

## 噴火活動に伴う桜島火山および始良カルデラ周辺の地盤変動

江頭 庸夫

### GROUND DEFORMATION AT SAKURAJIMA AND AROUND AIRA CALDERA ASSOCIATED WITH THE VOLCANIC ACTIVITY

By *Tsuneo* ETO

#### Synopsis

Vertical and the horizontal deformations of the ground have occurred at Sakurajima and around Aira Caldera, associated with the eruptive activity of Sakurajima Volcano. The secular variation of these ground deformations since 1891 have been examined by the data of geodetic surveys repeated.

The fundamental relations between ground deformations and volcanic activities at Sakurajima are concluded as follows,

(1) In flank eruption: Flank eruption with lava flows causes remarkable deflation of the ground around Aira Caldera immediately after the eruption. However, inflation of the ground begins anew within a few years and that inflation continues till the next eruption. There are local ground deformations which exceed the elastic limits of the earth's crust near the fissure line in Sakurajima.

(2) In summit eruption: Aira Caldera indicates gradual inflation of the ground in the calm stage of summit eruptions, and reverses to a slow deflation when the eruptive activity reaches its peak.

The deflation of the ground occurs around the caldera in proportion to the amount of magma which is extruded to the ground surface as lava flows, tephra and so on. The inflation of the ground will be continued until the future eruption, while magma is supplied and stored again in the magma reservoir beneath the center of Aira Caldera. Such a history of the ground deformations associated with the volcanic activity repeats itself at Sakurajima and around Aira Caldera.

#### 1. はじめに

有史時代に桜島火山は少なくとも4回にわたる溶岩流出を伴う山腹噴火をくりかえし、1955年以降は南岳の山頂噴火活動が継続している。これらの噴火活動のうちで、測地学的な地盤変動量の計測が行なわれている1914年(大正3年)の山腹噴火前後から最近の山頂噴火までの期間をとりあげ、この間の噴火活動に伴う桜島火山および始良カルデラ周辺の比較的長期間にわたる地盤変動の特徴をしらべた。同期間内における始良カルデラおよび桜島周辺の地盤変動は、始良カルデラ内部地下に想定されるマグマ溜りへのマグマの供

給・蓄積と噴火活動によるその放出に伴う、始良カルデラおよび桜島周辺の地盤の膨脹および収縮として理解できる。

## 2. 火山活動に伴う始良カルデラの地盤変動

### 2.1 大正噴火に伴った地盤変動

1914年1月に始まった桜島の大正噴火は翌年4月頃までその火山活動が継続した。この間に桜島の東西両山腹火口列から流出した溶岩は、 $1.14\sim 1.34\text{ km}^3$ <sup>1),2),3)</sup>、降下火砕堆積物は $0.52\sim 0.62\text{ km}^3$ <sup>1),4)</sup>と推定されている。Omori<sup>5)</sup>は大正噴火前後の南九州における地盤の垂直変動を調べ、始良カルデラの中央部に変動の中心を持つ、ほぼ同心円状の顕著な沈降量分布を明らかにした(Fig. 1)。始良カルデラ縁の北部鹿児島湾岸では約40~80 cmの沈降量が測定されている。最大の沈降量は始良カルデラ西縁の大崎ノ鼻にある水準点(BM. 2474)の89.4 cmであった。また、桜島南部および北部の三角点では32~171 cmの沈降量が報告されている<sup>5)</sup>。

大正噴火による始良カルデラ周辺の水平変動についてはOmori<sup>5)</sup>の報告に詳しく記載されている。それによると1898年と1914年に実施された三角測量結果から、桜島と始良カルデラ周辺の三角点の水平変動ベクトルが求められている(Fig. 2)。桜島南部を除く始良カルデラ縁の三角点の大部分は地盤沈降の中心とみられるカルデラ中央部方向に最大0.95 m(上米神)変位している。

このような地盤の垂直変動および水平変動は、大量の溶岩や降下火砕堆積物などの放出に伴う始良カルデラ周辺の地盤の収縮を反映したものと考えられる。なお、桜島をほぼ東西に横切っている大正噴火の火口列を境にして、桜島北部はほぼ北方へ最大4.52 m(鹿馬野)、南部はほぼ南方へ最大3.62 m(五本松)割れて広がった。国土地理院<sup>6)</sup>によれば、大正噴火時の桜島内の最大剪断歪分布は、島内西部の大正噴火の火口列付近

