

宇宙から降る素粒子で ピラミッドや火山を透視

地球上には宇宙から素粒子が絶えず降り注いでいる。名古屋大学の中村光廣教授と森島邦博特任助教らは、巨大な物体でも突き抜ける素粒子ミュオンを観測により、エジプトのクフ王・ピラミッド内部を透視し、未知の巨大空間を発見した。開発したミュオンの観測装置は、宇宙の謎の解明のみならず、原子炉内部の調査や火山のマグマ観測、社会インフラの点検へと活躍の場を広げている。

© ScanPyramids Mission



素粒子ミュオンで ピラミッドの謎に迫る

世界最古の巨大な石造建築物、ピラミッドは多くの謎に満ちている。神聖な王族の墓には、一体どんな意味が隠されているのか。どのように建造され、内部はどんな構造なのか。

古代の英知の結晶に現代の科学技

術で挑むのが、2015年10月に始まった「スキャンピラミッド」計画だ。エジプト、日本、フランス、カナダによる国際共同研究プロジェクトで、赤外線やレーザーなど最先端のスキャン技術を駆使し、世界遺産であるピラミッドを傷付けることなく、その内部構造を突き止める。日本から参画した名古屋大学が担当するのは、宇宙から降り注ぐ素粒子

ミュオンによる画像観測(宇宙線ミュオンラジオグラフィ)だ。2017年11月、同大はクフ王のピラミッドに未知の巨大空間を発見したと発表し、世界を驚かせた。

「この快挙の隠れた主役は原子核乾板です。素粒子を写すための特殊な写真フィルムで、約70年前から宇宙線探査に使われてきました」と、名古屋大学

の中村光廣教授は語る。圧倒的な解像度の高さが強みで、素粒子の軌跡(飛跡)を1マイクロメートル以下の精度で立体的に記録できる。

いわば「宇宙線を用いたレントゲン写真」と、同大の森島邦博特任助教は例える。森島さんは実際にエジプトに赴き、ピラミッドを透過したミュオンを原子核乾板で観測し、内部構造の透

視を試みた。透視の原理はX線撮影と同じだ。ミュオンが物体を透過する能力はX線をはるかに上回り、厚さ1キロメートルの岩盤をも突き抜ける。一方で、密度の高い物質には遮られる。この性質を利用し、通り抜けてきたミュオンの数や飛来方向を解析すれば、物質の密度や空間の有無を推測できるとい

う。高精細な原子核乾板に加えて武器となるのが、中村さんらが独自に開発し、改良を重ねてきた「自動飛跡読み取り装置」だ。原子核乾板に刻まれた膨大な飛跡を高速かつ自動的に顕微鏡で読み取り、コンピューターでデジタル画像化する。アナログ技術とデジタル技術の融合で、約4500年の歴史を持つピラミッドの透視に挑戦した。



■図1 女王の間の2つの異なる場所に原子核乾板を設置し、天頂方向から±45度を観測した。2カ所の画像を組み合わせることで、観測範囲を広げるとともに、より詳細に分析できる。新空間の正確な位置や構造の決定は今後の課題だ。



ピラミッド内部をミュオンで透視できることを実証するため、まずはクフ王の父でもあるスネフェル王の屈折ピラミッドに原子核乾板を設置した。原子核乾板はアルミ板で保護の上、固定されている。

厚さ100メートルの石を超えて 未知の巨大空間を発見

2016年4月、森島さんは原子核乾板を携えて、クフ王・ピラミッドの中心部に位置する「女王の間」に向かった。思いもかけずエジプト政府から調査の許可が得られた。ピラミッドの内部は狭くて暗い。ミュオン検出器を置ける場所も限られる。「原子核乾板は小型で通路に置くだけで済むため、許可されやすかったのだ」と森島さん。

わずか5メートル四方の女王の間に原子核乾板を敷き詰めた(図1)。観測に使った原子核乾板は、およそA4版の大きさで、厚さは0.3ミリメートルと非常に薄い。軽量な上、電源も不要なため、狭い通路が多いピラミッド内部への持ち込みが容易だ。小さな空間でも設置できる長所が最大限に発揮された。複数枚を並べれば大面積観測も可能だ。

ミュオンによるピラミッド調査は、ノーベル物理学賞を受賞したルイス・ウォルター・アルヴァレスが約50年前にもカフラー王のピラミッドで試みたが、新発見には至らなかった。クフ王のピラミッドは高さが約150メートル、底辺は約230メートルと、エジプト最大を誇る。厚さ100メートルもの石を通り抜けると、ミュオンは数百分の1以下に減る。しかも砂漠地帯にそびえるピラミッド内部は高温で、原子核乾板そのものが劣化しやすい。森島さんはミュオンを確実に検出するため、原子核乾板に使われる乳剤の組成を改良した。

