

# SAR衛星データ解析技術を用いた 斜面モニタリング



鎌田 慈  
Yasushi Kamata  
防災技術研究部  
気象防災研究室長



京増 顕文  
Akifumi Kyomasu  
防災技術研究部  
気象防災研究室  
研究員

## はじめに

鉄道事業者は、鉄道沿線の斜面において地すべりなどの大規模な崩壊が懸念される場合、伸縮計などの計測機器を設置して斜面の移動量のモニタリングを行い、移動量が基準値を超えると斜面巡視を行うなどの対応を取っています。しかし、これらの計測機器は維持・補修が必要なため、人的リソースが必要となります。また、2021年7月に発生した熱海市伊豆山地区での土石流災害<sup>1)</sup>のように、鉄道用地外で発生した崩壊による土砂が鉄道に到達することもあります。そこで、斜面や構造物を広域かつ低コストにモニタリングする技術の必要性が高まっています。

このようなモニタリング技術の一つとして、人工衛星のデータを使用することが挙げられます。衛星写真は、一見して斜面の状況がわかりますが、夜間や悪天候時の雲がある場合などに斜面が見えません。一方で、**合成開口レーダー**<sup>®</sup> (Synthetic Aperture RADAR : SAR) を搭載した人工衛星が撮影した画像を用いた解析 (以

後、SAR解析と記述) は、夜間・悪天候時にも鉄道用地内外を広範囲にモニタリングすることができます。ただし、計測頻度は人工衛星の周回周期に依存し、現状では約2週間に一度です。しかしながら、将来的に多数の小型SAR衛星の打ち上げが計画されており、計測頻度が上がれば鉄道用地内外の斜面・構造物を面的かつリアルタイムにモニタリングすることで、列車の運行可否の判断に活用できる可能性があります。本稿では、SAR解析を用いて実施した地盤変動量の推定、解析結果に与える誤差、現状でSAR解析を斜面モニタリングに用いる方法について紹介します。

## SAR解析の概要

最も基本的な解析手法は干渉SAR解析 (InSAR) です。衛星から照射した電波が地表面で反射して衛星に戻ることを観測することで、衛星と地表面との距離がわかります (図1)。干渉SAR解析では、1回目と2回目の距離の差から変位量を求めます。したがって、地表面から

### 合成開口レーダー

一般的にレーダー画像の解像度は、電波を送受信するアンテナの大きさに比例します。衛星に搭載するアンテナはサイズの制約から大きくすることができません。そこで、衛星の進行方向にレーダー画像を合成することで、小さい開口でも高解像度の画像を得ることができるレーダーです。

