ALOS-2 時系列干渉 SAR の 2.5 次元解析を用いた山地斜面の変動候補箇所の抽出

EXTRACTION OF POTENTIALLY DEFORMING AREAS ON MOUNTAIN SLOPES USING 2.5-DIMENSIONAL ANALYSIS OF ALOS-2 INSAR TIME SERIES ANALYSIS

服巻 智典[1]・三谷 泰浩[2]・本田 博之[2]・彌富 涼子[3]
Tomonori HARAMAKI, Yasuhiro MITANI, Hiroyuki HONDA and Ryoko IYADOMI

[1]九州大学大学院 工学府 土木工学専攻（〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地）
E-mail: haramaki.tomonori.857@s.kyushu-u.ac.jp
[2]九州大学大学院 工学研究院 附属アジア防災研究センター（〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地）
[3]九州大学大学院 工学府 土木工学専攻（〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地）

***Key Words**: interferometric SAR time series analysis, 2.5-dimensional analysis, slope deformation*

1. はじめに

近年，豪雨や地震に伴う斜面崩壊，地すべり，土石流などの土砂災害が全国各地で頻発しており，山地流域における斜面防災の重要性が高まっている．これらの斜面災害は豪雨等に起因して突発的に発生することが多いが，崩壊発生前からその地域特有の地質的・地形的素因による変状や地すべり性の変動などの緩慢な地表変動が進行している場合がある．そのため，災害発生前の地表変動を広域的かつ継続的に把握することは，危険箇所の特定や監視対象箇所の優先順位付けを行う上で重要である．

しかし，山地斜面における地表変動を現地調査のみで広域的かつ継続的に把握することは難しい．これに対し，衛星 SAR（Synthetic Aperture Radar）を用いた時系列干渉 SAR 解析は，広域を対象として面的かつ継続的に微小な地表変動を観測可能な手法として注目されている．特に，ALOS-2/PALSAR-2 に代表される L-band SAR[1]は，植生の影響を受けやすい山地・森林域においても比較的高い干渉性を維持できることから，山地斜面における変動把握への適用が期待されている．これまでも，干渉 SAR 解析や時系列干渉 SAR 解析を用いて，山地を含む広域における崩壊危険斜面を抽出した研究が報告されている[2),3)]．

SAR により観測される変位は衛星視線方向（Line Of Sight, LOS）成分であるため，LOS 変位のみでは，斜面の実際の変動方向や変動様式を十分に把握することが難しい．そこで，異なる 2 方向から取得された時系列干渉 SAR 解析の結果を組み合わせた 2.5 次元解析を用いて，山地斜面における鉛直方向および，主として東西方向を含む水平成分の年平均変動速度を算出する．本研究では，斜面崩壊等の大きな変形ではなく，斜面の不安定化を示す可能性のある比較的緩慢で継続的な地表面の変位を，対象とする地表変動とする．このような地表変動を示す領域を抽出し，SAR の観測特性や地表条件を考慮して地表変動箇所を精査した後，その分布と谷沿い斜面，谷部，尾根部などの地形条件との関係を整理する．これにより，土砂災害の危険性が高い箇所を特定する手法としての適用可能性を検討する．

2. 対象地域および使用データ

(1) 対象地域と解析範囲

本研究の対象地域は，大分県九重町周辺であり，約 11 km×12 km の範囲を解析対象とする（**図-1**，**図-2**）．対象地域は九州山地西部の山地・火山地域に位置し，急峻な斜面および発達した谷地形を有している．これらの地形条件から，降雨時には斜面崩壊や侵食が生じやすく，それらに関連して斜面の不安定化や緩慢な地表変動が生じる可能性がある地域である．また，山地部は森林に覆われており，河川沿いには国道 210 号や大分自動車道が位置している．

対象地域周辺では，令和２年７月豪雨をはじめとする豪雨時に表層崩壊などの土砂災害が発生しており，土砂災害の危険性が高い地域である．また，対象地域の地質は安山岩を主体とし，一部に凝灰岩や火山砕屑物が分布している．これらの火山性地質は風化を受けやすく，侵食や斜面変動の発生に影響を及ぼしている可能性がある．

