自体の性能からの制限ではなく, 後に述べる気象補正の精度を考慮すると, これ以上の精度は無意味であるためと考えられる。3 つの水晶振動子は恒温槽に納められているが, そのサーモスタットの点滅によりわずかに周波数が変化する。**Table 1** に示して

Table 1 Modulation frequencies and result of their calibration.

		F_1	F_2	F_3
Nominal value *		29970.000 kHz	30044.920 kHz	31468.500 kHz
Measured value (1971-2-10)	*1	29969.977	30044.920	31468.464
	*2	70.005	.942	.473

* — Frequency accuracy $\pm 2 \times 10^{-6}$ ($= 0.06 \text{ kHz}$).

*1 — Minimum value when the thermostat in the crystal oven is on.

*2 — Maximum value when the thermostat in the crystal oven is off.

いるのは 5 回の点滅に対してその極値を各々平均した値であるが, それぞれの測定値は平均値に対して $0.001 \sim 0.002 \text{ kHz}$ のずれしか示していないので, 表に示した値を最大値及び最小値と考えてさしつかえない。いずれの周波数共, 許容誤差内に充分おさまっている。最も大きくずれている F_3 の最小値でも 36 Hz で許容の 60 Hz の 6 割である。1 度の測定では, それまでずっと周波数誤差がなかったという保証はないが, 一応, 周波数は規定値であったものとして以下の議論を進める。

なお測定はタケダ理研製 TR-5578 C ユニバーサル・カウンタを使用した。ジョディメーターのデレーライン出力をコンデンサを介して直流分をカットし, カウンタに接続して測定した。

4. 機 械 定 数

機械の構造上生ずる, 観測された長さに補正すべき定数である。基石に合わず指標と, 測定上の零点との距離で, ジョディメーター定数と反射鏡定数とに分れる。前者は No. 6618 においては $-0.130 \pm 0.003 \text{ m}$ であるが, この値は機械が組み立てられた状態では不変であるため, 絶対測定値に対しては $\pm 0.003 \text{ m}$ の誤差を生ぜしめるが, 長さの変化分のみを目的にする時には影響しない。反射鏡についても同じ事情である。本体, 反射鏡共に三脚上にセットする時に底面が水平でないと見掛け上定数に変化するが, 気泡式の水平器 (本体には内蔵している) を使用するだけで充分避けることができる。

5. 各測定値の分散

当部門に於いて今まで実施してきた測量は延 100 測線にのぼる⁸⁾。各測線の測量にあたっては、通常 10 回行なってその平均値をとっている。その結果、現在までに約 850 回の測量データがあるので、これらの読取値を統計的に検討してみた。

まず $C_1 \sim C_3$ の値の分散状況を Fig. 2 に示す。これは 100 測線各々における平均値の度数分布である。 C は常に一定値をとる筈だが、実際には図に見られる様にかかなりのばらつきを示している。(標準偏差値はすべて Table 2 にまとめた。) C の値の時間的な変化を調べると、24 時間位ではほとんど変化せず、数日、数

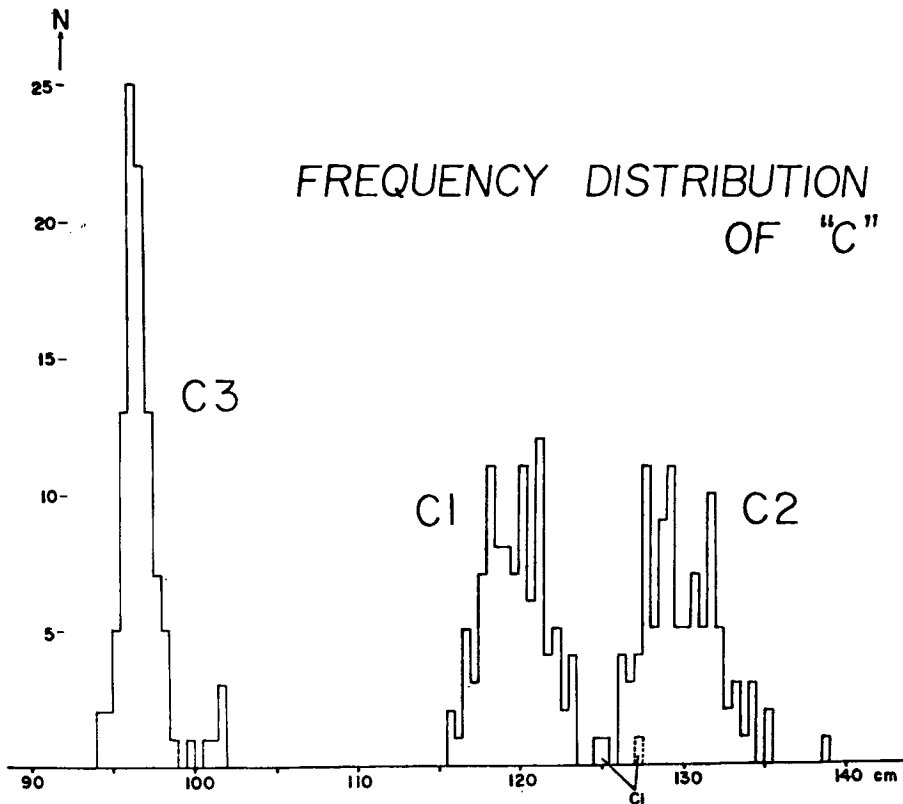


Fig. 2 Histogram of mean C values.

Table 2 Standard deviations.

Frequency	F 1	F 2	F 3	Histogram
mean C	36.2 ^{mm}	27.2 ^{mm}	12.1 ^{mm}	Fig. 2
C	9.55	11.78	9.48	Fig. 3
R	11.23	10.59	11.40	Fig. 4
L'	10.69	12.65	12.76	Fig. 6
L' (10 times mean)	3.38	4.00	4.04	—

カ月という時間の経過によって徐々に変化しているが、経年変化として傾向づけられる様な規則性、方向性は見られない。この変化する原因は明らかではないが、短絡光路の物理的長さは変化しないから、電子回路に原因があるものと思われる。デレーライン内部のインダクタンスやキャパシタンスの微細な変化でも測定値は直接影響を受ける。次に各測線毎の測定において、各々1回毎の測定値のその測線における平均値からの偏差の度数分布が Fig. 3 である。Fig. 2 が約3年間に於ける C 値の分散状況であるのに対して Fig. 3 は1測線の測定に要するせいぜい1~2時間の C 値の分散状況である。この分散原因は読取誤差の他、前と同様に電子回路の特性変化も一因であろう。発振回路のトランジスター及び水晶振動子は恒温槽内に納められているが、他の部分は外気温の影響を受け、直射日光による温度上昇も考えられる。標準偏差を比較すれば、どの周波数においても短時間の平均値からの偏差 (Fig. 3) の方が、平均値自身の長時間変化における標準偏差 (Fig. 2) よりも小さい (Table 2)。また分布のとがり (尖度) を比較してみると、Fig. 3 の方がピークが鋭く、裾野が広がっている。これは Fig. 2 では偶然誤差がかなり消去されていると共に、各平均値が一定の値に収束すべき傾向が著しくないのに対し、Fig. 3 では生の観測値の偏差であるから、極端

