

九州東南部における光波測量 (1981年-1993年)

大谷 文夫・寺石 眞弘・園田 保美・古澤 保

ELECTRO-OPTICAL DISTANCE MEASUREMENTS IN THE SOUTHEASTERN REGION OF KYUSHU DISTRICT (1981-1993)

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

Synopsis

Two base line networks at Miyazaki and Nobeoka have been surveyed repeatedly by electro-optical distance measurements (EDM) for the purpose of the monitoring the crustal strains since 1981. These networks are constructed at the coastal region of Miyazaki prefecture which faces to the Hyuganada, east off Kyushu, the source region of major earthquakes. The data are divided into two periods, before 1987 and after that, and adapted to the regression lines respectively. In the earlier period the base lines were measured by Geodimeter Model 600 (AGA) and in the later by DI3000 (Wild). The trends of the length change turned from extension at the earlier period into contraction at the later period, in the base lines in east-west direction at the both networks. Also in the continuous observations of ground-strain in the vault by extensometers and geodetic surveys by the Geographical Survey Institute, the contraction in east-west direction is predominant in this region.

In 1984 and 1987, earthquakes with $M=7.1$ and 6.6 respectively occurred in the Hyuganada, but the evidences of changes in the strain accumulation cannot be found in the survey data.

1. はじめに

日向灘地域の地震予知に関する研究を目的とする地震予知研究センター宮崎観測所では、日向灘沿岸部で地殻歪の観測を行っている。設立直後の1976年から実施している地殻変動連続観測と並行して、測地的手法による地殻変動観測として、光波測量を、1981年以来2地域において定期的の実施してきた¹⁾。本報では、1993年末までの反復測量の結果について報告しこの地域の最近の地殻歪の傾向について述べる。宮崎基線網の結果は、観測所本所での連続観測と対比し、延岡基線網の結果は、最も近い衛星観測点である槇峰での連続観測結果と比較する。また、国土地理院による一次網測量結果とも比較する。

2. 基線網および測定方法

両基線網の詳細については、すでに序報¹⁾で述べたが、宮崎基線網は測線長は最長が19,909mの8本の放射状基線であり、延岡も同様に放射状4本で構成され、その最長基線長は17,293mである (Fig. 1 及び Fig. 2)。

