

道路土工構造物の維持管理の高度化に資する衛星SARの活用

藤原年生・渡邊一弘・古関潤一

1. はじめに

近年、衛星干渉SAR画像による解析技術を活用した地形の変状を把握する技術が飛躍的に普及している。また、ダムの変形計測¹⁾や災害時での活用²⁾など様々な分野において適用されはじめているが、道路管理の分野では、適用事例が少ない状況である。

このような中、国土交通省道路局が設置する新道路技術会議において募集した「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」にて、「リモートセンシング技術を活用した道路土工構造物の維持管理の効率化に関する研究開発」が採択された。本研究は、東京大学を受託者として令和2年度にかけて国土交通省国土技術政策総合研究所（以下「国総研」という。）からの委託研究として実施したものであり、本報文ではその概要を紹介する。

2. 衛星SARを活用するうえでの留意事項

地球観測衛星「だいち2号」の合成開口レーダー（以下「ALOS-2SAR」という。）は、衛星の軌道が一定であり、後述するとおり測線の方角や高低差など地形によって、計測不能箇所や精度が大きく異なるものがある。

衛星は北行軌道と南行軌道があり、衛星視線は東西方向となっている。図-1に北行軌道における衛星視線方向と対象物の主測線方向の関係を示すが、衛星視線に対して直交する方向の変位を解析するには、留意が必要である。

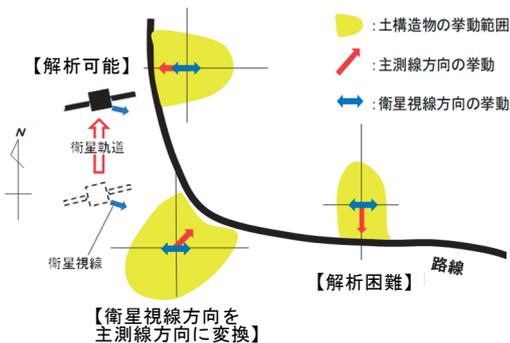


図-1 衛星視線方向と対象物の主測線方向の関係

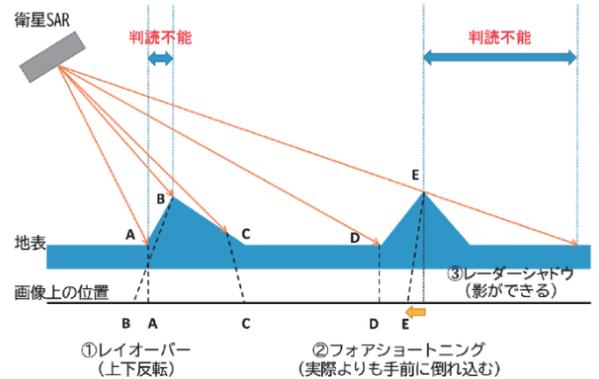


図-2 SAR画像の幾何特性

また、解析上の補正手順や方法を的確に把握して、解析を行う必要があることにも留意が必要である。

さらに、地形条件による判読に誤差が生じやすい、又は判読不能となる現象として、急斜面により上部の方が下部よりも衛星に近くなることによる上下反転するレイオーバーや、山などの影響により計測できないレーダーシャドウなどが存在する（図-2参照）。多様な方向性を有する道路ネットワークにおける道路構造物の維持管理に適用するうえでは、解析手法に留意が必要である。

衛星SARに使用される衛星の種類に関しては、いくつかの種類があり、各種衛星の代表的な特性を表-1に示す。広域的な範囲から変状場所を抽出するスクリーニングや実際の変状進行過程を過去の衛星データから溯って把握するなど、目的に応じて適切に使用する衛星を選定する必要がある。

