

研究終了報告書

「高度情報処理と素粒子計測の融合によるミュオントモグラフィ技術」

研究期間：2018年10月～2022年3月

研究者：森島 邦博

1. 研究のねらい

本研究では、名古屋大学の独自技術である超高解像三次元素粒子検出器「原子核乾板」による素粒子計測技術と高度情報処理の融合により、巨大な物体の内部を三次元可視化する革新的な計測技術「宇宙線ミュオントモグラフィ」の実現を目指す。

宇宙線ミュオンイメージングは、宇宙線中に含まれる素粒子ミュオンが持つ極めて高い物質透過性と直進性を用いる事でX線によるレントゲン撮影と同様の原理(物質に対する吸収量からそこに存在する物質量を推定)によりX線では不可能な“厚さ(最大で数km)”の人工構造物(ピラミッド、原子炉、土木構造物など)や自然物(火山や地下など)の内部を非破壊で可視化する新しい技術である。この技術は、研究代表者らがこれまでに研究対象としてきた、ピラミッドや原子炉の他、溶鉱炉などの工業用プラントや橋梁・堤防・ダムなどの社会インフラ構造物の点検や地下空洞探査など、多彩なものを対象とする。

本研究では、研究代表者らが開発してきた「原子核乾板」を宇宙線検出器として用いる。原子核乾板は、電源不要、軽量、コンパクト、高い可搬性という特徴を有する。宇宙線ミュオンイメージングでは、検出器を観測対象の周辺に配置して対象を透過した宇宙線を測定する。原子核乾板の特徴を生かすことで、検出器の設置場所に様々な制約がある場合でも、場所を選ばずに設置できることから、様々な位置や方向から観測対象を計測できる。本研究では、研究代表者らが発見したクフ王のピラミッドの内部空間を第一の対象として、発見した空間の三次元形状を数10cmの精度で推定することを目指す。また、複数箇所に設置した原子核乾板から得られるデータを統合的に分析するための計測技術(ハードウェア)および宇宙線シミュレーション(ソフトウェア)の高度化を進める事で、原子核乾板の設置から観測対象の内部を三次元的に可視化する宇宙線ミュオントモグラフィの開発まで統合的に進める。これらの研究開発により、幅広い対象へ適用可能な世界最先端の宇宙線ミュオントモグラフィ技術の基盤構築を目指す。

2. 研究成果

(1)概要

本研究では、名古屋大学の独自技術である超高解像三次元素粒子検出器「原子核乾板」による計測技術と高度情報処理の融合により巨大な物体の内部を三次元可視化する革新的な計測技術「宇宙線ミュオントモグラフィ」の開発を進めた。エジプトのクフ王のピラミッド内部に発見した2つの未知の空間(2016年、2017年)を対象に、ピラミッド内部に原子核乾板を複数設置して、同時に多地点からの観測を実施した。Covid-19パンデミックが起こる2019年度までに下降通路およびアルマムーンの通路から観測したデータを用いて、切妻構造の背後に発

見した新空間の詳細な三次元形状を推定するための解析の枠組みを構築し、解析手法の開発を進めた。また、マヤ遺跡の一つであるホンジュラスのコパン遺跡やイタリアのナポリの地下遺跡の観測などを進めて観測技術の基盤構築を進めた。原子核乾板による宇宙線観測技術の開発では、長期間特性の大幅な改善とその性能劣化の原因追及を行い、高い環境放射線環境下での観測耐性の強化を行った。クフ王のピラミッド内に発見した空間の三次元形状を特定するために、様々な条件のシミュレーションイメージを生成して比較分析する手法(多条件シミュレーション)の開発を進める中で、宇宙線スペクトルの既存モデルでは、十分な精度が得られないことが判明した。そこで、積算密度の二次元角度分布から直接的な三次元密度分布を推定するために必要な宇宙線のエネルギースペクトル測定技術の開発を進めた。これらの開発の成果として、エジプトのクフ王のピラミッドの切妻構造背後の空間の三次元形状を 10 cm 程度の精度で推定することができた(空間の形状を直方体と仮定)。これは、宇宙線ミュオンイメージングの解析に置いて過去に例がない高い精度である。エジプトのクフ王のピラミッドの観測では、エジプト考古省、カイロ大学、KEK、CEA などとの国際共同研究として進めた。ホンジュラスのマヤ遺跡では、ホンジュラス国立人類学歴史学研究所と学術協定を結び、イタリアのナポリの地下遺跡では、ナポリ大学などとの共同研究として進めた。本研究によるハードおよびソフトの両面を融合した計測技術の高度化により、考古学遺跡以外の対象へも適用範囲を広げた。その結果、大学などの研究機関や自治体、企業と連携して、橋梁内部や地下空洞の検知、河川堤防や盛土などの土木構造体の内部を宇宙線で可視化する新しい研究計画へと繋げ、それらを対象とした宇宙線ミュオンイメージングの研究を開始した。

