

衛星画像の時系列解析による送水パイプラインの漏水スクリーニング

新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 ○高橋 悠斗
新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 柴野 一真
新潟大学大学院総合学術研究科 学生会員 池田 弘毅
株式会社日本水工コンサルタント 正会員 宮崎 康文
新潟大学自然科学系（農学部） 正会員 鈴木 哲也

1. はじめに

上水道や農業用水の送水パイプラインでは、供用年数の経過に伴い漏水事故が増加傾向にある。パイプラインの多くは地中に埋設されているため、漏水の発生を直ちに検知することは困難である。筆者らは、管内に発生させた圧力波の計測による漏水検出手法の開発を試みている¹⁾。しかし、送水パイプラインの総延長は長大であり、現地計測に先立って調査区間を絞り込む概査手法が必要である。そこで本研究では、実際に漏水が発生した送水パイプラインを対象に、Sentinel-2の時系列衛星画像を用いた漏水スクリーニングを試みた。

2. 対象施設および解析方法

対象施設は東北地方に位置する幹線農業用パイプライン（L=8.6 km）である。漏水が発生した管は強化プラスチック複合管（FRPM 管）であり、管径は900 mm、土被りは1,643 mmである。2025年9月に漏水に伴う町道路肩の崩壊により漏水が顕在化した。漏水発生後、漏水区間では通水が行われず、2025年10月に破損箇所の修復が完了した。

対象施設上の衛星データのみに着目するため、対象路線のラインデータを作成した。衛星データのうち、ラインデータ上の各画素に対し、20 m×20 mの解析領域（以下、AOIと記す）を設定した。衛星データには、Sentinel-2 MSIのLevel-2A地表面反射率画像を用いた。対象期間は2020年1月から2026年8月までの293シーンである。雲、雲影および巻雲の画素は、Scene Classification Layerに基づき除外した。なお本報では、短波長赤外（以下、SWIRと記す）域のB11（SWIR1）およびB12（SWIR2）の2バンドを用いた。各AOIにおける2バンドの時系列変動に対し、漏水発生前の観測を学習データとして

時系列モデルを作成した。時系列モデルはProphet²⁾およびTIMESAT³⁾を使用した。時系列モデルによる推定値と観測値の残差 r を標準化することにより、 z -scoreを算出した

$$z = \frac{r - \mu}{\sigma}, \quad (1)$$

ここで、 μ は2024年以前の観測における残差の平均、 σ は残差の標準偏差である。漏水期間および補修後期間における z -scoreを算出することにより、季節変動を除外した漏水による衛星データの変化の検出を試みた。漏水期間は、漏水の発生時期が不明であることから、漏水発見日の60日前から修復完了日までと仮定した。補修後期間は、修復完了の翌日から2026年7月10日までとした。漏水地点近傍の z -scoreの低下を評価するため、漏水地点からの距離によりAOIを2群に分割した。漏水領域は漏水地点から60 m以内の14個のAOI、対照領域は漏水地点から200 m以上離れた992個のAOIとした。両領域の中間に位置する36個のAOIは比較から除外した。2群の z -scoreの差はMann-WhitneyのU検定により検定した。効果量はCohenの d により評価した。

3. 結果および考察

漏水地点上のAOIにおけるB12反射率の実測値とProphetによる推定値を図-1に示す。2025年8月24日の観測では、 z -scoreが-1.76まで低下していることが確認された。漏水領域と対照領域におけるB12の z -scoreの推移を図-2に示す。漏水期間において、漏水領域の z -scoreは対照領域の z -scoreを下回っていることが確認された。この低下は、水がSWIR域の放射を強く吸収する特性と整合する。一方、 z -scoreの低下は一時的な降雨によっても生じる可能性が考えられる。降雨の影響は、漏水地点の近傍に限定されないため、路線上の全AOIについて z -scoreを算出

