干渉 SAR 時系列解析による微小な変位量で進行する地盤変動監視の実用化へ向けて Approach for Monitoring of Small Ground Surface Deformation by InSAR Time Series Analysis

測地部 森下遊・鈴木啓¹ Geodetic Department Yu MORISHITA and Akira SUZUKI 地理地殻活動研究センター 小林知勝 Geography and Crustal Dynamics Research Center Tomokazu KOBAYASHI

要 旨

国土地理院では、陸域観測技術衛星「だいち」 (ALOS)のLバンド合成開口レーダー(PALSAR) のデータを使用して、全国の地盤沈下、地すべり及 び火山地域を対象に、地盤変動の監視を目的として 定常的にSAR干渉解析を実施してきた、今後は2013 年度内に打ち上げ予定のALOS-2データを使用して、 日本全国を対象にして定常解析を実施する予定であ る.

従来の SAR 干渉解析技術では地盤変動の計測精 度が数 cm であったため, 微小な規模で進行する変 動を検出することは困難であった.このような計測 精度の問題を改善するために,近年,国土地理院で は,SAR 干渉解析の発展的手法である「干渉 SAR 時系列解析」に関する調査・研究を実施しており, より高精度な結果が得られている.しかし,解析技 術には発展の余地があり,実用化へ向けてはまだ多 くの課題が残されている.

そこで,ALOS-2 データを使用した干渉 SAR 時系 列解析による日本全国の地盤変動監視の実用化を目 指し,さまざまな誤差低減手法の干渉 SAR 時系列解 析への適用や効率的な解析機能及び出力機能の開発 を行った.また,実際に ALOS データを使用して, これらの手法を適用し,関東地方及び九州地方を対 象に干渉 SAR 時系列解析を実施した.その結果,効 率的かつ高精度に地盤沈下,地すべり及び火山地域 の変動を検出することができ,干渉 SAR 時系列解析 による全国の地盤変動監視の実現可能性を確認する ことができた.一方,長波長ノイズや山岳地域では 良好な結果が得られないといった新たな問題点も明 らかになった.今後も干渉 SAR 時系列解析による地 盤変動監視の実用化へ向けて,調査・研究を続けて いく.

1. はじめに

干渉 SAR とは,高空間分解能な合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar: SAR)による観測を地表 の同一地点に対して2回以上実施し,反射波の位相 差を計算することによって,地表の変動を面的に捉 える技術である.国土地理院では,2006年1月~2011 年5月に運用されていた陸域観測技術衛星「だいち」 (ALOS)のLバンド合成開口レーダー(PALSAR) のデータを使用して、全国の地盤沈下・地すべりに よる地盤変動や火山活動による地殻変動の監視を目 的として、定常的にSAR干渉解析を実施してきた. 2013年度にはALOSの後継機であるALOS-2の打ち 上げが予定されており、そのデータを使用してSAR 干渉解析を引き続き実施する予定である.

これまでの定常解析では,解析時間の短縮のため, 事前に監視対象地域として地盤沈下17地域,地すべ り3地域,火山46地域を選定し,その範囲のみを切 り出して解析を実施してきた.しかし,近年の解析 機器性能の向上や国土地理院が開発した解析ソフト ウェア(以下,「新 GSISAR」という.)の改良によ り,解析効率が大幅に向上し,日本列島を縦断する ような広域解析が実現可能になってきた(例えば, 山中ほか,2011).特定の地域に限定しない網羅的な 解析は,未知の変動を検出する可能性を増加させ, 国土の監視としてはより理想的である.ALOS-2 で は,広域観測モードの観測頻度がALOS よりも大幅 に増加する見込みであることもあり,対象地域を限 定しない広域解析を実施する予定である.

また,これまで2時期の観測データからその間に 発生した変動を検出する従来型のSAR干渉解析手 法を主に使用してきたが,大気ノイズなどの影響に より,その計測精度は数 cm にとどまり,微小な規 模で進行する変動を検出することは困難であった. 国土地理院では,最近,数多くの観測データを使用 するスタッキングや干渉SAR時系列解析といった 発展的解析手法に関する調査・研究を実施しており, 従来よりも高精度な結果が得られている(山中ほか, 2013).ただ,これらの手法は多量のデータが必要で, 解析に多大な時間を要するという問題点がある.ま た,結果の出力形式が確立されておらず,地盤変動 監視への実用化へはまだ多くの課題が残っている.

