

## ■ 研究紹介

# 宇宙線ミュオンイメージングによるクフ王ピラミッド内部の新空間の発見

名古屋大学 大学院理学研究科

森島 邦博

morishima@nagoya-u.jp

名古屋大学 未来材料・システム研究所

北川 暢子

nobuko.kitagawa@nagoya-u.jp

2024年（令和6年）2月21日

## 1 はじめに

近年、素粒子や宇宙線の研究で培われた技術や知識を基盤に、宇宙線ミュオンが持つ高い透過力を利用した大型構造物や自然物の非破壊イメージング技術の開発が急速に発展している。この技術はミュオンラジオグラフィやミュオグラフィとも呼ばれるが、本稿では宇宙線ミュオンイメージングと記載する。宇宙線ミュオンイメージングは、今や様々な対象へ展開されているが、その中でも、エジプトのクフ王のピラミッドの内部に未知の空洞を発見した国際共同研究 ScanPyramids は、現在進行形で進展している文理融合研究の成功例と言える。

本稿では、ScanPyramids で得られた成果について、我々名古屋大学のグループが進めている原子核乾板を用いた宇宙線ミュオンイメージングによる研究成果を中心に紹介し、今後の展望についても述べる。素粒子物理の研究では触れる機会がないピラミッドについても少し詳しく書いたので、これを機に、興味を持っていただけたら幸いである。

## 2 宇宙線ミュオンイメージング

宇宙線ミュオンイメージングとは、宇宙線エアシャワー中のミュオンが幅広いエネルギー分布を持つこととあらゆる方向から飛来することを利用して、X線レントゲン撮影のように、最大数 km の厚さの自然物や人工構造物の内部の密度コントラストを非破壊で可視化する技術である。

宇宙線ミュオンイメージングの最初の観測は、水素泡箱の利用による共鳴状態の発見などにより1968年にノーベル物理学賞を受賞したアルヴァレラにより、1970年代にエジプトのピラミッドを対象に行われた。ピラミッドは、今なお史上最大規模を誇る石造建造物であり、建造された4500年前は、日本では縄文時代にあたる。世界遺産にも登録されているギザの三大ピラミッドは、三代にわたるクフ王、カフラー王、メンカウラー王によりギザ台地に建造されたピラミッド群のことである。クフ王とカフラー王は親子関係で同

時代に建造されたが、クフ王のピラミッドの内部構造は複雑であるのに対して、カフラー王のピラミッドはシンプルである（図1）。エジプトのピラミッドは、日本の古墳のように建造時期と構造が対応することなく、ピラミッドごとに独自の内部構造を持つことが知られおり、どのような未知の構造が隠されていても不思議ではない。

アルヴァレラはカフラー王のピラミッドにも未知の内部構造が隠されている可能性を信じ、宇宙線を用いて内部を探索することを提案した。彼らはカフラー王のピラミッドの中央下部に位置するベルツォーニの間と呼ばれる玄室の東側に4m<sup>2</sup>の検出面積を持つスパークチェンバーを数か月間設置してピラミッドを透過してくる宇宙線ミュオンの観測を行った[1]。当時の装置は部屋の大半を占めるほど大掛かりなものであった（図2）。ピラミッドの内部で観測した宇宙線ミュオンの飛来方向分布とピラミッドの既知の構造を反映したシミュレーション結果を比較したところ、大きな違いは見られず未知の内部構造は発見されなかった。

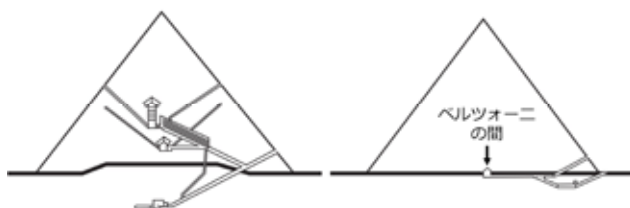


図1. クフ王のピラミッド（左）とカフラー王のピラミッド（右）の断面。クフ王のピラミッドの詳細は、図9に示す。

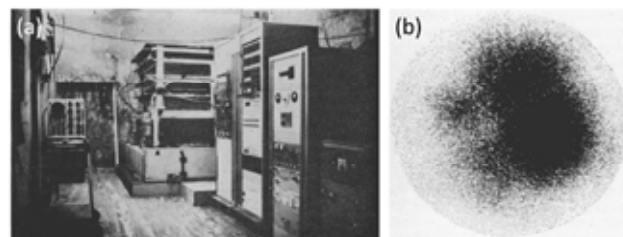


図2. (a) ベルツォーニの間に設置されたスパークチェンバー、(b) 検出された宇宙線ミュオンの飛来方向分布[1]。ピラミッドの頂点と稜線の方向で宇宙線が遮られている。

その後、1990年代に、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の永嶺氏らにより火山[2]や溶鉱炉[3]を対象とした水平ミュオンによるイメージング手法が開拓され、現在は東京大学地震研究所の田中氏らにより活火山である桜島のモニタリング[4]が進められている。2011年に東日本大震災による福島第一原子力発電所事故が起きた際には、高い放射線量に阻まれて立ち入ることができない原子炉建屋中心部に位置する炉心の溶融状態の把握が最大の関心事の1つであった。この課題に対して、宇宙線ミュオンイメージングを用いることを提案した我々名古屋大学とKEKを中心としたグループが各々独自に研究開発を進め、2015年にKEKらは1号機[5]、我々は2号機[6]の炉心溶融の状況を把握した結果を公表した<sup>1</sup>(図3)。このような透過型のミュオンイメージングの分野では、世界的にも日本が研究開発を先導してきた<sup>2</sup>。

