

桜島火山近傍の垂直地盤変動と山頂噴火活動の関係について

石 原 和 弘・江 頭 庸 夫

SURFACE DEFORMATION ASSOCIATED WITH THE ERUPTIVE ACTIVITY AT THE SUMMIT CRATER OF SAKURAJIMA VOLCANO

By *Kazuhiro ISHIHARA and Tsuneo ETO*

Synopsis

The data of levelling surveys, tidal observations and distance measurements are analyzed to examine the surface deformation associated with the eruptive activity which has begun in October 1972 at the summit crater of Sakurajima Volcano.

The results obtained are as follows;

(1) Surface deformation in the vicinity of Sakurajima Volcano shows the characteristic patterns closely related to the process of the eruptive activity at the summit crater. (I) In the quiet period, the vertical displacement of uplift becomes maximum at the center of Aira Caldera, on the southern rim of which Sakurajima Volcano is situated. (II) Upheaval movement of the ground of Sakurajima Volcano had begun early in 1971, preceding the beginning of the eruptive activity at the summit crater in October 1972, and continued till 1974 when the frequency of explosive eruptions becomes maximum, about 400 times per year. (III) After 1974, the eruptive activity is gradually decayed, and the ground of the whole caldera stops its upheaval movement and is partly depressed.

(2) Distribution of vertical displacements around Sakurajima Volcano in the period described in (III), can be explained by assuming the change of hydrostatic pressure within a spherical source at the depth of about 3 km beneath the summit crater. This result, which is derived from the data of levelling surveys, is compatible with the results of distance measurements.

1. は じ め に

桜島火山の大正の大噴火(1914年)の際には 1km^3 以上の熔岩を山腹より流出し、始良カルデラ(桜島以北の鹿児島湾)周辺の地盤はカルデラ中央部を中心にほぼ同心円状の顕著な沈降を生じた¹⁾。Mogi²⁾はこの現象を半無限弾性体内部の球状圧源の圧力減少による変形として解析し、始良カルデラの中心部地下約10kmにマグマ溜りが存在する結果を得ている。1915年以降カルデラ周辺の地盤は隆起に転じ、現在に至っている。カルデラ中心部に最も近い位置にあるBM. 2474を例にとってみると約 1cm/yr. で隆起が続いている。但し、1946年の山腹噴火時にも地盤の沈降があったと推定される。最近では、山頂噴火活動が激化し年間爆発回数が400回以上に達した1960年および1974年以降の数年間には隆起の一時的な停滞が測定されている(Fig. 1)。このような桜島火山の火山活動と地盤変動の密接な関係は噴火活動の場となっている桜島火山においてはより明確に把握しようと期待される。

1972年10月に再開した桜島南岳の山頂噴火活動は1974年を活動のピークとして、その後は漸次静穏化にむかっている。桜島火山では1957年以降精密水準測量を、1960年からは検潮観測を継続して実施している。そこで、1974年を活動のピークとする一連の山頂噴火活動を中心に桜島火山近傍の垂直地盤変動の時間的経過と山頂噴火活動の関係について考察を行った。

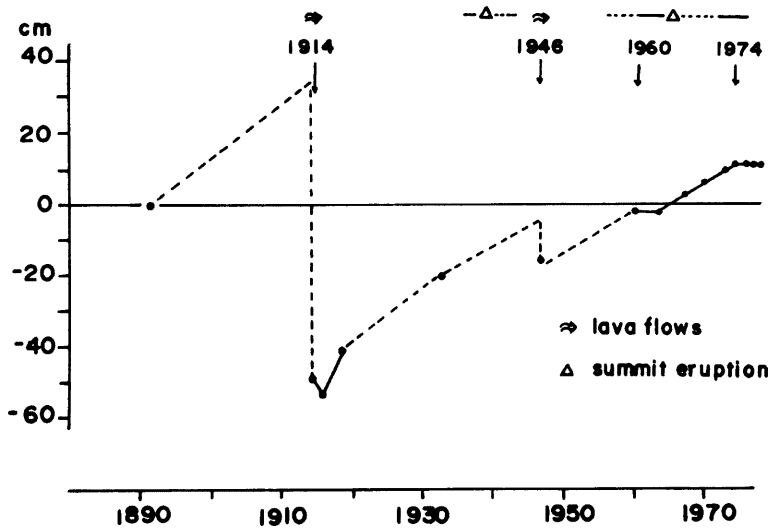


Fig. 1. Change of height of BM.2474 referred to BM.2469 shown in Fig. 2.

