

宇宙線ミュー粒子による 地盤・大型構造物可視化技術

鈴木 敬一¹

¹川崎地質株式会社 戦略企画本部.

社会インフラ施設の老朽化や過去の資源採掘跡の坑道の劣化などに伴う地盤の空洞化により、地表面における陥没事故が後を絶たない。極浅部の空洞については地中レーダが実用化され、陥没事故の未然防止に効果を上げている。しかし、地中レーダで効率良く探査できる深度は1~2m程度であり、それより深いところの探査については新たな探査手法の開発が望まれている。本稿では宇宙線ミュー粒子を用いた探査手法の原理と空洞痛いする数値シミュレーション結果を示し、今後の展望を示す。

キーワード：物理探査，宇宙線ミュー粒子，密度，地盤，空洞化

1. はじめに

地下にある社会インフラ施設の老朽化に伴う空洞化が問題となって久しい。その他にも過去の資源の採掘跡や戦時中の号空号などが原因となって生じる空洞化も問題となっている。これらの空洞を調べる方法に地中レーダがある。最近では車載型や車両牽引式などの方式も実用化され、成果を上げている。しかし、効率良く探査できるものの探査可能な深さが1~2m程度と浅いのが課題である。もう少し深くまで探査できる地中レーダも開発されているがそれでも10m以内の探査深さである。それより深いところの探査を行うには弾性波の反射法探査や電気探査、重力探査も適用される。しかし、都市部においては振動ノイズや電氣的ノイズにより必ずしも十分な成果が得られないことも多い。また、地中レーダ・反射法探査・電気探査では物性値として地盤の密度を測定しているわけではないため、必ずしも空洞を見つけられるとは限らない。重力探査では分解能は不足するなどの課題がある。宇宙線ミュー粒子を使うことにより、都市部特有のノイズに左右されず、これらの課題を解決することができると考えられる。都市部には地下に空間があるためそれらを利用することが可能である（図-1）。

2. 宇宙線ミュー粒子

宇宙線ミュー粒子は、宇宙に飛び交っている高エネルギーの素粒子を源とし、それが大気中に突入するときに発生する高エネルギーの素粒子の一種である。宇宙から到来する宇宙線を起源としているため宇宙線ミュー粒子と呼ばれる。物質との相互作用が適度にあり、地下深くにも透過する。透過する割合は、物質の密度と透過する

厚さによって異なるので、透過する割合を測定することにより、平均密度と鉛直方向の厚さを掛け合わせた量（これを面密度という）を求めることができる。この関係は湊の式²として知られている。

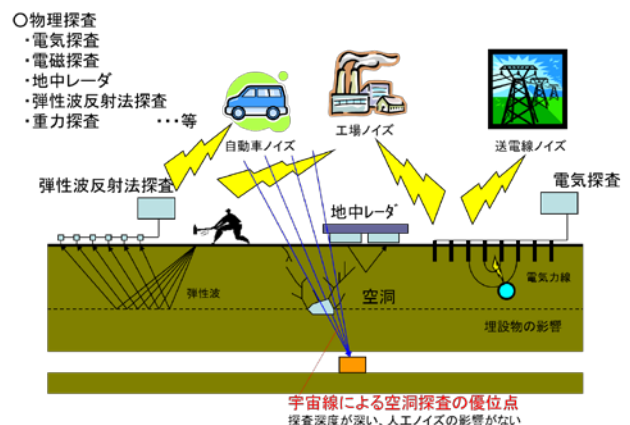


図-1 都市部における空洞探査の課題

3. 密度の求め方

湊の式はミュー粒子のフラックスと天頂角、面密度との関係を実験的に示した式である。フラックスとは単位時間・単位面積・単位立体角当たりのミュー粒子の到来する数である。天頂角とは鉛直真上を0度として、水平に近いほど数値が大きくなるように測定した角度である。図-2に湊の式から計算したフラックスと面密度の関係を示す。天頂角は0度から30度刻みに計算したが、天頂角90度は値が全て0になるため80度としてある。縦軸は面密度500hg/cm³まで表示してある。平均密度が2.0g/cm³であれば深さ250m、平均密度が2.5g/cm³であれば深さ200mとなる。

