

桜島火山における爆発的噴火の力学過程 —— 爆発地震の震源過程と空気振動の関係 ——

為栗 健・井口正人・石原和弘

要 旨

桜島火山における爆発的噴火に伴う爆発地震の震源過程と空気振動データから、爆発的噴火の発生メカニズムについて考察を行った。爆発地震の震源過程解析から、爆発地震発生の0.9-1.1秒後に火口底下0.25-0.5kmにおいて等方膨張、その後、水平収縮が発生しているという結果が得られた。また、空気振動の発振時および振幅と爆発地震の震源過程の比較から、空気振動は火口直下浅部における等方膨張によって励起されていることが明らかになった。等方膨張は火口直下浅部に蓄積されたガス溜まりの増圧によって、水平収縮はガス溜まりの破裂の後、ガス放出による火口付近の減圧によって生じていると考えられる。

キーワード: 桜島火山, 爆発的噴火, 爆発地震, 空気振動, ガス溜まり

1. はじめに

桜島火山では1955年以降、南岳山頂火口において活発な爆発的噴火活動が続いている。爆発的噴火に伴って爆発地震が観測される。桜島火山の爆発地震は深さ2kmにおける等方的な体積膨張で始まり (Tameguri et al., 2001), 引き続き鉛直方向の円筒形に近い収縮が発生する (Uhira and Takeo, 1994)。P波初動の約2秒後に振幅の大きな長周期振動が後続している。波動の特徴から、この位相はRayleigh波によって構成されていることがわかっているが (為栗ら, 1999), 震源メカニズムについては明らかではない。

爆発的噴火の際には空気振動が観測される。西 (1980) は爆発地震の震源モデルとして球状のcavityを仮定し、P波初動のスペクトル解析から、cavityの内部圧と空気振動の振幅に比例関係があることを示した。これは、深さ2kmにおける等方膨張と空気振動の発生に関係があることを示唆している。爆発的噴火の際に

観測される衝撃波および高速度の火山弾の放出から、火口底下にガス溜まりの存在が提案された (Ishihara, 1985)。爆発発生時に観測される傾斜計・伸縮計のstep状の変化は、火口底下0.5kmに存在するガス溜まりの破裂によって生じる急激な減圧に起因すると解釈された (Ishihara, 1990)。また、Ishihara (1985) はビデオ映像の解析から、空気振動は爆発地震発生の1.1-1.5秒後に火口底から生じていることを示した。これらの研究は、火口直下浅部のガス溜まりが空気振動の発生に関与していることを示している。

これまで、爆発地震の初動部分における解析からは、火口直下浅部における爆発現象に対応する震源過程は得られていなかった。本稿では、爆発地震の初動部分に後続する長周期振動の解析を行うことにより、爆発地震の震源過程を明らかにする。また、空気振動の発振時および振幅データを爆発地震の震源過程と比較することにより、空気振動の発生メカニズムと爆発的噴火の力学過程について考察する。

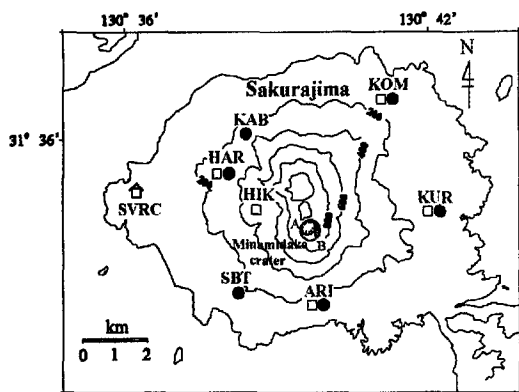


Fig. 1 Location map of air-shock and seismic stations. Air-shock is observed at SVRC. Solid circles denote permanent borehole stations. Open squares indicate broadband seismometers installed temporarily.

