

# 融雪期の広域斜面変状調査手法に関する研究

研究予算：運営費交付金  
研究期間：平 27～平 29  
担当チーム：防災地質チーム  
研究担当者：倉橋 稔幸、日外 勝仁、  
角田 富士夫、吉野 恒平

## 【要旨】

本研究では、融雪期の地すべりを対象に、陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」(ALOS-2) の合成開口レーダ (SAR) で観測された原初データにおいて比誘電率と積雪深から積雪によるマイクロ波の位相遅延を補正する解析法を考案し干渉 SAR 解析をおこなった。

その結果、積雪深が 30cm 以下であれば融雪期の干渉 SAR 解析が可能で、積雪下の 10cm 程度の地すべりの地表面変動量を検出できることを明らかにした。

キーワード：融雪期、地すべり、ALOS-2、位相遅延、干渉 SAR 解析

## 1. はじめに

陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」(ALOS-2) の搭載する合成開口レーダ (SAR) は、電波を地表面に照射し地表面から反射される電波を受信する。合成開口レーダが送受信する L バンドのマイクロ波帯 (1.2GHz 帯) の電波は波長約 24cm の電磁波で、雲や木の枝葉を透過する特性を持つ。そのため、地表で反射し衛星に戻ってきたマイクロ波の波形に振幅と位相が原初データとして記録される。ALOS-2 は地球を周回し、14 日で同じ場所に回帰するため、異なる時期に同一軌道から同一場所で観測した波形の位相差を干渉 SAR 解析することで、地すべり等による地表面の微小な変動を把握することができる。

しかし、地表に積雪がある場合には、L バンドマイクロ波が雪を透過する際に位相にずれを生じるため、融雪期の地すべり変動を的確に検出できるかどうかは定かではなかった。積雪地の地すべりでは、積雪により地表から目視で滑動状況を調査することが難しいことに加え、地形が急峻で斜面に近寄れないことがある。特に融雪期には地すべりが発生し道路の通行止めや河道閉塞を引き起こすことがあることから<sup>2)</sup>、融雪期の地すべりの変動範囲と変動量を適切に把握できる手法の開発が望まれている。

そこで、本研究では、衛星の原初データを基に積雪の比誘電率と積雪深からマイクロ波の位相遅延を補正し干渉 SAR 解析を行い、融雪期における積雪下の地すべり変動範囲と変動量を解析した。

## 2. 解析方法

### 2. 1 解析対象と積雪

解析の対象地は北海道壮瞥町の地すべりである。東西に流れる長流川に沿って左岸側と右岸側に地すべり地形が分布し、範囲は東西約 4km、南北約 3～4km に亘る<sup>3) 4) 5)</sup>。この対象地を同一軌道の同一位置で観測された、表-1 の無雪期と融雪期の二つの時期に観測された原初データを、それぞれマスタ画像とスレーブ画像として干渉 SAR 解析を行った。なお、当該解析に使用した原初データは、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) から提供されたものである。

また、表-2 に衛星観測日と同日の 2017 年 3 月 28 日における、図-1 の地上 10 地点で観測された積雪深を示す。地すべりをまたぐ 500m 四方の範囲で国道と町道沿いで観測された。なお、表-1 の融雪期の積雪深はこれらの観測値を平均化した値である。また、8 日前の 3 月 20 日における S1 地点の層構造・密度・含水率を図-2 に示す。積雪はざらめ状の雪を主体に

表-1 干渉SAR解析に用いた原初データの概要

衛星観測日		衛星観測時期 (積雪深 (cm))		衛星進行方向	衛星視線方向	偏波	オフナディア角 (°)
マスタ画像	スレーブ画像	マスタ画像	スレーブ画像				
2016年10月25日	2017年3月28日	無雪期	融雪期 (32)	南(降行)	西(右)	HH	29.1

構成されるが、中間層に暖気あるいは雨により一旦融けた後に生じる氷層も含んでいた。このときの積雪深は 42cm で、平均密度 0.44g/cm<sup>3</sup>、平均含水率 6.5%であった。雪質は乾雪に近い状態であった。

