

道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成果報告レポート
No.29-9

研究テーマ

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

研究代表者：東京大学教授

古関 潤一

共同研究者：東京大学教授

竹内 渉

東京大学准教授

清田 隆

基礎地盤コンサルタンツ（株）

柳浦 良行

基礎地盤コンサルタンツ（株）

吉川 猛

基礎地盤コンサルタンツ（株）

野口 ゆい

令和3年6月

新道路技術会議

目 次

研究概要（様式3）	P1
第1章 はじめに	P3
1.1 研究の概要	P3
1.2 研究の背景、目標及び成果	P3
1.3 研究の実施体制	P5
第2章 衛星SARの道路土構造物等の維持管理への適用に関する概説	P6
2.1 衛星SARによる道路土構造物の地盤変動評価における類似手法との比較	P6
2.2 道路土構造物等の維持管理の課題と衛星SARの活用	P7
第3章 衛星SARを用いた道路土構造物の維持管理手法	P9
3.1 衛星SARによる地盤変位測定のお考え方	P9
3.2 具体的な作業手順	P9
3.3 衛星SARデータの選定	P10
3.4 衛星SAR干渉解析	P13
3.5 衛星SAR干渉解析結果の整理	P16
3.6 解析結果の評価	P17
3.7 衛星SARを活用するうえでの留意点	P24
第4章 道路土構造物への衛星SARの活用事例	P27
4.1 道路土構造物等の維持管理における効果的な適用方法	P27
4.2 衛星SAR導入の初期・運用コストからの導入上の課題	P30
4.3 一路線（広域）で活用する場合（主に斜面の道路土構造物を対象）	P31
4.4 災害発生の可能性のある箇所、発生した箇所等に集中的に衛星SARを活用した事例	P37
4.5 海外の衛星（Xバンド、Cバンド）を利用した場合の活用事例	P38
4.6 のり面からの湧水箇所検出の試み	P39
4.7 衛星SARの活用マニュアルの作成	P40
第5章 まとめ	P42
5.1 得られた研究成果	P42
5.2 今後の道路政策への提案	P42
【資料編】	
資料1 衛星SARの種類と特徴	P44
資料2 任意な断面における挙動（水平、鉛直）の推定法	P45

「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」（平成 29 年度採択）

研究概要

番号	研究課題	研究代表者
29-9	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	東京大学 教授 古関 潤一

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研究開発。

1. 研究の背景・目的（研究開始当初の背景・動機、目標等）

広域の道路土構造物の点検・維持管理における現状の技術的課題としては、

- ・ 「築造当時からの変状に関するデータベースがなく（課題 1）」、「点検は目視中心で定量的な把握困難である（課題 2）」ため、変状範囲、変位量は詳細調査をしないと不明
- ・ 「草木で変状範囲が見つけづらい（課題 3）」ため、特に管理外の変状確認が困難
- ・ 「注意すべき地形地質箇所の変動度が明確でない（課題 4）」ため、点検・対策の優先順位が不明であった。これらの課題を解決し道路構造物の点検・維持管理の効率化を図るため、「衛星 SAR 差分干渉解析の適用条件の明確化」、「解析された地盤変状の地盤工学的考察」、「活用マニュアルの作成」を目標として研究を進めた。

2. 研究内容（研究の方法・項目等）

平成 29 年度は、衛星 SAR 差分干渉解析技術の道路土構造物への適用性を検討するため、地すべり範囲や軟弱地盤上の盛土の沈下に関して、実測値と解析値を比較し適用可能であることを示した。

平成 30 年度は、尾道松江道で斜面崩壊や地すべりが進行している吉舎地区、高野地区等において、変状範囲の妥当性、崩壊の前兆現象の再現性、任意断面での水平・鉛直変位解析の実測値との整合性を確認した。また、NEXCO の高盛土（宝塚地区）において GNSS で得られた地盤変状計測値と解析値を比較し妥当性を検討した。

令和元年度は、広域の一路線として尾道松江道を選定し、変状箇所のスクリーニングを行い、変状箇所のランク区分、今後の対応方針の検討、変状箇所の現地確認による地盤工学的な考察を行った。

令和 2 年度は、過去 3 年間の研究成果を取りまとめて活用マニュアル案を作成し、道路管理者（国交省、NEXCO）に意見照会を行い、実際の現場で活用できるようなマニュアルを完成させた。

3. 研究成果（図表・写真等を活用し分かりやすく記述）

(1) 道路土構造物の維持管理と衛星 SAR の活用

- ・ のり面、地すべり、大規模切土、軟弱地盤上の盛土に対して、管理外も含んだ変状範囲・活動状況の把握、斜面崩壊の前兆現象の把握、沈下の定期計測の補完の可能性を示した。
- ・ 広域な一路線のスクリーニングに対して、変動ランク区分による優先順位と注意すべき地形地質情報との組み合わせによる今後の対応方針の策定、定量的な計測の可能性を示した。
- ・ 災害対応に関して、変状範囲の把握による最小限の除草、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無い現地踏査、時系列的挙動情報による動態観測箇所の最適化の可能性を示した。

(2) 道路土構造物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

衛星SAR干渉解析方法としては、「1ペアの衛星SAR干渉解析（D-InSAR解析）」、「時系列解析

(SBAS、PS-InSAR解析)」があり、そ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」などが有効である。対象土構造物、目的に応じて使い分ける方法を示した。

(3) 解析事例

1) 変状範囲の把握

変状箇所における衛星 SAR による解析値と現地での調査結果の比較を尾道松江道の吉舎地区で行った結果を図-1 に示す。変状範囲はほぼ一致していることがわかる。

2) 変状の前兆現象の把握

2018 年 7 月豪雨で発生した尾道松江道の高野地区での地すべりに対して、豪雨前の前兆現象を評価し図-2 に示す。豪雨前にのり面アンカー工がない区間で地盤変状が発生していることが分かる。また、対象のり面以外で「変状あり」と解析され、現地確認したが変状は無かった。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ためであると考えられる。

3) 広域の一路線での適用例

一路線（広島県内の尾道松江道）において衛星 SAR 干渉解析によるスクリーニングを行った。図-3 に示すように各箇所の変動状況を変動 A～D に 4 区分し、注意すべき地形地質と合わせて評価した。



図-1 斜面崩壊範囲の現地踏査と衛星 SAR との比較

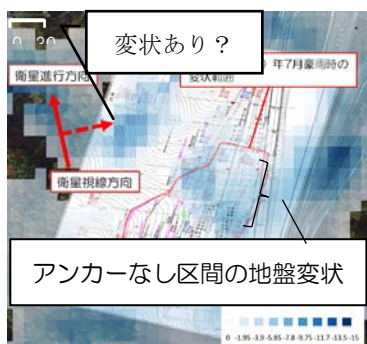


図-2 2018 年 7 月豪雨前に前兆現象の可能性のある範囲

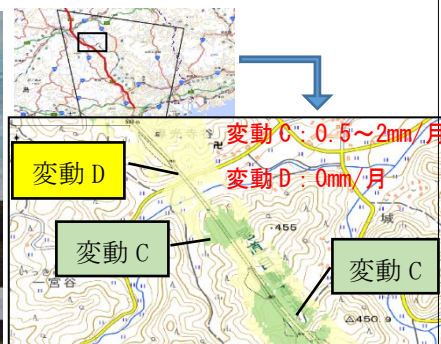


図-3 一路線（尾道松江道）におけるスクリーニング

4. 主な発表論文（研究代表者はゴシック、研究分担者は下線）

- ・ 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
- ・ 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
- ・ 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

5. 今後の展望（研究成果の活用や発展性）

路線毎に広域の道路変状を一括して定期的にスクリーニングすることが可能となり、変状が多い箇所を重点的に点検することができる。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。

6. 道路政策の質の向上への寄与（研究成果の実務への反映見込み等）

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。

7. ホームページ等（関連ウェブサイト）

https://www.kiso.co.jp/services/remotesensing/analytic_technology.html

第1章 はじめに

1.1 研究の概要

本研究は、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ことを目的とした研究開発である。

1.2 研究の背景、目標及び成果

(1) 研究の背景

広域の道路土構造物の点検・維持管理における現状の技術的課題としては、図-1に示すように「構造物の変状履歴に関して築造当時からデータベースがない（課題1）」、「点検は、目視点検が主流であり年度毎に点検技術者が異なることが多く、変状の進行度を定量的に把握することが困難（課題2）」ため、変状範囲や変位量は詳細調査をしないと不明であった。「草木で変状範囲が見つけられない（課題3）」ため、特に管理外の変状は確認が困難であった。広域の変状箇所の進行速度、地盤工学的原因が分からず「点検・対策の優先順位が不明（課題4）」であった。

著者らは道路土構造物の点検・維持管理の現状の課題を解決するため、衛星SAR差分干渉技術を活用することを考案し、その適用性等の研究を行った。衛星SAR差分干渉技術は、従来、土木分野で活用されていたリモセン技術と異なり、1)広域の全天候・昼夜観測、2)レーダー波の位相利用、3)植生透過、などの特徴があり、地盤の

変状を「数メートルのメッシュ、5mm程度」の検出分解能で把握することが可能である。

(2) 研究の目標と成果

上述の課題1~4を解決し、道路施設の点検・維持管理の効率化を図るため、以下の目標を立てて研究を進め（図-2参照）、その成果の概要は以下のとおりである。

a) 衛星SAR差分干渉解析の適用条件や適用限界の明確化(目標1)

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

b) 解析された地盤変状に対して地盤工学的考察(目標2)

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。

c) 活用マニュアルの作成(目標3)

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。

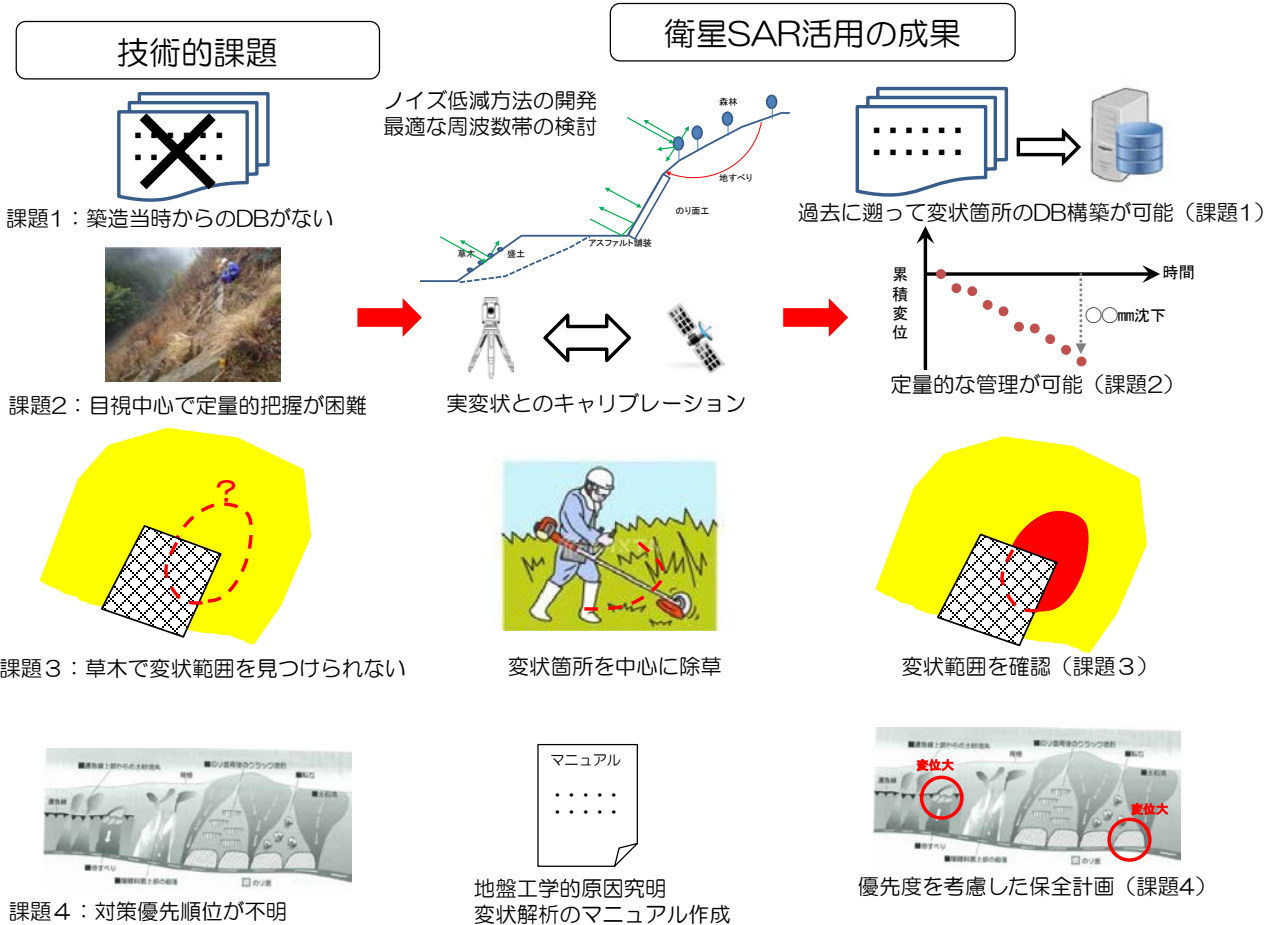


図-1 広域の道路土構造物の点検、維持管理の技術的課題と衛星SAR活用の効果

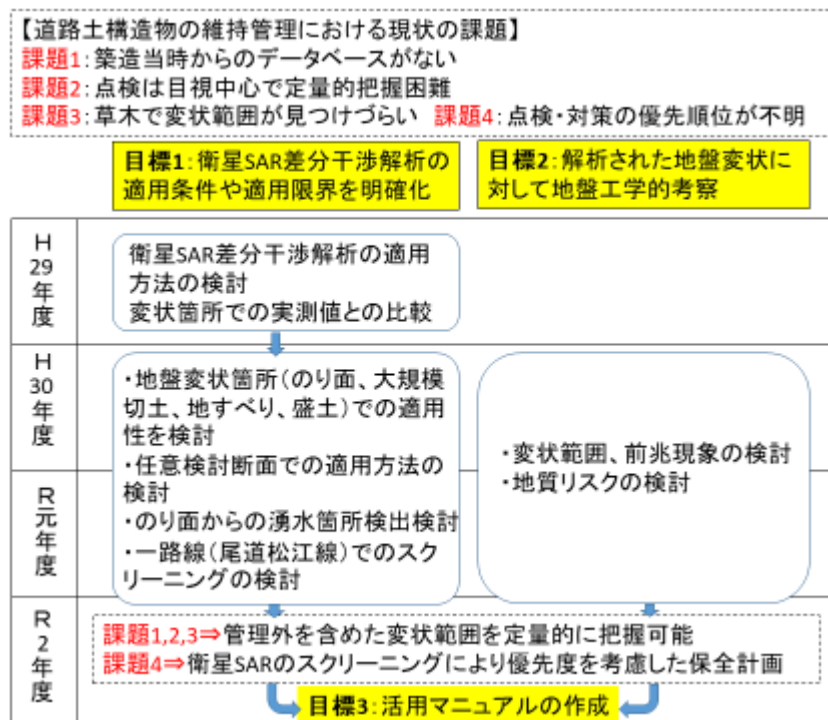


図-2 広域の道路土構造物の点検、維持管理の技術的課題に対する研究目標

1.3 研究の実施体制

研究の実施体制を図-3及び表-1に示す。

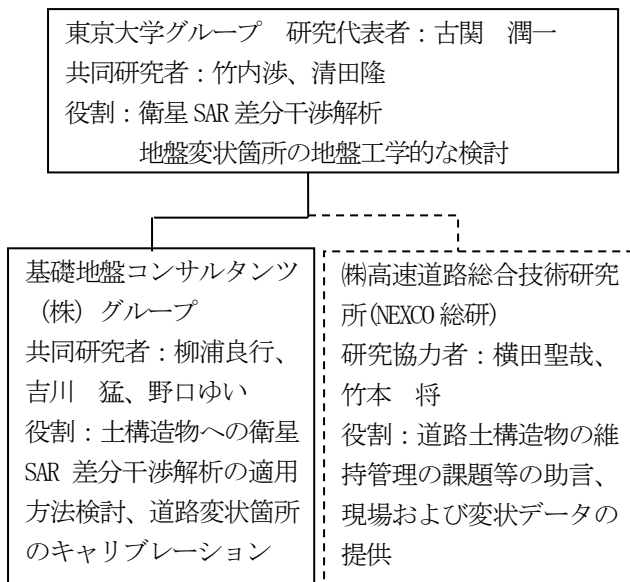


図-3 研究実施体制

表-1 研究者一覧

研究者氏名	分担研究内容	所属・役職	
古関潤一	研究全体の総括	東京大学	教授
竹内渉	衛星SAR解析		教授
清田隆	地盤工学的検討		准教授
柳浦良行	実用化の検討	基礎地盤コンサルタンツ (株)	社長
吉川猛	衛星SAR解析		課長
野口ゆい			課員

第2章 衛星SARの道路土構造物等の維持管理への適用に関する概説

2.1 衛星SARによる道路土構造物の地盤変動評価における類似手法との比較

衛星 SAR は、広域の全天候・昼夜観測、レーダー波の位相利用、植生透過などの特徴がある。このため従来、土木分野で活用されている表-2、図-4 に示すように類似の地盤変動評価技術と比較し、以下の点で特徴を有する。

(1) 航空写真

航空写真を実体視することにより視野に入った各事物の水平位置関係や比高等を観察し、写真上で計測して地図化する。このように空中写真を利用して土地の地理的な違い、差等を読み取っていく作業を「空中写真判読」と呼び、注意すべき地形地質の判読等に利用することができる。しかし、注意すべき地形地質等の活動状況を把握するには再度異なる時期の航空写真が必要である。また、写真で判読できる地盤変動は、大規模な豪雨や地震後であり、前兆現象を捕らえることは困難である。これに対し、衛星 SAR では、地すべりなどのゆっくりした地盤変動では前兆現象を計測することが可能な場合がある。

(2) 航空レーザー計測 (LP 測量)

広域の地形データを得られる航空レーザー計測は、CS 立体図や傾斜量図を作成することにより、注意すべき地形地質や落石箇所などの特定に利用することができる。しかし、注意すべき地形地質箇所等の活動状況を把握するには、再度異なる時期の航空レーザー計測が必要であ

り、新たに発生しつつある斜面崩壊等を航空レーザー計測では把握することができない。衛星 SAR は、定期的にデータの取得が可能であり、航空レーザー計測等で判別された注意すべき地形地質箇所の現在の滑動状況や新たに発生しつつある斜面崩壊などの前兆を捕らえることができる。ただし、豪雨や地震等で前兆現象なしに発生する斜面崩壊については、衛星 SAR でも不可能である。

(3) 通常測量、GNSS 測量

ターゲットを設置した箇所での変動を正確に測量できるが、広域あるいはターゲット以外の点の挙動把握には不向きである。衛星 SAR は広域の斜面全体の挙動を把握できる特徴がある。

(4) TLS

地上レーザースキャナを用いた数値地形測量であり、詳細な地形図を作成することができる。地盤の変動状況を把握するためには、再度異なる時期に測量を行う必要がある。しかし、レーザーが直線的に届く範囲での計測は可能であるが、草木の影響、広範囲の計測には不向きである。衛星 SAR は広域の斜面全体の挙動を把握できる特徴がある。

(5) MMS

簡易に道路周辺の地形や附帯構造物の形状を測量することができる。しかし、航空 LP 測量と同様に、これらの挙動を捕らえるには再度異なる時期のデータが必要である。また、レーザースキャナーで測定できる範囲は、

道路近傍に限られており、道路上からは見えない斜面の変状を捕らえることには不向きである。これに対し衛星

SAR では、道路近傍だけでなくその周辺の地盤の挙動を定期的に捕らえることができる。

表-2 地盤変動評価における類似手法との比較

類似技術	概要	特徴
衛星SAR	衛星データを活用して広域の地盤変動を取得	電磁波の波長の変化から広域の地盤の変動を測量する方法である。
航空写真	航空写真を活用して注意すべき地形地質の判読	空中写真を実体視することで空中写真判読を行う方法である。
航空レーザー計測 (LP測量)	航空機やドローンを使用して、広域の地形情報を取得	点群データから広域の地形情報を測量する方法である。
通常測量	現地に設置したターゲットを直接測量	ターゲットを設置した地点の三次元変動を直接測量する方法である。
GNSS測量	現地にGNSS測量機器を設置し衛星データを活用してその地点の変動を測量	GNSSを設置したターゲット地点の三次元変動を自動的に測量する方法である。
TLS	地上レーザースキャナを用いた測量	三次元点群データより地盤の変動を直接測量する方法である。
MMS	車両に装着したレーザースキャナーで計測する3次元測量	点群データから道路周辺の地形や附帯構造物の形状を測量する方法である。

2.2 道路土構造物等の維持管理の課題と衛星SARの活用

各道路土構造物の管理において、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 の活用例を表-3 に示す。また、これらの土構造物が連続する一路線での道路維持管理の現状の課題と衛星 SAR の活用例を表-4 に示す。

