

# 全国 SAR 干渉解析による斜面変動の検出事例

DETECTION OF LANDSLIDES USING INSAR ANALYSIS ALL OVER JAPAN

山中 雅之<sup>1</sup>・中埜 貴元<sup>2</sup>・和田 弘人<sup>3</sup>・仲井 博之<sup>2</sup>

Masayuki YAMANAKA, Takayuki NAKANO, Kozin WADA, and Hiroyuki NAKAI

<sup>1</sup>国土交通省国土地理院 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

E-mail: yamanaka-m96ah@milit.go.jp

<sup>2</sup>国土交通省国土地理院 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

<sup>3</sup>文部科学省研究開発局地震・防災研究課 (〒100-8959 東京都千代田区霞が関3-2-2)

**Key Words:** InSAR, landslide, ALOS-2,

## 1. はじめに

干渉 SAR とは、人工衛星等によるマイクロ波レーダー観測を、地表の同一地点で異なる時期に2回以上実施し、反射波の位相の差をとることによって地表の変動を捉える技術である。地表の変位を面的に捉える事ができるという特徴があり、測地・地殻変動研究では、地震や火山活動に伴う地殻変動を検出する技術として一般的に用いられるようになっている。

一方、干渉 SAR の地表の変位を面的に捉えることができるという特性を生かし、広域な地殻変動以外に、斜面変動のように比較的狭い範囲で発生する変動を検出した事例も報告されている<sup>1), 2), 3)</sup>。

国土地理院は、2006年1月に打ち上げられた陸域観測技術衛星「だいち」の観測データを用いて、定常的に SAR 干渉解析を実施してきた。さらに、2014年5月に打ち上げられた「だいち2号」のデータを用いて、特定の地域を限定せず、日本全国の網羅的な SAR 干渉解析を行い、地震・火山・地盤沈下・斜面変動をはじめとした様々な変動を抽出することに取り組んでいる<sup>4)</sup>。

全国の SAR 干渉画像には、多数の斜面変動を示すと考えられる位相変化が見られる。しかし、2章で述べるとおり、SAR 干渉画像の判読は容易でなく、抽出方法が確立されているわけはでない。そこで本稿では、まず、筆者らが行った SAR 干渉画像から斜面変動と考えられる位相変化の抽出方法について述べる。さらに、抽出した斜面変動のうち、3つの地区

において、干渉 SAR の結果と、現地における地上観測の結果や地表変形の痕跡との対比を行い、干渉 SAR により斜面変動がどの程度把握できるかを論じる。

## 2. 使用データ及び手法の概要

### (1) SAR 干渉解析に用いたデータと処理

本研究における SAR 干渉解析では、だいち2号のデータを使用した。解析処理は国土地理院で開発した「新 GSISAR」を使用した。SAR 干渉解析において、地形による干渉縞を除去するための DEM は基盤地図情報(数値標高モデル)10m メッシュ及びジオイドモデルから作成された「GSI10mDEHMJapan」<sup>5)</sup>を使用した。また、大気遅延による誤差を低減するため、数値気象モデルを用いた対流圏誤差低減処理<sup>6)</sup>を適用した。さらに、衛星の軌道誤差等に起因する長波長の誤差を低減するため、GNSS データを使用した補正<sup>7)</sup>を適用した。

### (2) SAR 干渉解析結果における斜面変動の抽出

干渉 SAR の解析結果には、地表面の真の変動以外に電離層の電子密度分布や水蒸気分布の変化等によるノイズや、散乱特性の変化等による干渉性の低下によるノイズが含まれている SAR 干渉画像からの斜面変動を抽出しようとしたときに、斜面変動を示すシグナルとこれらのノイズとを区別することが重要である。

筆者らは、SAR 干渉画像と地形図を重ね合わせた

うえて、以下に述べるような手順で斜面変動を抽出した。

- 1) 干渉性がある程度よい領域で、150m×150m 程度以上の空間的広がりを持つ領域が LOS 方向に 3cm 程度変動している。
- 2) DEM 誤差による位相変化、大気遅延による誤差、土地利用に起因する誤差を、定性的に除外する。
- 3) 観測される変動の方向と斜面方向に矛盾が無いことを確認する。
- 4) 複数の画像で矛盾のない結果が得られる。

