

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究終了報告書】

①研究代表者		氏名 (ふりがな)	所属		役職	
		こせき じゅんいち 古関 潤一	東京大学大学院工学系研究科		教授	
②研究 テーマ	名称	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				
	政策 領域	[主領域] 領域 8 : 維持管理や長寿命化対策に必要な評価手法及び技術に関する研究開発	公募 タイプ	タイプ II		
	[副領域] 領域 7 : 災害時の対応や防災対策に必要な検討評価手法及び対策技術に関する研究開発					
③研究経費 (単位 : 万円)		平成29年度	平成30年度	令和元年度	令和2年度	総合計
		890万円	1873万円	1,838万円	1,193万円	5,794万円
④研究者氏名		(研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)				
氏名		所属・役職 (令和3年3月31日現在)				
竹内 渉		東京大学生産技術研究所・教授				
清田 隆		東京大学生産技術研究所・准教授				
柳浦 良行		基礎地盤コンサルタンツ (株) 社長				
吉川 猛		基礎地盤コンサルタンツ (株) 技術本部・課長				
野口 ゆい		基礎地盤コンサルタンツ (株) 技術本部・課員				
⑤研究の目的・目標		(提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。)				
		本委託研究は、リモートセンシング技術 (合成開口レーダー[SAR]) を活用し、広域の道路土構造物 (のり面、地すべり、大規模切土、盛土など) の変状の経時変化を求め、道路点検や防災対策予算の優先度の評価、もらい災害の事前予知など、道路の維持管理の効率化および地質リスクの低減を図る技術を開発することを目的とした。				

⑥ これまでの研究経過・目的の達成状況

・これまでの研究経過

道路土構造物の維持管理における現状の課題は、「課題1：築造当時からデータベースない」、「課題2：点検は目視中心で定量的把握が困難」であるため、変状範囲、変量は詳細調査をしないと不明であった。「課題3：草木で変状範囲が見つけづらい」ため特に管理外の変状は確認が困難であった。注意すべき地形地質箇所等の活動度が明確でないため「点検・対策の優先順位が不明」であった。これらを解決するため、以下の目標を立てて研究を進めた。

目標1：衛星 SAR 差分干渉解析の適用条件や適用限界を明確化

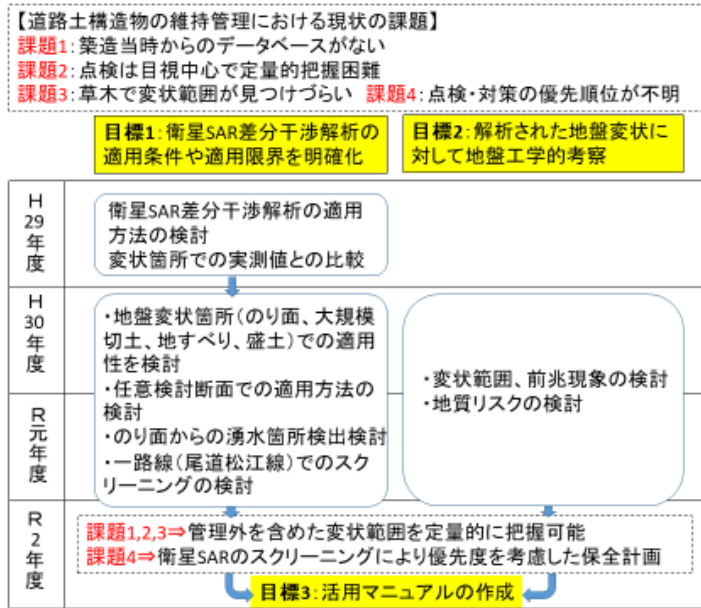
地盤変状箇所（のり面、大規模切土、地すべり、盛土）で解析値と実測値を比較し適用可能であることが分かった。衛星 SAR 干渉解析が不向きとされる任意断面での適用について実際の現場での計測結果と照合し、適用の可能性を示した。広域（尾道松江線）の道路において、道路変状の経時変化に関してスクリーニングを行い、優先度を考慮した点検・対策や保全計画が可能であることを示した

目標2：解析された地盤変状に対して地盤工学的考察

広域のスクリーニング結果に基づいた地盤変状箇所の資料調査、現地踏査を行い、地盤工学的な評価を行った。その結果、地質リスク箇所の現状の活動度評価に有効であることが分かり、地質リスクの低減に寄与できることを示した。

