

干渉 SAR 成果の利用拡大に関する研究開発（第 5 年次）

実施期間	平成 26 年度～平成 30 年度
測地部宇宙測地課	山下 達也 林 京之介 桑原 將旗 本田 昌樹 酒井 和紀 宗包 浩志
企画部	飛田 幹男

1. はじめに

測地部宇宙測地課では、陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」に搭載された合成開口レーダー (SAR) のデータを用いて SAR 干渉解析を実施し、日本全国の地盤変動を定常的に監視している（以下「全国定常解析」という.）。SAR 干渉解析で得られる画像（以下「SAR 干渉画像」という.）には、電離層やレイオーバーの影響によって位相差が生じることがあり、微小な地盤変動を検出する際の障害となっている。本研究では、電離層内を通過する電波の伝播遅延によって発生する位相差と、地表の状態と電波の入射角によって発生する位相差の低減に向けた取組について報告する。

2. 電離層に起因する位相差の低減

2.1 取組の概要

SAR 衛星のデータを用いた SAR 干渉解析では、電離層起因と考えられる位相変化が生じることがある。これは電波の伝播時間が伝播経路上に存在する全電子数 (TEC) に依存する結果として現れるものであり、電波の波長が長いほど伝播遅延及び位相変化が大きくなる (Gomba et al., 2016)。特に「だいち 2 号」は波長が長い L バンドを採用しており、電離層の影響を受けやすい。実際、宇宙測地課が 2014 年 9 月から実施している全国定常解析では、電離層起因と考えられる顕著な位相変化がこれまでに少なくとも 100 件以上検出されている。より信頼度の高い変動検出を目指す上で、電離層起因の位相変化を低減することは重要な課題と言える。そこで本研究では、全国定常解析で顕著な電離層起因の位相変化が検出された事例に対して、Split-Spectrum 法 (Gomba et al., 2016) による電離層遅延誤差低減処理（以下「電離層補正」という.）を実施し、その有効性について検証した。

2.2 SAR 干渉解析における電離層補正と全国定常解析への適用

SAR 干渉解析における電離層補正の手法の一つとして、Split-Spectrum 法が挙げられる。Split-Spectrum 法とは、電離層に起因する位相変化が電波の周波数に依存することに着目し、観測データの周波数帯域を高周波成分と低周波成分に分離してそれぞれ干渉画像を作成し、適切な重み付き平均を取ることで、電離層起因の位相変化を補正する手法である。

宇宙測地課では、平成 29 年度に、独自に開発した SAR 干渉解析ソフトウェア (新 GSISAR) に Split-Spectrum 法に基づく電離層補正を実装した。平成 30 年度は、電離層補正を今後の全国定常解析の解析ルーチンに組み込むことを目指し、電離層補正による誤差低減の度合いや処理時間等について定量的な調査を実施した。

2.3 得られた効果

本研究では、全国定常解析のうち電離層起因の位相変化が顕著に含まれている 34 事例に対して電離層補正を実施し、電離層補正の誤差低減効果を調査した。その結果、全ての事例で電離層起因と考えられる長波長の位相誤差が低減されたことを確認した。また、全 34 事例のうち 31 事例では、補正

前後の位相の標準偏差が補正前と比べて 60%以上低減された。電離層補正後の位相の標準偏差は、「だいち 2号」の Stripmap (3m 分解能) モードで、概ね 2cm 以下まで低減されることがわかった。図-1 の事例では、雌阿寒岳の火山活動に伴う変動が含まれているが、電離層補正を実施しても変動の情報は損なわれず、また変動の範囲をより明確に把握できるようになっていることが見て取れる。

Split-Spectrum 法による電離層補正では、観測データの周波数帯域を分割し、高周波・低周波の 2 つの差分干渉画像を作成する必要があるため、補正処理に時間を要する。本研究で使用した計算機環境での Stripmap (3m 分解能) モード補正処理の時間は、1 シーンで概ね 30 分程度であった。これは、全国定常解析の処理時間の約 3 割を占めるため、今後の全国定常解析では電離層補正なしでの処理を標準とし、顕著な電離層起因の位相変化が見られた場合に電離層補正を実施するといった解析戦略をとるのが妥当と考えられる。