(2) 使用したデータ

時系列干渉 SAR 解析を実施するため，宇宙航空研究開発機構（JAXA）が運用する ALOS-2/PALSAR-2 データを使用する．用いた SAR データは，2017 年３月から 2024 年９月までに取得された北行右向き（Ascending Right-Looking：AR）19 シーンおよび南行右向き（Descending Right-Looking： DR）38 シーンである（**表-1**）．ALOS-2 搭載の L-band SAR は，樹木の枝葉を透過しやすく，変化の少ない幹や地表面などで反射することから，山地・森林域でも干渉を得ることができる [1]．解析には Gamma Remote Sensing 社の GAMMA SAR を用いる．

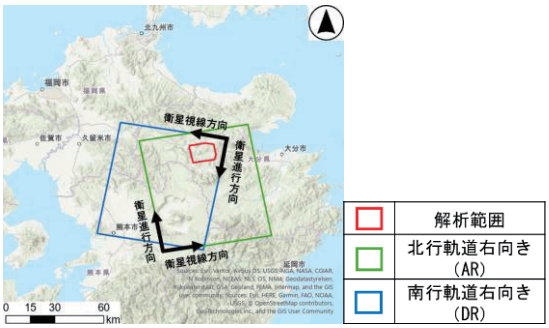


図-1　衛星観測範囲と解析範囲

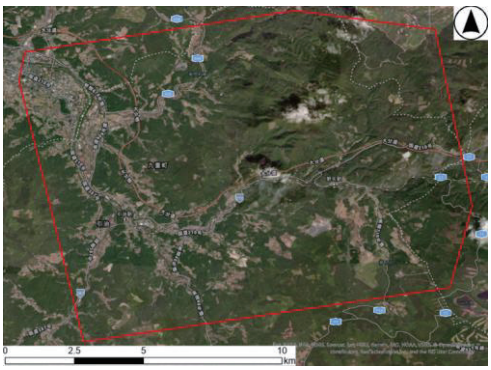


図-2　解析範囲

表-1　解析に用いる衛星 SAR データの概要

衛星	センサ	解像度	解析期間	軌道観測方向	データ枚数
ALOS-2	Lバンド合成開口レーダPALSAR-2	3 m	2017/6/1～2024/9/12	北行右向き（AR）	19枚
			2017/3/6～2024/2/26	南行右向き（DR）	38枚

地形補正および地形分析には，国土地理院が提供する基盤地図情報 5 m メッシュ DEM を使用する．また，この DEM を用いて変動域の地形的特徴を把握するため，陰影起伏図，傾斜角図，斜面方位図，谷線・尾根線を作成する．さらに，地質条件の把握には国土数値情報の 20 万分の 1 地質図を使用し，土地利用・土地被覆条件の把握には JAXA が提供する高解像度土地利用土地被覆図（以下，土地被覆図）を使用する．加えて，既往の地すべり地形との対応を確認するため，過去の空中写真判読により抽出された地すべり地形分布図 [4] を用いる．地形解析には，Arc GIS Pro を用いる．

3. 解析手法

(1) 時系列干渉 SAR 解析と 2.5 次元解析

ALOS-2/PALSAR-2 データを用いて時系列干渉 SAR 解析の一手法である SBAS（Small Baseline Subset）解析を実施し，対象地域における LOS 方向の時系列変位および年平均変動速度を算出する．SBAS 解析では，各観測時期の SAR データから干渉ペアを作成し，干渉性の低いペアを除外したうえで，干渉処理および時系列解析により，各解析点の LOS 方向変位を推定する．年平均変動速度は，解析期間内の時系列変位に対して線形近似を行うことで算出する．なお，ALOS-2/PALSAR-2 の SAR データが最小で 3 m メッシュであることを踏まえ，スペックルノイズの影響を低減しつつ，山地斜面における局所的な変動を可能な限り詳細に把握するため，6 m メッシュで解析を実施する．

SAR により観測される変位は LOS 方向成分であるため，単一軌道の解析結果のみでは，鉛直方向と水平方向の変動を十分に区別することが難しい．そのため，AR 方向および DR 方向の LOS 変位を組み合わせる 2.5 次元解析を実施し，地表変動の鉛直成分および東西方向を主成分とする水平成分を推定する．なお，山地斜面では植生被覆や大気遅延の影響により解析誤差が生じる可能性があるため，本研究では空間的に連続して分布し，かつ時系列的に一方

