

合成開口レーダーで捉えた Cinchona 地震(Mw6.1, コスタ  
リカ)に伴う地震時地殻変動と地すべりシグナル

**Coseismic deformation and landslide signals  
associated with the Cinchona earthquake (Mw 6.1,  
Costa Rica) detected by Synthetic Aperture Radar**

北海道大学 大学院理学院 自然史科学専攻  
地球惑星ダイナミクス講座 宇宙測地学研究室

梅村 宗太郎

Shutaro Umemura

指導教官 古屋 正人 教授

February 2015

## 要旨

近年、合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar; SAR) を搭載した衛星から得られたデータを用いた地表変動観測は欠かせないものになっている。地上観測点が不要で高空間分解能を持つため、地殻変動や氷河流動のような広範囲にわたる変動も詳細に観測されている。日本では 2014 年にだいち 2 号 (ALOS-2) の運用も開始され、今後のデータ活用・研究発展が期待される。

本研究では JAXA が 2006 年に打ち上げた陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS) に搭載された SAR センサーの PALSAR データを用いた。対象は中米のコスタリカで 2009 年に発生した Cinchona 地震と呼ばれる内陸地震である。Mw は 6.1 で、震源の深さは 4.5km であった。この地震によって 20 名以上が犠牲になったが、その多くは地すべりが原因だった。また、震源の 6km 西には Poas 火山という活火山があり、本震の 4 日後に VEI=1 の噴火 (水蒸気爆発) を起こした。

本研究では Cinchona 地震に伴う地震時地殻変動を InSAR (Interferometric SAR; InSAR) 解析によって検出した。最大の変位は約 20cm であった。この地殻変動データを用いて断層モデリングを行った。断層モデリングの際には Meade (2007) にある半無限弾性体を仮定した三角形要素のすべりによる変位の解析解を用いてグリーン関数を計算し、すべり量のインバージョンをした。その結果、Montero et al. (2013) にある Angel 断層の北西部が動いたことを確認した。モデリングで得られた断層が動いたことによる、Poas 火山直下への圧力変化を計算したところ、3km から 7km の深さで 1MPa 以上の圧力上昇が認められた。この増圧によってマグマ溜まりからマグマが絞り出され、本震 4 日後の水蒸気爆発に至ったと考えることができる。

また、地震を挟んだデータペアで Pixel offset 法を適用したところ、地殻変動よりも狭い範囲に 2m 以上の変位を検出した。その範囲は Castillo et al. (2013) で示された地すべりの発生域とよく一致していた。

## 目次

1.	はじめに .....	3
1.1	地表変動観測と合成開口レーダー .....	3
1.2	研究地域 .....	4
1.3	本研究の目的 .....	10
2.	データと手法 .....	11
2.1	使用したデータ .....	11
2.2	差分干渉 SAR .....	12
2.3	Pixel offset 法 .....	12
3.	観測結果・考察 .....	14
3.1	地震時地殻変動 .....	14
3.2	断層モデリング .....	16
3.3	地震は水蒸気爆発を誘発したか .....	18
3.4	Landslide シグナル .....	22
4.	まとめ .....	26
5.	謝辞 .....	27
6.	参考文献 .....	28

## 1. はじめに

### 1.1 地表変動観測と合成開口レーダー

近年の宇宙測地技術の進展には目をみはるものがある。GPS (Global Positioning System)に代表される GNSS (Global Navigation Satellite System)は地震学や火山学などにおいて、地表変動の観測を必要とする場合には欠かせない。日本では GNSS 連続観測網として GEONET (GNSS Earth Observation Network System)が整備されており、全国に約 1300 ある電子基準点から構成されている。しかし世界に目を向けると GEONET のように密な GNSS 連続観測網の例はない。また、地上観測点を必要とする性質上、密に展開するとしても限度がある。そのため突然発生する地震に対して事前に震央付近に観測点を設置できず、地殻変動の詳細がつかめないことがある (Abe et al., 2013)。震央付近の地震時地殻変動など、GNSS では達成できない高空間分解能が要求される観測に有効な手法として人工衛星搭載の合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar : SAR)を利用したものがあ

る。合成開口レーダーが通常の実開口レーダーと大きく異なる点として、合成開口技術を用いていることが挙げられる。実開口レーダーの分解能はアンテナを大きくすることで高めることができる。しかし地上に固定して使われるセンサーならば可能だが、衛星に搭載して地表を観測することを考えると大きな実開口のレーダーは現実的ではない。合成開口技術は、対象に電波を照射している間に受信を続け、ドップラー効果を考慮することで仮想的に大きなアンテナを合成し、プラットフォーム進行 (Azimuth)方向の空間分解能を高める技術である。Azimuth 方向の分解能はアンテナ長の半分の値で決まり、対象との距離や使用する波長には依存しない。そのため人工衛星が使用する高度からでも 10m 前後の分解能が得られる。また、電波の放射 (Range)方向はパルス圧縮技術を用いることで高空間分解能を達成している。

SAR は人工衛星や航空機、シャトルなどに搭載される。人工衛星搭載 SAR の歴史は、1978年に打ち上げられた Seasat に始まった。日本でも 1992年に JERS-1, 2006年に ALOS, そして 2014年には ALOS-2 が打ち上げられ、地殻変動や氷河流動観測など多くの成果を挙げている。SAR を用いて地表変動を検出する手段として、干渉 SAR (Interferometric SAR : InSAR)とピクセルオフセット法がある。InSAR は距離情報を持つ位相の差を取ることで、高空間分解能のまま cm オーダーの精度で変位を得ることができる。ピクセルオフセット法は画像をマッチングさせた際のピクセルのずれを計測することで、InSAR では得られない大きな勾配を持つ変位を求めることができる。本研究ではこれらを用いて地表変位を検出した。

## 1.2 研究地域

本研究では 2009 年 1 月 8 日に中米のコスタリカで発生した Mw 6.1 の内陸地震 (Cinchona 地震) を対象に解析を行った。コスタリカはカリブプレート上に位置し、南西の太平洋側からココスプレートの沈み込みを受けているため、地震はよく発生する (Figure 1-1)。ココスプレートがコスタリカ沖で沈み込む速度は 86mm/year である (DeMets, 2001)。コスタリカ東部でカリブプレートはパナママイクロプレートと接しているが、その境界ははっきりしていない。また、海溝に平行な活火山列がニカラグア側から続いており、コスタリカ中部まで明瞭に追跡できる。その火山の中には、Arenal 火山や Poas 火山など今世紀も噴火を繰り返す活火山も存在する。一方でコスタリカ東部では活火山はみられない。ここでは沈み込むココスプレート内での地震活動の下限が異常に浅くなっている。西部で深さ約 200km だった地震活動の下限は、東へ向かうにつれ浅くなり、パナマとの国境付近では約 50km である (Protti et al., 1994; Figure 1-2)。これはココスリッジと呼ばれる、ココスプレートに残るガラパゴスホットスポットの痕が沈み込み、浮力のあるココスリッジがある程度沈んだところで水平スラブを形成していることが原因とされている。

研究対象とした Cinchona 地震はコスタリカ内陸部にある Poas 火山の約 6km 西で発生し、震源の深さは 4.5km であった (USGS, 2009)。地震による犠牲者は 33 名であったが、その多くが地震に伴って発生した地すべりによるものであった (USGS, 2009)。震央周辺では過去に M5 を超える地震がいくつか発生しているが、1955 年 (M5.5) を最後に発生していなかった (Figure 1-3)。なお震央付近に南北走向の Angel 断層が知られていたが、この地震が発生した後に Montero et al. (2010) によって断層の北西延長が示され、本地震の震源断層とされている (Montero et al, 2013; Figure 1-3)。しかしながら、測地的なデータから震源断層を推定した研究はまだ行われていない。

Cinchona 地震に伴う landslide によって大きな被害が出たことは前述の通りだが、Castillo et al. (2013) によって LiDAR データを解析することで landslide 発生域のマッピングがされている (Figure 1-4)。SAR 衛星を用いて地すべりを検出する試みは各地でされている (e.g. 清水ほか, 2005; Rott and Nagler, 2006)。これらの研究では InSAR や定常散乱体干渉 SAR (PSInSAR) を用いて地すべりを検出し、地すべり地の監視などに役立っている。しかし人に被害が出るような短時間で大きく動く landslide を SAR 衛星データから検出した例はまだない。

また、Cinchona 地震発生 4 日後 (2009 年 1 月 12 日) に Poas 火山で VEI=1 の小規模な水蒸気爆発が発生した。本震の前日から当日にかけての震央分布と Poas 火山の関係を Figure 1-5 に示した。地震発生後に火山活動の増加は見られない中で発生した噴火であった (Global Volcanism Program, 2009)。この火山は 2006 年に 10 年ぶりの噴火をしてからしばしば噴火を起こしており、2009 年 1 月と同様の噴火は 2006 年 12 月と 2008 年 1 月にも

発生していた. Poas 火山の地下構造については Thorpe et al. (1981)によってアクティブな火口湖のすぐ下に細い火道があることが示され, Fournier et al. (2004)で火口湖の 500m 下に上端を持つ小さなマグマ溜まりがあると示されている (Figure 1-6).

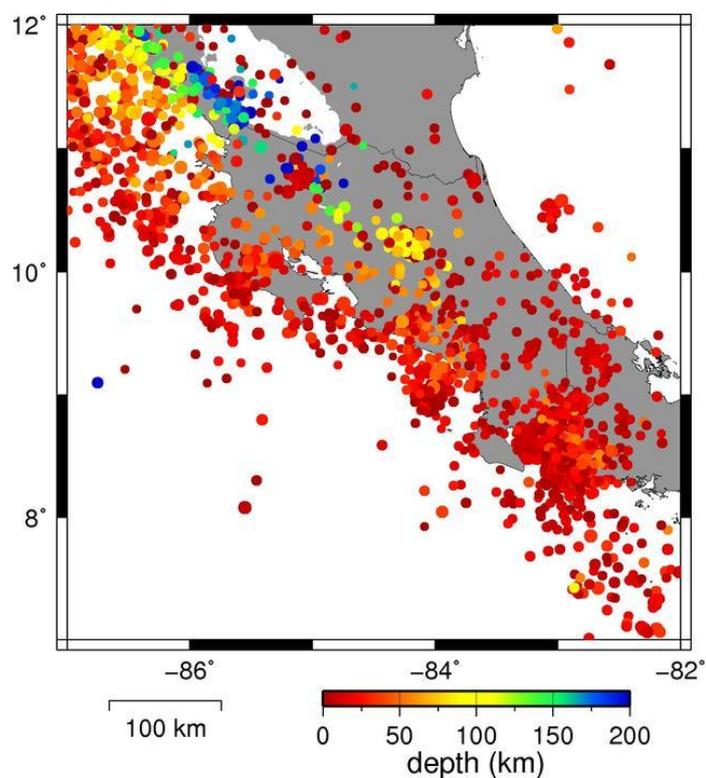


Figure1-1 2008 年から 2012 年までに発生した地震の深さ分布を示す. データは International Seismological Centre (ISC)の地震カタログより. コスタリカ東部では震源が深い地震が発生していないことがわかる.

