

火山噴火予知に関する 2, 3 の問題

—桜島火山の場合—

加 茂 幸 介

SOME PROBLEMS ON THE PREDICTION OF VOLCANIC ERUPTIONS

—IN CASE OF THE VOLCANO SAKURA-JIMA—

Kosuke KAMO

Synopsis

In this report some forerunning phenomena of volcanic eruptions of the Volcano Sakura-jima are introduced and discussed. The crustal movement of Aira-caldera on which somma the volcano is situated was clearly observed in the big event in 1914 flank eruption. It is also recognized that the crustal movement is closely related with the activity of the summit eruptions which have been taken place since 1955. For the seismic events before the summit eruptions, the migration of foci of earthquakes from somewhat deep place to shallow one under the crater is observed. This pattern has sometimes exceptions when the summit eruptions occur violently. The thermal conditions on the surface ground of flank and around the active crater are derived from their infrared images.

1. ま え が き

火山噴火の前駆現象に関する研究は、地震予知研究のモデル¹⁾ともなったが個々にはそれぞれの火山の活動時に多くの人^{2)~7)}がこころみてきた。火山の噴火予測に要求される事項はおおよそ次のように考えられる。

- (1) 噴火の発生時刻
- (2) 噴火の形式(災害の形態)
- (3) 噴火の規模(被災範囲)
- (4) 噴火の発生後の火山活動の推移

これらのうち(2)については、その火山の個性(溶岩の性質による)や過去の活動を調査することにより推定される。(3)については噴火の規模のみならずその火山の存在する地域の人文地文的条件を充分考慮しておかねばならないだろう。もっとも重要な(1)については、前駆現象となる異常現象を見出してそれがどのような火山活動と関連しているかを観測資料から定量化した関係をもとめることが基本となろう。このことが火山噴火予知の研究において火山の科学的常時観測(serveillance)を重視する理由となっている。

火山観測としては一般的に次のような項目が実施されている。

- (1) 火山性地震および火山性微動の観測
- (2) 火山性地殻変動の観測
 - a. 水準, 辺長測量
 - b. 傾斜, 伸縮, 水位, 潮位の連続観測

- (3) 重力観測
- (4) 地磁気と地電流の観測
- (5) 熱の観測
- (6) 火山ガス, 地下水, 温泉の観測
- (7) 火山噴出物の調査

最近推進されている噴火予知研究計画では、溶岩の特性による火山活動の個性の差や研究手段のちがいがもあり、各火山について得られている研究成果にもとづいた火山活動の監視設備の整備強化に重点がおかれている。したがって多くの火山で噴火の前駆現象として地震活動がみられていることからわが国の主要活火山では、(1)の観測が先づとりあげられている。監視の目的からテレメタリングによる集中記録化がすすめられている。噴火予知の研究では地震観測が主流となり、しばしば地震予知の知究と混同視されがちであるがあくまで手段として用いているのである。元来火山は熱現象の一つであり、熱測定が有力な方法となれば地震観測にかわって(5)が主要項目となろう。ところが一つの観測資料がある火山で噴火予測に有効であっても他の火山にそのまま適用しがたいのは火山の個性による。同一火山においてさえ活動時期の異なるため同一手法が有効でないこともある。特に噴火発生時刻の予測については、相当の時間巾をもちしかも「……であろう」というのが実情である。異常現象のいくつかの組合せがあって噴火予測に成功した例がいくつかある(1942年の Hawaii 島 Mauna Loa 火山の噴火, 1975年 Kamchatka の Tobachire 火山の噴火, 1975年 Hawaii 島 Kilauea 火山の小噴火等)。噴火予知について一般に集約して述べることはまだ困難で、成功例の列举におわりがちなので、ここでは桜島火山にかぎって前駆現象の特徴と今後の課題について若干述べたい。

