



Surveying the Earth to Create the Future

2022/12/3

防災研究所一般研究集会

砂防研究における技術伝承とDXの融合－実験・観測・計測ノウハウの共有および展開－

砂防分野における 人工衛星活用事例のご紹介

- 地球観測衛星について

- －光学衛星の活用事例
- －SAR衛星の活用事例

- 時系列干渉SAR解析のご紹介

- －紀伊山系を対象とした変動検出事例のご紹介
- －変動検出精度の評価

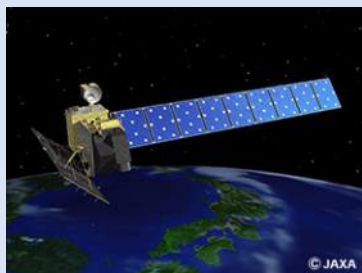
1.1.地球観測衛星について

【人工衛星の種類】

- 人工衛星には多くの種類がありますが、パスコは主に高度500km程度の軌道から地球を撮影する「地球観測衛星」を扱っています。

地球観測

光学衛星



だいち (ALOS-1) ※SARも搭載

SAR衛星



だいち2号 (ALOS-2)



WorldView-3
(光学衛星)



SPOT6&7
(光学衛星)



TerraSAR-X
(SAR衛星)

気象



気象衛星 ひまわり8号

通信・放送



超高速インターネット衛星 きずな

測位



準天頂衛星 みちびき

その他



惑星探査衛星 はやぶさ 2

JAXAやAirbus DS のHPより引用
<http://www.jaxa.jp/history/detail.html#category-3>
<https://www.intelligence-airbusds.com/optical-and-radar-data/#radar-constellation>

気象衛星 ひまわり8号画像は三菱電機、気象庁の著作 以下より引用した
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/society/space/satellite/observation/himawari8-9.html>

1.1.地球観測衛星について

【地球観測衛星の種類】

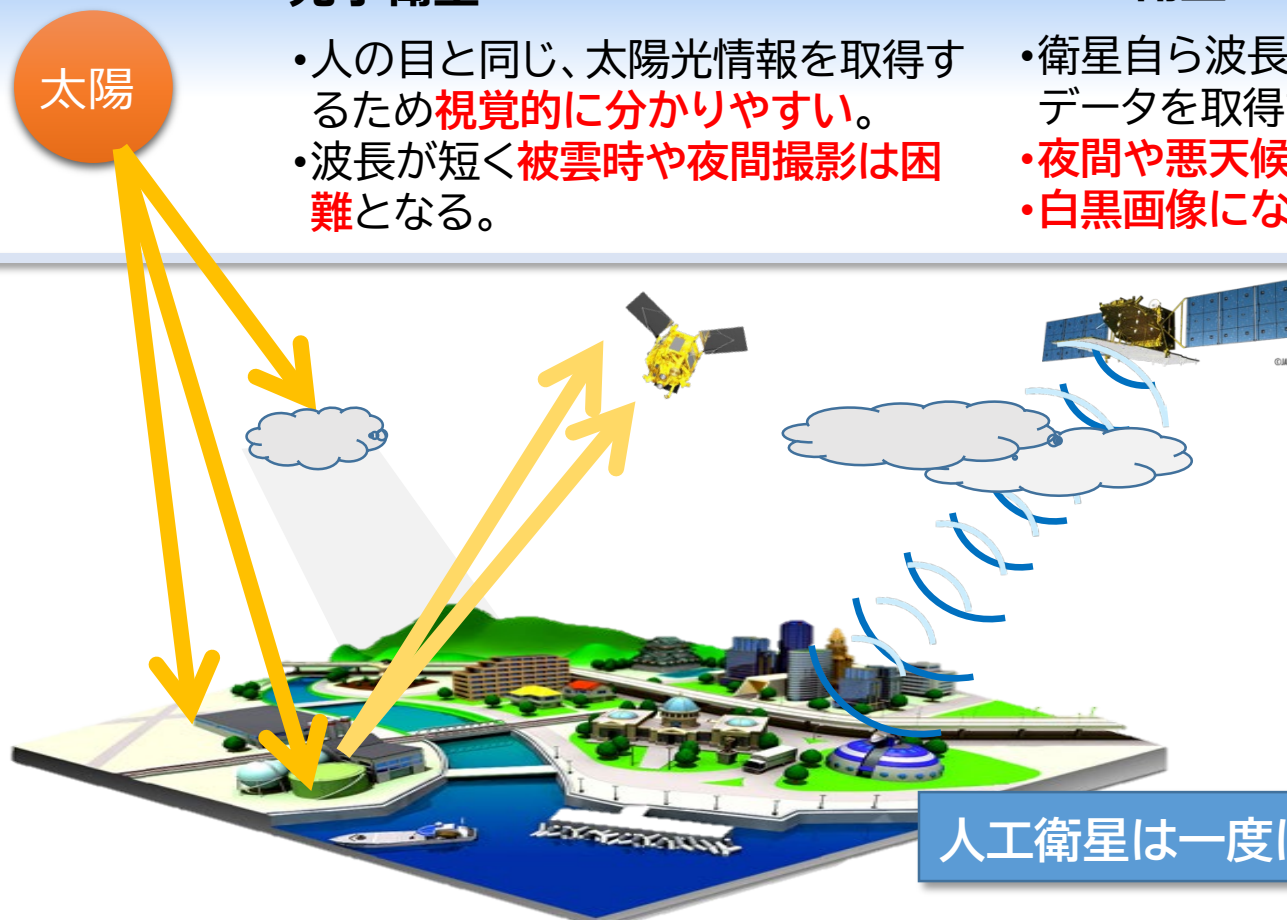
- 地球観測衛星には「光学衛星」と「SAR衛星」があります。

光学衛星

- 人の目と同じ、太陽光情報を取得するため**視覚的に分かりやすい**。
- 波長が短く**被雲時や夜間撮影は困難**となる。

SAR衛星

- 衛星自ら波長の長い電波を照射しデータを取得する。
- **夜間や悪天候でも撮影可能**。
- **白黒画像になるので分かりにくい**。



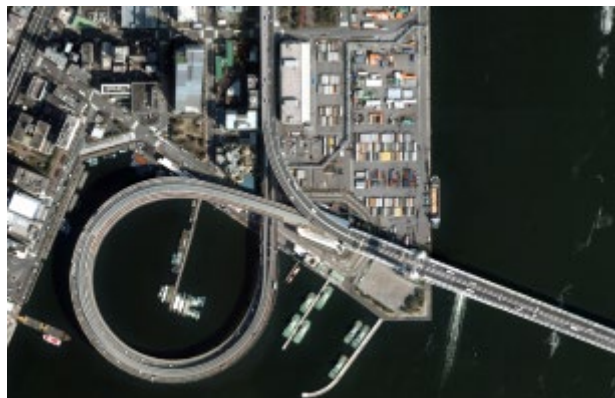
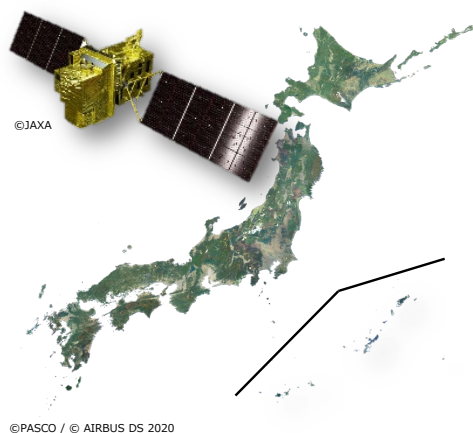
衛星軌道
地上500~700km
(太陽同期準回帰軌道)

人工衛星は一度に広域の観測が可能

1.2.地球観測衛星について（光学衛星）

【次期国産大型光学衛星 ALOS-3（だいち3号）】 ※打ち上げ予定

- **超広域観測** 観測幅70km、最大観測距離4,000kmで全世界の陸地を観測
- **高精度な衛星画像** 地上解像度80cm & 歪の無いデータでAI処理に最適
- **国産大型陸域光学衛星** ALOS-1号機(2006年1月-2011年5月)以来15年ぶり
- **新たなバンドの追加** コースタルバンド、レッドエッジバンドの追加



1.2.地球観測衛星について（光学衛星）

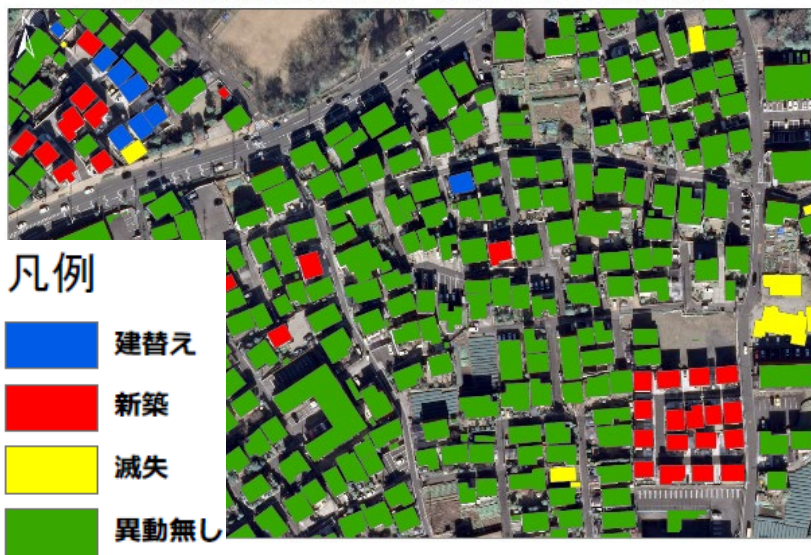
【光学衛星×AI判読技術】

- AI判読技術利用が急速に拡大。画像を対象にした判読技術のAIモデル化が急速に進み、判読対象は日々増加傾向。

家屋異動判読

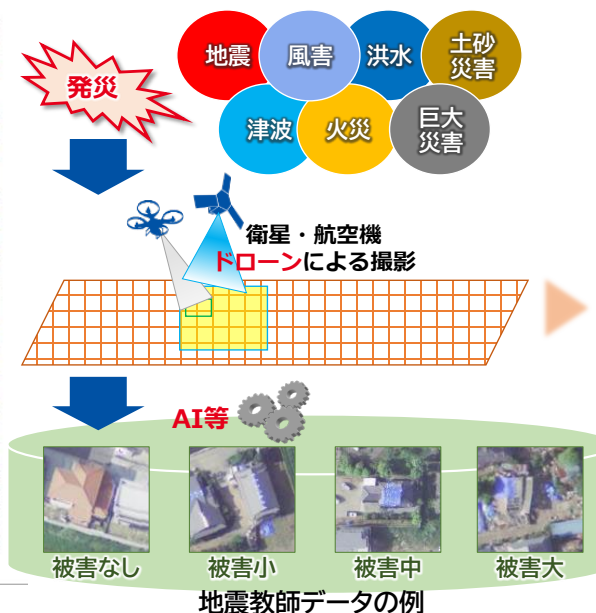
- ◆ 2時期の画像から、建物検出AIや変化分類AIにより家屋異動を自動判読

AIを活用した家屋異動判読～異動区分付与（最終成果）

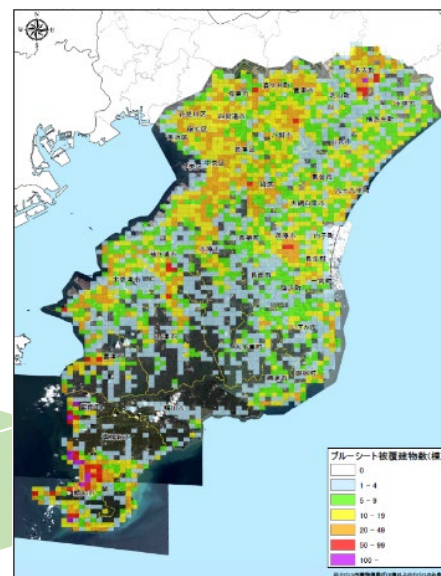


被災家屋判読

- ◆ 被災概況把握手法としてブルーシートを検出



令和元年台風15号(千葉風害)



