

## 火山を透視する

東京大学地震研究所 田中宏幸

### 1. 透視とは

透視とは文字通り物体を透かして中身を視る方法だ。世界で初めて透視が科学的に実演されたのは、1896年、ドイツの物理学者ウィルヘルム・コンラッド・レントゲン博士による。日本ではこの透視術を彼の名にちなんで、レントゲン写真撮影と呼んでいる。この技術は検診などでも普段からよくお世話になっているため、私たちには大変身近な存在だ。

レントゲン写真を撮るために使われるのがX線。レントゲン博士は目には見えない未知の線という意味を込めて、これをX線と名付けた。ではどうして、X線を使うと体の中を透かし撮ることができるのだろうか。その秘密はX線の透過力に隠されている。X線は目に見える可視光と同じく光の仲間だが、可視光が体の表面で止まるのに対して、X線は体を貫通する。しかし、全部貫通してしまつては、骨は写らない。空気が透明なのは、可視光が全部通り抜けてしまうからである。つまり、X線が全て体を通り抜けてしまつては、X線にとって体は透明になってしまうのだ。

それではどうして、レントゲン写真に骨が写るのか。それは体の中でX線が適度に止まってくれるからである。体の中でX線が止まりやすい部分(この場合は骨)と止まりにくい部分があつて、X線の透過量に差が出てくる。この差を描き出したのがレントゲン写真なのだ。

今では、私たちの体だけではなく、鉄筋コンクリート製のビルの壁や車のエンジンなんかでも撮影できるようになってきている。では、レントゲン写真撮影術を使えば、なんでも透視することができるのだろうか。たとえば、山一つ丸ごと透かし撮れるか。それができないことはすぐにわかる。X線の透過力が足りないのだ。X線は私たちの体の大きさに適した透過力を持っている。X線のエネルギーを上げたり、数を増やしたりすることで、この透過力を2倍、3倍に上げることはできる。だが、1000倍、2000倍となると話がまるで違う。人間が作り出すことができるX線ではこれだけの透過力を得ることはできないのだ。



写真1:レントゲンが撮影した同僚のケリカーの左手。指輪も写っている。(出典:ウィキペディア/レントゲン)

## 2. ミュオンという素粒子

では、X線を超える透過力を持つ物質はないのだろうか？1936年、アメリカの物理学者、カール・アンダーソンとセス・ネッダーマイヤーはミュオンという素粒子を発見した。素粒子とは文字通りそれ以上細かく分けることのできない物質のことを言うが、この素粒子には非常に強い貫通力があることがすぐにわかった。電子と似たような性質を持つが、その質量は電子より200倍重いというのが、理由である。

現代物理学では、世の中に4つのタイプの力が存在していることになっている。「電磁気力」、「弱い力」、「強い力」そして「重力」である。電磁気力は磁石が引き合う力、重力は私たちが地球に引き付けられる力として、分かりやすいがそれ以外にも電磁気力ほど強くはないが、重力ほどは弱くない「弱い力」、そしてもっとも強いタイプの力として「強い力」がそれぞれ見つかっている。

ここで、読者のみなさんは「地球に引き付けられる力の方が、磁石がひきつけあう力と比べて全然強いじゃないか」と思われるかもしれない。だが、この力は素粒子一つ一つにかかる力を意味しているので、そうはならない。一つの磁石に含まれる原子の数と地球全体に含まれる原子の数を比べてみるとその差は歴然としている。今後は、重力を除いた、残り3つの力についてのみ、考えることにする。

話は少しそれだが、ミュオンという素粒子には「電磁気力」、「弱い力」が働くが、「強い力」は働かない。電磁気力は電気を帯びた粒子(電子やミュオン)が光の吸収、放出を行うことで生まれる。(弱い力は弱ボソンという粒子をキャッチボールすることで生まれる。)一方で、光の一種であるX線はキャッチボールされる側の立場である。この時点でミュオンとX線は全然違う。

さて、地球上のあらゆる物体を構成している原子は原子核とその周りを回る電子でできている。つまり、物体内に入ってきたX線は電子や原子核に吸収されるのだ。光を吸収した電子や原子核は短い時間の間に光を放出する。実はこのプロセスがポイントで、放出されたX線のエネルギーは吸収される前のX線のエネルギーよりも低い。つまり、物体内の電子や原子核とX線が反応をすることで、X線が遅くなって、ついには止まるのである。このプロセスは物体にミュオンが入ってきた時も同じである。ミュオンの場合は電子や原子核と光のキャッチボールをするところが若干違うのだが。

