

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 上聞き手：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



レントゲン写真のように 火山の内部を透視する ミュオグラフィ

— 田中先生のご研究は、素粒子を利用して火山などの内部を透視する「ミュオグラフィ」と伺っております。まず、透視技術の基礎的な原理をお聞かせいただけますか。

田中 ミュオグラフィとは、ミュオンという素粒子を用いた透視撮影技術です。

19世紀の終わりに「見えないものを見せる」透視技術、放射線を活用したX線が誕生しました。そして21世紀には、透視対象物の大きさも巨大化し、大地の中で実際に何が起きているのか?これまで間接的な観測に基づく仮説でしか

語られなかった火山や地球の内部をミュオンという素粒子を使って透視する研究です。

ミュオンは、数キロメートルの岩盤さえ通り抜ける高い透過力を持っていますが、非常に高密度の物質の中では、ひしめく合う原子に邪魔され、通過できるミュオンの個数が減ってしまいます。この性質を利用してミュオンの飛来した方向と数を検出することで物体内部の密度分布を調べることができます。

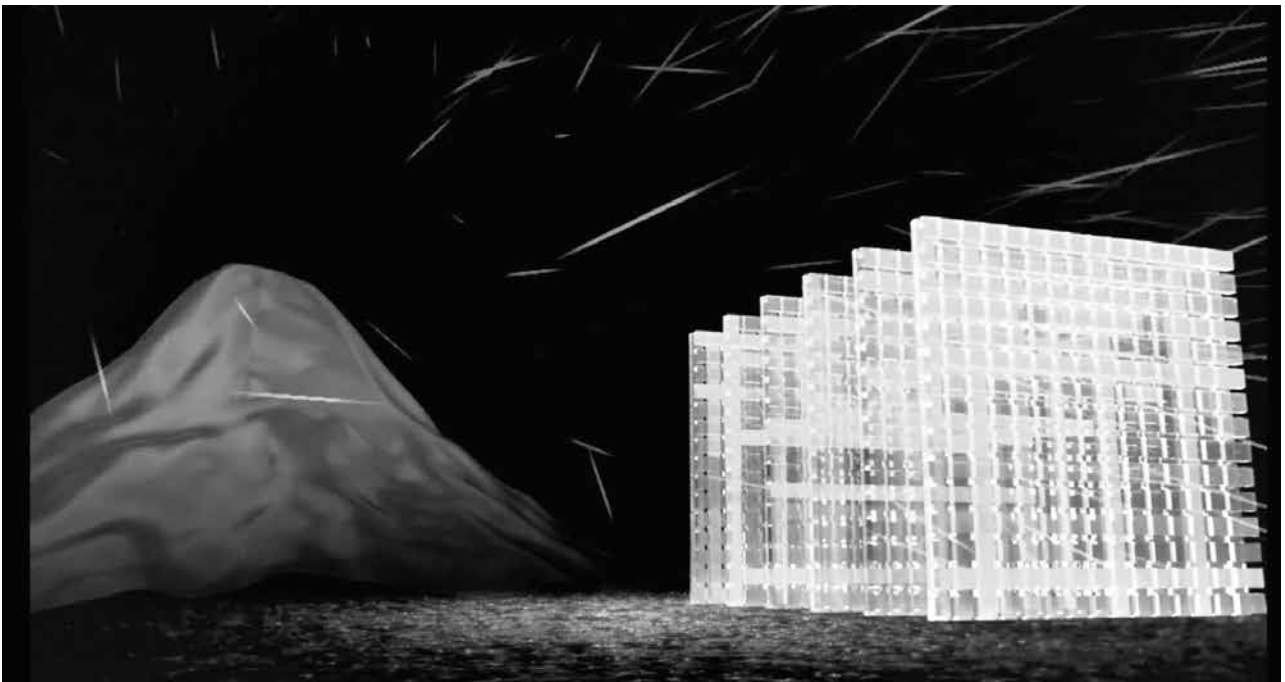
— ミュオンという素粒子は、常に地上に降り注いでいるものなのでしょうか。詳しく説明いただけますか。

田中 ミュオンは銀河の遥か彼方で起こった超新星爆発によって大量に加速された素粒子がもと

なってできています。銀河系内では、この超新星爆発は数十年に1回ぐらいはどこかで起こっています。ミュオンは数万光年離れたところから、1千万年ぐらいかけて地球に届くのですが、その経路は真っ直ぐではありません。

