火山-2505「合成開ロレーダーを用いた火山活動に伴う地殻変動の検出」

PI:防災科学技術研究所・地震・火山防災研究ユニット 小澤 拓 CI:防災科学技術研究所・地震・火山防災研究ユニット 宮城 洋介

1. はじめに

本課題の目的は、日本全国の火山を対象とし、SAR 解析による火山活動に伴う地表変動の検出を試 みることである.本研究期間においては、主に、2011 年新燃岳・霧島山噴火についての解析を行った. 2011 年新燃岳・霧島山噴火は、2011 年 1 月 19 日に発生した水蒸気爆発から開始し、1 月 26 日から 27 日にかけて、3 回の準プリニー式噴火が発生した.これは、1959 年噴火以来の 52 年振りの爆発 的噴火であった.1月 29 日から 31 日にかけては火口内に溶岩が流入し、その後、ブルカノ式噴火が 間欠的に発生する噴火様式に移行した.その後、爆発回数は時間とともに減少し、2011 年 9 月に発生 した爆発以降、現在まで爆発は発生していない.我々は、このような噴火活動を調査するために、衛 星搭載型合成開口レーダー(SAR)の解析を実施している.本報告においては、主に陸域観測技術衛 星「だいち」(ALOS)の SAR (センサ名: PALSAR)を用いて得られた解析結果(Kozono *et al.*, 2012; 宮城ほか、2013; Ozawa and Kozono、2013)について述べる.

2. 噴火前, 噴火時, 噴火後の地殻変動

2011 年新燃岳噴火前後の地殻変動を検出するために、SAR 干渉解析を実施した、本解析において は, 噴火前の 2007 年 12 月 28 日と 2010 年 2 月 17 日に取得された PALSAR データのペア (期間①), 同じく噴火前の 2010 年 2 月 17 日と 2010 年 11 月 20 日に取得された PALSAR データのペア(期 間②), 準プリニー式噴火発生時を挟む 2010 年 11 月 20 日と 2011 年 2 月 20 日に取得された PALSAR データのペア (期間③), そして噴火後の 2011 年 3 月 3 日と 2011 年 11 月 22 日に取得 された RADARSAT-2 データのペア(期間④)を使用した.得られた地殻変動を図 1 に示す.期間① においては、有意な地殻変動は検出されなかった. この期間においては、GEONET によっても顕著 な火山性の地殻変動は検出されておらず、それと調和的と言える。期間②においては、新燃岳火口か ら約 5km 西北西を中心として,周辺のノイズと比べて十分に大きな位相の変化が見られた.これは 衛星·地表間距離(スラントレンジ)が短縮したことを示しており,最大で約4cmの隆起を含む地殻 変動が起こったと解釈できる.同期間のGPS によって検出された地殻変動は,同じく火口から約5km 西北西に中心を持ち、放射状かつ隆起を示す地殻変動が検出されている。期間③においては、期間② で得られた地殻変動と同じ領域において,スラントレンジが伸長したことを示す位相変化が見られ, 最大で約 4.5 cm の沈降を含む地殻変動が起こったと解釈できる. 同期間の GPS によって検出され た地殻変動も同様に、期間②とおおむね反対方向の変動が検出されている。期間④においては、噴火 前,噴火中に地殻変動の中心があった領域と同じ位置を中心にスラントレンジが短縮したことを示す 位相変化が見られ、噴火前と同様に隆起を含む地殻変動が、同じ場所で起こったと解釈できる.ただ し、地殻変動量はやや小さく、最大で衛星視線方向に約 2.5 cm であった. 同期間の GPS によって 検出された地殻変動は, 噴火前と概ね同じ方向に変位する地殻変動が検出されている. このように, それぞれの期間における SAR 干渉解析結果は, GPS の結果は良い一致を示しており, どちらも同じ 変動源による地殻変動を検出したものだと考えられる.そして,噴火前の膨張,噴火に伴った収縮, そして噴火後の膨張の中心は, すべて新燃岳から約 5km 西北西付近にあるように見える.

45



図 1. 霧島山周辺の地殻変動. (a)-(d)はそれぞれ期間①-④の干渉ペアから求められた SAR 干渉画像を示す.

本研究では、Mogi (1958) による球状圧力源モデルを用いて、各期間に検出された地殻変動の説明 を試みた.この解析においては、地殻変動源のパラメータ(緯度,経度,深さ、体積変化量)は、観 測値と計算値から得られる χ^2 を最小にするものを最適パラメータとし、グリッドサーチにより推定 した.それぞれの期間の地殻変動から求めた地殻変動力源の位置は、有意な差は無いことから、地殻 変動力源はその位置を変えずに体積変化が生じたと考えられる.そこで、地殻変動源の位置は不変と して地殻変動源のパラメータを求めたところ、2011 年噴火に関与した主マグマ溜りの位置は新燃岳火 口から約 5km 西北西の地下 7.5 km であると推定された.推定されたマグマ溜りにおける体積変化 量は、期間②では $1.2 \times 10^7 \text{m}^3$ の増加、期間③では $1.2 \times 10^7 \text{m}^3$ の減少、期間④では $7.0 \times 10^6 \text{m}^3$ の増 加と見積もられた.期間②および④において、膨張レートが一定であったと仮定すると、1 日毎の膨 張レートはそれぞれ $4.3 \times 10^4 \text{m}^3$ /day と $2.7 \times 10^4 \text{m}^3$ /day と見積もることができる. GEONET の観測 より、噴火前の膨張は 2009 年 12 月 17 日から 2011 年 1 月 25 日まで継続していたと考えられるの で、噴火前の膨張レートを一定と仮定すれば、噴火前のマグマ溜りにおける体積増加量はおよそ 1.7 ×107m³ と見積もられる.期間③においては、噴火前後の膨張が含まれていると考えられるので、体 積が減少した期間を 2011 年 1 月 25 日から 2011 年 1 月 30 日と仮定し、その前後は期間②および④ で推定されたレートで膨張していたと考えると、噴火時の体積減少量は $1.5 \times 10^7 \text{m}^3$ と推定される.

