

## 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連について\*

吉 留 道 哉\*\*

550. 340, 551. 21

### On the Relation between Peculiar Seismograms and the Magma Reservoir in the Vicinity of Volcano Sakurajima

Mitiya Yoshidome

(Kagoshima Local Meteorological Observatory)

In order to watch the volcanic activity at Volcano Sakurajima, from 1964 seismological observations have been made at three points in Sakurajima. Some records for same earthquake differ in both period and amplitude from station to station.

The relationship among the peculiar and normal records, and seismic ray paths seem to suggest that the peculiar record will be affected by the magma reservoirs which will exist in the vicinity of Volcano Sakurajima.

The analysis of seismograms for nine earthquakes which occurred near the station indicates that two magma reservoir will exist under and near Volcano Sakurajima.

#### § 1. 序 論

火山爆発の予測精度を向上させるためには、マグマの移動、噴出の過程を適確に把握することが必要である。鹿児島地方気象台は長年にわたる火山観測の蓄積の結果、現業面で必要な爆発予測に関するいくつかの経験則を得た。その一つが溶岩上昇現象による爆発予測である。すなわち、爆発活動が近づくと、火道を溶岩が上昇する時期があり、そのとき顕著な火山性地震を伴うことから、爆発の時期が接近していることがわかる。たとえば、近年では1972年10月2日および1973年6月1日の爆発は、いずれも噴石を山ろくまで飛ばせ、山火事を起こしたり、作物に被害を与えたほどの大きな爆発であったが、それらは、南岳火口底へ多量の溶岩が上昇した時期に起こったものである。溶岩上昇時の火山性地震によって爆発の時期が、ある程度予測できる。こうした溶岩の上昇ないしその前段階に属するマグマの移動を追跡するためにも、マグマたまりの位置や大きさを含めた火山内部の機構を研究することは重要な意義を持っているわけであ

る。

桜島火山のマグマたまりの位置や大きさについては、すでに安井ら(1960)、茂木(1957)によって、地震観測もしくは地殻変動の解析から、いくつかのモデルが提起されているが、ここでは、鹿児島地方気象台の地震観測網を使って探知した桜島周辺のマグマたまりについて検討した。

#### 2. 観測点と地震計

まず鹿児島地方気象台の地震観測網について述べる。気象台に59型電磁地震計(1968年10月以前はウィヘルト地震計)があり、一般地震の観測に当たっているが、桜島南岳から約10km西方にあって、桜島爆発地震をはじめ火山性地震をよく記録する。さらに1964年、桜島に3点のほか霧島に1点、それぞれ62型電磁地震計が整備された。これにより、霧島、桜島両火山を含む5点地震観測網ができた(Fig. 1)。各観測点名は、鹿児島、霧島A点、桜島A<sub>1</sub>(またはA<sub>2</sub>)、B、C点である。桜島のA<sub>1</sub>点(O点とも称す)および霧島O点には56型高倍率地震計水平成分もあり、振幅の大きい地震の観測はこれで行なっている。桜島では、はじめ62A型電磁地震計の感部をA<sub>1</sub>点におき、記録も同所で行なっていたが、1968年

\* Received September 4, 1973  
Revised July 29, 1974

\*\* 鹿児島地方気象台

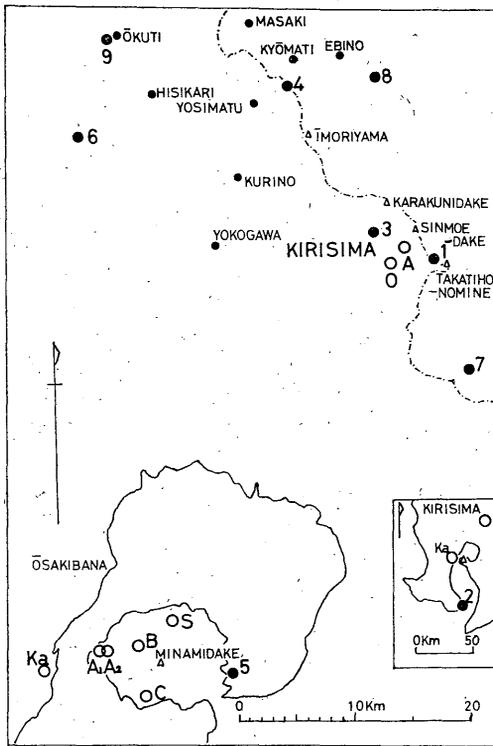


Fig. 1. Location of observation points (open circle) and epicentres (solid circle). The earthquake number is same as shown in Table 2.

8月, A<sub>2</sub>点にて感部を移し, テレメータしA<sub>1</sub>点記録をとっている. したがって1968年8月以前のはA<sub>1</sub>点, 以後のものはA<sub>2</sub>点における観測である. 白浜は1968年6月~7月の気象庁機動観測班による地震観測点である. 同観測班はこのほか吉野, 海潟でも観測を実施したが, Fig. 1では, これらは省略する.

各観測点の地震計の概略は Tab. 1 のとおりである.

### § 3. 桜島周辺で発生した地震と異常な地震記録

1955年以来, 桜島は活発な活動を続け, とくに1967年には4回にわたって南岳火口底へ溶岩が多量に上昇し, 爆発が増加したことがあった. また1968年5月には, 桜島で有感A型地震が群発するなどの顕著な活動がみられた. また桜島周辺においても, 1967年8月指宿地震, 1968年2月えびの地震, 1972年5月大口地震などがあつた.

これらの地震はいずれも, マグニチュードが小さく, 気象庁の一般地震観測網では震源がきめにくい地震であつたが, 鹿児島地方気象台の5点観測網では震源が決定できたものもあつた. なお震源決定にさいしては, 東京大学地震研究所霧島火山観測所のデータを参照させてもらったことがあり, 同観測所にこの紙面を借り, 厚くお礼申し上げる.

桜島周辺で発生した地震の, 桜島A, B, C点の記録は震央距離に対して観測点間の距離が小さいので, 地震

Table 1. Instrumental constants of seismographs. C: Component, T<sub>0</sub>: Period, V: Magnification

Observatory	Seismograph	C	T <sub>0</sub> (sec)	V	Observed Period
Sakurajima Point A <sub>1</sub>	JMA-56 JMA-62A	2(H) 3(H,z)	1.0 "	300 2,000	No.1: May 1960-1974 No.2: June 1960-1974 Jul. 1965-Aug. 1968
" Point A <sub>2</sub>	JMA-62A	"	"	"	Aug. 1968-Present
" Point B	JMA-62C	"	"	"	Dec. 1963- "
" Point C	JMA-62C JMA-62E	" "	" "	" "	Dec. 1963-Mar. 1972 Apr. 1972-1974
" Shirahama	JMA-62B	"	"	"	June-Jul. 1968
Kirishima Point A	JMA-62A	"	"	5,000	Jun. 1964-1974
" Point O	JMA-56	1(H)	"	300	Mar. 1966-1974
Kagoshima	Wiechert JMA-59 Strong Motion	3(H,z) " "	5.0 " "	80 100 1	June 1939-Sep. 1968 Sept. 1968-1974 Dec. 1950-1974

Table 2. Earthquakes used in the present study.

