

人工衛星SAR画像による 河道閉塞箇所への緊急判読調査手法の提案

神山 嬢子・江川 真史・國友 優

国土技術政策総合研究所 土砂災害研究部 土砂災害研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）。

豪雨等により、大規模崩壊等が広域的に発生している恐れがあると認められる場合、決壊等による二次災害を防止するためには、河道閉塞の有無や位置、規模を迅速に把握する必要がある。ここでは、ヘリコプターによる目視調査が困難な夜間や悪天候時でも迅速に調査を行い、河道閉塞を覚知することを目的とした、合成開口レーダ（SAR）画像の緊急判読調査手法を提案する。

キーワード 河道閉塞、判読調査、人工衛星、合成開口レーダ（SAR）

1. はじめに

近年、2004年新潟県中越地震や2008年岩手・宮城内陸地震、2011年9月の台風12号による豪雨など、地震や豪雨により大規模な河道閉塞が複数形成される事例が見られる。このような河道閉塞の形成につながる大規模崩壊等の異常現象が広域的に発生する恐れがある場合には、河道閉塞の有無や位置、規模を広範囲から迅速に把握し、決壊等による二次災害を防止する必要がある。

従来の被災状況把握には、ヘリコプターによる目視調査が用いられるが、夜間や悪天候時には迅速な調査が行えないことや、広範囲の調査に時間がかかるといった課題がある。

そこで、夜間や悪天候時でも広域的な調査を行い、より迅速に河道閉塞の有無・位置・規模を把握することを目的として、合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar：以下、「SAR」という。）画像を用いた河道閉塞箇所の緊急判読調査手法の検討を行った結果を報告する。

2. SAR観測・画像の特性

SARは、アンテナから地表面に対し斜めに照射したマイクロ波が対象物で散乱してアンテナ方向へ戻る後方散乱波を観測する能動型センサで、人工衛星や航空機に搭載されている。マイクロ波は雲を透過し、観測に太陽光を必要としないため、夜間や悪天候時でも観測できるという利点がある。

一方、SAR画像はマイクロ波の反射強度を表すモノクロ画像であり、光学画像と比較すると、直感的な地被状況の判別（裸地と植生の違い等）が困難である（図-

1）。また、マイクロ波を斜め下方に照射するため、急斜面等の上部が下部よりアンテナに近くなることで画像の上下が反転して白くつぶれるレイオーバー（図-2のA、B）や、高い山等が実際の平面位置よりアンテナに近い位置に倒れ込んで表示されるフォアショートニング（図-2のE）、マイクロ波が高い山等に遮られ影ができるレーダーシャドウ（図-2のEより衛星アンテナから遠い箇所）など、SAR観測原理上の特徴が画像上に現れる。結果、画像上に判読不能領域が生じる（図-2）。