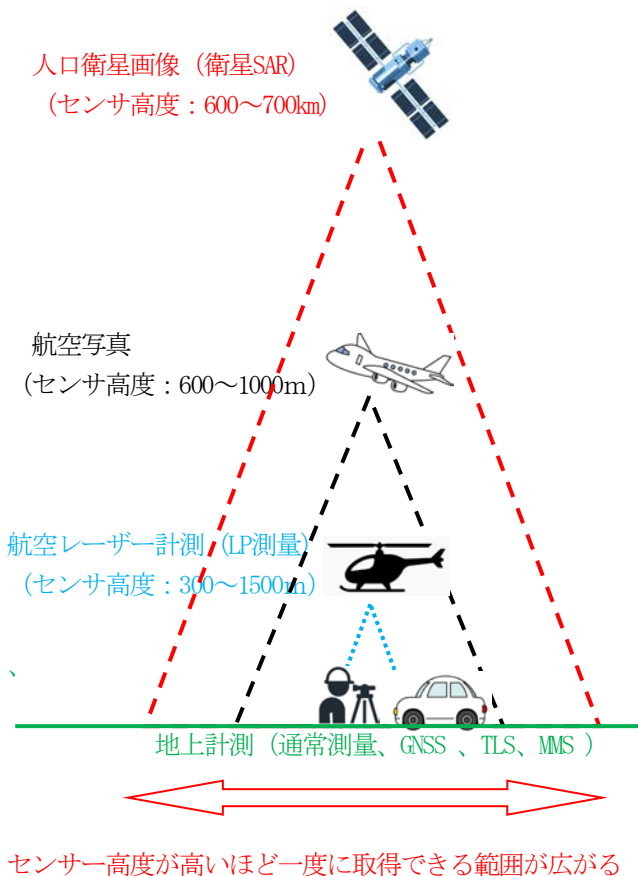


図-4 類似計測手法との比較

表-3 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

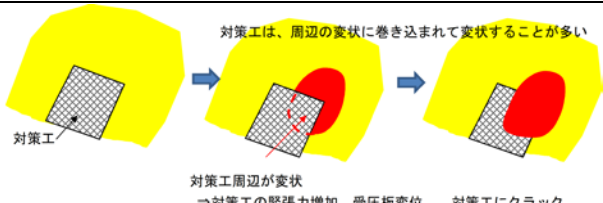
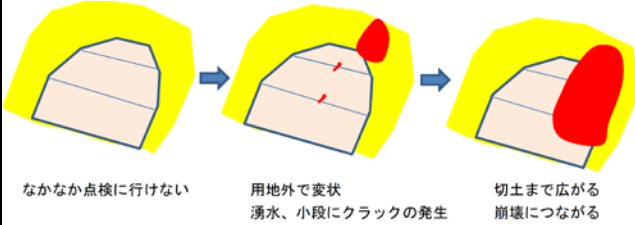
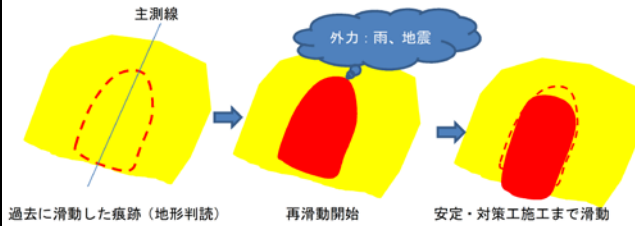
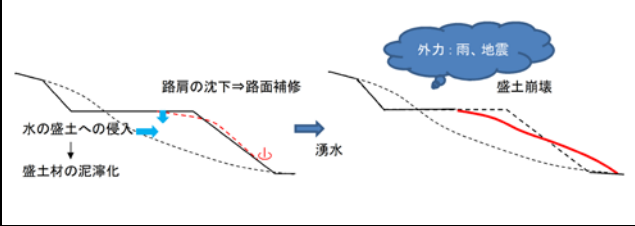
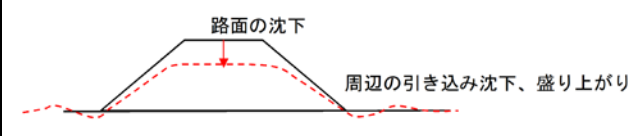
土構造物	変状の特徴	現状の課題と衛星 SAR の活用例
のり面対策工 (アンカー)		<p>【現状の課題】 上部の変状を確認するのに時間を要し、管理外からの変状を確認することができない。</p> <p>【衛星 SAR の活用例】 衛星 SAR では、対策工周辺の変状も捕らえることができ、変動が大きい箇所が抽出された時点で現地を確認する。</p>
大規模切土 (吹付、法枠含む)		<p>【衛星 SAR の活用例】 衛星 SAR では、対策工周辺の変状も捕らえることができ、変動が大きい箇所が抽出された時点で現地を確認する。</p>
地すべり		<p>【現状の課題】 地すべり土塊の範囲は詳細調査をしないと分からない</p> <p>【衛星 SAR の活用例】 衛星 SAR では、地すべり土塊の範囲の特定ができ、土塊の活動状況を把握することができる。</p>
片盛片切又は 谷埋め盛土		<p>【現状の課題】 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。</p> <p>【衛星 SAR の活用例】 衛星 SAR では盛土材の脆弱化や水位上昇に伴う路肩、法面の変状を捕らえることができる。変状の規模に応じて現地踏査を行えばよい。</p>
軟弱地盤上の 盛土、高盛土		<p>【現状の課題】 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</p> <p>【衛星 SAR の活用例】 定期的な沈下計測を補完する手法としても有効である。</p>

表-4 一路線における道路維持管理における現状の課題と衛星 SAR の活用例

道路土構造物	現状の課題	衛星 SAR の活用例
一路線	道路の管理延長が長く、一律な詳細な定期点検が難しい	広域の地域を一度、衛星 SAR で地盤変動に応じたスクリーニングを行い、詳細点検箇所の抽出、点検間隔の間引きなどの判断材料得ることができる。
	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	衛星 SAR では、定期的に地盤変動を定量的に捕らえることができ、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	衛星 SAR で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、解析された変状を確認することができる。
	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 (道路土工指針) 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。

第3章 衛星SARを用いた道路土構造物の維持管理手法

3.1 衛星SARによる地盤変位測定の考え方

衛星 SAR から地表に向かって発信した電波は、常に一定の波長で進む。時期を別にして、同じ位置から電波を発信した場合、地表面の変位に応じて電波の位相差が生じる（図-5）。そこで、2 回の電波の位相差を読みとることにより、地表の変位量を把握することができる。いわば、電波を巻尺代わりとし、2 時期の巻尺（電波）の差を求めることが衛星データによる地表面変位測定の原理である。

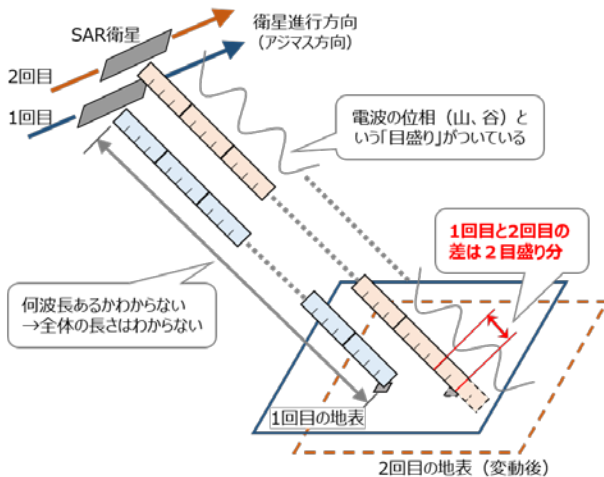


図-5 衛星 SAR による地盤変位測定の原理¹⁾
(国土地理院)

現在の技術において、衛星は高度な制御により軌道をコントロールされているものの、実際には高速で地球を周回するため、全く同一地点を通過するという事はほ

ぼない。そのため、軌道上の衛星位置は、できるだけ近接していることが必要である。

解析では、異なる2時期の衛星データから初期干渉画像を作成した後に種々の処理を行い、地盤高の差を算出する（=1ペアの干渉解析）。観測された衛星データには、大気中の水蒸気の影響などによるノイズを含む可能性があることから、算出した複数の地盤高の差を重ね合わせることで、ノイズ等の誤差の低減を図る（=時系列解析（スタッキング解析））。さらに、一路線でのスクリーニングに適用するため、撮影方向の異なる解析結果を組合せ、地盤変動を鉛直方向と東西方向に分離し（2.5次元解析）、得られた鉛直変位より斜面方向の変位を求める方法を提案した。また、任意断面方向での地表面変位（水平、鉛直ベクトルに分離）を求めることが多いため、任意断面方向への変換する方法を示した（任意断面方向への変換解析）。

3.2 具体的な作業手順

衛星SARによる地盤変動解析のための作業手順の概要は、主に次のようになる（図-6）。

【衛星SARデータの選定】：解析対象箇所の衛星データを選定（位置、期間）し、購入する。

【衛星SAR干渉解析】1ペアの干渉解析あるいは時系列解析を行う。

【衛星SAR干渉解析結果の整理】：2.5次元解析や任意断面方向への変換解析を行い、変位の範囲、変位速度の経時変化を整理する。。実測値がある場合には、対比し精度の検証を行う。

【評価】：変位速度から変動区分を行い、一路線の優先順位のスクリーニングを行い、地盤工学的考察を行った後、詳細調査を行うべき箇所を抽出する。地盤変位量の

データベースとして整理する。

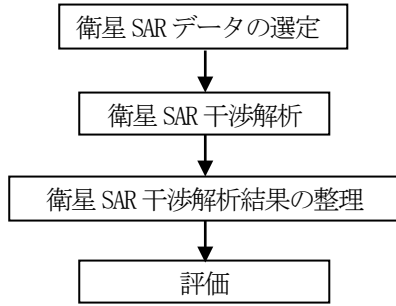


図-6 具体的な作業手順

像) に関して、解析可能な期間は、衛星が打ち上げられた時期によって異なり、表-5に示すとおりである。

表-5 各衛星の干渉 SAR 解析可能期間

衛星 SAR	観測波長	解析可能期間
ALOS-1 (日本)	Lバンド	2006年 (H18) ～2011年 (H23)
ALOS-2(日本)		2014年 (H26) ～現在
Sentinel-1 (EU)	Cバンド	2014年 (H26) ～現在
TerraSAR-X (独)	Xバンド	2007年 (H19) ～現在

3.3 衛星SARデータの選定

(1) 観測期間の設定

干渉 SAR 解析を行うことができる衛星 SAR データ (画

(2) 衛星SARデータの選び方

衛星 SAR データは、対象とする道路土構造物等や観測期間に応じて適切なデータを選定する必要がある。

表-6 SAR に使用されるマイクロ波の周波数特性等

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)
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)
		3×3m	50km		
Sentinel-1 (EU: ESA)	Cバンド (約 6cm)	5×20m	250km	月 2～3 回	日本全域 (無料)
TerraSAR-X (独*DLR)	Xバンド (約 3cm)	1×2m	10km		都市域中心 (約 50 万円～/枚)



都市域コヒーレンス割合



山地コヒーレンス割合

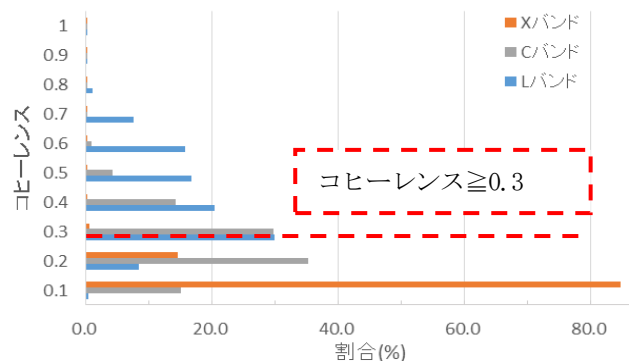
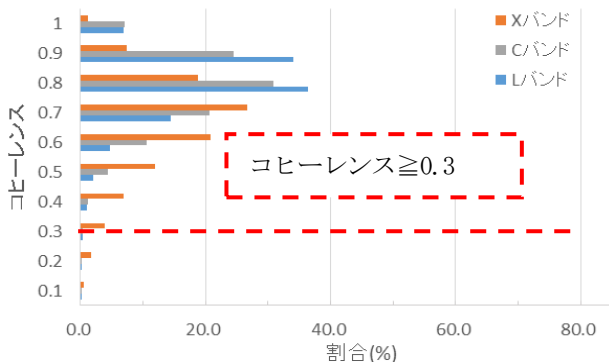


図-7 都市部と山地部の衛星SARによるC、X及びLバンドのコヒーレンスの比較

a) 衛星SARに使用されているマイクロ波の周波数特性

衛星 SAR に使用されているマイクロ波)には、周波数の異なる C、X 及び L バンドがあり、表-6 に示すような特徴を有している。

衛星SARでは、干渉している度合いを示すコヒーレンス(干渉性)という指標を活用して、解析の有効性を評価している。コヒーレンスは0~1の指標を取り、コヒーレンスが0.3以上ないと干渉性が悪く有効な解析結果を得ることはできない。図-7に都市部と山地部におけるC、X及びLバンドのコヒーレンスの比較結果を示す。都市部では、いずれのバンドのコヒーレンスも0.3以上が90%以上あり、問題なく使用できることが分かる。しかし、草木の影響がある山地部では、コヒーレンス0.3以上の割合がXバンド=0%、Cバンド=30%、Lバンド=80%であり、Lバンドが有効であることが分かる。

観測波長に応じて、地表面の変位測定の精度は以下のように影響を受けるため、表-7 に示すように構造物毎に異なるバンド・衛星を使用できる。

- ・ 波長が短いほど(Xバンド)、地表面の変位測定の精度は理論的には良い。
- ・ 波長が短いほど、樹木などの地表物の影響を受け干渉不能となる可能性がある。言い換えれば、波長が長いほう(Lバンド)が樹木を透過しやすい。
- ・ 衛星は南北方向に移動しながら横向きに撮影(衛星視線方向は東西)するため、地盤の南北方向の挙動を観測ができない場合がある。

表-7に示すようにJAXAのLバンドが、どの道路土構造物等にも適用できることが分かる。C、Xバンドは、草木の影響の無い箇所において、計測間隔を短くする必要がある場合等に有効である。

表-7 道路土構造物等毎の観測波長使用例
(変位測定の精度、分解能を考慮)

観測波長	Lバンド	Cバンド	Xバンド
法面(アンカー)	◎	△	△
地すべり	◎	×	×
大規模切土	◎	△	△
片盛片切又は谷埋め盛土	○	△	△
軟弱地盤上の盛土(路面)	○	◎	◎
軟弱地盤上の盛土(法面, 周辺地盤)	◎	△	△

◎: 最適、○: ほぼ可能、△: できる場合がある、
×: 適用不可

b) 解析に用いる衛星SAR

対象地域をカバーし、且つ、観測対象期間内に複数回の衛星データが取得され、対象土工構造物等に合った衛星を選定する。衛星データの諸元等は、当該衛星の運用期間のサイトで検索することができる。

調査計画の策定に際しては、対象地域で観測された衛星データが存在することを確認し、解析に用いる衛星を選択する。

c) 衛星SARデータ数の把握

蓄積データの中から、衛星 SAR 干渉解析に用いる衛星データを確定する。この選定に当たっては、地盤変状が進行する季節を考慮すると共に、観測偏波や衛星の基線長など、衛星 SAR 干渉解析上、考慮すべき技術的事項がある。そのため、

- ・ 解析に用いる衛星
- ・ 干渉ペア数を考慮したデータ数

について設定する。

具体的なデータ数の例は、表-10(後出)に示す解析手法に応じて以下の通りである。ここでの必要データ数は、対象地域が1枚の画像に全て入ること、アセンディング、ディセンディングの両方で解析を行うこと、ALOS-2を利用することを前提としている。

- ・ 1ペアの衛星 SAR 干渉解析: 異なる2時期×2枚=4枚
- ・ 時系列解析: 異なる20時期以上×2枚=40枚以上
(ALOS-2では約5年分以上の画像データ)

d) 衛星SARデータの解析可能範囲

ある対象路線の地盤変動量を解析する場合、1シーンの衛星データが、対象地域全域をカバーしているとは限らないため、1時期について複数シーンが必要となる場合がある。

表-11(後出)に示す2.5次元解析や任意断面方向への変換解析の際には、対象区間を西から観測する軌道と東から観測する軌道とを組み合わせるため、観測方向・観測方位にも留意が必要である。表-8に衛星軌道・観測方向と観測方位との関係を示す。衛星軌道は北行軌道と南行軌道の二つの軌道があり、観測方向は衛星の進行方向に対して右側観測が基本であり、左側観測は限定的である。

表-8 衛星軌道・観測方向と観測方位

衛星軌道	観測方向	観測方位	備考
北行軌道	右側観測	西から東	
北行軌道	左側観測	東から西	限定的
南行軌道	右側観測	東から西	
南行軌道	左側観測	西から東	限定的

2.5次元解析や任意断面方向への変換解析を行う場合は、図-8に示すように、二つの軌道のいずれも観測している範囲が解析可能範囲となる。

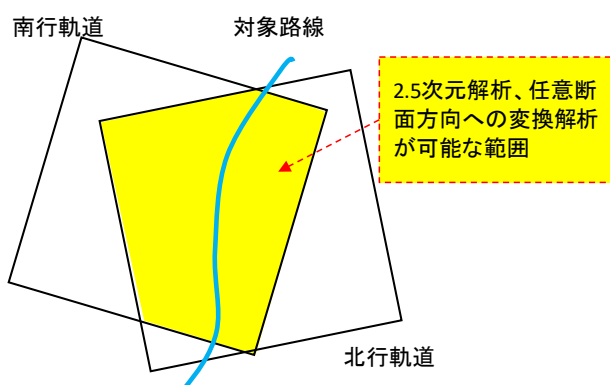


図-8 2.5次元解析や任意断面方向への変換解析の解析可能範囲の例

e) 衛星SAR干渉解析に用いる衛星SARデータの確定と留意点

選定した観測パス・観測フレームの衛星データから、衛星SAR干渉解析に用いる干渉ペアを確定する。

衛星SAR干渉解析は、使用する衛星データによっては、精度の低下などが発生することがある。衛星データ選定時に考慮すべき点は以下の通りである。

・ 衛星SAR干渉解析を行う衛星データの観測モード

干渉SAR解析およびスタッキング解析を行うためには、観測時の条件は、同じ仕様とする必要がある。この条件を表-9に一覧する。

・ 基線長

地球観測衛星は全く同一の地点を通過することはなく、異なる時期における衛星データの取得位置は、若干、差が生じる。衛星位置の差を基線長（図-9中のB）と言う。衛星SAR干渉解析を行う際には、2時期の軌道の差である垂直基線長（図-9中のB_{perp}）が短いことが望ましい。垂直基線長が長いと、DEM（数値標高データ）の誤差の影

響を強く受けるほか、干渉性の低下により解析の精度が下がる。そのため、衛星データの購入時には衛星SAR干渉解析を行うペアの垂直基線長が短いものを選定することが望ましい。ALOS-2は、非常に高い精度で軌道の調整を行っているため基線長が500m以下に抑えられており、十分に短く、どの組合せでも高い干渉性が得やすいため、ほとんど全ての観測された衛星データで干渉SAR解析を行うことができる。

・ 衛星データの時期

動態観測結果と比較するため、衛星データは動態観測の基準日に近いことが望ましい。さらに、衛星SAR干渉解析に用いるデータは、地盤変動が進行している期間挟むように選定する必要がある。

・ 衛星観測時の気象条件

大気中の水蒸気が多い時の観測データを用いると、衛星SAR干渉解析結果におけるS/N比（本来の地盤変動量と解析誤差を生じるノイズ成分の比）が悪化しやすい。このため、解析に用いる衛星データの選定にあたっては、データ観測時間帯の気象条件、特に降雨データ（Xバンド降雨データ）などを確認し、降雨が確認されれば解析対象データから除外することが望ましい。また、用いる場合は解析精度が悪化しやすいことに注意する必要がある。

表-9 衛星SAR干渉解析を行うために統一する必要があるデータ仕様

確認する仕様	説明
衛星進行方向	北行軌道と南行軌道(36)がある
観測方向)	センサで観測する方向のこと。進行方向に対して右側観測と左側観測(37)がある。右側観測が基本とされる。
観測パス番号	観測範囲のパス（東西）の番号
中心フレーム番号	観測範囲のフレーム（南北）の番号
観測モード	観測データのモードのこと。分解能や観測範囲が変化すると干渉しない。
オフナディア角	衛星が地表面を観測する時の傾き角度
偏波	観測する偏波のこと。HH、HV、VH、Wが存在する。解析を行うとき、使用するデータが同じ偏波でなければ干渉しない。

3.4 衛星SAR干渉解析

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、表-10 に示すように「2 回の観測データを用いた 1 ペアの衛星 SAR 干渉解析」、「時系列解析（スタッキング解析）」がある。

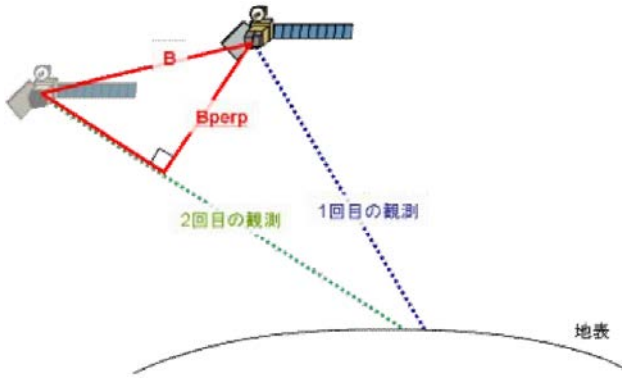


図-9 衛星の2時期の軌道の差（基線長）の成分²⁾
(国土地理院)

表-10 衛星 SAR 干渉解析の種類

解析方法	概要	特徴
1 ペアの衛星 SAR 干渉解析	2 時期の衛星データ (1 ペア) による衛星 SAR 干渉解析。衛星データから初期干渉画像を作成し地形による成分や軌道による成分を除いて地盤の変動量像を作成する。この地盤変動量には大気遅延による誤差等を含んでいる。	<p><長所></p> <ul style="list-style-type: none"> ・2 時期の衛星データだけで解析できる。 <p><短所></p> <ul style="list-style-type: none"> ・大気遅延などの誤差が多く含まれる ・地盤変動量は、衛星視線方向 (ALOS-2 では概ね東西方向で水平から約 51°) である。
時系列解析	解析手法としては、SBAS と PS-InSAR がある。SBAS では複数ペアの衛星 SAR 干渉解析結果を合成することで、大気遅延の誤差等を低減し、精度を上げることができる。PS-InSAR は、良質なピクセルのみ計算対象とすることで精度良い時系列変位を求めることができる。	<p><長所></p> <ul style="list-style-type: none"> ・大気遅延などの誤差を低減することができる。 ・合成する衛星データ数が多いほど精度が向上する。 <p><短所></p> <ul style="list-style-type: none"> ・同一の衛星軌道で複数回の観測が必要となり、1 ペアの衛星 SAR 干渉解析よりも多くのデータが必要となる。 ・地盤変動量は、衛星視線方向である。