なので、貫通力を上げる、つまり、止まるまでの距離を稼ぐためには、もっと速い(エネルギーの高い)X線を打ち込めばよいだけに思える。ところが、そうはいかない。これ以外にももう一つプロセスがあり、これがX線とミュオンの透過力の違いに決定打を与えているのだ。アインシュタインの相対性理論によると、エネルギーと質量は等価である。いわゆる $E=mc^2$ だ。つまり、X線の透過力を上げようとしてエネルギーを上げていくと、そのうち電子を作るエネルギーを超える。つまり、そのうちX線が電子(正確には電子とその反物質の陽電子のペア)を作り出すのだ。作り出された電子は物体内部の電子や原子核と光のキャッチボールをして、別のX線を放出する。この

反応でもX線は減速する。

このキャッチボールの頻度が電子とミュオンで40000倍も違うのだ。質量が200倍重いというのが、理由である。つまり、高エネルギーのX線は物体内部で電子を作る。電子は軽いので、高い頻度で高エネルギーの光の放出を繰り返して、すぐに止まる。だが、ミュオンは重いので、電子を作るような高エネルギーの光を中々放出しがないのだ。その結果ミュオンは物体中でエネルギーをあまり落とさない、つまり物体内部であまり遅くならないのである。また、X線は電子(と陽電子)を作るときに消滅するが、ミュオンは作った電子のエネルギー分を失うだけで、元のミュオンが何かに置き換わったりはしない。これが、ミュオンがX線に比べてけた違いに強い透過力を持っている理由だ。こうして強い透過力を得たミュオンはエネルギーが高ければ岩盤1 kmでも簡単に透過することができる。

ところで、「弱い力」しか働かない素粒子はあるのだろうか？ 実はある。ニュートリノと呼ばれる素粒子だ。電磁気力が働かないニュートリノはミュオンと比べてもさらにけた違いに強い貫通力を持っているため、宇宙に存在するほとんどのニュートリノが地球全体をも簡単に通り抜けることができる。

### 3. 巨大物体の透視

こんな理由で、エネルギーさえ高ければ、ミュオンは山一つ通り抜けることができる。では岩盤1km通り抜けるためにはどの程度のエネルギーが必要か。答えは1 TeVである。eVは素粒子のエネルギーを表す単位で、エレクトロンボルトと読み、1ボルトの電位差で粒子を加速した時のエネルギーだ。Tはテラの頭文字で1兆倍という意味を持つ。つまり、1 TeVは1兆ボルトの電位差で粒子を加速した時のエネルギーに相当する。現代の人類が持ちうる科学技術で1兆ボルトを達成できるかという、実は不可

能ではない。しかし、恐ろしく巨大な加速器が必要になる。これでは巨大物体の透視を行うたびに巨大な加速器を移動するか、建設するかしないといけな。これには、用地買収も含め、天文学的な費用が掛かるため、実行不可能である。

だが、宇宙には天然の加速器があるのだ。星の爆発である。宇宙は私たちが想像するよりはるかに広いので、常識では考えられないことがよく起こる。星全体が爆発す

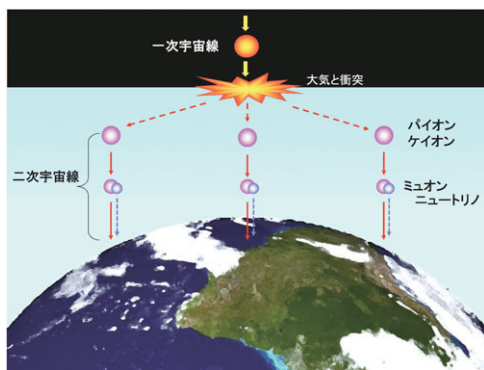


図1:大気中で生成される高エネルギーミュオンとニュートリノ。主にパイオンとケイオンの中間子を介して生成される。

るのもその一例である。その爆発エネルギーは計り知れなく、現代の人類が持ちうる科学技術で加速できる粒子の何万倍ものエネルギーを持つ粒子が、おびただしい数放出される。そのような高エネルギー粒子が1000万年くらいかけて、地球に到達するのだ。それを私たちは宇宙線と呼んでいる。宇宙線はほぼ陽子から成っているがこれが地球に突入すると、酸素や窒素の原子核と衝突して核反応を起こす。その結果できるのがミュオンとニュートリノだ(図1)。元の陽子のエネルギーが高いので、できるミュオンのエネルギーも高い。

