

放射線工学部会セッション「ミュオン工学の可能性」

(3) 原子核乾板による宇宙線ミュオン測定とその応用

(3) Measurement of Cosmic-ray muon with nuclear emulsion and its applications

*森島 邦博¹¹名古屋大学

1. 宇宙線ミュオンを用いた非破壊検査技術

我々は、原子核乾板を用いた宇宙線ミュオンラジオグラフィの技術開発とその応用を進めている。宇宙線は、地球外から飛来する一次宇宙線（陽子やヘリウムの原子核等を主成分とする）とその一次宇宙線が地球大気中の原子核と衝突する事で生成される二次宇宙線（ミュオン、中間子、ニュートリノ、陽子、中性子、電子、ガンマ線など多種多様）の2つの成分に分けられる。二次宇宙線の中でも電荷を持つために検出が容易であり、かつエネルギーに依存した極めて高い透過力を持つ“ミュオン”を利用する事で、X線レントゲン撮影と同様にミュオンの透過率の違いによる内部イメージングが可能となる。イメージングの対象は、火山や原子炉、ピラミッドなどの大型構造物である。ミュオンは大気中で一様に生成されるため、人工的に発生させて利用するX線のような平行ビームとは異なり、あらゆる方向から地上へ降り注いでいる。そのため、ミュオンによるイメージングでは、“どの方向から来たミュオンがどれくらい減っているのか？”という情報が必要であり、ミュオン検出器には3次元的な飛来方向の測定が求められる。我々は、このような宇宙線ミュオンを用いた大型構造物の非破壊イメージング技術「宇宙線ミュオンラジオグラフィ」に適した検出器として原子核乾板の技術開発を進めている。

2. 原子核乾板によるミュオン測定

原子核乾板とは、電荷を持つ素粒子や原子核（荷電粒子）の軌跡を $1\mu\text{m}$ 以下の極めて高い3次元空間分解能で記録する銀塩写真フィルムである。図1に示すように、原子核乾板の構造は、厚さ数十 μm の感光層の中に均一な粒子径（ $0.2\mu\text{m}$ 程度）の臭化銀結晶を高密度に分散したもので、この臭化銀結晶中を荷電粒子が通過すると結晶表面に潜像核が形成される。化学現像により潜像核は直径 $1\mu\text{m}$ 程度の銀粒子へと成長する。このような原理により荷電粒子の軌跡を $1\mu\text{m}$ 以下の分解能で3次元的な銀粒子列（飛跡）として記録出来る。これらの飛跡を立体的に認識するためには、光学顕微鏡による測定が必要である。我々は、原子核乾板に記録された3次元飛跡を高速にデジタルデータ化してコンピューター上で処理するための原子核乾板自動飛跡読み取り装置とその解析技術の開発を進めて来た。これらの技術により、宇宙線を原子核乾板で検出してその中からミュオンの飛跡を選別し、その飛来方向の角度分布を得る事が出来る。環境放射線バックグラウンドとなるMeV領域のガンマ線による電子飛跡との識別については、原子核乾板中での飛跡形状などを分析する事により高い識別が可能である。更に、原子核乾板と薄い鉛板等を交互に積層した検出器構造（ECC）を用いる事で、ミュオンのエネルギーの測定も可能である。

原子核乾板を宇宙線ミュオンラジオグラフィの検出器として用いる際の特徴としては、検出器が持つ高い角度分解能と360度の視野が挙げられる。更に、電源が不要であり、薄型・軽量である。また、任意の形状、サイズへ加工する事が出来るため、ボーリング孔への挿入による地下からの観測や、狭い隙間への挿入、壁への張り付けなど、大がかりな設備を必要とせず人力での設置・回収が可能である。これらの特徴は観測対象の周辺や地下に検出器を設置する宇宙線ミュオンラジオグラフィにおいては非常に大きな利点である。