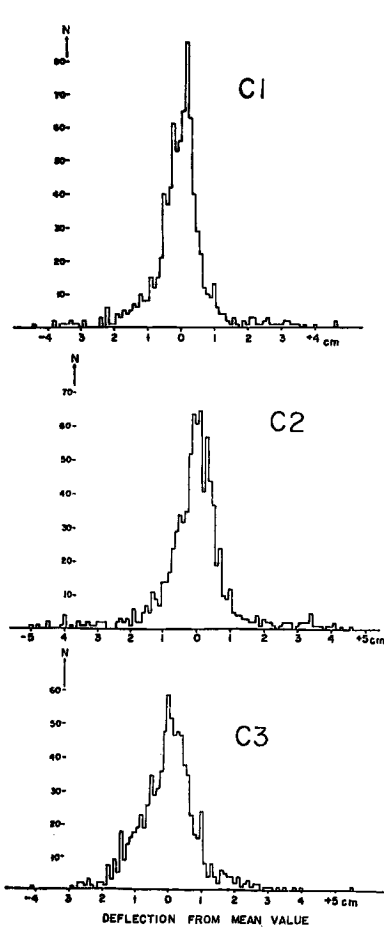


Fig. 3 Histogram of deflections from mean values (C).

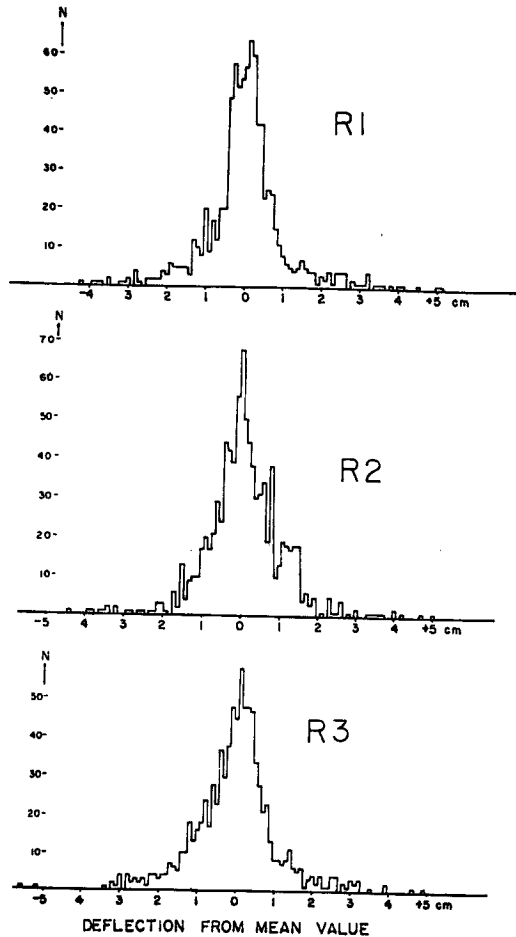


Fig. 4 Histogram of deflections from mean values (R).

な誤差がすべて現われていることと、平均値からの偏差は、正規分布等を想定すれば0にピークを持つことで説明される。

次に R の分散状況を調べてみる。 R の値そのものは測量する距離によって変化するので、Fig. 2 に対応する図はかけないが、Fig. 3 に対応して、各測線毎に各々の測定値のその平均値からの偏差を表わしたのが、Fig. 4 である。ここで注意すべきことは、 C の場合、機械内部のみを通過した光で測定しているのに対して、 R は大気中を数 km 往復した光について測定していることで、当然ノイズが多く入ってくることが予想されるが、それにしては標準偏差が小さい(Table 2)。周波数2にいたっては、 R_2 の標準偏差の方が、 C_2 の標準偏差よりも小さくなっている。これは大気中を通過するために発生するノイズのための偏差が、機械内部に原因をもつ偏差 (C の分散と同性格のもの) に比較して非常に小さいためと思われる、 R の標準偏差と C の標準偏差との間には有意差はないといって良い。

各測線毎の R の標準偏差と C の標準偏差との関係を見るためにその比率をとり測線長に対してプロットしたのが Fig. 5 である。(各周波数の区別はせず。) 全般的には距離が長くなるほど $S.D.(R)/S.D.(C)$ は

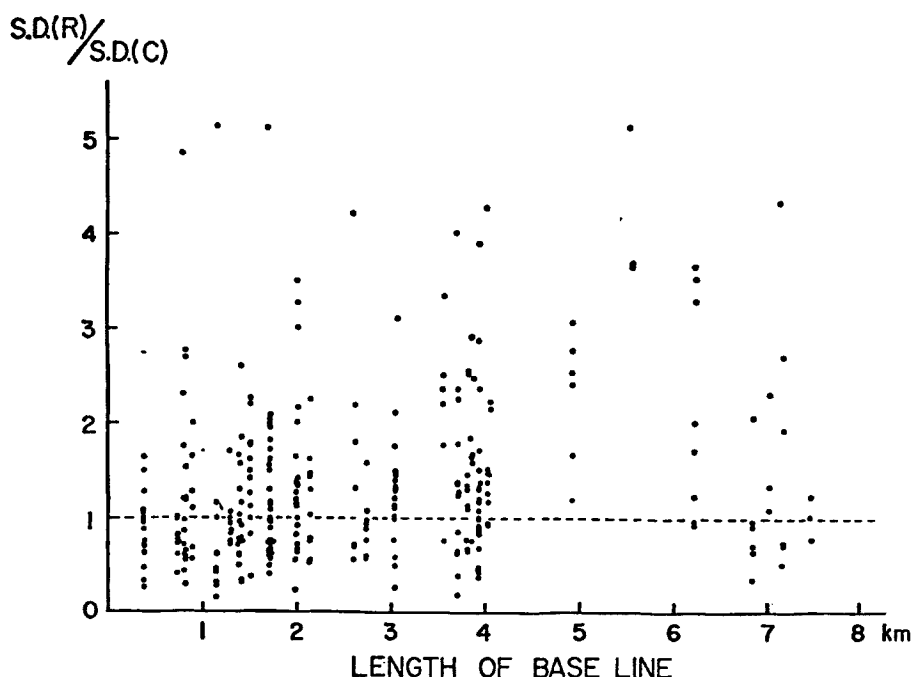


Fig. 5 The ratio of standard deviations of R values to those of C values.

