

移動時間窓での空振相関を利用した火山監視手法の適用

Case Studies of Volcanic Monitoring Based on Temporal Infrasound-wave Correlation

内田 東^{1*}, 菅野 洋^{1**}, 藤原 みどり², 岸本 博志^{3***}, 矢野 美波^{3****}, 横尾 亮彦⁴

Higashi UCHIDA^{1*}, Yo KANNO^{1**}, Midori FUJIWARA²,
Hiroshi KISHIMOTO^{3***}, Minami YANO^{3****}, and Akihiko YOKOO⁴

(Received October 19, 2022; Accepted March 28, 2023)

ABSTRACT: The cross-correlation and coherence of infrasound waves between two observation sites in a moving time window allows extraction of infrasound signals from wind noise within the volcano monitoring area of the Japan Meteorological Agency (JMA). This allows detection of subtle changes (such as crater outgassing) that are difficult to identify from individual continuous waveforms. As examples of such application, infrasound signals preceding an eruption at the volcano on Sakurajima Island were detected, and highly correlated infrasound waves accompanying thick ash cloud were observed during an eruption at the volcano on Kuchinoerabujima Island. At Mt. Aso, continuous infrasound signals of 0.5 and 3 Hz were observed regardless of eruption status, and infrasound noise apparently caused by the passage of Shinkansen trains through a tunnel was detected at the southern foot of Mt. Asama. Ground-coupled seismic signals were clear during intermittent eruptions at the volcano on Suwanosejima with a constant frequency throughout. In air-air and air-ground data, highly correlated frequency bands were generally observed around 1–7 Hz, but exceeded 15 Hz in the 2018 eruption of Mt. Kusatsu-Shirane. In the 2014 Mt. Ontake eruption, no frequencies with high correlation were observed in infrasound coherence analysis. Previous studies indicate that a combination of a seismometer and an infrasound sensor may be as good as two infrasound sensors in correlation monitoring. However, in air-ground correlations, no consistent or empirical correspondence for air-ground coupled seismic signals was observed. In volcanic monitoring, air-air correlation can thus be considered more reliable than the air-ground correlation for eruption-related infrasound detection. In this way, the correlation of infrasound waves recorded using multiple closely located infrasound sensors can be considered to enable reliable monitoring of volcanic infrasound signals and constraint of their arrival directions and sources.

1 はじめに

火山噴火は、固体地球表面からの物質の放出であることから、その放出の規模や形態に応じて空気振動（以下、空振）が発生する。このため、天候不良等により監視カメラで火山の状況を監視できない場合に

は、空振観測は噴火発生を判断するための極めて重要な手段となりうる（例えば、坂井・他、2000）。しかし、坂井・他（2000）でも指摘されているように、空振は風ノイズの影響を受けやすいという欠点がある。風ノイズの影響を低減して火山噴火に起因する空

¹ 地震火山部火山監視課, Volcanic Observation Division, Seismology and Volcanology Department.

*現所属: 鹿児島地方気象台, Kagoshima Meteorological Office.

**現所属: 文部科学省研究開発局地震・防災研究課, Earthquake and Disaster-Reduction Research Division, Research and Development Bureau, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology.

² 福岡管区気象台気象防災部地域火山監視・警報センター, Regional Volcanic Observation and Warning Center, Disaster Mitigation Department, Fukuoka Regional Headquarters.

³ 鹿児島地方気象台, Kagoshima Meteorological Office.

***現所属: 地震火山部火山監視課, Volcanic Observation Division, Seismology and Volcanology Department.

****現所属: 地震火山部地震火山技術・調査課, Earthquake and Volcanic Engineering Affairs Division, Seismology and Volcanology Department.

⁴ 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター, Aso Volcanological Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Kyoto University.

振波を検知するための方法として、空間的に離れた 2 点以上の空振計を利用するアレー観測が挙げられる（例えば、Matoza et al., 2007）。風ノイズの相関距離（Wilson et al., 2007; Shields, 2005）に比べ、火山噴火に起因する数十 Hz 未満の空振の波長はずっと長いいため、ある程度空間的に離れた 2 点以上の空振波形の相関を取ることで、風ノイズの中に埋もれた空振波の到来を効率的に検知できる（以下、空振－空振相関法と呼ぶ）。しかし、波形の相関に注目するアレー観測は、データ処理が煩雑であることや、そもそも火山によっては複数の空振計が設置されていないことから、これまで気象庁の火山監視業務では現業化されてこなかった。

そのような中で Ichihara et al. (2012) は、到来する空振と、その空振が地面を叩くことで励起される地震動との相互相関関数を時系列で連続的に並べて表示し、そのパターンを監視することで火山活動の変化を効率的に検知できることを示した（以下、この監視手法を「空振－地震相関法」と呼ぶ）。空振計と地震計は電源取得やデータ伝送の観点から併設されることが多く、この手法はほとんどの既存の火山観測網に適用可能である点で画期的であるといえる。さらに、必要な処理は、移動時間窓における相互相関関数の繰り返し計算だけであり、システムへの実装が比較的単純である。また、実装したソフトウェア（以下、相互相関モニタ）は、前述の空振－空振相関法のためにも利用できる。

空振－地震相関法で噴火を検知した報告は、例えば、複数の火山の検知事例を比較考察した Matoza and Fee (2014) や、数百 km 離れた遠方の大規模噴火を捉えた Fee et al. (2017), Matoza et al. (2018) がある。国内火山については、西之島 (Nishida and Ichihara, 2016), 箱根山 (Yukutake et al., 2018), 霧島山（えびの高原（硫黄山）周辺）(Muramatsu et al., 2022) の報告がある。

空振－空振相関法については数多くの報告がある。例えば Yamasato (1997) は、雲仙岳の火砕流に伴う空振を解析し、移動時間窓で相互相関を取ることで観測点間の空振の到達走時差を求め、空振源の位置推定とその追跡に成功している。最近では、空振の検知力を上げるために隣接した 2 つの空振計の相互相関関数を利用した Castaño et al. (2020) の例や、相互相関関数の位相差を空振源位置の拘束に利用した Walsh et al. (2019) の研究、さらに国内でも Muramatsu et al. (2021) による霧島山（えびの高原（硫黄山）周辺）の報告がある。し

かし、噴火警報発表を念頭においた国内の火山監視の事例報告やその議論はこれまで十分になされてきたとはいえない。

気象庁では、2001 年の火山監視・情報センター（現在の火山監視・警報センター。以下、火山センター）を中心とした業務体制（以下、火山現業）への移行以来、いくつかの火山噴火の対応経験を踏まえつつ、火山総合観測点の整備などの観測体制の強化や、噴火警報・噴火速報の運用開始などの火山防災情報の高度化を図ってきた。これを受け、火山現業も火山センター化以前から行われていた空振計 1 点観測に基づく従来の監視スタイルを改め、拡充された観測網を活用した高度な監視とそれに基づく確かな情報発表が求められている。その流れの中で、気象庁では 2017 年の霧島山（新燃岳）の噴火を契機として相互相関モニタを全国の火山センターと鹿児島地方気象台に整備し、以降、数多くの観測事例の蓄積が進むとともに、その現業運用上の課題も明らかになってきた。

本稿では、移動時間窓による波形相関の監視手法について、計算処理方法の実際について触れたあと、気象庁の日々の火山現業のなかで捉えられた異常検知事例を紹介する。それらを踏まえ、火山現業でこの技術を利用するうえでの留意点や課題、その解決策について議論する。

2 相関を利用した時系列データの監視手法

2.1 相互相関モニタ

時間長 T の時間窓 $[t - T/2, t + T/2]$ における二つの時系列信号 $a(t)$ と $b(t)$ のうち、信号 $b(t)$ を時間 τ だけ遅らせたときの両者の波形の相似性を確認する指標として相互相関関数を、

$$C_{AB}(\tau; t; T) \equiv \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} a(t')b(t' - \tau)dt' \quad (1)$$

で定義する。これを各波形の二乗平均の平方根で規格化した相互相関関数 (Normalized Cross-Correlation Function) $nCCF(\tau; t; T)$ を、

$$\begin{aligned} nCCF(\tau; t; T) & \\ & \equiv \frac{C_{AB}(\tau; t)}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} a(t')^2 dt'} \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} b(t')^2 dt'}} \quad (2) \end{aligned}$$

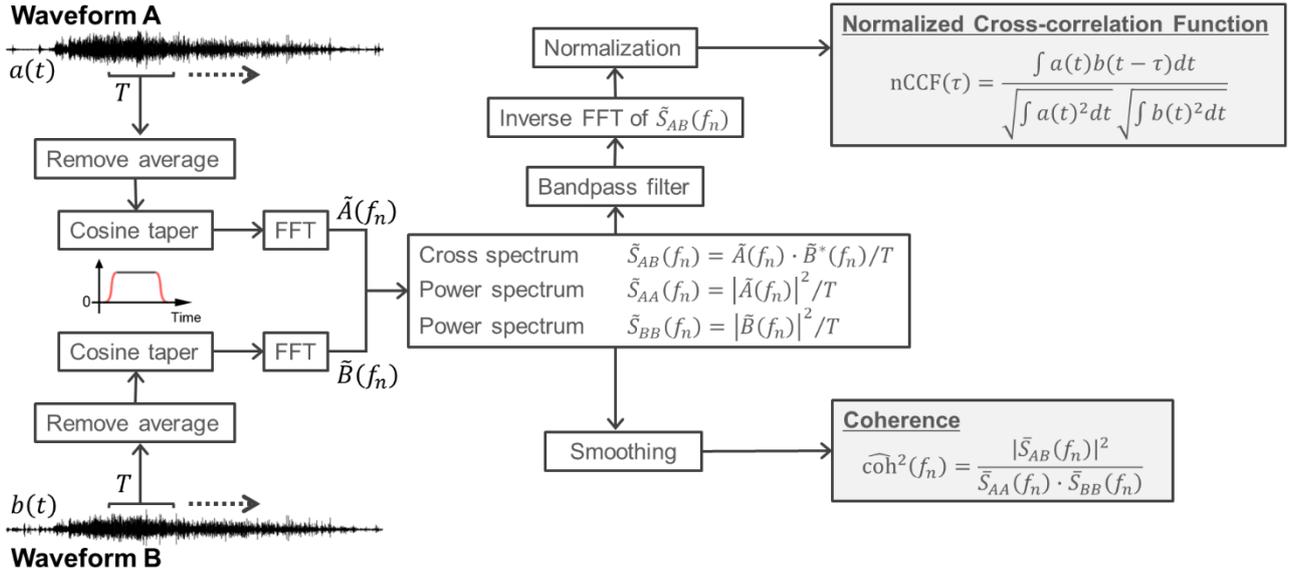


Fig. 1 Calculation of normalized cross-correlation functions and coherence from moving time windows with time-series waveforms of A and B

で定義する. 計算にあたって $a(t)$ と $b(t)$ が $[t - T/2, t + T/2]$ 以外では 0 であると仮定すれば, $-1 \leq \text{nCCF}(t; \tau) \leq 1$ であり, 互いに波形が相似であるときに $\text{nCCF}(t; \tau) = 1$, 波形が相似でなく時系列に相関が無い場合に $\text{nCCF}(t; \tau) = 0$, 互いに相似だが一方の波形の符号が反転している場合には $\text{nCCF}(t; \tau) = -1$ となる. $\text{nCCF}(t; \tau)$ は「相互相関係数」と呼ばれることがあるが, 本論文では「相互相関関数」と呼ぶことにした. 相互相関モニタでは, 横軸に時間窓の時刻 t , 縦軸にラグ時間 τ をとって相互相関関数 $\text{nCCF}(t; \tau)$ の値を二次元平面に表示し, その縞状の表示パターンの変化を監視する.

