

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

田中 穰¹⁾・小林亜由美²⁾・寺家孝明³⁾・吉島陽子¹⁾・最勝寺俊秀¹⁾

(1995年9月28日受理)

Long Term Variation of the Ellipsoidal Height in and around Sakurajima Volcano
Detected from GPS Observations/Triangulation Survey Data

Minoru TANAKA, Ayumi KOBAYASHI, Takaaki JIKE, Yoko YOSHIJIMA
and Toshihide SAISHOJI

Abstract

For detecting long term vertical crustal deformation in a volcanic region from a precise GPS measurement, observations at triangulation points are very useful because each surveying final result preserves the observed values at the time of the past surveying. With this purpose, differential GPS observations at about 25 triangulation points were carried out in 1993-4 in and around Sakurajima Volcano.

These results on secular change in the ellipsoidal height difference were obtained as follows, by correcting the present GPS observation data to the past triangulation point data, which were resurveyed in about 1970.

- (1) Subsidence area which amounts to about 29cm around the mountaintop including a crater (Minami dake) was detected,
- (2) Uniform tilting pattern of subsidence and upheaval in the northern and southern sides of Sakurajima was detected, respectively. The secular change in subsidence toward the center of the Aira Caldera is suggested from this tendency.
- (3) Anomalous upheaval (about 0.5 cm/yr) is seen in the south-eastern part of Sakurajima (in and around Sakurajima-guchi).

¹⁾ 鹿児島大学理学部地学教室 〒890 鹿児島市郡元1丁目21-35
Institute of Earth Sciences, Faculty of Science, Kagoshima University, 1-21-35 Korimoto,
Kagoshima, 890 Japan

²⁾ 株式会社萩原技研 〒890 鹿児島市山下町15番27号 現姓 山本亜由美
Hagihara Giken Co. Ltd., Yamashita-cho 15-27, Kagoshima, 890 Japan, present surname, Ayumi
YAMAMOTO

³⁾ 国立天文台地球回転研究系水沢観測センター 〒023 岩手県水沢市星が丘町2-12
National Astronomical Observatory, Division of Earth Rotation Mizusawa Astrogeodynamics
Observatory Mizusawa, Iwate-Ken, 023 Japan.

- (4) The irregular change in the contour map of the secular vertical movement shows the different motion between the eastern side of Kagoshima City and the western side of Sakurajima, which suggests a normal fault motion at the western boundary of the Kagoshima Graben.

Further investigation through a precise GPS measurement extending over a wide area is necessary to confirm these points. Moreover, it is very important to distinguish the neighboring uniform geoidal height differences from the secular vertical crustal deformation which tilts toward the center of the Aira Caldera from the southern part of Sakurajima. On this point, theoretical consideration is developed in this report, deriving a new conversion formula to detect varying geoidal height anomaly by differential GPS between new and old geoidal heights as the first approximation.

Key words: GPS-Leveling-Gravity, Sakurajima Volcano, changing height anomaly formula $\delta\zeta$

1. はじめに

地殻の上下変動の検出は、広域的には、ほぼ7～8年間隔の全国の定期的な繰り返し1等水準測量を実施する国土地理院により行なわれている。全国的な改測は既に7回目が1987年頃の九州から始まり現在東北地方で実施されているが、桜島とその周辺の測定は1914年の大噴火もあり、9回実施されている（国土地理院，1972，1982，1988）。一方、九州地方の水平変動については1等三角測量の繰り返し測量は除いて、一次基準点測量スケールでは、明治期の三角測量も含めて、1891～93，1981～82，1989～1991の3回実施されている。これらの結果は田中（1993，3月）により分析され、桜島火山の活動が九州南部のかなりの広域にわたり地殻変動として見られること、及び桜島がこれまでの沈降期から膨脹期へ移行したことが示された。即ち、地震や火山活動による直接的変動に比べてその約3倍の広がりを持つ地域に影響を与えているのがわかる。

他方、桜島島内の変動については、噴火活動に伴う桜島火山と始良カルデラ周辺の地盤変動について京都大学防災研究所付属桜島火山観測所（1988）により総合報告され、この結果に続き、更に第7回桜島火山の集中総合観測（昭和63年（1988））により、上下変動として桜島北部が南側に比べて1974・75年～1988年10・11月間で13cm沈下したことが江頭（1989）により報告されている。第8回桜島火山の集中総合観測（平成3年10月～平成4年3月）の結果では、1988年11月～1991年12月の間の上下変動は平均最大で約15mmの沈下が検出された（江頭，1995）。変動量は前と比べてやや小さくなっているが桜島全体が浮上してきているのが理解される。これは始良カルデラへのマグマの供給が増大していることを示している。

火山地域における地殻の上下変動の長期的変化を検出するためには、上記で示された水準測量に比較して観測精度は若干低下するが高山地域での観測の便利さや人員配置の安全性等を考慮するとGPS観測が簡便である。特に三角点上の観測結果は三角点高が標高決定当時の化石成果を温存しているのでその上に重なった相対的な変動を見るのに都合が良いと思われる。

こうした点から、1970年頃に再測が実施された九州南部の桜島とその周辺で約25点のGPS観測を三角点上等で実施した。その結果について報告する。

2. 三角点上での GPS 観測結果

使用観測機器として、GPS 受信機は、GP-R 1 Ver. 6 M (P コード対応), GP-RIDY (Y コード対応) (Ashtech 製) を、解析には DynaBook (東芝製), Contura (COMPAQ 製) 等 DOS/V 機にインストールされた Ashtech 製のソフト MP (Multi-Site Mission Planning System) 及び GPPS (Geodetic Post Processing System) をそれぞれ使用した。

図 1 に観測点の配置を示す。これらの点のうち、H1 ~ H15 までは建設省九州地建大隅工事事務所によって既存三角点から偏心観測により設置された航空標識の基準標である。田上 (TAGM), 坂元 (SAKA) は 2 等点, 郷戸 (TAKE), 方崎 (HAKM) は 3 等点, 鹿大 (KADI), 火北来 (KAPR), 一本松 (MATU), 湯の平 (SAO2), 二俣 (FUTA) は 4 等点, 1-2469, 1-2500 は水準点である。図 2 に観測点の網図を示す。観測では最初鹿児島市東部 (島内除く) の次数の高い三角点を基に、先ず KADI の偏心点である鹿児島大学理学部屋上点 (KUV1 と KUV2)