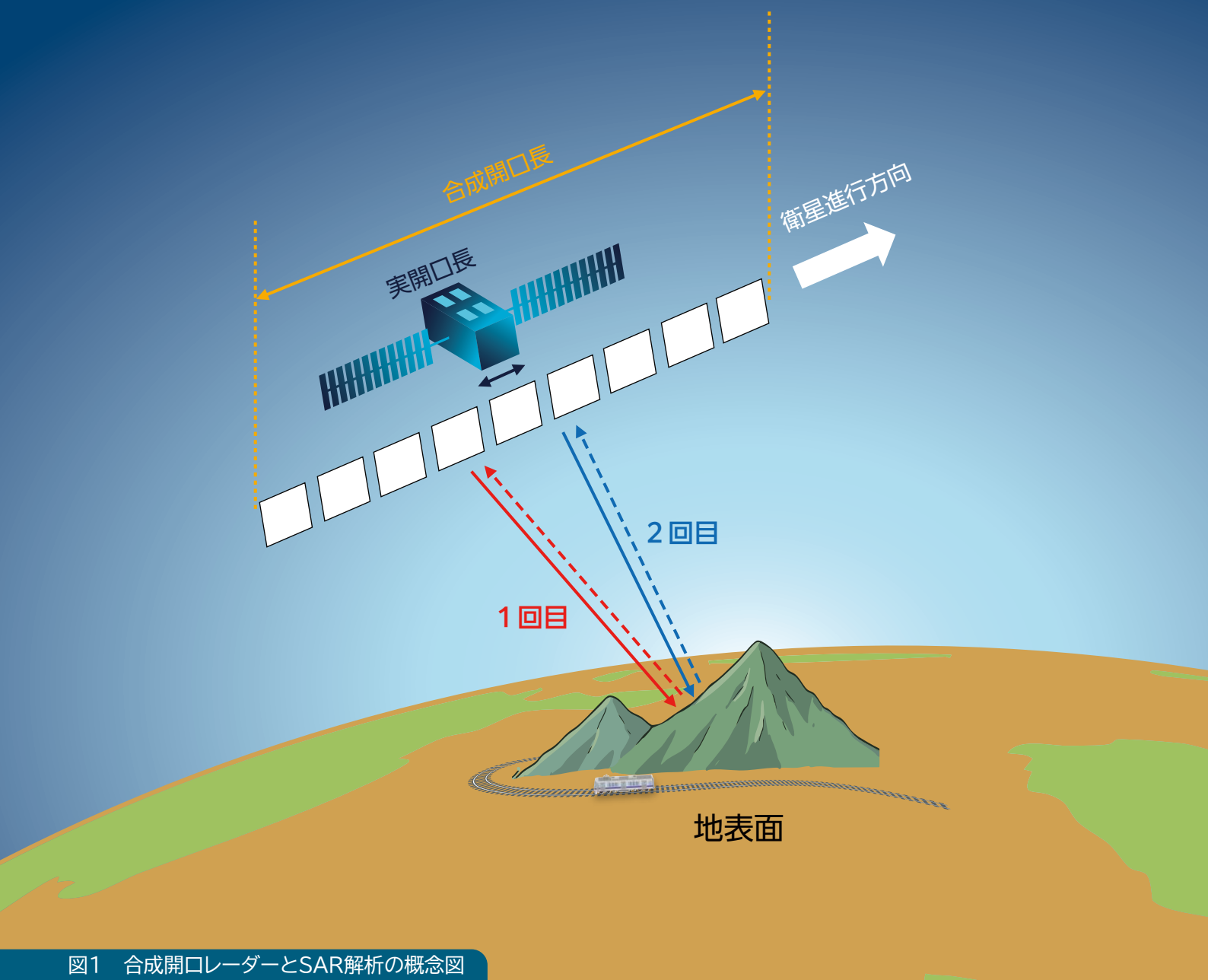


図1 合成開口レーダーとSAR解析の概念図

の反射が弱い場合は解析が困難となります。また、干渉SAR解析で得られた変位量には、実際の変位量のほかに電波が大気中を通過する際の水蒸気による遅延の誤差などが含まれています。

複数のSAR画像データから電波の反射が安定している地点(恒久散乱点(PS点)といいます)を抽出し、PS点においてある撮影日を基準として、その他の撮影日との距離の差を評価することで高精度に変位の変化を得る手法がPSInSAR (Persistent Scatterer

Interferometric SAR) 解析です。なお、安定した解析を実施するためには20以上のSAR画像データが必要です。

本稿では、データを無償で入手可能なヨーロッパ宇宙機関(ESA)の地球観測衛星Sentinel-1のSAR画像を用いて、鉄道総合技術研究所 塩沢雪害防止実験所周辺を対象として、大気中の水蒸気と地表面の積雪状況による誤差を評価しました。

