# 衛星画像解析による熊本地震被災地域の斜面・地盤変動調査 -多時期ペアの差分干渉 SAR 解析による地震後の変動抽出-

**Satellite Imagery Analysis for Detecting Slope and Ground Deformations** in Area Affected by the 2016 Kumamoto Earthquake

-Detection of postseismic deformations from DInSAR using multi-temporal image pairs-



防災科学技術研究所研究資料 第 四 \_\_\_\_ 二号 衛星画像解析による熊本地震被災地域の斜面 • 地盤変動調査

防災科学技術研究所



National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience Tennodai 3-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-0006 Japan

第412号

# 防災科学技術研究所研究資料

Technical Note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience: No.412

# 防災科学技術研究所研究資料

防災科学技術研
---------

第 342 号	強震ネットワーク 強震データ Vol. 28(平成 21 年 No. 2) (CD-ROM 版). 2010 年 3 月発行
第 343 号	阿寺断層系における深層ボーリング調査の概要と岩石物性試験結果(付録 CD-ROM) 15pp. 2010 年 3 月発行
第 344 号	地すべり地形分布図 第 46 集 「札幌・苫小牧」19 葉 (5 万分の 1) . 2010 年 7 月発行
第 345 号	地すべり地形分布図 第 47 集「夕張岳」16 葉 (5 万分の 1).2010 年 8 月発行
第 346 号	長岡における積雪観測資料(31)(2006/07,2007/08,2008/09 冬期)47pp. 2010 年 9 月発行
第 347 号	地すべり地形分布図 第 48 集「羽幌・留萌」 17 葉(5 万分の 1).2010 年 11 月発行
第 348 号	平成 18 年度 大都市大震災軽減化特別プロジェクト実大 3 層 RC 建物実験報告書 (付録 DVD) 68pp. 2010 年 8 月発行
第 349 号	防災科学技術研究所による深層掘削調査の概要と岩石物性試験結果(足尾・新宮・牛伏寺)(付録 CD-ROM)12pp.
	2010 年 8 月発行
第 350 号	アジア防災科学技術情報基盤(DRH-Asia) コンテンツ集 266pp. 2010 年 12 月発行
第 351 号	新庄における気象と降積雪の観測(2009/10 年冬期) 31pp. 2010 年 12 月発行
第 352 号	平成 18 年度 大都市大震災軽減化特別プロジェクトⅡ 木造建物実験 - 震動台活用による構造物の耐震性向上研究 -
	(付録 CD-ROM)120pp. 2011 年 1 月発行
第 353 号	地形・地盤分類および常時微動のH/Vスペクトル比を用いた地震動のスペクトル増幅率の推定 242pp.
	2011 年 1 月発行
第 354 号	地震動予測地図作成ツールの開発(付録 DVD) 155pp. 2011 年 5 月発行
第 355 号	ARTS により計測した浅間山の火口内温度分布(2007 年 4 月から 2010 年 3 月) 28pp. 2011 年 1 月発行
第 356 号	長岡における積雪観測資料(32)(2009/10 冬期) 29pp. 2011 年 2 月発行
第 357 号	浅間山鬼押出火山観測井コア試料の岩相と層序(付録 DVD) 32pp. 2011 年 2 月発行
第 358 号	強震ネットワーク 強震データ Vol. 29(平成 22 年 No. 1) (CD-ROM 版). 2011 年 2 月発行
第 359 号	強震ネットワーク 強震データ Vol. 30(平成 22 年 No. 2) (CD-ROM 版). 2011 年 2 月発行
第360号	K-NET・KiK-net 強震データ(1996 - 2010) (DVD 版 6 枚組), 2011 年 3 月発行
第361号	統合化地下構造データベースの構築 <地下構造データベース構築ワーキンググループ報告書> 平成 23 年 3 月
, ia	238nn 2011 年 3 月発行
第 362 号	
第363号	長岡におけろ積雪観測資料(33)(2010/11 冬期) 29nn 2012 年 2 月発行
第364号	新中における気象と降積雪の観測(2010/11 年冬期) 45np 2012 年 2 日発行
第365号	地立べり地形分布図 $250$ 集[名寄] 16 葉(5 万分の1) 2012 年 3 月発行
第366号	注閉山高峰水山観測共って試料の岩相と國序(付録 CD-ROM) 30nn 2012 年 2 月発行
第367号	は災利学技術研究所による関東・東海地域における水圧破砕井の孔井絵園データ 29mn 2012 年3 日発行
第368号	台圖災害被害データの比較について(1951 年~2008 年 都道府県別資料)(付録 CD-ROM)19nn 2012 年5月発行
第369号	F-Defense を田いた宇大 RC 極期 (C1.5 極期) 雪動破壊宇驗研究報告書 - 宇在の技術其進で設計した RC 極期の耐
Y1 002 11	雪地に関する雲動台宇殿及び之の解析。(村場 DVD) 64nn 2019 年 10 日発行
第 370 是	歳ほに因りる長勤日天秋及びての所们「(内蘇DVD)」のpp. 2012年10万元]  論霊動誕価のための千菅圓・莵城圓における津郊・涇郊地般紘会チデルの検討(付録 CD-ROM) 410mm 2013 任
A 010 J	3月発行
筆 371 号	9月2日 野島断層における深層堀削調査の概要と岩石物性試験結果(巫林・岩屋・田山)(付録 CD-ROM) 27nn 2012 在
7,011,1	
第 372 号	/ パンロー 長岡におけろ積雪観測資料 (34) (2011/12 冬期 ) 31pp 2012 年 11 日発行
第373 号	いたって、
第374 号	電視 1 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1
治 375 早	初回日辺10日2000元9日八田町10月11712年2月11日11戦(円駅 00-1001) 00pp. 2010 中 0 月光日 新山におけろ気象と路積雪の観測(2011/12 年友期) /0nn 9013 年 9 日発行
<b>府 376 号</b>	約111に301732X138に14項目の既保12011/12 十令約/ 30pp. 2013 十2 月光1] 地式べり地形分布図 第 51 年「天街・枯去・碓肉」90 巻 (5 万分の 1) 9012 年 2 日発行
カ 310 万 笛 277 旦	地テトラ地ルカル内 知 51 未, 八地, (双平, 1社) 40 未(5 万万0 1), 2013 年 5 万光1] 地方べり地形分布団 第 52 隹「北目・幼別」 25 茜 /5 玉公の 1) 2013 年 3 日発行
カシロ 万 笛 278 日	地テトワ地ルクルロ 第 52 末・4元 秋川」20 末(5 万万の 1) 2013 年 9 月光1] 地大べり地形公本回 第 52 年「黒庁」16 番 (5 五〇の 1) 2012 年 9 日惑谷
- − − − − − − − − − − − − − − − − − − −	地サニンリ地形万年凶 労 33 米1年ム」10 朱い 万万の 1). 2013 年 3 月光行 車口太十電災な跡まえな地電いボード運体のみ立と向けた検討 240mm 9019 年 19 日発行
弗 3/9 亏 密 200 口	宋口平八辰火を踏まんに地展ハリート評価の以及に回りに使討 545pp. 2012 年 12 月第行     □ 本の広山いギードマルプ集 第9時(付付 DVD) 196m 9019 年 7 日季行
弗 38U 号 ∽ 901 □	日平の八山ハリートイツノ朱 舟 4 版(1) 塚 U V U) 100 pp. 2013 年 / 月 光行
用 381 号 第 900 日	長岡における積雪観測資料 (35) (2012/13 冬期) 30pp. 2013 年 11 月発行
· 用 382 号	地9ペリ地形分布図 弗 54 集1 湘河・広尾」18 葉(5 万分の 1). 2014 年 2 月発行
弗 383 号	地 9 ペリ 地形分 布 凶 弟 55 集 1 斜里・ 知床岬」 23 葉 (5 万分の1). 2014 年 2 月発行
第 384 号	地すべり地形分布図 第 56 集! 釧路・根室」 16 葉 (5 万分の 1). 2014 年 2 月発行

第 385 号	東京都市圏における水害統計データの整備(付録 DV
第 386 号	The AITCC User Guide -An Automatic Algorithm fo
	2014年3月発行
第 387 号	新庄における気象と降積雪の観測(2012/13 年冬期)
第 388 号	地すべり地形分布図 第 57 集 「沖縄県域諸島」 25 葉(
第 389 号	長岡における積雪観測資料 (36) (2013/14 冬期) 22
第 390 号	新庄における気象と降積雪の観測(2013/14 年冬期)
第 391 号	大規模空間吊り天井の脱落被害メカニズム解明のた
	井の脱落被害再現実験および耐震吊り天井の耐震余
第 392 号	地すべり地形分布図 第 58 集 「鹿児島県域諸島」 27 葬
第 393 号	地すべり地形分布図 第59集「伊豆諸島および小笠原
第 394 号	地すべり地形分布図 第 60 集「関東中央部」 15 葉 (5 7
第 395 号	水害統計全国版データベースの整備. 2015 年発行予
第 396 号	2015 年 4 月ネパール地震(Gorkha 地震) における災害
第 397 号	2015 年 4 月ネパール地震 (Gorkha 地震) における建
第 398 号	長岡における積雪観測資料 (37) (2014/15 冬期) 29
第 399 号	東日本大震災を踏まえた地震動ハザード評価の改良
第 400 号	日本海溝に発生する地震による確率論的津波ハザー
第 401 号	全国自治体の防災情報システム整備状況 47pp. 20
第 402 号	新庄における気象と降積雪の観測(2014/15年冬期)
第 403 号	地上写真による鳥海山南東斜面の雪渓の長期変動観
第 404 号	2015 年 4 月ネパール地震 (Gorkha 地震) における
	2016年3月発行
第 405 号	土砂災害予測に関する研究集会-現状の課題と新技
第 406 号	津波ハザード情報の利活用報告書 132pp. 2016 年
第 407 号	2015 年 4 月ネパール地震 (Gorkha 地震 ) における
	120pp. 2016 年 10 月発行
第 408 号	新庄における気象と降積雪の観測(2015/16年冬期)
第 409 号	長岡における積雪観測資料(38)(2015/16冬期) 28
第 410 号	ため池堤体の耐震安全性に関する実験研究一改修さ
第411号	土砂災害予測に関する研究集会-熊本地震とその周

- 編集委	員会 -	防災
(委員長)	河合 伸一	
(委 員) 松澤 孝紀 若月 強 中村いずみ	三輪 学央 平島 寛行 三好 康夫	編
(事務局) 臼田裕一郎 (編集・校正)	横山 敏秋 樋山 信子	É

© National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience 2017

※防災科学技術研究所の刊行物については、ホームページ(http://dil-opac.bosai.go.jp/publication/)をご覧下さい.

■ 表紙図 ・・・・平成28年(2016年)熊本地震被災地域における多時期ペアの差分干渉SAR解析:(左上)2016年3月7日と5月2日(本震前後) の画像ペアによる解析結果,(右上)2016年5月16日と6月13日の画像ペアによる解析結果,(左下)2016年6月13日と 7月25日の画像ペアによる解析結果、(右下)2016年7月25日と8月8日の画像ペアによる解析結果、各画像上に本雲時 に発生した斜面崩壊・土石流の範囲(黒線)と本震後の降雨時に発生した斜面崩壊・土石流の範囲(白線)を示した.

# F究所研究資料

VD) 6pp. 2014 年 2 月発行 or the Identification and Tracking of Convective Cells- 33pp. 47pp. 2014 年 2 月発行 (5万分の1). 2014年3月発行 2pp. 2014 年 12 月発行 47pp. 2015 年 2 月発行 とめのE-ディフェンス加振実験 報告書 -大規模空間吊り天 ☆裕度検証実験− 193pp. 2015 年 2 月発行 葉(5万分の1). 2015年3月発行 原諸島」10葉(5万分の1).2015年3月発行 万分の1). 2015年3月発行 予定 序情報の利活用に関するヒアリング調査 58pp. 2015 年7月発行 建物被害に関する情報収集調査速報 16pp. 2015年9月発行 9pp. 2015 年 11 月発行 良(付録 DVD) 253pp. 2015 年 12 月発行 -ド評価の手法の検討(付録 DVD) 216pp. 2015 年 12 月発行 015 年 12 月発行 47pp. 2016年2月発行 見測(1979~2015年) 52pp. 2016年2月発行 る地震の概要と建物被害に関する情報収集調査報告 54pp. 技術-プロシーディング 220pp. 2016 年 3 月発行 ≤8月発行 る災害情報の利活用に関するインタビュー調査 -改訂版-

39pp. 2017年2月発行 8pp. 2017 年 2 月発行 されたため池堤体の耐震性能検証- 87pp. 2017 年 2 月発行 土砂災害予測に関する研究集会-熊本地震とその周辺-プロシーディング 231pp. 2017年3月発行

#### 災科学技術研究所研究資料 第 412 号

平成 29 年 9 月 29 日 発行

靠兼 国立研究開発法人 〒 305-0006 茨城県つくば市天王台3-1 電話 (029)863-7635

印刷所 前 田 印 刷 株 式 会 社 茨城県つくば市山中152-4

http://www.bosai.go.jp/

# 衛星画像解析による熊本地震被災地域の斜面・地盤変動調査 - 多時期ペアの差分干渉 SAR 解析による地震後の変動抽出-

木村 誇\*・酒井直樹\*・上石 勲\*・寶楽 裕\*\*・園部雅史\*\*\*・木村詩織\*\*・ 下村博之\*\*・武田大典\*\*・吉川和男\*\*

# Satellite Imagery Analysis for Detecting Slope and Ground Deformations in Area Affected by the 2016 Kumamoto Earthquake

- Detection of postseismic deformations from DInSAR using multi-temporal image pairs -

Takashi KIMURA<sup>\*</sup>, Naoki SAKAI<sup>\*</sup>, Isao KAMIISHI<sup>\*</sup>, Yutaka HORAKU<sup>\*\*</sup>, Masashi SONOBE<sup>\*\*\*</sup>, Shiori KIMURA<sup>\*\*</sup>, Hiroyuki SHIMOMURA<sup>\*\*</sup>, Daisuke TAKEDA<sup>\*\*</sup>, and Kazuo YOSHIKAWA<sup>\*\*</sup>

\*National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience kimurat@bosai.go.jp, sakai@bosai.go.jp, kamiisi@bosai.ac.jp \*\*PASCO CORPORATION \*\*\*College of Science and Technology, Nihon University

#### Abstract

Differential SAR Interferometry (DInSAR) was applied for time series analysis of ground surface displacement induced by the 2016 Kumamoto Earthquake and subsequent forcing events (aftershocks and rainfalls). We developed a new visualization method (the displacement distribution maps) using ALOS-2 (L-band), RADARSAT-2 (C-band) and TerraSAR-X (X-band) dataset as follows: 1) detecting displacement distribution from results of DInSAR analysis, 2) estimating amount of displacement from slant range differences, and 3) mapping the amount of displacement in mesh and road section. Probable causes of the displacement detected from DInSAR analysis (e.g. ground and slope deformations due to landslide, subsidence or liquefaction of the ground induced by the earthquake) were examined by interpretation of high-resolution optical images (SPOT-6, 7 and WorldView-2, 3) and field observation. Finally, a Standard Operating Procedure (SOP) of the displacement distribution map for secondary disaster mitigation after large earthquake(s) were proposed.

