

桜島における火山噴火に伴う空気振動の観測

京都大学防災研究所

横尾 亮彦・井口 正人

為栗 健

東京大学地震研究所

綿田 辰吾・及川 純

1. はじめに

桜島における空気振動観測は、1963年に春田山観測室(HAR;図1)において志田式微気圧計を用いて始められ(図2),その後1980年代になると、春田山観測室や桜島火山観測所(SVO)でも低周波マイクロホンを用いた観測^{1)~3)}が行われるようになった。そして、地震・映像等の観測結果と併せることで、火口上空における空気振動の伝播特性²⁾や、爆発地震の発生から

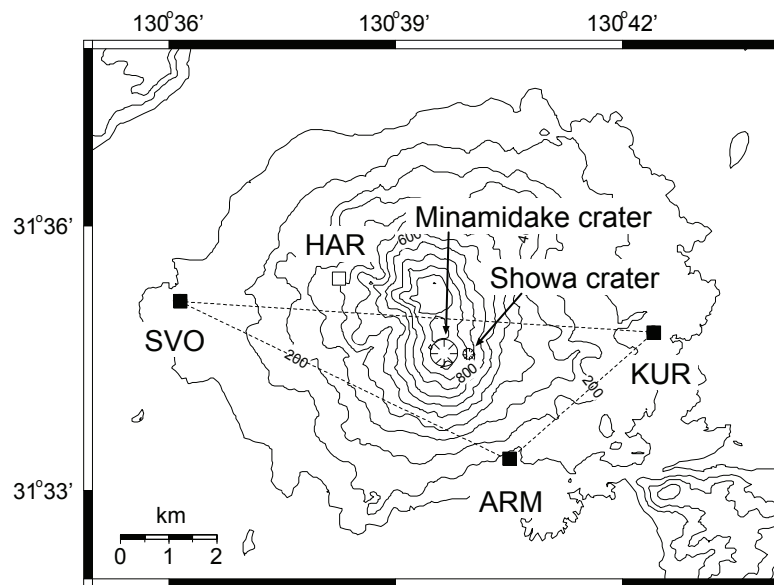


図1. 2008年2月現在における低周波マイクロホンの配置図(SVO, KUR, ARMの3点)。HARには志田式微気圧計が、KURには広帯域圧力計も、それぞれ設置されている。

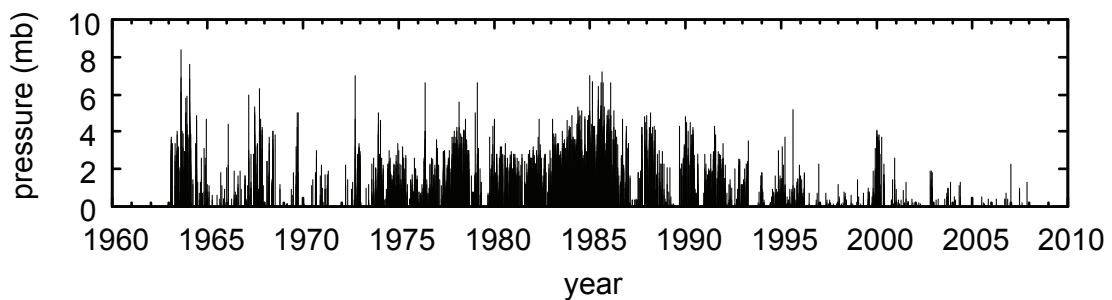


図2. HARの微気圧計によって記録されている1963年以降の空気振動の最大振幅の推移。

噴火表面現象(火口底における衝撃波の発生、噴煙の放出等)へいたる火山爆発の一連の力学過程⁴⁾などが明らかにされた。爆発的噴火の発生時以外における空気振動については、C型微動に伴う空振⁵⁾が報告されているものの、噴火表面現象との対応やその発生機構についてはまだ不明である。

