

サイエンス・プラザ

## ミュオグラフィ

国立大学法人東京大学 地震研究所 教授 田中 宏幸

### 1. はじめに

2017年10月、「Muographers（ミュオグラファーズ）総会17」が駐日フランス大使館で開かれ、2018年5月、「Cosmic Ray Muography（宇宙線ミュオグラフィ）」を英国王立協会が主催した。2018年11月にはイタリア外務省管轄の東京イタリア文化会館で「Muographers 総会18」が予定されている。半年おきに開かれる国際会議は世界のミュオグラフィ研究が加速していることを物語っている。

ミュオグラフィとは、物体内部の空間的な密度分布をX線レントゲン写真のように透かし撮る方法である。X線では難しい、巨大な火山や石造建造物の内部構造を描き出すことができる。その原理はレントゲンとほぼ同じだが、X線は使わずミュオンと呼ばれる素粒子を用いるところが異なっている。特に宇宙に由来するミュオンはエネルギーが高く、強い透過能力を持つため、キロメートルにも及ぶ岩盤を透過できる。

X線レントゲン写真は照射されたX線の一部が物体内部に止まる性質を利用して、内部の「影」を映し出す手法である。ミュオグラフィも同様に、巨大物体を透過するミュオンが一部途中で止まるために、同様の「影」を映し出すことができる。2007年、火山内部の透視撮影に初めて成功してから<sup>1)</sup>、ミュオグラフィは洞窟<sup>2)</sup>、遺跡<sup>3)</sup>、原発<sup>4)</sup>、地下資源<sup>5)</sup>など様々な方面に波及している。

X線診断が万能でないのと同じように、ミュオグラフィによって巨大物体の謎が全て解決するわけではない。たとえば、ミュオンの透過能力は岩盤にして数キロメートルが限界なので、可視化できるのは火山浅部に限られる。また、密度が同じ物質については、ミュオグラフィでは区別がつかない。それにもかかわらずミュオグラフィが魅力的なのは、巨大物体の内部構造の多くが、密度の空間分布に対応しているからである。空のマグマ流路にマグマが入れば密度は上昇する。ピラミッ

### ◆ も く じ ◆

サイエンスプラザ ミュオグラフィ……………	1	連載 研究で君が光り輝くために 第1回 客観と主観を分けることから始めよう……………	18
破局的災害を引き起こす 巨大カルデラ噴火予測への挑戦……………	9	新学習指導要領の主な変更点……………	22
第14回高校化学グランドコンテスト……………	14	高校生へ私が選んだ1冊の本 桜の科学……………	24

ド内部の玄室はほぼ密度ゼロの空間である。本解説では、ミュオグラフィが今後災害研究に役立つようになるのか、また、世界各国が抱える諸問題にどのように応えていくことができるのかについて述べる。

## 2. ミュー粒子（ミュオン）とは何か？

現代物理学の標準模型ではミュオンは宇宙を構成する12個の素粒子のうちの1つとされている。12個の素粒子は強い相互作用をするかしないかで、6つのクォークと6つのレプトンに分類される。ミュオンはレプトンの仲間である。レプトンはさらに電磁相互作用をするかしないかで3つのニュートリノとそれ以外の粒子に分けられる。ニュートリノは透過力が極端に強く、火山やピラミッド程度で止められることはない。すなわち、火山やピラミッドはニュートリノにとって透明なので透視には使えない。残り3つのレプトン、すなわち電子、ミュオン、タウオンのうち、私たちになじみが深い電子は透過力が低く巨大物体の透視には使えない。ミュオンは電子と似た性質を持つが、2つの点において大きく異なっている。1つ目は電子の200倍以上の重さを持っている点である。これがミュオンに強い透過力がある理由である。2つ目は、電子は勝手に消滅しないが、静止しているミュオンは約100万分の2秒で崩壊する点である。タウオンはミュオンより更に15倍重い、1兆分の1秒にも満たない時間で崩壊する。ミュオンが100万分の2秒で崩壊すると、光速で走ってもたかだか600m程度しか飛べない。だが、特殊相対性理論の有名な帰結に、光速に十分近い速度で運動する時計は遅れるというものがある。このとき、その粒子の持っている時計の進み具合は大体、(質量エネルギー)/(運動エネルギー)分だけ遅れる。このミュオンのエネルギー比はピラミッドを観測する場合で約1/1000、火山観測の場合で約1/10000である。タウオンはそもそも存在できる時間が1兆分の1秒未満と極端に短いため、このエネルギー比でもあつという間に崩壊する。このような理由で巨大物体を透視するためには、光速に近い速度で飛ぶ(相対論的)ミュオンが唯一解として残されるのである。ミュオンは

