

# レーザー測量などによる崩壊発生機構調査手法の高度化

戸田堅一郎

山地災害を未然に防ぎ被害を減らすためには、山地崩壊が発生しやすい場所を把握し、崩壊発生機構を理解した上で、適切な対策を講じる必要がある。近年、技術発達が目覚ましいリモートセンシング技術を活用して地形や地質構造などの素因把握を行うことで、崩壊発生機構を効率的に解明する手法を開発することを目的とし、長野県内で発生した災害を事例に崩壊発生機構の調査を行った。災害調査事例として、2014年に木曽郡南木曽町梨子沢流域で発生した土石流災害と、2017年に飯山市井出川流域で融雪期に発生した山腹崩壊災害について発生機構の検討を行った。

キーワード：崩壊発生機構，航空レーザー測量，干渉 SAR，ドローン，CS 立体図

## 1 はじめに

山地災害はその発生形態により表層崩壊，深層崩壊，地すべり，またはこれらの崩壊土砂が長距離流下する土石流など，様々な種類があり，その発生機構や被害形態も異なる。山地災害を未然に防ぐ，または被害を減らすためには，崩壊発生機構を理解し，同様の災害が発生しやすい場所を把握したうえで適切な対策を講じる必要がある。本研究では，近年，技術発達が目覚ましいレーザー測量等のリモートセンシング技術を活用して，地形や地質構造などの素因把握を行うことで崩壊発生機構を効率的に解明する手法を開発することを目的とする。

リモートセンシングとは，離れた場所から対象物に非接触で調査する技術のことをいう。取り扱うデータは人工衛星，航空レーザー測量，ドローンなど多様な種類があり，これらを解析する手法も様々である。さらには，それらのデータを野外に持ち出して使用することにより野外調査の効率が飛躍的に向上した。それらの技術体系を大別すると図-1の様に3つに区分することができる。1つ目は，「計測技術」である。従来から行われてきた空中写真測量等に加えて，レーザー測量やレーダーなどにより，詳細な地形情報や立木毎の樹形，地盤高の変動観測等が可能になった。また，計測機器を運ぶ手段として，人工衛星，航空機，ドローン，車両や人力など多様化が進み，様々な高さからの計測が可能になった。調査の目的に合わせて，適切な計測機器と運搬手段の組み合わせを選択す

ることが重要である。2つ目は，「データ解析技術」である。コンピュータの処理速度の高速化，低価格化に加えて，解析ソフトウェアの開発が進み，3Dモデルの作成や微細な地盤変動の把握，林相の自動判別，樹頂点の検出等を容易に行うことができるようになった。3つ目は，「モバイル技術」である。WebGIS やスマートフォンアプリを使用することにより，これらの解析データを野外に持ち出して利用することが可能になり，現場で現在位置周辺の森林の情報を閲覧したり，目的地までのナビゲーションを行うことも可能になった。これらの3つの技術がそれぞれに発達し，容易に利用できるようになったため，リモートセンシング技術がより身近なものになったと言える。

