

桜島における空振アレイ観測

横尾亮彦⁽¹⁾・鈴木雄治郎⁽²⁾・井口正人

(1) 京都大学大学院理学研究科

(2) 東京大学地震研究所

要 旨

桜島昭和火口の噴火を対象とした空振観測を行った。観測された昭和火口噴火の空振は 2Hz と 0.5Hz にピークを持っており、前者は火口内の地形構造が、後者は噴出噴煙そのものに起因して励起されたものと考えられる。また、爆発的噴火の観測波形は、噴火開始期に放射される爆発波の位相が、桜島山体や始良カルデラ地形で回折・反射し、1分以上にわたって断続的に多方向から到来したものであった。

キーワード: 桜島昭和火口, 火山噴火, 空気振動, アレイ観測

1. はじめに

2010年のEyjafjallajökull火山（アイスランド）や2011年のGrímsvötn火山（アイスランド）、Puyehue火山群（チリ）の噴火のように、大量の火山灰がひとたび噴煙として放出されると、火山近傍のみならず、広範囲にわたる地域において、航空機の飛行制限などに起因した多大な社会的影響が発生する。そのため、火山噴火発生の有無、噴火規模の判定、噴煙の追跡などに対する要請が火山観測研究に求められてきており、空振観測はその一部に対して貢献をしている（例えばFee et al., 2010）。

近年では、ブルカノ式〜プリニー式噴火に伴う空振記録の周波数特性が、大規模実験的な乱流ジェットによる振動周波数構造と類似していると認識され始め（Matoza et al., 2009）、そのような観点から空振現象についての比較研究を進めることで、将来的に、空振観測によって、噴煙ジェットの半径や速度、体積フラックスや流体特性などに迫れる可能性があることが指摘されている。もしこれが実現されれば、噴火活動モニタリング手法のひとつとして、空振観測のもつ重要性がよりいっそう高まるものと考えられる。

しかしながら、現在のところ、噴煙運動そのものによる空振励起や噴煙放出過程と空振放射の具体的メカニズム、特徴との関係性について、きちんと理解されているわけではない。噴火活動に伴う空振活

動の特性や、噴煙のどの部分から放射されているのかといった正確な波源、またそれらの時間推移などを明らかにすることが先決であろう。

我々は、火山噴煙の噴出、拡大、上昇過程に伴う空気振動現象について、その特徴と放射過程の詳細を定量的に理解することを目的とした空振観測を桜島において実施した。本稿では、この結果について報告する。

2. 桜島における空振観測

桜島の噴火活動度は日本屈指である。特に、2006年に南岳南東斜面に開口した昭和火口では、2012年6月現在も散発的な噴火活動が繰り返されている。気象庁によれば、2011年には、「爆発的噴火」と称される、ある基準以上の規模の噴火回数が1000回近くに及んだ。昭和火口の噴火活動の大半は噴煙高度1 km程度の極小規模なブルカノ式噴火であり、噴火回数にカウントされないような灰放出はほぼ日常的に発生している。また、表面的には目立った噴火活動が認められない時間でも、現地では大きな鳴動音が聞こえる場合もあり、その表面現象の多様性と活動定常性は、空振現象の観測研究を実施するフィールドに適していることを示す。

空振観測は、2011年7月末から12月にかけての半年弱、昭和火口から約3.3 km東に位置する京大防災研黒神観測室近傍で行った。観測には、当初、5台の低

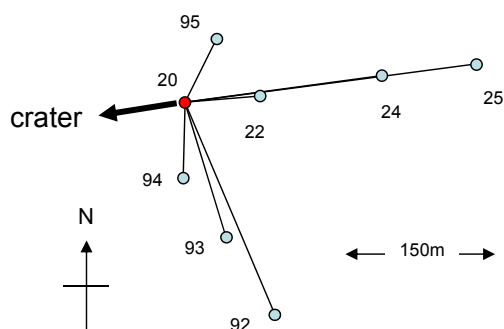


Fig. 1 Array configuration of infrasound observation at Kurokami area in Sakurajima. Mic 23 did not work well.