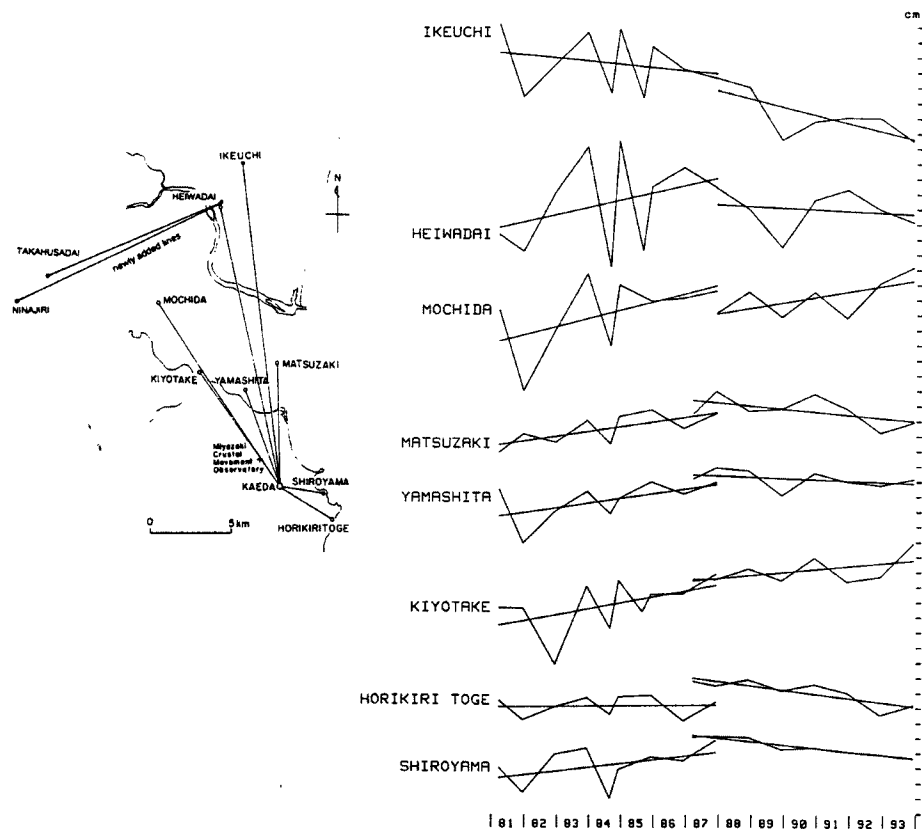


Fig. 1 EDM base line network at Miyazaki (left) and changes of base line length (right).

測定方法も、原則として序報に述べた方法によった。但し、その後次のような点が変更された。もっとも大きい変更は使用測距儀の更新である。1987年まではHe-Neレーザーを使用したAGA社製Geodimeter model 600を使用した。同年につなぎ測量を行い、それ以後、赤外線半導体レーザーのWild社製DI3000型に切り替えた。ただし、反射プリズムは全期間AGA社製を使用している。DI3000による測定は自動式であるため、G-600型に比べて非常に短い時間で終了できるが、時間的に従来の測定に近い条件にするため、繰り返し測定で順次累積したデータの平均値を出すモード(DILモード)で10回の平均値を求めるという測定を、3分毎に11回繰り返し、全所要時間を約30分としている。これは、気象補正に使用する気温・気圧データの時間的なばらつきを平均化するために必要な時間と考えている。また気温測定も測線両端での地上高5mの値の平均値を採用するという方法は変えていないが、気温測定自体は、指示式のサーミスター温度計から軽量で記録式の白金抵抗体使用のものに漸次切り変えている。センサー部は同心二重円筒の中心におき、強制通風をしている。

3. 観測結果

各測線の測定長の時間的な推移を、宮崎基線網についてはFig. 1に、延岡基線網についてはFig. 2に示す。途中で機種変更した新旧それぞれの機種について各々のグラフを描いているため、それぞれのグラフは1987年を境に2つの部分に分かれる。測量は原則として毎年11月末～12月始めに実施している。この時期と異なるのは、1981年3月、1984年8月、1987年3月の3回で、このいずれの年も追加測量であり正規の時期にも実施している。このうち、1984年と1987年は、'84年8月7日の $M=7.1^{(2)}$ 及び'87年3月18日

