

桜島火山の火山性微小地震と爆発の研究 (1)

—火山性微小地震の発生様式による爆発の
分類及び溶岩上昇時の爆発について—

西 澤

AN INVESTIGATION ON THE VOLCANIC MICRO-EARTHQUAKE AND THE VOLCANIC EXPLOSION OF SAKURAJIMA VOLCANO (1)

—On the Classification of the Volcanic Explosion
and on the Explosion after the Lava Ascending—

By *Kiyoshi* NISHI

Synopsis

Volcanic explosions at the Minamidake crater of Sakurajima Volcano are classified into six types, according to the mode of the occurrence of the volcanic micro-earthquakes before and after the explosion. The main results are as follows;

- 1) The same type explosions are often repeated. This may be explained that the each type explosion represents the condition of the volcanic vent and the energy supply from the reservoir.
- 2) The type of the large explosions are almost The D IV or the D IV' type.
- 3) After the formation of the lava-lake in the crater, the D I type explosions occur frequently. From the arrival time difference of the seismic wave and the sonic one, the origin of the D I type explosion is seemed to be shallower than that of the other type explosions. This fact is ascertained by the another observation also, that is the observation of the angle of the incidence of the explosion earthquakes. Moreover the process of the occurrence of the D I type explosion is considered.

1. 緒 言

桜島火山の南岳は、1955年10月13日に頂上における爆発を開始し、現在尚活動を続け、その爆発回数は1968年12月末迄に既に1700回をこえた。ところでこれらの爆発をすべて異なったものとも考えることもできるが、一方それぞれの爆発が火山の各活動段階を反映している筈であると考えて爆発をいくつかの種類に分けると言う事も考えられる。そして実際に爆発現象を観察した火山性地震や空気振動の記録を見てみると爆発にはいくつかの種類があることに気づく。分類の方法としては例えば、噴煙の昇り方、噴煙の量、噴煙の色、あるいは噴石の多少等によって分けることもできるが、これらは夜間あるいは悪天候時の爆発には適用できない。従ってなるべくもれなく分類を行なうためには連続観測の行なわれている地震計等の記録によるのがよい。そこでこの研究では、爆発による表面現象によってではなく、爆発前後の火山性微小地震の発生様式によって爆発そのものを分類することにし、次に分類された爆発のいくつかの性質について述べる。さらに、特に溶岩が上昇して火口内に lava-lake が生じた後で発生する爆発の型について述べその爆発の発生機構について考察を加えることにする。

なお、火山の爆発と言っても、研究上の立場から種々の範囲で考えられており統一的な定義はないので、この研究では一応噴石、空振があり微気圧計にも記録されているものを爆発とした。これは防災的な見地からの定義と言えよう。

2. 観測点及びデータ

観測点を Fig. 1 に示した。引の平観測点はルーチンの地震観測が行なわれている中では最も火口に近

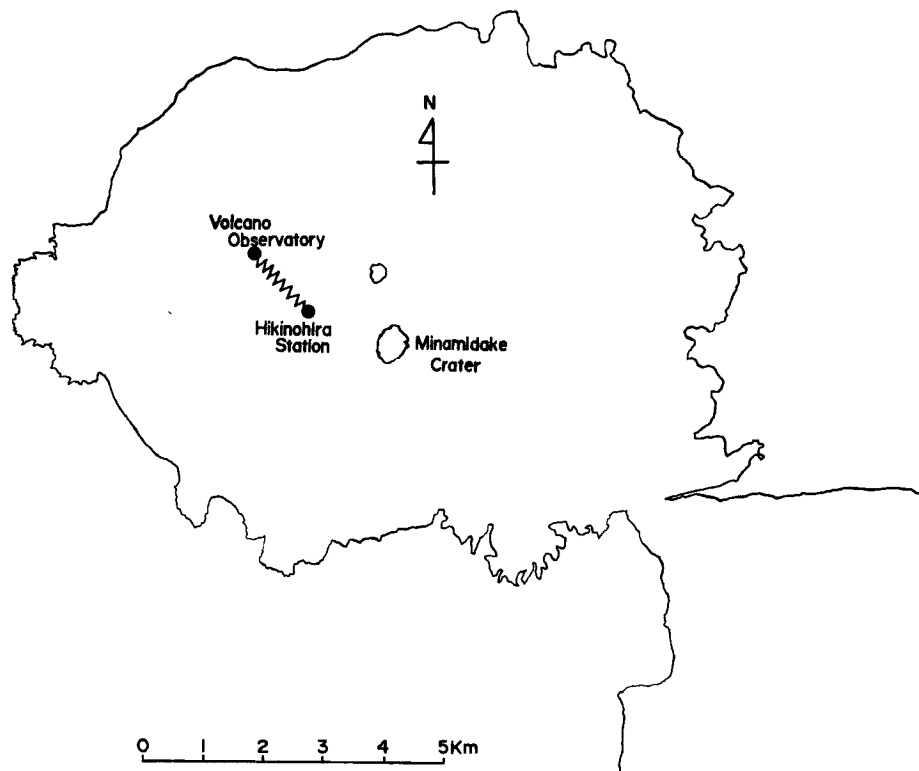


Fig. 1 Location of observation points.

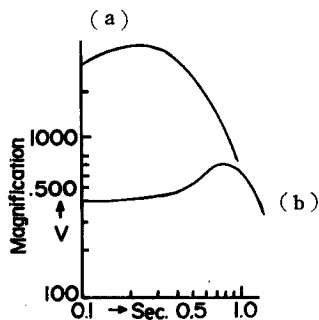


Fig. 2 Frequency characteristics of the seismometers.