周波マイクロホン（Datamark SI102）を使用していたが、観測終了直前の2011年12月の数日間、さらに4台の同型マイクロホンを追加し、全部で9台のマイクを用いた。観測点配列は、各マイクの間隔がおおよそ50～100 mで火口方向に直線状に配置したが、追加観測時には、全体として十字型のアレイ形状になるよう、これに直行する方向に80～100 m間隔でマイクロホンを配置した（Fig. 1）。5台のマイクデータは3台の近計EDR-X7000を使用して収録した（1kHzサンプリング）、追加観測時のデータ収録には、これらに加えて、Datamark LS8800を4台使用した（200Hzサンプリング）。

3. 観測結果とその意味

3.1 周波数特性

本観測期間中も昭和火口は活発な噴火活動を行っており、明瞭な爆発型の空振（～200 Pa）や、2Hz弱の周波数だけにピークをもつ0.1 Pa程度の微弱な微動型空振など、さまざまなタイプのものが観測された。

Fig. 2は2011年7月25日13時49分、11月16日18時06分から3分間の空振波形とランニングスペクトル、および大隈河川国道工事事務所によって撮影されたその時の噴火活動の様子である。前者のイベントは、片振幅がおおよそ10 Pa程度の小規模な噴火であるものの、それなりに立派な噴煙が噴出している様子が見て取れる。この噴火による空振の主たる振動は1分半ほど続いており、0.5～0.7Hzあたりの強いピークと2Hz弱の微弱なピークを持つことが特徴である。一方、後者は、わずかに灰の混じった火山ガスが火口から噴出している現象に対応したものであり、もう一桁小さな振幅のシグナルである。このときは、先のイベントで1Hz以下にあった強いピークは見られず、2Hz弱のところのピークだけが目立つ。

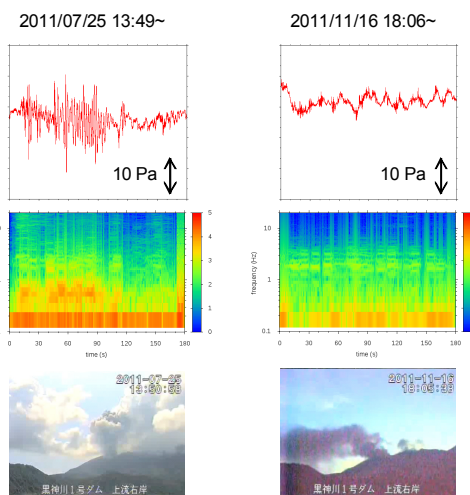


Fig. 2 Three minutes waveforms of infrasound and their spectrograms on 25 July (13:49) and 16 Nov. (18:06), respectively. Eruption images are also displayed.

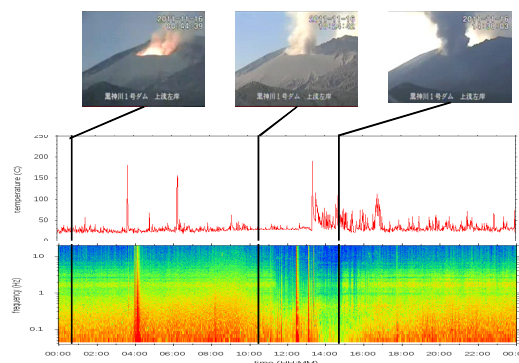


Fig. 3 One-day change of apparent temperatures at the crater region observed by an infrared camera (upper) and spectrogram of infrasound (lower) on 16 Nov, 2011. Activities of Showa crater at 00:44, 10:29, and 14:38 are shown.

二つのピーク周波数のうち、高周波側（2Hz弱）のものは噴火発生の有無と関係なく、ほぼ定常的に発生している（Fig. 3）。11月16日の例でいえば、昭和火口で明瞭な火映が観察される午前1時前、灰をあまり含まない火山ガスが勢よく噴出している10時半、これらとは対照的に、噴煙が噴出している最中であり、また、火口部の温度も高い15時前、などといった異なった表面現象を示す3つの時間帯のいずれにおいても、2Hz弱のピークが観察される。

7月25日の噴火のように、火口から相当量の火山灰が放出されるときになると、この2Hz弱の周波数帯に加えて、0.5Hzあたりのやや低周波帯域にもパワーが集中する（Fig. 1）。2Hzと0.5Hzのピークそれぞれが、なにかしらの火山学的な意味を持っていることが想