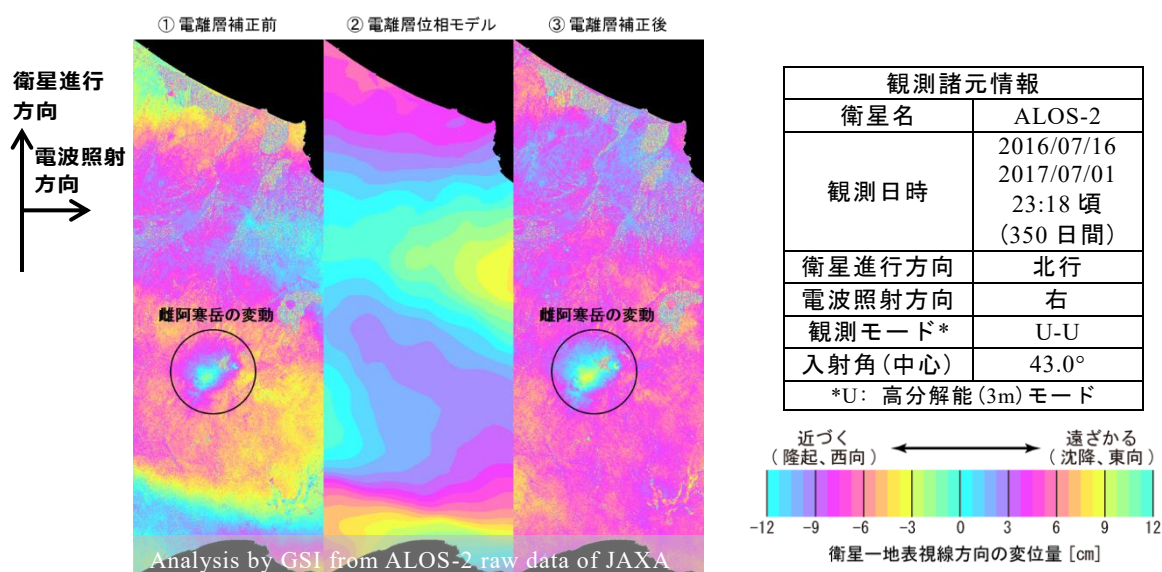


図-1 電離層補正の事例。①電離層補正前の位相。②推定した電離層位相。③電離層補正後の位相

3. レイオーバーに起因する位相差の低減

3.1 取組の概要

SAR 衛星は、進行方向と直交する面内で斜め下に電波を照射し、地表からの後方散乱波を衛星と地表との距離（以下「衛星視線距離」という。）が短い順に観測データを記録している。平地では、衛星に近い地点から順に後方散乱波の情報が記録されるのに対し、急峻な山岳地域では、山頂部が衛星側の山麓部よりも衛星視線距離が短くなる場合がある。このとき、衛星側の山麓部には位置は異なるものの衛星視線距離が等しい地点が存在するようになり、これらの地点からの後方散乱波は同時に衛星のアンテナに受信され、複数地点の情報が入り混じって記録されることになる。この現象は「レイオーバー」と呼ばれている。日本は全体的に山がちであり、全国定常解析では黒部峡谷などの急峻な山岳地域や、三宅島などの火山の火口壁など起伏が大きい地形でレイオーバーが検出されている。

レイオーバーがもたらす問題として、新 GSISAR の地形縞シミュレーションプログラム SimDem10（飛田，2009）では、アルゴリズムの特性上レイオーバーが発生している領域で見かけの位相変化（2 地点の標高差による残存縞（以下「地形縞」という。）が発生するという現象が挙げられる。レイオーバー起因の地形縞は、信頼度の高い変動検出を実現する上で大きな障壁となっていた。

