



|                  |                                                                                       |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Title            | 有限要素法による十勝岳62-I I火口周辺の局所的地殻変動の予備解析                                                    |
| Author(s)        | 奥山, 哲; 高橋, 浩晃                                                                         |
| Citation         | 北海道大学地球物理学研究報告, 78, 11-18                                                             |
| Issue Date       | 2015-03-19                                                                            |
| DOI              | <a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.78.11">https://doi.org/10.14943/gbhu.78.11</a> |
| Doc URL          | <a href="https://hdl.handle.net/2115/58237">https://hdl.handle.net/2115/58237</a>     |
| Type             | departmental bulletin paper                                                           |
| File Information | GBHU_78_p11-.pdf                                                                      |



## 有限要素法による十勝岳 62-II 火口周辺の局所的地殻変動の予備解析

奥山 哲

独立行政法人日本原子力研究開発機構

高橋 浩晃

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

(2015 年 1 月 16 日受理)

### Preliminary FEM analysis of the local deformation around the 62-II eruptive vent at Mt. Tokachi

Satoshi OKUYAMA

Japan Atomic Energy Agency

Hiroaki TAKAHASHI

Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science

Hokkaido University

(Received January 16, 2015)

We present the result of our preliminary FEM analysis of local deformation at Mt. Tokachi. Since 2006, displacement of several cm/yr has been observed by GPS measurement and SAR interferometry at 62-II eruptive vent which was formed by the eruptive event in 1962. The spatial scale of the deformation observed by SAR interferometry is around 2 km. This indicates that the deformation source is at the depth of less than 1 km, supporting that the deformation source is the hydrothermal activity rather than the magma chamber.

As a preliminary analysis, we assumed spheroidal pressure source beneath the 62-II vent and simulated the surface deformation to observe the relation between the surface deformation and source depth/shape. We then compared the simulated deformation and SAR interferometry result to find that prolate spheroid (flattening of 0.8) at the depth of 200 m best explains the observation.

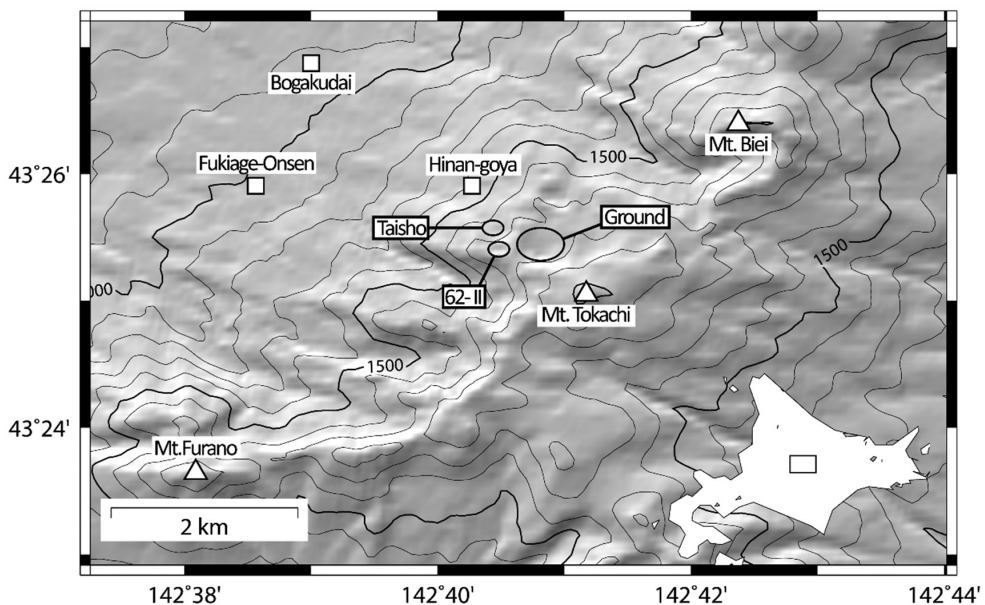
### I. はじめに

十勝岳は北海道中央部に位置する活火山であり、十勝岳連峰の主峰をなす (Fig. 1). 過去 100 年間の主な噴火イベントは 1926 年, 1962 年および 1988-1989 年に起こっており, これから噴火の間隔は 30 年前後であることがわかる. 2006 年以降, GNSS 観測および干渉 SAR から 62-II 火口

