

## 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（FS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 [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	公募 タイプ タイプII
③研究経費（単位：万円）	平成29年度		
	900万円		
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・准教授		
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）技術本部・本部長		
吉川 猛	基礎地盤コンサルタンツ（株）技術本部・課長		
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。）			
【目的】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測など、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。			
【目標1】土構造物への衛星SAR差分干渉解析の適用方法の検討：実際に変状が発生している検討路線を抽出し、広域の道路土構造物の変状を明確に捕らえるためにSARデータのノイズ除去方法（草木、アスファルト舗装など）の検討を行う。			
【目標2】道路変状箇所でのキャリブレーション：実際の道路変状と衛星SAR解析とのキャリブレーションを行い、道路の維持管理への適用性を示すとともに実用化に向けた課題の抽出を行う。			

## ⑥ FS 研究の結果

FS採択から本格採択に向けた条件として、新道路技術会議から以下のことが提示されている。

- ・ 広域的かつ定量的に変状を確認できる精度と現場での実用化に向けた課題を明らかにする。

FSの研究成果として「土構造物への衛星SAR差分干渉解析の適用方法の検討」、「道路変状箇所でのキャリブレーション」などを行い、実用化に向けた課題を明らかにすることができたので報告する。

### 6.1 概要

広域的かつ定量的に変状を確認できる精度と現場での実用化に向けての課題としては、①衛星SARデータに含まれる道路土構造物特有のノイズ成分の効果的な低減手法の開発、②実際の道路土構造物変状箇所でのキャリブレーションに基づく解析結果の評価方法の開発、③変状が激しい箇所での地盤工学的な考察、④道路土構造物の変状解析マニュアル作成などがある。

FS研究では、表6.1-1に示す実際に変状が発生している検討路線（酒田地区、虻田地区）において、衛星SAR差分干渉解析を行い、上記の課題①～③に対して、具体的にどのような課題があり、その課題をどのように解決したら実用化が可能であるかを示した。

表6.1-1 検討路線の概要

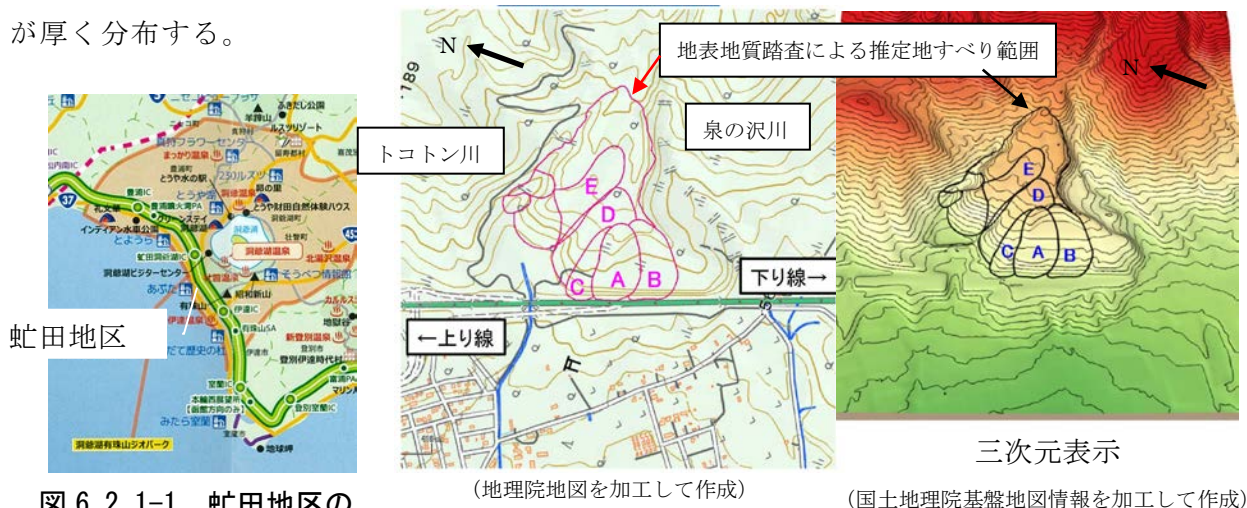
地区名	路線	対象土構造物
虻田地区	北海道：道央自動車道	切土、地すべり、路面隆起、アンカー
酒田地区	山形県、日本海東北自動車道	軟弱地盤上の盛土、ボックスカルバート

### 6.2 土構造物への衛星SAR差分干渉解析の適用

#### 6.2.1 虻田地区での解析と実測との比較

##### 6.2.1-1 地形・地質と地盤変状

図6.2.1-1～6.2.1-2に示すように有珠山西側の火山活動地域に当たり、北にトコタン川、南に泉の沢川に囲まれた丘陵上地形の中腹～末端部の道路下り線部の切土のり面である。当該地の地質は、洞爺湖や有珠山の火山活動に起因する地質（凝灰岩、軽石流堆積物など）が厚く分布する。



被災前と対策後の写真を図6.2-1-3および6.2.1-4に示す

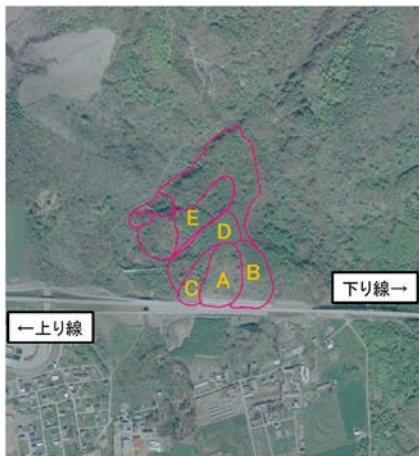


図 6. 2. 1-3 被災前 (H12 年)

(国土地理院空中写真を加工して作成)

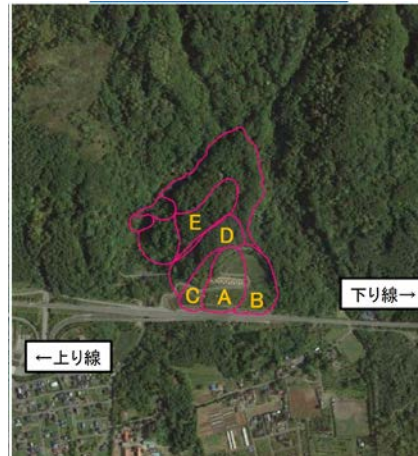


図 6. 2. 1-4 対策工後 (H26 年)

(地図データ : Google、ZENRIN)

表6.2.1-1に道路のり面の変状と対策の経緯および衛星SAR解析対象期間を示す。

表 6. 2. 1-1 道路のり面の変状と対策の経緯および衛星SAR解析対象期間

年度	工事及び変状等	対策	衛星 SAR 解析対象期間
平成 3 年	切土着工		
平成 4 年	地すべり (ブロック A、B) が発生		
平成 5 年		<ul style="list-style-type: none"> <li>・アンカー、集水井 1-3 を施工</li> <li>・動態観測開始</li> </ul>	
平成 8 年	地すべり土塊は安定したと判断		
平成 12 年	有珠山噴火、新たなクラック確認		※図 2
平成 13 年		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ A、B ブロック頭部を排土</li> <li>・ 末端部に押え盛土</li> </ul>	
平成 14 年		集水井 4、動態観測	
平成 19 年		動態観測終了	 InSAR
平成 21 年	アンカー浮き、リフトオフ試験		
平成 22 年	A、B、C ブロックで変位が顕在化のり尻に隆起部確認	アンカー工、集水井 5	
平成 23～25 年		押え盛土、深礎杭	時系列 InSAR
平成 26 年	A、C ブロックで融雪時にわずかに変位		※図 3