本研究では、実用化へ向けて、さまざまな誤差低 減手法の干渉 SAR 時系列解析への適用や効率的な 解析機能及び出力機能の開発を行った.また、干渉 SAR 時系列解析による地盤変動監視の実現可能性 及び課題を確認するため、5 年超の運用期間で多く のデータが蓄積された ALOS データを使用して,関 東地方及び九州地方を対象に干渉 SAR 時系列解析 を実施した.

2. 干涉 SAR 時系列解析

2.1 干渉 SAR 時系列解析の概要

干渉 SAR 時系列解析とは、多量のデータを使用す ることにより、干渉性の低下、DEM 誤差及び対流 圏・電離圏遅延などに起因するノイズの影響を低減 することで、計測精度を向上させる解析手法である. 一概に干渉 SAR 時系列解析といっても、様々なアル ゴリズムが開発されている.本稿では、非商用に限 り 無 償 で 利 用 可 能 な ソ フ ト ウ ェ ア で あ る StaMPS/MTI version3.2.1 (Hooper et al., 2007)を使用 した.本ソフトウェアでは、PSI (Persistent Scatterer Interferometry) という解析手法を実行可能である.

PSI は,解析期間において散乱特性が変化しない点 (PS 点)にのみ着目し,PS 点における時系列的な 変動を推定することができる.PS 点となり得る地表 の物体は主に人工建造物や岩であり,それらが密に 分布する都市部や植生及び積雪のない山肌などで良 好な結果が得られやすい.計測精度はデータ量,波 長,対象地域などによって大きく異なるが,条件が 良ければ 1mm/year 程度を達成可能であるという報 告がある (Crosetto et. al., 2008).

2.2 PSI の解析手順

StaMPS/MTI の解析手順の概要は以下の通りであ

- る (Hooper et al., 2007;福島, 2011).
- 1) L1.0 データから SLC の作成(画像再生)
- 2) 解析範囲の切り出し
- 1 つのマスター画像と他の全スレーブ画像との 間で画像マッチング
- 3)の結果に基づいて全スレーブ画像をリサンプ ル
- 5) マスター画像と他の全スレーブ画像との間で差 分干渉処理
- 6) ジオコード
- 7) 強度分散指標に基づいて PS 候補点を抽出
- 8) PS 候補点に対して位相安定性評価を行い, PS 点を抽出
- 9) (必要に応じて)加重平均による PS 点の間引き
- 10) 3次元位相アンラッピング
- マスター画像誤差,DEM 誤差,各スレーブの 軌道誤差を推定
- 12) (必要に応じて)時空間フィルタによりスレー ブ画像に含まれる空間相関ノイズを推定

このうち,7)以降が PSI と呼ばれる解析手順であり,6)まではそのために必要な前処理である.一般的に1)~4)及び8)に膨大な時間を要する.

3. さまざまな誤差低減手法の StaMPS/MTI への適 用

国土地理院では、干渉 SAR の計測精度を向上させ るため、数値気象モデルによる対流圏誤差低減処理 (小林ほか、2011)及び GNSS 補正(飛田ほか、2005) といった手法を開発してきた.しかし、これらは従 来型の SAR 干渉解析手法及び新 GSISAR に対応した ものであり、StaMPS/MTIでは実行できなかった. そこで、これら2つの手法を StaMPS/MTIで実行で きるように調製し、干渉 SAR 時系列解析のさらなる 精度向上を試みた.

3.1 数値気象モデルによる対流圏誤差低減処理

干渉 SAR で観測される位相には大気中の水蒸気 による遅延量が含まれ、それが地盤変動計測におい ては誤差となる(以下,「対流圏誤差」という).対 流圏誤差は、水蒸気分布の不均質性に起因して水平 方向に不規則に現れるものに加え,標高に相関して 現れるものがある (藤原ほか, 1999). 前者は時間的 に不規則であるため、複数の SAR 干渉解析結果を平 均化するスタッキングという手法で統計的に低減す ることが可能である(山中ほか, 2013).しかし,偶 然にも時間相関を持ってしまった場合は低減されな い. 後者については,標高と位相差の関係を近似し た一次関数を使用する補正手法がよく用いられてき た(藤原ほか, 1999). しかし, 実際の変動が標高に 相関する場合 (火山活動による地殻変動など),対流 圏誤差を正確に変動量から分離して推定することは 困難である.

