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
Landslides Movement Detection Using SAR Interferometry Image in Mt. Gassan Area, Yamagata Prefecture

測地部　鈴木　啓・雨貝知美・森下　遊
Geodetic Department　Akira SUZUKI, Tomomi AMAGAI and Yu MORISHITA
地理地殻活動研究センター　佐藤　浩[1]・小荒井　衛
Geography and Crustal Dynamics Research Center　Hiroshi P. SATO and Mamoru KOARAI
地理調査部　関口辰夫
Geographic Department　Tatsuo SEKIGUCHI

要　旨

国土地理院は，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の観測データを用いて，SAR干渉解析を定常的に実施している．定常的に監視する解析地域は，地盤沈下・火山・地すべり地域を対象とし，その解析結果を順次Web等により公開している．

地すべりの定常監視地域に該当する山形県月山周辺では，SAR 干渉解析によって，地すべり性の地表変動が数ヶ所捉えられた．その中でも七五三掛（しめかけ）地区や志津地区では，約 500m四方の地すべり性地表変動が検出された．特に七五三掛地区では，2009年２月下旬から地すべりが再活動し，春先の雪解け時期にかけて大きな被害をもたらした.SAR干渉解析では，この七五三掛地区で再活動した地すべりの前兆現象と思われる非常に緩やかな地表変動（約６～７cm/year）を捉えていた．この情報は，月山周辺の地すべり監視・対策を担う官署の１つである国土交通省新庄河川事務所に提供し，地すべり監視を目的としたGPS観測点を設置する上で貴重な情報として活用された．

また，志津地区では，地すべり監視のため 2006年から新庄河川事務所において，GPS 観測が継続されている．そこで，SAR 干渉解析で検出した変動量とGPS観測結果を比較した結果，概ね一致していることが示された．

１．はじめに

宇宙測地技術のひとつである干渉合成開口レーダー（Synthetic Aperture Radar Interferometry. 以下,「干渉 SAR」という.）は，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，反射波の位相差をとることによって，数 10km範囲の地表変動を面的に捉えることのできる技術である．

国土地理院では，宇宙航空研究開発機構（Japan Aerospace Exploration Agency：JAXA）によって2006年１月に打ち上げられた陸域観測技術衛星「だいち」（Advanced Land Observing Satellite：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）を用いた高精度地盤変動測量を実施している．この高精度地盤変動測量では，地盤沈下・火山・地すべりによる地殻・地盤変動の監視を目的とした定常的な監視や地震等の災害発生時には緊急的な解析を行っている．

干渉SARを利用した過去の地すべりの検出例は，1992 年に打ち上げられた地球資源衛星ふよう１号（Japanese Earth Resources Satellite-1：JERS-1）により，八幡平や遠音別岳山麓の地すべり，兵庫県南部地震時の芦屋断層付近の地すべりを検出した事例が報告されている（矢来ほか，2004；関口ほか，2005）．また，宇根ほか（2008）は，ALOSのPALSARを使って，平成 19 年（2007 年）能登半島地震の地震動に伴う地すべり性地表変動を捉えている．

本稿では，定期的なSAR干渉解析によって検出された山形県月山周辺の地すべり性地表変動域のうち，2009年２月下旬から変動が顕在化し，４月以降に大きな地すべり被害をもたらした七五三掛地区と地すべり対策工事が本格化した志津地区の事例について報告する．

