

特集：強靱な国土の実現を目指した土木技術

大規模土砂災害の危機管理を支える探査技術とその活用

水野正樹・内田太郎・高原晃宙・木下篤彦・江川真史・丹羽 諭

1. はじめに

豪雨等により天然ダム形成が想定される場合、天然ダムの発生有無・位置・規模を広いエリアから迅速に把握し、決壊等による被害を防止する必要がある。しかし従来、人家から離れた山間部で発生した大規模天然ダムは、形成したことの覚知や、夜間や悪天候時の天然ダム形成確認調査（ヘリ調査）が困難といった課題があった。

そこで、天然ダムの形成とその位置と規模をより早く把握するために、国土技術政策総合研究所（以下「国総研」という。）、及び(独)土木研究所（以下「土研」という。）では、「振動センサーによる大規模崩壊の把握手法」、「合成開口レーダー（以下「SAR」という。）画像による天然ダムの緊急判読調査手法」、「流量低下監視による天然ダムの形成覚知手法」の3つの天然ダム探査技術を確立したので報告する。ここで、SARとは、マイクロ波を地表面に斜めに照射し、地表面からの後方散乱波を観測する能動型センサーで、衛星や航空機に搭載される。

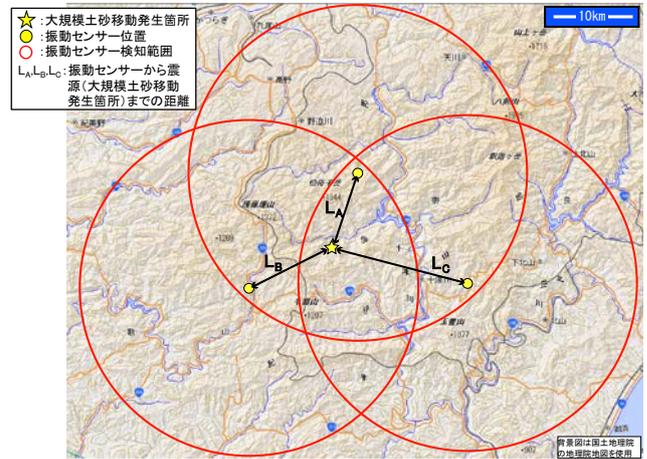
2. 大規模崩壊発生時の対応

2.1 振動センサーによる大規模崩壊の把握

(1) 仕組み

平成23年台風12号に伴う豪雨では、広域で同時多発的に土砂災害が発生し、大規模な土砂崩壊等の発生状況の把握に長時間を要したことから、住民避難のための的確な情報の早期提供が困難であったことが指摘されている¹⁾。よって、天然ダムを形成するような大規模崩壊が発生した際、いつ・どこで・どれくらいの規模で土砂移動が発生したかを夜間時や悪天候時等に関わらず、早期の住民避難のために迅速に把握する必要がある。

深層崩壊のような大規模土砂移動が発生すると、発生した箇所から数km先まで微弱な地盤振動が到達することが明らかになっている²⁾。この特性



※震源位置を繰り返し計算して、その収束点が震源（大規模土砂移動発生）位置

図-1 大規模土砂移動検知イメージ

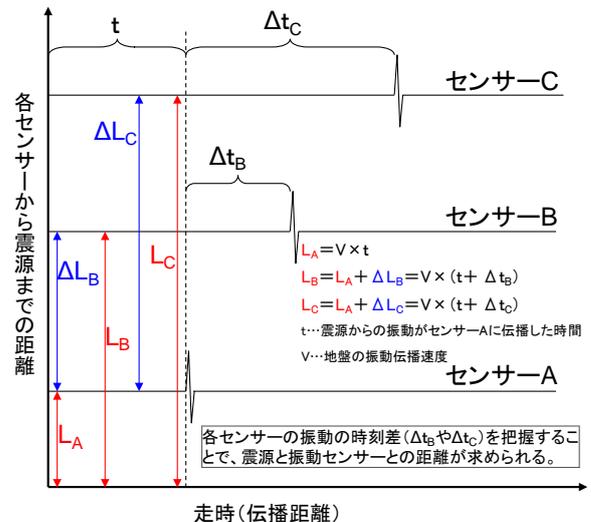


図-2 大規模土砂災害発生箇所特定イメージ

を利用し、崩壊によって発生した地盤振動を3箇所以上の振動センサーで捉えることで、それぞれのセンサーに到達した地震波の時間差や波形から崩壊発生位置や規模を特定・推定しようとする大規模土砂移動検知システムの構築が全国的になされている。大規模土砂移動の捕捉イメージ及び震源特定イメージを図-1、図-2に示す。

