



特集 ライダーデータ利用 I (エアロゾル・雲)

桜島火山に設置されたライダーによる 火山噴出物の観測

中道 治久*1

¹京都大学防災研究所附属火山活動研究センター (〒891-1419 鹿児島県鹿児島市桜島横山町 1722-19)

Lidar observations of eruptive products of the Sakurajima volcano

Haruhisa Nakamichi*1

¹Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 1722–19 Sakurajima-yokoyama-cho, Kagoshima 891–1419

(Received November 15, 2022; revised December 28, 2022; accepted January 13, 2023)

Two lidar instruments were installed at the Sakurajima volcano at the end of November 2014. These Sakurajima lidar instruments were the first to specifically observe the eruptive products of this volcano in Japan. The Sakurajima volcano is one of the most active volcanoes in the world and is in the best location for observing eruptive products. Volcanic ash is the most fine-grain of eruptive products with the particles size of atmospheric aerosols. The lidar instruments can observe such fine volcanic ash. Small eruptions, unreported by the Japan Meteorological Agency, can be detected by the lidar instruments set up at the Sakurajima volcano. Large volcanic eruptions are a concern in Sakurajima Island, during which prevailing westerly winds could disperse volcanic ash to the Japanese Islands. Therefore, this ash is expected to be observed using lidar instruments in the Japanese Islands.

キーワード: ライダー, 桜島火山, 火山噴火, 火山噴出物, 火山灰 **Key Words**: Lidar, Sakurajima volcano, eruption, eruptive products, volcanic ash

1. はじめに

火山噴火によって火口から放出される噴出物は、火山灰、火山レキと火山岩塊といった火山砕屑物と火山 ガスがある.これらのうち、最も細粒の火山砕屑物は火山灰である.Fig.1に大気エアロゾルと火山灰の粒 径毎の体積分率を示す¹⁾.細粒の火山灰の粒径 0.1~50 µm は粗大・蓄積モードのエアロゾルに相当する. 本解説ではミー散乱ライダーについて扱うが、レーザー光の波長(0.5 µm および 1 µm)は細粒火山灰の粒 径に近いため、この粒径の火山灰に対する感度が高い.火山噴火をモニタリングするためには火山灰を連続 かつ継続して採取するか観測する必要がある.そこで、桜島などの噴火が頻発する火山において自動火山灰 採取装置²⁾および光学式ディスドロメータ³⁾を設置して火山灰の採取および観測が行われている.しかし、 これらの方法では粒径 250 µm 以上の粗粒火山灰しか捉えることができない.火山灰の粒径が小さいほど遠 方まで火山灰が拡散する⁴⁾ことから、大気中の火山灰をモニタリングするには細粒火山灰の把握が必要であ る.そこで、ライダーを用いることで細粒火山灰の把握ができる.

大気中の火山灰を把握することは火山噴火そのものを監視することだけでなく,航空路の安全確保といった実用的な必要性がある.航空機のジェットエンジンが火山灰を吸い込むと,火山灰のガラス成分がエンジ





Fig. 1 Particle size distributions of atmospheric aerosol (light gray) and volcanic ash (dark gray). This figure is modified based on the original figure of Durant et al. $(2010)^{11}$.

ン内で融解し、エンジンのブレードに火山灰が付着し冷却孔を塞ぐため、エンジンが過熱され、推進力が低 下してエンジン停止が起こる。実際に、インドネシアのジャワ島のガルングン火山の 1982 年噴火において、 マレーシア発、オーストラリア行きのボーイング 747 型機の 4 基のジェットエンジンが 12 分停止した。ま た、リダウト火山の 1989 年噴火において、アラスカ上空にてボーイング 747 型機の 4 基のジェットエンジ ンが 8 分停止した⁵⁾. そのため、火山灰の航空路への影響を監視する国際的な仕組みが 1990 年代に構築さ れ、世界の 9 箇所の気象監視機関に航空路火山灰情報センター(Volcanic Ash Advisory Center; VAAC)が置 かれ、噴火と火山灰に関する情報が発出されている。そのうちの一つが気象庁に設置されており、東京 VAAC と呼ばれる⁶⁾. 火山噴火によって航空路が大規模に閉鎖された事例として、2010 年 4 月 14 日のアイ スランドのエイヤフィヤトラヨークトル火山の噴火がある。この噴火の噴煙は海抜 9 km 以上に達し、比較 的規模の大きい噴火であったため、火山灰が北西ヨーロッパ全土に拡散した。そのため、翌日からヨーロッ パ上空の大部分の空域が閉鎖され、大規模な航空混乱が起こった。飛行禁止区域の設定と解除のための大気 中の火山灰濃度基準があり、ヨーロッパのライダー観測網(European Aerosol Research Lidar NETwork, EAR-LINET)が火山灰濃度推定に活用された⁷¹. このように大気エアロゾル観測のために構築されたライダー観 測網は火山灰のモニタリングを行う試みが日本の桜島で始まっている.

