

## 地球物理学的観測による桜島火山のマグマ溜り および火道の推定

石 原 和 弘

### GEOPHYSICAL EVIDENCES ON THE EXISTENCE OF MAGMA RESERVOIR AND CONDUIT AT SAKURAJIMA VOLCANO, JAPAN

By *Kazuhiro* ISHIHARA

#### Synopsis

Recent geophysical studies and available data confirmed the existence of an active magma conduit and a live reservoir beneath Sakurajima Volcano during its recent eruptive period.

Analysis of levelling data indicated that a pressure source which induced the ground deformation of the volcano had been located in the range of depth from 2 to 5 km beneath the summit of the volcano. Seismological studies revealed that seismic shear waves were strongly attenuated in a zone which was located between 3 km and 6 km in depth with a radius of about 1 km beneath the three central cones of the volcano. In addition, no earthquakes have occurred at a deeper part than 4 km beneath the central cones during the period from 1975 to 1986, and volcanic earthquakes with deeper focuses originated out of this region. Thus, the pressure source, the zone of anomalous wave propagation and the aseismic zone occupy almost the same location at the volcano, especially in the range of depth between 4 km and 5 km beneath the summit. These geodetic and seismological studies suggest that a live magma reservoir is located at a deeper part than 3–4 km below sea level beneath the summit of the volcano.

The spatial distributions of explosion-quakes and A-type volcanic earthquakes illustrated the location of the active magma conduit and its size. These two events are quite different from each other in their focal mechanisms and in the relationship between volcanic explosions, and a recent study suggests that explosion-quakes originate in a magma conduit. The hypocenters of explosion-quakes located in a narrow zone with a lateral extent of 0.3 km×0.6 km from sea level to 2 km beneath the active summit crater. The direction of the longer axis coincided that of line connecting two active vents at the summit crater. The hypocenters of A-type volcanic earthquakes surrounded those of explosion-quakes in the range of depth from 0 to 2 km, and encircled an aseismic zone at the deeper part than 2 km. Assuming that the boundary between the hypocenters of A-type volcanic earthquakes and those of explosion-quakes coincides with the wall of magma conduits, it is inferred that there exist two magma conduits with the diameter of 200–300 m beneath the active crater and the two conduits are contacted with each other. Furthermore, the analysis of tilt and strain records indicated that pressure changes occurred for individual eruptions at the range of depth from 2 to 6 km beneath the summit. These results suggest that the magma conduits are connected with presumed magma reservoir at a depth of 3 to 4 km.

## 1. はじめに

始良カルデラの南縁に位置する桜島火山は、日本で最も活動的な安山岩質火山であると共に、1914年の噴火以来、調査研究がよくなされた火山のひとつである。そのマグマ溜りの存在に関しても、多くの議論がなされてきた。

1914年の桜島の噴火後、始良カルデラを中心に顕著な地盤変動を伴った。その地盤変動の解析から、Mogi<sup>1)</sup> および Yokoyama<sup>2)</sup> は始良カルデラ中心部地下約7~10 km にマグマ溜りが存在する可能性を示した。1915年以降は逆に始良カルデラを中心に隆起傾向が続いている<sup>3)</sup>。

Yoshikawa<sup>4)</sup> は桜島内の地盤変動の解析から桜島中心部直下約3 km に二次的なマグマ溜りが存在する可能性を示し、始良カルデラ直下のマグマ溜りとつらなっていると考えた。その後の水準測量による地盤変動観測の解析結果も、Fig. 1 に示したように、始良カルデラ地下約10 km と桜島の直下数 km にマグマ溜りが存在する可能性を強く示唆している<sup>5) 6)</sup>。

西<sup>7)</sup> は山頂噴火活動が比較的静穏な時期に短期間ではあるが、南岳山頂火口を囲む高密度の地震観測を実施し、詳細な震源分布を得た。その特徴として、南岳直下の海面下0.5~2.5 km の間に震源域の拡大がみられること、更に深くなると震源域は急に狭くなり、南南東に向い次第に震源が深くなることを指摘している。そのうえで、マグマは南南東から上昇し、南岳直下の海面下0.5~2.5 km でマグマ溜りを形成していると考えた。

吉留<sup>8)</sup> は、桜島や鹿児島では、桜島や始良カルデラを通過する近地地震の地震波、特にS波が大きく減衰して記録されることに着目して、異常減衰領域—マグマ溜り—をあきらかにしようとした。同様の手法で、加茂他<sup>9), 12)</sup> は、桜島の中央部地下の3 km 以深（少なくとも6 km まで）に半径約1 km の拡がりをもつ異常減衰領域があることを明らかにした。また、始良カルデラの地下にも地震波、特にS波が減衰する領域があることを示唆する解析結果を得た。しかし、解析例および観測点の数が少なく始良カルデラ中央部の異常減衰領域の範囲を特定することができず、有意な速度異常の有無も確認できなかった。

Ono et al<sup>10)</sup> は南九州で爆破地震調査を実施し地殻上部の地震波速度構造を推定すると共に、桜島・始良カルデラ周辺で Fan shooting を実施した。その結果、Fig. 2 に示したように始良カルデラおよび桜島の地下、周囲の地殻の6 km/s 層に相当する深度に地震波の異常減衰領域があることを見いだした。特に、桜島直下を通過する波の減衰が顕著であった。なお、6 km/s 層の上面の深度は3~6 km と推定されている。

1974年以降桜島内の地震観測網の整備、テレメータの導入により、震源決定能力が飛躍的に向上した。その結果、A型地震と呼ばれる構造性地震と同様な波形上の特徴（P波、S波の識別可能など）をもつ火山性地震の震源が限られたいくつかの範囲に分布すること、その発震機構が山頂噴火活動の段階によって変化することが明らかになった。<sup>12)</sup> A型地震は南岳山頂火口の直下の海面付近から4 km 付近までと、桜島の南西側の海岸付近から南南西方向の地域に集中して発生している。しかも、火口直下では殆ど垂直に分布し、南南西方向では火口よりも距離が増すほど、震源が深くなっている。1976年3月から5月にかけてこの地域において震源が次第に火口近くへ移動する現象が認められた。5月上旬から中旬にかけて震源のごく浅い火山性地震が多発し、その後活発な山頂噴火活動が始まった<sup>13)</sup>。地震観測からは、始良カルデラと反対の方向、つまり、桜島南方からのマグマの上昇貫入経路が想定されるような観測結果が得られた。

加茂・石原（1980）<sup>14)</sup> は、その後も活発な山頂噴火活動が継続しているにもかかわらず、この地域の地震活動が減少したことから、桜島の主たるマグマ溜りは始良カルデラ中心部地下にあって、桜島南西方向の地震活動は一時的なマグマの上昇貫入経路に対応する可能性もあると述べ、Fig. 3 に示すモデルを提示した。また、観測網が桜島内に限られている現状での地下深部のマグマ溜りおよびマグマの上昇貫入経路に関する知識の限界を指摘している。

Yokoyama<sup>15)</sup> は、1914年の噴火発生直後に発生したマグニチュード7の地震の震央が桜島南西海域に求まっており、近年の山頂噴火活動期にもこの地域の地震活動が高いレベルにあること、他方始良カルデラ中