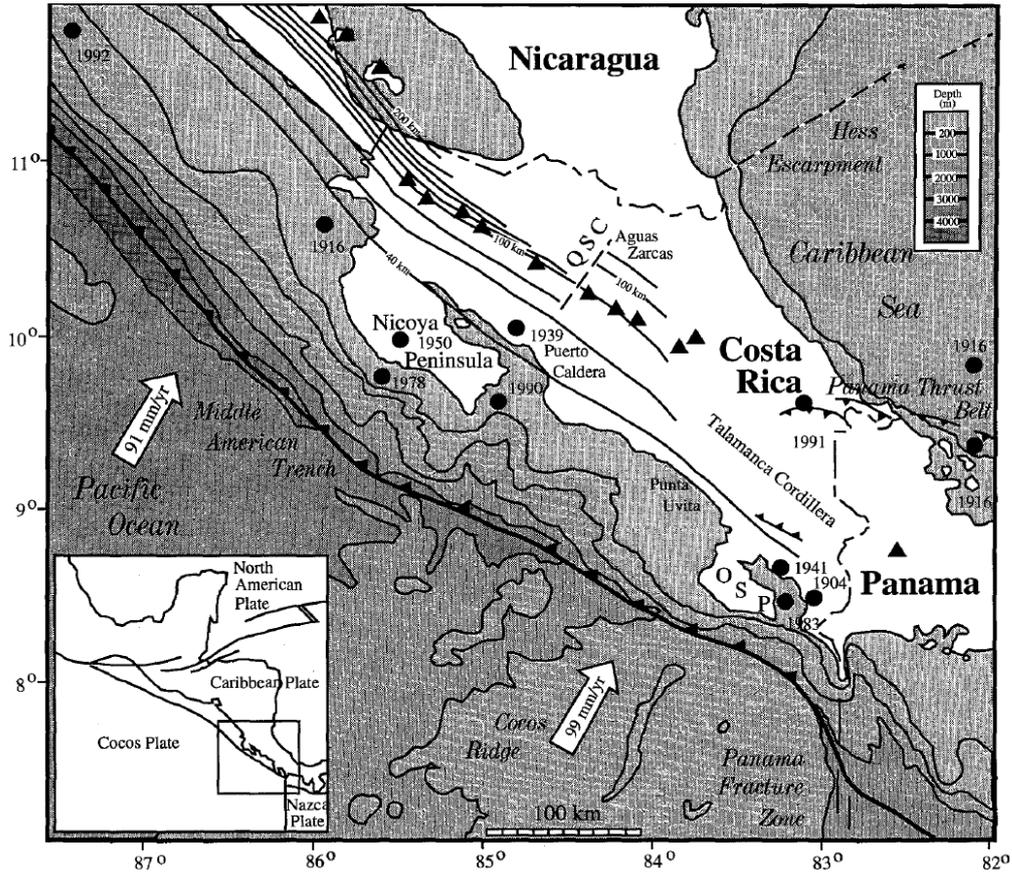


Figure1-2 コスタリカ周辺のテクトニクスを示す (Protti et al., 1994). 黒三角は活火山, 陸地にかかるコンターは和達-ベニオフ帯の等深度面を示しており, 40km から 20km 毎に引いてある. コスタリカ東部での活火山列の消滅と, 深さ 100km まで和達-ベニオフ帯が達していないことが確認できる. また, コスタリカ東部の沖合で沈み込むココスプレートが浅くなっていること (ココスリッジ)も確認できる.

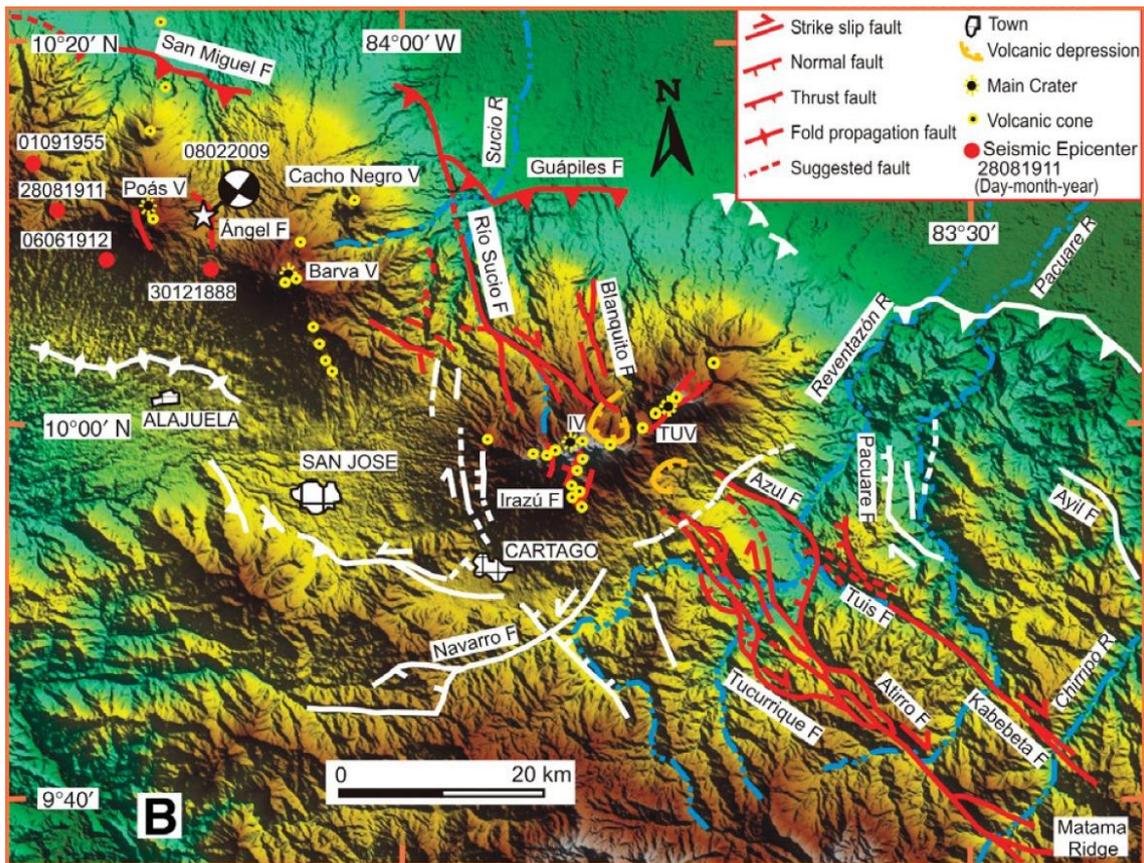


Figure1-3 対象領域周辺のテクトニクスを示す (Montero et al., 2013). 赤線・白線で活断層を示す. 白星で Cinchona 地震の震央を示し, Harvard のメカニズム解も示している. 赤丸は過去に発生した浅い M5 以上の地震の震央を示す.

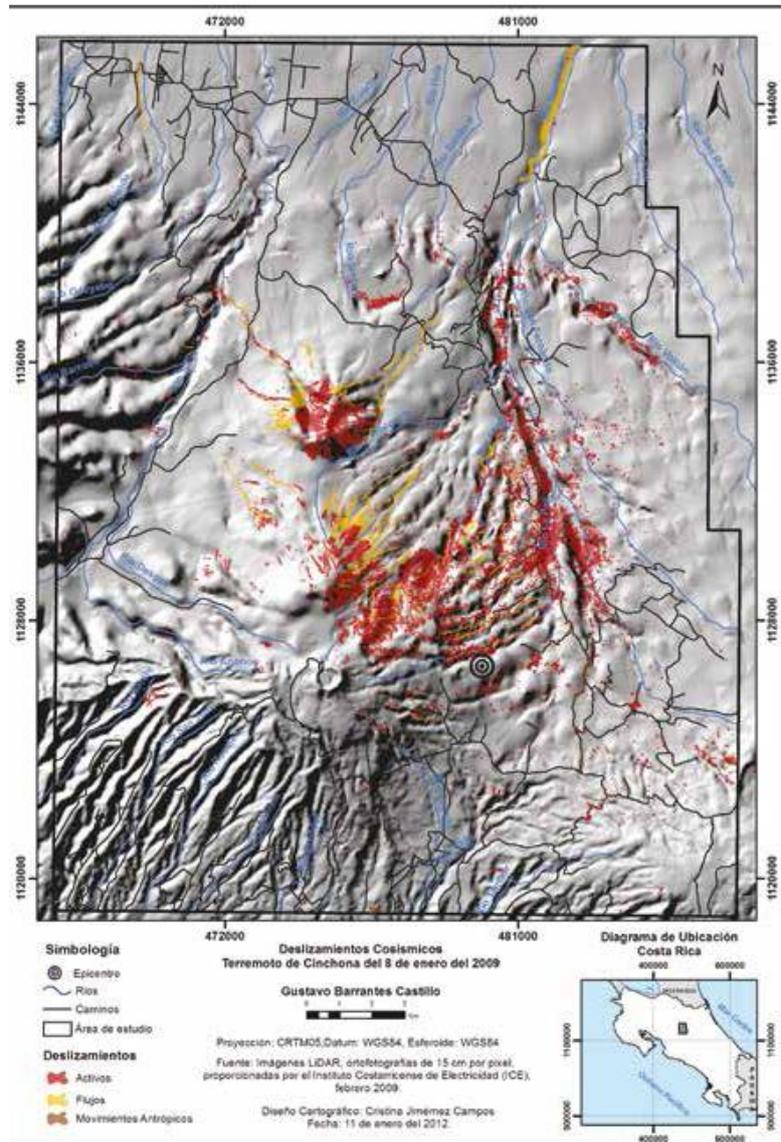


Figure 1-4 Landslide の発生域を示す (Castillo et al., 2013). 赤色が Landslide の発生域. 黒の多重丸で震央も示している.