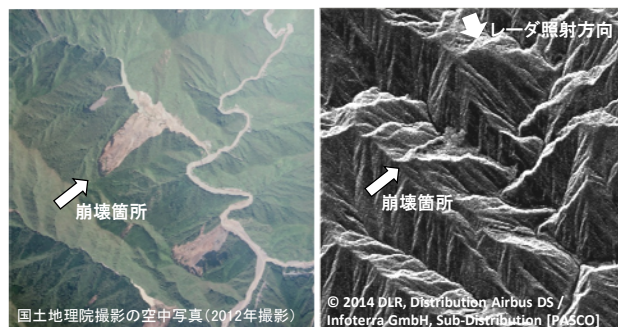


図-1 光学画像（左図）とSAR画像（右図）

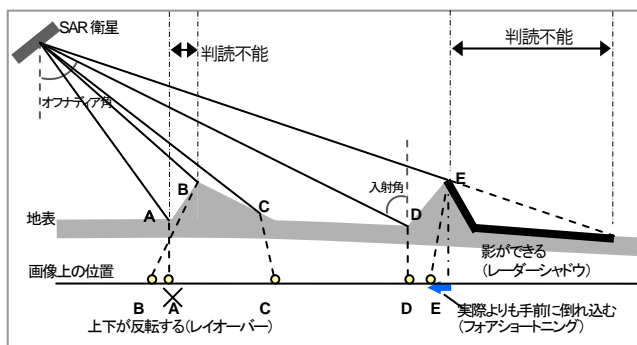


図-2 SAR画像の幾何特性（画像の反転、倒れ込み）

また、SARでは、偏波（電界の振動方向の向きを表す）の観測において、単偏波と多偏波がある。偏波は、水平偏波（H）と垂直偏波（V）に分類され（図-3）、単偏波は単一の偏波の送受信を行うものである。一方、多偏波は、センサがそれぞれの偏波を切り替えて送受信し、複数の偏波データを観測することができる。裸地ではHH及びVVが卓越し、森林ではHV及びVHが卓越するように、地表面の状況による後方散乱特性の違いを観測することができる。

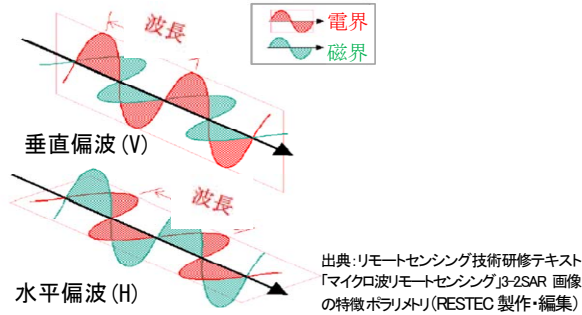


図-3 水平偏波、垂直偏波の概念図

3. 観測条件の検討

河道閉塞箇所の有無・位置・規模を迅速かつ的確に把握するためには、入手可能な人工衛星画像の中で、可能な限りSAR画像の判読可能範囲や判読可能な現象や規模、画像の視認性を向上する必要がある。SAR画像は、観測時の観測条件により、画像の視認性が大きく異なるため、山間地域における河道閉塞の判読に適した観測条件の検討を行った。

(1) 検討方法

2011年9月の台風12号による豪雨により形成された河道閉塞17箇所¹⁾のうち、災害後に取得したSAR画像の範囲に含まれる11箇所を対象に、観測条件の違いによる視認性の比較を行った。観測時に選択可能な観測条件である、バンド、照射方向、偏波観測、分解能、観測範囲、入射角の6項目を比較対象とした（表-1）。検討には、災害時に運用され、10mより高分解能で新規観測要求が可能なSAR衛星である、TerraSAR-X（ドイツ、Xバンド）、COSMO-SkyMed（イタリア、Cバンド）、RADARSAT-2（カナダ、Cバンド）の災害後1年以内の画像を用いた（表-2）

表-1 観測条件

規程条件	観測条件	SAR画像における主な影響
利用衛星	①バンド	土地被覆分類
	②照射方向	画像範囲、画像の歪み・倒れ込み方向
各衛星の観測モード	③偏波観測	土地被覆分類
	④分解能	判読対象規模
	⑤観測幅	画像範囲
—	⑥入射角	画像の歪み、倒れ込み

表-2 検討に利用したSAR画像（10シーン）

No	衛星	バンド	撮影日	軌道	照射方向	分解能	入射角	偏波	検討項目
1	TerraSAR-X	X	2011/09/05	北行	東向き	3m	39°	HH	標準画像（緊急観測）
2			2011/09/20	南行	西向き	1.7m	51°	HH	分解能
3			2011/10/06	南行	西向き	3m	37°	HH	照射方向
4			2011/10/06	南行	西向き	3m	37°	HH	照射方向
5			2011/11/19	南行	西向き	3m	39°	HH	照射方向
6			2012/01/21	北行	東向き	3m	21°	HH	入射角
7	COSMO-SkyMed	X	2011/09/10	南行	西向き	3m	34°	HH	バンド（センサの違い）
8	RADARSAT-2	C	2012/01/10	北行	東向き	3m	36°	HH	バンド
9			2012/01/10	北行	東向き	8m	36°	HH	分解能 （No1のリサンプリング画像）
10			2012/08/06	北行	東向き	8m	39°	HH,HV, VH,VV	偏波観測

