

地盤変動連続観測で捕捉された山頂噴火の前駆現象

加茂 幸介・石原 和弘

PRECURSOR OF SUMMIT ERUPTION OBSERVED BY WATER-TUBE TILTMETERS AND EXTENSOMETERS

By *Kosuke KAMO* and *Kazuhiro ISHIHARA*

Synopsis

An underground tunnel was constructed in the lava dome 2.8 kilometers northwest of the summit crater of Sakurajima Volcano in order to collect the tilt data and strain data of high quality and to detect the ground deformation associated with the summit eruption. A 2-component water tube tiltmeter and a 3-component extensometer were installed in August 1985. The precursor of the summit eruption was observed by the tiltmeter and the extensometer for 125 explosions, which corresponds to about 60% of the events, including minor explosions, during the period of the observation from August 1985 to January 1986. Upward tilt in the radial direction to the summit crater ranged from 10 minutes to 7 hours in duration and from 0.01 to 0.2 microradians in amount. The extension in the tangential direction and the extension or minor contraction in the radial direction ranged from 10^{-8} to 10^{-7} in strain. After the eruption, the downward tilt in the radial direction and the contraction in every direction were observed. The depth of the origin which generates the inflation of the summit is estimated to be from 2 to 6 kilometers beneath the active crater by comparing the observed ratio of the dilatation to the tilt (from 0 to 1.4) with the theoretical value calculated according to Mogi's model.

Ground tilt data in the radial component were continuously monitored and processed in real time by a computer in order to judge the stage of the eruptive activity from the rate of tilt change and tilt duration and to forecast the explosive eruption automatically. The practice of the preliminary program has been done for a month. The statistical results of the experiment indicate that the number of critical stage of activity judged from tilt data is 27 out of 39 explosions, 4 out of 5 short eruptions, and 7 out of 22 continuous eruptions. There were 21 critical stages reported when no significant event occurred. Most of these exceptions were caused by temporary relaxation in tilt due to minor eruptions, for example, the gas emission.

1. はじめに

火山の噴火はマグマが地下から地表へ噴出する現象であり、事前に噴火地点（例えば火口）の近傍の地盤が隆起することが期待される。このような噴火に伴う地盤変動を水準測量の繰り返しにより、また傾斜計等を使用した地盤変動の連続観測により捕捉しようとする試みはふるくから行なわれてきた。

Hawaii では, Jaggar and Finch¹⁾ が1913年から13年間のBosch-Omori 式地震計による傾斜変動観測結果を地震・火山活動との関係で論じている。また, Jones²⁾ は水準測量とトランシットによる角測の繰り返しによって, Kilauea 火口付近の地盤の変動を捕え, 地震活動との関係を調べた。これらの研究では, 観測計

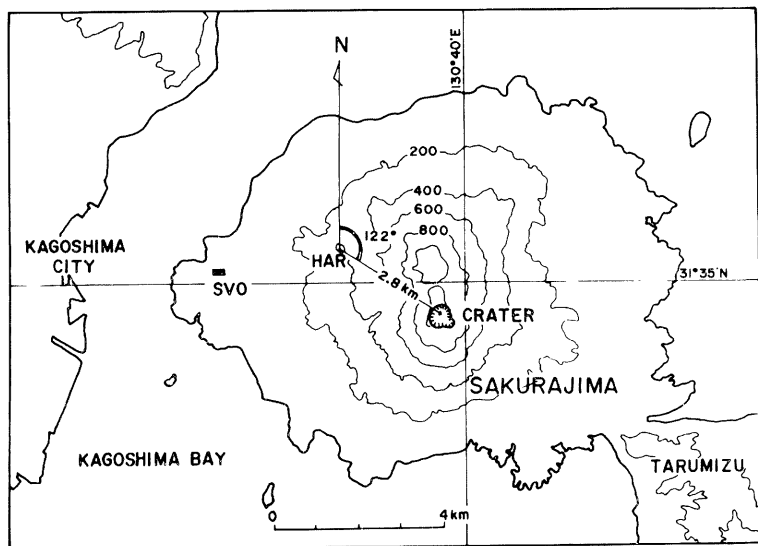


Fig. 1 Locations of Sakurajima Volcanological Observatory and Harutayama Branch.