(2) 検証

土研では、これまで、発生箇所及び発生時間が判明している既往の深層崩壊の事例を収集し、(独)防災科学研究所によるHi-net（高感度地震

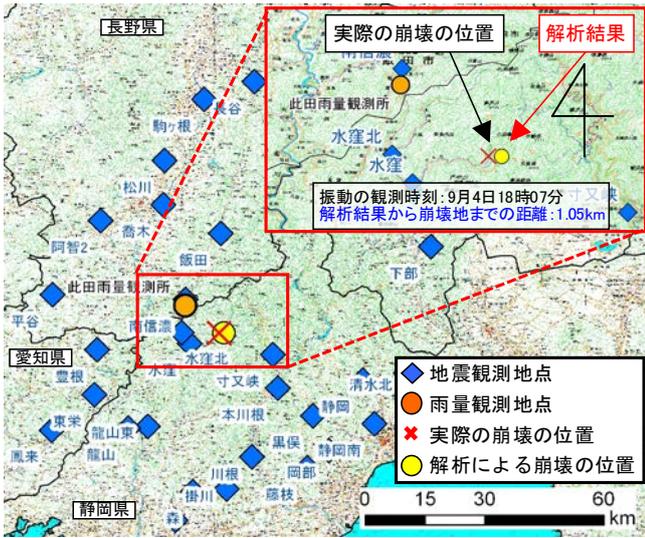


図-3 解析結果の一例（平成23年静岡県浜松市での崩壊）観測網）のデータを用いて振動から発生位置を予測する手法の検証を行った。一例として、平成23年台風12号により発生したと考えられている静岡県浜松市の水窪ダム上流域での崩壊の検証結果を図-3に示す。検証の結果、解析によって求められた崩壊位置と実際の崩壊位置にそれほどの差は認められず、本手法の有効性が示唆された。

(3) 課題

振動センサーには次のような課題も残る。まず、土砂移動以外の現象も計測することが挙げられる。例えば、地震に加えて、山地河川における洪水時の地盤振動³⁾といった自然由来の振動、交通や工場、下水道等の人工由来の振動など様々である。このように大規模土砂移動以外の現象により発生する地盤振動は大規模土砂移動を検知する過程においてはノイズとなる。

そこで今後、土砂移動の振動とノイズとなる振動の特徴を継続して整理・比較し、明確に区別できるようにしていくことが正確な土砂移動現象の把握及び崩壊位置の決定につながる。

また、振動センサーによる検知情報を基に住民に避難情報を短時間で伝達する状況に現状ではまだないが、住民に大規模崩壊の発生情報を迅速に伝えることは重要であり、検知手法と合わせて情報伝達方法を改善していくことが人命被害の防止に有効である。

2.2 SAR画像による天然ダムの緊急判読調査

(1)天然ダム探索におけるSAR画像の利用

SAR衛星のマイクロ波は、雲を透過し、観測に太陽光を必要としないため、従来へのり等によ

る調査と異なり、夜間でも悪天候時でも撮像可能といった利点がある。

そこで、国総研では、単偏波衛星SAR画像により天然ダムを探索する緊急判読調査手法を明確化した。そして国土交通省では、雨量レーダー、「振動センサーによる大規模土砂移動検知システム」、及び「衛星SAR画像による天然ダムの緊急判読調査」の3つの手法を組み合わせた大規模崩壊監視警戒システムを全国の深層崩壊の危険性の高い流域において構築することとしている。