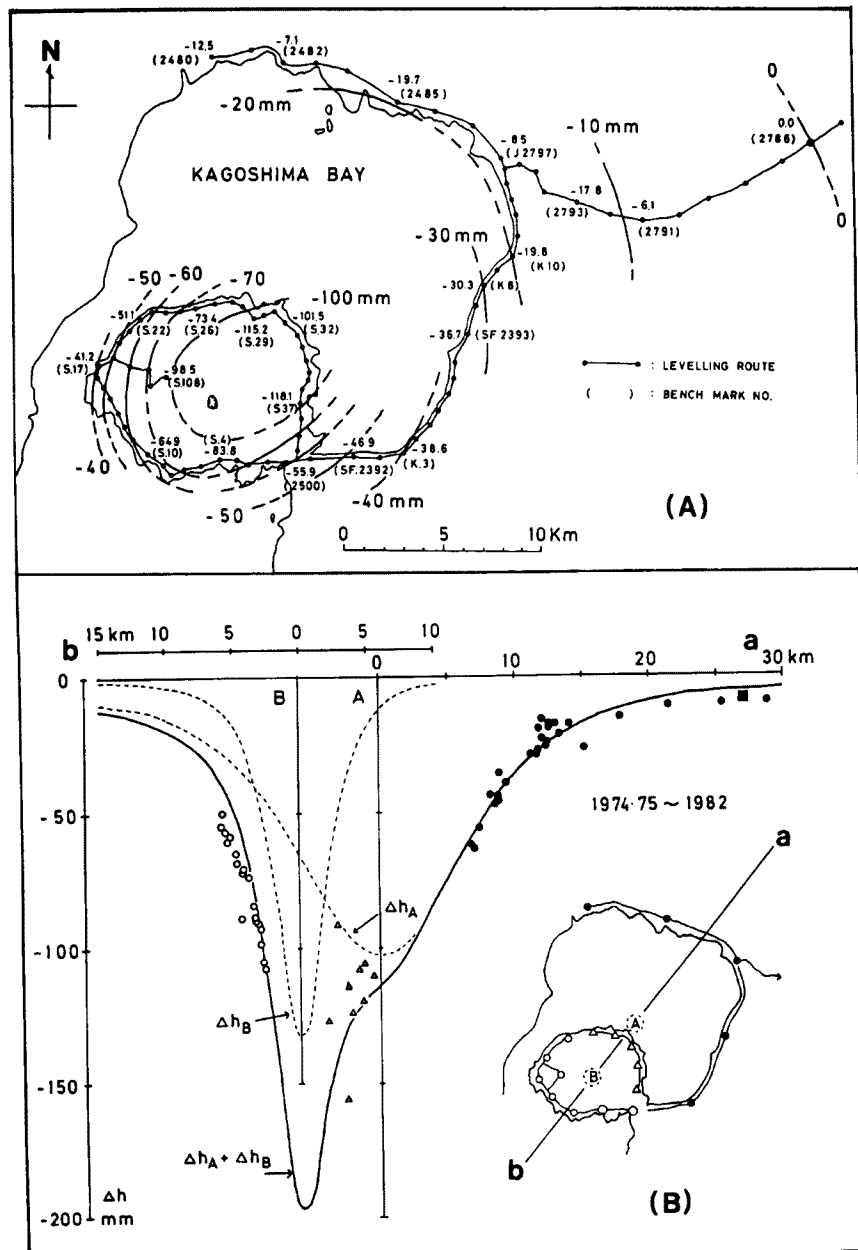


Fig.1. Vertical ground displacements around Sakurajima Volcano during 1975 to 1982 (A), and the comparison between the observed values and the theoretical curve along the line, a-b (B). The two pressure sources, A and B, are assumed to be located at depth of 10 km and 4 km, respectively (after Eto and Nakarura, 1986).

心部にはほとんど地震活動が認められないことから、始良カルデラの地下の active なマグマ溜りの存在に関して否定的な見解を表明している。始良カルデラを通過する地震波の異常減衰領域についても、カルデラ形成時の火砕物の堆積層による地震波の減衰の可能性を指摘している。そのうえで、1914年の噴火後の桜島を含む始良カルデラの地盤変動の特徴および桜島の南海域の地震活動を併せて説明するために、桜島の直下約 8 km に南側から斜めに突きあげるような圧力の働くマグマ溜りの存在を提案している。

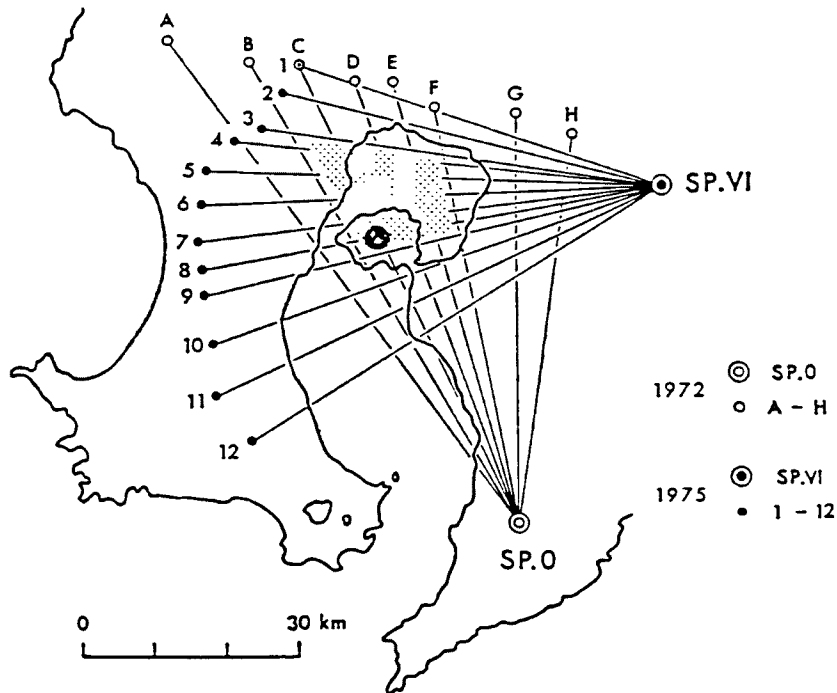


Fig. 2. Area of anomalous wave propagation indicated by fan-shootings (after One et al., 1978)

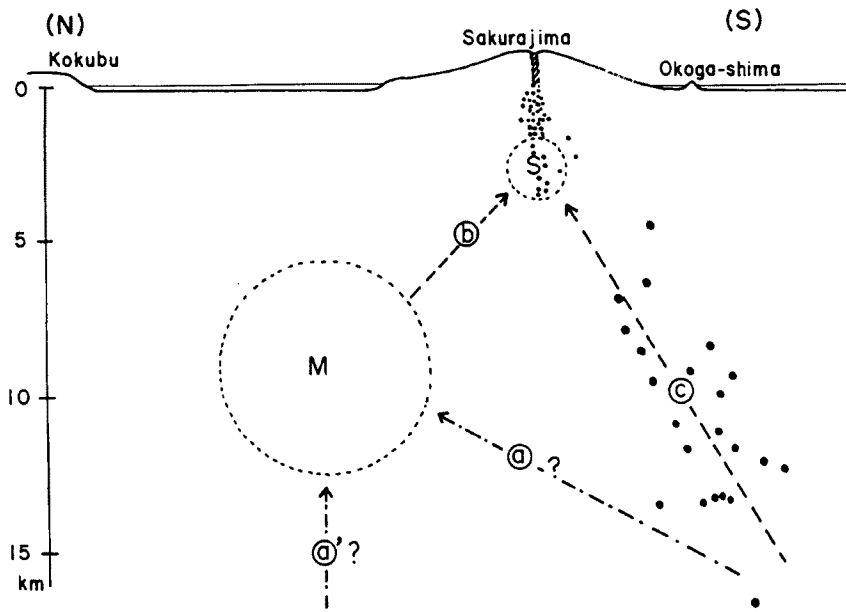


Fig. 3. A preliminary model on magma reservoirs and conduits beneath Sakurajima Volcano and Aira Caldera (after Kamo and Ishihara, 1980). The dots show the hypocenters of volcanic earthquakes, and the arrows do routes of magma supply. The circles denoted by M and S are presumed magma reservoirs.