3. 火口内溶岩の成長

本噴火活動の特徴の一つは,新燃岳の火口内部に溶岩が流入したことである.東京大学地震研究所 による上空からの目視観測が1月28日の午前中に実施され,火口湖の消失および直径数十mの溶岩 ドームの出現が確認された.その後,その溶岩ドームは成長し,海上自衛隊による1月31日の目視 観測においては、火口の大半が溶岩によって埋められていたことが明らかとなった.その後、ブルカ ノ式噴火に伴う噴出物の堆積や、噴火口の出現などが観測されている.このような火口内の地形の変 遷は、火山活動を理解する上で重要な情報である.しかし、一般に、可視光による火口の観測は、噴 煙や噴気、時には雲等に遮られることが多く、さらには夜間の観測は困難である.また、噴火活動が 活発な時期においては、航空機による観測は危険を伴うという問題もある.一方、SARは、噴煙を透 過して地表を観測することができるので、このような火口観測に対して有効である.そこで、本研究 においては、SAR 画像を用いて火口内溶岩の変遷を調査した.

1 月 19 日に新燃岳において小噴火が発生したことに伴い,新燃岳の火山活動把握を目的とした ALOS による緊急観測が,本火山 WG からの要求に基づいて実施された. ALOS の回帰周期は 46 日 であるが,レーダー波の照射方向を変更することにより,異なる軌道からの観測も実施され,火口の 画像がより高頻度に取得された.さらに,ドイツの TerraSAR-X,カナダの RADARSAT-2 による観 測も要求し,数日毎に火口内の SAR 画像が得られた.これらの SAR 画像を図 2 に示す.噴火前の 1 月 18 日に観測された画像においては,火口底に散乱強度が弱い領域が見られ,それは火口湖を示す ものである.一般に,波の穏やかな水面は,レーダー波は全反射成分が卓越するために後方散乱波成 分は小さくなるためである.その火口湖を示す低散乱強度域が,1月 27 日に取得された画像において は明らかに消失している.その小口湖を示す低散乱強度域が,1月 27 日に取得された画像において は明らかに消失している.そのかわりに,火口中央部に凸形状を持つような強度分布が見られる.そ のアジマス方向の幅は大まかに 100m 程度である.翌日の午前中に実施されたヘリコプターによる目 視観測によれば,ほぼ同じ場所に溶岩ドームの出現が確認されており,この結果は,溶岩ドームはそ の半日前には,すでに出現していた可能性を示すものである.ただし,SAR 画像から判読される構造 は,空間分解能と比べてそれほど大きくないことから,鮮明とは言い難い.爆発によって形成された 別の構造を示す可能性も否定できないので,1月 27 日の夜に,すでに溶岩ドームが出現していたかど



図 2. 新燃岳火口の SAR 画像. 表1にこれらの SAR 画像の諸元を示す.

	Date	Time (JST)	Satellite	Inc. angle	A/D	Path (ALOS)
а	2011/1/18	10:44	ALOS	39	D	73
b	2011/1/27	22:53	ALOS	50	А	428
c	2011/1/29	22:36	ALOS	24	А	420
d	2011/1/30	10:39	ALOS	44	D	71
e	2011/1/31	6:28	TerraSAR-X	21	D	-
f	2011/2/1	6:11	TerraSAR-X	52	D	-
g	2011/2/1	22:59	ALOS	55	А	431
h	2011/2/3	22:24	ALOS	35	А	423
i	2011/2/4	10:45	ALOS	35	D	74
j	2011/2/6	10:28	ALOS	55	D	66
k	2011/2/7	18:10	TerraSAR-X	31	А	-
1	2011/2/8	22:48	ALOS	44	А	426
m	2011/2/9	10:52	ALOS	24	D	77
n	2011/2/11	10:35	ALOS	50	D	69
0	2011/2/12	6:11	TerraSAR-X	52	D	-
р	2011/2/15	22:38	ALOS	29	А	421
q	2011/2/18	10:23	ALOS	58	D	64
r	2011/2/18	18:10	TerraSAR-X	31	А	-
S	2011/2/18	23:01	ALOS	58	А	432
t	2011/2/20	22:44	ALOS	39	А	424
u	2011/2/23	6:11	TerraSAR-X	31	D	-
v	2011/2/23	10:30	ALOS	54	D	67
W	2011/2/25	22:50	ALOS	47	А	427
Х	2011/2/26	6:11	RADARSAT-2	52	D	-
у	2011/2/28	10:36	ALOS	47	D	70
Z	2011/3/3	18:25	RADARSAT-2	46	А	-
aa	2011/3/4	22:34	ALOS	32	А	422
bb	2011/3/5	10:43	ALOS	39	D	73
сс	2011/3/6	6:11	TerraSAR-X	52	D	-
dd	2011/3/8	10:25	ALOS	57	D	65
ee	2011/3/12	10:31	ALOS	50	D	68
ff	2011/3/14	22:51	ALOS	50	А	428
gg	2011/3/17	6:11	TerraSAR-X	52	D	-
hh	2011/3/17	10:38	ALOS	44	D	71
ii	2011/3/19	22:58	ALOS	55	А	431
jj	2011/3/22	6:18	RADARSAT-2	36	D	-
kk	2011/3/27	18:25	RADARSAT-2	46	А	-
11	2011/3/29	10:35	ALOS	50	D	69

表 1. 図 2 に示す SAR 画像の諸元

*A and D indicate the ascending and descending orbits passes, respectively.

