

**ALOS / PALSAR を用いた  
地殻変動の時空間変化の検出  
- 伊豆大島火山の事例 -**

北海道大学理学部地球科学科 4 年

宇宙測地学研究室

22080175

葛西あやか

指導教官：古屋正人教授

平成 24 年 2 月 29 日

## 概要

伊豆大島火山は、伊豆半島の南東 25 km に位置する伊豆諸島最北端の島、伊豆大島のことを言う。山頂部は三原山と呼ばれる。近年では 30~40 年周期で中規模以上の噴火活動が起こっているほどの活発な活火山であり、前回は 1986 年に全島避難を余儀なくされるほどの噴火活動があった。

GPS のデータによると伊豆大島は、観測が始まった 1996 年から、東西方向・南北方向ともに 1~2cm/year 程度の膨張が起こっていることが分かるが、火口周辺の細かい変動までは GPS で読み取ることが出来ない。そこで、陸域観測技術衛星 ALOS を用いて、細部の変動の検出を試みた。

ALOS (Advanced Land Observing Satellite ; 日本名「だいち」) は、昼夜天候を問わず陸域の観測が可能な、フェーズドアレイ方式 L-band 合成開口レーダー-PALSAR を搭載している。本研究では PALSAR から得られた約 5 年分のデータを使用し、InSAR 画像を作成することで変動量を推定した。しかし、SAR データにはもともと大気や水蒸気による伝播遅延や軌道誤差、地理的なノイズが含まれており、それらをデータ処理の過程で完全に除去することは難しく、細かい変動を見落とししてしまいがちである。この問題を解決するための手法の 1 つとして、InSAR 時系列解析 (InSAR time-series analysis) が挙げられる。本研究ではそのうち PS-InSAR 法の解析ソフトウェア StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) を用いて、地殻変動のみの検出を試みた。

これらのデータから、伊豆大島火山は常に膨張し続けているが、3~4 年に 1 度収縮してから急激に膨張する時期があることが分かった。最近では、2006~2007 年には収縮傾向を示していたが、2008~2009 年頃から徐々に視線距離が伸び始め、2010 年後半には急激に伸びていた。島の東部・西部は島の外側に向かって膨張を続けており、特に 2009 年頃から顕著であった。また、島の中心部である中央火口付近では 3 年前くらいから 3~5cm 程度視線距離が伸びており、Ascending と Descending で同じ傾向を示していることから、東西方向・南北方向の変動ではなく上下方向の変動があったと推測され、この沈降を示している場所は 1986 年噴火 A 溶岩の位置と類似していた。

StaMPS による解析結果は、通常 InSAR 画像と比べると、島全体の trend に影響されることなく、PS 点ごとの細かな変動を見ることが出来た。また StaMPS の利点として、垂直基線長が長いために干渉度が低いペアも、PS-InSAR 法を用いるとほとんどのデータで干渉させられることも挙げられる。GPS データと比べると、各ピクセルにおける変動を見ることが出来るため、局所的な変動を知りたいときには有効であるが、時系列変動を見たいときには時間分解能が低いために実際の変動とは必ずしも一致しないことが分かった。

# 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	測地技術の歴史と発展	1
1.2	SAR (Synthetic Aperture Radar)	2
1.2.1	SLC 画像の作成 / 分解能	3
1.2.2	InSAR	4
1.2.2.1	干渉の流れ	4
1.2.2.2	InSAR 画像の変動量	7
1.3	ALOS / PALSAR	8
1.4	GPS	10
1.5	研究の目的	11
<b>2</b>	<b>地殻変動の時空間変化の検出</b>	<b>12</b>
2.1	観測地域	12
2.2	使用したデータ	13
2.2.1	ALOS / PALSAR データ	13
2.2.2	数値標高モデル	14
2.3	InSAR による解析結果	15
2.3.1	407-680(Ascending)	16
2.3.2	58-2920(Descending)	20
2.4	GPS 解析	24
2.5	InSAR 時系列解析 ; StaMPS	28
2.5.1	PS-InSAR 法	28
2.5.2	StaMPS	29
2.5.3	解析結果	30
<b>3</b>	<b>考察</b>	<b>38</b>
3.1	Gamma による InSAR 画像と StaMPS の比較	38
3.2	GPS 基線長変化と StaMPS の比較	39
<b>4</b>	<b>まとめ</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>謝辞</b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b>参考文献・画像引用</b>	<b>44</b>

# 1. はじめに

## 1.1 測地技術の歴史と発展

測地学の歴史は測量から始まる。その起源は、古代ギリシャ時代にエラトステネスが角度と距離から地球の半径を求めたことを一例とするような、時間や角度、距離などの基本的な物理量の測定から行われるものであった。

しかし時が経つにつれ、位置の決定精度が1cmを切り、ミリメートルオーダーの値が要求されるようになってくる。すると、三角測量や天文観測などのような、基本的な値を用いた手法からでは求められなくなってきた。

1970年代頃から測地技術は急速に発展し、準星クェーサーの発する電波雑音を受信することで観測点間の相対基線ベクトルを求めるVLBI (Very Long Baseline Interferometry; 超長基線電波干渉計)、地表から衛星にレーザーパルスを照射し、地表に帰ってくるまでの往復時間から距離を求めるSLR (Satellite Laser Ranging; 人工衛星レーザー測距)、複数の衛星が発する電波を同時に受信することで受信点の3次元位置を決定するGPS (Global Positioning System; 全地球測位システム) など、地球観測衛星に分類される人工衛星による測地技術が登場した。これらは現在も用いられているシステムであるが、その短所としていずれも地上に観測点が必要である点が挙げられる。現在の日本のように、観測網が張り巡らされている地域では高い時間分解能で観測を行うことが出来るが、観測網よりもさらに細かな変動を見たい場合や、観測点を置くことの出来ないような厳しい環境の地域を観測したい場合などには、適用が難しい。

そこで、近年注目を集めているのが、地上に観測点を必要としない人工衛星による観測である。そのうちの1つが、合成開口レーダーSARを用いたものだ。一度に広範囲のデータを取得することが出来るうえ、マイクロ波を使っているため天候や昼夜に左右されず、いつでも観測が可能であるというメリットがある。1990年代前半からSARを搭載した航空機や人工衛星が次々と実用化されてきた。もともとは地形計測が主な役割であったが、1992年Landers地震の地殻変動を検出した研究 (Massonnet et al., 1993) が発表されたことで、地殻変動の検出が可能だということが示された。最近では、SARデータの質や量の向上、誤差の補正方法の確立など解析の手法が豊かになったことで、さらに細かな変動を検出することが出来るようになってきている。

## 1.2 SAR

SAR (Synthetic Aperture Radar) とは、合成開口レーダーと呼ばれる技術のことである。人工衛星や航空機に搭載したアンテナを用いて、地表に対してマイクロ波の照射と反射波の受信を連続的に行い、空間上にあたかも巨大なアンテナが存在しているかのような状態を作り出すことで、高い空間分解能で地表の画像を得ることが出来る。対象物から反射される電波の強さから対象物の大きさや表面の性質を知ることが出来、また電波が帰ってくるまでの時間を測定することで対象物とのおよその距離を測ることが出来る。比較的波長が長いマイクロ波を使っているため、雲などの影響を受けずに観測を行えるという利点がある。

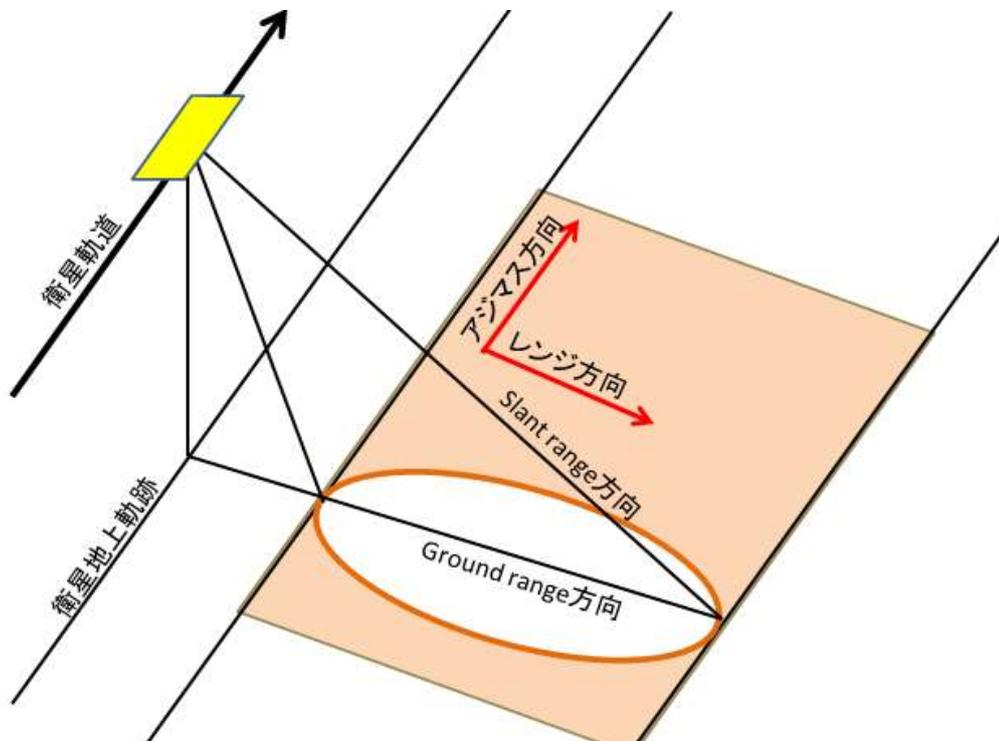


Fig.1-1 : SAR のジオメトリ

レーダーで観測する場合、空間分解能が問題となる。これを向上させるためには指向性を絞り細かいビームを照射できれば良いのだが、指向性を高めるためには大きなレーダーアンテナが必要となる。しかし、例えば 10cm、あるいはそれよりも高い分解能を達成するためには 1km を超えるアンテナが必要となり、人工衛星に搭載するには非現実的なサイズになってしまう。

そこで、人工衛星を移動させながら電波を送受信して、軌道上に仮想的なアンテナをいくつも並べた状態を作り出し、大きな開口を持ったアンテナと等価な画像が得られるようにした。このように、人工的に「開口」を「合成」したものが合成開口レーダーである。

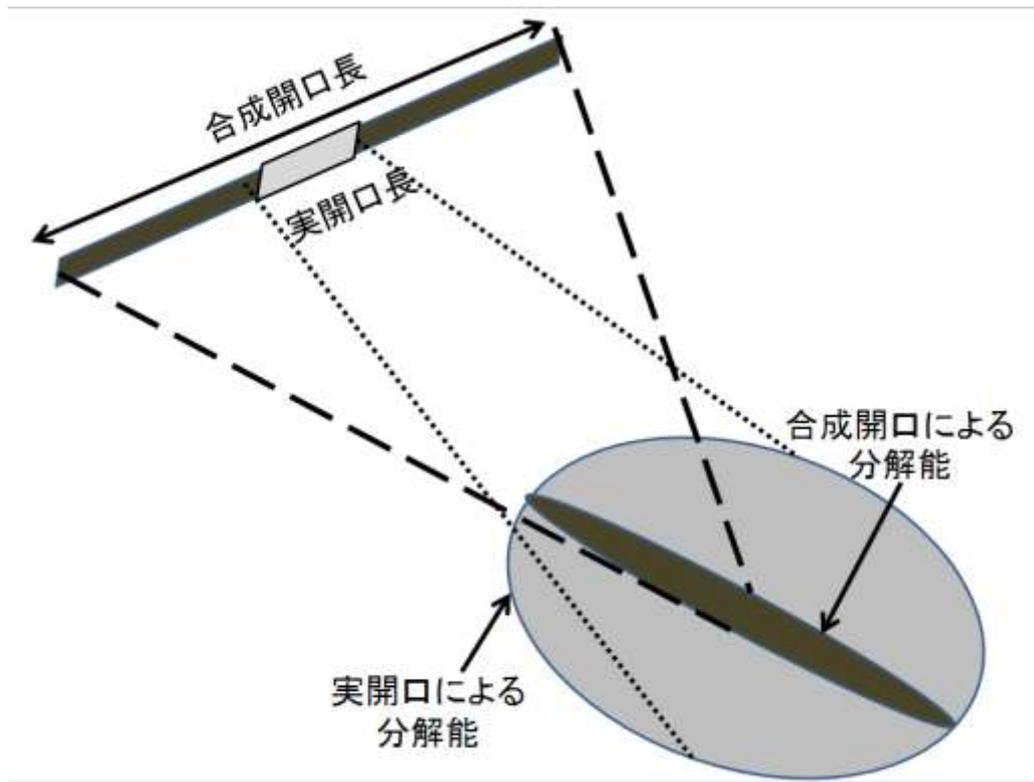


Fig.1-2 : 実開口と合成開口による分解能の差

また、レーダーを真下に向けて照射すると、進行方向に直行する両側の距離が等しい点からの反射波を区別することが出来ないため、SARは斜め下に向かってレーダーを照射している。これをサイドルッキングレーダーと言う。

### 1.2.1 SLC 画像の作成 / 分解能

最初に得られた SAR の受信生データ(Raw data)は、それだけでは何を示しているのかわからないものである。この生データに、Range 方向にはチャープパルスによるパルス圧縮を、Azimuth 方向にはアジマス圧縮をかけ、高分解能化を行うことで SLC (Single Look Complex) 画像を作成する。SLC 画像の複素数データの実部と虚部の二乗和の平方根をとったものを平均し、画像にしたものが強度画像である。

SAR はアンテナからパルスを送信し、地表で反射して衛星に戻ってくるが、反射する位置の違いによって衛星への到着時刻にずれが生じる。そのため、1 回のパルス送信でも Range 方向の対象物の識別が可能となる。この時間幅が狭いほど対象物の識別能力が向上するのだが、短い時間内に十分強力な電波を送信することは困難である。そこで、長いパルスに変調を加えて帯域を広げ、疑似的に時間幅の短いパルスを送受信しているかのような操作をすることで、この問題を解決している。この手法をチャープパルスによるパルス圧縮と呼ぶ。Azimuth 方向もドップラー効果によってチャープ信号と同じような扱い

をすることが可能であるため、Range 方向と同様に整合フィルターを用いることが出来る。これをアジマス圧縮と呼ぶ。

Range 方向の分解能 $\Delta r$ と Azimuth 方向の分解能 $\Delta a$ は以下の式で表される。

$$\Delta r = \frac{c}{2K_r T_p} \quad (1.1)$$

$$\Delta a = \frac{L}{2} \quad (1.2)$$

ここで、 $c$ は光速、 $K_r$ はチャープ率、 $T_p$ はパルスの継続時間、 $L$ はレーダーのアンテナの長さである。注目すべきは、Azimuth 方向の分解能が衛星の高度や波長によらず、アンテナ長のみ依存する点である。よって前述した合成開口は、Azimuth 方向の分解能向上に密接に結びついていることが分かる。

## 1.2.2 InSAR

InSAR (Interferometry SAR ; 干渉 SAR) とは、地表の同一地域において2回の SAR 観測を行い、そこから得られた2枚の SLC 画像を干渉させて差を取ることで、衛星と地表との視線距離の変化を知ることが出来る技術をいう。その原理はヤングの実験で示される干渉縞によって理解できる。

### 1.2.2.1 干渉の流れ

SAR で地表観測をした場合、アンテナと地表との往復の距離  $r$  は、以下の式で表される。ここで、 $\lambda$  は SAR マイクロ波の波長、 $n$  は SAR マイクロ波の視線上の波の数、 $\Delta x$  はその端数である。

$$2r_1 = n_1 \lambda + \Delta x_1 \quad (1.3)$$

$$2r_2 = n_2 \lambda + \Delta x_2 \quad (1.4)$$

InSAR では、地表の同一の場所に対して2回の観測を行い、その SLC 画像の位相差を取ることで、2回の観測の間に発生した衛星—地表間の視線距離の変化を求めることが出来る。

$$2(r_2 - r_1) = \Delta x_2 - \Delta x_1 = \frac{\lambda(\phi_1 - \phi_2)}{2\pi} \quad (1.5)$$

SAR 観測によって得られた画像の各ピクセルの信号  $c$  は複素数で表され、データとして実数部  $a$  と虚数部  $b$  が格納されている。これらを位相  $\phi$  と振幅  $d$  を用いて表すと、以下のようなになる。

$$c_1 = a_1 + ib_1 = d_1 e^{i\phi_1} \quad (1.6)$$

$$c_2 = a_2 + ib_2 = d_2 e^{i\phi_2} \quad (1.7)$$

1 回目と 2 回目の信号の位相差は、1 回目の観測値に 2 回目の観測値の共役複素数をかける干渉処理によって求めることができる。

$$\begin{aligned} c_1 c_2^* &= a_1 a_2 + b_1 b_2 + i(a_2 b_1 - a_1 b_2) \\ &= a_3 + ib_3 = d_1 d_2 e^{i(\phi_1 - \phi_2)} \end{aligned} \quad (1.8)$$

初期干渉画像は、この処理を画像の各ピクセルに行うことによって得られる。しかし、初期干渉画像には地表の変動による変動縞だけでなく、衛星軌道が一致していないために生じる軌道縞や地形縞など、複数のノイズが重なっている。

$$\Delta\Phi_{t_i} = \Delta\Phi_{deform} + \Delta\Phi_{orbit} + \Delta\Phi_{topo} + \Delta\Phi_{atm} \quad (1.9)$$

ここで、 $\Delta\Phi_{t_i}$  は初期干渉画像に見られる縞全てを指し、 $\Delta\Phi_{deform}$  は変動縞、 $\Delta\Phi_{orbit}$  は軌道縞、 $\Delta\Phi_{topo}$  は地形縞、 $\Delta\Phi_{atm}$  は大気の影響によるノイズを指す。その他に、水蒸気による影響なども含まれる。

したがって、初期干渉画像から軌道縞、地形縞を取り除いて変動縞だけを取り出す必要がある。軌道縞、地形縞は以下の式で表される。各変数は Fig.1-3, 1-4 に準ずる。

$$\Delta\Phi_{orbit} = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R = -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta_0 - \alpha) \quad (1.10)$$

$$\Delta\Phi_{topo} = -\frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\theta_0 - \alpha) \delta\theta \quad (1.11)$$

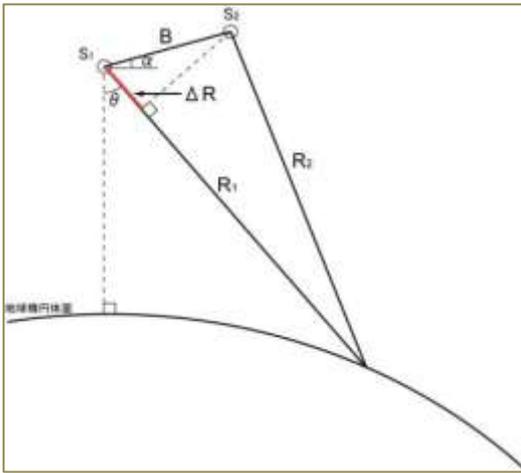


Fig.1-3 : 軌道縞

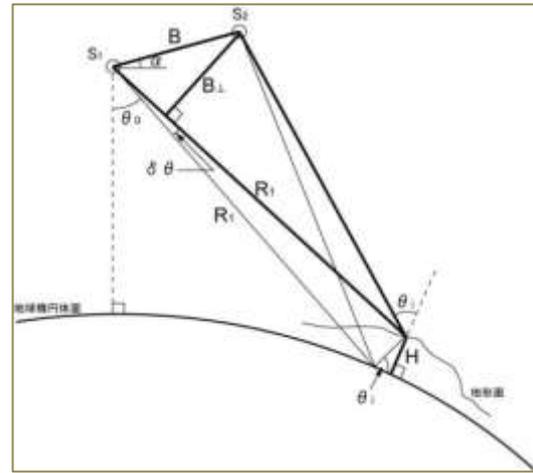


Fig.1-4 : 地形縞

(いずれも測地学テキストより)