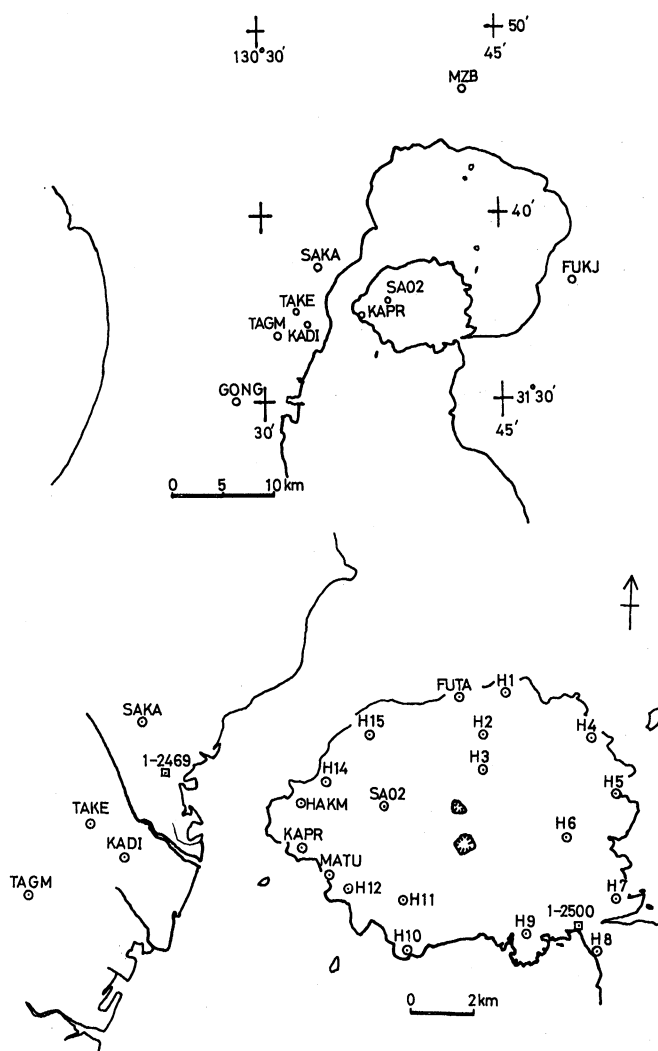


図 1 桜島・周辺の観測点配置図。上段；全体の位置図，下段；GPS 観測点，GONG：権現ヶ尾 I 点，FUKJ：福地 II 点，MZB：溝辺 II 点を示す。

Fig. 1. Location map of observation points. Upper; a general view, Bottom; GPS observation points, GONG, FUKJ, MZB shows Gongengao I Δ , Fukuti II Δ , Zyusantukahara II Δ , respectively.

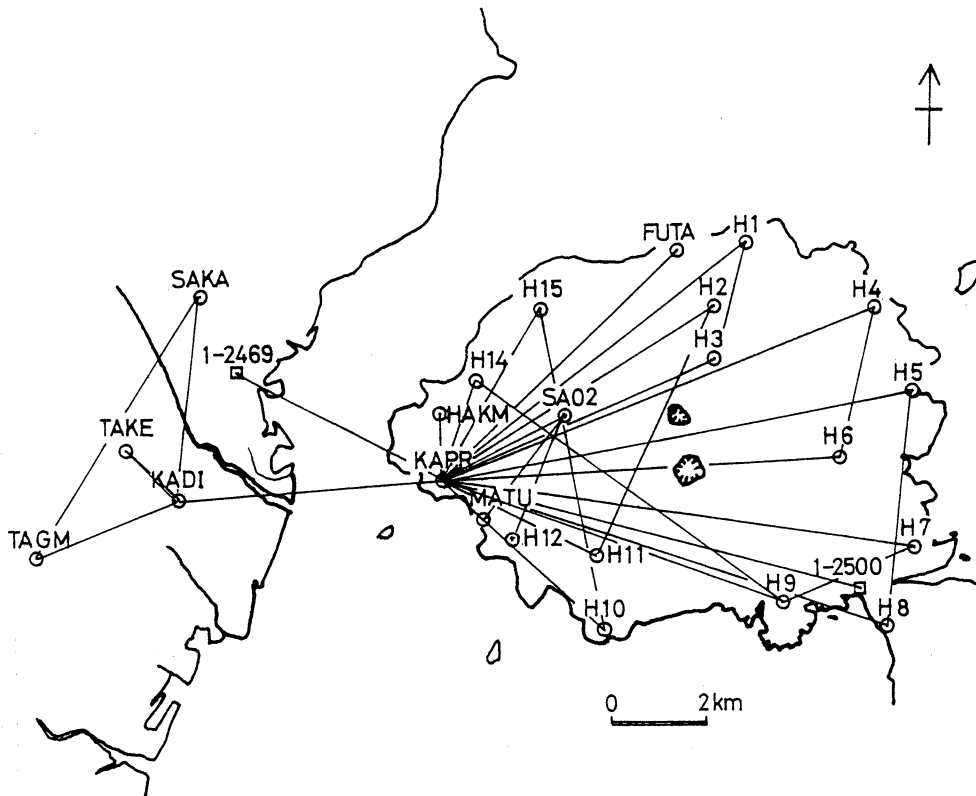


図2 桜島・周辺で観測された三角網図。

Fig. 2. Observed triangulation networks in and around Sakurajima

の新点の座標を決定し、そこを基準点にして桜島 KAPR の座標を決定した。この観測線は桜島の変動監視のため湯の平点 (SAO2) と共に既に何回か測定されている観測線である。次に KAPR を基に桜島島内の観測点を三角網を組みながらほぼ10km以内で2.5~3.5時間の測定を実施した。観測期間は概ね1993年8月から1994年1月下旬迄であったがその後3点の改測を実施した。

第1表に GPS 相対測位 (differential GPS) による WGS-84座標系での XYZ 3次元直交座標の観測値を示す。第2表に観測点間の辺長とその観測誤差を示す。KAPR-2500の誤差が異常に大きいのは2500の点が交通量の多い桜島口の道路三叉路の緩衝地帯にある偏心点のためノイズが大きかったと思われる。しかし、10km前後の辺長では概ねレーザー測距なみの精度で測定された。第3図に第2表の辺長 (上段) とサンプルとしてZ (下段) のそれぞれの標準偏差を示す。KAPR-2500は余りにも誤差が大きいため省略した。基準とした点以外の辺長の観測結果は第3表に示す。第4表には WGS84系から Bessel 系に座標変換された値を示す。4文字英数字の下段は国土地理院による三角点成果である。Bessel 系への変換パラメータは東京測地系と WGS84系の下記の関係式

$$\begin{aligned}
 X_{\text{Tokyo}} - X_{\text{WGS84}} &= 146.43\text{m} \\
 Y_{\text{Tokyo}} - Y_{\text{WGS84}} &= -507.89\text{m} \\
 Z_{\text{Tokyo}} - Z_{\text{WGS84}} &= -681.46\text{m}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

と国土地理院 (1994) による九州南部の変換パラメータを参考にして、桜島とその周辺の局所的

第1表 桜島・周辺のGPS干渉測位(WGS-84系)結果

(単位; m)

Table 1. Differential GPS observation (WGS-84 system) in and around Sakurajima (unit; m)

