

噴煙現象の統計 (第2報)*

(爆発噴煙)

田中康裕**

551.21

Statistical Analysis of Volcanic Smoke (Part 2) (Explosion Smoke)

Y. Tanaka

(*Seismological Section, J. M. A.*)
(*Seismological Laboratory, M. R. I.*)

The obtained results of this paper are as follows:

1) Quantity of explosion smokes and energy of explosion earthquakes of the volcanoes have a limit value.

2) Frequency number of slight explosion smokes is far more than that of great explosion smokes. Relation between quantity of volcanic smokes and frequency of them will be able to show two straight lines by the Ishimoto-lida's method, as look in the case of amplitude-frequency relation of explosion-earthquakes (Fig. 3)

3) Variations of height and quantity of volcanic smokes, and amplitudes of volcanic tremors which period are 0.2~0.6. sec. of the Volcano Aso are well shown surface volcanic activities. As for signs of the great explosions, phenomena of increase of amplitude of volcanic tremors and volcanic smokes were often observed.

4) Maximum arrival distance of flying bombs by the explosion is proportionate to maximum amplitude of explosion earthquake, and initial velocity of flying bombs is proportionate to height of explosion smokes.

§ 1. まえがき

第1報¹⁾で述べた噴煙の統計法を用いて、桜島・浅間山および阿蘇山の爆発噴煙の模様を解析した。

本文中の噴煙量を表わす Q , S , q の記号は、第1報で用いたものと同じで、それぞれ気象庁噴煙階級量、噴煙の垂直断面積、噴煙塊の体積を表わしている。

§ 2. 桜島・浅間山の爆発噴煙

爆発噴煙の大きさ (S や q) は火口内の閉塞の度合いや爆発の energy に関係して、いろいろな出方を示すが²⁾、その噴煙は概して多量で、かつ、突発的にあがるので、静穏時の噴煙とは一見して識別できる。

桜島の爆発で、その噴煙が観測され、かつ、鹿児島地方気象台の地震計に記録されたものは、1956~60年の間に420回あったが³⁾、これを噴煙量 Q_s 別に分けると、 $Q_s=1\sim2$ が0回、 $Q_s=3$ が23回、

* Received May. 20, 1966.

** 気象庁地震課, 気象研究所地震研究部

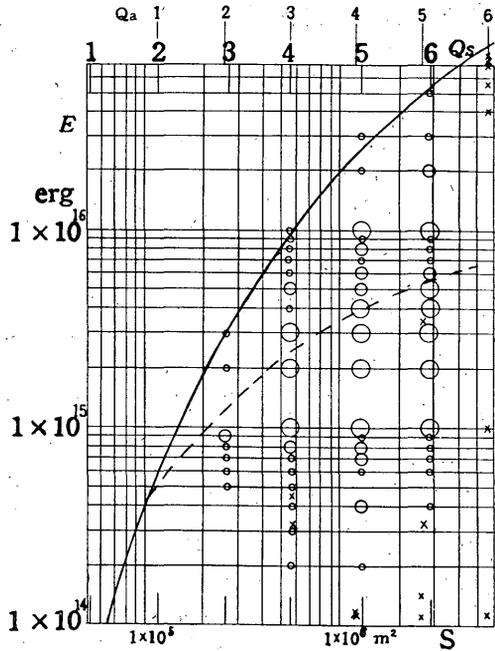


Fig. 1. Relation among energy (E) of explosion-earthquake and quantity (Q and S) of explosion smoke of the volcanoes.

- Q_a : Quantity of explosion smoke, classified 1 to 6 at the Volcano Asama.
- Q_s : Quantity of explosion smoke, classified 1 to 6 at the Volcano Sakurajima.
- S : Vertical section of dimensions of volcanic smoke.
- Large circle : 11 or more observed data. Middle circle : 6~10 observed data. Small circle : 1~5 observed data.
- : Observed explosion at the Volcano Sakurajima.
- × : Observed explosion at the Volcano Asama.
- Dotted curve : Mean value of observed explosion of Q_s .

$Q_s=4$ が90回, $Q_s=5$ が184回, $Q_s=6$ が123回であった。これらの爆発について, 地震記象の最大振幅 A から次式を用いて各爆発地震の震動の energy E を計算した。

$$M = 1.73 \log A + \log A - 0.83 \quad (1)$$

$$A = \sqrt{M^2_N + M^2_E}, \quad (1954 \text{ 坪井})$$

$$\log E = 1.5 M + 11.8 \quad (2)$$

(1956 Gutenberg-Richter)

ここで A は桜島の南岳山頂火口と鹿児島地方気象台

との距離 (10km), M は爆発地震の震動の magnitude である。

E と Q との関係図 (Fig. 1) からわかるとおり, 両者は比例関係にはないが, 爆発は Fig. 1 の曲線で界された右側の領域内で起こっている。すなわち, 桜島の爆発地震の震動の energy の限界はおおよそ

$$Q_s=1 \text{ で } E \leq 4 \times 10^{13} \text{ erg}, \quad Q_s=2 \text{ で } E \leq 6 \times 10^{14} \text{ erg},$$

$$Q_s=3 \text{ で } E \leq 3 \times 10^{15} \text{ erg}, \quad Q_s=4 \text{ で } E \leq 1 \times 10^{16} \text{ erg},$$

$$Q_s=5 \text{ で } E \leq 3 \times 10^{16} \text{ erg}, \quad Q_s=6 \text{ で } E \leq 5 \times 10^{16} \text{ erg}$$

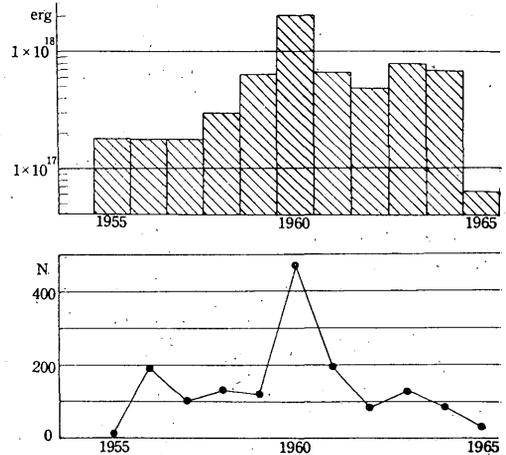


Fig. 2. Energy and number of explosion-earthquakes at the Volcano Sakurajima.