表-11 衛星SAR干渉解析結果の整理方法

整理方法	概要	特徴	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。	<p><長所></p> <ul style="list-style-type: none"> ・後作業なく簡便である。 <p><短所></p> <ul style="list-style-type: none"> ・特定方向の変位 (水平、鉛直) を求めることができない 	地すべり、斜面崩壊の影響範囲を推定する場合
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。	<p><長所></p> <ul style="list-style-type: none"> ・大気遅延などの誤差を低減することができる。 ・水平移動成分を除き、鉛直方向の変動成分を抽出できる。 <p><短所></p> <ul style="list-style-type: none"> ・異なる衛星データが必要となり、解析可能範囲が狭くなる。 	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、斜面のスクーリングなど)
任意な検討断面方向への変換解析	撮影方向の異なる2つの時系列解析結果を組合せ、任意断面内に投影し、地盤変動量を水平成分と鉛直成分に区分する。	<p><長所></p> <ul style="list-style-type: none"> ・大気遅延などの誤差を低減することができる。 ・任意断面方向の水平・鉛直方向の変動成分を抽出できる。 <p><短所></p> <ul style="list-style-type: none"> ・異なる衛星データが必要となり、解析可能範囲が狭くなる。 ・南北方向では精度が落ちる。 	任意な検討断面での水平、鉛直変位に着目する場合

解析結果の整理方法としては、表-12に示すように「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」などがある。変位量に着目しない地すべり範囲の検討では、解析結果をそのまま（衛星視線方向の変位）用いることができる。沈下が卓越する道路土構造物（例えば、軟弱地盤上の盛土など）では、2.5次元解析（水平変位は東西成分）を用いることができる。また、2.5次元解析では道路土構造物の方向に関係なく東西南北で同精度の沈下量を求めることができる特徴を活用して、斜面の地盤変動に対して鉛直変位と斜面の平均勾配（例えば1:1⇒水平から45°の勾配）から斜面に沿った変位量を推定することができ、一路線のス

クーリングでは有効である。スクーリングの結果、変動A（活発な活動中）、変動B（緩慢な運動中）と評価された場合には、より詳細な斜面の地盤変動を求めるため、任意断面での水平、鉛直方向の変位を求めることが有効である。目的や対象構造物によって適切に使い分ける必要がある。

(1) 1ペアの衛星SAR干渉解析

1ペアの衛星SAR干渉解析とは、異なる2時期の衛星データ（1ペア）を用いた最も基本的な解析であり、その流れを図-10に示す。

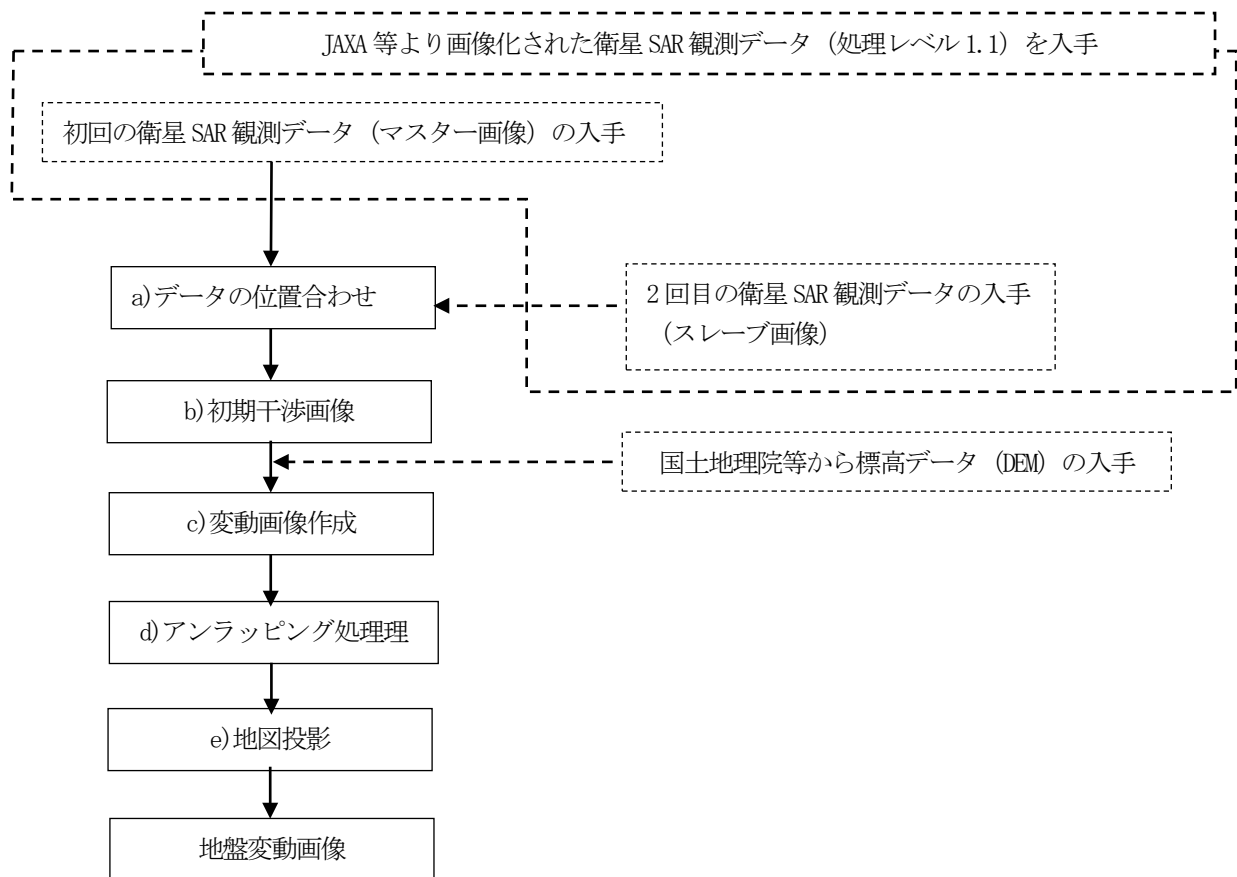


図-10 1ペアの衛星SAR干渉解析の流れ

a) データの位置合わせ

初回観測データをマスター画像、二回目観測データをスレーブ画像という。

ALOS-2では、処理レベル1.1データ（SLC：Single Look Complex、図-11）を入手し、2枚の観測データから、両画像で明瞭に認識できる対応点について画像上での位置ずれを算出し、マスター画像にスレーブ画像の位置を合わせる。

b) 初期干渉画像作成

位置合わせを行った2枚の画像の画素ごとに位相の差分を計算し、初期干渉画像を作成する（図-12）。

この段階での干渉画像は軌道縞・地形縞などの誤差成分の除去処理を行っていないため、初期干渉画像と呼ばれる。規則正しい平行線の縞模様は、高速で移動する衛星が1回目と2回目の観測で全く同一の地点から観測される事はほぼ出来ないため、この軌道のずれに起因する軌道縞であり、地形の凹凸のある場所では地形縞と重なり平行線が崩れる。また、水面など2時期の表面形状が大

大きく異なる場所では位相のばらつきが大きいいため、砂をばらまいたような画像となる。このような場所は干渉性が低くなるため、変動量の把握は困難となる。

c) 変動画像作成

初期干渉画像から前述した軌道のずれの影響を除去するため、衛星データの持つ基線長情報から算出した軌道縞の除去、数値標高データ (DEM) と基線長から算出した地形に起因する地形縞を除去し、初期干渉画像から地表面の変動情報のみを抽出する (図-13)。

また、衛星SARによる位相の分布には多くのノイズが含まれるため、その影響を軽減するためのフィルター処

理を適用しノイズを除去する

d) アラッピング処理

前項までの初期干渉画像や変動画像では、位相差を色表現した画像であるが、位相は $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ までの値しか持たない。そのため、変位が大きくなっていくと、 360° から 0° に戻ってしまう。これを、周辺の位相差55)を考慮して変位の絶対値に変換することが必要となる。この処理をアンラッピング処理という。アンラッピング処理の模式図を図-14に示す。

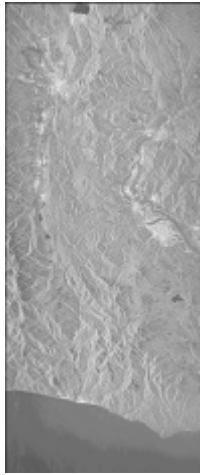


図-11 SLC データの例³⁾
(国土地理院)



図-12 初期干渉画像の例³⁾
(国土地理院)

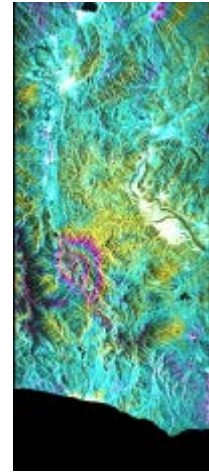


図-13 軌道縞・地形縞を除去した変動画像の例³⁾
(国土地理院)

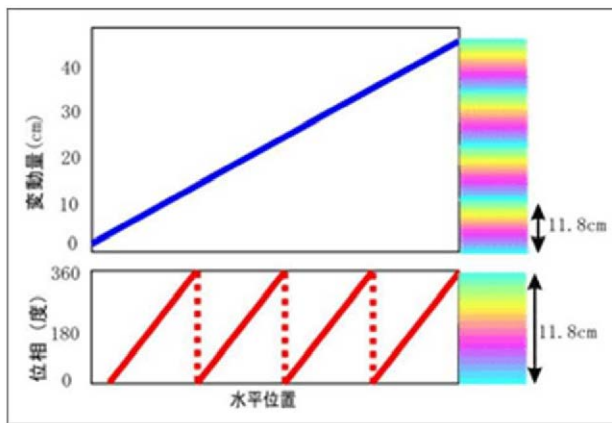


図-14 アラッピング処理の模式図¹⁾
(国土地理院)

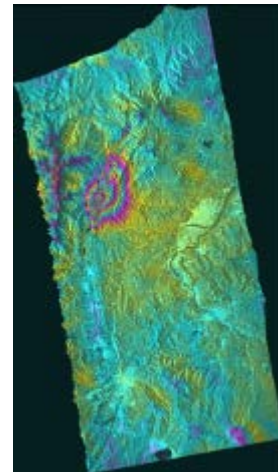


図-15 干渉 SAR 解析による地盤変動画像³⁾ (国土地理院)

e) 地図投影

変動画像の作成までは、衛星SARによって得られた画像の座標系で処理を行っているため、緯度経度や平面直角座標などの位置情報 (座標系) を持っていない。これ

を必要な座標系に変換し、地形図や市町村界など、他の空間情報と重ねられる地盤変動画像を作成する。このようにして作成された地盤変動画像を図-15に示す。

図-11～図-12の画像では、衛星データそのものが持つ

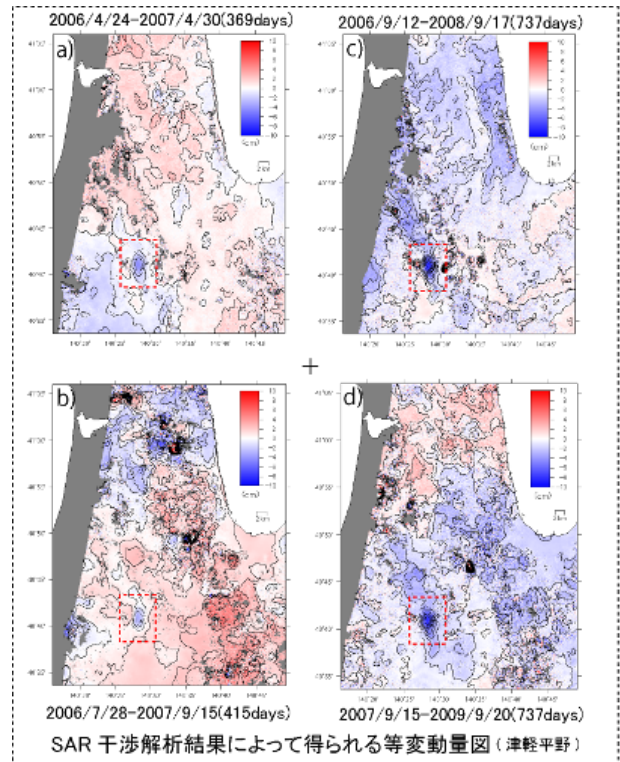
情報を処理しているため図-15と比較して左右反転している。これは他の空間情報との位置的な整合を取る前段階であるためである。

(2) 時系列解析 (スタッキング解析)

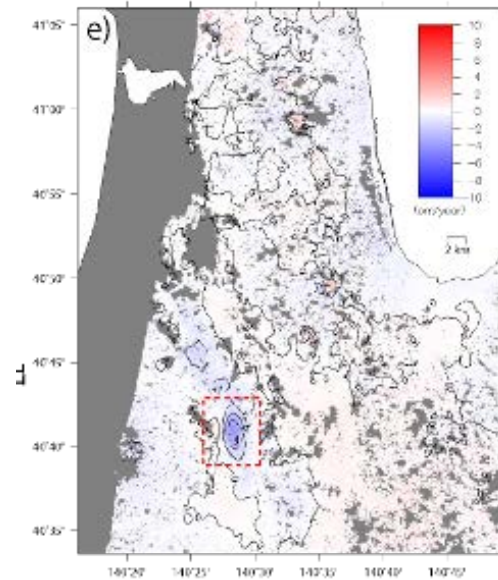
衛星SAR干渉解析ではGNSSと同様にマイクロ波を用いているため、電離層の電子密度が衛星観測時によって変化することによるマイクロ波の伝搬遅延（電離層の影響）と大気中の水蒸気の分布が空間的に異なるために発生するマイクロ波の遅延（大気遅延）が、主な誤差の原因として挙げられる。これらを補正する方法として1ペアの衛星SAR干渉解析による地盤変動画像を複数枚重ね合わせることで空間的な誤差を平均化し、誤差を軽減する方法がある。これを時系列解析またはスタッキング解析という（図-16参照）。

解析には、多くの衛星データが必要となり、使用するシーン数が多いほど、精度が高くなることが期待できる。スタッキング解析にあたり、1ペアの衛星SAR干渉解析結果を目視で確認したり、水準測量結果と比較し、ノイズの多い干渉ペアを除いたりすることで、時系列解析結果の精度を向上させることができる。

なお、解析手法には変位速度の平均化の他に、SBAS、PS-InSARなどの手法があり、いずれも地盤変動の観測把握に利用可能である



平均化し、変動速度を抽出



不規則なノイズが減少

図-16 時系列解析 (スタッキング解析) の概念図⁴⁾
(国土地理院)

3.5 衛星SAR干渉解析結果の整理

(1) 2.5次元解析

1ペア干渉SAR解析結果を踏まえたスタッキング解析結果から得られる変位は、その軌道からみた衛星視線方向の変動量である。衛星SARは観測原理の制約により、地

表を斜め方向から観測しているため、衛星SARで観測している変位は斜め方向の成分であり、鉛直方向なのか水平方向なのかを区別することはできない。

観測する位置を増やすことができれば、変位を求めることが可能となる。人工衛星による観測は南行軌道と北行軌道という異なる二つの軌道方向から地表を観測しているため、この二方向の解析結果を合成することで、変動量を鉛直方向と東西方向の成分へ分離することができる。このように、異なる方向からの結果を組み合わせることで変動量を推定する手法を2.5次元解析という。図-17に2.5次元解析の模式図を示す。

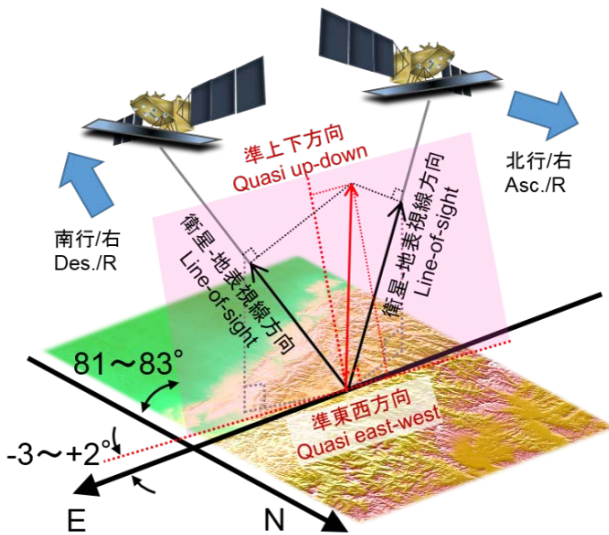


図-17 2.5次元解析の模式図⁰⁾
(国土地理院)

(2) 任意断面方向への変換解析

沈下が卓越する道路土構造物（例えば、軟弱地盤上の盛土など）では、2.5次元解析（水平変位は東西成分）を用いることができる。しかし、斜面の地盤変動のように任意方向の水平変位と鉛直変位が同時に発生する道路土構造物等に関しては、任意断面での水平、鉛直方向の変位を求める必要がある。

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 $\Delta y=0$ ）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ことができ、詳細は資料編-2に示す。

要は「任意断面内で発生した地盤の変位 Δx 、 Δz が、衛星視線の2方向の変位（ Δd 、 Δa ）として計測されることを利用し、衛星視線の2方向の変位（ Δd 、 Δa ）を任意断面に投影して Δx 、 Δz を求める」ことである。

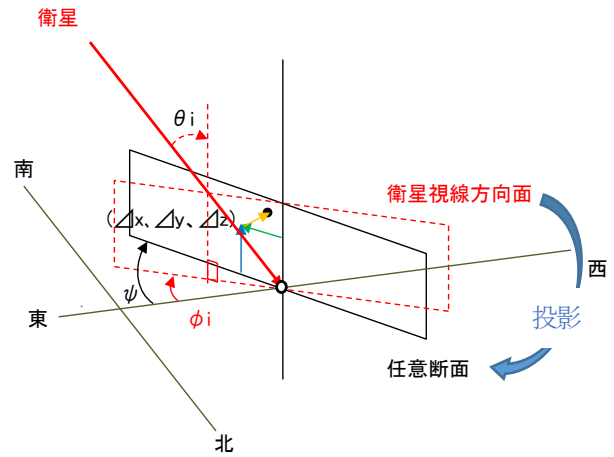


図-18 衛星視線方向変位の任意断面方向への変換

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

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）

Δx 、 y ：任意断面での水平変位および鉛直変位

3.6 解析結果の評価

解析値と実測値を比較し、本手法の道路土構造物等への適用における妥当性を検証した。

(1) 地盤変動範囲の想定

a) 地すべり土塊の範囲の設定

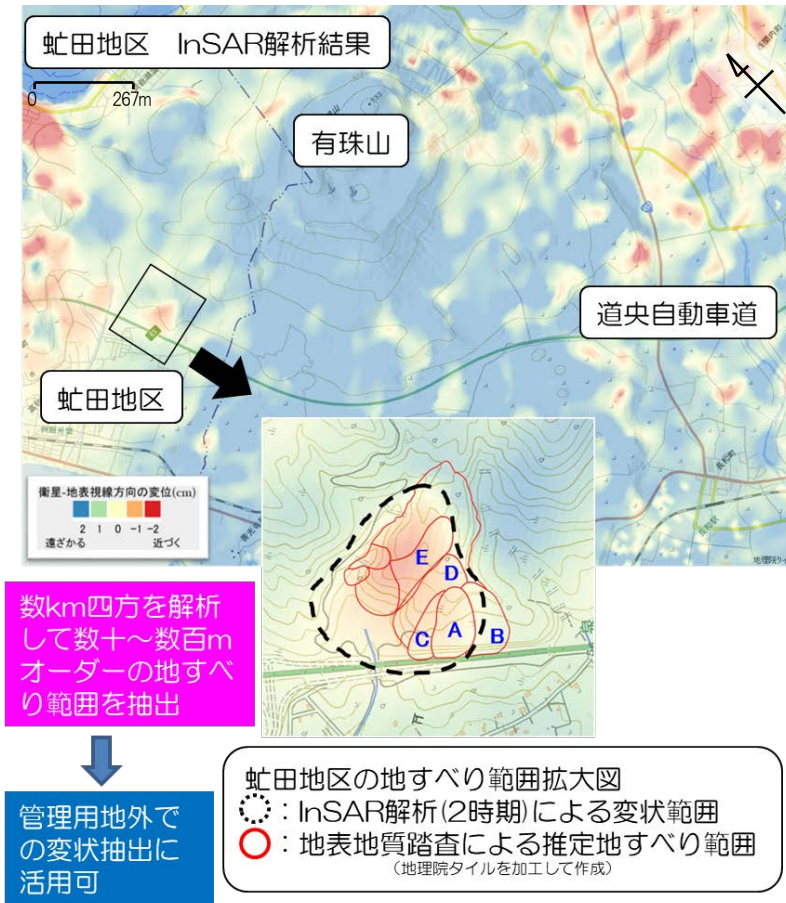
衛星SARを活用して、地盤変状が及んでいる範囲を推定することができる。図-19に、地すべり地において、地すべり土塊(66)の範囲に関して、衛星SAR干渉解析結果と地すべり調査で求めた結果を比較した例を示す。同図から、地すべり調査で得られるすべり土塊の範囲を衛星SARで求めることが可能であることが分かる。これは、技術的課題3「変状範囲の確認」に対応している。

地すべり土塊の範囲の特定には、従来、地質技術者による変状地形や地質状況の観察を行う現地踏査、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

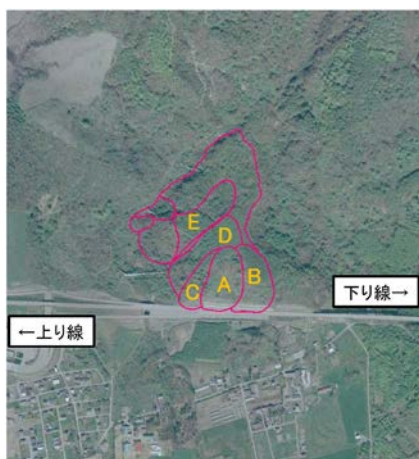
析を追加することにより、土塊の挙動を把握することができ、対策工の優先順位の設定や対策工の効果を確認することができる。また、動態観測位置の適切な位置・時期の設定や最小限化を図ることができる。

b) のり面変状範囲の設定

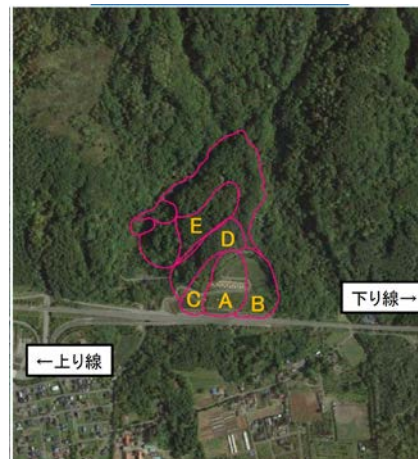
図-20 に示すように衛星 SAR で得られた変状箇所に関して、現地踏査を行ったが変状箇所の特定はできなかった。変状範囲の妥当性を検証するため、現地で TLS 測量を行い、その結果を図-20 に合わせて示した。同図より、衛星 SAR で確認できた盛土の変状箇所と TLS 測量で得られた変状箇所がほぼ一致することから、目視できないのり面変状範囲を可視化できることを示唆している。