### 6.2.1-2 InSAR 解析による地すべり変状範囲

地すべり土塊の範囲設定を行うため InSAR 解析(平成 19 年 10 月～平成 22 年 6 月の期間、使用衛星 ALOS-1、アセンディング)を行った。また、路面変位状況把握のために PS-InSAR 解析(平成 18 年 6 月～平成 22 年 12 月の時系列解析、使用衛星 ALOS-1、ディセンディング)を行った。図 6.2.1-5 に衛星 SAR の進行方向および撮影角度を示す。



図 6.2.1-5 衛星 SAR の進行方向と撮影方向

図 6.2.1-6 に虻田地区周辺および虻田地区の地すべり範囲の InSAR 解析(平成 19 年 10 月～平成 22 年 6 月の期間)結果を示す。

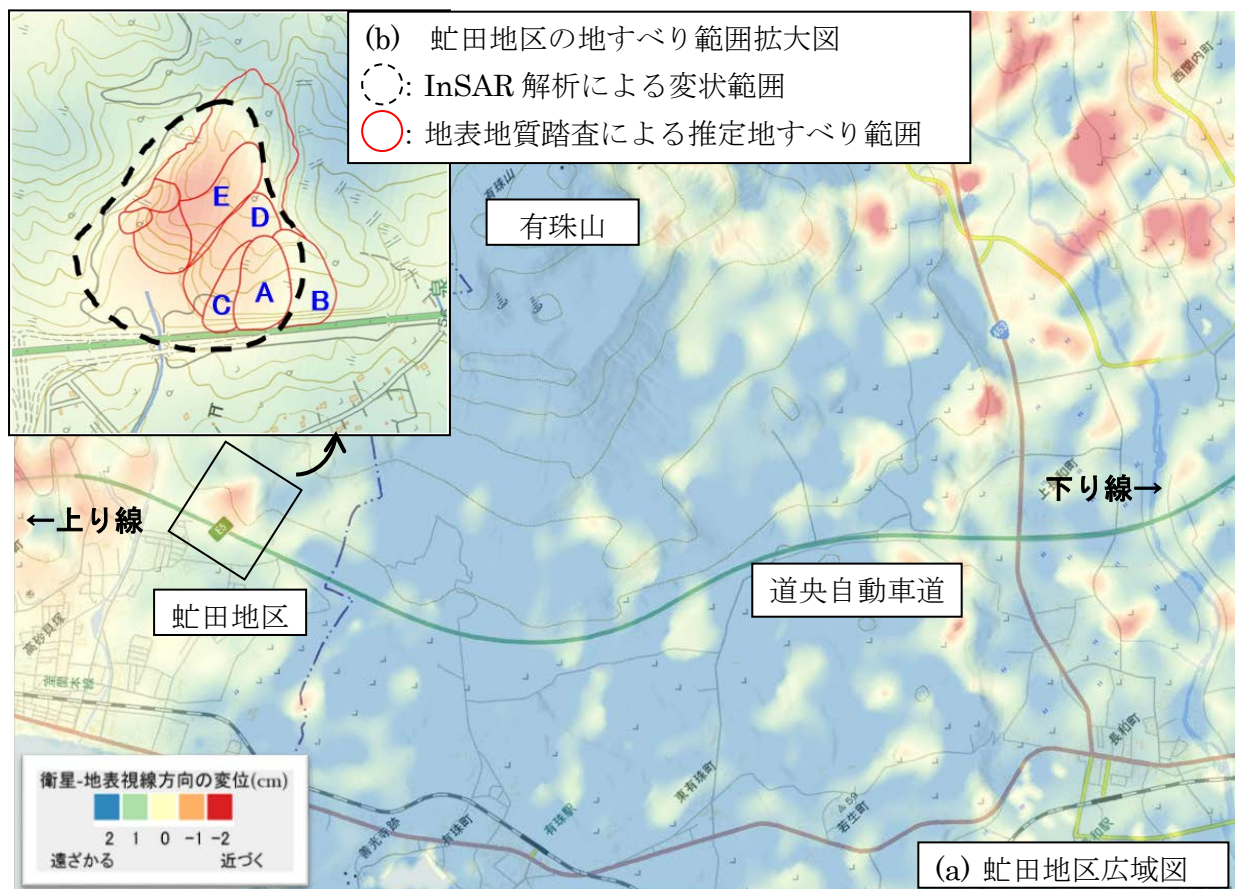


図 6.2.1-6 InSAR 解析(平成 19 年 10 月～平成 22 年 6 月の期間)結果  
(地理院タイルを加工して作成)

また、PS-InSAR 解析（平成 18 年 6 月～平成 22 年 12 月の時系列解析、使用衛星 ALOS-1、ディセンディング）による虻田地区周辺の路面の変状状況を図 6.2.1-7 に示す。



図 6.2.1-7 虻田地区周辺の路面の変状状況（「－」が沈下）

（地理院タイルを加工して作成）

この解析結果より以下のことが考察される。

- ・ 図 6.2.1-6(a)および図 6.2.1-7 より、変動が生じている広域の道路斜面（用地外を含む）、路面の変動状況のスクリーニングが可能である。また、有珠山の周辺の地盤は沈下傾向であることが分かる。
- ・ 図 6.2.1-6(b)より、地すべりブロック A,B,C において、すべり土塊は前に押し出されるような滑りを発生している。また、道路を挟んで反対側（上り線側）の斜面でも変状が生じている。

### 6.2.1-3 PS-InSAR（時系列解析）による地すべり土塊の挙動

InSAR 解析で得られた地すべり土塊の中で、地盤調査等が詳細に行われている B ブロックの土塊周辺の挙動を PS-InSAR（時系列解析、使用衛星 ALOS-1）で求め、その結果を図 6.2.1-8～図 6.2.1-13 に示す。同図より以下のことが分かる。

- ・ 図 6.2.1-9～図 6.2.1-12 より、下り線切土部の地すべり土塊の挙動は、上部、中腹部では鉛直方向の変位はほとんどなく、下部で盛り上がる挙動を示している。路面では、ほとんど変状が見られない。
- ・ 図 6.2.1-13 より、すべり土塊は、衛星に近づいているため水平方向に移動していると考えられる。これは、すべり面の底面に沿った動きであると考えられる。