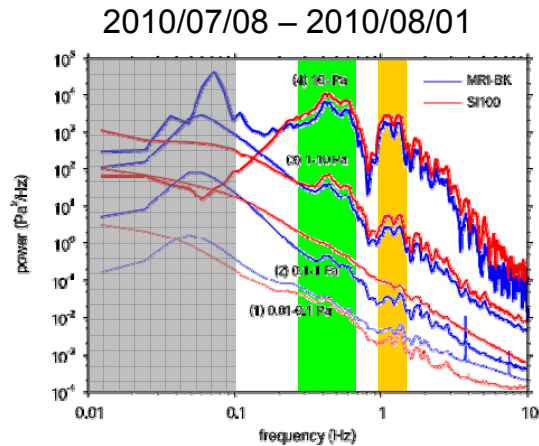


Fig. 4 Power spectrums of Sakurajima infrasound records with RMS amplitudes observed at the Seto station of JMA.

像される。

著者らがこれまで桜島で実施してきた空振観測においても（例えば横尾, 2011），これらのふたつの周波数帯（0.5Hzあたりと1～2Hz）でパワーが大きかった（Fig. 4）。二つのピーク周波数をもつという特徴は，Kilauea火山（アメリカ），St. Helens火山（アメリカ），Tungurahua火山（エクアドル）などの空振記録にも確認される。ただし，Matoza et al. (2009)はこの特徴については触れておらず，ふたつのピークそれぞれが持つ意味について，きちんと検討されたことはほとんどない。

0.5Hzあたりに見えるピークは何が原因で発生しているのであろうか。実際の空振観測結果だけに限らず，噴煙数値計算結果にも同じような周波数帯域にピークが見られる。Suzuki et al. (2005)の噴煙3次元計算によって，Table 1に示す条件で噴煙が形成された場合には，火口から2 km地点での圧力変動の周波数構造はFig. 5に示されるものとなり，0.3～0.6Hzあたりにパワーが集中する。数値計算には，火口や火道の情報は含まれず，純粋に大気中での噴煙挙動だけが再現されていることから，この周波数帯の空振シグナルは噴煙そのものから放射されているものと考えられる。

一方，卓越周波数2Hz弱のシグナルは，数値計算に含まれていなかった効果，すなわち，火口や火道の

Table 1 Condition of numerical simulation

mass charge rate	10 ⁶ kg/s
exit velocity	133.67 m/s
temperature	1373.15 K
vent diameter	20.37

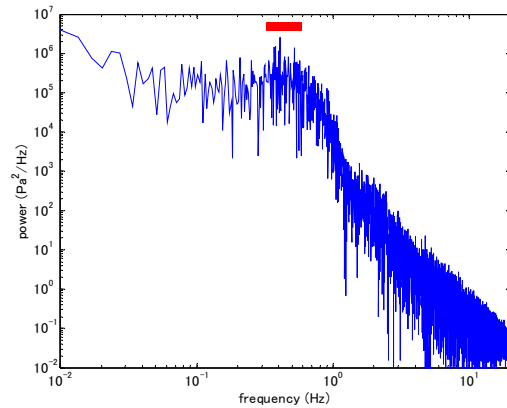


Fig. 5 Power spectrum of pressure change at the 2 km distant location calculated by the 3D numerical simulation of volcanic clouds.

形状やサイズなどとの対応性があるのかもしれない。実際，この周波数帯のシグナルは，噴火発生の有無とはあまり関係なく恒常的に観測されることから，火口や火道部分を，ガスや噴煙などのある種の流れ場となることで，通り道の固有振動数が強められるのではないだろうか。室内実験や数値計算の実施によって，上記の仮定の妥当性を検討すべきである。

3.2 到来方向

次に空振アレイの観測結果を使用した空振到来方向解析について記す。以下では，特に多点観測を実施していた12月16日，17日の噴火イベントの波形を例にとって説明する。

Fig. 6は12月16日8時41分の噴火の空振波形である。波形全体を概観すると，噴火開始時には200 Pa弱の大振幅の空振が到着し，最初の10秒ほどは片振幅10 Pa以上の振動が減衰しながら繰り返され，その後は数Paからもう一桁小さな振動が数分にわたって継続する。空振波形は火口に近い観測点（No.20やNo.94；Fig. 1）に先に到着し，その後，火口から離れる方向に順次移動していく。しかし，その約50秒後の微小振動時の位相を見てみると，波形先頭部の到来順とは異なることから，火口とは異なる方向から波が到来していることが強く示唆される。噴火直後から続く微小振動は，噴煙放出によって励起されるシグナルであると単純に考えるわけにはいかない。