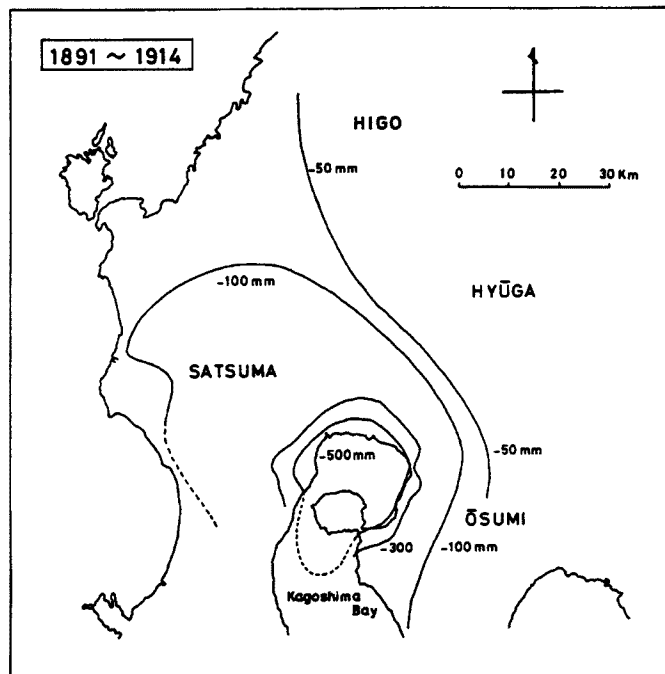


Fig. 1. Ground depression in southern Kyushu related to the 1914 eruption of Sakurajima Volcano. (after Omori, 1916)

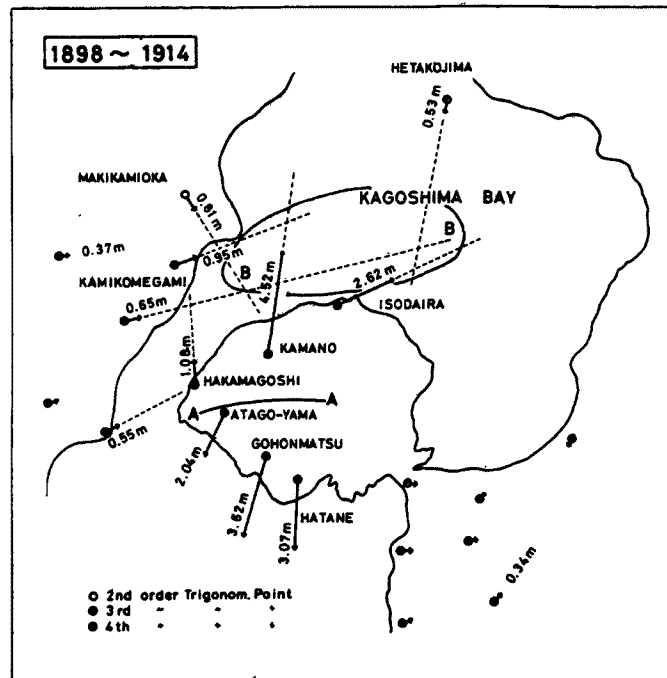


Fig. 2. Horizontal displacements related to the 1914 eruption of Sakurajima.

A-A : Fissure line.

B-B : Probable area of maximum horizontal disturbance, coinciding with the center of depression. (after Omori, 1916)

が最大で約 $2.5 \times 10^{-3}$ であり、ほぼ南北方向に主歪軸を持つ伸張が卓越している。桜島内部の大正噴火の火口列付近では、溶岩の流出に伴い局所的に弾性限界をこえる水平変動があったものとみられる。

## 2.2 始良カルデラ周辺の地盤変動の経年変化

1891年以降の始良カルデラ周辺の地盤変動の推移をみるため、BM. 2469 (鹿児島市) を不動点と仮定して、カルデラ周辺の水準点のうち、始良カルデラの中心部に最も近いカルデラ西縁のBM. 2474 (大崎の鼻) の比高の経年変化をしらべた。1891年のBM. 2474の比高を基準にして各測量年代のBM. 2474の比高をもとめ、その相対的な垂直変動の経過をFig. 3に示した<sup>7), 8), 9)</sup>。なお、Fig. 3では水準測量が頻繁に繰返されているところは実線で書き、測量間隔の長いところは他のデータからの推定も含まれているので点線でしめた。BM. 2474は大正噴火前には隆起が継続していたと推定される。大正噴火直後には約90 cm近く急激に沈降したが、その後は隆起回復の過程をたどっている。約 $0.18 \text{ km}^3$ の溶岩<sup>3)</sup>が流出した1946年(昭和21年)の噴火時には、10 cm程度沈降したものと推定される。1955年に始まった山頂噴火活動が活発化し、年間爆発回数が400回をこえる噴火活動のあった1960年と1974年以降には隆起が停止している。この4時期をのぞき、比較的長期間にわたり桜島の火山活動が静穏な時期には、年間約1 cmの速度で隆起が継続していたとみられる。国土地理院による1914年から1970年迄の水平変動ベクトル図<sup>10)</sup>によると、桜島および始良カルデラ周辺の地盤は、大正噴火の後、始良カルデラ中央部から外側にむけて最大70 cm(鹿馬野)変位している。これは、Fig. 3に示した同時期のカルデラの隆起とともに、始良カルデラ周辺の地盤が膨脹したことをあらわしている。

