

九州東南部における光波測量（序報）

高田 理夫・古沢 保・大谷 文夫
寺石 真弘・園田 保美

ELECTRO-OPTICAL DISTANCE MEASUREMENT IN THE
SOUTHEASTERN REGION OF KYUSHU DISTRICT

By *Michio* TAKADA, *Tamotsu* FURUZAWA, *Fumio* OHYA,
Masahiro TERAISHI and *Yasumi* SONODA

Synopsis

Two base-line networks for distance measurement with Geodimeter are constructed at the coastal region of Miyazaki prefecture in Kyushu district. The Miyazaki network consists of 8 base-lines and the Nobeoka network consists of 4 base-lines. Results of repeated surveys of these networks will reveal the horizontal strain changes in this region which neighbors on the source region of historical major earthquakes in the Hyuganada sea.

At the Miyazaki network, the first survey was carried out at March and the second at December in 1981. Observed strains for these 9 months contain quantitative uncertainty but qualitatively agree with the results of continuous observations by extensometers at the Miyazaki Crustal Movement Observatory and those of repeated surveys at rhombus base-lines and first triangulation net by G.S.I.. The Nobeoka network was surveyed only once at December in 1981.

An effective distribution of base-line azimuths is also discussed to estimate a homogeneous strain field.

1. はじめに

日向灘を震央とする地震の発生と地殻変動との関係を研究し、さらには地震発生予知の実用化をめざし宮崎地殻変動観測所では1976年以来地殻変動連続観測を続けている。またその北方約 90 km の槇峰地殻変動観測室ですでにそれ以前から連続観測を続けてきた¹⁾。今回、日向灘沿岸地方の地殻水平歪を測地的方法により観測するため、宮崎・延岡の2地域に光波測量基線網を設置し、1981年より測量を開始したのでその概要を報告する。

宮崎基線網は宮崎地殻変動観測所を包含し、延岡基線網は槇峰地殻変動観測室の東方約 20 km 附近に展開している。そのためこれら2基線網の繰り返し測量結果から検出される地殻歪は各々の連続観測結果と密接な関係が期待される。そして従来の連続観測記録に、光波測量データを加えることにより、この地方の地殻の歪状態の把握、特に空間的な面においての確かさが増すものとする。

2. 基線網

各基線網の位置と地殻変動観測所（室）の地理的な関係を Fig. 1 に示す。両基線網とも一点より放射状に展開された基線により構成されている。

2.1 宮崎基線網 (Fig. 2)

中央基点「加江田」は宮崎地殻変動観測所の南東約 2 km, 標高約 230 m の地点で、岩盤に穿孔してステ

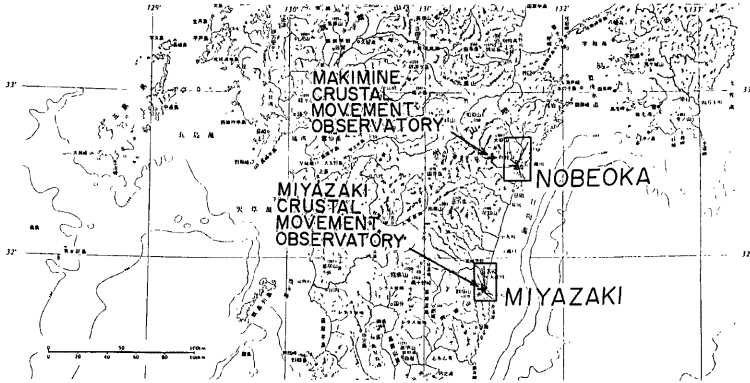


Fig. 1. Location of base-line networks and related crustal movement observatories.