各時刻における空振位相の到来方位を決定するため，火口に一番近い観測点（No.20）の空振記録（ウィンドウ幅4秒）を基準として，ほかの観測点記録との相関を求めた。相関が強くなる時間差は一定でなく，時間の経過と共に逐次変化している様子が分かる。これらの観測点ごとの時間差を，空振伝播速度を大気音速340 m/sと仮定して，到来方位に変換し，

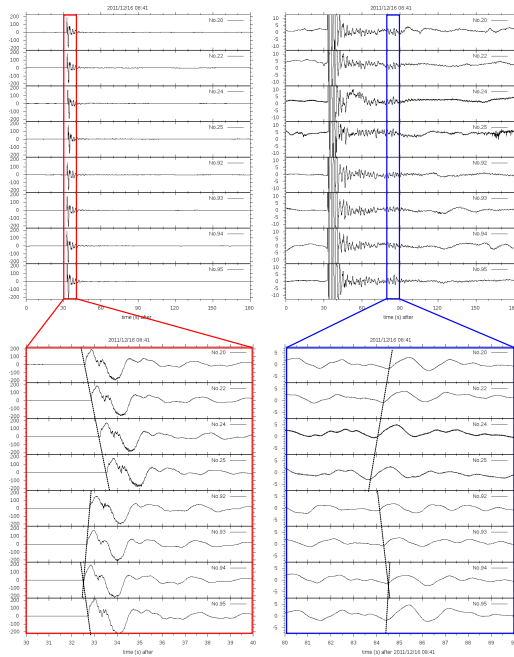


Fig. 6 Observed infrasound waveforms for the 08:41 eruption on 16 Dec., 2011. All diagrams shows the same data but with different ranges of the axes.

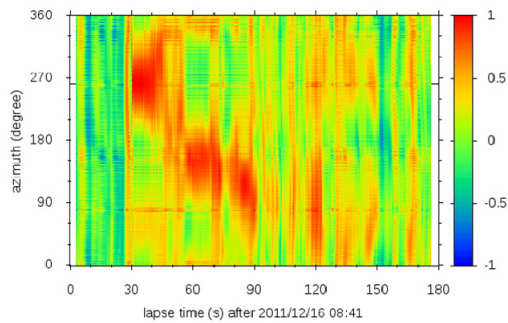


Fig. 7 Time variation of the back azimuth of the Showa crater eruption calculated using infrasound array record

全部の観測点間の相関の平均を求めることで、空振到来方位の時間変化とみなした (Fig. 7)。その結果、観測波形そのものから想像されていたように、噴火開始当初 (8時41分30秒過ぎ) はおおむね270度に近い方位から波が到来していたが (昭和火口は261.2度)、その後、時間経過とともに到来方位は変化していくことが明らかになった。

2011年12月16日、17日に発生した爆発7イベントに対して同様の解析を行い、初動到着以降の時間に対して、相関が0.7以上の到来方位だけをプロットした (Fig. 8)。解析結果は、噴火開始後のおよそ10秒弱は、火口方向から空振が到来していることを明瞭に示す。その後の数秒間で到来する位相は、空振観測

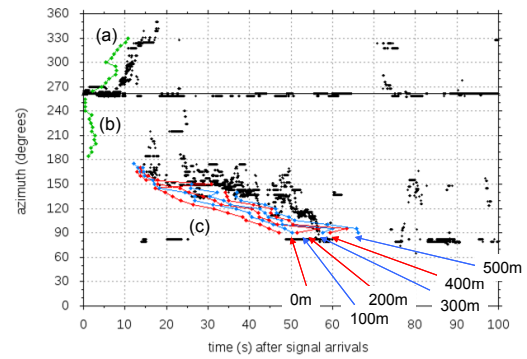


Fig. 8 Time variations of the back azimuths for 7 events on 16 and 17 Dec, 2011. Only data with CCF>0.7 are plotted. Expected arrival time of the diffraction/reflection waves from (a) NE flank of Sakurajima volcano, (b) topography around Nabeyama, and (c) wall-like topography with different altitudes of the Aira caldera, are also shown.