始良カルデラの地下には active なマグマ溜りは存在しないとする Yokoyama の見解の当否については、いまのところ吟味するだけの観測データは得られていない。その第一の理由は桜島は海に囲まれており、観測点の配置が限られるためである。特に、問題となっている始良カルデラ内は大半が海であり、この海域での観測データが乏しいことによる。

本稿では、観測網の整備がすすんでいる桜島の下にマグマ溜りが存在する可能性を地震観測および地盤変動観測にもとづき議論し、これまでにどの程度の知識が得られているか検討する。

## 2. 桜島火山直下のマグマ溜りについて

最近の山頂噴火活動期における水準測量データの解析から推定された地盤変動を引起す桜島直下の力源の

Table 1. Depth of pressure source beneath the center of Sakurajima Volcano estimated from ground deformation analysis

| Period    | Depth | Authors                 |
|-----------|-------|-------------------------|
| 1959–1960 | 3 km  | Yoshikawa (1961)        |
| 1963–1964 | 4 km  | Ishihara and Eto (1978) |
| 1964–1965 | 3 km  |                         |
| 1975–1977 | 3 km  |                         |
| 1975–1976 | 5 km  | Eto and Nakamura (1986) |
| 1976–1978 | 4 km  |                         |
| 1978–1980 | 3 km  |                         |
| 1980–1982 | 2 km  |                         |

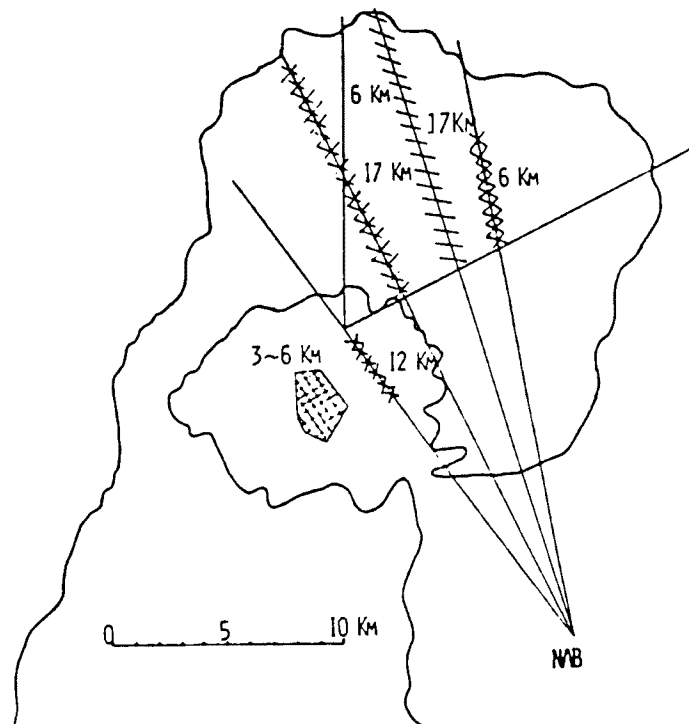


Fig. 4. The zone in which seismic shear waves were strongly attenuated (after Kamo et al., 1980).

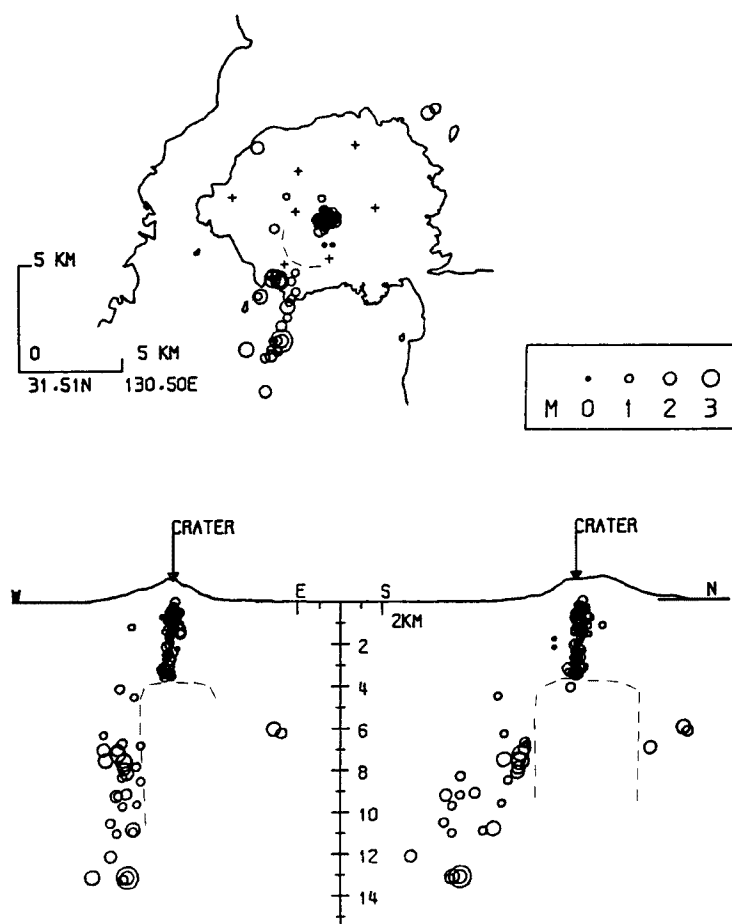
深度を **Table 1** にまとめて示した<sup>4),5),6)</sup>。山頂噴火活動期における桜島地下の圧力変化は桜島中央部地下 2~5 km の範囲で生じているといえる。

マグマ溜りが存在するとすれば、shear waves はその領域を通過しがたく、その内部では、地震の発生が認められないはずである。

加茂等<sup>10)</sup>によって推定された地震波の異常減衰域を、**Fig. 4** に示した。桜島の中央部の北岳、中岳および南岳の中央火口丘の直下を通過する地震波、特に S 波は極度に減衰する。観測点の分布範囲が限られているため、深さ方向の広がりについては、その下限を明確にすることはできなかったが、少なくとも、3~6 km の深さにその領域があると述べている。地震波の異常減衰域と山頂噴火活動期において地盤変動を引起す力源の位置がほぼ一致しているといえる。

1975年から1984年までの A 型地震の震源分布を **Fig. 5** に示した。南岳山頂火口の下、海水面レベルから 4 km までの範囲と桜島の南西海岸付近から南南西方向の帯状の領域に集中して発生している<sup>12)</sup>。ここで注目されるのは、桜島中央部の 4 km 以深では地震の発生が認められないことである。4 km 以深の地震は桜島の海岸部付近かその外で発生している。つまり、桜島中央部の地下 4 km 以深に地震の発生が認められない領域がある。

1975年以前は常時観測網が整備されていなかったが、1968年以降の一部の期間については、震源分布が既



**Fig. 5.** The hypocenters of A-type earthquakes during 1975 to 1986. Note no earthquakes originated at a deeper part than 4 km beneath the center of the volcano.