ここでは、対流圏誤差低減の有力な手法として近 年開発された数値気象モデルを使用した手法(小林 ほか,2011)を StaMPS/MTI で実行できるようにし た.この手法では、全データ点において、マイクロ 波の屈折の効果を考慮したレイトレーシング法を適 用して位相遅延量を推定する.そのため、データ点 数に比例して、ある程度の計算時間を要する.そこ で、計算するデータ点数を大幅に減らすために PS 点抽出・間引き後(2.2.手順9の後)に低減処理を実 行できるようにし、計算時間の大幅な短縮に成功し た.

本手法の効果として、阿蘇山の例を示す.当該地 域は山岳部内に広大なカルデラがあり、その中心に さらに中岳などの標高の高い地帯があるという特殊 な地形である(図-1).本手法適用前の観測量(図-2 上段)には標高に相関する位相変化量が見られる. この結果のみからでは火山性の変動によるものか、 対流圏誤差によるものかを判断することは不可能で ある.しかし、本手法によって数値的に推定した位 相遅延量(図-2 中段)を差引くことで、標高に相関 する位相変化量が大きく減少している(図-2下段). 時系列的にも不自然な位相変化がなくなったことか ら、対流圏誤差が大きく低減されたと考えられる. 今後は、数値気象モデルを利用した低減効果の更な る検証や将来公開予定の数値気象モデルである局地 モデル(LFM) への技術的対応が課題となろう.



図-1 阿蘇山及びその周辺の色別標高図



図-2 阿蘇山における対流圏誤差低減処理の効果.範囲は 図-1と同様.マスター観測日は2007年7月26日 で共通,各スレーブ観測日は図下部に示してある. (上段) PSI による観測量.(中段)数値気象モデ ルによる位相遅延量推定量.(下段)両者の残差.

3.2 GNSS 補正

SAR 干渉解析結果には、衛星軌道推定値の誤差に 起因する規則的な長波長の誤差が含まれる(藤原ほ か,1999). GNSS 補正は、地上における GNSS 観測 によって得られた変位量と SAR 干渉解析結果とを 比較することによって,この誤差量を推定・除去す る手法である(飛田ほか,2005).福島・Hooper(2011) では、同様の手法を StaMPS/MTI に適用しており、 補正関数としてバイリニア曲面に加え、標高相関成 分も推定している.ここでは補正関数として,傾斜 平面とバイリニア曲面,標高相関成分推定の有無を 選択可能にした.解析範囲内の GNSS 観測データ点 数や地形によって,最適な関数形を選択することが できる.

本手法は位相アンラッピング後に(2.2 手順11の 一部として)適用する.しかし,日本列島を縦断す るような広域の解析では,電離層擾乱に起因すると 考えられる不規則な長波長のノイズが卓越し,うま く補正関数にフィットしないことがある.不規則な 長波長ノイズは時空間フィルタ(2.2 手順12)によ って統計的にある程度除去することができる (Hooper et al., 2007)ため,ここでは,この手順以 降に再度本手法を適用可能にした.これにより,激 しい長波長ノイズをある程度除去した後でGNSS補 正を実施し,よりGNSS観測データに適合した結果 を得ることができる.ただ,変動の性質によっては, 検出すべき本物の変動もノイズとして除去されてし まう危険性があるため,適用する際には注意が必要 である.

4. 広域を対象とした干渉 SAR 時系列解析の試行

ALOS 打上げ当初は1日に10シーン程度を処理す るのが限界であったため、特定の地域を定常解析地 域に指定し、その範囲を切り取って解析を実施して いた(和田ほか、2007).しかし、解析機器の高性能 化や解析ソフトウェアの改良により、より多くのデ ータを高速に処理することが可能になってきた.国 土の監視という観点からは地域を限定しない網羅的 な広域解析が望ましい.そこで、広域解析の実現可 能性を確認し、その課題を明確にするため、関東地 方全域及び九州地方全域において、StaMPS/MTI に よる解析を実施した.使用したデータは ALOS の北 行軌道のものである.

