

放射線工学部会セッション「ミュオン工学の可能性」

(2) 地中空洞探査に向けたミュオグラフィ検出器開発

(2) Development of Muography Detector for Underground Cavity Survey

*金 政浩¹, 大野 裕明, Kullapha Chaiwongkhot¹, 近藤 和博¹, 渡辺 幸信¹¹九州大学総合理工学研究院

1. 研究背景

「非常に透過力の高い放射線が大気よりさらに上方からふりそそいでいる」という発見は1912年のV.F. Hessによる7回の気球飛行による計測によってなされた^[1]。ミュオン自体の発見にはそれからさらに長い時間を必要とした。1933年に霧箱を用いて陽電子を発見^[2]したC.D. Andersonが、その3年後の1936年に同様に霧箱による計測から、S.H. Neddermeyerと共に「150MeV以上の粒子が宇宙線に含まれている」と発表^[3]し、まさにこれがミュオンであった。

このミュオンを用いた「対象の透過実験」に関する試みは、さらにそれから19年後であった。1955年にE.P. Georgeが山のトンネル内から、表土の厚みをミュオン計測から予測したのが世界初のミュオンの巨大対象透過実験であった^[4]。ただ、この実験はまだ「ミュオグラフィ」…つまりミュオンを用いたラジオグラフィ…とは言えないものであった。

世界初のミュオグラフィ実験は、Alvarezらによって、ギザのピラミッドの透過画像を得たもの^[5]である。Alvarezはスパークチェンバーを主検出器として、ミュオンの飛来方向と強度を計測し、ピラミッド中にある未発見の部屋を探索した。あいにく結論としては、新しい部屋を見つけることはできなかったが、このアイデアは近代のミュオグラフィの研究に引き継がれていることは言うまでもない。

さて、近代のミュオグラフィは1987年の湊氏による名古屋地下鉄構内からの計測^[6]によって、土壌厚さとミュオン強度の関係を求めたfeasibility studyの頃から徐々に応用が再度検討され始めた。1995年には、長嶺らによってミュオグラフィの地学的応用のひとつとして、火山の噴火予知への応用が検討されはじめた^[7]。この研究は、現在の田中らによるミュオグラフィ研究^[8-12]に引き継がれ、大きく発展している。また、森島らの研究により、原子核乾板の読み出しが自動化されたこと^[13]と並行して、これを用いたミュオグラフィ技術に関する研究^[14,15]も精力的に進められている。海外でも、LANLと東芝(株)による、ホームランドセキュリティのための核物質探査に応用する研究^[16]や、Glasgow大学などによる核廃棄物監視に適用する研究^[17,18]など、枚挙に暇が無い。

このような状況のなか、ミュオグラフィは地中空洞探査応用への期待が高まってきている。地中空洞は、人工的な地下施設によって引き起こされ、徐々に成長し、しばしば地盤沈下に至る事例が報告されている。これらの空洞は地盤沈下に至る前に発見し、対策を講じることで事故を未然に防ぐことができる。しかしながら、既存の探査技術ではその分解能や探査深度に制限(いわゆる「探査空白域」)があり、十分な探査がなされていないことが指摘されている。2009年に財団法人機械システム振興協会の作成した「ミュオン粒子の工学応用による地中空洞化調査システムに関する調査研究報告書^[19]」では、次の様に述べられている。「ミュオン粒子による探査では①従来の探査技術ではできなかった空洞探査の空白域の探査が可能となる、②反射や屈折を考慮した複雑な解析が必要ない、③土木設計に適用できる密度を直接的に得ることができる、などの現状技術にはない優位性を期待することができる。」

*Tadahiro Kin¹, Hiroaki Ohno¹, Kullapha Chaiwongkhot¹, Kazuhiro Kondo¹ and Yukinobu Watanabe¹¹Kyushu Univ.