向へ累積傾向を示す変動域に着目して評価を行う．

(2) 変動域の抽出

鉛直方向に沈下傾向を示す領域に着目し，「斜面変動候補箇所」を抽出する．抽出手順のフローを**図-3**に示す．まず，前節で得られた 2.5 次元解析結果に対して，SAR の観測特性によりレイオーバーやフォアショートニングが生じる不可視領域を除外する．AR・DR 両方向において幾何学的に不可視となる領域は，2.5 次元解析に適さないため解析対象外とする．さらに，土地被覆図を用いて市街地や水域などの山地斜面ではない領域を除外し，SAR で観測可能な山地領域を抽出する．その後，鉛直方向に沈下傾向を示す解析点を抽出する．本研究では，年平均変動速度が 10 mm/年以上の沈下傾向を示す点を対象とする．さらに，点密度解析を実施することで，変動点が空間的に集中する領域を抽出し，ポリゴン化を行う．ただし，本手法により作成したポリゴンは，実際の変動範囲の詳細な境界を示すものではなく，鉛直沈下傾向が集中する領域を一次的に抽出したものである．そのため本研究では，点密度解析により得られたポリゴンを，鉛直沈下傾向が集中する「変動領域」として扱う．次に，Google Earth Pro 画像を用いて解析期間中の地表状況を目視により確認し，伐採や造成等の人工改変が確認された箇所を除外する．人工改変地を除外した後の領域を，本研究では「変動候補箇所」とする．

さらに，抽出した変動候補箇所について，水平方向変位との対応を確認する．本研究で推定した水平方向変位は，主として東西方向成分を表している．そのため，南北向き斜面では水平変位を検出しにくく，東西向き斜面では検出されやすいという特徴を有する．そこで，斜面方位を北を 0°として時計回りに増加する方位角で定義し，東向き斜面を 45°～135°，西向き斜面を 225°～315°として，東西向き斜面上に位置する変動候補箇所を抽出する．その上で，各変動候補箇所内の水平変位を平均化し，年平均 5 mm/年以上の水平変位が確認される箇所を抽出する．これにより，鉛直沈下傾向を示す変動候補箇所のうち，東西方向の水平変位も確認される箇所を整理する．

(3) 地形条件との重ね合わせ

抽出した変動候補箇所について，陰影起伏図，傾斜角図，斜面方位図，谷線・尾根線等の地形情報と重ね合わせ，地形条件との位置関係を整理する．また，地すべり地形分布図との重ね合わせを行い，既存の地すべり地形との対応関係を確認する．これにより，抽出された変動が既存地すべり地形の再活動として解釈できるか，あるいは地すべり地形として明瞭に判読されていない変動であるかを検討する．さらに，各変動候補箇所における時系列変位グラフを確認し，変位の累積傾向や時間的変化の特徴を整理する．一方で，明瞭な地形的対応を示さない変動域については，解析誤差や地表条件の変化など，別要因による影響の可能性も考慮する．