2. 測定資料

垂直変動量は水準測量および検潮観測によって求めた。水準測量は桜島を一周するルート、桜島西海岸より桜島南岳の山頂火口の西方約 1.7km まで近づくルートおよび対岸の鹿児島市より海岸に沿ってカルデラ中心部に近い BM. 2474 に至るルートについて1973年以降は少なくとも年 1 回の頻度で実施している。水準点間の平均距離は約 800m である。往復誤差および閉そく誤差は一等水準測量の許容誤差の範囲内である。

検潮観測は桜島西部の袴腰港と始良カルデラ縁部にあたる対岸の鹿児島港で実施している。両港の直線距離は約 3km である。海水面を媒介として、両地点の間の相対的な垂直変動を検出することを意図しているわけである³⁾。鹿児島港の月平均潮位 (K) と袴腰港の月平均潮位 (H) の差 (K-H) の変化を鹿児島に対する袴腰の比高の変動とみなす^{3), 4)}。前回の報告⁴⁾ ではそれぞれの潮位記録の毎時読み取り値の単純平均値を月平均潮位とし、K-H を求めていた。その際には 1 ケ月のうち欠測が 1 割未満 (毎時読み取り値にして約 70 個) の場合についても、特別な処理をせず単純平均値をその観測点の月平均潮位としていた。水管傾斜計の原理と同じように、ほぼ同時刻の 2 ケ所の海水面の潮位から相対的な垂直変動量を検出しようとする主旨からは前回の処理方法は適当とは言えない。今回は両観測点の潮位測定の時時性を重視する意味で、どちらかの観測点に欠測のある日は除き月平均潮位を求め、その差を K-H とした。この処理方法によりいづれかの観測点に欠測のあった月については K-H の値がかわり、結果として前回⁴⁾ に較べ値のばらつきは小さくなっている。

K-H より求めた垂直変動量と鹿児島市よりカルデラを一周して桜島に至る水準路線についての測定結果から求めた垂直変動量を比較したところ、それぞれの測定の誤差範囲内で一致を示した⁵⁾。従って、現在使用している検潮儀の測定精度 ($\pm 1\text{cm}$) からみて 2cm 以上の K-H の変化があれば有意な垂直変動があったと考えて差し支えなからう。

3. 桜島火山近傍の垂直地盤変動

3.1 山頂噴火活動の推移と桜島火山近傍の垂直地盤変動との関係

山頂噴火活動と桜島火山の垂直地盤変動の関係を Fig. 2 に示す。上段は袴腰の BM. S17 に対する桜島北部の代表点 BM. S29 の比高の変化であり、中段は山頂噴火活動の推移を表現する指標として 1955 年以降の月毎の爆発回数の積算値を示した。下段には K-H を図示した。K-H の増加は鹿児島に対して袴腰側が相対的に上昇したことを意味する。