である。この限界値を示す曲線は

$$\log E = 4.14 \log Q_s + 13.51 \quad (3)$$

で表わされる。さらに, 爆発地震の震動の energy の噴煙量別平均値は Fig. 1 の点線で示した曲線になり, これは

$$\log E = 2.19 \log Q_s + 14.07 \quad (4)$$

で表わされる。

(3), (4)式に第1報の(2)式, すなわち

$$\log S = 0.35 Q_s + 4.34 \quad (5)$$

の Q_s を代入すれば, E と S との関係が求まる。すなわち(3), (4)式はそれぞれ

$$\log E = 4.14 \log \frac{\log S - 4.34}{0.35} + 13.51 \quad (6)$$

$$\log E = 2.19 \log \frac{\log S - 4.34}{0.35} + 14.07 \quad (7)$$

となる。Fig. 1 には E と S との関係も含めて示してある。

次に、浅間山の爆発噴煙についても上述と同じ方法で計算を行なった。

浅間山の1958年10~12月, 1959年3~8月, 1961年8~11月の軽井沢測候所における爆発地震の記象から, (1), (2)式により算出した爆発地震動の energy と爆発噴煙量との関係を Fig. 1 に×印で記入した。浅間山の爆発の大きさの限界も桜島と同じ限界範囲内にある。浅間山, 桜島の噴煙量をそれぞれ Q_a, Q_s とすると, 第1報の(2)式によって

$$\log S = 0.35 Q_s + 4.34 = 0.34 Q_a + 4.73 \quad (8)$$

であるから

$$Q_s = \frac{0.34 Q_a + 0.39}{0.35} \doteq Q_a + 1 \quad (9)$$

(9)式を(3)式に代入すれば, 浅間山の爆発の大きさの限界曲線は

$$\log E = 4.14 \log(Q_a + 1) + 13.51 \quad (10)$$

となる。

ここであつかった桜島, 浅間山の爆発は, いずれも火山の噴火活動期中における中・小爆発に属するもので, 長い休止期を続けた火山が突然爆発したようなときのものではない。そのようなときの爆発は概して非常に大きいので, 噴煙量はその標準値の $Q = 6$ (第1報の Fig. 2) よりはるかに多量に噴出することが多く, 7以上の噴煙階級量を設定しなければならない。

(6)式は桜島, 浅間山に共通に使える式であるが, これは他の多くの火山についても適用できるかもしれぬ。

桜島は1955年10月に南岳山頂火口で噴火活動を始め, 10年余を経た現在(1966年)でも, 未ださかんに爆発をくり返している。Fig. 2は(1), (2)式によって算出した爆発地震動の年別 energy と爆発地震回数(いずれも鹿児島地方気象台または桜島火山観測所で観測されたもの)の図で, 近年の桜島の火山活動の消長を示しているものである。

桜島の爆発地震の大きさの分布をみるもう一つの方法として, 鹿児島地方気象台および桜島火山観測所の地震計で観測した爆発地震を石本・飯田の統計にかけてみた。爆発地点「南岳山頂」から鹿児島地方気象台および桜島火山観測所までの距離は, そ

れぞれ 10 km, 5 km であり, 前者では Wiechert 式地震計(周期 5 秒, 倍率 80, 制振度 8), 後者では 56 型高倍率地震計(周期 1 秒, 倍率 300, 制振度 8) による観測である。

$$NA^m = \text{const.} \quad (11)$$

(A: 地震の最大振幅, N: ひん度)

による統計図を描くと, 両観測点とも折れ曲がった 2 つの直線で表わされ (Fig. 3), 100~110 μ 以下の振幅に対しては

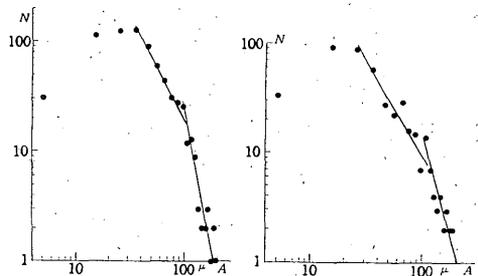


Fig. 3. Relation between Max. amplitude (A) and number (N) of explosion-earthquakes at the Volcano Sakurajima. (1961~65)

Left: Observed at the Kagoshima Local Meteorological Observatory, 10 km of the active crater.

