

合成開口レーダ干渉法による白頭山の火山活動に伴う地殻変動の検出

小澤 拓*・谷口宏充**

Detection of Crustal Deformation Associated with Volcanic Activity of Baitoushan Volcano Using SAR Interferometry

Taku OZAWA* and Hiromitsu TANIGUCHI**

*Volcano Research Department,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
taku@bosai.go.jp

**The Center for Northeast Asian Studies,
Tohoku University, Japan
taniguti@cneas.tohoku.ac.jp

Abstract

Under Baitoushan Volcano located on China - North Korea border, increase of seismic activity has been observed from mid 2002. To investigate the crustal deformation related to such activity, we attempted to apply synthetic aperture radar (SAR) interferometry utilizing ENVISAT SAR. From the interferometric pair of 15 Oct. 2004 and 4 Nov. 2005, shortening of a distance from the satellite to the ground (slant-range) was detected in 5 km range from the summit of Baitoushan Volcano. It is consistent with an inflation of the volcano. The slant-range change at the summit of Baitoushan Volcano was about 3 cm, and was considered a significant crustal deformation signal. Parameters of Mogi's model were estimated from detected crustal deformation, and the source location was determined to be at about 5 km depth just under the summit. This is consistent with an area where seismic activity has increased. We also investigated crustal deformation during a period when seismic activity was calm utilizing JERS-1 SAR interferometry but could not detect any slant-range change that reached to several centimeters per year. These results suggest that magma has ascended from a deep part to 5 km depth since mid 2002 and that activity of Baitoushan Volcano must be increasing.

Key words : Baitoushan Volcano, InSAR, Crustal deformation, ENVISAT, JERS-1

1. はじめに

白頭山は中華人民共和国（中国）と朝鮮民主主義人民共和国（北朝鮮）との国境に位置する火山であり、山頂には直径約 5 km の火口湖を有している（図 1）。15 世紀以降の文献には 1413 年、1597 年、1668 年、1702 年の 4 度の噴火が記録されており、さらに、火山灰調査等から 10 世紀に過去 2000 年間で最大級の噴火が発生していたことが明らかにされている（Machida *et al.*, 1990）。この噴火に関する火山灰は、日本海を越えて日本の東北地方や北海道南部にまで達しており、白頭山は日本にも災害を起こしうる火山といえる。

最近までの白頭山の火山活動は静穏であったが、2002 年中頃から山頂直下の 5km 付近で地震活動の活発化が観測された（例えば、Wu *et al.*, 2005）。さらに、1985 年以降、白頭山山麓において、森林樹木の枯死、火山性ガスの噴出や温泉水の温度上昇も観測されていることから、火山活動の活発化との関連が指摘されている。もし、地震活動の活発化が火山活動の活発化に関するものであれば、浅部へのマグマ移動に伴う地殻変動が生じている可能性があり、これを観測できれば白頭山の火山活動レベルを評価するうえで極めて重要な情報となる。しかし、現地における観測の困難等の問題があるので、人工

* 独立行政法人 防災科学技術研究所 火山防災研究部

** 東北大学 東北アジア研究センター

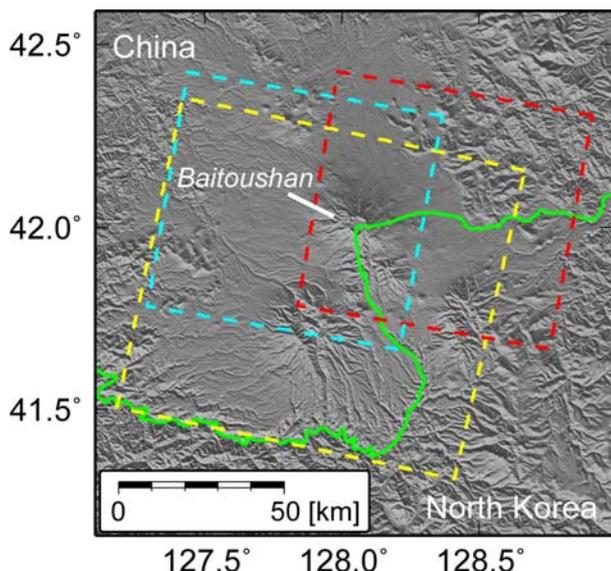


図 1 白頭山周辺の地形陰影図 (SRTM3 を用いて描画)。黄破線は ENVISAT データのシーン範囲を示し、赤破線と青破線は JERS-1 の干渉解析で用いた East scene と West scene のシーン範囲を示す。緑線は中国と北朝鮮との国境を示す。

Fig. 1 Topographic relief map around Baitoushan Volcano (based on SRTM3 DEM). The yellow broken box indicates the ENVISAT SAR scene area, and the red and blue broken boxes denote east and west scene areas of JERS-1 SAR. The green curve is the China – North Korea border.

衛星を利用したりリモートセンシング技術による観測に期待されている。

本研究では、地震活動活発化時における地殻変動を調査するために、ヨーロッパの ENVISAT 衛星に搭載されている合成開口レーダ(SAR)を利用した干渉解析を行った。さらに、得られた地殻変動との比較データを得るために、日本の JERS-1 衛星に搭載されている SAR を用いた干渉解析により、地震活動活発化以前の地殻変動の調査を行った。本稿においては、これらの解析から得られた白頭山周辺における地殻変動場を示し、白頭山直下で観測されている地震活動活発化と火山活動活発化との関連性について考察する。

2. 地震活動活発化時の地殻変動

2.1 解析データ

地震活動の活発化が観測された 2002 年以降に運用されていた SAR 搭載衛星は、ヨーロッパの ENVISAT 衛星、ERS-2 衛星およびカナダの RADARSAT 衛星である。残念ながら、地震活動が活発化していた期間においては、ERS-2 衛星と RADARSAT 衛星に関するアーカイブデータがなかったため、本解析では ENVISAT 衛星を用いた解析のみを行った。ENVISAT 衛星の SAR は C-band のマイクロ波 (波長: 5.6 cm) を用いており、このデータから作

