

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

A tool for reduction of atmosphere-related noises included in an InSAR image, incorporating a numerical weather model

地理地殻活動研究センター 小林知勝・石本正芳・飛田幹男
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Tomokazu KOBAYASHI, Masayoshi ISHIMOTO and Mikio TOBITA
測地観測センター 矢来博司¹
Geodetic Observation Center
Hirosi YARAI

要 旨

干渉合成開口レーダー (InSAR) 画像に含まれる大気遅延誤差は、微小な地表変位を抽出する際に、大きな誤差要因となる。本報告では、SAR 干渉画像内に含まれる大気遅延誤差を、数値気象モデルを用いて低減処理するために開発された計算プログラムツールの概要を紹介する。本処理ツールの特徴として、1) 数値気象モデルを利用した大気遅延誤差モデルの構築が可能、2) 波線追跡法の適用によりマイクロ波の屈折を考慮した位相遅延量の精密計算が可能、3) 数値気象モデルデータの前処理、位相遅延量計算、誤差低減処理済InSAR画像作成の一連処理を一括して実行可能、4) 新GSISARと高い親和性を持たせた入力インターフェースの実装、等が主に挙げられる。実データへの適用を試みたところ、数値気象モデルを用いることにより、大気遅延誤差の低減効果が有意に見られることが示された。大気-標高相関法では、誤差低減の効果が薄いInSAR画像にも、効果的に機能する場合があることが示された。

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。現在では、地震間の歪蓄積過程に伴う地盤変形等、数mmから数cm規模の地表変位抽出を目的とした観測手法としても利用の場が広がっているが、このような微小な規模の地表変位を観測対象とする場合、たとえ数cm程度の誤差でも、観測に大きな影響を及ぼす。

InSAR 画像内に内在する地殻変動以外の位相変化の要因の 1 つに大気の影響がある (Tarayre and Massonnet, 1996 ; Zebker et al., 1997)。大気の屈折率は真空中の値 (=1) より大きな値となるため、SAR センサから照射されるマイクロ波は遅延の効果を受

ける。屈折率は大気状態の変化に伴い時々刻々変化するもので、気象状態の異なる二時期の SAR データから生成される InSAR 画像の位相変化量は、たとえ地殻変動が無くともゼロにはならない。以後、この遅延により発生する位相変化量の誤差を、「大気遅延誤差」と呼ぶことにする。InSAR 画像内の大気遅延誤差は、10cm を超える場合もあり、微小な地表変位を抽出する際には、大きな誤差要因となる。しかし、大気遅延誤差を低減する手法は十分に確立されておらず、数 mm から数 cm 規模の位相変化の解釈を困難にしているのが現状である。

大気遅延誤差の低減には、大気の時空間的ランダム性を利用して複数のInSAR画像の平均化処理により誤差を低減させるスタッキング法 (Fujiwara et al., 1998) や標高と位相変化量の相関を利用した一次関数近似による低減手法 (以下、「大気-標高相関法」という。) (藤原ほか, 1999) が提案されてきた。しかし、前者の手法は、複数のInSAR画像を必要とすることや平均的な変位速度しかわからない点、また、後者は、火山活動時のように変動が標高と相関する場合や大気擾乱が空間的に不均質な時には適用困難である点、において必ずしも万能な誤差低減処理ではない。

このようなInSAR画像内の統計的情報を利用するアプローチの他に、気象データの情報から遅延量を独立に見積もって補正を試みる研究もなされてきた。中でも、数値気象モデルデータは、全球の大気状態を比較的高い時空間分解能で得ることが可能であり、それを利用した低減処理の試みが国内外で行われてきた (島田, 1999 ; Wadge et al., 2002 ; 小澤・清水, 2010)。

国土地理院では、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)」において、数値気象モデルを利用した大気遅延誤差の低減処理手法の開発を行い、実データへの適用の有効性を検証してきた。特別研究終了後は、更なる低減処理効果の

検証(例:小林ほか, 2011)に加えて, 測地部における高精度地盤変動測量事業での利用を目指し, 計算効率の向上, SAR干渉解析ソフトウェア「新GSISAR」との高い親和性を持った入出力インターフェースへの改造等を実施してきた. 本報告は, 本研究を通じて開発してきた大気遅延誤差低減処理ツール「AtmDeRay (あとむでいれい): **Atmosphere-related phase Delay modeling using Ray-tracing method**」の開発とその実用化に向けた整備がほぼ整ったことを受け, 本ツールの概要を紹介するものである.