図 1 の赤線は既存の探査技術の探査深度およびその分解能を示している。両者の間が探査空白域となっているが、地盤沈下対策のためには青線で示した分解能(〜30msr)が必要とされている(文献[20]の 5 章より概算)。ミュオグラフィ技術はまさにこの領域をカバーできる技術である。本研究では、このニーズに応えるため、地中空洞探査に向けたミュオグラフィ検出器の開発を目的とした。目標は、(1)地中空洞探査に求められる分解能 30msr 以上で、(2)地下からの計測を想定して小型かつ消費電力が小さく、(3)降雨などによる地下水分布に対応するためオンライン計測可能なミュオグラフィ検出器である。

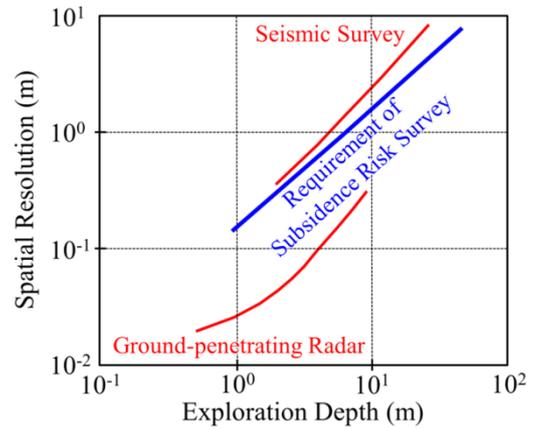


図 1 既存の探査技術の探査深度と分解能の関係、および地中空洞探査に求められる分解能

2. 開発したミュオグラフィ検出器

2-1. 検出原理

ミュオグラフィには「散乱法 [16-18]」と「透過法 [5-12]」がある。前者はミュオンの入射前後の散乱角を計測し、その差からおおまかな原子番号の分布まで得ることができるメリットがあるが、計測対象を 2 台の飛跡検出器で挟む必要があり、大規模な対象のミュオグラフィには高いハードルがある。我々は地中という大規模な構造を対象としているうえ、空洞という原子番号の情報が不要な計測を目的としているため、後者の透過法を用いた検出器を開発した。その概念図を図 2 に示す。図中のミュオグラフィ検出器は 2 台のミュオン

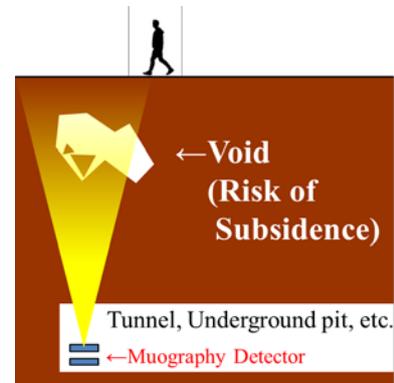


図 2 ミュオグラフィによる地中空洞探査の概念図

位置検出器 (mu-PSD, muon Position Sensitive Detector) から構成されている。この検出器に入射したミュオンは、各々の mu-PSD によって、空間中の座標が 2 点決定される。このことより、ミュオンの飛跡を求めることができる。長時間計測を行うことで、ミュオン強度の天頂角 θ 、方位角 ϕ 分布が得られる (θ と ϕ の定義は図 3 参照)。ある方向(θ, ϕ)に存在する土壌の厚み $t(\theta, \phi)$ は計測位置から求めることができる。また、厚み t の土壌で遮蔽されるミュオンの最大エネルギーを $E_{\max}(t)$ と置く。宇宙線ミュオンのエネルギー分布を $I_0(E, \theta, \phi)$ と置くと、想定されるミュオン強度 $I_p(\theta, \phi)$ は、次の様に書ける。

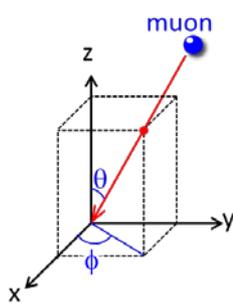


図 3 天頂角 θ と方位角 ϕ の定義

$$I_p(\theta, \phi) = \int_{E_{\max}(t)}^{\infty} I_0(E, \theta, \phi) dE$$

ミュオグラフィ検出によって得られた強度が、 $I_p(\theta, \phi)$ より大きければ、(θ, ϕ)の方向には低密度域 (地中空洞や地下水だまり) が存在することがわかる。

また、もうひとつの方法として、地表における計測が可能な場合、地表での計測率の生データ $R_s(\theta, \phi)$ と対象を計測した生データ $R_m(\theta, \phi)$ の比を取ることで、(θ, ϕ)方向の減衰率を求め、その減衰率から(θ, ϕ)方向の土壌厚さを線積分値として得る方法も可能である。

