

(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)

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)

令和3年7月

国立大学法人 東京大学
基礎地盤コンサルタンツ株式会社

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
1.1 マニュアルの目的と位置付け	1
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	3
1.2.1 使用する衛星 SAR データ	3
1.2.2 地盤変位測定のお考え方	3
1.2.3 具体的な作業手順	4
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	4
第2章 衛星 SAR を用いた道路土構造物等の維持管理手法	7
2.1 目的の設定	7
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	9
2.3 観測期間の設定	12
2.4 衛星 SAR データの選び方	12
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	12
2.4.2 解析に用いる衛星 SAR	14
2.4.3 衛星 SAR データ数の把握	14
2.4.4 衛星 SAR データの解析可能範囲	15
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	16
2.5 衛星 SAR 干渉解析	18
2.5.1 1 ペアの衛星 SAR 干渉解析	20
2.5.2 時系列解析（スタッキング解析）	23
2.5.3 2.5次元解析	23
2.5.4 任意断面方向への変換解析	25
2.6 解析結果の道路土構造物等への適用	26
2.6.1 具体的な道路土構造物等への衛星 SAR の活用方法	26
2.6.2 地盤変動範囲の想定	28
2.6.3 沈下量の経時変化	30
2.6.4 任意な断面における挙動（水平、鉛直）の把握	31
2.6.5 地表面変位から想定すべり線の設定	33
2.6.6 他の広域の地形情報等との組み合わせ	33
2.7 衛星 SAR を活用するうえでの留意点	35
2.7.1 測定できない地盤変動	35
2.7.2 1 ペアの衛星 SAR 干渉解析でおきるノイズ	36
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	37
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	39
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	45

第3章 道路土構造物等への衛星 SAR の活用事例	47
3.1 一路線（広域）での活用事例	47
3.1.1 丘陵・山地部の道路での活用事例	47
3.1.2 平野部の道路での活用事例	50
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	53
3.2.1 地すべりでの活用事例	53
3.2.2 大規模切土での活用事例	54
3.2.3 のり面対策工（アンカー）での活用事例	55
3.2.4 谷埋め盛土（大規模盛土）での活用事例	56
3.2.5 軟弱地盤上の盛土での活用事例	57
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	58
<参考文献>	60

資料編 目次

資料—1. SAR 衛星の種類と特徴及び衛星データの入手方法	資料 1
資料—2. 任意な断面における挙動（水平、鉛直）の推定法	資料 2
資料—3. 必要コストの積算例	資料 7
資料—4. 特記仕様書の例	資料 11
資料—5. 用語の説明	資料 18

本マニュアルの構成

本マニュアルは、道路土構造物等の維持管理に取り組む実務担当者に向けて衛星 SAR の実務的な活用方法を示し、道路土構造物への維持管理手法の一つの有効な手段であることを普及する目的で作成している。

第1章では、道路土構造物の維持管理を行う上で、合成開口レーダー¹⁾（以下、衛星 SAR¹⁾ [synthetic aperture radar]と略称する）の基本的な仕組みとどのように活用できるかなどの内容をはじめ、適用限界、必要な経費などや道路土構造物等（道路土構造物、自然斜面）²⁾の維持管理に適用する手順を概説している。

第2章では、SAR を活用した道路土構造物等の維持管理に具体的な適用目的毎に観測期間、周波数や干渉解析方法など技術的な内容について詳述するとともに活用する上での留意事項を示している。

第3章では、道路土構造物への衛星 SAR（陸域観測技術衛星「だいち」（ALOS）及び「だいち2号」（ALOS-2）を用いた L バンド）の活用事例を示している。また、海外の衛星を利用した場合の解析事例（X バンド、C バンド）での活用事例も示している。

巻末には、衛星 SAR のデータに関する一般的な知識や用語説明などをまとめている。

※文中の下付き数字「¹⁾」は、資料編「用語の説明」における通し番号に対応する。

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

本マニュアルは、道路土構造物等（道路土構造物、自然斜面）の維持管理として行われている「巡視⁴⁾」や「点検、危険度調査⁵⁾」及び「災害発生時の緊急・恒久対策⁶⁾」に衛星 SAR を活用し、より効率的な維持管理に資することを目的とする。

衛星 SAR は、現在行われている「巡視」や「点検、危険度調査」及び「災害発生時の緊急・恒久対策」に代わるものではなく、これらを安全で効率的に行ううえでの支援技術として位置付けられ、「一路線（広域）の道路の維持管理⁷⁾」や「災害発生時の緊急・恒久対策」などに活用できる。

衛星 SAR を道路土構造物等の「巡視」や「点検、危険度調査」に活用することにより、一路線（広域）の道路の維持管理に対して

- ・ 過去に遡ったデータベース⁸⁾（以下、DB⁸⁾と省略する）の作成
- ・ 変状の影響範囲（管理区域外を含む）⁹⁾、累積月平均変位量¹⁰⁾の評価
- ・ 優先的に現地踏査¹¹⁾を行うべき箇所の選定
- ・ 一路線毎に広域の道路変状を定期的なモニタリング

が可能となり、以下の効果が期待できる。

- ・ 道路土構造物等の点検、維持管理の効率化
- ・ 点検費用の縮減
- ・ 路線全体の均一的な耐久性の向上
- ・ 道路土構造物の性能・対策工優先度の評価
- ・ 急激な変状箇所を抽出
- ・ 航空 LP 測量¹²⁾、GNSS 測量¹³⁾、UAV 測量¹⁴⁾技術を組み合わせることによる調査精度の向上

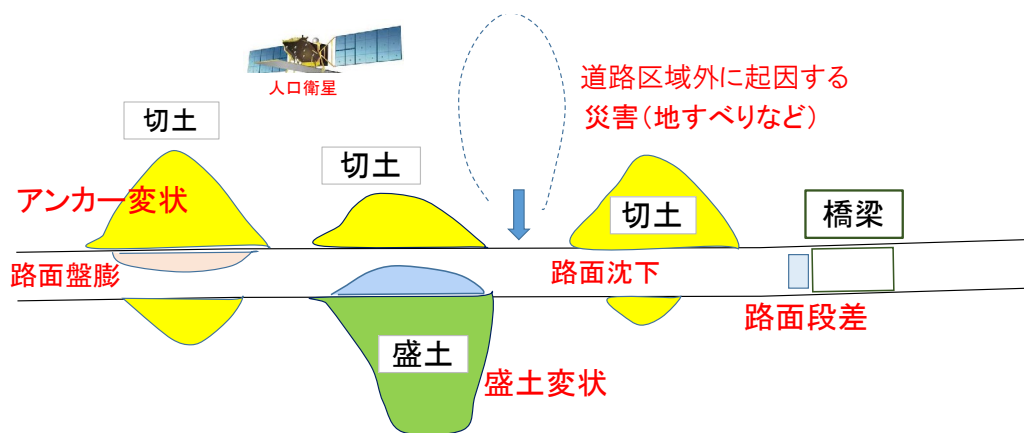


図 1.1 一路線の広域の道路変状を定期的（ALOS-2 の場合約 4 カ月に 1 回）にモニタリング

また、衛星 SAR を道路土構造物の「災害発生時の緊急・恒久対策」に活用することにより、災害が発生した箇所、災害の発生が予測される（地盤変位が進行している）箇所に対して

- ・ 変状の影響範囲の評価
- ・ 定量的、時系列的な挙動の把握
- ・ 現地踏査のための適切な除草範囲の設定
- ・ 効率的な現地踏査

が可能となり、以下の効果が期待できる。

- ・ 現地の地盤変状を踏まえた適切な応急対策工¹⁵⁾の提案・実施
- ・ 現地の地盤変状を踏まえた適切な詳細調査計画¹⁶⁾の立案・実施
- ・ 恒久対策工¹⁷⁾ 施工後の効果の確認

本マニュアルの適用に当たっては、以下の「適用性」、「適用範囲」及び「留意点」を考慮して使用する。

表 1.1 衛星 SAR を道路土構造物等に適用する場合の適用性、適用範囲及び留意点

適用性	<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 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。2022 年には ALOS-4 が打ち上げられ 2 週間に 1 回程度のデータ取得が可能となる予定である。 ・ 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、構造物の方向、変動特性を考慮して適用する必要がある。 ・ 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 でも不可能である。
適用範囲	道路土構造物等 (道路土構造物、自然斜面) の地盤変動に関するスクリーニング、継続監視、前兆現象のある斜面崩壊等の災害対応
留意点	<ul style="list-style-type: none"> ・ 観測ごとの地盤変位が電磁波の位相差 (Lバンド≒12cm、Cバンド≒3cm、Xバンド≒1.5cm) を超えた場合には衛星 SAR 解析が追従できない場合がある。 ・ 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。 ・ GNSS 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。

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

本マニュアルにおいては、地域観測技術衛星¹⁸⁾として国内の「だいち」(ALOS)、「だいち2号」(ALOS-2)、海外の Sentinel-1 (EU)、TerraSAR-X (独) の利用を想定する。これらの衛星の諸元などの詳細は、資料-1 を参照されたい。

1.2.2 地盤変位測定の方法

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 1.2)。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方法である。

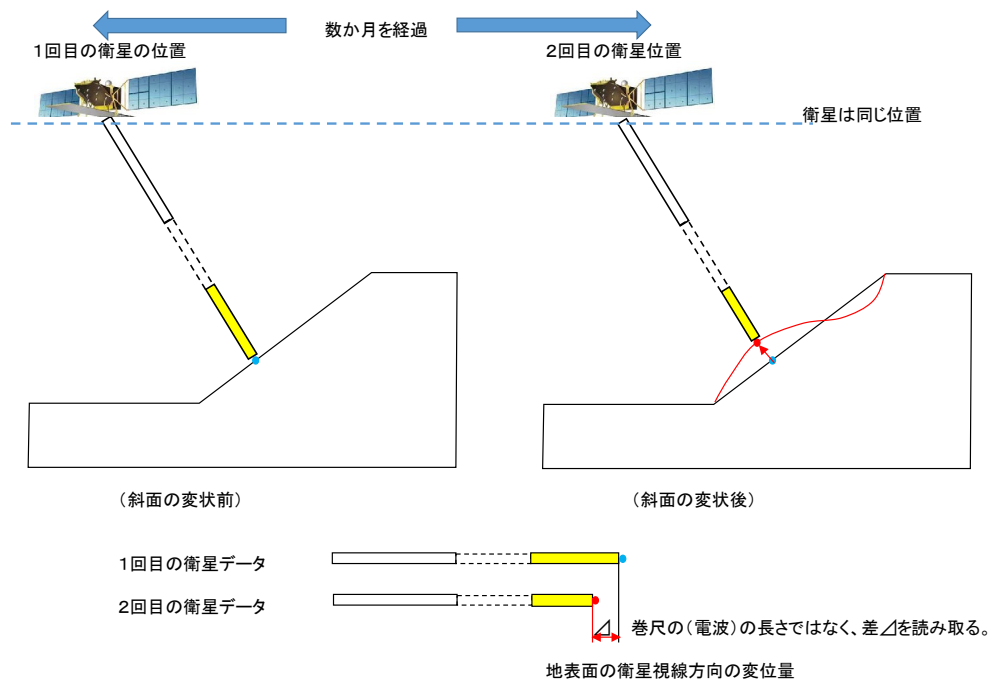


図 1.2 衛星 SAR による地盤変位測定の方法

(国土地理院、https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_mechanism.html)

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SAR解析¹⁹⁾)。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)²⁰⁾)。さらに、道路土構造物等では、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

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）。

ここで、解析する衛星データの間隔は様々であるため、最終的には、求めた地盤高の変位量を年間沈下量「mm/年」に換算して評価する。詳細については、第2章を参照のこと。

1.2.3 具体的な作業手順

衛星データ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1.3）。

- ① **【入力】**：解析対象箇所の衛星データを購入（衛星データの購入先は資料・1参照）し、入力データとする。
- ② **【処理】**：データを解析する（1ペアの干渉SAR解析→スタッキング解析→2.5次元解析²¹⁾、任意断面方向への変換解析²²⁾）。実測値がある場合には対比し、精度を検証する。
- ③ **【出力】**：解析データから着目地点（例えば、崩壊・地すべり地形箇所、軟弱地盤の沈下箇所など）での変位速度²³⁾、ある基準日からの変位量の経時変化を整理する。
- ④ **【整理・評価】**：地盤変位速度・変位量を整理し、変状の影響範囲、現地踏査を行うべき箇所の除草箇所の選定²⁴⁾等を行い、広域の道路の維持管理や災害発生時の緊急・恒久対策などの評価を行う。

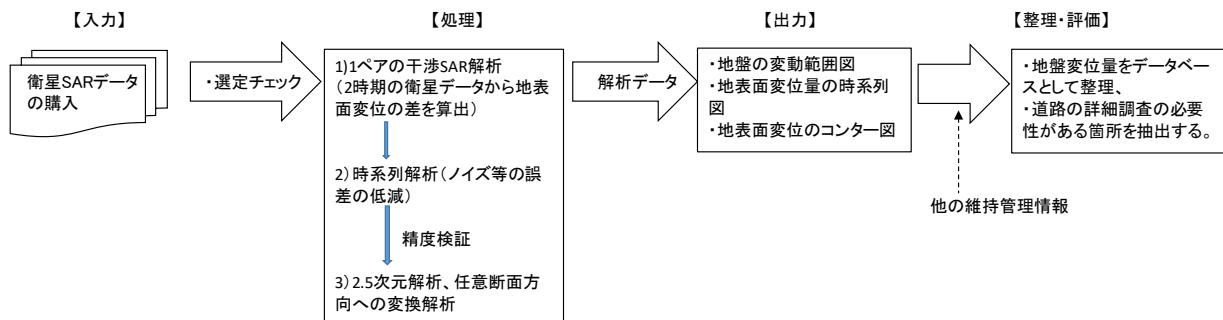


図1.3 地盤変動解析のための作業手順（概略）

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

道路土構造物等の安全性は、鋼・コンクリート構造物と異なり、築造された年代（＝設計に適用した基準の制定時期）で一律に評価されるのではなく、土構造物の築造された地域の地形・地質条件、地下水状態などで変化し、危険な箇所では事前に何らかの変状が生じていることが多い。

このため、道路土構造物等の特徴を踏まえた「一路線（広域）の道路土構造物の点検・維持管理」や「災害発生時の緊急・恒久対策」における技術的課題としては、

- ① 道路土構造物等全体の変状履歴に関して築造当時からの定量的、時系列的なデータベースがない（課題1）
- ② 点検は、目視点検²⁵⁾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である。災害時にも初期段階では目視による現地踏査が主流であり、いつ頃からこの変状が発生しているかを推測すること、道路区域外に起因する災害確

認²⁶⁾が困難である（課題 2）

- ③ 切土、盛土区間（用地外も含む）では、除草が十分にできず、変状および変状の影響範囲を見つけにくい（課題 3）。
- ④ 広域の変状箇所の変進速度、（変状の）地盤工学的原因²⁷⁾が分からず対策工の調査・設計・施工の優先順位をつけ難い（課題 4）。

などがある。

本マニュアルで使用する衛星 SAR 差分干渉解析（以下、衛星 SAR 干渉解析と省略する）²⁸⁾は、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る。このため従来、土木分野で活用されている表 1.2 に示すように類似技術と比較し、活用において以下の点で特徴を有する。

- ・ 測量、GNSS 測量では、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。
- ・ 広域の地形データを得られる航空 LP 測量は、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²⁹⁾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 LP 測量が必要であり、新たに発生しつつある斜面崩壊等を航空 LP 測量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 LP 測量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。
- ・ MMS では、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1.2 道路土構造物等で使用されている類似手法との比較

類似技術	概要	特徴
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。
航空LP測量 ¹²⁾	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。
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。
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。

地盤の変状を「地表面を数メートルの格子で分割し、格子の平均変位量を mm 単位」で把握することが可能であり、以下の効果が期待できる（図 1.4 参照）。

- ・ 過去に遡って（ALOS-1を利用した場合2006年～2011年、ALOS-2を利用した場合2014年～現在）変状箇所の地盤変位のデータベースの作成が可能となる。過去からの地盤変位の経時変化より、地盤全体の滑動性の有無、変状の影響範囲を評価できる（課題1に対して）。
- ・ 定期的な衛星データ活用により同じ視点で変状箇所の点検が可能となり、点検・維持作業の時間短縮、作業環境改善が図れる。また、現地踏査の事前情報として管理外を含めた変状の速度を提供することができる（課題2に対して）。
- ・ 地盤の変状の可能性のある箇所、範囲を特定できるため、必要最小限の費用で除草を行い、状況を確認でき、短期間での応急対策工の設計・施工が可能となる（課題3に対して）。
- ・ 道路土構造物等築造時のからの変状の進行速度、変状が生じた地盤工学的な要因が分かることにより、点検・維持管理の優先度を考慮した保全計画を立案し、道路土構造物等の信頼性の向上を図ることができる。また、災害箇所では、どこを重点的に対策工の設計・施工をすべきかの情報を提供することができる（課題4に対して）。

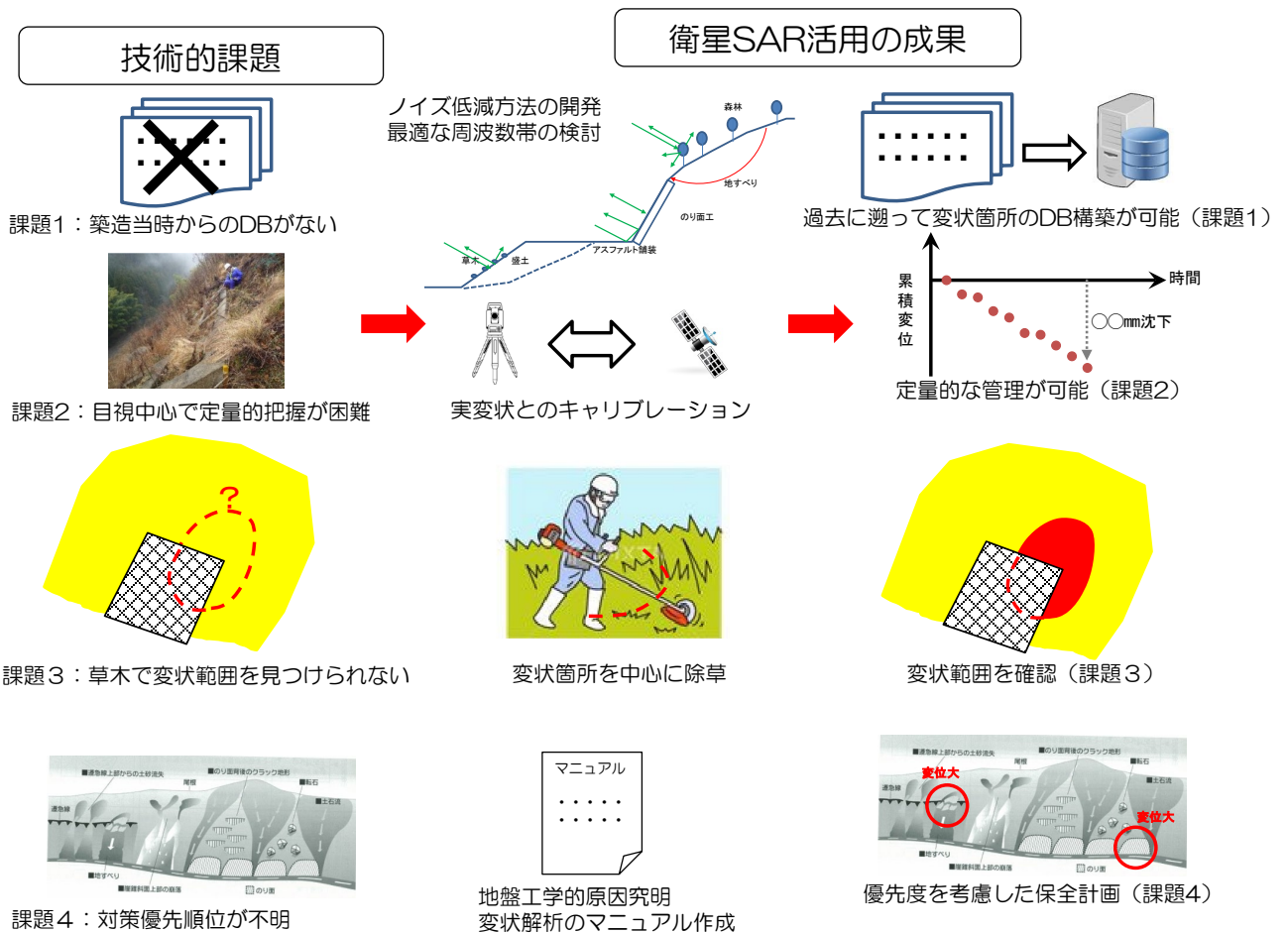


図 1.4 広域の道路土構造物の点検、維持管理の技術的課題と衛星 SAR 活用の成果

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

衛星による観測のメカニズムを十分に理解した上で、これまで目視観察、変位測量（GNSS を含む）及び動態観測のみで実施されてきた地表面の変動量観測を、中・長期的視野から俯瞰し、衛星データを活用する目的を明確に定める。

衛星データを活用した地盤変位測定の一歩のメリットは、面的に地表変位を把握できることである。従来の目視観察、変位測量及び動態観測³⁰⁾と併用し、両者の特徴を上手く組み合わせることで、地表面変量を測定し、「一路線（広域）における道路の維持管理」、「災害発生の可能性のある箇所、発生した箇所での緊急、恒久対策」などに活用できる。

一路線（広域）における道路の維持管理に活用する場合の目的としては、以下のようなものが考えられる。

- ① 過去に遡って点検・危険度調査箇所の地盤変位の定量的なデータベースの作成、地盤全体の滑動性の有無、変状の影響範囲の評価

構造物の変状履歴に関して築造当時の地盤変位のデータベースがない道路において、衛星データを活用することにより、過去に遡って変状の経時変化を広範囲に求めることができる。発見された道路土構造物等の変状の今後の予測、対策工の必要性を検討する上での基礎情報を得ることができる。

- ② 定期的な衛星データ活用により点検・維持作業の効率化

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な道路において、衛星データを活用することにより、定期的な衛星データ活用により同じ視点で変状箇所の点検が可能となり、点検・維持管理作業の時間短縮、作業環境改善が図れる。

- ③ 地盤の変状の可能性のある箇所、範囲を特定し、必要最小限の費用で除草・状況確認

広域の変状箇所の進行速度、地盤工学的原因が分からず優先順位が不明な道路においては、一路線で一律な点検・危険度調査が行われている。衛星データを活用することにより、構造物築造時のからの変状の進行速度、変状が生じた地盤工学的な要因が分かり、必要性の高い箇所への重点的な現地踏査、調査を行うことが可能となり、優先度を考慮した保全計画を立案し、道路土構造物の信頼性の向上を図ることができる。

- ④ 点検・維持管理の優先度を考慮した保全計画の立案

広域の変状箇所の進行速度、地盤工学的原因が分からず優先順位が不明な道路においては、一路線で一律な点検・危険度調査が行われている。衛星データを活用することにより、構造物築造時のからの変状の進行速度、変状が生じた地盤工学的な要因が分かり、必要性の高い箇所への重点的な現地踏査、調査を行うことが可能となり、優先度を考慮した保全計画を立案し、道路土構造物の信頼性の向上を図ることができる。

