火山 2507,火山 2508,火山 2509,火山 2510,火山 2511 「SAR干渉解析を用いた火山活動評価への利用の検討」

PI:気象庁・地震火山部火山課:松森敏幸
 CI:地震火山部火山課
 CI:気象研究所
 CI:札幌管区気象台
 CI:仙台管区気象台
 CI:福岡管区気象台
 CI:鹿児島地方気象台
 CI:地磁気観測所

1.はじめに

気象庁では,本庁火山課及び札幌・仙台・福岡の各管区に火山監視・情報センターを設置し,全国110 の活火山の活動状況を監視している.このうち火山噴火予知連絡会によって選定された47火山につい ては,火山周辺に設置した地震計,GPS,傾斜計,空振計,遠望カメラなどを火山近傍に設置し,24時 間体制で火山活動の監視を実施している.また,鹿児島地方気象台では,桜島をはじめとした鹿児島県 の火山について監視等を行っている.

火山活動評価を行う上で,地殻変動の推移を把握し,モニタリングすることは非常に重要である.地 殻変動をモニタリングする手段として汎用的な方法として,GPS や傾斜計による観測があげられる.た だし,GPS や傾斜計で実際に観測を行うためには,あらかじめ対象となる地表もしくは地中に観測機器 を設置する必要がある.例えば,火山噴火が開始した後に,その近傍に観測機器を多点展開することは 危険を伴い困難な場合が多い.一方,SAR 衛星を用いた地殻変動観測では,能動型センサを用いるため, 対象地域に観測機器を設置することは不要であり,観測時における制約が少ない.さらに,SAR で使用 するマイクロ波による観測は天候や昼夜を問わず観測できるほか,SAR 干渉解析手法は,衛星方向の変 化を高精度に検出することが可能である.特に地表面の状態把握に優れたLバンドセンサ(PALSAR)を 有する国産の SAR 衛星(ALOS)は,干渉性が高く地殻変動の情報が得やすい(橋本・他,2013).

気象庁では,上述した ALOS/PALSAR のメリットを生かし,各火山監視・情報センター及び鹿児島地方 気象台における火山活動評価に活用するため,担当地域毎に区分けした5課題(火山 2507,火山 2508, 火山 2509,火山 2510,火山 2511)について取り組みを行った.取り組んだ5課題については,地域は 異なるものの解析手法等は重複するものが多いことから,本報告書に一括して整理した.報告書は「2. 火山活動評価への利用」「3.解析手法の検討」「4.RADARSAT-2を用いた SAR 解析」で構成されている. 「2.火山活動評価への利用」では,平成23年6月に開催された第120回火山噴火予知連絡会で検討 された霧島山新燃岳及び阿蘇山周辺の SAR 干渉解析結果について報告する.本研究期間の初年度である 2011年5月にALOS が運用を停止したことから,平成24年度以降,アーカイブデータを中心とした研究 へとシフトし,解析手法の検討に取り組んでいる.「3.解析手法の検討」では,干渉 SAR 時系列解析, 気象庁非静力学モデルを用いた対流圏遅延補正について,解析手法の概要と適用事例を報告する.また, ALOS が運用されていない期間中の火山活動を把握する上で,RADARSAT-2の画像を取得し,霧島山新燃 岳と八甲田山の解析を試みたので,ALOS/PALSAR との干渉性の違いを含めて「4.RADARSAT-2を用いた 解析」にまとめている.

2.火山活動評価への利用

気象庁では,火山活動の評価において重要となる地殻変動を効果的に検知する観測手段のひとつとして,北方領土を含む全国の活火山周辺について SAR 干渉解析を実施し,解析結果を火山噴火予知連絡会・ 学会等に報告してきた(たとえば,気象研究所,2011a).本章では,2011年霧島山新燃岳噴火に伴う SAR 干渉解析及び阿蘇山周辺の SAR 干渉解析結果について,得られた地殻変動量から圧力源の推定を試 み,平成23年6月に開催された第120回火山噴火予知連絡会にて火山活動の評価・検討の資料として 活用された2事例(気象研究所,2011b,2011c)について記載する.

(1)霧島山新燃岳の事例

2011年1月の霧島山新燃岳噴火について,噴火前,噴火前後,噴火後のペアについて差分干渉 SAR 解 析を行った.解析には,SIGMA-SAR(Shimada,1999)を使用し,地形縞の除去には国土地理院から有償 販売されている 50m メッシュ標高を使用した.なお,解析ソフトの都合により,本章では Master に新 しい方の画像データ,Slave に古い方の画像データを利用し解析を行う.表2-1に使用したデータを, 図2-1に干渉解析結果を示す.

Scene Path-Frame	Orbit	Slave-Master (yyyy.mm.dd)	Span (days)	Bperp (m)	Cross-Track (degree)	Incident Angle (degree)	Memo
424-620	А	2008.02.12-2010.11.20	1012	-94	N80E	37.9	Fig. 3-1
73-2970_2980	D	2008.05.27-2011.01.18	966	144	N80W	37.1	Fig. 3-2
424-620	А	2010.11.20-2011.02.20	92	1038	N80E	37.9	Fig. 3-3
73-2970_2980	D	2011.01.18-2011.03.05	46	378	N80W	37.1	Fig. 3-4
424-620	А	2011.02.20-2011.04.07	46	533	N80E	37.9	Fig. 3-5
73-2970_2980	D	2011.03.05-2011.04.20	46	482	N80W	37.2	Fig. 3-6

表 2 - 1 本報告で使用した SAR 干渉解析ペア

噴火前のペアによる結果(図2-1の 及び)では,韓国岳から西南西約 5km 付近までにおいて, 北行軌道で最大 5cm 程度,南行軌道で最大 6cm 程度の衛星に近付く方向の位相差が検出された.また, 2011年1月26日の本格的なマグマ噴火活動を挟む前後のペア(図2-1の 及び)では,噴火前のペ アで認められた同じ場所を中心として,北行軌道で最大 6cm 程度,南行軌道で 4cm 程度の衛星から遠ざ かる方向の位相差が検出された.さらに,噴火後のペア(図2-1の 及び)では,北行軌道で局所 的に最大 5cm 程度の衛星に近付く方向の位相差が検出されたが,南行軌道では目立った位相差は確認で きなかった.

SAR 干渉解析の結果から,霧島山新燃岳の西側を中心とした火山活動に伴う地殻変動が得られている 可能性が示唆されることから,図2-1の 及び の結果を用いて,気象研究所が開発した「火山用地 殻活動解析支援ソフトウェア(福井ほか,2010)(以下,MaGCAP-Vという.)」を用いて,グリッドサー チによる増・減圧源の推定を行った.これらの結果を図2-2に示す.各々の期間において球状圧力源 (Mogi,1958)を仮定すると,新燃岳山頂の西北西約5kmの場所を中心とした深さ約6km,6.2×10^{6m³} の体積増加と,深さ約7km,1.2×10^{7m³}の体積減少で干渉縞を説明することが可能である.これらの結 果は,国土地理院(2012)や防災科学技術研究所(2012)で報告されているように霧島山新燃岳周辺に 展開されている GPS 観測網のデータを使った圧力源推定結果と概ね調和的である.



図 2 - 1 霧島山新燃岳周辺における 2011 年噴火前後の SAR 干渉解析結果 上段:噴火前のペア,中段:噴火前後のペア,下段:噴火後のペアを示し, 左側が北行軌道,右側が南行軌道の結果を示す.気象補正などは行っていない.



図 2 - 2 MaGCAP-V を用いた増・減圧力減の推定結果

図中の丸()は GPS 観測点を示す.

(符号なし:気象庁,地):国土地理院,防):防災科学技術研究所)

(2) 阿蘇山周辺での事例

阿蘇山周辺における長期ペアによる SAR 干渉解析を実施した結果(表2-2),北行軌道の一部ペアに おいて,高岳山頂付近を中心としたごく局所的な場所において,衛星に近づく方向の位相変化が検出さ れた(図2-3).位相変化が確認された近傍の GPS 観測点(砂千里浜,仙酔峡)における基線長では, 大きな変化が認められないことから,大気による位相遅延の可能性も考えられるが,少なくとも同ーシ ーンの同程度の標高について相関するような顕著な位相差は認められていない.また,同一期間を含む 南行軌道のペアについても解析を行ったが,高岳山頂付近において顕著な位相変化は認められなかった (図2-4).

