

SAR 干渉解析における地表面の変化に起因する位相変動に関する研究

実施期間

令和 6 年度～令和 7 年度

地理地殻活動研究センター

宇宙測地研究室

服部 晃久 小林 知勝

1. はじめに

国土地理院では、JAXA の衛星「だいち 2 号」(ALOS-2) による L バンド SAR 画像を解析し、日本全国の地殻・地盤変動の監視を行っている。SAR 画像を利用した変動監視には様々な手法があるが、特に SAR 干渉解析 (InSAR) は、2 時期の観測から地殻変動を高精度に検出できる有力な解析手法である。国土地理院ではこの手法を用いて、地盤沈下のような経年的な変動や、地震・火山活動に伴う突発的な地殻変動の把握に継続的に取り組んでいる。

しかし、SAR 干渉解析で得られる位相変動は、必ずしも全てが地殻変動に由来するとは限らず、大気遅延や電離層の影響、散乱体の性質の変化など、様々なノイズ要因が含まれている。特に、山岳地域を対象とした L バンド SAR 干渉解析では、斜面の far 側と near 側で顕著な位相差が生じることがあり、地殻変動とは無関係に生じるノイズである可能性が高い。藤原 (2023) は、このような山岳斜面に見られる位相差の要因として、土壌水分量の時空間的な変化に着目し、その影響の可能性を指摘している。ただし、その議論は主に定性的なものであり、定量的な評価や広域的な検証は十分には行われていない。

そこで令和 6 年度は、山岳地域特有の位相差がどのような条件下で発生するのかを明らかにし、将来的な補正手法の確立に資する知見を得ることを目的として、「だいち 2 号」による複数時期の観測データを用いた SAR 干渉解析を実施した。対象地域には、地形の起伏が大きく、気象条件の変動も顕著な北海道・日高山脈を選定し、位相差の空間分布の特徴を明らかにするとともに、地形条件や気象データ (降水量・土壌水分量) との関連性について検討を行った。

2. 研究内容

2.1 データと解析手法

対象地域には、北海道中央部に位置する日高山脈の山岳地帯を選定した。解析には、L バンド SAR 衛星「だいち 2 号」(ALOS-2) の SM1 モードによって取得された SAR 画像データを用いた。2019 年から 2023 年までの間に南行軌道のパス 17 (U2-8) 及び北行軌道のパス 122 (U2-7) で取得された観測データ (図-1) を使用し、全ての日付のペアで SAR 干渉解析を実施した。二つの観測ペアで同様の結果が得られたため、以下ではパス 17 の結果のみを示す。

SAR 干渉解析に当たっては、まず干渉画像の生成後、大気遅延及び電離層の影響を補正し、さらに空間的な長波長成分を除去するためのハイパス空間フィルタを適用した。得られた干渉画像について、地形による影響を評価する目的で、10 m メッシュ数値標高モデル (DEM) を用いて各画素の斜面方向及び傾斜角を算出した。

気象的な影響の検討には、アメダス観測による降水量データ (中杵臼及び上札内観測点) と、GLDAS (Global Land Data Assimilation System) に基づく表層 (0~10 cm) の土壌水分量のデータを使用した。これらの気象データは、SAR 画像の観測日に対応させて、干渉画像に現れる位相差の空間分布との関係性を検討した。

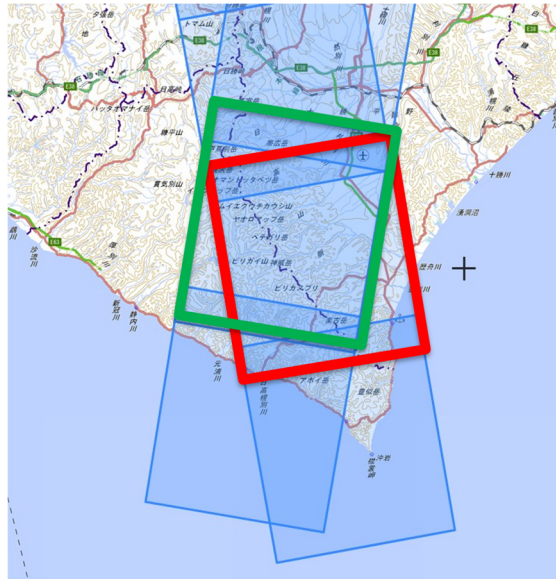


図-1 使用した「だいち2号」の観測データの位置. 緑色で示す領域が南行軌道のパス 17 U2-8 frame: 2760, 赤色で示す領域が北向軌道のパス 122 U2-7 frame: 840.