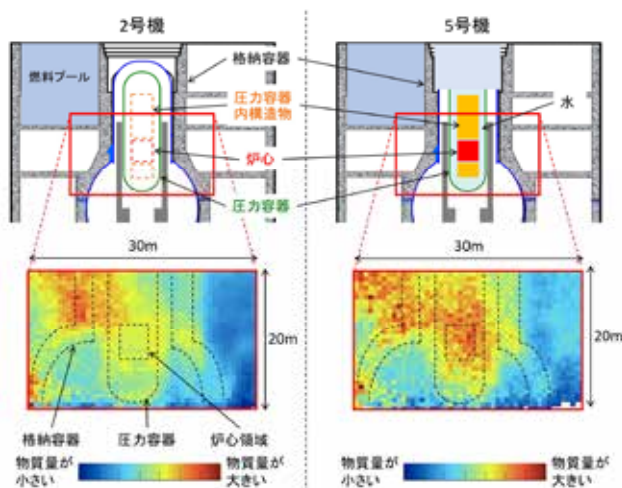


図3. 福島第一原子力発電所の炉心溶融の可視化[6]。健全な5号機は、炉心と水からなる物質量が大きな領域が見られるが、事故炉である2号機は、炉心溶融により炉心が溶け落ちて圧力容器に空いた穴から水が流出していたことが明らかとなった。

近年では、海外で複数のスタートアップが立ち上がるなど、素粒子や宇宙線の基礎研究分野にとどまらず、実用化に向けた多角的な研究開発が進んでいる。我々の研究グループも、本稿で紹介するピラミッドに限らず、その他の考古遺跡の調査、原子炉・溶鉱炉などの工業プラントの内部状況把握、河川堤防などの土木構造物の診断、地下空洞探査、地下資源探査、樹木内部の腐朽状態の把握など幅広い対象に展開しているが、本稿では紹介し切れないので別の機会に譲る。

<sup>1</sup> 我々名古屋大学と東芝のグループは事故炉である2号機と健全な5号機の比較により炉心溶融の程度を推定した。KEKを中心とした研究グループは、1号機の炉心溶融を確認し、後に2, 3号機についても確認した。

### 3 ScanPyramids

ScanPyramidsは、2015年10月に立ち上げた学際的な国際共同研究である。このプロジェクトはピラミッドを研究対象としているが、考古学者の特定の仮説にとらわれることなく科学的にピラミッドを調査し、その謎を解明することを目的としている。また、メディアやCGアーティストなどもメンバーに参加していて、幅広く研究成果を発信できることも大きな特徴である。エジプトの観光・考古省とカイロ大学を中心として、ピラミッド調査の許可を得て進めており、日本からは名古屋大学とKEK、フランスからはCEAとINRIA、カナダからはラバール大学、ドイツからはミュンヘン工科大学が参加している。宇宙線ミュオンイメージングを担当する名古屋大学、KEK、CEAはそれぞれ、原子核乾板、シンチレーション検出器、マイクロパターンガス検出器といった異なる特徴を持つ検出器を開発して用いている(図4)。その他の技術として、赤外線イメージングはラバール大学、地中レーダー探査および超音波探査はミュンヘン工科大学とカイロ大学が担当し、これらの技術を組み合わせて調査を進めている。各研究グループが計測からデータ解析まで独立に進め、バイアスを最小限に抑えることで結果の信頼性を保証している。



図4. ScanPyramidsで用いる検出器。

我々、名古屋大学の研究グループは、原子核乾板を製造できる唯一の研究機関であり、世界最高速度の読み取り装置Hyper Track Selector (HTS) [7]を開発、運用している。原子核乾板は、直径200 nm程度の臭化銀結晶をセンサーとして荷電粒子の軌跡を三次元的に記録することで、電源を必要とせずにミュオンの計測が可能である(図5) [8]。現像後に光学顕微鏡から構成されたHTSにより現像銀粒子の連なりで構成される飛跡をサブミクロンの精度で読み出す。このような技術により、原子核乾板は、厚さ1 mm以下の検出器構成でありながら数mradの角度精度を有している。データ取得までに現像工程が必要であるため、リアルタイムの解析はできないが、ピラミッドのように時間変化を伴わない対象であれば問題とはならない。これらの特徴に加

<sup>2</sup> 観測対象とする物体の前後にミュオン検出器を設置して対象物を通過する前後のミュオンの軌跡を再構成し、物体中でのミュオンの散乱角と位置の変化を計測することで物体内部の密度分布を可視化する散乱型のイメージングについては、海外が先行している[9]。

えてコンパクトかつ可搬性に優れるため、後に述べるようなピラミッド内部の狭い空間における観測において、原子核乾板は理想的な検出器であると言える。

ScanPyramidsが対象とするピラミッド群は、ピラミッド建造の最盛期である古王国時代に建造されたギザの三大ピラミッド（クフ王、カフラー王、メンカウラー王）とダハシュールにある2つのピラミッド（屈折ピラミッド、赤のピラミッド）である（表1）。良く知られたツタンカーメン王の時代はその約1000年後の新王国時代であり、ツタンカーメンの墓はギザから南へ約500 kmのルクソールにある王家の谷と呼ばれる遺跡で発見されている。ピラミッドは、石灰岩の岩盤から1辺が約1~2 mの大きさに切り出された数トンにもなる石材を数百万個も用いて四角錐の形に積み上げて造られた石造建築物である。しかし、その設計図は1つも残っておらず、ピラミッドの建造方法は未だに謎に包まれている。

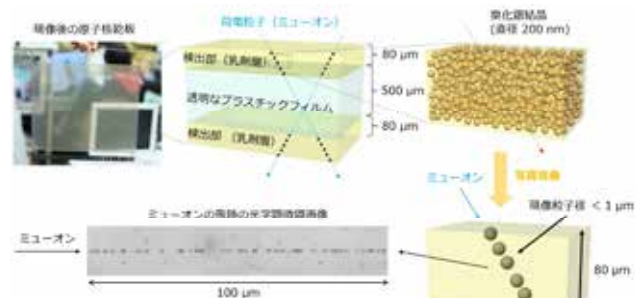


図5. 原子核乾板によるミューオン検出の概要。

表1. ScanPyramidsが対象とするピラミッド[10].

