

宇宙線による最新の透視技術でエジプト・クフ王の ピラミッドに未知の空間を発見

名古屋大学高等研究院（未来材料・システム研究所）の森島 邦博（もりしま くにひろ）特任助教らの研究グループは、原子核乾板を用いた宇宙線ミュオンを観測により、エジプト最大のピラミッドであるクフ王のピラミッドの透視に成功し、ピラミッド内部に未知の空間を新たに発見しました。この研究は、エジプト考古省、カイロ大学、HIP が主催し、日本からは名古屋大学、高エネルギー加速器研究機構（KEK）が参加する国際共同研究「スキャンピラミッド（ScanPyramids）」（日本、エジプト、フランス、カナダが参加）において行われています。

原子核乾板は、ミュオンなどの電荷を持つ素粒子の軌跡を $1\mu\text{m}$ 以下の精度で立体的に記録する特殊な写真フィルムです。薄くかつ軽量で電源を必要としないため、ピラミッドの入り組んだ狭い通路への設置や玄室への持ち込み・設置が容易です。今回の結果は、クフ王のピラミッド北側から内部へと続く幅高さ共に 1m 程度のせまい下降通路に設置した原子核乾板の解析により得られたものです。現在、検出した空間の大きさの推定などより詳細なデータ解析や追加の観測を行っています。

本研究の成果は、2016 年 10 月 13 日にエジプト・カイロで行われた考古学最高評議会で報告され、2016 年 10 月 15 日にスキャンピラミッドによりプレスリリースが行われました。名古屋大学からの本プレスリリースは、それを補足説明するものです。

スキャンピラミッドからのプレスリリース（英語）へのリンク

http://www.hip.institute/press/HIP_INSTITUTE_CP9_EN.pdf

【研究の背景・意義】

エジプトのピラミッドは、約 4,500 年前（古王国時代）に建造された世界最古かつ最大の石造建築です。その内部の構造については、未知の空間（部屋や通路などの内部構造）が残されているのではないか？どのように建造されたのか？など、未だ多くの謎が残されています。

2015 年 10 月、エジプトのピラミッド群（クフ王のピラミッド（ギザ）、カフラー王のピラミッド（ギザ）、屈折ピラミッド（ダハシュール）、赤のピラミッド（ダハシュール））を対象として、最新の科学技術を駆使した国際共同研究「スキャンピラミッド（ScanPyramids）」が立ち上げられました。このプロジェクトは、エジプト考古省、カイロ大学、HIP により運営されており、世界最先端の科学技術

を活用してピラミッドを一切破壊することなく内部および外部を調査し、ピラミッドの謎を明らかにする計画です。この調査には、宇宙線ミュオンラジオグラフィ（宇宙線によるイメージング）、赤外線イメージング、写真やレーザー測量による精密な 3 次元再構成の技術が用いられます。

名古屋大学は、原子核乾板を用いた宇宙線ミュオンラジオグラフィを担当しています。この計画では、最先端の科学技術を考古学研究へ投入するという従来にはない異分野融合的な試みにより、考古学研究に新たな技術を提供し、新しい知見を得る事が期待されています。

【クフ王のピラミッド】

クフ王のピラミッドは、エジプトのギザに建造された高さ約 150m のエジプト最大のピラミッドです（図 1、図 2）。周辺には、同時期に建造されたカフラー王、メンカウラー王のピラミッドが並びそれらはギザの 3 大ピラミッドと呼ばれています。クフ王のピラミッドの北側には、過去にピラミッド表層部の石が剥がされたことで現在確認する事が出来る切妻構造（図 3）があります。その切妻構造の下部に、ピラミッド建造時から存在すると考えられる入口があり、そこから内部へと繋がる下降通路があります。今回の観測では、その下降通路内に原子核乾板検出器を設置しました。

【原子核乾板】

原子核乾板は、厚さ約 0.3mm (300 μ m) と非常に薄いシート状の放射線検出器です（図 4）。透明なプラスチックシートの両面に素粒子の飛跡を写す乳剤層を塗布した構造を持ちます。乳剤層は、約 60 μ m の厚さのゼラチン中に約 200nm 径の臭化銀結晶が分散した構造となっており、この中をミュオンが通過すると通過した結晶に潜像という数個の銀原子からなる集合体が形成され、現像により 1 μ m 程度の大きさの銀粒子へと成長します。ミュオンが通過した跡（飛跡）は、このような現像銀粒子が 3 次元的に並んだ点の列として記録されます。このような原理により、現像後の原子核乾板を光学顕微鏡で計測する事で、ミュオンの通過経路や入射角度などがわかります。

