

衛星合成開口レーダーを用いた 地表面変動の把握

橋本 学¹

¹ 京都大学教授 防災研究所・地震予知研究センター（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

E-mail:hashimoto.manabu.7e@kyoto-u.ac.jp

2018年西日本豪雨で生じた広島地方の地表面変動を、人工衛星搭載合成開口レーダーにより検出を試みた。宇宙航空研究開発機構のALOS-2画像を干渉解析し、地表面変動とコヒーレンス変化、及び、加色混合法による強度変化の抽出を行った。ALOS-2の広域観測モードによる観測は発災直後になされたものの、空間分解能が大きいため、顕著な変化を検出できなかった。一方、ALOS-2の高分解能モードの観測で、東広島市～呉市境界の野呂山山麓に複数の強度変化を検出した。災害を挟む画像のペアにおいてコヒーレンスの低下が認められたが、山間部など災害前からコヒーレンスの低いところでは、必ずしも強度変化と一致しない。航空写真判読結果との比較では、今回の災害に伴う斜面崩壊等の地表面変動の検出には、コヒーレンス変化よりも強度変化の方が適していたと考えられる。

Key Words: SAR, surface movement, color composite image, coherence change, West Japan torrential rain

1. はじめに

西日本豪雨に伴って、各地で多数の地すべりや斜面崩壊が発生し、大きな被害をもたらした。豪雨や地震災害発生時の対応には被災地域の即時把握が必要であるが、人員・機材の不足や天候不良のために、困難なことが多い。これを補う手段として人工衛星搭載合成開口レーダーによる観測が期待されている。

宇宙航空研究開発機構（以下、JAXA）などの各国の宇宙機関はだいち2号（ALOS-2）など合成開口レーダーを搭載した地球観測衛星を運用しており、大規模災害発生時には緊急観測を実施して、行政の災害対応にデータないしは解析結果を提供している¹⁾。人工衛星搭載合成開口レーダーは天候に左右されず、地表面を幅数10 kmから400 kmを超える範囲で観測することができる利点がある。その一方、衛星が適切な観測軌道に再来するまで数日間待たなければならない、という欠点がある。この問題に対しては、ALOS-2は観測方向を変更することで対処しているが、発災直後2～3日中に適切な観測がなされる確率は必ずしも高くない。

SARデータは、衛星から射出した電波が地表面や構造物、あるいは使用する電波の波長によっては樹木の樹冠などで散乱された後方散乱波の振幅（強度）と位相からなる。一般にSAR画像として紹介されるのは、強度で

あり、被害地域の把握にはまず強度の変化を見ることが多い。例えば、発災前森林であったところが、斜面崩壊により裸地となると強度が増加することが多い。また、洪水・津波などにより陸域に湛水すると強度が大きく低下する。これらのことから被災地域を検出することが期待される。

一方、位相は衛星と地表面間の距離の情報と散乱特性の情報を含んでいる。発災前後の距離の変化から地表面変動を検出することが可能であり、これまで多くの研究例がある。しかし、この干渉法と呼ばれる手法は、変位勾配が大きいところでは全く情報が得られなくなる欠点があり、今回対象とするような災害には適用できない。これに対して、2回の観測の散乱波の位相の類似性（コヒーレンス）を見ることで、地表面の変動の有無を知ることが出来る。このコヒーレンス変化検出手法も地震に伴う構造物被害²⁾や液状化による被災地域³⁾の把握などに用いられている。

我々は、2017年九州北部豪雨に際して、ALOS-2画像を用いて、地すべりや斜面崩壊等の検出を試みた。今回、強度変化とコヒーレンス変化の2つの手法を広島市～呉市～東広島市周辺に適用し、その適用可能性について検討する。

2. 観測データと解析方法

(1) ALOS-2 画像

表 1 に本解析で使用した ALOS-2 画像の情報を示す。JAXA は、発災直後に複数の軌道から観測を実施したが、ここではコヒーレンス変化の検出を行うために、発災前に複数回の観測が行われている高分解能モード（Strip-map mode）の画像のペアを用いた。いずれも右方向に電波を射出する観測で、南行（北行）軌道の場合は東南東（西南西）上空から見た画像となっている。また、広域観測モード（ScanSAR mode）の活用可能性を議論するために、広域観測モードのペアも 1 組解析した。この観測は左方向の観測であるので、南行軌道からではあるが、西北西上空から見た画像となっていることに留意されたい。