(2) 検討結果

表-1の観測条件毎に、画像を比較検討した結果を以下に示す。

①バンド

SAR衛星で利用されているマイクロ波のバンドは、主に、Xバンド（波長3.1cm）、Cバンド（波長5.6cm）、Lバンド（波長23.6cm）がある。画像No.1（Xバンド）、No.8（Cバンド）を比較したところ、視認性に大きな違いは見られない（図-4）。

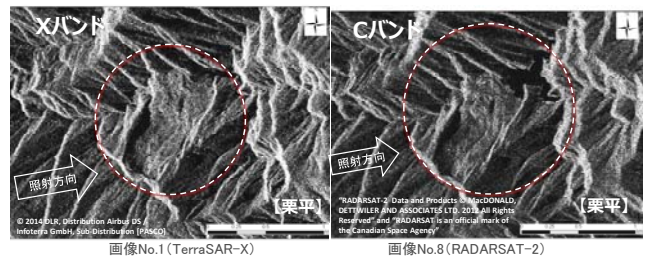


図-4 バンドの異なる単偏波SAR画像

②照射方向

画像No.1（東向き照射）とNo.5（西向き照射）を比較したところ、斜面の向きに対する照射方向の違いにより、SAR画像の視認性が大きく異なっている（図-5）。また、単偏波SAR画像の判読から、照射方向の違いによる河道閉塞11箇所の抽出率を求めたところ、片側照射の画像では概ね全体の50～70%、両側照射の画像では約90%であった²⁾。北行・南行の両軌道の画像を判読に用いることで、判読不能領域が減り、判読の見逃しを低減することができる。

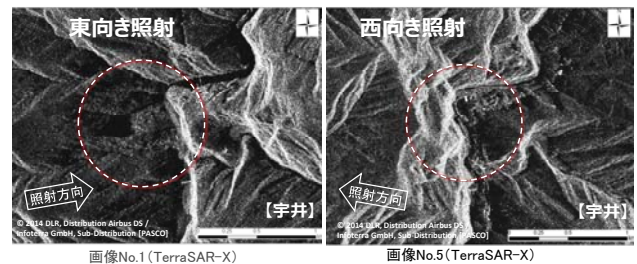


図-5 照射方向の異なる単偏波SAR画像

③偏波観測

単偏波はモノクロ画像であるが、多偏波は各偏波データを基に画像処理し、Red、Green、Blueの光の3原色に

処理値を割り当てることでカラー画像化できる。各偏波データの画像処理方法により、単純合成画像や3成分散乱電力分解画像³⁾など複数の多偏波SAR画像を作成できるが、画像の視認性や画像処理にかかる作業時間を考慮すると、河道閉塞箇所の緊急判読調査の目的においては、HH+HVの単純合成画像が適している⁴⁾。

比較検討には、このHH+HVの単純合成画像（以下、「2偏波画像」という。）を用いた。No.10は、森林で卓越するHV偏波をGreen、裸地で卓越するHH偏波をRedとBluで表現しているため、緑色で表現される森林の中で、崩壊により裸地化した斜面が赤紫色で表現される。そのため、モノクロの単偏波画像No.1と比較し、直感的に崩壊地の判読がし易い結果となった（図-6）。

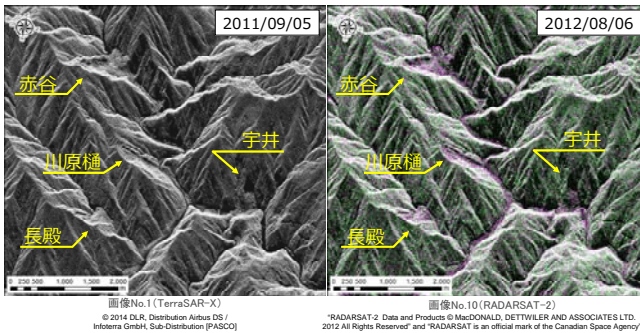


図-6 単偏波（左図）と2偏波（右図）のSAR画像

④分解能

画像No.8（分解能3m）とNo.9（分解能8m）を比較したところ、単偏波画像では、分解能8mでは画像が粗く、視認性が低下することが分かる（図-7）。判読上、単偏波SAR画像では3mより高分解能であることが望ましい。

