

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740305

研究課題名(和文) 巨大地震に伴う火山地帯の沈降メカニズム

研究課題名(英文) Volcanic subsidence caused by megathrust earthquakes

研究代表者

高田 陽一郎 (TAKADA, Youichiro)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：80466458

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：干渉合成開口レーダー(InSAR)解析を行い、5つの火山地域(秋田駒、栗駒、蔵王、吾妻、那須)に2011年東北地方太平洋沖地震に伴う局所的な沈降を検出した。これらの地域では地熱活動が活発であり、地下に高温で強度の低い深成岩体が存在すると思われる。この高温岩体が東北地震により変形した際に発生する地表変形を計算してInSAR解析と比較し、高温岩体の位置や形状を明らかにした。地震が引き起こす引張応力の主軸と直交する方向に高温岩体が伸びている場合に大きな沈降が引き起こされ易い。GPSデータは沈降が1日以内に完了したことを示すため、地下水の移動は沈降の直接的原因とは考えにくい。

研究成果の概要(英文)：I have detected that five volcanic regions (Akitakoma, Kurikoma, Zao, Azuma, and Nasu) subsided in response to the crustal deformation associated with the 2011 Tohoku earthquake (Mw 9.0). A common feature of five subsided volcanoes is their high geothermal activity, which indicates the existence of hot and weak plutonic body beneath there. I have calculated the surface deformation above the weak material caused by coseismic stress change. The synthetic surface deformation obtained from optimal shape and location of the weak material well explains the InSAR data. The surface subsidence gets larger when the weak body is elongated in the direction perpendicular to the extensional principal axis of coseismic stress change. GPS data indicate that the subsidence has completed in one day after the main shock at most. Therefore, the ground water movement is unlikely to directly cause the volcanic subsidence.

研究分野：地形形成論

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：巨大地震 合成開口レーダー解析 カルデラ 数値シミュレーション 火山

1. 研究開始当初の背景

日本の人工衛星「だいち」(以下 ALOS)は 2006 年 1 月以降、大量の合成開口レーダー(SAR)画像を撮像し続けて来た。異なる時刻に撮像された SAR 画像同士の差分を取ることで衛星から地表までの距離変化を観測する干渉 SAR(InSAR)は、面的に地表変位を観測できる強力な手法である。InSAR によって検出された極めて空間解像度の高いデータは、特に高熱流量地帯において、埋没カルデラの分布と地殻変動パターンに相関があることを明らかにしつつあった。この相関は、東北地方の鬼首カルデラ周辺において 1996 年に発生した群発地震や 2008 年岩手宮城内陸地震において特に明瞭である。このように火山地帯の構造と地震性地殻変動が相関を持つことは火山性島弧固有の現象であり、これまで大陸衝突帯で蓄積されてきた大陸性地殻の変形過程の理解に新たな側面を加える現象である。

このような状況において、2011 年 3 月 11 日に東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)が発生し、東日本全体に大きな地殻変動を引き起こした。広大な火山地帯でどのような地殻変動が引き起こされているかを詳細に知るためには、地上機器の設置が不要な InSAR 解析が極めて有効であった。ALOS が撮像した SAR 画像を用いて東日本の予察的な InSAR 解析を行った所、幾つかの火山地帯で局所的な沈降が発見された。しかし、沈降していない火山も多くあり、この沈降が引き起こされたメカニズムは明らかになっていなかった。

2. 研究の目的

2011 年東北地方太平洋沖地震(以下、東北地震)によって引き起こされた火山の沈降現象を詳細に調べる。次に、この沈降メカニズムを解明するべく、東北地震に伴う応力変化が地殻内の不均質構造に与える影響を数値的に調べ、数値計算の結果と InSAR で検出された地表沈降を比較し、これを良く説明するようにモデルパラメータを絞り込む。その結果をもとに、沈降が誘発された火山とされなかった火山の違いを物理的に解明することを目的とする。