大きくなる傾向がわずかに見られる。しかし短距離で大きい値をとるものや、長距離で1以下の値をとっているものも少なくない。又 R の偏差分布と C のそれとは顕著な差異が認められないのに、破線で示した $S.D.(R)/S.D.(C) = 1$ の付近に特に集中する様子も見えないことから、 R と C の標準偏差は相関が少ないものと思える。

次に $(R-C)$ の分散状況を調べてみた。Fig. 6 に示しているのは、 $R-C$ に対して $2\pi C n_1 / \omega_1$ を加え (L) 気象補正した値 (L') の測線毎の平均値よりの偏差分布であるが、分散状況は $R-C$ のものを保存していると云える。この分布の標準偏差は R, C のそれに比べてわずかに大きい。これは Fig. 5 よりの推論、 R, C の値のばらつき相互の間には相関が少ないことをうらづけている。しかし Fig. 2 の平均 C 値の分散に比較

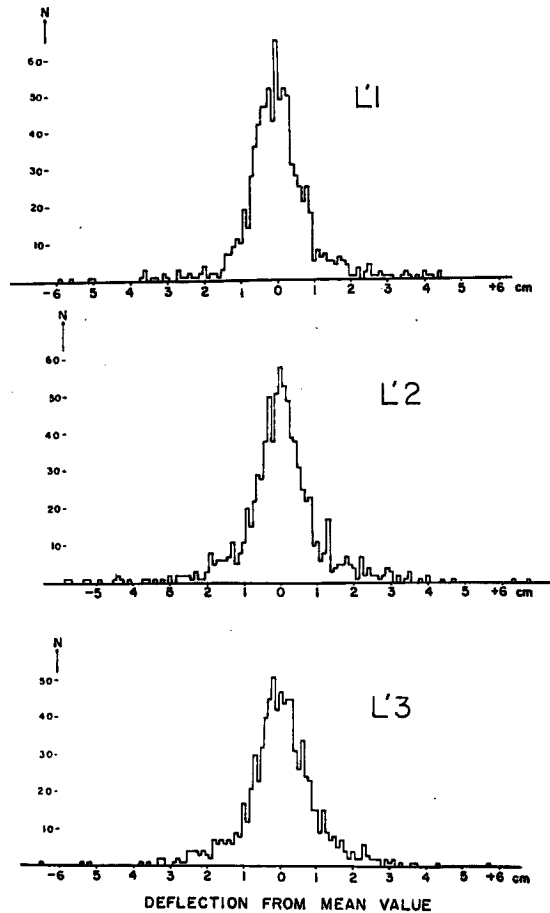


Fig. 6 Histogram of deflections from mean values (L').
(These patterns coincide with those of $R-C$.)

すれば、圧倒的に小さい。これが R の読みから直接測定結果を出さずに $R-C$ という操作を行なっている理由である。即ち機械状態の漂動のうち時間スケールの長い分を $R-C$ で除去しているのである。なお周波数 3 の場合、標準偏差値そのものは L'_3 の方が C_3 よりも大きくなっているが、 L'_3 は他と比べて極端に偏差の大きいものが含まれているために標準偏差が大きくなっているのに対し、Fig. 2 の C_3 の分布には極端な値がないことを考えると、 L'_3 も実質的には C_3 よりも小さい分散であると考えられる。

この L' の分布の標準偏差は 1 回毎の測定における周波数毎の測定結果の平均誤差の指標といえる。この段階で考えられる誤差は、機械状態の漂動、読取誤差、ノイズの影響等の偶然誤差である。 $R-C$ で除去できなかった短時間のゆらぎは、他の偶然誤差と共に、測定回数を増して平均することにより減少させられる。 n 回の測定の平均をとれば誤差伝播法測により平均値の平均二乗誤差は各々の測定の標準誤差の $1/\sqrt{n}$ になる。Table 2 には、当部門での標準測定回数 $n=10$ に対する平均二乗誤差も示してある。 $L'_1 \sim L'_3$ 共 3~4 mm の誤差と考えられる。

6. デレーライン較正表の誤差

デレーラインの読み取りは 3 桁のデジタル目盛を読み取るのであるが、これを長さに換算するために、

実験的に各々の機械について求められた較正表を用いる。この較正表に含まれる誤差の影響は次の様に表現できる。較正表記載値を引数 a に対して $P(a)$ としその誤差を $\varepsilon(a)$ とする。

$$\begin{aligned} R-C &= \{P(r)+\varepsilon(r)\}-\{P(c)+\varepsilon(c)\} \\ &= \{P(r)-P(c)\}+\{\varepsilon(r)-\varepsilon(c)\} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

真値 $\{P(r)-P(c)\}$ は $C\phi_r/\omega$ に等しいので、 $\{\varepsilon(r)-\varepsilon(c)\}$ を e と表わすと、(3) 式から各周波数に対して

$$L_1 = \frac{C(2n_1\pi+\phi_{r1})}{\omega_1} + e_1$$

$$L_2 = \frac{C(2n_2\pi+\phi_{r2})}{\omega_2} + e_2$$

$$L_3 = \frac{C(2n_3\pi+\phi_{r3})}{\omega_3} + e_3$$

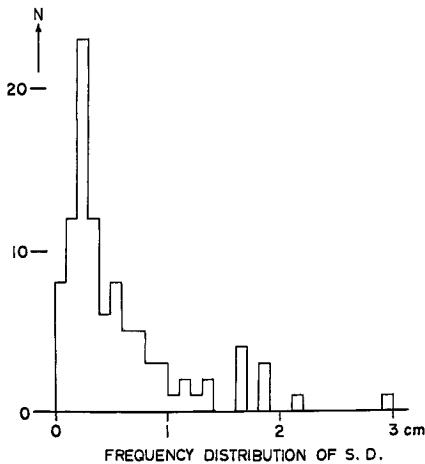


Fig. 7 Histogram of standard errors of L'_m .

$$\left(L'_m = \frac{L'_1 + L'_2 + L'_3}{3} \right)$$

較正表誤差 E_c は

$$5.62^2 = E_m^2 + E_c^2 \quad \text{より}$$

$$E_c = 5.17 \text{ (mm)}$$

となる。

メーカー仕様では、電気部品の老化による影響も含めてデレーライン誤差は 7 mm まで許容されるが、この点からは、5.17 mm は妥当な値と云えよう。

7. デレーライン較正表の作成

デレーライン読取値を長さに変換する較正表は、予めメーカーにて作成されている。第5節で述べたのは、No.6618 に対して 1967 年 11 月 9 日に作成されたメーカー製の較正表にもとづいたものである。表の値自体の平均二乗誤差 (第6節の $\varepsilon(a)$ の二乗平均) は 3 mm 程度だとされているので、 $e=\varepsilon(r)-\varepsilon(c)$ の平均二乗誤差は約 4 mm となり、3 周波数の平均値の平均二乗誤差は 2 mm 強となる。これに比較すると前節で得た結果 5.17 mm は少し大きすぎるわけで、較正表の誤差が 3 mm 以上になっているのではないかと考える。これは較正表を作り直せば解決することであり、次の様な方法⁶⁾で較正を行なった。Photo. 1 に示す様に、反射鏡を、ジョディーメーター本体の光軸上を前後に移動できる様に支持し一定距離づつ動かしていく度に、 R 及び C の値を読取る。こうして得た値からデレーライン読取値を引数とする表に作り直す