また、災害発生の可能性のある箇所、発生した箇所での緊急、恒久対策に活用する場合の目的としては、以下のようなものが考えられる。

① 地盤の変位量より変状の影響範囲を設定

地盤の変位量より変状の範囲を設定することができ、必要最小限の費用で除草・状況確認が可能となり、効率的な現地踏査を行うことができる。

② 変状の影響範囲の定量的、時系列的な地盤変位を把握

変状の大小を評価することができ、現地踏査での重点箇所、適切な応急対策の選定への情報を得ることができる。

③ 広範囲な地盤の変状を考慮した応急対策工の設計・施工

目視が困難な箇所も含めた地盤の変状を踏まえた応急対策工の設計・施工への情報を得ることができる。

④ 恒久対策工施工後の効果の確認

地盤の変位の経時変化より、対策工施工後の効果を確認することができる。

一方、衛星 SAR で以下に示すように「できないこと」、「できない場合があること」があるので留意（前出）する必要がある。

- ・ 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 12cm、Cバンド 1/2 波長 \approx 3cm、Xバンド 1/2 波長 \approx 1.5cm
- ・ 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。
- ・ GNSS 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。
- ・ 前兆現象なしの豪雨や地震等で発生する斜面崩壊については、衛星 SAR でも不可能である。
- ・ 1 ペア干渉解析では沈下と隆起が逆転することがある。

2.2 道路土工構造物等の維持管理における衛星 SAR データの活用

(1) 一路線（広域）における道路の維持管理

一路線（広域）における道路土工構造物等では、巡視（日常）や点検・危険度調査（定期）などにより維持管理が行われている。図 2.1 に示すように衛星データを活用し、事前に道路から目視できない道路土工構造物等の変状の可能性がある箇所、区間を選定することができる（目的①、②、③）。また、地盤の変状解析により、点検・維持管理の優先度を考慮した保全計画の立案を行うことができる（目的④）。

衛星 SAR による一路線のスクリーニングの結果、図 2.25（後出）に示す変動 A（活発に運動中）、B（緩慢に運動中）に区分された箇所では、路面や道路附帯構造物に変状が出ることも多い。このため、その区間を巡視（日常）するときには、特に注意して巡視区間を指示することができる。

点検・危険度調査では、決められた箇所のクラックの開きや構造物の傾きに注目して行われることが多い。変動 A、B に区分された区間では、決められた箇所の点検だけでなく、変動が発生している可能性が高い区間についても、点検範囲にいれることができる。また、従来の点検・危険度調査箇所以外で斜面崩壊の前兆がある場合には、現地踏査を行い点検箇所の追加の判断をすることができる。

保全計画の立案に当たっては、図 2.25（後出）に示す変動 A、B、C（継続観測が必要）、D（局所的な地盤変動、その他）の区分による地盤変動の活動度や LP 等による注意すべき地形地質の有無などを参考に優先順位を設定することができる。

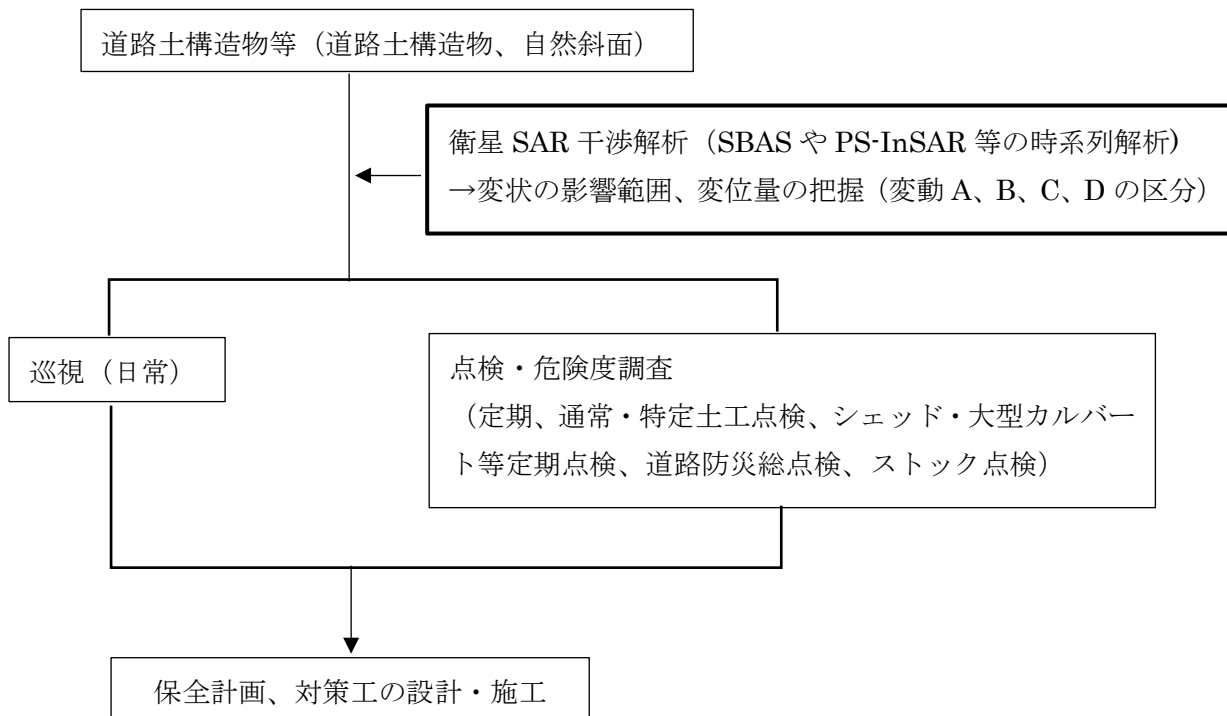


図 2.1 一路線における道路土工構造物等の維持管理における衛星データの活用

(2) 災害発生の可能性のある箇所、発生した箇所での緊急、恒久対策

災害発生の可能性のある箇所あるいは災害が発生した箇所では、緊急調査が行われ、応急対策工や恒久対策工の設計・施工が行われている。図 2.2 に示すように過去に遡って衛星 SAR 干渉解析 (SBAS₃₁) や PS-InSAR₃₂等の時系列解析) を事前あるいは災害発生後に行い、過去に遡って変状の経時変化を広く求め (目的①)、必要最小限の費用で除草・状況現地踏査、調査設計、応急対策、恒久対策を効率よく行う (目的②、③)。また、恒久対策施工後は、対策工の効果を衛星 SAR 干渉解析で行う (目的④)。

恒久対策の効果の確認に当たっては、図 3.2 (吉舎の事例) に示す活用例のように災害発生前の前兆現象、応急対策施工時・恒久対策施工時の変位量の時系列変化などから、地盤挙動が緩慢～停止していることを確認することができる。

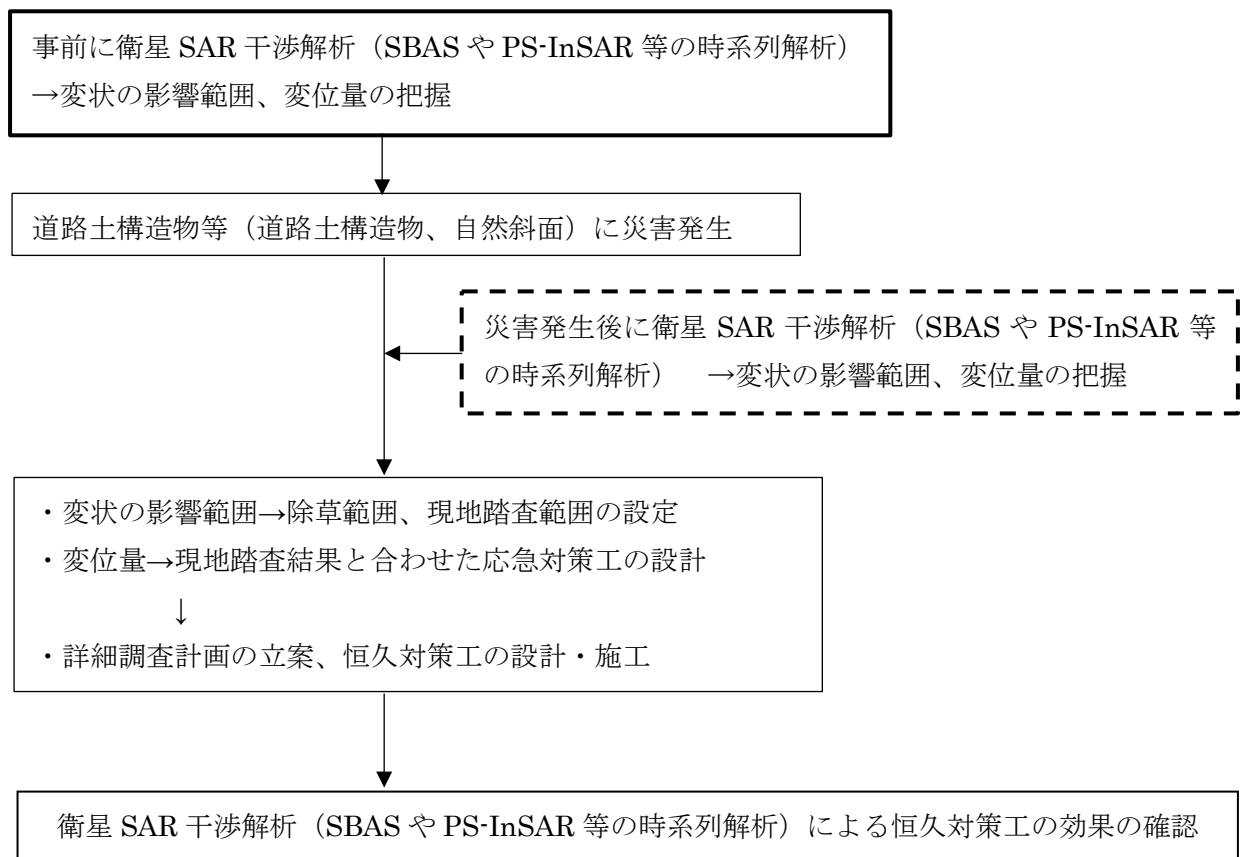


図 2.2 災害発生の可能性のある箇所、発生した箇所での緊急、恒久対策における衛星データの活用

前兆現象があれば事前に衛星 SAR データの入手を行い準備ができるが、急に災害発生した場合には、発生後の対応となり、時間との勝負になる。この場合の手順を以下に示す。

- ① 衛星 SAR 解析を行うには、まず衛星 SAR データの選定を行い、JAXA (実際は代理店) へ必要画像購入の申し込みを行う。
- ② 現場の規模、場所によって異なるが、衛星 SAR データ選定～申し込み後ダウンロード時間を含めて 1 週間程度必要である。また、解析～評価を含めて規模によるが 5～10 日が必要である。

る。なお、これらの時間は、緊急災害時として集中的に人、機材を投入した場合であり、平常時には適用できない。

- ③ ここで、問題は衛星画像が得られる頻度である。現在、定期撮影は ALOS-2 では、3～4 か月に 1 回であるが、2022 年に打ち上げられる ALOS-4 では 2 週間に 1 回の頻度になる予定である。画像の撮影時期と災害発生時の時期が合わない場合には、JAXA と協議し衛星の撮影頻度を変える必要がある。

2.3 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 2.1 に示すとおりである。

表 2.1 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 ³³⁾	2006年（H18）～2011年（H23）
ALOS-2（日本）		2014年（H26）～現在
Sentinel-1（EU）	Cバンド ³³⁾	2014年（H26）～現在
TerraSAR-X（独）	Xバンド ³³⁾	2007年（H19）～現在

2.4 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。

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

衛星 SAR に使用されているマイクロ波³⁴⁾には、周波数の異なる C、X 及び L バンドがあり、表 2.2 に示すような特徴を有している。

表 2.2 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)	5×5m	80km	月 1～2 回	日本全域 (無料)
		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)

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=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 2.3 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。

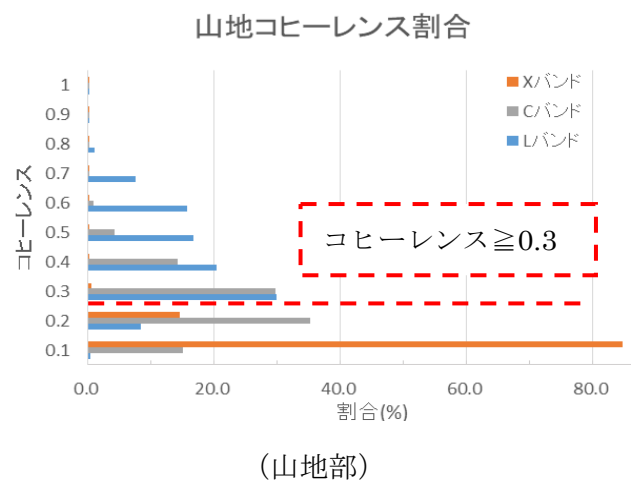
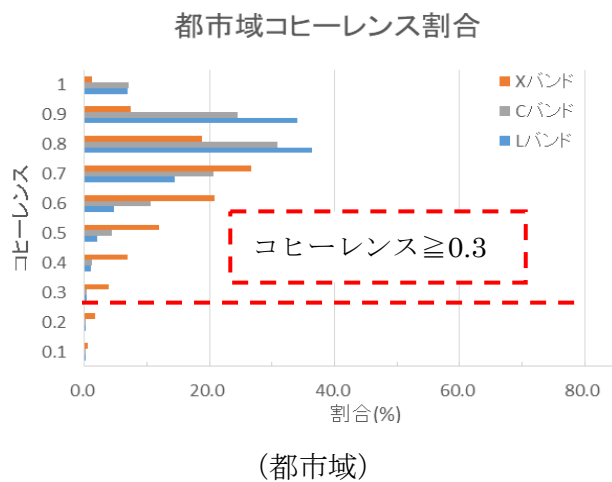
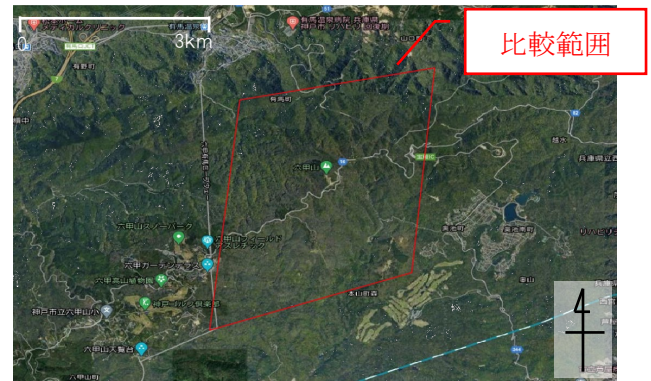


図 2.3 都市部と山地部の衛星 SAR による C、X 及び L バンドのコヒーレンスの比較

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 2.3 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 2.3 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、草木の影響なく L バンドが得られない時期、場所等に有効である。

表 2.3 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 (日本全国)	Cバンド (日本全国)	Xバンド (都市域中心)
のり面対策 (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 (のり面、周辺地盤)	◎	△	△
土石流、山腹崩壊	△	×	×
橋梁 (参考)	△	△	◎

◎：最適、○：ほぼ可能、△：できる場合がある、×：適用不可

2.4.2 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。

2.4.3 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
- ・ データ数 (干渉ペア数³⁵⁾ を考慮した)

について設定する。

具体的なデータ数の例は、表 2.6 (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 (SBAS)：異なる 10 時期以上×2 枚=20 枚以上 (約 3 年分以上の画像データ)
- ・ 時系列解析 (PS-InSAR)：異なる 20 時期以上×2 枚=40 枚以上 (約 5 年分以上の画像データ)

2.4.4 衛星 SAR データの解析可能範囲 ¹⁾を修正加筆

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₃₆₎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₃₆₎が必要となる場合がある。

表 2.7 (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 2.4 に衛星軌道・観測方向と観測方位との関係を示す。衛星軌道は北向軌道と南向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 2.4 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
北向軌道	右側観測	西から東	
北向軌道	左側観測	東から西	限定的
南向軌道	右側観測	東から西	
南向軌道	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 2.4 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。

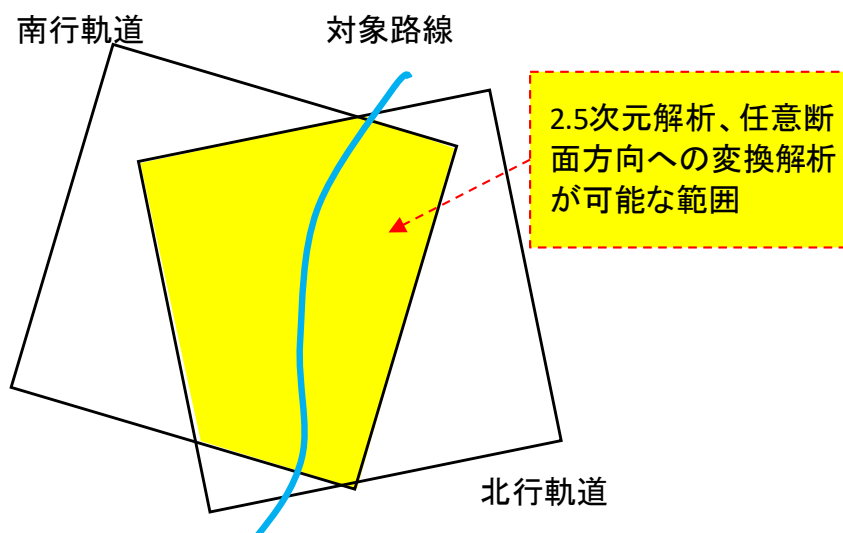


図 2.4 2.5 次元解析や任意断面方向への変換解析の解析可能範囲の例

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¹⁾を修正加筆

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。

(1) 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2.5に一覧する。

表 2.5 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 ³⁷⁾	北向軌道と南向軌道 ³⁷⁾ がある
観測方向 ³⁸⁾	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 ³⁸⁾ がある。右側観測が基本とされる。
観測パス番号 ³⁹⁾	観測範囲のパス（東西）の番号
中心フレーム番号 ⁴⁰⁾	観測範囲のフレーム（南北）の番号
観測モード ⁴¹⁾	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 ⁴²⁾	衛星が地表面を観測する時の傾き角度
偏波 ⁴³⁾	観測する偏波のこと。 HH、HV、VH、VV 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。

(2) 基線長

地球観測衛星は全く同一の地点を通過することではなく、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⁴⁴⁾（図2.5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⁴⁵⁾である垂直基線長（図2.5中のB_{perp}）が短いことが望ましい（図2.4中のB_⊥）。垂直基線長が長いと、DEM（数値標高データ）⁴⁶⁾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。

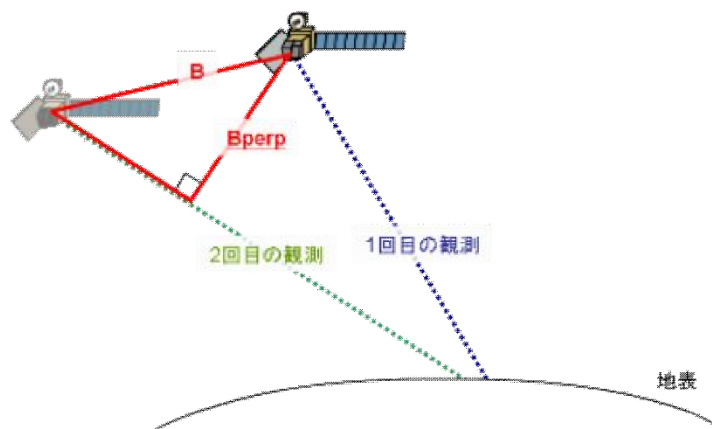


図2.5 衛星の2時期の軌道の差（基線長）の成分

（出典：国土地理院 干渉SAR Q&A に加筆：https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/gsi_sar_faq.html）

(3) 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を挟むように選定する必要がある。

(4) 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⁴⁷⁾（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低下しやすいことに注意する必要がある。

2.5 衛星 SAR 干渉解析 ¹⁾を修正加筆

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 2.6 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。

解析結果の整理方法としては、表 2.7 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、一路線のスクリーニングでは有効である。スクリーニングの結果、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。

表 2.6 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"> ・ <u>大気遅延などの誤差</u>⁴⁸⁾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	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。解析手法としては、SBAS と PS-InSAR がある。	<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（ペア数）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2.7 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、斜面のスクリーニングなど）
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

2.5.1 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 2.6 に示す。

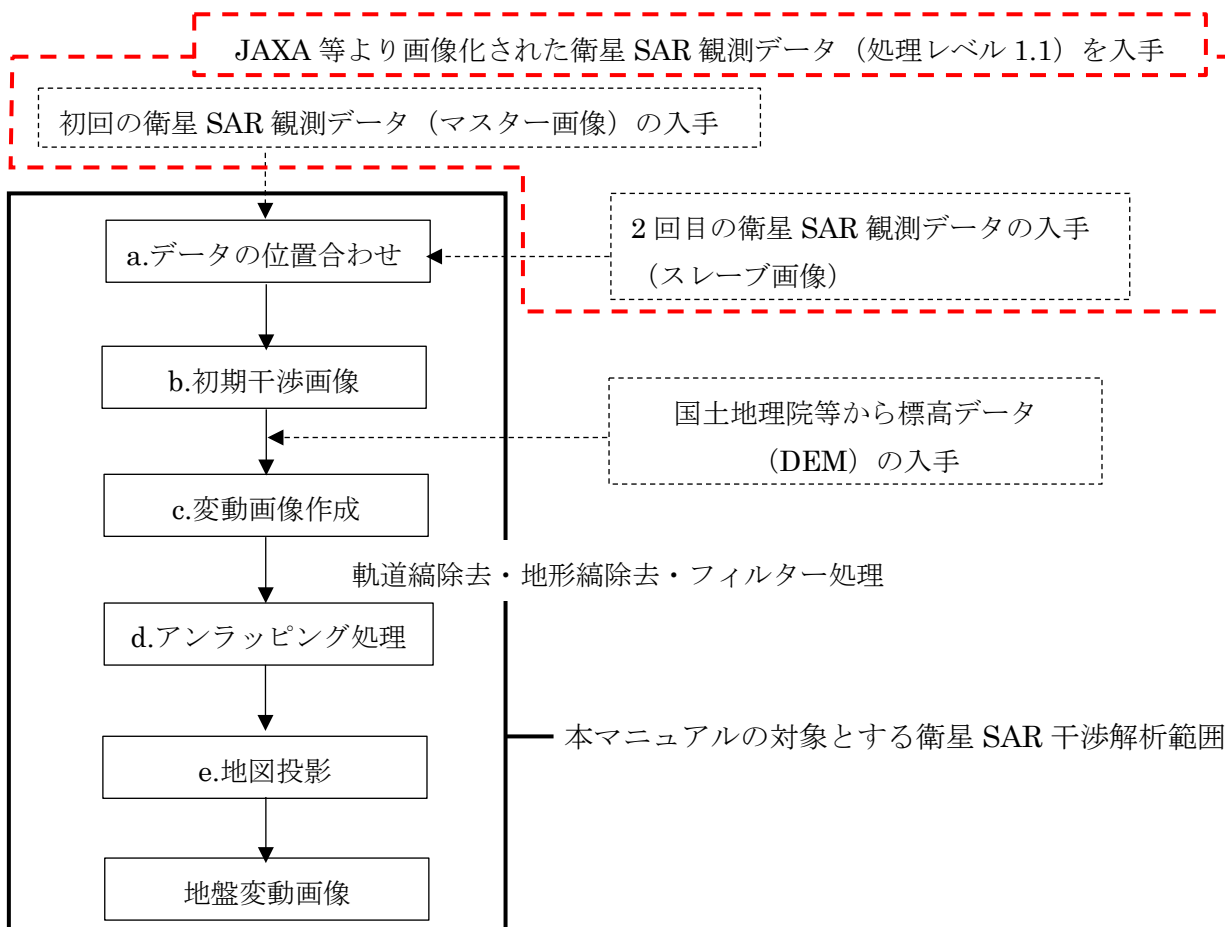


図 2.6 1ペアの衛星 SAR 干渉解析の流れ

a. データの位置合わせ

初回観測データをマスター画像⁴⁹⁾、二回目観測データをスレーブ画像⁵⁰⁾という。

ALOS-2 では、処理レベル 1.1 データ（SLC : Single Look Complex、図 2.7）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。

