

共分散解析に基づく異常検知システムの開発：SAR 時系列データへの適用

実施期間

令和 6 年度～令和 8 年度

地理地殻活動研究センター

姫松 裕志

地殻変動研究室

1. はじめに

地殻変動監視を目的とした衛星搭載型 SAR (衛星 SAR) のデータの解析は、解析手法の標準化が進んでおり、今や一定の精度を担保する定常的な解析結果の提供も可能となっている。SAR 干渉解析の結果を SAR 時系列解析に適用することによって、地殻変動の観測精度も向上してきた。海外では SAR 時系列解析の結果をプロダクトとしてウェブサイト公開し、数値データにアクセスできる環境も整備されつつある (Lazechý et al., 2020)。一方、SAR 衛星の運用数は増加傾向にあり、観測データの蓄積も飛躍的に進んでいる。観測データが増加したとしても標準化された解析手法を適用することによって、自動的に解析結果を得ることはできるようになった。一方、大量に生成された全ての解析結果に目を通すことは次第に困難になり、地殻変動由来のシグナルを早期に認知することも難しくなりつつある。地殻変動監視においては、新たに地殻変動が現れた場合や変位速度が上昇した時点を早期に検知することが重要である。地殻変動由来の位相変化が現れた際に、定量的にある指標をもって早期に認知できるシステムの開発が必要である。

近年では機械学習や深層学習といった異常検知手法が提案され、様々な場面において活用されている。地球科学分野においても主成分分析といった統計学的手法や機械学習に基づいた時系列データに対する異常検知手法が提案されている (Anantrasirichai et al., 2018; Albino et al., 2020; Festa et al., 2023)。SAR 時系列データに対しても地殻変動由来のシグナルの早期検知を目的とした手法が提案され、地殻変動を示唆する位相変化を異常の確率として評価できるようになった。機械学習では解析解によって計算される断層運動や火山地下における圧力変化に伴う地殻変動を学習データとして用いている。地殻変動の空間的特徴は無数に存在するため、大量の教師データを生成することができたとしても全ての位相変化を認識させるためには相当の計算資源を要する。従前の機械学習とは異なるアプローチによる SAR 時系列データに対する異常検知手法を提案が望まれている。

2. 研究内容

2.1 研究開発の概要

本研究では SAR 時系列データに対する異常検知手法の提案を目的として、統計学的手法 (教師なし学習) による異常検知手法の開発を目指す。研究期間初年度に当たる令和 6 年度は 2 次元データの空間的特徴から異常度を定量的に評価するために、データ共分散を用いた異常度算出手法を提案する。データ共分散は空間的に相関を持つノイズの空間的特徴を記述するために用いられる。衛星 SAR においては大気中の水蒸気擾乱を示す対流圏伝搬遅延に伴う位相変化といった数キロメートルの空間波長を有するノイズの特徴を共分散によって記述できる。本課題で開発を目指す手法は解析結果中に含まれるノイズの空間的特徴をモデルとして記述し、実データとの乖離の程度を定量的に評価することを目指す。機械学習をはじめとする教師あり学習に基づく異常検知手法では異常 (地殻変動) の空間的特徴を学習して異常を認識するのに対して、本手法ではノイズをモデル化するという異なる視点で異常検知を目指している点でユニークである。

2.2 データ共分散に基づく異常度スコアの算出手法

データ共分散に基づく異常度スコアの空間分布は主に以下の手順で求める。①2次元データにおける共分散のパラメータ推定，②任意の大きさの窓関数における共分散行列の生成，③2次元データの小領域に対して共分散行列の逆行列を用いた二次形式の計算をデータ全体にわたり実施する。

はじめに，空間的に相関を持つノイズの特徴を記述する共分散関数のパラメータを推定するために指数型バリオグラムを用いてモデル化する。指数型バリオグラムは横軸に相関距離を，縦軸にランダムに抽出した2点のデータ値の差分をプロットし，式(1)のバリオグラムのパラメータを推定する。

$$\gamma(h) = s_0 + (s - s_0) \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{r}\right) \right] \quad (1)$$