一般に ALOS-2 による繰り返し観測は、右方向の観測で 30～40° 前後の入射角で行われており、左方向の観測は頻度が低い。宇宙航空研究開発機構から公開されている画像は、発災直後に実施された観測のため、左方向や高入射角の観測である。それぞれ頻度が低いため、コヒーレンスの変化を見るのに適した観測を選んだ。

(2) 解析手法

解析には Gamma Remote Sensing 社製 Gamma® ソフトウェアを使用した。飛田幹男氏と小澤拓氏が国土地理院 10m メッシュ・デジタル標高データを楕円体高に編集した DEM をもちいて、一般的な 2 パス干渉法を適用した。干渉処理中に位置合わせされた強度画像を加色混合法で処理し、強度変化を抽出した。具体的には、最初の観測による強度画像を赤、2 回目に観測強度画像を水色（緑＋青）のチャンネルに適用して RGB 合成した。コヒーレンスは、Gamma® の cc_wave 関数を用いて計算した。なお、干渉処理およびコヒーレンス等の詳細に関しては、地震調査委員会⁴⁾を参照されたい。

コヒーレンスは、地表面の状態の変化の検出に適しているが、解析ペアの軌道間距離や期間、さらには地形などに大きく左右される。このため、災害前にコヒーレンスが低いところでは、変化の検出が難しくなる。このため、Watanabe et al.(2016)²⁾にならい、災害前のコヒーレンスが 0.2 以下の領域は除いた。また、単純にコヒーレンスの差を取るのではなく、Watanabe et al.(2016)などによく利用されている、(1)式の相対コヒーレンス変化を用いる。

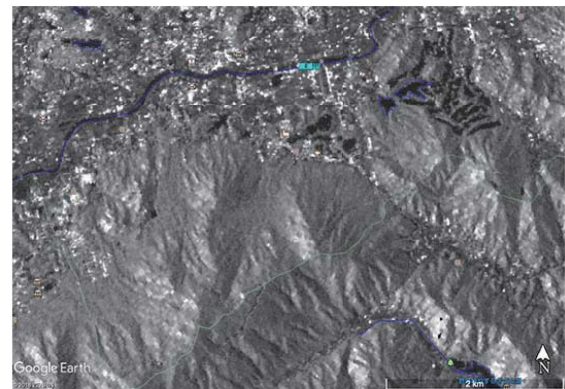
$$\Delta\gamma = \frac{\gamma_{pre} - \gamma_{co}}{\gamma_{pre} + \gamma_{co}} \quad (1)$$

ここで、 γ_{pre} および γ_{co} は、それぞれ災害前のペアのコヒーレンスと発災時を挟んだペアのコヒーレンスである。災害前のコヒーレンスは複数のペアがある北行軌道

表-1 解析に使用した画像ペアの情報

パス	軌道	方向	入射角	観測日 1	観測日 2	軌道間距離 (m)
P22	南	左	57°	2018/07/02	2018/07/16	75
		右	40°	2017/11/22	2018/6/20	226
				2018/6/20	2018/8/29	-179
P129	北	右	36°	2017/5/27	2018/1/20	-83
				2017/5/27	2018/7/21	4
				2018/1/20	2018/3/17	97
				2018/3/17	2018/7/21	86

(a)



(b)

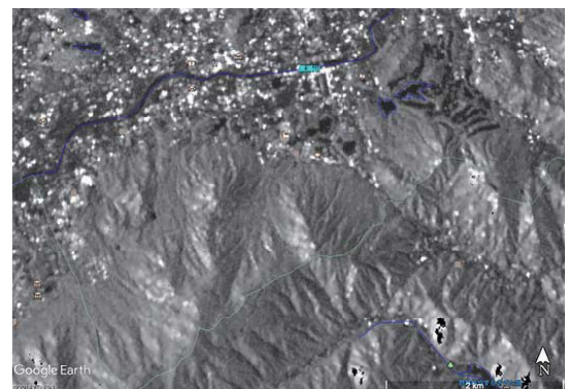


図-1. 強度画像の例。呉市～東広島市境界付近野呂山北麓の ALOS-2 強度画像。(a)2018 年 3 月 17 日、(b)2018 年 7 月 21 日。Google Earth により地理情報と重ね合わせた。

