

宇宙線ミュオンによる大型建造物の非破壊イメージング



森島 邦博

Morishima Kunihiko

(名古屋大学高等研究院, 未来材料・システム研究所)

1 はじめに

放射線は、物質に対する高い透過性を持つため、光では直接見ることができない物体の内部を非破壊イメージングする手段として幅広く利用されている。特に、1895年にRöntgenらにより示されたレントゲン撮影技術（X線イメージング）は、今では医療や空港の手荷物検査、工業検査などに幅広く用いられており社会に必要不可欠な基盤技術となっている。レントゲン撮影では、加速器により人工的に発生させたX線を観察対象に照射し、その密度や厚さの違いからX線の透過量に差が生じることを利用する。観察対象を透過したX線をX線フィルムなどの検出器でとらえることで、透過率の違いに起因するX線検出数の濃淡として物質の内部構造を直接反映した透過像が得られる。加速器や核分裂反応により発生した中性子を利用したイメージング技術では、主に水素などの軽元素に対して高いコントラストで撮影することができる。このようなX線

や中性子線の透過力は物質の厚さでおよそ1m程度である。図1に示すように、これらの放射線種と比較して、宇宙線に含まれるミュオン（電子と同じ性質を持つ素粒子。電子の約200倍の質量を持つ）は、エネルギーが高いものについては厚さ数kmでさえも透過するほどの極めて高い透過性と直進性を持つ。自然放射線の一種である宇宙線は、宇宙の高エネルギー天体現象により発生し加速された陽子などが地球大気と衝突することにより2次的に発生する素粒子・原子核群の総称である。このような宇宙線ミュオンの特徴を利用して、従来の技術では不可能な大型建造物内部をレントゲン撮影のようにイメージングする技術を宇宙線ミュオンラジオグラフィと呼ぶ。

2 宇宙線ミュオンラジオグラフィ

宇宙線ミュオンラジオグラフィの対象は、火山やピラミッド、原子炉などの大型建造物である。



図1 放射線イメージングの対象とその大きさ

あるかを確認するという手法をとった。原子核乾板の特徴により、原子炉建屋に隣接するタービン建屋の廊下に人力で運び込み至近距離からの観測を実現できた。観測装置の大きさは、縦横約 50 cm、高さ約 1 m と非常にコンパクトであり、約 3 か月間の観測を行った。この 2 号機と 5 号機の比較分析により、2 号機では炉心溶融が起きており、その炉心溶融の程度は 70% 以上であるという結果を初めて得た⁵⁾ (図 4)。このようにして得た 2 号機の結果は、廃炉工程の策定に資する情報として活用されている。

4.2 エジプトのピラミッドの内部調査

2015 年からエジプトの考古学遺跡である世界最大クフ王のピラミッド等を対象とした最新の考古学遺跡調査 (SCAN PYRAMIDS) をエジプト考古省、カイロ大学等との共同研究で進めている。2016 年には、クフ王のピラミッド観測の事前調査として、

高さ 100 m の屈折ピラミッド内部にある既知の空間を対象に観測を行い、その空間のイメージングに初めて成功した。屈折ピラミッドは一般への公開はされておらず電源設備も無いため、原子核乾板の特徴が生かされた。この事前調査により原子核乾板を用いた宇宙線ミュオンラジオグラフィのピラミッド調査への有効性を実証したことで、クフ王のピラミッドの調査が許可された。そこで、筆者らは、ピラミッドの入り口から下降する通路 (下降通路) と女王の間と呼ばれるピラミッド中心部の部屋に原子核乾板を設置して観測を開始した。これまでに、下降通路内に設置した原子核乾板の解析を行い、図 5 のように、検出器設置位置の上部に既知の構造からは説明できない新たな空間領域を発見した⁶⁾。現在、下降通路内の複数の観測点に原子核乾板を設置し、筆者らが発見した空間の 3 次元形状と位置を明らかにするための観測を進めている。