EARTHQ. No.	Time					Epicenter	Depth (km)
	Y	M	D	h	m		
1	1966	Apr.	29	00	38	Near Takachihonomine	1
2	1967	Aug.	8	04	27	Near Ibusuki	5
3	1968	Feb.	26	19	43	Near Karakunidake	13
4	1968	Feb.	29	22	31	Ebiuo	5
5	1968	Jun.	25	17	42	East part of Sakurajima	5
6	1968	Aug.	13	20	22	South of Ōkuti City	28
7	1969	Des.	2	00	48	South of Takachihonomine	22
8	1971	Sept.	10	00	11	Ebino (Kakuto Dist.)	16
9	1972	May	29	06	47	Ōkuchi City	10

記象型に大きな振幅差はないはずであるにもかかわらず、明らかに相異することがある。これは地震波の伝搬途中に、なんらかの異常域があるためと考えられ、こうした事例を示す多くの地震経路を追跡することによって、地下の異常域の位置および大きさを探知しようとするのである。

なお、田中(1971)はマグマたまりを液体とし、その中を通過する地震波の振幅変化について、「*P*波が reservoir へ入射する場合、入射角が小さいと屈折 *P* 波の振幅が大きくなること、また特定の入射角をもった *P* 波動は大きな振幅の *P* 波となって reservoir から出てくるが、*S* 波は小さい」ことを示した。桜島の観測点で示す異常な地震記録の中にも、これに類するものがみられる。

本論文で使用した桜島周辺で発生した地震を Fig. 1, Table 2 に示す。

#### § 4. 地震記録の比較

Fig. 1, Table 2 に示した地震について、桜島 A・B・C 点での記録を比較し、いくつかの例を Photos. 1~4 に示す。記録の正常なものには、写真の左側に○印、異常なものには×印を付したが、まずその判定法について述べる。

一般に地下増温率を 3°C/100m と仮定すると、地下 10 km の地中温度は 300°C 程度と推定される。桜島火山のマグマの温度は約 1000°C と推定されるので、地下 10 km ぐらいの所にマグマたまりがあるとすれば、そのま

わりの所とでは、大きな温度差があることになる。一般に同一深度では地震波は温度の低い所を通るほど速度が早く、振幅の減衰も小さいといわれている(勝又1970, 竹内1970)。また振幅は ① 地震計の周期特性 ② 地盤の振動特徴 ③ 波の経路 などが影響しあっている。しかし桜島の3点の地震観測については、①はすべての観測点で同一特性であり、②は地盤の違いによって生ずる振幅差以上の量をここでは論ずるので、いくつかの観測点で振幅差が生ずる原因は、③の問題にしぼられ、地震記象の振幅の異常は、地震波がマグマたまりのような高温な所を通過したかどうかの判別に使える。

次に *S* 波の周期の問題があるが、下鶴(1961)によれば、*S* 波に短周期の成分が観測される場合の地震波は、マグマポケットと関係のなさそうな経路を通過してきている。そこで *S* 波に短周期が欠けているものの中には、マグマたまりに作用されたものもあろう。

桜島周辺の地震では、*S* 波に短周期が卓越するため、その記録はス書きでは、まっ白になったり、ペンが浮き上って記録が部分的に欠けているものが多い。Photo. 1 における B 点の記録はその例である。

また、マグマたまりに作用されないと思われる記録は、たとえば Photo. 4 の白浜のように、*P* 相、*S* 相が明瞭で、全体的に三角形をしているのに対し、たとえば Photo. 4 の A・B・C 点のように、記録の相が不明瞭である。

以上のように、記録の正常もしくは異常の判定は、① 振幅の大きさ、② *S* 波における短周期の欠除、③ *P*,

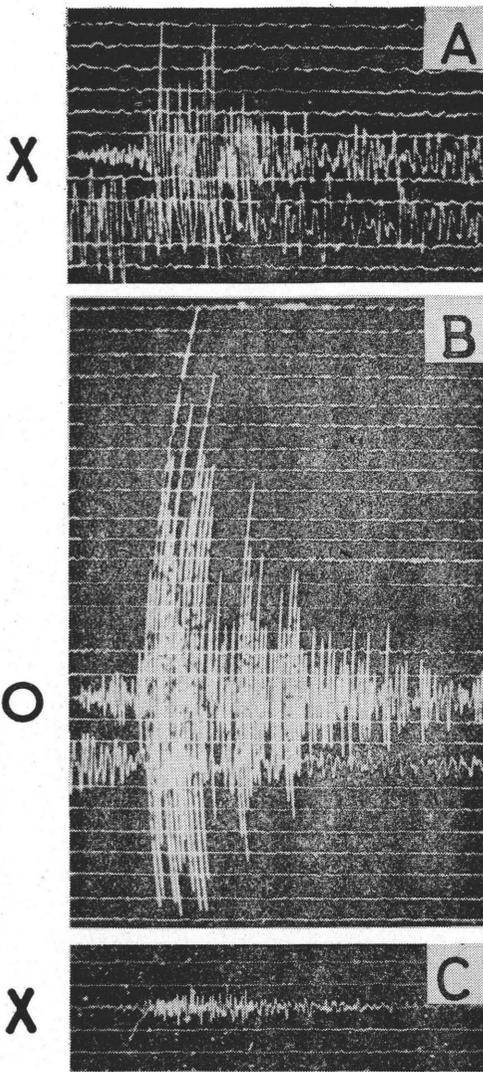


Photo. 1. Records of seismograms obtained at 00<sup>h</sup> 38<sup>m</sup> of Apr. 29, 1966.

Epicentre: near Takachihomine,

A, B, C: Observation station,

○: normal record,

×: abnormal record

S相の明瞭さなどを目安に分類することができる。なお Photo. 1~5 は必ずしも同一成分の比較ではないが、成分により記録に極端な相異は認められないので、特徴のはっきりした1成分を選択した。

次に Table 2 に示した地震について、個々の震源決定の概要を述べる。

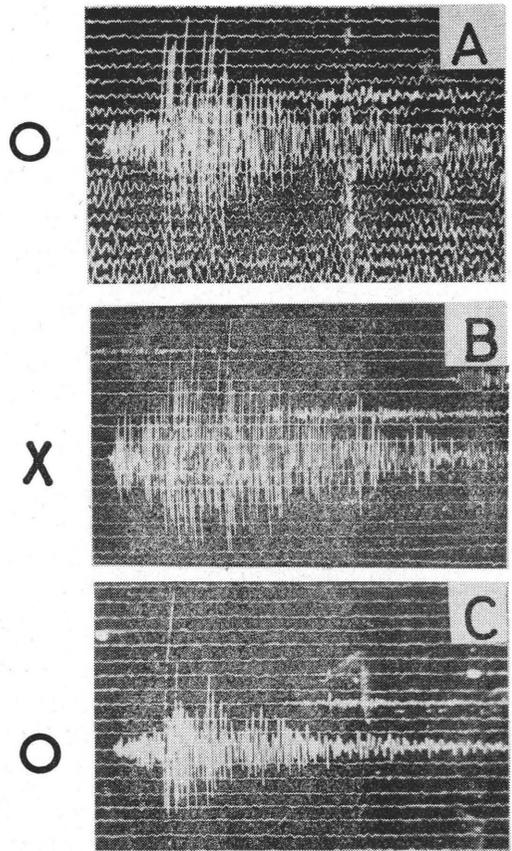


Photo. 2. Records of seismograms obtained at 04<sup>h</sup> 27<sup>m</sup> of Aug. 8, 1967.