2. データ

空気振動は火口から 5.6km の距離にある火山活動研究センター (SVRC) において、低周波マイクロフォンによって観測された。データはサンプリング周波数 100Hz で記録された。地震動の解析は、定常観測を行っている固有周期 1 秒の地中地震計記録、および 1999 年 8 月～12 月に臨時観測を行った広帯域地震計記録を使用した。観測点分布を Fig. 1 に示す。臨時地震観測には STS-2 および JCP-1 型広帯域地震計を使用した。これらの地震計は 0.02-120 秒で速度応答がフラットな特性をもつ。データは GPS 刻時校正付きデータロガーに、サンプリング周波数 100Hz で記録を行った。

3. 爆発地震の震源過程解析

Fig. 2 に HAR 観測点で広帯域地震計によって記録された爆発地震の波形例を示す。P 波初動 (P 相) の後、やや大きい引き波 (D 相) が続く。P 波初動の約 2 秒後に最大振幅をもつ長周期成分の位相 (LP 相) が見られる。各位相の見かけ伝播速度、振動軌跡、振幅の距離減衰の特徴は、P, D 相は P 波、LP 相は Rayleigh 波によって構成されていることを示している (為栗ら, 1999)。

Kikuchi and Kanamori (1991) の波形インバージョン

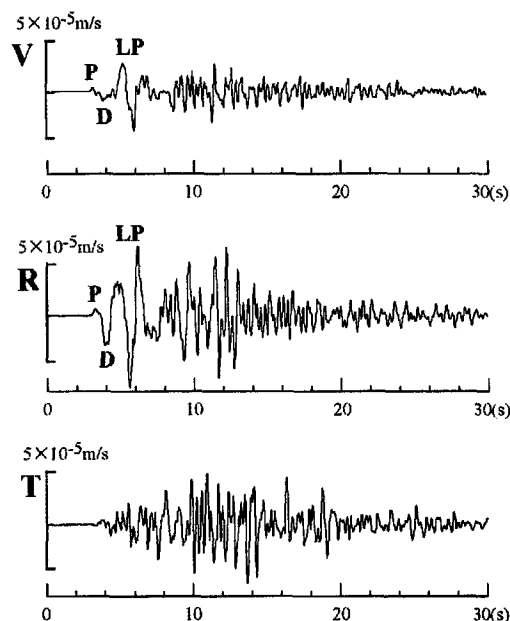


Fig. 2 An example of velocity waveform of explosion earthquake occurred at 04:55 on September 03, 1999. The three traces represent vertical (V), radial (R), and transverse (T) components, respectively.

法を使用し、各位相に対応する震源のモーメントテンソル解の推定を行った。モーメントテンソル解は観測波形と理論波形の残差二乗和が最小になる際に決定される。P 波初動到達時を用いた震源決定を行ったところ、震源は火口底下 1.8-2.2km に決定された。D 相の見かけ伝播速度は P 相とほぼ同じであったため、D 相の震源は P 相と同じ位置を仮定した。P, D 相の震源の深さでは、LP 相に対応する大振幅の Rayleigh 波は説明できなかったため、浅部に新たな震源を仮定する必要がある。LP 相は Rayleigh 波で構成されているため、到達時を用いた震源決定は難しい。そのため、深さを変えて波形インバージョンを行い、残差が最小になるモーメントテンソル解を決定した。LP 相は 1 つの震源時間関数では位相全体を説明できないため、2 つの震源時間関数を仮定し、それぞれのモーメントテンソル解の推定を行った。各位相の波形インバージョンを行う際の未知パラメータを Table. 1 に示す。理論波形を計算する際のグリーン関数は Hisada (1994) の方法を使用し、速度構造は P 波速度 2.5km/s の半無限均質構造を仮定して計算を行った。また、各位相と同様の周波数

Table 1. Ranges of search and increment of parameters for waveform analyses.

Source parameter	P phase		D phase		LP phase	
	Range	Increment	Range	Increment	Range	Increment
Epicenter	X_0, Y_0^* : Fixed	—	X_0, Y_0 : Fixed	—	X_0, Y_0 : Fixed	
Depth	Z_0^* : Fixed	—	Z_0 : Fixed	—	0.05~1km	0.05km
					1~3km	0.1km
Rise time of source time function	0.05~1s	0.05s	0.05~1s	0.05s	0.05~5s	0.05s
Source duration	0.1~2s	0.05s	0.1~2s	0.05s	0.1~10s	0.1s
Origin time	T_0^* : Fixed	—	$T_0 \sim T_0+2s$	0.05s	$T_0 \sim T_0+4s$	0.1s

* X_0, Y_0, Z_0 and T_0 are hypocenter and origin time calculated from arrival times of P-wave first motions.

