

地すべり性地表変動に関する SAR 干渉画像判読カードの提案 Proposal for SAR Interferometry Image Interpretation Card on Landslide Surface Deformation

地理地殻活動研究センター 佐藤 浩¹・小荒井 衛・飛田幹男

Geography and Crustal Dynamics Research Center

Hiroshi P. SATO, Mamoru KOARAI and Mikio TOBITA

測地部 鈴木 啓・雨貝知美

Geodetic Department Akira SUZUKI and Tomomi AMAGAI

地理調査部 関口辰夫

Geographic Department Tatsuo SEKIGUCHI

測地観測センター 矢来博司

Geodetic Observation Center Hiroshi YARAI

要 旨

陸域観測技術衛星「だいち」に搭載されている L バンド合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar : SAR) の観測データを用いた干渉解析によって、平成 19 年能登半島地震 (M6.9) による地すべり性地表変動が検出されたことが先行研究で報告された。その研究では、SAR 干渉画像から地すべり性地表変動をどのように判読するのかが説明されている。その後、能登半島地震を例に、対象地区を増やして SAR 干渉画像の判読例を解説した「地すべり性地表変動に関する SAR 干渉画像判読カード」を作成して国土地理院の Web から公表した。本稿では、その判読カードの様式と内容を説明するとともに、山形県鶴岡市七五三掛地区に平成 21 年 2 月から被害を与えた地すべりを例として、SAR 干渉画像判読カードを作成したので、その結果を報告する。

1. はじめに

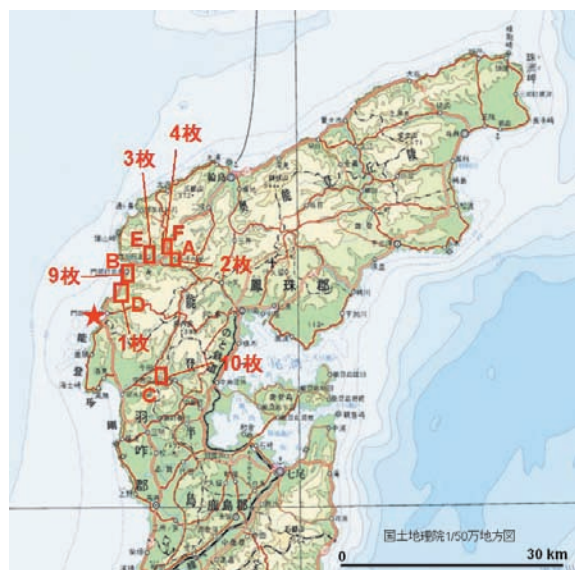
平成 18 年 1 月、宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency : JAXA) は、陸域観測技術衛星「だいち」 (Advanced Land Observing Satellite : ALOS) を打ち上げた。マグニチュード 6.9 の平成 19 年能登半島地震 (以下、「能登半島地震」という。) による地殻変動を検出するため、雨貝ほか (2007) は、ALOS に搭載された L バンド合成開口レーダー (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar : PALSAR) データから SAR 干渉画像を生成した (表 1)。宇根ほか (2007 ; 2008) は、その SAR 干渉画像から、Ozawa et al. (2008) の断層モデルをもとに計算した広域的な弾性変形のシミュレーション SAR 干渉画像を取り除いた「地殻変動差分画像」を作成し、防災科学技術研究所 (2000) の地すべり地形データベース (基図 : 国土地理院の 5 万分 1 地形図) と重ね合わせて、能登半島地震によって生じた地すべり性地表変動の分布を明らかにした。

その後、国土地理院 (2009) は、北陸電力が計測した航空レーザ測量データを使って等高線を生成し、その等高線図の読図の結果と縮尺 1/10,000 空中写真 (国土地理院、昭和 50 年撮影) の判読の結果を組み合わせて作成した 1/5,000 の微地形分類図を使って、地すべり性地表変動に関する「SAR 干渉画像判読カード」を作成した。これは、地すべりの研究者や地すべり防災の実務担当者の参考となる、画像の判読例と位相変化 (色変化) の追跡方法を豊富に示したものである (ここでは、地殻変動差分画像も、広義の SAR 干渉画像としておく)。図 1 に、その作成範囲と各範囲のカード作成枚数を示す。