目標3：活用マニュアルの作成

目標1、2を踏まえてマニュアル案（初版）を作成し、道路管理者（国交省、NEXCO 各社）へのヒヤリング結果を踏まえて、現地で適用しやすい「合成開口レーダー（SAR）の道路土構造物の維持管理への活用マニュアル（案）」を完成させた。



⑦ 中間・FS 評価で指摘を受けた事項への対応状況

【FS 評価（平成 29 年度）】

▽指摘事項 1-1： 実用的な精度が得られるか、適用方法との関連を整理するとともに、精度に影響を与える因子の特定が必要である。

▲対応状況 1-1： 各土構造物の維持管理に必要な精度を整理した後、必要な精度が衛星 SAR で得られることを確認した。また、精度に影響を与える因子を整理し、その影響を最小限に抑えるための解析手法について実測値と整合を取りながら、構造物毎に整理した。

▽指摘事項 1-2： 要素技術としての観測精度を向上させるとともに、グラウンドアンカーの不具合など、道路構造物の管理の観点での成果を取りまとめていただきたい。

▲対応状況 1-2： 道路土構造物の維持管理に関して、平野部と丘陵地・山地で要求されることは異なる。平野部では主に沈下に関して維持管理が要求され、時系列解析により従来の水準測量と同等程度の精度が得られることを確認した。丘陵地・山地では斜面崩壊、地すべりなど主側線方向の変位が要求されることから、衛星 SAR で得られた衛星視線方向の変位を任意な主側線方向の水平、鉛直変位に投影する方法を提案し、実測値との整合が取れることを確認した。

▽指摘事項 1-3： 地盤工学的考察について、前倒しして検討されることを期待する。

▲対応状況 1-3： 平成 30 年度より衛星 SAR で得られた地盤の変状に関して地盤工学的な考察を行った。

【中間評価（平成 30 年度）】

▽指摘事項 2-1： 最終成果としての「マニュアル」について、SAR というシーズの活用を主眼としたとりまとめ表現となっているが、SAR の活用条件を明確にした上で、道路管理者による具体的な活用場面やニーズを主眼とした「マニュアル」としていただきたい。

▲対応状況 2-1： マニュアルの作成の中間段階で、道路管理者（国土交通省、NXCO 西・中・東・総研）に対して具合的な活用方法やニーズ等の意見聴取を行い、その意見を取り入れながら最終マニュアルを作成した。

▽指摘事項 2-2： 実用に当たっての初期導入コストについても意識し、研究を進めていただきたい。

▲対応状況 2-2： 道路管理の様々な状況を考慮しながら、必要な初期導入コスト、運用段階コスト、災害時コストなどを検討し、マニュアルに反映させた。

【中間段階（令和元年度）】

▽指摘事項 3-1： 最終成果としての「マニュアル」について、SAR による計測方法のみを整理するのではなく、SAR の実務への適用条件や適用限界、長所や短所などを明確化するとともに、道路土構造物の維持管理の現状を踏まえ本技術が効果を発揮する適用方法などを整理し、実務において適切な活用がなされるようにするための「マニュアル」としていただきたい。

▲対応状況 3-1： ご指摘いただいた「SAR の実務への適用条件や適用限界」、「長所や短所などを明確化」するとともに、道路土構造物の維持管理の現状を踏まえ「本技術が効果を発揮する適用方法」について、道路管理者からの意見聴取などを参考にして、マニュアルに反映させた。

▽指摘事項 3-2： SAR 導入の初期コスト、運用コストについて、道路土構造物の管理の現状を踏まえ、実務への導入を見据えたものとなるよう、技術活用の方法論とあわせて研究を進めていただきたい。

▲対応状況 3-2： 実現場として尾道松江自動車道を選定し、ここで実施した衛星 SAR を活用した道路変状のスクリーニング結果を踏まえて、初期コスト、運用コストを提案した。合わせて今後の業務発注のための特記仕様書例を作成し、技術活用に有用な情報を整理した。

⑧ 研究成果

(1) 道路土構造物等の維持管理と衛星 SAR の活用

道路土構造物等の「管理の現状の課題」に対し、衛星 SAR の活用の可能性を実際の現場で実測値と比較しながら解析方法、整理方法などを検討し、表-1 に示すような結果が得られた。