人工的に作ることもできるが、宇宙に由来するものの方が圧倒的にエネルギーが高く、透過力に優れている。

ミュオンは銀河系内でおきる超新星爆発などの高エネルギーイベントに端を発している。爆発でエネルギーを得た陽子を主体とする粒子は宇宙線と呼ばれ、地球に到来すると大気(を構成する窒素や酸素などの原子核)と反応する。反応の結果、パイオンやケイオンと呼ばれるメソンが生成される。できたメソンは1億分の数秒程度でミュオンとニュートリノに崩壊する。このようにして大気中で作られたミュオンはほぼ一定の流量で地球表面に降り注いでいる。その数は1平米、1秒あたりおよそ100個である。

ミュオンのもととなる宇宙線には様々なエネルギーのものがあるため、ミュオンのエネルギーも様々である。だが、一般的な傾向として、ミュオンの流量は高エネルギーになるほど数が減る。透過力はエネルギーが高いミュオンほど強い。そのため、物体に入射したミュオンはエネルギーが低い物から順に止まっていき、通過していくうちに次第に数が減っていく。この減り具合はミュオンのエネルギー流量分布(エネルギースペクトル)に関する情報とモデル計算によって正確に計算できる。ミュオンは今からおよそ80年前の1936年、アンダーソンとネッダーマイヤーによって宇宙線の中に初めて観測された。それから80年の歳月を経て、今日ではミュオンのエネルギースペクトルはかなり正確になってきている<sup>6)</sup>。

## 3. ミュオグラフィとは

ミュオグラフィのアイデアは今から60年前にさかのぼる。オーストラリアの物理学者ジョージは、スノーウィーマウンテン水力発電所用の調査坑道(グテンガムンヤントネル)上部の岩盤密度を、ミュオンを用いて測定した<sup>7)</sup>。ジョージが用いた測定装置はガイガーカウンターと呼ばれ、文字通りミュオンの数を数えるカウンターであり、ミュオンの到来方向は分からなかった。つまり、岩盤の内部構造はイメージできなかったのだが、彼の研究はミュオンを用いて密度測定ができることを示した点で先駆的である。その後

10年余りの年月が経ち、素粒子物理学の実験技術が大きく発展した。そして1968年米国の物理学者ルイ・アルバレがエジプトのピラミッドを対象にミュオグラフィ観測を挑むことになった<sup>8)</sup>。アルバレが選んだのは、ギザの大地にそびえたつ3大ピラミッドの真ん中のカフラー王のピラミッドであった。アルバレは隣のクフ王のピラミッドの内部構造が複雑に入り組んでいるにもかかわらず、カフラー王のピラミッド内部はシンプルで玄室が一つあるだけで、それ以外何一つ発見されていない事実に疑問を抱いた。そこで使われたのが、スパークチェンバーと呼ばれるミュオン飛跡を記録できる装置である。数か月間にわたる観測にもかかわらず、新たな空洞は発見されず、ミュオグラフィの有効性を世界に示すことはできなかった。だが、アルバレの先駆的な試みはその後のミュオグラフィが発展する上で大きな役割を果たした。

物質に入射したミュオンは物質と度々反応することで少しずつエネルギーを失いついに止まる。入射してから止まるまでにミュオンが走る距離が透過距離である。ミュオンの透過距離は一般的にエネルギーが高いほど長くなる。ミュオンが物質と反応する頻度はミュオンが物質の中を進んでいくうちに衝突する粒子（電子、陽子、中性子）の総数、すなわち（ミュオンがたどった経路の長さ）×（経路に沿った密度）に比例する。つまりミュオンがたどった経路の長さが同じであれば、岩盤中を通ると空気中を通るとでは、ミュオンが衝突する粒子の総数も大きく異なる。ミュオンは衝突する度に少しずつエネルギーを損失するので、経路長が一定であれば、出会う粒子の総数が多いほど、つまり対象物体の密度が高いほど、エネルギー損失の総量は大きい。このエネルギー損失の総量は物体の形状や密度を与えることで、計算機シミュレーションで正確に見積もることができる<sup>9)</sup>。これが分かれば、物体を通り抜けることができるミュオンの最低エネルギーが分かる。この最低エネルギーより高いエネルギーを持つミュオンの総数を、先行測定によって得られているミュオンのエネルギースペクトルを用いて計算することで透過量を推定できる。一般的に、火山や