本稿では、日本で最も噴火が頻発しており、アクセスが比較的良好な桜島における火山観測専用のライ ダーによる観測の概要と、繰り返し微小噴火の観測事例について述べる.そして、最新の研究事例である火 山灰とエアロゾルの季節変動について簡単に述べ、最後に桜島において懸念されている大規模噴火に対する ライダー観測網を用いた広域の火山灰モニタリングの可能性について述べる.

2. 桜島におけるライダー観測の概要

桜島は鹿児島県鹿児島市に所在する火山(Fig. 2)であり、1955年から現在まで噴火が頻繁に発生している.そのため、桜島において火山研究ための様々な調査および観測が行われている.観測の一環として、京都大学防災研究所(防災研)は噴火の噴煙に含まれる細粒火山灰を観測するために2014年11月末に桜島に2台のミー散乱ライダーを設置して連続観測を開始した.2台のライダー(桜島ライダー)は防災研の施設である桜島火山観測所(SVO, 31.590°N, 130.601°E)と黒神観測室(KUR, 31.584°N, 130.702°E)に設置されている(Fig. 2). これらの桜島ライダーは水平方向(180°)および仰角方向(0~47°)にスキャンする機能を有するが、レーザー光の射出方向をそれぞれのライダーの設置場所から南岳火口上の方向に向けている(Fig. 2). SVOとKURのライダーの仰角はそれぞれ13°と15°である.そして、SVOとKURのライダー設置風景を示している.また、Fig.4はKURのライダーから出るレーザー光が噴煙に向かって射出されている夜間の様子を示している.SVOとKURのライダーからのレーザー光は南岳山頂の火口縁よりそれぞれ300mおよび100m上部のところへ射出されているため、桜島ライダーの仕様は国立環境研究所が中心になって運用している東アジアライダーネットワーク(Asian Dust and aerosol lidar observation Network, AD-Net)⁸にて用いられ





Fig. 2 Locations of lidar instruments installed at SVO (yellow diamond) and KUR (purple diamond) at the Sakurajima volcano. Lines indicate their lines of sight. The open white circle indicates an underground observation tunnel by the Ministry of Land, Infrastructure, Transport, and Tourism (ARI), in which an extension meter and a seismometer are installed.



Fig. 3 Lidar instrument at SVO. (a) This unit has a laser transmitter and a telescope (left) and data acquisition unit (right); (b) laser transmitter and telescope directed toward the Minamidake crater of Sakurajima volcano.



Fig. 4 Laser beam is pointed above the Minamidake crater from the KUR lidar (white arrow). This is taken from https://www.youtube.com/watch?v=HuBgUVqEjqg (Sakurajima Volcano Live camera on the YouTube by Sakurajima Museum).





Fig. 5 Example of automatic lidar data processing results on the web by the National Institute for Environmental Studies. The SVO lidar results are displayed for September 13, 2022. Graphs from top to bottom show backscatter intensity at a wavelength of 532 nm (arbitrary units), depolarization ratio at a wavelength of 532 nm (0–0.5), backscatter intensity at a wavelength of 1064 nm (arbitrary units), and azimuth and elevation angles of the telescope of the SVO lidar instrument. Arrows indicate hourly-mean wind speed along the direction laser of the SVO lidar instrument.