表-1 土構造物毎の変状の特徴を考慮した道路維持管理の現状の課題と衛星 SAR 利用の活用例、

土構造物	現状の課題	衛星 SAR の活用例
地すべり	地すべり土塊の範囲は詳細調査をしないと分からない。	衛星 SAR では、地すべり土塊の範囲、活動状況を把握することができる。
のり面対策工 (アンカー)	上部の変状を確認するのに時間を要し、管理外からの変状を確認することができない。	衛星 SAR では、管理外の変状も計測することができる。
大規模切土 (吹付、法枠含む)		
片盛片切又は谷埋め盛土	路面の変状は巡視 (日常) で確認できるが、路肩、法面の変状は現地踏査しないと分からない。	衛星 SAR では盛土材の脆弱化や水位上昇に伴う路肩、法面の変状を計測でき、変状の規模に応じて現地踏査を行う。
軟弱地盤上の盛土、高盛土	定期的な沈下観測が行われているが、その間がどうなっているか分からない	定期的な沈下計測を補完する手法としても有効である。
広域な一路線のスクリーニング	道路の管理延長が長く、一律な詳細な定期点検が難しい	広域の地域を地盤変動に関するスクリーニングを行い、点検箇所の抽出、点検間隔の見直しなどの判断材料とする。
	定期点検は、目視中心で定量的把握が困難、個人差が出る可能性がある	定期的に地盤変動を定量的に計測ことができ、個人差が出にくい。
	草木があり、地盤変状の前兆を見つけづらい	変状範囲を推定することができるので、その付近を目安に除草し、現地踏査を行う。
	点検、対策工の優先順位が不明	スクリーニングの結果を変動 A、B、C、D にランク分けし、詳細点検や対策工の優先順位設定に活用する。
災害対応	地盤の変状範囲の設定に現地踏査を行うための広範囲な除草が必要である	衛星 SAR で地盤の変状範囲を把握し、最小限の除草範囲とする。
	地質専門技術者による踏査を実施するが、短時間で全域を確認できない。	変状が激しい箇所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。
	現地に地すべり計、伸縮計等の計器を設置するが費用と期間が必要である。	衛星 SAR による地盤の時系列的挙動情報に基づき、動態観測の箇所を最小限にできる

(2) 道路土構造物等の維持管理のための最適な衛星 SAR 干渉解析方法と整理方法

選択された衛星データを利用した衛星 SAR 干渉解析により、地盤の変動量解析を行う。衛星 SAR 干渉解析方法としては、「2回の観測データを用いた1ペアの衛星 SAR 干渉解析 (D-InSAR 解析)」、「時系列解

析 (SBAS、PS-In SAR解析)」がある。

解析結果の整理方法としては、「解析結果をそのまま」、「2.5次元解析」、「任意断面方向への変換解析」などがあり、表-2に示すような利用を行うことができる。

表-2 衛星SAR干涉解析結果の整理方法

整理方法	概要	利用方法
解析結果をそのまま	衛星視線方向の地盤変動量をそのまま使用する。	影響範囲を推定する場合：地すべり、斜面崩壊
2.5次元解析	撮影方向の異なる解析結果を組合せ、地盤変動量を鉛直方向と東西方向に分離することで、鉛直方向の変位の精度を向上させる。	鉛直変位（沈下）が主体として評価する場合：軟弱地盤上の盛土、一路線のスクリーニング
任意な検討断面方向への変換解析	撮影方向の異なる時系列解析結果を組合せ、変動が任意断面内で生じると仮定し、地盤変動量を水平成分と鉛直成分に区分する	任意な検討断面での水平、鉛直変位に着目する場合：地盤挙動の動態観測（南北方向は精度低い）

(3) 解析事例

1) 地すべり土塊の範囲の設定

図-1に地すべり土塊の範囲（虻田）に関して、衛星SAR干涉解析結果と地すべり調査で求めた結果を比較した例を示す。ほぼ一致しており、現地踏査で得られるすべり土塊の範囲を衛星SARで求めることが可能であることが分かる。

地すべり土塊の範囲の特定には、従来、地質技術者による現地踏査、ボーリング調査及び地盤の動態観測など行われてきた。衛星SARにより、地すべり土塊の範囲だけでなく、時系列解析を追加することにより、土塊の挙動を把握することができ、対策工の優先順位の設定や対策工の効果を確認することができる。また、動態観測の位置・時期を最小限にすることができる。

2) のり面対策工及び大規模切土

a) 変状の範囲の設定

図-2に尾道松江道の吉舎ICで発生した斜面崩壊に関して、現地での調査結果とALOS-2を用いた衛星SAR干涉解析結果を示す。同図より、踏査結果とSAR解析による変状範囲が、ほぼ、一致していることが分かる。

