

Sentinel-1衛星による山口県上関大橋の段差事故のモニタリング

Monitoring of Girder Step Accident on the Kaminoseki Bridge, Yamaguchi, Using Sentinel-1 Satellite

○松岡 昌志¹, 大串 文誉²

Masashi MATSUOKA¹ and Fumitaka OGUSHI²

¹東京工業大学 環境・社会理工学院

School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology

²株式会社テラフェーズ

Terra Phase, Inc., Japan

On November 14, 2020, at around 8 p.m., the end of the main girder on the Murotsu side of the Kaminoseki Bridge in Yamaguchi Prefecture lifted, causing a step in the road surface and resulting in a collision with a passenger car. In this study, a time-series interferometric analysis of synthetic aperture radar (SAR) images taken by a Sentinel-1 satellite that had been observing the bridge since before the step accident occurred, was conducted to examine whether the occurrence of the step could have been predicted.

Keywords: displacement, bridge girder, synthetic aperture radar, times-series interferometric analysis

1. はじめに

2020年11月14日午後8時頃に山口県の上関大橋において、室津側の主桁端部が浮き上がったことで路面に段差が発生し、乗用車1台が衝突事故を引き起こした。1969年に完成したこの橋のように、高度経済成長期に建設されたインフラ施設は我が国に数多くあり、維持管理が課題になっている。老朽化だけでなく人口減少に伴う労働力の減少などにより、点検には多大なコストと労力がかかっており、管理者の負担になっている。平常時から都市のインフラ施設をモニタリングし、老朽化に起因した事故や被害を事前に防ぐことは、安全・安心な社会を維持する上で重要である。多くのセンサを必要な箇所に設置して異常を監視するシステムの構築などが考えられるが、対象となるインフラ施設を多く抱えている我が国では限界があるため、補完的なモニタリング技術が望まれている。本研究では、段差事故の前から上関大橋を観測している Sentinel-1 衛星の合成開口レーダ (SAR) 画像の時系列干渉解析 (NN-PSI) を行い、段差発生を予測できたのかについて考察を行った。

2. NN-PSI (Non-Linear Non-Parametric Persistent Scatterer Interferometry)

NN-PSI¹⁾は既往の時系列干渉解析の問題であった非線形的な挙動および 2πアンビギュエティを生じる大きな変位が推定できない点を改良し、マイクロ波が持続的に強く散乱するピクセルについて視線方向 (スラントレンジ方向) の時系列変位を計測する方法である。解析には多時期の人工衛星の SAR 画像を用意する必要がある。観測の模式図を図 1 に示す。変位計測の精度はマイクロ波の波長に依存する。ここで用いる Sentinel-1 衛星は C バンド (波長: 約 5.5 cm) の SAR センサ搭載し、位相情報から変位を計測するので、精度はミリメートル相当になる。一方、空間分解能は画像ピクセルの大きさ (Sentinel-1 衛星は約 2 m × 約 14 m) に依存する。

