

GPS干渉測位による桜島とその周辺における精密地殻変動とジオイド起伏の検出

著者	田中 穰, 最勝寺 俊秀, 黒沢 知也, 仮屋 新一, 愛甲 華子, 松原 有子
雑誌名	鹿児島大学理学部紀要. 地学・生物学
巻	29
ページ	89-112
別言語のタイトル	Detection of Precise Crustal Deformation and Geoidal Undulation by Interferometric GPS in and around Sakurajima Volcano
URL	http://hdl.handle.net/10232/00009998

GPS 干渉測位による桜島とその周辺における 精密地殻変動とジオイド起伏の検出

田中 穰*・最勝寺俊秀**・黒沢知也*・仮屋新一*・愛甲華子*・松原有子***

(1996年9月11日受理)

Detection of Precise Crustal Deformation and Geoidal Undulation
by Interferometric GPS in and around Sakurajima Volcano

Minoru TANAKA, Toshihide SAISHOJI, Tomoya KUROSAWA,
Shin-ichi KARIYA, Hanako AIKO and Yuko MATSUBARA

Abstract

South Kyushu is geomorphologically located in the edge of north-western part of Philippine Sea Plate (PHS) and that, in the edge of south-western part of Nankai-Trough related to recurrences of great earthquakes ($M \geq 7.8$) which have a return period of about 100~150 years. In this region, the subducting plate has the following characteristics;

(a) a thin plate (about 30~50 km in width) steeply descending at a high angle, (b) no double seismic zones, (c) large earthquakes ($M \leq 7.5 \sim 7.6$) at maximum, (d) volcanic arc that parallels the Nankai Trough and its southward elongation coincides in map view with the intermediate-depth earthquake zone that typically occurs at depths of 90-150 km in descending lithosphere, (e) this thin bending plate descending beneath the South Kyushu is not a continuous uniform one but is split into three blocks of north, middle and south parts at boundaries perpendicular to the Nankai Trough (Nagamune and Tashiro (1989), Kakuta et. al. (1991)), where the volcanoes of Aso and Sakurajima forming the great calderas are likely to be located above these splitting two boundaries. (f) negative Bouguer anomaly (~ -100 mgal) located in Off Miyazaki along the Nankai Trough and its seismic gap in and around this anomaly. In this place, earthquakes occur so as to break this anomaly (Tanaka, 1993).

* 鹿児島大学理学部地学教室 (Institute of Earth Sciences, Faculty of Science, Kagoshima University, Japan 890)

** (株)パスコ (Pasco corporation, Akasaka 7th Avenue Bldg., Akasaka 7-10-20, Minato-ku, Tokyo)

*** 日本振興(株) (Nihon-Shinko, Co Ltd, Shinge 3534-50, Sennan-City, Ōsaka)

For this, volcanism and its crustal movement are very active in and around this volcanic region. Then, detection of secular change in three dimensional precise crustal deformation by Interferometric GPS (IGPS) including the detection of the geoidal undulation is very important for making a prognosis of the present state of crustal activity and predicting earthquakes and volcanic eruption. Especially, it becomes a very important problem whether the Kagoshima Graben (Kagoshima bay) is spread or not by two plates (Eurasian or PHS plates) from a symbolized point of view.

For this purpose, the Laser distance measurements and interferometric GPS observations have been carried out monthly since August in 1992 in and around Sakurajima volcano.

The results obtained so far from this investigation are as follows,

- (1) Detection of horizontal and vertical deformations by IGPS.

At the present time, secular variation of horizontal deformation shows stationary state, on the contrary, secular variation of vertical deformation has shown an increasing upheaval state since the end of 1993. Then, the observations which cover a wide area included the Kagoshima bay and its vicinity are requested.

- (2) Detection of horizontal deformation due to thin plate motion steeply descending at a high angle toward the land from the Trough.

Considering the characteristics of the plate motion, IGPS data in the South Kyushu district relative to Usuda VLBI-GPS station were analyzed over the past three years. As a result, macroscopically speaking, contraction and elongation changes in about E-W and N-S directions of the Kagoshima bay were detected, respectively. In their details, secular change in contraction was large in the direction of NE-SW included the Sakurajima Volcano. It is necessary to continue watching the progress of this variation.

- (3) Detection of the geoidal undulation in and around the Sakurajima volcano.

The undulation pattern of geoidal height which was related to the magma ejection was precisely detected by IGPS using the triangulation and the leveling points data. The result which agrees well with the profile of volcanic underground structure determined from the gravity anomaly was obtained. Including this, geoidal undulation gap was detected between the eastern part of Kagoshima City and the western part of the Sakurajima Volcano, which suggests the graben-like normal fault patterns having a steep slope structure of the basement rocks.

These observations are now in progress for widening its investigation area and determining the caldera's underground structure or the geoidal undulation pattern related to the formation of the Kagoshima Graben.

Finally, a new model inferred from the detected geoidal undulation anomalies regarding the formation of the Kagoshima Graben is proposed.

1. はじめに

桜島とその周辺域での地殻変動の検出は、はじめは光波測距、その後直ぐに GPS 三次元干渉測位 (IGPS) に切り替えて 1992 年 8 月以来、月一回の連続観測を実施中である。1993 年の 7 月～10 月にかけて、変動のパターンが変わったことは既に報告した (田中・他 (1993), 最勝寺・他 (1994))。この事は、必要に応じて地震予知連絡会 (1994) や火山噴火予知連絡会 (1994) へも報告されている。地殻変動パターンが変わった前後では、ほぼ同期間での降下火山灰量、爆発地震、B 型地震が減少し、A 型地震が多かったこと (京大防災研・東大地震研, 1995) からこの事実が類推される。

最近の GPS による調査の概要は、下記の方針で進められている。

- (1) IGPS による桜島とその周辺における水平・上下変動の検出と火山噴火の長期予知
- (2) 高角薄板プレートによる九州南部広域プレート変動の検出
- (3) 九州南部における短波長精密ジオイド高の検出と鹿児島地溝のモデルの解明
- (4) 高角薄板プレートによる九州地方の地殻変動モデルとそのジオイド起伏
- (5) 最新の新技术…… GPS 気象学による水蒸気量の推定

最近の桜島周辺では隆起の傾向が見られる。これについては、石原 (1995) や京大防災研・東大地震研 (1995) では始良カルデラに起因していることを指摘し、新しい段階に来ていることを報告している。一方、短波長ジオイド分布では、Yokoyama and Ohkawa (1985) による桜島火山の地下構造とも良く一致するジオイド起伏も検出されている (田中, 1996)。

本報告では、(1)から(4)の上記の調査とその方針も踏まえて、最新の IGPS の高度利用も含めながら、我々が実施してきた約 3 年半の観測結果の要点と問題点をまとめて報告する。終わりに、鹿児島地溝の形成に関し、ジオイド起伏異常から想定される二重正ジオイド起伏モデルを提案する。

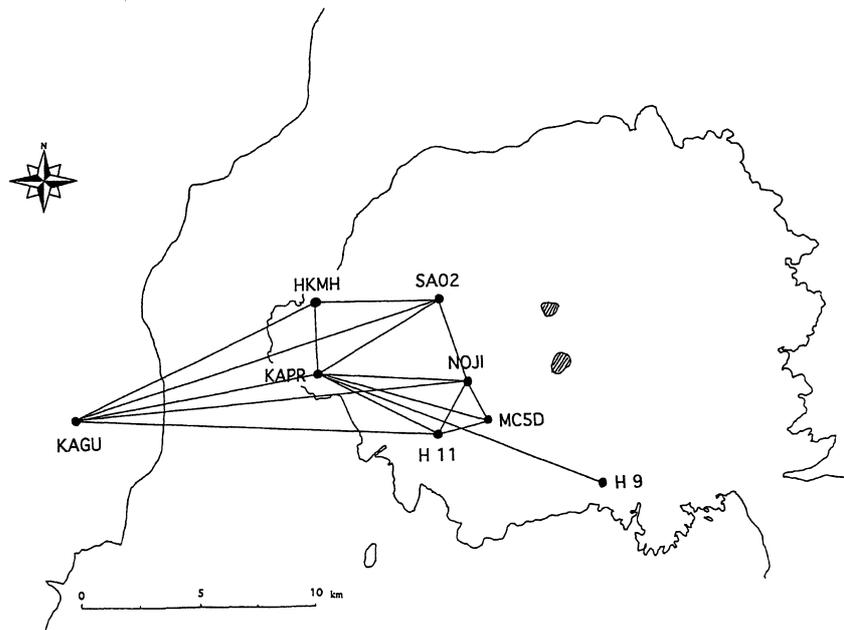
即ち、内側の正ジオイド起伏は桜島形成時の噴火によって生じたものと現在考えている。一方外側の正ジオイド起伏はプレート変動と鹿児島地溝の形成に関係していたのではないかと思われる。これらについて討論する。

2. GPS 観測結果の概要

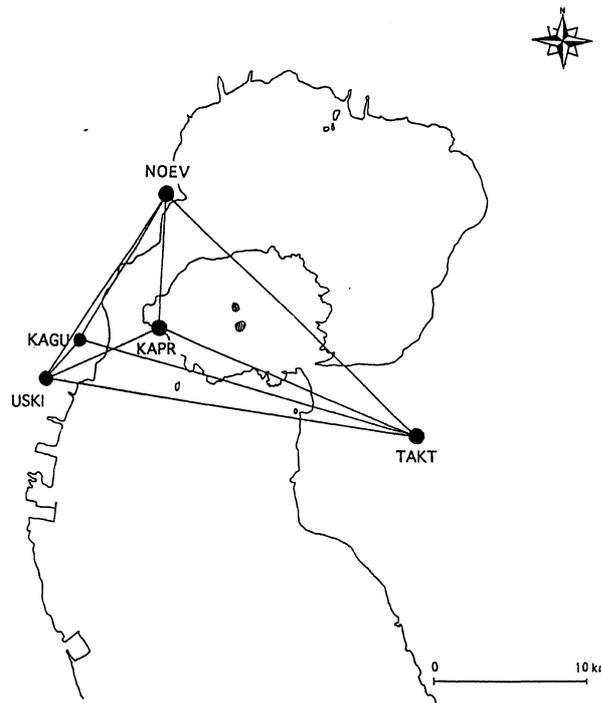
現在の GPS の観測は、連続観測以外は、月一回の割合で概ね 4～5 時間、10 時～15 時頃までの観測を実施している (田中・他 (1995))。相対観測精度は水平が 10^{-7} 、上下は 10 km 程度で ± 5 cm である。上下の観測精度が良くない。これは、大気中を通過する電波の遅延誤差が大きいため、それによって生ずる電波の屈折率誤差による。こうした条件を踏まえて、得られた結果の図を中心に、以下に述べる。

(1) IGPS による桜島とその周辺における水平、上下変動の検出と火山噴火の長期予知

第 1 図は鹿児島大学理学部の現在の GPS 観測網図である。(a)図は KAGU (鹿児島大学理学部点) を基点に KAPR (火北来) を中心とした桜島の観測網で、(b)図は桜島を囲むように網が組んである南西島弧地震火山観測所等による。NOJI (野尻川砂防観測展望台)、MC 5 D (持木川 5 号堤) は、南岳噴火口より約 2 km 強の場所にある。