うかについては、議論の余地が残るところである.1月29日に観測された画像からは、明らかに、凸 形状の構造が成長していることがわかる.さらに、1月29日に観測された ALOS 画像、1月31日、 2月1日に観測された TerraSAR-X 画像にも凸形状の構造が見られ、それは時間とともに成長してい るように見える.2月3日と2月4日に取得された PALSAR 画像には、2月1日の画像と同様の凸形 状の構造が見られるが、それ以降に取得された画像では、その形状は徐々に平坦化しているように見

える. それは, 溶岩の自重による変形を示すものかもしれない. また, 2月1日以降, 繰り返しブル カノ式噴火が発生し、その噴出物が堆積し、火口内表面の形状が平坦になる効果も大きいと考えられ る. そして, 2 月 4 日以降に観測された PALSAR 画像からは, その形状をはっきりと認識できなくな った.より高分解能の TerraSAR-X, RADARSAT-2 の画像においては、その表面の微細な表面形状 を判読可能であり,ブルカノ式噴火によって生じた穴などを識別することが可能であった.たとえば, 2月7日に取得された TerraSAR-X 画像には、溶岩の東端付近に南北に延びる穴が識別できる. それ 以前には、活発にブルカノ式噴火が発生しており、その噴火の跡であると推測される.2月12日に取 得された TerraSAR-X 画像においては、その南北に述べる穴は見られず、噴出物によって埋められた のかもしれない. 2 月 18 日に取得された TerraSAR-X 画像においては, 溶岩の南東端付近の境界が 不明瞭になっており,噴出物がより厚く覆ったと考えられる.2月23日に取得された TerraSAR-X 画像には、再度、溶岩の東端付近に南北に延びる穴が出現している.2月26日に取得された RADARSAT-2 画像からは、2月17日の画像とは大きく変化していないように見えるが、3月3日に 取得された RADARSAT-2 画像には,火口の南東壁付近に大きな穴が出現している.不明瞭であるが, 2月28日観測のPALSAR画像に、そのような火口は見られないので、これは3月1日に発生した爆 発における噴火孔と考えられる.その後,溶岩のふちに沿った小さな穴が出現するなど,小さな変化 が見られた.

前述したように、1月27日以降に観測された SAR 画像において火口内の溶岩を捉えた.その変化 を定量的に調べたい.しかし、これらのほとんどの画像は、入射方向ベクトルが異なる画像であるた め、フォアショートニングによる画像ひずみが異なる.よって、直接的な比較からは、その変化量を 求めることはできない.そこで、本研究においては、数値地形モデル(DTM)からシミュレートした SAR 画像が、観測された SAR と整合するように DTM を修正した.この解析においては、溶岩の表面形状 を回転楕円体の一部で表せると仮定し、その楕円体の中心の座標(緯度、経度、高さ)と楕円体のパ ラメータ(水平方向の長径、短径、上下の系、水平方向の回転角)を試行錯誤により決定した.図3 は、1月18日から2月3日までに観測された画像について解析した結果を示す.シミュレートした 画像は、観測画像とおおよそ一致している.溶岩表面の散乱強度はその周りと比べて有意に強いが、 それは地表面における散乱の違いによるものと考えらえる.形の若干の違いは、楕円体による近似に 当てはまらない部分があるためと考えられる.推定された地形を見ると、溶岩は火口湖の南西岸付近



図 3. 火口内溶岩の変遷の調査に使用した SAR 画像. SAR 画像の諸元は表1に示す.



図 4. 火口内溶岩の変遷の調査に使用した SAR 画像. SAR 画像の諸元は表1に示す.

に出現し、そこを中心に広がっていくという結果が求まった.溶岩出現前の地形との比較から火口内 の溶岩の体積を求めたところ、火口内の溶岩は1月29日頃から急激に増加し、1月31日の体積は約 15万立米に達した(図4).それ以降に、体積は大きく変化していないように見える.1月29日、30 日、31日の体積は一定の速度で増加しているように見えることから、それらに直線を当てはめると、 88.7m³/sec の噴出レートが求まった.さらに、そのx切片は29日7時33分(JST)に求まり、これ は溶岩噴出期に見られた継続的な傾斜変化が開始した時間と良く一致する.さらに、1月31日の TerraSAR-X の観測時間は継続的な傾斜変動が停止する直前であるが、それ以降の観測画像から推定 される体積は1月31日の画像から推定される体積と大きく変わらない.この結果は、推定された溶 岩体積の信憑性を示すとともに、この時期の傾斜変動と溶岩噴出のレートが深く関係していることを 示唆している.Kozono et al. (2012)は、SAR 画像から得られたマグマ噴出率とGPS および傾斜観測 から求まった地下マグマだまりにおける収縮量の比に着目し、それが不変と考えることにより、準プ リニー式噴火における噴出量および噴出率を推定した.また、この解析から得られた噴出量・率を、 これまでの世界中の噴火事例における噴出量・率と比較したところ、本噴火活動は爆発的噴火と非爆 発的噴火の境界付近の臨界状態で噴火が推移したことが明らかとなった.

次に,推定された溶岩形状の時間変化から,溶岩の粘性率について考察する. Huppert et al. (1982) は,平坦な場所に一定の噴出率で溶岩が噴出した場合の溶岩ドームの成長を理論的に解析し,その半 径は次式で表せることを示した.

