

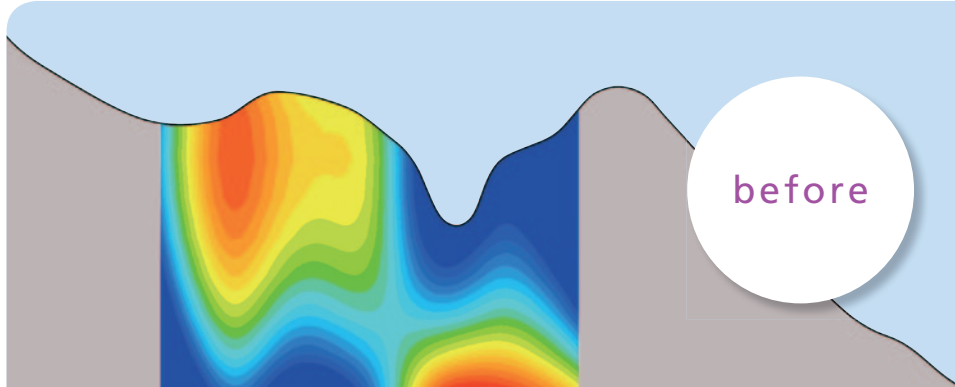
# CHEER news

素粒子で地球を覗く



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  
Center for High Energy gEophysics Research