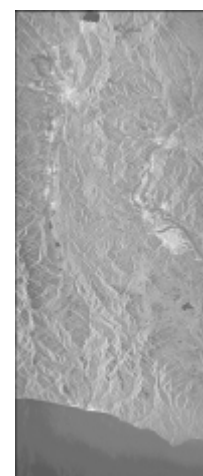


図 2.7 SLC データ⁵¹⁾の例

（出典：国土地理院 干渉 SAR 画像の作成手順

https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_procedure.html）

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⁵²⁾を作成する (図 2.8)。

この段階での干渉画像は軌道縞・地形縞⁵³⁾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、軌道のずれに起因する軌道縞である。軌道縞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生じる。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きく異なる場所では位相のばらつきが大きいため、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。

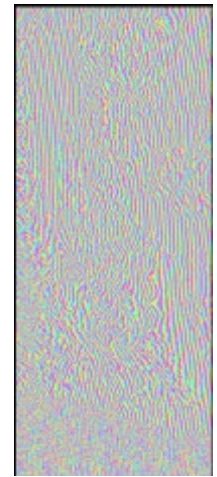


図 2.8 初期干渉画像の例

(出典：国土地理院 干渉 SAR 画像の作成手順

https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_procedure.html)

c. 変動縞画像⁵⁴⁾ 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 2.9)。

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。

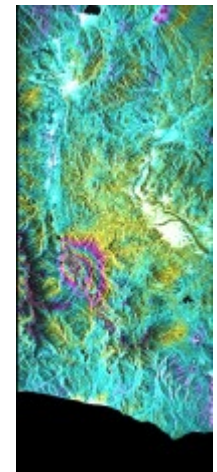


図 2.9 軌道縞・地形縞を除去した変動画像

(出典：国土地理院 干渉 SAR 画像の作成手順

https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_procedure.html)

d. アンラッピング処理⁵⁵⁾ (位相差から変動量への変換処理)

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⁵⁶⁾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 2.10 に示す。

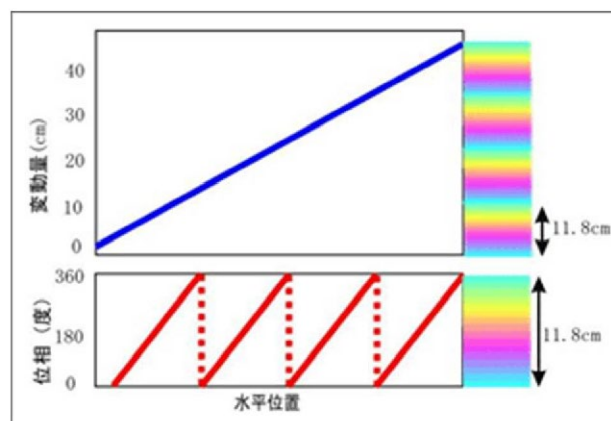


図 2.10 アンラッピング処理の模式図 (ALOS-2 の場合)

(出典：国土地理院 干渉 SAR ってなに？

https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_mechanism.html)

アンラッピング処理を行った結果の変動量は、衛星視線方向の変位となる。

e. 地図投影⁵⁷⁾

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 2.11 に示す。

図 2.7～図 2.9 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 2.11 と比較して左右反転している。

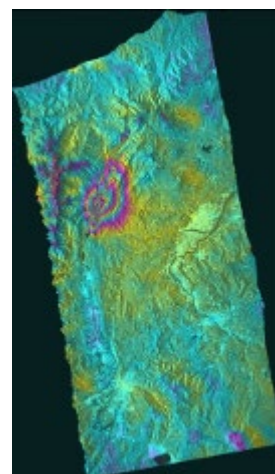


図 2.11 干渉 SAR 解析に

よる地盤変動画像

(出典：国土地理院 干渉 SAR 画像の作成手順

https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_procedure.html)

2.5.2 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 ⁵⁸⁾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） ⁵⁹⁾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） ⁶⁰⁾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。

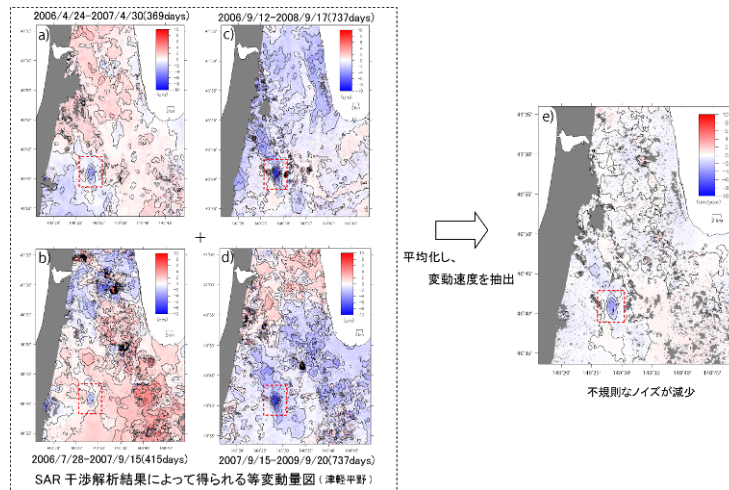


図 2.12 時系列解析（スタッキング解析）の概念図

（出典：国土地理院 干渉 SAR の応用、<https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar.application.html>）

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。時系列解析にあたり、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、スタッキング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 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。

2.5.3 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、地表を斜めの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、変位の方向を求めることが可能となる。人工衛星による観測は南向軌道と北向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 2.13 に 2.5 次元解析の模式図を示す。

各軌道によるスタッキング解析結果を用いて2.5次元解析を行うことで、鉛直方向の地盤変動をより精度よく得ることができる。

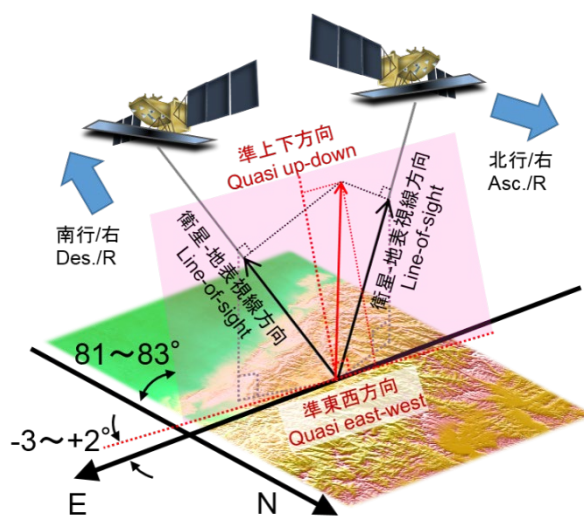


図2.13 2.5次元解析の模式図

(出典：国土地理院 干涉SAR の応用、

<https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar.application.html>)

2.5.4 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 $\Delta y=0$ ）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。

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

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⁶¹⁾（度）

θ_d （南向軌道）、 θ_a （北向軌道）

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⁶²⁾（度）

Φ_d （南向軌道）、 Φ_a （北向軌道）

$\Delta x, y$ ：任意断面での水平変位および鉛直変位

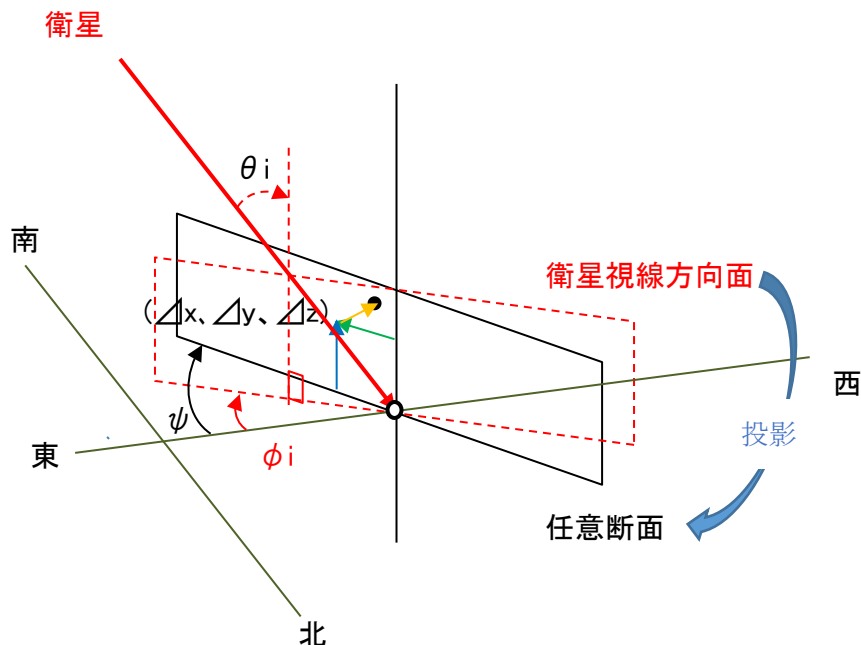


図 2.14 衛星視線方向変位の任意断面方向への変換

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

道路土構造物等の管理において、土構造物毎の変状の特徴を考慮した衛星 SAR の活用方法例を表 2.7 に示す。

表 2.7 道路土工構造物等毎の変状の特徴を考慮した衛星 SAR 活用方法

道路土構造物等	変状の特徴	衛星 SAR 活用方法
のり面対策工 63)	<p>対策工は、周辺の変状に巻き込まれて変状することが多い</p> <p>対策工 対策工周辺が変状 ⇒対策工の緊張力増加、受圧板変位 対策工にクラック</p>	対策工周辺の変状 (管理外を含む)
地すべり ⁶⁴⁾	<p>主測線 過去に滑動した痕跡（地形判読） 外力：雨、地震 再滑動開始 安定・対策工施工まで滑動</p>	地すべり土塊 ⁶⁵⁾ の 範囲の特定 土塊の活動度合い (管理外を含む)
大規模切土 ⁶⁶⁾	<p>なかなか点検に行けない 用地外で変状 湧水、小段にクラックの発生 切土まで広がる 崩壊につながる</p>	用地外での変状の範囲 のり面内変状 (管理外を含む)
片盛片切 ⁶⁷⁾ 又 は谷埋め盛土 68)	<p>路肩の沈下⇒路面補修 水の盛土への侵入 盛土材の泥濘化 湧水 外力：雨、地震 盛土崩壊</p>	盛土材の脆弱化、水位上昇に 伴う路肩の沈下
軟弱地盤上の盛 土 ⁶⁹⁾	<p>路面の沈下 周辺の引き込み沈下、盛り上がり</p>	路面年間沈下量、盛土周辺の 沈下、隆起量

また、現状の道路の維持管理と比較して効率的かつ有利な点を表 2.8 に整理した。

表 2.8 道路の維持管理における現状の課題と衛星 SAR の効率的な活用例

道路土構造物	現状の課題	衛星 SAR の効率的な活用例
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 (図 2.25 参照) 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。
のり面対策工 大規模切土	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、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。
地すべり	地すべり土塊の範囲は詳細調査をしない分からない	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。
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、のり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、のり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。
軟弱地盤上の 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。

2.6.2 地盤変動範囲の想定

(1) 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 2.15 に、地すべり地において、地すべり土塊の範囲に関して、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が行われてきた。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。

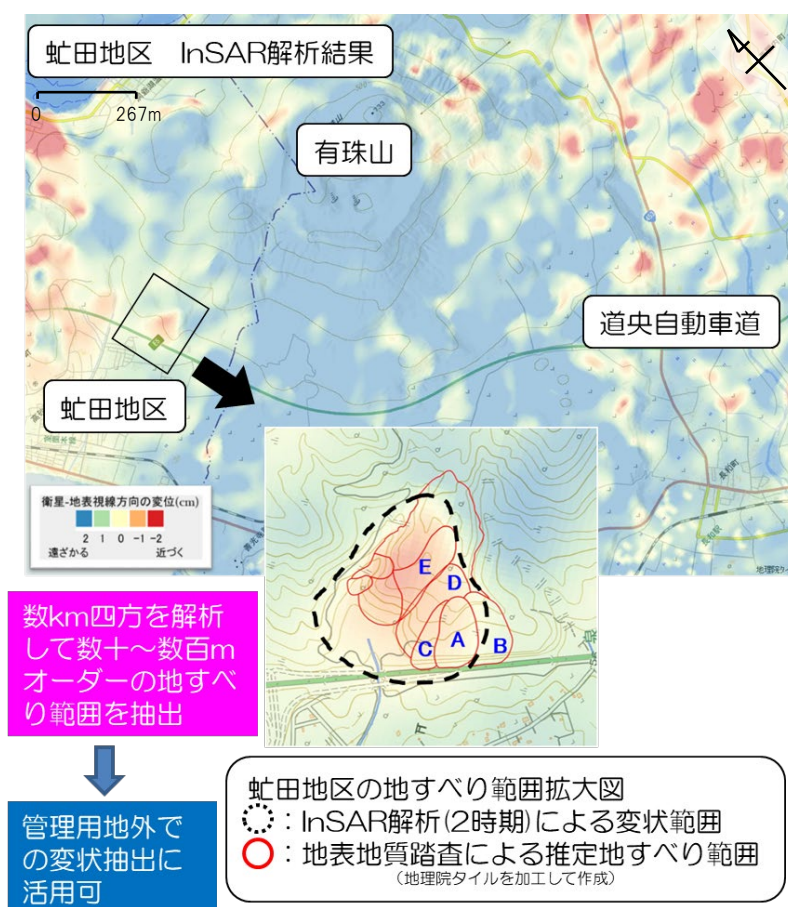


図 2.15 1 ペア解析 (D-InSAR₁₉) 解析、ALOS) による地すべり土塊の範囲の解析例 (虻田地区) ²⁾

(2) のり面変状範囲の設定

図 2.16 に示すように衛星 SAR 解析から推定さ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 LS（レーザースキャナー）測量を行い、その結果を図 2.16 に合わせて示した。同図より、衛星 SAR 解析で推定された盛土の変状箇所と LS 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。

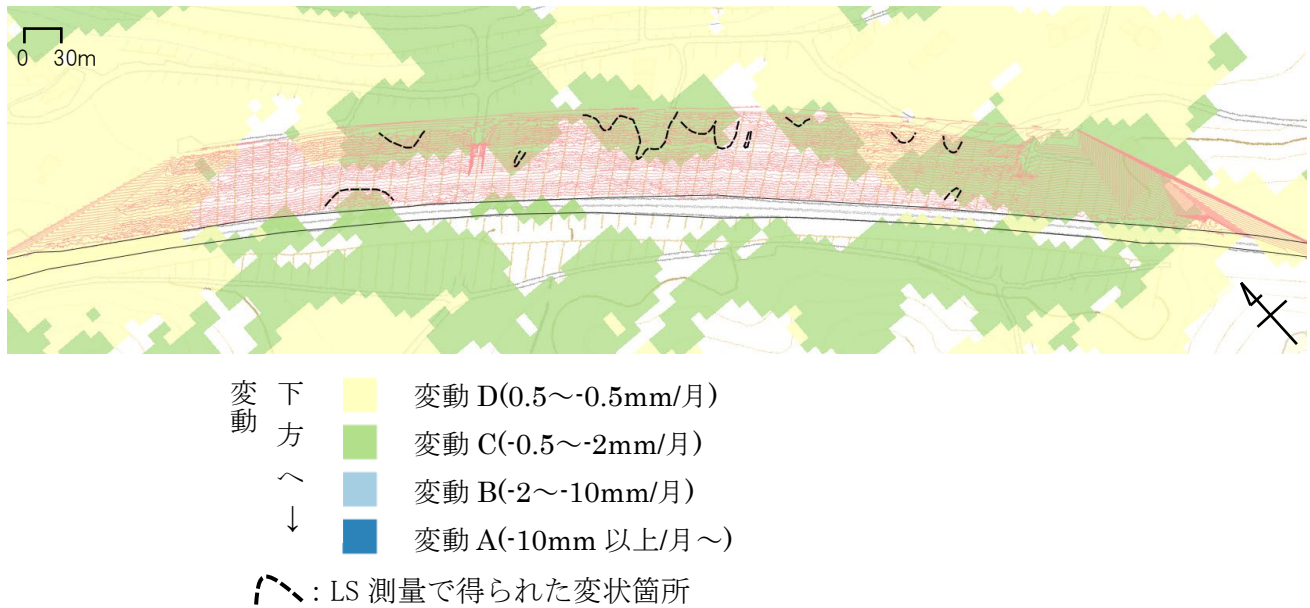


図 2.16 尾道松江道（世羅）での衛星 SAR による時系列解析結果と LS 測量による変状箇所の比較

2.6.3 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 2.17 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。

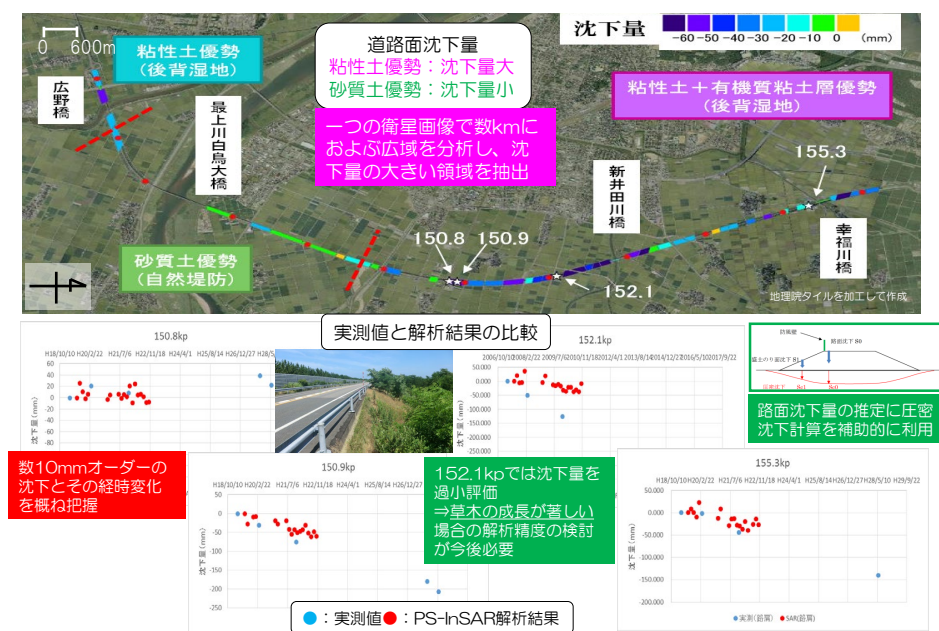


図 2.17 衛星 SAR 干渉解析（PS-InSAR による時系列解析、ALOS-1）による軟弱地盤上の盛土の沈下（酒田地区）³⁾

2.6.4 任意な断面における挙動（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 2.18 にのり面の挙動に関して、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では動態観測結果と衛星 SAR 干渉解析結果がほぼ一致するが、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、技術的な課題 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。

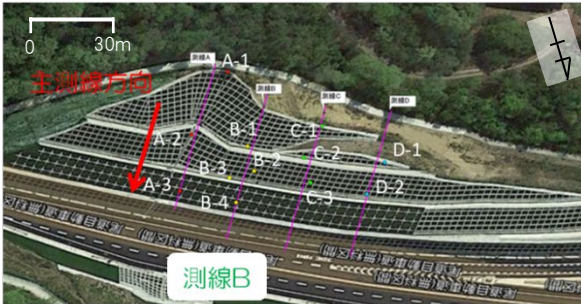
- ・ 要因 1：図 2.18 に示すように 50mm 以上で法枠工と地盤が分離して動いたため、衛星視線方向の変位では測量点の挙動を把握しきれなかった。
- ・ 要因 2：地盤の変位が大きくなったため、衛星 SAR 特有の位相差の影響が出た。

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 2.5.1 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。

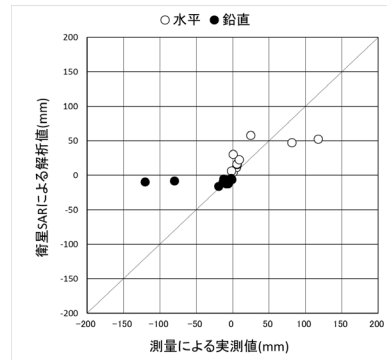
$$\text{実際の変位(cm)} = \text{衛星 SAR による解析値(cm)} \pm 12n \quad (n \text{ は整数。 } n=0, 1, 2 \dots) \quad (2)$$

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。図 2.18 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。

任意断面における鉛直、水平変位抽出

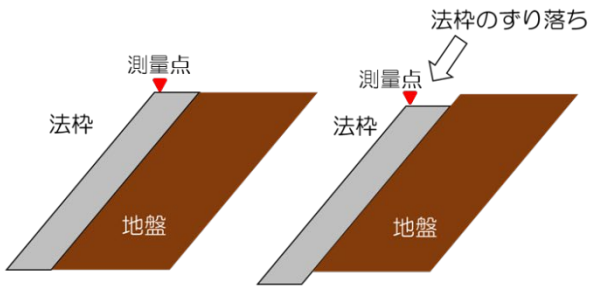


主測線方向を正として各地点の水平変位、鉛直上向きを正として各地点の鉛直変位を抽出

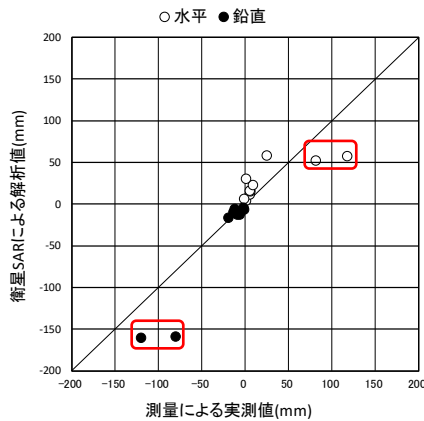


値の小さい範囲では、解析値、実測値ともに整合
値の大きい範囲では、解析値と実測値が乖離

大きな変動は法枠が地盤から剥離した可能性



【要因1：法枠工と地盤の分離】



【要因2：位相差の影響、□がアンラッピング処理後】

図 2.18 尾道松江道における吉舎地区での衛星 SAR 干渉解析 (PS-InSAR 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) ⁴⁾