Key words: The 2016 Kumamoto Earthquake, Differential SAR Interferometry (DInSAR), Slope and ground deformation, Standard Operating Procedure (SOP) in disaster period

<sup>\*</sup>国立研究開発法人 防災科学技術研究所

<sup>\*\*(</sup>株)パスコ

<sup>\*\*\*</sup> 日本大学 理工学部

# 目 次

1. 衛星画像調達	3
1.1. ALOS-2(SAR,L バンド)	4
1.2. RADARSAT-2(SAR,C バンド)	7
1.3. TerraSAR-X(SAR,X バンド)	10
1.4. SPOT-6,7(光学, 1.5 m)	13
1.5. Worldview-2, 3 等(光学, 40 cm)	15
1.6. 各バンドでの SAR 画像のアーカイブ	17
2. 衛星画像解析	21
2.1. 干涉 SAR 解析	22
2.2. 変動候補地の抽出	26
2.3. 検証作業	34
2.4. 災害時標準対応手順(案)作成	37
2.5. まとめ	38
3. 災害時標準対応手順(案)	39
3.1. はじめに	39
3.2. 地震による被害と衛星画像解析の方針	39
3.3. SAR 画像の特性	43
3.4. 取得データの品質管理について	46
3.5. 変動箇所抽出結果の可視化について	48
3.6. 一連の手順の迅速性について	50
3.7. 衛星画像による解析手法	51
4. 衛星画像解析手法と変動タイプごとの抽出可能性の検討	52
4.1. はじめに	52
4.2. 干渉 SAR 画像からの地表面変動解析手順	53
4.3. 強度差分画像からの地表面変動解析手順	93

# 1. 衛星画像調達

対象範囲の SAR 衛星, 光学衛星の新規撮影計画および干渉 SAR 解析が可能なアーカイブ 画像の調達を行った. 衛星画像の撮影は事前の撮影シミュレーション結果に基づき, 撮影の 詳細等を発注者と確認し, 調達した. 対象範囲を図 1.1, 使用する衛星を表 1.1, 表 1.2 に示 す.



図1.1 対象範囲(約1,600 km<sup>2</sup>,背景には国土地理院電子地形図タイルを使用)

A m mm vou me					
衛星	撮影周期	撮影幅	分解能	波長	
ALOS-2 (SAR, 日本)	14 日	55 km × 70 km	3 m	L バンド (約 24 cm)	
RADARSAT-2 (SAR, カナダ)	24 日	50 km × 50 km	3 m	C バンド (約 5 cm)	
TerraSAR-X (SAR, ドイツ)	11 日	30 km × 50 km	3 m	X バンド (約 3 cm)	

表 1.1 解析する SAR 衛星

衛星	撮影周期	撮影幅	分解能	波長
SPOT-6,7 (光学,フランス)	26 日	60 km	1.5 m	光学 (可視-近赤外域)
WorldView-2,3 等 40 cm 級(光学, 米国)	1~11日	13.1 km~	40 cm	光学 (可視-近赤外域)

#### 1.1. ALOS-2(SAR,L バンド)

ALOS-2 は発注者による指示に基づき撮影された画像を調達した.対象範囲をカバーする 2 シーンの画像について, ALOS-2 の回帰日数毎の画像調達を行った.本調査では 14 シーン の新規撮影の画像を使用した. ALOS-2 の撮影条件等を表 1.3 に,撮影範囲を図 1.2 に示す. また,撮影の実施結果は表 1.4,撮影結果の例を図 1.3 に示す.

撮	影条件	処理条件		
撮影モード	Strip Map (UBS/UBD)	処理レベル	L1.1	
偏波チャンネル	HH	軌道精度	—	
入射角	32.4	撮影優先度	—	
指定パス	Descending-Right	備考	D23	
	(南行軌道,右側撮影)		ビーム No.U2-7	

表1.3 ALOS-2 (SAR,L バンド)の撮影条件および処理パラメータ



図 1.2 ALOS-2 撮影範囲(背景には国土地理院電子地形図タイルを使用)

回数	撮影予定日	シーンフレーム番号	実施結果
1	2016/9/9	2950	撮影成功
2	2010/8/8	2960	撮影成功
	2016/8/22	2950	未撮影
	2010/8/22	2960	未撮影
3	2016/0/5	2950	撮影成功
4	2010/9/3	2960	撮影成功
5	2016/0/10	2950	撮影成功
6	2010/9/19	2950	撮影成功
7	2016/10/2	2950	撮影成功
8	2010/10/3	2960	撮影成功
9	2016/10/17	2950	撮影成功
10	2010/10/17	2960	撮影成功
11	2016/10/21	2950	撮影成功
12	2010/10/31	2960	撮影成功
13	2016/11/14	2950	撮影成功
14	2010/11/14	2960	撮影成功

表1.4 ALOS-2 撮影計画と実施結果(アーカイブ画像を含まない)



図 1.3 ALOS-2 撮影結果 (新規撮影: 2016/5/2)

#### 1.2. RADARSAT-2(SAR,C バンド)

RADARSAT-2 は軌道 1 および軌道 2 の 2 つの軌道で撮影されたデータを入手した. それ ぞれの撮影・処理条件を表 1.5,表 1.6,撮影範囲を図 1.4 に示す.新規撮影画像を軌道 1 と し,5 シーンを調達した(表 1.7 参照). それぞれの撮影結果の例を図 1.5 に示す.

**表 1.5** RADARSAT-2 の撮影条件および処理パラメータ(軌道 1)

新規撮影条件		処理条件	
撮影モード	Wide Ultra-Fine	処理レベル	SLC
偏波チャンネル	HH	軌道精度	_
入射角	WideU (U2W2)	撮影優先度	優先 (Priority)
指定パス	Ascending-Right	備考	2016-Jul-19
	(北行軌道,右側撮影)		09:12:33.630
分解能	3 m	撮影軌道	北行軌道

表 1.6 RADARSAT-2 の撮影条件および処理パラメータ(軌道 2)

撮影条件	(アーカイブ)	処理条件	
撮影モード	Wide Ultra-Fine	処理レベル	SLC
偏波チャンネル	HH	軌道精度	_
入射角	WideU (U7W2)	撮影優先度	優先 (Priority)
指定パス	Descending-Right	備考	2016-Aug-09
	(南行軌道,右側撮影)		21:17:32.046
分解能	3 m	撮影軌道	南行軌道



図1.4 RADARSAT-2 撮影範囲(背景には国土地理院電子地形図タイルを使用)

回数	撮影予定日	種別	実施結果	
1	2016/8/12	軌道1	撮影成功	
2	2016/9/5	軌道1	撮影成功	
3	2016/9/29	軌道1	撮影成功	
4	2016/10/23	軌道1	撮影成功	
5	2016/11/16	軌道1	撮影成功	

表1.7 RADARSAT-2 撮影日 (アーカイブ画像を含まない)



図 1.5 RADARSAT-2 撮影結果(新規撮影: 2016/8/12)

#### 1.3. TerraSAR-X(SAR,X バンド)

TerraSAR-X については軌道 1, 軌道 2, 軌道 3 の 3 つの軌道のデータを入手した. それぞれの撮影条件等を表 1.8~表 1.10 に示す. また,撮影範囲は図 1.6 の通りである. 新規撮影 画像は表 1.11 に示す 20 シーンを調達した.撮影結果の例を図 1.7 に示す.

**表 1.8** TerraSAR-X の撮影条件および処理パラメータ(軌道 1)

新規撮	影条件	処理条件		
撮影モード	StripMap	処理レベル	SSC	
偏波チャンネル	HH	軌道精度	—	
入射角	38.0~40.4	撮影優先度	優先 (Priority)	
指定パス	ASC Right	備考	D12	
分解能	3 m	撮影軌道	南行軌道(軌道1)	

表 1.9 TerraSAR-X の撮影条件および処理パラメータ (軌道 2)

撮影	条件	処理条件		
撮影モード	StripMap	処理レベル	SSC	
偏波チャンネル	HH	軌道精度	—	
入射角	22.4~25.5	撮影優先度	優先 (Priority)	
指定パス	DES Right	備考	D88	
分解能	3 m	撮影軌道	南行軌道(軌道 2)	

表 1.10	TerraSAR-X	の撮影条件および処理パラメータ	(軌道3)
--------	------------	-----------------	-------

撮影	条件	処理条件		
撮影モード	StripMap	処理レベル	SSC	
偏波チャンネル	HH	軌道精度	—	
入射角	31.8~34.6	撮影優先度	優先(Priority)	
指定パス	DES Right	備考	A35	
分解能	3 m	撮影軌道	北行軌道(軌道3)	



図 1.6 TerrSAR-X 撮影範囲(青:軌道1, 紺:軌道2, 紫:軌道3, 背景には国土地理院電子地 形図タイルを使用)

回数	撮影予定日	種別	実施結果	備考
1	2016/7/30	軌道 1	撮影成功	
2	2016/8/4	軌道 2	撮影成功	
3	2016/8/10	軌道 1	撮影成功	
4	2016/8/15	軌道 2	撮影成功	
5	2016/8/21	軌道1	撮影成功	
6	2016/8/26	軌道 2	撮影成功	
7	2016/9/1	軌道1	撮影成功	
8	2016/9/6	軌道 2	撮影成功	
9	2016/9/12	軌道 1	撮影成功	
10	2016/9/17	軌道 2	撮影成功	
11	2016/9/23	軌道 1	撮影成功	
12	2016/9/28	軌道 2	未撮影	2016/9/25 軌道 3 を用いる
13	2016/10/4	軌道 1	撮影成功	
14	2016/10/9	軌道 2	未撮影	2016/10/6 軌道 3 を用いる
15	2016/10/15	軌道 1	撮影成功	
16	2016/10/20	軌道 2	未撮影	2016/10/17 軌道 3 を用いる
17	2016/10/26	軌道1	撮影成功	
18	2016/10/31	軌道 2	未撮影	2016/10/28 軌道 3 を用いる
19	2016/11/6	軌道1	撮影成功	
20	2016/11/11	軌道 2	撮影成功	

**表 1.11** TerraSAR-X 撮影予定日 (アーカイブ画像を含まない)



図 1.7 TerraSAR-X 撮影結果(新規撮影: 2016/7/19)

#### 1.4. SPOT-6,7(光学, 1.5 m)

光学衛星の調達範囲については、別途実施している航空機 LP の計測範囲が、阿蘇山中央 火口丘の飛行禁止区域を避けていることを考慮し、中央火口丘にあるセンサ設置予定の渓 流の集水域全体が入るように調整した.

SPOT-6,7 については図 1.8 に示す 500 km<sup>2</sup>の範囲とし,新規撮影の回数は 3 回とした.撮影結果の例を図 1.9 に示す.

撮影期間は、協議に基づいて当初計画より変更して実施した. SPOT-6,7 の撮影条件および実施結果を表 1.12 に示す.



図1.8 SPOT-6,7 撮影範囲(背景には国土地理院電子地形図タイルを使用)

	<b>汉</b> 112 51 01-0,7 10 (2) 50 0 回復					
回数	撮影期間(当初)	撮影期間 (変更)	面積	撮影実施日		
1	2016/7/29~8/15	2016/7/29~8/15	500	2016/8/11		
2	2016/9/1~9/10	2016/10/1~10/10	500	2016/10/10		
3	2016/10/1~10/10	2016/11/1~11/10	500	2016/11/3		

表 1.12 SPOT-6,7 撮影期間および面積



図 1.9 SPOT-6,7 撮影結果 (2016/8/11)

# 1.5. Worldview-2,3 等(光学, 40 cm)

WorldView-2,3 等の光学画像の調達範囲は,図1.10 に示す 300 km<sup>2</sup>の範囲とし,新規撮影の回数は 3 回とした.撮影結果の例を図1.11 に示す.

撮影期間は協議に基づいて当初計画より変更して実施した. WorldView-2,3 等画像の撮影 条件および実施結果を表 1.13 に示す.



図 1.10 Worldview-2,3 (光学, 40 cm)撮影範囲(背景には国土地理院電子地形図タイルを使用)

回数	撮影期間(当初)	撮影期間 (変更)	面積	実施結果		
1	2016/7/29~8/15	2016/7/29~8/15	300 km <sup>2</sup>	2016/8/13, 19, 27, 31		
2	2016/9/1~9/10	2016/10/1~10/10	300 km <sup>2</sup>	2016/10/2, 10		
3	2016/10/1~10/10	2016/11/1~11/10	300 km <sup>2</sup>	2016/11/1, 5		

表 1.13 Worldview-2,3 (光学, 40 cm) 撮影予定期間および面積



図 1.11 WorldView-2,3 (光学, 40 cm) 撮影結果 (2016/8/11-2016/8/31)

#### 1.6. 各バンドでの SAR 画像のアーカイブ

SAR での解析では, 熊本地震の発生近傍のアーカイブを入手し, 一連の SAR 解析に追加 して解析を行い, 判読精度を向上に利用した. 各バンドにおいて新規に撮影した衛星画像と 同条件で撮影された画像を入手した. SAR 画像のアーカイブ数量は, 協議に基づいて当初 計画より変更して入手した.