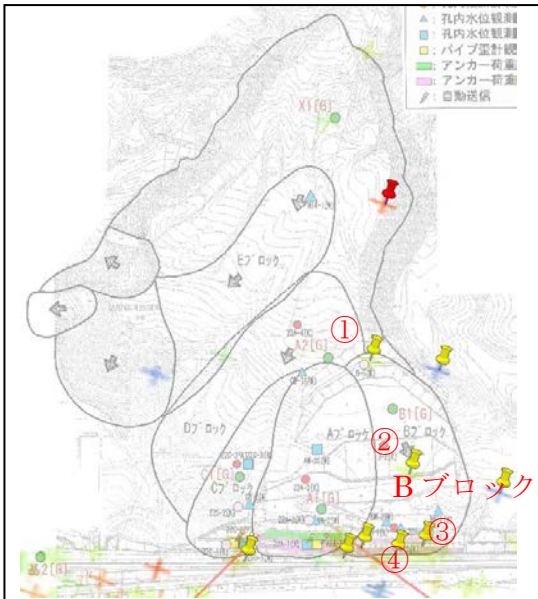


図 6.2.1-8 PS-InSAR 解析（時系列解析）の位置

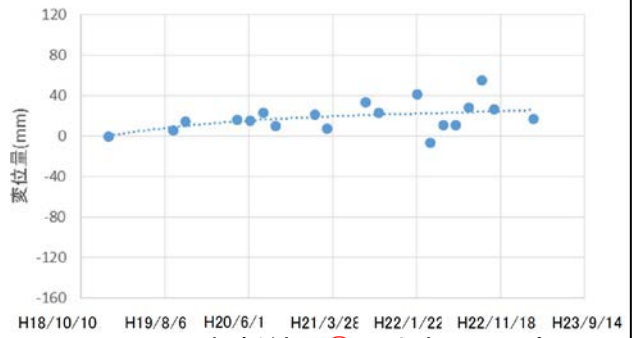


図 6.2.1-9 解析結果①（地すべり上部）

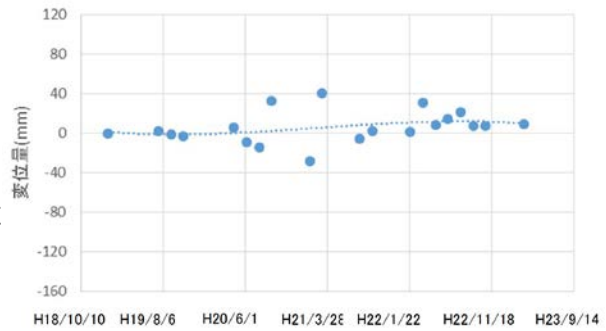


図 6.2.1-10 解析結果②（地すべり中腹部）

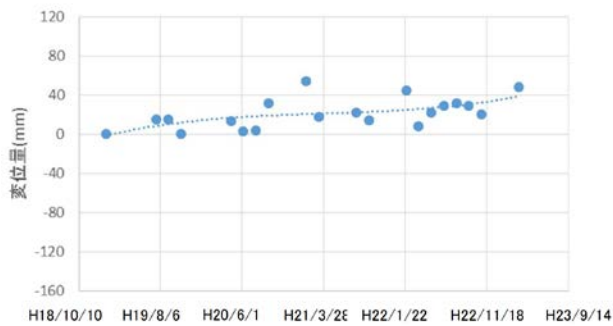


図 6.2.1-11 解析結果③（地すべり下部）

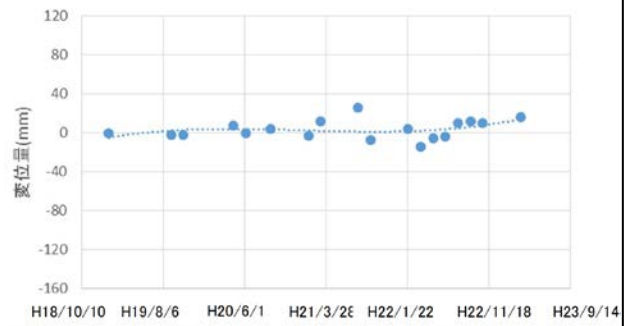


図 6.2.1-12 解析結果④（路面）

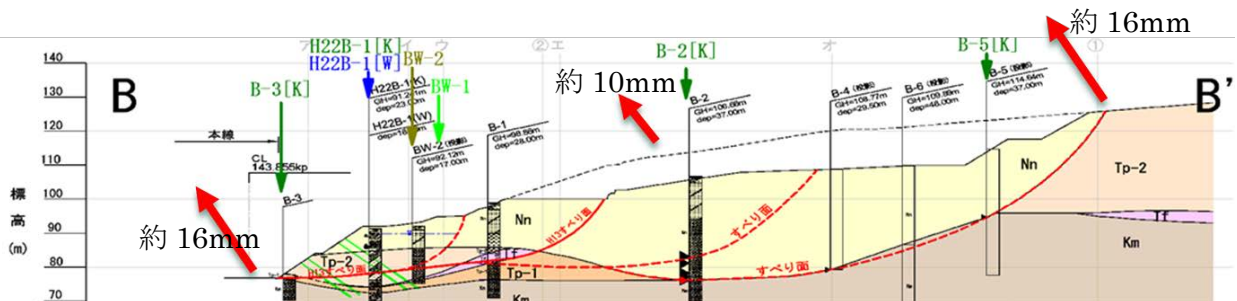


図 6.2.1-13 解析結果（Bブロック）

← : アセンディングで衛星に近づく



## 6.2.2 酒田地区での解析と実測との比較

### 6.2.2-1 地形・地質

対象区間の位置図を図 6.2.2-1 に、平面図、縦断図、地層断面図を図 6.2.2-2 に示す。N 値 1～4 の軟弱粘性土、N 値 10～15 の砂質土が互層状に GL-25m 程度まで分布している。同図より、区間により「粘性土が優勢な区間（最上川左岸後背湿地）」、「砂質土が優勢な区間（自然堤防）」および「粘性土と有機質土が優勢な区間（最上川右岸後背湿地）」に区分されることが分かる。

### 6.2.2-2 地盤変状

橋梁は杭基礎で支持され沈下はほとんど生じていないが、盛土において軟弱粘性土が厚く分布する区間では、圧密沈下（一次圧密＋二次圧密）が進行している。

道路は、平成 13 年（2001 年）に供用開始され、維持管理の基礎データとして、路面沈下が継続的に測定されている。

平成 19 年 3 月～平成 21 年 11 月（2007 年 3 月～2009 年 11 月）の期間における沈下量を図 6.2.2-3（実測値）に整理した。同図より、橋梁部では沈下が生じていないが、盛土部の軟弱粘性土区間で大きな沈下が生じていることが分かる。

### 6.2.2-3 PS-InSAR 解析（時系列解析）による路面沈下量、沈下速度

衛星 SAR 時系列解析（平成 19 年 6 月～平成 22 年 11 月、使用衛星 ALOS-1）による酒田地区の広域路面沈下状況を図 6.2.2-4 に示す。

また、実測値がある KP145～156 における沈下量、沈下速度を実測値と比較して、図 6.2.2-5～図 6.2.2-6（解析値）に示し、「沈下量が少ない盛土部」および「沈下量が多い盛土部」の沈下量の時系列の比較を図 6.2.2-7 に示す。