2.2 SAR 干渉画像と地形の比較

図-2 に、ALOS-2 パス 17 (U2-8) の 2019 年 8 月 31 日と 2019 年 11 月 23 日の観測データを使用し作成した SAR 干渉画像と、同範囲における DEM から算出した傾斜方向及び傾斜角の分布を示す. この地域では、日高山脈の主稜線に向かって両側から標高が上昇する地形特性があり、図-2(d)に示す領域 1 の平野部では、傾斜方向が 0 度～90 度方向に卓越する傾向が確認される. 一方で、その他の領域 2～9 の山岳部では、傾斜方向がほぼ均等に分布しており、地形の複雑さが反映されている. 図-3 は、図-2(d)に示した領域 5 を対象に、4 ルックで処理した干渉画像から傾斜方向ごとの位相の分布を抽出したものである. 衛星から見て near 側（傾斜方向が 0～180 度）では、位相値はおおむね 0 rad 付近に集中して分布しているのに対し、far 側（傾斜方向が 0～-180 度）では、分布のピークが約 $-\pi/4$ rad 付近に見られる. 図-4 は、傾斜方向に基づく位相値とコヒーレンスの関係を示したものである. near 側ではコヒーレンスが比較的高く、位相値も安定して 0 rad 付近に集中している. 一方、far 側ではコヒーレンスが低下する傾向があり、特にコヒーレンスの低い画素においては位相値が 0 rad から離れて分布する傾向が見られた.

マルチルック処理や Goldstein フィルタなどの位相強調処理を適用することで (図-4), far 側と near 側の位相差はある程度軽減されたが、完全に解消されることはなく、SAR 干渉画像中に位相差が残る例も見られた.

本研究で作成した全ての干渉画像において、far 側斜面ではコヒーレンスの低下及び位相のばらつきが一貫して確認されたのに対し、near 側ではコヒーレンスが比較的高く、安定した位相分布が得られることが多かった. また、全干渉ペアの半数以上において、地形の傾斜方向に沿った位相差が明瞭に認められた. これらの傾向は、観測時期の間隔や垂直基線長の違いといった観測幾何の要因による影響は小さく、特定の観測日を含む干渉ペアでは特に明瞭に現れることが確認された (図-5).

