

諏訪之瀬島における空振観測から考える噴火ハザード

Eruption Hazards Evaluated from Infrasonic Observation at Suwanosejima Volcano

井口正人・山田大志

Masato IGUCHI and Taishi YAMADA

Synopsis

Eruption hazard caused by volcanic bombs and volcanic ash at Suwanosejima volcano is examined using infrasound. The explosive eruption, which ejected volcanic bombs to distances around 1 km, occurred during high explosivity with infrasound larger than 200 Pa. The high explosivity accompanied only a low plume (<1500 m). Smaller (<100 Pa) infrasound pulses are successively recorded prior to the high explosivity. The frequent occurrence of infrasound pulses is classified into Type L: 1-9 days duration and minute order time interval and Type S: 1-4 hours duration and second order time interval, and it is regarded as precursor of increase in hazard due to volcanic bombs. Eruptions with plumes higher than 3000 m sometimes occurred. The amplitudes of infrasound onset pulse were much smaller than the explosive eruptions, but tremor-like vibration continued for a longer time (several minutes). Suwanosejima volcano repeats hazardous states of volcanic bombs and volcanic ash alternatively.

キーワード: 諏訪之瀬島火山, 空振, 火山岩塊, 火山灰

Keywords: Suwanosejima volcano, infrasound, volcanic bomb, volcanic ash

1. はじめに

諏訪之瀬島は鹿児島県の吐噶喇列島のほぼ中央に位置する我が国で最も活動的な火山の1つである。島の中央火口丘を形成する御岳山頂部を挟んで、富立岳とナベダオ火山が北東―南西方向に並ぶ。19世紀の噴火活動は活発であり、1813年には御岳山頂の南西側、「トンガマ」および「旧火口」と呼ばれる場所において大規模噴火が発生した。この噴火活動の末期には、御岳山頂から北東側に開く作地カルデラにおいて崩壊も発生している(嶋野・小屋口, 2001)。また、1884年にはカルデラ内において溶岩が流出した(明治溶岩流)。

20世紀以降は、カルデラ内に形成された火砕丘においてブルカノ式、ストロンボリ式噴火、火山灰放出が繰り返されている。このような噴火は1957年～1995年に頻繁であり、爆発的な噴火活動は2週間から4週間の間隔で繰り返された(井口, 2000)。特に、

1967年と1968年には、噴煙が高度6000m～7000mまで上昇する噴火が発生し、噴石が集落近くの牧場まで達している。1996年以降、一時静穏化した。2000年12月にはカルデラ内の火砕丘の北東側から噴火が始まり、噴火活動が活発化した。2000年12月以降もブルカノ式、ストロンボリ式噴火、火山灰放出が繰り返されている。気象庁は、2007年12月に噴火警戒レベルの発表を開始した。この時点での噴火警戒レベルは2(御岳火口から概ね1kmの範囲では、大きな噴石に警戒)であった。噴火活動は徐々に低下傾向を示していたものの小規模な噴火は繰り返されていたため、その後も噴火警戒レベル2が維持されていた。

2020年10月下旬から噴火が頻繁に発生するようになり、火山灰が御岳火口から南へ3.5kmにある集落まで頻繁に降下するようになり、島民の生活にも影響を及ぼすようになった。さらに、2020年12月21日からは空振を伴い、火山岩塊を御岳火口から1km付近の距離まで到達させる爆発的な噴火が発生するよう

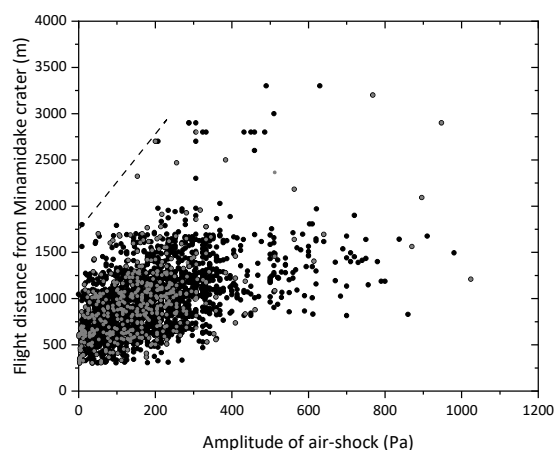


Fig. 1 Relationship between amplitude of air-shock and flight distance of volcanic bombs ejected by vulcanian eruptions of Sakurajima volcano.

になった。12月28日には火山岩塊が火口から1.3kmの距離に到達したため、気象庁は噴火警戒レベルを3に引き上げて、御岳火口から概ね2kmの範囲では、大きな噴石に警戒するよう呼び掛けた（福岡管区気象台・鹿児島地方気象台，2020）。その後、爆発的噴火活動は一時静穏化して2021年1月には噴火警戒レベルを2に引き下げたが、3月31日には再び同様の爆発的噴火が発生したため噴火警戒レベルを3に引き上げた（福岡管区気象台・鹿児島地方気象台，2021）。これ以降も、爆発的噴火の活発化と低下を繰り返し、噴火警戒レベルも2と3の間の上げ下げが繰り返された。爆発的噴火は、2022年8月現在も繰り返されており、この時点の噴火警戒レベルは2である。

20世紀以降は、カルデラ内に形成された火砕丘において小規模なブルカノ式、ストロンボリ式噴火、火山灰放出が繰り返されているので、噴火によるハザードは火山岩塊と降灰である。火山岩塊を放出するような爆発活動は可聴域の爆発音から可聴域よりも低周波の気圧波に至る広い周波数帯域の信号を発するので、信号の識別が容易なインフラサウンド（以下、空振と呼ぶ）観測は、火山活動の監視だけでなく火山岩塊のハザードを評価する上で活用できる可能性がある。特に、山頂火口域が雲に覆われて目視できない場合に有用であろう。

本稿では、空振の発生頻度と振幅を用いて、その発生様式を明らかにした上で諏訪之瀬島における火山岩塊ハザードを評価する。また、火山灰放出量が多いと考えられる噴煙高度の高い噴火の空気振動の特徴を明らかにしたうえで、降灰ハザードの評価も併せて試み、諏訪之瀬島と同様に長期間にわたって、ブルカノ式、ストロンボリ式噴火、火山灰放出を繰り返している桜島の火山岩塊および降灰ハザードと