2-2. 検出器の構成

今回開発した mu-PSD は、Plastic Scintillating Fiber (PSF) とシンチレーション光を読み出す MPPC から構成されている。まず、断面が $2 \times 2\text{mm}$ の正方形の PSF を 64 本並べ、4 本ごとに束ねて、アルミ箔の反射材を巻いた。この PSF Sheet を 2 枚、図 4 のように直交させて配置し、各々束ねられた PSF の一方の端面に MPPC を取り付けました。この mu-PSD は 1 ピクセルのサイズが約 $8 \times 8\text{mm}$ となる。地中空洞探査に必要な 30msr 以上の分解能を達成するために、2 台の mu-PSD の検出器間距離は 100mm とした。

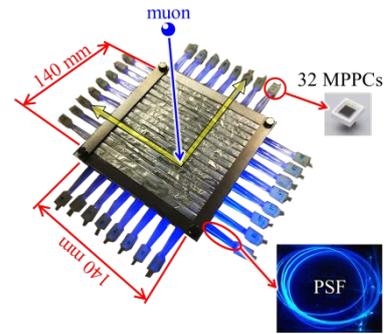


図 4 ミュオン位置検出器の写真

こうすることで、分解能は 25msr となる。また、MPPC は温度によって Gain や Dark Count が著しく変動することがよく知られている。これを抑えるため、ペルチェ式の冷却・加熱システムによる温度コントロールシステムを導入した。2 台の mu-PSD は、この温度コントロール可能な暗室の中に図 5 のように設置した。なお、MPPC の動作とデータ読み出しには、EASIROC Module^[21] を使用している。



図 5 組み上がったミュオグラフィ検出器の写真

3. テスト実験

ここでは、International Symposium on Radiation Detectors and Their Uses 2016 (T. Kin et al. “Measurement of Zenith and Azimuth Angular Differential Flux of Cosmic Muons Using a Prototype Portable Muography Detector”) で報告したオープンスカイ計測と、原子力学会九州支部第 34 回研究発表講演会で報告したミュオグラフィテスト計測 (K. Kondo et al. 「簡易体系イメージングによるプロトタイプミュオグラフィ検出器の性能検証」) について概要を述べる。

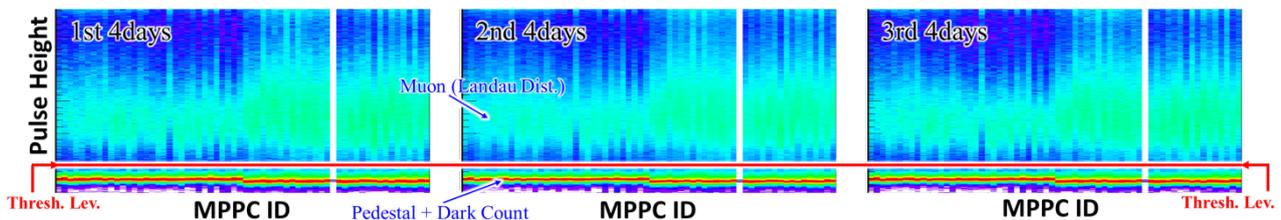


図 6 オープンスカイ計測における、各計測期間の MPPC の波高分布

3-1. オープンスカイ計測

まずは、検出器の動作確認と計測の安定性をチェックするため、天頂角 40 度まで空が開けた体系での計測を実施した。なお、計測は 4 日×3 回行った。また、この計測は、2-1 で述べた $I_s(\theta, \phi)$ のデータとして、3-2 のミュオグラフィテスト計測にも使用する。

まず、計測の安定性をチェックするため、3 回の計測結果を図 6 に示す。全ての計測期間で、ゲインの大幅な変動、ダークカウントの著しい増減は見られなかった。また、ダークカウントは Threshold レベル以下にとどまり、計測に影響を与えていないことも確認された。

次に、オープンスカイ計測によって得られた $R_s(\theta, \phi)$ のデータを図 7 に示す。結果は非常に滑らかな関数として得られ、検出器は良い Uniformity を持っている事が確認できた。

