

科学の  
峰々

90

取材日：2016年11月29日  
東京科学機器協会会議室東京大学 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  
高エネルギー素粒子地球物理学分野教授

田中 宏幸 先生に聞く

ミューオン素粒子研究と  
巨大物体の内部を覗く  
21世紀の透視技術  
ミュオグラフィ 下聞き手：柴田 眞利 日本科学機器協会 広報委員長  
藏満 邦弘 同 専務理事  
岡田 康弘 同 事務局長

(取材・撮影・編集協力：クリエイティブ・レイ(株) 安井久雄)



## 田中 宏幸 先生のプロフィール

## 〈経歴〉

12004年 名古屋大学大学院博士課程短縮修了  
 2004年 カリフォルニア大学リバーサイド校博士研究員  
 2006年 日本学術振興会特別研究員  
 2008年 東京大学地震研究所特任助教  
 2010年 東京大学地震研究所准教授  
 2013年 東京大学地震研究所 高エネルギー素粒子地球物理学分野教授

## 〈賞〉

日本鉄鋼協会俵論文賞  
 NPO法人日本火山学会論文賞  
 EPS(地球電磁気・地球惑星圏学会、(公社)日本地震学会、  
 火山学会、日本測地学会、日本惑星学会の5学会)賞



## 沈み込む海洋プレートと火山噴火との関係

— これまでミュオンを使って火山の内部などを透視するミュオグラフィについてお話を伺ってきました。それに関連して、そもそも火山噴火はどうして起こるのか、火山とはどのようなものなのか、お聞かせいただけますか。

**田中** 火山の下には、地球を構成している岩石が溶けて溜まったマグマだまりがあります。そのマグマだまりにマグマが上がってくるのは、海洋プレートと大陸プレートの動きが大きく関係しているのです。

火山列島の日本では、海洋プレートがゆっくり時間をかけて大陸プレートの下側に沈み込んでいきま

す。その際、海洋プレートの上層部の岩盤は、海水に接しているので水を含んでいます。

水を含んだ海洋プレートの岩盤は、固体が溶けて液体に変化する融点下がります。それが地下に潜っていくと、融点温度が低いため、岩石の水を含んだところが選択的に溶けていきますので、溶けにくい固体の岩石の中に液体ができる状態になります。

そのような状態になると、固体より液体の方が浮力があるので、水を含んで溶けたマグマは長い時間をかけて岩盤の中をゆっくり浮き上がっていきます。そして、マグマが溜まりやすい地形があると、そこにマグマが流れ込みマグマだまりができます。

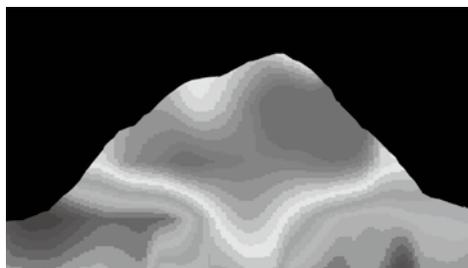
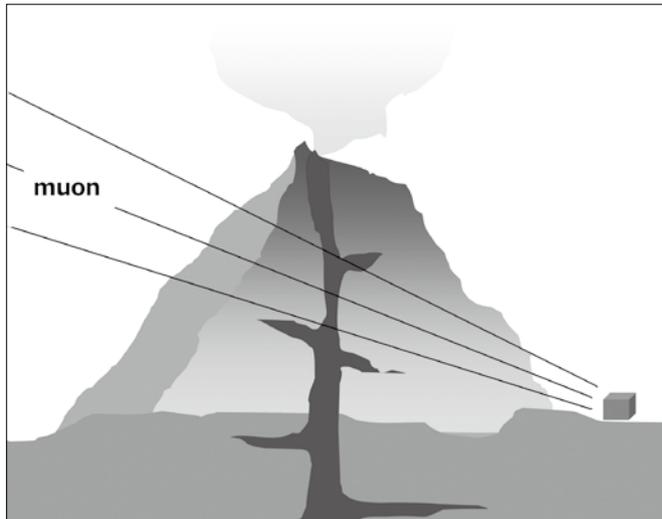
火山によりますが、マグマだまりはだいたい地下3～5キロメートル

のところでき、そのマグマだまりの上に火山が存在するのです。つまり、火山噴火の規模は、このマグマだまりの大きさが分かれば、おおまかな予測ができます。

活火山は、熱いマグマが地球内部から次々に供給されるので、マグマだまりには圧力が溜まり、徐々に膨張していき、火口付近では地表が盛り上がったたり、広がったりします。このような盛り上がりや広がり近年合成開口レーダーの技術を用いて観測できるようになってきています。