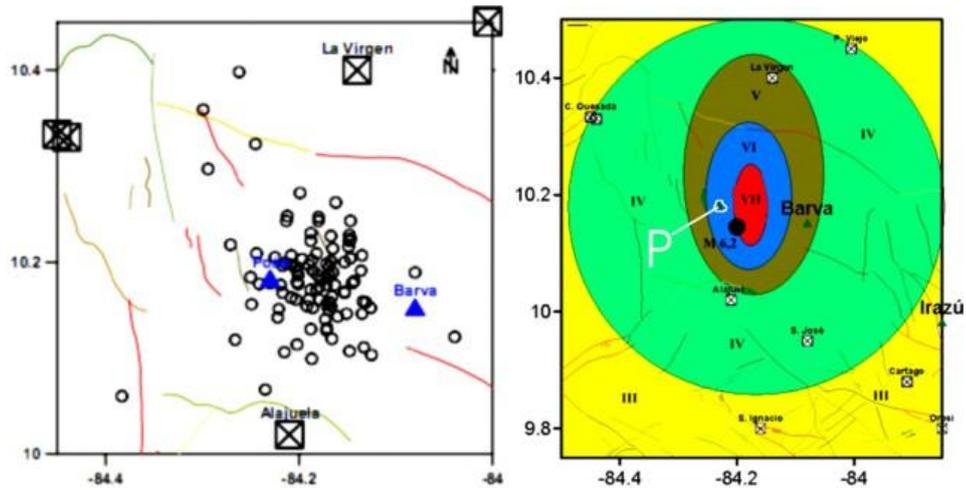


Figure 1-5 Poas 火山と Cinchona 地震の位置関係を示す (Global Volcanism Program, 2009). 左：2009 年 1 月 7 日から同年 1 月 8 日に発生した地震プロットを黒丸, Poas 火山と Barva 火山を青三角で示す. 右：Cinchona 地震による震度 (Modified Mercalli Intensity)をカラーで, Poas 火山の火口を白枠で示す.

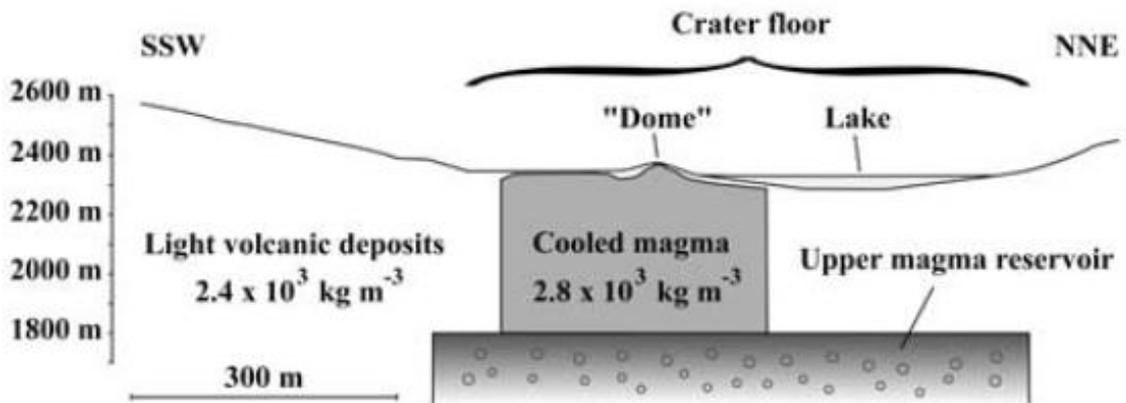


Figure 1-6 重力調査から推測された Poas 火山の地下構造 (Fournier et al., 2004).

### 1.3 本研究の目的

内陸で発生する浅い地震は、居住地から震源までの距離が近いこと地震の規模に対して被害が大きくなることもある。しかしながら詳細な地殻変動や震源断層は、観測点の少なさや地表まで断層破壊が達しないなどで明らかにならないことも多い。地上観測点を必要とせず高空間分解能で地殻変動を検出できる InSAR は、内陸地震の詳細をつかむことに適している。

Landslide 発生域のマッピングには、現地踏査や航空写真を用いた解析などがある。現地踏査は災害発生後にすぐ行えるが、広域を調査するには時間がかかる上、山中で発生した場合などは危険性から現場に到達できないこともある。航空写真を用いた解析にそのようなリスクはないが、航空写真の取得には特別な観測が必要である。SAR 衛星のデータから landslide が検出できれば、定常的に得られるデータから広域のマッピングが可能になる。

本研究では ALOS/PALSAR のデータを用いて Cinchona 地震に伴う地殻変動を検出し、断層モデリングによってこの地震を引き起こした震源断層を決定する。また、Pixel offset 法による landslide の検出可能性を示し、地震と landslide の関係を探る。

## 2. データと手法

本章では使用したデータと解析手法について述べる。

### 2.1 使用したデータ

本研究では宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency: JAXA) が 2006 年によって打ち上げられ, 2011 年まで運用された陸域観測技術衛星「だいち (Advanced Land Observing Satellite: ALOS)」に搭載された SAR センサー PALSAR (Phased Array Type L-band SAR) の level 1.0 データ (raw data) を用いた。撮像領域は Figure 2-1 に, 撮像日のペアは Table 2-1 に示した。なおデータ解析においては GAMMA 社のソフトウェアを使用した。また, 地形縞の除去には ASTER GDEM の数値地形モデルを使用した。

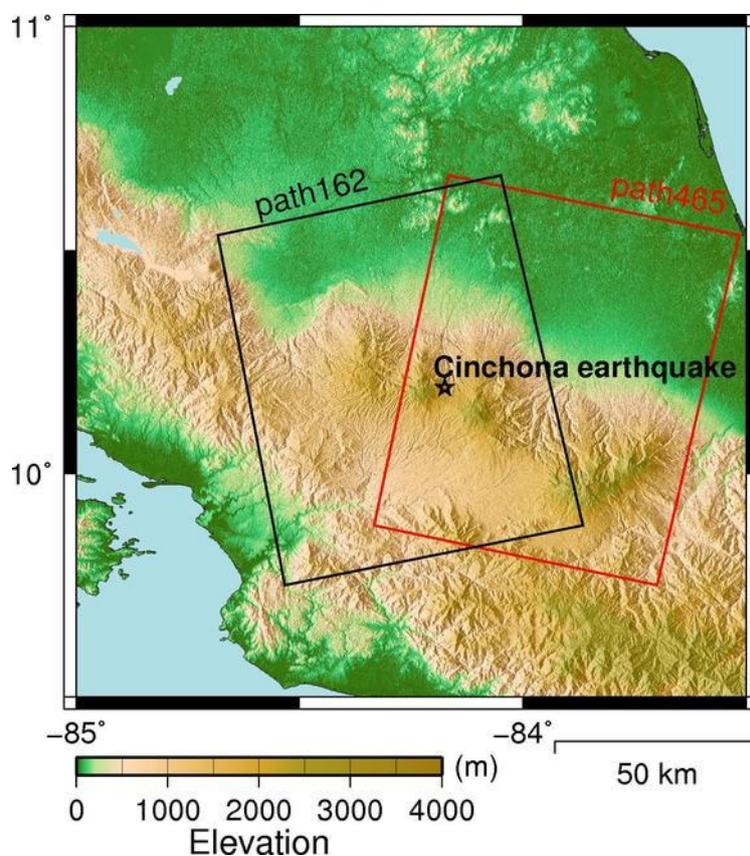


Figure 2-1 解析範囲を示す。黒枠は Ascending で, path-frame 番号 162-190 の撮像領域, 赤枠は Descending で, path-frame 番号 465-3410 の撮像領域をそれぞれ示す。黒星は Cinchona 地震の震央を示す。背景には ASTER GDEM の数値標高モデルを表示した。

Table 2-1 使用したデータセット

Path-Frame	Orbit	Date (yyyy/mm/dd)	Bperp	Events
162-190	Asc.	2007/10/05-20080220	701.03m	Eruption
162-190	Asc.	2008/11/22-2009/08/25	738.75m	Cinchona eq., Eruption
162-190	Asc.	2009/08/25-2010/01/10	-199.83m	Eruption
465-3140	Des.	2008/11/21-2009/02/21	324.55m	Cinchona eq., Eruption

## 2.2 差分干渉 SAR

SAR 衛星が得るデータには受信したマイクロ波の振幅と位相の情報が含まれており、両方の情報が全てのピクセルに格納されている。そのため SAR 得られる画像データは複素数である。振幅は地表から返ってくる散乱波の強度を、位相は衛星-地表間の距離などを情報として持っている。干渉 SAR (InSAR)の基本的な原理はヤングの実験と同様である。同じ波が2つのスリッドを通り壁に当たると、光路差によって位相が同じならば強め合い、逆の位相ならば弱め合い縞模様を作る。InSAR でも同様の縞模様が見られる。差分干渉 SAR (Defferential InSAR; または単に InSAR)では異なる撮像日に同じ軌道 (path)同じ場所 (frame)で得られたデータを用いて干渉させる。同じ path, frame のデータでもピクセルレベルで一致することはないため、まず異なる撮像日の画像をサブピクセルレベルで位置合わせする必要がある。その後で位相差を取れば初期干渉画像が得られる。初期干渉画像には地表変動の変動縞の他、衛星軌道位置の違いから軌道縞と地形縞、そしてマイクロ波伝搬経路の大气中の水蒸気や電離層の電子密度差などに由来するノイズが含まれている。これらの内、軌道縞と地形縞は衛星軌道情報と DEMを用いてシミュレーションで再現できるので、初期干渉画像から差し引ける。この処理で変動縞以外の大きな縞は取り去ることができる。大気ノイズや電離層ノイズは補正することはできるが完全に除去することは難しい。また、得られた変動は位相のまま $-\pi$ から $+\pi$ の間に丸め込まれているので、実際の変動に展開する unwrap が必要である。変位勾配が急で縞が密な場合などはこの処理がうまくいかないこともある。

