

2-2 Pi-SAR X3を用いた火山観測と2025年度観測結果

2-2 Volcanic Observations Using Pi-SAR X3 and FY2025 Results

牛腸 正則 上本 純平

GOCHO Masanori and UEMOTO Jyunpei

NICTでは、航空機搭載型合成開口レーダー (SAR) を用いて地表観測を行っている。SARはXバンド帯の電波を用いたアクティブセンサーであるため、夜間や雲がある場合でも地表の様子を調べることができる。本稿では、2025年度に実施した火山観測実験について八丈島および蔵王山の観測結果に焦点を当てて紹介するとともに、観測結果の画像から火口、溶岩ドーム、火口湖、山肌や植生などがSAR観測データにおいてどのように可視化されるかを示す。

NICT operates an airborne synthetic aperture radar (SAR) system called Pi-SAR X3. NICT has used this system to observe volcanic terrain and surface features. Since Pi-SAR X3 uses X-band radio waves, it can observe the ground even at night or under cloudy conditions. This paper presents the results of experiments conducted using the system to observe volcanoes in 2025. The results demonstrate that Pi-SAR X3 can visualize volcanic features, including craters, lava domes, crater lakes, mountain slopes, and vegetation.

1 まえがき

人工衛星や航空機に搭載したセンサーを用いて高高度から地表を観測する地表リモートセンシングは現代社会を様々な方向から支えている。人が直接現地に行き、測量せずとも上空から広範囲を網羅的に計測できるため、日常生活においては地図の作成や国土情報の取得などに、災害時などの非常時には被災状況の把握や災害の予兆の検出などに利用されている。最も身近な例は空中写真であり、日常生活の様々な場所で目にする機会があることだろう。

合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar: SAR) は電波を用いて地表を面的に可視化可能なセンサーである [1]。SARは図1に示すように、直線的に飛行するプラットフォーム (レーダーを搭載する飛翔体、人工衛星や航空機など) に搭載したレーダーを飛行しながら動作させ、その一連の観測データを信号処理的に合成することで地表面を二次元的に可視化する。この一連の処理により、飛行した経路長に相当する巨大なアンテナが仮想的に形成される。SARには以下のような利点が存在する。

- (1) 地表を航空写真のように面的に可視化可能である。
- (2) アクティブセンサーであり、かつ雲や噴煙を透過する周波数帯を用いているため昼夜・天候を問わずに観測が可能である。

- (3) 空間分解能がセンサーからターゲットまでの距離に非依存であるため、高高度からの広範囲観測と高分解能性の両立が可能である。
- (4) 電波の位相情報を利用した解析 (干渉解析や偏波解析など) が可能である。

NICTでは1990年代から航空機搭載SARを運用してきた。2026年現在においては第三世代型であるPi-SAR X3が運用されている。本稿では、Pi-SAR X3を用いて観測した火山観測結果を示すとともに、火口がどのように可視化されるのかを紹介する。

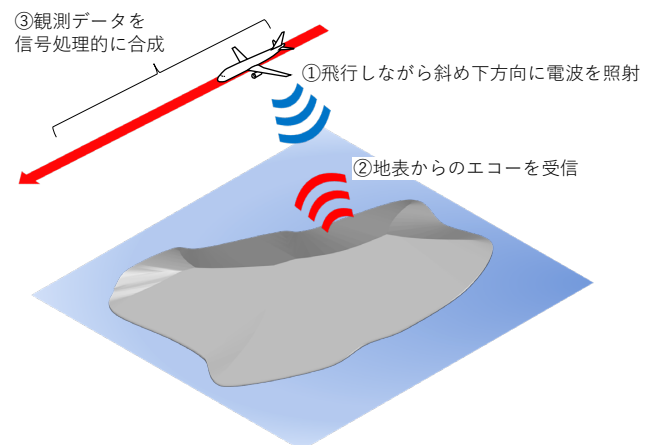


図1 航空機SARによる地表観測

2 合成開口レーダー (SAR) とPi-SAR X3

2.1 合成開口レーダー (SAR) の観測原理

図1に示すように、SARは航空機や人工衛星などに搭載されたレーダーと信号処理技術を組み合わせて地表観測を実現するアクティブセンサーである。レーダーは飛行方向に対して斜め下方へパルス波を照射し、地表や構造物、植生などで後方散乱したエコーを受信する。受信信号には、反射強度に対応する振幅情報と、電波の往復伝搬距離に対応する位相情報が含まれる。距離方向の位置はパルスを送信してからエコーを受信するまでの遅延時間から求められ、飛行方向の位置はプラットフォームの移動に伴って同一散乱点を複数回観測したときの位相変化を利用して推定される。

