

(25) 衛星 SAR データを用いたキラウエア火山噴火における被害情報の抽出

園部 雅史¹・羽柴 秀樹²

¹正会員 日本大学助手 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14)
E-mail:sonobe.masashi@nihon-u.ac.jp

²正会員 日本大学教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14)
E-mail:hashiba.hideki@nihon-u.ac.jp

2015年5月3日からハワイ島キラウエア火山の火山活動が活性化し、大規模な噴火が継続して発生している。これらの噴火によって溶岩の流出、噴石の噴き上げ、火山灰や火山ガスを含む噴煙が発生し、建物や道路、周辺環境に多くの損害を与えている。本研究では、今回の噴火前後に観測されたCバンドSARのSentinel-1衛星による衛星観測情報を利用し、噴火による溶岩流の広がり火口の形状の変化状況および地震による地殻変動の状況を調査した。これらの調査結果から観測後に準リアルタイムに入手可能な全天候性の特徴を有するSentinel-1衛星画像を用いた調査結果から災害対応における概要調査や継続的なモニタリングに対する適用性を考察した。これらの結果から、火山活動と被害の概略的かつ継続的な調査に対して、Sentinel-1衛星の有用性が確認された。

Key Words: Sentinel-1, disaster, eruption, lava flow, Remote Sensing

1. はじめに

近年、比較的大規模な地震が発生し、多くの火山が活動が活性化している¹⁾。2014年の御嶽山の大規模な噴火により多くの人命の損失や住民の長期間にわたる避難は記憶に新しい。国外においては、古くから火山活動が続いていたが、2018年5月からキラウエア火山で大規模な噴火が発生している²⁾。2018年5月3日に噴火が確認され、翌日の5月4日に発生したマグニチュード6.9の地震が発生した。その後、火山活動がさらに活性化し、5月17日に爆発的噴火により溶岩の流出、噴石の噴き上げ、火山灰や火山ガスを含む噴煙が発生し、建物や道路、周辺環境に多くの損害を与えている。このような大規模な噴火現象に伴う対応としてヘリやUAVなどによる緊急撮影が行われるが、悪天候で飛行不可の場合や噴煙等により近づけず調査が困難な場合がある。このような背景から、これまでに衛星リモートセンシングによる火山活動の監視や噴火による被害状況の調査が実施されてきている^{3)~6)}。被災状況の調査と周辺土地被覆の継続的な環境モニタリングに対して、周期的な観測特性を有する衛星リモートセンシングは有効な観測評価手段の一つである。火山周辺の土地被覆や森林環境への影響などを詳細に把握するためには、光学式センサでのマルチスペクトル画

像情報の特性が大きく貢献すると考えられる³⁾⁴⁾が、悪天候の場合や噴煙や溶岩流による周辺地物の火煙により地表面の情報を取得できない可能性がある。このような理由により、天候や噴煙の影響が少ない合成開口レーダ(SAR)衛星による観測が数多く実施されてきている⁵⁾⁶⁾。また、近年では中分解能クラスのSAR衛星による観測情報は、観測後に準リアルタイムでの入手が容易となり、被災状況の迅速な把握と評価が可能と考えられる。本研究では観測後、準リアルタイムに観測データを入手可能なSentinel-1衛星画像を用いた。本衛星は現在2機体制でそれぞれ12日周期で同一範囲を観測するため、即応フェーズでの被害の概要調査や復旧・復興フェーズでの定期的且つ時系列な調査が可能であり、防災分野の利用に期待できる。そこで、キラウエア火山の大規模噴火および地震前後に観測されたSentinel-1衛星により観測されたSAR画像とALOS全球数値地表モデル情報を利用し、噴火による溶岩流の広がり火口の形状の変化状況および地震による地殻変動の状況を調査した。これらから観測後に準リアルタイムに入手可能な災害前後のSentinel-1衛星画像を用いた被害域のモニタリング結果から災害対応における概要調査および継続的な調査に対する有用性を考察した。

2. 調査対象地域と使用データ

(1) 調査対象地域

本研究の調査対象地域はハワイ島東部に位置するキラウエア火山周辺とした(図-1)。キラウエア火山は楕状火山に分類され、流出する溶岩の粘性が比較的小さいため、溶岩の流出範囲は広がりやすく、火口周辺は緩やかな傾斜が形成される。加えて、火山山腹に割れ目が形成されるため、この地帯に沿って噴火が起きることが知られている。本噴火において、溶岩を流出した噴火口も火山山腹で発生しており、周辺の建物や道路などで被害が発生している地域である。現在も火山活動は継続している。