(a) KAGU (鹿児島大学理学部)とKAPR (火北来4等三角点)を基線にした桜島西部の観測網

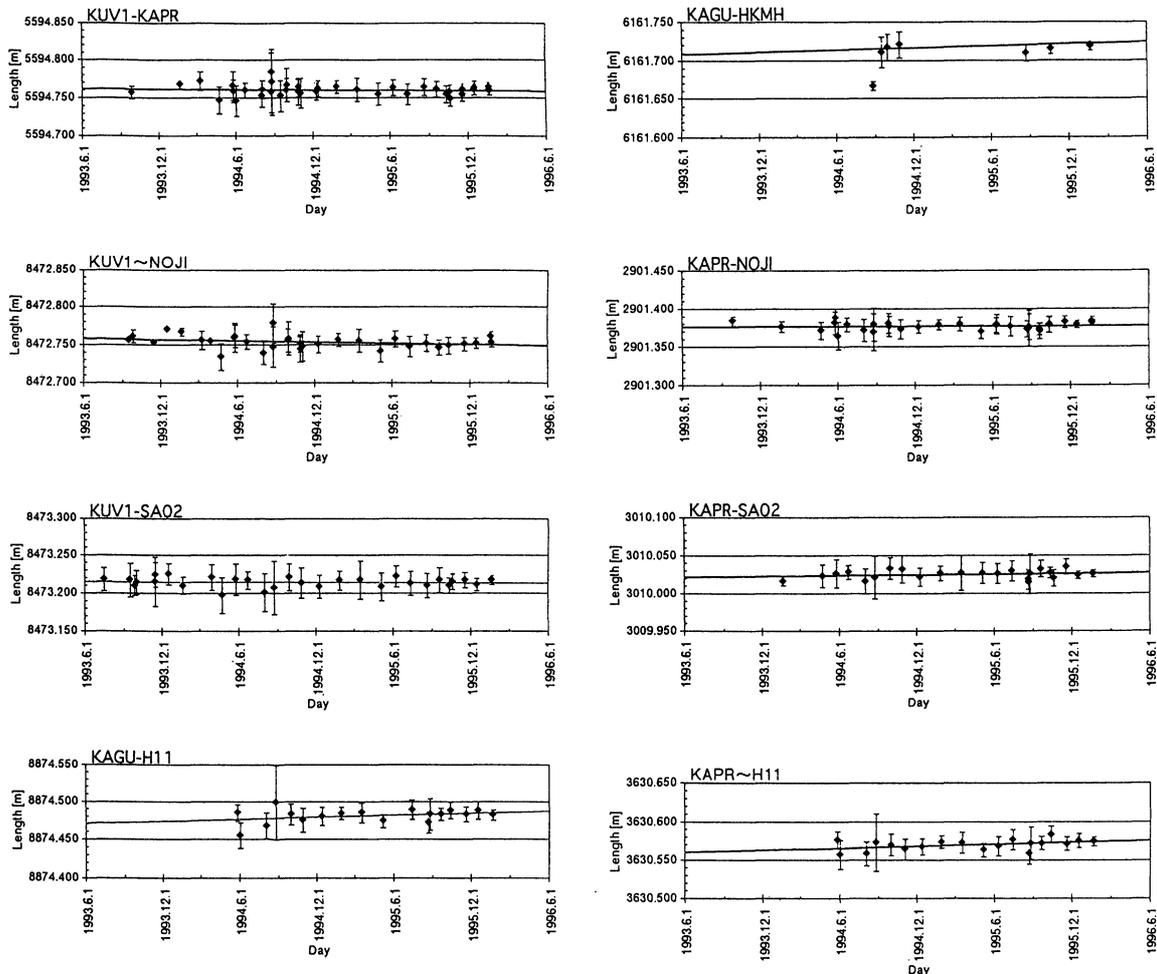


(b) 南西島弧地震火山観測所等による桜島を囲む周辺の観測網

第1図. 桜島とその周辺におけるGPS干渉測位の観測網.

Fig.1. Observation net by IGPS in and around Sakurajima Volcano. (a) Observation net based on the KAGU~KAPR baseline in the western part of Sakurajima (b) Observation net by NOEV and others around Sakurajima.

第2図に代表的な GPS 観測点の基線長の変動①～④を示す。第1図の(a)図の網図に対応する。ここで KUV1 は KAGU とほぼ同一の点である。KAGU に相対的な基線長の変化は KAGU-H11 では若干伸びが見られる。他の基線長には変動は見られない。

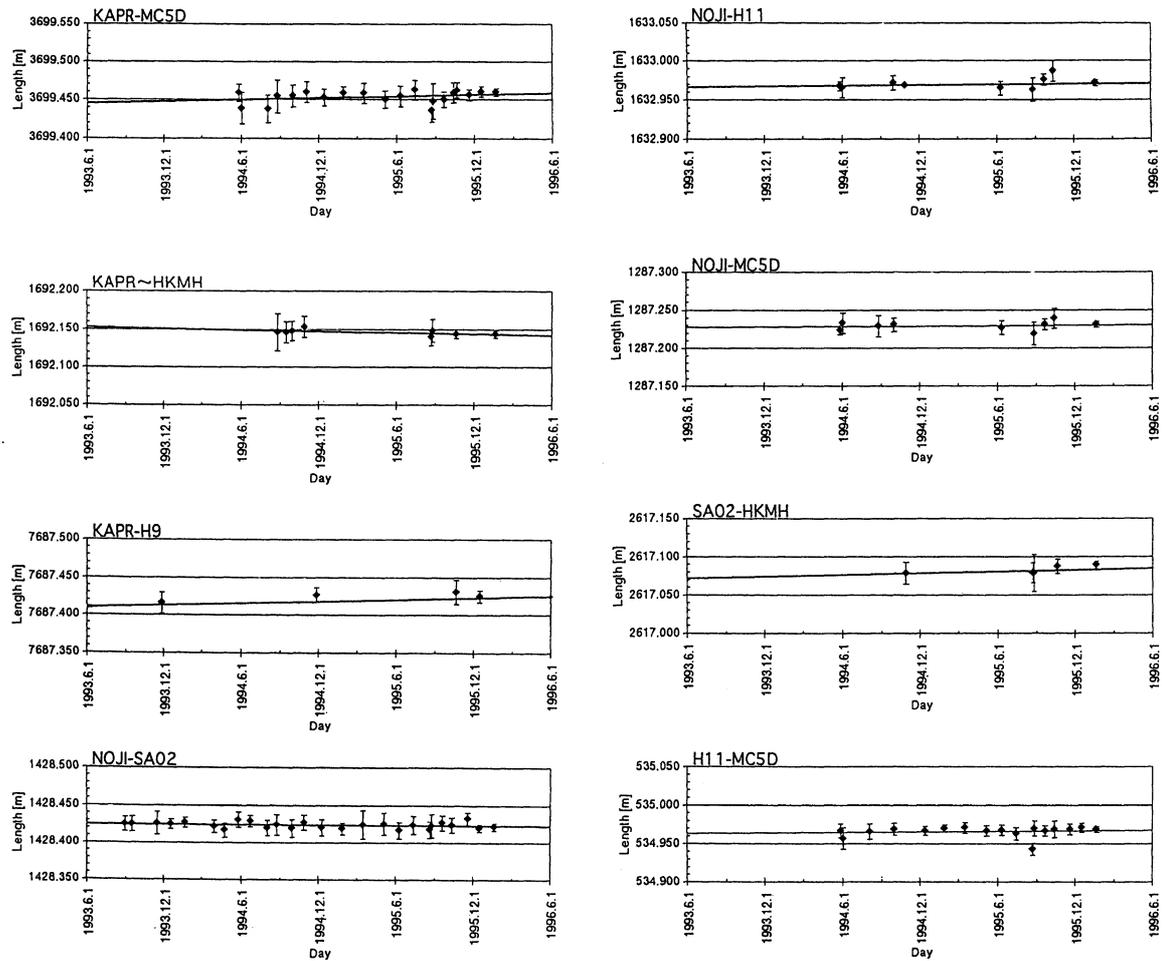


桜島における基線長経年変化 ①

桜島における基線長経年変化 ②

第2図. 代表的な IGPS 観測点における基線長の経年変化(①～②)。図1の(a)に対応する。KUV1とKAGUはほぼ同一の点である。KAGUに相対的な基線長の変化はKAGU-H11で伸びが若干見られる。他の基線長には変動は見られない。

Fig.2. Secular change in baseline length in main IGPS observation points (①～②). This corresponds to (a) of Fig.1. KUV1 and KAGU are almost the same point. The secular change in elongation between KAGU and H11 relative to KAGU is pointed out.



桜島における基線長経年変化 ③

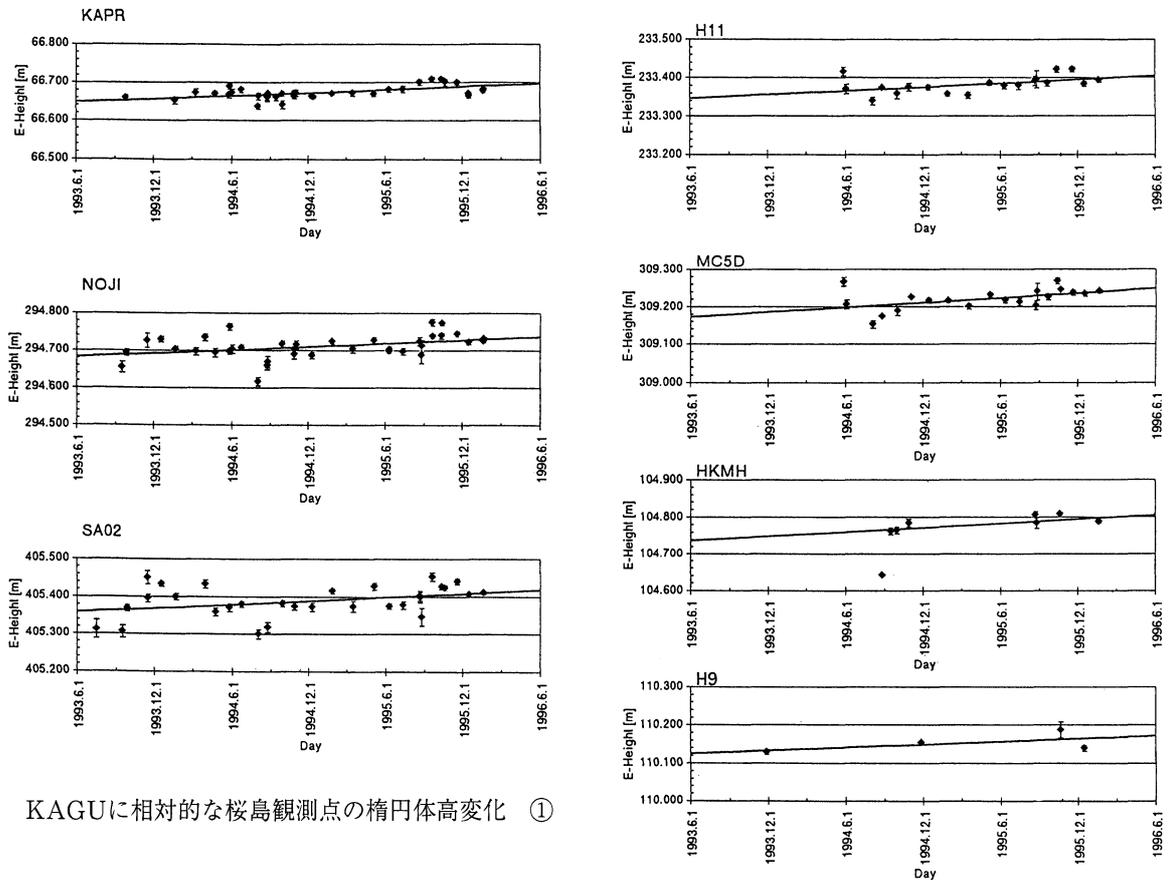
桜島における基線長経年変化 ④

第2図. 代表的なIGPS観測点における基線長の経年変化(③~④)。図1の(a)に対応する。KUV1とKAGUはほぼ同一の点である。KAGUに相対的な基線長の変化はKAGU-H11で伸びが見られる。他の基線長には変動は見られない。

Fig.2. Secular change in baseline length in main IGPS observation points (③~④).