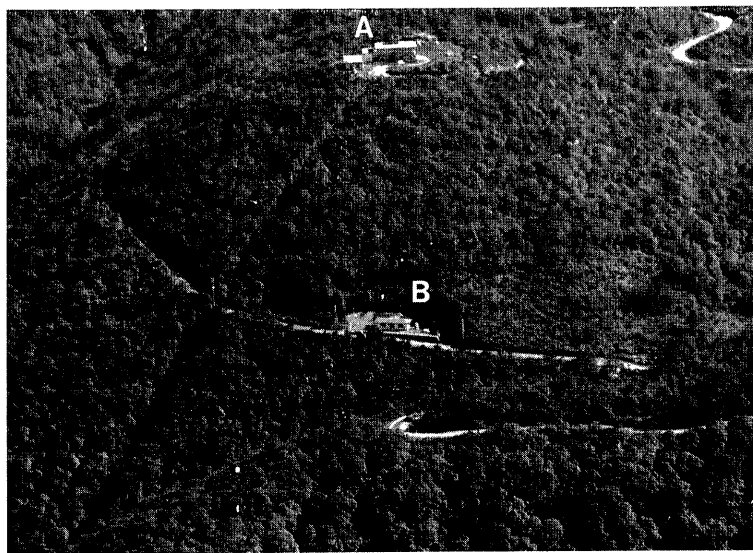


Photo 1 Aerial view of Harutayama lava dome. The buildings (A) at the top of the hill are Harutayama Branch and the house (B) at the foot of the hill is the entrance of the tunnel.

器の性能の限界もあって、地震・火山活動との関係を明瞭に捕捉することはできなかった。その後、Kilauea では Eaton³⁾ によって製作された小スパンの水管傾斜計による観測が続けられており、噴火に対応した傾斜変化が得られている。1980年から始まった St. Helens 火山の活動では、光波測距儀や気泡式傾斜計等の近代的な観測機器により、山体や lava dome の inflation が観測され、地震計測等と併せて実用的な噴火予測に利用されている⁴⁾。

日本においても、Hawaii における Jaggar 等の研究とほぼ同時期に先駆的な研究がなされている。Sassa⁵⁾ は阿蘇火山の1932—1934年の活動期に噴火に先だち火口方向が数秒角上昇する現象を傾斜計により見出した。また、Minakami⁶⁾ は浅間火山の1935—1942年の活動期に顕著な爆発群十数例に対応して1—2ヶ月前から20—50秒角の異常傾斜変化を観測した。更に、傾斜変化量と爆発の機械エネルギーの関係を定量的に検討し、傾斜変化量から期待される爆発エネルギーを予測する試みを行なっている。但し、浅間火山の場合は傾斜変動の方向が火口の方向と一致していない。

桜島火山においても、Yoshikawa⁷⁾ および江頭⁸⁾ は桜島西部の防空壕跡地等を利用した観測室に設置した水平振り型傾斜計により、顕著な山頂爆発の数日前から北東方向が数秒角下る『異常傾斜変化』を観測した。山頂爆発の前兆としては火口方向（ほぼ東）の上昇が期待されるにもかかわらず、観測された傾斜変化の向きは大きく異っていた。その原因は計器設置点付近の局所的な地盤構造（亀裂・構造線の存在等）によるものと考えられた⁹⁾。その後、水平振り型傾斜計より安定した計測ができると予想された気泡式傾斜計を火口の北西方向 2.8 km にあるハルタ山観測室に設置したところ、1976年5月の山頂噴火の活発化の約2週間前よりほぼ山頂火口の方向が約10秒角上昇する傾斜変化が得られた¹⁰⁾。

これまでの研究により、火山噴火に伴う何らかの地盤変動が生じかつ計測しうること、地盤変動連続観測が火山噴火予知の観測手段として有効であることが立証されたと言える。しかし、計測された傾斜変動の方向および変動量に疑問が残る、噴火現象との関係について物理的な解釈および定量的な議論をするには至っていない。

従来、活火山における地盤変動連続観測の問題点として次のようなことが指摘できる。火山という地形上および地質構造上の制約もあって、観測室を地下深所に設けることが困難で気象条件等外界の影響を受けやすい地下浅所の観測室に計器を設置して傾斜観測が行なわれた。また、狭小な観測室であったため、長い span を設けて2点間の比高変化を検出する水管傾斜計に比べて、得られた変動量の信頼度が劣ると考えられる水平振り型傾斜計あるいは気泡式傾斜計を使用せざるをえなかった。

桜島火山観測所では、これら観測環境の問題点を解決し個々の山頂噴火に対応した地盤変動を捕捉することを目的に観測坑道の設置を計画した。水準測量・辺長測量による地盤変動測定結果¹¹⁾および今までの傾斜観測結果から判断して山頂噴火を対象とした連続観測に有利と考えられる火口から2~3 km の範囲で、しかも気象の影響を考慮して深度を50 m 以上とることとし、観測坑道設置に適した場所としてハルタ山を選定した。1985年8月に坑道内に水管傾斜計および伸縮計を設置し、観測を開始した。その結果、個々の山頂噴火に対応した傾斜変化および伸縮変化が観測された。本稿では現在までに解析した結果を報告する。

2. 観測坑道および観測機器

ハルタ山は Fig. 1 に示したように、桜島南岳山頂火口の中心から北西約 2.8 km の地点にあり、標高 408 m の頂上には桜島火山観測所ハルタ山観測室がある。観測坑道は Photo 1 に示すように、その北西斜面標高 342 m 地点から丘の中心に向け（火口方向より 11° 北寄り）ほぼ水平に掘削されており、ハルタ山観測室の直下に地盤変動観測坑道が設けられている。Fig. 2 に観測坑道方向のハルタ山の地質断面と計器の配置図を示した。地質調査ボーリングによると、表層約 25 m は火山灰と軽石の互層であり、その下には標高約 50 m まで安山岩質溶岩が堆積している。その下位は凝灰角礫岩である。ハルタ山は溶岩丘といえる。観測坑道の入口から水平に約 140 m 地付近までは亀裂が発達しているが、地盤変動観測坑道付近は亀裂がなく、岩質は

