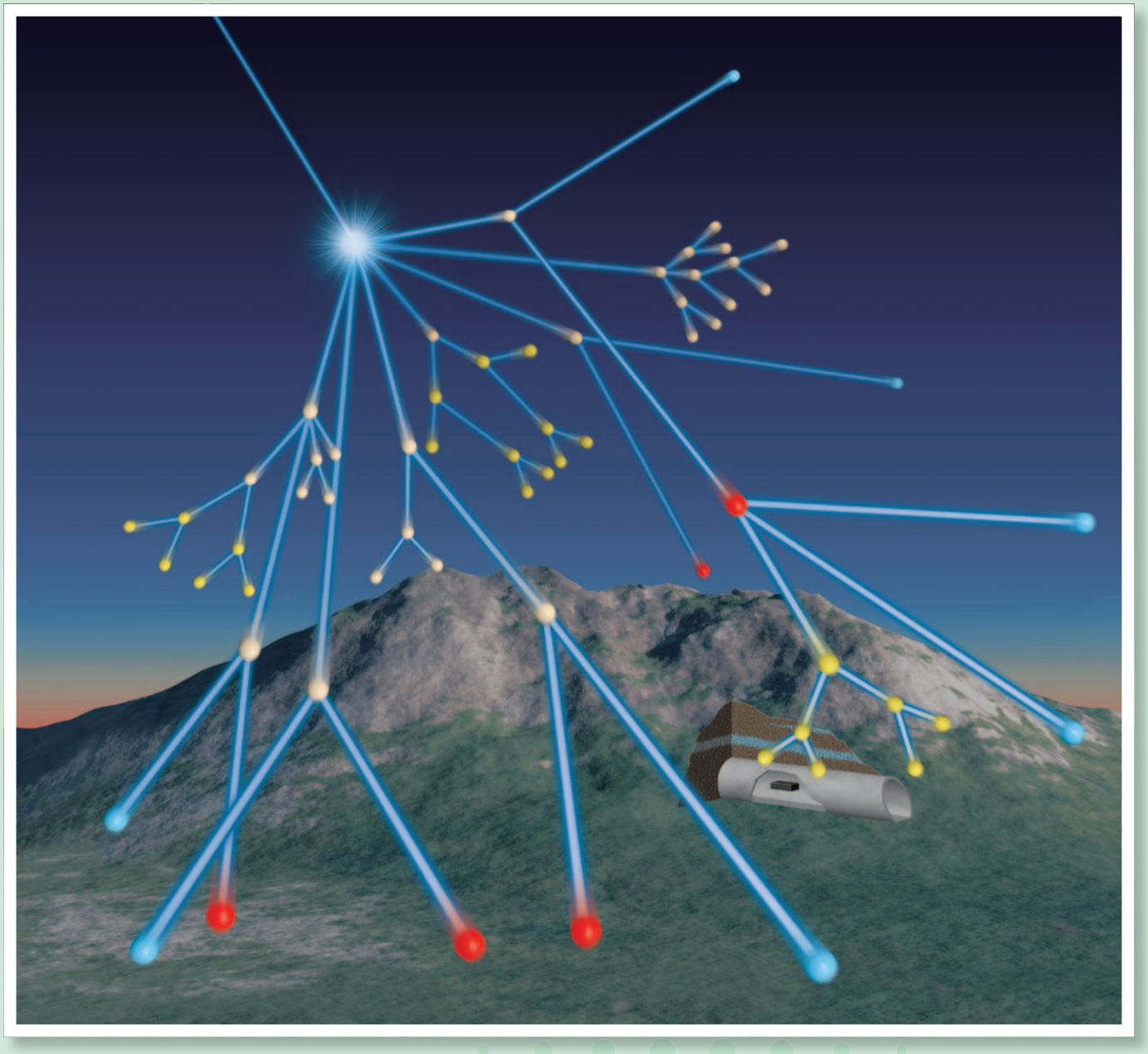
CHEER news

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.4



特 集

CHEERの3本の矢
―ミューオン、ニュートリノに続く第3の透視技術

CHEERの3本の矢
――ミューオン、ニュートリノに続く第3の透視技術

高エネルギー素粒子地球物理学研究センター　助教　武多昭道

ミューオン観測の最大の敵を利用する

「宇宙線に含まれるミューオン以外の電磁成分って、何かに使えないかな――すべての始まりは、田中宏幸教授のこの一言でした」と武多昭道 助教は振り返る。

ミューオンは素粒子の一つで、透過力が強く、物質を貫通していく。それでも、密度が大きいところを通ると数が少し減る。その性質を利用し、ミューオンが飛んできた方向と数を測定することで、通過してきた場所の平均密度が分かる。CHEERでは、世界に先駆けてミューオンを用いた透視技術「ミュオグラフィ」を開発し、火山の透視に成功している。