第3図にKAPR, NOJI, SAO2, MC5D, H11, H9, HKMHの楕円体高の変動を示す(①~②)。標高の経年変動はいずれも楕円体高が経年的に高くなっており、これは桜島の隆起を示す。

楕円体高の変動で比高差の大きなSAO2, NOJIでは、6月~10月に、特に8月に季節変動と思われる変動が大きい。SAO2では約10cmの変動となっている。比高の低いKAPRでは、季節変動も小さく、隆起の傾向が検出された。この傾向は②の図でも同様に見られる。このことから最近の約3年半では、桜島の西部が隆起に転じたことが理解されよう。一方、水平位置は第2図で示されるように変動は見られない。



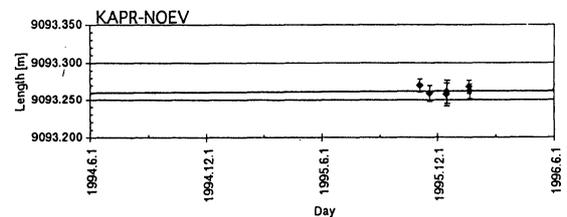
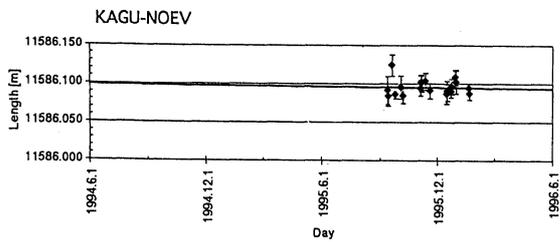
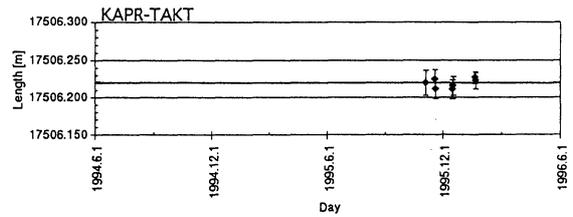
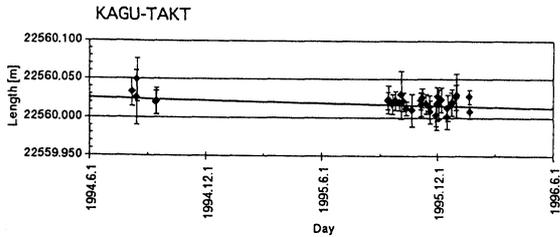
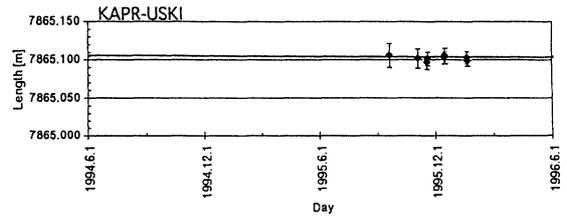
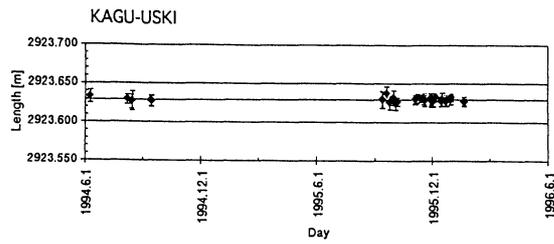
KAGUに相対的な桜島観測点の橢円体高変化 ①

KAGUに相対的な桜島観測点の橢円体高変化 ②

第3図. KAPR, NOJI, SA02, MC5D, H11, H9, HKMHのそれぞれの橢円体高の経年変動。いずれも隆起の傾向が見られる。始良カルデラの変動と桜島南岳の変動を示唆する。

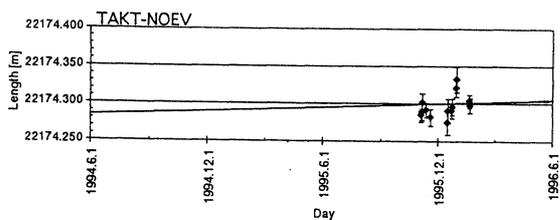
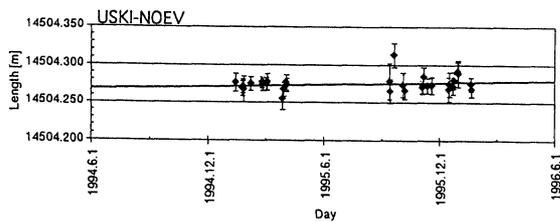
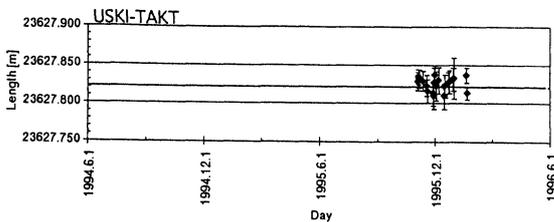
Fig.3. Secular changes in respective ellipsoidal heights of KAPR, NOJI, SA02, MC5D, H11, H9, and HKMH. Upheaving tendency is seen in the respective ellipsoidal heights. These suggest the recent active variations of the Aira caldera and the Sakurajima Volcano.

第4図に第1図(b)に対応した網図の基線長の変動(①~③)を示す。観測期間が短いので明確なことは云えないがKAGU-USKI, KAGU-NOEVは誤差の範囲内の変動であるが, KAGU-TAKTの基線長は縮みの傾向が見られる。鹿児島湾がほぼ東西方向で縮んでいることを示唆する。一方, 第5図には, それらの橢円体高が示されている。TAKTでは隆起の傾向が見られる。この現象は後述する鹿児島地溝東部の隆起を示唆する。ここは, Yokoyama and Ohkawa (1985)による重力異常を示す場所でもあり, 非常に興味深い現象であるが観測期間



固定点における基線長経年変化 ①
(KAGUからの距離)

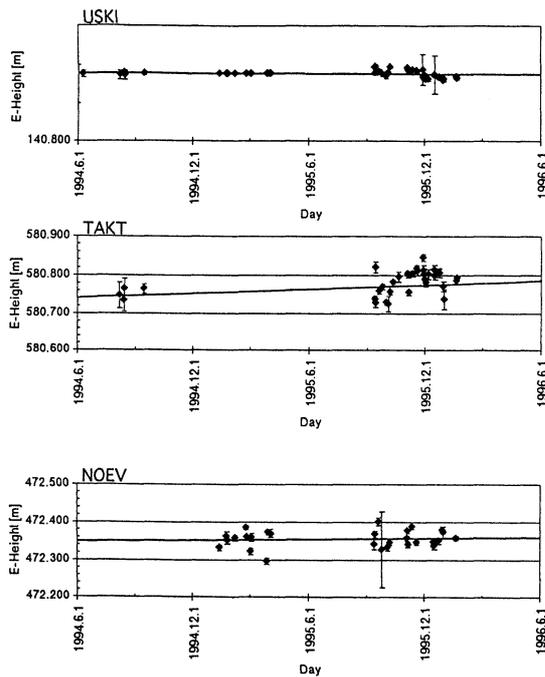
固定点における基線長経年変化 ②
(KAPRからの距離)



固定点における基線長経年変化 ③
(固定点からの距離)

第4図. 桜島周辺のIGPSによる基線長の経年変動(①~③)。これは図1の(b)に対応する。KAGU-TAKTは縮む傾向を示す。

Fig. 4 Observation net of baseline length by IGPS. This corresponds to (b) of Fig.1. The secular change in baseline length of TAKT-KAGU shows a tendency of contraction.



第5図. 図4における桜島周辺の楕円体高の変動。
TAKTで隆起の傾向が見られる。

Fig.5 Secular changes in the ellipsoidal heights of USKI, TAKT and NOEV. Upheaving tendency is seen in TAKT

KAGUに相対的な固定観測点の楕円体高変化 ②

が短いので今後の推移を観測を通じて見守る必要がある。

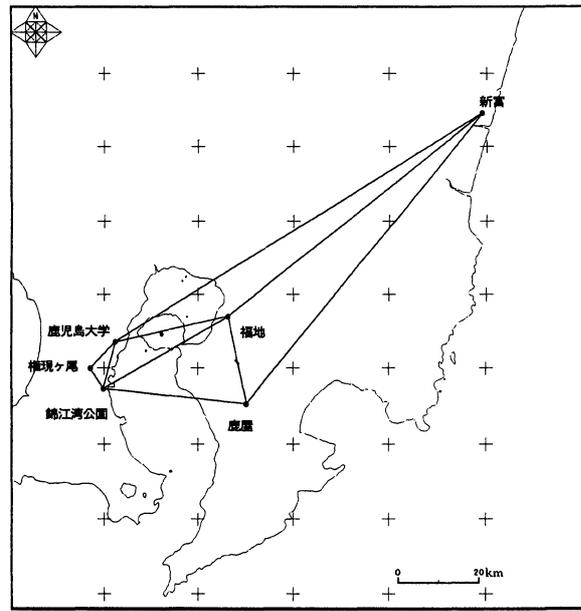
H11とMC5Dの水平変動の結果では伸びの傾向が見られる。これは観測点そのものが谷底の方への変動を示すような水平変動を示したのかも知れない、第1図(b)図の観測網図では観測期間も短いので有意な変動は認められない。これらの結果は松原(1996)のまとめによる。

(2) 高角薄板プレートによる九州南部の広域プレート変動の検出

ユーラシアプレートとフィリピン海プレートとの相対的力学的関係により、南九州では、桜島等を通る火山帯で鹿児島地溝が形成されており、それがどのように東西開閉・南北伸張するかが重要な問題となっている。現実にはこれらの変動が混合した状態で水平変動量として現れる。それに加えて、地溝とその周辺では隆起・沈降が生ずる。それらは火山体そのものであったり、東西方向での両プレートによる圧縮も加えてカルデラ壁やその外側で変動が生じたりする。永い年月では、それらが地形地質や活断層として現れるので、地形の成り立ちや活断層の機構が重要となっている。一方、地殻変動の長期的診断では地震の発震機構とその主応力が深さ方向の情報をもたらすので重要となっている。

こうしたことを考慮しながら、上記(2)のプレート変動の検出を実施した。解析期間は1993年～1995年のGPS観測キャンペーンで実施した3年間である。長野県臼田の宇宙科学研究所の臼田観測点を座標基地点として、Bernese GPS Softwareにより宮崎県新富町にある新富VLBI点補点と鹿児島大学構内のGPS固定点のITRF93座標を決定した。更にその固定点を既知点とし、GPPS(Ashtech, Inc.)を用いて、鹿児島湾周辺の観測点の座標をもとめた。第6図はそれらの位置図を示す。