成した干渉画像における 2πラジアン位の位相変化は、人工衛星と地表との距離 (スラントレンジ) の 2.8 cm の変化に相当する。これによって数ミリメートルのスラントレンジ変化にも感度を持つが、L-band の SAR による干渉画像と比べて、植生変化に対する干渉性劣化が生じ易く、植生が多い地域ではノイズが大きくなる。よって、良好な干渉を得るためには、観測間隔が短い干渉ペアを用いる必要があるが、効率的に地殻変動を捉えるためには観測間隔が長いデータペアを解析する必要がある。C-band の SAR を利用した干渉法の適用においては、このような trade-off の問題が生じる。本解析では観測間隔が 1 年以上の干渉ペアも用いたが、この適用条件は必ずしも良好な条件とはいえない。

干渉解析に用いた SAR 画像のシーン範囲を図 1 に示す。干渉解析から得られる地殻変動は、このシーン内での相対的な地殻変動 (スラントレンジ変化) である。観測はディセンディング軌道から VV 偏波の IS2 モードによって行われた。この観測における地表でのレーダ波入射方向は垂直から 23°、北から西に 78° の方向であり、これを単位ベクトルに換算すると (東西: -0.37, 北南: 0.08, 上下: -0.93) となる。干渉解析から得られる地殻変動成分は、干渉ペアの観測間に生じた地殻変動によるスラントレンジ変化量であり、これは地殻変動ベクトルをレーダ波入射方向に投影した量に等しい。表 1 は解析に用いたデータペアの観測日および軌道間距離の視線方向に対する直交成分 (B_{PERP}) を示す。 B_{PERP} は干渉解析への適用条件を示し、これが長すぎる場合には干渉解析を適用することが出来ない。本解析で用いた干渉ペアにおける B_{PERP} は、干渉処理に適用する上では十分に良好な条件といえる。また、差分干渉 SAR 法 (Massonnet *et al.*, 1993) を適用するためには地形標高モデル (DEM) が必要であるが、本解析では Shuttle Radar Topographic Mission による 3-arc second の DEM (SRTM3) を用いた。

2.2 解析結果

図 2 は、表 1 に示す干渉ペアから作成した干渉画像である。これらは、ノイズ軽減のために、約 500 m の範囲で空間平均を行っている。全体的に干渉性の劣化が顕著に見られ、高周波ノイズが卓越しているが、E1 (図 2(a)) の干渉ペアに関しては、その他の干渉ペア (図 2(b)-(d)) と比べると比較的高い干渉性が得られている。干渉性劣化の要因は、植生によってレーダ波の散乱が時間的に不安定になるためと推測されるが、E1 に関するデータ取得時期は落葉の季節であったため、地面からの安定な後方散乱が卓越していたために、比較的高い干渉性が得られたと推測される。干渉ペア E1 から得られた干渉画像において、白頭山周辺に着目すると、半径 5 km 程度の同心円状の干渉縞パターン (外側から青→黄→紫→青) が見られ、山頂付近においては約 3 cm のスラントレンジの短縮が検出された。この干渉縞パターンが地殻変動シグナルと考えると、これは白頭山の山体が膨張するセンスの地殻変動パターンに相当する。SAR 干渉法の適用においては、大気中における電波伝搬遅延による誤差が生

表 1 ENVISAT の干渉解析で用いた干渉ペア

Table 1 Interferometric pairs used in ENVISAT SAR analysis.

Pair	Master	Slave	観測間隔[day]	B_{PERP} [m]
E1	2004/10/15	2005/11/4	385	-184
E2	2004/11/19	2005/9/30	315	188
E3	2004/5/28	2004/10/15	140	23
E4	2005/8/26	2005/11/4	70	35