この図からは次のことが言える。

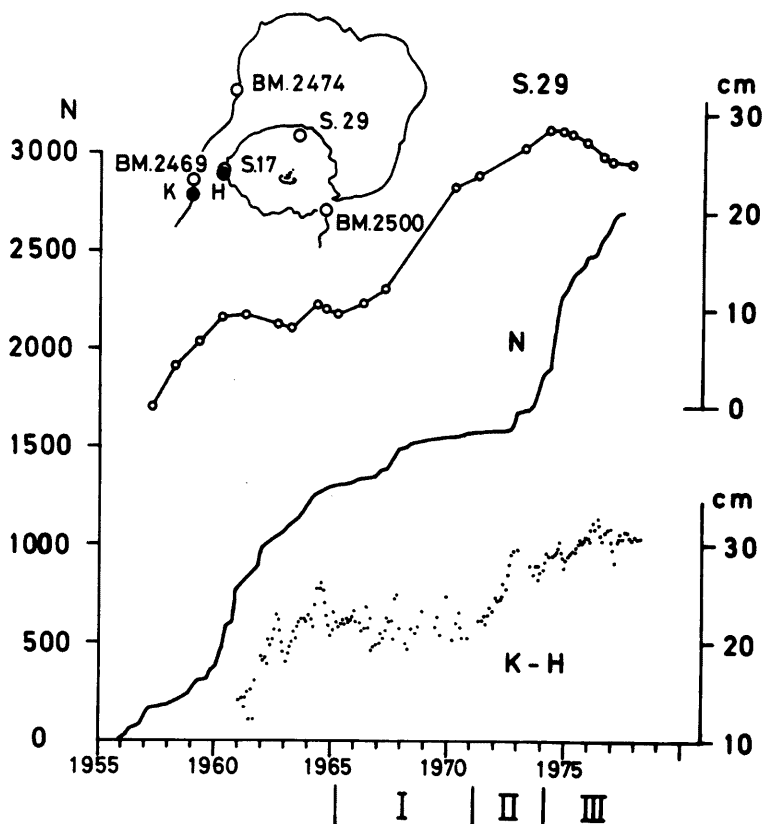


Fig. 2. Change of height of BM.S29 referred to BM.S17 (upper), accumulated numbers of volcanic explosions at the summit crater of Sakurajima Volcano (middle) and differences between the monthly mean sea level at Hakamagoshi harbor and that at Kagoshima harbor, represented by K-H (lower). The increase of K-H means that the ground of Hakamagoshi uplifts relatively to that of Kagoshima.

- (1) 山頂噴火活動が活発化する時期には袴腰が鹿児島に対して上昇する。(1960~64年および1971~76年) 一方、静穏化にむかう時期には袴腰の上昇は停止し、若干下降する。(1964~70年および1976年以降) 1971年をはじめより、現在まで続いている一連の山頂噴火活動の発端となった1972年10月の噴火までには約7cmにおよぶ急激なK-Hの増加が認められる。
- (2) BM. S29は静穏期から山頂噴火活動初期には袴腰に対し相対的の上昇を示す。(1957~60年および1965~74年) 山頂噴火活動が最盛期に達すると、その後は上昇を停止し若干下降傾向を示す。(1960~65年および1974年以降)

次に山頂噴火活動の推移から1965年以降をFig. 2に示す3つの期間に分け、鹿児島港を不動として各期間における垂直変動速度(cm/yr)を求め、その分布をFig. 3にした。第I期(1965~71年)は静穏期であり、第II期(1971~74年)は山頂噴火活動が再開し活発化する時期、第III期(1974年以降)は最盛期以降、漸次活動が静穏化にむかう時期に対応している。

第I期には最大の隆起箇所は桜島北方の始良カルデラ中央部であると推定される。第II期には桜島中央部から南部の地盤が沈降から隆起に転じ、最大隆起箇所は桜島北部附近と推定される。第III期にはこの地域が全体的に変動を停止し、桜島中央部から始良カルデラ中央部にかけて若干の沈降が認められる。

1955年から1965年に至るまでの山頂噴火活動に伴う地盤変動については観測資料が充分ではないが、Fig. 2上段のBM. S29の変動から判断すると、定性的には1972年以降の山頂噴火活動の場合と同様の時間的経過を経たものと推察される。

このような桜島火山の山頂噴火活動と垂直地盤変動の関係は山頂噴火活動の機構を解明する一つの手掛りを与えてくれる。桜島火山周辺の地盤の隆起・沈降は地下の圧源(マグマ溜り)の圧力の増減の結果であるとすれば、定性的には次のような山頂噴火のプロセスが考えられる。

第I期。始良カルデラ中央部地下の圧源へより深い部分よりマグマが供給され、圧力が増加する。その結果、始良カルデラ中央部を中心とした同心円状の地盤の隆起を生じる。

第II期。始良カルデラ中央部地下より山頂噴火活動の場となる桜島火山へマグマが移動、あるいは桜島火山の地下へ2次の圧源が生成・成長し、山頂噴火活動を再開し活発化する。この期間においては、桜島火山の地盤が他のカルデラ縁部より急激な隆起を示す。