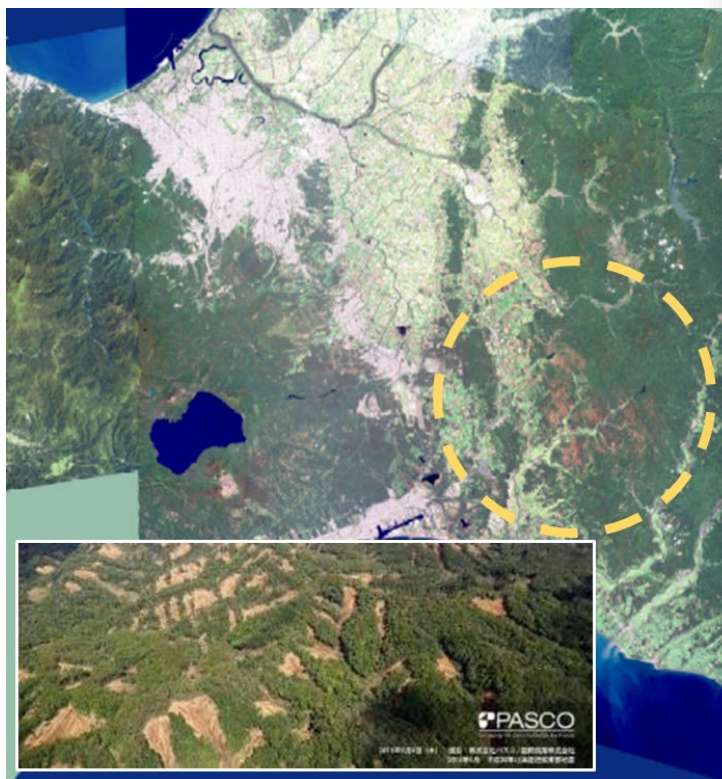
1.2.地球観測衛星について（光学衛星）

【光学衛星×AI判読技術】

- AI判読技術利用が急速に拡大。画像を対象にした判読技術のAIモデル化が急速に進み、判読対象は日々増加傾向。

平成30年北海道胆振東部地震により発生した崩壊地の自動判読

2018年9月11日 発災5日後の広域観測画像



	目視判読対応	自動画像解析対応	人工知能対応
手法	発災後に光学衛星画像（あるいは航空機による空中写真）を撮影		
	撮影された画像を目視で判読	教師付分類による自動画像解析により判読	CNNにより構築した人工知能モデルを用いた判読
判読例			
判読作業時間	5日 1/10	6時間 1/40 (1/400)	5分（新聞に掲載）
判読作業人員	5日×5人 述べ25人日	6時間×1人 述べ1人日	0.1時間×1人 述べ0.02人日
判読の確実度	表層崩壊の他、土砂流出・堆積箇所、地すべり、深層崩壊などが判読される	土砂移動部は抽出されるが、樹木が残存する範囲が抽出されない 採石場や伐採地が誤抽出される	目視判読に近い確実度（正解率93%）で抽出される


※「判読作業時間」は目視判読部分の短縮時間であり、実際の作業には発災から衛星観測までの待ち時間やデータ処理時間等が別途発生します。

1.3.地球観測衛星について（SAR衛星）

【SAR衛星のメリット】

- SAR衛星は、自ら電磁波(レーダー)を照射するので、夜間でも観測できます。
- 電磁波(レーダー)は雲を透過するため、悪天候でも観測できます。

光学センサーによる観測画像




太陽から入射

光が雲に
さえぎられる

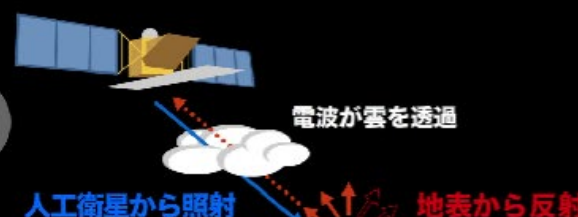
光

光学センサーによる観測



©JAXA

レーダーセンサーによる観測画像




電波

電波が雲を透過

人工衛星から照射

地表から反射

SARセンサーによる観測



富士山、山中組 ©JAXA, METI, analyzed by JAXA

iPadアプリ『SAR超入門』より © ORCA Production, Inc.

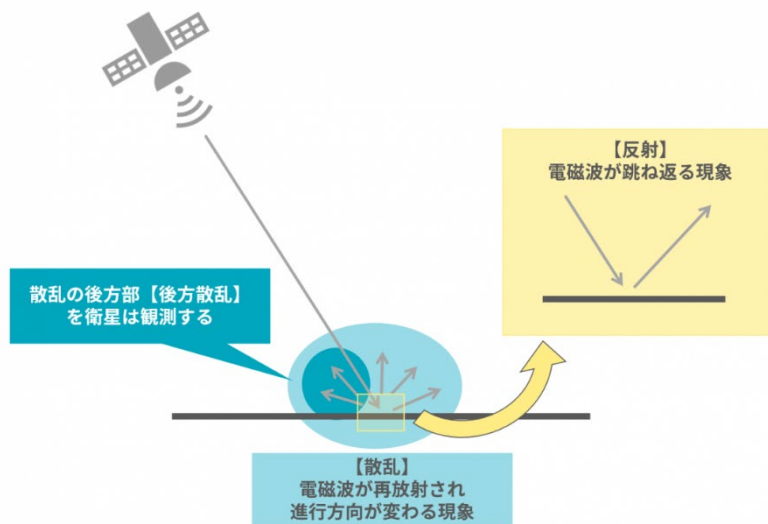
1.3.地球観測衛星について（SAR衛星）

【SAR衛星による観測データ】

- SAR衛星は、センサから地表に向けて電磁波(レーダー)を照射し、地表で反射した「反射強度」と「位相」を観測します。

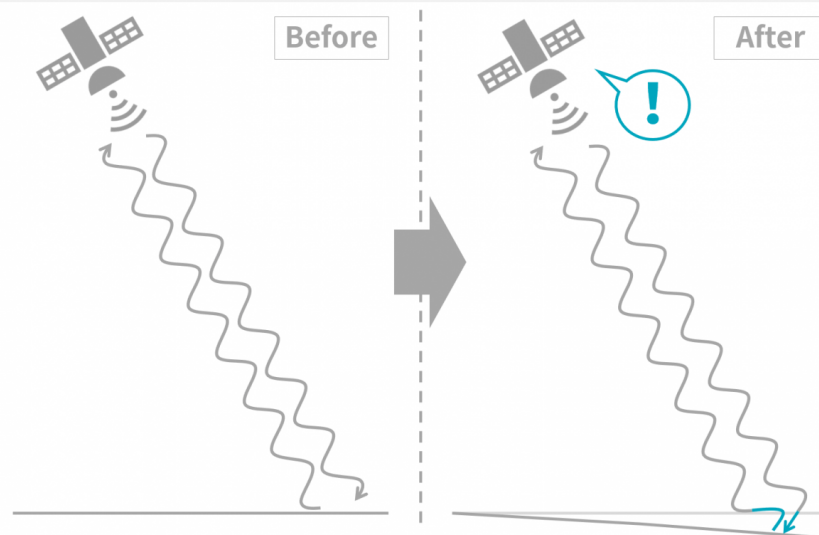
反射強度の観測イメージ

散乱と反射



位相の観測イメージ

差分干渉SARは地面の変化が分かる

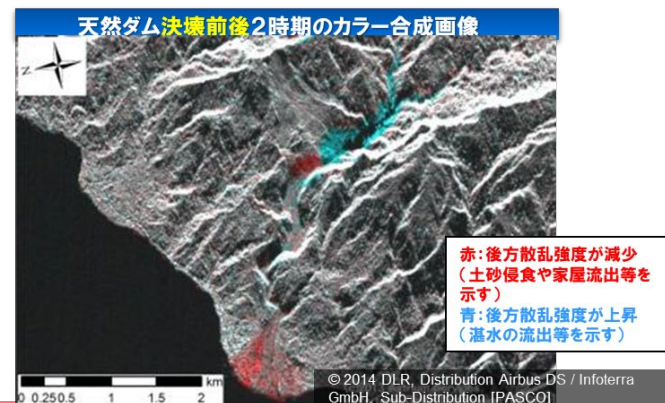
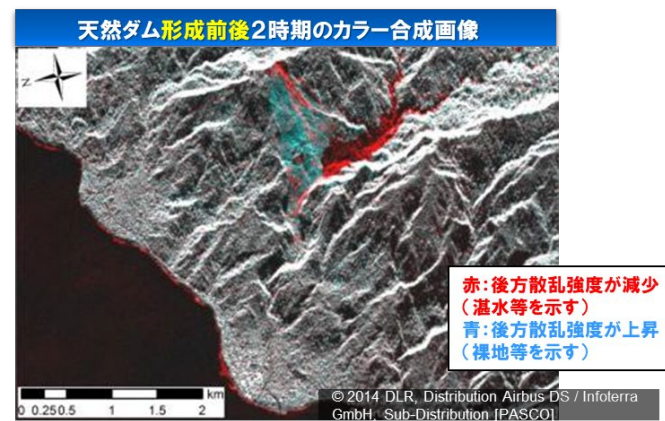


(宙畑ホームページより)