ピラミッドなど測定対象となる物体の形状は複雑で、ミュオンの到来方向毎に経路長が異なるので、このエネルギー損失量を方位角、仰角方向について計算する。こうして、ミュオグラフィ画像を想定するのである。

一方、実際の観測において、観測時間や装置の有感面積、つまりミュオンを受けることができる領域の面積などの諸条件が分かれば、実際の対象物体を透過してきたミュオンの流量を求めることができる。これと、前述のミュオグラフィの想定画像を比較することによって、ミュオンがどのような内部構造を通り抜けてきたかが分かる。例えば、想定された画像と比べて、実際得られた画像の方が濃ければ、よりたくさんのミュオンが通り抜けてきた（それだけ通り抜けやすかった）ということであり、対象の密度は仮定された値より低かった、と結論できる。まとめると、ミュオグラフィ観測でやるべきこととは、対象物体透過後のミュオン計数と想定画像を比較することである。

## 4. 火山観測におけるミュオグラフィ

### 4-1. 噴火

火山噴火の規模を示す指標として、Volcanic Explosivity Index (VEI) が1982年に提案されている<sup>10)</sup>。VEIは噴出物の総質量などの要素を組み合わせて決めるものであるが、もしこのVEIを予測できれば、地震火山噴火災害の軽減に大きな意味を持つ。火山噴火の予知は「いつ始まるのか」についての予測だけではない。「どの程度の規模の噴火が起こるのか」、「噴火がいつまで続くのか」についての予測も極めて重要である。たとえば、2010年に噴火したアイスランドのエイヤフィヤトラヨークトル火山の噴火では大量の火山灰が放出され、西ヨーロッパおよび北ヨーロッパ地域の空港が長期間閉鎖された。航空機のジェットエンジンが火山灰を吸い込むと故障する確率が格段に上がるからである。当時、エイヤフィヤトラヨークトル火山の噴火による経済的ダメージを予測できなかった。当該地域で空輸をいつから再開できるのか見積もることができなかったからである。この状況は今でも大きく改善されているとはいいがたい。噴火が「いつ始まるのか」につい

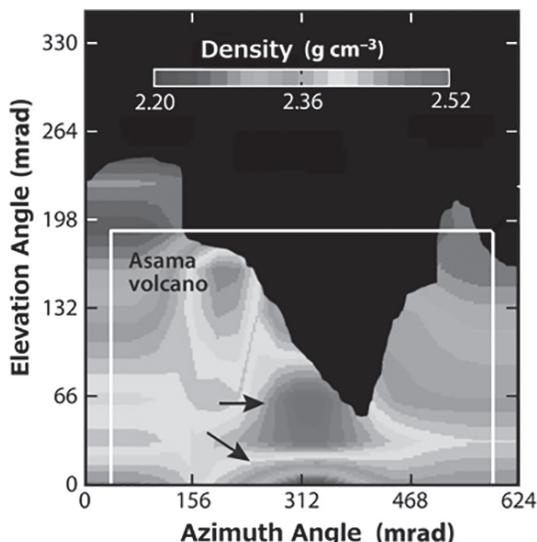


図1. 浅間山頂上部付近のミュオグラフィ像。図中の白枠は図2の時系列画像の表示領域を示す。矢印上は火口底上部に堆積した固結した高密度マグマ、矢印下は低密度のマグマ流路をそれぞれ示す。

ては、火山性地震の測定や地殻変動のモニタリングによっておおよそ分かるようになってきている。しかし、「どの程度の規模の噴火が起こるのか?」と「いつまで続くのか」については現在でも予測が難しい。だが、これらの問いはVEIの予測と直結する。2009年の浅間山でのミュオグラフィ観測結果は、将来ミュオグラフィが「噴火がいつまで続くのか」についての予測に実用化できる可能性を示唆している。