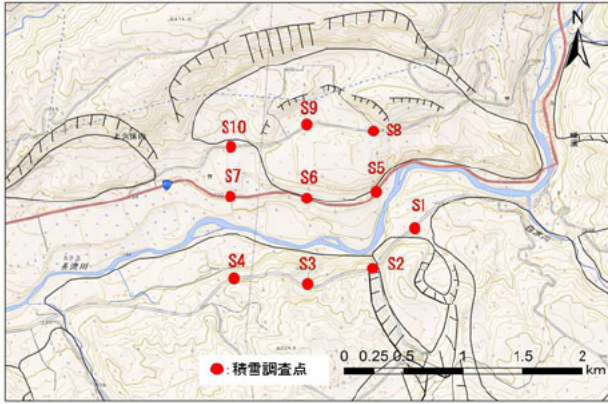


図-1 調査位置図と積雪調査地点

背景の地すべり範囲は、地すべり地形分布図<sup>45)</sup>から引用した。

表-2 2017/3/28 の各積雪調査地点の積雪深

2017年3月28日										
測点	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
積雪深 (cm)	39	41	40	31	30	33	9	18	41	39

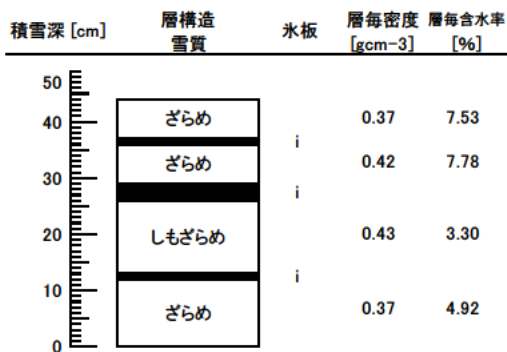


図-2 2017/3/20 の S1 地点の積雪層構造と各地点の積雪深

## 2.2 干渉 SAR 解析と積雪による位相遅延

通常の干渉 SAR 解析では、まず位相値を求め、次に位相アンラッピング処理を行って変動値を求めた。最後にコヒーレンス解析を行った。コヒーレンスとは可干渉性を言い、干渉 SAR 解析結果の確からしさを示す。コヒーレンス解析値は 0 から 1 の範囲で示され、この値が 1 に近ければ良い干渉性を示す。

ただし、マイクロ波は電磁波であるため大気と積雪層の境界で屈折し、積雪層内の密度等の違いから速度も減少するため、位相に遅れを生じる。そのため、無

雪期と融雪期の干渉 SAR 解析で解析した変動量に位相差による遅延も含まれている。そこで次節で位相の遅延補正方法について述べる。

## 2.3 位相遅延補正方法

### 2.3.1 位相遅延補正方法

既往の研究によると、地表面に対し、無雪期と積雪期のマイクロ波の伝搬経路は図-3のように示され、位相差は式 (1) で表される<sup>6)</sup>。マイクロ波は積雪表面でスネルの法則によって屈折することから、積雪の比誘電率は大気の比誘電率よりも大きいため、 $\theta_0 > \theta_i$  となる。ここで積雪層表面点 B の位相は、積雪が無い場合の点 A と同じとなる。積雪が無い場合にはマイクロ波は地表面点 C まで直進し、伝搬距離は  $r_0$  と表される。一方、積雪がある場合には、マイクロ波は積雪表面で屈折し、伝搬経路は直角三角形 ABC の斜辺 BC をたどり、その伝搬距離は  $r_s$  と表される。ゆえに、積雪がある場合には、その伝搬距離は積雪のない場合に比べて増加する。さらに、積雪の状態 (深さ、含水率、密度等) によって波長が短くなるため、伝搬時間が増加する。経路長  $r_s$  と  $r_0$  と屈折角  $\theta_i$  は式 (2) で表せるため、式 (1) へ代入すると、位相差は式 (3) のように導かれる。

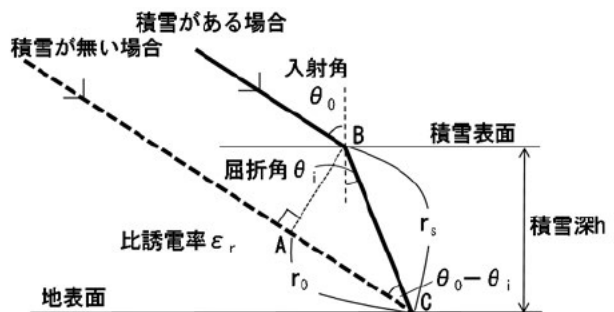


図-3 マイクロ波の伝搬経路

$$\text{位相差} \varphi = \frac{4\pi}{T} \left( \frac{r_s}{c/\sqrt{\epsilon_r}} - \frac{r_0}{c} \right) \quad (1)$$