Right: Observed at the Sakurajima Volcano Observatory, 5 km of the active crater.

$$m = 1 \sim 2 \quad (12)$$

それ以上の大きさの振幅に対しては

$$m = 4 \sim 5 \quad (13)$$

となり, 100~110 μ の振幅を界として爆発地震の起こり方が急激に変わる。この傾向は噴煙量別に分類した爆発地震の振幅のひん度についても成り立った(図は省略)。

(1), (2), (3), (11)式から N と Q の関係を求めると, 鹿児島地方気象台, 桜島火山観測所とも

$$NQ_s^{2.8m} = \text{const.} \quad (14)$$

となり, これに(12), (13)式の m を代入すれば, 噴煙量別の爆発回数の増加率が推定できる。

m の値に 2 種類あるとはいえ, (14)式から, 少量の噴煙をあげる爆発回数は, 極度に多くなることが予想される。ちなみに, 鹿児島地方気象台から観測した桜島の噴煙量別爆発回数は Table 1 のとおりで

ある。この表の噴煙量別総回数(1955~1965年)を統計すると、次式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} NQ_s^{3.62} &= \text{const.} \\ NS_s^{1.11} &= \text{const.} \\ Nq_s^{0.78} &= \text{const.} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

ただし、上式の係数 3.62, 1.11 および 0.78 は、年によって相当変化しているようである(図は省

略)。一般に、噴火活動がはげしい年ほど、上記の係数は大きくなるような傾向を示しているの、これは、火山活動度に関係している値であるかもしれぬ。

なお、Table 1 の $\log S$ および $\log q$ は、それぞれ、第1報の(2)式および(3), (5), (10)式から計算で求めた値である。

Table 1 Observed number of remarkable explosion smokes at the Volcano Sakurajima ⁴⁾⁵⁾⁶⁾

Year	Quantity of volcanic smoke					Year	Quantity of volcanic smoke				
	Q log S log q	3 5.39 8.77	4 5.74 9.30	5 6.09 9.83	6 6.44 10.36		Q log S log q	3 5.39 8.77	4 5.74 9.30	5 6.09 9.83	6 6.44 10.36
Oct.1955		17	6	6	7	1961		618	175	55	8
1956		522	219	81	35	1962		81	32	12	3
1957		356	97	42	5	1963		487	223	57	8
1958		226	50	38	20	1964		186	78	37	18
1959		99	44	29	30	1965		26	5	4	0
1960		536	284	193	94	Total		3154	1213	554	228

§ 3. 阿蘇山の噴煙

Fig. 4 は1951~64年の阿蘇山の火山活動の概要を示した図である。中岳火口の西 1 km の阿蘇山測候所において、石本式地震計または56型高倍率地震計(両地震計は共に周期 1 秒, 倍率 300, 制振度 8)で観測した周期 0.2~0.6 秒の火山性微動の日別最大全振幅を示したもので、噴石を火口外に相当量飛ばせた爆発を●印で記してある。この微動は佐々博士⁷⁾⁸⁾が、阿蘇山の第3種および第4種微動として分類したものに属し、微動の強弱は火口の表面活動の消長に随伴するといわれている。

Fig. 5 は 1951~65 年の中岳第 1 火口の噴煙量の変動である。観測値に季節変化量⁹⁾を補正し、さらに 2 か月ごとの移動平均値によって表わしてある。ただしこの図には、大爆発時の噴煙量は観測できなかったため除いてある。この図によって、阿蘇山の噴煙活動の変動の大要を知ることができる。また、Fig. 4 の火山性微動の出方と噴煙の状態との比較もできるが、さらに噴火活動のあった時期だけを取り出してくわしく検討してみることにする。

1951~65年に、阿蘇山で、火口外に相当量の噴石を飛ばせた大爆発は Table 2, Fig. 7 に示した12回のものがあつた。これらの大爆発前後において、噴煙の高さ、噴煙量、微幅の振動および噴火活動の持続期間などがどんな状態を示したかを詳細に調べた。Fig. 6 は、各活動期の噴煙の高さ・量、微動の変動などを示したもので、値はすべて半月ごとの最大値を統計した。噴煙量には季節変化量を補正してあり、大爆発時の噴煙の高さおよび量は観測できなかったため除いてある。各噴火活動期の特徴をくらべると次のようになる。

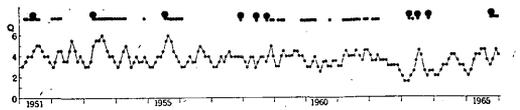


Fig. 5. Variation of quantity of smoke(Q) at the Volcano Aso.
Large spot (mark:●) is the great explosion, that shown in Table 2. Small spot (mark:·) is slight explosion or ash-fall.

