

火山の爆発過程における噴煙および 火山ガスの放出について

石原 和弘・井口 正人・加茂 幸介

EMISSION OF VOLCANIC CLOUD AND GASES ON THE PROCESS OF A VOLCANIC EXPLOSION

By *Kazuhiro ISHIHARA, Masato IGUCHI and Kosuke KAMO*

Synopsis

TV camera was installed at Sakurajima Volcanological Observatory to study the mechanism of volcanic explosion. At first, the sequence of phenomena occurred in a volcanic explosion was examined, analyzing the observed pictures. The occurrence of an explosion-quake below the crater preceded the emission of volcanic gases and ejecta from the vent by a few seconds. Visible shock wave passing through the atmosphere above the crater was also recorded as the moving pictures. The velocity of shock wave is estimated to be Mach 1.3-1.5.

Furthermore, the growth of eruption column in the initial stage of explosion was examined. Expansion of volcanic cloud was predominant for 3-10 seconds. Emission rate of volcanic gases was estimated to be 10^2 - 10^3 tons/sec assuming that the volume of volcanic gases is nearly equal to that of volcanic cloud in the initial stage of explosion. It is inferred that the occurrence of the atmospheric shock wave results from the high emission rate of volcanic gases.

1. はじめに

Vulcano 型の強い噴火（以下では爆発と呼ぶ）は大気中に火山ガスと噴出物を急速かつ瞬時に放出する。爆発は衝撃波を発生し、多量の噴石を火口から数 km の範囲に飛散させ、火口上空に噴煙柱を形成する。

火山噴火をエネルギー的に見ると噴出物のもつ熱エネルギーが大半を占めるが¹⁾、爆発の強度は噴出物の放出速度に依存する。Vulcano 型の爆発は他の噴火様式（例えば Plinian 型や Stromboli 型）と比較すると短時間の突発的な現象であり、real time で観測し噴出物の放出速度を求めることは困難である。このため落下した火山弾の火口からの到達距離を調べ、放出速度を推定し圧力を計算する方法²⁾がとられてきた。

桜島火山の爆発の大半は Vulcano 型に属する。そこで、筆者らは TV カメラおよび 35mm スチールカメラを用いた爆発現象の観測を始めた^{3),4)}。本稿では今までの解析で判明した爆発の時間的経過を述べ、爆発に伴い放出される火山ガスの量の推定を行う。

2. 爆発の時間的経過

はじめに観測システムの概略を述べる。TV カメラは桜島南岳山頂火口の西側約 5.5km にある桜島火山観測所本館に設置してある (Fig.1)。通常の観測では、南岳山腹と火口上空約 2000m (火口 rim から約 1000m) が撮影できる画角を設定している。火口底が海拔 830m であり、rim が 1050~1100m であるから、火孔 (vent) から約 250m の範囲の現象は観測できない。

TV カメラの映像出力には、地震観測に使用している時計と同期して駆動するビデオタイマーにより刻時

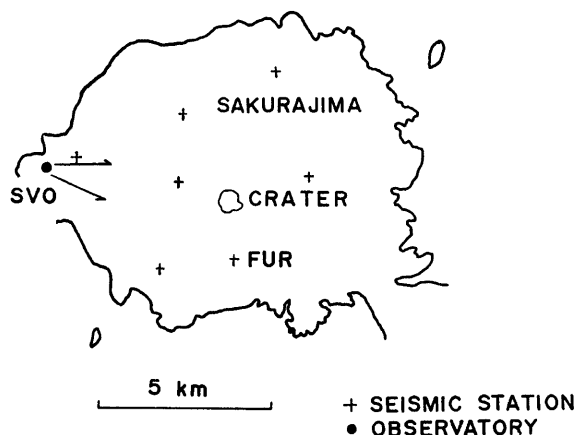


Fig. 1 Locations of the seismic stations and Sakurajima Volcanological Observatory. TV camera is installed at the observatory.