【現地踏査と衛星 SAR による地すべり範囲の比較】



被災前 (H12年)
(国土地理院空中写真を加工して作成)



対策工後 (H26年)
(地図データ: Google、ZENRIN)

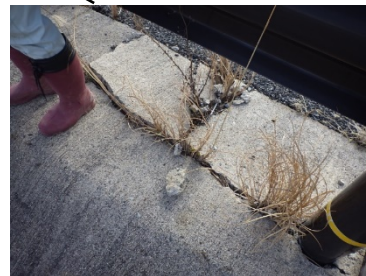
【地すべり対策前後の空中写真】

図-19 1ペア解析 (D-InSAR 解析、ALOS) による地すべり土塊の範囲の解析例 (虻田地区) ⁵⁾ に加筆

のり面：ガリー侵食



法肩クラック
開口幅 20mm 程度



法肩クラック

【衛星 SAR で解析された変動区分】

変動	下	■	変動 D (0.5 ~ -0.5mm/月)
	方	■	変動 C (-0.5 ~ -2mm/月)
	へ	■	変動 B (-2 ~ -10mm/月)
	↓	■	変動 A (-10mm 以上/月 ~)



【LS 測量で得られた変状箇所： 、 】

図-20 尾道松江道（世羅）での衛星SARによる時系列解析結果とLS測量による変状箇所の比較

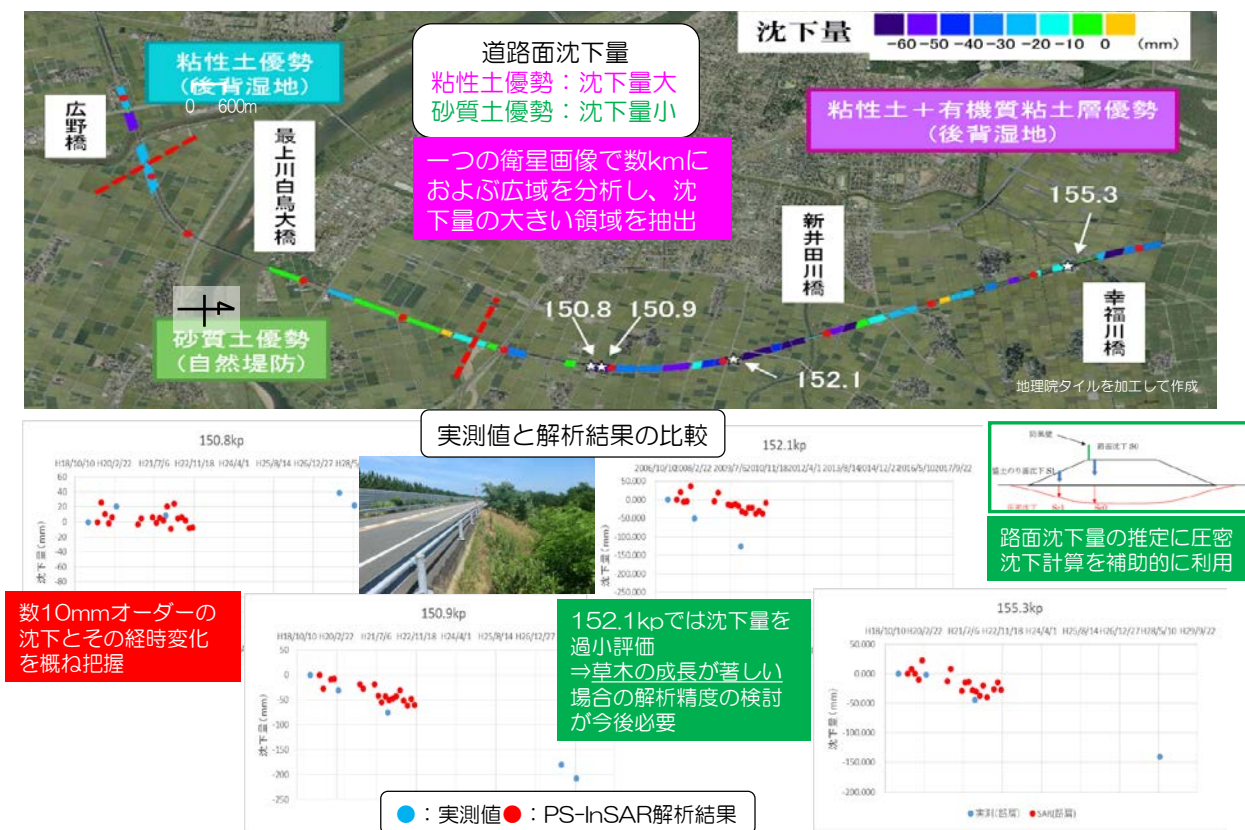


図-21 衛星 SAR 干渉解析 (PS-InSAR による時系列解析、ALOS-2) による軟弱地盤上の盛土の沈下 (酒田地区) ⑥

(2) 沈下量の経時変化

沈下量 (鉛直変位) が卓越する箇所では、衛星視線方向の変位から容易に沈下量の経時変化を求めることができる。図-21に軟弱地盤上の盛土 (路面) における衛星 SAR 干渉解析結果と動態観測で求めた沈下の経時変化を示す。同図より軟弱地盤上の盛土 (路面) に関して、「mm オーダ」での解析が可能であることが分かる。また、路面の沈下量の大小から今後のオーバーレイなどの優先順位策定に利用できることが分かる。これらは、技術的課題1「過去に遡ってデータベース構築」、技術的課題2「定量的な管理が可能」及び技術的課題4「優先度を考慮した保全計画」などに対応している。

(3) 任意断面における挙動 (水平、鉛直) の把握

のり面主側線方向の断面 (任意な断面) における地盤の挙動 (水平、鉛直) を求めることができる。図-22に法面の挙動に関して、動態観測結果と衛星 SAR 干渉解析結果を比較した例を示す。動態観測は、平成 27 年 1 月 28 日と平成 29 年 12 月 26 日に光波測量で観測された結果の差分値であり、衛星 SAR 干渉解析は同時期の差分値である。観測された測量点は 10 箇所ある。

観測された測量点において、50mm 程度までの変位箇所は、動態観測結果と衛星 SAR 干渉解析結果はほぼ一致するが、それ以上になると衛星 SAR 干渉解析結果が小さくなっている。これは、技術的課題 2「定量的な管理が可能」に対応しているが、小さくなった要因としては、以下のことが考えられる。

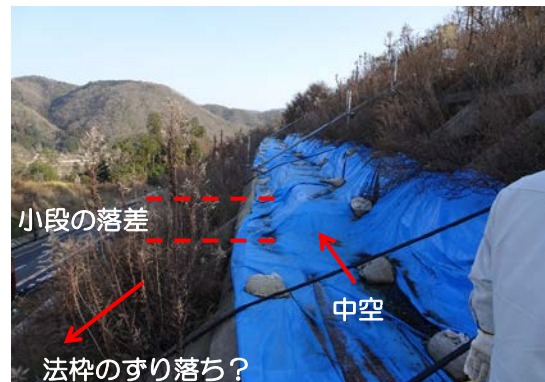
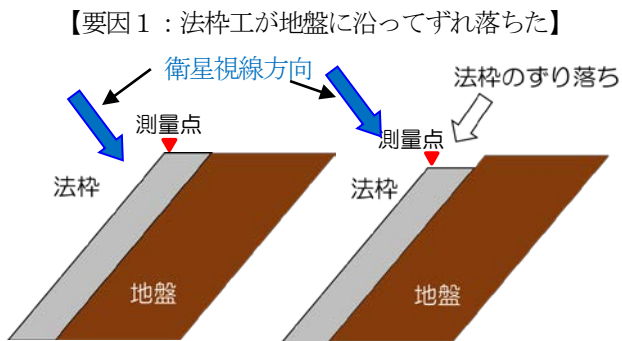
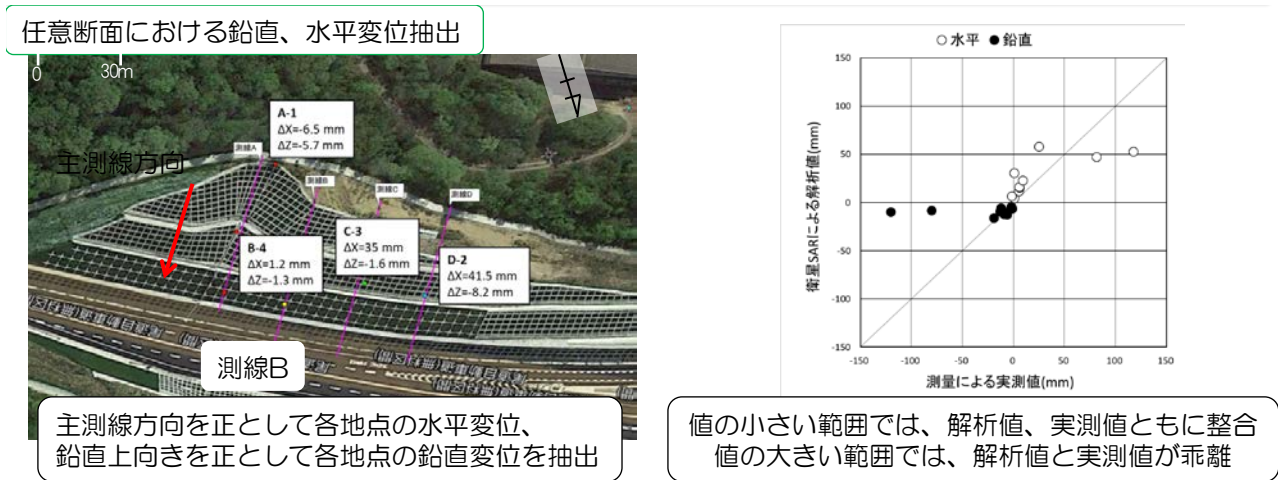
- ・ 要因 1：法枠工が地盤に沿ってずれ落ちた場合、衛星と地盤の距離は相対的に変わらないため、変位を過少に解析した可能性がある。
- ・ 要因 2：衛星 SAR の解析では異なる二時期の観測波の位相差を変動量として計算するが、観測間に波長を超える変動があった場合、それが一波長の変動なのか二波長分の変動なのか区別することができない。

要因 2 である衛星 SAR 特有の位相差の影響の程度を把握するため、前出 3.4(1)d) で説明したアラッピング処理を行った。この現場では ALOS-2 を使用しているため、波長は約 24cm であり 360° の位相差は約 12cm (往復測定を片道に直すため 2 で割る) の変位として生じ、位相差を考慮した実際の変位は式 (2) で表すことができる。

$$\text{実際の変位 (cm)} = \text{衛星 SAR による解析値 (cm)} \pm 12n \quad (n \text{ は整数, } n=0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$

図-22 にアラッピング処理を 1 回行った結果を示すが、実測値に近づくことが分かる。

ここで衛星 SAR による解析値は衛星視線方向の変位である。



【要因 2：位相差の影響、□がアンラッピング処理後】

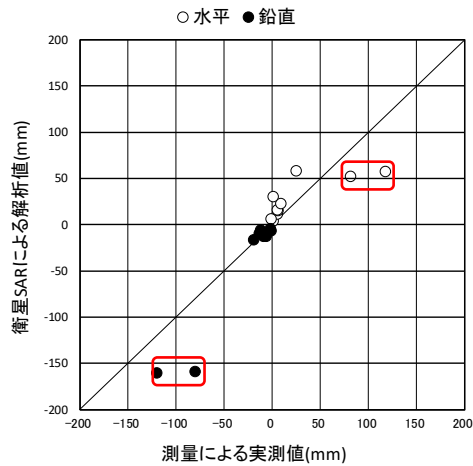


図-22 尾道松江道における吉舎地区での衛星 SAR 干渉解析 (SBAS による時系列解析、ALOS-2) によるのり面の主側線方向断面の挙動 (水平、鉛直) 7) に加筆

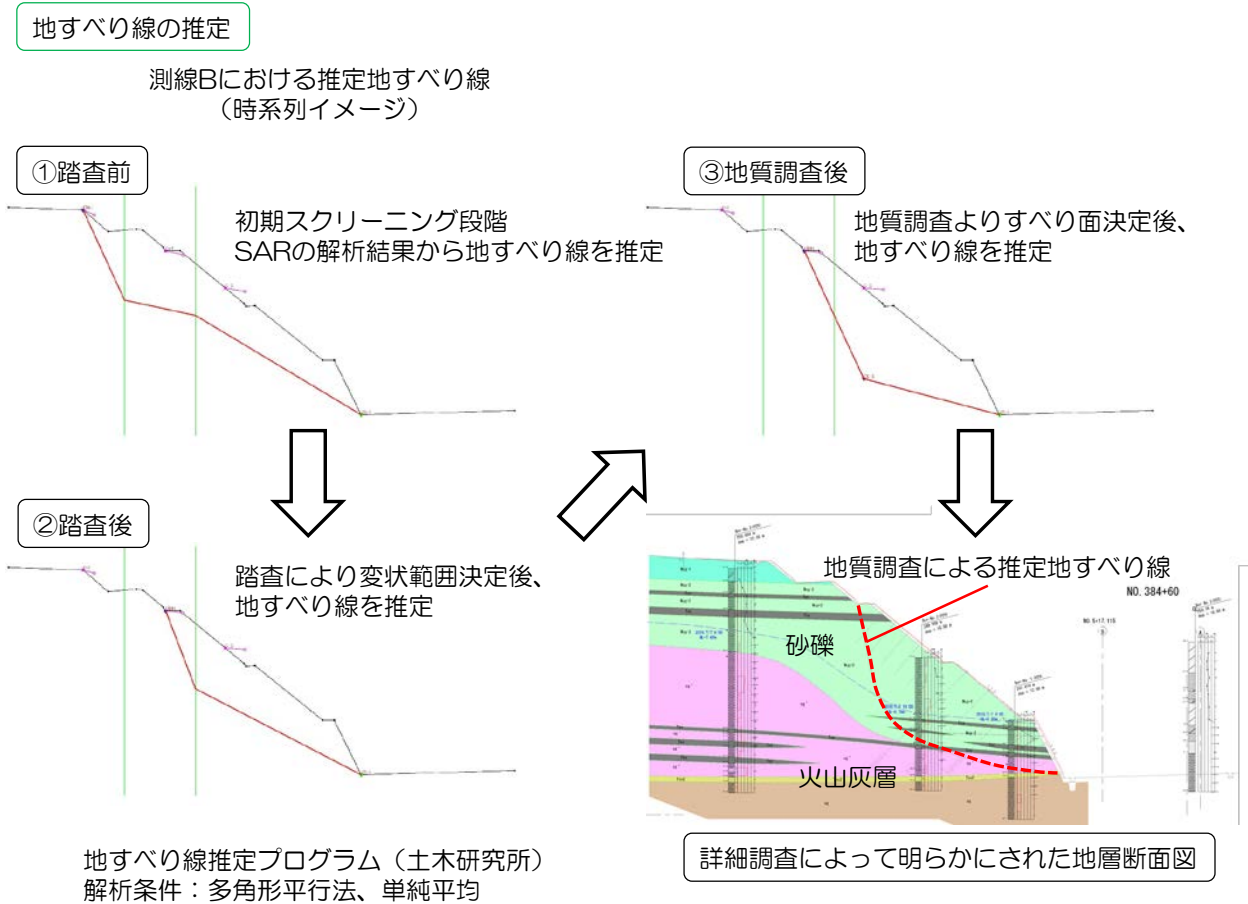


図-23 衛星 SAR 干渉解析 (SBAS による時系列解析、ALOS-2) の地表面変位からすべり線を想定した例 (吉舎地区)⁹⁾

(4) 地表面変位から想定すべり線の設定

地表の変位が分かれば、「地すべり線の形状推定法 (独立行政法人 土木研究所)⁸⁾」を用いて、図-23 に示すように想定すべり線を設定することができる。これは、技術的課題3「変状範囲の確認」に対応している。

「①踏査前」は、何も事前情報が無い状態での解析結果である。この解析結果を踏まえて現地踏査の範囲や適切な地盤調査計画が効率的に立てることができ、現地調査が進むにつれて (②踏査後、③地質調査後) 対策工選定の基本となる推定すべり面を効率的に設定することができる。

(5) 他の広域の地形情報との組み合わせ

他の広域の地形情報等としては、従来からある航空写真の立体視、最近増加してきた航空レーザー測量 (以下航空 LP 測量と省略する) などがある。

これらの地形情報等からは、のり面、自然斜面及び地すべりなどの過去あるいは現在の挙動が地表に表れた地形を抽出することができ、地質リスクの評価に従来から

用いられてきた。しかし、これらの地形情報等だけでは、現在の、のり面、自然斜面及び地すべりが滑动しているかどうかは、詳細な現地調査をしないと評価することができない。

これらの広域の地形情報等に衛星 SAR の解析結果を組み合わせるにより、詳細な調査を行う前に、調査の必要性の有無を評価することができる。図-24では、空中写真判読、航空 LP データから作成した CS 立体図からわかった崩壊ブロックに衛星 SAR 干渉解析結果を組み合わせることにより、図-24の (a) では、滑动中のブロックであること、(b) では、滑动が休止中あるいはすべり土塊がなくなったブロックであることが分かる。このような場合、(a) の方の斜面について調査を優先的に行うべきであることが分かる。

衛星 SAR では、数十 km 四方の地盤変動状況を一度に把握することができる。このため、多くの管理者が別々に管理する地域全体のインフラ (道路、河川、港湾、建築物など) を一括管理することが可能となる。

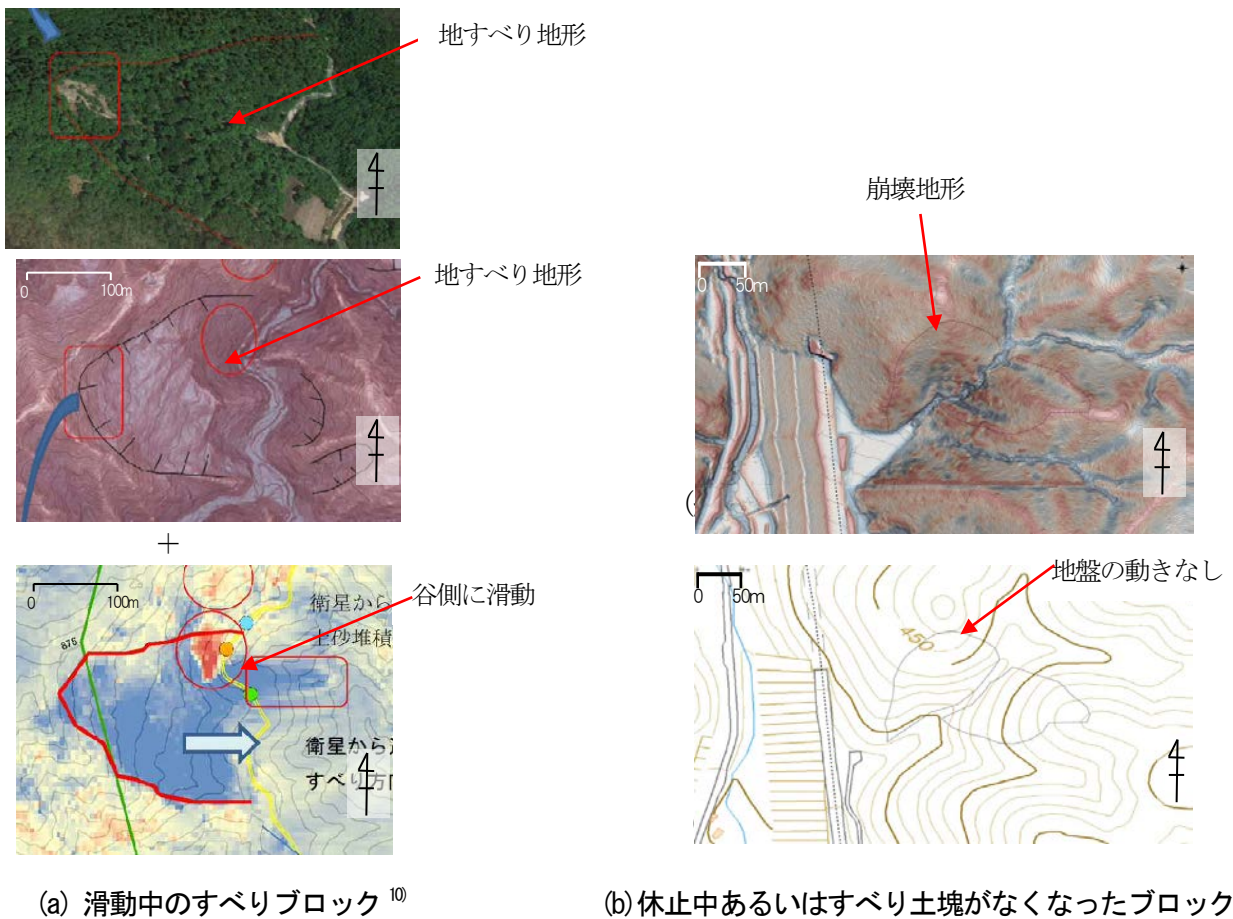


図-24 広域の地形情報等と衛星SAR干渉解析結果の組合せ

3.7 衛星SARを活用するうえでの留意点

(1) 測定できない地盤変動

a) 主測線方向について

図-25に示すように衛星SARは、南北又は北南方向の軌道を描き、ほぼ東西方向の衛星視線方向の地盤の変位を測定できる。同図に示す任意な主測線方向（任意な断面方向）に関しては、「任意断面方向への変換解析」を行うことにより、この主測線方向の変位を求めることができる。しかし、主測線が南北方向の道路土構造物の場合には、解析困難である。

b) 高い山等の影響

衛星 SAR 干渉解析では、マイクロ波を斜め下方に照射するため、①急斜面等の上部が下部よりアンテナに近くなることで画像の上下が反転して白くつぶれるレイオーバー現象（図-26 の A、B）、②高い山等が実際の平面位置よりアンテナに近い位置に倒れ込んで表示されるフォアショートニング現象（図-26 の E）、③高い山等が障害物となり背後側が影となり黒くつぶれるレーダーシャドウ現象（図-26 の E より衛星アンテナから遠い側）な