次章以降では，これらの技術を組み合わせて活用し，長野県内で発生した災害について機構解析を行った事例を紹介する。

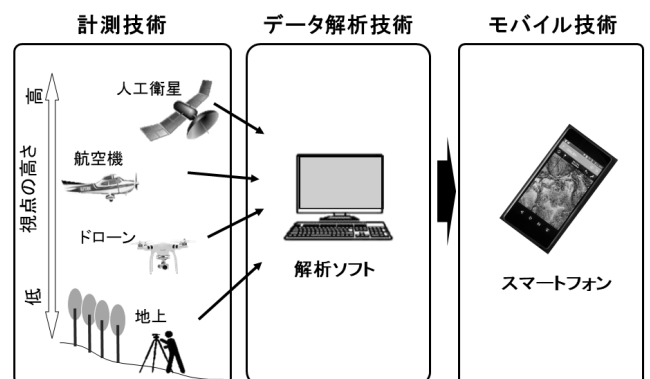


図-1 リモートセンシング技術の体系

## 2 2014 年発生 南木曾町災害

### 2.1 対象地概要

調査対象地は、2014年7月9日の豪雨（最大日雨量128mm，最大時間雨量76mm）により土石流災害が発生した木曾郡南木曾町梨子（なし）沢流域とした。図-2に対象地周辺の水系図を示す。対象地内には、木曾川に直接流入する溪流として、北から牧々沢川、梨子沢、大沢田沢、蛇抜沢、大水上沢の5本の溪流が存在する。このうち、当該災害においては梨子沢で土石流が発生し、死者1人、負傷者3人、全壊を含む建物被害44棟のほか、道路、JR中央線、農地等への土砂流入や橋梁流出など、下流域では甚大な被害を受けた<sup>1)</sup>。長野県デジタル地質図2015<sup>2)</sup>によると、対象地の地質は、花崗岩・花崗閃緑岩であり、比較的脆弱な地質と言える。梨子沢水系は、南木曾岳から西向きに流れる大梨子沢と小梨子沢の2本の沢が合流し木曾川に流入している。災害発生直後に現地踏査を行ったところ、下流域では土石流の越流による被害が大きく、上流の大梨子沢、小梨子沢の本流では河床の洗掘が激しかった（写真-1）。しかし、流域内の山腹には新たな崩壊は見られず、支流からの土砂の流入もほとんど見られなかった。また、林内には切捨て間伐された残材や、放置された風倒木等があったが、豪雨により移動した痕跡はなかった（写真-2）。

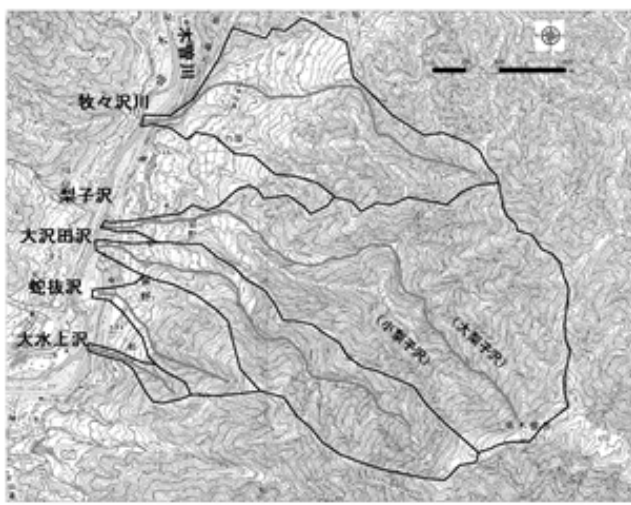


図-2 対象地周辺の水系図

（背景図に国土地理院の数値地図25000を使用）



写真-1 梨子沢中流域の河床洗掘状況

（2014年7月15日撮影）



写真-2 被災直後の周辺森林の状況

（2014年7月15日撮影）

### 2.2 調査方法

#### 2.2.1 溪床縦断面図の作成

周辺の5流域の溪流の特徴を把握するために、2014年（災害発生後）に国土交通省多治見砂防事務所が航空レーザ測量により作成した1mメッシュ数値標高モデル（Digital Elevation Model：以下DEM）を用いて、5溪流の溪床縦断面図を作成し、平面図から溪流長と集水面積を計測した。

#### 2.2.2 航空レーザ測量を用いた土砂移動量の把握

梨子沢流域の土砂移動形態を詳しく把握するために、災害前後の航空レーザ測量データの差分解析を行った。2008年（災害発生前）と、2014年（災害発生後）に国土交通省多治見砂防事務所

が実施した航空レーザー測量による1mメッシュDEMを用いて、(2014年DEM) - (2008年DEM)により2時期のデータの標高差をセル毎に計算した。また、災害後(2014年)に撮影した空中写真の目視判読から土砂移動が発生した範囲を特定した。

さらに、梨子沢流域の縦断面図から、河床勾配の変化点を基準に上流域、中流域に分け、大梨子沢と小梨子沢の合流地点より下流を下流域として、差分の負の値を侵食、正の値を堆積として、区域毎にセル値の和により侵食土砂量と堆積土砂量を算出した。