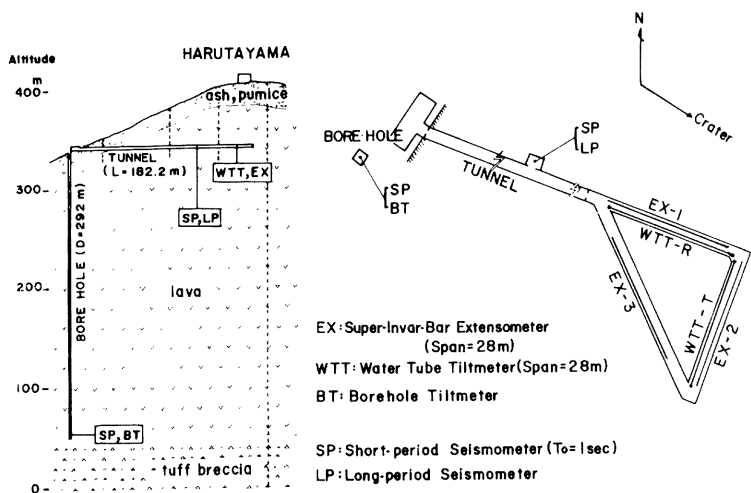


Fig. 2 Geological structure of Harutayama lava dome on the vertical cross-section and the arrangement of the instruments in the tunnel and the borehole.

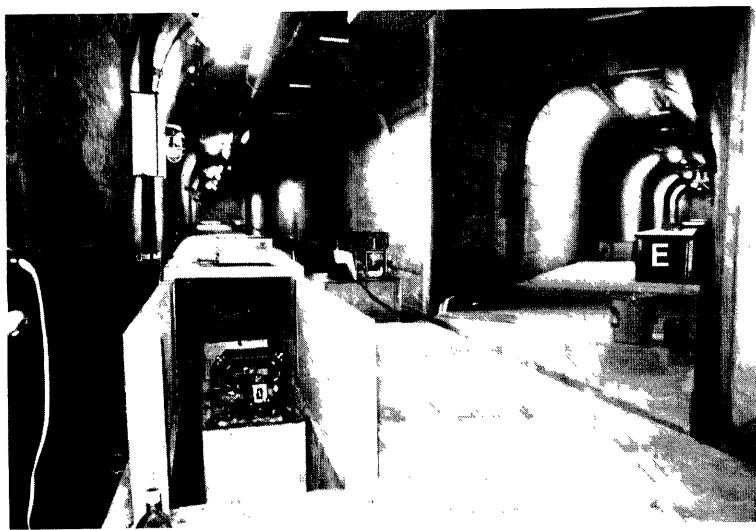


Photo 2 The instruments installed in the tunnel. The notation T shows the water tube tiltmeter and the notation E does the super-invar bar extensometers.

Table 1 Constants of the instruments.

Instrument	Component & Azimuth	Span	Sensitivity	Transducer
Water-tube Tiltmeter	WTT-R, N111°E	28.0 m	0.56 V/ μ rad.	magnesensor
	WTT-T, N159°W	28.0 m	0.56 V/ μ rad.	
Super-invar Bar Extensometer	EX-1(R), N111°E	28.0 m	28.0 mV/ 10^{-8}	differential transformer
	EX-2(T), N159°W	28.0 m	28.0 mV/ 10^{-8}	
	EX-3, N156°E	28.0 m	28.0 mV/ 10^{-8}	

堅固である。

観測坑道最奥部の直角二等辺三角形の地盤変動観測坑道には、水管傾斜計 2 成分 (WTT-R と WTT-T) およびスーパーインバル棒伸縮計 3 成分 (EX-1, EX-2 および EX-3) が設置してある。その様子を **Photo 2** に示した。基線長はいずれも 28 m である。計器基礎は坑道床面より 1 m 深以上で岩着しており、基礎の周囲には 10 cm 幅の縁切り溝が設けてある。坑道の方向は N 111° E であり、火口方向から 11° 北寄りになっている。本稿では坑道方向を火口に対して Radial 方向、それに直交する方向を Tangential 方向とみなし、それぞれの方向の成分を R 成分および T 成分と略記する。坑道入口にはテレメータ装置および増幅部・記録計等を配置するための舎屋が設けてある。また、そのわきには深度 292 m の観測井がありその孔底には地中地震計 (速度計および加速度計それぞれ 3 成分)、傾斜計および温度計が設置してある。