ALOS-2 のアーカイブ画像は表 1.14 に示す 16 シーンを入手した. アーカイブ画像の例を 図 1.12 に示す.

		52 (brind $E/(2)$ ) (b)	バーノ固係
回数	撮影日	シーンフレーム番号	実施結果
1	2016/2/7	2950	アーカイブ調達
2	2010/3/7	2960	アーカイブ調達
3	2016/4/19	2950	アーカイブ調達
4	2010/4/18	2960	アーカイブ調達
5	2016/5/2	2950	アーカイブ調達
6	2010/3/2	2960	アーカイブ調達
7	2016/5/16	2950	アーカイブ調達
8	2016/5/16	2950	アーカイブ調達
9	2016/6/13	2950	アーカイブ調達
10		2960	アーカイブ調達
11	2016/6/27	2950	アーカイブ調達
12	2016/6/27	2960	アーカイブ調達
13	2017/11	2950	アーカイブ調達
14	2010/ //11	2960	アーカイブ調達
15	2016/7/25	2950	アーカイブ調達
16	2010/7/23	2960	アーカイブ調達

表1.14 ALOS-2 (SARLバンド)のアーカイブ画像



図 1.12 ALOS-2 撮影結果 (アーカイブ調達: 2016/3/7)

RADARSAT-2 のアーカイブ画像は表 1.15 に示す 5 シーンを入手した. アーカイブ画像の 例を図 1.13 に示す.

回数	撮影予定日	種別	実施結果
1	2016/7/19	軌道 1	アーカイブ調達
2	2016/8/9	軌道 2	アーカイブ調達
3	2016/9/2	軌道 2	アーカイブ調達
4	2016/9/26	軌道 2	アーカイブ調達
5	2016/10/20	軌道 2	アーカイブ調達

表 1.15 RADARSAT-2 撮影日 (アーカイブ画像)



図 1.13 RADARSAT-2 撮影結果 (アーカイブ調達: 2016/8/9)

TerraSAR-X のアーカイブ画像は表 1.16 に示す 7 シーンを入手した. アーカイブ画像の例 を図 1.14 に示す.

回数	撮影予定日	種別	実施結果	備考
1	2016/7/19	軌道1	アーカイブ調達	
2	2016/7/24	軌道 2	アーカイブ調達	
3	2016/9/3	軌道 3	アーカイブ調達	
4	2016/7/21	軌道 3	アーカイブ調達	
5	2016/8/1	軌道 3	アーカイブ調達	
6	2016/8/12	軌道 3	アーカイブ調達	
7	2016/8/23	軌道 3	アーカイブ調達	

表 1.16 TerraSAR-X 撮影日 (アーカイブ画像)



図 1.14 TerraSAR-X 撮影結果 (アーカイブ調達: 2016/7/30)

#### 2. 衛星画像解析

新規撮影およびアーカイブ調達により入手した画像を用いて ALOS-2 (L バンド解析), RADARSAT-2 (C バンド解析), TerraSAR-X (X バンド解析)の解析可能な全てのペアにお いて干渉処理を行った (表 2.1 参照). なお, ALOS-2 は1ペアの解析において各撮影日毎に 2 シーンを使用した.

干渉処理より得られた初期干渉画像から軌道や地形の影響を除去し,時系列の変動を検 出する差分干渉解析を実施した.得られた差分干渉結果より変動縞の目視判読を行い,変動 候補地の抽出を行った.作業の詳細および目視判読を含めた手順については,災害時標準対 応手順(案)としてまとめた.衛星画像解析のフローを図2.1に示す.

<b>我们</b> 你们的公用生间像************************************					
采旦	妥旦	解析処理実績(シーン)			
留万	用年1717、シート	新規撮影	アーカイブ	合計	
1	Lバンド (ALOS-2)	14	16	30	
2	Cバンド (RADARSAT-2)	5	5	10	
3	X バンド (TerraSAR-X)	20	7	27	

表 2.1 解析する衛星画像のシーン数



図2.1 衛星画像解析フロー

#### 2.1. 干涉 SAR 解析

干渉 SAR 解析手順を図 2.2 に示す. 干渉 SAR 解析においては, ALOS-2 (Lバンド解析), RADARSAT-2 (Cバンド解析), TerraSAR-X (Xバンド解析) をも同じ処理工程で実施した. それぞれのパラメータを表 2.2 に示す.



図 2.2 干渉解析フロー

表 2.2 使用パラメータ設定一覧

加珊夕	パラメータ名	各衛星での処理設定		
处理有		ALOS-2	RADARSAT-2	TerraSAR-X
②初期干涉 SAR 処理	ルック数	2×2	3×3	$2 \times 2$
③軌道編·地形編除去	会昭 DEM	国土地理院 10 m メッシュ DEM		
⑦地図投影(オルソ化)	参照 DEM			
④位相強調フィルタ	フィルタ強度	1.0		
	FFT 窓サイズ	32		
⑤大域誤差除去フィルタ	除去空間スケール	1,000 m		

# 2.1.1. ALOS-2 の干渉 SAR 解析結果

ALOS-2の干渉 SAR 解析結果を図 2.3 に示す. ペア数は 105 ペアとなる.



※ 8/22 の観測は JAXA 緊急観測と競合により未観測

図 2.3 ALOS-2 の干渉 SAR 解析結果

# 2.1.2. RADARSAT-2 の干渉 SAR 解析結果

RADARSAT-2 の軌道 1, 軌道 2 における干渉 SAR 解析結果を図 2.4 に示す.



図 2.4 RADARSAT-2 の干渉 SAR 解析結果 (左: 軌道 1, 右: 軌道 2)

### 2.1.3. TerraSAR-X の干渉 SAR 解析結果

TerraSAR-X の軌道 1, 軌道 2, 軌道 3 の干渉 SAR 解析結果を図 2.5~図 2.7 に示す.



図 2.5 TerraSAR-X の干渉 SAR 解析結果(軌道1)



※ 9/28 から 10/31 の観測は競合により未観測





※ 9/14 の観測は競合により未観測

図 2.7 TerraSAR-X の干渉 SAR 解析結果(軌道 3)

#### 2.2. 変動候補地の抽出

変動候補地の抽出は, 表の(A) ~ (Y) の変動タイプに分類して特徴を把握した上で, L バンド (ALOS-2), C バンド (RADARSAT-2), X バンド (TerraSAR-X) の画像解析結果 から目視により抽出した.

「斜面変動」は傾斜地ほど多く、かつ傾斜地は森林域となっていることが多いのでLバンド SAR による干渉 SAR 解析結果を用いることを基本方針とした.

一方,「地盤変動」は平地で路面などが舗装された区域にも多数発生することや,(F)液状化および噴砂に伴う地盤沈下(陥没)のように比較的小さなスケールの現象を含んでいることから,Lバンドだけでなく,CバンドやXバンドといった波長が短いSARによる干渉SAR解析結果を用いて実施した.

また,大規模地震後の期間における地表面変動は家屋の撤去等の人為的な要因もあるため,人為活動による変化を付け加え,干渉 SAR による変動候補地抽出で捉えられない変動 タイプについては,強度画像による変動箇所の抽出を行った.

斜面 変動	刻五	(A) 斜面崩壊
	(B) 地すべり(斜面における重力性の変形に伴う)開口亀裂	
	<b></b>	(C) 土石流・流水による土砂移動
自然	自然 災害	(D) 側方流動(阿蘇谷で発生した湖成面がすべり面になったとみられる平
災害		地の地すべり)
現象	地盤 亦動	(E) 地表地震断層(共役断層を含む)
	发到	(F) 液状化および噴砂に伴う地盤沈下(陥没)
		(G) その他
②人為活動		(X) 家屋等の構造物の倒壊・撤去,新規建設
		<ul><li>(Y) 道路網の改変</li></ul>

表 2.3 変動タイプ

Cバンド, Xバンドについては「地盤変動」の抽出に特化するという理由で,国土数値地 図情報等の既存データ(道路網や橋梁などインフラの地図データ,森林域の地図データ)か ら解析対象範囲の絞り込みを行った.

#### 2.2.1. 干渉 SAR 解析の目視判読手順

干渉 SAR 解析によって 2 回の観測間の変動を示す差分干渉画像を作成後,下記の手順に より変動候補地の抽出を行った.

- ① 検出対象範囲の絞りこみ
- ② 変動縞の検出
- ③ 変動縞の選定

#### (a) 検出対象範囲の絞りこみ

検出対象外の範囲を目視判読の際に対象から外すことで、効率的に変動を抽出した.

まず,斜面変動を検出するため,斜面領域(勾配10度以上)を対象とした.次に,斜面 や地形を考慮して変動を抽出するよう,差分干渉画像と地形図を重ね合わせた.その際のレ イヤの透過率は40%程度とした.干渉性が低い領域では,色調が砂目(モザイク)状で変動 縞が明瞭でないことが多いため,明瞭に変動縞が確認できる干渉性が高い領域(色の連続性 を確認できる)を対象とした.

誤抽出を減らすため、画像をオルソ補正する際に生じるレイオーバ域、フォアショートニ ング域、レーダーシャドウ域もマスクして除いた.これらの領域は正しい解析情報が得られ ず、解析困難な領域である.

さらに効率的な判読のため、干渉 SAR 解析に用いるバンド(波長)に応じて GIS データ 等を用いてマスクを行った.波長が短い C, X バンドを用いる場合,森林域は干渉性が低い ことが推定される.そのため、国土数理情報の土地被覆細分メッシュデータや森林地域等を 利用し、目視判読域から除外した.

項目	条件	
斜面変動を検出するため	斜面領域(勾配 10 度以上)を対象	
干渉性が低い領域を対象外	コヒーレンスによる閾値	
提影士向・提影免度による負領公で解析困難	レイオーバ域マスク	
電影力同・電影角度による忌傾料で脾机困難 な地域を対象外	フォアショートニング域マスク	
	レーダーシャドウ域マスク	
波長特性で干渉しない地域を対象外	国土数理情報の土地被覆細分メッシュデータ	
C, X バンドを用いる場合は植生の変化	(森林地域等)をマスク	

表 2.4 目視判読域から除外するための材料

(b) 変動縞の検出

変動候補地の抽出は、下記の基準に沿って作成した干渉画像上の変動縞を目視判読する ことにより行った.色が周囲と異なる範囲をポリゴンで囲み、1つの GIS データ(シェープ ファイル)に保存した.

- 色の変化は下図に示すような色のステップ単位で評価する
- 周辺部から少なくとも2ステップ以上離れた縞の範囲を「明瞭に色が異なる範囲」とし、 検出の対象とする
- 面積が広く、標高依存性(等高線に類似したパターンの変動編)がある変動編は検出対 象としない
- 地すべりが確認されている場所や地上センサ設置場所周辺に注目する



図2.8 色が周囲と異なる(2ステップ以上離れている) 縞の例

(c) 変動縞の選定(詳細は 3. 災害時標準対応手順(案)を参照のこと)

変動候補地となる変動縞を抽出後,下記の手順で変動縞の選定を行った.GIS データ(シ ェープファイル)に保存された変動縞のポリゴン毎に選定結果を属性情報に入力した.

- 差分干渉 SAR 解析により抽出した変動縞に対して、人工地物等の有無について確認する、人工地物であれば明らかに斜面変動とは異なる変動縞である。
- 差分干渉 SAR 解析により抽出した変動縞に対して、「ノイズの有無」について確認する。
   矩形な変動縞や衛星の進行方向に延びる複数の変動縞が確認された場合、斜面変動とは
   異なる変動縞である。
- 複数ペアにて継続的な変動や変動方向の調和性が取れているかを確認する.
- 参照情報(地すべり地形 GIS データ等)を重畳して比較する.範囲が重なる場合,実際 に斜面が変動している可能性が高い.

<実際の変動をとらえている可能性が低い変動編>

- 人工地物等に起因する(送電線や鉄塔等による変動編は空間スケールが小さい)
- 矩形ノイズのようなセンサ性能に起因する
- 変動範囲の大きさが他のペアと比較してバラつきがある
- 変動が継続的に現れていない
- 斜面変動で想定される方向と調和していない(斜面を上る動き等)



図 2.9 変動の可能性が低い変動縞(人工地物による変動)

#### 2.2.2. 強度画像を用いた2時期カラー合成画像の目視判読手順

地表面の変化を確認するため, SAR 画像の後方散乱強度の差を用いた.後方散乱強度と は, SAR 衛星のセンサから送信されたマイクロ波が地表面の対象物に当たり, SAR 衛星の アンテナがある後方に散乱し,センサに観測された強度である.後方散乱強度の変化を利用 した変化抽出の手順を下記に示す.

①検出対象範囲の絞りこみ
 ②強度画像の変化箇所の検出
 ③変化箇所の選定

#### (a) 強度画像について

SAR 衛星の強度画像は地表面の粗さに依存している.表面が滑らかな水面等ではマイク 口波が鏡面反射するため,衛星への反射(後方散乱)がほとんどなく,暗く表される.一方, 陸地等の地表面が粗い場所は強く反射され,明るく映る.一般的に反射が強いと白く,弱い と黒く表示される.なお,SAR 画像には特有のノイズが含まれている.



図 2.10 阿蘇くまもと空港周辺(2016/4/17)

#### (b) 2時期カラー合成画像について

同じ撮影条件で撮影された 2 時期の SAR 画像は RGB への割り当て(カラー合成)を行うことで変化を容易に抽出可能である.強度画像を判読する際, 2 時期カラー合成画像を用いて変化の抽出を行った.

熊本地震の前後に同パス,入射角度で観測された2時期のSAR画像を用いたカラー合成 画像を図2.11に示す.赤に時期が古い画像(災害前)を割り当て,緑と青に時期が新しい (災害後)画像を割り当てることで,変化箇所はシアンあるいは赤色で表示され,変化がな い箇所は白あるいは黒色で表示される.

【判読のための2時期カラー合成画像の作成条件】

- 同バンド(もしくは同衛星)
- 同軌道(もしくは同パス)
- 同入射角



ALOS-2 2016/03/08

ALOS-2 2016/04/17



2時期カラー合成画像(R:2016/04/17, G, B:2016/03/08)

図 2.11 地震前後の単画像と2時期カラー合成画像(高野台地区)

例えば、地震前に道路だったところが地震後に土砂だまりとなった場合(散乱強度が増加) には赤色、森林だったところが土砂崩壊面の裸地となった場合(散乱強度が減少)は水色と なる.