### 2.2.3 CS 立体図を用いた地形判読と崩壊発生機構の推定

2014年、2008年のDEMからCS立体図<sup>3)</sup>を作成し、周辺の流域を加えた広範囲の地形判読を行い、災害発生機構を考察した。

## 2.3 結果と考察

### 2.3.1 溪床縦断面図の作成

5溪流の溪床縦断面図を図-3に、溪流長を図-4に、集水面積を図-5に示した。周辺の溪流に比べて溪流長、集水面積ともに梨子沢が最も大きく、特に集水面積は他の溪流に比べて極めて大きかった。このため、豪雨時には、梨子沢に最も多くの水が流入したと推測できる。

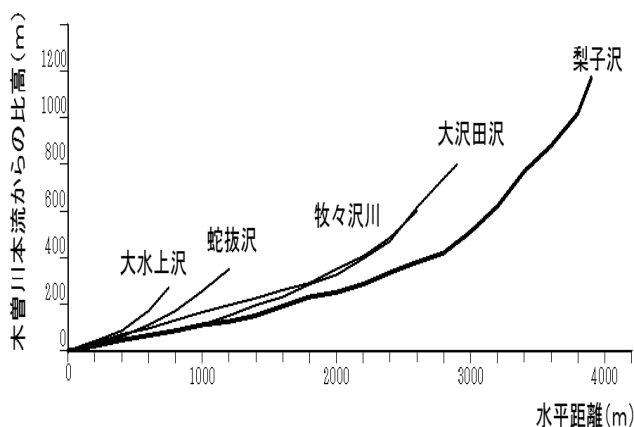


図-3 溪床縦断面図

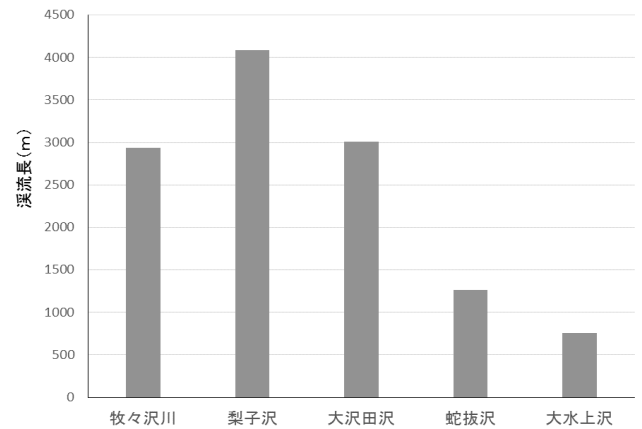


図-4 溪流長の比較

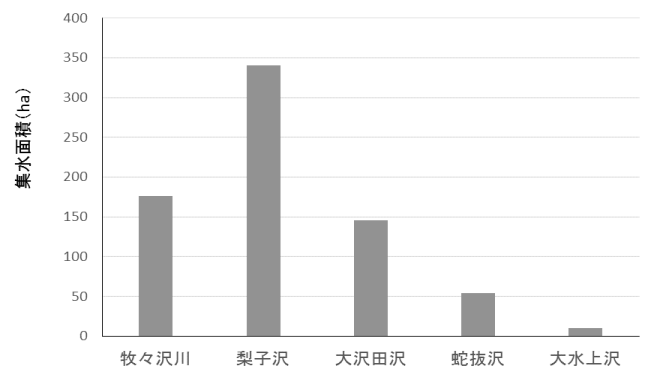


図-5 集水面積の比較

### 2.3.2 航空レーザー測量を用いた土砂移動量の把握

図-6に大梨子沢及び小梨子沢の溪床縦断面図を示し、縦断面勾配の変化から上流域、中流域、下流域の区分を行った。大梨子沢、小梨子沢共に最上部から標高800m以上の急勾配区間を上流域とし、そこから2溪流の合流点までを中流域、それ以下を下流域とした。国土地理院の数値地図25000に、差分解析による土砂移動範囲を重ね、地形判読によりプロットした既設堰堤を重ねて図-7に示した。土砂移動範囲は、大梨子沢、小梨子沢の本流の河床に限定されており、周辺の山腹には新たな崩壊等は見られなかった。この原因の一つとして、河床には土砂が厚く堆積しており、豪雨により本流の流量が増したことで不安定な土砂が洗掘および流出したためと推測した。