以上のようにして得られた変動データは、衛星に近づいたか遠ざかったかの情報を持つ、すなわち 1次元の変動データである。衛星から地表を見た方向を衛星視線方向 (Line-of-Sight ; LOS)と言い、その方向の変位を LOS 変位と呼ぶ。同じ領域を複数の軌道から観測している場合は、それぞれで LOS 変位を得ることでデータを増やすことができる。

## 2.3 Pixel offset 法

Pixel offset 法は InSAR と同様に地表の変動を得る手法の一つである。使う元データと、2 画像の位置合わせが必要なところまでは InSAR と同じである。その後、適当なサイズの相関窓を設定し、対応する窓同士で面積相関係数が最大になる位置を求める。その位置が元の位置からどれだけずれているかを求めることで変動が得られる。画像上のずれを求めるため、衛星視線方向だけでなく衛星進行方向の変位も検出することができる。また、大きなメリットとして InSAR では得られない変位勾配が急な局所的大変位の検出が可能である。

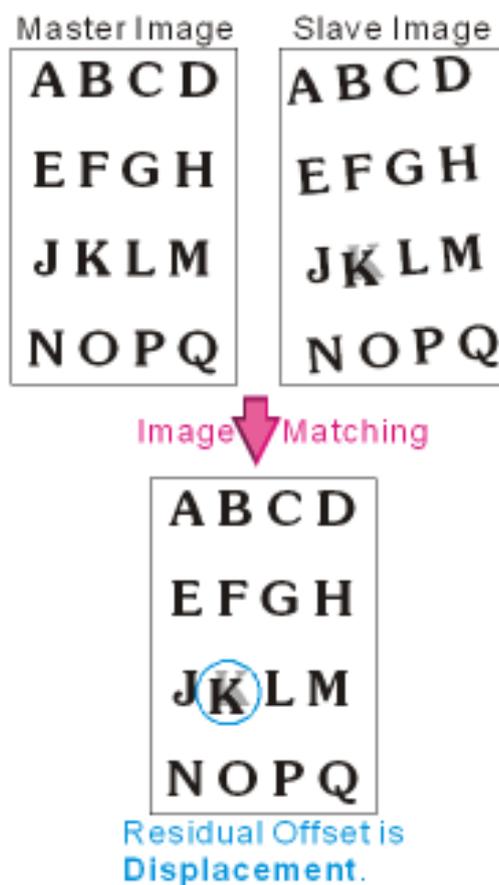


Figure 2-2 Pixel offset 法 の概念図 (小林ほか, 2011)

### 3. 観測結果・考察

#### 3.1 地震時地殻変動

Figure3-1 に InSAR 解析で得られた地震時地殻変動を示した。両軌道ともデータの欠損があるが、これは時間の経過または後述する landslide によって地表面の様子が大きく変わったことにより干渉性が失われたためである。得られた最大の LOS 変位は両軌道ともに約 20cm であった。Figure3-1 から明らかな変位の不連続は認められなかったため、断層破壊は地表まで達しなかったと考えられる。Figure3-1 のデータ期間には本震の 4 日後に Poas 火山で発生した VEI=1 の水蒸気爆発 も含まれている。ALOS/PALSAR の観測データがある範囲では、Poas 火山は 2008 年 1 月と 2009 年 9 月にも VEI=1 の噴火をした。これらの噴火についても、それぞれを挟んだ期間のデータを用いて InSAR 解析を行った (Figure3-2)。その結果、噴火に伴うシグナルは認められなかった。そのため、Figure3-1 にも噴火に伴うシグナルは無いと考え、断層モデリングの際に地震時地殻変動データとして用いた。

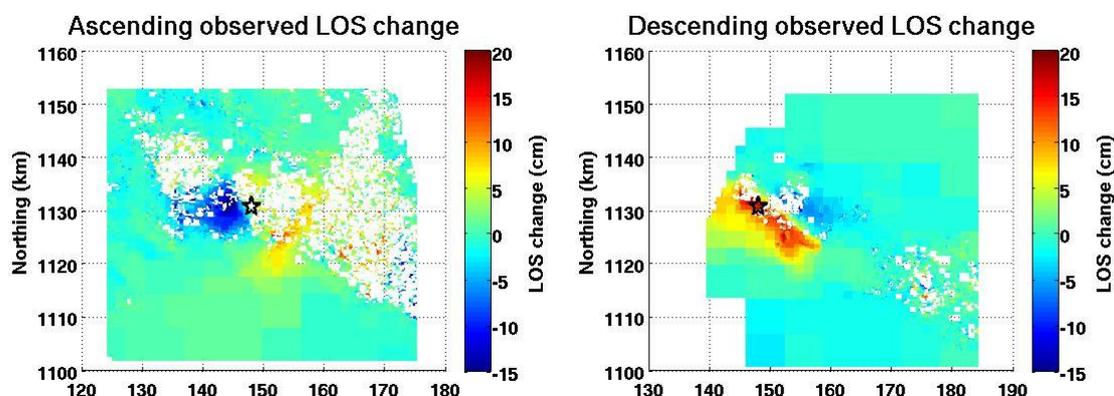


Figure 3-1 地震を挟むペアで観測された LOS 変位を示す。左：Ascending 軌道のデータ。右：Descending 軌道のデータ。縦軸，横軸はともに UTM 座標 (zone 17P) で，単位は km である。LOS の単位ベクトルは Ascending で  $U = 0.6142*U_x + 0.1224*U_y - 0.7796*U_z$ ，Descending で  $U = -0.6139*U_x + 0.1224*U_y - 0.7798*U_z$  である。

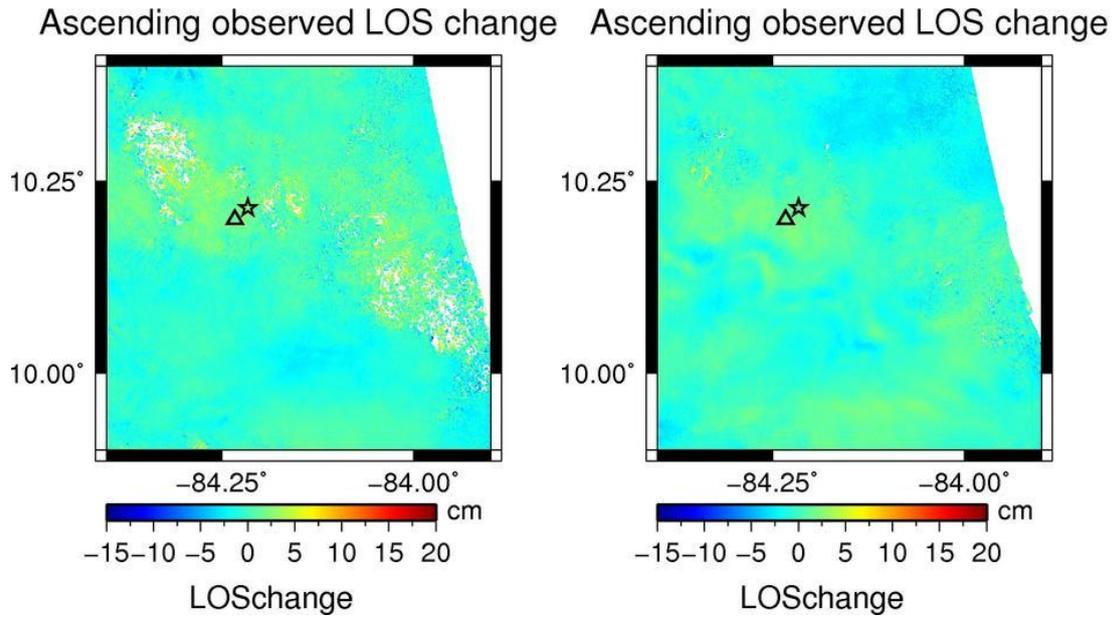


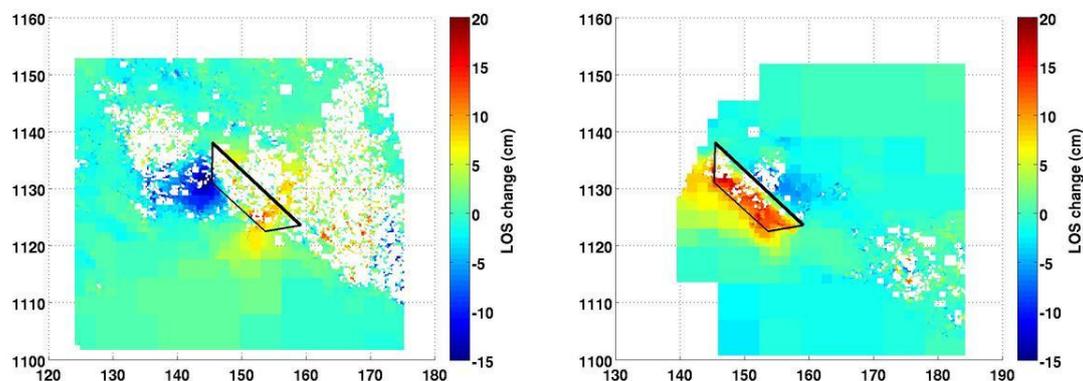
Figure 3-2 噴火を挟むペアで観測された LOS 変位を示す. どちらも Ascending 軌道で得られたデータ. 左: 2008 年 1 月の噴火 (VEI=1) を含む. 右: 2009 年 11 月に始まった噴火 (VEI=1) を含む. 黒三角は Poas 火山の位置を示している. 黒星は, これらの撮像期間に含まれないが, 目印として Cinchona 地震の震央を示している. カラースケールと表示範囲は Figure 3-1 の左図と同じである.