一方、図-6に示す単偏波画像が分解能3mに対し、2偏波画像は分解能8mと、単偏波よりも分解能が低下するが、2偏波画像は地表面の状況をカラー化して表現できるため、視認性において分解能低下の影響は小さいと考える。

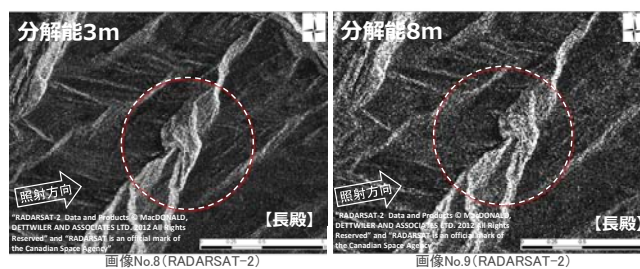


図-7 分解能の異なる単偏波SAR画像

⑤観測幅

各人工衛星の観測モードにより観測幅は異なるが、一般的に高分解能や、多偏波観測を行うモードである程、観測幅が小さくなる。そのため、河道閉塞箇所の判読が可能な分解能、かつ、ある程度の広域性を確保する上では、観測幅20km程度以上が望ましいと考える。

⑥入射角

画像No.1（入射角39°）とNo.6（入射角21°）を比較したところ、No.1では画像の歪みが少なく視認性が良好であるのに対し、入射角が小さいNo.6では画像の歪みが大きく、地形的な特徴を判別することが難しい（図-8）。一方で、入射角が大きいと画像の歪みは小さくなるが、レーダーシャドウが多くなり、判読不能領域が広がる。検討に用いた画像の判読では、入射角35°～45°程度の画像の視認性が良いことが分かった。

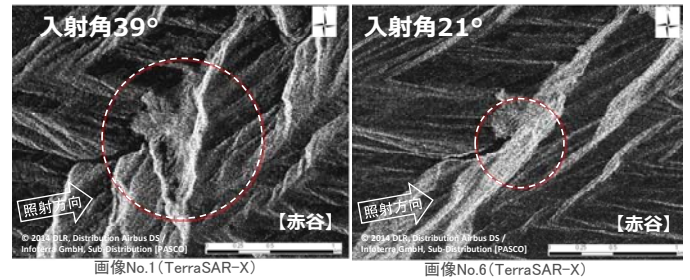


図-8 入射角の異なる単偏波SAR画像

以上の検討結果を元に、山間地域における河道閉塞の判読に適した観測条件を表-3に整理した。

また、今回判読の対象とした河道閉塞11箇所は、崩壊地の平面投影面積が0.6～33.7haと、様々な規模を対象としたが、表-2の画像のいずれも、面積1ha未満の河道閉塞箇所の判読は困難であった。SAR画像の判読により抽出可能な河道閉塞の規模としては、面積1ha程度以上の崩壊地を判読対象とすることが適当である。

表-3 推奨する観測条件

観測条件	単偏波SAR画像	2偏波SAR画像
①バンド	X, C	
②照射方向	東向き・西向きどちらの照射方向も可 ※両方向の画像を用いると判読の見逃しが軽減	
③偏波観測	単偏波観測 (HH)	2偏波観測 (HH/HV)
④分解能 (Res)	Res ≤ 3m	Res ≤ 8m
⑤観測幅	他条件を満たす広域観測モード	
⑥入射角	35° ≤ θ ≤ 45° 程度	

4. 判読手法の検討

(1) 判読チェックリストの作成

SAR画像を用いた河道閉塞箇所の判読は、2. で述べたSAR画像の特徴による判読の難しさから、判読を行う技術者により、見落としや誤抽出等、判読結果の確度が大きくことなることが予想される。そのため、判読者により大きな差異が生じないように、標準的な判読の基準として、判読の際の着眼点を検討した。

河道閉塞の形成による地形的特長として、湛水域、崩壊地、河道を閉塞させる崩壊土砂の堆積域がある（図-9）。これらの地形的特長と、2. で述べたSAR画像の特徴を踏まえ、判読チェックリストを作成した（表-4）。