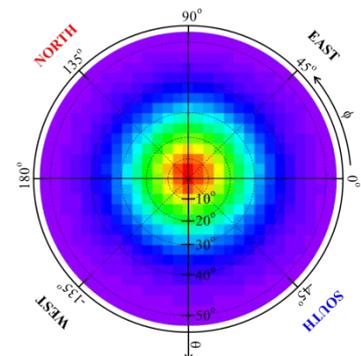


図 7 オープンスカイ計測の結果

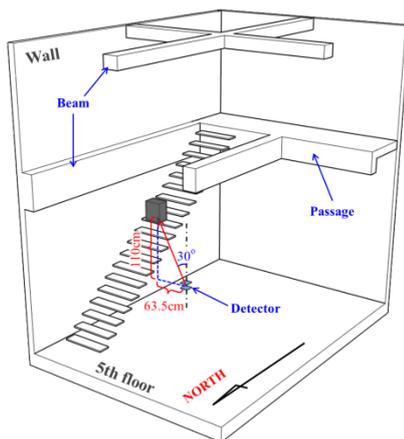


図8 テスト計測体系の概要

3-2. ミュオグラフィテスト計測

次に、鉛ブロックを対象とした簡易的なミュオグラフィテスト計測を実施した。図8に示すように、検出器から110cm上方、東方向、天頂角30度の位置に、 $20 \times 30 \times 35 \text{cm}^3$ の鉛を配置した。計測室は5階建て建屋の5階であり、上方には天井と梁程度しか存在しない条件である。

約168時間の計測で得られた計数率分布 $R_m(\theta, \phi)$ を図9に示す。さらに、これを3-1で得られた $R_s(\theta, \phi)$ で割ることで、減衰率の分布に換算したものを図10に示す。減衰率分布では、壁や梁の影響とみられる構造が観測されたが、鉛を配置した $\theta=30^\circ$ 、 $\phi=45^\circ$ 、付近に明確な減衰が見られた。このことから、開発したミュオグラフィ検出器は対象物を正しい位置に撮像できることが確認できた。

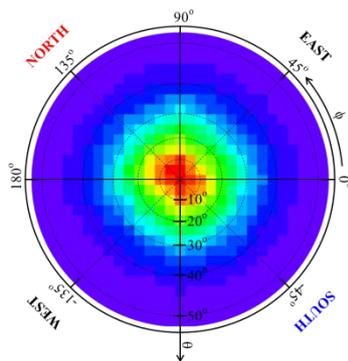


図9 テスト計測の結果(Raw Data)

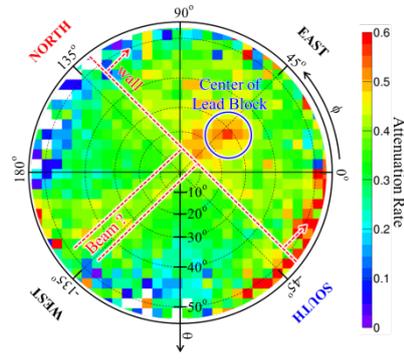


図10 テスト計測減衰率分布

さらに、鉛による減衰率の妥当性の検証を簡易的に行った。図の青丸で示した $\theta=30^\circ$ 、 $\phi=45^\circ$ 方向は、図8に示したように、大きな梁が存在する。鉛ブロック中心付近の減衰率56.9%は、その梁による減衰も含んでいる。そこで、梁のみが存在する $\theta=30^\circ$ 、 $\phi=20^\circ$ 方向の平均減衰率45.2%との差を取ったところ、鉛のみの寄与は11.7%とわかった。 $\theta=30^\circ$ 、 $\phi=45^\circ$ 方向の鉛の厚みは約40cmである。これは、最大で580MeVのミュオンを遮蔽できる厚みに該当する。全宇宙線ミュオンのうち、580MeV以下のミュオンがしめる割合は13.6%であり、おおむね実験で得られた減衰率と一致していることがわかった。

4. 結論

我々は、地中空洞探査へのミュオグラフィ技術の応用を考え、(1)地中空洞探査に求められる分解能30msr以上で、(2)地下からの計測を想定して小型かつ消費電力が小さく、(3)降雨などによる地下水分布に対応するためオンライン計測可能なミュオグラフィ検出器の開発を行った。その結果、(1)検出器の設計により、約25msrの分解能の検出器となっており、(2)MPPCの使用により消費電力を抑えた、(3)オンライン計測可能なミュオグラフィ検出器を作成した。