点名	X	Y	Z
SAKA	-3534433.2773	4131192.9750	3324083.2132
KUV2	-3535667.0645	4133235.9027	3320003.9176
TAGM	-3533690.9068	4135715.6956	3319218.3063
KADI	-3535574.5736	4133129.6265	3320239.2023
KUV1	-3535667.3205	4133240.1617	3319998.3273
TAKE	-3534430.9270	4133474.6666	3321194.8113
KAPR	-3539577.3189	4129307.4631	3320738.0205
MATU	-3540547.9881	4129048.2451	3319986.7536
SAO2	-3541257.6907	4127247.1208	3322149.2452
FUTA	-3541672.2641	4124001.5529	3325053.4516
HAKM	-3539016.3941	4128797.4214	3322037.0805
H12	-3541147.7940	4128917.2464	3319548.7321
H4	-3545398.3595	4121769.9092	3323949.2906
H6	-3545960.5293	4123614.4289	3321169.9111
H7	-3547819.2864	4123280.4386	3319472.2774
H9	-3545986.1110	4125750.8632	3318419.7484
H1	-3542742.2127	4122970.9085	3325231.5052
H3	-3543248.4486	4124599.3206	3323375.2323
H2	-3542836.1223	4124141.4657	3324107.3163
H11	-3542687.1642	4127884.0653	3319519.8948
H10	-3543345.2956	4128454.6161	3317872.5687
H15	-3539829.3192	4126437.2975	3324038.1657
H5	-3546629.7146	4121956.7104	3322376.2973
H8	-3547911.8535	4124353.4900	3317973.1718
H14	-3539393.8717	4127764.9091	3322810.7089
1-2469	-3535553.5798	4131185.1401	3322616.9080
1-2500	-3547338.3966	4124346.3710	3318613.6261
MZB	-3539891.1233	4113714.5106	3340012.6755

第2表 観測点間の辺長とその観測誤差

(単位 ; cm)

Table 2. Slope distance between observation points and the observation error (unit; cm)

観測点間	辺長 (cm)	Rms (cm)	σ X (cm)	σ Y (cm)	σ Z (cm)
SAKA-KUV2	472614.4	0.72	0.55	0.54	0.40
SAKA-TAGM	668381.9	1.14	0.62	0.64	0.57
KUV2-KADI	27424.1	0.57	0.39	0.37	0.44
KUV2-KUV1	703.2	0.41	0.27	0.26	0.32
KUV1-KADI	28078.3	0.80	0.49	0.44	0.40
KUV1-TAKE	173644.3	0.98	0.64	0.55	0.51
KUV2-KAPR	559121.1	0.68	0.45	0.57	0.34
KUV2-MATU	643118.8	0.80	0.44	0.50	0.37
KUV2-SAO2	846894.5	0.97	0.51	0.58	0.43
KAPR-FUTA	715293.1	0.19	0.89	1.02	0.80
KAPR-HAKM	150410.6	1.49	0.79	0.93	0.65
SAO2-H12	309258.5	1.30	0.77	0.82	0.70
SAO2-KUV1	847321.4	1.11	0.76	0.69	0.77
KAPR-H4	1005044.7	1.07	0.50	0.57	0.50
KAPR-H6	856402.6	0.90	0.44	0.46	0.40
KAPR-H7	1028869.1	1.18	0.70	0.72	0.56
KAPR-H9	768741.9	0.99	0.56	0.58	0.50
KAPR-H1	838808.0	1.58	0.82	1.01	0.85
KAPR-H3	652676.7	1.14	0.56	0.65	0.69
KAPR-H2	697563.6	1.48	0.97	0.95	0.86
KAPR-H11	363057.1	1.37	0.64	0.68	0.66
KAPR-H10	480997.0	0.88	0.51	0.53	0.55
KAPR-H15	438090.3	1.01	0.58	0.61	0.63
KAPR-H5	1031764.5	0.76	0.35	0.37	0.34
KAPR-H8	1008219.7	1.15	0.59	0.98	0.58
KAPR-H14	259020.5	0.89	0.40	0.44	0.35
KAPR-KUV2	559121.0	1.17	0.52	0.56	0.45
KAPR-KUV1	559476.9	0.60	0.60	0.48	0.70
KAPR-SAO2	301001.7	0.89	0.63	0.56	0.79
KAPR-2469	482144.8	1.57	0.94	1.26	0.82
KAPR-2500	945283.9	4.71	3.22	3.04	2.05

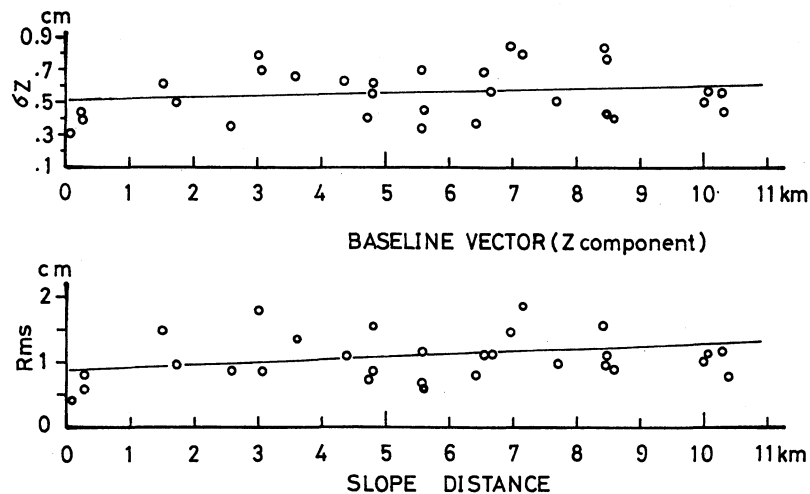


図3 桜島・周辺での観測誤差。上段；観測点間の基線距離とその標準誤差，下段；観測点間の基線距離 (Z成分) とその標準誤差。

Fig. 3. Observation errors of baselines in and around Sakurajima. Upper; standard deviation of observed slope distance. bottom; a standard error of observed baseline (Z component).

第3表 観測点間の (ΔX , ΔY , ΔZ) 基線結果Table 3. Baseline difference (ΔX , ΔY , ΔZ) between observation points

観測日	観測点間	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
1993/10/4	SAKA-KUV2	-1233.787	2042.928	-4079.296
	-TAGM	742.370	4522.721	-4864.907
1993/8/31	KUV2-KADI	92.491	106.276	235.285
	-KUV1	0.256	4.259	-5.590
1993/8/30	KUV1-KADI	92.731	-110.518	240.886
	-TAKE	1236.394	234.505	1196.484
1993/9/27	KUV2-KAPR	3910.255	-3928.440	734.103
1993/9/28	KUV2-MATU	-4880.924	-4187.658	-17.164
	-SAO2	-5590.626	-5988.782	2145.328
1993/10/23	KAPR-FUTA	-2094.945	-5305.910	4315.431
	-HAKM	560.925	-510.042	1299.060
1993/11/17	SAO2-H12	109.892	1670.147	-2600.503
	-KUV1	5590.382	5993.039	-2150.926
1993/11/26	KAPR-H4	-5821.041	-7537.554	3211.270
	-H6	-6383.211	-5693.034	431.891
1993/11/27	KAPR-H7	-8241.968	-6027.025	-1265.743
	-H9	-6408.792	-3556.600	-2318.272
1993/12/4	KAPR-H1	-3164.894	-6336.555	4493.485
	-H3	-3671.130	-4708.143	2637.212
1993/12/5	KAPR-H2	-3258.804	-5165.998	3369.296
1994/10/1	-H11	-3109.846	-1423.398	-1218.126
1993/12/8	KAPR-H10	-3767.977	-852.847	-2865.452
	KAPR-H15	-252.001	-2870.165	3300.145
1993/12/12	KAPR-2469	4023.739	1877.677	1878.888
	-2500	-7760.946	-4960.943	-2124.366
1993/12/13	KAPR-H5	-7052.396	-7350.753	1638.277
	-H8	-8334.535	-4953.937	-2764.849
1994/1/21	KAPR-H14	183.447	-1542.554	2072.688
	-KUV2	3910.259	3928.435	-734.097
1994/1/21	KAPR-KUV1	3910.006	3932.701	-739.694
	-SAO2	-1680.376	-2060.326	1411.239