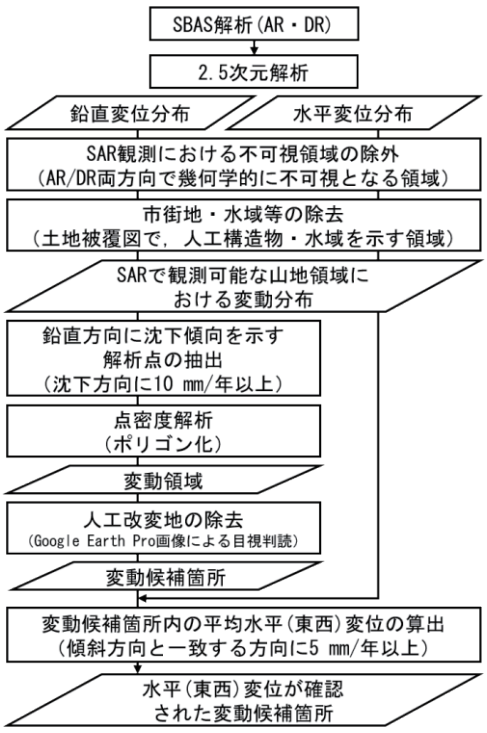


図-3 斜面変動候補箇所の抽出フロー

4. 結果

(1) 平均変動速度分布と変動域抽出結果

2.5 次元解析による鉛直方向の年平均変動速度分布を**図-4** に示す．鉛直方向の年平均変動速度は，-22 mm/年～14 mm/年の範囲であり，対象地域内の多くでは顕著な変動は認められなかった．一方で，一部の山地斜面で鉛直方向の沈下傾向を示す領域が確認された．特に，解析範囲南東部に位置する野稲岳周辺では広範囲に沈下傾向が認められたが，Google Earth Pro 画像により伐採に伴う人工改変地と判読されたため，変動候補箇所から除外した(**図-5**)．また，**図-4** 中の西側に位置する地すべり地形と重なる隆起傾向の範囲についても，周辺で造成工事が確認された．同様に，解析期間中の人工改変の有無を目視で確認したうえで，71 箇所の変動候補箇所を抽出した（**図-6**）．これらの変動候補箇所は，谷沿い斜面や谷部，尾根部など様々な地形条件下に分布していた．

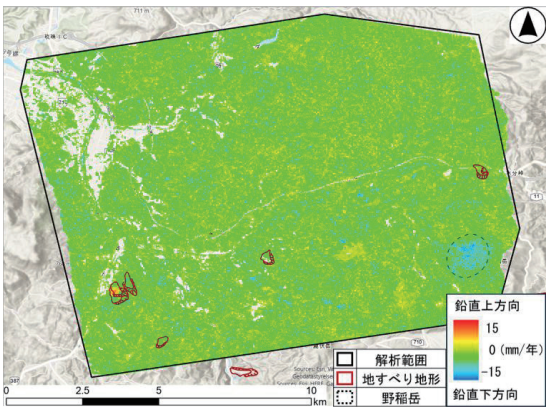


図-4　2.5 次元解析による 2017～2024 年における鉛直方向年平均変動速度と地すべり地形分布

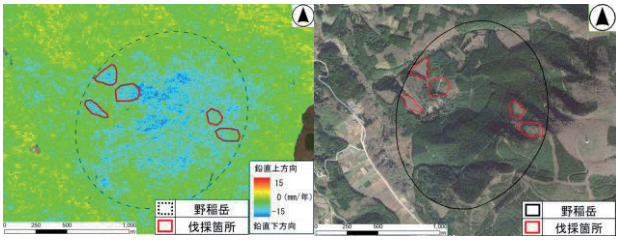


図-5　野稲岳周辺の鉛直方向変位と衛星画像

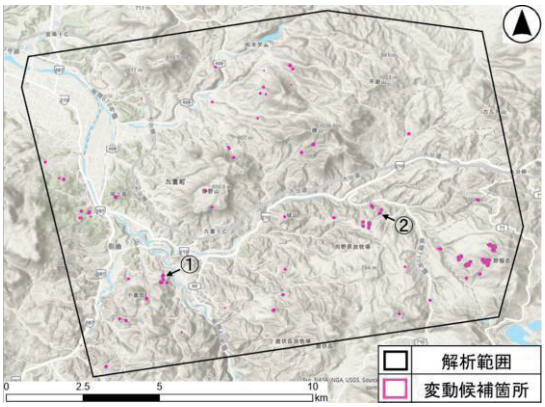


図-6　抽出された変動候補箇所

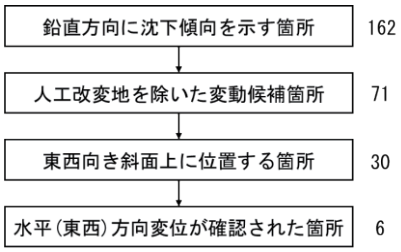


図-7　変動候補箇所抽出における絞り込み結果

さらに，水平方向変位との対応を確認するため，変動候補箇所のうち東西向き斜面上に位置する箇所を対象に比較を行った．その結果，東西向き斜面 30 箇所のうち 6 箇所において，傾斜方向と一致する方向の水平方向変位が確認された（図-7）．