2. 桜島火山の噴火形式と災害

桜島火山の噴出物の化学組成から、溶岩に含まれる SiO_2 は 57~66% であり粘性は比較的大きい。噴火の形式は *volcanian eruption* といわれ爆発型である。桜島火山は始良カルデラの南縁に噴出した火山で外輪山の一部となっている。カルデラには海水が侵入し内湾を形成している。この点内陸部にあるカルデラとは事情が異なり海中噴火(或は水中噴火)を発生することがある。噴火の形式を整理するため活動史を図化したのが Fig. 1 である。用いた記号は *Bulletin of Volcanic Eruption* の例にならった。地質調査から桜島火山の発生はおそらく 13 000 YBP に近い時期であろう⁸⁾と推定されている。古文書等の記載からは高々 1 300 YBP の活動の様子がうかがえる程度である。Fig. 1 にみられるように溶岩流出をともなった噴火活動は過去 4 回(1471~1476, 1779, 1914, 1946年)ある。溶岩流出をみた場合はすべて山腹噴火であり特徴的なのは両山腹噴火の火口はいずれも南岳山頂火口を通る直線上両山腹に並んでいることである。これらは大量の溶岩上昇にともない桜島にきれつが生じたものとみられる。一方山腹噴火の間には山頂噴火活動がみられる。特徴は多量の噴石と降灰をとまうことである。このように桜島火山の噴火形式は山腹噴火と山頂噴火のくり返しと云えよう。

山腹噴火は火砕流、溶岩流を生じいわゆる *flow* による災害をひきおこす。又海中噴火の場合は津波を発生した例もある。山頂噴火の場合1955年以降20年間も継続していることからわかるように噴石による被害更に降灰による被害(主として農林災害)は長期化すれば溶岩流出の場合にも匹敵する。一般に火山災害は地盤災害, 地震動災害, 農林災害, 河川災害, 火災等をふくめた複合災害と云えよう。特に近年の山頂噴火活動の激しい状態から降灰による農林災害のほかに *flow* による災害として2次的なものであるが土石流による災害はみのがせなくなっている。

3. 桜島周辺の地盤変動

鹿児島市周辺の水準測量はしばしば実施されていて、1914年の大噴火前後の始良カルデラの隆起沈降の様子が良くわかっている。即ちカルデラの中心部を中心とする同心円状に溶岩流出の場合沈降して、その後現在に至るまで隆起をつづけている。この間のことについては多くの^{1), 2), 9)~13)}が議論してきたところである。

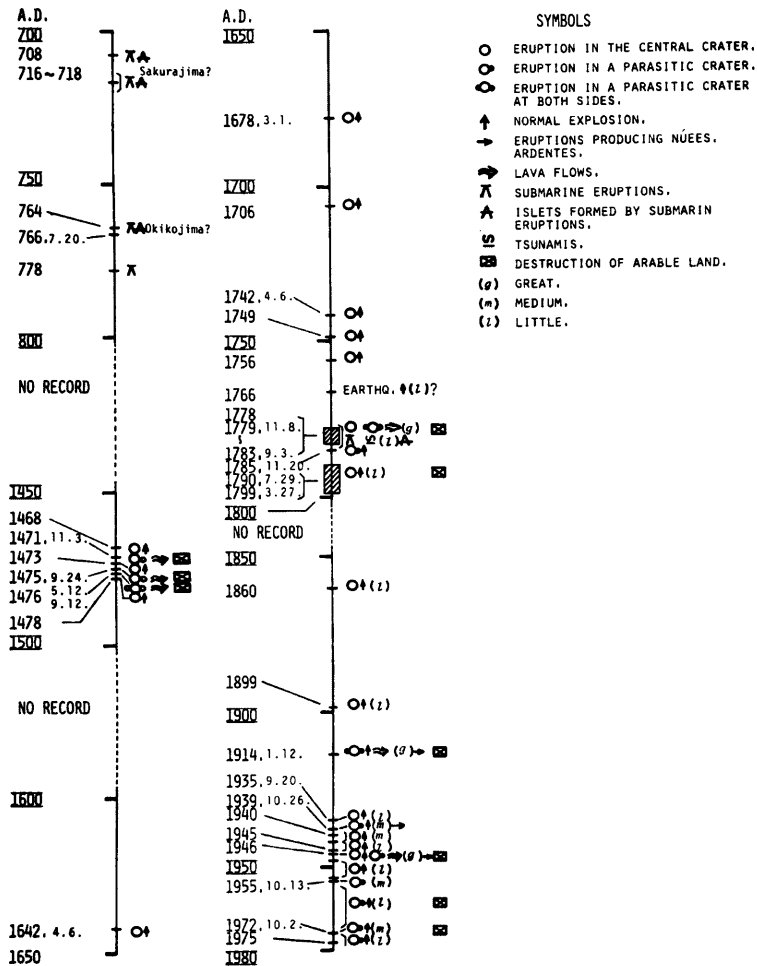


Fig. 1. Chronology of volcanic activity of the Volcano Sakura-jima.

