

噴火前後の火山性地震の性質

和田卓彦・加茂幸介・小野博尉・須藤靖明

THE NATURE OF VOLCANIC EARTHQUAKE OBSERVED BEFORE AND AFTER AN ERUPTION

By *Tatsuhiko WADA, Kôsukey KAMO, Hiroyasu ONO*
and *Yasuaki SUDO*

Synopsis

During the recent active period of the Volcano Aso, of which the main eruption happened on October 31, 1965, the precise seismometric net was set around the crater and the observation of a swarm of volcanic earthquakes was carried out. The foci are found in a small area near the crater and the fact suggests these earthquakes correlating immediately with the volcanic activity. Therefore the variation of the area occupied by the foci with the increasing or decreasing of the activity is examined to find a clue to the problem of forecasting the volcanic eruption. On the other hand, the source mechanism of volcanic earthquake is discussed by examining the sign (push or pull) of the initial phase of each earthquake. The main results obtained are as follows: (1) The foci are concentrated in a small region northeastwards the crater before the main eruption and are gradually scattered in wider region and transferred somewhat southwards the crater after the main eruption and in the later stage. The depths are found between 500 and 1,000 meters. (2) On the main eruption, the fragments of rocks or lava are thrown into the southwestern parts from the crater pit, and the other hand, the region occupied by the foci of the volcanic earthquakes is located in the northeastern part from the crater pit. This relation enables us to imagine that the region occupied by the foci could be the uppermost magma reservoir or the store-room of volcanic energy. (3) The foci of the earthquakes occurred immediately before the main eruption occupy the volume surrounded by $500 \times 500 \times 500$ meters and then the strain energy which can be stored in the volume is amounted to 10^{18} ergs. On the other hand, the eruption energy estimated from the mass of the ejected materials and the maximum distance from the crater pit to the place where a ejected fragment is found, is amounted to 10^{18} ergs. The coincidence of the both values gives us a clue to forecast the degree of eruption. (4) The existence of characteristic earthquake of rarefaction type, that is, all first phases around the epicenter are indicated by "pull", is found and these earthquakes are frequently found in the earlier stage or before the main eruption but scarcely in the later stage or after the main eruption. The fact infers that the eruption of volcano is not simply explosive type.

1. 緒 言

阿蘇火山は昭和初期の大活動期の後、中岳第一火口だけがその活動を継続してきているが、ここ数年來は殆ど顕著な活動を示していなかった。昭和40年に入ると、火山性微動や地盤変動にも、また火口底の観察からも、活動の徴候が認められるようになり、その年の夏頃から赤熱状態が火口底に認められ、時々火口附近での火山性地震が記録されるようになってきた。そこで観測網を火口周辺に順次整備し、機材の補充点検を続けていたが、10月23日には直径数米程度の小さい口を火口底に開けたので、直ちに観測にとりかかった。そのため、10月31日未明の大爆発の前後の状態をかなり精しく調べることが可能になった。これまでは爆発後しばらくしてからの観測が殆どであり、この意味で爆発前の記録もしくは爆発直後の記録は、貴重なものといえる。この時のことは別に述べたことも^{1), 2)}あるので、ここでは、特に噴火予知に直接役立つと思われるものに限定し、しかもそれらは従来、既にある程度の実績を示した、例えば火山性微動の発生状況、地盤変動の特徴といったものとは別のものを述べることにする。しかしそうした既知のものも火山活動の一つの測度としては参考にするつもりである。具体的に言えば、火山性地震の seismicity と発震機構の問題をとり上げることにする。実際に観測もそういう問題意識のもとで続けてきたものである。阿蘇火山の場合、幸いなことに佐々³⁾ (1936) によって、昭和7～8年の活動の時の研究が行なわれていて、この問題の端緒を開いている。それによると、

(1) 噴火活動の上昇期、最盛期および老衰期の3期について、震源の分布を見ると、最初はある地域に集中しているが、後になる程拡散していく傾向がある。

(2) 初動の“押し”“引き”を調べてみると、(1)と同じ3期について、最初は“押し”が“引き”の1/2、ついで同数、最後に“押し”が“引き”の2倍になる傾向がみとめられる。但しこの場合は1ヶ所の観測によって得た結果であるため、それ以上のことは分らなかった。しかし発震機構が変るのではないかという期待は当然生れていた。