抽出された変動候補箇所では，沈下方向に最大 15 mm/年，水平（東西）方向に最大 21 mm/年の変動が確認され，面積はおおむね 100 m^2～2,500 m^2 程度であった．ただし，本研究で作成したポリゴンは変動候補箇所の位置を一次的に抽出するためのものであり，実際の変動範囲や面積を正確に示すものではない．また，抽出された変動候補箇所と地すべり地形分布図を重ね合わせた結果，本研究で対象とした変動候補箇所では，明瞭な地すべり地形との対応は確認されなかった．

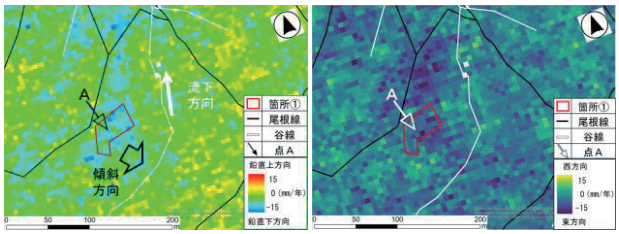
(2) 変動候補箇所の時系列変位

抽出した変動候補箇所の変動検出の整合性を検証するため，代表地点を対象として時系列変位を確認した．その結果，一部の地点では，解析期間を通じて一方向へ累積する変位傾向が認められた．以下に，東西向き斜面上に位置し，鉛直方向および水平方向の変位がともに確認された変動候補箇所の例を示す．

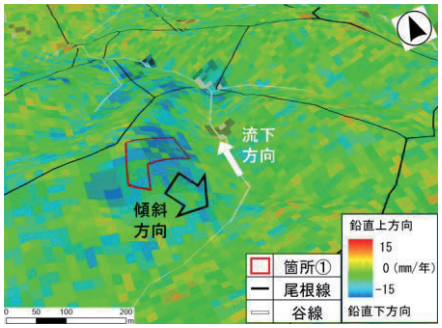
図-6 に示す変動候補箇所①は，南東向き，傾斜角約 22° の谷沿い斜面に位置する箇所である．図-8(a)，(b)に鉛直方向および水平方向の年平均変動速度分布，図-8(c)に 3D 図を示す．赤枠で囲んだ範囲を中心に鉛直下方向への変位が確認された．また，水平方向には東向きの変位が認められ，斜面の傾斜方向と概ね一致していた．赤枠で囲んだ変動候補箇所内部で平均的な時系列変位を示していた点 A の時系列変位からも，解析期間を通じて継続的な変位傾向が確認される（図-8(d)，(e)）．一般的に，地すべり性変動や侵食による斜面変形では，斜面の傾斜下方向への変位が卓越すると考えられる．本地点では，水平方向変位が斜面方位と整合していることから，斜面下方への変位を反映している可能性がある．一方で，地すべり地形分布図においては，明瞭な既存地すべり地形との対応は確認されなかった．

図-6 に示す変動候補箇所②周辺の鉛直方向および水平方向の年平均変動速度分布を図-9(a)，(b)に，3D 図を図-9(c)に示す．この箇所では，東向きの谷沿い斜面から谷部にかけて赤枠で囲んだ範囲を中心に鉛直下方向の変位が観測された．また，範囲の周辺で広く東方向の変位が検出された．変動候補箇所①と同様に，代表地点 B の時系列変位からも，解析期間を通じて継続的な変位傾向が確認される（図-9(d)，(e)）．一方で，東方向の変位を示す範囲が広く，谷を挟んだ西向き斜面でも検出されるため，解析結果の解釈には注意が必要である．

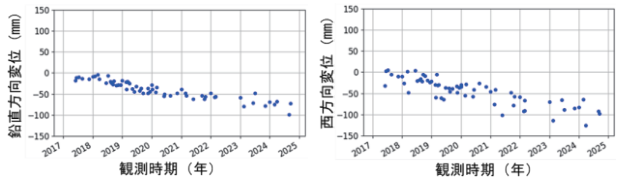
以上より，鉛直および水平方向の時系列変位から，変動候補箇所では一方向への累積する変位がみられるため，単発的なノイズではなく，継続的な斜面変