一般的に,球状圧力源(増圧)を仮定した場合,地表では同心円状の隆起が期待されることから,北 行軌道のみで局所的な地殻変動が検知されたことはノイズの可能性が高いと考えられるが,実際の地殻 変動の影響範囲は圧力源の深さや地形効果(地表面の凹凸)の影響も大きい.そこで,仮に北行軌道で 確認された位相差が火山性によるものとみなして MaGCAP-V(福井・他,2010)を用いて球状圧力源(Mogi, 1958)を求めたところ,山頂直下約2~3kmの深さにおいて,約1.0×10⁶m³の体積増加量を想定すれ ば,北行軌道で検知された位相差が説明できることが分かった(図2-5).

Scene Path-Frame	Orbit	Slave-Master (yyyy.mm.dd)	Span (days)	Bperp (m)	Cross-Track (degree)	Incident Angle (degree)	Memo
		2007.07.26-2010.06.18	1058	918	N80E	37.6	Fig. 3-3-1
		2007.09.10-2010.08.03	1058	880	N80E	37.0	Fig. 3-3-2
122 640	٨	2007.09.10-2010.09.18	1104	808	N80E	37.6	Fig. 3-3-3
425-040	A	2007.10.26-2010.09.18	1058	263	N80E	37.6	Fig. 3-3-4
		2008.01.26-2010.09.18	966	-126	N80E	37.6	Fig. 3-3-5
		2007.10.26-2010.12.19	1150	767	N80E	37.6	Fig. 3-3-6
		2007.01.07-2010.04.17	1196	343	N80W	37.2	Fig. 3-4-1
73-2960	D	2008.04.11-2011.03.05	1058	948	N80W	37.1	Fig. 3-4-2
		2008.04.11-2010.12.03	966	267	N80W	37.1	Fig. 3-4-3
	D	2008.04.11-2011.04.20	1104	1435	N80W	37.1	Fig. 3-4-4
		2008.05.27-2011.03.05	1012	534	N80W	37.1	Fig. 3-4-5
		2008.05.27-2011.04.20	1058	1021	N80W	37.1	Fig. 3-4-6

表 2 - 2 本報告で使用した SAR 干渉解析ペア



図 2 - 3 阿蘇山周辺における SAR 干渉解析結果(北行軌道) 図中の丸()は GPS 観測点を示す.

(符号なし:気象庁,地):国土地理院,防):防災科学技術研究所)



図 2 - 4 阿蘇山周辺における SAR 干渉解析結果(南行軌道) 図中の丸()は GPS 観測点を示す.

(符号なし:気象庁,地):国土地理院,防):防災科学技術研究所)



図 2 - 5 球状圧力源を仮定した SAR 干渉結果による圧力源推定結果 図中の丸()は GPS 観測点を示す。 (符号なし:気象庁,地):国土地理院,防):防災科学技術研究所)

3.解析手法の検討

気象庁では,SAR 干渉解析を用いた火山活動における地殻変動監視の高度化・高精度化を目指し,干 渉 SAR 時系列解析及び気象庁非静力学モデルを用いた対流圏遅延補正手法導入の取組を実施した.以下, 解析手法の概要と適用事例を報告する. (1)干涉 SAR 時系列解析

近年,多量のSARデータを使用することにより,干渉性の低下,DEM 誤差及び対流圏・電離圏遅延な どに起因するノイズの影響を低減する,干渉SAR 時系列解析という手法が開発され,多用されるように なってきている(たとえば,福島・Hooper,2011).今回,火山活動における地殻変動監視の高度化に 向けて,ALOS 運用中に蓄積された複数のPALSARデータを用いて干渉SAR 時系列解析を実施し,火山活 動に伴う地殻変動の検出を試みた.解析ソフトはStaMPS(Hooper et al.,2004,2007)で,解析手法 はPSI(Persistent Scatter Interferometry)で実施した.PSIは,解析期間において散乱特性が変化 しない干渉度の高い点(PS点)のみに着目し,PS点における時系列的な変動の推定を行う.PS点とな る得る地表の物体は主に人口建造物や岩であり,それらが密に分布する都市部や植生及び積雪のない山 肌で良好な結果が得られやすいという特徴がある.StaMPSの解析処理では,PSIと共に,全体的に干渉 度が高い短基線長の干渉画像を多数作成して時系列処理を行うSBA& Small Baseline Subset Algorithm) を併用することも可能であるが,本章での解析結果はPSIで処理したものである.解析は,全国の複数 の火山で実施し,十勝岳・吾妻山・伊豆大島・三宅島・薩摩硫黄島にて地殻変動と思われる衛星視線方 向の変化を確認することができた.以下に使用したデータ及び解析結果について記載する.

(1-1)伊豆大島の事例

1) 解析データ

北行軌道,南行軌道のそれぞれについて,21枚,23枚のデータを用いた(表3-1).用いたデータ はすべて,オフナディア角34.3度の標準モードで撮像されたもので,垂直基線長の大きなもの(Bperp: 約3km以上)を除き,基本的に利用可能な標準モードのデータ全てを用いて解析処理を実施した.

表3-1 干渉 SAR 時系列解析(伊豆大島)に使用したデータ

(a) 北行軌道

< Path: 407 Frame: 680 >

No.	観測日	垂直基線長 (m)
1	2006/9/11	-444
2	2007/6/14	-290
3	2007/7/30	228
4	2007/9/14	349
5	2007/10/30	887
6	2007/12/15	1092
7	2008/1/30	1410
8	2008/3/16	1581
9	2008/5/1	2248
10	2008/9/16	-2497
11	2008/12/17	-2081
12	2009/2/1	-1582
13	2009/6/19	-820
14	2009/8/4	-1278
15	2009/12/20	0
16	2010/2/4	516
17	2010/3/22	892
18	2010/5/7	1019
19	2010/8/7	1362
20	2010/12/23	1824
21	2011/2/7	2376

(b)南行軌道

< Path : 58 Frame : 2920 >

No.	観測日	垂直基線長(m)
1	2006/6/12	-1542
2	2006/7/28	-610
3	2006/9/12	-2548
4	2007/1/28	91
5	2007/9/15	710
6	2008/1/31	1623
7	2008/5/2	2112
8	2008/9/17	-2305
9	2008/11/2	-2025
10	2008/12/18	-1543
11	2009/2/2	-1232
12	2009/3/20	-846
13	2009/5/5	-660
14	2009/8/5	-229
15	2009/9/20	0
16	2009/11/5	51
17	2009/12/21	437
18	2010/3/23	1215
19	2010/5/8	1403
20	2010/8/8	1357
21	2010/11/8	2743
22	2010/12/24	2684
23	2011/2/8	3008

(a) 北行軌道



図 3 - 1 干渉 SAR 時系列解析により求めた伊豆大島の変動時系列

各図の左上に付した番号は,表3-1の番号(No.)と対応している.北行軌道は2006/9/11 を南行軌道は2006/6/12を基準日とし,各図は基準日からの変動量を示しており,アンラッ プ位相から DEM 誤差位相,全画像の大気及び軌道誤差を差し引いた変動量である.



図3-2 干渉 SAR 時系列解析により求めた伊豆大島の平均変動速度 図はアンラップ位相の平均変動速度から DEM 誤差位相,スレーブ画像の大気及び 軌道誤差を差し引いた変動量である.黒色の四角()は,参照点の位置を示す.