(2) の場合には、唯単なる震源の移動による見掛け上のものかも知れないので、ぜひとも多点の観測が必要である。この意味から、必ずしも十分とは言えないが、今回の観測はこの種の問題を探る一つの機会と言ってよい。

2. 観測のシステムと震源のきめ方

前節で述べた目的に適するように、観測網は火口を取巻いて配置したが、観測すべき地震の大きさを考えて、初動が読み易いことを第一として、適当な空間的配置を考えた。そのため、時間精度の要求はかなり厳しく、後述するような方法でその保持に努めるようにした。ベースは簡単ではあるがコンクリートで作り、lava sheet を出来るだけ探した。記録はすべて地震計から有線で本堂観測室に結び、そこで記録することにした。使用した地震計の主な性能は Table 1 に、観測点の位置は Fig. 1 にそれぞれ示したが、上下動地震計はすべての観測点に配置し、水平動2台づつを本堂と火口東に追加してそれぞれ三成分の記録が得られるようにしてある。記録は通常は煤書きガルバーによったが、好条件下ではendless tape recorderを仲介にして、電磁オシロ又は tape recorder に記録し 1/1000 秒程度の時間精度に耐えられるように努めた。

解析については、特に記すべきものはないが、火山性地震特有の“立上り”の鈍いものが多いことから、できうる限り明確なものだけに限って解析したので、例えば震源の求められるようなものは全体の数%程度であった。震源の決定法は、初動から作図で求める方法であるが、構造は uniform なものを考え try and error でP波速度を幾つか選び、震源の位置の error (作図上の体積) ができうる限り少くなり、かつすべての地震について、もっとも適当なものになる様選んだ。その結果 2 km/sec が得られたが、この値をどちらへづらしても、error は急に増すこと、また他の結果⁴⁾ [Wada, T. and K. Kamo (1964)] ともよく一致しているので、第一近似としては妥当な値と考えられる。

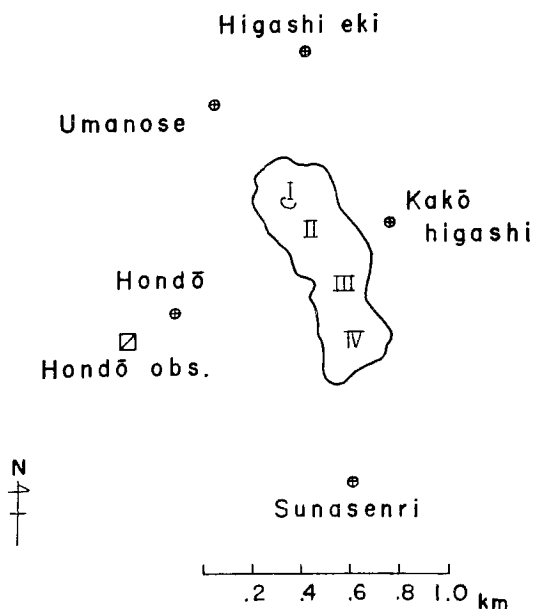


Fig. 1 Seismograph stations around the crater.

Table 1 Instrumental description.

Station	Symbols	Type of instrument	Galvanometer*	Operated term
Hondō	1	PK-110, 3-comp. moving coil type $T_0=1$ sec., $h_0=1$	$T_0=0.3$ sec. $h_0=1$	Apr., 1, '65 Mar., 31, '66
Umanose	2	ditto. only vertical	ditto.	Nov., 20, '65 Mar., 31, '66
Higashieki	3	ditto.	ditto.	ditto.
Kakōhigashi	4	ditto. 3-comp.	ditto.	ditto.
Sunasenri	5	ditto. only vertical	ditto.	Apr., 1, '65 Mar., 31, '66

* recorded on smoked paper

3. Seismicity と火山活動

佐々の指摘した第一の問題⁹⁾、即ち震源の分布の変化を調べるために、今回の活動を次のような三つの時期に分けておく。これは佐々の分類に従ったわけであるが、第1期から第3期までとしてここでは表現しておくことにする。