水管傾斜計の水管は内径 15 mm の石英ガラス管であり、両端の水槽中のフロートの変位はそれぞれマグネセンサにより電気量に変換され、観測舎屋の増幅器により加算および減算出力がえられる。水管傾斜計の出力感度は、**Table 1** に示したように、水位変化に対して 20 mV/ μ m、傾斜変化に対して 0.56 V/ μ rad. である。

伸縮計には直径 10 mm のスーパーインバル棒を用い、1 m 間隔でステンレス線により吊っている。変位の検出には差動トランスを使用している。現在の運用感度は変位に対して 100 mV/ μ m、歪に対して 28 mV/ 10^{-8} である。水管傾斜計および伸縮計の出力は観測舎屋内の打点式記録計でモニターするとともに、テレメータ装置により観測所本館に伝送している。

3. 山頂噴火に伴う歪と傾斜変化

1985年 8 月～1986年 1 月の観測期間中に発生した山頂爆発のうち約 6 割にあたる 125 回の爆発*に対して、約 10 分～約 7 時間前から爆発発生までに 0.01～0.2 μ rad. の傾斜変化および 10^{-8} ～ 10^{-7} の歪変化が観測された。

3.1 記録例

山頂爆発前後の水管傾斜計および伸縮計の記録例を **Fig. 3** および **Fig. 4** に示した。**Fig. 3** は変動の比較的大きい場合の例である。水管傾斜計の R 成分 (WTT-R) に注目すると、06 時 43 分の爆発の約 2 時間前より山頂方向の上向きの傾斜変動をしていることがわかる。伸縮計では全成分が伸びであり、爆発発生の際に、EX-1 (R 成分) および EX-3 で 2×10^{-8} 程度の伸び、EX-2 (T 成分) で縮みとなる『ステップ』が認められる。噴火継続中は、火口方向に下向きの傾斜変化と伸縮計全成分での縮みが観測される。

Fig. 4 には前兆期間が短く変動の小さい例を示した。前掲の例と異なる点は、伸縮計の R 成分 (EX-1) の前兆期間中の伸びが不明瞭になる、あるいは逆に縮みとなっていることである (12 月 1 日 02 時 16 分の爆発

(脚注)* 桜島火山観測所の『爆発』の基準：ハルタ山観測室で計測される地震動の最大振幅が 10 micron 以上で空振の強度が 0.1 mb 以上の噴火

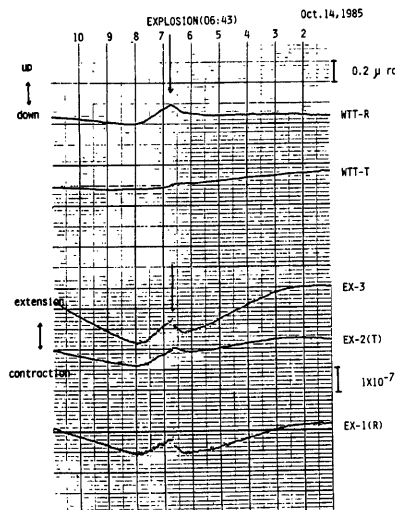


Fig. 3 A typical example of the tilt change and the strain associated with an explosive eruption.

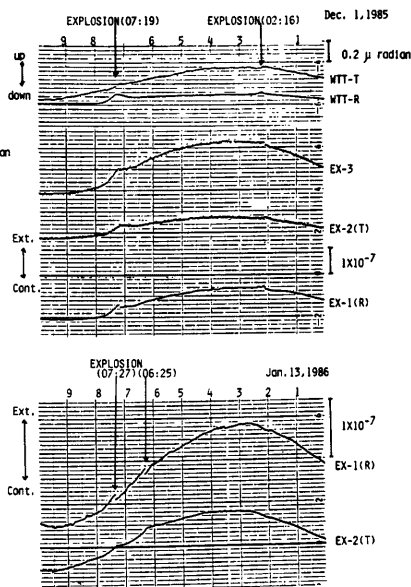


Fig. 4 Examples of the strain and the tilt change associated with minor explosive eruptions.

の場合および1月13日の2例)。他方、前兆期間中の火口方向に上向きの傾斜変化および火口と直交する成分の伸び、爆発発生時の『ステップ』、それに噴火継続中の火口方向の下向きの傾斜変化および伸縮計全成分の縮みはすべての場合に共通して認められた。このような変動は爆発的ではないが噴出量の多い噴火の場合も観測された。

このような傾斜変化および伸縮変化は、山頂噴火の直前に山体地下の圧力が高まり火口近傍の地盤が隆起・膨張し、噴火開始とともに噴出物の放出により地下の圧力が低下し地盤が下降・収縮する過程を反映していると考えられる。なお、前兆期間には伸縮計のT成分が常に『伸び』を示し、しかもR成分に『伸び』と『縮み』の2様式がみられることは、力源の深さが関係していることを直感的に暗示している。