(月日時分秒および 1/100 秒) が挿入され、ビデオテープレコーダ (VTR) に記録される。通常、記録がおわったテープは自動的に巻戻され、VTR は再び記録モードになる。爆発地震が発生し、地震観測システムの判別装置がトリガー信号を出力した時のみ、VTR が記録モードに復帰しないような制御を行っている。爆発現象の解析は TV モニターの再生映像上で行った。解析の対象とする映像の各シーンを TV モニター上に静止させるスケールで必要な計測を直接行う方法と、カメラで TV モニター上の静止画像を撮影し写真上で計測する方法を併用した。

石原・井口³⁾ は1982年5月に発生した爆発のうち3例の映像を解析し、次に述べる結果を得た。

- (1) 爆発地震^{5), 6)} の発生は火口底で生じる爆発現象 (衝撃波の発生および噴石・噴煙の放出) に数秒先行する。
- (2) 衝撃波が大気中を伝播する様子は火口上空に適度の雲または水蒸気が存在すれば、映像として観測できる。衝撃波の compressional phase では断熱圧縮による気化が生じ雲の消滅現象が認められ、引続く rarefaction phase では断熱膨張によって雲が現われる。衝撃波の伝播速度は vent 直上 300~600m でマッハ 1.3~1.4 である。衝撃波が vent から射出された時刻は爆発地震の発生より約1.5秒遅れる (Fig. 2)。
- (3) 噴石および噴煙の放出は、衝撃波の発生とほぼ同時刻または2~3秒遅れる (Fig. 3)。噴煙の上昇速度はある高度 (Fig. 3 中の H_c) までは減少し、上昇速度が極小になった後はほぼ一定速度 (20~25 m/sec) で上昇を続ける。なお、噴煙の放出時刻は、爆発初期の上昇過程が乱流ジェットとして扱える、即ち上昇速度が vent からの高度に反比例すると仮定して推定している。

1982年5月から11月までに発生した爆発のうち約2割にあたる19回の爆発が映像として記録されている。本稿では比較的明瞭な映像が得られている4例の爆発の解析結果を加えて、前述した爆発地震と火口内での爆発現象の時間的関係を再検討した。

Table 1 に解析の結果得られたデータを示した。爆発地震の発震時 (T_1) および震源の深さをすべての爆発について決定することはできなかった。しかし古里観測点 (Fig. 1 中の FUR) への地震波の到達時刻は、衝撃波の vent からの射出時刻 (T_2) に0.3~1.8秒先行しており、爆発地震の発生が火口底での爆発現象に先行していることは明白である。Table 1 に示した解析結果を模式的に表現したのが Fig. 4 である。

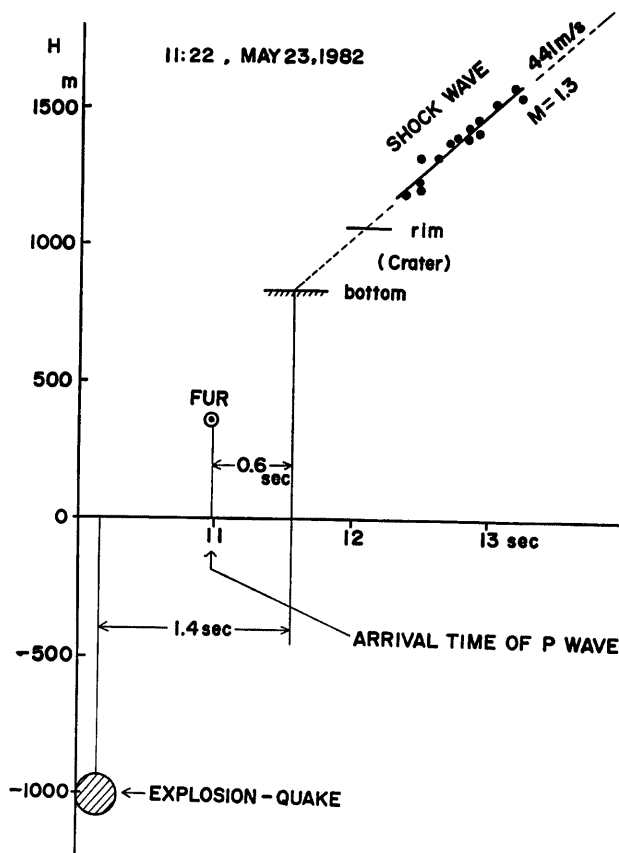


Fig. 2 Velocity of the atmospheric shock wave caused by the volcanic explosion, which occurred on May 23, 1982. The explosion-quake originated before the appearance of the shock wave.

Table 1. Sequence of phenomena occurred in volcanic explosions.

