

## ■研究紹介

# 地球内部のミュオグラフィ観測の現状と展望

東京大学地震研究所

田 中 宏 幸

ht@eri.u-tokyo.ac.jp

2014年5月7日

## 1 はじめに

1950年代、オーストラリアの物理学者 George はガイガーカウンターを用いて地下のミュオン強度を測定することで坑道上部の厚さ 100m 程度の地層の密度測定を行なった[1]。ミュオン強度は坑道内部と外部で測定され、その比からミュオンの減衰量を見積もった。

ミュオンは質量が電子の 207 倍もあり、その結果、制動輻射を起こす確率は同じエネルギーであれば電子より圧倒的に低い。そのため、高エネルギーの電子や光子では透過できないような巨大物体を透過することができる。ミュオンを用いた透過イメージング法（レントゲン写真撮影法）をミュオグラフィと呼ぶ。

ミュオグラフィの先駆けとなったこの実験はガイガーカウンターで行われたので、ミュオンの到来方向を測ることはできなかったが（したがって、イメージングが出来なかつたが）、地層の厚みを水等量で  $163 \pm 8$  m と決定することに成功した。この結果はコアサンプリング（掘削による調査を行い、直接地下の岩石の物性を調べる方法）の結果  $175 \pm 6$  m（水等量）と比較され、7% の精度で一致した。

1967 年には Alvarez によるピラミッドのミュオグラフィが試みられた<sup>1</sup>。Alvarez はスパークチェンバーを用いることで、ミュオンの到来方向を決定して、記録に残る初のミュオグラフィ観測を行った[2]。

### 1.1 ミュオンの透過力

ミュオンのエネルギー損失過程は連続的過程と離散的（確率的）過程に分けられる。前者は電離損失による。反応頻度は高いが、反応ごとのエネルギー損失は小さく連続的にエネルギーを落としているように見えるので連続的過程と呼ばれる。エネルギー損失  $dE/dx$  は、ミュオンのエネルギーが数百 MeV のとき極小値（岩石でおよそ  $1.9 \text{ MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)$ ）を持ち、その後エネルギー増大とともにゆっくりと大きくなる。ミュオンエネルギーが充分高い場合、最小電離エネ

ルギー以下（したがって、ベーテ・ブロッホの式の中の  $\beta^{-2}$  の効果）は無視することができるので、電離損失によるエネルギー損失はミュオンエネルギーの対数に比例する、と近似できる。

一方、後者は制動輻射、直接対生成、光核反応過程によるエネルギー損失過程である。ミュオンのエネルギーが増大するとともに、制動輻射を起こす確率が増える。しかし、それでもミュオンによる制動輻射は比較的起こりにくいため、直接対生成や光核反応過程も離散的過程の一部としてある程度の割合を占める。制動輻射、直接生成、光核反応によるエネルギー損失はすべてミュオンのエネルギーに比例する。ミュオンが十分高エネルギーであるとき、ミュオンのエネルギー損失は以下の近似式で表すことができる。

$$dE_\mu/dx = [1.88 + 0.77 \ln(E_\mu/M) + 3.9E_\mu] \times 10^{-6} (\text{TeV g}^{-1} \text{cm}^2) \quad (1)$$

最初の 2 項が電離損失、最後の 1 項が制動輻射、直接生成、光核反応によるエネルギー損失を表している。図 1 にミュオンの飛程とエネルギーの関係を示す。

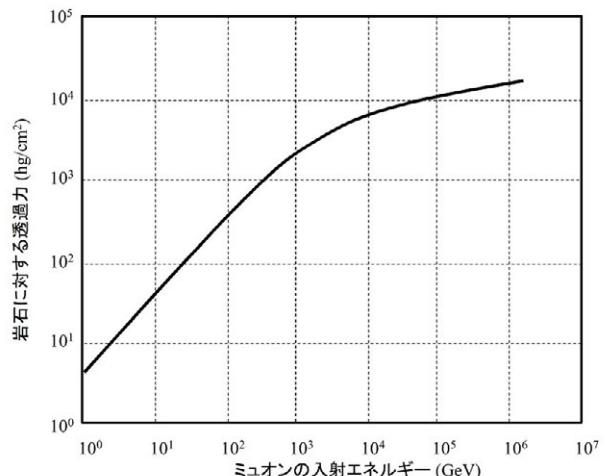


図 1 ミュオン入射エネルギーと岩石に対する透過力との関係。

### 1.2 大気中でのミュオン生成

一次宇宙線と大気の原子核が衝突すると、パイオンやケイオンなどのメソンが発生する。以下に大気中で発生する主なメソンの崩壊プロセスを示す（カッコ内はそれがおきる割合）。

<sup>1</sup> Alvarez は、クフ王のピラミッド内部が、「王の間」、「女王の間」、「大回廊」に分かれているのに、すぐ隣にあるカフラー王のピラミッドの内部には下部に小さな玄室が一つしかないことに疑問を抱いた、と言われる。

$$\cdot \text{荷電パイオン } \pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu) \quad (\sim 100\%) \quad (2)$$

$$\cdot \text{中性パイオン } \pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad (\sim 98.8\%) \quad (3)$$

$$\cdot \text{荷電ケイオン } K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu) \quad (\sim 63.5\%) \quad (4)$$

$$\cdot \text{中性ケイオン } K_L \rightarrow \pi^\pm + e^\pm + \nu_e (\bar{\nu}_e) \quad (\sim 38.7\%) \quad (5)$$