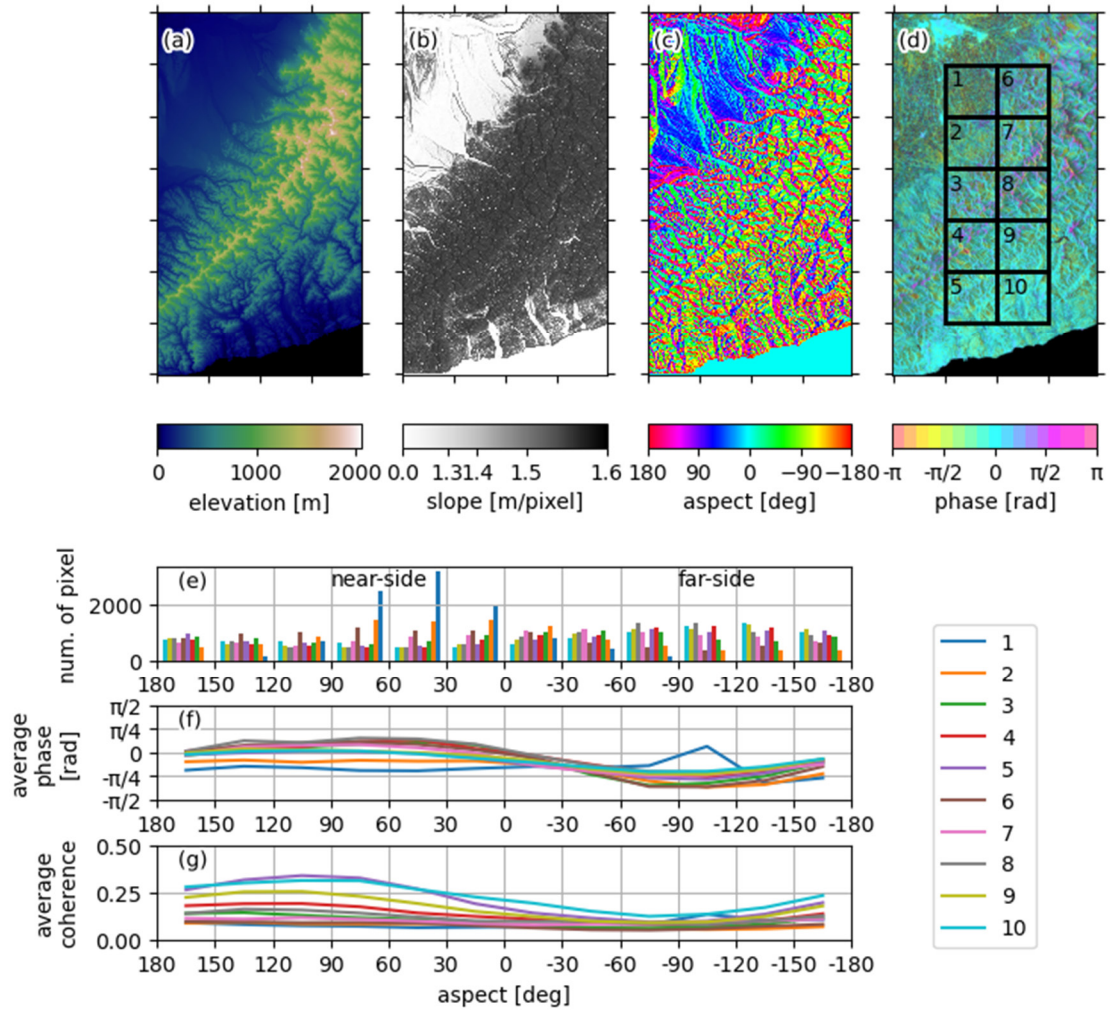


図-2 パス 17, U2-8 frame: 2760 の範囲の DEM 及び干渉画像

- (a) 10 m メッシュ数値標高モデルから求めたレーダー座標系における DEM
- (b) (a)から計算されるピクセルごとの傾斜角
- (c) (a)から計算されるピクセルごとの傾斜方向（衛星進行方向を 0 度とした時計回り）
- (d) ハイパスフィルタを適用した 2019-08-31 と 2019-11-23 の干渉画像（64 ルック）
- (e) (d)の図中の 1 から 10 の領域それぞれに対して、(c)の傾斜方向 30 度ごとのピクセル数を示したヒストグラム
- (f) (d)の図中の 1 から 10 の領域それぞれに対して、(c)の傾斜方向 30 度ごとの位相の平均
- (g) (d)の図中の 1 から 10 の領域それぞれに対して、(c)の傾斜方向 30 度ごとのコヒーレンスの平均

