

## 道路政策の質の向上に資する技術研究開発

## 【研究状況報告書（2年目の研究対象）】

①研究代表者		氏名（ふりがな）	所属		役職
		こせき じゅんいち 古関 潤一	東京大学大学院工学系研究科		教授
②研究 テーマ	名称	リモートセンシング技術を活用した道路土構造物の維持管理の効率化に関する研究開発			
	政策 領域	[主領域] 領域8：維持管理や長寿命化対策に必要な評価手法及び技術に関する研究開発	公募 タイプ	タイプII	
	[副領域] 領域7：災害時の対応や防災対策に必要な検討評価手法及び対策技術に関する研究開発				
③研究経費（単位：万円）		平成30年度	令和元年度	令和2年度	総合計
		1,997万円	2,068万円	2,235万円	6,300万円
④研究者氏名		（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）			
氏名		所属・役職			
竹内 渉		東京大学生産技術研究所・教授			
清田 隆		東京大学生産技術研究所・准教授			
柳浦 良行		基礎地盤コンサルタンツ（株）社長			
吉川 猛		基礎地盤コンサルタンツ（株）技術本部・課長			
野口 ゆい		基礎地盤コンサルタンツ（株）技術本部・課員			
Umar MUHAMMAD		東京大学生産技術研究所			
⑤研究の目的・目標		（提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。）			
		本委託研究は、リモートセンシング技術（合成開口レーダー[SAR]）を活用し、広域の道路変状の経時変化を求め、道路点検や防災対策予算の優先度の評価、もらい災害の事前予知など、道路の維持管理の効率化および地質リスクの低減を図る技術を開発することを目的とする。			

⑥ これまでの研究経過

6.1 研究の進捗状況

研究の進捗状況を示し、現時点、今後の見通しに関して記載する。

本研究の計画と実績を表 6.1-1 に示す。

表 6.1-1 本研究の計画と実績

研究項目	FS	本採択		
	H29 年度	H30 年度	R1 年度	R2 年度
<b>1. SAR 差分干渉解析の適用方法の検討 (変状箇所のカリブレーション含む)</b>				
・道路土構造物への SAR 差分干渉解析の適用方法の検討	■			
・変状箇所のカリブレーション	■			
・道路土構造物への SAR 差分干渉解析の適用方法の検討				
① 検討路線の抽出 (変状が発生している路線)		■	■	
② 各道路構造物の変状に適合した衛星データの選定等による解析精度の向上		■		■
③ 任意な検討断面における道路土構造物の挙動の把握		■	■	■
④ 法面からの湧水箇所の検出			■	
⑤ 一路線における道路土構造物への SAR の適用方法の検討			■	■
<b>2. 地盤工学的考察</b>				
・道路土構造物の変状に関する地盤工学的な考察				
① 変状範囲、前兆現象の検討			■	■
② 地質リスクの検討		■	■	■
<b>3. 維持管理への具体的な適用方法</b>				
・道路土構造物の管理に関する合成開口レーダー (SAR) の活用方法検討		■		
・道路土構造物への衛星 SAR の適用上の留意点			■	
・道路土構造物の維持管理への SAR 活用マニュアルの作成				■

- : 計画
- : 実績 (H29, H30, R1 年度)
- : 計画 (R2 年度)

「1. SAR 差分干渉解析の適用方法の検討」では、①変状が発生している 7 か所の検討路線の抽出し、のり面対策工、地すべり、軟弱地盤上での盛土、高盛土、山腹崩壊における SAR 差分干渉解析の適用性について検討を行い、その有効性を確認した。 ②複数の衛星データ (観測波長 L, C 又は X バンド) を用いて、変状箇所のカリブレーションを行い、各道路土構造物に適合した衛星データ選定の基礎資料を得た。 ③任意な検討断面における道路土構造物での主測線方向の鉛直、水平方向変位の解析方法を提案し、実測値とのカリブレーションを行い、有効な結果を得た。 ④法面からの湧水箇所の検出につい

て、後方散乱係数での解析を試みたが、湧水箇所の特特定まには至らなかった。⑤一路線における道路土構造物への SAR の適用について尾道松江道（三次河川国道事務所の管理区間、L=約 110 km）を事例として行った。R2 年度においては、各道路土構造物の SAR 差分干渉解析の適用性、適切な衛星データの選定、一路線における道路土構造物への SAR の適用上の留意点について検討する予定である。

「2. 地盤工学的考察」では、変状箇所の現地踏査を行い、変状の原因、構造物に与える影響について考察した。R2 年度においては、変状範囲の妥当性の検証、崩壊の前兆現象の活用方法、道路土構造物の地質リスク的な評価などを組み合わせて地盤工学的考察を行いたい。

「3. 維持管理への具体的な適用方法」では、構造物毎の変状の特徴を考慮した SAR の活用方法を検討し、SAR 利用における課題および留意点を整理した。R2 年度においては、道路管理者（国交省、NEXCO 等）による査読意見も反映させながら「道路土構造物の維持管理への SAR 活用マニュアル」を作成する予定である。

## 6.2 道路土構造物の管理に対する合成開口レーダー[SAR]の活用方法と課題

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 SAR の活用方法を検討し、SAR 利用における課題を整理した。その概要を表 6.2-1 に示す。

表 6.2-1 構造物毎の変状の特徴を考慮した SAR 活用方法および SAR 利用の課題、

土構造物	変状の特徴	SAR 活用方法	SAR 活用の課題
のり面対策工 (アンカー)	<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          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	変状の大きさが異なる 周辺地盤：cm 構造物：mm
地すべり	<p>主測線          過去に滑動した痕跡 (地形判読)          再滑動開始          安定・対策工施工まで滑動          外力：雨、地震</p>	地すべり土塊の範囲の特定 土塊の活動度合い	主測線方向の変位量、大きさ (cm)
大規模切土 (吹付、法枠含む)	<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 のり面内湧水・変状	用地外の崩壊の範囲、変状の方向、大きさ (cm) のり面内の湧水、クラック
片盛片切又は谷埋め盛土	<p>路肩の沈下⇒路面補修          水の盛土への侵入          盛土材の泥溜り          湧水          盛土崩壊          外力：雨、地震</p>	盛土材の脆弱化、水位上昇に伴う路肩の沈下	盛土の沈下量 (mm) 盛土のり面の湧水
軟弱地盤上の盛土、高盛土	<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 (mm)、盛土周辺の沈下、隆起量	盛土の沈下量 (mm)
土石流、山腹崩壊	<p>用地外で山腹崩壊、溪流上流に堆積土          土石流の発生          外力：雨、地震</p>	用地外での山腹崩壊規模 (m)、溪流上流の堆積土量	用地外の山腹崩壊の把握、溪流上流の堆積土量の把握

## 6.3 道路土構造物への衛星SAR 差分干渉解析の適用方法の検討

### 6.3.1 検討路線の抽出（変状が発生している路線）

道路土構造物に変状が発生し、維持管理上問題が発生している（あるいは、していた）箇所を抽出し、本研究開発の検討路線とした。今回対象とした路線は、表6.3.1-1に示す。

表6.3.1-1 検討路線の抽出

名称	場所	対象構造物	提供者 (実施年度)	計測期間	変位方向
酒田	山形県 酒田市	軟弱地盤上の盛土	文献①② (H29)	2007 ～2012	鉛直
虻田	北海道 洞爺湖町	地すべり	NEXCO東 (H29)	なし	西南西へ
中条	新潟県 新発田市	軟弱地盤上の盛土	文献③ (H29)	2002 ～2008	鉛直
宝塚北SA	兵庫県 宝塚市	高盛土	NEXCO西 (R1)	2017 ～2018	鉛直卓越
高槻IC	大阪府 高槻市	軟弱地盤上の高盛土	NEXCO西 (R1)	2017 ～2018	鉛直卓越
吉舎IC	広島県 三次市	のり面対策工 (アンカー)	三次河川国道	2015 ～2017	北北東へ
高野IC	広島県 庄原市	山腹崩壊	三次河川国道 (H30)	2018	東へ
尾道松江 自動車道	広島県～ 島根県	各種土構造物	三次河川国道 (R1)		

文献①：澤野幸輝、長尾和之、高橋修二、佐藤修治、友清悟：  
軟弱地盤上の高速道路盛土における長期観測結果からの一考察、  
第52回地盤工学研究発表会、2017年7月、pp. 1079-1080

文献②：友清悟、長尾和之、澤野幸輝、佐藤修治：  
圧密沈下促進工法に伴う長期圧密沈下ひずみ速度に関する一考察、  
第52回地盤工学研究発表会、2017年7月、pp. 1081-1082

文献③：塚越光二、星野雅幸、野上克宏：  
軟弱地盤地帯における長期残留沈下の対策について、  
土木学会第65回年次学術講演会、2010年9月、pp. 537-538

### 6.3.2 検討路線における SAR 差分干渉解析の適用性についての検討

#### 6.3.2-1 のり面対策工（吉舎 IC、高野 IC：H30 年度）

##### (1) 吉舎 IC での変状範囲の比較

図 6.3.2-1 に吉舎 IC での変状範囲に関して、現地での調査結果と SBAS 解析（L バンド、時系列 SAR 解析、期間：2014(平成 26)年 9 月 20 日～2018(平成 30)年 3 月 31 日）結果を示すが、ほぼ、一致していることが分かる。