本稿では、その判読カードの様式を解説するとともに、この様式を使って、山形県月山西麓・鶴岡市七五三掛地区に平成 21 年 2 月から被害をもたらした地すべり (中里ほか, 2009) に関して同カードを作成したのでその内容を説明する。現在、独自に SAR 干渉画像を使って地すべり性地表変動を把握する研究者や実務担当者が少ない中で、SAR 干渉画像でどのような地表変動が見いだせるのか、この様式に従ってそれぞれが情報を蓄積し、お互いに公開すれば、

表 1 SAR 干渉画像の諸元 (雨貝ほか, 2007)

項目	諸元
計測日	平成 19 年 2 月 23 日と 4 月 10 日
センサ	ALOS/PALSAR
バンド	L バンド
波長	23.6cm
解像度	約 20m (2 ルック処理)。ただし元の PALSAR データは 10m (FBS [Fine Beam Single] モード)。
衛星の進行方向	Ascending (北行軌道)
衛星の視線方向	西側上空から東向
オフナディア角	図 1
基線長	+432m (Bperp)



図－1 能登半島における地すべり性地表変動に関する SAR 干渉画像判読カード（国土地理院，2009）の作成範囲（A～F 範囲）。星印は平成 19 年能登半島地震の震央。

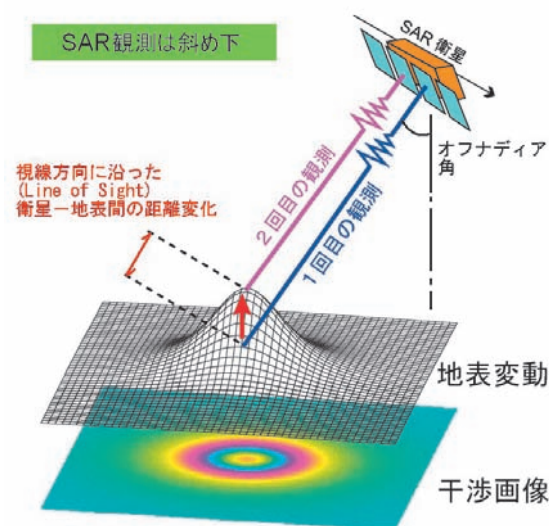
議論がより深まると考えている。

今後 JAXA により打ち上げられる人工衛星 ALOS-2 では、SAR データの解像度が PALSAR データより高くなる可能性が JAXA によって示されており（宇宙航空研究開発機構，2009），研究者や実務担当者が現場で把握する地すべり性地表変動を実感できる程度に SAR 干渉画像の解像度が高くなる可能性もある。従って、局所的な地すべり性地表変動をどのように読み解くか、研究者や実務担当者の間の議論も現在より活発化する可能性が高い。そのようなとき、情報を共有できる共通の仕様として、本稿で提案する SAR 干渉画像判読カードの意義が深まると思われる。

2. SAR 干渉画像

SAR は、人工衛星や航空機に搭載されたセンサから地表に向けて電波（マイクロ波）を射出し、その反射波をセンサの受信部で観測することにより地表面の状態を把握する技術である。干渉 SAR は図－2 に示すように、分解能の高いマイクロ波レーダー観測を地表の同一地点で 2 回以上実施し、反射波の位相のずれを干渉画像として捉えることによって、2 回の観測の間に発生した数 10km 四方の地表変動を面的に捉えることのできる技術である。1 回目の観測で得られた画像をマスター画像、2 回目の観測で得られた画像をスレーブ画像という。

SAR に用いられるマイクロ波には、主に X バンド（波長約 3 cm）、C バンド（約 6 cm）、L バンド（約 24 cm）があり、波長が短いほど解像度は高いが、干