4.1 関東地方全域の PSI 広域解析結果

解析に使用したデータは合計で934シーンにも及 んだ(表-1).ここでは定常的な変動に着目し,観測 期間における衛星-地表間距離(LOS)平均変動速度 を算出した.2007年7月16日の新潟県中越沖地震 や2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震に伴う 変動を含むデータは,LOS平均変動速度算出からは 除いた.また,電離層擾乱の影響と思われる長波長 の激しいノイズを含むデータも除去した.これらの データ除去後においても,全パスで観測数15回以上 のデータを使用することができた. このような広範囲を本来の分解能(1 ルック)を 保持したまま解析すると, PS 点数が計算不可能なほ ど膨大になってしまう.本解析では,広域的な変動 のみに着目することとし, PS 候補点を抽出する閾値 を下げ,さらに抽出した PS 点を 500m 間隔に間引い た.また,前章の対流圏誤差低減処理及び GNSS 補 正を適用し,GNSS 観測データの固定点は,解析地 域のほぼ中心に位置する電子基準点「境」(020956) とした.さらに,時空間フィルタによりスレーブ画 像に含まれる空間相関ノイズを推定・除去した.な お,空間スケールの小さな変動を検出するのに特化 した解析手法については次章で述べる.

表-1 関東地方の解析データ情報

パス番号	404	405	406			
フレーム数	8	8	7			
解析観測数	23	24	22			
*	(15)	(16)	(17)			
平均変動速度	2007/7/25	2006/12/24	2007/1/10			
計算期間	2010/12/18	2011/2/19	2011/3/8			
パス番号	407	408	409			
フレーム数	6	6	5			
解析観測数	22	27	22			
*	(17)	(23)	(20)			
平均変動速度	2007/9/14	2006/12/29	2007/1/15			
計算期間	2010/12/23	2011/2/24	2011/1/26			
※任ご内は地震関連データ及び激しい長速長ノイブを含むこ						

※ 括弧内は地震関連テータ 及ひ激しい長波長ノイスを含むっ ータ除去後の観測数

関東地方における PSI 広域解析の結果を図-3 に示 す.山岳地域の大部分では結果が得られていないが, これは PS 点が抽出できなかったためであり、PSI では当該地域の結果を得るのが困難であることを示 している.長波長ノイズの影響により、パスの境界 では変動速度の値は必ずしも一致しない.また、LOS 方向の平均変動速度のため,上下成分のみではなく, 東西成分の変動も寄与していることに注意しなくて はならない.日本海側が LOS 伸長,太平洋側が LOS 短縮の傾向が見られるが、GNSS 観測の結果も考慮 すると、これは主に東西方向の変動を反映している と考えられる. その中でも, 九十九里平野や新潟平 野などでは、周囲と比較して相対的に LOS 伸長の変 動を示す局所的な地域が見られ、これらは地盤沈下 を捉えていると考えられる (図-3 黒破線内). ただ し、空間分解能を低下させ、かつ時空間フィルタを 適用しているため、この変動速度は水準測量などで 検出されているものより小さく、過小評価されてい ると考えられる.



図-3 関東地方における PSI 広域解析の結果.背景の灰色 が表示されている地域は結果が得られなかった地 域である.黒矢印及び緑棒はそれぞれ水平方向及び 上下方向の 2007 年 9 月~2010 年 9 月における GNSS 観測による変動量.星印は GNSS 観測デー タの固定点を表す.黒破線内は地盤沈下が捉えら れていると考えられる地域を表す.

4.2 九州地方全域の PSI 広域解析結果

解析に使用したデータは合計で558シーンであった(表-2).関東地方と同様に,長波長の激しいノイズを含むデータを除去し,対流圏誤差低減処理,GNSS補正及び時空間フィルタを適用した.GNSS補正の固定点は,解析地域のほぼ中心に位置する電子基準点「五木」(021073)とした.