周辺で膨張を示す地殻変動が得られている（気象庁，2009，奥山・村上，2010）．干渉 SAR から得られた地殻変動の空間スケールは約 2 km であることから変動源は地下数 100 m の浅部にあると考えられ，これは変動源がマグマ溜りではなく熱水活動によるものであることを示唆している．磁力観測からは深さ 150 m で消磁が推定されていること（橋本他，2010），また AMT 観測を基に推定された 3 次元比抵抗構造では深さ 150 m～650 m に低比抵抗域が推定されていること（山谷他，2010）もこれを支持する．

2012 年・2013 年には大正火口で発光現象が観測され（気象庁，2013，2014a），2014 年 12 月には GNSS 観測から得られた地殻変動の変化率が 7 月頃から増大したことを受けて噴火警戒レベルが引き上げられた（気象庁，2014b）．これらの観測結果は十勝岳が次の噴火の準備段階に入っていることを示唆しており，十勝岳周辺の地殻変動およびその変動源についてのより深い理解が急務である．

我々は 62-II 火口周辺の局所的地殻変動について有限要素法による解析を行い，その変動源について調査している．現時点ではまだ予備解析の段階であるが，変動源の形状，位置について一定の知見が得られたので報告する．

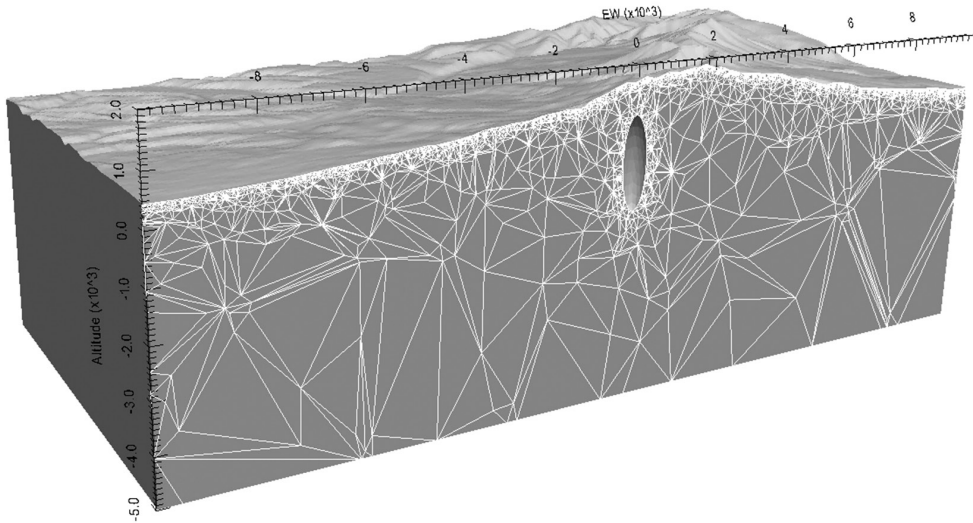


**Fig. 1.** Topography around Mt. Tokachi. Three ellipses indicates the eruptive vents/crater.

## II. 解 析

有限要素法は、ある領域で定義された微分方程式に対し、領域を単純な形状の微小要素で分割し、領域内での方程式を単純な補間関数に置き換えることで数値的に近似解を得る手法である。その性質から、複雑な形状・境界条件を容易に取り扱うことができるため、地球物理学の諸問題の数値解析に頻繁に利用される。