第4表 WGS-84系から Bessel 系に変換した観測値

Table 4. Observed values converted WGS-84 system into Bessel ellipsoid system

観測点名	Latitude	Longitude	Height (m)
SAKA	31.60974583	130.5508555	156.971
	31.609745833	130.550855833	157.11
KUV2	31.5672802	130.5467397	25.731
TAGM	31.55840698	130.5139418	126.256
	31.558408611	130.513941389	126.07
KADI	31.56975358	130.5467271	28.873
	31.569752778	130.546726667	28.72
KUV1	31.56722116	130.5467126	25.702
TAKE	31.57936919	130.5352077	119.315
	31.579369722	130.535207778	119.35
KAPR	31.57500123	130.6049500	34.868
	31.575001111	130.604948889	34.82
MATU	31.56717363	130.61449093	12.174
	31.567173611	130.614489722	12.17
SAO2	31.58806447	130.63252126	373.584
	31.588064444	130.6325200	373.69
FUTA	31.6207372	130.65811602	28.170
	31.62073750	130.658115833	28.38
HAKM	31.58853663	130.6039605	74.323
			74.264
H12	31.56243318	130.6201857	30.864
			30.799
H4	31.60877405	130.7032318	76.519
			76.704
H6	31.57908068	130.6950484	123.856
			123.659
H7	31.56150633	130.7121881	52.074
			51.728
H9	31.55021776	130.6805802	78.737
			78.681
H1	31.62250453	130.6737503	49.540
			49.761
H3	31.60084755	130.6666121	409.363
			409.359
H2	31.60938258	130.6664605	268.398
			268.480
H11	31.56118106	130.6395795	201.760
			201.972
H10	31.54445298	139.6409255	73.949
			73.838
H15	31.60987565	130.6266546	47.638
			47.827
H5	31.59222517	130.7117848	56.896
			56.866
H8	31.5458597	130.7055554	12.192
			11.885
H14	31.59702321	130.6140621	21.215
			21.289
1-2469	31.59506699	130.5598795	3.908
			3.841
1-2500	31.5525730	130.7010253	23.999
			23.669
MZB	31.77800449	130.7146161	263.900
	31.778002778	130.714620556	265.06

(註) 上段は今回の GPS による観測値, H は航測基準標成果 (標高のみ), 下段は測地成果.
upper; GPS observation values, Bottom; geodetic final results

変換パラメータを三角点座標のある4文字英数字の各点を使って補正計算を実施し下記の値を暫定的に決めた。

$$\begin{aligned} X \text{ Sakurajima} - X \text{ WGS84} &= 141.061\text{m} \\ Y \text{ Sakurajima} - Y \text{ WGS84} &= -498.280\text{m} \\ Z \text{ Sakurajima} - Z \text{ WGS84} &= -676.063\text{m} \end{aligned} \quad (2)$$

これらの値を基に WGS84系から Bessel 系へ変換したのが第4表である。三角点水平座標値は4等三角点の水平座標精度でコンマ7桁(約1"/1000)程度まで合わせることが出来た。しかし、標高差は約7mのばたをはいてしまい KUV2での GPS の初期座標値が相対的に4m程度小さかったことが分かった。ちなみに GPS JAPAN の測定値を KUV2に適用すると標高差は約50cmとなり既存成果とかなり一致してくることが分かった。第4表の GPS から決定した標高には6.990mの補正がしてある。これで4等三角点の精度の限界付近まで値が決められたことになる。鹿児島湾全体を扱う場合には変換パラメータの決定は国土地理院による次数の高い信頼度の高い三角点データを用いて再度局所的にまず求めそれを逐次的に繋ぎながら求めることが必要である。

3. 桜島とその周辺のジオイド高の変動

GPS により観測された測定値をベッセル楕円体値に変換し、その時のジオイド高を N^G 、楕円体高を h^G 、標高を H^G とすると、楕円体高は第4図に示すように次式で与えられる、

$$h^G = H^G + N^G \quad (3)$$

基準にする過去のベッセル成果 (B で示す) は次式で与えられるとする。

$$h^B = H^B + N^B \quad (4)$$

GPS で測定されるのは h^G であり、測地成果は標高であるから H^B である。そこで、いま、

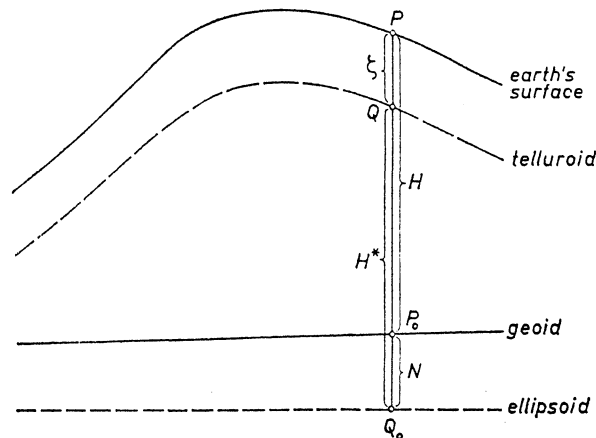


図4 地表下深さ H でのジオイドと楕円体からの地形異常

Fig. 4. The geoid at a depth H below the earth's surface and the relationship of ground level anomalies to the ellipsoid (Heiskanen and Moritz (1967)). H , N , ξ and H^* show the orthometric height, the geoidal undulation, the height anomaly and the normal height, respectively. The mutual relation is given by $h = H + N = H^* + \xi$.

$$H^G = H^B + \delta H \quad (5)$$

とすると,

$$h^G = H^B + \delta H + N^G \quad (6)$$

観測される物理量は $h^G - H^B$ であるから, (6) から

$$h^G - H^B = \delta H + N^G \quad (7)$$

(5) と (7) 式から地殻上下変動を示す δH は次式で与えられる.