をもつ遠地震の振幅を用いて、観測点の振幅補正を行った。

桜島島内では、地表設置の地震計による波形記録は、水平動の P 波初動の立ち上がりが上下動と比較して約 0.2 秒遅れる。地中地震計による波形記録では、このような水平動の立ち上がりの遅れは見られない。この現象を理論的に説明できないため、地表設置の地震計による記録を使用して波形インバージョンを行った場合、正確な解が得られない (Tameguri et al., 2001)。一方、固有周期 1 秒の地中地震計では長周期成分が卓越する LP 相を正確に記録できない。そのため、本稿では P, D 相は地中地震計による波形記録, LP 相は地表設置の広帯域地震計の記録を用い、15 例の爆発地震について、モーメントテンソル解の推定をおこなった。

4. 波形インバージョン結果

4. 1 P, D 相

Fig. 3 に P, D 相の波形インバージョン結果の 1 例を示す。上段左側に P, D 相に対応する震源時間関数、右側に得られたモーメントテンソル成分を示す。下段は、実線が観測波形、破線が理論波形を表す。全観測点で、観測波形と理論波形がよく合っている。P 相のモーメントテンソル成分は体積変化を表す対角成分が卓越しており、非対角成分は対角成分の 10% 以下である。対角成分はすべて正で、ほぼ同じ値をもっており、

等方的な体積膨張を表す結果が得られた。D 相のモーメントテンソル成分は P 相と同様に、対角成分が卓越している。対角成分の値はすべて負で、水平方向の dipole が鉛直方向の dipole の約 2 倍大きい。これは鉛直方向の円筒形収縮を表す (Chouet, 1985)。P, D 相を励起する震源の継続時間はそれぞれ 0.4 秒、1.2 秒であり、D 相を励起する地震モーメントは P 相の約 10 倍大きい結果が得られた。解析を行った 15 例の爆発地震について、地震モーメントの大きさに違いはあるが、ほぼ同様の結果が得られた。

4. 2 LP 相

Fig. 4 に LP 相の波形インバージョン結果の 1 例を示す。また、Fig. 5 に震源の深さによる残差の変化を示す。深さ 2km における P, D 相に対応する等方膨張、円筒収縮より明らかに浅い位置で残差が最小となった。Fig. 4 は震源の深さを 0.3km とした場合の波形インバージョン結果を示している。図の構成は Fig. 3 と同様である。全観測点で観測波形と理論波形がよく合っている。LP1 相のモーメントテンソル成分は対角成分が卓越しており、非対角成分は対角成分の 10% 以下である。対角成分はすべて正で、ほぼ同じ値をもっており、等方的な体積膨張を表す結果が得られた。LP2 相のモーメントテンソル成分は水平方向の dipole が卓越しており、対角成分の値はすべて負である。鉛直方向の dipole および非対角成分は水平方向の dipole の 10% 以

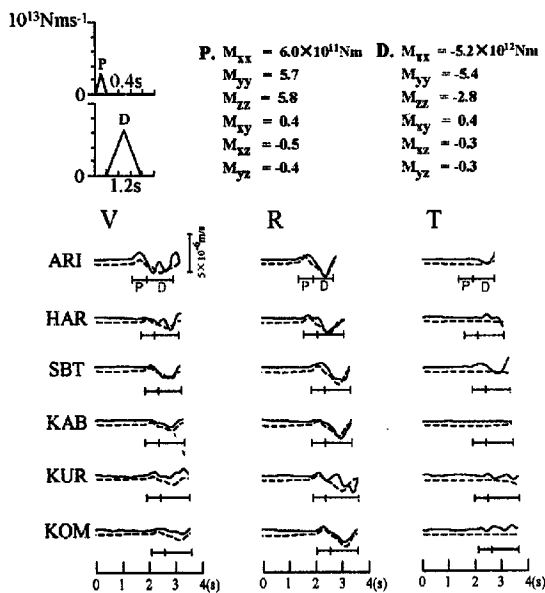


Fig. 3 An example of result of the waveform inversion for the P and D phases. The explosion earthquake occurred at 04:14, September 15, 1999. Waveforms of vertical (V), radial (R), and transverse (T) components are plotted from left to right. Two triangular source time functions P and D corresponding to the P phase and following D phase are displayed in the upper left. Bars with symbols "P" and "D" under the waveform represent time window of waveform inversion.