1.3.地球観測衛星について（SAR衛星）

【強度差分画像の活用事例】

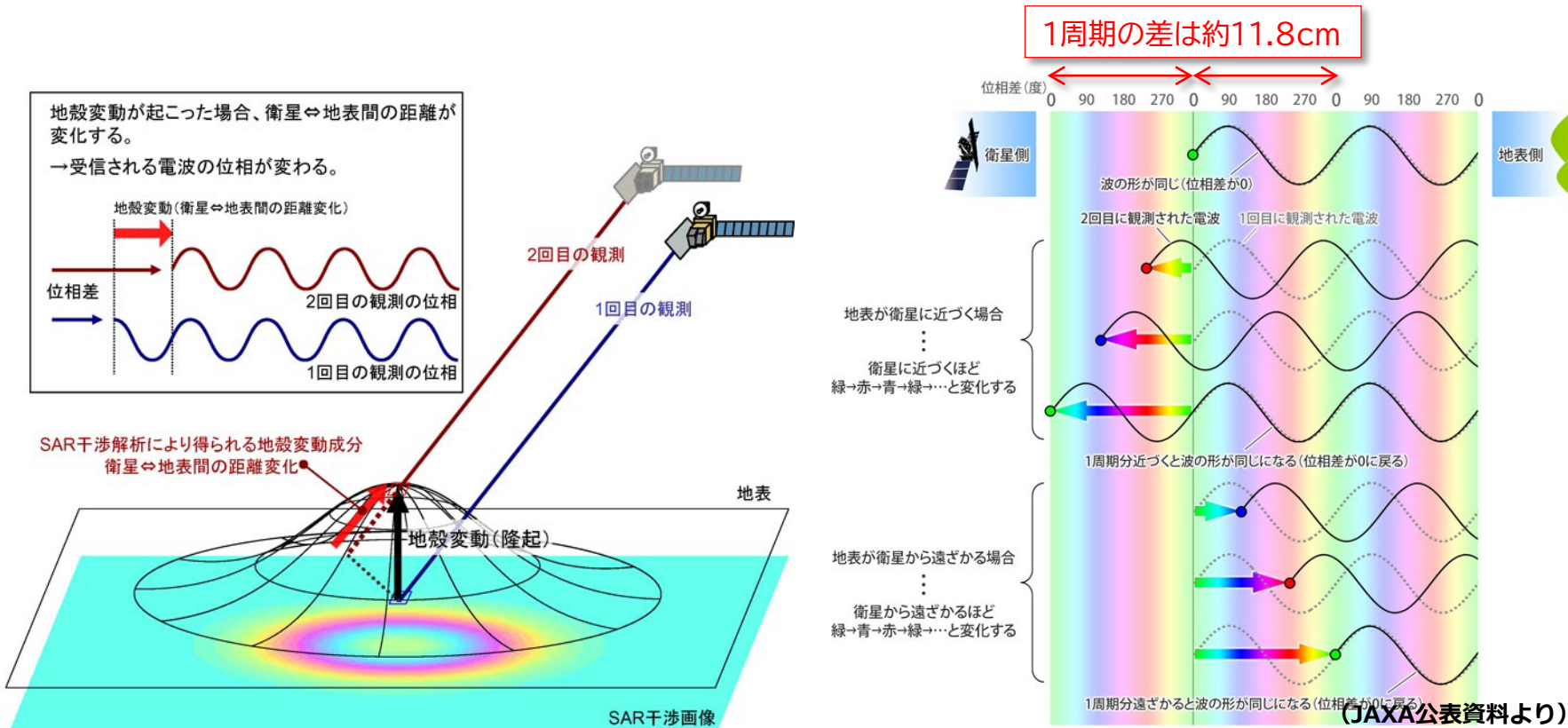
- 2012年7月13日、インドネシア共和国アンボン島で発生した深層崩壊の崩壊土砂によりワイエラ川が閉塞し天然ダムが形成された。
- パスコは合成開口レーダ衛星TerraSAR-Xによるモニタリングを実施し、結果は国土交通省によりインドネシア政府に速やかに提供されました。



1.3.地球観測衛星について (SAR衛星)

【干渉SAR解析とは？】

- SAR衛星による2時期の位相観測データを干渉解析し、観測時点間の地表の変動(衛星視線方向)を検出する技術であり、「干渉SAR解析」と呼ばれる。



SAR干渉解析により得られる地殻変動成分の概略図

(国土地理院公表資料より)

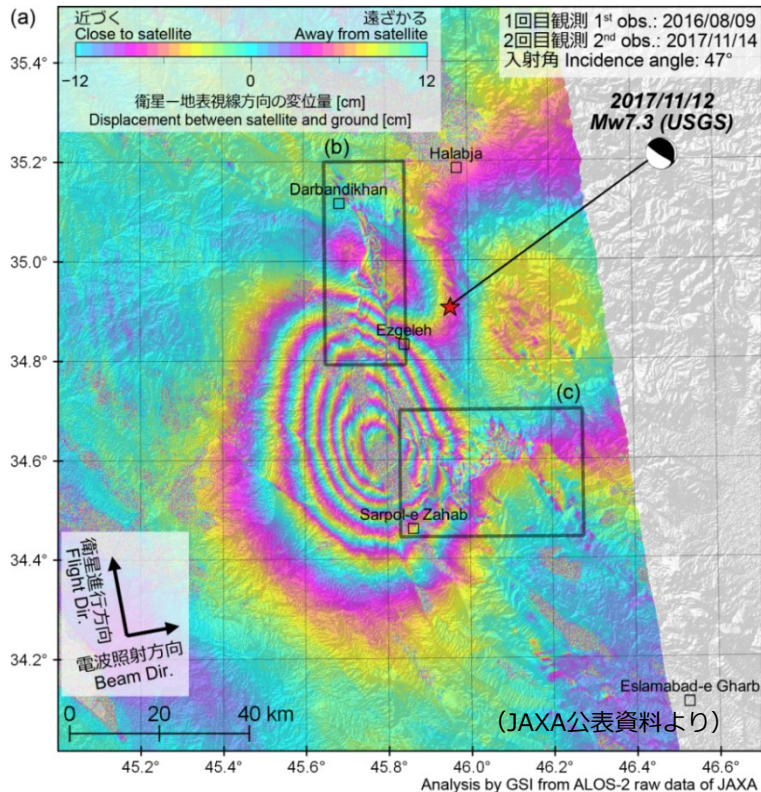
検出できるのは、衛星視線方向(電波照射方向)の変動である。
(衛星に近づく方向/衛星から遠ざかる方向)

1.3.地球観測衛星について（SAR衛星）

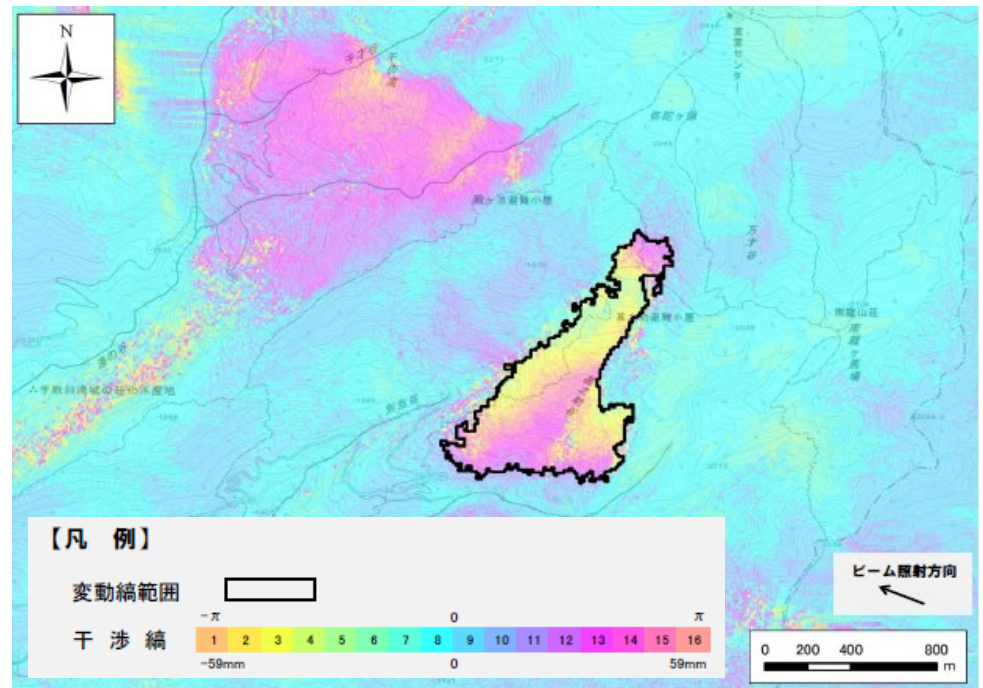
【干渉SAR解析事例】

- 干渉SAR解析結果から、地震による地表変動の範囲や変動量や、地すべり等による斜面変動の範囲や変動量が検出できる。

地震による地表変動検出事例(海外)



地すべりによる地表変動検出事例(白山)



2.1.時系列干渉SAR解析とは

【干渉SAR解析結果の課題】

- 位相の観測結果は様々な要因によって誤差が生じやすく、1枚の解析結果のみでは解釈が困難な場合が少なくない。
- 従来、干渉SAR解析結果から斜面変動を把握する場合、判読者が色の変化を目視確認することによって解釈されており、判読者の主観を伴う。

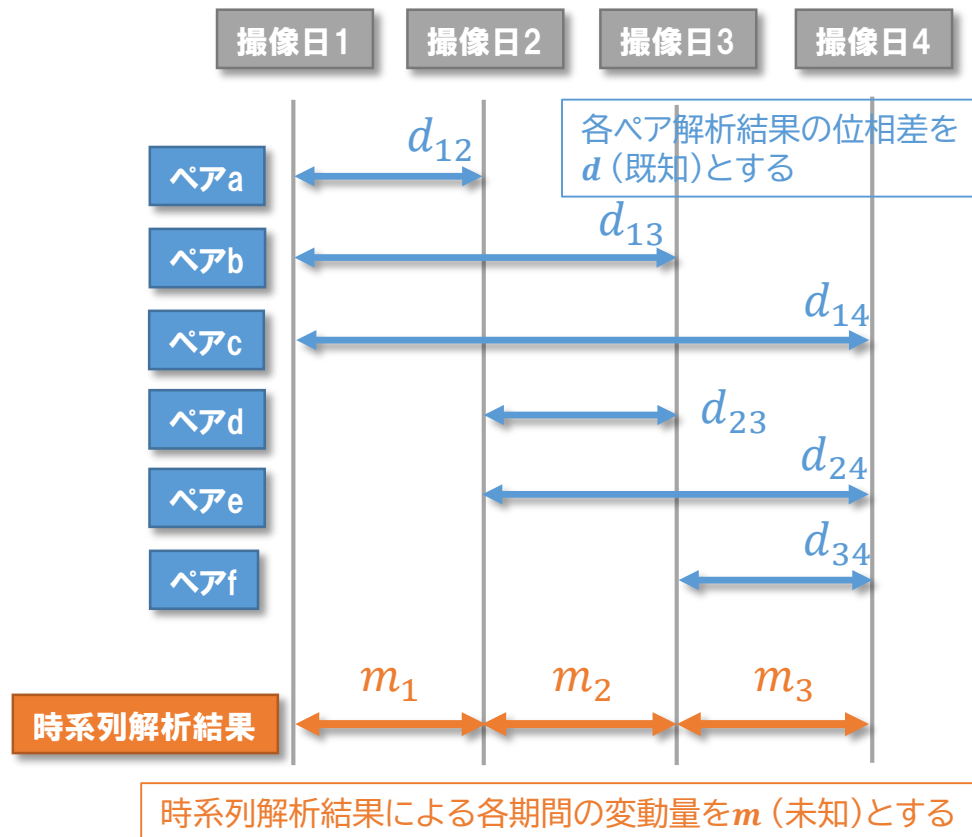
【背景】

- 近年、SARデータが豊富に蓄積されてきており、多数のデータを活用した「時系列干渉SAR解析」が可能になり、注目されている。
- 時系列干渉SAR解析によって、変動量の観測精度が従来手法よりも向上することが期待されている。