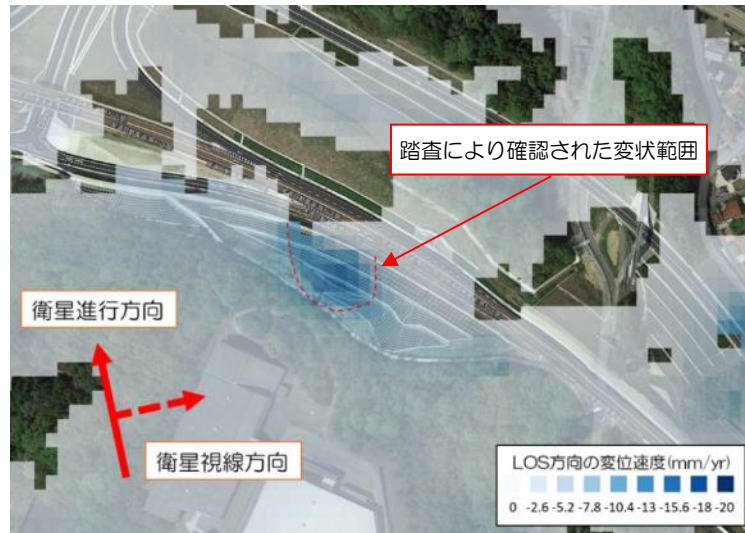


図 6.3.2-1 吉舎 IC における現地踏査と SBAS 解析による変状範囲の比較

##### 6.3.2-2 地すべり（虻田：H29 年度）

図 6.3.2-2 に虻田での地すべり範囲に関して、現地踏査結果と DInSAR 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）結果を示すが、ほぼ、一致していることが分かる。

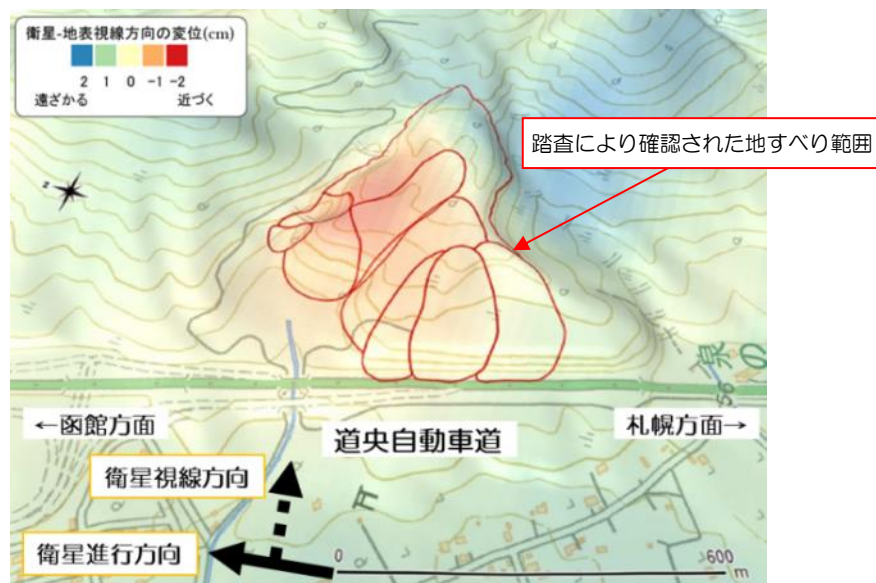
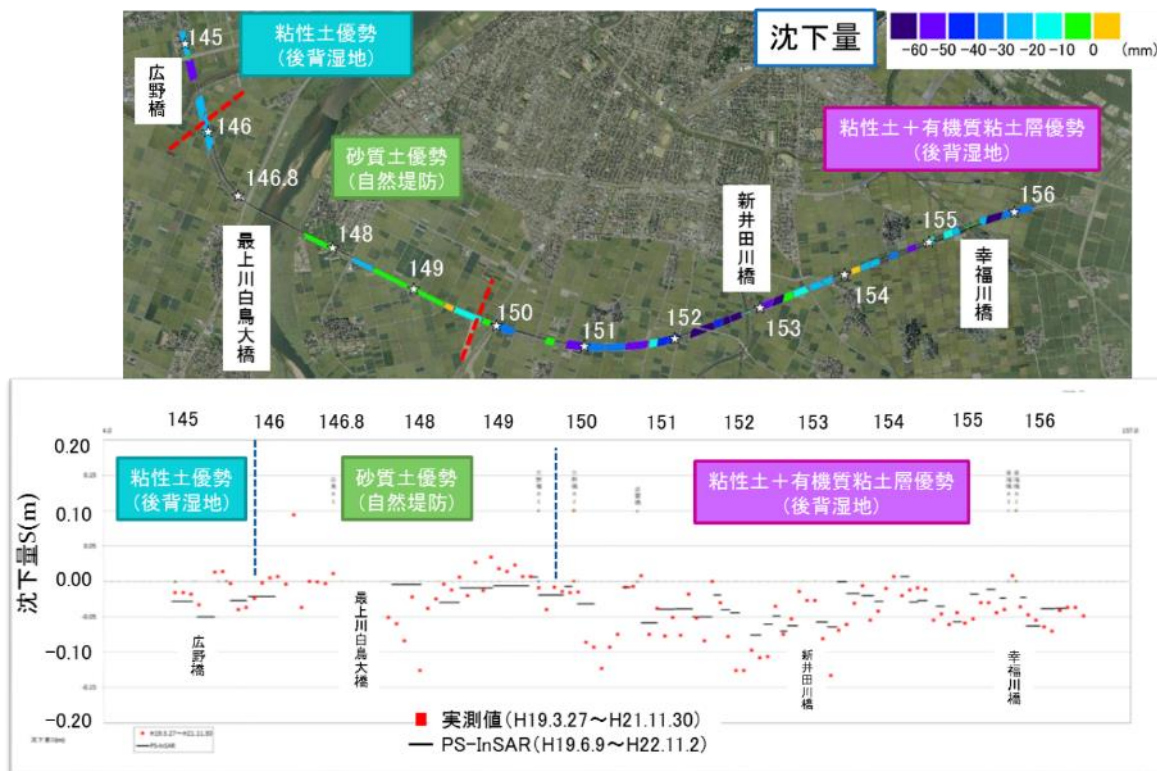


図 6.3.2-2 地すべり（虻田）における現地踏査と InSAR 解析による地すべり範囲の比較

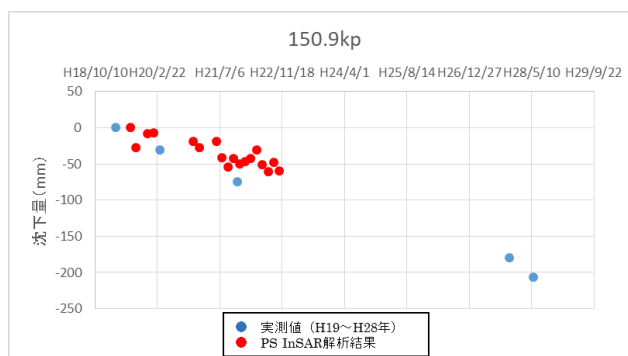
### 6.3.2-3 軟弱地盤上の盛土（酒田、中条：H29 年度）

#### (1) 酒田での盛土沈下の比較

図 6.3.2-3 に酒田での盛土沈下に関して、現地での測量結果と PSInSAR 解析（L バンド、時系列 SAR 解析、期間：2007(平成 19)年 6 月 9 日～2010(平成 22)年 11 月 2 日）結果を示す。(a) 平面図では、微地形区分に応じて、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。(b) の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。



(a) 微地形区分による沈下傾向の違い

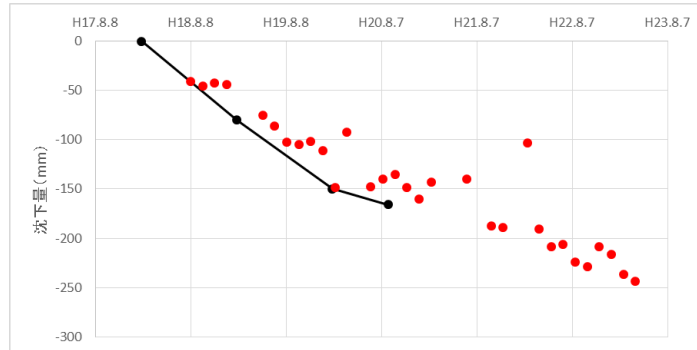


(b) 盛土沈下に関する測量結果と PSInSAR 解析結果の比較

図 6.3.2-3 軟弱地盤上の盛土（酒田）における沈下の比較

## (2) 中条での盛土沈下の比較

図 6.3.2-4 に中条での盛土沈下に関して、現地での測量結果と PSInSAR 解析（L バンド、時系列 SAR 解析、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

(野上ほか；軟弱地盤地帯における長期残留沈下の対策について，土木学会第 65 回年次学術講演会，pp537-538，2010)

図 6.3.2-4 軟弱地盤上の盛土（中条）における沈下の比較

## 6.3.2-4 高盛土（宝塚北 SA：R1 年度）

図 6.3.2-5、および図 6.3.2-6 に宝塚 SA での盛土沈下に関して、現地での GNSS 観測結果と PSInSAR 解析（X バンド、時系列 SAR 解析、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。