Date	Time	Explosion-quake		Shock wave Velocity (V_a)	Volcanic cloud			
		T_1	Focal Depth		T_3	T_4	Hc	V_t
1982 May 7	08:50	-0.91sec	1.1km	sec	1.2sec	5.5sec	260m	23m/sec
May 7	15:11	-0.86	1.2	0.4 (450)	2.7	7.0	310	25
May 23	11:28	-0.86	1.0	0.6 441	2.8	6.6	320	23
May 25	16:25			0.8 461	0.8	8.0	280	21
Sep. 17	11:30			1.8 (450)	3.0	12.4	750	28
Nov. 12	14:23			0.3 (450)	0.5	4.0	390	33
Nov. 23	15:32	-0.81	0.8	0.3 500				

* V_t denotes the uprising velocity of the volcanic cloud above Hc. The other notations are the same as in Fig. 3.

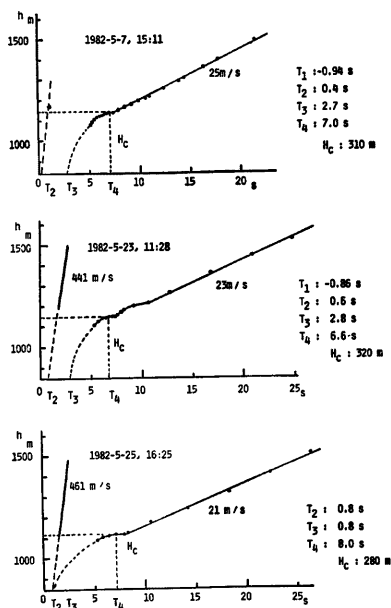


Fig. 3 Uprise of the volcanic cloud in the initial stage of the volcanic explosion. T_1 denotes the origin time of the explosion-quake reduced by the arrival time of seismic wave at FUR, the location of which is shown in Fig. 1. T_2 and T_3 are the times when the shock wave and the volcanic wave are emitted from the vent, respectively. The velocity of the volcanic cloud becomes minimum at the height of H_c and at the time of T_4 .

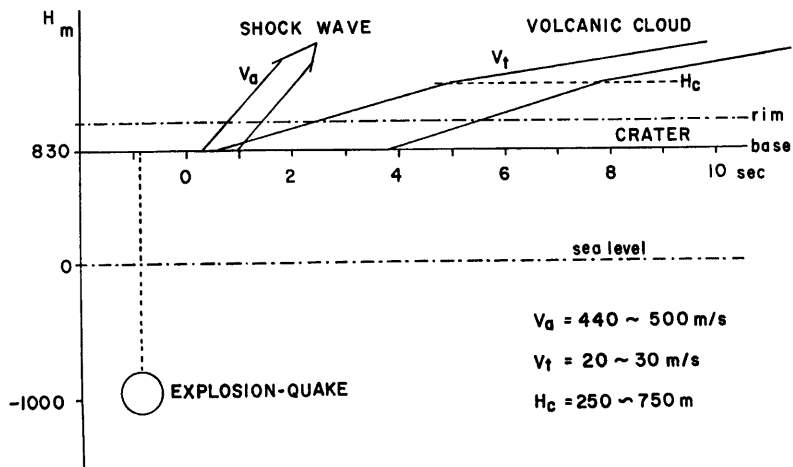


Fig. 4. Schematic representation for the sequence of phenomena in a volcanic explosion.

爆発地震の震源決定がなされ、衝撃波の射出時刻が推定できた爆発について、2つの現象の時間差および発生位置の高度差を求めると、1.1~1.5秒および1.6~2km となる。爆発地震の発生を内部爆発とみなすと、火道内を圧力波が伝播あるいはガスを含んだマグマが上昇する速度は 1000~1500m/sec の高速値となる。

3. 爆発により放出される火山ガス量の推定

今までに明瞭な映像記録が得られた爆発のうち、最大級の爆発は、1982年9月17日11時30分の爆発である。火口から約 4km の地点に降下した火山灰は約 5kg/m² であり、総噴出量は約 10⁵ton と見積られている。この値は今回解析した他の爆発の推定噴出量より1桁大きい。Fig. 5 にこの爆発時の噴煙の上昇高度の時間的変化と2秒毎の噴煙の輪郭を示した。噴煙の火口 rim から約200m上空 (vent から約 400m) での上昇速度は 100m/sec に達し、上昇速度が極小になった高度 (H_c) は vent から約 750m 上空であった。