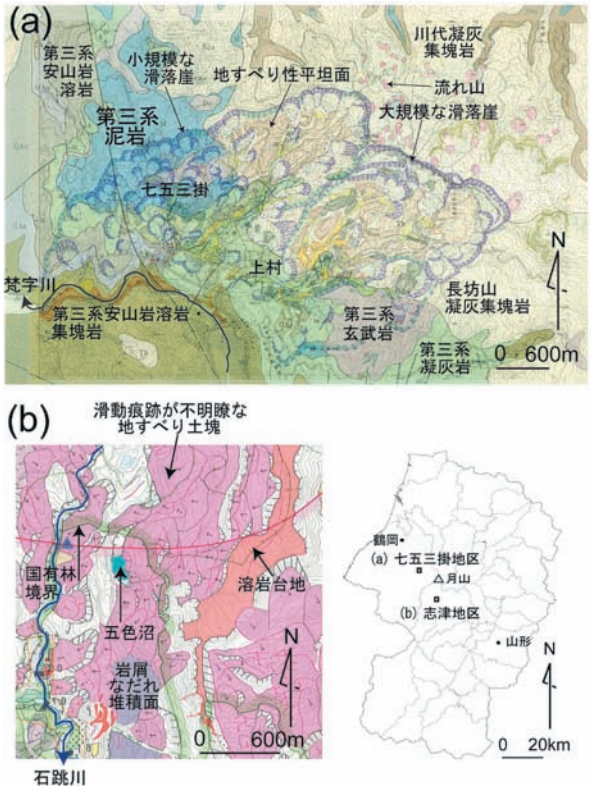
２．対象地区

２．１　地形の概要

対象地区は，山形県月山（標高1,984m）の南麓と西麓に位置する，七五三掛地区と志津地区（図－１右下の挿図参照）である．図－１(a)のとおり，七五三掛地区は梵字川北岸の大規模地すべり地帯の中央付近に位置し,斜面は主に南西を向いている.また,本地区周辺には小規模な地すべりが多数分布している．なお，七五三掛地区近傍の上村地区では，1906～1910年と1935年に大規模な地すべりが生じていた（経済企画庁，1964）．

志津地区は,図－１(b)の微地形分類図に示すよう

現所属：[1]地理空間情報部



図－１　対象地区の地形，(a)七五三掛地区，(b)志津地区，右下：対象地区の位置図．(a)の背景の地質図と(b)の微地形分類は，それぞれ，山形県商工労働部商工課（1979），国土交通省新庄工事事務所（2002）による．

に石跳川東岸の既存の地すべり地帯に位置し，斜面は主に西向きである．また，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．

２．２　地すべり対策事業

七五三掛地区については，2009年２月下旬から顕在化した地すべり災害を受けて，集落周辺における地すべりに関連する直轄砂防災害関連緊急事業が採択され実施されてきた（国土交通省新庄河川事務所，2009a）．その結果，国土交通省が実施している対策工事については，集水井13基が設置された．この工事の目的である地下水の水位低下については，工事開始前よりほぼ全ての地下水位観測孔で水位が低下し，最大で30m以上も低下した観測孔もみられた．このような状況から，地すべり性の地表変動を引き起こしそうな地下水位の上昇は観測されていないが，新庄河川事務所では引き続き地下水位等の観測を行いながら，地すべり監視を継続している（国土交通省新庄河川事務所，2009c）．

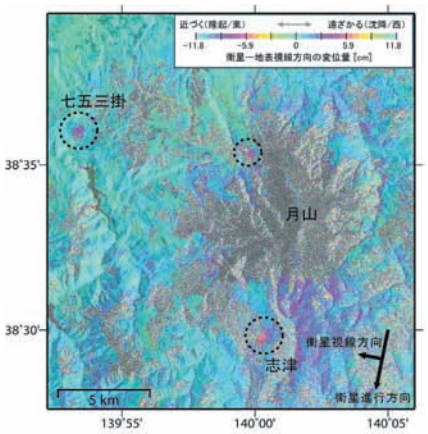
月山周辺における七五三掛地区以外の地区では，新庄河川事務所により従来から地すべりの変位や地下水位の監視等が行われてきたが，平成21年度からは集水井工，排水トンネル工，鋼管杭工等の地すべり対策事業を直轄化することが決定された（国土交通省新庄河川事務所，2008）．これを受けて，志津地区では，平成21年10月26日より新庄河川事務所が直轄地すべり対策事業を本格化させた（国土交通省新庄河川事務所，2009b）．

３．月山周辺のSAR干渉解析

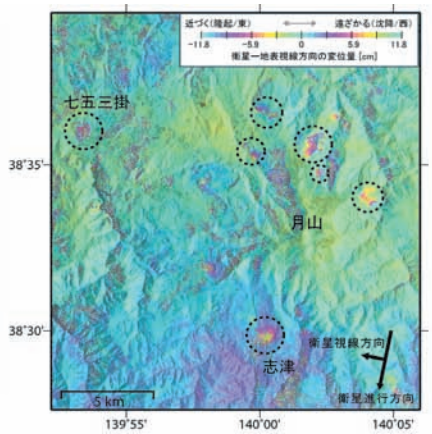
３．１　SAR 干渉解析の概要

ALOS の PALSAR には，複数の観測モードがある（宇宙航空研究開発機構，2006）．国土地理院では，それらの観測モードの中で，最も高精度な高分解能モード（１偏波，２偏波）（以下，「FBS」，「FBD」という．）のオフナディア角 34.3° の観測モードを基本モードとして定常解析を行っている．また，SAR 干渉解析を実施するためには，最低２回の観測が必要である．この組となる２つの観測データを「干渉ペア」と呼び，先に観測されたものを「マスター」，後に観測されたものを「スレーブ」という．