2. 数値気象モデルによる大気遅延誤差の低減処理

2.1 大気遅延誤差の理論的背景

SARセンサを搭載したプラットフォーム(人工衛星等)から地上ターゲットまでのマイクロ波の伝播過程に発生したInSAR画像中の位相遅延量 $\Delta\phi$ は,

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \quad (1)$$

で表せられる. ここで ΔR および λ はそれぞれ, マイクロ波が伝播する距離の変化量とマイクロ波の波長である. 伝播経路 s 中の屈折率を $n(s)$ とすると, ΔR は次のようになる.

$$\Delta R = \int [n(s) - 1] ds + [R' - R] \quad (2)$$

ここで R はSARセンサから地上ターゲットまでの直線距離を, R' は屈折を伴う実際の伝播経路上の距離を示す. この式が示すように, マイクロ波が伝播に伴って受ける遅延は, 主に2つの物理に支配される. 1つ目は, マイクロ波が屈折率が1より大きい大気を通過するために真空中よりも減速され光路長が増加する効果であり, 右辺第1項に対応する. 2つ目は, 右辺第2項にあたる幾何学的効果で, マイクロ波の伝播経路が屈折に伴い曲率をもち, 直線距離 R より経路が長くなる効果である(図-1). 大気の密度は相対的に下層が大きいので, プラットフォームから地上ターゲットまでの波線経路は上方に凸形となる. 大気の屈折率を用いて定義される屈折度 N は, 以下の経験式で表現されることが知られている(Thayer, 1974).

$$N = (n - 1) \times 10^6 = k_1 \frac{P_d}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \quad (3)$$

ここで, P_d , e , T は乾燥大気圧(hPa), 水蒸気分圧(hPa), 絶対温度(K)である. 第1項は乾燥大気成分, 第2・3項は水蒸気成分に起因する項である. 係数 k_1 , k_2 , k_3 はそれぞれ実験等により決定されるものであり, AtmDeRayでは, 77.6(K/hPa), 70.4(K/hPa), 3.74×10^5 (K²/hPa)を採用している(Bevis et al., 1994). なお, 大気伝播の遅延効果は一般に周波数依存性(分

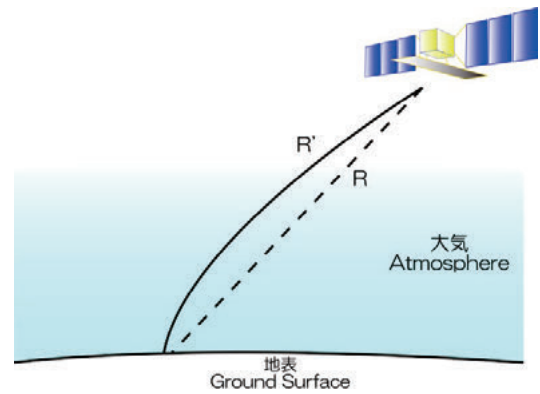


図-1 大気中のマイクロ波の屈折の模式図.

散性)があるが, (3)式は電離していない中性大気において20GHz以下の周波数について成立するとされる(Thayer, 1974).

2.2 数値気象モデルを利用した低減処理の概略

AtmDeRayにおける低減処理の概略を図-2に示す. まず, SARの観測時刻に対応する気象パラメータを数値気象モデルから抽出し作成する. 得られた気象データを元に, マイクロ波の伝播経路上の屈折率を見積り位相遅延量を計算する. 位相遅延量は, InSAR画像の各ピクセル毎に電波照射方向ベクトルを考慮して見積もられる. AtmDeRayでは, 伝播経路の屈折に伴う効果を考慮するため波線追跡法(Ichikawa et al., 1995)を適用している. マスター画像(1回目の観測), スレーブ画像(2回目の観測)それぞれの位相遅延量を全ピクセルについて計算し, 両画像の差分をとることで, 数値気象モデルから予想される位相変化量の分布をモデル化する. 通常のInSAR処理により得られた差分干渉画像から, モデル化された遅延量を差し引くことで, 数値気象モデルを用いた誤差低減処理画像が得られる. なお, 波線追跡法の計算には, 国土交通省総合技術開発プロジェクト「準天頂衛星測位・通信システムの開発」において開発された「衛星測位システムシミュレータ(SPSS)」(宗包ほか, 2008)の一部を利用している.

AtmDeRayでは, 気象パラメータが与えられている高度面に挟まれる層内ではマイクロ波は直進し, 高度面との交点でスネルの法則に従って屈折するとしている. スネルの法則は高度面を挟む上下層の屈折率に支配されるが, 数値気象モデルは水平空間解像度が5kmのため, 交点に相当する場所の屈折率は, 空間的に線形補間して与えている.

2.3 数値気象モデルについて

AtmDeRayでは, ①国土地理院と気象庁とのオンライン防災情報の相互交換に関する協定「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