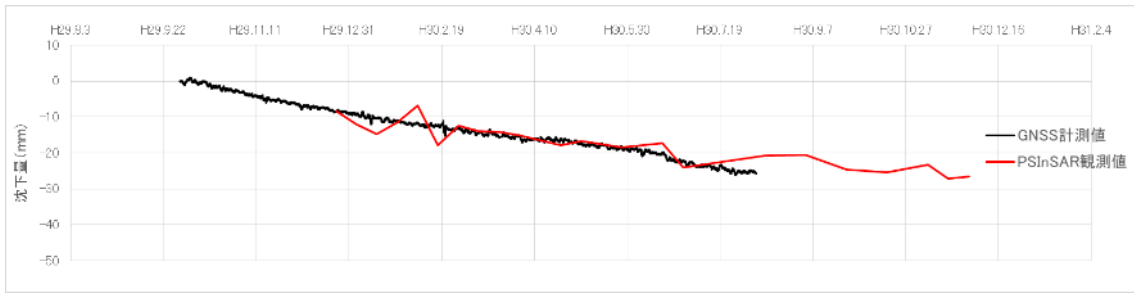


図 6.3.2-5 高盛土（宝塚北 SA）における GNSS 点および PS 点の位置

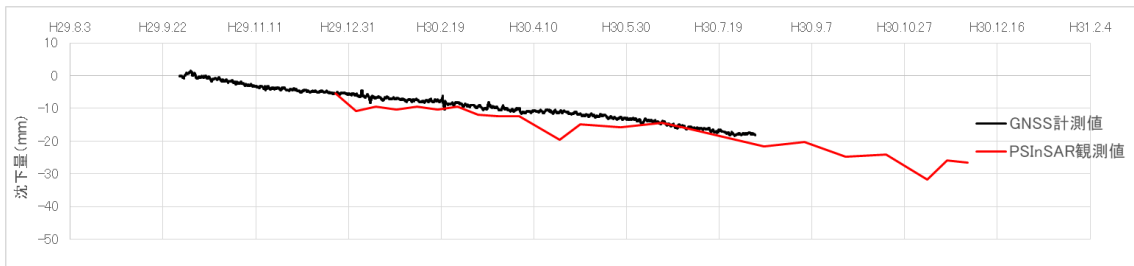
(mm/年)



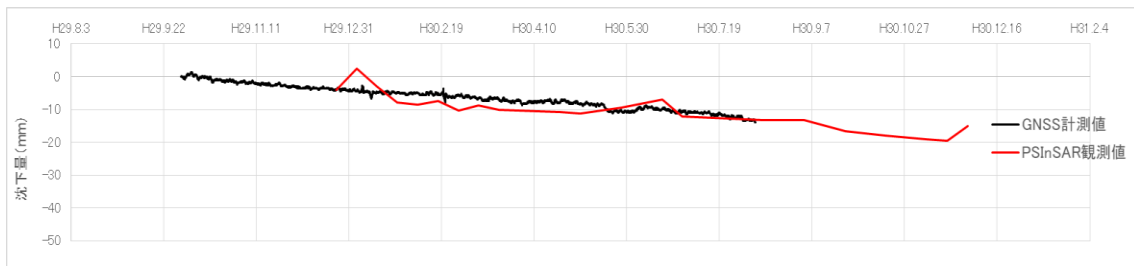
G2



G4



G5



G6

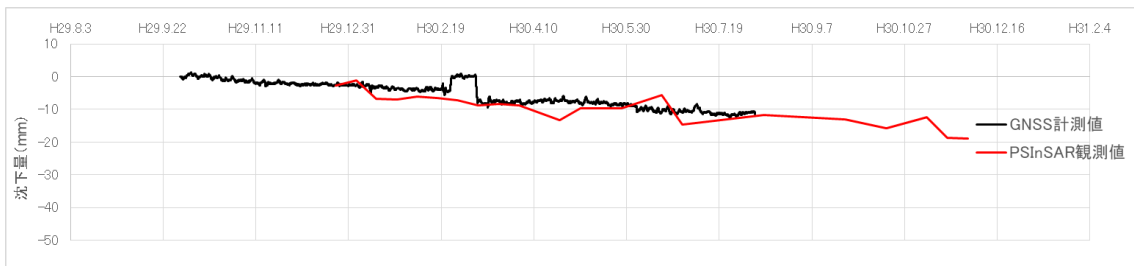


図 6.3.2-6 高盛土（宝塚北 SA）における沈下量の比較

### 6.3.2-5 山腹崩壊（高野 IC:H30 年度）

高野 IC における 2018 年 7 月豪雨前の事前変状に関して 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 6.3.2-7 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。

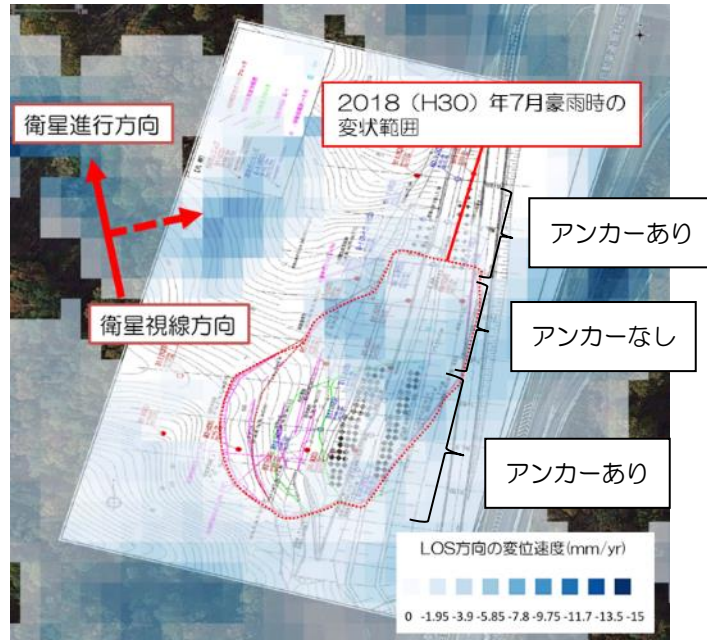


図 6.3.2-7 高野 IC における SBAS 解析による 2018 年 7 月豪雨前の事前変状の可能性のある範囲

### 6.3.2-6 変位の精度について

道路の維持管理において、表 6.3.2-1 に示すように対象とする土構造物で必要とされる変位の精度が異なる。概略として、コンクリート構造物や舗装面は mm オーダ、地盤変状では cm～m オーダが必要と考えられている。

各種の衛星 SAR 解析を行った結果、表 6.3.2-1 に示す対象構造物ごとに以下の精度の変位が得られることを確認した。

表 6.3.2-1 各土構造物、解析方法および使用バンドに違いにより得られる変位の精度

土構造物		解析方法	使用バンド	必要データ数	変位の精度		対象路線
					鉛直	水平	
のり面対策工	法枠等の構造物	SBAS	C	10 以上	解析困難		吉舎 IC
	周辺地盤		L	10 以上	mm	mm	吉舎 IC
			L		cm	cm	吉舎 IC
地すべり		InSAR	L		(cm)		虻田, 高野 IC
大規模切土		SBAS	L		(cm)		高野 IC
盛土	軟弱地盤	PSInSAR	L	20	mm	-	酒田, 中条
	高盛土	SBAS	L, X, C	10 以上			宝塚北 SA
山腹崩壊		SBAS	L	10 以上	(cm)		高野 IC

変位の精度が(〇〇)の箇所は、InSAR 解析で変状土塊の範囲を中心に解析を行い得られた変位であり、参考値として扱う。

なお、表中に示したように SBAS (C バンド) を用いてのり面対策工の変状解析を吉舎 IC で試みたが、図 6.3.2-8 に示すように解析不能であった。この原因としては草木の影響等が考えられる。

軟弱地盤上の盛土 (路面) における変位の精度は、H29 年度に行った酒田および中条での解析結果より「mm オーダ」で可能であることが分かった (図 6.3.2-3 及び図 6.3.2-4 参照)



図 6.3.2-8 吉舎 IC における SBAS 解析 (C バンド) による干渉点の分布

### 6.3.3 各道路土構造物の変状に適合した衛星データの選定

各道路土構造物に対して、複数の衛星データ（観測波長L、C又はXバンド）を用いて変状箇所のキャリブレーション解析を行い、解析精度に影響を与える因子の特定を行い、各道路土構造物の変状に適合した衛星データを選定した。

#### 6.3.3-1 SAR利用の課題と検討方法

表6.2-1に示した土構造物における「SAR利用の課題」に対して、解析精度に影響を与える因子の特定を行い、どのような観測波長、解析方法等が適切であるかを評価したその結果を表6.3.3-1に示す。

表6.3.3-1 土構造物へのSAR利用上の課題と検討方法

土構造物		SAR利用上の課題（○：必要）								
		変位の精度		変状土塊の範囲	主測線方向の変状	すべり土塊の深さ	草木の影響	崩壊の予兆	湧水	対象路線
		mm	cm、m							
のり面対策工		○ (構造物)	○	○	○	○	○	○	○	虻田、吉舎IC、高野IC
地すべり			○	○	○	○	○	○	○	虻田、高野IC
大規模切土			○	○	○	○	○	○	○	高野IC
片盛片切又は谷埋め盛土			○	○	○		○	○	○	宝塚北SA、高槻IC
軟弱地盤上の盛土		○ (路面)	○	○			○(構造物)			酒田、中条、高槻IC
土石流、山腹崩壊			○	○	○		○	○		吉舎IC、高野IC
衛星データ選定(適用…●)	L, C, Xバンドとの比較	●								宝塚北SA
	Lバンド (InSAR解析)		●	●			●			虻田、
	Lバンド (PSInSAR解析)		●				●			酒田、中条、
	Lバンド (SBAS解析)	●		●	●	●	●	●		吉舎IC、高野IC
	反射強度の比較								●	尾道松江道

### 6.3.3-2 各種衛星データ（L及びXバンド）を用いたSAR解析結果の比較

宝塚北SAにおける高盛土において、各種衛星（L及びXバンド）を用いて、時系列解析を行った。その結果を図6.3.3-1に示す。Xバンドの解析結果ではのり面付近に解析結果が得られているのに対し、Lバンドでは解析結果が得られていない。これは、Xバンドの解析には供用開始後（施工後）のデータを使用しているのに対し、Lバンドの解析には供用開始前（施工中）のデータを含んでいることに起因すると考えられる。Lバンドの解析では、施工により地表面状況が変化し、解析期間を通して一定の干渉性が得られず、解析結果が得られなかったと考えられる。