以上の過程のうち、ミュオンを直接生成するのは荷電パイオンと荷電ケイオンでともに2体崩壊である。メソンの発生後、たとえばパイオンは26 nsでミュオンとミューニュートリノのペアに崩壊する。出来たミュオンは2.2 μsで、3つの粒子に崩壊する。

$$\mu \rightarrow e + \nu + \bar{\nu} \quad (6)$$

大気中で作られたパイオンのうち崩壊前に別の大気原子核に衝突するパイオンは別のパイオンを多重生成する。こうして、パイオンの数は大気の頂上を起点に増加していくが、パイオン崩壊によって減ってもいく。地表に到達するまでにほとんどが崩壊する。パイオンの崩壊は2体崩壊で、かつミュオンの質量が分かっているため、ミュオンとニュートリノの運動量どちらも正確に計算できる。

したがって、地表に到達するまでにすべてのパイオンが崩壊すると仮定することで、地表に置けるミュオンのエネルギースペクトルを予言できる。

パイオン崩壊によってできたミュオンは2.2 μsで崩壊する。残存率  $W_\mu$  は飛行距離  $L$  の関数で、以下の形をとる：

$$W_\mu = \exp[-L / L_{\text{decay}}] \quad (7)$$

崩壊長  $L_{\text{decay}}$  はミュオンの運動エネルギー  $E_\mu$  がミュオンの質量エネルギー  $m_\mu$  よりも充分大きいときは、以下の式となる。

$$L_{\text{decay}} = c\beta\gamma\tau = 3 \cdot 10^8 \text{ (m/s)} \cdot E_\mu / m_\mu \cdot 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ (s)} \\ = 6.6 \cdot E_\mu / m_\mu \text{ km} \quad (8)$$

図2にミュオンスペクトルを示す。図中の角度は天頂から測った角度である。低エネルギーになるほど数が減っているのは崩壊長  $L_{\text{decay}}$  が短くなるためである。また、鉛直方向から飛来するミュオン（鉛直ミュオン）と比べて、水平方向から飛来するミュオン（水平ミュオン）の方が小さいのは、鉛直方向では大気の密度勾配が大きいからである。その分、メソンの平均自由行程も短くなり、メソンの多密度が上がる。一方、水平方向では大気の密度勾配が小さいため、いったんできたメソンは別の原子核にぶつかる前にミュオンに変わる確率が高い。エネルギーが分散されない分、エネルギーの高いミュオンができる。

図1から、ミュオンが透過する“厚み”に対する最低透過エネルギーを求めることができるが、この値を積分区間の下限値として、図2のエネルギーfluxを無限大まで積分すると、岩石に対する透過ミュオンflux（対象物体透過後のミュオンflux）をミュオン透過密度長（経路長×経路に沿った平均密度）と到来角度の関数として計算することができる（図3）。

図3からミュオンはキロメートルにも及ぶ岩盤を通り抜けることがわかるが、岩盤の厚みや、密度が高くなるほど、透過できる数が急激に減る。山体内部に密度の変化があれば、透過できるミュオン強度に濃淡ができる。この濃淡はミュオン透過密度長を反映したものであるから、たとえば地形図や測量データなどから、実際の経路の長さで規格化すれば、ミュオン経路に沿った平均密度を求めることができる。得られた平均密度を方位角、仰角の角度空間で到来方向ごとに整理することで、ミュオグラフィイメージを作成できる。イメージの解像度は検出器、対象間の距離と検出器の角度分解能で決まる。