(2)SAR画像の特性

SARの観測原理上、マイクロ波を斜め下方に照射するため、SAR画像は、影や特有のゆがみや倒れ込みによる判読不能領域が生じる（図-4）。

また、SAR画像の輝度特性として、軌道方向や対象物の表面粗度、地形勾配に対する電波の入射角の違いにより、SAR画像の見え方や明暗が異なる。特にマイクロ波が鏡面反射する水部（湛水池）や局所的に影（レーダーシャドウ）となる滑落崖は、画像上で黒色となる特徴がある。

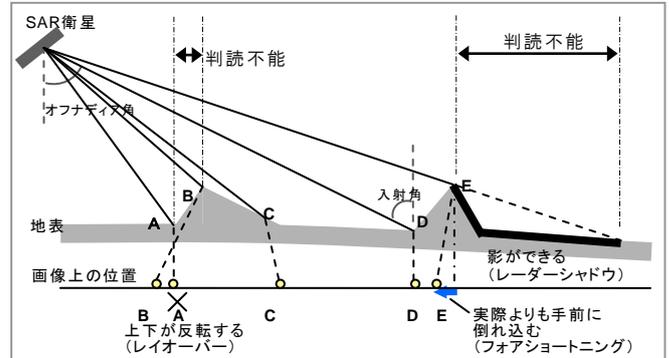


図-4 SAR画像の幾何特性（画像のゆがみ、倒れ込み）

(3)画像入手に要する時間

衛星SAR画像を有効に活用するためには、航空写真より早く衛星SAR画像からの情報が入手できる必要がある。SAR画像の撮影依頼から画像入手までに要する時間は、現在運用されている主なSAR衛星で約15時間～数十時間、2013年度打ち上げ予定のALOS-2で2時間程度を要する。そして、衛星軌道位置から決まる各衛星の撮影頻度は、4日に1回程度の衛星から、4機体制衛星の約12時間に1回程度の衛星がある。

従って、各衛星の軌道位置をもとに、最も早く必要な観測範囲の良好な条件の画像が入手できる衛星を迅速に選定する必要がある。

(4)SAR画像判読

判読に利用する単偏波SAR画像の条件は、分解能3m程度の広域画像、入射角39~48°程度が望ましい。また、単偏波SAR画像で判読可能な対象は、主に湛水域を有する平面投影面積1ha程度以上の天然ダムであり、衛星電波の照射方向が上となるよう画像を回転させ配置すると画像が判読し易い。

天然ダムを探索する場合に留意すべき地形的特徴は、湛水域、崩壊地、河道を閉塞させる崩積土砂である。これらの地形的特徴と、2.2(2)で述べたSAR画像の特性を踏まえて、表-1のチェックリスト⁴⁾に従い画像判読を実施するとともに、北行・南行の両軌道の画像を用いると判読不能領域が減り見逃しが減少する。

平成23年台風12号災害で発生した天然ダムの探索事例では、7箇所の大規模崩壊箇所が抽出できた。探索した画像の一部を図-5に示す。

表-1 単偏波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	
河道	湛水域	・湛水域がシャドウとして確認されるか		
		・上下流の滞り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では無いか		
周辺地形	斜面勾配	・湛水域近傍に斜面は存在するか ・周辺斜面は発生する程度の急勾配斜面か 等		
		・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ウ・レイオーバーは確認できるか ・滑落崖の形状は斜面方向に対し円弧状となっているか 等		
崩壊地	崩壊地内	・崩壊地の下に崩壊形状は確認されるか ・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かけ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		
	画像の肌理	・崩壊地内・崩積土等の表面は周辺林地と比べ平滑になっているか ・周辺斜面にみられる縞線パターンと違うパターンとなっているか 等		
	相対的位置関係	上下関係等		・滑落崖・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
		周辺地物		・周辺の道路網に分析はないか ・建物が埋積されているような状況は確認されるか
	総合評価			

