

# 山形月山地区におけるSAR干渉画像を用いた 地すべり性地表変動の検出

佐藤 浩<sup>1</sup>・鈴木 啓<sup>2</sup>・雨貝 知美<sup>2</sup>・関口 辰夫<sup>3</sup>・  
小荒井 衛<sup>1</sup>・齋藤 克浩<sup>4</sup>・鈴木 邦章<sup>4</sup>

<sup>1</sup>国土地理院 地理地殻活動研究センター 地理情報解析研究室 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

<sup>2</sup>国土地理院 測地部 宇宙測地課 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

<sup>3</sup>国土地理院 地理調査部 環境地理課 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

<sup>4</sup>東北地方整備局 新庄河川事務所 調査課 (〒996-0071 山形県新庄市小田島町5-55)

地すべり性の地表変動を広域的かつ時系列的に把握することは、地すべり防止の効率的な対策上重要である。地球観測衛星「だいち」に搭載された合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar, SAR) で得られた最近の画像 (2009年6月14日～2009年7月30日) の干渉処理の結果は、山形月山地区の志津温泉でこの短期間 (46日間) に地すべりの著しい変化は無かったことを示すとともに、七五三掛<sup>しごめかけ</sup>でこの期間の一部の地すべりの動きを示唆した。しかし、過去の2006年9月12日と2008年9月17日撮影の干渉処理の結果は、両地区における長期間 (2年間) の地すべりの変動を捉えていた。本稿では、それらの結果を報告する。

キーワード 月山, 地すべり, だいち, 合成開口レーダー, SAR, 干渉

## 1. はじめに

干渉合成開口レーダー (干渉SAR, Synthetic Aperture Radar Interferometry) は、地表面の変動を面的に把握する技術として、地震時の地表変動や火山活動に伴う火山体の変動<sup>1)</sup>、地盤沈下の広がり<sup>2)</sup>の把握に、すでに、多くの実績がある。干渉SARを用いて地すべりの変動を検出する試みは、例えばカスピ海に面するイラン北部・アルプス山脈<sup>3)</sup>やリヒテンシュタインのライン川に面するアルプス山脈<sup>4)</sup>で行われている。一方、日本が打ち上げた地球資源衛星JERS-1 (ふよう1号; 1998年運用停止) に搭載されたSARセンサを用いて、SAR干渉画像から八幡平や遠音別岳の地すべり<sup>5)</sup>や兵庫県南部地震時の芦屋断層付近の地すべり<sup>6)</sup>を検出した事例が報告されている。

2006年1月に、日本は陸域観測技術衛星ALOS (だいち; 太陽同期準回帰軌道, 回帰日数: 46日, 高度: 691.65km<sup>7)</sup>) を打ち上げた。その衛星に搭載されたPALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) の干渉画像を用いて、2007年の能登半島地震による地すべりの検出事例が報告された<sup>8)</sup>。本稿の目的は、これと同様の手法を用いて、山形月山地区の地すべりを検出

することである。

## 2. 研究対象地区

本稿の対象地区は、山形県月山 (標高1984m) の南麓と西麓に位置する、志津温泉地区と七五三掛地区である (図-1)。七五三掛地区では2009年2月に地すべりの土塊の移動が顕在化した。対象地区の地質は、基本的には、第四紀に噴出した溶岩や火砕流、月山火山からの岩屑なだれに伴う堆積物が、それ以前の花崗岩類や中新統の安山岩質火山砕屑岩、泥岩・凝灰質砂岩を覆う層序となっている<sup>9)10)11)</sup>。

志津温泉地区は、図-1(a)の微地形分類図<sup>12)</sup>に示すように、石跳川の東岸の既存の地すべりの中に位置している。月山火山の溶岩台地から構成される主尾根の標高は約1000m、石跳川の河床の標高は600mであり、斜面は主に西向きである。標高約700mの五色沼を境として、その斜面上方と斜面下方には移動痕跡が不明瞭な別々の地すべり土塊がいくつか見られる。「4」で後述するように、地すべりの再活動が認められるため、それを防止するた