2)解析結果

PSIによる伊豆大島の変動時系列を図3-1に,変動時系列から求めた平均変動速度を図3-2に示す. 図3-1及び図3-2では,GPS連続観測点大島1(国土地理院)を参照点とし,参照点から半径100m 以内のPS点の変動量の平均値が0となるように固定し作成している.山頂部三原山付近では,北行軌 道及び南行軌道ともに衛星から遠ざかる方向の地殻変動が顕著に認められた.また,沿岸部付近では, 北行軌道で伊豆大島の西側沿岸部で衛星に近づく方向の地殻変動が,南行軌道で伊豆大島の東側沿岸部 で衛星に近づく方向の地殻変動が認められた.

GPS による観測結果から,伊豆大島では短期的な収縮・膨張を繰り返しながら,全島的な膨張が続い ていることが知られている.また,山頂部三原山付近では局所的な沈降も GPS によって捉えられている (たとえば,気象研究所,2013).今回の干渉 SAR 時系列解析結果から得られた,北行軌道で西側沿岸 部が衛星に近づく方向の地殻変動,南行軌道で東側沿岸部が衛星に近づく方向の地殻変動は,GPS 観測 結果と同様に島全体が膨張していることを示唆している.また,山頂部三原山で見られた衛星から遠ざ かる方向の地殻変動も,GPS による観測結果と調和的である. (1-2) 三宅島の事例

1)解析データ

北行軌道,南行軌道のそれぞれについて,21枚,23枚のデータを用いた(表3-2).用いたデータ はすべて,オフナディア角34.3度の標準モードで撮像されたもので,垂直基線長の大きなもの(Bperp: 約3km以上)を除き,基本的に利用可能な標準モードのデータ全てを用いて解析処理を実施した.

表3-2 干渉 SAR 時系列解析 (三宅島)に使用したデータ

(a) 北行軌道

(b)南行軌道

< Path: 407 Frame: 680 >					
No.	観測日	垂直基線長(m)			
1	2006/9/11	-417			
2	2007/6/14	-290			
3	2007/7/30	228			
4	2007/9/14	344			
5	2007/10/30	877			
6	2007/12/15	1079			
7	2008/1/30	1390			
8	2008/3/16	1551			
9	2008/5/1	2219			
10	2008/9/16	-2455			
11	2008/12/17	-2050			
12	2009/2/1	-1556			
13	2009/6/19	-803			
14	2009/8/4	-1266			
15	2009/12/20	0			
16	2010/2/4	510			
17	2010/3/22	879			
18	2010/5/7	1003			
19	2010/8/7	1345			
20	2010/12/23	1789			
21	2011/2/7	2335			

<	Path	•	58	Frame	•	2920
`	raur	٠	00	IIame		2320

< Path . 56 Flame . 2920 >				
No.	観測日	垂直基線長 (m)		
1	2006/6/12	-1521		
2	2006/7/28	-573		
3	2006/9/12	-2574		
4	2007/1/28	98		
5	2007/7/31	322		
6	2007/9/15	707		
7	2008/5/2	2102		
8	2008/9/17	-2307		
9	2008/11/2	-2024		
10	2008/12/18	-1541		
11	2009/2/2	-1231		
12	2009/3/20	-846		
13	2009/5/5	-659		
14	2009/8/5	-219		
15	2009/9/20	0		
16	2009/11/5	49		
17	2009/12/21	434		
18	2010/3/23	1211		
19	2010/5/8	1400		
20	2010/8/8	1348		
21	2010/11/8	2752		
22	2010/12/24	2682		
23	2011/2/8	3004		

2)解析結果

PSIによる三宅島の変動時系列を図3-3に,変動時系列から求めた平均変動速度を図3-4に示す. 図3-3及び図3-4では,GPS連続観測点 三宅1(国土地理院)を参照点とし,参照点から半径100m 以内のPS点の変動量の平均値が0となるように固定し作成している.三宅島山頂部付近では,北行軌 道及び南行軌道ともに衛星から遠ざかる方向の地殻変動が顕著に認められた.また,沿岸部付近では, 北行軌道で三宅島西側の沿岸部で衛星に近づく方向の地殻変動が認められた.

GPS による観測結果では,三宅島において,山体浅部の収縮を示す地殻変動,島の南北を挟む長距離の基線において山体深部の膨張を示す地殻変動が観測されている(たとえば,気象庁,2013a).今回の 干渉 SAR 時系列解析結果から得られた,北行軌道で西側沿岸部が衛星に近づく方向の地殻変動は,GPS 観測結果と同様に山体深部が膨張していることを示唆している.また,北行軌道・南行軌道で見られた 山頂部付近での衛星から遠ざかる方向の地殻変動は,山体浅部の収縮を示しており,GPS による観測結 果と調和的である.

(a) 北行軌道



衛星進行方向 本nalysis by JMA from ALOS raw data of JAXA / METI レーダ波 照射方向 30cm →

Near

Far

(b)南行軌道



図 3 - 3 干渉 SAR 時系列解析により求めた三宅島の変動時系列

各図の左上に付した番号は,表3-2の番号(No.)と対応している.北行軌道は2006/9/11 を南行軌道は2006/6/12を基準日とし,各図は基準日からの変動量を示しており,アンラッ プ位相から DEM 誤差位相,全画像の大気及び軌道誤差を差し引いた変動量である.



- 図3-4 干渉 SAR 時系列解析により求めた三宅島の平均変動速度 図はアンラップ位相の平均変動速度から DEM 誤差位相,スレーブ画像の大気及び 軌道誤差を差し引いた変動量である.黒色の四角()は,参照点の位置を示す.
- (1-3) + 勝岳の事例
- 1)解析データ

北行軌道,南行軌道のそれぞれについて,11枚,10枚のデータを用いた(表3-3).用いたデータ はすべて,オフナディア角34.3度の標準モードで撮像されたもので,垂直基線長の大きなもの(Bperp: 約3km以上)及び積雪期(11月~5月)の期間を除き,基本的に利用可能な標準モードのデータ全てを 用いて解析処理を実施した.

表3-3	干涉 SAR 時系列解析 (〔十勝岳〕	に使用し	、たデータ
------	----------------	-------	------	-------

(a) 北行軌道

< Path: 397 Frame: 860 >

No.	観測日	垂直基線長 (m)
1	2007/6/28	958
2	2007/8/13	1216
3	2007/9/28	1496
4	2008/6/30	152
5	2008/8/15	-2955
6	2009/7/3	-80
7	2009/8/18	0
8	2009/10/3	591
9	2010/7/6	2343
10	2010/8/21	2644
11	2010/10/6	2925

(b)南行軌道

< Path: 56 Frame: 2740 >

No.	観測日	垂直基線長(m)
1	2006/9/24	-1982
2	2007/8/12	762
3	2007/9/27	1262
4	2008/6/29	-442
5	2008/8/14	-2452
6	2009/8/17	-311
7	2009/10/2	0
8	2010/7/5	1945
9	2010/8/20	2151
10	2010/10/5	2505

(a) シーン全体



図 3-5 干渉 SAR 時系列解析により求めた十勝岳周辺の変動時系列(北行軌道)

各図の左上に付した番号は,表3-3の番号(No.)と対応している.2007/6/28を基準日とし,各図は基準日からの変動量を示しており,アンラップ位相からDEM 誤差位相,全画像の大気・軌道誤差及び平均推定位相平面を差し引いた変動量である.(b)は,(a)の赤枠内の拡大図であり,(b)の領域は図3-7(左)と一致している.

(a) シーン全体





図 3-6 干渉 SAR 時系列解析により求めた十勝岳周辺の変動時系列(南行軌道)

各図の左上に付した番号は,表3-3の番号(No.)と対応している.2006/9/24を基準日とし,各図は基準日からの変動量を示しており,アンラップ位相から DEM 誤差位相,全画像の大気・軌道誤差及び平均推定位相平面を差し引いた変動量である.(b)は,(a)の赤枠内の 拡大図であり,(b)の領域は図3-8(右)と一致している.

TOKACHI_(2007/06/28-2010/10/06)



図3-7 干渉 SAR 時系列解析により求めた十勝岳周辺の平均変動速度(北行軌道) 図はアンラップ位相の平均変動速度から DEM 誤差位相,平均推定位相平面を差し 引いた変動量である.黒色の四角()は,参照点の位置を示す.