2.6.5 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）」⁵⁾を用いて、図 2.19 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。

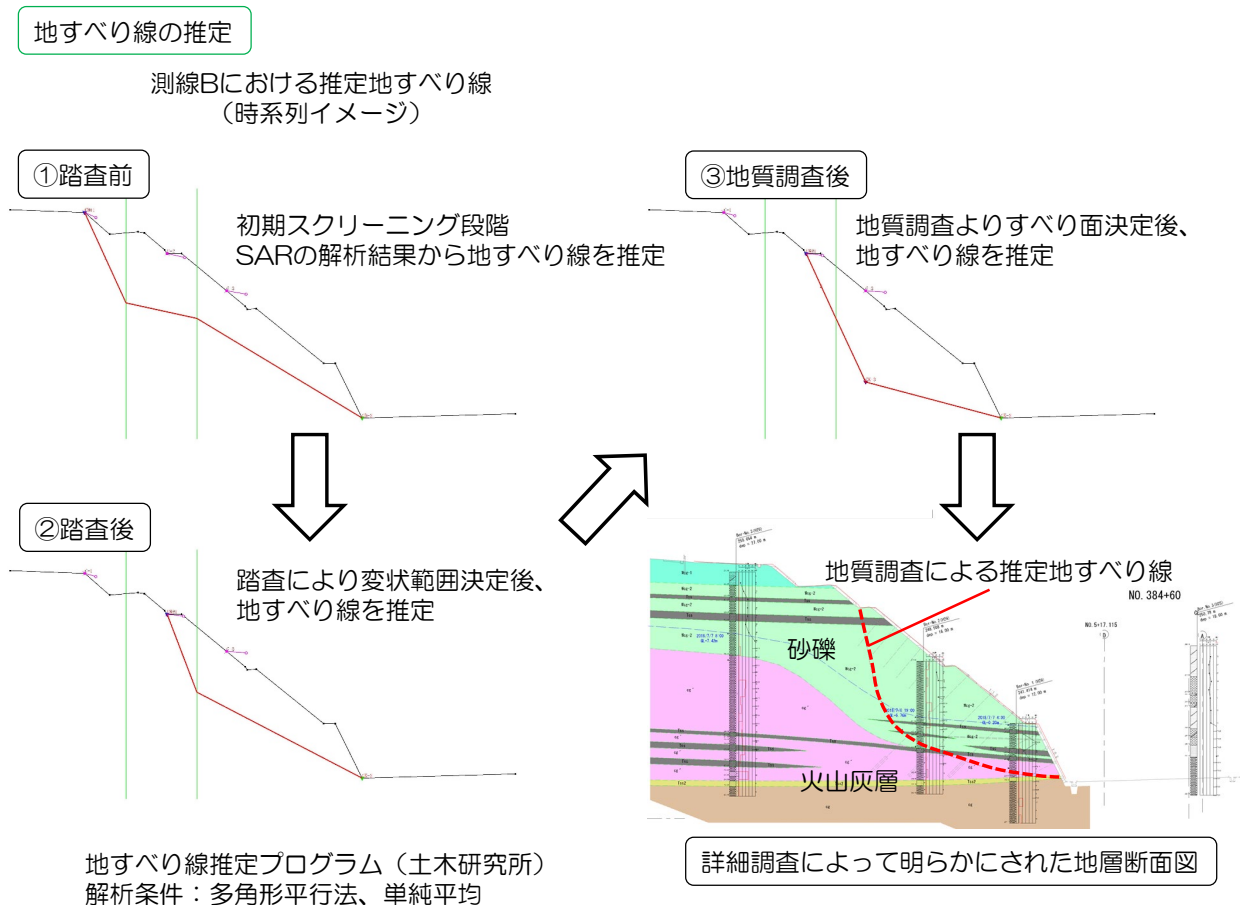


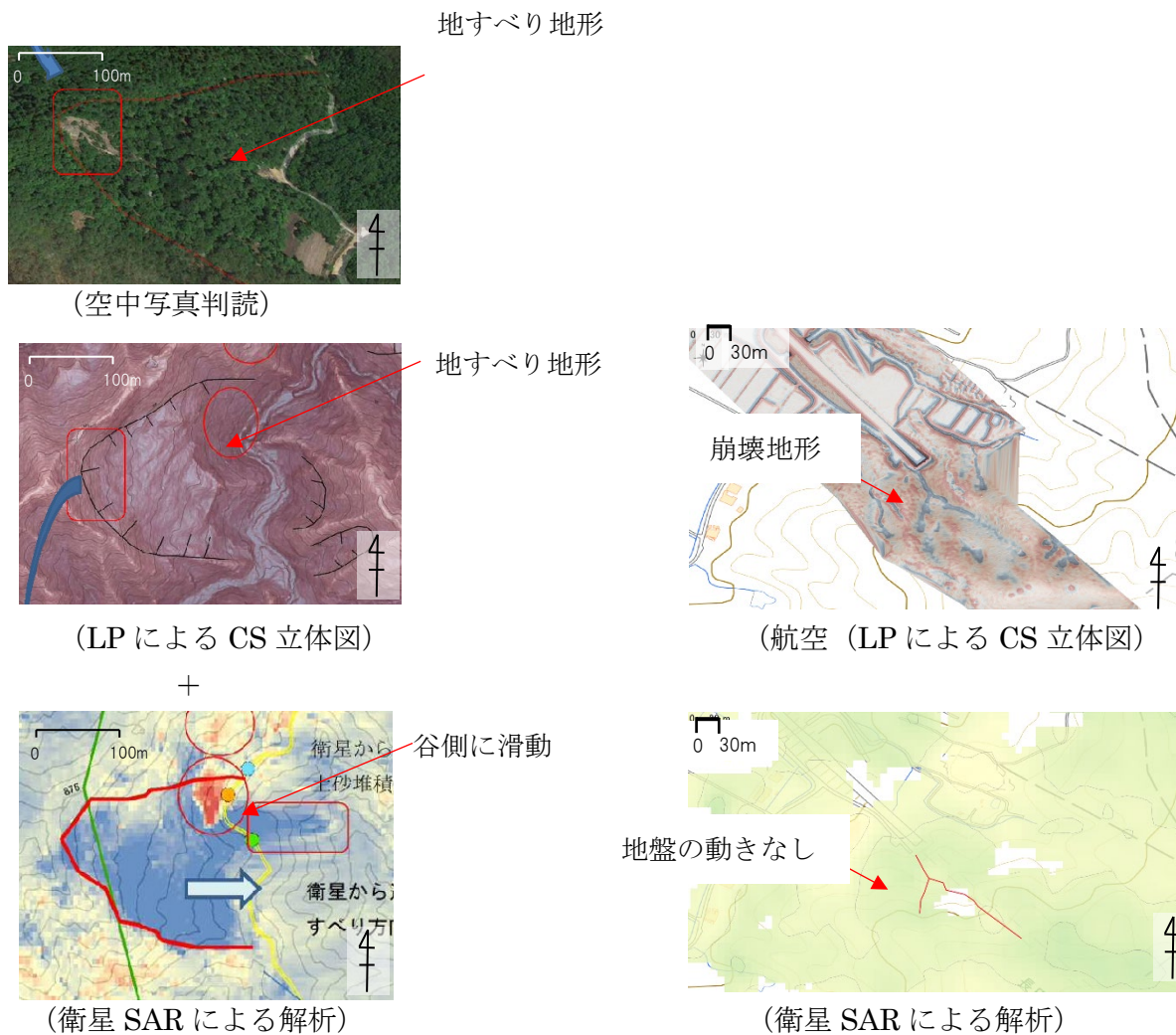
図 2.19 衛星 SAR 干渉解析（PS-InSAR による時系列解析、ALOS-2）の地表面変位からすべり線を想定した例（吉舎地区）⁶⁾

2.6.6 他の広域の地形情報等との組み合わせ

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）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、のり面、自然斜面及び地すべりが現在滑動しているかどうかは判別できず、詳細な現地調査が必要となる。

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ことにより、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 2.20 では、空中写真判読、航空 LP データから作成した CS 立体図⁷⁰⁾ 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 2.20 の(a)では、滑動中のブロック⁷¹⁾ であること、(b)では、滑動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。



(a) 滑動中のすべりブロック⁷¹⁾

(b) 休止中あるいはすべり土塊がなくなったブロック

図 2.20 広域の地形情報等と衛星 SAR 干渉解析結果の組合せ

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。

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

(1) 主側線の方向について

図 2.21 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側線方向（任意な断面方向）⁷²⁾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、この主側線方向の変位を求めることができる。しかし、主側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。

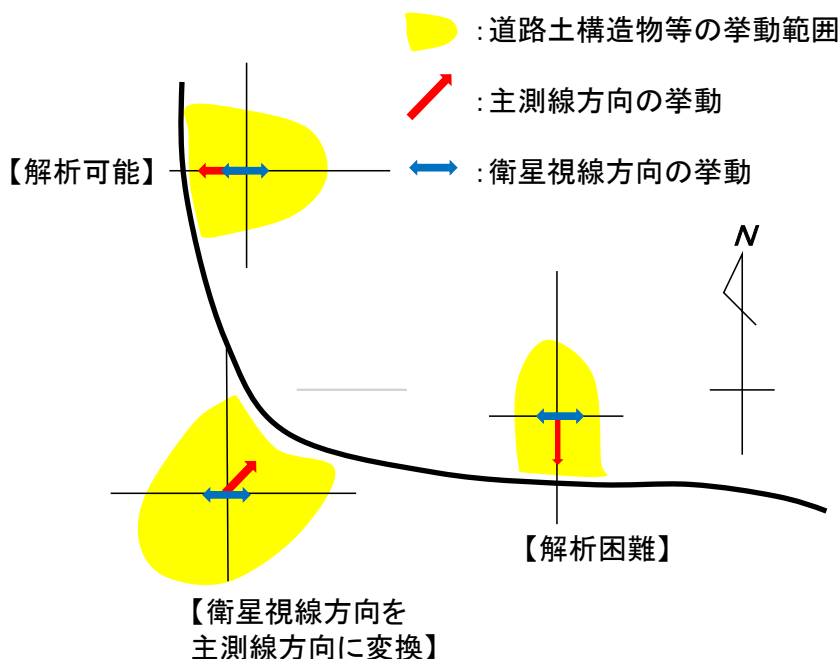


図 2.21 衛星視線方向と道路土構造物等の主側線方向の関係

(2) 高い山等の影響（レーダーシャドウ現象）

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⁷³⁾(図 2.20 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⁷⁴⁾ (図 2.22 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⁷⁵⁾ (図 2.22 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。

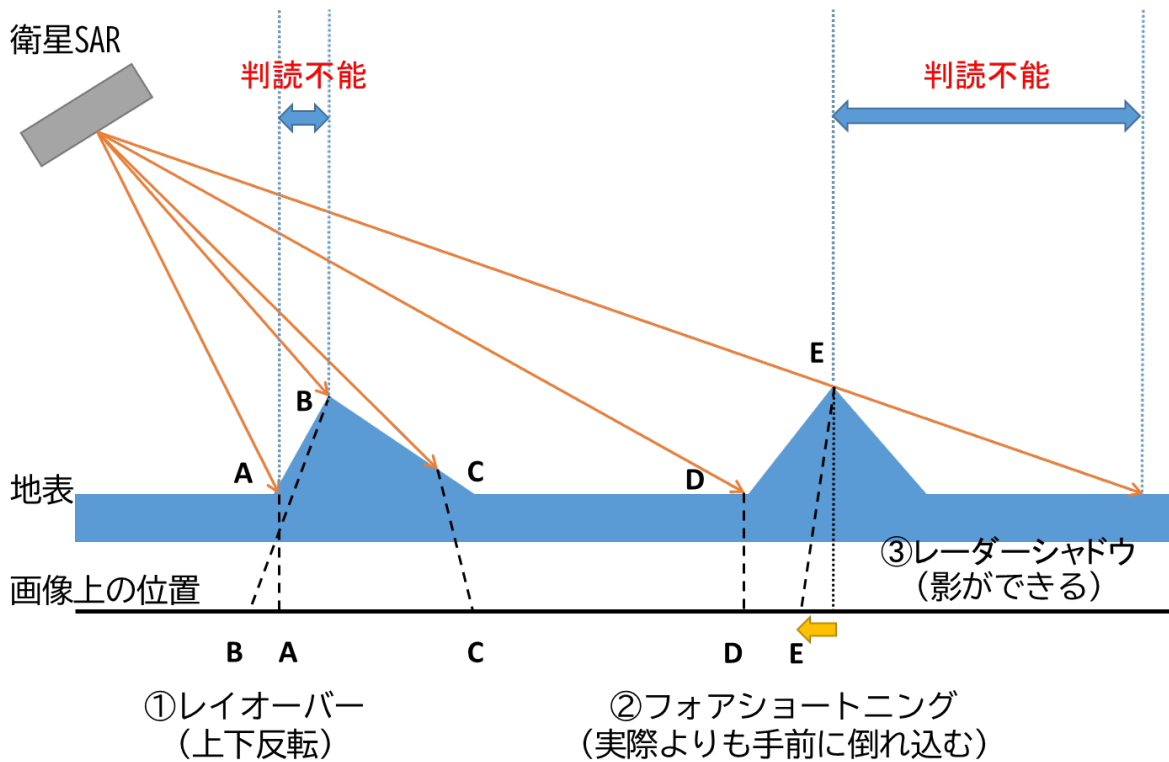


図 2.22 SAR 画像の幾何特性 (画像の反転、倒れこみ、影)⁸⁾

2.7.2 1 ペアの衛星 SAR 干渉解析でおきるノイズ

図 2.23 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。

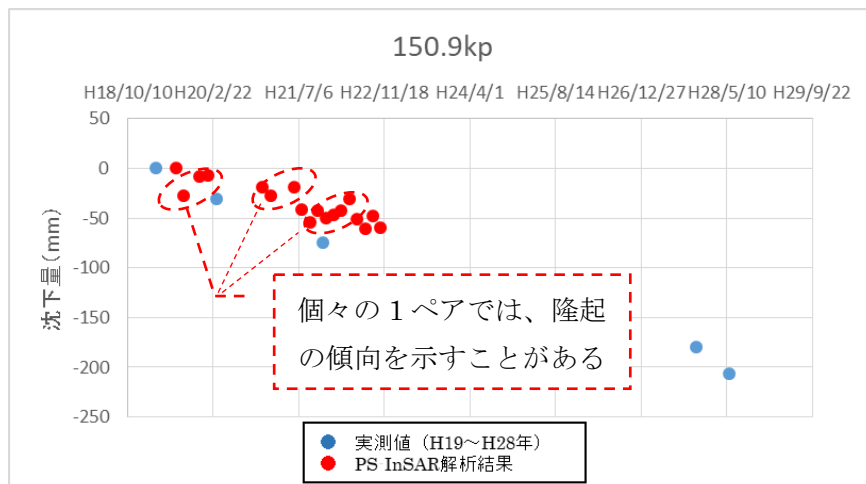


図 2.23 道路路面の沈下量の経時変化 (酒田地区)³⁾

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

(1) 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 2.9 に整理した。

表 2.9 衛星 SAR の適用条件と適用限界（一部表 1.1 と重複）

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 バンド（Sentinel-1、EU）や X バンド（TerraSAR-X、独）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、2.6.2～2.6.7 章の実施例を参考する。
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。 ・ GNSS 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。

(2) 衛星 SAR の長所、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

- ・ 道路区域外に起因する災害を予測可能

【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 2.24 に示すように対象斜面以外の部分で「変動あり」と解析され、現地確認したが変動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 2.21 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 2.22 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。

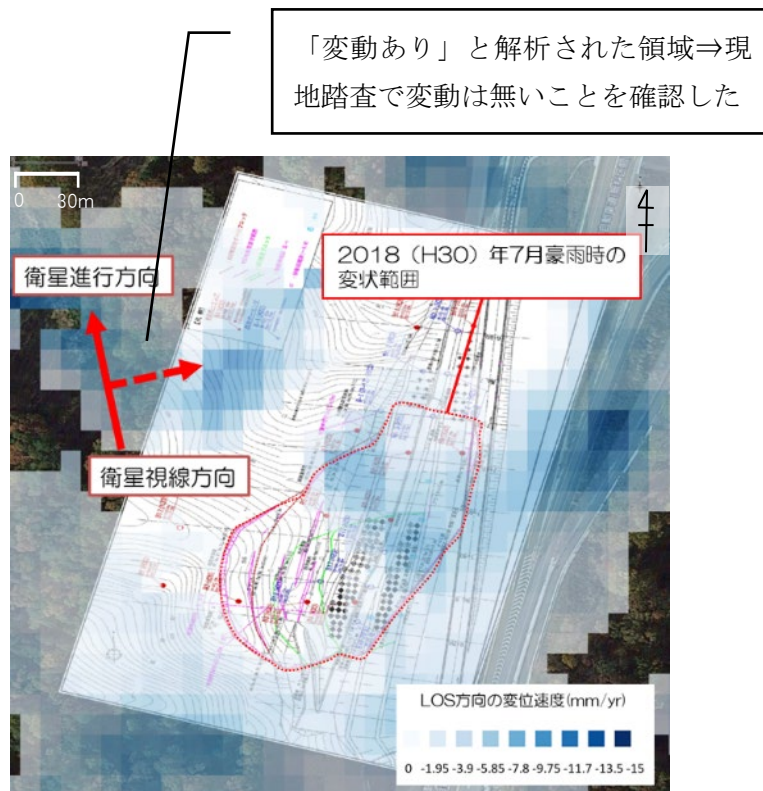


図 2.24 対象斜面以外の箇所で「変動あり」となったが現地で確認できなかった例

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

(1) 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）

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。

① 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 2.25 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・危険箇所調査への追加を行う。
- ・ 衛星 SAR による継続監視：今後の動向を継続監視する。

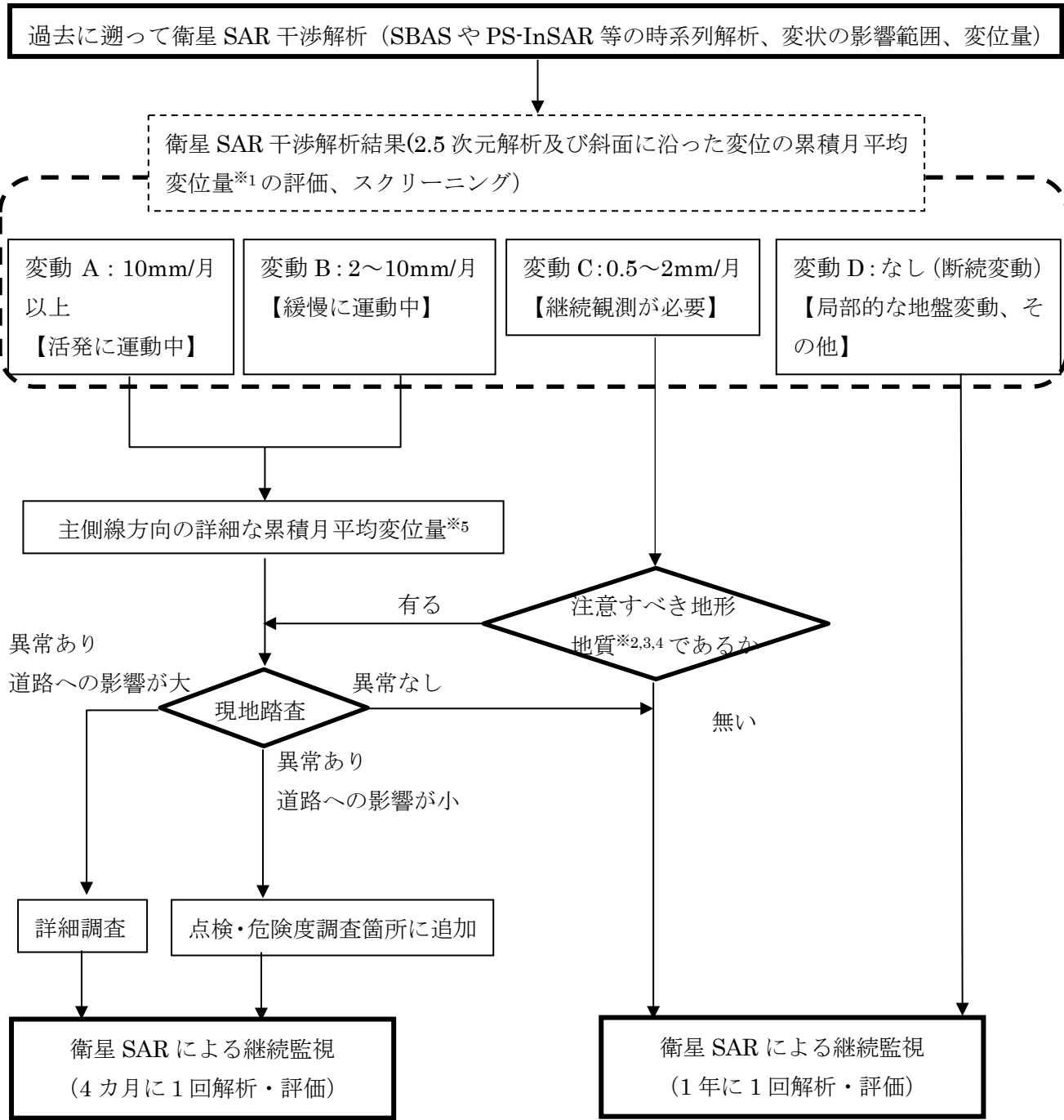


図 2.25 一路線で衛星 SAR を活用する場合の初期段階での対応
(主に斜面の土構造物を対象)

※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 2.26 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

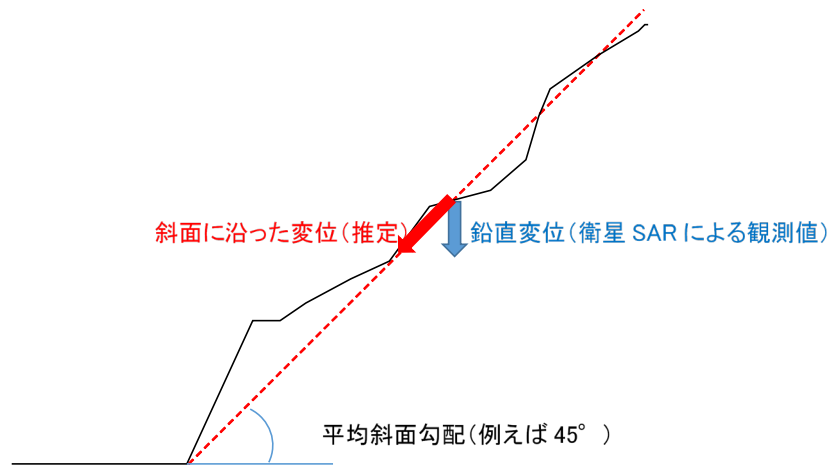


図 2.26 衛星 SAR による鉛直変位から斜面に沿った変位の推定

② 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・危険度調査箇所を追加する場合には、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あるいは災害が発生した箇所に集中的に適用する場合