- a) SH-II type seismometer.
- b) S-1000 type seismometer.

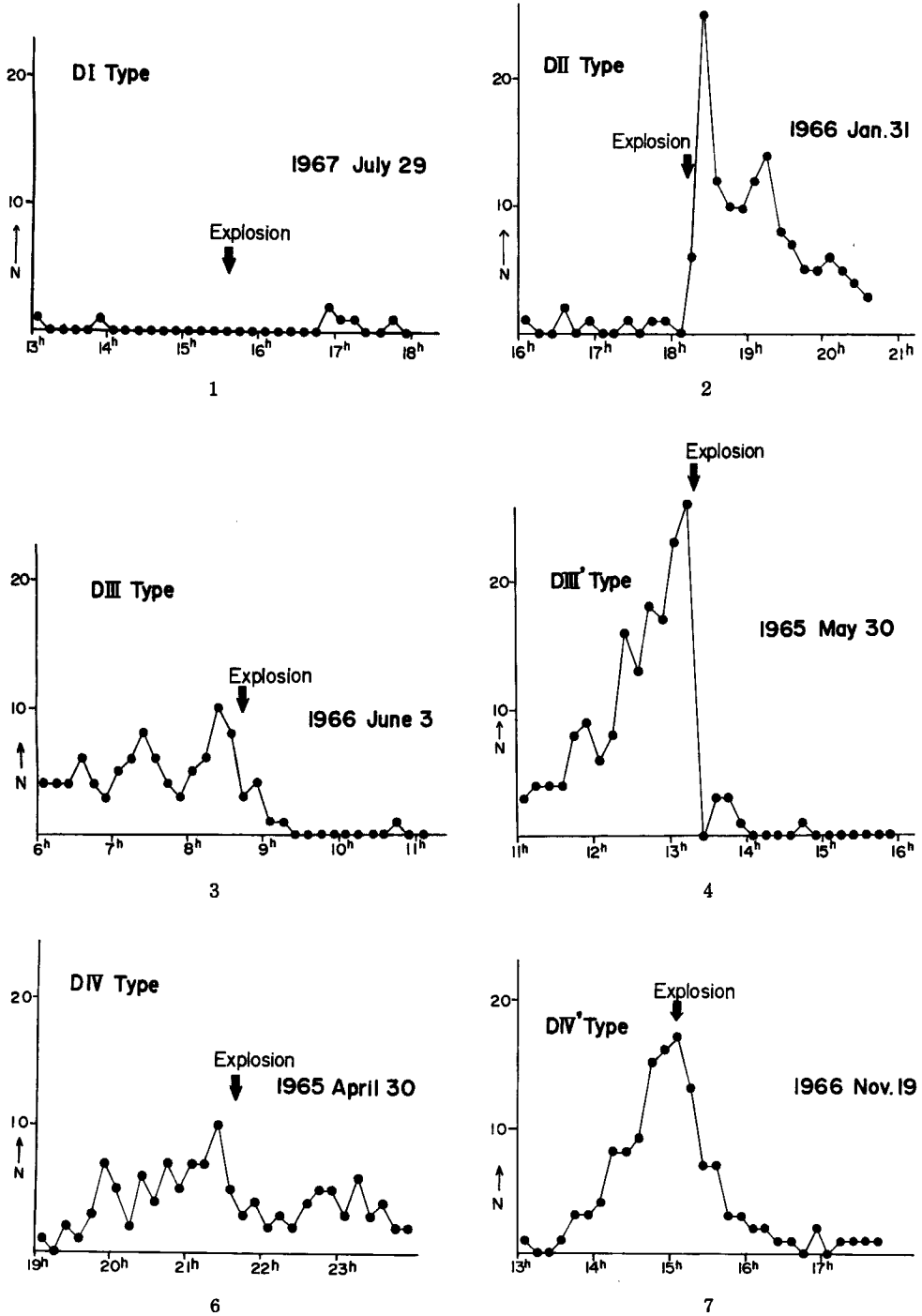


Fig. 3 Typical examples of each explosion types.

く、火口からの直線距離は 1.6 km である¹⁾。この研究の爆発の分類に用いたデータはこの引の平観測点の S H-II 型電子式地震計の上下動成分によって得られたもので、地震計の変位倍率の周波数特性を Fig. 2(a) に示した。爆発地震のパワースペクトル、初動の入射角及び初動と空振波の到着時間差に関しては春田山の観測所の S-1000 型地震計によった。この地震計の特性を Fig. 2(b) に示した。爆発地震の大きさに関しては J. M. A. の火山報告²⁾に載っているものによった。

3. 微小地震の発生様式による爆発の分類

爆発前後の地震の発生状態は多種多様であるが、爆発前後の短い時間に注目するならば、いくつかの種類に類型化することができる。桜島火山の爆発を爆発前後の微小地震の発現状態によって分類することは鹿児島地方気象台によって 1959 年に行われており³⁾、当時の爆発速報に爆発の型が記載されていたが、その後の速報には爆発の型の記載はなく、又実際に爆発を微小地震の発現状態によって分類するには爆発の前後のどのくらいの時間を問題にするかを明確にしないと困難な場合が生じる。そこでこの研究では爆発の前後の約 2 時間程に注目し、その間の火山性微小地震の発生様式すなわち地震の発生の有無及び地震の発生回数の時間的変化によって組織的に次の 6 種類に分類した。なお、爆発前の 2 時間程に特に注目したのは、上に述べたような分類上の容易さの外に、ある種の爆発では爆発の約 2 時間前から地震の発生回数が顕著に増加する場合があります⁴⁾、また一方そのような地震の発生なしに爆発する場合もあり、爆発前の 2 時間程から顕著な対比が見られるからである。