即ちデレーライン較正表に誤差があれば、一致すべき L_1, L_2, L_3 が一致しなくなる。しかも各々の誤差 e_i は系統誤差であるため、10 回平均値を求めても、その影響からのがれる事はできない。一つの目安として各測線毎に各周波数に対して L'_i の 10 回平均値 L'_{mi} を求め、 $i=1\sim 3$ まで平均した L'_m の標準誤差 (L'_{mi} の標準偏差) の度数分布が Fig. 7 である。最頻値は 2.5 mm であり、平均値は 5.62 mm となる。もし較正表の誤差がなかったものと仮定すると、Table 2 に示された平均二乗誤差を持つ $L'_{m1}\sim L'_{m3}$ の相加平均の平均二乗誤差 E_m は、

$$E_m^2 = \frac{3.38^2 + 4.00^2 + 4.02^2}{9}$$

$$E_m = 2.20 \text{ (mm)}$$

となる。

2.2 mm の予想値に対して、実際には 2 倍以上の誤差があるということは、周波数の誤差と、デレーライン較正表の誤差に原因があると考えられる。周波数の誤差による影響は見積りが困難であり、上のすべてを較正表誤差に起因させると、

ためには、デレーライン読取値と長さを smooth な関数によって表現するため、観測値に基づき小区間内で最小二乗法で三次式近似を行ない、この区間を running させて、全領域で両者の関数関係を決定した。この様にして得られた校正表から、ほぼ 1/4 波長分（最近接零点同士の距離）の間隔を持つ 2 つの引数欄の値をとり出して比較したのが Table 3 である。測定値は R, C 共に同じ表を使って求めた後、減算をするので、絶対値ではなく 2 つの数値の差にのみ着目すれば良い。2 カ月の間隔を置いて実施した 2 回の校正結果を示しているが、その期間中にデレーラインの大きな状態変化はなかったと考えると、5 月 1 日と 6 月 29 日とで、周波数 1 と 3 では 4 mm の差、周波数 2 では 6 mm の差があり、これらの数値から判断するかぎり平均二乗誤差は 2-3 mm と云える。

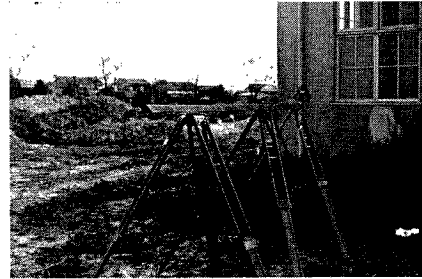


Photo. 1 Revision of calibration tables
(slideway for reflector).

Table 3 Revision of calibration tables.

Frequency	Date Arguments of calibration table	Nov. 9, '67	May 1, '70	June 29, '70
F 1	400	519 mm	493 mm	562 mm
	2 700	3 072	3 057	3 122
	difference (2 700-400)	2 553	2 564	2 560
	comparison with (Nov. 9, '67)	—	+11	+7
F 2	400	511	444	459
	2 700	3 067	3 006	3 072
	difference (2 700-400)	2 556	2 562	2 568
	comparison with (Nov. 9, '67)	—	+6	+12
F 3	400	356	415	382
	2 500	2 742	2 803	2 766
	difference (2 500-400)	2 386	2 388	2 384
	comparison with (Nov. 9, '67)	—	+2	-2

一方 6 月 29 日の校正による表を使って、逆にそのもとになったデータのデレーライン読みから長さを求めて実際の反射鏡の位置と比較してみると、その平均二乗誤差は次の様な値となる。

周波数	1	平均二乗誤差	3.28 mm
	2		3.35
	3		3.10

以上のことから上記の方法によってユーザーで校正表を作成しても、メーカーによって作成されたものと同程度の精度のものが作れることが分った。

次に実際にその校正表を使ってすべてのデータを処理して、1967 年の校正表によるものと、どちらが良い結果が得られるかを調べた。その判定基準は L'_m の標準誤差が小さくなる方を採用した。その結果は新しい表を使った方が良い結果を与えるものが少なからずあることが明らかになった。時間的にはやはり、校正を実施した日に近い時には新校正表の方が適当なものが多いとは云えるが、地域によって、例えば桜島地域は常に新校正表の方が良い値を与える測線が多い。又 '70 年 11 月以降の測量はすべて旧校正表の方が良い結果を与える。従って時間的にデレーラインの状態が変化することがあり、新たに校正を行なうことによりそれを償う事が出来ると共に、各校正毎に、非常に誤差の少ない部分と、多い部分とがあり、たまたま誤差の小さい部分を使用する測線では、新校正表で誤差の大きい場合よりも良い結果が得られるとも考えられる。新しい結果を用いて第 6 節の計算をやり直すと、全データから求められた L'_m の標準誤差の平均は 4.01mm

に減少する。さらに前と同様に E_e を求めると較正表平均二乗誤差は 3.41 mm となり、ほぼ満足すべき値を得る。

8. 気象補正について (地形の考慮)

(3) 式から明らかな様に光速度の精度は測定精度に直接影響を及ぼす。光速度としては IUGG 決議によって採用式が決められている²⁾ が、ジオディメーターの場合、実効波長 550 mμ に対して、変調光に対する実効屈折率が $n_g=1+30.4 \times 10^{-6}$ となり、結局距離 D に対する補正量は次の式で表わされる。

$$C_{orr} = \left(309.2 - \frac{83189.40}{273.2 + T} \cdot \frac{P}{760} \right) \cdot 10^{-6} D$$

但し T : 気温 ($^{\circ}\text{C}$)

P : 気圧 (mmHg)

10^{-6} の変化は $\Delta T=1$ 又は $\Delta P=3$ に相当するため、正確な気象観測が要求される。

まず気圧については、現在アネロイド気圧計を使用しているが、測量前後に水銀気圧計で較正することによって ± 1 mmHg 程度の精度は充分保たれるし、光路上の気圧の変化も海拔高度の変化により指数関数的に変化するのでジオディメーター側と反射鏡側とで観測をすることで充分であると思われる。

一方気温は、地上に於いて精度の高い観測をするのは比較的容易であるが、ここで必要なのは全光路における平均気温であり、これを地上の観測値より推定するのはかなり困難である。光路の途中において気象観測を実施するのが理想的であり⁴⁾、繫留気球による観測も試みられている⁴⁾⁹⁾ が、当部門においては人員等の制約から測線両端点で地上気温を観測し、気温補正は両者の平均値に基づいて行なっている。しかし気温は一般的に海拔高度並びに地上からの高さに伴って変化するので、両端点を除く全光路が地上からかなりの高さにある光波測量測線の場合は、地上の値のみを使用しただけではかなりの誤差が予想される。又個々の測定時を考えると日照、風、地形等の状態でかなり複雑な分布をする。それ故、地上における気温観測のみにたよる場合、何らかの方法で地上値から全光路上の平均値に換算するか、同一測線では毎回一定の偏差が期待される様な条件で測量を実施することが要求される。