災害発生の可能性の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」を行い、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。

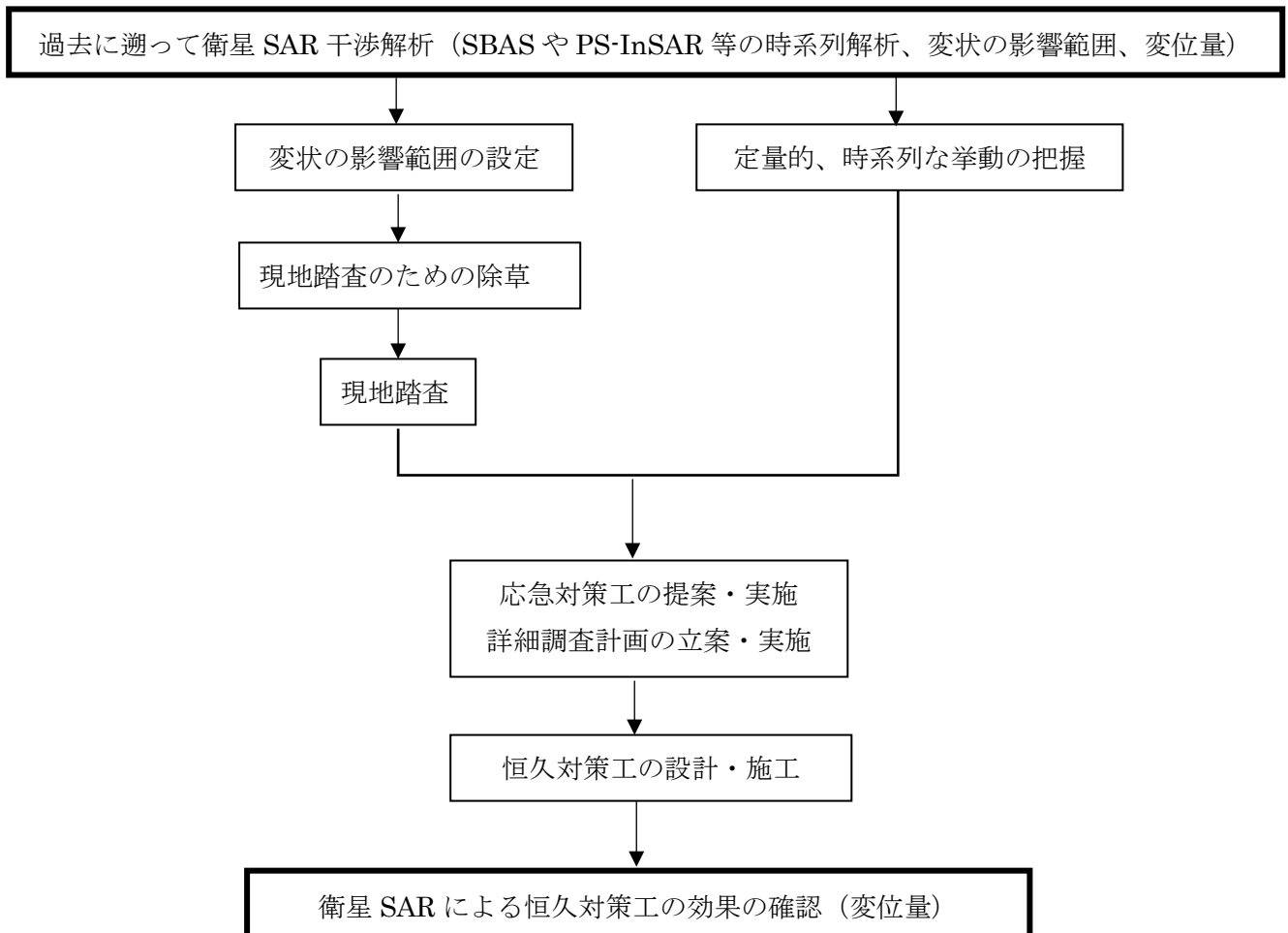


図 2.27 災害発生の可能性のある箇所、発生した箇所に集中的に衛星 SAR を活用する場合の対応

(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。

(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 2.10、2.11 に整理した。

表 2.10 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
<u>路線全体のスクリーニング</u> ⁷⁶⁾		道路台帳 地形、地質の机上調査 現地踏査 防災カルテ	図 2.25 に従った <u>定量的なスクリーニング技術</u> を追加し、危険箇所抽出、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） <u>全てについて現地踏査を実施する</u>	図 2.25 に従い <u>現地踏査が必要な箇所のみ</u> 行う。
	点検方法	目視	目視＋ <u>定量的な評価</u> を行う

表 2.11 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。

(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、2.6.3 及び 2.6.4 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。

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

(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 2.12 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 2.12 一路線で活用する場合の必要コストの例

時期	内容	概算（税抜）	条件
初年度	衛星 SAR 干渉解析（時系列解析）及び評価	約 28,000 千円 (約 19,000 千円)	100km 衛星データ 80 枚
運用年度	衛星 SAR 干渉解析（時系列解析）及び評価	約 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（PS-In SAR）、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 2.25 に従った以下の成果を得ることができる。これらの具体的な内容（概算の根拠含む）は、資料編-3 の積算例や資料-4 の特記仕様書例として示す。

- ・ 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 27,800 千円万程度を見込まれる。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、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 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 2.13 に示す。

表 2.13 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	内容	概算（税抜）	摘要
災害発生	衛星 SAR 干渉解析（時系列解析） 及び評価	約 3,700 千円 (約 3,200 千円)	50×100m 衛星データ 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 2.27 に従った以下の成果を得ることができる。これらの具体的な内容（概算の根拠含む）を資料編-3 の積算例として示す。

- ・ 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

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

尾道松江道において、衛星 SAR 干渉解析（SBAS 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。

(1) 道路変状箇所の抽出

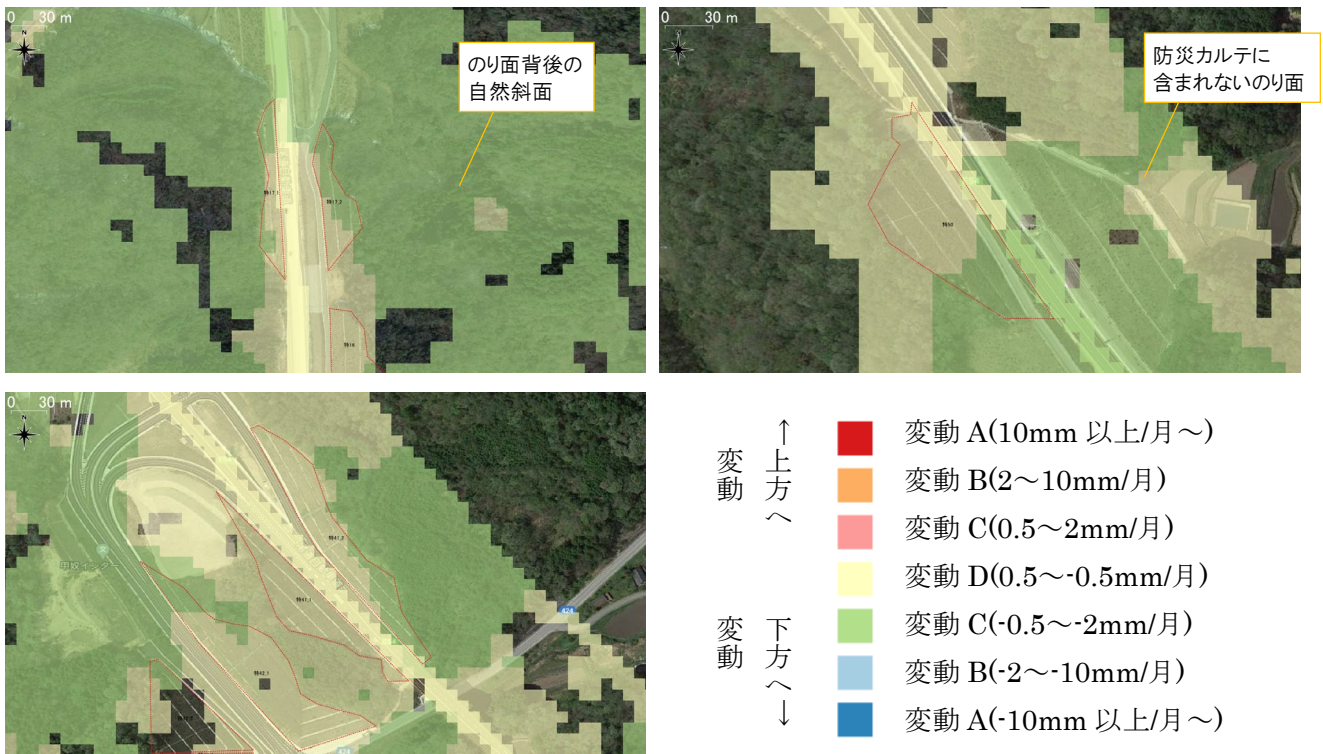
一路線（尾道松江道、図 3.1 参照）において ALOS-2 を用いて衛星 SAR 干渉解析（SBAS 解析、Lバンド、期間：2014年（平成26年）9月～2020（令和2年）6月、2014年（平成26年）9月～2020年（令和2年）3月）を行った。解析結果の点検・危険度調査箇所について、図 2.25 に従い地盤変動区分 A～D を行った。解析に当たっては、2.5次元解析で全域の沈下量を算定した後、のり面部に関しては $\sqrt{2}$ 倍（ここでの平均のり面勾配 1:1 と設定）して評価を行った。

その結果を図 3.2 に示すが、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 70 km）では、表 3.1 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 3.1 尾道松江道（三次河川国道事務所の管理区間）における各種道路土構造物等の検討区間



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吹き出しで示す

図 3.2 解析結果の例

表 3.1 尾道松江道（対象区間尾道 JCT～高野 IC、約 70 km）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

(2) 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、過去に災害が発生し、現在、恒久対策工が施工されている「吉舎」について、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 3.3 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を確認し、動態観測が開始された。2017（平成 28 年）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 7 月の豪雨で変状範囲の拡大が報告されたが、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。

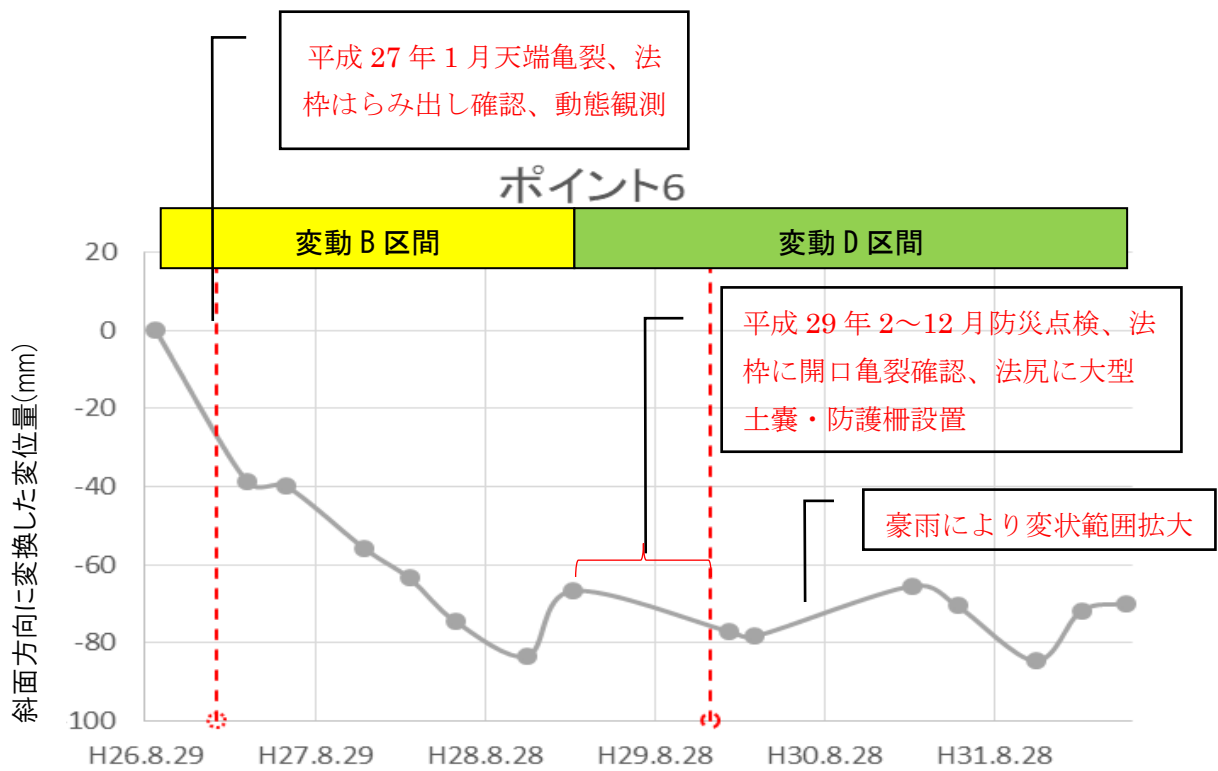
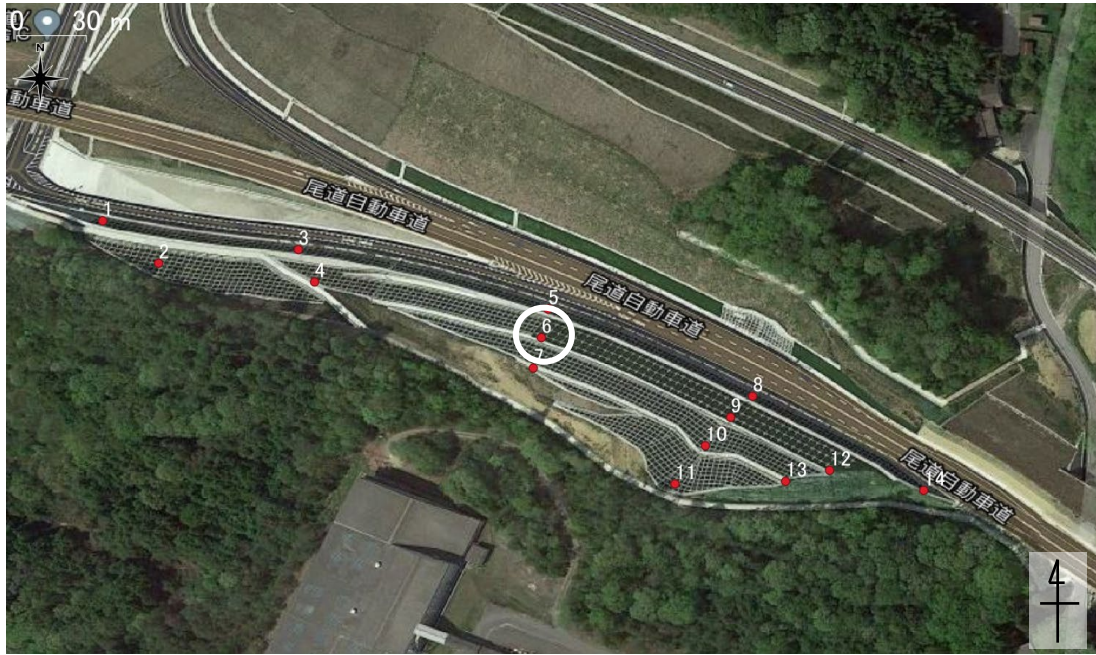
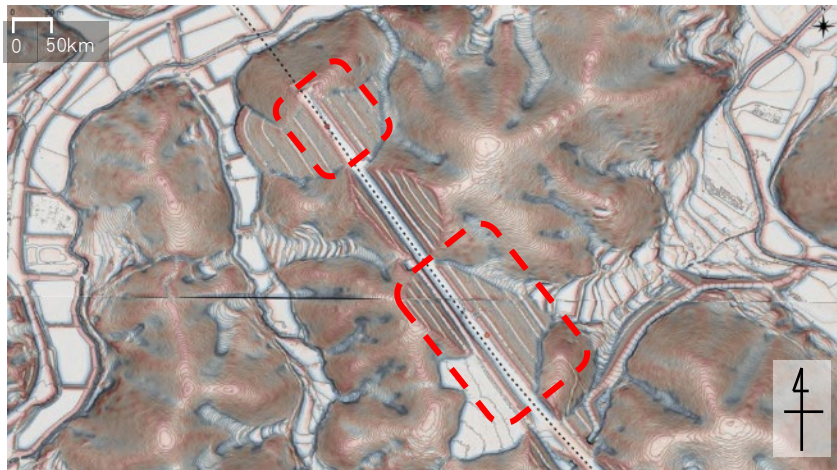


図 3.3 吉舎地区における時系列解析結果 (2.5次元解析で得られた沈下量を $\sqrt{2}$ 倍)

(2) 注意すべき地形地質箇所の抽出

注意すべき地形地質箇所の抽出において、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により地形判読を視覚的にかつ容易に行える立体図法) を作成した一例を図 3.4 に示す。丘陵・山地部の注意すべき地形地質箇所の抽出は、航空 LP 測量を用いた CS 立体図を利用する他に、「航空写真の立体視」などでも可能である。



(谷埋め盛土)

図 3.4 尾道松江道（甲奴地区）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の抽出例

(3) 衛星 SAR 干渉解析結果

図 3.5 に衛星 SAR 干渉解析結果を示す。図で示した谷埋め盛土部で、路面及びのり面が沈下していることが分かる。一路線内において、衛星 SAR 干渉解析では注意すべき地形地質箇所の近年の変位状況を把握することができ、「詳細調査」の必要性、「点検・危険度調査箇所」に追加、「衛星 SAR による継続監視」など、道路の維持管理の優先順位を計画することができる。

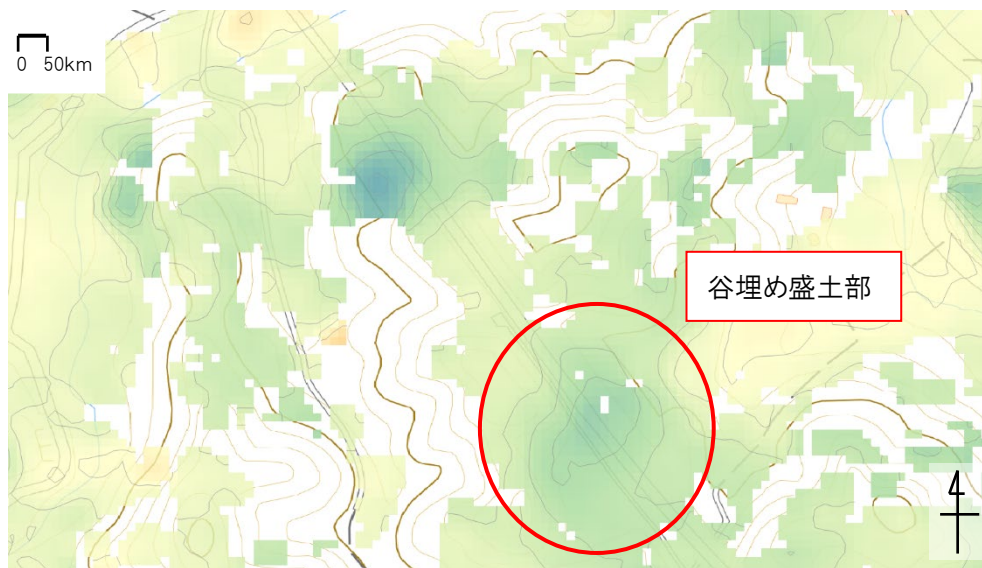


図 3.5 尾道松江道（甲奴地区）衛星 SAR 干渉解析による谷埋め盛土部の変状評価例

3.1.2 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 $L \div 11.5\text{km}$ ）間で衛星 SAR 干渉解析（PS-InSAR 解析）を行い、微地形区分に応じた盛土沈下量を評価した。

(1) 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、L 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 3.6 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。

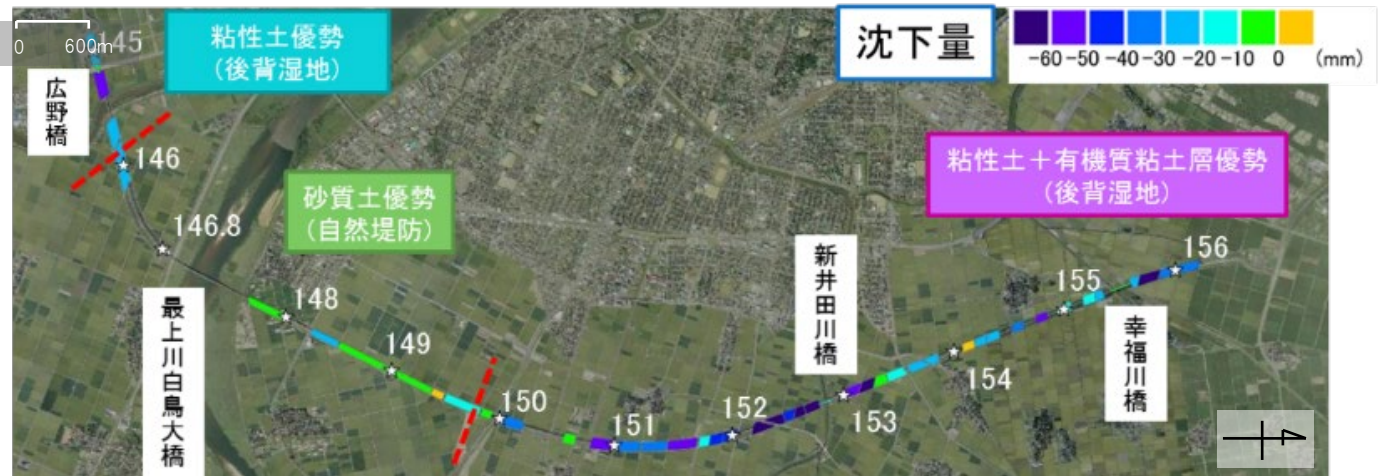


図 3.6 山形自動車道（酒田 IC～酒田みなと IC 間）における盛土の沈下状況³⁾
解析期間：2007（平成 19）年 6 月 9 日～2010（平成 22）年 11 月 2 日

(2) 想定地質縦断面図

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 3.7 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。