図 2.12 斜面崩壊箇所の例(内牧:6月豪雨による発生化箇所)

### (c) 2時期カラー合成画像の変化箇所の検出

2時期カラー号せ画像に示される強度差より,変化箇所の検出を行った.変化箇所の検出 は下記の基準に沿って行った.強度差により着色された範囲をポリゴンで囲み,1つのGIS データ(シェープファイル)に保存した.

- 明瞭に着色された箇所を変化箇所とする
- 着色された箇所の形状が線状や面的なものを変化箇所とする



図 2.13 明瞭に着色されている箇所の例 (2016/03/08-2016/04/17)

(d) 変化箇所の選定(詳細事例は災害時標準対応手順(案)参照)

変動候補地を抽出後,変化箇所の選定を行った. GIS データ(シェープファイル)に保存 している変化候補箇所について,下記の基準に沿って GIS データの属性情報に「変化箇所 の可能性あり」または「変化箇所の可能性なし」を入力して選定した.

- 2 時期カラー合成画像により抽出した変化候補箇所に対して,生育過程の地表面である か確認する.田等の定期的に変化する箇所であれば,災害箇所とは異なる可能性が高い.
- 2時期カラー合成画像により抽出した変化候補箇所に対して、「ノイズの有無」について 確認する.衛星の進行方向や観測方向に延びる形状が確認された場合、災害箇所とは異 なる可能性が高い.
- 複数の2時期カラー合成画像がある場合,斜面崩壊による土砂堆積の有無を確認する.
   一般的に道路等の平面に土砂が平地に堆積した場合は,該当斜面が崩壊した可能性が高い.
- 参照情報(地すべり地形 GIS データ等)を重畳して比較する.範囲が重なる場合,実際 に斜面崩壊や土砂すべりしている可能性が高い.

#### 2.3. 検証作業

検証作業では干渉 SAR 解析によって抽出した変化箇所に対し,選定基準を基に数箇所選定し,干渉 SAR 解析期間中の地形変位を現地にて確認した.この検証作業は,協議にもとづいて,2016 年 8 月 20 日から同年 12 月 6 日の期間に合計 4 回実施した.なお,現地確認結果には干渉 SAR 解析結果にて変動が検出されたが,現地にて変状を確認されなかった事例についても記載した.

回数	期間	内容
1回目	平成 28 年 8 月 20 日(土)	災関緊候補箇所、センサ設置箇所の確認
2回目	平成 28 年 9 月 8 日(木)~	高野台,火の鳥温泉,阿蘇大橋西側,大切畑,
	平成 28 年 9 月 9 日(金)	乙ヶ瀬などの変動候補地
3回目	平成 28 年 10 月 20 日 (木) ~	市ノ川駅周辺の陥没帯、山王谷の斜面崩壊、
	平成 28 年 10 月 21 日 (金)	高砂の護岸などの変動候補地
4回目	平成28年12月5日(月)~	内牧の斜面崩壊、益城町の倒壊建物の撤去、
	平成 28 年 12 月 6 日 (火)	高野台の道路改変などの変動候補地

表 2.5 検証作業実施

#### 2.3.1. 選定基準

検証作業の候補地の選定基準は次の通り.また、人家,道路などの変状の情報があれば適 宜、調査箇所の優先順位に反映させた.

- 地すべりなどにより地形の変位が予想され、既に傾斜計、伸縮計などの観測機器が設置されている災関緊候補箇所
- 2) 干渉 SAR 解析により地形変位の可能性がある災関緊候補箇所
- 3) 干渉 SAR 解析により地形変位の可能性がある箇所
- 4) 既存の地すべり防止区域,砂防事業,治山事業の対象箇所で地形変位の可能性がある 箇所
- 5) 災関緊候補箇所のうち土石流危険渓流など地盤変位以外の理由(侵食,堆積など)に より地形変位の可能性がある箇所

上記の選定基準より,干渉 SAR 解析による結果と比較するため,地すべり地域を優先として,既に傾斜計・伸縮計が設置されている災関緊候補箇所として,具体的な検証箇所の例を以下とした.

- 1:大切畑地区(地すべり)※大峯山内の設置箇所確認
- 2:高野台地区(地すべり)
- 3:火の鳥温泉地区(地すべり)
- 4:阿蘇大橋西側
## 2.3.2. 現地確認の手法について

現地調査では地盤の変位を示す状況,保全対象の状況などを記載する.下記に例を示す.

- ① 開口亀裂·段差地形
- ② 石積などのはらみだし
- ③ 針葉樹の根曲り

## 2.3.3. 検証作業の結果概要

第1回の検証作業では、傾斜計、伸縮計、センサ設置候補地や災害関連候補箇所の状況把 握および調査経路の確認を行った.

第2回の検証作業では、前述の選定基準に沿って約20箇所の変動箇所を確認した.

第3回の検証作業では,第1回に加え,道路の変状が確認を優先に現地調査候補地を絞り込んだ.190箇所の変動候補地の中で,国道,県道,高速と交差するX,Cバンドの変動候補箇所が44箇所あり,その中で,周辺状況や液状化位置,データの品質を考慮し,優先度高い10箇所を候補地とした.

(A)	斜面崩壊・地すべり	$\rightarrow$		4 箇所
(C)	土石流・流水による土砂移動	$\rightarrow$		1 箇所
(D)	側方流動(阿蘇谷で発生した湖成面がすべり)	面にた	5	ったとみられる平地の地すべり)
		$\rightarrow$		1 箇所
(F)	液状化および噴砂に伴う陥没体	$\rightarrow$		5 箇所

そのほか,平成28年(2016年)10月8日に発生した阿蘇山中岳の噴火による降灰範囲, 資料より把握した土砂災害発生箇所と干渉SAR 解析による変状箇所が重なるか,または近 い箇所を確認候補地とした.

- ① 阿蘇山中岳の噴火による降灰範囲の確認(光学画像)
- ② 側方流動箇所の変動の確認
- ③ 熊本県等で確認されている土砂災害地域周辺の変動確認

第4回の検証作業では,過去2回の現地確認箇所の継続確認と,前回協議で新たに加わった「人為活動」による変化について,強度画像による変化抽出の結果を確認した.

①自然災害現象の継続確認地点

(A)	斜面崩壊・地すべり	$\rightarrow$	6 箇所
(C)	土石流・流水による土砂移動	$\rightarrow$	4 箇所
(D)	側方流動(阿蘇谷で発生した湖成面がすべ	り面にな	、ったとみられる平地の地すべり)
		$\rightarrow$	2 箇所
②人ネ	為活動の変化確認候補地		
(37)			

- (X) 家屋等の構造物の倒壊・撤去,新規建設 → 6箇所
- (Y) 道路網の改変 → 3箇所

## 2.3.4. 検証作業の整理

検証作業結果と変動タイプについて整理を行った.対象ペアにおいて干渉したシーンが あれば干渉有とし、農地において生育状況に起因する変位は干渉有かつ変位無と整理した. また、ノイズの場合は干渉なし(×)とした.検証作業を行った特徴箇所における干渉 SAR 解析結果と変動タイプの整理凡例と整理結果は表 2.6 および表 2.7 の通りである.

百日		現地確認における被災跡および継続的な変状可能性			
		有	無		
工业: 士	変位 有	0	<b>A</b>		
丁砂 有	変位 無	•	$\bigtriangleup$		
干涉 無	X				
データなし		_			

表 2.6 検証作業の整理凡例

			工业CAD日復制结		n stat ēste	地震前後 強度	6月豪雨 強度	10-	-11月強	度
	種別 / 地点名称 / 備考	継続的な 変計可能性	十速	SAR E 19	見手り記で	3/7-4/18	6/13-7/25	L_1003-1114	LC.0929-1116.X	1006-1028
		支1人可能江	L	С	х	L	L	L	С	Х
①自然災害現象										
(A)斜面崩壊・地すべり										
I-01大峰、Ⅲ-01	地すべり性の変状 動態観測中	有	0(セ)	×	×					
I-02大切畑、Ⅲ-02	地すべり性(法面)の変状	有	0	×	×					
I-10山田西部牧野、Ⅲ-03	地すべり性の変状	有	0	0	0					
Ⅲ-21山田西部牧野	地すべり性の変状	有	0	×	×					
I-13赤瀬川(阿蘇大橋)、Ⅲ-04	大規模斜面崩壊(土砂移動、対策工事による地形変化を含む)	有	0	٠	0					
I-14高野台地区、Ⅲ-05	地すべり性を含む斜面崩壊 動態観測中	有	0(セ)	0	0					
I-15乙ヶ瀬、Ⅲ-06	地すべり性の変状	有	0	×	×					
Ⅰ-19小萩	現地調査では変状を確認できない(地形上は地すべり性の変状の可能性)	不明	▲	-	×					
Ⅱ-01山王谷川(C重複)	渓岸の崩壊・侵食が多数発生			•	<b></b>					
(B)(斜面における重力性の変形に	半う)開口亀裂									
(C)土石流・流水による土砂移動										
Ⅱ-01山王谷川(A重複)	土石流発生箇所	有	0	•	•					
Ⅱ-02的石端辺牧野	流水による土砂堆積と考えられる	有	•	0	•					
Ⅲ-07内牧1	15m程度幅の土石流(6月豪雨により発生、防災科研判読抽出箇所)	不明	•	×	×		0			
Ⅲ-08内牧2	20m程度幅の土石流(6月豪雨により発生、防災科研判読抽出箇所)	不明	•	×	×		0			
Ⅲ-09内牧3	15m程度幅の土石流(6月豪雨により発生、防災科研判読抽出箇所)	不明	•	×	×		0			
Ⅲ-10内牧4	30m程度幅の土石流(6月豪雨により発生、防災科研判読抽出箇所)	不明	•	×	×		0			
(D)側方流動(阿蘇谷で発生した湖)	或面がすべり面になったとみられる平地の地すべり)									
I −03坂ノ下	側方流動の可能性(不明瞭)	不明		•	•					
I −04車帰	側方流動の可能性(やや明瞭)	不明		•	0					
Ⅰ-05赤水駅	側方流動の可能性(開口亀裂あり)	不明	•	٠	•					
Ⅰ-06赤水	側方流動の可能性(地盤の傾斜あり)	不明	•	٠	•					
I-07東黒川	変状を確認できない	不明		•	<b></b>					
I-11駄原	側方流動の可能性(明瞭) 大規模構造物(学校)周辺に変状有	不明	0	0	0					
Ⅰ-09、Ⅱ-05小里	側方流動の可能性(明瞭) 大規模構造物(集合住宅)周辺に変状有	不明	0	0	0					
Ⅱ-03市ノ川駅周辺ほ場 陥没体	顕著な液状化及び噴砂なし	不明	•	٠	•					
(E)地表地震断層(共役断層を含む)	)									
<ul><li>(F)液状化及び噴砂に伴う陥没体</li></ul>										
Ⅱ-08中井手	変状を確認できない	不明		Δ						
Ⅱ-09岩坂	変状を確認できない	不明		Δ						
Ⅱ-10富合町釈迦	変状を確認できない	不明		Δ						
Ⅱ-11辺見	液状化発生地点であり、道路面で変状を確認できる	不明	•	•	•					
Ⅱ-04高砂	液状化など埋立地の変状(3回目月次は画像なし)	不明	-	-	0					
(G)その他		ļ								
Ⅰ-16堀渡	種別を現地調査では判断できない	不明		×						
I-17七曲	現地調査遠望のみ・種別未確定	不明	•	×	×					
I −20南段原町	画像解析に起因するノイズを変状と判断して調査	無	•	-	▲.					
Ⅱ-06阿蘇山(火口)	火山噴火に伴う変化及び噴出物の堆積に伴う周辺の地形変化(噴火前後)	不明	×	×	×					
II-07市ノ川	調整池	不明	-	-	-					
(2)人為活動										
(X)家屋等の構造物の倒壊・撤去、新	<u> 新规建設</u>									
Ⅲ-13益城町建物	3時期光字で変化があり、SAR強度でも変化あり	人為的						0	Δ	×
Ⅲ-18災害廃棄物仮置場	3時期光字で変化があり、SAR強度でも変化あり	人為的			-			0	0	0
(Y) 道路網の改変		1			ļ					
	次山上功の納土し治療修繕					<u> </u>	<u> </u>		· · ·	

表 2.7 検証作業の整理結果

※Ⅰは第2回調査,Ⅱは第3回現地調査,Ⅲは第4回現地調査

## 2.4. 災害時標準対応手順(案)作成

災害時標準対応手順(案)は、災害時の迅速な災害情報の提供を考慮して可能な限り簡便 な手順を作成した(図 2.14 参照).作成した手順(案)の詳細については次章で述べる.

手順(案)では干渉 SAR 解析や強度差分解析より得られる変動量や反射強度の差分画像 を目視判読することにより変動箇所を抽出・選定し,マップ化する.変動箇所の抽出・選定 では,目視判読の効率化や誤判読の防止のため,事前スクリーニングとして GIS データや 判読対象外のマスクデータを重畳し,判読作業を行う.この一連の手順を新規撮影データが 入手する度に行うことで,迅速な情報提供を行うことが可能となる.



図 2.14 災害時標準対応手順(案)

2.5. まとめ

本調査では、地震後の斜面や地盤の変動(とそれに伴う二次災害の発生危険性)を継続的 に観測するため、干渉 SAR 解析を行い、地表面の変動候補箇所を抽出した.

変動候補箇所の抽出手法としては、迅速な情報提供を主目的とし、1時期(1ペア)の干 渉 SAR 画像による判読で変動候補地を抽出した.

抽出された変動候補箇所のうち,6月の降雨前後やその後の期間に変化がみられた箇所は 現地でも変化の痕跡を確認することができた.地上センサが設置されている箇所(高野台,

大峯山)では、調査期間中センサに変動はみられず、干渉 SAR 解析においてもノイズレベルを超える変動は検出されなかった.一方、高野台の大規模斜面崩壊箇所では、土砂の流出と考えられる変動が確認された.また、赤瀬川(阿蘇大橋)では工事による斜面整備等の人為的な改変を捉えていると思われる変動が確認された.