$$\delta H = H^G - H^B = (h^G - H^B) - N^G \quad (8)$$

ある点におけるジオイド高の微小項を $N^G = N^B + \delta N = \bar{N}^B + \Delta N_{\phi, \lambda} + \delta N$, とおくと, (8) 式より,

$$\delta H = (h^G - H^B) - (\bar{N}^B + \Delta N_{\phi, \lambda}) - \delta N \quad (9)$$

いま, 更に, 楕円体高の微小項を $h^G = h^B + \delta h$ とし, (4) を考慮すると

$$\delta H = -\delta N + \delta h \quad (10)$$

となる. δh は標高異常を ζ , 正規高を H^* とし, $H^{*G} = H^{*B} + \delta H^*$, $\zeta^G = \zeta^B + \delta \zeta$, とすれば, $h = H + N = H^* + \zeta$ より微小項を考えると,

$$h^G = h^B + \delta h = H^B + \delta H + N^B + \delta N = H^{*B} + \delta H^* + \zeta^B + \delta \zeta \quad (11)$$

となる. いま, ブーゲー重力異常を Δg_B とすると, $H^* - H = \Delta g_B \cdot H^B$ (Heiskanen and Moritz (1967)) を考慮し, 近似的に $\delta H^* - \delta H \doteq \delta (H^* - H) = \delta (\Delta g_B \cdot H^B)$ となるから地形異常変動 $\delta \zeta$ は

$$\delta \zeta = \delta N - (\delta H^* - \delta H) \doteq N^G - N^B - \delta (\Delta g_B \cdot H^B) \quad (12)$$

$$= \delta h - \delta H - \delta (\Delta g_B \cdot H) \quad (12-1)$$

$$= \delta h - (h^G - H^B) + (\bar{N}^B + \Delta N_{\phi, \lambda}) + \delta N - \delta (\Delta g_B \cdot H^B) \quad (12-2)$$

と仮定できる. (12-1) 式は「GPS-水準-重力」システム観測の重要性を示す. 地殻変動のエネルギーは「自分自身のポテンシャルエネルギーに加えて相手から受ける変動エネルギーと放出のエネルギーの総和である」から一般に, ブーゲー重力異常による高さへの影響は変動論としては他項と比べて $1/3$ 程度以下であり小さいので無視しても良い. このカルデラ地域では重力による値は小さいので, 右辺の第3項は無視出来ると仮定すると, $\delta \zeta \doteq \delta N = \delta h - \delta H$ となる. δh は楕円体高の変化だから将来 GPS の繰り返し測定によって与えられる量である. δH は水準測量で与えられる. 物理的意味を考えると, (12-2) の右辺第1項はプレート変動や広域応力場等の外的要因も含む楕円体高変動項, 第2, 3項は水準測量によって局地的ジオイドから決められる標高変動の項で塑性物質の圧縮のように密度の変化がなくても標高に変動がでる項である. 第4項はその場の密度の変化, 即ち重力変化による標高変動の項と見なせる. $\Delta \zeta$ の項は変動を考えない地形の異常としては Heiskanen and Moritz (1967) より

$$\Delta \zeta \text{ in m} = H^* - H = -\Delta g_B \text{ in gals} \cdot H \text{ in km} \quad (13)$$

で与えられる (前述). この項による地形異常はここでは無視できるほど小さいことを後で示す.

本論では全体を通して変動部分には δ を使用した。 Δ とは異なった δ と測地学の重要性を指摘するためである。 ΔN は新旧両者の楕円体面の差によるジオイド高の系統的な差を第一義的には示す。楕円体高の変化分は(9)式で与えられる。そこで ΔN の補正式を導入しよう。

楕円体面は ϕ , λ の大きさにより補正の符号が変わるので、いま観測値を囲む十分に離れた平均的代表的な2点, または, 3点を選択し, その間において, ΔN の緯度 ϕ , 経度 λ の微小変化分に関する補正式を求めると次式のように与えられる。

$$\Delta N_{\phi, \lambda} = (\delta \Delta N / \delta \phi) (\phi_i - \phi_0) + (\delta \Delta N / \delta \lambda) (\lambda_i - \lambda_0) \quad (14)$$

ここでサフィックス0は基準観測点とする。iは観測点である。

いま, ジオイド高の変動のみに着目し, (9)における $\delta H + \delta N \equiv \delta h$ を求めて見よう。小さめに測定されたジオイド高の差の分の平均値 $\bar{N}^B = 6.990\text{m}$ を標高Hに加えて楕円体面を一致させhからそれらを引くと微小変化分としては

$$\delta h = (h^G - H^B) - 6.990 - \Delta N_{\phi, \lambda} \quad (15)$$

となる。(13)式の Δg は湯の平三角点付近で標高374m, $\Delta g_B = 10\text{mgal}$ (Yokoyama and Ohkawa, 1986) とすると約4mm程度の大きさのため, $\Delta N > \Delta g$ でありここでは無視されている。1993~4年に実施されたGPS相対測位観測結果をBessel楕円体高に変換し, (15)式の $\Delta N_{\phi, \lambda} = 0$ として既存成果との比較により δH を求めたのが第5図である。