3. 研究の方法

まず、東北地震に伴う地表変位場を InSAR 解析から求める。InSAR 解析には GAMMA ソフトウェア(Wegmüller and Werner, 1997)を用いる。得られた干渉画像から局所的な変位のみを取り出すために、位相データを離散的にサンプリングし、それらを空間の二次多項式としてモデル化する。これを元の画像から差し引くことで、変位場の長波長トレンドを除去する。

このように得た短波長擾乱と地質学的な情報を徹底的に照らし合わせる。特に重要な火山学的な情報として、地熱活動に関する観測、および過去の埋没カルデラの分布と沈

降域を良く比較する。最終的には、沈降が引き起こされた火山と、引き起こされなかった火山の違いを明らかにする。

次に、沈降領域の下に高温で強度の低い物体が存在することを仮定し、これが地震に伴う応力変化によって周辺にどのような変形を及ぼすのかを計算し、その結果が InSAR 解析の結果をより良く復元するように強度が低い領域の形状と位置を推定する。計算方法には複合境界要素法(Cayol and Cornet, 1997)を用いる。低強度領域の形状を三軸不等楕円体で近似し、中心の位置(深さは上端)、三軸それぞれの長さ、長軸の方位等を未知数として、マルコフ連鎖モンテカルロ法に基づくベイジアンバージョン(Fukuda and Johnson, 2008)を行う。また、この計算では低強度領域の内部は液相で満たされていると仮定し、境界面上での接線応力はゼロという境界条件を課す。地震に伴う応力変化は GPS データを良く説明する断層モデル(Nishimura et al., 2011)を用いて計算した。

低強度領域の物性を理解するために、沈降領域内に存在する GPS 観測点のデータを用いて、どの程度の時間をかけて沈降したのか解析する。

最後に、低強度領域の内部が液相ではなく、強度の低い弾性体であると仮定して、有限要素法を用いて地表沈降を計算する。低強度領域の位置と形状は、上述したインバージョン解析で求めた最尤モデルを用いる。この有限要素法解析では、観測値と計算値を合わせることよりも、低強度領域がどのような位置および形状をとると沈降量が大きくなるかを理解し、沈降が引き起こされた火山と引き起こされなかった火山の違いを、定量的に理解することを目指す。

4. 研究成果

東北地震による地殻変動から長波長トレンドを除去した InSAR 画像を図 1 に示す。この結果から、沈降した火山は北から秋田駒、栗駒、蔵王、吾妻、那須の 5 カ所であることが分かる。沈降量は吾妻で最大(約 15cm)、那須で最小(約 5cm)であった。これらはいずれも火山フロントに属する活火山である。つまり、背弧側に存在する火山は沈降しなかったことが明らかになった。

沈降した火山は、いずれも地熱活動が極めて活発であることが明らかになった。図 2 に示す通り、沈降した火山は地温勾配が高い地域と一致し、さらに泉温が高い地域とも良く一致することが分かった。また図 2 から、沈降した火山地帯ではカルデラがクラスタリングしている様子が分かる。特に栗駒山周辺では、カルデラの分布と沈降域の形状が良い一致を見せる(図 3)。この図から、沈降の中心域に近づくに従って熱流量が高くなることも明らかになった。カルデラの地下には、それと同等の大きさの花崗岩体が存在すると考えられており、秋田駒近傍の葛根地域

では 3.7km という浅部で 500 に達する極めて若い花崗岩が掘削されている (Doi et al., 1998)。以上より、火山の沈降原因は、この高温の深成岩体が地震時の伸張応力の増加によって変形し、それによって局所的な地表沈降が引き起こされたためと考えられる。