こうしてできたミュオンは地球上どこでも雨あられのように降り注いでいて、その数は手のひらに一秒間に1個程度。四季を通してほぼ一定だ。この数、あまりピンと来ないかもしれないが、一晩寝ている間に私たちの体を100万個のミュオンが通り抜けているといえ、意外と多いと感じられるのではないだろうか。

あとは、ミュオンを捉える装置を作れば、巨大物体の透視撮影、つまりミュオグラフィの準備が整う。ミュオンを捉える装置はシンチレーターという、ミュオンを光に変える部品と光電子増倍管という光を電気信号に変える部品を組み合わせで作る。ミュオンを電気信号に変えることで、ミュオンの到来方向や数を測定できるようになるのだ(図2)。つまり、巨大物体のどの位置をどれだけのミュオンが通過してきたのかが分かる仕組みだ。レントゲン写真と同じく、物体中でミュオンが止まりやすい部分と止まりにくい部分の間の透過量に差を描き出せばミュオンを使った巨大物体のレントゲン写真、ミュオグラフィが撮れる。ところで、ニュートリノで山を透かし撮ることが可能だろうか？答えはNoである。ニュートリノは透過力が強すぎて、全部通り抜けてしまうため、ニュートリノにとって山は透明になってしまう。

#### 4. 火山を透視する

火山の麓にミュオンを捉える装置を置けば、斜め方向から到来するミュオンの通過位置と透過量を測定することで、火山のミュオグラフィが撮れる。火山を透視することで何が見えるか？まずマグマの通り道が見えるだろう。山の中にマグマの通り道があればそこが水道管のように空洞になっているわけだから、その分ミュオンが通り抜けやすい。そこにマグマが上がってくればマグマによってミュオンが止まりやすくなり、結果として透過できるミュオン数が減る。

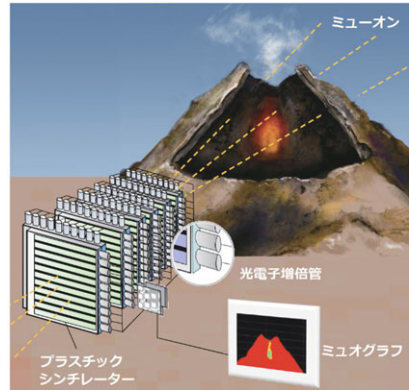


図2:ミュオンの到来方向や数を測定する仕組み。ミュオンを光に変換するプラスチックシンチレーターと出てきた光を電気信号に変える光電子増倍管から成る。

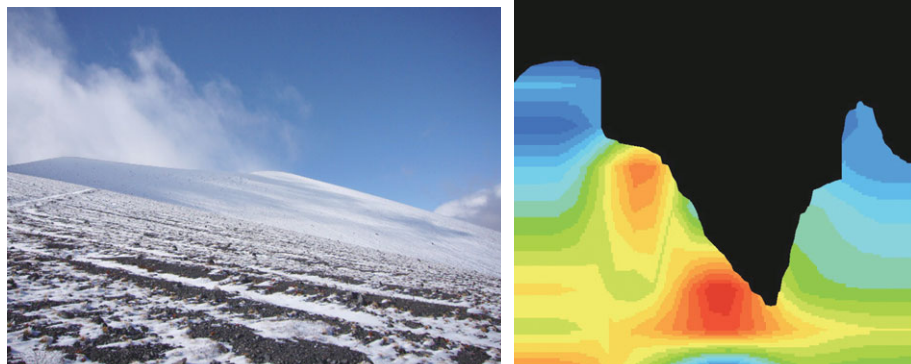


図3: 浅間山のミュオグラフィ透過像。赤い部分が高密度、青い部分が低密度の部分を示す。

図3は世界で初めて撮影された浅間山内部のミュオグラフである。お椀のような火口の下にミュオンが通り抜けにくい部分(赤色)が見える。さらにその下に通り抜けやすい部分(青色)が見える。赤い部分はマグマ、そして青い部分は空っぽのマグマの通り道を示している。このマグマが発泡すると、火山ガスが発生する。軽くなるのでその分ミュオンも通り抜けやすくなる。その様子を示しているのが、図3だ。ビールの入ったビンを振っても中身には変化が現れないが、蓋を開けた瞬間、泡が噴き出してくる。同様な現象が火山でも起こっているのだ。マグマにもガスが溶け込んでいる。マグマが上昇して圧力が下がると、溶け込んだガスが泡となって出てくる。その様子を示しているのが世界で3番目に撮影されたこの薩摩硫黄島の透視像である(図4)。図中青い部分がマグマが発泡しているところである。既に噴火を終えた昭和神山(図

