

# 衛星レーダーによる溶岩流 3 次元動態観測と溶岩流量推定手法の開発

実施期間  
地理地殻活動研究センター  
地殻変動研究室

令和 3 年度～令和 6 年度  
姫松 裕志

## 1. はじめに

噴火に伴う溶岩の噴出率は火山活動の推移の推測や溶岩流シミュレーションの精度を向上させる上で重要なパラメータの一つである。通常はカメラなどによる遠望観測や現地観測、衛星光学画像を用いて噴出率を推定する(Harris et al., 2007)。一方、遠隔地の離島においては観測網が十分ではなく、生活圏から離れている場合には溶岩の噴出率の推定精度は低下する。衛星光学画像を用いる場合でも天候や噴煙によって観測の可否が制約される。衛星 SAR では強度画像や干渉性の変化範囲を追跡することにより溶岩流の流下範囲を見積もることができるが、溶岩の体積や噴出率を見積もる手法は確立されていないのが現状である。

小笠原諸島に位置する西之島では 2013 年に元の島の南東の沖合で噴火が発生し、2020 年にかけて断続的に噴火が続いた(Maeno et al., 2021)。元の島の南東の沖合に出現した新島は拡大を続け、2013 年 12 月に元の島と接続し、更なる噴火活動によって島の面積が拡大した。西之島における火山活動の監視には主に衛星画像を用いられるが、航空機による目視観測も実施されている。国土地理院では写真測量の結果を基に Digital Surface Model (DSM) を作成し、技術資料として公開している。2 時期に取得された DSM の差分を取ることで主に溶岩流の層厚や堆積量を求めることができる。こうした写真測量は噴火が収まった時期に実施されており、噴火発生時に精度良くデータを取得することは困難である。噴火発生時においても即時的に溶岩流の流量を見積もることが噴火の推移を推定する上で重要であり、従来手法とは異なる溶岩流の流量推定手法を提案することが求められている。

## 2. 研究内容

### 2.1 研究開発の概要

本研究では衛星 SAR により得られる地殻変動データを用いて溶岩流の流量の推定に寄与するパラメータを抽出する手法の提案をすることを目指す。溶岩流に関するパラメータを抽出するために①噴火時における溶岩流の定置に伴う荷重変形と②噴火後の溶岩原における熱弾性収縮に焦点を当てる。本研究では西之島を解析対象とし、溶岩流を伴った 2013–2020 年における一連の噴火を対象とした。

荷重変形は SAR データを用いて媒質上面に溶岩流が定置した際に生じる変形を検出し、解析解を用いて観測された地殻変動を最もよく再現する荷重領域と荷重量を推定する。DSM 差分の増加分が溶岩流の体積を反映していると仮定し、荷重変形量から推定される体積と比較をする。物体の体積  $V$  [m<sup>3</sup>] は、式(1)の圧力  $P$  [Pa] の定義に従って換算する。

$$P = \frac{\rho V g}{S} \quad (1)$$

ここで  $\rho$  は物体の密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $g$  は重力加速度 (9.8 [m/s<sup>2</sup>])、 $S$  は荷重をかける面積 [m<sup>2</sup>] とする。噴火後の熱弾性収縮は溶岩の熱拡散に伴う経時的な体積収縮を指し、噴火が収束していた期間に撮像され

た SAR データに SAR 時系列解析を適用することにより，溶岩原における経時的な変形を追跡した．荷重変形と熱弾性収縮を再現する解析解のパラメータは Particle Swarm Optimization で推定した (Kennedy and Eberhart, 1995)．

## 2.2 使用データ (衛星 SAR)・解析手法

本研究では西之島を撮像範囲に含む ALOS-2/PALSAR-2 のデータを使用した (表-1)．SAR データの解析は GAMMA ソフトウェア (GAMMA 社製) を使用した．地形依存の位相変化を補正するために，撮像日の直近で更新された標高データ (国土地理院技術資料) を使用した．SAR 干渉解析では非干渉ノイズのにじみ出しの影響を最小限にするために，multi-look の処理は適用していない．噴火後の地殻変動観測のための SAR 時系列解析では，時間基線長のしきい値を 6 か月程度と設定した複数の異なる撮像間隔の干渉ペアを作成して，最小二乗的に各撮像間隔における衛星視線距離変化速度を推定した．