伸縮計の記録上に顕著に現れている正弦波状の変化は地球潮汐を示し、その各成分の最大振幅は次の通りである。

- | | |
|-----------|------------------------------------|
| (1) 水管傾斜計 | WTT-R: $\pm 0.03 \mu \text{ rad.}$ |
| | WTT-T: $\pm 0.1 \mu \text{ rad.}$ |
| (2) 伸縮計 | EX-1: $\pm 7 \times 10^{-8}$ |
| | EX-2: $\pm 5 \times 10^{-8}$ |
| | EX-3: $\pm 1 \times 10^{-7}$ |

3.2 傾斜変化

Fig. 5 に2つの山頂噴火の前後の傾斜変動ベクトルを示した。この図では、ベクトルの方向は上昇方向を示している。いずれの場合も爆発前は火口方向が上昇し、爆発後は火口方向が下降している。爆発地震の震

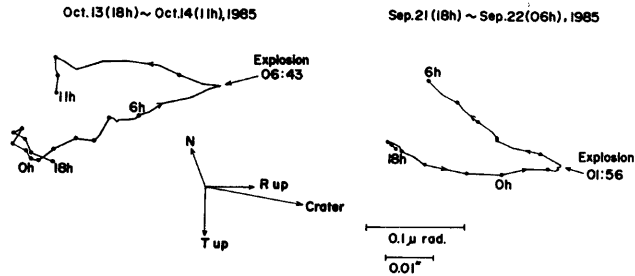


Fig. 5 Vector diagrams of the tilt changes.

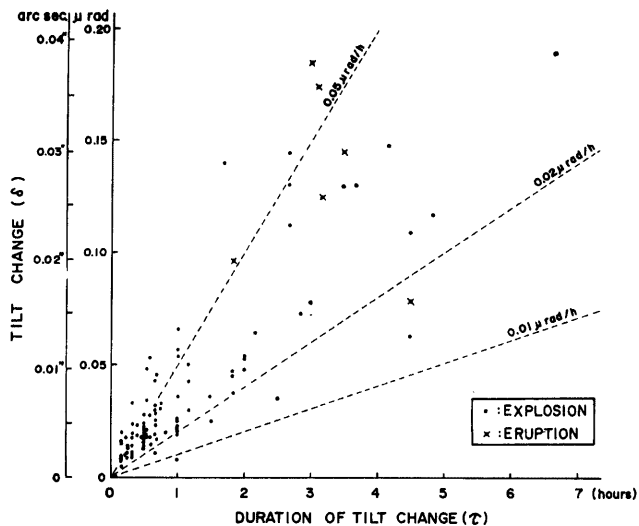


Fig. 6 The amount of precursory tilt change versus the duration.

源が山頂火口の直下1~3 kmの範囲に垂直に分布している¹²⁾ ことと考えあわせると、山頂爆発前後の歪および傾斜変化を惹起する原因は南岳山頂火口直下にあると考えられる。

前兆期間の長さと同傾斜変動量(δ)との対応をみるため、爆発的ではないが噴出物量の多い噴火の場合も含め、その関係を Fig. 6 に示した。今までの観測期間中についていえば、前兆期間は大半が1時間以下であり、長い場合で約7時間である。また、変動量は最大0.2 μ rad. 程度となっている。前兆期間が長いほど傾斜変動量も大きいといえる。前兆傾斜変動の rate は0.02~0.1 μ rad./hour 程度である。

3.3 歪変化

前述したように伸縮計の各成分には地球潮汐の影響が傾斜計に比べて大きく現れており、前兆変動を明瞭にするにはその影響を除去する必要がある。本稿では地球潮汐の振幅が小さい時期、即ち小潮時に発生した

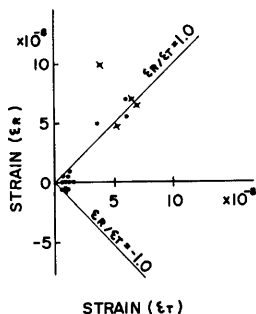


Fig. 7 The precursory strain in the radial direction to the active crater versus the strain in the tangential direction.

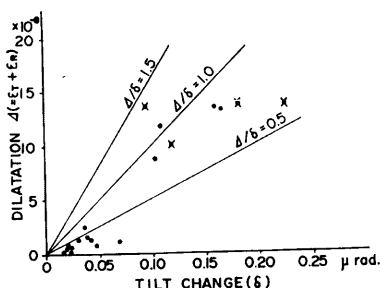


Fig. 8 The dilatation versus the tilt change.