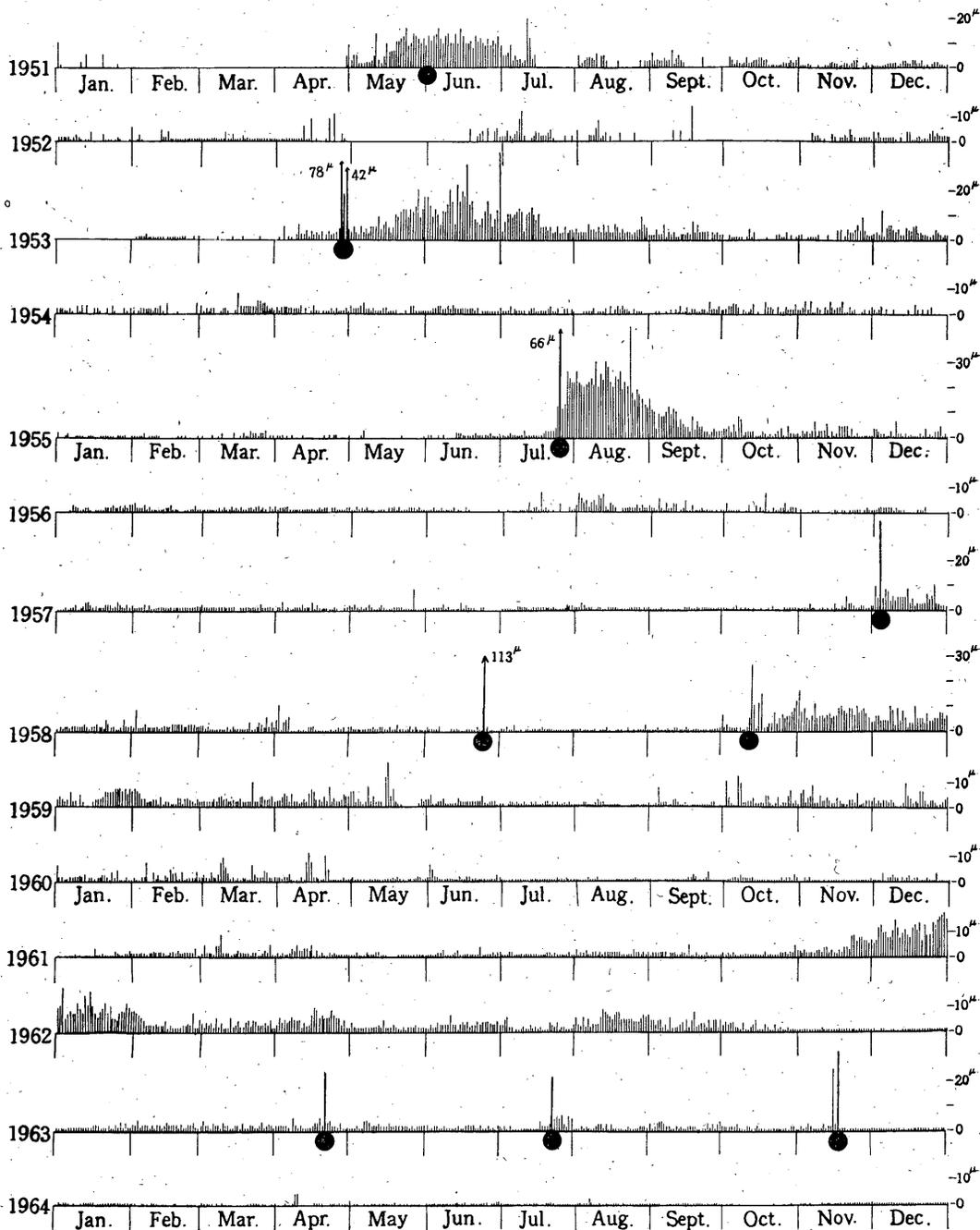


Fig. 4. Daily max. double amplitude of volcanic tremor, observed at the Asosan Weather Station, 1 km of the active crater.

Period of tremor is ca 4 sec.

Mark ● is great explosion, that is shown in Table 2, Fig. 6 and Fig. 7.