名称	所在地	底辺	高さ
屈折ピラミッド	ダハシュール	189 m	105 m
赤のピラミッド	ダハシュール	220 m	105 m
クフ王のピラミッド	ギザ	230 m	147 m
カフラー王のピラミッド	ギザ	215 m	144 m
メンカウラー王のピラミッド	ギザ	105 m	66 m

## 4 屈折ピラミッド

先述の通り、アルヴァレラが行ったカフラー王のピラミッドの内部探査では、新たな構造は見つからなかったため、エジプト観光・考古省から宇宙線ミューオンイメージングの技術的な実証を求められた。そこで、我々は実証に適した内部構造を持つ屈折ピラミッドを対象として選んだ（図6）。このピラミッドは、クフ王の父親であるスネフェル王によってギザから南に約30 km離れたダハシュールに赤のピラミッドと共に建造され、安定性を高めるために途中で傾斜角を変更したと考えられており、その形状から屈折ピラミッドと呼ばれている。スネフェル王がのちに建造した赤のピラミッドは、この経験を生かすことで初めて四角錐の形を実現し、

クフ王のピラミッドへと継承されている。

屈折ピラミッドは、他のピラミッドと大きく異なる特徴として直行する方向に入りが見つかっている。北側と西側の面にある2つの入口からは、ピラミッドの中心に向かう下降通路があり、その先に各々の玄室がある。西側の入口から続く玄室（上部玄室）は、北側の入口から続く玄室（下部玄室）よりも高い位置にある。そこで、下部玄室に原子核乾板を設置して上部玄室を可視化することを試みた。屈折ピラミッドは、1965年を最後に観光客へ開放されておらず、電力の供給がなかったためシンチレーション検出器やガス検出器の設置が困難であった<sup>3</sup>。また、ピラミッドの内部へ続く通路の断面が1辺あたり1 m程度と狭く、検出器をピラミッドの内部に人力で運ぶのも一苦勞である。そこで、軽量、コンパクト、電源不要な原子核乾板を用いて宇宙線ミューオンイメージングの技術実証を行うことにした。

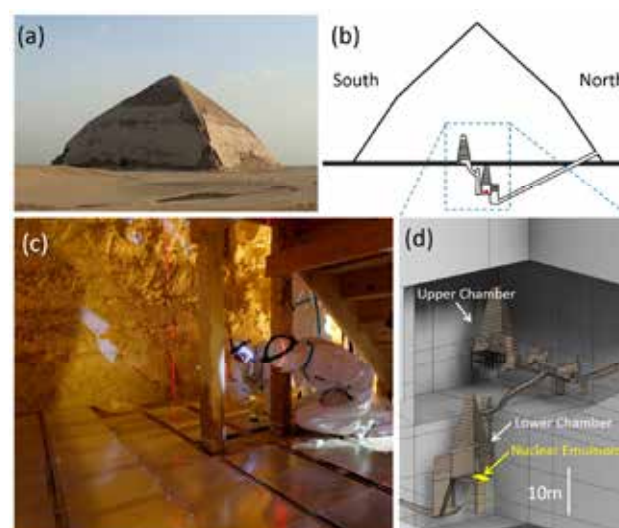


図6. (a) 屈折ピラミッドの外観、(b) 断面図、(c) 原子核乾板を設置している様子、(d) 立体図。

2016年に鉄製の治具を下部玄室に持ち込み、ピラミッド内で原子核乾板を2枚以上重ねて、2枚の鉄板に挟み込む構成で3 m<sup>2</sup>の検出面積に相当する40個の検出器を組み立てて、床面に敷き詰めた。40日間の観測後、ピラミッド内で検出器を解体し、重ねた2枚の原子核乾板を分離して外へ持ち出した。原子核乾板の現像は、当時、カイロに建設中のGrand Egyptian MuseumのConvention Center (GEM-CC)に借りた実験室に構築した現像室で行った。現像後の原子核乾板を日本に持ち帰り、名古屋大学でHTSを用いて原子核乾板に記録されたミューオンの三次元飛跡をデータ化した。原子核乾板は、製造してから現像するまで

<sup>3</sup> 2019年に観光客への公開が再開されて、現在は電力が供給されている。

常に荷電粒子の飛跡を記録する。そのため、ピラミッドの中で観測中に記録されたミュオン飛跡をピラミッドの外で記録された膨大なノイズ飛跡の中から選別する必要がある。これは、ピラミッド内で2枚重ねにした原子核乾板のアライメントを取り、2枚を直線的に貫通するミュオンの飛跡を選び出すことで実現している。ピラミッド内で観測されたミュオン飛跡の角度分布と、ピラミッドの三次元構造モデルを用いたシミュレーションの結果を比較したところ、観測データにも同様の位置に上部玄室が検出された(図7) [11,12]。この結果は、ピラミッドのような巨大遺跡の内部構造を可視化できることを実証した初めての事例となった。これにより、エジプト観光・考古省からクフ王のピラミッドの本格的な調査の許可が得られた。

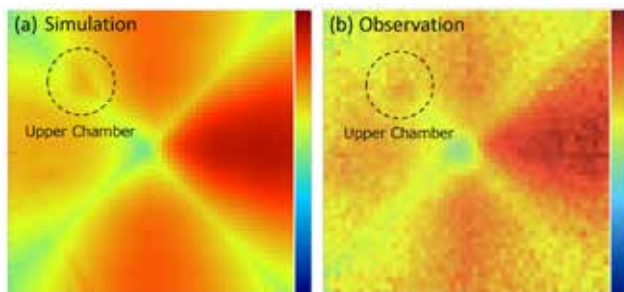


図7. 屈折ピラミッドに設置した原子核乾板検出器から得られた宇宙線ミュオンイメージ[11]。(a) 既知の構造からの予測されるシミュレーション, (b) 観測結果。