40日後、女王の間の2カ所に設置した原子核乾板を回収した。刻まれたミュオンは、約1100万個にも上った。これを読み取り装置で解析したところ、大回廊と呼ばれる王の間につながる巨大空間の上で、同一方向に多くのミュオンが通り抜けていることが確認された(図2)。それはすなわち未知の空間が存在することを示唆する。

「ぼんやりとした影が見えて、はじめは読み取り装置の誤作動やプログラムのミスを疑いました。乾板を何度も置き直して確認してやっと、未知の空間に違い

ないと確信できました」と、森島さんは振り返る。新空間は全長30メートルを超えると推測され、その容積は200人乗りの旅客機に匹敵する。「これほど大きな空間が見つかるとは、想像もしていませんでした」と、当時の驚きを語った。すぐさまスキャンピラミッドに参画する高エネルギー加速器研究機構とフランスの原子力代替エネルギー庁の調査チームが独自のミュオン検出器で観測し、大空間の存在を追認した。

まだ見つかっていないクフ王のミイラや埋葬品が隠された部屋なのか。それとも別の空間につながる通路なのか。ピラミッドの建造方法を解き明かす鍵になるかもしれない。今後は新空間のより近くに観測点を増やして、正確な方向や大きさを明らかにする。

古くて新しい原子核乾板 素粒子研究の伝統が輝く

原子核乾板を使った名古屋大学の素粒子研究は、1971年に丹生潔教授(当時)が未知の粒子(後のチャームフォーク)を発見したことに始まる。当時、素粒子フォークは3種類というのが世界の常識だったが、この発見により同大は先んじて4種類目の存在を知った。このことが、フォークは6種類とし、後にノーベル賞物理学賞を受賞する「小林・益川理論」を生み出す契機となった。同大の原子核乾板技術は大きく発展していく。

原子核乾板は極めて高い精度を誇る。素粒子がどの場所をどの角度で通り抜けたのか、見事にわかる。しかし、顕微鏡下で膨大な飛跡を1つ1つ目視で読み取る作業が難点で、欧米では飛跡を迅速に分析するデジタル検出器が主流となっていった。名古屋大学は弱点である読み取り速度の改善に乗り出した。1985年に開発した最初の自動読み取り装置はデジタル式とは名ばかりで、「人手より遅く、実用にはほど遠かった」と、中村さんは回想する。

1990年代に入り、最新の顕微鏡、CCDカメラ、コンピューターなどを組み合わせ、「高速自動読み取り装置

(UTS)」を開発した。これが「タウンニュートリノ」と呼ばれる素粒子の世界初の発見に貢献した。装置設計の立役者である名古屋大学大学院理学研究科の中野敏行講師を中心に、読み取り装置はその後進化し続け、大型構造物を透視する世界にたった1つの武器となる。

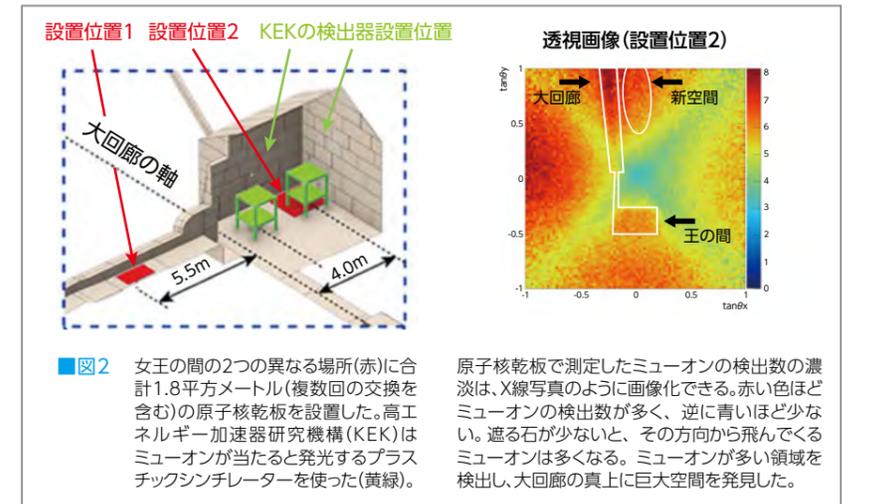
当時は1時間に1平方センチメートルの原子核乾板を読み取る速度だったが、今ではその5000倍以上も高速でデジタル画像化できる「超高速自動飛跡読み取り装置(HTS)」を開発し、最大の課題であった解析時間の大幅な短縮に成功した。