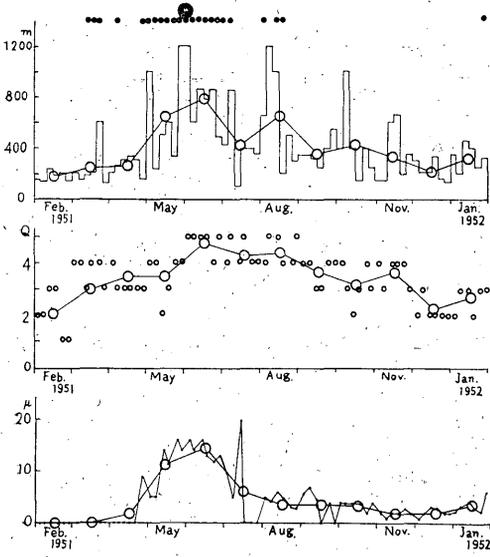


Fig. 6-1

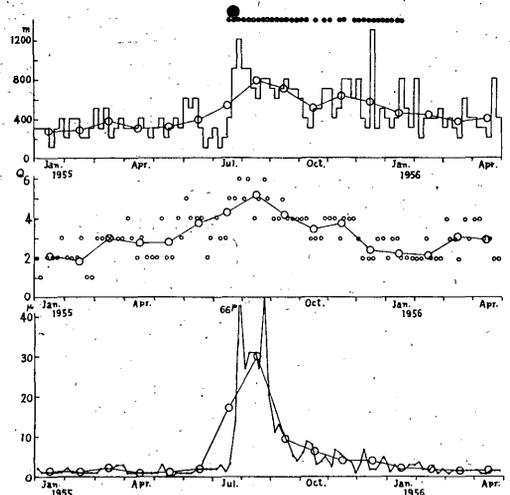


Fig. 6-3

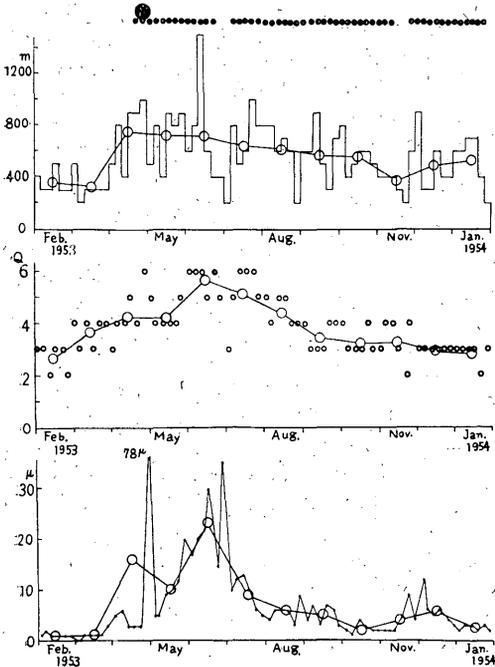


Fig. 6-2

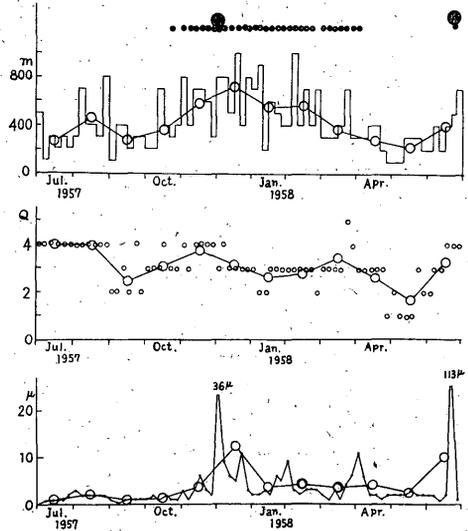


Fig. 6-4

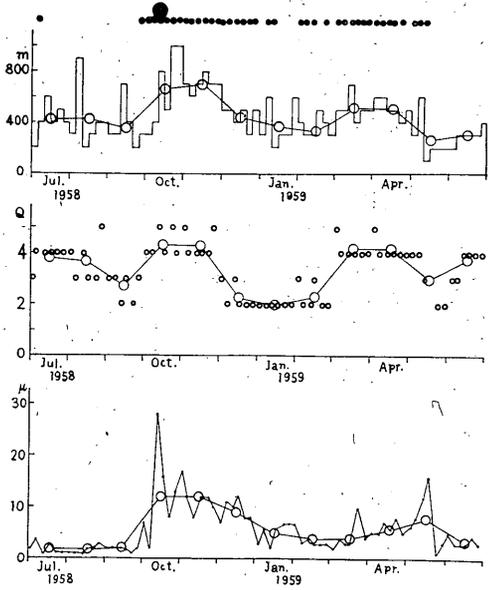


Fig. 6-5

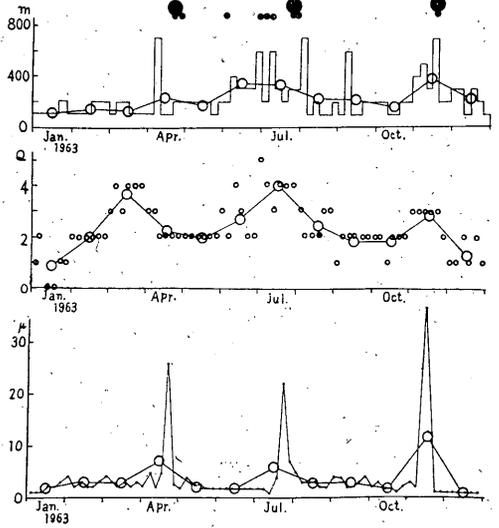


Fig. 6-7

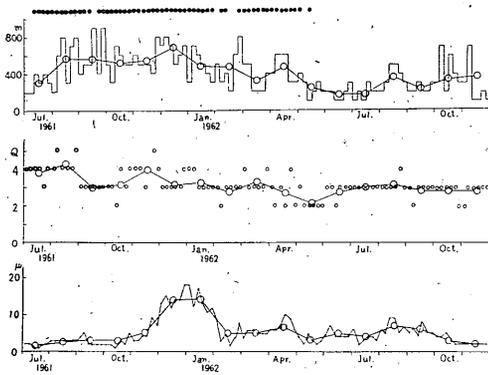


Fig. 6-6

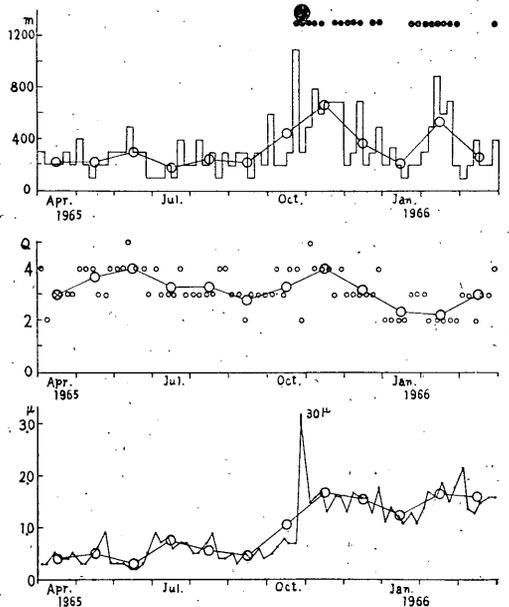


Fig. 6-8

Fig. 6. Variation of height (m) and quantity (Q) of volcanic smoke, and max. double amplitude (μ) of volcanic tremor, observed at the Asosan Weather Station.

(1965~66 year, μ is max. amplitude, observed at the observation point of 0.7 km W of the active crater, by the electromagnetic seismograph)

Large spot (mark: ●) is great explosion.

Small spot (mark: ·) is slight explosion or ash-fall.