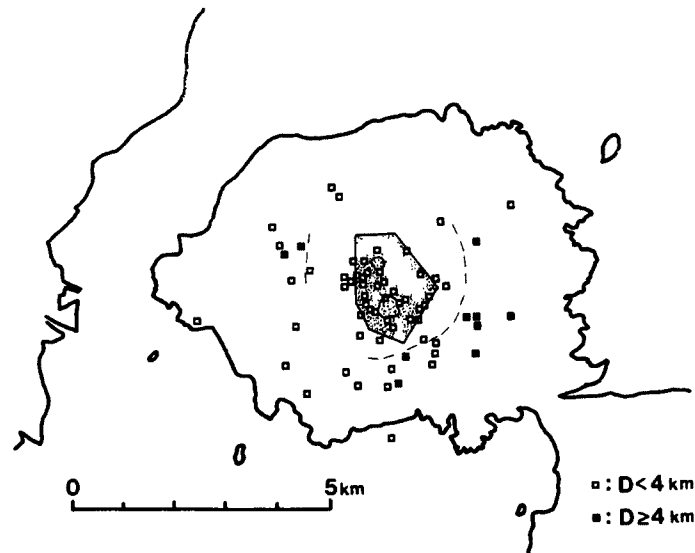


Fig. 6. The epicenters of A-type earthquakes during 1968 to 1974, compiled from the data by Yoshikawa and Nishi (1968), Nishi (1971) and Kamo (1976).

に発表されている<sup>7),16),17)</sup>。それらの震源をまとめて作成した震央分布図を Fig. 6 に示した。震源の深さ 4 km より浅い地震と 4 km より深い地震を区別して図示している。図には参考のために、加茂等による異常減衰域を記入した。一見して分るように、最近の震源分布と同様に桜島中央部地下 4 km 以深には地震の発生が認められない。この領域は、地震波の異常減衰域とほぼ重なるように分布しており、ductile な岩石あるいは、溶融した物質により占められていると推察される。

地震波の異常減衰域、aseismic な領域および地盤変動を引起す力源の位置がほぼ一致していることから判断すると、マグマ溜りが桜島の地下浅部に存在するとすれば、中央火口丘を含む南北約 3 km、東西約 1~2 km の範囲のうちで、地下 3~4 km 以深といえる。

### 3. 火道について

桜島火山は昭和30年10月13日に南岳山頂火口において爆発を生じ、現在まで活発な噴火活動を継続している。昭和33年12月24日に溶岩が火口に貯溜していることが航空写真で確認されて以来、現在に至るまで、断続的に火口底に溶岩が貯溜していることが確認されている。溶岩の火口底への上昇貯溜・山頂爆発による溶岩の放出という過程を幾度となく繰返してきた。このことは、少なくとも、山頂噴火活動期には桜島の地下から南岳火口底（標高約 850 m）への溶岩の通路、つまり火道が確かに存在していることを示している。

西<sup>7)</sup>は山頂噴火活動が比較的静穏であった1971年4月に南岳山頂火口を囲み臨時地震観測を実施し、Fig. 7 に示す詳細な火山性地震の震源分布を得た。西は火山性地震の震源を含む筒状の領域を火道、震源分布域が拡大している深度 0.5~2.5 km の部分をマグマ溜りと考えた。火道およびマグマ溜りの内部の物質は溶融状態にあり地震は発生しがたいはずであるので、西の描いた領域がそのまま火道およびマグマ溜りの領域を表わしているとは考えにくい。西の指摘していることで注目されることは、南岳山頂火口の直下には地震が発生せず、火口縁部とその外側に発生していることである。火道が存在するとすれば、この地震の『空白域』に相当する部分にあると考えるほうが妥当であろう。

南岳山頂火口での爆発的噴火の発生開始とほぼ同時に爆発地震が観測される。その震源は、南岳山頂火口直下の海面レベル付近から約 2 km の深度の範囲に分布し、前述の A 型地震の分布域と重なる<sup>13)</sup>。桜島で

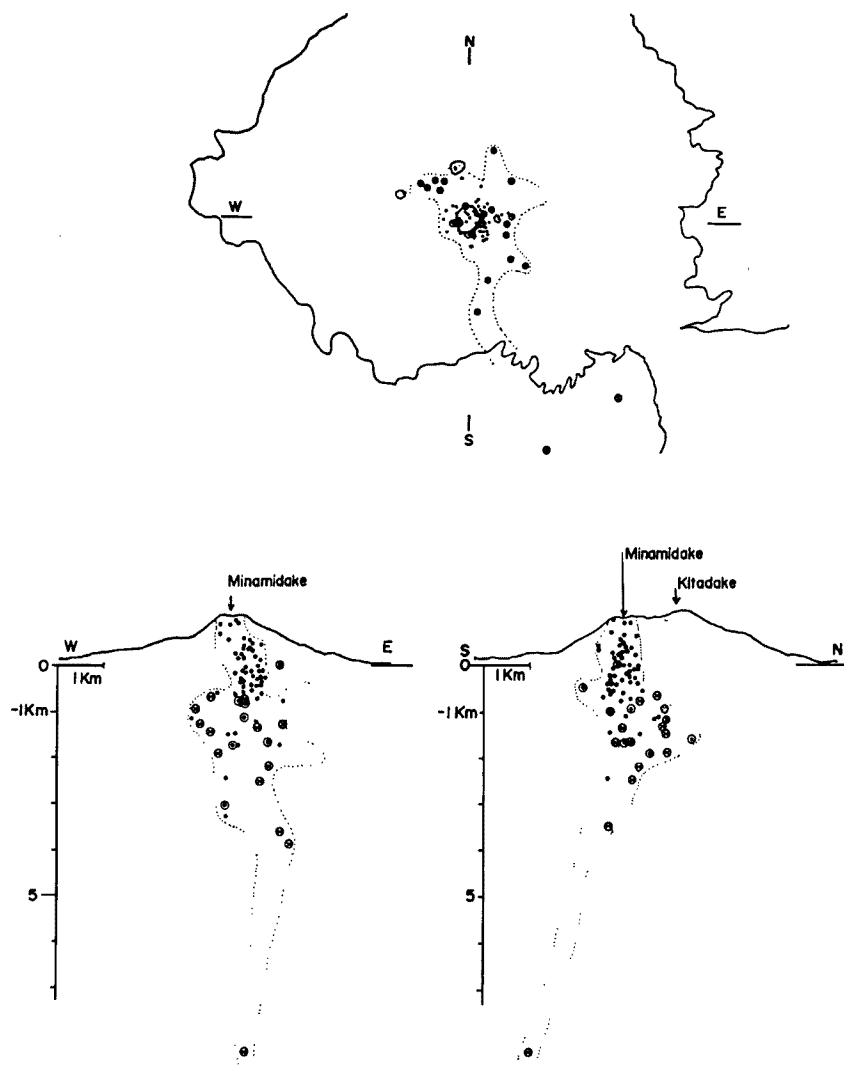


Fig. 7. The locations of volcanic earthquakes beneath the central cones of Sakurajima Volcano determined by a temporary observation (after Nishi, 1971). The notations  $\otimes$ ,  $\bullet$  and  $\odot$  represent A-type earthquakes, B-type earthquakes and low-frequency A-type earthquakes, respectively.