BM. 2474の垂直変動(Fig. 3)に代表される長期間にわたる始良カルデラの地盤変動の経年変化を見ると、カルデラ地下には少なくとも過去60年余りほぼ一定の割合いでマグマが供給されて蓄積を続け、地盤の隆起が継続していたと考えられる<sup>11)</sup>。桜島の火山活動の静穏期における始良カルデラの膨脹率( $1.1 \sim 1.4 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{year}$ )から検討したマグマの供給率は $2 \sim 4 \times 10^{13} \text{ gr/year}$ 程度と見積もられている<sup>12)</sup>。大正噴火時に放出

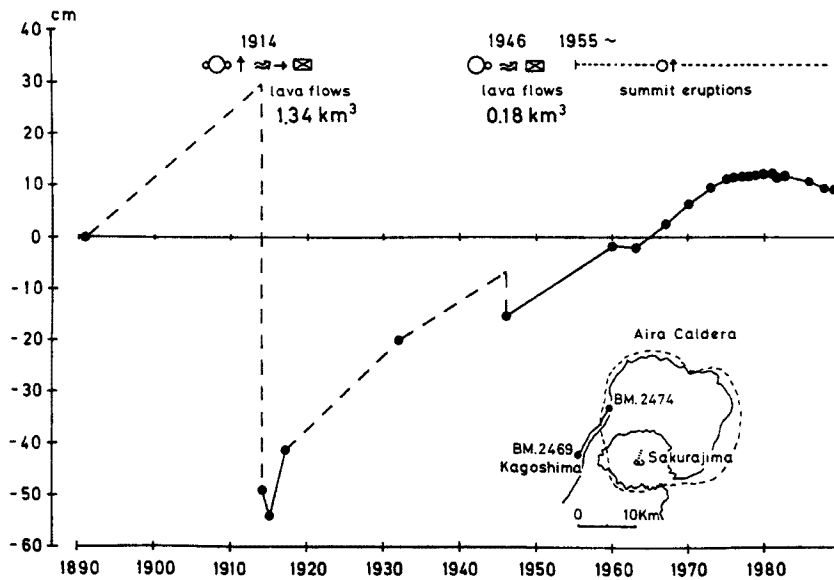


Fig. 3. Vertical displacements of BM. 2474 referred to BM. 2469 (Kagoshima City) and volcanic activity of Sakurajima since 1891.

された固体噴出物容積と始良カルデラの沈降容積との関係は、Omori<sup>5)</sup>、原田<sup>13)</sup> および加茂ら<sup>11)</sup> によって検討されており、沈降容積は噴出物容積の1/2~1/3に相当することが指摘されている。噴火活動によってマグマは地表に噴出するが、噴出物量に比例して地盤の沈降と収縮 (deflation) が発生するものと考えられる。その後、再びマグマ溜りにマグマが供給されて蓄積をつづけ、次の噴火活動が始まるまでの間にはカルデラの隆起と膨脹 (inflation) が継続する。この様な、火山活動に伴う地盤変動の歴史が始良カルデラの周辺で繰り返されているものと考えられる。長期的にみた始良カルデラ周辺の地盤変動はカルデラ地下へのマグマの供給と蓄積、および噴火活動によるその放出との関係から理解できよう。

### 3. 桜島火山および始良カルデラ周辺の地盤変動のモデル

Tsuboi<sup>14)</sup>、宮部<sup>15)</sup> は大正3年の山腹噴火に伴った始良カルデラ周辺の垂直変動量分布について、地塊の傾斜運動すなわち地盤の剛体運動の立場から検討している。活火山周辺に発生する地盤変動の理論的モデルとしてはMogi<sup>16)</sup> や Yokoyama<sup>17)</sup> のモデルがある。Mogi<sup>16)</sup> は活火山周辺の地盤変動を半無限弾性体内部にある球状圧力源内部の静水圧の増減による地表面の弾性変形と考えた。そして前述の桜島の大正噴火に伴った始良カルデラ周辺の垂直変動量分布をカルデラ中央部地下10 kmに位置する圧力源 (マグマ溜り) 内部の圧力減少による地盤沈降として説明した。

Yoshikawa<sup>18)</sup> は1957年から1960年にかけて測量した桜島内の垂直変動量分布についてMogiのモデルを用いて検討した。その結果、始良カルデラ中央部地下10 kmに想定される主圧力源のほかに、桜島中央部地下3 kmに副圧力源が存在することを推定している。石原ら<sup>19)</sup> は山頂噴火活動期における桜島内の垂直変動量分布の特徴から、始良カルデラ中央部地下の主圧力源のほかに活動期には桜島火山直下に二次的なマグマ溜りが生成することを推察し、南岳火口直下3 kmに副圧力源を仮定して桜島火山近傍の垂直変動量と水平歪をほぼ説明した。