図－2 干渉 SAR

渉画像を得づらい。特に、わが国のように植生が密な地域では、X バンドや C バンドでは、部分的にしか干渉画像を得ることができない。ALOS/PALSAR は、L バンドのマイクロ波を射出・受信するセンサである。

干渉 SAR では、地表面の変動を反映した縞模様の SAR 干渉画像が得られる。図－2 に示すように、干渉画像上の青→緑→黄→赤→青（もしくはその逆）の 1 回り（すなわち 1 波長分）の色の変化は、2 回の観測の間に、衛星視線方向に沿って（Line of Sight, LoS）衛星と地表の間の距離に半波長分（衛星と地表の間を往復するので 1 波長の半分）の変化があったことを示す。ALOS/PALSAR の波長は約 23.6 cm であるので、1 回りの干渉縞の色変化は約 23.6 cm の半分、つまり衛星視線方向に約 11.8 cm の距離変化があったことを示す。

距離変化の計測自体の精度は、原理的にはミリメートルまで可能である。しかし、軌道情報から得られる衛星の位置に起因する誤差、大気中の水蒸気擾乱により反射波が時間遅れをもって受信部で観測することによる誤差、水蒸気の量が山や谷によって大気の厚さが異なる分だけ異なることによる誤差（地形に起因する誤差）などの誤差が入り、その誤差も各種条件によって変わる（例えば、水蒸気の水平的な分布は時々刻々変化する気象条件に強く左右される）。従って、すべての SAR 干渉画像が同じ精度を持っているわけではない。一般的には、数 cm 程度と考えられる。

3. SAR 干渉画像判読カード

3. 1 平成 19 年能登半島地震の例

図－3 に、地殻変動差分画像を使った国土地理院（2009）の SAR 干渉画像判読カードの例（図－1 の

E 範囲の一部) を示すとともに、これに基づいて、その様式と内容を説明する。

SAR 干渉画像判読カードの右上には作成年月日と改訂した日付を記入する。1～2 行目には、SAR 干渉画像を地形図と対応づけられるように、地形図の図幅名やその図幅の属する地勢図の図幅名(総図名)を示している。また、代表地点(対象地区の中央など)の緯度・経度も示す。さらに、図-1 で示した A～F 範囲の区別を示し、図-1 で示したように E 範囲では SAR 干渉画像判読カードを 3 枚作成したので、それが判るようにかっこ書きで番号を付した。

図-3 の 3 行目左には、微地形分類図を示す。基図の地形図の縮尺は 1/5,000 程度とし、また、利用が可能であれば、写真測量よりも航空レーザ測量による等高線図を用いる。これは、その程度の縮尺だと、図面と照らし合わせて現地地すべり地形を把握するのに最適であると考えたことと、写真測量よりも航空レーザ測量による等高線図のほうが、地すべり地形を読図しやすいことが既に判っているため(八木ほか, 2003) である。

国土地理院(2009)には微地形分類図の凡例が示されているが、凡例は任意である。しかし、少なくとも地すべり地形の特徴を示す滑落崖と移動体の記載は必須である。また、微地形分類図では、必要に応じて地すべりの地形的特徴が空中写真や読図によって明瞭に判読されるのか、それともやや明瞭なのかの区別をする。これは、SAR 干渉画像で判読される地すべり性地表変動が、比較的新しい地すべりの再活動を意味しているのか、それとも古い地すべりの再活動を意味しているのかを明らかにするためである。なお、国土地理院(2009)に示されている C 範囲の凡例には、他の範囲の凡例に加えて小起伏面に関わる分類等が加筆されている。その理由は、太田・国土地理院(1997)が、能登半島を広域的に取り巻く高位の海成段丘のほか、さらに高位の 7 段の小起伏面(狭い尾根上の丘陵頂面)を認めており、それらの面が比較的良く保存されていればこれまで地すべり性地表変動をはじめとする地形の開析をあまり受けておらず、それほど保存されていなければ開析を受けていると判断できるためである。