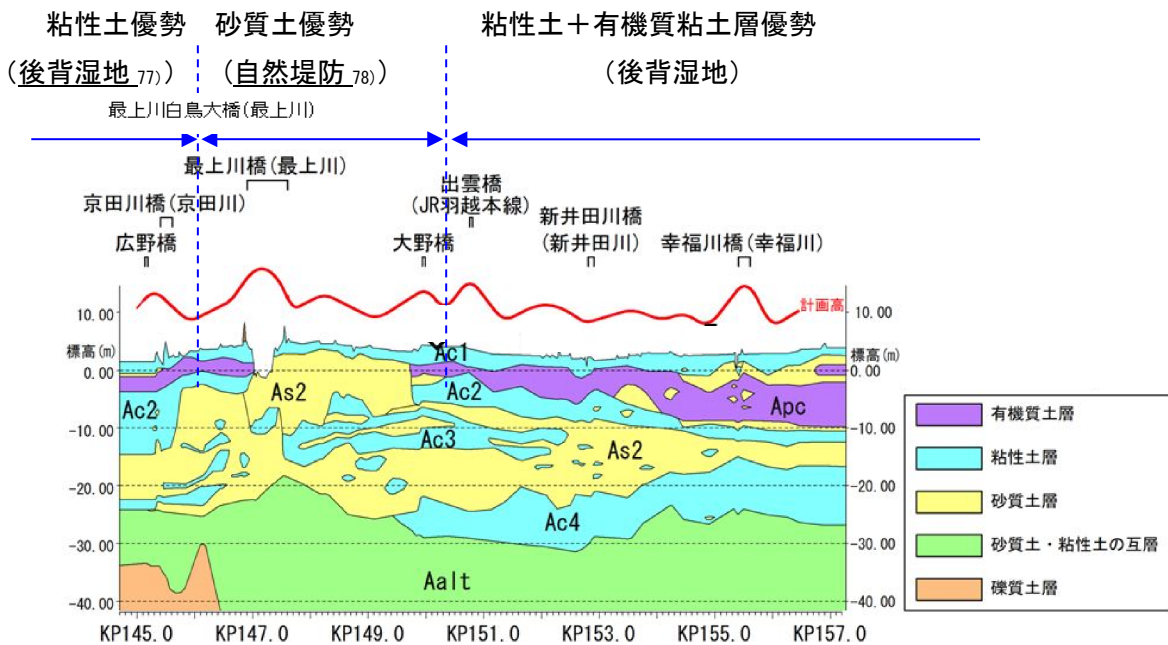


図 3.7 地質縦断面図³⁾

(3) 沈下量の経時変化

図 3.7 に 150.9kp における実測値と SAR 解析値の経時変化を示す。ほぼ一致していることが分かる。

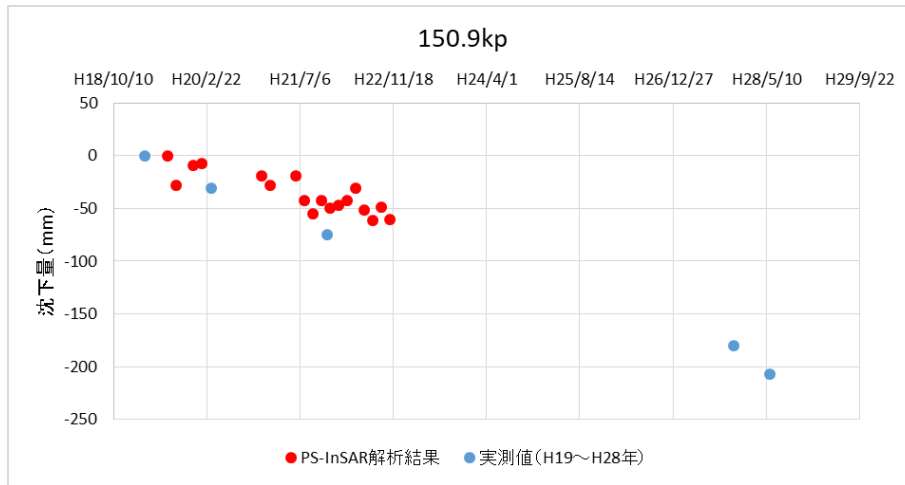


図 3.7 盛土沈下に関する測量結果と衛星 SAR 干渉解析 (PS-InSAR) 結果の比較³⁾

図 3.7 において衛星 SAR の解析値が凸凹している。図 3.7 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 3.8 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。

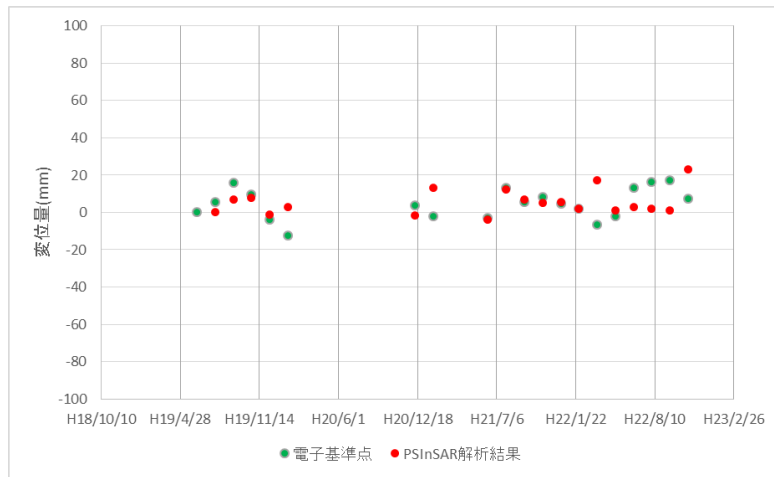


図 3.8 図 3.7 の実測値の電子基準点の動き

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

図 3.9 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（1 ペアの干渉 SAR 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。

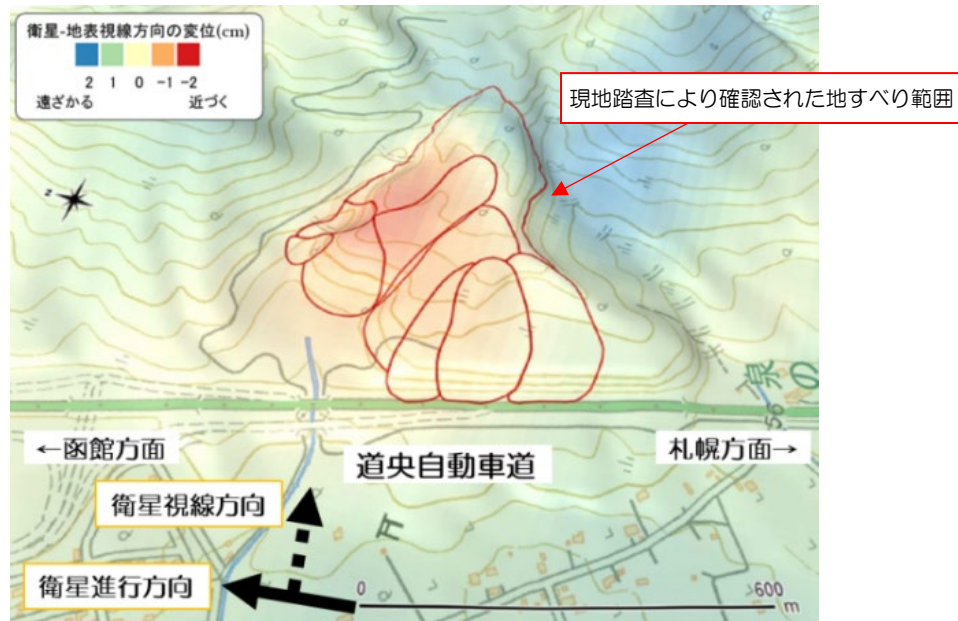


図 3.9 道央自動車道（虻田地区）で発生した地すべり範囲の現地踏査と衛星 SAR 干渉解析の比較²⁾

3.2.2 大規模切土での活用事例

図 3.10 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 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。

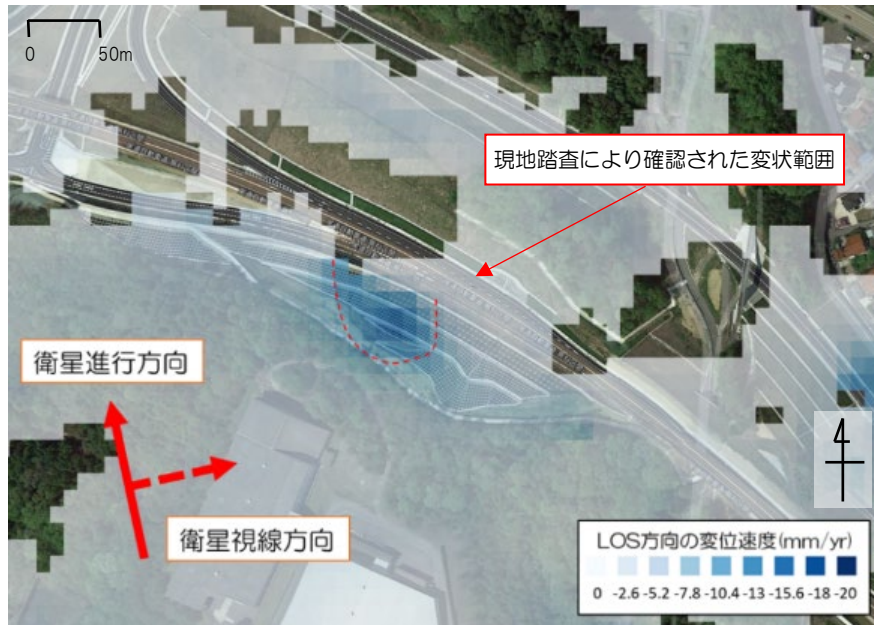


図 3.10 尾道松江道 (吉舎 IC) で発生した斜面崩壊範囲の現地踏査と衛星 SAR 干渉解析の比較⁴⁾

3.2.3 のり面对策工（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 解析、L バンド、期間：2014（平成 26 年）年 9 月 20 日～2017（平成 29 年）年 3 月 4 日）を行った。図 3.11 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。

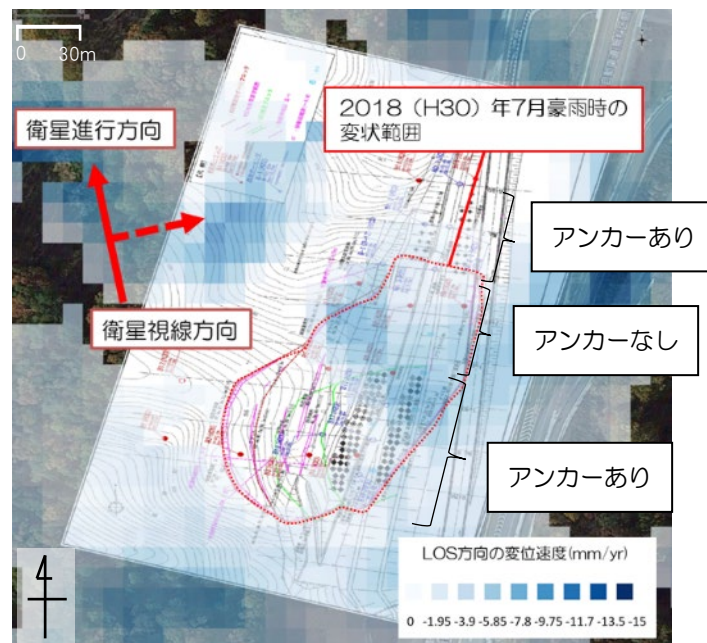
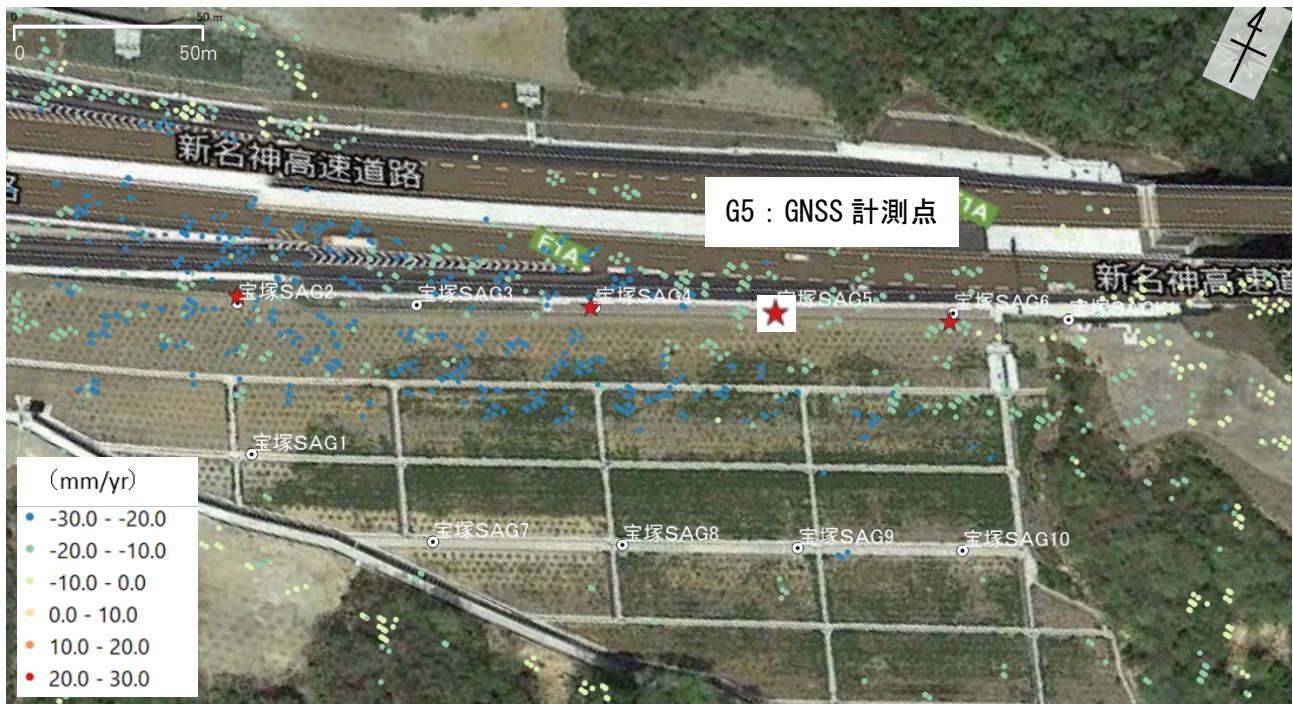


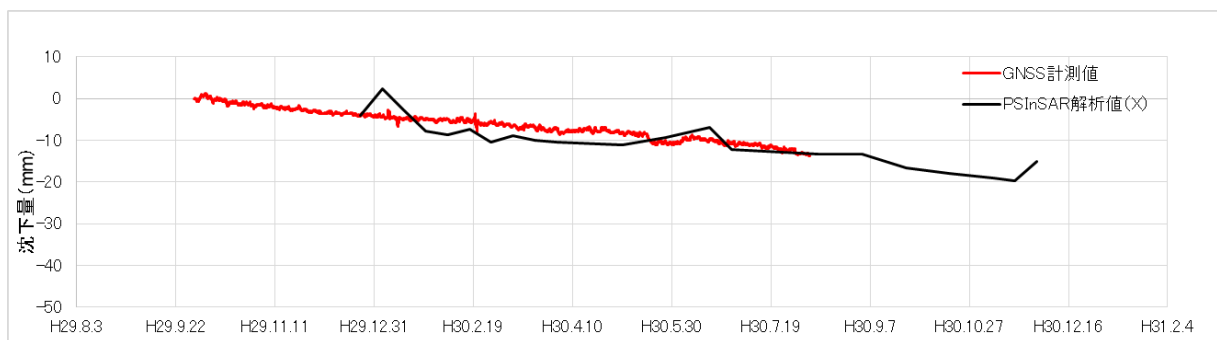
図 3.11 衛星 SAR 干渉解析（SBAS）結果から推定された事前変状の可能性のある範囲（2018 年 7 月豪雨時に尾道松江道（高野 IC）で発生した地すべり）

3.2.4 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 3.12 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 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。



(GNSS の計測点)



(G5 地点の沈下の経時変化)

図 3.12 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

3.2.5 軟弱地盤上の盛土での活用事例

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 3.13 に現地での測量結果と ALOS-1 を用いた衛星 SAR 干渉解析（PS-InSAR 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。

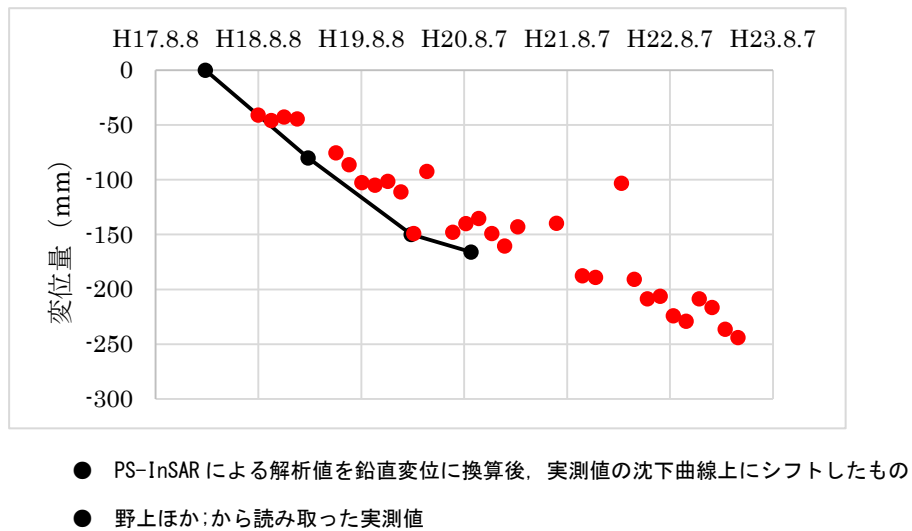


図 3.13 東北自動車道（中条地区）での軟弱地盤上の盛土（中条）における沈下の比較⁹⁾

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

山陽自動車道の宝塚北 SA（図 3.14 参照）における谷埋め盛土の沈下に関して、図 3.15 に Sentinel-1 を用いた衛星 SAR 干渉解析（PS-InSAR 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 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 3.15 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 3.16 に示す。実測値と解析値では両バンドで正の相関がみられ、特に X バンドデータでは非常に良い相関が得られていることが分かる。



図 3.14 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 バンドデータ使用結果）
 （下：C バンドデータ使用結果）

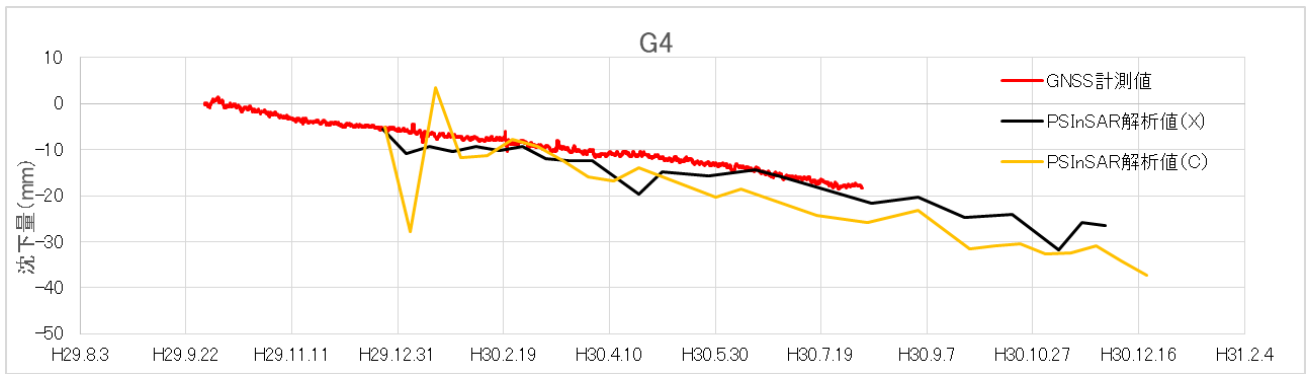


図 3.15 高盛土（宝塚北 SA）における沈下量の比較

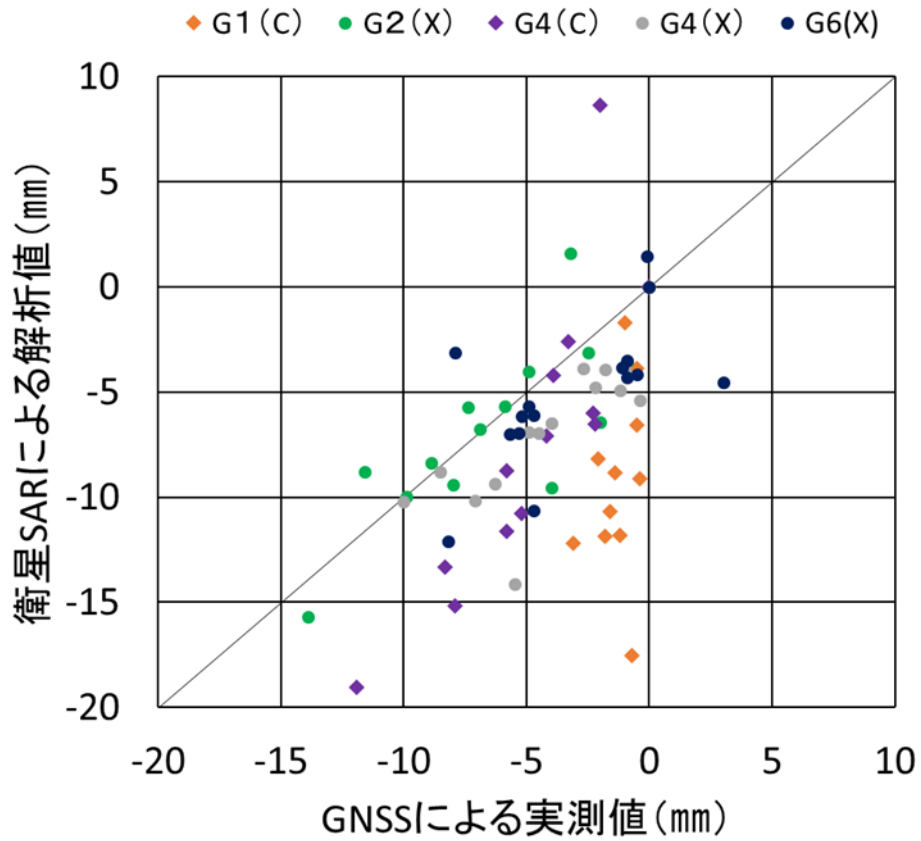


図 3.16 高盛土（宝塚北 SA）における GNSS 実測値と衛星 SAR 解析値相関図

<参考文献>

- 1) 環境省 水・大気環境局：地盤沈下観測等における衛星活用マニュアル、平成 29 年 3 月
- 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、2018 年 7 月、pp.1113-1114
- 3) 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
- 4) 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 を利用したのり面変状の把握（その 1）、第 54 回地盤工学研究発表会、2018 年 7 月、pp.1065-1066
- 5) （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
- 6) 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 を利用したのり面変状の把握（その 2）、第 54 回地盤工学研究発表会、2018 年 7 月、pp.1067-1068
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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

資料—1. SAR 衛星の種類と特徴及び衛星データの入手方法

資料 1.1 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 1.1 に示す。

資料表 1.1 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)	5×5m	80km	C バンド	12 日	29.1 ~ 46 度	約 11 度	無料
	5×20m	250km					
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⁷⁹⁾：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⁶¹⁾
- ・ 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⁶²⁾