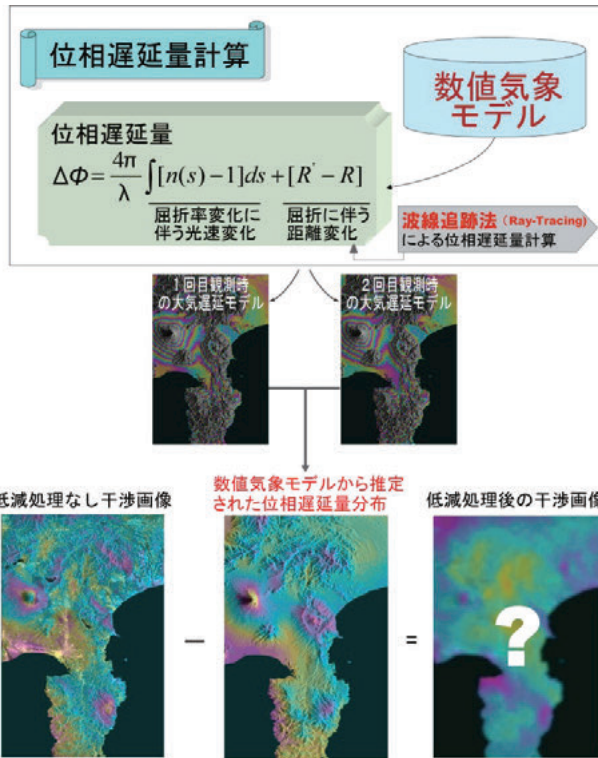


図-2 数値気象モデルを用いた大気遅延誤差の低減処理の概略図。

関する細部取り決め協議書」によって、気象庁から提供されている数値気象モデルデータ（以下、「GSI-MSM」という。）及び②一般財団法人気象業務支援センターで販売されているメソ客観解析データ (MANAL) の数値気象モデルが利用可能である。ALOSデータの解析を念頭に、2006年3月～2009年4月6日までのMANAL (GRIB形式) とGSI-MSM (2008年4月以降) に対応している。両数値気象モデルとも時間分解能は3時間、水平空間分解能は前者のモデルが10km、後者が5kmである。ALOSにおける日本付近の観測時刻は、南行軌道では10:30前後、北行軌道では22:30前後である一方、これら数値気象モデルは0時、3時、6時、9時、12時、15時、18時、21時のデータであるためSARの観測時刻に対応していない。AtmDeRayでは、SARの観測前後の気象モデルに格納されているデータ値を撮像時刻にあわせて時間的に線形補間した値を使用している。なお、数値気象モデル面より上部は、U.S. Standard Atmosphere 1976 (USSA, 1976) のモデル値に準拠している。

2.4 「AtmDeRay」の処理の流れ

AtmDeRayは、国土地理院においてSAR干渉解析に使用されている新GSISARソフトウェアと親和性の高い稼働を目指して開発が行われた。AtmDeRayの処理フローを図-3に示す。AtmDeRayの実行は、新

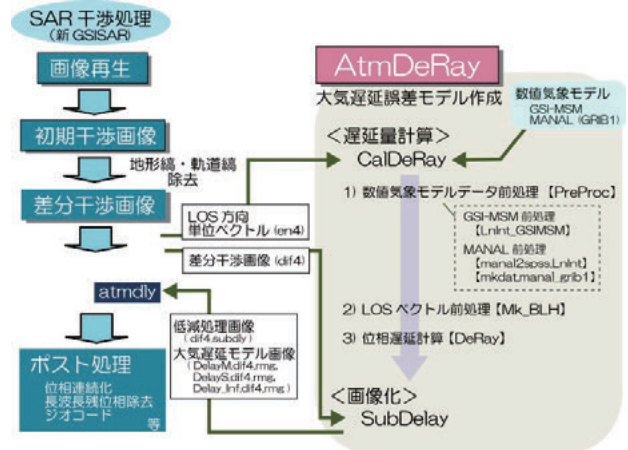


図-3 AtmDeRayの内部処理フローの概略。

GSISARにおいて差分干渉画像の作成終了後に行われる。AtmDeRayの操作はコマンドライン上で行われ、実行の際に以下の6つの引数を必要とする：①新GSISARの作業ディレクトリ、②マスター画像用の数値気象モデルの格納ディレクトリ、③スレーブ画像用の数値気象モデルの格納ディレクトリ、④マスター画像用の数値気象データの種類 (1: GSI-MSM / 2: MANAL)、スレーブ画像用の数値気象データの種類 (1: GSI-MSM / 2: MANAL)、2-Look InSAR画像用の位相遅延モデルの作成 (1: ON / 0: OFF)。

実行後、新GSISARの作業ディレクトリの下にatmdlyというフォルダが自動生成され、数値気象モデルから計算された大気遅延誤差モデル等が出力される。出力は、①マスター画像撮像時に対応する大気遅延誤差モデル画像、②スレーブ画像撮像時に対応する大気遅延誤差モデル画像、③大気遅延誤差モデル画像、④大気遅延誤差低減処理後のInSAR画像である。

AtmDeRayは、数値気象モデルデータ前処理、位相遅延量計算、誤差低減処理済InSAR画像作成の一連の処理を一括して実行可能としていることも特徴の1つである。入出力のインターフェースを、国土地理院のSAR干渉解析業務等で使用される新GSISARに対応させ、また、複雑な計算過程の一括処理化により、将来、新GSISARのシステム内への組み込みが簡便となっている。

AtmDeRayでは、位相遅延量の計算時間を、単純並列化 (trivial parallelization) により短縮している。例えば、図-4に示すALOS/PALSARのFBSモードデータ (1シーン) の4ルック画像に対する計算時間は、CPU Intel Xeon X5680 3.33GHz 6Core×2の計算環境下で約50分である。これは単純並列化を施さない場合の約20%の計算時間である。

