

干渉 SAR 時系列解析プロトタイプシステムの開発 A Prototype System for InSAR time series analysis

地理地殻活動研究センター 小林知勝・森下遊・山田晋也
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Tomokazu KOBAYASHI, Yu MORISHITA and Shinya YAMADA

要 旨

地盤変動の時間的推移を高い計測精度と空間解像度で検出することを目的として、干渉 SAR 時系列解析システムのプロトタイプを開発した。本研究開発では、干渉 SAR 時系列解析の計測精度を高めるために、植生、対流圏、電離圏の影響による誤差を低減するための技術開発を行い、システムに実装した。本システムの特徴として、1) Phase Linking 法を組み込んだ位相最適化処理による植生の影響の低減、2) 数値気象モデルを利用した対流圏起因の誤差の低減、3) Range Split-Spectrum 法等による電離圏起因の誤差の低減、等が主に挙げられる。さらに本システムを実データに適用して、特に植生と電離圏の影響低減に関する各開発技術の効果を検証した。植生の影響低減に関しては、位相最適化処理により PS 点の少ない山間部においても、従来の手法より高い空間密度で計測点を取得することができ、局所変動の詳細な空間分布の検出に資することが期待される。電離圏の影響低減に関しては、Range Split-Spectrum 法の適用による誤差低減効果が高く、従来用いられてきた時空間フィルタに依存せずに適切に変動を抽出できることが示された。本機能は、L バンド SAR を利用した SAR 干渉処理において、広域変動の観測に不可欠な技術となると期待される。また、本システムで計測される変動速度の精度を検証するために水準測量データとの比較を実施した。その結果、両者は高い相関を示し本事例の場合、水準測量との最大較差は 6mm/yr であった。本システムの開発により、ALOS-2 や 2020 年度打上げ予定の先進レーダ衛星 (ALOS-4) の L バンド SAR データを用いた地盤変動の時間推移把握が高度化されることが期待される。

1. はじめに

合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar : 以下「SAR」という。) データの応用解析技術である SAR 干渉 (Interferometric SAR : InSAR) 解析は、地震や火山活動に伴う地殻変動を数 cm の計測精度で面的に検出できる手法として 1990 年代後半から広く使用されるようになった。しかし、SAR 干渉解析の結果には、大気中の水蒸気分布の変化等を起因とする誤差が含まれ、一般的に微小な変動規模で進行する変

動を検出することは困難である。こうした背景の下、複数枚の画像を統計的に処理することにより、計測精度を高める手法が提案されてきた。代表的なものに、PSI 法 (Ferretti et al., 2001) や SBAS 法 (Berardino et al., 2002) があり、これら以外にも数多くの解析手法が提案されており通常の SAR 干渉処理より高い計測精度で変動の時間発展を追跡し、年間数 mm 程度の速度で進行する微小な定常変動も検出することが出来る。本報告ではこうした解析を総称して干渉 SAR 時系列解析と呼ぶ。

干渉 SAR には様々な原因で位相誤差が含まれるが、主として、1) 地表の散乱状態の変化 (主に植生) に伴う誤差、2) 対流圏擾乱 (主に水蒸気) に伴う誤差、3) 電離圏擾乱に伴う誤差が、計測精度を大きく左右する (図-1)。こうした誤差をいかに効果的に低減できるかが、プロダクトの質を向上させる鍵である。国土地理院では、特別研究「干渉 SAR 時系列解析による国土の地盤変動の時間的推移の面的検出に関する研究 (平成 26-30 年度)」において、計測の空間密度を劣化させる原因となる植生の影響及び計測精度を劣化させる原因となる対流圏、電離圏の影響を低減するための技術開発を行うとともに、開発した新規技術や既存の要素技術を実装させた干渉 SAR 時系列解析システムの開発に取り組んできた。本報告では、本研究を通じて開発してきた干渉 SAR 時系列解析システム「GSITSA (ジーえすあいていーさ) : GSITSA InSAR Time Series Analysis」のプロトタイプの概要について紹介し、実データを用いた適用効果について紹介する。

2. 干渉 SAR 時系列解析システムの概要

本章では、各中間処理の概要や主な特徴の紹介を通じて、本システムの解析戦略や解析フローを概説する。図-2 は本システムの解析フローである。図に示されるように、本システムは、新 GSISAR 等で生成された SAR 画像データ (Single Look Complex: SLC) 及び数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM) を入力データとして解析が行われる。以下、これら各中間処理の概要を順に説明する。

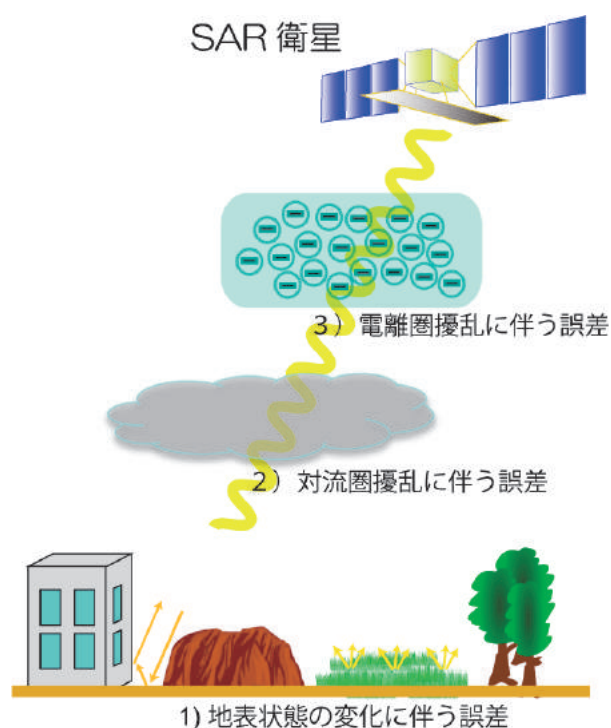


図-1 干渉SAR時系列解析における主な誤差要因を示した模式図。

2.1 前処理 ～解析手法・干渉ペアの選択～

前処理では、干渉ペアの選択、SLC画像の位置あわせ、振幅画像の作成、DEMデータ処理が行われる。この中で干渉ペアの選択は、解析手法の選択や最終的なプロダクトの品質を左右する重要な処理である。本システムでは、ある1つの画像を共通のマスターとして干渉画像ペアを作成する解析方法（以下「シングルマスター」という。）と複数の画像をマスターとして干渉画像ペアを作成する方法（以下「マルチマスター」という。）を選択可能である（図-2）。一般的に、前者はPSI法で、後者はSBAS法で用いられる。