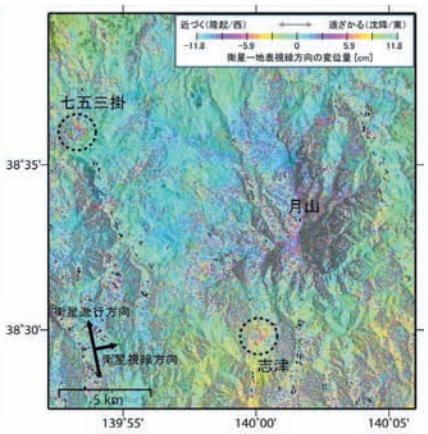
SAR干渉解析で月山周辺の地すべりを効率よく検出するために，①基線長垂直成分が短いこと（500m未満を目安），②積雪期のデータを使用しないこと，③融雪期を挟むような期間であること，以上のような条件を考慮し，表－１に示す干渉ペアの解析を行った．



図－２　月山周辺の SAR 干渉画像
（2006/04/27-2007/04/30）



図－３　月山周辺の SAR 干渉画像
（2006/09/12-2008/09/17）



図－４　月山周辺の SAR 干渉画像
（2006/06/06-2008/10/12）

表－１　月山周辺の SAR 干渉解析に使用したペア（１）

観測日（マスター） 観測日（スレーブ）	モード	軌道	基線長 垂直成分	期間
2006/04/27 2007/04/30	FBS FBS	南行	−398m	368 日
2006/09/12 2008/09/17	FBS FBS	南行	+103m	737 日
2006/06/06 2008/10/27	FBS FBD	北行	−452m	874 日

３．２　地すべり性地表変動の検出

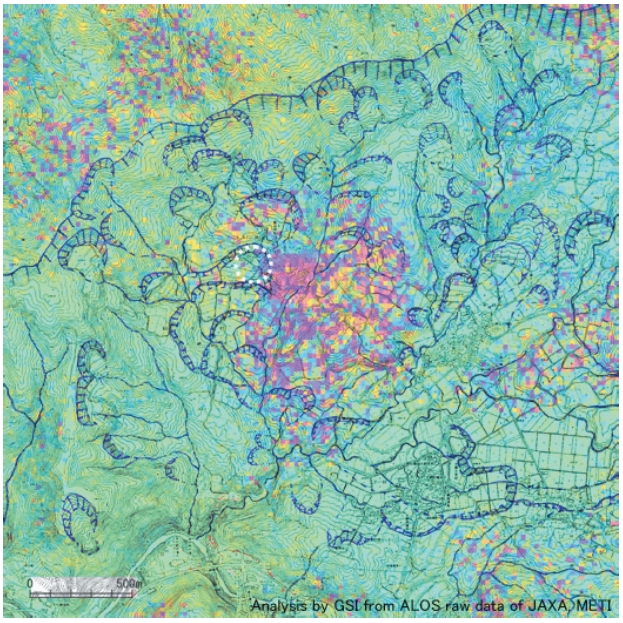
表－１に示した南行軌道の SAR 干渉画像をそれぞれ図－２，３に示す．約１年間のペアでは，残雪の影響のため月山山頂付近は，干渉してないため，変動の有無を確認できない．しかし，その影響の少ない月山の麓では，地すべり性の地表変動を示す位相変化が数ヶ所で確認できる(図－２の破線部)．また，さらに長期間（約２年間）の干渉ペアでは，月山山頂付近でも明瞭な地すべり性の地表変動が検出されている（図－３の破線部）．一方，北行軌道の SAR 干渉画像（図－４）は，南行軌道に比べて干渉性が良くないが，七五三掛地区や志津地区では，地表変動と思われる位相変化が確認できる．この結果から，干渉 SAR を利用した地すべり監視の主な利点は，広範囲を面的にかつ人の立ち入りが困難な地域についても地表変動域を把握できることが挙げられる．

本稿では，干渉SARによって検出された数ヶ所の地すべり性地表変動のうち，2009年２月以降に地すべりが再活動した七五三掛地区と継続的な地すべり監視が実施されている志津地区に注目した．