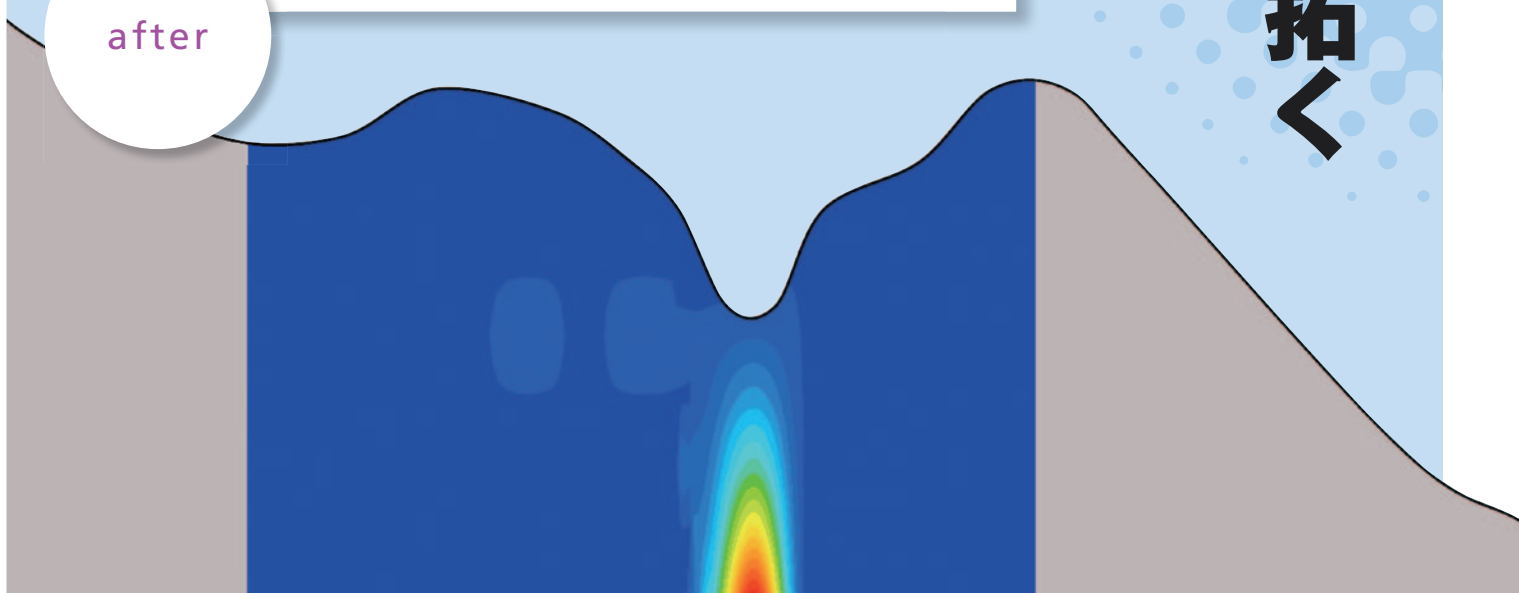
No. 1



ミュオグラフィによって得られた北海道・明治新山の透過像。  
従来方式 (before) と4層式カロリメータ (after) の比較。



after



特集

新しい地球科学  
ミュオグラフィが拓く

# ミュオグラフィが拓く 新しい地球科学

ミュオグラフィは、宇宙線に含まれる $\mu$ 粒子(ミュオン、ミュオン)という素粒子を使って物体を透視しようという新しい技術である。世界に先駆けてミュオグラフィによる火山の透視を成功させたのが、田中宏幸 准教授だ。そして、ミュオンやニュートリノなど高エネルギー素粒子を用いたイメージングの導入によって地球科学を発展させることを目指し、2010年、東京大学地震研究所に高エネルギー素粒子地球物理学研究センターが設立された。ミュオグラフィの最前線を紹介しよう。

## 世界初。 火山体内部の透視に成功

2007年、1枚の画像に注目が集まった。科学雑誌『Nature』のリサーチハイライトでは「Cosmic rays peek inside (宇宙線が中身を覗く)」というタイトルで紹介され、『Science News』や新聞各紙でも取り上げられた。その画像とは、ミュオグラフィによって得られた浅間山の透視像である(図1)。

「ミュオンを使って火山や巨大構造物の内部の密度構造が見えることは、原理的には1950年代から知られていました。しかし、観測に成功した例はなく、ミュオグラフィの実現には多くの研究者が懐疑的でした。だからこそ、私たちが示した浅間山の透視像に世界が驚いたのです」と田中准教授。

ミュオンとは、宇宙から飛んでくる宇宙線

図1 浅間山の透視像

点線は2004年9月に噴火する前の火口。火口壁の密度が高い領域(赤)は噴出して固まったマグマである。火口底直下の密度が低い領域はマグマが通る火道で、噴火が収まった後マグマが下って空洞になっている。

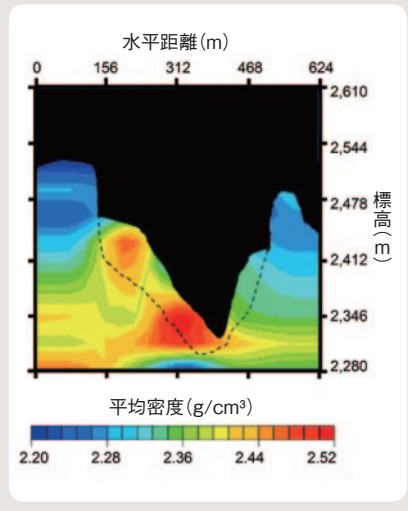
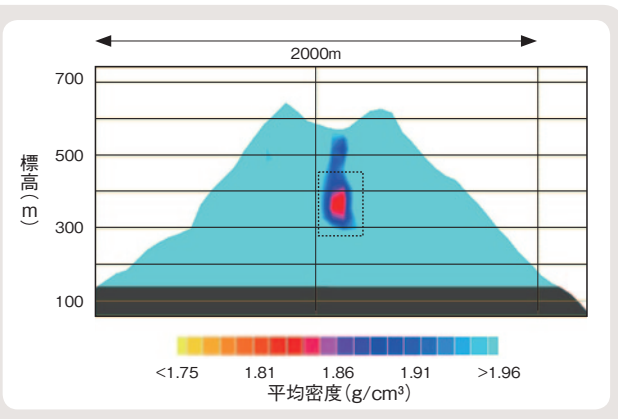


図2 薩摩硫黄島の透視像

火口の300mほど下に密度の低いマグマが見える。マグマの中でガスが発泡しているためだと推測されている。



が大気中の原子と衝突して発生する素粒子の一つで、物質を通り抜けて直進する性質を持つ(裏表紙「CHEER豆事典」参照)。「ミュオンは岩盤も通り抜けますが、物質の密度が高いところや厚いところを通ると数が減ります。一方、密度が低いところや空洞を通ると、数はあまり減りません。ミュオンが飛来した方向と数を測定することで、そのミュオンが通過してきた場所の平均密度が分かるのです。私たちは浅間山のみもとにミュオン検出器を設置し、2ヵ月間観測して内部の密度構造を得ることに成功しました」