爆発を取り上げ、火口方向の成分の歪 (ϵ_R) および火口と直交する方向の成分の歪 (ϵ_T) の関係を調べた。その結果を Fig. 7 に示した。

記録例の項で述べたように、前兆期間が短い場合には、 ϵ_R は負、即ち縮みになることがあるが、前兆期間が長く変動量が多い場合には伸びとして観測された。火口と直交する方向の歪 ϵ_T は常に伸びである。爆発によって比 ϵ_R/ϵ_T が変化すること、特に火口方向の歪 ϵ_R が正負両方あることは、前述のように、爆発毎に変動を惹起する力源の位置あるいは力源の性質が変化することを示唆している。そこでつぎに、このことを考察してみる。

3.4 力源の深さの推定

桜島南岳山頂火口直下のある深さに球状の力源が存在し、その内部圧が静水圧的に増大地盤の変動を惹起するという仮定のもとに、前兆傾斜変化と歪の関係に着目して、力源の深さを推定してみる。

Fig. 8 に面積歪 (d) と傾斜変化 (δ) の関係を示した。変動量の小さい場合は比 d/δ は 0~0.6 であるが、変動量が大きくなると (前兆期間が長い場合に相当する) その比も 0.6~1.4 と大きくなっている。

半無限弾性体内部の深さ D を中心とする半径 a の球の壁面に等方的に圧力 dP が働いた場合の地表面における傾斜および歪を、いわゆる茂木モデル¹³⁾に従って計算すると、Fig. 9 (a) のようになる。このモデルによると、力源方向の傾斜および力源方向と直交する方向の歪はどのような距離でも正となる。他方、力源方向の歪は距離 $R/D = 1/\sqrt{2}$ を境に伸びから縮みに変化する。モデルから期待される変動の特徴と、観測された山頂噴火の前兆地盤変動の特徴が合致しているといえる。特に火口方向の歪 ϵ_R は伸縮両方の場合が観測されていることから、ハルタ山観測坑道は力源に対して距離 $R/D = 1/\sqrt{2}$ 付近にあることになる。 R としハルタ山から山頂火口までの距離 2.8 km を採用すれば、力源は深さ 4 km 前後に想定されることになる。

ここで、面積歪と傾斜変化の関係に戻って、力源の深さをより詳しく検討する。 $R = 2.8$ km として面積歪と傾斜変化の比 d/δ と力源の深さ D との関係を計算し、図示したのが Fig. 9 (b) である。比 d/δ の観測値をこの図に当てはめると、力源の深さとして、1.9~6 km を得る。前述したように、前兆変動が大きくなると比 d/δ が大きくなる傾向が認められた。従って、前兆変動が大きければ、その原因となる力源の深さが増すものと推察される。

水準測量による地盤変動調査からは、火口直下 3~5 km に地盤変動を惹起する力源があると推定されて

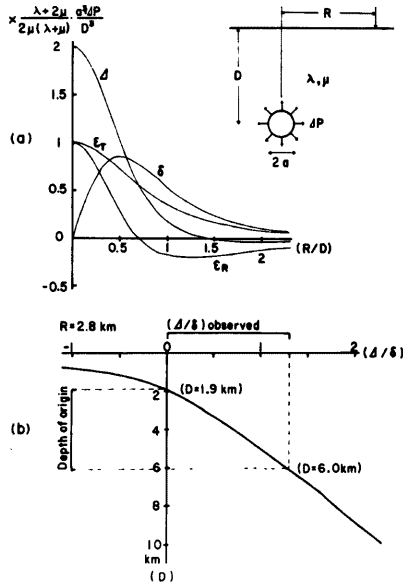


Fig. 9 (a) Distribution of the tilt and the strains calculated according to Mogi's model and (b) The relation between the depth of origin and the ratio of the dilatation to the tilt at a distance of 2.8 kilometers. Notations δ , ϵ_R , ϵ_T and Δ denote the tilt, the radial strain, the tangential strain and the dilatation, respectively.

いる¹¹⁾¹⁴⁾。また、地震波の減衰域が桜島中央部の地下3~6 km付近に存在することが確かめられている¹⁵⁾。これ等の観測結果は桜島中央部の地下数 km にマグマ溜りが存在することを示唆している。前述したように爆発地震の震源は火口直下1~3 km に垂直に分布している。従って、本稿で試算された山頂噴火の前兆地盤変動を惹起する力源の位置は桜島において想定されるマグマ溜りおよび火道下端付近に相当するといえる。圧力増大の原因としては、地下深部からのマグマの貫入あるいはマグマからのガスの分離等が考えられるが、立入った議論は更に詳細な解析にもとずき別の機会の行なうこととする。

4. 前兆傾斜変化の自動判別の試み

前節で述べた前兆傾斜変化を電子計算機により、リアルタイムで自動的に判定させる試みを約1ヶ月間行なった。観測所本館で受信した水管傾斜計のR成分の信号を12 bit AD変換器を付加したパーソナル・コンピュータに入力し、判定処理結果の表示および印字をさせた。

判定プログラムのフローチャートをFig. 10に示した。プログラムの基本はTable 2に示すように、傾斜変化のrateにより、噴火活動をPre-eruption, EruptionおよびNon-eruptionの3つの段階に区分し、現時点がどの段階にあるか判定することである。基礎データは水管傾斜計出力の1分間の平均値である。5分前の値との差から変化率計算している。ここで、それぞれの段階の判定条件を述べる。

(1) Pre-eruption (噴火準備中)

傾斜変化のrateが $0.02 \mu \text{ rad./hour}$ 以上の状態が5分間継続すること。

(2) Eruption (噴火)