４．七五三掛地区の地すべり監視

４．１　被害前の地すべり変動

七五三掛地区では，2009 年２月下旬に地すべりが再活動し，融雪時期の春先にかけて地すべり被害が拡大した．そこで，2009 年２月以前の干渉ペア（表－１）で，最も基線長が短い約２年間の SAR 干渉画像（図－３）の七五三掛地区周辺に地形分類図（空中写真により地すべり地形を判読）を重ね合わせた結果を図－５に示す．干渉 SAR によって，この期間に検出した変動域は，地形分類図の地すべり地形の滑落崖と概ね一致し，土塊が衛星から遠ざかる方向（西向き/沈降）に，少なくとも約６～７cm 変動したことが確認できる．しかし，2009 年２月下旬に亀裂が多数発生した地域は，干渉 SAR で検出した変動域の西側の地すべりブロック（図－５の白破線部）であり，雪解け以降もこの周辺の被害が最も大きかった（中里ほか，2009）．以上の結果より，干渉 SAR



図－５　図－３の七五三掛地区を拡大し，地形分類図と重ね合わせた図（青線：滑落崖，白破線：地すべり被害が顕在化し始めた地点）

で検出されていた地すべりブロックと 2009 年２月以降に被害をもたらした地すべりブロックは，異なることが示唆される．

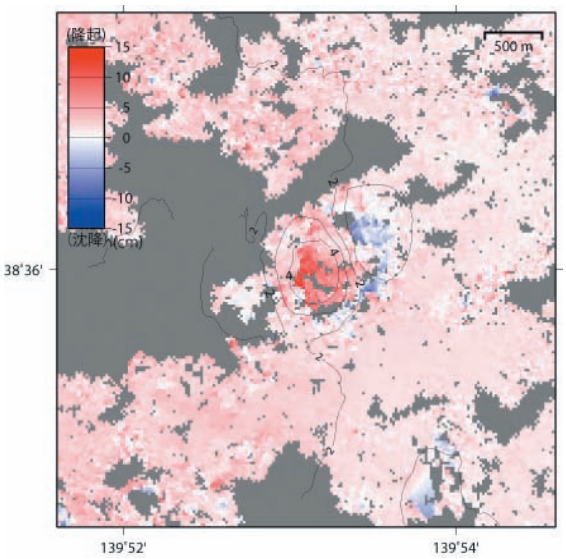
４．２　2.5 次元解析

干渉 SAR では，衛星から地表への視線方向の変位量を計測するため，単独では変動の方向（東西・南北・上下）を特定することができない．しかし，２方向以上からの SAR 干渉画像を合成することにより東西方向・上下方向へ分離することが可能となる（Fujiwara et al.，2000）．また，南北方向については，衛星視線方向と直交する方向のため感度がなく，変動量を検出することができないといった短所もある．そこで本稿では，北行軌道と南行軌道（２方向）の解析結果を利用し，被害前に検出された地表変動について 2.5 次元解析を行った．2.5 次元解析に使用する解析結果は，南行軌道と北行軌道の解析期間をある程度一致させた方が望ましいため，図－３と図－４の約２年間の解析結果を利用した．

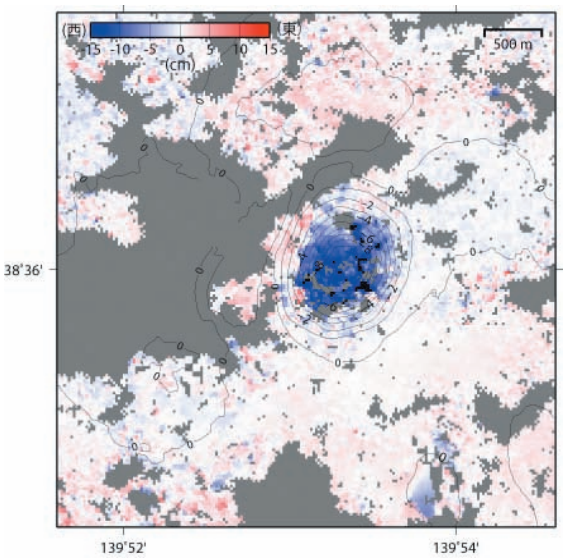
その結果，上下方向には地すべりの形跡を示す馬蹄形の変動が数 cm 見られ(図－６)，東西方向では，干渉 SAR で検出されていた地すべりブロックの全域で西向きへ約９cm の変動が確認できた（図－７）．この地すべりブロックの全体的な西向きへの変動が，西隣に位置する地すべりブロック（2009 年２月以降に再活動）に何らかの影響を与えたことも考えられるが，更なる検討が必要である．

