

宇宙線ミュー粒子を用いた 地盤・土木構造物探査

鈴木 敬一¹

川崎地質株式会社 戦略企画本部 技術企画部

大規模な土木構造物、例えばダム堤体や河川堤防などを非破壊で探査する方法は、これまで電気探査、表面波探査、地中レーダなどが適用されてきた。また、路面下の空洞探査には地中レーダ、法面の探査には弾性波探査などが適用されてきた。しかし、いずれの場合も探査深度や分解能には限界があった。本発表では、宇宙線ミュー粒子という透過性の高い素粒子を用いて、これまでの限界を克服し、地盤や土木構造物の内部構造を探査する方法を紹介する。宇宙線ミュー粒子は常に自然に一定量が、大気の上空で生成され、物質中も適度に透過する。この性質を利用すると、地盤や土木構造物内部の密度構造を推定することが可能である。特にトモグラフィ技術と組み合わせると、地盤や土木構造物の密度構造を三次元で得ることが可能である。都市部においても、電気ノイズや振動ノイズの影響を受けず、高精度の計測が可能である。さらに、地盤や土木構造物だけでなく、原子炉やピラミッドなどの非破壊探査にも適用することができる。

キーワード：物理探査、宇宙線ミュー粒子、密度、地盤、土木構造物

1. はじめに

地盤の性状や空洞の探査、あるいは大型土木構造物などの探査には、地中レーダや電気探査、弾性波探査などの物理探査が適用される。これらの手法は、対象物やその規模、探査深度などによって適切な手法を選択する必要がある。しかし、これらの探査手法は、深度10m程度までを対象とした場合、必ずしも適用可能であるとは限らない。さらに都市部では電氣的ノイズや振動ノイズなどにより物理探査が適用できないことも多い。

一方、社会インフラ施設の老朽化が原因で地盤の空洞化や、土木構造物そのものの劣化などが社会問題となっている。この問題に 대응するには、探査深度10m以上、分解能1m以下の探査性能を有する手法が必要である。

本稿ではこの問題を解決するために、宇宙線ミュー粒子を利用した探査手法の原理と事例を紹介する。

2. 宇宙線ミュー粒子

宇宙線は超新星の爆発や太陽活動などによって生じる高エネルギーの素粒子である。これが、大気の上空で他の原子と衝突して発生して2次宇宙線を発生させる。2次宇宙線の中で、ミュー粒子と呼ばれる素粒子は、電子の

仲間のレプトンと呼ばれる種類である。ミュー粒子は透過能力が高いため、地表から地盤内部まで透過することができる。物質中を透過すると周囲の原子との相互作用により、電子とニュートリノに崩壊し、その数は減少する。物質の密度が大きい、あるいは透過する距離が長いほど崩壊する確率は高くなり、数の減る割合も高くなる。

宇宙線を起源としたミュー粒子は、地表付近の野外では 10cm^2 、すなわち手のひらのサイズ程度の面積に1秒間に1個の割合で常にほぼ一定量が降り注いでいる。

3. 探査原理

地盤や土木構造物など、物質中を透過したミュー粒子の減少する割合を測ることができれば、透過した経路に沿って「密度×透過距離」を求めることができる。透過距離は、測量や図面などから求めることができるため、測定した量を距離で割れば、透過経路に沿った平均密度を求めることができる。

地表における宇宙線ミュー粒子の単位時間・単位面積・単位立体角あたりの数（これをフラックスという）はよくわかっているので、物質を透過した後のフラックスを測定すれば、探査が可能となる。これらの詳しい説明は文献1)に示されている。

具体的に簡単な数値シミュレーションを次に示す。図

-1はシミュレーションのための数値モデルの平面図である。灰色の部分には地下の通路であり、その上に直径2mの球形の空洞を仮定する。図-2は断面図である。通路の直交方向に5度刻みで宇宙線ミュオン粒子のフラックスを測定する。これを1地点ごとに測定し、図-1に示すように2m間隔で12m区間を測定したとする。なお、通路までの深さは20m、空洞の中心位置は地表から10m、地盤の平均密度を 1.6g/cm^3 とした。角度の表記は、真上を0度として図の右側を正、左側を負とした。測定点は、図-1の黒丸で示した位置で、2m間隔に設定した。検出器の大きさは直径24.5cmであり、角度ごとのフラックスを計測するには検出器を2台使用し、距離を一定に保つ必要がある。このときの距離は1.4mとした。一方向当たりの計測時間は12時間とした。これらのパラメータにより統計的な誤差が変化したが、このときの統計誤差は4%程度であった。計算の方法や統計誤差の詳しい内容については文献1)に記載されている。