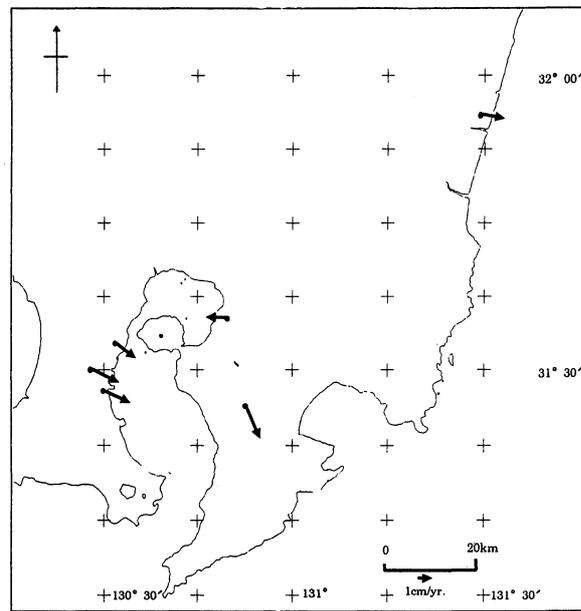
第7図は臼田に相対的な九州南部の最近3年間の変動から求めた水平変動である。福地～鹿児島大学間では約3 cm/yrで距離が縮んでいる。始良カルデラをほぼ東西に横断する寺山T～



南九州での観測網

第 6 図. プレート変動検出のための九州南部域の観測網図

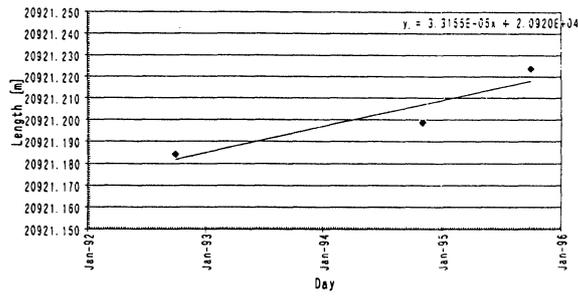
Fig.6. IGPS observation points for detecting crustal deformation by plate motion in the southern Kyushu.



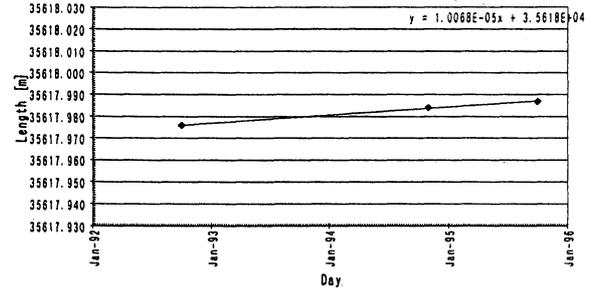
臼田点を不動としたときの南九州地方の地殻変動 (年変化率)

第 7 図. 最近 3 年間のデータから求めた臼田に相対的な九州南部の水平変動

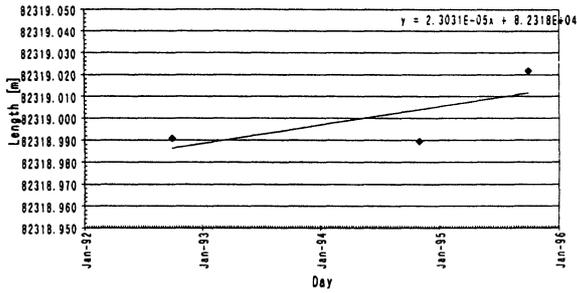
Fig.7. Horizontal deformation of South Kyushu relative to Usuda VLBI station for recent three years.



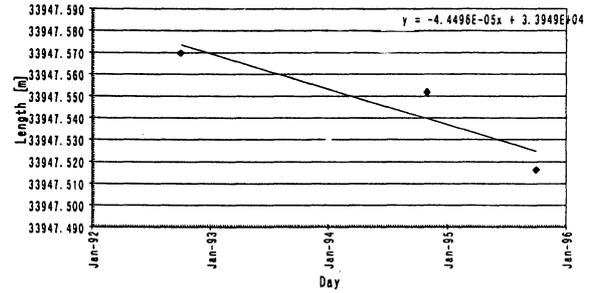
福地～鹿屋の基線長変化



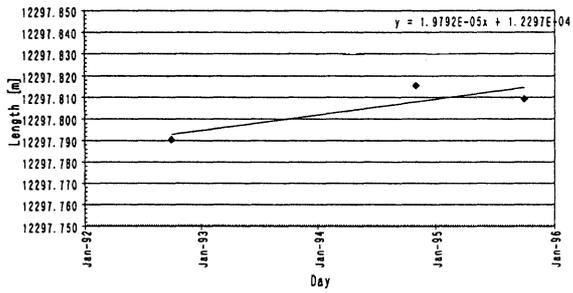
鹿児島大学～鹿屋の基線長変化



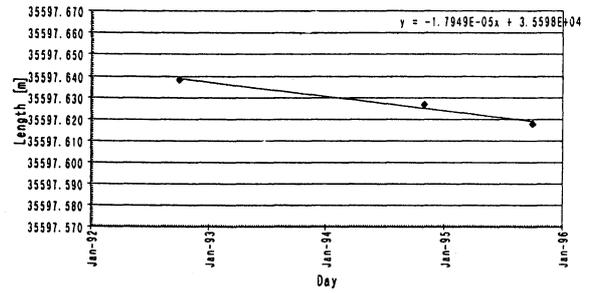
新富～福地の基線長変化



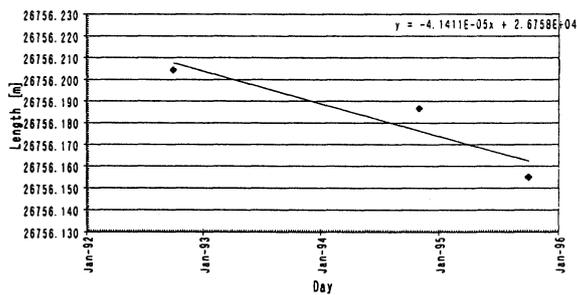
錦江湾公園～福地の基線長変化



鹿児島大学～錦江湾公園の基線長変化



錦江湾公園～鹿屋の基線長変化



鹿児島大学～福地の基線長変化

第8図. 各基線長の経年変化。ほぼ南北伸び, ほぼ東西縮みが検出された。

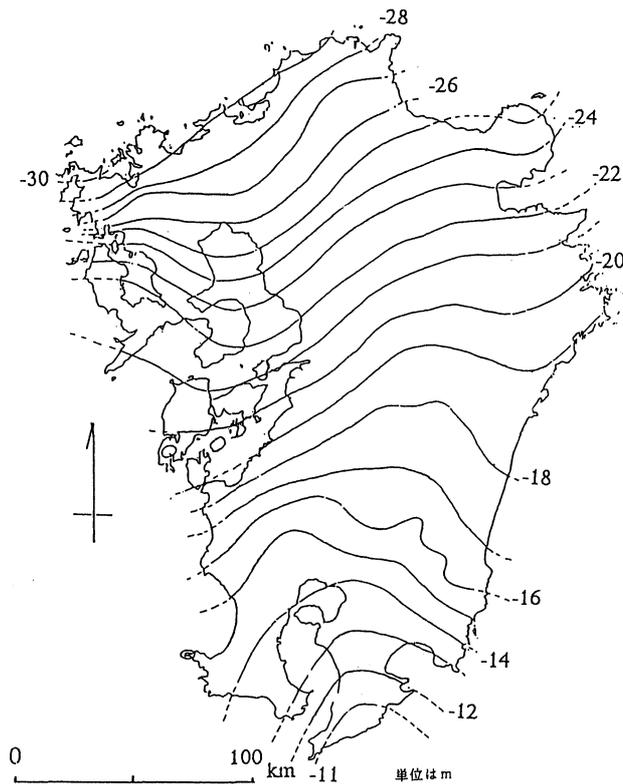
Fig.8. Secular change in each baseline length. Elongation in about N-S direction and contraction in about E-W direction were detected.

浮津U間の基線長変化は約2 cm/yr (江頭, 1995)である。福地~鹿児島大学間の縮みが大きいのは、この期間での始良カルデラの活動と桜島火山活動の両者を含む結果だからと思われる。第4図のKAGU-TAKTの結果からも東西縮み南北伸びが若干認められる。

第8図に各基線長の変化を参考のため示す。ほぼ南北伸び、ほぼ東西縮みは両プレートによる東西圧縮を示唆する。鹿屋点の南西進が大きいいため鹿児島大学~鹿屋の基線長は伸びの傾向を示す。地質年代では鹿児島湾は東西に開いているが短期的には圧縮され、閉じていることが理解されよう。これらの変動を検出することにより長期的噴火の推移を把握することが出来る。これらの結果は最勝寺(1995)による。

(3) 九州南部における短波長精密ジオイド高の検出と鹿児島地溝のモデルの解明

日本全国の一次基準点(従来の1・2等三角点)測量結果をもとにした基準点座標92(国土地理院, 1994)による九州地方のジオイド高は第9図に示される。九州南部では火山や地形地質、地溝などの影響を受けた短波長ジオイド起伏があるはずであるがメッシュが粗いためか本図では短波長ジオイド起伏が認められない。重力データを基にしたFukuda et. al. (1993)による精密ジオイドでも同様である。

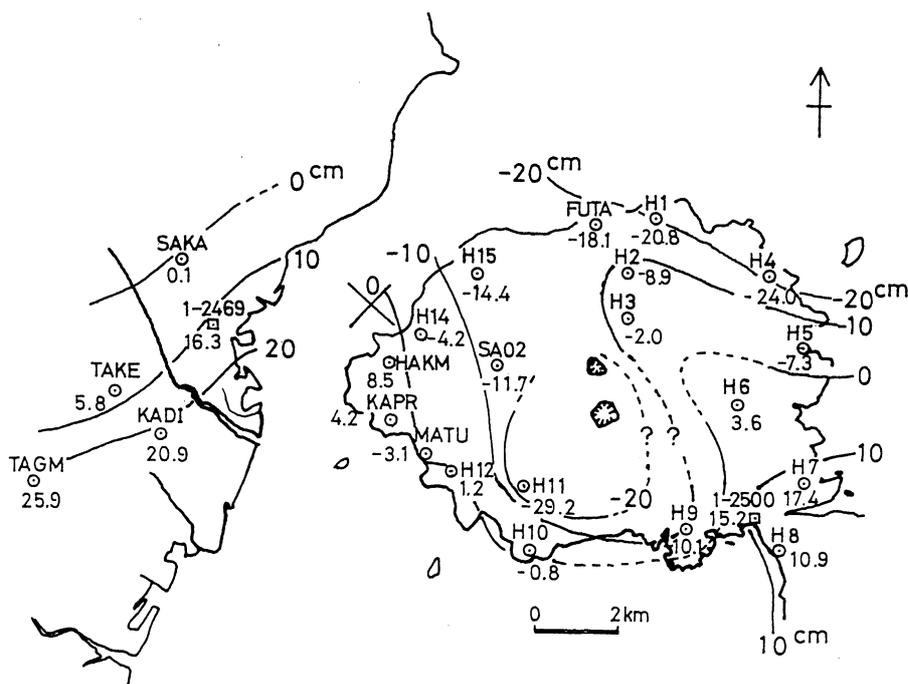


第9図. 基準点座標92による九州地方のジオイド高(国土地理院, 1994)。

Fig.9. Geoid height in Kyushu compiled from the Geodetic Framework of Japan 92 by the Geographical Survey Institute (1994).