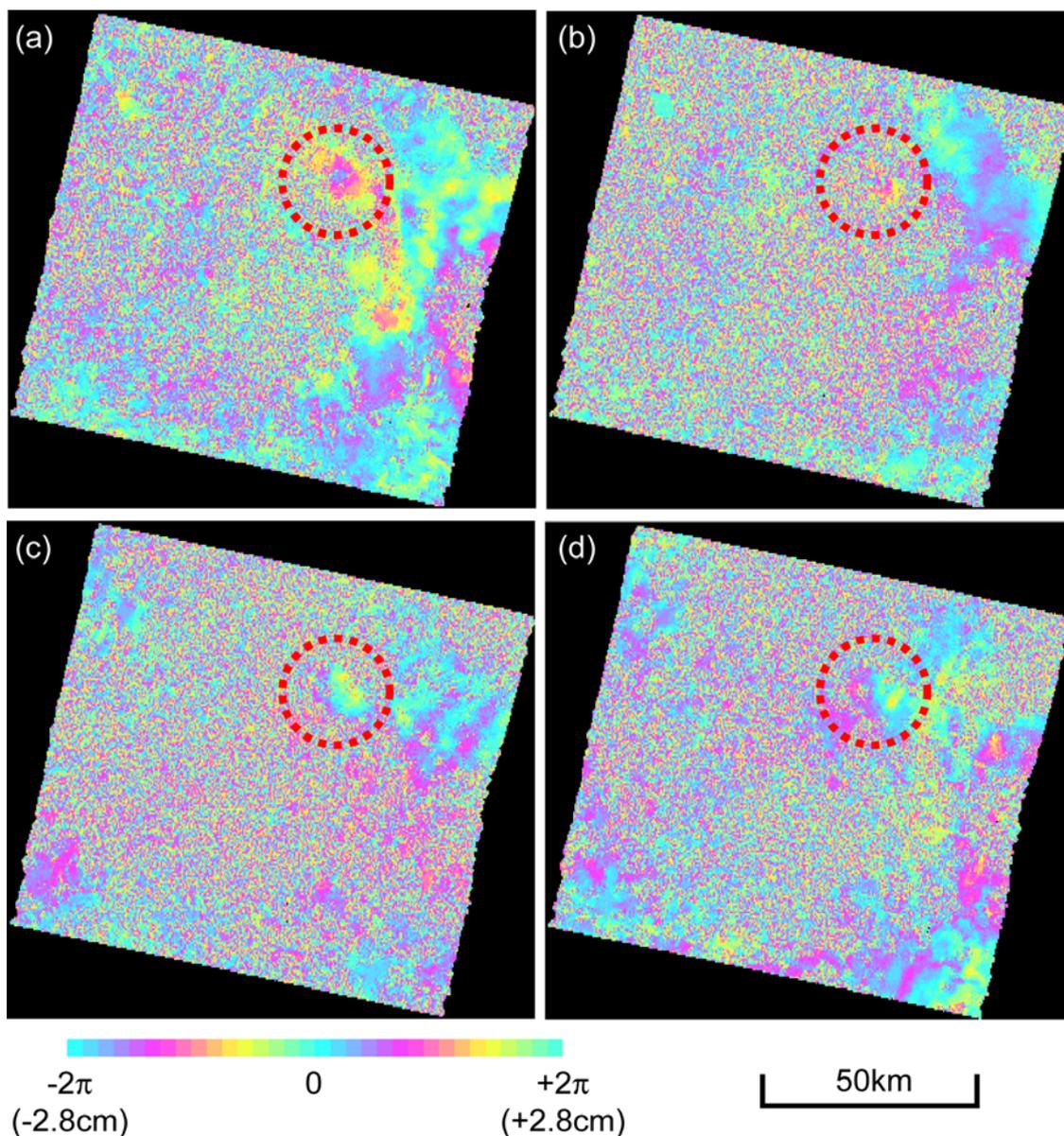


図 2 ENVISAT 衛星の SAR データから作成した干渉画像. 赤破線は白頭山周辺で同心円状の干渉縞パターンが見られた領域を示す. (a) 干渉ペア E1 (2004/10/15–2005/11/4) から作成した干渉画像. (b) 干渉ペア E2 (2004/11/19–2005/9/30) から作成した干渉画像. (c) 干渉ペア E3 (2004/5/28–2004/10/15) から作成した干渉画像. (d) 干渉ペア E4 (2005/8/26–2005/11/4) から作成した干渉画像

Fig. 2 Interferograms generated from ENVISAT SAR data. Dashed red circle designate the area where a concentric fringe pattern was detected. (a) Interferogram generated from SAR pair E1 (15 Oct. 2004 and 4 Nov. 2005). (b) Interferogram generated from SAR pair E2 (19 Nov. 2004 and 30 Sep. 2005). (c) Interferogram generated from SAR pair E3 (28 May 2004 and 15 Oct. 2004). (d) Interferogram generated from SAR pair E4 (26 Aug. 2005 and 4 Nov. 2005).

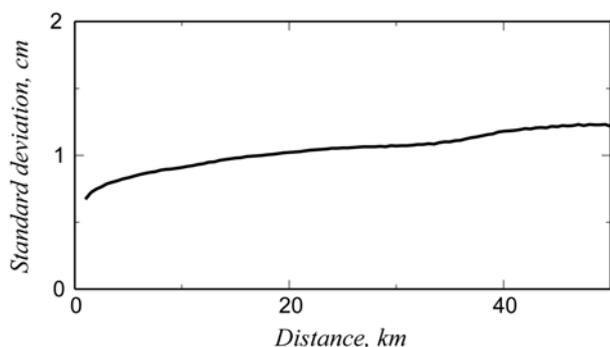


図 3 干渉ペア E1 から得られた干渉画像に関する推定ノイズレベル

Fig. 3 Estimated noise level for the interferogram generated from SAR pair E1.

じ、気象状態によってはこのような標高依存性の干渉縞パターンを生じさせる場合がある。このような誤差を軽減するために、本解析では、白頭山の南東と南西に位置する 2,000 m 級の山において、標高依存性の干渉縞がなくなるように、藤原ほか (1999) による標高の 1 次式で近似される気象ノイズモデルを適用して補正している。この補正を適用した後も、このような干渉縞パターンが現われていることから、この位相成分は標高依存性の気象ノイズでは無いといえる。しかし、気象ノイズには、標高に依存しない成分も含まれ、そのような成分に起因するものと推測される干渉縞パターンが画像全体に見られる。よって、白頭山周辺で得られた干渉縞パターンが、実際の地殻変動シグナルであるかどうかを判断するためには、より注意深い考察が必要である。以下では、白頭山周辺で得られた干渉縞パターンが気象ノイズではなく、地殻変動シグナルである可能性について、より詳しく考察する。

図 2(b) は、干渉ペア E2 (表 1) から作成した干渉画像である。この観測期間は干渉ペア E1 の観測期間と大幅に重なっており、白頭山周辺で得られた干渉縞パターンが地殻変動シグナルであれば、同様の干渉縞パターンが現われるはずである。残念ながら、干渉性の劣化が著しく、高周波ノイズが卓越しているため、確定的には言い難いが、うっすらと同じ干渉縞パターンが現れているように見える。図 2(c) は干渉ペア E3 から作成した干渉画像であり、この干渉ペアの Slave 画像は干渉ペア E1 の Master 画像と同じデータ (2004 年 10 月 15 日) を使用している。もし、白頭山周辺で得られた干渉縞パターンが 2004 年 10 月 15 日の気象状態に起因するノイズであるならば、干渉ペア E3 から作成した干渉画像には、同じ形かつ逆の位相変化を持つ干渉縞パターン (外側から青→紫→黄→青) が現れるはずであるが、そのような干渉縞パターンは見られない。図 2(d) は干渉ペア E4 から作成した干渉画像であり、この干渉ペアの Slave 画像は干渉ペア E1 の Slave 画像と同じデータ (2005 年 11 月 4 日) を使用している。もし、白頭山付近で得られた干渉縞パターンが 2005 年 11 月 4 日の気象状態に起因するノイズであるな