銀河には磁場があり、ミュオンはそこに捕えられます。例えば、銀河という巨大なスポンジに吸われて、そこに蓄えられ、そこから少しずつしみ出すように放出されるのです。そのようにしてミュオンは一つ一つの超新星から予想もつかないような経路で地球に届き、地上に常に降り注いでいます。

その素粒子は地球に届くと、大気と衝突して新たな粒子メソンを作りますが、これは1億分の1秒で消滅してしまい、ミュオンになります。メソンに比べるとミュオンはまだ安定しているのですが、それでも



地上に降り注ぐミュオン素粒子の飛来イメージとミュオグラフィのイメージ。
火山観測で用いるミュオグラフィ装置の大きさは、2×2×3m³、重さは20トン近くにも上る。

100万分の2秒ぐらいで崩壊します。しかし、アインシュタインの相対性理論の効果により、運動する物体の時間の進みが遅れ、寿命が延びます。

本来100万分の2秒しか生きられないと600mほどしか進めないのですが、相対性理論の効果によって、その10倍から100倍も進むことができます。

このように宇宙から飛んでくるミュオンを使って火山などの内部の密度をレントゲン写真のように透視撮影することができるのです。

医療検査で使われるレントゲン写真では、骨のところはX線が通らないので黒い影となり、X線がたくさん通るその他のところは白く映ります。皆さんが見るレントゲン写真は、その白黒を反転させているわけです。

ミュオグラフィの場合、ミュオンが通過しないところは、密度の高い重い物質があるところで、赤く色付けしています。火山の透視図ではマグマなどが赤く表示されますが、赤いところは熱いわけではなく、物質の密度が高いところです。一方、ミュオンが通り抜けたところは物質の密度が少なく、軽い物質があるところで、青く色付けをしています。

実は、ミュオンの透過図をカラーで表現したのは私たち東京大学が世界で初めてでした。カラーで表現するとサーモグラフィーのような印象になってしまうので、より良い表現方法を検討しているところです。

2006年、東京大学が 世界初の透視技術 ミュオグラフィを開発

—ミュオグラフィの研究は、いつごろから始まったものなのでしょうか。

田中 ミュオグラフィは、60年以上の歴史があります。1955年にオーストラリアの物理学者が考案し、ガイガーカウンターを使って岩盤の厚みなどを測定していました。しかし、当時はミュオンがどこから飛んでくるのか分からず、きちんとしたイメージングをすることはできませんでした。

その後、1968年、アメリカの物理学者がミュオンを使えば、エジプトのピラミッドの内部の様子が分かるかもしれないと言って、カフラー王のピラミッドを調査しました。

このようにミュオグラフィの歴史は長く、遺跡調査や資源探査に用いられて来ましたが、なかなかよい結果が得られず、主要な技術となることはありませんでした。

ところが、2006年に私たち東京大学が世界で初めてミュオンを使って巨大物体の内部構造を見ることに成功しました。その後、一気にこの透視技術が世界へ波及していったのです。

現在では火山の内部探査のほか、ピラミッドの調査、洞窟探査、二酸化炭素を地下に閉じ込めたときの地下の構造調査、被災した福島第一原発での調査、さらには宇宙へも活躍の場を広げています。

遺跡・洞窟・原発の調査や 惑星の探査などにも応用

—世界に波及したミュオグラフィのいくつかの応用例を簡単にご説明いただけますか。

田中 ピラミッドの調査では、エジプト政府とフランス、日本が協力して行っているもので、ミュオグラフィを使ってクフ王のピラミッド調査が行われました。

ピラミッドは長い間、王の墓と考えられてきましたが、内部はグランドギャラリーと王の間、王妃の間と3つの空間がありますが、結果はすべて空でした。そのほかには公共事業のために造られたとか、天体観測ツールだったとか、いくつかの説があります。その仮説に終止符を打ちたいと、内部に王の墓があるのか、それとも新たな空間があるのかなどを調べているようです。

洞窟探査は日本では盛んではありませんが、海外ではけっこう需要があります。例えば、クロマニヨン人が壁画を描いた洞窟の周囲に、まだ発見されていない洞窟がないかなど、洞窟探査にも使われています。

次に、二酸化炭素についてですが、地球温暖化の対策として二酸化炭素の排出に規制がかかるようになり、削減できなかった分はお金を払って排出するか、自国で処理する必要が出てきました。