４．３　被害後の GPS 観測と SAR 干渉解析

新庄河川事務所は，地すべりの被害に即応し，2009 年３月下旬から GPS 観測点を２点設置し，2009 年６月現在ではさらに GPS 観測点を４点追加し，地すべり変動の監視を実施している．ここで３月下旬に設置された A1-2 点は，国土地理院から新庄河川事務所への情報提供により，干渉 SAR で検出されていた変動域に設置されることになった．次に，新庄河川事務所から提供された GPS 観測結果のうち，特に変動量の大きかった期間の観測点の結果を図－８に示す．A1-1 点では，３月下旬から約１ヶ月間で南南西の方向に１m以上変動し，上下方向には約 25cm 沈降していることが観測されている．この最も変動の大きかった A1-1 点の周囲（写真－１）では，被害が拡大したため５月以降観測は中止された．また，A1-2 点は，2006 年以降の干渉ペアにおいて変動を捉えていた地域であるが，約１ヶ月間で南南西方向に約 16cm 変動し，３月以降変動速度が速くなったことがわかる．しかし，６月以降では，設置された全ての GPS 観測点において，変動量が約１～２cm であったことから，地すべりの活動が落ち着いてきたと判断される．



図－６　七五三掛地区の 2.5 次元解析結果（上下成分）



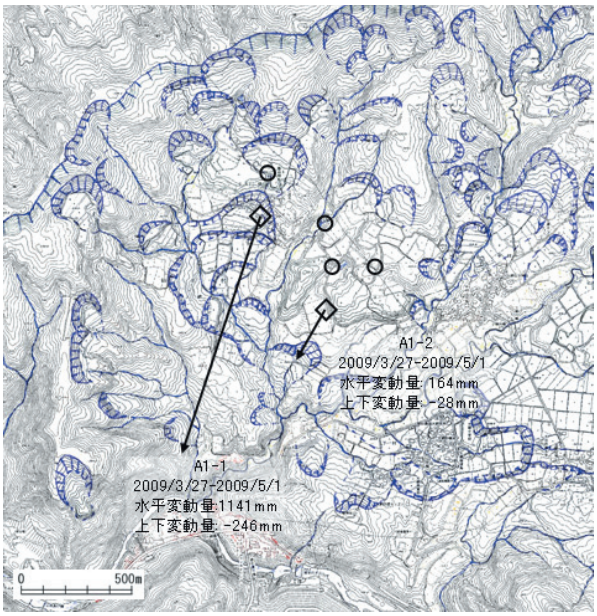
図－７　七五三掛地区の 2.5 次元解析結果（東西成分）

表－２　月山周辺の SAR 干渉解析に使用したペア（２）

観測日（マスター） 観測日（スレーブ）	モード	軌道	基線長 垂直成分	期間
2009/03/20 2009/05/05	FBD FBS	南行	+197m	46 日

る．

次に，地すべり被害が顕在化した 2009 年２月下旬から GPS 観測で変動量が大きく観測された５月上旬までの期間を挟む数ヶ月のペアで SAR 干渉解析を行った．しかし，３．１で述べたような地すべり変動を効率よく検出するための３つの条件を満たす干渉ペアは，表－２に示す１つのペアしか存在しなかった．この結果，十王峠や大網地区周辺では，地表変



図－８　七五三掛地区の GPS 観測結果（新庄河川事務所の観測による）

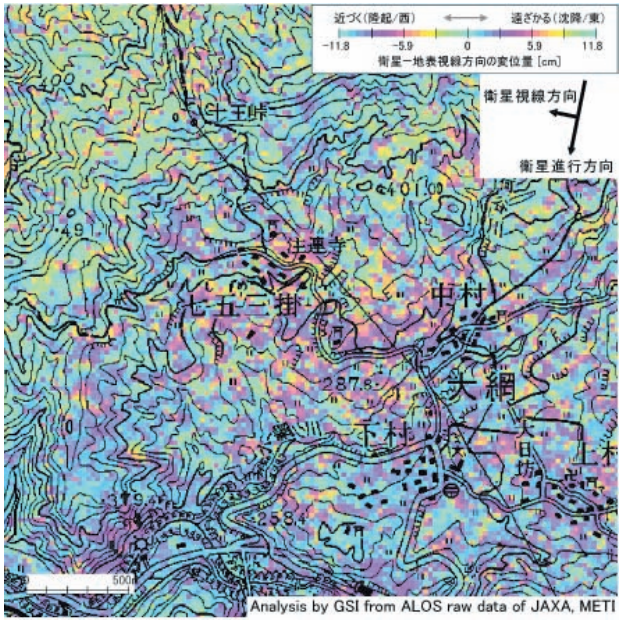
（GPS 観測点◇：2009 年３月下旬から観測
GPS 観測点○：2009 年６月中旬から観測（変動量が数 cm のため，ベクトル未表示））