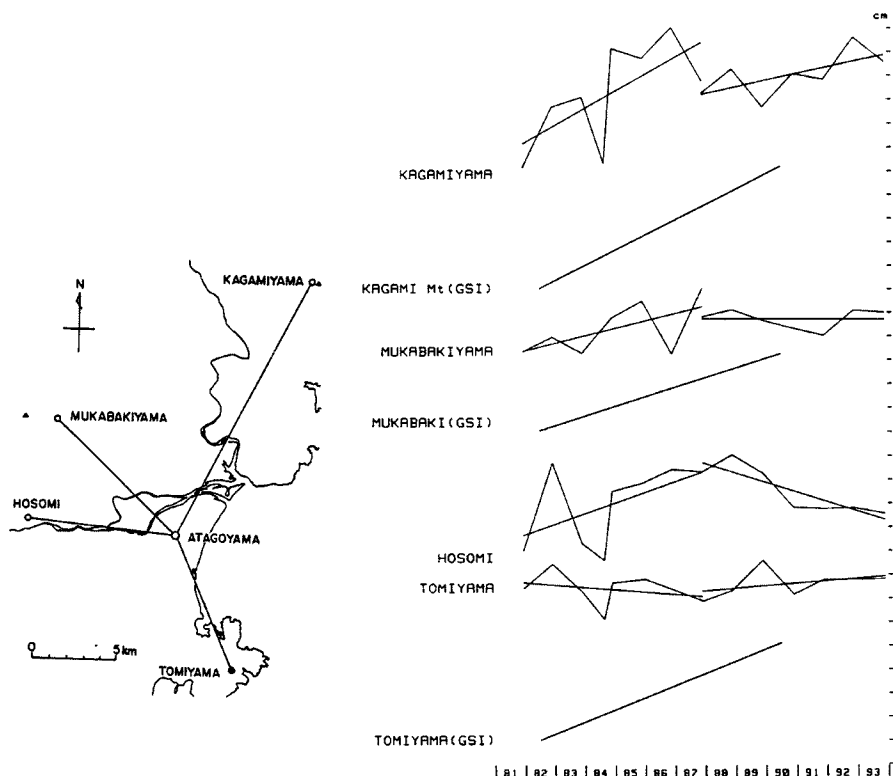


Fig. 2 EDM base line network at Nobeoka (left) and changes of base line length (right). In the right figure, GSI means the result of the primary geodetic network survey by the Geographical Survey Institute.

のM=6.6の日向灘の地震の直後に実施したものである。新旧機種をつなぐ部分において、同時に測った2台での値はそれぞれの測線毎に必ずしも一致はしていない。「つなぎ」にあたっては、測定時の周波数のキャリブレーションの結果、いずれも規定値の許容範囲内であったため、機差には距離依存項がないものとし、新旧の差は測線長に関係しない常数と見なして一方の機種による結果を全体に一定量だけシフトさせている。この常数にはDI3000とAGA製プリズムの組み合わせにより生ずる表示値と実距離との差も含んだものとして一括して補正している。

グラフを一見して明らかなのは、G-600による結果は、経年的な変化が一様でなく年による差が大きいものに対して、DI3000ではスムーズな変化をしている点である。前者は手動により零点を見つける方法で操作上の誤差が入るのに対し、後者は自動的にデジタル表示がなされる方式でありシグナルレベルが十分でありさえすれば操作上の誤差は入らないことによる差であると見られる。歪率が一定であると見なして回帰直線をもとめてみると、一本の直線を無理なく引ける測線と直線回帰には無理がある測線とがある。そこで、新旧の機種毎のデータそれぞれに直線をあてはめてみた。Fig. 1及びFig. 2ではこの直線を書き込んでいる。このような便宜的な方法で分割をしたのは、(1)途中で傾向が変わっていると見られる測線であっても、その変曲点の時期を明確に指摘できるほどばらつきの少ないデータではない。そして新旧切り替えの1987年は対象期間の丁度中点となる。(2)機種が変わった時点でステップが生じているように見られる測線もある。すでに述べたように新旧でデータのばらつきに差があり回帰直線の信頼度にも差がある。(3)全期間が一定率で変化しているとすればどこで分割しても前期後期の2本の直線が同一となる解が得られるはず、等の理由からである。

このように分割してみると、宮崎の場合、全測線にわたり前期より後期のほうが変化率が（符号も含めた意味で）小さくなっている。つまり、伸びであったところは、伸び率が落ちるか、縮みに転じ、唯一縮みであった「池内」測線はさらに大きい *rete* で縮んでいる。一方、延岡の場合、「遠見山」以外は宮崎と同じ傾向である。「遠見山」測線は僅かであるが縮みから伸びに転じている。しかしこの伸びへの変化は分割点を変えれば事情は変わると見られ、有意な結果ではない。

この歪状況を 2 次元歪として分かりやすく見るため、つぎのような表示をした（**Fig. 3**；宮崎）。最小二乗法により歪主軸を求め、それを歪を強調した歪楕円で表わし、その上に各観測値を描き加えている。点線の単位円に対し、歪は年間の *rate* を半径を 3.33×10^{-6} とするスケールで実線の楕円状（数値によっては繭型となる）で表わしている。主軸は実線が伸び、破線が縮みである。宮崎地域の歪主軸の計算にあたっては、序報と同様に、8 測線全部からの計算と、北—北西方向の測線を長、短の 2 グループに分けて、それぞれを東—南東の 2 測線と組み合わせて長基線解と短基線解とにした。各測線毎の変動から予想されるように、全測線、長基線、短基線ともに 1987 年後の楕円は、1987 年前の楕円に完全に包含される。全期間を通じたものは、前後の変動が相殺されて絶対値としては一番小さくなる。また歪という指標でみれば、最も短い測線である「城山」測線の結果が最も大きな影響をおよぼし、東西方向の主値を規定している事情がよく分かる。その結果、北北西—南南東方向の第一主歪値は 1987 年前にはわずかに伸び、後はほとんど 0 であるが、これに直交する第二主歪値は、「城山」、「堀切峠」が伸びから縮みにかわったのに応じて、同様に伸びから縮みに変化している。