第III期。激化した山頂噴火活動により多量の火山灰・火山ガス等が放出され、放出量が供給量に対し、平衡状態から過剰となり、地下圧源の圧力変化はやや減少の傾向となる。この結果、カルデラ周辺の地盤の隆起は停滞し、

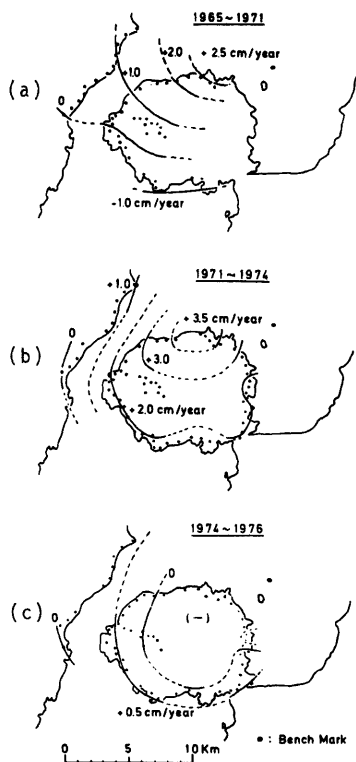


Fig. 3. Distributions of the rates of vertical displacements around Sakurajima Volcano in each period shown in Fig. 2.

桜島および始良カルデラ中央部においては若干の沈降を生じる。

3.2 桜島火山下の圧源の位置について

3.1で述べた桜島火山の山頂噴火活動期における垂直変動量分布の特徴を説明するには始良カルデラ中央部地下の圧源とは別に桜島火山下に2次の圧源を仮定する方が都合が良い。そこで第一近似として Mogi の方法³⁾ にならって桜島火山下の圧源の位置を見積ってみる。解析の対象となりうるのは3.1で述べた第II期および第III期である。第II期の変動の特徴 (Fig. 3 (b)) からは始良カルデラ中央部の圧源の圧力変化の影響がこの地域全体に及んでいると判断される。垂直変動量の測定範囲がカルデラの南西の象限に限られていることを考慮すると、カルデラ中央部の圧源の位置を確定し、その圧力変化の影響を除去した上で桜島火山下の圧源の位置を見積るとすれば、解析上の困難と見積りの不確かさが伴う。従って、今回はカルデラ縁部の隆起が停止し (Fig. 1), カルデラ中央部の圧力変化をほとんど無視して桜島火山下の圧源の位置を見積りうると見込まれる第III期 (Fig. 3 (c)) に限って解析した。

Fig. 4 (a) に示すように、半無限弾性体内部に半径 r の球状の圧源を想定する。円筒座標の原点に圧源の中心をおき、 $z=D$ に自由表面をとり、圧源で ΔP の静水圧変化が生じた場合の表面の変形を考える。ポアッソン比が 0.25, r が D に対して充分小さいという条件のもとで、表面における水平変位 U_R , 垂直変位 U_z は

$$U_R = \frac{3r^3 \Delta P}{4\mu} \cdot \frac{R}{(R^2 + D^2)^{3/2}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$U_z = \frac{3r^3 \Delta P}{4\mu} \cdot \frac{D}{(R^2 + D^2)^{3/2}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる^{3), 4)}。但し、 μ は剛性率である。圧源の直上での垂直変位を U_z^0 とすると

$$U_z^0 = \frac{3r^3 \Delta P}{4\mu D^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(3) 式を (1), (2) 式に代入すると、

$$U_R = U_z^0 \cdot \frac{(R/D)}{[(R/D)^2 + 1]^{3/2}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$U_z = U_z^0 \cdot \frac{1}{[(R/D)^2 + 1]^{3/2}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。水平距離 (R/D) に対して、圧源の直上の表面での垂直変位 U_z^0 で標準化した U_R , U_z を計算した結果を Fig. 4 (b) に示す。

