

SAR データの解析手法の高度化に関する研究（第 2 年次）

実施期間

令和元年度～令和 3 年度

地理地殻活動研究センター

宇宙測地研究室 森下 遊

1. はじめに

国土地理院では、災害対応や防災活動を主な目的として、人工衛星に搭載された SAR（合成開口レーダー）のデータを使用した SAR 干渉解析により、地震・火山活動・地盤沈下・斜面変動等に伴う地表変動を計測・監視する事業、またその事業に資するための研究開発を行っている。

解析ソフトウェアは、測地部宇宙測地課が 2004 年に開発を開始した、GUI 操作が可能な「GSISAR」（Version 2、「新 GSISAR」とも呼ばれる）を主に使用しており、継続的に新しい解析手法の導入や効率化等の改良を行ってきた（和田ほか，2007）。開発当初に利用可能だった JERS-1 や ALOS の SAR データに比べて、現在主に利用している ALOS-2 のデータの品質（例えば軌道情報精度）は大きく向上しており、この GSISAR Version 2 には現在では使用しなくなった機能（例えば基線値再推定）も搭載されていた。また、数多くの機能追加によりソフトウェアの構造が複雑化しており、新任者が容易に理解し、操作することが困難な状態となっていた。さらに、GUI のライブラリは開発当初の古いものがそのまま用いられており、操作性に優れているとはいえなかった。

令和 4 年度には、ALOS-2 の後継機である ALOS-4 が打ち上げられる予定であり、観測幅の拡大と観測頻度の向上により、データ量が約 5 倍に増加する見込みである。そのため、ALOS-4 へ向けて解析処理と解析戦略の効率化・最適化を図り、解析ソフトウェアの改良を行う必要があった。しかし、現行の GSISAR への機能追加ではさらに構造が複雑化してしまうという問題があった。

そこで本年度、ALOS-2/4 の解析に最適化するために、GUI と解析フローを一新した GSISAR Version 3 の開発が行われた。その中で本研究ではいくつかのコア機能の新規開発及び改良を行い、その成果は Version 3 に組み込まれた。なお、GUI を含むソフトウェア全体の開発は宇宙測地課が外注で実施した。

2. 新規開発・実装した機能

2.1 電離層誤差レベル推定機能

令和元年度に開発した電離層誤差レベルを推定する機能（森下，2020）を発展させ、GSISAR に新たに実装した。令和元年度時点では、アジマスシフトの一次導関数に相当するアジマス方向のサブバンド（前方視・後方視）画像間の位置ずれのみを電離層誤差レベル推定に使用していたが、今回新たにアジマス方向積分によりアジマスシフトそのものも算出する機能を追加した。そして、電離層誤差レベルの評価は、アジマスシフト及び一次導関数の両方で行うこととした。その理由は、アジマスシフトは長波長、一次導関数は短波長の電離層擾乱を検出しやすく、両方で検出しやすい電離層擾乱の特性が異なり、両者を用いることで多様な電離層擾乱を評価・検出できることがわかったためである。実際の運用では、アジマスシフト及び一次導関数の解析範囲全体についての標準偏差を計算し、それらのうちいずれかがそれぞれに設定された閾値以上であれば、電離層誤差が大きいとみなし、非線形位置合わせを自動的に実行することとした。

2.2 ローパスフィルタ機能

SAR 干渉画像には対流圏誤差や電離層誤差等の長波長誤差が含まれる。この誤差は数値気象モデルによる対流圏誤差低減処理（小林ほか，2014）やスプリットスペクトラム法による電離層誤差低減処理（Gomba et al., 2016）等により低減することが可能だが，これらの処理でも十分な効果が得られず，長波長誤差が干渉画像に残存することがある。また，例えば大地震時に，震源断層運動による大規模な地表変動と，副次的に励起された小規模な地表変動（例えば，お付き合い断層や斜面変動）が同時に生じた際，長波長位相変化（大規模地表変動）に含まれる短波長位相変化（小規模地表変動）のみを抽出したい場合がある（例えば，宇根ほか，2008）。このような場合，単純なローパスフィルタにより長波長成分を計算し，これを元の画像から差し引くことで，長波長位相変化だけを除去して目的とする短波長の位相変化を得ることができる。

