

ミュオン観測を用いた溶岩ドームの内部構造把握

長崎河川国道事務所 岩田 和甫

一般財団法人砂防フロンティア整備推進機構 赤沼 隼一・田村 圭司・蒲原 潤一・

渡邊 尚・金子 剛史・○寺山 祐司・森 俊勇*

※旧所属

1. はじめに

雲仙普賢岳では1990年からの活発な火山活動により溶岩ドームが形成され、1991年に大規模な火砕流が発生した。現在の溶岩ドームは幅約500m、長さ約600m、深さ約200mにおよぶ岩塊であり、1997年から2024年までの26年間で約1.45mの変位が観測されている¹⁾。委員会提言²⁾では溶岩ドーム内部に塊状溶岩の緩みの激しい範囲で崩壊が起こる可能性があるとして指摘されており、溶岩ドーム周辺は警戒区域に指定されている。このため、広範囲の外形観測に加え、安全面も考慮した長期的な内部観測を行う必要がある。しかし、内部観測については限定的で短期的な観測にとどまっている。そこで、本研究では、溶岩ドームに対し非破壊方式で内部状況の把握手法（内部観測手法）の検討を行った。

2. 観測手法

2.1. ミュオン観測について

内部観測手法には、ミュオン観測の他にはボーリングコア掘削や弾性波探査などがあるが、ボーリングコア掘削は安全性の面で適用性が低く、弾性波探査は含水量を推定できるがそれだけで内部構造まで把握することは不可能である。そこで本研究では、非破壊方式であり、面的な内部構造の観測が可能であるミュオン観測を採用した。

ミュオン観測とは、宇宙を構成する12個の素粒子の一つであるミュオンの性質を利用して構造物などの密度を求める内部透視技術である³⁾⁴⁾。宇宙から地球には原子核や素粒子からなる多くの宇宙線が降り注いでいるが、素粒子のうちミュオン(μ)やニュートリノ(ν_e, ν_μ, ν_τ)は大気への衝突による減衰が少ない。中でもミュオンは1秒間に1m²当たり100個程度地表に降り注いでおり、1,000m単位の物体も透過することができるが、透過する物体の密度に応じて貫通量が減衰するため、貫通したミュオンの数から物体の密度を見積もることができる。

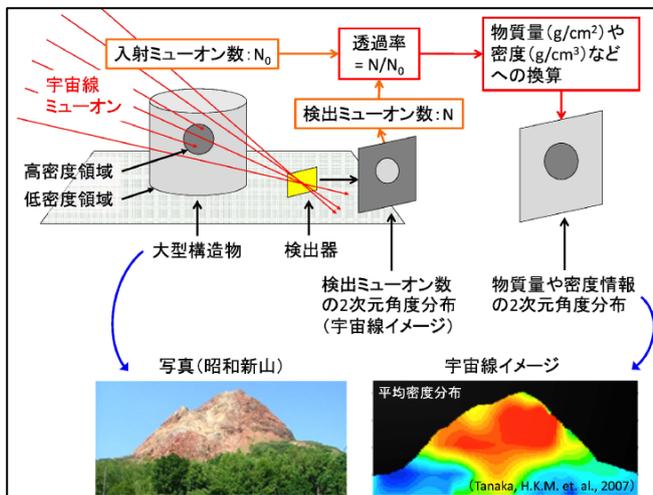


図 2.1 ミュオン観測のイメージ

2.2. 観測箇所・観測期間

観測箇所は、図 2.2 に示した通り3か所の候補を考慮したが、警戒区域の外側であること、溶岩ドームまでの遮蔽物が少ないこと、アクセス性等を総合的に判断し、図中の候補箇所③から赤矢印の方向とした。