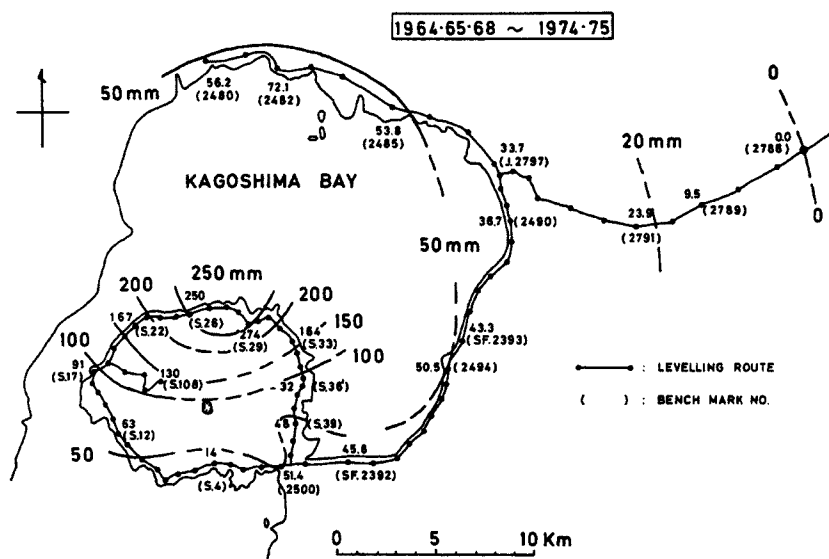


Fig. 4. Vertical displacements during 1964, 65 to 1974, 75.

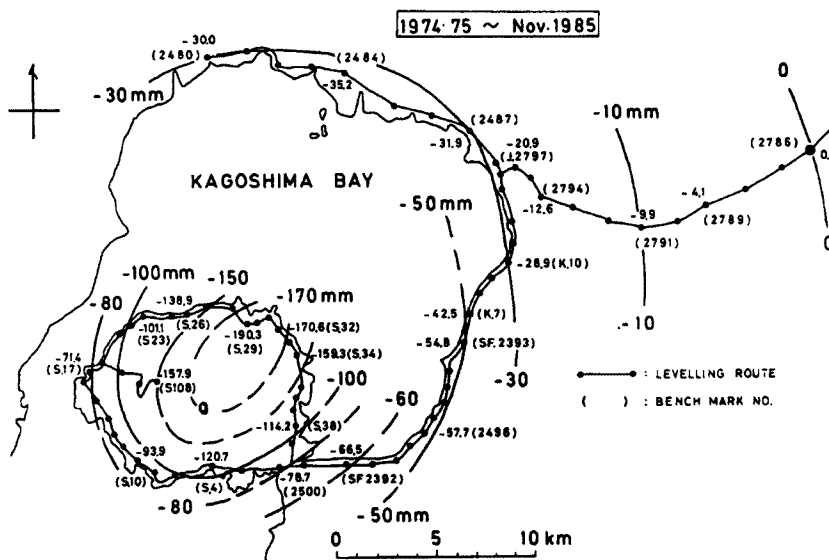


Fig. 5. Vertical displacements during 1974, 75 to 1985.

最近の山頂噴火活動が再活発化する前の垂直変動量分布 (1964, 65, 68年~1974, 75年) を Fig. 4 に示した。この期間、始良カルデラ周辺の地盤はカルデラ内部を中心にしてほぼ同心円状に隆起を続けており、桜島北部の地盤は 25 cm 以上隆起した。これは始良カルデラ内部地下 10 km に想定されるマグマ溜りにマグマの貯溜があり、その内部圧力が増加した結果、地盤が隆起したものと考えられる。山頂噴火活動最盛期が継続中の 1974, 75年から 1985年までの垂直変動量分布を Fig. 5 に示した。この期間には、桜島の北東部から内部にかけて地盤沈降の中心があり、桜島北東部では約 19 cm 沈降している。ただし、その沈降速度は急激な沈降を示した 1914年の大正噴火時とは異なり、約 1.9 cm/year の比較的緩慢な沈降が継続している。このような地盤沈降のモデルとして、始良カルデラ内部地下と桜島中心部地下とに圧力源を持つ 2 圧力源の弾性変形