発生している爆発地震の初動は火口を取囲む全観測点で押しとして観測される<sup>18)</sup>。また、初動付近の卓越周波数は約 2 Hz と他の火山性地震にくらべても低い<sup>19)</sup>。つまり、構造性地震と異なる発震機構である。爆発地震は火口底での爆発現象に約 1 秒先行して発生することから、山頂爆発の直接的な引きがねと考えられる。山頂爆発—マグマの噴出—との直接的な対応関係からみて、爆発地震は火道内で発生する震動と考えられる<sup>20)</sup>。これに対して、A 型地震は通常の構造性地震と同様に四象限型の発震機構をもち<sup>12)</sup>、しかも、爆発地震のような表面活動との対応関係は認められないことから、物質が溶融状態にある火道内で発生しているとは考えがたい。このような考えが妥当であるならば、爆発地震と A 型地震は比較的隣接した異なる場所で発生しているはずである。

このような観点から、ルーチンの震源決定データを用いて、山頂火口の下で発生する爆発地震と A 型地震の震源の位置関係を吟味してみた。その結果を Fig. 8 に示した。震源決定の精度は、計算の残差から判

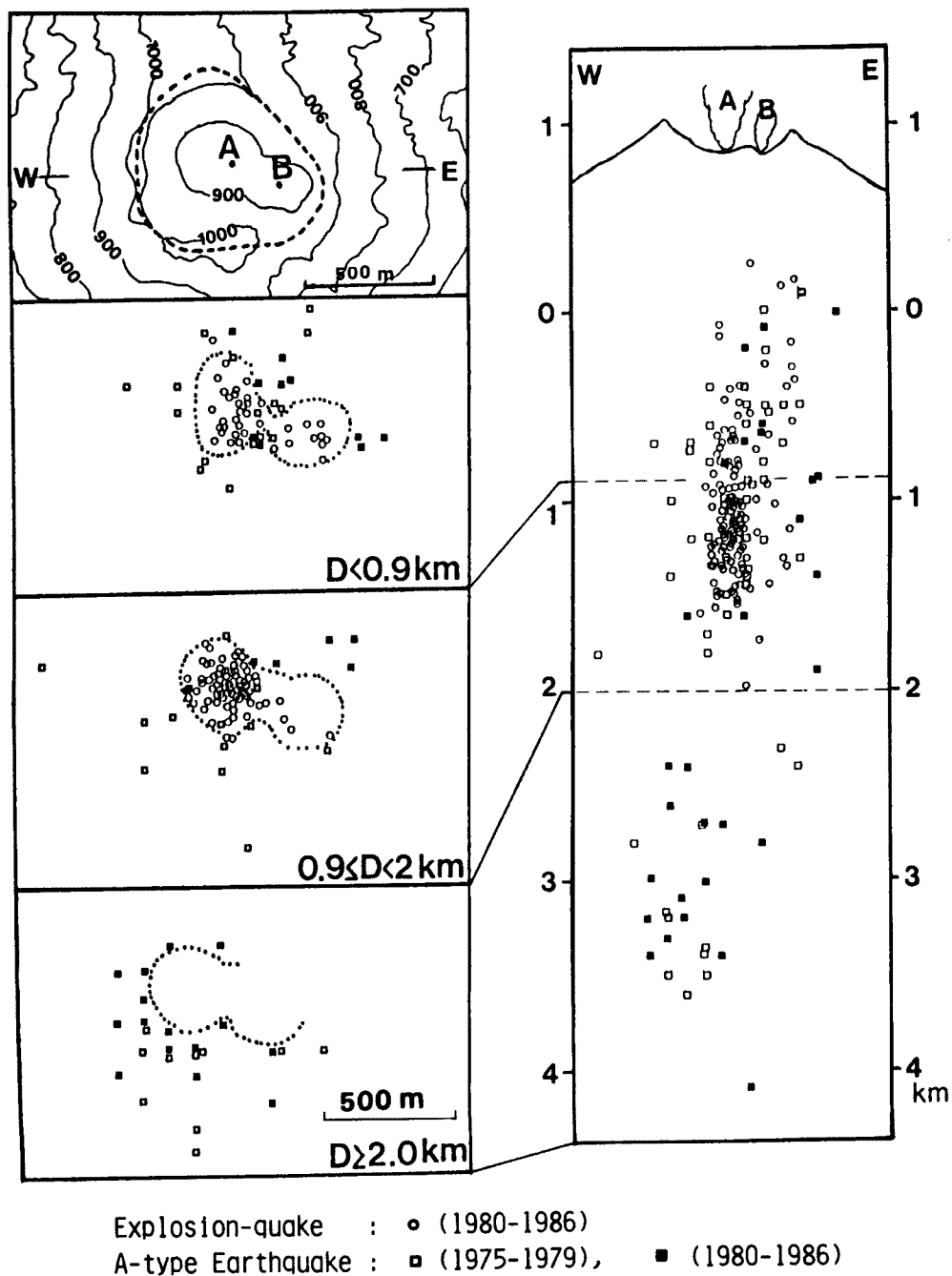


Fig. 8. The hypocenters of explosion-quakes and A-type earthquakes beneath the South Cone of Sakurajima. A and B show the position of the two active vents in the summit crater, the rim of which is denoted by the encircled broken line.

断して、水平方向で  $\pm 0.3$  km 以内である。観測点毎の走時残差は火口直下の地震に対してはほぼ一定であり、その原因は主として、火山体および観測点付近の不均質な構造によると考えられ<sup>18)</sup>、初動の読取の誤差に起因するものではない。山頂爆発が発生する度に観測される爆発地震については爆発地震同志の相対的な位置の精度を保つために、1980年から1986年までの期間に全観測点（7点）で明瞭に初動が識別できた場

合のみの震源（総数の約7%）を白丸で記入した。この場合の爆発地震の震央の相対的な位置の誤差は0.1 km以下である。A型地震は発生回数がすくないので4点以上で明瞭に初動が識別できた場合について記入した。観測点の整備が進行中であった1976～1980年については別の記号で表した。

Fig. 8 をみて分るように、爆発地震は南岳山頂の直下の海拔0 m 付近から2 km の深さの範囲で発生し、2つの火口、A 火口およびB 火口の位置関係に対応して、西北西・東南東方向に伸びた震央分布を示す。2 km の深さまでのA型地震の震央は、爆発地震の震央分布の縁あるいは外側に分布する。震源決定の誤差を考慮すると、爆発地震とA型地震の発生する領域の境界は点線で囲んだように隣接した直径200～300 m のふたつの円形状になる。深さ方向の拡がりを考慮すると、爆発地震は火口底直下の隣接したふたつの円柱状の領域内で発生しているといえる。このような領域が2 km 以深にも延びていると仮定すると、図に示したように、A型地震の震源に囲まれた地震の空白域を描くことができる。

爆発地震は火道内で発生し、A型地震が火道外で発生するとすれば、最近の山頂噴火活動期の火道は、山頂火口底からは鉛直に延び、海水面レベルから2 km の深さまでは隣接あるいは連結したふたつの円筒（直径200～300 m）のような形態をなし、深さ3～4 km でマグマ溜りにつながっていると考えられる。

#### 4. 最近の観測結果と検討

最近、桜島の個々の山頂噴火に対応した山頂部地盤の隆起膨張・沈降収縮現象が火口から2.8 kmにある観測坑道内に設置した水管傾斜計および伸縮計によって捕捉された<sup>21)</sup>。解析の結果、傾斜変化量と面積歪の比は、約0から1.4までの範囲にあり、変動量が増大するとその値が大きくなる傾向が認められた（Fig. 9）。火口直下の球状力源内の静水圧変化によって変動が引き起こされたと仮定し、その比から力源の深度は約2 km から約6 km の範囲になることが示された。この深度は、ここまでの検討で推定された火道の下端か

