

## サブミリ測地解析による火山活動モニタリング

三浦 哲, 山本 希, 市來雅啓, 出町知嗣, 立花憲司, 西村太志  
東北大学大学院理学研究科

### 1. はじめに

宮城・山形県境に位置する蔵王山では, 2012 年頃から深部低周波地震の発生頻度が増大するとともに, 2013 年以降は火山性地震・微動が観測されている(図 1). 2015 年 4 月には多数の火山性地震が継続的に発生するようになったため, 気象庁が同年 4 月 13 日に火口周辺警報(火口周辺危険)を発表するに至ったが, 地震回数は徐々に減り始めたため, 同年 6 月 16 日に警報は解除された. 同時期には蔵王山周辺の GNSS 連続観測網によって僅かな山体膨張も観測されている. 小規模な火山性地震は現在も発生しており, その中には静的な傾斜変化を伴うような長周期地震(LPE)も発生している. 本報告では, 広帯域地震計(BBS)で観測された LPE 波形から mm 以下の変位や傾斜変化を抽出し, 測地インバージョンによって変動源を明らかにすることによって, 火山活動のモニタリングに役立てられないか検討した結果についてする.

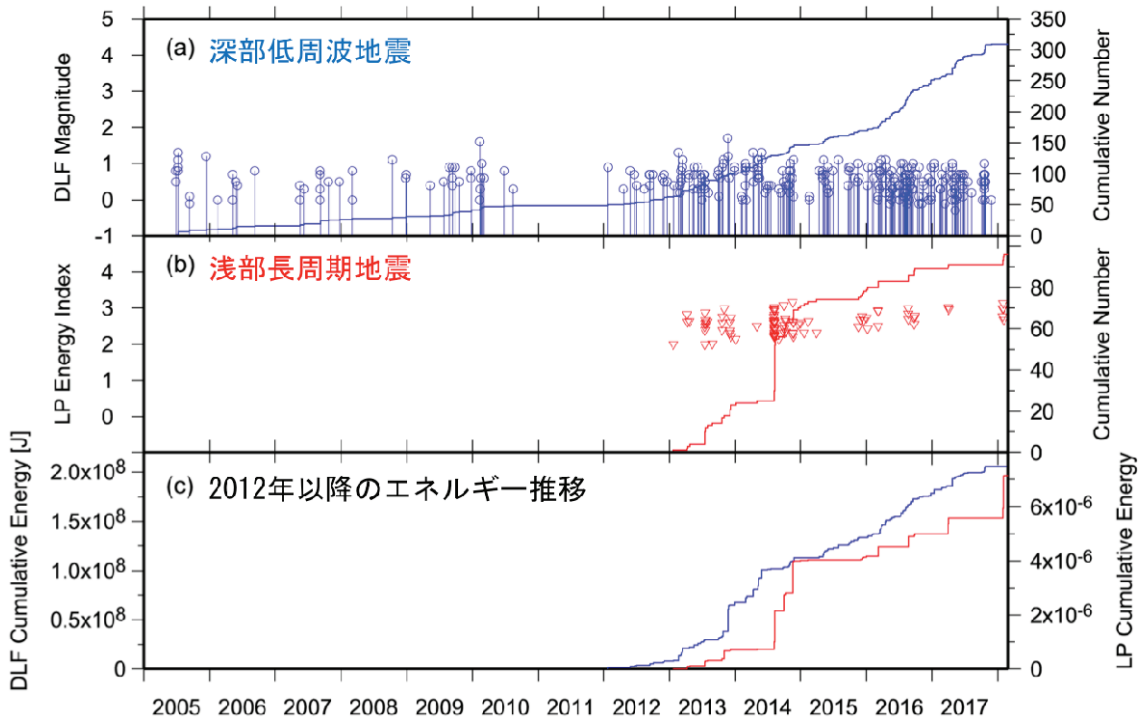


図 1. 蔵王山周辺の地震活動. (a) 深部低周波地震の MT 図及び日別地震回数の積算値(2005 年以降). (b) 浅部長周期地震の日別地震回数の積算値及びエネルギー(2012 年以降). (c) 深部低周波地震及び浅部長周期地震のエネルギー積算値(2012 年以降).