また、いくつかのテスト計測を通して、良いUniformityを持つこと、ゲイン変動が小さく安定した波高スペクトルが得られること、計測対象の位置と密度を比較的良い精度で求められることを明らかにした。

地中空洞探査では、 $0 \sim 3.0 \text{g/cm}^3$ 程度のダイナミックレンジを持ち、10%程度以上の密度分解能があることが必要と想定される。今後は、さらにテスト計測を重ねることで、密度分解能の性能について評価を行う。さらに、地下施設から、人工建造物などの形状がわかっているもののミュオグラフィ計測をおこない、実用に向けた詳細な検討を積み重ねて行く予定である。

参考文献

- [1] V. F. Hess, "Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten" Z. Phys. 13 (1912) 1084.
- [2] C.D. Anderson, "The Positive Electron" Phys. Rev. 43 (1933) 491.
- [3] C.D. Anderson and S.H. Neddermeyer, "Cloud Chamber Observations of Cosmic Rays at 4300 Meters Elevation and Near Sea-Level" Phys. Rev. 50 (1936) 263.
- [4] E.P. George "Cosmic rays measure overburden of tunnel" Commonwealth Engineer (1955) 455.
- [5] L. W. Alvarez, et al. "Search for Hidden Chambers in the Pyramids" Science (USA) 167 (3919), 832 (1970).
- [6] S. Minato "Feasibility study on cosmic-ray nondestructive testing through structural analysis of subway stations" NDT int'l, 20 (1987) 231.
- [7] K. Nagamine et al. "Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic-ray muons and possible application to volcanic eruption prediction" Nucl. Instr. Meth. A 356 (1995) 585.
- [8] H. Tanaka, et al. "Development of the Cosmic-ray Muon Detection System for Probing Internal-Structure of a Volcano" Hyperfine Interactions 138 (2001) 521.
- [9] H. Tanaka, et al. "Development of a two-fold segmented detection system for near horizontally cosmic-ray muons to probe the internal structure of a volcano" Nucl. Instr. Meth. A 507 (2003) 657.
- [10] H.K.M. Tanaka et al. "Radiographic measurement of the internal structure of Mt. West Iwate with near-horizontal cosmic-ray muons and future developments" Nucl. Instr. Meth. A 555 (2005) 164.
- [11] H.K.M. Tanaka et al. "Detecting a mass change inside a volcano by cosmic-ray muon radiography (muography): First results from measurements at Asama volcano, Japan" Geophysical Research Letters 36, L17302 (2009) 1.
- [12] H.K.M. Tanaka et al. "Radiographic visualization of magma dynamics in an erupting volcano" Nature Comm. 5 3381 (2014) 1.
- [13] K. Morishima and T. Nakano "Development of a new automatic nuclear emulsion scanning system, S-UTS, with continuous 3D tomographic image read-out" JINST 5 P04011 (2010).
- [14] H.K.M. Tanaka et al. "RADIOGRAPHIC IMAGING BELOW A VOLCANIC CRATER FLOOR WITH COSMIC-RAY MUONS" American J. of Science, 308 (2008) 843.
- [15] 名古屋大学プレスリリース, 「名古屋大学が(株)東芝と共同で、福島第一原子力発電所 2 号機原子炉内部の宇宙線ミュー粒子による透視に成功」 2015 年 3 月 20 日.
- [16] C.L. Morris et al. "Tomographic Imaging with Cosmic Ray Muons" Science and Global Security 16 (2008) 37.
- [17] A. Clarkson et al. "The Design and Performance of a Scintillating-Fibre Tracker for the Cosmic-ray Muon Tomography of Legacy Nuclear Waste Containers" Nucl. Instr. Meth. A 745 (2014) 138.
- [18] R. Kaiser et al. "A Prototype Scintillating-Fibre Tracker for the Cosmic-ray Muon Tomography of Legacy Nuclear Waste Containers" EPL Web of Conferences 66 INPC 2013 (2014) 10005.
- [19] 財団法人エンジニアリング振興協会, "ミュー粒子の工学応用による地中空洞化調査システムに関する調査研究報告書" (財団法人機械システム振興協会, Tokyo (2009).
- [20] T.Kawamoto, BUTSURI-TANSA, 58 (2005) 589.
- [21] 石島直樹 "ATLAS アップグレード用シリコン検出器試験用システムの開発" 修士学位論文, 大阪大学理学研究科 (2014).