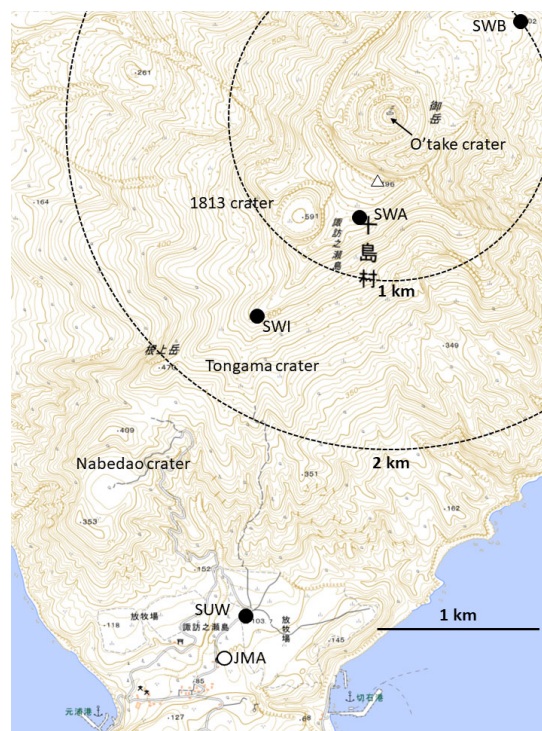


Fig. 2 Location of infrasound microphones. Dots are stations installed by Kyoto University, and open circle is by Japan Meteorological Agency.

比較する。

2. 空気振動観測

2.1 空気振動振幅と火山岩塊の到達距離

桜島のブルカノ式噴火では、火道最上部において溶岩ドームにより蓋をされて形成されたガスポケットに爆発地震により励起された圧力波が、加わることでガスポケットが膨張、さらに溶岩ドームが破壊されることにより、空気振動の主要相が発生すると考えられている（Yokoo et al., 2009）。ブルカノ式噴火により放出される火山岩塊は、破壊されたドームの溶岩片なので、火山岩塊の初速度（火山岩塊の飛散距離）と空気振動の主要相には相関があると考えられる。実際、桜島南岳のブルカノ式噴火に伴う火山岩塊の飛散距離と空気振動の主要相には相関が認められる。相関関係をFig.1に示す。空振振幅は南岳火口から北西2.7kmの距離にあるハルタ山において観測された空振の増圧相の振幅であり、飛散距離は鹿児島地方気象台の遠望観測による落下位置から推定したものである。飛散距離が2.5kmを超える火山岩塊は概ね空振振幅が200Paを超えるブルカノ式噴火によって放出されている。

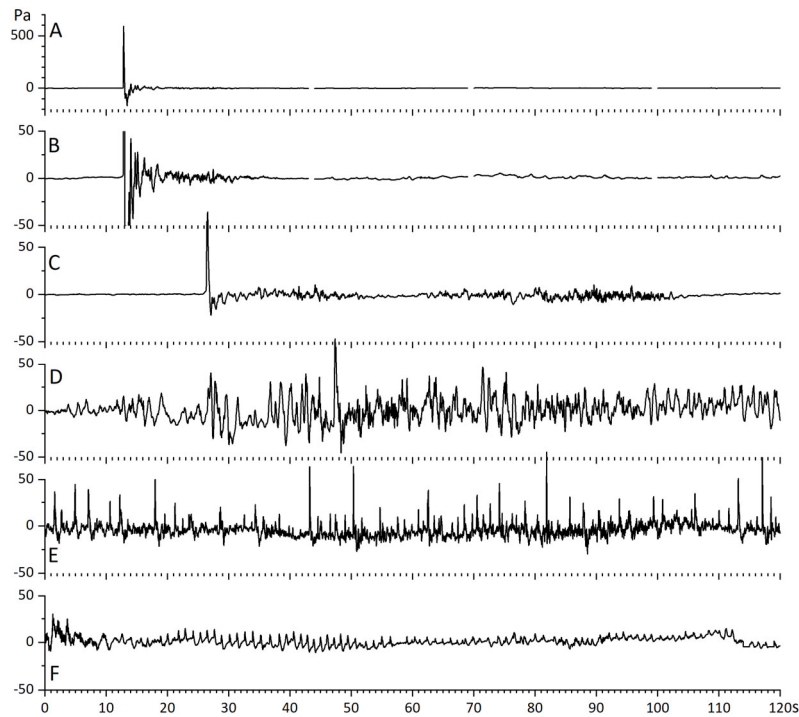


Fig. 3 Examples of infrasound waveform recorded at station SWA. A: Explosion, B: Enlargement of A, C: Impulsive type eruption, D: Tremor type eruption, E: Repeat of infrasound pulses and F: Harmonic type.

2.2 諏訪之瀬島における空気振動観測

京都大学防災研究所は、1989年5月に空振計 (ACO, Type7144) を山麓の観測点SUW (御岳火口から3.1km南南西, Fig.2) に設置し (加茂・他, 1993), 2022年8月時点においても観測を継続している。また、気象庁はJMA観測点 (御岳火口から3.4km南南西, Fig.2) に同タイプの空振計を設置して監視観測を行っている。これらの観測点は御岳火口から3km以上離れているので、空振の検知力を向上させるために2021年に観測点SWI (火口から1.4km), SWA (0.7km), SWB (1.0km) に空振計 (SI104, 白山工業製) を設置した (Fig.2)。また、このタイプのマイクロホンは観測点SUWにも増設し比較観測を行っている。SUWにおける空振振幅はSWAの約1/4.5であり、SUWにおける空振振幅は火口からの距離に比例して減衰している。

2.3 空振波形の特徴

御岳火口に最も近いSWAに設置した空振計により観測された典型的な波形をFig.3に示す。噴火に伴う空振波形は多様であるが、気象庁が「爆発」と定義する榊戸原 (JMA観測点, Fig.2) において振幅10Pa以上 (全振幅) の空振を伴うイベントでは、初動の増圧相がそれ以降の位相に比べて卓越して大きい特徴がある (Fig.3A)。これは、桜島におけるブルカノ式噴火と同様である。SWAにおいて空振振幅は数十Pa以

上に達する。一方、気象庁が「噴火」と定義する噴煙高度が火口縁上1000m以上に達する空振振幅10Pa未満のイベントは、「爆発」のように初動部分が卓越して大きいもの (Fig.3C), 初動が小さく不明瞭で火山性微動に類似するもの (Fig.3D), 空気振動がノイズレベル以下のものに分けられる。Fig.3Cに示した空気振動は、「爆発」に類似しており、爆発の小規模なものに位置づけられるが、噴煙の大気中への注入およびその成長過程を反映するコーダ波は、概して「噴火」の方が長い傾向がある (Fig.3C)。Fig.3Dに示したイベントでは初動は7Pa程度であるが、徐々に空振振幅が増加し、50秒後には77Paに達している。