原子核乾板には、ミュオンの他にも環境放射線によるガンマ線から生成される電子なども記録されますが、その軌跡の直線性や長さなどを分析することでミュオンを選び出す事が出来ます。ミュオンが残した飛跡を名古屋大学で独自に開発した高速読み取り顕微鏡装置（Track Selector）で読み出し、原子核乾板中に記録されたミュオンの位置と角度の計測を行います。

原子核乾板によるミュオン測定は、高い方向決定精度と広い視野を併せ持ちます。更に、軽量・コンパクトで電力を必要としないため、可搬性が高く設置・観測が容易であるという利点があります。また、塗布で製造できるフィルムであるため

に、大判の複数の原子核乾板を並べた大面積観測により、より高精細なイメージを短時間で得ることが出来ます。

このような特徴を生かし、これまでに、電源インフラが整っていない火山観測(昭和新山、浅間山)や福島第一原子力発電所2号機のタービン建屋内の廊下において観測を行ってきました。また、スキャンピラミッドでは、2015年12月から2016年1月にかけて、電源設備を持たないエジプト・ダハシュールの屈折ピラミッド内部での宇宙線観測により、世界で初めてのピラミッド内部空間(既知の玄室)のイメージングに成功しています。

【宇宙線ミュオンラジオグラフィ】

ミュオンは、岩盤1kmでも透過するという極めて高い透過力を持つ素粒子で、大気上層部で生成され、1平方センチメートルあたりの面積を1分間に約1個の割合で、常に地上に降り注いでいます。このような天然の宇宙線ミュオンは、幅広いエネルギー分布を持ちます。ミュオンのエネルギーが高いほど透過能力が高いという特徴を利用し、X線では測定不可能な大きさ(厚さ)の対象物周辺にミュオン検出器を設置して、対象物を通過して来るミュオンの飛来方向分布を計測します。測定したミュオンの角度分布の濃淡は観測対象の内部構造を反映しており、X線写真のようにミュオンの飛来経路中に存在する質量分布を映像化することが出来ます。ミュオンがより多く検出した(透過率が高い)方向は、そこに存在する物質の量がより少ない事を示しています。(図5)

ピラミッドの観測の場合、既知の構造から期待されるミュオンの飛来方向分布を、独自開発したコンピューターシミュレーションにより作成し、シミュレーションと得られた実験結果とを比較します。ミュオンが期待よりも多く検出された方向には想定よりも物質が少ないこと、つまり、空間または低密度領域が存在することが、逆に期待よりも少ない場合は、その方向には高密度領域が存在する事が分かります。

【成果と意義】

今回、ピラミッド北側の切妻構造(図3)下部の入り口から内部へと続く下降通路(幅高さ共に1m程度)(図2参照)に2016年6月から8月にかけて67日間原子核乾板を設置して宇宙線ミュオンによる観測を行いました。下降通路内には3つの原子核乾板検出器を設置し(図6、7)、それらのフィルムに蓄積した約870万本の宇宙線ミュオンの情報を分析しました。これらの検出器を設置した場所から期待される宇宙線のイメージをシミュレーションにより求めて実験結果と比較した結果、切妻構造下部の入り口から真上にかけての方向にシミュレーションよりもミュオンが多く検出される異常領域を検出しました(図8)。このような異常が偶然起きる確率は一千万分の一以下と小さく、極めて高い信頼性で異常領域の存

在を検出したと言えます。結果は、その方向に空間、または、密度が低い領域が存在することを示していますが、通路のような1つの長い構造であるのか、または、少し大きさの違う2つ以上の構造が連なったものであるのか、など形状の詳細については、引き続きデータ解析を行っています。また、下降通路の複数箇所に原子核乾板を設置して、複数方向からの分析が可能な追加観測を進めるなど、さらなる解明を進めています。

ピラミッドのような巨大な石造建築物におけるこのような未知の空間の発見は世界で初めての成果です。今後、この宇宙線ラジオグラフィの手法は、様々な考古学遺跡調査や空洞調査へと応用が可能であることを示しており、大きな波及効果が期待されます。

本成果は、名古屋大学とNHKとの共同研究により実施されました。また、今回透視に成功した宇宙線ラジオグラフィ技術は、JST先端計測分析技術・機器開発プログラム（要素技術タイプ H23～H27）の一環として開発され、現在同プログラム（先端機器開発タイプ H28～H32）においてさらなる高精度化/システム化を目指しているものです。また文部科学省/日本学術振興会の科学研究費、基盤（B）「原子核乾板を用いた宇宙線ミューオンラジオグラフィ技術の高度化と新分野への応用展開」で開発した技術も貢献しています。