日本では北海道の苫小牧で、地下に二酸化炭素を貯留しようと

いう実験が行われています。しかし、地下の空間に亀裂などが入っていると、二酸化炭素が漏れてしまい、意味がなくなってしまいます。

岩盤は二酸化炭素を吸うと密度が変わるのですが、穴の中にミュオグラフィの装置を入れて岩盤の密度を測り、二酸化炭素が確実に吸われているかどうか、モニタリングするという研究が進められています。

次に、東日本大震災で被災した福島第一原発では、メルトダウンによってどれだけの核物質が下に漏れ出しているのか、その調査にもミュオグラフィが使われています。

このプロジェクトは震災後すぐに始まったのですが、最近になって、原発がメルトダウンしていることが明らかになったと東京電力が説明しました。ミュオグラフィを使った調査で、メルトダウンしている核燃料は200トン程度と推定されており、相当な物質がメルトダウンしていることがわかりました。

— 宇宙開発では、どのように使われようとしているのでしょうか。

田中 ミュオグラフィの元になっている素粒子物質は、何光年も離れた場所で起きている超新星爆発なので、どこでも同じように降り注いでいます。そこで、特に海外で話題になったのですが、ミュオグラフィを火星で生命探査に使えないか、小惑星での資源探査に使えないかという研究が始まりつつあります。

大きな産業用プラントの経年変化の調査にも活用

— 民間企業からの調査依頼でミュオグラフィが使われることはございますか。

田中 企業から依頼され、産業用プラントや土木事業などでのイメージングに使われることはあります。これまで大きな産業用プラントやダム、トンネルなどは図面通りに作り、経年劣化はシミュレーションに頼っていました。

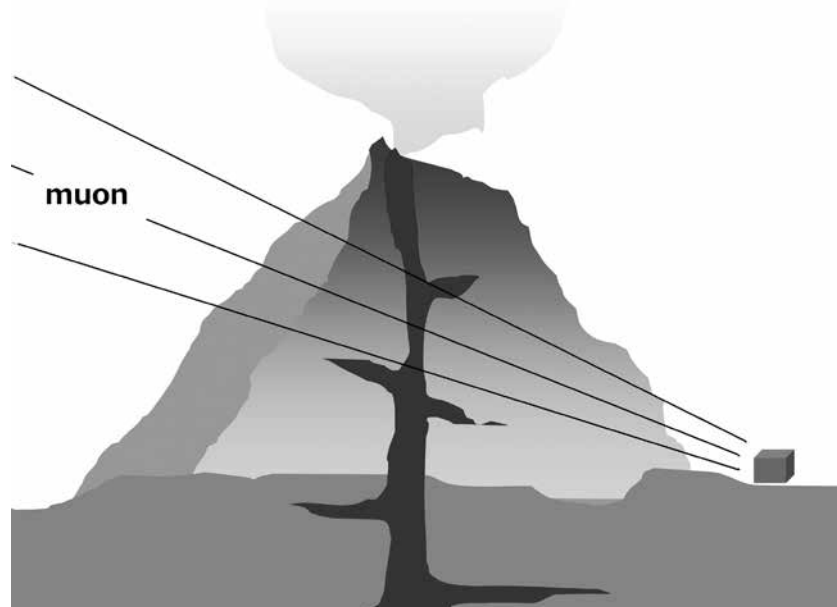
そこにミュオグラフィを使えば、溶鉱炉、電炉、原子炉などプラント内部の様子を調べたり、あるいは、トンネルの隣に地下水が溜まっているか、土砂降りのときに水がどんな影響を与えるのかといったことを調べることができるのです。

— この技術を使えば、道路などが陥没していないかを調べることもできそうですね。

田中 以前、高速道路をモニタリングできないかという話をいただいたことがあります。現在は高速道路の下にギャラリーという空間があり、そこに作業員が入って、上からエックス線を照射し、下で画像を撮影して道路の点検をしています。

この方法ではエックス線なのでピンポイントの撮影となり、面として捉えることはできません。そこでミュオグラフィの装置を初めから埋め込んだ高速道路を作っておけば、リアルタイムで、広い範囲をモニタリングできるのでないかという提案をしました。