○：形状が読みとれる箇所 △：不明瞭だが形状が確認できる箇所 ×：形状が読みとれない箇所

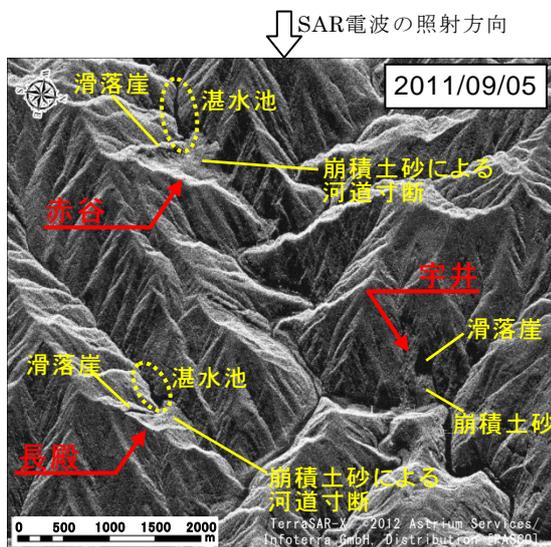


図-5 SAR画像による天然ダム発生状況

2.3 流量低下監視による天然ダムの形成覚知

土塊が山地河道の流水を堰き止めることにより、天然ダムより下流では、流量が通常の出水時に比べて急激に減少する⁵⁾。このことから、天然ダム下流で生じる急激な流量低下を検知することで天然ダムの形成を覚知することが可能と考えられてきた。

しかし、「どのような流量変動が生じた場合、天然ダムが形成したと判断するか?」、「どの範囲の天然ダムが覚知可能なのか?」については、十分な検討例がなく、流量観測データを用いた天然ダムの形成覚知・確認が実際に行われているとは言いがたい。そこで、国総研では、関東地方整備局と連携し、これら2つの課題について分析する手法を提案した(以下、「提案手法」と呼ぶ)。

まず、1つ目の課題については、通常時(非天然ダム形成時)に生じると考えられる、流量減少の程度を天然ダム形成の判断基準にすると、多くの空振りが生じる可能性があると考え、過去の実績から、空振りの頻度がある程度以下に抑えられると想定される流量減少の程度を天然ダム形成と判断する手法を提案した。

次に、2つ目の課題については、当該箇所でも天然ダムを形成した場合に通常時を上回るような急激かつ大規模な流量の低減が生じると考えられる区間を監視可能区間とする手法を提案した。提案手法では、ある流量観測箇所における天然ダムによる流量減少の程度は、天然ダム上流の流域面積に対する流量観測箇所の流域面積の割合に依存すると考えた。すなわち、流量観測箇所の流域面積に比べて、河道閉塞箇所上流の流域面積が大きい場合は、流量減少の規模も大きくなり、覚知しやすくなる(図-6のAの天然ダム)。一方で、流量観測箇所の流域面積に比べて、天然ダム上流の流域面積が小さい場合は、流量減少の規模も小さく、通常時の流量減少と同規模かそれ以下となり、天然ダムの覚知が困難であると考えられる(図-6のCの天然ダム)。そこで、提案手法では、十分な流量低下が生じ、河道閉塞の覚知が可能となる区間の集水面積の最小値を限界面積(図-6の黄色の範囲)とし、限界面積より、集水面積が小さい区間における天然ダムの覚知は困難であると考えた(図-6の緑線で囲んだ区間)。

