

## 宇宙線ミュオンによる雲仙溶岩ドームのラジオグラフィ\*

### Radiography of the lava dome in Unzen with cosmic-ray muons

宮本 成悟\*\*  
MIYAMOTO Seigo

清水 洋\*\*\*  
SHIMIZU Hiroshi

長縄 直崇\*\*\*\*  
NAGANAWA Naotaka

#### Abstract

The lava dome in Mt. Unzen was formed during the eruption from January 1991 to early 1995 and the activity was calmed down in 1995. Researchers kept observing the eruption in this period with a variety of methods. Some of them proposed a growth model, another proposed a different model from their data. It is significant for the growth model of lava dome which has viscous magma to investigate the density structure in it. We made a 2D density map of the Unzen lava dome by using cosmic-ray muon detector, nuclear emulsion films which has high position resolution and 0.8m<sup>2</sup> effective area, was installed in a natural cave from early December 2010 to the end of March. The developed nuclear emulsion films have been scanned by automated muon readout system. The muon detection efficiency is estimated from muon detector it precisely. The systematic analysis of efficiency and random noise ratio are performed by taking a pattern match and making a connection of muon tracks between three films. After estimation and removing undesired low energy electron tracks, we got a preliminary density map of the Unzen lava dome

Keywords: cosmic-ray, muon, radiography, nuclear emulsion, volcano, Unzen, lava dome

#### 1. 溶岩ドーム内部構造とミュオンラジオグラフィ

1991年に始まった雲仙普賢岳の噴火活動により、大規模な火砕流が発生した。これにより多数の人々が命を落とし、周辺の街に甚大な被害をもたらした。1993年後半から1995年にかけては、火道から供給される溶岩が溶岩ドームのからを突き破らず、内部から少しずつ大きくなってゆく「内成的成長」過程が支配的となった。Nakada et al.(1995) [1]は、この期間における溶岩ドームの成長を外部から精密に観察し、記録した。彼らの記録では、火道がある中心軸を対照に溶岩ドームの外皮が内側から外側にキャタピラのように広がり、がれきを巻き込みながらドームの根本に潜り込むような様子がとらえられた。このような観測データを元にして、溶岩ドーム成長モデルを提唱した。このモデルが正しいとすると、岩石間の空隙が図1に示されるようになっていっていると予想される。

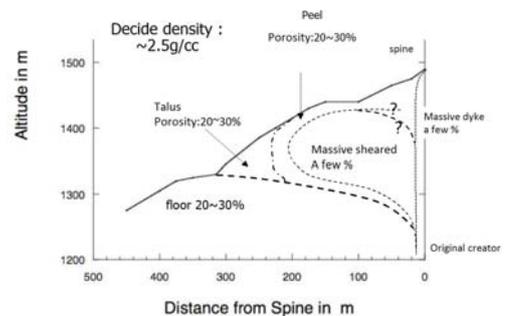


図1 : S. Nakada et al(1995)から予想される、現在の溶岩ドームの断面図(検出器設置点から溶岩ドーム中心まで)。溶岩ドーム東側のローブを除いて、Spineを軸に対して軸対象になっていると考えられる。

\* 200#.##.## 受付 (8 pt、受付日は決定後事務局で記入)

\*\* 東京大学地震研究所 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

TEL: (03)5841-5785 FAX: (03)5841-5777 E-mail: miyamoto@eri.u-tokyo.ac.jp

\*\*\* 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター

\*\*\*\* 名古屋大学大学院理学研究科

## 2. 検出器設置と乾板中のミュオン飛跡の自動読み取り

宇宙線ミュオンによる溶岩ドームの内部構造の観測は、H. Tanaka et al(2007)によって過去昭和神山に対して行われた例がある[2,3]。我々は雲仙溶岩ドームの内部密度構造を観測し、かつ成長モデルを検証すべく、溶岩ドーム北西部に位置する風穴に原子核乾板を設置した(図 2a、図 2b)。有効面積は  $0.8\text{m}^2$ 、照射期間は 2010 年 12 月から 4 ヶ月間であった。東大地震研、イタリア・ナポリ大、サレルノ大、パドヴァ大、グランサツソ伊国立研究所と共同で、乾板の飛跡読み取りを行い、ほぼそれを終えた。



図 2a(左)：雲仙溶岩ドーム(平成新山)と検出器を設置した風穴との位置関係。風穴の標高は約 1300m、ドーム山頂までの距離は約 500m、ドーム山頂との高低差は約 480m である。原子核乾板の開口角は、ドーム中心方向を方位角 0 度として、方位角方向に  $\pm 30$  度、仰角方向に  $0 \sim 30$  度である。

図 2b(右)：風穴に設置された原子核乾板検出器の様子。溶岩ドームの方角にアルミ製のパネルを向けている。1 つのパネルには  $0.1\text{m}^2$  の乾板が 3 枚重ねられて設置されている。

## 3. 解析

検出効率、観測期間以前に蓄積された飛跡の偶然一致によるフェイクミュオンの見積りは、奥行方向に 3 枚重ね合わせた乾板自身を用いて行われた。これによって求められた山体の位置ごとの貫通ミュオン数分布  $\text{Data}(\theta, \varphi)$  から、仰角依存性を持つと仮定した一様バックグラウンド分布  $BG(\theta)$  を引き、これとシミュレーションによる期待値  $\text{Simu}(\theta, \varphi)$  とを比較し、ミュオン数の過剰と不足の割合  $\text{Excess}(\theta, \varphi)$  をミュオンの到来方向 (山体の位置) ごとに求めた。これを数式で表すと、次のようになる：

$$\text{Excess}(\theta, \varphi) = (\text{Data}(\theta, \varphi) - BG(\theta) - A \times \text{Simu}(\theta, \varphi)) \div (A \times \text{Simu}(\theta, \varphi))$$