表に差分解析による土砂移動量の計算結果を示した。中流域と上流域は、大梨子沢と小梨子沢の合計値で示した。上流域では差引89千m<sup>3</sup>の侵

食があったが、中流域では、侵食土砂量 118 千 m<sup>3</sup> に対して、95 千 m<sup>3</sup> の土砂が堆積している。これは、治山および砂防の既設堰堤が一定の効果を発揮したと評価できる。しかし、下流域では、従来の河道を越流して 5 千 m<sup>3</sup> の土砂が住宅地に堆積し、民家等への被害を拡大させた。また、差引土砂移動量計の 107 千 m<sup>3</sup> は木曾川へ流出したことになる。なお、最大侵食深さは 15.9m, 最大堆積高さは 15.3m であった。

表 差分解析による土砂移動量

	面積 (千m <sup>2</sup> )	侵食土砂量	最大深さ	堆積土砂量	最大高さ	差引土砂移動量
		① (千m <sup>3</sup> )	(m)	② (千m <sup>3</sup> )	(m)	①+② (千m <sup>3</sup> )
上流域	38	-90	-15.9	1	4.7	-89
中流域	101	-118	-10.4	95	15.3	-23
下流域	48	-13	-7.1	18	7.9	5
計	187	-221		114		-107

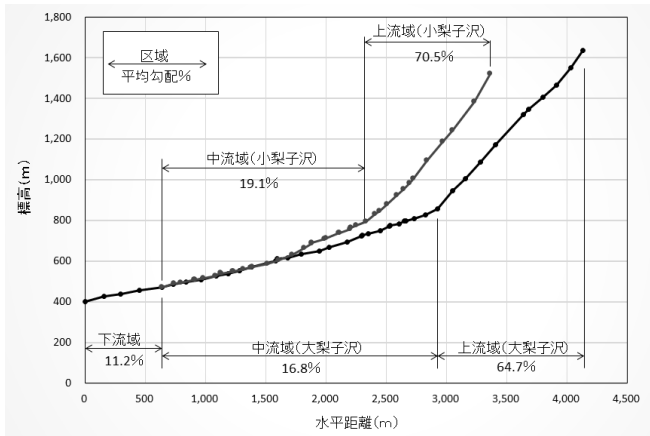


図-6 梨子沢流域の河床縦断面図

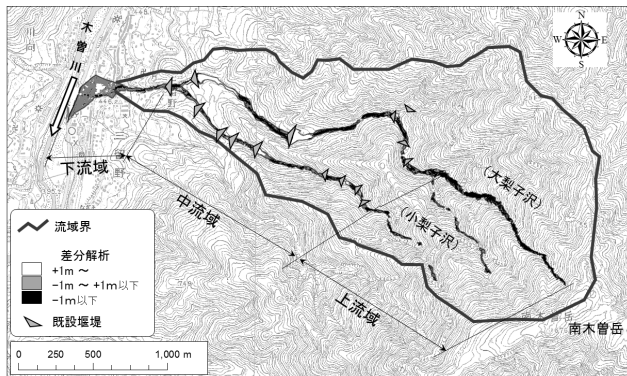


図-7 差分解析による土砂移動範囲

(背景図に国土地理院の数値地図 25000 を使用)