即ち溶岩流出をとまなう山腹噴火の場合には桜島周辺の地盤が歪むことがわかったわけで、隆起状態を監視することが予測の手がかりとなっている。

Fig. 2 はこの間の事情を1956年に佐々¹⁾がカルデラ縁のベンチマークの変動について示したものである。1914年および1946年の山腹噴火については前述の通り沈降を示しているが、注目したいのは1935年から1939

年に至る間点線で隆起変動が一旦平衡状態であることを示していることと1956年以降若干沈降を示したことである。この2つの場合は山腹噴火に対して山頂噴火の場合を示している。一方 Fig. 3 には B.M. 2474 について1962年以降の実測値による変動の様子、桜島々内の B.M. 29 と111について1957年以降の実測値による変動の様子および山頂爆発回数の積算値(1955年以降)の経年変化を夫々示した。1960年と1974年はもっとも山頂噴火の激しい時期で、これに対応していづれのベンチマークの変動も平衡状態又は若干沈降の状態を示していることが良くわかる。即ち Fig. 2 において推定されたことが確かめられた訳である。山頂噴火活動に対応する地盤変動の特徴であろう。

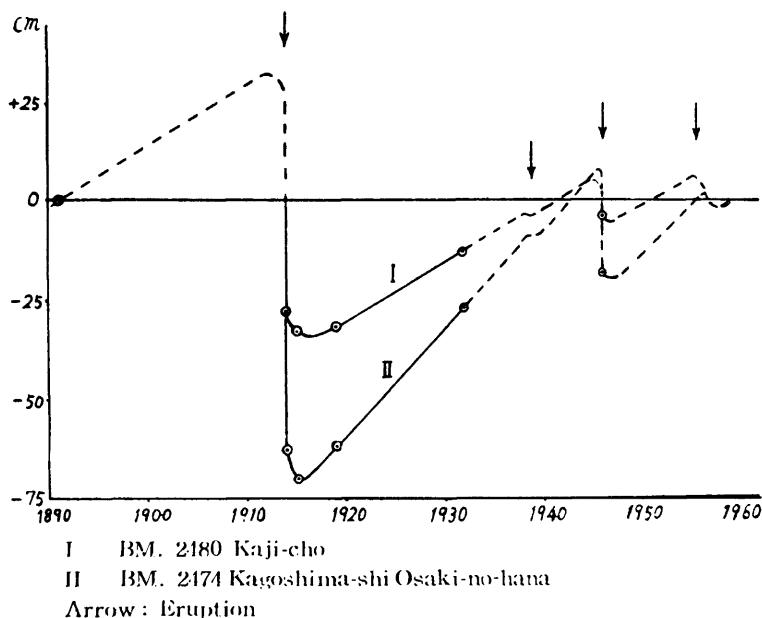


Fig. 2. Crustal deformation accompanied by eruption of the Volcano Sakura-jima (after K. Sassa).

次に B.M. 2474 の隆起状態をみて気付くことはその隆起速度がほぼ一定なことに気付く。そこで始良カルデラ全体でどの程度の容積膨脹を示すのか概算すると約 10^{12} c.c./year となる。一方山頂噴火活動のもっとも激しかった1974年前3カ年に山頂火口より噴出した火山灰の量を概算すると約 10^{13} c.c. となり先にもとめた年容積膨脹量 10^{12} c.c. で 10^1 年蓄積したものが放出されたと考えると都合が良いことになる。山頂噴火活動に対応してこのような地盤変動がみられると噴火予測の立場から個々の山頂噴火についても対応した地盤変動がありそうである。1963~1964年と1975~1976年に、即ち山頂噴火活動の高まったあとの時期に山頂火口より約2km地点に設置した傾斜計に爆発と直接関連したと考えられる異常傾斜が観測された。その一例¹⁴⁾を Fig. 4 に示した。異常傾動の方向は山頂火口の隆起を示すもので、爆発は隆起現象がとまって発生する場合が多かった。何故山頂噴火活動の高まったあと観測されたか、何故隆起が止まったあと噴火するのか等疑問の余地はあるが今後の重要な課題となろう。