ただし、地形縞については数値標高モデル(DEM)を用いることでシミュレートが可能であり、これを用いて除去することが出来る。DEMについては2.2.2項で後述する。

軌道縞、地形縞を除去した後は、変動縞 $\Delta\phi_{deform}$ をイメージ化する。ここではまだ位相情報が $0\sim 360^\circ$ の値の中にwrappingされており、変動の絶対値を得ることが出来ない。そのため、折りたたまれている情報を元に戻す位相unwrappingを行う。それからノイズ除去を行うフィルターをかける。強くかけすぎてしまうと細かな変動を潰してしまうことになり、また弱すぎると干渉度が低い部分がほぼ表示されなくなってしまふ。最後にレーダー座標で表されている画像を地図投影変換(geocoding)することでInSAR画像が完成する。

これらをまとめると、以下のような流れとなる。



Fig.1-5 : SLC から InSAR 画像完成までのプロセス

### 1.2.2.2 InSAR 画像の変動量

InSAR 画像から読み取れる変動は絶対量ではなく、基準点に対する相対量である。また、地上における3次元変位を、LOS (Line of Sight ; 人工衛星の視線方向) に投影した1次元の視線距離であることに注意しなければならない。LOS の変化量は以下の式で表される。

$$dLOS = \cos \theta_H \sin \theta_i dux - \sin \theta_H \sin \theta_i duy + \cos \theta_i dh \quad (1.12)$$

ここで、 $dux$ は衛星軌道に直行する方向の変動、 $duy$ は衛星軌道に平行な方向の変動、 $dh$ は鉛直方向の変動量、 $\theta_H$ は衛星の軌道方向が真北から時計回りにずれている角度 (Heading 角)、 $\theta_i$ はマイクロ波の入射角を示す。

この式から、 $\Delta LOS$ だけでは水平方向の変動なのか鉛直方向の変動なのかを読み取ることが出来ないことが分かる。仮に地盤沈下などのように鉛直方向の変動だけだということが分かっていた場合も、 $\Delta LOS$ では実際の変動量よりも小さく評価されてしまうため、変動の絶対量を考える際にはこれらを考慮する必要がある。

### 1.3 ALOS / PALSAR

陸域観測技術衛星 ALOS（Advanced Land Observing Satellite；日本名だいち）は、宇宙航空研究開発機構（Japan Aerospace eXploration Agency；JAXA）によって 2006 年 1 月 24 日に打ち上げられた地球観測衛星である。地図作成、地域観測、災害状況把握、資源調査などへの貢献を目的としており、実際に新潟県中越沖地震や四川大地震、東日本大震災などの災害被害観測や、国土地理院やアフリカの地図作成への貢献など、日本国内に留まらずさまざまな成果を挙げた。

しかし、目標寿命である 5 年を過ぎた 2011 年 4 月 22 日に電力異常が発生したことで観測機器がオフ状態となってしまい、同年 5 月 12 日にその運用を停止することとなった。



Fig.1-6；ALOS（JAXA デジタルアーカイブスより）

軌道	太陽同期準回帰軌道 (回帰日数 4 6 日)
軌道高度	約 690km (軌道長半径 7,070km)
軌道傾斜角	約 98°
姿勢制御	三軸姿勢制御方式 (高精度姿勢軌道決定機能)
設計寿命	3 年 (目標寿命 5 年)
大きさ	本体：約 6.2×3.5×4.0m 太陽電池パドル：約 3.1×22.2m 質量：約 4,000kg アンテナ長：約 8.9×3.1m

Table1-1：ALOS の仕様

ALOS には、標高など地表の地形データを読み取る PRISM（パנקロマチック立体センサー）、土地の表面の状態や利用状況を知るための AVNIR-2（高性能可視近赤外放射計 2 型）、昼夜・天候を問わず陸域の観測が可能な PALSAR（フェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダー）の 3 つの観測機器が搭載されている。

そのうち、本研究で使用した PALSAR は能動型のマイクロ波センサーで、高分解能観測モードや広観測域モード（ScanSAR）などを持っている。ALOS に搭載されているものは、1992 年に打ち上げられた地球資源衛星 JERS-1（Japanese Earth Resources Satellite-1；日本名ふよう 1 号）に用いられていた合成開口レーダー（SAR）の機能・性能をさらに向上させたものである。PALSAR 高分解能モードの仕様は以下の通りである（Table1-2）。

中間周波数	1270MHz (L-band)	
モード	FBS	FBD
バンド幅	28MHz	14MHz
偏波	HH, VV	HH+HV, VV+VH
地上分解能	7~44m	14~88m
観測幅	40~70km	
offnadir	34.3° (41.5° )	

Table1-2 : PALSAR 高分解能モードの仕様

また、PALSAR は L-band と呼ばれる波長 23.5cm のマイクロ波を使用している。細かい変動をとらえることにはあまり向いていないが、C-band や X-band のような波長の短いものよりも植生などの影響を受けにくく、干渉度が高いことが特徴である。日本のように山地や植生が多く、地形が険しい地域には L-band が適している。現在使用されている SAR 衛星はほとんどが C-band を用いたものであるため、L-band の SAR 衛星が継続的に使用できる状況が求められる。

なお現在 ALOS のミッションを発展的に引き継ぐ後継機として、ALOS-2 の開発が進んでいる。ALOS-2 には PALSAR を高性能化させた PALSAR-2 を搭載し、観測の高分解能化を図る。ALOS-2 は 2013 年に打ち上げが予定されており、緊急観測のための国際協力を目指している。

## 1.4 GPS

GPS (Global Positioning System ; 全地球測位システム) は、航空機・船舶などの航法支援用としてアメリカ合衆国によって開発された、複数の GPS 衛星が発する電波を地上の観測点で受信し、その 3 次元位置を決定するシステムのことである。現在、GPS 衛星は上空約 2 万キロメートルを周回しており、6 軌道面に約 30 個配置されている。3 次元位置に加え、受信機時計の誤差も未知量として考えるため、4 個以上の GPS 衛星からの距離を同時に測ることにより、自分の位置を決定することが出来る。

同様のシステムは、旧ソビエト連邦によって開発され現在はロシアで活用されている GLONASS(GLObal NAVigation Satellite System)、EU によって開発された Galileo、中国の北斗など各国が所有しているが、いずれも予算面や設備面などの理由から世界的な本格運用には至っていない。日本では、2010 年に準天頂衛星の実用試験機みちびき (QZS-1) が打ち上げられ、試験期間が終了し次第 GPS や Galileo と併せて使用される予定である。

GPS の利用形態は主に、受信点の絶対位置を単独で決定する単独測位と、既に位置が決められている基準点に対してもう一方の点の相対位置を決定する相対測位とがある。

単独測位は、4 個以上の GPS 衛星から送信される情報を 1 台のアンテナで受信し、往復に要した時間を同時に測定し、それを距離に変換することで観測点の位置を決定するものである (Fig.1-7)。衛星の位置誤差や、対流圏や電離層での電波遅延などの影響から、約 10m の誤差で位置決定をすることが出来る。また相対測位は、2 台以上の受信機を用いて、4 個以上の同じ GPS 衛星を同時に観測し、それぞれの電波信号が到達する時間差を測定することで 2 点間の相対的な位置関係 (ベクトル) を決定するものである (Fig.1-8)。各観測点で同じ衛星の電波を受信していること、衛星から発射された電波が同じような気象条件の中を通過してくることから、単独測位で含まれてしまう衛星の位置誤差や対流圏・電離層遅延量を除去することが出来るため、100 万分の 1 の精度で 2 点間の相対的な位置関係が分かる。

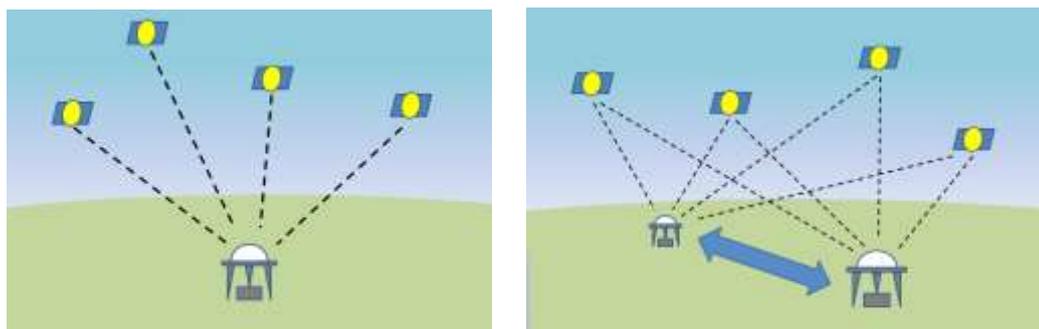


Fig.1-7 (左) : 単独測位 (受信機は 1 台、GPS 衛星は 4 個以上)

Fig.1-8 (右) : 相対測位 (受信機は2台以上、GPS 衛星は4個以上、同時に測定)

## 1.5 研究の目的

本研究では、ALOS/PALSAR が 2006 年 6 月～2011 年 2 月に取得したデータを使用して伊豆大島火山のカルデラ周辺における InSAR 画像を作成することで、地殻変動の時空間変化をより詳細に調べることを目的としている。

GPS の観測網は全国各地に張り巡らされている。伊豆大島火山全体の膨張・収縮の様子や、その観測点自身の動きを捉えることは可能だが、そのデータのみでは火口付近の細かい変動を捉えることは難しい。よって、GPS データからは島全体の基線長変化を求め、また衛星に対する SAR の視線方向の距離の変化を計算した。

また ALOS/PALSAR は、前述のとおり一度に広域の観測が可能であるため伊豆大島火山全体の変動を可視化することが出来るが、1 次元的な SAR の視線方向への変化量しか読み取ることが出来ない。そのうえ、観測時や解析時に生じるさまざまなエラーを完璧に除去し切ることが現段階では難しい。そこで、InSAR 時系列解析の 1 つの手法である PS-InSAR 法を用いた。これは観測領域の中で空間・時間分解能が低下しにくい恒久散乱体を見つけ出し、その位相変化を捉えるものであり、地震活動や火山噴火による顕著な地殻変動ではない、細かな変動を見るのに有用とされる。本研究では PS-InSAR 法の解析ソフトウェアである StaMPS を用いることで、カルデラ周辺の小さな変動を見つけることを試みた。

最終的に、InSAR 時系列解析によって求められた結果と、InSAR 画像・GPS データとの比較を行い、その精度や有用性を確かめる。また、現在の伊豆大島火山の変動をこれらのデータからまとめる。

## 2. 地殻変動の時空間変化の検出

### 2.1 観測地域

伊豆大島は、伊豆半島から南東に約 25km に位置する伊豆諸島最北端の島である。その主体を成しているのが伊豆大島火山と呼ばれる玄武岩質マグマで出来た成層火山であり、陸上部である山頂火口のあるカルデラ内の中央火口丘を三原山と呼んでいる。最高峰は、1950～51年の噴火で形成された三原新山で、標高は 764m である。



Fig.2-1 : 伊豆大島(Google Map より)

現在の伊豆大島火山の形となったのは、今からおよそ 4 万年前頃である。それ以前は、岡田火山、行者窟火山、筆島火山と呼ばれる古い火山体が重なり合ったものから成っており、現在でもその一部が露出して残っている。K-Ar 法により、岡田火山は 4 2 万年前よりも新しい火山であることは分かっているが、それ以上のことははっきりしていない。

火山噴出物は粘性の低い玄武岩～玄武岩質安山岩であるため、なだらかな山体が形成されている。現在でも活発に活動する活火山であり、中央火口だけでなく、側火山の形成や割れ目噴火があちこちで起こっている。

近年は、1912～1914 年、1950～1951 年、1986 年に中規模以上の噴火がある。特に 1986 年の噴火では、割れ目噴火の発生により住宅街への被害が懸念されたため、1 か月間の全島避難を余儀なくされている。また、この期間以外にもしばしば小規模な噴火を起

こしている。

## 2.2 使用したデータ

### 2.2.1 ALOS/PALSAR データ

本研究では、伊豆大島を含む2つのシーンを用いて解析を行った。

ALOS/PALSAR データには、北行軌道(Ascending)と南方軌道(Descending)の2種類がある(Fig.2-2)。今回は、Ascending の Path407, Frame680 と、Descending の Path58, Frame2920 を解析に用いた(Table2-1)。以降、Path, Frame は 407-680, 58-2920 と表記する。なお、解析には Gamma 社が開発した Gamma Software を使用した。

407-680 (Ascending)		58-2920(Descending)	
Data (YYYYMMDD)	Mode	Data(YYYYMMDD)	Mode
20060911	FBS	20060612	FBS
20070614	FBD	20060728	FBD
20070914	FBD	20070128	FBS
20071030	FBS	20070915	FBD
20071215	FBS	20080131	FBS
20080130	FBS	20080502	FBS
20080316	FBS	20080917	FBS
20080501	FBD	20081102	FBD
20080916	FBD	20081218	FBS
20081217	FBS	20090202	FBS
20090201	FBS	20090320	FBD
20090619	FBD	20090505	FBS
20090804	FBD	20090805	FBS
20091220	FBS	20090920	FBS
20100204	FBS	20091105	FBS
20100322	FBS	20091221	FBS
20100507	FBD	20100323	FBS
20100807	FBS	20100508	FBS
20101223	FBS	20100808	FBS
20110207	FBS	20101108	FBS
		20101224	FBS
		20110208	FBS

Table2-1：解析に使用したデータ

基準点は、島南部に位置する GEONET の GPS 点 OOSHIMA2 とした（位置は 2.4 項 Fig.2-7 にて示す）。

## 2.2.2 数値標高モデル

数値標高モデル(Digital Elevation Model ; DEM)とは、地形のデジタル表現である。SAR 画像から地形の影響を取り除くためだけでなく、立体地図の作成や重力計測の補正など、さまざまな用途で使用されている。その作成方法も種々あり、人工衛星 Terra に搭載された地球観測衛星センサ ASTER によって作られ、ほぼ全球をカバーしている ASTER GDEM、スペースシャトルレーダーを用いて作られた SRTM3、世界中の DEM データを集めてまとめた GTOPO30 などがある。それぞれカバー域やピクセル間隔、欠損域、高さ精度などに違いがあり、使用用途に合わせた選択が可能である。

本研究では、国土地理院が発行している 5 万分の 1 および 1 万分の 1 の火山基本図に書かれている等高線を数値化したものに基づいて作られた、国土地理院の数値地図 10m メッシュ（火山標高）を使用した。

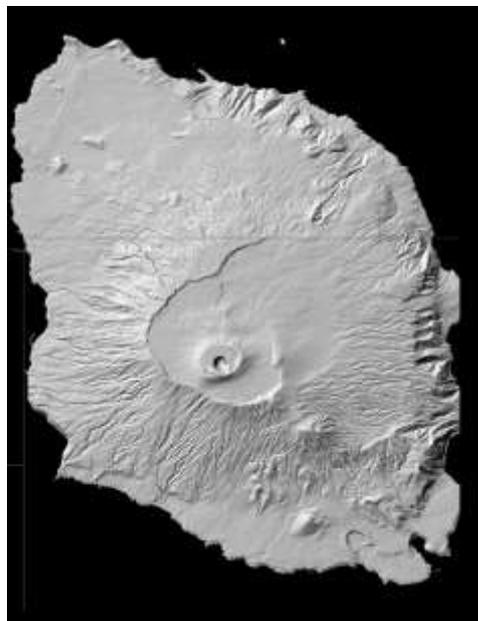


Fig.2-2：伊豆大島の DEM  
国土地理院数値地図 10m メッシュによる。

## 2.3 InSAR による解析結果

InSAR 画像は、観測日・時刻による衛星の位置のずれを示す垂直基線長  $B_{\text{perp}}$  が長いものほど、また 2 枚の画像の観測間隔が長いものほど干渉性が低くなりやすい。他の条件も関係してくるが、目安として  $B_{\text{perp}}$  が 2000m 以下であると干渉が上手く行く。