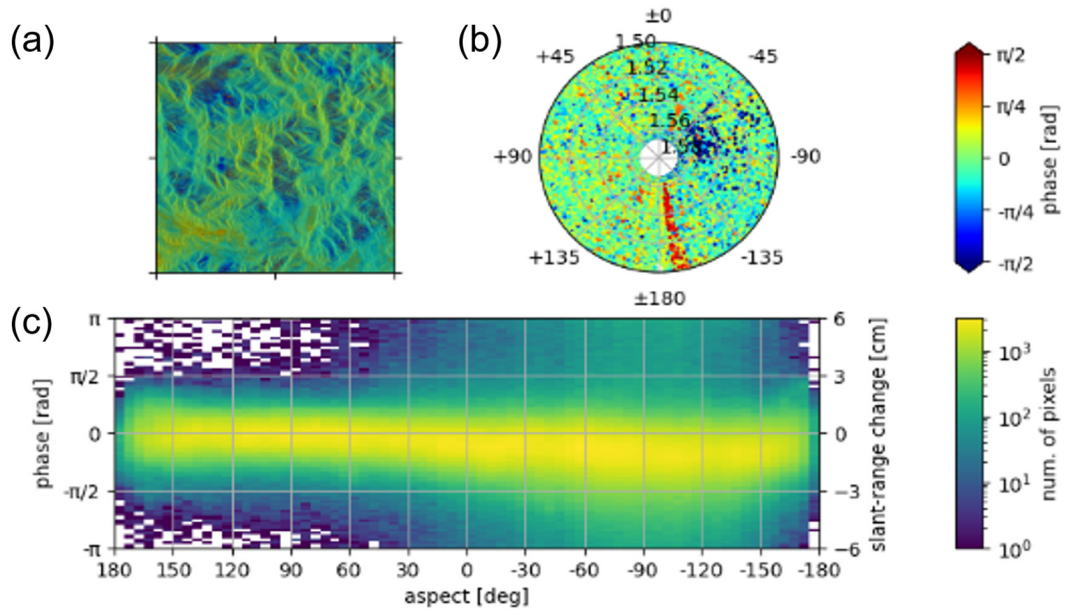


図-3 図-2(d)領域 5 の干渉画像

- (a) ハイパスフィルタを適用した 2019-08-31 と 2019-11-23 の干渉画像（4 ルック）
- (b) 干渉画像で得られた位相差を傾斜角，傾斜方向ごとに示した極座標プロット
- (c) 干渉画像で得られた位相差を傾斜方向ごとに示した二次元ヒストグラム

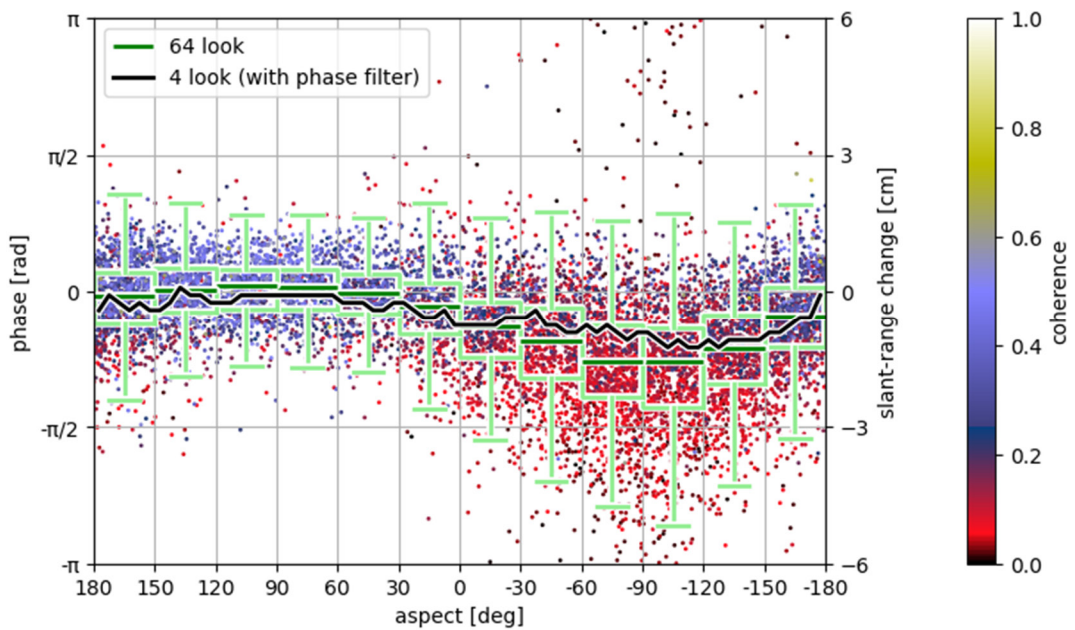


図-4 図-2(d)領域 5 の傾斜方向ごとの位相とコヒーレンスの分布. 横軸は各画素の傾斜方向，縦軸は各画素の位相差，色は各画素におけるコヒーレンスを示す. 緑色で示すボックスプロットは，64 ルック処理を行った干渉画像の各画素に対して，傾斜方向 30 度ごとで分割を行ったグループごとの位相差の分布を示す. 黒線は干渉画像に 4 ルック処理及び Goldstein フィルタ処理を行った後の各画素について，傾斜方向 5 度ごとに分割を行い，複素数領域で平均化した位相差を表す.