## 時間への興味から 相対論的物理学へ

— ミュオグラフィは、素粒子の研究から生まれた技術であるわけですが、田中先生はどうして



↑火山の構造とミュオグラフィ画像  
銀河系宇宙から飛来してくるミュオン素粒子を地上のミュオグラフィ装置でとらえて火山の構造を画像化する。



↑巨大物体の可視化に取り組む田中先生(右)とハンガリー科学アカデミーウィグナー物理学研究センターのデッソ・ヴァルガ准教授。(左)

2016年9月、大阪市立科学館と東京大学地震研究所が連携して主催された展示会では、最先端の研究を実用化している日本の技術力を体感して、科学に興味を持っていただくことを目的にミュオグラフィ装置が公開された。

会場では、ミュオンが通過すると、その飛来をランプの点灯で伝える装置(写真)を展示。会場の大阪市立科学館の建物から、直接見えない近隣のビル群の姿をモニターに映し出す実験が紹介された。

物理学や素粒子研究の道に入れたのか、その理由や経緯などをお聞かせいただけますか。

**田中** あまり自己分析をしたことはなく、答えにくいのですが、私は小さい頃から「時間」の構造に興味を持っていました。

もともとニュートン力学では、時間は空間とは独立した1つのパラメータに過ぎませんでした。そこにアインシュタインが時間と空間を不可分な存在として四次元空間に組み入れたことで、空間の一部としての物理学的な存在意義を得ました。

もう1つ、直感的な話として、時間をどう定義するのかという問題があります。時間とは記憶を積み重ねているだけで、私たちに記憶がなければ、時間は存在しません。過去があるのは過去の現象に私たちの脳が反応するからです。空間は別の問題で、あるものが入るか入らないかという話です。そういう問題が、まず私の頭の中にありました。

では、そんな私が物理学を研究する上で何をやりたいのかというと。例えば、仮に時間に興味があったとして、タイムマシンを作りたいと考えても、タイムマシンを作るための方法論が思いつきません。

そこで、時間が組み入れられている理論に最も近いところにある研究は何かと探したところ、相対性理論の延長線上にあるものが宇宙物理学でした。宇宙では普段私たちが目にする日常的な現象

からかけ離れた物理が展開されていると考えたからでした。

私が特に興味を覚えたのは、私たちの近いところにあるものと、遠いところにあるものが、同じ物理法則に従って動いているのかということでした。それを調べる方法として天文学がありました。私は天文学があまり好きになれませんでした。また、物理学をやっていくためには、現象そのものではなく、根源にある法則をいかに抽出するかが大切だと感じていました。

その当時、流行っていた言葉はブラックホールで、ブラックホールを衝突させるとどうなるのか?という研究も盛んでした。

ブラックホールの衝突のシミュレーションは私も面白いと思ったのですが、本にまとめられている研究はすでに成果が出ているということなので、新たな発見を得ることは難しいと感じました。やはり、研究をするからには自分自身で新しいものを作り出す研究をしたいと思ったのです。

その頃、ちょうど素粒子物理学に関する情報が周囲の研究者から入ってくるようになりました。もともと時間的な物理学が好きだったこともあり、また馴染みもあったので、相対論的物理学をベースにした素粒子物理学も候補に入れたわけです。

— 田中先生は「ミュオグラフィ」とどのようにして出会ったのでしょうか。

**田中** 素粒子物理学は加速器ができたころに全盛を迎えたのですが、その当時の素粒子物理学の人気は非加速物理学に移っていったところでした。つまり、岐阜県の神岡にあるスーパーカミオカンデに代表されるニュートリノの研究です。

ただ、加速器を使って面白い素粒子の研究をするという道も残っており、その分野で研究をしている人もいました。私も関心はあったのですが、加速器の問題点は規模がとて大きく、費用がかかることです。加速器を1日動かすだけで100万円から数百万円はかかり、研究を行う組織も大きくなります。私としては、大きな組織に参加したとしても、自分が主体的に動くことは難しいと感じました。

素粒子研究は、加速器ができる前に全盛だった宇宙線の研究があり、そこから加速器へ移り、そして再び宇宙線へ戻るという流れがありました。

私も宇宙に興味があったので、宇宙線の研究も1つのターゲットと考えるようになり、そんなとき、宇宙線を使って火山の内部を探索する研究をしている人がいると耳にしたので、理化学研究所へ行って話を聞かせてもらいました。それがミュオグラフィとの出会いです。