桜島南岳の南東斜面に位置する昭和火口(図1)では、今回の集中観測に先立つ2006年6月に、58年ぶりとなる噴火活動が再開した。その後、2008年2月現在に至るまで、3期間にわたって噴火活動を繰り返してきている。昭和火口の噴火活動再開を機に、われわれは、従来からSVOに設置されていた低周波マイクロホン1点に加えて、島内2地点(KUR, ARM;図1)にも同タイプのマイクロホンを設置し、3点による空振ネットワーク観測を開始した。また、広帯域圧力計1台もKURに設置し、長周期の大気圧力変動観測も併せて行っている。

本稿では、われわれの空振ネットによって観測された山頂火口、昭和火口の噴火活動に伴う空振波形の特徴を紹介する。また、各観測点での到着時刻を元に空振波源計算を行ったので、その結果についても報告する。

2. 観測

南岳山頂火口、昭和火口の両方を囲む位置にそれぞれ配置した、SVO, KUR, ARMの3観測点(図1)による空振ネットワーク観測は、2006年6月から開始し(ただし2006年8月21日～9月9日はSVO, ARMと臨時観測点HARの3点)、2008年2月現在も継続している。各観測点で使用している低周波マイクロホン・増幅器は、ACO社製TYPE 3048S/7144(SVO), 3348/7144(KUR, ARM)であり(いずれも0.1～100 Hzの音圧特性が平坦)、増幅器からの出力信号は白山工業社製LT8500(SVO), LS7000XT(KUR), LS7000(ARM)により24bit A/D変換し、200Hz(SVO, ARM)および100 Hz(KUR)のサンプリング周波数で通信回線を介してテレメータ収録している。

2006年6月23日には、広帯域圧力計1台(Temex社製MB2000, 0.01～20 Hzで平坦)もKURに併せて設置し、低周波マイクロホンの信号と同様に24bit A/D変換、100 Hzサンプリングでデータ収録を開始した。

3. 観測された空気振動波形の特徴

3.1. 山頂爆発に伴う空気振動

2006年6月から2007年2月現在までに、南岳山頂火口では13回の爆発的噴火が発生した。各爆発に伴って発生した空振は、これまでの報告^{1), 3)}にあるように、急峻な圧縮相で始まり、

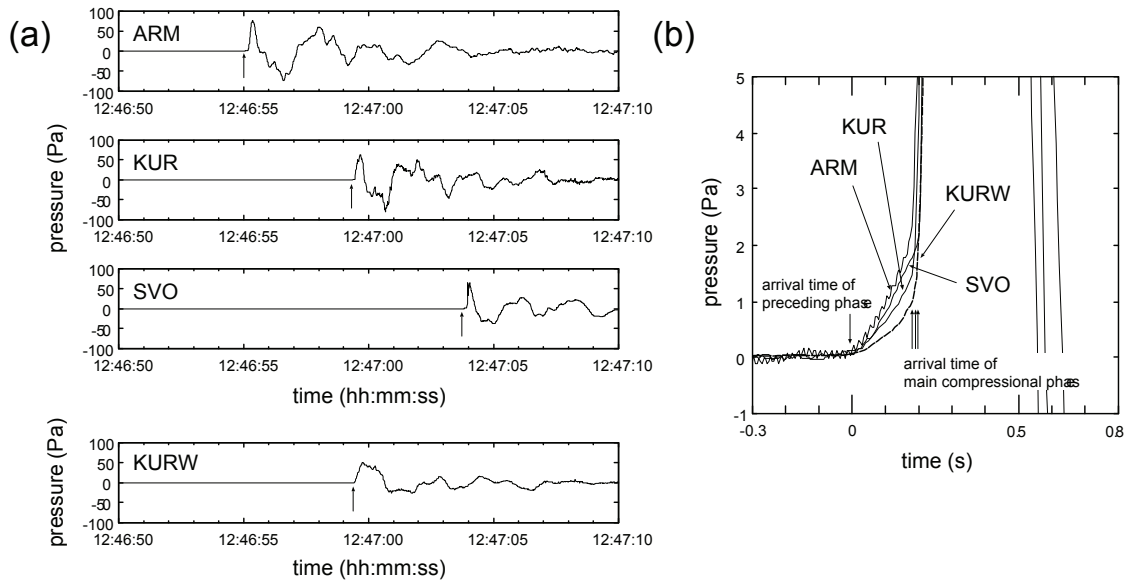


図 3. (a) 2007 年 10 月 29 日の南岳山頂火口の爆発的噴火の際に観測された空振波形。矢印は空振到着時刻。最下段(KURW)は広帯域気圧計による波形。(b) 主要圧縮相到着の約 0.2 秒前から弱い圧力増加が開始している(先行相)。破線は広帯域圧力計の記録。