下である。これは水平方向の収縮を表す。LP1 および LP2 相を励起する震源の継続時間は 1.3 秒である。震源時間関数上の P, D は深さ 2km の等方膨張, 円筒収縮の発震時を表している。LP1 相を励起する震源の発震時は深さ 2km における等方膨張の 1.1 秒後に発生している。15 例の爆発地震について解析を行った結果, ほぼ同様の結果が得られており, LP 相は爆発地震発生の 0.9-1.1 秒後に火口直下 0.25-0.5km における等方膨張, その後の水平収縮によって励起されていることが明らかになった。

Fig. 6 に爆発地震の震源過程を模式的に示す。爆発地震は, 深さ 2km における等方膨張により始まり, その 0.2-0.5 秒後に同じ位置で円筒収縮へと移行する。爆発地震の発生から 0.9-1.1 秒後には火口直下の深さ 0.25-0.5km において等方膨張と水平収縮が発生する。

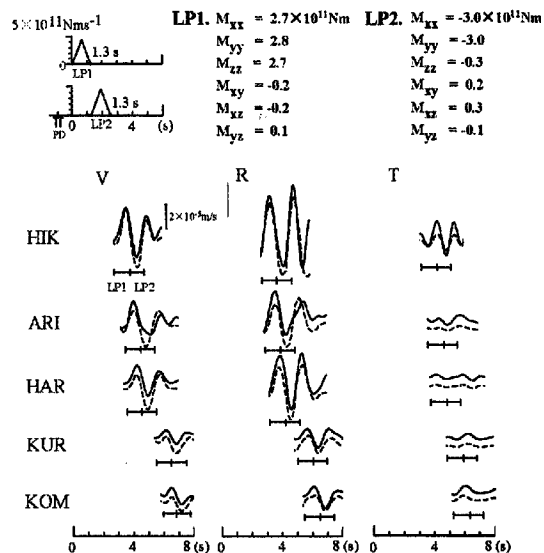
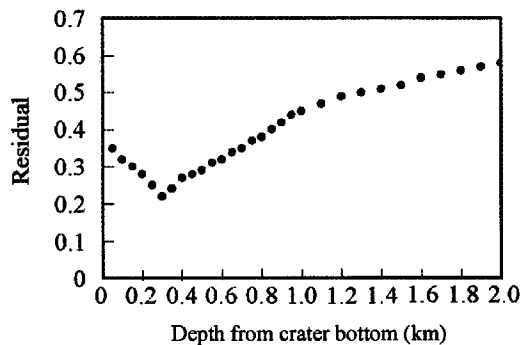


Fig. 4 An example of result of the waveform inversion for the LP phase. Triangular source time functions LP1 and LP2 corresponding to the LP1 phase and following LP2 phase are displayed in the upper left. P and D in the time axis of source time function represent origin times. Bars with symbols "LP1" and "LP2" under the waveform represent time window of waveform inversion.

LP1



LP2

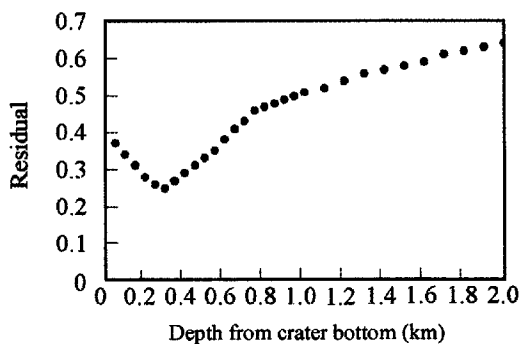


Fig. 5 Relation between source depths and residual.