(P129) については 2017 年 5 月と 2018 年 1 月のペアと 2018 年 1 月と 3 月のペアのコヒーレンスの平均を、南行軌道 (P22) については 2017 年 11 月と 2018 年 6 月のペアのコヒーレンスを用いた。

3. 強度変化

図-1 に強度画像の例を示す。呉市と東広島市境界付近野呂山北麓の ALOS-2 強度画像である。河川や池、水田、ゴルフ場などは散乱波の強度が低いため、黒く見える。一方、植生の多い山地部では斜度により灰色から白色に表現される。この画像は北行軌道から得られたものであるため、西向きの斜面が明るく、東向きの斜面が暗

(c)

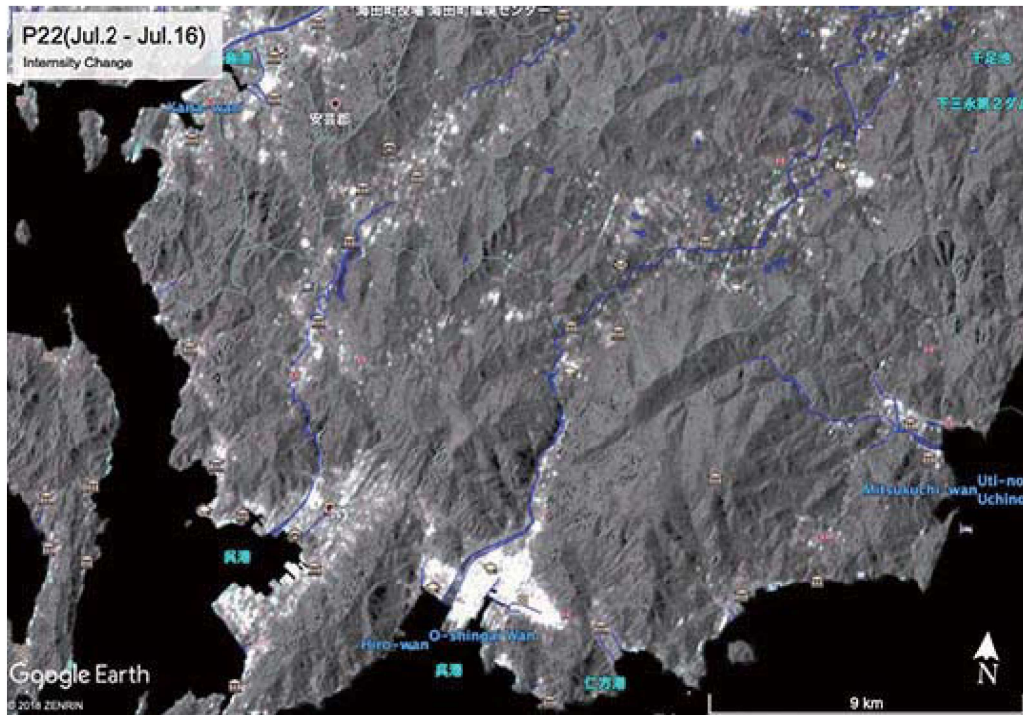


図-2（続き）．(c)南行軌道 P22 の広域観測モードの 2018 年 7 月 2 日と 16 日のペア．

図-2(b) は南行軌道 P22 の 2018 年 6 月 20 日と 8 月 29 日のペアである．図-2(a) と同様に，野呂山北麓に水色の領域が認められ，大きな地表面の変化があったことがわかる．この画像の方が北行軌道のものより明瞭で，かつ検出された変動域が多い．これは，電波の射出方向と斜面の向きの関係で検出可能性が変化するためと考えられる．なお，この画像においても，坂町周辺の変化は認められない．