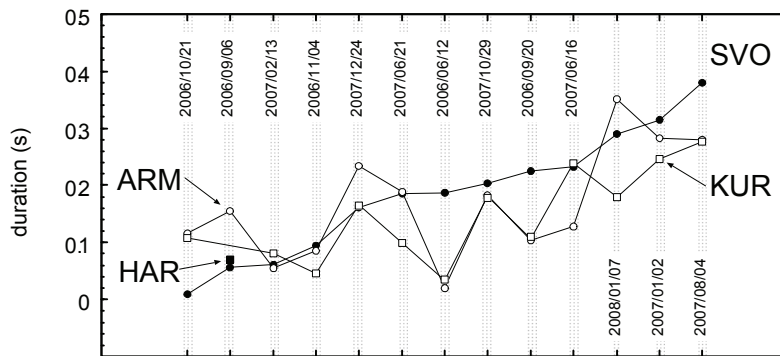


図 4. 各噴火イベントでの先行相継続時間。SVO での継続時間の順で並べた。

それに引き続くやや長い膨張相，そして数回の減衰振動を繰り返して元の大気圧へ復調する，という特徴がある(図 3a)。また，3 観測点で捉えられた波形にはいずれも，主要な圧縮相の到着に先立って，微弱(ARM で 3 Pa 以下)で短い時間(0.4 秒以下)の圧力増加も認められた(図 3b; 先行相⁶⁾)。先行相は広帯域圧力計でも捉えられており(図 3b)，低周波マイクロホンの機器特性に起因した見かけ上のシグナルではない。また，各観測点間で先行相の継続時間に大きな違いはない(図 4)。

3. 2. 昭和火口噴火に伴う空気振動

昭和火口では，2006 年 6 月，2007 年 5 月～6 月，2008 年 2 月の 3 期間で噴火活動があった。

2006 年噴火は規模が小さいこともあり，各噴火イベントに対応する明瞭な空気振動は観測で

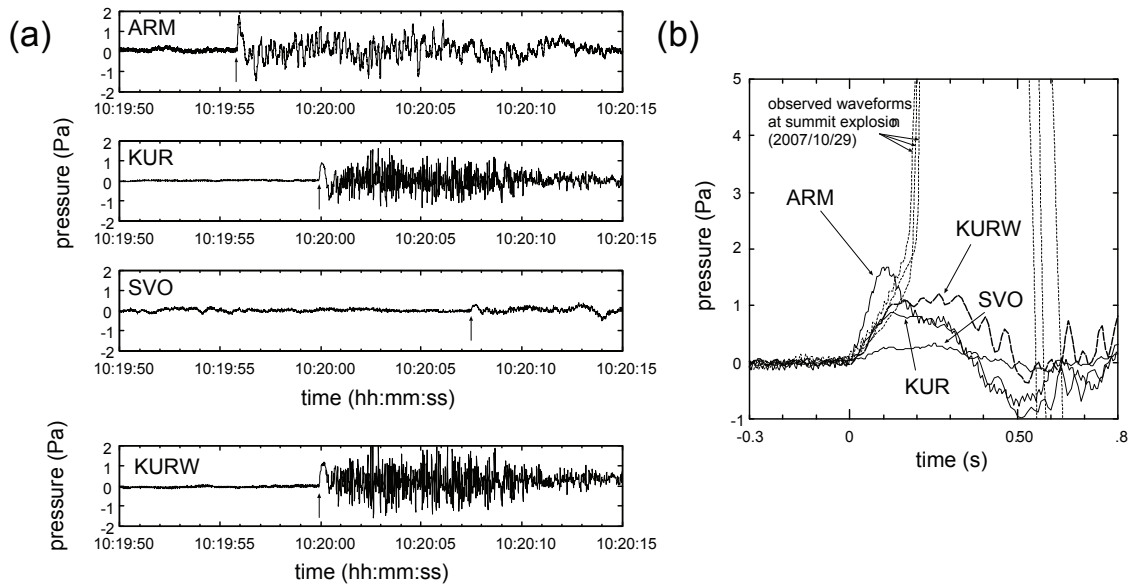


図 5. (a) 2007 年 5 月 24 日の昭和火口の噴火の際に観測された空振波形。(b) 山頂噴火の空振波形 (点線) と異なり, 先行相, 主要相の区別はみられない。