以下に観測時期と  $B_{\text{perp}}$  の差を示す(Fig.2-3, 2-4)。

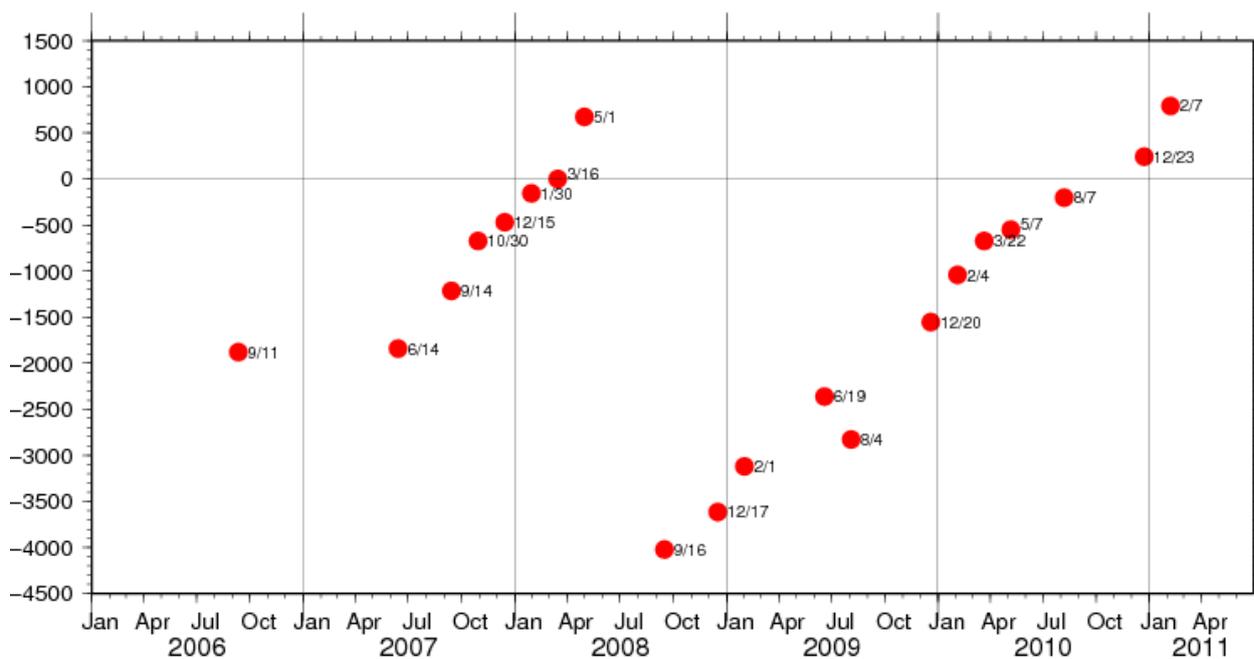


Fig.2-3 : 407-680(Ascending)における  $B_{\text{perp}}$  の差

Master は 20080316 である。

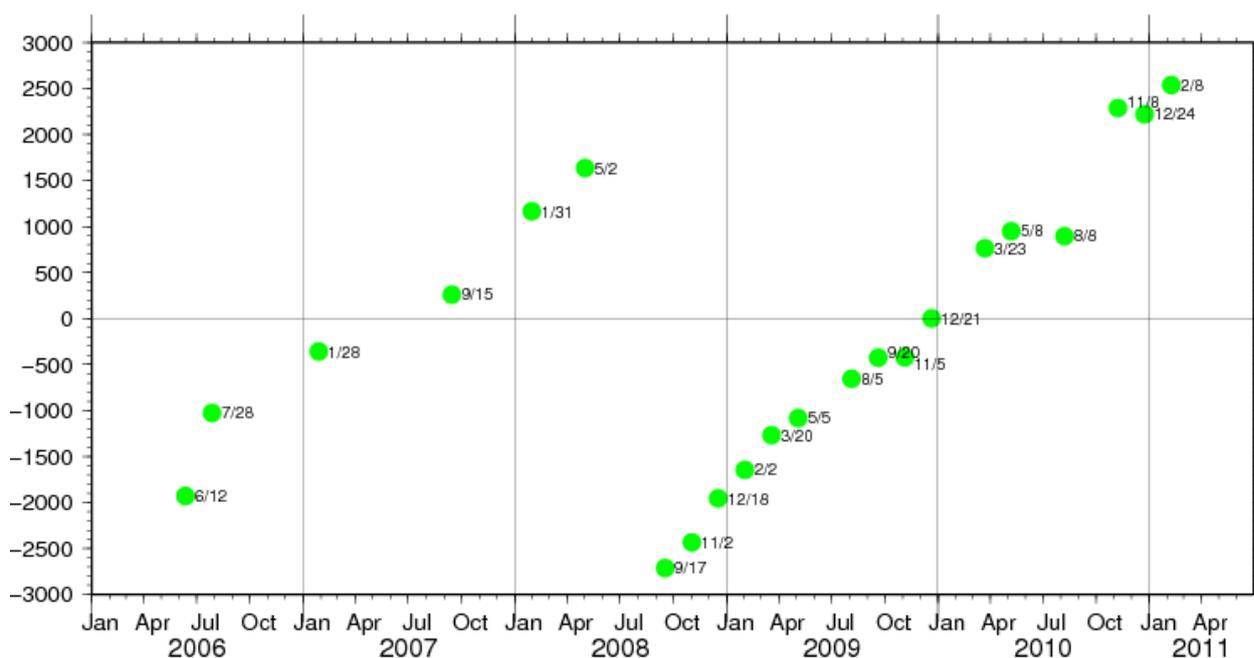


Fig.2-4 : 58-2920(Descending)における  $B_{\text{perp}}$  の差

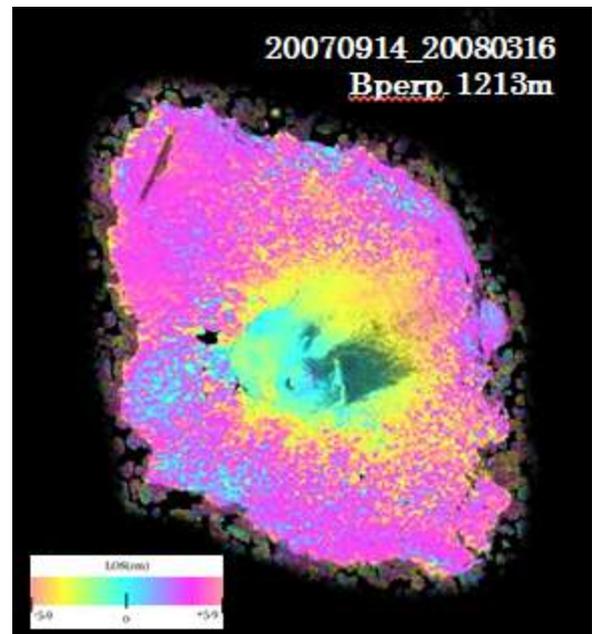
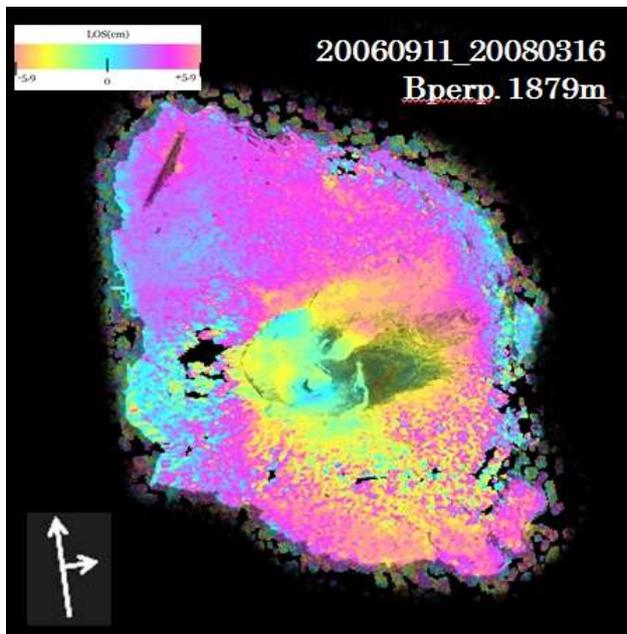
Master は 20091221 である。

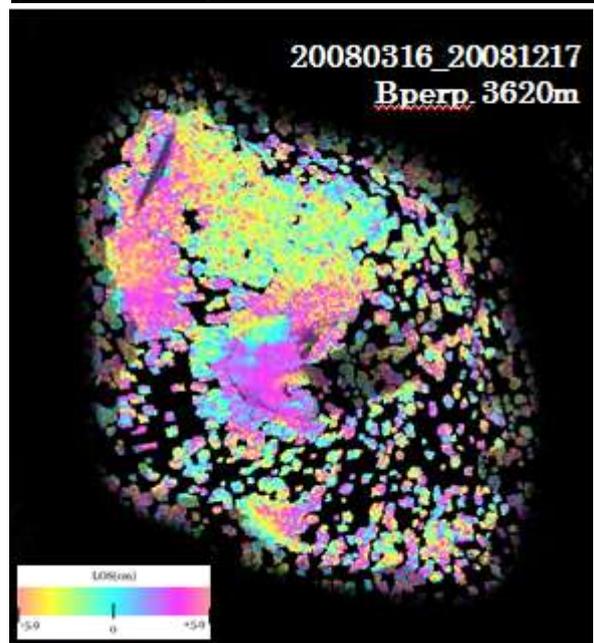
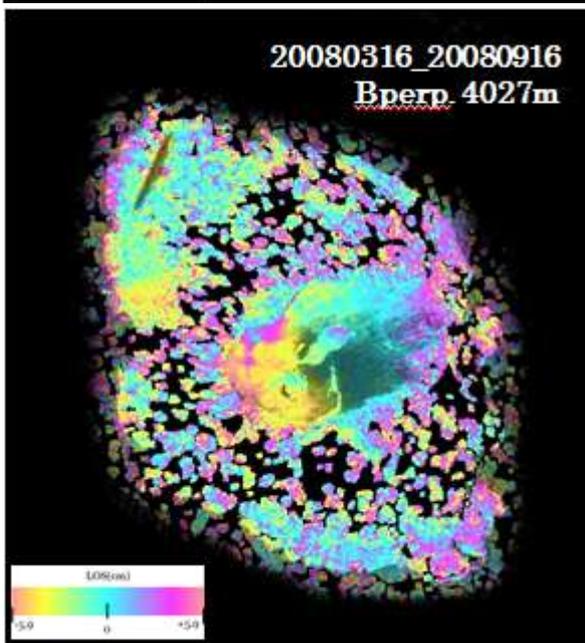
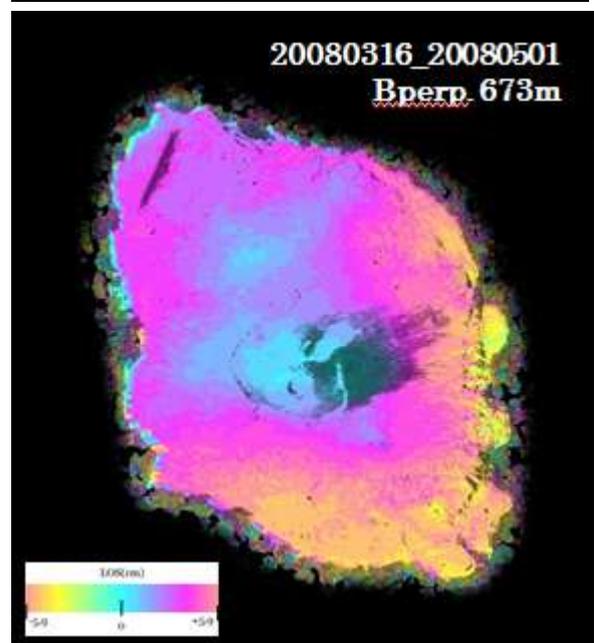
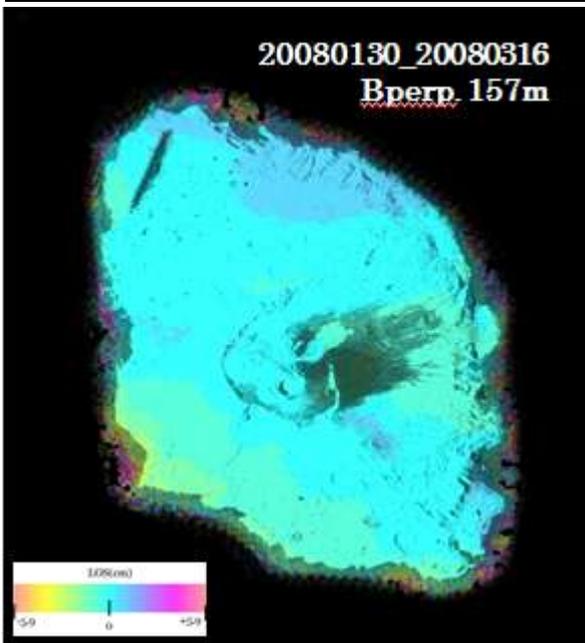
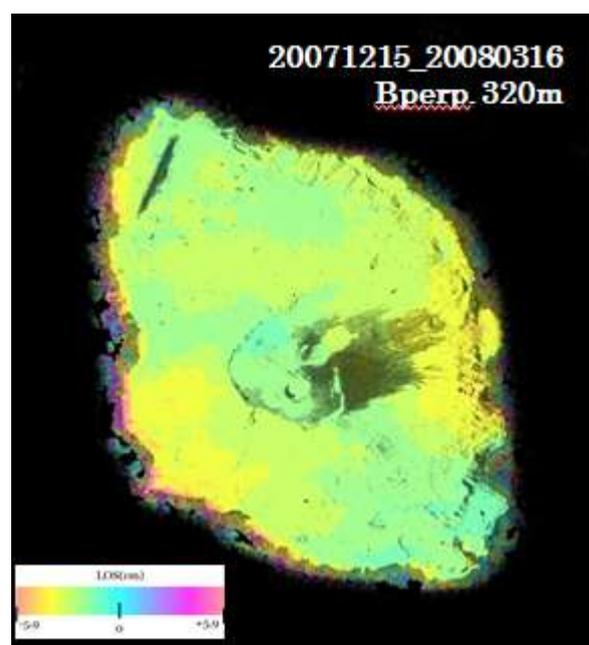
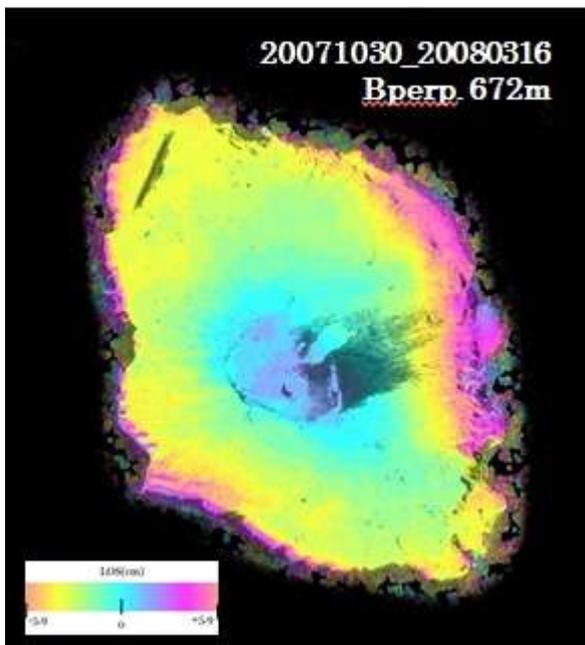
なお、2008 年の途中で Bperp. が急激に変化するののは、Bperp. が年々伸びていってしまっただけのために修正が行われたからである。

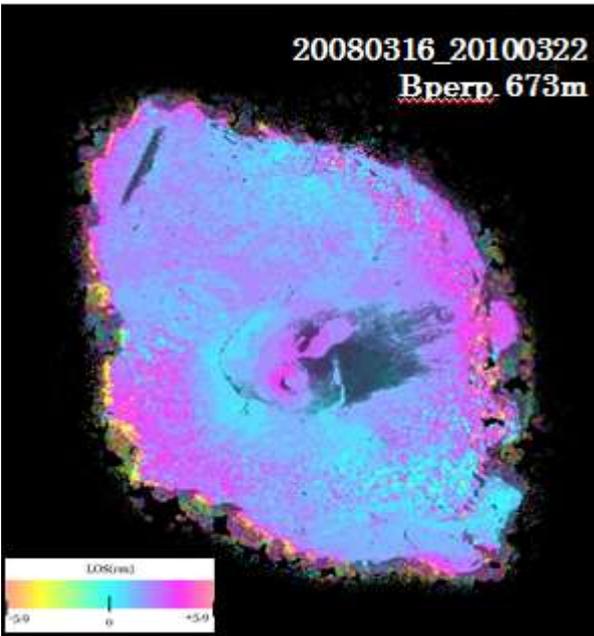
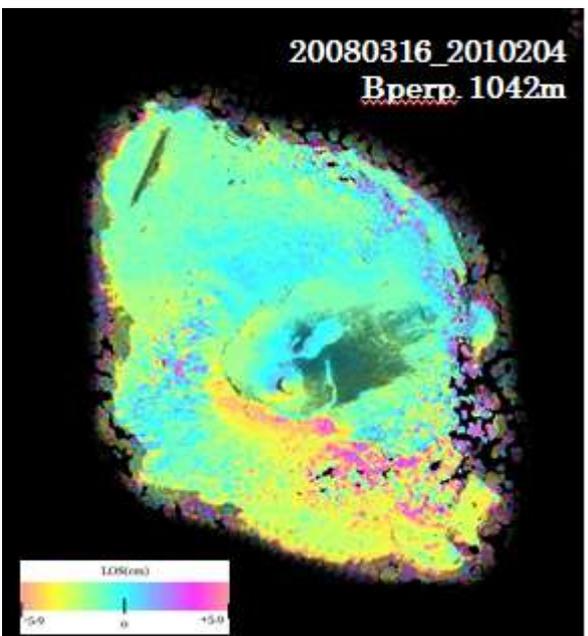
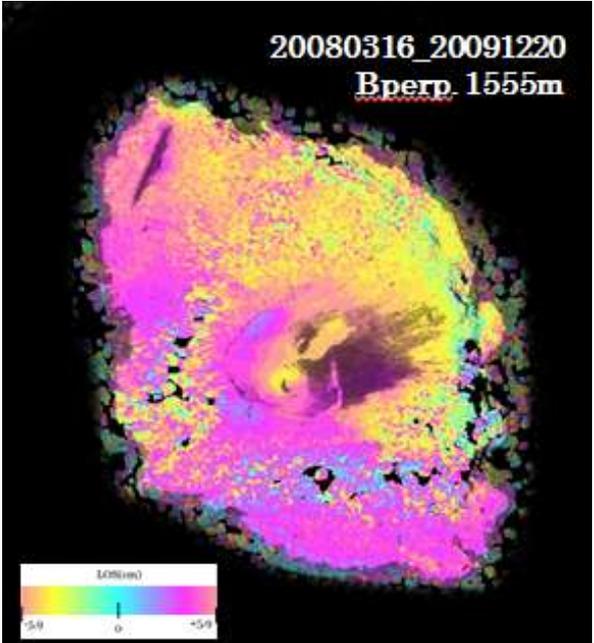
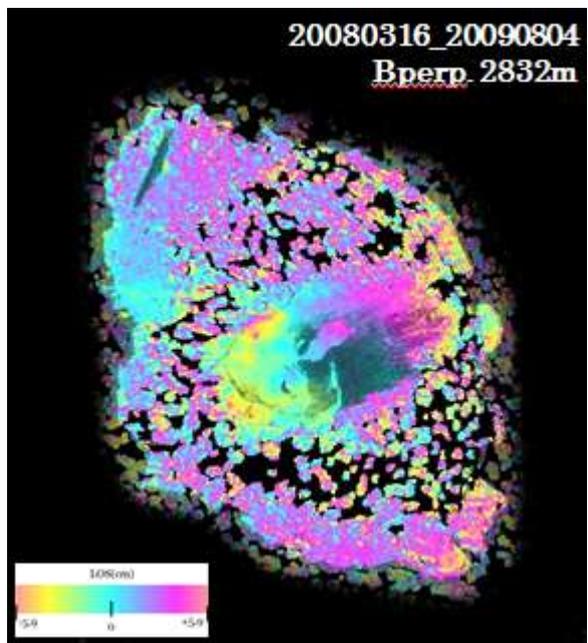
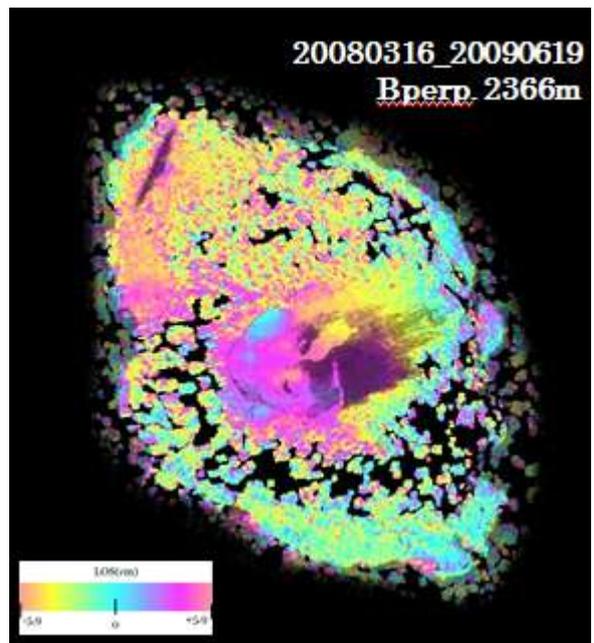
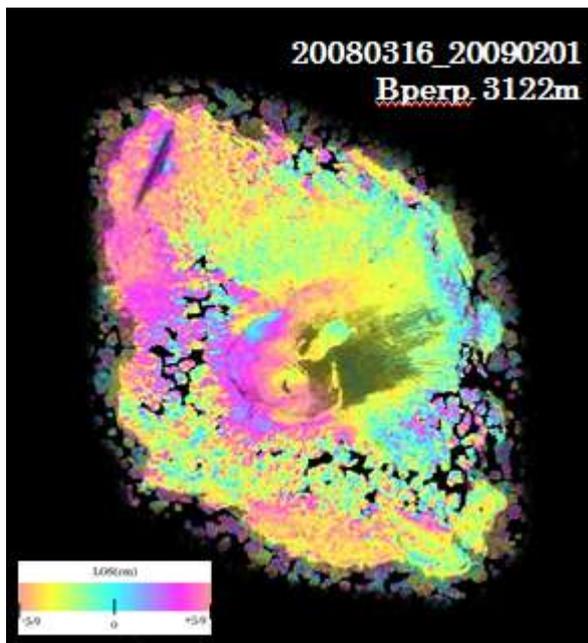
画像中の右上の数字は Master と Slave の日付を YYYYMMDD 形式で表記したものである。また、左下のスケールバーは SAR の視線方向に対する距離の変動量を示している。虹色で表される位相変化は、1 周期あたり 11.8cm の変動を表している。