尾道松江道の高野ICにおいて、2018年7月豪雨で発生した地すべりを対象に、豪雨前の事前変状に

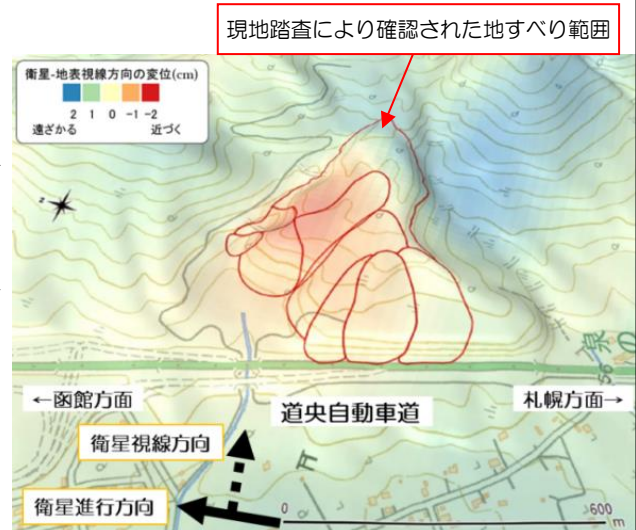


図-1 道央自動車道（虻田地区）で発生した地すべり範囲の現地踏査と衛星SARとの比較

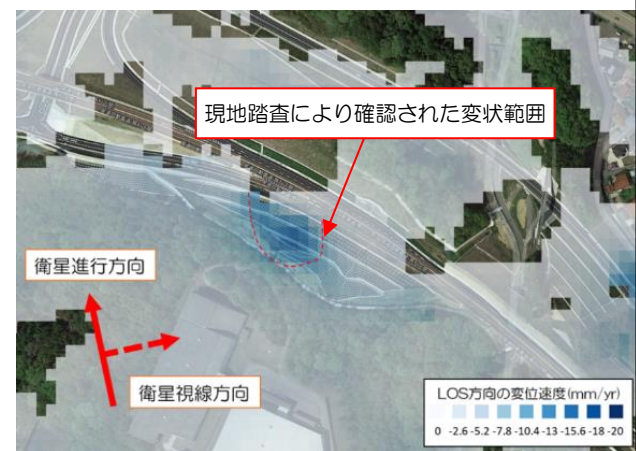


図-2 尾道松江道（吉舎IC）で発生した斜面崩壊範囲の現地踏査と衛星SARとの比較

関して、ALOS-2 を用いて、衛星 SAR 干渉解析を行った。図-3 に解析結果を示す。アンカーが施工されていない領域を中心に 2018 年 7 月豪雨前、のり面変状が発生していた可能性があることが分かった。

広域の解析を行うと、図-3 に示すように対象斜面以外の部分で「変状あり」と解析され、現地確認したが変状らしきものが無い場合もある。これは、電離層の電子密度の変化、大気の影響、地球の全体の動き等による誤差を完全に除去できない領域が生じるためであると考えられている。

b) 任意断面での鉛直水平変位の計測

土木分野では、任意断面を設定した場合、変動は任意断面方向で発生（断面直角方向の変位 $\Delta y = 0$: 図-4 参照）すると考えることが多いため、2ペアの衛星視線方向の差分値より、式(1)を用いて水平、鉛直方向の変位に変換する。

$$\begin{pmatrix} \Delta d \\ \Delta a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\theta_d \cos(\psi - \phi_d) & \cos\theta_d \\ \sin\theta_a \cos(\psi - \phi_a) & \cos\theta_a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、

Δd 、 Δa : 南行軌道、北行軌道での衛星視線方向の変動差分値

θ_i : 衛星視線入射角 (度)

θ_d (南行軌道)、 θ_a (北行軌道)

ψ : 任意断面の東西方向からの回転角 (度)

ϕ_i : 衛星視線方位角の東西方向からの回転角 (度)

ϕ_d (南行軌道)、 ϕ_a (北行軌道)

$\Delta x, y$: 任意断面での水平変位および鉛直変位

図-2 で示した尾道松江道 (吉舎 IC) で得られた実測値 (光波測量) と式(1)を用いた衛星 SAR 解析値の比較例を図-5 に示す。50mm 程度までの変位箇所は、実測値と衛星 SAR 解析値がほぼ一致するが、それ以上になると衛星 SAR 解析値が小さくなっている。この要因としては以下のことが考えられ、今後データの蓄積を行い原因と特定する必要がある。