 $r_N = 0.715 (g \Delta \rho Q^3 / 3 \nu)^{1/8} t^{1/2}$

(1)

rvは溶岩の半径, t はマグマ噴出開始からの時間, g は重力加速度, Δp は大気とマグマの密度差, Q は噴出レート, vt粘性率である. SAR 画像の解析からは, 噴出率 Q と溶岩が覆った面積 S が求まっ ており, 溶岩が覆った領域を円で近似すれば, 溶岩の半径 rvは(S/π)^{1/2} から求められる. マグマと大 気の密度差はマグマの密度とみなすことができ, この溶岩は安山岩質の溶岩であることが分かってい るので, その密度はおおよそ 2500kg/m³ である. よって, これらの値を式(1)に代入すると溶岩の粘 性を求めることが可能である. 最小二乗法によって, 1月 29日, 30日, 31日の画像から推定された 溶岩の半径に式(1)を当てはめると 8.4GPa s の粘性が求まった. ただ, その当てはまりはあまり良く なかった. これは, 溶岩が覆った領域を平面と仮定したことによる影響と考えられる. 噴火前の火口 は火口縁に近づくほど傾斜が大きくなり, 溶岩の拡張がブロックされる効果が加わる. よって, その

増加率が小さくなると推測され,実際に,観測結果も半径が広がるにつれて理論値よりも半径の増加 率が小さくなっている.この推測が正しいならば,1月29日の値のみから求めた粘性が最も真値に近 いと考えられ,その場合の粘性率は2.1GPasと求まった.1月29日までに溶岩が覆った領域も傾斜 を持っているため,実際の粘性率はさらに低い可能性がある.Kozono and Koyaguchi (2009)は,桜 島で1917年に流出した溶岩流の粘性を0.5-11.2GPasと見積もっており,さらに,石原(1985)は, その溶岩の噴出率を29-1190m³/secと見積もっている.これらは本研究で見積もった溶岩の粘性率お よび噴出率はその中に含まれる.それを考慮すれば,今回のイベントで現れた溶岩は,火口の外側に 出現していたならば,溶岩流として流下した可能性が高いと考えられる.

4. まとめ

本報告においては、主に、2011年新燃岳・霧島山噴火についての解析を行った. PALSAR データ を用いた SAR 干渉解析からは霧島山の西方で膨張変動が検出され、その地殻変動から、主マグマ 溜りの位置は新燃岳火口から約 5km 西北西の地下 7.5 km であると推定された. さらに、噴火時に は収縮、噴火後には再膨張が観測されたが、それらの地殻変動力源は同じ位置であることが示唆され た.また、SAR 画像から火口内に流入した溶岩の成長を捉えた.単一の SAR 画像から火口内の地形 を大まかに求める手法を開発し、2月1日に観測された TerraSAR-X 画像にその手法を適用したとこ ろ、溶岩の体積は約 1500 万立米と推定された.また、溶岩は1月29日から1月31日まで 88.7m³/sec の一定の速度で噴出していたことを示す結果が得られた.この結果は、地下のマグマだまりの収縮量 との関連性や溶岩の粘性を見積もる重要な情報となった.この溶岩の成長を定量的に捉えたのは、 SAR のみであり、火山活動把握における SAR の有効性を示す結果といえる.

謝辞

本研究で用いた PALSAR データは、防災利用実証実験火山 WG から提出された観測要求に基づい て観測されたものである.また、使用したデータは、PIXEL (PALSAR Interferometry Consortium to Study our Evolving Land surface) において共有しているものであり、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と東京大学地震研究所との共同研究契約により JAXA から提供されたものである.本研究の一部は、 科学技術振興調整費「平成 23 年霧島山新燃岳噴火に関する緊急調査研究」において実施された.ま た一部は、東京大学地震研究所共同研究 (B)「SAR を用いた地震火山活動に伴う地殻変動の検出」 で行われた. PALSAR データの所有権は経済産業省および JAXA にある.本研究で使用した TerraSAR-X のデータは、Infoterra GmbH が所有権を有するものであり、株式会社パスコから供給 されたものである.本研究で使用した RADARSAT・2 のデータは、MDA が所有権を有するものであ り、株式会社イメージワンから供給されたものである.また、本研究においては国土地理院による GEONET データおよび 10m メッシュ数値標高モデルを使用した.

参考文献

- Herbert E. Huppert, John B. Shepherd, Haraldur Sigurdsson and R. Stephen J. Sparks: On lava dome growth, with application to the 1979 lava extrusion of the Soufriere of St. Vincent, J. Vol-canol. Geotherm. Res., 14, 199–222, 1982.
- 石原和弘,井口正人,加茂幸介,桜島火山の溶岩流(II) -大正溶岩流のシミュレーション-,京大防災研究所年報, 28(B-1),1-11,1985.

- Kozono, T. and T. Koyaguchi, Effects of relative motion between gas and liquid on 1-dimensional steady flow in silicic volcanic conduits: 2. Origin of diversity of eruption styles, J. Volcanol. Geotherm. Res., 180, 37–49, 2009.
- Kozono, T., H. Ueda, T. Ozawa, Takehiro Koyaguchi, Eisuke Fujita, Akihiko Tomiya, and Yujiro J Suzuki: Magma discharge variations during the 2011 eruptions of Shinmoe-dake volcano, Japan, revealed by geo-detic and satellite observations, Bulletin of Vol-canology, Vol. 75:695. doi: 10.1007/s00445-013-0695-4, 2013.
- 宮城洋介,小澤拓,河野裕希, DInSAR 及び GPS によって検出された霧島山・新燃岳 2011 年噴火に伴う地殻変動,火山, 58,341-351,2013.
- Mogi, K., Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them, Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo, 36, 99-134, 1958.
- Ozawa, T. and T. Kozono, Temporal variation of the Shinmoe-dake crater in the 2011 eruption revealed by spaceborne SAR observations, Earth Planets Space, 65, 527-537, 2013.