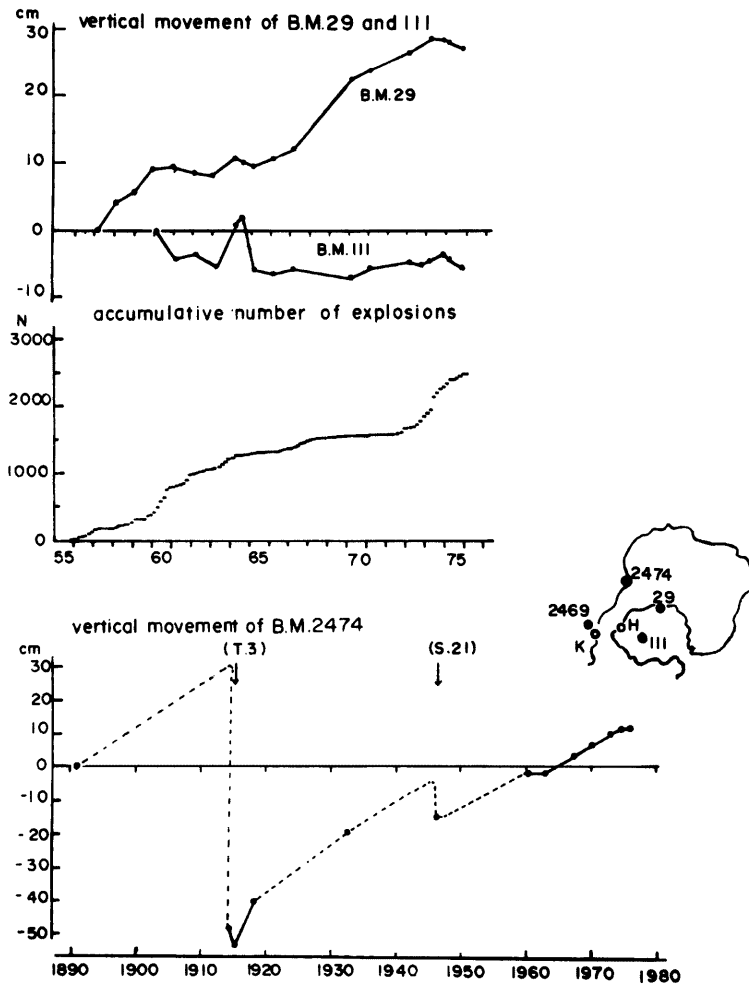


Fig. 3. Activity of summit-explosions and vertical movement of bench-marks around the Volcano Sakura-jima.

4. 火山性地震と火山性微動

過去の山腹噴火の際にどのような地震活動があったのかをみる。Fig. 5 に1914および1946年の山腹噴火の場合、鹿児島市内の測候所に設置されていた低倍率地震計 (Wiechert 地震計10倍) による観測結果¹⁵⁾を示した。1914年の噴火では桜島々内で有感地震が多発してその様子が鹿児島市内の地震計測結果にも良くあらわれている。又1946年の場合島内で微震1～2回程度と報告されているが地震計測では噴火前に地