図-3 で、微地形分類図の右には、同じ場所の立体視ができる空中写真を配置するとともに、空中写真の撮影計画機関、撮影年、空中写真の縮尺を示す。また、微地形分類図と空中写真の位置関係を認定しやすいようにするため、両者の同一地点をそれぞれ点で示すように工夫した。

図-3 で、微地形分類図と空中写真から数えて下の 4 行分には、表-1 に示したような SAR 干渉画像の諸元を記入する。2 時期の計測時期を記載することは、地表の状態(積雪の影響や植生の繁茂の状況)

を類推するのに必要であろう。特に、2 時期の衛星の空間的な隔たりの大きさを示す基線長(ここでは、2 時期の衛星の位置間の距離に関して、マスター画像計測時の衛星から地上への視線方向に対する垂直成分、 B_{perp})は、干渉性の高低に関わる指標であり、SAR 干渉画像判読カードには重要な情報である。また、アセンディング・ディセンディングとオフナディア角の記載は、入射するマイクロ波に対して注目する斜面がオーバーレイやフォアショートの影響を受けやすいか否かの判断になるため、それぞれ重要な情報である。

諸元の下には、図-3 に示すように、前述の微地形分類図を含む範囲の SAR 干渉画像を掲げ対比が容易ようにする。その SAR 干渉画像には、アセンディング・ディセンディングの向きと衛星視線の向き、そして干渉縞を色変化で把握するためのカラーバーを併記する。SAR 干渉画像の色変化によって、みかけ上ではなく実際の変動の向きを追う場合は、マスター画像に対してスレーブ画像が不動と考えられるような、なるべく広範囲を占める青の部分の起点を選んだほうがよい。そこで、その起点を選びやすいように、図-3 には、広域の SAR 干渉画像も並列して示す。その画像には、微地形分類図の範囲を枠で示し、局所の SAR 干渉画像と照らし合わせやすくする。図-3 の場合、広域の SAR 干渉画像に地すべり地形が示されているが、それを重ね合わせるか否かは任意である。

図-3 の「備考」欄には、干渉縞の明瞭さ、SAR 干渉画像の視線方向の色変化、変動の向きを述べる。さらに、変動の向きが微地形と関連しているか(変動の向きが斜面の形状と調和しているか否か)などを述べる。

3. 2 鶴岡市七五三掛地区の地すべりの例

七五三掛地区では、平成 21 年 2 月以降、地すべりの再活動により、家屋の倒壊や水田に段差が生じるなど、地表の状態が著しく変化した(中里ほか, 2009)。また、平成 21 年 3 月 27 日から 5 月 1 日までの水平変動量が 1,141mm(新庄河川事務所の GPS 観測による)であり、換算すると約 33mm/day と著しかった。鈴木ほか(2010)は、SAR 干渉画像を使って本地区の地すべり性地表変動を見出している。

干渉 SAR は、観測期間の前後で地表の状態に著しい変化がなく、ゆっくりとした変位の検出に最も有効である。地表変動が著しいと、SAR 干渉画像によってその変動を抽出するのは難しい。また、この期間、位相の変化がばらばらで画像がざらついたように見えて、明瞭な干渉縞として地表変動の傾向を把握することは困難だった(佐藤ほか, 2009)。そのため、図-4 に示した七五三掛地区における SAR 干渉