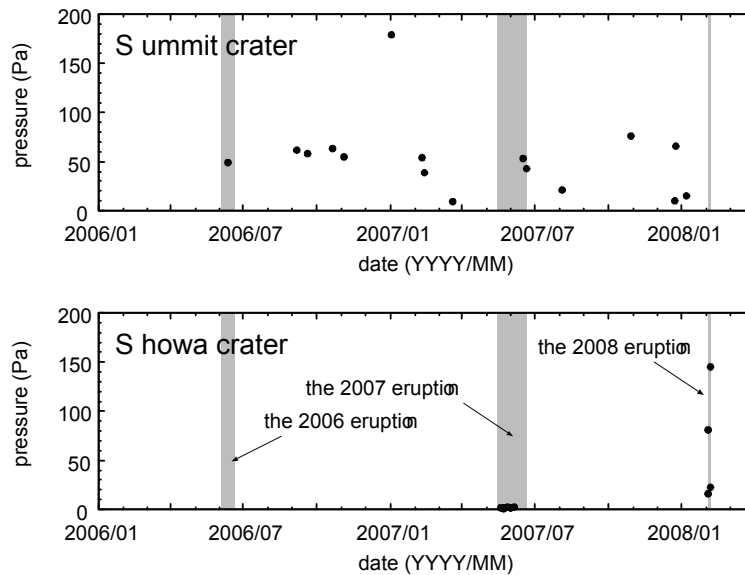


図 6. ARM で観測した空振最大振幅の時間変化(上: 山頂爆発, 下: 昭和火口噴火)。灰色は昭和火口の噴火活動期間を表す。

きていない。

2007 年噴火のなかでも比較的大きめの噴火(たとえば 2007 年 5 月 24 日 10 時 19 分の噴火)に伴って発生する空振は図 5a に示すような振動波形を呈し, 変動開始時に(相対的に)やや大きめの圧縮相があり, その後に膨張相が続く。変動開始時の圧力変化は山頂爆発の際に観測される先行相とほぼ同規模である(図 5b)。後続の膨張相は明瞭でないことが多く, さらにその後には, はじめの圧縮相と同程度かやや小さい振幅の短周期振動が発現する。圧縮相の最大振幅は, 昭和火口に最も近い ARM(伝播距離 2.3 km)において 1~2 Pa であり, 2006 年以後の山

頂爆發 13 例 (ARM において 15~180 Pa; 伝播距離 2.7~2.8 km) に比べて 1 桁から 2 桁小さい (図 6)。そのため、昭和火口から最も遠い観測点である SVO (伝播距離 6.2 km) では風ノイズ等に埋もれて空振シグナルを識別できないことが多い。

昭和火口から火山灰が放出されているときには、継続時間が数分から 10 数分の微動型の空気振動も観測された (図 7a)。初動は正圧変化から始まるが、ARM での振幅でも 0.5 Pa 以下と小さいため、SVO ではほとんど識別できない。また、ARM, KUR でも到着時刻が判読できるものはまれである。空振のスペクトル構造は 1 Hz あたりに明瞭なピークが認められ (図 7b), 2007 年 6 月 7 日から 6 月 21 日までの 20 例の微動型空振について FFT (20.48 秒) により見積もった卓越周波数は、0.7~1.7 Hz の値でほぼ一定である。また、空振が発生し続けている間にもその卓越周波数に大きな変化はなく、たとえば 6 月 11 日 11 時 40 分~48 分にかけて発生した微動型空振の卓越周波数 (解析区間 20.48 秒, 1 秒刻み) の明瞭な時間変化は認められず、0.9~1.3 Hz の範囲に収まる。