XバンドSAR衛星は11日周期で観測を行うため、最近、供用された構造物に対しても時系列SAR解析を行うのに十分なデータが短期間で蓄積する。一方、LバンドSAR衛星（だいち2号）は3～4ヶ月周期で観測を行うため、時系列SAR解析を行うのに十分なデータが蓄積するまでに数年を要するという短所がある。

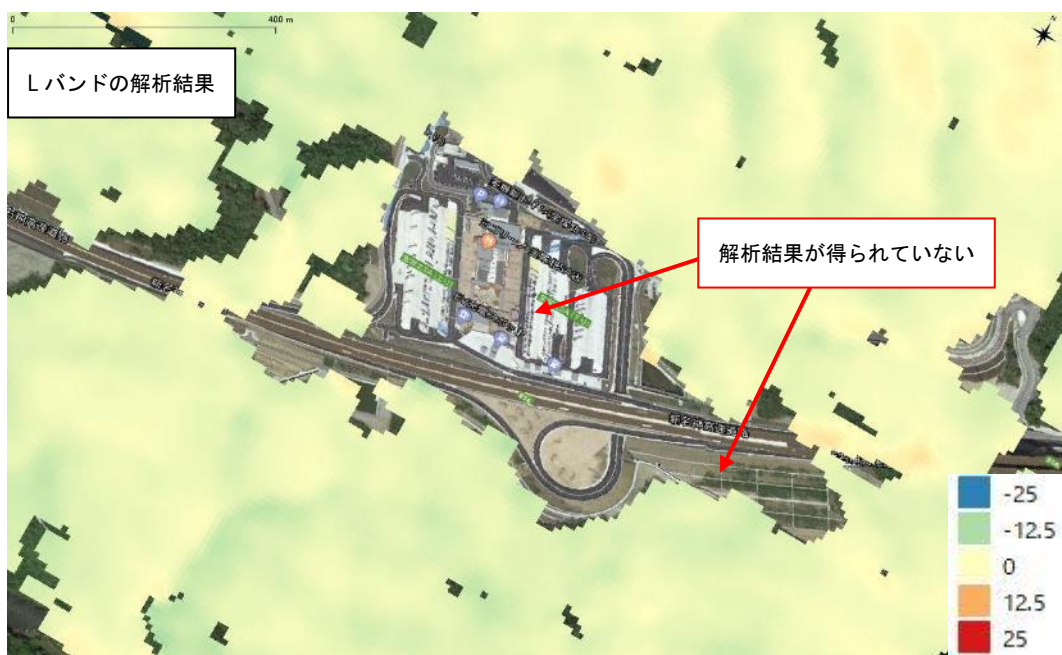


図6.3.3-1 各種衛星データ（L及びXバンド）を用いたSAR解析結果の比較（宝塚北SA）  
 （上：Xバンド、時系列SAR解析、期間：2017(平成29)年12月24日～2018(平成30)年11月30日）  
 （下：Lバンド、時系列SAR解析、期間：2014(平成26)年10月5日～2018(平成30)年12月9日）

### 6.3.4 任意な検討断面における道路土構造物の挙動の把握方法

#### 6.3.4-1 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 6.3.4-1 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。

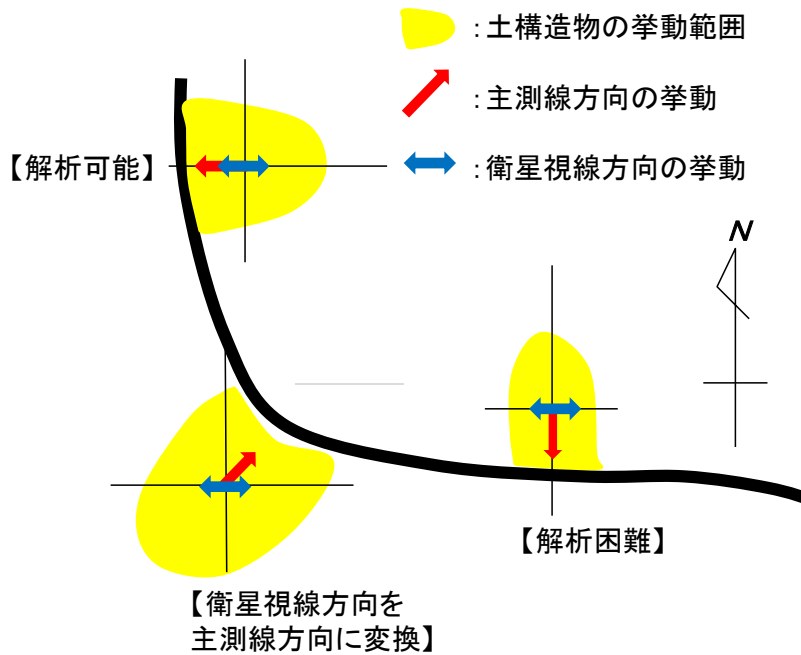


図 6.3.4-1 衛星視線方向と土構造物の主測線方向の関係

この衛星視線方向で得られた衛星 SAR データを土構造物主測線方向に変位に変化する方法としては、以下のような方法が考えられる。

図 6.3.4-2 に示す衛星  $S_3$  で観測した変位  $d_3$  から、変位  $d_3$  を満たす実変位  $r'$  の存在範囲は、平面  $w_3$  上になる。これに衛星  $S_1$  と  $S_2$  で観測した変位  $d_1$  と  $d_2$  を加えると、衛星  $S_1$  から  $S_3$  の観測結果を満たす実変位は、交線  $AB$  と平面  $w_3$  の交点となり、実変位  $r$  が求まる。数式で表すと、衛星で観測した変位  $d=(d_1, d_2, d_3)^T$ 、地盤の変位を  $\Delta r=(\Delta r_x, \Delta r_y, \Delta r_z)^T$  として以下のようなになる。式(2)は(1)を行列式で表記したものである。 $(\cos\alpha_i, \cos\beta_i, \cos\gamma_i)$  は観測点からの衛星  $S_i$  の方向を示す方向余弦である

$$d = N \cdot \Delta r \tag{1}$$

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha_1 & \cos\beta_1 & \cos\gamma_1 \\ \cos\alpha_2 & \cos\beta_2 & \cos\gamma_2 \\ \cos\alpha_3 & \cos\beta_3 & \cos\gamma_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta r_x \\ \Delta r_y \\ \Delta r_z \end{pmatrix} \tag{2}$$

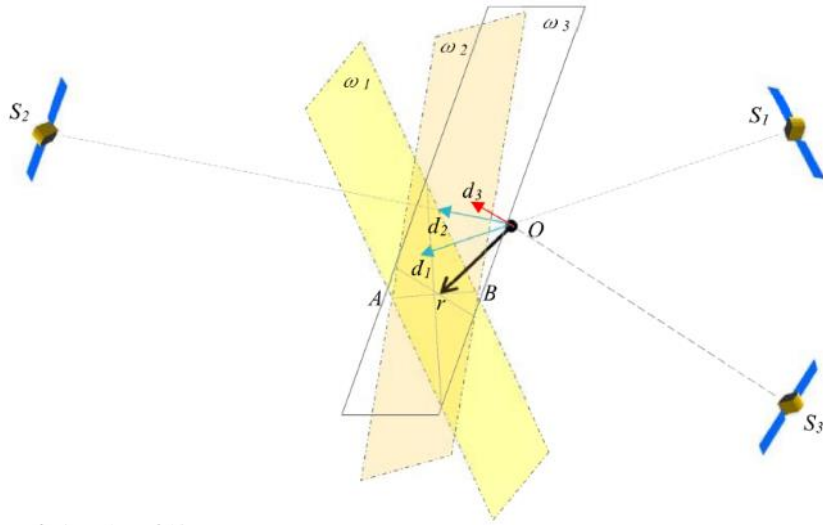


図 6.3.4-2 地盤変位と衛星視線方向との関係

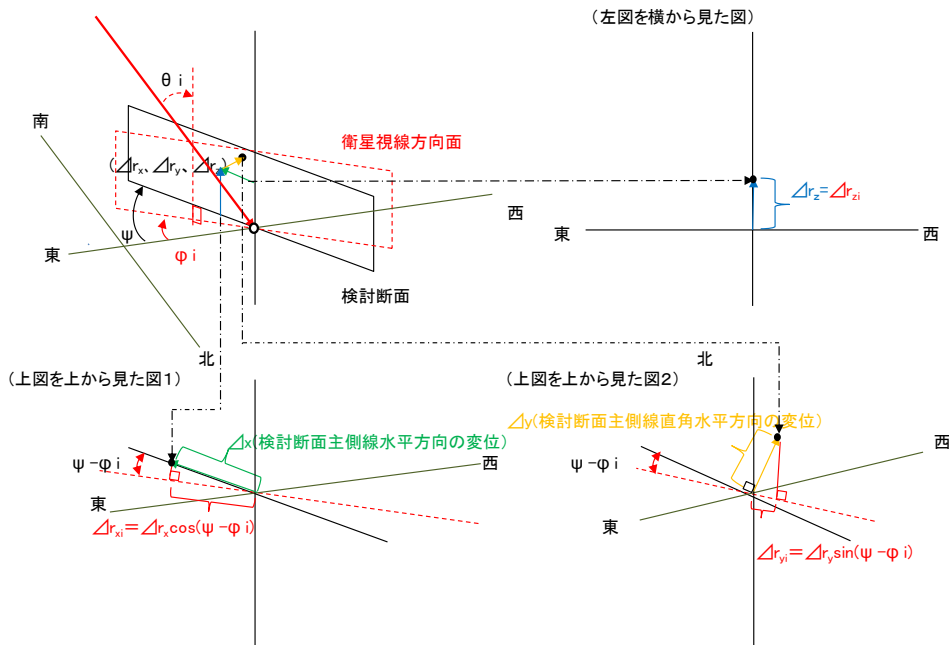


図 6.3.4-3 地盤変位と衛星視線方向との幾何学的な関係

【方法 1 : 一方向の変位が無い場合 (図 6.3.4-3 において  $\Delta r_y$  (主測線直角方向)  $\cong 0$ )】

・方向余弦で表した場合

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \gamma_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta r_x \\ \Delta r_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