2000年代後半に入ると、原子核乾板が途絶える危機に直面する。カメラのデジタル化のあおりで、原子核乾板に使われる乳剤の生産からフィルム企

業が撤退したのだ。「研究が消えてしまうと心配していたところに、フィルム企業を退職した技術者が『大学で原子核乾板を作らないか』と声をかけてくれたのです」。

こうして逆境を乗り越え、企業と同じ原子核乾板を研究室で製造することに成功する。性能も急速に向上させるとともに、観察目的に合わせて作製できるようになり、用途が大きく広がった。

アナログ技術である原子核乾板が、なぜ名古屋大学で生き残ったのか。中村さんはこう述懐する。「原子核乾板の精緻さも理由の1つですが、何より研究室の先達から受け継がれた伝統が強いのかも知れません。古くて新しいこの乾板と読み取り装置を、先輩とともに何度も改良を重ねて高度化してきました」。



■図2 女王の間の2つの異なる場所(赤)に合計1.8平方メートル(複数回の交換を含む)の原子核乾板を設置した。高エネルギー加速器研究機構(KEK)はミュオンが当たると発光するプラスチックシンチレーターを使った(黄緑)。

原子核乾板で測定したミュオンの検出数の濃淡は、X線写真のように画像化できる。赤い色ほどミュオンの検出数が多く、逆に青いほど少ない。遮る石が少ないと、その方向から飛んでくるミュオンが多くなる。ミュオンが多い領域を検出し、大回廊の真上に巨大空間を発見した。



もりしま くにひろ
森島 邦博
 名古屋大学 高等研究院
 特任助教

2010年名古屋大学大学院理学研究科博士後期課程修了。博士(理学)。14年より現職。子供の頃に読んだ科学雑誌をきっかけに、宇宙や考古学に興味を持った。中村教授と共に、原子核乾板を使った宇宙線観測装置の開発と大型構造物の透視に挑む。



なかむら みつひろ
中村 光廣
 名古屋大学
 未来材料・システム研究所
 教授

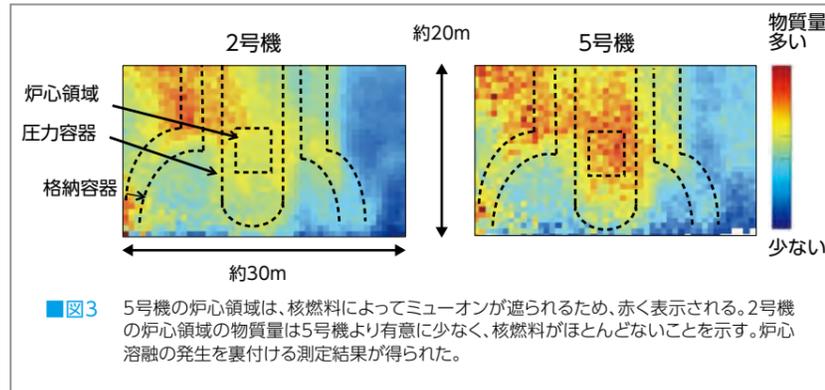
1985年名古屋大学大学院理学研究科博士後期課程単位取得退学。理学博士。同大学院理学研究科准教授などを経て、2013年より現職。11年より先端計測分析技術・機器開発プログラムのチームリーダー。原子核乾板を使った素粒子や暗黒物質の観測装置を開発する他、大型構造物の透視に取り組んでいる。

大型構造物の透視へ 技術を社会に役立てる

素粒子研究という基礎研究で実績を上げていく中で、意外な応用の可能性に出合った。「原子核乾板で火山の内部を見ることはできないか」という問い合わせが研究室に届いたのだ。昭和新山(北海道)を透視実験したところ、マグマが通った火道の直径を確認できた。次いで、浅間山(長野・群馬県)内部のマグマ状態を観察し、ミュオンで火山内部を画像化することに世界で初めて成功した。

すると、その評判を聞いた鉄鋼関係者から「溶鉱炉の耐火壁内部の状態も見てほしい」という要望が寄せられた。こうして、原子核乾板を用いた大型構造物の透視という新たな分野が、切り拓かれていった。