観測期間は、2024年4月1日～同年10月25日とし、観測期間中は定期メンテナンスのバッテリー交換時を除き、24時間常時観測を行った。



図 2.2 観測箇所・観測方向（雲仙普賢岳）

2.3. ミュオン観測器

ミュオン観測器は、6枚のMWPC（荷電粒子検出器：Multi Wire Proportional Chamberの略）、データ取得装置及び電気制御装置、数枚の鉛吸収板からなる（図 2.3）。MWPCは2枚の基板とその間に格子状にワイヤーが組まれた構造となっており、中に混合ガス（Ar 80%, CO₂ 20%）が充填されている。また、ワイヤーに高電圧を加えることでその基板間に高電場を発生させている。ミュオンが通過するとAr分子がイオン化され、それにより生じた電子がワイヤーに寄ってくると電場からエネルギーをもらって加速する。加速した電子は他のガス分子を電離し、さらに多くの電子を発生させる。MWPCはこのような過程を繰り返して電子を増幅させ、通過したミュオンを電子パルスとして取り出している⁵⁾。

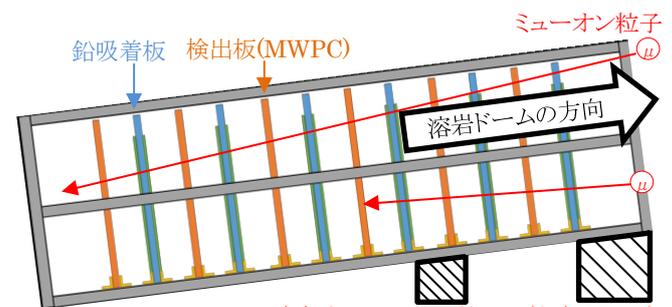


図 2.3 設置イメージ図

2.4. 観測結果の解析手法

今回の観測では、前述したミュオン粒子の透過による電気的な出力の解析によりミュオン粒子の個数を算出し、山体の密度を割り出している。本項ではその解析手法を解説する。

① 1次解析（他粒子などの誤差を取り除き、有効なミュオンのデータのみを取り出す）

観測方向に対し、より有効な粒子（直進性の強い＝エネルギー量の高い粒子、図中青点）による出力を抽出し、不確実なもの（直進性が弱い＝エネルギー量が低い粒子、図中赤点）を除外する（図 2.4）。

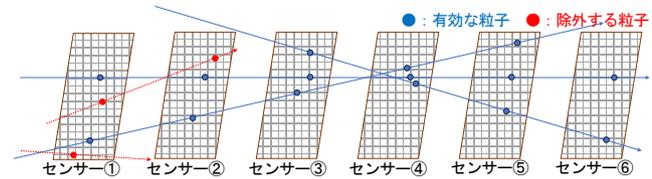


図 2.4 センサーにおける1次解析のイメージ

② 2次解析（ミュオンの個数から密度長を割り出す・LPデータから透過長を計算する）

①の結果（ミュオンの個数）からミュオンが透過した物体の「密度長」（物体の透過長×密度）を算出する。

密度長を対象物の密度に変換するために透過長（ミュオンが通過した山体の長さ）が必要となるため、観測器と溶岩ドームとの位置関係（観測距離、観測方向、観測器の仰角）から山体の透過長を算出する。なお、透過長の計算に当たっては、「令和4年度雲仙岳航空レーザー測量業務」成果に基づくLPデータを使用した。

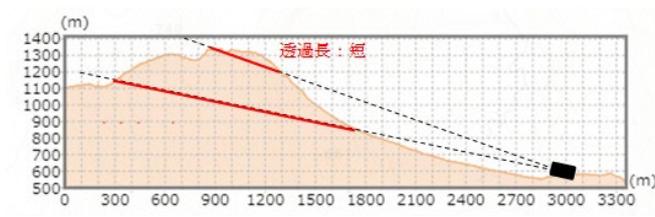


図 2.5 透過長の概念図

③ 3次解析（密度長を透過長で割ることで、密度を算出する）

2次解析で得られた密度長を透過長で割ることで、観測メッシュごとの密度を算出し、3章の図 3.1 のような密度分布図を作成する。

3. 解析結果の考察

解析結果に基づき、溶岩ドームの密度分布について整理した。図 3.1 では、黄色（最大値 2.5）ほど密度が高く、青（最小値 0）ほど密度が低い。向かって左側の稜線部の下方 2~4 メッシュにかけて密度の低い（0.2~0.7 程度）部分が存在しており、その下方には高密度（2.0~2.6 程度）の領域が存在している。一方、向かって右側の稜線については、地表面まで高密度が分布している他、左下の緑が見える部分に該当する観測結果についても高密度部分が分布している。