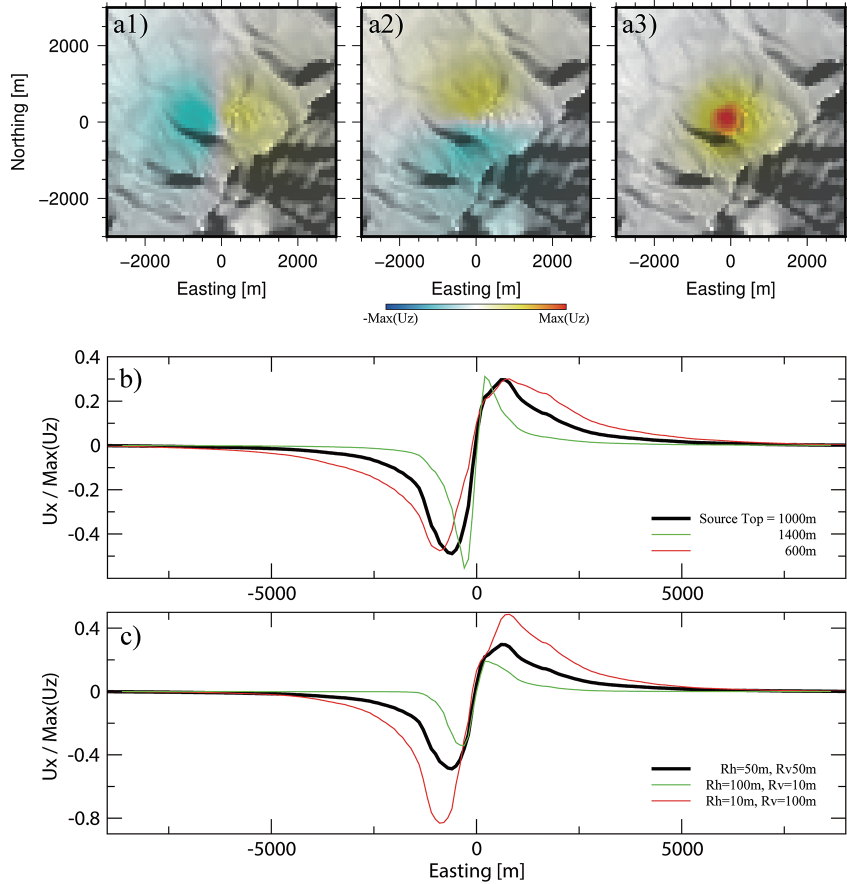
有限要素法によるシミュレーションを実施するためには、インプットデータとして対象領域を微小要素で分割したメッシュデータ、各要素の弾性パラメタと境界条件が必要である。62-II 火口周辺の地殻変動をシミュレートするにあたり、我々は 62-II 火口を中心とした東西 20 km、南北 20 km の矩形範囲を解析領域とし、標高 -5 km までを四面体要素を用いて分割した。地表面形状には SRTM3 (Farr et al., 2007) を利用し、変動源は 62-II 火口直下に置いた鉛直方向に軸を持つ回転楕円体として表現した (Fig. 2)。各要素の弾性パラメタは一様に剛性率 30GPa、ポアソン比 0.25 とし、無限小ひずみを仮定した。メッシュの作成には tetgen (Si, 2013) を、実際の有限要素法による解析には PyLith (Aagaard et al., 2013) を利用した。



**Fig. 2.** Generated tetrahedral mesh for the spheroidal source of  $(D, R_h, R_v) = (1000 \text{ m}, 300 \text{ m}, 100 \text{ m})$ .

### Ⅲ. ソースパラメタの推定

干渉 SAR 解析から得られた 2 次元地殻変動の特徴として、最大東西変位と最大鉛直変位が同程度であることと、最大東西変位を示す点と変位の中心間の距離が約 290 m であることの 2 点が挙げられる。球状圧力源の場合、最大水平変位と最大鉛直変位の比は約 0.4 であり、長球ではその扁平率に応じてこれより大きな値となる。また一般に変動源が深くなればなるほど地表変位の空間スケールは大きくなる。従って前者は圧力源の形状を、後者は位置を反映していると言える。我々は回転楕円体の上端位置  $D$ 、水平半径  $R_h$ 、鉛直半径  $R_v$  について、様々なパラメタの組み合わせから計算された地表変位の特徴を干渉 SAR 解析の結果と比較した (Fig. 3)。