i) 第1期とは、火山活動の上昇期とみられる時期で、火口附近地盤の隆起、火山性微動の増加等で特徴付けられ、火口底の加熱状態の認められることが多い。

ii) 第2期とは、火山活動の最盛時とみられる時期で、火口附近地盤の隆起が極大になりそれが保持さ

れ、噴火活動の著しい時期である。

iii) 第3期とは、火山活動の衰退期とみられる時期で、火口附近の地盤の沈下が始まり、微動もまたその盛期を過ぎて著しく減少し、火口内もほぼ静穏な時期である。

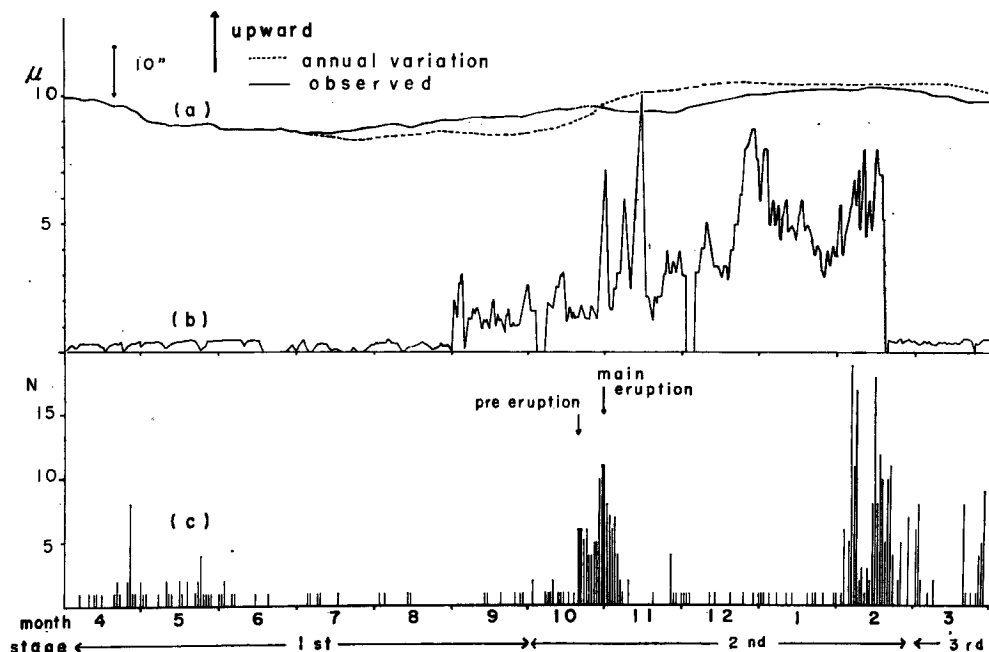


Fig. 2 (a) Variation of the ground tilt at Sunasenri.
(b) Mean amplitude of the 1st kind volcanic microtremors at Sunasenri.
(c) Daily total number of volcanic earthquakes.

Table 2 Summary of volcanic activity.

Stage	Time	Visible phenomena at the crater	Tilt motion at the crater area
1 st	Apr., 6 Sep., 30	hot water lake, dry and heated.	uplift
2 nd	Oct., 1 Feb., 28	a small pit opening on Oct. 23. a great eruption on Oct. 31, following with many Strombolian type eruptions.	reached max. uplift, holding equilibrium and beginning subsidence.
3 rd	Mar., 1	crater-bottom covered with ash	subsidence

このような状態は Fig. 2 の傾斜計および地震計からの結果と、活動状態を示した Table 2 から求められる。各期間の切れ目は難しい問題であり、その限界を心得て、かなり便宜的なものと考えておくべきであろう。

このような時期で一応火山活動の大まかな目安を付けておいて、火山性地震の震源分布を見るのだが、第1期は観測が必ずしも十分でないので、第2期の最初の頃と第2期の後期から第3期についてのものとを

Fig. 3 の (a) (b) に示した。これによると10月31日の噴火の直前には、震源は第一火口東北部に局在している。その後は、相当分散して分布するようになっている。深さについては殆どのが500~1000 m の範囲に入っている。この結果は佐々の結果を確めているものといつてよい。噴火の直前の震源は噴火予知の問題から特に興味があるが、Fig. 3 (a) は実は噴火直前の2日間の記録から得られたもので、その位置は噴火の時に放出された放出物の散乱している地域と強い相関を示す。噴出物の分布を調査した結果は Fig. 4 に示したような状態であつて、それは第一火口の西南に強い方向性を示している。

