

SAR データの解析手法の高度化に関する研究（第1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。現在は 2014 年に打ち上げられた ALOS-2 のデータを主に利用しているが、2021 年度には約 5 倍のデータ量を観測可能な後継機 ALOS-4 の打ち上げが予定されており、さらに膨大となるデータを効率的に処理するため、解析処理の全自動化が課題となっている。

筆者は、昨年度に引き続き、日本学術振興会海外特別研究員として、英国リーズ大学に滞在し、SAR 干渉解析についての研究開発を実施した。まず、解析処理の全自動化へ向けた課題を解決するため、SAR データに含まれる電離層誤差レベルを推定する機能を開発した。ALOS-2 の約 5 年間にわたる令和元年度の研究時点までの膨大な観測データに同機能を適用したところ、顕著な電離層誤差が含まれる割合は季節や観測時間によって大きく異なることがわかった。5～8 月の北行軌道（深夜 0 時前後の観測）では約 40%が該当するのに対し、それ以外では 1～2%程度と非常に少なかった。

また、英国の地震火山関係の研究グループである COMET（リーズ大学も含む）によってウェブ上で公開されている Sentinel-1（C バンド）の干渉画像を利用して、ほぼ全自動で時系列解析を実施するソフトウェア「LiCSBAS」を開発し、GitHub で公開した。本ソフトウェアは世界中（10 ヶ国以上）の研究者やプロジェクトで利用され始めているとともに、ALOS-2 や ALOS-4 でも利用可能となるように設計しており、国土地理院の事業における日本全国を対象とする干渉 SAR 時系列解析の自動化の実現に向けて必須となる基礎開発が大きく前進した。

2. SAR データに含まれる電離層誤差とその推定機能の開発

2.1 SAR データに含まれる電離層誤差

電離層擾乱が SAR データに及ぼす影響の大きさは波長（周波数帯）に依存し、L バンドは C バンドより約 20 倍影響を受けやすいため、L バンドにおいて電離層擾乱の影響は致命的となる。影響を受ける要素は多岐にわたるが、干渉 SAR において最も重要である位相においては、スプリットスペクトル法（Gomba et al., 2016）によって大部分が解決したと言える。もう一つの重要な要素として、アジマス（衛星進行）方向の位置がずれる「アジマスシフト」が挙げられる。TEC のアジマス方向の勾配によってアジマスシフトが生じ、その量が局所的に非常に大きい領域は干渉が得られなくなる（図-1(a, b)）。このような場合は位相アンラップが不可能となり、スプリットスペクトル法の適用も不可能になってしまう。このアジマスシフトの問題は、位置合わせにおいて、通常用いているアフィン変換等の多項式の代わりに、非線形なオフセットマップを使うことによって解決できる（図-1(c, d)）。しかし、多くの場合、位置合わせは計算負荷の小さい多項式による手法で十分であり、顕著な電離層誤差が含まれる場合のみに非線形位置合わせを適用することが望ましい。データごとに適した位置合わせ手法を自動的に選択するためには、顕著な電離層誤差が含まれるかどうかを事前に知る必要がある。

2.2 電離層誤差レベル推定手法とその機能の開発

アジマスシフトの一次導関数 (TEC の二次導関数) がアジマス方向のサブバンド (前方視・後方視) 画像間の位置ずれに相当することから, その位置ずれを精密に計測することで各 SLC 画像に含まれるアジマスシフト量を推定することができる. 本手法は, GAMMA ソフトウェアに含まれる `ionosphere_check` コマンドを参考に開発した. 具体的には, 1 枚の SLC 画像からアジマス帯域分割により前方視・後方視画像を作成し, 通常的位置合わせ時と同様に, 強度の相互相関により, 両画像間の位置ずれ (アジマスオフセット) を詳細に計測する. GAMMA ソフトウェアではここまでで処理は終わりであるが, 本研究では, 干渉性低下の要因となる局所的なアジマスシフトに着目するため, 計測したアジマスオフセットから 1 次傾斜平面成分を差し引いた. また, 現時点では理由は不明であるが, 標高に相関する一定の成分が明らかに含まれていたため, DEM を用いて標高相関成分を最小二乗的に推定して差し引いた. こうして得られたサブバンド間のアジマスオフセット量分布 (図-1(e, f)) から, 範囲全体の誤差レベルの指標として, RMS を算出する. この RMS がある閾値以上であれば, 顕著な電離層誤差が含まれるとみなし, 非線形位置合わせを実行することとした. 本手法の利点の一つとして, 干渉ペアではなく, 各観測日単位で電離層誤差レベルを推定でき, 問題となる観測日を特定できることが挙げられる.