2.3 SAR 干渉画像と気象データとの関係性

2.1 に示した方法で実施した SAR 干渉解析で作成した全ての干渉画像に対して、傾斜方向ごとに平均位相を算出し、near 側斜面と far 側斜面における位相差を定量的に評価した。この値と、対応する気象データ（GLDAS 土壌水分量及びアメダス降水量）との比較を行い、関係性を検討した。

図-5(a)には、干渉ペアごとに得られた傾斜方向依存の位相差と、GLDAS に基づく 2 観測日の土壌水分量の差を示している。図-5(b)では、これらの土壌水分量の差と、near 側と far 側の平均位相の差との関係を散布図として示している。両図からは、土壌水分量の差と位相差の間に一貫した相関関係は確認されず、単純な変化量の差分によって斜面位相差を説明することは困難であることが分かる。

図-6 に示すアメダス降水量データとの比較においても同様の傾向が見られた。ここでは、アメダスの 1 時間降水量データに対し、時系列的な重み付けを行って加重累積降水量を算出し、各干渉ペアに対応付けた。この場合においても、near 側と far 側の位相差と降水量の間に明瞭な関係性は見られなかった。

これらの結果は、位相差が土壌水分や降水量の変化との線形関係といった単純なモデルでは説明しきれないことを示している。要因として、GLDAS 土壌水分量の空間解像度は干渉 SAR 画像に比して粗く、急峻な地形や局所的な水文条件を十分に捉えられていない可能性がある。また、降水や土壌水分の変動が地表の散乱特性に影響を与える過程は非線形かつ時定数を持つと考えられ、短期的な気象変化との単純な対応関係からは位相差の実態を把握することが難しいことが考えられる。

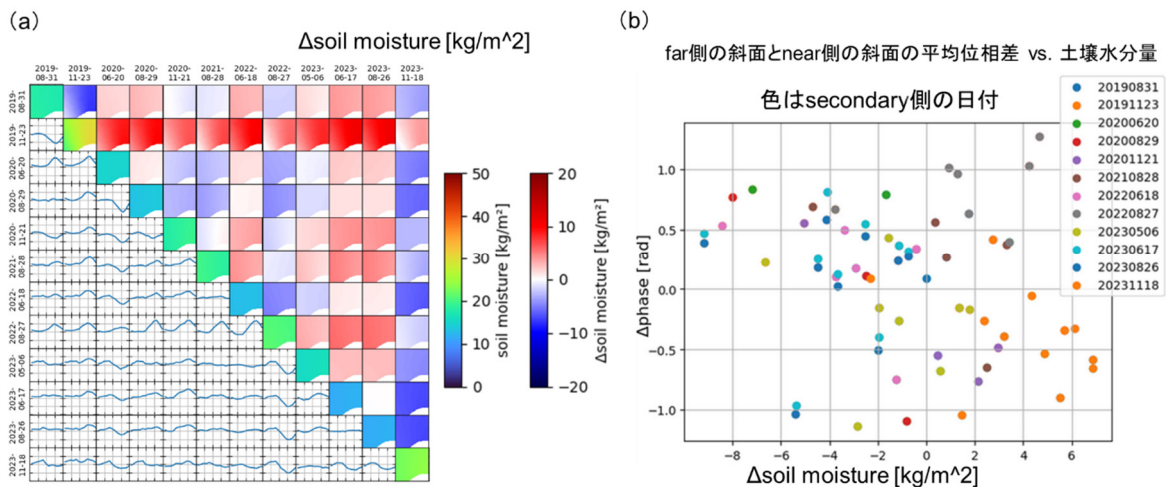


図-5 干渉画像における斜面方向位相差と土壌水分量の関係

- (a) 各干渉ペアの日付における GLDAS 土壌水分量の差をペアの日付ごとに示した図。左上から右下を結ぶ対角線上に位置する図はそれぞれの観測日の GLDAS 土壌水分量を干渉画像中の対象領域で内挿補間した結果を表す。同対角線より右上側に位置する図は各干渉ペアの日付のうち後の日付の土壌水分量から前の日付の土壌水分量を引いた差を表す。同対角線より左下側の図は図-2 (f) の領域 5 のプロットに相当する、干渉画像中の傾斜方向 30 度ごとの位相の平均を表す。
- (b) 各干渉ペアの日付における far 側と near 側の平均位相の差と、土壌水分量の差を示した散布図