延岡についても同様に表現したのが **Fig. 4** である。この地域の結果も、宮崎と同じ傾向がみられ、「細見」測線が 1987 年前後で伸び・縮みしているのに応じ 1987 年前後で主歪値は東西伸びから同方向の縮みに変化している。南北方向では、後期に伸びが現れている。そして期間全体ではほとんど伸び縮みが相殺されている。

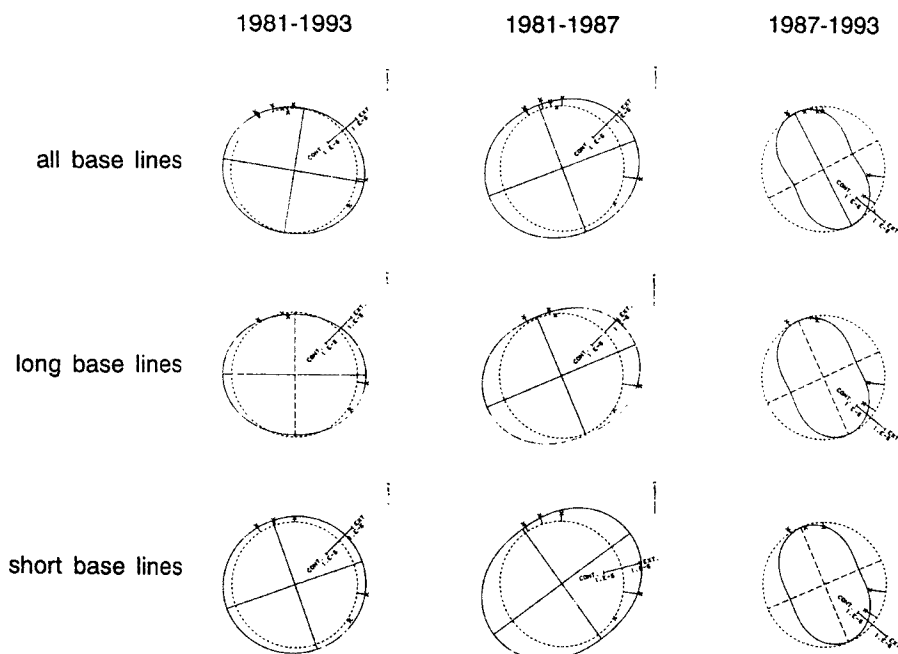


Fig. 3 Principal strains in the Miyazaki base line network.

今回の観測期間内では $M=7$ 前後の地震が2回発生している。本章の最初に述べたようにそれぞれの地震後に臨時測量を実施した。しかし定常測量の繰返しにおけるばらつきの範囲を超えるような変動は見いだせなかった。また1984年の場合全測線が縮んでいるが、季節変動も重畳していると見られる。また経年的な変動についても、13年間全体を通して見れば、前期後期で傾向の変化が認められるものの、それを1984年と1987年の地震と直接結び付けられるような時間的な関係はみられない。

4. 坑道内連続観測結果等との比較

宮崎観測所観測坑道内での伸縮計による地殻歪観測結果を Fig. 5 に示す。計器諸元やデータの詳細は既報^{3), 4)}にゆずるが本図は連続観測に関する前報⁴⁾から1年後までデータを伸ばし始点も光波測量の時期と合わせた区間について365日移動平均により季節変化成分を取り除いた経年変化のグラフである。このデータについては前報⁴⁾においていくつかの期間に分けたが、本報では、比較のため、Fig. 1, 2と同様に1987年で分けた2期間に対して、それぞれ回帰直線を求めた。E1成分では、特に区間分けの必要はなさそうであり、E3では、直線近似に無理を感じるが、大きな傾向としては一定のトレンドを示唆している。しかし、E2成分ではこの期間分けで不自然さは感じられない。