爆発については、強い増圧相とそれに続く減圧相が1回観測されるが、この初動部分のパルスが1秒から数秒の間隔で頻繁に繰り返されることがある (Fig.3E)。また、ハーモニックな形状を示すこともある (Fig.3F)。

2.4 諏訪之瀬島における空気振動振幅と火山岩塊の到達距離

Fig.4aにSWAにおける空気振動の増圧相の振幅と火山岩塊の到達距離の関係を示す。火山岩塊の到達距離は福岡管区気象台の観測によるものである。Fig.1に示した桜島のような相関の強さは見られないが、空気振動の増圧相の振幅が大きいほど、火山岩塊の到達距離の下限が増加するなど、遠方まで達す

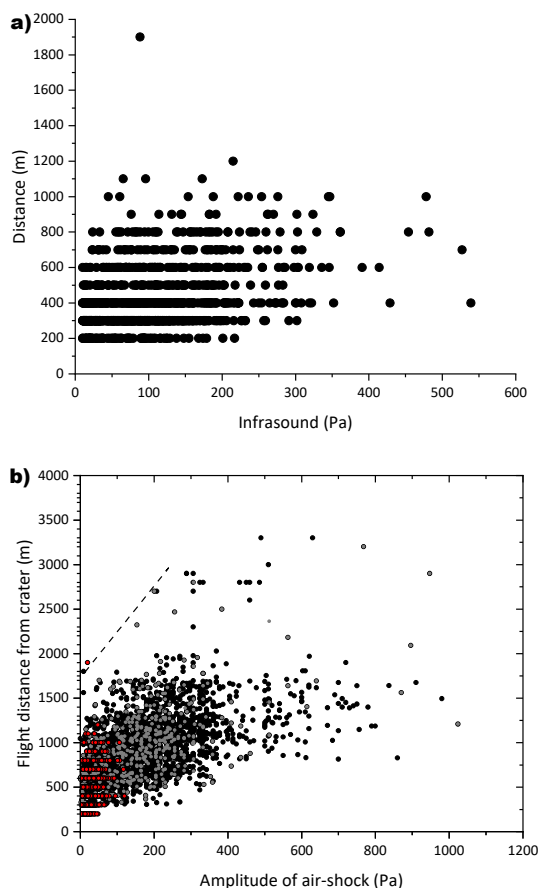


Fig. 4 a) Relationship between amplitude of air-shock (SWA) and flight distance of volcanic bombs ejected by vulcanian eruptions of Suwanosejima volcano. b) Comparison of the relations between Suwanosejima (red) and Sakurajima (black) volcanoes. The amplitude of Suwanosejima was corrected to the value at a distance of 2.7 km (Sakurajima's reference).

る傾向がみられる。

空気振動の増圧相の振幅と火山岩塊の到達距離の関係を桜島と比較してFig.4bに示す。諏訪之瀬島の空振振幅は桜島の空振観測点に合わせて補正した。諏訪之瀬島における分布は、桜島のブルカノ式噴火のうち、小規模なイベントに位置づけられる。

3. 空振振幅の時間変化

火山岩塊の飛散の多くは、夜間に高感度カメラによって観測されたものである。昼間における観測例は少なく、冠雲状態では観測できないため、より安定的にデータの得られる空気振動の振幅を用いて、火山岩塊ハザードの評価を試みる。

まず、噴火活動が活発であった2021年3月1日～2022年4月30日までの空振の増圧相の振幅に着目し、

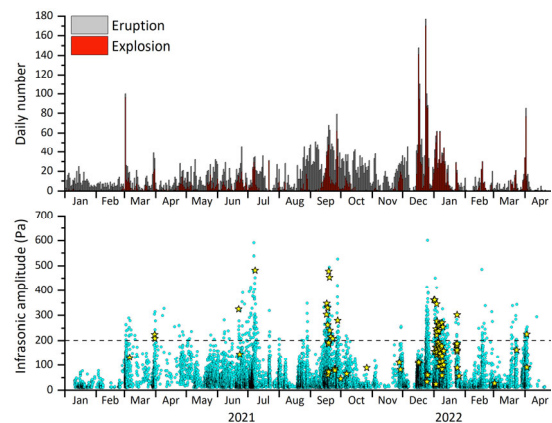


Fig. 5 Time series of amplitude of infrasonic pulse associated with eruptions (bottom), as compared with daily numbers of eruption and explosion. Stars indicate infrasonic amplitude of explosions that ejected volcanic bombs reaching at distances ≥ 800 m.

SWAにおいて振幅が10Pa以上に達した空振をSTA/LTA法で抽出し、その時系列をFig.5に示す。なお、SWAにおける空振が欠測の場合は、SUW観測点における振幅を4.5倍している。御岳火口に最も近いSWAにおける振幅100Pa以上のイベントが気象庁の定義する「爆発」に概ね対応する。この期間にSWAにおいて空振振幅100Pa以上に達するイベントは、2127回観測され、空振活動のピークは2021年7月上旬、9月、12月下旬に現れた。振幅が特に大きいイベントは7月7日(591Pa)、9月27日(527Pa)、12月25日(601Pa)に発生した。

気象庁が噴火警戒レベル3へ引き上げを検討し始める火口からの距離800m以上に火山岩塊が到達したイベントをFig.5に☆印で示した。これらのイベントは空振振幅が200Pa以上となる爆発を多数含む爆発頻発期に発生している。気象庁が噴火警戒レベルを3に引き上げる基準とする火山岩塊が御岳火口から1km付近の距離に達する爆発は10月26日を除いて空振振幅が200Pa以上となる爆発を多数含む爆発頻発期に発生している。

空振振幅時系列の時間軸を拡大してFig.6に示した。2021年3月1日～2022年4月30日までの期間に空振振幅が200Pa以上となる爆発を多数含む爆発頻発期は18回識別できた。爆発頻発期に先行して、100Pa未満の小振幅の空振の発生頻度が急増している。

小振幅空振の発生頻度増加頻発現象は、その発生間隔から2種類に分類できる。ここでは、空振の発生間隔が分オーダーであるものをType L、秒オーダーであるものをType Sと呼ぶことにする。Type Lは1日

