

特集

世界初 噴火に伴う
マグマの動きを
動画で捉えた

世界初

宇宙線に含まれるミュオンという素粒子を使って物体を透視するミュオグラフィ技術が大きく進展した。田中宏幸教授らは、ノイズを従来の100分の1と極限まで下げた高感度のカロリメータを開発。それをういて薩摩硫黄島を観測し、噴火に伴って火山内部のマグマが上下する様子を透視動画として捉えることに成功したのだ。活動的な火山の内部を動画で捉えたのは世界で初めて。さらに、霧島山新燃岳では火口から5km離れた地点からの透視にも成功。ミュオグラフィによる火山の噴火予測の実現に大きく近づいた。

噴火に伴うマグマの動画で捉えた

高エネルギー素粒子
地球物理学研究センター

田中宏幸 教授

草茅太郎 大学院博士課程2年

鹿児島県の薩摩硫黄島の硫黄岳では、2013年6月3日からごく小規模な噴火が時々発生し、降灰も確認された。気象庁は6月4日に噴火警戒レベルを、平常の1から火口周辺規制の2に引き上げた。それを受けて田中教授は、ミュオグラフィによる薩摩硫黄島の観測を決めた。

ノイズを100分の1に低減

ミュオグラフィとは、宇宙線に含まれているミュオンという素粒子を用いて物体の内部を透視するイメージング技術である。ミュオンは厚さ数kmの岩盤も通り抜けて直進するが、密度が高い所を通ると数が減る。ミュオンが飛来した方向と数を測定することで、レントゲン写真のように、ミュオンが通過してきた物体内部の平均密度が分かるのだ(図1)。2006年に田中教授が浅間山の透視に成功して以降、世界中の注目を集め、ミュオグラフィは急速に発展してきた。

しかし、ミュオグラフィには課題もあった。「私たちは、火山内部のマグマの動きを動画のように見たいのです。それができれば、噴火メカニズムの理解や噴火予測に役立ちます。しかし、ノイズが多いため、1枚の透視像を撮るのに数十日かかっていました」。そう語る田中教授は、ミュオグラフィのノイズの低減に取り組んできた。

そして2013年、ノイズを従来の100分の1以下に低減したカロリメータの開発に成功(図1)。そのカロリメータは、ミュオンを捉える検出器(プラスチックシンチレータと光電子増倍管から成る)6台と、鉛の板で構成されている。鉛の板でノイズとなる放射線を取り除き、さらにカロリメータを直線的に通過したミュオンのデータのみを採用することで、ノイズの大幅な低減が可能になったのだ。透視動画実現の準備が整った。

薩摩硫黄島のマグマの動きを捉えた

「薩摩硫黄島を観測すると決めたものの、最初の難関がカロリメータの輸送でした」と田中教授。薩摩硫黄島が噴火したとき、カロリメータは北海道の有珠山麓にあり、試験観測を行っていた。総重量20トンにもなるカロリメータを日本列島の端から端まで輸送しなければならなかったのだ。しかも新型の輸送はそれが初めてだった。

大小さまざまなトラブルに見舞われながら運んだカロリメータを、硫黄岳山頂から1.4kmの地点に設置し、6月14日から観測を開始した。「実は、ドキドキでした」

と田中教授は笑う。「これまでミュオグラフィで観測したのは、活動期にない火山ばかりです。噴火している火山の観測は、私たちににとって初めてだったのです」

噴火警戒レベルが平常の1に戻った7月10日まで継続して観測を行った。そして、地下のマグマの動きを3日に1枚の透視動画として捉えることに成功した(表紙、図2)。赤はマグマなどの密度が高い領域、青は空洞など密度が低い領域だ。火山の内部が変動しているように見える。しかし、変動がどのような現象に対応しているのかわからない。そこで、透視動画と気象庁による遠望観測の記録を比較した。

気象庁の遠望観測では、6月16日に高さ400mの噴煙と火映が、また6月30日に高さ200mの噴煙と火映が捉えられていた。火映とは、上昇してきた高温のマグマによって火口の上空が夜間、赤く映える現象である。噴火が起きた6月16日と6月30日の透視像では、火口まで高密度領域になっている。そして、噴火から1~2日たった6月17日と7月2日の透視像では、火口周辺に低密度領域がある。「私たちは、火山内部のマグマが噴火時に上昇し、数日たつと下降する様子を動画として捉えることに成功したのです。それは世界で初めてです」と田中教授は解説する。