本システムにおいて、シングルマスター処理では、本来の空間解像度の画素（以下「シングルルック」という。）で解析が行われる。PSI法によりSAR画像本来の空間解像度で変動を検出可能であり、局所的な変動を捉えるのに適している。一方、マルチマスターの処理では、シングルルックでの処理に加えて、マルチルック処理（隣接する複数の画素を空間平均）した画像での時系列解析が可能である。空間解像度を犠牲にするものの、広域を対象とした時系列解析を時間効率良く実行できる。

多数の画像から解析に適切なマスター画像を選択することは容易ではない。本システムでは、シングルマスター処理におけるマスター画像をドップラー周波数、垂直基線長、観測日間隔を考慮して計算されるStack Coherenceという指標（Kampes, 2006）を

用いて最適な画像を選択できる。これにより、ユーザーの主観によらず客観的な指標で多くの画像からマスター画像候補を簡便に選択できる。

2.2 PS候補点の抽出

本処理では、高い位相精度を長期間維持する画素を、統計的な処理を通して抽出する。こうした画素は、Persistent Scatterer（PS）点と呼ばれ、高い計測精度を目指す時系列解析では、このPS点をいかに効率よく適切に取得するかが重要な鍵となる。干渉SAR時系列解析において中心的な処理の1つである。本システムでは、大きく2つの処理を実装している。

2.2.1 PS候補点の直接探索

処理の1つは、生来PSの性質をもつ画素を画像内から直接探索するものである。本来の目的は、位相精度の高い画素を抽出することだが、位相は0から 2π に折りたたまれているため、位相連続化を行わない限り、位相の時間的安定性を位相値から直接評価することは困難である。しかしシングルルックのSAR干渉画像を位相連続化するのは実質不可能なため、考案されたのが振幅から位相の時間的安定性を評価する手法である。マイクロ波の照射域には多くの散乱体があり、SARセンサはそれらの反射波を受信するが、この照射域の中に孤立した強い反射体（代表的なものとして、建物等の人工構造物）があると位相が安定するという性質がある。こうした反射体は、時間的に安定した反射強度をもつことから、この強度の時間的安定性を指標にPS点となる候補を探すものである。代表的な手法にAmplitude Dispersion（AD）法（Ferretie et al., 2001）があり、本システムに実装した。振幅の時間平均とその標準偏差の比（統計学的には変動係数に相当）を指標として用いるAD法は、計算が簡便で精度がいいことから、多くのPSI法で用いられている。

本システムでは、AD法に加え、Signal-to-Clutter ratio（SCR）法（Adam et al., 2004）も実装した。これは対象とする画素とその周囲の画素の強度比により画像内の孤立した反射強度の高い点を探索する手法である。AD法が有意に機能するには20枚程度必要といわれているが、本手法は単画像から計算が可能であり、画像枚数が少ない場合にAD法の補完として利用することができる。

2.2.2 位相最適化処理によるPS点への変換

SAR画像はマイクロ波の照射域に存在する散乱体から反射してきた信号により構成されている。照射域の中に孤立した強い反射体無く、多数の散乱体からの反射波で構成されるものを、Distributed

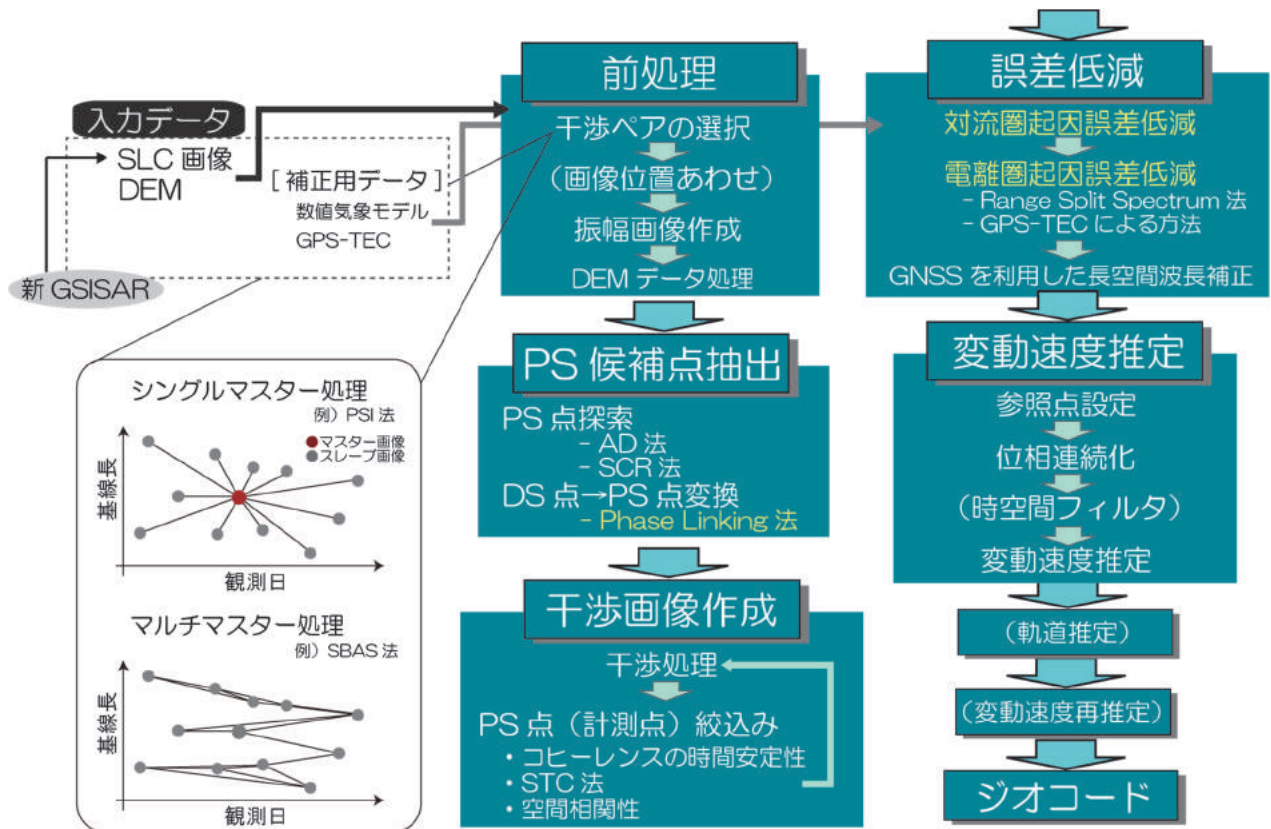


図-2 干渉SAR時系列解析ソフトウェアの内部処理フローの概略。

Scatterers（DS）点と呼ぶ。SAR 画像の大半を占めるこの種の画素は位相精度が悪い。そのため通常の PSI 解析ではこうした画素を捨て PS 点のみ解析する。都市域では人口構造物等の強い反射体の信号で構成される PS 点が多く存在する一方、山間部では DS 点が支配的であり PS の性質を持つ画素は少ない。そのため、山間部において計測点の密度を向上させるには、DS 点を有効に活用する必要がある。