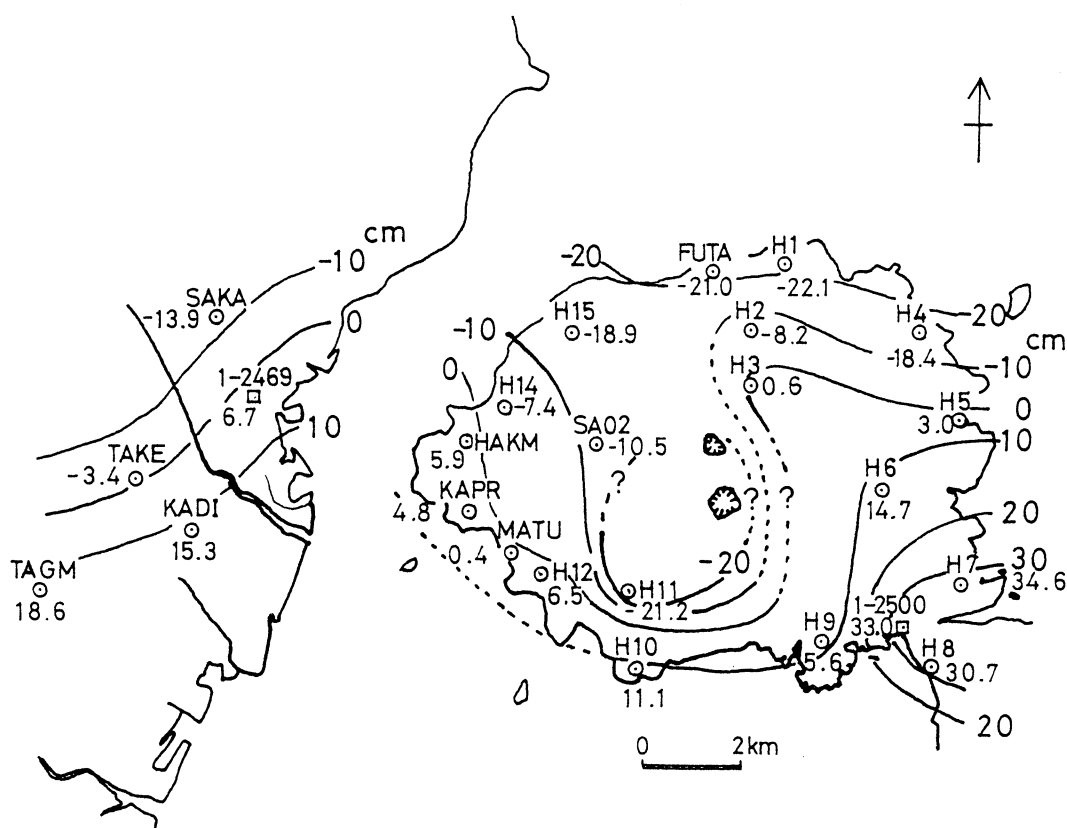


図5 GPS観測による標高結果と三角点等の既存標高成果との比較による楕円体高変化の検出。

Fig. 5. The change in the ellipsoidal height in and around Sakurajima detected from the comparison of the orthometric height obtained by GPS observations with that obtained by the existing final results of triangulation point and so on.

さて、 $\Delta N_{\phi, \lambda}$ について評価して見よう。(12)式の $(\delta \Delta N / \delta \phi)$ と $(\delta \Delta N / \delta \lambda)$ を求めるために基準点座標92(国土地理院, 1994)の九州南部における GEOID 高(Bessel)を参照しながら、桜島とその周辺を囲む地域のジオイド高コンター図をもとに変動の少ない安定した平均的な三角点として、7659権現ヶ尾($31^{\circ}30'02.53''$, $130^{\circ}28'08.68''$, 484.54m, ジオイド高-13.87m), 7627十三塚原($31^{\circ}46'40.81''$, $130^{\circ}42'52.63''$, 265.06m, ジオイド高-14.49m), 7649福地($31^{\circ}36'15.25''$, $130^{\circ}49'29.31''$, 563.21m, ジオイド高-13.42m)を選択する。権現ヶ尾を基準として、補正項は緯度効果として、十三塚原との緯度差から $\delta \Delta N / \delta \phi = 2.236\text{m}$ 、経度効果として、福地との経度差から $\delta \Delta N / \delta \lambda = -1.265\text{m}$ とした。従って、基準座標として権現ヶ尾の座標値 $\phi = 31.5007025$, $\lambda = 130.4690789$ とすると(14)式から次式が得られる,

$$\Delta N_{\phi, \lambda} = 2.236 (\phi_i - \phi_0) - 1.265 (\lambda_i - \lambda_0) \quad (16)$$

この式により GPS Bessel 楕円体面と既存の測地成果が若干適合したことになる。コンターの乱れは変動を示すことになる。このようにして求められたのが第6図である。

第6図の特色はジオイド高の北に向かって下がっている勾配の中で桜島の北側沈降、南側隆起で南東部の桜島口付近で約10cm以上の隆起が見られること、北側での近い将来のGPS観測では、始良カルデラの沈降との関係が注目されること、噴火口のある南岳周辺部は約30cm近い沈降を

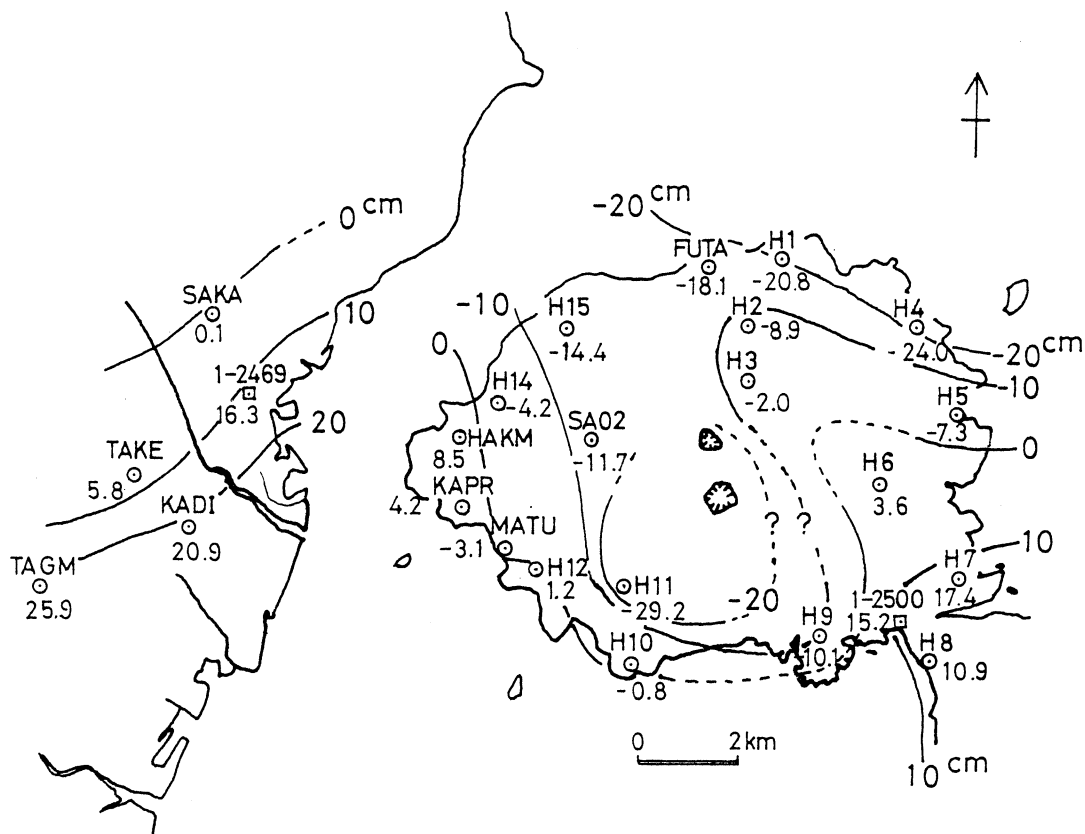


図6 系統的なジオイド起伏差を補正された標高異常の検出。この図の差から正断層運動が示唆される。
Fig. 6. Detection of height anomalies in and around Sakurajima. In this figure, the major part of the systematic geoidal undulation difference is corrected. A normal fault motion is suggested from the difference of pattern in this figure.