5kmの距離から新燃岳を透視

その後、カロリメータを鹿児島県の霧島山新燃岳に移動させた。2度目の移動は、前回の反省を活かしてトラブルも減った。新燃岳は2011年1月に噴火し、3000m上空まで噴煙が上がった。火口内では湖が消失し、溶岩があふれそうになっている様子も観測された。現在でも噴火警戒レベル2(火口周辺制限)が継続されている。

図1 ミュオンで火山内部を透視する仕組み

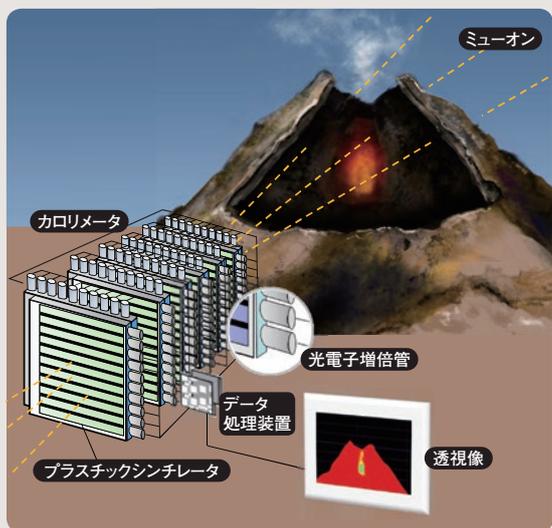
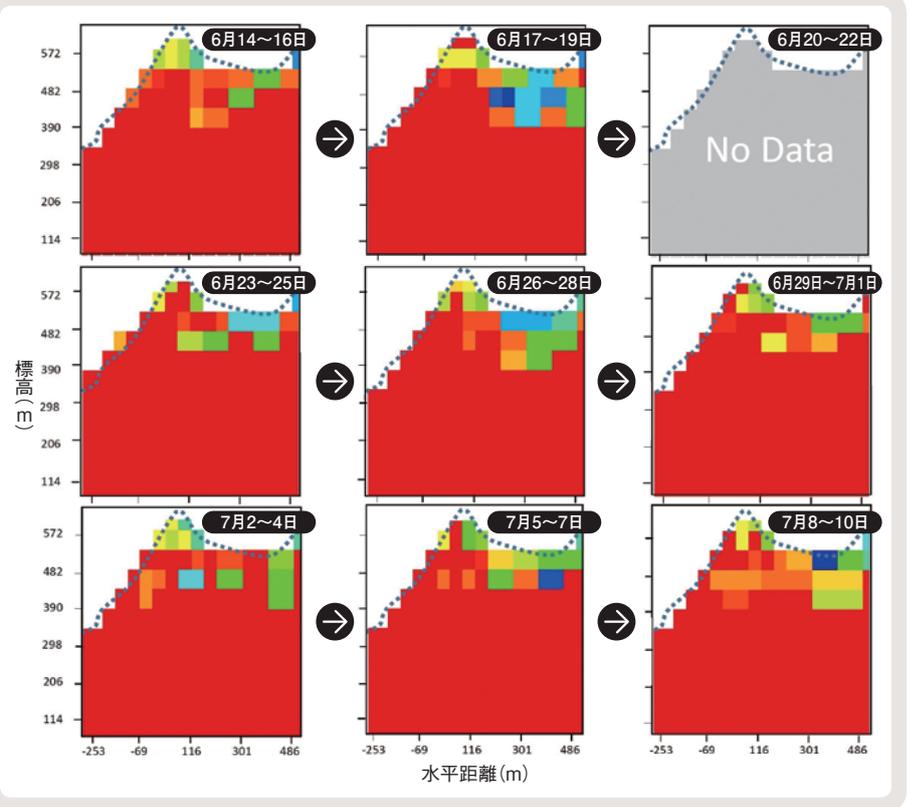


図2 薩摩硫黄島のミュオグラフィによる透視像の時系列変化

赤は高密度領域、青は低密度領域を表す。噴煙と火映が観測された6月16日と6月30日に、マグマ(オレンジ～赤)が上昇している。数日後にはマグマが下降し、空洞(黄色～緑～青)になっている。