このようにして得られる生データは、送信パルスごとに距離方向のサンプルを並べ、さらに飛行方向に沿って時間順に蓄積した二次元データである。画像化処理では、まず送信波形に対応した整合フィルタを用いてレンジ圧縮を行い、距離方向の分解能を得る。次に、プラットフォームの移動によって生じるドップラー周波数や位相変化を用いてアジマス圧縮を行い、飛行方向の分解能を得る。この処理により、実アンテナの物理長よりもはるかに長い開口長を信号処理で形成することになり、高分解能な二次元レーダー画像を取得できる。これらの処理の詳細については文献[1]–[3]などを参照いただきたい。

2.2 Pi-SARシリーズ

NICTは1990年代から航空機搭載SARを運用し、現在は第三世代型のPi-SAR X3を運用している[4]。Pi-SAR X3は2026年時点で日本全国の多様な観測対象に

ついて100シーン以上の観測を実施してきた。表1に示すように、Pi-SAR X3は多様な観測モードと高い分解能を兼ね備えており、本稿で示す火山観測だけでなく、SAR観測技術高度化のための技術実証機としての活用が進められている。

3 Pi-SAR X3による火山観測

3.1 観測体制

NICTは地震火山観測研究計画部会の参画機関として活動しており、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第3次)[5]ではPi-SAR X3を用いた地震および火山による被害状況把握技術やモニタリング技術の高度化を目的として観測を実施している。これまでの観測で気象庁が定める常時観測火山(図2)を主な観測対象とし、航続距離の関係で観測困難な硫黄島を除く、主要な火山の観測を完了した[6]。

3.2 2025年度火山観測計画

2025年10月17日にPi-SAR X3を用いた火山観測を実施した。本実験では表2に示す4火山の観測を実施した。図3に八丈島と蔵王山の観測パスと観測領域を抜粋して示す。ここで図中の実線(黄色)が飛行パスを示し、矩形領域が観測領域(電波照射領域)を示している。また、各画像のキャプションには観測領域中心の地名を記載している。それぞれの観測領域は飛行パス方向に約20 km、電波照射方向に約8 kmである。

3.3 観測結果

本稿では、2025年度観測のうち八丈島および蔵王山の観測結果を抜粋して示す。観測結果を合成開口処理

表1 Pi-SAR X3の性能・無線局概要^{*1}

世代	Pi-SAR (X-band)	Pi-SAR 2	Pi-SAR X3
運用時期	1996 – 2007	2008 – 2017	2021 –
中心周波数	9.55 GHz	9.65 GHz	9.7 GHz
周波数帯域幅	100 MHz	500 MHz	1.0 GHz
空間分解能 (Range, Azimuth)	(1.5 m, 1.5 m)	(30 cm, 30 cm)	(15 cm, 15 cm)
アンテナ	導波管スロットアレー アンテナ	導波管スロットアレー アンテナ	マイクロストリップパッチ アレーアンテナ
ビーム幅 (Az, El)	(2.5°, 40°)	(3.0°, 35.0°)	(6.0°, 25.4°)
最大送信出力	6.3 kW	8 kW	9 kW
送信偏波	水平／垂直	水平／垂直	水平／垂直
受信偏波	水平／垂直	水平／垂直	水平／垂直
干渉観測	可	可	可