以下の a)～g) で手法を詳述する。

#### a) 検出できる変動の大きさと変動量

高分解能モードのデータの解析結果から得られた画像の解像度は約 12m であるが、SAR 干渉画像では、ある程度の連続するピクセルの位相が変化することを変動と認識している。経験的には 150m×150m 程度の空間的広がりより狭い範囲の変動を認識することは困難である。

また、干渉 SAR は原理的には mm 単位の変動を計測できるが、実際には様々な誤差要因の影響により、干渉 SAR の計測精度は数 cm 程度とされている。

以上より、経験的に 150m×150m 程度以上の空間的広がりを持つ領域でおよそ衛星-地表視線方向に(以下、「LOS 方向」という) 約 3cm 以上の位相変化を変動と識別することとした。

#### b) 画像の干渉性

SAR 干渉画像は、一般的に干渉性が高いほど変動測定精度は高く、干渉性が非常に低い場合には、SAR 干渉画像は砂目模様のようになり、変動量を計測することは不可能となる。

だいち 2 号は干渉性低下の大きな原因となる 2 回の観測間の衛星間の距離(以下「基線長」という)垂直成分が常に短くなるように運用されているが、山間部では積雪や落葉などの影響で、2 回の観測の間に地表面の状態が大きく変化し、干渉性が非常に低くなる場合がある。また、衛星の反対側の斜面では、後方散乱強度が弱くなることから、衛星側の斜面と比較して、干渉性が低くなる傾向がある。

筆者らは、定量的な閾値は設けていないものの、定性的に干渉性が低いと判断した箇所を除外して、斜面変動の抽出を試みた。

#### c) DEM 誤差による位相変化

干渉画像を作成する過程で、DEM を利用して地形によって生じた縞を除去する。このとき、DEM と SAR 観測で計測された地表面の形状が異なる(以下、「DEM 誤差」という)場合、その差が位相差として画像に現れる。このような DEM 誤差により生じた位相変化

の形状は斜面変動により生じる位相変化の形状と類似することがある。

DEM 誤差による位相変化量は基線長垂直成分に比例する。だいち 2 号は基線長垂直成分を常に 500m 以内に保つように運用されており、DEM 誤差による位相変化量と基線長垂直成分との関係式<sup>8)</sup>によれば数 cm 以上の位相変化が現れるのは、DEM 誤差が数十 m を超える場合のみである。そのような場所は採石場などで大規模な地表の掘削が行われた場所である。従って、DEM 誤差による位相変化は地形図や最新の航空写真との対比により、比較的容易に識別することが可能である。

#### d) 大気遅延による誤差

2 章(1)で述べたとおり、国土地理院における SAR 干渉解析では、対流圏誤差低減処理を行っているが、大気遅延の影響を完全に除去することはできない。

大気遅延による誤差は標高との相関が見られることや<sup>9)</sup>、広域的に同方向の斜面の位相変化として見られることが多い。

本研究では、以上の性質を利用して、位相変化の形状と地形から、定性的に大気遅延によるノイズと斜面変動とを識別した。

#### e) 地表面の状態による位相変化

SAR 干渉画像では、裸地と森林の境界など、地表面の状態が周囲と異なることによる見かけの位相変化が見られることがあり、その形状が斜面変動により生じる位相変化の形状と類似することがある。これらも、DEM による誤差と同様に、地形図や最新の航空写真との対比により、位相変化の領域と、植生の境界等と一致の有無を確認することで、定性的にノイズと斜面変動とを識別した。

#### f) 傾斜方向と変動の向き

斜面変動の向きは概ねその場所の最大傾斜方向であると仮定することができる。最大傾斜方向に大きさ 1 の斜面変動が発生したとすると干渉 SAR により観測される LOS 方向の距離の変化量  $S$  は、最大傾斜方向の単位ベクトルを  $\vec{g}$ 、地表における衛星方向を示す単位ベクトルを  $\vec{u}$  とすると、式 (1) で示すとおり、両ベクトルの内積の符号を逆転させたものである。

$$S = -\vec{g} \cdot \vec{u} \quad (1)$$

$S$  が正の場合には衛星から遠ざかる変動が見られ、 $S$  が負の場合には衛星に近づく変動が見られる。 $S$  はある斜面を干渉 SAR で観測した時の斜面変動の感度であると言い換える事もできる。図-1 は次章で示す白山地区における、だいち 2 号での観測による北行軌道・南行軌道それぞれの場合の感度を示したものである。例えば、西傾斜の斜面における変動を計測す