衛星 SAR 時系列解析を行うにあたり、図 6.2.2-8 に示すように下り線の全区間に防風壁（高さ 5m 程度）が設置されており、マイクロ波が路面に到達しづらい箇所があった。そのような区間では、図 6.2.2-8 に示すように盛土のり面（図 6.2.2-8 の S1）で得られた衛星 SAR 時系列解析結果を、予め次元圧縮解析（盛土の荷重分散を考慮）で求めておいた路面と盛土斜面における沈下量の比を用いて補正した。

衛星 SAR 時系列解析結果と実測値の比較より以下のことが分かる。

- ・ 図 6.2.2-4 より広域の道路の沈下状況把握を SAR でスクリーニングすることが可能であることが分かる。
- ・ 図 6.2.2-5～図 6.2.2-6 より全体の傾向としては、SAR 解析値はほぼ実測値を再現していることが分かる。
- ・ 図 6.2.2-7 より、沈下の時系列においても SAR 解析値は実測値を再現していることが分かる。
- ・ 図 6.2.2-9 に電子基準点と衛星 SAR 時系列解析の比較を示すが、ほぼ一致しており、今回の解析が精度良く行われたことを示唆している。

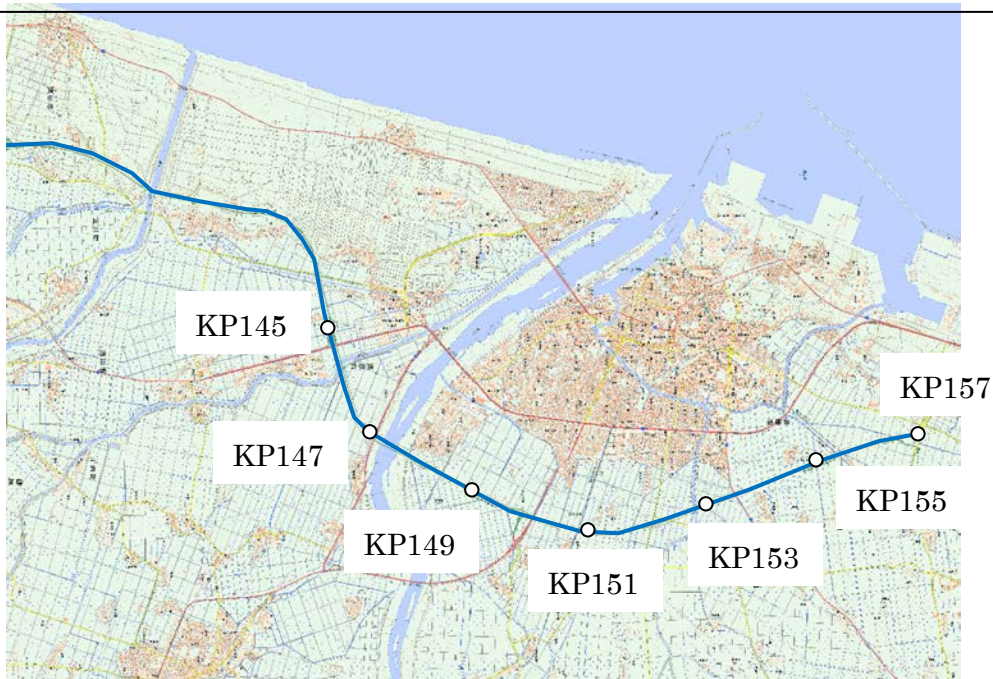


図 6.2.2-1 酒田地区の位置図 (—: 対象路線)

(地理院地図を加工して作成)