図 1. クフ王のピラミッド（北側から撮影）

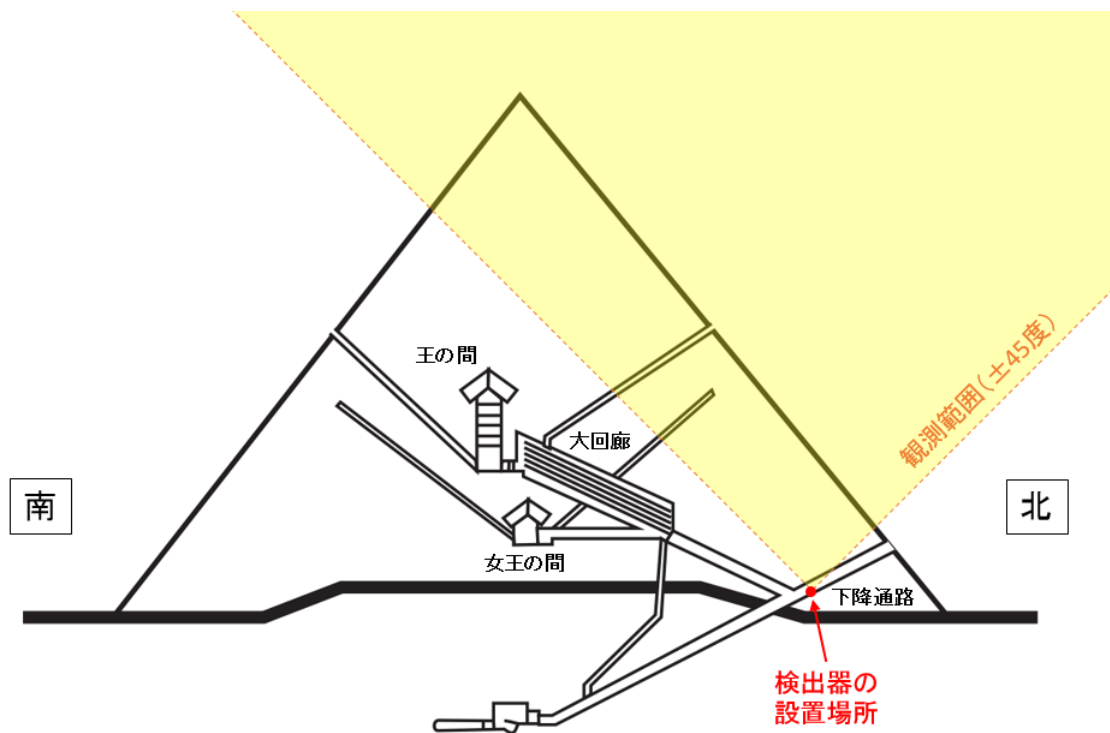


図 2. クフ王のピラミッドの断面図と今回の解析に用いた検出器を設置した場所
黄色で示す範囲（天頂方向から ± 45 度）を観測している。

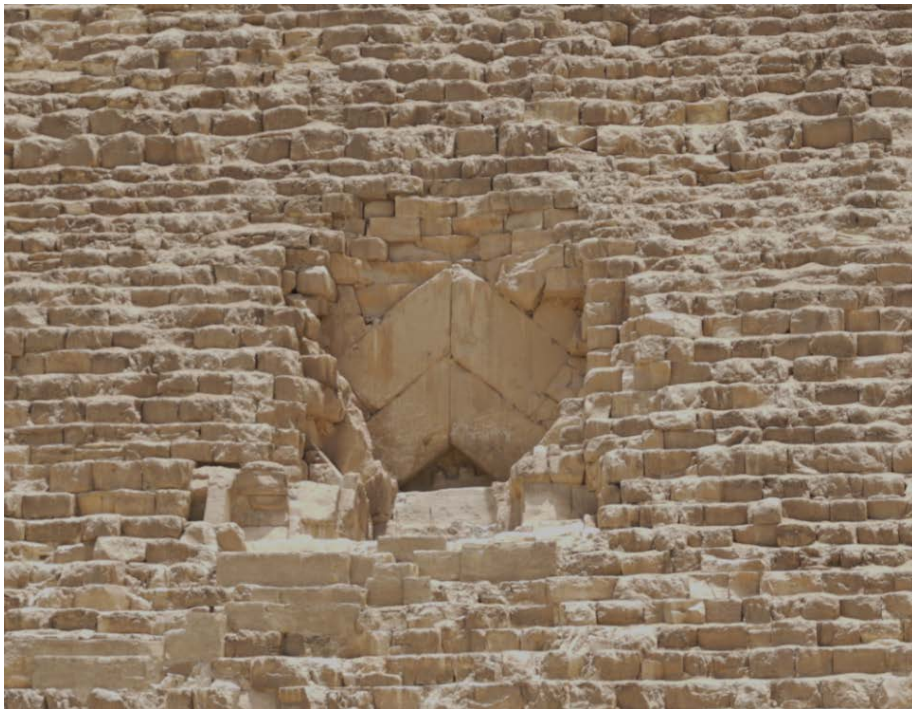


図 3. ピラミッド北側にある切妻構造

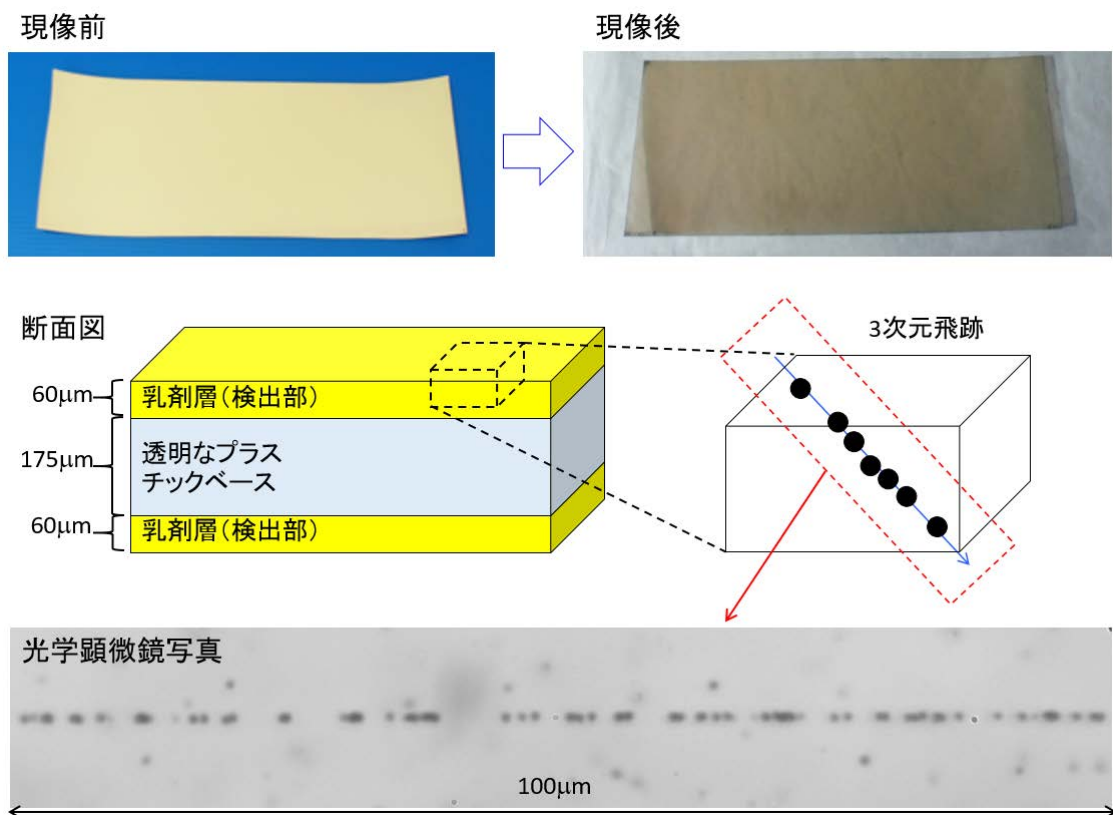