・任意断面の東西方向からの回転角 ( $\psi$ )、衛星視線方位角 ( $\varphi_{1,2}$ )、衛星視線入射角 ( $\theta_{1,2}$ ) で表した場合 (図 2.4 参照)

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta_1 \cos(\psi - \varphi_1) & \cos \theta_1 \\ \sin \theta_3 \cos(\psi - \varphi_3) & \cos \theta_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta r_x \\ \Delta r_z \end{pmatrix} \quad (4)$$



【方法2：一方向の変位が無く、地盤の変位が変化する場合】

地盤の変位 ( $\Delta r_x^i$ ,  $\Delta r_z^i$ ) が時間的に変化する場合について、最小二乗法を応用した手法を用いて地盤の変位を求める。詳細は、資料編を参照のこと。

地盤の変位 ( $\Delta r_x^i$ ,  $\Delta r_z^i$ ) が時間的に変化する場合、式(3)は、

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_i \\ \vdots \\ d_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & \cos \gamma_1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \cos \alpha_2 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & \cos \gamma_2 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & & & \vdots & \vdots & 0 & \ddots & 0 & & \vdots \\ 0 & \vdots & & \cos \alpha_i & & \vdots & 0 & \vdots & & \cos \gamma_i & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & \ddots & 0 & \vdots & \vdots & & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & \cos \alpha_n & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & \cos \gamma_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta r_x^1 \\ \Delta r_x^2 \\ \vdots \\ \Delta r_x^i \\ \vdots \\ \Delta r_x^n \\ \Delta r_z^1 \\ \Delta r_z^2 \\ \vdots \\ \Delta r_z^i \\ \vdots \\ \Delta r_z^n \end{pmatrix} \quad (6)$$

となる。これを改めてベクトル形式で、

$$\mathbf{d} = \mathbf{Tr} \quad (7)$$

と表す。式(6)あるいは式(7)は未知数の方が多く、変位  $\mathbf{r}$  を解くことができない。

ここで、式(7)を何らかの工夫を加えて解くことを考える。ここで、変位  $\mathbf{r}$  を解くことは、式(8)に示す評価関数  $E$  を変位  $\mathbf{r}$  について最小化することと等価である。

$$E = (\mathbf{d} - \mathbf{Tr})^T (\mathbf{d} - \mathbf{Tr}) \quad (8)$$

式(8)が解けないことは明白であるので、式(8)に正則化項を付加して、次式のような評価関数を考える。

$$E = \frac{1}{2\lambda} (\mathbf{d} - \mathbf{Tr})^T (\mathbf{d} - \mathbf{Tr}) + \|\mathbf{Br}\|_1 \quad (9)$$

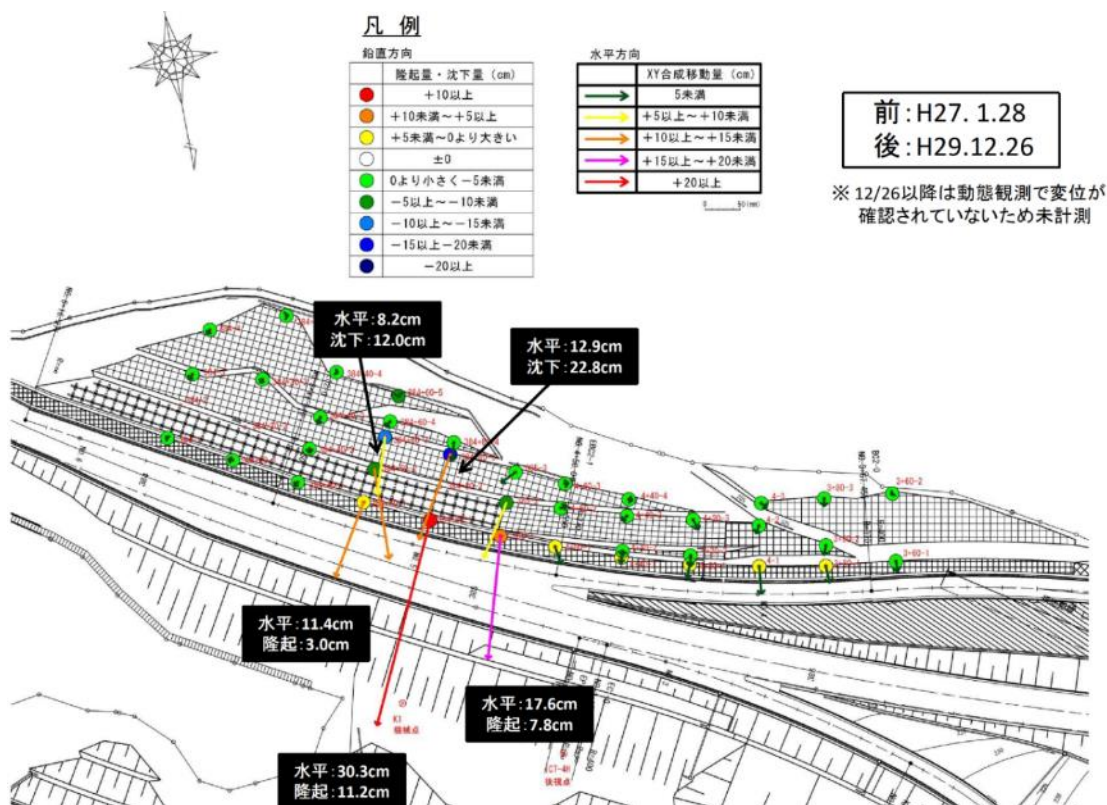
ここで、 $\lambda$  は正則化パラメータであり、 $\mathbf{B}$  は変位  $\mathbf{r}$  を線形変換する正方行列である。また、右辺の第2項は  $L_1$  ノルムを表す。ここで、 $\mathbf{Br}$  が0成分を多く、あるいは0とみなしてよい成分を多く含むベクトルとなった場合、式(9)を最小化することで変位  $\mathbf{r}$  を求められる可能性がある。

例えば、観測時間が隣接した変位に殆ど差が無い場合、変位の差は0とみなしてよい（例えば、時間的に近接したアセンディング、ディセンディングの観察結果）。このとき、行列  $\mathbf{B}$  に隣接する変位の差をとる演算を組み込めばよい。行列  $\mathbf{B}$  にどのような作用を与えるかは工学的に判断すればよい。

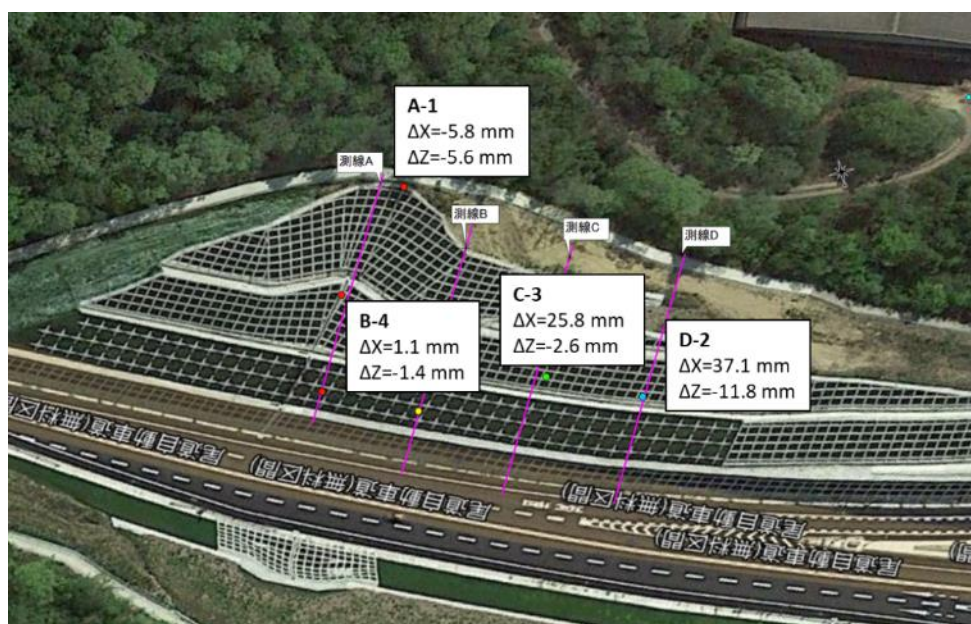
### 6.3.4-2 実測値と解析値の比較

#### (1) 吉舎ICでの事例

吉舎ICにおいて、SBAS解析（Lバンド）によるのり面変位量（衛星方向への変位量）を用いて、衛星方向への変位量をのり面主測線方向の鉛直、水平変量に分解した。その結果を図6.3.4-4～6.3.4-5に示す。



(実測されたのり面の地盤変状)



(SBAS 解析によるのり面主測線方向の鉛直、水平変位量)