*1 通常観測モードの値を記載している。

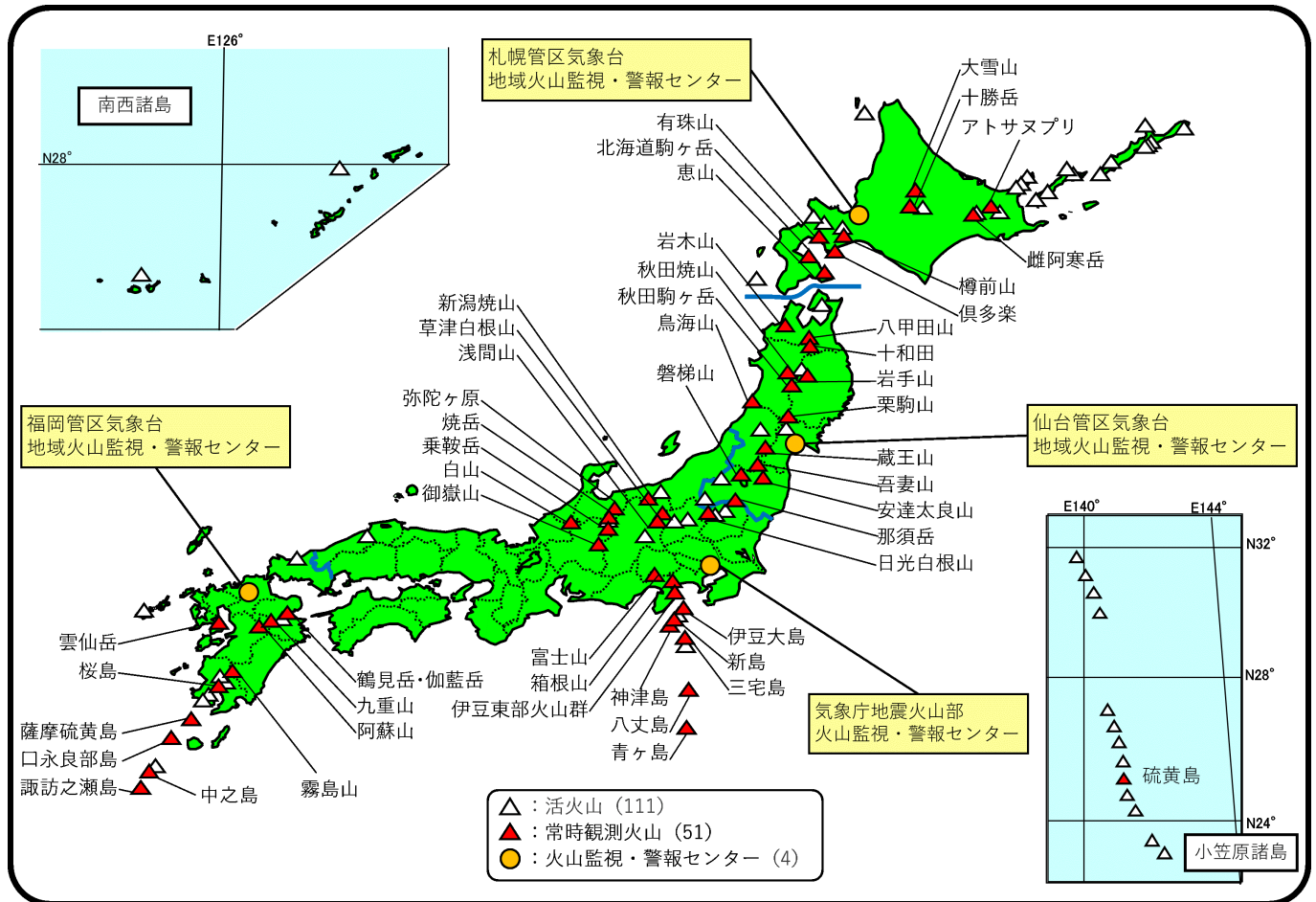
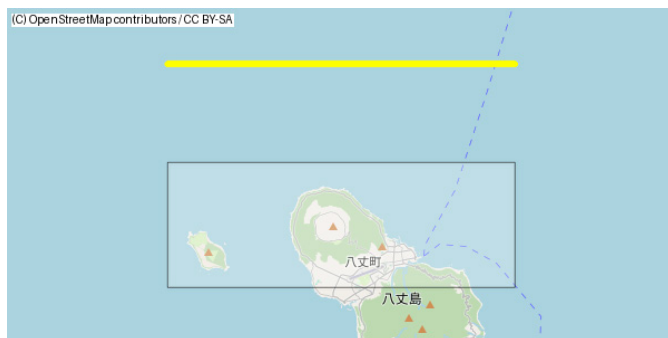