らば、干渉ペア E4 から作成した干渉画像には、同じ形かつ同じ位相変化を持つ干渉縞パターン (青→黄→紫→青) が現れるはずであるが、そのような干渉縞パターンは見られない。

次に、画像全体でのノイズレベルを評価するために、まず、画像内の全ピクセルにおける全組み合わせの位相差を計算した。仮に、画像範囲内が無変動場であるならば、計算した位相差はすべてノイズ成分と考えられる。また、一般に、ピクセル間距離が短い場合には、気象ノイズ成分は似ているので、その相対値は小さくなる。このように、干渉解析における気象ノイズの大きさは、ピクセル間距離に依存するという特徴があるので、ピクセル間距離において 500 m ごとに気象ノイズ成分の標準偏差を計算した。この大きさをノイズレベルと定義する (図 3)。白頭山付近で検出された干渉縞パターンの半径は約 5 km なので、それより十分に長い 10~20 km 離れた領域を地殻変動の基準と考えると、そのノイズレベルは約 1 cm と求まった。それに対して、白頭山付近で得られたシグナルの大きさは、その 3 倍程度であり、統計的にも有意な地殻変動シグナルと言える。以上のことから、白頭山付近で得られた干渉縞パターンはノイズではなく、地殻変動シグナルである可能性が高いといえる。

2.3 球状圧力源モデルによる力源パラメータの推定

白頭山付近で検出された地殻変動に関するメカニズムを調べるために、地殻変動モデルによる力源のパラメータの推定を試みる。このような同心円状の地殻変動パターンは、球状圧力源の膨張に伴う地殻変動パターンと良く一致するので、本解析では球状圧力源モデル (Mogi, 1958) のみを仮定した。ただし、白頭山のような標高差が大きい地形においては、その効果によって地殻変動量が大きく異なるので、標高補正付の球状圧力源モデルを採用した。このようなモデルにおいて、図 4(a) の青線で囲まれた領域の地殻変動を良く説明するように、圧力源の水平位置、深さ、体積変化量を推定した。また、気象ノイズが重畳している可能性があるため、図 4(a) の青線に囲まれた領域における気象ノイズの大きさは一定と仮定して、その大きさも推定した。圧力源の位置は白頭山山頂直下の海拔下 2.2 km (山頂から約 5 km) と推定され、体積変化量は $+1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ と求まった。得られたパラメータからシミュレートした干渉画像は、観測された干渉画像をよく説明している (図 4(a)-(c))。また、推定された気象ノイズの大きさは 5 mm と求まり、これは図 3 に示すノイズレベルと同程度である。よって、妥当な推定値といえる。

膨張源が推定された位置は、Wu *et al.* (2005) が求めた地震活動活発化域とほぼ一致している。よって、地震活動の活発化と得られた地殻変動の関連性は高いと考えられる。ただし、火山活動の活発化との関連性を調べるためには、地震活動活発化以前の地殻変動を調べ、時間的な関連性についても調べる必要がある。

3. 地震活動活発前の地殻変動

3.1 解析データ

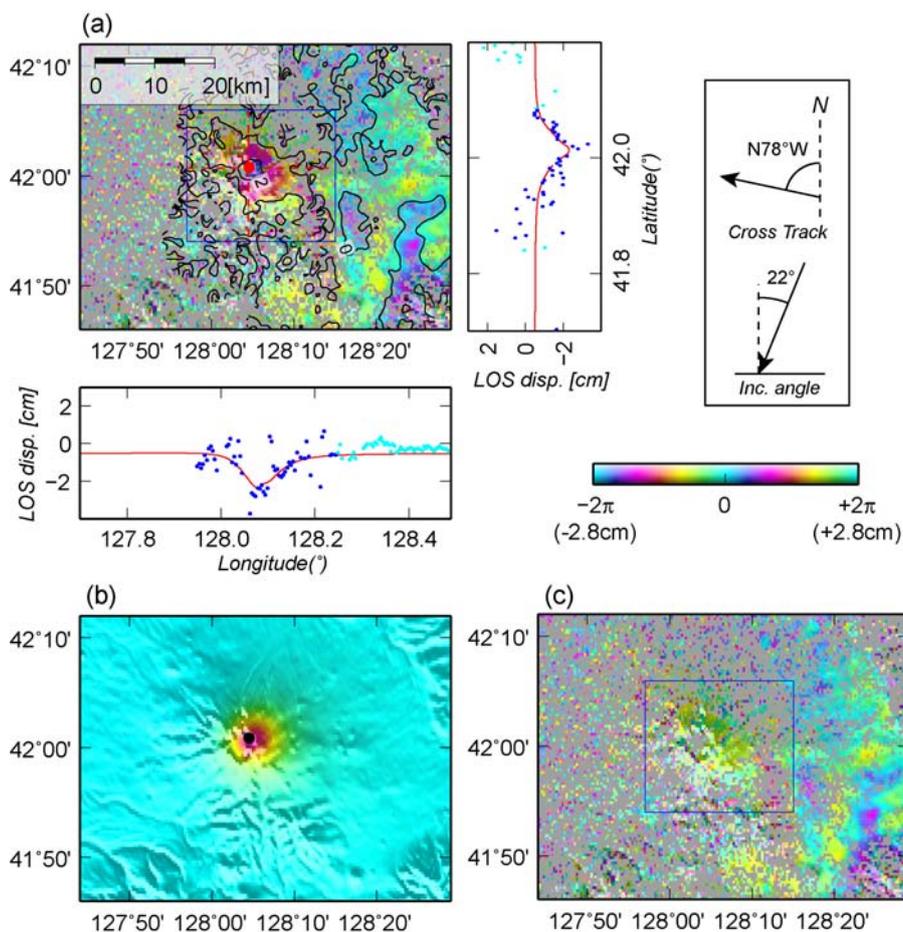


図 4 (a)干渉ペア E1 から得られた白頭山周辺における地殻変動。コンターは 1 cm 毎のスラントレンジ変化量を示す。青線は逆解析に入力データとして用いた領域を示す。赤丸は推定された圧力源の推定位置。右および下に示す図は、赤破線上において観測されたスラントレンジ変化量（青点）とシミュレートしたスラントレンジ変化量（赤線）との比較。水色の点は逆解析に用いていないスラントレンジ変化量を示す。
 (b) 推定された球状圧力源のパラメータからシミュレートした干渉画像。黒丸は推定された圧力源の推定位置。
 (c) 残差（観測値－計算値）。青線は逆解析に入力データとして用いた領域を示す。