Epicentre: near Ibusuki. Notations are same as shown in photo. 1

4-1. 1966年4月29日00時38分 (Photo. 1)

高千穂峯付近に発生したごく浅い地震であった。霧島火山観測所の電磁地震計3成分の初動とP~Sから震源をきめた。桜島のB点は短周期が卓越し、振幅も大きく、P、S相も明瞭で、正常な記録と考えられる。これと比較し、A点はB点に比べ振幅は小さく、地震波の周期が乱れており、またC点の振幅はさらに小さく、地震波の周期も乱れている。

4-2. 1967年8月8日04時27分 (Photo. 2)

8月5日指宿市田良浜付近で地震が群発した。Photo. 2は一連の群発地震の中の一つである。A・C点の記録はP~Sが明瞭で、記象上になんら異常はない、しかし、B点の記録は短周期ではあるが、P波の部分が大きく、S波の部分はそのわりに小さく、P-Sが不明瞭で異常

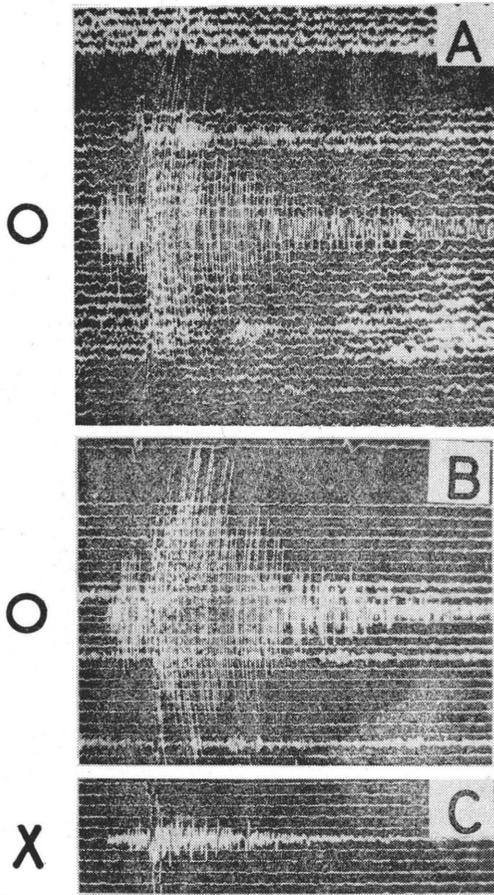


Photo. 3. Records of seismograms obtained at 22<sup>h</sup> 31<sup>m</sup> of Feb. 29, 1968.  
Epicentre: near Ebino. Notations are same as shown in photo. 1.

な記象と考えられる。

4-3. 1968年2月26日19時43分

1968年2月21日、えびの地震発生後韓国岳を中心とする霧島火山の地下のやや深い所で、多数の地震が発生した。鹿児島地方気象台霧島火山観測所の電磁地震計の初動とP~S(大森常数K=6と仮定)を用いて、震源を決定した。震源は韓国岳から半径5km以内に分布し、深さは11~17kmであった。4-3はこの時の一連の地震の中の一つである。桜島においては3点とも地震波の周期が乱れており、またC点はA・B点に比べ振幅が極めて小さい(Photo. 省略)。

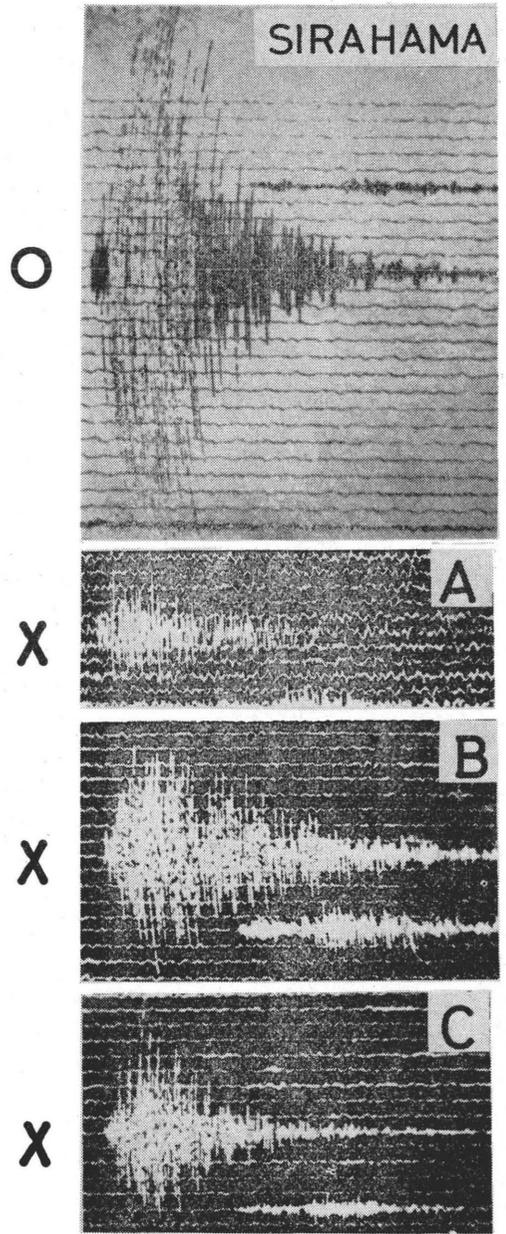


Photo. 4. Records of seismograms obtained at 17<sup>h</sup> 42<sup>m</sup> of June 25, 1968.  
Epicentre: east part of Sakurajima. Notations are same as shown in photo. 1.

4-4 1968年2月29日22時31分 (Photo. 3)

1968年2月21日、えびので震度VIの地震が発生し、数か月にわたり余震が続いた。

震源域はえびの市を中心に4km半径のほぼ円形の地

域で、震源の深さは、10 km 以浅であった。

Photo. 3 は、この一連の地震の中の一つである。桜島において、A・B点の記録は短周期で振幅も大きく、記象型に異常は認められない。しかしC点はA・B点に比べ、振幅は極めて小さく、地震波の周期は乱れており、異常な記象である。

#### 4-5 1968年6月25日17時42分 (Photo. 4)

1968年5月29日、桜島で有感A型地震が群発したので気象庁機動観測班が出動し、6月12日から7月19日まで臨時に観測点を設けて、観測を実施した。それに既設の鹿児島地方気象台の地震観測網および京都大学の観測資料を参照し、震源決定が行なわれた。Photo. 4 はその一連の地震の中の一つであるが、白浜の記録はP~S明瞭、S波の最大振幅は大きく、短周期も卓越し、典型的なA型地震記録といえる。これに対し、A・B・C点の記録は、P~S相が不明瞭で、A型地震としての特徴が失われていることは、白浜と比較し明瞭である。B・C点の震央距離は白浜と同程度であるが、振幅ははるかに小さい。

#### 4-6. 1968年8月13日20時22分

1968年8月13日、えびので同年3月25日以来5か月ぶりに震度Ⅳの地震が発生した。各地の震度は、えびの、吉松でⅣ、横川、人吉、飯野でⅢ、大口、牧園、宮之城でⅡ、阿久根でⅠであった。えびの、吉松地区では地鳴りがきこえた。霧島O点、桜島A点、鹿児島島の3点のP~Sから大森常数  $K=8$  として震源を求めた結果は、えびの地震の震源域の中心から西ないし西南西18kmの大口市南部針持駅付近の深さ28kmとなった。