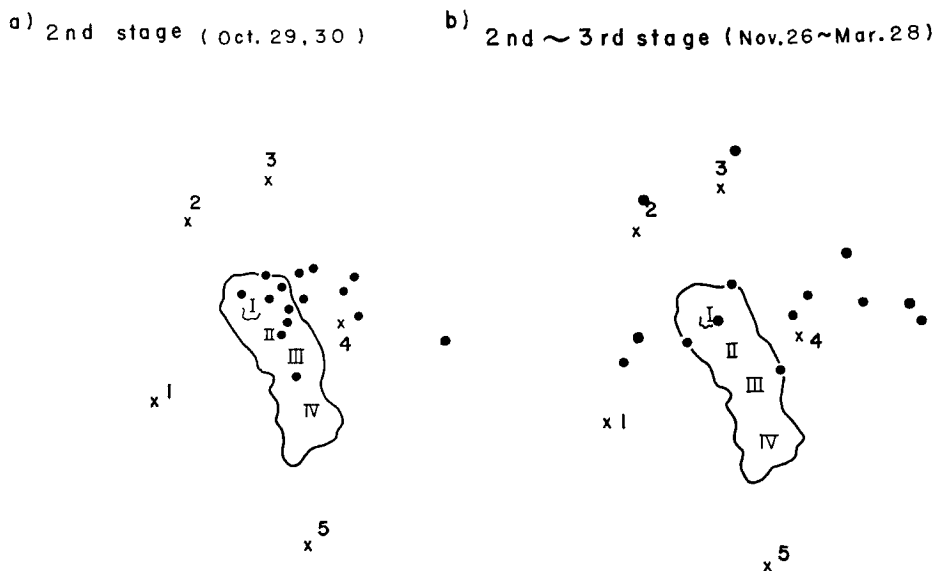


Fig. 3 Distribution of epicenters of volcanic earthquakes.

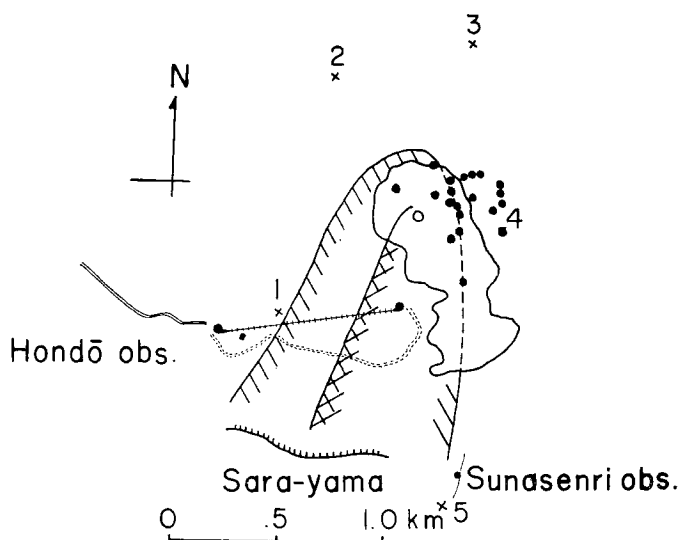


Fig. 4 Distribution of the ejecta erupted on Oct. 31, 1965 and the epicenters of volcanic earthquakes occurred immediately before the eruption.



Photo. 1 Night view of Strombolian type eruption at the Volcano Aso, on Nov. 28, 1965.

この方向は Fig. 3 (a) の震源分布の火口からみて、丁度正反対の向きで、丁度噴火の時の圧力源が震源域にあって、火口底の開口箇所を大砲の砲口に見たてたように、噴火したと考えられる。実際に Photo. 1 に例示したように、その後続いた Strombolian type の噴火の際にも、赤熱した溶岩片は、西南方向へ飛んでいる。このことは、噴火前の地震群の震源を調べておけば、噴火の際の被害をおよぼす方向の推定が可能になるということを示し、火山災害予知の上で一つの方向を与えるものといえる。このような噴火前の震源域が噴火のエネルギー源らしいという考えは、エネルギーそのものから調べてみることも考えられる。それには地震学の方から確められている（例えば坪井⁹⁾）考えを適用するの一つの方法である。震源域は、その体積内に構成岩石の破壊強度直前まで歪エネルギーを貯えられるとすると、震源域の体積 V 、構成岩石の弾性常数 μ 、破壊強度 α とすると、エネルギー E は

$$E = \frac{1}{2} \mu \alpha^2 V$$

で与えられる。 V は Fig. 5 に示したように $500 \times 500 \times 500$ m 程度、 μ は $5 \times 10^{11} \sim 10$ (C. G. S) 程度、 α は $1 \sim 2 \times 10^{-4}$ (C. G. S)