資料 1.2 衛星 SAR 画像の入手方法

衛星 SAR 画像は、原則、代理店から入手することができる。

入手に当たっての留意点は、以下のとおりである。

- ① 衛星 SAR 解析の目的に応じた適切な解析を行うために必要な解析範囲、解析期間などを予め決め、解析可能なデータの有無等を確認した後に入手する。
- ② ALOS-2、TerraSAR-X のデータ購入には、注文から取得までに約 1~2 週間程度かかる。
- ③ Sentinel-1 のデータの入手は、Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>) で行う。ただし、データの取得には、アカウントを作成する必要がある。

資料— 2. 任意な断面における挙動（水平、鉛直）の推定法

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、表 2.1 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。

解析結果の整理方法としては、表 2.2 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。

表 2.1 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（概ね東西方向で水平から 51 度程度）である。
時系列解析	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。	<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（ペア数）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2.2 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。	<長所> ・後作業なく簡便である。 <短所> ・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。	<長所> ・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。 <短所> ・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、斜面のスクリーングなど）
④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	<長所> ・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。 <短所> ・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。	任意な検討断面での水平、鉛直変位に着目する場合

2.1 任意な検討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討断面における水平、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討断面における水平、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2.3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、南北方向の主側線では、変位を求めることが困難であることが分かる。

図 2.4 に任意位置の検討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「 ϕ （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。
- ・ 任意な検討断面での3次元変位は「 Δx 、 Δy 、 Δz 」である。

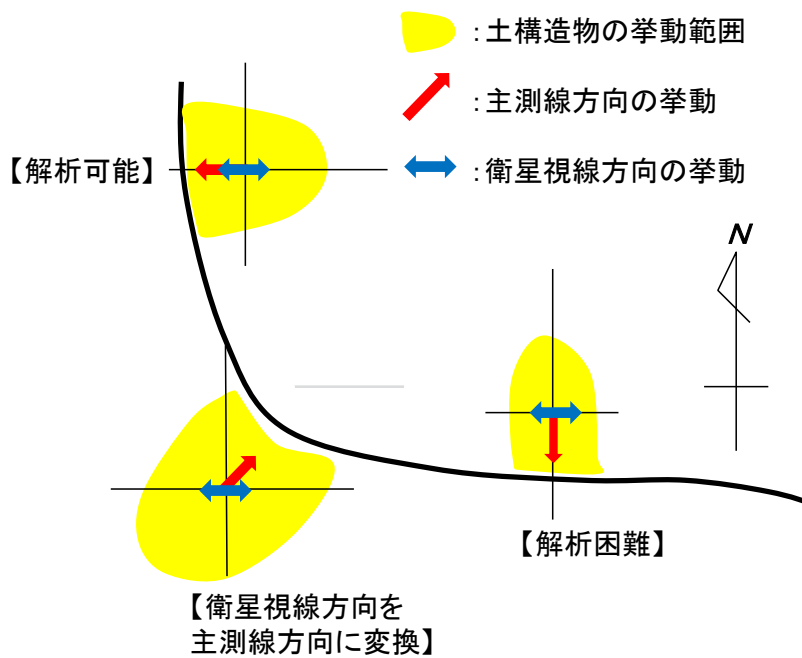


図 2.3 衛星視線方向と土構造物の主測線方向の関係

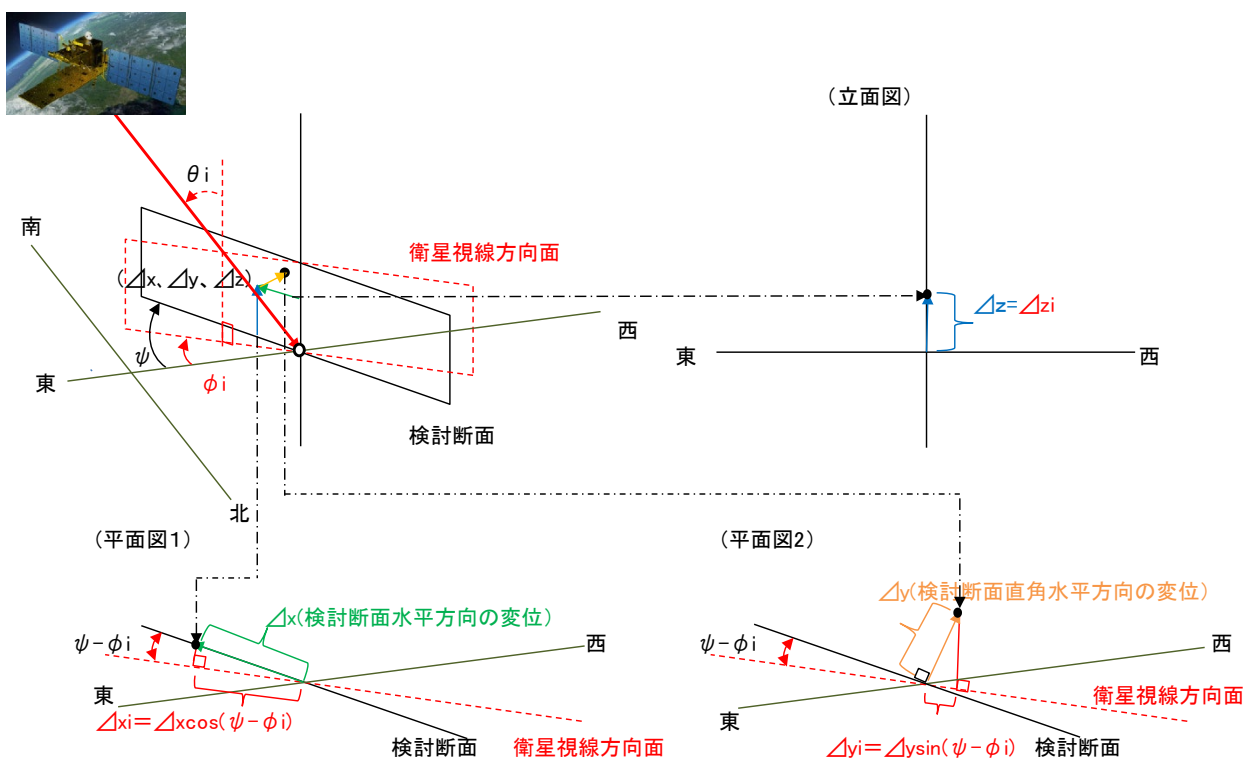


図 2.4 検査断面における 3 次元変位 (Δx 、 Δy 、 Δz) と衛星視線方向の関係

任意な検討意断面における、水平変位（検討断面主側線方向）、鉛直変位（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。

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

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

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

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2.4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。

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

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（南向軌道及び北向軌道）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2.5に示すような南向軌道（ディセンディング）及び北向軌道（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2.5及び式(7)では、南向軌道（ディセンディング）及び北向軌道（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。

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

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

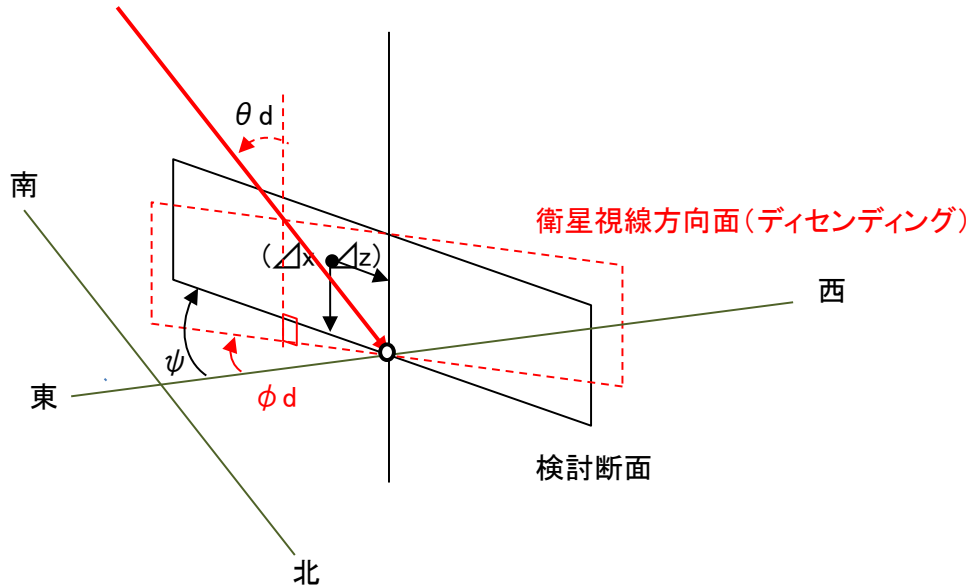
$$\theta_1, \theta_3 \Rightarrow \theta_d, \theta_a$$

南向軌道（ディセンディング）及び北向軌道（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)

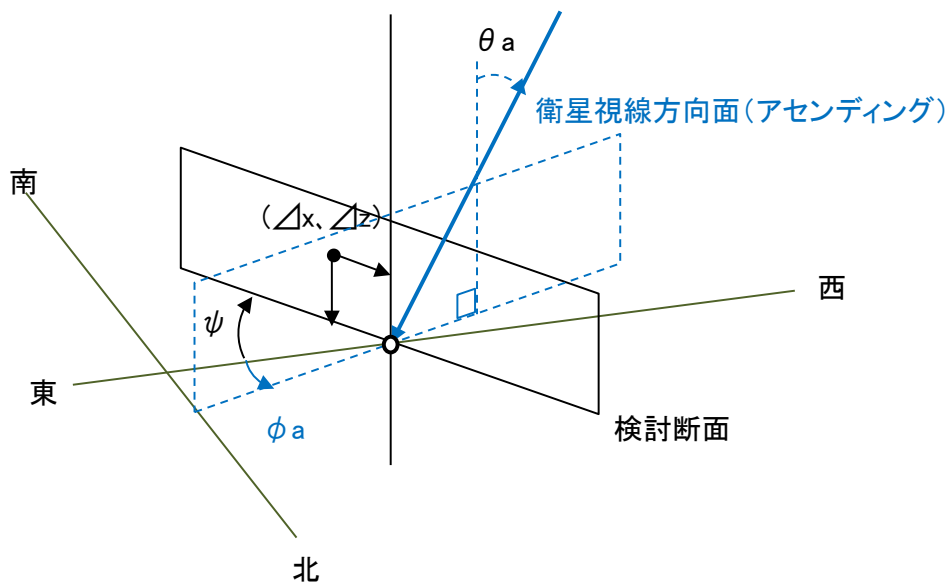


図 2.5 検討断面における変位と衛星視線方向面 (アセンディング及びディセンディング) の関係

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。

資料—3. 必要コストの積算例

資料表 3.1～3.2 に一路線における衛星 SAR 干渉解析（時系列解析）の積算例を示す。なお、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。

積算条件

- ・ 場所：尾道松江道（三次河川国道事務所管理区間、L≒100km、幅はのり面崩壊の可能性範囲を網羅する必要があるため、道路左右において流域境界線以上の範囲を目安とする。）
- ・ 使用衛星：ALOS-2
- ・ 解析期間：5 年間
- ・ 使用衛星 SAR データ（画像）：80 枚 {解析に必要な枚数（20 データ）×2 方向（アセンディング、ディセンディング）×2 エリア（北側、南側）}
- ・ 衛星データ単価：¥80,000
- ・ 解析手法：時系列解析（PS-InSAR）
- ・ 累積月平均変位量の評価：100 箇所
- ・ 現地踏査：10 箇所
- ・ 注意すべき地形地質の評価：航空 LP データから CS 立体図を作成して評価
- ・ 初期段階：初年度の解析及び評価
- ・ 運用段階：初期段階の解析を踏まえ 2 年度以降の運用段階での解析及び評価

また、資料表 3.3 に災害発生が発生した箇所における衛星 SAR 干渉解析（時系列解析）の積算例を示す。なお、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。

積算条件

- ・ 場所：尾道松江道（吉舎 IC、50m×100m）
- ・ 使用衛星：ALOS-2
- ・ 解析期間：5 年間
- ・ 使用衛星 SAR データ（画像）：4 枚（既存の衛星 SAR 画像 40 枚に追加）
40 枚=20 データ×2 方向（アセンディング、ディセンディング）}
- ・ 衛星データ単価：¥80,000
- ・ 解析手法：時系列解析（SBAS）
- ・ 変状の影響範囲、変位量の整理
- ・ 現地踏査：0.5 日

資料表 3.1 広域の道路土構造物等の維持管理における衛星 SAR 活用検討業務（初期段階）の積算例

広域の道路土構造物等の維持管理における衛星SAR活用検討業務(初期段階):L=100km

項目・工種・種別	数量	単位	単価	金額	摘要
解析等調査					
直接業務費				7,180,850	
衛星SAR干渉解析(時系列解析)、一路線の初期段階	1	式		6,939,100	別紙第1号直接人件費内訳書
打合せ	1	式		241,750	〃
打合せ	1	式		241,750	〃
打合せ協議	1	式		241,750	〃
直接経費	1	式		7,037,635	
直接経費	1	式		7,037,635	
旅費交通費	1	式		3,680	広島～三次
電子成果品作成費	1	式		287,000	
画像化された衛星データ購入費	80	枚	80,000	6,400,000	
電算使用料	1	式		346,955	直接人件費×5%
直接原価計	1	式		14,218,485	
その他原価	1	式		3,866,887	α = 35%
業務原価	1	式		18,085,372	
一般管理費等	1	式		9,732,654	β = 35%
解析等調査業務価格	1	式		27,818,026	

第 1 号 直接人件費内訳書（広域、初期段階の場合）

作業項目	主任技術者	技師長	主任技師	技師(A)	技師(B)	技師(C)	技術員	摘要	
	64,300	60,400	51,200	45,500	37,200	30,000	25,400		
衛星SAR干渉解析(初期段階)		0.000	28.000	37.000	50.000	40.000	30.000	6,939,100	
解析計画			3.000	4.000	2.000	1.000	1.000	465,400	100km
画像化された衛星SARデータの選定			1.000	5.000	5.000			464,700	80枚(20データ×2方向×2エリア)
時系列解析			5.000	10.000	10.000	10.000	10.000	1,637,000	100km
累積月平均変位量の評価			5.000	5.000	10.000	10.000		1,155,500	変動A,B,C,Dが100箇所
主側線方向の詳細な累積月平均変位量			1.000	5.000	5.000			464,700	変動A、Bが5箇所
注意すべき地形地質の評価			5.000	5.000	10.000	10.000	10.000	1,409,500	航空LiDAR(等高線)データ貸与、対象箇所: 60箇所
現地踏査			4.000	4.000	2.000			461,200	10箇所
維持管理の対応方針の決定			5.000	5.000	10.000	10.000	10.000	1,409,500	100箇所
照査			3.000	3.000	3.000			401,700	
打合せ協議			2.5	2.5				241,750	
業務着手時			0.5	0.5				48,350	
中間			1.5	1.5					3回
成果物納入時			0.5	0.5				48,350	

資料表 3.2 広域の道路土構造物等の維持管理における衛星 SAR 活用検討業務（運用段階）

広域の道路土構造物等の維持管理における衛星SAR活用検討業務(運用段階):L=100km、4か月毎に年3回

項目・工種・種別	数量	単位	単価	金額	摘要
解析等調査					
直接業務費				3,241,250	
衛星SAR干渉解析(時系列解析)、一路線の初期段階	1	式		3,096,200	別紙第1号直接人件費内訳書
打合せ	1	式		145,050	〃
打合せ	1	式		145,050	〃
打合せ協議	1	式		145,050	〃
直接経費	1	式		1,567,490	
直接経費	1	式		1,567,490	
旅費交通費	1	式		3,680	広島～三次
電子成果品作成費	1	式		129,000	
画像化された衛星データ購入費	16	枚	80,000	1,280,000	
電算使用料	1	式		154,810	直接人件費×5%
直接原価計	1	式		4,808,740	
その他原価	1	式		1,745,413	$\alpha = 35\%$
業務原価	1	式		6,554,153	
一般管理費等	1	式		3,523,093	$\beta = 35\%$
解析等調査業務価格	1	式		10,077,246	

第 1 号 直接人件費内訳書（広域、運用段階の場合）

作業項目	主任技術者	技師長	主任技師	技師(A)	技師(B)	技師(C)	技術員	摘要
	64,300 円	60,400 円	51,200 円	45,500 円	37,200 円	30,000 円	25,400 円	
衛星SAR干渉解析(運用段階)	0.000 人	0.000 人	12.000 人	22.000 人	21.500 人	10.000 人	15.000 人	3,096,200 円
解析計画			0.500	0.500	1.000			85,550 100km
画像化された衛星SARデータの選定			0.500	0.500	0.500			66,950 16枚(80枚÷5年間)
時系列解析			5.000	10.000	10.000	10.000	15.000	1,764,000 100km 4か月毎で年3回解析
累積月平均変位量の評価			1.000	2.000	2.000			216,600 変動A,Bが5箇所、 変動C,Dが95箇所
主側線方向の詳細な累積月平均変位量			1.000	5.000	5.000			464,700 変動A、Bが5箇所
注意すべき地形地質の評価			0.000	0.000	0.000	0.000		0
現地踏査			2.000	2.000	1.000			230,600 5箇所
維持管理の対応方針の決定			1.000	1.000	1.000			133,900 100箇所
照査			1.000	1.000	1.000			133,900
打合せ協議			1.5	1.5				145,050
業務着手時			0.5	0.5				48,350
中間			0.5	0.5				48,350 1回
成果物納入時			0.5	0.5				48,350

資料表 3.3 衛星 SAR 干渉解析（時系列解析）の積算例（災害発生箇所）

災害発生の可能性のある箇所あるいは災害発生時における衛星SAR活用検討業務(50m×100m程度)、恒久対策工の設計含まず

項目・工種・種別	数量	単位	単価	金額	摘要
解析等調査					
直接業務費				1,265,250	
衛星SAR干渉解析(時系列解析)、災害対応	1	式		1,168,550	別紙第1号直接人件費内訳書
打合せ	1	式		96,700	〃
打合せ	1	式		96,700	〃
打合せ協議	1	式		96,700	〃
直接経費	1	式		432,108	
直接経費	1	式		432,108	
旅費交通費	1	式		3,680	広島～三次
電子成果品作成費	1	式		50,000	
画像化された衛星データ購入費	4	枚	80,000	320,000	既存の衛星データに追加
電算使用料	1	式		58,428	直接人件費×5%
直接原価計	1	式		1,697,358	
その他原価	1	式		681,337	α = 35%
業務原価	1	式		2,378,695	
一般管理費等	1	式		1,274,608	β = 35%
解析等調査業務価格	1	式		3,653,303	

第 1 号 直接人件費内訳書（災害対応の場合）

No.1

作業項目	主任技術者	技師長	主任技師	技師(A)	技師(B)	技師(C)	技術員	摘要	
	64,300	60,400	51,200	45,500	37,200	30,000	25,400		
衛星SAR干渉解析(災害対応)	0.000	1.500	7.000	10.500	6.500	0.000	0.000	1,168,550	
解析計画			0.500	0.500				48,350	1現場(50×100m程度)
画像化された衛星SARデータの選定			0.500	0.500				48,350	4枚 (既存の衛星データに追加)
時系列解析			1.000	5.000	5.000			464,700	1現場(50×100m程度)
任意断面方向への変換解析			1.000	1.000				96,700	2断面
変状の影響範囲、変位量の整理			0.500	0.500	0.500			66,950	
現地踏査			0.500	0.500				48,350	0.5日程度
応急対策工の提案			1.000	1.000				96,700	詳細な計算は含まない
詳細調査計画の立案			0.500	0.500				48,350	
照査		1.500	1.500	1.000	1.000			250,100	
打合せ協議			1.0	1.0				96,700	
業務着手時			0.5	0.5				48,350	
中間			0.0	0.0					
成果物納入時			0.5	0.5				48,350	

資料-4 特記仕様書の例

資料-3に対応する特記仕様書例を以下に示す。

4.1 広域の道路土構造物等の維持管理における衛星 SAR 活用検討業務（初期段階）の特記仕様書

1. 適用の範囲

本仕様書は「広域の道路土構造物等の維持管理における衛星 SAR 活用検討業務（初期段階）」に適用する。

2. 業務目的

本業務は、合成開口レーダ（SAR）を活用し、広域の道路変状の経時変化を求め道路土構造物等の維持管理の効率化を図ることを目的とし、一路線の初期段階での検討に適用する。

業務に実施に際しては、「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ュアル」を参照する。

3. 業務の内容

(1) 解析計画

対象とする一路線の道路土構造物の経時変化を適切に求めるため、道路の供用時期、衛星データの取得可能時期、変状の影響範囲などを考慮して、解析期間や解析範囲を計画する。

解析範囲に関しては、注意すべき地形地質が評価できるように留意する。

(2) 衛星 SAR データの選定

使用する衛星 SAR データは、ALOS-2（Lバンド）を基本とし、解析計画で設定した解析期間と解析範囲を捕捉できる衛星データを選定する。

(3) 時系列解析

時系列解析は、SBAS（短基線長解析による干渉 SAR）又は PS-InSAR（永久散乱体を用いた干渉 SAR）を用いて解析を行う。

解析結果は、対象とする道路土構造物等の 2.5 次元解析から得られた鉛直変位から斜面に沿った変位を設定する。

(4) 累積月平均変位量の評価（スクリーニング）

(3)で得られた道路土構造物等の斜面に沿った変位より、累積月平均変位量を算出したのち、変動 A：10mm/月以上、変動 B：2～10mm/月、変動 C：0.5～2mm/月、変動 D：なしに区分する。この変動 A～D を用いて、道路土構造物等の変状状況をスクリーニングする。変動 A,B 箇所に関しては、道路土構造物の主側線方向における水平、鉛直変位を合成し、より詳細な累積平均変位量を評価する。

(5) 注意すべき地形地質の評価

注意すべき地形地質に関しては、「道路土工 切土工・斜面安定工指針：(公社)日本道路協会、平成 21 年 6 月」、「杭基礎設計便覧：(公社)日本道路協会、令和 2 年 9 月」及び「斜面上の深礎基礎設計施工便覧：(公社)日本道路協会、平成 24 年 4 月」などを参考に評価を行う。

(6) 現地踏査

スクーリングで抽出された変動 A 箇所、変動 B 箇所、注意すべき地形地質がある変動 C 箇所において現地踏査を行い、地盤変状と道路への影響について考察する。

(7) 維持管理の対応方針の検討

衛星 SAR による変動 A～D、注意すべき地形地質の有無、現地踏査などから総合的に道路土構造物等毎に詳細調査、点検・危険度調査箇所の追加、衛星 SAR による継続監視（4 か月に 1 回又は 1 年に 1 回）などの維持管理の対応方針を検討する。

4. 報告書の作成

上記（3）の結果を取りまとめて、報告書を作成する。なお、取りまとめにあたり業務内容を要約した概要版を作成するものとする。受託者は、電子媒体を提出する際には、ウィルス対策を実施した上で提出しなければならない。

5. 成果品の提出

本業務の成果品は下記の通りとする。

- ① 電子成果品（CD-R、DVD-R） 2部
- ② 報告書概要版 1部
- ③ その他調査員が指示するもの 1式

6. 成果品の補修

受託者は、成果品の引き渡し後といえども受託者の過失及び粗漏に起因する不的確な個所が発見された場合は、速やかに受託者の負担により、訂正・補正等の処置を取らなければならない。