表-1 本研究で使用した ALOS-2/PALSAR-2 データの詳細

|          | Path 14         | Path 125       |
|----------|-----------------|----------------|
| 衛星進行方向   | 南行軌道            | 北行軌道           |
| レーダー照射方向 | 右               | 右              |
| 観測モード    | Spotlight (SPT) | Stripmap (SM1) |

## 3. 解析結果・解釈

### 3.1 噴火時の溶岩流定置に伴う荷重変形

噴火時における SAR 干渉解析の結果は，溶岩流の定置に伴う後方散乱特性の変化に伴う干渉性劣化領域が認められた (図-1)．山腹における干渉性劣化領域の縁部において視線距離伸長が認められる．2017 年と 2018 年のいずれの事例においても視線距離変化量は最大で 10 cm 程度であり，溶岩の定置領域の広さと衛星視線距離変化量との相関は認められない．また中央火砕丘においても噴出物の堆積に伴う後方散乱特性の変化に伴う干渉性劣化が認められた．

半無限弾性体の荷重変形を求める解析解を用いて，噴火時に検出された溶岩流定置領域の周縁部における視線距離変化の空間的特徴を最もよく再現する荷重領域と荷重を推定した (Farrell, 1972; Becker and Bevis, 2004; Love, 1929)．ここでは DSM 差分から見積もられる溶岩の体積と比較するために，2017 年と 2018 年の噴火に伴う累積変化量に対して荷重量を見積もった．最適なパラメータは Particle Swarm Optimization によって探索した (Kennedy and Eberhart, 1995)．最適なパラメータの推定に当たって計算資源を節約するために，SAR 干渉解析の結果を四分木法に基づいて削減した．

2017 年噴火に伴う荷重変形の再現の例を図-2 に示す．データ欠損領域は位相アンラッピングの前処理としてマスクした領域であり，観測結果を再現するための荷重範囲は非干渉によりマスクされた領域とおおむね整合している．観測結果の再現に必要な荷重量はおよそ 0.5 MPa であった．再現に必要な荷重量から物体の体積を見積もると，およそ  $2.2 \times 10^6 \text{ m}^3$  と求めた．換算に当たって密度は安山岩の代表値である  $2,500 \text{ kg/m}^3$  (1 気圧)，重力加速度  $9.8 \text{ m/s}^2$  を使用した．同様の計算を 2018 年噴火に対しても適用すると再現に必要な荷重量は 6.9 MPa，荷重量から求められる物体の体積は  $5.0 \times 10^5 \text{ m}^3$  であった．DSM 差分から求められる体積は，2017 年と 2018 年の噴火でそれぞれ  $12.7 \times 10^6 \text{ m}^3$  と  $16.7 \times 10^5 \text{ m}^3$  と見積もられた．荷重から見積もられた体積は DSM 差分から見積もられた体積と比較し

て、おおむね 17–29%に相当する。

荷重から見積もられた体積が過小評価となった要因として以下の 3 点を挙げる。①媒質の弾性近似の限界、②矩形近似の限界、③温度の効果。差異を生じさせた大きな要因は媒質の弾性近似の限界であると考えられる。実際には降伏応力の弾塑性又は塑性の効果を検討する必要がある。特に地表面にかかる圧力によって生じる局所的な変形に注目しているため、弾塑性や塑性の影響は本来無視できないと考えられる。これが 2017 年と 2018 年の噴火に伴う溶岩流の幅に大きな差異があっても、同程度の衛星視線距離変化量が検出された要因の一つと考えられる。また弾性変形の媒質はこれまでの噴火で噴出した溶岩が固結したものと考えられるが、新たな溶岩との接触により塑性的な振る舞いを獲得することも考えられる。いずれにしても荷重変形を精緻に再現するために媒質を複雑に設定することができる有限要素法といった数値計算による手法を用いた検証が必要である。一方で、両者から見積もった体積はオーダーでは整合しており、即時的な溶岩流の体積の推定手法としては一定の有用性が認められる。今後は更なる観測事実や適用事例の蓄積を進める必要がある。