図 3.2 の写真と比較すると、向かって左側の低密度部分が確認できる範囲には溶岩ドームが広く分布していることが確認できる。今回の解析では、1 メッシュはおおよそ 24m のため、密度が低い部分は溶岩ドーム表面から 70m~100m 程度、高密度部は 150~200m 程度の深さを透過しているミュオンから推定された結果と考えられる。

今回の観測結果（図 3.1）と既往の検討結果（図 3.3）を照らし合わせると、観測結果の低密度部分は溶岩ドーム

の塊上溶岩のうち特に表面に亀裂等を多く含む範囲を、また同観測結果の下方の高密度部分はより深い位置にあるロープと地山付近の境界部分に相当している。

これらのことから、今回の解析結果は過去の推定と概ね整合していると考えられる。

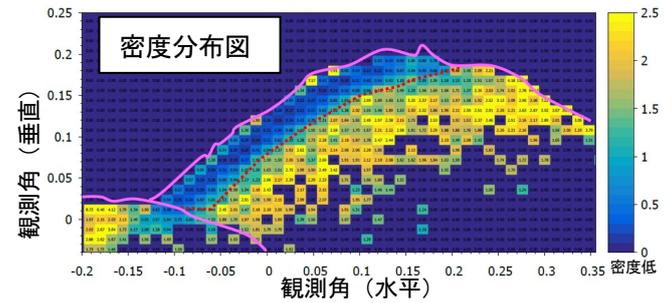


図 3.1 観測期間全期間での密度分布



図 3.2 解析範囲とおおむね同じ画角の写真

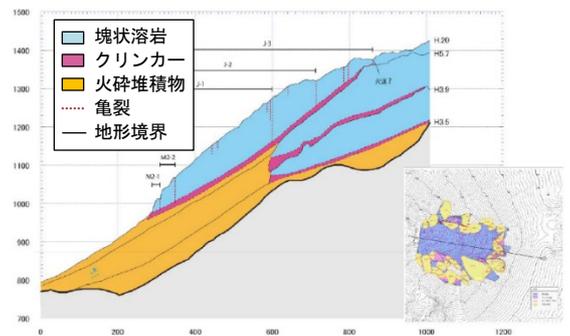


図 3.3 既往の検討結果における溶岩ドームの構造

4. まとめ

ミュオン観測により、警戒区域の外側から内部構造の観測を行え、かつ密度の異なる物質の境界面を可視化できることを実証できた。今後の課題として、三次元的な密度把握のための多方向からのミュオン観測や、精度向上のための他の観測と組み合わせ合わせた複合的な解析が有効と考えられる。今後、観測を継続すれば、遠方から非破壊方式でロープ同士やロープと地山との境界部分をとらえることが出来ると考えられるため、崩壊規模の推定に大きく寄与できる可能性がある。

【参考文献】

- 1) 雲仙砂防管理センター（2023），令和5年度雲仙岳火山防災協議会 委員会資料
- 2) 雲仙砂防管理センター（2014），雲仙・普賢岳溶岩ドーム崩壊対策構造検討会 委員会資料
<https://www.qsr.mlit.go.jp/unzen/committee/index.html>
- 3) 田中宏幸・大城道則(2017)：ミュオグラフィ ピラミッドの謎を解く 21世紀の謎
- 4) Overview of muographers, Hiroyuki K. M.Tanaka and László Oláh, 2019
- 5) 宮本ら（2021），ミュオグラフィを活用した内部構造の観測，NEC 技報/Vol.74 No.1/安全・安心・公平・効率を提供する社会インフラ特集