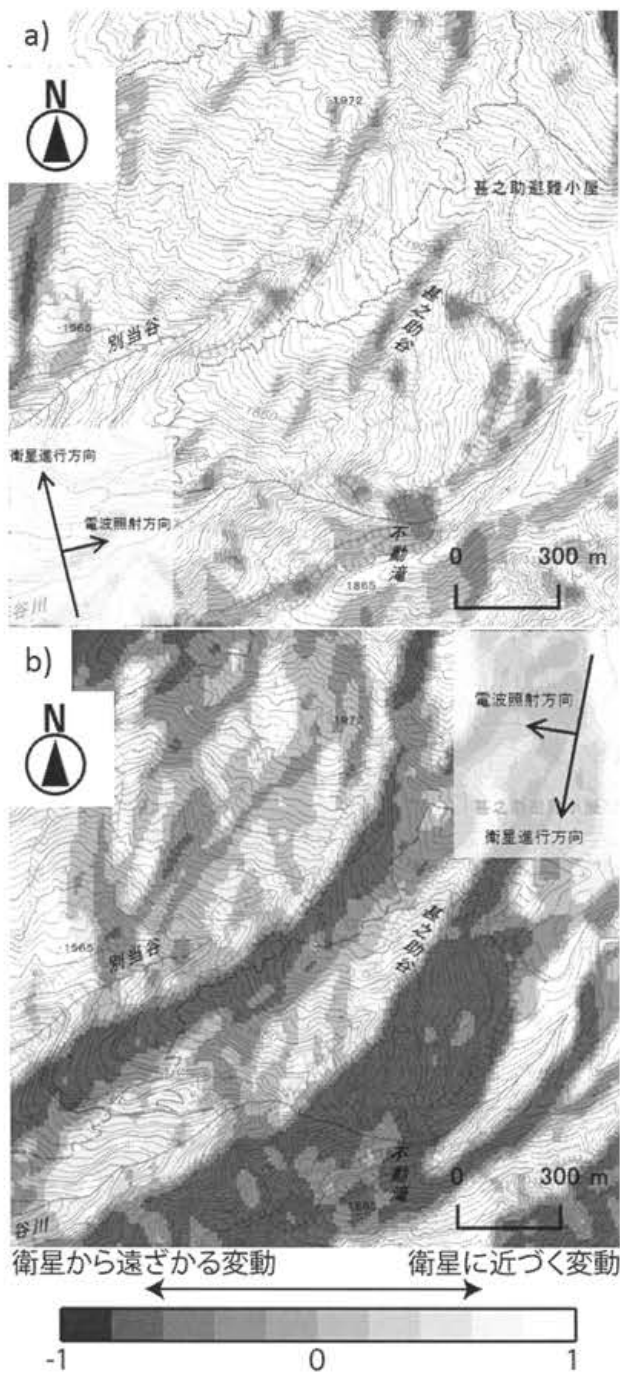


図-1 白山地区における最大傾斜方向に1変動した場合の干渉SARで見える変動量(感度)

a)はだいち2号の北行軌道 b)は南行軌道で観測した場合を示す。

る場合、同地域を北行軌道で観測すると衛星に近づく位相変化が現れ、反対に南行軌道で観測すると衛星から遠ざかる位相変化が見られる。

斜面変動を抽出する際には、観測された変動の向きと斜面方向に矛盾がないことを確認している。

### g) 複数のSAR干渉画像による確認

上述の方法では斜面変動を示すシグナルとノイズとを区別することが困難な場合には、同一地区の別

のペアによるSAR干渉画像での変動の有無を確認するしかない。

しかし、図-1からもわかるとおり、干渉SARでは、衛星と反対側の斜面における斜面変動に対しては感度がいいが、衛星側斜面における斜面変動に対しては感度が悪くなるため、同じ時期に南北両軌道の観測により得られた画像を比較したとしても、片方の画像では感度が小さい場合があることに注意する必要がある。

地すべりが継続的に続く場合には、観測データの蓄積により、より確実に変動を抽出できることが期待できる。

## 3. 対比

2章で述べた方法により2014年から2015年の日本全国のSAR干渉解析画像から約180箇所の斜面変動と思われる位相変化を検出した。検出した斜面変動のうち、長年に地上観測が行われている石川県白山市甚之助谷地区及び、全国でも斜面変動が多く検出された四国地方で比較的交通アクセスが良い、高知県いの町手箱谷地区、高知県本山町白髪山地区において、干渉SARと現地における地上観測の結果や地表変形の痕跡との対比を行った。