表-2 九州地方の解析データ情報

	パス番号	422	423	424	425	
	フレーム数	5	6	6	5	
	解析観測数	24	21	27	30	
	*	(20)	(15)	(23)	(25)	
	平均変動速度	2007/7/9	2008/1/26	2007/8/12	2006/8/26	
	計算期間	2011/1/17	2010/12/19	2011/4/7	2011/3/9	
※括弧内は激しい長波長ノイズを含むデータ除去後の観測数						

全体として西側が LOS 伸長,東側が LOS 短縮の 傾向を示しているが, GNSS 観測の結果も考慮する と、これは主に東西方向の変動を反映していると考 えられる(図-4).九州地方では雲仙岳,霧島山,桜 島など活動が活発な火山が複数存在するが、本解析 では PS 候補点を抽出する閾値を下げ、かつ空間分 解能を低下させているため、目立った変動は検出さ れなかった.



図-4 九州地方における PSI 広域解析の結果.背景の灰色 が表示されている地域は結果が得られなかった地 域である.黒矢印及び緑棒はそれぞれ水平方向及び 上下方向の 2007 年 9 月~2010 年 9 月における GNSS 観測による変動量.星印は GNSS 観測デー タの固定点を表す.

4.3 広域解析の実現可能性と課題

これらの解析を実施した結果,約 13TB のファイ ルが生成された.不要な中間ファイルを削除するこ とである程度ディスク容量は節約できるが,いずれ にせよ日本全国を解析するには大容量のハードディ スクが必須となる.

解析に要する時間は、データ数や PS 点数に大き く依存するが、1 つのパスでおおよそ 4 日~1 週間程 度であった.しかし、現在入手可能な解析機器性能 であれば複数のパスを並行して解析でき、効率的に 解析を実施できる.また、可能な限りの処理の自動 化を行ったため、手動での処理を要する部分は各処 理手順の結果の確認や最適な結果を得るための解析 パラメータ調整などに限定され、少人数でも広域解 析は実現可能であると考えられる.ただ、解析パラ メータ調整においては解析に関する高度な知識や経 験が必要とされる.

激しい長波長ノイズが含まれるデータが多く見られ、これが広域解析において使用可能データの減少 及び精度低下を招く大きな要因の一つとなっている. このノイズは電離層擾乱に起因するものであると考えられているが、現時点では効果的な誤差低減手法 はなく、当該データを除去するしかない.しかし、 データ数の減少は干渉 SAR 時系列解析において精 度低下につながる.Lバンドは電離層の影響を受け やすく、ALOS-2 でも同様の問題に直面することが 想定されるため、誤差低減手法の確立が求められる.

PSI では解析の性質上,植生のある山岳地域で結 果を得るのが困難である.L バンドは時間的・空間 的短基線の干渉ペアであれば植生地域でも干渉性の 高い結果が得られるため,そのような結果を利用す る干渉 SAR 時系列解析のもう一つの主な手法であ る SBAS (Small Baseline Subset)であれば,山岳地 域でも良好な結果が得られる可能性がある (Berardino et al., 2002).

5. 効率的な局所解析と実用的な出力

広域解析ではデータ量の調整のため空間分解能を 大きく低下させたが、PSI は本来、高分解能を利点 とする解析手法である.地盤沈下、地すべり、火山 活動などの局所的な地盤変動の監視においては高分 解能な情報が望ましい.そこで、広域解析の結果を 利用して効率的に高分解能な結果を得る機能を開発 し、StaMPS/MTI に追加した.そしてこの機能を実 際に地盤沈下、地すべり及び火山地域に適用した.

また,実用化にあたっては,解析結果の利用・理 解のしやすさも重要な要素の一つである.そこで, 解析結果を KML 形式で出力する機能を開発した.

5.1 効率的な局所解析

StaMPS/MTI の標準的な処理では,異なる範囲の 解析を実施する場合,解析範囲の切り出し(2.2 手順 2)から実施するため,局所的な解析でも長時間を要 していた.しかし,広域解析を実施済であれば時系 列処理に必要な前処理(2.2 手順6まで)の結果が存 在する.そこで,この結果に対して解析範囲の切り 出しを行い,PSI処理(2.2 手順7)から開始できる ような機能を追加した.これにより,局所的で高分 解能な解析の計算時間を大幅に短縮することに成功 した.