今回，アンラップ画像とラップ画像のどちらの画像に対してもローパスフィルタを適用できる機能を開発し，GSISAR に組み込んだ。アンラップ画像に対しては，単純にアンラップ済みの位相に対して 2 次元ガウシアンフィルタによる畳み込み演算を行うだけである。ただし，アンラップエラーが含まれると正しい結果が得られないので，注意が必要である。一方のラップ画像では，元データが複素数であるため，まず複素数の振幅を均一にし，次に実部・虚部それぞれに対して 2 次元ガウシアンフィルタによる畳み込み演算を行うことでこれを実現できる。ただし，フリッジレートが高い領域では正確に長波長成分が計算できず，不連続が生じることがあるので，注意が必要である。

2.3 Pixel Offset 機能

Pixel Offset は，2 枚の SAR 強度画像の精密な位置合わせにより，数 m に及ぶような大きな地表変動を，レンジ・アジマス 2 成分で面的に計測できる技術である（例えば，小林ほか，2011）。今回，GSISAR のコアプログラムを組み合わせる Pixel Offset を実行するプログラムを作成し，GSISAR に組み込んだ。解析手順は，(1) 地形補正，(2) オフセット計測，(3) 相関係数に基づくマスク及びメジアンフィルタの適用であるが，GUI で実行ボタンを押すだけでこれらの処理を一連実行することを可能とした。さらに，オフセット計測では膨大な量の計算を行う必要があるが，並列処理により高速化を実現した。

2.4 MAI 機能

MAI は，2 枚の SAR 画像を信号処理によりそれぞれ前・後方視画像に分割し，各方向の干渉画像を作成し，それらの差分を計算することで，アジマス方向の変動を計測できる技術である（Bechor and Zebker, 2006）。今回，GSISAR のコアプログラムを組み合わせる MAI を実行するプログラムを作成し，GSISAR に組み込んだ。解析手順は，(1) 前・後方視画像への分割，(2) 前・後方視干渉画像作成，(3) MAI 画像作成とフィルタ，(4) MAI 画像のアンラップ，(5) MAI 位相から変動量への変換である。これらは，GUI で実行ボタンを押すだけで一連実行が可能である。

2.5 アジマス方向の変動量における電離層誤差補正機能

TEC（電離圏全電子数）のアジマス方向の勾配によって生じるアジマスシフトは，アジマス方向の変動を計測する Pixel Offset や MAI にとって直接的な誤差要因となる。TEC を SAR 画像に匹敵する空間分解能で把握することはスプリットスペクトラム法（Gomba et al., 2016）が確立するまでは不可能であったが，現在では同法で推定するレンジ方向の電離層誤差からアジマスシフトをある程度の空間分解能で計算することが可能となった。今回，Yamashita et al. (under review) が提唱したアジマス方向の電離層誤差補正を実行するプログラムを作成し，GSISAR に組み込んだ。

2.6 データ GeoTIFF 出力機能

解析結果の詳細な判読や作図には，背景地図やさまざまな地理空間情報と重ね合わせて表示するた

めに QGIS 等の GIS ソフトを用いる。GIS ソフトで最もよく用いられている画像形式の一つに GeoTIFF がある。GeoTIFF には表示色があらかじめ設定された色付き形式と、数値データをそのまま格納したデータ形式がある。色付き形式では、GIS ソフト側で表示色の設定をする必要はないが、表示色を変更するためには GeoTIFF ファイルの再作成が必要となる。一方のデータ形式では、GIS ソフトでの読み込み時に表示色を設定する必要があるが、GIS ソフト上で表示色を自由に変更でき、汎用性が高い。表示色が決まっているデータでは色付き形式が適しているが、調査研究等で最適な表示色を試行錯誤したい場合にはデータ形式の方が使い勝手が良い。また、データ形式であれば、GDAL というライブラリを用いて複雑な計算も簡単に実行することが可能であり、3次元解析等の後続処理にも使用しやすい。