### 3.2 断層モデリング

本地震に対して、メカニズム解と震源位置から震源断層を推定し、InSAR で得られた地震時地殻変動の観測値を説明するような断層モデルを作成した。地殻変動データを観測値、Meade (2007)にある半無限弾性体を仮定した三角形要素のすべりによる変位の解析解をグリーン関数として用いて、インバージョンで断層のすべり量を求めた。断層面のジオメトリは trial-and-error で決定した。また、断層面の三角形要素への分割には Gmsh (Geuzaine and Remacle, 2009)を用いた。インバージョンの際に拘束条件として断層すべりは右横ずれ成分と正断層成分のみである仮定した。さらに、地殻変動の観測値に明瞭な変位の不連続は認められなかったため、断層面の端に面している三角形要素のすべり量は 0 になる条件も加えた。現実的なすべり分布を得るために、すべり分布を滑らかにする演算子を用いた。

Figure 3-3 と Figure 3-4 に断層モデリングの結果を示した。インバージョンで得られたすべり量から LOS 変位に戻した計算値を観測値から引いた残差をみると、一部で取れ残りがあがるものの全体としては観測値をうまく説明できている (Figure 3-3)。断層すべりは右横ずれ成分が卓越しており (Figure 3-4)、断層面の走向方向と合わせて CMT 解とよく一致した。さらに断層面の地表側は Montero et al. (2013)にある Angel 断層の北西部に一致した。すべり量が最大となる深さは約 5km であった。これは USGS が決定した本震の震源深さ 4.5km に近い値であった。

剛性率を 32GPa としてすべり量からモーメントマグニチュードを計算すると 6.216 となり、USGS が公表した本震のマグニチュード Mw6.1 よりも大きな値を示した。これは本震から 5 日間で 12 回発生した M4 以上の余震も観測期間に含んでいるので、それらを捉えたと考えた。



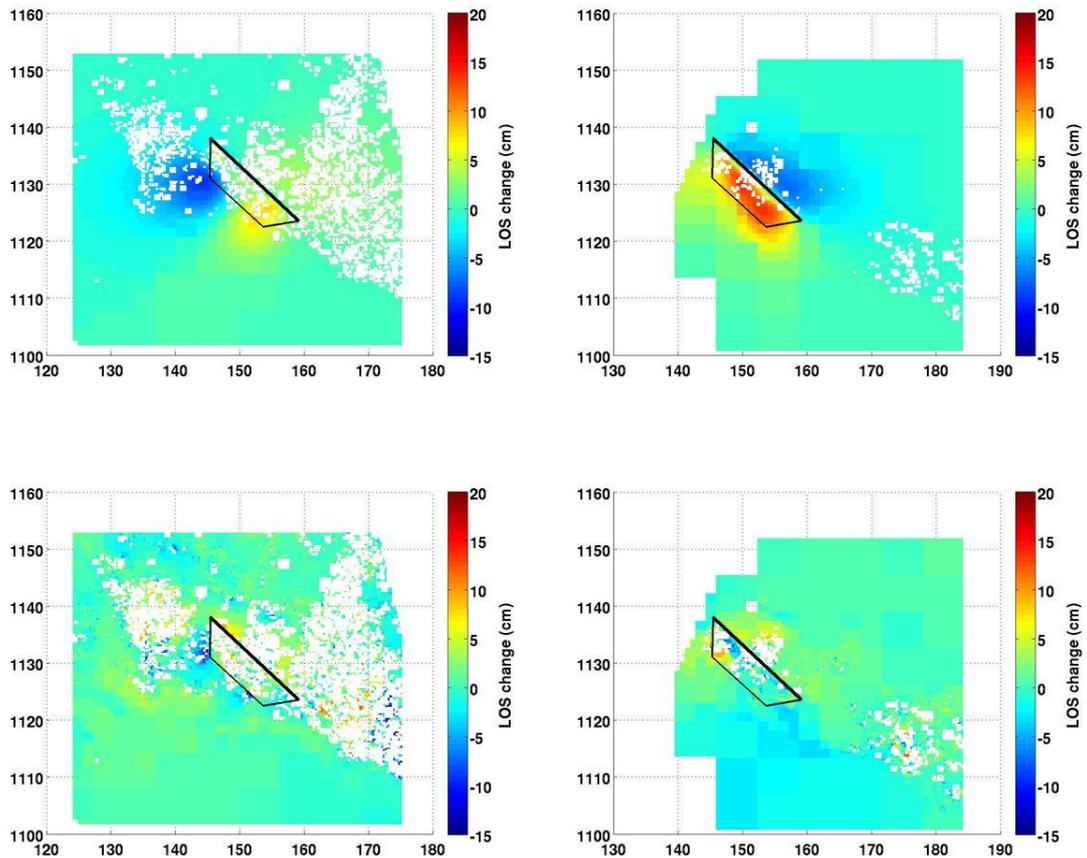


Figure 3-3 断層モデリングの結果得られた地表変位を示す. 左列 : Ascending 軌道. 右列 : Descending 軌道. どちらの列も上段が観測値, 中段がすべり量 (Figure 3-4)から計算された LOS 変位, 下段が観測値から計算値を引いた残差を示す. 黒枠は決定した断層面の地表投影で, 太い線は断層面の上端を示す.

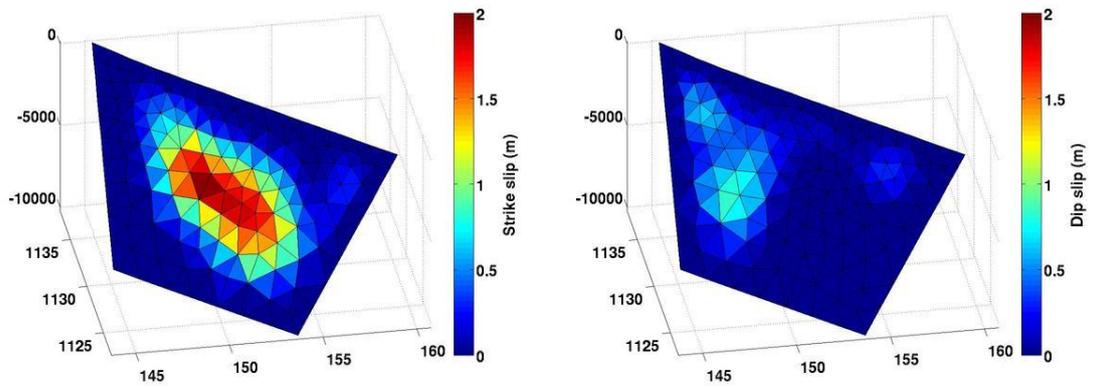


Figure 3-4 断層モデリングの結果得られた断層面でのすべり量とすべり分布を示す.

左：右横ずれ成分，右：正断層成分．縦軸は地表から鉛直上向きを正にした (m)で，深さを表す．全ての軸のグリッドは 5km 間隔である．

### 3.3 地震は水蒸気爆発を誘発したか

地震と火山の関係はまだよくわかっていないことが多いが，小山 (2002)や Eggert and Walter (2009)ではこれまでされてきた研究の一部をリストアップしている．これらの研究の中には噴火もしくは火山活動によって周辺の浅い地震を誘発する (e.g., Nishimura et al., 2001)，または逆に，地震が火山活動の変化を促した可能性を示唆する研究も数は少ないものがある (e.g., Walter et al., 2007)．他にも Takada and Fukushima (2013) は 2011 年東北地方太平洋沖地震によって 5 火山で沈降が引き起こされたことを示した．

地震と火山活動が連動するメカニズムは小山 (2002)にまとめられている．それによれば，火山活動の活発化による static な歪変化が断層変位を促進する方向に働き断層破壊に至るモデル，断層変位による static な歪変化がマグマ溜まりを膨張させてマグマの発泡を促すモデル，同じく断層変位による static な歪変化がマグマ溜まりを圧縮してマグマを絞り出すモデル，断層破壊で生じた強震動による dynamic な歪変化がマグマの発泡を誘発するモデルなど様々あり，いずれのモデルも地震か火山どちらか一方の活動によってもう片方の沈静化が起こる場合もある．ここでは断層運動が火山活動に影響を与えたとする Walter et al. (2007), Nostro et al. (1998)と比較をして，Cinchora 地震の断層運動が Poas 火山の噴火を誘発する動きかどうかを議論する．

Walter et al. (2007) はインドネシアの Merapi 火山の火山活動の変化と 2 つの地震 (2001 年と 2006 年に発生したどちらも Mw6.3 の地震) との関連を調べた．彼らは，火山の直下へ伝わった地震波による dynamic な圧力変化と震動は，Merapi 火山においては火山活動の活発化をトリガーしうる，とまとめている．地震モデルから求められた dynamic な圧力変化は 2001 年の地震では約 10kPa, 2006 年では約 60kPa の peak-to-peak value で，どちらも約 20 秒間続いた (Figure 3-5)．一方 static な圧力変化は 2001 年では+0.3kPa, 2006 年で-3kPa であり (Figure 3-5)，それぞれの dynamic な圧力変化よりも明らかに小さい上に，2001 年と 2006 年で正負が違うことから，トリガーの原因にはならなかっただろうとしている．

Nostro et al. (1998)は，イタリアの Vesuvius 火山と Apennine 山脈で発生した地震との相互作用について論じている．それによれば，噴火によるマグマ溜まりの収縮が 0.01-0.1MPa のクーロン応力変化を断層面に生じ，また断層変位は 0.01-0.1MPa の応力変化を球状のマグマ溜まりもしくは北西走向のダイクに与え，北東走向のダイクには貫入を促進し，噴火を誘発したとしている．