程度とみてよい。したがって $E \approx 10^{18}$ ergs である。

噴火の際放出された量 M は調査の結果⁷⁾、約 10^5 ton、放出物の最も遠く飛ばされた距離 S は約 1200 m で、その初速度 v を求められるから、エネルギー E は $E = \frac{1}{2} M v^2$ から約 10^{18} ergs が得られる。つまり確かにその order は一致している。このような考え方はこの一例のみでは尚十分ではない。しかし例えば昭和 7～8 年頃の大活動期に佐々の調べた震源域は今回のものより遙かに大きく、それからエネルギーを推測すると、 $10^2 \sim 10^3$ 倍位大きいことになる。実際にこの頃の噴出物なり観察記録から今回に較べて桁外れに大きい活動であったことは疑う余地がない。少なくともこの考えは今後検討する値打ちがありそうである。この考えは噴火予知の問題にとって、極めて重要な方法を暗示している。噴火予知の現況では、その時間をきめることに力を尽してきたし、実際それが最大の問題であることは疑いない。しかし相当の難問であり、早急に解決しそうには思われない。そうなると次善の策として、もし噴火が発生すればどの程度のものかを予測することが望ましい。この意味で震源の分布体積から、それが求められるならば、かなり見透しは明いことになる。

4. 発 震 機 構

昭和 7～8 年の観測によると、火山性地震の初動の“押し”“引き”の頻度が、火山の活動期によって変わることが見付けられているので、そのことを調べてみるため、5つの観測点で得られた初動の分布を期間別に並べたのが Table 3 である。この表では、“押し”の数と“引き”の数との比で示してあるが、砂千里

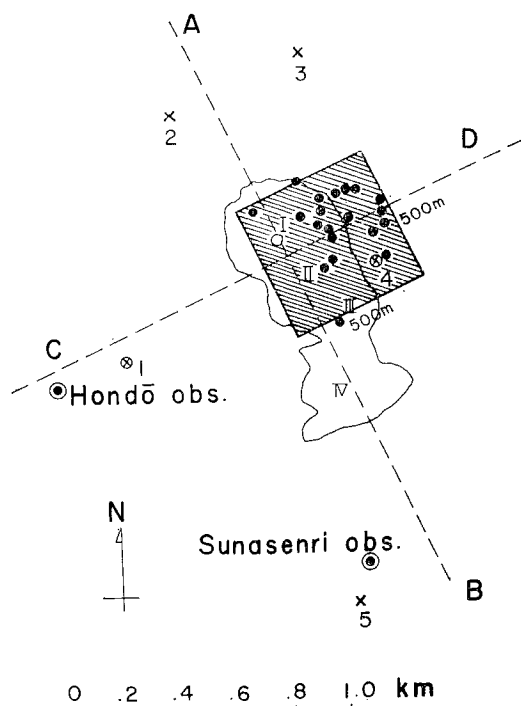


Fig. 5 The shadow zone shows approximately the area occupied by the epicenters before the eruption and their depths are 500~1000 m.

を一まづ考えないとすると、第1期で1/2、第2期では1、第3期では2と考えてよい、これも佐々の結果とよく合っている。

Table 3 Number of push / number of pull.

Stage	Hondō	Umanose	Higashieki	Kakōhigashi	Sunasenri
1 st	$\approx 1/2$				≈ 1
2 nd	≈ 1	≈ 1	≈ 1	≈ 1	≈ 1
3 rd	≈ 3	≈ 1	≈ 2	$\approx 1/3$	$\approx 1/2$

勿論期間の切れ目、地震の数の少ないことから定量的にはやや確かさを欠くが、定性的に、「初期に“引き”の地震が多く、ついで殆ど“引き”“押し”が同数となり、やがて“押し”が多くなる」ことは間違いなさそうである。ところでこの傾向はいづれにしても火山活動と関連しているのであるが、発震機構そのものの変化によるものか、震源の移動による見掛け上のものかを調べる必要がある。そこで、震央と“押し”“引き”が全部分ったものを幾つか取り出してみると、Fig. 6 の各図のようになる。

1) Fig. 6 (a), (b) この図からの地震は完全に観測網内で起っていて、全部“引き”で始まっている。この型の地震は多少不明瞭な記録をも利用すると、第1期から第2期の初めにかけて、多く認められる。第2期の後半や第3期頃には殆ど認められない。