これまでの GISAR では解析結果画像を色付き GeoTIFF 形式に変換する機能は存在したが、データ GeoTIFF 形式で出力する機能はなかった。そこで、GDAL ライブラリを用いて解析結果画像をデータ GeoTIFF 形式で出力するプログラムを開発し、GISAR に組み込んだ。さらに、圧縮オプションとして DEFLATE を指定することにより、ファイルサイズを大幅に縮小することが可能となった。

2.7 国外 DEM 自動準備機能

SAR 干渉解析では地形に起因する位相変化成分を除去するために高分解能・高精度な DEM の情報が必須である。国内を対象とする解析では、国土地理院の 10m (一部 5m) メッシュ DEM から作成した GSI10mDEHMJapan (飛田, 2010; 桑原ほか, 2020) という日本全域のデータセットを使用しているため、解析のたびに DEM を新たに準備する必要はない。一方、地震に伴う解析等で国外を対象とする際は、解析前に DEM が必要な範囲を目視で決定し、対象範囲をカバーする SRTM3 (90m メッシュ) や ASTER GDEM (30m メッシュ) のデータを配布サイトから手動でダウンロードし、形式変換を行うツールを適用して DEM を準備する必要があり、多くの手間を要していた。

今回、対象範囲の決定、DEM データの自動ダウンロード、形式変換を一連実行するプログラムを作成し、GISAR に追加した。これにより、国外の解析の際に DEM を準備する手間を大幅に省くことが可能となった。なお、DEM データの自動ダウンロードには米国の大学や政府系機関が運用している OpenTopography の API (OpenTopography, 2021) を利用する。利用可能な DEM の種類は 30m メッシュの SRTM1 及び AW3D 並びにそれぞれの標高を楕円体高に換算したもの (EGM96 ジオイドモデル使用) である。

3. 改良した機能

3.1 コヒーレンス計算機能

コヒーレンスは干渉性を表す指標であるが、あるピクセル単体における真値を計測することは原理的に不可能であり、周囲のピクセルの情報からこれを推定することとなる。コヒーレンスの推定値には、コヒーレンス計算に使用するウィンドウ内の独立サンプル数 (実効ルック数) に依存するバイアスが含まれる (Hanssen, 2001)。この独立サンプル数が小さいとバイアスが大きくなるため、低コヒーレンス値を正しく評価できなくなるという問題が生じる。バイアスを小さくするには、ウィンドウサイズを大きくすることにより独立サンプル数を大きくすればよいが、空間分解能が犠牲になるため、ウィンドウサイズを不必要に大きくはしたくない。従来の GISAR では、ウィンドウサイズを必ずしも適切ではない値で固定してコヒーレンスの計算を行っており、バイアスが大きくなってしまったことがあった。そこで、観測モードやルック数に応じて必要最小限のウィンドウサイズを自動的に計算し、それを用いてコヒーレンス計算を行うプログラムを作成し、実装した。これにより、バイアスが十分に小さく、かつ、可能な限り空間分解能を維持した形でコヒーレンスを自動的に計算することが可能

となった。さらに、このプログラムではコヒーレンス値から計算できる標準偏差 (Hanssen, 2001) も同時に出力するようにした。この標準偏差は観測データの誤差として使用可能であり、複数データを組み合わせる 3 次元解析等の高度化には欠かせない重要な情報である。