Fig. 6 Backscatter intensity (top) and extinction coefficient (bottom) at a wavelength of 532 nm obtained with the SVO lidar instrument. The time scale is the same as Fig. 5.

ているライダーと同様,エアロゾル計測用ライダーシステム⁹⁾の一種である. 桜島ライダーは波長 532 nm と 1064 nm の Nd:YAG レーザーパルスを 1 秒間に 20 回射出している. パルスあたりの出力は 30 mJ であり, アイセーフではない. なお,火口周辺は飛行禁止区域であるため,航空機等にレーザーが照射される恐れは ない. 大気中のエアロゾルで散乱された光は,受信望遠鏡で集光され,そして光電子増倍管 (photo-multiplier tube PMT, 波長 532 nm) およびアバランシェ・フォトダイオード (avalanche photodiode APD,波長



1064 nm)にて検知され、電気信号に変換され、信号波形として記録される⁹⁾.また、桜島ライダーは波長 532 nm のレーザー光を偏光させて射出しており、その偏光面に平行および直交の方向の後方散乱光を同時 に検知し記録している⁹⁾.なお、桜島ライダーはレーザーを2秒間(40パルス)射出して8秒間休止すると いうサイクルにて連続的に運用されている. 桜島ライダーの時間分解能は10秒で、距離分解能は6mで、 測定可能距離は0~24 kmである.記録されたデータはライダー制御 PC を通じてインターネット経由にて 国立環境研究所に転送され、AD-Net と同様の方法でデータ処理が自動的に行われている.そして、データ 処理の結果を web ブラウザにて国立環境研究所のサイトにて随時確認することが可能である¹⁰⁾. Fig. 5 と Fig. 6 はデータの自動処理結果の例で、前者は各波長の後方散乱強度と波長 532 nm の偏光解消度とレー ザー光の方位角と仰角の図示で、後者は波長 532 nm における後方散乱強度と消散係数の図示である.

3. ライダーによる繰り返し微小噴火の検知

Fig. 5 は桜島火山観測所 (SVO) のライダーによる 2022 年 9 月 13 日午前 0 時(日本時間) から 24 時間 のライダー設置場所を原点として南岳火口方向の射距離における波長 532 nm における散乱強度(送信レー ザーの偏光面に平行および直交する成分の合計)および波長 532 nm の偏光解消度と波長 1064 nm における 散乱強度を示している. 散乱強度は白色がバックグラウンドを示し, 強度の上昇に応じて青色, 緑色, 赤色 を示す、高濃度エアロゾルでは、通過する送信レーザー光およびエアロゾルからの後方散乱光とも強い減衰 を受けるためライダーの受信信号強度は微弱になるため、散乱強度がノイズレベルに近くなりバックグラウ ンドと差がわずかとなる. なお, 散乱強度は規格化された任意単位で示され, 偏光解消度は0から0.5の範 囲で示されている. 鹿児島地方気象台におけるこの日の天候は晴れで、最低気温 27℃、最高気温 33℃で あった. そして, 1時間毎の風向は0時から4時は時間毎に西南西, 東北東, 南南東, 東北東に変化した が、4時から9時まで北東が卓越し、9時から22時まで東が卓越し、22時から24時は東北東が卓越した. Fig. 2 に示す通り南岳火口から桜島火山観測所 (SVO) は西北西の位置あり, SVO は南岳火口からの向かい 風の方角に近い. そのため、噴火すると南岳火口における噴出物の一部は SVO 方向に向かってくると思わ れる. Fig. 5 に示す SVO からレーザー射出方向の距離と散乱強度の時間変化において上記の風の変化に対 応が見られる.0時から3時ごろまでは散乱強度の高い距離は4kmから5kmの間に線状に分布し、この距 離より長距離においてはレーザー光の強度が減衰するため散乱強度はかなり小さく、短距離において散乱強 度は小さい. 一方,3時ごろから4時ごろにかけて線状の散乱強度の高い部分は短距離である3kmから4 km に分布が移り, その後12時までにこの距離に位置していた. この時間帯においては散乱強度の高まり が、スジ状に短距離へ分布した.そして、12時ごろから24時までの間は距離4km以内において散乱強度 の高まりが時間経過とともに変動している.また、この時間帯においては距離0~4 km 間で偏光解消度が 高い値が卓越している。つまり、散乱強度の高まりの移動は非球形の固体の存在つまり、噴出物の存在と移 動を示唆している。特に、15時以降においては時間経過とともに散乱強度の高まりが短距離へと短時間に 移動したためスジ状に見えている部分が複数ある. この傾向は Fig. 6 に示す波長 532 nm の後方散乱強度お よび消散係数においても見られる.これらのスジ状の散乱強度の高まりは、噴火後に噴出物が風に流されて SVO 方向に近づいてくるのを反映している可能性がある.なお,鹿児島地方気象台による 2022 年桜島噴火 観測表¹¹⁾によれば9月13日の噴火は16時28分に発生した噴煙高度が火口縁から上へ1600mで噴煙の流 向が西の噴火のみであった、しかし、噴火観測表に記載されないような小規模な噴火による噴出物の移動に てスジ状の散乱強度の高まりが見られた可能性がある.