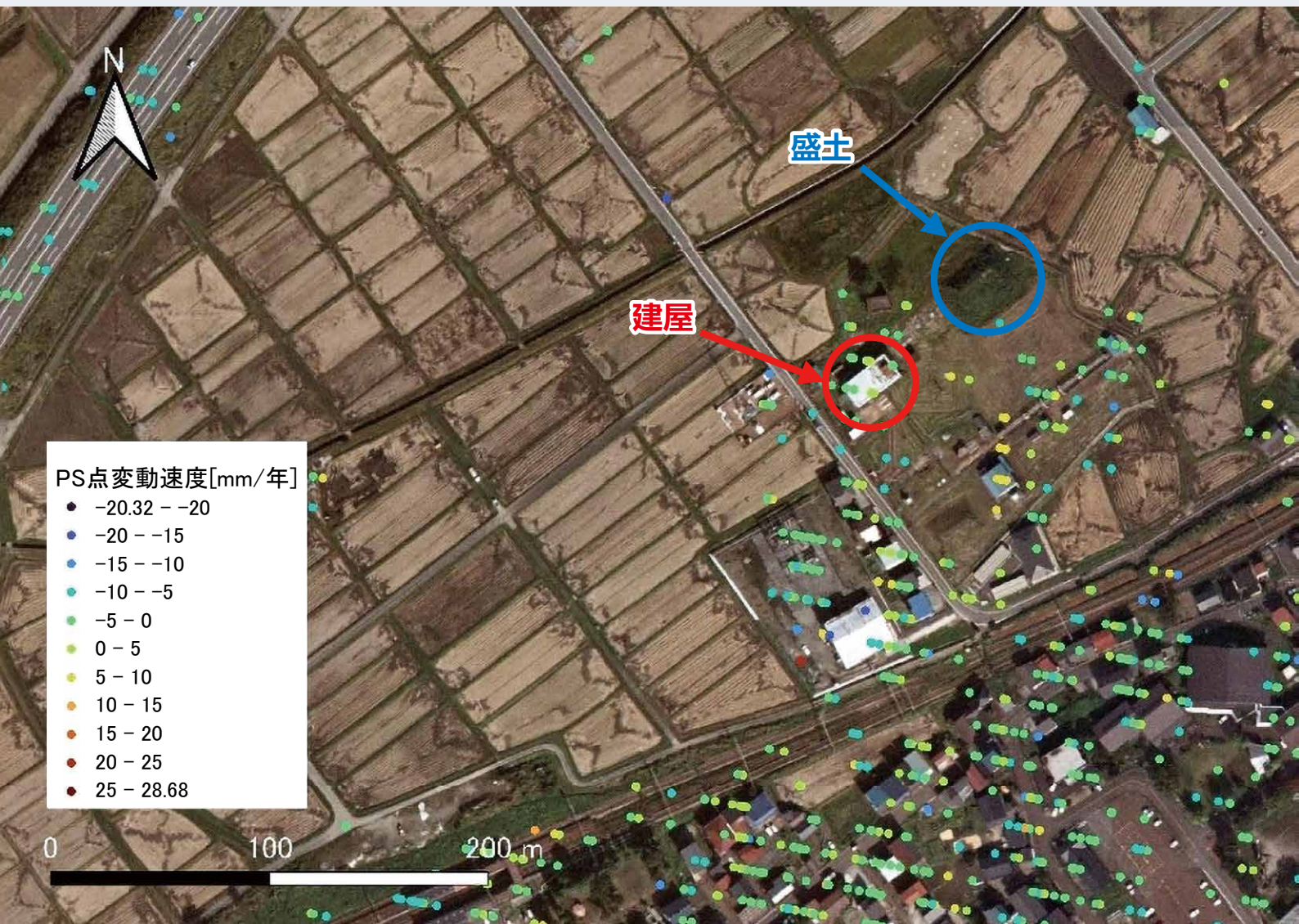


図2 塩沢雪害防止実験所周辺を対象としたSAR解析の結果

## 地盤変動量の推定に及ぼす誤差

### PS点の抽出状況

図2に塩沢雪害防止実験所周辺のPSInSAR解析結果を示します。建屋ではPS点が抽出されているのに対し、盛土ではPS点は抽出されていません。また、塩沢実験所周辺においても民家が密集するエリアでは多数のPS点が抽出されますが、田んぼではPS点はほとんど抽出されていないことがわかります。これは、田んぼや自然斜面では衛星から照射した電波の散乱などが起こり、衛星に反射波が届いていないことを意味します。そこで、本稿ではPS点が抽出

される建屋の解析結果を使用して、誤差を検討しました。ここで、解析期間中に建屋に変状はないため、建屋の変位量は0mmと仮定します。

### 大気中の水蒸気による遅延誤差

大気中の水蒸気が多くなると、衛星から照射された電波が大気を通過する際に遅延が生じます。そこで、2020年度の無積雪期を対象として、基準となる日と比較対象となる日の水蒸気量との差分に対応する誤差を求め、補正を試みました(図3)。大気中の水蒸気量は夏場に多く、春や秋は少ないことがわかります。干渉SAR解析による変位量の真値に対する平均的な誤差