(a)　鉛直方向　　(b)　水平（東西）方向

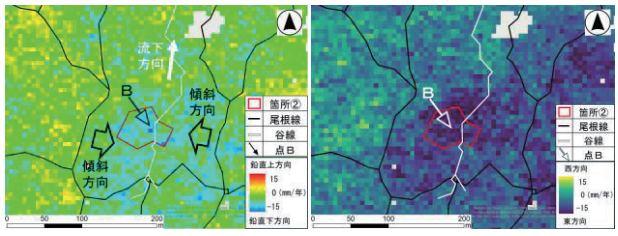


(c)　変動候補箇所の３D 図

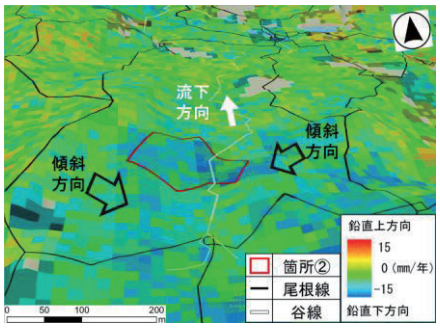


(d)　鉛直方向時系列変位　　(e)　水平方向時系列変位

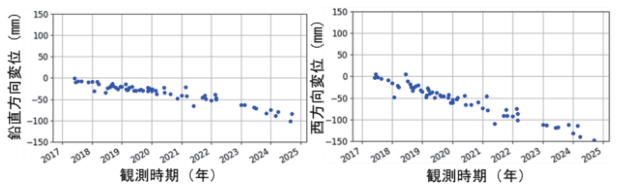
図-8　東向き斜面上の変動候補箇所①



(a)　鉛直方向　　(b)　水平（東西）方向



(c)　変動候補箇所の３D 図



(d)　鉛直方向時系列変位　　(e)　水平方向時系列変位

図-9　東向き斜面上の変動候補箇所②

動を反映していることが示唆された．

5. 考察

(1) 鉛直沈下と水平移動の評価

従来の時系列干渉 SAR 解析では，LOS 変位として地表変動を把握するため，観測された変位が鉛直方向の沈下によるものか，あるいは傾斜方向への移動によるものかを区別することが難しい場合がある．特に山地斜面では，局所的な沈下や解析誤差，大気遅延などの影響を含む可能性がある．

これに対し，本研究で実施した 2.5 次元解析では，AR および DR の LOS 変位を組み合わせることで，鉛直成分と主として東西方向を含む水平成分を分離して評価することが可能となった．

また，時系列変位において一方向へ累積する傾向が確認されたことから，抽出された変動候補箇所の一部では，単発的なノイズではなく，継続的な地表変動を反映している可能性が示唆された．このことは，山地斜面における変動箇所の抽出において，2.5 次元解析および時系列変位確認が有効である可能性を示している．

一方で，本研究で推定される水平方向変位は主として東西方向成分であり，SAR の観測方向の特性上，南北方向の変位成分を十分に評価することは難しい．そのため，水平方向変位が斜面の最大傾斜方向と一致しない場合であっても，直ちに変動が存在しない，あるいはノイズであると判断することはできない．特に山地斜面では，斜面方位，植生条件，大気遅延，地表面状態の変化などが変位推定に影響する可能性があるため，水平方向の変位については，地形条件および時系列変位と合わせて解釈する必要がある．

(2) 変動と地形の関係

抽出された変動候補箇所の多くは，谷沿い斜面や谷部に分布していた．これらの箇所では，地すべり性変動や集水に伴う侵食による地表変化が発生している可能性が考えられる．また，谷部に河川が流れている箇所では，側方侵食に伴う斜面脚部の支持低下により，斜面変動が生じている可能性がある．

特に本研究で確認された代表的な変動候補箇所では，水平方向変位は斜面下方向と概ね一致しており，斜面下方への変位を反映している可能性がある．また，時系列変位において継続的な累積傾向が確認されたことから，地すべり性変動や重力性斜面変形を含む地表変動を捉えている可能性が示唆された．しかし，抽出された変動候補箇所の多くは，地すべり

地形分布図において明瞭な既存地すべり地形との対応が確認されなかったため，新たな地すべり性変動や集水に伴う侵食による地表変化が進行している可能性がある．

ただし，SAR により変動が検出された場合であっても，その変位要因を直接特定することは困難である．実際の地表変動には，地形条件，地質条件，植生，被覆状態，地下水条件など様々な要因が関与している可能性がある．そのため，変動メカニズムを詳細に解釈するためには，周辺の地表状態や地質条件を含めた詳細な地形判読や現地調査を実施する必要がある．