## 5 クフ王のピラミッド

クフ王のピラミッドは、我々人類が築き上げた史上最大の人工構造物である(図8)。まず、この内部構造について紹介する(図9)。ピラミッドの北面には建造当時の入口があり、内部へと続く下降通路に繋がっている。その入口の上部には良質な石灰岩の板で組まれた切妻構造があり、シェブロン(Chevron)と呼ばれている。切妻構造とは、クフ王のピラミッドで初めて用いられた革新的な建築方法であり、その上部の重量を分散することで下部の空間が崩壊するのを防ぐための屋根型の構造である。この入口は、現在は閉鎖されており、特別な許可なしでは立ち入ることはできない。観光客は9世紀にアルマムーンにより開けられた水平通路(アルマムーンの通路)から中に入ることができる。下降通路とアルマムーンの通路は内部で合流し、合流地点で上方と下方に分岐する。縦横1m程度の断面を持つ下降通路は約100mの長さを有し、その先にある地下の間(幅8m, 奥行14m, 高さ5m)へと続いている。この分岐点から上昇通路を上りきると、大回廊(上辺約1m, 下辺約2m, 高さ約9mの台形上の断面形状を持ち、長さは40m)と呼ばれる巨大な空間が広がっている。大回廊に入り眼前の水平

通路を進むと天井に切妻構造を持つ女王の間(幅5m, 奥行5m, 高さ6m)に到達する。大回廊を上ると王の間(幅5m, 奥行10m, 高さ6m)に到達する。王の間は、クフ王のピラミッドで唯一、花崗岩で作られている。王の間の上部には、重量軽減の間と呼ばれる5層構造の空間があり、その最上階の天井は、女王の間と同様に切妻構造である。この空間は、1760年代に最下層が発見され、1837年にハワード・ヴァイズらによるダイナマイトを用いた破壊調査により上層層が発見された。この後、186年間、レーダー探査など様々な調査がピラミッド内外で行われたが新たな空間の発見には至らなかった。

これらの内部構造の中で、下降通路、地下の間、女王の間、重量軽減の間は一般公開されていない。そのため、ScanPyramids開始当初は、検出器が観光客により触れられる心配がない下降通路と女王の間の2箇所検出器を設置した(図10)。検出器の設置と回収、現像は、屈折ピラミッドの観測と同様に行ったが、大型化に伴う軽量化のために検出器構成をアルミ板やアルミハニカム板に変更した。女王の間には原子核乾板とシンチレーション検出器を設置して観測を行い、下降通路の内部は狭いため、原子核乾板のみで観測を行った。



図8. クフ王のピラミッドの外観とシェブロン(左上)。

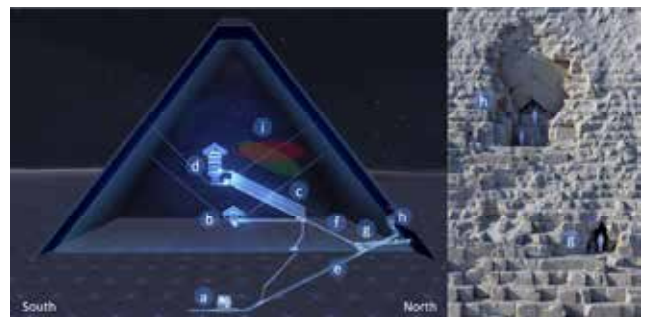


図9. クフ王のピラミッドの内部構造と名称[14]。

a: 地下の間, b: 女王の間, c: 大回廊, d: 王の間, e: 下降通路, f: 上昇通路, g: アルマムーンの通路, h: シェブロン, i: 発見した新空間 SP-BV。



図10. クフ王のピラミッド内に設置した原子核乾板検出器。(a) 下降通路に設置したアルミ板型の検出器, (b) 女王の間に設置したアルミハニカム板型の検出器。

### 5.1 下降通路からの観測

2016年に下降通路の1箇所を設置した3つの原子核乾板検出器で宇宙線ミュオンを67日間観測した結果と、既知の構造から予測されるシミュレーション結果を比較したところ、既知の構造では説明できない $5\sigma$ 以上のミュオン超過領域を発見した(図11)[11,13]。これは下降通路の上部に位置する未知の空間によるものであり、その分布から南北に延びる通路状の空間であると考え、ScanPyramids North Face Corridor (SP-NFC)と名付けた。この観測で得られた2次元イメージからは深さ方向の情報は得られず、SP-NFCの詳細な三次元的な位置と形状を把握するだけの十分な精度は無かった。

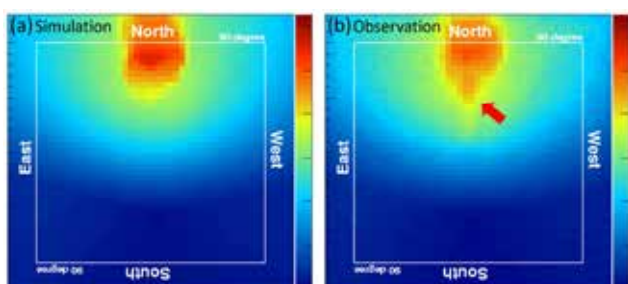


図11. 下降通路に設置した原子核乾板検出器から得られた宇宙線ミュオンイメージ[11]。(a) 既知の構造からの予測されるシミュレーション結果, (b) 観測結果。矢印の先はミュオンの超過を観測した領域を示す。

### 5.2 女王の間からの観測

女王の間では、2016年に大回廊に対する東西の2箇所原子核乾板を設置して観測を行った[14]。検出器の位置からは、上部に位置する大回廊と王の間が可視化される。西側はアルミハニカム板を用いた検出器を女王の間の床面に設置し、東側はアルミ板を用いた検出器を女王の間の壁面のくぼみに掘られた縦横1 m程度の穴の中に設置した。

原子核乾板は、潜像退行と呼ばれる現象により、記録された飛跡が時間経過と共に消失するという課題がある。ScanPyramidsを開始した当初、潜像退行により、ミュオンの検出効率が約2カ月で低下したため、女王の間の観測