2.1.時系列干渉SAR解析とは

【SBAS法】

- 多数の干渉SAR解析結果から時系列に各期間の変動量を得る手法。
- 多数の解析結果を用いることで、誤差が低減され、変動量の時系列変化が得られる。



【各期間の変動量の計算方法】

G : 係数行列

d : 干渉SARで得られた観測位相差

m : 推定したい変動量

$$G m = d$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{12} \\ d_{13} \\ \vdots \\ d_{mn} \end{bmatrix} \begin{matrix} \longrightarrow (m_1 - d_{12})^2 \\ \longrightarrow \\ \vdots \\ \downarrow \end{matrix}$$

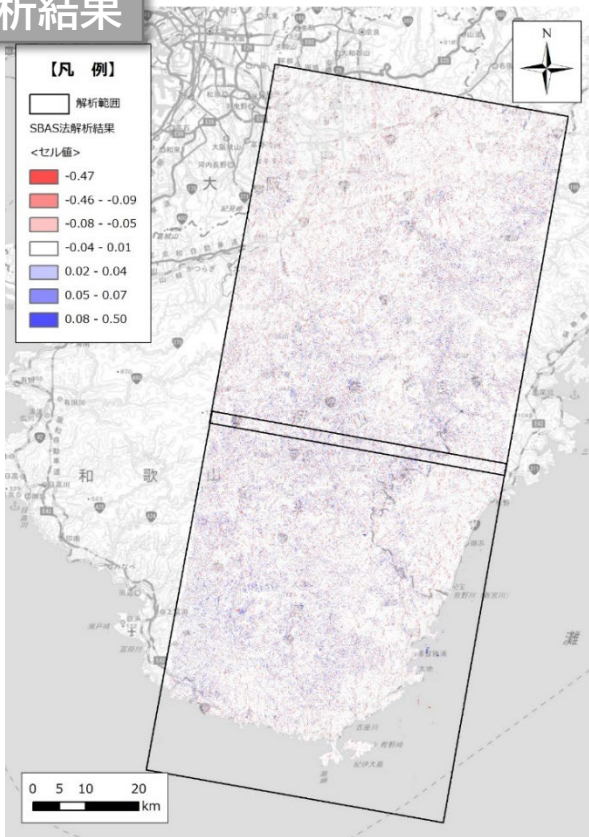
二乗誤差 $\|Gm - d\|^2$

最小二乗法によって二乗誤差が最小となる m を求める

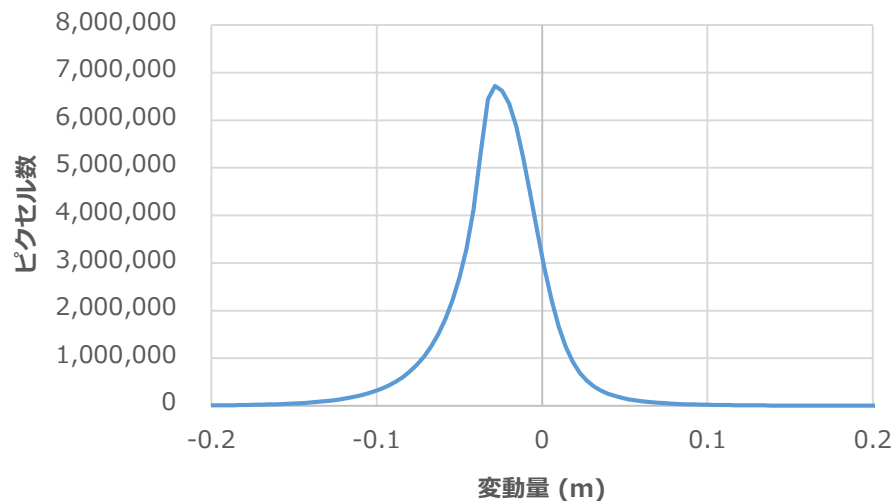
2.2.変動範囲の検出

- 紀伊半島を対象に20シーンの観測データをもとに解析を実施し、2014年から7年間の累積変動量分布図を得た。
- 全域的に正負の変動量がランダムに分布しているが、これらが全て地表変動を表しているとは考え難く、誤差であると考えるのが自然。

解析結果



変動量ごとのピクセル数



【解析結果のデータ確認結果】

- 変動量は平均 $\mu = -0.02\text{m}$ 、標準偏差 $\sigma = 0.03\text{m}$ の正規分布

2.2.変動範囲の検出

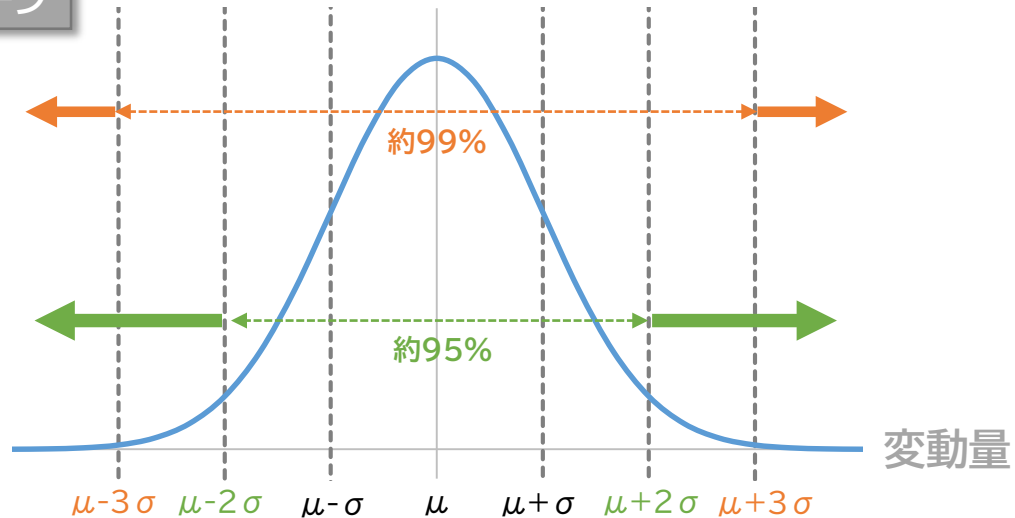
【標準偏差を用いた確率的な抽出手法の検討】

- 得られた変動量が全て誤差であると仮定すると、誤差が正規分布に従うことから、 $\mu \pm 3\sigma$ を超える変動量は誤差である確率は1%未満ということになる。
- 変動量の分布をもとに、標準偏差を閾値として変動範囲を抽出する方法を検討。

標準偏差を用いた閾値の設定イメージ

$\mu \pm 3\sigma$ 以上の範囲 =
「変動の可能性が高い範囲」

$\mu \pm 2\sigma$ 以上の範囲 =
「変動の可能性のある範囲」



【手法の長所】

- 主観を伴わない、確率的かつ客観的な評価、抽出が可能である。
- 機械的に抽出することが可能である。

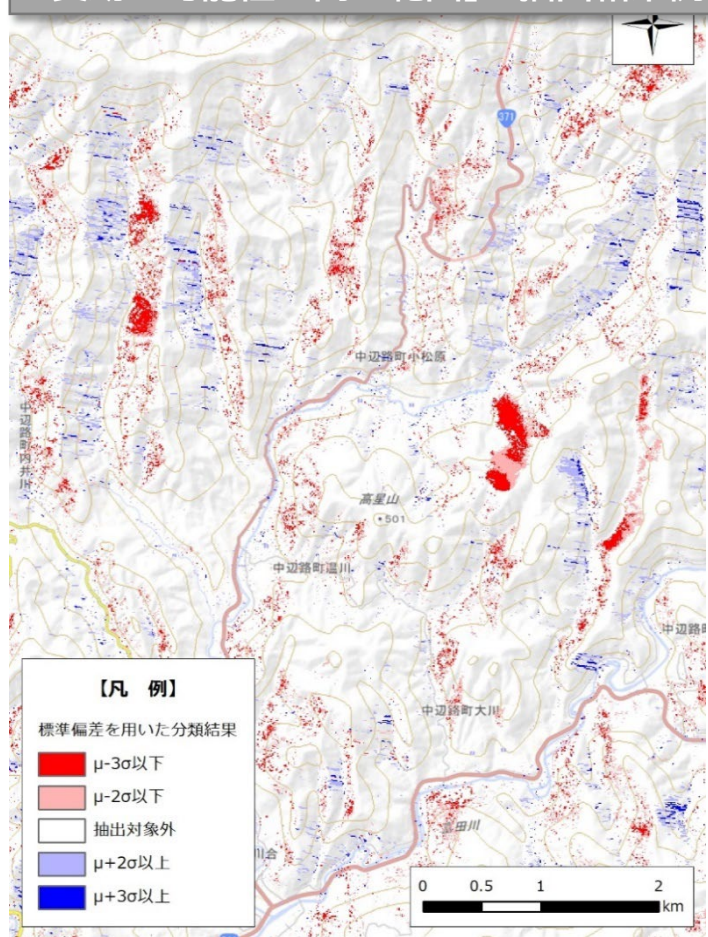
【手法の短所】

- 抽出する際の閾値(σ)は解析結果のデータ分布に依存し、解析結果ごとに変化するため一貫性に欠ける。

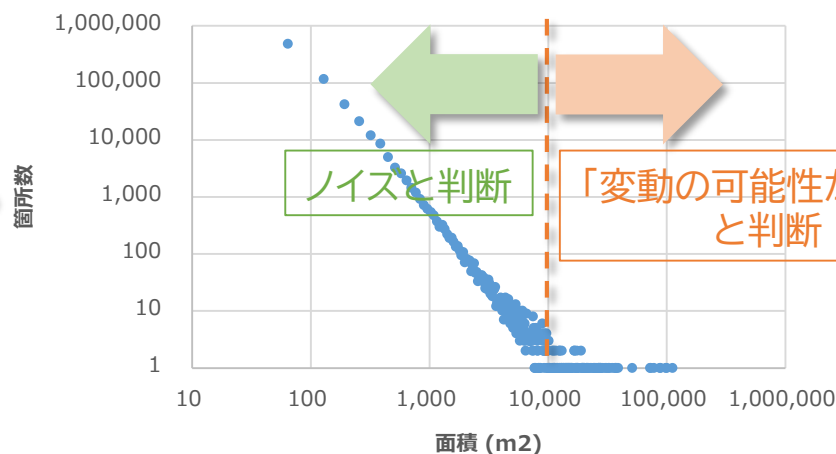
2.2.変動範囲の検出

- 「変動の可能性が高い範囲」の抽出結果は面積が小さいもの(ノイズ)を多く含んでいたため、一定以上の面積の範囲に絞ることを検討。

「変動の可能性が高い範囲」の抽出結果例



「変動の可能性が高い範囲」の面積と箇所数の関係
(標準偏差の3倍を超える変動量の範囲)