傾斜変化のrateが $-0.02 \mu \text{ rad./hour}$ 以下の状態が3分間(5分間に設定した場合もある)継続すること。即ち、火口方向が下降する状態である。

(3) Non-eruption (噴火の徴候なし)

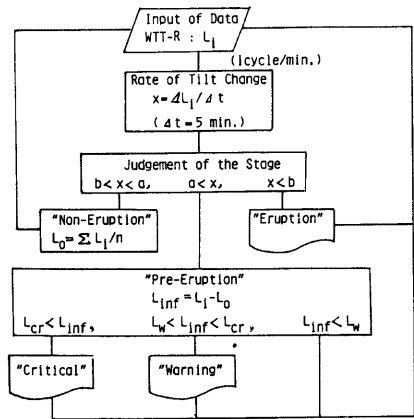


Fig. 10 Flow chart of the preliminary program on predicting an explosive eruption. The constants were chosen in the practice as follows; $a=0.02$ and $b=-0.02$ microradians per hour. $L_w=0.01$ microradians and $L_{cr}=0.02$ microradians.

Table 2 Definition of the stages and the level of the eruptive activity by the tilt change.

Stage or Level	Condition
"Pre-eruption" stage	(rate of tilt change) $\geq a > 0$: inflation
"Eruption" stage	(rate of tilt change) $\leq b < 0$: deflation
"Non-eruption" stage	$b < \text{(rate of tilt change)} < a$
"Warning" level	$L_w \leq \text{(amount of tilt since the onset of pre-eruption stage)} < L_{cr}$
"Critical" level	$L_{cr} \leq \text{(amount of tilt since the onset of pre-eruption stage)}$

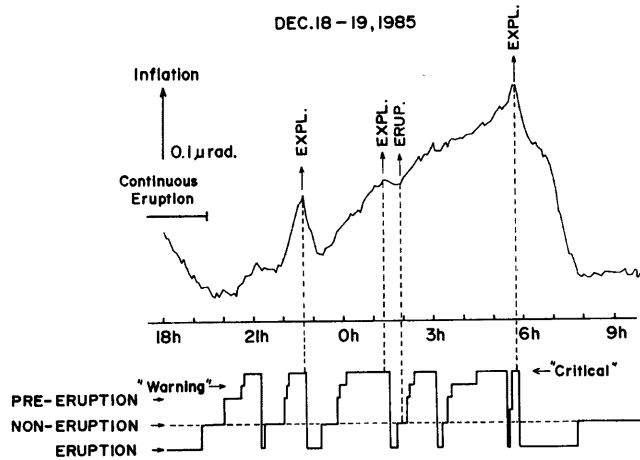


Fig. 11 An example of the practice of the program. The stages judged by the computer are compared with the actual eruptive activity and the tilt data of the radial component.

Table 3 Summary on the practice of the program.

Actual eruptive activity		Number of events which occurred in "Critical" level		Comments & remarks
Type	Total number of events	Total: 59 times		
Explosion	39 ¹⁾	27	38	1) The number of the explosions which occurred in each stage; 27: "Critical" level 8: "Warning" level 3: "Pre-eruption" stage 1: "Non-eruption" stage 2) The notation "?" means that no remarkable events could be recognized on the seismograms.
Eruption	5	4		
Continuous Eruption	22	7		
"?" ²⁾	—	21	21	

* The test of the program was done during the period from December 3rd to 29th in 1985. At Sakurajima Volcanological Observatory, an explosion is defined by the maximum seismic amplitude of the explosion-quake being equal to or more than 10 microns and the intensity of the air-shock being equal to or more than 0.1 millibars, which are observed at Harutayama Branch.

傾斜変化の rate が $-0.02 \mu \text{ rad./hour}$ 以上でかつ $0.02 \mu \text{ rad./hour}$ 以下の状態が 5 分間継続することとち、傾斜変動の小さい状態が続くことである。

Pre-eruption の段階ではその始まりからの傾斜変化量を逐次監視し、 $0.01 \mu \text{ rad.}$ に達したら "Warning" および $0.02 \mu \text{ rad.}$ に達したら "Critical" の 2 種類の警告を印字出力させた。

水管傾斜計の出力 (R 成分) と電算機により判定した噴火活動の段階の関係の例を Fig. 11 に示した。この例では、6 回の "Critical" 宣言を出力しているが、実際には、爆発は 3 回しか発生していない。3 回の "Critical" 宣言およびそれに続く Eruption Stage に対応する顕著な噴火は地震記録をみるかぎり認められない。いわば、『空振り』である。短時間ではあるが、火口方向の下向きの傾斜変化により "Critical" が reset されたためである。定数の設定値を変えれば改善の余地がある。

約 1 ケ月間運用した結果をまとめ Table 3 に示した。59 回の "Critical" 宣言のうち、35% は顕著な噴火を伴わず『空振り』であった。しかし、爆発 39 回のうち 70% に対しては、事前に "Critical" 宣言をおこなっている。また、1 例を除き、他の爆発はすべて山頂方向が隆起をしている状態 (Pre-eruption) で発生している。