$\gamma(h)$ はデータ分散である。 s_0 はNugget， s はSill， r はLag distance と呼ばれる。Nugget は空間的に無相関なノイズの分散，Sill は空間的に相関をもつノイズの分散，Lag distance はノイズの相関距離を示す。上記で推定したパラメータを式(2)に適用することにより共分散関数を求める。

$$C(h) = \begin{cases} s & h = 0 \\ s_0 + (s - s_0) \exp\left(-\frac{h}{r}\right) & h > 0 \end{cases} \quad (2)$$

2次元データ（例えばSAR干渉解析によって得られた衛星視線距離変化の分布）に対する異常度スコアの空間分布を求めるために，任意の共分散行列の大きさを設定し，2次元データの小領域に対してデータ全体の平均を差し引いた上で共分散行列を除する操作をシーン全体に対して走査する。ここで得られる値はマハラノビス距離の二乗値に相当し，設定した任意の小領域における異常度のスコアを算出することになる。

2.3 擬似データへの適用

上記の異常度スコア算出手法の実効性を検証するために，擬似データへ適用する試行実験を実施した。擬似データは解析解を用いて求めた地表変位と空間的に相関を持つ擬似ノイズの和をとって生成した。地表変位は半無限弾性体媒質における矩形領域の食い違いに伴う地表変位と球状圧力源の圧力変化に伴う地表変位の解析解を用いて生成した。空間的に相関を持つ擬似ノイズは以下の式で求めた。

$$\mathbf{n}_c = \mathbf{L} \times \mathbf{n}_u \text{ where } \Sigma_d^{-1} = \mathbf{L} \mathbf{L}^T \quad (3)$$

\mathbf{n}_c は空間的に相関を持つ白色ノイズ， \mathbf{n}_u は空間的に相関を持たない白色ノイズ， Σ_d^{-1} は共分散行列の逆行列， \mathbf{L} はCholesky分解による下三角行列を示す。

2.4 実データへの適用

実データへの適用例として，福島県と山形県の県境に位置する吾妻山を対象としたSAR干渉解析の結果に適用する。吾妻山では2014–2015年，2020–2021年にかけて大穴火口周辺で繰り返し膨張が生じていることが報告されている。

3. 得られた成果

3.1 擬似データへの適用

擬似データを用いた検証の結果を図-1 と図-2 に示す。擬似データを用いた検証では、解析解を用いて計算した変位を与えた領域周辺で異常度スコアが高い値を得ることができた。図-2 で示す断層運動を想定した例では、空間的に相関を持つノイズの振幅は擬似変位の振幅よりも大きい領域があり、単純にデータ分散で除した場合には擬似ノイズにも感度を持ってしまう。一方、共分散を考慮した場合には空間的に相関を持つノイズには感度を持たずに、先験的に与えた変位の領域にのみ高い異常度スコアが求められることができた。