ど、SAR 観測原理上の特徴が画像上に現れる。その結果、画像上に判読不能領域が生じる。

特に道路のような線状構造物では、③レーダーシャドウ現象が発生する可能性があるため、解析結果の評価において、画像上に判読不能領域が抽出された場合には、他の手法で道路の維持管理を考慮する必要がある。

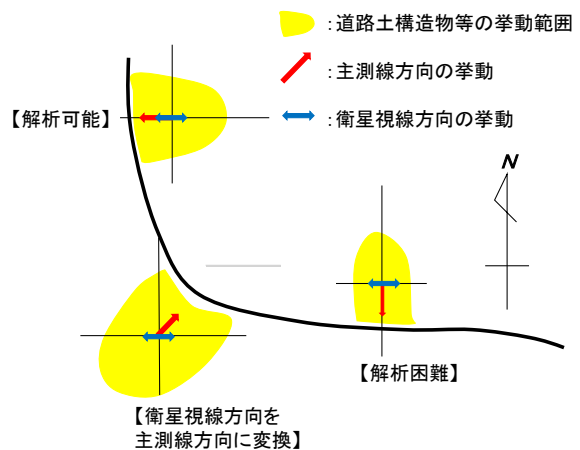


図-25 衛星視線方向と道路土構造物等の主測線方向の関係

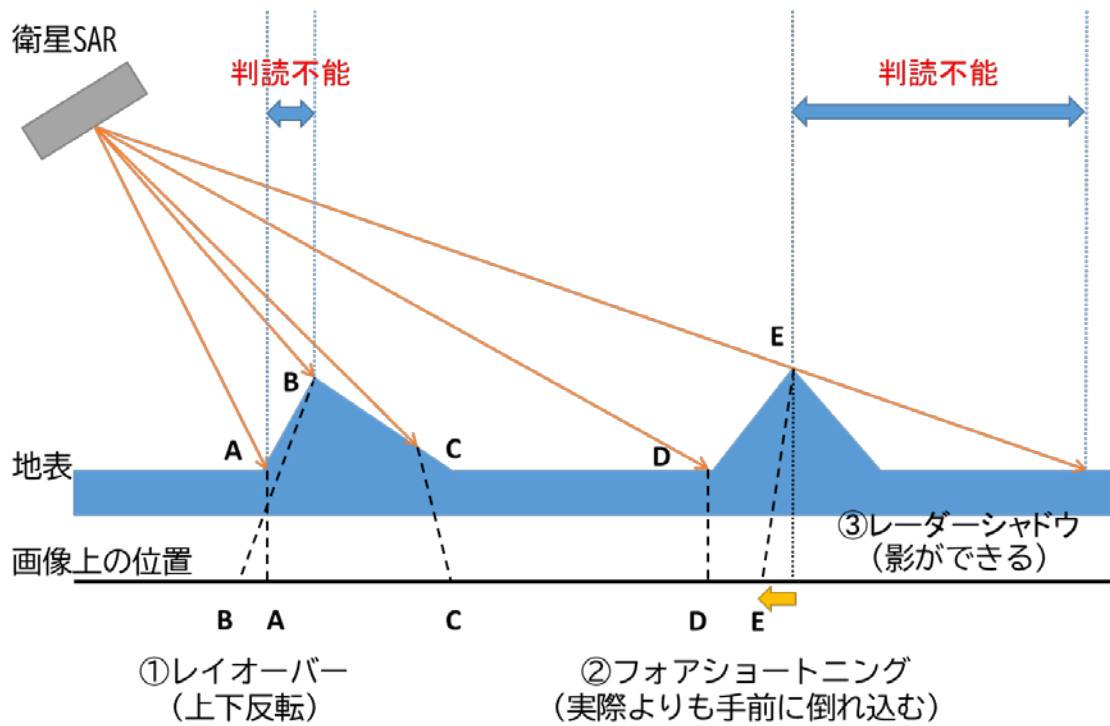


図-26 SAR 画像の幾何特性 (画像の反転、倒れこみ、影)¹¹⁾

(2) 1 ペアの衛星SAR干渉解析でおきるノイズ

図-27 (図-21の150.9kpにおける沈下量の経時変化) から、衛星SAR干渉解析で求めた道路路面沈下量の経時変化は、全体としては、実測値とよく一致しているが、「個々の1ペア」では、沈下ではなく隆起の傾向を示すこともある。これは、衛星SARによる測定及び解析上のノイズあるいは誤差によるものと考えられ、現状では解決することができない。このため、地表面の変状を衛星SAR干渉解析で求める場合には、SBASやPS-InSARなどの時系列解析を行い、全体の傾向として評価することが良いと考えられる。

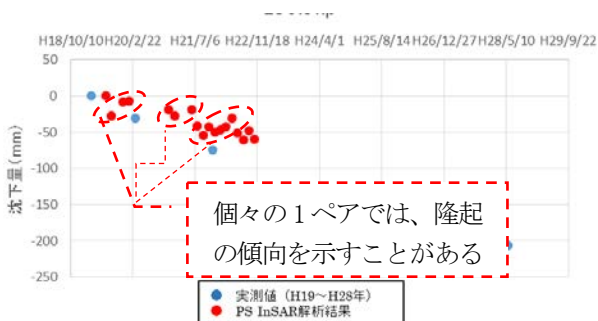


図-27 道路路面の沈下量の経時変化 (酒田地区)⁶⁾

(3) 衛星SARの実務への適用条件や適用限界及び長所や短所

a) 衛星SARの実務への適用条件や適用限界

衛星SARの実務への適用条件や適用限界を表-12に整理した。

b) 衛星SARの長所や短所

衛星SARの長所、短所を整理すると以下ようになる。

【長所】

- 過去に遡ってデータベースの作成が可能
- 路線毎に広域の道路変状を定期的にモニタリングすることが可能
- 現地へ行かずに、道路の変状を把握可能
- 地形情報等で崩壊のり面や地すべりの現在の滑動度合いを評価可能
- 道路管理外からのもらい災害を予測可能

【短所】

- 衛星軌道の関係でALOS-2の場合には、約3~4カ月に1回しか観測されない
- 広域の解析を行うと、図-28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。
- 図-25に示すように構造物の主側線方向が南北方向の場合には、解析が困難となる。

- ・ 図-26に示すように近傍に高い山がある場合には、解析が困難となることがある。

表-12 衛星 SAR の適用条件と適用限界

適用条件及び適用限界	内容
適用条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 草木のある山地、丘陵地で使用する L バンド (ALOS-2、JAXA) は現在 3~4 か月に一回しかデータが取得できないため、長期間の観測に適する。 ・ 一方、平野部では週単位で C (Sentinel-1、EU) バンドや X (TerraSAR-X、独) バンドの情報を取得できるため、短期的な地盤変動にも適用可能である。 ・ 衛星視線方向の影響に関して、鉛直変位 (沈下) に関しては影響を受けない。しかし、水平変位に関しては南北方向に近づくに従い精度が落ちるため、構造物の変動特性を考慮して適用する必要がある。 ・ 具体的な解析精度は、道路土構造物の形状、方向などで異なるので、第4章の活用事例を参考にする。
適用限界	<ul style="list-style-type: none"> ・ 観測ごとの相対変位量がバンドの半波長を超えた変位が発生する場合には観測が追従できない場合がある。Lバンド 1/2 波長、$\approx 12\text{cm}$、Cバンド 1/2 波長$\approx 3\text{cm}$、Xバンド 1/2 波長$\approx 1.5\text{cm}$ ・ 南北方向近傍の水平変位では、誤差が発生する場合がある。 ・ 衛星視線方向に障害物 (山、道路の防風柵など) がある場合、解析できない場合がある。 ・ 求めようとする期間の衛星データが欠如していることがある。 ・ 対象構造物表面で電磁波が乱反射し、観測できない場合がある。 ・ GPS 測量と同様に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の影響を受け、観測値の誤差が発生する場合がある。 ・ 1ペア干渉解析では沈下と隆起が逆転することがある。地盤変動を求める場合には誤差を最小限にできる時系列解析が有効である。 ・ 豪雨や地震等で前兆現象なしに発生する斜面崩壊を予知することは、衛星 SAR ではできない。

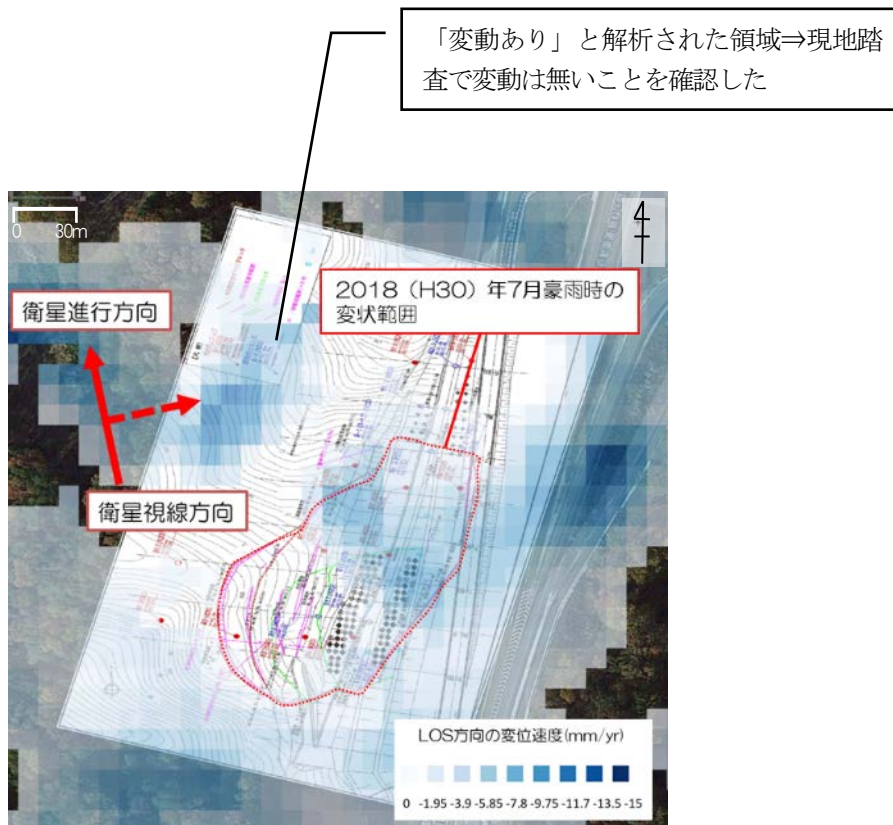


図-28 対象斜面以外の箇所でも「変動あり」となったが現地で確認できなかった例

第4章 道路土構造物への衛星SARの活用事例

4.1 道路土構造物等の維持管理における効果的な適用方法

(1) 一路線（広域）で活用する場合

一路線（広域）で活用する場合の効果的な手順を以下に示す。

a) 初期段階

路線全体の衛星画像を数年分購入する。全区間にて衛星SAR干渉解析（SBASやPS-InSAR等の時系列解析）を行い、路線沿いの道路土構造物等全体の挙動を把握し、滑動度評価を図-29に示す指標に基づいて以下のように評価を行う。

- ・ 変動A～D：「（公社）日本道路協会：道路土工のり面工・斜面安定工指針、平成21年6月、解表11-5 地盤伸縮計による地盤伸縮の程度とその特徴」より引用。
- ・ 詳細調査：道路にすぐに影響がでる可能性がある場合（影響が大）には、原因究明・対策工検討のための「詳細調査」を行う。
- ・ 点検・危険度調査箇所に追加：異常は発生しているが道路にすぐに影響がでる可能性が少ない場合（影響が小）には、点検・危険箇所調査の追加を行う。

衛星SARによる継続監視：今後の動向を継続監視する。

b) 運用段階

1年に1回、4時期分の路線全体の衛星画像を購入（詳細調査及び点検・危険度調査箇所に追加する場合には、4カ月毎に購入）し、初期段階と同様の評価を行う。

(2) 災害発生の可能性のある箇所、発生した箇所等に集中的に適用する場合

災害発生の可能性がある箇所あるいは災害が発生した箇所において、以下のように集中的に適用する。

- ・ 過去に遡って地盤変動を衛星SAR干渉解析（SBASやPS-InSAR等の時系列解析）で求め「影響範囲の特定」し、現地調査のための除草範囲、現地踏査の範囲、集中的に見る場所、調査計画の立案に活用する（図-31参照）。

(3) 路面の維持管理で活用する場合

路面の維持管理で活用する場合には、衛星SAR干渉解析を行い、路面の沈下量を求め、定期観測を補完する。

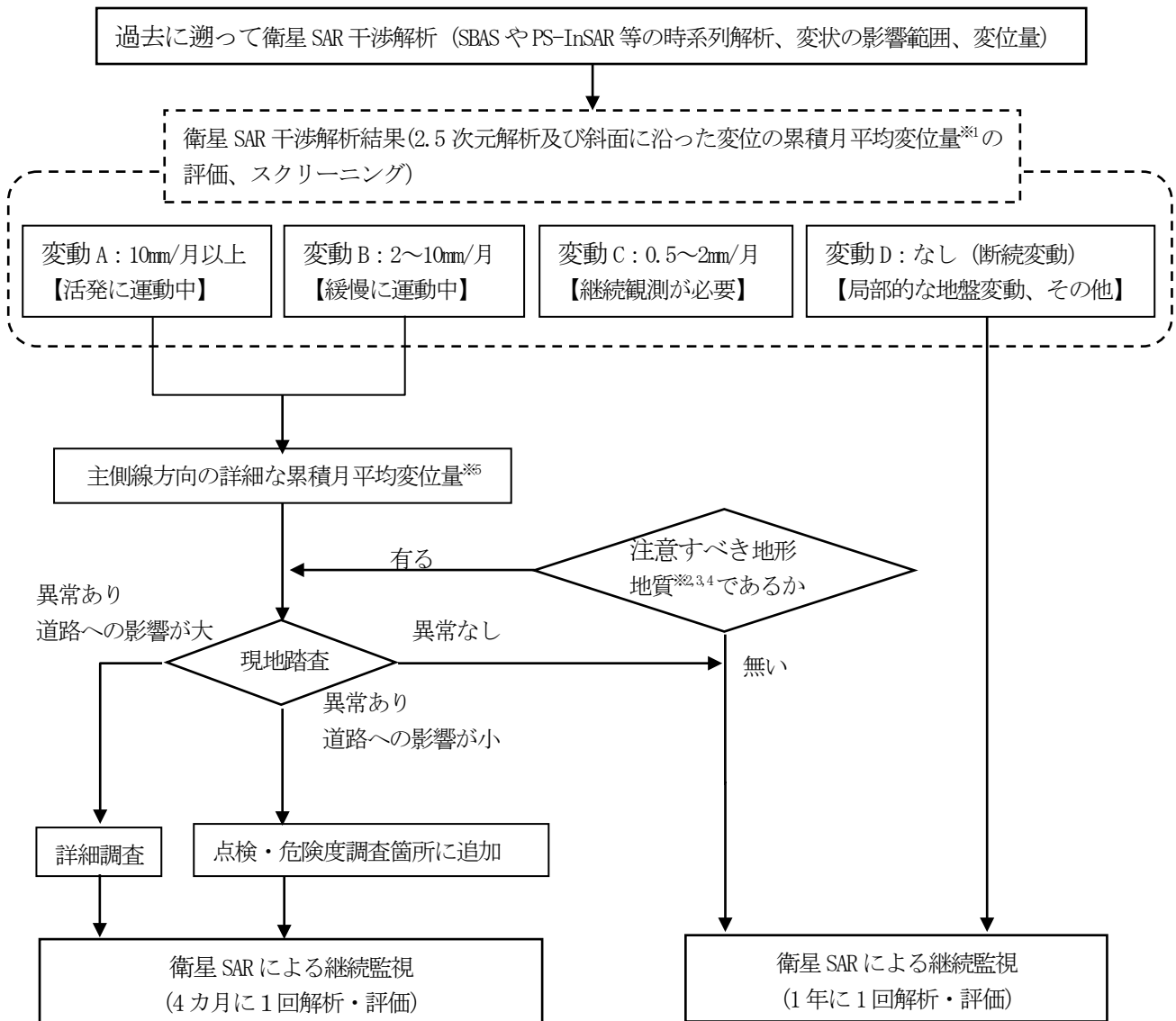


図-29 一路線で衛星 SAR を活用する場合の初期段階での対応
(主に斜面の土構造物を対象)

※1: 2.5 次元解析より得られた鉛直変位と斜面の平均勾配 (例えば 1:1⇒水平から 45° の勾配) から斜面に沿った変位量を推定 (図-27 参照)

※2: (公社) 日本道路協会: 道路土工 のり面工・斜面安定工指針、平成 21 年 6 月

※3: (公社) 日本道路協会: 杭基礎設計便覧、令和 2 年 9 月 (主に平野部の注意すべき地形・地質)

※4: (公社) 日本道路協会: 斜面上の
深礎基礎設計施工便覧、平成 24 年 4 月
(主に丘陵地、山地部の注意すべき地
形・地質)

※5: 変動 A、変動 B と評価された場合
には、より詳細な斜面の地盤変動を求め
るため、道路主側線方向 (任意断面) で
の水平、鉛直方向の変位を求め、より詳
細な累積平均変位量を評価

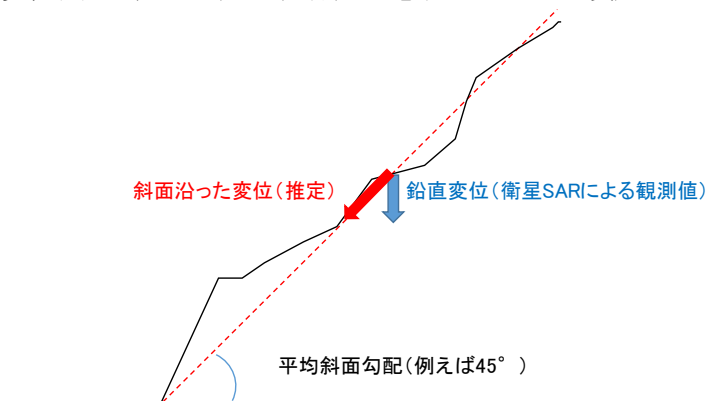


図-30 衛星 SAR による鉛直変位から斜面に沿った変位の推定

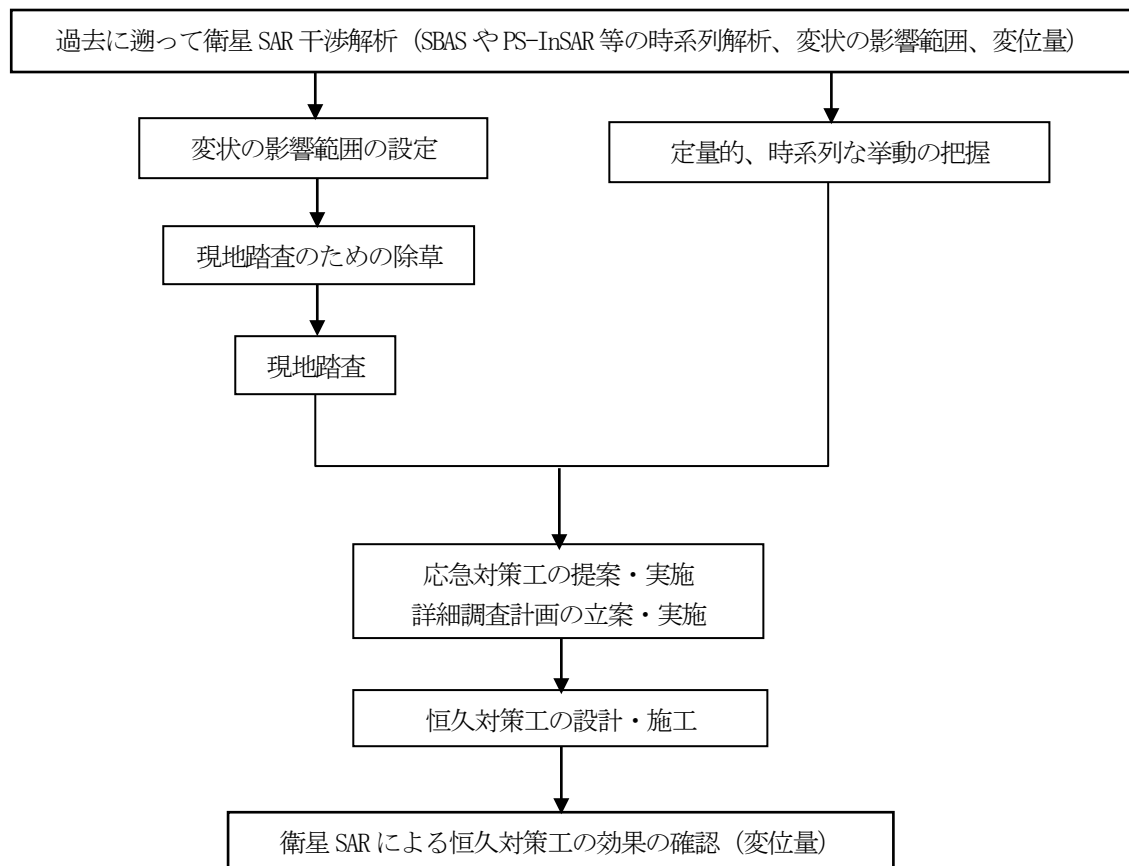


図-31 災害発生の可能性のある箇所、発生した箇所に集中的に衛星 SAR を活用する場合の対応

(4) 衛星SARの適用による道路土構造物の維持管理の効率化

一路線あるいは災害発生の道路土構造物の維持管理に衛星SARを活用することにより、従来の道路土構造物の維持管理がどのように効率化されるかを表-13、14に整理した。

(5) 現地との整合、精度の評価方法

動態観測データがある現場で衛星SARを利用する場合には、図-21や図-22に示すようにキャリブレーションを行い、衛星SARデータの精度の検証を行うことができる。現地で行われている動態観測との整合が取れることを確認し、コスト等を考慮し衛星SAR観測に変更するか、動態観測の回数を減らすことの検討が可能となる。