A点の記録は正常であるがC点のS波の最大振幅が小さく、異常である。B点は記録不良のため判別できない (Photo. 省略)。

#### 4-7 1969年12月2日00時48分

霧島火山観測所の電磁地震計の初動とP~Sから大森常数  $K=8$  として震源を求めた。震源は高千穂峯のほぼ南9km、深さ22kmとなった。

桜島の3点の記録とも、P・S相が不明瞭で、地震波の周期も乱れている。またA点はB点に比べ、振幅が極めて小さい (Photo. 省略)。

#### 4-8 1971年9月10日00時11分

各地の震度はえびのでⅢ、吉松でⅡ、横川でⅠであっ

た。鹿児島、桜島B点、霧島O点のP~Sから大森常数  $K=8$  として震源を求めた。震源はえびの地震の震源域の中心とみなされる国鉄京町駅の南2.5kmから東へ約7kmの地点で、深さ16kmであった。

B点の記録は振幅は大きい、短周期が卓越していない。A・C点は振幅が小さく地震波の周期が乱れている (Photo. 省略)。

#### 4-9 1972年5月29日06時47分

大口市で震度Ⅲで地鳴りを伴った。また吉松町で震度Ⅲ、菱刈町でⅡ、横川町でⅠ、宮之城町で無感であった。桜島A点、霧島A点できれいなA型地震記録が得られた。これらのP~Sに東京大学地震研究所霧島火山観測所 (岡元小学校) のデータ (神沼1972) を加え、大森常数  $K=8$  とし、震源を求めた。震源は大口市内、深さ10kmとなった。

A・B点の地震記録は、短周期が卓越し、P、S相も明瞭で地震記象型は正常である。

C点は振幅も小さく、地震波の周期が乱れている (Photo. 省略)。

以上の結果は、Table 3 のように分類される。

Table 3. Classification of seismograms. Earthq. No. is same as shown in Table 2. Mark ○ denotes normal record and × abnormal one.

Earthq. No.	Photo. No.	Point			
		A	B	C	S
1	1	×	○	×	
2	2	○	×	○	
3		×	×	×	
4	3	○	○	×	
5	4	×	×	×	○
9		○		×	
7		×	×	×	
8		×	×	×	
9.		○	○	×	

### § 5. 震波線ノモグラム

久本 (1965) は震央距離と震波線の深さとの関係をあらわすノモグラムを作った。これは震央距離が数100kmにも及ぶ場合に用いられるものであって、この調査のように震央距離50km前後のものを対象とする場合には、そのままでは使用できない。そこで、筆者はごく近距離の地震に適用できる震波線ノモグラムを、久本にならっ

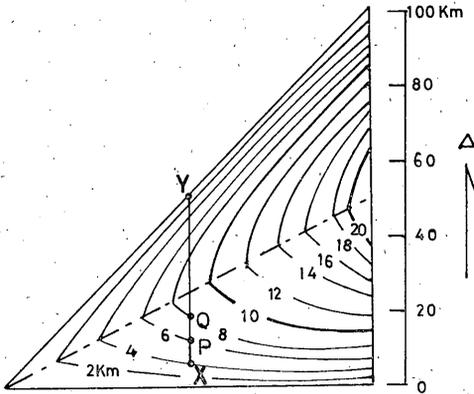


Fig. 2. Seismic ray nomogram. If it is 4 km in focal depth and 45 km in epicentral distance, each depth on the seismic ray is given by intersections of the straight line XY and curves, P, Q,.....(X: Origin, Y: observation point). For instance, depths of the ray.....are 6 km, 8 km, .....

て作成した。すなわち Fig. 2 である。いま、たとえば震源の深さ 4 km, 震央距離 45 km の場合の震央と観測点を結ぶ線上の任意の点における震波線の深さは、次のようにして求められる。

震央 X を図中の 4 km の曲線上にとり、斜辺上に観測点 Y をとって、線分 XY を震央距離 (45 km) に等しく、かつ図の底辺に垂直になるようにする。そうすれば、XY 上の任意の点における震波線の深さは、XY と曲線の交点からただちに読みとることができる。鎖線と交わるところが最深点である。すなわち、震央距離 XP, XQ, .....の点における震波線の深さは、それぞれ 6 km, 8 km, .....である。

§ 6. 第 1 マグマたまり

火山の真下にマグマたまりを考えると、種々の火山現象を説明するうえに、都合がよい。桜島の有史以来の三大噴火 (文明, 安永, 大正) は、南岳を中心にほぼ対称的な両側山腹もしくは山すそで起こった。このことは、ほぼ南岳火口真下に中心をもつかなり大きなマグマたまりがあることを示唆している。この火口下のマグマたまりを第 1 マグマたまりとする。

Fig. 3 は Table 3 において、B 点もしくは C 点の地震記象が異常を示した地震波の経路を示したものである。同図により、2-B (震源 2 から B 点までの Path, 以下同様)、5-C 等により、地下の異常域の限界域が推

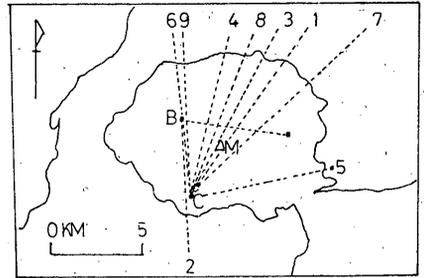


Fig. 3. Paths of seismic rays arrived anomalously at the seismographs, which passed through near the crater of Minamidake (denoted M). The earthquake number is same as shown in Fig. 1 and Table 2.

測される。マグマたまりが球体である根拠も必然性もないが、ここでは簡単に球体と考える。中心が南岳火口真下であり、5-C がひっかかるような球体であるとすれば、半径 2.5 km が必要である。

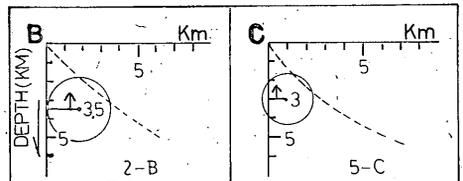


Fig. 4. Assumed location of the No. 1 magma reservoir and seismic rays arrived at the observation points B and C. Arrow mark shows the corrected location for center of magma reservoir.

次に第 1 マグマたまりの深さを求める。2-B はマグマたまりに阻害されているので、Fig. 4 に示すように第 1 マグマたまりの中心が、3.5 km 以浅でなければならない。同様に 5-C により、第 1 マグマたまりの中心は 3 km 以浅でなければならない。

この二つから第 1 マグマたまりの中心は海面下 3 ~ 2.5 km であることがわかる。作図等の便宜上、第 1 マグマたまりの中心は南岳火口の真下、海面下 2.5 km とする。

§ 7. 第 2 マグマたまり

桜島火山には火口真下のマグマたまりのほか、桜島北方の鹿児島湾の真下にもう一つ、マグマたまりの存在

が推定されている。このマグマたまりを第2マグマたまりとする。第2マグマたまりは始良カルデラのほぼ中央に位置し、同カルデラのかつての活動源であったことを示唆している。

大正3年(1914年)の桜島の大噴火はその噴火の規模が大きかったこと、地殻変動が広大であったことが知られている。水準測量は噴火前と噴火後数回行なわれ、興味ある結果が大森(1916)によって報告された。すなわち、沈降地域はほとんど同心円状に広がり、その中心は桜島火山の火口と一致せず、北方の鹿児島湾内にあるというものであった。