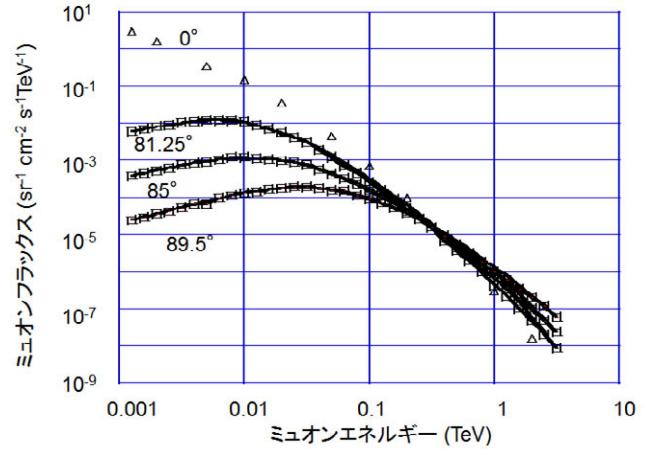


図2 大気中で生成されたミュオンのエネルギースペクトル。

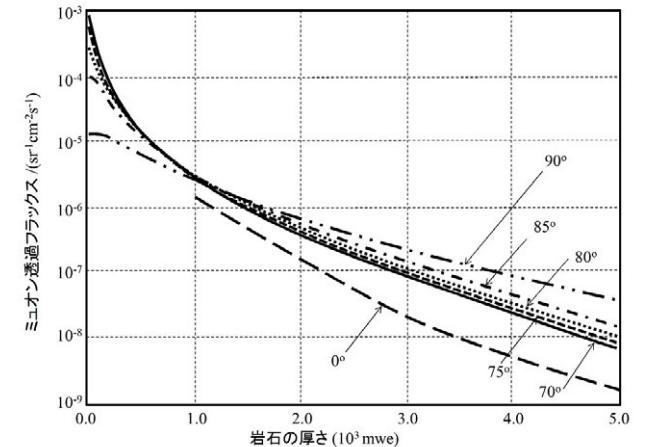


図3 ミュオン透過fluxと岩石の厚さの関係。角度は天頂角、岩石の厚さの単位は水等量 (m.w.e.)。

## 2 ミュオグラフィ検出器

ミュオグラフィ検出器は高エネルギー素粒子物理学実験で用いる素粒子検出器と似ているが、大きな違いは位置情報（あるいは角度情報）や時間分解能にそれほど精度を必要としない点である。これは同時に、低消費電力でメンテナンスフリーの装置ができる可能性を示唆している。しかし、実際の野外観測に必要な機能と高度なミュオグラフィ観測を同時に満足させることは難しい。検出器の有感面積、

角度分解能、検出効率、アクセプタンス、可搬性（重さや耐衝撃性も含む）、消費電力、コストは、互いに両立させることが難しい機能である。

Barnafoldi et al. (2012) [3] は洞窟探査にガス検出器を利用した。このシステムは大きさが一辺 50 cm の立方体に入る程度の大きさで、重さはわずか 13 kg だった。彼らは鍾乳洞に検出器を人力で設置し、周囲の地層構造を推定した。有感面積が小さくても観測する地層が薄ければ、それだけ透過できるミュオンフラックスが増える。したがって、比較的小さな検出器でも高い統計精度でミュオグラフィ観測を行うことができる。しかし、有感面積が小さすぎるとたとえば火山のような大きな対象物体のイメージングができない場合もある。Lesparre et al. (2012) [4] が西インド諸島の火山観測で用いたシステムの総重量は、800 kg である。しかし、システムを組み立て式に設計しておけば、ある程度厳しい地形環境でも現場での組み立て設置が可能である（図 4）。このように、野外観測で用いるミュオグラフィ検出器には、普遍的なデザインやサイズではなく、対象の規模や設置環境に特化して様々な形に最適化されるのが現状である。



図 4 浅間山での検出器運搬の様子。検出器はパーツに分割され、雪上車などで観測点まで輸送される。

## 2.1 積分型検出器

原子核乾板は商用電源が使えない限られた環境下でミュオグラフィ観測を行なう際に大変有用な検出器である。しかし、実際の観測では、画像を得るまでに、設置、回収、現像、解析の一連の作業が必須であるため、リアルタイムモニタリングを行うことはできない。

放射線が写真作用を持つことは古くから知られていたが、ミュオンの飛跡を記録できるような感度の高い写真乳剤（感光材料）は調整が難しく、熟練した技師による長年の経験とノウハウが必要である。また、従来、写真乾板の解析は、顕微鏡を用いて、人の目でひとつひとつ追っていく方法をとっていたが、これを何百万本ものミュオン飛跡を読み取る必要があるミュオグラフィに適用することは非常に難しい。写真乾板を用いたミュオグラフィの実現は、感度の高

い写真乳剤だけでなく、乾板の高速自動読み取り装置の開発と深く結びついている[5]。フィルムを高速で自動的に解析できる顕微鏡の開発によってはじめて、写真乾板をミュオグラフィに応用できるようになった。

原子核乾板は、他の検出器と比べて、3つの利点を持つ。第1に原子核乾板は外部から電気を供給しなくとも 6 ヶ月以上の積分事象を記録することができる（これより長期間にわたる観測を行うとフェーディングという現象により、飛跡が少しずつ消えていく）。次にサイズに関する利点である。写真乾板を用いた検出器システムでは、乾板が薄いことと、データ収集回路が不要であることから全体のサイズは他の検出器に比べて小さい（図 5）。また、衝撃にも強く取り扱いが比較的簡単である。第3の利点は、有感面積と空間分解能あたりの単価が安いことである。そのため、比較的安価にミュオンの飛来角度を精度よく求めることができる。



図 5 北海道、昭和新山のミュオグラフィ観測で用いられた原子核乾板

## 2.2 リアルタイム検出器

現在、リアルタイムミュオグラフィ観測でよく利用されているのがシンチレーション検出器とガス検出器である。

### 2.2.1 シンチレーション検出器

ミュオグラフィ観測に用いられるシンチレーション検出器は 2 層以上の位置敏感な平板から構成され、それぞれの平板は水平方向と垂直方向に各々  $N_x$  個および  $N_y$  個の細長い棒状のプラスチックシンチレーターを並べることで構成される（図 6）。ミュオン飛跡はミュオンが通過した位置  $(a_{i,j}, b_{k,l})$  のペアで決定される。ここで、 $a_{i,j}$  はミュオンが最初に通過した位置、 $b_{k,l}$  はミュオンが次に通過した位置をそれぞれ示す。 $i, k$  は 1 から  $N_x$  まで、 $j, l$  は 1 から  $N_y$  までの値をとる。位置  $(a_{i,j}, b_{k,l})$  がとりうる組み合わせの数は  $(2N_x - 1) \times (2N_y - 1)$  個である。この場合、幾何学的なアクセプタンスは検出器面と垂直な方向 (0,0) で最大になる。