(2) 使用した衛星観測データ

本研究で用いたSentinel-1衛星データの諸元を表-1に示す。観測モードはInterferometric Wide Swath (IWS)モードであり、分解能は衛星進行方向に5m、電波照射方向に20m、観測幅は250kmである。使用した観測データはVH、VV偏波の情報を有しており、本研究では溶岩流による地表面の平坦化が推察されるため、裸地に卓越なVV偏波を用いた。これらの観測データは準リアルタイム衛星データベースのCopernicus Open Access Hubから入手した。また標高データは分解能30mのALOS全球数値地表モデル情報を使用した。また、2017年5月に観測されたLandsat-8/OLIセンサによる観測画像を参照用として使用した。

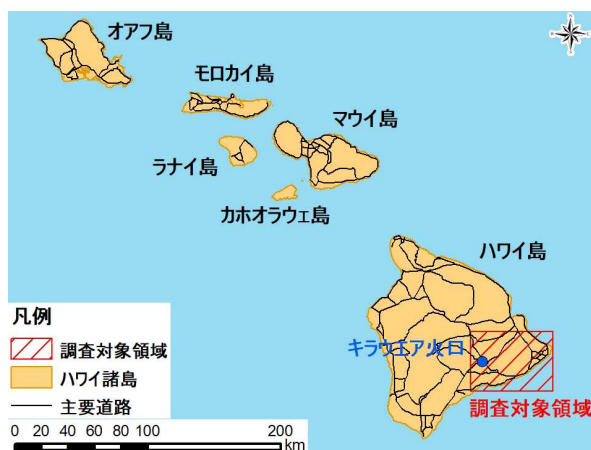


図-1 調査対象地域

表-1 使用データ

衛星	パス No.	軌道方向	照射方向	観測日
Sentinel-1B	124	北行	右 (西→東)	2018/05/02
Sentinel-1A	87	南行	右 (東→西)	2018/05/05
Sentinel-1B	124	北行	右 (西→東)	2018/05/14
Sentinel-1A	87	南行	右 (東→西)	2018/05/17
Sentinel-1B	124	北行	右 (西→東)	2018/05/26
Sentinel-1A	87	南行	右 (東→西)	2018/05/29
Sentinel-1B	124	北行	右 (西→東)	2018/06/07
Sentinel-1A	87	南行	右 (東→西)	2018/06/10

3. 調査手法

(1) 後方散乱係数への変換

Sentinel-1衛星画像の振幅情報を用いて局所入射角を考慮した後方散乱特性の基本物理量である後方散乱係数(σ_0)に変換した。後方散乱係数は衛星から照射されたマイクロ波が地表面で散乱し、衛星に戻ってきた強度を示す。後方散乱係数の変換式を下記に示す。

$$\beta_0 \text{ dB} = 10 * \log_{10}(\text{DN}^2) \quad (1)$$

$$\sigma_0 \text{ dB} = \beta_0 \text{ dB} + 10 * \log_{10}(\sin \theta_{\text{loc}}) \quad (2)$$

DN : 画素値

β_0 : Radar Brightness (明度)

σ_0 : Radar Backscatter Coefficient (後方散乱係数)

θ_{loc} : local incidence angle (局所入射角)

(2) MTC画像の作成

溶岩流を主とした地表面の変化を把握するために、ここでは2時期の強度画像と2時期間の干渉度を表すコヒーレンス画像を用いて時点が古い観測画像を赤、新しい観測画像を緑、コヒーレンス画像を青に割り当てて合成し、MTC (Multi Temporal Coherence) 画像⁷⁾を作成した。

(3) 差分干渉解析による変位

2018年5月5日に発生したマグニチュード6.9の地震前後に観測されたSentinel-1衛星画像を用いて地殻変動の把握を試みた。衛星観測日は5月2日と5月14日の日間隔が12日のデータである。一般的にSentinel-1衛星のCバンドSARは波長が短いため、干渉性が低く、山体に植生が繁茂している場合、差分干渉による把握は困難な場合が多い。そのため、ここでは溶岩流の流出範囲の概略的な調査を目的とし、国土地理院が公表するLバンドSARのALOS-2衛星による差分干渉解析結果⁸⁾と比較した。

(4) 溶岩流の流出範囲の作成

MTC画像による溶岩流の抽出可能性を検討するため、USGS (米国地質調査所) が公表する6月1日と6月8日、6月11日時点の溶岩流の流出範囲情報⁹⁾から衛星画像との位置合わせを行い、重畳可能なGISデータを作成した。