TOKACHI_(2006/09/24-2010/10/05)



図 3 - 8 干渉 SAR 時系列解析により求めた十勝岳周辺の平均変動速度(南行軌道) 図はアンラップ位相の平均変動速度から DEM 誤差位相,平均推定位相平面を 差し引いた変動量である.黒色の四角()は,参照点の位置を示す.

2)解析結果

PSIによる十勝岳の変動時系列を図3-5(北行軌道)・図3-6(南行軌道)に,変動時系列から求め た平均変動速度を図3-7(北行軌道)・図3-8(南行軌道)に示す.各図では,GPS連続観測点 望岳 台(気象庁)を参照点とし,参照点から半径100m以内のPS点の変動量の平均値が0となるように固定 し作成している.62-2火口周辺では,南行軌道で衛星に近づく方向の地殻変動が顕著に認められた.ま た,北行軌道でも62-2火口周辺で衛星に近づく方向の変位が確認された.

+勝岳では, GPS 繰り返し観測による火口付近の基線長変化から, 62-2 火口を囲む基線において継続的に 膨張していることが捉えられている(気象庁, 2013b).したがって,本解析結果は, GPS 観測結果とも調和 的であると共に,+勝岳火口周辺の地殻変動の生じている範囲や圧力源を特定する上で有効な資料といえる.

(1-4) 吾妻山の事例

1) 解析データ

北行軌道,南行軌道のそれぞれについて,14枚,9枚のデータを用いた(表3-4).用いたデータは すべて,オフナディア角34.3度の標準モードで撮像されたもので,垂直基線長の大きなもの(Bperp: 約3km以上)及び積雪期(11月~5月)の期間を除き,基本的に利用可能な標準モードのデータ全てを 用いて解析処理を実施した.

表 3-4 干渉 SAR 時系列解析 (吾妻山)に使用したデータ

(a) 北行軌道

(b)南行軌道

< Path: 404 Frame: 740 >

No.	観測日	垂直基線長(m)
1	2006/6/6	-1263
2	2007/6/9	681
3	2007/7/25	969
4	2007/9/9	1239
5	2007/10/25	1695
6	2008/9/11	-2072
7	2008/10/27	-1704
8	2009/6/14	-306
9	2009/7/30	-484
10	2009/9/14	0
11	2009/10/30	465
12	2010/6/17	1956
13	2010/8/2	2201
14	2010/9/17	2175

< Path:58 Frame:2860 >

No.	観測日	垂直基線長(m)
1	2006/6/12	-1373
2	2006/7/28	-529
3	2006/9/12	-2339
4	2007/4/30	195
5	2007/9/15	1052
6	2008/9/17	-2212
7	2009/8/5	0
8	2009/9/20	262
9	2010/8/8	1773

2)解析結果

PSIによる吾妻山の変動時系列を図3-9(北行軌道)・図3-10(南行軌道)に,変動時系列から求め た平均変動速度を図3-11(北行軌道)・図3-12(南行軌道)に示す.各図では,GPS連続観測点幕川 温泉(気象庁)を参照点とし,参照点から半径100m以内のPS点の変動量の平均値が0となるように固 定し作成している.北行軌道及び南行軌道の平均変動速度を確認すると,大穴火口周辺で衛星に近づく 方向の地殻変動が確認できる.しかし,図3-9・図3-10の変動時系列からは,大穴火口周辺での地殻 変動が一定ではなく,画像毎に変化があることが分かる.これは,短期的な膨張・収縮を繰り返しなが ら,衛星に近づく方向の地殻変動となっていると考えられる.

吾妻山では,GPS 観測結果から,大穴火口に囲む基線において膨張・収縮を繰り返していることが捉 えられている(吉田・他,2012).したがって,本解析結果は,GPS 観測結果とも調和的であると共に, 大穴火口周辺の地殻変動の領域及び圧力源を把握する上で有効な資料といえる.

80

(a) シーン全体



図 3-9 干渉 SAR 時系列解析により求めた吾妻山周辺の変動時系列(北行軌道)

各図の左上に付した番号は,表3-4の番号(No.)と対応している.2006/6/6を基準日とし,各図は基準日からの変動量を示しており,アンラップ位相から DEM 誤差位相,全画像の大気・軌道誤差及び平均推定位相平面を差し引いた変動量である.(b)は,(a)の赤枠内の拡大図であり,(b)の領域は図3-11(左)と一致している.

```
(a) シーン全体
```





図 3-10 干渉 SAR 時系列解析により求めた吾妻山周辺の変動時系列(南行軌道)

各図の左上に付した番号は,表3-4の番号(No.)と対応している.2006/6/12を基準日とし,各図は基準日からの変動量を示しており,アンラップ位相から DEM 誤差位相,全画像の 大気・軌道誤差及び平均推定位相平面を差し引いた変動量である.(b)は,(a)の赤枠内の 拡大図であり,(b)の領域は図3-12(右)と一致している.

AZUMAYAMA_(2006/06/12-2010/08/08)



図 3-11 干渉 SAR 時系列解析により求めた吾妻山周辺の平均変動速度(北行軌道) 図はアンラップ位相の平均変動速度から DEM 誤差位相,スレーブ画像の大気及び 軌道誤差を差し引いた変動量である.黒色の四角()は,参照点の位置を示す.

AZUMAYAMA_(2006/06/12-2010/08/08)



図 3 -12 干渉 SAR 時系列解析により求めた吾妻山周辺の平均変動速度(南行軌道) 図はアンラップ位相の平均変動速度から DEM 誤差位相,スレーブ画像の大気及び 軌道誤差を差し引いた変動量である.

1)解析データ

北行軌道,南行軌道のそれぞれについて,27枚,26枚のデータを用いた(表3-5).用いたデータ はすべて ,オフナディア角 34.3 度の標準モードで撮像されたもので ,垂直基線長の大きなもの(Bperp: 約 3km 以上)を除き,基本的に利用可能な標準モードのデータ全てを用いて解析処理を実施した.

表3-5 干渉 SAR 時系列解析 (薩摩硫黄島)に使用したデータ

(a) 北行軌道

< Path: 425 Frame: 600 >				
No.	観測日	垂直基線長(m)		
1	2006/5/26	-2664		
2	2006/8/26	296		
3	2006/10/11	-596		
4	2006/11/26	193		
5	2007/1/11	-2257		
6	2007/7/14	213		
7	2007/8/29	525		
8	2007/10/14	830		
9	2008/1/14	1243		
10	2008/2/29	1775		
11	2008/5/31	1865		
12	2008/7/16	-701		
13	2008/8/31	-2812		
14	2008/10/16	-1887		
15	2009/1/16	-1296		
16	2009/3/3	-1171		
17	2009/7/19	-754		
18	2009/9/3	-296		
19	2009/10/19	0		
20	2010/1/19	368		
21	2010/3/6	878		
22	2010/4/21	992		
23	2010/6/6	1115		
24	2010/7/22	1251		
25	2010/9/6	1367		
26	2011/1/22	2085		
27	2011/3/9	2645		