今後、伸縮計のデータも併用しプログラムを改良することにより判定の信頼度を向上させれば、噴火の直前予測に利用することが可能になろう。しかし、計測しうる量の地盤変動を伴わない爆発もあり、地盤変動観測のみによる噴火予測には限界があろう。

目視観察から判断すると、爆発的噴火に限らず噴煙量の多い噴火は前兆傾斜変化が大きい傾向がある。即ち、隆起変動量は噴出物総量に関係している。しかし、爆発の強さ (例えば、爆発によって放出される岩塊の到達距離あるいは空振の強度) は別な要因にもかかわっているため、地盤変動の量から被害を想定した爆発の強さを事前に評価することは無理なように考えられる。

5. お わ り に

桜島南岳山頂火口の北西 2.8 km の位置にあるハルタ山観測坑道に設置した水管傾斜計により、個々の山頂噴火に対応した地盤変動を捕捉することができた。山頂噴火の直前予測を行なう上で、また、山頂噴火のメカニズムを解明する上で重要な手掛りとなる現象であるといえる。

現在までの解析結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 計測できた前兆地盤変動は噴火の 10 分～数時間前から生じる。前兆地盤変動は、山頂付近の地盤が隆起・膨張したことを反映した火口方向に上向きの傾斜変化 ($0.01 \sim 0.2 \mu \text{ rad.}$) および火口方向と直交

する方向の伸び ($10^{-8} \sim 10^{-7}$) で特徴づけられる。

- (2) 噴火継続中は山頂付近の地盤が下降・収縮したことを反映しているとみなせる傾斜変化および地盤の縮みが観測された。
- (3) 前兆地盤変動は山頂火口直下 2~6 km の地点における球状力源内で内部圧が増大したことにより惹起されたものと解釈できる。この深さは、他の観測結果によれば、マグマ溜りおよび火道の下端が想定される深度である。

傾斜変動データを電算機に入力し、リアルタイムで噴火活動を評価し、山頂噴火を予測することを試みた。試行期間中に発生した爆発39回のうち70%に対しては、事前に警告を出力したが、警告出力59回のうち35%は顕著な噴火を伴わず『空振り』であった。伸縮計等のデータも併用し、プログラムを改良すれば、より精度の高い直前予測ができる可能性がある。

本稿をおわるにあたり、観測機器の設置および保守にあたっていただいた桜島火山観測所所員の方々に厚く御礼申し上げます。伸縮計の設置については、地殻変動部門・宮崎地殻変動観測所の方々にも御協力いただいた。また、判定プログラム作成にあたっては、データ取込み等の部分について井口正人氏に協力願った。記して感謝の意を表します。なお、この研究の費用の一部は文部省科学研究費補助金による。

参 考 文 献

- 1) Jaggard, T. A. and R. H. Finch: Tilt Records for Thirteen Years at the Hawaiian Volcano Observatory, Bull. Seism. Soc. Amer., Vol. 19, 1927, pp. 38-51.
- 2) Jones, A. E.: Ground Surface Displacements and Earthquakes at Kilauea, Hawaii, First Half-year, 1935, Bull. Seism. Soc. Amer., Vol. 27, 1935, pp. 113-137.
- 3) Eaton, J. P.: A Portable Water-tube Tiltmeter, Bull. Seism. Soc. Amer., Vol. 49, 1959, pp. 301-316.
- 4) Swanson, D. A., et al.: Forecasts and Prediction of Eruptive Activity at Mount St. Helens, U. S. A.: 1975-1984, J. Geodynamics, Vol. 3, 1985, pp. 397-423.
- 5) Sassa, K.: Micro-Seismometric Study on Eruptions of the Volcano Aso, Mem. Coll. Sci., Kyoto Univ., Vol. 19, 1936, pp. 11-56.
- 6) Minakami, T.: On Volcanic Activities and Tilting of the Earth's Surface, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 20, 1942, pp. 431-504.
- 7) Yoshikawa, K.: On the Crustal Movement Accompanying with the Recent Activity of the Volcano Sakurajima (Part 2), Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 50, 1962, pp. 1-24.
- 8) 江頭庸夫: 火山性地殻変動 (II), 京大防災研年報, 第9号, 1966, pp. 110-118.
- 9) 吉川圭三: 火山性地殻変動, 火山, 第10巻, 10周年特集号, 1966, pp. 110-118.
- 10) 加茂幸介他: 1976年5月桜島南岳噴火活動の前駆的現象, 第13回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, 1976, pp. 245-246.
- 11) 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, 京大防災研年報, 第21号 B-1, 1978, pp. 153-162.
- 12) 加茂幸介: 桜島における噴火の前駆現象と予知, 火山, 第23巻, 1978, pp. 53-64.
- 13) 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.
- 14) 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. 11-21.
- 15) 加茂幸介他: 桜島南方の地震活動と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.