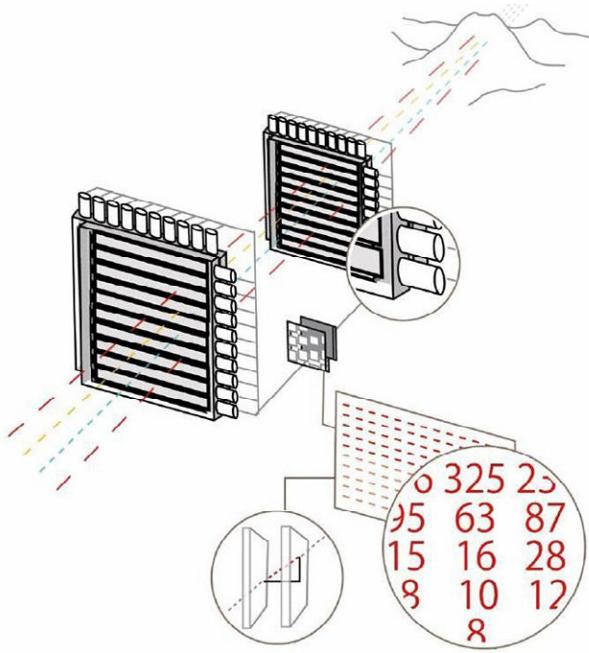


図6 セグメントシンチレーション検出器を用いたミュオグラフィ観測の概念図。点線は山を通り抜けるミュオン、拡大部は光電子増倍管、下部インセットは到来角度決定原理と角度空間でビニングされるミュオンカウント（高仰角ほど多い）がそれぞれ示されている。

シンチレーション光の読み出しに用いる光電子増倍管には、1000Vを超える高い電圧をかける必要があるが、この電圧を通常の電圧変換器を使って得ようすると、巻き線の電気抵抗によるジュール損（負荷電流の2乗にほぼ比例する損失）が大きく、エネルギー効率が悪い。限られた電力しか利用できない屋外での観測では、高い電力消費がボトルネックとなる。たとえば、通常の高電圧印可装置はコッククロフト・ウォルトン回路の実装により、この電圧変換器をシステムから取り除くことができる。これまでの観測実験で、コッククロフト・ウォルトン回路を取り入れた光電子増倍管は、低消費電力ながら優れた性能をもつことが実証されている[6]。

また、半導体検出器の利用も可能である。半導体検出器には、光に対する感度に優れたものがあり、ミュオグラフィを進化させる可能性を秘めている[7]。半導体検出器は大変小さく（数mm角）、消費電力も10万分の1ワット程度とほぼ無視できる。しかし、半導体検出器の雑音レベルが野外でのミュオグラフィ観測を行なう上で障壁となる。ペルチェ素子などを用いてセンサーの温度を一定に保てば、ノイズの影響を最小限に抑えられるが、温度を一定に保つために電気を大量に使っては意味がない。半導体検出器のメリットが薄れないよう、工夫が必要である。

## 2.2.2 ガス検出器

ガス検出器は数mm程度の高い位置分解能を安価に実現できるため、一定の温度環境下で使う限り、ガス検出器は

シンチレーション検出器と比べて重さ、位置分解能の点でコスト的に優れた検出器である。ガス検出器は、これまでもっぱら洞窟内の観測に用いられてきた。洞窟内部は湿度が高いという問題があるが、内部の気温は一年を通してほぼ一定である。温度依存性が大きいガス検出器に適した環境である。

ガス検出器の問題点はガス交換である。検出器内部を新鮮なガスで常に満たしておく必要があるため、長期間にわたるミュオグラフィ観測ではガスタンクを何度も交換しなければいけない。アクセスが困難な場所での野外観測ではこれが大きな障壁となる。必要なガス流量は毎時1.5Lから5L程度で、たとえば10Lタンク（150bar）を用いると20日間の連続観測が行なえるが、実際の観測ではこれより短くなることが多い[8]。

Caffau et al. (1997) [9]や Barnafoldi et al. (2012) [3]はタンクを洞窟内部に入れるのは交換を考えるとあまり現実的ではない、との理由から洞窟入り口に設置した。しかし、100mを超える長さのホースを用いて検出器にガスを送り込むと、途中で別の元素が侵入してくることが報告されている。そのため、実験室内でのテストと比べて実際の観測では必要なガス流量が増える傾向にある(Olah et al. 2012) [8]。