しかし, 干渉 SAR 解析にて変動があっても実際に現地で痕跡が確認出来ない箇所もあり, 引き続き原因の精査が必要である.また, 地震前後の画像を用いた干渉 SAR 解析により, 崩壊に至らないまでも変動している斜面(地震変動と異なる変動)が国土地理院より報告さ れている.地震前の画像も含めて解析を行い, 変動候補地として監視することも必要である.

#### (a) L バンドで検出できたこと、出来なかったこと

○乙ヶ瀬,山田西部牧野(2箇所):斜面崩壊箇所の抽出(干渉 SAR 解析)
 ×小萩:現地における変化確認(干渉 SAR 解析)
 ○内牧,高野台:斜面崩壊前後(強度差分解析)
 ○高野台,益城町:道路,建物の改変の把握(強度差分解析)

# (b) C バンドで検出できたこと、出来なかったこと ○高野台、赤瀬川(阿蘇大橋)周辺:土砂の堆積・流出 ○駄原、小里:地震による建物や道路の変化

(c) Xバンドで検出できたこと、出来なかったこと
 ○高野台,赤瀬川(阿蘇大橋)周辺:土砂の堆積・流出
 ○駄原,小里:地震による建物や道路の変化
 ○高砂:海岸構造物の補修による変化
 ×富合町釈迦堂付近:道路陥没の痕跡

抽出された変動候補箇所は,干渉 SAR 画像から算出した衛星視線方向の変動量をメッシュ単位や道路単位で表した図面を作成したが,変動の特徴がかえって分かりづらくなる側面もあり,衛星視線方向ではなく2次元の成分に分解する等の改良が必要である.

#### 3. 災害時標準対応手順(案)

#### 3.1. はじめに

災害時標準対応手順(案)は、「平成28年衛星画像解析による熊本地震被災地域の地形・ 地盤情報の調査」において、Lバンド、Cバンド、Xバンドによる干渉 SAR 解析による地 表面変動が示す現象(地すべり、地盤沈下、液状化等)の考察を行い、各バンドにおける地 盤災害の判定手順や事例、判定精度をまとめたものである.

手順(案)の作成にあたり, 熊本地震による被災地域を対象に衛星画像解析によって地震 後の地形・地盤変動を長期間にわたって観測した.その結果をもとに,2次災害の危険度を 広域に評価(可視化)するための衛星画像調達, 衛星画像解析, 解析結果の判読評価の方法 をまとめた.

#### 3.2. 地震による被害と衛星画像解析の方針

地震による被害は、ほとんどが地震動によるものであるが、地表地震断層の出現による変 位に起因するものもある。前者の地震動による被害の大小は、地震規模や震源の深さ、・震 央距離など地震固有の要因だけでなく、軟弱地盤の厚さや地震基盤の構造・基盤構成地質・ 地形形状・建物の振動特性などにも大きく左右される。これによる具体的な被害は、強振動 による建物や土木構造物の倒壊・破損だけでなく、地盤特性に起因する強振動域や液状化・ 流動化の発生や斜面崩壊・地すべりの誘発もある。

一方,後者の地表地震断層の変位による被害は,断層の長さや変位量の大小のほか,断層 や褶曲のタイプと断層面などの傾斜角,未固結層の被覆程度などによって大きく異なる.こ れによる具体的な被害は,鉄道や道路などの土木構造物やライフラインの切断や変位,地表 の陥没・盛り上がり,海域の場合には津波の発生要因となる<sup>1</sup>.

地震発生時	
地震動によるもの	地表地震断層の出現によるもの
● 斜面崩壊	● 断層の出現
<ul> <li>● 地すべり</li> </ul>	・地表の陥没・盛り上がり
● 液状化	・津波(海域の場合)
● 流動化	
地震発生後	
地震後の降雨等によるもの	余震等によるもの
● 斜面崩壊	
<ul> <li>● 地すべり</li> </ul>	
● 液状化/流動化	

表 3.1 地震時の地表面変動

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> 出典:事例で学ぶ地質の話 地盤工学会 (P177)

本手順(案)では,対象とする地変現象を,①自然災害現象,②人為活動に大分類した. さらに,①自然災害現象は「斜面変動」と「地盤変動」に中分類し,前者には(A)斜面崩壊, (B)地すべり,(C)土石流・流水による土砂移動の3つを,後者には(D)側方流動,(E)地表面 地震断層,(F)液状化および噴砂に伴う地盤沈下,(G)その他,の4つを含めた.②人為活動 における変化には(X)家屋等の構造物の倒壊・撤去,新規建設,(Y)道路網の改変,の2 つを含めた.これら9つの変動タイプの抽出・分類手順をフローチャート化した.

1	刻五	(A) 斜面崩壞
	<b></b> 赤曲	(B) 地すべり(斜面における重力性の変形に伴う)開口亀裂
	<b></b>	(C) 土石流・流水による土砂移動
自然		(D) 側方流動(阿蘇谷で発生した湖成面がすべり面になったとみられる平
災害	山山山	地の地すべり)
現象	地盤 亦動	(E) 地表地震断層(共役断層を含む)
② 到	変動	(F) 液状化および噴砂に伴う地盤沈下(陥没)
		(G) その他
	为注册	(X) 家屋等の構造物の倒壊・撤去,新規建設
②八4	<b>讨</b> 伯	(Y) 道路網の改変

表 3.2 変動タイプ

「斜面変動」は傾斜地ほど多く、かつ傾斜地は森林域となっていることが多いので、Lバンド (ALOS-2) での解析を基本方針とした.

一方,「地盤変動」は,平地で,路面などが舗装された区域にも多数発生することや,(F)のように比較的小さなスケールの現象を含んでいることから,Lバンドだけでなく,Cバンド,Xバンドといった短い波長の干渉 SAR 解析結果を用いる方針で実施した.

大規模地震後の期間における地表面変動としては、家屋の撤去等の人為的な要因もある ため、人為活動による変化を付け加え、干渉 SAR 解析結果による変動候補地抽出で捉えら れない変動タイプについては、強度画像による変動箇所の抽出を行った.

さらに、C バンド、X バンドについては「地盤変動」の抽出に特化するという理由で、国 土数値地図情報など既存のデータ(道路網や橋梁などインフラの地図データ,森林域の地図 データ)から解析対象範囲を絞り込む手順を導入した.



図3.1 変動タイプと衛星画像分類



図 3.2 災害対応の画像解析処理フロー

## 3.3. SAR 画像の特性

植生に対する SAR 画像のバンドの特性を下図に示す.一般的にLバンドは電波の透過性 に優れ,植生の影響を受けにくい.植生に覆われている地域での地殻変動や災害前後の地表 面の変化抽出に有利な特徴を持つ.一方,波長の短い C バンド, X バンドは森林などでは 枝や葉の樹冠部で反射するようになるが,樹冠部は風などによる動揺や成長などにより干 渉性が悪くなる.そのため,地盤沈下など都市部で多く見られる現象は対象とする場合は C バンド, X バンドが有利である.

衛星	観測周期	撮影幅	分解能	波長	得意分野	特徴
ALOS-2 (SAR, 日本)	14 日	55 km × 70 km	3 m	L バンド (約 24 cm)	<u>森林域の</u> 地 盤・地すべり の動き	○波長が長く, <u>森林</u> <u>域の地すべり等</u> に有 効
RADARSAT-2 (SAR, カナダ)	24 日	$50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$	3 m	C バンド (約 5 cm)	<u>下草程度</u> の地 面や構造物	<ul> <li>○波長が短く,<u>裸地</u></li> <li><u>の変位</u>や道路の陥没</li> <li>等を検出に有効</li> <li>●波長が短く,森林</li> <li>域の変動には不向き</li> </ul>
TerraSAR-X (SAR, ドイツ)	11 日	$30 \text{ km} \times 50 \text{ km}$	3 m	X バンド (約 3 cm)	<u>植生のない</u> 地 面や構造物	<ul> <li>○波長が非常に短く,<u>道路の陥没等</u>の 検出に有効</li> <li>●波長が短く,森林 域の変動には不向き</li> </ul>

表 3.3 SAR 衛星の特徴



図 3.3 SAR 衛星のバンド特性

各バンドの強度画像の比較図を示す.比較する強度画像は比下記に樹木と草原における 強度画像の見え方を示す.

No	被覆	Lバンド (ALOS-2)	C バンド (RADARSAT-2)	X バンド (TerraSAR-X)
1	草地 (右上の斜面)	草地を透過し,平坦な 地面の鏡面反射によ り,反射強度が弱い.	草の上で反射し,反射 強度が高い.	草の上で反射し,反射 強度が高い.
2	裸地 (平坦な崩壊地)	草地を透過し,平坦な 地面の鏡面反射によ り,反射強度が弱い.	草地を透過し,平坦な 地面の鏡面反射によ り,反射強度が弱い.	平坦な地面の鏡面反 射が見られるが,草の 上で反射し,反射強度 が少し高い.
3	森林	森林の体積散乱により,反射強度が強い.	森林の体積散乱によ り,反射強度が強い.	樹木の上で反射し, 反射強度が高い.

表 3.4 SAR 画像のバンド特性(高野台)

※2の箇所は傾斜によるフォアショートニングによる影響があり平坦な部分を対象とした



図 3.4 各バンドにおける強度画像の比較(高野台)

画像面のピクセルにおいて、地表面からレーダーの反射波(後方散乱)は、信号処理<sup>2</sup>され、1つのオブジェクト(ポイント散乱)から構成されるものと複数のオブジェクト(分散 散乱)から構成される.



図3.5 ポイント散乱と分散散乱からの画像処理

レーダー画像にはサイドルッキング方式に特有の幾何学的特性があり、フォアショート ニングによる画像強度の増加 (D-E 間)、画像強度の減少 (B-C 間)、レイオーバによる画像 位置の逆転 (A-B 間)、レーダーシャドウによる陰影部の発生が引き起こされる.



図 3.7 ALOS-2 におけるレイオーバ・フォアショートニング・レーダーシャドウ

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎(東京電機大学出版局 P136)

## 3.4. 取得データの品質管理について

干渉 SAR 解析において干渉性を左右する要因は大きいのものから下記の通りとなる<sup>3</sup>.

- ① 注目する画素の空間の中での衛星-地表間距離の変化のばらつき
- ② 1回目と2回目の観測の人工衛星等の軌道間距離のうち視線方向の垂直成分の長さ
- ③ 土壌に含まれる水分の多さ・少なさや、植生の成長・伐採、耕作の前・後などによる地表の状態の変化
- ④ SAR 衛星から射出されるマイクロ波を妨害する電波の存在

このような要因が著しいときは干渉性が低く,SAR 干渉画像は砂を撒いたようにざらつ いた状態となる.逆に干渉性が高いときは,SAR 干渉画像はざらつきが少ない一様な状態 となる.

軌道間距離において ALOS-2 は基準軌道の周り 500 m 以内に常時保持するよう軌道高度 の維持と軌道面方向の制御がされているため干渉性に与える影響は少ない.また, TerraSAR-X においてもノミナル値で±500 m 以内の高精度に運用されている. RADARSAT-2 は 1,000 m 以内の運用を目標として運用している.以下に本業務で使用した衛星の軌道間距離を示 す.

<b>₩</b> • • • • • • • • • • • • • • • • • • •		
衛星	基線長 (Bperp) の平均 (m)	ペア数
ALOS-2	155.6	105
RADARSAT-2(軌道1)	52.2	15
RADARSAT -2(軌道 2)	35.7	6
TerraSAR-X (軌道1)	78.6	55
TerraSAR-X (軌道 2)	28.5	21
TerraSAR-X (軌道 3)	522.2	36

表 3.5 衛星および軌道における全組み合わせの基線長の整理



図3.8 基線長の説明(国土地理院から引用<sup>4</sup>)

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> 山形月山地区における SAR 干渉画像を用いた地すべり性地表変動の検出(佐藤ら)

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/qanda/qanda.html



本業務での対象範囲のコヒーレンス解析による干渉マスクの範囲を下図に示す.

TerraSAR-X コヒーレンス全体図 (軌道 1:7/30-8/10, 軌道 2:8/26-9/6) TerraSAR-X コヒーレンス拡大図 (7/30-8/10)

図3.9 各衛星ペアのコヒーレンス例(背景には国土地理院電子地形図タイルを使用)

#### 3.5. 変動箇所抽出結果の可視化について

干渉 SAR 解析は、広域かつ面的な変動量が得られるという特長がある.一方で、ノイズ 等によるバラつきのため、着目する領域(関心領域)の変動量が分かりにくいという課題が あった.下記の事例では、航空写真中央の道路の変動量を得たいが、地形情報が無いことや バラつきのため、変動量が分かりにくい.



干渉SAR解析結果と同じ範囲の航空写真

干渉SAR解析で得られた変動量

図 3.5.1 写真と干渉 SAR 結果

干渉 SAR 解析で得られた変動量について,<u>着目する目標の変動量をより分かりやすく</u>, より確からしい数値で表現する工夫を行った.\_手順の概要を以下に示す.



図 3.5.2 取りまとめ解析フロー

対象範囲(約1,600 km<sup>2</sup>) について,衛星画像解析により抽出した変動量を統計処理にて メッシュ図,道路等へ取りまとめを行い,ベクトルデータ(Shape ファイル形式)へ変換を 行った.月次レポートでは変動評価図(メッシュ版,道路版)として作成した. 変動量の基準日は撮影された衛星画像の最も古い観測日からの累積の変動量とした. (例:干渉 SAR ペア A28~A32 の平均変動量を合計した累積変動量を表示) この時,メッ シュや道路に集計される変動量の画像ピクセルの標準偏差も合わせて計算し,空間的に変 動量のばらつきが大きい箇所はノイズである可能性がある(信頼性が低い)と判定した.(積 算変動量<標準偏差(期間最大)となるメッシュは非表示とした)「変動」のランク区分と して,①変動なし,および②※+・-③大・中・小の7区分とした.(20,40,60 mm を閾値 として色分け表示した.ランク評価については変動量に基づくものや,変動箇所数や変動抽 出頻度などに基づくものなど,記載レベルではいくつか検討や調整が必要である.