D I 型：爆発の前後 2 時間程に地震の発生がほとんどなかった爆発。

D II 型：爆発の前 2 時間程に地震は発生していなかったが、爆発後地震や連続微動が発生した爆発。

D III 型：爆発の前 2 時間程は地震が発生していたが爆発後地震の発生がなくなった爆発。

D III' 型：D III 型の爆発であるが爆発前の地震発生回数の増加が特に顕著な爆発。

D IV 型：爆発の前後 2 時間に地震が発生している爆発。

D IV' 型：D IV 型の爆発のうち爆発前の地震の発生回数の増加が特に顕著な爆発。

Fig. 3 に各型の爆発の例をあげ、Fig. 4 に各型の微小地震の発生様式を模式的に示した。

なほ、1956 年に鹿児島地方気象台によって行なわれた分類との対応は厳密にはつけ難いがおよそ次のようになる。

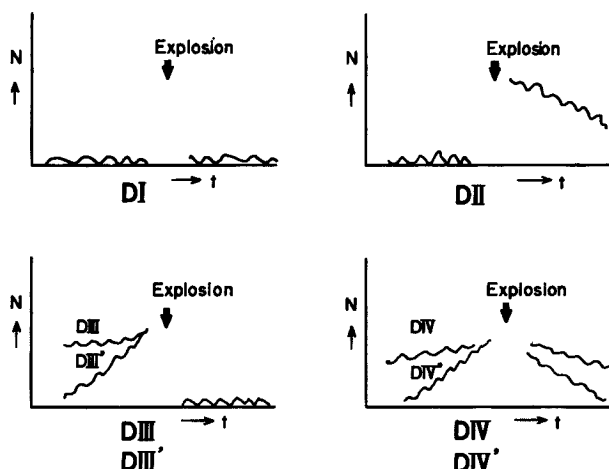
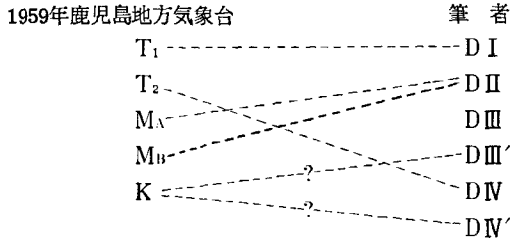


Fig. 4 Schematic representation of each explosion types.



最近同じく鹿児島地方気象台の清水⁵⁾によって微小地震の発生回数の変化による爆発の分類が行なわれているが、これは対象にする時間の範囲が一定ではなく数日に及ぶ地震の数の変化を問題にしている。

4. 分類の結果と考察

a) 分類された爆発の型の年変化

Fig. 5 に各型の爆発が全体の爆発に占める割合を、年別に1963年から1968年迄図示した。図からわかるようにD I型の爆発は1965年から増加し現在では50%に近く、また爆発の前に地震の発生回数が顕著に増加し爆発に至る D III', D IV' 型の爆発は年々減少の傾向にあり現在では全体の10%程度になっている。なお、1963年は9月から12月迄のデータを用いたので除外し、各年の爆発回数を調べてみると'64年80回、以後、'68年迄までは26回、40回、107回、36回であり各型の年度化と特にはっきりした相関はみられない。

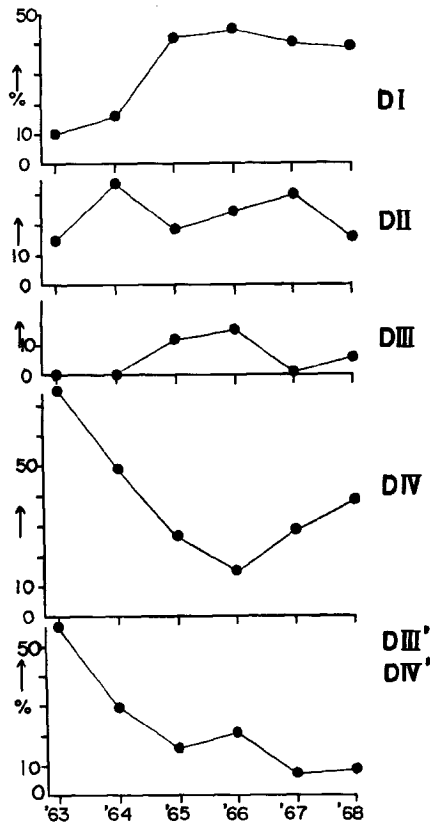


Fig. 5 Annual variation of the occurrence of each explosion types.

b) 連続して同じ型の爆発が発生する割合

ある1つの爆発が起きた場合その次の爆発がどの型の爆発であるかについて各型別に示したのが Fig. 6 である。斜線の部分が引き続いて同じ型の爆発が起った割合を示している。図からわかるようにD III型は引き続いて同じ型の爆発が起ることはないが、この型の爆発は Fig. 5 からわかるように全体の爆発の数%であるので無視すると、大部分の爆発は、同じ型がくり返されやすいことを示している。この事は爆発の各型が火道内の状態及び下からの emergy の供給のされ方等を反映しているためと考えられる。D III型の爆発では引きつづいて同じ型の爆発が起ることはないが、これはこの型の爆発を起す火道内の状態が非常に不安定なものであることを示しているのであろう。