ここで、 $\theta$  は  $\tan$ (仰角)、 $\varphi$  は  $\tan$ (溶岩ドーム山頂を  $0^\circ$  としたときの相対方位角)、 $A=1.13$  は規格化定数で、岩石の厚みが 20m 以下の領域における、 $\text{Data}(\theta, \varphi) - BG(\theta) - A \times \text{Simu}(\theta, \varphi)$  のズレが最小になるように決められた。岩石の厚みが 20m 以下の領域におけるズレの RMS は、15% である。 $BG(\theta)$  は、次のように定義される  $\chi^2(\theta)$  が最小になるように各  $\theta$  ごとに求められた。

$$\chi^2(\theta) = \sum_{\varphi} (\text{Data}(\theta, \varphi) - BG(\theta) - A \times \text{Simu}(\theta, \varphi))^2 \div \text{RawData}(\theta, \varphi)$$

ここで、 $\text{RawData}(\theta, \varphi)$  は、検出効率で補正する前の、観測ミュオン数であり、最小二乗法を行う上で統計エラーの重みをかける役割を果たしている。

## 4. 暫定結果

飛跡読み取りはほぼ完了した。そのうち、解析処理が終了している  $0.16\text{m}^2$  での暫定結果を図 3 に示す。

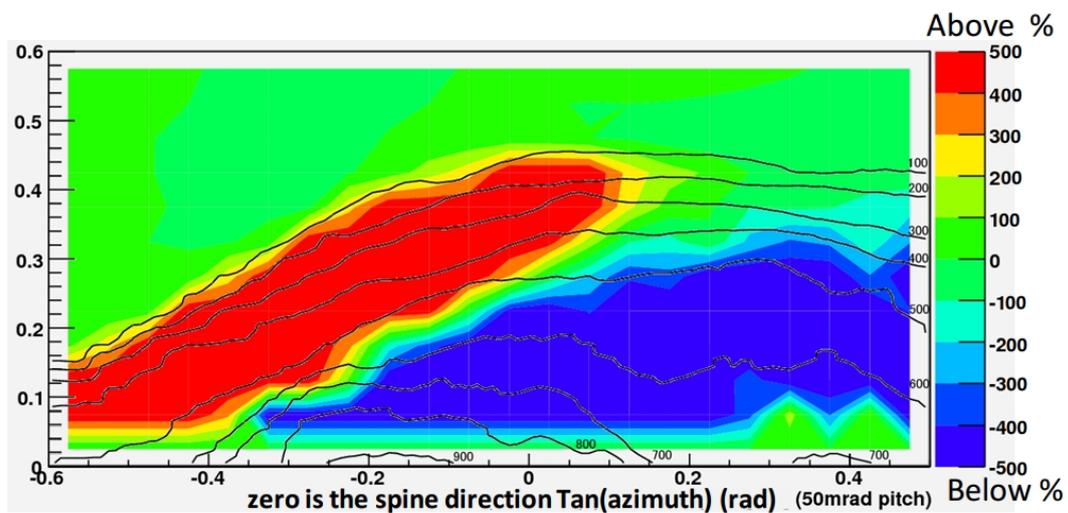


図 3：シミュレーションによる期待値と比較した時の、ミュオン数の過剰・不足の割合 $Excess(\theta, \varphi)$ をプロットしたものの角[rad]、横軸はドームの中心方向を方位角 0 度とした時の、 $\tan(\text{方位角})$ 。縦軸横軸共に 0.1 rad の幅 がドームにおける空間距離 50m に相当する。色の違いが $Excess(\theta, \varphi)$ を表す。赤い領域は期待値よりも多くのミュオンが到来し (2.5g/cc より密度が低い)、青い領域は期待値よりもミュオンの数が少ない(密度が高い)。黒色の等高線は、検出器を置いた地点からドームを見た時の山体の厚みを示す。

## 5. 考察

- 岩盤の厚みが 400m 以上の領域について、議論するのに十分な統計数がない。既に読み取りが終わっている乾板データの解析処理を終了させ、統計を増やしてゆく。
- 上記以外の領域について、ドーム浅部(表面から 50m 以下の領域)にて、左右(ドーム北部とドーム南部)でミュオン数の差が見られた。この結果はどのような意味をもたらすのか、今後検討してゆく。

## 参考文献

- [1] S. Nakada, Y. Miyake, H. Sato, O. and A. Fujinawa, Endogenous growth of dacite dome at Unzen volcano (Japan), 1993-1994. , *Geology* , v. 23; no. 2; p. 157-160 (1995).
- [2] H.K.M.Tanaka et al., Imaging the conduit size of the dome with cosmic-ray muons:The structure beneath Showa-Shinzan Lava Dome, Japan, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 34, L22311 (2007).
- [3] H.K.M. Tanaka et al., RADIOGRAPHIC IMAGING BELOW A VOLCANIC CRATER FLOOR WITH COSMIC-RAY MUONS, *American Journal of Science*, Vol. 308, P. 843-850 (2008)