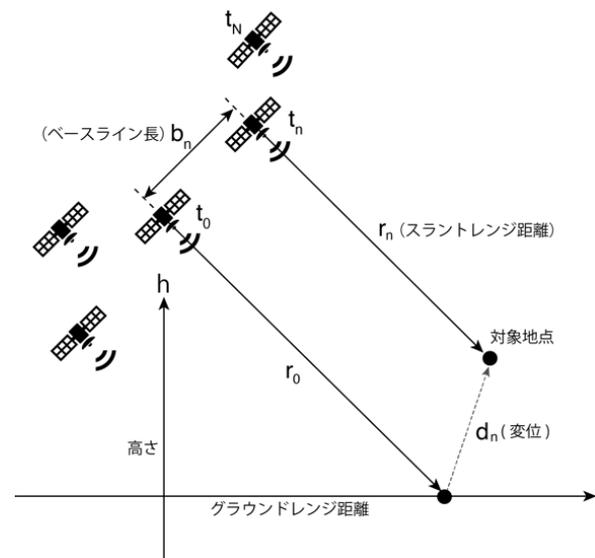


図 1 時系列 SAR 観測による変位計測の模式図

3. SAR画像

2014年に打ち上げられた Sentinel-1 衛星は 2 基体制にて運行され、それぞれ下降軌道と昇降軌道から上関大橋を観測している。すべての観測画像が無償で利用できる点が他の人工衛星とは異なる。本報告では、2017年1月9日から段差事故が生じた後の2020年12月19日までの下降軌道の121シーン(1440日間)のデータを用いた。送受信偏波はVVである。図2(a)に上関大橋のSAR画像を、図2(b)には光学センサ画像(Google Earth)を示す。本来の橋は1本なのにSAR画像では3本の線が映る。これは、橋桁が海面よりも高い位置にある場合に起こる現象で、衛星から照射したマイクロ波が橋桁に直接当たったもの(1回散乱)、橋桁と海面との反射(2回散乱)、そして、橋桁の下側と海面との複数反射(3回散乱)が記

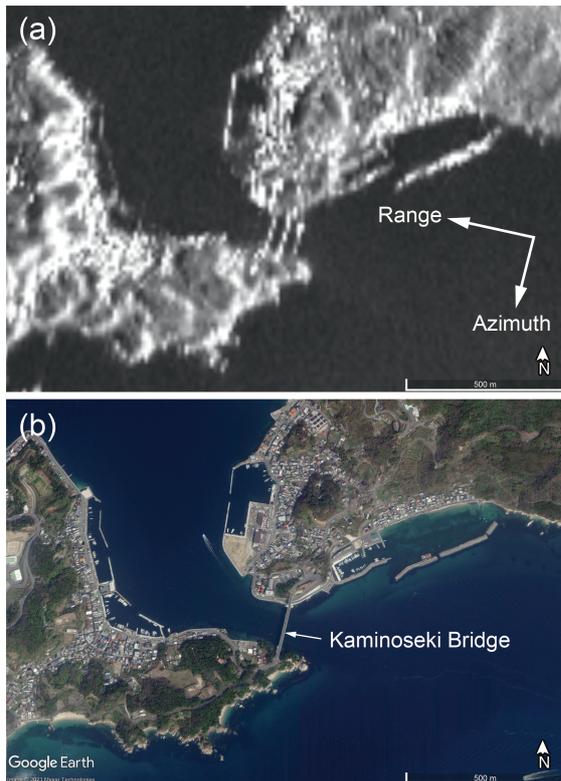


図2 上関大橋の衛星画像, (a) Sentinel-1 SAR 画像, (b) Google Earth の光学センサ画像

録されるために発生する²⁾. 本研究では橋桁の変位計測が目的なので, 1 回反射のところを用いる. つまり, 衛星に近い側 (図 2(a) の SAR 画像においては東側) に映る橋について視線方向の時系列変位を推定する.

4. 上関大橋の時系列変位と考察

上関大橋とその周辺において, NN-PSI から推定したマイクロ波の散乱体の高さ (参照 DEM からの高さ) および位置を地図 (グラウンドレンジ) に投影した結果を図 3 に示す. 図中の赤点は散乱体の位置を示す. ただし, この点は散乱体があると思われるピクセルの北東端である. 室津側を拡大した図には段差が生じた付近 (girder-1) およびやや南側 (girder-2) の散乱体の推定高さを示している. そして, 高さの値を参考にして選択した橋桁と考えられる散乱体のピクセルを青色矩形で示している.