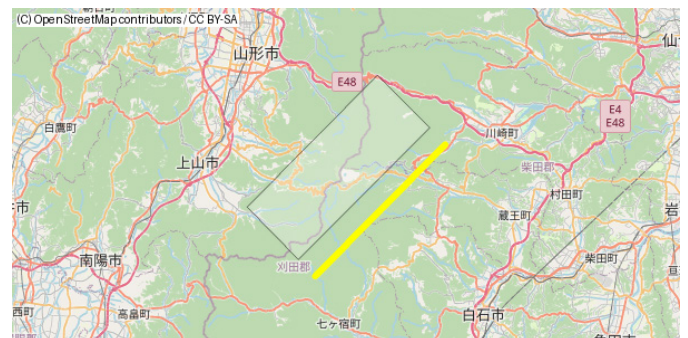
図2 気象庁常時観測火山 (気象庁ホームページ [8] より引用)

表2 2025年度の観測火山リスト

地方	火山名	中心緯度 (北緯)	中心経度 (東経)	飛行方向 (真方位)
東北	蔵王山	38.14°	140.44°	45°
東北	磐梯山	37.60°	140.07°	60°
関東・中部	伊豆東部火山群	34.90°	139.09°	300°
伊豆・小笠原諸島	八丈島	33.14°	139.77°	270°



(a) 八丈島



(b) 蔵王山

図3 2025年観測パス・観測領域 (抜粋)

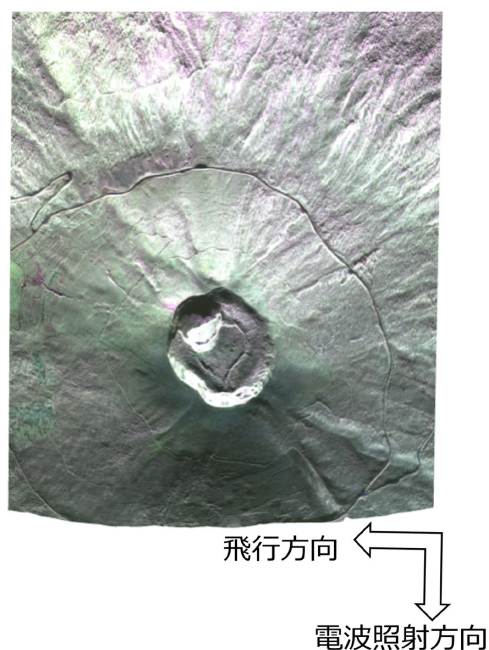
2 フェーズ1 自然災害に対する予測・検知

し、画像化したものを図4に示す。ここで、それぞれの画像は以下のような画像化処理を行ったものである。

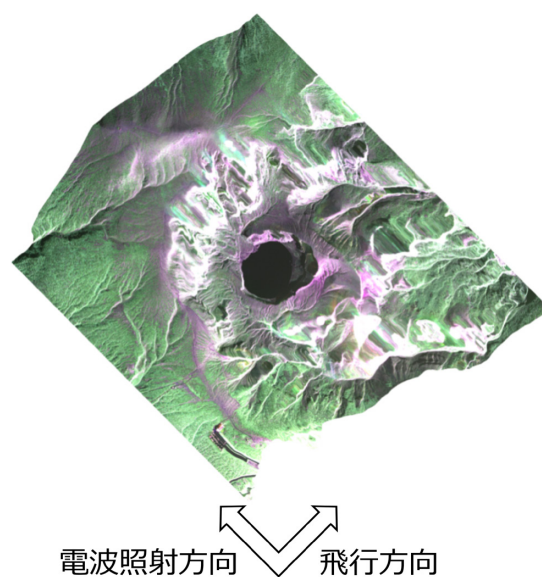
- 画像化範囲：火口部を中心として約2 km四方の画像化を行った。
- 画素値：画素の輝度(明るさ)はレーダーの受信電力に対応しており、画素の色は偏波チャンネルに以下のように対応させている。
 - ・赤色：HH偏波チャンネル
 - ・緑色：HV偏波チャンネル
 - ・青色：VV偏波チャンネル