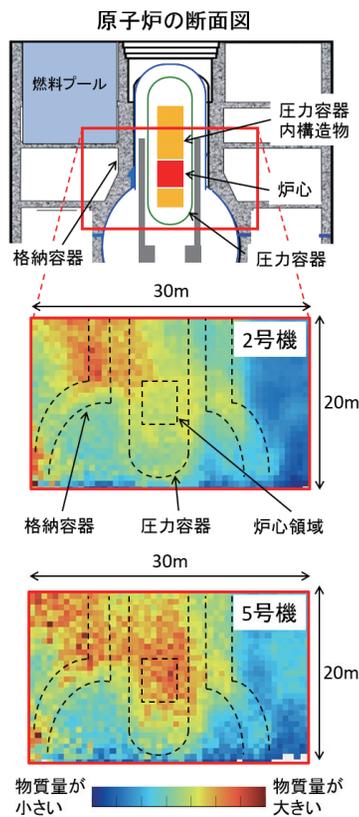


図 4 福島第一原子力発電所の原子炉の宇宙線ミュオンラジオグラフィ

原子炉の断面図 (上) と 2 号機 (中) 及び 5 号機 (下) の観測結果。赤い色ほど多くの物質が存在している事を示す。この 2 つの原子炉のイメージの比較と数値分析から、健全な 5 号機よりも 2 号機の方が炉心領域に存在する物質質量が少ない事を確認し、2 号機は炉心溶融が起きていることを明らかにした。

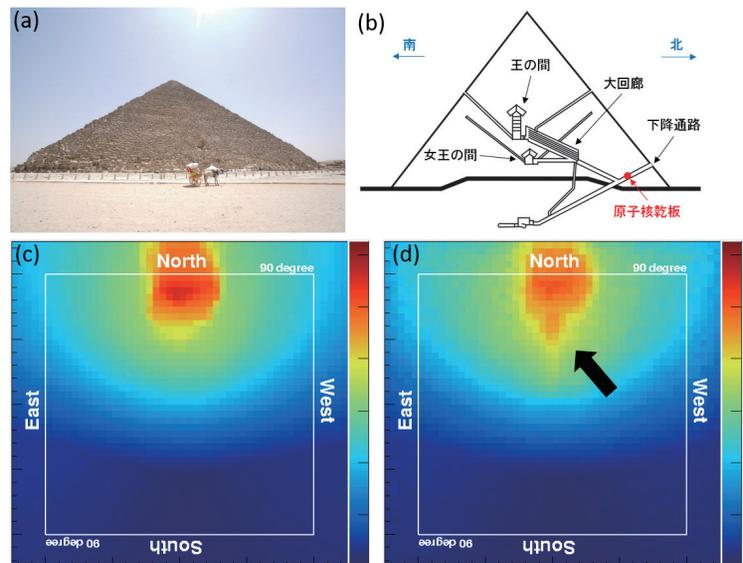


図 5 クフ王のピラミッドの宇宙線ミュオンラジオグラフィ

(a) クフ王のピラミッドの外観 (b) クフ王のピラミッドの断面図と原子核乾板の設置位置 (c) 既知の構造から期待されるシミュレーション結果 (d) 観測により得られたデータ。データとシミュレーションは共に検出したミュオンの数の方向分布を示しており、赤い色ほど数が多く、青い色ほど少ない。データ中の矢印で示す赤い部分は、シミュレーションには見られない。これは、既知の構造から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、この領域には未知の空間が存在していることを明らかにした。

5 今後の展望

今後は、溶鉱炉などの工業プラントの診断技術や地盤陥没事故などを未然に防ぐための地下空洞調査などへの応用を検討している。更に、盛土やダムなどの巨大な人工構造物の内部密度測定やより巨大な対象である火山内部の火道形状のイメージングなども進めていきたい。技術的には、これまではラジオグラフィとしての2次元情報の解析であったが、クフ王のピラミッドで進めているような多地点からの観測データの取得とその3次元再構成による宇宙線トモグラフィの確立を目指している。このように、宇宙線ミュオンラジオグラフィは、原子炉やピラミッドの他にも数多くの適用対象があり、今後、宇宙線トモグラフィ技術の開発と共に応用範囲は急速に拡大していくものと考えている。

参考文献

- 1) K. Morishima, Latest Developments in Nuclear Emulsion Technology, *Physics Procedia.*, **80**, 19-24 (2015)
- 2) K. Morishima, *et al.*, Development of nuclear emulsion for muography, *ANNALS OF GEOPHYSICS.*, **60**, 1, S0112 (2017)
- 3) K. Morishima, *et al.*, Development of a new automatic nuclear emulsion scanning system, S-UTS, with continuous 3D tomographic image read-out, *JINST.*, **5** P04011, (2010)
- 4) K. Morishima, *et al.*, Development of Automated Nuclear Emulsion Analyzing System, *Radiation Measurements*, **50**, 237 (2013)
- 5) http://www.nagoya-u.ac.jp/about-nu/public-relations/researchinfo/upload_images/20150320_esi.pdf
- 6) http://www.nagoya-u.ac.jp/about-nu/public-relations/researchinfo/upload_images/20161017_imass.pdf