### (1) 石川県白山市甚之助谷地区

#### a) 対象地区の概要

対象地区は、石川・岐阜両県の県境部にそびえる白山の西側斜面に位置する。昭和初期に地すべりの存在が明らかになって以降、継続的に土塊の移動が観測されており、現在の移動量は年間10cm程度である。甚之助谷の地すべりブロックは、4群のブロック及びその上に乗る3つの小ブロックで構成されている<sup>10)</sup>(図-2)。1995年以降、毎年GPS観測が行われている<sup>10)</sup>ほか、だいちによる干渉SARの結果と地上GPS等の地上観測との比較も実施されている<sup>3)</sup>。

#### b) SAR干渉画像

図-2に北行軌道のSAR干渉画像(2014年10月8日~2015年7月15日:280日間)を示す。中間尾根ブロック及び左岸大規模ブロックに相当する領域で衛星に近づく変動が見られる。これらのブロックは西向きに移動しており、位相変化と実際の変動の向きは整合している。別当大崩ブロック及び別当谷ブロックは、変動量が小さく、変動方向が北行軌道では感度が小さい方向であり(図-1)、位相変化は見られない。

#### c) GNSS測量結果

今回、比較に使用した GNSS 観測結果は国土交通省北陸地方整備局金沢河川国道事務所が 2014 年 10 月及び 2015 年 10 月に観測を実施したものである。観測点の位置は図-2 に示すとおりである。観測及び解析は 3 級基準点測量に準じた方法で実施された。

#### d) SAR 干渉画像と GNSS 測量結果との比較

2014 年 10 月と 2015 年 10 月の GNSS 観測点における三次元移動量から LOS 方向の変動量を算出した。

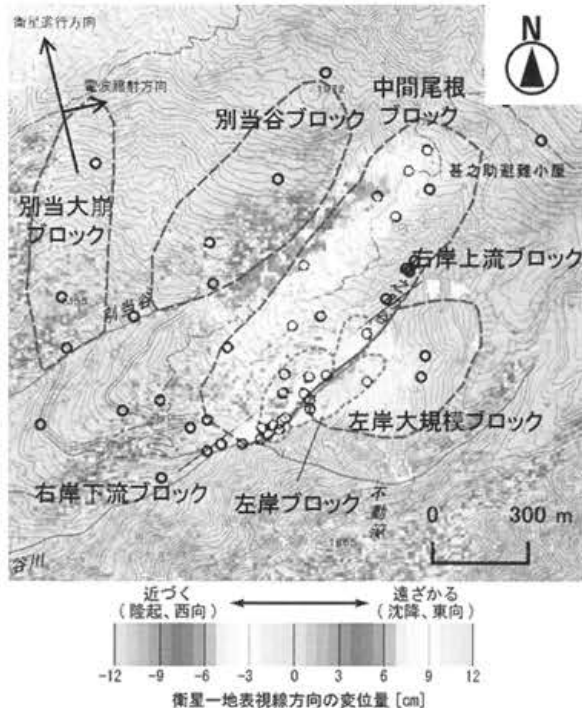


図-2 白山地区の SAR 干渉画像(2014/10/8-2015/7/15)  
黒丸は GNSS 観測点の位置を、破線は地すべりブロックを、点線は小ブロックを示す。