以降は、約1~2ヶ月ごとに原子核乾板を交換し、各期間の観測結果を積算して解析を行った。西側と東側の検出器の解析では、各 $0.45\text{ m}^2$ の面積に対して、合計140日間と98日間に相当する観測データを用いた。

その後、潜像退行に対処するために、原子核乾板に添加する化合物の特性を評価し、潜像退行を抑制する効果を持つ化合物を見つけ出すことに成功した。現在では、約3カ月ごとに原子核乾板の交換を行い、効率的な観測を実現している[15]。

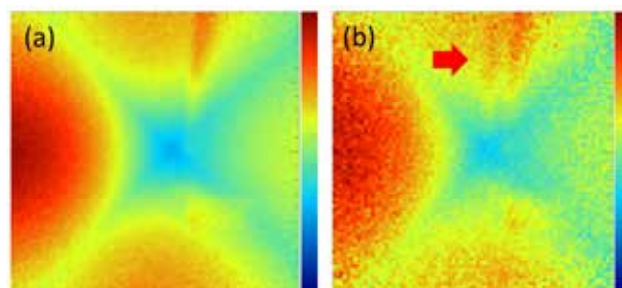


図12. 女王の間に設置した原子核乾板検出器から得られた宇宙線ミュオンイメージ[14]。(a) 既知の構造からの予測されるシミュレーション, (b) 観測結果。矢印の先はミュオンの超過を観測した領域を示す。

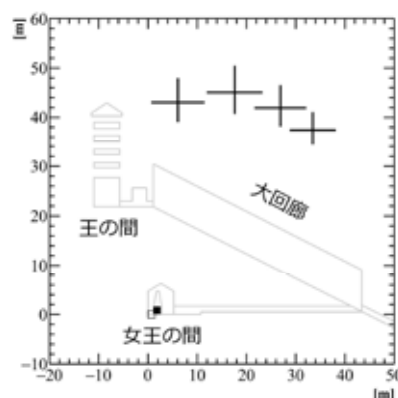


図13. クフ王のピラミッド内に発見した巨大空間の位置[14]。



図14. クフ王のピラミッド内部に発見した2つの空間。

各々の検出器から得られた観測結果と対応するシミュレーション結果を比較したところ、2箇所共に、 $10\sigma$ 以上の有意性でミュオン超過領域を検知した(図12)。検出器の位置とミュオンが超過して飛来する方向を用いて三角測量を行うことで、ミュオン超過の原因となる空間の三次元位置を推定した結果、大回廊の直上かつ女王の間から40m上方に位置することが判明した(図13)。さらにその長さは30m以上で、ミュオン超過量から推定される断面積は大回廊と同程度という巨大な空間であることが分かった。

並行して、KEKのシンチレーション検出器による観測も行われ、その観測結果は、我々の結果を支持するものであった[14]。さらに、CEAによるガス検出器を用いたピラミッド外側からの観測結果は、名古屋大学とKEKが特定した空間の位置に対応するミュオンの超過を確認した[14]。

このように、独立した3つの研究グループが用いた3種類の検出器による観測および解析結果は、未知の巨大空間の存在を無矛盾で示しており、2017年11月2日にNatureから速報を出すとともに、この空間をScanPyramids Big Void (SP-BV)と名付けた(図14)。この巨大空間の存在は誰も想像し得なかったため、発見当時は、宇宙線ミュオンイメージングの技術や解析結果に対する不理解も相まって、一部の考古学者からは、結果に対する根拠のない反論が表明されていた。

### 5.3 SP-NFCの三次元形状推定

発見した2つの空間(SP-NFCとSP-BV)の三次元的な位置と形状を明らかにするため、2019年に大規模な観測を実施した。ここでは、解析が既に完了しているSP-NFCについて紹介する[16]。

下降通路の直上に位置するSP-NFCを対象として、下降通路の4箇所とアルマムーンの通路の3箇所に原子核乾板を設置し、多地点からの同時観測を実施した(図15, 16)。下降通路は、 $0.225\text{ m}^2$ のアルミハニカム板検出器を最大211日間設置した。その位置からはSP-NFCを真下かつ近距離からイメージングできるため、その断面の大きさと北端、南端を精度良く決定できる。一方、下降通路の西側に位置するアルマムーンの通路には、 $0.075\text{ m}^2$ のアルミ板検出器を272日間設置した。その位置からはSP-NFCを側面からイメージングできるため、SP-NFCの傾きや長さを強く制約できる。

SP-NFCの形状推定は、シミュレーションに用いる3Dモデルおよびモデル中の検出器の位置・角度の把握精度が大きく寄与する。この解析では、カイロ大学のレーザー測量データから作成したピラミッド内外の精細な3Dモデルを基にシミュレーションを行った。シミュレーション結果と観測データを比較して、3Dモデル中での原子核乾板の位置と角度をそれぞれ5cm以下、1度以下の精度で決定した。

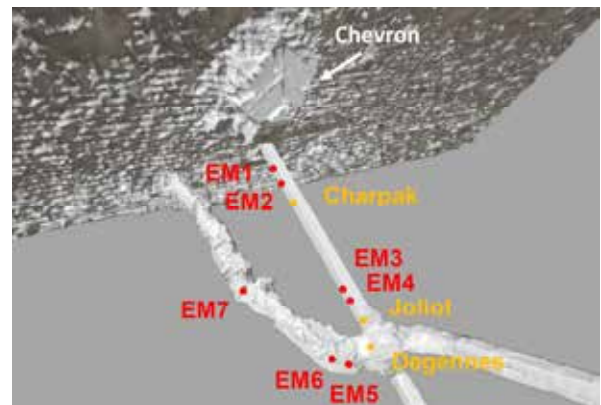


図15. クフ王のピラミッドの内側から見たシェブロンを含むピラミッド北面と内部構造の3Dモデル[16]。EM1~4は下降通路に設置した原子核乾板検出器、EM5~7はアルマムーンの通路に設置した原子核乾板検出器の位置を示す。Charpak, Joliot, Degennesは、CEAによるガス検出器の位置を示す。