図 3.5.3 変動量のランク分け例(※+:衛星に近づく, -:衛星から遠ざかる変動)

## 3.6. 一連の手順の迅速性について

ー連の手順が比較的簡易な手順で迅速にできるかどうかも重要な点であり、データ取得から各種画像生成、解析、抽出、可視化までに要する時間の概略を示す.特に変動候補地の判読抽出作業については、技術者の技量や、判定基準、実際の地表変動状況に依存するので、単純な所要時間の算出は難しいが、今回の対象地域約1,600 km<sup>2</sup>において、画像取得後の1ペアあたりの全工程に要する時間は18時間を目安とした.

ただし、衛星画像の撮影からデータ取得(ダウンロード)に関しては、衛星画像の提供会 社の標準的な提供時間を記載した.



図3.4 データ入手からレポート提出までのタイムライン

表 3.6	新規撮影データの提供時間	

衛星	新規撮影データの提供時間	備考
ALOS-2	撮影日の1日後	高精度起動決定データ
TerraSAR-X	撮影日から5日間以内	
RADARSAT-2	撮影日から5日間以内	
SPOT-6/7	撮影日の1日後	
WorldView-2 · 3	撮影日の1日後	

#### 表 3.7 新規撮影データの提供時間

番号	新規撮影データの提供時間
1	アーカイブデータ (衛星データ)
2	撮影範囲の DEM(標高)データ
3	判読対象範囲(シュープファイル)
4	判読単位の図郭(シュープファイル)
5	道路縁データ(国土数値図情報)
6	土地利用細目メッシュ(国土数値情報)

# 3.7. 衛星画像による解析手法

地震発生時には,災害前の衛星画像と災害後の衛星画像の比較により地表面変化を解析 する. 画像には光学画像と SAR 画像があり,また,センサの地上分解能により検出できる 地表面変動の規模が限定される.光学画像では雲等の影響を受けると地表面が確認出来な い場合がある.一方で SAR 画像は,撮影方向/角度と地形の傾斜,植生等の影響を受ける. 下表に本手順で用いる解析手法の一覧を記載する.

衛星種別	画像種別	内容			
SAR	災害後単画像	強度画像のみで大規模な強度の変化(陸域→水域)を確認する			
	災害前後の2時 期の強度差	2時期の強度差を利用することで、変化箇所を抽出する.(斜面崩 壊の目視確認で概要把握が可能、但し、森林伐採も抽出される)			
	災害前後の干渉 SAR 画像	2時期の電波の位相差を利用することで、変動箇所を確認する.			
光学画像	2時期の比較	目視確認により変化した箇所を確認する.			

表 3.8 解析手法の例



図 3.5 干渉 SAR および強度差による解析結果

# 4. 衛星画像解析手法と変動タイプごとの抽出可能性の検討

4.1. はじめに

本章では、L, C, X バンドを用いた干渉 SAR 解析で抽出される地表面変動の要因(地す べり、地盤沈下、液状化等)を分析し、抽出事例や判定精度を整理する. 変動タイプ別の解 析手法と抽出可能性は以下のようにまとめられる.

変動タイプ	災害前後	SAR						光学		
		強度	強度差			干涉 SAR				
		L,C,X	L	С	Х	L	С	Х	高分解能 目視判読	中分解能 目視判読
A	前	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	後	0	0	0	0	×	×	×	0	
в	前	×	$\times$	×	×	0	0	0	-	-
	後	0	0	0	0	×	×	×	0	
C	前	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	後	$\bigcirc$	0	0	0	×	×	×	0	
D	前	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	後	×					-	-	0	
Б	前	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E	後	×				0	-	-	0	
F	前	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	後	×					0	0	0	
G1 降灰	前		-	-	-	-	-	-	-	-
	後	×	0	0	0	0	0	0	0	0
G2 河道 閉塞	後	0	0	0	0				0	

表 4.1 変動タイプ別の解析手法と抽出可能性(案)

■抽出可能性

○:条件(変位,規模等)により抽出可能

▲:規模によるが抽出困難な場合が多い(※抽出可能性は未評価)

×:抽出不可(地震前後で変位がある場合)

- -:該当なし(地震後にのみ変位がある変動)
- ■条件
  - 災害前は各変動タイプの発生予兆が把握可能かを評価(災害:前)
  - 各波長で抽出可能な変動が異なるが、波長の比較による評価は整理していない.
  - 単画像の抽出には光学写真等のアーカイブがあること

# 4.2. 干渉 SAR 画像からの地表面変動解析手順

干渉 SAR 画像から 2 つの同衛星, 同ペア, 同入射角の観測画像を用いて, 2 時期間の変 位を確認できる.干渉 SAR 画像には, 期間の変動やノイズなどが干渉画像に表れる.地表 面変動箇所を抽出するため, ノイズなどの除去を考慮した解析を行う必要がある.

# 4.2.1 使用する機材

SAR 画像の解析処理にはガンマ社 (スイス)のソフトウェア「GAMMA SAR」を用いた. また目視判読および図面作成 ESRI 社 (米国)の「ArcGIS for Desktop」を用いた. それぞれのバージョンは下記の通りである.

- GAMMA SAR 2016/6/25 版
- ArcGIS for Desktop 10.4.1

# 4.2.2 干渉 SAR 解析フロー

干渉 SAR 解析フローを図 4.1 に示す. なお,アーカイブと新規撮影データは同衛星,同パス,同入射角の必要がある.



図 4.1 干渉 SAR 解析フロー

## ① 画像位置合わせ

干渉 SAR 解析を行うために、マスター画像(観測日が古い画像)とスレイブ画像(観測日が新しい画像)の SLC (single look complex) データを用いてサブピクセルオーダー (画像の1画素よりも小さい精度)で位置合わせを行う.

#### 2 初期干渉処理

位置合わせ処理を実施後,初期干渉 SAR 解析を行う.初期干渉 SAR 解析とは,2時期の観測データから,2時期間の位相差と2時期間の位相の相関(コヒーレンス:干渉性の高さを表す尺度)とを計算し,干渉縞を算出する.



図 4.2 初期干渉 SAR 画像の例(背景にコヒーレンス画像を使用)

## ③ 軌道稿·地形稿除去

衛星画像から推定したペア間の軌道間距離(垂直基線長)と DEM から軌道縞と地形 縞をシミュレートした.初期干渉 SAR 画像からシミュレートした画像を差し引き,差分 干渉 SAR 画像(変動縞)を作成する.



図4.3 軌道縞・地形縞除去の概念

## ④ 位相強調フィルタの適用

差分干渉 SAR 画像処理の後, さらにノイズを低減するため, 代表的な位相強調フィル タである GW (Goldstein and Werner) フィルタを用い, ノイズ低減処理を施した. 位相強 調フィルタは, 差分干渉 SAR 画像に残っている位相ノイズを低減させ, また変動縞の信 号を強調することで, 微細な変動縞をより明瞭とさせる処理である.



図4.4 位相強調フィルタの適用例

#### ⑤ 大域誤差除去フィルタ適用

前述のとおり,既往の干渉 SAR 解析では,衛星軌道の誤差,電離層,水蒸気等に起因 するノイズ成分を除去できない.これらのノイズ成分に起因する縞は,斜面変動候補地 (変動縞)を検出する際の変動縞の視認性低下につながるため,過剰検出や検出漏れに 起因する精度低下を招く.そこで,衛星軌道の誤差,電離層,水蒸気等による精度低下 要因の影響を可能な限り排除するため,大域誤差除去フィルタを適用した.

一般に、衛星軌道の誤差や電離層、水蒸気等に起因する編は、斜面変動候補地に現れ る変動編と比較して空間スケールが大きい傾向がある.よって、空間スケールが大きい 編のみを除去することで、衛星軌道の誤差や電離層、水蒸気等の影響を低減できる.こ れが、大域誤差除去フィルタの動作原理である.



図4.5 大域誤差除去フィルタ適用例

## ⑥ アンラップ処理

位相差は2つの画像間での変位に比例するが、位相は2πの周期をもつため、観測されるのは2πの剰余のみである.これを「位相がラップされている」と言う.そこで、実際の変位量を知るためには、観測された位相差から真の位相差を求めること、すなわち「位相をアンラップする」必要がある.図にアンラップ処理の概念を示す.アンラップ 処理は、

1. すべてのピクセルの値が(-π,π)の範囲にある

2. 隣接したピクセルで位相が滑らかに連続している

という仮定の下で、真の位相差が既知であるか、構造的に不動で位相差を0とみなせる不動点を用いて行われる. アンラップ処理には、Minimum Cost Flow 法(以下 MCF 法)が一般的によく用いられる.



図4.6 アンラップ処理の概念

⑦ オルソ化

算出した干渉 SAR 画像 (変動縞) は、レンジとアジマスという 2 軸で表現されたレーダー座標の画像である.そのため、そのままでは地図やその他 GIS 情報と重畳することができない.そのため、DEM より作成した地図投影情報を使用して、干渉 SAR 画像 (変動縞) をレーダー座標から地理座標系に変換(以下、オルソ化)した.

また,干渉 SAR 画像(変動編)は,-πからπまでの値を浮動小数点の画像である.しかし,斜面変動候補地(変動編)を検出する上で,画像ファイルサイズが非常に大きい浮動小数点の情報である必要性は低い.よって,干渉 SAR 画像(変動編)を上図に示すような 16 ステップに区分して色付けを行うことで,画像の取扱いやすさを向上させ,さらに斜面変動候補地(変動編)を検出する上での定量的な評価を可能とした.



図 4.7 配色イメージと変位方向の関係

## 4.2.3 解析に用いたパラメータ

既往研究<sup>5</sup>で有効性が示された斜面変動の検出に特化した処理パラメータを用いて解析 を実施する.今回の処理に使用したパラメータ設定一覧を表 4.2 に示す.衛星軌道,電離層, 水蒸気等による精度低下要因の影響を可能な限り排除するため,大域誤差除去フィルター を適用した.

処理名	パラメータ名	設定
②初期干涉 SAR 処理	ルック数	ALOS-2, TerraSAR-X : $2 \times 2$
		RADARSAT-2 : $3 \times 3$
③軌道編·地形編除去	会昭 DEM	国土地理院が公主する10m メッシュ DEM
⑦地図投影(オルソ化)	参照 DEM	国土地理阮が公表する 10 III メッシュ DEM
④位相強調フィルター	フィルター強度	1.0
	FFT 窓サイズ	32
⑤大域誤差除去フィルター	除去空間スケール	1000 m

表 4.2 使用パラメータ設定一覧

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> 江川ら:国土監視ツールとしてのLバンド SAR 干渉解析の活用について 平成 27 年度砂防学会

#### 4.2.4 地形マスク(LSマップ)作成フロー

判読作業の効率化を目的とし、地形マスクを作成する.地形マスクは撮影時の衛星 SAR の位置と地形の幾何学的特性から生じる情報が得られない領域を指す.具体的には、衛星 SAR は地表面に対し斜め方向に観測を行うため、山の比高が大きくなると、山頂が衛星側 に倒れこみ斜面の情報が失われることや、山の起伏が大きくなると影になり、情報が抽出で きない領域である.地形マスクの作成フローを図 4.8 に示す.



図4.8 地形マスク作成フロー

① マルチルック処理

アーカイブ画像と新規撮影の SLC データを対象にマルチルック処理を行う. マルチル ック処理は, SAR 画像にはスペックルノイズと呼ばれる「雑音」が含まれ, このノイズ の低減の目的で隣接するピクセルを平均化する処理を指す.

② シミュレーション

オルソ化を行う前処理としてスラントレンジ座標から地図座標へ投影するためのシミ ュレーション画像を作成する.作成後に位置座標の対応付けとなるルックアップテーブ ルが作成される.これと同時に地形マスクが作成される.

# 4.2.5 目視判読

作成した干渉 SAR 解析結果を用いて対象領域の目視判読を行う. ArcGIS に干渉 SAR 解 析結果を表示し、16 ステップに分類し、目視判読を実施する. 図 4.9 に目視判読フローを示 す.



## ① 検出対象範囲の絞り込み

SAR 画像の撮影範囲や収集した災害情報を用いて目視判読を行う対象範囲を設定する.



図4.10 目視判読の対象範囲

## 目視判読の図郭の作成

判読作業の分担や効率化と判読漏れを防ぐため目視判読の作業単位となる図郭を作成 する.



図4.11 目視判読時の図郭割(背景には国土地理院電子地形図タイルを使用)

## ③ 判読に利用する GIS データの入手・準備

一般に SAR 画像は単画像ではグレースケールであるため、判読が困難である. そのため、下記の GIS データを用いることにより、災害箇所のあたりや判読の容易化・効率化を図る.

- 地形図(国土地理院・標準地図)・・・・・・土地利用や地形の把握に利用
- 光学画像(アーカイブ) ・・・・・過去の土地利用や地形の視覚的な把握に利用
- 土地利用図(国土数値情報など)・・・・・・土地利用の把握に利用
- 災害に関わる GIS データ・・・・・・災害履歴や土砂災害警戒区域等の把握に利用
- 図郭・・・・・判読作業の効率化のために利用
- 調査範囲・・・・・調査範囲の判読を網羅するために利用
- 地形マスク(LS マップ)・・・・・・地形の影響による不可視領域(衛星の入射角や標高 値より算出)
- 干渉マスク(コヒーレンスマップ)・・・・・・画像ペアの干渉性が低く,地表面変動の抽出 が困難な領域(コヒーレンスマップは0から1の値をとり,値が小さいほど干渉性が悪 い領域を示す.なお,干渉 SAR 解析結果の中間ファイルとして作成される)

#### ④ 目視判読による変化候補箇所の抽出

斜面や地形を考慮して変動を抽出するよう,差分干渉画像と地形図を重ね合わせる. その際,レイヤの透過率は40%程度とする.



図 4.12 差分干渉画像と地形図との重ね合わせ (背景には国土地理院電子地形図タイルを使用)

判読作業の効率化と誤抽出を少なくするために、干渉性が低い領域(色調が砂目(モ ザイク)状で変動縞が明瞭でない箇所)と画像をオルソ補正する際に生じるレイオーバ 域、フォアショートニング域、レーダーシャドウ域を除去した干渉マスクと地形マスク を重ね合わせる.判読対象となる干渉マスクの閾値は0.7以上とした.これにより、判読 作業は重なりがない領域を対象に行う.