図 6.3.4-4 吉舎における地盤変状に実測値と解析値

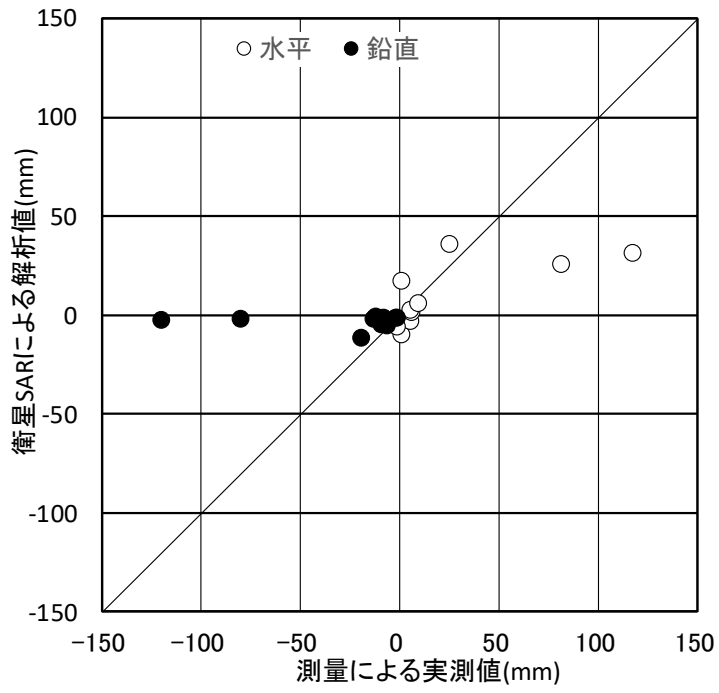


図 6.3.4-4 のり面変位の測量による実測値と衛星 SAR による解析値 (のり面直角方向)

(2) 宝塚北 SA での事例

図 6. 3. 4-5 に示す宝塚北 SA における盛土のり面の GNSS による実測値と衛星 SAR による解析値の比較を図 6. 3. 3-6 に示す。非常に良い正の相関が得られていることが分かる。今後の課題としては、①今後ののり面植生の発生での X バンドの有用性、②C バンド、L バンドの適用性などが考えられる。



図 6. 3. 4-5 宝塚北 SA における盛土のり面への GNSS の配置

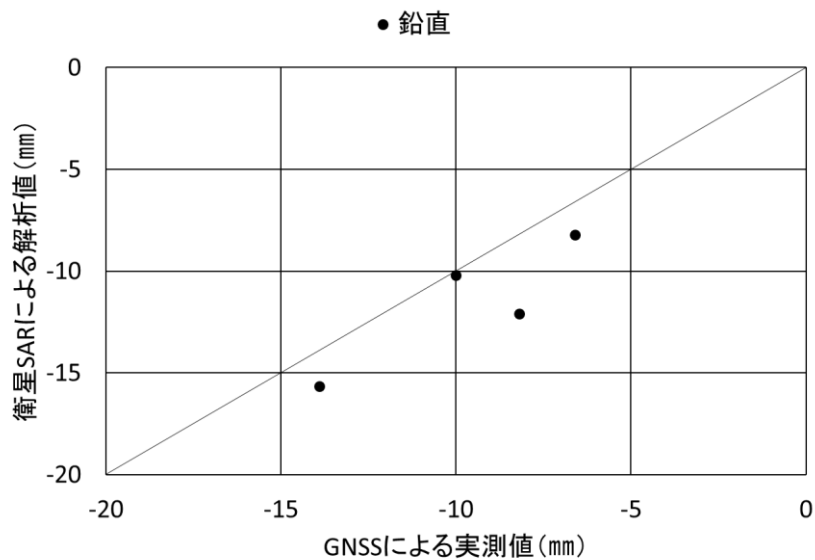


図 6. 3. 4-6 盛土のり面の GNSS による実測値と衛星 SAR による解析値

解析期間：2017(平成 29)年 12 月 14 日～2018(平成 30)年 11 月 30 日、使用衛星：TerraSAR-X、解析方法：PSInSAR、閾値：0.75)

### 6.3.5 のり面からの湧水箇所の検出

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 6.3.5-1 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 6.3.5-1 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)

### 6.3.6 一路線における道路土構造物への SAR の適用方法の検討

各種土構造物がある尾道松江道において、衛星 SAR の適用方法について検討する。検討にあたっては、以下の情報も合わせて検討した。

- ① LP データを用いた潜在的な地質リスクの検討：広島県の LP データを活用して崩壊地形、地すべり地形、谷埋盛土などの地質リスクが潜在する箇所について CS 立体図等を用いて抽出し、それらの活動度合いを衛星 SAR で評価した。
- ② 衛星 SAR を用いた活動的な地質リスクの検討：衛星 SAR を用いて、道路周辺の斜面や路面の活動度を評価し、一路線における地質リスクを考慮した維持管理の対処方法について検討した。

#### 6.3.6-1 尾道松江道における各種土構造物の変状の可能性評価

尾道松江道（三次河川国道事務所の管理区間）における各種土構造物の変状の可能性ある箇所を図 6.3.6-1 に示す。解析では約 200 箇所の異常が認められた。この中から代表的な箇所について抜粋したものを表 6.3.6-1 に示す。衛星データは ALOS2（L バンド）、解析方法は SBAS（時系列解析）、解析期間は北向軌道（2014 年 9 月 20 日～2019 年 6 月 8 日）、南向軌道（2014 年 9 月 3 日～2019 年 8 月 14 日）とした。



図 6.3.6-1 尾道松江道（三次河川国道事務所の管理区間）における各種土構造物の変状の可能性ある箇所位置図

表 6.3.6-1 尾道松江道（三次河川国道事務所の管理区間）における  
各種土構造物の変状の可能性ある箇所

箇所番号	場所	土構造物の種類	変状の状態	地形・地質	地質リスク
2	広島県 世羅町		谷部の変状	斜面	斜面崩壊
17	広島県 三次市	盛土	盛土の沈下	谷埋盛土	路面沈下のり面変状
18		盛土	盛土の沈下	谷埋盛土	路面沈下のり面変状

また、衛星 SAR の解析で異常は認められていないものの、CS 立体図による地形解析から地形的リスクが潜在する可能性がある箇所をリスク箇所として抽出した。その一部を表 6.3.6-2 に示す。

表 6.3.6-2 尾道松江道（三次河川国道事務所の管理区間）における  
地質リスクが潜在する可能性のある箇所

リスク箇所番号	場所	土構造物の種類	変状の状態	地形・地質	地質リスク
1	広島県 庄原市	斜面	なし	急崖	落石 斜面崩壊

### 6.3.6-2 斜面における異常箇所抽出事例（異常箇所2：広島県世羅町川尻地先）

斜面における異常箇所抽出事例として広島県世羅町川尻地先の事例を図6.3.6-2に示す。下り線脇の斜面に谷地形が複数形成され、そのうち一筋において、谷地形内部で上部から下部（衛星から離れる方向）に変位が生じている。将来的に谷の変状・崩壊が本線に影響を与える可能性がある。

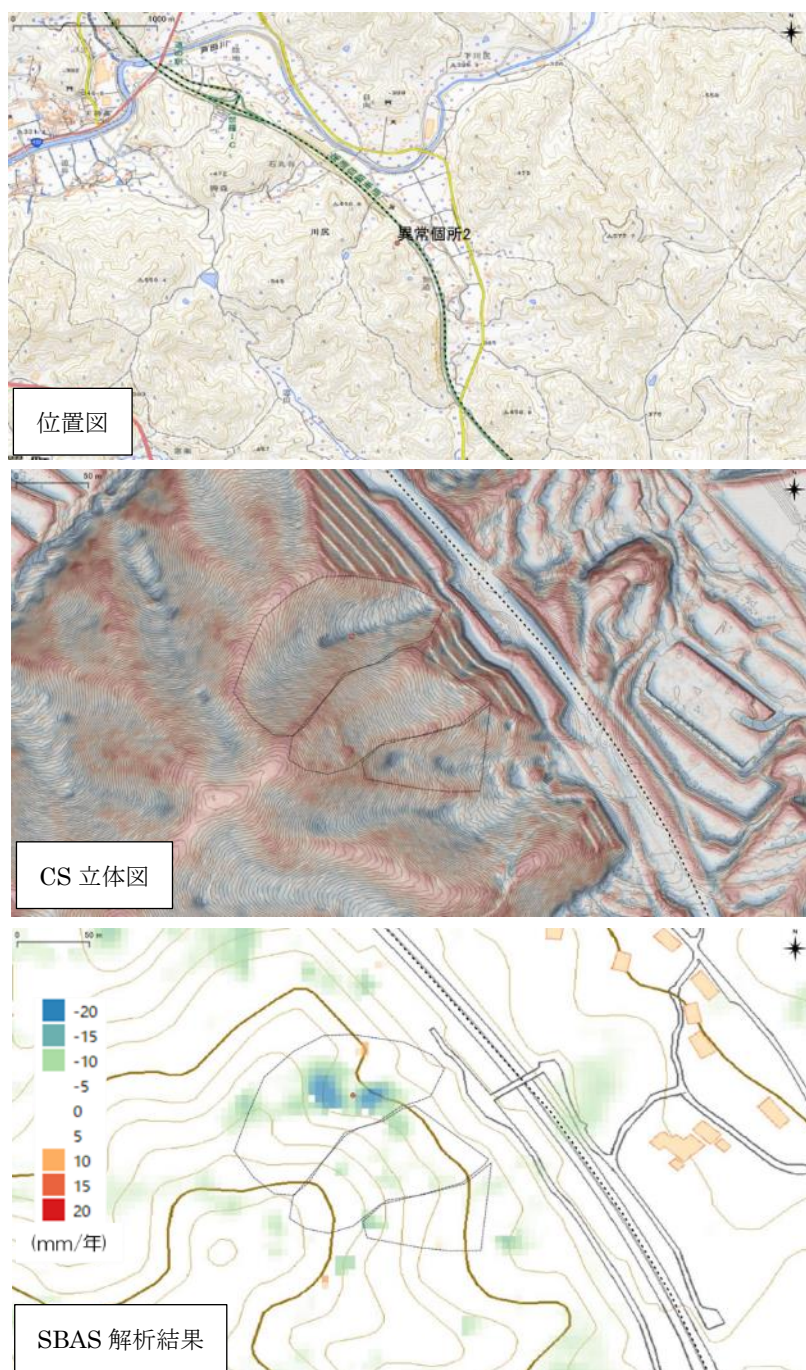


図 6.3.6-2 斜面における異常箇所抽出事例（異常箇所2：広島県世羅町川尻地先）

※CS 立体図：谷地形や崩壊地形など地形区分を見やすくした図法



### 6.3.6-3 盛土における異常箇所抽出事例（異常箇所 17、18：広島県三次市甲双町宇賀地先）

盛土における異常箇所抽出事例として広島県三次市甲双町宇賀地先の事例を図 6.3.6-3 に示す。盛土部分が沈下する傾向にあり、路面およびのり面に変状が生じている可能性がある。