図16. (a), (b)下降通路, (c)アルマムーンの通路に設置した原子核乾板検出器[16]。

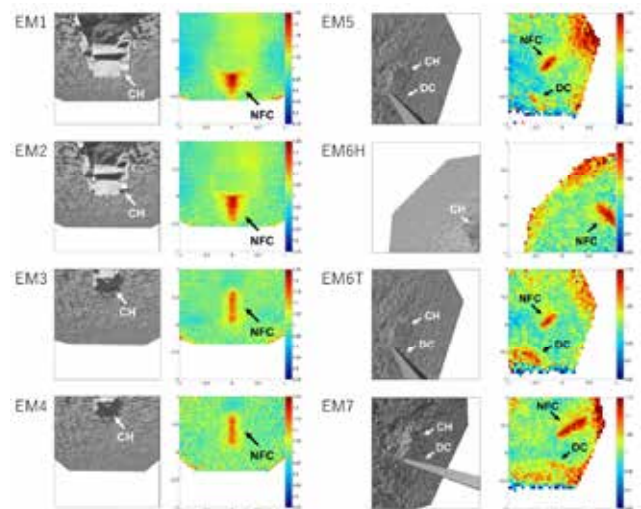


図17. 下降通路(EM1~4)とアルマムーンの通路(EM5~7)から観測されたシェブロン背後の空間(SP-NFC)の宇宙線ミュオンイメージ[16]。各イメージの組の左図は、検出器が設置された位置から確認されるピラミッドの内部構造(3Dモデル)を示す。右図は、データとシミュレーションの比率(シミュレーションが分母)の分布を示す。データがシミュレーションを上回る場合、ミュオンが予想以上に多く観測されたことを意味し、空洞の存在を示唆する。図中のCHはシェブロンを、DCは下降通路を、NFCはシェブロン背後の空間を指す。

このように構築した高精度な 3D シミュレーション体系を用いた Geant4 によるモンテカルロシミュレーションと観測結果の比較から、全ての原子核乾板検出器で SP-NFC を確認した (図 17)。

下降通路からの観測結果の解析では、全検出器から得られたミュオン超過領域の広がりから、SP-NFC のおおよその位置と長さを推定した。次に、SP-NFC の形状が直方体であると仮定し、3D モデル中の三次元的な位置と形状を定義するパラメータを変化させ、シミュレーションと観測データが最もよく一致する条件を探索した。観測したミュオンの統計数や 3D モデルの精度などを考慮した結果、表 2 に示すように、宇宙線ミュオンイメージングとしては極めて高い精度を達成した。

SP-NFC を側面から観測しているアルマムーンの通路に設置した検出器の観測結果では、ミュオンの超過方向の分布から SP-NFC が水平構造であることが確認された。さらに、その位置や長さは下降通路からの解析結果と良く一致した (図 18)。さらに、その空間の床面は、シェブロン切妻構造の下のかぼみからわずか数 cm 上に位置している事が判明した。

原子核乾板の観測後、CEA のガス検出器を用いた観測が下降通路とその周辺の 3 箇所から行われ、その観測結果は名古屋大学の結果と誤差の範囲で一致した (図 15, 表 2)。

この結果を受けて、ミュンヘン工科大学とカイロ大学は地中レーダー探査や超音波探査などの物理探査を実施し、宇宙線ミュオンイメージングで推定した位置に空間の存在を確認した[17]。これは、我々の結果を完全に支持するものであった (図 19)。

これらの結果からいくつかの驚くべきことが明らかとなった。1つ目は、SP-NFC がシェブロン切妻構造の背後に位置していることである。先にも述べたが、シェブロン切妻構造は、女王の間や重量軽減の間にも見られる切妻構造である。切妻構造は、それよりも下の空間を守るための構造と考えられているため、従来の考古学的知見に基づく解釈ではシェブロン切妻構造の背後に空間が存在するという説は皆無であった。2つ目は、シェブロン切妻構造の表面からわずか 80 cm 背後に SP-NFC が位置していることである。この 80 cm という値は、シェブロン切妻構造の板の厚さと完全に一致する。つまり、わずか 1 枚の石灰岩の板の奥に 4500 年間閉ざされた空間が存在していることになる。

#### 5.4 ファイバースコープによる SP-NFC 直接確認

2023 年 2 月、シェブロン切妻構造の板とその背後の石組みのわずかな隙間にファイバースコープを通し、SP-NFC の床下側からその内部の撮影に初めて成功した (図 20,21) 4。この撮影は、ScanPyramids プロジェクトの主要メンバーと共に、元考古大臣のザヒ・ハワス博士、ハーバード大学のマーク・レーナー博士を含む複数の考古学者が立ち会う中で行

表 2. 名古屋大学の原子核乾板による解析結果と CEA のガス検出器による解析結果をまとめた表[16]。α は NFC の傾きを示す。X, Y, Z については、図 18 の座標系に示すようなシェブロン切妻構造の特徴点を原点とした。

Parameter	Nagoya Univ.	CEA
Width W (m)	$2.02 \pm 0.06$	$1.87 \pm 0.11$
Height H (m)	$2.18 \pm 0.17$	$1.86 \pm 0.12$
Length L (m)	$9.06 \pm 0.07$	$9.23 \pm 0.48$
North-South X (m)	$0.84 \pm 0.05$	$0.45 \pm 0.22$
East-West Y (m)	$0.03 \pm 0.04$	$-0.07 \pm 0.11$
Altitude Z (m)	$0.72 \pm 0.13$	$1.34 \pm 0.53$
Slope α (°)	$-0.3 \pm 1.5$	$-1.9^{+7.2}_{-4.7}$