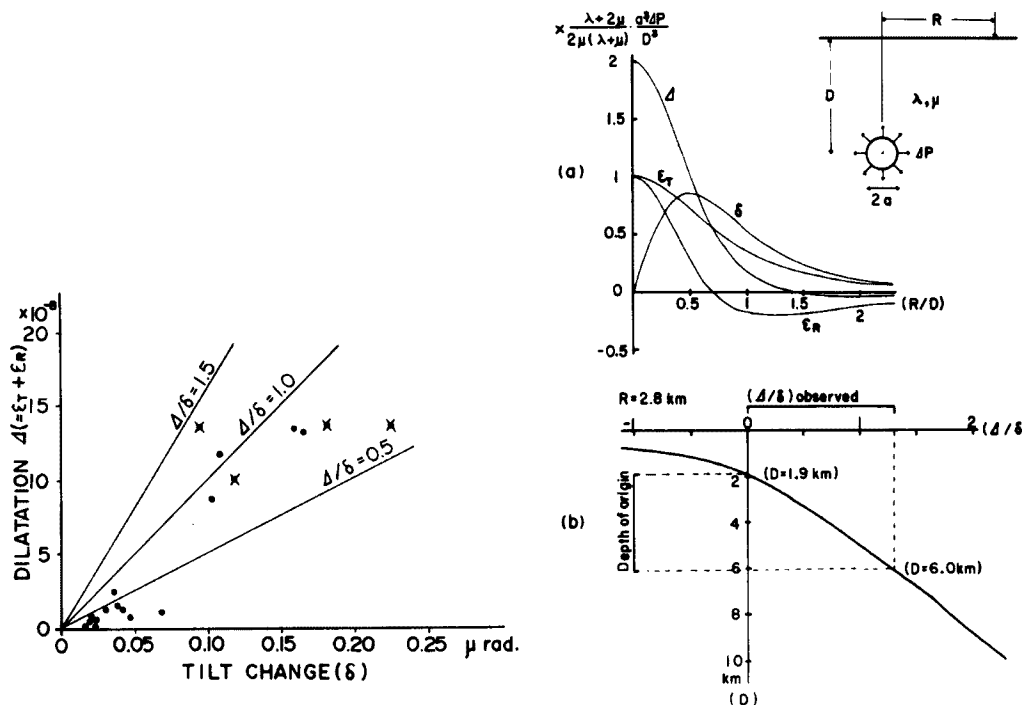


Fig. 9. The relation between precursory ground-tilt and dilatation observed for individual eruptions by the tiltmeter and extensometers installed 2.8 km northwest from the summit crater (left), and estimation on the depth of the pressure source according to Mogi's model (right), (after Kamo and Ishihara, 1986).

らマグマ溜りの領域に相当する。山頂噴火の準備としての地下深部からマグマ溜りへのマグマの上昇貫入、あるいは火道の下端からマグマ溜りの領域でのマグマの発泡現象が個々の噴火に先立ち生じていることを示唆する。個々の爆発的噴火に対して、山頂部の地盤の隆起膨張、爆発地震の発生、山頂火口での爆発、山頂部の地盤の沈降という一連の現象が繰返し観測されていることから判断して、桜島南岳直下に火道とマグマ溜りが存在すると考えることは十分に根拠があるといえる。

これまでは、主に地震観測および地盤変動観測から推定される場所の桜島火山直下の火道およびマグマ溜りについて述べてきた。その他の観測では、どのように捕えられているかを述べる。桜島の火山活動を総合的に評価する目的で、1974年以降、1985年までに計6回の集中総合観測が実施され、桜島の地下の状態変化を反映した現象が検知されている。

例えば、全磁力の繰返し測定では<sup>22)</sup>、1977年以降桜島内の測定点で、桜島中央部地下の帯磁が弱まる傾向の変化が観測されている。長期間の活動によりマグマ溜りあるいは火道の微小な拡大あるいはその周囲の岩石の温度上昇により帯磁が弱まった可能性はあるが、変化量は10 nT以下で山体の侵食等による地表面の形状変化の影響を受ける測定点もあって、帯磁が弱まった領域の位置を特定するまでにいたっていない。

精密重力測定では<sup>23)</sup>、1975年以降桜島中央部を中心に重力の増加傾向が続いていることが分った。増加量は地盤の沈降量（測定点の高度変化）から期待される変化量より数倍大きい。噴火活動の静穏期におけるカルデラの隆起速度から推定されるマグマの供給量と最近の山頂噴火活動によるマグマの消費量の差の蓄積

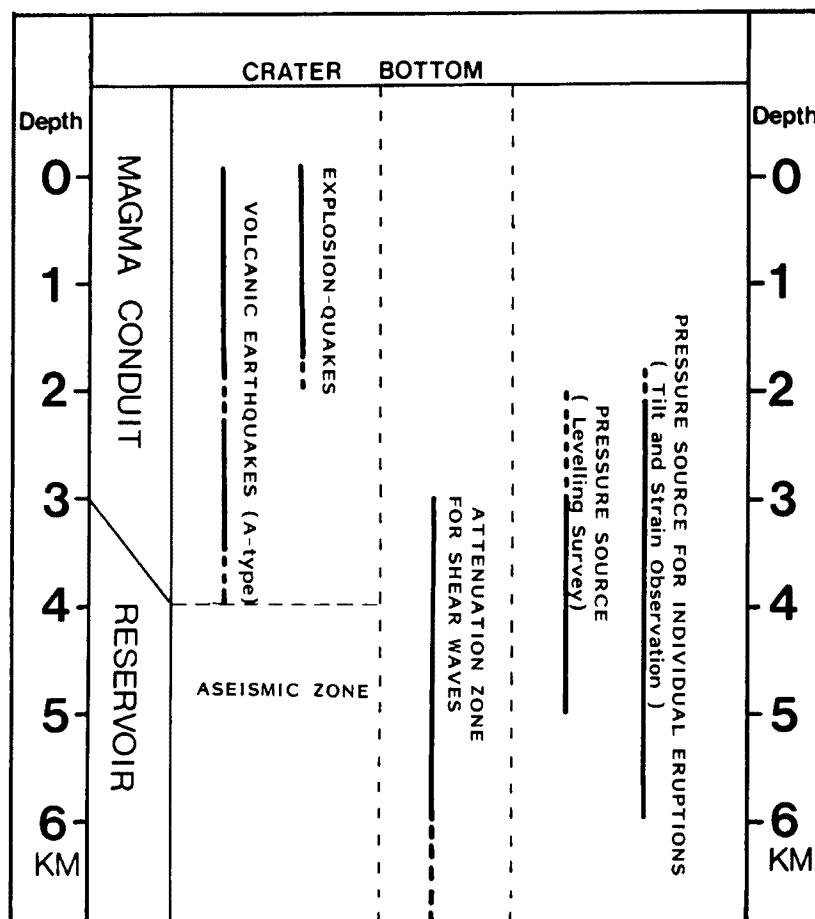


Fig. 10. The summary of observed phenomena related with the magma reservoir and conduit beneath Sakurajima Volcano.