### 2.3.1 407-680 (Ascending)

各データ間の Bperp. の差が出来るだけ小さくなるようにするため、2008 年 3 月 16 日のデータを Master として解析を行った。







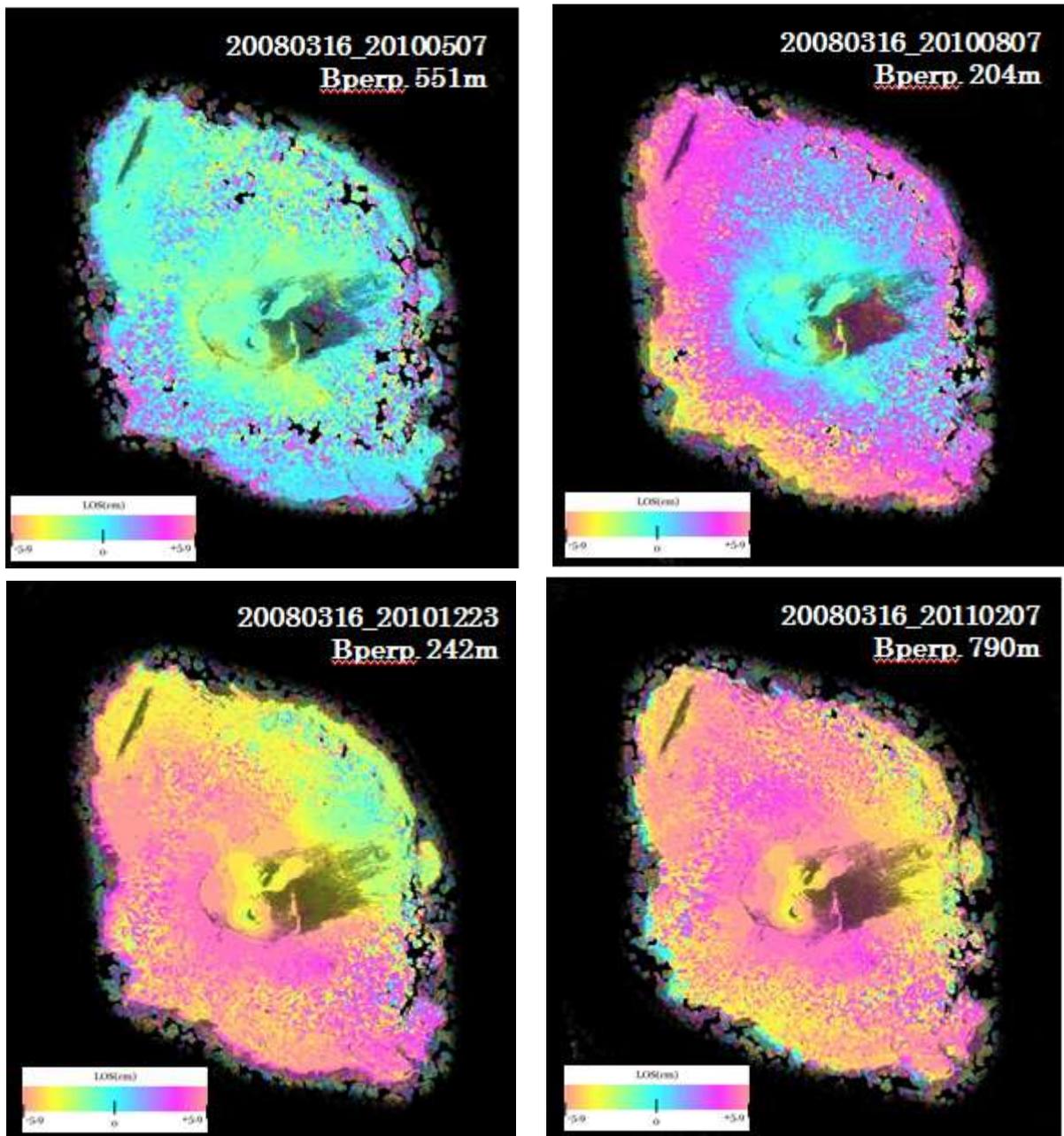


Fig.2-5 : 407-680(Ascending)の InSAR 画像 (18pair)

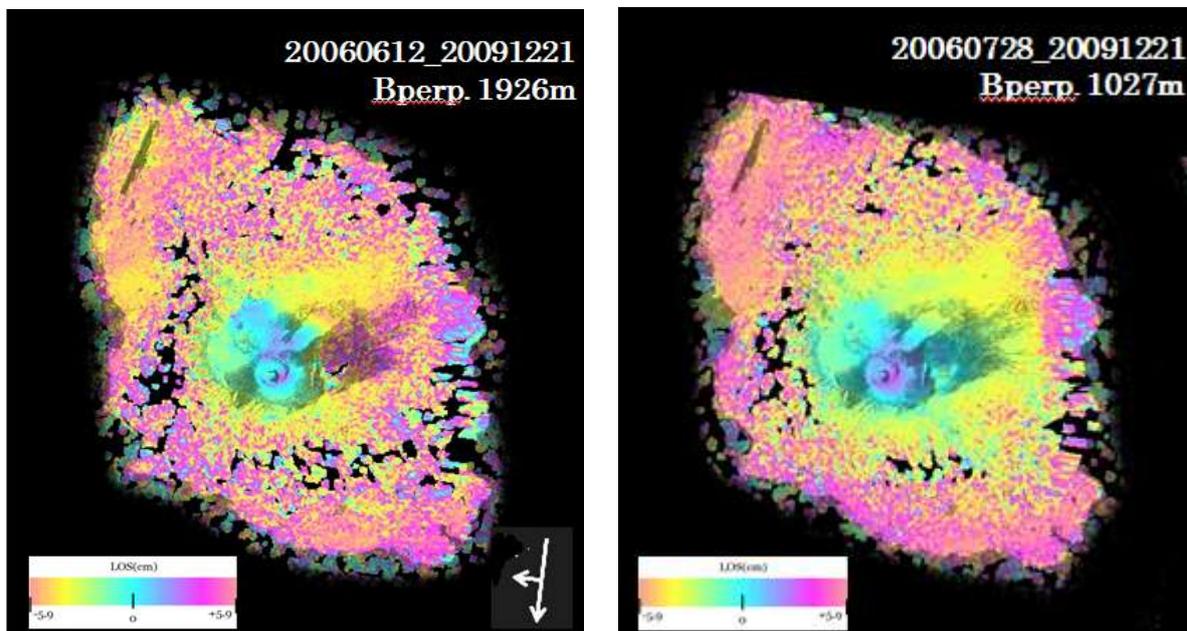
衛星軌道・視線方向は 20060911\_20080316 に示した。

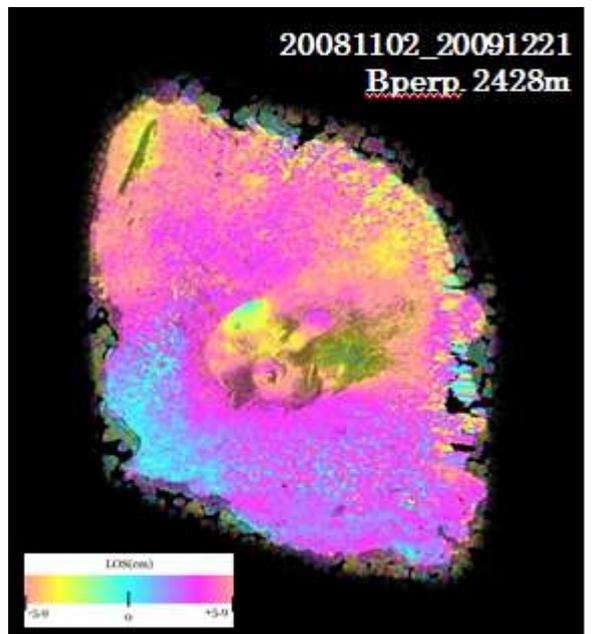
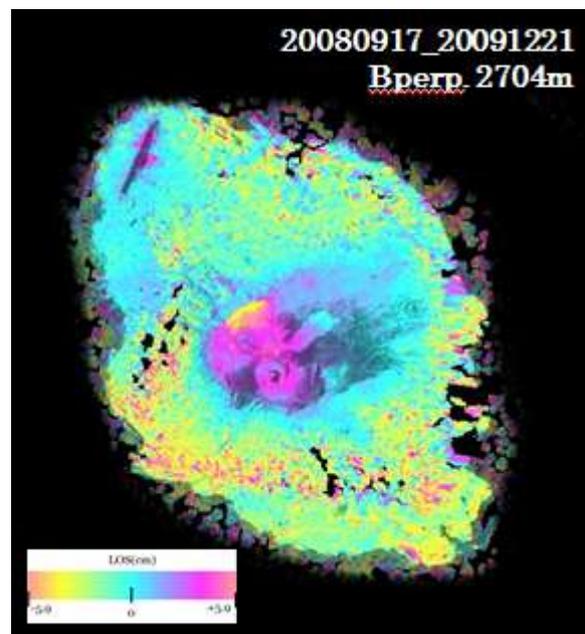
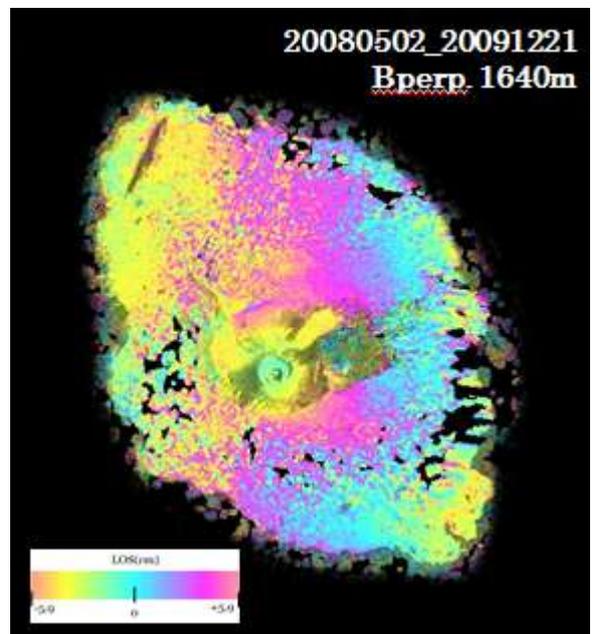
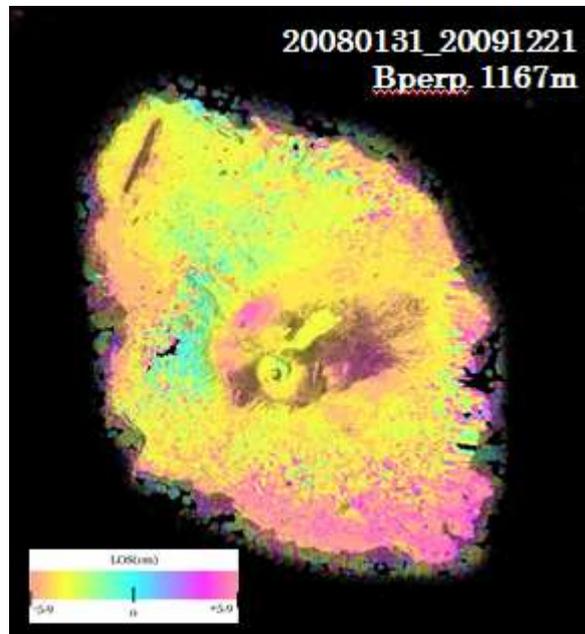
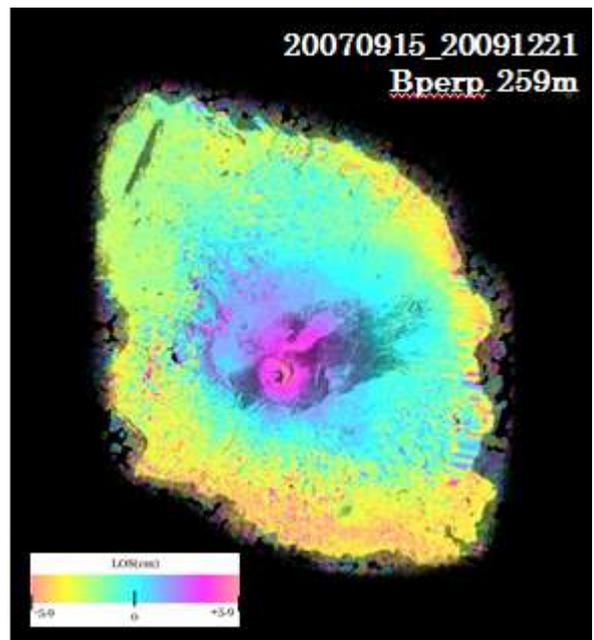
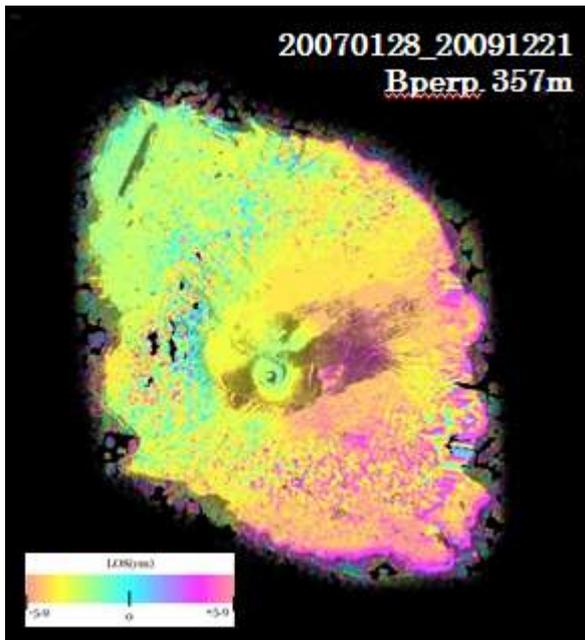
三原山東部の裏砂漠 (InSAR 画像において中央火口付近で黒く見えている四角形の部分) は比較的干渉性が低いためか、時々unwrapping に失敗し位相が飛んでしまうことがある (20080316\_20100807 など)。Bperp.が 2000m を超えているものは、中心付近では少し干渉できているものの、島の縁に向かうにつれて干渉度が低くなることが分かる。

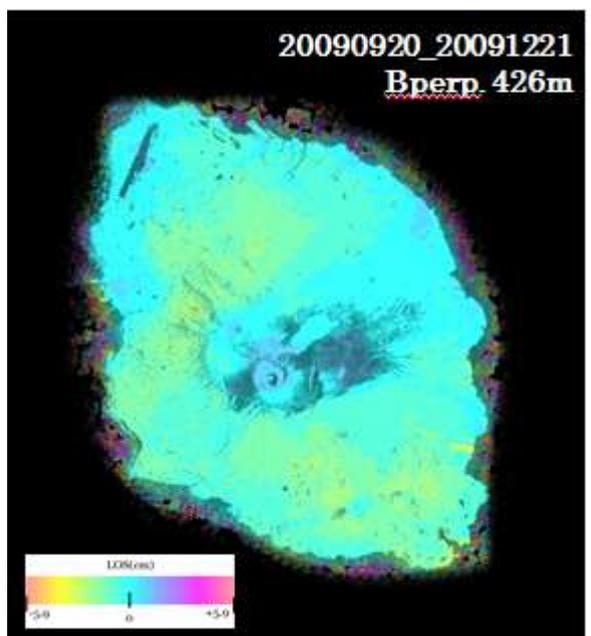
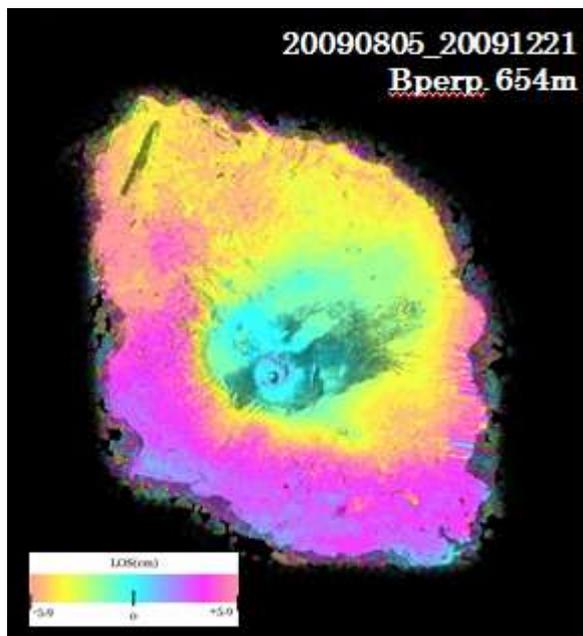
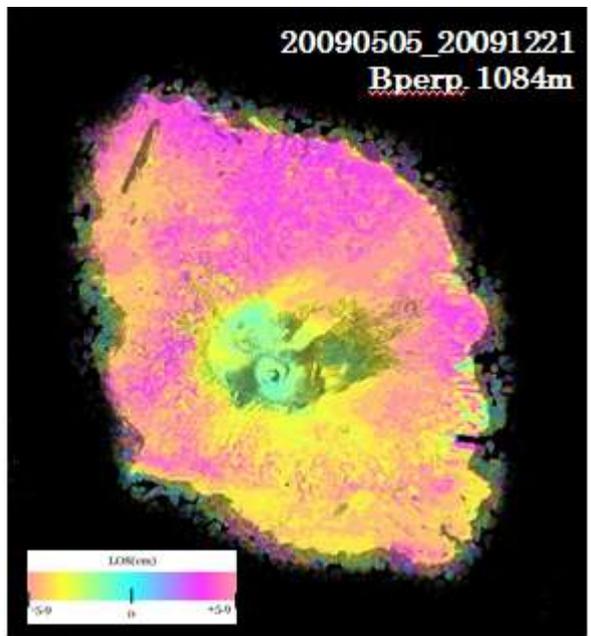
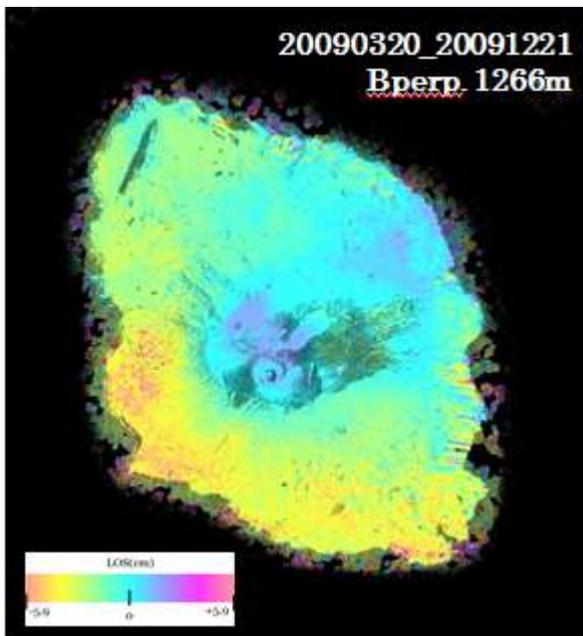
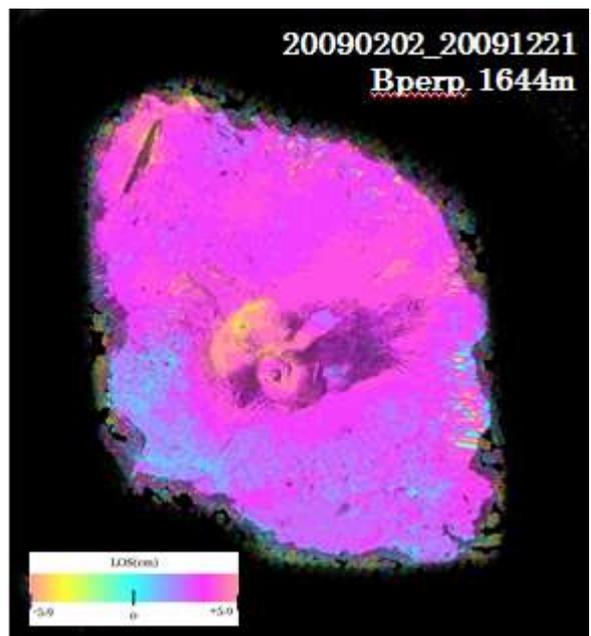
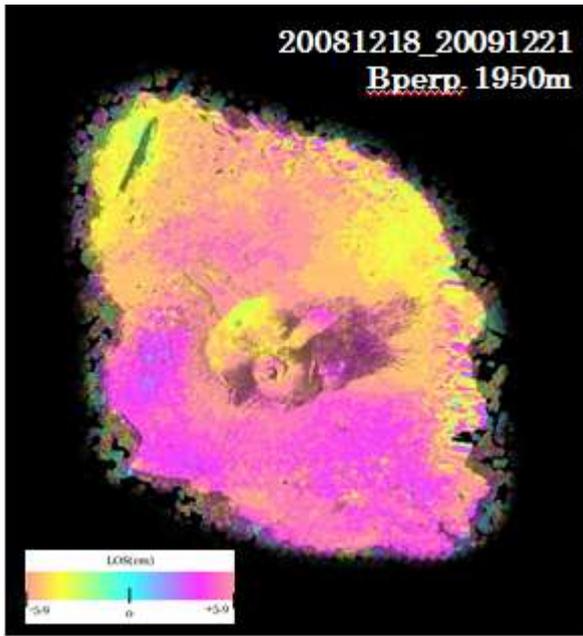
これらの画像から、2006 年、2007 年のデータを Slave とした InSAR 画像は島の端から中心に向かって視線距離が長くなる傾向にあるが、2008 年 5 月以降のデータを Slave としたものは中心に向かって視線距離が短くなる傾向にあることが分かった。また、中心から島の縁に向かって同心円状に変動量に変化していくこと、2009 年の終わりごろから、同心円状だけでなく、南北方向にも同じ変動の傾向が見られることが分かる。