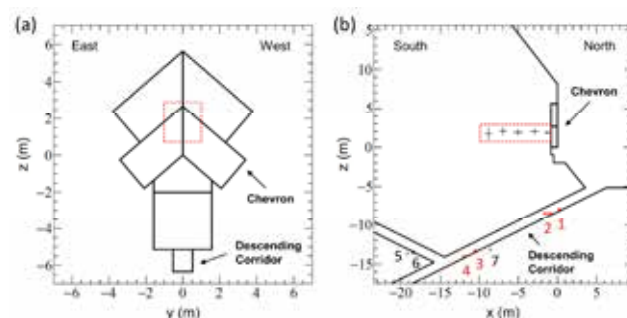


図 18. 宇宙線ミュオンイメージングにより決定した SP-NFC の構造。(a)は北側から、(b)は東側から見た図[16]。下降通路に設置した原子核乾板の解析結果を赤の点線で示す。アルマムーンの通路に設置した原子核乾板から得られた SP-NFC によるミュオン超過方向を下降通路の中心を通る垂直断面に投影した代表点と誤差を(b)に示す。

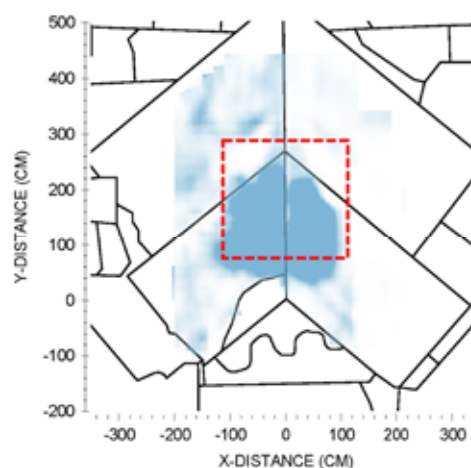


図 19. 地中レーダー探査の結果。原子核乾板による宇宙線ミュオンイメージングの結果から推定した空間の位置を赤の点線で示す[17]。

4 SP-NFC の内部は当然のことながら真っ暗である。シェブロン切妻構造の下から唯一アクセスできる石の隙間は 1cm 程度と狭い。そこで、強力な薄型 LED を固定した薄い金属板を石の隙間に通して内部を照明し、事前に挿入した直径約 1 cm の金属パイプの中に直径 6 mm の Evident 製のファイバースコープを押し込むことで SP-NFC の内部を撮影した。

われた。ファイバースコープの映像を確認したとき、考古学者たちからは「Congratulations!」という歓声が上がった。その数日後、エジプト考古省の主導により、クフ王のピラミッドの前で国際記者会見が開かれた。

これらの一連の成果は、宇宙線ミュオンイメージングにより発見した空間が確かに存在し、推定した空間の位置と形状が正確であることを示した世界初の事例となった。その後、考古学者からの否定的な意見を耳にすることはなくなり、宇宙線ミュオンイメージングが考古学研究における新しい探査手法として認められた点においても非常に大きな意味を持つ。

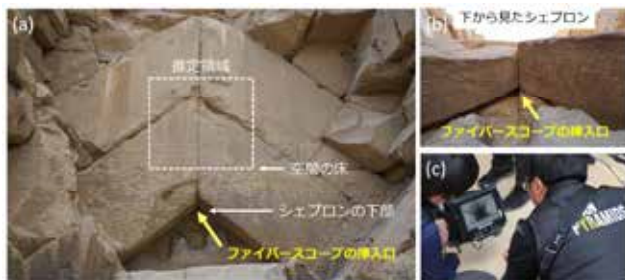


図 20. (a),(b)空間の推定位置とファイバースコープの挿入口, (c)ファイバースコープによる映像を確認している様子。



図 21. 発見した空間 (SP-NFC) をファイバースコープで撮影した映像 (ScanPyramids)。

## 5.5 その他の観測

2019年には、上記の観測に加えて大回廊や重量軽減の間、地下の間からの観測も実施した。大回廊は SP-BV の直下に位置し、重量軽減の間は SP-BV の南側下方に位置する。これらの複数地点から SP-BV を観測することでその三次元的な位置や形状を推定できる。観光客は、大回廊中央の通路を行き交うが、その通路の両脇にある幅 50 cm 程度の石段の上に木箱を固定し、その中に原子核乾板を設置して観測を行った (図 22(a))。現在、計 9 カ所に設置した原子核乾板

から得た観測データの解析を進めている。重量軽減の間からは、SP-BV を斜め下から観測できるため、その傾きの推定を試みた (図 22(b))。しかし、重量軽減の間を構成する花崗岩由来のガンマ線が検出器中で引き起こすコンプトン散乱による電子の飛跡が蓄積することでノイズが増加し、解析が困難となった。このような石材由来の放射線が検出器に影響を及ぼす環境下でも観測可能な原子核乾板および解析システムの開発は今後の課題である。地下の間はピラミッド内部構造の最下部に位置するため、女王の間からは探査できない女王の間の周辺や下部を可視化できる。しかし、女王の間と比較して宇宙線の透過率が大幅に低下することから、より大面積かつ長期間の観測が必要である。そのため、原子核乾板を 30 枚並べた 2.25 m<sup>2</sup> の検出器を 2 箇所に設置して約半年間の観測を行い、現在解析中である (図 22(c))。計 4.5 m<sup>2</sup> の検出器面積は、ピラミッドに限らず宇宙線ミュオンイメージングの観測における最大規模である。