が、桜島中央部地下で密度の増大現象を生じさせていると解釈された。火口から 2.5 km 以内の測定値がないことと測定誤差に比較して変化量が十分に大きくはないことから、密度変化の領域の深度を確定するには無理があるが、南岳火口直下 3 km の球状の領域で密度の増加現象が生じたと仮定すれば、検出された重力変化量の分布を比較的良好に説明できることが示された。

全磁力測定および精密重力測定の結果は、積極的にマグマ溜りの位置の推定に寄与するものではないが、マグマ溜りおよび火道の存在の可能性を支持しているといえる。

これまでに検討してきたことをまとめて、Fig. 10 に示した。山頂噴火活動期の、桜島内の地震観測および地盤変動観測データを検討した限りでは、桜島南岳直下 3~4 km 以下にマグマ溜りが存在し、そこから火口底へ通ずる火道があると推定される。火道の形態については、爆発地震と A 型地震の分布域からある程度推測できたものの、マグマ溜りが存在すると推定される 3~4 km より深い部分についてはその実体が必ずしも明確ではない。桜島の深部のマグマの存在形態を解明するには、桜島の外の地震観測点の記録も含め、総合的かつ定量的に、速度異常も含む地震波の異常伝搬領域の特性を明らかにする必要がある。

ここで、山頂火口直下に存在すると推定された火道について、捕捉的な議論を行なう。

南岳直下で発生した A 型地震と爆発地震の深度別の発生頻度を Fig. 11 に示した。Fig. 5 あるいは Fig. 8 から読みとれるが、深度 2 km 付近で A 型地震の発生頻度が極小になっていることが分る。その原因としては、地層の境界あるいは火道の部分的拡大などの構造上の不連続が考えられる。西<sup>12)</sup>は A 型地震の発震機構と震源の位置および噴火活動の関連を調べた。噴火活動が高まる時期には正断層型の発震機構になることを指摘している。更に、Tension 軸の方向が深度 2~4 km では東西方向になり、鹿児島湾の深さ 4~10 km で発生する地震の tension 軸方向とほぼ一致するのに対して、2 km 以浅では南北方向の張力場になっていることを指摘している<sup>24)</sup>。一方、Yokoyama and Ohkawa<sup>25)</sup>は重力異常の解析から、Fig. 12 に示したように、桜島火山の中央部地下の基盤(四万十層群)の深度を 2.5 km と推定している。深度約 2 km 付近の地震活動の減少および 2 km 付近を境とした Tension 軸方向の変化は、重力異常の解析から推定されているような構造(カルデラの基盤面の存在)、あるいは西が火山性地震の震源分布から推定したような火道の部分的拡大(Fig. 7)を深度 2 km 付近に仮定しなければ理解しがたい。

有史時代の 3 回の巨大山腹噴火は、いずれも南岳の両山腹に、しかもそれぞれ異なる方向にほぼ直線状に火口列を生じ溶岩を流出している。文明年間の噴火(1471~1476)では北東および南西山腹に、安永の噴火(1779~1780)では北および南の山腹に火口群を形成した。1914年の噴火では、東西方向の火口列を生じ、Fig. 13 に示したような水平変動が生じた。Yokoyama<sup>15)</sup>はこの変動を解析し 2 km の深度に局所的な力源の存在を仮定すれば、説明できることを示した。もし、鹿児島湾付近の地殻浅部の応力場が有史時代を通じ

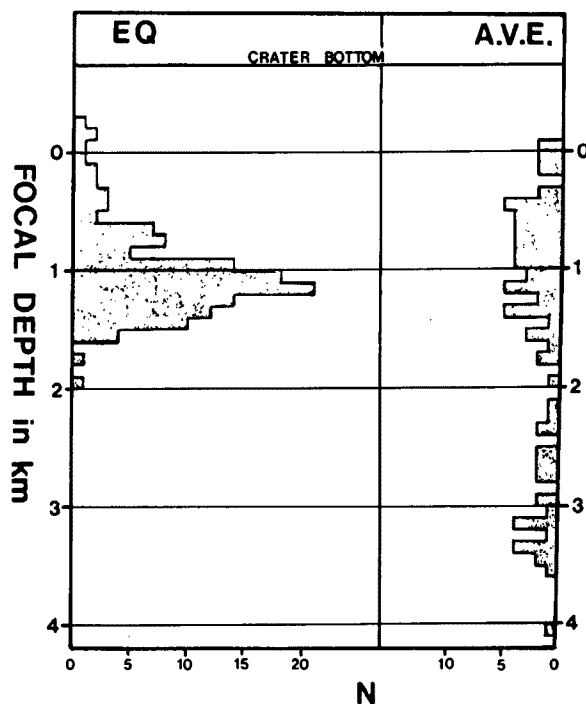


Fig. 11. The histogram of the focal depth of explosion-quakes (EQ) during 1980 to 1986, and A-type volcanic earthquakes (A.V.E.) originating beneath the summit crater of Sakurajima Volcano during 1975 to 1986.

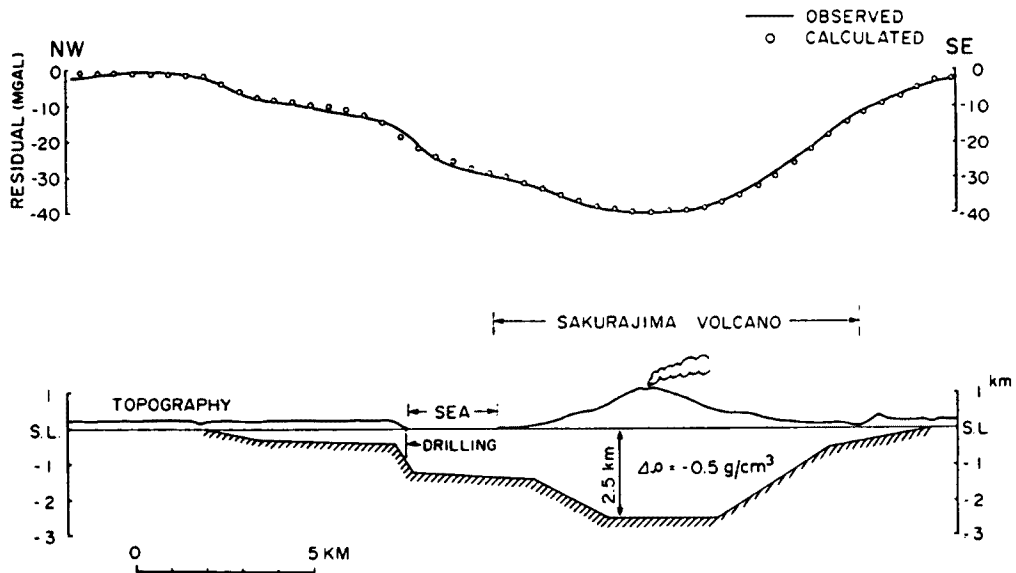


Fig. 12. Subsurface structure of Sakurajima Volcano reduced from Bouguer gravity anomalies (after Yokoyama and Ohkawa, 1986).

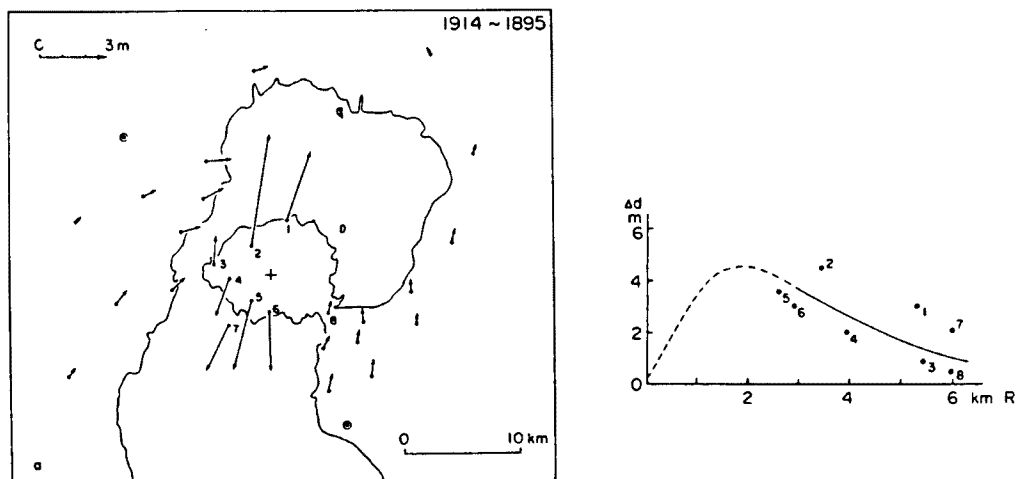


Fig. 13. Horizontal displacements around Aira Caldera during 1895 to 1914, and radial distribution of horizontal displacements from the center of deformation on Sakurajima Volcano, associated with the 1914 eruption (after Yokoyama, 1986).