(3) 土砂災害危険箇所のスクリーニング

本研究の結果から，ALOS-2 時系列干渉 SAR の 2.5 次元解析を用いることで，広域山地における継続的な地表変動域を抽出できる可能性が示された. 特に，鉛直沈下と水平方向変位を同時に評価することで，従来の LOS 変位のみでは把握が難しかった変動特性を把握できる可能性がある．

また，本手法は広域を対象として面的に解析を行うことができるため，現地調査前の一次スクリーニングとして有効であると考えられる．抽出された変動候補箇所を地形条件や既往の地すべり地形分布図と重ね合わせることで，詳細な地形判読や現地調査を行うべき箇所の優先順位付けに活用できる可能性がある．特に，既存の地すべり地形として明瞭に判読されていない箇所において継続的な変位が確認される場合，新たな地すべり性変動や侵食に伴う地表変化を把握する手がかりとなる可能性がある．

ただし, 本手法により抽出される変動候補箇所は, 直ちに崩壊危険箇所を示すものではない．SAR 解析に基づく変動抽出結果は, 地形判読, 既往災害履歴, 降雨履歴，土地被覆変化，現地調査結果と組み合わせて解釈する必要がある．したがって，本手法は土砂災害危険箇所を直接特定する手法ではなく，広域山地において詳細調査や監視を行うべき箇所を絞り込む一次スクリーニング手法として位置付けることが適切である．

6. 結論

本研究では，ALOS-2 時系列干渉 SAR の 2.5 次元解析を用いて，山地斜面における鉛直方向および水平方向の年平均変動速度を算出し，継続的な斜面変動を示す領域の抽出を試みた．得られた主な結論を以下に示す.

1. 2.5 次元解析により，従来の LOS 変位のみでは判別が難しい鉛直沈下成分と水平変動成分を分離して評価することができた.
2. 鉛直方向に沈下傾向を示す解析点を抽出し，点密度解析および人工改変地の除外を行うことで, 山地斜面における変動候補箇所を抽出した．また，抽出した変動候補箇所のうち，東西向き斜面において水平方向変位が確認される箇所を整理した.
3. 代表地点の時系列変位から，一部の変動候補箇所では一方向へ累積する継続的な変動傾向が認められた. また, 抽出された変動候補箇所は, 谷沿い斜面，谷部，尾根などの地形条件下に分布していた.

以上より，ALOS-2 時系列干渉 SAR の 2.5 次元解析は，広域山地における継続的な斜面変動候補箇所の抽出に有効である可能性が示された．今後は，抽出された変動候補箇所が実際の地表変動を反映しているかを確認するため，LP データ，既往災害履歴，現地調査結果等との比較を行い，変動要因および変動メカニズムを検証する必要がある．

謝辞：本研究で使用した ALOS-2 の PALSAR-2 データは，国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構からご提供いただき使用しました. また, 2.5 次元解析は, 三菱電機株式会社に実施していただきました．ここに感謝の意を表します.

参考文献

1) 安井秀輔，佐藤功一，藤原寛朗 : SAR 衛星データ解析入門，KS 情報科学専門書，p34，2026.
2) 崎山朋紀, 榎原伴樹, 坂口武弘, 田中健貴, 木下篤彦, 江川真史，佐藤匠，久保毅，鈴木大和，山下久美子：干渉 SAR 解析による崩壊危険斜面抽出手法とその適用範囲について, 河川技術論文集, Vol.25, pp.693-398, 2019.
3) Mizuochi, H., Miyazaki, K., Abe, T., Hoshizumi, H., Kawabata, D., Iwao, K., Matsuoka, M., Miyachi, Y.: Detection of long-term slope displacement using time-series DInSAR and geological factor analysis for susceptibility assessment of landslides in northwestern Kyushu Island, *Geomorphology*, Vol.453, pp.1-15, 2024.
4) 防災科学技術研究所：地すべり地形 GIS データ：ダウンロード，https://dil-opac.bosai.go.jp/publication/nied_tech_note/landslidemap/gis.html，(2026 年 5 月 21 日閲覧)

（2026.5.29　受付）