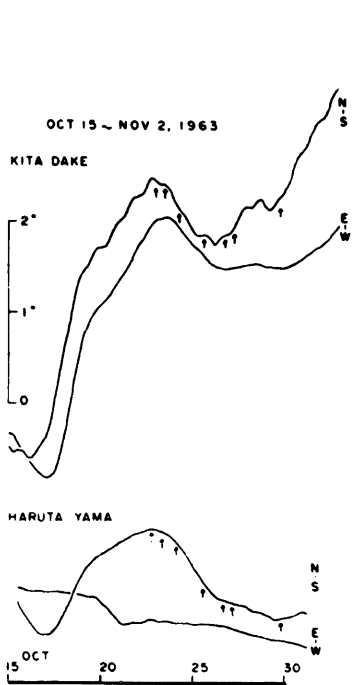
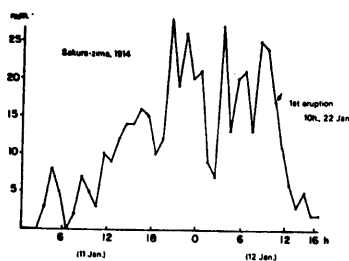
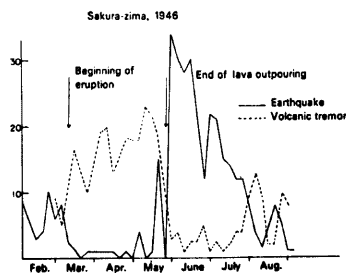


Fig. 4. Abnormal tilt accompanied with explosions. Arrows show explosions at Minamidake crater (after T. Eto).



Hourly numbers of earthquakes recorded by the ordinary seismograph at Kagoshima Meteorological Observatory during the 1914 eruption of Sakura-zima Volcano (after Omori, 1922).



Numbers of earthquakes recorded in successive 3-day periods during the 1946 eruption of Sakura-zima.

Fig. 5. Seismic activity before and after flank-eruption of the Volcano Sakurajima (after D. Shimozuru).

震発生を記録している。いずれにしても現在では高倍率地震計を多数島内に設置しているので地震活動の動向は適確に計測され得る。前駆現象としての群発微少地震の把握が期待でき、その震源の決定、震源の移動が噴火活動の予測の手がかりとなろう。

科学的地震観測が実施されてから、我々は山頂噴火活動だけを経験している。1972年以降の山頂噴火活動について云うと

やや深い地震の発生⇒浅い地震の発生⇒山頂噴火（爆発）

という火山活動をもっとも理解し易い様式を示している場合が多い。いいかえるとマグマが移動（上昇）して噴火するという課程を示すと理解できる。山頂噴火の定性的予測がある程度可能であろう。ところがこの様式は山頂噴火活動が進行すると例外が多くみられるようになるので唯一の予測手段とはならない。そこで爆発の大きさとその直前の浅い群発地震の比較をみたのが Fig. 6 である。同じ大きさの爆発を発生させるのに、群発地震は時期によって発生規模が異っている。このちがいをもたらす条件を何らかの方法で定量化して組み込まない限り、定性的予測に止まることになる。このため桜島では地震観測網の整備、テレメータ化、データ処理装置の導入が計画されていて、震源決定精度の向上そして単に ray theory による解析だけでなく地震波動解析を指向している。その例として桜島火山に発生する火山性微動をとりあげてみる。

従来桜島火山に発生する微動は C 型と名付けられ、溶岩柱の振動ではないかとされていた。我々¹⁰⁾の解

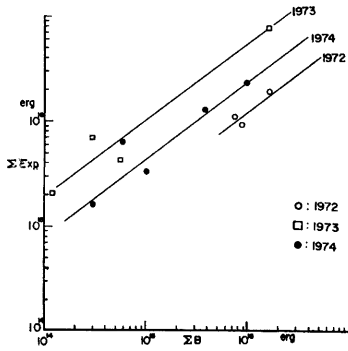


Fig. 6. Relation between magnitudes of explosion-earthquakes and shallow-earthquakes originated near summit-crater (after K. Nishi).

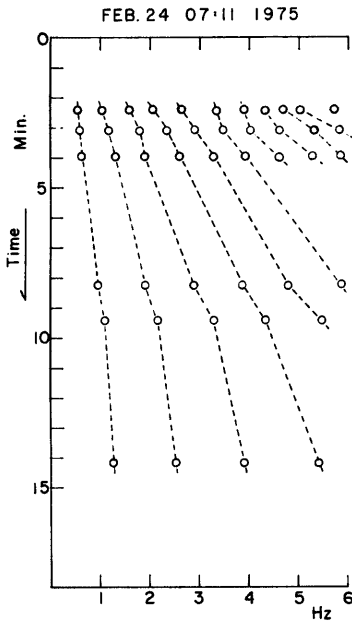


Fig. 7. Variation of spectral peaks of volcanic micro-tremors at the Volcano Sakura-jima.