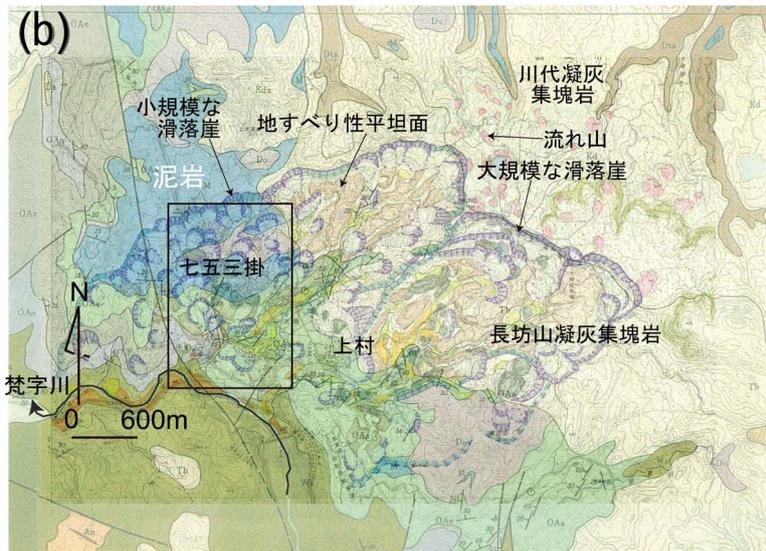
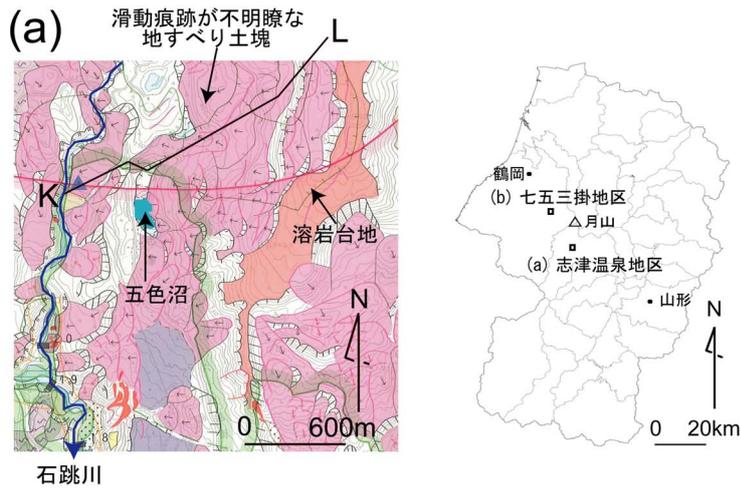


図-1 研究対象地区．(a)志津温泉地区の微地形分類図<sup>12)</sup>，K-Lは後述の図-4のK-Lの場所に一致する．(b)七五三掛地区，空中写真判読により作成した地形分類図（基図は国土地理院1/25,000地形図「大網」）と地質図<sup>10)</sup>の重ね合わせ図．四角の黒枠の範囲は、後述の図-3(e)の範囲に相当する．

め新庄河川事務所によって、地すべり対策の事業（平成21年度からは直轄化）が推進されている．

七五三掛地区は、図-1(b)の地形分類図（空中写真判読により1/25,000地形図を基図として作成）と地質図<sup>10)</sup>の重ね合わせの図に示すように、梵字川（河床の標高は約200m）北岸の大規模な地すべりの中央付近に位置する．大規模な地すべり滑落崖の縁に相当する主尾根の標高は約550mであって、斜面は主に南西を向いている．七五三掛地区の標高は約300mである．主尾根より北東側の斜面には川代凝灰集塊岩（更新世の月山火山の岩屑なだれ堆積物）から構成される流れ山が散在しており地すべり地形はあまり認められないが、主尾根より南西側には多くの地すべり地形が認められる．そして、大規模な地すべり滑落崖と地すべり性平坦面は、長坊山凝灰集塊岩（更新世の月山火山の岩屑なだれ堆積物）の範囲に分布する．七五三掛地区とその周辺には小規模な地すべりが