このため、桜島とその周辺において測地データの整った三角点上での GPS 干渉測位を実施し、局地的なジオイド高を求めてみた。

第10図は、桜島とその周辺における楕円体高である（田中・他，1995）。桜島では火山噴火による標高変動が大きく、通常の「楕円体高（IGPS によって得られる）－標高（測地測量によって得られる）」では、ジオイド高は決められない。GPS 測量と測地測量をほぼ同時に実施するか、地殻変動が無視できるほど小さければ良いが、桜島では三角点設置時（1970年頃）以降の標高変動が大きいのでその補正がどうしても必要となる。標高変動は第11図に示す。国土地理院（多田・橋本（1988））と京大防災研・他（江頭（1989））による両者の結果を合成したものである。図中の×印は多田・橋本（1988）による噴火源の位置を示す。江頭（1989）の2圧力源モデルの結果とはその位置が若干異なる。第10図から第11図を引いたジオイド高は第12図（田中（1997））で示される。この結果、ジオイド高は桜島では10～20cmの変動を示すことが判った。この変動と Yokoyama and Ohkawa（1985）による重力異常から求めた地下構造と比較したのが第13図である。噴火の影響による沈降と鹿児島市と桜島西部との間で桜島側の落ち込みが見られる。早坂・大木（1971）による地質基盤の落ち込み正断層を反映した結果を示す。1914年当時 M 7.1 の地震発生もあり、正断層的活断層の発達途上を示唆する。

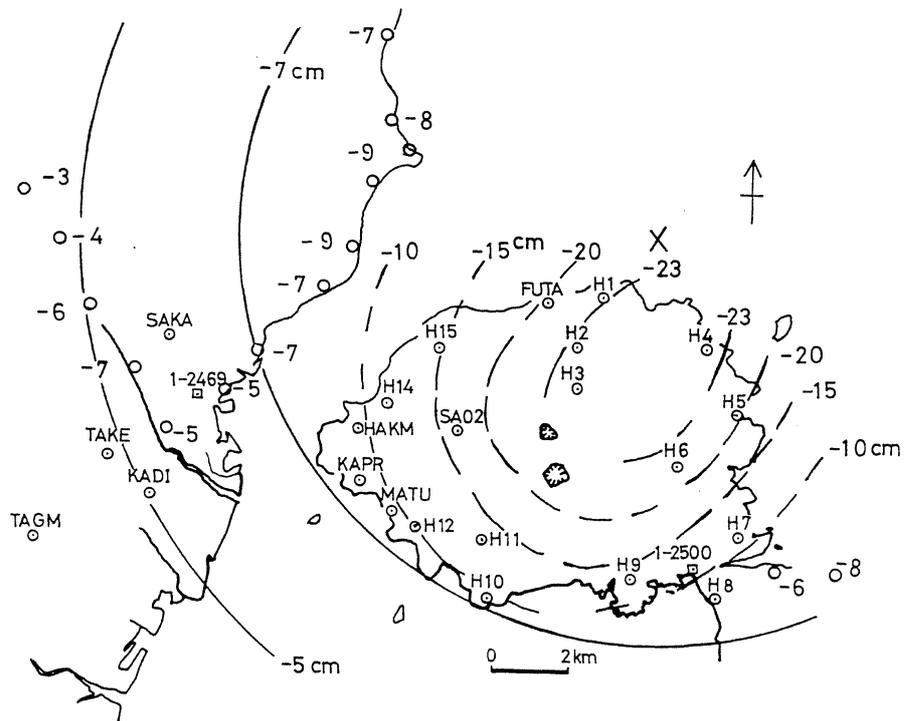


第10図. 桜島とその周辺における楕円体高（田中・他，1995）。

×印は1914年噴火直後の M 7.1 の震源位置を示す。

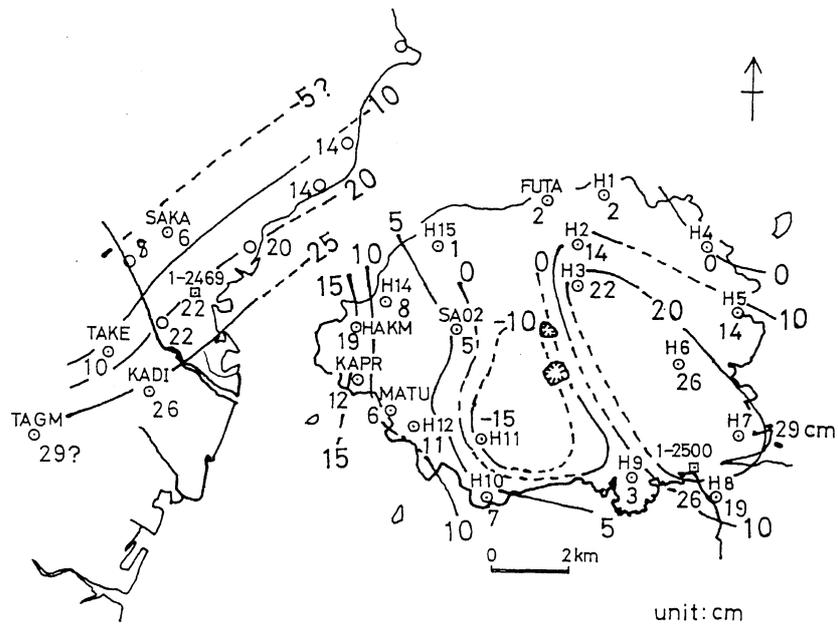
Fig.10. The ellipsoidal height in and around Sakurajima (Tanaka et. al., 1995).

× mark shows the epicenter of the earthquake occurrence (M7.1) just after the 1914 eruption.



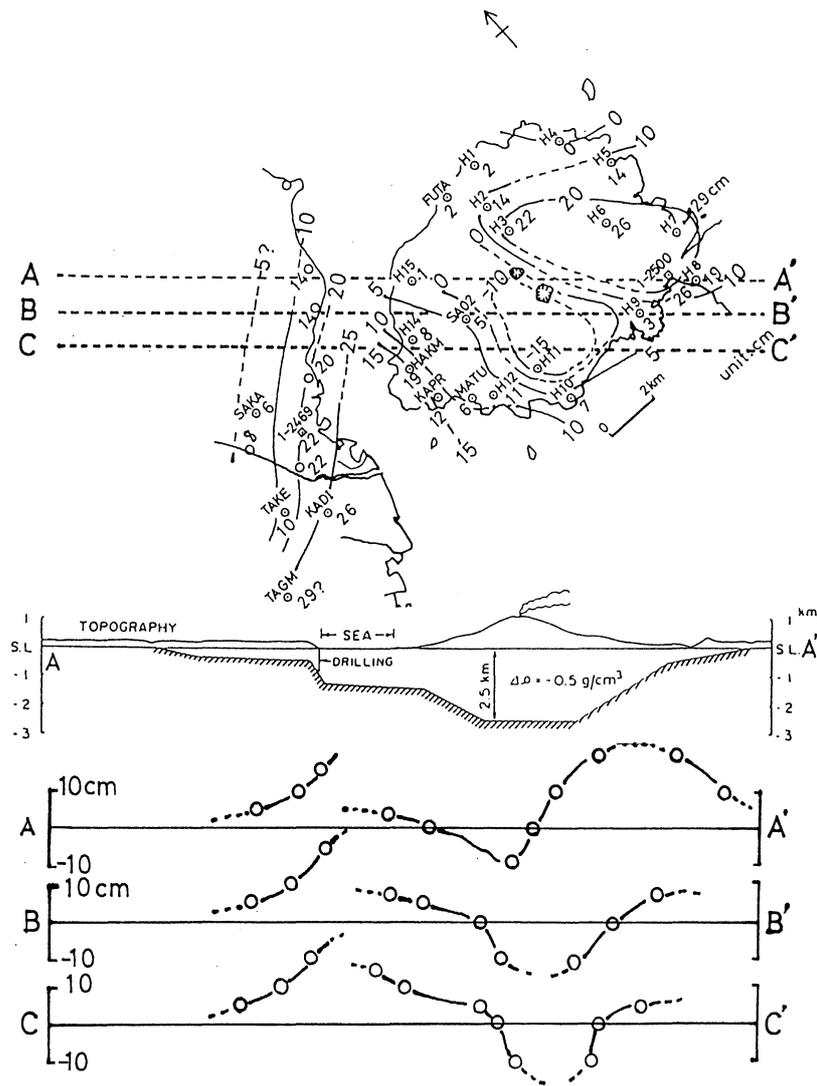
第11図. 桜島火山とその周辺における標高変動

Fig.11. Secular change in the orthometric height (1987/88-1974/75) in and around Sakurajima (Tada and Hashimoto (1988) and Eto (1988)).



第12図. 桜島火山のジオイド起伏 (田中, 1997)

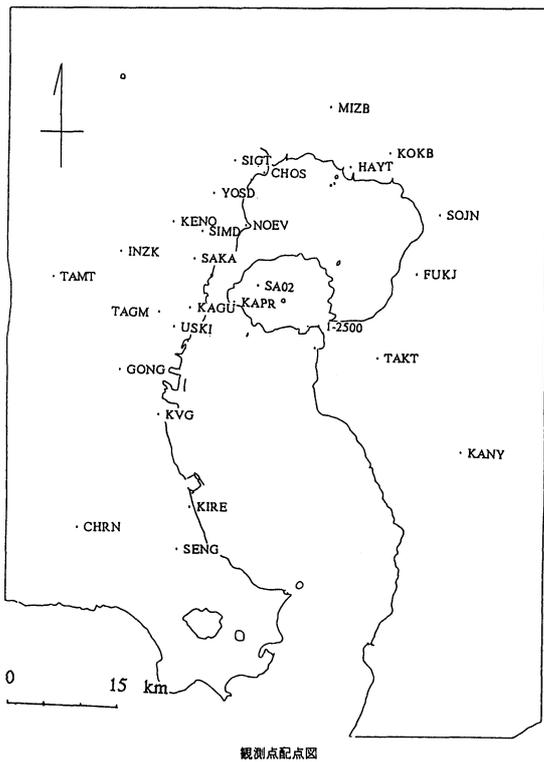
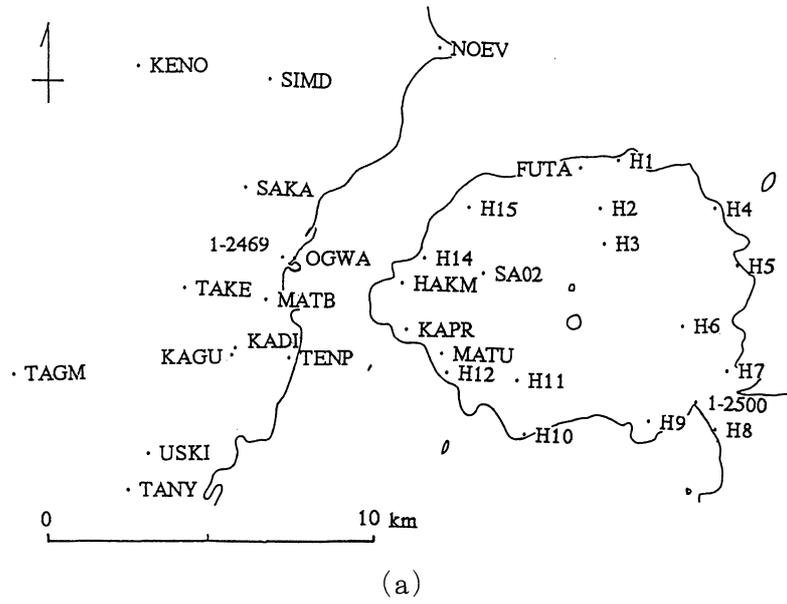
Fig.12. Geoidal undulation in and around Sakurajima Volcano (Tanaka, 1997).