(5) 光学画像のパンシャープン化

噴火前の調査対象地域の地表面被覆を確認するため、USGSで整備されている噴火1年前のLandsat-8/OLI観測画像を観測後、準リアルタイムで入手可能なEarthexplorerから入手した。これらをパンシャープン処理を行い、Sentinel-1画像データと位置合わせを行った。

4. 調査結果

(1) 後方散乱係数画像による火口形状の評価

噴火前を含む8時期の後方散乱係数画像を用いて火口の変化状況を調査した。キラウエア火山の火口付近の後方散乱係数画像を図-2に示す。白く表示される個所は後方散乱強度が高いことを示し、暗い個所は低いことを示す。パス87（南行軌道）と124（北行軌道）で照射方向の違いから火口縁の高反射位置が異なることがわかる。また、画像から噴火活動の進行に伴い火口が拡大する様子や火口内の溶岩湖の変化が視認できる。このように時系列に観測されたSAR画像の強度情報を利用することにより、今回の事例で火口の形状の変化が確認でき、火山活動の状況を把握可能であることがわかった。

(2) MTC画像による溶岩流の流出範囲の評価

①5月26日と6月7日、②5月29日と6月10日のMTC画像を用いて溶岩流の流出範囲を調査した。USGSによる溶岩流の流出範囲を重畳したMTC画像と噴火1年前のLandsat-8/OLI画像のパンシャープン画像を図-3に示す。

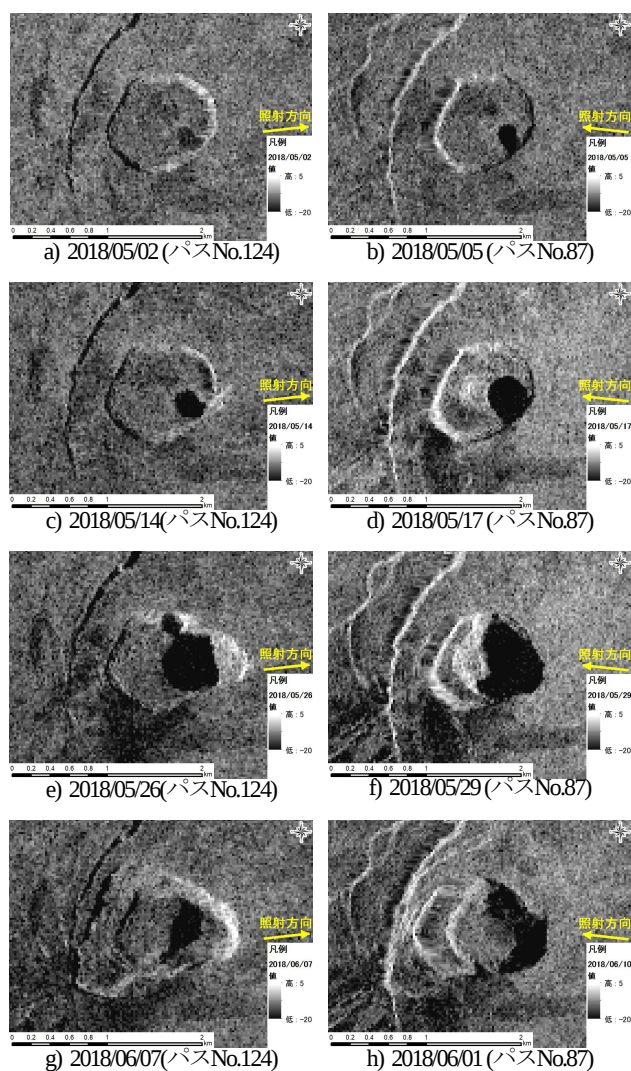


図-2 キラウエア火口の変化

図-3a), b) から後方散乱係数の低下が赤色、上昇が緑色で表示されている。Landsat-8/OLI画像（図-3c）と比較すると森林などが黄色、都市部や過去の溶岩原などが青色で表示されている。①のペアから後方散乱係数の低下で溶岩流の抽出範囲が赤みがかって表示されていることがわかる。また、火口から北東方向に線状に濃い赤色が見られることから、後方散乱係数の低下が確認できる。これらは衛星観測時に流出する溶岩流と推察される。海岸付近で緑色に表示されていることから海水への流入により溶岩流が固まり、後方散乱係数が上昇したことが推察される。この範囲はUSGSによる6月8日時点の流出範囲とほぼ一致していることがわかる。②のペアでも同様な特徴が見られ、6月8日からの6月10日にかけての溶岩流の面積の拡大範囲とほぼ一致していることがわかる。これらからMTC画像を画像判読に利用することで噴火後の溶岩流の特徴や流出範囲の把握することが可能となり、継続的な被害情報の収集において有効性が示された。