3.2 大気地形補正機能

干渉 SAR に含まれる誤差の一つに、地形に相関する大気誤差があり、これは標高にある係数を乗じた位相を差し引くことで低減できる (藤原ほか, 1999)。従来の GISAR では、解析者が試行錯誤して主観的にこの係数を決めていたが、位相残差が最小になるよう最小二乗法により自動で係数を決定する機能を追加した。また、解析範囲全体の傾斜位相も同時に考慮すべき場合があるため、傾斜位相の係数も同時に最小二乗推定できるようにした。さらに、変動域や標高が低い領域を除いて係数を推定したい場合があるため、使用/除外範囲や使用標高範囲を指定するオプションも追加した。加えて、補正の効果を容易に確認できるように、補正前後の位相と標高の関係を表す散布図と補正前後の比較画像を出力するようにした。

3.3 多項式補正機能

干渉 SAR に含まれる誤差の一つに、軌道情報の誤差や対流圏・電離層遅延に起因する傾斜位相誤差がある。同誤差は、変動がないと仮定できる地点の干渉 SAR の位相から傾斜位相の係数を最小二乗推定して差し引くことで低減可能である。従来の GISAR では、推定可能な傾斜モデルは 2 次関数 ($a+bx+cy+dxy+ex^2+fy^2$) のみであったが、過剰フィッティングによりシーン端で不正確な位相が生じることがあった。そこで、傾斜位相誤差の特性に応じて、2 次関数に加えてバイリニア関数 ($a+bx+cy+dxy$)、1 次関数 ($a+bx+cy$)、0 次関数 (a のみ) も選択できるようにした。また、従来は手動で使用する点を一つずつ取得する必要があったが、この点数が少ないと正確に係数が推定されないおそれがあるため、指定範囲内の全点を使用するようにプログラムを変更した。

3.4 GNSS 補正機能

解析範囲の大部分に変動が含まれる場合、上述の多項式補正は適用できない。そのような場合は、外部データである GNSS の変動量に位相をフィットさせる補正が有効である (森下, 2016)。従来は多項式を用いた GNSS 補正はバイリニア関数のみが使用可能であったが、誤差の特性に応じて 1 次関数と 2 次関数も選択できるようにした。

3.5 位相アンラップ機能

位相アンラップには、従来は独自開発したプログラムによる Branch cut 法のみが利用可能であったが、島等の離れた領域は手動でアンラップ開始点を指定する必要がある等、自動処理には必ずしも適しているとはいえなかった。今回、オープンソースの位相アンラップソフトウェア Snaphu (Chen and Zebker, 2002) を使用して位相アンラップを実施するプログラムを作成し、GISAR に組み込んだ。Snaphu は数多くの干渉 SAR 関連ソフトウェアに組み込まれており、その性能と安定性は非常に高い。これにより、手動調整が必要な場面が大きく減少した。

3.6 ジオコード機能

ジオコードにはフォワードジオコードとバックワードジオコードの 2 通りの手法がある。フォワードジオコードは高速だが低精度であり、バックワードジオコードは逆に低速だが高精度である。バックワードジオコードは大きい画像では数時間以上の処理時間を要していたため実運用でこれを用いることは非現実的であり、これまではフォワードジオコードを主に使用せざるを得なかった。そこで今回、バックワードジオコードの並列処理が可能なプログラムを開発した。これを用いることで、例えばバックワードジオコードに 8 時間を要していた画像も、コア数 48 個による並列処理であれば、10 分という現実的な時間で完了できるようになった。これにより、バックワードジオコードを標準的な

手法として用いることが可能となり、解析の高精度化につながった。

3.7 加色混合機能

加色混合は、2 時期の強度画像をそれぞれシアン及び赤で表示して重ね合わせ、その期間に生じた散乱強度の変化を視覚的に表現する手法であり (Tobita et al., 2006)、海岸線の変化や、建造物の倒壊等を検出することができる。これまでは独立したスクリプトで実行し、ある程度手動操作が必要であったが、今回、一連実行するプログラムを作成して GSISAR に組み込み、GUI から実行できるようにした。これにより、GSISAR の解析フローの一部に組み込まれ、自動実行が可能になった。

