

II. 厚生労働科学研究費補助金（健康安全・危機管理対策総合研究事業）
「水道情報の活用等による技術水準の確保及び技術継承のための研究」
分担研究報告書

ビッグデータに基づく水道管路に関する配水管維持管理の実態把握及び解析

研究分担者 丸山 喜久 千葉大学大学院工学研究院 教授

研究要旨

本研究では、干渉 SAR 時系列解析によって地盤変動量を推定し、水道管路における漏水箇所の分析をすることを目的とする。SBAS 法（Small Baseline Subset Method）を用いて、千葉県を撮影した ALOS-2 の PALSAR-2 画像の干渉 SAR 時系列解析を行った。推定された 2015 年から 2022 年までの 8 年間における垂直方向の平均変動速度を空間解像度 10 m/pixel にリサンプリングした。千葉県が公開する毎年の水準測量データを用いて、干渉 SAR 時系列解析で推定された地盤変動量を検証した。その結果、地盤変動が目立った地域においては、干渉 SAR 時系列解析の結果は地盤沈下の傾向をとらえることができていることが分かった。一方で、 $\pm 10\text{mm}$ よりも小さな地盤変動は、干渉 SAR 時系列解析によって地盤変動量を推定することはやや困難であった。千葉県内の漏水データを用いて、漏水箇所付近の地盤変動量と漏水の発生状況の関係を考察した。地盤変動が目立った A 市では、地盤沈下が顕著な地域に漏水箇所が集中していたため、地盤沈下が水道管の漏水に影響を与えているものと考えられる。

A. 研究目的

漏水の原因には、経年劣化による腐食、交通荷重、地盤変動によるひずみなどいくつかある。これらの原因の中で、本研究では、地盤変動により管路にひずみが生じることで、漏水が発生するという点に着目した。そこで、衛星合成開口レーダー（SAR）画像を用いた干渉処理に基づく地盤変動のモニタリングを行った。干渉 SAR では広範囲の地盤変動を長期的に観測することができるという利点がある。Aimaiti ら¹⁾は、3つの衛星で撮影した SAR 画像を用いて、1993 年から 2017 年まで千葉県浦安市の地盤変動を推定した。推定された地盤変動量は、水準測量データと概ね一致していたため、干渉 SAR を用いた地盤変動の観測は有効であると考えられる。

そこで本研究では、2015 年から 2022 年までに千葉県を撮影した ALOS-2 の PALSAR-2 画像を用いて、干渉 SAR 時系列解析によって地盤変動量を推定し、水道管の漏水箇所との関連性を分析した。

B. 研究方法

干渉 SAR 解析とは、電波の位相を利用して地表面の変化を調べる手法である。地表の同一地点に対して 2 時期に SAR 観測を実施し、反射波の位相差を取ることによって、その期間内に起きた地表の変動を捉える技術である²⁾。干渉 SAR 解析による干渉結果で得られた位相差には、地表変動による位相変化以外に、2 時期の衛星の軌道が一致しないために生じる位相変化（軌道縞と地形縞）、電離層や対流圏などの電波遅延による位相変化、植生などの地表被覆や地表被覆の変化による干渉性の低下などによる誤差が含まれる。軌道縞と地形縞は、衛星位置と地形データを用いて除去できるが、大気や対流圏の電波遅

延を補正する汎用的な方法はない。そのため、1 ペアの SAR 画像の干渉結果には一定の誤差が含まれている。

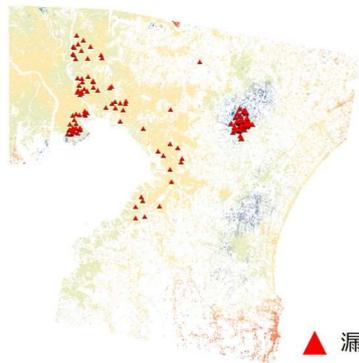
干渉 SAR 時系列解析は、異なる時期の観測データを用いて作成した多数の干渉画像を統計的に処理することにより、SAR 干渉画像に含まれる大気や軌道誤差に起因する誤差を低減し、個別の干渉画像では捉えることが困難な微小な地表の動きとその時間変化を捉える解析手法である³⁾。干渉 SAR 時系列解析では、一定期間の間に連続して観測した数十枚の SAR データを統計的に処理することで干渉解析に含まれる誤差を軽減させ、時系列の変動量や、期間中の変動速度（例えば、 $\text{cm}/\text{年}$ もしくは $\text{mm}/\text{年}$ ）を求めることができる。