Stress change at Mt. Merapi due to the 2001 and 2006 earthquakes

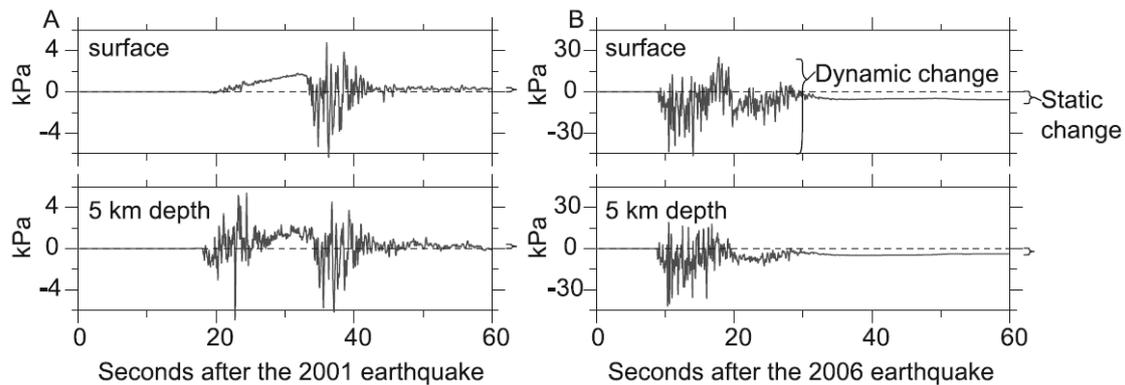
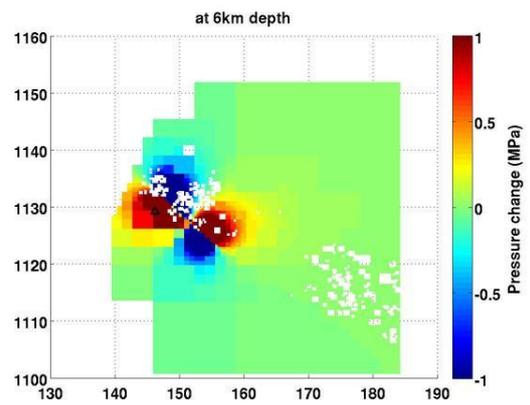
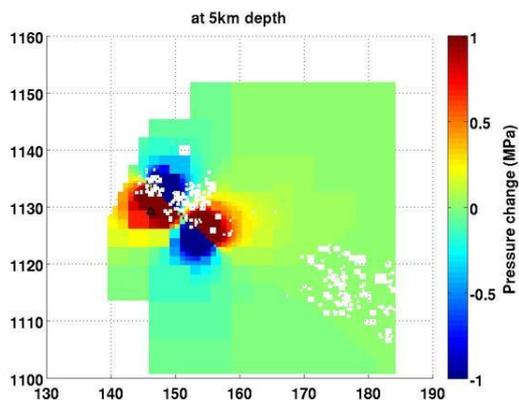
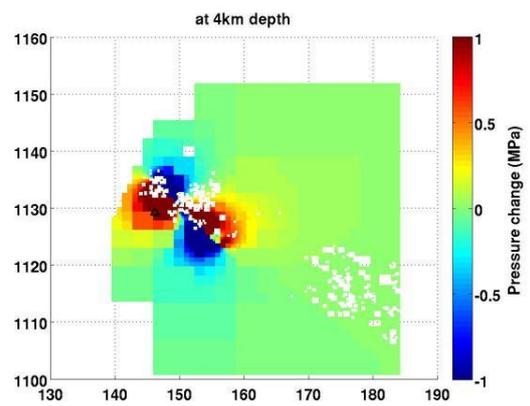
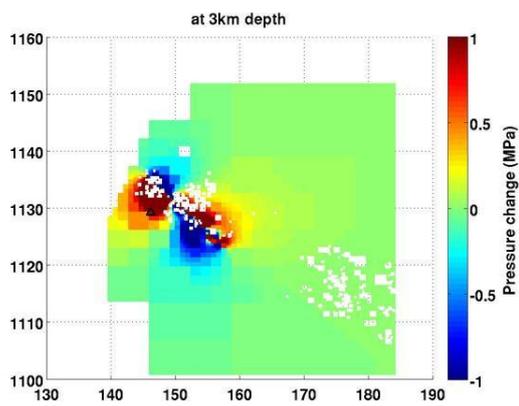
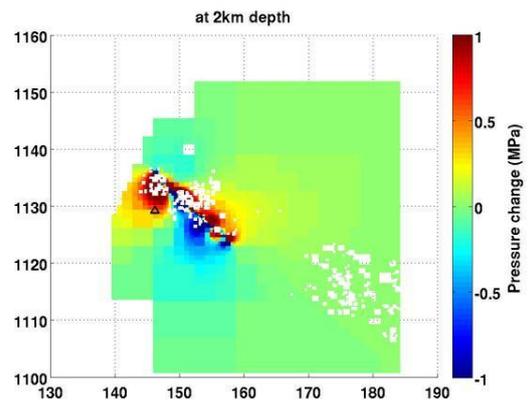
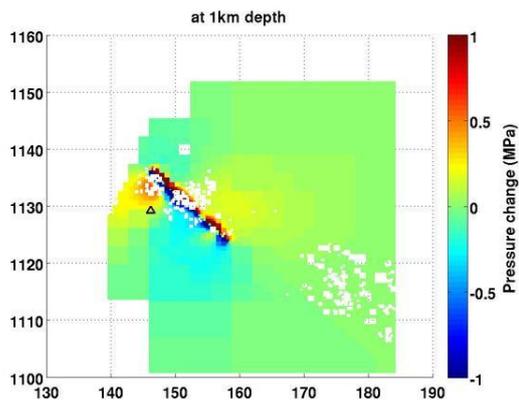


Figure 3-5 Walter et al. (2007)で計算された Merapi 火山での圧力変化を示す. 左：2001年の地震. 右：2006年の地震. 上段：地表での値. 下段：深さ 5km での値. 震源はどちらも Merapi 火山から水平距離で 50km, 深さは 2001年の地震が約 130km, 2006年が 30km 以浅である.

本研究では、断層モデリングで得られたすべり量から Meade (2007)にある解析解を利用してひずみを計算し、ひずみテンソルの対角成分の和を取ることで体積変化率を求めた. また、Walter et al. (2007)と比較するために体積変化率に体積弾性率を掛けて、static な圧力変化を求めた (Figure 3-6). なお、剛性率は 32GPa, ポアソン比は 0.25 とした.

Figure 3-6 から、Poas 火山の直下での断層運動による static な圧力変化は 1km から 10km の深さで常に正 (圧縮)で、深さ 3km から 7km では 1MPa を超えた. この値は Walter et al. (2007)で求められた 2006年イベントでの dynamic な圧力変化 60kPa や、Nostro et al. (1998)で得られた地震-火山噴火の相互作用にかかった 0.01-0.1MPa よりも著しく大きい. 火山地下で火道もしくはマグマ溜まりの外からマグマに力がかかると、マグマが絞り出されるように上昇することが考えられる (中村, 1971; 大倉・安藤, 1994). Poas 火山は地表近くまでマグマが達していると考えられているため、地下での圧力増加によって、地表近くにあったマグマの貫入が進行して水蒸気爆発に至ったと考えることができる. Cinchona 地震の震源断層が Poas 火山から数 km に位置していたことから、地震動による dynamic な圧力変化も大きかったことが予想される. しかし本研究では dynamic なデータを扱っていないため考慮できなかった.



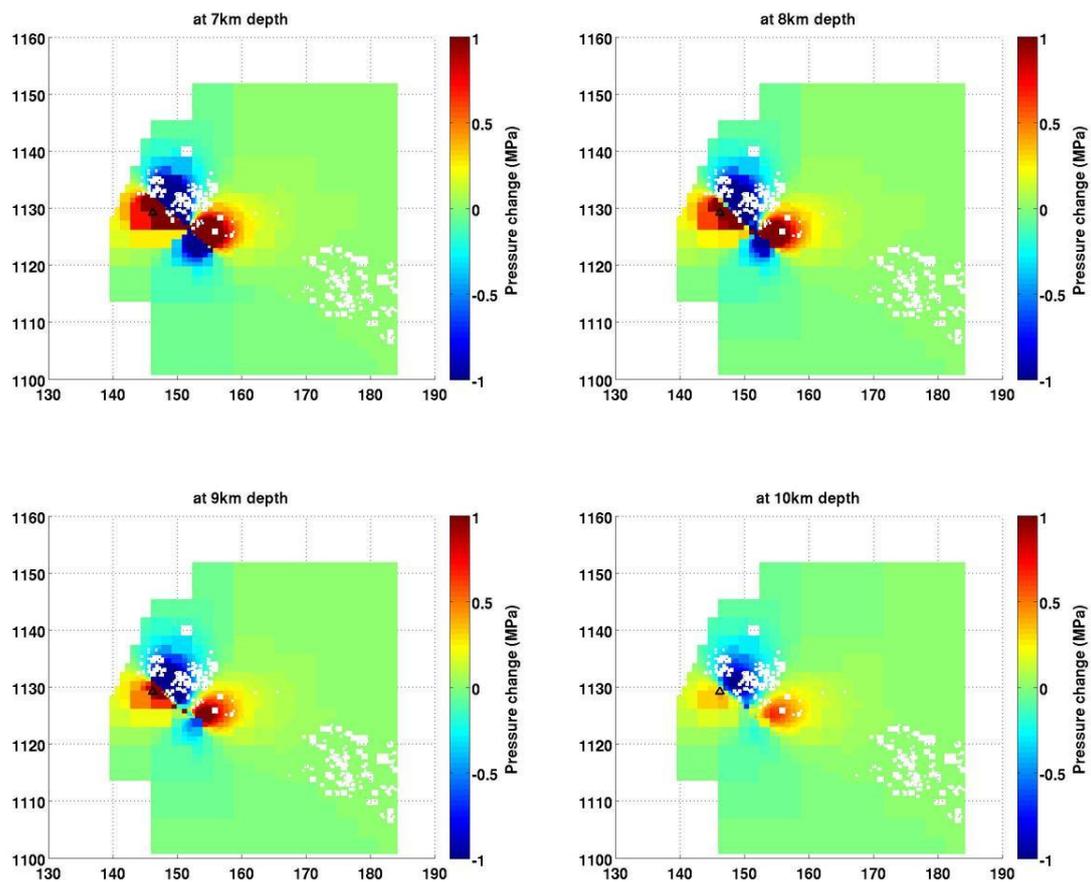


Figure 3-6 断層モデルのすべり量から計算した static な圧力変化を示す. 深さは 1km から 10km まで 1km 毎に表示した. 正の値は圧縮を表す. 黒三角は Poas 火山の位置を示す.