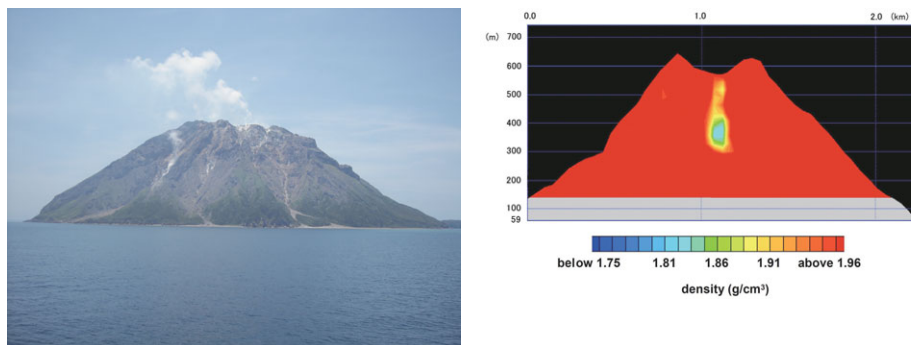


図4: 薩摩硫黄島のミュオグラフィ透過像。赤い部分が高密度、青い部分が低密度の部分を示す。

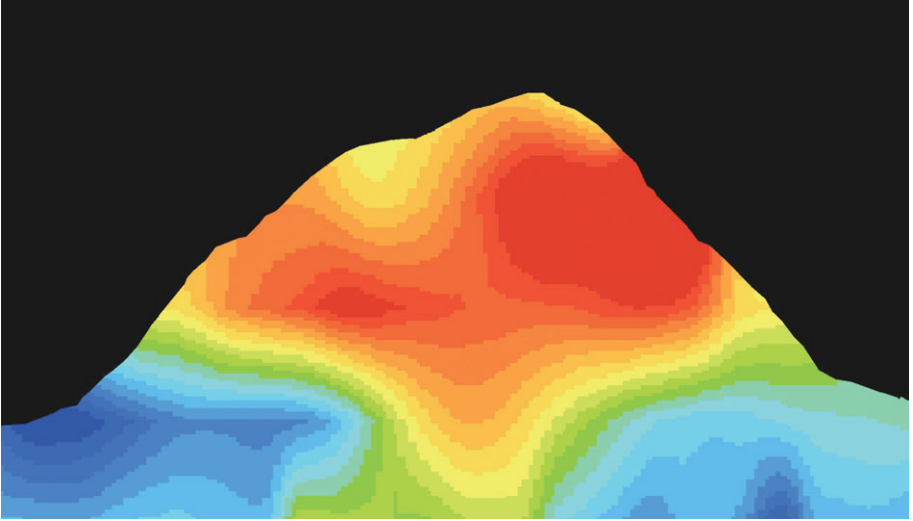


図5:昭和新山のミュオグラフィ透過像。赤い部分が高密度、青い部分が低密度の部分を示す。

5)の内部の通り道が泡のないマグマで埋め尽くされているのと比較をすると対照的である。

火山のレントゲン撮影技術は火山以外にもいろいろな巨大物体の透視に利用され始めている。たとえば、東日本大震災で大きな被害を受けた福島第一原発の透視撮影が一例である。最近、名古屋大学と東芝のグループはミュオグラフィを用いて、原発2号機の炉心溶融を証明した。燃料の炉内残像量や残存場所の推定にも使えるという。ミュオグラフィ技術はこれまで透視ができなかった巨大物体の透視に次々と使われていくことだろう。

## 著者紹介 田中 宏幸(たなか ひろゆき)



東京大学地震研究所教授。著書に『素粒子で地球を視る』(東京大学出版会)がある。2010年、日本鉄鋼協会依論文賞、2011年、日本火山学会論文賞、2013年EPS賞(地球電磁気・地球惑星圏学会、日本地震学会、火山学会、日本測地学会、日本惑星学会の5学会による)受賞。