図-2(c) は，広域観測モードのペアの強度画像の加色混合結果である．この画像においては，顕著な変化は認められない．SARにおいてはかなり大きい入射角（ 57° ）が用いられていることが一つの要因と考えられる．また，広域観測モードは空間分解能が約 100 m とされており，高分解能モードにくらべて大きく劣ることも影響しているのかもしれない．

4. コヒーレンス変化

図-3に，高分解能モードの画像ペアのコヒーレンスを示す．図-3(a)および(c)に明かなように，災害前でも山地においてコヒーレンスが低い．特に広島市の北東部

や呉市の北側の山地は 0.4 以下のコヒーレンスとなっている．これらの地域は，災害を挟むペアでも同様に低コヒーレンスであり，災害を挟むペアのみで被害の有無を検出するのは適切ではないことがわかる．特に，南行軌道 P22 の画像は，軌道間距離がいずれのペアでも 200 m 前後であり，これがコヒーレンスを低下させる要因であると考えられる．一方，北行軌道 P129 の画像は，軌道間距離が 100 m 以下で，全体的にコヒーレンスが高い．災害前のペア図-3(c)と災害を挟むペア図-3(d)を比べると，災害を挟むペアにコヒーレンスが低い領域が増えていのように見える．

図-4 は，(1)式の $\Delta\gamma$ を図示したものである．なお，災害前のペアにおいてコヒーレンスが 0.2 以下の領域はマスクしている．図-4(a)と(b)ともに全体が正の値になっており，画像全体ではコヒーレンスが低下したことがわかる． $\Delta\gamma$ が 0.6 以上の変化を示した領域も散見されるが，平野部のものは，前記の通り河川や水田等である．山間部で $\Delta\gamma$ が 0.6 以上の領域が見られるが，その多くは災害前のコヒーレンスが低い領域である．特に南行軌道 P22 では，この傾向が顕著である．一方，強度画像で認められた野呂山北麓の変化は顕著でない．