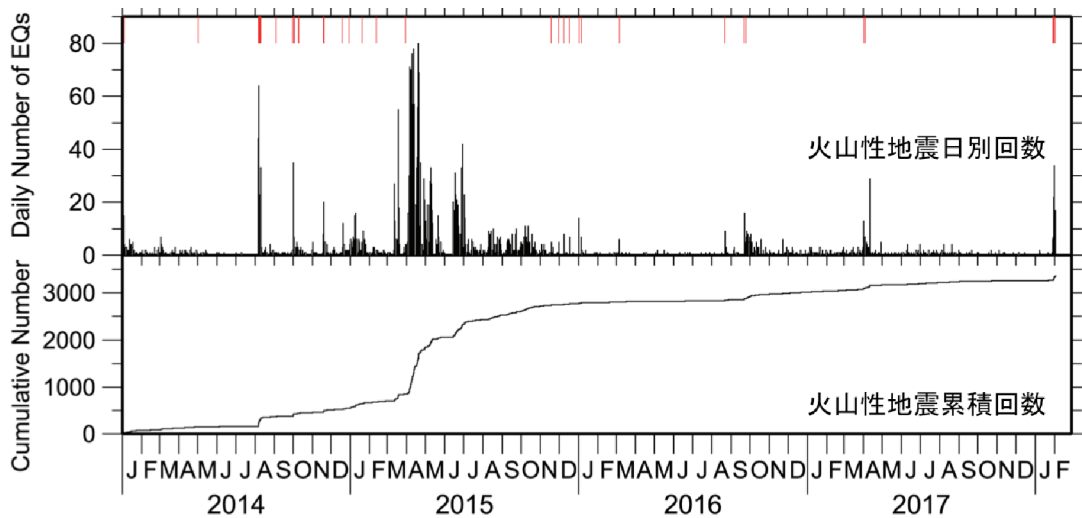


図 2. 蔵王山周辺の地震活動(2014 年以降). 上図:火山性地震の日別地震回数と長周期地震の発生時(赤線). 下図:火山性地震の積算回数.

## 2. 解析方法

Thun et al. (2015, 2016) は, BBS により得られる LPE 波形をメディアンフィルターで処理することにより, 速度波形を積分して変位波形に変換する際に問題となる長周期ノイズを効果的に除去する手法(RMF 法)を提案している. それを実験室内で mm 以下の強制変位を BBS に与えて得られたデータに適用し, 最適なパラメータを選択することによって所与の傾斜関数的な強制変位を再現できることを示した. さらに, 同手法をいくつかの火山で得られた実際の LPE データに適用し, mm 以下の静的変位が求められることを示した. 以下に彼らの処理手順の概要を述べる. (1)原記録の速度波形に対して BBS の機器特性を補正し, (2)遮断周波数  $5/M$  でローパスフィルターをかけ, 時間窓  $M$  秒のメディアンフィルターをかけて長周期ノイズ成分を抽出して(1)の波形から差し引く. (3)積分して変位波形を計算する.

図 3 に, 2017 年 4 月 1 日に発生した LPE に際して, 蔵王山の山頂火口湖(御釜)の東南東約 1.5 km に 2016 年に新設した東北大学大黒天観測点(ZDK, 図 4)で得られた BBS データ(上下成分)に適用した結果を示す. 上から, 原記録(A/D カウント値), BBS 特性補正済み速度波形(m/sec), RMF 法(時間窓  $M$  は 300 秒)による変位波形(m)及び従来の方法による変位波形(東北大学, 2017)を示す. RMF 法による変位波形を見ると, LPE 前後の変位に長周期成分が見られない, LPE の立ち上がりが明瞭, といったになってしまいう傾向が見られ, パラメータの最適化が必要であることを示唆する. この LPE では, 約 2 分間で  $50\text{--}60\mu\text{m}$  程度隆起した後に高周波変動を伴いながら約 2 分間かけて沈降し, 結果的に  $20\text{--}30\mu\text{m}$  程度の静的隆起が生じたことがわかる.