写真－１　GPS 観測点 A1-1 周辺（撮影：2009 年６月）

動を示す位相変化は見られなかったが，七五三掛地区では，写真－１のように干渉 SAR では捉えきれないほど地表面が大きく変化したため，干渉していなかった．よって，この非干渉領域から，地すべり変動域をある程度特定することができた（図－９）．

４．４　継続的な地すべり監視

七五三掛地区で発生した地すべり変動を監視するため，継続的な SAR 干渉解析を行った．解析に使用したペアを表－３に示す．図－10 では，七五三掛地区を中心に位相変化が見られ，変動が継続していると思われる．また，2009 年６月以降では，一部変動



図－９　七五三掛地区の SAR 干渉画像
（2009/03/20-2009/05/05）

表－３　月山周辺の SAR 干渉解析に使用したペア（３）

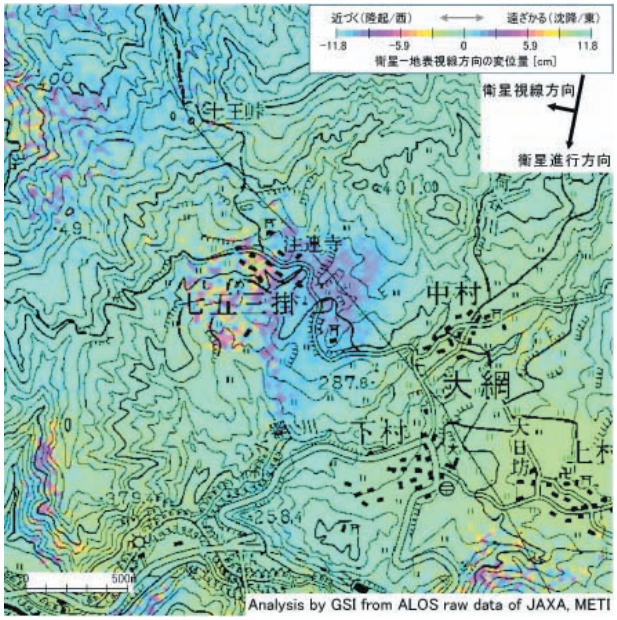
観測日（マスター） 観測日（スレーブ）	モード	軌道	基線長 垂直成分	期間
2009/05/05 2009/08/05	FBS FBS	南行	+426m	92 日
2009/06/14 2009/07/30	FBS FBD	北行	-175m	46 日

と思われる位相変化が確認できるが，全体的に変動が落ち着いていることがわかる（図－11）．これは，新庄河川事務所から提供された GPS 観測結果とも一致している．

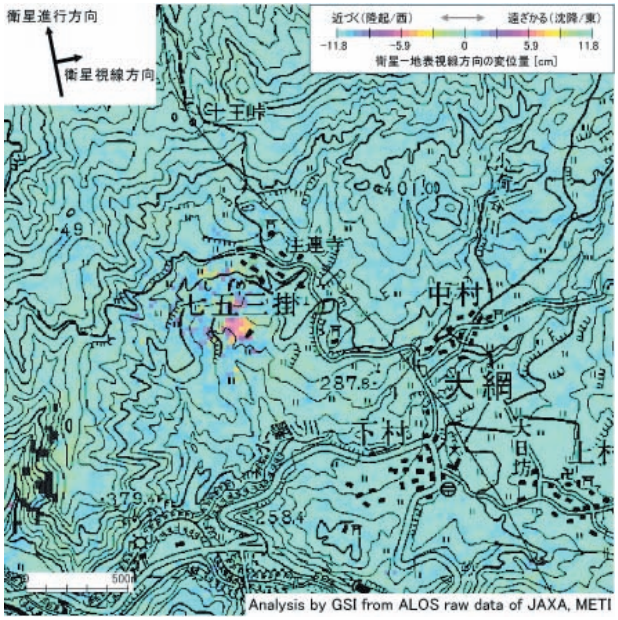
５．志津地区の地すべり監視

５．１　GPS 観測との比較

山形県月山周辺には，七五三掛地区以外に志津地区においても地すべり性の地表変動が干渉 SAR によって捉えられている（３．２）．干渉 SAR によって地すべりが検出された志津地区では，2006 年頃から新庄河川事務所によって，GPS 観測を利用した監視が継続されている．そこで，図－３の志津地区を拡大した SAR 干渉画像と GPS 観測結果を図－12 に示す．この約２年間の SAR 干渉画像では，志津地区の東側斜面において，衛星から遠ざかる方向（西向き/沈降）に約７～８cm の変動が確認できる．また，干渉 SAR で捉えた変動域周辺（五色沼の北側）に位置する GPS 観測点でも約２年間で南西方向に約７～８cm 変動が確認できるため，両者の観測結果が概ね一致していることがわかる．