さらに、原子核乾板を社会に役立てる1つの転機が訪れた。2011年の東日本大震災で発生した東京電力の福島第一



■図3 5号機の炉心領域は、核燃料によってミュオンが遮られるため、赤く表示される。2号機の炉心領域の物質量は5号機より有意に少なく、核燃料がほとんどないことを示す。炉心溶融の発生を裏付ける測定結果が得られた。

原子力発電所事故だ。壊れた原子炉内を透視できるのではないかと考えたが、そのためにはこれまでの読み取り装置を100倍高速化しなくてはならなかった。そこで、先端計測分析技術・機器開発プログラムに応募した。「どの分野にも属さない新しいテーマだったので、受からないと思っていました。採択されなかったら、今の成果は生まれていなかったでしょう」と中村さんは振り返る。

採択から4年後の2015年には、福島原発の原子炉内部の透視に成功し、爆

発で内部が大損壊した2号機の炉心溶融(メルトダウン)を裏付ける調査結果を発表した。2号機の原子炉は放射線量が高くて人が近づけないが、原子核乾板は小型で電源を必要としないため、短時間でも設置できた。2号機と、破壊を免れた5号機の原子炉圧力容器の周辺をミュオンで透視して比較したところ、2号機内の物質量が少ないという結果が得られた(図3)。原子炉内の核燃料の70パーセント以上が溶けたと推測される。

「先端計測に採択されたのは福島原発事故の直後で、原子炉内部の調査を目的に掲げたことが評価されたのだと思います。当時は私たち以外にできることはなかったはず」と森島さん。分厚い鋼鉄に覆われた原子炉を透視するため、乳剤を厚く塗布して感度を高めるなど、創意工夫を凝らした。「素粒子で巨大な構造物の内部を見ることは、全く新しい研究です。何に利用できるか、どんなデータを得られるか、何もかもが初めてで、挑戦しがいがあります。これからも観測技術を磨き、確立していきたい」と意気込む。

富士山の噴火予測に挑戦 インフラ老朽化診断にも期待

次の大きな目標は、富士山マグマの探査だ。国内には活火山が111ある。最近では御嶽山(長野県、2014年)をはじめ箱根山(神奈川県、15年)、新燃岳(宮崎県、17年)が噴火、噴煙を上げ、富士

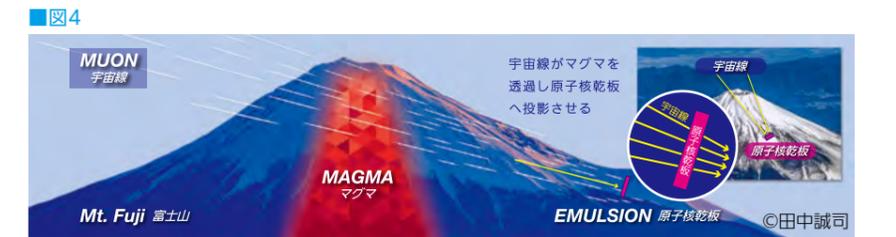
山の活動も気にかかる。まずは原子核乾板を富士山中腹の宝永火口付近に設置することを検討している(図4)。火山をリアルタイムで観測できるようになれば、噴火予測に大いに役立つ。

ピラミッドの成果発表以降、トンネルや鍾乳洞など、さまざまな調査依頼が中村さんのもとに飛び込んで来ているという。中でも橋梁やダムなど、年々増え続ける社会インフラの老朽化を診断し、事故を未然に防ぐことは急務となっている。

原子核乾板の製造から読み取りまで一貫してできるのは、今や世界でも名古屋大学だけだ。今後は、原子核乾板

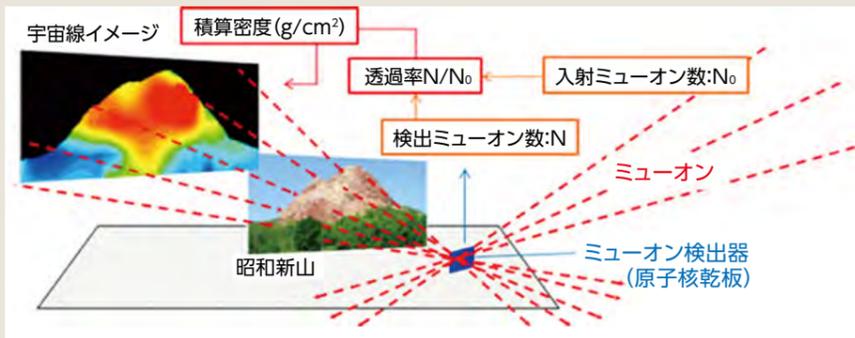
の大量生産化や、読み取り装置のさらなる高速化、解析システムの性能向上に取り組み、さまざまな対象物を観測できる技術を目指している。