ソレスパイプを埋め、その内部に十字線を刻印したステンレス標柱を共にセメントで埋設固定している。このパイプの上部は観測時以外は保護キャップで蓋がされ、基点の損傷防止に留意している。基線網はここを基点に8方向に8基線が設定されている。これらの設定に当り、「平和台」、「清武」、「堀切峠」には今回花崗岩角柱の標石を埋設し、「松崎」、「山下」は国土地理院既設の三角点標石を、「城山」は宮崎市道路台帳用標識を用いている。また「池内」、「持田」は後に述べる国土地理院菱形基線の標石を使用している。8基点の標高は、「松崎」の22mを最低、「持田」の125m

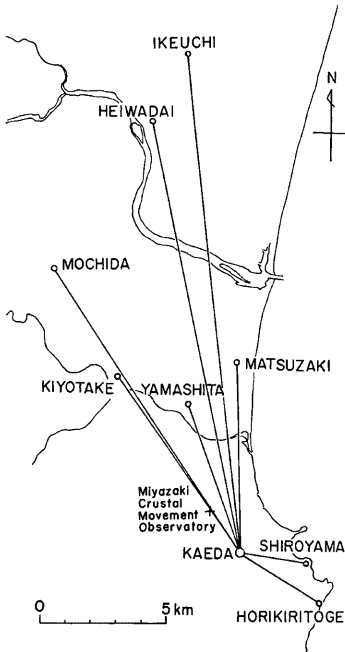


Fig. 2. Miyazaki base-line network.

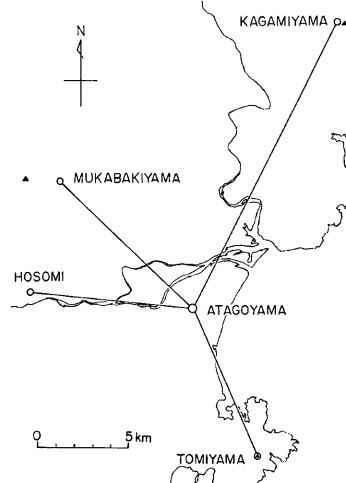


Fig. 3. Nobeoka base-line network.

を最高とするが、他の大部分は 50~80 m に揃っている。

これら 8 基線は図で明らかな様にその長さから短・中・長の 3 グループに分けられる。北西-北方向の 6 基線についてはこのグループ分けにより水平歪の空間分布の細かい議論ができる可能性をもっている。地形上の制約から測線方位が偏っている本基線網においては、東方の短かい基線が歪主軸を求める時に重要な役割を果たすが、これに関しては後章で論ずる。

2.2 延岡基線網 (Fig. 3)

これは 4 本の基線で構成される。中央基点の「愛宕山」は鉄筋コンクリート製展望台屋上に設けられている標識を使用、「細見」及び「行隣（むかばき）山」は標石として花崗岩角柱を埋設し、「遠見山」は国土地理院既設三角点標石を使用した。「鏡山」基点では鉄筋コンクリート製水槽にセメントとエポキシ系接着材を併用してねじを固定し、測定時には反射プリズムが直接取りつけられる様にしている。各点の標高は「愛宕山」210m に対して、「細見」77m, 「遠見山」310m, 「行隣山」370m, 「鏡山」635m と様々であり、光路の傾斜は各基線で大きく異なっている。しかし平面配置は「行隣山」を除く 3 基線の方位傾角がすべて 120° に近い。

3. 測定方法

測定に当っては AGA 社 Geodimeter 600型 (器番 No. 64062) を使用し、AGA 社が取扱説明書²⁾ で指示する標準方法 (4 位相測定) により行なった。測定は両基線網共、中央基点に Geodimeter を設置、放射状の端点に反射プリズムを設置し、1 基線に対する測定は連続 10 回を標準とした。なお反射プリズムは、AGA 社製の直径約 6 cm のコーナー・キューブを使用した。これの使用個数は、まだ測量開始後、日が浅いこともあり、各基線毎に試行錯誤しているが、大体 10 km 以内は 1 個、以遠の場合は状況により 1~4 個を使用した。また、夜間の近距離測定では減光フィルターを使用した。Geodimeter に対する日光の直射を遮るためと、風による三脚、本体等の振動を防ぐために、測定基点ではテントを張るなど配慮した。