Fig. 4 (a) Crustal deformation around Baitoushan Volcano obtained from SAR pair E1. Contour lines express the slant range change in 1 cm intervals. The blue box indicates the area used in estimating source parameters. The red circle shows the location of the estimated inflation source. The right and the bottom figures compare the observed and the modeled slant-range changes on the red dashed lines. Light blue dots represent slant-range change data that was not used in the parameter estimation.
 (b) Interferogram simulated from estimated source parameters. The black circle indicates the location of the estimated source.
 (c) Residual (observed – simulated interferogram). The blue box shows the area that was used in the parameter estimation.

地震活動が活発化する以前に運用されていた SAR 衛星は、日本の JERS-1 衛星、ヨーロッパの ERS-1/2 衛星、カナダの RADARSAT 衛星である。前章で述べたように、効率的に長期間の地殻変動を捉えるためには、植生に起因する精度劣化に対する耐性が高い L-band の SAR が有効であるが、これらの衛星の中で L-band の SAR を搭載した衛星は JERS-1 衛星のみなので、本解析では JERS-1 衛星の SAR（波長：23.5cm）を用いることにした。L-band の SAR を用いることによって、観測間隔が 3 年を超える干渉ペアにも SAR 干渉法の適用が可能である。JERS-1 衛星に関しては、図 1 に示す 2 つの衛星軌道から観測さ

れた SAR シーンに白頭山が含まれている。そこで、東側のシーンを East scene、西側のシーンを West scene と呼ぶこととし、それぞれのシーンにおいて干渉解析を行った（使用したデータを表 2 に示す）。East scene に関するレーダ波の入射方向は（東西：-0.63，北南：0.11，上下：-0.77）であり、West scene に関しては（東西：-0.59，北南：0.10，上下：-0.80）である。また、本解析においても、差分干渉 SAR 法を適用するために SRTM3 を用いた。さらに、標高依存性の気象ノイズ成分を補正するために、標高の 1 次式による気象ノイズモデル（藤原ほか，1999）を適用した。

表 2 JERS-1 の干渉解析で用いた干渉ペア

Table 2 Interferometric pairs used in JERS-1 SAR analysis.

East scene (Path: 088, Row: 230, RSP: 079)

Pair	Master	Slave	観測間隔[day]	B _{PERP} [m]
JE1	1992/9/24	1997/10/16	1848	-898
JE2	1994/8/29	1998/4/10	1320	-538
JE3	1995/8/16	1998/8/20	1100	224
JE4	1993/6/15	1996/8/2	1144	319
JE5	1996/10/29	1998/5/24	572	-302

West scene (Path: 089, Row: 230, RSP: 080)

Pair	Master	Slave	観測間隔[day]	B _{PERP} [m]
JW1	1992/9/25	1994/8/30	704	495
JW2	1994/8/30	1998/7/8	1408	-486
JW3	1993/6/16	1996/10/30	1232	-230
JW4	1996/8/2	1998/5/25	660	-537

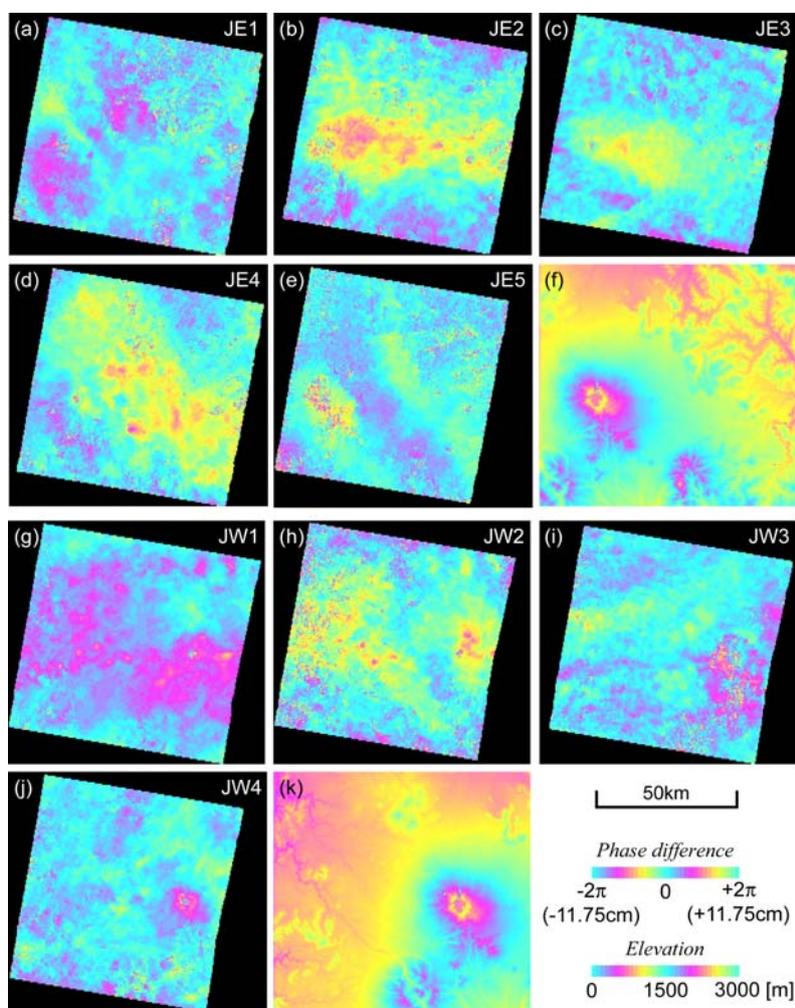


図 5 JERS-1 衛星の SAR を用いて作成した干渉画像。右上の番号は、表 2 の干渉ペア番号に対応する。(a)-(e) East scene の干渉画像。(f) East scene の地形。(g)-(j) West scene の干渉画像。(k) West scene の地形

Fig. 5 Interferograms generated from JERS-1 SAR. The number in the upper right corner corresponds to SAR pair number in Table 2. (a)-(e) Interferograms of the east scene. (f) Topography of the east scene. (g)-(j) Interferograms of the west scene. (k) Topography of the west scene.