作成日：2009年1月16日（改訂日：2010年7月12日）

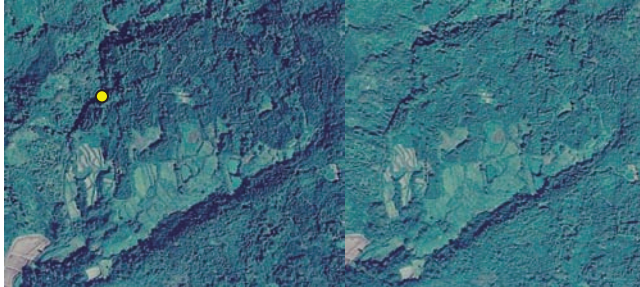
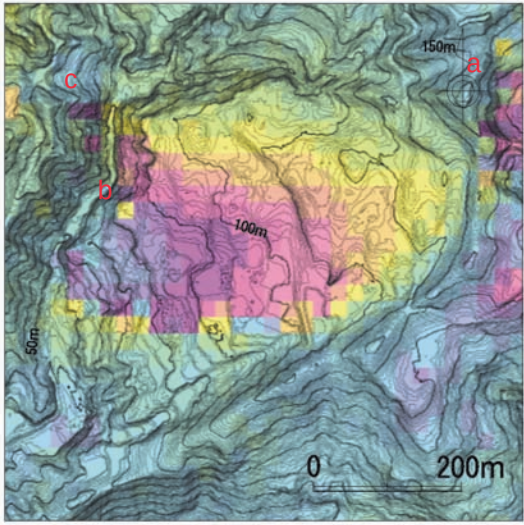
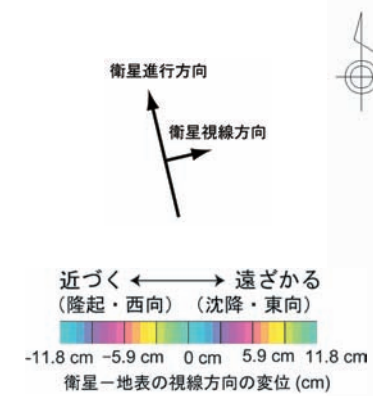
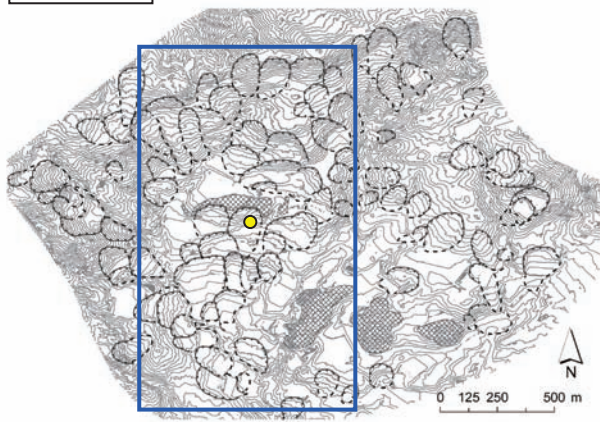
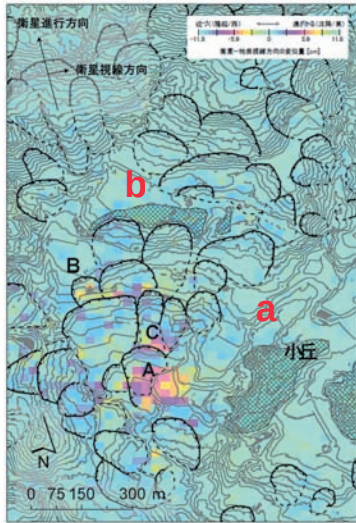
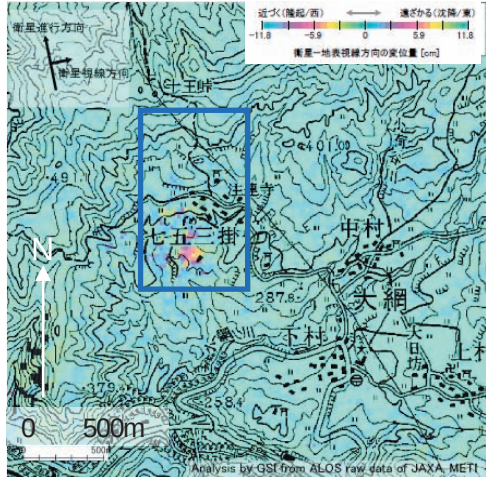
総図名	七尾	1/2.5 万図名	門前
対象地点の中心	北緯 37r 17' 46"	東経 136r 45' 41"	Area E(3)
地形分類図	空中写真（国土地理院 1975 年撮影、縮尺 1/10,000）  ● 地形分類図と空中写真との同一地点		
背景の等高線は北陸電力株式会社の航空レーザ測量データによる。 SAR 干渉画像：アセンディング；オフナディア角：41.5r ；基線長 Bperp：+432m 撮影年月日：2007 年 2 月 23 日～2007 年 4 月 10 日 解像度：(FBS)/FBD (2007 年 2 月 23 日) (FBS)/FBD (2007 年 4 月 10 日) 衛星の視線方向：(西側上空から東向き) (東側上空から西向き)			
	 背景の等高線は北陸電力株式会社の航空レーザ測量データによる。 Analysis by GSI from ALOS raw data of JAXA, METI		
備考：			
斜面（地すべり）			
① 干渉縞：明瞭			
② 視線方向の色変化：（馬蹄形変動の東側にある無変化の青色部分 a を基準に東から西に向かって）青→黄→赤色			
③ 移動方向：西向きないしは隆起			
干渉縞は、上の左図、「a」を起点として東から西に向かって青→黄→赤となり、次に青（「b」）となる。上の中央、色変化の凡例の中央の「青」を起点として左側への移行、すなわち西側上空の衛星に向かって近づく動きであることから、西向きの地表の動きまたは隆起の動きのいずれかとして判読される（土塊が南西向きに移動する地すべり地形が判読され、検出された動きとしては地すべり地形に整合する）。			
なお、上の左図、「b」の青と、起点（「a」）の青は一周期、位相が異なっていると解釈される。それよりさらに西側の青（「c」）は無変化部分を示しているが、「b」と「c」の青の位相の切れ目は判然としない。			