「宇宙線にはミューオン以外にも、電子や陽電子、ガンマ線などの電磁成分が含まれていて、それらがミュオグラフィにとってノイズになります。私たちは、宇宙線に電磁成分がどのくらい含まれているかを調べ、ミュオグラフィの精度を向上させようとしていました。データもまとまり一区切りついたと思ったとき、田中先生が、ふとその言葉を発したのです」

2011年の初めのことだ。「正直、何を言っているんだろう、と思いました。電磁成分はミュオグラフィの最大の敵です。敵方のノイズを使うという発想に驚愕しました」と武多助教。「本当は、できませんね、と言って終わりにしたかったのですが、簡単な実験をやってみると、宇宙線の電磁成分を使って透視ができそうだと分かってしまったのです」

粒子がすべて物体を貫通してしまったり、逆にまったく貫通しなかったりでは、全面が真っ黒か、真っ白の透視画像しか得られない。これでは物体の内部を探ることはできないから、対象によって適切な粒子を選ぶことが、透視の鍵を握っている。宇宙線の電磁成分は、X線で見るには大き過ぎてミューオンで見るには小さ過ぎる、数mから数十mの物体を透視するのにちょうどよかったのだ（図1）。

水は10cm、コンクリートは5cmの厚さの違いを測定可能

では、電磁成分による透視には、どのような用途が考えられるのだろうか。「そのころ、2011年3月の東北地方太平洋沖地震に伴って福島第一原子力発電所の事故が発生し、原子炉や燃料プールの水位が分からないことが問題になっていました。電磁成分を使うと、水であれば10cmの厚さの違いを測定できるので、原子炉や燃料プールの水位を調べることも可能です。また、コンクリートであれば5cmの厚さの違いを測定できるので、コンクリートが劣化して内部に空洞が生じていないかを調べることもできます」

電磁成分を検出する方法の開発も進めた。「問題は、いかに宇宙線から電磁成分だけを分離して捉えるかです」と武多助教は言う。加速器では、強力な磁石を使って電子や陽電子を分離している。しかし、その磁石は高価で、しかも巨大で非常に重いので野外での観測には使えない。武多助教は、ほかに方法はないかと考えた。

そもそも宇宙線とは、星が爆発してできる超新星残骸などから放出される陽子や原子核である。それが地球に入ってくると、大気の原子核と反応してニュートリノやミューオン、電子、陽電子、ガンマ線などがつくられる（表紙）。粒子の束がシャワーのように広がっていくことから、空気シャワーと呼ばれている。

「ミューオンは1個ずつ飛んできます。一方、電磁成分は複数個がまとまって同時に飛んできます。検出器が捉えた反応が1個の粒子によるものならばミューオン、同時に入ってきた複数の粒子によるものならば電磁成分として統計的に処理することで、電磁成分だけを分離できるはずです」と武多助教。そして原理実証にも成功。宇宙線の電磁成分を用いた透視の基礎はできた。