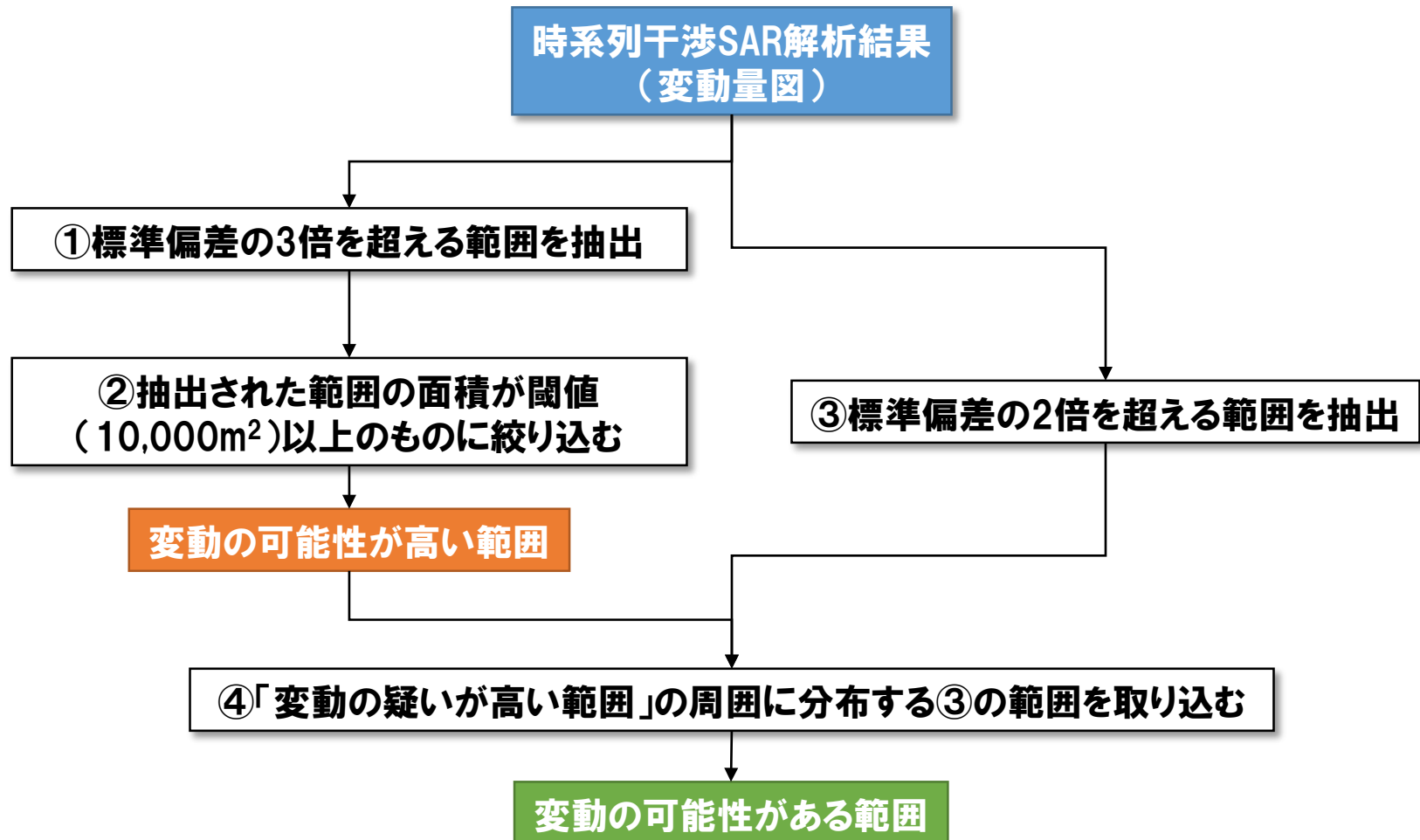


【変動の疑いが高い範囲の抽出結果】

- 標準偏差の3倍を超えるひとまとまりの範囲を「変動の疑いが高い範囲」として抽出。
- 70万箇所以上の箇所が抽出されたが、大半が面積10,000m²未満の小さいもの。
- 干渉SAR解析で検出可能な最小面積は約10,000m²とされていることから、これを閾値とした。

2.2.変動範囲の検出

【検討結果から得られた抽出フロー】



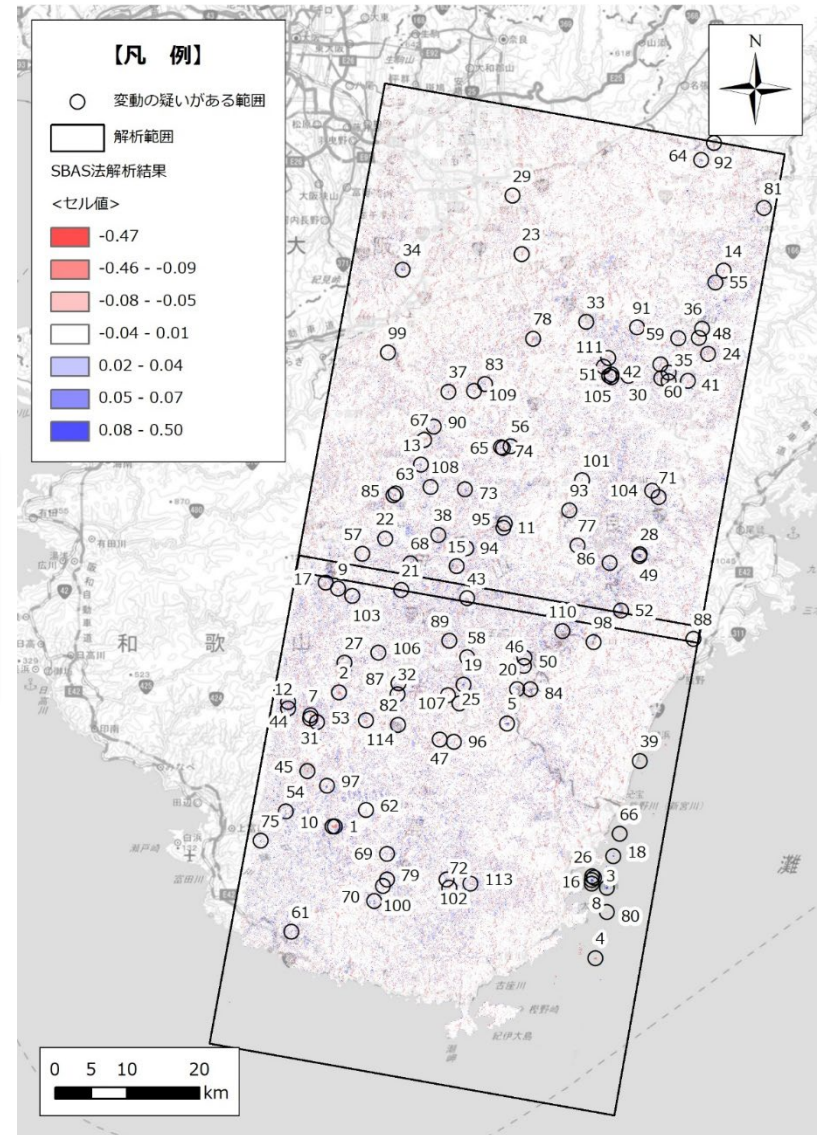
2.2.変動範囲の検出

【抽出結果(全体)】

- 検討した手法で抽出した結果、114箇所が抽出された。
- 海上の範囲で抽出されたものもあるなど、明らかに斜面変動では無い範囲もいくつか存在する。

【明らかに斜面変動では無い場合】

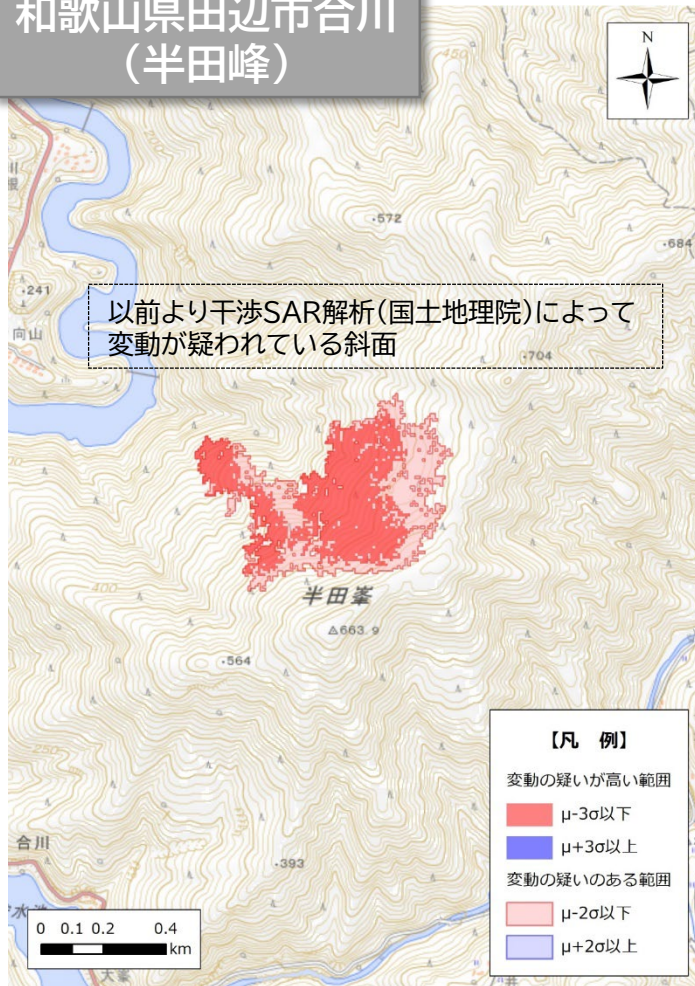
- 検討した手法では、何らかの原因で継続的に大きい位相差が生じる範囲を抽出してしまう。
- これらが生じる原因のさらなる整理と、これらを判別する手法を検討する必要がある。