示していることと南側の変動勾配が大きいこと、第5図では西側の鹿児島市と桜島が点線でつながって図示されているが第6図ではコンターの乱れから明瞭に標高差がでていることが解り、1914年当時の地溝（活断層）を境としたその後の継続する正断層的な桜島全体の沈降－鹿児島地溝の変動－が示唆されること、等が指摘される。

桜島口付近の隆起を示す変動は地域としても重要な問題となろう。今後更に高精度に観測を実施してこれらの結果を確かめたいと考えている。

4. 討論と結論

WGS84系でのGPS観測値を既存のBessel成果に変換するには変換パラメータを高精度に決めることが重要である。基準点座標92（国土地理院，1994）で示された全国レベルの変換パラメータは桜島とその周辺部では変動が大きい余りにも局所的すぎるためよく適合せず新しく決め直すことが必要とされる。このため、東京測地系を基にそれに対する補正值のみを求めるとして決めたのが（2）式である。 ΔZ は補間法で決めた。水平位置については1/1000秒程度まで既存成果との間で調整することができた。ジオイド高については今回の観測値の初期値が小さめに測定されたため測定精度は 10^{-7} レベルであったが約6.990mのジオイド高の差の分がでた。なお、全国レベルの結果（国土地理院，1994）ではこの付近ではジオイド高は約13.5mとなっている。しかし、局所的な場での変動量を求めるためには、新旧のジオイド面を同一面上に重ねて、その面上での変化分を検出することが必要である。このため、（9）ないし（15）式が新たに導かれた。（9）ないし（15）式には新旧ジオイド面の補正項として ΔN が考案されている。標高異常の微小変化分の $\delta\zeta$ の項は、ここでは、 $\delta N > \delta\zeta$ のため十分に考慮されていない。新旧の観測値で変動量の大きい桜島の噴火口付近は、（9）式での δh の置き換えにより火山地域での地形異常変動 $\delta\zeta$ （ $\equiv \delta h - \delta H$ ）をHeiskanen and Moritz（1967）にある（13）式とは異なった実学的な方法での近似として求めることが出来よう。即ち、一例として桜島では石原・他（1995）は標高の変化は重力変化で与えられるとして標高変化－重力変化を約 $-13\mu\text{gal/cm}$ とした。従って、地形異常変動は、 $\delta\zeta \equiv \delta h + [13\mu\text{gal/cm}]^{-1} \cdot [\text{重力変化観測値}\mu\text{gal}]$ 、で実効的に与えられよう。 $\delta\zeta$ は崩落地形にも関係する異常変動量であるから地形隆起が続く場合には $\delta\zeta$ のうちの崩落率を正確に見積ることにより土石流や地滑りの長期的対策に寄与することが出来るかもしれない。GPSの δh の観測がこの種の困難を解決してくれるであろう。「GPS－水準－重力」のシステム観測が重要である。この点については応用面の重要性もあり今後の防災的な点も含めて重要な研究課題となろう。

上下変動のパターンについての特色は前述した通りである。水準測量による結果のほうが三角点上でのGPS測量による上下変動より格段に正確である。今回は4等三角点とその偏心誤差も入る新旧2回にわたる誤差を含むので $\pm 5\text{cm}$ は見積る必要があるだろう。こうしたことを考慮しつつ、江頭（1989，1995）の水準測量結果と比較すると概ね変動のパターンは合っているようである。第7図に江頭（1995）の結果を参考のため示す。一方、島内の垂直変動量分布では桜島が、1992－1974・75の間で約12cm（ -7mm/yr ）沈降しており。また付近の春田山では遠くの末吉町（BM2786）基準では22cm（1992－1974・75）（ -1.2cm/yr ）（江頭，1989，95）の沈下、今回検出した湯の平三角点SAO2での沈下は12cm（約 -6mm/yr ）となっている。桜島対岸の鹿児島湾西部での変動は1914年の大噴火以降の回復変動についてはマグマ溜りの膨張による変動（Yokoyama，1986）とされているが、鹿児島市（BM2469）付近に相対的に大崎鼻（BM2474）

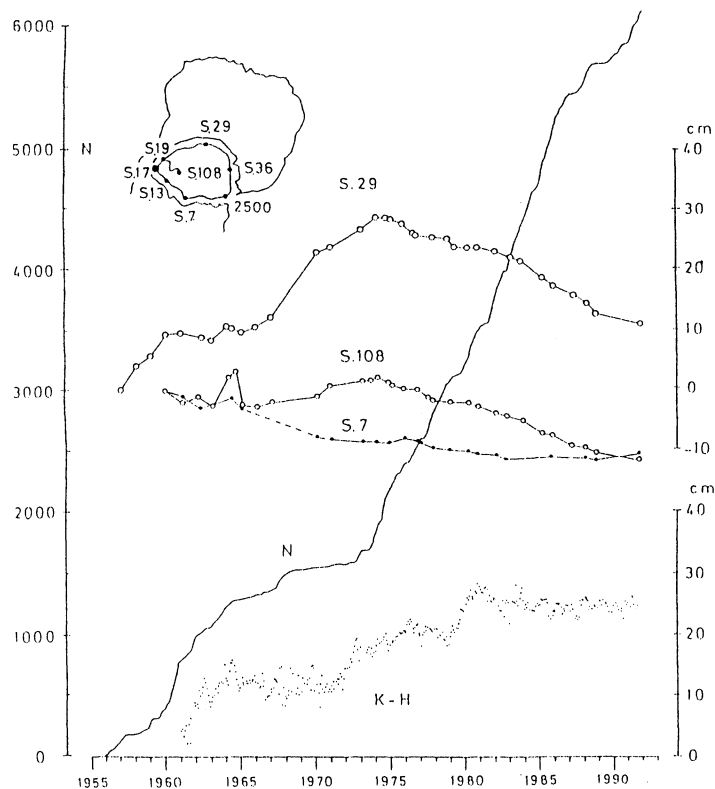


図7 桜島南岳の山頂噴火活動と垂直変動との関係 (江頭, 1995).
 (上) 水準点S.17 (袴腰) に対するS.29 (北東部), S.108 (西腹) およびS.7 (南部) の比高変化,
 (中) 南岳の月間爆発的噴火回数の積算値 (N),
 (下) 鹿児島港 (K) と袴腰 (H) の月平均潮位差 (K-H) の変化.

Fig. 7. Relationship among the vertical displacement of BM. S.29, S.108 and S.7 referred to BM. S.17 (upper), the accumulated number of explosion since 1955 (middle) and the difference of monthly mean sea levels between Hakamagoshi (H) and Kagoshima (K) (bottom) (Eto, 1995).