(2) 詳細

研究テーマ1 「高度情報処理によるアルゴリズム開発」

アルゴリズム開発は、クフ王のピラミッドの北面に位置する切妻構造の背後に発見した空間を対象に進めた。2019年2月～11月までの期間(最大272日間)、下降通路およびアルマムーンの通路の計7箇所に設置した検出器により取得した観測データを用いた(図1右図)。それぞれの観測に対して、開発した宇宙線イメージングシミュレーター(1. 解析的に求める高速シミュレーター、2. 素粒子反応のシミュレーションパッケージである GEANT4 を用いたモンテカルロシミュレーションによる高精度シミュレーター)を用いてシミュレーションを行った。シミュレーションに入力する情報は、1. ピラミッド内外の三次元モデルと検出器位置、2. ピラミッドを構成する石灰岩の密度、3. ミュオンフラックスのモデル、である。1については、カイロ大学が取得した三次元レーザースキャニングデータと検出器設置時に測量した情報を組み合わせることで、三次元モデルの表面形状を 10 cm 以下、三次元モデル中での検出器位置の決定精度を 2 cm 以下に抑えた三次元データを構築した。2および3については、9つの既存の宇宙線フラックスモデルと石灰岩の密度の組み合わせからデータとシミュレーションが良く一致するものを探索した。その結果、M. Guan et al (2015) のモデルを使用した場合に、全角度領域に対して比較的良い一致が得られた。しかし、M. Guan et al., のモデルを用いても、一致しない領域が一部確認された。その領域とピラミッドの厚さの相関を分析した結果、ピラミッドの厚さが薄い領域、つ

まり、透過可能なミュオンのエネルギー下限値が低い領域において差が大きいことが分かった。これは、宇宙線のエネルギースペクトルのモデルが低エネルギー領域においては不十分であることを示している。

下降通路から得た観測データを用いた解析では、ピラミッド内の人工的な構造は平面で構成されていることから発見した空間の三次元形状を直方体であると仮定して、空間の形状を推定する手法を開発した。空間の位置(X, Y, Z)および直方体形状(高さH, 幅W, 長さL)を決定する6つのパラメータに対して独立に最適値を探索した(多条件シミュレーション)。具体的には、観測データとシミュレーションを比較して、仮定した直方体の空間を除く領域でデータとシミュレーション間の誤差が最も小さくなるような規格化を行う。次に、シミュレーションの6つのパラメータのうち1つのパラメータを変更しながら観測データとの差が最も小さくなる条件を χ 二乗検定により決定した。この手法の開発により、宇宙線スペクトルの低エネルギー領域での不定性がある中で、空間の三次元形状の推定を可能にした。

この結果に対する独立な検証も行った。アルマムーンの通路は、下降通路とは東西方向に異なる位置に掘削された通路であり、その通路内に設置した原子核乾板から得られる観測データは、空間を側面から捉える。アルマムーンの通路は、下降通路内の観測点よりも遠方に位置するために、空間のイメージング解像度は低下する。そのために、同様の手法(χ 二乗検定)を用いる事は困難であった。そこで、アルマムーンの通路での観測により検出されたミュオン超過分布の中で最も超過した方向を用いて下降通路を貫く断面上に投影して、高さ方向の位置を推定した。その結果、下降通路から得られた結果と誤差の範囲で一致した。これらの手法および結果をまとめた論文を投稿し、現在、査読中である。