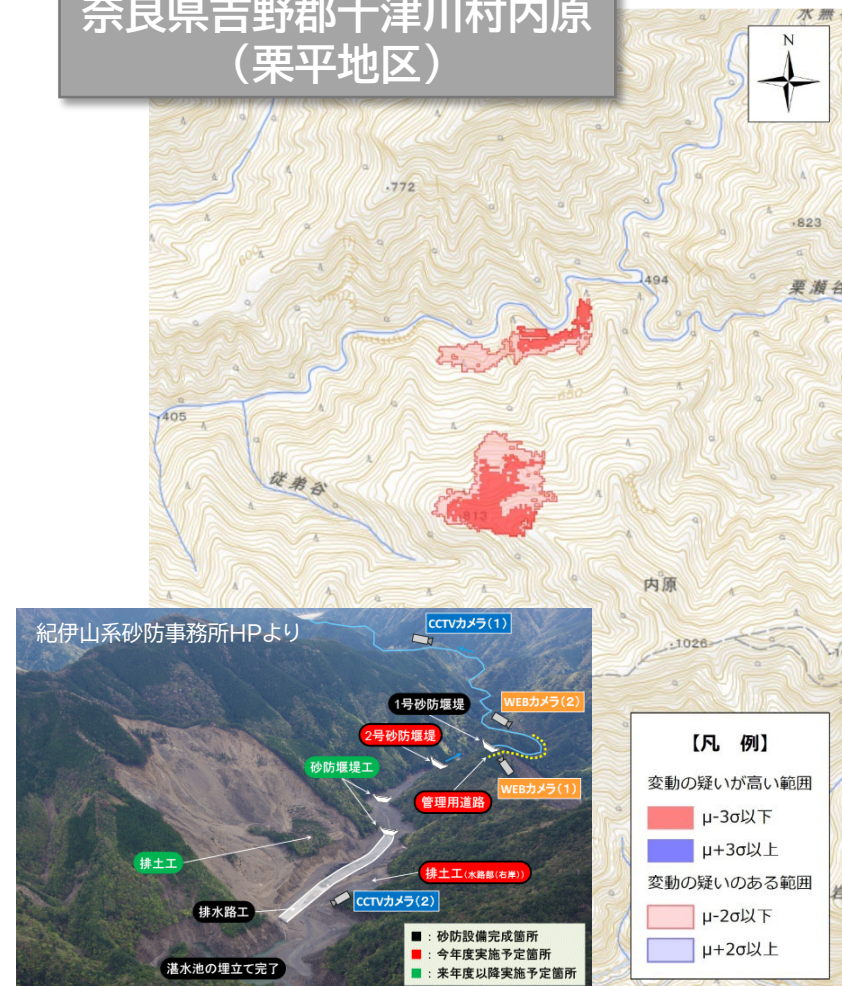
2.3.変動範囲の検出結果

【抽出結果例】

和歌山県田辺市合川
(半田峰)



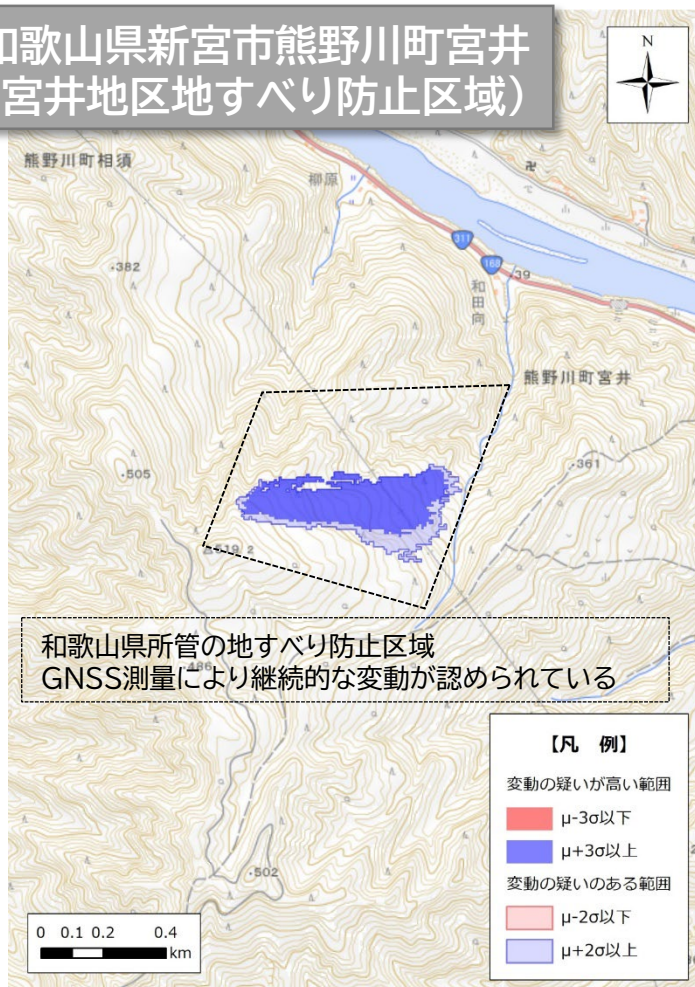
奈良県吉野郡十津川村内原
(栗平地区)



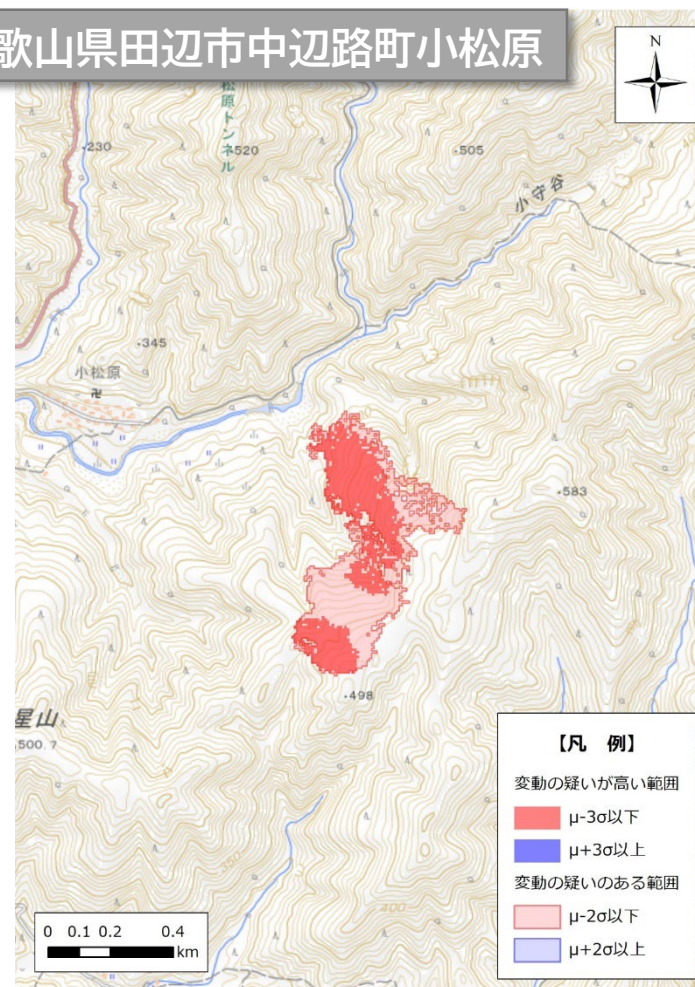
2.3.変動範囲の検出結果

【抽出結果例】

和歌山県新宮市熊野川町宮井
(宮井地区地すべり防止区域)