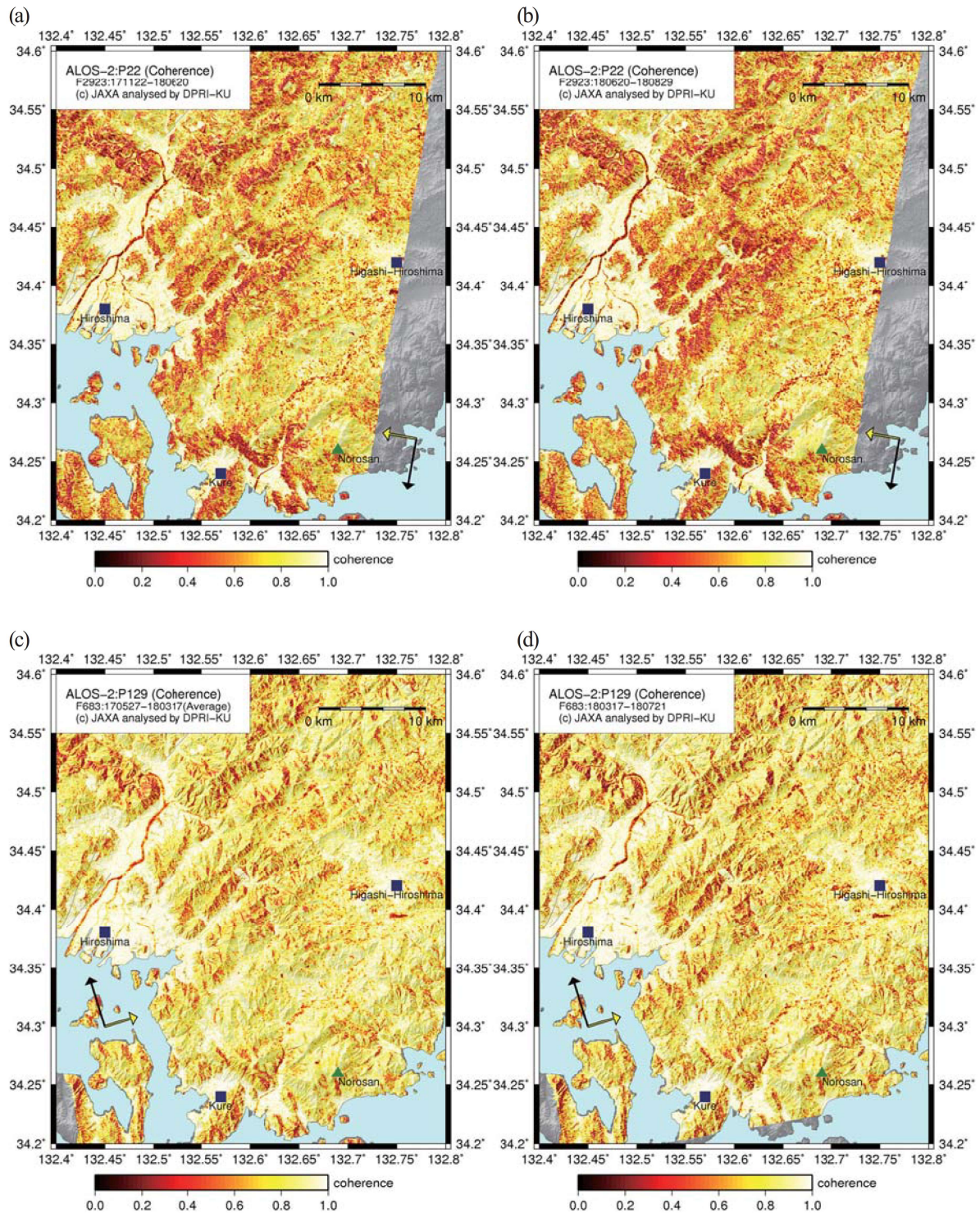


図-3. 高分解能モードの災害前と発災時を挟むペアのコヒーレンス。(a)南行軌道 (P22) の2ペア (2017年11月-2018年1月と2018年1月と6月)の平均。(b)P22の2018年6月と8月のペア。(c)北行軌道 (P129) の災害前のペア (2017年5月と2018年3月)。(d)P129の2018年3月と7月のペア。