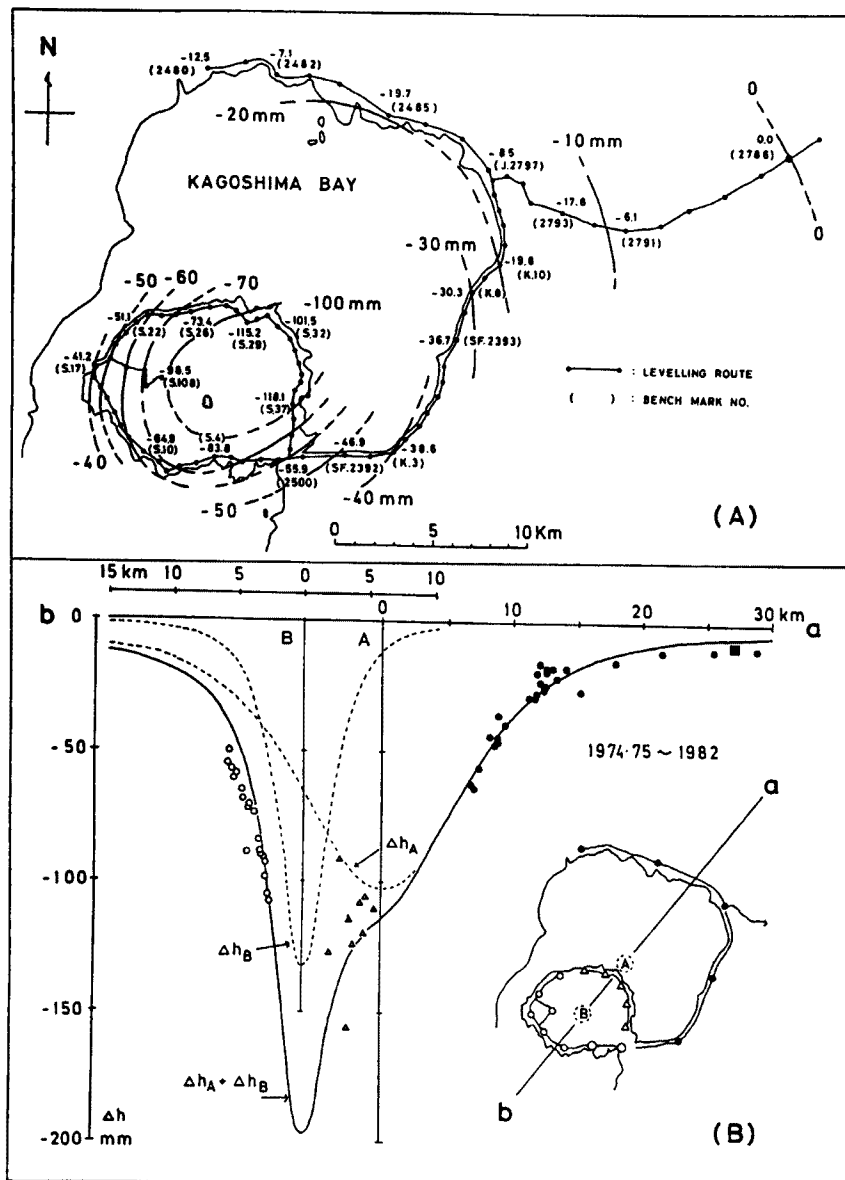


Fig. 6. Vertical displacements at Sakurajima and around Aira Caldera during 1974, 75 to 1982 (A), and comparison between the observed values and the theoretical curve along the line a-b (B), assuming two pressure sources A and B located at depth of 10 km and 3 km, respectively.

モデルが考えられる。いま、山頂噴火活動最盛期の1974, 75年から1982年迄の沈降水量分布を二つの圧力源の影響によるそれぞれの垂直変動量の合成と仮定すると、Fig. 6に示したように、桜島北東沖の地下10 kmの主圧力源 (A) と南岳火口直下3 kmの副圧力源 (B) の内部圧力減少によるそれぞれの垂直変動量 (沈降水量) の重ね合せとしてほぼ説明できる<sup>20)</sup>。

計測された地盤変動量に基づくこれらのマグマ溜りのモデルについては、その存在を直接証明する他の観

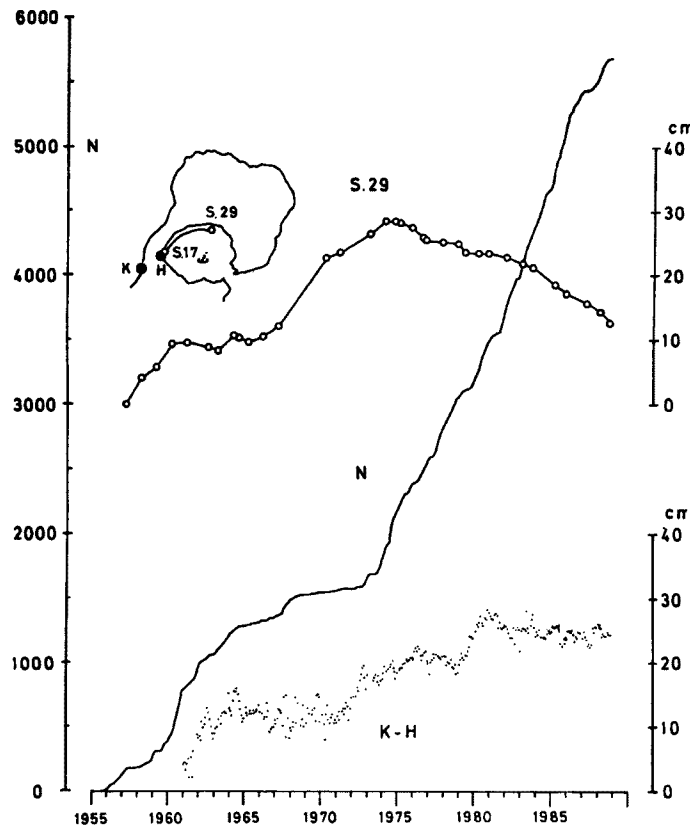


Fig. 7. Relationship among the vertical displacement of BM. S. 29 referred to BM. S. 17, the difference of monthly mean sea levels (K-H) between Kagoshima (K) and Hakamagoshi (H), and the accumulated number of explosive eruptions (N) since 1955.