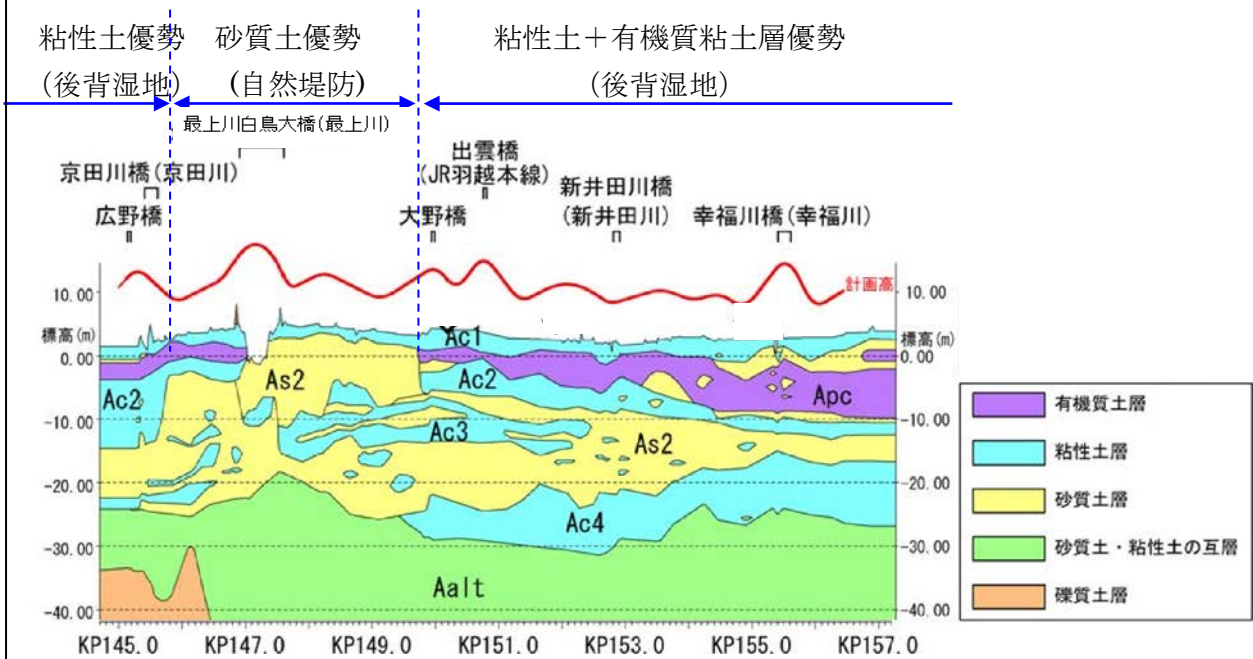


図 6.2.2-2 対象道路の平面図、地層断面図 1)に加筆



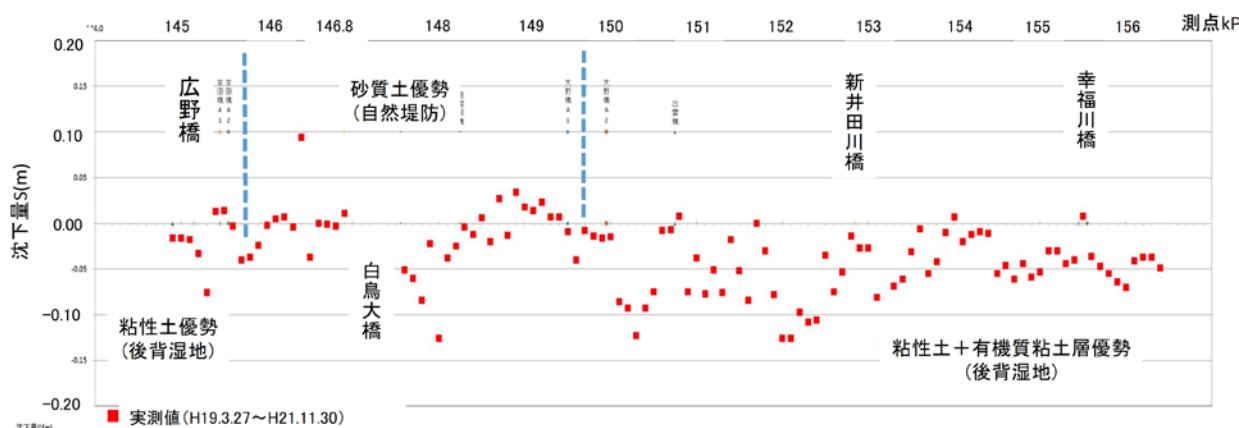


図 6. 2. 2-3 路面の沈下量 (平成 19 年～平成 21 年) 実測値は 2) に基づく

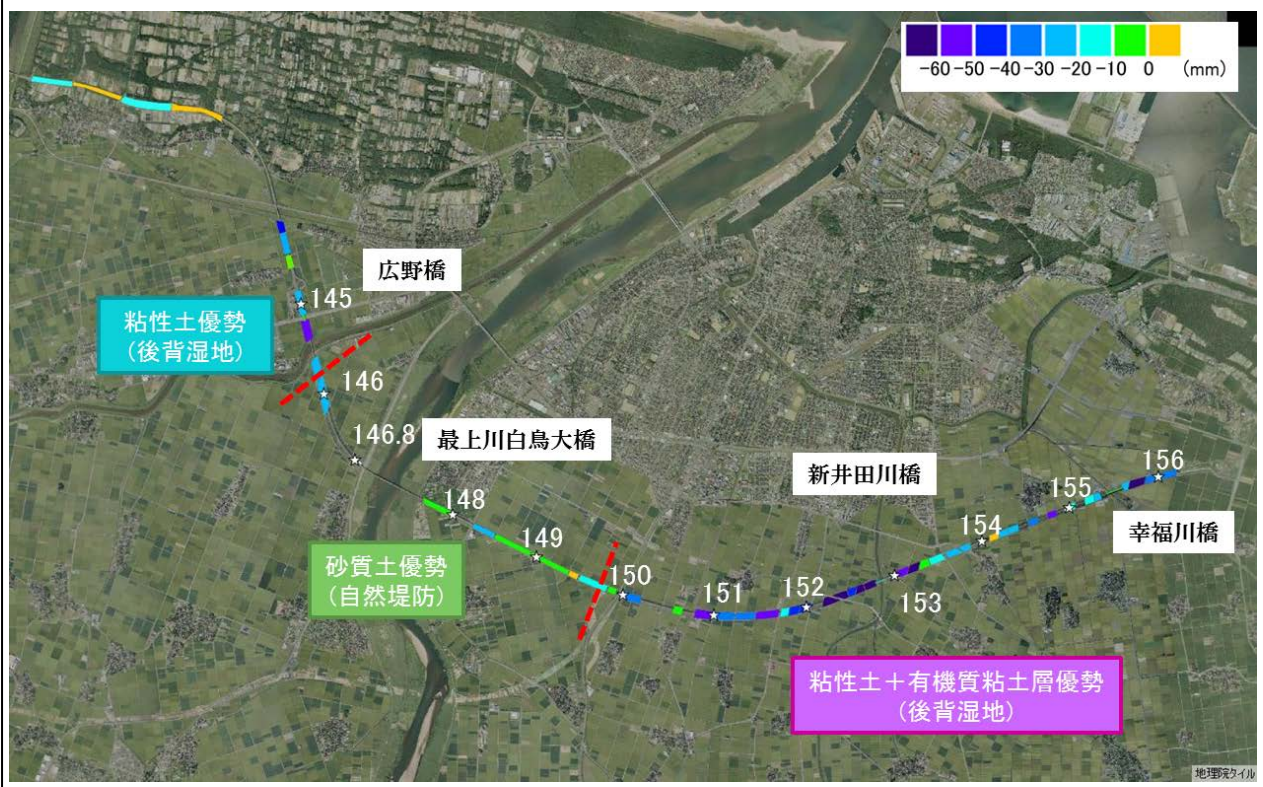


図 6. 2. 2-4 酒田地区における広域の路面沈下量 (平成 19 年～平成 22 年) 2) に基づく  
(地理院タイルを加工して作成)

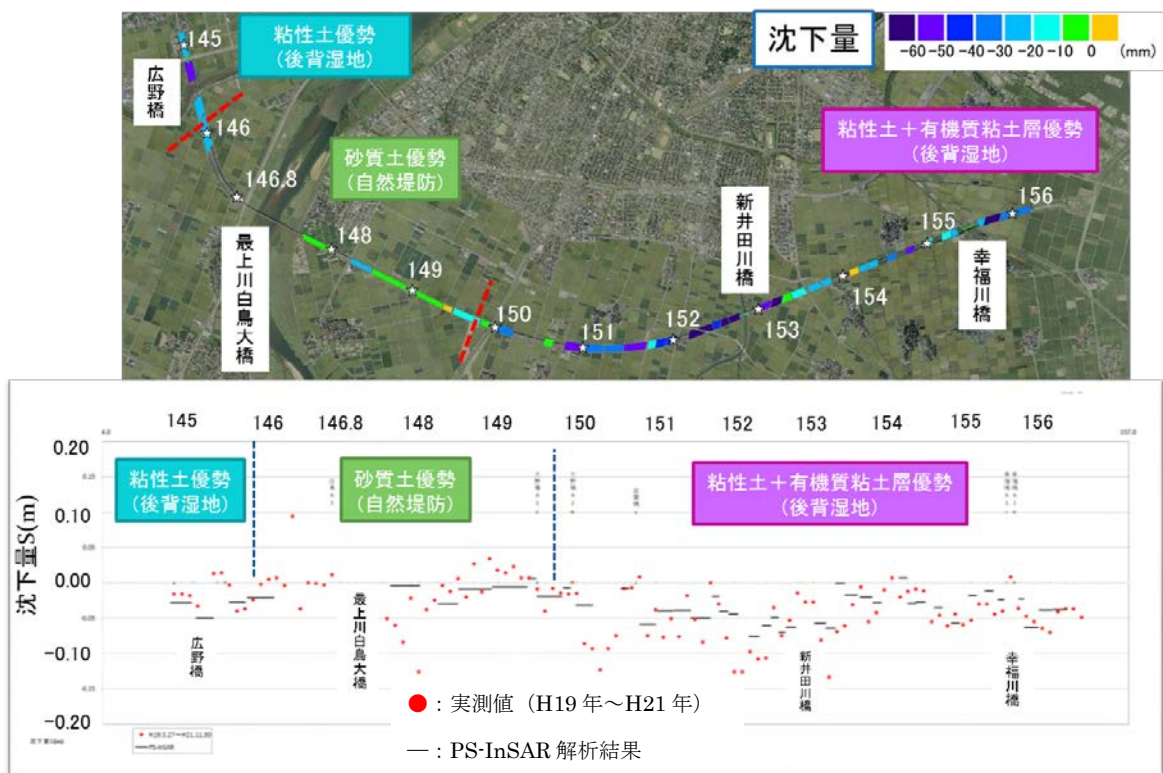


図 6.2.2-5 路面の沈下量 (平成19年～平成22年) 実測値は 2)に基づく

(写真は地理院タイルを加工して作成)