一般的には、DS 点をマルチルック処理することにより誤差低減して変位計測するが、空間解像度が劣化するほかに、時系列解析では特有の問題が生じる。例えば 3 枚の SAR 画像から成る 3 ペアの干渉画像を考えた場合（図-3）、ある画素における干渉ペア 1 と干渉ペア 2 の位相差の和は、干渉ペア 3 のものと等しくなるはずである（図-3a）。PS 点であれば、位相精度は高くどのような干渉ペアの組み合わせでも位相差の値は整合してつながることから、PS 点を用いた解析では精度高く時間変化を追跡できる。一方、誤差が含まれると、ペア間の位相の整合性は成立しなくなり（図-3b）、位相の時間発展を精度良く追跡することが困難になる。

そのような欠点を克服するために、本システムでは、Phase Linking 法（Guarnieri and Tebaldini, 2008）を適用することで、DS 点を PS 点に変換する処理を実装した。Phase Linking 法では、こうしたペア間に

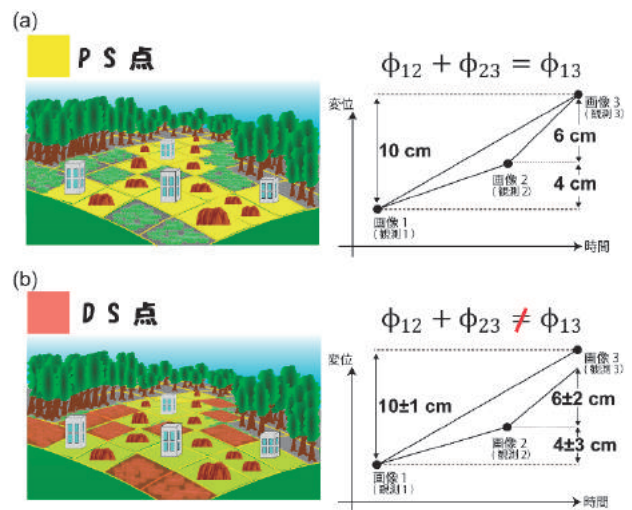


図-3 PS点の位相精度とDS点の位相精度の違いがもたらす各SAR干渉ペア間の位相の整合性を示す概念図。

における位相の不整合を最大限抑えるよう、最尤法により最適な位相値を見積もる。この操作により、各ペア間の位相（Phase）が整合的につながる（Link）ことになる。例えるなら、水準測量データの解析でしばしば行われる網平均計算を時間軸上で行っていることに相当する。ちなみに、SBAS 法も本質的にはこうした位相最適化処理を行っている。ただし、

SBAS 法は位相連続化後の位相を用いるため、位相連続化のエラーを抑えるために、コヒーレンスの高い（比較的位相精度の高い）短基線を選択して処理を行う。一方、Phase Linking 法は位相連続化“前”の全ての画像ペアの全面素を用いるところに特長があり、適切にコヒーレンスを推定できれば、コヒーレンスの低い画素も高い画素に変換することができる。コヒーレンスの低かった画素も計測に利用することができるようになるため、干渉性が高くない場合には、理論上、Phase Linking 法のアプローチが有利である。なお、本処理ではシングルルックのままマルチルック処理する方法を採用しており、本来の空間解像度を維持したまま PS 点に変換している。基本的なアルゴリズムは SqueeSAR (Ferretie et al., 2011) を踏襲している。詳細は、Kobayashi et al. (2018a) や Kobayashi (2018) を参照されたい。

2.3 干渉処理

2.2 節で選定した PS 候補点の画素を対象にして、各ペアの SAR 干渉画像が作成される。さらにここでは、SAR 干渉画像の位相値の時間・空間的安定性を基に PS 候補点を絞り込むことができる。最も簡便な方法として、コヒーレンスの時間平均値を指標にして、高い位相精度を維持する画素を選択する方法を実装した。その他に、Spatio-Temporal Consistency (STC) 法 (Hanssen et al., 2008) や位相の空間相関を利用した方法 (Hooper et al., 2012) も実装した。後者 2 つは、近傍の画素の時間変化との整合性も評価することで、ある程度空間的広がりを持つ変動の画素を効果的に抽出することができる。

2.4 誤差低減処理

2.2 節の処理は、地表での散乱状態の変化に伴う影響を低減するものであった (図-1 の 1) の誤差)。これに対して、干渉 SAR の誤差には、マイクロ波の伝播過程で受ける影響によるものがある。主に対流圏及び電離圏の影響である (図-1 の 2) 及び 3) の誤差)。こうした誤差を含んだままの時系列データでは、変動速度の推定にも大きく影響することから、これらの誤差をいかに低減できるかが変動の時間変化を推定する上で重要となる (図-4)。

多くのアルゴリズムではこの種の誤差を、フィルタリング操作により低減するアプローチをとっている。そこでは、これらの誤差が、空間的には長波長で、時間的にはランダムに出現する、という特徴を利用して、空間方向にはハイパスフィルタを時間方向にはローパスフィルタをかける。しかし、フィルタ係数の設定は主観によるところが大きく、恣意性が高い操作である。それゆえ、可能な限り解析者の恣意性を排除した誤差低減処理が望まれる。このよ

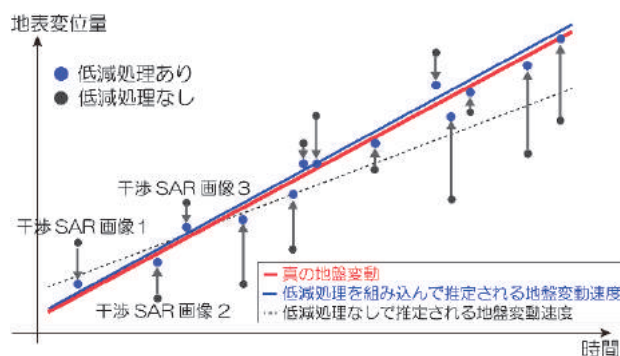


図-4 対流圏・電離圏起因の誤差低減処理と変動速度推定の関係を示す概念図

うな背景の下、本システムでは、こうした従来型のフィルタリングによらない誤差低減処理機能を実装した。

2.4.1 数値気象モデルによる対流圏起因誤差の低減

特別研究「正確・迅速な地盤変動把握のための合成開口レーダー干渉画像の高度利用に関する研究 (平成 20-22 年度)」で開発された数値気象モデルによる大気遅延誤差低減処理ツール「AtmDeRay」(小林・ほか, 2014) を本システムに実装した。各干渉画像に対して数値気象モデルから予想される位相遅延量を差し引くことで、各画素の時系列データから変動速度や非定常の変動を推定する精度を高めている。本処理は、標高に相関する位相遅延に関する誤差に有効であり (小林, 2016)、特に火山性変動の観測に有効である。時系列解析における数値気象モデルを用いた誤差低減の効果については、森下・小林 (2018) を参照されたい。

