特集富士山噴火に備える 世界初の多方向3次元透視が 明らかにした大室山の内部構造

小山真人 こやま まさと 静岡大学防災総合センター 宮本成悟 みやもと せいご 東京大学地震研究所 長原翔伍 ながはら しょうご 神戸大学大学院 鈴木雄介 すずき ゆうすけ 株式会社 STORY

火山のふるまいは実に不思議であり、その解釈や予 測は難しい。せめてその内部を覗くことができれば ……それは火山学者すべての見果てぬ夢であった。 伊豆高原にそびえる優美な火山・大室山、その透視 によって火山内部のマグマの営みが可視化され、夢 の一部が現実となった。

## スコリア丘を透視する

活火山・伊豆東部火山群に属する大室山は,お よそ4000年前の噴火で誕生したプリン形の単成 火山(スコリア丘)である\*1(図1)。大室山から流れ出

<sup>3</sup>D density tomography determined from multi-directional muography of the Omuroyama volcano, Japan

Masato Koyama, Seigo Miyamoto, Shogo Nagahara, and Yusuke Suzuki

<sup>\*1</sup>一単成火山は、ただ一度の噴火で生じた小型の火山であり、 スコリア丘、溶岩ドーム、マール、タフリングなどの種類があ る。スコリア丘は、粘性の低いマグマのしぶきであるスコリア (暗色のスポンジ状火山ガラス)が、火口の周囲に降り積もって できる。溶岩ドームは粘性の高いマグマが火口の周囲に盛り上 がってできる。マールやタフリングは、浅瀬や湿地で大量の水 とマグマが触れ合う爆発的噴火によって生じる。なお、単成火



図 1-北西側から見た大室山スコリア丘

た溶岩は、周囲に広がる山地の凹凸を埋めて伊豆 高原をつくるとともに、相模湾に流れ込んで城ヶ 崎海岸を誕生させた。スコリア丘は世界中にその 分布が知られているが、その立体的かつ詳細な内 部構造を明らかにした例はほとんどなかった。

しかしながら、ミューオンと呼ばれる宇宙線を 使った物体の透視技術(ミュオグラフィ)<sup>1</sup>が、それを 可能とした。透過する物体の密度が高いとミュー オンの透過率が下がるので、その内部を人体のレ ントゲン写真のように透視することができる\*2。 構造の単純すぎる溶岩ドームや、山体が扁平なた めに透視に向かないマールやタフリングと異なり、 スコリア丘の内部には岩脈や溶結部などによる密 度コントラストの存在が見込まれるため、透視の 成果が期待できる。また、スコリア丘を対象とし て基本的な技術やノウハウを培うことによって、 より複雑な構造をもつ複成火山の透視技術も高め られると筆者らは考えた。

多方向3次元ミュオグラフィ

ミューオン観測に用いたのは原子核乾板(特殊な 乳剤を塗ったフィルム)であり、そこを通過した高エ ネルギー荷電粒子の飛跡が記録される。電力を必

要としないため、インフラが整備されていない場 所への設置も容易である。低運動量の粒子による ノイズを除去して解像度を高めるため、本研究で は10 cm×12.5 cmの原子核乾板 20 枚と鉛板 19 枚を交互に積層させた観測ユニットを組み立てて 設置した<sup>3</sup>。

60~90日間にわたる観測の後,ユニットを回 収してフィルムを現像した。高エネルギー粒子の 飛跡は、フィルム内に銀粒子の整列線として記録 される。それらを名古屋大学の高速自動スキャ ナ<sup>4</sup>と独自ソフトウェア<sup>5</sup>を用いて読み取り、ミュ ーオンの飛跡を分別した。

1 方向からのミュオグラフィで測定可能な観測 量は、ミューオンの経路に沿った密度と長さの積 分(密度長)であり、経路上の密度分布の情報を含 まない。したがって、火山内部に興味深い密度コ ントラストが見つかったとしても、それが火山体 のどの部分からの寄与なのか不明である。そこで、 既存の3次元密度イメージング技術として名高 い医療用X線CTと同様に、ミューオンの観測 方向を増やすことによって空間分解能を高めるこ とを目論んだ。

これまで火山のミュオグラフィを2または3 方向から実施した研究もあったが,解像度が十分 ではなかった。本研究では大室山をぐるりと囲む 11 地点に観測ユニットを設置し,そのうちの10 地点から得られた良質のデータから,線形インバ ージョン法を用いて大室山内部の3次元密度分 布を求めた。なお,10地点もの多方向から火山 の立体的透視に成功したのは世界で初めてである。

# 透視された内部構造とその解釈

多方向3次元ミュオグラフィによって、これ まで誰も見たことがなかった驚異的な解像度で大 室山内部の3次元密度構造が露わになった(図2)。

山頂火口の真下には密度の高い部分が地下へと 続いており、マグマが上ってきた通路(火道)とみ られる。さらにその通路から北北東・南南東・西 の3方向に分岐した高密度部があり、割れ目に

山に対し,休止期間をはさみながら何度も噴火して大型の山体 を成長させる火山を複成火山と呼ぶ。

<sup>\*2-</sup>ミュオグラフィによる透視の成功例として,エジプトの クフ王ピラミッドでの成果<sup>2</sup>が有名である。



マグマが入り込んだ岩脈と解釈できる。西に進ん だマグマは大室山の西麓に溶岩流 IV となって漏 れ出し,南南東に進んだマグマは山腹で噴火を起 こして側火口をつくったとみられる。これまで地 表の限られたデータから類推するしかなかった地 下のプロセスが,透視によって可視化されたので ある。