各成分と個々の測線との比較はむづかしいが、E1成分と方向が一番近い「持田」、「清武」測線とは、いずれも全期間通じて伸びており、量的にも年間 10^{-7} 及至その数倍程度でスパン、方法とも全く異なった観測の結果としてはよく一致しているといえる。E2成分とは同方向の測線がない。E3成分とは「松崎」、「池内」測線の方向に近いが、短基線の「松崎」とは1987年前では共に $3 \sim 4 \times 10^{-7}$ /年

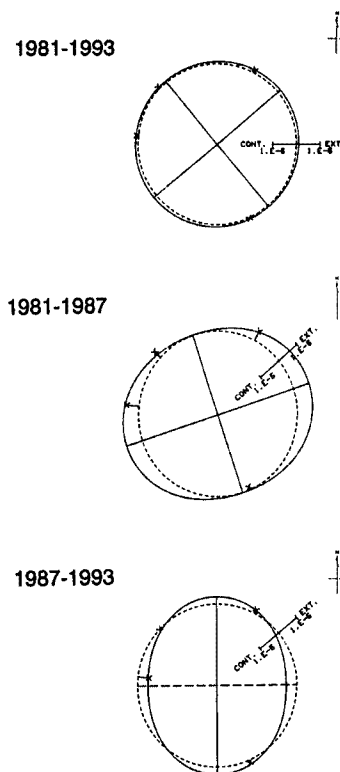


Fig. 4 Principal strains in the Nobeoka base line network.

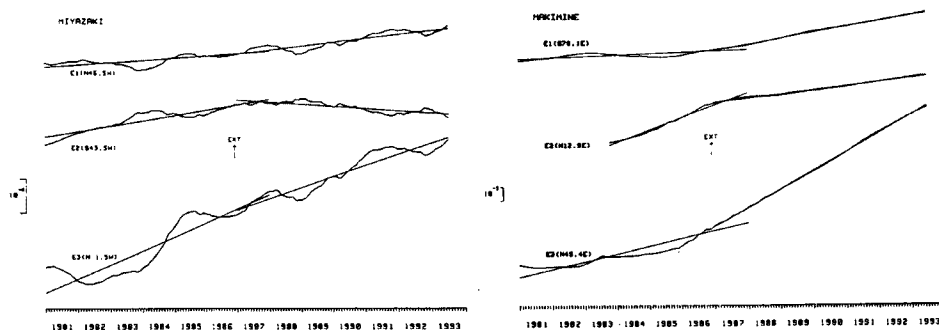


Fig. 5 Secular variations of ground-strains observed in the vault at Miyazaki observatory (left) which is situated at the southern part in the Miyazaki network and that at Makimine observatory (right) at about 20km apart from Nobeoka network.

とほぼ一致しているが、その後は「松崎」は縮みに転じた。伸縮計による主歪解は Fig. 6 に示すが期間を問わずほぼ南北伸び、東西圧縮のよく似たパターンとなる。

延岡と対比する連続観測結果としては、基線網中心の「愛宕山」から約 20km 離れた槇峰観測室の経年変化の結果を Fig. 5 に、やはり 1987 年を境とする 2 期間の回帰直線と共に示す。本観測坑では前報⁴⁾に述べたように、この境の時期がテレメーター化に伴う工事期にあたり、図に見られる前後期のトレンドの違いが地殻歪の状態の変化を正確に反映していない可能性もある。しかしこの回帰直線の勾配をもとに計算した主歪解 Fig. 7 を光波測量結果による Fig. 4 と比べると、主軸方向はずれるが、類似点も見られる。つまり、1987 年前では光波・連続観測の両者とも第一主歪値は正、第二主歪値はほぼ 0 なのに対して、1987 年後では共に、第一が正、第二が同オーダーの負値となっている点である。