## 3 火山のミュオグラフィ観測例

ミュオグラフィによる火山観測は浅部に限られるが、噴火現象の理解に大きく貢献する可能性がある。この節ではマグマ流路の可視化に焦点を絞り、世界各国で進められてきた火山のミュオグラフィ観測の最新結果の一部を紹介する。

### 3.1 マグマ流路の可視化

#### 3.1.1 浅間山

2006年原子核写真乾板を用いたミュオグラフィ観測によって浅間山浅部構造が透視された[10]。浅間山は首都圏からも近い活火山で、噴火の際には火山灰などが東京都下でも観測されることがある。写真乾板を用いて行われた初めてのミュオグラフィ観測で、これまでにない空間分解能で浅間山山頂部の透視画像が得られた。この観測で2004年に噴出したマグマが火口底に固結した様子が周囲よりも高密度の領域として見つかった（図7左図上側の矢印）。

これに加えて、火口底の下にマグマ流路の上端と考えられる低密度の領域がイメージングされた（図7左図下側の矢印）。マグマ流路内でガスの圧力が高まると、固結した溶岩は吹き飛ばされ、火山灰などとなって、麓に降り注ぐ。このようなシナリオが考えられたが、後のミュオグラフィ観測で、塞がれたマグマ流路の上に溜まったマグマが、吹き飛んだ現象もとらえた。

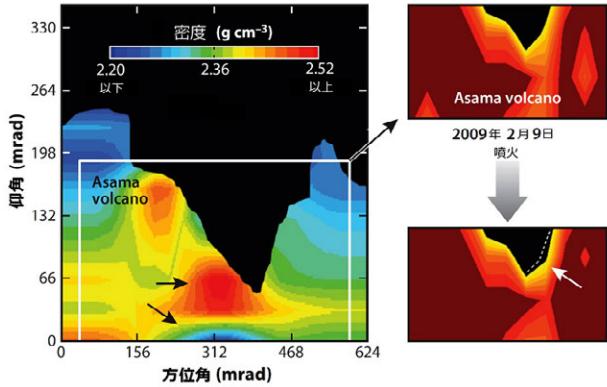


図 7 浅間山のミュオグラフィ透過像。左は 2006 年、右は 2009 年の噴火前後で得られたデータをそれぞれ示す。左図矢印（上）は 2004 年噴火時に形成されたマグマ、矢印（下）はマグマ流路を示す低密度領域。右図矢印は噴火により欠損した火口壁を示す。（出典は Tanaka et al. 2007 [10], Tanaka et al. 2009[11] に基づく Tanaka 2014. [12]）

2006 年に行った原子核写真乾板によるミュオグラフィ観測に引き続き、浅間山で噴火モニタリングを続けるために、2008 年 10 月、シンチレーション方式のリアルタイム検出器が山頂からおよそ 1.2 km 東にはなれた観測点（東側観測点）に設置された。標高 2150 m にある東側観測点には深さおよそ 2.5 m の地下室が建設され、ミュオン検出システムはその地下室に埋設された。外部には無線 LAN 送信用のアンテナが立てられ、ふもとの基地局との間でデータが送受信された。

観測中の 2009 年 2 月 2 日未明に浅間山で噴火が起こった。測定装置は噴火前後で止まることなく安定的に稼動した。噴火直前と直後の火口直下のイメージを比較したのが図 7 右図である[11]。図の右側が北方向である。図には 2009 年 2 月の噴火前の火口の形状に合わせて点線を入れた。2004 年の噴火で火口底に溜まったマグマの北側部分が欠損していることが分かる。その結果、図 7（右図）では火口が大きくなっているように見える。これは噴火でマグマ流路の上部に溜まったマグマが、吹き飛んだからに他ならない。この結果は、噴火で飛び出した噴出物（火山灰、火山弾）の岩石学的性質が 2004 年噴火時に火口底にたまつたマグマと同一であることと調和的である。

一方、2009 年の噴火ではマグマが上昇した証拠は得られなかった。浅間山のミュオグラフィ観測から 2009 年 2 月 2 日の噴火はマグマが火道を上昇して噴火したものではなく、より深い場所でマグマが帶水層と接触して発生した水蒸気がマグマ流路内の圧力を高め、火口底に溜まった古いマグマを吹き飛ばした、いわゆる小規模な噴火であることが結論できる。実際、これ以降噴火が続くことはなかった。

### 3.1.2 エトナ火山

イタリア南部のシシリア島に位置するエトナ火山はヨーロッパ最大の活火山（標高 3350 m）で、そのサイズは日本

の富士山に匹敵する。エトナ全体はミュオンの透過力の不足から透視することはできないが、頂上付近に特化すれば可能である。Carbone et al. (2013) [13] は頂上付近に位置する 4 つの火口のうち、南東火口のミュオグラフィ観測を行った。