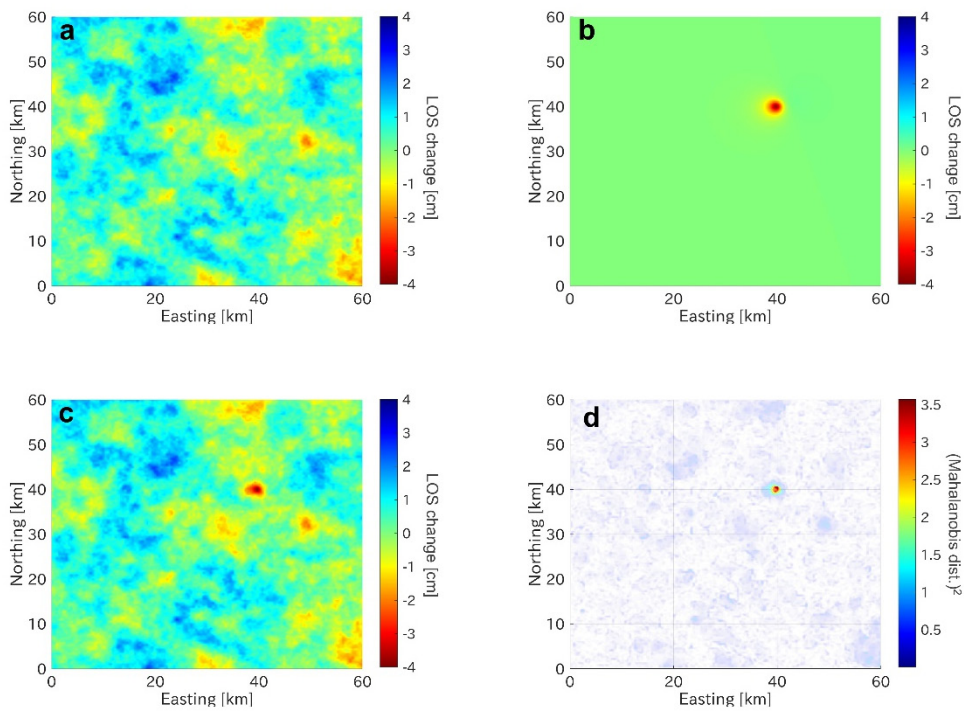


図-1 擬似データへの適用事例（球状圧力源）(a)擬似ノイズ(s_0 : 0.2 cm², s : 1.0 cm², r : 5.0 km), (b)解析解を用いて生成した球状圧力源の圧力増加に伴う地表変位, (c)擬似ノイズと地表変位の合成, (d)データ共分散に基づくマハラノビス距離の2乗値の空間分布.