また、ALOS-2SARによる解析を行う場合には、2014年からの運用になっていることに留意が必要である。

このような留意事項を把握した上で適用を図っていくべきである。

表-1 SARに使用される代表的なマイクロ波の特性

衛星	観測波長	分解能	観測幅	同条件での画像観測間隔	観測範囲 (画像購入価格)	解析可能期間
ALOS-2 (日本: JAXA)	Lバンド (約24cm)	1×3m	25km	年3~4回	日本全域 (8万円/枚)	2014(H26)~現在
		3×3m	50km			
Sentinel-1 (EU: ESA)	Cバンド (約6cm)	5×5m	80km	月1~2回	日本全域 (無料)	2014年(H26)~現在
		5×20m	250km			
TerraSAR-X (独*DLR)	Xバンド (約3cm)	1×2m	10km		都市域中心 (約50万円~/枚)	2007年(H19)~現在

3. 道路のり面変状箇所での適用性

本研究では、道路のり面が変状している箇所において、現地での地上レーザ測量による継続的な計測結果と新たにALOS-2SARを用いた干渉解析(SBAS解析Lバンド、期間：2014.9.20～2018.3.31)の変状を比較した(図-3)。変状範囲がほぼ一致しており、ALOS-2SAR干渉解析が、当該事例では有効であった。この比較を通じて把握した、異常があるり面の調査にALOS-2SARを活用する場合の留意点を表-2に示す。

また、事前に変状があるか不明な道路に対してALOS-2SARの解析を行った。図-4にその結果を示す。道路周辺にて目立った変状の進行は確認できないものの、一部の箇所ではわずかな変位が確認できる。このようなデータが中長期的変動傾向として得られるため、広域に渡る情報を頻度高く得ることを通じ、例えば変位の累積状況等を確認することにより異常箇所の検知に繋げることが期待できる。

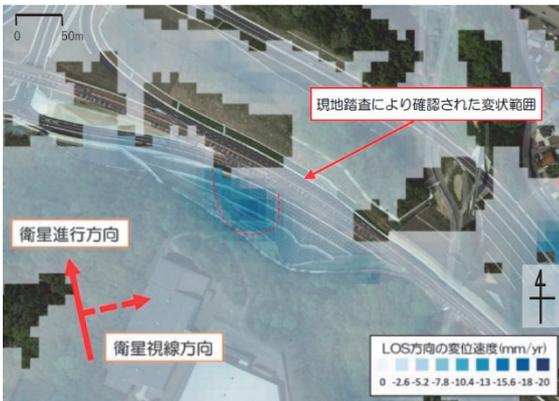


図-3 現地斜面変状の測定結果と衛星SAR干渉解析結果

4. 広域を対象とした変状把握の適用性

前章では、局所的な変状発生箇所の適用性について検討したが、ALOS-2SARの特徴を踏まえ、変状発生の可能性のある箇所をスクリーニング抽出するなど、ALOS-2SARを活用することにより広域を対象とした変状把握への適用も期待できる。