図－10　七五三掛地区のSAR干渉画像
(2009/05/05-2009/08/05)



図－11　七五三掛地区の SAR 干渉画像
(2009/06/14-2009/07/30)

５．２　継続的な地すべり監視

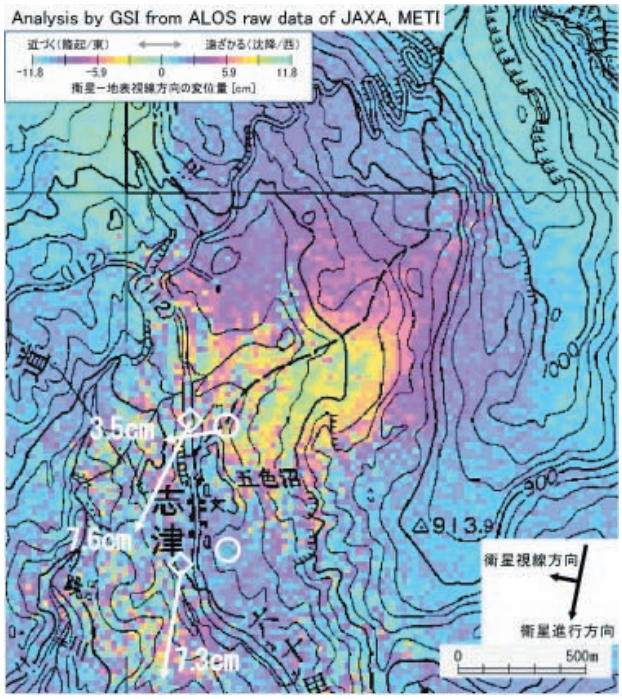
七五三掛地区同様，地すべり変動を監視するため，継続的な解析を行った．解析ペアは，表－３のとおりである．結果的にこの期間の SAR 干渉画像からは，特に目立った変動は検出されなかったが（図－13），今後も継続的な監視は，実施していく予定である．

６．まとめと今後の展望

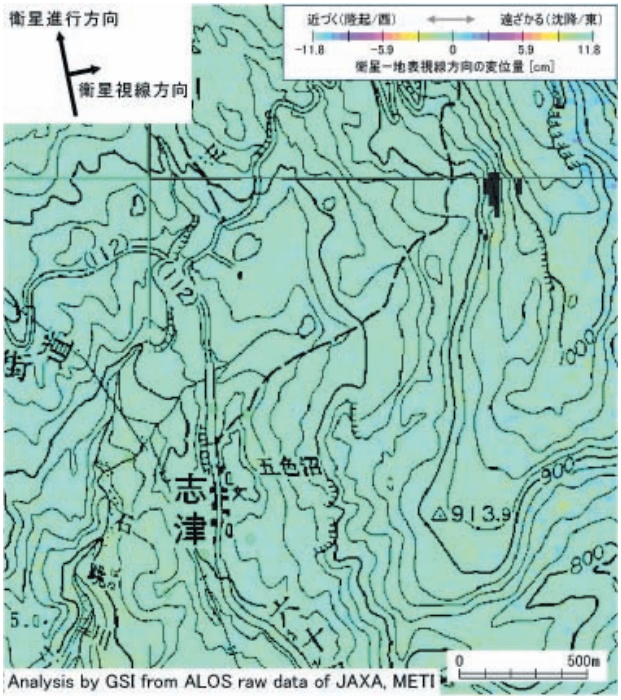
干渉 SAR を利用することによって，山形県月山周辺で地すべり性の地表変動を面的に捉えることができた．特に七五三掛地区では，2009 年２月下旬から地すべりが再活動し，春先の雪解け期にかけて被害が拡大した地域である．干渉 SAR では，地すべり被害が顕在化する以前の 2006 年４月と 2007 年４月の干渉ペアから七五三掛地区において地すべり性の地表変動を検出していた．この干渉 SAR によって変動を検出していた地すべりブロックは，2009 年２月下旬から最も活動した地すべりブロックとは異なり，東隣に位置していた．そして，2.5 次元解析の結果，干渉 SAR が捉えていた地すべり性の地表変動は，全体的に西向きに変位していたことから，この地すべりブロックの西隣に位置していた今回再活動した地すべりブロックに何らかの影響を与えたとも考えられるが，この結果からだけでは何ともいえない．