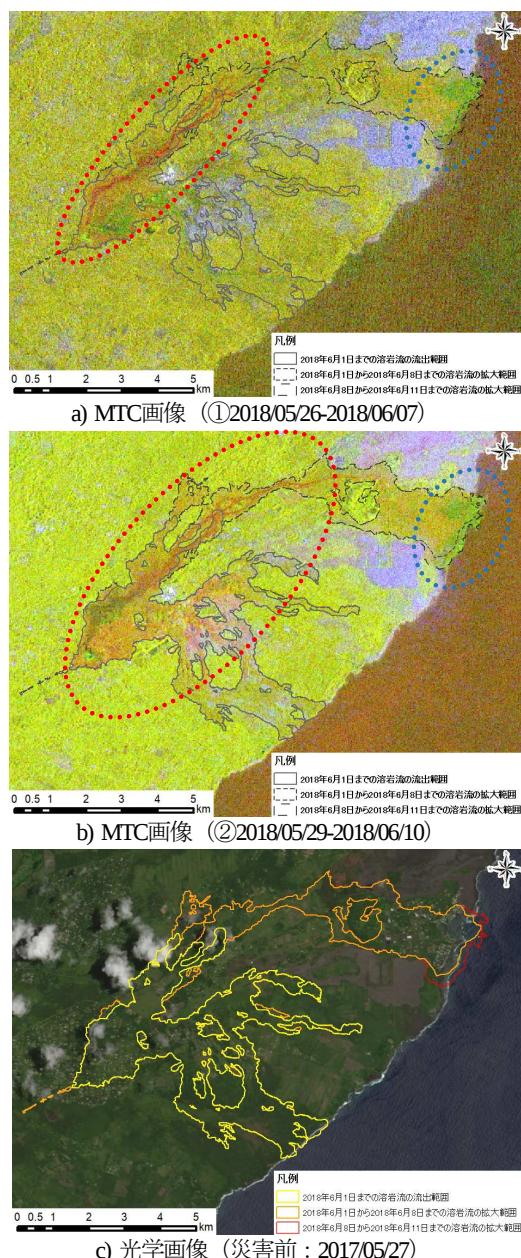


図-3 MTC画像による溶岩流の流出範囲

(3) 差分干渉解析による地盤変動の評価

2018年5月5日に発生したマグニチュード6.9の地震による地殻変動の概略的な把握のため、地震前後のSentinel-1衛星画像を用いて差分干渉解析を行った。得られた干渉解析画像を図-4に、変動量を図-5に示す。なお、変動方向は照射方向（衛星視線方向）である。図-4からイーストリフトゾーンに変動中心が存在し、北側は衛星から遠ざかる方向、南側では近づく方向に変位していることがわかる。従来、CバンドSAR衛星は植生域では干渉性が低いとされてきたが、Sentinel-1衛星は基線長や観測間隔が短いことから、干渉性が高いことがわかる。ただし、イーストリフトゾーンは変動が大きいことからピクセル間の連続性が確認できない。図-5の差分干渉解析により得られた変動量からイーストリフトゾーンの北側において衛星視線方向に最大0.6m程度の変位が確認できる。南側においては0.2m程度の変位が確認できる。この傾向は国土地理院が公表するLバンド波長帯のALOS-2衛星による差分干渉解析結果⁹⁾と観測間隔が異なるため詳細な比較は困難であるが、変位方向は同様である。これらから火山活動と関連性のある地震や山体膨張などによる変位が定常的に観測されるSentinel-1衛星画像を用いて差分干渉解析を適用することで継続的な地殻変動のモニタリングに有効性が示されたと考えられる。

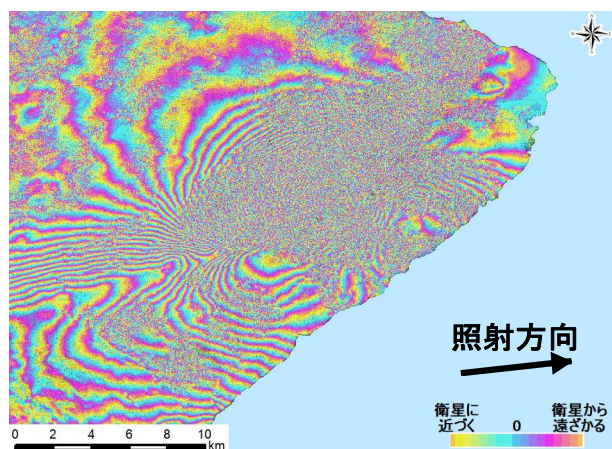


図-4 差分干渉解析画像 (2018/05/02-2018/05/14)