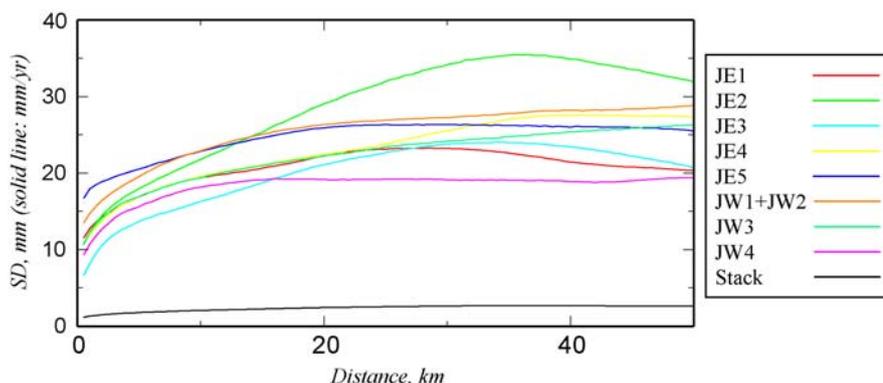


図6 JERS-1 衛星の干渉画像に関する推定ノイズレベル。凡例に示す番号は表2に示す干渉ペア番号に対応する。

Fig. 6 Estimated noise levels for JERS-1 SAR interferograms. Each number shown by the legend corresponds to the pair number in Table 2.

3.2 解析結果

East scene および West scene で得られた干渉画像を図5に示す。得られた干渉画像においては、半波長を超える干渉縞パターンが見られるが、観測期間が重なる他の干渉ペアに共通する干渉縞パターンが見られないことから、これらのほとんどは気象ノイズと推測される。このようなノイズレベルを評価するために、前章で用いたノイズレベル推定法を適用した(図6)。白頭山から10~20 km離れた領域を地殻変動の基準と考えると、ノイズレベルは2~3 cmと求まった。よって、これらの干渉画像から3 cm程度の地殻変動が生じていたかどうかを知ることは困難といえる。

3.3 干渉画像スタッキング

一般に、気象ノイズを生じさせる最大の要因である水蒸気の分布は時間的にランダムと考えることができるので、観測日が異なる複数の干渉画像をスタッキングすることにより、気象ノイズに対する地殻変動シグナルのSN比を高めることが可能である(Williams *et al.*, 1998)。本解析においては、West scene における JW1 の Slave 画像と JW2 の Master 画像は同じデータであるが(表2)、JW1 と JW2 の和は1992/9/25 と 1998/7/8 のデータペアから解析した結果に等しいので、同じデータを用いていることによる問題はない。ただし、本スタッキング解析においては、East scene においては5ペア、West scene においては3ペアの干渉画像を用いた場合に相当する。スタッキング解析においては、より多くの干渉画像を用いることにより、より高い地殻変動検出精度が得られると期待されるが、スタッキング解析に用いることが可能な条件を満たす干渉ペアは表2に示す干渉ペアに限定された。

本解析では、まず、East scene と West scene それぞれにおいてスタッキング解析を行い、1992年から1998年までの平均的な地殻変動を求めた(図7)。West scene におけるスラントレンジ変化速度は、白頭山周辺を除いて5 mm/yr以下であるが、白頭山付近においては、北東山麓においてスラントレンジが短縮し、南西山麓において伸張するような地

殻変動パターンが得られた。このようなパターンは、East scene においても見られるが、同程度のスラントレンジ変化速度が白頭山から離れている領域においても見られることから、十分に気象ノイズを軽減できていないことによる誤差である可能性も考えられる。そこで、よりノイズ成分の軽減を試みるために、East scene と West scene が重なる領域において、すべての干渉画像を用いたスタッキング解析を行った。East scene と West scene では入射角が異なるが、入射角が異なる画像を用いたスタッキング解析により得られる地殻変動成分は、

$$\begin{aligned} X \text{ 成分} &: \sum (t_{1i} \times u_{x1}) + \sum (t_{2j} \times u_{x2}) \\ Y \text{ 成分} &: \sum (t_{1i} \times u_{y1}) + \sum (t_{2j} \times u_{y2}) \\ Z \text{ 成分} &: \sum (t_{1i} \times u_{z1}) + \sum (t_{2j} \times u_{z2}) \end{aligned} \quad (1)$$

を入射方向ベクトルとして観測された地殻変動量に等しい。ここで、 t_{1i} は East scene における i 番目の干渉画像に関する観測間隔であり、 t_{2j} は West scene における j 番目の干渉画像に関する観測間隔である。 $(u_{x1} \ u_{y1} \ u_{z1})$ と $(u_{x2} \ u_{y2} \ u_{z2})$ は、それぞれ East scene と West scene におけるレーダ波の入射方向ベクトルである。本解析においては、(東西: -0.62, 北南: 0.11, 上下: -0.78) を入射方向として観測された量に相当する。入射方向に関してはスタッキングに用いた干渉画像を観測した1992年から1998年までの期間に生じた地殻変動が、一定の速度で進行していた場合にのみ成り立つが、もし、この仮定が成り立たないとしても、本解析では East scene と West scene の入射方向の相違は 3° 程度なので、得られる地殻変動パターンには大きく影響はしないと推測される。ただし、変化速度に関しては、地殻変動の時間的揺らぎが影響する場合が考えられるので、注意深い調査が必要である。それについては今後の課題としたい。