測事実はないが、吉留<sup>21)</sup>、Ono et al.<sup>22)</sup>、加茂ら<sup>23),24)</sup>は始良カルデラ地下と桜島火山の地下に地震波の異常減衰域があることを観測している。

#### 4. 山頂噴火に伴う地盤変動

1955年10月に桜島南岳の山頂噴火が始まり、33年経過した現在もその活動が継続している。この間、1960年と1974年以降には年間400回以上の爆発的噴火が発生し、噴火活動は最盛期を迎えた (Fig. 9 参照)。1957年以降の測地測量資料等に基づき、山頂噴火活動に伴う地盤変動とその特徴についてしらべた。

##### 4.1 垂直変動の経年変化

山頂噴火活動にともなう桜島の垂直変動の推移を Fig. 7 に示した<sup>19),25)</sup>。同図において、上段 (S. 29) は桜島西部の袴腰 (BM. S. 17) を基準とする桜島北部の水準点 BM. S. 29 の比高の経年変化である。中段 (N) には山頂噴火活動の推移を1955年以降の月間爆発回数の積算値でしめた。勾配の急な時期は爆発多発をあらわしている。下段 (K-H) は鹿児島港の月平均潮位 (K) と袴腰港の月平均潮位 (H) との差による、鹿児島側に対する桜島側の垂直変動を示している。Fig. 7 より次の特徴が読み取れる。

(1) 水準点 S. 29 に代表される桜島北部の地盤は、山頂噴火活動の静穏期から最盛期にかけて (1957年～1960年および1965年～1974年)、袴腰に対して相対的に隆起した (Fig. 4 参照)。桜島北部は1957年から1974

年までに約 29 cm 隆起している。

(2) 山頂噴火活動が最盛期になると、桜島北部 (S. 29) は隆起を停止し (1960年～1965年)、沈降の傾向をしめす (1975年以降)。

(3) 山頂噴火活動が活発化する時期には、鹿児島側に対して桜島側が隆起している (1971年～1976年)。

1975年以降、桜島周辺の地盤は沈降を続けている。始良カルデラ中央部の東方約 28 km にある水準点 BM. 2786 (末吉町) を不動点とすると<sup>26)</sup>、1974、75年から1985年までの地盤沈降の中心域は桜島北東部付近にあるとみられる。この期間の最大沈降水量は 19 cm あるいはそれ以上と推定され (Fig. 5)、その変動領域はカルデラ中央から半径約 30 km に達している。

前述の S. 29 の比高変化によって代表される桜島北部の垂直変動の経年変化をみると、山頂噴火活動時にも山腹噴火時と同様に始良カルデラの地盤隆起と沈降が発生していることがわかる。山頂噴火活動の静穏期に測定された始良カルデラ周辺の隆起 (Fig. 4) は、山頂噴火活動が活発化する前兆現象であったと考えられる。将来、桜島において山頂噴火活動が活発化する前には、同様の隆起の発生することが予想されよう。

#### 4.2 山頂噴火活動に伴う水平歪

山頂噴火に伴う水平変動量を調べるため、桜島では1968年から光波測距儀による辺長測量が行われている<sup>20),25),27),28),29),30),31)</sup>。噴火活動が再活発化した1974年前後で、桜島西部の水平歪がどう変化したかを比較検討した。1968年および1975年を基準とした桜島西部の蓄積水平歪の経年変化を Fig. 8 に示した。ただし、基点の亡失により 1 測線は1974年の前後でことなり、1972年～1974年間については水平歪を求めることは出来ない。1972年までは面積歪が増加しているのに対し、1975年以降は減少している。このような水平歪の経年変化は、前述の垂直変動と同様に桜島付近の地盤が山頂噴火活動の推移に対応して膨脹と収縮を行うことをあらわしている。

なお、現在の山頂噴火活動に伴う降下火砕堆積物量については1978年6月以降の月間降灰量が推定されている (Fig. 9)<sup>32),33)</sup>。1974年以降1988年12月までの降下火砕堆積物の総量は約  $1.46 \times 10^8$  ton と見積もられる。降下火山灰の見掛上の比重を 1.3 とすれば、その総容積は約  $1.12 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup> となる。同期間内の始良カルデラの容積変動量を 2 力源モデルによって計算すると、約  $0.9 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup> と推定され、両者はほぼ同量であることがわかる。すなわち、容積のみを比較するならば、噴出物量にみあうだけ、始良カルデラの容積変動(減少)が生じているものと考えられる。