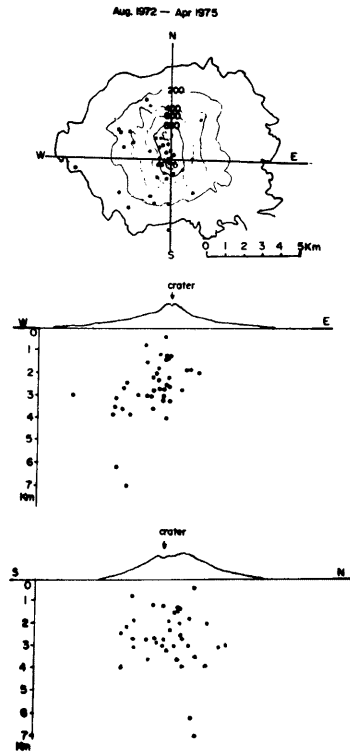


Fig. 8. Distribution of foci of volcanic earthquakes (A type) at the Volcano Sakura-jima.

析によると、微動のスペクトルは基本周波数から数次の高調波まで含んでいる。基本周波数は時間と共に変化し、その様子からある volume をもった振動 mass が段々 dimension を小さくして行くような model を考えざるを得なくなっている。Fig. 7 にその様子を示した。1975年3月に約20分間発生した火山性微動が時間の経過とともに基本周波数と高調波の周波数が高い方にずれていく様子がわかる。

1972年8月から1975年4月までの、やや深い地震の震源分布を Fig. 8 に示した。誤差は水平方向で $\pm 2\text{km}$ 、垂直方向で $\pm 5\text{km}$ である。発生数の約1割が決まっている。殆ど桜島火山体の下で発生しているとみて差支えないが数が少ないのと精度が良くないので系統的な発生状況はわからない。今後観測精度の向上に伴って重要な噴火予測の手段となろう。

5. 熱の観測

火山における熱測定は、腐蝕性のガスと火山体が熱の不良導体であることからその技術上の困難さが原因で試みられる機会が少なかった。近年赤外線による熱映像の撮影が容易になり火山の研究にとり入れられるようになった。特に桜島のように火口近傍に近寄れない火山では遠隔測定は有利な方法をと云える。最近、地上より山体、空中より火口内外の地表温度の異常域を調査する目的で赤外映像を撮影した。その結果の1例を夫々 Fig. 9 と Fig. 10 に示した。Fig. 9 は地上より測定したもので桜島東山腹にある1946年噴火口が周囲に比べ 40°C 前後の高温を示している。Fig. 10 は南岳山腹火口内外の表面温度を示したものである。いずれもこのような測定法で火山体の熱異常を発見できることを示したもので、特に山腹噴火に対する予測方法として有効であろう。空中赤外については経費の点からも又航空機を使用することからも容易に何時でも測定できない欠点がある。

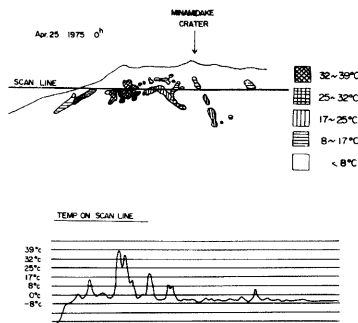


Fig. 9. Thermal pattern of east flank of Minamidake at the Volcano Sakura-jima.