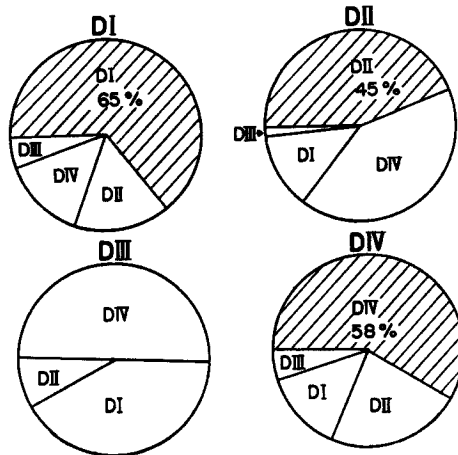


Fig. 6 Probability of the successive occurrence of the same explosion type.

c) 各爆発型についての爆発地震の大きさ分布

大きな爆発はどの型のものが多いかを知るために、1963年9月から1967年12月までの爆発で爆発地震の大きいものから順に10個選んで表にしてみると Table 1 のようになり、すべて DIV 型または DIV' 型であることがわかる。 Fig. 7 はすべての大きさの爆発地震について、各爆発型がそれぞれの大きさの爆発地震に

Table 1 The list of the large explosions and their types.

	爆発地震 (μ)	Date	Type
1	163	'63 Oct. 23	D IV
2	153	'63 Dec. 12	D IV'
3	152	'63 Nov. 6	D IV
4	149	'64 Jan. 20	D IV
5	141	'63 Nov. 9	D IV'
6	136	'63 Sept. 5	D IV'
7	133	'67 Oct. 2	D IV
8	125	'63 Sept. 23	D IV'
9	124	'64 May 20	D IV'
9	124	'67 May 20	D IV'
10	121	'63 Oct. 12	D IV'

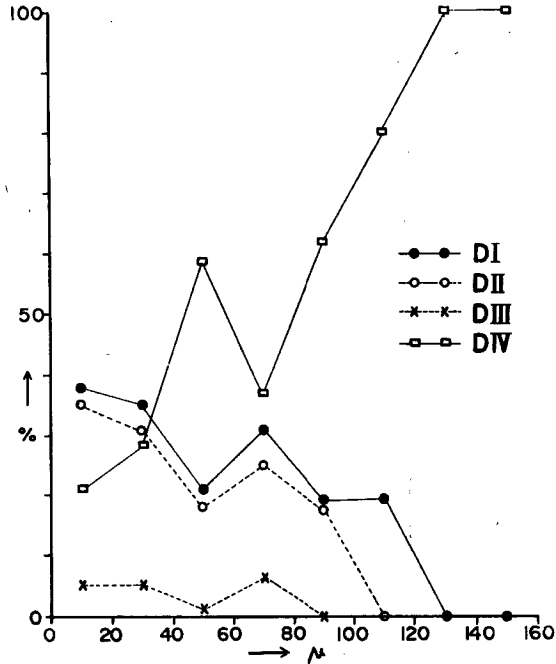


Fig. 7 Probability distribution of the amplitude of the explosion earthquake.

める占割合を示したものである。図からわかるように、爆発地震が 30μ 以下の爆発は D I 型, D II 型が多く、爆発地震が大きくなるにつれて D IV 型の割合が多くなっている。(尚, D IV' は型 D IV に含めて取り扱った。) このように小爆発には D I, D II 型が多く爆発が大きくなるにつれて D IV 型が多くなる理由については今後の問題としておきたいが D I 型については後で少し触れることにする。

d) 爆発地震のスペクトル

爆発の型式の違いによって爆発地震のスペクトルに相違が見られるのではないかと考え次の方法で調べてみた。まず S-1000 型地震計の上下動成分の記録の初動から空振波の到着しない部分までを $1/20\text{ sec}$. ごとにコンパレータで読み取り、次に読み取った値を Hamming の digital filter⁶⁾ に通して数値化に伴う短周期のノイズを消し、ついで初動附近のスペクトルを求めるため笠原の方法⁷⁾ によって重み関数 $e^{-(c^2/4)t^2}$ ($c=1.0$) をかけてフーリエ解析を行ない power spectrum density を求めた。

結果は $0.3\text{ sec.} \sim 0.5\text{ sec.}$ に 1 個または 2 個の peak があることは各型に共通であるが、その他は同じ型式の爆発でも異なったスペクトルを示し各型のちがいによる系統的な相異は見い出せなかった。D I 型と D II 型の例を Fig. 8 に示した。尚爆発地震の型によるスペクトルの相違を調べるのが目的であり、同一地震計の記録であるため Fig. 8 は地震計の補正は行っていない。1 秒前後から数秒にかけての peak は地震計の固有周期が 0.7 sec 秒であるためあまり信用できない。そこで周期がもっと長い地震計の記録による解析を行なう予定である。