- ・ 法枠工が地盤に沿ってずれ落ちた場合、衛星と地盤の距離は相対的に変わらないため、変位を過少に解析した可能性がある。

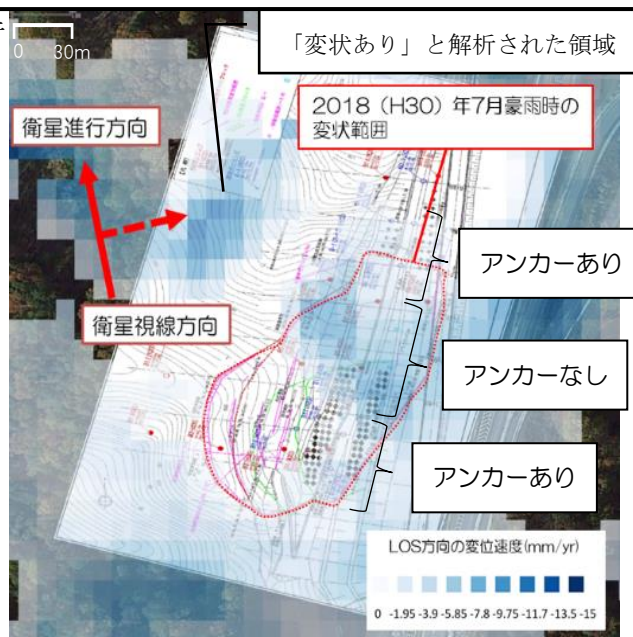


図-3 尾道松江道 (高野 IC) で発生した地すべりの衛星 SAR による 2018 年 7 月豪雨前の事前変状の可能性のある範囲

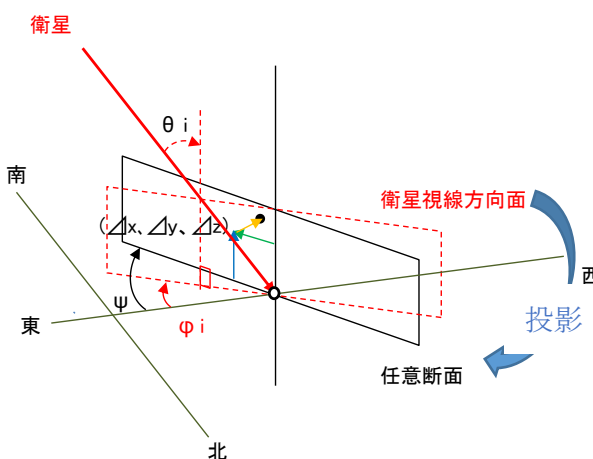


図-4 衛星視線方向変位の任意断面方向への変換

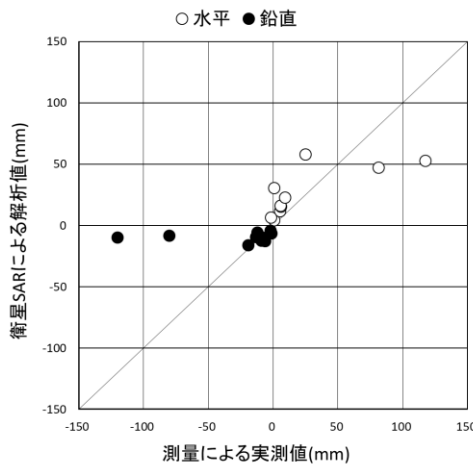


図-5 図-2 における実測値と衛星 SAR 解析値の比較

- 衛星SARの解析では異なる二時期の観測波の位相差を変動量として計算するが、観測間に波長を超える変動があった場合、それが一波長の変動なのか二波長分の変動なのか区別することができない。

3) 軟弱地盤上の盛土

山形自動車道の酒田 IC～酒田みなと IC（延長 L≒11.5km）間で衛星 SAR 干渉解析を行い、微地形区分に応じた盛土沈下量を評価した。盛土沈下に関して、衛星 SAR 解析を行い、その結果を微地形区分と合わせて図-6 に示すが、軟弱な後背湿地で大きな沈下が発生していることがわかる。