2.2 コヒーレンスモニタ

実際に火山から到来する空振波はその周波数特性が様々であることから, 監視で実際に相互相関モニタを利用する場合には相関が明瞭にあらわれる周波数帯の選択に迷うことがある. 入力波形にけるバンドパスフィルターを試行錯誤しながら, 相互相関モニタの表示が明瞭になる周波数帯を探してもよいが, 一般には次式で示すコヒーレンス $\text{coh}^2(f)$ (例えば, 日野, 1977; Matoza and Fee, 2014) を利用するのが便利である.

$$\text{coh}^2(f) \equiv \frac{|S_{AB}(f)|^2}{S_{AA}(f) \cdot S_{BB}(f)}. \quad (3)$$

ここで f は周波数である. $S_{AA}(f)$ と $S_{BB}(f)$ は, それぞれ $a(t)$ と $b(t)$ のパワースペクトル, $S_{AB}(f)$ は $a(t)$ と $b(t)$ のクロススペクトルで,

$$S_{AA}(f) \equiv \lim_{T \rightarrow \infty} \langle |A(f; T)|^2 / T \rangle, \quad (4)$$

$$S_{BB}(f) \equiv \lim_{T \rightarrow \infty} \langle |B(f; T)|^2 / T \rangle, \quad (5)$$

$$S_{AB}(f) \equiv \lim_{T \rightarrow \infty} \langle A(f; T) \cdot B^*(f; T) / T \rangle, \quad (6)$$

である. ここで $A(f; T)$ と $B(f; T)$ は, それぞれ $a(t)$ と $b(t)$ のフーリエ積分,

$$A(f; T) \equiv \int_{-T/2}^{T/2} a(t) e^{2\pi i f t} dt \quad (7)$$

$$B(f; T) \equiv \int_{-T/2}^{T/2} b(t) e^{2\pi i f t} dt \quad (8)$$

であり, $\langle \dots \rangle$ はアンサンブル平均を表す. クロススペクトルは 2 信号の相互相関関数のフーリエ周波数成分 (例えば, 日野, 1977),

$$S_{AB}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} C_{AB}(\tau; T) e^{2\pi i f \tau} d\tau. \quad (9)$$

であることから, これをパワースペクトルで割ったコヒーレンス $\text{coh}^2(f)$ の平方根は, これら 2 信号の周波数 f 成分の相互相関関数に対応する. コヒーレンス

の取りうる値の範囲は $0 \leq \text{coh}^2(f) \leq 1$ であり、値が大きいほど信号の周波数 f 成分の相関が高いことを示す。

コヒーレンス (3) 式) は無限に長い時間窓での連続関数の積分から定義されるが、ここでは有限の時間窓で離散化された時系列信号からコヒーレンスを推定したい。時間長 T の時間窓 $[t - T/2, t + T/2]$ を離散化間隔 $\Delta t = T/N$ で N 個に離散化し、時系列信号 $a(t)$ と $b(t)$ の離散フーリエ変換をそれぞれ、

$$\tilde{A}(f_n; t; T) \equiv \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} a(t_k) e^{2\pi i f_n t_k} \quad (10)$$

$$\tilde{B}(f_n; t; T) \equiv \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} b(t_k) e^{2\pi i f_n t_k} \quad (11)$$

と定義する。ここで、 $k = 0, 1, \dots, N-1$, $t_k = t - T/2 + k\Delta t$ である。これらは (7), (8) 式に対応する。 f_n は離散化された周波数で $n = -N/2, \dots, N/2$, $f_n = n/(N \cdot \Delta t)$ である。有限時間窓の離散フーリエ変換から計算されるパワースペクトルとクロススペクトルは、

$$\tilde{S}_{AA}(f_n; t; T) = |\tilde{A}(f_n; t; T)|^2 / T \quad (12)$$

$$\tilde{S}_{BB}(f_n; t; T) = |\tilde{B}(f_n; t; T)|^2 / T \quad (13)$$

$$\tilde{S}_{AB}(f_n; t; T) = \tilde{A}(f_n; t; T) \cdot \tilde{B}^*(f_n; t; T) / T \quad (14)$$

となる。これらを (3) 式に代入してコヒーレンスを求めたいところだが、(3) 式の分子と分母は無限長の時間窓のアンサンブル平均で定義されており、これらをそのまま代入することはできない (そのまま代入すると (10) 式と (11) 式の定義から明らかなように常に $\text{coh}^2(f_n; t; T) \equiv 1$ になってしまう)。コヒーレンスを推定するために、有限時間窓 $[t - T/2, t + T/2]$ と同様の状況が無限に続くような定常状態を仮定し、(12) - (14) 式をそれぞれ平滑化することで (4) - (6) 式に代える。平滑化は日野 (1977) にならう三角ウィンドウ、

$$\tilde{S}(f_n) = \frac{1}{m^2} \sum_{j=-m+1}^{m-1} (m - |j|) \cdot \tilde{S}(f_{n-j}) \quad (15)$$

を用いた。ここで $\tilde{S}(f_n)$ と $\tilde{S}(f_n)$ はそれぞれ平滑化前と平滑化後のクロススペクトルあるいはパワースペ

クトルである。 m は平滑化の次数で、値が大きいほどスペクトルは滑らかになる。コヒーレンスモニタでは、横軸に時間窓の時刻 t 、縦軸に周波数 f_n をとって移動時間窓で計算したコヒーレンスの推定値、

$$\widehat{\text{coh}}^2(f_n; t; T) \equiv \frac{|\tilde{S}_{AB}(f_n; t; T)|^2}{\tilde{S}_{AA}(f_n; t; T) \cdot \tilde{S}_{BB}(f_n; t; T)} \quad (16)$$

を二次元平面上に表示する。

2.3 相互相関モニタとコヒーレンスモニタの計算

二つの時系列波形 $a(t)$ と $b(t)$ の相関の度合いの時間変化を追うために、固定長の時間窓を一定の時間ステップでずらしながら相互相関関数 $n\text{CCF}(\tau; t; T)$ とコヒーレンス $\widehat{\text{coh}}^2(f_n; t; T)$ の計算を繰り返し行う。計算の処理の流れを Fig. 1 で示す。

まず、波形を時間窓で切り取って高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform, FFT) によって (10) 式, (11) 式を求め、パワースペクトルとクロススペクトル ((12) - (14) 式) を計算する。これらを (15) 式で平滑化しコヒーレンス ((16) 式) を計算する。

相互相関関数もパワースペクトルとクロススペクトルから計算する。(1) 式の $C_{AB}(\tau; t; T)$ はクロススペクトルの離散逆フーリエ変換から高速に計算できる。

$$\begin{aligned} C_{AB}(\tau; t; T) &\cong \frac{1}{T} \sum_{k=0}^{N-1} a(t_k) b(t_k - \tau) \Delta t \\ &= \frac{1}{TN} \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{A}(f_n; t; T) \tilde{B}^*(f_n; t; T) e^{-2\pi i f_n \tau}. \end{aligned} \quad (17)$$

(2) 式の相互相関関数 $n\text{CCF}(\tau; t; T)$ の分母の積分は Parseval の定理より、

$$\begin{aligned} &\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} a(t')^2 dt' \\ &\cong \frac{1}{T} \sum_{k=0}^{N-1} a(t_k)^2 \Delta t = \frac{1}{T^2} \sum_{n=0}^{N-1} |\tilde{A}(f_n; t; T)|^2 \end{aligned} \quad (18)$$

により $\tilde{A}(f_n; t; T)$ から計算するのが効率がよい。 $b(t)$ に関しても同様である。

相互相関関数の計算では必要に応じてバターワースフィルター、

$$\text{BPF}(f) = \sqrt{\frac{1}{1 + \sigma(f)^{2n_F}}}, \quad (19)$$

を $\tilde{A}(f_n; t; T)$ と $\tilde{B}(f_n; t; T)$ に乗算してから相互相関関数を計算した. ここで $\sigma(f)$ はバンドパス特性を持たせるために,

$$\sigma(f) = \frac{f^2 - f_{H_c}f_{L_c}}{f(f_{H_c} - f_{L_c})}, \quad (20)$$

であり (例えば, 斎藤, 1978), f_{H_c} と f_{L_c} はそれぞれ高周波側と低周波側のカットオフ周波数, n_F はフィルターの次数である.

移動時間窓における波形の切り取りでは, 有限時間窓の影響を軽減する目的で, 時間窓の平均値をオフセットとして取り除き, 時間窓の片側 5% ずつコサインテーパーをかけて両端が滑らかにゼロに収束するようにした. また, 離散フーリエ変換の際に有限長の時

間窓の一方の終端が他方の終端に回り込んで影響を及ぼしてしまう問題を避けるため, 時間窓の長さと同じだけ終端にゼロで埋めた時間長を追加した.

本報告の解析では時系列データのサンプリング間隔 $\Delta t = 0.01$ 秒, 時間窓長 $T = 20.48$ 秒, ゼロ埋めの領域を加えた時間窓サンプル長 $N = 4096$ とし, 隣り合う時間窓は互いに時刻が重ならないようにした. 周波数の離散化間隔は $\Delta f = f_{n+1} - f_n = 1/N\Delta t = 0.024$ Hz である. 三角ウィンドウによる平滑化の項数 m の値は 20 を用いた. すなわちスペクトルの 1 サンプルあたり前後それぞれ 0.48 Hz の加重平均で平滑化を行った.

移動時間窓による相互相関関数とコヒーレンスの算出では, 固定長 FFT の繰り返し計算が必要になる. ここで毎回の FFT のたびにメモリの確保と開放を繰り返すと一般には処理速度が大きく低下するため, 計算機でのコーディングでは, 最初に時間窓サンプル長 N に対応した記憶領域を確保し, その記憶領域を時間窓の移動に応じて書き換えながら FFT を繰り返すの

Table 1 Observations

No.	Volcano	Date (YYYY/MM/DD)	Infrasound Source	Waveform character ^a	Corr. Pair ^b	Dist. ^c (km)	Corr. Pattern ^d	Corr. Freq. ^e (Hz)	Fig. ^g
1	Sakurajima	2019/09/16	Eruption	T, C	MC-MC SU-MC	5	Clear Poor	<6 (None)	3
2	Sakurajima	2019/10/30	Eruption	T, I	MC-MC	5	Clear	<2	4
3	Shinmoe-dake, Kirishima	2018/03/10	Eruption	T	SU-MC SU-MC	4 12	Poor Clear	(None) 1 – 7	6
4	Kusatsu-shirane	2018/01/23	Eruption	T	SU-MC	3	Clear	>15	8
5	Suwanose-jima	2020/04/28	Eruption	C, I	SU-MC	3	Clear	>1	10
6	Kuchinoerabu- jima	2020/05/05–06	Eruption	C	MC-MC	2 – 3	Clear	1 – 4	13
7	Aso	2020/01/16	Eruption	C, I	MC-MC	1	Clear	<7	16
8	Ontake	2014/09/27	Eruption	C	MC-MC	2 – 3	Clear	? ^f	18
9	Sakurajima	2019/08/24	Fireworks	I	MC-MC	4 – 5	Poor	(None)	19, 20
10	Asama	2020/02/20	Noise	I	MC-MC	~5	Clear	~1	22, 23

^a Approximate characteristics of infrasound and seismic waveforms. T: transient; C: continuous; I: intermittent.

^b Combination for calculation of correlations. MC: infrasound microphone; SU: seismometer vertical component.

^c Distance to infrasound source

^d Pattern clarity in cross-correlation monitoring

^e Cross-correlation frequency band; “None”: no correlation across the whole band

^f No clear frequency band correlation in coherence monitoring

^g Results

がよい。FFT のライブラリは数多く存在し、例えば計算コードの詳細な説明がある Numerical Recipes (Press et al., 2007) やオープンソースで高速な FFTW (Frigo and Johnson, 2005) があるが、(10), (11) 式の指数部の符号がライブラリによっては異なることがあり、(17) 式のラグ時間 τ にかかる符号が逆になることがあるため注意が必要である。

なお、2022 年現在、気象庁の火山監視・情報システム (VOIS) では相互相関モニタのみが実装されており、コヒーレンスの計算機能は未実装となっている。また、VOIS ではバンドパスフィルターは、移動時間窓による切り出しを行う前に時間領域で漸化式フィルター (斎藤, 1978) を使って適用されている点が本報告と異なるが、結果に違いはない。

3 適用結果

ここでは空振の観測事例を全 10 事例紹介する。事例の一覧は Table 1 のとおりで、火山活動による空振の 8 事例の他に、参考として人為的な空振による 2 事例を加えた。Table 1 の事例番号 (No.) は本章の節番号に対応している。また、空振—地震相関法における地震計の設置状況の参考のために、本報告で使った地震計の埋設深度を Table 2 にまとめた。

現在の気象庁の火山監視では、相互相関モニタで相関パターンの縞模様が現れるか否かに注目して監視することがほとんどであり、また後述する空振計の位相特性の問題もあるため、位相情報に注目することが少ない。このため、事例の紹介にあたっては、相関が高い周波数帯がどこなのか特に注目するために、主にコヒーレンスで事例を紹介することにした。すなわち、コヒーレンスの高い周波数帯にバンドパスフィルターをかけて相互相関モニタを表示すれば、相関パターンの縞模様が確認できる (ただし「3.8 2014 年 9 月

Table 2 Seismometer depths

Volcano	Seismic station	Depth (m)
Sakurajima	SET	0
	YOK	85
Shinmoe-dake,	KIHN	0
Kirishima	KIKR	0
Kusatsu-shirane	KSHA	0
	KSAO	94
Suwanose-jima	SUW	0



Fig. 2 Observation stations and the main crater at Sakurajima volcano. Black dots: observation stations; red star: Mt. Minami crater; black star: fireworks launch site referred to in Fig. 19.