図1は、2006年、世界で初めて撮影された浅間山内部のミュオグラフィ像である。浅間山はこの撮影の2年前の2004年にも噴火している。噴煙は高度3500～5000mに達したため、1983年以来、21年ぶりの本格的な噴火が危惧された。2006年当時、この噴火で、流出したマグマが火口の底にたまっていた。図に示されているV字型にえぐれている部分は火口である。この透視画像を見ても火口底（火口の底の部分）に冷えて固結したマグマが周囲よりも高密度の領域として映し出されている（図1 矢印上）。これは2004年の噴火時に噴出したマグマである。火口底の更に下には、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ている（図1 矢印下）。一般的に、火山の噴火は火山浅部の中

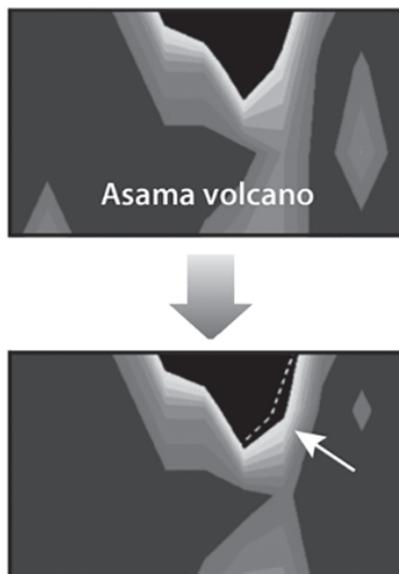


図2. 2009年の浅間山噴火前後における時系列ミュオグラフィ像。点線は噴火前の火口形状を示す。矢印は欠損部分。

にある筒状の管の中を地下から上昇してきたマグマが通って起きると考えられている。つまり、噴火が起きていない定常時には、浅間山浅部においてこのマグマ流路は低密度の状態になっていると推測される。浅間山のように流路上が固結したマグマで栓をされている状態では、マグマが再び流路を上がり、深部のマグマによって熱せられた地下水が流路内部の圧力を上昇させる。そしてついには栓を吹き飛ばすことになる。これこそが2009年2月に起った浅間山の噴火であった。

図2がその時とらえられた画像である<sup>11)</sup>。上の図が噴火前に撮影されたもの、下の図が噴火後に撮影されたものである。噴火前の火口の形状が分かるように、噴火後の画像に点線でその形を書き込んだ。2枚の図を比較してみるとまず、噴火によって火口サイズが大きくなっている事が分かる。これは、火口の底に固まっていたマグマが吹き飛ばされたからに他ならない。このマグマは2004年の噴火の際に形成された物である。つまり、吹き飛ばされたもの（火山灰や火山弾）を分析すれば、その組成が2004年に噴出したマグマと組成的に同一の物が分かるが、実際に測定した結果は確かに2004年噴出したマグマと同一であった。

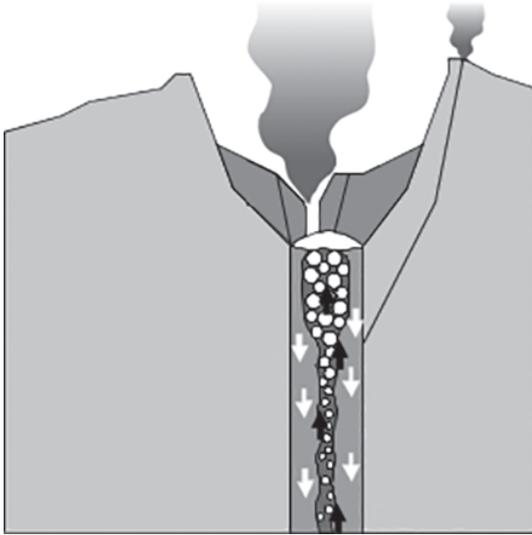


図3. ミュオグラフィの撮像結果から想定される薩摩硫黄島のマグマ対流を示す図。マグマ上部は高度に発泡している。

次に火口底の下に注目してみる。図中火口底から下に伸びている薄い色の領域がマグマ流路である。上下の図で若干の違いは有るものの、劇的に変化しているとは言いがたい。もし、ここをマグマが上がって来たら、マグマ流路は全て高密度となり、色がより濃くなる事が予想される。だが、実際はそうっていない。ということは2009年の浅間山噴火では、マグマは地表まで上がってきかなかったという事である。マグマが実際に上がってきかない噴火は小規模な噴火と呼ばれる。それは、単発の噴火で終わる事が多いからである。実際、2009年の浅間山噴火では、繰り返し噴火が起きる事は無かった。