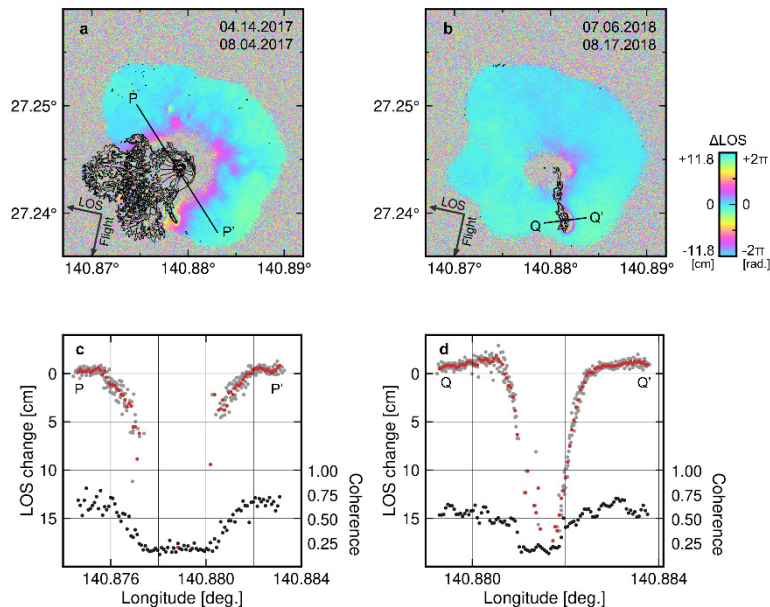


図-1 噴火時における衛星視線距離変化と断面。(a, b)SAR 干渉解析の結果。DSM 差分による標高差のコンターを 5m 間隔で示す。(c, d)衛星視線距離変化とコヒーレンスの断面。左列は 2017 年噴火、右列は 2018 年噴火の事例を示す。

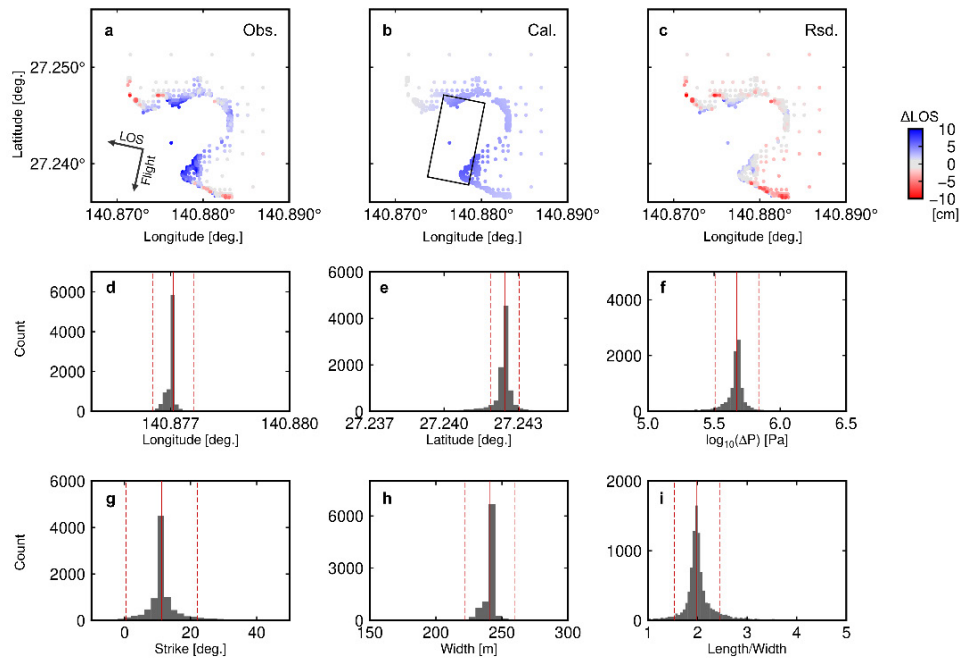


図-2 2017年噴火に伴う荷重変形モデル。(a-c)最適パラメータを用いた計算値と観測結果との比較。(d-i)荷重変形モデルのパラメータの事後確率密度分布。赤実線は中央値、赤点線は標準偏差を示す。