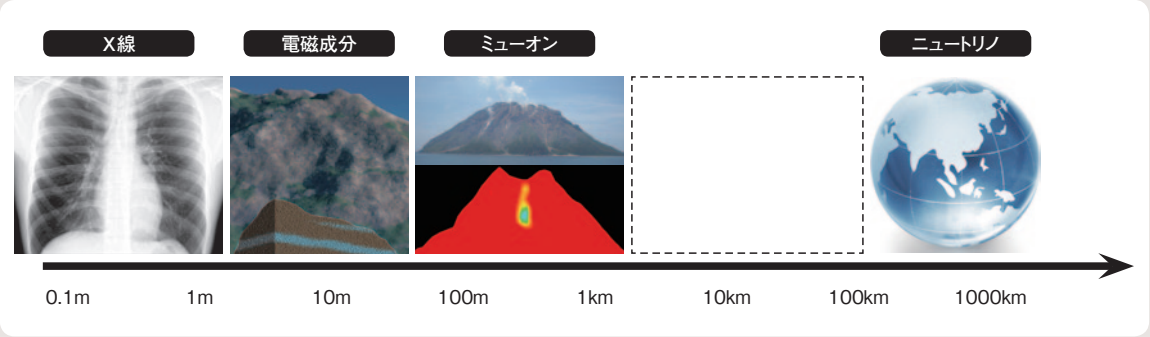
世界初の画期的な技術である。しかし、田中教授と武多助教は思い悩んでいた。「原子炉の水位や建物の損傷の調査は、地震研で扱っている対象と懸け離れています。地球科学の発展に寄与するような用途がなければ、この研究を進めていくのは難しいのではないか。そんな話をしていました」

土壌水分量を見る

そんなある日、武多助教は、地震研2号館の廊下で大久保修平センター長から、「電磁成分は透視に使えそうですか？」と声を掛けられた。「建物の中の水は見えることは分かったのですが……と話すと、大久保センター長は、『建物の中の水が見えるということは、土

図1　それぞれの粒子による透視可能な物体の大きさ

粒子によって物質との相互作用の強さ、つまり透過力が異なる。X線は数十cm、電子や陽電子やガンマ線を含む電磁成分は数mから数十m、ミューオンは数十mから数km、ニュートリノは数千kmの物体を透視するのに適している。



高エネルギー素粒子地球物理学研究センター（CHEER）では、宇宙線に含まれるミューオンを用いて構造物を透視するミュオグラフィによって、火山の内部構造を次々と明らかにしてきた。ミューオンの観測では、宇宙線のほかの成分である電子や陽電子などの電磁成分がノイズとなる。武多昭道 助教は、邪魔者とされていた電磁成分を用いた透視技術を開発。土壌水分量を測定できる画期的な新手法として、火山内部のマグマ運動の理解や土砂災害の防止に役立つと期待されている。

壌水分も見えるよね』とおっしゃったのです」

大久保センター長は、重力計を使って火山の活動を調べる研究を行っている。地下に密度が大きい物があると重力は大きくなる。重力を測定することで、火山の内部にどのくらいマグマが存在しているのかを知ることができるのだ。しかし、重力の変動はわずかである上に、土壌水分の影響を受けてしまう。電磁成分を用いて土壌水分の量を測定できれば、重力の値を補正し、火山の内部を精密に知ることが可能になる。「まさに地球科学の発展に役立つ用途です。土壌水分の測定をターゲットに研究を進めてみることにしました」

大久保センター長との立ち話が2011年夏ごろのことだ。武多助教はすぐ、鹿児島県の桜島で試験観測を行うための準備を始めた。「ミューオンの観測などに使用していたプラスチック・シンチレータや光電子増倍管など、あるものを集めて検出器をつくりました。大変ですが、工夫しながらつくっていくのは面白いものです」

2011年9～12月に、京都大学防災研究所と国土交通省大隅河川国道事務所の協力のもと、桜島有村観測坑で試験観測を実施。有村観測坑は、桜島の南側斜面に掘った長さ300mほどのトンネルで、その中に検出器を設置した。雨が降ると、検出器の上を覆っている山腹で土壌水分が増える。土壌水分が増えるほど、電磁成分は減衰し、検出器に到達する強度が弱くなるはずだ。

「観測結果を見ると、見事に降水量と電磁成分の強度が逆相関していました（図2）。まずは成功」と武多助教。「次の目標はリアルタイム観測です。この研究で科研費や所長裁量経費を頂くことができたので、新たな検出器を製作しているところです（図3）。今年度中の観測実施を目指しています」

これまで土壌水分の量を知るには、地下水位や誘電率などを用いて間接的・局所的に測定する方法しかなかった。電磁成分を用いて土壌水分の総量を測定し、従来の方法と組み合わせることで、重力の測定値の補正に大いに役立つと期待されている。