一方、土塊が山地河道の流水を堰き止めること

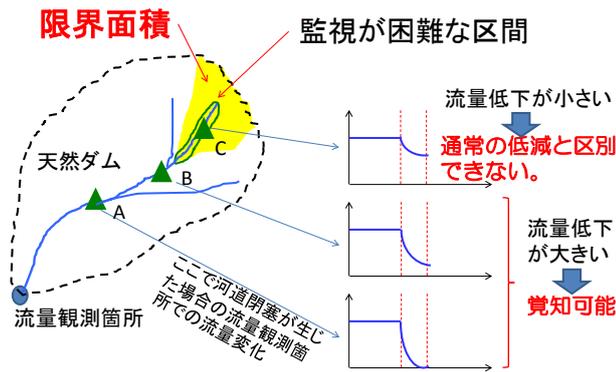


図-6 限界面積の模式図

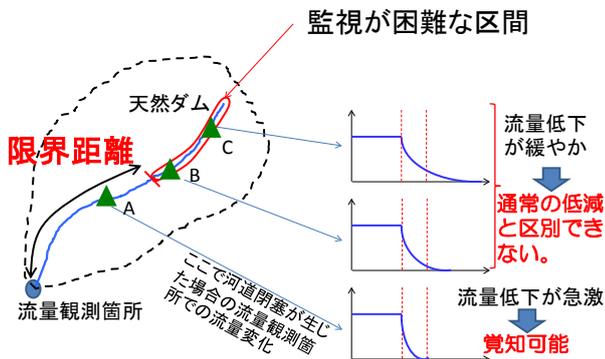


図-7 限界距離の模式図

により、天然ダム直下では流量が急激に減少した場合であっても、天然ダムから距離が離れるにつれ、図-7に示すように、流量変化が緩やかになると考えられる。その結果、天然ダムから下流側に離れた地点では、流量減少が通常時の流量減少と同程度かそれ以下になり、河道閉塞の覚知が困難になると考えられる（図-7のCの天然ダム）。そこで、提案手法では、天然ダムによる急激な流量減少が緩やかにならず伝搬し天然ダムの形成を監視することが可能な距離を限界距離として（図-7の黒い矢印）、この距離より離れた区間は監視困難な区間とした（図-7の赤線で囲まれた範囲）。限界距離は、不定流計算により算出した。

その上で、集水面積が限界面積より大きく、流量観測箇所からの距離が限界距離以内の範囲を天然ダムの形成監視可能区間とする手法を提案した。

3. まとめ

国総研、土研では、天然ダム発生を迅速に覚知する技術として、「振動センサーによる大規模崩壊の把握手法」、「流量低下監視による天然ダムの形成覚知手法」を実用化した。そして、夜間や悪天候時の天然ダムの形成確認のために「衛星SAR画像による天然ダムの緊急判読調査手法」を確立した。今後、広域的な大規模土砂災害時には、天然ダム等の形成を迅速に探査するために、本成果の活用が期待される。そして、残る課題の解決と更なる探査精度の向上のため、各手法の研究をさらに進めてまいりたい。

参考文献

- 1) 土砂災害への警戒の呼びかけに関する検討会：「土砂災害への警戒の呼びかけに関する検討会」報告書、<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/yobikake.html>、2013.
- 2) 森脇寛：土砂移動型土石流の流下に伴う地盤の震動特性、地すべり、Vol.36、No.3、pp.99～107、1999.
- 3) 武澤永純、山越隆雄、石塚忠範、中谷洋明：山地河川における洪水時の地盤振動特性の評価、土木技術資料、第55巻、第7号、pp.10～15、2013.
- 4) 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、吉川和夫：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、pp.32～39、2013.
- 5) 千葉幹、森俊勇、内川龍男、水山高久、里深好文：平成18年台風14号により宮崎県耳川で発生した天然ダムの決壊過程と天然ダムに対する警戒避難のあり方に関する提案：砂防学会誌、Vol.60、No.1、pp.43～47、2007.

水野正樹



国土交通省国土技術政策総合研究所
危機管理技術研究センター砂防研究室 主任研究官
Masaki MIZUNO

内田太郎



国土交通省国土技術政策総合研究所
危機管理技術研究センター砂防研究室 主任研究官、
博(農)
Dr. Taro UCHIDA

高原晃吾



(独)土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム 研究員、
博(農)
Dr. Teiyoshi TAKAHARA

木下篤彦



(独)土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム 主任研究員、
博(農)
Dr. Atsuhiko KINOSHITA

江川真史



国土交通省国土技術政策総合研究所
危機管理技術研究センター砂防研究室 部外研究員
Masafumi EKAWA

丹羽 諭



国土交通省国土技術政策総合研究所
危機管理技術研究センター砂防研究室 部外研究員
Satoshi NIWA