-投影方法：紙面上方向が北側かつ水平方向空間解像度が一定となるようにオルソ処理を施してある。ここでオルソ処理には国土地理院基盤地図情報数値標高モデル(DEM10AおよびDEM10B) [7] を使用している。

図5に各SAR画像に対応する領域の空中写真を示す。ここで空中写真は国土地理院ウェブサイト(地理院地図 [2]) を使用している。なお、空中写真の取得日はSAR画像の観測日と異なることには注意が必要である。



(a) 八丈島 (西山)

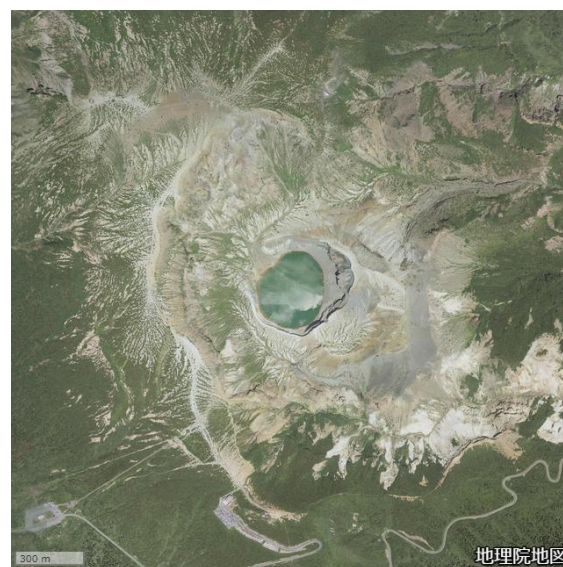


(b) 蔵王山 (御釜)

図4 2025年火山観測結果(抜粋)



(a) 八丈島 (西山)



(b) 蔵王山 (御釜)

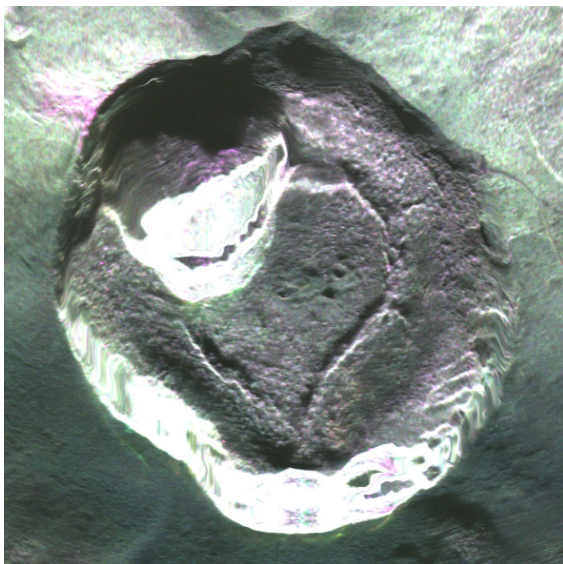
図5 対応する領域の空中写真(出典：地理院地図 [9])

SAR画像(図4)より観測対象である火山の山肌の様子が精細に取得できていることが確認できる。また、偏波チャンネルの強度をRGBに割り当てた疑似カラー表示から、山肌を被覆する岩や植物の識別が視覚的に可能である。これは主に露出した地表からの反射波が送受信の偏波方向が一致するHH偏波やVV偏波(それぞれ画像における赤色、青色に対応)が支配的となるのに対し、植物などからの反射波には送受信の偏波方向が交差するHV偏波(画像における緑色に対応)の割合が多くなるためである。