27 日御嶽山噴火」の例を除く)。本報告の解析では機器の特性 (位相遅れ, 周波数特性) の補正は行っていない。この問題については第 4 章で議論したい。

3.1 2019 年 9 月 16 日の桜島連続噴火

2019 年 9 月 16 日の桜島の噴火は、数日前からの顕著な山体の膨張の後に発生した比較的規模の大きな噴火であった (気象庁, 2019)。気象庁では桜島の場合、有色噴煙が概ね火口縁上 1,000m を上回った場合に噴火として記録する。鹿児島地方気象台の 9 月 16 日の遠望観測によると、07 時 10 分から南岳山頂火口で白色噴煙を観測したのち、07 時 46 分に火口縁上 2,800 m の灰白色の噴煙が上がり噴火開始を観測した。その後、噴火は断続的に続き、有色噴煙の高さが概ね火口縁上 1,000m を下回った 11 時 10 分に噴火終了を観測した。1,000m を下回る少量の有色噴煙の放出はその後しばらく続いていとみられる。

観測点と噴火場所である南岳山頂火口の位置を Fig. 2 に、噴火前後の観測結果を Fig. 3 に示す。島内の観測波形 (Fig. 3a) をみると、気象台で噴火開始を記録した 07 時 46 分に瞬間的に振幅が大きくなり、直後に振幅は小さくなったものの 08 時 40 分から再び振幅が大きくなり 11 時過ぎまで振幅の大きな状態が続いた。スペクトル (Fig. 3b - d) も振幅の高まりに対応して 0.25 - 0.5 Hz 付近でパワーの高まりがみられた。

桜島の東西両端に位置する YOK (横山) (火口から西北西に約 5 km) と SET (瀬戸) (火口から東南東に

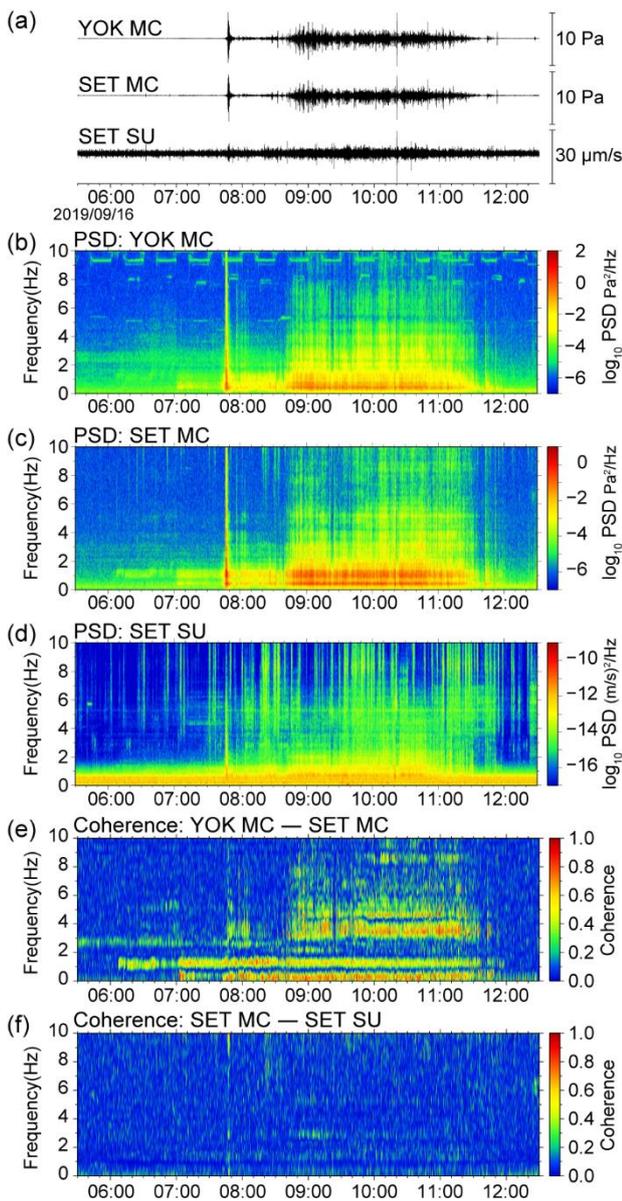


Fig. 3 Infrasound/seismic waveforms and related spectrograms/coherence before and after the September 16 2019 eruption at the Sakurajima volcano. The Kagoshima Meteorological Office reported ongoing white plume emission followed by an eruption at 07:46. (a) Raw microphone signals (MC) from YOK and SET, and vertical seismometer components (SU) from SET; (b – d) related spectrograms; (e) infrasound coherence from YOK and SET; (f) coherence of infrasound and seismic waveforms observed at SET. Poor coherence is observed between microphone and collocated seismometer signals.

約 5 km) の空振記録どうしでコヒーレンスを調べると (Fig. 3e), 噴火開始約 90 分前の 06 時 10 分ごろから

1.2 Hz 付近で相関が高くなり, さらに白色噴煙を確認した 07 時頃から 0.5 Hz 未満でも相関の高まりがみられた. さらに噴火開始後の 08 時 40 分以降では 5 Hz 以上の高周波でも相関が高くなった. 期間を通じて相関が高い周波数帯は一定ではないこと, さらに噴火開始前から相関の高まりがみられることが分かった. また, パワーの大きな周波数と相関の高い周波数が必ずしも一致しないことも分かった. コヒーレンス (Fig. 3e) では 1.5 – 3.0 Hz 帯は相関が常にみられないが, 個々のパワースペクトル (Fig. 3b, 3c) をみると, 相関のある 3 Hz 以上と比べてパワーの欠落があるわけではない.

瀬戸観測点の空振計と地震計 (広帯域地震計, 地表面設置) の相関 (Fig. 3c) をみると, 噴火開始の 07 時 46 分に 10 Hz 付近の高周波でわずかに相関の高まりが確認できたのを除き, ほとんど両者の信号に相関は確認できなかった.

3.2 2019 年 10 月 30 日の桜島の爆発

桜島で発生する噴火のうち, 急激な噴出に伴う地震 (爆発地震) を伴い桜島島内で概ね 10Pa 以上の空振を観測したものを気象台では「爆発」と記録している. 2019 年 10 月 30 日 15 時 27 分の桜島南岳山頂火口の爆発の前後の波形とその相関を Fig. 4 に示す. この爆発では噴煙が最高で火口縁上 2,800 m まで上がり, 空振の最大振幅は YOK (横山) 92.3 Pa, SET (瀬戸) 41.2 Pa であった. 火口から西に約 11 km 離れた鹿児島地方気象台でも 36.1 Pa, 体感空振で階級 2 (誰にでも感じる程度) と比較的大きな空振が観測された. SET と YOK の空振のコヒーレンス (Fig. 4d) では爆発のあった 15 時 27 分頃に広い周波数帯で相関の高まりがみられる. ただし, その高まりは相関を計算する移動時間窓が爆発の波形に重なる短時間に限られ, 数時間にわたって相関の高まりがみられた前項の 2019 年 9 月 16 日桜島連続噴火の事例 (Fig. 3e) とは対照的である. このように爆発にともなう一過的な空振は, 相互相関モニタやコヒーレンスモニタでは表示上あまり目立たない.

さらに Fig. 4d を注意深くみると, 爆発からしばらく経った 15 時 44 分頃から 15 時 56 分頃にかけて断続的に 0.5 Hz から 1.5 Hz 付近で相関の高い周波数帯が

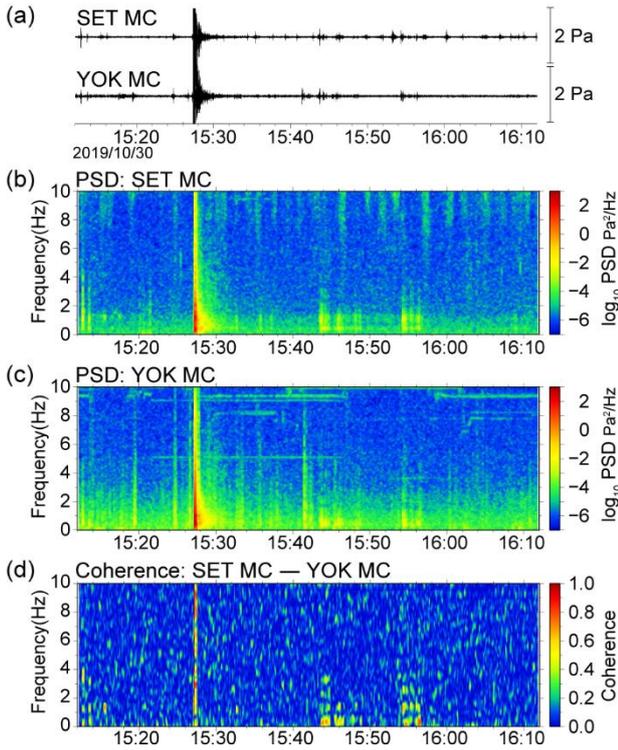


Fig. 4 Infrasound signals from before and after the Sakurajima volcano eruption at 15:27 on October 30 2019. (a): Infrasound waveforms observed at SET and YOK (maximum amplitudes for SET and YOK: 41.2 Pa and 92.3 Pa, respectively); (b, c): related spectrograms; (d) coherence between infrasound waveforms from SET and YOK.

みられる。鹿児島地方気象台では 15 時 40 分に火口縁上 800 m の有色噴煙を観測しており、その後もしばらく噴煙が出ていた。

3.3 2018 年 3 月 10 日 01 時 54 分霧島山(新燃岳)噴火
霧島山(新燃岳) (Fig. 5) で 2018 年 3 月 10 日 01 時 54 分に発生した噴火前後の波形とその相関を Fig. 6 に示す。この噴火では噴煙が火口縁上 4,500 m まで上がり、これは 2018 年 3 月に新燃岳で数多く観測された噴火の中では最も高かった。この噴火の例では、相互相関モニタにより、地震計とそれに併設された空振計の波形の相互相関関数 (Ichihara et al., 2012) に注目する。地震計は固有周期 1 秒の短周期地震計、空振計はアコー社製超低周波マイクロホン (Type 3348+7144) を使用しており、解析にあたり両者の位相特性は補正せずに使用した。



Fig. 5 Mt. Shinmoe volcano. Black dots: observation points; red star: Mt. Shinmoe Crater.

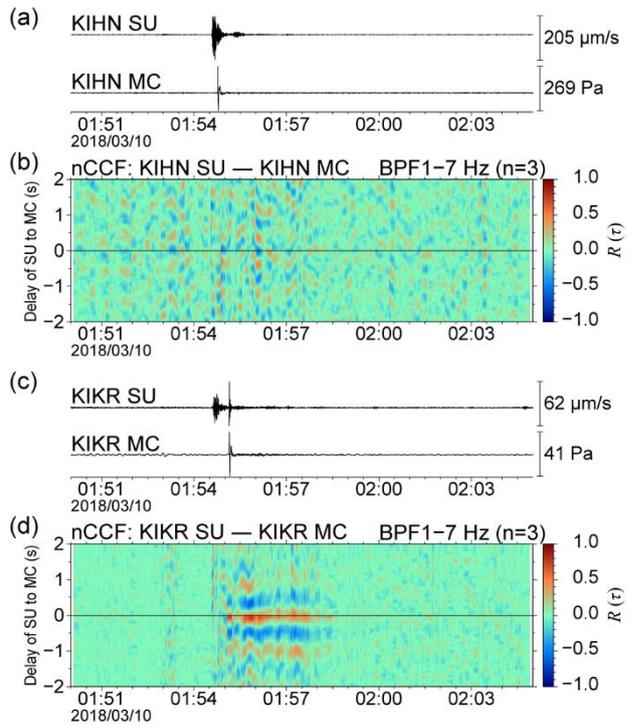


Fig. 6 Temporal evolution of cross-correlation between infrasound and seismic signals before and after the Mt. Shinmoe volcano eruption at 01:54 on March 10 2018. (a): vertical ground velocity and infrasound waveforms at KIHN; (b): related cross-correlation functions in the 1 – 7 Hz band; (c): waveforms at KIKR; (d) related cross-correlation functions in the 1 – 7 Hz band.