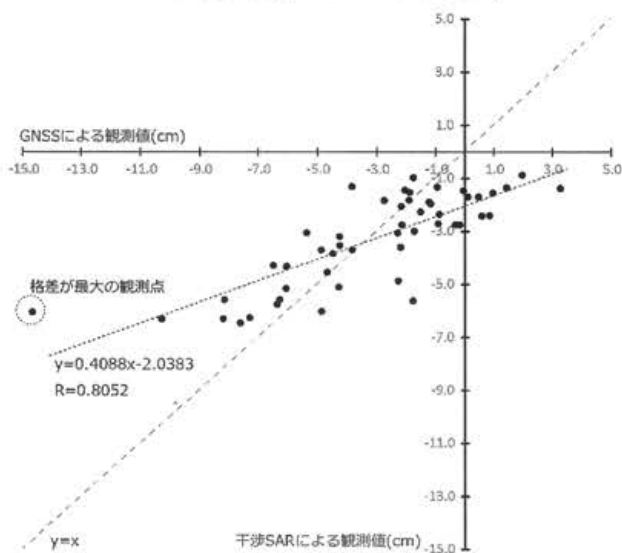


図-3 干渉 SAR により求めた変動量と GNSS 測量により求めた変動量との比較  
点線は回帰直線を示す。

一方、SAR 干渉画像については位相アンラッピング処理を行った結果の変動量に 365/280 を掛けることで一年間の変動量に換算した。さらに、GNSS 観測点の座標から半径 10m 以内のピクセルの平均値を干渉 SAR における変動量と見なし、両者を比較した。

図-3 はグラフの横軸に GNSS 測量の観測値を、縦軸に干渉 SAR の観測値をとったものである。両者に誤差が無ければ、傾きが 1 の直線上にプロットされるはずである。両者の変動の傾向は概ね一致しているものの、比較結果の回帰直線の傾きは 0.4 と 1 より小さく、干渉 SAR による結果は GNSS と比較すると変動量が小さくなる傾向がある。この原因は不明である。

また、干渉 SAR の結果と GNSS 測量の結果の最大較差は 8.6cm、また RMSE は 2.2cm である。較差が最大の観測点は周囲の観測点と比較して GNSS 観測による変動量が大きく、観測点に異常があった可能性がある。この観測点を除くと最大較差は 4.0cm、RMSE は 1.9cm となる。

以上より、干渉 SAR による変動量は GNSS と比較すると、変動量を小さく見積もる傾向があるが、全体の変動量の傾向はおおむね一致している。

## (2) 高知県の町手箱谷地区

### a) 対象地区の概要

対象地域は高知県の町の中央部に位置し、地質は三波川変成岩類泥質片岩からなる。高知県治山担当者からの私信によると対象地区は昭和 50 年代後半に地形の変状が確認され、対策工事や地すべり調査が行われており、現在はパイプひずみ計による監視が行われている。

### b) SAR 干渉画像

この領域では、表-1 に示す北行軌道の画像で位相変化が見られる。図-4 に 2015 年 5 月 3 日～2015 年 11 月 29 日 (210 日間) の画像を示す。対象地域では衛星から遠ざかる変動が見られる。斜面の傾斜方向は北東方向であり、位相変化と実際の変動の向きは整合している。

### c) SAR 干渉画像とパイプひずみ計との比較

対象地域では、高知県林業振興・環境部により、図-4 に示す位置にパイプひずみ計が設置されている。パイプひずみ計は実際の変位を観測しているわけではなく、SAR 干渉画像とパイプひずみ計とを定量的に比較することはできないが、BV26-9 以外の観測点では、干渉 SAR で変動が検出されている 2015 年 6 月から 11 月に滑りが観測されている。BV26-9 は、SAR 干渉画像において、位相変化が見られる領域の

表-1 手箱谷地区で斜面変動が検出された SAR 干渉画像

観測日	観測モード	衛星進行方向	観測方向	中心入射角 (°)
2014/9/21-2015/4/5 (196日)	高分解能モード	北行	右	39.7
2014/6/26-2015/6/28 (280日)	高分解能モード	北行	右	39.7
2014/4/27-2015/11/23 (210日)	広域観測モード	北行	右	39.1
2015/5/3-2015/11/29 (210日)	広域観測モード	北行	右	39.2
2014/6/28-2015/12/13 (168日)	高分解能モード	北行	右	39.7