また、150.9kp における実測値と SAR 解析値の経時変化を示すが、ほぼ、一致していることが分かる。

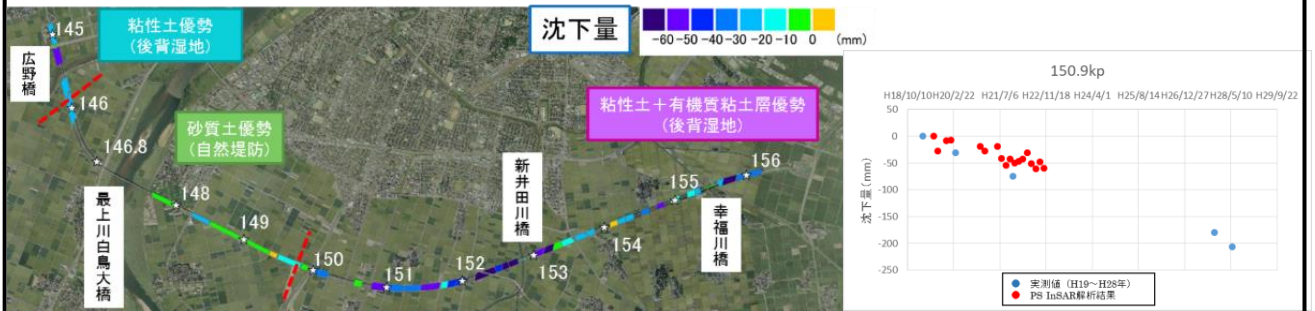


図-6 山形自動車道における軟弱地盤上の盛土における沈下の比較

4) 広域の一路線での適用例

一路線（広島県内の尾道松江道、図-7）参照）において衛星 SAR 干渉解析を行った。道路防災点検箇所におけるスクリーニングを行い、各箇所の変動状況を変動 A（10mm/月以上、活発な運動中）、変動 B（2～10mm/月、緩慢な運動中）、変動 C（0.5～2mm/月、継続観測が必要）、変動 D（なし、断続変動、局部的な地盤変動、その他）に区分した。

図-7(1)に示すように尾道松江道のうち、広島県内を検討区間とした。(2)のように南北軌道の重なり合う一区画分の解析結果を合成し、2.5次元解析を行った。(3)では、(2)で得られた結果の尾道～三次の区間の路線部分を抽出したものを示す。(3)の鉛直変位から、道路土構造物斜面については斜面方向の変位に換算（切土での平均法勾配 1:1 と設定し、斜面方向変位＝鉛直変位× $\sqrt{2}$ ）倍）した結果を(4)に示す。変動 C 及び変動 D に区分されることが分かる。