光路上の平均気温を推定する試みは田島ら¹⁰⁾ によって高さにより平均気温及び日変化振幅が減少する気温分布を仮定して行なわれている。ここでは田島らの式に項を付加して、実測値のある場所ではその値と一致する気温分布を与える式 (Fig. 8 上段 (5) 式) を使って、全光路上の平均気温を求め、この値によって気象補正を行なってみた。日変化の位相が高くなるに従って遅れていくことは考慮していない。Fig. 8 下段の様な地形を考えた場合最高気温時及び最低気温時の光路上の気温分布を中段の図に実線で示す。実際の計算にあたっては T_m 及び t_0 は近くの気象官署での 24 時間気温観測値のフーリエ展開 24 時間周期項の振幅及び位相を使った。 $F(t)$ 及び T_0 は測量時にジオディメーター本体設置点及び反射鏡設置点で観測した値と (5) 式から求めたその場所、時刻での値が一致する様に決める。Fig. 9 が計算された気温分布の一例で、吉松地域木原牧場測線の 1970 年 5 月のデータを使用している。最下段が地形断面で、上の分布図は横軸が距離 (下の断面図に対応)、縦軸が時間 (1 回毎の測量に対応する) を示す。太線は 1°C 毎の等温線である。 $F(t)$ を決定する時ジオディメーター側の気温に fit させた時 $F_0(t)$ が求まり、同様に反射鏡側に対しては $F_R(t)$ が求まる。Fig. 9 のうち上図は $F_0(t)$ と $F_R(t)$ を両端からの距離に応じて比例配分したものを $F(t)$ として使用し、中図は全光路上で $F_0(t)$ 、下図は $F_R(t)$ を採用したものである。今後の説明及び図中ではそれぞれ “G&R”, “G”, “R” として区別していく。G&R の場合、気温減率 λ は両端の気温差と高度差から一意的に決まる。しかし、G, R の時は λ を仮定する必要がある。Fig. 9 では $\lambda = -0.00977 (^{\circ}\text{C}/\text{m})$ (乾燥断熱減率) を使っている。b 値は上図が 1/300, 中図が 1/200, 下図が 1/500 としている。

計算は全測線断面を 4 つに分類し各タイプ毎に 3 測線を選び計 12 測線で '69 年及び '70 年のデータを使用した (Table 4)。 λ 値は -0.006 , -0.008 , -0.00977 , b 値は 1/200, 1/300, 1/500 を組み合わせた。

$$T(t, h, h') = T_0 + \lambda h + \exp(-bh') \cdot T_m \left(\cos\left(\frac{t-h}{24h} 2\pi\right) + F(t) \right) \quad (5)$$

λ Lapse rate of atmosphere temperature
 h Height above sea level
 h' Height above ground surface
 T_m Amplitude of daily variation of temperature

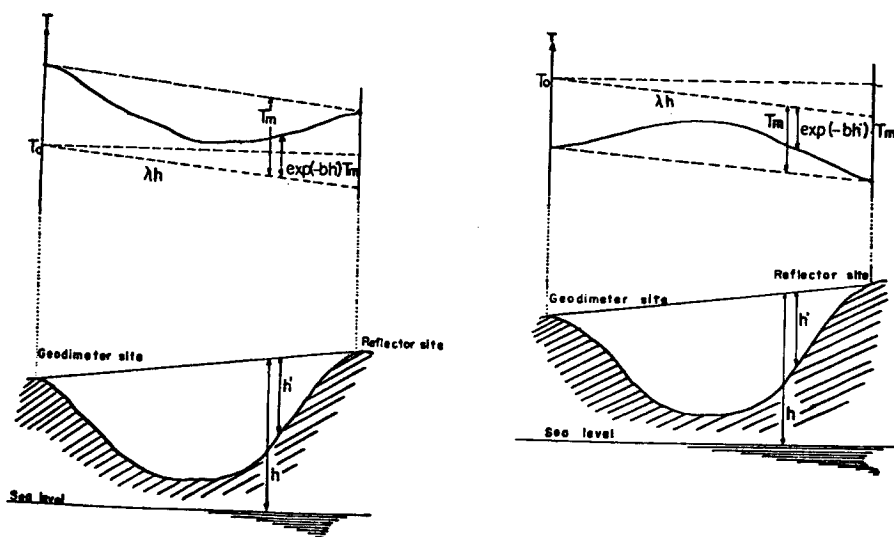


Fig. 8 Equation used in the calculation of temperature distributions (above) and qualitative schemata of temperature distributions and topographic profiles (below).

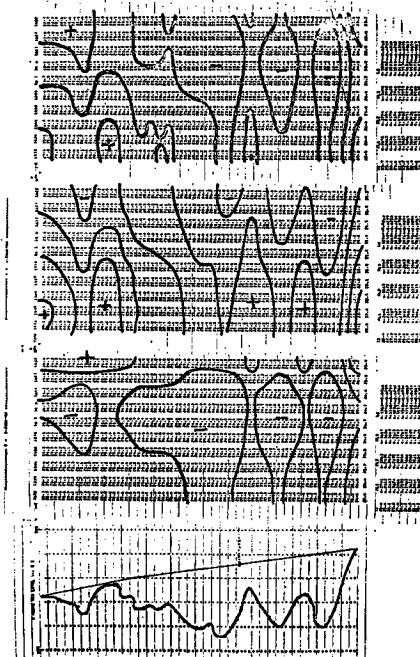


Fig. 9 Examples of calculated temperature distributions on the light path (above).
 Abscissa corresponds to profile (below) and ordinate to time.

upper G & R $b=1/300$
 middle G $b=1/200$
 under R $b=1/500$

$\lambda = -0.00977$ ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)

Table 4 Classification of base lines by topographic conditions.

Topographic type		Area	Base line	Length
A	Horizontal light path (above plane)	Kochi	Hissan	3 555 m
		"	Mimase	4 910
		Wakayama	Wakayama-jo	3 865
B1	Sloped light path (above plane)	Sakurajima	Ryugamizu	7 150 m
		Kochi	Syorenji	6 215
		Wakayama	Nagusayama	5 545
B2	Sloped light path (above hills or mountain)	Yoshimatsu	Uonogoe	3 935 m
		"	Kihara-bokujo	3 715
		"	Mekuragoe	3 935
C	Steeply sloped light path	Sakurajima	Saido-chugaku	3 040 m
		"	Shiroyama	3 045
		"	Hikinohira	1 415

計算結果を各地形タイプから一つずつ選び、測線断面と共に Fig. 10~Fig. 13 に示す。補正結果のグラフは縦軸が補正された長さ（零点は従来の両端気温の単純平均値を使用した時の長さをとっており、求めるべき長さの最確値という意味ではない）、横軸が λ で、同じ b 値のもの同士を細線で結んでいる。

すべての計算結果を示せないが、ほぼ次の様な傾向が見られる。まず b と λ の影響は λ を変化させるよりも b の変化の方が大きな影響を与える。従って C 地形のような高低差がある場合でも地上高の低い所を光路が通る時は良い結果が得られる。 b の値を知るには、地表より高い所での気温観測が必要であり、気球等を利用しないかぎり適当に b 値を仮定しなければならないが、そうすると地上高が高い程大きい誤差が生ずる可能性がある。このことは A 地形の様に λ よりも b 値が効く測線の結果が悪いことから示される。 b が効く上に λ も効くという B1 の場合が最悪のケースとなり、Fig. 11 の竜ヶ水の場合では、計算結果の範囲が 25 mm にも及び、測線長に対して 3×10^{-6} に達する。結局、先に 4 つの地形パターンに分けたが、要素に着目すると、まず測線の地上高を低く、次いで両端の高低差を少なくすべきであると云える。 b 値の影響を実質的に避ける方法としては、日変化の少ない曇天日を選ぶのも一法である。又、A 地形の様に光路が水平であれば、気温が日平均値に近くなる時に測定すれば良い。測線に高低差 (dh) がある時には $dh \cdot \lambda$ に相当する分だけ平均気温よりずれた時に観測すると、やはり b 値の不確定さに対して安定であると云える。