しかし、レイオーバーにより複数地点の情報が入り交じって記録された場合においても、後方散乱

が最も強い地点からの寄与が最も大きいことに着目すると、レイオーバー起因の見かけの位相変化を軽減できることが分かった。そこで本研究では、SimDem10 を改良し、全国定常解析でレイオーバーが検出された SAR 干渉画像を対象にレイオーバーの影響を軽減した地形縞を作成した。また、この地形縞の作成に必要な時間を計測し、地形縞データベースの全国整備に向けた解析戦略を検討した。

3.2 地形縞シミュレーションプログラム (SimDem10) の改良

従来の SimDem10 による地形縞シミュレーションでは、同じ衛星視線距離の地点が複数個所存在する場合、衛星側に最も近い地点で地形縞を評価している。このとき、同じ衛星視線距離の地点のうち散乱強度が最も強い地点の位相が衛星側に最も近い地点に紐づけられ、地形縞を精度良く推定することができなくなる場合がある。その結果として、SAR 干渉画像で地形縞が出現することになる。

以上を踏まえ、本研究では SimDem10 にレイオーバーの影響を軽減する「レイオーバー探索」と「レイオーバー最強散乱体選択」を同時に実行する機能を搭載した (2 機能をまとめて以下「レイオーバーモード」という.)。「レイオーバー探索」とは、観測した領域の中から衛星視線距離が同じ地点を選出する機能であり、「レイオーバー最強散乱体選択」とは、「レイオーバー探索」機能で選出した衛星視線距離が同じ地点において、数値標高モデル (DEM) 及びオフナディア角の情報から各地点の後方散乱係数を算出し、後方散乱係数が最も大きい地点 (電波の散乱強度が最も強い地点) を「最強散乱体」として選択する機能である。レイオーバーモードでは、電波の散乱強度が強い地点の画素が選択されるため、標高差に応じた地形縞を軽減することが可能である。ただし、レイオーバー発生領域の記録データには複数地点のデータが含まれているので、地形縞を完全には除去できないことに注意しなければならない。

3.3 得られた効果

本研究では、全国定常解析でレイオーバーが検出された黒部峡谷を対象に、レイオーバーモードを搭載した SimDem10 を用いて地形縞を作成し、レイオーバーの軽減効果を調査した。図-2 左は、レイオーバーが発生している斜面の断面図である。従来の SimDem10 による地形縞シミュレーション結果を用いた SAR 干渉画像では、衛星に近い斜面 (図-2 左の緑線) にある点に衛星の方向を向いている斜面 (図-2 左の青線) の点の位相情報が重複して記録されるため、SAR 干渉画像において、衛星に近い斜面では、両斜面の標高差による地形縞が発生し、衛星の方向を向いている斜面の画素は欠損する。一方で、レイオーバーモードによる地形縞を用いた SAR 干渉画像は、衛星側を向いている斜面のほうが衛星に近い斜面よりも散乱係数が大きいため、衛星側を向いている斜面の画素が選択され、衛星に近い斜面の画素は欠損する (図-2 右)。両斜面において、衛星視線距離が同じ地点の位相情報は、散乱係数が大きい地点からの寄与が大きいため、レイオーバー最強散乱体選択による地形縞を用いた SAR 干渉画像では、両地点の標高差による顕著な地形縞は見られなかった。

レイオーバーモードでは、画像全体から衛星視線距離が等しい地点を探索し、散乱係数を比較しているため、従来の処理に対して約 60 倍の時間が掛かり、処理時間は画像内でレイオーバーが発生している場所が多いほど長くなる傾向があることが分かった。上記の結果を踏まえると、全国定常解析を対象としたレイオーバーモードによる地形縞データベースを整備するには、約 3 か月もの計算時間がかかるが見込まれる。しかし、解析パスの約 7 割でレイオーバーによる影響が検出されていることから、宇宙測地課では「だいち 2 号」の基本観測が行われず計算機リソースの余裕がある時期を利用してレイオーバーの影響を軽減した地形縞データベースを順次整備することを検討している。