図 4. 原子核乾板

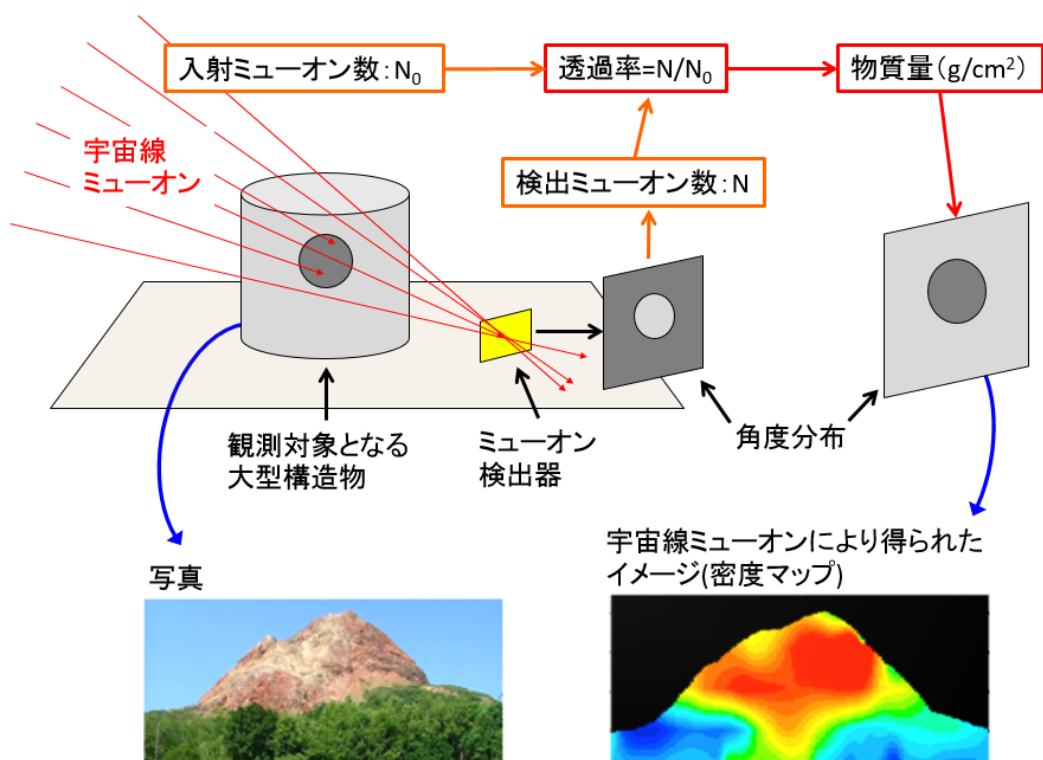


図 5. 宇宙線ラジオグラフィの原理（宇宙線ミューオンのイメージは H.K.M. Tanaka, T. Nakano, et. al., 2007 より）。



図 6. 下降通路に原子核乾板検出器を設置する様子。手前の 2 枚のアルミ板の間に原子核乾板が挟み込まれている。



図 7. 下降通路に設置した 3 つの原子核乾板検出器の様子