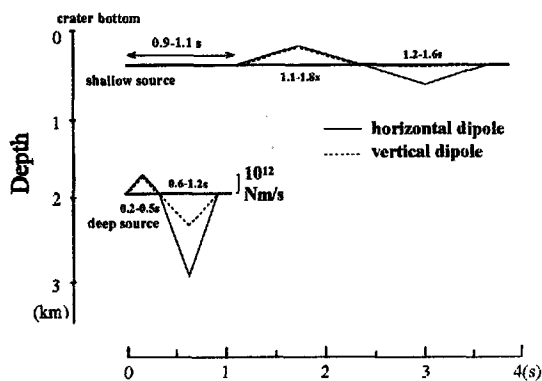


Fig. 6 Time sequence of origin times and depths of 4 sources generating the P, D, and LP phases. Solid and broken lines indicate source time functions of horizontal and vertical dipoles, respectively.

5. 空気振動解析

桜島火山南岳には現在活動中の二つの火口 (Fig. 1, 7 中の A, B) があり, 爆発的噴火が発生した火口を判別できた 4 つのイベントについて, 空気振動データの解析を行った。空気振動の発振時は観測された空気振動の到達時と Minakami et al. (1970) の波線経路による走時計算から推定した。Fig. 7 に空気振動の波線経路を示す。空気振動の走時には, 観測点と火口間の平均気温, 風向, 風速の補正を行っている。空気振動の発振時の計算結果と爆発地震の各 phase に対応する発振時を Table 2 に示す。空気振動の発振時は火口直下浅部における等方膨張の発振時と 0.3 秒以内で一致しており, 両者はほとんど同時に発生しているという結果が得られた。

さらに, 空気振動の振幅と地震モーメントの比較を行った。震源過程解析から求められた深さ 2km における等方膨張および火口直下浅部における等方膨張の地震モーメントと空気振動の振幅の関係を Fig. 8 に示す。空気振動の振幅は深さ 2km における等方膨張より, 浅部における等方膨張との間に線形相関が見られる。以上のことから, 空気振動の発生は火口直下浅部における等方膨張に伴って発生していると考えられる。

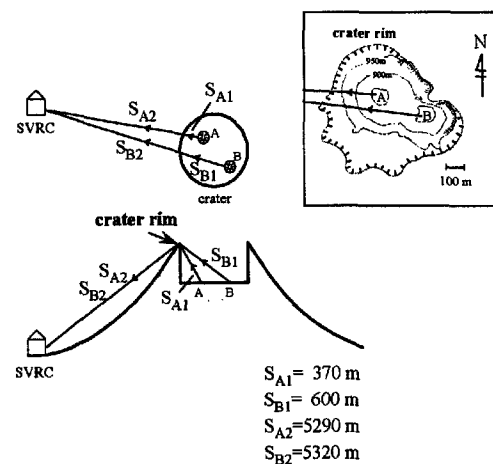


Fig. 7 Schematic figure for calculation method of path of air-shock (Minakami, 1970). S_{A1} and S_{B1} represent path from vents to crater rim of direction of the station. S_{A2} and S_{B2} represent path from crater rim to the station SVRC. The path of the air-shock from crater to the station is calculated by adding S_1 to S_2 .

6. 議論

桜島火山における爆発地震の震源過程と空気振動データから爆発的噴火の力学過程を考察してみる。Fig. 9 の上段に爆発地震の震源過程, 下段に爆発的噴火の力学過程を示す。爆発地震の発生前には火口底に溶岩ドームの存在が確認されており, その直下にガス溜まりが形成されていると考えられる (Ishihara, 1985)。爆発地震は深さ 2km における等方膨張により始まり, その 0.2-0.5 秒後に同じ深さで円筒形収縮が発生する。桜島のマグマは深さ 3-4km 付近で水の過飽和状態に達している (Sekine et al., 1979) ことから, 爆発地震の震源付近ではマグマからの脱ガスによって, gas bubble が存在し得る。従って, 深さ 2km における等方膨張は球状の gas bubble の破裂によって生じていることが考えられる。この gas bubble の破裂により, 上方への gas flow の通り道ができ, 震源付近の圧力が減少し, 円筒形の火道収縮が発生する。

火口直下浅部における等方膨張の発生原因について考えてみる。爆発地震発生 0.9-1.1 秒後に火口底下 0.25-0.5km において等方膨張と水平収縮が発生する。爆発地震発生と火口直下浅部における等方膨張の発生

Table 2. Origin times of air-shock and each phase of explosion earthquakes.