多数分布し、そこには長坊山凝灰集塊岩より下位の地層に相当する第三系の泥岩が分布している．七五三掛地区は、1906～1910年と1935年に大規模な地すべりが生じた周辺の上村地区<sup>13)</sup>と比較すると、少なくとも明治以降、地盤は比較的安定していた．ところが、2009年2月から地すべりの再活動が顕在化し、現在、国土交通省を含む国と山形県が地すべり対策事業を実施している．

### 3. 方法

SAR干渉画像の解説は、国土地理院の干渉SARのホームページ<sup>14)</sup>に掲載されているので詳細はそれに譲り、以下、簡単に原理を説明する．

SARは、図-2に示すように、人工衛星や航空機に搭載

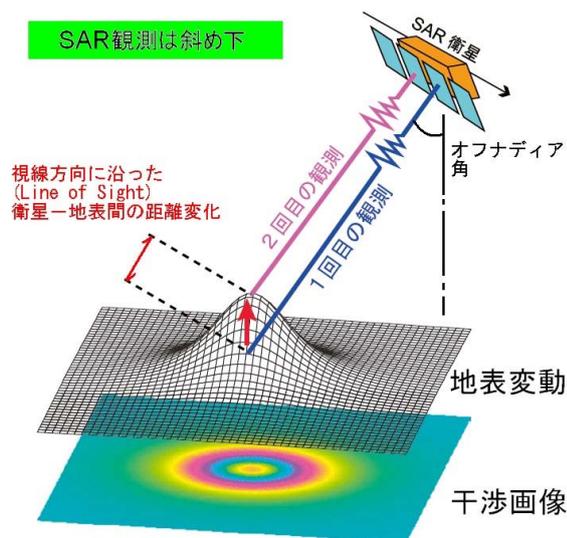


図-2 SAR干渉画像

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、地表の同一の地点のSAR観測を時期を違えて2回行い、人工衛星等と地表との間の距離の変化によって生じる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地表面の変動を面的に把握する技術である。

干渉SARにおける干渉性とは、センサの受信部に戻ってくるマイクロ波の位相変化が、集団としてどれだけ一様であるかを示す指標である。干渉性を左右する要因を大きいものから並べると、1) 注目する画素の空間の中での、衛星-地表間距離の変化のばらつき、2) 1回目の観測と2回目の観測の人工衛星等の軌道間距離のうち、視線方向の垂直成分の長さ、3) 土壌に含まれる水分の多さ・少なさや、植生の成長・伐採、耕作の前・後などによる地表の状態の変化、4) SAR衛星から射出されるマイクロ波を妨害する電波の存在であり、このような要因が著しいときは干渉性が低く、SAR干渉画像は砂を撒いたようにざらついた状態となる。逆に、干渉性が高いときは、SAR干渉画像はざらつきが少ない一様な状態となる。

SARに用いられるマイクロ波は、主にXバンド（波長約3cm）、Cバンド（約6cm）、Lバンド（約24cm）があり、波長が短いほど解像度は高いが、干渉性は低下する。特に、わが国のように植生が密な地域では、XバンドやCバンドでは干渉性は極めて低い（ほとんど干渉画像を得ることはできない）。「だいち」に搭載されているPALSARは、Lバンドである。