### 2.3.2 58-2920(Descending)

Ascending と同様に InSAR 画像作成を行った。Master は 2009 年 12 月 21 日のものを使用している。







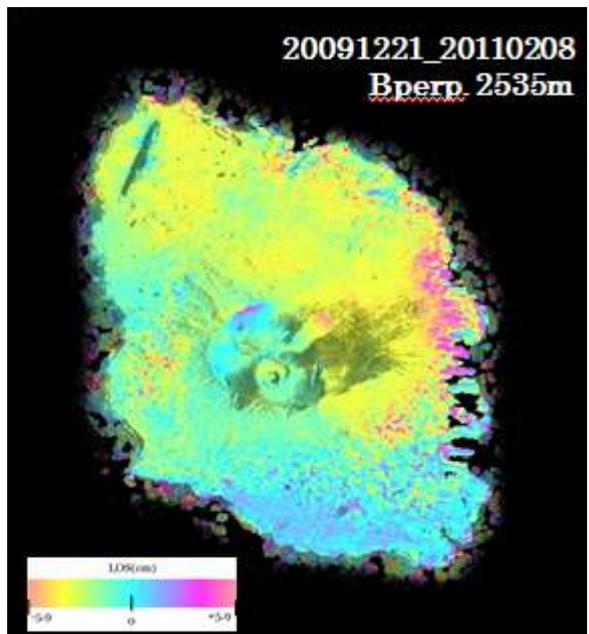
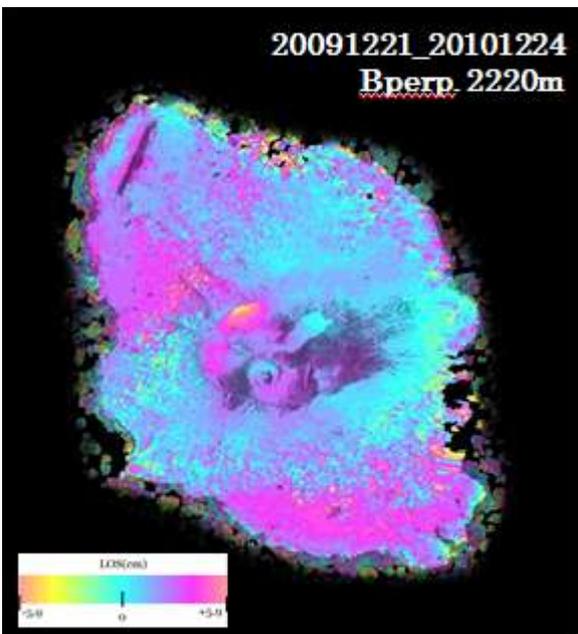
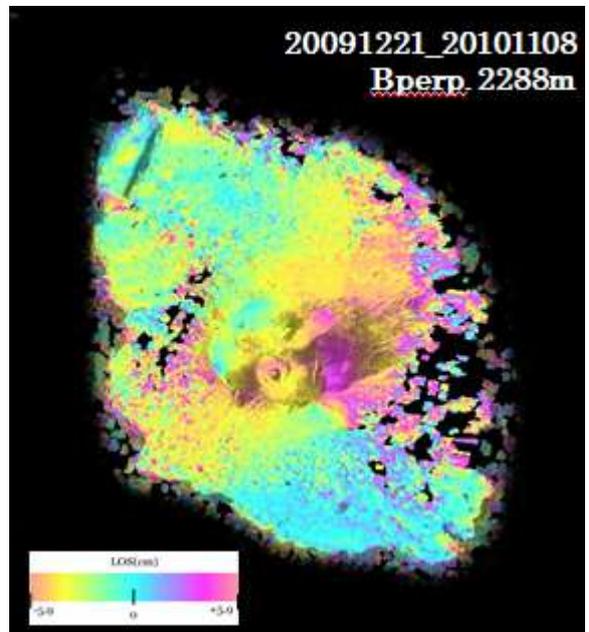
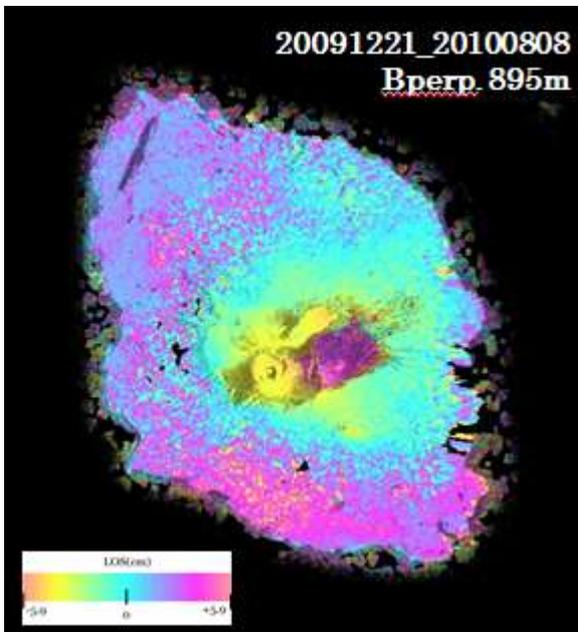
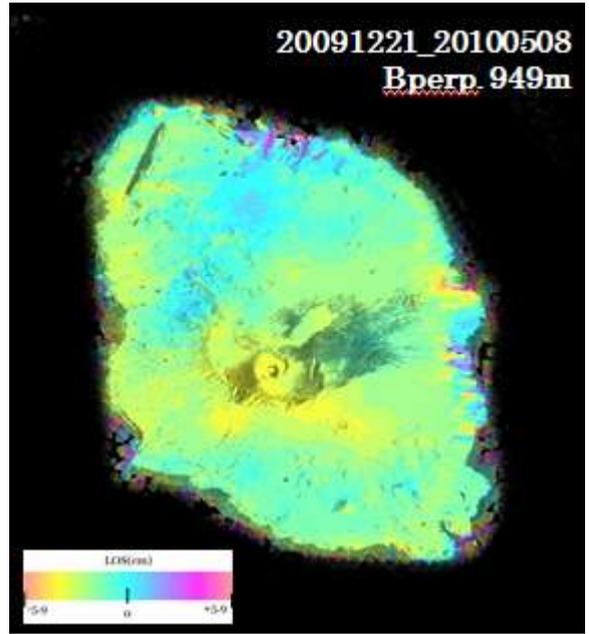
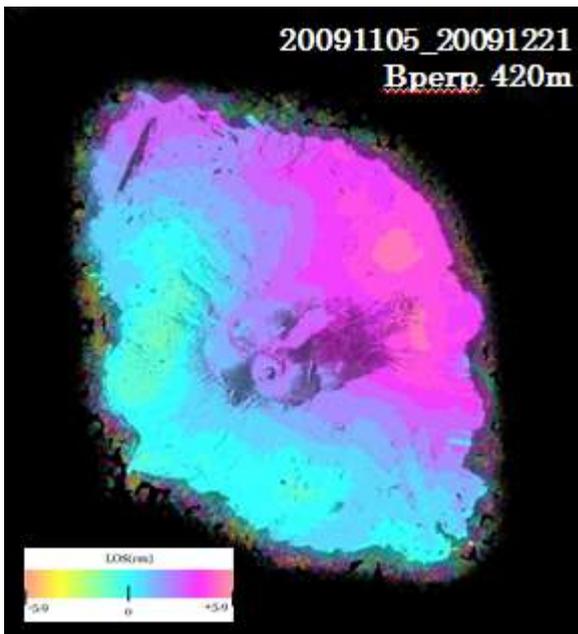


Fig.2-6 : 58-2920(Descending)の InSAR 画像(20pair)  
衛星軌道・視線方向は 20060612\_20091221 に示した。

20080502\_20091221 は、軌道縞を消し切ることが出来なかったために東西方向に位相変化が顕著に表れた。20091221\_20100808 では、Ascending のものと同じように大砂漠の付近で位相の **unwrapping** に失敗した。Slave の観測時期が 1 日違いであるため、ちょうどこの時期に大砂漠で干渉度を低下させるようなことが起こっていたと考えられる。

Ascending と同様、2006～2007 年は島の中心に向かって視線距離が伸びる傾向が見られる。2008 年の終わりから 2009 年にかけては、視線距離の変化がほとんど見られないが、20090505\_20091221, 20090805\_20091221 には島の中心に向かって視線距離が伸びる変化が見られる。また、2010 年頃から島の中心に向かって視線距離が短くなる傾向がある。

## 2.4 GPS 解析

伊豆大島には、国土地理院や気象庁、防災科学技術研究所、東京大学地震研究所などが GPS 点を設置している。うち本研究で使用したデータは、GPS 連続観測システム (GPS Earth Observation Network System ; GEONET) から得たものである。これは国土地理院によって構築された地殻変動を観測する精度の高い測量網システムである。現在、日本全国に GEONET の電子基準点はおよそ 1,200 地点存在しており、それらは 24 時間連続で観測を行い、観測センターへリアルタイムでデータ送信をしている。地殻変動による位置変動の解析可能精度は 1cm 以下であり、かなり高い精度で測量できることが分かる。

伊豆大島に置かれている GEONET の電子基準点は、OOSHIMA1(93051), OOSHIMA2(93055), OOSHIMA3(960594), OOSHIMA4(960595) の 4 点である (Fig.2-7)。

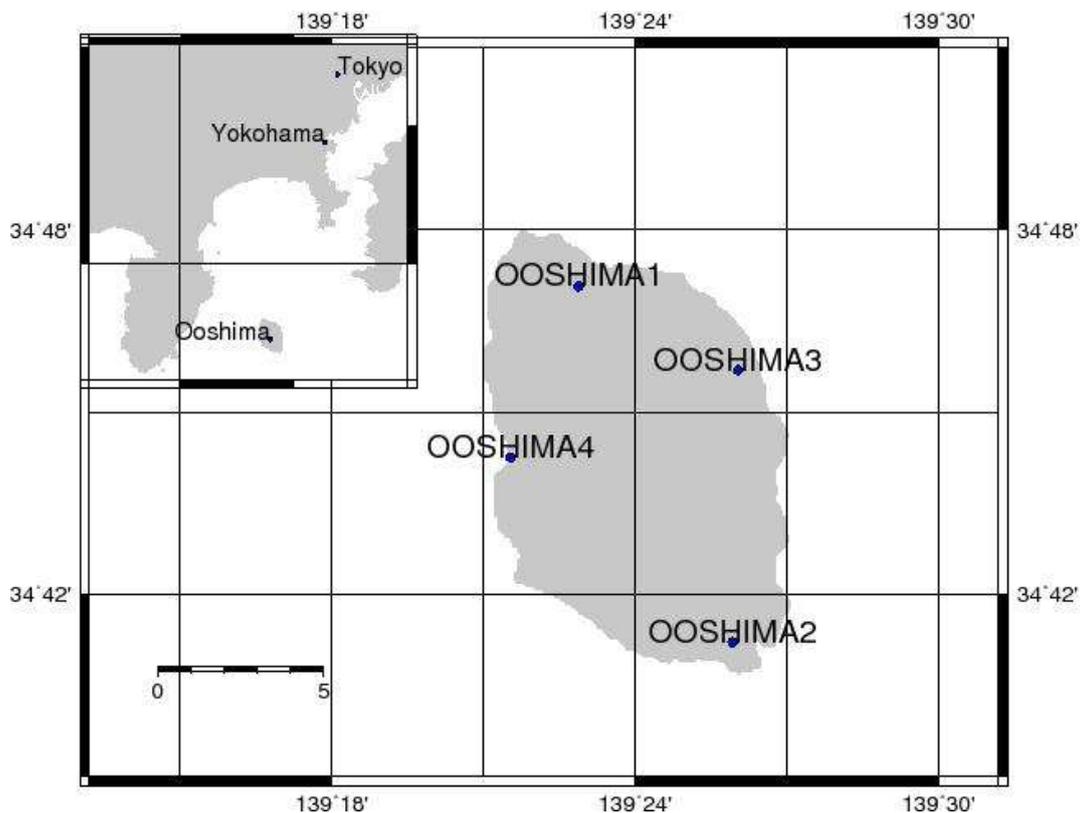


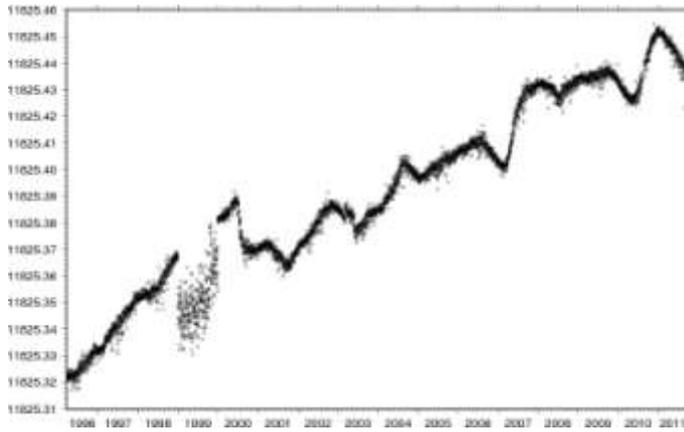
Fig.2-7 : 伊豆大島の GEONET 電子基準点

OOSHIMA1, OOSHIMA2 は 1996 年 3 月から、OOSHIMA3, OOSHIMA4 は 1997 年 3 月からそれぞれ観測が開始されており、今回はそれぞれの電子基準点における F3 解を使用した。

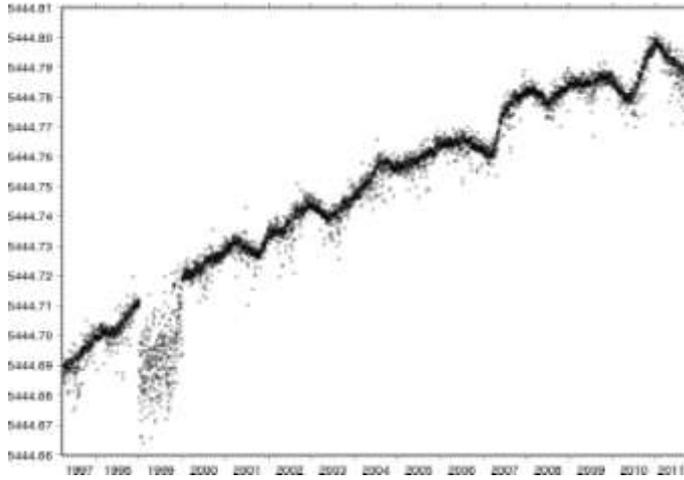
各点の  $x$ 、 $y$ 、 $z$  座標から、以下の式を用いて 2 点間における基線長  $L$  を計算した。GPS 点  $A(x_1, y_1, z_1)$ 、 $B(x_2, y_2, z_2)$  を置いたとき、 $AB$  間の基線長  $L_{12}$  は以下の式で求められる。

$$L_{12} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (2.1)$$

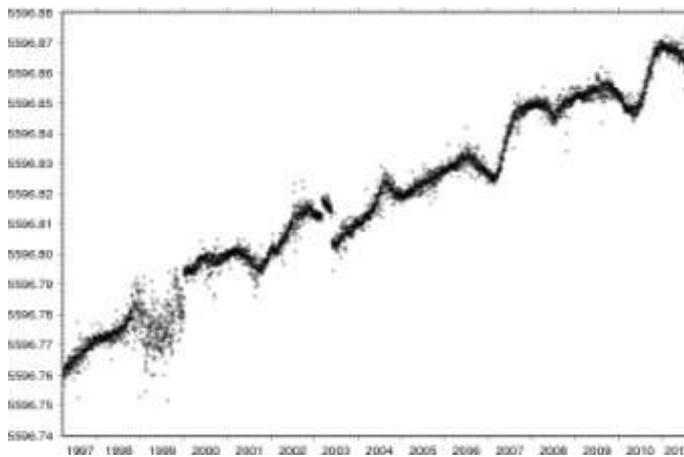
計算の結果は以下の通りであった (Fig.2-8)。縦軸は基線長(m)、横軸は時間(year)を表している。OOSHIMA1 における 1999 年のデータが全体的にばらついてしまっていた。