2.4.2 電離圏起因誤差の低減

日本のように、深い植生で覆われた地域に SAR 干渉解析を適用するには、L バンドの SAR の使用が不可欠である。しかし、L バンドは電離圏の擾乱の影響を受けやすく、SAR 干渉画像の中に大きな位相誤差を与えることがある。本システムでは、この種の誤差低減に対して 2 つの処理法を実装している。1 つは、特別研究「衛星干渉 SAR による高度な地盤変動監視のための電離層補正技術に関する研究 (平成 25-27 年度)」で開発された外部データ (GNSS) を利用する方法であり、もう 1 つは、SAR データ自身の内部処理を通じて誤差低減する Range Split-Spectrum 法である (Gomba et al., 2016)。前者は GNSS データから見積もった全電子数 (Total Electron Content: TEC) から位相誤差をモデル化し、誤差低減を行う。電離圏擾乱に伴う誤差を概ね低減可能である一方で、低減効果が小さい場合も少なからずあるという課題も残されていた。一方、後者は、SAR デ

ータのレンジ成分を周波数分割し、中心周波数の異なる 2 枚の SAR 干渉画像から誤差モデルを構築し誤差低減を行う。誤差の低減効果が高いこと、前者の方法と異なり GNSS データ等の外部データを必要としないことから、現在、電離圏擾乱起因の誤差低減に最も有効な手法である。本特別研究では、当初実装を予定していなかった機能であるが、その低減効果の高さから、急遽本システム用に計算コードを開発し実装した。本機能の効果については、3.2 節で後述する。

2.4.3 GNSS を利用した誤差低減

GNSS の変位データを用いた誤差低減処理（飛田・ほか、2005）を実装した。本手法では、GNSS 点の位置における SAR 干渉画像の位相と GNSS の変位データの衛星視線方向成分との差を近似曲面でモデル化することにより長空間波長の誤差を補正する。本システムでは、4 次、6 次、10 次の多項式近似曲面及びスプライン曲面を選択可能である。GNSS データを用いた補正効果については Kobayashi et al. (2018b) に紹介されているので参照されたい。

2.5 変動速度の推定

2.5.1 参照点の設定

時系列解析における時間及び空間における不動点を設定する。本システムで得られる変位量は、ここで設定される参照点を基準としたものとなる。

2.5.2 位相連続化

各干渉画像の位相連続化を行う。位相連続化処理には、MCF 法（Costantini, 1998）と 3D アンラップ法（Hooper and Zebker, 2007）を選択可能である。後者は、StaMPS ソフトウェア（Hooper et al., 2012）に実装されている処理部を本システム用に移植したものである。位相連続化処理により、各画素における変位の時系列データが獲得され、変動速度の推定が最小二乗法等により可能となる。

2.5.3 時空間フィルタ

変動速度等の推定精度を高めるため、時空間フィルタを適用できる。空間的に長波長で、時間的にランダムに出現する位相誤差に対して、空間方向（各干渉画像）にはガウシアンフィルタ等のハイパスフィルタを、時間方向には三角窓フィルタ（Ferrettie et al., 2000）等のローパスフィルタを適用する。先述のとおり、本機能は簡便に誤差低減が可能である反面、フィルタリングの強さの設定に恣意性が残ることから、本システムでの実施は選択制になっている。

2.5.4 変動速度推定

前項までの処理で得られた変位時系列データを用いて変動速度を推定する。シングルマスター処理（PSI 法）の場合、変動速度 v は以下のモデル式を用いて最小二乗的に推定される。

$$\Delta\phi_i^k = -\frac{4\pi}{\lambda} \left(v_i t^k + \frac{B_p^k}{R_i^k \sin\theta_i^k} \Delta h_i \right) + \alpha_i + n_i^k \quad (1)$$

ここで $\Delta\phi_i^k$ は k 番目の SAR 干渉画像の i 番目の画素における位相差、 λ はマイクロ波の波長、 t は観測日間隔、 B_p は垂直基線長、 R は衛星－地表間のスラントレンジ距離、 θ はマイクロ波の入射角、 Δh は DEM の誤差、 α はマスター画像に含まれる誤差、 n は非定常変動及びモデル化出来ない誤差である。一方、マルチマスター処理（SBAS 法等）の場合は、Schmidt and Bürgmann (2003) の手法を用いて変動速度を推定する。

3. 実データへの適用試験

本章では、開発した干渉 SAR 時系列解析システムを実データに適用し、実装した各機能についての効果や計測精度について紹介する。本稿では、Phase Linking 法による位相最適化処理の効果、電離圏擾乱起因の誤差低減の効果、水準測量との比較による精度評価について紹介する。数値気象モデルを用いた低減効果の詳細については、紙幅の都合で既報の論文（森下・小林、2018）に譲る。

3.1 Phase Linking 法による位相最適化処理の効果について

ここでは、Kobayashi (2018) で報告されている立山・弥陀ヶ原火山の解析結果を示し、その効果を紹介する。本解析では、2007 年から 2010 年に ALOS 衛星によって撮像された 12 枚の画像を用いた。図-5(a)は、位相最適化処理を施して得られた変動速度である。比較のために AD 法と SCR 法を組み合わせた PS 候補点抽出による結果を図-5(c)に示す。位相最適化処理を施した結果は広域にわたり PS 点を抽出できていることが分かり、地熱地帯である地獄谷で有意な変動が、南北約 250m、東西約 500m にわたって分布していることが明瞭に確認できる。図-5(b)及び図-5(d)は、地獄谷の拡大図であるが、前者はその変動分布の詳細がよく把握できる。最終的な計測点数は、従来の方法では 2,034 点であるが、位相最適化処理を施した結果では、216,356 点と約 100 倍の計測点が獲得できている。従来の方法でも、地獄谷の変動は捉えられてはいるものの、詳細な空間分布を知ることはできない。一方、位相最適化処理により高い空間密度で計測点を抽出できることで、変動域の南側でより大きな変動が進行していた等、局