火山-2506「衛星画像による火山噴火時土砂災害緊急調査技術の検討」

PI:(独)土木研究所・土砂管理研究G火山・土石流T 清水武志(H23-25)
 CI:(独)土木研究所・土砂管理研究G火山・土石流T 山越隆雄(H23-24)
 CI:(独)土木研究所・土砂管理研究G火山・土石流T 中野陽子(H23)

1.はじめに

降下火砕堆積物や火砕流堆積物に覆われた斜面に雨が降ると土石流が発生しやすくなる。 その傾向は堆積深の増加に比例する(例えば地頭園ほか,1991)。そのため,降下火砕堆積 物の範囲やその堆積層厚の範囲の情報は,土石流等の土砂災害対策を考える上で重要であ る。降下火砕堆積物の範囲や堆積層厚を表す等重量線図を作成するには、一般に現地で直 接計測する手法が用いられる。しかし,噴火活動中は安全性の確保などのために立入禁止 区域が設定され,火口付近の土石流が発生しやすい急勾配斜面上のデータが得られないこ とが多い。そのため,火山に接近することなく迅速かつ安全に降下火砕物範囲や堆積層厚 を把握する調査手法として,特に噴煙下でも地表面の観測が可能な衛星搭載型合成開口レ ーダ SAR を利用したリモートセンシング技術の利用が期待できる。

このような背景のもと,我々の研究グループでは,火山噴火後の2次土石流の対策に資する情報を衛星画像から取得するための調査を実施してきた。平成22年度までは,(独) 宇宙航空研究開発機構のだいち ALOS に搭載された光学センサ AVNIR-2による正規化植生指標 NDVIの変化と火砕堆積物の堆積の関係などについて検討した。その後,平成25年度までの3年間は,A)2011年1月の霧島(新燃岳)噴火,B)2010年10月インドネシアのム ラビ火山噴火,を対象として,合成開口レーダの利用方法について検討した。

SAR によって得られる情報には,後方散乱強度(あるいは振幅)と位相の情報がある。前 者の情報である強度画像によって対象とするイベント前後を比較して変化箇所を抽出する 方法は,大規模な火砕流の堆積範囲の抽出に適用可能であるが(Terunuma et al. 2005), 小規模な火砕流や降下火砕物堆積範囲の把握は困難である(Nakano et al.,2010)。後者 の情報を用いる手法は大別すると2種類である。2枚の SAR 画像の相関を示すコヒーレンス 画像によって変化箇所を抽出する方法(以下、本報告書ではコヒーレンス解析)と,2時期 に同一箇所を観測した2枚の SAR 画像を干渉させ地表面変位を定量的に評価する手法であ る(以下,本報告書では SAR 干渉法)。そこで、イベントA に対してはコヒーレンス解析や SAR 干渉法の一つである差分干渉 SAR (DInSAR)による降灰範囲と堆積厚の関係,イベント B に対しては SAR 強度画像による土砂移動現象の把握の可能性について調査を行った。 2.2011年1月の霧島(新燃岳)噴火後の降灰範囲に関する調査

2.1. 背景と目的

広い範囲に堆積深の大きな火砕流や土石流の堆積物が分布している場合,2枚の SAR 画像 のコヒーレンス画像によって堆積範囲を抽出可能なことが Terunuma et al.(2005)が報告 した。一方,SAR 干渉法で降灰の堆積厚を計測するのは困難と考えられてきたが,小澤(2011) は、2011 年新燃岳噴火における新燃岳周辺の降下火砕堆積物を対象として,ALOS(だいち) に搭載された PALSAR の画像を用いて堆積層厚を推定した。その結果、現地計測と整合した ことを報告した。

そこで, SAR の位相情報を活用するコヒーレンス解析および SAR 干渉法を用いて、堆積深の薄い降下火砕物堆積範囲および小澤(2011)が使用した PALSAR と異なる画像ペアを用いた火山灰堆積深の計測の可能性について検証した。

2.2.データ

2011 年 1 月 26 日から 27 日にかけて噴出した降下火砕物の等重量線図は,第 120 回火山 噴火予知連絡会で報告されている((独)産業技術総合研究所・アジア航測㈱,2011)。ま た,噴火から 5 ヶ月経過した 2011 年 6 月 14 日に,新燃岳南東面斜面において火山灰・軽 石の堆積深を現地で計測した(表 2.1)。

これらの情報を検証データとし、2.1 節で記述したコヒーレンス解析および SAR 干渉手法 を、表 2.2 に示す ALOS/PALSAR の画像に適用した。各 case は次のような意図で設定した。 降下火砕物の影響の無い噴火前に撮像された画像のペアが case_00 であり、比較に用いる。 case_01 ~ case_04 は降下火砕物が堆積した期間の前後の画像のペアである。case_01 ~ case_03 は噴火後は同一で噴火前が異なる北行軌道であり、case_04 は南行軌道である。 case_05 はオフナディア角が他の case とは異なる。

2.3.結果

(1)コヒーレンス分析

図2.1に 表2.2 の case_01 ~ case_04 の SAR 画像ペアに対するコヒーレンス画像を示す。 併せて, case_00 のコヒーレンス画像と降下火砕物の等重量線図の拡大図を示す。

火山噴火前のペアである case_00 のコヒーレンス画像と比べると, case_01, case_04 の コヒーレンス画像において, 新燃岳から南東方向の高千穂峰にかけて幅約2 km 長さ約8 km のコヒーレンスが低い領域が明瞭に見られる。一方, case_02 ではやや不明瞭となり, case_03 ではほとんど周辺と見分けられない。case_01, case_04 でコヒーレンスが低下し ている領域は,同じ範囲の1月26日~27日の降下火砕物の堆積深分布図と比較すると,概 ね50 kg/m²と100 kg/m²の等重量線の間に分布していることが分かる。

表 2.1 2011 年 6 月 14 日の降下火砕物堆積状況調査結果*(中野ほか, 2013)