本研究では、陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」（ALOS-2）が撮影した PALSAR-2 画像を用いる。図 -1 に、本研究で用いた ALOS-2 の軌道を示す。パス 1 については、2015 年 1 月から 2022 年 11 月までに撮影された 16 枚の画像、パス 2 については 2014 年 12 月から 2022 年 11 月までに撮影された 23 枚の画像を使用した。ALOS-2 に搭載されているレーダセンサ PALSAR-2 は、地上 3 m 分解能を有する L バンドのセンサであり、災害状況の把握、森林分布の把握や地殻変動の解析など、様々な目的で使われている。L バンドのマイクロ波は、透過性が高く木の枝葉を透過しやすいため、地表面の形状を捉えることができる。

干渉 SAR 時系列解析の結果は、千葉県が公開する毎年の水準測量データを用いて精度を検証した。対象地域内では 1003 個の水準測量点が存在する。また、地盤変動量と水道管の漏水位置との関連性の分析に



図-1 本研究で用いた PALSAR-2 画像の撮影時の軌道



▲ 漏水箇所

図-2 本研究で使用した漏水データの位置

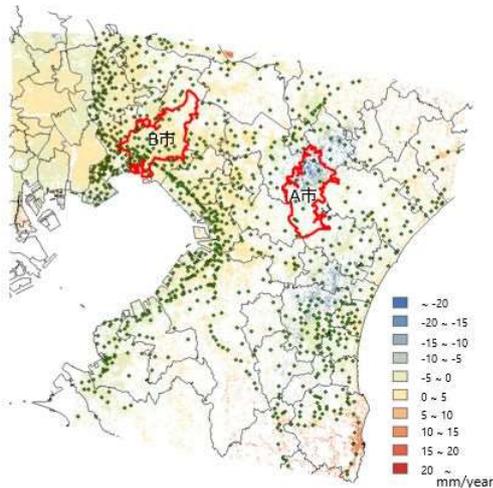
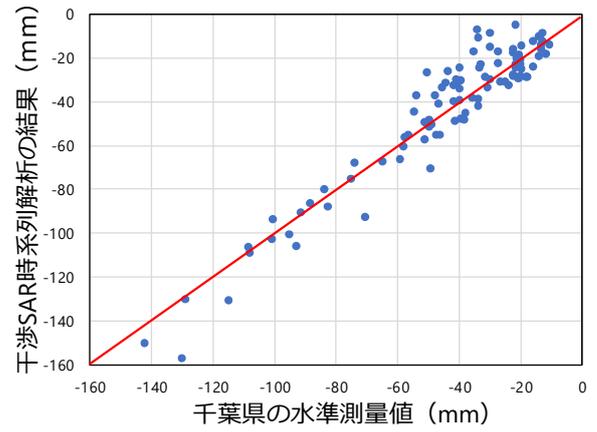


図-3 干渉 SAR 時系列解析結果

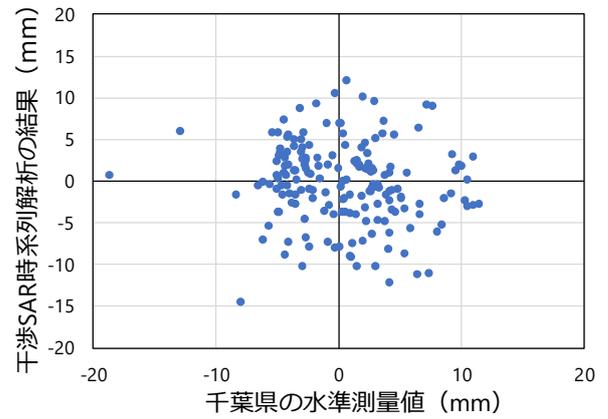
使用した漏水データの位置を図 2 に示す。

C. 研究結果

千葉県が公開する毎年の水準測量データを用いて、干渉 SAR 時系列解析で推定された地盤変動量の精度を検証した。図-3 に、干渉 SAR 時系列解析によって推定された垂直変動速度と水準基準点の位置を示す。水準測量点の観測は毎年 1 月に公開されている。本研究では、2015 年の水準測量点の高さを基準に 2022 年まで毎年の変動量を求めた。一方、本研究で