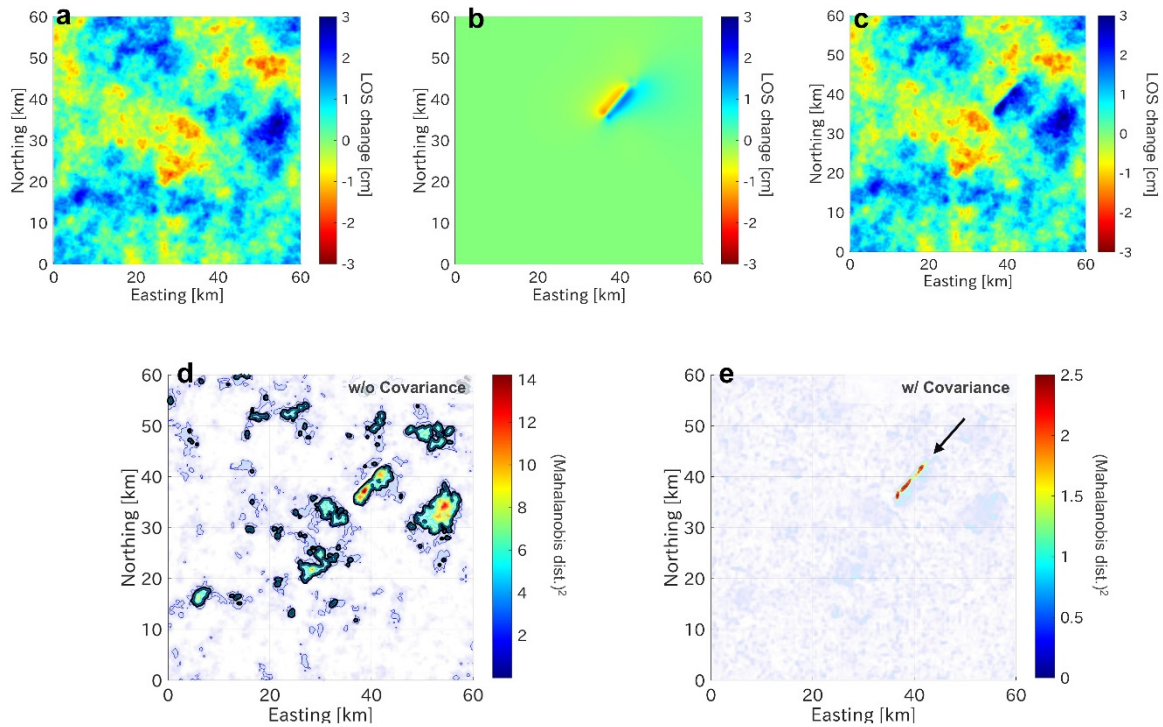


図-2 擬似データへの適用事例（断層運動）(a)擬似ノイズ (s_0 : 0.2 cm², s : 1.0 cm², r : 5.0 km), (b)解析解を用いて生成した矩形領域の食い違い（横ずれ）に伴う地表変位, (c)擬似ノイズと地表変位の合成, (d, e)データ共分散に基づくマハラノビス距離の2乗値の空間分布. (d)共分散成分を考慮しない場合, (e)共分散成分を考慮した場合.

3.2 実データへの適用

実データを用いた検証の結果を図-3に示す。SAR 干渉解析の結果には大穴火口で最大 6 cm の視線距離短縮が検出された。この結果は大穴火口を中心とした膨張を示唆している。大穴火口の周辺では水蒸気擾乱の影響に伴う位相変化も認められる。吾妻山を含まない領域でデータ共分散を推定したところ、Nugget s_0 は 0.23 cm², Sill s は 0.81 cm², Lag distance r は 3.0 km と推定された。これらのパラメータを用いて異常度の分布を求めると、共分散を考慮する場合としない場合のいずれも大穴火口周辺で高い異常度スコアを求めることができた。一方、大穴火口以外の領域においても χ^2 分布（自由度 1）の上側有意確率が 95% となる 3.84 の値を超えている領域が複数認められる。また大穴火口南東に位置する吾妻小富士においても高い異常度スコアが算出されている。これはフォアショートニングの影響で位相変化が地形の傾斜方向に引き伸ばされて、高い変位の勾配が生じている。この位相変化の高い変位勾配に対して感度を持ってしまった可能性が考えられる。

4. 結論

統計学的手法による SAR 時系列データに対する異常検知手法の開発を目指して、令和 6 年度はデータ共分散を用いた空間的な異常度の定量的な評価手法を提案した。データ共分散による 2 次元データの空間的異常検知は、ノイズの相関距離との差異が大きい空間波長が小さいシグナルに対する感度が高い結果を得ることができた。したがって、地すべりや火山の地下浅部の圧力変化に由来する地殻変動、内陸部におけるクリープに伴う地殻変動といった変位の勾配が大きい地殻変動の検知に有効であることを示唆している。統計学的手法に基づいた異常度スコアの算出はデータ共分散を精度良く求

めることさえできれば、学習データに依存せずに異常検知を強健に行うことが期待できる。一方、観測結果の空間フィルターの強度によっても異常度算出に対する感度が変わる可能性もある。異常度スコアを算出する際の解析戦略については引き続き検討すべき事項である。令和7年度は時系列データの時間変化に対する異常検知手法について検討を行う。