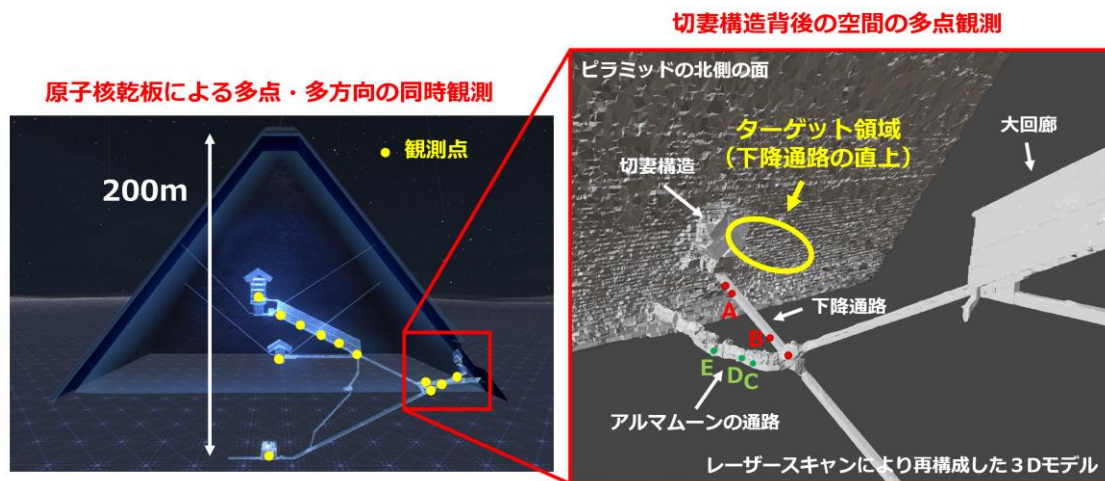


図1. クフ王のピラミッドの全体像と切妻構造背後の空間の観測体系

研究テーマ2 「計測技術の高度化と観測の実施」

宇宙線イメージングでは統計精度を上げることでコントラストが向上するが、宇宙線の飛来頻度は一定であるため、長期間にわたる観測が不可欠である。富士フィルムと共同で長期特性の改善に寄与する化合物の探索を実験室で行い、有効な数種類の化合物を特定し、ピラミッド

の観測において実用化した結果、ピラミッド内部の気温 25 度の環境下で最大 360 日間の観測が可能となり、従来比 12 倍の性能改善となった(3)。この成果は、観測における大幅な労力(原子核乾板の製造、設置、回収、現像、読み取りの作業)の低減および高統計化を可能とした。さらに、銀塩写真技術の専門家である元富士フイルム社の研究者らと共同で、有効性を確認した化合物の特徴を評価し、原子核乾板の潜像退行機構を明らかにした(1,2)。その機構から導いたアイデアを元に、新しい有効化合物候補の探索手法の開発とその評価を進めている。

研究対象のデータを取得するために、クフ王のピラミッドの観測を行った。観測のために原子核乾板を設置した場所は、1. 下降通路およびアルマムーンの通路、2. 大回廊、3. 王の間、4. 地下の間の 4 か所である(図1左図)。これらの観測は、Covid-19 パンデミック以前の 2019 年 12 月に回収した原子核乾板を最後に、その後、原子核乾板の回収に行くことができず、現在(2022 年 3 月)も原子核乾板が設置された状態である。これらの観測データを自動飛跡読み取り装置により読み取り、観測中に原子核乾板を貫通した飛跡を選別してデジタルデータ化を行った。データ解析を進める中で、王の間のデータに大量の電子飛跡のノイズが蓄積されており、解析が困難であった。その原因は、クフ王のピラミッドの大半は石灰岩で構成されているのに対して王の間を構成する石材は花崗岩であることによるものであった。同様の事例は、マヤのコパン遺跡およびイタリアナポリの地下遺跡の観測でも確認されており、それらは共に凝灰岩により構成されている遺跡および地層であった。これらの観測現場で長期間にわたる観測を可能とするための原子核乾板解析手法の開発を進めた。具体的には、原子核乾板を読み取る際に検出層を膨潤することでノイズとなる電子飛跡の認識効率を低下させつつ直線的なミュオンの飛跡の認識効率を維持するという方法である。この手法の開発により、現像後の原子核乾板の検出効率を最大 50%程度向上させることに成功した。