そこで、本研究では軟弱地盤上の盛土を含む一連の区間を対象とし、過去のALOS-2SARの情報を取得して、沈下量をALOS-2SARの時系列変化により確認した。

一連の区間における路面の沈下量を計測した事例³⁾をもとに衛星ALOS-2SARの解析を実施した結果を図-5に示す。このように、一連の区間における

表-2 異常箇所への衛星SARの活用

項目	現状	衛星SARの活用
変状の影響範囲の設定	空中写真、現地調査等で設定する	地盤が変状している範囲を追加し、影響範囲設定の精度を上げる
現地踏査のための除草	大きめに除草する	影響範囲に基づき、最小限の除草範囲を設定できる
現地踏査	地質専門技術者による踏査を実施する	変状が特に激しい箇所の情報を地質専門技術者に提供し、抜けのない現地踏査を実施する
定量的、時系列的な挙動の把握	現地に沈下計、地すべり計、伸縮計等の動態観測用計器を設置し地盤挙動を把握する	地盤の定量的、時系列的な挙動情報に基づき、動態観測の箇所、測定項目を最小限にする
応急対策工の提案・実施	現地調査結果に基づき、道路管理者が提案・実施する	この時点では、動態観測用の計器の情報は得られていない。衛星SARで得られた地盤挙動の情報も参考にして、応急対策工の提案、実施できる
詳細調査計画の立案・実施	現地踏査にもとづき詳細調査計画を立案・実施する	変状の影響範囲、定量的、時系列的な挙動データも参考して、詳細調査計画を立案・実施する
恒久対策工の設計・施工	詳細調査結果及び動態観測結果に基づき恒久対策工の設計・施工を行う	同上
恒久対策工の効果の確認	目視確認が中心となる	目視+衛星SARによる地盤の挙動解析で効率的に評価する

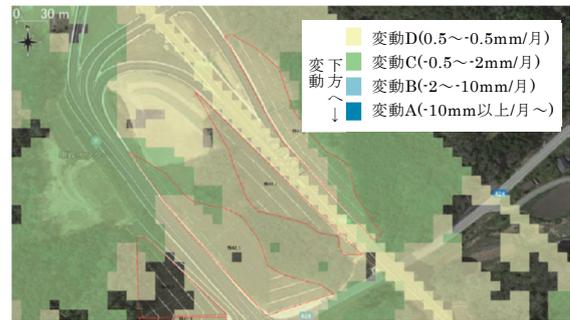


図-4 変状が不明な箇所でのALOS-2SAR干渉解析結果

沈下量の大小を衛星ALOS-2SARの解析で計測しうることが分かる。図-6は、ある地点の現地観測の結果と衛星ALOS-2SARの解析結果を比較したものである。ALOS-2SARで得られるデータの期間的な制約に留意が必要であるが、現地観測結果と整合的であった。これは広域を対象とした変状把握のスクリーニングとしての有効性を示唆するものであった。なお、このように衛星ALOS-2SARを用いて現地計測箇所以外の沈下量を推定する場合は、地盤条件や道路構造(図-7)などの情報も含め、例えば地質学



図-5 軟弱地盤上の盛土沈下箇所のSAR解析結果



図-6 盛土沈下箇所の現地観測とALOS-2SAR解析結果³⁾に追記

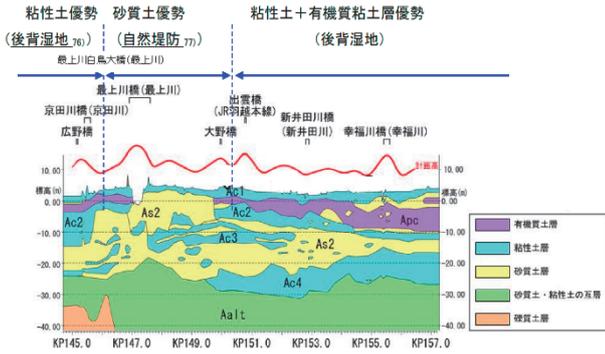


図-7 道路構造と地質縦断面図³⁾

的考察などを含めた総合的な判断が有効と考えられる。

また、より広範囲の道路維持管理への適用性を確認するため、図-8に示す道路においてALOS-2SAR干渉解析を実施した。4年間のALOS-2SARのデータから数回のデータを対象とし、ある一連の区間において図-9に示すように地形の変動を把握した。評価においては、特に防災カルテ点検の対象箇所(区間内94箇所)に着目して評価したが、変動が2mm/月を超える箇所は確認されなかった。また、防災カルテ点検箇所とそれ以外の近傍の箇所において、変状把握状況に大差はない結果となった。これらより、本解析においては広範囲の道路維持管理での適用性を評価することは難しかったが、例えば豪雨や地震の前後で、過去のALOS-2SARのデータを活用できることを生かし、時系列で詳細に解析すれば異常を検知できる可能性もある。