図-3 能登半島における SAR 干渉画像判読カードの例（国土地理院，2009 を一部改変）

作成日：2010 年 7 月 12 日

総図名	村上	1/2.5 万図名	大網
対象地点の中心	北緯 38° 36' 13"	東経 139° 53' 6"	
地形分類図	空中写真空中写真（国土地理院 1977 年撮影、縮尺 1/15,000）		
			
背景の等高線は新庄河川事務所計測の航空レーザ測量データによる。	● 地形分類図と空中写真との同一地点		
SAR 干渉画像：アセンディング；オフナディア角：34.3°；基線長 Bperp：-175m			
撮影年月日：2009 年 6 月 14 日～2009 年 7 月 30 日			
解像度：FBS/FBD（2009 年 6 月 14 日）/FBS/FBD（2009 年 7 月 30 日）			
衛星の視線方向：西側上空から東向き／東側上空から西向き			
			
左図の背景の等高線は新庄河川事務所の航空レーザ測量データによる。			
Analysis by GSI from ALOS raw data of JAXA, METI			
備考：			
斜面（地すべり）			
④ 干渉縞：やや明瞭			
⑤ 視線方向の色変化：（変動の北東側にある無変化の青色部分 a を基準に東から西に向かって）青→黄→赤			
⑥ 移動方向：西向きないしは隆起			
上の右図で、七五三掛地区の南方にやや明瞭な干渉縞が見られ、上の左図、地すべり移動体 A の南端付近に相当する。「a」を起点として青→黄→赤となり、局所的な赤が黄色に取り囲まれたように判読される。上の左図、色変化の凡例の中央の「青」を起点として左側への移行、すなわち西側上空の衛星に向かって近づく動きであることから、西向きの地表の動きまたは隆起の動きのいずれかとして判読される（この地区は土塊が南～南南西向きに移動する地すべり地形が判読され、検出された動きとしては地すべり地形に整合する）。上の左図、地すべり移動体 B には不明瞭な色変化（「b」を起点として青→黄色）が見られるが、色変化の面積が極めて狭く、判然としない。			