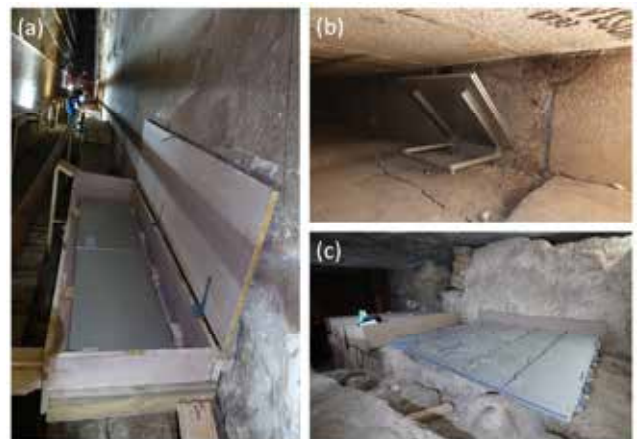


図 22. クフ王のピラミッドに設置した原子核乾板検出器。(a)大回廊, (b)重量軽減の間, (c)地下の間。

## 6 カフラー王のピラミッド

ScanPyramids は、Covid-19 パンデミックにより 2020 年初めから中断していたが、2022 年 10 月に再開し、カフラー王のピラミッドの探査を開始した。前述の通り、カフラー王のピラミッドは、アルヴァレラにより既に観測されている。我々は、ベルツォーニの間からアルヴァレラがスパークチェンバーを設置した位置に原子核乾板を設置した (図 23)。これにより、アルヴァレラの結果を直接検証するとともに、斜め 45 度に傾けた原子核乾板を設置し、通常の水平設置による観測と組み合わせることで、ベルツォーニの間からピラミッドの全方位探査が可能となる。ピラミッドの北面付近に位置する下降通路と副室にも原子核乾板を設置して観測しており、宇宙線イメージングで可能な全範囲を探査する計画である。





図 23. (a)カフラー王のピラミッド, (b), (c)ベルツォーニの間に設置した原子核乾板検出器。(b)はアルヴァレがスパークチェンバーを設置した位置からピラミッドの中心部を観測。(c)は斜め 45 度に傾けてピラミッドの東側を観測。

## 7 まとめと今後の展望

本稿では、2015 年から始まった ScanPyramids の進展について紹介した。クフ王のピラミッドの解析をまとめた 2 本の論文[14,16]は、2017 年の Nature の TOP100 論文の 30 位、2023 年の Nature Communications の physics 部門の TOP25 論文に選ばれた。2016 年に発見した通路状の空間 “SP-NFC” は、ピラミッドの表面からわずか 80 cm ほど隔てたところに位置しているという幸運にも恵まれて、2023 年にファイバースコープによりその存在を直接確認することができた。次の課題は、2017 年に発見した巨大空間 “SP-BV” の直接確認であり、そのためには、空間の正確な位置と形状の推定が不可欠である。

今後は、カフラー王にとどまらず、メンカウラー王のピラミッドの探査も計画しており、ギザの三大ピラミッドを制覇する予定である。宇宙線ミュオンイメージングは、内部構造を可視化して未知の構造を発見するだけでなく、積算密度を算出し、ピラミッドの三次元形状を用いて平均密度が推定可能である。3 つのピラミッドの密度の違いは、使用している石灰岩の密度や石材の充填率などの内部構造を反映するため、ピラミッド建造の謎に迫る唯一無二の新しいデータを提供できる。

この他にも、中南米のマヤ遺跡やナポリ市街地の地下に埋もれたギリシャ時代の遺跡、城郭の石垣などを対象とした考古遺跡調査を進めており、宇宙線イメージング考古学の更なる発展に期待していただければ幸いである。最後に、エジプトに行かれる際には、この記事を手元に、ピラミッドの奥深さと宇宙線で発見した新空間に思いを馳せていただければ嬉しい限りである。

## 8 謝辞

本稿の内容は ScanPyramids における共同研究に基づいています。本研究は、学術変革領域研究 (B) 「素粒子現象から巨大構造物までを透視するマルチスケールミュオンイメージングの創成」などの科学研究費助成事業 (15H04241, 18H03470, 21H05086), JST さきがけ (18069661), JST 先端計測, 名古屋大学若手新分野創成研究ユニット「宇宙線イメージング考古学」の支援などを受けています。改めて、共同研究者の皆様にご感謝いたします。また、本稿の改善に貴重なご意見を下さった編集委員の皆様にご感謝いたします。

## 参考文献

- [1] L. W. Alvarez *et al.*, *Science* **167**, 832-839 (1970).
- [2] K. Nagamine *et al.*, *NIM* **356**, 585-595 (1995).
- [3] K. Nagamine *et al.*, *PJA Series B* **81**, 257-260 (2005).
- [4] L. Olah, H. K. M. Tanaka and G. Hamar, *Scientific Reports* **11**, 17729 (2021).
- [5] H. Fujii *et al.*, *PTEP* **4**, 043C02 (2020).
- [6] 森島邦博, *日本写真学会誌* **79**, 42-47 (2016).
- [7] M. Yoshimoto *et al.*, *PTEP* **10**, 103H10 (2017).
- [8] K. Morishima, N. Kitagawa and A. Nishio, *Muography, Exploring Earth's Subsurface with Elementary Particles, Chapter 21* (2022).
- [9] L. J. Schultz *et al.*, *NIM A* **519**, 687 (2004).
- [10] M. Lehner and Z. Hawass, *Giza and the Pyramids: The Definitive History*, The University of Chicago Press (2017).
- [11] K. Morishima *et al.*, *PoS(ICRC2017)* 295.
- [12] ScanPyramids press release, 2016 年 4 月 [http://www.hip.institute/press/HIP\\_INSTITUTE\\_CP7\\_EN.pdf](http://www.hip.institute/press/HIP_INSTITUTE_CP7_EN.pdf)
- [13] ScanPyramids press release, 2016 年 10 月 [http://www.hip.institute/press/HIP\\_INSTITUTE\\_CP9\\_EN.pdf](http://www.hip.institute/press/HIP_INSTITUTE_CP9_EN.pdf)
- [14] K. Morishima *et al.*, *Nature* **552**, 386-390 (2017).
- [15] A. Nishio *et al.*, *NIM* **966**, 163850 (2020).
- [16] S. Procureur, K. Morishima *et al.*, *Nature Communications* **14**, 1144 (2023).
- [17] M. Elkarmoty *et al.*, *NDT and E Int.* **139**, 102809 (2023).