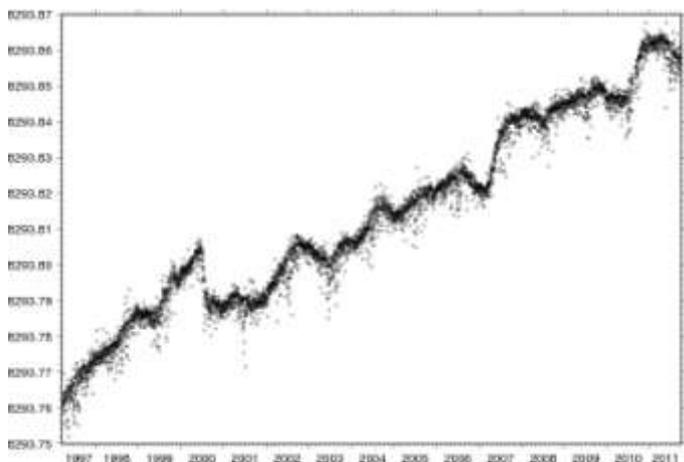
OOSHIMA1-OOSHIMA2 (N-S)  
1996.3.21~2011.10.1



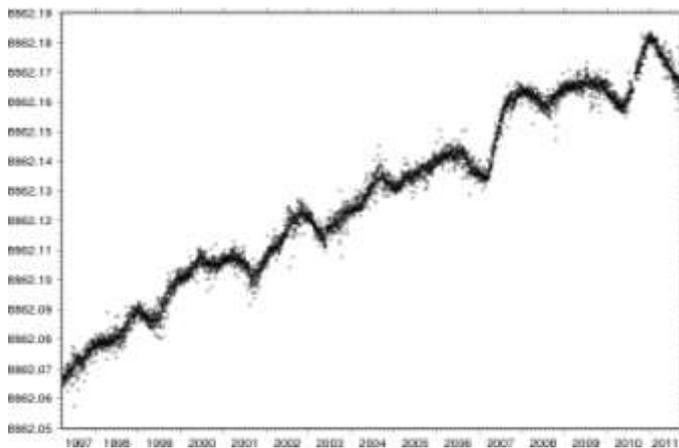
OOSHIMA1-OOSHIMA3 (N-E)  
1997.3.19~2011.10.1



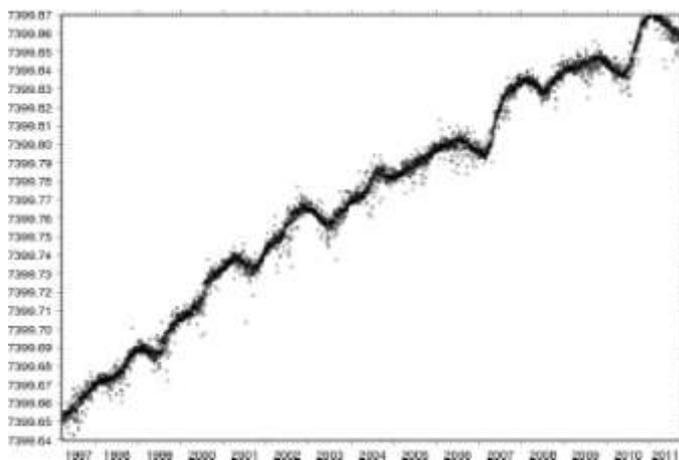
OOSHIMA1-OOSHIMA4 (N-W)  
1997.3.19~2011.10.1



OOSHIMA2-OOSHIMA3 (S-E)  
1997.3.19~2011.10.1



OOSHIMA2-OOSHIMA4 (S-W)  
1997.3.19~2011.10.1



OOSHIMA3-OOSHIMA4 (E-W)  
1997.3.19~2011.10.1

Fig.2-8 : 伊豆大島内の4つのGPS点における基線長の経年変化

Fig.2-8によると、OOSHIMA1-2, OOSHIMA1-3, OOSHIMA1-4, OOSHIMA2-3, OOSHIMA2-4 はそれぞれ約13~14年間で13cm前後基線長が伸びていることが分かる。OOSHIMA3-4のみ22cm程度の伸びを示すことから、南北方向よりも東西方向の膨張の方が大きいことが読み取れる。平均すると南北方向には約1cm/year, 東西方向には約1.7cm/year膨張していることとなる。

また、3~4年に1回急激に基線長の伸びが大きくなる時期があり、その前には少し収縮傾向を見せている。2001年から現在までの日別地震回数(Fig.2-9)、地震活動と地殻変動の関係(Fig.2-10)と比較すると、2003~2004年、2006~2007年、2010年の基線長の伸びが大きくなる時期と、カルデラ周辺部での地震が増加する時期が似ていることが分かる。また、島周辺の地震よりもカルデラ周辺部での地震の方が先に増加し始める傾向があることも読み取れる。

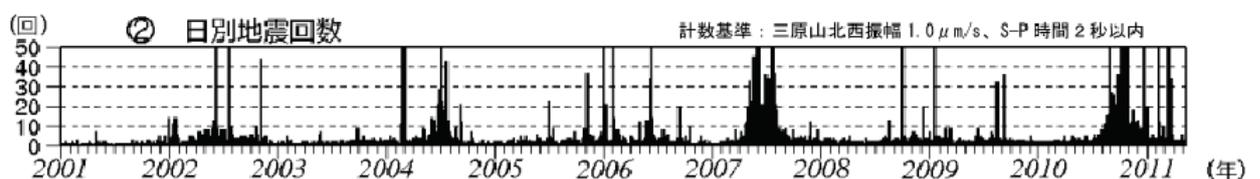


Fig.2-9：日別地震回数（第120回火山噴火予知連絡会資料より）  
 2011年3月の地震増加は、東北地方太平洋沖地震による影響である。

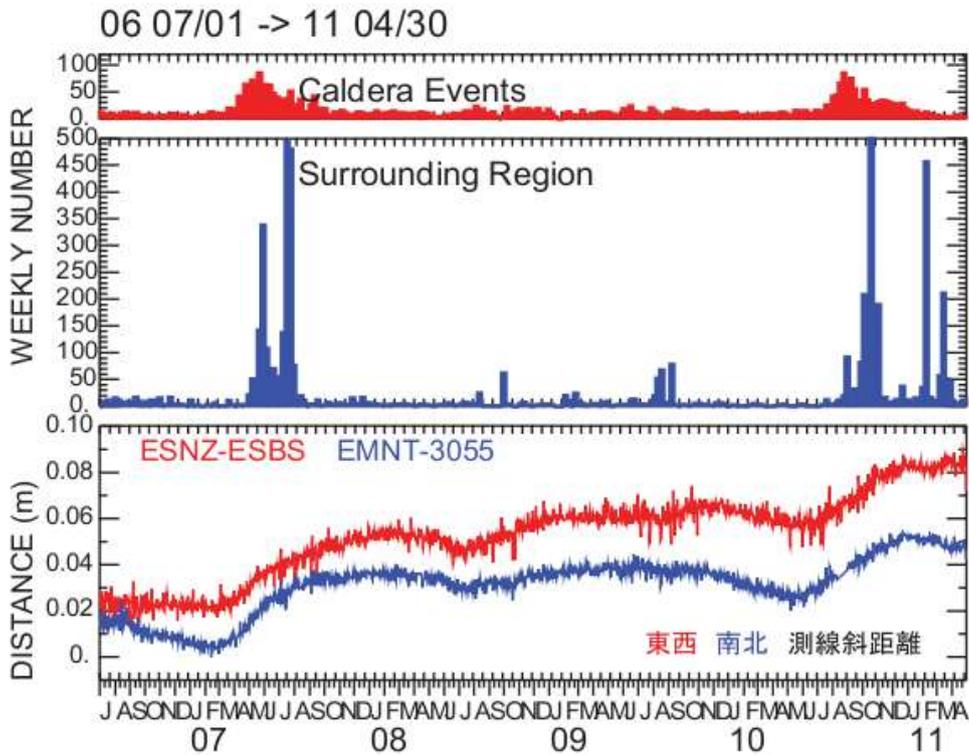


図3. 地震活動と地殻変動の関係(国土地理院のGEONETのデータを利用した)

伊豆大島

Fig.2-10：地震活動と地殻変動の関係（第120回火山噴火予知連絡会資料より）

## 2.5 InSAR 時系列解析；StaMPS

InSAR は、地震や火山現象に伴う多くの地殻変動の検出に役立ってきた。逆に言うと、顕著な変動を起こすようなイベントにのみ使われてきたとも言える。これは、対流圏での伝播遅延などによる誤差の補正方法が確立されておらず、変動の検出限界が数センチメートル程度であったことが大きな要因として挙げられる。

もともと InSAR 画像には、大気や電離層におけるマイクロ波の屈折による伝播遅延、衛星軌道決定の誤差、水蒸気の影響などを要因とする位相変化が含まれている。前述のように(Fig.1-5)、地形によるものや衛星軌道によるものはデータ処理の過程で除去すること

が出来るのだが、どんなデータペアでも必ず除去できるわけではなく、垂直基線長  $B_{\text{perp}}$  が長い場合には干渉度の低下が起こってしまう。

これらの問題を解決し、ミリメートルオーダーの微小な変動を読み取ることが出来るようになったのが、InSAR 時系列解析(InSAR time-series analysis)という手法である。InSAR 時系列解析は、さらに Ferreti *et al.* (2001) などを用いられた恒久散乱体 InSAR 法 (Persistent/Permanent Scatterer InSAR ; PS-InSAR 法) と、Berardino *et al.* (2002) など使われた短基線長 InSAR 法 (Small Baseline InSAR ; SBAS 法) の 2 種類に大きく分けられる。

### 2.5.1 PS-InSAR 法

恒久散乱体 (Persistent Scatterer ; 以下 PS) とは、レーダー波に対して安定な反射特性を示す物体のことで、ビルや岩などが主な例である。PS を含むピクセルのことを PS 点と言う。PS 点の位置が変わらなければ、同じ方向から観測を行っている限り、マイクロ波の進行方向が入射角に対して  $\pm 90^\circ$  以上変化する後方散乱特性はそのままのはずである。ただ実際は、植物の生長などによる散乱体の位置変化・出現・消滅が起こったり (時間干渉度低下)、衛星の位置がずれることによってマイクロ波の入射角が変化したり (空間干渉度低下) するため、後方散乱特性は変わってしまう。

しかし、SAR 画像の中に PS のような強い散乱体があった場合、他の散乱体の影響を受けないため空間干渉度の低下が起こらない。また、ビルや岩などには時間干渉度が変化しないため、これによる干渉度の低下もない。よって、SAR 画像から強力な散乱体を含む PS 点のみを抽出してその変動を追えば、それらに共通するノイズが分かり、対流圏や電離層での伝播遅延を除去することが出来るようになる。このように、位相の安定したピクセルのみを利用して InSAR 時系列解析を行う手法を、PS-InSAR 法と呼ぶ。

Hooper *et al.* (2004) によると、地理的に適当な干渉性を持った  $i$  番目のものにおける  $x$  番目のピクセルにおける位相残差 (residual phase)  $\varphi$  は、以下の 5 つの項で書き表すことが出来る。

$$\varphi_{x,i} = \varphi_{\text{def } x,i} + \varphi_{\alpha x,i} + \varphi_{\text{orb } x,i} + \varphi_{\varepsilon x,i} + n_{x,i} \quad (2.2)$$

ここで、 $\varphi_{\text{def}}$  は衛星の視線方向に投影した変動による位相変化、 $\varphi_{\alpha}$  は大気遅延による位相等価の違い、 $\varphi_{\text{orb}}$  は衛星軌道誤差、 $\varphi_{\varepsilon}$  は DEM による地理的なエラー、そして  $n$  はピクセルからの散乱によるノイズの項である。シグナルを十分に確認できるように、 $n$  が出来るだけ小さなピクセルを PS 点としている。

## 2.5.2 StaMPS (Stanford Method of Persistent Scatterer)

本研究では、スタンフォード大学において Andrew Hooper らが開発した PS 解析ソフトウェアパッケージである StaMPS(Stanford Method for Persistent Scatterers)を使用し、InSAR 時系列解析を行った。

StaMPS の特徴として、地表変動シグナルの空間相関性に基づいて PS 点の選択を行うという点が挙げられる。これは StaMPS が従来の PS-InSAR 法よりもより広範囲のテクニクな変動検出を目的としていることに依る。

StaMPS の処理手順は右のフローチャートのとおりである(Fig.2-11)。通常 InSAR 画像を作るときは、Master 画像に対し 1 枚ずつ Slave 画像の位置合わせをするが、StaMPS では Master 以外の画像をすべてリサンプリングすることで時系列画像群を作成する。生データからの SLC 画像の作成は米国ジェット推進研究所 (Jet Propulsion Laboratory)で開発された ROI\_PAC (Rosen *et al.*, 2004)を使用する。ここで一緒に強度画像を得ることが出来る。次に干渉解析は、デルフト工科大学によって開発された Doris(Kampes *et al.*, 2003)を用いる。DEM と位置合わせをすることで Azimuth 方向の位置のずれを推定し、画像ごとに位置合わせを行っていく。地形の起伏が大きい場合は、地形縞のシミュレート画像の作成を必要とする。それから Slave 画像のリサンプリングを行い、干渉処理が完了する。geocoding を行った後、PS 点の選定をし、PS 処理が実行される。

これらの一連の流れを含んだものが StaMPS パッケージであり、ROI\_PAC, Doris, Matlab の環境が整っていれば半自動的に干渉画像を作成することが出来る。

現段階で、ALOS のみならず SAR を搭載したあらゆる衛星(ERS-1/2, ENVISAT, RADAR-SAT-1, TerraSAR-X など)に対応しており、今後の活躍に期待される。

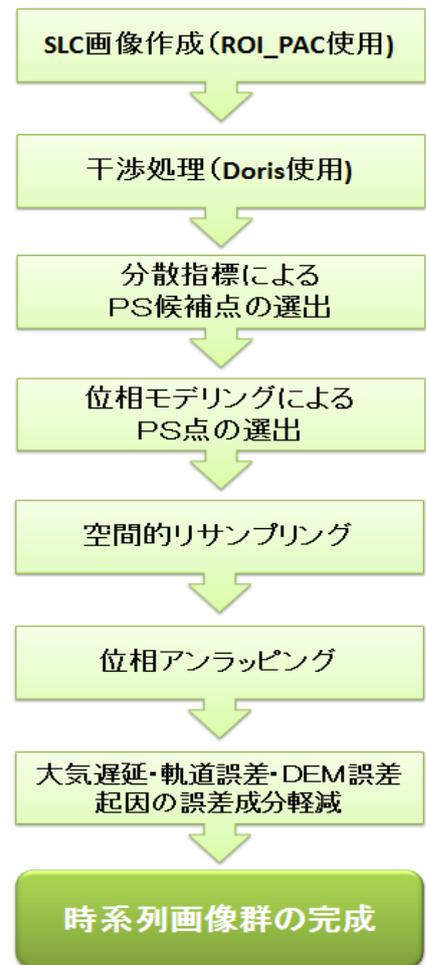


Fig.2-11 : StaMPS のフローチャート

## 2.5.3 解析結果

まず、407-680(Ascending)の結果を以下に示した(Fig.2-12)。これは干渉処理、PS 処

理をしたのち、各ピクセルから抽出された DEM エラーと、全ての InSAR 画像の大気と軌道による推定誤差 (Atmosphere and Orbit Error ; AOE) を取り除いたものである。PS 点は 33,471 個であった。

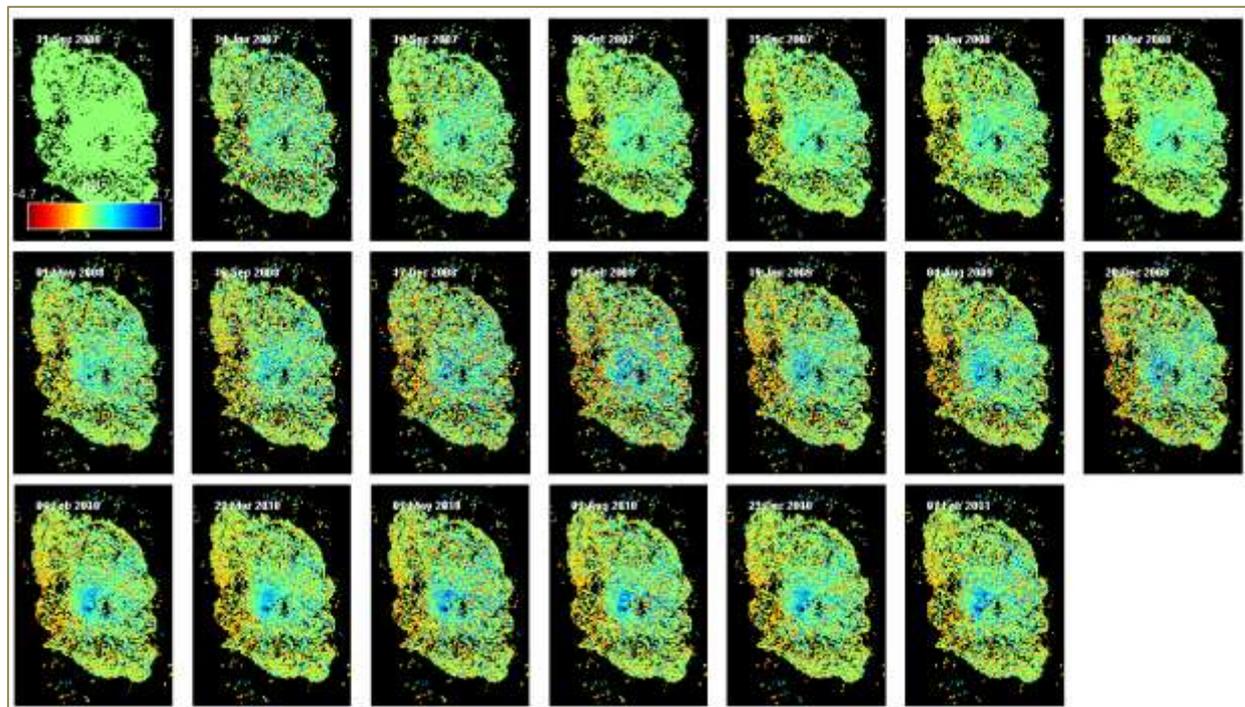


Fig.2-12 : 407-680 の StaMPS 解析結果

スケールは-4.7~+4.7rad である。

2007 年から、少しずつ島の中央火口周辺で位相が正の値を取るようになり、2008 年に入ると遠目にも位相が変化しているのが見えるようになっている。また、2008 年の終わりごろから島の東部、西部において負の値を占めているのが見て取れる。これは 2009 年の終わりごろまではっきりと見えており、2010 年になるとやや落ち着いている。全体的に、島の中心部ではやや正の値、縁では負の値を示しており、それぞれで異なる変動をしていることが分かる。

次に、58-2920(Descending)の結果を示す(Fig.2-13)。こちらも上図と同様の処理をした。島の東部に PS 点が少なく、一部欠けてしまった。PS 点は 33,137 個であった。