#### 4-2. マグマ対流

鹿児島から100 kmほど南下したところにある薩摩硫黄島は鬼界カルデラの北東縁に位置する火山島である。鬼界カルデラはそのほとんどが海面下にあり、今から7300年前に形成された直径19 kmの巨大カルデラである。鬼界カルデラは完新世(1万1784年前以降の時代)では最も大きな噴火の一つに数えられるアカホヤ噴火(150 km<sup>3</sup>の噴出, VEI7の噴火マグニチュード)を引き起こしており、このとき発生した大規模火砕流によって九州南部の縄文初期の文明が壊滅し

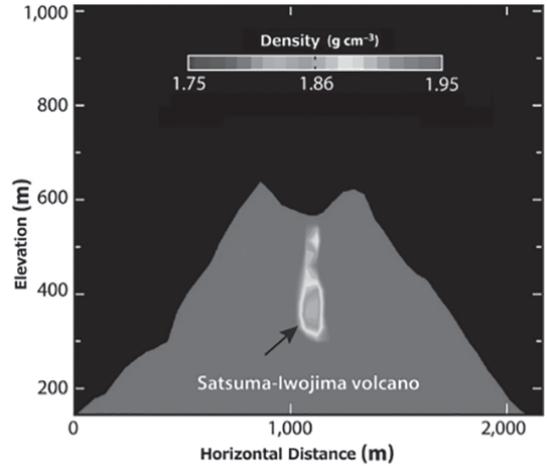


図4. 薩摩硫黄島のミュオグラフィ像。矢印は発泡している低密度マグマを示す。

たと考えられている。だが、薩摩硫黄島はマグマ性のガス(マグマから直接分離して出てくるガスで、マグマで温められて地表に出てくる水蒸気などとは異なる)を日常的に大量に吹き出しているにもかかわらず、ある程度の規模を超える噴火は少なくとも5~600年間起きていない。その理由として考えられているのがマグマ対流仮説である。マグマ対流仮説の原理を図3に示す<sup>12)</sup>。マグマは地下深く(地下10 km程度にあると考えられている)のマグマだまりとつながっており、地表近くとの間を常に行き来している。地下10 kmからマグマがゆっくりと上浮すると、マグマの中にとけ込んでいた気体が減圧によって泡となって分離する。この分離が進むと、そのうちマグマは泡だらけになるため、一層密度が低くなり、浮力でマグマは急速に上昇するが、それと同時に泡も外に抜ける。泡が抜けたマグマは周囲より密度が高くなり、今度は地下深くへと落ち込んでいく。このようなサイクルが薩摩硫黄島の中では、休み無く続いていると考えられているのだ。

図4に薩摩硫黄島のミュオグラフィ画像を示す<sup>13)</sup>。図中の明るい部分が、マグマが高度に発泡している領域である。下から上に向かって暗色から明色に急激に変化しているところが、泡がほとんど含

まれていない高密度マグマの最上端である。その上に泡の層に対応する低密度の領域が浮いている(図4 矢印)。泡はそのうちはじけ、その中に閉じ込められていたガスが上部にある通り道を通して、火山の外に逃げていく。

薩摩硫黄島で2013年6月、小規模な噴火が起こった。噴火に伴ってマグマはどう動いたのだろうか? 図5にはそのとき撮影された時系列画像が示されている<sup>14)</sup>。薩摩硫黄島では6月4日に噴火レベルが1から2に引き上げられ、7月10日に警報が解除された。その間、6月16日と30日に、夜間火口付近が赤く映える「火映」と呼ばれる現象が確認されている。火映はマグマなどの高温の物体が地表付近まで上がってくる事で火口付

近の岩石が赤熱されるため観測されると考えられている。時系列画像の下に示した表1には火映と噴煙が観測された日時および噴煙の高さを入れた。だが、噴煙については、雨水や地下水などが地温で熱せられて発生する事もあるため、必ずしもマグマが地表近傍に上がっていることにはならない。6月14~16日および、6月29~7月1日にかけて観測された透視画像から地表付近までマグマが上昇してきていたことが分かる。

### 5. ミュオグラフィの発展

前節までに述べてきた火山のミュオグラフィは紙面の都合で2例だけ紹介したが、日本だけでなく、イタリア、フランスを中心として国外でも実施されており、想像の域を出なかった仮説の検証、