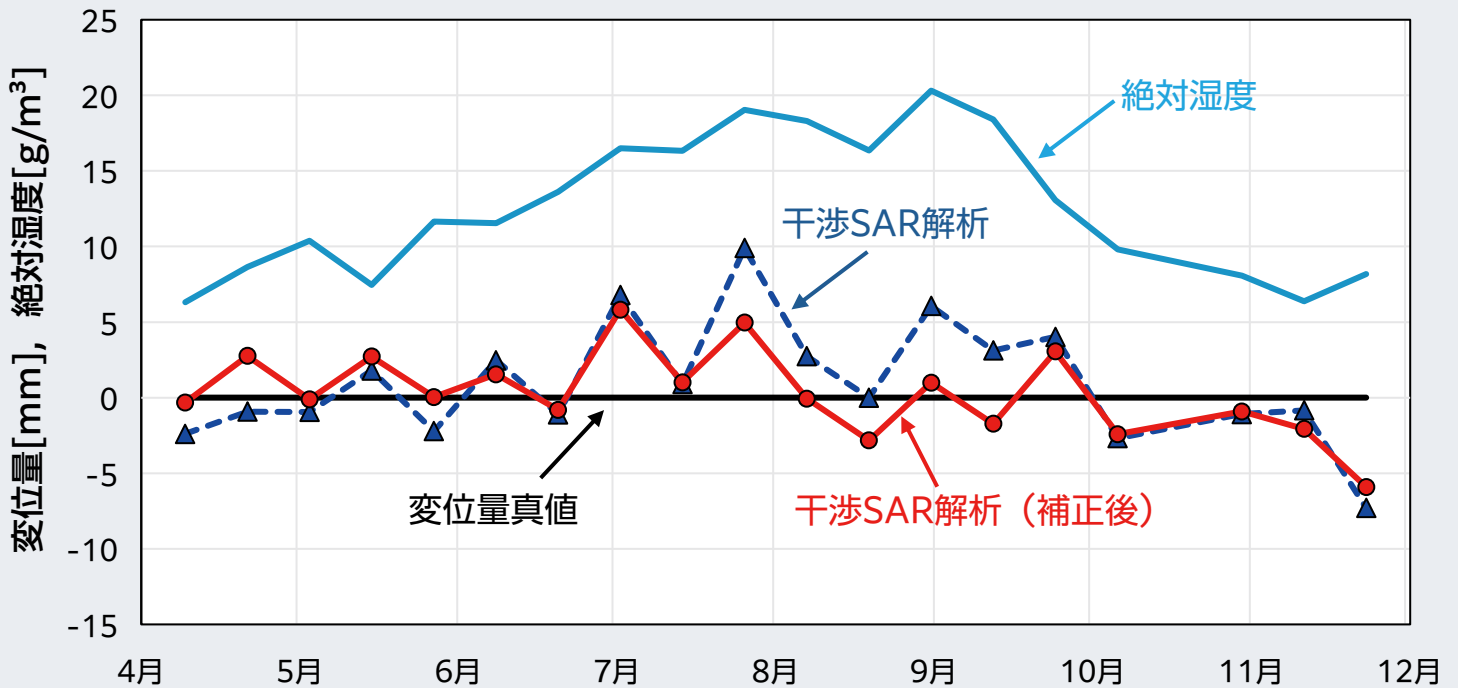


図3 絶対湿度と干涉SAR解析による変位量の変化

(RMSE) は4.0mmでしたが、大気遅延量の影響を補正することで、誤差は2.7mmに低減することがわかりました。

### 積雪に起因する誤差

2019～2022年度に撮影された各32枚のSAR画像を用いて、積雪期の画像枚数が異なる各20枚のSAR画像群を5セット作成し、解析開始日の異なる各画像群に対してPSInSAR解析を実施しました(図4)。ここでの変位量は、正が衛星から遠ざかる向き(沈下方向)の変位、負が衛星に近づく向き(隆起方向)を表します。無積雪期の変位量は±5mmの変動範囲ですが、

積雪期には衛星に近づく向きに最大10mm程度変位量が大きくなっていることがわかります。

図5に積雪深と変位量との関係を示します。積雪深0cmでは平均が0mm付近ですが、積雪があると負の変位となる傾向があります。ただし、積雪深が2mを超えても変位量は-10mm程度であり、積雪深を反映しているわけではありません。これは、電波が構造物上の積雪によって散乱し、衛星に近づく向き、すなわち負の変位として解析されるためと考えられます。このように構造物や地表面が雪で覆われると誤差が大きくなることがわかりました。