岩脈が3方向の放射状となる理由は、マグマ 上昇によって生じる山体の膨張がもたらした力学 的結果と考えるのが自然である。同様な3方向 の岩脈群は、単成・複成を問わず世界中の火山に 例がある。一方、大室山が属する伊豆東部火山群 は伊豆弧と本州弧との衝突による北西—南東方位 の圧縮場に位置するため、同方位の火山配列が卓 越することが知られていた<sup>6</sup>。このことは大室山 内部の岩脈方位が放射状になることと一見矛盾す るように見えるが、山体内など地下のごく浅い部 分は広域応力場の影響を受けにくいため、マグマ 上昇の際に生じた局所的な応力場に支配されたの だろう。



(上)大室山スコリア丘の地形陰影図。静岡県高密度 点群データにもとづく10 cm メッシュ標高データ を使用。(下)ミュオグラフィによって透視された大 室山内部の3次元密度分布。白丸はミューオン観 測ユニットの設置場所。西麓の溶岩流IV ならびに 南山腹の側火口の位置と概形,10 m 間隔の地形等 高線も示した。この図の3D 画像を以下のサイトで 公開中。https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/CHEER/data/ omuro3ds/

以上から、大室山の主要な噴火推移と周辺地形 の形成プロセスを、これまでわかっている噴火 史<sup>7</sup>、新たな調査で得た地形・地質学的データ、 ならびにミュオグラフィから判明した密度構造と 合わせて、以下のように組み立てた(図3. 丸数字で <sub>形成順序を示す</sub>)。

まず,①溶岩流 I を西麓に流出させながら①ス コリア丘の大部分が形成された後,北東麓から② 溶岩流 II,南麓から②溶岩流 III があいついで流 出した。両者の流出口は溶岩流 I と違って大室山 の中心から離れているため,中心火道から放射状 に2方向への岩脈貫入が起きた先で流出口が生 じたとみられる。おそらくスコリア丘形成末期の 火道閉塞による中心火道内のマグマ増圧によって 岩脈貫入が生じたのであろう。なお,このときの 岩脈はスコリア丘の山体より下に位置するため, 今回のミュオグラフィの観測範囲外にある。

溶岩流 II と III の流出末期の粘性増加により両 者の流出口に③溶岩ドーム 2 つ(北東麓の岩室山と南 麓の森山)が形成して溶岩流出は停止した。このた



図 3-大室山の噴火推移と周辺地形の形成プロセス ス 詳細は本文参照。

め,出どころを失ったマグマが再度上昇し,山頂 火口内に④溶岩湖を形成した。

その後のさらなる増圧によって山体内の中心火 道から北北東,西,南南東の3方向に放射状岩 脈が貫入した(図3に示す3つの自破線矢印)。これらの 岩脈が今回透視されたものである。西に向かった 岩脈は山体の西麓に⑤溶岩流 IV を流出させ,南 南東に向かった岩脈は南山腹の⑤側火口を噴火さ せた。この岩脈貫入にともなうマグマ頭位の低下 によって山頂火口内の溶岩湖は消滅し(北東端部のみ 火口内に現存),噴火は終了へと向かった。

# 火山防災への見通し

火山の噴火にともなうドラスティックな現象を いち早く捉え,それが何をもたらすかを察知する ことは防災上きわめて重要である。しかし,従来 の観測技術では,観測データに生じる変化の意味 を的確に解釈して確度の高い警告に結びつけるこ とは困難な場合が多かった。

今回の研究によって大室山の詳細な噴火推移が 明らかになるとともに、とくに山体内の岩脈形成 と側噴火との関係が可視化された。こうした火山 内部のマグマ移動を直接可視化するという点にお いて、ミュオグラフィは従来の間接的な観測技術 と一線を画するものである。今後, ミュオグラフ ィの効率や解像度を一層高めていけば, たとえば 火山の中心にあるマグマの急激な側方移動を捉え た場合, 確たる根拠をもってその方角の山麓住民 を避難させることができるようになるだろう。

謝辞 ミューオン飛跡の読み取り装置とソフトウェアを使用さ せて頂いた名古屋大学の森島邦博・中野敏行の両氏に感謝する。

#### 文献

1一田中宏幸・竹内薫:素粒子で地球を視る.東京大学出版会(2014)

2-K. Morishima et al.: Nature, 552, 386(2017)

- 3—S. Miyamoto et al.: Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems, **11**, 127(2021); S. Nagahara et al.: Submitted to Bulletin of Volcanology(2022)
- 4—M. Yoshimoto et al.: Progress of Theoretical and Experimental Physics, **10**, 103H01 (2017)
- 5-K. Hamada et al.: Journal of Instrumentation, **7**, P07001 (2012)
- 6-小山真人:科学,**63**,312(1993);小山真人:伊豆の大地の物 語.静岡新聞社(2010)

7-古谷野裕・他:地学雑誌, **105**, 475(1996)

【小山真人・他:世界初の多方向3次元透視が明らかにした大室山の内部構造,本文 pp. 637-640】



### 図 2---大室山内部の 3 次元密度構造

(上)大室山スコリア丘の地形陰影図。静岡県高密度 点群データにもとづく 10 cm メッシュ標高データ を使用。(下)ミュオグラフィによって透視された大 室山内部の3次元密度分布。白丸はミューオン観 測ユニットの設置場所。西麓の溶岩流 IV ならびに 南山腹の側火口の位置と概形, 10 m 間隔の地形等 高線も示した。この図の 3D 画像を以下のサイトで 公開中。https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/CHEER/data/ omuro3ds/

【吉本充宏:富士山ハザードマップの改定,本文 pp. 641-646】



左は 2004 年版,右は今回改定した図。