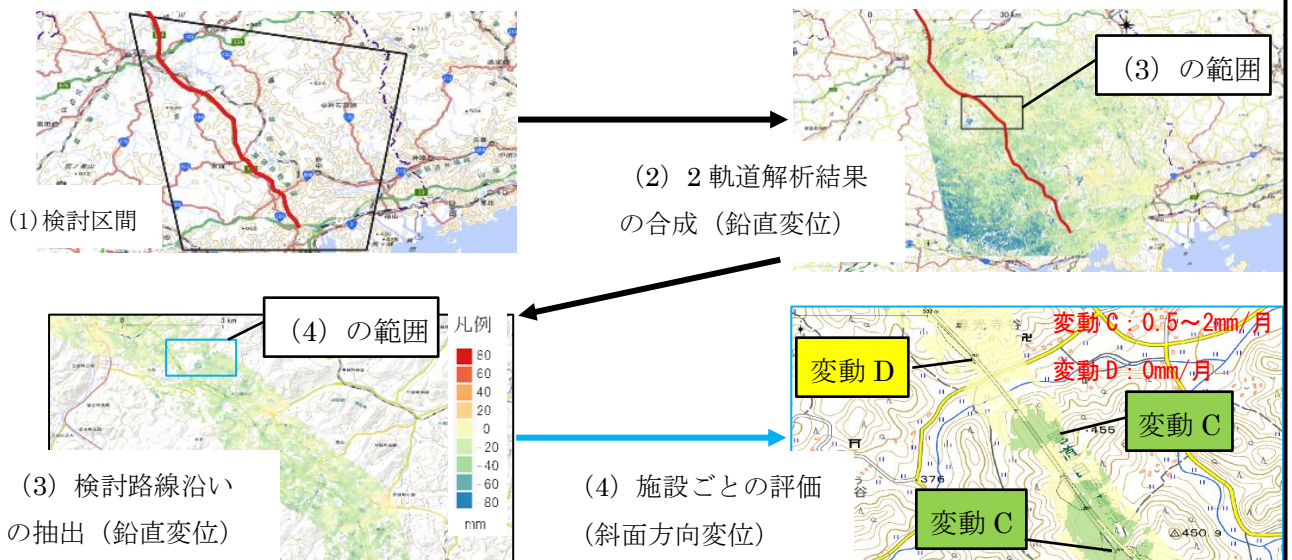


図-7 一路線（尾道松江自動車道）における衛星 SAR の適用例

⑨ 研究成果の発表状況

【平成 30 年度】

- 1) 吉川 猛、古関潤一、清田隆、竹内渉、横田聖哉、柳浦良行、野口ゆい：SAR を利用した軟弱地盤地域における高速道路路面沈下量の把握、第 53 回地盤工学研究発表会、pp. 1111～1112, 2018.
- 2) 野口ゆい、古関潤一、清田隆、竹内渉、横田聖哉、柳浦良行、吉川猛：SAR を利用した地すべり土塊および道路変状の推定、第 53 回地盤工学研究発表会、pp. 1113～1114, 2018.
- 3) 古関潤一、横田聖哉、竹内渉、吉川猛、柳浦良行、野口ゆい：道路土構造物の維持管理の効率化のための干渉 SAR による変状調査方法、地盤工学会誌、pp. 22-25、2018.
- 4) 吉川 猛、古関潤一、清田隆、竹内渉、柳浦良行、横田聖哉、野口ゆい：SAR を利用した軟弱地盤地域の高速道路路面変位状況の把握、土木学会第 73 回年次学術講演会、pp. 219～220, 2018.

【令和元年度】

- 1) 吉川 猛、野口ゆい、古関潤一、清田隆、竹内渉、柳浦良行、鎌田裕介：SAR を利用した法面変状の把握（その 1）、第 54 回地盤工学研究発表会、pp. 1065～1066, 2019
- 2) 野口ゆい、吉川 猛、古関潤一、清田隆、竹内渉、柳浦良行、鎌田裕介：SAR を利用した法面変状の把握（その 2）、第 54 回地盤工学研究発表会、pp. 1067～1068, 2019
- 3) 吉川 猛、古関潤一、鎌田裕介、清田隆、柳浦良行、竹内渉、野口ゆい：衛星 SAR を活用した道路土構造物の維持管理の効率化、第 33 回日本道路会議、2019
- 4) 吉川 猛、野口ゆい、鎌田裕介、古関潤一、清田隆、竹内渉、柳浦良行：衛星 SAR を利用した法面変状計測事例、令和元年度日本応用地質学会研究発表会、2019

【令和 2 年度】

吉川 猛、古関潤一、清田隆、竹内渉、柳浦良行、野口ゆい、鎌田裕介：衛星 SAR と航空 LP を活用した道路周辺の斜面リスク抽出、土木学会第 75 回年次学術講演会、2020.

【令和 3 年度】

- 1) 吉川 猛、古関潤一、清田隆、竹内渉：干渉 SAR を利用したのり面変状の把握、基礎工 2021 年 1 月号、pp. 63-65、2021
- 2) 吉川 猛、野口ゆい、古関潤一、清田隆、竹内渉、柳浦良行衛星 SAR を活用した道路土構造物の維持管理方法の提案、第 56 回地盤工学研究発表会（投稿中）

⑩ 研究成果の社会への情報発信

2019 年 7 月 28 日にパシフィコ横浜で行われた IEEE IGARSS2019 にて、Natural disasters and hazards monitoring using Earth Observation data と題して、6 カ国 20 名の参加者を対象に、本研究で開発した SAR を用いた高速道路の診断手法を演習形式で紹介した。IGARSS は、リモートセンシング分野では世界最大の学会であり、参加者からは、同時に行われた SAR を用いた洪水、地すべりなどの事例とともに、本研究成果に対して高い関心が寄せられた。

同様に、2020 年 9 月 26 日、2020IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium のオンラインシンポジウム、2020 年 12 月 1 日、2020 IEEE International India Geoscience and Remote Sensing Symposium のオンラインシンポジウムにおいてもチュートリアルを行った。

⑪ 研究の今後の課題・展望等

道路土構造物の維持管理に衛星 SAR の活用を推進するためには、以下の課題を解決する必要がある。

(1) 道路土構造物の維持管理の実現場への適用

作成したマニュアルを用いて道路土構造物の維持管理の実現場での衛星 SAR の活用が望まれる。実現場で活用することにより、本研究では出てこなかった課題を抽出し、その改善を行い、より実務に適合した衛星 SAR の活用法を見出す必要がある。