Fig. 6a と 6b には火口から約 3 km 離れた KIHN (夷守岳西) 観測点の地震計と空振計の波形、およびそれらの相互相関モニタを示す。Fig. 6c と 6d には火口か

ら約 9 km 離れた KIKR (栗野岳西) 観測点の地震計と空振計の波形, およびそれらの相互相関モニタを示す. 空振—地震の相互相関関数の縞模様のパターンは, 火口からより遠い KIKR で明瞭に確認できた一方で, 火口により近い KIHN ではほとんど確認できなかった. この特徴は Fig. 6 に図示した 1–7 Hz 帯に限らず, 他の周波数帯でも同じだった. また KIKR で両者の相関が確認できるのは, 噴火に伴う一過的な空振が到達した後の 01 時 55 分から 58 分にかけてであり, 地震波と空振波のラグ時間はほぼ 0 秒であった.

3.4 2018 年 1 月 23 日草津白根山 (本白根山) 噴火

2018 年 1 月 23 日 10 時 02 分頃に草津白根山の本白根山付近 (Fig. 7) で噴火が発生した. 当時, 草津白根山では KSHA (水釜北東) と KSAO (青葉山西) の 2 点の空振計を監視していたが, いずれの連続記録でも噴火に対応する明瞭な振動はみられなかった. Fig. 8 には KSHA の空振計とそれに併設された地震計の噴火前後の観測例を示す. 10 時 03 分以降は機器障害によりデータが得られていない. 噴火に関連して発生したとみられる微動が KSHA の地震計では 10 時 00 分頃から確認されているが, 空振計ではノイズレベルを超える明瞭な振動は確認できなかった (Fig. 8a). 一方で, 両者のコヒーレンスの時間変化 (Fig. 8d) に注目すると, 10 時 02 分 30 秒頃に 15 Hz 以上の比較的高周波の帯域で相関の高まりがみられ, これは東京大学地震研究所 (2018) でも報告されている. Yamada et al.



Fig. 7 Mt. Kusatsu-Shirane. Black dots: observation sites; red stars: 2018 Mt. Motoshirane eruption craters (JMA, 2019). No infrasound signal associated with the eruption was detected at KSAO.

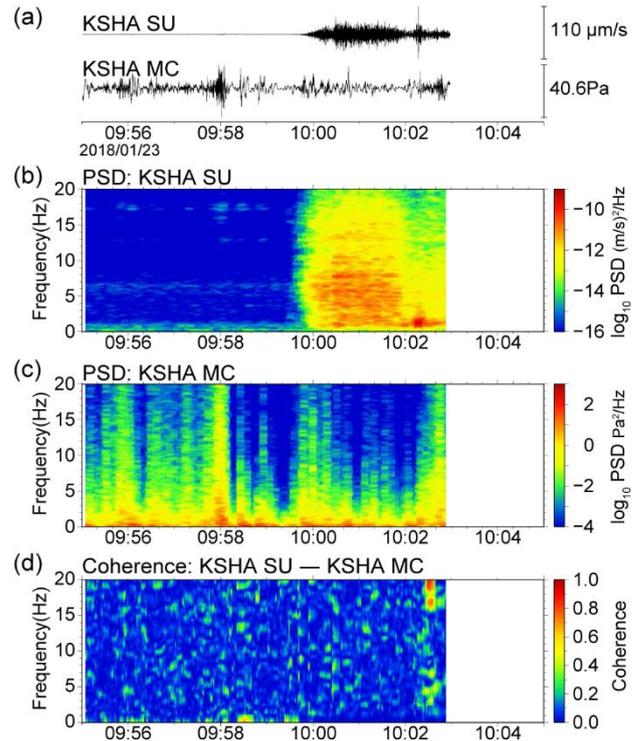


Fig. 8 Infrasound and seismic waveforms before and after the 2018 Mt. Motoshirane eruption. (a): vertical ground velocity and infrasound waveforms at KSHA; (b, c): related spectrograms; (d) related coherence.

(2021) は, 本白根山の北北西 1 km に東京工業大学が独自に設置した空振計の記録を調べ, 特徴的な相の KSAO との到達時間差から噴火発生時刻を 10 時 02 分 09 秒と見積もっている.

一方で, より火口に近い KSAO の空振計とそれに併設する地震計では波形の相関が認められなかった. KSHA の地震計は地上に設置されているのに対し, KSAO はボアホールの孔底に設置されている違いがある (Table 2). また, KSAO と KSHA の空振波形どうしても相関は認められなかった.

3.5 諏訪之瀬島の断続的な空振を伴う火山性微動

諏訪之瀬島の御岳火口 (Fig. 9) では 2020 年 4 月 28 日 04 時 32 分から噴火が観測された. 気象庁では諏訪之瀬島の場合, 桜島と同様に, 有色噴煙が概ね火口縁上 1,000m を上回った場合に噴火として記録する. 翌 29 日にかけて断続的に空振を伴う振幅の大きな火山性微動が発生し, 噴石が火口近傍に多数飛散した. 十島村役場諏訪之瀬島出張所によると, 同火口から南南西 4 km の集落で空振による窓ガラスや障子等の揺れ



Fig. 9 Suwanose-jima volcano. Black dots: observation stations; red star: Otake Crater.

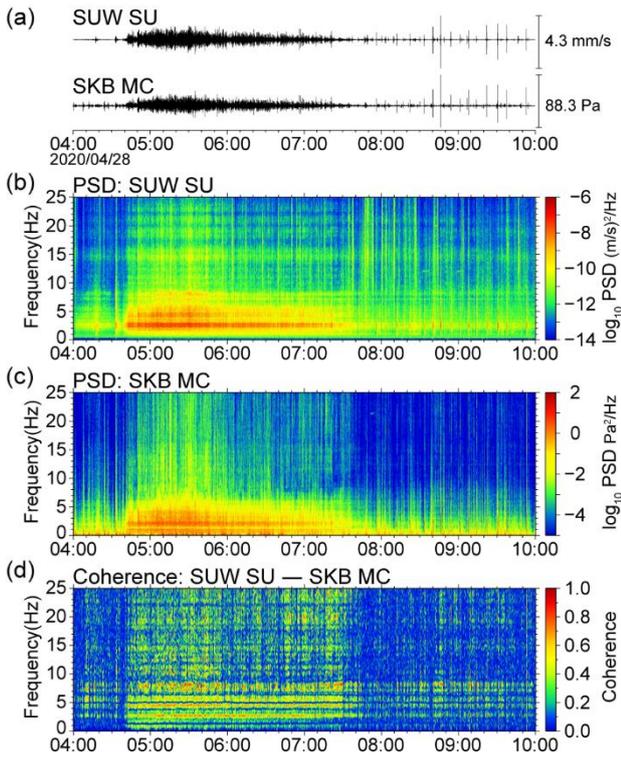


Fig. 10 Seismic and infrasound signals associated with intermittent eruptions starting at 04:32 on April 28 2020 at Suwanose-jima volcano. (a): vertical ground velocity waveforms at SUW and infrasound waveforms at SKB; (b, c): related spectrograms; (d) related coherence.

が感じられ、鳴動も確認された (気象庁, 2020). Fig. 9には解析に使用した観測点の位置を示す. SKA (榑戸原) は気象庁が島内に設置した唯一の空振計 (火口から南南西に約 3.3 km) だが、地震計は併設していない. このため、SKB に近い京都大学の SUW (諏訪之瀬島) 観測点 (火口から南南西に約 3.1 km) の地震計の波形との相関を調べた. Fig. 10 に両者の観測波形とそれぞれのパワースペクトル、コヒーレンスの時間変化を示す. 連続的な相関の高まりは噴火開始時刻 04 時 32 分ではなく、その約 10 分後の 04 時 40 分からみられた. また、その前後でも断続的にパルス状の空振波と地震波が確認でき (Fig. 10a), それに伴って両者の相関の高まりがみられた (Fig. 10d). また、相関の高い周波数帯域はほぼ一定で、特に 1–8 Hz 付近で安定して相関が高い一方、10 Hz 以上の高周波帯でも相関が高い状態が断続的に続いた. 一方でスペクトルをみるとパワーは 5 Hz 以下に集中しており、パワーの大きな周波数帯と相関の高い周波数帯は必ずしも一致していないことが分かった. また、期間を通じて相関が高い周波数帯がほぼ変わらず一定である特徴があり、この特徴は桜島 2019 年 09 月 16 日噴火 (Fig. 3e) の例とは対照的であった.

3.6 2020 年 5 月 5 日口永良部島噴火

口永良部島の^{しんだけ}新岳火口 (Fig. 11) では、2020 年 5 月 5 日から翌 6 日にかけてごく小規模な噴火が発生し、噴煙が最高で火口縁上 500 m まで上がった. 島内に設置された^{ほんむら}KEMN (本村西) カメラ (Fig. 11) からみた噴火の様子を時系列順に Fig. 12 に示す. また、島内に設置された^{ほんむら}KEHT (新岳北東山麓) 観測点 (火口から北東に約 2.3 km) および^{ほんむら}KEMH (本村東) 観測点 (火口から北西に約 2.7 km) (Fig. 11) の空振計の記録を Fig. 13a に示す. それぞれの空振の連続記録 (Fig. 13a) では噴火に対応して目立った変化はみられず、それぞれのパワースペクトル (Fig. 13b, 13c) でもわずかに 2–4 Hz のパワーの高まりがみられるだけであった. 一方、両者のコヒーレンス (Fig. 13d) をみると、5 月 6 日 00 時 05 分から 00 時 20 分頃にかけて周波数 1–4 Hz 付近で相関の高まりがみられた. この時、本村西カメラの画像では噴煙の色がそれまでと比べて濃くなった (Fig. 12d). 福岡管区気象台が^{ほんむら}KEMN (本村西) カメラで有色噴煙を確認したのは 5 月 5 日 23 時 50 分から翌 6 日 00 時 30 分にかけての 40 分間である. 空



Fig. 11 The Kuchinoerabujima volcano. Black dots: infrasound stations; black square: camera location; red star: Shindake Crater.



Fig. 12 (a – f): camera images of the minor eruption on May 5 – 6 2020 at the Shindake crater of the Kuchinoerabujima volcano. Each image corresponds to the a – f time points in Fig. 13 a.

振の相関がみられた時間はこのうちの約 15 分間にすぎず、有色噴煙を確認した時間と一致しなかった。

3.7 2020 年 1 月 6 日阿蘇山噴火

2020 年 1 月 6 日に阿蘇山の中岳第一火口 (Fig.14) で噴火が観測された。KSA (草千里) カメラ (Fig. 14) からみた噴煙の様子を Fig. 15 に時系列順に示す。Fig. 16 には HOD (本堂) の空振波形と FBC (古坊中) の空振波形、それらのパワースペクトルとコヒーレンスの時間変化を示す。有色噴煙が火口から噴出する 08 時 46 分から 08 時 48 分頃にかけて空振の振幅が大きく

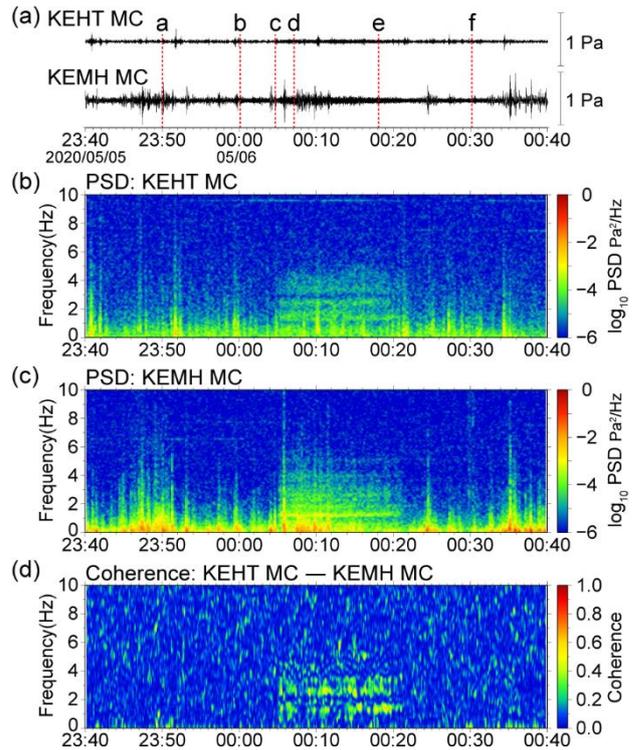


Fig. 13 Infrasound signals from a minor eruption on May 5 – 6 2020 at the Shindake Crater of the Kuchinoerabujima volcano. (a): infrasound waveforms at KEHT and KEMH; (b, c) related spectrograms; (d) related coherence. The a – f time points in (a) correspond to a – f in Fig. 12.