## 素粒子で地球を覗く。 CHEER設立

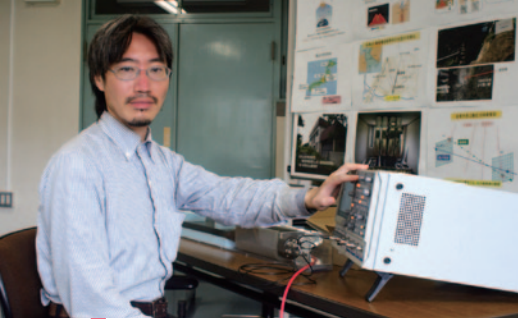
田中准教授は浅間山に続いて有珠山麓の昭和新山、薩摩硫黄島の内部密度構造を明らかにするなど、名古屋大学、北海道大学、産業技術総合研究所、高エネルギー加速器研究機構および地震研究所の研究者との共同研究を通じて、次々と成果を挙げていった(図2)。2008年には「International Workshop on High Energy Earth Science」と題した国際会議を東京で開催。なぜ「Volcanology(火山学)」ではなく、「Earth

Science(地球科学)」なのだろうか。

「ミュオグラフィは、火山だけでなく、地下の断層を調べるなど、地球の中を見る新しい手法として使えます。しかも、これまで地球内部の探査に使われてきた地震波より、はるかに細かく見ることができます。地球科学ではなじみのない素粒子を取り入れ、地球科学の新しい潮流をつくりたいのです。世界に先駆けて画期的な成果を出した日本こそが、この分野を主導していくべきです」

そうした背景から、2010年4月、高エネルギー素粒子地球物理学研究センター(Center for High Energy gEophysics Research:CHEER)が設立された。CHEERはその名前の通り、素粒子の中でも高エネルギーのミュオンやニュートリノなどを使って地球を調べることを目的としている。素粒子物理学と地球科学の学際的な領域であるため、文部科学省と東京大学の支援を受けて、地震研究所と東京大学大学院理学系研究科が共同で運営を行う。

「ミュオグラフィはまだ新しく、未熟な技術です。大きな潮流をつくるためには、性能が高く、使い勝手のいい技術にすることが必要です。私たちは、もっと厚く、もっと大きな物の内



**田中宏幸**  
高エネルギー素粒子地球物理学  
研究センター 准教授

部を透視できるミュオン検出器の開発に取り組んでいます」

### ノイズを抑えた 4層式カロリメータを開発

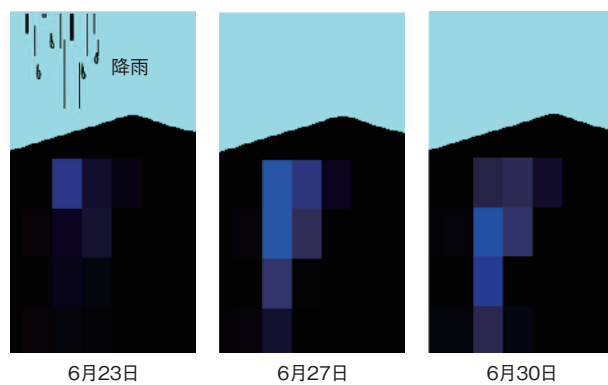
「現在のミュオン検出器の最大の問題はノイズ」と田中准教授は指摘する。

従来は、2台の検出器を少し離して設置し、ミュオンが2台の検出器を通過した点を結んで飛来方向を決めている。しかし、ミュオンは透視したい物体の方向から飛んでくるものばかりではない。検出器の上からも飛来する。偶然ほぼ同時に2台の検出器を2個のミュオンが通過した場合、1個のミュオンの飛跡であると誤認してしまい、それがノイズとなる(図3左)。そこで田中准教授らは、検出器を4台用いる4層式のカロリメータを開発している(表紙写真)。3層以上にすることで、ほぼ同時にミュオンが検出器を通過した場合でも、点を結んで直線にならなければ偽の信号だと分かり、ノイズとして取り除くことができるのだ(図3右)。

2011年、北海道大学有珠火山観測所との共同研究として、有珠山麓の明治新山(裏表紙「COVER」参照)で4層式カロリメータの試験観測を実施。その結果が、表紙の下の画像である。火口の下内部密度構造が見えている。表紙の上は、従来の装置で得られる画像を再現したものである。密度構造が見えているように思えるが、これらはノイズである。「4層式カロリメータは、従来の検出器

**図4 糸魚川—静岡構造線の北縁に位置する断層の透過像**

青は密度が高い領域で、雨水が断層破砕帯に染み込んでいく様子を捉えている。



と比べてノイズが90%削減されており、同じ精度の画像を得るのに従来の3分の1の観測時間で済みます。対象の厚さも従来の約2倍まで精度よく測定できるようになりました。さらに7層まで増やして層の数とノイズの関係を定式化し、対象物によって層の数を使い分けることを目指しています」