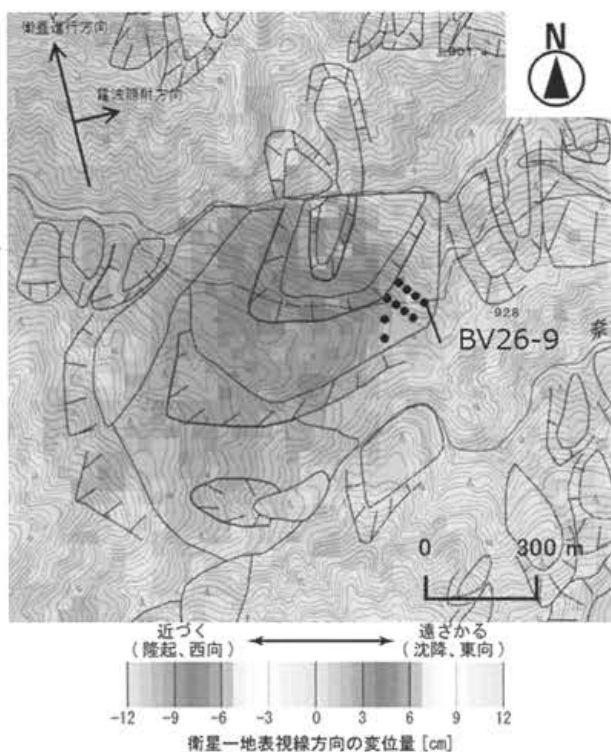


図-4 手箱谷地区の SAR 干渉画像 (2015/5/3-2015/11/29) 黒丸はパイプひずみ計の位置を示す。地すべりブロックの位置は地すべり地形分布図 (防災科学技術研究所による)

境界付近に位置しているため、ひずみ観測に現れなかったと考えられる。

### (3) 高知県本山町白髪山地区

#### a) 対象地区の概要

対象地域は、高知県本山町中央部の白髪山の北側斜面に位置し、地質は三波川変成岩類泥質片岩及び珪質片岩からなる。また、防災科学技術研究所の地すべり地形分布図において地すべり地形と分類されている。

#### b) SAR 干渉画像

この領域では、表-2 に示す複数の南行軌道の画像

表-2 白髪山地区で斜面変動が検出された SAR 干渉画像

観測日	観測モード	衛星進行方向	観測方向	中心入射角 (°)
2014/8/6-2015/9/2 (392日)	高分解能モード	南行	右	32.5
2014/10/10-2015/10/23 (378日)	高分解能モード	南行	右	43.0

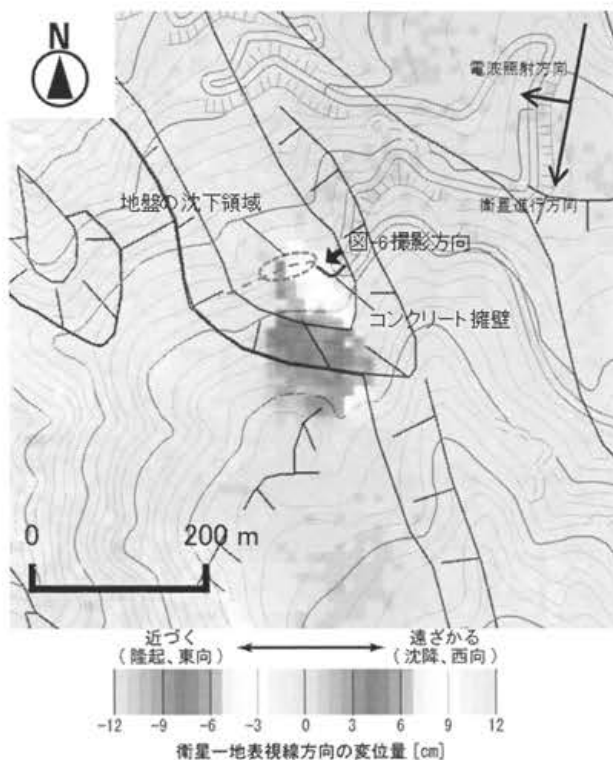


図-5 白髪山地区の SAR 干渉画像 (2014/10/10-2015/10/23)

地すべりブロックの位置は地すべり地形分布図 (防災科学技術研究所による)

で位相変化が見られる。図-5 に 2014 年 10 月 10 日～2015 年 10 月 23 日 (378 日間) の SAR 干渉画像を示す。変動が見られる領域では、周囲から連続的に位相が変化していない箇所があるため、SAR 画像から変動の向きを判読することは困難であるが、斜面方向から衛星から遠ざかる変動を示していると考えられる。

#### c) SAR 干渉画像と現地の変状との比較

SAR 干渉画像付近に図-5 の赤線で示すとおり、コンクリート擁壁があり、その西側のブロックが斜面下方へ移動したと思われる擁壁の開口亀裂が複数確認できた (図-6)。また、図-5 の点線で示す位相変化領域を横切る登山道では、位相変化が見られる範囲で 30～50cm 程度の地表面の沈下が見られた。

これらの変状がいつ現れたものかは不明だが、擁壁の開口亀裂には古いものと新しいものが混在して



図-6 白髪山地区におけるコンクリート擁壁の変形状況 (2016年3月10日撮影)