### 3.2 噴火後の溶岩原における熱弾性収縮

噴火後における SAR 時系列解析の結果は溶岩流が定置した領域において、視線距離変化速度が指数関数的に減少する経時的な変動が認められた(図-3)。いずれも視線距離伸長は溶岩の経時的な収縮を示唆している。いずれの事例においてもおよそ1年で視線距離伸長量は15 cmに達した。

噴火後の溶岩原における経時的な収縮を再現するために、半無限弾性体媒質中に熱源を定置した後の地表変位の時間推移を計算した。視線距離変化の時系列データを用いて観測結果を最もよく再現する熱源の大きさ(Magnitude of heat source [ $\text{m}^3\text{K}$ ]), 熱源の深さ[m], 熱拡散係数 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]を見積もった(Furuya, 2004, 2005)。最適なパラメータは Particle Swarm Optimization によって探索した(Kennedy and Eberhart, 1995)。ポアソン比は0.25, 線形熱膨張率 [ $1/\text{K}$ ]は  $4.0 \times 10^{-6}$  を先験的に与えた。線形熱膨張率の値は室内実験から見積もられた安山岩溶岩に対する値である(Griffiths et al., 2024)。

2017年と2018年の噴火後の視線距離変化の時系列データからは熱源の深さは18 mと32 mと見積もられた。これは DSM 差分から得られた溶岩の堆積層厚とおおむね整合している。最適な熱拡散係数はそれぞれの噴火の後に  $1.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  と  $2.2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  と見積もられた。室内実験では  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  のオーダーと推定されており、今回得られた最適な熱拡散係数とオーダーで差異が認められた(Vosteen and Schellschmidt, 2003)。熱拡散係数の差異は先行研究でも報告されており、天水との接触といった外部要因により効率的な熱放出が熱拡散係数の推定に影響を及ぼしたことが示唆されている(Wang and Aoki, 2021)。

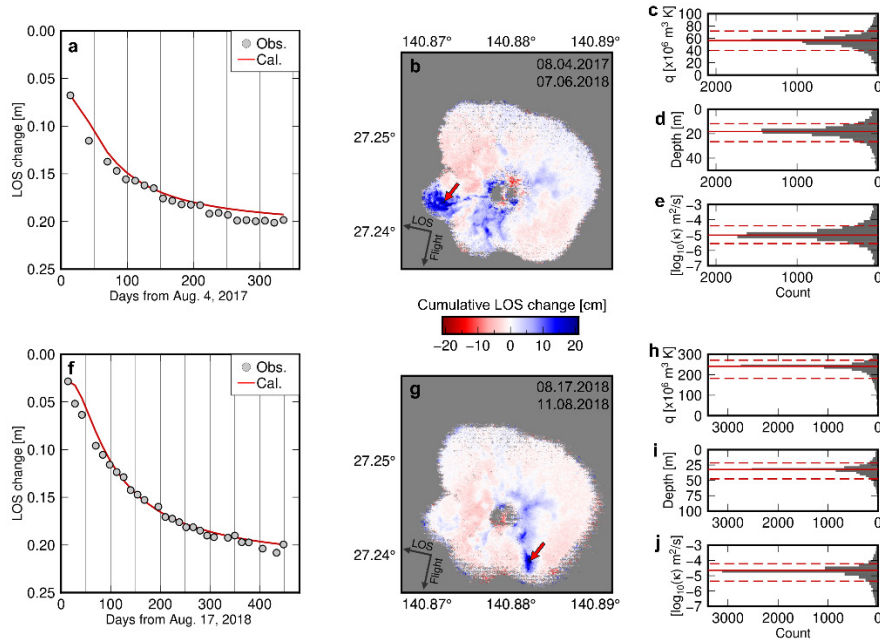


図-3 噴火後における溶岩原における変動を再現する熱弾性収縮モデル。左列は衛星視線距離変化の時系列。丸は観測値、赤線は最適モデルによる計算値。中央列は衛星視線距離の累積変化。赤矢印は時系列をとった点を示す。右列は熱弾性変形モデルの事後確率密度分布。赤実線は中央値、赤点線は標準偏差を示す。