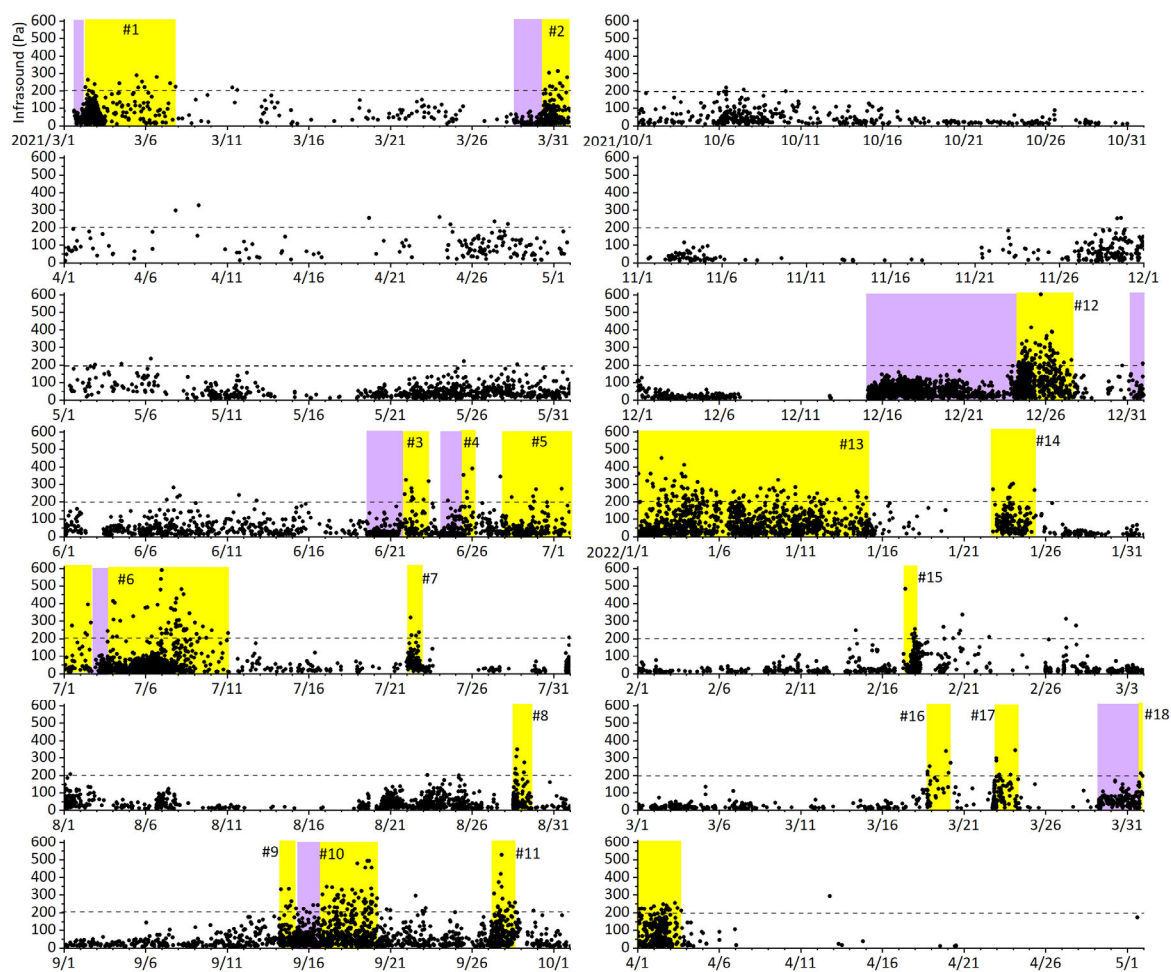


Fig. 6 Time series of amplitude of infrasonic pulse associated with eruptions during the period from March 1, 2021 to April 30, 2022. The highlight in yellow indicates the frequent explosion period, which includes many explosions with infrasonic amplitudes of 200Pa or more. The highlight in purple indicates the precursory period, which are characterized by infrasonic amplitudes of <100Pa.

から9日程度継続し、2021年3月1日、3月29日～30日、6月20日～21日、6月24日、7月3日、9月15日～16日、12月15日～23日、2022年3月29日～31日に発生した。Type Sの小振幅空振頻発現象の例をFig.7aに示す。この例では1時間に10Pa以上の増圧相を持つ空振パルスが9回発生し、空振の最大値は51Paであった。空振振幅が200Pa以上となる爆発を多数含む爆発頻発期#3に先行する小振幅空振の発生頻度増加頻発現象の振幅と発生間隔の時間変化をFig.8aに示す。19日22時から20日12時と22日1時から5時に小振幅空振の発生頻度増加頻発現象がみられる。振幅は概ね60Pa以下であり、発生間隔は20秒から1000秒であった。系統的な時間変化はない。

一方、Type Sを構成する空振パルスは1～2秒しか続かず、長く続くコーダ波はない (Fig.3E)。Type Sの活動は1時間から4時間程度続く。顕著なType Sイベントは、7月31日、8月23日、28日、9月27日、12月

24日に発生した。事例として8月28日12:53から15時ごろまで発生したType Sイベントをあげる (Fig.7b)。この時間帯に2063回の空振パルスが観測され、振幅は100Pa前後から30Paまで徐々に小さくなるとともに、発生間隔は2～3秒から30秒程度まで、徐々に長くなる時間変化が見られた (Fig.8b)。そして、15:33から200Paを超える空振振幅を持つ爆発が発生するようになった。

4. 空振からみた火山岩塊ハザード評価

空振パルスの頻発現象であるType Sは、1980年代の桜島南岳の活動期によく見られたBL型地震を伴いながら頻発する桜島のストロンボリ式噴火発生時の空振パルス (石原・井口, 1989) によく似ている。桜島のBL型群発～ストロンボリ式噴火は爆発強度の強いブルカノ式噴火の前駆現象である。ストロン

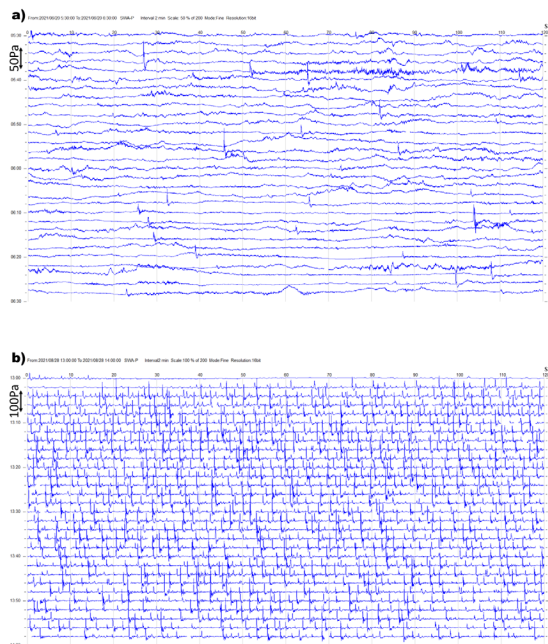


Fig. 7 a) An example of infrasonic record of Type L increase in pulses from 5:30 to 6:30 on June 20, 2021. b) Type S increase in infrasonic pulses from 13:00 to 14:00 on August 28, 2021.