2008 年噴火の際に観測された空気振動 (図 8) は、山頂爆發時に観測される空振波形に類似したものや、2007 年噴火で観測された微動型空振波形に類似したもの、また、それらとはやや異なるタイプのものなどいくつかありそうである。ARM での最大振幅は 20~150 Pa であり (図 6, 図 8), 2006 年, 2007 年噴火よりも爆發力が強い噴火が発生したことがわかる。詳細な解析は現在も継続して行っている。

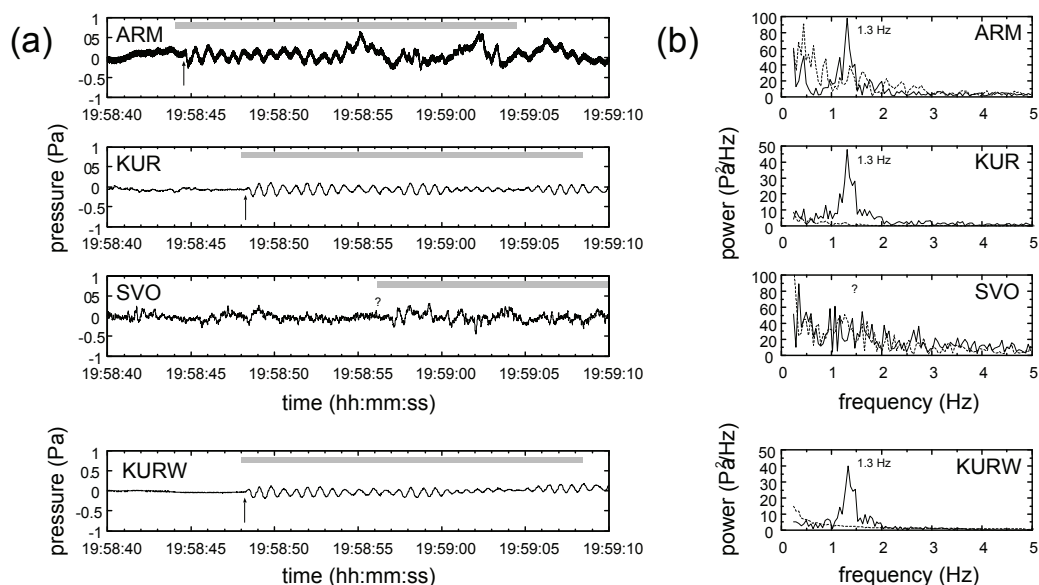


図 7. (a) 2007 年 6 月 15 日の昭和火口の噴火の際に観測された空振波形。SVO では判読できない。(b) 図 7(a)で灰色に塗った時間 (20.48 秒) の周波数特性 (実線)。卓越周波数は ARM, KUR (および KURW) で 1.3 Hz である。点線は空振が到達するおよそ 30 秒~1 分前の背景スペクトルを示す。