5. 溶岩上昇後に発生する D I 型爆発

a) 溶岩上昇後の爆発の型の推移

1967年には火口内に lava-lake が生じたことが 4 回確認されている。Photo. 1 に1967年 5 月の溶岩上昇

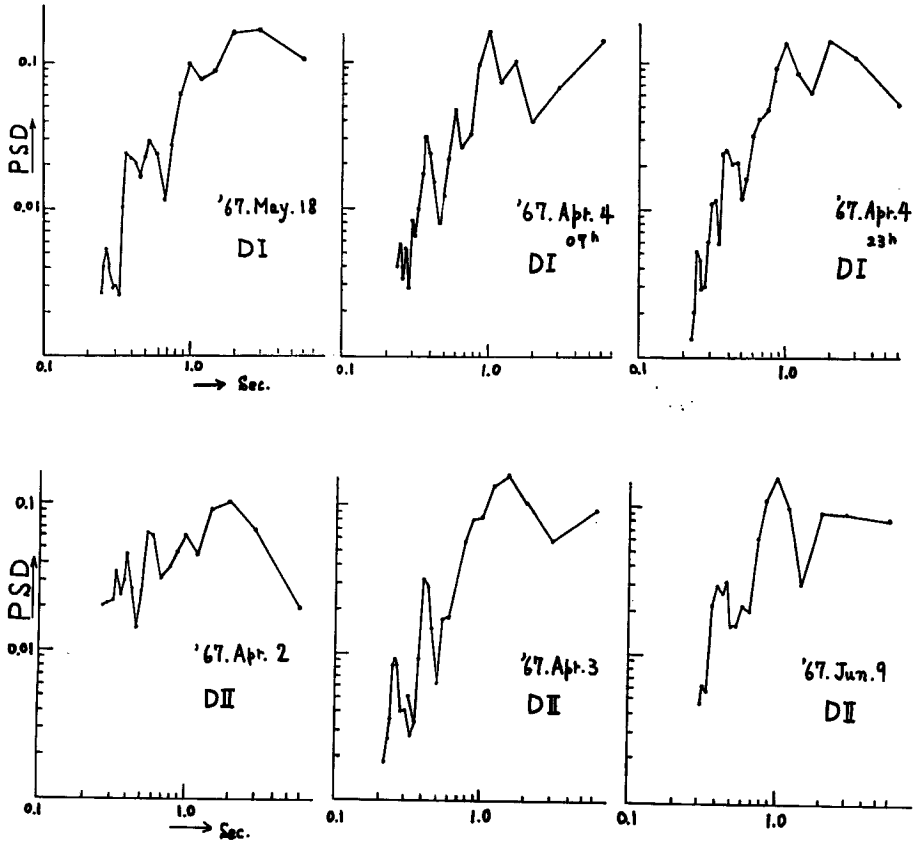


Fig. 8 Examples of the power spectral density of the DI and DII type explosion earthquakes.

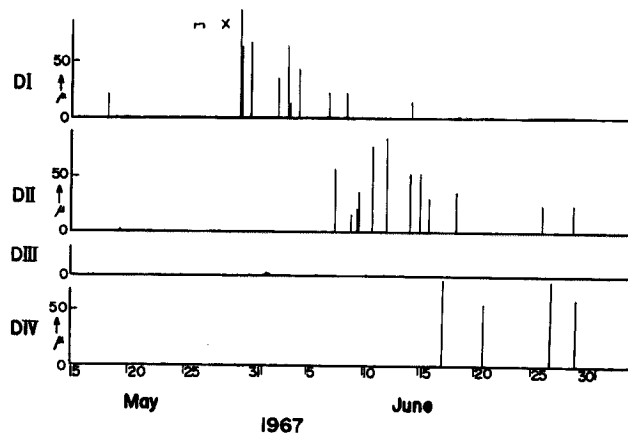


Fig. 9

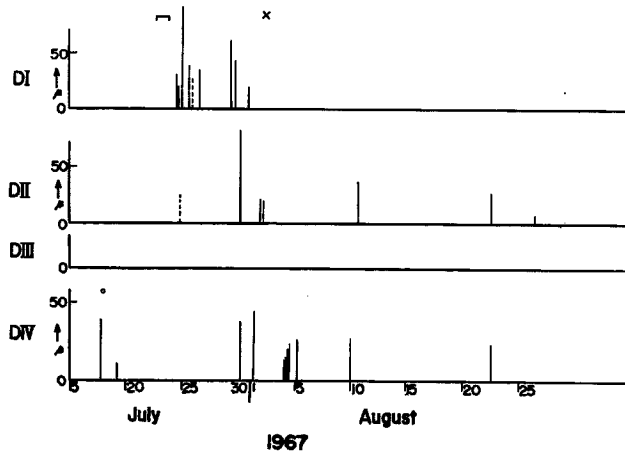


Fig. 10

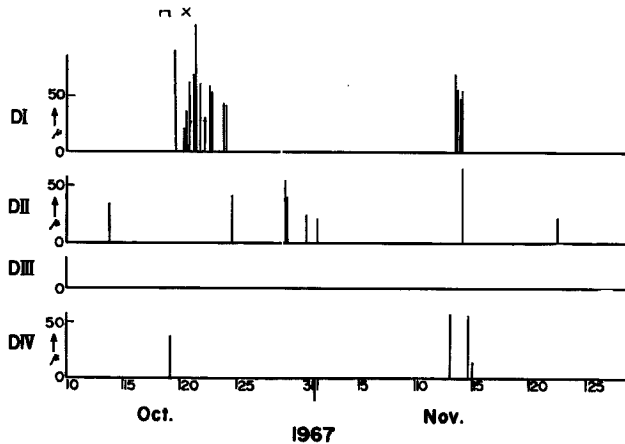


Fig. 11

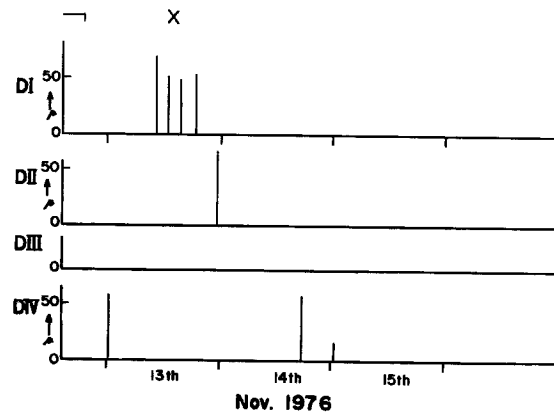


Fig. 12

Figs. 9~12 The transition of the explosion type after the lava-lake formation.