干渉SARでは、地表面の変動を反映した縞模様様の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

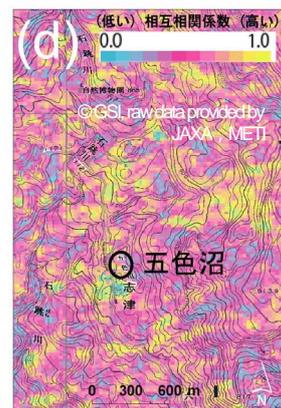
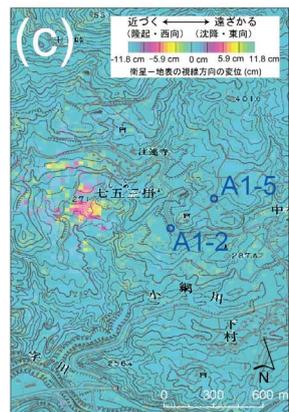
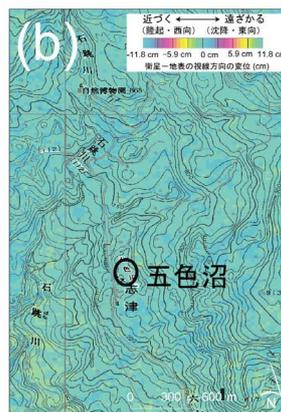
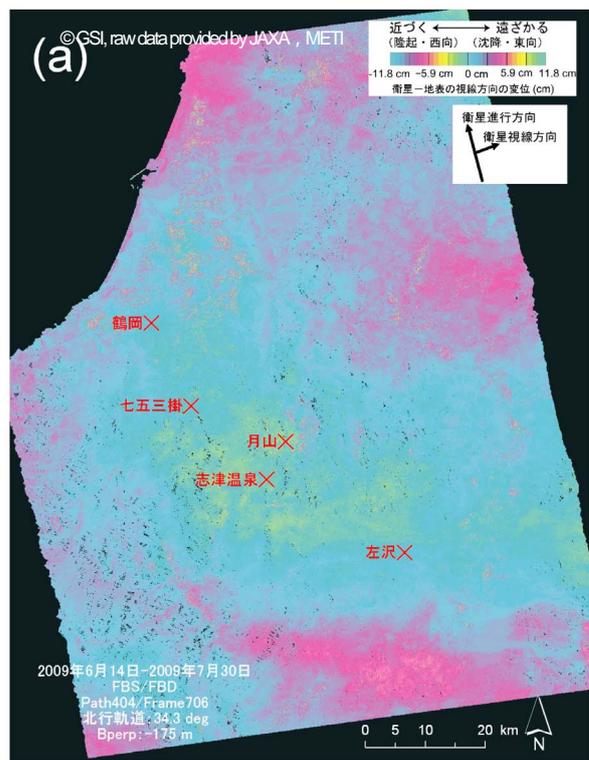


図-3 (a) 2009年6月14日~2009年7月30日のSAR干渉画像（北行軌道、オフナディア角 34.3°, Bperp = -175m）、(b) 「(a)」の志津温泉地区の拡大図、(c) 「(a)」の七五三掛地区の拡大図、(d) 「(b)」の干渉性を画像化した図、(e) 七五三掛地区の微地形分類図、基図は新庄河川事務所 1/5,000「赤川流域平面図（梵字川）」。

わち1波長分)の色の变化は、2回の観測の間に、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。「だいち」のPALSARの波長は23.6cmであるので、1回りの干渉縞の色変化は23.6cmの半分、つまりLoSで11.8cm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、さまざまな種類の誤差が入り、その誤差も各種条件によって変わる。したがって、すべての干渉SAR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<sup>14)</sup>。

#### 4. 検出の結果

##### (1) 2009年6月14日～7月30日のSAR干渉画像

図-3(a)に、2009年6月14日～7月30日のSAR干渉画像を示す。左沢の南で、青赤色の東西に細長く見える広域的な色変化は、大気中の水蒸気の影響 (大気中では電波の速度が真空中より遅くなるので、真空中の電波の伝播速度を仮定して距離を算出すると衛星と地表の距離が見かけ上伸びたように見える) と考えられる。広い範囲の青色の場所は、地表変動が無変化すなわち動いていないことを意味する。