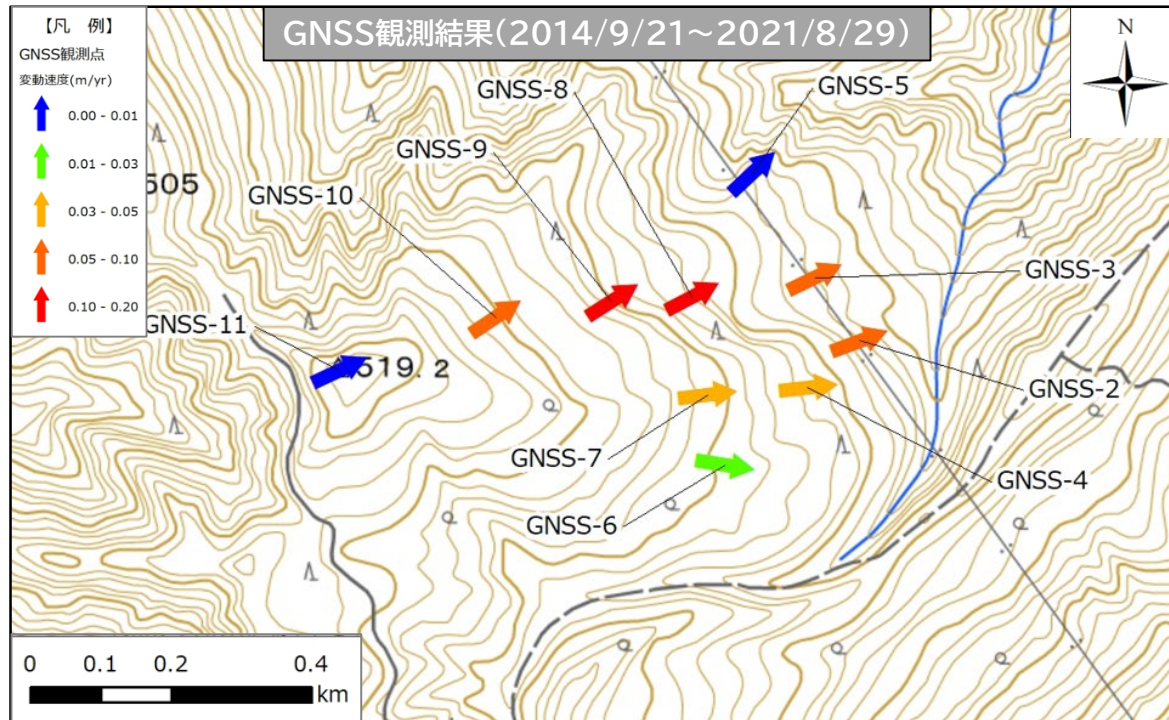
和歌山県田辺市中辺路町小松原



2.4.変動量の検出精度の評価

【対象地区:宮井地区地すべり防止区域について】

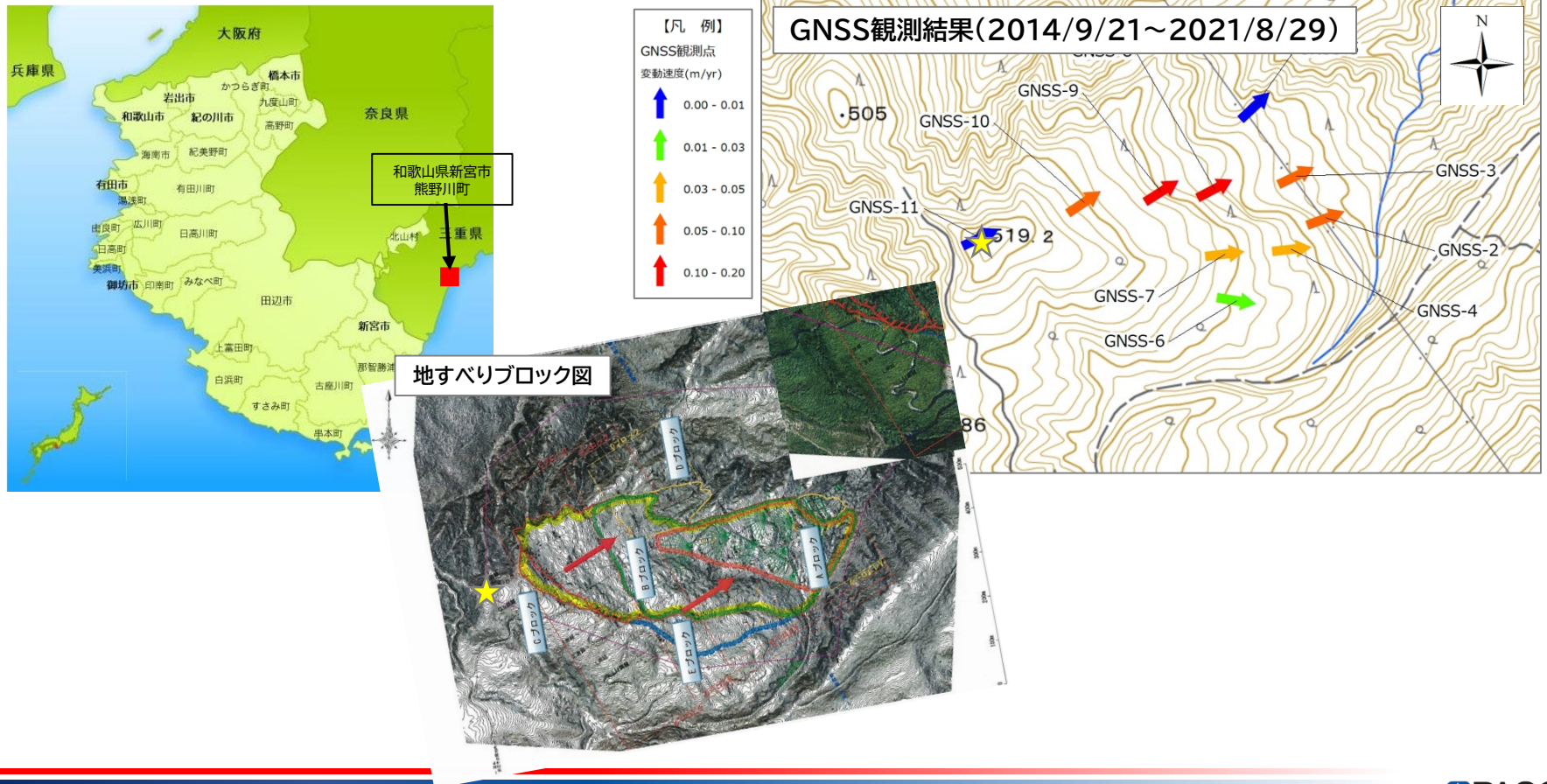
- 2003年8月台風第10号豪雨による末端部崩壊後、地すべり防止区域に指定された。
- GNSS測量による変動量観測が2008年から現在まで毎年1回の頻度で継続して行われている。
- 過去から継続的な地すべりがあったことが認められている。



2.4.変動量の検出精度の評価

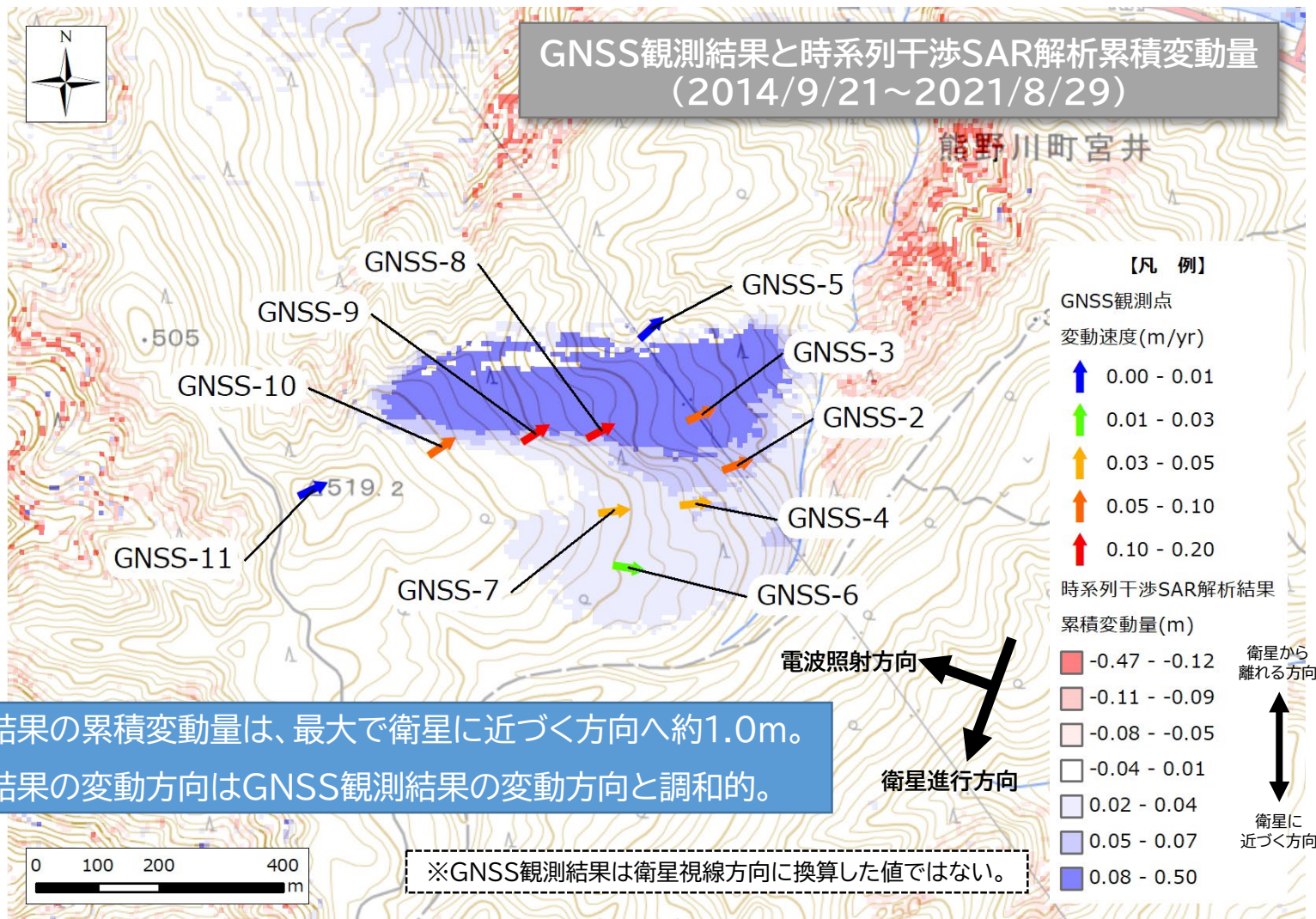
【GNSS観測結果との比較による変動量検出精度評価(宮井地区)】

- 宮井地区地すべり防止区域を対象として、変動量の検出精度を評価した。
- GNSS測量による変動量観測が2008年から現在まで年1回の頻度で継続して行われている。



2.4.変動量の検出精度の評価

【時系列干渉SAR解析結果とGNSS観測結果の比較】



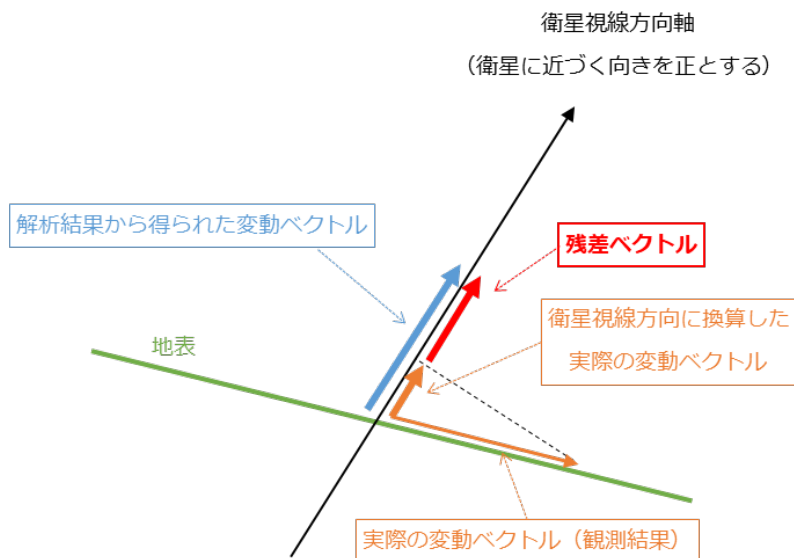
- 解析結果の累積変動量は、最大で衛星に近づく方向へ約1.0m。
- 解析結果の変動方向はGNSS観測結果の変動方向と調和的。

2.4.変動量の検出精度の評価

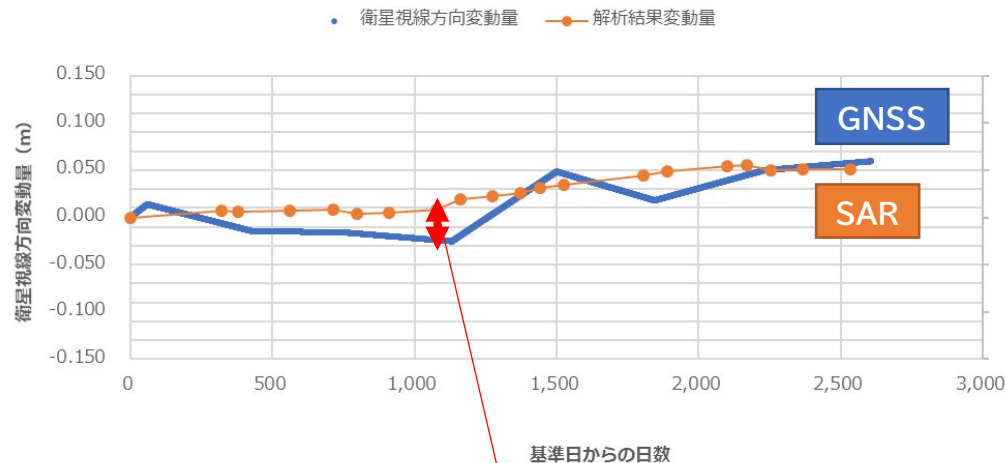
【変動量検出精度の評価方法】

- 残差ベクトルの大きさ(=時系列干渉SAR解析結果ベクトル-GNSS観測結果ベクトル)を指標として評価。
- そのままでは比較ができないため、GNSS観測結果の変動ベクトルを衛星視線方向の換算したうえで、残差を算出する。