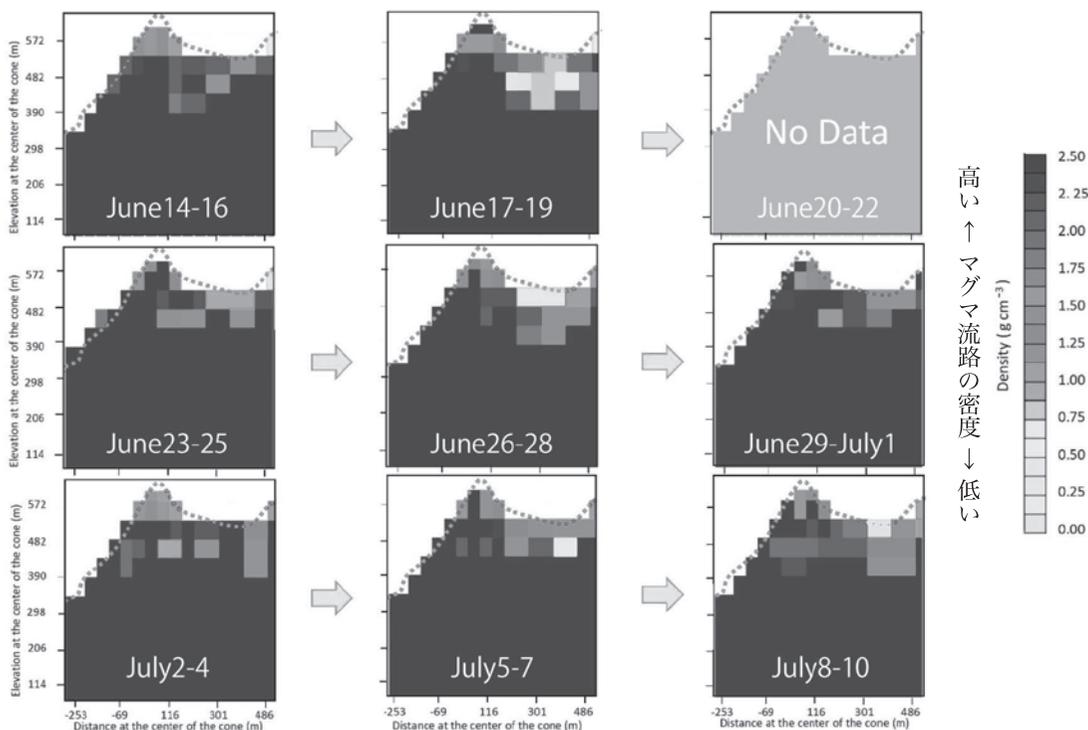


図5. 薩摩硫黄島の2013年の噴火の際撮影された時系列的ミュオグラフィ像。

2013年 薩摩硫黄島の噴火の推移	
<b>6月</b>	<b>4 6 7 16 17 30</b>
噴煙の高さ	- 300 600 400 100 200
火映	- - - X - X

表1. 2013年の薩摩硫黄島の噴火推移。データは気象庁による (Report about Volcanism-Satsuma-Iwojima Vol. 7)。Xは火映が観測された日に入れた。

火山内部の動態の検出など、各国で成果が上がりつつある。だが、火山がある地域は限られている。日本やイタリアは火山国だが世界の大部分には火山はない。だが世界の国々は様々な事情を抱えている。それらの事情を解決するためにミュオグラフィが応用され始めている。例えば、カナダは世界有数の鉱山資源国である。従って、ミュオグラフィの鉱床探査への応用は極めて自然の流れと言える。イタリアには世界有数の文化遺産がある。これらの内部構造には分かっていないものが多く、ミュオグラフィを用いた構造探査が進められている。この全てを本論の限られたスペースで解説することは不可能であるが、私たちに特になじみが深い文化遺産、産業プラントについて、一部をここで紹介する。また、私たちが得た新たな眼であるミュオグラフィは芸術制作活動に対してもインスピレーションを与えている。このような文理融合に対する試みについても紹介する。