この変動を山川(1955)は、地殻を一樣な弾性体とし、地下深所に簡単な力源がある場合の地殻の変形として説明した。そのモデルとして地下の力源を球状の静水圧力源とし、半無限弾性体中に球状静水圧力源がある場合の変形について、計算式を示した。

茂木(1955)は噴火に伴う大規模な地殻変動を簡単に地下のマグマたまりの圧力変化による地殻の弾性変形と仮定した。地殻を一樣な弾性体とし、桜島北方の鹿児島湾内の海面下約10kmに中心を有し、3~4kmの半径を有する圧源の圧力が減少したとして、大正噴火後の広大な沈降を説明した。

京都大学防災研究所桜島火山観測所では1957年から桜島と鹿児島市吉野町の海岸付近一帯の水準測量を実施し、マグマたまりの動きや火山活動の動向を探っている。江頭(1971)によると桜島北側と鹿児島市吉野町大崎鼻、奄ヶ水一帯の隆起が大きい。特に桜島北側の白浜における隆起は顕著で、1957~70年における隆起量は227.1mmである。この隆起は第2マグマたまりへのマグマの補充によるものかもしれない。

以上述べたように第2マグマたまりの存在性は強いし、茂木(1957)によりモデルは提起されているが、さらに地震現象面からの確認がほしいところである。そこで第1マグマたまりに用いたと同じ手法により、第2マグマたまりの探知を試みた。

Fig. 5はTable 3において、桜島北方鹿児島湾を通り、B点で記録した地震のPathと震波線の深さを示したものである。同図において、×印は茂木により推定された地殻変動源の中心である。8-B、3-Bは異常で、その端の4-B、1-Bは正常であることから、3-B、8-Bにはさまれる中間にマグマたまりの中心があることがわかる。茂木の推定した圧力源の中心は該区域にあり、該点をマグマたまりの中心としてよいことがわかる。また中心から離れた4-B、1-Bが正常であるの

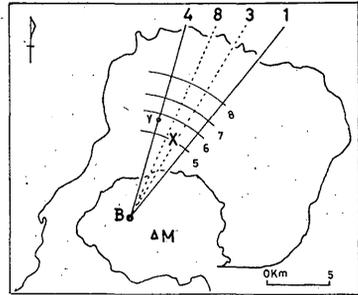


Fig. 5. Paths and depths of seismic rays arrived at point B and passed through under the Kagoshima Bay north off Sakurajima. Solid and dotted lines show the paths corresponding to normal and abnormal records, respectively. Numbers 5, 6, 7, 8 are shown depth (km) of path of seismic ray. Numbers 1, 3, 4, 8 are Earthquake No. shown in Fig. 1 and Table 2. Mark X denotes the center of source of the earth's crustal deformation obtained by K. Mogi. Mark Y shows the intersection of the path and the path 3-A<sub>1</sub> in Fig. 6.

は、地震波線がマグマたまりを通らないためと考えられる。

Fig. 6は桜島北方の鹿児島湾を通り、A点で記録した

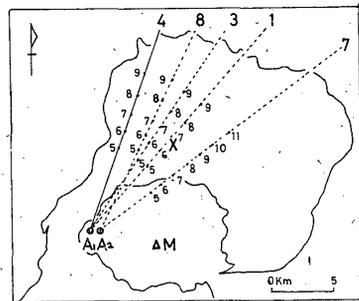


Fig. 6. Paths and depths of seismic rays arrived at point A and passed under the Kagoshima Bay north off Sakurajima. Notations are same as shown in Fig. 5.

地震の震波線とその深さを示す。

4-A<sub>1</sub>が正常記録を示すことから、この若干東側に第2マグマたまりの西限があることが予想される。また3-A<sub>1</sub>とFig. 5における4-Bの震波線は大崎鼻東北東(Fig. 5, Y点)で、互いに接近し交差している。しかし観測点からY点までの距離は、B点よりA<sub>1</sub>点の方

が離れているため、Y点での震波線の深さは、3-A<sub>1</sub>の方が4-Bより約1 km 深くなっている。3-A<sub>1</sub>はマグマたまりに阻害され、4-Bはそうでないことは、マグマたまりの境界面がY点では、二つの震波線の深さの間、ほぼ垂直1 km 以内に存在することを示している。また Fig. 5 における8-Bが異常で、4-Bが正常であることから、境界面が中心から離れるにしたがい、湾曲下降することが想像できる。

マグマたまりの中心の平面的位置は前述のとおりきまったので、次にマグマたまりを球体としたときの半径と中心の深さを検討する。

まず、マグマたまりの中心から震波線4-A<sub>1</sub>への最短距離は4 km であるから、マグマたまりの半径は4 km が限界であることがわかる。

ここでは茂木 (1957) により求められた半径の上限 (4 km) をマグマたまりの半径として論じてみる。

Fig. 7 はマグマたまりを球体と仮定し、その中心の深さを探るために、震波線とマグマたまりの関係を示した

ものである。同図において、1-B、4-BはともにB点における記録が正常で、マグマたまりに影響されない。

したがって、いずれもマグマたまりの中心の深さは、海面下9.5 km 以深でなければならない。次に、3-B、8-A<sub>2</sub>、8-Bはいずれもマグマたまりに作用され、それぞれの観測点における記録が異常を示す場合である。

3-Bはマグマたまりの中心が9.5 km 以浅、また8-A<sub>2</sub>、8-Bは10 km 以浅でなければならない。以上5者を満足するものは、海面下約9.5 km であり、これがマグマたまりの中心の深さとなる。マグマたまりを球体としたときの上限は、海面下5.5 km、下限は13.5 km となる。

### § 8. マグマたまりのモデル

以上述べたとおり、桜島火山には二つのマグマたまりの存在が考えられる。Fig. 8 に、Table 2 の地震波の経路を示した。震波線がマグマたまりを通過する部分は点線で示したが、点線の集合によりマグマたまりの輪郭を

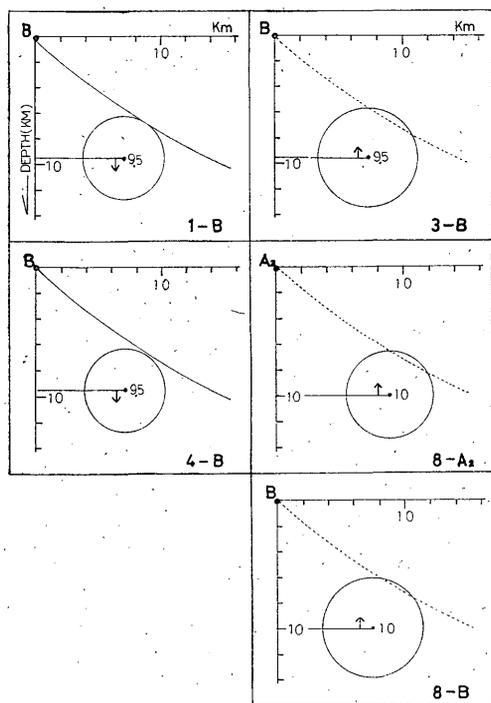


Fig. 7. Assumed location of the No. 2 magma reservoir and seismic rays. Dotted lines of seismic waves are interacted by the magma reservoir, but solid ones are not. Other notations are same as shown in Fig. 4.