Large circle (mark: ○) is monthly mean value.

i-) 1951年6月の大爆発

噴煙の高さ：爆発の約1か月前から増加し始め、増加途中に爆発。

" 量：爆発の約3か月前から増加し始め、増加途中に爆発。

微動の振幅：爆発の約1か月前から増大し始め、増大途中に爆発。

そ の 他：大爆発の2.5か月前から降灰現象が始まった。

ii~iv) 1953年4月の大爆発

噴煙の高さ：爆発の約0.5か月前から増加し始め、最高に達したときに爆発。

" 量：爆発の約3か月前から増加し始め、増加途中に爆発。

微動の振幅：爆発の約1か月前から増大し始め、増大途中に爆発。

そ の 他：3日間に3回の大爆発が続いて起こった。

v) 1955年7月の大爆発

噴煙の高さ：爆発の約1か月前から減少。爆発後増加。

" 量：爆発の約5か月前から増加。増加途中に爆発。

微動の振幅：爆発と同時に増大。

vi) 1957年12月の大爆発

噴煙の高さ：爆発の約2か月前から増加し始め、増加途中に爆発。

" 量：爆発の約3か月前からやや増加し始め、爆発時に最多。

微動の振幅：爆発の約0.5か月前から増大し始め、増大途中に爆発。

そ の 他：爆発の約1か月前から降灰現象が始まった。

vii) 1958年6月の大爆発

噴煙の高さ：爆発の約1か月前から増加し始め、爆発後短時間で平常に復す。

" 量：爆発とほとんど同時に増加。短時間で平常に復す。

微動の振幅：爆発とほとんど同時に増大。短時間で平常に復す。

そ の 他：爆発後の降灰現象期間が短かった。

viii) 1958年10月の大爆発

噴煙の高さ：爆発の約0.5か月前から減少。爆発後増加。1か月後減少を始める。

" 量：爆発の約1か月前から増加。1か月後減少を始める。

微動の振幅：爆発の約0.5か月前から増大し始め、増大途中に爆発。

そ の 他：爆発後の降灰現象期間が短かった。

ix) 1963年4月の大爆発

噴煙の高さ：平常時とほとんど変わらず。

" 量：爆発の約3か月前から増加し始め、爆発の約1か月前が最多。減少途中に爆発。

微動の振幅：爆発時に最大。爆発前後は平常時と同じ。

x) 1963年7月の大爆発

噴煙の高さ：平常時とほとんど変わらず。

" 量：爆発の約3か月前から増加し始め、爆発の約0.5か月前が最多。減少途中に爆発。

微動の振幅：爆発時に最大。爆発前後は平常時と同じ。

そ の 他：爆発後、ほとんど降灰現象がなかった。

xi) 1963年11月の大爆発

噴煙の高さ：爆発の約0.5か月前から増加し始め、最高時に爆発。

" 量：爆発の約1か月前からやや増加し始め、爆発時に最多。

微動の振幅：爆発時に最大。爆発前後は平常時と同じ。

そ の 他：爆発後の降灰現象がなかった。

1963年中に起こった3回の大爆発を比較すると、噴煙量の極大時から爆発時期までの時間差は、後に起こった爆発ほど短くなった。

xii) 1965年10月の大爆発

噴煙の高さ：爆発と同時に増加。

" 量：爆発の約1か月前から増加。

微動の振幅：爆発と同時に増大。

xiii) 1961~62年の活動

噴煙の高さ、量には顕著な変動はなかったが、微動が増大した。大爆発はなく、降灰現象が長く続いた。

以上に述べた大爆発前後の事象を総合すると、大爆発の起こる時期の噴煙現象は次の3つの場合に大別される。

- 1) 噴煙活動が上昇過程中に大爆発が起こる。
- 2) " の最盛期に大爆発が起こる。
- 3) " が最盛期を過ぎて間もなく大爆発が起こる。

また、上記の10回の大爆発について、それらの前兆現象がどのくらい前から始まったかについて整理すると

噴煙の高さに変化が現われた回数は

大爆発の2か月前から増加…1回	} 10回中7回
" 1 " …2回	
" 0.5 " …2回	
" 1 " 減少…1回	
" 0.5 " " …1回	

噴煙の量に変化が現われた回数は

大爆発の5か月前から増加…1回	} 10回中9回
" 3 " …4回	
" 2 " …1回	
" 1 " …3回	

微動の振幅に変化が現われた回数は

大爆発の1か月前から増大…2回	} 10回中4回
" 0.5 " …2回	

となり、噴煙現象には大爆発の前兆が現われやすいことを示している。なお、噴火活動の程度と爆発の時期との関係は明らかでない。

§ 4. 阿蘇山の噴石分布と噴煙の高さ

1951~65年に阿蘇山で起こった大爆発による噴石の分布を Fig. 7 に示した。

噴石の飛散方向は爆発ごとに異なるが、これらはいずれも中岳第1火口の爆発によるものである。飛散方向の違いは、爆発したときの火口のむきによ

て大きく左右されるものと思われる。

Fig. 7 から、噴石の水平最大到達距離 x および山腹の傾斜面 i を求めて、各爆発の噴石の初速度 v を計算した。すなわち、

$$v = \sqrt{\frac{g x \cos i}{1 + \sin i}} \quad (16)$$

(g : 重力の加速度)

から求めた v を Table 2 に示した。

また、噴石の水平最大到達距離 x (m) と爆発地震の最大振幅 A (μ) とは

$$x = 15A \quad (A = \sqrt{M_N^2 + M_E^2}) \quad (17)$$

で表わされることがわかった。これは地震計の最大振幅から噴出物の飛散状態を知る目安として都合のよい式である。

噴石の初速度は爆発時の噴煙の火口における噴出速度にはほぼ等しいと考えられるので、Table 2 にあげた大爆発時の噴煙がどのくらいの高さに昇ったかを推定してみる。