ボリ式噴火頻発によって、マグマからの脱ガス及びマグマの結晶化が進んだ結果、火道最上部が徐々に閉塞してプラグが形成され、その火道状態に新たにマグマが貫入すると、爆発力の大きいブルカノ式噴火が発生するものと考えられている（立尾・井口，2009）。これを空振観測から見ると10Pa未満の小振幅の空振パルス頻発現象（ストロンボリ式噴火）から大振幅（10Paから数百Pa）の空振発生（ブルカノ式噴火）への移行と位置付けられる。ストロンボリ式噴火では南岳火口上200m程度高さに達するものの火口の縁を超えることはほとんどないが、ブルカノ式噴火では火山岩塊は火口縁を超えて山腹に落下し、最大3.3kmの距離に達することもある。火山岩塊ハザードが火口内に限定されるストロンボリ式噴火から火山岩塊ハザードが3km付近まで拡大するブルカノ式噴火への移行である。諏訪之瀬島の場合も、小振幅の空振パルス頻発現象から大振幅の空振発生へ移行しており（Fig.8），ストロンボリ式噴火からブルカノ式噴火へ移行したのと考えられる。空振振幅が200Pa以上となる爆発を多数含む爆発頻発期には1kmを超える距離まで火山岩塊を飛散させるので（Fig.5），小振幅の空振パルス頻発現象は、爆発力が強く火山岩塊ハザードが広い噴火の前駆現象に位置付けられる。

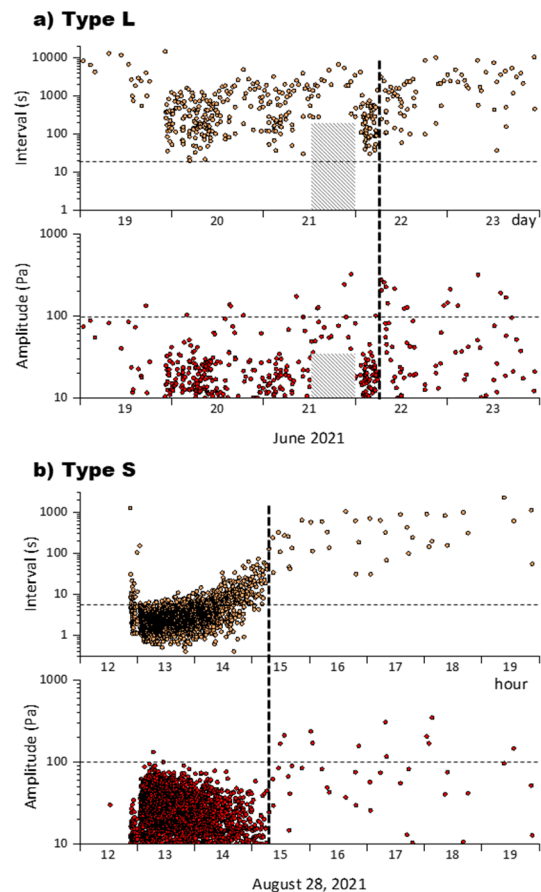


Fig. 8 a) Time series of interval and amplitude of infrasonic pulses in Type L. Noisy period is indicated by hatched area. Dashed line indicates sudden increase in amplitude, switching over to vulcanian eruption. b) Type S series of interval and amplitude of infrasonic pulses.

5. 空振と噴煙高度の関係

空振振幅を噴煙活動と比較し、火山灰放出との関係について考察する。気象庁は噴火に関する火山観測報において噴煙高度を公表している。御岳山頂が雲に覆われて目視できないことも多いので、噴煙高度の観測はすべての噴火について得られるデータではないが、1週間以上の噴煙活動の推移傾向を検討するには役立つであろう。噴煙高度が火口縁2000m以上に達する噴火は2021年1月～2022年4月に365回記録されているが、そのうち320回（87%）は「噴火」である。2021年7月31日18:14，8月28日12:31，9月26日7:11に始まった噴火では、それぞれ噴煙頂は3800m，4800m，5400mに達した。これらの噴火の空気振動をFig.9a-cに示す。空振の初動増圧相の振幅は、12Pa，2～3Pa，4Paに過ぎない。空気振動の振幅は徐々に増

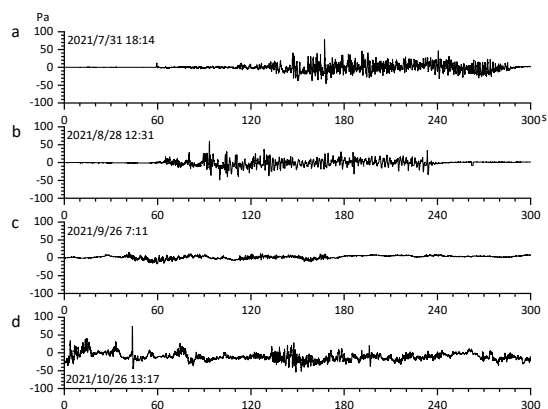


Fig. 9 Examples of infrasound waveform associated with plume higher than 3000 m.