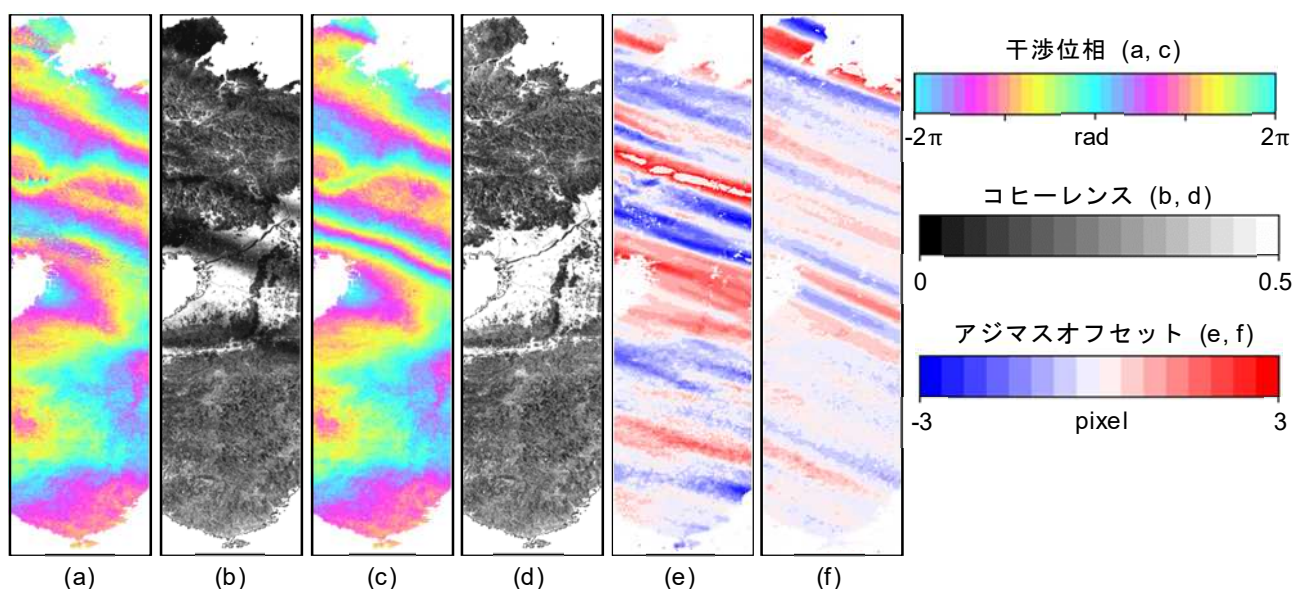


図-1 パス 128, フレーム 660-700, モード U2-9, 北行軌道, 観測日 2017/06/19 と 2018/04/09 の事例. 範囲は主に京都, 大阪, 和歌山. (a, b) アフィン変換による干渉画像とコヒーレンス画像. 顕著な電離層誤差と干渉性低下領域が見られる. (c, d) 非線形位置合わせによる干渉画像とコヒーレンス画像. a, b で見られた干渉性低下領域はなくなっている. (e, f) 2017/06/19 (RMS=1.01) 及び 2018/04/09 (RMS=0.60) のサブバンド間のアジマスオフセット量分布. 顕著な電離層擾乱の影響が見られる.

2.3 ALOS-2 実データへの適用と結果の統計

開発した機能を, 測地部宇宙測地課が全国定常解析に使用してきた 1563 枚の SLC 画像 (2014/08/05 ~ 2019/04/05) に適用し, 電離層誤差レベルの傾向を調べた. ファイルサイズが膨大であるため, 計算には 4 台のサーバーを全て活用しても数週間を要した.