##### a) 志津温泉地区

図-3(b)は、「(a)」の画像を志津温泉地区で拡大した図である。この短期間 (46日間) に、同地区では著しい地表変動は見出されていない。

図-3(d)は「(b)」の干渉性を画像化した図である。これは、干渉性の高低を表した図であり、本図では、干渉性が高いほど黄、低いほど青に色づけされている。図-3(d)を見ると、谷部や凹部を中心に青色の部分がまだら模様分布しているが、概して高い干渉性を示す黄色～赤色が分布している。このことは、図-3(b)のSAR画像の干渉縞の色変化が、比較的高い干渉性に裏付けられていることを示している。

##### b) 七五三掛地区

図-3(c)は、「(a)」画像を七五三掛地区で拡大した図である。一部を除いて全体的に青色に近いことを示しており、地すべりの動きがこの短期間 (46日間)、無変化に近いことが示されている。図-3(e)は、「(c)」と同じ範囲の微地形分類図 (空中写真判読により新庄河川事務所1/5,000「赤川流域平面図 (梵字川)」を基図として作成) である。両者を比較すると、2009年2月以来の活動的な地すべり (猫谷川西岸) で、色がざらついて見える。同じ範囲の干渉性の画像を見たところ、この色変化の範囲が青色だったので干渉性が低く、土塊の内部が様々な方向にばらばらに変動した可能性が示唆される。

表-1 2009年6月19日～2009年7月31日のGPS観測による平面直角座標系上の地表変動。観測点名は、図-3(c)と一致する。

	X(m)	Y(m)	H(m)
A1-2	-0.011	0.003	-0.011
A1-5	-0.028	-0.009	0.006

したがって、土塊が集散的にどの方向に変動したかは判らない。

新庄河川事務所では、現地のGPS観測により地表変動を監視している。表-1は、それらのデータのうち、SARデータの観測期間に含まれて、しかも、なるべく重複期間が長いように選んだ2つの地点の地表変動を示す。A1-2では南に1.1cm、鉛直下向きに1.1cmの動きを示し、A1-5では南に2.8cm、鉛直上向きに6mmの動きを示す。いずれも、衛星の視線方向よりも、衛星の視線方向と直交する成分の動きが多いためか、図-3(c)では、地表変動はほとんど無変化 (すなわち青色を帯びて) で示されている。

##### (2) 2006年9月12日～2008年9月17日のSAR干渉画像

##### a) 志津温泉地区

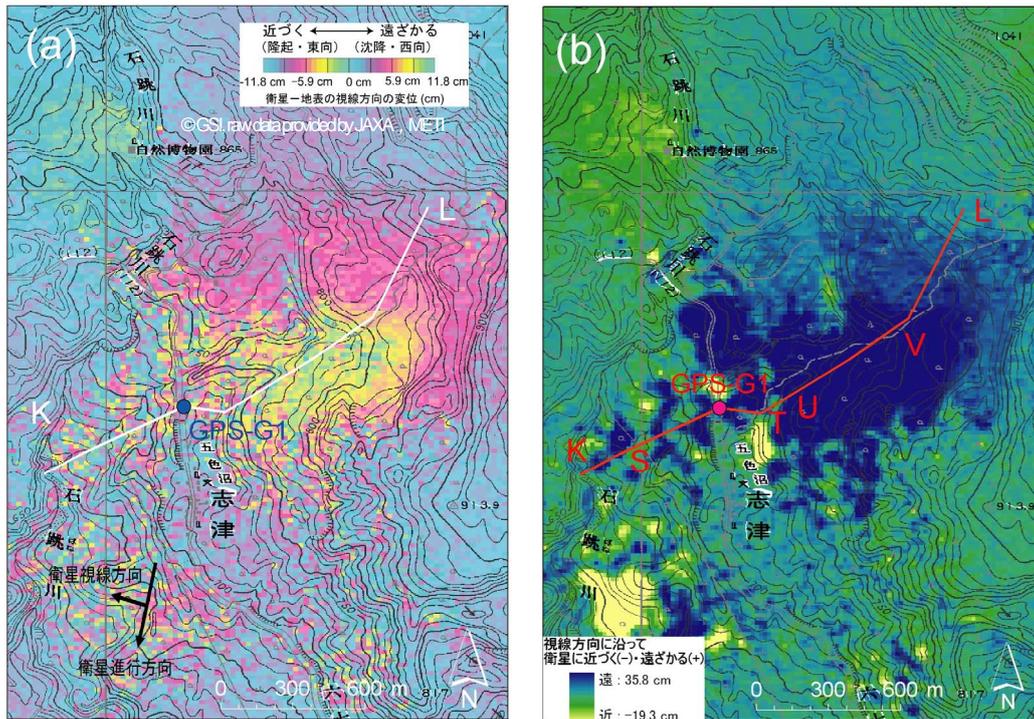
図-4(a)に、志津温泉地区における2006年9月12日～2008年9月17日のSAR干渉画像を示す。この図は、図-3(a)と異なり南行軌道から (すなわち、東側上空から現地を見下ろす視線方向) のSARデータが使われている。この図を見ると、五色沼付近に馬蹄形の干渉縞が現れており、Lの北東側に広がる青い (無変化の) 場所を基準に色変化を追跡すると、青赤黄色、すなわち馬蹄形の内部が西に向かって衛星から遠ざかるか沈降していることが読み取れる。