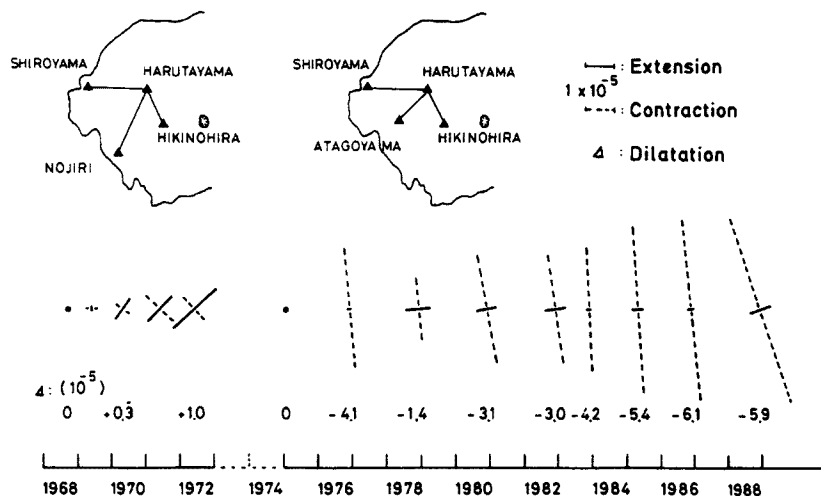


Fig. 8. Accumulated horizontal strains in the western part of Sakurajima referred to 1968 and 1974.



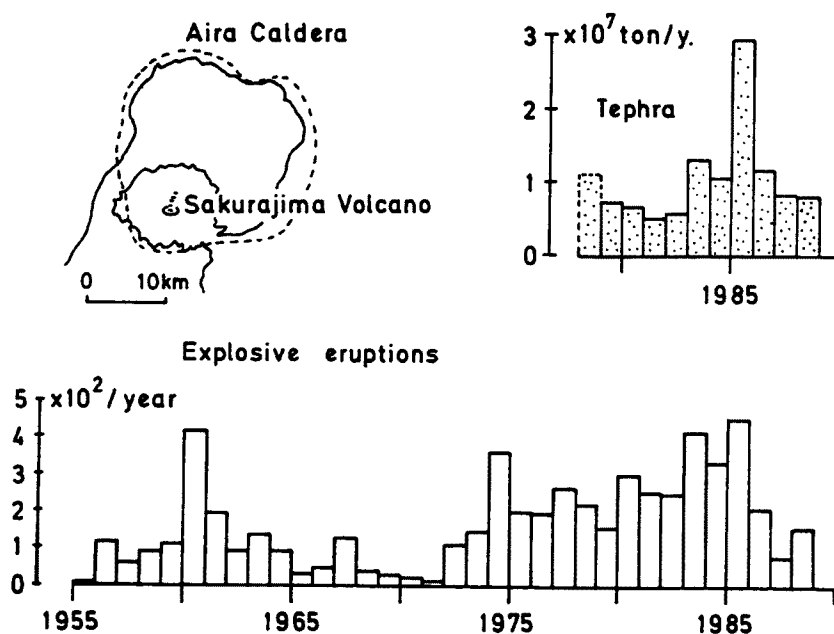


Fig. 9. Annual number of explosive eruptions and estimated amounts of volcanic ash-fall deposits.

## 5. おわりに

大正噴火から現在に至る間の桜島火山および始良カルデラ周辺の地盤変動量について、計測された変動量にもとづきその特徴をしらべた。基本的な点を要約すると、

(1) 山腹噴火時：噴火前には始良カルデラの隆起（と膨脹）があり、溶岩流出をともなう山腹噴火直後にカルデラ内部は急激に沈降する。桜島内の噴火口近傍では局所的に弾性限界をこえる地盤変動が見られる。

(2) 山頂噴火時：噴火活動の最盛期前には始良カルデラの隆起があり、島内では膨脹がみられる。最盛期以降にはカルデラ内部から桜島にかけて緩慢な沈降が継続し、島内では収縮がみられる。ただし、地盤変動量は山腹噴火時ほど大きくはない。

始良カルデラと桜島周辺の地盤は、マグマの蓄積量および噴出物量に対応した容積変動量をもつ地盤の膨脹と収縮の歴史を繰り返してきたものと考えられ、将来も同様の火山活動に伴う地盤変動を繰り返すものと考えられる。

おわりに、御指導を賜った加茂幸介教授に心から厚く御礼を申し上げます。測量作業に御協力をいただいた京都大学防災研究所附属桜島火山観測所の職員諸氏に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) Omori, F.: The Sakurajima Eruptions and Earthquakes I, Bull. Imp. Earthq. Invest. Comm., Vol. 8, 1, 1914.
- 2) Koto, B.: The great Eruption of Sakurajima in 1914, Jour. of the College of Sci., Imp. Univ. of Tokyo, Vol. 38, 1916.
- 3) 石原和弘・高山鉄朗・田中良和・平林順一：桜島火山の溶岩流 (I), 京都大学防災研究所年報, 第24号, B-1, 1981, pp. 1-10.