Date	Vent	v_s (m/s)	t_a	T_a	T_1 ($T_a - T_1$)	T_2 ($T_a - T_2$)	T_3 ($T_a - T_3$)	T_4 ($T_a - T_4$)
Nov. 16, 1999	B	334.63	11:06:47.6	11:06:29.9	11:06:29.0 (0.9)	11:06:29.3 (0.6)	11:06:30.0 (-0.1)	11:06:31.3 (-1.4)
Nov. 21, 1999	A	338.28	15:22:56.2	15:22:39.4	15:22:38.1 (1.3)	15:22:38.3 (1.1)	15:22:39.2 (0.2)	15:22:41.0 (-1.6)
Dec. 12, 1999	A	333.66	16:49:10.7	16:48:53.6	16:48:52.3 (1.3)	16:48:52.5 (1.1)	16:48:53.3 (0.3)	16:48:54.9 (-1.3)
Dec. 17, 1999	B	335.02	15:30:51.3	15:30:33.6	15:30:32.5 (1.1)	15:30:33.0 (0.6)	15:30:33.6 (0.0)	15:30:34.9 (-1.3)

v_s : Velocity of sound after atmospheric correction

t_a : Arrival time of air-shock at SVRC

T_a : Origin time of air-shock

T_1 : Origin time of isotropic expansion at a depth of 2km

T_2 : Origin time of cylindrical contraction at a depth of 2km

T_3 : Origin time of isotropic expansion at shallow part

T_4 : Origin time of horizontal contraction at shallow part

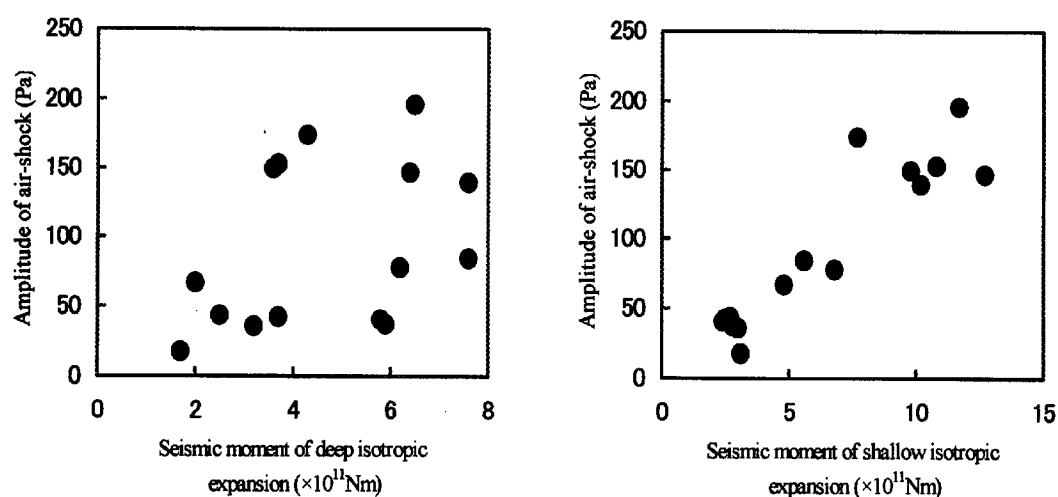


Fig. 8 Relation between the amplitude of air-shock and the seismic moment of deep isotropic expansion (left) and shallow isotropic expansion (right).

の時間差から、火道内における現象の伝播速度は 1.4-1.9km/s と推定される。しかしながら、深さ 2km において発生した gas flow が火口直下に到達し等方膨張を発生させるには、伝播速度が速すぎる。一方、熔融状態の安山岩質マグマ内を伝播する圧力波の速度は 2.3-2.5km/s である (Murase and McBirney, 1973)。火道内は熔融状態のマグマに脱ガス過程によって形成された

gas bubble が混在しているものと考えられるので、圧力波の伝播速度は実験値よりもやや遅くなると思われ、震源過程から見積もられた伝播速度と調和的である。以上のことから、火口直下浅部の等方膨張は、深さ 2km における等方膨張によって生じた圧力波が、火口直下に形成されているガス溜まりを破裂させることにより発生し、空気振動はガス溜まりが破裂する際の増圧