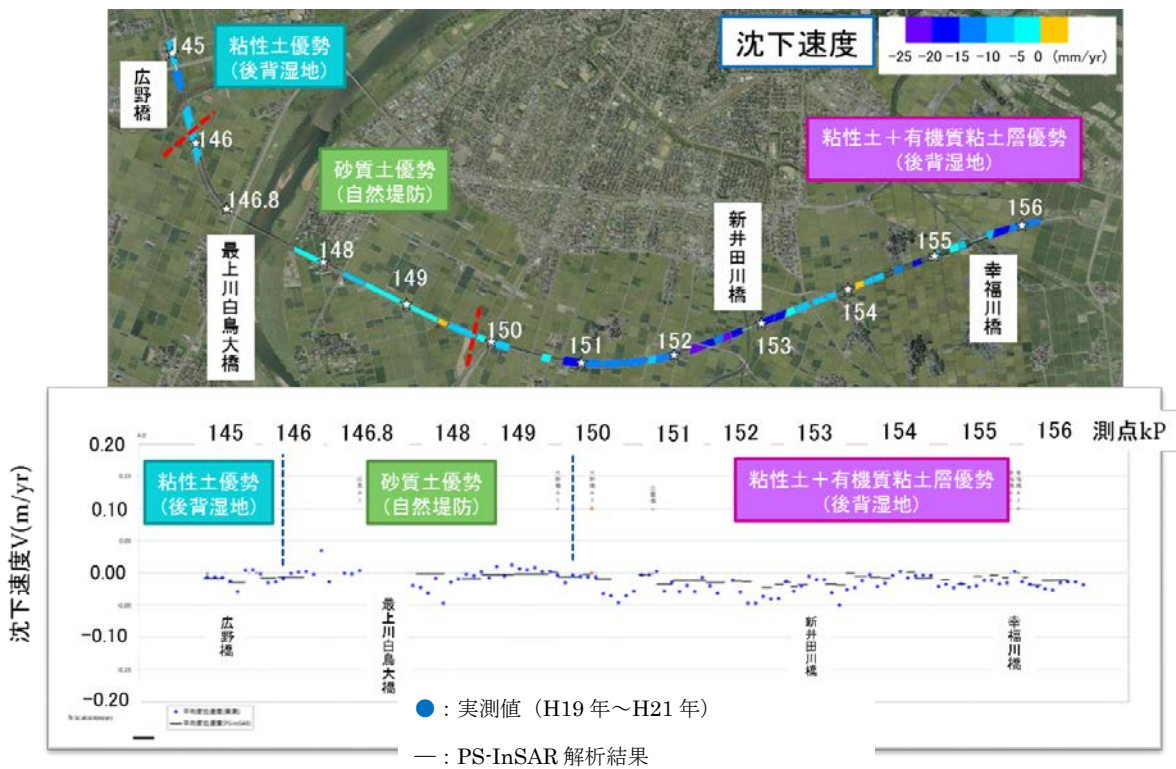


図 6.2.2-6 道路の沈下速度 (平成19年～平成22年) 実測値は 2)に基づく

(写真は地理院タイルを加工して作成)



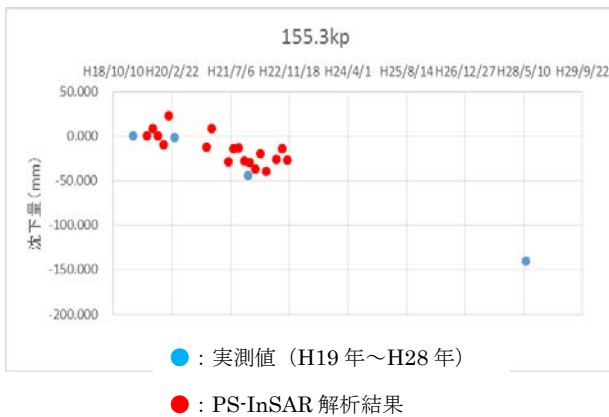
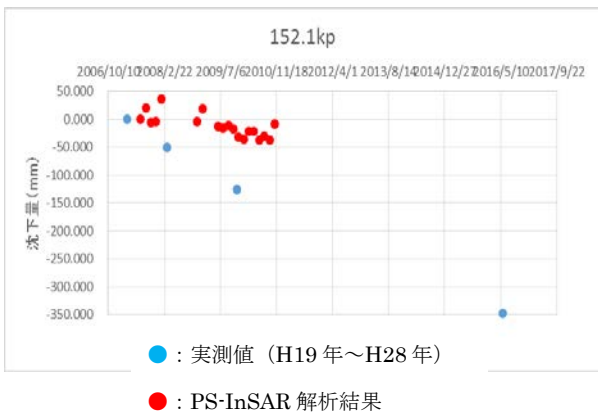
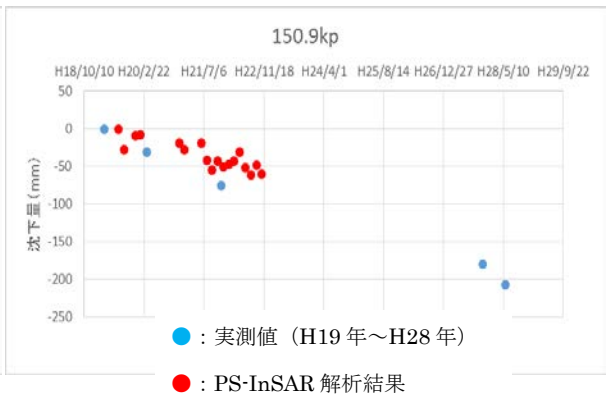
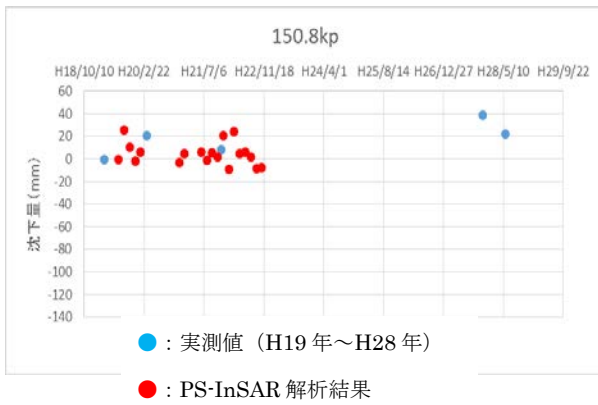
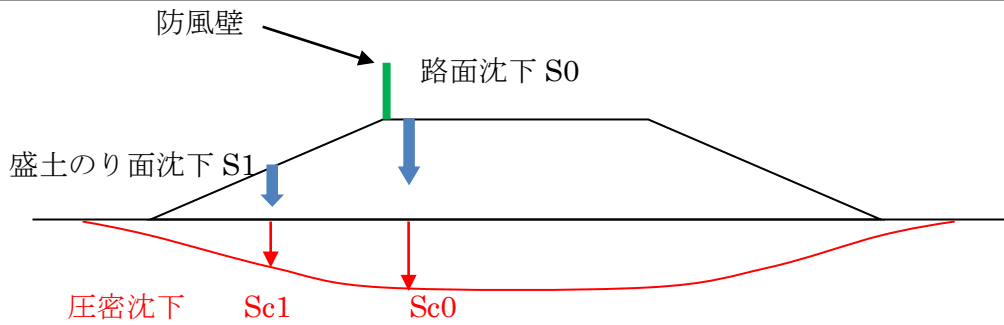