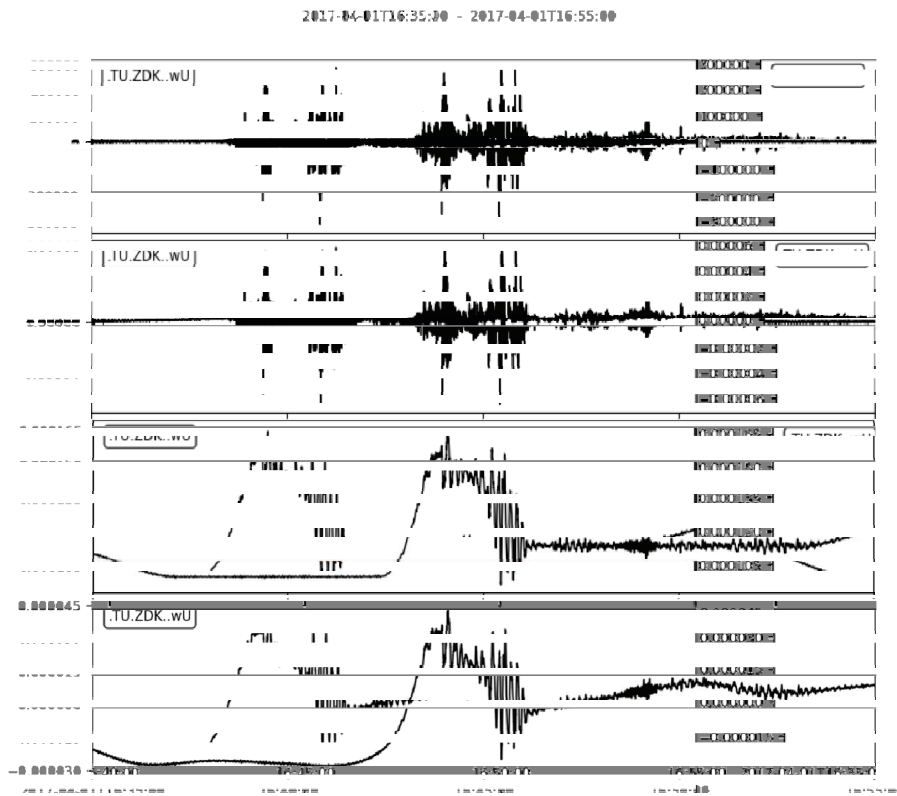


図 3. 2017 年 4 月 1 日に蔵王山で発生した長周期地震の波形例 (詳細は本文参照).



図 4. 蔵王山山頂周辺の観測点配置図.

### 3. 長周期地震に伴った地殻変動の測地インバージョン解析

図 5 に 2017 年 4 月 1 日に発生した LPE に伴って観測された傾斜変化を示す. 全ての観測点において, 長周期地震による震動が到達する 100~200 秒前から徐々に傾斜変化が見られる. さ

に地震後にはオフセット, すなわち静的傾斜変動も見られる. 以下では, これらの静的傾斜変動量に加え, 前節で述べた BBS により捉えられた静的上下変位も使用して測地インバージョン解析を行った結果について述べる.

インバージョン解析には Matsu'ura & Hasegawa (1987) による先験情報付き非線型インバージョン法を用い, 変動源は  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  の大きさの開口断層を仮定してその位置, 走向, 傾斜角, 開口量を推定した. グリーン関数は均質半無限弾性体中の有限矩形断層 (Okada, 1992) である. 表 1 に推定されたパラメータを, 図 6 に観測値と計算値の比較を示す. 開口断層は火口湖 (御釜) の南側に推定されたが, LPE の粒子軌道から推定されている震源は御釜のやや北東の深さ  $2 \sim 3 \text{ km}$  あたりと推定されており, 位置としてはあまり合っていない. また, 傾斜変化のみを使用した場合には観測値と計算値は概ね整合しているが, 上下変位も併用した場合には, あまり合っていない.

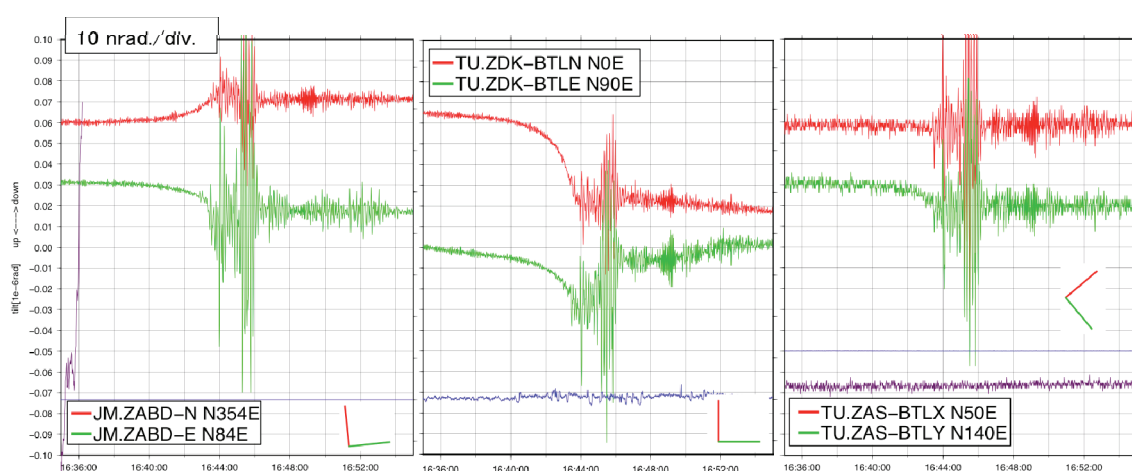


図 5. 孔井式傾斜計によって観測された長周期地震前後の傾斜変化. 左から坊平 (ZABD, 気象庁), 大黒天 (ZDK, 東北大), 蔵王 (ZAS, 東北大) のデータを示す.