**Fig. 3.** Calculated surface displacement. Displacements are normalized by maximum vertical displacement. a) Displacement field: a1, a2 and a3 are  $U_x$ (eastward),  $U_y$ (northward) and  $U_z$ (upward) component respectively. b) Relation between  $D$  and spatial distribution of  $U_x$ .  $R_h$  and  $R_v$  are fixed to 50 m (spherical source). c) Relation between flattening of the source spheroid and spatial distribution of  $U_x$ .  $D$  is fixed to altitude of 1000 m.

Fig. 4 に圧力源のパラメタと、最大東西変位と最大鉛直変位の比  $\alpha = \text{Max}(U_x) / \text{Max}(U_z)$  の関係を示す。圧力源の上端位置  $D$  を特定の値に固定した場合 (Fig. 4a, 4b, 4c) から、 $\alpha$  と  $R_v/R_h$  に相関があることがわかる。干渉 SAR 解析の結果では、 $\alpha \approx 1$  であるので、 $R_v/R_h$  は 3 以上 (扁平率 0.7 以上) と推定される。一方  $\alpha$  と  $D$  の間には明確な関係は見られない (Fig. 4d)。

また Fig. 5 は圧力源のパラメタと、ソース直上から最大東西変位を示す点までの距離を 290 m で正規化したもの  $\beta = \text{dist}(\text{Max}(U_x))$  である。Fig. 4 同様に上端位置を特定の値に固定した場合 (Fig. 5a, 5b, 5c) から、最適な  $R_v/R_h$  は圧力源の位置により変化することがわかる。仮に  $R_h = 20$ ,  $R_v = 60$  とした場合、最適な圧力源の上端は標高 1400 m である。この結果は扁平率がより大きな場合でもほぼ変化しない (Fig. 5d)。

以上から、圧力源は上端が標高 1400 m にある扁平率 0.7 以上の長球であることが推定された。しかし噴火のポテンシャルの指標となる圧力源の体積については依然未知である。我々は圧力源の上端位置を標高 1400 m に固定し、扁平率 0.8 と 0.9 の 2 つの場合について体積を変化させた場合の  $\alpha$  と  $\beta$  を計算した (Fig. 6)。 $\alpha$  を基準とした場合、膨張源の体積は  $10^6 \text{m}^3$  のオーダーであると推定された (Fig. 6a)。一方  $\beta$  を基準とした場合の推定体積は  $10^5 \text{m}^3$  またはそれ以下であり (Fig. 6b)、オーダー単位の差があるが、少なくとも膨張源の体積が  $10^7 \text{m}^3$  以下であることは確実である。