干渉マスクの重ね合わせ

地形・干渉マスクの重ね合わせ

図 4.13 地形マスクと干渉マスク(背景には国土地理院電子地形図タイルを使用)

一般的に波長が短い C, X バンドは森林域においては干渉性が低い. そのため, 国土数理 情報の土地被覆細分メッシュデータを利用し, 目視判読域から除外することで判読作業の 効率化が可能である.



図 4.14 森林域のマスクの例(緑の領域) (背景には国土地理院電子地形図タイルを使用)

判読対象を除外するためのマスクデータについて表 4.3 に示す.

バンド	地形マスク	干渉マスク	森林マスク
L	0	0	×
С	0	$\bigcirc$	0
X	$\bigcirc$	$\bigcirc$	0

表 4.3 マスクデータ

凡例:〇必要,×不要

## ⑤ 変動候補箇所の検出

下記の基準に沿って,変動候補箇所の検出を行う.色が周囲と異なる範囲をポリゴン で囲み,1つのシェープファイルに保存する.

- 色の変化は図 4.15 に示すような色のステップ単位で評価する.
- 周辺部から少なくとも2ステップ以上離れた縞の範囲を「明瞭に色が異なる範囲」
   とし、検出の対象とする.(位相の変化が 45°(π/4 rad.)以上みられること)
- 面積が広く(約500 m<sup>2</sup>以上),標高依存性(等高線に類似したパターンの変動編) がある変動編は検出対象としない.
- 地すべりが確認されている場所や地上センサ設置場所周辺に注目する.



図 4.15 色が周囲と異なる(2 ステップ以上離れている) 縞の例



図 4.17 変動候補箇所となる変動縞の例(その 2) (背景には国土地理院電子地形図タイルを使用)

⑥ 変動縞の選定

変動候補地となる変動縞を抽出後,下記の手順で変動縞の選定を行う.ベクターレイ ヤファイル (shp 形式) に保存している変動縞について,属性情報に新たなフィールドを 追加し,1 (斜面変動の可能性あり)または0 (斜面変動の可能性なし)を入力する.

- 差分干渉 SAR 解析により抽出した変動縞に対して,人工地物等の有無について 確認する.人工地物であれば明らかに斜面変動とは異なる変動縞である.
- 差分干渉 SAR 解析により抽出した変動縞に対して、「ノイズの有無」について 確認する. 矩形な変動縞や衛星の進行方向に延びる複数の変動縞が確認された 場合、斜面変動とは異なる変動縞である.
- 複数ペアにて継続的な変動や変動方向の調和性が取れているかを確認する.
- 参照情報(地すべり地形 GIS データ等)を重畳して比較する.範囲が重なる場合,実際に斜面が変動している可能性が高い.

(A) <実際の変動をとらえている可能性が低い変動編>

- 人工地物等に起因する(送電線や鉄塔等による変動縞は空間スケールが小さい)
- 矩形ノイズのようなセンサ性能に起因する
- 変動範囲の大きさが他のペアと比較してバラつきがある
- 変動が継続的に現れていない
- 斜面変動で想定される方向と調和していない(斜面を上る動き等)



図 4.18 変動の可能性が低い変動編(人工地物による変動) (背景には国土地理院電子地形図タイルを使用)

参考:対象期間に発生した降雨、地震などの変動に影響するイベントの把握

判読対象期間における降雨量や地震などの変動に影響するイベントを把握することで, 変動の要因を推測することが可能である.例えば,下図から日降水量が多い②の期間におい ては,土砂災害が発生しやすく,地殻変動が発生している可能性が高い.同様に比較的大き い地震が判読対象範囲の近くで発生している場合,その地震を挟む期間の①と⑤で地殻変 動が発生している可能性が高い.



図 4.19 干渉 SAR の解析期間例

# 4.2.6 とりまとめ

判読調査のとりまとめレポートとして判読対象範囲の全体図と分割版の図面を作成する. 下記に図面の例を示す.なお,災害時は対応を急ぐ必要があるため,図面のテンプレートは 事前に準備しておくことが望ましい.



図 4.20 全体図の例(背景には国土地理院電子地形図タイルを使用)



図 4.21 分割版の例(背景には国土地理院電子地形図タイルを使用)

## 4.2.7 抽出箇所の例

変動タイプ別の変化候補箇所の例を以下に示す.ここでは災害前後のデータを有する ALOS-2 の画像を用いる.なお,現地写真は本業務における検証作業により得た写真である.

- (A) 斜面崩壞
  - ・夜峯山
  - 赤瀬川(阿蘇大橋)
- (B) 地すべり(斜面における重力性の変形に伴う)開口亀裂
  - ・高野台(京大火山研)
  - ・大峯
  - ・大切畑
  - ·山田西部牧野
  - ・乙ヶ瀬
  - ・小萩
- (C) 土石流・流水による土砂移動
  - ・山王谷川
  - ·的石端辺牧野
- (D) 側方流動(阿蘇谷で発生した湖成面がすべり面になったとみられる平地の地す べり)
  - ・小里
  - ・坂之下
  - ・赤水駅
  - ・車帰
  - ・赤水
  - ・東黒川
  - ・駄原
  - ・市ノ川駅周辺ほ場(陥没帯)
- (E) 地表地震断層(共益断層を含む) 事例なし
- (F) 液状化および噴砂に伴う陥没帯・高砂
- (G) その他(降灰範囲:等)
  - ・堀渡
  - ・南段原町
  - ・阿蘇山火口(噴火前)
- (X) 家屋などの構造物の倒壊,撤去,新規建設
  - ・益城町建物
- (Y) 道路網の改変
  - ·県道河陰阿蘇線(高野台地区)

# (A) 斜面崩壊

例1:夜峯山

● 当該地域は災関緊候補箇所であり、地震後に斜面崩壊した南向き斜面である. また、地上センサ(ワイヤー式変位センサー)による監視斜面である.



<sup>※</sup>地形図および干渉 SAR 解析結果図の背景には国土地理院電子地形図タイルを使用

例2:赤瀬川(阿蘇大橋)

当該地域は大規模な斜面崩壊が発生した箇所である.対策工事の施工が進行中であり、人工的な改変が継続している.また、表層の侵食・堆積が進行しており地形変化を示すものと考えられる.崩壊した阿蘇大橋左岸付近の路面にて開口亀裂が見られる.



<sup>※</sup>地形図および干渉 SAR 解析結果図の背景には国土地理院電子地形図タイルを使用
- (B) 地すべり(斜面における重力性の変形に伴う)開口亀裂
  - 例1:高野台(京大火山研)
    - 当該地域は災関緊候補箇所であり,西から南斜面において地震による地すべり が発生した箇所である.5月から9月の地上センサ(伸縮計)の結果からは変 位が見られない.



※地形図および干渉 SAR 解析結果図の背景には国土地理院電子地形図タイルを使用

例2:大峯

● 当該地域は大峯山末端を活断層が通り,明瞭な滑落崖が認められ地すべり性の 変状が確認でき,地上センサ(傾斜計)の結果からは変位が見られない.



<sup>※</sup>地形図および干渉 SAR 解析結果図の背景には国土地理院電子地形図タイルを使用

例3:大切畑

 当該地域は災関緊候補箇所であり、村道沿いの路面に亀裂が連続的に認められ、 法肩が落ちており、斜面崩壊箇所が複数認められる.



例4:山田西部牧野

● 当該地域は牧草地の中に地すべり性の変状を確認できる箇所であり,段差地形 が階段状に確認でき,滑落性の段差(比高=約1m)が複数見られる.



例5:乙ヶ瀬

● 当該地区は宅地や農地として利用されている斜面であり、現地ヒアリングによる と本震により崩壊、その後、6月の豪雨により崩壊が拡大している斜面である.



例6:小萩

● 当該地区は竹林が群生しており、周辺は果樹園として利用されている地区である.



## (C) 土石流・流水による土砂移動

例1:山王谷川

 当該地区は災関緊候補箇所であり、土石流により土砂が流出し、渓流沿いに土 砂が堆積した箇所である.源頭部では侵食、堆積による河床変動や斜面の崩壊 が多数発生しており、渓流沿いで杭型センサによる監視が行われている.



※地形図および干渉 SAR 解析結果図の背景には国土地理院電子地形図タイルを使用

例2:的石端辺牧野

● 当該地区は広大な牧場として利用されており、丈が短い草地の被覆となっている. 牧場を囲むように森林があり、牧場と森林との境界で高さ3m~5m程度の 崖を造成している.



(D) 側方流動(平地の地すべり)

例1:小里

当該地区では集合住宅施設を中心に各バンドの干渉 SAR 解析結果で変位が確認されている.また,集合住宅施設周辺には道路面に複数の亀裂が認められるが,噴砂などの液状化現象は調査時には確認できない.



例2:坂ノ下

 当該地区では農業用水路や道路面に地震時に発生したと思われるや亀裂が多く 見られる。



例3:赤水駅

 当該地区は大豆,牧草あるいは休耕田のほ場に利用されている地区である.休 耕田の水田跡には亀裂,段差が生じている.9月8日の現地調査結果からは地 震による直接的な地盤変位なのか,液状化などによる二次的な変位なのかは現 地調査では判断できない.



<sup>※</sup>地形図および干渉 SAR 解析結果図の背景には国土地理院電子地形図タイルを使用

例4:車帰

農業用水路周辺に補修が多数認められ,護岸ブロックの損傷なども認められる.
 農道上の橋梁に変状が認められ,亀裂・段差が発生している.段差は見かけ上橋梁が浮く形で発生しており,周辺地盤の液状化による沈下などの可能性がある.この変状は複数箇所で認められるが,地震後も継続的に変状をしているかは事象からは判断できない.



<sup>※</sup>地形図および干渉 SAR 解析結果図の背景には国土地理院電子地形図タイルを使用

例5:赤水

 水田が傾斜し、休耕田となっているほ場が確認できる.また、水が吐けずに水田、水路にたまっている.JR 踏切付近には段差注意の看板や舗装痕が新しい補修痕、開口が認められる.付近の集落の塀に複数の亀裂、補修痕が認められる. 地震後、地盤変位が一体で発生した可能性が高いが、変位が累積的に継続しているかを確認することは難しい.



※地形図および干渉 SAR 解析結果図の背景には国土地理院電子地形図タイルを使用

例6:東黒川

● 当該地区は道路沿いに低層な建物が連続している. 地震による集落や道路への 被害は現地調査からは確認できない.



例7:駄原

● 阿蘇中学校の校舎を中心に各バンドの干渉 SAR 解析結果から変位が確認できる. 校舎周辺の舗装面などに複数の圧縮変状が認められる. 外見上は校舎は新しく,顕著な亀裂などは確認出来ていない. 噴砂などの液状化現象は調査時は認められず,横方向の応力による変形が強い可能性が考えられた. 変状が継続的に進行しているかは確認できない.



<sup>※</sup>地形図および干渉 SAR 解析結果図の背景には国土地理院電子地形図タイルを使用

例8:市ノ川駅周辺ほ場(陥没帯)

 当該地区は地震時に比較的大きい開口亀裂や陥没が発生した地区である.局所 的に大きな北〜北西向きの水位変位と標高低下が確認できる.



# (F) 液状化および噴砂に伴う陥没帯

例1:高砂

 当該地区は干拓地であり、熊本地震後の防災科学技術研究所による被害調査で 液状化による噴砂等が確認された地区である.地震による被害と思われる護岸 構造物の亀裂等の被害や修繕工事の跡が確認できる.



(G) その他

例1: 堀渡

当該地区は宅地や農地として利用されており,緩やかな斜面が形成されており,
 2車線道路を含む領域において変位が見られる地区である.9月9日の現地確認
 結果からは亀裂などの地盤変位を示す変状は確認できなかった.



例2:南段原町

当該地区は宇土市の九州新幹線が交差する地区である.新幹線の高架下には調整池があり、衛星照射方向側に工場が立地する.



- 例3:阿蘇山火口 (噴火前)
- 10月8日午前1時46分ごろに阿蘇山の中岳第一火口で爆発的噴火が発生した.
   噴火前の撮影された直近の2時期画像の干渉 SAR 解析結果から噴火の兆候を 調査した.



# (X) 家屋等の構造物の倒壊・撤去,新規建設

# 例1:益城町建物

 ・益城町は熊本地震により多くの建物が全壊あるいは半壊した地区である。12/6
 ・時点の現地調査で倒壊建物の撤去作業中であることを確認した。



(Y) 道路網の改変

例1:県道河陰阿蘇線(高野台地区)

 県道河陰阿蘇線は高野台地区において、地震による西から南斜面の大規模土砂 災害が発生し、道路上に土砂が堆積した箇所である.道路復旧工事により、土 砂が撤去され8月31日に開通し、阿蘇市側から南阿蘇村への交通アクセスが可 能になった.



### 4.3. 強度差分画像からの地表面変動解析手順

2時期の強度画像の差分を用いて地表面の変化検出を行う手順を示す.一般的に強度画像 は地表面の凹凸からの散乱強度を捉えた画像である.災害時は,地形改変が想定される災害 後の画像と災害前の画像を用いることが想定される.

#### 4.3.1. 使用する機材

SAR 画像の解析処理にはガンマ社 (スイス)のソフトウェア「GAMMA SAR」を用いた. 目視判読および図面作成は ESRI 社 (米国)の「ArcGIS for Desktop」を用いた. それぞれの バージョンは下記に示す.

- GAMMA SAR 2016/6/25版
- ArcGIS for Desktop 10.4.1

#### 4.3.2. 2時期カラー合成の解析処理フロー

SAR 画像の SLC (single look complex) データを用いた 2 時期カラー合成画像の処理フロ ーを図 4.22 に示す. SLC データはレンジ圧縮およびアジマス圧縮を行った後の、スラント レンジ上の複素数データである. なお、後方散乱係数はバンド、入射角などに影響されるた め、アーカイブと新規撮影データは同衛星、同パス、同入射角の必要がある.



図 4.22 2 時期カラー合成画像のフロー

① マルチルック処理

アーカイブ画像と新規撮影の SLC データを対象にマルチルック処理を行う. マルチル ック処理は, SAR 画像に含まれるスペックルノイズと呼ばれるノイズの低減を目的とし, 隣接するピクセルを平均化する処理のことである.