### 2.2.3 CS 立体図を用いた地形判読と崩壊発生機構の推定

図-8 に梨子沢下流域の CS 立体図を示した。梨子沢は、大梨子沢と小梨子沢が合流する Y 字型をなしている。合流付近では河床が広く底部が平らな箱状谷を呈しており、発災前には河床に多量の堆積土砂を有していたと推測できる。また、特筆すべき地形的特徴として、合流付近に見られる貫通丘陵地形があげられる。貫通丘陵とは、元々は別の溪流であったものが、何らかの理由で一方の河床に多量の碎屑物が供給されて河床が上昇し、尾根を乗り越えて合流したために、それより下流側の尾根が島状に取り残された地形のことをいう<sup>4)</sup>。大梨子沢と小梨子沢の合流点の北側には島状に取り残された地形があり、それより下方に旧河道の痕跡の地形が見られることから、かつては大梨子沢と小梨子沢は別々に木曾川に流入する溪流であった可能性が高い。合流部付近の大梨子沢右岸には、大きな崩壊跡地形が見られるため、過去の大規模な崩壊により大梨子沢が堰き止められて河床が上昇し、尾根を越流して小梨子沢に合流したものと推測できる。そのため、合流部付近には今も多量の河床堆積物を有する箱状谷となった可能性が高い。また、現在の梨子沢下流域は、元々は小梨子沢のみを集水していたが、2 溪流が合流したことにより従来の 2 倍以上の集水面積を集めているため、現在の河道に対して集水面積が広く、水量が多くなると越流しやすい状態である可能性がある。以上のような素因が重なり、2014 年の豪雨の際には、梨子沢では多量の水流が河床の堆積物を流送して土石流が発生したと推測した。

このように、過去の深層崩壊等により2つの溪流が合流し、合流点付近に多量の土砂を堆積する形状の流域では、豪雨時には河床の洗掘による土石流に注意する必要があると考える。

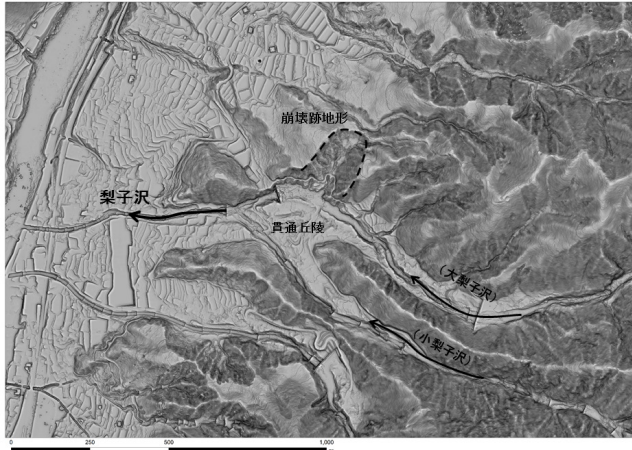


図-8 梨子沢下流域のCS立体図

### 3 2017年発生 飯山市井出川災害

#### 3.1 対象地概要

2017年5月19日に大規模な山腹崩壊が発生した飯山市井出川流域を対象として災害発生機構の解析を行った。図-9にCS立体図を示す。崩壊発生地となった井出川は、新潟県境付近から南東に向かって流れ、出川と合流した後に千曲川に流入する。当災害では、5月19日の早朝に山腹が崩壊し、土石流が下流の集落付近を流下したことにより、周辺住民には一時避難指示が出され、JR飯山線も運転見合わせとなった。崩壊発生の直前に降雨はなく、気温の上昇による多量の融雪水が誘因であった。融雪による崩壊では、通常の豪雨災害と異なり、晴天時に突然崩壊が発生するため、二次災害の恐れもあり崩壊地内の踏査は危険である。このような状況下で崩壊形態を詳細に把握するため、ドローン写真撮影、航空レーザー測量、干渉SAR解析等のリモートセンシング技術を活用して状況把握を行い、災害発生機構について考察を行った。

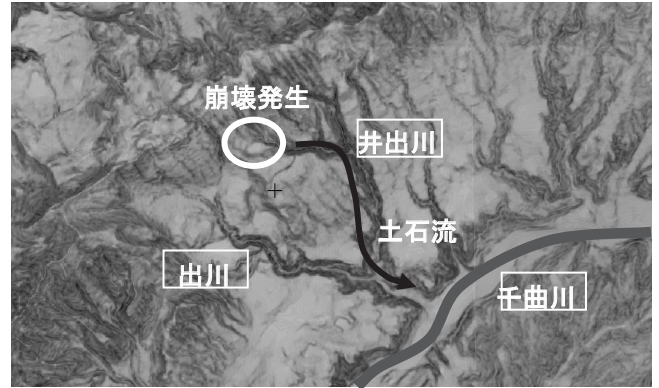


図-9 対象地周辺のCS立体図(10mメッシュ)