— ちなみに、素粒子物理学と量子力学の違いとは、何なのでしょうか。

**田中** 素粒子物理学と量子力学は本質的には同じものですが、人

によって定義が変わるかもしれません。

そもそもこの分野は、素粒子物理学、原子核物理学、非加速器物理学など様々なサブカテゴリがあります。私の理解では、まず、高エネルギー粒子を使うのが素粒子物理学となります。

高エネルギーとは、相対論的な効果が表れるエネルギーを持つ素粒子で、自分より重いキネティックのエネルギーを持っているような粒子です。素粒子物理学と非相対論的量子力学の違いは、相対論的か、そうでないかということになります。

そして、加速器の研究者は、止まっているターゲットに粒子を当てるのが原子核物理学で、ニュートリノの研究は非加速器物理学と呼ぶこともあります。

### 暗黒物質や宇宙線に関するこれまでの研究

— ところで、暗黒物質に関する研究などは、現在どのような状況にあるのでしょうか。

**田中** 暗黒物質とは、宇宙全体の質量の大半を占めていて、まだ発見されていない物質のことです。その暗黒物質には発見されていない粒子と暗い星の2つがあります。また、暗黒物質の研究には2つのプロジェクトがあり、一時期流行った物理のテーマでしたが、今は小康状態になっています。

— 暗黒物質の研究とは、どのようなものだったのか、お聞かせいただけますか。

**田中** 宇宙はまだ発見されていない粒子で満たされており、その粒子はけっこう重く、プロトンの100倍くらいあると考えられています。そういう粒子を見つけるのがテーマの1つでした。もう1つは、宇宙に暗い星がどれくらいあるのかを調べることでした。

なお、粒子としての暗黒物質についてはインタラクション(相互作用)が弱く、地球に降り注いでも地球を通り抜けてしまいます。したがって、宇宙に漂うこのような粒子は地球の重力にトラップされてしまい、地球の中心に溜まっていて、ときどき反応を起こしてニュートリノを出しているのではないかとされています。現在、南極にあるニュートリノの施設ではそれを観測しています。

— それが地球の中心核のエネルギーの元になっている、ということはないのでしょうか。

**田中** それを計算したことがあるのですが、全然地球全体が放出しているエネルギーに比べると桁違いに小さいことがわかりました。ただし、もし本当にそのような粒子が地球の重力に捉えられ、地球の中心に落ち込んで行っているのだとすれば、極めて局所的に何百万度を超えるような相当高いエネルギーの反応が起きている可能性はあるのではないかと思います。

宇宙線に関して言うと、今から10数年前に出された論文で、面白いと思ったものがあります。銀河には渦の濃いところと渦のないところがあります。渦の濃いところは星が密集しているところであり、渦のないところは星が少ないところです。太陽系はそういう銀河の中を回っています。

銀河の渦が濃く、星の多いところは、その分、超新星爆発の確率が高くなります。そのため、私たちの太陽系が渦の濃いところを通る間は、近くで超新星爆発が起こる確率が上がりますが、もし近くで超新星爆発が起こると、宇宙線が大量に地球に降り注ぐことになります。

その論文によると、その大量の宇宙線が地球の気候に影響を与えたり、火山の噴火を助長したり、地球の物理学的変動を起こしているということでした。

もう1つ、面白いと思った論文がありました。地球に降り注ぐニュートリノは私たちの体を通り抜けます。私たちの体に影響を与えることはありませんが、ごくまれに私達を構成する原子核と反応します。ただし、普段はこの確率は無視できるほど小さく、誰も気にしません。しかし、太陽系の近くで超新星爆発が起き、それによって大量のニュートリノが地球に降り注ぐと、生き物の体に異変を起こすと言われ、かつて地球に大量のニュートリノが降り注いだ時期と、恐竜の大量絶滅の時期とが一致するということがありました。

— 恐竜の絶滅は巨大な隕石がメキシコのユカタン半島に落ちたことが原因とする説がありますね。

**田中** 隕石による恐竜絶滅説を唱えたのは、アルバレというアメリカの物理学者です。彼はもともとは加速器の専門家で、アルバレ型加速器を作った人です。素粒子研究によりノーベル賞も受賞しています。

彼は元素分析の技術をイリジウムの微量分析に使い、ユカタン半島にある巨大なクレーターを隕石によるものと断定し、そこから隕石による恐竜絶滅説を唱えたのです。

実は、この研究者は前にお話した、ミュオグラフィを使ってエジプトのピラミッドを初めて調査した人物でもあります。ミュオグラフィと恐竜絶滅説は、こういう意外なところで繋がりがあられるわけです。