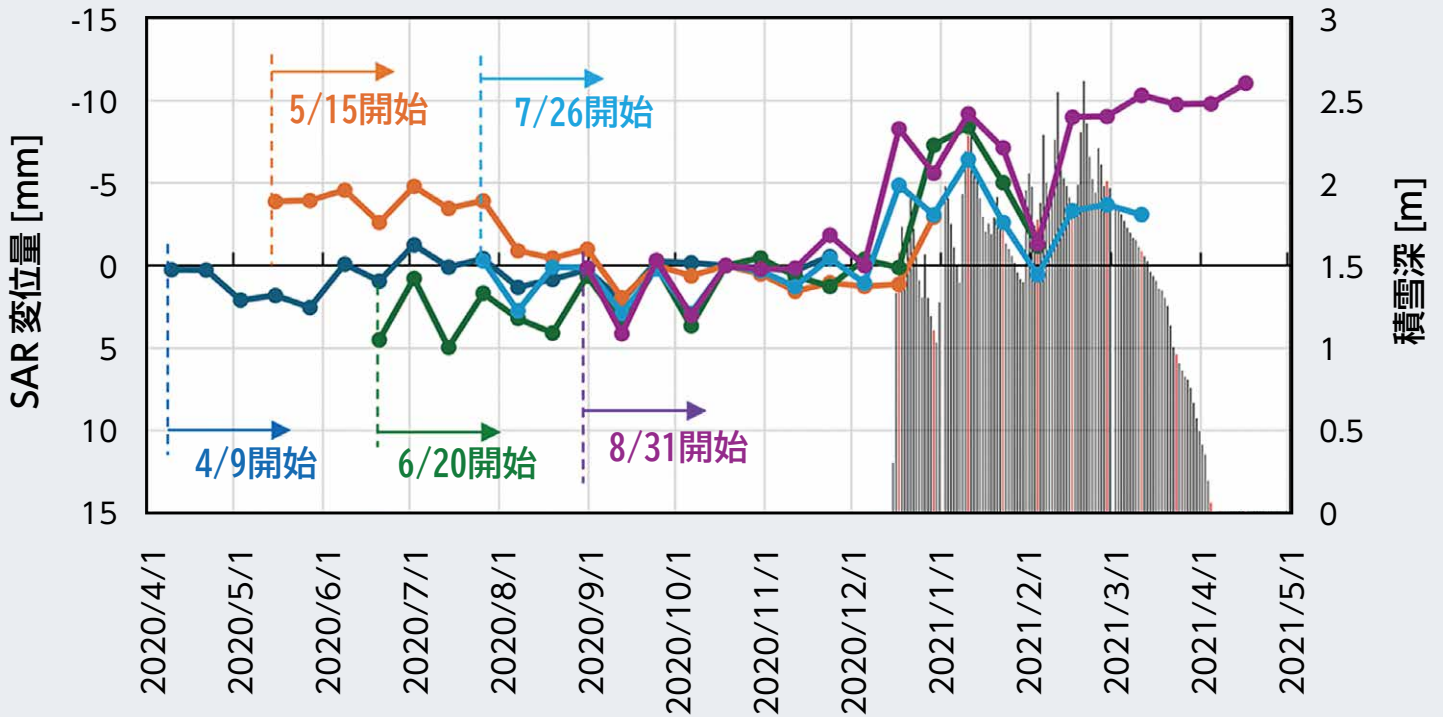


図4 PSInSAR解析による変位量と積雪深の時系列変化

### SAR解析技術を用いた斜面モニタリング

SAR解析は、広域を解析可能ですが、大気中の水蒸気や地表面の積雪による誤差があり、変動していない建屋に対しても±10mm程度の変位が解析されます。鉄道における地すべり地関連の管理基準値は、警戒が1日に10mm、避難が1時間に2～4mmとなっている例<sup>2)</sup>があることから、管理基準よりもSAR解析による変位量は大きいです。また、現状では、衛星の周回周期は高頻度のもので12日程度であり、斜面崩壊を見逃す可能性があります。このように現状ではSAR解析などの衛星データを斜面

安定度モニタリングに適用することは困難と考えられます。しかしながら、SAR衛星の打ち上げ計画が進んでおり、将来的には観測頻度の向上や、研究の進展による解析精度の向上が期待できます。そこで、以下のような方法で、現状でもSAR解析技術を斜面モニタリングに活用可能と考えられます。

- ①あらかじめ地すべり地形など、沿線の要注意斜面を抽出します。
- ②要注意斜面に電波を強く反射する1m四角程度のコーナーリフレクター (CR) を設置します。