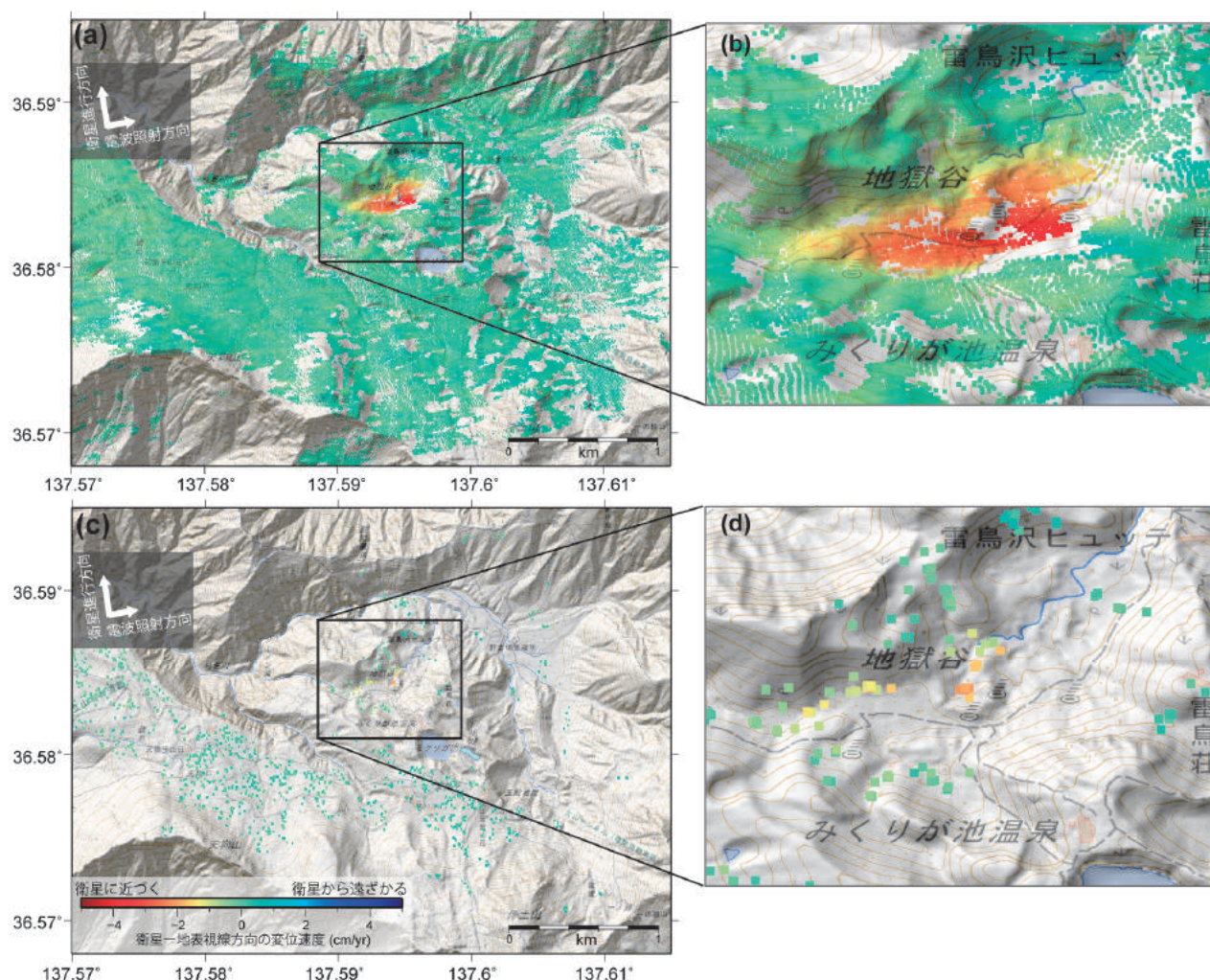


図-5 Phase Linking法を用いた解析の効果。(a)Phase Linking法を用いた解析から得られた弥陀ヶ原火山における2007年から2010年の変動速度。(b)(a)における地獄谷及びその周辺の拡大図。(c)AD法とSCR法を用いた解析から得られた変動速度。(d)(c)における地獄谷及びその周辺の拡大図。

所的な変動の詳細を把握するのに有効であることが分かる。山間部には生来のPS点が少ないため、従来の標準的な方法では十分な数の計測点を取得することは容易ではない。本事例のように、本機能は、山間部における局所変動の詳細把握に有効である。なお、Kobayashi et al. (2018a) では、より短い波長のマイクロ波 (Cバンド) のデータを用いた解析においても、本機能が有用であることが示されている。

3.2 電離圏擾乱起因の誤差低減の効果について

平成28年(2016年)熊本地震(2016年4月16日発生)の余効変動に関する解析を通じて、Range Split-Spectrum法の効果を示す。ここでは、マルチルック(8×8ルック)のSAR干渉画像を利用したSBAS法で変動の時間推移を推定した。解析には、ALOS-2衛星のPath23(南行軌道)の画像18枚(2016年4月18日から2018年7月9日)を用いた。垂直基線長30m以内のペアを選択した結果、合計28ペアが選ばれた。各干

渉画像を作成後、コヒーレンスの時間平均値が0.9以上の画素のみを抽出し、時系列解析の計測点とした。数値気象モデルによる誤差低減を施した後、Range Split-Spectrum法により電離圏起因の誤差を低減した。参照点は電子基準点「球磨(021075)」の位置とした。なお、ランプ関数による位相傾斜平面の補正処理は施しているが、時間方向のフィルタは適用していない。

図-6は干渉SAR時系列解析で得られた2016年4月18日を基準とした2018年7月9日(地震発生から812日経過)の変位分布である。地震時には断層運動によって布田川断層帯沿いに変位の食い違いが見られたが、余効変動においては類似の変位は明瞭に見られず、むしろ断層帯周辺の地盤が一様に衛星に近づく動きを示している。一方、地震時にも見られた出ノ口断層沿いや水前寺公園周辺での変動(沈降)は、継続して余効変動にも見られることが分かる。また、阿蘇カルデラ内の西端部では衛星に近づく変動が見