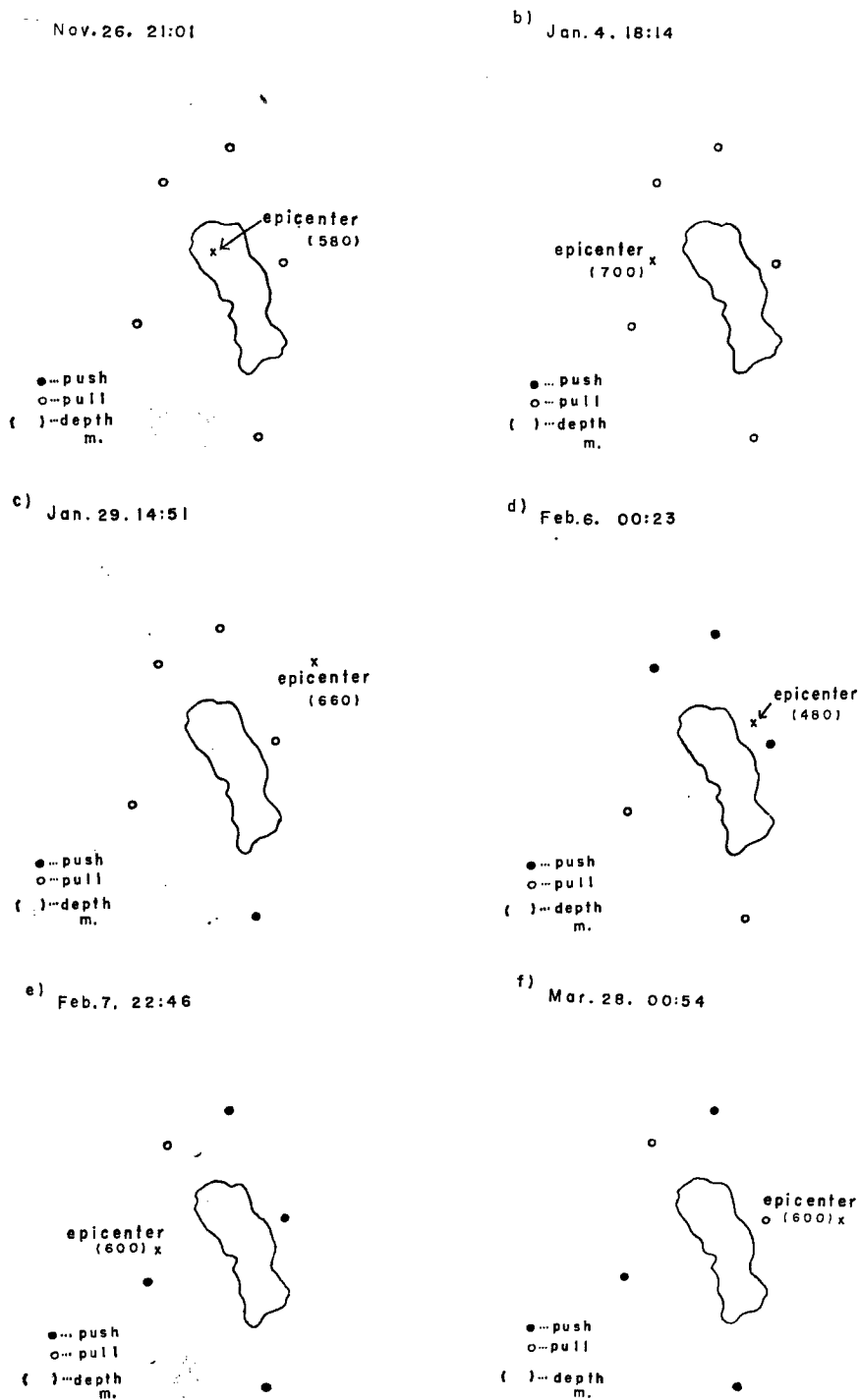


Fig. 6 Sense of the first motion of volcanic earthquakes.