加し、このことは、空振振幅の小さい非爆発的な噴火の方が、噴煙高度が高く火山灰放出量が多いことを意味する。Fig.10aに空振の初動増圧相の振幅と噴煙高度の関係を示す。両者には正の相関は見られず、噴煙高度の上限は、空振の初動増圧相の振幅が増加するとともに低下している。空振の初動増圧相の振幅であらわされるような爆発力は噴煙の上昇に寄与

しないことを示す。

Fig.9a-cに示すように、噴煙高度が高い噴火に伴う空気振動は火山性微動状に3-4分間継続し、爆発に伴う空気振動 (Fig.3B) と比べて、振動継続時間は明らかに長い。山田・他 (2022) は、空気振動エネルギーに着目し、空気振動エネルギーと火山灰放出重量の間に相関関係を見出している。桜島などの他の火山に比べて、諏訪之瀬島の噴火では、空気振動エネルギーの割に噴煙高度から推定される浮力を獲得しやすいものの、空気振動エネルギーと浮力の間には一定の相関が認められる。火山灰ハザードの評価には、空気振動の初動増圧相の振幅よりも空気振動全体のエネルギーを評価する必要があるだろう。

6. ハザード評価

諏訪之瀬島について火山岩塊と火山灰によるハザードを噴火の実績に基づいて評価してみる。Fig.10bに火山岩塊の到達距離と噴煙高度の関係を示す。噴煙高度の上限は、空振の初動増圧相の振幅が増加するとともに低下している (Fig.10a) ので、空振の初動増圧相の振幅に正の相関がある火山岩塊の到達距離

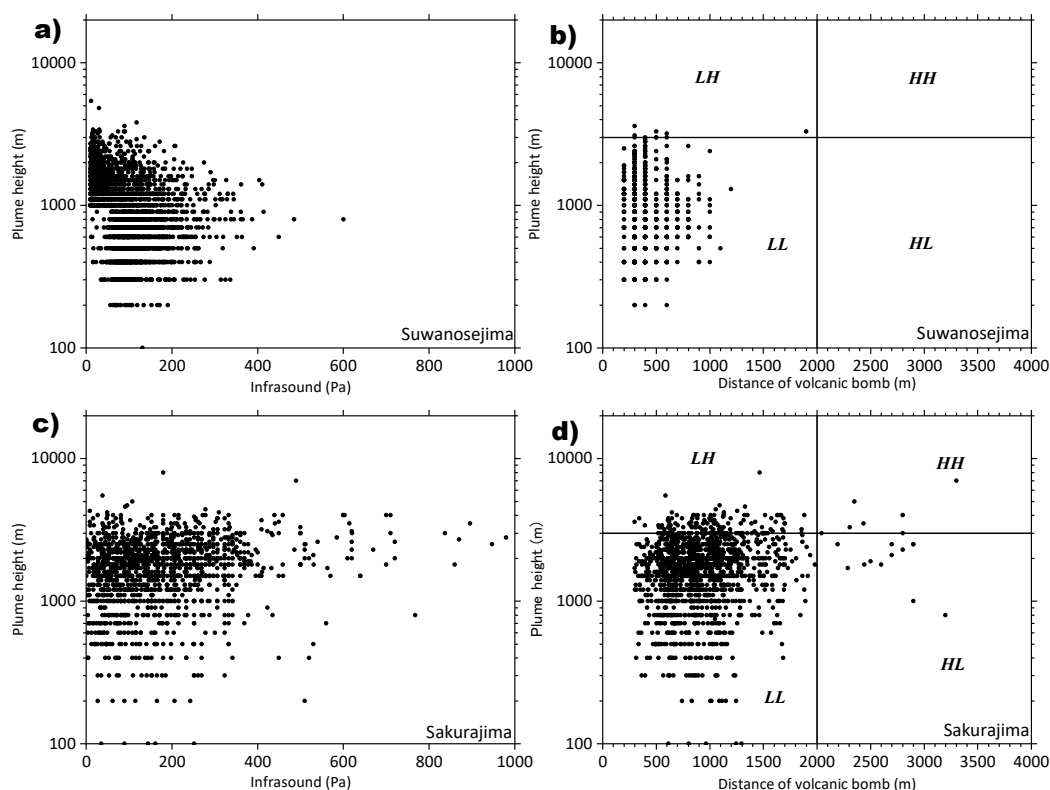


Fig. 10 Relationship between infrasonic amplitude and plume height at Suwanosejima (a) and Sakurajima (c). Relationship between distance of volcanic bombs and plume height at Suwanosejima (b) and Sakurajima (d). “LH” indicates low hazard of volcanic bomb and high hazard potential of volcanic ash. “HL” indicates high hazard of volcanic bomb and low hazard potential of volcanic ash. “HH” is high hazard both of volcanic bombs and ash.

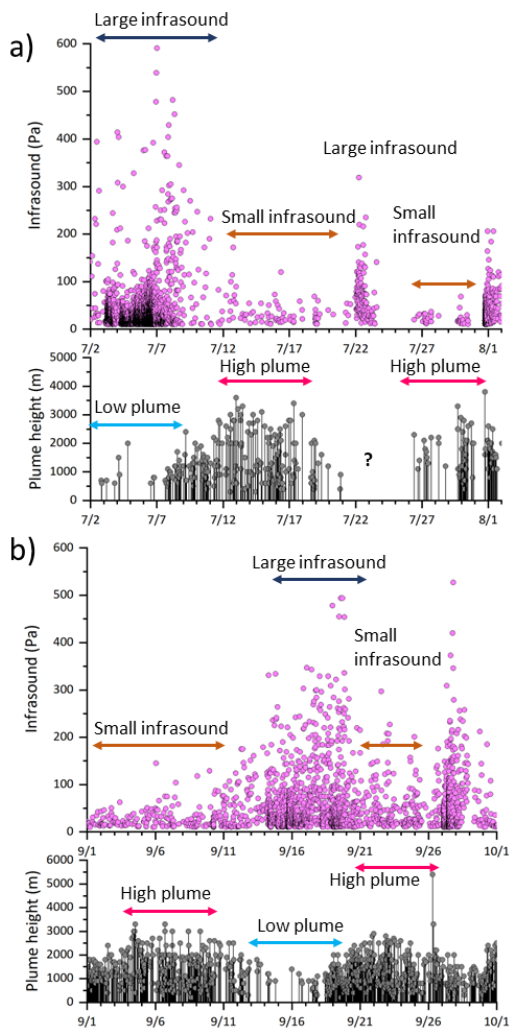


Fig. 11 Examples of time series of infrasound amplitude and plume height in July (a) and September 2021 (b).