全干渉画像を用いたスタッキング解析の結果(図8)、1年間で数 cm に達するようなスラントレンジ変化は検出

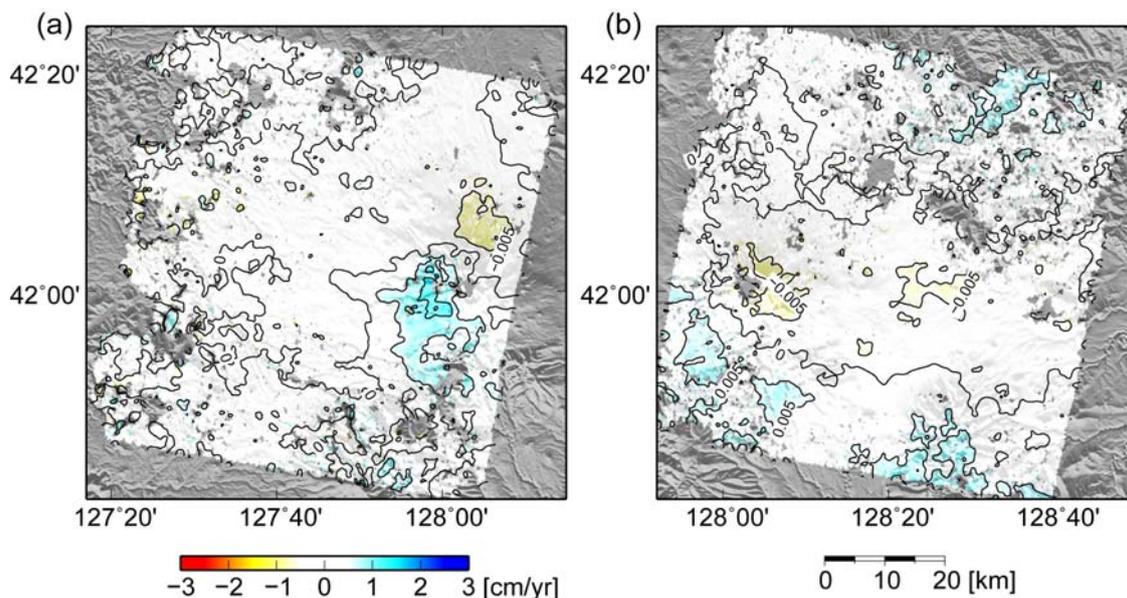


図 7 スタッキング解析から得られた地殻変動。コンターは 5 mm/yr 毎のスラントレンジ変化速度。(a) East scene における解析結果。(b) West scene における解析結果

Fig. 7 Crustal deformation obtained from interferogram stacking. Contour lines indicate slant-range changes of 5 mm/yr. (a) The result in the east scene. (b) The result in the west scene.

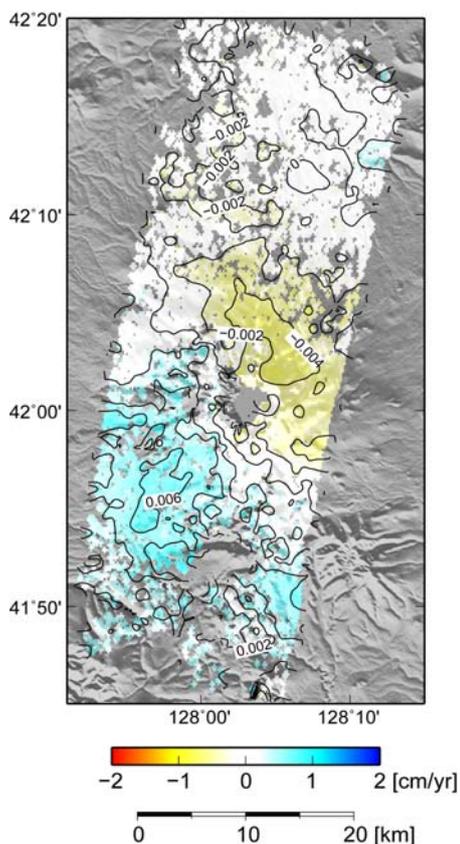


図 8 East scene と West scene の共通領域において全画像をスタッキングして得られた地殻変動。コンターは 2 mm/yr 毎のスラントレンジ変化速度

Fig. 8 Crustal deformation in the overlap area of the east and the west scenes obtained from a stacking of all interferograms. Contour lines indicate slant-range changes of 2 mm/yr.

されなかった。この結果は、地震活動活発化時に検出された山体膨張パターンが以前から継続的に進行していた地殻変動では無いことを示す。ただし、スラントレンジ変化量は小さいが、白頭山の山頂付近を境として、北東側でスラントレンジが短縮し、南西側で伸張するパターンが求まった。その大きさは、北東側で最大 4 mm/yr、南西側で最大 6 mm/yr である (図 8)。それに対するノイズレベルを、スタッキングに用いた干渉画像に関するノイズレベルの root-sum-square から求めると、白頭山から 10~20 km 離れた領域を地殻変動の基準として 2~3 mm/yr と推定された。つまり、白頭山山麓で得られた地殻変動パターンは、ノイズレベルに対して 2 倍程度の大きさに相当する。この比較は、画像内でノイズレベルが一樣であるという仮定の下に行っているが、山岳域周辺では特異な気象条件が生じる場合も考えられ、ノイズレベルが大きくなる可能性は十分に考えられる。よって、得られたパターンが必ずしも有意な地殻変動シグナルとは言えないかもしれない。