$$r_s = \frac{h}{\cos \theta_i}, \quad r_0 = \cos(\theta_0 - \theta_i) \times r_s, \quad \sin \theta_i = \frac{\sin \theta_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

$$\text{位相差} \varphi = \frac{\sqrt{\epsilon_r} - \cos \left( \theta_0 - \sin^{-1} \left( \frac{\sin \theta_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) \right)}{\cos \left( \sin^{-1} \left( \frac{\sin \theta_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) \right)} \times \frac{4\pi f}{c} \times h \quad (3)$$

$$= \phi \times \lambda \times h$$

T: 周期、c: 真空中の光速、 $\epsilon_r$ : 積雪の比誘電率

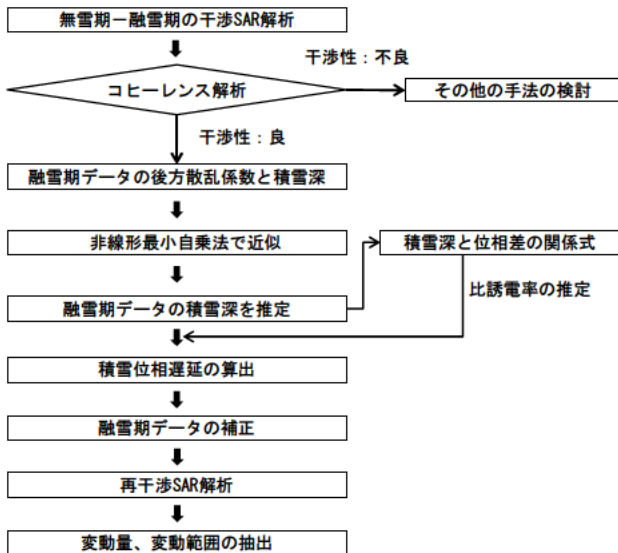


図-4 積雪による位相遅延補正の解析フロー図

図-4に位相遅延補正方法の解析フロー図を示す<sup>89)</sup>。平均積雪深 32cm の融雪期原初データに対して、メッシュ領域平滑化法とメッシュ領域細分法による位相遅延補正を適用し、干渉 SAR 解析を実施して結果を比較した。

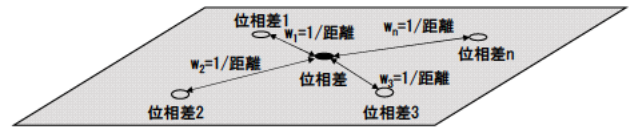
位相差の補正を行う分割メッシュ領域の数を変え、干渉 SAR 解析結果を比較した。

まず、1つのメッシュ領域による解析では、各測点を中心とするメッシュの代表点を設定し、それらの測点を包含する1つのメッシュ領域を作成した。中心点の位相遅延値を各測点間の位相差を逆距離加重法で内挿することにより算出した。メッシュ領域の代表位相遅延値を、各メッシュ測点から離れた距離の逆数で重み付けし、メッシュ領域の位相遅延を平滑化した(図-5 1))。

一方、複数メッシュ領域による解析では、図-1の積雪調査点の各測点ごとに10のメッシュ領域に分割し、各メッシュの位相遅延値を補正に用いた(図-5 2))。

ただし、いずれの方法でも位相差を求めるには、比誘電率と積雪深を仮定する必要がある。そこで、次項で実測値と推定値とを比較し吟味することで、補正に必要な解析パラメータを設定した。

### 1) 1つのメッシュ領域による解析



### 2) 複数メッシュ領域による解析

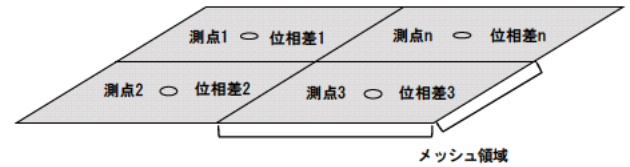


図-5 メッシュ数による位相補正方法の概念図

## 2. 3. 2 解析パラメータの設定

### 1) 比誘電率の設定

式(3)に示すように、位相差は媒質である雪の比誘電率に從属する。無雪期と融雪期の2時期の原初データの位相差と実測積雪深との関係から推定比誘電率値(以下、推定 $\epsilon_r$ と略す)を算出し、経験的に用いられている式(4)<sup>6)</sup>により実測比誘電率値(以下、実測 $\epsilon_r$ と略す)と比較した。