### 技術は必要かそうでないか 科学は好きか嫌いかが重要

— 話題は変わりますが、昨今、子供たちの理科離れが指摘されています。田中先生はこれをどのようにお感じになりますか。

**田中** 子供たちの理科離れというのは、日本よりもヨーロッパのほうが危機的とも言えるくらいに進んでいます。私と一緒に研究を行っているヨーロッパの科学者は、どのように教育プログラムを進めるか、新しいアプローチに取り組んでいる方がいます。

私が思うのは、まず、技術と科学は違うということです。技術は必要かそうでないか、一方、科学は好きか嫌いかという点が重要です。例えば、車はいるかいらないか、それに対し、フェラーリは好きか嫌いか、ということです。

そこにデザイン性や芸術性が入ってくるわけです。その点で、科学は芸術と共通点があり、私自身は昔からそういうものに興味を持っていました。

子供たちが理科離れをしたとしても、技術は一定の需要があるので、それほど衰えることはないでしょう。しかし、科学も芸術も嫌いなものがあれば、そこから離れていくでしょう。

科学から離れていくのを防ぐには、科学好きを増やすという別のアプローチが必要なのではないでしょうか。従来通りの理科教育を続けていても、新しい創造は出てこないと思います。

例えば、ミュオグラフィに理解のある画家が市民大学で講座を持

っています。参加しているのは子供から大人までさまざまですが、彼らに火山の噴火の絵を描いてもらった結果を見せてもらいましたが、一見落書きのようにしか見えない絵から、頑張って描き込んでいる絵まで、さまざまでした。ここで重要だと思うことは、科学に興味がないわけではないということです。ここから科学をどう好きになってもらうか、これまでとは別のアプローチが求められているように思います。

— 科学は芸術と共通点があるという話が出ましたが、最近では科学技術を使ってアートを制作する人も増えているように思えますが、先生はどのようにお感じになりますか。

**田中** それらについてきちんと理解しているわけではないのですが、昨今、少なくとも科学技術を使ったアートは流行っています。

古くから絵の具などを使って絵を描いていたわけですが、最近は



MUOGRAPHERS 2016 IM2N Workshop/2016年度/駐日/ハンガリー大使館/ミュオグラフィ研究におけるイノベーション創成のためのワークショップでの田中先生(写真左)



MUOGRAPHERS 2016 General Assembly/2016年度/駐日欧州連合代表部/世界のミュオグラフィ研究者の総会

LEDやドローンなどを使ってアートを作り出しているようです。ある意味、アートを制作するための技術が変わってきたのだと思います。しかし、技術と違って、サイエンスとアートは同じカテゴリーのものだと思うので、融合するのか、敵対するのか、これは難しい問題だと思います。

### ミュオグラフィをもっと多くの人に利用してもらうために

—これからミュオグラフィがどのようにになっていくのか、その将来像などについてお話しいただけますか。

**田中** 今のところ、ミュオグラフィは素粒子物理学者にしか作成できず、火山学者がミュオグラフィを手軽に利用できるようなにはなっていません。

一方、レントゲン写真では、各病院でレントゲン写真を撮影し、

それを医師が見て、所見を出すようなシステムがあります。だからこそ医療に役立っているわけです。

そこで、私たちが目指していることは、例えば、鹿児島・桜島のミュオグラフィを私たちが作り、それをスマートフォンなどで簡単に見られるようにすることです。このようにすれば、火山学者自身がミュオグラフィを扱えなくても、噴火と連動して、それぞれの研究にミュオグラフィを役立てることができるはずですよ。

今、ミュオグラフィはあらゆる方向に進みつつあります。研究が発展するには、さまざまな研究を調整し、いかに同じ方向性を持って進めるかが大切です。それを続けることによって、応用分野の広いミュオグラフィは幅広い研究に新たな価値基準と研究成果をもたらすことができるでしょう。

—最後になりますが、素粒子研究全体について、将来的に期待される研究はございますか。

**田中** ミューオンの透過力は岩盤で3~5キロほどですが、ニュートリノは非常に強い貫通力があり、地球などはほとんど透明のようなもので、簡単に通り抜けてしまいます。

しかし、地球を通り抜けると3分の1ぐらいに数が減るエネルギー領域のニュートリノを使うと、地球のレントゲン写真を撮影することが可能になります。ニュートリノは地球の密度が低いところは通り抜け、密度が高いところは留まって通り抜けられず、影になって映るので。

これは壮大な話ですが、その研究は南極にあるニュートリノ研究施設で進められています。

次号「科学の峰々」では、東京理科大学副学長、宇宙航空研究開発機構・技術参与、宇宙飛行士、医師・医学博士の向井千秋先生にお話しいただきます。