そこで、9月13日の17時から24時におけるSVOのライダーの散乱強度と国土交通省有村観測坑道 (ARI)における地震のスペクトル振幅と伸縮計(南岳火口とARIを結ぶ直線に直交する方向)の記録を比 較する(Fig. 7). Fig. 7aに示す散乱強度は波長532 nmの偏光面に平行および直交の方向の成分の散乱強度 の合計である. Fig. 7bの地震スペクトルに周波数1Hzから5Hz帯に顕著な振幅があり縦のスジ状見える部 分(白矢印)があり, Fig. 7cに示す伸縮計の記録において伸長(Expansion)から急激に収縮(Contraction) に変化する部分に対応しており、これらは噴火に伴う地震記録および伸縮計の記録の特徴¹²⁾と同じである. したがって、この時間帯において鹿児島地方気象台の噴火観測表¹¹⁾には記載されてないような微小な噴火 が繰り返し発生したと考えられる. 微小噴火の発生時刻(Fig. 7bの白矢印)のほぼ全てについて、Fig. 7a に示す散乱強度において距離4kmの散乱強度の高い部分が時間経過とともに短距離へ移動するのが確認で





of seismic waves at ARI, and (c) the strain record of an extension meter at ARI. (a) The backscatter intensity and (b) amplitude spectrum are shown in dark blue, blue, green, yellow, red, and red-brown as they increase, and their units are dimensionless.

きる. 散乱強度の高い部分は,火口から噴出したエアロゾルと考えられる. この移動時間はおよそ 10 分で あるので,移動速度は 6.7 m/s である. これは 9 月 13 日の 17 時から 24 時の平均風速の 6.0 m/s と大まかに 対応していることからも散乱強度が高い部分が噴出エアロゾルであることが支持される. 噴火後に噴出物で 構成される噴煙が風で移流し,拡散していく過程において,同時に噴煙から噴出物が降下する過程をライ ダーにて捉えたと考えられる. したがって,ここで紹介した観測事例は,風向き次第ではあるにせよ,ライ ダーを用いることで微小噴火を検知することが可能であることを示している.

4. 最新の研究成果と今後の展開

4.1 桜島における火山灰とエアロゾルの放出の季節変動

前述では桜島ライダーで捉えられた短時間での散乱強度の距離分布の時間変化を卓越する風向きと噴火との対応で示した.より長期間については,桜島のライダーを用いて火山灰の月毎の消散係数平均値と桜島の 噴火活動と消散係数と風向との比較が月毎になされ,消散係数と風向の季節変動の関係が明らかになっ た¹³⁾. Fig. 8 は SVO のライダーにおける 2018 年の月平均の消散係数と鹿児島地方気象台による月毎の噴火 回数,爆発回数,単位面積当たりの火山灰量,月毎の火山灰降下日数と推定火山灰降下量を比較している図 である.消散係数の距離分布からは5月から8月の期間で高い値が卓越している.特に,6月と7月の距離 5.5 km に高い値が見られ,この距離は前述の通り SVO のライダーから南岳火口への射距離である.5月か ら8月の期間は噴火回数が他の月よりも多く,火山灰降下量が大きい.また,鹿児島地方気象台における降 下火山密度が6月が特に高い.鹿児島地方気象台における1時間毎に卓越する水平風向の月毎の頻度分布か らは,夏季において SVO が南岳に対して風下に対応する風向が卓越する¹³⁾.したがって,2018 年の夏季に おいて,火口上に噴出によるエアロゾルが多くあり,それが SVO のライダー方向に流れてきていることが 示唆された.