番号	東経(°)	北緯 (°)	降下火砕物堆積深 (unit: mm)
1	130.9188836	31.9018133	15
2	130.9136424	31.8972209	70
3	130.9122012	31.8942595	100
4	130.906126	31.8961144	200
5	130.9014323	31.8927045	300
6	130.9025263	31.8945736	200
7	130.8998837	31.8895758	200

* 降下火砕物堆積深は,スケールを当てて目読した簡易計測による値である

表 2.2 使用画像および検討ケース(中野ほか, 2013)

CASE	パス	フレーム	A/D*1	Observation Time (UT) *2	観測モード	偏波	オフナディア角	Bperp*3	
case_00 424			20080514 13:44:16.610	FBD	HH+HV	34.3	100 01		
	424	620	A	20101120_13:45:43.172	FBD	HH+HV	34.3	480.61	
case_01 4	101	620	А	20101120_13:45:43.172	FBD	HH+HV	34.3	1130.61	
	424			20110220_13:43:53.592	FBS	HH	34.3		
case_02 424	494	620		20100820_13:47:35.737	FBS	HH	34.3	005 15	
	424		A	20110220_13:43:53.592	FBS	HH	34.3	- 905.15	
case_03 4	494	620		20100705_13:47:35.737	FBD	HH	34.3	928.86	
	424		A	20110220_13:43:53.592	FBS	HH	34.3		
case_04	79	2980	D	20110118_01:43:39.784	FBS	HH	34.3	401 69	
	15		960 D	20110305_01:42:38.819	FBS	HH	34.3	491.02	
case_05	109	620	А	20110127_13:53:00.968	FBS	HH	43.4	695.56	
	462			20110314_13:51:57.139	FBS	HH	43.4		
case_06	71	2980	D	20110130_01:39:07.062	FBS	HH	38.8	116 96	
				20110317_01:38:02.700	FBS	HH	38.8	- 110.80	
		Act 101 ar 12	fort hele	1-1-2-2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2	ALL I AL ON TH ONE	the re Las Las Las	1000		

 CALANDIAL OF 1.00.100.100
 PDS
 HH
 38.8

 パス、フレーム、観測モード、偏波、オフナディア角などは独立行政法人航空研究開発機構 (2008)
 参照

 *1 A/D はそれぞれ北行軌道 (Ascending) と南行軌道 (Descending) を表す

 *2 標記は年月日_時:分:秒で、年月日はそれぞれ4桁、2桁、2桁の整数とし、時刻はUTである。上段が Master、下段が Slave である。

 *3 Bperp は基線長。単位は m である



図 2.1 検討ケース毎に得られたコヒーレンス画像(中野ほか, 2013) 等重量線図は(独)産業技術総合研究所・アジア航測㈱(2011)より引用

(2) SAR 干涉法

図 2.2 に, 表 2.2 の case_01 ~ case_04 の SAR 画像ペアに対する差分干渉画像を示す。 新燃岳から南東方向の高千穂峰にかけての範囲を包み込むように,case_01 から case_03 で は,楕円形の干渉縞が見られる。ただしノイズと考えられる成分も確認できる。楕円形の 干渉縞は特に case_01 では明瞭である。一方,case_04 では干渉縞が明瞭でない。図 2.2 中 の case_01 の干渉縞の色の変化を,新燃岳と高千穂峰を両端とする線分の垂直二等分線に 沿って南西から北東方向に順番にたどると,黄 ピンク 青というサイクルで 2 回繰り返 して変化した後,逆順に同じく 2 サイクル分変化する。これは,南西側では地表面が衛星 視線方向に概ね位相にして 4 分接近し,北東側では遠ざかる方向に 4 分変化することを 表わす。位相 4 分の変化は、case_01 の画像のオフナディア角 34.3 °、入射角約 40 °、 波長約 23.6 cm であることから、およそ 30 cm 程度の地表面の増減に相当する。

現地計測地点(表2.1)における降下火砕物の堆積深と,同地点における case_01 および case_00 の画像ペアの位相差から推定された地表面変位を図2.3 に示す。位相差から推定さ れる地表面変位は,アンラップした位相差と波長から鉛直方向の距離に換算した。ただし, 相対値しか算出できないため降下火砕物の堆積深が0 mm と確認された地点を変位量0 mm と補正している。case_01 の推定結果は、現地計測結果とほぼ1:1 対応線上にプロットされ,良い整合を示す。case_00 は降下火砕物の堆積がないことから,SAR 干渉法による推定 値は0 mm に近い値を示す。



図 2.2 検討ケース毎に得られた差分干渉画像(中野ほか,2013) 等重量線図は(独)産業技術総合研究所・アジア航測(株)(2011)より引用



図 2.3 現地計測による降下火砕物の堆積深とSAR干渉法による地表面変位 (中野ほか, 2013)

3.インドネシアのムラピ火山 2010 年噴火による降下堆積物

3.1.背景と目的

インドネシアのムラピ火山は赤道付近に存在し、2010年10月に噴煙柱崩壊型の火砕流を 伴う噴火があった(図3.1)。噴火後の2次土石流で特に火山体南西のPutih川等の下流で 被害が発生した。

この噴火で生産された土砂を対象に、SARの後方散乱強度により降下火砕堆積物と火砕流 堆積物の範囲について検討した。前者は降下火砕堆積物の現地調査結果を基に確認した。



図 3.1 ムラピ火山周囲の河川名・地形 (Suruno, 2013)。K. (kari) は川を表す。図中左 下の広域図は地理院地図を使用した。

3.2.調查手法

(1) PALSAR

使用した PALSAR のデータ諸元は表 3.1 の通りである。噴火前後の画像のペアを選定した。

Polarization	Off-nadir angle(°)	Observation direction	Date
HH	41.5	D	2007/09/12
HH	41.5	D	2010/11/05