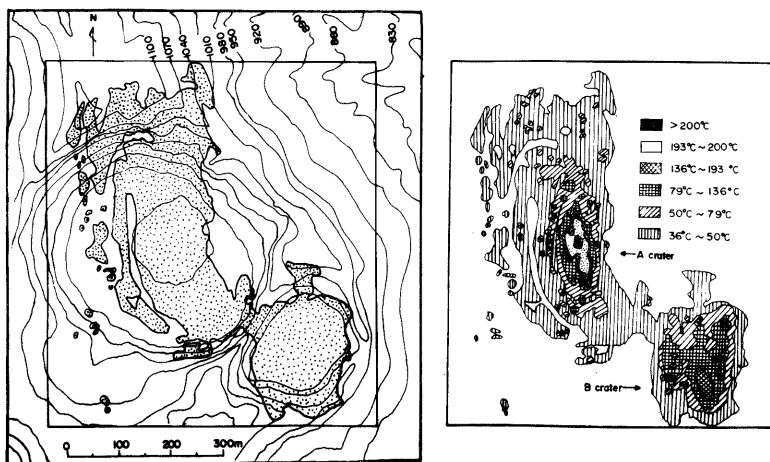


Fig. 10. Thermal Pattern in and around summit-crater of the Volcano Sakura-jima.

6. お わ り に

桜島火山の火山活動の特徴は山腹噴火と山頂噴火であり、それぞれの場合、地盤変動、地震活動そして熱の測定から、噴火予知の手がかりとなる研究を概説し今後の問題点にもふれた。このほか辺長測量、重力測定、地磁気の測定、火山ガス、温泉・地下水等の項目による研究は火山活動との系統的関連に着目して始められたところでありふれることができなかった。火山噴火予知は一研究項目でなるものではなく、これらの項目が夫々相補い又関連して確かなものになっていくものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 佐々憲三：地震予知に関する2, 3の問題, 防災研創立5周年記念論文集, 1956, pp. 3-7.
- 2) 大森房吉：震災予防調査会報告, 第86号, 日本噴火誌.
- 3) Sassa, K.: Geophysical Studies on the Volcano Aso, Part I and II, Mem. of Coll. Sci., Kyoto Univ., Vol. 18, No. 5, 1935, pp. 253-293; Vol. 19, No. 1, 1936, pp. 11-55.
- 4) Minakami, T.: Fundamental research for predicting volcanic eruptions, part 1, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 38, 1960, pp. 497-544.
- 5) Tokarev, P. I.: On a Possibility of Forecasting of Bezyminny Volcano Eruptions According to Seismic Data, Bull. Volcan., Vol. 26, 1963, pp. 379-386.
- 6) Finch, R. H. and G. A. MacDonald: Hawaiian Volcanoes during 1950, U. S. Geol. Surv. Bull., no. 996-B, 1953, pp. 27-89.
- 7) 和田卓彦, 加茂幸介, 小野博尉, 須藤靖明：噴火前後の火山性地震の性質, 京大防災研年報, 第11号 A, 1968, 121-130.
- 8) 荒牧重雄：地質・噴出物, 桜島火山の総合調査報告, 1975, pp. 79-88.
- 9) 宮部直巳：桜島近傍における地殻の変動に就て, 震研彙報, 第12巻, 1934, pp. 471-481.
- 10) 原田美道：桜島近傍の地殻変動に就いて：Bull. Geographical Survey Inst. Vol. 1, 1950, pp. 9-15.
- 11) Mogi, K.: Relation between the Eruptions of Various Volcanoes and the Deformations of the Ground Surface around Them, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 36, 1958, pp. 99-134.
- 12) Yoshikawa, K.: On the Crustal Movement Accompanying with the Recent Activity of the Volcano Sakurajima, Part 1, Bull. Disaster Prev. Res. Inst., No. 48, 1961, pp. 1-15.
- 13) Yokoyama, I.: Crustal Deformations Associated with Volcanic Activities, Tectonophysics, Vol. 23, 1974, pp. 349-360.
- 14) 江頭庸夫：火山性地殻変動(II), 京大防災研年報, 第9号, 1966, pp. 83-98.
- 15) Shimoizuru, D.: A Seismological Approach to the Prediction of Volcanic Eruptions, The Surveillance and Prediction of Volcanic Eruption, Unesco Paris, 1971, pp. 17-45.
- 16) 加茂幸介, 古沢 保, 赤松純平：桜島で観測される火山性地震波の性質について, 第12回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, 浦和, 1975, pp. 365-366.