爆発噴煙の高さ h_1 は、ある定点 (高さ h_0) で観測した煙の速度 v_0 に比例し

$$h_1 = \frac{v_0}{v_1} h_0 \quad (18)$$

で表わされる¹⁰⁾¹¹⁾。

噴煙の高さ h_1 は、水平方向の風速 v_1 (便宜上地上の平均風速を用いる) と等しくなる所まで上昇するものとし、 v_0 は h_0 が火口底から100mの高さにおける値であると仮定する。こうした計算値はあくまでも参考程度のものであるが、合わせて Table 2 に示した。Table 2 の爆発は、多くは夜間であったり、悪天候の時であったため、爆発時の煙の高さは観測できなかった。そこで、Table 2 には爆発後3日以内に観測した最高噴煙を記入して、計算値と比較した。一般に、大きな爆発後の噴煙ほど高く昇っている傾向がみられる。

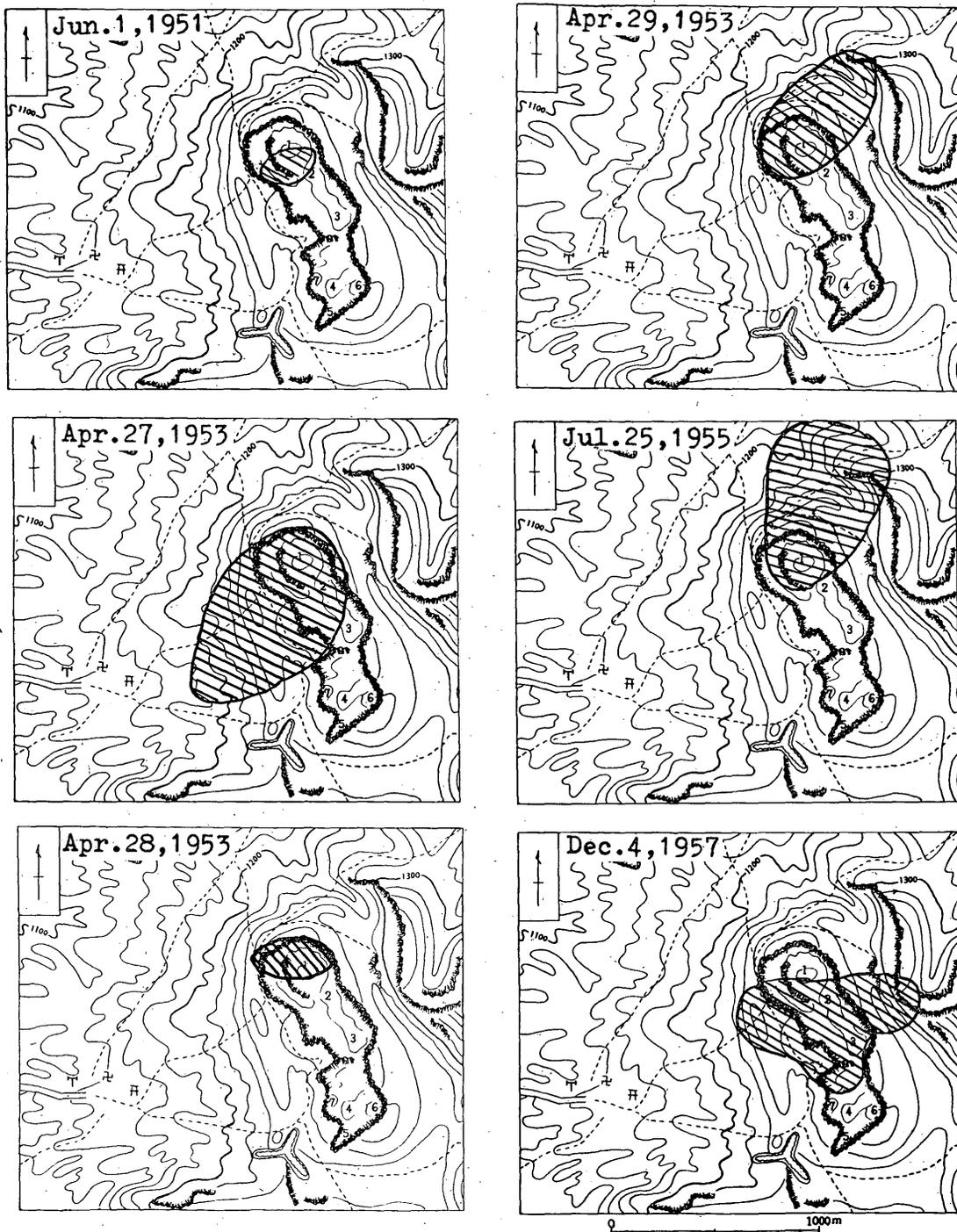


Fig. 7—1 Distribution of volcanic bombs by the great explosion of the Volcano Aso, during the period from 1951 to 1965. Survey by the Asosan Weather Station.