第13図. 図12から得られた桜島火山周辺のジオイド起伏の断面図と Yokoyama and Ohkawa (1986) による地下構造断面 (A-A') との比較

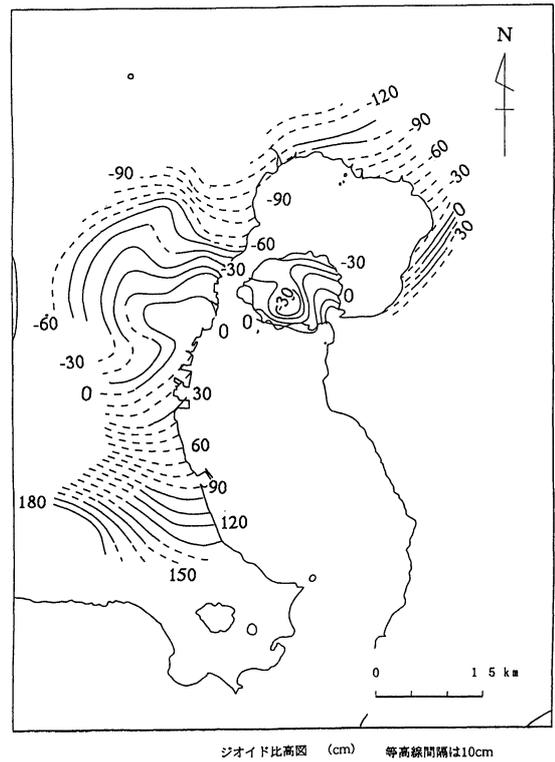
Fig.13. Profiles of the geoidal undulation (A-A', B-B', C-C') (upper and bottom) shown in Fig.12 and the subsurface structure along the A-A' (NE-SW) by Yokoyama and Ohkawa (1986) (middle).

第14図は、桜島を除く周辺では地殻変動は小さいとして「楕円体高-標高」によりジオイド高を求めた結果を示す。(a), (b)にその観測網図を示す。(c)に桜島とその周辺西部にジオイド起伏を示す。(まとめは黒沢 (1995) による)。第15図に大隅半島北東部の観測網図とその結果を示す(まとめは愛甲 (1996) による)。鹿児島市周辺と高隈山地でジオイド高が高くなっているのが見つかった。また、第5図の高隈 (TAKT) の隆起と桜島の影響、第7図の鹿児島湾のほぼ東西短縮の結果も考え併せると、鹿児島地溝の成因とその活動に大きな解決の糸口を実測のうえから示したことになる。



観測点配点図

(b)

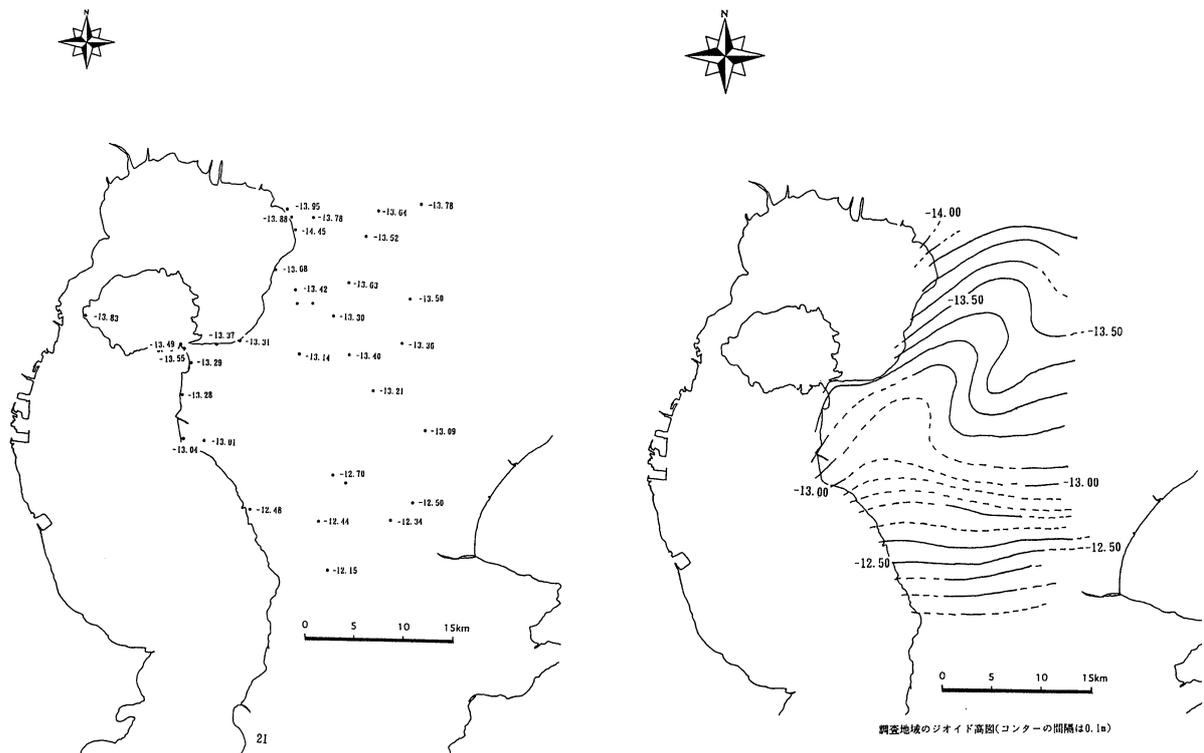


ジオイド比高図 (cm) 等高線間隔は10cm

(c)

第14図. 鹿児島湾北部周辺-薩摩半島中部の観測網図とそのジオイド起伏

Fig.14. Observation net and its geoidal undulation around the northern part of the Kagoshima Bay including the middle part of Satsuma peninsula.



第15図. 大隅半島北東部の観測網図とジオイド起伏

正のジオイド起伏が鹿児島市付近(図14)と本図の高隈山地付近で見つかった。

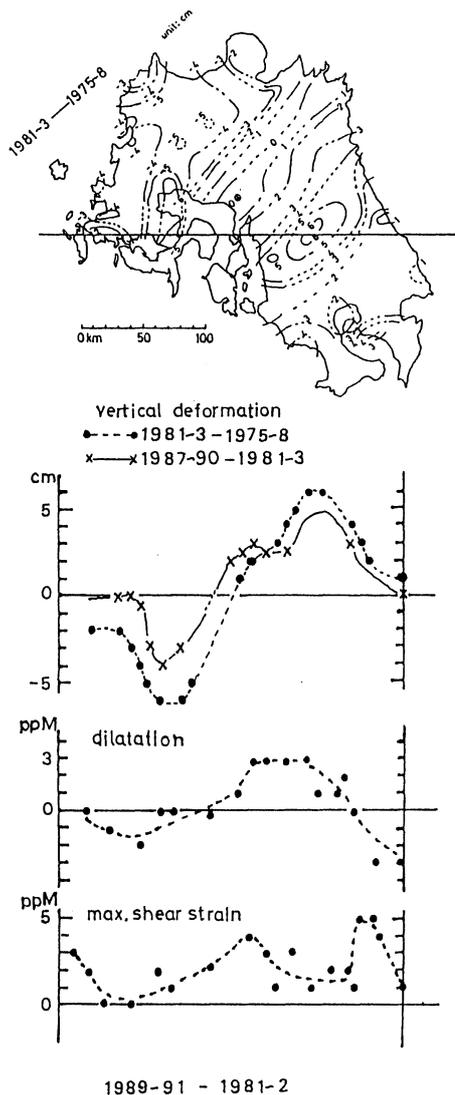
Fig.15. Observation net and its geoidal undulation in the northern part of Oosumi peninsula.

The positive geoidal undulation anomalies were found in Kagoshima City and its vicinity shown in Fig.14 (c) and the northern part of Takakuma mountain region in this figure (right).

(4) 精密地殻変動から推定する高角薄板プレートによる九州地方の地殻変動モデルとそのジオイド起伏

九州に向かって潜り込むプレートは、太平洋プレートの低角厚板プレートと異なり、高角薄板プレートの潜り込みである。このため、地殻上下変動の様相は東北日本と異なり歪みエネルギーの熱エネルギーへの変換が大きく九州中央部隆起を示す。それを第16図上図に示す。一方、国土地理院の精密一次基準点測量の結果、水平変動のうち、三角測量データを除くレーザー測距同志だけの比較から、面積歪(中図)は概ね隆起と対応し、最大せん断歪(下図)は隆起ないしは面積歪の周りでそれらを解消するように概ね大きくなる傾向があることが判った。この値は誤差の限界を越えるか越えない程度の範囲の値のため傾向とした。地球時間でゆっくり暖めた場合には、例えば、地殻おもちの膨らみは中心から壊れるのではなく、周りから壊れることを示す。火山地形等ではこれが現れている例が屢々見られる。

こうしたことから、ジオイド起伏の膨らみと地震と活断層のデータを調査した。それを第17図に示す。ジオイド高起伏(Fukuda et. al. (1993))の周りで地震(気象庁, 1994)が発生し、活断層を生じている。或いは、地震の発生機構を見ると、その発達途上にあることが判る。全国調査は次回に報告する(田中, 1997)。