なり (Fig. 16a), これにあわせてコヒーレンスでは 5 Hz 程度までの広い周波数帯で相関の高まりがみられた (Fig. 16d). 一方で、目立った噴煙がみられない時間帯でも、3 Hz 付近と 0.5 Hz 付近で相関の高い信号が継続的してみられた (Fig. 16d). このような有色噴

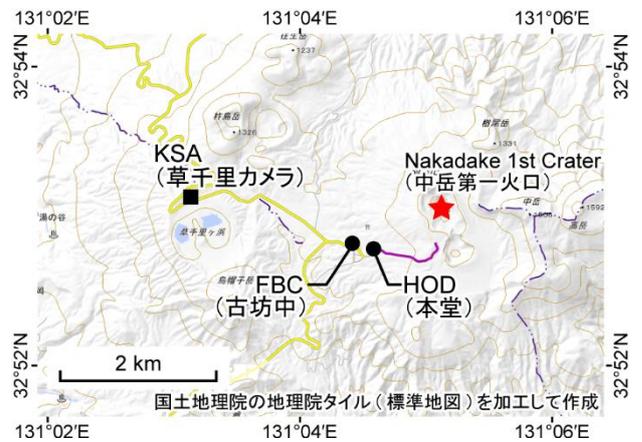


Fig. 14 Mt. Aso. Black circles: infrasound observation stations; black square: camera location; red star: Nakadake Crater No. 1.

煙の噴出と対応しない空振波の到来は、Fig. 3 で示した桜島噴火前の空振とも共通する。



Fig. 15 (a – i): camera images of the minor eruption on January 6 2020 at Nakadake Crater No. 1 on Mt. Aso. Each image corresponds to the a – i time points in Fig. 16 a.

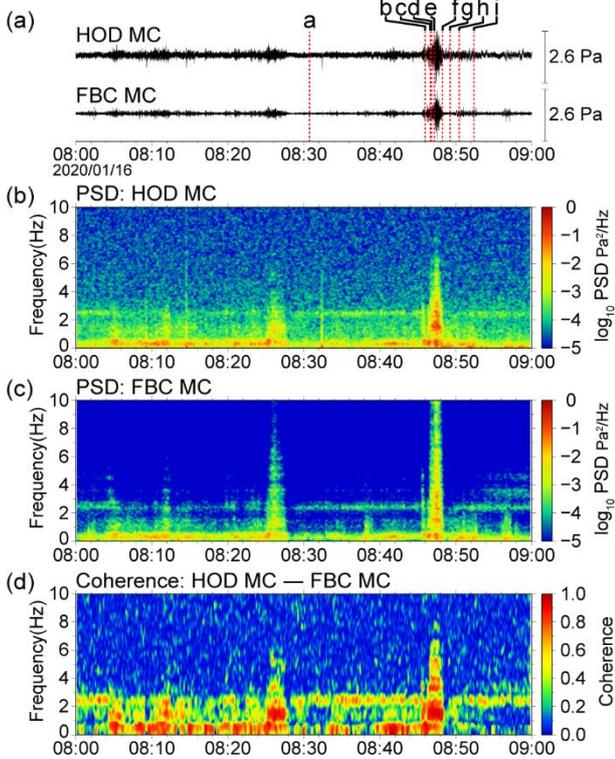


Fig. 16 Infrasound signals from a minor eruption on January 6 2020 at Nakadake Crater No. 1 on Mt. Aso. (a): Infrasound waveforms at HOD and FBC; (b, c): related spectrograms; (d): related coherence. The a – i time points in (a) correspond to images a – i in Fig. 15.

3.8 2014 年 9 月 27 日御嶽山噴火

2014 年 9 月 27 日の御嶽山噴火の事例は、相互相関モニタで明瞭に検知できた一方で、コヒーレンスモニタでは検知できないという特異な事例であった。

Fig. 17 は 2014 年 9 月噴火の火口列位置 (Oikawa et al., 2016) と観測点位置を示し、Fig. 18 は空振波形の解析結果を示す。Oikawa et al. (2016) によると噴火開始時刻は 11 時 52 分 30 秒頃であったが、ONTA (田の原上) と ONTN (田の原) のそれぞれの空振波形 (Fig. 18a) はノイズレベルが高く、これらの波形を個別に見ただけでは噴火開始を判断することは難しい。Fig. 18b, 18c のパワースペクトルでは噴火開始時刻付近から 10 Hz 未満の信号が噴火開始後から徐々に大きくなるのが分かるが、やはり噴火開始時刻の判断は困難である。一方で、相互相関関数 (Fig. 18d) をみると、噴火開始時刻からラグ 2.4 秒付近に相関の高まりが明瞭に認められる。ONTA と ONTN の 2 観測点は概ね火口列が並ぶ方向に配置されており (Fig. 17)、火口列方向からみた 2 観測点の距離差は 0.8 km である。音速 340 m/s を仮定すれば到達時間差は 2.4 秒で、相互相関関数の鋭いピークがみられるラグ時間にほぼ一致し、この信号は概ね火口列方向から到来している空振波によるものと推定できる。これは、市原・他 (2014) でも既に報告されている。

Fig. 18d の相互相関モニタには周波数フィルタをかけた後に計算した相互相関関数を示した。相互相関は特

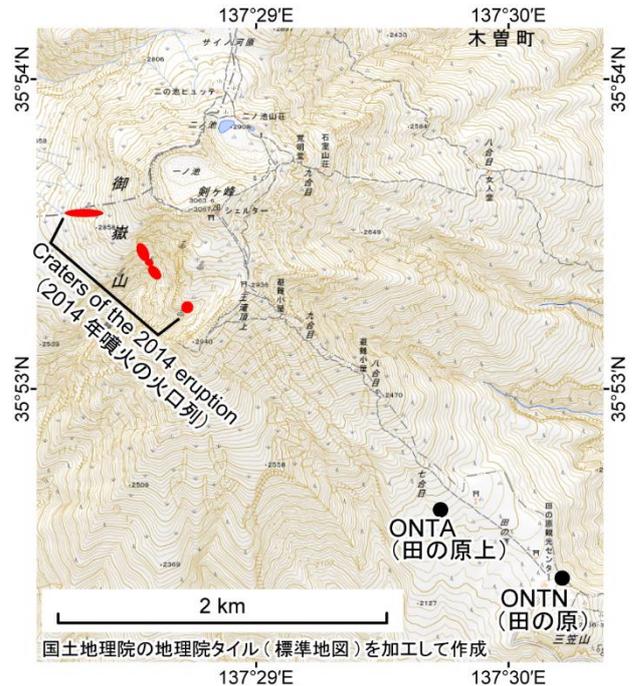


Fig. 17 Mt. Ontake. Black circles: infrasound observation stations; red: craters of the 2014 eruption (Oikawa et al., 2016).

定のラグ時間に非常に鋭いピークがみられるのみでほとんど時間変化せず、縞模様がラグ時間方向に広がっていない。また、コヒーレンスモニタ (Fig. 18e) では噴火前後で明瞭な変化を検出できなかった。

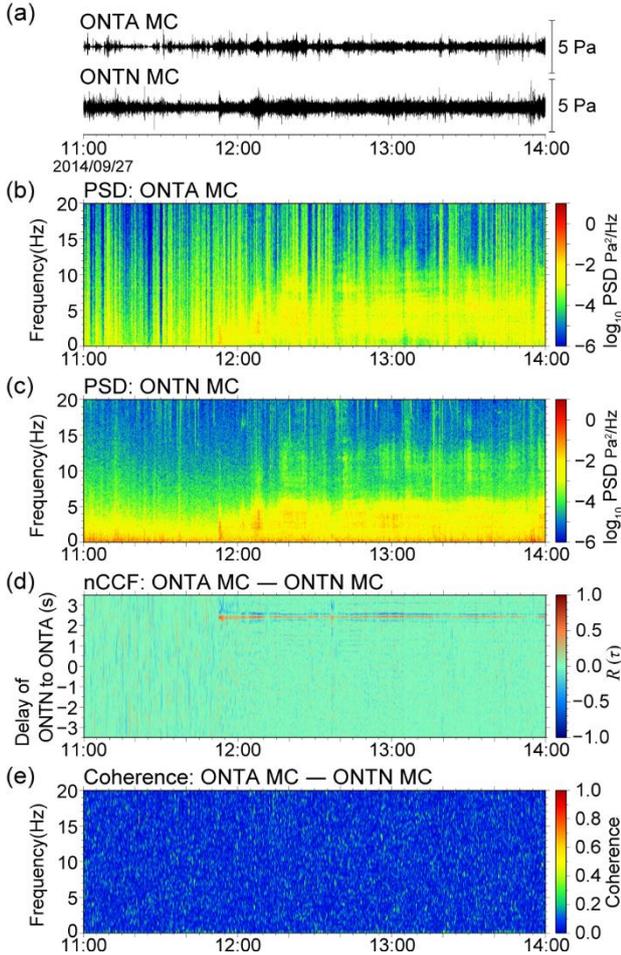


Fig. 18 Infrasound signals from the Mt. Ontake eruption on September 27 2014. (a): infrasound waveforms at ONTA and ONTN; (b, c): related spectrograms; (d): related cross-correlation functions; (e) related coherence. No frequency filter is applied to the cross-correlation function.

3.9 桜島周辺の花火大会に伴う空振ノイズ

空振は火山噴火だけでなく、打ち上げ花火や自衛隊の火力を使った演習でも発生するため、火山監視においては、しばしば噴火現象との判別が重要となる。Fig. 19には、2019年8月24日19時30分からおよそ1時間にわたって鹿児島港付近 (Fig. 2) で行われた花火大会に伴う、YOK (横山) と KOR (東郡元) の空振記録を示す。空振の観測波形 (Fig. 19a) に注目すると、花火の打ち上げに伴い一過的な空振が繰り返し発生し、

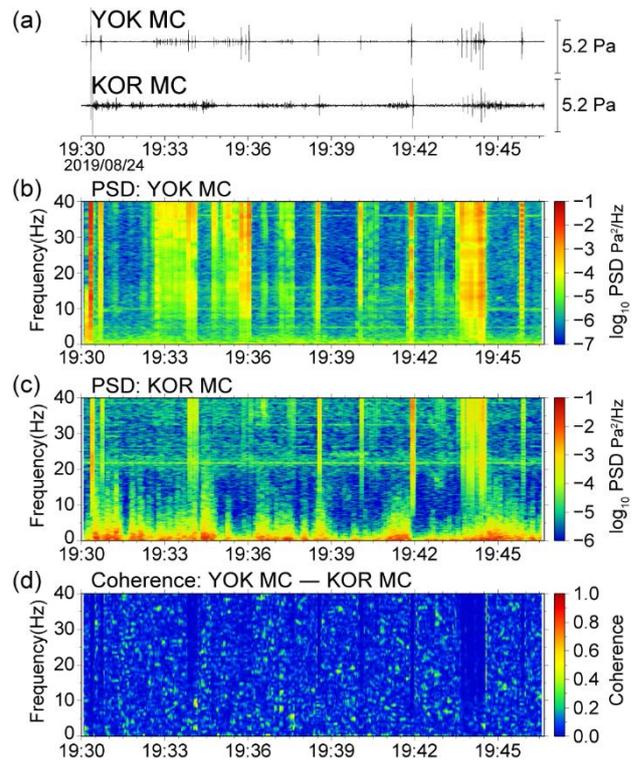


Fig. 19 Infrasound from a fireworks display on August 24 2019 (launch site: Fig. 2). (a): infrasound waveforms observed at YOK and KOR; (b, c): related spectrograms; (d) related coherence between infrasound waveforms at YOK and KOR.

二つの観測点で時間的に対応した振幅の高まりがみられる。ランニングスペクトル (Fig. 19b, c) をみると、10Hz 未満の低周波よりも概ね 30 Hz 以上の高周波の方が大きいパワーをもっており、この特徴は桜島の噴火 (Fig. 3, 4) が 10Hz 未満の低周波にパワーのピーク

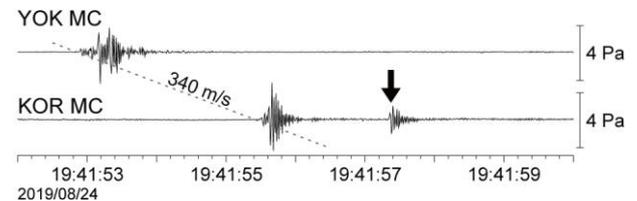


Fig. 20 Detailed infrasound waveforms for the fireworks display on August 24 2019. As per Fig. 19 a, but with time-axis focus around 19:42. Dotted line: temporal change at the speed of sound (340 m/s). The phase marked by the arrow for KOR is assumed to indicate waves reflected from surrounding topography and buildings. No corresponding phase is seen in YOK.