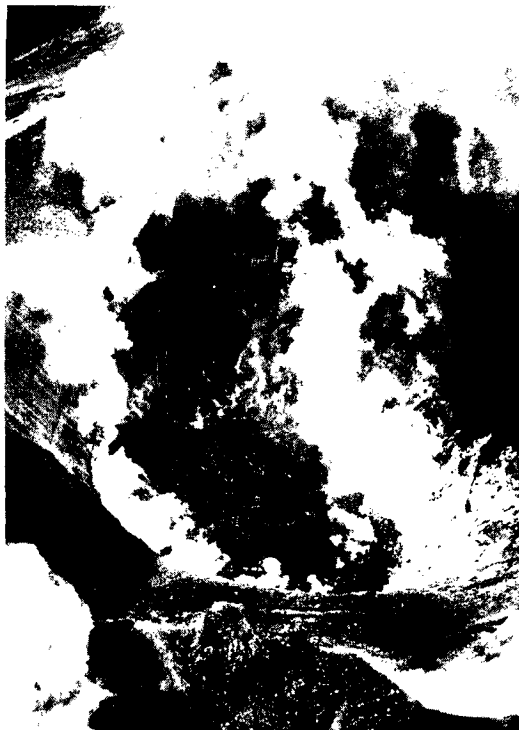


Photo. 1 Lava-lake formation in May, 1967

の際の航空写真を示した。火口内に同心円状に溶岩が見える。**Fig. 9** から **Fig. 12** に lava-lake 形成後の爆発の型がどのように変化したかを図示した。

Fig. 9 は1967年5月の溶岩上昇の際のもので、□印のところで地震の発生から溶岩の上昇が推定され、×印の時点で **Photo. 1** のような航空写真によって lava-lake が生じたことが確認された。**Fig. 9** からわかるようにまず D I 型が発生し次に D II 型が多くなり D IV 型へと移行している。**Fig. 10** は1967年7月の溶岩上昇の際のものでこの場合も溶岩上昇後まず D I 型が多発していることがわかる。**Fig. 11** は同年の10月と11月の溶岩上昇の際のものであるが、同様な傾向のあることが認められる。11月の例は D I 型の発生期間が短かいので時間軸を10倍に拡大して **Fig. 12** に示した。なお、5月の例以外は D I 型の後 D II 型から D IV 型への移行と言う点のはっきりしないが、まず D I 型が頻発する点は上に述べたように共通である。従って、もし D I 型が頻発し始めたら火口内に lava-lake が生じていたと考えてよいであろう。

b) DI 型の爆発地点

a) で述べたように火口内に lava-lake が生じた後で D I 型爆発が頻発することから、D I 型は他の型式の爆発より山頂に近い所で発生していると考えられる。そこで次にこの点に関して爆発地震の初動と空振波の到着時間の差、及び爆発地震の初動の入射角等から確かめてみることにする。

Photo. 2 は火口から 2.7 km 離れた地点の春田山観測所の S-1000 型地震計による爆発地震の記録である。記録からわかるように空振波の相が明瞭に出ている。このような記録を集めて、初動と空振波の到着時間差を求め各型の爆発についての頻度分布を示したのが **Fig. 13** である。空振波の到着時間は、経路の温度分布、風向、風速の影響を受けるためこれ等の値により補正を加える必要があるが、これらの影響は各型の爆発とも平均としては等しく受けるはずである。従って、地震波の初動と空振波の到着時間との差を各

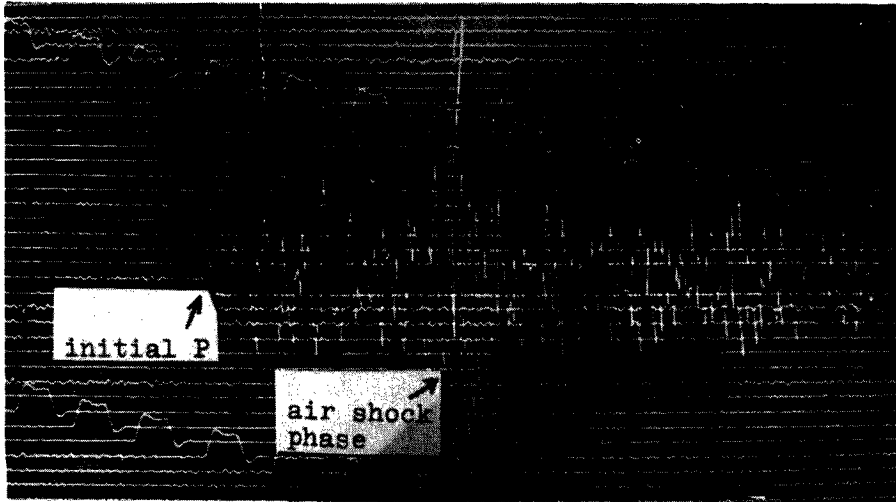


Photo. 2 An example of the seismogram of the explosion earthquake.