3. 実データへの適用実験

AtmDeRay による数値気象モデルを用いた大気遅延誤差低減の効果を実データを用いて確認する(図-4, 5, 6, 7, 8). ここでは, 富士山・伊豆半島とその周辺地域(Path:59 Frame:2910, 旧観測日-新観測日 2008/08/19-2008/10/04), 十勝岳とその周辺地域(Path:56 Frame:2740, 旧観測日-新観測日 2009/05/17-2009/08/17及び2008/06/29-2009/05/17), 富士山・甲府とその周辺地域(Path:60 Frame:2900-2910, 旧観測日-新観測日 2008/07/21-2009/09/08), つくば周辺地域(Path:57 Frame:2890, 旧観測日-新観測日 2007/07/14-2007/08/29)の5例を紹介する. なお, 地形縞・軌道縞の除去のほか, 長空間波長の残位相は基線推定により補正し, 多項式近似による補正は行わない. いずれのデータペアも, 観測期間に地震等の地殻変動の原因となるような事象は発生していない. 従って, 誤差が重畳してなければ, 画像は全面シアン色(位相変化なし)となるはずである.

図-4に, 富士山・伊豆半島とその周辺地域の結果を示す. 図の左から, 低減処理を施していないInSAR画像, 大気-標高相関法による低減処理を施したInSAR画像, 数値気象モデルによる低減処理を施したInSAR画像を示している. 低減処理を施していない干渉画像には, 富士山や伊豆半島の天城山に明瞭な位相変化が見られる(それぞれ, 最大約13cm, 最大約5cm). 大気-標高相関法を適用することで, これら誤差は低減されるものの, 富士山にはなお, 約7cmの誤差が残っている. これに対して, 数値気象モデルを用いた処理では, 大気-標高相関法では

低減が不十分であった富士山の位相変化が有意に低減されていることが確認できる. 低減処理前に富士山頂で見られた約13cmの位相変化は約3cmに, 伊豆半島・天城山付近で見られた約5cmの位相変化は約2cmに低減されている.

同様に, 数値気象モデルを用いた処理による誤差の低減効果は, 十勝岳周辺の解析結果でも確認できる(図-5, 6). 画像中央右側に十勝岳, 美瑛岳, 富良野岳が連なる十勝火山群が位置し, それら山間部には, 図-5(a)の画像では約8cm, 図-6(a)の画像では約5cmの見掛けの位相変化が見られる. 両画像とも, 大気-標高相関法及び数値気象モデルによる低減処理により誤差が有意に低減されていることが確認できるが, 両者を詳細に比較してみると, 例えば図-5の十勝岳付近では, 大気-標高相関法では約5cmに低減した位相変化が数値気象モデルの利用により約3cmに, 図-6では約4cmの位相変化が約2cmになっており, 数値気象モデルを用いることで, より低減効果が見られることがわかる.

一般的に, 遅延をもたらす主な原因である水蒸気の分布は, 標高に比例することが多いため, 数値気象モデルを用いた大気遅延誤差モデルも, 概ね標高に比例した遅延分布となる傾向にある(図-2). 従って, 図-4, 5で見られるように, 標高と相関を持つ誤差分布においては比較的良く低減効果が見られる. 図-9は, InSAR画像内の位相変化量と標高の関係を示すために, 画像内の全ピクセルの位相変化量を標高順に並べ, 50m(図-9(d)は25m)毎に階層化し, 各階層の平均値をプロットしたものである. 図-9(a),