7. 打合せ

打合せは下記の区切りで行うものとし、回数は 3 回とする。

- 1) 業務着手時
- 2) 中間打合せ（1回）
- 3) 成果品納入時

8. 疑義

本業務に疑義が生じた場合には、委託者と受託者の協議により定めるものとする。

9. 個人情報の取り扱い

受託者は、個人情報の取扱いに際しては、設計業務共通仕様書 1131 条を準拠して、本業務を履行しなければならない。

10. 安全の確保

受託者は、本業務の履行に際しては、設計業務共通仕様書 1132 条を準拠して、安全等を確保しな

ければならない。

4.2 広域の道路土構造物等の維持管理における衛星 SAR 活用検討業務（運用段階）の特記仕様書

1. 適用の範囲

本仕様書は「広域の道路土構造物等の維持管理における衛星 SAR 活用検討業務（運用段階）」に適用する。

2. 業務目的

本業務は、合成開口レーダ（SAR）を活用し、広域の道路変状の経時変化を求め道路土構造物等の維持管理の効率化を図ることを目的とし、一路線の運用段階での検討に適用する。

業務に実施に際しては、「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ュアル」を参照する。

3. 業務の内容

(1) 解析計画

対象とする一路線の道路土構造物の変状の進行、新たな変状の発生を確認するため、初期段階で設定した解析範囲において新たに得られた衛星データを照査し、解析期間を計画する。

(2) 衛星 SAR データの選定

使用する衛星 SAR データは、ALOS-2（Lバンド）を基本とし、解析計画で設定した解析期間と解析範囲を捕捉できる衛星データを選定する。

(3) 時系列解析

時系列解析は、SBAS（短基線長解析による干渉 SAR）又は PS-InSAR（永久散乱体を用いた干渉 SAR）を用いて解析を行う。

解析結果は、対象とする道路土構造物等の 2.5 次元解析から得られた鉛直変位から斜面に沿った変位を設定する。

(4) 累積月平均変位量の評価（スクリーニング）

(3) で得られた道路土構造物等の斜面に沿った変位より、累積月平均変位量を算出したのち、変動 A：10mm/月以上、変動 B：2～10mm/月、変動 C：0.5～2mm/月、変動 D：なしに区分する。この変動 A～D を用いて、道路土構造物等の変状状況をスクリーニングする。変動 A,B 箇所に関しては、道路土構造物の主側線方向における水平、鉛直変位を合成し、より詳細な累積平均変位量を評価する。

(5) 現地踏査

スクリーニングで抽出された変動 A 箇所、変動 B 箇所、注意すべき地形地質がある変動 C 箇所において現地踏査を行い、地盤変状と道路への影響について考察する。

(6) 維持管理の対応方針の検討

衛星 SAR による変動 A～D、注意すべき地形地質の有無、現地踏査などから総合的に道路土構造物等毎に詳細調査、点検・危険度調査箇所の追加、衛星 SAR による継続監視（4 か月に 1 回又は 1 年に 1 回）などの維持管理の対応方針を検討する。

4. 報告書の作成

上記（3）の結果を取りまとめて、報告書を作成する。なお、取りまとめにあたり業務内容を要約した概要版を作成するものとする。受託者は、電子媒体を提出する際には、ウィルス対策を実施した上で提出しなければならない。

5. 成果品の提出

本業務の成果品は下記の通りとする。

- ④ 電子成果品（CD-R、DVD-R） 2部
- ⑤ 報告書概要版 1部
- ⑥ その他調査員が指示するもの 1式

6. 成果品の補修

受託者は、成果品の引き渡し後といえども受託者の過失及び粗漏に起因する不的確な個所が発見された場合は、速やかに受託者の負担により、訂正・補正等の処置を取らなければならない。

7. 打合せ

打合せは下記の区切りで行うものとし、回数は3回とする。

- 4) 業務着手時
- 5) 中間打合せ（1回）
- 6) 成果品納入時

8. 疑義

本業務に疑義が生じた場合には、委託者と受託者の協議により定めるものとする。

9. 個人情報の取り扱い

受託者は、個人情報の取扱いに際しては、設計業務共通仕様書 1131 条を準拠して、本業務を履行しなければならない。

10. 安全の確保

受託者は、本業務の履行に際しては、設計業務共通仕様書 1132 条を準拠して、安全等を確保しなければならない。

4.3 災害発生の可能性のある箇所あるいは災害発生時における衛星 SAR 活用検討業務の特記仕様書

1. 適用の範囲

本仕様書は「災害発生の可能性のある箇所あるいは災害発生時における衛星 SAR 活用検討業務」に適用する。

2. 業務目的

本業務は、合成開口レーダ (SAR) を活用し、災害発生の可能性のある箇所あるいは災害発生時における現地の変状にあった応急対策工の設計及び詳細調査計画の立案を行うことを目的とする。

業務に実施に際しては、「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ュアル」を参照する。

3. 業務の内容

(1) 解析計画

対象とする災害発生の可能性のある箇所あるいは災害発生箇所における道路土構造物等の経時変化を適切に求めるため、道路の供用時期、衛星データの取得可能時期、変状の影響範囲などを考慮して、解析期間や解析範囲を計画する。

解析範囲に関しては、注意すべき地形地質が評価できるように留意する。

(2) 衛星 SAR データの選定

使用する衛星 SAR データは、ALOS-2 (Lバンド) を基本とし、解析計画で設定した解析期間と解析範囲を捕捉できる衛星データを選定する。

(3) 時系列解析

時系列解析は、SBAS (短基線長解析による干渉 SAR) 又は PS-InSAR (永久散乱体を用いた干渉 SAR) を用いて解析を行う。

(4) 任意断面への変換解析

時系列解析結果を活用し道路土構造物主側線方向断面での鉛直変位、水平変位を算出する。すべり土塊の範囲やすべり線の深さを設定する。

(5) 変状の影響範囲、変位量の整理

変状の影響範囲からすべり土塊の大きさ、変位量からすべり土塊の深さを設定する。

(6) 現地踏査

変状の影響範囲を目安に踏査範囲を決め現地踏査を行い、地盤変状と道路への影響について考察する。

(7) 応急対策工の提案

すべり土塊の大きさ、深さ、活動の程度、現地踏査を踏まえた湧水の状況などから適切な応急対策工を提案する。

(8) 詳細調査計画の立案

すべり土塊の大きさ、深さ、活動の程度、現地踏査を踏まえた湧水の状況などから適切な地質調

査計画や動態観測計画を立案する。

4. 報告書の作成

上記(3)の結果を取りまとめて、報告書を作成する。なお、取りまとめにあたり業務内容を要約した概要版を作成するものとする。受託者は、電子媒体を提出する際には、ウィルス対策を実施した上で提出しなければならない。

5. 成果品の提出

本業務の成果品は下記の通りとする。

- ⑦ 電子成果品（CD-R、DVD-R） 2部
- ⑧ 報告書概要版 1部
- ⑨ その他調査員が指示するもの 1式

6. 成果品の補修

受託者は、成果品の引き渡し後といえども受託者の過失及び粗漏に起因する不的確な個所が発見された場合は、速やかに受託者の負担により、訂正・補正等の処置を取らなければならない。

7. 打合せ

打合せは下記の区切りで行うものとし、回数は3回とする。

- 7) 業務着手時
- 8) 中間打合せ（1回）
- 9) 成果品納入時

8. 疑義

本業務に疑義が生じた場合には、委託者と受託者の協議により定めるものとする。

9. 個人情報の取り扱い

受託者は、個人情報の取扱いに際しては、設計業務共通仕様書 1131 条を準拠して、本業務を履行しなければならない。

10. 安全の確保

受託者は、本業務の履行に際しては、設計業務共通仕様書 1132 条を準拠して、安全等を確保しなければならない。

資料— 5. 用語の説明

1) 合成開口レーダ (SAR : Synthetic Aperture Radar)

レーダの一種。人工衛星に搭載し、移動させることによって仮想的に大きな開口面 (レーダの直径) として働く。

2) 道路土構造物等 (道路土構造物、自然斜面)

道路土構造物 (トンネル、橋梁以外の道路構造物) とそれに連続する自然斜面の総評。

3) リモートセンシング技術

「物を触らずに調べる」技術のこと。

4) 巡視

道路及びその付属物を常時良好な状態に保つため、通常パトロールにより道路の状況を把握し、必要に応じた応急措置的な作業並びに交通安全対策を実施すること。

5) 点検、危険度調査

定期点検、通常・特定土工点検、シェッド・大型カルバート等定期点検、道路防災総点検、ストック点検のことである。

6) 災害発生時の緊急・恒久対策

豪雨や地震災害により、道路構造物に何らかの障害が発生した場合に講じる対策。この対策の方針決定時に SAR での解析・評価を有効に活用することができる。

7) 一路線 (広域) の道路の維持管理

一路線 (このマニュアルでは 100km 程度) の道路の維持管理を一括して衛星 SAR で解析・評価することである。

8) 過去に遡ったデータベース (DB)

道路防災点検等では、点検箇所毎に点検地点 (構造物のクラック等) を決めてその挙動が経時的に確認されている。しかし、当初決めた点検地点以外に変状が発生した場合には、見逃すことがある。衛星 SAR を活用して、点検箇所全体の変状を過去に遡ってデータベースを構築することにより、変状の進行度合いを評価する。

9) 変状の影響範囲 (管理区域外含む)

地すべり、斜面崩壊、路面沈下などの地盤変状の影響範囲 (管理区域外を含む) を衛星 SAR で解析・評価する。

10) 累積月平均変位量

数年間の累積した地盤変位量から算出される月平均変位量である。

11) 現地踏査

地質専門技術者が現地を訪れ、地盤変状の範囲の推定、地形・地質調査などを行うこと。これを基に、地下水位の分布状況、変状の発生原因の推定今後の変動・被災予測、応急対策工の検討などを行う。

12) 航空 LP 測量

航空機に搭載した航空レーザスキャナから地上に向けてレーザパルスを発射し、反射して戻ってきたレーザパルスを解析することで三次元地形データを取得する技術のことである。

13) GNSS 測量

GNSS(Global Navigation Satellite System)衛星の電波を受信して緯度経度を測定し、位置等の計測を行う技術のことである。

14) UAV 測量

UAV（ドローン）による空中写真を用いた数値地形図作成及び三次元点群作成を行う技術のことである。

15) 応急対策工

災害発生時に被災の拡大防止を一時的に図るために応急的に行う対策工のことである。

16) 詳細調査計画

恒久対策工を設計施工するために必要な調査計画のことである。現地踏査や衛星 SAR による解析・評価結果に基づき、地盤変状の範囲、地下水位の分布状況、変状の発生原因の推定、今後の変動・被災予測を行う。

17) 恒久対策工

同様な災害が発生しないように被災原因の除去や低減を図るための対策工のことである。

18) 地球観測技術衛星

地図作成、地域観測、災害状況把握、資源調査などへの貢献を目的とした地球観測衛星のことである。日本では宇宙航空研究開発機構（JAXA）が開発した ALOS や ALOS-2 などがある。

19) 1 ペアの干渉 SAR 解析(D-InSAR)

衛星 SAR 解析において、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技術のことである。D-InSAR（Differential Interferometric SAR：差分干渉 SAR 解析）とも呼ばれる。

20) 時系列解析（スタッキング解析）

複数の干渉画像を重ね合わせることで変動速度を求める手法である。これにより SAR データに含まれる大気中の水蒸気の影響などによるノイズが低減される。

21) 2.5 次元解析

西側からの観測と東側からの観測の二方向の解析結果を合成することで、衛星視線方向の変動量を鉛直方向と東西方向の成分へ分離する技術である。

22) 任意断面への変換解析

衛星視線方向で測定される地盤の変位を、任意な断面方向の変位に変換するための解析方法である。

23) 着目地点（例えば、崩壊・地すべり地形箇所、軟弱地盤の沈下箇所など）の変位速度

衛星 SAR では、着目点の年間の変位速度を求めることができる。基準点を決めることにより、変位量の時系列変化を評価することができる。

24) 現地踏査を行うべき箇所の除草箇所の選定

現地踏査に先立ち、衛星 SAR により変状の範囲を特定して、必要最小限の除草を行うことが可能である。

25) 目視点検

点検技術者が施設に対して計測、触診、打音検査ができる距離まで近づき、損傷状態や変状を

詳細に調べること。

26) 道路区域外に起因する災害確認

衛星 SAR では、のり面上部や山間部等、現地で立ち入ることが困難である道路管理用地外の変状についても確認することが可能である。

27) (変状の) 地盤工学的な原因

道路土構造物等は、全て地盤の上あるいは中に構築されており、その変状原因の多くは周辺地盤の地盤工学的な原因(地下水位の上昇、盛土材料の泥濘化、軟弱地盤、流れ盤、断層破砕帯など)に起因することが多い。

28) 衛星 SAR 差分干渉解析 (以下、衛星 SAR 干渉解析と省略する)

異なる2時期の SAR データの位相差をとることにより地表の変位(地面がどれだけ動いたか)を測定する技術のこと。1 ペアの解析(D-InSAR)および時系列解析等の総称。

29) 注意すべき地形地質

道路土構造物等を設計・施工・維持管理するうえでの注意すべき地形地質は、平野部、山地・丘陵部で異なる。平野部では、扇状地、自然堤防、後背湿地、三角州、潟湖跡、旧河道、埋立地などである。山地・丘陵部では、地すべり地形、岩盤クリープ地形、流れ盤地形、土石流地形、集水地形、ガリー地形、落石・崩壊地形、崖錐、断層地形、リニアメント、空洞・陥没地形、未固結の地層が厚く堆積する斜面などがある。

30) 動態観測

地表面や地中に地盤の変動を測定できる機器(伸縮計、地すべり計、傾斜計、水位計、ひずみ計、沈下計、水圧計など)を設置し、時系列的に観測して地盤の挙動を把握する方法である。

31) SBAS (Small Baseline Subset algorithm : 短基線長解析による干渉 SAR)

衛星 SAR 干渉解析の時系列解析の一手法である。短い垂直基線長及び短い撮像日間隔の SAR 干渉画像を多数作成し、各観測時の変動量および変位速度を推定する。

32) PS-InSAR (Permanent Scatterers Interferometry SAR : 永久散乱体を用いた干渉 SAR)

衛星 SAR 干渉解析の時系列解析の一手法である。人工構造物など反射の位相が非常に安定したターゲット(永久散乱体: Permanent Scatterer)を含むピクセルのみを用い干渉処理を行う。各観測時の変動量および変位速度をピクセルごとに推定する。

33) Lバンド、Cバンド、Xバンド

SAR センサの観測周波数帯の名称。Lバンド(1~2GHz)、Cバンド(4~8GHz)、Xバンド(8~12GHz)の順に波長が短くなる。Lバンドは、電波が植生を通過するため、幹や地表面に近いところの様子が分かる。CバンドやXバンドでは電波が木の葉や枝で反射されるが、Lバンドと比較して分解能が高い。

34) マイクロ波

電磁波の一種。光より波長が長く、雲を透過するため、曇天や雨天でも地表面を観測することができる。SAR では衛星から斜め下方にマイクロ波を照射、地表面で散乱したもののうち衛星に戻ってきた強さ(後方散乱強度)を測定し、画像化する。

35) 干渉ペア数

解析に使用した異なる時期の観測データの組合せ数のことである。

36) 1 シーン、複数シーンの衛星データ

解析対象が「1 シーンの衛星データ」(およそ 50 km 四方) で収まる場合は準備する衛星データは 1 シーンで済む。解析対象が「1 シーンの衛星データ」では収まらない場合は、「複数シーンの衛星データ」を準備する必要がある。

37) 衛星進行方向 (北向軌道と南向軌道)

衛星の運動する方向 (アジマス方向) のこと。衛星が北に向かっていく軌道のことを北向軌道 (アセンディング軌道)、衛星が南に向かっていく軌道のことを南向軌道 (ディセンディング軌道) という。

38) 観測方向 (右側観測と左側観測)

センサで観測する方向のこと。衛星進行方向に対し右側観測と左側観測がある。

39) 観測パス番号

観測パス番号は衛星の地上軌跡 (1 回帰分) に対し西向き順に付加される。観測パス番号を指定すれば衛星の地上軌跡が決まり、センサの走査幅や指向方向を考慮すれば観測領域を特定することができる。

40) 中心フレーム番号

観測パスの軌跡を等間隔に区分した範囲のこと。観測パス番号と中心フレーム番号より特定の場所を指定できる。

41) 観測モード

衛星 SAR の撮像において、観測幅や解像度によって定められたモードのこと。例えば ALOS-2 では、「スポットライトモード: 最も詳細な観測を実現する分解能 1m×3m (観測域 25km)」、「高分解能モード: 分解能 3m、6m、10m から選択可能 (観測域 50km or 70km)」、「広域観測モード: 広範囲を一度に観測できる (分解能 60m~100m、観測域 350km or 490km)」を選ぶことができる

42) オフナディア角

衛星の鉛直直下 (ナディア) 方向と衛星視線方向のなす角度のことである。

43) 偏波

衛星データの観測条件の 1 つ。時間的に変動する電場の振幅と振動方向の関係を記述するものであり、電解ベクトルの向きにより水平偏波 (振幅が進行方向に対して水平: H) と垂直偏波 (振幅が進行方向に対して垂直: V) に分類され、送受信の組合せで HH、HV、VH、VV で表現される (1 文字目: 照射、2 文字目: 受信)。

44) 基線長

1 回目の観測と 2 回目の観測の SAR 衛星の軌道間距離のこと。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が短いことが望ましい (本文、図 2.4 中の B_⊥ 参照)。

45) 2 時期の軌道の差

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 2 時期における衛星データの取得位置は、若干、軌道の差が生じる。

46) DEM (数値標高データ)

地表面を等間隔の正方形に区切、それぞれの正方形に中心点の標高値を持たせたデータである。

47) 衛星 SAR 干渉解析における 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のことである。

48) 大気遅延などの誤差

電波は、真空では光速で進行するが、物質中では伝搬速度が変化する。高高度の人工衛星から発射された電波は、大気中を通過する際に光速より遅い速度で伝わるため、電波は真空の場合より遅れて伝わる。この遅れを大気伝搬誤差と呼ぶ。

49) マスター画像

干渉処理の過程において使用する 2 枚の画像のうち、撮像日時の古いもの。プライマリーとも呼ばれる。この画像を変位量計算の基準とする。

50) スレーブ画像

干渉処理の過程において使用する 2 枚の画像のうち、撮像日時の新しいもの。セカンダリーとも呼ばれる。

51) SLC (Single Look Complex) データ

SAR 画像フォーマットのひとつで、振幅と位相の情報を持つ複素データ。解像度が最も高い。

52) 初期干渉画像

異なる 2 時期の衛星データの干渉処理で作成される位相差の画像。この時点では軌道や地形等の影響を多く含む。

53) 軌道縞、地形縞

2 時期の衛星軌道の不一致や地面の標高差により生じる縞。軌道縞は軌道間距離(基線長)に依存する。初期干渉画像から軌道縞、地形縞を除去すると、地表面の変動によって生じる位相変化(変動縞)が得られる。

54) 変動縞画像

初期干渉画像から軌道縞、地形縞を除去して作成される変動情報についての画像。SAR の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。

55) アンラッピング処理

衛星 SAR 干渉解析では 0 度~360 度の値で位相差が得られ、そのままでは変動の絶対値を得ることができない。もともと幅広い値をもっている位相情報が 0 度から 360 度の範囲に折り畳まれて (wrap) いるのを、解いて元に戻す (unwrap) ことにより、変動量の絶対値に戻す処理のことである。

56) 位相差

ある同じ解析地点を対象とした異なる 2 時期の SAR データについて、衛星と地表面間の距離の差から生じた位相の差のことである。SAR は電波を地表に放射しその反射波からデータを得る観測センサで、電波は波の性質を持つことから、2 回の観測で地表の変位があると、観測される波の位置の差(位相差)が生じる。

57) 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とである。

58) 電離層の電子密度

電離層(太陽光線によって高温加熱された大気が、電子と陽子に乖離した状態(プラズマ状態)になった層)中の電子の数のことである。

59) マイクロ波の伝搬遅延(電離層の影響)

電波が地上に届くまでの伝搬経路には、地表約 50~1000km の電離層と地球を取り囲む大気の層がある。電波が電離層中を通過するとき、電子密度に比例し、電波の周波数の二乗に反比例するある量だけ電波の速度が遅くなる。このため、その遅延量を補正する必要がある。また、電離層の性質は一定ではなく、昼と夜、太陽活動の活発化などで大きく変動する。

60) マイクロ波の遅延(大気遅延)

人工衛星から発射された電波は、大気中を通過する際に光速より遅い速度で伝わるため、電波は真空の場合より遅れて伝わる。この遅れを大気遅延と呼び、正確な位置の決定には、この誤差を補正する必要がある。

61) 衛星視線入射角

衛星視線方向面(資料図 2.3 参照: 地表散乱面)に入射するビームと地表と直角の法線のなす角度のことである。

62) 衛星視線方位角の東西方向からの回転角

衛星視線方向面(資料図 2.3 参照: 地表散乱面)に入射するビームが東西方向からの回転角のことである。

63) のり面対策工

のり面の保護を目的として行う植生工、吹付工、法枠工、アンカー工などの総称

64) 地すべり

時間をかけて土塊が移動する、または、現在土塊が動いていない場合でも地震時等に変動するような現象である。

65) 地すべり土塊

地すべりにおいて移動する土塊のことである。

66) 大規模切土

特定道路土工構造物の切土高おおむね 15m 以上の切土のことである。

67) 片盛片切

切土部と盛土部が同時にある土構造物において、切土のり面と盛土のり面の間にはさまれた部分のことである。

68) 谷埋め盛土

谷部に構築された盛土のことである。

69) 軟弱地盤上の盛土

軟弱地盤の上に構築された盛土のことである。

70) CS 立体図

傾斜図と曲率図と標高図を組み合わせ、微地形を判読しやすくされた立体地図のことである。長野県林業総合センターで開発された。

71) 滑動中のブロック

地すべり等で現在、移動中の土塊の範囲のことである。

72) 主側線（任意な断面方向）

解析、設計を行ううえでの検討断面の方向。道路土構造物等の場合には、道路法線直角方向を設定することが多い。

73) レイオーバー現象

急斜面等の上部が下部より衛星 SAR 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現象のことである。

74) フォアショートニング現象

画像上で、高い山等が実際の平面位置より衛星 SAR アンテナに近い位置に倒れ込んで表示される現象のことである。

75) レーダシャドウ現象

高い山等が障害物となって山の背後側が影となり、画像上で黒くつぶれる現象のことである。

76) 路線全体のスクリーニング

路線全体において衛星 SAR を活用して、危険個所の抽出などの選定を効率的に行うことである。

77) 後背湿地

自然堤防の背後にある低湿地のことであり、洪水時にあふれた水が、自然堤防に妨げられて流路に戻れないために、沼や湿地となった地形である。

78) 自然堤防

氾濫原を流れる河川の両側に自然に形成された堤防状の小高い地形のこと。洪水時に運搬されてきた土砂が流路の両側に堆積したもので内側は急に、外側はゆるく傾斜し、数 m 内外の比高をもつ。