付近が多田・橋本 (1988) の図を読むと1987年-1914年の最近73年間で約43cm (約+6 mm/yr) の回復隆起をしている。BM 2474付近の変動は、地溝を挟んで噴火前は熱物質の供給により両方隆起で、噴火により桜島西部が沈降すると地溝の西側では位相が遅れて若干の沈降しか生じないことが想定される。一方、桜島西部の地溝の東側では次の熱物質の供給が行なわれると再び両方とも隆起をする。このように地溝の両端では位相差のある繰り返し変動と仮定するならば、距離が開かなくても隆起は保たれることになる。実際、国土地理院 (1988) や江頭 (1995) の結果では始良カルデラでは地溝間の距離は短縮しているし地溝の両端の外側は隆起地形であり、open crack モデルによる考え方はここでは変動論から見て成立していないようである。このモデルは応力場のかかっている噴火口周辺での噴火による局所的な浅いマグマ活動の説明のためのモデルと思われる。いずれにせよ、新しい地溝のモデル化、カルデラが何故成長を続けるのかの

モデルが必要であろう。ここでは一例を示した。

このようなことを考慮すると総合した平均的レベルで見ても桜島北部に対し大崎鼻付近での相対的隆起変動は最大で12~14mm/yrの変動をしていると推量される。半分の隆起量としても全国的にも他にない大変な隆起量である。地質年代までの拡張はもともと不可能であるがオーダー評価のみとして概算してみよう。

大木・他(1990)を参照すると一次近似でこの割合で25000年(始良カルデラの入戸火砕流)の変動を継続していたと仮定すれば地形的差は最初の桜島の出来る前の13800年間で83m~97m, 桜島誕生後の11200年(桜島火山の活動の新时期火山灰および軽石層)(石川・他(1972))では134m~157m, 両者を加えて約217m~254m程度の差を持つことが示唆される。1914年桜島大噴火時の地震(M7.1, $\phi = 31.6^\circ \text{N}$, $\lambda = 130.6^\circ \text{E}$, 断層長24km)を考えると地溝性の正断層を目下作っているらしいことも示唆される。いずれにせよこの付近は地溝の西側では地形は隆起するが崩落地形的となり, 反対の東側の桜島では噴火後の沈降をさせないために熱物質の供給があり, 地形の安定不安定を考慮したアイソスタシー上では地溝の西側が一方的に隆起するというこれまでとは異なったカルデラ外壁の変動を示す地溝のモデルを示している。この地域の隆起-沈降を精密に測定すれば, 火山に伴った都市直下型地震の長期的予測にも寄与することが可能となろう。この場合活断層の変動に関しては水平変動の縮みが重要となろう。第6図に示すように鹿児島市側と桜島側でこの約20年間で面的に15cm程度の上下変動のギャップが認められる。北に向かって差が大きく認められることから活断層的な様相を示しており, 鹿児島地溝(早坂・大木, 1971, 大木・他, 1990)の変動が継続していることが示唆される。この場所は Yokoyama and Ohkawa (1986)の鹿児島湾とその周辺の重力ブーゲー異常図でコンターの急勾配の場所-カルデラ外壁の落込み-に一致している。

ΔN の補正量については, 新旧のジオイド高を完全に一致させるには今回観測した変動量に基づいた式を構成すべきと思われるが始良カルデラも沈降しており, 全体量が不明であり, より客観性を追求するため, 国土地理院の決定した結果の補正のみを実施した。従って, 溝辺付近では, 今回観測した新旧のジオイド差の115cmのうち約85cmは改善したが, 約30cmは傾動勾配として残っている。これは未補正のためか, 1914年時の大噴火による始良カルデラの相対的沈降(Yokoyama, 1986, 橋本・多田, 1988, 多田・橋本, 1988)後の未回復かを示しているのではないと思われる。

結論として下記のことが指摘される。

- (1) 南岳周辺部で約29cmにおよぶ沈降が検出された。
- (2) 南側から北側に始良カルデラの中心に向かって変動が傾斜を示すこと。
- (3) 桜島南東部で約10cm程度(約5 mm/yr)を超える異常隆起が検出されたこと。
- (4) 鹿児島市側と桜島側との間で変動に10cmを超えるギャップが検出されたこと。これは鹿児島地溝ないしは潜在活断層(正断層)の変動を示唆する。1914年時の地震断層の解明が望まれる。
- (5) GPS測量のための地殻上下変動を求める新しい補正式が提示され, δ とないしは δN 測地学の重要性が指摘され, 変動測地学の物理的意味が一層理解し易くなったこと。

いずれにせよ, 三角点上での広域の高精度GPS測量の実施により(1)変換パラメータの高精度決定(2)実効的な標高異常の検出法(3) δN 変動量の高精度検出(4) ΔN の客観的求め方(5)鹿児島地溝の変動と桜島南東部の隆起, などの問題を解決しながら火山活動と地溝の変動(都市直下型地震予知)-プレート変動の関係-を目指して再度挑戦したいと考えている。

本報告をまとめるにあたり、早坂祥三先生、大木公彦、小林哲夫両助教授の討論に対して謝意を表します。建設省九州地方建設局大隅工事事務所、国土地理院地殻調査部には桜島とその周辺での航測基準標のデータ、三角点の成果等をお教え頂き厚く御礼申し上げます。また、理学部南西島弧地震火山観測所からのGPSの便宜供与についても謝意を表します。高木章雄先生のご指導ご鞭撻にたいしても厚く御礼申し上げます。鹿児島大学理学部地学科修士1年仮屋新一君の協力にも謝意を表します。

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, 1989年7月.
- 江頭庸夫, 1995, 桜島火山周辺における地盤変動—1988年~1991・92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, 1995年3月
- 橋本 学・多田 堯, 1988, 1914年桜島大噴火に伴う地殻変動, 鹿児島国際火山会議, 274-277.
- 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質学的考察, 鹿児島大学理学部紀要(地学・生物学) No.4, 15-29.
- Heiskanen W. A. and H. Moritz, 1967, *Physical Geodesy*, 8-12, Determination of the Geoid from Ground-level Anomalies, 325-330.
- 石川秀雄・肥後精一・泊芳英・大木公彦・浜崎和男, 1972, 蒲生軽石流および新时期火山灰・軽石層の¹⁴C年代, 地質学雑誌, **78**, 563-565.
- 石原和弘・大島弘光・前川徳光・植木貞人・沢田宗久, 1995, 桜島および鹿児島湾周辺における精密重力測定, 第8回桜島火山の集中総合観測(1991年10月~1992年3月), 37-44, 1995年3月.
- 国土地理院, 1972, 九州, 中国地方の上下変動について, 地震予知連絡会報, No.7, 47-49.
- 国土地理院, 1982, 九州地方の上下変動, 地震予知連絡会報, No.28, 309-320.
- 国土地理院, 1988, 中国・九州・沖縄地方の地殻変動, No.39, 359-358.
- 国土地理院, 1994, 基準点座標92, 平成6年6月.
- 京都大学防災研究所附属桜島火山観測所, 1988, 噴火活動に伴う桜島火山および始良カルデラ周辺の地殻変動, 鹿児島国際火山会議1988論文集, 278-281.
- 大木公彦・船津俊宏・早坂祥三, 1990, 鹿児島市南部の地質・とくに伊作火砕流と照国火砕流との関係について, 浦島幸世教授退官記念論集, 地球のめぐみ, 125-133.
- 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, 九州南部地方の地震・火山テクトニクス, 火山の総合的研究の展開法に関する調査研究報告書—火山と地域産業—(研究代表者 田中 穰), 73-90, 鹿児島大学.
- Yokoyama I. and S. Ohkawa, 1986, The Subsurface Structure of the Aira Caldera and Its Vicinity in Southern Kyushu, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **30**, 253-282.
- Yokoyama I., 1986, Crustal Deformation Caused by The 1914 Eruption of Sakurajima Volcano, Japan and Its Secular Changes, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **30**, 283-302.