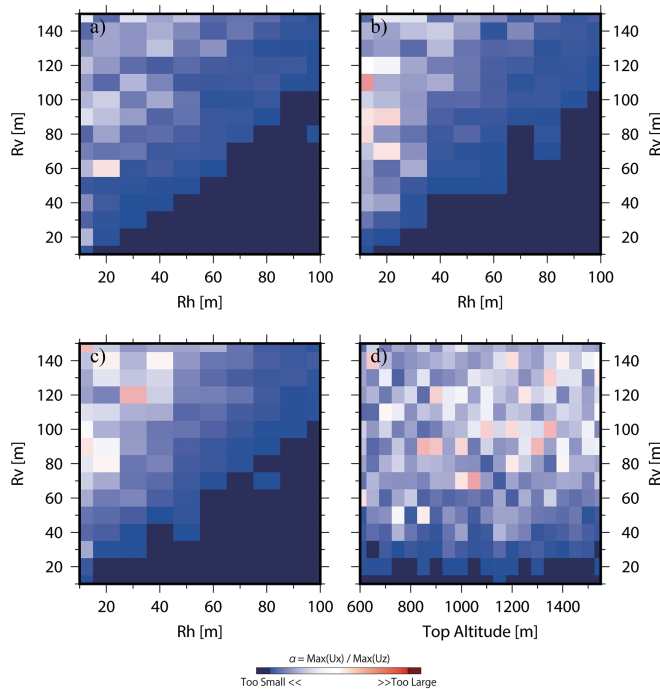
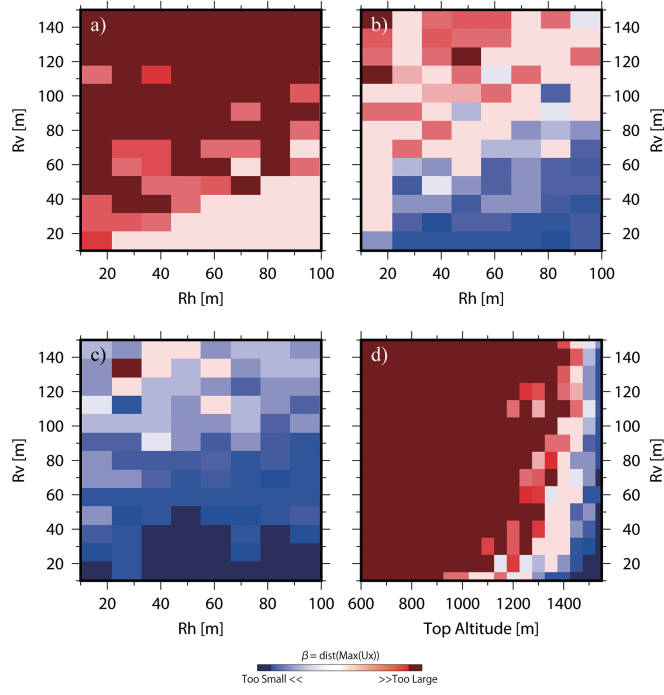
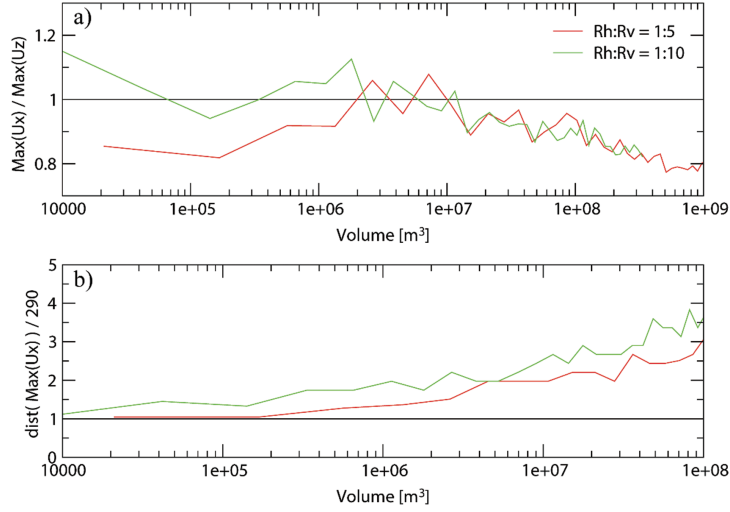


Fig. 4. Various set of source parameters and calculated  $\alpha$ . a)  $D = 600 \text{ m}$ . b)  $D = 1000 \text{ m}$ . c)  $D = 1400 \text{ m}$ . d)  $R_h = 20 \text{ m}$ .



**Fig. 5.** Various set of source parameters and calculated  $\beta$ . a)  $D = 1200$  m. b)  $D = 1400$  m. c)  $D = 1500$  m. d)  $R_h = 20$  m.



**Fig. 6.** a) Relation between the volume of the source and  $\alpha$ . b) Relation between the volume of the source and  $\beta$ . In both figures,  $D$  is fixed to 1400 m altitude. Red line indicates the case of  $R_h:R_v = 1:5$  and green indicates  $R_h:R_v = 1:10$ .