— ミューオンを使って計れる構造物の大きさは、どのくらいになるのでしょうか。



火山ミュオグラフィの原理。

空から飛来してくるミュオンを地上に設置した観測装置でとらえ、画像化する。

田中 ミューオンが届く範囲ですので、測定できる対象の直径は約5キロメートルが最大となります。

— ミュオグラフィの装置を一度置けば、常に測定・検出が可能というわけですね。

田中 それがミュオグラフィの売りの一つなのですが、現時点では装置がとても高額で、億単位の費用がかかります。その大きさはひと部屋ぐらいのスペースをとってしまいます。しかし、一桁ぐらい金額を安くできる技術が出てきているので、それが実用化できれば、より多くの場面で活躍ができるのではないかと考えています。

ミュオグラフィを使って 火山内部のマグマを透視

— 田中先生が取り組んでおられるミュオグラフィを使った火山のご研究について、詳しくご説明いただけますか。

田中 火山の噴火は、初めは小さなものでも、大噴火につながる場合があります。

例えば、噴火から30周年を迎えた伊豆大島の三原山は、最初の噴火は小さなものでした。噴火を見ようと人が集まり、それが観光資源になるので島では歓迎ムードがありました。ところが、大噴火が起り、5万人の島民が島を離れる全島避難となりました。

最初の小さな噴火が大噴火に

つながるのか、その噴火は長く続くのか、それとも1回きりの噴火なのか、それを噴煙だけで評価しろと言われても難しいのです。

では、火山の内部ではどんなことが起こっているのかというと、一つは水蒸気爆発です。マグマが地表近くまで上がり、地下水を熱して圧力を高めます。圧力が高まると、火口付近の蓋のような部分が吹き飛ばされますが、マグマは外には噴出しません。

一方、マグマが上がってきて、溶岩が噴き出すタイプは、多くの場合、噴火は長引き、警戒しなければいけない噴火です。

一例として2009年の浅間山の噴火と2013年の硫黄島の噴火をミュオグラフィの画像を比較するとわかります。

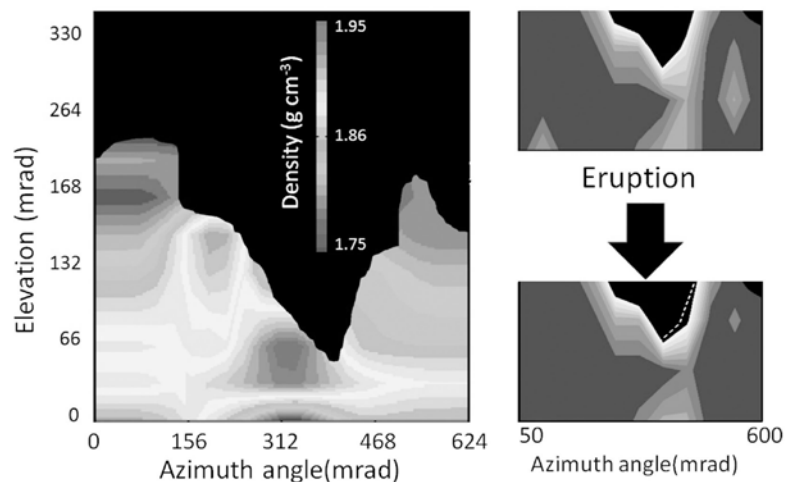
浅間山の噴火直後の画像を見ると、密度の高い物質、つまり、マグマが火口近くへ上がって来たということは確認できません。密度の低いもの、つまり、高温の水蒸気が上がってきて、火口の一部を

吹き飛ばしたことがわかります。このミュオグラフィの画像を受けて、2009年は小規模な噴火と断定されたのですが、実際、そのときの噴火は1回きりで終わりました。

その後、噴火による噴出物の科学的な分析が行われました。その分析によって2004年に起こった一つ前の噴火の噴出物と化学組成が一致したため、噴火によって火口付近で固まった古いマグマが吹き飛ばされたことがわかりました。

次に2013年の硫黄島のミュオグラフィを見ると、まず、火口近くに青で表示されている部分があります。そこは密度が低いところで、マグマの通り道です。次の画像で、そのマグマの通り道に赤く表示される密度の高いもの、つまり、マグマが上がってきたことがわかります。

観測を始めたのは最初の噴火のところからで、ミュオグラフィによりマグマが上がってきたことが観測されました。観測を続けていると、マグマは上がったたり下がったりを繰り返し、活動は長く続きました。



2006年に世界で初めて撮影された火山内部の透視画像（左）。対象火山は浅間山。2009年の浅間山噴火前後のミュオグラフィ画像（右）。マグマは上昇してきていないが（凹部の下のオレンジの通路に大きな違いが見られない）、火口の一部が欠損した（吹き飛んだ）様子（点線）がわかる。