を持つとは異なる特徴である．YOK と KOR の空振波形のコヒーレンス (Fig. 19d) では，全周波数帯で相関の高まりは認められなかった．個々の打ち上げに伴う波形を確認すると (Fig. 20)，YOK と KOR の観測点に限らず，複数観測点で波形が相似ではない．加えて，KOR には周辺の地物からの反射波とみられる YOK に対応しない相もみられた (Fig. 20)．

3.10 浅間山の新幹線によるトンネル微気圧波

火山噴火以外の空振源により空間的に離れた複数の空振計で相関のある信号がみられた珍しい例として，浅間山の南山麓 (Fig. 21) で観測されたノイズの例 (Fig. 22, 23) を紹介する．このノイズは，その発生時刻が新幹線の通過時刻と対応がよく，南側山麓の線路上 (Fig. 21) から音速で伝播していると考えると各観測点の走時がおおむね説明できる (Fig. 22)．この付近には新幹線のトンネルが複数設置されていることから，このノイズは新幹線のトンネル通過に伴う微気圧波とみられる．Fig. 23 には 2020 年 2 月 20 日の SNY (塩野山) と CNT (血の滝) 観測点で観測されたトンネル微気圧波の例を示す．CNT 観測点のスペクトル (Fig. 23b) で示すようにトンネル微気圧波は約 1 Hz

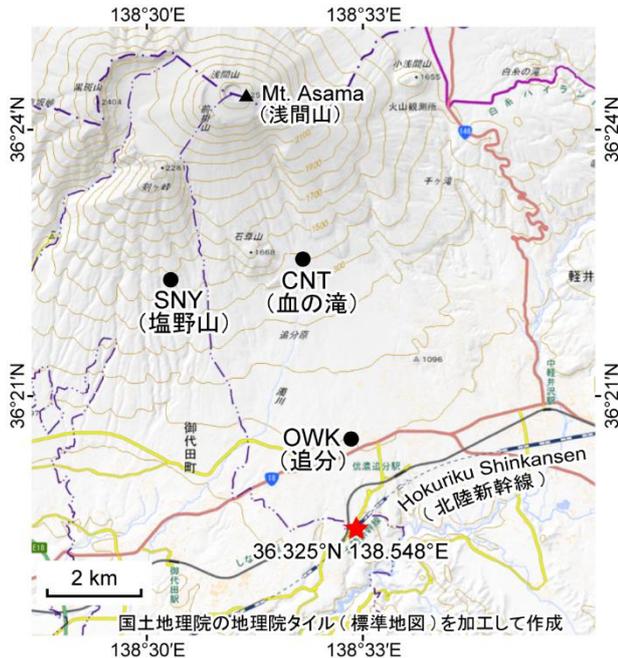


Fig. 21 Southern foot of Mt. Asama. Black circles: observation points; red star; potential noise source on the Hokuriku Shinkansen train line (Fig. 22).

が卓越する．SNY 観測点ではトンネル微気圧波以外の環境ノイズが大きく，観測波形 (Fig. 23a) とスペクトル (Fig. 23c) ではトンネル微気圧波の存在は分かりにくい，コヒーレンスモニタ (Fig. 23d) では 19 時 27 分 30 秒から 19 時 28 分ごろにかけてトンネル微気圧波の到来による相関の高まりが 1 Hz 付近で認められた．

4 議論

以上の事例を踏まえ，空振波 (あるいは空振によって励起された地震波) の相関を監視する中で得られた知見と，今後，この手法を火山現業で活用していく上での課題やその解決の方向性について議論する．

4.1 相互相関を取ることで検知できる空振波の存在

空間的に離れた 2 点の空振計の観測波形 (あるいは空振計と地震計の観測波形) の相互相関を取ることで，それぞれ単独の連続空振記録からは気づきにくかった空振波の到来を検知し，これまで見逃していた火山活動の変化を検出できるようになった．Fig. 3 で示し

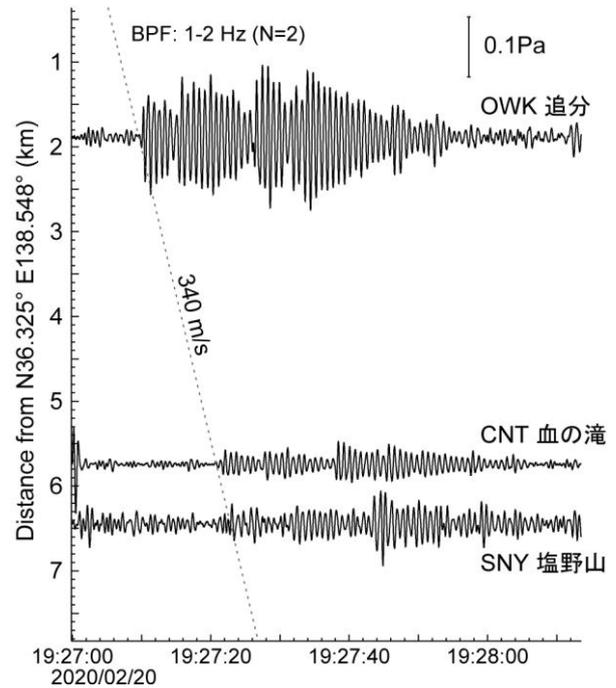


Fig. 22 Filtered (1 – 2 Hz) infrasound noise assumed to be from Shinkansen train operation. Vertical offsets: horizontal distance from potential noise sources on the train line denoted by the red star in Fig. 21; dotted line: temporal change at the speed of sound.

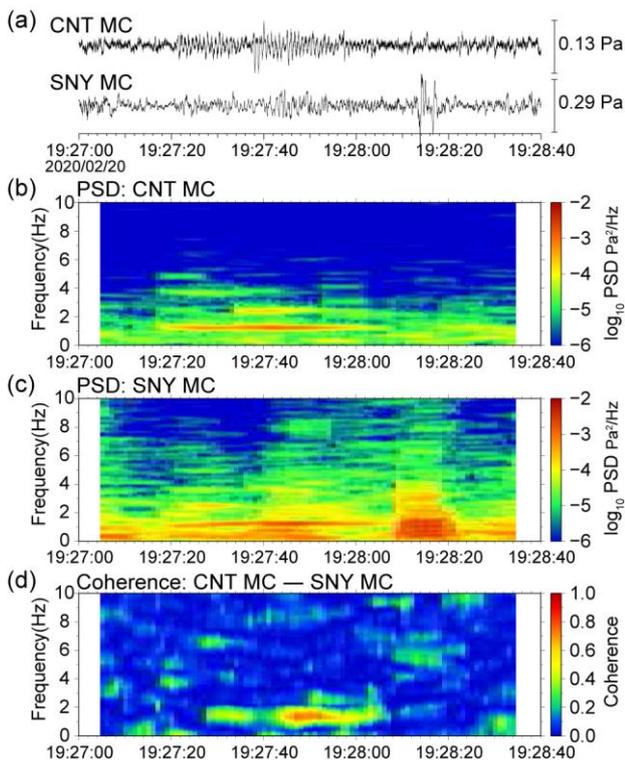


Fig. 23 Infrasound frequencies assumed to be caused by Shinkansen train operation. (a): infrasound waveforms for CNT and SNY; (b, c); related spectrograms; (d) related coherence.

た桜島 2019 年 9 月 16 日の噴火では、噴火開始時刻の約 90 分以上前の 06 時 10 分頃から、桜島の両端に位置する二つの観測点の相互相関により約 1 Hz の空振が検出された。空間的に離れた観測点の空振波に相関があることは単一の空振源から空振波が放出されていることを強く示唆し、噴火に先立って火口からのガス放出が起きている可能性 (Iguchi et al., 2008) が考えられる。さらに噴火約 40 分前から 0.5 Hz 付近でも相関の高い信号が連続的に検出されている。一方、阿蘇山の例 (Fig. 16) でも、噴火に伴う空振とは別に、ほぼ継続的に 3 Hz と 0.5 Hz 付近で相関の高い空振波が連続して検出されている。また、口永良部島では、噴火が継続した時間のうち、有色噴煙が濃くなった時間 (Fig. 12) に対応して、1–4 Hz 付近で相関の高い空振が検知できた (Fig. 13)。これらの信号の変化は従来の連続波形のモニタリング上では見逃していたものであり、火山活動の変化を検知し噴火の予兆を捉えたり、噴火メカニズムを解明したり、あるいはこれまで気付かなかった微小な噴火を検知する上で役に立つ可能性がある。

一方で、空振波到来の有無は地形や大気構造の影響を強く受ける場合がある (例えば, Lacanna et al., 2013)。空振—空振相関法において特定の周波数帯で相関がみられないことがあるのはこのためであろう。桜島 2019 年 09 月 16 日噴火 (Fig. 3) の例では、1.5 Hz から 3 Hz の帯域は時間に関わらず、常にコヒーレンスは小さい。YOK と SET は互いに大きく離れた桜島の両端に位置しており、空振の周波数による伝播経路の違いが影響していると考えられる。すなわち、1.5–3 Hz 帯で、一方の観測点にのみ反射波など伝播経路が異なる波が混入すれば、その帯域だけ相関は下がる。2020 年 1 月 6 日阿蘇山噴火 (Fig. 16) の例では、FBC と HOD の両観測点 (Fig. 14) でパワーの大きな周波数帯 (Fig. 16b, c) と相関の高い周波数帯 (Fig. 16d) に大きな違いは無い。これは FBC と HOD は近接しており伝播経路に両者でほとんど違いが無いためだと考えられる。このような伝播経路の違いの影響を避けるために、相互相関による監視では、空振計 (あるいは空振計と地震計) は互いに近接して設置されていることが望ましい。

4.2 空振—地震相関法の運用

ここでは Ichihara et al. (2012) で示された空振と「空振により励起される地震」の相互相関による火山監視について注目したい。

まず桜島 2019 年 9 月 16 日の例 (Fig. 3) をみると、空振計どうしでは明瞭な相関がみられた一方で、SET (瀬戸) の空振計と、これに併設された広帯域地震計では全周波数帯で相関がみられなかった (Fig. 3f)。YOK (横山) の空振計と地震計の組み合わせでも同様に相関はみられなかった。SET の広帯域地震計は地上に設置されている一方で、YOK の地震計は 85 m の孔底に設置されているという違いがあるが、いずれにしても、この事例では地震計が地上にあるか地中にあるかに関わらず地震と空振の相関は不明瞭であった。

また、霧島山 (新燃岳) の 2018 年 3 月 10 日 01 時 54 分噴火の例 (Fig. 6) では、より火口に近い KIHN (ひなもりだけ 夷守岳西) では空振と地震の波形に明瞭な相関がなかった一方で (Fig. 6b), KIHN よりも火口から 3 倍もの距離がある KIKR (栗野岳西) では両者に相関がみられた (Fig. 6d)。なお、この例では両観測点ともに地震計は短周期地震計であり、地上に設置されている。

いずれにしても本調査では、空振と「空振により励

起される地震」の相関について、観測点距離や周波数帯、あるいは地震計の埋設深度等に貫した法則や経験則を見出すことはできなかった。Ichihara et al. (2012) は震源から地震動として伝播する微動振幅が増大することで、相対的に空振により励起される震動振幅が小さくなり、地震と空振の相関が失われる事例を示している。桜島で空振—地震の相関が現れなかった事例 (Fig. 3f) や霧島山 (新燃岳) で火口により近いにも関わらず相関がみられなかった事例 (Fig. 6b) はこのためであろう。

また、空振—地震相関法では、相関が高い周波数とそれぞれのパワースペクトルが極大となる周波数とが必ずしも一致しなかった (例えば、草津白根山 (本白根山) (Fig. 8), 諏訪之瀬島 (Fig. 10))。空振の地面への入力に対して、それに応答する地面の動きには周波数による違いがあることを示しており、観測点の浅部地下構造、あるいは観測点の設置環境が影響していると考えられる。Matoza and Fee (2014) は、空振がその直下の地面を叩くことで地震動が励起される効率 (単位振幅の空振に対する地震動の応答関数) H_{pw} に注目し、セントヘレンズ火山の噴火記録で高周波帯ほどその効率 (ゲイン) が大きくなる例を紹介している。彼らは、軟質な堆積物の地盤では硬質な岩石地盤に比べてゲインが大きくなる例 (Hinzen, 2007) を挙げて、ゲインの周波数依存性が観測点地下浅部の地質条件に基づく可能性について言及している。また、Ichihara et al. (2021) は空振—地震の相互相関から応答関数 H_{pw} を簡便に推定する手法を提案している。噴火の空振観測事例が蓄積されている火山であれば、あらかじめ観測点ごとに H_{pw} を把握しておくことで、より信頼度の高い監視ができるであろう。いずれにしても、空振—地震相関法は安定した空振の検出に課題がある。