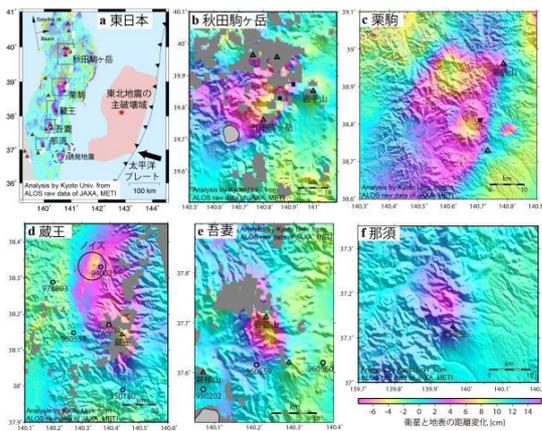


図 1. InSAR 解析で得られた東北地震に伴う火山地帯の局所的な沈降。長波長トレンドは除去してある。

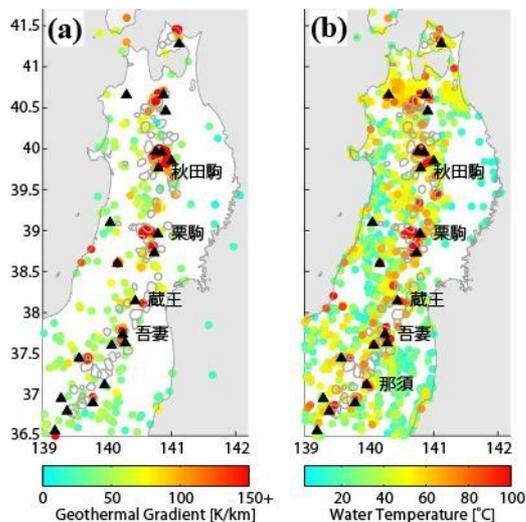


図 2. 沈降した 5 火山と (a) 地温勾配、(b) 泉温分布の比較。黒三角は活火山。灰色の枠はカルデラ。

次に、吾妻と蔵王の沈降域内に GEONET 点があるので、GPS データと InSAR 解析を比較したところ、双方の沈降量は整合的であった。また、GPS データの時系列を用いて沈降の時間スケールを調べた結果、沈降は長くととも 1 日以内に完了していることが明らかになった (図 4)。このことから、沈降の原因は主に弾性応答であり、地下水の移動によるもの (Pritchard et al., 2013) である可能性は極めて低いことが明らかになった。