これらの検討を通じ明らかにした、のり面の維持管理とALOS-2SARの活用方法について表-3に示す。路線全体のスクリーニングを行う際に定量的に変位を示せるため有効な手法と考えられるが、衛星の進行方向や実変状との精度確認、計測範囲など、留意点を認識した上で活用する方法を検討していく必要がある。

また、図-10に航空LP測量を用いたCS立体図により把握した谷埋め盛土の抽出例を、図-11に同位置における鉛直方向における変位 (H26.9~R2.6間)に関するALOS-2SARの解析結果を示す。このように、広範囲の道路維持管理への適用を検討する上で、他の手法で得られた情報とALOS-2SARによる解析結果を組み合わせることも有効であると考えられる。

5. 道路維持管理の現場への実装に向けて

ALOS-2SARは、過去に遡っての確認や広域的に定量的な確認が可能であることのメリットがある反



図-8 防災カルテ箇所と衛星SARの解析対象範囲

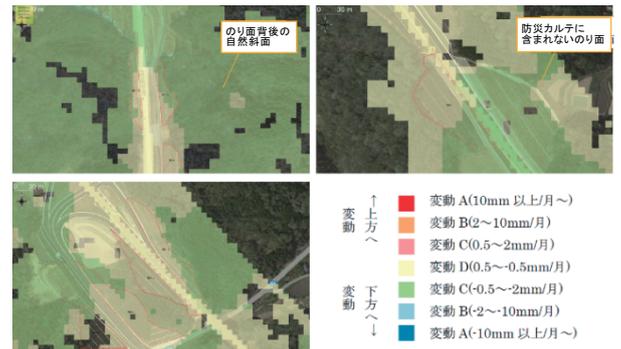


図-9 ALOS-2SARの解析結果の抜粋

表-3 のり面維持管理の現状と衛星SARの活用

項目	現状	衛星SARの活用
路線全体のスクリーニング	道路台帳 地形、地質の机上調査 現地踏査 防災カルテ	定量的なスクリーニング技術を追加し、危険箇所の抽出、防災カルテ作成等を効率的に行う
点検・危険度調査	点検箇所 防災カルテの点検箇所(構造物の開口、段差等)全てについて現地踏査を実施する	現地踏査が必要な箇所のみ行う
点検方法	目視	目視+定量的な評価を行う

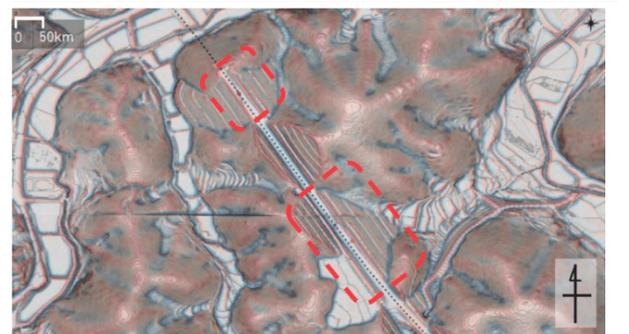


図-10 航空LP測量を用いたCS立体図による注意すべき地形地質(谷埋め盛土)の抽出例

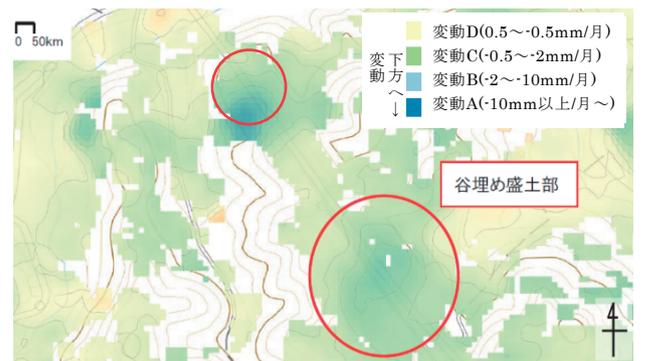


図-11 ALOS-2SARによる谷埋め盛土部の変状評価

面、解析可能範囲の制約、解析手法、コスト面など克服すべき課題も多い。この様な中で道路管理者による現場の適用に向けては、これら課題を適切に認識した上で対象とする現場ごとに活用目的に応じたALOS-2SARの適用性を評価することが重要となる。これらの参考となるマニュアル案の策定を行うとともに課題のうち、代表的なもの対応策・留意点等を以下に示す。