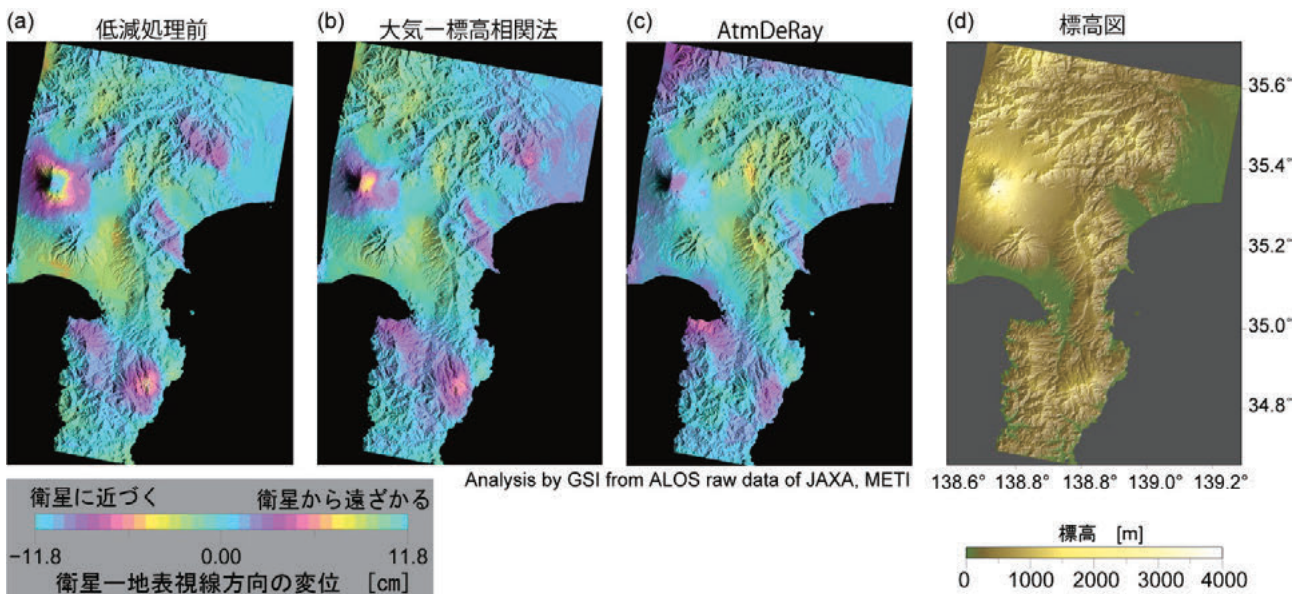


図-4 富士山・伊豆半島とその周辺地域(Path:59 Frame:2910)のInSAR解析による大気遅延誤差の低減処理の例. それぞれ, (a) 低減処理前, (b) 大気-標高相関法, (c) AtmDeRayによる処理の結果を示す. 旧観測日及び新観測日は, それぞれ2008/08/19及び2008/10/04である. (d) 解析領域の標高図.

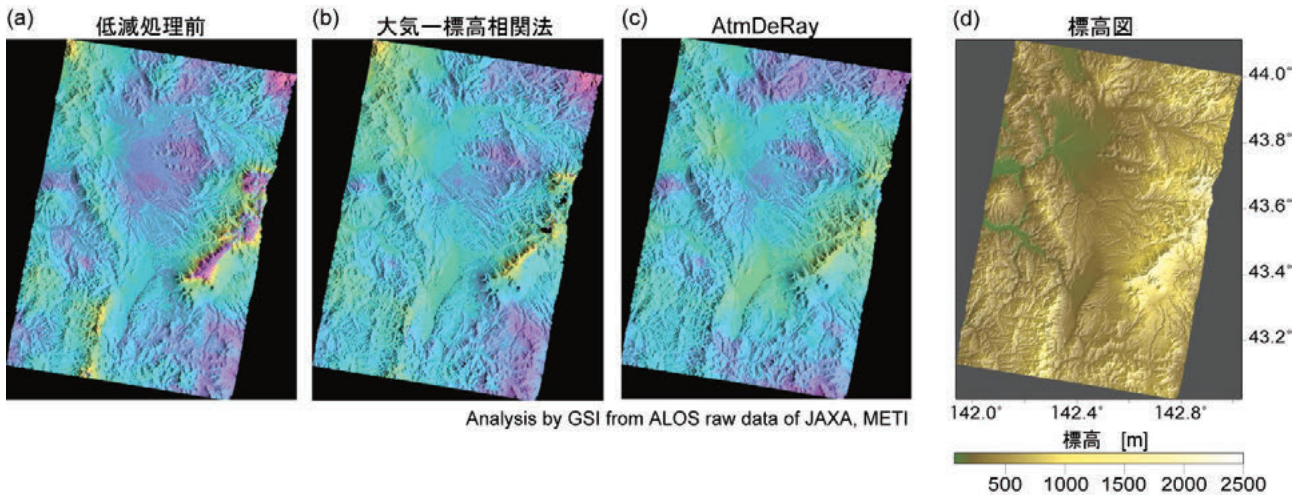


図-5 十勝岳とその周辺地域 (Path:56 Frame:2740) のInSAR解析による大気遅延誤差の低減処理の例. それぞれ, (a) 低減処理前, (b) 大気一標高相関法, (c) AtmDeRayによる処理の結果を示す. 旧観測日及び新観測日は, それぞれ2009/05/17及び2009/08/17である. カラースケールは図-4と同じ. (d) 解析領域の標高図.