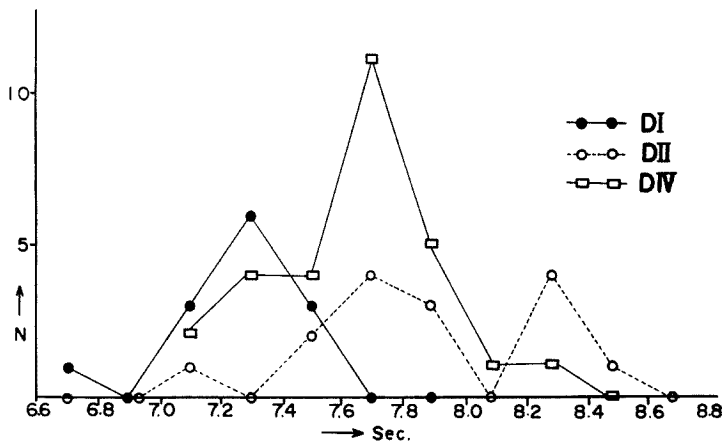


Fig. 13 Frequency distribution of the arrival time difference from the air shock wave to initial wave.

型によって比較する際にはそれほど必要なことではない。Fig. 13によれば、DI型の爆発の peak は 7.3 sec. のところにあり他の型の爆発に比べて初動と空振波の到着時間の差が小さい。このことは、爆発地点からの shock が地表に出て空振波となるまでの時間が短いことを意味している。従ってDI型の爆発は他の型式の爆発より山頂に近い所で行なわれていると考えられる。

このように地震波と空振波の到着時間の差を用いる方法は既に30年以上も前に佐々によって阿蘇火山で行なわれており火道内の shock wave の velocity が求められている⁸⁾。

次に爆発地震の初動の入射角によって同じくDIの爆発地点について調べてみた。初動の入射角を Fig. 14の上の図のように測るとすると、爆発地点が山頂に近い程入射角は大きくなる筈である。S-1000型地震計の三成分の記録から poisson's ratio を $\frac{1}{4}$ と仮定して入射角を求めると Fig. 14の下の図となる。図によればDI型の入射角は他の型式の爆発の値よりやや大きい傾向を示している。やはりDI型の爆発は他の型式の爆発より山頂に近い所で行なわれていると考えるべきであろう。

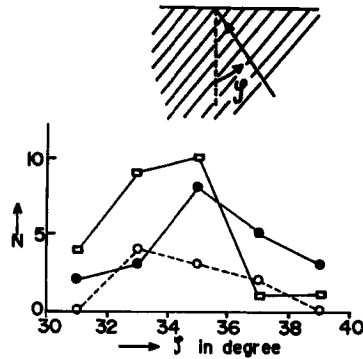


Fig. 14. Frequency distribution of the incident angle of the explosion earthquake.

c) DI 型爆発の発生過程

これまで述べてきたようなDI型爆発の特長を説明するためには Fig. 15 に示すような爆発に至る過程を考えればよい。

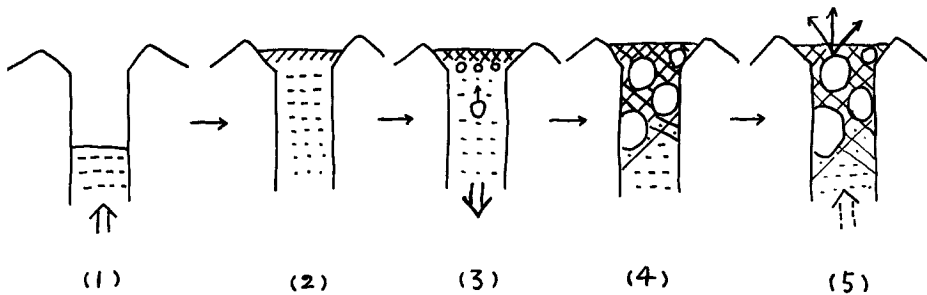


Fig. 15 The schematic diagram of the occurrence of the DI type explosion.

溶岩上昇からDI型の爆発が開始される迄の期間を Fig. 15 に示したように次の5つに大別する。1) 溶岩上昇期。2) 溶岩最高, 溶岩池完成期。3) 溶岩下降, gas chamber 形成期。4) gas chamber 成長期。5) DI型爆発開始期。

さて, 溶岩上昇期, 溶岩池完成期を経て次の段階に入ると火口内の溶岩池の表面は温度が下がり固まり始めているであろう。そのような時に溶岩が何かの原因でさがり始めるとすると溶岩池の表面はついて行けず従って溶岩内が減圧され溶岩中の gas 成分は過飽和状態となり急速に gas 成分と溶岩の分離が行なわれるであろう。分離された gas は溶岩池の下に集積されるかあるいは既に火道内の温度がかなり下っている場合には, 火道内の粘性が大きくなるため途中で停止するものもあるであろう。これが, 3) の溶岩下降, gas chamber 形成期のあらましである。ところで, このように溶岩の下降によって減圧が生じるのは桜島火山のように粘性が比較的高く ($10^6 \sim 10^7$ poise) 温度が低い安山岩質の溶岩の火山の場合に特長的なのであって, より粘性が低く温度が高い玄武岩質の溶岩の火山の場合には, 火道内を容易に溶岩が下降するため減圧はほとんど問題にならないと思われる。

4) の gas chamber 成長期は gas の分離が更に進行した溶岩の crystalization により分離されたのも加わって gas chamber の圧力が次第に増加していく時期である。この際再び溶岩が上昇の動きを見せて gas chamber の圧力を更に高める場合もあるであろう。そして5) のDI型爆発開始期に入り gas chamber が