単偏波のモノクロ画像では、主に水部で後方散乱強度が弱く画像が黒く表現される湛水池に着目して判読し、カラー合成が可能な2偏波画像では、裸地と植生の判別視認性が向上するため、湛水池に加えて崩壊地に着目した判読が可能となる。そのため、それぞれの画像に応じた判読チェックリストの細部は異なるが、ここでは、より画像の視認性が高い2偏波画像の判読チェックリストを例示する(表-4)。

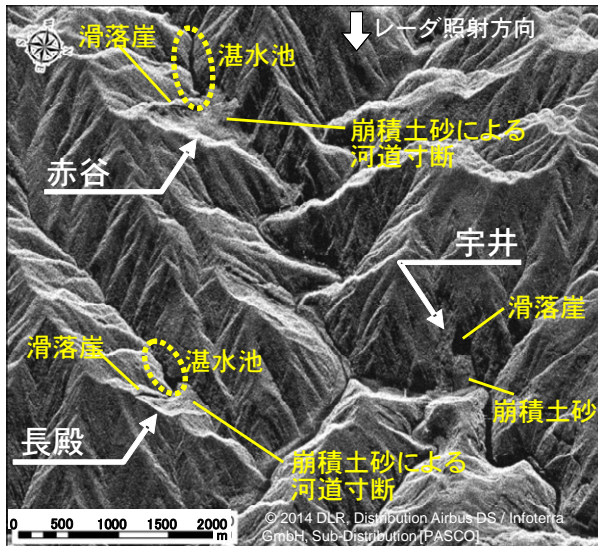


図-9 SAR画像における河道閉塞箇所の見え方
(単偏波SAR画像の例、2011年9月5日撮影)

表-4 2偏波SAR画像判読チェックリスト

確認範囲	チェック項目	判断基準	評価
崩壊地	裸地	・複偏波画像で赤紫色の裸地を呈するか ・斜面に位置するか(平坦地や緩斜面の集落、河道ではないか)	
	滑落崖	・湛水域周辺に滑落崖が確認できるか ・滑落崖周辺に段差によるシャドゥレイアウトは確認できるか ・滑落崖の形状は斜面方向に垂直な形状となっているか 等	
	崩壊地内	・滑落崖の下に崩壊形状は確認できるか ・崩壊形状は斜面方向と整合しているか 等	
	崩積土砂 (河道閉塞部)	・崩壊地内から下部に向かって崩積土は確認できるか ・崩積土の形状は舌状になっているか ・崩積土の到達範囲は地形形状と整合しているか ・河道閉塞部は谷を埋積する形状となっているか ・河道閉塞部の上流に湛水域は形成されているか ・崩積土上に倒木等の形状は確認されるか 等	
	崩壊規模	・河道閉塞が発生する程度の崩壊規模か	
土石流痕跡	流下痕跡	・崩壊地下部から流下跡が見られるか ・河道の拡張、植生の流出等による土石流の流下痕跡が見られるか	
	土石流堆積物	・土石流の堆積地(土石流段丘、沖積錐)が見られるか	
周辺地形	斜面勾配	・湛水域近傍に斜面は存在するか ・周辺斜面は崩壊が発生する程度の急勾配斜面か 等	
	相対的位置関係	・崩壊崖、崩積土、湛水域等の位置関係に不自然さはないか ・崩積土の到達範囲は地形と整合しているか 等	
河道	湛水域	・湛水域と想定される暗い領域が確認されるか ・上下流の常流幅と比べ不自然な幅となっているか ・ダム、取水堰等の人工構造物による湛水域はないか	
		崩壊跡地、露岩地	
判定	新規模崩壊	表層崩壊	
		大規模崩壊	
		深層崩壊	
	土石流痕跡	河道閉塞	

評価指標
○：形状が読み取れる △：不明瞭だが形状が確認できる箇所 ×：形状が読み取れない箇所 -：分からない

(2) 判読の流れ

広域の画像を効率的に判読する場合には、判読の優先順位や画像表示縮尺に留意する必要がある。大規模崩壊等により重大な二次災害を引き起こす河道閉塞箇所の早期把握を最優先とし、予察、概査、精査の順に行う。