2) Fig. 6 (c), の例のように砂千里だけは「押し」で、他は「引き」である場合が幾つかある。このように砂千里のみ逆位相になる場合はかなり多い。これは砂千里の観測点が少し条件が悪いことからくる誤認もあるだろうが、砂千里と第一火口との間にどこか nodal line が通るものと考えた方が本当であろう。この理由のために Table 3 の砂千里を除外して考えたのである。

3) Fig. 6 (d), (e), (f) のような一般的で最も多い型のものは、震央が、観測網の端や外に出ることが多いので、これ以上何も言うわけにはいかないが、噴火とか爆発というイメージから想像する explosive もしくは compression 型はまづ殆ど認められないことは確かで、何らか tectonic な構造を持っているといえてよい。

要するに、佐々の与えた初動の特徴は確かに認められ、それは本質的に発震機構の変化を示すと考えてよい。また rarefaction type の地震が認められ、その存在が、この初動の分布の特徴に重要な影響を与えている。ともかくこの rarefaction type の地震が存在し、それが前期程多いということは、火口上部で「引き」の型になるストレス分布を考えなければならない。Rittmann⁹⁾ の提唱しているように、圧力低下によるマグマの融解により火山活動が起るという説と関連しているのかも知れない。

また地盤変動についての火口域隆起—極大保持—沈降という佐々のパターンとも関連して考えてみる必要もある。一方災害科学の観点から考えると、その理由はともあれ、rarefaction type の地震が認められる時は危険が近いということが一つの指標とみられる。

5. 結 語

昭和40年10月31日の噴火の際に観測した火山性地震の震源分布とその発震機構について調べたところ、次の主な結果を得た。

(1) 震源は現在の活動の中心とみられる第1火口の東北にあり、直接火山活動と関係しているものと考えられるが、その分布の仕方は噴火の前の頃は比較的密集して発生しておりやがて、幾らか南西の方により拡散してくる。

(2) 特に噴火直前の地震群が局在しているその位置は、恰も圧力の中心のような位置を占め、そこと開口箇所を結ぶ線に噴出物を放出したと考えられる。その上地震群の震源の占める体積は、そこに収め得る歪エネルギーが約 10^{18} ergs 程度で、この値は放出物の観察から推定した噴火のエネルギーと同程度であることがわかった。

(3) 火山性地震の初動の「押し」「引き」の分布は火山活動によって変化する。即ち、第1期と第2期の初期、要するに噴火の前の頃は「引き」の割合が「押し」の割合の倍程あり、噴火の最盛期は殆ど同数、その後は逆に「押し」の割合が「引き」の割合の倍になる。

(4) rarefaction type の地震が確かに認められる。この型のものは、(3)で述べた「引き」の頻度の高い頃によく認められるが、後期には認められず、(3)の原因の少くとも一つの主なものと考えられる。

以上の結果は佐々の昭和初期の結果とよく合っている。これらの物理学的内容を考えるのは別の機会にゆずるとして、噴火予知の立場からみると、「噴火前の火山性地震をできうるかぎり精密に測定し、その震源を決定することが重要であって、それにより噴火の規模とその方向性を予め推定する資料が得られる。また同時に「押し」、「引き」の分布を調べ「引き」の頻度の多い時には注意を要する」ということになる。

この研究に際しては、最初からすべての点について御指導下さった京都大学名誉教授佐々憲三先生に厚くお礼申し上げる。また観測には阿蘇火山研究施設の江藤技官、外輝明氏、山田年広氏の協力をお願いした。感謝の意を表する。この研究は文部省科学研究費によって行なわれたものであることを附記する。

参 考 文 献

- 1) 和田卓彦, 加茂幸介, 小野博尉: 阿蘇火山中岳1965年10月噴火概報 (I) (II); 1966年日本火山学会春季講演会で発表。

- 2) 和田卓彦, 須藤靖明: 阿蘇火山の火山性地震の発震機構; 火山, 12, 1967, 61~69.
- 3) Sassa, K.: Micro-seismometric study on eruptions of the Volcano Aso; Mem. Fac. Science, Kyoto Imp. Univ., Series A, 19, 1936, 11~56.
- 4) Wada, T. and K. Kamo: A simplified model of upper crust from seismic wave velocities at Volcano Aso; Special Contributions, Geophysical Inst., Kyoto Univ., No. 4, 1964, 81~104.
- 5) 3) と同じ
- 6) 坪井忠二: 地震のエネルギー・地震体積・余震域面積と地殻の強さ; 地震, 9, 1956, 76~80.
- 7) 福岡管区気象台要報, 第22号, 1967, 1~26.
- 8) Rittmann, A.: Volcano and their activity; John Willey & Sons, New York, 1962.