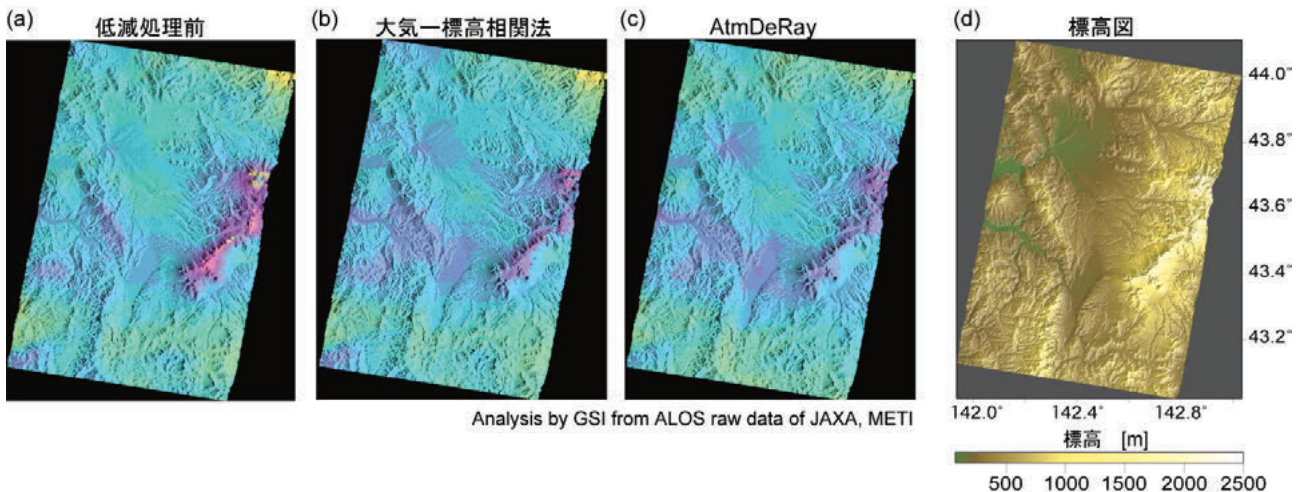


図-6 十勝岳とその周辺地域 (Path:56 Frame:2740) のInSAR解析による大気遅延誤差の低減処理の例. それぞれ, (a) 低減処理前, (b) 大気一標高相関法, (c) AtmDeRayによる処理の結果を示す. 旧観測日及び新観測日は, それぞれ2008/06/29及び2009/05/17である. カラースケールは図-4と同じ. (d) 解析領域の標高図.

(b) は, 図-4, 5における位相変化と標高の関係である. 黒, 青, 赤色の線はそれぞれ, 低減処理前, 大気一標高相関法, 数値気象モデルによる低減処理の結果を示している. 特に, 大きな誤差を生んでいる高い標高では, 数値気象モデルを用いた処理により, 有意に誤差が低減されていることがわかる. しかし, 位相変化が2cm程度となる標高の低い領域では, 顕著な低減効果は見られない.

図-7は, 富士山・甲府とその周辺地域のInSAR画像における処理結果である. 標高とは相関しない誤差を持つことが特徴である(図-9(c)). このようなInSAR画像に対しては, 大気一標高相関法はその効果をほとんど発揮しない. しかしながら, 数値気象モデルを用いることにより, 画像全体の誤差は有

意に低減していることがわかる. 画像全体の位相変化量の標準偏差は, 図-7(a), (b), (c)でそれぞれ, 1.8, 1.7, 1.2cmである. 特に, 標高200-300mの領域(主に甲府盆地)に局所的に存在する誤差が, 数値気象モデルにより有意に低減している点は注目に値する(図-7, 図-9(c)).

一方, 数値気象モデルを用いた低減処理も, 全ての干渉画像に対して効果があるわけではない. 図-8は, つくば周辺のInSAR画像における処理結果を示しているが, 数値気象モデルによる低減処理を施しても, その効果はほとんど見られない.

本章では, 実データへの適用実験を通して, 従来から用いられている大気一標高相関法では低減処理効果が薄いInSAR画像においても, 数値気象モデル

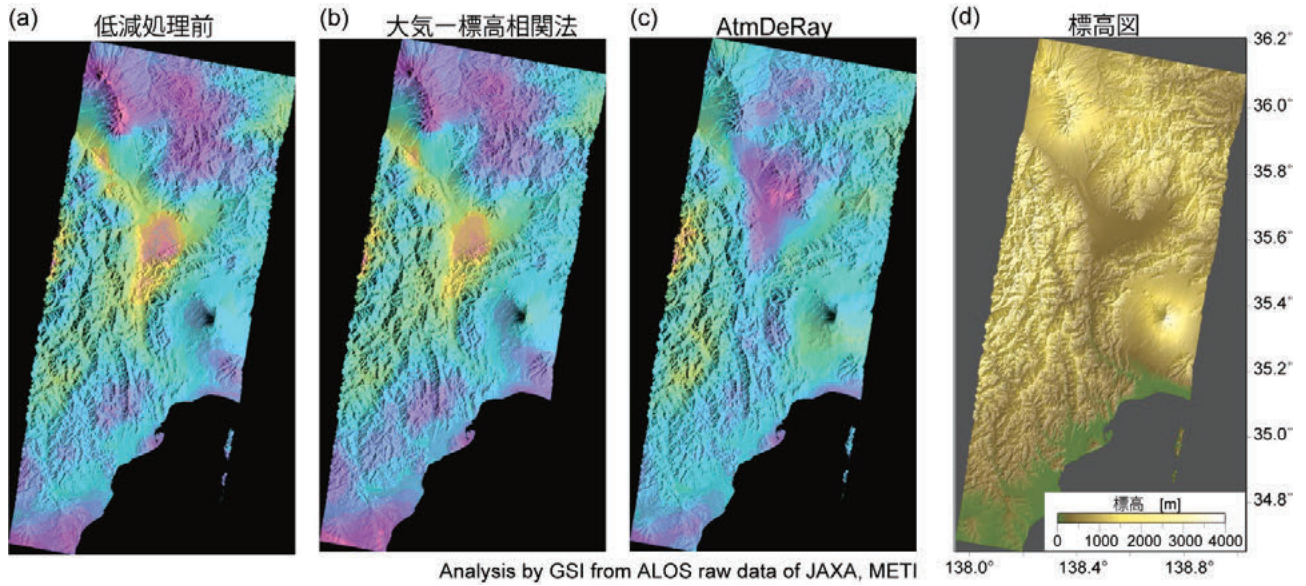


図-7 富士山・甲府とその周辺地域 (Path:60 Frame:2900-2910) のInSAR解析による大気遅延誤差の低減処理の例。それぞれ、(a) 低減処理前、(b) 大気一標高相関法、(c) AtmDeRayによる処理の結果を示す。旧観測日及び新観測日は2008/07/21及び2009/09/08である。カラスケールは図-4と同じ。(d) 解析領域の標高図。