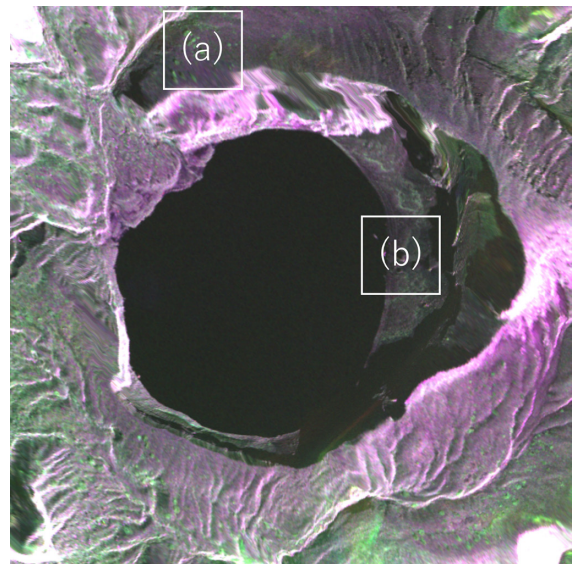
図6に観測された火口部の拡大図を示す。八丈島火口部について、火口(左上側の窪み)と溶岩ドーム(中央部)の様子が視覚的に確認できる。また、火口壁部の構造を確認することができる。一方で火口部と火口

壁部にレイオーバー現象が生じている領域(地形の傾斜等により明るい領域、オルソ化処理により大きく引き延ばされた領域)と、レーダーシャドウ領域(地形が電波を遮ったことで生じる暗い領域)が存在している。これは観測方向と地形の傾斜に起因するものであり、視認性を損なうものであるが単一のSAR観測で解消することは困難である。

蔵王山火口について、火口湖面(中央部)は低電力領域(暗い領域)となっていることが確認できる。これは照射された電波が湖面ではほぼ鏡面反射しレーダーへ返ってこないことが理由である。火口湖外縁部に着目すると、地表が露出している領域では主にHH偏波とVV偏波の散乱(それぞれ疑似カラーの赤色と青色に対応するため、疑似カラー合成では紫色に対応する)



(a) 八丈島 (SAR)



(b) 蔵王山 (SAR)

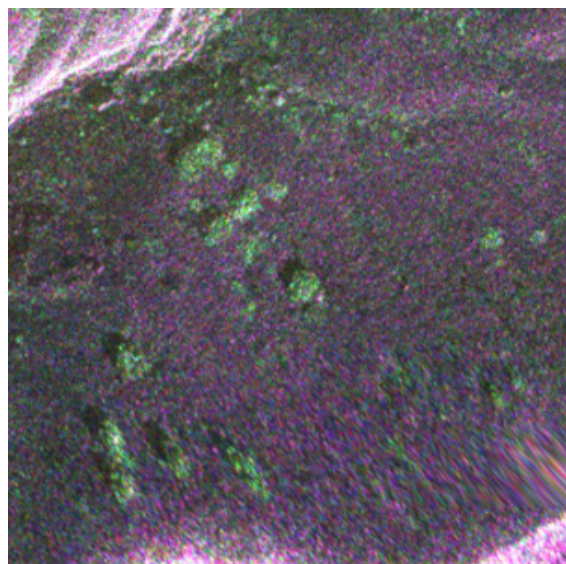


(c) 八丈島 (空中写真)

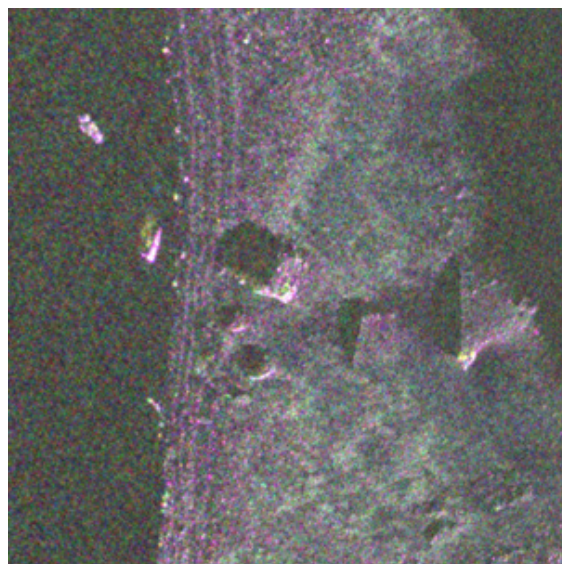


(d) 蔵王山 (空中写真)