- 4) 江頭庸夫：有史時代の噴火に伴った固体噴出物量の調査，桜島火山，噴火災害の特質と Hazard Map の作製およびそれによる噴火災害の予測の研究，自然災害科学特別研究成果，1981，No. A-56-1，pp. 164-170.
- 5) Omori, F.: The Sakurajima Eruptions and Earthquakes II, Bull. Imp. Earthq. Invest. Comm., Vol. 8, 2, 1916.
- 6) 国土地理院：桜島地方水平歪および重力変化について，火山噴火予知連絡会会報，第3号，1975，pp. 24-27.
- 7) 佐々憲三：地震予知に関する2，3の問題(II)，地殻変動観測について，京都大学防災研究所創立5周年記念論文集，1956，pp. 3-5.
- 8) 江頭庸夫：火山性地殻変動 III，始良カルデラ周辺の地殻変動と桜島の火山活動，火山，第2集，第12巻，1967，pp. 80-88.
- 9) 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. 53-64.
- 10) 国土地理院：桜島地方の水平変動について，火山噴火予知連絡会会報，第2号，1975，pp. 1-3.
- 11) 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調査研究報告，1980，pp. 19-28.
- 12) Ishihara, K.: A Quantitative Relation between the Ground Deformation and the Volcanic Material Ejected, 1981 IAVCEI Symposium-Arc Volcanism-, Abstract, 1981, pp. 143.
- 13) 原田美道：桜島近傍の地殻変動に就いて，地理調査所報告，第1号，1950，pp. 9-15.
- 14) Tsuboi, C.: Investigation of the Deformation of the Earth's Crust found by Precise Geodetic Means, Jap. Jour. Astro. Geophy., Vol. 10, 1932-33, pp. 93-248.
- 15) 宮部直巳：桜島近傍に於ける地殻の変動に就て，東京大学地震研究所集報，第12号，1934，pp. 471-481.
- 16) Mogi, K.: Relation between the Eruptions of Various Volcanoes and the Deformations of Ground Surface around them, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 36, 1958, pp. 99-134.
- 17) Yokoyama, I.: A Model for the Crustal Deformation around Volcanoes, Jour. Phys. Earth., Vol. 19, 1971, pp. 199-207.
- 18) Yoshikawa, K.: On the Crustal Movement Accompanying with the Recent Activity of the Volcano Sakurajima (Part 1), Bull. Dis. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 48, 1961, pp. 1-15.
- 19) 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.
- 20) 江頭庸夫・中村貞美：桜島火山周辺における地盤変動—1974年～1982年—，第5回桜島火山の集中総合観測，1986，pp. 11-21.
- 21) 吉留道哉：桜島周辺における地震記録の異常とマグマ溜りとの関連について，験震時報，第39号，1974，pp. 49-62.
- 22) Ono et al.: Explosion Seismic Studies, National Report of the Geodynamic Project Japan, Vol. 5, 1975, pp. 61-63.
- 23) 加茂幸介ほか：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.
- 24) 加茂幸介ほか：桜島南方の地震活動と地震波異常伝搬域，第3回桜島火山の集中総合観測，1980，pp. 11-15.
- 25) 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，第2回桜島火山の集中総合観測，1977，pp. 21-27.
- 26) 宮崎 務・山口 勝・小山悦郎：水準測量による始良カルデラ周辺の地盤上下変動，第4回桜島火山の集中総合観測，1982，pp. 23-27.

- 27) 江頭庸夫・大谷文夫：光波測量による桜島・吉松地域の地殻変動観測 I, 火山, 第 2 集, 第17号, pp. 135-143.
- 28) 江頭庸夫・石原和弘：桜島および始良カルデラ周辺の地殻変動と火山活動, 第 1 回桜島火山の総合調査報告, 1975, pp. 19-24.
- 29) 江頭庸夫・石原和弘：桜島火山周辺の地盤変動, 第 3 回桜島火山の集中総合観測, 1980, pp. 16-21.
- 30) 江頭庸夫・石原和弘・中村貞美：桜島火山周辺の地盤変動, 第 4 回桜島火山の集中総合観測, 1982, pp. 19-21.
- 31) 江頭庸夫：桜島火山周辺における地盤変動—1982年～1985年—, 第 6 回桜島火山の集中総合観測, 1988, pp. 15-19.
- 32) 江頭庸夫・石原和弘：鹿児島県下における桜島の火山灰の降下堆積状態—昭和53年 6 月～昭和54年 2 月—, 鹿児島県の地震と火山, 第11号, 1979, pp. 77-94.
- 33) 江頭庸夫：桜島火山から放出された降下火山灰量について, 鹿児島県の地震と火山, 第13・15合併号, 1984, pp. 45-53.