離が長くなると、噴煙高度は低くなるように見える。ここでは、火山岩塊の到達距離と噴煙高度によって、火山岩塊と火山灰のハザードの大きさを4つに区分した (Fig.10b)。領域LHは火山灰ハザードが大きく、火山岩塊ハザードが小さい。領域HLはその逆である。領域LLは火山岩塊と火山灰のハザードのいずれも小さく、領域HHはその両方とも大きい状態である。暫定的にその閾値を火山岩塊の到達距離については2000m、噴煙高度については3000mとすると、諏訪之瀬島の噴火のほとんどは火山岩塊と火山灰のハザードのいずれも小さい領域LLにある。数は少ないが、Fig.9に示したような噴煙高度の高い噴火が火山灰ハザードのみ大きい領域LHに入る。領域HL, HHに分布するものはないが、火山岩塊の到達距離の閾値を1000m (噴火警戒レベル2と3の境界) にすると、噴火警戒レベル3の根拠となる噴火に相当するものが、領域HLに入ってくる。

このハザード区分を桜島の南岳噴火に適用してみ

る (Fig.10d)。桜島の噴火についても火山岩塊と火山灰のハザードのいずれも小さい領域LLに属するものの割合が大きい、火山灰ハザードの大きいLH、火山岩塊ハザードの大きいHLに属するものも多い。注目すべきは、領域HHに分布するものであり、火山岩塊と火山灰ハザードのいずれも大きい噴火である。最近の事例では2020年6月4日2:59に発生したブルカノ式噴火 (火山岩塊到達距離3.3km, レーダー観測による噴煙高度7000m) がHHに相当する。桜島南岳噴火活動のハザードの方が大きく評価される。幸いなことに、最近の諏訪之瀬島の噴火活動では、領域HHに含まれる噴火は発生していない (Fig.10b)。1967年8月21日の爆発では、噴煙高度は6000m~7000mに達し、こぶし大の噴石は集落近くの牧場に落下したとされる。噴石の落下を火山岩塊の飛散と考えてよいかは疑問があるが、活動によっては領域HHに近い噴火も起こりうると考えた方がよい。

7. 空振活動と噴煙活動の推移

Fig.9aに示したように、諏訪之瀬島では空振初動の増圧相が大きく、かつ噴煙高度が高い噴火が発生していない。これを空振振幅と噴煙高度の時間変化から検討する。空振振幅と噴煙高度の時間変化が大きかった2021年7月と9月の推移をFig.11に示す。7月1日から7月10日までに、空振振幅が200Paを超える爆発が55回発生している (#5, #6, Fig.6)。この期間は目視観測の状態は良くないが、噴煙高度は最大でも2000m程度であり、1000mに達しないものが多い。7月11日以降、空振振幅の減少傾向が認められるが、この頃から噴煙高度が高くなり、17日までに3000mを超えるものが9回発生している。このように、空振振幅が大きい時期には噴煙高度は低く、逆に空振振幅が小さい時期には噴煙高度は高くなる対応関係がみられる。同様の対応関係は9月にもみられ、9月1日から10日と9月21日から25日は空振振幅が小さく噴煙高度は高い時期、9月14日から20日は空振振幅が大きく噴煙高度は低い時期であった。また、12月24日から31日までに200Pa以上となる空振を伴う爆発が63回発生しているが (#12, Fig.6)、噴煙高度の多くは1000m以下で、2000mを超えていない。

噴煙は火山ガスと火山灰の混合体であるが、噴煙高度が低く火山灰放出量が少ない状態で、空振振幅が大きいことは、噴煙に火山ガスが卓越していることを示唆する。逆に、火山灰量が多いと考えられる噴煙高度が高い状態で空振が小さいことは、噴煙に占める火山灰の割合が増えていることを示す。桜島の2019年9月から2020年6月までの噴火活動期では、揮発性成分に富むbubblyなマグマの貫入・放出から

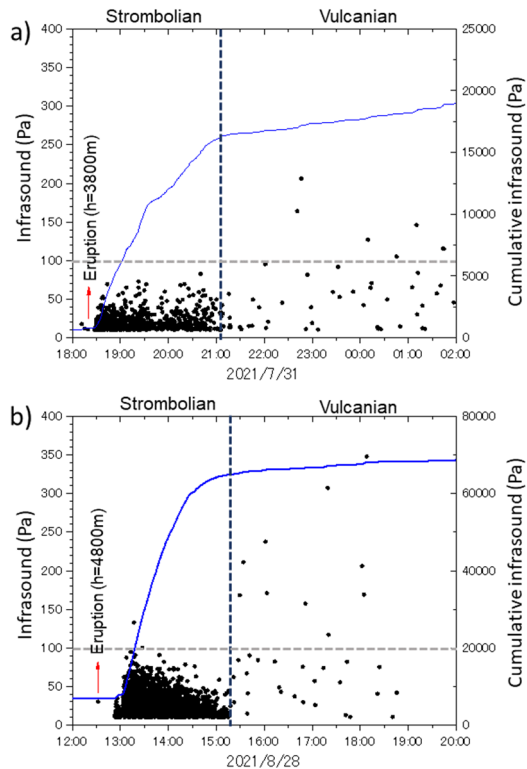


Fig. 12 Time series of infrasound amplitude in short-term transients from high-plum eruption, strombolian eruption (Type S infrasonic pulse increase), vulcanian eruption). Blue curves indicate cumulative infrasound amplitude. (a) July 31 and (b) August 28, 2021.

脱ガスしたマグマの放出である火山灰の卓越する活動へ移行したことが知られている (Iguchi et al., 2022). 諏訪之瀬島において2021年7月1日から10日までの空振振幅が大きく噴煙高度は低い時期は、11日から17日までの空振振幅が小さく噴煙高度は高い時期へ移行しており、揮発性成分に富むbubblyなマグマの貫入・放出から脱ガスしたマグマの放出である火山灰の卓越する活動へ遷移したと考えればよい。22日に再び現れた空振振幅の大きい時期は、新たな揮発性成分に富むマグマの貫入であろう。揮発性成分の放出が卓越している状態と脱ガスが進行して固形成分である火山灰放出が卓越している状態を短時間に交互に繰り返しているように見えるのは、マグマからの脱ガスの速さと揮発性成分に富むマグマ貫入の頻繁な貫入を反映したものといえる。これを噴火ハザードの視点から見ると火山岩塊ハザードが高まった状態と火山灰ハザードが高まった状態を頻繁に切り替えていることになる。

空振振幅の変化から短時間に起こったマグマの状態変化が推定できる例をFig.12に示す。2021年8月28日12:31に小振幅の空振 (2~3Pa) から始まった噴火