1975~77年の垂直変動量の地理的分布から、桜島内で沈降量が最大となるのは桜島南岳山頂火口附近とみられる (Fig. 3 (c))。そこで、圧源を南岳山頂火口直下とし、圧源の深さを 1, 2, 3, 4 および 5km と仮定し、それぞれの場合について (5) 式による計算値とカルデラ中心部に近い桜島北東部を除く桜島島内の垂直変動測定値の相関を調べ、相関係数および U_z^0 を求めた。その結果、圧源の深さを 2km および 3km とした場合に最もよい相関が得られた。桜島北東部の値除き解析したのはこの地域がカルデラ中心部から約 5km 以内にあり、カルデラ中央部地下の圧源の圧力減少による変形を反映するとみられるからである (Fig. 3 (c))。Fig. 5 に圧源の深さを 2km および 3km とした場合の理論曲線と測定値を示した。横軸には南岳山頂火口からの水平距離をとっている。6km 以内の測定値が桜島内の水準測量から得られた値である。そのう

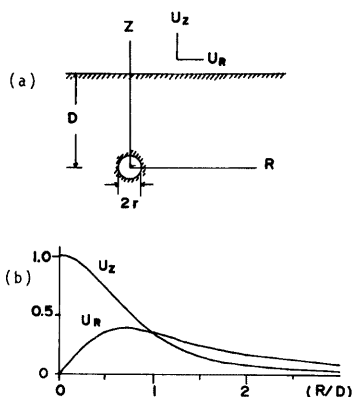


Fig. 4. Theoretical model (a), and vertical (U_z) and radial (U_R) displacements on the free surface due to this model (b).

ち × 印で示すのは桜島北東部の測定値である。鹿児島側については K-H を媒介とした垂直変動量をプロットした。7km 以遠の測定値がこれらに相当する。鹿児島側については検潮観測結果を媒介としており、 $\pm 1\text{cm}$ 程度の誤差を見込まなければならない。この図から桜島内の垂直変動分布によって求めた圧源の深さは鹿児島側の垂直変動測定値についても満足していると言える。

1975~77年と同様に 3.1 で述べた第 III 期に相当するとみられる 1960 年代前半には桜島火山中央部の顕著な地盤の隆起・沈降が測定されている⁷⁾。そこで、(a) 1963~64 年および (b) 1964~65 年の測定結果について、1975~77 年の変動について行った方法に従って解析した。圧源の位置は垂直変動量の地理的分布⁷⁾ から南岳山頂火口直下とした。圧源の深さを (a) の場合に 4km, (b) の場合に 3km とした時、計算値と測定値との相関がもっとも良い結果を示した。理論曲線と測定値を Fig. 6 に示した。桜島北東部の測定値には始良カルデラ中央部地下の圧源の影響が若干認められる。