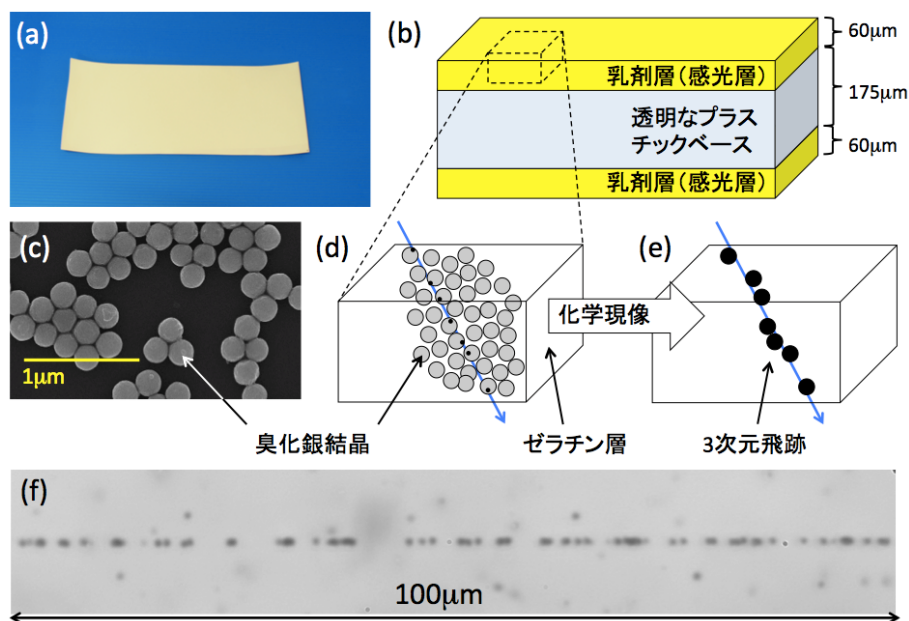


図 1. 原子核乾板の概要。(a) 現像前の原子核乾板の写真、(b) 原子核乾板の断面図、(c) 臭化銀結晶の電子顕微鏡写真、(d) 荷電粒子が通過して潜像（臭化銀結晶中の黒い点）が記録される様子、(e) 化学現像後に潜像が成長して現像銀粒子となる様子 (f) 現像されたミュオンなどの荷電粒子の飛跡（銀粒子の黒い点列）の光学顕微鏡写真。

3. 福島第一原子力発電所 2 号機観測への適用

我々は、このような原子核乾板の特徴を生かす事で、福島第一原子力発電所の原子炉内部の迅速な観測の実施が可能であると考え、2014 年から 2015 年にかけて、原子核乾板を用いた 2 号機、及び 5 号機の観測を行った（(株) 東芝との共同研究）。原子核乾板は名古屋大学で製造して福島第一原子力発電所へ輸送、3 週間程度のミュオンの観測後、回収して名古屋大学へ輸送する手順で行った。その後、名古屋大学で現像を行い、自動飛跡読み取り装置 S-UTS による飛跡情報のデジタルデータ化により得られたミュオン飛跡の解析を行った。原子核乾板はガンマ線により散乱される電子に感度を持つためにガンマ線を遮蔽する構造体が必要であり、厚さ 5cm の鉛遮蔽体を製作してその中に原子核乾板を挿入して観測を行った。その大きさは、高さ約 1m の非常にコンパクトなものであった。この観測では、炉心溶融が疑われる 2 号機と同型の健全な 5 号機との同時観測を行った。その結果、圧力容器内の炉心部については、健全な 5 号機よりも 2 号機の方が有意に物質の存在量が少ない事を確認し、2 号機では炉心溶融が起きていた事を裏付けた。

4. 多分野への応用

我々は、原子炉のようなプラント診断の他、以下のような分野への応用を進めている。

4-1. 考古学遺跡調査への応用

考古学遺跡は、未だにその内部構造が不明なものが多く、様々な非破壊検査技術による内部調査が行われている。このような調査では、例えばレーダー探査などが用いられるが遺跡内部を探索するには、探索可能な深度や解像力が不十分である。そのため、宇宙線ミュオンラジオグラフィの適用が期待されているが、考古学遺跡調査では原子核乾板が持つ“電源不要・軽量・コンパクト”という特徴が非常に適してい

る。現在、高さ 100m を越えるものもあるエジプトのピラミッド調査への応用を本格的に進めており、他にも日本の古墳やメキシコの遺跡、イタリアのポンペイの遺跡等への応用も検討している。

4-2. 火山、断層、資源探査などへの応用

火山内部構造のイメージングにはすでに宇宙線ミュオンが用いられているが、1km を越える厚さの山体を通過する事が出来るミュオンの数は極めて少ないため、火道などの構造をイメージングして十分な解像力を得るためには、100m²級の大面積検出器が必要である。また、3次元情報を得るためには、周辺に複数の検出器を設置する必要があるため、更にその数倍にもなる。このような大面積検出器の実現に原子核乾板は適している。また、同様の理由から断層や資源探査などへの応用も可能である。

4-3. 地下空洞調査や老朽化検査などインフラ点検への応用

地下に存在する空洞などが引き起こす陥没事故を未然に防ぐためには、地下空洞調査が不可欠であるが、これも宇宙線ミュオンラジオグラフィの対象である。しかし、上空から降り注ぐ宇宙線を対象とするために、地下への検出器の設置が不可欠となる。そのためには、ボーリング孔などを掘り、そこに検出器を挿入するなどの工夫が必要である。原子核乾板は、サイズや形状を自在に決められるがその角度分解能は変わらないため、ボーリング孔に挿入可能な検出器とする事が可能でありこのような用途に非常に適している。また、ダムや盛土などの老朽化検査においては、密度の測定が一つの手段であり、これも宇宙線ミュオンラジオグラフィの対象である。原子核乾板であれば、同時に複数箇所に設置出来るため、これらのインフラ点検などへの実用化研究も進めている。

5. まとめ

我々は、極めて高い角度分解能を持ちながらも電源不要・軽量・コンパクトという特徴を併せ持つ「原子核乾板」による宇宙線ミュオンラジオグラフィ技術の開発を進めている。このような特徴により、福島第一原子力発電所の原子炉の観測では迅速な測定が行われ、2号機の炉心溶融を裏付ける結果が得られている。現在では、巨大な石造建築であるエジプトのピラミッド内部の観測も進めている。今後、大面積検出器の実現による火山などの観測やボーリング孔を活用した地下空洞調査などのインフラ点検技術への応用など、原子核乾板による宇宙線ミュオンラジオグラフィ技術の幅広い展開を進めていく。

*Kunihiro Morishima¹

¹Nagoya Univ.