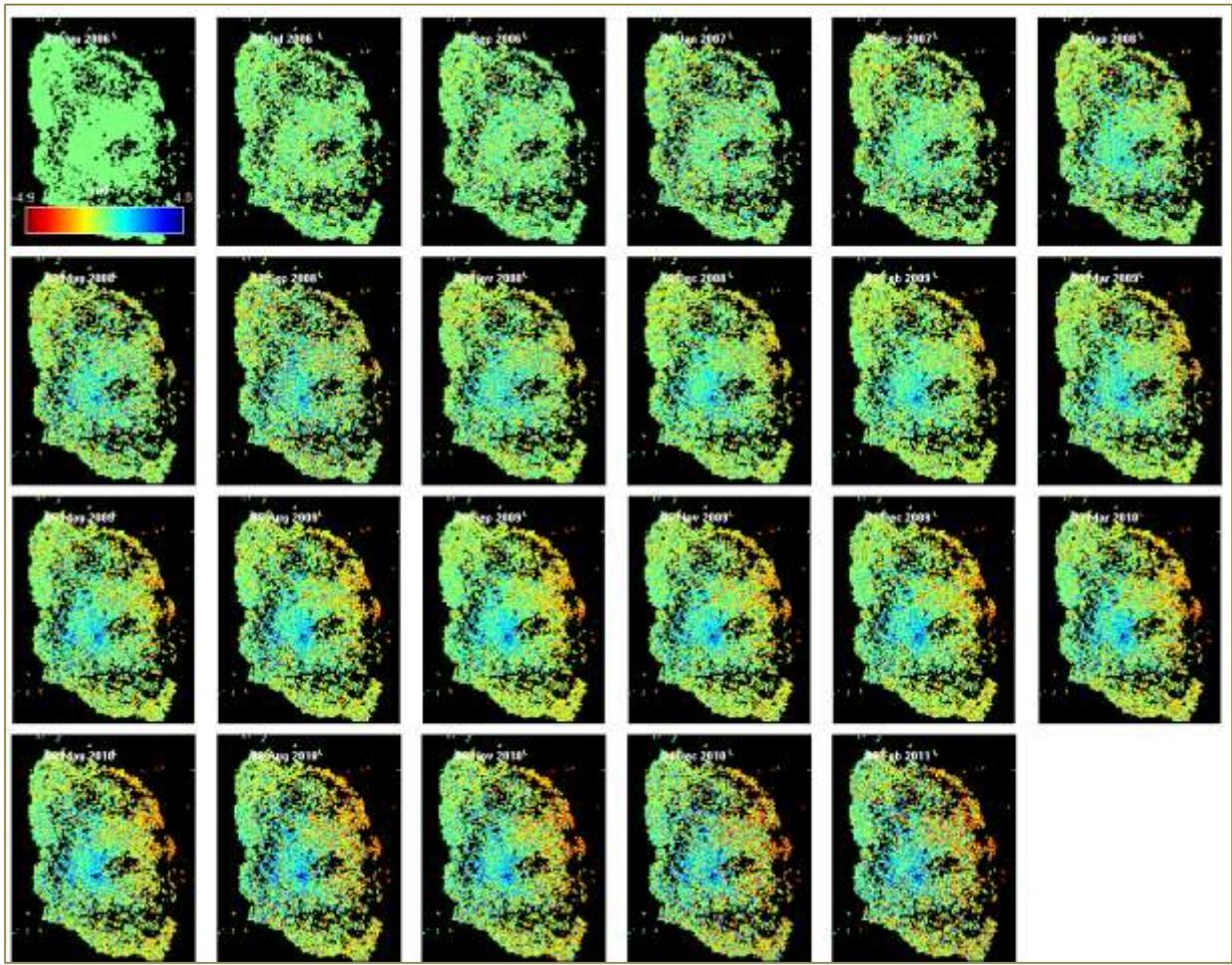


Fig.2-13 : 58-2920 の StaMPS 解析結果

スケールは-4.9~+4.8rad である。

Descending でも、2007 年ごろから少しずつ中央火口付近で位相が正の値を取るようになり、2008 年に入ったころからははっきりと正の値を示しているのが見えるようになっていた。また、2008 年ごろから島の東部において負の値を、島の西部では正の値を取っていることが分かった。特に東部では、2011 年 2 月の画像まで変動がはっきりと見て取れる。衛星軌道方向を考慮すると、東部と西部の変動は Ascending で得られた結果と一致していると言える。

StaMPS での解析結果を用いて、PS 点ごとの変動の速度を求めたところ、以下の通りであった(Fig.2-14, 2-15)。正の値が衛星軌道に近づく方向である。

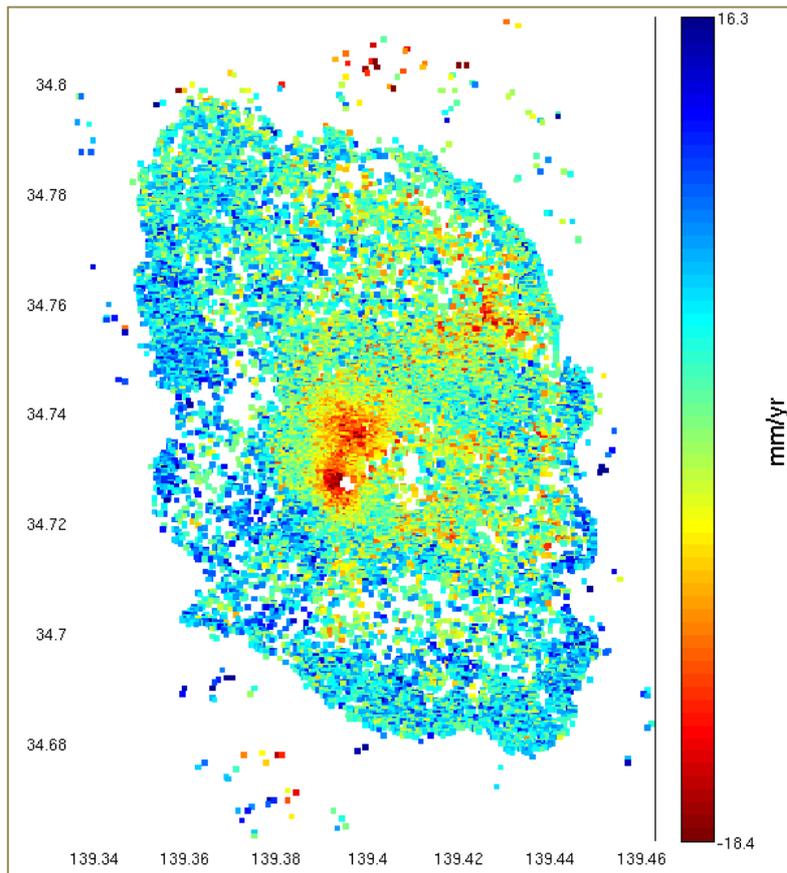


Fig.2-14 : 407-680(Ascending)の視線方向の速度

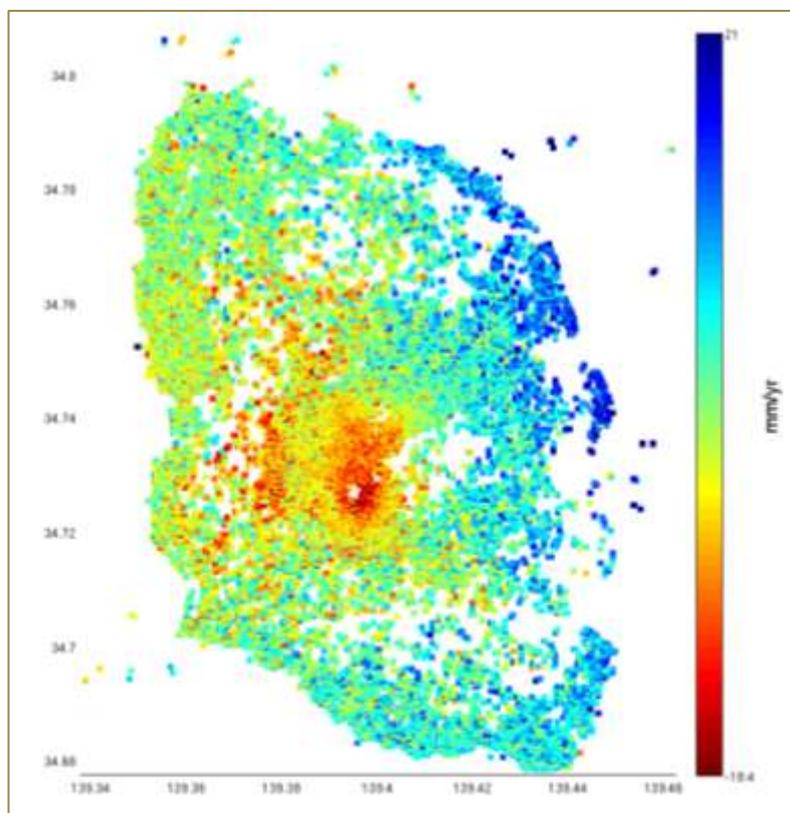


Fig.2-15 : 58-2920(Descending)の視線方向の速度

Fig.2-14, 2-15 より、島の西側は Ascending の軌道から遠ざかり、Descending の軌道に近づく方向、つまり西に向かって約 1.5cm/year の変動をしていることが読み取れる。また、島の南部はいずれも正の値を示していることから東西方向の変動ではなく、南へ向かって約 1cm/year の変動をしているのではないかと考えられる。2つの画像で示している符号が逆になっているが、これは軌道の違いによるものである。いずれも島中心部では負の値を示していることから、火口付近では約 1.8cm/year 沈降していたと見る事が出来る。また、沈降を示している部分は 1986 年噴火の A 溶岩の位置に似ており、噴火後の収縮を表している可能性がある。



Fig.2-16 : 1986 年 A 溶岩の位置、緑の矢印の付近  
(Google Map より)

また、OOSHIMA1, OOSHIMA2, OOSHIMA3, OOSHIMA4 の周りの、ある範囲内にある PS 点を取り出し、それぞれを時系列プロットした (Fig.2-17~2-20)。それぞれ、左が 407-680 (Ascending), 右が 58-2920 (Descending) である。これも、衛星に近づく方向を正としている。真ん中の折れ線グラフは各 PS 点の変動、赤いグラフはその近似線、黄緑のグラフはそれぞれのエラーの範囲を示している。

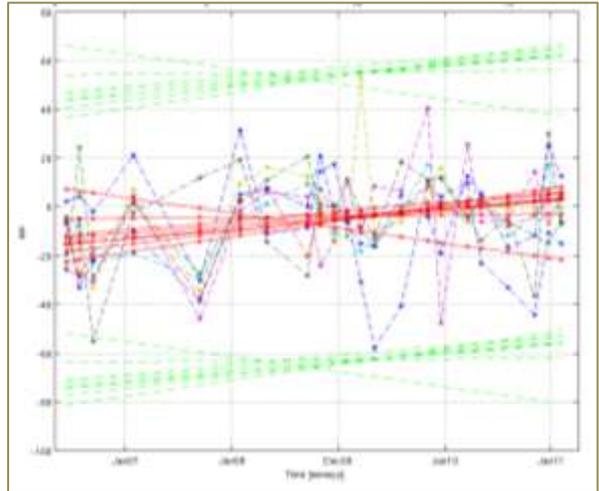
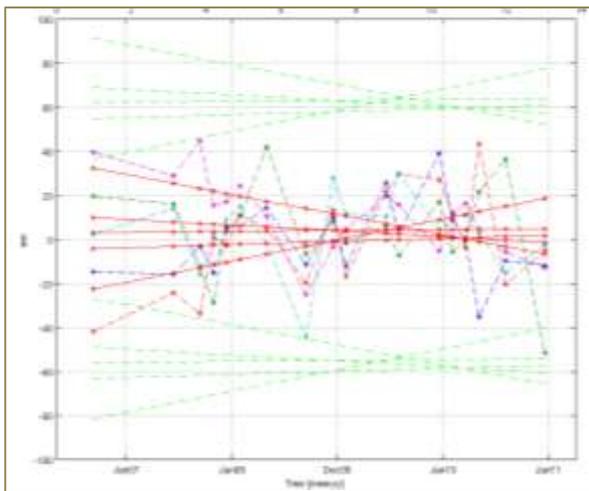


Fig.2-17 : OOSHIMA1 の時系列変動

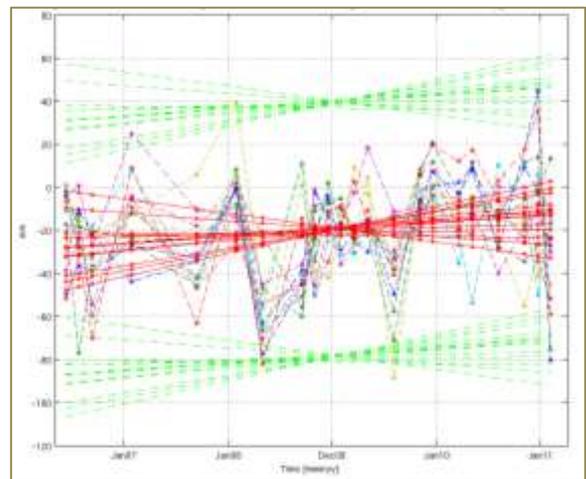
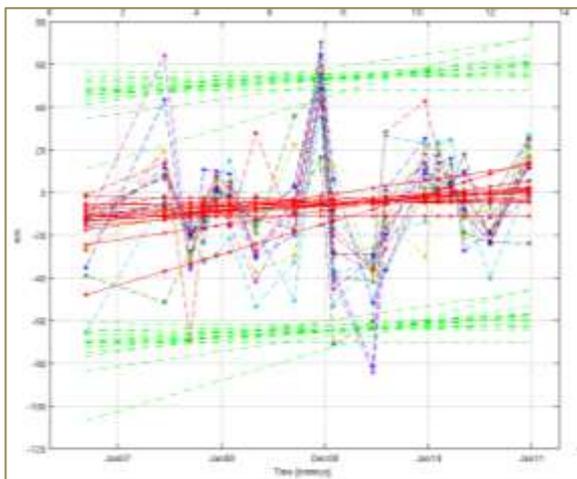


Fig.2-18 : OOSHIMA2 の時系列変動

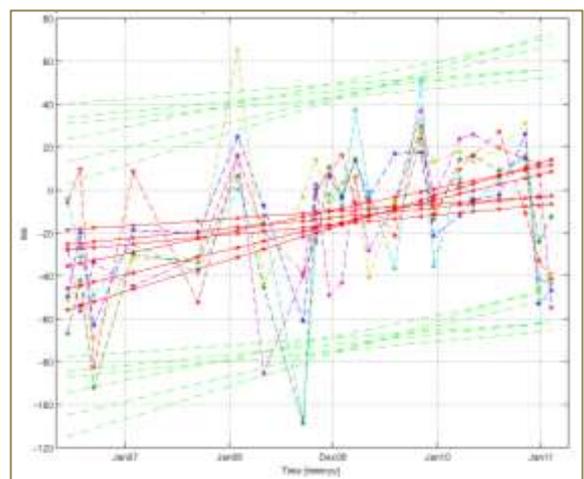
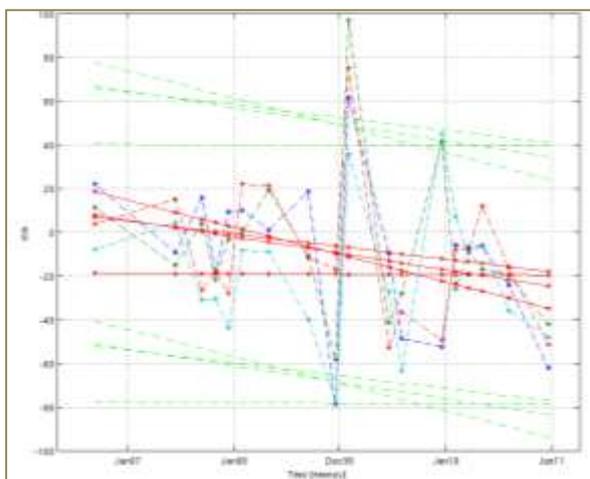


Fig.2-19 : OOSHIMA3 の時系列変動

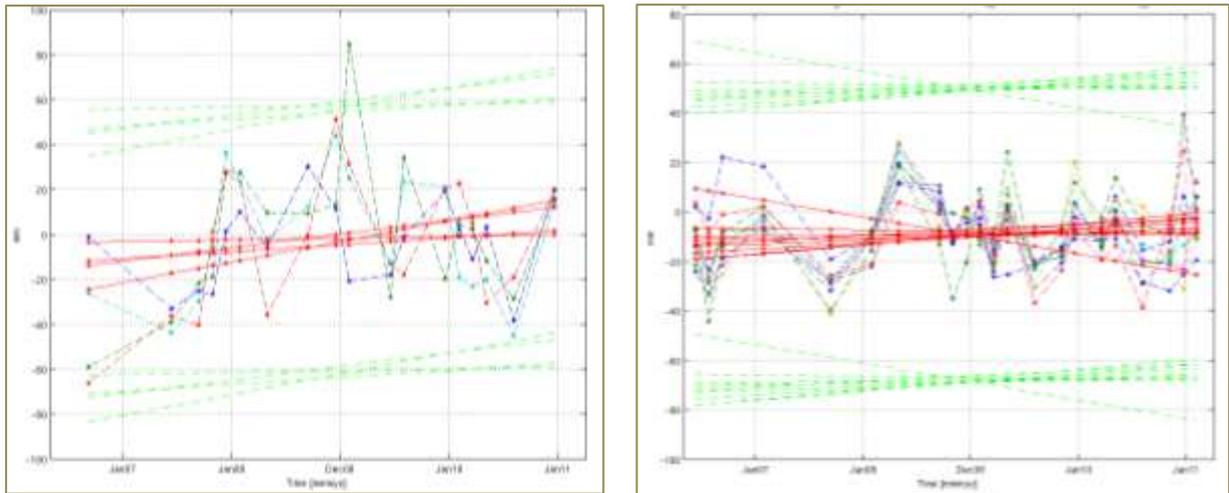


Fig.2-20 : OOSHIMA4 の時系列変動

Ascending のグラフによると、OOSHIMA1, 2 は 5 年間でほとんど変化がない、または衛星に近づく方向に 1~2cm 程度の変動があることが読み取れる。逆に OOSHIMA3 は衛星から 2~4cm 遠ざかる方向に変動している。OOSHIMA4 は 1, 2 と同様に 2~3cm 程度の変動が見てとれる。

また Descending のグラフによると、OOSHIMA1, 4 は衛星に近づく方向にそれぞれ約 2cm 変動している。OOSHIMA3 も同じ方向に約 4cm の変動が見られる。OOSHIMA2 のみ、他の 3 点と比べてばらつきが大きく、判断が難しい。