Fig. 4 に示したモデルを仮定すると、桜島火山近傍の垂直地盤変動の特徴は、

- (1) 1975~77 年については桜島南岳山頂火口直下深さ 2~3km にある圧源の圧力が減少したとすれば測

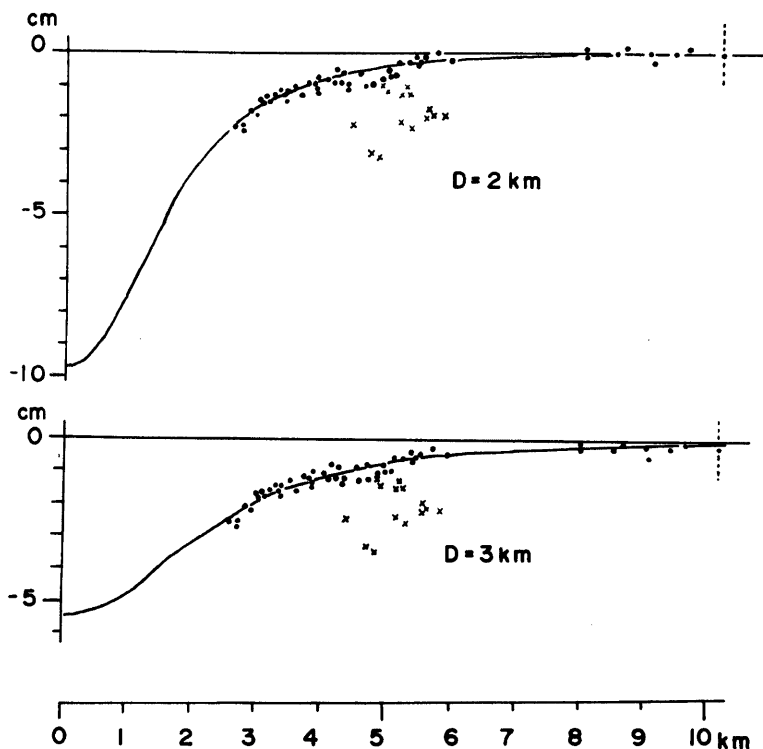


Fig. 5. Radial distribution of vertical displacements observed around Sakurajima Volcano between December 1975 and December 1977 (solid circles). Crosses show observed values in the northeastern part of Sakurajima. Dotted bars indicate the observational error of K-H. Curves are calculated due to the model.

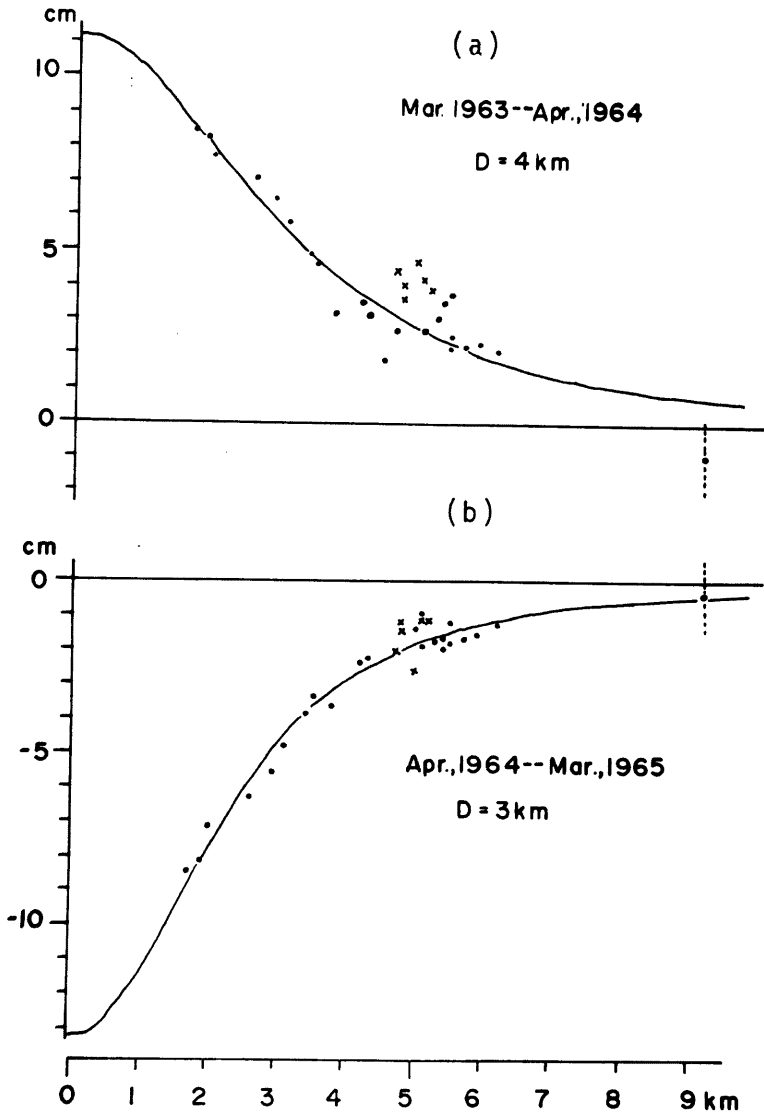


Fig. 6. Radial distribution of vertical displacements around Sakurajima Volcano between March 1963 and April 1964(a), and between April 1964 and March 1965(b). The representations in this figure are the same as in Fig. 5. Curves are calculated due to the model.