多くの場合でサブバンド間のアジマスオフセット量の RMS が 0.35 以下となったことから, 顕著な電離層誤差が含まれるとみなす閾値を 0.35 とした (図-2). また, RMS が大きくなるデータには季節

や観測時間の規則性が見られる。北行軌道（深夜 0 時前後の観測）かつ 5～8 月では RMS が 0.35 を超える事例が約 40%もあった一方で、それ以外の月では約 2%であった。南行軌道（昼 12 時前後の観測）では一年を通して少なく、全体で約 1%であった。これらのことから、顕著な電離層誤差が生じやすい季節及び時間帯が存在し、それは 5～8 月の深夜であるといえる。夏季夜間には強い MSTID（中規模伝搬性電離圏擾乱）が発生しやすいと報告されており、北行軌道の傾向は MSTID の特性と一致している（Tsugawa et al., 2007）。

南行軌道で検出された数少ない事例のうちの一つである 2016 年 5 月 25 日のデータは、スプラディック E によるものであるとの研究がある（Furuya et al. 2017）。スプラディック E 等の電離層擾乱は観測が困難であり、空間構造など未解明の部分が多いが、SAR データは面的に電離層擾乱を捉えられるため、電離層研究においても貴重なデータとなる。本研究のような全数調査は、電離層擾乱の研究にも大きく貢献できると考えられる。

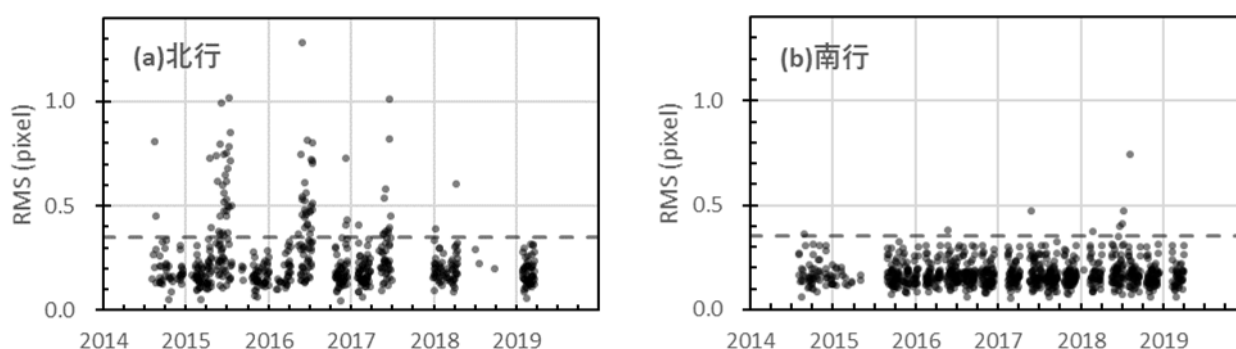


図-2 各観測データのサブバンド間アジマスオフセット量の RMS。破線は閾値とした RMS=0.35 を示す。

2.4 今後の課題

サブバンド間アジマスオフセットにおける 1 次傾斜平面成分はアジマスシフトにおいては 2 次曲面となり、アフィン変換による位置合わせでは相殺されないため、1 次傾斜平面ではなくバイアスのみを差し引くべきかもしれない。また、電離層誤差の評価は一時導関数ではなくアジマスシフトそのものの大きさを評価した方がよいと思われるため、サブバンド間アジマスオフセットを積分すべきかもしれない。さらに、局所的なアジマスシフトが存在してもその他の領域で小さければ RMS は小さくなるので、アジマスシフトの絶対値の最大値などで評価すべきかもしれない。自動解析時に使用する適切な閾値についてもさらなる検討が必要である。

3. 干渉 SAR 時系列解析ソフトウェア「LiCSBAS」の開発

3.1 LiCS プロジェクトと LiCSBAS の概要

COMET が進める LiCS プロジェクトでは、世界中の地殻変動帯や火山の変動を監視・計測し、歪み速度分布を高空間分解能で明らかにすることなどを通して、地震火山ハザードモデルへ貢献することを目的としている。その目的を達成するため、Sentinel-1 の SAR データを自動で干渉解析し、干渉画像及びコヒーレンス画像をウェブ上で公開している (<https://comet.nerc.ac.uk/COMET-LiCS-portal/>)。