(a) A 市



(b) B 市

図-4 水準測量結果と干渉 SAR 時系列解析による垂直変動量の比較

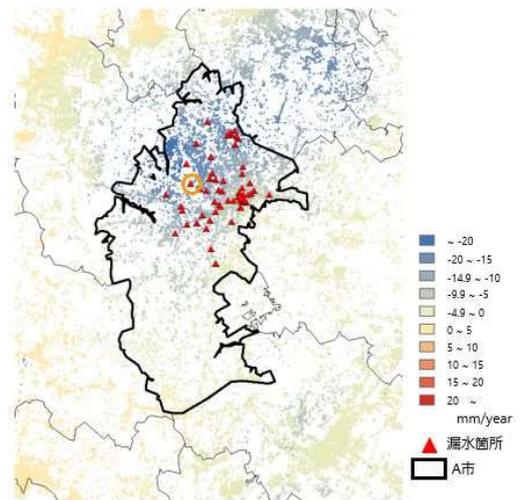


図-5 A 市内の干渉 SAR 時系列解析による平均垂直変動速度分布と漏水位置の分布

使用した PALSAR-2 画像は主に 3 月と 11 月に撮影されたものであるため、各年の 3 月の画像で得られる推定変動量を比較に用いた。2015 年 1 月の画像を基準とし、各年 3 月の画像で推定された変動量と水準測量で得られた変動量を比較した。地盤沈下が目立った A 市と、地盤変動がほとんどなかった B 市を

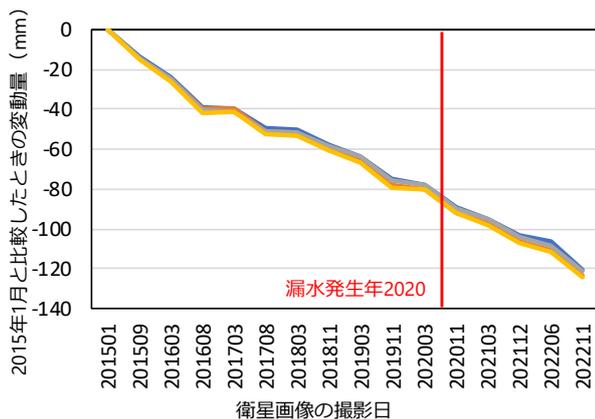


図-6 A市の漏水地点(図-5の丸印)における地盤変動量の時系列変化

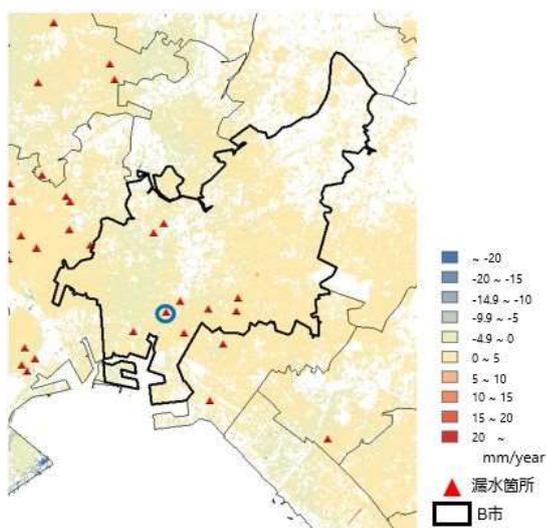


図-7 B市内の干渉 SAR 時系列解析による平均垂直変動速度分布と漏水位置の分布

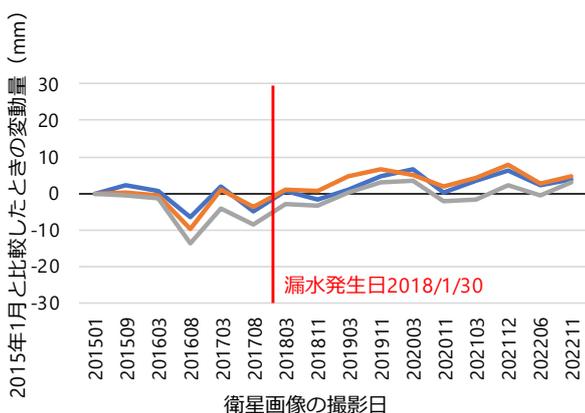


図-8 B市の漏水地点(図-7の丸印)における地盤変動量の時系列変化

例として、結果を図-4に示す。

千葉県内の漏水発生地点の地盤変動状況を干渉 SAR 時系列解析による垂直変動量を用いて評価した。図-5に、A市内の干渉 SAR 時系列解析による平均垂直変動速度分布と漏水位置の分布を地図上に示す。