定結果をうまく説明できる (Fig. 5)。

- (2) 1963~64年については同じく南岳山頂火口直下 4km の圧源の圧力増加, 1964~65年については深さ 3km にある圧源の圧力減少が生じたとすれば測定値をよく説明できる (Fig. 6)。

ここで認められる圧源の深さの若干の差は変動量が小さい (1975~77年) あるいは測定点が少ない (1960年代前半) ことを考慮すれば有意なものとは言えない。山頂噴火活動期における桜島火山下の圧源はほぼ南岳山頂火口の直下約 3km にあり, 少なくとも1960年以降の活動期においては顕著な移動はないと考える方が妥当であろう。

桜島北東部の垂直変動測定値の理論曲線からのずれ (Fig. 5 および Fig. 6 (a)) はカルデラ中心部の圧源の圧力変化がこの地域には 3.1 で述べた第 III 期にも強く反映していることを示しているとみられる。しかも, 理論曲線からのずれの方向が桜島中心部の変動の方向と同じであることから, 山頂噴火活動期においてはカルデラ中心部の圧源と桜島火山下の圧源がほぼ同時に圧力の増減を生じていることを示唆したものと考えられる。

圧源の半径および圧力変化についての定量的な議論は今の段階では行えない。例えば桜島火山の地盤の剛性率についてそのオーダーですら明確になっていないからである。

次に光波測距儀による辺長測量結果が上述の垂直変動から見積った圧源の位置で説明が可能か否か検討してみた。桜島西部を中心とした1968年以降の辺長測量の結果から次のような点が明らかになっている³⁾。

- (1) 1975~76年の辺長の伸縮は桜島西部で顕著であり, 10^{-5} のオーダーの縮みが測定された。対岸の鹿児島側との測線では有意な変化は認められなかった。
 - (2) 桜島西部について面積歪の時間的変化を調べると, 1968年より山頂噴火活動再開直前の1972年5月までは緩やかな膨張であったが, 最盛期をすぎた1975~76年には急激な収縮であった。
- 1975年2月から1976年12月までの桜島西部における辺長の伸縮の測定値と, ほぼ同時期の垂直変動量より

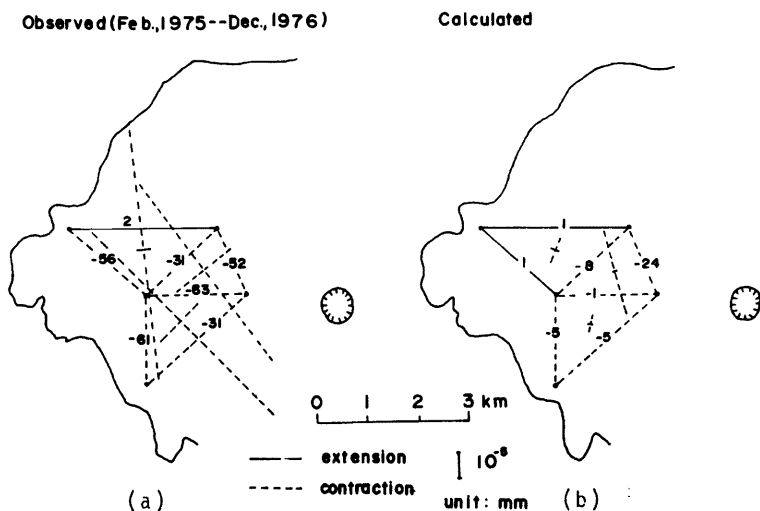


Fig. 7. Distance changes and shear strains observed in the western part of Sakurajima Volcano (left), and those calculated due to the model, assuming $D=3$ km and $U_z=-55$ mm at $R=0$ (right).