(b)南行軌道 < Path : 74 Frame : 3000 >

No. 観測日 垂直基線長 (m) 1 2007/3/11 -449 2 2007/4/26 990 3 2007/6/11 138 4 2007/7/27 68 5 2007/9/11 157 6 2007/10/27 357 7 2007/12/12 734 8 2008/1/27 1195 9 2008/4/28 1403 10 2008/7/29 -390 11 2008/9/13 -2477 12 2008/12/14 -11978 13 2009/3/16 -805 15 2009/8/1 -418 16 2009/8/1 -418 16 2009/12/17 0 19 2010/2/1 277 20 2010/5/4 1058 21 2010/6/19 991 22 2010/8/1 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26						
1 2007/3/11 -449 2 2007/4/26 990 3 2007/6/11 138 4 2007/9/11 157 6 2007/1/27 68 5 2007/9/11 157 6 2007/1/27 357 7 2007/1/27 357 7 2007/1/27 357 7 2007/1/27 357 7 2007/1/27 357 7 2007/1/27 1195 9 2008/1/27 1195 9 2008/1/28 1403 10 2008/7/29 -390 11 2008/9/13 -2477 12 2008/12/14 -1978 13 2009/3/16 -418 14 2009/6/16 -805 15 2009/8/1 -418 16 2009/12/17 0 19 2010/2/1 2777 20 2010/5/4 1058 21 2010/6	No.	観測日	垂直基線長 (m)			
2 2007/4/26 990 3 2007/6/11 186 4 2007/7/27 68 5 2007/9/11 157 6 2007/10/27 357 7 2007/12/12 734 8 2008/1/27 1195 9 2008/4/28 1403 10 2008/7/29 -390 11 2008/9/13 -2477 12 2008/12/14 -1978 13 2009/3/16 -1106 14 2009/6/16 -805 15 2009/8/1 -418 16 2009/12/17 0 19 2010/2/1 2777 20 2010/5/4 1058 21 2010/6/19 991 22 2010/8/4 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598 <td>1</td> <td>2007/3/11</td> <td colspan="2">-449</td>	1	2007/3/11	-449			
3 2007/6/11 186 4 2007/7/27 68 5 2007/9/11 157 6 2007/10/27 357 7 2007/12/12 734 8 2008/1/27 1195 9 2008/4/28 1403 10 2008/7/29 -390 11 2008/9/13 -2477 12 2008/12/14 -1978 13 2009/3/16 -1106 14 2009/6/16 -805 15 2009/8/1 -418 16 2009/9/16 -257 17 2009/12/17 0 18 2009/12/17 0 19 2010/2/1 277 20 2010/5/4 1058 21 2010/6/19 991 22 2010/8/4 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26	2	2007/4/26	6 990			
4 2007/7/27 68 5 2007/9/11 157 6 2007/10/27 357 7 2007/12/12 734 8 2008/1/27 1195 9 2008/4/28 1403 10 2008/7/29 -390 11 2008/9/13 -2477 12 2008/12/14 -11978 13 2009/3/16 -1106 14 2009/6/16 -805 15 2009/8/1 -418 16 2009/9/16 -257 17 2009/12/17 0 18 2009/12/17 0 19 2010/2/1 277 20 2010/5/4 1058 21 2010/6/19 991 22 2010/8/4 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	3	2007/6/11	186			
5 2007/9/11 157 6 2007/10/27 357 7 2007/12/12 734 8 2008/1/27 1195 9 2008/4/28 1403 10 2008/7/29 -390 11 2008/9/13 -2477 12 2008/12/14 -11978 13 2009/3/16 -1106 14 2009/6/16 -805 15 2009/8/1 -418 16 2009/9/16 -257 17 2009/12/17 0 19 2010/2/1 277 20 2010/5/4 1058 21 2010/6/19 991 22 2010/8/4 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	4	2007/7/27	68			
6 2007/10/27 357 7 2007/12/12 734 8 2008/1/27 1195 9 2008/4/28 1403 10 2008/7/29 -390 11 2008/9/13 -2477 12 2008/12/14 -11978 13 2009/3/16 -1106 14 2009/6/16 -805 15 2009/8/1 -418 16 2009/9/16 -257 17 2009/12/17 0 19 2010/2/1 277 20 2010/5/4 1058 21 2010/6/19 991 22 2010/8/4 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	5	2007/9/11	157			
7 2007/12/12 734 8 2008/1/27 1195 9 2008/4/28 1403 10 2008/7/29 -390 11 2008/9/13 -2477 12 2008/12/14 -11978 13 2009/3/16 -1106 14 2009/6/16 -805 15 2009/8/1 -418 16 2009/9/16 -257 17 2009/12/17 0 19 2010/2/1 277 20 2010/5/4 1058 21 2010/6/19 991 22 2010/8/4 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	6	2007/10/27	357			
8 2008/1/27 1195 9 2008/4/28 1403 10 2008/7/29 -390 11 2008/9/13 -2477 12 2008/12/14 -1978 13 2009/3/16 -1106 14 2009/6/16 -805 15 2009/8/1 -418 16 2009/9/16 -257 17 2009/11/1 -356 18 2009/12/17 0 19 2010/2/1 277 20 2010/5/4 1058 21 2010/6/19 991 22 2010/8/4 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	7	2007/12/12	734			
9 2008/4/28 1403 10 2008/7/29 -390 11 2008/9/13 -2477 12 2008/12/14 -1978 13 2009/3/16 -1106 14 2009/6/16 -805 15 2009/8/1 -418 16 2009/9/16 -257 17 2009/11/1 -356 18 2009/12/17 0 19 2010/2/1 277 20 2010/5/4 1058 21 2010/6/19 991 22 2010/8/4 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	8	2008/1/27	1195			
10 2008/7/29 -390 11 2008/9/13 -2477 12 2008/12/14 -1978 13 2009/3/16 -1106 14 2009/6/16 -805 15 2009/8/1 -418 16 2009/9/16 -257 17 2009/11/1 -356 18 2009/12/17 0 19 2010/2/1 277 20 2010/5/4 1058 21 2010/8/19 991 22 2010/8/14 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	9	2008/4/28	1403			
11 2008/9/13 -2477 12 2008/12/14 -1978 13 2009/3/16 -1106 14 2009/6/16 -805 15 2009/8/1 -418 16 2009/9/16 -257 17 2009/11/1 -356 18 2009/12/17 0 19 2010/2/1 277 20 2010/5/4 1058 21 2010/6/19 991 22 2010/8/4 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	10	2008/7/29	-390			
12 2008/12/14 1978 13 2009/3/16 1106 14 2009/6/16 805 15 2009/8/1 418 16 2009/9/16 257 17 2009/11/1 356 18 2009/12/17 0 19 2010/2/1 277 20 2010/5/4 1058 21 2010/6/19 991 22 2010/8/4 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	11	2008/9/13	-2477			
13 2009/3/16 -1106 14 2009/6/16 -805 15 2009/8/1 -418 16 2009/9/16 -257 17 2009/11/1 -356 18 2009/12/17 0 19 2010/2/1 277 20 2010/5/4 1058 21 2010/6/19 991 22 2010/8/4 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	12	2008/12/14	-1978			
14 2009/6/16 -805 15 2009/8/1 -418 16 2009/9/16 -257 17 2009/11/1 -356 18 2009/12/17 0 19 2010/2/1 277 20 2010/5/4 1058 21 2010/6/19 991 22 2010/8/4 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	13	2009/3/16	-1106			
15 2009/8/1 -418 16 2009/9/16 -257 17 2009/11/1 -356 18 2009/12/17 0 19 2010/2/1 277 20 2010/5/4 1058 21 2010/6/19 991 22 2010/8/4 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	14	2009/6/16	-805			
16 2009/9/16 -257 17 2009/11/1 -356 18 2009/12/17 0 19 2010/2/1 277 20 2010/5/4 1058 21 2010/6/19 991 22 2010/8/4 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	15	2009/8/1 -418				
17 2009/11/1 -356 18 2009/12/17 0 19 2010/2/1 277 20 2010/5/4 1058 21 2010/6/19 991 22 2010/8/4 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	16	2009/9/16	-257			
18 2009/12/17 0 19 2010/2/1 277 20 2010/5/4 1058 21 2010/6/19 991 22 2010/8/4 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	17	2009/11/1	-356			
19 2010/2/1 277 20 2010/5/4 1058 21 2010/6/19 991 22 2010/8/4 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	18	2009/12/17	0			
20 2010/5/4 1058 21 2010/6/19 991 22 2010/8/4 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	19	2010/2/1	277			
21 2010/6/19 991 22 2010/8/4 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	20	2010/5/4	1058			
22 2010/8/4 1044 23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	21	2010/6/19	991			
23 2010/9/19 1523 24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	22	2010/8/4	1044			
24 2010/11/4 2038 25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	23	2010/9/19	2010/9/19 1523			
25 2010/12/20 2068 26 2011/3/22 2598	24	2010/11/4	2038			
26 2011/3/22 2598	25	2010/12/20	2068			
	26	2011/3/22	2 2598			

2)解析結果

PSI による薩摩硫黄島の変動時系列を図3-13 に、変動時系列から求めた平均変動速度を図3-14 に示 す.図3-13及び図3-14では,GPS連続観測点 鹿児島三島(国土地理院)を参照点とし,参照点から 半径 100m 以内の PS 点の変動量の平均値が 0 となるように固定し作成している.北行軌道では,硫黄岳 火口東側において衛星から遠ざかる方向の地殻変動,硫黄岳火口西側において衛星に近づく方向の地殻 変動が認められる.南行軌道では,硫黄岳火口周辺において衛星から遠ざかる方向の地殻変動が見受け られる.また,稲村岳周辺では PS 点が得られていないことが分かる.これは,稲村岳は,硫黄岳に比 ベ木々に覆われており,時期によって散乱特性が変化することが原因と考えられる(写真3-1).