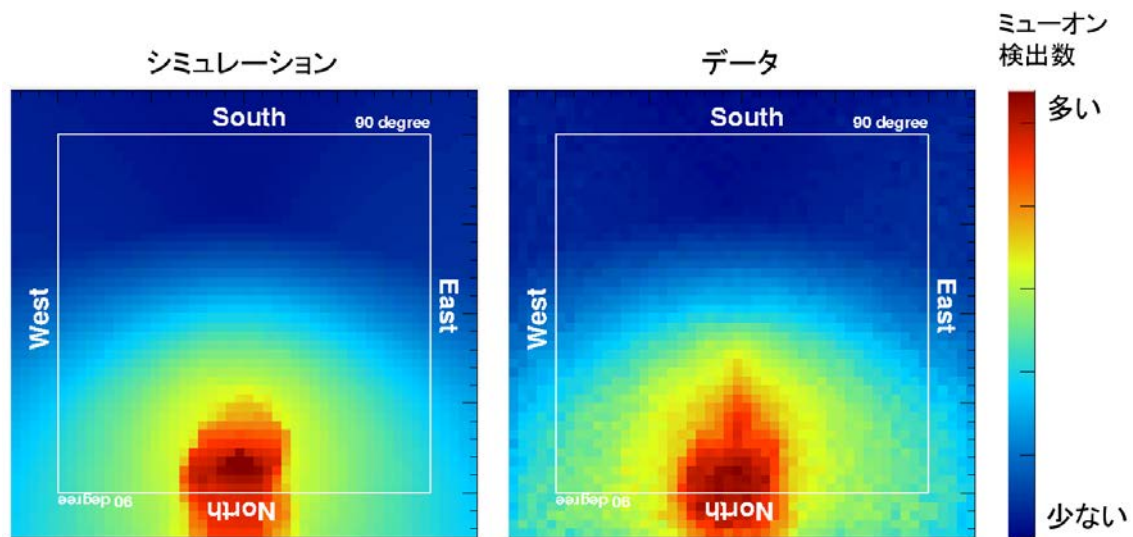


図 8. 1 つの原子核乾板検出器によるシミュレーション (左) と実験 (右) の結果。赤い色ほどミュオンの検出数が多いことを表しており、逆に青い色ほど少ない。シミュレーションと実験の結果を比較すると、実験結果の方が中心よりやや下に赤い領域が多くみられる。このようなデータとシミュレーションの差は、期待されるよりも多くのミュオンを検出した事を示しており、これは北側から南側（中心方向）にかけて空間が存在することを示唆している。