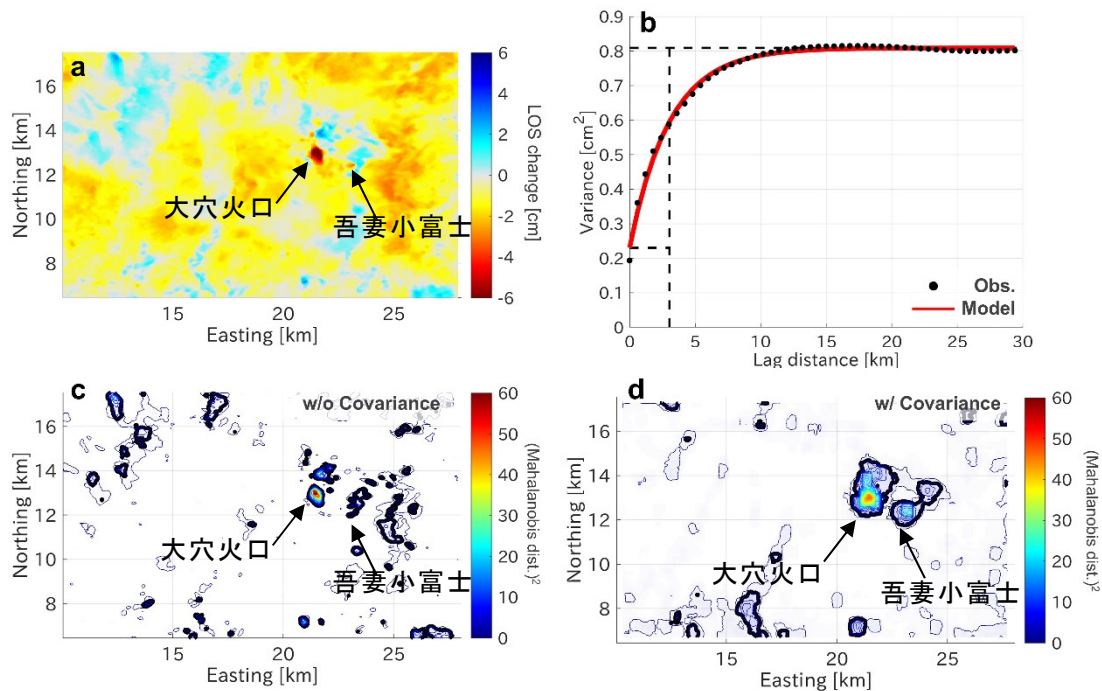


図-3 実データへの適用事例 (a)ALOS-2/PALSAR-2のSAR干渉解析の結果、(b)SAR干渉解析の結果におけるバリオグラム。黒点は観測データ、赤線はモデル。黒点線は共分散関数のパラメータの値(s_0 : 0.23 cm², s : 0.81 cm², r : 3.0 km)を示す。(c)共分散を考慮しない場合のマハラノビス距離の2乗値の空間分布、(d)共分散を考慮した場合のマハラノビス距離の2乗値の空間分布。黒線は χ^2 分布の95%の上側有意確率のコンター(3.84)を示す。

謝辞

本研究で使用しただいち2号の原初データの所有権は、JAXAにある。これらのデータは、だいち2号に関する国土地理院とJAXAの間の協定に基づき提供された。本研究課題は科学研究費助成事業(24K17132)の助成を受けて実施した。

参考文献

- Albino, F., Biggs, J., Yu, C. and Li, Z. (2020): Automated Methods for Detecting Volcanic Deformation Using Sentinel - 1 InSAR Time Series Illustrated by the 2017-2018 Unrest at Agung, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2).
- Anantrasirichai, N., Biggs, J., Albino, F., Hill, P. and Bull, D. (2018): Application of Machine Learning to Classification of Volcanic Deformation in Routinely Generated InSAR Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(8).
- Festa, D., Novellino, A., Hussain, E., Bateson, L., Casagli, N., Pierluigi Confuorto, Matteo Del Soldato and Raspini, F. (2023): Unsupervised detection of InSAR time series patterns based on PCA and K-means

clustering. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 118(103276).

Lazecký, M., Spaans, K., González, P. J., Maghsoudi, Y., Morishita, Y., Albino, F., Elliott, J., Greenall, N., Hatton, E., Hooper, A., Juncu, D., McDougall, A., Walters, R. J., Watson, C. S., Weiss, J. R. and Wright, T. J. (2020): LiCSAR: An Automatic InSAR Tool for Measuring and Monitoring Tectonic and Volcanic Activity. *Remote Sensing*, 12(15), 2430. doi:10.3390/rs12152430