て不変（東西方向の伸張場）で、しかも桜島の火山体にも影響が直接的に及んでいるならば、伊豆大島で認められるように、火口列の方向はほぼ一定の方向になることが期待される。山腹噴火—火口列の形成—に関する地震学的データは乏しいが、前述の最近の観測結果と併せ考えると、桜島南岳直下の火道が深度 2 km 付近、基盤との境界付近で部分的に拡大し、その部分での圧力変化が 2 km 以浅の局所的応力場（火山性地震の発震機構の変化や山腹噴火の火口列の方向など）をコントロールしていることも考えられる。

この問題を更に深めて議論するには、桜島および周辺の地下構造および地震活動（発震機構も含めて）を詳細に検討する必要がある。

## 5. お わ り に

山頂噴火活動期における桜島火山直下のマグマの移動噴出に関わる構造、マグマ溜りおよび火道の存在の可能性をこれまでになされた研究成果および地震観測と地盤変動観測で得られたデータをもとに検討した。桜島の中央部の下3~4 km 以深にマグマ溜りが存在する可能性が高い。また、南岳山頂のA、Bふたつの火口に対応した火道が火口からはほぼ垂直に地下へのび、約3~4 km の深度でマグマ溜りにつらなっていると推定される。推定するにあたって根拠とした主な観測事実は下記のとおりである。

- (1) 南岳火口直下の深度4 km 以深には火山性地震の発生が認められない。
- (2) 北岳、中岳および南岳からなる中央火口岳の地下3~6 km の領域を通過する地震波、特にS波は異常に減衰する。
- (3) 桜島内の山頂噴火活動期の垂直地盤変動は南岳の地下2~5 km に位置する力源の圧力変化によって説明できる。
- (4) 南岳山頂火口直下で発生するA型地震は、海水面からの深度0~2 km の範囲では、爆発地震の震源域を取囲むように分布している。2 km 以深には、爆発地震の分布域の延長上に、A型地震の発生が認められない領域がある。
- (5) 個々の山頂噴火に対応して生じる山頂部地盤の隆起膨張・沈降収縮現象は、南岳火口直下の深度約2~6 km に位置する力源の圧力の増減によって説明できる。

本稿をおわるにあたり、助言を頂いた加茂幸介教授、議論していただいた桜島火山観測所の諸氏に厚く御礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) Mogi, K.: Relations between the Eruptions of Various Volcanoes and the Deformation of the Ground Surface around them, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 36, 1958, pp. 99-134.
- 2) Yokoyama, I.: A Model for the Crustal Deformations around Volcanoes, J. Phys. Earth, Vol. 19, 1971, pp. 199-207.
- 3) 原田美道：桜島近傍の地殻変動について、地理調査所報告、第1巻、9-15.
- 4) Yoshikawa, K.: On the Crustal Movement Accompanying with the Recent Activity of Volcano Sakurajima (Part 1), Bull. Disast. Prev. Inst. Kyoto Univ., No. 48, pp. 1-15.
- 5) 石原和弘・江頭庸夫：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、京都大学防災研究所年報、第21号 B-1, 1978, pp. 153-162.
- 6) 江頭庸夫・中村貞美：桜島火山周辺における地盤変動—1974~1982年—、第5回桜島火山の集中総合観測、1986, pp. 11-27.
- 7) 西 潔：桜島火山の火山性極微小地震と爆発の研究(2)—火山性地震の震源分布—、京都大学防災研究所年報、第14号 A, 1971, pp. 113-121.
- 8) 吉留道哉：桜島周辺における地震記録の異常とマグマたまりとの関係について、験震時報、第39巻、1974, pp. 49-62.
- 9) 加茂幸介・西 潔・古沢 保・赤松純平・菊池茂智・小野博尉・須藤靖明・高木章雄・海野徳仁・堀修一郎・佐藤泰夫・角田寿喜：始良カルデラ周辺の地震活動と地震波の異常伝搬の検出について、第2回桜島火山の集中総合観測、1977, pp. 13-20.
- 10) 加茂幸介・西 潔・高山鉄朗・植木貞人：桜島南方の地震活動と地震波の異常伝搬域、第3回桜島火山の集中総合観測、1980, pp. 11-15.
- 11) Ono, K., K. Ito, I. Hasegawa, K. Ichikawa, S. Iizuka, T. Kakuta and H. Suzuki: Explosion Seismic Studies in South Kyushu especially around the Sakurajima Volcano, J. Phys. Earth, Vol. 26, 1978, s 309-s 319.

- 12) 西 潔：桜島火山に発生するやや深い地震の発震機構，京都大学防災研究所年報，第21号 B-1，1978，pp. 69-73.
- 13) 加茂幸介：桜島における噴火の前駆現象と予知，火山，第2集，第23巻，1978，pp. 19-28.
- 14) 加茂幸介・石原和弘：地盤変動からみた桜島の火山活動，桜島地域学術調査協議会研究報告（鹿児島県），1980，pp. 19-28.
- 15) Yokoyama, I.: Crustal Deformation Caused by the 1914 Eruption of Sakurajima Volcano, Japan and its Secular Changes, J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 30, 1986, pp. 283-302.
- 16) 吉川圭三・西 潔：桜島深部の地震活動について，京都大学防災研究所年報，第12号 A，1969，pp. 57-65.
- 17) 加茂幸介：火山噴火予知に関する2，3の問題—桜島火山の場合—，京都大学防災研究所年報，第19号 A，1976，pp. 31-39.
- 18) 山里 平：桜島爆発地震の初動分布，火山，第2集，第32巻，1987，pp. 289-300.
- 19) 西 潔：火山性地震のスペクトル的研究—爆発地震—京都大学防災研究所年報，第23号 B-1，1980，pp. 29-35.
- 20) Ishihara, K.: Dynamical Analysis of Volcanic Explosion, J. Geodynamics, Vol. 3, 1985, pp. 327-349.
- 21) 加茂幸介・石原和弘：地盤変動連続観測で捕捉された山頂噴火の前駆現象，京都大学防災研究所年報，第29号 B-1，1986，pp. 1-12.
- 22) 原田 朗他：桜島および周辺部における地磁気測定，第5回桜島火山の集中総合観測，1986，pp. 41-60.
- 23) 石原和弘・横山 泉・前川徳光・田島広一：桜島および鹿児島周辺における重力の精密測定，第5回桜島火山の集中総合観測，1986，pp. 33-40.
- 24) 西 潔：桜島火山のA型地震の発震機構と火山活動，火山，第2集，第32巻，1987，p. 158.
- 25) Yokoyama, I. and S. Ohkawa: The Subsurface Structure of the Aira Caldera and its Vicinity in Southern Kyushu, Japan, J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 30, 1986, pp. 253-282.