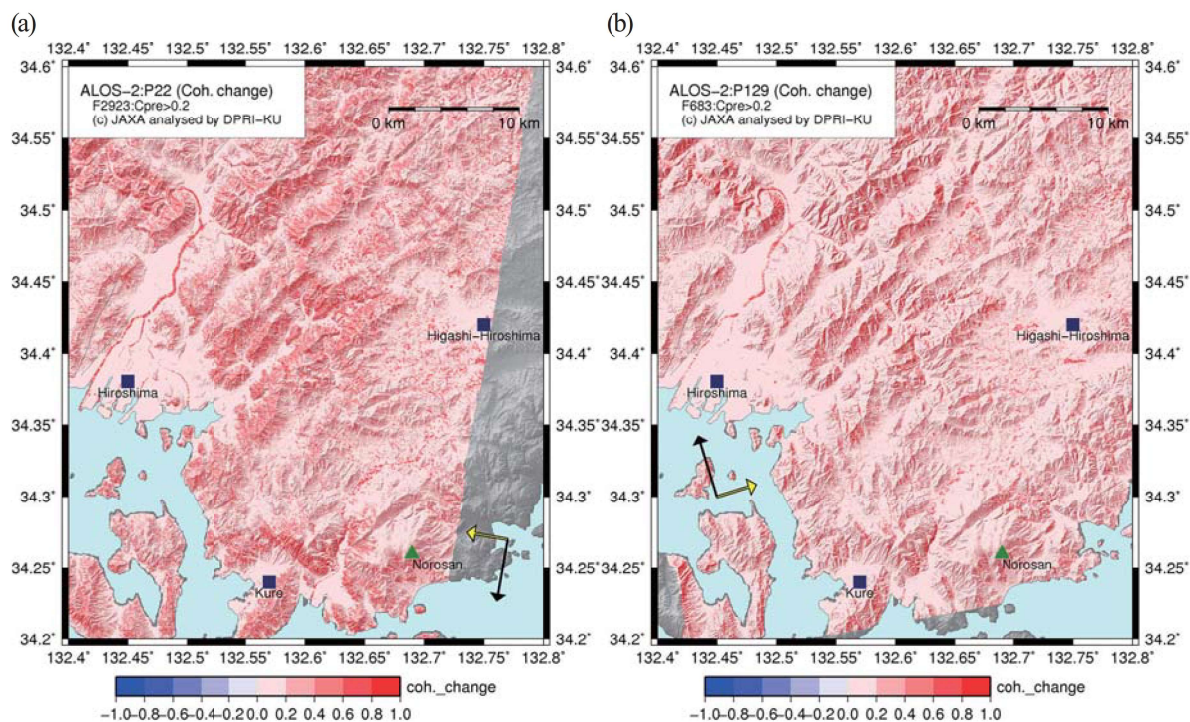


図-4. コヒーレンス変化. 災害前のペアのコヒーレンスが 0.2 以上の領域の $\Delta\gamma$. (a) 南行軌道 (P22). (b) 北行軌道 (P129).

5 議論

西日本豪雨前後の ALOS-2 画像を解析し、地表面変動域を検出する手法として広く用いられている、強度変化の加色混合法とコヒーレンス変化を適用し、斜面崩壊や地すべり等の検出を試みた。結果として、呉市と東広島市境界の野呂山北麓に強度の変化が認められた。

図-5 に国土地理院による航空写真判読から得られた崩壊地等の分布を示す⁹⁾。これによると、広島市から東広島市に至る領域のほぼ全域において崩壊が検出されている。今回の ALOS-2 の解析ではこれほどの強度やコヒーレンスの変化領域が検出されなかった。この原因としては、いくつかの理由が考えられる。まず、SAR の場合、斜め上空からの観測になることから、斜面の向きによって電波の入射角が変わり、場合によってはシャドーになって散乱波が得られないケースもある。また、山間部は植生に覆われていることが多いことから、災害前も強度やコヒーレンスが必ずしも高くない。特にコヒーレンスは図-3 に示すように、衛星の軌道間距離に影響される。また、植生の季節変化（広葉樹の落葉など）にも影響される。これらを低減するためには、時間間隔が短く、かつ軌道間距離も短い観測が求められる。

図-3 から明らかなように、コヒーレンス変化を活用するためには、災害前のコヒーレンスの情報を蓄積しておく必要がある。このためには、同じ軌道から同じ入射角で定期的に観測が繰り返されることが前提となる。

しかし、ALOS-2 は緊急時には入射角を変更して観測することができるが、必ずしも災害前の観測から短時間である保証はない。また、多方面で緊急観測が行われており、そのためのリカバリー観測などが実施されることから、高分解能モードの観測が、不定期になっているケースが散見される。この欠点を克服するためには、広域観測モードを繰り返すことが考えられる。これにより 14 日の災害間隔でデータが得られるが、空間分解能が高くないため、図-2 に見られるように、必ずしもよい結果が得られない。

欧州宇宙機関が運用している Sentinel-1 は 2 機の衛星を運用することにより、最短で 6 日の再来間隔を達成している。しかし、C バンドのレーダーであることから、山間部でのコヒーレンスが低いケースが多い。実際、今回の災害に際しても画像解析を行ったが顕著な変化は得られなかった。

以上より、複数の L バンド SAR 搭載の衛星の運用、または、広域観測モードでかつ空間分解能が高い観測が必要と考える。JAXA が開発中の次期先進レーダー衛星 ALOS-4 は、広域観測かつ高分解能の観測が可能なレーダーの搭載を予定している⁹⁾。この衛星の運用により、日本域では 2 週間に 1 回の頻度で最大観測幅 200 km、かつ空間分解能 3~10m の観測が可能となる。ALOS-4 に期待するところが大きい。