局所解析の場合は,対流圏や電離層による長波長 ノイズの影響が小さいため,多くの場合,時空間フ ィルタを使用したスレーブ空間相関ノイズを推定す る必要がない.よって、本物の地盤変動を過小評価 してしまう危険性が低下する.

5.2 KML 形式での解析結果の出力

解析結果をより効果的に利用するには、他の地理 空間情報と重ね合わせて表示できることが望ましい. そこで、KML 形式で PSI 結果を出力する機能を開発 した.本機能により、PS 点の位置及び変動量、等量 線、格子化画像、凡例などを地図上に表示すること が可能となった.

KML 形式を表示できるソフトウェアは無償で公 開されており、インターネット環境があれば誰でも 簡単に利用することができる.地図の拡大/縮小及び 情報の表示/非表示の切り替えが容易で、視覚的に理 解しやすい.重ね合わせ情報として、電子国土 Web システムの標準地図や色別標高図(http://geolib.gsi.g o.jp/download.html)及び基本基準点や公共基準点の 位置情報(http://sokuseikagisl.gsi.go.jp/)などが KM L 形式で入手可能である.その他にもさまざまな地 理空間情報を重ね合わせて表示することが可能であ る.

5.3 地盤沈下(新潟県柏崎市)への適用事例

新潟県では消雪用として地下水が利用されており, 県内の複数の地域で地盤沈下が発生してきた(環境 省,2012).地盤沈下を監視するため,複数の市で毎 年,高密度な水準測量が実施されてきた.ここでは, 顕著な地盤沈下が水準測量でも検出されている柏崎 市への適用事例を示す.

PSI局所解析の結果,最大 2cm/year を超えるよう な地盤沈下が検出された(図-5).この結果は水準測 量の結果とも整合的である.水準点の分布と比較す ると,PS点の方が非常に多く分布していることがわ かる.水準点の存在しない地点の変動量も計測可能 で,変動の極大点の位置を高精度に推定したり,未 知の変動域を発見したりすることも可能である.観 測頻度も,水準測量は年1回(柏崎市は2年に1回) が標準であるのに対し,ALOSは最大年8回であり, 時間分解能も高い.干渉 SAR 時系列解析の結果は, 水準測量を効率的に実施するための参考情報や,水 準測量を実施していない地域の新たな情報として利 用できると考えられる.

5.4 地すべり(佐賀県唐津市)への適用事例

佐賀県唐津市の地すべり地帯に本機能を適用した ところ,最大 3cm/year を超える LOS 短縮の変動が 検出された(図-6).地形の形状から,西向きの地す べり性の変動が発生していると考えられる.この結 果は,干渉 SAR 時系列解析により地すべり性の微小 な変動を検出できることを示している.

本機能では、この事例のような数 km 四方の解析 範囲であれば、わずか数十分で解析結果を得ること ができる.一般的に地すべりは空間スケールが小さ いため、高密度な観測網が展開されていない限り検 出は困難であるが、干渉 SAR 時系列解析を地すべり が疑われる範囲に対してくまなく適用することで、 未知の地すべりを発見することが可能になると期待 される.



図-5 新潟県柏崎市における PSI 局所解析の結果. 丸印及 びその色が PS 点の位置及び平均変動速度,緑四角 印及び文字列がそれぞれ水準点の位置及び水準点 名を表す. 色付きの実線は PS 点の平均変動速度か らスプライン補間により推定した等量線である. 平 均変動速度は,水平方向の変動はないと仮定して, LOS から上下方向に投影したものである.



図-6 佐賀県唐津市における PSI 局所解析の結果

5.5 火山 (大分県九重山) への適用事例

九重山は「火山防災のために監視・観測体制の充 実等が必要な火山」として火山噴火予知連絡会によ って選定された 47 火山のうちの一つで,気象庁によ り地震計や GNSS を使用した常時観測が実施されて いる.本機能を適用したところ,星生山頂付近にお ける約 1km 四方の狭い範囲で,最大 6cm/year を超え る LOS 伸長の変動が検出された(図-7).気象庁の GNSS 観測点は今回検出した変動域の外側に位置し ているため,このような変動は検出されていなかっ た.地上の観測点を設置するのが容易ではない火山 地域において, PSI による高分解能な監視は効果的 であるといえる.しかし,植生や積雪があると PS 点を抽出するのは困難になるため,適用可能な火山 は限定される可能性がある.