衛星視線方向へのベクトル変換のイメージ



残差計算のイメージ



解析結果とGNSS観測結果の残差を算出

2.4.変動量の検出精度の評価

【変動ベクトルの衛星視線方向への換算方法】

衛星視線方向の方位角(北を0として時計回りに計測した角度)を θ_a 、入射角(鉛直上向き0として計測した角度)を θ_i とすると、衛星視線方向の単位ベクトル e は式(1)で表される。

$$e = (\sin \theta_i \sin \theta_a, \sin \theta_i \cos \theta_a, \cos \theta_i) \quad \text{式(1)}$$

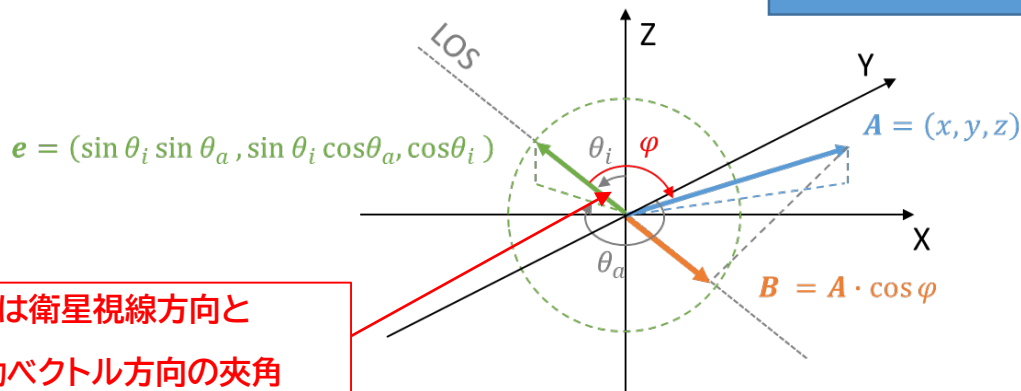
変動ベクトルを $A = (x, y, z)$ とし、 e と A の夾角を φ とすると、 $\cos \varphi$ は式(2)で求められる。

$$\cos \varphi = \frac{e \cdot A}{\sqrt{|e| \cdot |A|}} = \frac{x \cdot \sin \theta_i \sin \theta_a + y \cdot \sin \theta_i \cos \theta_a + z \cdot \cos \theta_i}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad \text{式(2)}$$

変動ベクトルを衛星視線方向に分解したベクトルを B とすると、 B は式(3)で求められる。

$$|B| = |A| \cdot \cos \varphi \quad \text{式(3)}$$

衛星視線方向変換後の変動ベクトル
= 変動ベクトル × $\cos \varphi$

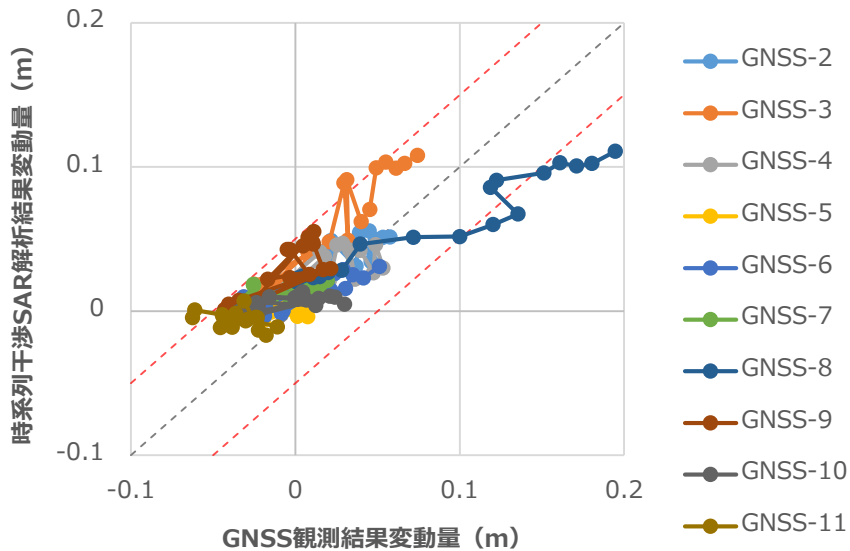


2.4.変動量の検出精度の評価

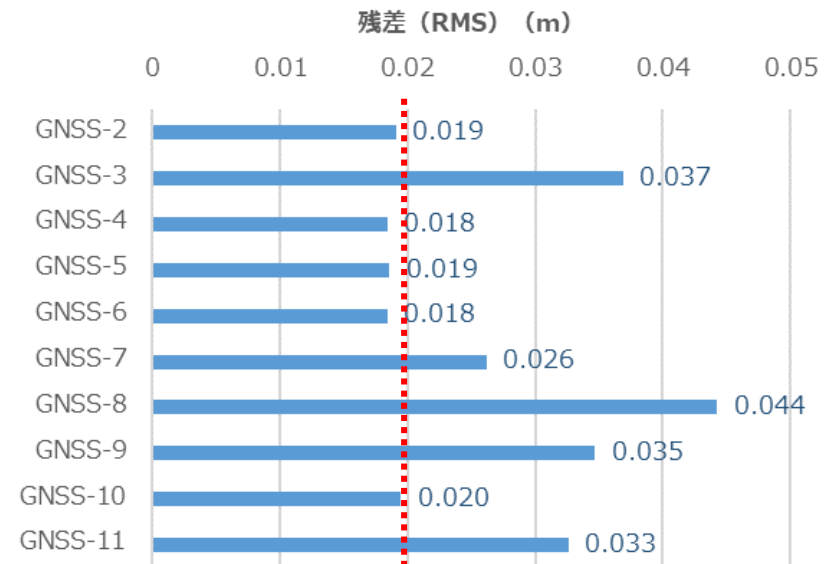
【解析結果およびGNSS観測結果の残差の評価結果】

- ほとんどの観測点で残差が±5cmに収まっている。
- 半数の観測点では、残差(RMS)が2cm以下に収まっている。
- 残差(RMS)は最大でも4.4cmである(GNSS-8)。

GNSS観測結果変動量と解析結果変動量の関係

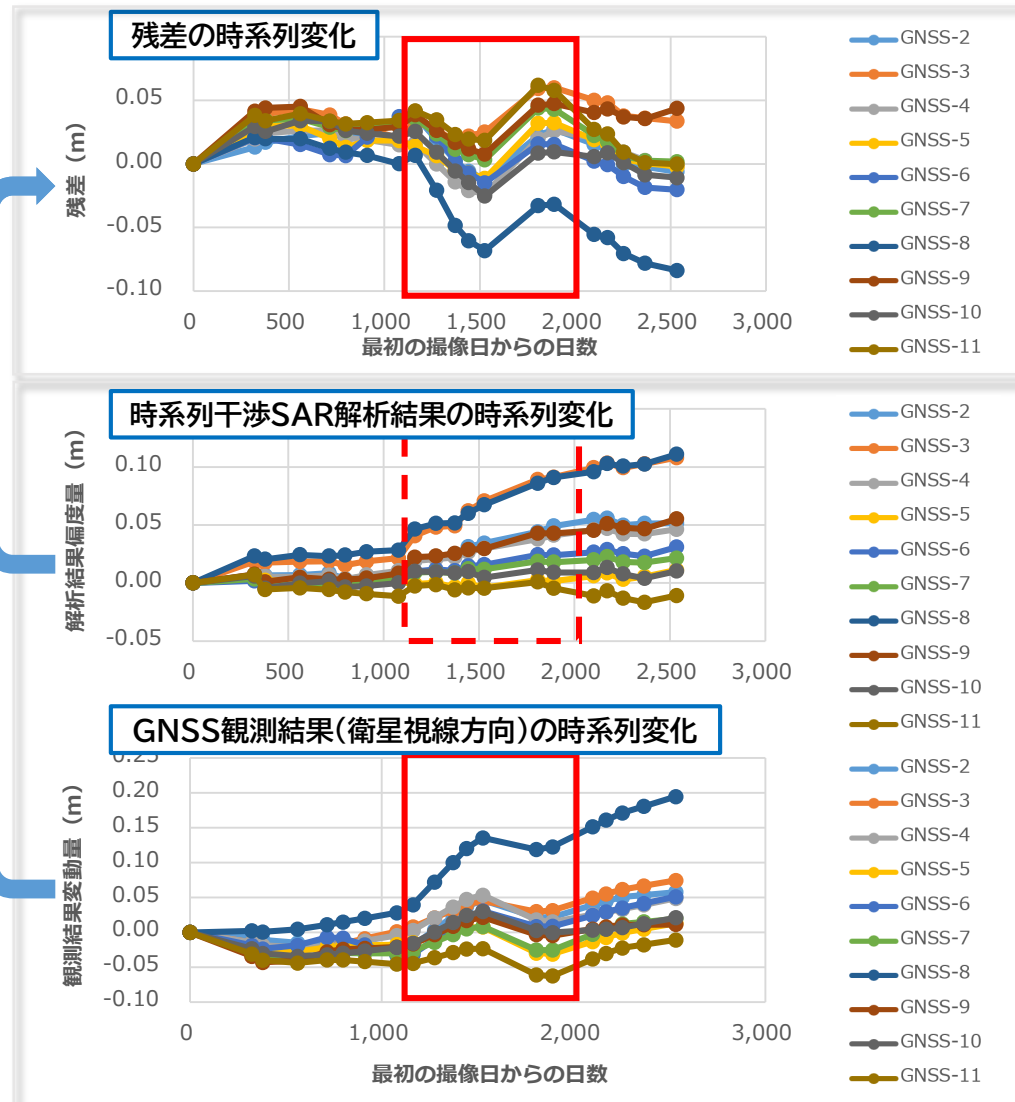


観測点ごとの残差(RMS)の計算結果



2.4.変動量の検出精度の評価

【相対的に残差が大きい観測点の原因分析】



- 相対的に残差(RMS)が大きいGNSS-3, 8, 9に着目し、その原因について分析した。
- 全体的に残差が正負の両方向に変化している。
- 時系列干渉SAR解析結果とGNSS観測結果の時系列変化をそれぞれ確認した結果、GNSS観測結果において衛星に近づく/遠ざかる方向が変化していることがわかった。



• GNSS観測結果の鉛直方向の誤差が大きかった可能性。

2.5.まとめ

【まとめ】

- 変動量の分布をもとに変動範囲を検出する方法を検討し、主観を伴わない客観的な抽出が可能であり、いくつかの既知の変動範囲が適切に検出されていることを確認した。
- 変動量の検出精度を評価した結果、本検討の対象地区では、変動量の時系列変化を残差(RMS)2cm程度の精度で検出できることが分かった。

【今後の課題】

- 検証が不十分であるため、今後、現地での変動量観測や調査結果をもとにした検証事例を増やす必要がある。
- 明らかに斜面変動ではない場合の原因の分析と判別するための手法の検討が必要である。