### 断層や地熱貯留層の 探査にも活躍

ミュオグラフィによって、地下の断層の透視にも世界で初めて成功した(図4)。雨水は地下に染み込んで断層破砕帯の隙間を埋める。すると、そこだけ平均密度が高まるので、ミュオグラフィによって断層が浮き彫りに見えるのだ。透視したのは糸魚川—静岡構造線の北縁に位置する断層で、これまで知られていなかった断層も発見した。ミュオグラフィは、トレンチや人工地震探査に加えて新たな断層調査の手法としても期待される。

「ミュオグラフィが役立つのは断層の調査だけではありません」と田中准教授。地下水は、地すべりの原因やトンネル工事の障害になる。ミュオグラフィで地下水の位置を調べることで、災害や事故の防止にも役立つという。「今、自然エネルギーの一つとして地熱発電が目立っていますが、熱を貯蔵している地層の探査にもミュオグラフィは使えます。また、石油を地下に備蓄したり、増加した二酸化炭素を海底下に貯留したりする計画がありますが、石油や二酸化炭素の漏出の監視

にも使えるでしょう」

### 地球科学の 新しい潮流を生み出す

ミュオグラフィには、まだ多くの課題がある。一つは、さらにノイズを減らし、観測時間を短縮することだ。「明治新山の透視像を1枚得るために10日かかっています。それを1日1枚撮れるようにしたい。そうすれば、マグマが上がってくる様子が見えて、火山の監視にも役立つでしょう」

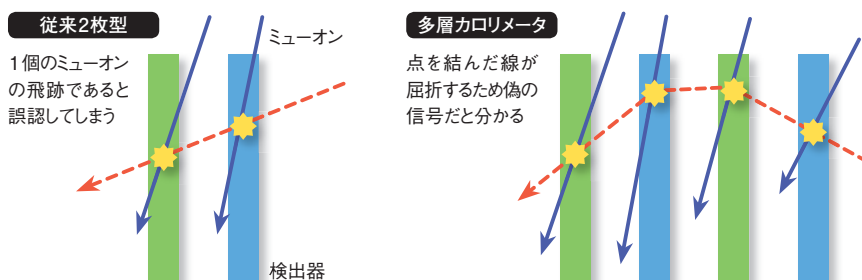
糸魚川—静岡構造線の断層は丘陵になっていたため、観測装置を地上に設置して観測できた。しかし、地下の断層を調べたり地熱貯留層を探査したりするには、地下を掘削し、直径10cmほどの掘削孔に装置を入れて観測しなければならない。装置の小型化や耐久性、耐熱性、省電力などが要求される。「100ピースのジグソーパズルに例えたら、現在のミュオグラフィはまだ3ピースくらいしか埋まっています。ミュオグラフィが誰でも使える技術になるにはまだ時間がかかりますが、1ピース埋めるごとに新しい地球が見えてくる。それが楽しいですね」

そして田中准教授には、温めている計画がある。「ミュオグラフィで火星の山を観測し、洞窟を見つけたいのです」。なぜ火星、しかも洞窟なのだろうか。「火星の生命探査が盛んに行われていますが、気温が安定していて有害な宇宙線が少ない洞窟にこそ、生命が存在する可能性がある」と私は考えています。火星で洞窟を見つけることができるのは、ミュオグラフィ以外にありません。NASA(アメリカ航空宇宙局)との共同研究を立案しています」

ミュオグラフィは、地球科学だけでなく、惑星科学における新しい潮流を生み出そうとしている。2008年の国際シンポジウムの参加国は4カ国だったが、2011年にCHEERが主催した第2回の参加国は11カ国にまで増えたことも、世界の潮流をリードしている証しと見える。

(取材・執筆:鈴木志乃)

**図3 バックグラウンドノイズの原因と除去方法**



# TOPICS

## センター・プロGRESS・レポート公開

平成23年度の研究成果の科学的・技術的短報(英文)を、『プロGRESS・レポート』としてWEB上で公開致しました。[http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/CHEER/Progress Report](http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/CHEER/ProgressReport) をご覧ください。