(2) 大地 4 号及び民間衛星データの活用によるデータ取得間隔の縮減

大地 4 号 (L バンド) の打ち上げが 2022 年に予定され、衛星データの取得間隔が 3~4 か月から 2 週間間隔まで短縮できる。X バンドに関しては、民間で国産小型衛星の打ち上げが行われつつあり、今後、時間単位でのデータの取得が可能となり、平野部の立木や草木の無い箇所での適用は期待できる。衛星データの取得間隔が狭まることにより、建設工事における動態観測などへの利用の幅が拡大されると考えられ、精度だけでなくコスト面でも従来の方法と比較しながら現場への適用を考える必要がある。

(3) 東南アジアへのインフラ管理技術の輸出

東南アジアは、日本と同様に森林に覆われる特色を持ち、今回の研究成果が活かせると考えている。東南アジアを中心に道路の維持管理に活用してもらうため、国際学会・学会誌での論文発表に加えて JICA 等に働きかけを行う。海外へのインフラ輸出において、地形・地質などに応じた土構造物の長期的な維持管理技術を包含した内容で国際展開を図りたい。

⑫ 研究成果の道路行政への反映

(1) 研究成果による道路行政への貢献内容

路線毎に図-8 に示すように広域の道路変状を定期的にスクリーニングが可能となり、変状の多い箇所を重点的に点検、詳細調査を行うことができる。このことにより、効率的に道路土構造物の点検・維持管理を行うことができ、点検費用の縮減と路線全体の均一的な耐久性の向上を図ることができる。

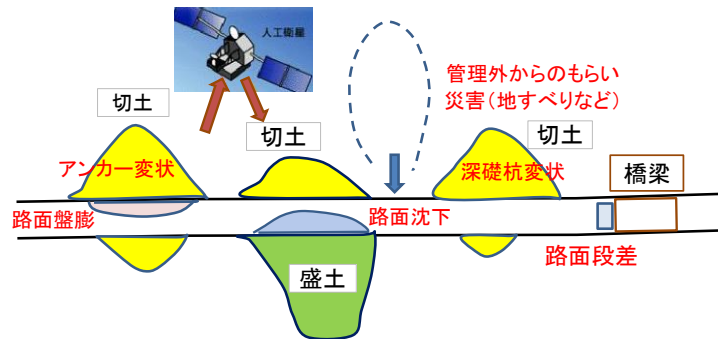


図-8 広域道路変状を一括してスクリーニング

(2) 研究成果が果たす役割、成果の実用性

過去に遡ってデータベースを作成することにより、広域にわたって劣化しつつある道路土構造物の性能・対策優先度を評価し、道路施策の点検・維持管理の効率化を図ることができる。

広域の道路変状を一括して定期的にモニタリングした結果として急激な変状箇所が抽出された場合には、現地踏査を行うだけでなく GPS 測量、3 次元レーザー測量、UAV 写真測量技術を組み合わせた詳細測量を実施することにより変状計測の精度を向上させることで、災害の発生前に、調査、対策工の施工を効率的に行うことができる。

⑬ 自己評価

前述した「研究目的の達成度、研究成果、今後の展望、道路政策の質の向上への寄与、研究費の投資価額」についての自己評価を以下に示す。

- ・ 研究の達成度に関しては、ほぼ当初の目的を達成することができたと考えられる。特に現場の計測データを国交省、NEXCO から貸与していただき、「⑧研究成果」に示すように研究した内容を現場で実証することもでき、現場での適用性が高い研究が達成できたと考えている。
- ・ 研究成果に関しては、令和2年度で研究成果を実務に適用するためにマニュアルを作成した。マニュアルの作成にあたっては、道路管理者である国交省及びNEXCO に査読依頼を出し、種々の意見をいただき、それを反映させることにより実務に供することができる研究成果をまとめることができた。
- ・ 今後の展望に関しては、より多くの現場で本技術を適用し、より良いマニュアルへの改善が望まれる。また、東南アジアを中心に道路の維持管理に活用してもらうため、国際学会・学術誌での論文発表に加えて、JICA 等に働きかけを行う予定である。これにより海外へのインフラ輸出において、地形・地質などに応じた土構造物の長期的な維持管理を包含した内容での国際展開ができる。
- ・ 道路政策の質の向上への寄与に関しては、広域の道路変状を定期的にモニタリングが可能となり、変状の多い箇所を重点的に点検することができる。このことにより、効率的に道路土構造物の点検・維持管理を行うことができ、点検費用の縮減と路線全体の均一的な耐久性の向上を図ることができる。
- ・ 実際の道路変状箇所との比較し、衛星 SAR の課題と優位性を検証することができ、実務に適合した研究成果を得ることができたと考え、本研究に対する投資効果は相当に高いものと考えている。