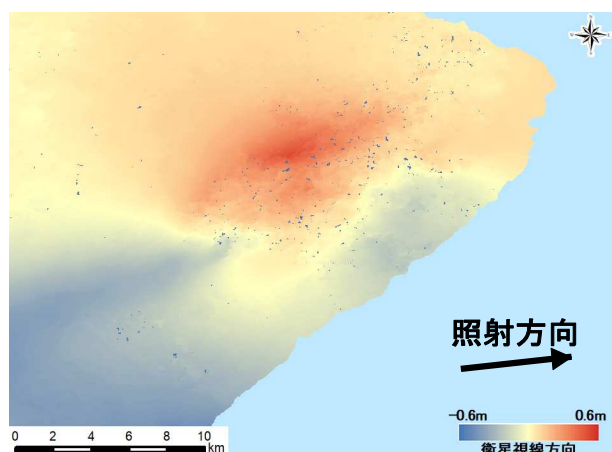


図-5 差分干渉解析による変動量 (2018/05/02-2018/05/14)

5. おわりに

ここでは観測後、準リアルタイムに観測データを入手可能なSentinel-1衛星によるSAR画像情報とALOS全球数値地表モデル情報から、ハワイ島キラウエア火山帯の噴火に伴う火口の形状や溶岩湖の変化が照射方向が異なる時系列なSAR衛星画像を用いることで効果的に把握できた。また、2時期の強度情報やコヒーレンス画像を合成したMTC画像を用いることで溶岩流の流出状況の判読が可能であった。加えて海岸に達した溶岩流による面積の広がりも判読可能であった。差分干渉解析により火山噴火と併発した地震による地殻変動の概要を把握できた。このことは、即応性が求められる災害対応での利用可能性も示されたと考えられる。また、Sentinel-1衛星は定常的に観測することから継続的な被害情報の収集の利用可能性が示されたと考えられる。2018年6月時点で火山活動は収束に至っていないため、今後は衛星観測の優位性である周期的な特性も生かしながら継続的モニタリングを実施し、解析結果の検証を実施する予定である。

謝辞：Sentinel-1画像データはCopernicusの提供による。

Landsat-8/OLI画像データおよび溶岩流の流出範囲は米国地質調査所の提供による。ALOS全球数値地表モデルは宇宙航空研究開発機構が公開するプロダクトである。

参考文献

- 1) 気象庁：火山活動解説資料、<http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/monthly_vact.php>（入手2018.6.12）。
- 2) 米国地質調査所：キラウエア火山噴火、<<https://www.usgs.gov/news/k-lauea-volcano-erupts>>（入手2018.5.25）。
- 3) Urai M. : Volcano monitoring with Landsat TM short-wave infrared bands: the 1990–1994 eruption of Unzen Volcano, Japan, International Journal of Remote Sensing, Vol. 21, No. 5, pp. 861-872, 2000.
- 4) 菅野正人，加藤正人：衛星データによる2000年有珠山噴火の降灰と森林被害の把握，日本リモートセンシング学会誌，Vol. 22, No. 1, pp. 89-95, 2002.
- 5) Marzano F.S., Lamantea M., Montopoli M., Herzog M., Graf H., and Cimini D. : Microwave remote sensing of the 2011 Plinian eruption of the Grímsvötn Icelandic volcano, Remote Sensing of Environment, Vol. 129, pp. 168-184, 2013.
- 6) Kubanek J., Westerhaus M., Schenk A., Aisyah N., Brotopuspito K.S., and Heck B. : Volumetric change quantification of the 2010 Merapi eruption using TanDEM-X. In SAR, Remote Sensing of Environment, Vol. 164, pp. 16-25, 2015.
- 7) Bocard et al. : Multitemporal SAR Coherence Analysis: Lava flow monitoring case study, 2015 IEEE Intl. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015.
- 8) 国土地理院：2018年5月ハワイ島キラウエア火山活動に関するSAR解析結果、<http://www.gsi.go.jp/cais/topic180301-index_00001.html>（入手2018.6.12）。