図-6に3月28日の実積雪深と、無雪期と融雪期の原初データの位相差との関係を示す。分解能 3m の衛星観測データを使用し、各ピクセルをマルチルック処理によって平均化しグリッドサイズを 100m と 200m の 2 通りに設定して比較した。両者ともに相関係数は小さく、大きくばらついた。切片の無い回帰直線の傾きは、式(3)における積雪深( $h$ )より前の $\theta$ と $\lambda$ を表している。この $\theta$ 式と $\lambda$ 式の中で光速 $c$ 、周波数 $f$ 、入射角 $\theta_0$ はそれぞれ既知であることから、回帰直線の傾きに一致するように $\epsilon_r$ を試算すると、推定 $\epsilon_r$ はグリッドサイズ 100m と 200m で 1.8 と算出された。

一方、実測 $\epsilon_r$ については、実測した平均雪密度 0.44g/cm<sup>3</sup>を式(4)に代入し、実測 $\epsilon_r$  2.0を得た。

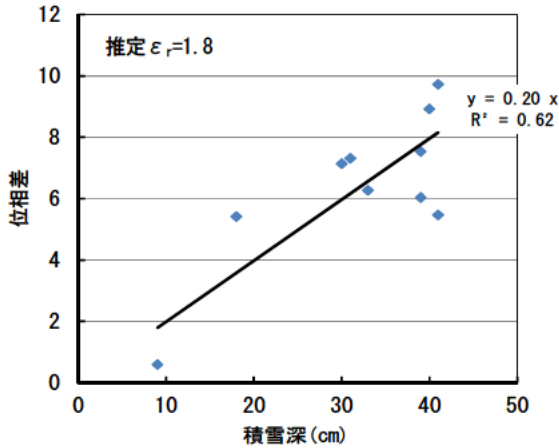
$$\epsilon_r = 1.0 + 2.2 \rho \quad (4)$$

$\rho$  : 積雪の密度 (g/cm<sup>3</sup>)

以上のように推定 $\epsilon_r$ は実測 $\epsilon_r$ に近い値をした。これは積雪深と位相差との相関を近似して推定できる可能性を示唆している。ただし、積雪深が 30cm 以上となると、位相差が  $2\pi$  を超えてしまうため、位相差の不定を処理する煩雑性があることや、含水率によって $\epsilon_r$ 値が変化することが課題である。については、本研究では推定 $\epsilon_r$ を用いて位相遅延を補正した。



1) グリッドサイズ 100m



2) グリッドサイズ 200m

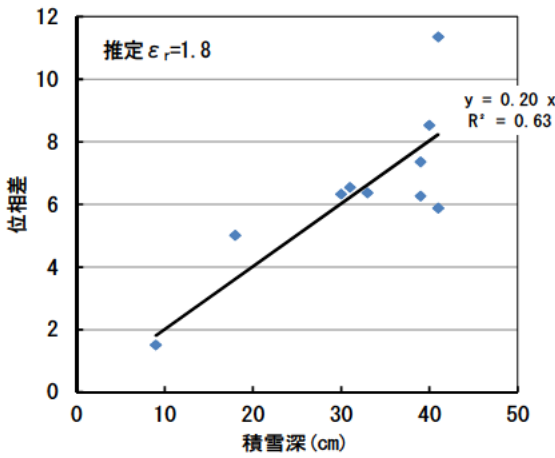


図-6 積雪深と位相差

雪期の原初データから得られた値だが、平均化グリッドサイズを200mとした場合の値を用いた。

$$\sigma^0 = A - B \exp(-\alpha W) \quad (5)$$

A, B : 定数、 $\alpha$  : 減衰係数

回帰分析で求めた近似曲線に対して散布値は右肩上がりの傾向を示すが、全体的に回帰精度が良くなかった。この要因は、複雑な層構造や含水率の影響が考えられる。また、雪密度が一律であることが考えられる。層構造や含水率の影響を比較することや雪密度を適切に設定することが、精度良い積雪深の推定に向けて課題となる。ゆえに、解析では実測した積雪深を利用して位相遅延を補正した。