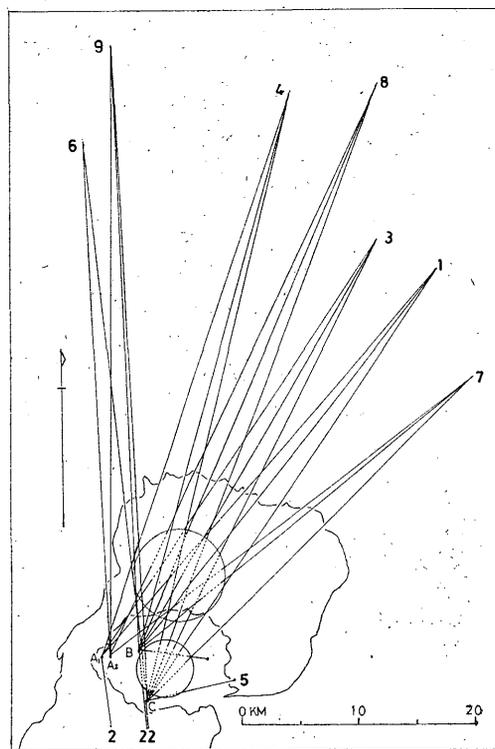


Fig. 8. Relation between paths of seismic rays and the magma reservoirs. Dotted parts in seismic paths suggest the locations of the magma reservoirs.

知るとともに、その他の実線部により、そのほかにはマグマたまりは存在しそうなことがわかる。

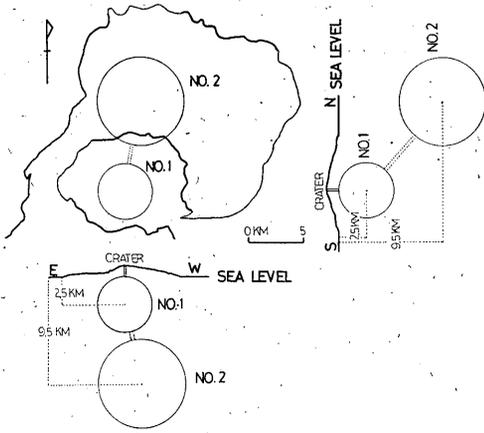


Fig. 9. Locations of the magma reservoirs near volcano Sakurajima.

またこのようなマグマたまりの側面図を Fig. 9 に示した。第2マグマたまりと第1マグマたまりの連結は、同図のような単純なものではないことはいままでの間、マグマの移動経路上では地震が発生するかもしれないが、現在までに第2マグマたまりと第1マグマたまりの中間に当たる桜島の北部にA型地震は発生していないか、ごく少ない。Fig. 10は1958年以降の有感A型地震の震源分布である(吉留1970)。震源は主として南岳西南西方に分布し、桜島北部にはない。しかし安井ら(1960)によると1959年2月~5月におけるA型地震の震源分布は南岳から北~北西の方に分布し、火口から遠ざかるにつれて深くなっている(Fig. 11)。これらは第2マグマたまりと第1マグマたまりを結ぶマグマ移動の一つのルート上に発生した地震であるかも知れない。

桜島の火山活動は、まず第2マグマたまりにマグマが充満し、ついで第1マグマたまりに移動し、火口から噴煙、火山弾等となって噴出する過程をたどると思われている。それを示唆するのが Fig. 12 である(江頭1971)。同図は京都大学防災研究所桜島火山観測所の水準測量による、袴腰に対する白浜の比高の推移と爆発との対比を示したものである。

同図において、B.M. 29(白浜)が1957~60年に顕著に上昇しているのは、1960年を中心として1964年までに及んだ活発な活動に対応している。また1966~70年における顕著な上昇は1967~68年における活発な活動と1972年秋以降の顕著な活動の原動力となっているように思わ

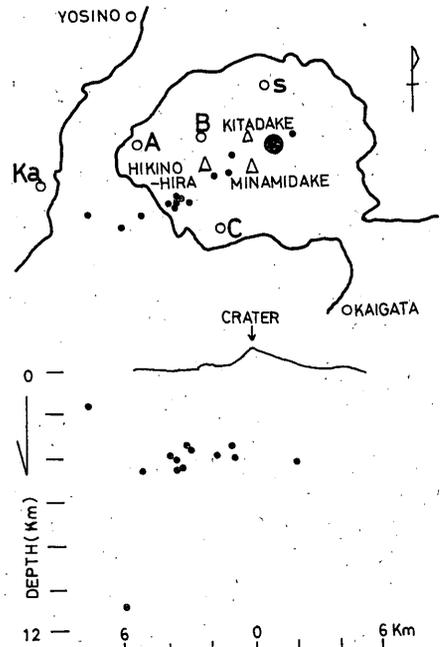


Fig. 10. Distribution of origins for felt A-type earthquakes which occurred on volcano Sakurajima during 1958~1968 (Yosidome, 1970). Big solid circle is origin of the A-type earthquake swarm at May 29 1968.

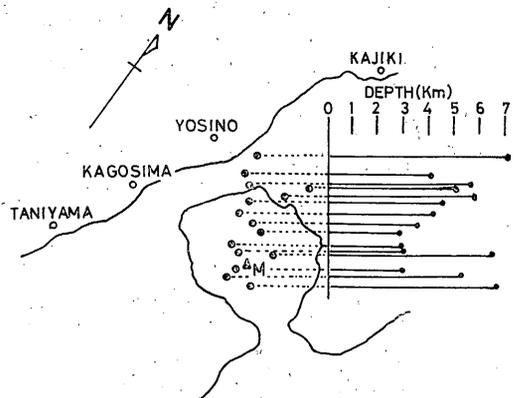


Fig. 11. Distribution of origins for A-type earthquakes which occurred on volcano Sakurajima during Feb. ~ May 1959 (after Y. Yasui et al, 1960). M denotes Minamidake crater.

れる(Fig. 13)。白浜の隆起は第2マグマたまりの充満によるものと考え、第2マグマたまりから第1マグマたまりへのマグマの移動に時間を要するために、白浜

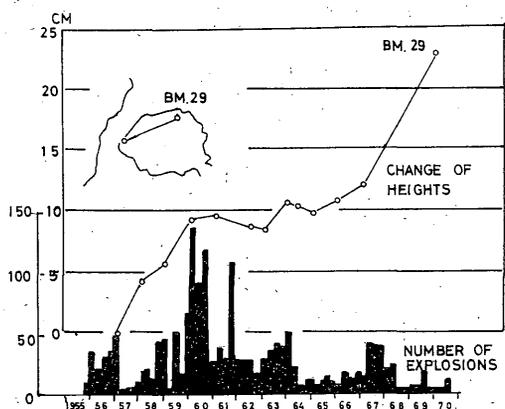


Fig. 12. Relation among the changes in elevation of B. M. 29 and three monthly total number of volcanic explosions at Minamidake crater (after T. Eto, 1971).