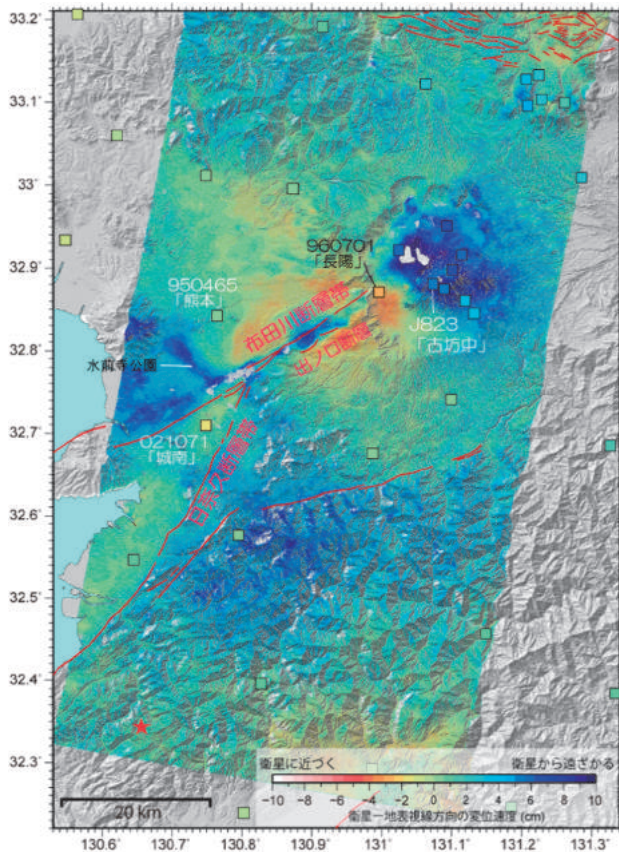


図-6 干渉SAR時系列解析から得られた熊本地震の余効変動分布図。★印は、干渉SAR時系列解析の参照点。

られる一方で、西端部を除く広い領域では、衛星から遠ざかる変動が広がっている。

図の□印はGNSS観測点の位置で、□内の色はGNSSデータから得られる衛星-地表間距離方向の変位を示す。干渉SAR時系列解析により得られた変動速度は、GNSSデータとほぼ同じ変位量が推定されており、変動の空間分布とともに良い一致が認められる。例えば、阿蘇カルデラ内の西端部にある「長陽」観測点では衛星に近づく変位を、阿蘇山にある「古坊中」観測点では衛星から遠ざかる変位を示している。カルデラ内で衛星-地表間の変位成分が逆転する複雑な動きであるが、その変動を時系列解析でも捉えることができている。

図-7は、GNSS観測点における時系列データ（黒丸）とSAR解析により得られた時系列データ（赤色の四角）を比較したものである。SAR解析により変動の時間発展が追跡できていることが分かる。白色及び灰色の四角印は、電離圏擾乱起因の誤差低減を行わなかった場合で、前者はその後時空間フィルタを適用しなかった場合、後者は時空間フィルタを適用した場合の時系列データである。ここでは、幅30kmのガウシアンフィルタと時間方向に180日幅の三角窓を用いたフィルタリングを適用している。Range Split-Spectrum法による処理により、最大30cm程度含

まれる電離圏起因の誤差を大きく低減できている、その適用効果の高さを確認できる（図-7a, -7c, -7e, -7g）。また、時空間フィルタを適用せずとも、従来のフィルタリング処理の結果と同様の変動検出を可能にしていることも確認できる（図-7b, -7d, -7f, -7h）。

3.3 計測精度について - 水準測量との比較 -

本システムにおける干渉SAR時系列解析が、どの程度の計測精度を持つのかを検証するために、水準測量データ及び電子基準点データとの比較を行った。ここで比較に使用した水準測量データは、地盤沈下の調査のために新潟県により1年に1回観測された新潟平野の変動である。本報告では、山中ほか(2013)で使用されたものと同じ2007年9月から2010年9月のデータセットを利用した。これに対しSAR解析では、マルチルック（4×8ルック）のSAR干渉画像を利用したSBAS法で変動速度を推定した。解析には、ALOS衛星のPath406（北行軌道）の画像17枚（2007年8月から2010年12月）及びPath60（南行軌道）の画像16枚（2007年7月から2010年10月）を用いた。なお、積雪期（1, 2, 3月）及び2007年中越沖地震（2007年7月19日）発生前の画像を除いている。垂直基線長500m以内のペアを選択した結果、Path60では20ペア、Path406では29ペアが選ばれた。各干渉画像を作成後、コヒーレンスの時間平均値が0.9以上の画素のみを抽出し、時系列解析の計測点とした。参照点は水準測量の基準点（SI-9）の位置に設定した。長波長の誤差低減には、ラング関数による位相傾斜平面の補正を行った。なお、時間方向のフィルタは適用していない。両軌道データの変動速度を得た後、計測点を50m間隔のグリッド上にリサンプリングし、北行軌道の画像と南行軌道の画像の双方に値が存在する画素を用いて準上下方向と準東西方向成分に変換した（Fujiwara et al., 2000）。

図-8は干渉SAR時系列解析で得られた準上下（図-8a）及び準東西（図-8b）成分の変動速度である。変動分布図からは、従来から知られている阿賀野川河口付近での経年的な地盤沈下が認められる。図の□印は水準測量の観測点の位置、◇印は電子基準点の位置で、□や◇内の色はそれぞれの観測データから得られている上下及び東西成分の変動速度を示す。干渉SAR時系列解析により得られた変動速度は、水準測量及び電子基準点データとほぼ同じ速度が推定されていることがわかる。変動量及び変動の空間分布ともに良い一致が認められる。