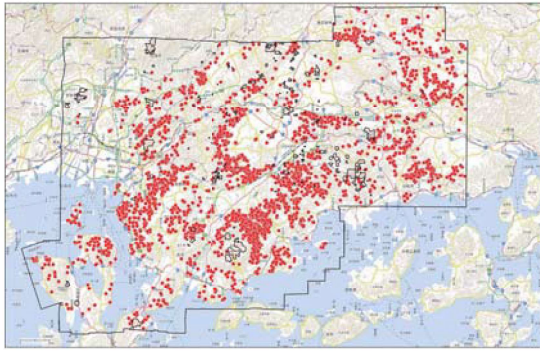


図-5. 国土地理院による航空写真判読から推定された崩壊地の分布⁵⁾

6. 結論

西日本豪雨前後の ALOS-2 画像を解析し、広島市～呉市～東広島市の領域で、斜面崩壊等の検出を試みた。強度画像の加色混合とコヒーレンス変化の計算を行ったところ、強度変化画像中の呉市～東広島市境界の野呂山山麓において変化を検出した。これは航空写真判読結果とも整合する。しかし、その他の地域では顕著な変化が認められなかった。コヒーレンス変化では山地の災害前のコヒーレンスが低いことから、斜面崩壊に伴うと考えられる明瞭な変化は見られなかった。また、広域観測モードでは強度変化においても変化の検出はできなかった。

上記の結果は、衛星の観測頻度や軌道間距離等衛星の問題や山地の傾斜や植生の季節変化などの要因が考えられる。これらの問題に対処するべく、JAXA が高頻度・高空間分解能の広域観測が可能な次期先進レーダー衛星が開発中であり、これに期待したい。

謝辞：本解析で使った ALOS-2 画像は、ALOS-2 Research Announcement 2（代表者：橋本学（P3052002））にて、JAXA より提供されたものです。国土地理院 10 m メッシュの楕円体高デジタル・モデルは東京大学地震研究所共同利用特定共同研究「SAR を用いた多角的な地殻・地表変動研究」（課題番号 2018-B-02、研究代表者：高田陽一郎北海道大学准教授）において提供されました。関係者の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター、「だいち 2 号」による平成 30 年 7 月豪雨の観測結果について，https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/img_up/jdis_pal2_heavyrain_westernjapan_20180711.htm（2019 年 2 月 10 日アクセス）。
- 2) Watanabe, M., R. B. Thapa, T. Ohsumi, H. Fujiwara, C. Yonezawa, N. Tomii, and S. Suzuki: Detection of damaged urban areas using interferometric SAR coherence change with PALSAR-2, *Earth Planets Space*, Vol. 68, No.131, doi:10.1186/s40623-016-0513-2, 2016.
- 3) 小林知勝・飛田幹男・小荒井衛・乙井康成・中埜貴元，干渉 SAR のコヒーレンス変化から見る平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震に伴う液状化地域，国土地理院時報，122 巻，143–151，2011。
- 4) 地震調査委員会，「合成開口レーダーによる地震活動に関連する地殻変動観測手法」報告書，https://www.jishin.go.jp/reports/research_report/main_eisei/，2011（2019 年 2 月 10 日アクセス）。
- 5) 国土地理院，平成 30 年 7 月豪雨に関する情報 4. 崩壊地等の分布図，<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H30.taihuu7gou.html#5>，2018（2019 年 2 月 10 日アクセス）。
- 6) 宇宙航空研究開発機構，先進レーダー衛星 ALOS 4，http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos4/index_j.html，（2019 年 2 月 10 日アクセス）。

(2019. 2. 10 受付)

DETECTION OF SURFACE MOVEMENTS WITH SATELLITE-BORNE SYNTHETIC APERTURE RADAR

Manabu HASHIMOTO

We analyzed ALOS-2/PALSAR-2 images acquired before and after the torrential rain in the Hiroshima area, western Japan in July, 2018 to detect locations of slope failures or landslides. We produced color composites of intensity images and computed change in coherence. ScanSAR images that was acquired right after the disaster did not detect significant changes in intensity possibly due to their coarse spatial resolution. On the other hand, strip-map mode images revealed several spots of change in intensity on the northern flank of the Mt. Norosan at the boundary of the Kure and Higashi-Hiroshima cities. Although we recognized decrease of coherence for the pair of images spanning the disaster, those were not necessarily consistent with intensity changes in mountainous areas. Comparing the present results with those deduced from areal photos, we consider that intensity changes are more suitable for the detection of surface changes than coherence changes in this disaster.