## 共同研究の募集

地震研究所の共同利用の枠組みで、特定共同研究(B)に課題「共通モジュール開発を通じたミュオグラフィ測定要素技術の体系化」を設定しました。このテーマについて共同研究を希望する方のエントリーを歓迎致します(締め切りは2012年10月31日)。エントリー期間、資格などの詳細は<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sharing> をご参照の上、ふるってご応募ください(WEB申請)。

【共同研究概要】従来からの地震学・火山学的应用に加え、新たに地熱/資源貯留層モニタリングや海底資源探査などの地球工学分野、歴史的巨大構造物の耐震構造評価などの防災工学分野などへの、ミュオグラフィ(ミュオンを用いたラジオグラフィ)の応用が期待されている。これらの期待に応えるためには、共通モジュールとして、耐水・耐圧・耐熱・高分解能センサー、坑井内センサーなどの開発が不可欠となる。本共同研究では、これら要素技術の開発と体系化を目指し、地球科学や地球工学への総合的なフィードバックを行っていく。

# INFORMATION

## 受賞

●西山竜一  
「宇宙線ミュオンラジオグラフィと重力観測を組み合わせる昭和火山溶岩ドームの内部密度構造」  
日本測地学会 学生による講演会優秀発表  
(2011年10月28日)

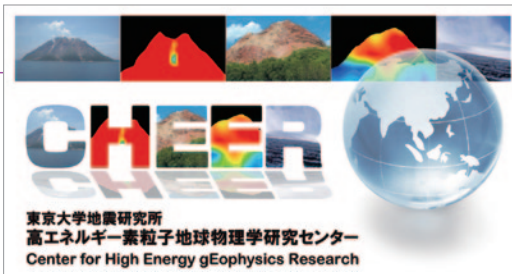
## 人事

●相原博昭・大久保修平  
日本学術会議会員就任(2011年10月1日)  
●相原博昭  
理学系研究科長就任(兼務)(2012年4月1日)

# COVER

明治火山は北海道の有珠山麓にある。左の写真は、明治火山の1910年(明治43年)の噴火の様子。大森房吉の英語論文“The Usu-san eruption and earthquake and elevation phenomena”(1911年)に掲載されたもので、ミュオン透視を行った方向とほぼ同じ向きから撮影されている。

右の写真は、現在の明治火山(写真提供:北海道大学有珠火山観測所)。ミュオン透視観測点の裏側に当たる洞爺湖側から撮影。100年の歳月を経て樹木に覆われ、往時の激しい噴火は外見からは想像できない。



## CHEERのロゴ紹介

最上段の5つのフレームは、左から、薩摩硫黄島火山の外観、同火山の内部密度(ミュオン透視画像)、昭和火山の外観、同山の内部密度(ミュオン透視画像)、浅間山ミュオン観測装置設置点から望む浅間山です。ミュオン透視画像において、赤は高密度、青は低密度の領域を表しています。マグマの存在や、その通り道のサイズ・位置を示す画像として、世界的に注目を集めています。

## 大学院進学者の進路相談

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。

本号特集で紹介したカリリメータや研究室の見学、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。

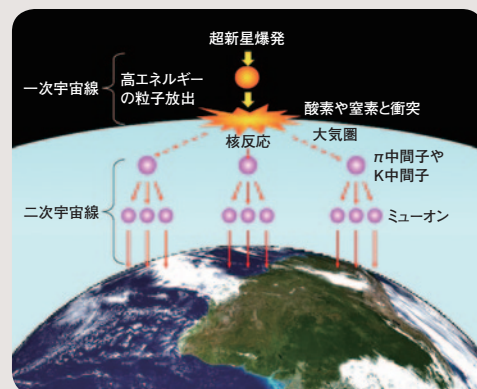
## CHEER 豆事典 ①

### 宇宙線ミュオンとは

超新星残骸などから、高エネルギーの陽子や原子核が放出されます。これを一次宇宙線といい、地球にも大気上層部に降り注ぎます。一次宇宙線は大気の原子核と衝突し、さまざまな過程を経て、中間子、ニュートリノ、ミュオンなど別の粒子に形を変えて、地表に降り注ぎます。これを二次宇宙線といいます。

中でもミュオンは、1cm<sup>2</sup>あたりに毎分約1個と数多く降っており、これは一晩寝ている間に人の体を100万個ほどが通り抜けていることになります。高エネルギーのミュオンは透過力が強く、一部は吸収されるものの、5km程度の厚さの岩盤であっても透過することができます。

CHEERでは、この宇宙線ミュオンを用いて、地球惑星科学の研究を行っています。



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1号

2012年9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>