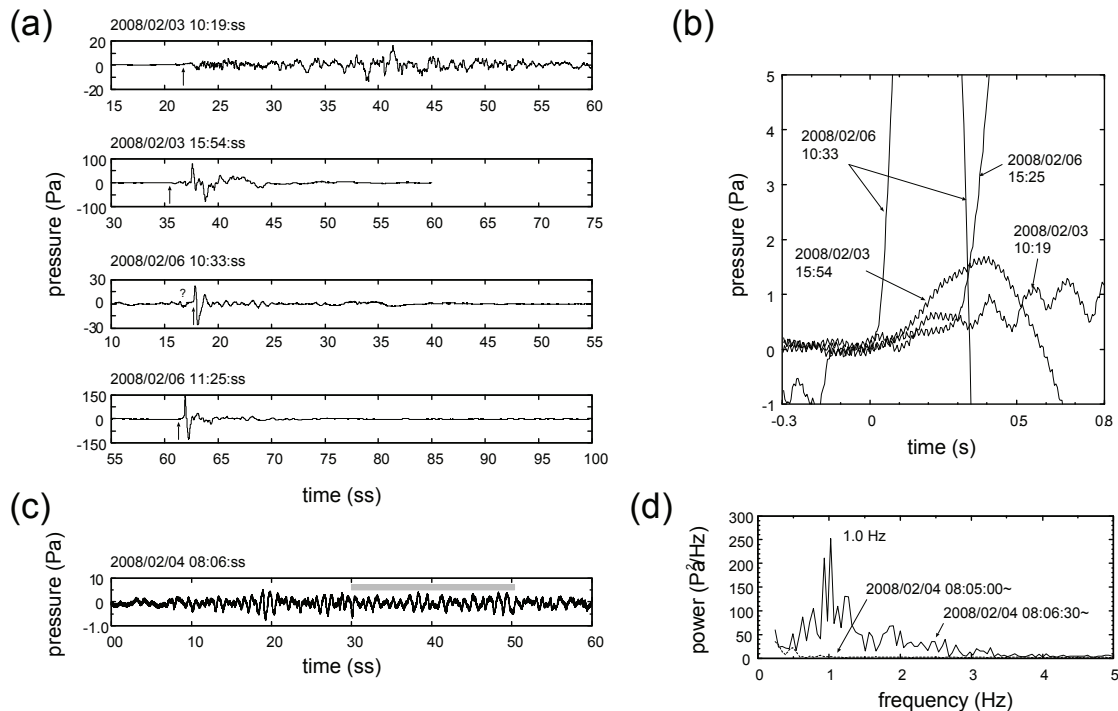


図 8. (a) 昭和火口 2008 年噴火の際に ARM で観測された空振波形。2 月 3 日 10 時 19 分の波形(最上段)以外の 3 例は、一見すると典型的な山頂爆発の空振波形に類似している。しかし、2 月 3 日 15 時 54 分の波形は、微小振動が始まった約 2.2 秒後に急激な圧力増加が発生しており、山頂爆発の空振とはやや異なる。(b) 空振到着時の圧力変動の拡大図。2 月 6 日 15 時 25 分の噴火には、先行相らしきものが観察される。(c) 2007 年の微動型空振に類似した空振波形(2 月 4 日 8 時 6 分)。変動開始時刻は読み取れない。(d) 図 5(c)における灰色の時間(20.48 秒)における FFT パワースペクトル。1.0 Hz にピークを持つ。1 分半前のスペクトル(点線)には 1.0 Hz のピークはない。

4. 空振波源計算

各観測点への空気振動到着時刻から、空振波源および発振時刻を見積もった。具体的な手順は次のとおりである。

波源計算の前段階として、まず、南岳山頂火口、昭和火口を含む $1200 \text{ m} \times 700 \text{ m}$ の領域の山体地表面に 10 m 刻みの点 (x, y) を設定し、各点 (x, y) から各観測点 i までの空振伝播距離 $L_i(x, y)$ を計算した。その際、空振伝播経路は Miniakami et al.⁷⁾ にならう、波源と観測点を結ぶ地形断面上における最短経路とした。使用した地形データは、2001 年 11 月～12 月測定の数値標高モデル (DEM) であるが、その後の状況を判断して、山頂火口内南側にある B 火口は標高 700 m まで崖錐堆積物で埋まっているとした。一方、2006 年噴火以降の昭和火口の正確なサイズ・深さが不明であったので、昭和火口近傍の山体地形は 2001 年末の DEM をそのまま採用した。

地表面上の各点 (x, y) から観測点まで伝播するのに要する時間 $T_i(x, y)$ は、各高度における伝播経路 $\Delta L_i(z)$ を伝播するのに要する時間 $\Delta t_i(z) = \Delta L_i(z) / (c_i(z) + w_i(z))$ の総和として

計算した。ここで、 $c_i(z)$ は高度 z における大気音速、 $w_i(z)$ は空振伝播方向への風速成分である。 $c_i(z)$ 、 $w_i(z)$ は鹿児島市上空の高層気象データ(09 時, 21 時のものうち、噴火時刻により近いもの)から、高度 100 m 刻みで求めた値を使用した。これにより、各点 (x, y) における空振の仮想発振時刻 $t_{\text{ten}_i}(x, y)$ が、各観測点 i における空振到着時刻 t_{arr_i} から $t_{\text{ten}_i}(x, y) = t_{\text{arr}_i} - T_i(x, y)$ により計算される。そして、求められた 3 観測点分の $t_{\text{ten}_i}(x, y)$ の平均値を仮想的な発振時刻 $t_{\text{ten}}(x, y)$ とし、 $\Delta t_{\text{err}} = 1/N \cdot \sum |t_{\text{ten}_i}(x, y) - t_{\text{ten}}(x, y)|$ (ただし $N=3$) を最小とする点 (x, y) を空振波源 (x_0, y_0) とみなした。そして、そのときの時刻 $t_{\text{ten}}(x_0, y_0)$ を空振の発振時刻 t_0 とした。