girder-1 と girder-2 のピクセルの時系列変位 (平均) を図 4 に示す. 正の値は衛星に近づく方向, 負の値は衛星から遠ざかる方向に変位していること意味する. 図より girder-1 と girder-2 共に 1 年ごとの周期的な変動がみられ, これは夏季の気温上昇に伴う部材の膨張に起因している. girder-2 においてその変化が大きい. そして, 1095 日 (2020 年 1 月) 頃から girder-2 は衛星から遠ざかるように, 1300 日 (2020 年 8 月) 頃からは girder-1 が衛星に近づき始め, 段差発生直前まで徐々に変位が大きくなっている. なお, 実際の段差の大きさは室津側で最大約 200 mm³⁾とマイクロ波の波長の 4 分の 1 よりもかなり大きい. 橋の水平変位がほぼゼロだとすると, 視線方向の変位は鉛直方向の変位に変換できる. 段差発生直前の変位は夏季の材料膨張に伴う変位より大きく, 視線方向の変位が約 10 mm とするとマイクロ波の入射角を考慮した鉛直変

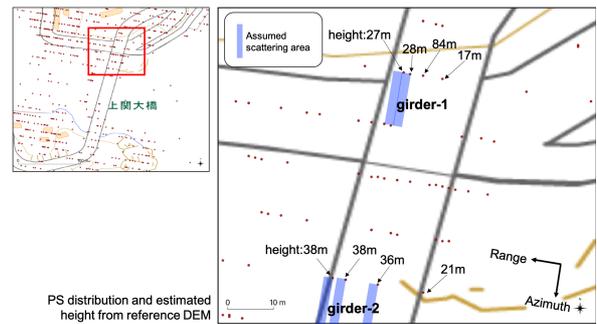


図3 上関大橋付近の散乱体の位置 (数値は NN-PSI から推定した参照 DEM からの高さ, 青色矩形は橋桁と考えられるピクセル) 背景: 地理院地図

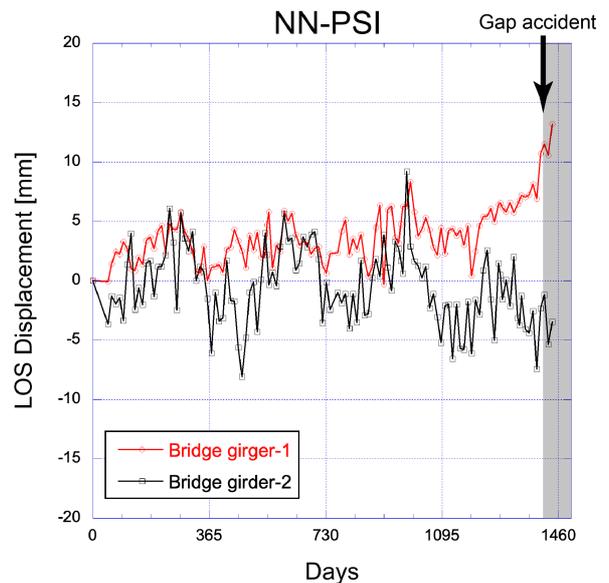


図4 NN-PSI から推定した視線方向の時系列変位

位は約 15 mm だったことが推察される.

5. まとめ

2020 年 11 月 14 日に山口県の上関大橋において発生した路面段差発生を未然に予測できたのかを考察するために, 2017 年 1 月から段差発生後まで上関大橋を観測した Sentinel-1 衛星の時系列干渉解析 (NN-PSI) から橋桁の変位を推定した. その結果, 室津側の橋桁においては 2020 年に入ってからそれ以前とは異なる変位挙動を示していたことを明らかにした.

参考文献

- 1) F. Ogushi, M. Matsuoka, M. Depilippi, P. Pasquali: Implementation of non-linear non-parametric persistent scatterer interferometry and its robustness for displacement monitoring, *Sensors*, 21(3), 1004, 2021.
- 2) X. Chen, Y. Zheng, J. Peng, M. Floris: Monitoring river water level using multiple bounces of bridges in SAR images, *Advances in Space Research*, 68, 4016-4023, 2021.
- 3) 山口県: 上関大橋復旧検討会議報告書, 2021. <https://www.pref.yamaguchi.lg.jp/soshiki/128/142697.html>