#### IV. 考 察

計算された  $\alpha$  と  $\beta$  にはかなりのばらつきがあり、正確なパラメタ推定を困難にしているが、これは使用したメッシュの細かさが十分でないためと考えられる。有限要素法では、各要素内の値は要素を構成する頂点での値を線形補間することで求める。メッシュが十分細かい場合には使用したメッシュによらず同じ結果が得られるはずであるが、メッシュが粗い場合には、パラメタが急変する領域において実際の値と補間により計算された値の差が大きくなり、精度が低下してしまう。対象領域全体においてメッシュを十分細かくすることは非効率的であるため、パラメタの変化率に応じたメッシュサイズを用いることが望ましい。

また膨張源の体積の推定については、推定に用いるパラメタによってオーダー単位での差が見られた。これは上で述べたメッシュの細かさの問題の他に、固定したパラメタが不適切であった可能性がある。Fig. 4, 5 では  $R_h < 100$ ,  $R_v < 150$  の領域しか計算しておらず、より大きな  $R_h$ ,  $R_v$  では最適な膨張源の位置が変化する可能性がある。また干渉 SAR の結果では東西変位の対称軸が鉛直方向に軸を持つ回転楕円体膨張源から想定される南北ではなく、北北西－南南東方向であり、これは回転楕円体の軸が傾いている可能性を示唆している。従って、パラメタの自由度を増加し、また値の範囲を広げたシミュレーションを行う必要があると考えられる。

#### VI. ま と め

十勝岳 62-II 火口周辺の局所的地殻変動について、有限要素法による予備解析を行った。62-II 火口直下に鉛直方向に軸をもつ回転楕円体の膨張源を仮定し、最大水平変位と最大鉛直変位の比および最大水平変位を示す点の膨張源直上からの距離を干渉 SAR による結果と比較した。解析の結果、膨張源は上端深さが標高 1400 m にある扁平率 0.7 以上の長球と推定された。膨張源の体積は、推定に用いるパラメタにより値が異なるものの  $10^7 \text{m}^3$  を超えない。推定されたパラメタにはかなりのばらつきがあり、これはメッシュの粗さに起因すると考えられる。今後、メッシュの再分割によるパラメタ推定の安定化と共に、膨張源のパラメタの自由度を増加し、観測結果をより良く説明できるモデルを構築する予定である。

#### 文献

- Aagaard, B., S. Kientz, M. Knepley, L. Strand, and C. Williams, 2013. PyLith User Manual, Version 2.0.0., <http://geodynamics.org/cig/software/pylith/>.
- Farr, T. G., et al., 2007. The Shuttle Radar Topography Mission, Rev. Geophys., 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- 橋本武志・西村三治・有田真・山本輝明・小木曾仁・重野伸昭・岡崎紀俊・茂木透, 2010. 十勝岳の全磁力変化と蓄熱過程 (2008-2009 年), 北海道大学地球物理学研究報告, 73, 269-280.

気象庁, 2009. 第 114 回噴火予知連絡会資料.

気象庁, 2013. 十勝岳の火山活動解説資料 (平成 25 年 7 月).

気象庁, 2014a. 十勝岳で発生した対象火口付近が夜間に高感度カメラで明るく見える現象, 火山噴火予知連絡会会報, 113, 6-19.

気象庁, 2014b. 十勝岳の火山活動解説資料 (平成 26 年 12 月 16 日).

奥山哲・村上亮, 2010. PALSAR により検出された十勝岳の局所的地殻変動, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会予稿集 (CD-ROM), STT072-P11.

Si, H., 2013. TetGen: A Quality Tetrahedral Mesh Generator and Tree-Dimensional Delaunay Triangulator, <http://tetgen.org/>.

山谷祐介・橋本武志・茂木透・村上亮・岡崎紀俊・吉本充宏・伏谷祐二・橋本政樹・山本輝明・西村三治・有田真・的場敦史・土屋遼平, 2010. 十勝岳 62- II 火口周辺の 3 次元比抵抗構造, 北海道大学地球物理学研究報告, 73, 281-294.