次々に破壊されてD I型爆発が頻発することになる。長沢が boring stage の爆発¹³⁾と呼んでいるのはこの時点の爆発であろう。なお、D I型の噴煙はいわゆる一発噴煙型と呼ばれ長くは続かないが、これは gas chamber の周りの溶岩がかなり固まっているため gas chamber が破壊して圧力が低下してもその後はあまり gas の分離が行なわれなためであろう。

以上のような過程を考えるとまずD I型爆発が lave-lake が生じた後で頻発し、かつ他の型式の爆発に比べて山頂に近い所で発生することは十分説明される。またD I型の爆発は4のc)で述べたようにD IV型等に比べると小型のものが多いがこれは爆発が山頂近くで行なわれるため gas chamber の圧力が低い状態でも破壊が起るためであろう。次にD I型の爆発の前後で地震がないのは次のような2つの理由によって説明がつく。

1. gas chamber の周りの物質は溶岩の固ったものあるいは固まりつつあるものであるからかなり均質と考えられ、従って岩石の破壊実験等⁹⁾で示される“均質な物質の破壊に際しては elastic shock が発生しにくい”と言う事実と相当している。

2. 山頂に近い所で発生するため、たとえ小さな地震が少々起ったとしても、表層の非常に減衰の大きい堆積物を通過して観測点に達するので観測され難い。

6. 結 語

爆発の前後2時間程の火山性微小地震の発生様式をルーチン観測の記録を用いて調べ、1963年9月から1968年12月までの爆発を6種類に分類した。その結果及び考察は次の通りである。

1) 爆発の2時間程前から特に顕著に地震の発生回数が増加して爆発に至る DIII', DIV' 型の爆発は年々減少し1968年には全体の爆発の10%以下となった。

2) 同じ型の爆発がひきつづいて発生しやすい。これはここで分類された爆発の型が、火道内の状態及び下から energy の供給のされ方等を反映しているためと考えられる。

3) 爆発地震の大きな爆発は、爆発の前後で地震が発生している場合が多い。

4) 爆発地震の初動附近のパワースペクトルは1 sec より短かい範囲については爆発の型による顕著な相違は見られない。

5) 1967年には合計4回の溶岩上昇が見られたが lave-lake が生じた後の爆発はどの場合もまずD I型が頻発し次にD II型及びD IV型が発生した。このことからD I型の爆発は火口に近い地点で行なわれていると考えられるので、爆発地震の初動と空振波の到着時間の差によって、さらに爆発地震の3成分の記録から初動の入射角を求め、D I型は他の型式の爆発より火口に近い浅い所で発生していることを確かめた。

なお、D I型爆発は lava-lake が生じた後でない場合にも発生するが、その場合は散発的である。従ってD I型爆発が Fig. 9 から Fig. 12 に見られるように頻発し始めたら火口内に lave-lake が生じていると考えてよいであろう。

次に lave-lake が生じた後で発生するD I型の発生機構を説明するために lava-lake の固結と溶岩下降による減圧効果を考慮した model を示した。この model は Littman の model^{10,11)} にほぼ近いが、上に述べたように lava-lake の固結と溶岩の下降による火道内の減圧を考えに入れた点で大いに異なる。この事は桜島火山のように粘性が比較的高くまた温度が低い溶岩の火山の場合には重要な事柄であろう。溶岩が火道内を下降する原因としてはいろいろ考えられるが Littmann が述べているように¹²⁾新しい割れ目による magma chamber の体積の増大等も一因であろう。なお、上に述べた model によればD I型の性質は全て説明できる。

最後にご指導いただいた吉川圭三教授、ご討論いただいた桜島火山観測所及び阿蘇火山研究施設の方々には厚くお礼申し上げます。又、この研究の数値計算は、九大・大型計算機センターの FACOM 230-60 によった。付記して関係者に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 吉川圭三・西 潔：桜島火山における地震観測について (第3報), 京都大学防災研究所年報, 第8号, 昭和40. 3, pp. 43~49.
- 2) 気象庁：火山報告, Vol. 3, No. 3~Vol. 7, No. 4.
- 3) 鹿児島地方気象台：桜島爆発速報, 第8号, 昭34, 5.
- 4) loc. cit., (1)
- 5) 清水邦夫：桜島火山の爆発に伴う群発微小地震について, 験震時報, Vol. 32, No. 3, 4, 1969, pp. 39~50.
- 6) Hamming, R.V.: Numerical Methods for Scientists and Engineers, McGraw-Hill Book Co. 1969.
- 7) Kasahara, K.: The Nature of Seismic Origins as Inferred from Seismological and Geodetic Observations (1); B.E.R.I, Vol. 67, 1957.
- 8) Sassa, K. Volcanic Micro-Tremors and Eruption-Earthquakes, Mem. Coll. Sci., Kyoto Imp. Univ., Ser. A, 18 (1935) pp. 255~293.
- 9) Mogi, K.: Study of Elastic Shocks Caused by the Fracture of Heterogeneous Materials and Its Relations to Earthquake Phenomena, B.E.R.I. Vol., 40, 1962, pp. 125-173.
- 10) Rittmann, A.: On the Mechanism of Persistent Volcanic Activity. Bulletin Volcanologique, Tome XXIV, 1962, pp. 301~313.
- 11) Rittmann, A.: Volcanos and Their Activity, 1962, pp. 221~242.
- 12) loc. cit., 11).
- 13) 長沢隆次：桜島火山の爆発並びに噴煙の研究. 鹿児島大学理科報告, No. 15, 1966, pp. 35~48.