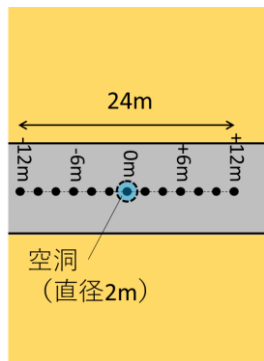


図-1 シミュレーションのための数値モデル平面図

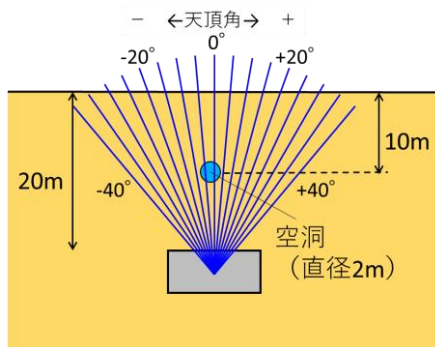


図-2 シミュレーションのための数値モデル断面図

図-3に数値シミュレーションの結果を示す。グラフ上に実線と黒丸で示したのが空洞の真下(0m地点)のプロファイルであり、破線は空洞がない均質な地盤の場合(-12m地点)のプロファイルである。ランダムノイズを統計誤差4%分加えている。空洞がある場所では見掛け上、地盤の透過距離が短いため、ミュオン粒子のカウント数が大きくなっている。上に凸になっているのは、天頂角が大きくなるとミュオン粒子の数が減少する天頂角依存性があることと、斜めになると透過経路が長くなるため、その分のカウント数が減るためである。図-4は2m間隔に計

測したミュオン粒子のカウント数を、水平距離と天頂角に対してプロットしたものである。中央部(水平距離0m, 天頂角0度)にカウント数の大きい領域があり、これが空洞の範囲を示している。図-5は空洞のないプロファイルを差し引いたカウント数の分布である。空洞部分だけが明確に可視化されている。

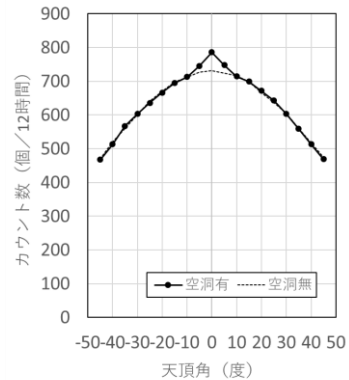


図-3 空洞の有無によるカウント数の違い

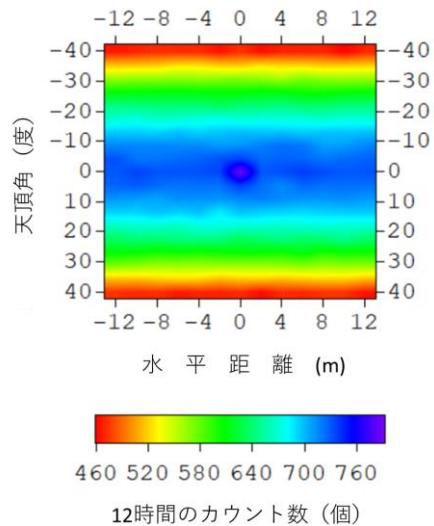


図-4 数値モデルによるカウント数分布

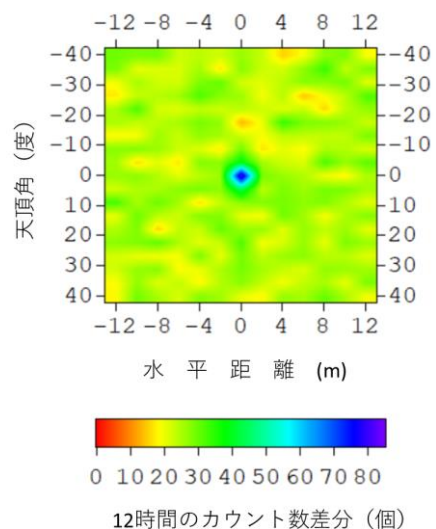


図-5 差分処理による空洞の可視化

4. 探査事例

数値シミュレーションと同じような条件での事例を次に示す。

図-6は計測を実施した実験サイトの概要である。上の図が平面図、下が断面図である。深さ約11mのところ地下の通路があり、その上に屈曲した別の通路がある。さらに下水管とマンホールが存在する。下の通路に検出器を置いて、50cm間隔で、一地点当たり15方向を計測した。図-7は横断方向の断面である。計測時の状況を図-8に示す。検出器は数値シミュレーションで検討したときと同じように直径24.5cm、検出器間の距離は1.4mである。検出器を複数配置することにより、同時に5方向の計測を行うことができる。