表 3.1 使用した PALSAR の諸元 (Nakano et al. 2011を改変)

(2)降下火砕堆積物現地調查

2010 年 10 月の噴火約 1 年後の 2011 年 11 月および 2012 年 1 月に降下火山灰の調査を行 った。調査は火山全周にわたって実施した。ただし、火口から南に流下した火砕流の堆積 物は調査対象から外した。

調査項目と方法は,2011年1月27日に噴火した霧島火山の新燃岳噴火において,土砂災 害防止法に基づく国土交通省の緊急調査として実施された降下火砕堆積物の堆積状況や表 面の固化状態の調査に倣い(木佐ほか,2012)次の情報を整理した。

(1)調査地点の諸元:河川名,近辺の砂防施設の名称,GPSによる位置(測地系:WGS84)
 (2)写真:表面(調査前後),断面,周辺状況

(3)降下火砕物堆積層厚(cm)

3.3.結果

(1)火砕流堆積物の分布

表 3.1 の No. A の PALSAR の強度画像を比較した結果を図 3.2 に示す。黒い部分は噴火に より後方散乱強度が著しく低下した領域である。例えば藤田ほか(2012)が示した火砕流 堆積物の範囲とほぼ一致する。強度の著しい低下は、谷を埋積する火砕流堆積物によって 地表面が平滑になり後方散乱する成分が減少したためであると考えられる。

(2)降下火砕堆積物の分布

現地調査結果を表 3.2 に示す。この値を地図にプロットし視覚的に補間して作成した等 層厚線図を図 3.3 に示す。

一方,噴火前後の SAR による変化について,2007 年9月12日に撮影した画像を赤(R), 2010 年11月5日に撮影した画像を緑(G),青(B)に割り当てた RGB イメージを図3.4 に 示す。赤色が減少した領域が噴火後に後方散乱強度が低下した領域である。これを見ると, 表現が異なるだけであるため図3.2 と同様に火砕流堆積物の領域は著しく色が変化してい る。一方,火口付近の赤い領域の周囲に,火山体全域にわたり青い環状の分布が見られる。 これは図 3.3 の 20 mmの降下火砕堆積物の領域とほぼ一致している。一方、火山体の東面斜面において、図 3.3 の現地調査結果は,図 3.4 の SAR 強度画像と比較して,東に凸な形状である。SAR 強度画像(図 3.4)が東に凸でないのは,撮影時の衛星進行方向が南行方向(Discending;表-3.1におけるD)でPALSAR は進行方向右側を照射することから,火山体の山頂付近の倒れこみの影響であると考えられる。



"Analysis by PWRI from ALOS raw data of METI, JAXA"

図 3.2 後方散乱強度の差分画像。黒い領域は噴火後に後方散乱強度が減少した領域を表している (Nakano et al, 2011)。



図3.3 降下火砕堆積物の堆積深の調査結果に基づく等層厚線図(清水ほか,2014)

NO	LONGITUDE	LATITUDE	Thickness mm	DATE	RIVER	FACILITIES
1	E110:26:1.94	S7:30:19.43	40.0	2011-11-26	Pabelan	AP-D4
2	E110:23:47 81	S7:29:57 44	40.0	2011-11-24	Pabelan	PA-RD2
3	E110:23:17.11	S7:30:30.81	30.0	2011-11-24	Pabelan	PA-RD5
4	E110:22:56.53	S7:30:40.05	20.0	2011-11-24	Pabelan	PA-D3 (Sengi)
5	E110:18:32.48	S7:32:50.09	5.0	2011-11-24	Pabelan	PA-C3
6	E110:24:8.79	S7:30:26.7	50.0	2011-11-26	Apu	AP-D3
7	E110:21:28.03	S7:31:48.15	15.0	2011-11-24	Trising	TR-C8
8	E110:23:57.57	S7:32:47.21	120.0	2011-9-8	Blongkeng	Gemer1
9	E110:23:34.49	S7:33:34.57	115.0	2011-11-7	Putih	PU-D5
10	E110:23:7.34	S7:34:4.27	100.0	2011-11-22	Putih	PU-D4
11	E110:22:16.57	S7:34:39.28	95.0	2011-11-22	Putih	PU-D2
12	E110:20:59.93	S7:35:12.98	20.0	2011-11-22	Putih	PU-C9
13	E110:19:40.35	S7:35:46.81	20.0	2011-11-22	Putih	PU-RD6
14	E110:18:53.17	S7:36:13.51	20.0	2011-11-22	Putih	PU-C8
15	E110:23:34.67	S7:34:46	100.0	2011-11-23	Bebeng	BE-RD2
16	E110:23:21.59	S7:34:54.34	85.0	2011-11-23	Bebeng	BE-D8
17	E110:22:54.69	S7:35:14.44	45.0	2011-11-23	Bebeng	BE-D5
18	E110:22:32.51	S7:35:31.79	30.0	2011-11-23	Bebeng	BE-D3/D2
19	E110:21:42.28	S7:36:31.86	25.0	2011-11-23	Bebeng	BE-C4
20	E110:19:25.99	S7:38:20.18	15.0	2011-11-23	Krasak	KR-C (Kopen)
21	E110:25:19.86	S7:35:45.11	50.0	2011-11-24	Boyong	BO-D7
22	E110:25:3.11	S7:36:12.35	40.0	2011-11-24	Boyong	BO-D6
23	E110:24:54.2	S7:36:58.3	20.0	2011-11-24	Boyong	BO-D4
24	E110:24:22.1	S7:35:56.25	24.0	2011-11-24	Boyong	BO-C6
25	E110:24:4.8	S7:38:28.85	25.0	2011-11-24	Boyong	BO-C8A
26	E110:24:3.13	S7:38:34.14	25.0	2011-11-24	Boyong	BO-D1
27	E110:23:40.94	S7:39:57.15	15.0	2011-11-24	Boyong	BO-C2
28	E110:23:22.93	S7:41:53.01	15.0	2011-11-24	Boyong	BO-C1
29	E110:28:13.08	S7:35:49.95	25.0	2012-1-4	VV OrO	WO-D6
30	E110:28:11.07	\$7:33:59.53	20.0	2012-1-4	Manggai	-
31	E110:28:52.57	57:32:11.62	30.0	2012-1-4	Mogol	-
32	E110:30:54.16	57:33:9.06	15.0	2012-1-4	Mogol	-
33	E110:32:15.32	57:33:17.89	0.0	2012-1-4	Gandul	-
34	E110:28:35.1	57:30:58.32 57:20:52.70	25.0	2012-1-4	Gandul	-
30	E110:30:54.44	57:30:52.79	0.0	2012-1-4	Pahelan	-
30 27	E110.27.9.00 E110.17:56.59	S7.30.30.30	0.0	2012-1-4	Lonena	-
31 20	E110.17.30.30	ST.JI.T.S ST.21.7.22	15.0	2012-1-5	Trising	- TP D4
20 20	E110.23.33.00	ST.ST.T.SS S7:31:11 20	40.0	2012-1-3	Trisina	
39	E110.23.3.08	S7-31-132 02	40.0 25 0	2012-1-5	Trisina	
40 ∡1	F110.21.47.13	S7:32:6.96	20.0 50.0	2012-1-5	Senowo	SE-RD5
42	F110:22:07:22	S7:35:30 0	30.0	2012-1-5	Bedog	KR-D5
42 43	F110:25:44 16	S7:37:4 32	20.0	2012-1-6	Kununa	KII-D2
44	E110:25:59.21	S7:35:47.43	40.0	2012-1-6	Kunung	KU-C1