気象補正には、気温及び気圧を基線の両端点で観測しその平均値を使った。気温観測にはサーミスター温度計を用い、感部は長さ 5 m のアルミ製ポールの先端に取り付けた。従って地上高は標準で 5 m、ポールを他の建造物に取り付ける場合 (愛宕山) は 10 m 以上の高度での測定となっている。感部は当初自然通風で、直射日光と雨を遮るために傘を用いたが、強風に耐えられないなど支障が多いため、その後、外側が金属、内側が合成樹脂の同軸二重円筒の中心に感部を置き、感部周囲と共に、二重円筒の内筒と外筒との間も強制通風する方式を採用することにした。Photo. 1 にこのセンサー・ケースを示す。気圧の測定は、観測所に設置した水銀気圧計で校正したアナロイド気圧計によって行なった。

観測時期は見通しが良く天候も安定する冬期に実施するようにしている。時刻については日没前後が気温の鉛直勾配が最も小さくなり、精度のよい気象補正が可能とされている³⁾ が、全基線をこの時刻に測定することは作業日数が長期にわたりすぎるので、終日測定を行なう中で、長距離基線については測定時間が日没時を含むスケジュールとなる様努めた。これは明るい間に照準して、外来光ノイズの少ない状態で測定を行なうという技術的な要請とも一致するものである。

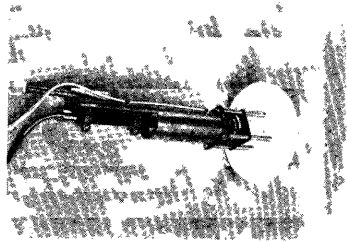


Photo. 1. Thermistor holder with double coaxial covers and ventilation fan.

4. 測定結果

これまでに宮崎基線網は1981年の3月と12月の2回、延岡基線網では同12月に測定を行なった。これらの結果を **Table 1** に、10回の平均値とその標準偏差で示す。このうち、宮崎・城山基線の3月測定結果は、強風のため測定続行が危険となり5回で打ち切っているため、その平均値である。2基線網のうち宮崎では2回の測定結果があるので、その差を変動量として若干の解析を行なった。

4.1 宮崎基線網の歪場

3月と12月の2回の測定からでは、測距儀性能とテクニクな歪速度の大きさ、正確な気象補正の困難さ等を考慮すると定量的な議論の材料にできる結果を導くのは無理であるが、定性的な傾向はつかめる可能性もあり、解析を行なった。均一歪場の仮定のもとで主歪を計算した結果を **Fig. 4** に示す。8基線を方向と長さから次の3グループに分ける。即ち北西-北方向の長距離グループとして「池内」、「平和台」、「持田」、同方向の中距離グループとして「松崎」、「山下」、「清武」、東-南東方向の短距離基線として「城山」、「堀切峠」と分けることができる。そこで、全測線によるものと、2グループずつ組み合わせたもの計4つの場合について計算した。**Fig. 4** においてAは計算に使用した測線略図、Bは各測線の観測歪量を図化した

Table 1. Results of distance measurements

Miyazaki Network									
No.	Date	Base-Line	Ikeuchi		Heiwadai		Mochida		Matsuzaki
			m	mm	m	mm	m	mm	mm
1	Mar. 23-26, 1981		19909.071	±2	17534.657	±3	13575.280	±3	7641.905 ±4
2	Dec. 13-15, 1981		.029	±4	.648	±5	.227	±3	.918 ±3

No.	Date	Base-Line	Yamashita		Kiyotake		Horikiritoge		Shiroyama
			m	mm	m	mm	m	mm	mm
1	Mar. 23-26, 1981		6336.339	±2	8630.959	±2	3776.530	±2	2676.231 ±4
2	Dec. 13-15, 1981		.306	±1	.959	±4	.516	±3	.217 ±3

Nobeoka Network									
No.	Date	Base-Line	Tomiyama		Hosomi		Mukabakiyama		Kagamiyama
			m	mm	m	mm	m	mm	m
1	Dec. 11-12, 1981		8813.884	±5	8797.780	±3	9942.955	±2	17292.891 ±3

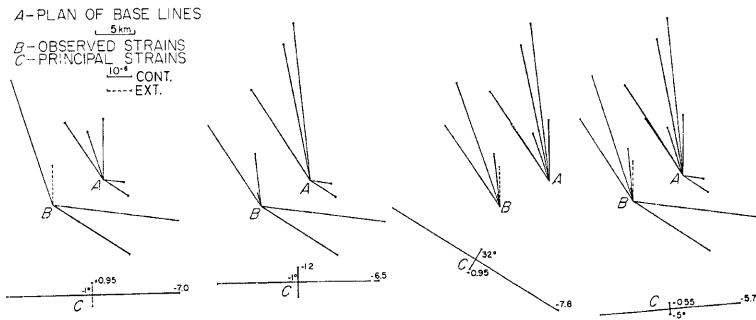


Fig. 4. Principal strains calculated from various combinations of base-lines in Miyazaki network.