表-13 一路線における道路土構造物の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	図-26 に従った <u>定量的なスクリーニング技術</u> を追加し、 <u>危険箇所</u> の抽出、 <u>防災カルテ作成</u> 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） <u>全てについて現地踏査</u> を実施する
	点検方法	目視
		図-26 に従い <u>現地踏査が必要な箇所</u> のみ行う。
		目視+ <u>定量的な評価</u> を行う

表-14 災害発生の可能性のある箇所、発生した箇所への衛星 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、影響範囲設定の確度を上げる。
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。

4.2 衛星SAR導入の初期・運用コストからの導入上の課題

(1) 一路線（広域）で活用する場合

一路線で活用する場合の初期コスト・運用コストに関して、本研究でALOS-2を用いて尾道松江道を解析した実績に基づき概算を算定し、表-15に示す。点検・危険度調査の精度向上、点検頻度の削減とのコスト比較が必要である。

表-15 一路線で活用する場合の必要コストの例

時期	概算（税抜）	条件
初年度	約 28,000 千円 (約 19,000 千円)	100km 衛星データ 80 枚
運用年度	10,000 千円 (約 8,300 千円)	100km 衛星データ 16 枚追加 (合計 96 枚)

概算の()書きは国交省の場合

この概算には、解析計画、衛星データの選定（ALOS-2のLバンド画像データ）、時系列解析（SBAS）、累積月平均変位量の評価、主側線方向の詳細な累積月平均変位量、注意すべき地形地質の評価、現地踏査、維持管理の対応方針の決定、電算使用料（解析ソフト使用料）が含まれ、図-29に従った以下の成果を得ることができる。

- 路線全体の累積月平均変位量よりスクリーニングを行い、各箇所の変動状況のランクを変動 A, B, C, D に区分。
- 変動区分 A, B, C, D や注意すべき地形地質よりすぐに現地踏査すべき箇所を踏査。
- 上記の結果を踏まえて、詳細調査、点検・危険度調査箇所への追加、継続監視に区分。

初年度は解析に必要な衛星画像の購入費用が高額となり、また、解析および解析結果の整理などに工数を要することが予想され、諸経費含む総額で 28,000 千円程度を見込む。次年度以降は、新規に撮影された画像のみ

購入し、解析は既存のデータセットに新たに撮影された画像を加える形で行う。この場合、同じく総額で10,000千円程度を見込む。ただし、国交省関連部署（各事務所含む）はJAXAとの協定により衛星画像を9,000円/枚で購入することができるため、コスト低く抑えることができる。

なお、地盤変動の抽出については航空LP測量による点群データの差分によっても地盤変動を抽出することができるが、同じ領域を航空LP測量（地図情報レベル1000）で測量する場合、およそ25,000千円～30,000千円の費用を要する。この他、現地踏査費用を考慮すると、初期導入費用としては同程度のコストがかかることが見込まれる。しかし、差分を取るために次年度以降も同じ費用を要することから、継続コストを考慮した場合、衛星SARの適用の方が低コストで済ませることができる。なお、初年度における約28,000千円のなかには直接費として6,400千円（720千円）の衛星データ購入費が含まれている。

(2) 災害発生の可能性のある箇所、発生した箇所に適用する場合

災害発生の可能性のある箇所、発生した箇所に適用する場合の概算費用を表-16に示す。

表-16 災害発生の可能性のある箇所、発生した箇所で活用する場合の必要コスト

時期	概算（税抜）	摘要
災害発生	約3,700千円 （約3,200千円）	50×100m 既存の衛星データに4枚追加

概算の（ ）書きは国交省の場合

この概算には、解析計画、衛星データの選定（ALOS-2のLバンド画像データ）、時系列解析（SBAS）、任意断面への変換解析、変状の影響範囲・変位量の整理、現地踏査、応急対策工の提案、詳細調査計画の立案、電算使用料（解析ソフト使用料）が含まれ、図-28に従った以下の成果を得ることができる。

- 変状の影響範囲を整理し、現地踏査のための除草箇所、調査の範囲、対策工の範囲などを設定。
- 応急対策工の提案、詳細調査計画の立案

4.3 一路線（広域）で活用する場合（主に斜面の道路土構造物を対象）

(1) 丘陵・山岳地の道路での活用事例

尾道松江道において、衛星SAR干渉解析（SBAS時系列解析）を行い、注意すべき地形地質箇所の変動状況を評価した。

a) 道路変状箇所の抽出

一路線（尾道松江道の広島県内、図-32(1)参照）において衛星SAR干渉解析（SBAS時系列解析、ALOS-2、Lバンド、2014年（平成26年）9月～2020（令和2年）6月、2014年（平成26年）9月～2020年（令和2年）3月を「ALOS-2」を用いて行い、図-29に従い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、局所的な地盤変動、その他）に区分した。

図-32(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。図-32(3)では、図-32(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。図-32(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× $\sqrt{2}$ ）倍した結果を図-32(4)に示す示すが、道路変状箇所の抽出に関して、衛星SARを以下のように利用できることが分かる。

- 防災カルテ以外の道路土構造物の変動、用地外の地盤の変動の情報を得ることができる。
- 防災カルテ箇所（対象区間尾道JCT～高野IC、約70km）では、表-17に示すように、全ての箇所で現状では変動C,Dにランクされることが分かる。

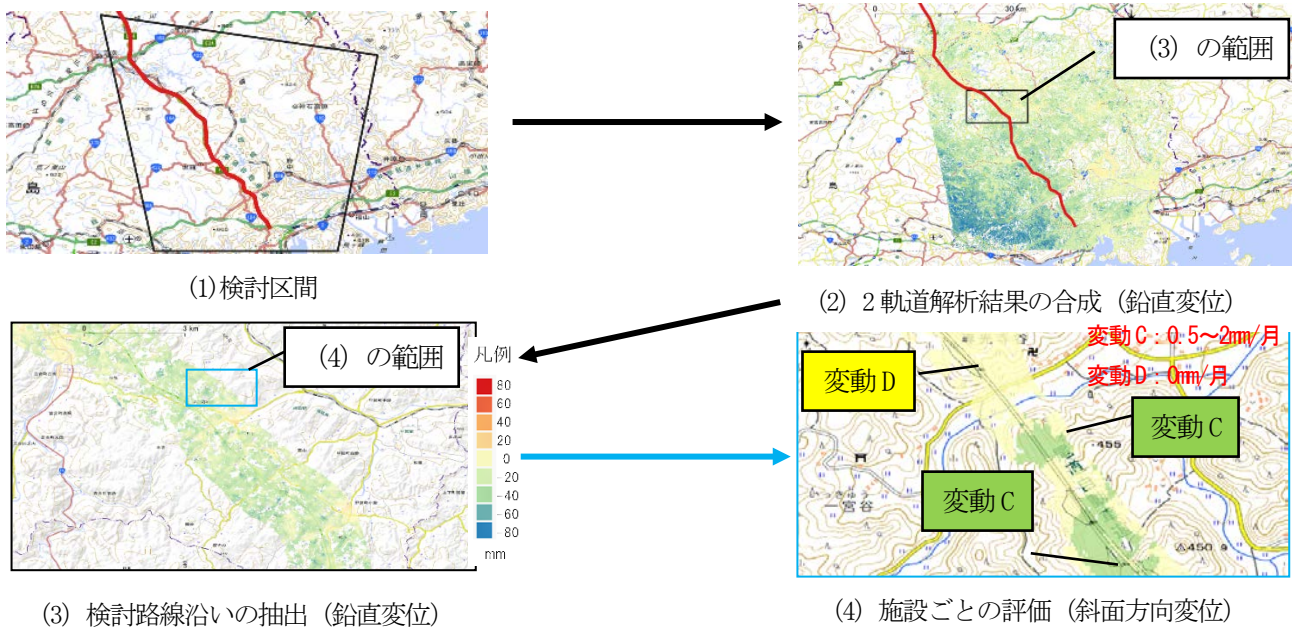


図-32 一路線（尾道松江自動車道）における衛星 SAR の適用例

表-17 尾道松江道（対象区間尾道JCT～高野IC、約70km）における防災カルテ地点の地盤変動区分

変動区分	箇所数
A (活発に運動中)	0
B (緩慢に運動中)	0
C (継続観測が必要)	65
D (局所的な地盤変動、その他)	29
計	94

b) 災害発生箇所での地盤変動

現状の変動区分はDであるが、過去、災害が発生し、現在、恒久対策工を施工されている「吉舎地区」における災害が発生した時期を含めた変動区分の時系列分布例を図-33示す。衛星 SAR による解析では、2014年（平成26年）8月から2016年（平成28年）12月付近まで前兆現象（変動B区分）が継続していることが分かる。2015年（平成27年）1月に天端亀裂、法枠はらみ出しを現地で確認し、動態観測を開始された。2017年（平成29年）2～12月に防災点検（法枠に開口亀裂確認）、法尻に大型土嚢・防護柵設置（変動区分D）が行われ、監視が継続された。

2018年（平成30年）年7月の豪雨で変状範囲が拡大したが、解析では追従できていない。これは、地盤変動が急激に発生したためと考えられる。



(吉舎の対象のり面)

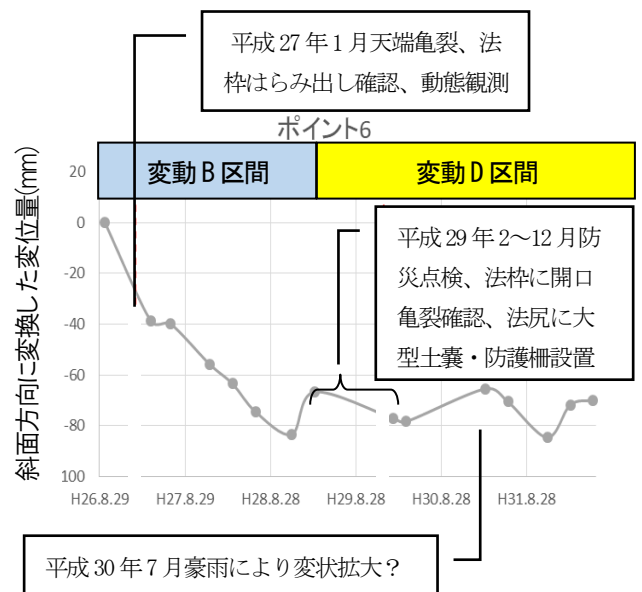


図-33 吉舎地区における時系列解析結果（2.5次元解析で得られた沈下量を $\sqrt{2}$ 倍）

c) 道路土構造物の変状に関する地盤工学的な考察

- ・ 斜面における異常箇所抽出事例（広島県世羅町川尻地先）

図-34 に示すように本線脇の山腹斜面に、本線に向かって複数の谷地形が形成され、そのうち一筋において谷地形内部に衛星から離れる方向（斜面の傾斜方向）に変位が生じている。周辺は、災害を起こしやすい広島花崗岩類が分布しており、今後、豪雨等の外因により土砂災害が発生し、本線に影響を及ぼす可能性がある。

ここで、注意すべき地形地質箇所の抽出においては、航空LP測量を用いたCS立体図：標高・傾斜・曲率の3つのデータレイヤを重ね合わせることで地形判読を視覚的にかつ容易に行える立体図法）を利用した。丘陵・山地部の注意すべき地形地質箇所の抽出は、航空LP測量を利用する他に、「航空写真の立体視」などでも可能である。衛星SAR干渉解析はSBASを用いている。

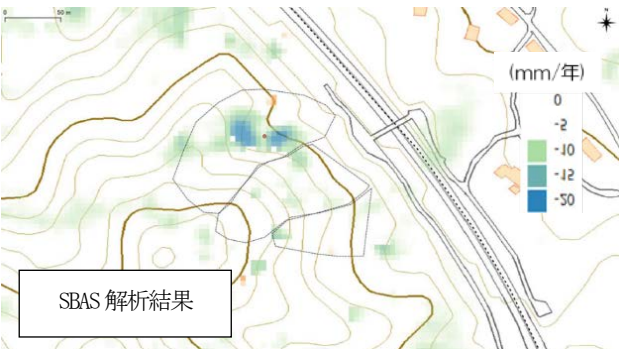
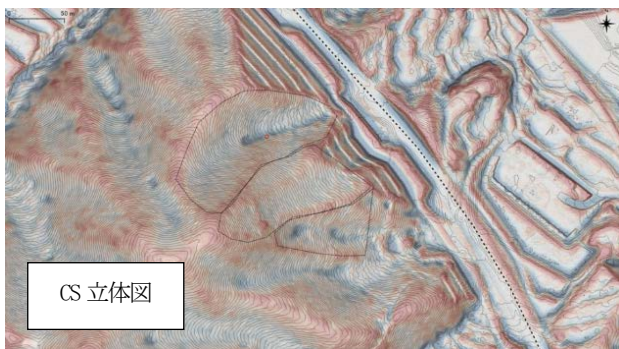
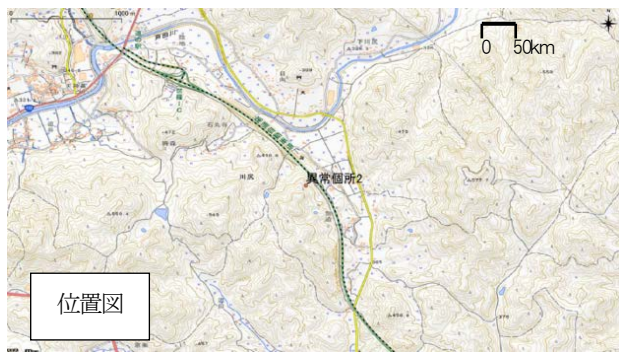


図-34 斜面における異常箇所抽出事例（広島県世羅町川尻地先）

- ・ 盛土における異常箇所抽出事例（広島県三次市甲双町宇賀地先）

図-35に示すように本線および法面付近において衛星から離れる方向に変位が生じている。その傾向は異常箇所17において特に顕著である。路面及びのり面に変位が生じている可能性がある。

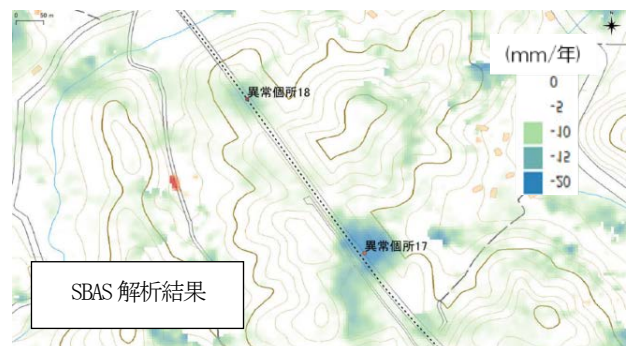
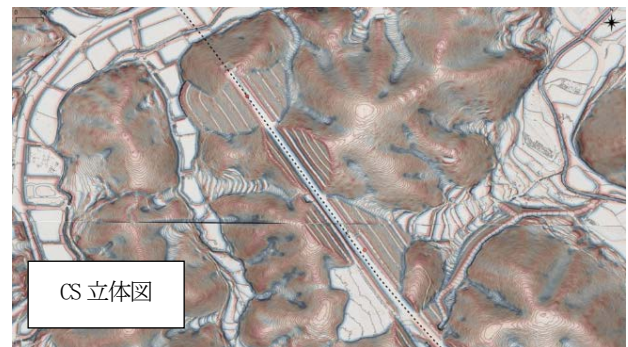


図-35 盛土における異常箇所抽出事例（広島県三次市甲双町宇賀地先）

- ・ 斜面における異常箇所抽出事例（変動B4：広島県庄原市口和町竹地谷地先）

図-36に示すように下本谷トンネル、三次側坑口脇の斜面に谷地形が形成され、谷地形内部では斜度60度以上の救外地形が発達している。現状、変位は生じていない

が、周辺は高田流紋岩類（硬質で急崖を形成する一方、節理が発達し、落石や崩壊を引き起こしやすい地質）が分布している。今後、豪雨や地震等の外因により落石や岩石崩壊が発生し、本線に影響を及ぼす可能性がある。衛星SARによるモニタリングで監視する必要がある。

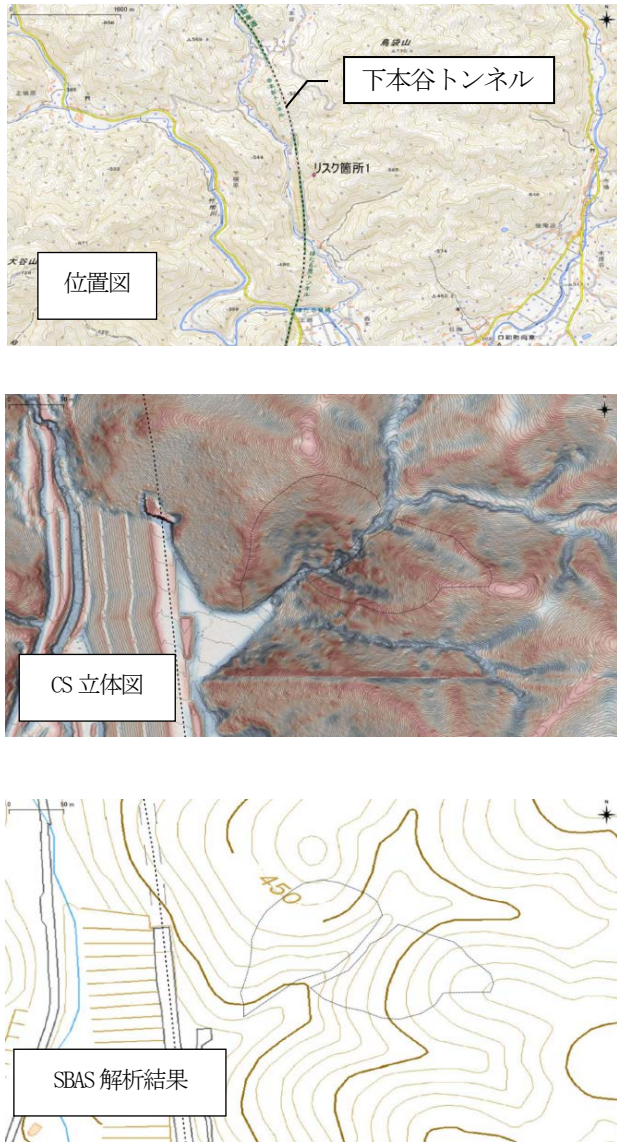


図-36 斜面におけるリスク箇所抽出事例（広島県庄原市口和町竹地谷地先）

(2) 平野部の道路での活用事例

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（PS-InSAR 解析）を行った（図-21 で前出）盛土沈下量について、地盤工学的評価を行った。

a) 盛土沈下量の解析

盛土沈下に関して、衛星SAR干渉解析（PS-InSAR時系列解析、バンド、期間：2007（平成19）年6月9日～2010

（平成22）年11月2日）を行い、その結果を微地形区分と合わせて示す。図-37より、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（図-21前出）。

b) 想定地質断面図

山形自動車道（酒田 IC～酒田みなと IC）想定地質縦断面図を図-38 に示す。微地形区分に応じて基礎地盤の軟弱層の地層構成が異なり、これが沈下量の大きさに影響していることが分かる。

c) 沈下量の経時変化

図-39 に 150.9kp における実測値と SAR 解析値の経時変化を示すが（図-21 前出）、ほぼ、一致していることが分かる。衛星 SAR 時系列解析を行うにあたり、図-40 に示すように下り線の全区間に防風壁（高さ 5m程度）が設置されており、マイクロ波が路面に到達しづらい箇所があった。そのような区間では、図-40 に示すように盛土のり面（図-40 の S1）で得られた衛星 SAR 時系列解析結果を、予め次元圧縮解析（盛土の荷重分散を考慮）で求めておいた路面と盛土斜面における沈下量の比を用いて補正した。

d) 衛星SAR解析結果の凸凹について

図-39 において衛星 SAR の解析値が凸凹している。近傍の電子基準点と同地点での衛星 SAR 時系列解析の比較を図-41 に示す。ほぼ同じ範囲で凸凹していることが分かり、これは衛星データを利用する上での特徴と考えざるを得ない。