Fig. 8 Monthly average of extinction coefficients at a wavelength of 532 nm obtained with the SVO lidar instrument in 2018 (top). Monthly numbers of eruptions and explosions at the Sakurajima volcano (bottom). Monthly amount of ash fall density at Kagoshima weather observatory, the monthly number of confirmed ash fall days, and the estimated total amount of ash fall around Sakurajima (bottom). Eruptions and explosions are not associated and associated with strong infrasound caused by eruptions, respectively. Ash fall density and the number of ash fall days are rescaled by a factor of 0.2 and 5, respectively. This figure was taken from the publication of Shimizu et al. (2021)¹³⁾.

4.2 桜島の大規模噴火のライダーによるモニタリングの可能性

前述の通り桜島は噴火が頻発している火山である一方,将来的に大規模噴火の発生が懸念されている¹⁴⁾. なぜならば,1914年1月に桜島において大正噴火と呼ばれる大規模噴火が発生した¹⁵⁾ことと,その後にお いて桜島のある姶良カルデラの直下にてマグマの蓄積が示唆されているからである¹⁶⁾.1914年の桜島大正 噴火では,火山灰が偏西風にて運ばれて,日本列島の広範囲にて降灰が確認された.Fig.9のハッチで描か れた範囲は降灰が確認された領域を示しており,領域は九州地方,中国地方,四国地方,関西地方,中部地 方,関東地方,福島県,宮城県といった広範囲に及んだ¹⁵⁾.桜島において大規模噴火が発生すれば,噴煙 は成層圏まで到達し,偏西風にのって東向きに流されるため日本列島の各所へ火山灰が運ばれる可能性が高 い.また,日本周辺における主要航空路の一つが桜島上空周辺を通り関東へ向かうルートで,アジア各国か ら北米へ向かうトラフィックが非常に多い航空路でもある¹⁴⁾.したがって,桜島が大規模噴火するとこの 主要航空路に影響があることは確実である.幸い,Fig.9に示す AD-Net のライダーが日本各地に設置され ているため,アイスランドのエイヤフィヤトラヨークトル火山の2010年噴火と同様に,桜島の大規模噴火 についても火山灰濃度測定が迅速に行われることが期待されるとともに,現在の桜島の噴火の頻発を利用し て,AD-Net のライダーの火山灰検知能力の検証を行うなどの研究を進めることが期待される.





Fig. 9 Map showing the area of fallen volcanic ash of the 1914 Sakurajima Taisho eruption, as reported by Omori (1916)¹⁵⁾, and the lidar distribution of AD-Net.

謝 辞

桜島では文部科学省 2014 年度施設整備補助金によって 2 台のライダーが整備された.そして,2016 年度 以降は文部科学省の次世代火山研究・人材育成プロジェクトの次世代火山研究推進事業による委託研究にて 運用されている. 桜島ライダーのデータは次世代火山研究推進事業にて整備された Japan Volcanological Data Network (JVDN) にて提供されている¹⁷⁾とともに,京都大学防災研究所の共同利用にてデータを提供して いる¹⁸⁾. 桜島ライダーからのデータ伝送および自動解析と表示は国立環境研究所の清水厚氏の貢献であり, また同氏から本稿について貴重なコメントを頂いた. 桜島ライダーの維持管理には桜島火山観測所の所員, 清水厚氏および株式会社 mss の松井一郎氏が貢献してきている. 関係各位に感謝するとともに,多くの研 究者によるデータの利用を期待したい. 本解説の執筆の機会を与えて下さった京都大学生存圏研究所の矢吹 正教氏と匿名の査読者に感謝します.