図-4(b)は、図-4(a)の画像から、視線方向の衛星-地表の距離の伸び縮みをマッピングしており、各画素が衛星から遠ざかるほど (注目地点が西向きに動くか沈降すると) 青色が濃くなり、逆に近づくほど (東向きに動くか隆起すると) 黄色が濃くなるように色づけした図である。この図も、馬蹄形状の変動域の移動の向きを直感的に知ることができる図である。

図-4(c)は、図-4(b)のK-L断面における視線方向の衛星-地表の伸び縮みを定量的に示したグラフであり、新庄河川事務所が設置しているGPS観測点GPS-G1よりも東側 (L側) で、この時期に変動が大きかったことを示唆している。新庄河川事務所では、GPS-G1以外にも多数のGPS観測点を配置しているが、図-4(a)に示したSAR干渉画像の観測期間と比較的一致していたのがGPS-G1であったことから、今後、この期間にGPS-G1で観測された3次元の変動データを衛星視線方向の衛星-地表の距離の伸び縮みに換算し、図-4(c)と重ね合わせて両者の合致の度合を調べる予定である。

##### b) 七五三掛地区

図-5(a)に、七五三掛地区における2006年9月12日～2008



SAR 観測日：2006 年 9 月 12 日～ FBS/FBS Path58/Frame2840  
 2008 年 9 月 17 日 南行軌道 off nadir 角：34.3° ; Bperp = +104m

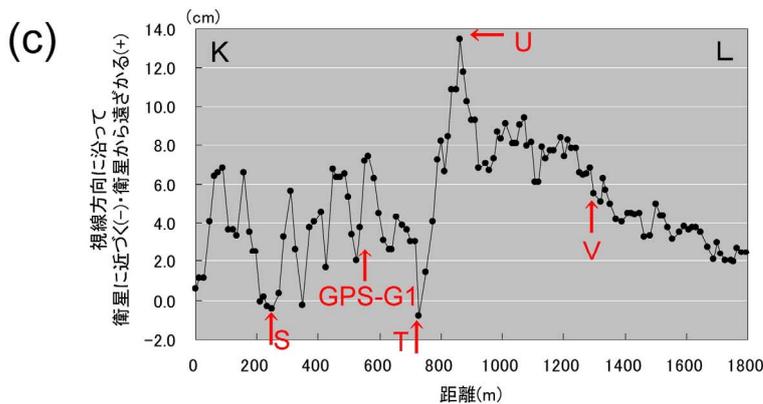


図4 (a) 2006年9月12日～2008年9月17日の志津温泉地区のSAR干渉画像，(b) 視線方向に沿った（LoSの）衛星と地表面の距離の伸縮の分布，(c) LoSの伸縮のK-L断面（図-1(a)，図-4(a)のK-Lと同位置）．図-4(b)のS，GPS-G1，T，U，Vは図-4(c)のS，GPS-G1，T，U，Vと一致する．