本研究では、それらを利用してほぼ全自動で時系列解析を実施するソフトウェア「LiCSBAS」を開発し、GitHub で公開した。LiCSBAS では、フレーム番号や解析対象範囲などのわずか数個のパラメータを設定するだけで、自動的に公開されている干渉画像等をダウンロードし、時系列解析を実行する。この時系列解析においては、解析途中で誤差が多く含まれるデータを自動で検出・除去することで、多くの場合に手動調整なしでも良好な結果が得られるようになっている。さらに、結果の解釈を容易

にするため、操作性に優れた解析結果表示機能も備えている。

LiCSBAS は GitHub (<https://github.com/yumorishita/LiCSBAS>) 上で公開しており、論文掲載から約 1 か月程度にもかかわらず、世界中（例えば、米国、英国、イラン、インドネシア、カナダ、ギリシャ、台湾、ドイツ、トルコ、日本、NZ、ポーランドなど、私信）で少なくとも数十名以上の研究者に利用されている。LiCSBAS で用いている手法の詳細については、Morishita et al. (2020) を参照されたい。

3.2 適用事例

100km 以上の広域にわたる最大約 5cm/yr の平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震の余効変動、新潟市の定常的な地盤沈下、小千谷市の季節変動、三条市の 2018 年 2 月頃の急激な不可逆地盤沈下を時空間的に詳細に明らかにした (Morishita et al., 2020)。計測精度は、変動速度で約 2mm/yr、各観測日の変動量で 1cm 未満と推定された。また、約 1,000km に及ぶトルコ全土を対象とした事例では、北アナトリア断層及び東アナトリア断層沿いの変動や局所的な地盤沈下などが詳細に捉えられた。さらに、その高分解能な変動速度データを利用することで、GNSS のみから推定した結果よりもはるかに詳細に歪み速度分布を明らかにすることができた (Weiss et al., under review)。これらの結果は歪み蓄積と地震発生の関係や地震サイクルの解明にとって重要なものである。それぞれの結果についての詳細は、各論文を参照されたい。

3.3. 今後の課題

LiCSBAS の開発により、日本全国を対象とする干渉 SAR 時系列解析の自動化へ大きく前進した。次は、日本全国の ALOS-2 データを使用して、干渉画像作成から位相アンラップまでを自動実行するシステムを構築する。さらに、そのシステムと LiCSBAS を使用して ALOS-2 日本全国時系列解析を実施する。2021 年度打ち上げ予定の ALOS-4 での自動時系列解析の実現に向けても準備を進めていく。

謝辞

本研究は、筆者が日本学術振興会海外特別研究員制度の助成を受け、リーズ大学への派遣期間中に実施されました。ALOS-2 の原初データは、国土地理院と JAXA の間の協定に基づき提供されました。ALOS-2 の原初データの所有権は JAXA にあります。

参考文献

- Furuya, M., Suzuki, T., Maeda, J., and Heki, K., (2017): Midlatitude sporadic-E episodes viewed by L-band split-spectrum InSAR. *Earth Planets Space*, 69, 175.
- 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.*, vol. 54, no. 3, pp. 1446-1461.
- Morishita, Y., Lazecky, M., Wright, T.J., Weiss, J.R., Elliott, J.R., and Hooper, A. (2020): LiCSBAS: An Open-Source InSAR Time Series Analysis Package Integrated with the LiCSAR Automated Sentinel-1 InSAR Processor. *Remote Sens.*, 12, 424.
- Tsugawa, T., Kotake, N., Otsuka, Y. and Saito, A. (2007): Medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS receiver network in Japan: a short review, *GPS Solut.*, 11, 139-144.
- Weiss, J., Walters, R., Morishita, Y., Wright, T., Lazecky, M. et al.: High-resolution surface velocities and strain for Anatolia from Sentinel-1 InSAR and GNSS data, *Geophys. Res. Lett.*, under review.