図－4 鶴岡市七五三掛地区における SAR 干渉画像判読カード

画像判読カードには、国や県が地すべり対策に着手して地表変動が沈静化に向かい始めた平成 21 年 6 月と 7 月の SAR 干渉画像を使っている。図-4 の背景の等高線は、新庄河川事務所が計画して計測した航空レーザ測量データ(国土交通省新庄河川事務所, 2009) による。

図-4 の 2 つの SAR 干渉画像の右図, 七五三掛地区の南には、やや明瞭な干渉縞が見られ、その周囲はほとんど広域的に青色が広がり、SAR 干渉画像の上でも無変化と考えられるため、地すべり防止のため SAR 干渉画像で検出されるような地表変動が止まったと考えられる。

図-4 の 2 つの SAR 干渉画像の左図では、画像に既存の地すべり地形を重ね合わせた。これを見ると、やや明瞭な干渉縞は、図中の地すべり移動体 A の末端部に相当する。干渉縞の色変化を確認すると、無変化の青が広範囲に見られる「a」を起点として青→黄→赤(図-5 の①の変化の向き)に変化し、赤が黄色に取り囲まれているように見える。これは、衛星視線方向に約 6 cm (図-5 のカラーバーで、1 回りの干渉縞の色変化 11.8 cm の概ね半分) 縮むような変動、すなわち西向きに移動するか隆起があったことを示唆している。地すべり移動体 A は南南西向きの斜面に位置し、移動体の西向き成分の移動と整合的である。地すべり移動体 A の滑落崖のすぐ斜面上方、「C」付近に青→赤色(図-5 の②の変化の向き)の不明瞭な色変化が見られるが、色変化の面積が狭いため、衛星視線方向に沿って伸びるような変動、すなわち東向きに約 6 cm 移動するか沈降する動きがあったのか、これだけでは判然としない。

図-4 の 2 つの SAR 干渉画像の左図、地すべり移動体 B には、「b」を起点として青→黄色(図-5 の③の変化の向き)の不明瞭な色変化が見られ、衛星視線方向に約 3 cm (図-5 のカラーバーで、1 回りの干渉縞の色変化 11.8 cm の概ね 1/4) の縮みがあると考えられる。しかし、これについても、色変化の

面積が狭いため、これからだけでは、実際に判然としない。

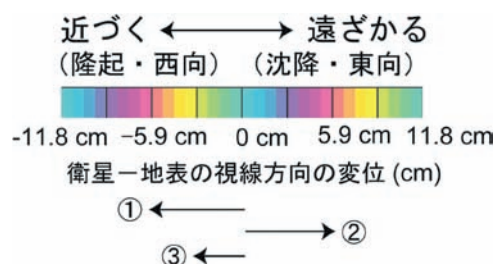


図-5 衛星視線方向の距離の伸び縮み

4. おわりに

本稿では、平成 19 年能登半島地震を例に、地すべり性地表変動に関する SAR 干渉画像判読カードの様式を提案するとともに、その内容や地すべり性地表変動を SAR 干渉画像で判読する方法を解説した。また、その応用として、七五三掛地区の地すべりを例にして SAR 干渉画像判読カードを作成した。本稿で提案した SAR 干渉画像判読カードが、SAR 干渉画像を使った地すべり性地表変動に関する今後の議論の活発化の一助となれば幸いである。