今回計算した大部分のケースでは、G&R, G, R の各々のグループ (λ や b の値をかえた時に得られる各結果) においてはかなり狭い範囲 … 5 mm 程度におさまっている。このことは b や λ が確定できなくても、そのグループ全体の真値に対する偏倚量がわかれば、かなり確かな値が求まることを示す。田島らによれば b 値としては 1/300 が良いとされている¹⁰⁾ が、「G&R, $b=1/300$ 」に相当する値と従来の補正法との差の経年変化を調べるとやはり 5 mm 以内に大部分がおさまる。この偏倚量が毎年一定になれば、最も簡単な手続き（従来と同じ方法）で気象補正をやるだけで、かなりの精度が期待されることになるが、具体的提案には、もう少し長年のデータの検討を必要とする。

現在光路上での気温分布をできるだけ簡単に推定する方法を研究するため、測線中央付近の地上部においても自記計器による気温観測を実施している。又、光路に沿った気温をより直接的に推定するために、測線両端間の音波伝播速度を使用する可能性についても検討中である。

9. 天ヶ瀬地殻変動観測所における観測

現在、地震予知計測部門にて設置している基線網⁸⁾のうち、特記すべきものは、天ヶ瀬地殻変動観測所内部における観測である。坑道内という特殊条件から、今まで述べた各種の誤差のいくつかは減少させることが可能である。本来、伸縮計との比較観測を行なう目的で始めたものだが、開始後日が浅いため、高精度観

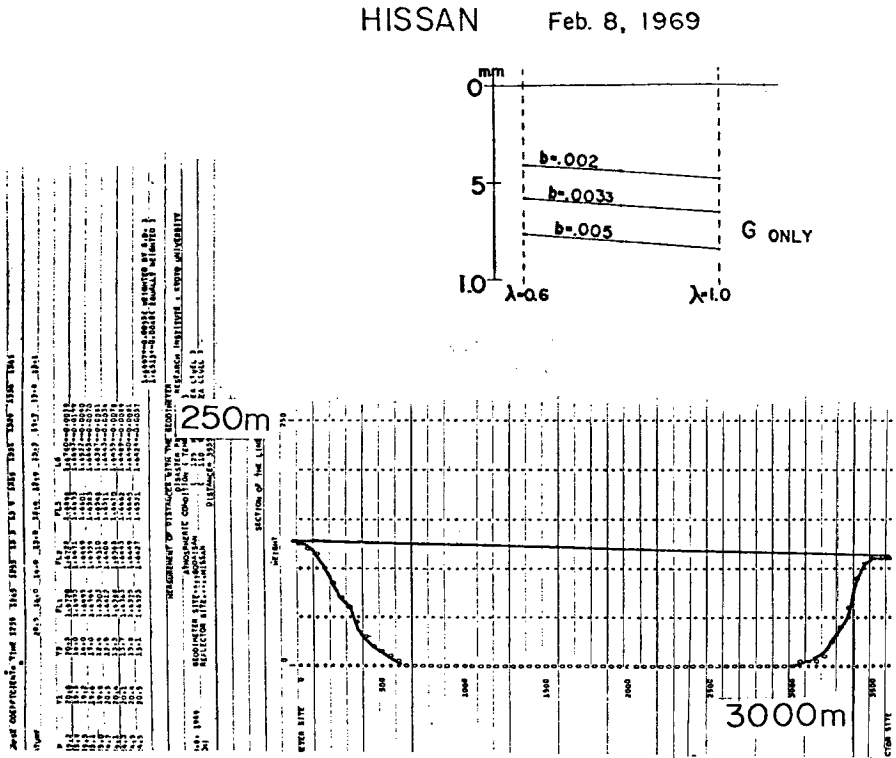


Fig. 10 Topographic profile (type A) and variation of corrected length when various temperature distributions are assumed.

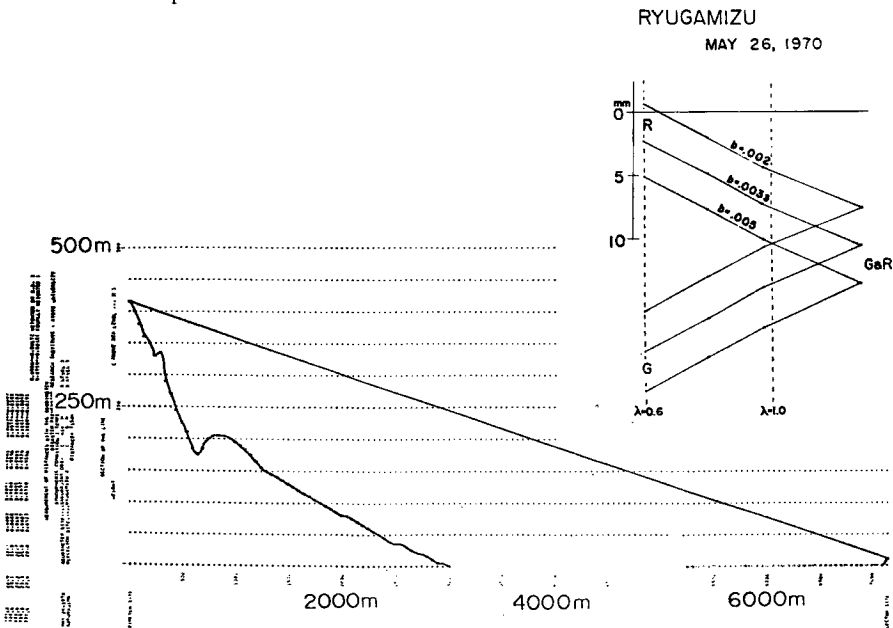


Fig. 11 Topographic profile (type B1) and variation of corrected length when various temperature distributions are assumed.