の隆起と火山の表面活動とに時間的なおくれを生ずると考えると、Fig. 12 はわかりやすい。

なおこれに関連し吉留(1970)は、鹿児島、油津両検潮所の月平均潮位差から、鹿児島の地殻変動を取り出す方法を用い、1953年、1957年、1966年にそれぞれ鹿児島の地殻が上昇しているのを見出した。これらは第2マグマたまりへのマグマの充満と関連するもので、いずれも2~3年後の火山活動を示唆する傾向を示した。

§ 9. 地震記録の振幅減少度と火山活動の関係

桜島の北東方面に震源を持つ地震の桜島A・B・C点の地震記録をみると、C点はA・B点に比べ極端に小さい。A・B点への震波線が第2マグマたまりを通過する距離は、場合によっては、C点到達する震波線が第1マグマたまりを通過する距離よりも長いことがある。しかしその場合でも、C点の方がはるかに記録は小さい。これはC点が第1マグマたまりのほぼ南西外縁にあり、北東方からくる震波線がマグマたまりにより、シャ閉されているためであると考えられる。これに対し、A点の記録が大きいのは、第2マグマたまりの外縁からある程度離れており、シャ閉が十分でないことが大きく原因していると思われる。

ただC点におけるこのような振幅減少は必ずしも一樣でなく、火山活動とある種の関係があるように見える。Table 4はTable 3で示した地震について、C点の振幅減少度合を分類したものである。第1群は減少度合の大きいもの、第2群は減少度合の小さいものである。

Table 4. Classification of decrease in amplitude on seismograms observed at point C. Earthq. No. is same as shown in Table 2.

Group	Earthq. No.	Classification of decrease for amplitude
1	1	Large
	3	
	4	
2	6	Small
	7	
	9	

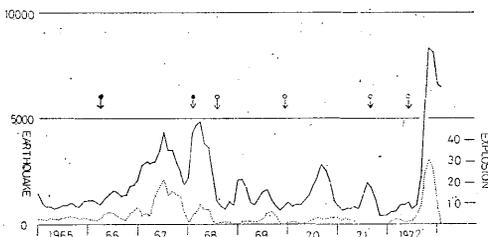


Fig. 13. Seismic activity originating from volcano Sakurajima and its explosive eruption. Solid line is number of volcanic earthquakes (running average for three months).

Dotted line is that of volcanic explosion. Arrows indicate earthquakes shown in Table 4. Closed circles indicate the earthquakes of Group 1 in Table 4 and open circles indicate Group 2.

Fig. 13 には地震回数、爆発回数の推移とともに、Table 4 の地震の発生を矢印で示した。

この中で第1群は地震活動、爆発活動の盛んな時にあり、第2群はそれらの活動が低調なときに起こっている。桜島の活動は第1マグマたまりにマグマが補給されると、地震活動、ならびに噴火活動が盛んとなり、マグマを噴石、火山灰等の形で噴出し終えると、平静となるというパターンをくり返しているが、マグマの補給時点で第1群があり、噴出終了後に第2群があることは興味深い。

§ 10. 振幅の減衰状態からみたマグマたまりの探知

1968年5月29日、桜島で有感A型地震が群発したので、気象庁機動観測班が出動し、震源が求められた(金沢、柏原1971)。この地震について、白浜(S)、霧島(ki)のデータを、Table 5に示す。両者とも地震計はJMA 62型で、地震計特性は同じである。これらの地震

Table 5. Earthquakes occurring in the east part of Sakurajima, June~July, 1968.

Earthq. No.	Time					Max. Amp. ( $\mu$ )		Epicentral distance (km)	
	Y	M	D	h	m	$M_s$	$M_{ki}$	$\Delta_s$	$\Delta_{ki}$
1	1968	Jun.	23	21	59	5.3	0.04	6.1	39.3
2	//	//	25	17	42	19.5	0.14	6.6	39.1
3	//	Jul.	2	15	30	5.3	0.04	5.1	39.2
4	//	//	6	12	20	21.0)	0.42	4.3	38.5

の震央距離を比較すると、霧島は白浜の5.9~9.0倍に位置するが、最大振幅をみると、白浜は霧島の130~140倍である。

一方、これらの地震の群発当時における震源は、Fig. 10に大きな黒丸で示されているが、このうち、鹿児島(k<sub>a</sub>)でも記録された地震の最大振幅を、霧島(k<sub>i</sub>)と比較した結果は、次のとおりである。

May	29	03h09m	$M_{ka}$	12 $\mu$	$M_{ki}$	1.2 $\mu$
		04 25		6		0.9
		06 36		12		2.2
June	1	07 53		7		0.8
	2	23 44		8		1.3
		平均振幅		8.5		1.3
		振幅比		6.8		1.0

震央距離は、霧島で39.5 km、鹿児島で11.3 kmとなっている。これらの結果から、鹿児島の振幅の減小状態はきわめて大きく、一般的な地震波の減衰を、表面波または実体波として計算しても説明できない。その理由として、これらの地震の震源が第1マグマたまりの北東外縁にあり、鹿児島へ向かう震波線が第1マグマたまりにしゃ閉されることがあげられる。これは、9章で述べたC点の振幅が著しく減小するのと似た関係にある。鹿児島の地震計特性は、Table 1に示すように霧島、白浜とは違うので、厳密な追究はできないが、振幅減少の事実是否定できない大きな差異を示している。

次にTable 5の4個の地震について、白浜(S)に到達する地震波を正常とみなすと、A, B, C点の振幅は、Photo. 4に示すようにいずれも小さく、Fig. 14に示したように、これら4個の地震波が第1マグマたまりを通過したことにより振幅が減少したことを示すものと思われる。白浜の記録は、きれいなA型地震を示すのに対し、桜島西部にある3点の記録は、相は乱れ、振幅も減小している。白浜できれいなA型を記録するのは、①観測点の地盤がよい ②通過地層が安定している ③マ

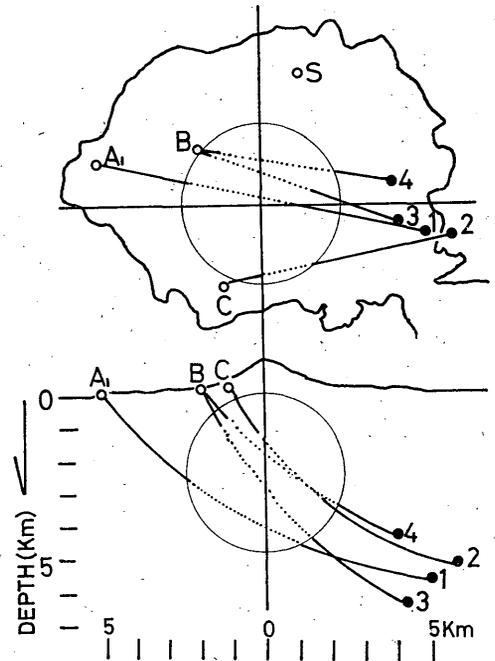


Fig. 14. Sketch of seismic rays of which passed through the No. 1 magma reservoir. Numerals in the plot show the earthquake number which is given in Table 5.

グマたまり等の障害をうけないなどの条件が揃っているためであろう。しかし、①、②については、桜島の東部と西部に大差は考えられないので、③のマグマたまりが大きく影響していると考えざるを得ない。

#### § 11. マグマたまりを通過する地震波の速度の変化

Table 6は日向灘もしくは四国沖に震源をもち、桜島付近を通り鹿児島で観測された地震データの比較である。これらの地震の震央分布については、Fig. 15に示す。Table 6において、(1)または(2)欄の上段は、地震月報により鹿児島のPもしくはS到達時間( $T_p$ もしくは $T_s$ )

Table 6. Near Earthquakes whose seismic waves passed through near Sakurajima.  
*E*: Epicentral distance, *H*: Depth of earthquake,  $T_p-T_0$ ,  $T_s-T_0$ : Arrival time of *P* or *S* wave,  $\bar{v}_p$ ,  $\bar{v}_s$ : Mean velocity of *P* or *S* wave.