謝 辞

ここで使用した ALOS/PALSAR データの所有権は、経済産業省および JAXA にある。そのデータは、JAXA との共同研究協定に基づいて、提供を受けている。また、SAR 地すべり判読カードで使用した航空レーザ測量データの著作権と所有権は、能登半島地区については北陸電力株式会社、鶴岡市七五三掛地区については国土交通省新庄河川事務所にある。航空レーザ測量データの借用に便宜をいただいた北陸電力土木部の穴田文浩課長と野原幸嗣様、新庄河川事務所の齋藤調査課長と調査課鈴木専門員(それぞれ当時)に、この場を借りてお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 雨貝知美, 和田弘人, 藤原みどり, 鈴木啓, 飛田幹男, 矢来博司 (2007) : 衛星合成開口レーダーを用いた平成 19 年 (2007) 年能登半島地震に伴う地殻・地盤変動の検出, 国土地理院時報, 113, 3-11, <http://www.gsi.go.jp/common/000045008.pdf> (accessed 3 Sep. 2010).
- 防災科学技術研究所 (2000) : 地すべり地形データベース, <http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/> (accessed 3 Sep. 2010).
- 国土地理院 (2009) : 国土地理院技術資料 H・1-No. 9 平成 19 年能登半島地震の地表変動に関する SAR 干渉画像判読カード, <http://gisstar.gsi.go.jp/ното/index.html> (accessed 8 Sep. 2010).
- 国土交通省新庄河川事務所 (2009) : 山形県鶴岡市七五三掛地区における航空レーザ計測結果について, http://www.thr.mlit.go.jp/shinjou/03_sabou/jisuberi/pdf/03idouryo.pdf (accessed 8 Sep. 2010).
- 中里裕臣, 木下勝義, 井上敬資, 奥山武彦, 須貝俊彦, 八木浩司 (2009) : 2009 年 2 月 25 日以降の山形県鶴岡市七五三掛地すべりの再活動と移動状況の特徴 (速報), 地学雑誌, 118(3), 587-594, <http://www.geo.or.jp/journal/back/pdf118-3/p587-594.pdf> (accessed 8 Sep. 2010).

- 太田陽子, 国土地理院地理調査部 (1997) : 1:100,000 地殻変動土地条件図「能登半島」解説, <http://www1.gsi.go.jp/geowww/themap/pdf/disa-pdf/d1347.pdf> (accessed 8 Sep. 2010).
- Ozawa, S., H. Yarai, M. Tobita, H. Une and T. Nishimura (2008): Crustal deformation associated with the Noto Hanto Earthquake in 2007 in Japan, *Earth Planets Space*, 60, 95-98.
- 佐藤浩, 鈴木啓, 雨貝知美 (2009) : 山形県七五三掛地すべりの地形的特徴と時系列 SAR 干渉画像による地表変動の監視, <http://www.gsi.go.jp/common/000048450.pdf> (accessed 3 Sep. 2010).
- 鈴木啓, 雨貝知美, 森下遊, 佐藤浩, 小荒井衛, 関口辰夫 (2010) : 山形県月山地区における SAR 干渉画像を用いた地すべりの検出, *国土地理院時報*, 120, 1-7, <http://www.gsi.go.jp/common/000055382.pdf> (accessed 9 Sep. 2010).
- 宇宙航空研究開発機構 (2009) : 陸域観測技術衛星 2 号 (ALOS-2) プロジェクトについて, http://www.jaxa.jp/press/2009/10/20091028_sac_alos2.pdf (accessed 3 Sep. 2010).
- 宇根寛, 佐藤浩, 矢来博司 (2007) : 衛星合成開口レーダー画像で抽出された平成 19 年 (2007 年) 能登半島地震に伴う地形変化, *国土地理院時報*, 113, 41-47, <http://www.gsi.go.jp/common/000045014.pdf> (accessed 3 Sep. 2010).
- 宇根寛, 佐藤浩, 矢来博司, 飛田幹男 (2008) : SAR 干渉画像を用いた能登半島地震及び中越沖地震に伴う地表変動の解析, *日本地すべり学会誌*, 45(2), 125-131, http://www.jstage.jst.go.jp/article/jls/45/2/125/_pdf/-char/ja/ (accessed 3 Sep. 2010).
- 八木浩司, 檜垣大助, 吉松弘行, 相楽渉, 高木洋一, 内山庄一郎 (2003) : 空中レーザー高精度地形図の地すべり・微地形判読への応用, *日本地すべり学会誌*, 39(4), 421-427, <http://www.journalarchive.jst.go.jp/jnlpdf.php?cdjournal=jls1964&cdvol=39&noissue=4&startpage=421&lang=ja&from=jnlto>c (accessed 9 Sep. 2010).