図 6.2.2-7 盛土部の沈下量の比較 (実測値は 2) に基づく)  
(写真は地理院タイルを加工して作成)





路面沈下 S0 = 盛土のり面沈下 S1 (衛星 SAR 時系列解析結果)  
 $\times Sc0/Sc1$

図 6. 2. 2-8 防風壁でマイクロ波が十分に届かない区間での補正方法

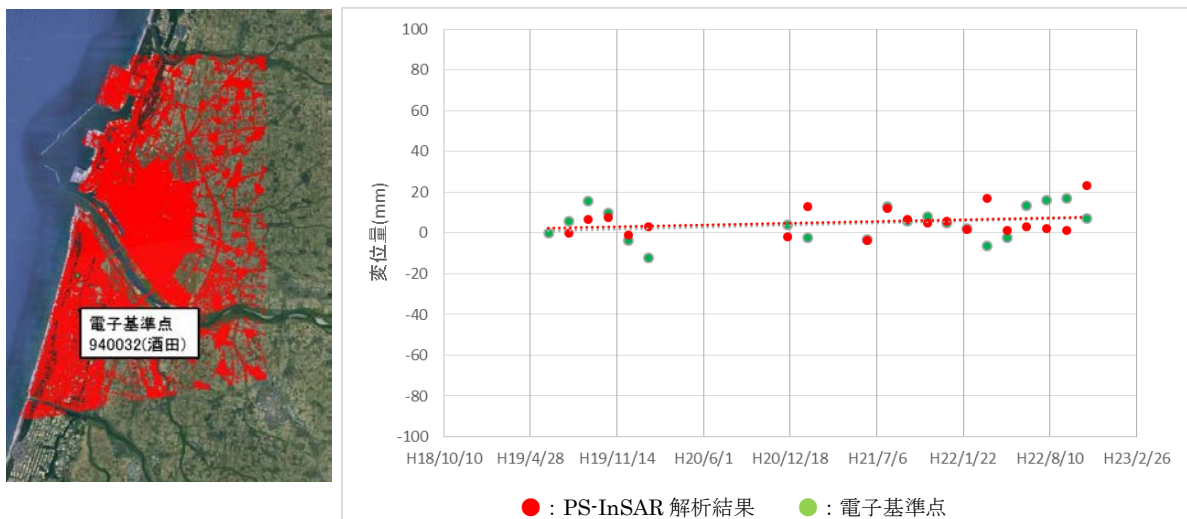


図 6. 2. 2-9 電子基準点における沈下量の比較

(地図データ : Google, DigitalGlobe)

### 6.3 広域的かつ定量的に変状を確認できる精度と現場での実用化に向けての課題

検討路線（酒田地区、虻田地区）における衛星 SAR 差分干渉解析の適用方法の検討、道路変状箇所でのキャリブレーションなどを踏まえて、実用化に向けた課題を以下に整理した。

#### 6.3.1 衛星 SAR データに含まれる道路土構造物特有のノイズ成分の効果的な低減手法の開発

衛星 SAR データに含まれる道路土構造物特有のノイズ成分としては、草木、アスファルト舗装、道路構造物などがある。

草木 : ALOS-1 は L バンド（長周期）帯マイクロ波を使用している。草木の生い茂った虻田地区で、L バンドを使用することにより地すべり土塊の挙動が解析可能であったことから、草

木の影響によるノイズは最小限にできることが分かった。

アスファルト舗装：草木と同様に、虻田地区、酒田地区での解析結果より大きな障害にはならないことが分かった。

道路構造物：酒田地区で防風壁が障害となった。盛土の沈下問題であったため、圧密沈下計算を補助的に用いることより、路面の沈下量を推定することを行った。今後、マイクロ波を妨げる道路構造物周辺の変位を解析するためには、種々の工夫が必要であることが分かった。

「道路土構造物特有のノイズ成分の効果的な低減手法の開発」における具体的な課題は以下のとおりである。

- ・ マイクロ波を妨げる道路構造物がある場合の解析手法
- ・ 虻田地区のように変状のキャリブレーションを行うことができない場合の解析結果の精度の評価方法

### 6.3.2 実際の道路土構造物変状箇所でのキャリブレーションに基づく解析結果の評価方法の開発

InSAR 解析、PS-InSAR 解析（時系列解析）を虻田地区、酒田地区で行った結果、ALOS 以外の衛星 SAR の利用も含めて、以下のような道路維持管理に適用できる可能性があることが分かった。

表 6.3.2-1 目的を達成するための衛星 SAR の選択

目的	解析手法		事例
	InSAR	PS-InSAR 解析 (時系列解析)	
過去に遡って変状箇所の DB 構築	△	○	虻田：地すべり土塊の挙動解析例
定量的な管理が可能	△	○	酒田：路面の沈下解析例
優先度を考慮した保全計画	○	△	虻田：地すべり土塊の活動度、用地外のすべり土塊の予測 酒田：路面の沈下速度

○：主に使用、△：補助的に使用

今回の道路土構造物変状箇所でのキャリブレーションを踏まえて解決しなければならない具体的な課題は以下のとおりである。

- ・ 草木の成長が激しい箇所での L バンドでの解析結果の評価
- ・ 草木等の障害物が無い場合に C、X バンドデータを利用して、精度向上が可能であるか
- ・ C、X バンドデータは、海外のデータであり高価なデータもあり、採算性についても検討が必要

### 6.3.3 変状が激しい箇所での地盤工学的な考察

虻田では、精度は若干劣るがすべり土塊の動きの大小を把握できた。従来の地質技術者の地

表地質踏査と組合せることによって、より高度な防災を行うことができる。

酒田では、防風壁が障害となり、従来は路面の沈下速度を求めることは困難であったが、地盤工学的な圧密沈下の概念を補助的に利用することにより、路面での沈下速度を推定することができた。

これらの事例を考察すると、衛星 SAR で解析された変状に地盤工学的な解釈を考慮することにより、道路土構造物の維持管理に役立つ情報を得ることができることを示唆している。衛星 SAR の解析データを道路土構造物の維持管理に展開するための地盤工学的な考察として必要な具体的な課題は以下のとおりである。