解析結果を図-9に示す。この解析では、カウント数をフラックスに換算し、平均密度を求めたものである。縦軸は天頂角、横軸は水平距離である。図の左側には屈曲した通路が低密度で表されている。右側にはマンホールと埋設管によると考えられる低密度領域も認められる。図の周囲に現れている高密度の部分は、周囲の建物などの影響が表れているものと考えられる。これが重なって、通路の下の方では見掛け上の密度が大きく計算されている。

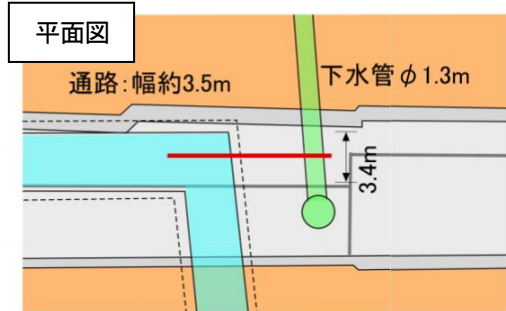


図-6 実験サイトの概要と測線配置図

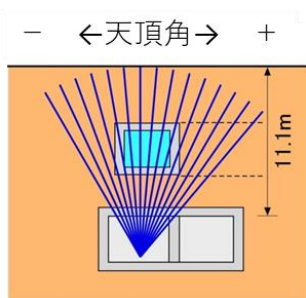


図-7 横断方向の断面

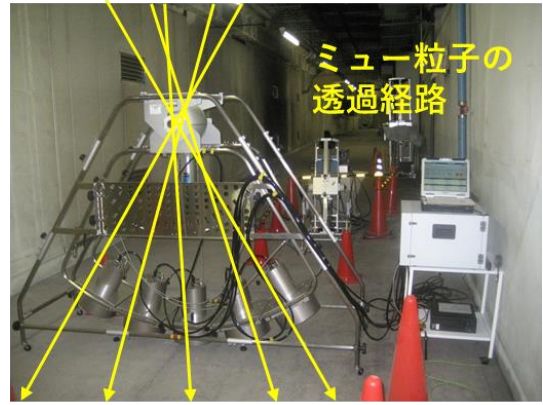


図-8 計測状況

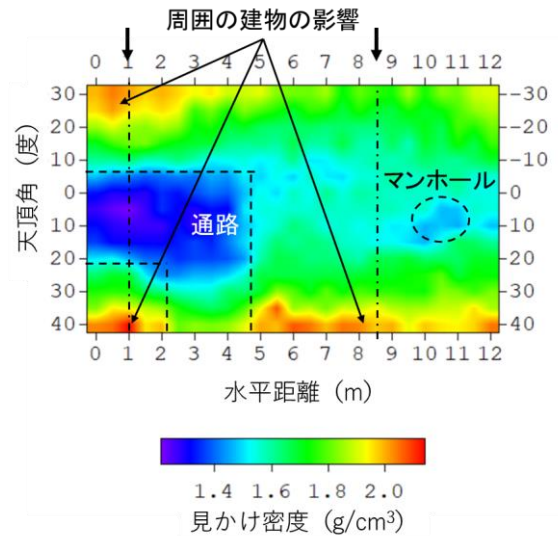


図-9 密度解析結果

図-10には、図-9で示した1m地点（通路有）と8.5m地点（通路無）のプロファイルを示す。通路が無いところのプロファイルは天頂角 -10° から $+20^{\circ}$ の範囲で密度 1.6g/cm^3 程度の一定値を示すのに対し、通路のあるところでは密度 1.4g/cm^3 以下の低密度を示し、通路の影響が明らかである。