地すべりの発生を予測し、防災に役立てる

「電磁成分を用いた土壌水分量の測定は、火山研究以外でも注目されています。地すべりの発生の予測です」と武多助教。

集中豪雨などによって地すべりが発生し、大きな被害が出ている。現在は、降水量などから地すべりの危険を予測しているが、重要なのは、土壌がどのくらい水を含んでいるかだ。地すべり地帯などにある水抜き孔に電磁成分の検出器を設置して土壌水分量をモニターすることができたら、地すべり発生の危険を正確に把握し、防災に役立てることができる。2014年度には、地すべりが懸念される地域での試験観測を行う計画だ。

三人寄れば……

武多助教は、「この研究は、3人がいたことで生まれたものです」と言う。「宇宙線の電磁成分が何かに使えないかと言った田中教授、土壌水分が見えないかと言った大久保センター長。そして私も宇宙線についての知識で貢献できました」。武多助教は、東京大学宇宙線研究所で宇宙から飛来してくる超高エネルギー宇宙線の起源を探る研究を行っていた。宇宙線の電磁成分を統計的手法で分離するというアイデアは、空気シャワーについて熟知しているからこそ出たものだ。

武多助教は、なぜ地震研へ籍を移したのだろうか。「地震研でミューオンを用いた研究をしていることも、詳しくは知りませんでした」と笑う。「私はものづくりが好きで、得意です。地震研で取り組んでいる研究では、新たな装置の開発が不可欠です。ここなら、ものづくりが得意という私の唯一の取りえを活かせると考えたのです。研究分野にはこだわっていません。どこにいても通用する人でありたい、必要とされる人でありたい。そう思っています」

武多助教の研究室をのぞくと、組み立て中の装置などが所狭しと並んでいる。それもそのはずだ。電磁成分を用いた透視のほかに、ミューオンを用いた断層の透視、さらにはニュートリノを用いて地球内部の化学組成を求めるという研究も行っている。「粒子が違えば、見る対象も検出器も解析方法も変わります。今は、とにかく大変で、つらいです。でも、もしかしたら何年か先、それらをやっていたからこそできる研究があるかもしれない。そんなことも期待しながら取り組んでいます」

ミューオンとニュートリノで透視できる物体のサイズには、ギャップがある。10～1000kmの物体を透視する技術は、まだない（図1）。ミューオン、ニュートリノ、電磁成分に続く第4の透視技術の誕生も待たれている。

（取材・執筆／鈴木志乃）

図2　桜島有村観測坑における試験観測の結果

青は2時間あたりの降雨量。このときの電磁成分の強度変化を赤丸で示した。強度の単位のmHzは、1000秒間に1回空気シャワーが到来することを意味する。雨が降り始めて数時間すると、強度は平均値（赤線）以下に低下した。

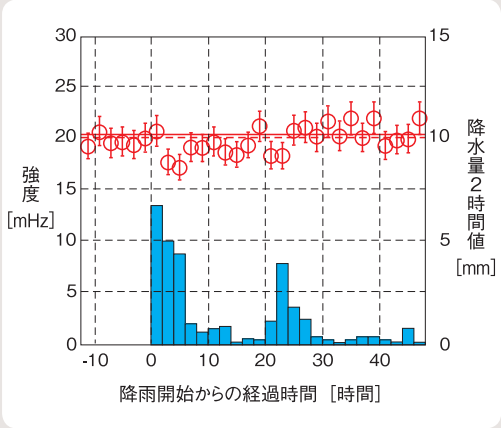
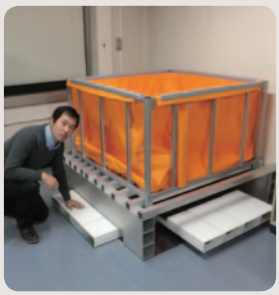
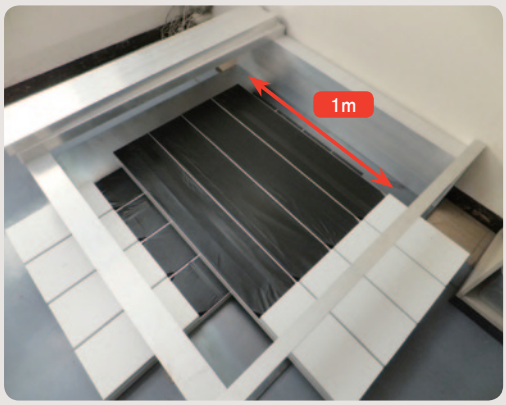