3.8 地図タイル化機能

干渉 SAR の解析結果を地理院地図等のウェブ地図上で表示することで判読・解釈の作業効率が大きく向上するが、そのためには画像をタイル化する必要がある。これまでは GSISAR からは独立したコマンドでこれを実施していたが、今回、GSISAR の GUI に組み込むことで処理の一連実行が可能となった。また、タイル化には GDAL ライブラリに含まれるコマンド (gdal2tiles.py) を使用しているが、これまではかなり古いバージョン (ver1) を使用してきた。これを今回新しいバージョン (ver2.3 以降) に変更したことで並列実行等のオプションが利用可能になり、処理の効率化が図られた。

4. まとめ

データ量が大幅に増加する予定の ALOS-4 の利用へ向けて、SAR データ解析のためのいくつかの新機能開発と改良を行い、解析処理の効率化・多様化・高精度化・安定化を実現した。開発・改良した機能は、解析フローが効率化・最適化され GUI が一新された GSISAR Version 3 へ組み込まれ、従来よりも多様かつ高度な解析を容易に実行できるようになり、事業レベルでの活用が可能になった。

参考文献

- Bechor, N.B.D., and Zebker, H.A. (2006): Measuring two dimensional movements using a single InSAR pair, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L16311.
- Chen, C.W., and Zebker, H.A. (2002): Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40, 1709-1719.
- 藤原智, 飛田幹男, 村上亮, 中川弘之, Rosen, P.A. (1999): 干渉 SAR における地表変動検出精度向上のための基線値推定法と大気-標高補正, *測地学会誌*, 45, 4, 315-325.
- Gomba, G., Parizzi, A., De Zan, F., Eineder, M., and Bamler, R. (2016): Toward Operational Compensation of Ionospheric Effects in SAR Interferograms: The Split-Spectrum Method, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 54, 3, 1446-1461.
- Hanssen, R. (2001): *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, Springer Netherlands, Dordrecht.
- 小林知勝, 石本正芳, 飛田幹男, 矢来博司 (2014): SAR 干渉解析のための数値気象モデルを用いた大気遅延誤差の低減処理ツールの開発, *国土地理院時報*, 125, 31-38.
- 小林知勝, 飛田幹男, 村上亮 (2011): 局所的大変位を伴う地殻変動計測のためのピクセルオフセット解析, *測地学会誌*, 57, 2, 71-81.
- 桑原將旗, 三木原香乃, 本田昌樹, 島崎久実, 山下達也, 酒井和紀, 宗包浩志 (2020): 次世代 SAR 衛星を用いた地殻変動監視 (第 1 年次), *国土地理院令和元年度調査研究年報*, 40-43.
- 森下遊 (2016): GNSS データを用いた干渉 SAR に含まれる空間的長波長誤差の低減, *測地学会誌*, 62, 2, 89-100.

森下遊 (2020) : SAR データの解析手法の高度化に関する研究 (第 1 年次), 国土地理院令和元年度調査研究年報, 154-157.

OpenTopograph: OpenTopography for Developers, <https://opentopography.org/developers> (accessed 2 Feb. 2021).

飛田幹男 (2010) : 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), 国土地理院平成 21 年度調査研究年報, 109-110.

Tobita, M., Suito, H., Imakiire, T., Kato, M., Fujiwara, S., and Murakami, M. (2006): Outline of vertical displacement of the 2004 and 2005 Sumatra earthquakes revealed by satellite radar imagery, *Earth Planet Sp* 58, e1-e4.

宇根寛, 佐藤浩, 矢来博司, 飛田幹男 (2008) : SAR 干渉画像を用いた能登半島地震及び中越沖地震に伴う地表変動の解析, *日本地すべり学会誌*, 45, 2, 125-131.

和田弘人, 雨貝知美, 藤原みどり, 飛田幹男, 矢来博司, 藤原智 (2007) : 干渉 SAR 解析技術の高度化に関する研究 (第 1 年次), 国土地理院平成 18 年度調査研究年報, 61-64.

Yamashita, T., Morishita, Y., and Kobayashi, T. (under review): Mitigation of ionospheric noise in azimuth offset based on the split-spectrum method, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*