「研究室のメンバーはみんな宇宙が好きで、宇宙線や暗黒物質探査に関心が集まっていますが、常に社会的問題に目を向けることの必要性を、若手には知ってほしいですね。そこから研究が大きく進展することもあります。原子核乾板のたくさんの可能性を追求し、これからも私なりにじっくり極めていきます」と中村さんは語る。目に見えない小さな素粒子が今、世界に新しい見方をもたらしている。

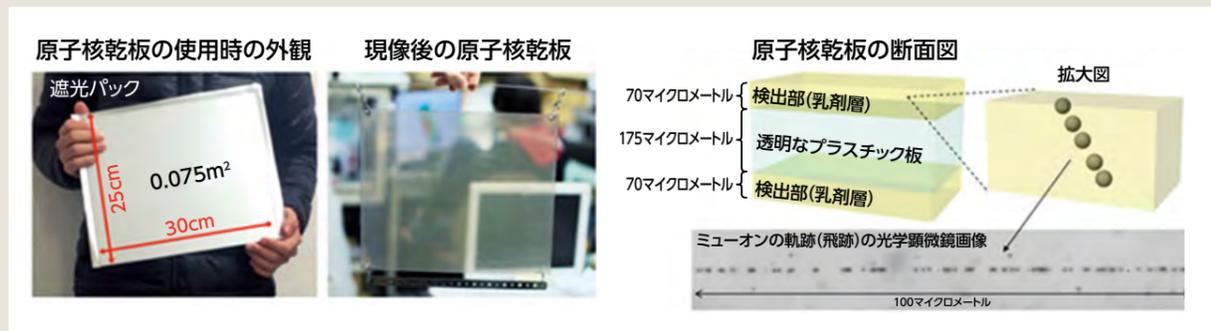


■図4

原子核乾板を用いた大型構造物の透視

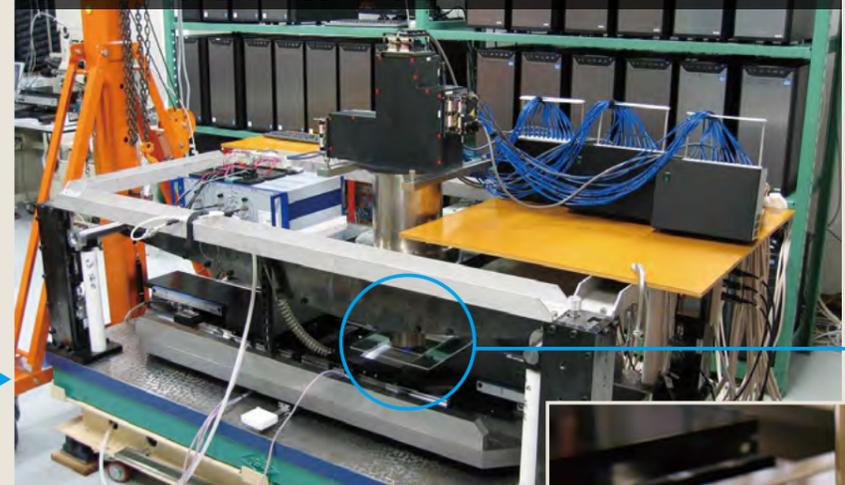


観測対象を透過したミュオンは、検出器である原子核乾板に立体的に記録される。ミュオンの数と飛来方向を測定し、ミュオンの検出数の濃度を画像化することで、物質の密度や空間の有無がわかる。



■原子核乾板は、薄く透明なプラスチック板の両面に、ミュオンを検出する乳剤を塗布している。乳剤層は厚さ70マイクロメートル(1マイクロメートルは1000分の1ミリメートル)で、ミュオンが透過すると乳剤層に銀原子の集合体が形成される。これを現像処理すると、直径1マイクロメートル程度の大きさの銀粒子が、3次元的に並んだ点の列として記録される。現像後の原子核乾板を光学顕微鏡で測定することで、ミュオンの飛来方向や角度がわかる。

超高速原子核乾板自動飛跡読み取り装置 (HTS)



■中央の上部の黒色は装置の心臓となるカメラで、円筒部分は顕微鏡のレンズ。原子核乾板を移動させながら焦点距離を合わせ、顕微鏡で拡大して読み取り、コンピューターで処理する。世界にたった1台しかない。

デジタルデータ化された3次元飛跡情報