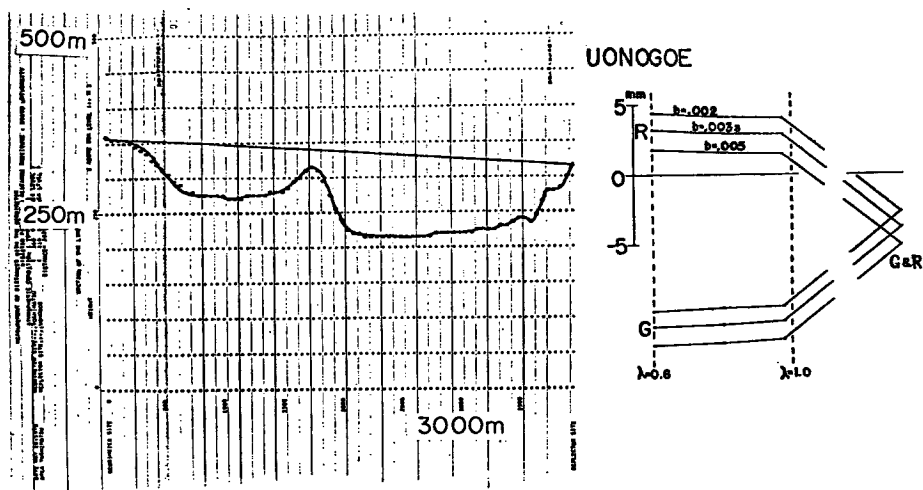


Fig. 12 Topographic profile (type B2) and variation of corrected length when various temperature distributions are assumed.

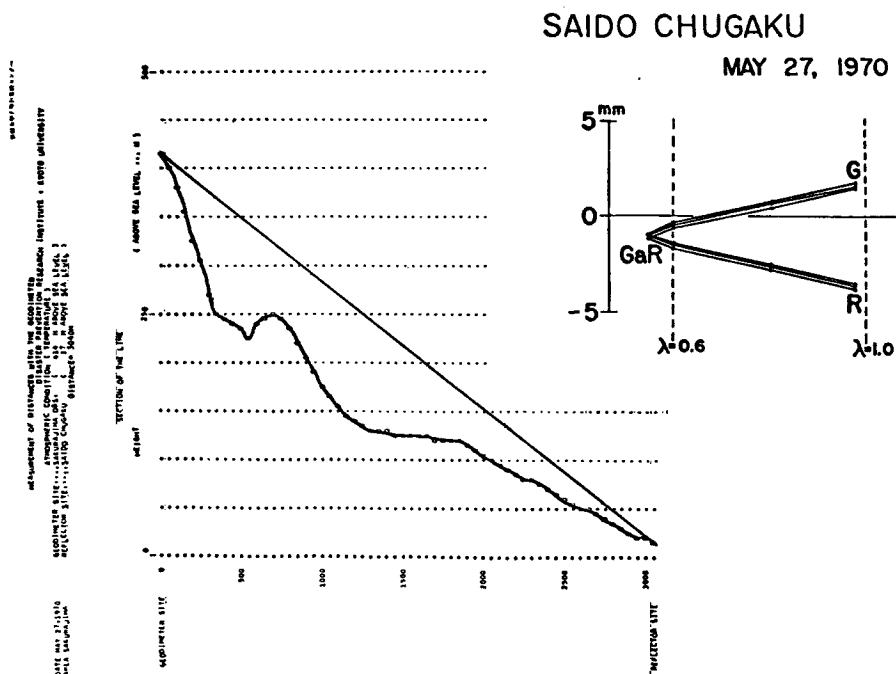


Fig. 13 Topographic profile (type C) and variation of corrected length when various temperature distributions are assumed.

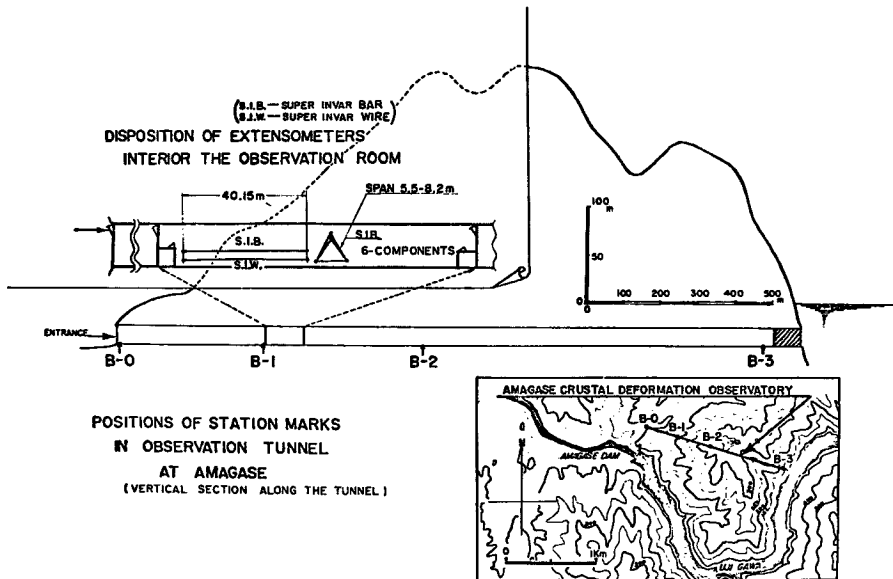


Fig. 14 Amagase Crustal Deformation Observatory.

測という点を中心にして述べる。同観測所は Fig. 14 に示す様に全長 2 km 弱の旧水路トンネルを利用している。その入口に B-0 基石をうめ込み、奥へ順に B-1, B-2, B-3 と 3 基石を設けている。これらは頭部にねじを切ったステンレス棒を使用しており、反射鏡を直接そのねじに取り付けて据えつけ誤差をなくしている。また坑道内部は気温が年間を通じ、ほぼ一定であると共に光路に沿って測定が可能であるので、気象補正による誤差は極めて少ない。さらにデレーライン較正表誤差もなくす工夫を行なっている。(4) 式より較正表誤差 $\epsilon(r) - \epsilon(c)$ は $r=c$ であれば 0 となる。このため周波数 1 に対して $R=C$ となる位置に B-1~B-3 を設置して、周波数 1 のみを使用する単一周波数法によっている。この基石設置位置は気温の恒常性によってある位置が定まるのであり、普通の測線においては、気温の変化によりその位置が移動する。但し天ヶ瀬においても気圧変化のために R と C に差が生ずることがあるのは止むを得ない。実際の観測データの処理手続としては、デレーラインの読み取り値自体を減算する $(r-c)$ 。一方較正表の C 値付近での 1 目盛変化に対する長さは、Table 3 にあげた 3 つの較正表のどれからも同一値 1.175 mm/digit が得られているので、この係数を掛けることにより $R-C$ を得る。

この観測結果を Table 5, Fig. 15 に示す。Fig. 15 には同方向の伸縮計による観測値も加えてある。同図における添字 1, 2 は Table 5 の No. 1, No. 2 に対応する。Table 5 では通常の方法による測定値（三周波数方式）も示してある。その結果は B-1, B-3 に対しては満足すべきものであるが、B-2 は考え得る誤差以上の変化を示している。伸縮計及び B-1, B-3 の結果からはこれを支持することが出来ず、何らかの誤差によるものと思われる。その原因は不明であるが、測定者が No. 0 と No. 2 は同一人で、No. 1 は別の人読み取っており、これも一因であるかもしれない。原理的には $R-C$ で個人差も消去される筈であるし、野外においては、たとえ個人差があっても検知できない。この測線ではタイムスケールを長くすれば伸縮計との比較観測になるし、短くすればジオディメーターのキャリブレーションに使えるものと考えられる。

10. 結 び

ジオディメーターによる光波測量の誤差としては、機械に起因するもの、測定技術によるもの、気象補正

Table 5 Result of electro-optical measurements of distances in Amagase Crustal Deformation Observatory.