図-7 大分県九重山における PSI 局所解析の結果. 黄緑色 印は気象庁が設置した GNSS 観測点を表す.

6. まとめ

今回の結果から、干渉 SAR 時系列解析による地盤 変動監視の実現可能性を確認することができた. PSI 広域解析では、長波長ノイズや山岳地域では良好な 結果が得られないといった問題点が明らかになった が、PSI 局所解析により、地盤沈下、地すべり及び 火山地域において効率的に高精度な結果を得ること ができた. 今後は、より良好な結果を得ること ができた. 今後は、より良好な結果を得るため、電 離層ノイズ低減手法やPSIとは異なる干渉 SAR 時系 列解析手法に関する調査・研究を実施し、ALOS-2 などの次世代の SAR 衛星データを使用した地盤変 動監視の実用化を目指す.

謝 辞

本研究で使用した「だいち」の PALSAR データの 所有権は、(独) 宇宙航空研究開発機構(JAXA)及 び経済産業省にあります.これらのデータは、「陸域 観測技術衛星を用いた地理空間情報の整備及び高度 利用に関する協定」に基づき、JAXA から提供され ました.数値気象モデルは「電子基準点等観測デー タ及び数値予報格子点データの交換に関する細部取 り決め協議書」に基づき、気象庁から提供されまし た.KML 出力機能の一部として GMT (Wessel and Smith, 1998) を利用しました.干渉 SAR 時系列解 析の計算処理の一部は、平成 25 年度職場体験実習生 の京都大学大学院・金子泰洗ポール君に実施しても らいました.ここに記して謝意を表します.

(公開日:平成25年11月6日)

参考文献

- Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti (2002): A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 40, 2375-2383.
- Crosetto, M., O. Monserrat, N. Adam, A. Parizzi, C. Bremmer, S. Dortland, R.F. Hanssen and F.J. van Leijen (2008): Validation of existing processing chains in Terrafirma stage 2, http://www.terrafirma.eu.com/validatio n/ValProj/Final%20Reports/ValProj Final report.pdf (accessed 30 Aug. 2013).
- 藤原智, 飛田幹男, 村上亮, 中川弘之, P.A. Rosen (1999): 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 標高補正, 測地学会誌, 45, 315-325.
- 福島洋(2011): StaMPS パッケージを用いた PS 干渉 SAR 解析,測地学会誌,57,41-48.

福島洋, A. Hooper (2011): PS 干渉解析による 2004 年新潟県中越地震後の地殻変動, 測地学会誌, 57, 195-214.

- Hooper, A., P. Segall, and H. Zebker (2007): Persistent scatterer InSAR for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos, J. Geophys. Res., 112, B07407
- 環境省(2012): 全国地盤環境情報ディレクトリ(平成 23 年度版), http://www.env.go.jp/water/jiban/dir_h23/in dex.html (accessed 30 Aug. 2013).
- 小林知勝,飛田幹男,今給黎哲郎,鈴木啓,野口優子,石原操(2011):「だいち」SAR 干渉解析により捉え られた霧島山(新燃岳)の火山活動に伴う地殻変動とその圧力変動源の推定,国土地理院時報,121,195-201.

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(2005):干渉合成開 ロレーダの解析技術に関する研究,国土地理院時報,106,37-49.

和田弘人,松坂茂,藤原智,仲井博之,藤原みどり,雨貝知美,飛田幹男,福崎順洋,矢来博司(2007):

ALOS/PALSAR データの干渉 SAR 測量への利用とデータ処理・解析システムの構築概要,国土地理院時報, 111, 107-117.

Wessel, P. and W. H. F. Smith, New, improved version of the Generic Mapping Tools released, EOS Trans. AGU, 79, 579.

山中雅之,野口優子,鈴木啓,宮原伐折羅,石原操,小林知勝,飛田幹男(2011):衛星合成開口レーダーを 用いた平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動の検出,国土地理院時報,122,47-54.

山中雅之,森下遊,大坂優子(2013):干渉 SAR 時系列解析による地盤沈下の検出,国土地理院時報,124, 1-14.