4.3 コヒーレンスモニタで捉えられない 2014 年 9 月 27 日御嶽山噴火

2014 年 9 月 27 日御嶽山噴火の事例 (Fig. 18) では、相互相関モニタで噴火発生が検知できるものの、コヒーレンスモニタでは噴火発生がうまく検知できない特異な事例だった。これは、相互相関関数 (Fig. 18d) が空振の到達時間差であるラグ時間 2.4 秒付近だけに鋭いピークを持つことと対応していると考えられる。

仮に、単一の空振源から発生する空振波が白色雑音

である場合を考える。白色雑音は、全周波数帯でパワースペクトルが一定で、かつ、それぞれの周波数の位相が全くランダムであり、自己相関関数はラグ時間ゼロ以外では相関がゼロとなるデルタ関数となる (例えば、日野, 1977)。この白色雑音の空振波がそのまま空間的に離れた地点 A と地点 B に時間差 τ_{AB} で伝播するとすれば、この二地点の相互相関関数はラグ時間 τ_{AB} のみに鋭いピーク値を持つデルタ関数 $\delta(\tau - \tau_{AB})$ となる。よって (9) 式より、地点 A と B で観測される波形のクロススペクトルの絶対値は、

$$\begin{aligned} |S_{AB}(f)| &= \left| \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} C_{AB}(\tau; T) e^{2\pi i f \tau} d\tau \right| \\ &= \left| \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\tau - \tau_{AB}) e^{2\pi i f \tau} d\tau \right| = |e^{2\pi i f \tau_{AB}}| \\ &= 1 \end{aligned} \quad (21)$$

となり、周波数によらず一定となる。さらに、白色雑音では、パワースペクトル ((4) 式と (5) 式) も全周波数で一定であることから、コヒーレンス ((3) 式) も周波数によらず一定となる。以上は、白色雑音という理想的な状況であるが、一般的には、空振波が広い周波数域で平坦なパワーを持ち、かつ、周波数によって位相がランダムであるほど、相互相関関数はラグ時間 τ_{AB} のみに鋭いピークを持ち、さらにクロススペクトル ((9) 式) から導かれるコヒーレンスも広い周波数帯に分散して値を持つことになる。よって、コヒーレンスを計算する際の平滑化の操作によって、値の周波数による変化が見えにくくなってしまふと考えられる。Fig. 18e の御嶽山の例では、到来する空振波のパワーが広い周波数の帯域に分散し、さらに位相が周波数によってランダムだったため、コヒーレンスモニタで検知できなかったと考えられる。また、このようなコヒーレンスモニタでの見逃しを防ぐには、周波数フィルターをかけない相互相関モニタもあわせて表示するのが有効であろう。

このようなコヒーレンスモニタで捉えられない空振波の特徴は、桜島の長時間噴火の例 (Fig. 3e) や諏訪之瀬島の長時間噴火 (Fig. 10d), 阿蘇山の噴火 (Fig. 16d) とは対照的である。御嶽山の例 (Fig. 18) で、到来する空振波が互いに位相がランダムな広い周波数成分の波を含んでいた理由としては、空振源に固有の振動系が存在せず、空振源の大きさや数やその位置が

時間的にも変動するような状況が考えられる。たまたま ONTA (田の原上) と ONTN (田の原) の両観測点を結ぶ直線上に空振源となる複数の火口が位置していたため (Fig. 17), 空振源がその直線上で様々に変わっても相互相関関数が極大となるラグ時間がほぼ一定 (Fig. 18d) だったのであろう。御嶽山の噴火では複数の火口が新たに形成され (Oikawa et al., 2016), さらに火砕流や泥流の噴出 (例えば, 岸本・他, 2014) があり, 複雑な空振励起過程があったと推測される。相互相関モニタやコヒーレンスモニタから分かるこのような特徴も噴火過程を理解するうえで何らかの参考になるかもしれない。

4.4 相互相関モニタにおける空振と「空振により励起される地震」の位相差の監視 — 気象庁の展開する空振計の問題 —

Ichihara et al. (2012) で説明されているように, 空振が地面を叩くことで地震動が励起される場合, その地震動の振幅は空振よりも 90 度位相が遅れる (Ben-Menahem and Singh, 1981)。このため, 空振—地震相関法ではこの 90 度の位相ずれを確認することで空振の到来を検知できる。しかし, 気象庁の火山監視ではこの 90 度位相ずれを明瞭に確認できた事例はなかった (例えば Fig. 6d では地震—空振の位相差はほぼ 0 である)。これは, 気象庁の火山監視で広く用いられているアコー社製超低周波マイクロホン (Type 3348+7144) と固有周期 1 秒の短周期地震計のそれぞれの位相特性によるとみられる。新堀・他 (2013) は, 桜島噴火の空振波の観測データを用い, アコー社製空振計の位相特性を Paroscientific 社製絶対気圧計 (Model6000-16B) との比較観測により推定した。その結果, アコー社製の空振計の出力は入力に比べて 1 Hz 付近で約 45 度位相が進み, これよりも高周波あるいは低周波ではさらに位相が進むことを報告している。また, Yukutake et al. (2018) は箱根山の空振の地震動との相関解析にあたって, あらかじめアコー社製の空振計を白山製 SI104 空振計と比較することで, アコー社製の空振計の伝達関数を求め, これを補正した上で空振—地震の相関解析を行っている。さらに, 国内火山で広く展開されている固有周期 1 秒の地震計も, その固有周期付近では位相特性が大きく変化する。

気象庁の現在の観測網で空振—地震の 90 度位相ずれに注目して監視するためにはそれぞれの位相特性

の補正があらかじめ必要となる。加えて, 相互相関モニタでは, 相関の明瞭な周波数帯の選択に試行錯誤が必要である。最初から位相差は議論せず, 相互相関モニタにおける相互相関関数の縞模様の発現のみに注目して監視するのであれば, 周波数窓の選択の必要がないコヒーレンスモニタのほうが監視に使用しやすいであろう。ただし前節の 2014 年御嶽山の事例のようにコヒーレンスモニタで捉えられず, 相互相関モニタで捉えられる事例も存在することに注意が必要である。また, 相互相関モニタは, 相互相関関数の縞模様の変化から空振波の到来方向や周波数のわずかな変化を監視できるというメリットがある。

4.5 一過的 (Transient) な空振波の監視

火山活動に伴う空振には, Fig. 3 のような数時間以上も継続した桜島の連続的な脱ガスと連続噴火による空振とは対照的に, Fig. 4 のような爆発に伴う一過的 (transient) な空振 (例えば, Fee and Matoza, 2013) がある。一過的な空振の典型的な波形例として 2020 年 6 月 4 日の桜島の爆発に伴う空振波形を Fig. 24a に示した。継続時間が相互相関を計算する移動時間窓の長さと同様かそれ未満の一時的な波に対しては, 当然, その移動時間窓が波の発現時刻に重なる短時間にしか相関の高まりは期待できない。もちろん, その一瞬をとらえてアラームを出すという監視方法も考えられるかもしれないが, 風ノイズが 2 観測点で一瞬だけたまたま高い相関で現れる可能性もあり現実的でない。また, 相互相関関数とコヒーレンスの計算にあたっては, それぞれの時間窓で解析対象とする波動が (その時間窓よりも長い時間スケールで) ほぼ時間的に定常であることを暗に仮定している。例えば, 有限時間窓の終端で波の主要部分が切断されることで元の波形の相関性が大きく失われることは想定していない。

坂井・他 (2000) でも指摘されているように, このような一過的な空振では異なる観測点で波形の相似性が高い。噴火発生が予測される監視対象の火口が既に決まっているのであれば, 走時を補正した上で空振波形を重合 (スタッキング) し, その重合波形 (Fig. 24b) をモニタするという監視方法も考えられる。重合によって各観測点に無相関な風ノイズなどが相殺されて信号対ノイズ比が向上し, 噴火に伴う空振のみを高い信頼度で検出することが期待できる。

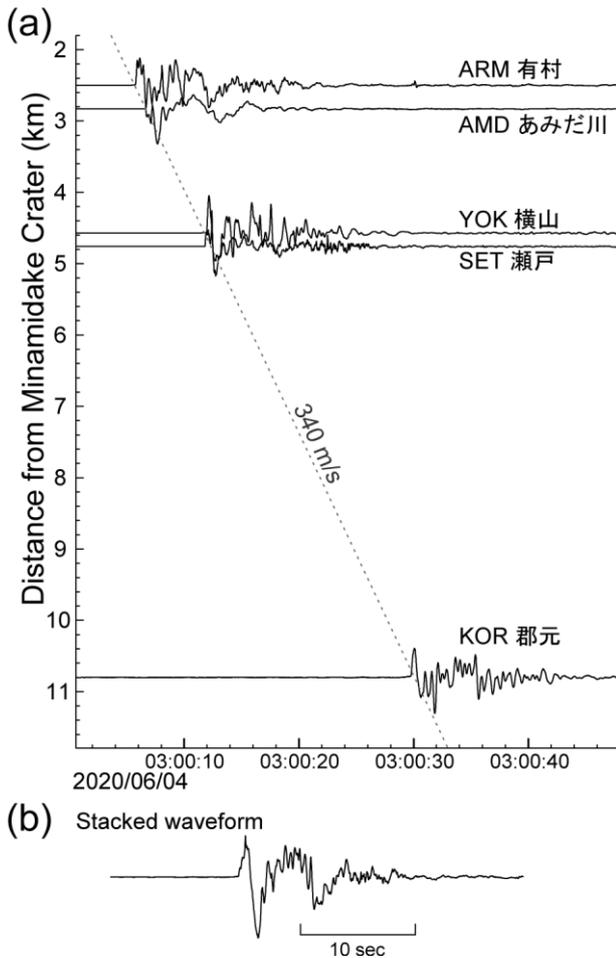


Fig. 24 Transient infrasound signals. (a) Waveforms of the eruption at the Minamidake Crater of the Sakurajima volcano. Vertical axis: horizontal distance from the crater. Each trace is plotted relative to an amplitude axis anchored at the distance of the station from the crater. The dotted line indicates temporal change at the speed of sound (340 m/s). (b) Stacked waveform from traces in (a). Before stacking, the temporal delay of each waveform was removed with the assumption of the source as the Minamidake Crater, and the peak-to-peak amplitude of each waveform was normalized to 1.

4.6 相関解析を念頭に置いた空振計の配置と現業化

噴火による空振の観測経験が少ない上に人的アクセスや通信・電力インフラが制限される火山地域においては、空振計が複数設置されることは稀である。特に、噴火経験が近年無い火山では、空振計の設置はごく少数に限られるが、噴火の社会的影響は大きく、その発生検知の重要性は高い。Ichihara et al. (2012) の手

法を用いて空振計と地震計の最低限の組み合わせで噴火検知力を上げられることは魅力だが、空振—地震の相互相関は安定した空振の検知が難しいことが分かった。より確実に火山活動に伴う空振波を捉えるためには、従来のように空振計を単独で設置する考えを改め、2点以上の空振計を隣接しておくことを検討すべきであろう。気象庁の現行の火山観測網では、Fig. 25aのように、想定火口を囲むように空振計は互いにできるだけ離して設置することが暗黙の了解となっている。しかし、それぞれの観測点で空振到達時間に大きな差がある場合には、相互相関やコヒーレンスを計算するために移動時間窓を長くとる必要があり、相関による空振検知には適さない。例えば、火口から5 kmの観測点と火口近傍の観測点とで空振の相関を計算する場合、走時に約15秒の差があるため、正負のラグを考慮して30秒以上の時間窓で相関を計算することが求められる。また、空振が長距離を伝播する過程で反射波が一方のみに混入し、相関が低下することも考えられる。一方で、Fig. 25bのように空振計を想定火口の動径方向に近接して設置すれば、短い時間窓で風ノイズの影響を抑えた信頼度の高い空振の検知ができるだけでなく、空振波が想定火口方向から到来しているか否か、ラグ時間から判断もできる。風ノイズの相関距離は長くても数m程度 (Wilson et al., 2007; Shields, 2005) であるのに対し、捉えたい空振が1–10 Hz程度だとすれば、その波長は数十mから数百m程度である。このため10m程度離して2点以上の空振計を設置できれば、火山活動に起因する空振をより信頼度高く検知できると考えられる。