引用文献

- A. J. Durant, C. Bonadonna, and C. J. Horwell, "Atmospheric and environmental impacts of volcanic particulates," Elements, 6, 235–240 (2010).
- 2) 嶋野岳人, "火山噴出物の特徴と試料採取," エアロゾル研究, 30 (3), 183-189 (2015).
- T. Kozono, M. Iguchi, T. Miwa, M. Maki, T. Maesaka, and D. Miki, "Characteristics of tephra fall from eruptions at Sakurajima volcano, revealed by optical disdrometer measurements," Bulletin of Volcanology, 81, 41 (2019).
- 4) C. Bonadonna, C. B. Connor, B. F. Houghton, L. Connor, M. Byrne, A. Laing, and T. K. Hincks, "Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand," Journal of Geophysical Research Solid Earth, 110, B03203 (2005).
- 5) 澤田可洋, "火山灰と航行の安全に関する第一回国際シンポジウム,"火山, 36(4), 457-459(1991).



- 6) 気象庁, "東京航空路火山灰情報センター," https://www.data.jma.go.jp/vaac/data/indexj.html (Accessed 2022.11.10)
- 7) A. Ansmann, M. Tesche, S. Grob, V. Freudenthaler, P. Seifert, A. Hiebsch, J. Schmidt, U. Wandinger, I. Mattis, D. Muller, and M. Wiegner, "The 16 April 2010 major volcanic ash plume over central Europe: EARLINET lidar and AERONET photometer observations at Leipzig and Munich, Germany," Geophysical Research Letters, 37 (13), L13810 (2010).
- 8) A. Shimizu, T. Nishizawa, Y. Jin, S.-W. Kim, Z. Wang, D. Batdorj, and N. Sugimoto, "Evolution of a lidar network for tropospheric aerosol detection in East Asia," Optical Engineering, **56** (3), 031219 (2017).
- 9) 杉本伸夫, "エアロゾル計測用ライダーシステム," レーザーセンシング学会誌, 1(1), 14-28 (2020).
- 10) 国立環境研究所, "桜島ライダーの自動処理結果表示", https://www-lidar.nies.go.jp/Sakurajima/fig (Accessed 2022.11.13)
- 11) 鹿児島地方気象台, "2022 年桜島火山噴火観測表," https://www.jma-net.go.jp/kagoshima/vol/data/skr_exp_2022. html (Accessed 2022.11.9)
- 12) M. Iguchi, T. Yamada, and T. Tameguri, "Sequence of volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan, as revealed by non-eruptive deflation," Frontiers in Earth Science, **10**, 727909 (2022).
- A. Shimizu, M. Iguchi, and H. Nakamichi, "Seasonal variations of volcanic ash and aerosol emissions around Sakurajima detected by two lidars," Atmosphere, 12, 326 (2021).
- 14) 井口正人, 中道治久, "桜島の大規模噴火を考える,"自然災害科学, 38 (3), 279-345 (2019).
- 15) F. Omori, "The Sakura-jima eruptions and earthquakes II," Bulletin of the Imperial Earthquake Investigation Committee, 8 (2), 35–179 (1916).
- 16) J. Hickey, J. Gottsmann, H. Nakamichi, and M. Iguchi, "Thermomechanical controls on magma supply and volcanic deformation: application to Aira caldera, Japan," Scientific Reports, 6, 32691 (2016).
- 17) 防災科学技術研究所, "Japan Volcanological Data Network," https://jvdn.bosai.go.jp/portal/ja (Accessed 2022.11.14).
- 18) 京都大学防災研究所,"共同利用施設," https://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/shared (Accessed 2022.11.14).



中道治久

2001年東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士課程修了・博士(理学)取得.2001年東 京大学地震研究所研究員.2003年防災科学技術研究所日本学術振興会特別研究員.2005年名古 屋大学大学院環境学研究科助手.2013年から現在は京都大学防災研究所准教授.国内の複数の火 山およびインドネシアの火山について主として地震学的手法にて研究をしてきた.また,2014年 の桜島ライダーの導入および,2016年から現在までライダーの運用に関わってきているととも に,2017年に桜島を含めた南九州の火山においてXバンド偏波レーダーの導入と現在まで運用 に関わってきた.日本地球惑星科学連合,日本火山学会,米国地球物理学連合,国際火山学及び 地球内部化学協会会員.