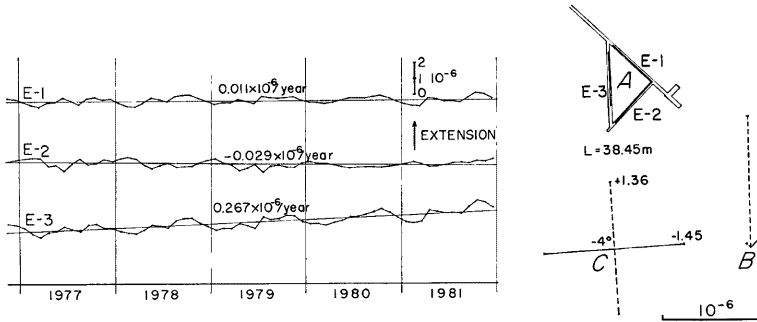


Fig. 5. Secular strain rates observed by extensometers at the Miyazaki Crustal Movement Observatory and principal strains calculated from them. Notations of A,B,C are the same as in Fig. 4.

もの、そしてCが計算結果の主歪である。求められた4主歪パターンは北方向6基線によるものと、残り3つとは異なった傾向を示し、前者は後者にくらべて縮み主軸が約45°ずれている。この両解のグループの差は、前者には東方向2基線の測定結果が入っていない点である。しかし、これを地域的な差と結びつける程有意な結果とは考えられない。4パターン全体から判断してこの歪場を東西あるいは北西-南東方向の縮みが卓越した場と見れば、その卓越方向の観測値があれば精度良く決まるが、その方向を欠けば大きな誤差が含まれるとも考えられ、そうだとすれば基線方向が偏っていることが問題となる。いずれにせよ、これ以上の議論は今後観測回数を重ねてからでないと無理である。

5. 既観測データとの比較

前章で求めた主歪解を、これまでのこの地域の各種の地殻水平歪の観測結果と比較して、どの程度整合するかを検討する。

まず宮崎地殻変動観測所の伸縮計の連続観測結果を Fig. 5 に示す。ここに示されている歪主軸はほぼ東西に縮み、南北に伸びであり、定性的には東西方向の縮み軸は光波測量の結果と一致している。しかし量的には9か月では主歪量は 3×10^{-7} にすぎず、Geodimeterの精度以下である。従って Fig. 4 で南北方向の主歪が伸びと縮みの両者であらわれているのも不自然ではなく、東西方向には、むしろ種々の誤差が重なった結果、誇張されて観測されたものと考えざるを得ない。

次に国土地理院による測地測量のデータを2種示す。一つは Fig. 6 に示すような宮崎菱形基線の測量であり、1967年以来1979年まで4回測定が行なわれている⁹⁾。菱形基線端点のうち、「池内」「持田」の2点は加江田基点から見通せるため、宮崎基線網の一部として使用している。この菱形基線のうち東半分の三角形において、最新測量とその前回測量との間の6年間の歪主軸を、発表されている基線長変化より計算して Fig. 7 上部に示す。国土地理院の結果については測定器械を変更した事による変化が含まれると考えられ有意な変動ではないとコメントされとおり、また Fig. 4 に示す結果も大きな標準誤差を含むものでは

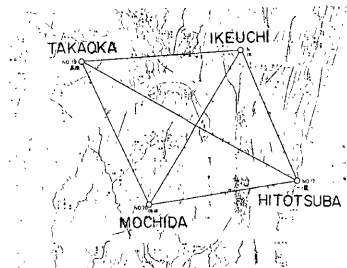


Fig. 6. Miyazaki rhombus base-lines by Geographical Survey Institute.