#### ② 後方散乱係数への変換

マルチルック処理を施した画像から絶対値的に計測・比較が可能な後方散乱係数画像 を作成する.異なる時期の後方散乱係数の比較により,2時期間の地表面の凹凸の変化 の把握が可能となる.後方散乱係数の算出式はプロダクトレベルに応じて計算式が異な る.校正係数は観測モード,処理ソフトウェアのバージョンにより値が異なる.本業務 ではプロダクトレベル L1.1を用いたため②の式を用いた.下記に ALOS-2 による後方散 乱係数の算出式を示す.

■後方散乱係数の算出式

● L1.5,L2.1 の場合

$$\sigma_{016}^0 = 10 * \log_{10} (DN^2) + CF_1$$

● L1.1 の場合

$$\sigma_{slc}^{0} = 10 * \log_{10} \langle I^{2} + Q^{2} \rangle + CF_{1} - A$$

σ<sup>0</sup>:後方散乱係数 [単位:DB]
 DN:画素値
 CF<sub>1</sub>, A:校正係数 [単位:DB]

	プロダクトの注文時刻 (処理ソフトウェアのバージョン)	観測モード/ビーム	值 [単位 : dB]
CF1	2014/09/11-2016/09/28 7:00 UT の間に注文された プロダクト(バージョン 000.001~002.021)	広域観測モード (ビーム W2) 以外	-83.0
		広域観測モード (ビーム W2) 以外	-79.0
	2016/09/28 7:00 UT 以降に注文されたプロダクト (バージョン 002.022 以降)	全観測モード共通	-83.0
А	すべての期間で共通(全バージョン共通)	全観測モード共通	32.0

表 4.4 ALOS-2 の校正係数

③ オルソ化

スラントレンジ座標と地図座標の対応付けしたシミュレーション画像の生成時に作成 されるルックアップテーブルを用いてオルソ化を行う.

# ④ 画像重ね合わせ (スタック)

オルソ化を施したアーカイブと新規撮影の後方散乱係数画像の重ね合わせ処理を行う. レイヤ1(赤)にアーカイブ,レイヤ2(青・緑)に新規撮影とし,2時期カラー合成画 像を作成する.



図 4.23 2 時期カラー合成画像

表 4 5	地表面変化の例
衣 4.3	地衣囲変化の例

強度画像の色	2時期の変化	地表面変化と考えられる例
水色	反射強度が増加	・水域に土砂が堆積
		・倒木や流木による散乱体の増加
赤色	反射強度が低下	・道路が舗装される
		・家屋が撤去され更地にかわる
		・植生が裸地に代わる(斜面崩壊)
		・田んぼに水が張られる
		・火山灰の堆積

## 4.3.3. 目視判読

2 時期カラー合成画像を用いて対象領域の目視判読を行う. ArcGIS に 2 時期カラー合成 画像を表示し,赤にアーカイブ,緑・青に新規撮影の後方散乱係数画像に設定する. 図 4.24 に目視判読フローを示す.



図4.24 2時期カラー合成画像の目視判読フロー

## ① 検出対象範囲の絞り込み

SAR 画像の撮影範囲や収集した災害情報を用いて目視判読を行う対象範囲を設定する.

# 目視判読の図郭の作成

判読作業の効率化と判読抜けの防止を目的とし、目視判読を行う図郭を作成する.



図4.25 目視判読の図郭割(背景には国土地理院電子地形図タイルを使用)

## ③ 判読に利用する GIS データの入手

ー般に SAR 画像の強度画像はグレースケールであるため, 判読が困難である場合が多い. 災害箇所のあたりや判読の容易化・効率化を図るため, 参照データとして下記の GIS データを入手する. 入手した GIS データを 2 時期カラー合成画像に重畳し, 判読に用いることが望ましい.

- 地形図(国土地理院 標準地図)
   土地利用や地形の把握に利用
- 光学画像(アーカイブ)
   過去の地表面状況を視覚的に把握するために利用
- 土地利用図(国土数値情報など)
   土地利用の把握に利用
- 災害に関わる GIS データ
   過去の災害発生履歴や土砂災害警戒区域などを参照のため利用
- 図郭

判読作業の効率化のために利用

● 調査範囲

調査範囲の判読を網羅するために利用

### ④ 目視判読による変化箇所の抽出

2 時期カラー合成画像を用いた目視判読では、光の加色混合の原理を用いて赤にマス ター(時期が古い)画像を割り当て、緑、青にスレイブ(時期が新しい)画像を割り当 てる.変化箇所はシアン、あるいは赤色で表示され、変化なしは白色で表示される.着 色された箇所の形状や参照する GIS データを参照して目視判読を行う.なお、判読を行 う際は地図縮尺を一定の縮尺に揃えて均一にし、図郭単位で判読作業を実施すると効率 が良い.

2 時期カラー合成画像を用いた変化候補箇所の抽出は下記の基準に沿って,作業を行う.抽出により着色された範囲をポリゴンで囲み,1つのシェープファイルに保存する. 図 4.26 に 2 時期カラー合成画像の目視判読による抽出例を示す.

- 明瞭に着色された箇所を変化箇所とする.
- 着色された箇所の形状が線状や面的なものを変化箇所とする.



ALOS-2 2016/03/07

ALOS-2 2016/04/17



2 時期カラー合成画像(R:2016/04/17、G、B:2016/03/08) 図 4.26 地震前後の単画像と2 時期カラー合成画像(高野台地区)

## ⑤ 変化箇所の選定

変化候補箇所を抽出後,下記の手順で変化箇所の選定を行う.ベクターレイヤファイ ルに保存している変化候補箇所について,属性情報に新たなフィールドを追加し,1(変 化箇所の可能性あり)または0(変化箇所の可能性なし)を入力する.

- 2 時期カラー合成画像により抽出した変化候補箇所に対して,生育過程の地表 面であるか確認する.田等の定期的に変化する箇所であれば,災害箇所とは異 なる可能性が高い.
- 2 時期カラー合成画像により抽出した変化候補箇所に対して,「ノイズの有無」 について確認する. 衛星の進行方向や観測方向に延びる形状が確認された場合, 災害箇所とは異なる可能性が高い.
- 複数の2時期カラー合成画像がある場合,斜面崩壊による土砂堆積の有無を確認する.一般的に道路等の平面に土砂が平地に堆積した場合は,該当斜面が崩壊した可能性が高い.
- 参照情報(地すべり地形 GIS データ等)を重畳して比較する.範囲が重なる場合,実際に斜面崩壊や土砂すべりしている可能性が高い.

## 4.3.4. とりまとめ

目視判読結果のとりまとめレポートとして判読対象範囲の全体図と分割版の図面を作成 する.図 4.28 に図面の例を示す.なお、災害時は対応を急ぐ必要があるため、図面のテン プレートは事前に準備しておくことが望ましい.



図 4.27 全体図の例(背景には国土地理院電子地形図タイルを使用)



図 4.28 分割版の例

## 4.3.5. 抽出箇所の例

熊本地震被害箇所を対象とし,変動タイプ別の変化候補箇所の例を以下に示す.なお,現 地写真は本業務における検証作業により得た写真を掲載する.

(A) 斜面崩壞

・内牧

- (B) 地すべり/(斜面における重力性の変形に伴う)開口亀裂 事例なし
- (C) 土石流・流水による土砂移動

・山王谷川

- (D) 側方流動(阿蘇谷で発生した湖成面がすべり面になったとみられる平地の地す べり)
  - ・市ノ川駅周辺ほ場(陥没帯)
- (E) 地表地震断層(共益断層を含む) 事例なし
- (F) 液状化および噴砂に伴う陥没帯 事例なし
- (G) その他(降灰範囲:等)
  - ・阿蘇山火口(噴火前後)
- (X) 家屋などの構造物の倒壊,撤去,新規建設・益城町建物
- (Y) 道路網の改変
  - ·県道河陰阿蘇線(高野台地区)

- (A) 斜面崩壊
  - 例:内牧(6月豪雨による斜面崩壊箇所)
    - 当該地区は6月豪雨により複数箇所で斜面崩壊が発生した地区である.対象箇所は幅30m程度の斜面崩壊により、土砂や植生が流出し、堆積していることがわかる.
    - 赤枠内において ALOS-2 の 6/13-7/25 の 2 時期カラー合成画像から赤色は反射強度の低下を示し、森林域が裸地に変わったことが理由であると考えられる.
    - 水色は反射強度の増加を示し、流出土砂の堆積による散乱体の増加と考えられる.





光学写真



ALOS-2 6/13-7/25





現地写真(12/5 撮影)

図 4.29 (A) 斜面崩壊の例 (内牧,背景には国土地理院電子地形図タイルを使用)

(C) 土石流・流水による土砂移動

例:山王谷川

- 当該地区は地震前後に発生した土石流により土砂が流出し、渓流沿いに堆積した箇所であり、源頭部では侵食、堆積による河床変動や斜面の崩壊が多数発生している。
- 赤枠内において ALOS-2 の 3/7-4/18 の 2 時期カラー合成画像からは土石流の流 出経路は確認できない.これはレイオーバやレーダーシャドウにより判読が困 難になった箇所と思われる.
- 水色は反射強度の増加を示し、流出土砂の堆積による散乱体の増加と考えられる.







ALOS-2 3/7-4/18

光学写真





現地写真(10/20撮影)

図 4.30 (C) 土石流・流水による土砂移動の例 (山王谷川,背景には国土地理院電子地形図タイルを使用) (D) 側方流動(平地の地すべり)

例:市ノ川駅周辺ほ場(陥没帯)

- 当該地区は地震時に阿蘇カルデラ内に開口亀裂や陥没が発生した地区である。
   局所的に大きな北〜北西向きの水位変位や標高低下が確認されている。なお、
   亀裂は東西方向に生じている。
- 地震後に撮影された光学画像 (SPOT) においても開口亀裂や陥没が確認できる.
- 赤枠内において ALOS-2 の 3/7-4/18 の 2 時期カラー合成画像からは東西方向の 亀裂は確認できない.
- 3/7-4/18 の期間内における植生の変化によって着色している箇所が確認でき, 目視判読の際に注意が必要である.





地形図

光学写真



ALOS-2 3/7-4/18





現地写真(10/20撮影)

図 4.31 (D) 側方流動の例 (市ノ川駅周辺ほ場,背景には国土地理院電子地形図タイルを使用) (G) その他(降灰範囲:等)

例:阿蘇山火口周辺

- 10月8日午前1時46分頃に阿蘇山の中岳第一火口で爆発的噴火が発生した.
- 防災科学技術研究所の報告によると国土交通省 XRAIN 雨量データ等から火山 噴出物が北東方向に広範囲に降った可能性があると報告さている.
- 噴火前後のXバンドの2時期カラー合成画像から火口周辺の降灰厚が大きい範囲において赤色に着色されている.これは、降灰により反射強度が低下したことが要因であると考えられる.光学画像からも同様の範囲において影響が確認できる.





光学写真



TerraSAR-X 10/3—10/17





現地写真(10/20撮影)

**図 4.32** (G) その他 (阿蘇山火口周辺,背景には国土地理院電子地形図タイルを使用)

- (X) 家屋などの構造物の倒壊,撤去,新規建設
  - 例:益城町
    - ・ 益城町は熊本地震により多くの建物が全壊あるいは半壊した地区であり、8/19
       と10/2のWorldView-2画像と12/6時点の現地調査で倒壊建物の撤去作業中であることを確認できる。
    - 赤枠内において ALOS-2 の 10/3-11/14 の 2 時期カラー合成画像から赤色は反射 強度の低下を示し,建物倒壊によるがれきのあった箇所が撤去作業により裸地 に変わったことが理由と考えられる.



地形図

光学写真









現地写真(12/6 撮影)

図 4.33 (X) 家屋などの構造物の倒壊,撤去,新規建設 (益城町,背景には国土地理院電子地形図タイルを使用)

- (Y) 道路網の改変
  - 例:県道阿陰阿蘇線(高野台地区)
    - 高野台地区において,西から南斜面の熊本地震時の大規模土砂災害が発生し, 県道阿陰阿蘇線の路面上に土砂が堆積した箇所した.
    - 道路復旧工事により,土砂が撤去され8月31日に開通し,阿蘇市側から南阿蘇村 への交通アクセスが可能になった.光学画像においても工事進捗が確認できる.
    - 赤枠内において ALOS-2 の 3/7-4/18 の 2 時期カラー合成画像から道路上に水色 に着色していることがわかり,斜面崩壊により流出した土砂が確認できる.
    - TerraSAR-X の 8/10-8/21 の 2 時期カラー合成画像から道路上に赤色に着色していることがわかり、土砂の撤去および道路の舗装が確認できる.





光学写真





現地写真(4/17 撮影)南阿蘇村 HP 参照



現地写真(12/6 撮影)

図 4.34 (Y) 道路網の改変 (県道阿陰阿蘇線 高野台地区,背景には国土地理院電子地形図タイルを使用)
## 要 旨

平成 28 年 (2016 年) 熊本地震被災地域において,本震後の多時期にわたる衛星画像ペアを用いた差分 干渉 SAR 解析 (DInSAR) の時系列比較を行い,余震や降雨による地表面変動 (斜面・地盤災害) の発生 を継続的に観測した.被災地域内における土地被覆・土地利用等の違いを考慮して,ALOS-2(Lバンド), RADARSAT-2 (Cバンド), TerraSAR-X (Xバンド) の 3 種類の衛星画像データセットをもとに,次のよ うな手順で地表面変動を可視化する手法 (変動抽出箇所分布図) を考案した:1) 差分干渉 SAR 解析結果 から地表面変動が発生した可能性のある箇所を抽出する,2) 変動抽出箇所におけるスラントレンジの 差分より地表面変動量を推定する,3)メッシュ単位または道路区間単位に換算した地表面変動量をマッ ピングする.この解析結果をもとに,高解像度光学衛星画像 (SPOT-6,7 および WorldView-2,3) の判読 と現地調査を行い,変動抽出箇所における変動要因 (地すべり,地盤沈下,地震による地盤の液状化な ど)を検討した.最後に,大規模地震後の二次災害軽減を目的とした地表面変動の抽出とマップ化の手 順を災害時標準対応手順 (案)としてまとめた.

キーワード:平成28年熊本地震,差分干渉SAR解析,斜面・地盤変動,災害時標準対応手順