### 5-1. 文化遺産への展開

Heritage Innovation Preservation (HIP) Institute が主導的に進めるスキャンピラミッドプロジェクトにおいて、エジプトのクフ王のピラミッド内部に新たな空洞を示唆するミュオグラフィデータが得られた<sup>3)</sup>。また、発見された空洞の発掘はされていないが、今後の動向に注目すべきである。ミュオグラフィの文化遺産への適用はアルバレが今から50年前にカフラー王のピラミッドに対して、先駆的な観測を実施しているが、既存の孔に観測装置を入れ、その周囲をイメージングする測定手順は近年のエジプト、イタリア、インドネシア<sup>15)</sup>での観測実施例においても変わっていない。現在、イタリアのナポリ市では、都市システムにおける耐久性と安全性を確保するための新たなテクノロジーの統合開発プロジェクトが進められている。これが、「メトロポリスプロジェクト」である。都市経済の脆弱性の評価など6つのテーマから構成されているこのプロジェクトの一環として、「都市システムの知見」テーマの中でエキア山ミュオグラフィプロジェクトは実施されている<sup>16)</sup>。このテーマではナポリ市に特有の問題である、都心部における古代地下空間の調

査及び、その有効利用法の検討が進められている。エキア山は紀元前5世紀に新たな都市を意味するネオポリス（ナポリ）が作られる遙か昔の紀元前8世紀、もともとの移住者であったギリシャ人が作った町である。町は地下空間に作られ、現在でもその全貌は明らかになっておらず、最近でも新たな構造が次々と発見されている。エキア山プロジェクトはこのテーマに対するミュオグラフィの有効性を検証するためのプロジェクトでイタリア国立原子核物理学研究所がエキア山のイメージングを実施している。

### 5-2. 産業プラントへの展開

溶鉱炉、電炉、発電用プラント、核廃棄物用サイロなどは概してサイズが大きく、X線レントゲン写真撮影によって内部を直接可視化することができないため、その内部動態の推定には専ら計算機シミュレーションが用いられてきた。ミュオグラフィは炉壁の損耗状態、炉内の操業状態、原料の充填状態、異物混入の確認など炉内を調べる有効手段になり得るため<sup>17)</sup>、現在国内外でその検証と実用化研究が進んでいる。プラントの中でも中を開けるのが特に難しいのが原子炉である。2011年3月11日の東日本大震災により被災した福島第一原子力発電所では、1号機から3号機の原子炉の炉心が溶融したと考えられている。しかし、被災した原子炉内部を直接観察することは難しい。名古屋大学のグループは、2014年に福島第一原発の2号機と5号機でミュオグラフィ観測を実施した<sup>18)</sup>。得られた透視画像から、2号機の炉心領域に存在する物質量は5号機と比べて有意に少ないという結果が得られた。その欠損量は180～210トンと見積もられた。本来有るべきところに核燃料があれば、それによりミュオンが遮られて、その方向からの数が減るはずだが、実際にはより多くのミュオンが通り抜けてきた。この結果から、2号機では炉心溶融が起きていたことが裏付けられたのである。

### 5-3. 芸術制作活動へのインスピレーション

科学と芸術の結合は、より視覚的な記憶と数学などに変わる新たなボキャブラリーが得られることから科学を新しい目で見るきっかけを与える。

前節まででミュオグラフィが考古学から工学，火山学まで幅広い分野をカバーできることを示した。そして，ミュオグラフィがそれらと素粒子物理学や宇宙物理学との結合の産物であることも重要である。このような分野横断型の研究に芸術を結合させることは科学未経験者にとって優れたイントロダクションとなり得るが，更に，このタイプの文理融合はコミュニティにおける一般的な科学リテラシーを再検討させ，新たな科学分野へのサポート，科学の道徳的，倫理的な側面に対する理解を深めることにもつながる。特に，ライブアート（芸術作品の公開制作）は観客に物理が静的なものではなく動的なものであることを改めて感じさせる。例えば，2018年に実施された日ハンガリーの協働プロジェクトに，多摩美術大学美術館におけるアート・イン・レジデンスプログラムがある。これはハンガリーのアーティストである Agnes Husz が「宇宙に訊ねよーミュオグラフィが透視する科学と芸術の会合うミライ」展において，期間中に公開制作を行い，観客の前で徐々に作品を仕上げたもので，ミュオグラフィの過程をセラミックスの視点からとらえ直したものである（図6）<sup>19)</sup>。このような科学者と芸術家との視点の共有は，観客との視点の共有ももたらす。芸術家との協働によって実現する，よりクリエイティブな社会対芸術家の新たなコミュニケーションは，広範な人々のミュオグラフィに対する興味を喚起させることとなるだろう。