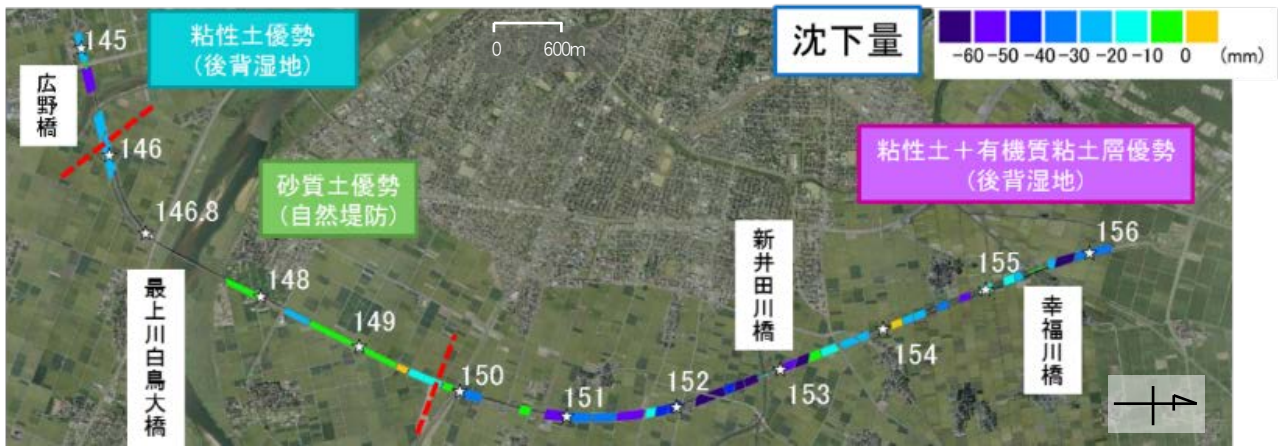


図-37 山形自動車道（酒田 IC～酒田みなと IC間）における盛土の沈下状況³⁾
 解析期間：2007(平成19)年6月9日～2010(平成22)年11月2日

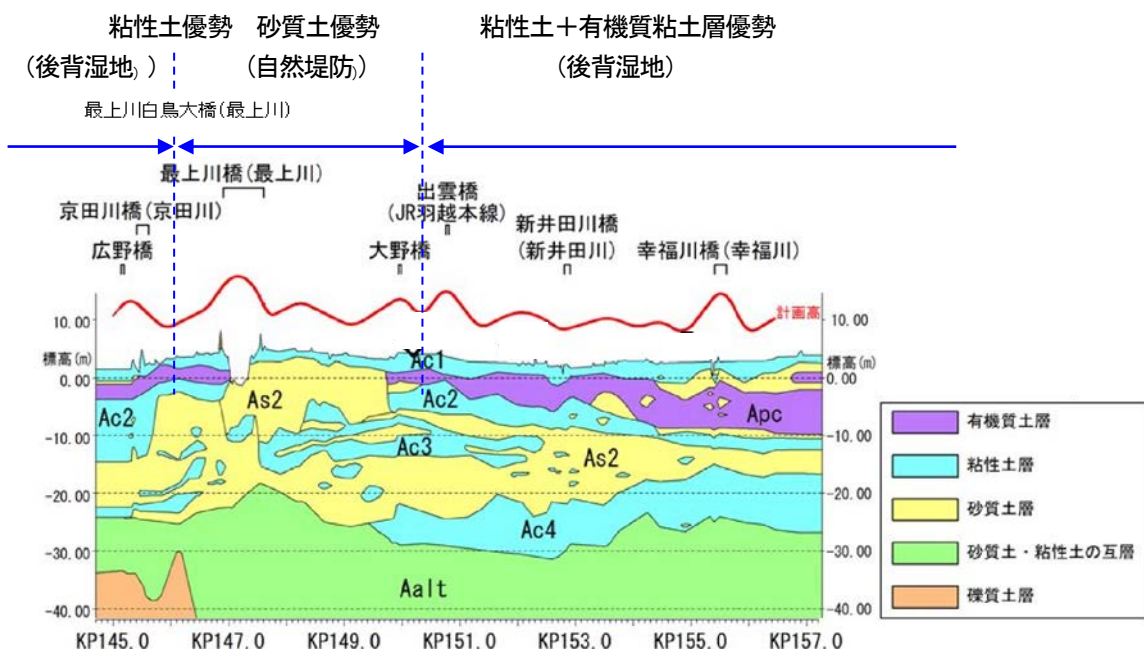


図-38 地質縦断面図

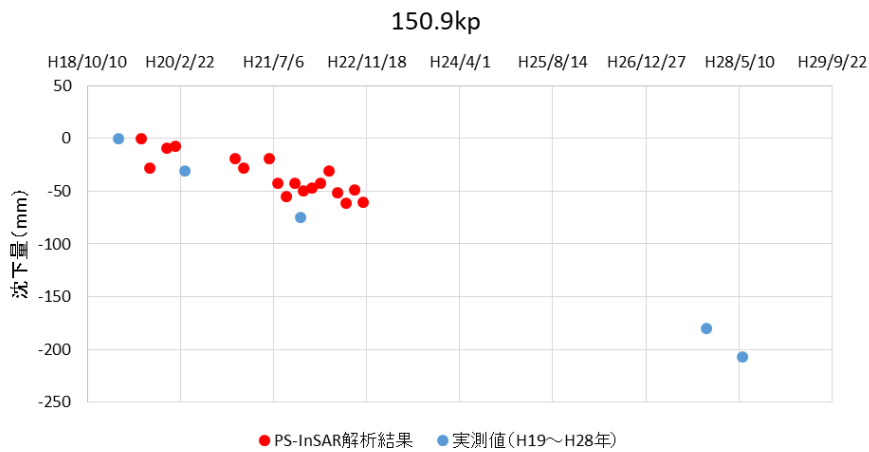


図-39 盛土沈下に関する測量結果と衛星SAR干渉解析（PS-InSAR）結果の比較⁶⁾

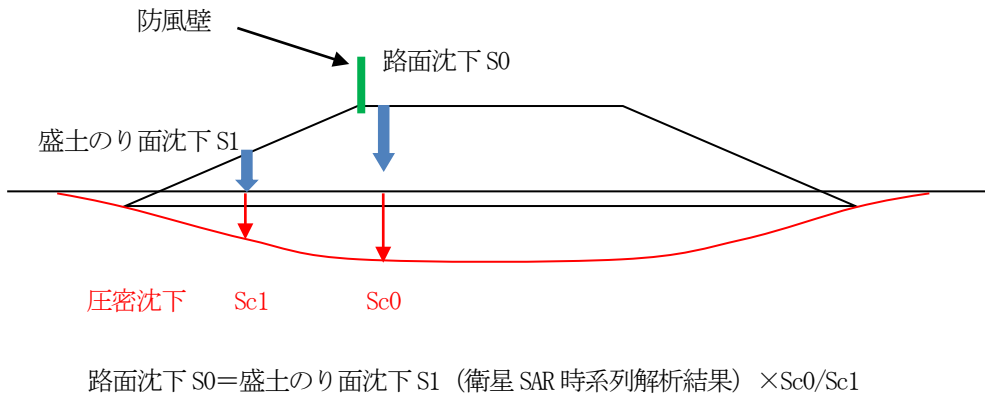


図-40 防風壁でマイクロ波が十分に届かない区間での補正方法⁶⁾

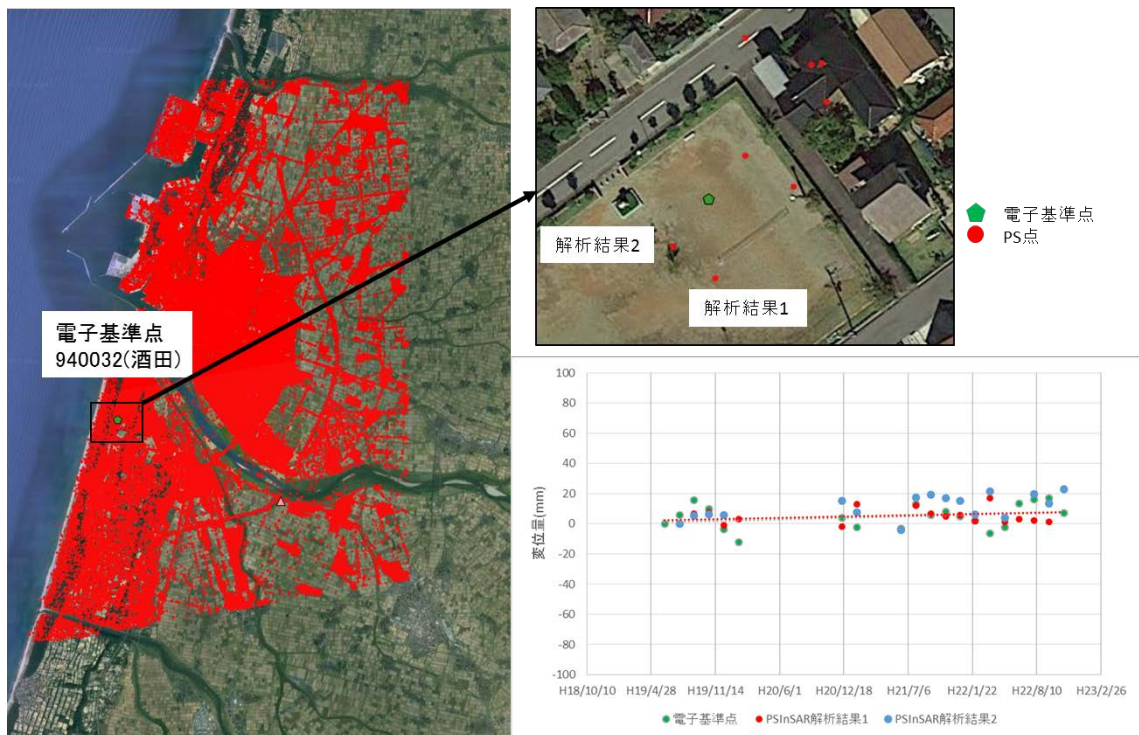


図-41 図-35 の実測値の電子基準点の動き (地図データ : Google、DigitalGlobe)

4.4 災害発生の可能性のある箇所、発生した箇所等に集中的に衛星SARを活用した事例

(1) 地すべりでの活用事例 (図-19で前出)

図-42に、道央自動車道の虻田地区で発生した地すべりに関して、現地踏査結果と衛星SAR干渉解析 (D-InSAR 解析、Lバンド、期間：2007 (平成19) 年10月20日～2010 (平成22) 年6月12日) 結果を示す。図中で赤く色づいている範囲は地すべりの影響範囲を示すが、踏査結果とほぼ、一致していることが分かる。

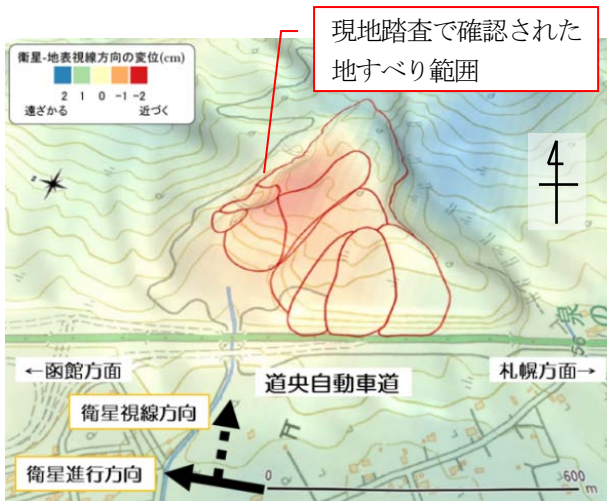


図-42 道央自動車道 (虻田地区) で発生した地すべり範囲の現地踏査と衛星 SAR 干渉解析の比較⁵⁾

(2) 大規模切土での活用事例

図-43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干渉解析 (SBAS時系列解析、Lバンド、期間：2014 (平成26) 年9月20日～2018 (平成30) 年3月31日) 結果を示す。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。

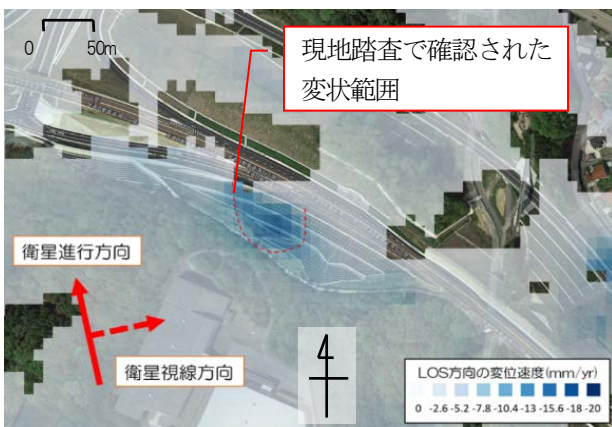


図-43 尾道松江道 (吉舎IC) で発生した斜面崩壊範囲の現地踏査と衛星SAR干渉解析の比較⁷⁾

(3) のり面対策工 (アンカー) での活用事例

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関して、ALOS-2を用いて、衛星SAR干渉解析 (SBAS時系列解析、Lバンド、期間：2014 (平成26) 年9月20日～2017 (平成29) 年3月4日) を行った。図-44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。

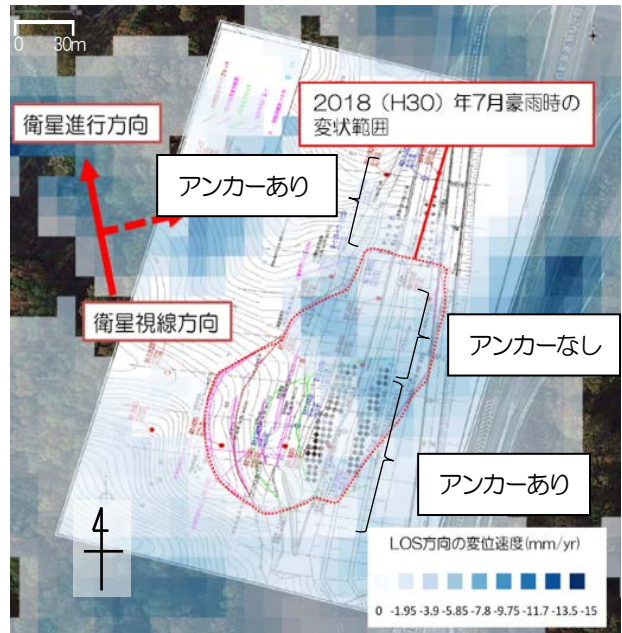


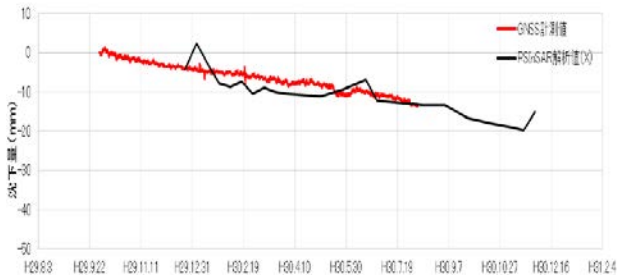
図-44 尾道松江道 (高野IC) で発生した地すべりの衛星SAR干渉解析 (SBAS) による2018年7月豪雨前の事前変状の可能性のある範囲

(4) 谷埋め盛土 (大規模盛土) での活用事例

山陽自動車道の宝塚北 SAにおける谷埋め盛土の沈下に関して、図-45に現地でのGNSS観測結果とTerraSAR-Xを用いた衛星SAR干渉解析 (PS-InSAR時系列解析、Xバンド、期間：2017 (平成29) 年12月24日～2018 (平成30) 年11月30日) 結果を示す。沈下の時系列の比較において、実測値と解析値は、ほぼ、一致していることが分かる。



(G5の計測点)

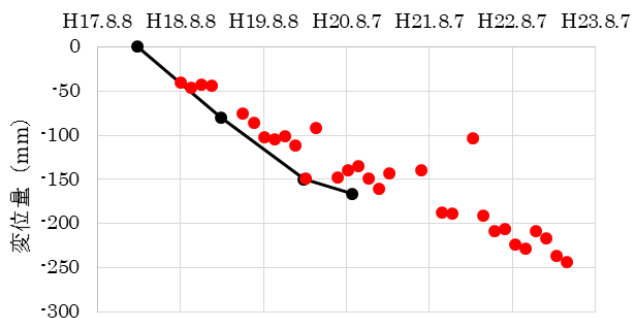


(G5 地点の沈下の経時変化)

図-45 山陽自動車道（宝塚北SA）におけるGNSS観測と衛星SAR干渉解析の比較

(5) 軟弱地盤上での活用事例

日本海沿岸東北自動車道の中条地区での盛土沈下に関して、図-46 に現地での測量結果と衛星 SAR 干渉解析（PS-InSAR 時系列解析、Lバンド、期間：2006（平成18）年8月8日～2011（平成23）年4月6日）結果を示す。沈下の時系列の比較において、実測値と解析値は、ほぼ、一致していることが分かる。



- PS-InSAR による解析値を鉛直変位に換算後、実測値の沈下曲線上にシフトしたもの
- 野上ほかから読み取った実測値

図-46 東北自動車道（中条地区）での軟弱地盤上の盛土（中条）における沈下の比較¹²⁾

4.5 海外の衛星（Xバンド、Cバンド）を利用した場合の活用事例

山陽自動車道の宝塚北 SA（図-47 参照）における谷埋め盛土の沈下に関して、図-48 に Sentinel-1 を用いた衛星 SAR 干渉解析（PS-InSAR 時系列解析、Cバンド、期間：平成29（2017）年12月25日～平成30（2018）年12月20日）結果、TerraSAR-X を用いた衛星 SAR 干渉解析（PS-InSAR 時系列解析、Xバンド、期間：2017（平成29）年12月24日～2018（平成30）年11月30日）結果を示す。図-48 より、沈下の時系列の比較において、実測値と X バンドデータを用いた解析値は、ほぼ、一致していることが分かる。

盛土のり面の GNSS による実測値と衛星 SAR による解析値の相関を図-49 に示す。実測値と特に X バンドデータ由来の観測値は、非常に良い正の相関が得られていることが分かる。

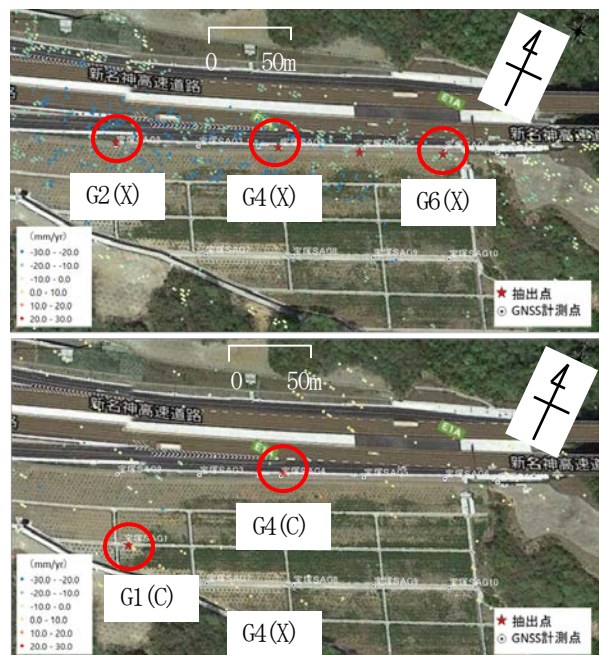


図-47 高盛土（宝塚北 SA）における解析結果（Google Earth を加工して作成）
（上：Xバンドデータ結果、下：Cバンドデータ結果）

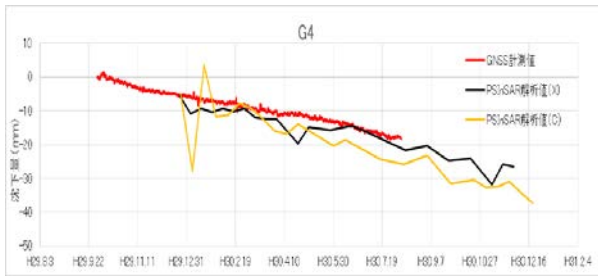


図-48 高盛土（宝塚北 SA）における沈下量の比較

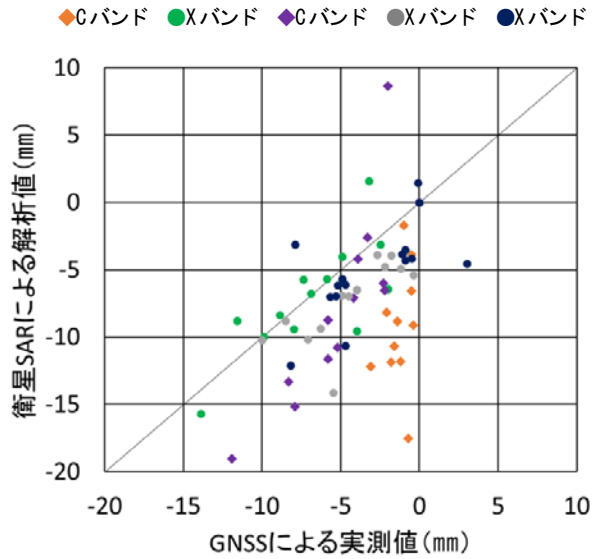


図-49 高盛土（宝塚北 SA）における GNSS 実測値と衛星 SAR 解析値相関図

4.6 のり面からの湧水箇所検出の試み

衛星画像の後方散乱係数を利用して、「尾道松江道」においてのり面からの湧水箇所の検出方法について検討した。その結果を図-50に示す。湧水箇所に付近に-30dB程度のピクセルが2つあるが、周囲にも同様なピクセルが多数あり、後方散乱係数では湧水箇所の評価は困難と考えられる。

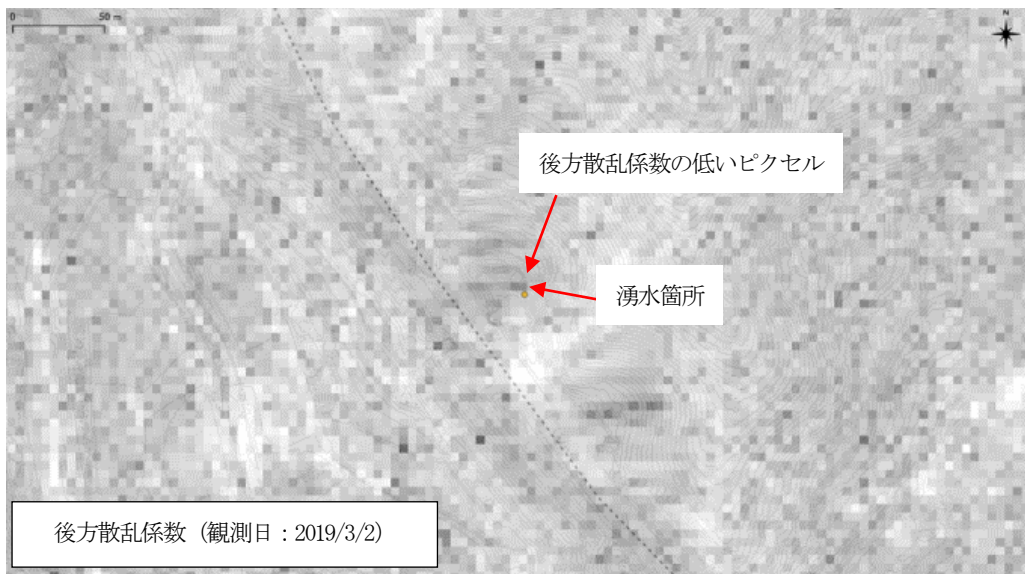


図-50 後方散乱係数を活用したのり面からの湧水箇所の検出結果(広島県世羅町)

4.7 衛星SARの活用マニュアルの作成

道路管理者へのヒヤリング等を踏まえた「合成開口レーダ (SAR) の道路土構造物の維持管理への活用マニ

アル」を作成した。マニュアルの作成に当たっては、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にし、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た。

マニュアル及び道路管理者からの意見の詳細は資料編に示し、概要を以下に示す。

(1) マニュアルの目次

マニュアルの目次を以下に示す。

第1章 衛星 SAR の道路土構造物等の維持管理への適用に関する概説

- 1.1 マニュアルの目的と位置付け
- 1.2 衛星 SAR データによる道路土構造物等の維持管理の方法と特徴
 - 1.2.1 使用する衛星 SAR データ
 - 1.2.2 地盤変位測定の方法
 - 1.2.3 具体的な作業手順
- 1.3 衛星 SAR データを道路土構造物等の維持管理へ活用する効果