この爆発では噴煙の上昇運動は定常的な乱流ジェットでは説明できず、上昇速度が vent からの高度の3乗に反比例するとした方が観測値とよく一致する。噴煙の輪郭の時間的変化に注目すると、H_cに達するまで (Fig. 5 中の実線で示した輪郭) は鉛直方向と同様に水平方向にも広がる傾向がみられる。即ち、この stage では噴煙は膨張運動をしていると言える。他方、H_cを超えると (Fig. 5 中の破線で示した輪郭) 水平方向の運動量は減少し、鉛直方向の上昇運動が卓越している。この stage は噴煙柱の下部から大気が混入し、対流運動が卓越する過程といえる。

一般に流体中では細粒なものほど流速に近い速度を得ることが期待される。火山噴火の場合にも同様の観測結果が得られている⁷⁾。噴煙を構成する主な固体噴出物は径が1mm未満の火山灰である。従って、爆発初期の膨張過程における噴煙の容積は概略火山ガスの容積とみなせよう。ここでは、噴煙の上昇速度が極小になった時、vent から放出された高温・高圧ガスが大気圧と平衡状態に達したとみなし、火山ガスの放出量を計算する。

Fig. 6 に示したような vent を原点とする扇形を回転した形で噴煙を近似し、噴煙、即ち放出された火山

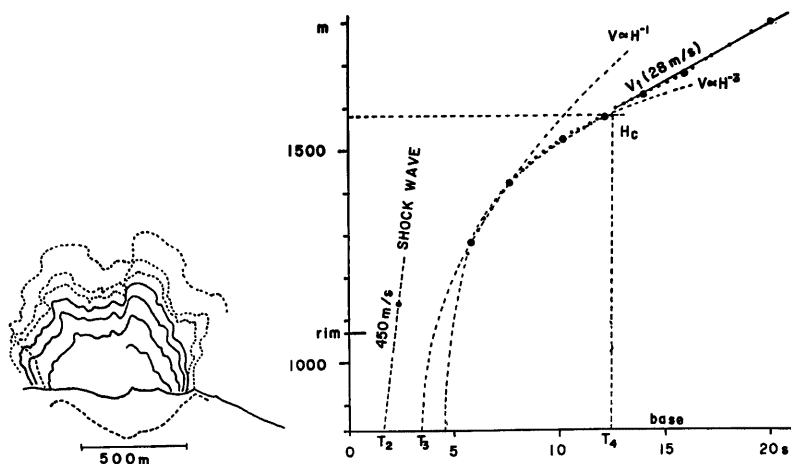


Fig. 5 Growth of the volcanic cloud by the explosion, which occurred on Sep. 17, 1982. The shape of the cloud is also shown every two seconds. Notations are the same as in Fig. 3.

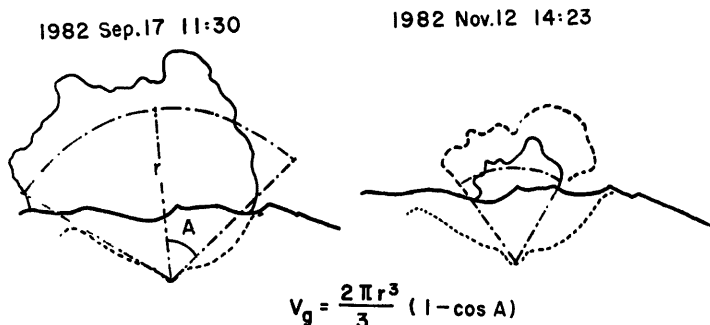


Fig. 6 Approximation for the volume of the volcanic cloud in the initial stage of explosion.

スの容積 V_g を求める。次に理想気体の状態方程式から火山ガスの質量 W_g を次式で計算した。

$$W_g = \frac{MPV_g}{RT}$$

この式で、火山ガスの平均分子量 M を 19.8, 気圧 P を $0.9 \times 10^6 \text{ dyn/cm}^2$, 温度 T を 400°K^* とした。 R は気体常数 ($8.3 \times 10^7 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) である。

Table 2. Amounts of volcanic gases emitted in the initial stage of volcanic explosions.