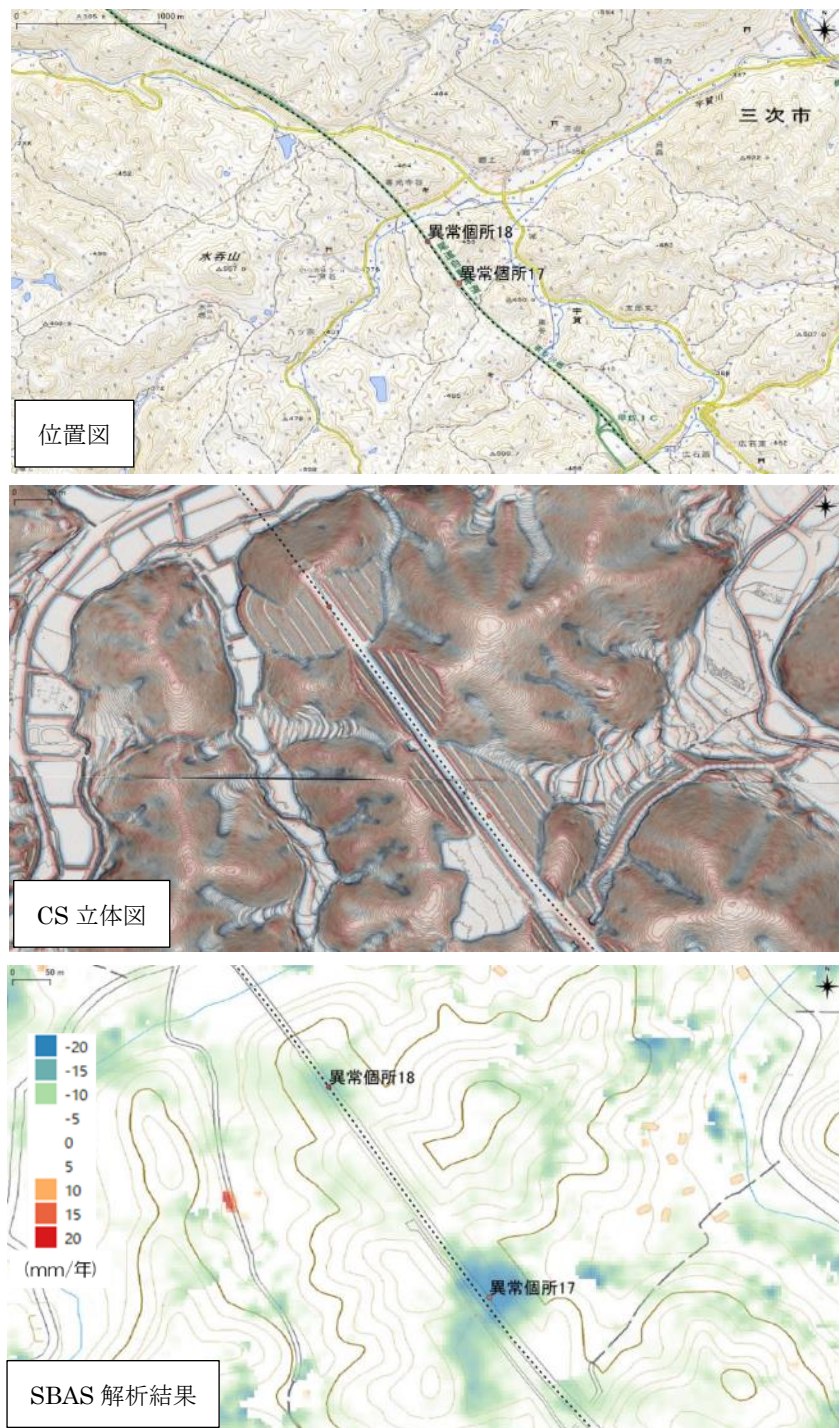


図 6.3.6-3 盛土における異常箇所抽出事例  
(異常箇所 17、18：広島県三次市甲双町宇賀地先)

#### 6.3.6-4 斜面におけるリスク箇所抽出事例（リスク箇所1：広島県庄原市口和町竹地谷地先）

斜面におけるリスク箇所抽出事例として広島県庄原市口和町竹地谷地先の事例を図 6.3.6-4 に示す。現状、変状は生じていないが、急崖地形を呈するため落石等のリスクがある。今後、衛星 SAR によるモニタリングで監視する必要がある。

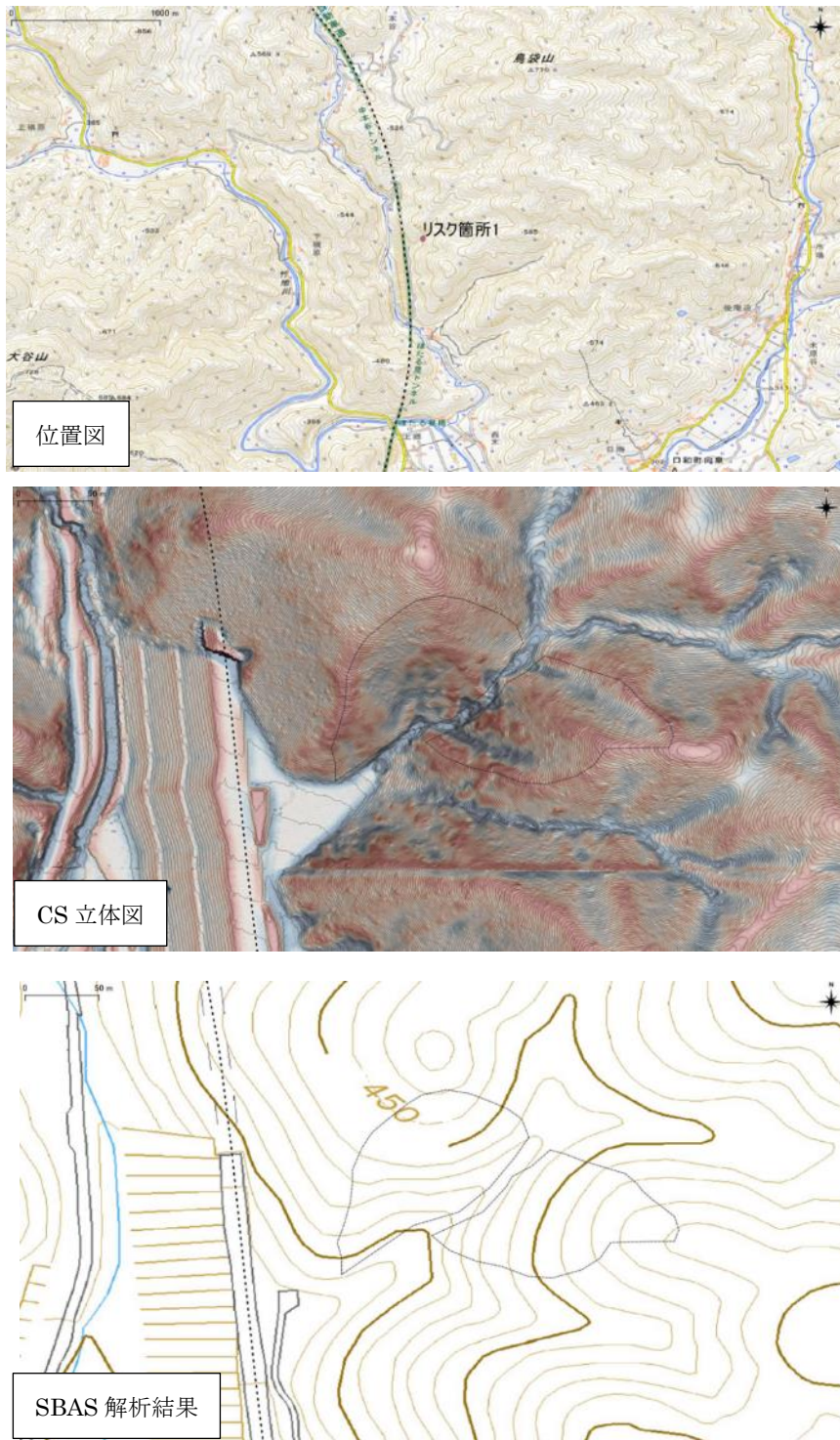


図 6.3.6-4 斜面におけるリスク箇所抽出事例  
（リスク箇所1：広島県庄原市口和町竹地谷地先）

## 6.4 道路土構造物の変状に関する地盤工学的な考察

### 6.4.1 変状範囲、前兆現象の検討

変状範囲の妥当性の検証、前兆現象の活用方法を以下のように検討した。

- ① 変状範囲の妥当性：既往解析箇所である「吉舎 IC」、「高野 IC」において、現地調査結果との整合性を検証した。「吉舎 IC」、「高野 IC」については、立木の影響を取り除いた DEM データを基図として再解析を行い、その有用性についても検討した。なお、LP データを基図とした再解析を予定していたが、十分な範囲の LP データが得られなかったため、行わなかった。
- ② 前兆現象の検証：「高野 IC」について、立木の影響を取り除いた DEM データ、LP データを基図として再解析を行い、その有用性を検証した。