### 3.4 Landslide シグナル

InSAR 解析で地震時地殻変動を捉えたデータペアと同じデータを使用して Pixel offset 解析を行ったところ, 地震時地殻変動よりも狭い範囲で大きな offset があることがわかった(Figure 3-3). 特に衛星視線方向に感度を持つ Range offset では, Ascending・Descending 共に衛星から遠ざかる方向への offset が認められた. この Range offset で+1.5m 以上の値を示す領域は Castillo et al. (2013) にある landslide の発生域とよく一致する (Figure 1-4). そのため, Cinchona 地震によって引き起こされた landslide を捉えたものだと考えられる. 衛星進行方向に感度を持つ Azimuth offset は, Ascending でノイズが大きかったものの, Descending は Range offset で大きな正の値が見られた領域において正負どちらも 2m 以上の offset があつた. しかし, ここではシグナルの傾向を読み取ることはできなかった.

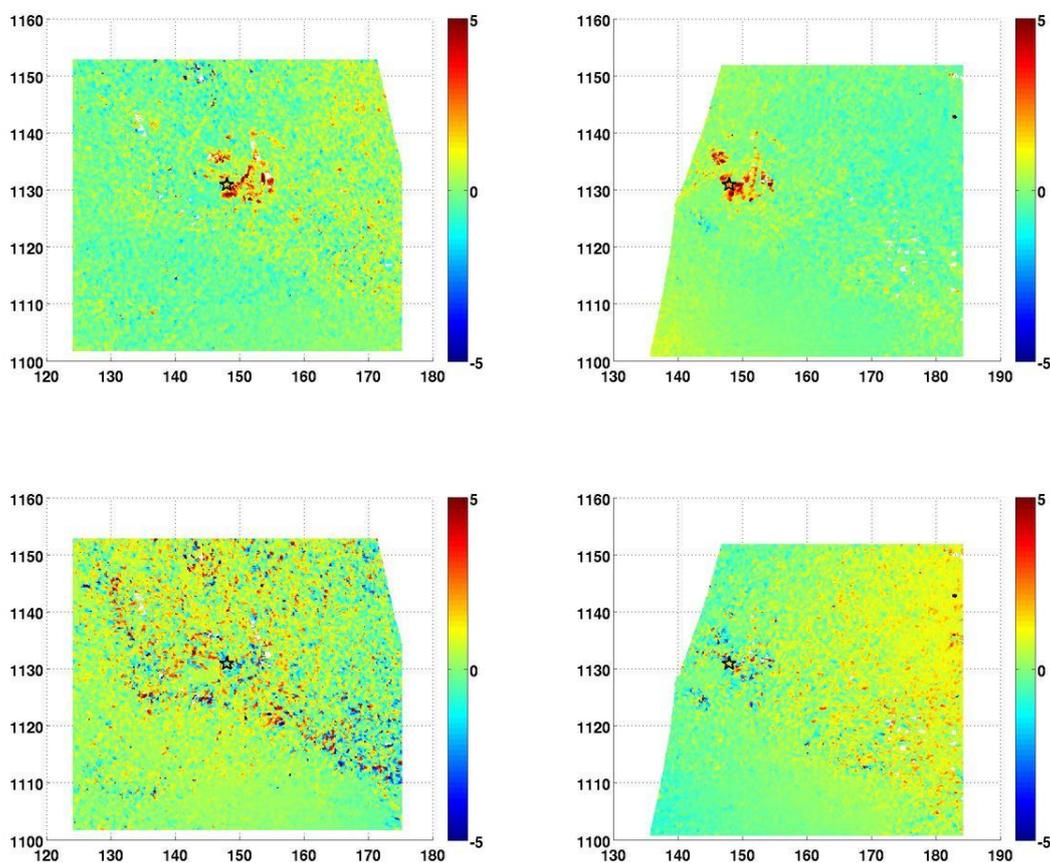


Figure 3-7 Pixel offset の結果. 左列は Ascending, 右列は Descending, 上段は Range offset, 下段は Azimuth offset. カラーバーは-5m から+5m. 感度方向は, Range offset は InSAR の感度方向と同じ衛星視線方向で, Ascending で  $U = 0.6142*U_x + 0.1224*U_y - 0.7796*U_z$ , Descending で  $U = -0.6139*U_x + 0.1224*U_y - 0.7798*U_z$ , Azimuth offset は

衛星進行方向で、Ascending は  $U = -0.1954*U_x + 0.9807U_y$ , Descending は  $U = -0.1955*U_x - 0.9807*U_y$ .

Landslide シグナルのデータは異なる 4 方向に感度を持つため、最小二乗法で 3 次元 offset を求めた (Figure 3-8). 計算範囲は震源周辺の 20km 四方とした. また, 大きな変位を持つ領域のみを計算するため, Ascending もしくは Descending の Range offset の絶対値が 1.5m 以上のピクセルを残すようにマスクをかけた.

Z 成分は全て下向きの動きを示していた. X 方向は, 特に南北に走る谷筋で顕著だが, 西を向いている斜面では東への offset (正の値), 逆に東傾斜の斜面では西への offset (負の値) を示すことが確認できた. Y 方向に関しては, 東西に長く延びる尾根や谷が震源周辺に少なかったためか, 傾向は読み取れなかった. これから, Pixel offset で得られた landslide のシグナルは, landslide の前と後での地形の差を検出したものと推察できる.

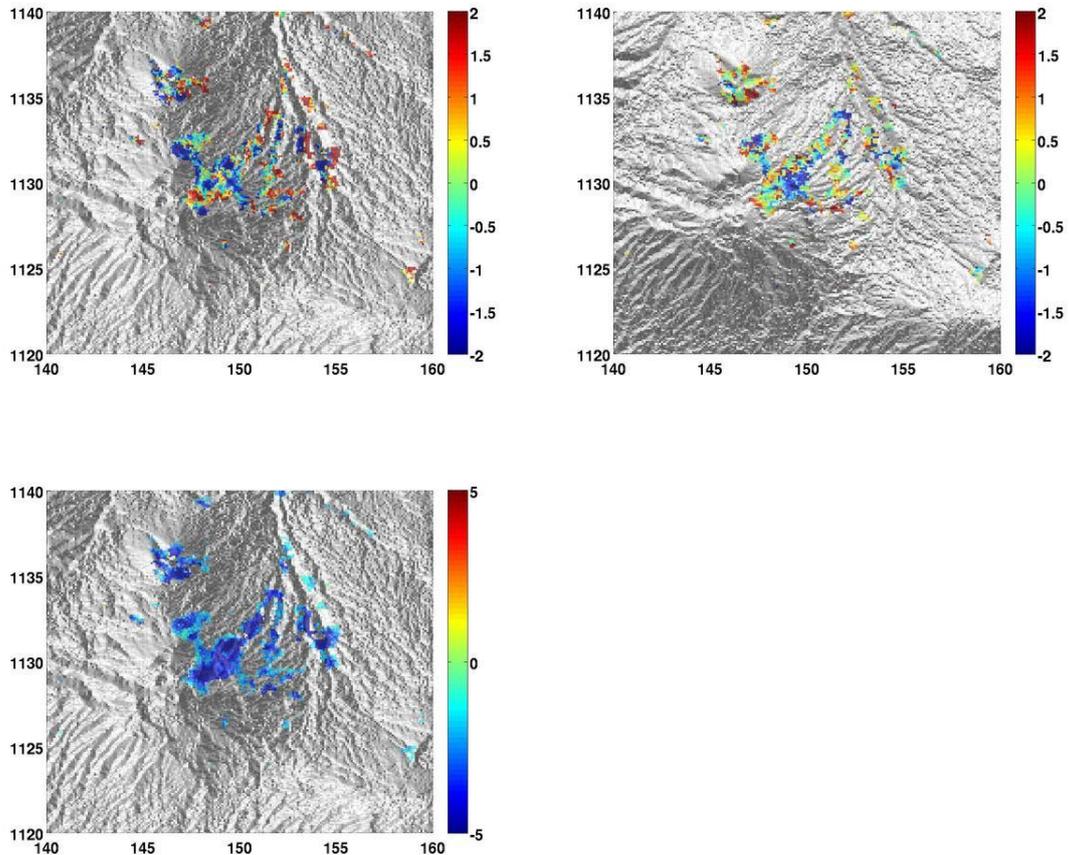


Figure 3-8 Landslide シグナルの 3 次元変位を示す. 上段左 : X 成分の offset で, +は東へ

の移動を意味する。上段右：Y成分で、+は北への移動を示す。下段：Z成分で、+は上向きの移動を示す。X、Z成分の図には西から、Y成分の図には北から光を当てたときの地形の陰影を背景に表示している。

地震に伴う水平方向の最大加速度 (Peak Ground Acceleration)を計算し、landslide 発生の要因を探った。水平最大加速度は、司・翠川 (1999)の距離減衰式に従って求めた。震源の深さとモーメントマグニチュードには USGS が示した値を用い、震源断層までの距離には断層モデリングで得られた断層面までの距離を代入した。

Landslide のシグナルは計算された PGA が 450gal 以上の領域 (Figure 3-9)に収まっていた。450gal 以上は改正メルカリ震度階でおおよそⅧに相当する。しかしながら、PGA が 450gal 以上の領域の広がりに対して、landslide のシグナルが見られる範囲は狭い (Figure 3-7)。PGA が大きい領域の内、Castillo et al. (2013)が指摘するように、急峻な地形で発生していることが見てとれる (Figure 3-10)。