最後に国土地理院による精密測地網一次基準点測量の結果と比較する。宮崎地域では 1981 年と 1991 年に一次網測量が行われている^{5), 6)}。この間の歪を Fig. 8 に示す。この地域一帯に東西圧縮が卓越した結果となっている。この結果は光波の 1987 年以降の解とほぼ一致し、連続観測の結果とも調和的といえる。また、延岡地域では 1982 年と 1990 年に一次網測量が行われている。地理院の三角網と本基線網との関係は、「遠見山」が地理院の三角点を直接利用しているのをはじめ、われわれが基点を設置している「愛宕山」、「鏡山」、「行勝（むかばき）山」の 3 山にそれぞれ地理院の三角点が置かれている（相互の距離は最大で 2 km 離れている）。そこで、本報の基線に対応するこれらの三角点間の距離の変動を地理院の学術成果から引用

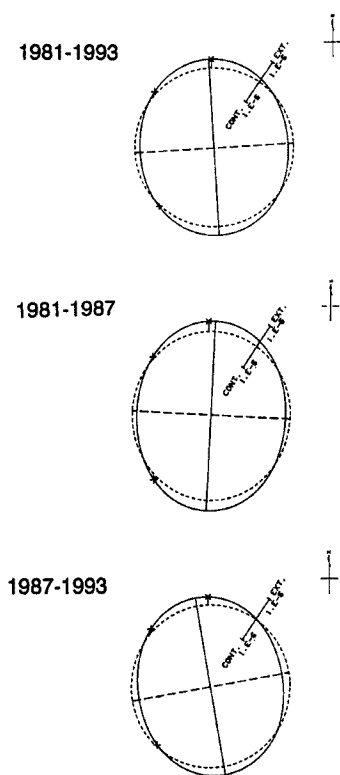


Fig. 6 Principal strains calculated from secular variations of continuous strain observations in the vault at the Miyazaki observatory.

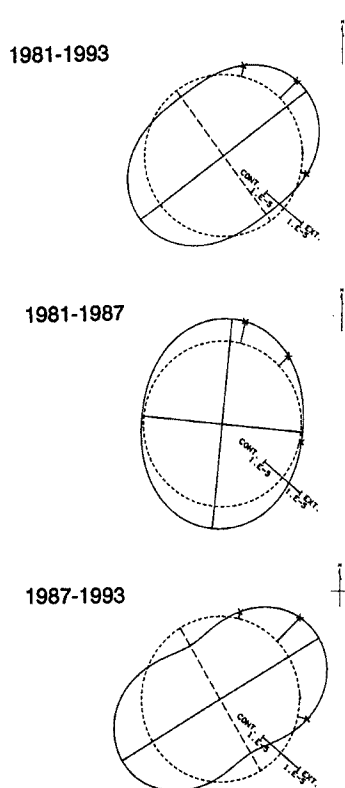


Fig. 7 Principal strains calculated from secular variations of continuous strain observations in the vault at the Makimine observatory.

または計算して Fig. 2 に記入した。これら地理院のデータは網平均をした結果であり、本報のデータのように単純に2点間の距離測定データのみを処理したものではない。両者を比較すると「鏡山」と「行勝山」は非常によく一致している。「遠見山」では、本報の結果では、地理院の測量に見られような伸びは認められない。

5. まとめ

日向灘沿岸部の2地域における放射状基線網での光波測量の繰返し実施による地殻歪の観測結果について報告した。1981年から1993年の結果であるが、途中1987年に測距儀を更新したためそれぞれの期間ごとに解析した。

- (1) 宮崎では前期では東西伸びであったのが、後期では同縮みに変化した。連続観測では全期間を通じて南北伸び東西縮み、国土地理院の一次網の結果では東西縮みが卓越している。
- (2) 延岡でも東西方向が前期伸び、後期縮みと変化している。主歪解の変化は20kmはなれた槓峰での連続観測による解の変化と類似点が見られる。