図-9は、横軸に各水準測量の観測点における変動速度を、縦軸に干渉SAR時系列解析における変動速度をプロットしたものである。水準点の座標から

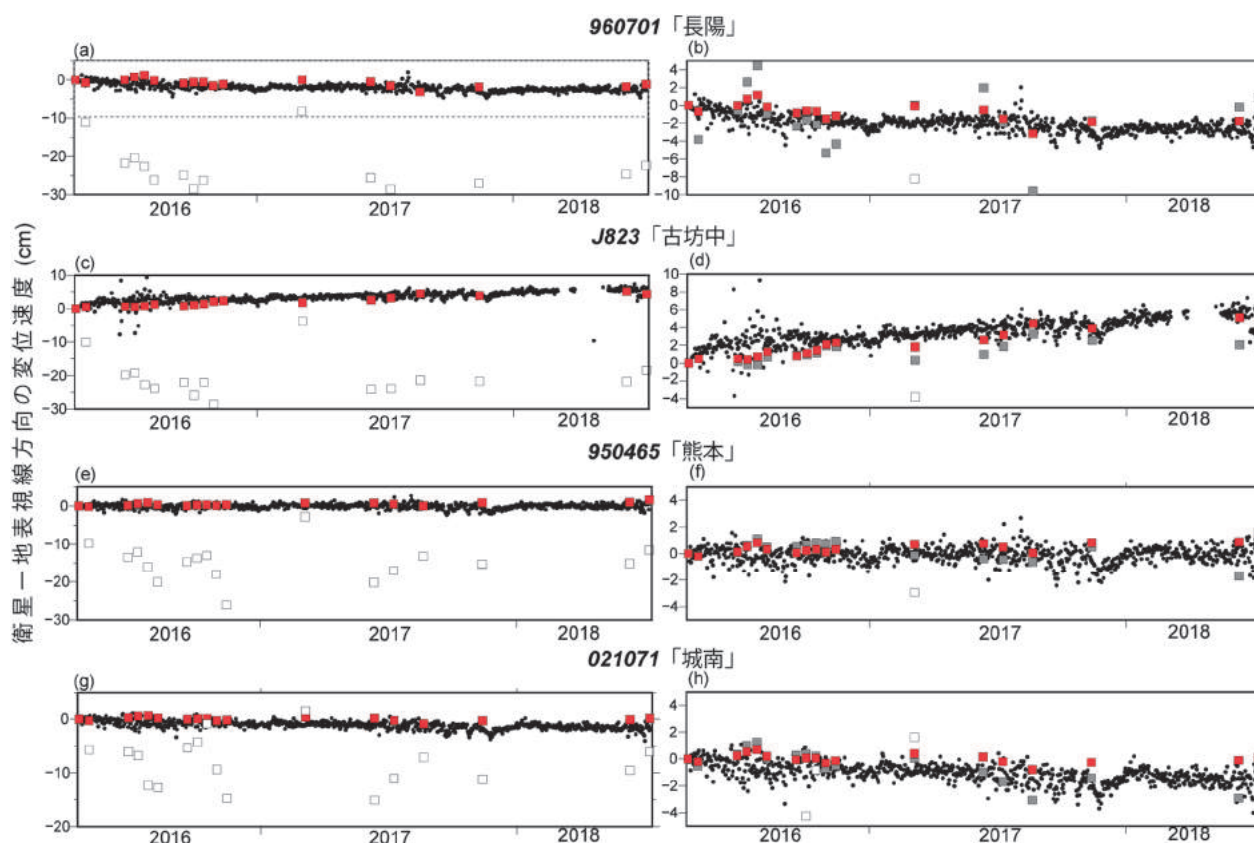


図-7 干渉SAR時系列解析とGNSS観測点の変位時系列データ。●はGNSS，■は干渉時系列解析で得られた各観測点の時系列データを示す。左の図((a),(c),(e),(g))は、電離圏起因の誤差低減を実施しなかった場合の時系列データ(□)との比較。右の図((b),(d),(f),(h))は、従前の時空間フィルタを適用した時系列データ(■)との比較。

50m以内で最も近い画素を水準点と同じ位置であるとみなし、比較を行った。50m以内に値をもつ画素が存在しない水準点については比較を行っていない。図からSARによる観測結果と水準測量の観測値は、高い相関を持っていることが認められる。線形回帰式の傾きは1.09、相関係数は0.85である。水準測量との較差は最大6mm/yrであり、1cm/yr以下の変動計測にも対応できているといえる。ただし、SARの結果には約2mm/yrのオフセットが重畳しており、この乖離についての検討は、今後の課題である。

4. まとめと議論

地盤変動の時間的推移を高い計測精度と空間解像度で検出することを目的として、干渉SAR時系列解析システムのプロトタイプを開発した。本稿では、2章において本プロトタイプシステムの概要とその特徴を紹介するとともに、3章において実データへの適用効果を紹介した。

本研究開発では、干渉SAR時系列解析の計測精度を高めるために、植生、対流圏、電離圏の影響による誤差を低減するための技術開発を行いシステムに実装した。植生の影響低減に関する研究開発では、山間部においても計測点の空間密度を高めることを

目的に、Phase Linking法を組み込んだ位相最適化処理技術を開発した。これにより、PS点の少ない山間部においても、従来の手法より高い空間密度で計測点を取得することができ、局所的な変動の空間分布も詳細に検出することが可能となった。本手法は、画像枚数が少ない場合やCバンドのような短い波長において、より効果を発揮する。対流圏の影響低減に関する研究開発では、数値気象モデルを用いた誤差低減処理機能をシステムに実装した。特に、標高差に伴う大気遅延誤差の影響を受けやすい火山の地殻変動観測において本機能は有効である。電離圏の影響低減に関する研究開発では、GNSSデータから見積もられるTEC情報を利用した誤差低減処理及びSARデータ内の周波数差を利用した誤差低減処理(Range Split-spectrum法)を開発・実装した。特に、後者の方法は低減効果が高く、熊本地震の余効変動への適用試験においてもGNSSデータと整合的な変動を捉えることができている。従来用いられてきた時空間フィルタに依存せずに変動を適切に抽出できる可能性が示唆された。本機能は、LバンドSARを利用したSAR干渉処理において、広域変動の観測に不可欠な技術となると期待される。