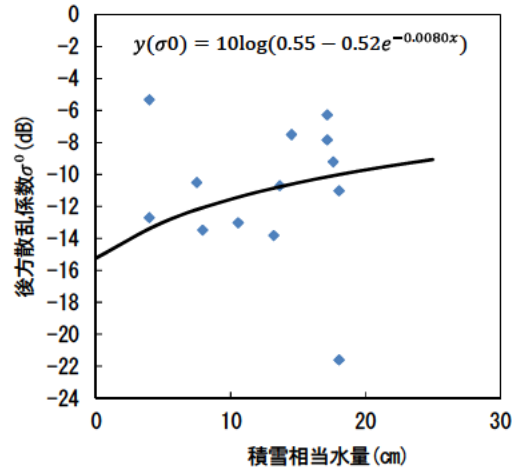


図-7  $\sigma^0$ と積雪相当水量

2) 積雪深の設定

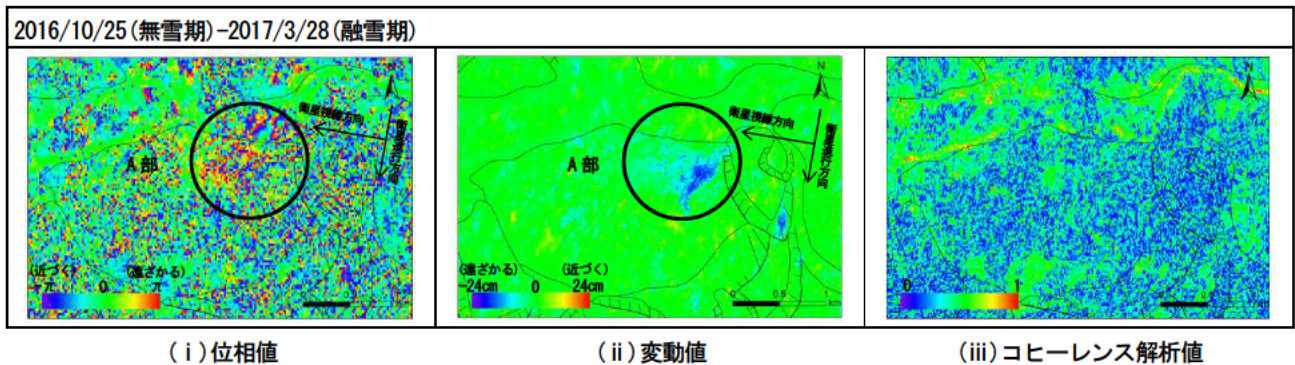
融雪期の原初データの後方散乱係数 $\sigma^0$ と実測した積雪相当水量の関係を図-7に示す。

後方散乱係数 $\sigma^0$ (dB)と積雪相当水量W(cm)の関係は式(5)で示すように指数関数で表される。積雪相当水量は積雪深と雪密度の積であるので、各調査地点の実測積雪深に実測平均雪密度 0.44g/cm<sup>3</sup>を一律に掛け合わせた。また、 $\sigma^0$ は実測地点と同じ位置における融

3. 解析結果

3.1 積雪を考慮していない干渉 SAR 解析結果

積雪による位相遅延を補正していない干渉 SAR 解析結果を図-8に示す。図-8の左から(i)位相値、(ii)位相アンラッピングを行った変動値、(iii)コヒーレンス解析値の画像を示す。(i)位相値の画像A部に、周囲との違いが判別できる色の変化が見られ、(ii)変



(i) 位相値

(ii) 変動値

(iii) コヒーレンス解析値

図-8 通常の干渉SAR解析結果

原初データ©JAXA

動値で同部に衛星から 10cm 遠ざかる変化が認められた。これは防災科学技術研究所の地すべり地形分布図<sup>49)</sup>に示された地すべり尖端部にあたる。この部分では北海道立総合研究機構地質研究所が GNSS 連続測量の測点を設け、2016 年 11 月に測点で変動が確認されていた。