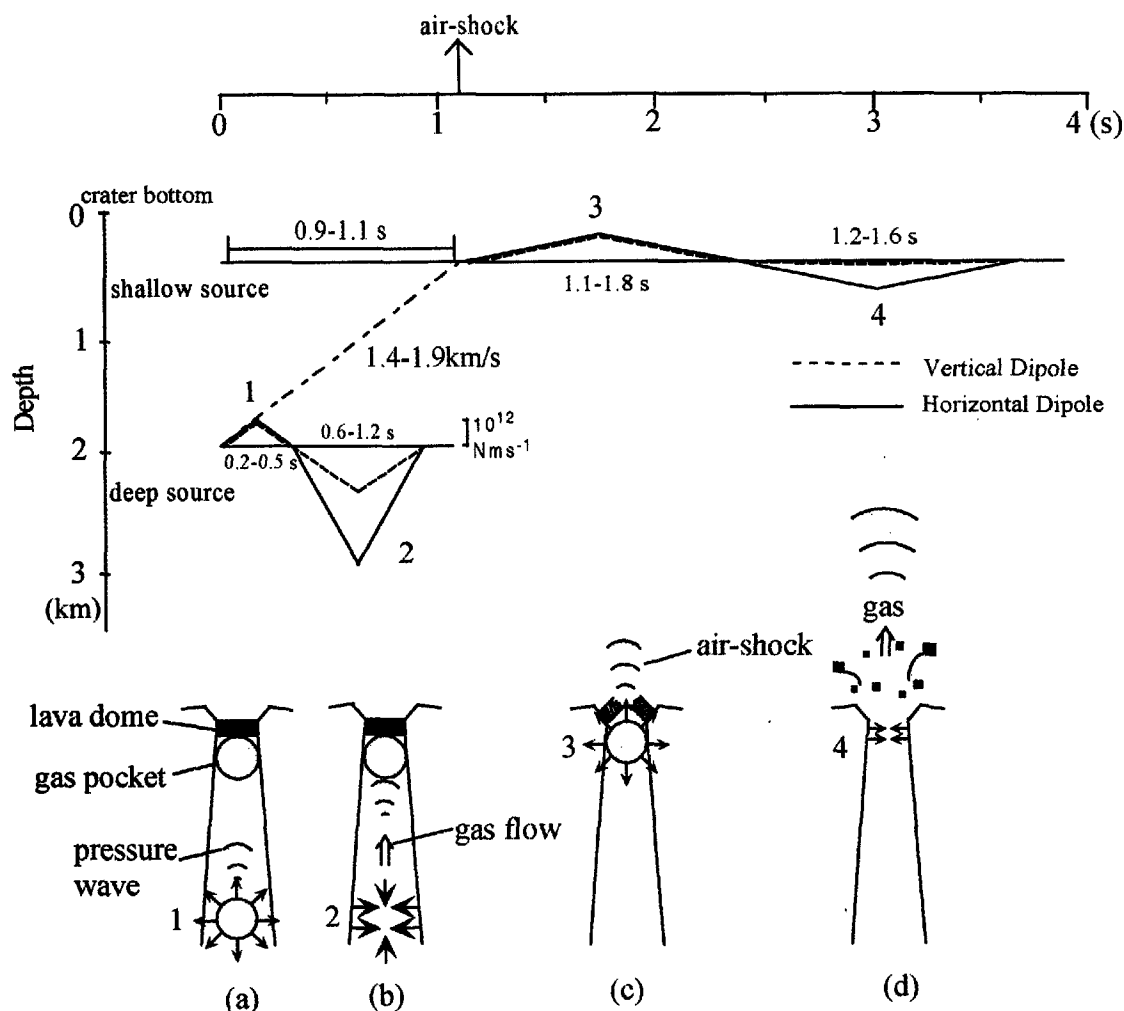


Fig. 9 Time sequence of origin times and depths of 4 sources generating the P, D, and LP phases is shown in upper part. Mechanics of explosive eruption is schematically shown in lower part.