南東火口からは 2007 年から 2011 年の間に 18 回の噴火が観測されている。図 8 (a) に示されるミュオグラフィ画像は透過ミュオンフラックスの予想値からのずれで表現されている（正のところは低い密度、負のところは高い密度）。まず、中央部の低密度領域はマグマ流路の上端部で、空隙の多い礫で満たされていることを反映している。固結したマグマで蓋がされている様子は見えない。右側の低密度層は円頂丘の南東斜面にできた割れ目と考えられている。このような割れ目周辺の岩石は強い力を受けて破碎されており、空隙が多い状況となっている。この割れ目がマグマ流路となって、写真（図 8 (b)）にみられるような噴火を引き起こしていると解釈されている。噴火を頻繁に行っているエトナ火山であるが、蓋がないからだろうか、エトナ火山は特別に危険な火山とは考えられておらず、数千人がその斜面と麓に住んでいる。

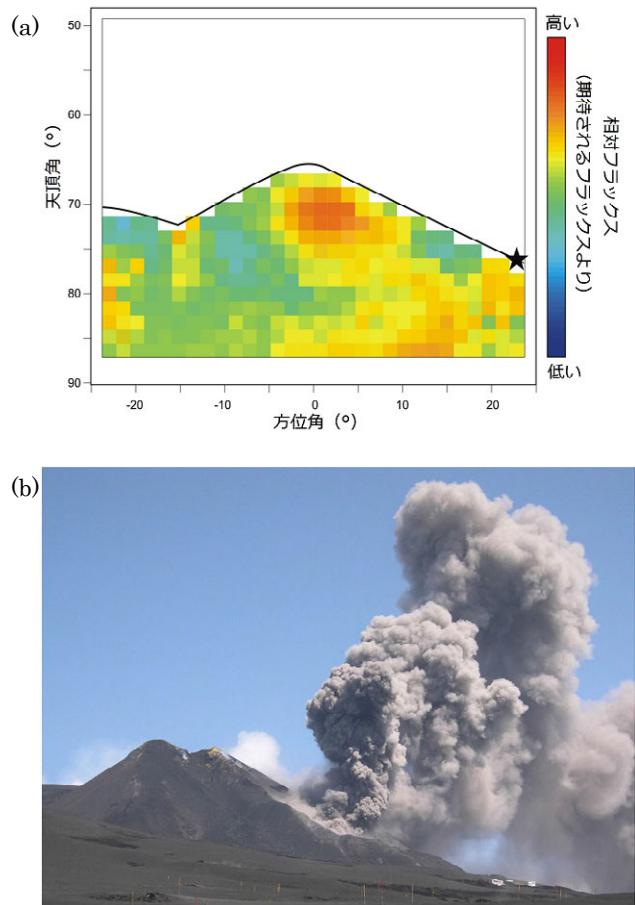


図 8 エトナ火山のミュオグラフィ透過像(a)、および側方（ミュオグラフィ透過像中星印）からの噴火を示す写真(b)。（出典は Carbone et al., 2013[13]）

### 3.1.3 スフリエール火山

西インド諸島グアドループ島最大の成層火山、スフリエール火山は人口密集地帯の近くに位置するにもかかわらず、火山活動を監視するための設備の整備が遅れ、1950年代になってようやく少しづつ、整備されていった。だが、1976–77年に断続的におこった噴火を機に、ここ2, 30年の間で整備拡充が急速になされてきた火山である。

スフリエールは最近300年で6回爆発を起こしたことが記録されている。特に、20世紀最後に起きた噴火(1976–1977年)については、その噴火メカニズムがよく研究されている。それによると、マグマは地下からゆっくりと昇ってきたが地表には達さずに地下数キロメートルの深さで止まった。だが、マグマの熱が地下水を沸騰させ、爆発を引き起こしたということになっている。爆発を伴いながらもマグマが地表に到達しなかったという点は、2009年2月の浅間山の噴火と似ている。

スフリエール火山の観測ではシンチレーション方式が採用された。また、検出器への給電には、ソーラーパネルが用いられた。ソーラーパネルのエネルギー源は太陽光線なので、夜や曇りの時は使えない上に、熱帯雨林地帯に属するグアドループ島では、雨季には何ヵ月も雨天が続くことがある。そこでとられた工夫がミュオグラフィ装置が消費する電力の何十倍も発電する能力を持つソーラーパネルを使って、発電できるときにできるだけ発電しておくという方法である(発電力に対する必要な電力の比をセキュリティーファクターと呼んでいる)。そして余った電力はバッテリーに保存する。バッテリーに保存された電力は、夜間や曇りの日などソーラーパネルが発電できない時に使うようにする。スフリエール火山の観測では、セキュリティーファクターとして20を確保したが、何ヵ月も観測が中断した期間があったと聞く(Lesparre 2012[4])。

図9に示されるスフリエール火山のミュオグラフィ画像は多数の“穴”(あるいは洞窟)が開いていることを示している。穴があいていればその部分を通ってくるミュオンは穴の分だけ吸収されないので、透過量が増える(すなわち、密度が低下する)。スフリエール火山には穴が山体のいたるところにあいているようである。

図9の中央下部に写っている巨大な空間はスパランザニ洞窟と呼ばれる巨大な洞穴と考えられている。スパランザニ洞窟については19世紀初頭の教科書に説明があるが、1836年に崩れて、中に入れなくなったりと報告されている。現在では崩れていて、その入り口がどこにあるのか分からない。当時のスパランザニ洞窟の見取り図をミュオグラフィ透過像に重ね合わせてみると、中央下部(方位角40°~60°、仰角5°~20°の領域)に写っている巨大な空間とスパランザニ洞窟の位置が一致する。