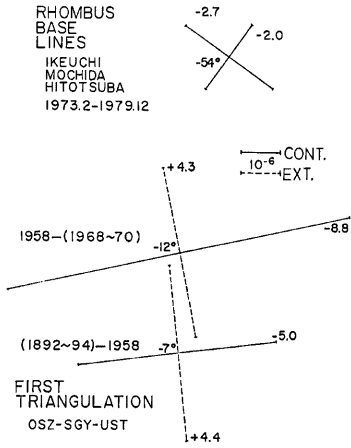


Fig. 7. Principal strains calculated from results of observations at Miyazaki rhombus base-lines (above) and from results of first triangulation net adjustments (below).

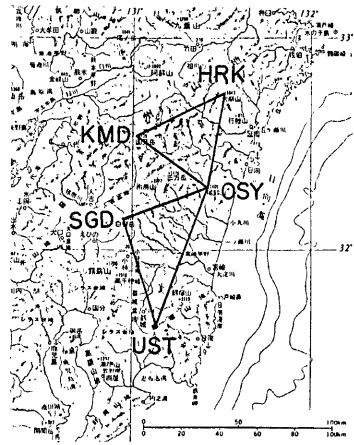


Fig. 8. First triangulation net neighbouring of our networks.

あるが、主軸の方向は Fig. 4 右から 2 番目の、北西-北方 6 基線による解と非常によく一致している。両軸共縮みである点も両者同じであり定性的にはよく似ている。

他の一つは 1 等三角測量であり、三角網のうち今回設置した基線網に最も近いのは、Fig. 8 の 2 つの三角形である。測量は明治に 1 回、昭和に 2 回行なわれているが、宮崎基線網に近い南側の三角形（尾鈴山・白髪岳・牛ノ峠）について原田ら⁹⁾ による計算結果を Fig. 7 下部に示す。これによると明治-昭和 1 回目の約 65 年間の歪と、昭和 1-2 回目の約 10 年間の歪とをみると、その主軸の方向にはほとんど変化がみられないが、歪速度は後者の方がずっと早い。そして主歪方向は宮崎地殻変動観測所での連続観測結果とよく似ており、量的にも大きな矛盾はない。従って今回の結果との関係にも、本章前半で論じたことと同様のことがいえる。

6. 基線網形状について

第 4 章で観測値の方位分布が主歪値に影響を及ぼしていることを示唆した。また前章で述べた、今までに得られている地殻歪の蓄積速度は、Geodimeter の精度に比較して非常に遅いものであり、長期にわたって観測を続けなければ無意味である。今後、目的とする地殻歪検出の能率をできるだけ向上させるために、また長期にわたって基線網を維持していく途中において、不幸にして基準標石の損壊等による基線の遺棄や逆に基線の新設について検討されることもあると思われる。そこでこれらの観点から以下のような考察を行った。

二次元均一歪場で歪主軸を求める場合、本稿の場合のように 4 方向以上の歪観測量があれば、最小二乗法が適用できる。この時、残差平方和の大きさから主歪値及び軸方位角の最確値に対する標準誤差が求められる。即ち最小二乗解は Fig. 9 右上のように表現される。ここで S は残差平方和、 n は歪観測数、 e_1, e_2 が主歪値、 θ_1 は e_1 の方位角である。ここで x, y, s はすべての歪観測方位と θ との関数となる。従って具体的な観測網と歪解が与えられた時のみ、この評価が可能となる。第 4 章においては、定量的議論をしなかつ

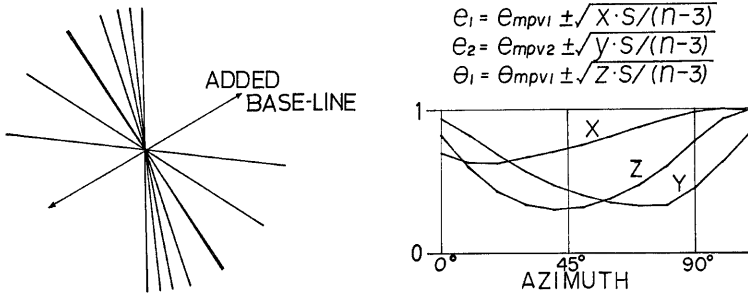


Fig. 9. Addition of a base-line to 8 base-lines network (left figure) reduces the standard errors in homogeneous strain solutions. The ratios of standard errors in the solutions based on 9 base-lines network to those based on 8 base-lines network are plotted in function of azimuth of added base-line (right figure). Suffix “mpv” means most provable value and “S” is sum of residual squares and “n” is a number of base-lines.