動きを

火口から5kmの地点にカロリメータを設置し、2014年10月から観測を開始。遠い距離からのミュオグラフィ観測に薩摩硫黄島で用いたカロリメータが使えることを思い付いた大学院博士課程2年の草茅太郎さんだが、リアルタイムで送られてくるデータを見ながら、落ち着かない日々を過ごしていた。「世界的に見ても、これまでミュオグラフィの射程距離は最大1.5kmでした。それが5kmと遠い上に、新燃岳は薩摩硫黄島より山体が厚いので、ミュオンの数が少なくなってしまうため、十分なデータが得られるのか不安でした。3週間蓄積したデータを解析して透視像が得られたときは、ホッとしました」

図3が、今回得られた新燃岳の透視像である。点線が2011年の噴火前の火口の地形で、それより上の高密度領域は、噴火で噴出したマグマだ。火口の西部には低密度領域がある。2011年1月26日の噴火の噴出口が火口西部に確認されており、火道と呼ばれるマグマの通り道に溶岩が落ち込んで空洞になっている可能性がある。

田中教授は、「火口から5kmの距離から透視に成功したことで、活動的火山の観測をしていく自信ができました」と言う。噴火が起きると火口から3kmくらいは警戒域となって立ち入りが禁止される。活動的火山を対象とするには、3km以上離れても観測できることが必須条件なのだ。

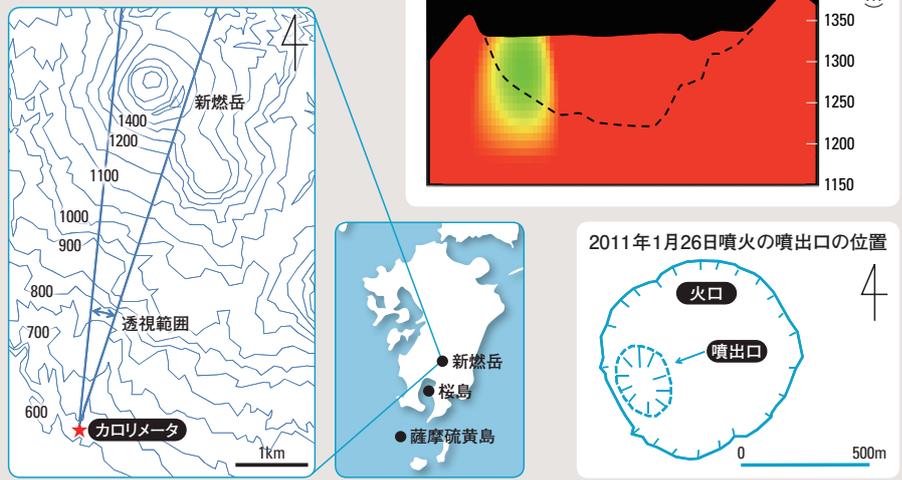
新燃岳の観測は約1ヵ月間行った。そして2014年11月上旬、カロリメータは桜島に運ばれた。桜島は1日に数回、爆発的噴火を起こしている。薩摩硫黄島とは異なるタイプの噴火に伴うマグマの動きを捉えるべく、京都大学防災研究所桜島火山観測所と共同で観測を行う計画だ。

火山の噴火予測の実現へ

2014年9月27日に長野県と岐阜県の境に位置する御嶽山が噴火し、大きな被害が出た。火山噴火予測の実現を期待する声は、さらに大きくなっている。

図3 霧島山新燃岳の透視像

新燃岳の火口から5kmの地点に検出器を設置して観測を行った。透視像の点線は、2011年の噴火前の火口の地形を示す。西部の低密度領域は火道で、噴火の後にマグマが下降して空洞になっている可能性がある。



ミュオグラフィで噴火予測を行うには、何が必要なのだろうか。田中教授は、「検出器の大型化」を挙げる。「高精度な噴火予測には、数時間から1日ごとの透視像が必要です。検出器の面積が広いほど短い時間で透視像を得ることができます」。現在の検出器は2m²だ。それを複数並べて同期させ、一つの大きな検出器にすることを検討している。

噴火の兆候がない火山にカロリメータを常時設置して監視するのは現実的ではない。火山性微動や山体膨張など噴火の兆候が

現れたら、カロリメータを設置して観測することになるだろう。迅速に移動できるように、カロリメータを車載型にすることも検討中だ。複数並べて大型化しやすく、車上にソーラーパネルを付ければ電源がない場所にも設置できる。