図6 火口部の拡大図



(a)



(b)

図7 蔵王山火口湖外縁部(図6 (b) 矩形領域)の拡大図

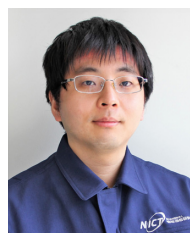
が支配的であることが確認できる。また、空中写真で低木が群生する領域(火口西側など)ではHV散乱(疑似カラーの緑色に対応する)が強いことが確認できる。実際にSAR画像の図7(a)に示す領域に着目すると、低木と推測される反応を確認することができる。同様に図7(b)に示す領域では火口内の岩石を確認することができる。これらの結果から、背景となる地表の散乱に対する信号強度差、あるいは偏波特性差が十分にあれば、これらの数メートル程度の大きさを持つ物体を識別できることが確認できる。一方で、これらのSAR画像のみでは対象物の具体的な種類を特定することは困難であり、データ利活用のためには光学写真などの他センサーと比較、またはAIに代表される分類技術を利用する必要がある。

4 むすび

本稿ではNICTが運用する航空機SAR(Pi-SAR X3)による火山観測について紹介し、観測結果の抜粋として八丈島と蔵王山の例を示した。今後の展望として、令和8年度も引き続きPi-SAR X3による観測実験を行いつつ、円軌道観測(Circular SAR)によるレイオーバー・シャドウの低減や、AIを利用した高度情報抽出など、SAR観測データの解析技術高度化に取り組む予定である。また、取得データの利活用についての検討を進める予定である。

【参考文献】

- 1 M. Soumekh, Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms, Wiley-Interscience, 1999.
- 2 大内和夫, リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎, 第2編, 東京電機大学出版局, 2009.
- 3 島田政信, 合成開口レーダによる高精度な地球観測の原理と実際, 東京電機大学出版局, 2023.
- 4 S. Kojima, J. Uemoto, A. Nadai, T. Kobayashi, T. Matsuoka, T. Umehara, and M. Tanaka, "Development Status of Nict's new X-Band Airborne SAR (Pi-SAR X3)," Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS), pp.4306-4309, 2023.
- 5 地震火山観測研究推進協議会, "災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画," 東京大学地震研究所, https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/_f/2025/10/R6-10pamphlet_all_update202510.pdf, April 30, 2025.
- 6 上本純平, 川村誠治, 牛腸正則, "先端リモートセンシングによる地震及び火山の被害状況把握技術の高度化," 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第3次) 令和6年度成果報告シンポジウム, 2025.
- 7 国土地理院, "基盤地図情報数値標高モデル," 国土地理院, <https://www.gsi.go.jp/kiban/>, 参照 July 14, 2026.
- 8 気象庁, "火山の監視," 気象庁, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/intro/gyomu/index92.html>, 参照 July 6, 2026.
- 9 国土地理院, "地理院地図(電子国土WEB)," 国土地理院, <https://maps.gsi.go.jp/>, 参照, July 1, 2026.



牛腸 正則 (ごちょう まさのり)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
主任研究員
博士(工学)
電波伝搬、アレー信号処理、合成開口レーダー、
リモートセンシング
【受賞歴】

- 2022年 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究
専門委員会 2021年度下半期若手奨励賞
2018年 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究
専門委員会 優秀論文賞
2017年 電子情報通信学会通信ソサイエティ
2017年度電子情報通信学会学術奨励賞



上本 純平（うえもと じゅんぺい）

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
主任研究員
博士（理学）
合成開口レーダー、リモートセンシング、
超高層大気物理学

【受賞歴】

2017年4月 前島密賞
2015年6月 日本リモートセンシング学会
優秀論文発表賞