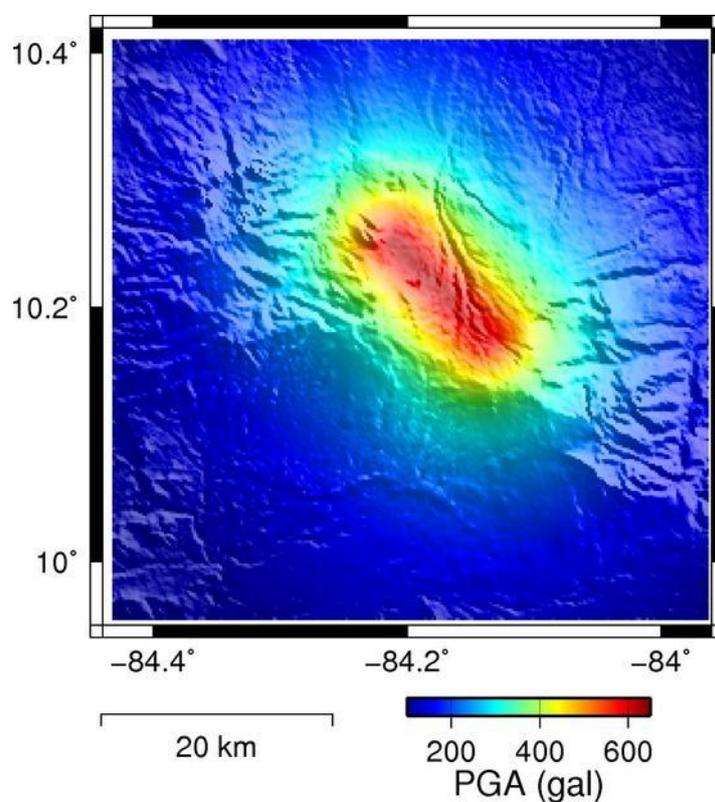


Figure 3-9 PGA の計算値を示す (司・翠川, 1999 の式を用いた)。背景には比較のため地形による陰影をつけている。

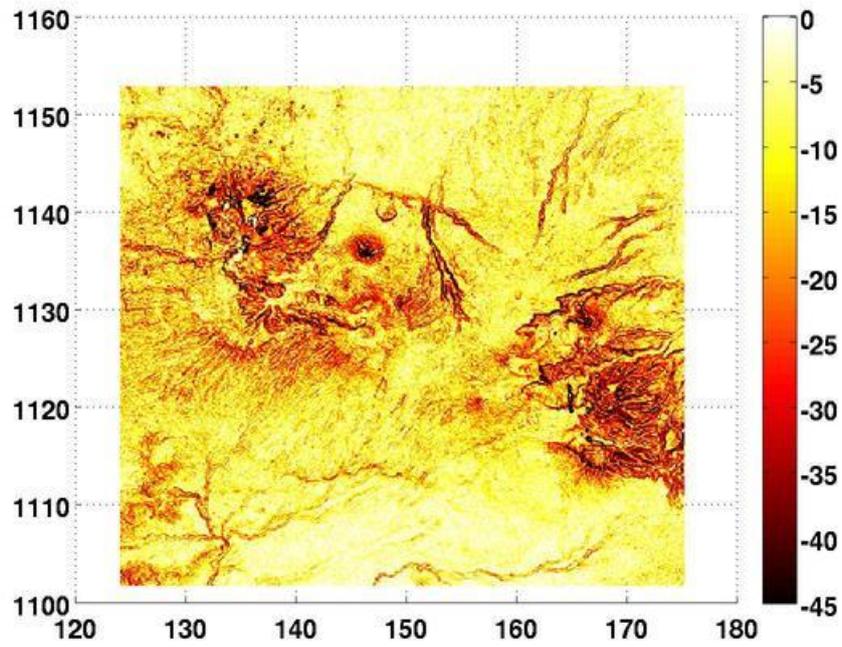


Figure 3-10 DEM から計算された斜面の傾斜角 (degree)を示す. 赤色が濃いほど急傾斜となる. 表示範囲は Figure 3-9 と等しい.

## 4. まとめ

本研究では ALOS/PALSAR のデータを用いて、中米コスタリカで発生した Mw6.1 の Cinchona 地震とそれに伴い、または続いて発生した自然現象にアプローチした。まず InSAR 解析で地震時地殻変動を検出し、観測値を説明する断層モデルを作成した。その結果、Cinchona 地震は Montero et al. (2013)にある Angel 断層の北西部で発生したことを測地学的に明らかにした。また、断層運動は Poas 火山の地下 3km から 7km にかけて 1MPa 以上の大きな static な圧力変化をもたらした。これが Cinchona 地震の 4 日後に発生した噴火を誘発したと、考えることもできる。

Pixel offset 法を、Cinchona 地震を挟むペアに適用したところ、Range offset から地震時地殻変動よりも狭い領域で 2m 以上の変位を検出した。この領域は Castillo et al. (2013)が示した Cinchona 地震によって引き起こされた landslide の発生域とよく一致した。2 軌道の Pixel offset から異なる 4 方向の感度を持つデータが得られたので 3 次元変位に変換したところ、斜面が面している方向と逆向きのトレンドが求まった。そのため、Pixel offset では landslide による地形の変化を変位として捉えたと考えられる。また、Cinchona 地震による水平最大加速度を司・翠川 (1999)の式に従って求めた。その結果 landslide は水平最大加速度が大きい領域の中でも、急傾斜の地形でのみ発生していたことが読み取れた。

## 5. 謝辞

本研究を行うにあたり、宇宙測地学研究室をはじめ、固体系ゼミの皆様から多くのご指導ご鞭撻を賜りました。指導教員の古屋正人教授には、SAR のことを何も知らなかった私にもわかるように解析・研究方法を教えていただきました。また学会発表へも多く参加させていただき、大変勉強になりました。2 年間という短い間でしたが、本当にありがとうございました。

宇宙測地学研究室の皆様と過ごした時間は忘れがたいものになりました。解析方法や作図の議論、雑談などに付き合っていたいただいた先輩、同級、後輩の皆様、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、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あります。PALSAR データの所有権は経済産業省および JAXA にあります。また、ASTER GDEM データは経済産業省および NASA が作成したものであり、これらに帰属します。記して感謝申し上げます。

## 6. 参考文献

- Abe, T., M. Furuya, and Y. Takada (2013), Nonplanar Fault Source Modeling of the 2008 Mw 6.9 Iwate–Miyagi Inland Earthquake in Northeast Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 1, 507–518, doi 10.1785/0120120133.
- Castillo, G. B., C. J. Campos, and M. J. O. García (2013) DESLIZAMIENTOS PROVOCADOS POR EL TERREMOTO DE CINCHONA DE 2009, COSTA RICA, *Revista Geográfica de América Central*, N. 51, 89–100.
- DeMets, C. (2001), A new estimate for present-day Cocos-Caribbean plate motion: Implications for slip along the Central American volcanic arc, *Geophysical Research Letters*, Vol. 28, No. 21, 4043-4046.
- Eggert, S., and T. R. Walter (2009), Volcanic activity before and after large tectonic earthquakes: Observations and statistical significance, *Tectonophysics*, 471, 14-26.
- Fournier, N., H. Rymer, G. Williams-Jones, and J. Brenes (2004), High-resolution gravity survey: Investigation of subsurface structures at Poás volcano, Costa Rica, *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L15602, doi:10.1029/2004GL020563.
- Global Volcanism Program (2009), Report on Poas (Costa Rica). In: Wunderman, R. (ed.), *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 34:1, Smithsonian Institution, doi : 10.5479/si.GVP.BGVN200901-345040.
- 小林知勝・飛田幹男・村上 亮 (2011), 局所的大変位を伴う地殻変動計測のためのピクセルオフセット解析, *測地学会誌*, 第 57 卷, 第 2 号, 71-81.
- 小山真人 (2002), 火山で生じる異常現象と近隣地域で起きる大地震の関連性—その事例とメカニズムにかんするレビュー—, *地学雑誌*, 111, 2, 222-232.
- Meade, B. J. (2007), Algorithms for the calculation of exact displacements, strains, and stresses for triangular dislocation elements in a uniform elastic half space, *Computers & Geosciences*, 33, 1064–1075.
- Montero, W., G. J. Soto, G. E. Alvarado, and W. Rojas (2010), DIVISIÓN DEL

DESLIZAMIENTO TECTÓNICO Y TRANSTENSIÓN EN EL MACIZO DEL VOLCÁN POÁS (COSTA RICA), BASADO EN ESTUDIOS NEOTECTÓNICOS Y DE SISMICIDAD HISTÓRICA, *Revista Geológica de América Central*, N. 43, 13-36.

Montero, W., J. C. Lewis, J. S. Marshall, S. Kruse, and P. Wetmore (2013), Neotectonic faulting and forearc sliver motion along the Atirro–Río Sucio fault system, Costa Rica, Central America, *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 125, No. 5-6, 857–876, doi: 10.1130/B30471.1.

中村一明 (1971), 地殻歪みの指示者としての火山, *火山*, 第 2 集, 16, 63-71.

Nishimura, T., S. Fujiwara, M. Murakami, M. Tobita, H. Nakagawa, T. Sagiya, and T. Tada (2001), The M6.1 Earthquake triggered by volcanic inflation of Iwate volcano, northern Japan, observed by satellite radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, Vol. 28, No. 4, 635-638.

Nostro, C., R. S. Stein, M. Cocco, M. E. Belardineli, and W. Marzocchi (1998), Two-way coupling between Vesuvius eruptions and southern Apennine earthquakes, Italy, by elastic stress transfer, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, 24487-24504.

大倉敬宏・安藤雅孝 (1994), 1991 年ピナツボ噴火は 1990 年フィリピン地震に引き起こされたか?, *地学雑誌*, 103, 464-470.

Protti, M., F. Gündel, K. McNally (1994), The geometry of the Wadati-Benioff zone under southern Central America and its tectonic significance: results from a high-resolution local seismographic network, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 84, 271-287.

Rotti, H., T. Nagler (2006), The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards, *Advances in Space Research*, 37, 710-719.

清水孝一・山越隆雄・小山内信智・福嶋 彩・三尾有年 (2005), 合成開口レーダの差分干渉処理技術による地すべり検知の可能性について, *地すべり*, 42, 312-317.

司 宏俊・翠川三郎 (1999), 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, *日本建築学会構造系論文集*, 第 523 号, 63-70.

Takada, Y., and Y. Fukushima (2013), Volcanic subsidence triggered by the 2011 Tohoku earthquake in Japan, *Nature Geoscience*, 6, 637-641.

Thorpe, R. S., C. A. Locke, G. C. Brown, P. W. Francis, and M. Randal (1981), Magma chamber below the Poás volcano, Costa Rica, *Journal of the Geological Society*, 138, 367-373.

Walter T. R., R. Wang, M. Zimmer, H. Grosser, B. Lühr, and A. Ratdomopurbo (2007), Volcanic activity influenced by tectonic earthquakes: Static and dynamic stress triggering at Mt. Merapi, *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L05304, doi:10.1029/2006GL028710.

USGS (2009), earthquake summary poster,

URL : [earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/poster/2009/20090108.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/poster/2009/20090108.php).