以上のように光波測量で得られた歪は2地域相互で類似しており、時間的な変化は東西方向の伸縮変化で特徴づけられる。また国土地理院の結果とも調和的な部分が多い。

地震の発生との関連では、期間分けをした1987年には $M=6.6$ の地震が起こっているが、1984年にも $M=7.1$ の地震が起こっており、これらの地震の発生に関連した歪変化と認め得る現象は本報の結果からは明らかにはなっていない。

なお前報¹⁾において、測線配置が主歪解を求めるためには不利な配置であることを述べたが、その点を改善するため最近2測線を増設した。まだ結果を報告するには至っていないが、測線位置のみ Fig. 1 内に示した。

近年、GPSが普及し、地殻歪の観測にも広く用いられるようになってきた。本基線網においては、設定後10年以上経過し、視通の確保に次第に努力を要するようになってきたことは否定できないが、この程度の基線長では、測距儀性能が向上したと相まって、現状では光波測量でGPSに比べてかなり短時間で十分な精度をもった測定が可能である。また現在の各基点は、光波を前提に設定されているので、全方位の視野が確保されていない。しかし、例えば、上述の測線方位の問題でいえば、反射点相互で座標を測定すれば、現在の測線方位では得られない方向の歪を得ることも可能となる。現在の測線の規模は、坑道内連続観測と一次網程度の規模の測地測量との間を補間していることが、本稿でも明らかになっている。そのような点から、本基線網は長期にわたって維持していかなければならないが、今後、新しい技術の動向も睨みながら必要な改善も進めていく必要があると考えている。

最後に、測量は宮崎市、延岡市、北川町等の関係者の御理解のもとに実施しており、各位の御協力に深く感謝いたします。また各測量作業において防災研究所地震予知研究センターの森井互氏には支援協力を頂き、同センター山田勝技官と藤田安良技官には長距離測線を含む作業の円滑な遂行に協力頂いており、深く感謝致します。国土地理院地殻調査部・吉村愛一郎地殻変動解析室長には学術成果を提供していただきました。厚くお礼申し上げます。

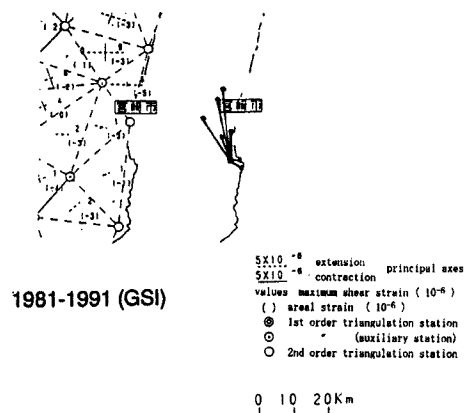


Fig. 8 Result of the the primary geodetic network survey by the Geographical Survey Institute near our Miyazaki network. (after GSI, 1993)

参考文献

- 1) 高田理夫・古澤 保・大谷文夫・寺石眞弘・園田保美：九州東南部における光波測量（序報），京都大学防災研究所年報，第 25 号 B-1，1982，pp.23-30.
- 2) 古澤 保・大谷文夫・寺石眞弘・高田理夫：1984 年 8 月 7 日日向灘地震に関連した宮崎地殻変動観測所における地殻変動と地震活動，京都大学防災研究所年報，第 28 号 B-1，1985，pp.31-39.
- 3) 高田理夫・古澤 保・大谷文夫・寺石眞弘・園田保美：日向灘地殻活動総合観測線，京都大学防災研究所年報，第 30 号 B-1，1987，pp.29-40.
- 4) 大谷文夫・寺石眞弘・園田保美・古澤 保：日向灘地殻活動総合観測線による地殻変動連続観測，京都大学防災研究所年報，第 35 号 B-1，1992，pp.299-312.
- 5) 国土地理院：九州地方の地殻変動，地震予知連絡会会報，第 48 卷，1992，pp.436-454.
- 6) 国土地理院：九州地方の地殻変動，地震予知連絡会会報，第 49 卷，1993，pp.527-541.