「現在、火山内部のマグマの動きを観測できる方法はミュオグラフィだけです。ぜひ噴火予測につなげたい」と田中教授。「その熱意は誰にも負けません」

(取材・執筆:鈴木志乃/フォトンクリエイト)

東京大学地震研究所外部評価

地震研究所の研究活動などに関して、有識者による外部評価が2014年6月に実施されました。高エネルギー素粒子地球物理学研究センター(CHEER)の設置以来の研究教育活動について、特に重点的な評価が行われ、以下のような概要が示されました。

- ① 2010年以降の研究開発によって、火山やその他の対象物のイメージングにおいて世界をリードする革新的な成果発表が行われた。
- ② 重力観測との連携など、今後のミュオグラフィのさらなる研究開発を、熱意を込めて支持する。
- ③ 地球深部の組成を直接的に調査・検証するためのニュートリノ観測計画を支持する。
- ④ 国際的な活躍を続けるために、地震研究所がCHEERの設立期間を更新するための努力をすることを強く推奨する。

なお、評価結果が確定次第、原文(英文および和訳)が、地震研究所のWEBサイトに掲載される予定です。



ミュオン・カロリメータの移設

霧島山新燃岳の観測に用いたカロリメータ(特集参照)を、10トトラック2台によって、2014年11月6日に桜島に移設しました。連日頻繁に爆発を繰り返す昭和火口直下の透視が可能になると期待されています。



▲カロリメータをクレーンでつり上げて、建屋のプレハブ内に据え付ける様子。

シンポジウムと国際共同研究協定

2014年11月12日に駐日イタリア大使館で国際シンポジウムを開催し、イタリア国立原子核物理学研究所(INFN)およびイタリア国立地球物理学火山学研究機構(INGV)と、東京大学との間で全学協定合意書が締結されました。



▲協定書を締結する、(前列左から)INFN副所長のStorolin教授、小屋口 地震研究所長、INGV火山部長のPapale博士。後列は駐日イタリア大使のGiorgi氏と桂 科学技術協力担当大使。
(The Japan Times紙2014/11/14付の掲載写真より転載[2014/12/9許諾])

論文掲載

「地球ニュートリノグラフィのデモンストレーション—地球ニュートリノグラフィに使える反電子ニュートリノ方向検知技術—」(原題⁶Li-loaded directionally sensitive detector for possible geo-neutrino-graphic imaging applications)が、『Nature』誌に掲載されました。

東京大学地震研究所で開発が進められている火山のミュオグラフィ技術と東北大学ニュートリノ科学研究センターの地球ニュートリノ観測技術を融合することで、地球内部を透視する地球ニュートリノグラフィに使える可能性のある反電子ニュートリノ方向検知技術を見いだしました。本技術を使えば、破局噴火を起こすような巨大マグマだまり、地球形成過程で局在化したコア・マントル境界の巨大不均質構造など、新たな観測窓を開けるほか、原子炉モニタリング、天体物理学への貢献などの波及効果も大きいことが予想されます。

次のWEBサイトから、どなたでもお読みになれます(英文)。

<http://www.nature.com/srep/2014/140424/srep04708/full/srep04708.html>

大学院進学への進路相談

地震研究所CHEERの研究室・研究設備を用いて、東京大学の大学院生として高エネルギー素粒子地球物理学の研究を行うことができます。CHEERの教員は理学系研究科の大学院指導教員として、指導に当たります。

研究室の見学、およびCHEER在籍の大学院生との面談も可能です。本ページ左下に記載されている広報担当まで、メールで申し込んでください。夏休みのオープンキャンパス・一般公開(2015年8月上旬の予定)などもご活用ください。CHEERは、伸び盛りのあなたを待っています!

高エネルギー素粒子地球物理学研究センター(CHEER)のミッション

「宇宙線ミュオンやニュートリノ等の高エネルギー素粒子を用いた、火山などの巨大物体の透視」という革新的技術を核に、組織的・有機的な理工学の研究開発及び若手研究者の育成を進める。

CHEER news 第6号

2015年1月発行

発行者
東京大学地震研究所
高エネルギー素粒子
地球物理学研究センター

制作協力
フォントクリエイト
(デザイン: 酒井デザイン室)

問い合わせ先
〒113-0032
東京都文京区弥生1-1-1
東京大学地震研究所
高エネルギー素粒子
地球物理学研究センター
広報担当

Eメール
Koho-cheer@eri.u-tokyo.ac.jp
ホームページ
<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/CHEER>