年9月17日のSAR干渉画像を示す．図-5(a)は，前報<sup>15)</sup>の図-2のSAR干渉画像の期間（2006年4月27日～2007年4月30日）と後半の5ヶ月余りが重複し，より長期間（2年間）の地すべり性の地表変動を示していることになる．

前報の図-2と同様，猫谷川より西側の，2009年2月以来の活動的な地すべりは捉えておらず，図-5(a)の「1」を中心に青 赤色，すなわち西向きに遠ざかるか沈降する変動が読み取れる．また，前報の図-2と比較すると，図-5(a)の「2」周辺でのSAR干渉画像のざらつきが著しくなっているようであり，干渉性が低いかもしれないが，地表が細かく変動している可能性もある．図-5(b)は，SAR干渉画像を図-3(e)の地形分類図と重ね合わせたもの

である．前報の図-2と比較すると，2007年4月30日以降，2008年9月17日までの間に図-5(a)の「3」周辺にもSAR干渉画像にざらつきが見られ，既存の地すべり地形の内部で地表変動が生じていた可能性もある，しかし，干渉性の低さも考慮しなければならず，断定はできない．

## 5. まとめ

SAR干渉画像で地すべり性の地表変動を見出したからといって，それが地すべり災害を起こすとは限らない．

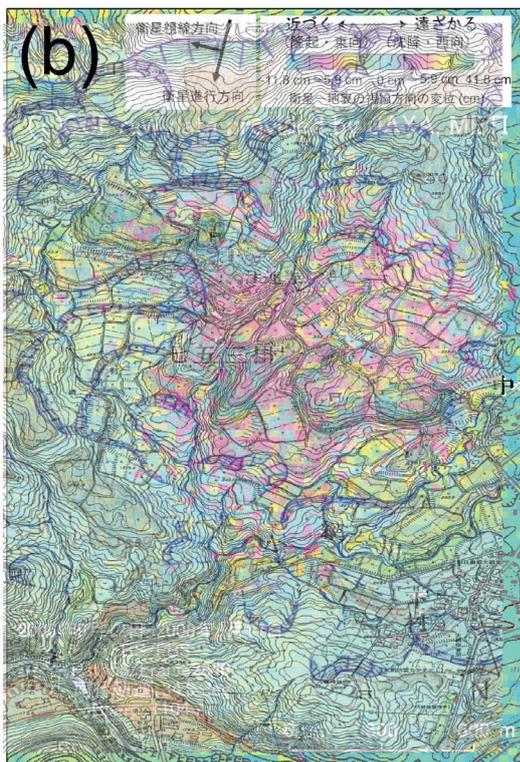
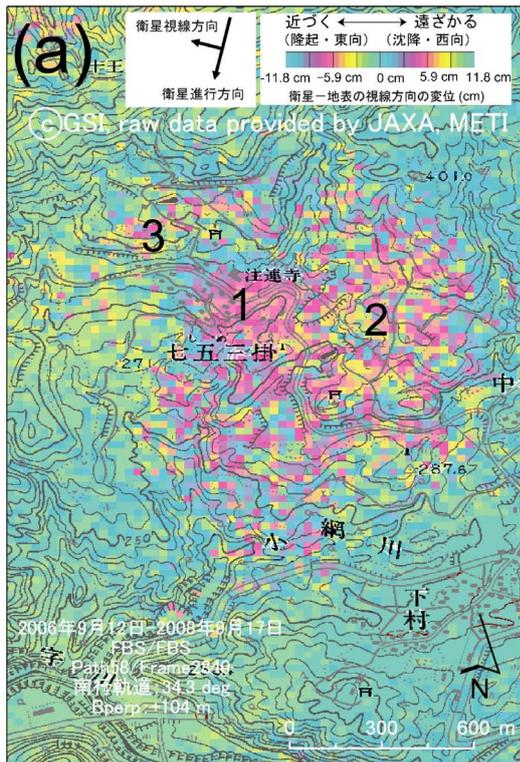