- (1)(2) Upper: Observed  
 Lower: Calculated  
 (3): Difference in observed and the standard velocities.  
 (4) 1: Seismic waves passed through the magma reservoir.  
 2: Seismic waves did not pass through the magma reservoir.

Earthq. No.	Time					<i>E</i> (km)	<i>H</i> (km)	(1)		(2)		$T_s-T_0$ (sec)	(3)		(4) Case
	Y	M	D	h	m			$T_p-T_0$ (sec)	$\bar{v}_p$ (km/sec)	$\Delta v_p$ (km/sec)	$\bar{v}_s$ (km/sec)		$\Delta v_s$ (km/sec)		
1	1968	May	28	13	06	197	0	36.1 33.5	5.46 5.88	-0.42	61.0 58.6	3.23 3.36	-0.13	1	
2	1968	Jul.	16	22	09	126	0	24.0 23.7	5.25 5.31	-0.06	42.9 39.8	2.93 3.16	-0.23	1	
3	1969	Jun.	20	12	09	136	0	25.7 25.1	5.28 5.42	-0.14	44.7 42.4	3.04 3.21	-0.17	1	
4	1969	Jul.	28	22	03	225	80	34.1 34.0	6.61 6.63	-0.02	56.6 56.2	3.99 4.01	-0.02	2	

と Origin Time ( $T_0$ ) から求めた到達所要時間ならびに平均速度である。同欄の下段は、近地地震の *P*, *S* 走

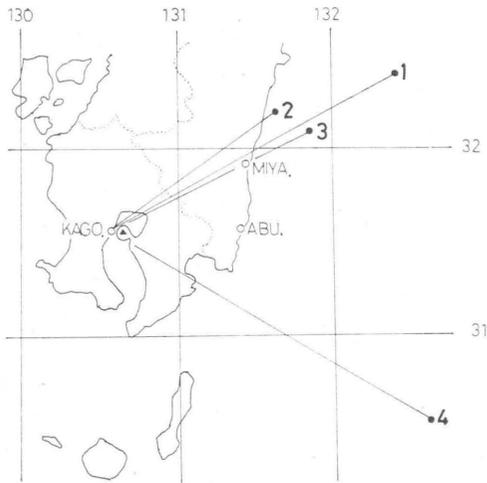


Fig. 15. Distribution of epicenters and seismic rays which passed through near Sakurajima and arrived at Kagoshima Local Meteorological Observatory. Earthquake Nos. are same as used in Table 6.

時表 (気象庁1971) から求めた値で、標準値とみなせる。 $\Delta v_p$ ,  $\Delta v_s$  は(2)欄の上段から下段を減じた差である。ここで Case 1 は桜島北方鹿児島湾下の第2 マグマたま

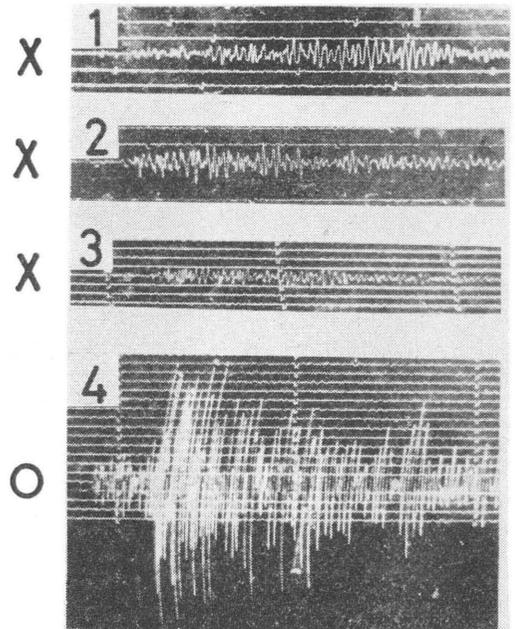


Photo. 5. Records of seismograms, obtained at Kagoshima Local Meteorological Observatory. Epicentre: Hyūga-nada or south off Sikoku. Numbers 1~4 are the same ones shown in Fig. 15 and Table 6.

Marks ○ and × are same as used in Photo. 1

りを通過した場合であり、Case 2 はマグマたまりに作用されない場合を示す。Case 1 は、Photo. 5 において地震記録が異常を示し、Case 2 は正常を示す。また Case 1 は Case 2 に比べ、 $\Delta v_p$ 、 $\Delta v_s$  が大きな負偏差を示す。このことはマグマたまりの影響によるものかも知れない。

## § 12. 結 語

桜島周辺で発生した地震が桜島で記録される場合、ときとして異常を示すことに着眼し、震波線経路から桜島火山のマグマたまりの探知を試みた。そのために桜島周辺で発生する地震の震源決定を独自に行ない、また震波線の深さを求めるために、震波線ノモグラムを作成した。地震記録により震波線を正常と異常に分類し、経路別にふるいわけ、マグマたまりの位置を決定した。

その結果、第1 マグマたまりとして南岳火口直下、海面下 2.5 km に中心をもつ半径 2.5 km の球体を、第2 マグマたまりとして桜島北岸の白浜の沖合 3 km (大崎鼻東方 5 km) の海面下 9.5 km に中心をもつ半径 4 km の球体を想定できた。

次に桜島周辺の地震波の減衰状態からみて、桜島東部で発生し、第1 マグマたまりを通過する地震波は、著しく振幅が減少することをあげ、第1 マグマたまりの存在について別の裏付けとした。また日向灘から第2 マグマたまりを通り、鹿児島へ到達する地震波の平均速度は、標準速度に比べ小さいことがわかった。

終わりに当たり、本稿に対し助言ならびに校閲をいた

だいた気象研究所田中康裕博士、気象庁地震課清野政明専門官、震波線ノモグラムについて教示をいただいた同庁地震課久本壮一主任技術専門官に対し、厚く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 江頭庸夫 (1971): 火山性地殻変動 (V), 京都大学防災研究所年報 第14号A, 97~106.
- 久本壮一 (1965): 東日本にあらわれる S 波の著しい異常走時について (第2報), 地震 18 195~203.
- 柿沼克伊 (1972): 私信
- 金沢茂夫, 柏原静雄 (1971): 桜島調査報告, 気象庁技術報告 75 131~137.
- 勝又 護 (1970): 日本列島およびその周辺におけるサイスミシティとそれに関する諸問, 題験震時報 35 75~142.
- 気象庁 (1971): 近地地震の P 走時表・S の走時表, 地震観測指針 (解析編) 85~87.
- 茂木清夫 (1957): 桜島の噴火と周辺の地殻変動との関係, 火山 2 集 1 9~18.
- Omori, F (1916): The Sakurajima eruptions and earthquakes, II. Bull. Imp. Earthq. Inv. Com. 8 No. 2 35~79.
- 下大嶋輔 (1961): マントル上層部の温度分布と magma pocket の存在性について, 地震 Ser. 2, 14, 227~242.
- 竹内 均 (1970): "統・地球の科学", NHK ブックス 東京
- 田中康裕 (1971): Magma reservoir を通る地震波について, 験震時報 36, 29~43.
- 山川宣男 (1955): 内部力源による半無限弾性体の変形について (第1報), 地震 Ser. 2, 8, 84~98.
- 安井豊, 東谷幸男, 野田義男, 利光貞夫 (1960): 昭和30年10月13日以降の桜島火山爆発と A 型地震の関係について, 験震時報 25, 25~28.
- 吉留道哉 (1970): 桜島における有感 A 型地震と弱線形成について, 験震時報 35, 65~72.