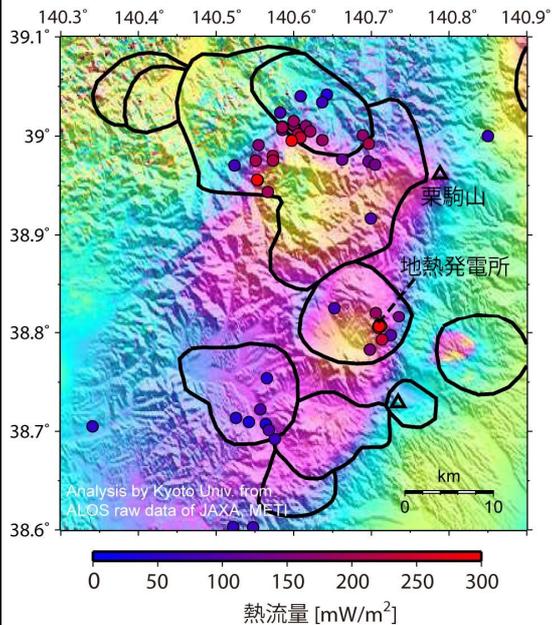


図 3. 栗駒山周辺の InSAR 画像拡大図。黒枠はカルデラリム。丸は熱流量。

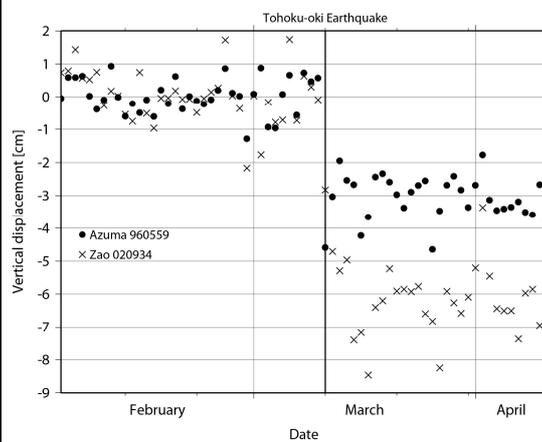


図 4. 吾妻と蔵王の沈降域内にある GPS 点の局所的な上下変位。

秋田駒・吾妻・那須について、InSAR 解析を説明するような高温岩体の位置と形状を推定することに成功した。吾妻山の例を図 5 に示す。沈降域が非常に広く、かつ沈降量も大きいので、推定された高温岩体は浅く (上端深度は 5km 以浅)、大きい。例えば吾妻の場合、長軸半径は 11.7km と推定された。

次に、弾性体中に三軸不等楕円体の不均質物を埋め込み、楕円体内部を液相ではなく、ヤング率の低い弾性体として有限要素法解析を行った。楕円体内部のヤング率を 1GPa、周囲を 20GPa とし、ポアソン比は一様 (0.25) とした。媒質全体に 0.26 MPa の引張応力を楕円体の長軸方向と直交するように加えて、変形を計算した。計算設定を図 6 に示す。