研究テーマ3 「宇宙線シミュレーション技術の高度化」

宇宙線イメージングにおけるシミュレーション技術として、1. 解析的な高速シミュレーター、2. モンテカルロシミュレーションによる高精度シミュレーター、の 2 つの手法の開発を行った。1については、obj ファイルなどのメッシュデータを三次元形状として用いて、宇宙線モデルを選択することで、検出器位置で観測される宇宙線ミュオンの角度分布を推測するアルゴリズムとして実装した。2については GEANT4 パッケージを用いて、gdml ファイル形式の三次元形状データを入力し、宇宙線モデルのエネルギースペクトルの角度分布に従ってミュオンを照射し、設定する検出器内でミュオンの軌跡を推測するアルゴリズムとして実装した。モンテカルロシミュレーションは、物質中でのミュオンの多重電磁散乱による解像度低下を再現することができる。これらの 2 つのシミュレーションの開発を並行して行うことで、それぞれの結果を相互評価しながら開発を進めた。宇宙線シミュレーションにおいて最も問題となったのは、研究テーマ 1 に記した低エネルギー領域での観測データとシミュレーション結果の不一致であった。この問題の理解を深めるために、宇宙線のエネルギースペクトルの実測およびその技術開発を進めた。1 つ目の手法は、水中で宇宙線を観測することで宇宙線が検出器に到達するために必要なエネルギーが水深ごとに異なることを利用して積分スペクトルを求める手法で、暫定的な結果を得た。また、2 つ目の手法として、原子核乾板とタングステン板を交互に積層して宇宙線がタング

ステン板から受ける僅かな散乱を高い精度で測定することで、幅広いエネルギー領域をカバーする宇宙線のエネルギースペクトル測定手法の開発を進めた。

3. 今後の展開

本研究で得られた成果を基に、宇宙線スペクトルモデルの高精度化やさらなる三次元再構成手法の開発により、より多彩な対象(幅広い厚さ)に対して宇宙線トモグラフィによる絶対密度測定が可能な宇宙線イメージング技術へと発展させていく。宇宙線を用いて巨大構造物や自然物の内部を非破壊で三次元可視化する宇宙線トモグラフィ技術の確立は、医療や工業分野をはじめとして現代社会に不可欠な基盤技術であるX線CTに匹敵する技術革新を起こす可能性がある。必要な要素技術の開発と基盤構築は、基礎研究と観測対象に合わせて最適化する解析アルゴリズムの開発と共に、各分野の専門家らとの共同研究または産学連携・協働による実課題解決型の研究活動を推進することで、今後数年のうちに技術実証という形で達成したい。技術実証に向けた活動では、スタートアップの起業も視野に入れている。これらの研究・実証活動の先に、宇宙線ミュオンイメージングを社会実装することを今後10年スパンで目指す。

4. 自己評価

本研究では、宇宙線トモグラフィの基盤技術の開発を目標に、ハード(原子核乾板)およびソフト(シミュレーション、解析手法)の両面から開発を進めたことで、主な対象である「エジプトのクフ王のピラミッド内部に発見した空間」の形状を従来の宇宙線ミュオンイメージングでは達成されていない10 cm程度の高い精度で推定することに初めて成功した。本研究の過程で、宇宙線スペクトルモデルにおける新たな課題も明らかとなり、シミュレーションの精度向上のために宇宙線スペクトルを実測するための技術開発を新たに進めることで、宇宙線ミュオンイメージングにおいて普遍的であり、絶対密度測定のためには必要不可欠な新しい研究テーマを見出した。また、原子核乾板によるクフ王のピラミッド内での連続観測期間を可能な限り長期化するために、長期間特性の改善に対して有効な新しい化合物を導入した新型原子核乾板を実現し、大幅な長期間安定性が達成されたことで、本技術の活用範囲を飛躍的に広げた。これらの開発と並行して、積極的に他分野の研究者との交流や課題調査を進めたことで、新しい宇宙線イメージングの対象として土木構造物(河川堤防や盛土)や陥没事故につながる地下空洞調査などへ展開する新しい研究グループを組織するなど、社会実装に向けた活動を積極的に進めている。その具体的な成果の1つとして、科学研究費補助金の学術変革領域研究(B)の領域代表として研究体制を組織し、令和3年度の課題「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」として採択された。これらの研究を通じた技術実証と社会実装まで見据えた開発を継続して推進することで、社会の安全や安心につながる技術革新の一翼を担い、学術的にも経済的にも大きな波及効果が期待できる。情報処理を駆使するという点については、本研究で進めた多条件シミュレーションによる三次元形状推定の他にも多くの試行すべき要素や手法が考えられるため、今後も継続して開発する課題が残されているが、宇宙線ミュオントモグラフィの実現のための計測および解析における技術基盤の構築はおおむね達成できたと考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 3件