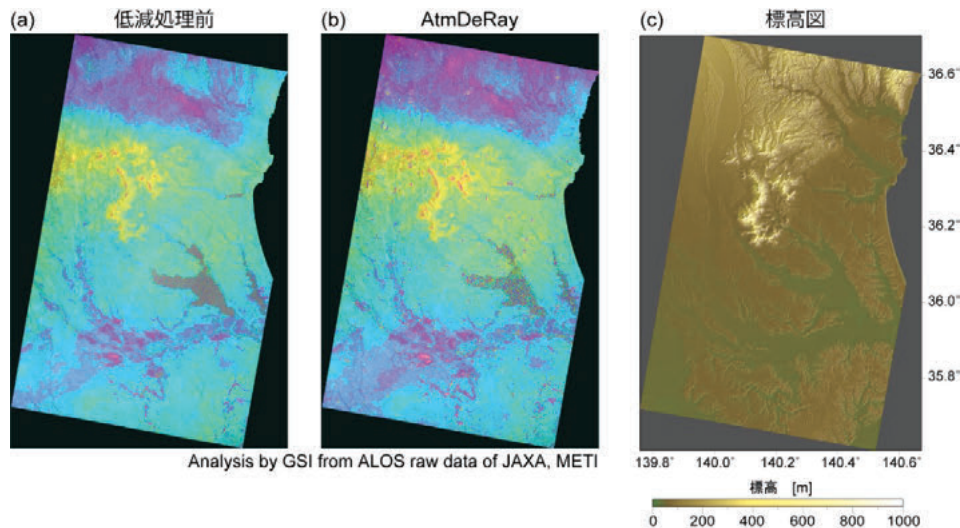


図-8 つくば周辺地域 (Path:57 Frame:2890) のInSAR解析による大気遅延誤差の低減処理の例。それぞれ、(a) 低減処理前、(b) AtmDeRayによる処理の結果を示す。旧観測日及び新観測日は、それぞれ2007/07/14及び2007/08/29である。カラスケールは図-4と同じ。(c) 解析領域の標高図。

を利用することにより大気遅延誤差を効果的に低減できることが示された。一方、図-8に示されるように、誤差を低減できない場合もあり、数値気象モデルを用いた処理は、必ずしも誤差を低減できる万能な手法ではないのも事実である。現状では、数値気象モデルとSARデータの間には、時空間分解能に大きな乖離がある。そのため、SAR画像の撮像時の大気状態を十分再現しきれないことが、有意な低減処理効果を発揮しない要因の1つと推測される。数値気象モデルは、現在、気象庁において、時空間分解能をさらに高めたモデル(高分解能局地モデル: LFM)に移行されようとしている。高度化された数

値気象モデルを用いて、低減処理の効果がどれほど向上するのか、今後、更なる検証が必要であろう。

4. まとめ

本報告では、InSAR画像に内在する大気遅延誤差を数値気象モデルを用いて低減処理する計算プログラムツール「AtmDeRay」の概要を紹介し、また、本ツールによる処理を実データに適用してその効果や適用限界の一部を報告した。AtmDeRayは、主に以下のような特長を持つ。