また、図-6には、図-5の丸印の漏水地点に関して、推定された地盤変動量の時系列変化を示す。図-7には、B市内の干渉 SAR 時系列解析による平均垂直変動速度分布と漏水位置の分布を地図上に示す。また、図-8には、図-7の丸印の漏水地点に関して、推定された地盤変動量の時系列変化を示す。

D. 考察

図-4によると、A市については、千葉県の水準測量の結果と干渉 SAR 時系列解析の結果が概ね 1:1 の直線上に分布していることがわかる。全体の 74% の水準点が誤差 ± 10 mm 以下、91% が誤差 ± 20 mm 以下に収まっており、RMSE (二乗平均平方根誤差) は 9.7 mm である。2015 年から 2022 年までに、水準測量値では平均 71.6 mm 沈下し、干渉 SAR 時系列解析の結果では平均 69.5 mm 沈下したと推定される。これらのことから、地盤変動が目立った地域においては、干渉 SAR 時系列解析の結果は地盤沈下の傾向をとらえることができていると言える。一方、B市に関しては、地盤変動が顕著ではないため、水準測量の結果と干渉 SAR 時系列解析の結果に相関が見られない。全体の 87% の水準点が誤差 ± 10 mm 以下、100% が誤差 ± 20 mm 以下に収まっており、RMSE は 7.2 mm であるが、実際の地盤変動量が ± 10 mm 以下と小さいため、干渉 SAR 時系列解析によって地盤変動量を推定することはやや困難である。

図-5、図-6によると、A市においては地盤沈下が顕著な市内北部に漏水箇所が集中していることが分かった。この地域においては、管種にもよると思うが、地盤沈下が水道管の漏水に影響を与えているものと考えられる。

図-7、図-8によると、B市の漏水箇所については、漏水発生日より前の地盤変動は ± 10 mm 以下であり、大きな地盤変動は見られなかった。本研究による干渉 SAR 時系列解析によって推定される垂直地盤変動量の RMSE が約 ± 10 mm であることを踏まえると、図-8の地盤変動量は有意な値とは言い難い。したがって、この地域では、経年劣化や交通荷重などのほかの要因が漏水に影響しているものと考えられる。

E. 結論

本研究では、干渉 SAR 時系列解析を用いて千葉県内の地盤変動量の推定を行った。推定された 2015 年から 2022 年までの 8 年間における垂直方向の平均変動速度を空間解像度 10 m/pixel にリサンプリングした。次に、千葉県が公開する毎年の水準測量データを用いて、干渉 SAR 時系列解析で推定された地盤変動量を検証した。地盤変動が目立った A 市においては、干渉 SAR 時系列解析の結果は地盤沈下の傾向をとらえることができていることが分かった。一方で、 ± 10 mm よりも小さな地盤変動は、干渉 SAR 時系列解析によって地盤変動量を推定することはやや困難であった。

千葉県内の漏水データを用いて漏水箇所付近の地盤変動量を調べた。地盤変動が目立った A 市では、地盤沈下が顕著な地域に漏水箇所が集中していたため、地盤沈下が水道管の漏水に影響を与えていると考えられる。一方で、B 市の漏水箇所では、漏水発生日より前に大きな地盤変動はなかったため、漏水には埋設環境や、経年劣化、交通荷重など他の要因が影響しているものと考えられる。

F. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

(発表誌名巻号・頁・発行年等も記入)

内山明音, 劉ウエン, 丸山喜久: 干渉 SAR 時系列解析による千葉県内の地盤変動量の推定と漏水箇所の分析, 第 14 回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演論文集, 土木学会, pp. 21-24, 2024.

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

参考文献

- 1) Y. Aimaiti, F. Yamazaki and W. Liu: Multi-Sensor InSAR Analysis of Progressive Land Subsidence over the Coastal City of Urayasu, Japan, Remote Sensing, 10(8), 1304, 2018.
- 2) 藤原智, 飛田幹男: 地表変動検出のための干渉 SAR 画像作成技術, 測地学会誌, Vol. 45, No. 4, pp. 283-295, 1999.
- 3) 三村 祐介, 石塚 師也, 小田 義也, 窪田 健二: ALOS-2 データを用いた 2016 年熊本地震前後の九重山の地表変動の推定, 物理探査, Vol. 73, pp. 136-148, 2020.