表 3.2 調査結果一覧(清水ほか,2014)



"Analysis by PWRI from ALOS raw data of METI, JAXA"

図 3.4 噴火前後の SAR 強度画像の RGB イメージ

4.まとめ

本成果報告書では,合成開口レーダの位相情報(2章)と強度情報(3章)を活用した, 火砕流堆積物や降下火砕堆積物の範囲や層厚の調査結果について示した。撮影条件の良否 やイベント前後の撮影画像の有無など,解析可能な条件を満たせば SAR 画像を活用し、火 山噴火後に人が出入り出来ない状況下において土石流等の2次災害対策に資する情報を得 ることが可能である

参考文献

- (独)産業技術総合研究所・アジア航測(株)(2011):第120回火山噴火予知連絡会資料(その1)霧島山, p.64-67
- (独)航空研究開発機構(2008): ALOS ユーザハンドブック 平成 19 年 11 月(第2版), p.60 62, p.85 93
- 藤田正治,宮本邦明,権田豊,堀田紀文,竹林洋史,宮田秀介,Djoko Legono, Muhammad Sulaiman, Faisal Fathani, Jazaul Ikhasan: 2010 年インドネシア・メラピ火山噴 火災害,京都大学防災研究所年報,第55号A,p.171-180,2012

- 地頭園隆,下川悦郎:桜島における火山活動が土石流・泥流の発生や流出に及ぼす影響 について,新砂防(砂防学会誌),第43巻,第6号,p.9-15,1991
- 木佐洋志,山越隆雄,石塚忠範,杉山光徳,瀧口茂隆:2011年霧島山(新燃岳)噴火 による火砕物堆積斜面の降雨表面流出特性,砂防学会誌,第65巻,第6号,p.12 21,2013
- Y. Nakano, T. Yamakoshi, T. Shimizu, K. Tamura and S. Doshida: The evaluation of eruption induced sediment related disasters using satellite remote sensing Applications for emergency response, International Journal of Erosion Control Engineering, Vol.3, No.1, p.34-42, 2010
- Y. Nakano, T. Shimizu, T. Yamakoshi, T. Ishizuka: Utilization of satellite-equipped synthetic apeture radar as a tool to immediately update volcanic hazard maps, Seminar Mitigasi Bencana Alam dan Ulang Tahun ke 10 Program Pendidikan Bencanna di MTPBA-FTUGM, ISSN, 2011
 中野陽子,清水武志,山越隆雄,木佐洋志,石塚忠範:合成開口レーダの位相情報を活
- 用した降下火砕物の堆積分布および堆積深の推定,砂防学会誌,Vol.66, No.4, p.44-47, 2013
- 小澤拓(2011):衛星搭載 SAR による火口変化の抽出,「平成23年霧島山新燃岳噴火に関する緊急調査研究」報告書 1-6, p.50-57
- 清水武志,山越隆雄,木佐洋志,中野陽子,森田耕司,石塚忠範:2010年10月ムラピ 火山噴火における降下火砕堆積物分布調査,土木技術資料,56-3, p.33-36,2014
- Surono, P.Jousset, J. pallister, M. Boichu, M.F. Buongiorno, A. Budisantoso, F. Costa, S. Andreastuti, F. Parata, D. Schneider, L. Clarisse, H. Humaida, S. Sumarti, C. Bignami, J. Griswold, S.Carn, C. Oppenheimer, F. Lavigne: The 2010 explosive eruption of Java's Merapi volcano-A '100-year' event, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 241-242
- Terunuma T., Nishida K., Amada T., Mizuyama T., Sato I. and Urai M. (2005): Detection of traces of pyroclastic flows and lahars with satellite synthetic aperture radars, International Journal of Remote Sensing, vol. 26, No.9, pp.1927-1942