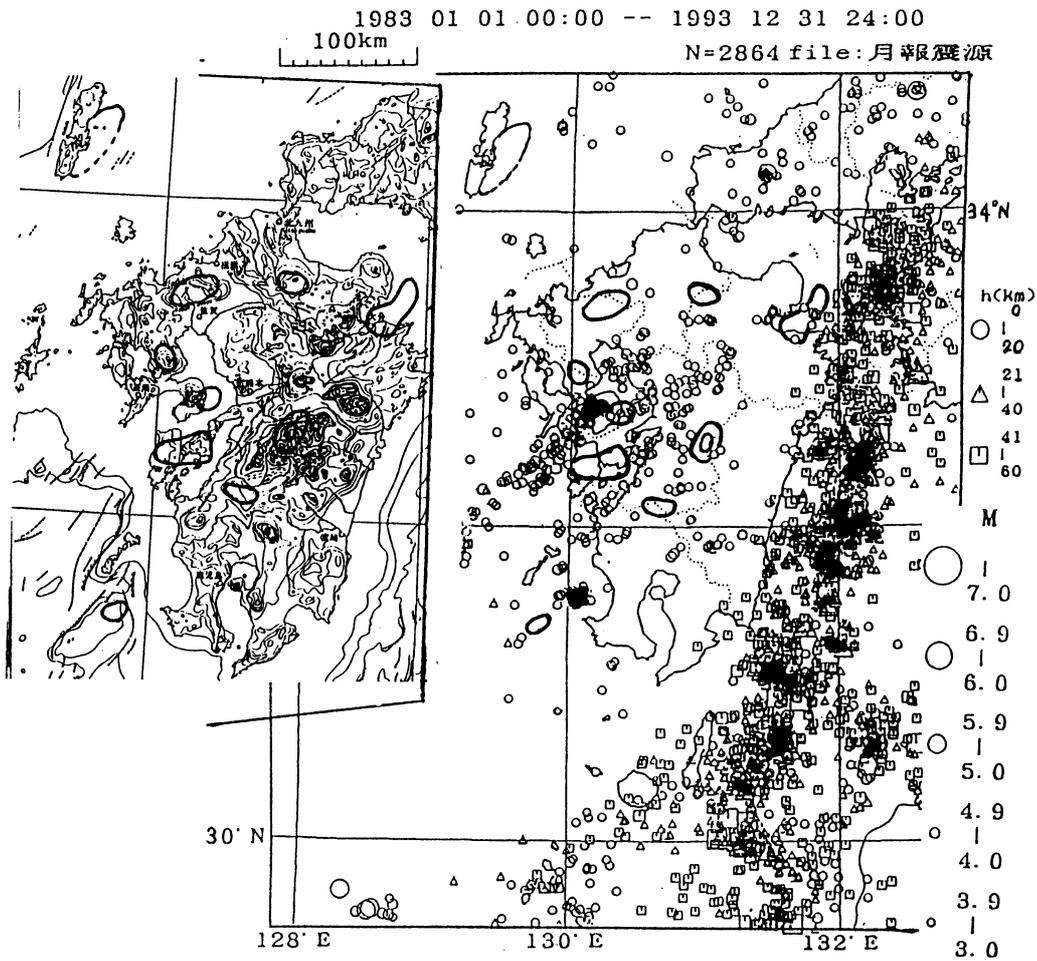
第16図. 最近10年間の九州地方の活動テクトニクスと九州パラオリッジの方向の延長上での断面図。隆起域と面積歪は概ね対応し、その周辺部でせん断歪が大きい。高角沈み込みプレートの特色を示す。

Fig.16. Active tectonics in recent 10 years in Kyushu district and its profile of vertical variation in an extension line of direction of the Kyushu-Palau ridge. Upheaving area almost corresponds to dilatation area and maximum shear strain is slightly large around its upheaving area. This shows the typical pattern of crustal deformation caused by the thin and high angle subducting plate.

(5) 最新の新技术 — GPS 気象学による水蒸気量の推定

GPS 電波は 1.57542GHz と 1.2276GHz の 2 周波があり、円軌道の高度約 2 万 km の GPS 衛星から送信される。受信周波数は電離層と対流圏の影響を受け、後者の方が影響は大きい。この影響を補正し、位置を正確に求めることが必要である。逆に、この補正量を使って、大気中の水蒸気量を推定できる。GPS 観測点 1000 点時代に何が出来るかで地殻変動、地震予知、火山噴火予知、カーナビゲーション等地図利用以外に、GPS 受信電波の高精度化のため、GPS 気象学をしよう、日本全国上空の水蒸気量のトモグラフィをつくり、気象予測に役立てようとの努力が GPS 研究者、気象学者により試みられている。南九州では台風銀座と称されるほど台風が多いので、台風シーズンや梅雨期などでの集中豪雨による水蒸気量の推定は、地元としても災害予測のために必要不可欠な研究テーマである。

GPS 電波は波長約 19cm で、降水前後の RHI レーダー(長崎大学)による雨滴のエコーは、9.4 GHz の波長 3.2cm で観測される。これらとの比較観測をして水蒸気量との関係を探り、GPS 電波の気象による攪乱の補正をすると共に気象学にも役立てようというのが我々の目的である。

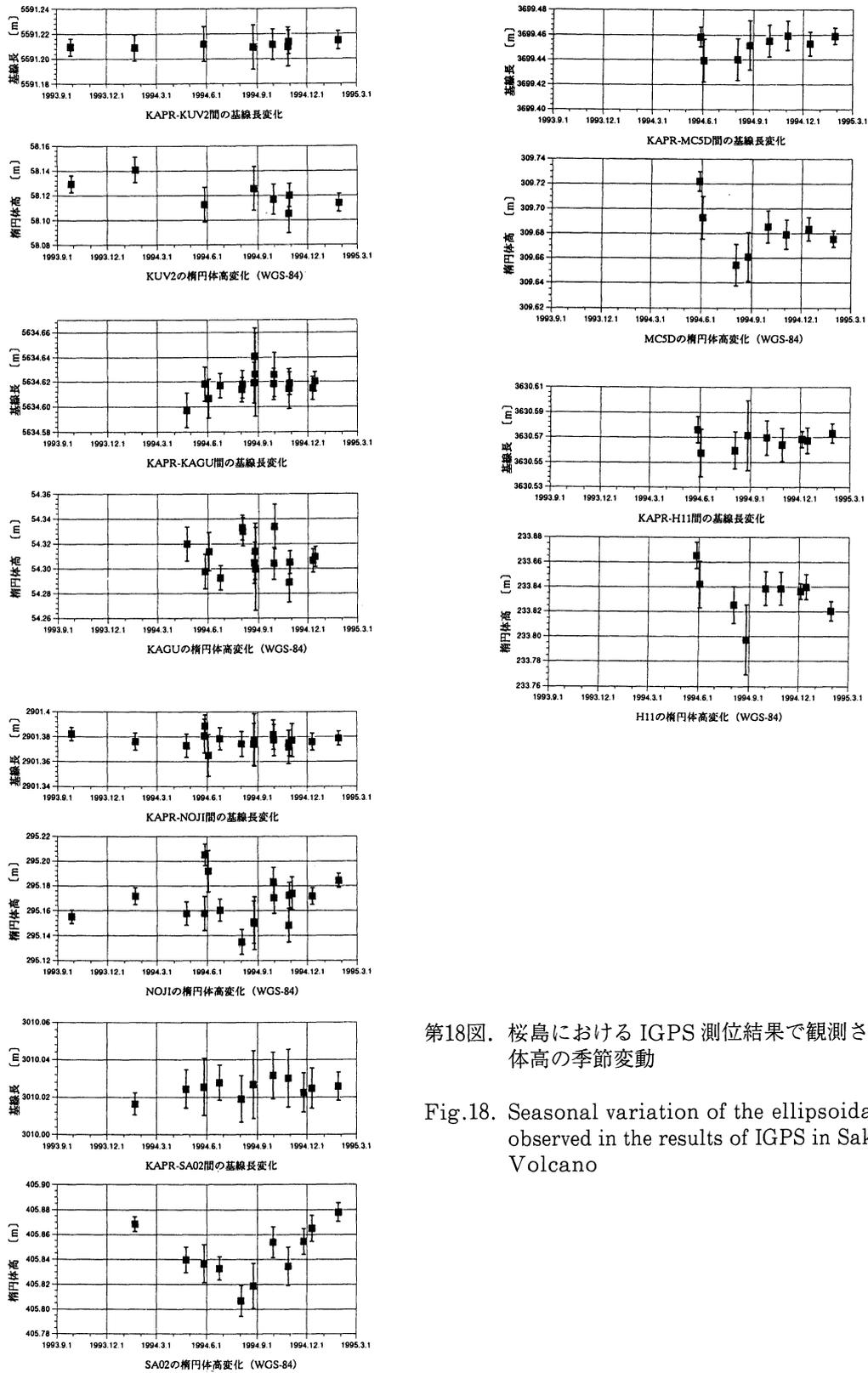


第17図. 九州地方におけるジオイド起伏異常と地震及び活断層

Fig.17. The relation among the geoidal undulation anomalies (thick solid circle) (Fukuda, Shi, Segawa, 1993), the shallow earthquakes (J. M. A., 1994) and the active fault in the Kyushu district (Active Fault in Japan, 1980).

From these results, earthquake are expected to occur around the geoidal undulation anomalies.

第18図は桜島における GPS 楕円体高の測位の結果で、季節変動の大きい電波攪乱の例を示す。基線長の変化には余り影響はしないが、楕円体高の変化は比高が増すと影響が大きくなることが判る。また、6月～9月頃、特に8月は影響が大きい。比高が同じ程度では、影響が小さい。200mを越えると影響が大きいことが判る。ばらつきの程度は比高で5cm程度である。これらの結果は、仮屋(1994)のまとめによる。この事からもGPS観測値に対して気象補正をし、正しい変動量を決定することが重要である。



第18図. 桜島におけるIGPS測位結果で観測される橢円体高の季節変動

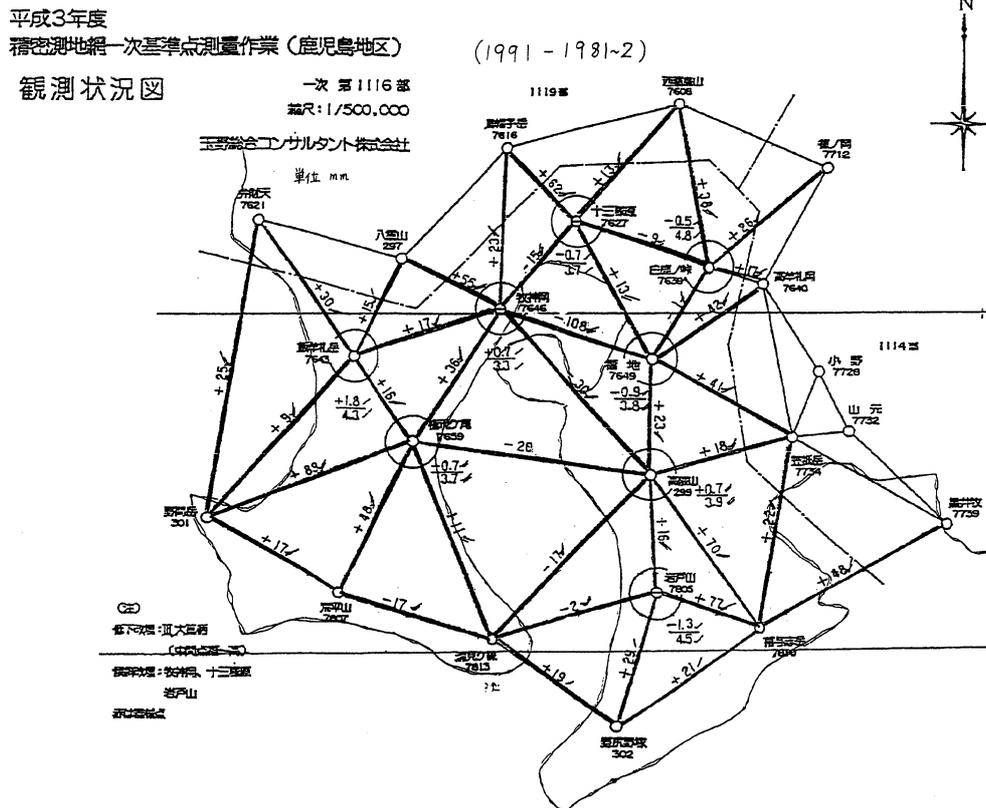
Fig.18. Seasonal variation of the ellipsoidal height observed in the results of IGPS in Sakurajima Volcano

3. 討論と結論

GPS の干渉測位の相対精度は 10^{-7} から 10^{-8} に達しているが定誤差が 5 mm 以下程度あり、近距離の測距の場合には若干の精度の低下を招いている。しかし、これまでのレーザー測距の相対精度10kmで約 1 cm という 10^{-6} の精度は有している。鉛直方向の高さの精度は、8月を最大に7~9月頃の気象の揺らぎの大きいときに低下する。こうしたことを踏まえてデータを見てみよう。

(1)のIGPS による水平変動の検出では比高差が大きいとき、夏場の時には若干精度が低下する。測量中の突然の雷雨等で誤差が大きくなった例もある。第1図(a)図の約2年間のGPSデータによる桜島における経年変動は特に際だった変動は見られないが季節変動との関係もあり、その推移を見守ることが必要である。上下変動については、標高の低いKAPR が小さな季節変動を示す中で全体として隆起の傾向が見られる。

KAPR 8 ± 5 mm/yr, NOJI 9 ± 5 mm/yr, SAO 210 ± 5 mm/yr, H9 12 ± 8 mm/yr であるが、MC5D 26 ± 5 mm/yr, H11 19 ± 2 mm/yr, で噴火口に近いほど若干隆起率が大きい。がHKMH 26 ± 6 mm/yr は始良カルデラに近いためとも考えられるが、誤差も大きいので今後のデータの蓄積が必要である。TAKT は 20 ± 31 mm/yr なので誤差の方が大きい、この観測点の重要性もあり、観測を継続する必要がある。



第19図. レーザー測距による精密測地測量一次基準点測量結果
(1991年11月~1982年度)(国土地理院による).