図-5 (a) 2006年9月12日~2008年9月17日の七五三掛地区の SAR 干渉画像 (南行軌道, オフナディア角  $34.3^\circ$ ,  $B_{perp} = +104\text{m}$ ), (b) SAR 干渉画像「(a)」と図-3(e)の地形分類図の重ね合わせ.

しかし, SAR干渉画像で地すべりの前兆現象をとらえることによって, GPSなどの現地観測機器をどこに配置するのか, 時系列のSAR干渉画像によって推定される地すべりの発生機構から, どのような対策を行えばいいのかといった初動体制と対策の立案, そして, 地すべり対策事業の終了後も引き続きSAR干渉画像で地表変動を監視することによって事業効果を確認できるといった点で, 今後, SAR干渉画像で地すべり性の地表変動を見出す意義は大きい.

謝辞: 七五三掛地区の現地調査にあたっては, 山形大学地域教育文化学部の八木浩司先生に, 地すべりの詳細な位置や性状についてご指導をいただいた.

#### 参考文献

- 1) 村上亮・飛田幹男・矢来博司・小沢慎三郎・西村卓也・中川弘之・藤原智: 合成開口レーダーを利用した地殻変動の検出とその地震・火山研究への応用, 地学雑誌, 109, pp.944-956, 2000
- 2) 中川弘之・村上亮・藤原智・飛田幹男: JERS-1 による干渉 SAR で検出した関東平野北部地域の地盤沈下, 日本測地学会誌, 45, pp.347-350, 1999
- 3) Colesanti C, Wasowski J: Investigating landslides with spaceborne synthetic aperture radar (SAR) interferometry, Engineering Geology, 88, pp.173-199, 2006
- 4) Peyret M, Djamour Y, Rizza M, Ritz J-F, Hurtrez J-E, Goudarzi MA, Nankali H, Chery J, Dortz KL, Uri F: Monitoring of the large slow Kahrod landslide in Alborz mountain range (Iran) by GPS and SAR interferometry, Engineering Geology, 100, pp.131-141, 2008
- 5) 矢来博司・大井信三・関口辰夫・飛田幹男・藤原智: JERS-1/SAR データの干渉解析による火山地域の地すべり変位の検出, 平成 16 年度東京大学地震研究所共同研究 (研究集会) 「干渉 SAR の展開」 (課題番号: 2004-W-09)
- 6) 関口辰夫・藤原智・飛田幹男・矢来博司・大井信三: 干渉 SAR による地すべりの検出と地形の関係, 日本地理学会発表要旨集, 68, p.95, 2005
- 7) リモート・センシング技術センター: 総覧 世界の地球観測衛星 Web 版, <http://www.restec.or.jp/databook/>
- 8) 宇根寛・佐藤浩・矢来博司・飛田幹男: 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, pp.125-131, 2008
- 9) 小泉治彦: 月山火山, 共立出版「日本の地質 2 東北地方」, p.194
- 10) 山形県商工労働部: 5 万分の 1 地質図幅説明書「湯殿山」・「月山」, 1979
- 11) 山形県商工労働部: 5 万分の 1 地質図幅説明書「左沢」, 1974
- 12) 新庄河川事務所: 「寒河江川流域微地形分類図」
- 13) 経済企画庁: 土地分類基本調査「湯殿山」, 1964
- 14) 国土地理院: 干渉 SAR, <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/>
- 15) 佐藤浩・鈴木啓・雨貝知美: 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>, 2009