① 予察

SAR画像の撮影範囲とその位置関係(主要地名、ダム

や道路などの主要地物)、SAR画像の特徴(斜面の倒れ込み具合、谷の見え方、河川・道路の見え方)を確認。

② 概査

河道閉塞の湛水域が短時間で満水となり、重大な二次災害を引き起こす可能性が高い主要河道の本川沿いや主要な集落の上流域について、優先的に判読する。

③ 精査

概査により抽出した箇所の細部(湛水の有無、濡筋や道路の寸断等)を詳細に判読する。次に、主要支川、支溪流レベルへと順次、細部まで判読し、画像内全域の状況を把握する。

(3) 判読調査の留意点

人工衛星SAR画像を有効に活用するためには、航空写真より早くSAR画像を入手する必要がある。各人工衛星の軌道位置により撮影頻度が異なることや、緊急観測の要求をしてからSAR画像を入手するまでに時間を要するため、各人工衛星の軌道位置をもとに、調査に必要な観測範囲に対し、表-3に整理した推奨される観測条件の画像を最も早く入手できる人工衛星を迅速に選定することが求められる。

5. まとめ

本報告では、人工衛星SAR画像による河道閉塞箇所の緊急的な判読調査手法の提案を行った。大規模な災害の恐れがある場合に、本手法による判読調査を実践できるよう、パソコン等の機材や地形図等のデータ類など日頃から準備しておくべきものや、人工衛星SARの緊急観測を依頼する際の手順等も含め、単偏波SAR画像、2偏波SAR画像それぞれについて、国土技術政策総合研究所資料に取りまとめている⁵⁾⁶⁾。

SAR画像を用いた目視判読において、判読の効率化や判読結果の一定の精度を確保するための標準的基準を取りまとめることができたが、目視による判読結果は、技術者の熟練度による影響が大きいと考えられるため、今後は、画像解析等で崩壊箇所を抽出する手法の検討や画像判読を支援するシステム開発を行い、判読調査のさらなる効率化、高精度化を図りたい。

なお、現在、LバンドSAR衛星の「だいち2号(ALOS-2)」が2014年5月に打ち上げられた事で、海外衛星も含め4つの高分解能人工SAR衛星が運用されている。LバンドSAR衛星は、本報告の検討対象に含まれていないが、高分解能かつ多偏波観測が可能であり、緊急判読調査に活用できるものと考えている。

また、災害の恐れがあるエリアを迅速に観測するためには、人工衛星の観測機会は限られるため、複数衛星の利用を想定するとともに、より迅速性や精度の向上が期待できる航空機搭載SARの活用も含め、判読調査におけるSAR観測の最適なおペレーションを検討していきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部：平成 23 年 9 月 13 日 記者発表 台風 12 号豪雨に伴う河道閉塞箇所数について
- 2) 林真一郎・水野正樹・佐藤匠・神山嬢子・岡本敦・吉川知弘・鶴殿俊昭・横田浩・野田敦夫・吉川和男：紀伊半島台風 12 号災害を事例とした人工衛星高分解能 SAR 画像の判読による河道閉塞箇所探索手法の確立、砂防学会誌、Vol.66、No.3、p.32-39、2013
- 3) 渡邊学・佐藤源之：フルポーラリメトリ Lバンド SAR データを用いた水害域、土砂災害域検出、ALOS-2/3 ワークショップ、2010
- 4) 水野正樹・江川真史・神山嬢子・佐藤匠・蒲原潤一：衛星多偏波 SAR 画像による大規模崩壊の緊急判読調査手法、土木技術資料、Vol.55、No.11、p.35-38、2013
- 5) 水野正樹・神山嬢子・江川真史・佐藤匠・蒲原潤一・林真一郎：単偏波の高分解能 SAR 画像による河道閉塞箇所判読調査手法（案）、国土技術総合研究所資料 No.760、2013
- 6) 水野正樹・神山嬢子・江川真史・佐藤匠・蒲原潤一：2 偏波 SAR 画像による大規模崩壊及び河道閉塞箇所の判読調査手法（案）、国土技術総合研究所資料 No.791、2014