#### 3.2 調査方法

##### 3.2.1 ドローンによる崩壊地の把握

前述の通り、融雪災害は気温が上昇した日に発生するため、豪雨災害と異なり、再崩壊の危険性を予知するのが難しい。このため、崩壊発生後に安易に周辺山地に入ることは避けたい。しかし、対策検討のためには、発災後は迅速に崩壊規模を特定する必要がある。そこで、ドローンによる空中写真から崩壊地の全容把握を試みた。5月23日にドローン(DJI社製, Phantom3 Advanced)による空撮を行った。SfMソフト(Agisoft PhotoScan ver1.2.6)を用いてオルソ画像作成し、GIS(ArcGIS10)により目視判読で崩壊範囲をトレースした。

##### 3.2.2 航空レーザー測量による崩壊土砂量の算出

次に発災前後のDEMの差分から地形変化を計算した。解析に用いたDEMは、2014年に林務部が計測した航空レーザー測量データによる0.5mメッシュDEMと、2017年に建設部が計測した航空レーザー測量データによる1mメッシュDEMを使用した。解像度を統一するために2014年データは0.5mメッシュから1mメッシュに切りなおして用いた。

##### 3.2.3 干渉SARによる地形変化の時系列把握

発災前からの地形変化を時系列で把握するために、対象地周辺の干渉SAR解析を行った。干渉SARにはJAXAが運用する「だいち2号(ALOS-2)」の観測データを用い、夏期と融雪期の変化を区別するため、2015年6月7日、2015年11月8日、2016年6月5日、2016年11月6日のデータにより各区間の干渉解析を行った。なお、解析には

ENVI SAR Scape を用い、森林総合研究所の村上亘氏の協力により行った。

### 3.2.4 現地踏査の実施

本災害においては、筆者は災害直後の現地踏査は行わず、上記により崩壊発生機構を推測した後に、安全を確認し崩壊地内の現地踏査を行った。

## 3.3 結果と考察

### 3.3.1 ドローンによる崩壊地の把握

図-10 にドローン撮影写真 304 枚から合成したオルソ画像を示した。オルソ画像から目視により崩壊範囲を判読し、GIS ソフト (ESRI ジャパン ArcGIS10) により崩壊範囲をトレースした。山腹崩壊地は幅約 100m、長さ約 700m、面積は 8.5ha であり、西から東に向かって崩壊土砂が土石流となって流下したことが分かる。また土石流が発生した流域の南の流域では湛水池が確認できた。

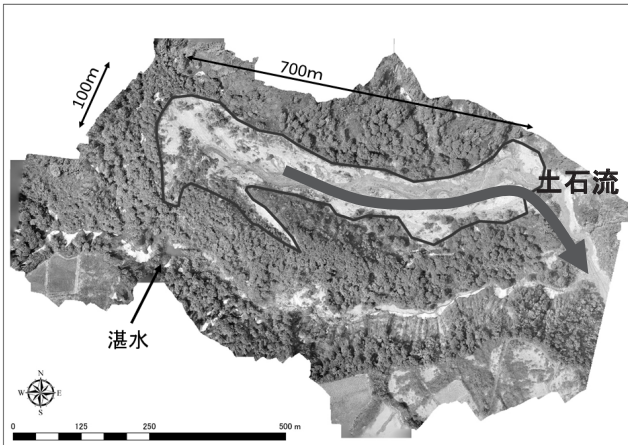


図-10 ドローン写真から合成したオルソ画像

### 3.3.2 航空レーザ測量による崩壊土砂量の算出

図-11 に発災前後の DEM の差分解析結果を示した。5 m 以上の変化があった場所を着色して示したところ、崩壊地頭部は地盤高の低下を表す黒色になっているが、地盤高の上昇を示す灰色となったのは、土石流が流下した方向とは異なり、崩壊範囲の南側に隣接する流域であった。このことから、対象地では地形傾斜とは異なり南東向きに地すべりが発生し、地すべり頭部の崩壊土砂が、地形傾斜に沿って西から東に向かって流下したと推測できた。