は空振振幅の増大と減衰から (Fig.9b) 3分間程度続いたと推定される。しばらく静穏化したのち、噴火に伴う空振より振幅の大きいパルスが12:52から頻発するようになり、この活動は15時すぎまで続いた (Fig.7b)。この間に、空振振幅は100Pa付近から徐々に小さくなるとともに、発生間隔は徐々に長くなった (Fig.8b)。15:33に最初の200Pa超の爆発が発生し、その後も同程度の空振を伴う爆発が繰り返された。12:31から12:34までの噴火に伴う噴煙高度は4800mまで達しており、8月21日から始まった小空振・高高度噴火活動の最後のイベントに位置づけられる。4800mの噴煙高度は、一連の噴火の中でも特に高く、その20分後に噴出するマグマからの熱の供給により浮力を獲得した可能性がある。この噴火により火道内の脱ガスマグマは排除され、新鮮な揮発性成分に富むマグマが火道内を上昇し、気泡の破裂を反映する空振パルスが頻発するようになった。空振パルスの振幅は徐々に小さくなり、その発生頻度も低下していることから温度低下、結晶化により、火道最上部は徐々に閉塞状態に向かったことが推測される。火道最上部が閉塞されるとプラグの下にガスたまりが形成され、プラグの破壊を伴って空振振幅のさらに大きいブルカノ式噴火が発生するようになる。Fig.12aに示した空振振幅も同様の推移を示した。したがって、Fig.12に示した一連の噴火活動は、脱ガスマグマの排出、新たな揮発性成分に富むマグマの上昇・発泡、その結晶化による火道の閉塞状態の進行という一連のプロセスに位置づけられ、このプロセスはわずか4時間程度で進行した。

8. 空振振幅と岩塊到達距離に関する考察

空振振幅と火山岩塊の到達距離の間には正の相関があるものの (Fig.4a), 到達距離には1000m近いばらつきがある。200Pa程度の空振増圧相を伴う爆発でも、2021年9月20日23:50に発生した爆発では、火山岩塊が1200mの距離に達したが、9月28日4:20に発生した爆発では300mにとどまっている。火山岩塊の到達距離は初速度と射出角に強く依存するが、ここでは初速度のみについて考えてみる。Wilson (1980) は、初速度を評価するために、ブルカノ式噴火に伴う火山岩塊の加速度を火道内ガスたまりの圧力変化、空気抵抗と重力により表現した。観測される空振は火道内ガスたまりの圧力変化を直接的に表すわけではないが、定性的な議論には役立つであろう。2021年9月20日23:50に発生した爆発の空振の増圧相継続時間は0.65秒であり、他の爆発に伴う空振増圧相継続時間0.3秒から0.4秒に比べて長い。空振の増圧相において岩塊の加速が続いているとすれば、初速度は空

振の積分値により表されることになる．増圧相継続時間を含めた積分値で評価する必要があるのかもしれない．

また，2021年9月26日13:17に発生した爆発に伴う火山岩塊は1900m南方に達し，他の爆発の相関から逸脱している．福岡管区气象台によれば，この岩塊は13:19に発生した噴煙高度3300mの噴火により放出されたものとされている．13:19ごろには振幅50Paの微動状の空振が観測されていることから（Fig.9d），上昇速度の速い噴煙に加速された火山岩塊が遠方まで到達した可能性もある．

9. まとめ

諏訪之瀬島の最近の噴火活動によるハザードは火山岩塊と火山灰であり，これらのハザードを空振振幅から評価した．火山岩塊が火口から800m以上の距離に到達する爆発は，空振増圧相振幅200Pa以上に達する爆発頻発期に発生している．爆発頻発期は2021年3月から2022年4月までに18回現れた．そのうち，7月7日，9月27日，12月24日は特に活動的であった．

爆発頻発期に先行してパルス状の小振幅空振が頻発する．小振幅空振頻発現象は，1～9日続き，発生間隔は分オーダーであるType Lと継続時間は1～4時間と短い，発生間隔は秒オーダーのType Sに分けられる．小振幅空振頻発現象から爆発頻発への遷移は，1980年代の桜島南岳活動期によく表れたストロンボリ式噴火からブルカノ式噴火への移行を意味し，開放系火道の閉塞が進行したことを意味する．

諏訪之瀬島では火山ガスが強く関与する大空振・低高度噴煙を伴う噴火活動から火山灰放出が卓越する小空振・高高度噴煙噴火へ移行することが多い．火山岩塊から火山灰ハザードへの移行というハザード要因のスイッチングが頻繁に起こる．

謝 辞

諏訪之瀬島の噴火に伴う噴煙高度は気象庁による遠望観測記録を参照した．また，火山岩塊の到達距離のデータは，福岡管区气象台にいただいた．期して御礼申し上げます．

参考文献

- 井口正人（2000）：諏訪之瀬島火山活動の経過－1989年～1999年－，第3回諏訪之瀬島火山の集中総合観測，pp. 1-10.
- 石原和弘・井口正人（1989）：火山体の変形，表面活動と火山性地震発生との関係（1），京都大学防災研究所年報，第32号B-1，pp. 1-11.
- 加茂幸介・石原和弘・井口正人（1993）：諏訪之瀬島火山活動の経過－1989年－，第2回諏訪之瀬島火山の集中総合観測，pp. 1-2.
- 嶋野岳人・小屋口剛博（2001）：諏訪之瀬島火山1813年噴火（文化噴火）の噴火様式とマグマの脱水過程．火山，第46巻，pp. 53-70.
- 立尾有騎・井口正人（2009）：桜島におけるBL型地震群発活動に伴う地盤変動，火山，第53巻，pp. 175-186.
- 福岡管区气象台・鹿児島地方气象台（2020）：火山名諏訪之瀬島噴火警報（火口周辺）令和2年12月28日02時56分．
- 福岡管区气象台・鹿児島地方气象台（2021）：火山名諏訪之瀬島噴火警報（火口周辺）令和3年3月31日03時30分．
- 山田大志・井口正人・為栗健（2022）：空気振動観測による放出火山灰量推定と噴煙到達高度の検討，月刊地球，第14巻，第7号，pp. 338-346.
- Iguchi, M., Yamada, T. and Tameguri, T. (2022): Sequence of volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan, as revealed by non-eruptive deflation, *Front. Earth Sci.*, 10:727909.
- Wilson, L. (1980): Relationships between pressure, volatile content and ejecta velocity in three types of volcanic explosion, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 8, pp. 297-313.
- Yokoo, A., Tameguri, T. and Iguchi, M. (2009): Swelling of a lava plug associated with Vulcanian eruption at Sakurajima volcano, Japan, as revealed by infrasound record: Case study on eruption on January 2, 2007, *Bull. Volcanol.*, Vol. 71, pp. 619-630.

（論文受理日：2022年8月31日）