たのでこの根号の中身（不偏分数）の値を計算していない。しかし基線網形状について考える時、 x, y, z は観測量に explicit には依存しない（ θ を通じての implicit な関係となる）ので、重要なパラメーターとなる。

そこで宮崎基線網の 8 本の基線方向に対してもう 1 本の基線を追加する (Fig. 9 左側) と、主歪最確値の誤差がどれだけ少なくなるかを計算した。 θ としては 8 基線による解 $N 5^\circ W$ を採用した。Fig. 9 右側が 8 本の時と 9 本の時の x, y, z の値の比を、追加基線の方位角（北より東まわり）に対してプロットしたものである。（ $S/(n-3)$ は単位観測に対する分散の不偏推定値であるから原理的には n が変化しても変わらない。）この図の z の曲線から、現在空白方位となっている所のほぼ中央、 $N 45^\circ E-S 45^\circ W$ の方位で観測ができれば、主軸方位の精度は約 3 倍になること、また y 曲線からは $N 85^\circ E$ の圧縮軸に対して「城山」と対称的な $N 80^\circ E$ 位の方向に追加して、主軸方位を 2 本の基線が狭い角度ではさめば、この軸の歪値の精度は、やはり 3 倍に向上すること等が読みとれる。これら、基線方位の偏りについての問題は、勿論基線網設置当初から直観的に明らかではあったが、以上のような方法で定量的に表現できることが分かった。

上記の計算は測線の追加のみならず、削除した時の影響も同様に推定できる他、加重計算をして、特定の基線網の各基線に対して最も能率の良い測定回数の比率を求めることも可能である。しかしこれらの議論には均一歪場という仮定があり、かつ測定目的の一つである歪主軸の方位が計算に必要である点において限界がある。このため例えば各測線毎に測定回数を変える場合、標準回数から増すのは問題ないとしても、減らすことには相当に慎重でなければならない。

宮崎基線網について、今後どのような形で現在の網形状の弱点を補うかは検討中であるが、何らかの改善を施す必要があると考えている。

7. 謝 辞

2 基線網の設置及び観測にあたり、宮崎市、清武町、延岡市、北川町ならびに地元の関係各位及び延岡市細見工藤進一氏からいただいた深いご理解とご支援に対し、心からお礼を申し上げます。また三角網調整計算結果の生データを提供していただきました国土地理院原田健久氏（現パシフィック航業）、菱形基線に関する資料等を送付していただきました国土地理院多田堯氏には厚くお礼を申し上げます。末筆ながら、測量作業にご協力いただきました山田勝技官、気温測定器具を製作していただきました小林年夫技官に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 高田理夫・古沢 保・竹本修三・尾上謙介・寺石真弘・園田保美：宮崎地殻変動観測所における地殻変動観測（第1報），京都大学防災研究所年報，第22号 B-1, 1979, pp. 61-77.
- 2) AGA Geotronics AB: Geodimeter 600 Operating Manual, 1977, 1979, pp. 22-24.
- 3) 須田教明：光波測距儀による距離測定における気象補正法に対する考察，測地学会誌，第16巻第3号，1970, pp. 137-147.
- 4) 木股文昭・山内常生：光波測距における温度補正，測地学会誌，第27巻第3号，1981, pp. 173-182.
- 5) 国土地理院地殻調査部：宮崎菱形基線測量結果，地震予知連絡会報，第24号，1980, pp. 234-235.
- 6) 原田健久・葛西篤男：最近60年間における日本の地殻の水平歪，測地学会誌，第17巻第1・2号，1971, pp. 4-7.