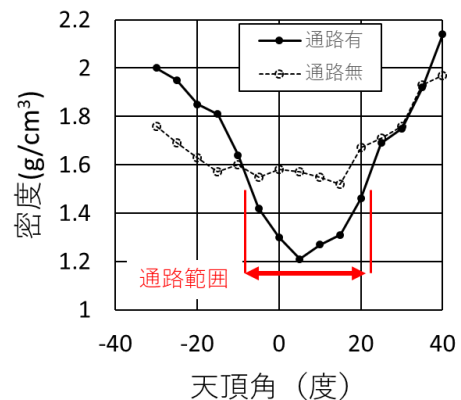


図-10 通路の有無による密度の違い

図-11は実験サイト付近、約1.5km四方の公表されている土質試験結果から得られた地盤の密度（単位体積重量）の値である。試料数は122、深さは2.3～28mまで（平均値11.7m）を使用した。平均値は1.61g/cm³であり、ミュオン粒子の計測から得られた密度に近い値となっている。

図-9に示したデータは横断方向の計測データであるが、縦断方向の計測や、複数の測線のデータを組み合わせて、トモグラフィ解析を行うことも可能である。

実際に文献2)では三次元トモグラフィ解析を行い、地盤の三次元密度構造を得ている。

ジオトモグラフィには弾性波や電気（比抵抗）あるいは電磁波を利用した方法が実用化されている。弾性波や電磁波などの波動を用いたジオトモグラフィの場合、物性値の異なる境界面では屈折や反射、あるいは散乱などを考慮する必要がある。しかし、宇宙線ミュオン粒子によるジオトモグラフィでは、物質中の散乱や屈折がほとんど生じないため、波線の経路を直線として近似でき、複雑な解析アルゴリズムを必要としない。

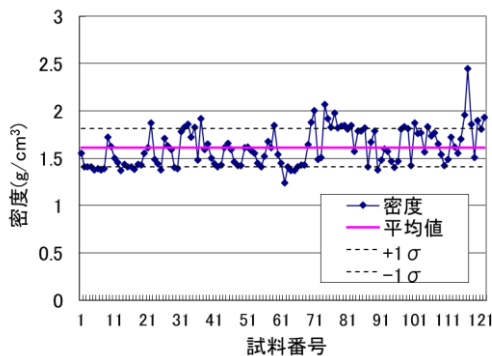


図-11 実験サイト付近の土質試験による密度（単位体積重量）

5. 今後の展望

これまでの物理探査では密度を直接解析する手法は重力探査しかなかった。検層では密度検層があるが、ボーリング孔の孔壁の周囲のみのデータしか得られず、地盤や土木構造物の可視化ができるほどではない。

宇宙線ミュオン粒子による探査では、密度そのものを高解像度で解析することができるため、応用範囲も広いと考えられる。

本稿で紹介した検出器はシンチレーション検出器と呼ばれるシンチレータと光電子増倍管を組み合わせた検出器であるが、他に原子核乾板を用いた検出方法もある。最近、ピラミッドの内部構造を推定するために宇宙線ミュオン粒子が利用され、話題となったのは記憶に新しい³⁾。

文献4)には、様々な宇宙線ミュオン粒子による探査事例の紹介が掲載されている。これによれば、城、高層ビル、地下鉄、採石場跡などの事例が報告されている。

宇宙線ミュオン粒子による探査は、上空から到来するものを利用するため、対象物の下に検出器を置く必要がある。都市部では地下に多数の空間があるため、これらを利用することができる。地下に空間が無くてもボーリング孔を設置できれば、孔内での計測も原理的に可能である。現時点で実用化はされていないが、現在開発を進めているところである。これが実現できれば適用範囲もより広がると考えられる。

謝辞：本稿で紹介した検出器は(一財)機械システム振興協会が(公財)JKKAから競輪の補助金の交付を受け、その財源をもとに(一財)エンジニアリング協会が受託した事業で製作したものです。本稿の作成にあたっては川崎地質株式会社の金沢淳・草茅太郎の両氏に有益な意見を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 鈴木敬一・金沢淳：宇宙線ミュオン粒子を利用した探査技術の応用地質分野への適用，応用地質，**57**，pp.266-276，2017.
- 2) 鈴木敬一：ミュオン粒子による土木物理探査の可能性，物理探査，**65**，pp.251-259，2012.
- 3) Morishima, K., *et al.* : Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons, *Nature*, **552**, 386-390, doi:10.1038/nature24647, 2017.
- 4) 鈴木敬一・草茅太郎：宇宙線ミュオン粒子による空洞探査，土と岩，**67**，pp.18-27，2019.