また、浅間山の新幹線によるトンネル微気圧波のように、空振—空振相関法でも検知されてしまう波長の長い空振ノイズの存在も明らかになった。それが火山活動によるものか否かの判断のためには、空振の到来方向や空振位置の特定が求められる。例えば、少なくとも3点の空振計があればそれらを三角形に配置することで空振波の到来方向が拘束できる。また、火山周辺に配置した複数の空振波形の相互相関から空振の到達時間差を求めることで空振源の位置を拘束できる (例えば、Yamasato, 1997; Yokoo et al., 2019)。ただし、気象庁で採用しているアコー社製空振計は入力に対する位相ずれが顕著であり、他機関の空振計で記録された波形との位相差を議論する場合には注意が必要である (新堀・他, 2013; Yukutake et al., 2018)。

また、火山監視業務として安定的に本手法を運用する上では、相互相関モニタとコヒーレンスモニタを表示するための計算資源にも配慮が必要である。常時観測火山は全国に 50 火山あり (2023 年 1 月現在)、現在、一つの地域火山センターがモニタする火山は 10–20 火山程度である。到来方向まで拘束するために 1 火山あたり 2–3 組の観測点ペアで相関を計算するとして、20–60 の観測点ペアで相互相関の常時計算が必要となる。またこれら多数のコヒーレンスモニタ・相互相関モニタを監視するためには効率的な画面配置も課題となる。

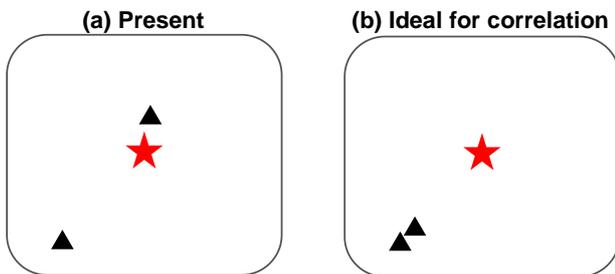


Fig. 25 Layouts for two infrasound observation stations (black triangles) and the crater (red star) assumed to be the infrasound source. (a) Present typical station arrangement. Infrasound sensors are placed as far apart as possible around the presumed source crater. This arrangement is not suitable for detecting infrasound waves in wind noise using correlation due to the large arrival time difference of air waves from the crater. (b) Arrangement of infrasound sensors assuming correlation monitoring. These are placed close together radially around the presumed source crater. This allows infrasound detection with suppressed wind noise using correlation and determination of whether infrasound waves are actually coming from the presumed source crater.

5 まとめ

相互相関モニタ、あるいはコヒーレンスモニタにより、空間的に離れた 2 点の空振波形の相関を監視することで、単独の空振連続記録からは気づきにくかった空振の到来やその特徴の変化を明瞭に検知できるようになった。桜島では噴火に先行する空振の発生を捉えた。阿蘇山では一定の周波数の空振が噴火とは別に連続して検知された。口永良部島では有色噴煙が濃くなった時間に対応して空振が検知された。諏訪之瀬島の断続的な空振を伴う噴火では、空振が励起した地震

動と空振の相関が明瞭で、その周波数は噴火の期間を通じて一定だった。浅間山の南山麓の複数の空振計では、2 点の空振計の相関により、新幹線通過が原因とみられる空振ノイズが検知された。空振—空振、あるいは空振—地震の相関が明瞭である周波数帯は、多くの場合で 1–7 Hz 付近であったが、15 Hz 以上の高周波に限られた例やコヒーレンスモニタで相関の高い周波数帯が特定できない例もあった。

空振が励起した地震動と空振の相関の監視では、その相関が現れる観測点距離や周波数帯、あるいは地震計の埋設深度等に貫した法則や経験則を見出すことはできなかった。より確実に火山活動に伴う空振波を捉えるためには、空振計を単独で設置する従来の考えを改め、2 点以上の空振計を隣接して設置しその相関を監視するのがよい。

ただし、気象庁で採用されているアコー社製の空振計は観測帯域で入力に対する位相ずれが顕著であり、地震計や他機関の空振計との相関で位相差を議論するには伝達関数の違いに留意すべきである。さしあたり空振発生のみを検知するのであれば、相互相関モニタだけでなく、周波数窓選択の必要がないコヒーレンスモニタも併用するのがよい。

謝辞

本稿は、2018 年 12 月 25 日付で策定された「今後の火山業務の基本方針 (気火第 139 号)」に基づき、気象庁の火山現業作業の計画的な見直しを進める中での成果をまとめたものである。火山監視課の山里平博士、本稿を作成する契機を与えていただいた加藤幸司調査官、火山監視・警報センターの小林幸技術専門官には本稿を作成する上での的確なコメントをいただいた。東京大学地震研究所の市原美恵准教授と行竹洋平准教授、気象庁の武尾実参与には議論に応じていただき有益な意見をいただいた。また、査読者の坂井孝行氏と藤原善明氏の指摘により本稿は大きく改善された。事例の収集にあたっては、気象庁の火山監視・情報システム (VOIS) に相互相関モニタを実装することで日々の火山監視に供した増田与志郎調査官の貢献が多大である。桜島・諏訪之瀬島の事例では、「南九州の活動的火山の災害軽減に関する共同研究(その 2) (研究実施期間: 2019 年 4 月 1 日~2024 年 3 月 31 日)」の協定に基づき京都大学のデータを使用させていただいた。また、京都大学防災研究所火山活動研究セン

ターの井口正人氏（センター長）には京都大学のデータを使用する上で便宜を図っていただいた。記して感謝の意を表します。

文献

市原美恵・西田 究・常松佳恵 (2014): 御嶽山 2014 年水蒸気噴火の空振解析結果, 日本火山学会講演予稿集, U P-18.

岸本博志・藤田浩司・千葉達朗・荒井健一・佐々木寿 (2014): 御嶽火山 2014 年 9 月噴火で発生したごく小規模な火口噴出型泥流, 日本火山学会講演予稿集, UP-12.

気象庁 (2019): 桜島の火山活動解説資料 (令和元年 9 月). https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/19m09/506_19m09.pdf, (参照 20 22-10-19).

気象庁 (2020): 諏訪之瀬島の火山活動解説資料 (令和 2 年 4 月). https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/20m04/511_20m04.pdf, (参照 2022-10-19).

斎藤正徳 (1978): 漸化式デジタルフィルターの自動設計, 物理探鉱, **22** (6), 240-263.

坂井孝行・山里 平・宇平幸一 (2000): 火山観測における空振観測の重要性, 験震時報, **63** (1), 1-16.

新堀敏基・小久保一哉・高木朗充・鬼澤真也・山本哲也・福井敬一・安藤 忍・藤原善明・坂井孝行・山里 平・上田義浩・加藤幸司・中橋正樹・松末伸一 (2013): 桜島における空振比較観測, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, MTT40-P02. <https://www2.jpгу.org/meeting/2013/session/PDF/M-TT40/MTT40-P02.pdf>, (参照 2022-03-29).

東京大学地震研究所 (2018): 2018 年 1 月 23 日噴火に伴う空振活動, 第 140 回火山噴火予知連絡会会議資料, その 1 の 1-2 (草津白根山), 54-56. https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/140/140_01-1-2.pdf, (参照 2022-10-19).

日野幹雄 (1977): スペクトル解析, 新装版, 朝倉書店, 296pp.

Ben-Menahem, A., and S. J. Singh (1981): *Seismic Waves and Sources*, Springer New York, 1,108pp.

Castaño, L. M., C. A. Ospina, O. E. Cadena, B. Galvis-Arenas, J. M. Londono, C. A. Laverde, T. Kaneko, and M. Ichihara (2020): Continuous monitoring of the 2015–2018 Nevado del Ruiz activity, Colombia, using satellite infrared images and local infrasound records, *Earth Planets Space*, **72**, 81.

Fee, D., R. S. Matoza (2013): An overview of volcano infrasound: From Hawaiian to Plinian, local to global, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **249**, 123-139.

Fee, D., M. M. Haney, R. S. Matoza, A. R. Van Eaton, P. Cervelli, D. J. Schneider, and A. M. Iezzi (2017): Volcanic tremor and plume height hysteresis from Pavlof Volcano, Alaska, *Science*, **355** (6320), 45-48.

Frigo, M., and S. G. Johnson (2005): The Design and Implementation of FFTW3, *Proceedings of the IEEE* **93** (2), 216-231.

Hinzen, K. -G. (2007): London fuel tank explosion recorded by short-period seismic stations at 500-km distance, *Seismological Research Letters*, **78** (3), 383-388.

Ichihara, M., M. Takeo, A. Yokoo, J. Oikawa, and T. Ohminato (2012): Monitoring volcanic activity using correlation patterns between infrasound and ground motion, *Geophys. Res. Lett.*, **39** (4), L04304.

Ichihara, M., K. Yamakawa, and D. Muramatsu (2021): A simple method to evaluate the air-to-ground coupling efficiency: a tool helping the assessment of seismic/infrasound energy partitioning during an eruption, *Earth Planets Space*, **73** (1), 1-9.

Iguchi, M., H. Yakiwara, T. Tameguri, M. Hendrasto, and J. Hirabayashi, (2008): Mechanism of explosive eruption revealed by geophysical observations at the Sakurajima, Suwanosejima and Semeru volcanoes, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **178** (1), 1-9.

Lacanna, G., M. Ichihara, M. Iwakuni, M. Takeo, M. Iguchi, and M. Ripepe (2013): Influence of atmospheric structure and topography on infrasonic wave propagation, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **119**, 2988-3005.

Matoza, R. S., M. A.H. Hedlin, and M. A. Garcés (2007): An infrasound array study of Mount St. Helens, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **160**, 249–262.

Matoza, R. S., and D. Fee (2014): Infrasonic component of volcano-seismic eruption tremor, *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 1964-1970.

Matoza, R. S., D. Fee, D. N. Green, A. Le Pichon, J. Vergoz, M. M. Haney, T. D. Mikesell, L. Franco, O. A. Valderrama, M. R. Kelley, K. McKee, and L. Ceranna (2018): Local, regional, and remote seismo-acoustic observations of the April 2015 VEI 4 eruption of Calbuco volcano, Chile. *J. Geophys. Res.*, **123**, 3814-3827.

- Muramatsu, D., T. Matsushima, and M. Ichihara (2021): Reconstructing surface eruptive sequence of 2018 small phreatic eruption of Iwo-yama volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan, by infrasound cross-correlation analysis, *Earth Planets Space*, **73**, 8.
- Muramatsu, D., M. Ichihara, T. Matsushima, O. Kuwano, and Y. Tajima (2022): Surface eruptive dynamics of 2018 small phreatic eruption of Iwo-Yama volcano, Japan: Constraints from seismo-acoustic observation and mud suspension rheology, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **421**, 107452.
- Nishida, K., and M. Ichihara (2016): Real-time infrasonic monitoring of the eruption at a remote island volcano using seismoacoustic cross correlation, *Geophys. J. Int.*, **204** (2), 748-752.
- Oikawa, T., M. Yoshimoto, S. Nakada, F. Maeno, J. Komori, T. Shimano, Y. Takeshita, Y. Ishizuka, and Y. Ishimine (2016): Reconstruction of the 2014 eruption sequence of Ontake Volcano from recorded images and interviews, *Earth Planets Space*, **68** (1), 1-13.
- Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery (2007): *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing* (3rd Edition), Cambridge University Press, 1,235pp.
- Shields, F. D. (2005): Low-frequency wind noise correlation in microphone arrays, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **117** (6), 3489-3496.
- Walsh, B., J. Procter, I. Lokmer, J. Thun, T. Hurst, B. Christenson, and A. Jolly (2019): Geophysical examination of the 27 April 2016 Whakaari/White Island, New Zealand, eruption and its implications for vent physiognomies and eruptive dynamics, *Earth Planets Space*, **71**, 25.
- Wilson, D. K., R. J. Greenfield, and M. J. White (2007): Spatial structure of low-frequency wind noise, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **122** (6), EL223-228.
- Yamada, T., A. Kurokawa, A. Terada, W. Kanda, H. Ueda, H. Aoyama, T. Ohkura, Y. Ogawa, and T. Tanada (2021): Locating hydrothermal fluid injection of the 2018 phreatic eruption at Kusatsu-Shirane volcano with volcanic tremor amplitude, *Earth Planets Space*, **73**, 14.
- Yamasato, H. (1997): Quantitative analysis of pyroclastic flows using infrasonic and seismic data at Unzen volcano, Japan, *Journal of Physics of the Earth*, **45** (6), 397-416.
- Yokoo, A., K. Ishii, T. Ohkura, and K. Kim (2019): Monochromatic infrasound waves observed during the 2014 – 2015 eruption of Aso volcano, Japan, *Earth Planets Space*, **71**, 12.
- Yukutake, Y., M. Ichihara, and R. Honda (2018): Infrasonic wave accompanying a crack opening during the 2015 Hakone eruption, *Earth Planets Space*, **70**, 53.

(編集担当 山里 平)