Date	Time	Volume (Vg)	Mass (Wg)	Duration
1982 May 7	08:50	$4.8 \times 10^{12} \text{ cm}^3$	$3 \times 10^9 \text{ gr.}$	3.7sec.
	May 7 15:11	4.0×10^{12}	2×10^9	4.7
	May 23 11:28	1.2×10^{13}	8×10^9	3.8
	May 25 16:25	6.1×10^{12}	3×10^9	7.2
	Sep. 17 11:30	1.2×10^{14}	7×10^{10}	9.4
	Nov. 12 14:23	9.0×10^{12}	6×10^9	3.5

6回の爆発について、前述の方法で推定した火山ガスの放出量を **Table 2** に示した。爆発初期 (3~10秒間) に放出される火山ガスは $10^9 \sim 10^{10} \text{ ton}$ と見積られる。平林⁹⁾ は桜島火山の火口から定常的な噴煙活動による火山ガスの放出量を $(1 \sim 2) \times 10^4 \text{ ton/day}$ と見積っている。この値と比較すると、爆発の際に噴出する火山ガスの量は定常的な噴煙活動によって数時間から1日の間に放出される量に相当すると言える。放出 rate で比較すると、爆発に伴う火山ガスの放出 rate は定常的な噴煙活動におけるよりも3~4桁大きいことになる。

* 1982年6月12日22時07分の爆発の赤外線映像によると噴煙の温度は $100 \sim 150^\circ \text{C}$ であった。

4. ま と め

桜島火山の爆発を TV カメラにより撮影し、7例の爆発について解析し次の結果を得た。

- (1) 火口直下 1.6~2km で発生した爆発地震は、火口底での爆発現象に1.1~1.5秒先行して発生した。
- (2) 爆発の際に発生する衝撃波の伝播速度は vent 上空 300~600m でマッハ1.3~1.5であった。
- (3) 噴煙の上昇速度 vent から射出後3~10秒で極小値を示す。その後一定速度 (20~35m/sec) の上昇

運動に移行する。

- (4) 爆発初期（3～10秒間）の噴煙の運動を vent から放出された高温高圧ガスの膨張過程とみなし、爆に伴い放出された火山ガスの量を試算すると $10^3 \sim 10^4 \text{ ton}$ となる。放出 rate からみると、定常的な噴煙活動に比較し3～4桁大きい値（ $10^2 \sim 10^3 \text{ ton/sec}$ ）である。

火山の爆発機巧について現段階で確定的なことは言えないが、以上の解析結果を考え併せると、火山爆発は次のような現象として認識される。

ある条件により vent の直下 1～3km の深さでマグマから急激にガスが分離する（爆発地震の発生）。そこから火口に向け圧力波あるいは火山ガスを多量に含んだマグマが $1000 \sim 1500 \text{ m/sec}$ で上昇する。vent 内に蓄積されていたあるいは上昇してきた $10^3 \sim 10^4 \text{ ton}$ の火山ガスが短時間（3～10秒）のうちに大気中に放出される。その際に衝撃波が発生し、噴石・火山ガスと共に大気中へ放出される。

火山の爆発過程の中で最初に発生する爆発地震の発生のメカニズムは明確になっていない。物理化学的な実験と理論的検討および観測にもとづく検討（爆発地震の解析と爆発前の表面現象の解析）が必要であろう。

本稿を終るにあたり、観測システムの整備・保守にあたられた高山鉄朗技官に厚く御礼申し上げます。なお、観測に要した経費の一部は科学研究費補助金によってまかなった。

参 考 文 献

- 1) Yokoyama, I.: Energetics in active volcanoes. 2nd paper, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 35, 1957, pp. 75-97.
- 2) Minakami, T.: On the distribution of volcanic ejecta(part 1), Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 20, 1941, pp. 65-91.
- 3) 石原和弘・井口正人：火山の爆発現象の映像による解析(1), 火山, 第2集, 第27巻, 昭57, p. 340.
- 4) 井口正人・石原和弘・加茂幸介：火山弾の飛跡の解析—噴出物の放出速度と爆発圧力について—, 京都大学防災研究所年報, 第26号B-1, 昭58. 4, pp. 9-21.
- 5) 加茂幸介：桜島における噴火の前駆現象と予知, 火山, 第2集, 第23巻, pp. 53-64.
- 6) 西澤：火山性地震のスペクトルの研究（I）—爆発地震—, 京都大学防災研究所年報, 第23号B-1, 昭55. 4, pp. 29-35.
- 7) Chouet, B., N. Hamisevicz and T. R. McGetchin: Photoballistics of volcanic jet activity at Stromboli, Italy, J. G. R., Vol. 79, 1974, pp. 4961-4976.
- 8) 平林順一：桜島火山の地球化学, 火山, 第2集, 第27巻, 昭57, pp. 293-309.