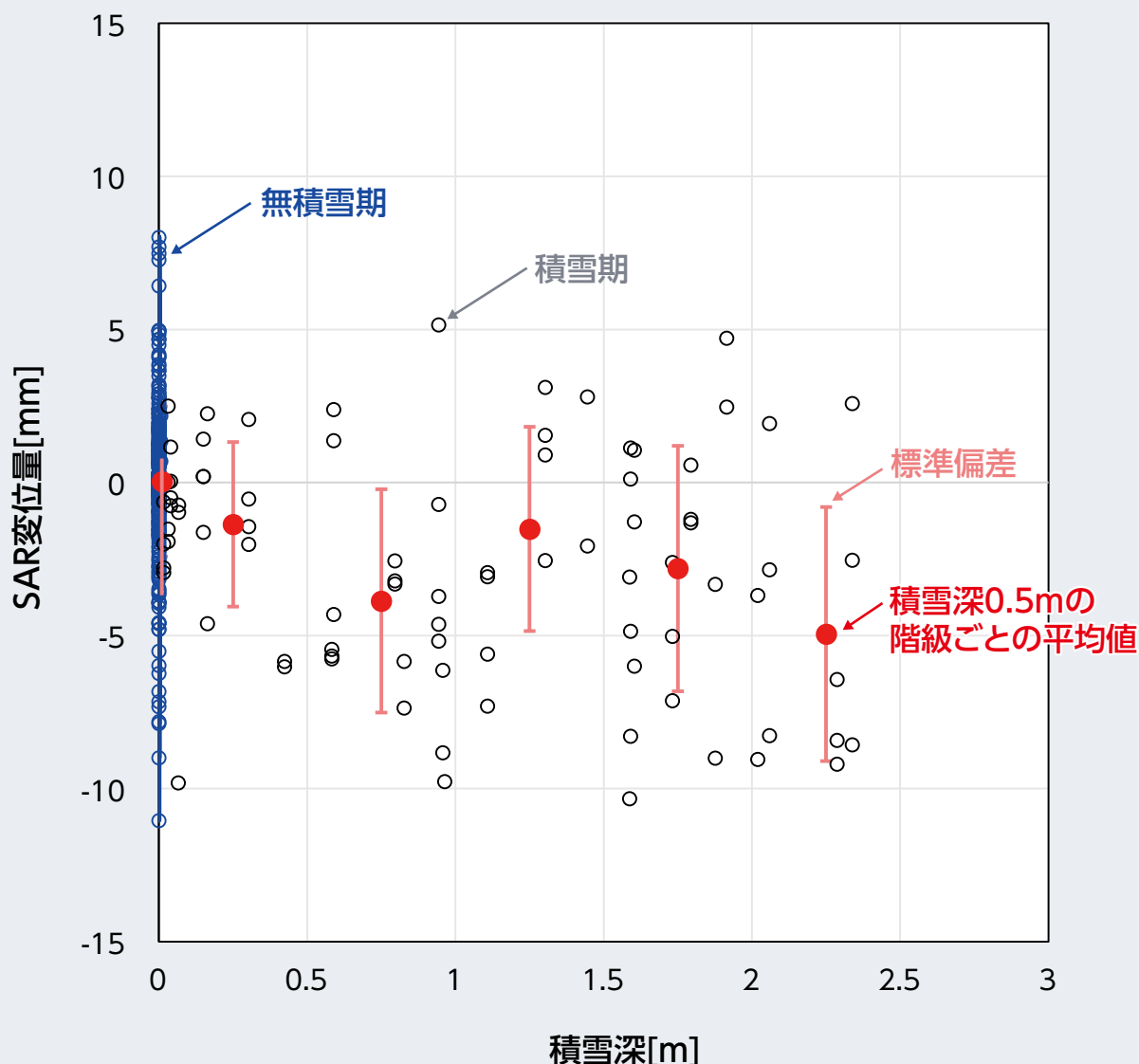


図5 PSInSAR解析による変位量と積雪深の比較

③干渉SAR解析とPSInSAR解析を実施します。

干渉SAR解析を実施することで、CRの設置点が消失した場合に土砂災害の発生を検知可能となり、PSInSAR解析により長期的な地すべりによる変位をモニタリングすることが可能となります。

来有望な技術であることから、今後も研究を進めていきたいと考えております。 **RRR**

### おわりに

本稿では、SAR解析の概要と現状の解析結果に及ぼす誤差について紹介してきました。SAR解析技術は発展途上であり、解析精度の向上、計測の高頻度化は今後の課題です。しかし、将

### 文献

- 1) 静岡県：熱海市伊豆山地区土砂災害関連情報について：<https://www.pref.shizuoka.jp/bosaikinkyu/saigai/atamidosa/1035911.html> (入手日：2025年2月26日)
- 2) 村上温，野口達雄 監修：鉄道土木構造物の維持管理，日本鉄道施設協会，pp.368-378，1998