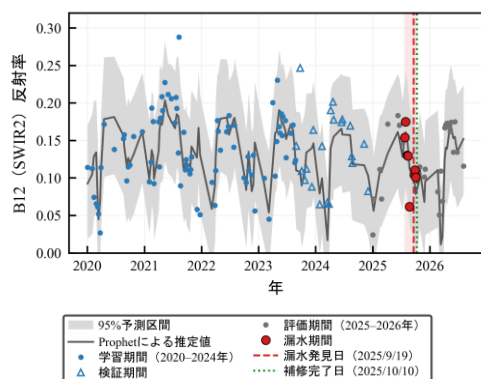


図-1 漏水地点上のAOIにおけるB12反射率の実測値とProphetによる推定値

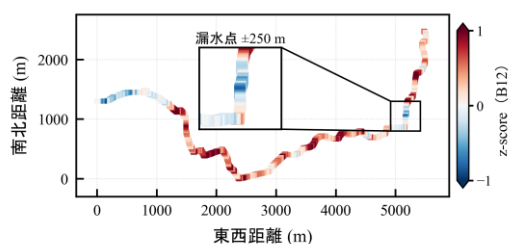


図-3 漏水期間におけるB12のz-scoreの空間分布

した。漏水期間におけるB12のz-scoreの空間分布を図-3に示す。負のz-scoreは、漏水地点の近傍に分布していることが確認された。各期間の統計量を表-1に示す。Prophetでは、漏水期間におけるB12のz-scoreの平均は漏水領域で-0.49、対照領域で+0.37である。2群の差は有意である($p=1.8 \times 10^{-9}$, $d=-2.05$)。B11およびTIMESATにおいても、漏水期間の差は有意であった。補修後期間では、いずれのモデルおよびバンドにおいても d の絶対値が0.55以下に縮小した。したがって、漏水期間におけるSWIR反射率の低下は広域的な降雨の影響ではなく、漏水に対応した局所的な変化であることが示唆された。次に、解析で仮定した漏水領域の半径と漏水期間の始点について感度分析を行った。対照領域を200 m以遠に固定し、漏水領域の半径を20~200 mの範囲で変化させた。ProphetのB12では、半径30~70 mにおいて d が-1.98~-2.17の範囲にあった。また、漏水期間の終点を修復完了日に固定し、始点を漏水発見日の0~150日前の範囲で変化させた。始点が30~150日前の範囲では、 d は-1.37~-2.05の範囲にあった。以上より、漏水領域と対照領域の差は、2つの仮定の設定値に強く依存しないことが確認された。

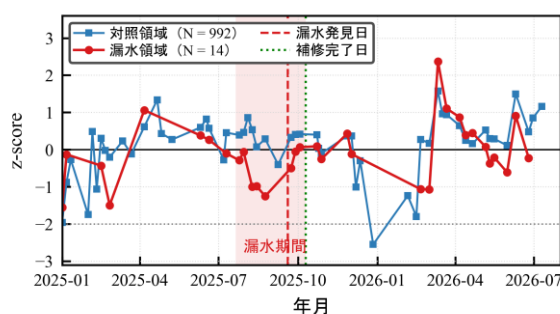


図-2 漏水領域と対照領域におけるz-scoreの推移

表-1 漏水領域と対照領域におけるz-scoreの比較

時系列モデル	バンド	漏水領域 平均 (N=14)	対照領域 平均 (N=992)	d	p	補修後の d
Prophet	B11	-0.38	+0.36	-1.81	8.6×10^{-9}	-0.53
Prophet	B12	-0.49	+0.37	-2.05	1.8×10^{-9}	-0.55
TIMESAT	B11	-0.34	+0.05	-1.39	6.8×10^{-6}	+0.09
TIMESAT	B12	-0.46	-0.18	-0.89	3.2×10^{-4}	-0.50

4. おわりに

本研究では、漏水が発生した送水パイプラインを対象に、Sentinel-2の時系列画像を解析した。漏水期間において、漏水地点近傍のSWIR反射率は対照領域に比べ有意に低下した。この低下は、2種類の時系列モデルおよび2バンドで共通して確認された。補修後期間では、両領域の差が縮小した。以上より、衛星画像の時系列解析は送水パイプラインの漏水スクリーニングに利用できる可能性が示唆された。今後は、複数の漏水事例により検出性能の評価を試みたいと考えている。

謝辞 本研究の実施にあたり、三重大学みえの未来図共創機構の藤山 宗氏、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構の中田達氏、山口大学大学院創成科学研究科の萩原大生氏、農林水産省東北農政局の佐藤正一氏ならびに岡村裕加氏、および管轄の土地改良区の皆様より多大なるご協力を賜った。ここに記して感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 高橋悠斗, 坪田到馬, 萩原大生, 鈴木哲也: 水撃圧の減衰に着目したひずみ計測によるポンプ圧送式パイプラインの漏水の非破壊検出, 土木学会論文集, Vol. 82, No. 15, 25-15035, 2026.
- 2) Taylor, S. J. and Letham, B.: Forecasting at scale, *The American Statistician*, Vol. 72, No. 1, pp. 37-45, 2018.
- 3) Jönsson, P. and Eklundh, L.: Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40, No. 8, pp. 1824-1832, 2002.