産学官との連携

以前、アイスランドで火山が噴火し、噴煙の影響で西ヨーロッパの空港が閉鎖されました。これまでは噴火がいつまで続くのか、そして空港がいつまで閉鎖されているのか、その経済損失がどのくらいになるのか、予測ができませんでした。こうしたことから、噴火を学術的に明らかにすることは重要な研究だと考えています。

— 現在、ミュオグラフィを使って観測している火山はどのくらいあるのでしょうか。

田中 メインで観測しているのは鹿児島島の桜島です。桜島は何度も噴火していますが、私たちが知りたいのは、噴火が大きくなるのか

どうか、火山灰が周辺にどれくらい降り注ぐのか、ミュオグラフィを使って取り組んでいます。

— ミュオグラフィを活かして、火山の噴火予知や地震予知は可能なのでしょうか。

田中 地震には火山性の地震とプレートの動きにより発生する地震の2つがあります。このうちプレートによる地震は日本のどこでも起こりうるものです。ミュオグラフィは対象を特定しないと行けないので、地震予知への応用は難しいでしょう。

また、火山研究の難しい点は、ミュオグラフィによって画像が手に入っても、今まで誰も火山の内部を見た人がいないので、ゼロの状

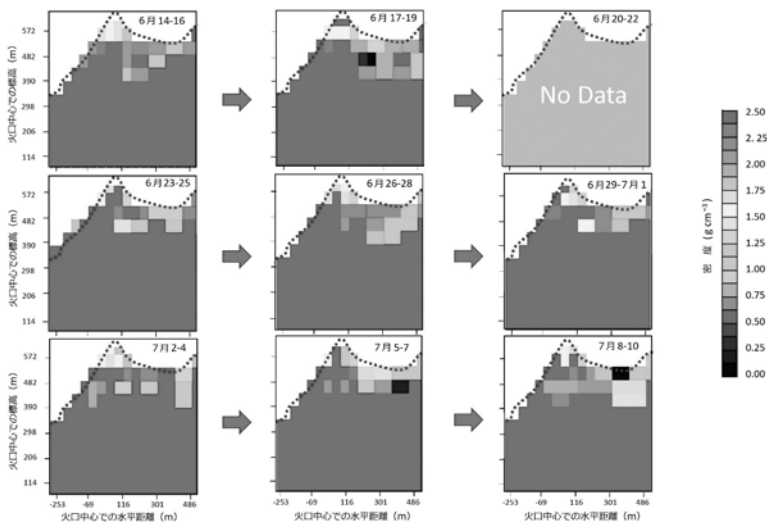
態からそれが何を意味しているのかを解いていかなければならないことです。

レントゲン写真の場合、解剖学の知識が元になり、映し出されたものが何か分かっています。その点、火山研究はクリアで分かりやすい結論を出すことが難しく、この点が、これからの研究分野だと考えています。

— 海外でもミュオグラフィを活かした研究は進んでいるのでしょうか。

田中 火山が集中しているのは、リング・オブ・ファイアと呼ばれる太平洋を取り巻く地域、アフリカ大陸とヨーロッパ大陸のプレートがぶつかっているところ、アフリカ大陸とインドのプレートの境界である東アフリカ、それとカリブ海です。

ミュオグラフィを火山に適用した研究を精力的に行っているのは、それらの地域にある国々です。日本、イタリアをはじめ、そこに植民地を持っていたフランスやイギリス、スペインなどです。火山以外にもそれぞれの国の地理に応じてミュオグラフィの適用範囲は変わってきます。エジプトではピラミッド、スイスでは氷河、ハンガリーでは洞窟、アメリカ、カナダでは地下資源などです。私たちはそれらの国々と新しい研究を立ち上げています。



2013年 薩摩硫黄島の噴火の推移							
日付(6月)	4	6	7	16	17	30	7月10
噴煙の高さ(m)	—	300	600	400	100	200	—
火映	—	—	—	X	—	X	—
噴火レベル	1→2			2→1			

2013年の薩摩硫黄島において、ミュオグラフィでマグマ昇降を初めてとらえた様子。6月16日と30日には火映が確認された。火映とはマグマなど高温物質が地表付近に近づき夜間火口底が赤く映える現象をいう。この期間にはマグマの通り道を示す青い部分が減っており、マグマが上がってきていたことが示唆される。

次号「科学の峰々」では引き続き田中宏幸先生にミュ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)をお話いただきます。