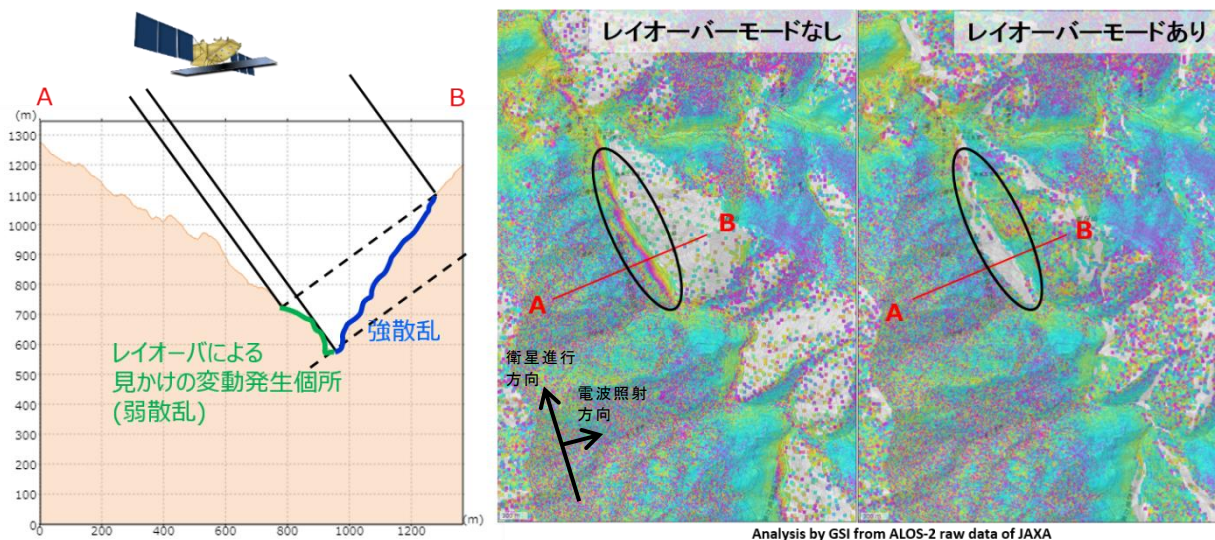


図-2 レイオーバの影響を軽減した事例。左図はレイオーバが発生している斜面の断面図。
右図は従来モードとレイオーバモードの地形縞を用いて作成した SAR 干渉画像の比較。

4. まとめ

SAR 干渉画像に含まれる電離層起因と考えられる位相変化に対して、Split-Spectrum 法による電離層補正を実施し、電離層位相の低減効果を調査した。全国定常解析で検出された顕著な電離層位相が含まれる 34 事例に対して電離層補正を実施し、31 事例で位相標準偏差の大幅な減少を確認した。電離層補正後の位相の標準偏差は、「だいち 2 号」の Stripmap (3m 分解能) モードで、概ね 2cm 以下まで低減されることがわかった。

さらに、地形縞シミュレーションプログラム SimDem10 にレイオーバの影響を軽減する機能を搭載し、全国定常解析のデータを対象としたレイオーバの軽減効果の調査と今後の地形縞データベースの全国整備に向けた解析戦略を検討した。レイオーバモードで地形縞を推定した SAR 干渉画像では、レイオーバ発生域の画素がもっともらしい地点に紐づけられ、従来の処理で生じていた地形縞が軽減された。

宇宙測地課では、引き続き SAR 干渉画像に含まれる位相誤差を低減し、より信頼度の高い変動検出に取り組んでいく。

謝辞

「だいち 2 号」の原初データは、国土地理院と（国研）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

Gomba, G., A. Parizzi, F. De Zan, M. Eineder, R. Bamler, (2016): Toward Operational Compensation of Ionospheric Effects in SAR Interferograms: The Split-Spectrum Method, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 54, 1446-1461.

飛田幹男 (2009)：地殻変動計測のための SAR 画像分析の高度化に関する研究 (第 3 年次), 平成 21 年度国土地理院調査研究年報, <http://www.gsi.go.jp/common/000057644.pdf> (accessed 9 Jan. 2019).