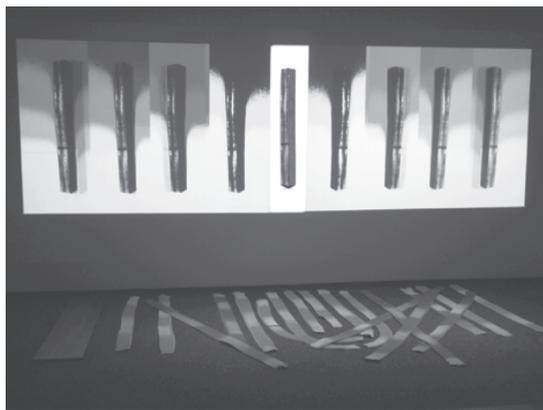


図6. 多摩美術大学美術館において Agnes Husz によって公開制作されたミュオグラフィ。

## 参考文献

- 1) Tanaka, H. K. M. *et al.* 2007 High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.* **263**, 104–113.
- 2) Olah, L. *et al.* 2013 Cosmic Muon Detection for Geophysical Applications, *Advances in High Energy Physics* **2013**, 560192
- 3) Morishima, K. *et al.* Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons, *Nature* **552**, 386-390.
- 4) Special Exhibition “Muography: Perspective Drawing in the 21st Century”, 2015.12.05-2016.05.08, <http://www.intermediatheque.jp/en/schedule/view/id/IMT0086>
- 5) Klinger *et al.* 2015 Simulation of muon radiography for monitoring CO2 stored in a geological reservoir, *International Journal of Greenhouse Gas Control* **42**, 644-654.
- 6) Patrignani C. *et al.*, 2016 Review of particle physics. *Chin. Phys. C* **40**, 100001.
- 7) George, E.P. 1955 Cosmic rays measure overburden of tunnel. *Commonw. Eng.* **1955**, 455-457.
- 8) Alvarez, L.W. *et al.* 1970 Search for hidden chambers in the pyramid. *Science* **167**, 832-739 (1970).
- 9) Groom, D.E. *et al.* 2001 Muon stopping-power and range tables: 10 MeV–100 TeV. *At. Data Nucl. Data Tables* **78**, 183–356.
- 10) Newhall, C. G., and S. Self 1982 The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism, *J. Geophys. Res.* **87**, 1231–1238.
- 11) Tanaka, H. K. M. *et al.* 2009 Detecting a mass change inside a volcano by cosmic-ray muon radiography (muography): First results from measurements at Asama volcano, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L17302 (2009).
- 12) Shinohara, H. and Tanaka, H.K.M. 2012 Conduit magma convection of a rhyolitic magma: Constraints from cosmic-ray muon radiography of Iwodake, Satsuma-Iwojima *Earth Planet. Sci. Lett.* **349-350**, 87-97.
- 13) Tanaka, H.K.M., *et al.* 2009 Cosmic-ray muon imaging of magma in a conduit: degassing process of Satsuma-Iwojima Volcano, Japan, *Geophys. Res. Lett.* **36**, L01304.
- 14) Tanaka, H.K.M. *et al.* 2014 Radiographic visualization of magma dynamics in an erupting volcano. *Nat. Commun.* **5**, 3381.
- 15) Hanazato, T. and Tanaka, H.K.M. 2016, 宇宙線による世界遺産建造物の内部構造探査, *Isotope News* **741**, 60-64.
- 16) Saracino, G. *et al.*, 2017b: Imaging of underground cavities with cosmic-ray muons from observations at Mt. Echia (Naples), *Scientific Reports* **7**, 1181. doi: 10.1038/s41598-017-01277-3
- 17) Tanaka, H. K. M. 2013: Development of stroboscopic muography, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, **2**, 41–45.
- 18) Morishima, K., 2015: Muographic investigation of Fukushima nuclear power plant. Muography: Perspective Drawing in the 21st Century, 87.
- 19) Tama Art University Museum exhibit “Answer From the Universe: Vision Towards the Horizons of Science and Art Through Muography” May 19 - June 17, 2018 <http://www.tamabi.ac.jp/museum/exhibition.htm> (Japanese)