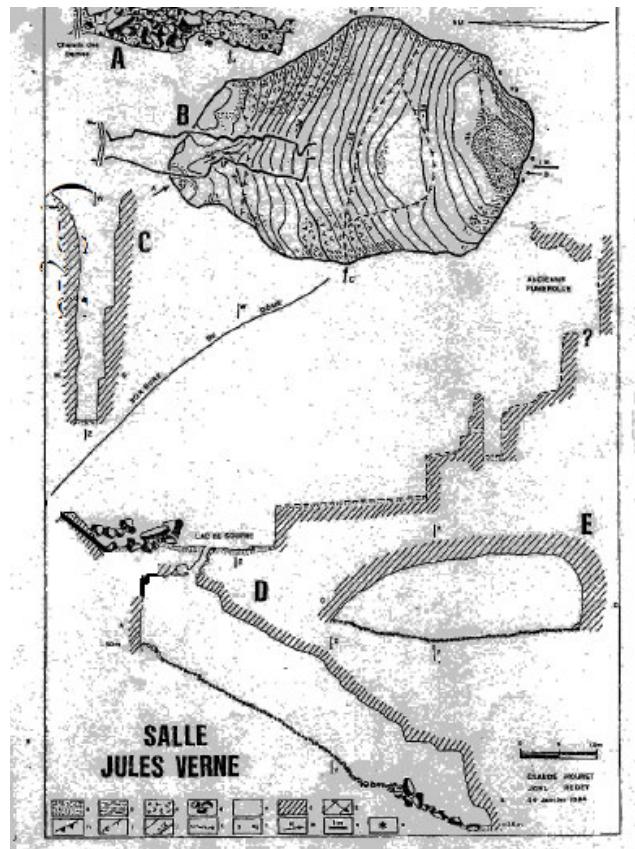
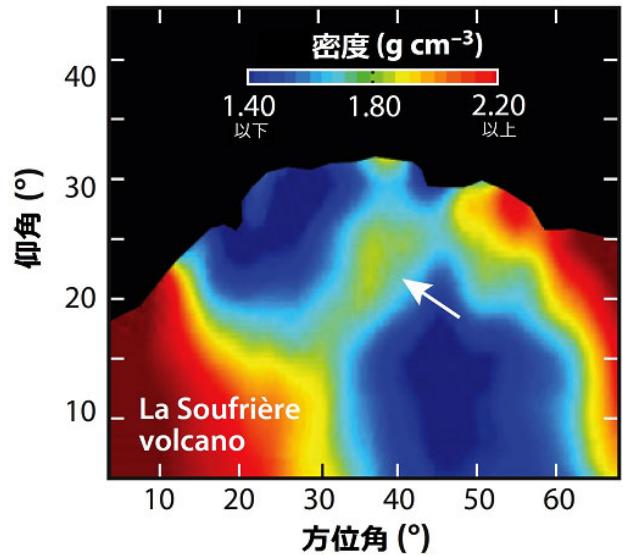


図9 スフリエール火山のミュオグラフィ透過像(上図)及び、19世紀の文献に示されるスパランザニ洞窟(下図)。矢印は洞窟上方に確認されたプラグを示す。(上図の出典は Lesparre et al. 2012[4]に基づく Tanaka 2014[12]. 下図の出典は Gibert 2013 [14].)

スフリエール火山のミュオグラフィ観測ではもう一つ重要な発見があった。スパランザニ洞窟と思われる巨大な空間と上部にあいた巨大な空間—これは火口と考えられている—の間に比較的高密度の領域がある。これは浅間山でも観測されたマグマ流路にできた蓋と考えられる。火口か

らは高温の火山性のガスが噴き出しているが、これはスパンザニ洞窟よりもさらに深いところで、マグマにより地下水が熱せられてその蒸気が噴き出しているものと考えられている。このガスの噴き出す量が少ないうちはいわゆる蓋の隙間からガスは抜けていくが、将来、マグマの上昇により、地温が上昇することで、ガスの噴出量が増えると、スパンザニ洞窟内部の圧力が上がり、蓋を吹き飛ばして爆発するかもしれない。

このようにミュオグラフィによる火山内部の視覚化は、これまでにない、高い空間分解能で火山内部のイメージングを行うことができるため、火山噴火予知の中でも、従来の技術では難しいとされてきた部分に対して情報を与えてくれる。今後、より多くの火山噴火事例にミュオグラフィ測定を適用することによって詳細なデータベースを構築して、将来の「予測」の科学に役立つよう、測定の信頼性を上げていく必要があると思われる。

## 4 将来展望

ミュオンの透過能力の限界からミュオグラフィによる火山観測は浅部に限られるため、いわゆるマグマ溜りなどの地下数十 km にある大規模構造をイメージングすることはできない。そのため、透過力がミュオンより強いニュートリノを用いる必要がある。しかし、ニュートリノの反応断面積はミュオンと比べても何桁も低く、エネルギーが 20 TeV でも半分が  $6 \times 10^7$  m.w.e. (メートル水等量) の岩盤を通り抜ける。したがって、ミュオグラフィと同じようにはニュートリノを利用することができない。