図3　開発中の電磁成分検出器

下の写真の黒い部分の中には電磁成分が入ってくると発光するプラスチック・シンチレータがあり、出てきた光を白い箱の中の光電子増倍管で検出する。シンチレータの大きさは、長さ1m、幅20cm。右は、検出器の上に検出器較正用の水槽を設置している武多助教。





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

「宇宙線ミュー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。

TOPICS

受賞

田中宏幸教授が2012年度のEPS賞を受賞し、2013年5月19日、幕張メッセ国際会議場で授賞式が行われました。独自の視点をもって新しい計測システムを開発し、ミューオンによる火山の内部構造の測定手法を展開させたことが、ユニークでオリジナリティーあふれる研究と評価されたものです。

EPS賞は、固体地球惑星科学の5学会が共同刊行する国際英文雑誌『Earth Planets Space』に掲載された論文の中から毎年、特に優れた1編に授与されるものです。

国際シンポジウム

●IAVCEI（国際火山学・地球内部化学協会）の学術総会が、2013年7月20～24日に開催され、田中宏幸教授がミューオンを用いた火山学の分科会の座長を務めました。

●MNR2013「ミュオン、ニュートリノによる素粒子地球物理学とその応用」を2013年7月25～26日に東京都内で主催しました。わが国を含む6ヶ国から70名が参加しました。

●Workshop on Particle Geophysics「素粒子地球物理学に関する国際ワークショップ」を2013年10月30日、東北大学青葉記念会館で、東北大学ニュートリノセンターと共同主催しました。国内外から32名が参加しました。

EGUハイライト論文

EGU（European Geosciences Union：欧州地球科学連合）は、自らが発行するオープン・アクセス学術誌全15誌の中から特に優れた論文約200編を、ハイライト論文として顕彰しています。このたび、2013年のハイライト論文として、以下のCHEER関係の論文3編が選出されました。これらの論文は、http://www.egu.eu/publications/highlighted-papers/?journal=gi&limit=10にアクセスすれば、どなたでも読むことができます。

●火星探査にミューオン透視を用いる提案
Kedar, Tanaka *et al.*, Muon radiography for exploration of Mars geology, *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2, 157-164, 2013.

●ミューオン透視を用いた断層・地熱貯留層の調査
Tanaka and Muraoka, Interpreting muon radiographic data in a fault zone: possible application to geothermal reservoir detection and monitoring, *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2, 145-150, 2013.

●ミューオンによるストロボ透視（高速連続画像）
Tanaka, Development of stroboscopic muography, *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2, 41-45, 2013.

大学院進学の進路相談

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。冬休み、春休みなどの時期もご活用ください。CHEERは、伸び盛りのあなたを待っています！

INFORMATION

人事

●宮本成悟　採用（研究員→助教）（2013年7月16日）
●Chiara De Sio　イタリア・サレルノ大学との共同研究のため一時滞在（2013年12月2～13日）

CHEER newsバックナンバー　http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/CHEER/newsletter.htmlで公開

CHEER豆事典 4

宇宙線って、変身したり、増殖したりするの？――空気シャワーの巻

空気シャワーという言葉を聞いたことがありますか？ 精密機械工場のクリーンルームなどに設置され、空気の流れで、体に付いたほこりを落とす装置のことです。

しかし、ここでは別の意味で、宇宙線がつくる空気シャワーについて説明します（表紙イラスト）。大気圏外からやって来る宇宙線の正体は、主に陽子やヘリウム原子核です。これが大気の原子核と反応すると、多くの二次粒子（主にパイ粒子などの中間子）が生まれます。その二次粒子の一部は、ほかの大気の原子核と衝突してさらに別の粒子をつくります。残りは崩壊して、ミューオン、ニュートリノ、電磁成分へと変身します。このようにして、1個の親粒子から、数多くの娘粒子や孫粒子が生成されますが、これらの粒子の集団のことを、空気シャワーと呼びます。

大きな空気シャワーになると数千億個の二次粒子が生まれますが、本号の研究では、数個の二次粒子から成る、比較的小規模の空気シャワーを用いています。

CHEER news 第4号

2013年12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
フォトンクリエイト
（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