- ・ 解析データに活用に関して、土構造物毎にどのような地盤工学的な考察が必要であるかを整理

#### 6.3.4 道路土構造物の変状解析マニュアル作成

衛星 SAR を利用した道路土構造物の変状解析マニュアルを作成するためには、上記の種々の課題を解決する必要がある。

##### 参考・引用文献

- 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
- 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



## ⑦本格研究の見通し

### 7.1 FS 研究の結果を踏まえた本研究における研究成果の見通し

FS 研究の結果を踏まえた実用化に向けた本研究の研究成果の見通しは以下のとおりである。

#### ① SAR差分干渉解析の適用方法の検討：

国内外のSARデータには各種のノイズ成分が含まれている。道路斜面の草木に対してはLバンドが有効であるが、防風壁などの道路施設の影響が出てくることが分かった。1)今後、他の道路構造物特有のノイズを検証し、分解能の向上を図ることが必要である。2)今回はだいち1号のLバンドデータを用いたが、X, C, Lと周波数の異なる複数のSAR画像を比較し、道路構造物毎に変位検出に最適な周波数帯の検討が必要である。3)今回は解析手法として、InSAR解析、PS-InSAR解析を行ったが、これらの解析方法の構造物毎の選択方法、SBASを用いた検討、両者の利点を活かした検討を行う必要がある。

#### ② 変状箇所でのキャリブレーション：

酒田地区で道路盛土などの構造物の変状を実測値と比較して評価した。まだ、若干のかい離も見られるが、概ね実測値を再現可能であること確認した。今後、実用化に向けて他の現場でより多く実測値と比較したキャリブレーションが必要である。

#### ③ 地盤工学的な考察：

虻田地区では地すべりの挙動評価、酒田では防風壁がある場合の路面の沈下量の圧密沈下解析からの推定など、現場に有意なデータを得るためには、「衛星SARデータ+地盤工学的考察」が不可欠であることが分かった。今後、多くの道路土構造物で具体的にどのような地盤工学的考察を行うことが必要であるか整理する必要がある。

#### ④ 維持管理への具体的な適用方法：

①～③より、リモセン技術を用いた道路土構造物の変状解析のマニュアルを作成し、点検・維持管理の効率化を図る。

### 7.2 今後の研究成果の達成見込み

図7.2-1に示すようにリモセン技術を用いて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となり、変状の多い箇所を重点的に点検することができると考えられる。

また、過去に遡ってデータベースを作成することにより、広域で劣化しつつある道路土構造物の性能・対策優先度を評価し、道路施設の点検・維持作業の効率化を図ることができる。

広域の道路変状を一括して定期的にモニタリングすることにより、急激な変状箇所が抽出された場合には、GPS測量、3次元レーザー測量、UAV写真測量技術を組み合わせることにより変状計測の精度を向上させ、災害発生前に、調査、対策工の施工が効率的に行うことができる。

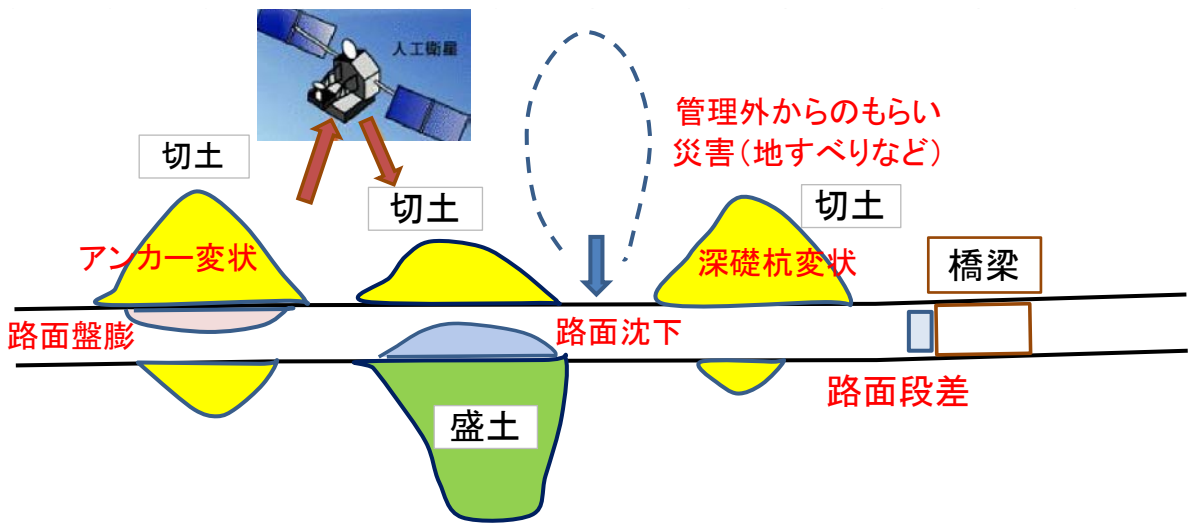


図 7.2-1 広域の道路変状を一括して定期的にモニタリングが可能

### 7.3 成果の活用方法、手段

研究協力者である NEXCO を中心に実際の点検に活用し、実用上の課題の抽出・改良を図り、定期的に道路会議等で発表し、全国の道路管理者に成果を利用してもらう。

### 7.4 今後の展開

東南アジアを中心に道路の維持管理に活用してもらうため、東南アジアで開催される国際学会での論文発表だけでなく、JICA 等に働きかけを行う。海外のインフラ輸出において、地形・地質などに応じた土構造物の長期的な維持管理技術をセットで国際展開ができる。

## ⑧特記事項

### 8.1 FS 研究から得られた知見、学内外等へのインパクト等、特記すべき事項

虻田での InSAR 解析において、既存の地質技術者が地表地形地質踏査や写真判読から行った地すべりブロックと今回の解析結果がほぼ一致した。このことは、道路管理区域外に存在する崩壊地や地すべりなどを机上で抽出可能であることを示唆している。また、InSAR 解析に加えて PS-InSAR 解析を行うことにより、抽出できた地すべり土塊の活動度を評価できることが分かった。これらの結果は、道路区域外からの「もらい災害」を事前予測し、対策工の「優先度を評価」することが可能となり、今後の道路防災を展開するうえで非常に有意義な解析結果であると考えられる。

酒田での PS-InSAR 解析において、道路路面の沈下速度を解析し、実測値とほぼ一致する結果が得られた。道路路面の沈下速度は、舗装のオーバーレイの計画を立案するうえで重要なデータである。従来の測定の補間として有効であると考えられる。

### 8.2 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

研究の目標と達成時期を図 8.3-1 のように考えている。これに従うと、約 25%程度の進捗と考えられる。

表 8.3-1 研究のスケジュール

研究項目	H29 年度	H30 年度	H31 年度	H32 年度
1. SAR 差分干渉解析の適用方法検討				
2. 変状箇所でのキャリブレーション				
3. 地盤工学的考察				
4. 維持管理業務での活用方法検討				