によって励起されている。その後の水平収縮はガス溜まりが破裂し、ガスが放出され、火口底付近の減圧によって生じていると考えられる。

溜まりの破裂後、ガス溜まり内のガスが放出される。

謝 辞

7. まとめ

桜島火山で発生する爆発的噴火に伴う空気振動は火口直下浅部に形成されているガス溜まりが破裂する際の増圧によって発生していることが示唆された。爆発地震の震源過程および空気振動データから爆発的噴火の力学過程として以下のようなモデルが考えられる。深さ 2km における球状の gas bubble の破裂により圧力波が生じる。この圧力波が火道内を伝播し、火口直下浅部に形成されているガス溜まりを破裂させる。ガス

地震動および空気振動の観測を行う際、火山活動研究センターのスタッフにご協力いただいた。また、同センター神田径博士から本稿について有益なコメントをいただいた。鹿児島地方気象台から貴重な気象データをご提供いただいた。あわせてお礼申し上げます。

参考文献

為栗 健・井口正人・石原和弘 (1999): 桜島火山で発生する爆発地震の低周波主要動の特徴, 火山学会講

- 演予稿集, No. 2, B10, p52.
- 西 (1980): 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, 23B-1,
pp.29-35.
- Chouet, B. (1985), Excitation of a buried magmatic pipe: A seismic source model for volcanic tremor, *J. Geophys. Res.*, 90, pp.1881-1893.
- Hisada, Y. (1994), An efficient method for computing Green's functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, pp.1456-1472.
- Ishihara, K. (1985), Dynamical analysis of volcanic explosion, *J. Geodyn.*, 3, pp.327-349.
- Ishihara, K. (1990), Pressure sources and induced ground deformation associated with explosive eruptions at an andesitic volcano: Sakurajima volcano, Japan, in *Magma Transport and Storage*, edited by M. P. Ryan, pp.336-356, John Wiley, New York.
- Kikuchi, M. and H. Kanamori (1991), Inversion of complex body waves-III, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 81, pp.2335-2350.
- Minakami, T., S. Utibori, S. Hiraga, T. Miyazaki, N. Gyoda, and T. Utsunomiya (1970), Seismometrical studies of Volcano Asama, Part 1. Seismic and volcanic activities of Asama during 1934-1969, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 48, pp.235-301.
- Murase, T and A. R. McBirney (1973), Properties of some common igneous rocks and their melts at high temperatures, *Bull. Geol. Soc. Am.*, 84, pp.3565-3592.
- Sekine, T., T. Katsura, and S. Aramaki (1979), Water saturated phase relations of some andesites with application to the estimation of the initial temperature and water pressure at the time of eruption, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, pp.1367-1376.
- Tameguri, T., M. Iguchi, and K. Ishihara (2001), Reexamination of moment tensors for initial motion of explosion earthquakes using borehole seismograms at Sakurajima volcano, Japan, *Earth Planets Space*, 53, pp.63-68.
- Uhira, K., and M. Takeo (1994), The source of explosive eruption of Sakurajima volcano, Japan, *J. Geophys. Res.*, 99, pp.17775-17789.

Mechanics of Explosive Eruption at Sakurajima Volcano —Relation between Source Process of Explosion Earthquake and Air-shock—

Takeshi TAMEGURI, Masato IGUCHI and Kazuhiro ISHIHARA

Synopsis

Source process of explosion earthquakes that accompany explosive eruptions at Sakurajima volcano, was investigated to clarify mechanical process of explosive eruption. The results of source process showed that the explosion earthquake was initiated by an isotropic expansion and a cylindrical contraction at a depth of 2km beneath the crater bottom. A shallow isotropic expansion at depths of 0.25-0.5km beneath the crater bottom was followed by the explosion earthquake after 0.9-1.1s. The origin time of shallow isotropic expansion coincided with generation of air-shock at the crater bottom and seismic moments of shallow expansion source were correlated with the amplitudes of air-shock. It is inferred that the isotropic expansion is caused by instantaneous pressure increase in the gas pocket formed at the uppermost part of the volcanic conduit, which generates air-shock

Keywords: Sakurajima volcano; explosive eruption; explosion earthquake; air-shock; gas pocket