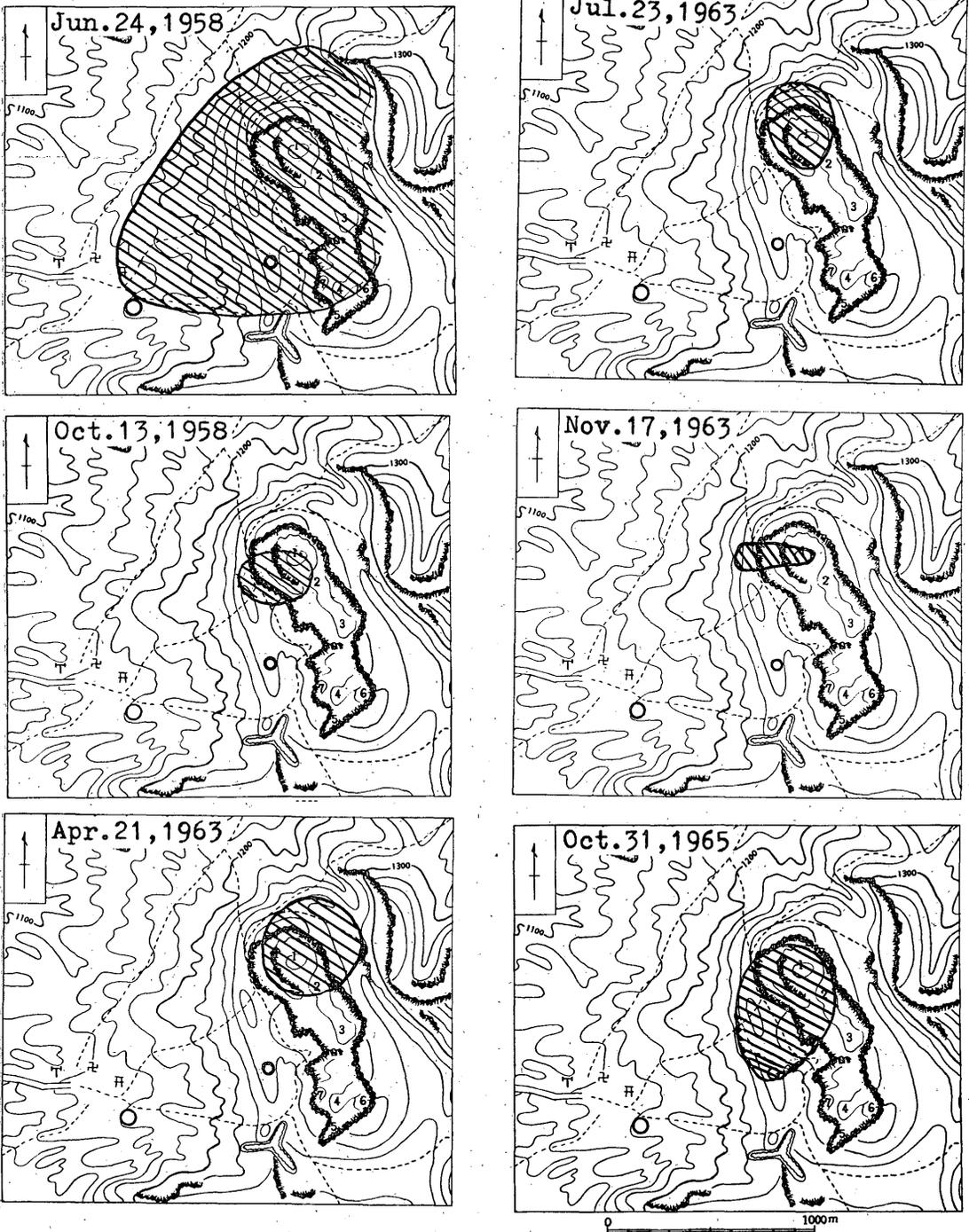


Fig. 7-2. Distribution of volcanic bombs by the great explosion of the Volcano Aso, during the period from 1951 to 1965. Survey by the Asosan Weather Station.

Table 2 Great explosions of the Volcano Aso, during the period from 1951 to 1965.

Date	Explosion earthquake		Main direction of distributed cinder	Max. arrival distance of flying bombs	Initial velocity of flying bombs	Height of volcanic smoke		
	Max. amplitude					Seismic intensity	Calculated value	Observed value
	M_N	M_E						
Jun. 1, 1951	8 ^μ	— ^μ	0	S	200	40	800	1200
Apr. 27, 1953	39	—	II	SW	800	85	1700	} 1000
" 28, "	3	—	I	N	200	40	800	
" 29, "	21	—	II	NE	500	70	1400	
Jul. 25, 1955	33	—	II	N	700	80	1600	1200
Dec. 4, 1957	18	30	0	S	550	70	1400	800
Jun. 24, 1958	57	49	II	SW	1100	95	1900	700
Oct. 13, 1958	14	13	0	SW	400	60	1200	800
Apr. 21, 1963	13	11	0	NE	330	55	1100	200
Jul. 23, 1963	11	8	0	N	270	50	1000	300
Nov. 17, 1963	19	19	0	W	350	60	1200	700
Oct. 31, 1965	30	30	II	S	600	75	1500	1100

§ 5. むすび

火山活動と噴煙現象とは密接な関係があり、噴煙を常時観測することは火山活動監視上大変有効なことである。現在こうした観測がきるのは日本では気象官署だけであり、たゆまぬ観測がやがて噴火予知に結びつくものであることを痛感してやまない。

参 考 文 献

- 1) 田中康裕：噴煙現象の統計（第1報），験震時報32（1968）37—50.
- 2) 安井豊：桜島の噴煙（I），研究時報9（1957）209—215.
- 3) 中央気象台（気象庁）：地震月報（1956—1960）.
- 4) 鹿児島地方気象台：桜島火山活動推移（その3），福岡管区気象台要報13（1957）125—127.
- 5) 鹿児島地方気象台：昭和31年10月以後の桜島火山の活動，福岡管区気象台要報14（1958）148—172.
- 6) 気象庁：地震月報，火山報告（1955—65）.
- 7) Kenzō Sassa: Volcanic Micro-Tremors and Eruption-Earthquakes, Memorirs of the College of Science 18（1935）255—295.
- 8) Kenzō Sassa: Micro-Seismic Study on Eruption of the Volcano Aso, Memorirs of the College of Science 19（1936）11—56.
- 9) 1)と同じ
- 10) 永田武・川野実・大林辰蔵：桜島噴火に伴ふ鳴動及び噴煙，震研彙報24（1946）201—206.
- 11) 佐久間修三：“乱れ”としてみた火山の煙，火山2集1（1957）1—8.