また，志津地区でも干渉 SAR によって地すべり性の地表変動が検出され，GPS 観測で捉えられた変動量とも概ね一致していた．以上の結果より，地すべり監視においても干渉 SAR の有効性が示された．

しかし，干渉 SAR にも大気等によるノイズの影響による精度の低下や衛星視線方向と直交するような南北方向に感度が無いなどの欠点があり，単一の SAR 干渉画像からでは変動を検出することが困難な場合もある．よって，本稿の事例のように複数の SAR 干渉画像を利用し，検討することが必要となる．



図－12　図－３の志津地区を拡大し，GPS 観測（新庄河川事務所による）結果と重ね合わせた図
（GPS 観測点◇：2006/10/19-2008/10/29
GPS 観測点○：2007/12/07-2008/10/29
（ベクトル未表示：変動量１cm 未満）



図－13　志津地区の SAR 干渉画像
(2009/06/14-2009/07/30)

干渉 SAR を利用して定期的な地すべり監視を行う最大の利点は，再活動する可能性がある地すべりの前兆現象となる非常に緩やかな地表変動を面的に捉えられることである．このような地表変動を把握することにより，GPS 等の観測機器の配置といった初動対策や対策事業を行った後の地すべりの監視を通じた事業効果の見積もり等を行う上で貴重な資料となる．今後も干渉 SAR を利用した地すべりの検出事例を蓄積し，地すべり監視への貢献を目指したい．

謝　辞

今回の地すべりで被害に遭われた地元の方々に，改めてお見舞いを申し上げます．ここで使用した ALOS/PALSAR データの所有権は，経済産業省および宇宙航空研究開発機構にあります．また，これらのデータは，宇宙航空研究開発機構との共同研究協定に基づいて，提供を受けています．さらに，GPS 観測結果については，新庄河川事務所よりデータを提供頂くとともに，同事務所齊藤克浩調査課長，調査課鈴木邦章専門員（それぞれ当時）にお世話になりました．2009 年６月の現地の地形調査では，山形大学地域教育文化学部の八木浩司教授と，(独) 農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究所の中里裕臣室長にご指導を頂きました．この場を借りてお礼申し上げます．

参 考 文 献

Fujiwara, S., T. Nishimura, M. Murakami, H. Nakagawa and M. Tobita (2000): 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, Geophysical Research Letters, 27, 2049-2052.

経済企画庁 (1964)：５万分の１土地分類基本調査（地形・表層地質・土じょう調査），湯殿山.

国土交通省新庄工事事務所 (2002)：寒河江川流域微地形分類図.

国土交通省新庄河川事務所 (2008)：記者発表資料（平成 20 年 12 月 20 日付け），http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/kisya/kisyah/images/22111_1.pdf (accessed 29 Jan. 2010).

国土交通省新庄河川事務所 (2009a)：直轄地すべり防止区域の概要，http://www.thr.mlit.go.jp/shinjyou/03_sabou/jisuberi/jisuberi.html#a (accessed 26 Jul. 2010).

国土交通省新庄河川事務所 (2009b)：記者発表資料（平成 21 年 10 月 22 日付け），http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/kisya/kisyah/images/25702_1.pdf (accessed 26 Jul. 2010).

国土交通省新庄河川事務所 (2009c)：記者発表資料（平成 21 年 12 月９日付け），http://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/kisya/saigai/25980_kisya_preview.html (accessed 26 Jul. 2010).

関口辰夫，藤原智，飛田幹男，矢来博司，大井信三 (2005)：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，68，95.

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 20，http://www.geog.or.jp/journal/back/pdf118-3/p587-594.pdf (accessed 29 Jan. 2010).

宇宙航空研究開発機構 (2006)：ALOS データ利用ガイドブック，付録３．PALSAR データの関連情報.

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，45，125-131，http://www.jstage.jst.go.jp/article/jls/45/2/125/_pdf/-char/ja/ (accessed 29 Jan. 2010).

山形県商工労働部商工課 (1979)：５万分の１地質図幅説明書，湯殿山.

矢来博司，大井信三，関口辰夫，飛田幹男，藤原智 (2004)：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」.