決定したモデルから期待される計算値を比較する。1975年12月から1977年12月までの間の垂直変動量分布 (Fig. 5) から求めた結果を使う。圧源の深さ $D=3\text{km}$, 圧源直上の垂直変位 $U_z^0 = -55\text{mm}$ とし, (4) 式より各測点の水平変位を求め, 各測点の南岳山頂火口に対する位置関係を考慮して各辺長の伸縮量を計算した。測点間の高度差が大きく, 垂直変動により見掛け上の距離変化を生じる場合については補正を施した。測定値と計算値の比較を Fig. 7 に示す。

辺長の伸縮および水平歪の主軸の方向は両者で定性的にはほとんど矛盾はないが, 量的に比較すると測定値が計算値より1桁も大きくなっている部分がかなり認められる。モデルから期待される最大水平変位量は圧源直上に生じる最大垂直変動量の高々2分の1程度である (Fig. 4 (b))。圧源の深さを2km以浅とすると定性的にも矛盾を生じる。4km以深としてもこの差を解消する解は得られない。前述のように有意な辺長の伸縮は桜島 (半径約5km) 内にも認められたことを考慮すると, 垂直変動量分布から見積った桜島火山直下の圧源の深さはほぼ妥当であると考えてよさそう。桜島西部の測線のいくつかは大正の噴火(1914年)の火口列¹⁾をまたいでいる。従って, 垂直変動量分布から期待される辺長の伸縮量と測定値との顕著な差は単にモデルを変更³⁾するだけでは解決せず, この地域の地盤が非弾性的な振舞いをしている可能性を示していると考えられる。

4. ま と め

精密水準測量および検潮観測資料により, 1972年10月に再開した桜島火山の一連の山頂噴火活動とその前後の垂直地盤変動の関係を調べた結果次のようなことが明らかになった。

- (1) 山頂噴火活動の推移に対応して桜島火山近傍の垂直地盤変動は特徴的な時間的経過を示す。静穏期には始良カルデラ中央部を中心とする同心円状の隆起を生じる。この時期桜島内においてはカルデラ中心部に近い北部は隆起し, 南部は沈降する。山頂噴火活動初期には桜島火山全体が他のカルデラ縁部に対し急激な隆起を示す。検潮観測資料からは山頂噴火活動の再開に先行して, 1~2年前より桜島火山が隆起したことが認められる。山頂噴火活動が最盛期を過ぎると, この地域全体の地盤の隆起はほとんど停止し, 桜島火山中央部から始良カルデラ中央部が若干沈降を示す。
- (2) 山頂噴火活動期における垂直地盤変動の特徴からは桜島火山下に2次のマグマ溜りが生成していることが推察される。桜島火山南岳山頂火口直下約3kmに球状圧源を仮定すると桜島火山近傍の垂直変動量分布の特徴を説明することができる。この結果は辺長測量結果とも定性的には矛盾しない。

本稿を終るにあたり, 終始御指導を戴いた加茂幸介教授に厚く御礼申し上げます。なお, 鹿児島港の潮位資料は鹿児島地方気象台より提供されたものである。その御好意に対し感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Omori, F.: The Sakura-jima Eruptions and Earthquakes, Bull. Imp. Earthq. Inv. Comm., Vol. 8, 1914-1922.
- 2) Mogi, K.: Relations between the Eruptions of Various Volcanoes and the Deformations of the Ground Surfaces around them, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 36, 1958, pp. 99-134.
- 3) 江頭庸夫：検潮観測による桜島の垂直変動, 京都大学防災研究所年報, 20号 B-1, 1977, pp. 77-84.
- 4) 石原和弘：桜島火山の地殻変動について (I), 京都大学防災研究所年報, 第19号 B-1, 1976, pp. 21-27.
- 5) 江頭庸夫・石原和弘：桜島火山周辺の地盤変動と山頂噴火活動, 自然災害特別研究, 第2回桜島火山の集中総合観測 (昭和51年11月~12月), 1977, pp. 21-27.
- 6) Machado, F.: Crustal Deformation near Volcanoes, Physical Volcanology, Elsevier, 1974, pp. 264-267.
- 7) 江頭庸夫：火山性地殻変動 (I) 最近の桜島火山における垂直変動と火山活動との関係, 京都大学防

災研究所年報, 第 8 号, 1965, pp. 71-82.

- 8) Yokoyama, I.: Crustal Deformations Associated with Volcanic Activities, *Tectonophysis*, Vol. 23, 1974, pp. 349-360.