#### 4. まとめ

本研究では西之島で 2013 年から 2020 年までに発生した一連の噴火を対象として、衛星 SAR による荷重変形と熱弾性収縮による解釈に基づいた溶岩流の流量推定手法について検討した。いずれも解析解を用いた簡便な計算手法で最適なパラメータを推定したが、おおむね溶岩流の質量や層厚に関する情報を即時的に見積もることができる手法として評価できる。溶岩流シミュレーションにおいても溶岩流の噴出率が重要なパラメータであり、オーダーでも見積もることができれば一定の精度を担保したシミュレーション結果を得ることにつながる。熱弾性変形モデルでは標高データを頻繁に更新できないような状況においても、定置した溶岩の層厚や熱拡散係数の見積りにつなげることが期待できる。将来的には有限要素法といった数値計算を用いて、地殻変動の計算をより厳密に行うことによって、地殻変動の駆動機構やパラメータの推定精度の向上を目指したい。

#### 謝辞

本研究で使用しただいち 2 号の原初データの所有権は、JAXA にある。これらのデータは、だいち 2 号に関する国土地理院と JAXA の間の協定に基づき提供された。本研究課題は科学研究費助成事業 (21K14000) の助成を受けて実施した。

#### 参考文献

- Becker, J. M. and Bevis, M. (2004): Love's problem. *Geophysical Journal International*, 156(2), 171–178. doi: 10.1111/j.1365-246x.2003.02150.x
- Farrell, W. E. (1972): Deformation of the Earth by surface loads. *Reviews of Geophysics*, 10(3), 761. doi: 10.1029/rg010i003p00761
- Furuya, M. (2004): Localized deformation at Miyakejima volcano based on JERS-1 radar interferometry: 1992-

1998. *Geophysical Research Letters*, 31(5), L05605. doi: 10.1029/2003gl019364
- Furuya, M. (2005): Quasi-static thermoelastic deformation in an elastic half-space: theory and application to InSAR observations at Izu-Oshima volcano, Japan. *Geophysical Journal International*, 161(1), 230–242. doi: 10.1111/j.1365-246x.2005.02610.x
- Griffiths, L., Heap, M. J., Lengliné, O., Baud, P., Schmittbuhl, J. and Gilg, H. A. (2024): Thermal Stressing of Volcanic Rock: Microcracking and Crack Closure Monitored Through Acoustic Emission, Ultrasonic Velocity, and Thermal Expansion. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 129(3). doi: 10.1029/2023jb027766
- Harris, A. J. L., Dehn, J. and Calvari, S. (2007): Lava effusion rate definition and measurement: a review. *Bulletin of Volcanology*, 70(1), 1–22. doi: 10.1007/s00445-007-0120-y
- Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995): Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, 4, 1942–1948. doi: 10.1109/icnn.1995.488968
- Love, A. E. H. (1929): The stress produced in a semi-infinite solid by pressure on part of the boundary. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 667, 377–420. doi: 10.1098/rsta.1929.0009
- Maeno, F., Yasuda, A., Hokanishi, N., Kaneko, T., Tamura, Y., Yoshimoto, M., Nakano, S., Takagi, A., Takeo, M. and Nakada, S. (2021): Intermittent Growth of a Newly-Born Volcanic Island and Its Feeding System Revealed by Geological and Geochemical Monitoring 2013–2020, Nishinoshima, Ogasawara, Japan. *Frontiers in Earth Science*, 9. doi: 10.3389/feart.2021.773819
- Vosteen, H.-D. and Schellschmidt, R. (2003): Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(9-11), 499–509. doi: 10.1016/s1474-7065(03)00069-x
- Wang, X. and Aoki, Y. (2019): Post-eruptive Thermoelastic Deflation of Intruded Magma in Usu Volcano, Japan, 1992–2017. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(1), 335–357. doi: 10.1029/2018jb016729