本システムの計算で得られる変動の精度を検証す

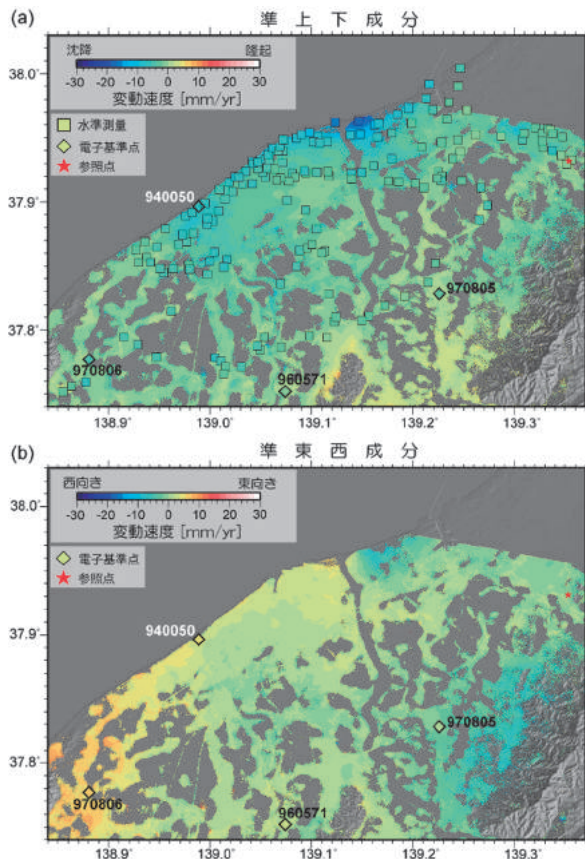


図-8 干渉SAR時系列解析により求めた変動速度(上下成分)と水準測量データ及び電子基準点データとの比較。(a)上下成分。(b)東西成分。

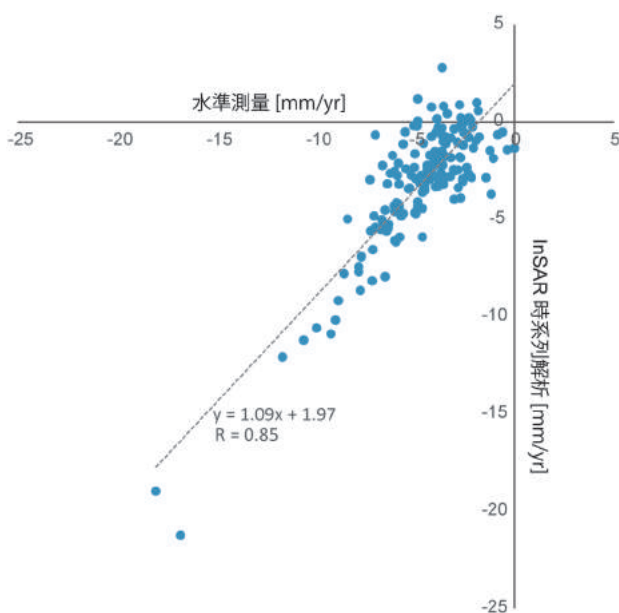


図-9 干渉SAR時系列解析により求めた変動速度(上下成分)と水準測量との比較。図中の式は推定された線形回帰式、Rは相関係数を示す。

るため、水準測量データとの比較を実施した。その結果、両者は高い相関を持っており、本事例の場合、

水準測量との最大較差は 6mm/yr であった。一般的に、微小な規模で進行する変動の検出には、波長の短い C バンドや X バンドが有利であるが、本検証結果は、L バンドにおいても 1cm/yr 前後の変動に対して検出感度を有し得ることを示している。

現在日本で運用されている ALOS-2 衛星は、SAR 干渉処理が可能な画像の撮像が年 3-4 回程度の頻度に留まっており、時系列解析を行う上で必ずしも十分な観測がなされていない。このような中、2020 年度に、ALOS-2 衛星の後継機である先進レーダ衛星 (ALOS-4) が打ち上げられる予定である。SAR 干渉処理が可能な画像を 2 週間程度の頻度で撮像する予定であり、L バンド SAR データによる時系列解析のデータ環境が飛躍的に向上することが期待される。こうした大量データを効率よく解析できるよう、本システムの足回りをさらに改造していくことが今後必要となる。また、本システムは、200 個以上の計算プログラムと各処理を制御するスクリプトで構成されており、こうした複雑な中間処理群を簡便に扱えるようにシステムの操作性も向上させる必要がある。こうした背景の下、現在、干渉 SAR 時系列解析を簡便かつ統合的に実行可能とするグラフィカルインターフェース (GUI) 操作のシステムも開発中であり (小林・森下, 2017)、地盤変動監視・観測ツールとしてのさらなる利活用を目指し、改造作業を推し進めていく必要がある。

謝 辞

解析に使用した SAR 衛星「ALOS-2」のデータは、ALOS-2に関する国土地理院とJAXAの間の協定に基づき提供されました。ここで使用しただいち2号の原初データの所有権は、JAXAにあります。「ALOS」のデータは、国土地理院とJAXAの「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書」に基づき、国土地理院がJAXA から購入したものです。「だいち」データの著作権は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 及び経済産業省にあります。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。熊本地震の余効変動の解析で使用したGNSSデータの一部は、気象庁及び防災科学技術研究所から提供を受けました。図の作成にはThe Generic Mapping Tool (GMT) ソフトウェア (Wessel and Smith, 1998) を使用しました。

(公開日：平成30年12月27日)

参 考 文 献

- Adam, N., B.M. Kampes and M. Eineder (2004): Development of a scientific persistent scatterer system: Modifications for mixed ERS/ENVISAT time series. In ENVISAT & ERS Symposium, Salzburg, Austria, 6–10 September, 2004, 9.
- 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.
- Costantini, M. (1998): A novel phase unwrapping method based on network programming, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36, 813 – 821.
- Ferretti, A., C. Prati and F. Rocca (2001): Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39, 8–20.
- Ferretti, A., A. Fumagalli, F. Novali, C. Prati, F. Rocca, and A. Rucci (2011): A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 49, 3460–3470.
- Fujiwara, S., T. Nishimura, M. Murakami, H. Nakagawa, M. Tobita and P.A. Rosen (2000): 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 2049–2052.
- Gomba, G., A. Parizzi, F.D. Zan, M. Eineder and R. Bamler (2016): Toward operational compensation of ionospheric effects in SAR interferograms: The split-spectrum method, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 54, 1446–1461.
- Guarnieri, A.M. and S. Tebaldini (2008): On the exploitation of targets statistics for SAR interferometry applications. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 46, 3436–3443.
- Hanssen, R.F., F.J. van Leijen, G.J. van Zwieten, C. Bremmer, S. Dortland, and M. Kleuskens (2008): Validation of existing processing chains in terraFirma stage 2; product validation: Validation in the amsterdam and alkmaar area. Technical report, Delft University of Technology, The Netherlands; TNO, The Netherlands. European Space Agency TerraFirma report, ESRIN contract No. 19366/05/I-E.
- Hooper, A. and H.A. Zebker (2007): Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series. *J. Opt. Soc. Am. A*, 24, 2737–2747.
- Hooper, A., D. Bekaert, K. Spaans, and M. Arikan (2012): Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514–517, 1–13.
- Kampes, B.M. (2006): *Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique*. Springer, Dordrecht, the Netherlands.
- Kobayashi, T., Y. Morishita, and H. Munekane (2018a): First detection of precursory ground inflation of a small phreatic eruption by InSAR, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 491, 244–254, doi:10.1016/j.epsl.2018.03.041.
- Kobayashi, T., M. Tobita, Y. Morishita, and Space Geodesy Division (2018b): Research on secular crustal deformation in the Niigata-Kobe tectonic zone by applying InSAR time series analysis, Final report of ALOS 4th Research Announcement (RA4), in press.
- Kobayashi, T. (2018): Locally distributed ground deformation in an area of potential phreatic eruption, Midagahara volcano, Japan, detected by single-look-based InSAR time series analysis, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 357, 213–223, doi:10.1016/j.jvolgeores.2018.04.023.
- 小林知勝(2016)：数値気象モデルを用いた干渉 SAR の大気遅延誤差の低減効果について～2015 年桜島マグマ貫入イベントの解析を例に～，*測地学会誌*，62，79–88，doi:10.11366/sokuchi.62.79.
- 小林知勝，石本正芳，飛田幹男，矢来博司(2014)：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*，125，31–38.
- 小林知勝，森下遊(2017)：干渉SAR時系列解析による国土の地盤変動の時間的推移の面的検出に関する研究（第3年次），*国土地理院調査研究年報（H28年度）*，106–108.
- 森下遊，小林知勝(2018)：ALOS-2干渉SAR時系列解析で検出された霧島山の地表変位と大気遅延誤差低減処理の効果，*測地学会誌*，64，28–38.
- Schmidt, D.A. and R. Bürgmann (2003): Time dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara Valley, California, from a large InSAR data set. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 108 (B9):2416, doi:10.1029/2002JB002267.
- 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)：干渉合成開口レーダの解析技術に関する研究．*国土地理院時報*，106，37–49.
- Wessel, P. and W.H.F. Smith (1998): New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. Am.*

Geophys. Union, 79, 579.

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.