2006 年 6 月～2008 年 2 月の間に発生した南岳山頂爆発的 13 例、昭和火口噴火 12 例の空振観測結果に適用して計算した波源位置を図 9 に示す。山頂爆発に伴って発生した空振と昭和火口で発生した空振は、その波源が明瞭に区別できることがわかった。特に、昭和火口の噴火に伴う空振の波源は、DEM 上で東西 140 m×南北 130 m の比較的狭い領域に決定され、これは現在開口している火口地形とほぼ同じ大きさである。また、2007 年、2008 年の計算結果は、それぞれの年の噴火活動中心であった、昭和火口南部と北部にそれぞれ分布する傾向が見られた。他方、南岳山頂火口内での波源分布は、その多くが山頂火口内北側に位置している A 火口に求まっているものの、分布範囲は 160 m×280 m と昭和火口における波源領域よりもやや広く、南北のふたつのクラスターがあるようにもみえる。また、 Δt_{err} も昭和火口噴火のものよりも広く、南北に伸びている。これらの違いは、空振観測点の配置(図 1)が東西に伸びた三角形で

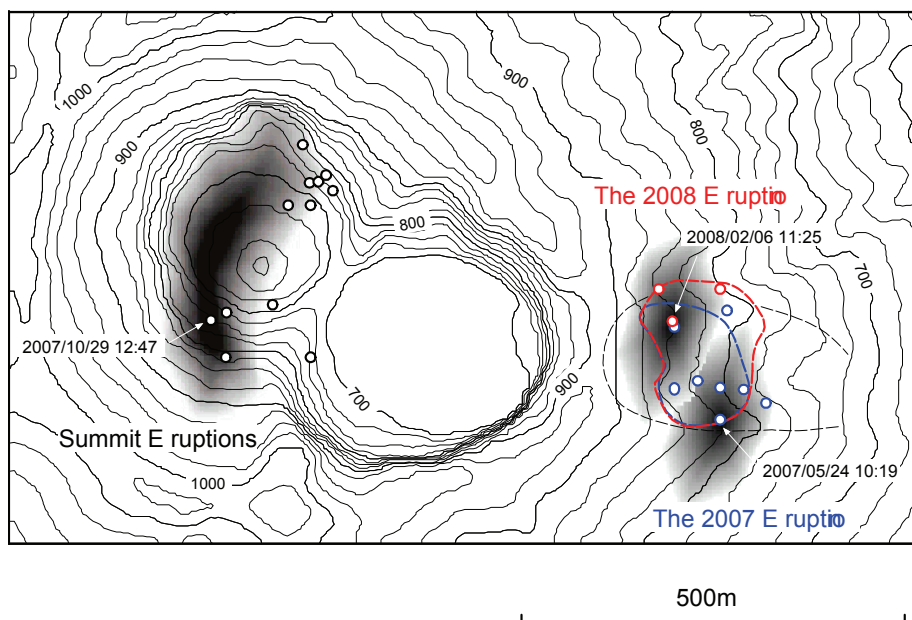


図 9. 各観測点の空振シグナル到着時刻から推定される波源位置。南岳の山頂爆発と昭和火口における空振波源は明瞭に区別できる。昭和火口の破線はそれぞれの時期の火口サイズを示す。2007 年 10 月 29 日 12 時 47 分(山頂火口), 2007 年 5 月 24 日 10 時 19 分(昭和火口南側), 2008 年 2 月 6 日 11 時 25 分(昭和火口北側)の 3 例について、 $\Delta t_{\text{err}} \leq 0.15$ s をグレースケールで表示した。濃い色ほど波源位置としての信頼度が高い。