1. T. Tani, A. Nishio, T. Uchida, K. Morishima, “Track formation in nuclear emulsion plates for cosmic-ray imaging with stabilized Ag nanoparticles”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, Volume 1006 (2021) 165427

原子核乾板中の飛跡が時間経過とともに消失する現象である潜像退行について、潜像(感光核である銀ナノ粒子)の安定性を光電子収量分光法(PYSA)により評価した。その結果、原子核乾板の潜像退行は、酸化剤による潜像中心の酸化と潜像中心の再ハロゲン化によるという機構であることを明らかにした。このことから、宇宙線イメージング用原子核乾板の潜像退行を抑制するためのいくつかのアイデアが得られた。

2. T. Tani, A. Nishio, T. Uchida, K. Morishima, “Latent image stabilization in nuclear emulsions for cosmic-ray imaging”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, Volume 975 (2020) 164163

私たちが特定した原子核乾板に対して潜像安定剤として機能する新しい化合物(ベンゾチアゾリウム)の特性と挙動を光電子収量分光法(PYSA)により評価した。評価結果と潜像形成のメカニズムを考察した。その結果、化合物が開環して潜像に吸着することで、酸化に耐性のある潜像中心を形成し、潜像退行の第一段階を抑制しているという機構を提案した。

3. A. Nishio, K. Morishima, K. Kuwabara, T. Yoshida, T. Funakubo, N. Kitagawa, M. Kuno, Y. Manabe, M. Nakamura, “Nuclear emulsion with excellent long-term stability developed for cosmic-ray imaging”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 966 (2020)

原子核乾板は小型で電源を必要としないため、屋外での観測を必要とする宇宙線イメージング用の検出器として適している。しかし、長期安定性や温度耐性の問題から、使用できる観測期間や季節、場所が限られていた。上記の長期特性に影響を与える要因は、ゼラチン、添加化合物、包装材料であることを明らかにした。その対策を施した新しい原子核乾板を開発した結果、30°Cで260日以上での観測を可能とする大幅な性能向上を達成した。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 1件(特許公開前のもも含む)

| | | |
|---|-------|---|
| 1 | 発明者 | 森島 邦博、西尾 晃、舟窪 健 |
| | 発明の名称 | 荷電粒子の飛跡検出用シート |
| | 出願人 | 国立大学法人名古屋大学、富士フイルム株式会社 |
| | 出願日 | 2019/10/28 |
| | 出願番号 | 2019-195452 |
| | 概要 | 原子核乾板は小型で電源を必要としないため、屋外での観測を必要とする宇宙線イメージング用の検出器として適している。しかし、長期安定性や温度耐性の問題から、使用できる観測期間や季節、場所が限られていた。本出願は、長期特性を大幅に改善する化合物とその処方について記載している。 |

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

森島邦博、「宇宙線ピラミッドイメージング」、第 39 回日本医用画像工学会大会、招待講演、
2020 年 9 月 19 日

森島邦博、「宇宙線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と今後の展望」、
日本オリエント学会第 62 回大会、招待講演、2020 年 12 月 5 日

AGU-Wiley book

GEOPHYSICAL MONOGRAPH SERIES

Muography – Exploring Earth’s Subsurface with Elementary Particles –

Chapter 21 Development of Nuclear Emulsions for Muography

Kunihiro Morishima, Nobuko Kitagawa, and Akira Nishio

Doi:10.1002/9781119722748.ch21

2020 年 3 月 一般財団法人 日本宇宙フォーラム 第 4 回宇宙開発利用大賞 文部科学大臣賞 宇宙線を活用した巨大物体の内部イメージング 森島邦博

2019 年 4 月 文部科学省 文部科学大臣表彰 若手科学者賞 原子核乾板による宇宙線イメージングの開発とその応用の研究 森島邦博

2019 年 1 月 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 NEDO-TCP 最優秀賞 Cosmic Ray Imaging 森島邦博