おり、この変動は長期的に継続している可能性が高い。干渉 SAR による結果はその変動領域を示している可能性がある。

#### 4. まとめ

国土地理院では、だいち2号に搭載された SAR データを使用して、日本全国の SAR 干渉解析を行っており、2014年から2015年の SAR 干渉解析画像から約180箇所の斜面変動と思われる位相変化を検出した。本稿では、SAR 干渉画像から斜面変動の抽出する手法を具体的に示した。

抽出した斜面変動のうち、石川県白山市甚之助谷地区、高知県の町手箱谷地区、高知県本山町白髪山地区において、干渉 SAR と現地における地上観測の結果や地表変形の痕跡との比較を行った。その結果、3地区いずれも干渉 SAR の観測結果を支持する結果が得られた。これらの結果は、これまでに変動が起きていることが知られていない地域であっても、斜面変動を検出できる可能性を示している。

現状では、SAR 画像の判読が容易ではないケースも多く、干渉 SAR で見られる変動を実際に評価した例は多くない。しかし、地すべりが継続的に続く場合には、観測データが蓄積されることにより、より確実に変動を抽出できることが期待できる。

今後、全国の SAR 干渉解析を継続すると共に検証事例を増やすことで、地すべりが継続的に続く箇所を抽出し、未知の変動をリスク情報として提供することを目指している。

**謝辞：**だいち2号の原初データの所有権は、JAXA にあります。だいち2号の原初データは、国土地理院と JAXA の間の協定に基づき提供されました。数値気象モデルは、国土地理院と気象庁の協定に基づき提供されました。甚之助谷地区の GNSS 測定の結果は国

土交通省水管理・国土保全局砂防部を通じ、国土交通省北陸地方整備局金沢河川国道事務所から提供されました。手箱谷地区のパイプひずみ計の観測データは高知県林業振興・環境部から提供されました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Kimura, H. and Yamaguchi, Y.: Detection of landslide areas using satellite radar interferometry, photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 66-3, pp.337-334, 2000.
- 2) 鈴木啓, 雨貝知美, 森下遊, 佐藤浩, 小荒井衛, 関口辰夫: 山形県月山周辺における SAR 干渉画像を用いた地すべりの検出, 国土地理院時報, 120, pp37-49, 2010.
- 3) 道中仁志, 平松良浩: ALOS/PALSAR データの干渉解析による白山の地すべり変位の検出, 測地学会誌, 56, pp179-194, 2010.
- 4) 三浦優司, 山中雅之, 山田 晋也, 攪上泰亮, 仲井博之, 和田弘人, 森下遊: だいち2号を用いた全国 SAR 干渉解析, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会講演予稿集, <https://confit.atlas.jp/guide/event-img/jpgu2016/STT54-P04/public/pdf?type=in>, 2016.
- 5) 飛田幹男: 地殻変動計測のための SAR 画像分析の高度化に関する研究 (第3年次), 平成 21 年度国土地理院調査研究年報, <http://www.gsi.go.jp/common/000057644.pdf>, 2009.
- 6) 小林知勝, 石本正芳, 飛田幹男, 矢来博司: SAR 干渉解析のための数値気象モデルを用いた大気遅延誤差の低減処理ツールの開発, 国土地理院時報, 125, pp31-38, 2014.
- 7) 飛田幹男, 宗包浩志, 松坂茂, 加藤敏, 矢来博司, 村上亮, 藤原智, 中川弘之, 小澤拓: 干渉合成開口レーダの解析技術に関する研究, 国土地理院時報, 106, pp37-49, 2005.
- 8) R. Hanssen: Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis, Kluwer Academic Publishers, 308p, 2001
- 9) 藤原智, 飛田幹男, 村上亮, 中川弘之, P. A. Rosen: 干渉 SAR における地表変動検出精度向上のための基線値推定法と大気一標高補正, 測地学会誌, 45, pp315-325, 1999.
- 10) 二俣秀, 藤田重敬, 安達 忠浩: 甚之助谷地すべりの現況について, 北陸地方整備局事業研究発表会, [http://www.hrr.mlit.go.jp/library/happyoukai/h22/anzen\\_anshin/05.pdf](http://www.hrr.mlit.go.jp/library/happyoukai/h22/anzen_anshin/05.pdf), 2010.

(2016.5.31 受付)