Kim and Won (2003)は、本研究と同じ JERS-1 衛星のデータを用いた SAR 干渉解析を適用し、白頭山で 2~3 mm/yr の隆起が生じていたとする結果を報告している。彼らの解析においては、標高に依存する気象ノイズ成分を解析的に推定しているが、地殻変動も標高に依存するという仮定のもとで、隆起量の推定を行っている。しかし、本研究で得られた地殻変動は、標高に依存するパターンではなく、山頂を境として北東側でスラントレンジが短縮し、南西側で伸張するパターンが得られている。つまり、彼らの解析における仮定には、矛盾が含まれている可能性を示している。また、彼らは観測値と推定値に関する残差の分散が大きいことから、彼らが求めた結果について信頼度は高くないことについても述べている。よって、この期間に白頭山が隆起をしていたと結論付けることは出来ないと考える。一方、本解析から得られた結果との相違は、解析手法によっては数 mm/yr 程度の相違が表れる可能性を示している。ただし、得られた結果が実際の地殻変動を示すシグナルであれば、白頭山の火山活動メカニズムを知る重要な手がかりとなりうる。よって、検出された地殻変動パターンが地殻変動シグナルであるのか、もしくは見かけのノイズであるのか見極めることは極めて重要であり、今後の課題としたい。

4. 結論とまとめ

白頭山直下における地震活動活発化時には、ENVISAT 衛星の SAR を利用した干渉解析から山体が膨張するような地殻変動パターンが得られた。これは、スラントレンジ変化で 3 cm 程度と求まり、有意な地殻変動シグナルと考えられる。得られた地殻変動から求められる膨張源の位置は、地震活動の活発化領域とおおよそ一致する。一方、地震活動が活発化する前に関しては、JERS-1 衛星の SAR を利用した干渉解析から、1 年間でスラントレンジが数 cm 変化するような地殻変動は検出されなかった。これらのことから、白頭山の山体膨張傾向は、空間的に

も時間的にも地震活動活発化と関連があるものと言える。つまり、これらの結果は、2002 年頃からマグマが白頭山直下の地下 5 km 付近にまで上昇していることを示唆している。また、本解析から得られた体積増加量は $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 程度であるが、これは 2004 年 10 月から 2005 年 11 月までの結果であり、地震活動の活発化を開始した 2002 年中頃からの体積増加量はさらに多いと推測される。このように、白頭山の火山活動は活動期に入りつつある可能性を示しており、今後は、火山活動を継続的に監視する体制を整えることが必要と考える。そのためには、植生による精度劣化に対する耐性が高い L-band の SAR を使用することが必要不可欠であるが、日本で 2006 年に打ち上げられた L-band SAR 搭載衛星 (ALOS) の利用が可能になったので、今後の観測に期待したい。

また、白頭山の火山活動を継続的に監視する上では、その活動メカニズムをより詳しく調べる必要がある。静穏期の地殻変動についてもより良く理解する必要がある。現時点においては、JERS-1 衛星の干渉解析結果が有意な地殻変動シグナルかどうかを判断することは出来ないが、今後は地質・地形学等の別の観点からの解釈も加えつつ、より総合的に活動メカニズムに関する調査を進めたい。

謝辞

本研究で用いた ENVISAT 衛星の ASAR に関する原初データの所有権は European Space Agency (ESA) が有する。また、JERS-1 衛星の SAR に関する原初データの所有権は、経済産業省および宇宙航空研究開発機構が有する。本論文の図の一部は、Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1998) を用いて作成した。本論文の改訂においては、匿名閲読者からの丁寧なコメントが有益であった。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Kim, S.-W. and Won, J.-S. (2003): Slow deformation of Mt. Baekdu stratovolcano observed by satellite radar interferometry. Proc. FRINGE 2003 workshop, ESA-ESRIN, http://earth.esa.int/workshops/fringe03/proceedings/posters/57_kim.pdf, March 5, 2007.
- 3) Machida, H., Moriwaki, H., and Zhao, D. (1990): The recent major eruption of Changbai volcano and its environmental effects. Geogr. Rept. Tokyo Metropol. Univ., 25, 1-20.
- 4) Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., and Rabaut, T. (1993): The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. Nature, 364, 138-142.

- 5) Mogi, K. (1958): Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. Bull. Earthq. Res. Inst., 36, 99-134.
- 6) Williams, S., Bock, Y., and Fang, P. (1998): Integrated satellite interferometry: Tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar products. J. Geophys. Res., **103**, 27051-27067.
- 7) Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1998): New, improved version of the Generic Mapping Tools released. EOS Trans. AGU, 79, 579.
- 8) Wu, J.-P., Ming, Y.-H., Zhang, H.-R., Su, W., and Liu, Y.-M., (2005): Seismic activity at the Changbaishan Tianchi volcano in the summer of 2002. Chinese J. Geophys., **48-3**, 621-628 (in Chinese with English abstract).
(原稿受理：2007 年 3 月 2 日)

要 旨

中国と北朝鮮の国境に位置する白頭山直下において、2002 年中頃より地震活動の活発化が観測された。これに伴う地殻変動を調査するために、ENVISAT 衛星の合成開口レーダ (SAR) を利用した干渉解析の適用を試みた。2004 年 10 月 15 日と 2005 年 11 月 4 日の干渉ペアからは、白頭山山頂付近を中心とする半径 5 km の範囲でスラントレンジが短縮する地殻変動パターンが検出された。これは山体が膨張するセンスの地殻変動に相当する。山頂付近におけるスラントレンジ変化量は約 3 cm と求まり、これは有意な地殻変動シグナルと考えられる。得られた地殻変動から、球状圧力源モデルのパラメータを推定したところ、膨張源が白頭山山頂直下の地下 5 km に求まり、この位置は地震活動の活発化位置とおおよそ一致する。一方、地震活動が活発化するより以前の地殻変動を、JERS-1 衛星の SAR を利用した干渉解析を用いて調査したところ、年間 1 cm を超えるスラントレンジ変化を生ずるような山体膨張傾向の地殻変動は検出されなかった。これらの結果は、地震活動が活発化した 2002 年中頃から、マグマが深部から地下 5km 付近にまで上昇していることを示唆しており、白頭山の火山活動が活動期に入りつつある可能性を示している。

キーワード：白頭山, SAR 干渉法, 地殻変動, ENVISAT, JERS-1