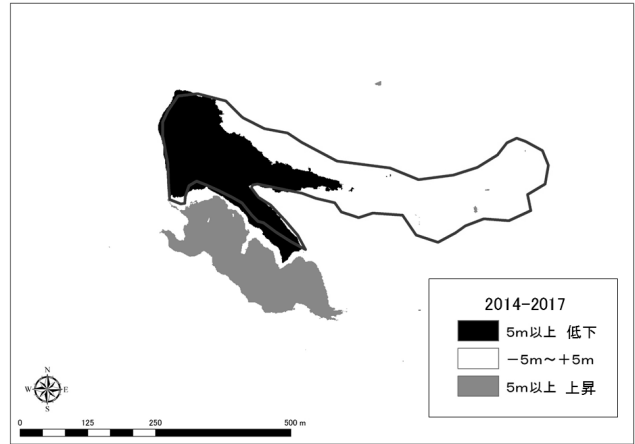


図-11 崩壊発生前後の DEM の差分解析

### 3.3.3 干渉 SAR による地形変化の時系列把握

図-12 から図-14 に干渉 SAR 解析結果を示した。発災の 2 年前の夏期に当たる 2015.6.7～2015.11.8 では大きな変化は見られない。しかし、発災前年の融雪期を含む 2015.11.8～2016.6.5 では、崩壊地頭部で 5 cm 以上衛星から遠ざかる動きがあった。また、次の 2016.6.5～2016.11.6 では、大きな変化は見られなかった。このことから、対象地の地すべりは、少なくとも前年度の融雪期から変動があり、夏期の降雨よりも、融雪期に活発に滑動する性質があると推測できた。

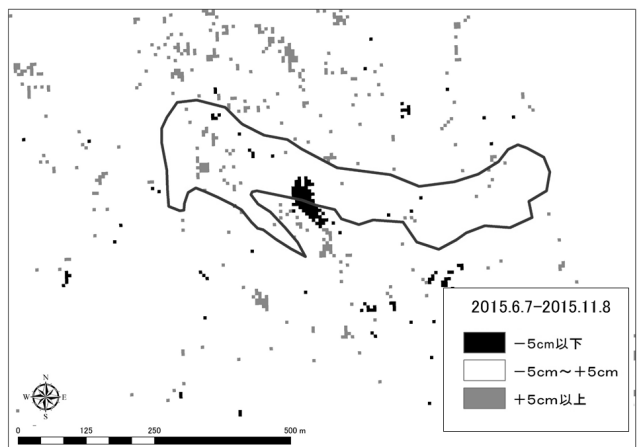


図-12 干渉 SAR 解析 (2015.6.7～2015.11.8)

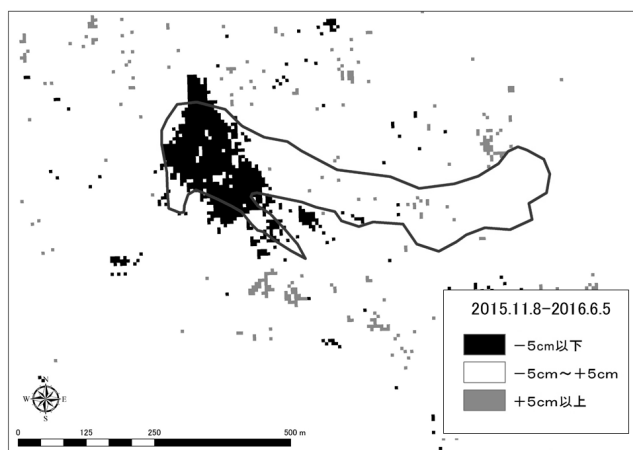


図-13 干渉 SAR 解析 (2015. 11. 8～2016. 6. 5)



写真-2 現地状況 (崩壊地頭部全景)