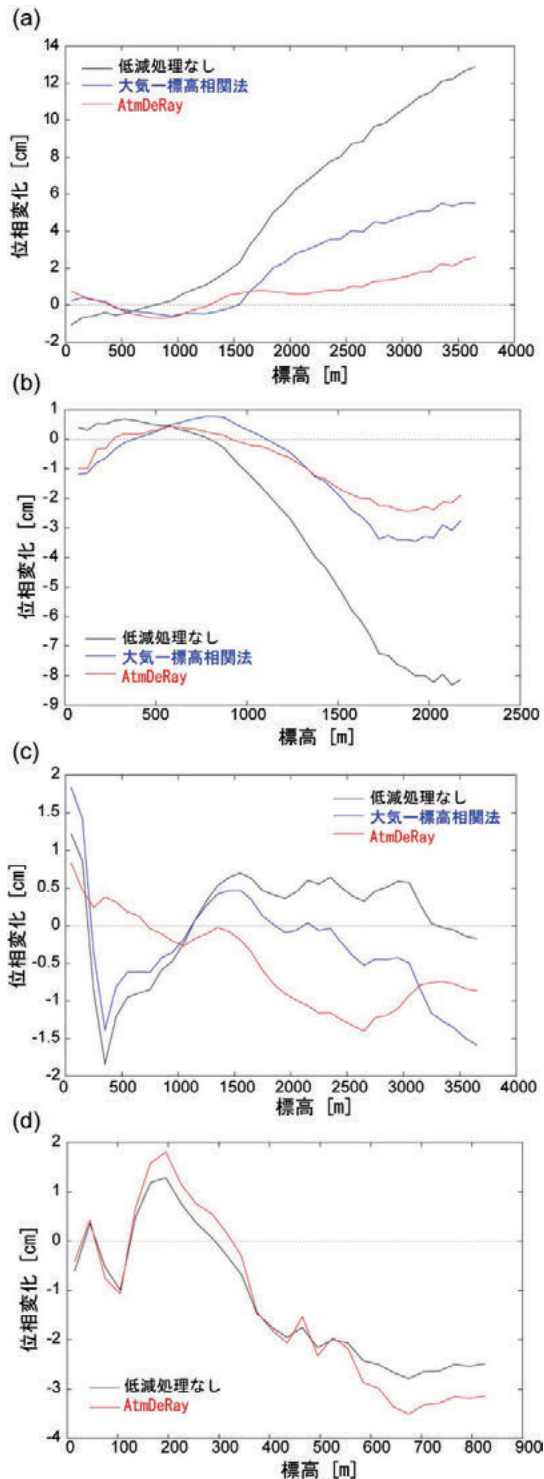


図-9 位相変化量と標高の関係の例. 黒, 青, 赤色の実線はそれぞれ, 低減処理なし, 大気-標高相関法, AtmDeRayによる低減処理を示す. それぞれ (a) 図-4, (b) 図-5, (c) 図-7, (d) 図-8の結果を示す.

1) 数値気象モデル (GSI-MSM 及び MANAL (GRIB 形式)) を利用した大気遅延誤差低減処理が可能

2) 波線追跡法の適用により, マイクロ波の屈折を考慮した精密な位相遅延量の計算が可能

3) 数値気象モデルデータ前処理, 位相遅延量計算, 誤差低減処理済 InSAR 画像作成までの一連の処理を一括して実行可能

4) 新 GSISAR と高い親和性を持たせた入出力インターフェースを実装

実データへの適用試験を行ったところ, 数値気象モデルを用いることにより, 大気遅延誤差の低減効果が有意に見られることが示された. 従来から用いられている大気-標高相関法では低減処理効果が薄い InSAR 画像にも, 効果的に機能することが示された. 一方, 元々位相変化の小さい領域 (地形起伏の小さな領域や標高の低い領域) では, 数値気象モデルを用いても, 有意な低減効果は認められない場合がある.

謝辞

解析に使用した SAR 衛星「だいち」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. 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. この場を借りて, 御礼申し上げます. 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 26 年 3 月 3 日)

参考文献

Bevis, M., S. Businger, S. Chiswell, T. A. Herring, R. A. Anthes, C. Rocken, and R. H. Ware (1994): GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water. *J. Appl. Meteor.*, 33, 379-386.

- Fujiwara, S., P. A. Rosen, M. Tobita, and M. Murakami (1998): Crustal deformation measurements using repeat-pass JERS 1 synthetic aperture radar interferometry near the Izu Peninsula, Japan, *J. Geophys. Res.*, 103(B2), 2411–2426, doi:10.1029/97JB02382.
- 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一標高補正, *測地学会誌*, 45, 315-325.
- Ichikawa, R., M. Kasahara, N. Mannoji, and I. Naito (1995): Estimations of Atmospheric Excess Path Delay based on Three-Dimensional, Numerical Prediction Model Data, *J. Geodetic Society of Japan*, 41 (4), 379-408.
- 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.
- 宗包浩志, 黒石裕樹, 畑中雄樹, 矢来博司 (2008) : 衛星測位システムシミュレータの開発, *国土地理院時報*, 115, 123-131.
- 小澤拓, 清水慎吾 (2010) : 数値気象モデルを用いた SAR 干渉解析における大気遅延誤差の軽減, *測地学会誌*, 56, 137-147.
- 島田政信 (1999) : SAR 干渉処理における軌道誤差と大気位相遅延の補正方法—地殻変動検出への応用—, *測地学会誌*, 45, 327-346.
- Tarayre, H. and D. Massonnet (1996): Atmospheric propagation heterogeneities revealed by ERS-1 interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 989-992.
- Thayer, G. D. (1974): An improved equation for the radio refractive index of air, *Radio Sci.*, 9(10),803–807, doi:10.1029/RS009i010p00803.
- United States Committee on Extension to the Standard Atmosphere (1976): "U.S. Standard Atmosphere, 1976", National Oceanic and Atmospheric Administration, National Aeronautics and Space Administration, United States Air Force, Washington D.C..
- Wadge, G., et al. (2002) : Atmospheric models, GPS and InSAR measurements of the tropospheric water vapour field over Mount Etna, *Geophys. Res. Lett.*, 29(19), 1905, doi:10.1029/2002GL015159.
- Wessel, P., W. H. F. Smith (1998): New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, 79, 579.
- Zebker, H.A., P. A. Rosen and S. Hensley (1997): Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps, *J. Geophys. Res.*, 102, 7547-7564.