点の北西側からくるが、時間経過とともに北側へ遠ざかる。桜島山体北東稜線部からの回折波だと考えて到来時刻を計算すると、その時間経過のパターンは解析結果と似た傾向を示す。その後は、観測点からの方位角180度~90度方向からの波が卓越する。始良カルデラリムの一部からの反射波が支配的であることを意味し、時間経過とともに反射位置はカルデラ地形の南から東方向へ移動していることを表している。観測波形のエンベロープを考えれば、この反射によって、空振振幅はおおむね1/50~1/150ほどに減衰しているものと計算される。

噴煙噴出が続いていたとしても、噴火開始から少なくとも1分以上にわたって、噴火最初期の爆発空振の位相の影響が強く残る。すなわち、爆発の主位相が回折波、反射波として観測点の北西側、南~東側から到来し続ける。そのため、噴煙放出現象によって放射され続けていると考えられる空振位相を認識することは難しい。噴煙挙動と空振特性との詳細な対応性は明らかにするためには、このような空振波形記録からでも、本来の火口方向起源のシグナルを抽出する方法をきちんと構築する必要があると考えられる。

4. まとめ

2011年7月から12月にかけて、桜島昭和火口の噴火を対象とした空振観測を実施した。その結果、昭和火口噴火の空振は、2Hzと0.5Hzにピークを持つことがわかった。前者は噴火発生の有無とは関係なく観測されることから、火口内の地形構造が影響して放

射されるものであると考えられる。また、3次元噴煙数値計算との比較から、後者は噴出噴煙そのものに起因した特徴であると考えられる。爆発的噴火の観測波形は、噴火開始期に放射される爆発波が、桜島山体や始良カルデラ地形で回折・反射するものが1分以上にわたって断続的に観測点へ到来していることを明瞭に示す。噴煙運動によって放射される空振シグナルを抽出するためには、そのような観測記録からでも火口方向からの位相を正確に抽出することが必要である。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(23654157)、東京大学地震研究所一般共同研究(2011-G-03)、京都大学防災研究所萌芽の共同研究(23H-01)による補助の下実施した。

参考文献

横尾亮彦 (2011) 火山噴火による低周波音. サウンド, 26, 11-14.
Fee, D., M. Garcés, and A. Steffke (2010a) Infrasound

from Tungurahua Volcano 2006-2008: Strombolian to Plinian eruptive activity. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 193, 67-81, doi:10.1016/j.jvolgeores.2010.03.006
Fletcher, N.H., and T.D. Rossing (1988) *The Physics of Musical Instruments*, 2nd ed., Springer, New York
Goto, A., and J.B. Johnson (2011) Monotonic infrasound and Helmholtz resonance at Volcano Villarrica (Chile). *Geophys. Res. Lett.*, 38, L06301, doi: 10.1029/2011GL046858
Matoza, R.S., D. Fee, M.A. Garcés, J.M. Seiner, P.A. Ramón, and M.A.H. Hedlin (2009) Infrasonic jet noise from volcanic eruptions. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L08303, doi: 10.1029/2008GL036486
Suzuki, Y.J., T. Koyaguchi, M., Ogawa, and I. Hachisu (2005) A numerical study of turbulent mixing in eruption clouds using a three-dimensional fluid dynamics model. *J. Geophys. Res.*, 110, B08201, doi: 10.1029/2004JB003460

(論文受理日: 2012年6月8日)

Infrasound Array Observation at Sakurajima Volcano

Akihiko YOKOO⁽¹⁾, Yujiro J. SUZUKI⁽²⁾ and Masato IGUCHI

(1) Graduate School of Science, Kyoto University
(2) Earth Research Institute, The University of Tokyo

Synopsis

Results of the 2011 infrasound observations at Sakurajima volcano revealed several basic but suggestive facts for the future study of volcanic infrasound. Two peaks, around 2Hz and 0.5Hz, in power spectrum of the infrasound are identified; the former peak would be related to the eigen frequency of the vent of Showa crater, but the latter would be related to dynamics of eruption clouds. The first 10 s duration of the infrasound signal is made by explosion itself. However, after that time, diffraction and reflection waves from characteristic topography around Sakurajima volcano, like a wall-like topography of the Aira caldera, are dominant.

Keywords: Sakurajima volcano, Showa Crater, infrasound, array observation