一方、図-9 にコヒーレンス解析値の分布を示す。コヒーレンス解析値は 0.2~0.4 の範囲に分布することから、干渉性は悪くない。つまり、この結果は、スレーブ画像の観測時の積雪層に電波が侵入し地表面まで届き、積雪下の地すべりの変動を把握できたことを示唆している。ただし、これらの変動量には積雪層の位相遅延が含まれている。そこで、次節で、調査地の積雪調査地点 10 点の周囲 200m をグリッドサイズとする平均化処理を行うことで各測点の位相遅延を算出し推定 $\epsilon_r$ と実測積雪深から積雪を透過する際に生じる位相遅延を補正し、干渉 SAR 解析を実施した。

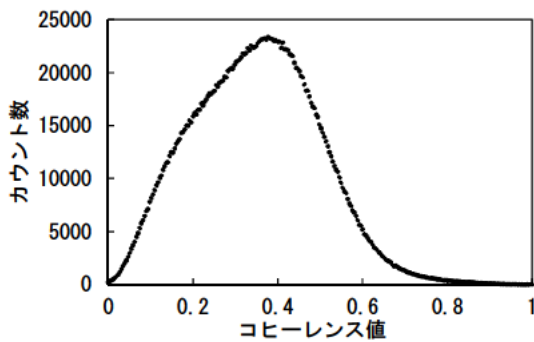


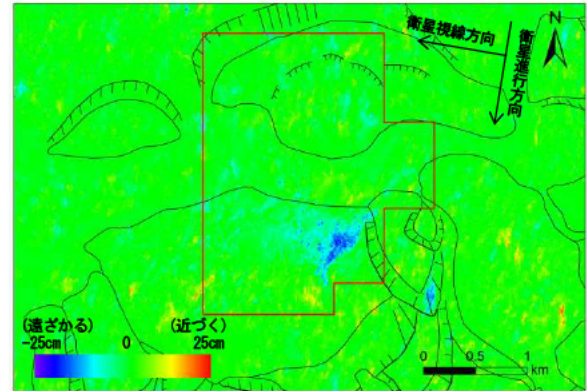
図-9 コヒーレンス解析値の分布

### 3. 2 位相遅延補正した干渉 SAR 解析結果

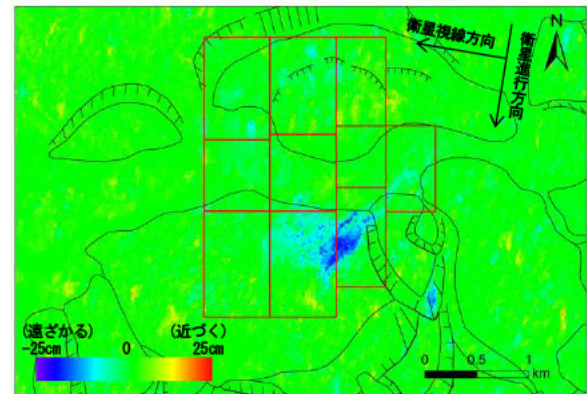
図-10 の 1)図は 1 メッシュ領域により位相遅延補正した変動図を、2)図は 10 メッシュ領域による変動値を示す。いずれも、地すべり尖端部において 500m の範囲にわたり衛星から約 10cm 遠ざかる変動が見られた。両者の変動量には大きな差は認められなかったものの、1 メッシュ領域の変動範囲を内包するように一つの位相遅延値で補正された。これに対し、10 メッシュ領域の変動範囲は 2 つのメッシュ領域に及んでいたため、2 つの位相遅延値で補正され、変動範囲が広がった。今後さらに精度を上げるためには、積雪深の推定を高密度に行う必要がある。また、隣り合うピクセル同士で積雪位相遅延補正後の位相差が  $2\pi$  を超えた場合に位相アンラッピングが適切に処理される必要がある。さらに、多くの観測データを利用し

た時系列干渉 SAR 解析により大気遅延などの誤差を除去することが必要である。

#### 1) 1 メッシュ領域による解析



#### 2) 10 メッシュ領域による解析



原初データ©JAXA

図-10 2016/10/25(無雪期)-2017/3/28(融雪期)の位相遅延補正された干渉SAR解析結果  
赤枠はメッシュ領域を示す

### 4. まとめ

本研究で積雪層の位相遅延補正による干渉 SAR 解析を実施し融雪期の地すべり変動量と変動範囲を解析した結果は、以下のようにまとめられる。

- 1) 無雪期-融雪期の干渉ペアでは積雪層が乾雪に近く 30cm 程度の薄層であれば、干渉 SAR 解析が実現可能であることがわかった。
- 2) 積雪深 30cm 程度以下の位相遅延を補正し、衛星から 10cm 遠ざかる地すべりの変動を検出できた。その際、1 つのメッシュ領域よりも複数のメッシュ領域による解析の方が変動範囲を精度良く解析できることを明らかにした。