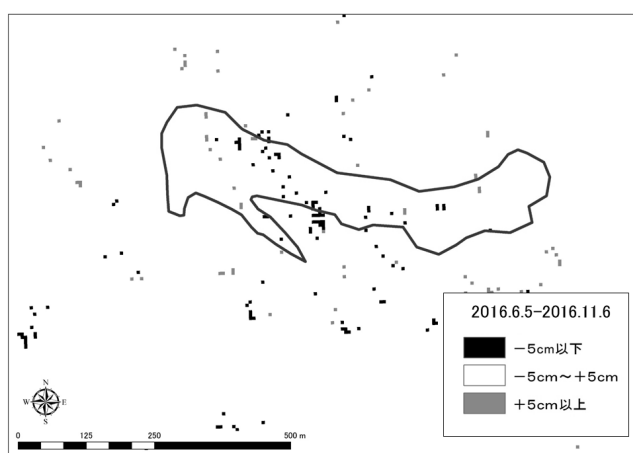


図-14 干渉 SAR 解析 (2016. 6. 5～2016. 11. 6)



写真-3 現地状況 (地すべりブロック内の亀裂)

### 3.3.4 現地踏査の実施と崩壊発生機構の推測

現地状況写真を写真-2 から写真-3 に示した。崩壊地頭部は大きく裸地化し、堅い基盤岩が露出しており、地表流も見られる。その南側の地すべり地形内では地面に多数の亀裂や陥没があり、立木は大きく傾倒していた。

以上の調査から当災害における崩壊発生機構を下記のように推測し、図-15 に示した。対象地では初めに①の地すべりが滑動し、少なくとも崩壊前年度の融雪期には変状があった。2017年の融雪により①の地すべりは大きく滑動し、南隣の溪流の対岸にあたって停止し、その上流には湛水池を形成した。その際、地すべり頭部の崩壊土砂が②の方向に土石流として流下した。

対象地においては、今後も融雪期の地すべり再滑動に注意をして対策を進めるべきと考える。

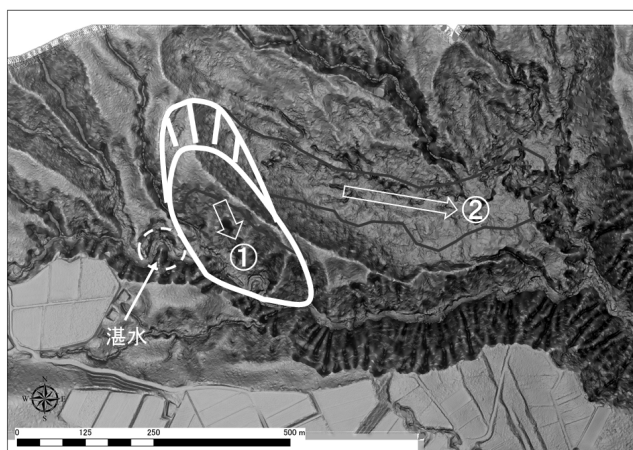


図-15 崩壊発生機構

#### 4 おわりに

本稿で紹介した、南木曾町災害と飯山市井出川災害の事例では、いずれもリモートセンシング技術を活用することで、発災後に迅速かつ効率的で、安全に現地の状況を把握することができた。近年、温暖化等により極端な豪雨災害が全国各地で発生している。災害時の初動調査では、限られた人員において、迅速な調査の実施と、対策の判断が求められる。本稿で紹介したリモートセンシングを活用した調査手法が今後の災害調査において活用され、現場担当者の業務の軽減に寄与することを願う。

#### 謝辞

本稿で取り上げた南木曾町災害及び飯山市災害において被災者された方々に、心からお見舞い申し上げます。また、南木曾町災害において、災害直後の混乱時の中、現地調査にご協力いただいた木曾地方事務所（現木曾地域振興局）、南木曾町役場の担当職員の皆様に感謝いたします。飯山災害においては現地調査のご協力をいただいた北信地域振興局、及び県庁治山係、さらに干渉 SAR 解析のご協力をいただいた森林総研の村上亘氏に深く感謝します。

#### 引用文献

- 1) 南木曾町(2015), 平成 26 年度 主要事業成果報告書, 255pp
- 2) 長野県地質図活用普及事業研究会(2015), 長野県デジタル地質図 2015

- 3) 戸田堅一郎(2012), 航空レーザ測量データを用いた微地形図の作成, 砂防学会誌, vol. 65, No. 2. p. 51-55
- 4) 鈴木隆介(2004) 建設技術者のための地形判読入門, 古今書院, 1322pp