Fig. 19. Precise geodetic survey result by laser distance measurement
(Nov. 1991-1982) (Geographical Survey Institute 1993).

始良カルデラのマグマ蓄積による桜島周辺を含む全体の隆起の中で、噴火口付近の隆起現象の振る舞いの解明のためにも、広域的に拡大した観測網の中で観測を継続しながら、プレート変動による広域変動の中でその推移を見守ることが重要となろう。

(2)の九州南部のプレート変動の検出では、鹿児島地溝の南北伸び、東西縮みの傾向が検出された。平成3年度の精密測地網一次基準点測量結果(1991年11月-1982年度)(国土地理院, 1993)では、鹿児島湾北部の東西縮みが大きく(一等三角点牧神岡7646(NOEVに近い)と福地7649間でこの間-10.8cm)、権現ヶ尾7659-高隈山299間では-2cmとなっている。一方、鹿児島湾両側の南北基線はいずれも伸びとなっている(第19図)。この結果とIGPSによる結果と比べるとIGPSの方が過大評価に検出されている。この理由は、観測期間が短かったこと、観測精度がまだ粗いこと(気象補正が十分でない)、網の形が良くないこと、等が指摘される。今後は南九州全域の観測網で形を良くして期間も長く取り、再度挑戦することとする。

(3)の短波長ジオイド高の検出と鹿児島地溝のモデルについて、短波長ジオイド起伏は、Yokoyama and Ohkawa(1985)による重力異常と地下構造を比較しながら、ほぼ東西線上のプロファイルで噴火口付近では、沈降でほぼ南北開口割れ目状であるが、その周辺部南北両側では、盛り上がりとし断層の生成を示唆する。一方、それらの更なる遠方の両側では、正のブーゲ異常があり、ジオイド起伏も盛り上がりの傾向が検出されたので、地溝のモデルは、2重起伏を示す結果となっており、プレートとの関係も示唆されよう。両プレートに圧縮される潜り込み地帯の地溝のモデルが提唱される。雲仙-島原地溝帯とはスケールと内容が異なっている。現在、調査中でもあり、稿を改めて報告する予定である。

鹿児島地溝は大西洋海嶺などの変動パターンのミニエィチュア版を示している国内第1級のフィールドであるが沈み込み帯にあるので微細構造は大西洋海嶺とも若干異なっている。我々の結果は地溝と火山の関係について新しい知見が得られたことを示す。九州は地形的に見て、箱庭的に普遍的内容が盛り込まれている。鹿児島地溝以外にも、例えば、内海の成因について、九州中西部の有明-島原-八代湾の沈降は瀬戸内海等の沈降の解明に有力な情報をもたらすことに成ろう。

(4)の精密地殻変動から推定する高角薄板プレートによる九州地方の地殻変動モデルについては、隆起を示すとき、面積歪は隆起と相関するが、せん断歪は面積歪の周りで大きくなる傾向が見られると述べたが、データは国土地理院によるものであり、その判定基準になる誤差については、下記の通りである。

隆起は一等水準測量により検出されたものでプロファイル上では10cmに及び、1975-8年を基準にして2回同じ傾向であり、誤差を越える変動である。精密測地網一次基準点測量結果(1989-91-1981-2)はレーザー測距のみのデータなので大きく見て前後2回で5ppmの誤差は免れない。面積歪は6ppmの変動、せん断歪は5ppmであるから、傾向が得られたと云う程度であろう。測地測量データから解析検出する地殻変動は普通有意かどうかの誤差の限界一杯一杯のところまでバラつくデータが多い。その中で、過去の経年変動を見ながら真実を見通すことが必要となっている。上記の内容は従って傾向として検出されたというのが正しい。こうしたことを踏まえて、ジオイド起伏と地震分布を比較した。この結果、隆起を解消する、即ち、不安定なジオポテンシャル場は、その異常場の周りで破壊、即ち、地震を起こして異常地殻変動を平準化して安定化するという像が得られる。通常、重力ポテンシャルは変動しないといわれているが不安定場では破壊を起こして安定化する。前年の北海道深川付近の地震や今年の宮城県北部北鳴子付近の地震は正のジオイド起伏の周りで破壊を示した好例で、直下型地震の予知に知見を与える。全国版については追って報告する。

(5) 最新の新技术 — GPS 気象学による水蒸気量の推定

この件については、台風銀座と云われている鹿児島こそ最も最適の実験場であるので、GPS 研究者と歩調を揃えながら、進めている段階である。第18図は、気象補正が必要であることを示す。又、この補正は、桜島の噴火予測のためにも重要である。九州南部では、桜島を越える山越え気流の問題一つ解決されていない現状である。

結論として、鹿児島地溝のモデルを解明するための、新しい知見として、地溝を横切る方向での正の2重のジオイド起伏プロファイルが得られた。目下調査中のところもあるが、プレート変動と地溝と火山の相互作用を示す新しい結果を提供したことになろう。又、茂木モデルにもある種の制約をあたえることに成ろう。問題点として、九州中部の日本海側の有明海などのように、九州南部でも甑島が発達して、何故沈降湾を形成しなかったのかが指摘されよう。長宗・田代(1989)の指摘する桜島を通る北西-南東の断裂構造線や沖縄トラフ北端部の影響が関係しているのかも知れない。鹿児島湾の成因も含めて今後調査していきたい。

南西島弧地震火山観測所の GPS 機材使用の協力に関し厚く感謝します。また、大木公彦助教授の討論にも謝意を表します。第6図、第7図、第8図の結果は GPS グループ(地震研 加藤照之、九大理学部島原 松島 健、高知大理 田部井隆雄、他)各氏の協力による。又ジオイド計測に必要な三角点成果は国土地理院による。併せて厚く感謝します。

参考文献

- 江頭庸夫, 1989, 桜島火山周辺における地盤変動—1985年~1988年—, 第7回桜島火山の集中総合観測(1988年10月~12月), 13-19.
- 江頭庸夫, 1995, 桜島火山周辺における地盤変動—1988年~1991・1992年—, 第8回桜島火山の集中総合観測(1991年10月~1992年3月), 15-21.
- Fukuda, Y., Shi, P. and Segawa, J. 1993, Map of Geoid in and around Japan with JODC J-BIRD Bathymetric Chart in a Scale of 1 : 1,000,000. Bull. Ocean Res. Inst. Univ. Tokyo, No31.
- 早坂祥三・大木公彦, 1971, 鹿児島市地域のボーリング資料にもとづく地学的考察. 鹿児島大学理学部紀要(地学・生物学)4, 15-29.
- 石原和弘, 1995, 桜島火山の噴火活動予測. 科学(岩波), 65(10), 708-710.
- 角田寿喜・宮町宏樹・高木章雄, 1991, 九州-琉球弧北部の稍深発地震. 地震, 2(44), 63-74.
- 鹿児島大学理学部, 1994, 6-17 桜島西部の GPS 観測結果(田中穰). 地震予知連会報, 52, 515-518.
- 鹿児島大学理学部, 1994, 桜島西部におけるレーザー測距と GPS による地殻変動観測(田中穰). 火山噴火予知連会報, 59, 100-105.
- 気象庁, 1994, 大・中・小地震, 地震予知観測の成果(3). —近畿・中国・四国・九州・沖縄地域—地震予知連絡会地域部会報第6巻, 国土地理院, 13-31.
- 国土地理院, 1993, 私信.
- 京都大学防災研究所桜島火山観測所・東京大学地震研究所, 1995, 1995年8月25日桜島南岳の噴火と最近の火山活動. 火山噴火予知連会報, 63, 88-90.
- 長宗留男・田代秀樹, 1989, 九州下における和達-ベニオフゾーンの形状. 地震, 2, 44, 13-19.
- 最勝寺俊秀・田中穰・寺家孝明・小林亜由美・吉島陽子, 1994, 桜島西部における GPS 地殻変動観測.

鹿児島大学理学部紀要（地学・生物学）**27**, 173-187.

多田堯・橋本学, 1988, 最近の始良カルデラ周辺の地殻変動と桜島火山の活動について. 鹿児島国際火山会議1988論文集, 270-273.

田中穰, 1993, 火山の総合的展開法に関する調査研究報告書—火山と地域産業—. 鹿児島大学, 研究代表者, 田中穰, 第4章, 九州南部地方の地震・火山テクトニクス, 73-89.

田中穰・中野博・寺家孝明・高濱伯主・最勝寺俊秀・吉島陽子・小林亜由美, 1993, 桜島湯の平—鹿児島大学理学部間の距離の経年変化. 鹿児島大学理学部紀要（地学・生物学）, **26**, 101-106.

田中穰・小林亜由美・寺家孝明・吉島陽子・最勝寺俊秀, 1995, GPS/三角点観測から検出した桜島火山とその周辺の楕円体高の長期的変動. 鹿児島大学理学部紀要（地学・生物学）, **28**, 63-78.

田中穰, 1997, 桜島火山周辺におけるGPS干渉測位による精密ジオイド高の検出とその時間変動に関する一考察. 測地学会誌, 出版予定.

Yokoyama, I. and Ohkawa, S. 1986, The Subsurface Structure of the Aira Caldera and Its Vicinity in Southern Kyushu. *J. Volcano. Geotherm. Res.*, **30**, 253-282.

本稿のまとめに使用した火山学講座の卒論, 修論に関する調査研究報告書は下記の通りである.

- ・松原有子, GPS観測による桜島およびその周辺の地殻変動, 1995年度特別研究B.
- ・最勝寺俊秀, GPSによる南九州地方の地殻変動の検出, 1995年度理学研究科修士論文.
- ・黒沢知也, 「GPS/水準」法による鹿児島湾北部周辺のジオイド比高の決定, 1994年度特別研究B.
- ・愛甲華子, GPS/水準法による大隅半島北部地域のジオイド比高の検出, 1995年度特別研究B.
- ・仮屋新一, 桜島とその周辺におけるGPS観測, 1994年度特別研究B.