第2章 衛星 SAR を用いた道路土構造物等の維持管理手法

- 2.1 目的の設定
- 2.2 道路土構造物等の維持管理における衛星 SAR データの活用
- 2.3 観測期間の設定
- 2.4 衛星 SAR データの選び方
 - 2.4.1 衛星 SAR に使用されているマイクロ波の周波数特性
 - 2.4.2 解析に用いる衛星 SAR
 - 2.4.3 衛星 SAR データ数の把握
 - 2.4.4 衛星 SAR データの解析可能範囲
 - 2.4.5 衛星 SAR 干渉解析に用いる衛星 SAR データの確定と留意点
- 2.5 衛星 SAR 干渉解析
 - 2.5.1 1ペアの衛星 SAR 干渉解析
 - 2.5.2 時系列解析（スタッキング解析）
 - 2.5.3 2.5次元解析
 - 2.5.4 任意断面方向への変換解析
- 2.6 解析結果の道路土構造物等への適用
 - 2.6.1 具体的な道路土構造物等への衛星 SAR の活用方法
 - 2.6.2 地盤変動範囲の想定
 - 2.6.3 沈下量の経時変化
 - 2.6.4 任意な断面における挙動（水平、鉛直）の把握
 - 2.6.5 地表面変位から想定すべり線の設定
 - 2.6.7 他の広域の地形地質情報との組み合わせ
- 2.7 衛星 SAR を活用するうえでの留意点
 - 2.7.1 測定できない地盤変動
 - 2.7.2 1ペアの衛星 SAR 干渉解析でおきるノイズ

- 2.7.3 衛星 SAR の実務への適用条件や適用限界及び長所や短所
- 2.7.4 道路土構造物等の維持管理における効果的な適用方法
- 2.7.5 衛星 SAR 導入の初期・運用コストからの導入上の課題

第3章 道路土構造物等への衛星 SAR の活用事例

- 3.1 一路線（広域）での活用事例
 - 3.1.1 丘陵・山地部の道路での活用事例
 - 3.1.2 平野部の道路での活用事例
- 3.2 災害発生の可能性のある箇所、発生した箇所等に集中的に衛星 SAR を活用した事例
 - 3.2.1 地すべりでの活用事例
 - 3.2.2 大規模切土での活用事例
 - 3.2.3 のり面対策工（アンカー）での活用事例
 - 3.2.4 谷埋め盛土（大規模盛土）での活用事例
 - 3.2.5 軟弱地盤上の盛土での活用事例
- 3.3 海外の衛星（Xバンド、Cバンド）を利用した場合の活用事例

<参考文献>

- 資料編
- 資料—1. SAR 衛星の種類と特徴及び画像データの入手方法
- 資料—2. 任意な断面における挙動（水平、鉛直）の推定法
- 資料—3. 必要コストの積算例
- 資料—4. 特記仕様書の例
- 資料—5. 用語の説明

(2) 道路管理者からの意見の概要

意見照会では、15の組織から回答を得ることができた。掲載した事例について「具体的な活用事例があり適用検討に役立つと思う」、「具体的な方策の理解に役立てられて良い」といった肯定的な意見がある一方、解析技術について「受注者が対応する点であり、道路管理者がここまで把握する必要はない」といった意見もあった。また、「道路管理者はSAR未経験であることが多く、具体的な活用法が理解しにくい」、「専門用語が理解できない」など、認知不足と思わせる意見もあった。

第5章 まとめ

5.1 得られた研究成果

研究で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 衛星 SAR による InSAR 解析により草木の影響を受けるが、Lバンドを用いることにより、すべり土塊の範囲を特定することは可能である。
- (2) 衛星 SAR により時系列解析 (PS-InSAR, SBAS) により路面などの平坦な場所が連続し、沈下が卓越する箇所では、「mmオーダー」の沈下量を経時的に解析できる。
- (3) 衛星 SAR による 2.5次元解析結果で得られた鉛直変位を斜面方向の変位に換算することにより、一路線における斜面の安全性のスクリーニングを行うことができる。
- (4) 衛星 SAR 解析においてアセンディングやディセンディングなどで得られる衛星方向の変位量データを組み合わせることにより、任意断面の主測線方向の鉛直、水平方向変位を求めることができる。
- (5) Cバンド、Xバンドは波長が短く、一般的に精度が高いと言われているが、のり面では、草木の影響で十分な解析成果が得られない場合がある。
- (6) 後方散乱係数を用いた湧水箇所の解析に関しては、湧水箇所を特定する有益な結果は得られなかった。
- (7) 一路線における道路土構造物への衛星 SAR の適用に関しては、SBAS より求めた累積月平均変位量から変動 A~D を評価し、注意すべき地形地質 (崩壊地形、地すべり地形、谷埋め盛土など) と組み合わせ、路線全体のスクリーニングが可能である、道路の維持管理に対して有益な情報を提供できることが分かった。
- (8) 現場でのLP測量と衛星SARの比較により、地質リスクを評価するために必要な変状範囲、前兆現象を評価できることが分かった。

5.2 今後の道路政策への提案

(1) 研究成果による道路行政への貢献内容

路線毎に図-51 に示すように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。

(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。

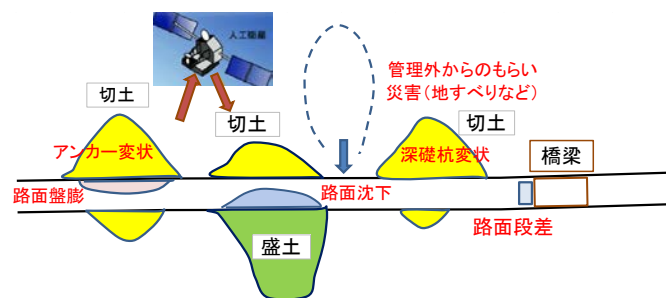


図-51 広域道路変状を一括してモニタリング

(3) 研究成果の継続性、国際展開

得られた研究成果は、図-52に示すように国交省、NEXCOグループを中心に高速道路の実際の点検で活用し、実務上の課題の抽出と改良を重ねたいと考えている。また、成果を各種学会や道路会議等で発表・公表することで、より広範囲のかたから意見をいただきな

から全国の道路にも展開したいと考えている。さらには、東南アジア諸国の道路維持管理にも活用していただけるよう、JICA等への働きかけ、英文論文として成果をとりまとめて国際学会等で発表していく考えである。

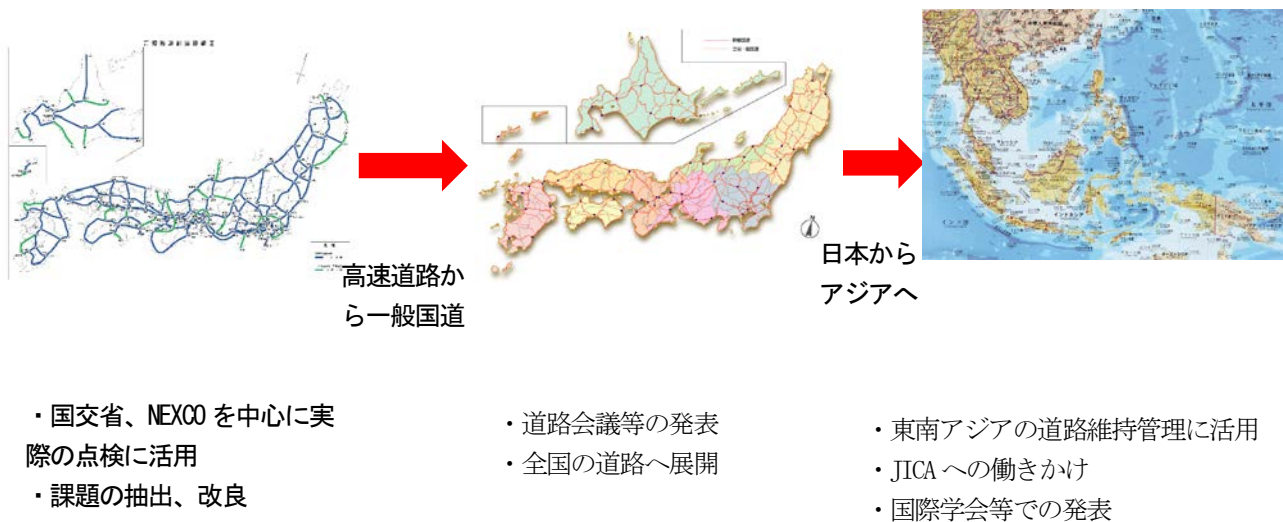


図-52 研究成果の継続性、国際展開

参考文献

- 1) 国土地理院ホームページ：干渉 SAR の原理
https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_mechanism.html
- 2) 国土地理院ホームページ：干渉 SAR の基礎・原理に関する質問、基線長、垂直基線長とは何ですか？
https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/gsi_sar_faq1.html#1-8
- 3) 国土地理院ホームページ：SAR 干渉画像の作成手順
https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_procedure.html
- 4) 国土地理院ホームページ：干渉 SAR の応用
<https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar.application.html>
- 5) 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、2018 年 7 月、pp.1113-1114
- 6) 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、2018 年 7 月、pp.1111-1112
- 7) 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、2018 年 7 月、pp.1065-1066
- 8) (独) 土木研究所、国際航業 (株)、日本工営 (株)、基礎地盤コンサルタンツ (株)、(株) キタック、(株) レイディック：地すべり線の形状推定法、鹿島出版会、2013 年 5 月
- 9) 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、2018 年 7 月、pp.1067-1068
- 10) 永川勝久：道路斜面管理への衛星 SAR 適用例、基礎地盤レクチャー in 関西、2018 年 9 月
- 11) 神山嬢子、江川真史、國友優：人工衛星 SAR 画像による河道閉塞箇所 の緊急判読調査手法の提案、国土交通省国土技術研究会論文集、2014 年、pp.13-17
- 12) 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、2018 年 8 月、pp.219-220

第6章 資料編

6.1 衛星 SAR の種類と特徴

人口衛星に搭載された SAR の波長帯には、L、C、X バンドがあり、このうち分解能 100m 以下の SAR 画像を取得可能な人工衛星（2020 年 12 月時点）の概要を資料表-18 に示す。

表-18 SAR 画像が取得可能な人工衛星（2020 年 12 月時点）の例

衛星名 (開発国)	分解能	観測幅	観測波長	回帰日数	衛星視線		価格/画像
					入射角	回転角	
ALOS-2 (日本)	1×3m	25km	Lバンド	14日 (3~4月)	8~70度	約9度	8万円
	3m	50km					
Sentinel-1 (EU)	5×20m	250km	Cバンド	12日	29.1~46度	約11度	無料
TerraSAR-X (ドイツ)	1×2m	10km	Xバンド	11日	15~60度	約9度	48万円~

- ・ 観測波長：Lバンド≒24cm、Cバンド≒6cm、Xバンド≒3cm であり、波長が長い方が樹木を透過しやすい。
- ・ 回帰日数：周回する人工衛星が、自転する地球上のある同一地点の上空に戻るまでの日数
“下段（ ）” は、同一条件で観測が行われる回帰日数
- ・ 入射角：任意断面方向への変換解析に必要な衛星視線入射角
- ・ 回転角：任意断面方向への変換解析に必要な衛星視線方位角の東西方向からの回転角

6.2 任意な断面における挙動（水平、鉛直）の推定法

(1) 任意な検断断面方向への変換解析の考え方

衛星視線方向の解析結果を用いて、道路土構造物の任意な検断断面における水平、鉛直方向変位の解析方法を検討した。

衛星視線方向の解析結果を用いて、道路土構造物の任意な検断断面における水平、鉛直方向変位の解析方法を検討した。衛星SARは、南北又は北南方向の軌道を描き、ほぼ東西方向の衛星視線方向の地盤の変位を測定できる。道路土構造物の場合、図-53に示すように任意な方向に主測線があり、この主測線方向の変位に変換する必要がある。また、南北方向の主測線では、変位を求めることが困難であることが分かる。

図-54に任意位置の検断断面における変位と衛星視線方向の関係を示す。基本的な角度は以下のように設定している。

- 任意断面は、東西方向から「 ψ （プサイ）度時計回り」に回転した面とした。
- 衛星視線方位角は、東西方向から「 ϕ_i （ファイ）度時計回り」に回転した方向である。
- 衛星視線入射角は、鉛直軸から「 θ_i （シータ）度」傾斜した方向である。

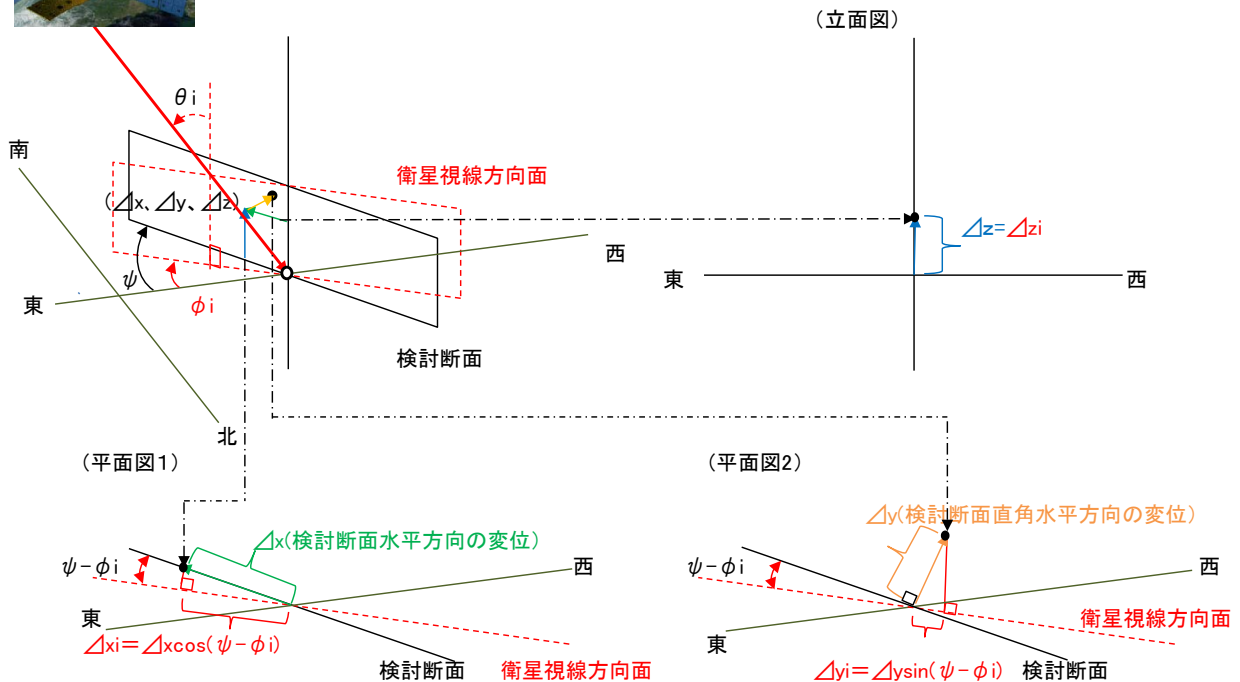


図-54 検断断面における3次元変位 (Δx 、 Δy 、 Δz) と衛星視線方向の関係

- 任意な検断断面での3次元変位は「 Δx 、 Δy 、 Δz 」である。

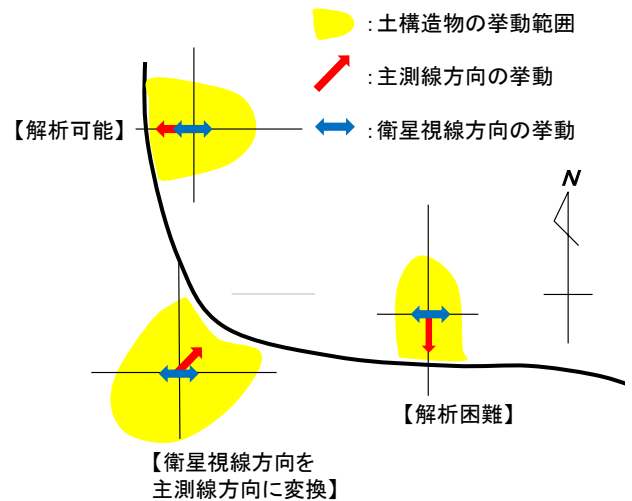


図-53 衛星視線方向と土構造物の主測線方向の関係

任意な検討意断面における、水平変位（検討断面主側線方向）、水平変位（検討断面主側線直角方向）、鉛直変位を Δx 、 Δy 、 Δz とすると、衛星視線方向には以下のように投影される。

$$\Delta x \text{ の投影} \Rightarrow \Delta x_i = \Delta x \cos(\psi - \phi_i) \quad (1)$$

$$\Delta y \text{ の投影} \Rightarrow \Delta y_i = \Delta y \sin(\psi - \phi_i) \quad (2)$$

$$\Delta z \text{ の投影} \Rightarrow \Delta z_i = \Delta z \quad (3)$$

ここで、 i は「衛星視線方位角、入射角の異なる3ペアの $i=1\sim 3$ 」とする。

(2) 任意な検討断面での3次元変位 (Δx 、 Δy 、 Δz) の求めかた

図-54 を利用して、衛星視線方向の差分 Δr_i は、以下の式で求めることができる。

$$\begin{aligned} \Delta r_i &= (\Delta r_{i1}, \Delta r_{i2}, \Delta r_{i3}) \\ &= \Delta x \cdot \sin \theta_i \cos(\psi - \phi_i) + \Delta y \cdot \sin \theta_i \sin(\psi - \phi_i) + \Delta z \cdot \cos \theta_i \quad (4) \end{aligned}$$

式(4)を用いて、衛星視線方向の方位角、入射角が異なる3ペア ($i=1\sim 3$) について衛星視線方向の差分 Δr_i ($i=1\sim 3$) については、以下の式が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} \Delta r_1 \\ \Delta r_2 \\ \Delta r_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta_1 \cos(\psi - \phi_1) & \sin \theta_1 \sin(\psi - \phi_1) & \cos \theta_1 \\ \sin \theta_2 \cos(\psi - \phi_2) & \sin \theta_2 \sin(\psi - \phi_2) & \cos \theta_2 \\ \sin \theta_3 \cos(\psi - \phi_3) & \sin \theta_3 \sin(\psi - \phi_3) & \cos \theta_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} \quad (5)$$

式(5)において、未知数は Δx 、 Δy 、 Δz であるので、式(5)を連立方程式として解くことができる。

地すべり等の斜面のすべりに関しては、検討断面では、「 $\Delta y=0$ 」とすることが多いため、2ペア（南行き軌道及び北行き軌道）の衛星視線方向の差分値より、式(6)を用いて Δx 、 Δz を求めることが可能である。

$$\begin{pmatrix} \Delta r_1 \\ \Delta r_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta_1 \cos(\psi - \phi_1) & \cos \theta_1 \\ \sin \theta_3 \cos(\psi - \phi_3) & \cos \theta_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{pmatrix} \quad (6)$$

図-55 に示すような南行き軌道（ディセンディング）及び北行き軌道（アセンディング）により Δx 、 Δz を式(7)を用いて求めることができる。図-55 及び式(7)では、南行き軌道（ディセンディング）及び北行き軌道（アセンディング）を明確にするため、記号を以下のように書き換えている。

$$\Delta r_1, \Delta r_2 \Rightarrow \Delta d, \Delta a$$

$$\phi_1, \phi_3 \Rightarrow \phi_d, \phi_a$$

$$\theta_1, \theta_3 \Rightarrow \theta_d, \theta_a$$

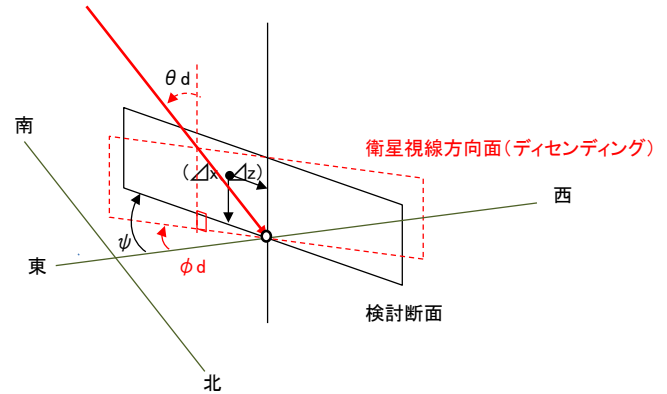
南行き軌道（ディセンディング）及び北行き軌道（アセンディング）では、「 ϕ_d 、 ϕ_a 」や「 θ_d 、 θ_a 」の方向が図2.5 示すように逆であるので、式(7)の適用に当たっては

「正負の判断」に留意する必要がある。

$$\begin{pmatrix} \Delta d \\ \Delta a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta_d \cos(\psi - \phi_d) & \cos \theta_d \\ \sin \theta_a \cos(\psi - \phi_a) & \cos \theta_a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{pmatrix} \quad (7)$$

式(7)において $\psi=0$ （検討断面が東西方向）の場合が2.5次元解析に相当する。

ディセンディング(南行軌道)



アセンディング(北行軌道)

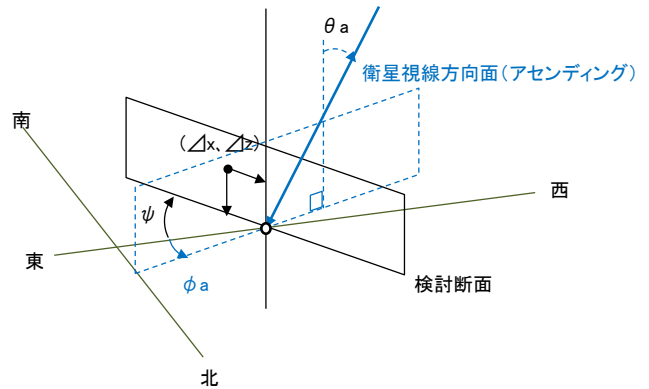


図-55 検討断面における変位と衛星視線方向面（ディセンディング及びアセンディング）の関係

これらの任意断面への変換解析は、任意断面内で発生した地盤の変位 Δx 、 Δz が、衛星視線の2方向の変位 (Δd 、 Δa) として計測されることを利用し、衛星視線の2方向の変位 (Δd 、 Δa) を任意断面に投影して Δx 、 Δz を求めることを意味している。

道路政策の質の向上に資する技術研究開発 成果報告レポート No. 29-9
研究テーマ名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

2021.6