硫黄岳山頂火口縁での GPS 測量の結果から,2006 年~2013 年の間に火口の収縮が進行しているとの 報告がある(産業技術総合研究所・京都大学防災研究所,2013).南行軌道での硫黄岳火口周辺におい て衛星から遠ざかる方向の変位は,火口の収縮傾向と一致している.また,北行軌道での硫黄岳火口西 側での衛星に近づく変化は,水平成分の東から西への変動が大きいと考えれば,火口の収縮傾向と結び 付けることができる.今後,2.5次元解析(Fujiwara et al., 2000)等の手法を適用し,準東西成分・ 準上下成分に衛星視線方向の変化量を分けることで,地殻変動のより詳細な傾向を明らかにすることが 期待できる.

	S.	s E		s Elo	
a de la composición de	s i de	3. E	a de la composición de	s 🚷	
	s. 🐼	a E	a de la como	3. E	
a je	3. E	a de la compañía de la	s, A	s 🔇	
	[@]	³³		25	
26		Analysi 衛星進行方向	s by JMA from AL	 .OS raw data of J.	AXA / METI

レーダ波

照射方向

Near

30cm

Far

(b)南行軌道



図 3-13 干渉 SAR 時系列解析により求めた薩摩硫黄島の変動時系列

各図の左上に付した番号は,表3-5の番号(No.)と対応している.北行軌道は2006/5/26 を南行軌道は2007/3/11を基準日とし,各図は基準日からの変動量を示しており,アンラッ プ位相から DEM 誤差位相,全画像の大気及び軌道誤差を差し引いた変動量である.



図 3-14 干渉 SAR 時系列解析により求めた薩摩硫黄島の平均変動速度 図はアンラップ位相の平均変動速度から DEM 誤差位相,スレーブ画像の大気及び 軌道誤差を差し引いた変動量である.黒色の四角()は,参照点の位置を示す.



写真3-1 薩摩硫黄島(日本活火山総覧第4版(気象庁編,2013)より抜粋) 奥の噴気の出ている山が硫黄岳,手前の緑の山が稲村岳

(2)対流圏遅延補正

合成開口レーダを使った差分干渉解析は,火山活動等に伴う地殻変動を面的に把握するのに有効な手 段であるが,衛星から地表に向かって照射されるマイクロ波は,大気の屈折率の影響を受けるため,電 波伝搬遅延が生じる.屈折率の変化は大気中の水蒸気の影響が大きいが,その時空間的分布が不均質な ため,場所によって電波伝搬遅延量が異なり,結果的に SAR 干渉解析で得られる位相差に誤差として重 畳することになる.これらの誤差要因を除去するためには,何らかの方法で,撮像日における大気遅延 量を推定し,差分干渉画像に適用する必要があり,全球客観解析データ(GANAL)の解析値を用いた大 気遅延補正の推定(島田,1999)や,メソ数値予報モデル(MSM)の解析値を用いた大気遅延による誤 差の軽減(Hobiger et al., 2008 や小澤・清水,2010 など)が提案され,有効であることが示されて いる.本報告では,GPS 可降水量等の種々の観測データを非静力学メソ4次元変分法によりデータ同化 して作成されたメソ解析値(以下,MANAL)を初期値として,気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)を用い て,5km 1kmとダウンスケーリング(以下,5km-NHM,1km-NHM)して得られた気象要素(温位,気圧, 混合比(水蒸気))から屈折率を計算し,対流圏から下部成層圏の視線方向の遅延量を推定,得られた 遅延量を SAR 干渉解析結果の位相差から補正することにより誤差の軽減を試みた MANAL 5km-NHM 1km-NHM へのダウンスケーリング計算に用いた設定は,表3-6及び図3-15のとおりで,観測ターゲッ トと衛星の視線方向における大気遅延量を次の手順で計算した.

- A) 観測ターゲットから天頂方向の各モデル面高度を計算
- B) 各モデル面高度に対応する視線方向の緯度経度(座標)を計算
- C) A)及びB)で求めた各ポイントにおいて撮像時間の前後1時間の1km-NHM予報値を時空間内挿 し屈折率を計算
- D) C) で求めた屈折率とそのポイントにおけるモデル層厚から大気遅延量を計算
- E) D)で求めた大気遅延量を視線方向に積算

なお,SAR 干渉画像で得られる位相差は,2時期における視線方向の変化であるため,大気位相遅延 量差の計算については,島田(1999)と同様に,地表面平行大気を仮定し,屈折率については,GPS 可 降水量で使用されている大谷・内藤(1998)の計算式を用いて算出した.これらの手法を適用した事例 について以下に示す.

·	MSMモデル面予報値	JMA-NHMによる高分 解能モデル面予報値
水平格子間隔	5 k m	1 k m
鉛直層数	50層 (高度約22kmまで)	50層 (高度約22kmまで)
タイムステップ	24秒	8秒
予報間隔	1時間(毎正時)	1時間(毎正時)
予報領域	$3600\mathrm{k}\mathrm{m}{\times}2900\mathrm{k}\mathrm{m}$	約200km × 200km
モデル地形	GTOPO30を平滑化 (約 ^{7.5} km相当)	GTOPO30を平滑化 (約7.5km相当)

表 3-6 数値予報 GPV 計算の設定



図 3 - 15 数値予報 GPV 計算の概略図

(2-1)霧島山新燃岳の事例

2011 年霧島山新燃岳噴火前後の解析で用いた撮像日における気象要素を計算し,霧島山新燃岳山頂付近の断面図(A-B)を図3-16に示す.これによれば,撮像日によって水蒸気量が異なっており,また, その分布している高度も日によって実に様々であることが分かる.図3-15の概略図で示したように,



図 3-16 霧島山新燃岳周辺における各撮像日の大気状態(上段:北行軌道,下段:南行軌道) 上段から順に,高分解能モデル面(1km-NHM)の風,1時間降水量,気圧面,A-B断面図 における鉛直22kmまでの混合比(以上,予報値),及び解析雨量を示す.



図 3 -17 霧島山新燃岳周辺における大気遅延量分布 各ペアの番号は図 3-1 と同じ.凡例のマイナスは位相遅れ, プラスは位相進みを示す.



図3-18 大気遅延補正後の霧島山新燃岳周辺の干渉画像 図3-1で示した干渉画像をアンラップ処理した後に,図4-3で示した大気遅延量を 補正し,再度ラップし表現した.なお,強度画像が表示されている部分は干渉性が 低いもしくは非干渉部分を示す.

SAR 衛星から発射されたマイクロ波は,大気中を透過し地表まで到達し,ターゲットで反射した成分が 衛星に戻ってくることで画像データとして取得される.このため,一般的に大気中を透過する際に,よ リ水蒸気量が多い,または層厚が長い場所を透過する場合には大きな遅延量が生じると予想される.さ らに,図3-16の結果を用いて図2-1で示した各干渉ペアにおける大気遅延量を計算した(図3-17). その結果,新燃岳周辺において,最大で約2.5cmの位相遅れが推定されたほか,1ペアの干渉画像中で も最大約1.2cmの遅延量差があることが分かり,時間的にも空間的にも非常に複雑かつ不均質な大気遅 延量が存在していることが明らかになった.