それでも、地球深部の探査に使える可能性があるニュートリノを用いた地球内部イメージング（ニュートリノグラフィ）の技術開発に対する模索は続いている。Tanaka and Watanabe (2014)[15]は地球内部のウランやトリウムが発する地球内部起源ニュートリノ（地球ニュートリノ）の到来方向を検知することで、ミュオグラフィでは見ることが困難な巨大マグマだまり<sup>2</sup>のイメージングができる可能性があることを示した。ニュートリノの発生源が地球内部の特定の領域に濃集していることを利用する方法である（たとえば[16]）。また、ニュートリノ振動の物質効果を用いることで、さらに深部の地球コアの元素組成を調べることができると提案されている[17, 18]。ニュートリノ経路に沿った平均電子密度と地震波トモグラフィから求められる核子密度の比から求めようというのである。しかし、精度のよい電子密度測定を行おうとすると、巨大検出器と高精度の振動パラメータが必要であるが、これは PINGU や

<sup>2</sup> 地震波速度が周囲より低く、不適合元素としてマグマに濃集しやすいウランやトリウムが高濃度に分布している場所をマグマだまりと定義した。

Hyper-Kamiokande などの将来計画の中で実現可能になるものと期待している。

## 5 おわりに

今回紙面の都合で紹介できなかつたが、ミュオグラフィによる地球内部のイメージングは未発見の洞窟探査や断層破碎帯<sup>3</sup>の調査にも用いられ始めている。また、2013 年、イギリス、ダラム大学が主導するコンソーシアム「ミュオン技術を用いた炭素貯留槽モニタリング」は液化二酸化炭素の廃棄施設としての炭素貯留槽（CCS）の連続モニタリングに使えるミュオグラフィ技術の開発を開始した。地下深部の貯留槽に廃棄された、液化二酸化炭素を岩盤密度の時間変化という形でモニタリングしようというのである[19]。現在実用化されているモニタリング技術は繰り返し地震波トモグラフィを行うもので、年間数億円の費用を要する。ミュオグラフィによる貯留槽のモニタリングシステムを構築することで、費用を削減することができるかもしれない。一方、カナダでは資源探査を目的としたミュオグラフィ観測の実用化が推し進められている[20]。坑道内部からの観測すでに存在が分かっている鉱床のイメージングを行い、掘削サンプリングの結果と比較したところ、よい一致を見た。ミュオンやニュートリノを使った地球観測学が今後ますます発展していくことを期待したい。

## 参考文献

- [1] E. P. George (1955) Commonwealth Engineer, **1**, July, 455-457.
- [2] L. Alvarez *et al.* (1970) Science, **167**, 832-9.
- [3] G. G. Barnafoldi *et al.* (2012) Nucl. Instrum. Meth., **A689**, 60-69.
- [4] N. Lesparre *et al.* (2012) Geophysical Journal International, Vol. **190**, 1008-1019.
- [5] T. Nakano (1997) PhD thesis, Nagoya University (in Japanese).
- [6] H. K. M. Tanaka *et al.* (2010) Journal of Geophysical Research **115** B12332.
- [7] A. Anastasio *et al.* (2013) Nucl. Instrum. Meth., A, **718**, 134-137, doi.org/10.1016/j.nima.2012.08.065.
- [8] L. Olah *et al.* (2012) Geosci. Instrum. Method. Data Syst., **1**, 229-234.
- [9] E. Caffau *et al.* (1997) Nucl. Instrum. Methods A, **385**, 480-488.

<sup>3</sup> 地震などで地下の岩盤に大きな力が加わって割れた面がずれ動くことで作られる断層には断層破碎帯と呼ばれる地質構造が見られることが多い。断層破碎帯では断層面周辺の岩盤が破碎されることで、岩石の破片の間の隙間が多い状態となっている。

- [10] H. K. M. Tanaka *et al.* (2007) Earth Planet. Sci. Lett. **263** 104-13.
- [11] H. K. M. Tanaka *et al.* (2009) Geophysical Research Letters **36** L17302.
- [12] H. K. M. Tanaka (2014) Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Volume **42**, May 30.
- [13] D. Carbone *et al.* (2013) Geophys. J. Int. doi: 10.1093/gji/ggt403.
- [14] D. Gibert, Calorimetry for High Energy Frontier, 22-28 April 2013. Paris.
- [15] H. K. M. Tanaka and H. Watanabe (2014), Scientific Reports, **4**, 4708.
- [16] O. Sramek *et al.* (2013) Earth Planet. Sci. Lett. **361** 356-366.
- [17] C. Rott, Japan Geoscience Union Meeting 28 April -2 May 2014, Yokohama.
- [18] M.G. Aartsen et al. arXiv:1401.2046 [physics.ins-det]
- [19] News, Science & Technology Facilities Council, England, 22 November, 2012.
- [20] Z. Liu *et al.* (2012) International Workshop on “Muon and Neutrino Radiography 2012,” 17-20 April 2012, Clermont-Ferrand, France.