- 3) 積雪位相遅延を補正するには、積雪の比誘電率と積雪深を設定する必要がある。ただし、積雪深が30cm以上となると、位相差が $2\pi$ を超えてしまうため、位相差の不定を処理する煩雑性があることや、含水率の影響を受けることが課題である。また、積雪深を推定するためには、融雪期データの後方散乱係数と積雪相当水量の関係式を求める必要がある。しかし、複雑な層構造や含水率の影響、および雪密度の一律化によって関係式の算定に至らなかったため、本研究では実測値を用いた。今後は層構造や含水率の影響を比較することや雪密度を適切に設定し検証していく必要がある。そのほか、様々な地すべりに適用し融雪期に起きる地表面変動を検出し適用性を検証するとともに、融雪期点検・監視等の道路管理への利用方法について検討する必要がある。
- 8) 角田富士夫, 日外勝仁, 倉橋稔幸: 「干渉 SAR による積雪下の地すべり変動解析」, 土と基礎, 地盤工学会, pp.30-31, 2018年4月
- 9) 角田富士夫, 日外勝仁, 倉橋稔幸: 「融雪期干渉 SAR 解析の積雪位相遅延補正法の適用について」, 寒地土木研究所月報, 第776号, pp.34-39, 2018年1月

#### 参考文献

- 1) 石塚師也, 藤井幸泰, 金子誠, 高橋亨, 松岡俊文: 「干渉 SAR 解析によって推定した地表変動と地すべりブロックとの関連—白山甚之助谷周辺の地すべりを例に—」, 応用地質, 第57巻, 第6号, pp.289-294, 2017年2月
- 2) 倉橋稔幸: 「2012年春季の融雪による土砂災害」, EPOCH, 日本応用地質学会北海道支部・北海道応用地質研究会, No.67, pp.7-10, 2013年9月
- 3) 田近淳, 石丸聡, 川上源太郎, 高橋良: 「北海道, 長流川中流域の大規模地すべり(その1): 地形・地質と最近の活動」, 第52回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.7-8, 2013年8月
- 4) 清水文建, 井口 隆, 大八木規夫: 「地すべり地形分布図『洞爺湖温泉』」, 地すべり地形分布図第44集「室蘭・久遠」, 防災科学技術研究所研究資料, No.338, 2010年3月
- 5) 清水文建, 井口 隆, 大八木規夫: 「地すべり地形分布図『徳舜警山』」, 地すべり地形分布図第46集, 防災科学技術研究所研究資料, No.344, 2010年7月
- 6) 神力正浩, 佐々木正巳, 鈴木勝裕: 「積雪観測におけるINSAR利用の可能性についての考察」, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.22, No.40, pp.19-24, 1998年8月
- 7) Fawwaz, T. U., and William, H. S.: "The active and passive microwave response to snow parameters, 2. Water equivalent of dry snow", Journal of Geophysical Research, Vol.85, No.C2, pp.1045-1049, 1980

# A STUDY ON INTERFEROMETRIC SAR ANALYSIS FOR LANDSLIDE SURFACE DISPLACEMENT IN A SNOWMELT SEASON

Research Period : FY2015-2017

Research Team : Cold Region Construction  
Engineering Research Group  
(Geological Hazards)

Author : KURAHASHI Toshiyuki

AGUI Katsuhito

TSUNODA Fujio

YOSHINO Kohei

**Abstract** : In this study, we conducted the interferometric SAR analysis (InSAR) using synthetic aperture radar (SAR) of advanced land observing satellite 2 (ALOS-2) detect landslide surface displacement in a snowmelt season. As a result, it was found that the InSAR of the snow melting period was possible if the snow depth was 30cm or less. Furthermore, in the snow melting phase InSAR, we devised an analysis method to compensate for the phase delay due to snow, which led to the accuracy of the amount of displacement. The method enabled us to extract the amount of landslide surface displacement in precision of about 10 cm under the snow.

**Key words** : snowmelt, landslide, ALOS-2, Interferometric SAR analysis, phase delay