表 1. インバージョン解析により推定された開口断層のパラメータ

Data used	Depth* (km)	Strike (deg.)	Dip (deg.)	Uopen (mm)
Tilt & displacement	2.9	208	45	4
Tilt	1.7	217	53	9

\*: Shallower edge of the rectangular fault.

#### 4. 今後の課題

本研究では, 広帯域地震計で得られた上下変位成分のみを使用した. 今後は水平成分についても同様のデータ処理を行ってみて, 変位の水平成分の抽出を試みる予定である. また, モデルパラメータの推定に使用した非線型インバージョン法には初期値依存性があるため, 推定されたモデルの信頼性に問題があると考えられる. これについては, 最近の研究で多用されているマルコ

フ連鎖モンテカルロ法などを用いることで解決できる可能性がある。さらに、インバージョン解析で使用したグリーン関数は均質半無限媒質を仮定しており、本研究のような火山地域では、地形や地下構造の影響について検討する必要がある。今後の検討課題としたい。なお、本研究で対象とした傾斜イベントはこれまでに複数回発生しているため、これらについても解析をひろげる予定である。

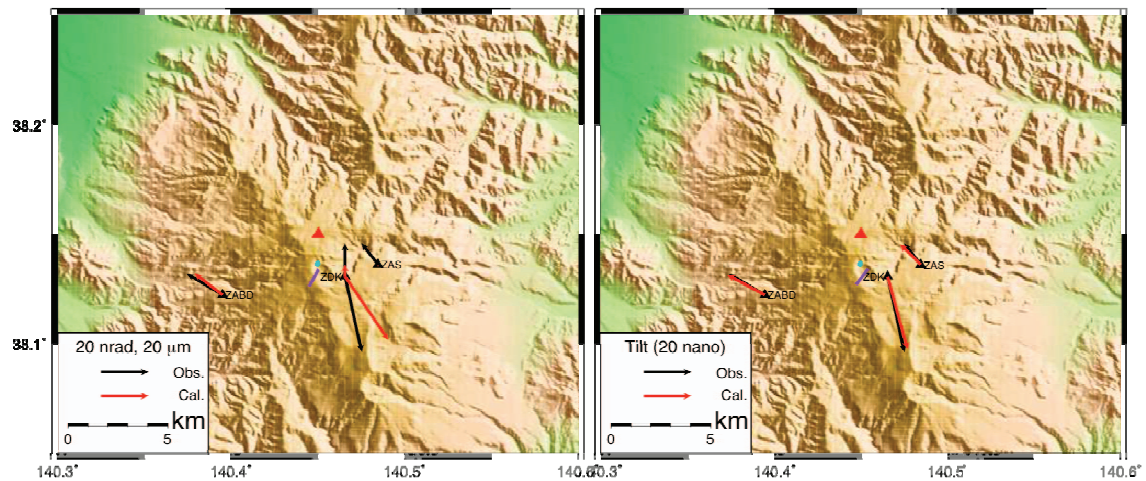


図 6. 孔井式傾斜計によって観測された長周期地震前後の傾斜変化及び大黒天観測点の広帯域地震計によって観測された微小隆起。観測量を黒矢印で、推定された開口断層の上端を紫線で、計算された傾斜変化及び微小隆起を赤矢印で示す。左図は傾斜変化及び変位両方を使用した結果、右図は傾斜変化のみを使用した結果を示す。

## 参考文献

- Matsu'ura, M., and Y. Hasegawa (1987), A maximum likelihood approach to nonlinear inversion under constraints, *Phys. Earth and Planet. Int.*, 47, 179-187
- Okada, Y. (1992), Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 83, 1018-1040.
- Thun et al. (2015), New observations of displacement steps associated with volcano seismic long-period events, constrained by step table experiments, *GRL*, 42, 3855–3862, doi:10.1002/2015GL063924.
- Thun et al. (2016), Micrometre-scale deformation observations reveal fundamental controls on geological rifting. *Sci. Rep.* 6, 36676; doi: 10.1038/srep36676.