次に図3-16と図3-17の結果を用いて,図2-1の各干渉画像について大気遅延量補正を行った結果 を図3-18に示す.その結果,噴火後の両軌道及び噴火前や噴火前後の南行軌道において,大気遅延量 による補正の効果があることが分かる.また,噴火前や噴火前後の北行軌道,噴火後の南行軌道では, 大気による位相遅れが少ないため補正前後において,ほとんど差がないことが分かる.補正の効果が顕 著であった図3-18の と については,本事例中,最も水蒸気量の多かった図3-16の が関係して いることから,過剰な大気補正になっている可能性もある.原因の一つとして,衛星とターゲット間の マイクロ波の軌跡推定の際にスネルの法則を考慮していないことや大気遅延量計算の際に,粗い標高デ ータ(GTOPO30)を用いていることなどが考えられる.このように,今後の課題もいくつか挙げられる ものの,JMA-NHM モデルを用いた大気遅延量計算による電波伝搬遅延を軽減する手法は,非常に有効で あることが分かった.

(2-2) + 勝岳の事例

北海道の十勝岳では,2006年9月から2008年6月にかけて62-2火口付近浅部の膨張を示すと考えられる地殻変動が札幌管区気象台及び北海道立地質研究所による繰り返しGPS観測で検出された.一方,周辺の山麓や山腹間の基線での変化は認められていないことから,62-2火口周辺の局所的な地殻変動であると報告されている(気象庁,2010).

繰り返し GPS で変化が検出された期間とほぼ同じ 2006 年 9 月 24 日と 2008 年 8 月 14 日に ALOS/ PALSAR で撮像されたデータを用いて,SAR 干渉解析を行い,面的な地殻変動を検出した(図3-20 左). これによれば,確かに 62-2 火口を中心とした衛星に近づく方向の地殻変動が検出されているが,その 位相変化の範囲は十勝岳の山麓にまで及んでおり,GPS 観測結果と整合していない.このため,JMA-NHM による大気遅延量を推定し,ノイズの軽減を試みたので報告する.各撮像日の大気状態を図3-19 に示 す.これによれば,2006 年 9 月の方が 2008 年 8 月よりも混合比が高く,水蒸気量が多いことを示して いるが,その層厚は前者が鉛直 6km 程度であるのに対して,後者の方が上空 9km 程度まで,わずかなが ら湿っていることが分かった.一方で,撮像時間における1時間解析雨量をみると,どちらも十勝岳山 頂付近では解析されていないが,後者では山麓周辺において解析雨量が確認されている.

大気遅延量補正前の干渉結果と図3-19 の結果を用いた大気遅延量分布及び補正結果について図3-20 に示す.その結果,本ペアにおける大気遅延量は非常に大きく,十勝岳周辺では2.5cm から1.3cm 程度の位相遅れが生じていることが分かった.また,これらの補正量を元の干渉画像に適用した結果,山腹から山頂の標高に相関して重畳していた衛星に近づく方向の位相差がきれいに除去され,62-2 火口 周辺の局所的な地殻変動が顕著になり,繰り返し GPS 観測や連続 GPS 観測の結果と整合的な地殻変動が得られた.







図 3-20 十勝岳 62-2 火口周辺の SAR 干渉解析結果

左:大気遅延量補正前の干渉画像,中:大気遅延量分布(マイナスは位相遅れを示す), 右:大気遅延量補正後の干渉画像.

4. RADARSAT-2 を用いた SAR 解析

ALOS の運用が 2011 年 5 月で終了し, L バンドの SAR センサである PALSAR を用いて火山活動の監視が できなくなった.そのため, ALOS が運用されていない期間中の火山活動を把握する目的で, C バンドの SAR センサを搭載した RADARSAT-2 の画像を取得し,解析を実施した.解析した RADARSAT-2 画像は,霧 島山新燃岳と八甲田山である.解析した結果,植生の多い日本の火山の地殻変動監視において, L バン ド SAR のデータは, C バンドのものと比較して干渉性の高い領域が大きく,優位であることを確認した. 以下,2事例の解析結果について記載する.

(1)霧島山新燃岳

霧島山新燃岳は, ALOS 運用停止後も 2011 年 9 月まで噴火を繰り返しており,活発な活動が続いたことから, RADARSAT-2 による撮像を実施した.取得した画像は, 2011 年 6 月 8 日, 2012 年 2 月 3 日,



図 4 - 1 Radarsat-2 から得られた霧島山新燃岳周辺でのコヒーレンス画像 (左:解析期間 [2011/06/08-2012/02/03],右:解析期間 [2012/02/03-2012/03/03])



図 4 - 2 PALSAR から得られた霧島山新燃岳周辺での干渉画像およびコヒーレンス画像 (左:干渉画像[2010/11/20-2011/02/20],右:コヒーレンス画像[2010/11/20-2011/02/20]) 2012 年 3 月 22 日の計 3 枚である.解析は,解析期間 (2011/06/08-2012/02/03)と解析期間 (2012/02/03-2012/03/22)の 2 期間で実施した.それぞれの期間のコヒーレンス画像を図 4 - 1 に示す.

L バンドである PALSAR のコヒーレンス画像(解析期間:2010/11/20-2011/02/20)と比べて RASARSAT-2 の画像ではコヒーレンス(干渉性)のよい領域が少ないことが分かる(図4-1・図4-2).これは, RADARSAT-2 が照射する電波はCバンドであり,Lバンドである PALSAR に比べて短波長であるため,木 の生い茂っている植生の多い場所等では干渉が得にくいことを示唆しており,火山活動に伴う地殻変動 を把握する上でLバンドの優位性を示すものである.

取得した RADARSAT-2 の SAR データでは, コヒーレンスの高い範囲が画像全体ではなく, 一部に限定 されたため,図4-1の赤丸で示した新燃岳周辺の範囲に絞って比較を実施した.期間 (2011/06/08-2012/02/03)と期間 (2012/02/03 - 2012/03/22)の差分干渉画像を図4-3に示す.新燃岳山体にお いて,期間 では衛星と地面の距離が遠ざかる収縮センスの位相変化が見られ,期間 では衛星と地面 の距離が縮む膨張センスの位相変化が見られた.この結果は,深部圧力源とは別に,新燃岳山体付近に 浅部圧力源が存在することを示唆している.大気による位相遅延等の誤差による影響も考えられるが, GPS 観測による基線解析結果から新燃岳山体付近に浅部圧力源が存在することが,気象研究所(2013b) で述べられており,解析結果は妥当なものと考えられる.

> 2011/06/08-2012/02/03 (Bperp: 277m) 新燃岳付近: 数 cm の 伸長(収縮) レーダ波 高千穂河原 照射方向 Analysis by from ALOS raw data of JAXA / METI 衛星進行方向 2012/02/03-2012/03/22 (Bperp: 80m) G(東大地震研 新燃岳付近: 数 cm の短縮(膨張) -ダ波 照射方向 from ALOS raw data of JAXA / METI Analysis by 衛星進行方向 近づく (Near) 遠ざかる(Far) 0 +2.8cm -2.8cm

図 4 - 3 RADARSAT-2 から得られた霧島山新燃岳周辺での干渉画像(アンラップ処理実施) (上:解析期間 [2011/06/08-2012/02/03],下:解析期間 [2012/02/03-2012/03/03]) (2)八甲田山

八甲田山で 2013 年 2 月頃より国土地理院の GEONET 基線解析結果から膨張センスの地殻変動がみられた.八甲田山は常時観測の 47 火山には入っていないため,火山近辺に稠密な常時観測網が整備されておらず,どの程度の範囲で地殻変動が生じているか,分からない状況であった.そのため,八甲田山周辺の地殻変動の面的な状況把握のため,RADARSAT-2 による撮像を実施した.