No. & Date	B-1		B-2		B-3	
	Single	Triple	Single	Triple	Single	Triple
No. 0 July 29, '70	m 389.8537 ± 6	m 389.8462 ± 14	m 827.3572 ± 10	m 827.3544 ± 15	m 1714.8862 ± 8	m 1714.8833 ± 7
No. 1 Nov. 12, '70	- 8 * .8529 ± 16	+74 * .8536 ± 17	+106 * .3678 ± 18	+104 * .3648 ± 18	-32 * .8830 ± 10	+54 * .8887 ± 11
No. 2 Jan. 19, '71	+ 4 * .8541 ± 9	+67 * .8529 ± 10	+34 * .3606 ± 11	+127 * .3671 ± 16	- 8 * .8854 ± 23	+43 * .8876 ± 37

* — Comparison with No. 0 (unit 1/10mm).

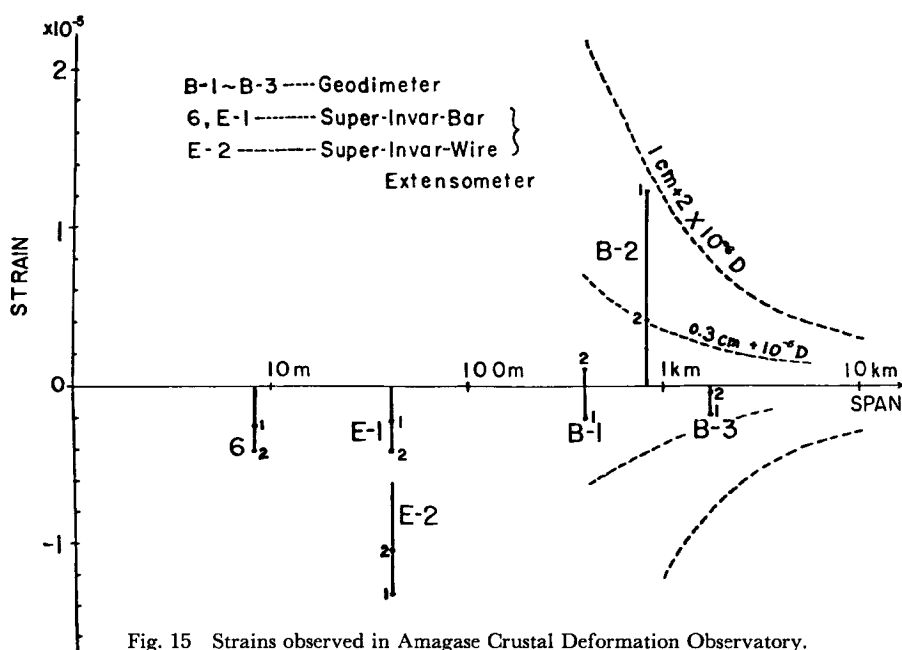


Fig. 15 Strains observed in Amagase Crustal Deformation Observatory.
0-July 29, 1970; 1-Nov. 12, 1970; 2-Jan. 19, 1971

によるものと大別される。

本文中ではほとんど述べなかったが、測定技術に関しては、機械の据え付け誤差及び測定所要時間の問題がある。前者については、天ヶ瀬地殻変動観測所内で採用した名大大山方式¹¹⁾あるいは光学下げ振りの採用等で無視し得る程度に減少させるのは困難ではない。機械内部状態の漂動は Fig. 3 や Fig. 4 で示されている程度は避けられないから、できるだけ短時間で測量を済ませ、R 読み取り時と C 読み取り時との時間間隔を短くする必要がある。

機械に起因するものとしては、周波数及びデレーライン校正表が主なものである。校正表についてはキャリブレーションを行なうことにより 3~4 mm に押える事が可能である。

気象補正に関するものが、もっとも定量的見積りが困難である。気象観測精度は通常の方法で充分であるが、観測網を立体的に広げるか、何らかの方法で、光路上の値を推定する必要がある。適切な気象補正が行

なわれれば、5 mm 又は 10^{-6} 程度の精度は期待できる。

以上を総合すると、較正に常に注意を払っておれば、平均二乗誤差としては $\pm 7 \sim 5$ mm 程度、距離に比例する誤差は周波数誤差も合わせて 2×10^{-6} と考えられる。

最後に御指導いただいた高田理夫教授に厚くお礼申し上げます。又、天ヶ瀬、桜島他各地域のデータ使用にあたり、観測に従事、協力いただいた、地震予知計測部門、屯鶴峰地殻変動観測所、桜島火山観測所の皆様に厚く感謝いたします。気象補正のデータは、鹿児島、和歌山、高知、鳥取各地方気象台、都城、人吉両測候所より提供をうけました。周波数検定にあたっては工学部電子工学教室池上研究室の協力を得ました。数値処理、計算は京都大学大型計算機センターの FACOM 230-60 を使用いたしました。各官署並びに関係者の方々に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 笠原慶一・岡田 惇・柴野睦郎・佐々木幸一・松本滋夫・平井正代：光波測量による地殻変動の観測，地震研究所彙報，(1) 44, 1966, pp. 1149-1165, (2) 46, 1968, pp. 741-758, (3) 47, 1969, pp. 803-818.
- 2) 坪川家恒・大森又吉：測地学序説，1969.
- 3) Kasahara, K., A. Okada, M. Shibano, K. Sasaki, S. Matsumoto and M. Hirai: Electro-Optical Measurement of Horizontal Strains Accumulating in the Swarm Earthquake Area, B.E.R.I., (1) 44, 1966, pp. 335-350, (2) 44, 1966, pp. 1715-1733, (3) 45, 1967, pp. 225-239, (4) 46, 1968, pp. 651-661.
- 4) Hofmann, R. B.: Geodimeter fault movement investigations in California, Calif. Dep. Water Resour. Bull., 116-6, 1968.
- 5) Scholz, C. H. and T. J. Fitch: Strain Accumulation along the San Andreas Fault, J.G.R., 74-27, 1969, pp. 6649-6666.
- 6) AGA Aktiebolag: Geodimeter Model 6 Operating Manual, 1965.
- 7) 石川甲子男：Geodimeter について，地理調査所時報 20, 1956, pp. 26-28 等
- 8) 高田理夫・田中寅夫・尾上謙介・山田 勝・藤田安良・大谷文夫：光波測量による地殻水平ひずみの観測（第一報），京都大学防災研究所年報，14-A, 1971, pp. 33-40.
- 9) 田島 稔・佐藤 裕・須田教明：光波距離測定気象補正（I）繫留ゾンデによる低層気温観測，測地学会誌，15-4, 1971, pp. 121-129.
- 10) 田島 稔・池田 稔：低層気象の測量におよぼす影響，測地学会第 34 回講演会，1970.
- 11) 志知竜一・飯田汲事：犬山における地殻変動の観測—光波測量基線網の設定，測地学会誌 14-4, 1969, pp. 135-143.