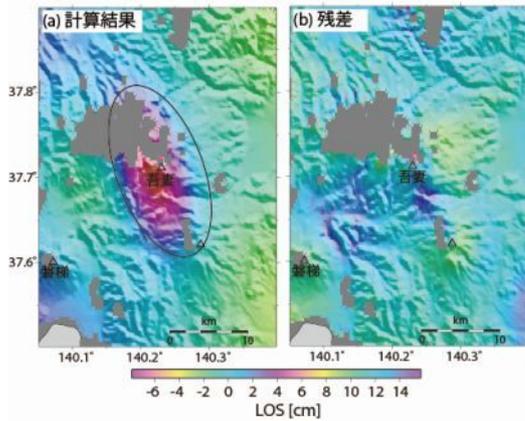


図 5. 吾妻の最尤モデルから計算した InSAR 画像 (a) と観測量との残差 (b)。

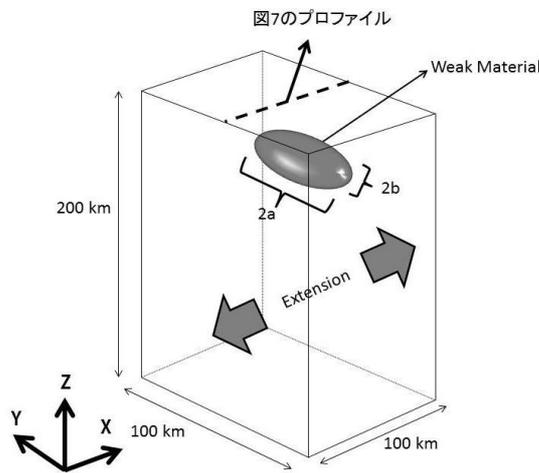


図 6. 有限要素法の計算設定。

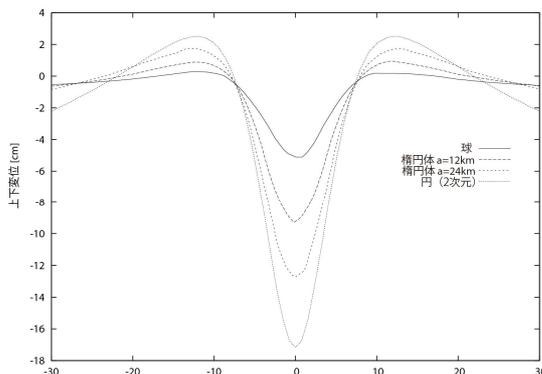


図 7. 楕円体直上の上下変位。測線は図 6 を参照。楕円体の長軸半径が異なる 4 つのケースを示した。上下変位量は周囲に対する相対的な値。

楕円体の長軸半径を、他の二軸と等しい場合 (球) から無限大まで様々な値に設定して計算を行った。12km の場合が吾妻の事例に該当する。無限大の場合には断面が円の二次元問題になる。それぞれの場合の地表沈降プロファイルを図 7 に示す。この図から、長軸が長いほど沈降量大きいことが分かる。一方、無限に長い場合でも沈降量は 18 cm 程度であり、これが上限値である。また、楕円体の伸びる方向と引張応力の方向が平行する場合には沈降量は著しく小さくなる。このことはインバージョン結果から長軸の方向が引張応力と直交する場合が最尤モデルとして得られることと調和的である。以上から、大きな沈降を引き起こすためには高温岩体が引張応力と直交する方向に長い必要がある。まとめると、火山に大きな沈降を引き起こされる条件は、(1) 地下浅部に高温で強度の低い深成岩体が存在すること、(2) 高温岩体が地震に伴う引張応力と直交する方向に伸びていること、という結論を得た。

2010 年にチリで発生したマウレ地震 (Mw 8.8) においても、火山地域で局所的な沈降が発生したことが Pritchard et al. (2013) によって報告された。沈降域の大きさや形状も東北地震の場合と酷似している。このことは、巨大逆断層地震に伴う火山の沈降が普遍的な現象である可能性を示す。しかし、Pritchard et al. (2013) はチリの沈降原因は火山地域の地下から大量に脱水したことにあるとしており、本研究の結論と異なる。本研究では GPS 時系列から脱水の可能性が低いことを示したが、地震時の河川流量変化を測定することも重要であろうと思われる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

1. Youichiro Takada and Yo Fukushima, Volcanic subsidence triggered by megathrust earthquakes, Journal of Disaster Research, 査読有, 9, 2014, 373-380.
<http://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=DSSTR000900030014.xml>
2. 高田陽一郎, 巨大地震に伴う火山の沈降、ニュースレター JGL, 査読無, 10, 2014, 8-11.
<http://www2.jpgu.org/publication/jgl/JGL-Vol10-1.pdf>
3. Youichiro Takada and Yo Fukushima, Volcanic subsidence triggered by the 2011 Tohoku earthquake in Japan, Nature Geoscience, 査読有, 6, 2013, 637-641. DOI: 10.1038/NGE01857

〔学会発表〕(計 4 件)

1. Youichiro Takada, Volcanic subsidence triggered by the 2011 Tohoku earthquake in Japan: Hot and weak material hypothesis, European Geosciences Union General Assembly 2014, 2014 年 4 月 29 日, オーストリア・ウィーン (招待講演)
2. 高田陽一郎, 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う火山性地殻変動と地殻内高温物体、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、2013 年 5 月 24 日、千葉
3. Youichiro Takada, Megathrust earthquakes in Japan and Chile triggered multiple volcanoes to subside, American Geophysical Union Fall Meeting 2012, 2012 年 12 月 6 日、米国・サンフランシスコ
4. 高田陽一郎, 2011 年東北地方太平洋沖地震によって誘発された火山性地殻変動: 続報、日本測地学会第 118 回講演会、2012 年 11 月 2 日、仙台

〔その他〕

ホームページ等

東北地方太平洋沖地震に伴う火山の沈降を検出 - 巨大地震が火山活動に与える影響の解明に向けて -

http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news_data/h/h1/news6/2013/130701_2.htm

東北地方太平洋沖地震に伴う火山の沈降を検出 - 巨大地震が火山活動に与える影響の解明に向けて -

http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web_j/dpr/news/news70/pdf/news70.pdf

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高田 陽一郎 (TAKADA, Youichiro)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号: 80466458