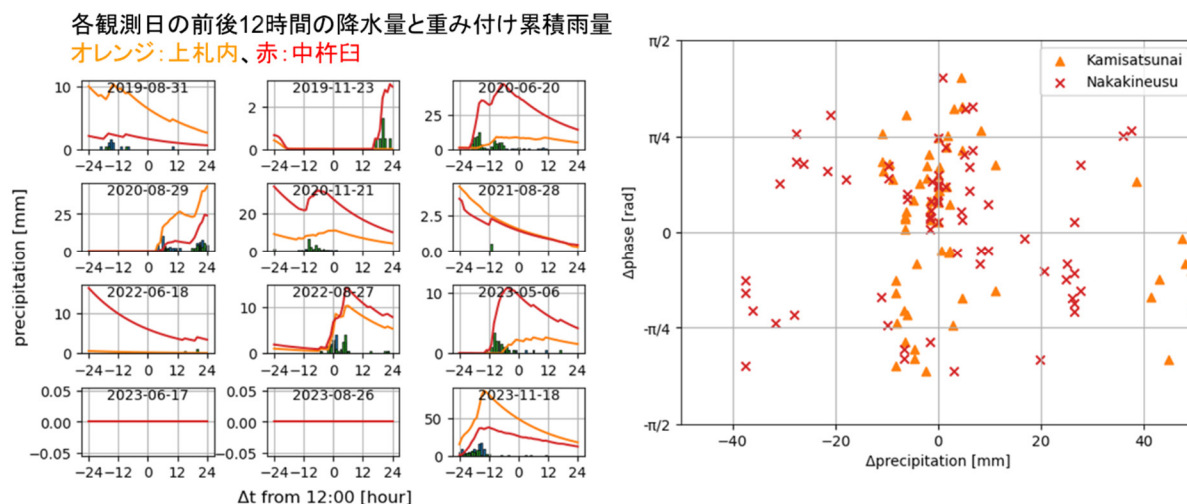


図-6 干渉画像における斜面方向位相差と降水量の関係

(左) 各干渉ペアにおける累積降水量の差をペアの日付ごとに示した図

(右) 各干渉ペアにおける far 側と near 側の平均位相の差と、累積降水量の差を示した散布図

3. まとめ

本研究では、北海道日高山脈を対象に、「だいち2号」の SAR 画像を用いた SAR 干渉解析において山岳斜面に生じる位相差の特徴と、それに関与する地形的・気象的要因との関係について予備的な検討を行った。その結果、far 側斜面におけるコヒーレンスの低下や位相のばらつき、並びに傾斜方向に沿った系統的な位相差が確認された。また、特定の観測日を含む干渉ペアにおいて、位相差が顕著となる事例も見られた。

降水量や土壌水分量といった環境要因との単純な対応関係は明確には確認できなかったが、図-2 で確認されたように位相差が地形の向き、レーダーの観測方向、コヒーレンスの分布といった地形条件と密接に関連していることが示唆された。ただし、現時点の解析ではこれらの要因を定量的に分離・評価するには至っておらず、今後は時間分解能の高いデータや、季節的・地質的条件の異なる観測データを用いた比較検討が必要である。さらに、SAR 信号の散乱特性は地表の状態（表面粗度、水分、植生被覆など）に強く依存することから、これらの影響を含めた散乱メカニズムの理解を深めることが、位相差の物理的背景を解明する鍵となる。

今後は、より多くの地域での干渉ペアを用いた統計的解析を進めるとともに、積雪や植生、地質などの追加要因を考慮した多変量解析を実施する予定である。解析対象地域を他の山岳地域にも拡張し、斜面方向に現れる位相差の発生メカニズムの普遍性と地域特性を評価することで、将来的には SAR 干渉解析におけるノイズ低減手法の構築を目指す。

謝辞

「だいち2号」の原初データは、国土地理院と宇宙航空研究開発機構（JAXA）の間の協定に基づき提供されました。「だいち2号」の原初データの所有権は、JAXA にあります。

参考文献

藤原智 (2023) : L バンド干渉 SAR による地殻変動検出における対象物の水分量変化の影響, 測地学会誌, 69, 1-7. doi: 10.11366/sokuchi.69.1