次に、島の中心部付近の PS 点の時系列変動を以下に示した(Fig.2-21)。

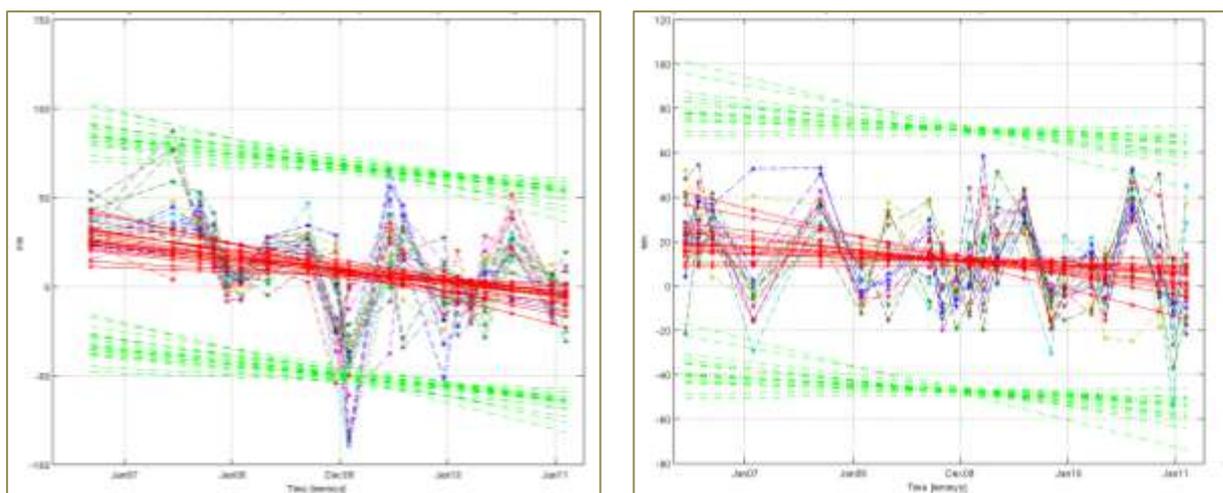


Fig.2-21 : 中央火口付近の時系列変動

左が Ascending, 右が Descending である。

Fig.2-21によると、2006~2007年にかけては Ascending と Descending で逆の動きを見せている。また 2008年の終わりごろから 2009年の初めにおいて、Ascending ではほぼ全ての PS 点が 5cm 以上の沈降を見せているが、Descending ではそこまで顕著な変化は見られない。そこを除けば、2008年以降は Ascending と Descending で変動の傾きやその量がほぼ同じであることから、2008年頃からの変動は東西南北方向ではなく、ほとんどが上下方向の変動成分であると考えられる。よって、中央火口付近は 2008年以降の約 3年間で隆起と沈降を繰り返し、結果的に 2006年と比べて 3~5cm 沈降したことが分かる。

### 3. 考察

#### 3.1 Gamma による InSAR 画像と StaMPS の比較

まず 407-680 (Ascending) の InSAR 画像と StaMPS の画像を比較した。いずれも 2007 年までは収縮傾向、2008 年以降では膨張傾向を見せるといった変動の仕方に変化が現れたことは読み取れている。Gamma を使った通常の干渉処理では島の端にある基準点に対し、島中心部までどのように変化が起きているかは分かった。しかし、ALOS / PALSAR の分解能の限界であったり、地形や大気によるエラーを取り除けていなかったりしたため、細かい変動がよく分からなかったり、GPS データの結果に対し大きすぎる変動が現れていたりした。また、20080316\_20080916, 20080316\_20081218 のように、Bperp. が長いものは干渉度が大変低く、ほとんど変動縞を見ることが出来なかったが、StaMPS では PS 点に着目して干渉処理をしているため、このような Bperp. が長いものについてもはっきりと干渉処理を行うことが出来ていた。

次に、58-2920 (Descending) の InSAR 画像 と StaMPS の画像を比較した。こちらも、2007 年までは収縮していて 2008 年頃から膨張を始めた様子が、どちらの画像でも検出できている。また、2009 年頃から島の東側で位相変化が負の値を取る様子も、20090805\_20091221 や 20091221\_20100808 の 2 枚で確認できているが、その他の画像ではほとんど検出できていない。また、InSAR 画像では除去し切れなかった軌道縞を、StaMPS では特別な処理をせず消すことが出来ていた。

いずれのデータも、2007~2008 年頃から島全体の変動が見られることを示しており、それらが読み取れる時期もほぼ一致していた。InSAR 画像だけでは Master との視線距離の変化しか読み取れないが、StaMPS を使うと一番初めの日付からの変動量や年間の変動速度などを得ることが出来た。また、各ピクセルにおける視線距離の変化を見ることが出来るため、InSAR 画像よりも細かい変動を確認することが出来る。その結果、カルデラ内の細かい変動を局所的に見ることが可能となった。

よって、顕著な地殻変動によらない細かい変動を見ようとする場合は、様々なエラーを除去しなければはっきりとした変動が見えてこないため、フィールド全体の大まかな変動なら InSAR 画像を、より細かい部分は InSAR 時系列解析を用いたものを、というように使い分けや融合が必要になると考える。

### 3.2 GPS 基線長変化と StaMPS の比較

GPS による基線長変化からは、3~4 年に 1 度いったん収縮してから急激に膨張する時期があること、また各点間の基線長変化を平均したところ、いずれも約 1~1.5cm/year の膨張があることが分かった。

StaMPS の各 GPS 基準点付近の PS 点の時系列プロット (2.5 項、Fig.2-17~20) はいずれも視線方向の変動を示しているものであるので、比較のために GPS でも視線距離の変化を求めた (Fig.3-1~4)。計算には(1.12)式を用い、Heading 角は Ascending が  $-10.12^{\circ}$  , Descending が  $-169.83^{\circ}$  、入射角は  $34.3^{\circ}$  (offnadir と等しい) とした。いずれも縦軸の単位は m で、 $-0.1 \sim +0.1\text{m}$  としている。また、StaMPS における時系列との比較のため、衛星に近付く方向を正とした。いずれも、左が 407-680 (Ascending), 右が 58-2920 (Descending) である。

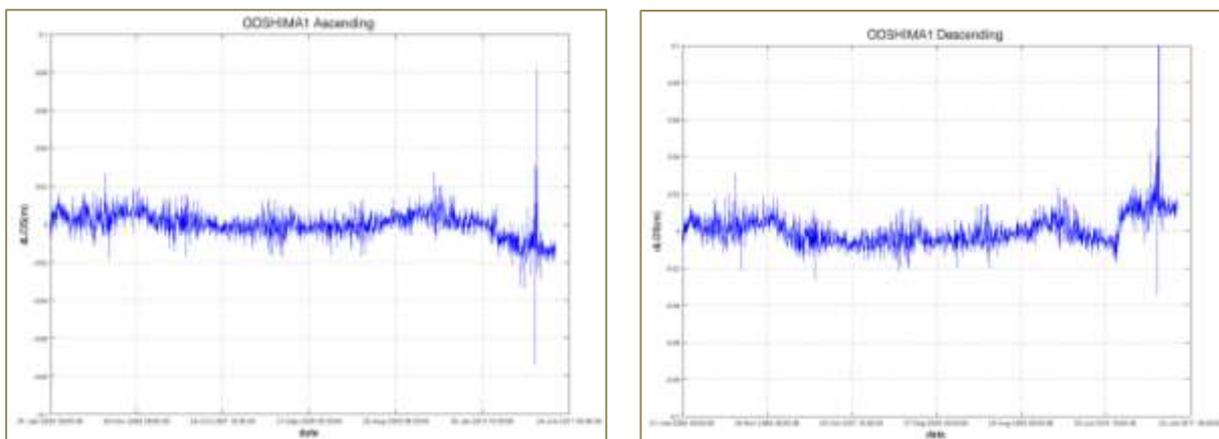


Fig.3-1 : OOSHIMA1 における視線距離の変化

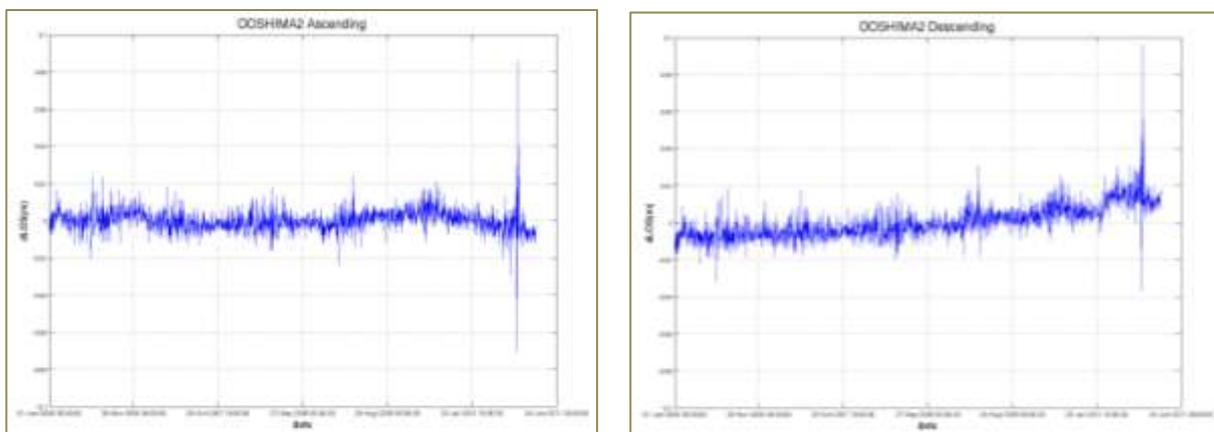


Fig.3-2 : OOSHIMA2 における視線距離の変化

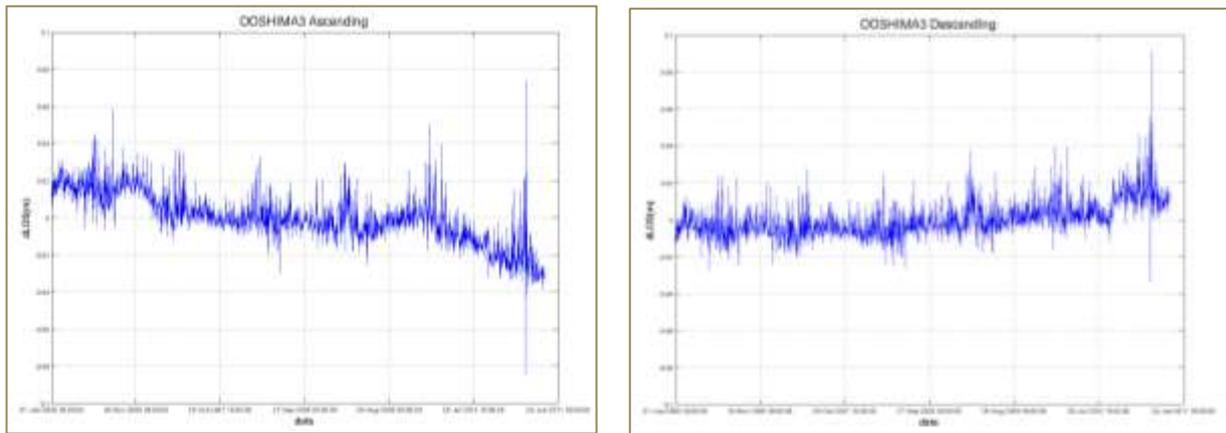


Fig.3-3 : OOSHIMA3 における視線距離の変化

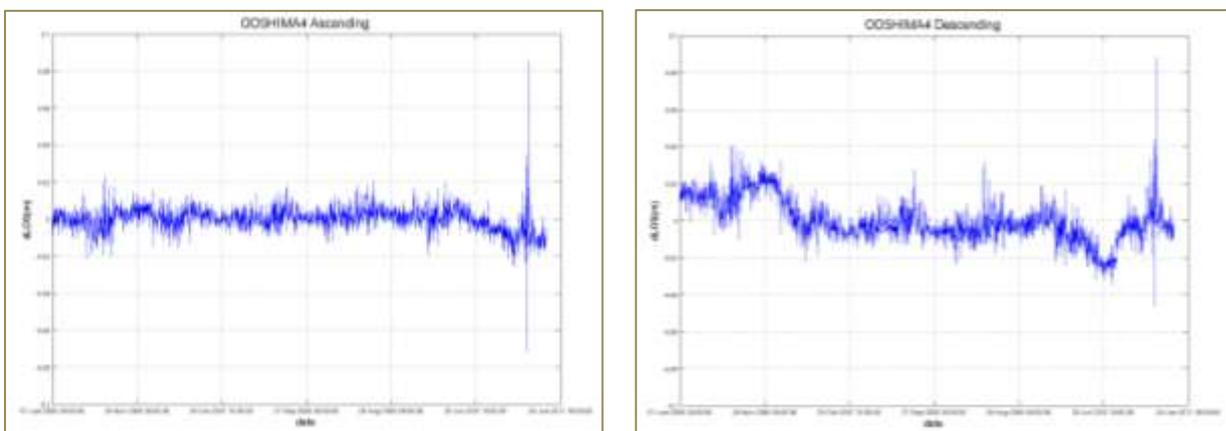


Fig.3-4 : OOSHIMA4 における視線距離の変化

2011年3月頃に見られる大きなjumpはいずれも東北地方太平洋沖地震によるものであると考えられる。これらのデータによると、AscendingではOOSHIMA3以外はあまり大きな変動をしておらず、OOSHIMA3のみ5年間で6cm程度衛星から遠ざかっている。Descendingでは、OOSHIMA1, 2, 3は多少の増減はあるものの徐々に衛星に近付いていっているのが分かる。OOSHIMA4のみ5年間で2cm前後遠ざかる傾向を見せている。また、Ascendingのデータでは2010年の夏頃より衛星から遠ざかる方向へと移動する傾向が見られるが、これはDescendingのOOSHIMA1, 3, 4で急激に衛星に近づく方向に動く時期よりやや早く始まっている。OOSHIMA2, 3はAscendingとDescendingで伸縮が逆の動きをしているように見えるが、OOSHIMA1, 4は2006年から2009~2010年頃までほとんど同じような動きをしているように見える。

これらをStaMPSのデータと比較してみると、AscendingのOOSHIMA2, 4やDescendingのデータは動きが似ているように見えるが、変動の大きさまで同じとは言えない。しかし、これはそれぞれの観測の時間分解能の違いによるものとも考えられる。出来、一概に異なっているとは言えない。

GPSデータからは、各電子基準点間の基線長の変化や基準点自体の変動量を調べるこ

とは可能だが、電子基準点のない場所の細かな変動を知ることまでは出来ない。しかし StaMPS による解析では、ピクセルごとに変動量が分かるため、GPS よりもかなり多くの点での変動データを得ることが出来る。ただし、ALOS の回帰周期が 46 日であったため、GPS に比べると現段階では時間分解能が低い点が短所として挙げられる。今後観測頻度が向上したり、また SAR を搭載した他の衛星から得られたデータと併用したりすることが出来るようになると、解決できるだろう。

## 4. まとめ

伊豆大島でのマグマ貫入における地殻変動の検出を、ALOS / PALSAR によって行った。InSAR 画像によると、407-680 (Ascending) では、2006~2007 年は中心部に向かって視線距離が短くなる傾向があり、2008 年以降は中心部に向かって長くなる傾向が見られた。58-2920 (Descending) では、2006~2007 年は Ascending とほぼ同様の傾向が見られ、2008~2009 年の初めごろまではあまり大きな変動が見られず、2009 年以降は中心部に向かって視線距離が長くなる傾向が見られた。

GEONET の電子基準点 4 点を用いた GPS による基線長変化から、伊豆大島は過去 16 年間で平均して東西方向に 1.7cm/year、南北方向に 1cm/year 膨張していることが分かった。3~4 年に 1 度基線長が急激に伸びる時期があり、その直前には少し基線長が縮んでいた。この時期はカルデラ周辺での地震回数が増える時期と一致していることが分かった。

InSAR で細かな変動を見るための解析手法として InSAR 時系列解析というものがある。PS-InSAR 法を用いた解析パッケージソフトウェア StaMPS を使用して、伊豆大島火山の時系列解析を試みた。その結果、中央火口付近では 2008 年頃から明らかに正の値を示すようになっていること、時系列データからは、3~5 年間で約 5cm の沈降があり、これは 1986 年噴火の A 溶岩の位置に似ているということが分かった。また速度変化の図から、島の東部・西部では 2009 年頃から膨張する傾向を見せていたことが分かった。これは、通常の干渉処理で得られた InSAR 画像や、GPS の基線長変化のグラフから読み取ったことと概ね一致していた。

通常の干渉処理で求められた InSAR 画像と、StaMPS によって求められた時系列解析の結果を比較すると、いずれも島の変動の仕方が変わった時期はしっかりと検出できていることが分かった。しかし、島の中心部の沈降は StaMPS の画像からしか読み取ることが出来ず、PS 点ごとの変動量を求められる PS-InSAR 法の有用性が示されたと言える。

また、StaMPS による GPS 点周辺の PS 点と、各 GPS 点の SAR 視線方向の距離の変動を比較してみたところ、おおよそ動きは似ているように見えるが、その変動量自体は必ずしも同じとは言えないことが分かった。これは ALOS の時間分解能の低さによるものが主な要因として挙げられ、今後打ち上げられる SAR 衛星の回帰周期の向上が期待される。

## 5. 謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々のご指導・ご協力をいただきました。ここに感謝の意を述べさせていただきます。

特に指導教官である古屋正人教授には、大変お世話になりました。大学に入学してすぐに ALOS、InSAR の魅力を教えていただいたことで、人工衛星を使えばいろいろなことが出来ることを知る良い機会となりました。研究においては、ただ面白い、興味がある、何か見えているというだけではなく、自分で考えることの重要性を教えていただきました。また ALOS / PALSAR だけでなく、いろいろな視点から物事を見ていくため、様々な手法・文献を提供してくださいました。1つのものに固執せず、あらゆる方向から物事を正確に理解することの大切さを知ることが出来ました。今後も、教わったことを忘れずにいたいと思っております。

また、日置幸介先生には GPS データを用いた基線長の計算方法を教えていただきました。そして固体系ゼミの先生方には、ゼミ発表の時などに様々なご指摘、ご指導をいただきました。研究室の諸先輩方には InSAR 画像の作り方や解析の方法、プログラミング、結果の見方など、どのように研究を進めていけば良いかを何度も丁寧に教えていただきました。ありがとうございました。

本研究で用いた PALSAR データは PIXEL (PALSAR interferometry Consortium to Study our Evolving Land surface) において共有しているものであり、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と東京大学地震研究所との共同研究契約により JAXA から提供されたものです。PALSAR データの所有権は経済産業省および JAXA にある。本研究は、東京大学地震研究所特定共同研究 (B) 「衛星リモートセンシングによる地震・火山活動の解析」で行われました。

## 6. 参考文献、画像引用

Andrew Hooper, Howard Zebker, Paul Segall, and Bert Kampes (2004) : A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 31, 2004GL021737

M.Simons and P. A. Rosen (2007) : TREATISE ON GEOPHYSICS, 3.12 Interferometric Synthetic Aperture Radar Geodesy

古屋正人 (2006) : 地殻変動観測の新潮流 InSAR, 測地学会誌第 52 巻, 第 4 号, 225-243 頁

Paolo Berardino, Gianfranco Fornaro, Riccardo Lanari, Eugenio Sansosti (2002) : A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 40, NO. 11

福島洋 (2010) : StaMPS パッケージを用いた PS 干渉 SAR 解析, 測地学会誌第 57 巻, 第 2 号, 41-48 頁

国土交通省国土地理院 火山土地条件調査報告書 (伊豆大島地区)

国土地理院干渉 SAR : <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/>

国土地理院 GPS 連続観測システム : [http://terras.gsi.go.jp/gps/geonet\\_top.html](http://terras.gsi.go.jp/gps/geonet_top.html)

JAXA : <http://www.jaxa.jp/>

測地学テキスト : <http://wwwsoc.nii.ac.jp/geod-soc/web-text/>

Google Map : <http://maps.google.co.jp/>

伊豆大島ジオパーク : <http://www.izu-oshima.or.jp/geopark/index.html>