5.1 マニュアル（案）の作成

衛星SARの技術を道路管理者が現場で活用するにあたっては、その利点と課題を整理する必要がある。そこで、今回、道路管理者や道路管理に活用する場合の留意事項を整理したマニュアル（案）⁴⁾を作成した。

5.2 精度評価の方法

精度評価をするうえでは、現地の動態観測結果とのキャリブレーションを行い、精度検証を行う必要がある。しかし、通常の維持管理区間では、動態観測を実施されていないため、既存の航空LP測量などの基盤データをもとに、現地での測量手法を選定していく必要がある。また、対象物の時系列での変状進行過程や対象とする区間の広域性を考慮して、精度評価を実施していく必要がある。

5.3 導入及び運用コスト

衛星SARの解析では、衛星データの購入費用や解析人件費、解析ソフトの使用料があり、導入（開始）時と運用時にそれぞれ発生する。よって、適用に先立ちあらかじめ必要となる費用を見込んでおく必要がある。

6. まとめ

本報文は、国土交通省道路局が設置する新道路技術会議における技術研究開発制度として実施した「リモートセンシング技術を活用した道路土構造物の維持管理の効率化に関する研究開発」の概要を紹

介した。この研究を通じ、道路土工構造物の維持管理の高度化に資する衛星SARの活用について、様々な活用の利点や課題などの留意点を整理した。

今後は、先進レーダー衛星「だいち4号」（ALOS-4⁵⁾）などが運用開始予定であり、ALOS-2SARの観測幅や観測頻度がさらに向上し、変状把握をより効率的に行うことが期待できる。また、航空LP測量など観測データのデジタル化の一層の進展も見込まれており、他の手法で得られる情報と組み合わせた分析も期待できる。地質・地盤情報の収集の重要性や現地調査の必要性等も十分考慮しつつ、道路の維持管理へどのように衛星SARを適用させていくか、引き続き関係機関と連携して検討していく必要がある。

謝 辞

本研究の実施にあたって、現地データの提供等のご協力をいただいた中国地方整備局三次河川国道事務所のほか関係各位にこの場をお借りして厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 佐藤弘行ほか：衛星SARによる19基のロックフィルダムの外部変形計測、土木技術資料、第59巻、第9号、pp.36-41、2017
- 2) 宇宙航空研究開発機構衛星利用運用センター、国土交通省水管理・国土保全局砂防部砂防計画課（平成30年6月）：災害時の人工衛星活用ガイドブック土砂災害版、https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/sabo/satellite/manual_191219.pdf
- 3) 澤野・長尾・高橋・佐藤・友清：軟弱地盤上の高速道路盛土における長期観測結果からの一考察、第52回地盤工学会研究発表会、2017、pp1079-1080
- 4) 国土交通省 新道路技術会議（令和3年開催予定の技術研究開発成果・事後評価に掲載予定）
<https://www.mlit.go.jp/road/tech/jigo/jigo.html>
- 5) 宇宙航空研究開発機構：先進レーダー衛星「だいち4号」
https://www.jaxa.jp/projects/sat/alos4/index_j.html

藤原年生



研究当時 国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部道路基盤研究室 主任研究官、現 中国地方整備局道路部道路管理課長
FUJIHARA Toshio

渡邊一弘



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部 道路基盤研究室長
WATANABE Kazuhiro

古関潤一



東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 教授、博士（工学）
Dr. KOSEKI Junichi