図 6.4.1-1 に AW3D (30m グリッド、立ち木含む一般的な DEM、図 6.3.2-7 で前出) と AW3D(5m グリッド、立ち木を除いた地表面高さの DEM) との比較を示す。両者の間で解析結果に大きな違いはないことが分かった。

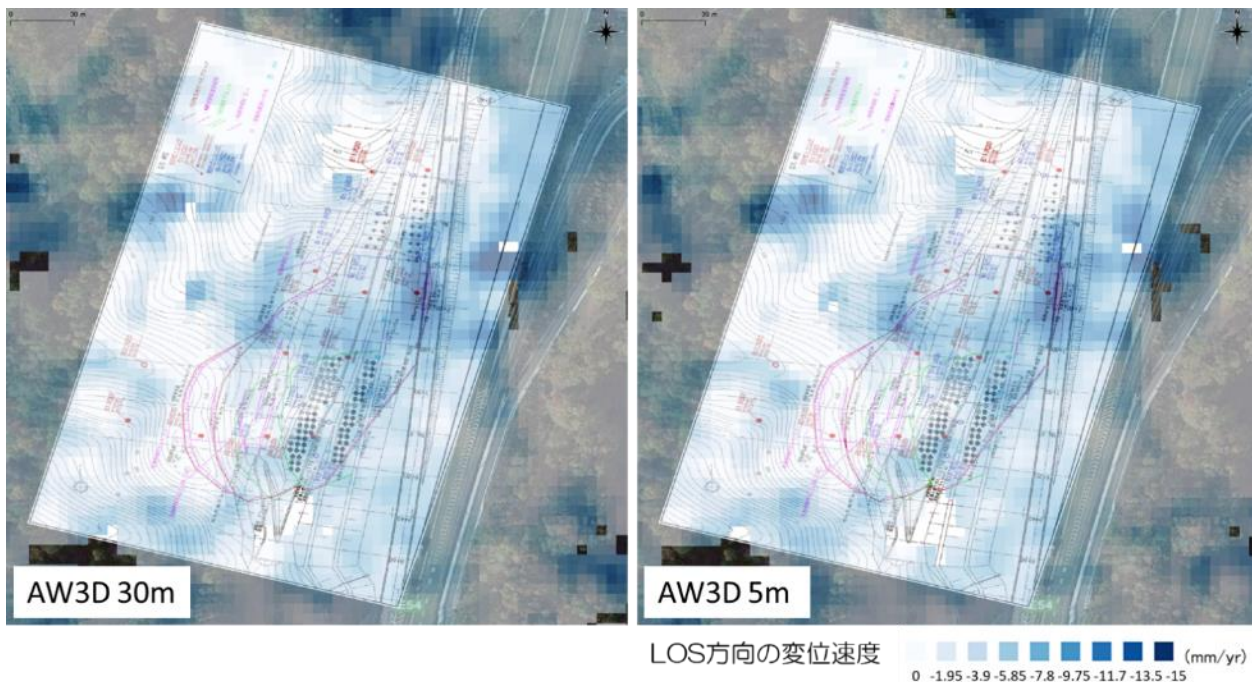


図 6.4.1-1 DEM の違いによる解析結果への影響

## 6.4.2 地質リスク的な検討

「6.3.6」で抽出された地質リスクに関して、現地踏査、地質評価等を通して、地盤工学的考察を行い、その結果の事例を以下に示す。

### 6.4.2-1 斜面における異常箇所抽出事例（異常箇所2：広島県世羅町川尻地先）

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。

### 6.4.2-2 盛土における異常箇所抽出事例（異常箇所17、18：広島県三次市甲双町宇賀地先）

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。異常箇所17付近には、吉舎ICや高野ICで法面変状を引き起こした備北層群が分布しており、同様の変状が進行している可能性がある。

### 6.4.2-3 斜面におけるリスク箇所抽出事例（リスク箇所1：広島県庄原市口和町竹地谷地先）

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。周辺は高田流紋岩類が分布している。高田流紋岩類は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である。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。

## 6.5 維持管理への具体的な適用方法

### 6.5.1 道路土構造物への衛星 SAR の適用上の留意点

#### 6.5.1-1 道路管理者による具体的な活用場面やニーズを考慮した道路土構造物への衛星 SAR の適用上の留意点

最終年度（令和2年度）のマニュアル作成に向けて、「6.2 道路土構造物の管理に対する合成開口レーダー[SAR]の活用方法と課題」に示した道路管理者による具体的な活用場面やニーズを考慮した道路土構造物への衛星 SAR の適用上の留意点について検討し、以下のような内容と構成案を設定した。

## 第1章 衛星 SAR の道路土工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工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 地盤変位測定のお考え方

#### 1.2.3 具体的な作業工程

### 1.3 衛星 SAR データを道路土工構造物等の維持管理へ活用する効果

### 1.4 衛星 SAR による地盤変動解析

## 第2章 衛星 SAR を用いた道路土工構造物等の維持管理手法

### 2.1 目的の設定

### 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

### 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 干渉 SAR 解析に用いる衛星 SAR データの確定と留意点

### 2.5 干渉 SAR 解析

#### 2.5.1 1ペアの干渉 SAR 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 解析結果の道路土工構造物等への適用

#### 2.6.1 具体的な道路土工構造物等への衛星 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状

### 2.7.2 推奨する解析手法

## 第3章 道路土工構造物等への衛星 SAR の活用事例

### 3.1 一路線での活用事例（尾道松江道）

#### 3.1.1 注意すべき地形地質箇所、区間の抽出

#### 3.1.2 干渉 SAR 解析（PS-InSAR）

## 6.5.2 道路土構造物への衛星 SAR を適用する場合の概算コスト

道路土構造物の管理の現状を踏まえて、道路土構造物への衛星 SAR を適用する位置づけ、導入コスト（初期コスト、継続コスト）について本研究の対象とした尾道松江道（A＝延長約 110km×幅 1km）を例として表 6.5.2-1 に整理した。

表 6.5.2-1 衛星 SAR を適用する場合の概算費用の例

初年度導入費用	
画像購入費	576 万円 (8 万円×72 枚)
解析費、 結果整理費、 現地踏査費用等 (諸経費含む)	約 2500 万円

次年度以降費用	
画像購入費	160 万円 (8 万円×20 枚)
解析費、 結果整理費、 現地踏査費用等 (諸経費含む)	約 1500 万円

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 3000 万円～3500 万程度を見込む。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、1500 万円～2000 万円程度を見込む。

なお、地盤変動の抽出については航空レーザ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、同じ領域を航空レーザ測量（地図情報レベル 1000）で測量する場合、およそ 2500 万～3000 万円の費用を要する。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。

## ⑦研究成果の発表状況

以下の論文を発表し、外部に対して研究成果の公表を行った。

### 【平成30年度】

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

### 【令和元年度】

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

## ⑧ 研究成果の活用方法

### 8.1 実務への適用に向けた活用方法・手段・今後の展開

令和2年度において、今までの成果を体系的に整理し、実務への適用に向けたマニュアルを作成する。マニュアルに作成に当たっては、道路管理者（国交省、NEXCO等）からのヒヤリングや査読意見を踏まえて、実務者が利用しやすい観点から作成したいと考えている。

### 8.2 研究期間終了後における研究に継続性や成果活用の展開

研究期間終了後においては、実現場での適用、国内外に利用してもらうため、以下のことを考えている。

- ・実現場での適用事例の増加
- ・国内外で利用してもらうため、積極的に国内外での論文発表を行う。

## ⑨ 特記事項

### 9.1 研究で得られた知見

研究で得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 衛星SARにより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 PS-InSAR 解析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」の沈下量を経時的に解析できる。
- 3) 衛星 SAR により SBAS 解析を用いて少ないデータ数（10 枚程度）で、地盤の変状を解析することができる。
- 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、若干の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 SAR の適用に関しては、路線沿いの地質リスク箇所（崩壊地形、地すべり地形、谷埋め盛土など）について、現状の活動度評価を行い、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。

## 9.2 学内外等へのインパクト

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

<https://igarss2019.org/Tutorials.asp#FD6>

### 9.3 研究の目的・目標からみた研究成果の見通しや進捗の達成度についての自己評価

研究の目的・目標からみた研究成果の見通しや進捗の達成度を表 9.3-1 に示す。全体としては、ほぼ順調に進んでいると考えられる。

表 9.3-1 研究の目的・目標からみた研究成果の見通しや進捗

研究の目的・目標	達成度 (%)	FS	本採択		
		H29 年度	H30 年度	R1 年度	R2 年度
<b>1. SAR 差分干渉解析の適用方法の検討 (変状箇所のキャリブレーション含む)</b>					
・道路土構造物への SAR 差分干渉解析の適用方法の検討	100				
・変状箇所のキャリブレーション	100				
・道路土構造物への SAR 差分干渉解析の適用方法の検討					
① 検討路線の抽出 (変状が発生している路線)	100				
② 各道路構造物の変状に適合した衛星データの選定等による解析精度の向上	70				
③ 任意な検討断面における道路土構造物の挙動の把握	90				
④ 法面からの湧水箇所の検出	50				
⑤ 一路線における道路土構造物への SAR の適用方法の検討	50				
<b>2. 地盤工学的考察</b>					
・道路土構造物の変状に関する地盤工学的な考察					
① 変状範囲、前兆現象の検討	70				
② 地質リスクの検討	70				
<b>3. 維持管理への具体的な適用方法の検討</b>					
・道路土構造物の管理に関する合成開口レーダー (SAR) の活用方法検討	100				
・道路土構造物への衛星 SAR の適用上の留意点	100				
・道路土構造物の維持管理への SAR 活用マニュアルの作成	0				