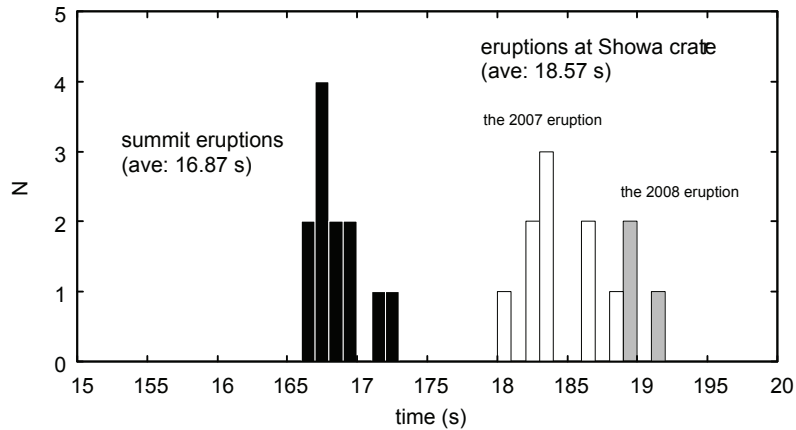


図 10. 空気振動の発振時刻 t_0 と SVO への到着時刻 $t_{arr, SVO}$ との時間差の頻度分布

あることに起因していると考えられ、より正確な波源位置を推定するためには、山頂火口を南北に挟むための観測点がさらに必要となる。なお、計算により見積もられた発振時刻は、山頂爆発の場合だと、SVO への空振到着時刻の 16.7～17.2 秒前(平均 16.9 秒前)、昭和火口噴火の空振は 18.1～19.1 秒前(平均 18.6 秒前)であった(図 10)。

4. まとめ

低周波マイクロホン 3 台を用いた空気振動ネットワーク観測を 2006 年 6 月から桜島において開始した。この空振ネットによって、南岳山頂火口、昭和火口からの各噴火イベントに対応した特徴的な空気振動波形が、それぞれ観察できた。特に、2007 年、2008 年の昭和火口噴火で観測された微動型の空振は、これまで桜島で観測された例は少ない。また、各観測点への空振到着時刻を用いて波源計算を行ったところ、山頂火口、昭和火口のイベントは明瞭に区別できることがわかった。

謝 辞

ARM の空振観測結果は国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所のものである。桜島 DEM データは国際航業株式会社から、高層気象データは鹿児島地方気象台からそれぞれ提供していただいた。その際、菅井 明氏、平松秀行氏のご協力があった。観測点の保守は桜島火山観測所スタッフ諸氏に負うところが大きい。記して感謝します。

参 考 文 献

- 1) 石原和弘・井口正人・田平 誠 (1986): 火山爆発に伴う空気振動の観測, 第 5 回桜島火山の集中総合観測, 131-138.

- 2) Ishihara, K. (1985): Dynamical analysis of volcanic explosion, *J. Geodyn.*, 3, 327-349.
- 3) 井口正人・石原和弘 (1990): 爆発的噴火に伴う地震動・空気振動の比較研究—桜島火山と諏訪瀬島火山の比較—, 京大防災研年報, 第 33 号 B-1, 1-12.
- 4) Tameguri, T., Iguchi, M. and Ishihara, K. (2002): Mechanism of explosive eruptions from moment tensor analyses of explosion earthquakes at Sakurajima volcano, Japan, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, Vol. 47, 197-215.
- 5) 坂井孝行・山里 平・宇平幸一 (1996): 桜島火山の C 型微動に伴う超低周波音, *火山*, 第 41 巻, 181-185.
- 6) 坂井孝行・中禮 正明・吉田明夫 (2001): 桜島火山およびカリムスキー火山の爆発的噴火に伴う空振波形の先行相の存在, 日本火山学会講演予稿集, A16.
- 7) Minakami, T., Utibori, S., Hiraga, S., Miyazaki, T., Gyoda, N. and Utunomiya, T.: Seismometrical studies of volcano Asama, Part 1. seismic and volcanic activities of Asama during 1934-1969, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Vol. 48, 253-301.

(Received on March 17, 2008)