取得した画像は, 2012 年 8 月 21 日, 2013 年 9 月 9 日の計 2 枚である.干渉 SAR 解析を行ったが, 八甲田山周辺において干渉性のある解析結果は得られず,十分な地殻変動の有無を判断することはでき なかった(図4-4).八甲田山は植生が多く,葉などの表面で反射したため,干渉性が失われたものと 考えられる.また,強度画像の差分を取り,地形の変化抽出を行ったが,八甲田山周辺で大きな地形変 化は見られなかった(図4-5).



図 4 - 4 RADARSAT-2 から得られた八甲田山周辺での干渉画像およびコヒーレンス画像 (上:干渉画像[2012/08/21-2013/09/09],下:コヒーレンス画像[2012/08/21-2013/09/09])



図 4 - 5 RADARSAT-2 から得られた強度画像の差分画像(八甲田山周辺): 2012/08/21-2013/09/09 2013/09/09 の強度画像を赤色, 2013/08/21 の強度画像を青色・緑色とし, RGB 合成処理 を実施(変化した箇所が赤色で表示される.)

5.まとめ

本課題において,火山活動評価への利用を検討するため,SAR 干渉解析を実施した.第2章では平成 23年度に火山活動評価に活用された2事例について紹介した.共同研究の開始当初,日本全国の主な活 火山について,網羅的にSAR 干渉解析を実施し,地殻変動の監視・火山活動評価に活用することを予定 していた.しかし,2011年5月をもってALOSが運用を停止したことから,火山活動を監視・評価する ための解析手法を検討することに変更した.

干渉 SAR 時系列解析では,伊豆大島・三宅島・十勝岳・吾妻山・薩摩硫黄島において地殻変動の動き を時空間的に捉え,GPS の観測結果とも調和的であることを確認した.例えば,薩摩硫黄島では,気象 庁で監視に使用している GPS 連続観測点が2点であり,硫黄岳山頂部の地殻変動をモニタリングするこ とができていない.干渉 SAR 時系列解析を用いることで,これまでの2ペアの SAR 干渉画像に見られて きたノイズ等の影響を軽減し,GPS 連続観測点の空白域を時空間的に補完できることを示している.ま た.気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)を用いた対流圏遅延補正手法を開発し,霧島山新燃岳・十勝岳 に本手法を適用し,その有効性を検証した.検証した結果,いくつかの課題はあるものの干渉 SAR での ボトルネックである大気中の水蒸気による位相遅延を補正し,SAR 干渉解析をより高精度に実施できる ことを確認した.

RADARSAT-2 を用いた SAR 解析では、L バンド SAR に比べて C バンド SAR である RADARSAT-2 は短波長 であるため、木の生い茂っている植生の多い場所等では干渉が得にくいことを確認した.これは、日本 のように植生が多い火山地域での地殻変動を把握する上で L バンドの優位性を示しているといえる.

次期 ALOS(ALOS-2)で定常的にデータが得られるようになれば,本取組で得た知見・技術を生かし, 火山地域における地殻変動の監視に活用し,火山活動評価に生かしていきたい.

謝辞

本解析で用いた, ALOS/PALSAR Level 1.0 データについては火山噴火予知連絡会が中心となって進め

ている防災利用実証実験(火山 WG)に基づいて,JAXA にて観測・提供されたものである.また,一部 の ALOS/PALSAR Level 1.0 データは,PIXEL (PALSAR Interferometry Consortium to Study our Evolving Land surface)で共有しているものであり,宇宙航空開発研究機構(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.ALOS/PALSAR に関する原初データの所有権は経 済産業省及び JAXA にある.また RADARSAT-2 データの所有権は MDA が有するものであり,(株)イメー ジワンから配布されたものである.なお解析については、JAXA の島田政信氏により開発された SIGMA-SAR, GAMMA REMOTE SENSING 社の GAMMA-SAR,StaMPS (Hooper et al., 2004, 2007)を使用させて頂いた. 記してお礼申し上げる.また,今回の霧島新燃岳噴火に際しては,緊急観測及び FTP サーバを使った観 測データの即時提供など JAXA の多大な御協力を頂いた.関係者の皆様に深く感謝する.

参考文献

- 防災科学技術研究所 (2012): 2011 年霧島山 (新燃岳)噴火に対応した地殻変動,火山噴火予知連絡会 会報,108,221-226.
- Fujiwara S., T. Nishimura, M. Murakami, H. Nakagawa, M. Tobita, and P. A. Rosen (2000): 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, GeophysicaL Research Letter, 27, 2049-2052.
- 福井敬一・安藤 忍・高木朗充・鬼澤真也・新堀敏基・山里 平・大須賀弘 (2010):火山用地殻変動解 析支援ソフトウェアの開発 (3) - EDM, InSAR データ解析機能,簡易版動的解析機能の組み込み, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会予稿集,SSS014-P02.
- 福島洋・Hooper Andrew (2011): PS 干渉解析による 2004 年新潟県中越地震後の地殻変動,測地学会誌, 57, 195-214.
- 橋本学・古屋正人・小澤拓・福島洋(2013): 我が国の SAR (合成開口レーダー)による地殻変動研究の展望,測地学会誌,59,119-132.
- Hobiger, T., R. Ichikawa, T. Takasu, Y. Koyama, and T. Kondo (2008): Ray-traced troposphere slant delays for precise point positioning, Earth Planets Space, 60, e1-e4.
- Hooper, A., H. Zebker, P. Segall and B.Kampes (2004) : A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, Geophys. Res. Lett., 31, L23611, doi:10.1029/2004GL021737.
- Hooper, A., P. Segall and H. Zebker (2007) : Persistent scatterer InSAR for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galpagos, J. Geophys. Res., 112, B07407, doi:10.1029/2006JB004763.
- 気象庁 (2010): 十勝岳 GPS 観測で捉えられた 62 火口群周辺の地殻変動,火山噴火予知連絡会会報, 101, 16-24.
- 気象研究所(2011a): ALOS/PALSAR から見た全国の活火山について(4), 第118回火山噴火予知連 絡会資料.
- 気象研究所(2011b):「だいち」/PALSAR による阿蘇山周辺の干渉解析結果,火山噴火予知連絡会会 報,109,115-121.
- 気象研究所(2011c):「だいち」により観測された霧島山新燃岳山頂火口の地形変化および霧島山周 辺の地殻変動について,109,179-191.
- 気象研究所(2013a):マグマ活動の定量的把握技術の開発とそれに基づく火山活動度判定の高度化に 関する研究,気象研究所技術報告,69,16-52.

気象研究所(2013b):マグマ活動の定量的把握技術の開発とそれに基づく火山活動度判定の高度化に 関する研究,気象研究所技術報告,69,146-151.

- 気象庁(2013a):三宅島,第127回火山噴火予知連絡会資料,58-71.
- 気象庁(2013b): 十勝岳, 第127回火山噴火予知連絡会資料, 28-41.
- 国土地理院 (2012): 霧島山周辺の地殻変動,火山噴火予知連絡会会報,108,197-220.
- Mogi, K. (1958): Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them, Bull. Earthquake Res. Inst., 36, 99-134.
- 大谷竜,内藤勲(1998): GPS 可降水量の物理と評価,気象研究ノート 192 号, 15-33.
- 小澤拓・清水慎吾(2010): 数値気象モデルを用いた SAR 干渉解析における大気遅延誤差の軽減,測地 学会誌,56,137-147.
- 産業技術総合研究所・京都大学防災研究所(2013):薩摩硫黄島,第125回火山噴火予知連絡会資料, 57-59.
- Shimada, M. (1999): Verification processor for SAR calibration and interferometry, Advances in Space Research, 23, 8, 1477-1486.

島田政信(1999): SAR 干渉処理における軌道誤差と大気位相遅延の補正方法,測地学会誌,45,327-346.

吉田友香・舟越実・西田誠・近江克也・高木朗充・安藤忍(2012): GPS 観測で捉えられた吾妻山の地 殻変動,験震時報,76,1-8.