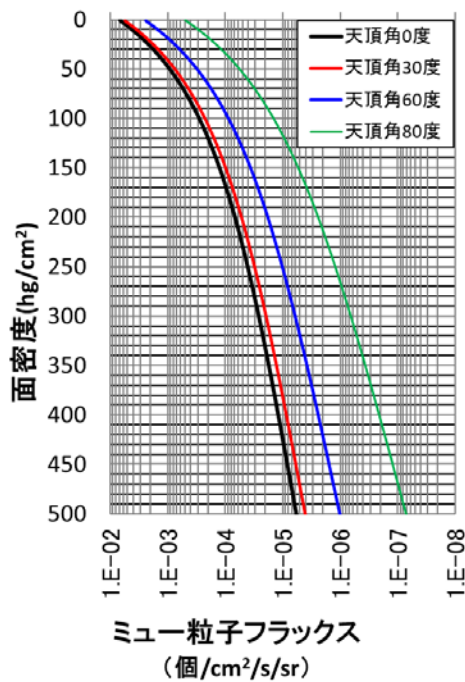


図-2 ミュー粒子フラックスと面密度との関係

ミュー粒子フラックスを測定して、面密度を図-2から求める。図面や測量などから土被り（鉛直方向の厚さ）がわかれば、得られた面密度を土被りで割れば経路に沿った平均密度を計算することができる。地盤を可視化するための方法のひとつとしてトモグラフィを応用した方法がある。図-3に示すように、地下のトンネルなどの場所から様々な天頂角に沿った経路のミュー粒子を測定する。例えば左側の地点Aにおいて天頂角0度から+65度まで5度刻みで測定する。次に右側の地点Bで天頂角0度から反対側に-65度まで5度刻みで測定する。天頂角は図の右側が正、左側を負とした。このときの土被りは20m、平均密度を 1.8g/cm^3 とし、空洞の直径を3m、空洞の中心の深さを10mとする。

このときの天頂角に対する地点AとBのカウント数（これを天頂角分布という）を図-4および図-5にそれぞれ示す。空洞がない場合の天頂角分布は破線で示した。地点Aでは天頂角+15度を中心にカウント数が大きくなっているところがあり、これが空洞により見かけの土被りが少なくなっていることを示している。地点Bでは天頂角-45度方向でカウント数の大きくなっているところが認められる。

ここでは2地点のみを示したが、多数の測定手で同様の測定を行うことにより、人体のCTスキャンと同じようにトモグラフィ解析が可能となり、地盤の密度分布を可視化することができる。

宇宙線ミュー粒子の到来方向を測定するには図-6に示すように同時計数法を用いる。同時計数法は、2つの検出器を同時に通過したミュー粒子だけをカウントすることで到来方向を知ることができる。

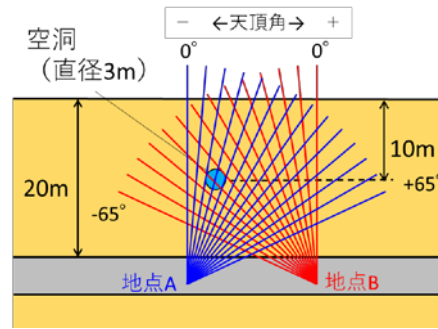


図-3 トモグラフィによる空洞探査方法

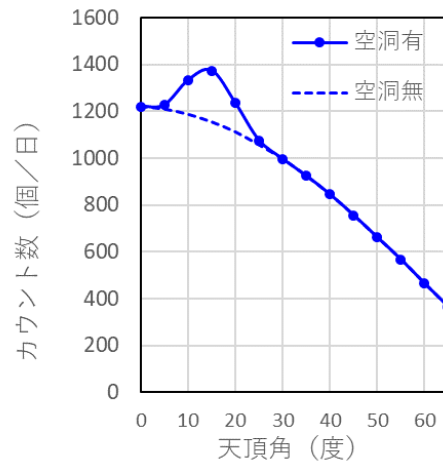


図-4 地点Aにおけるカウント数の天頂角分布

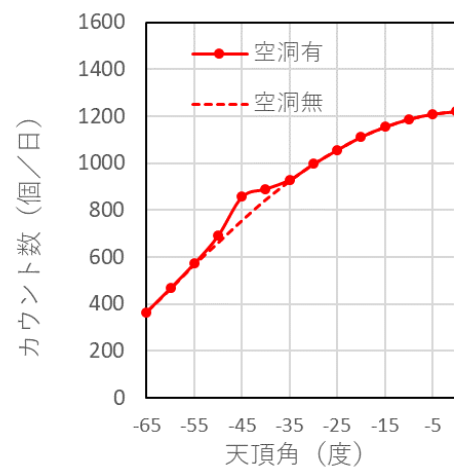


図-5 地点Bにおけるカウント数の天頂角分布

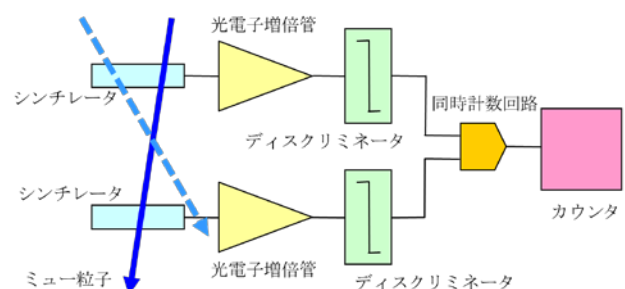


図-6 同時計数法による測定方法

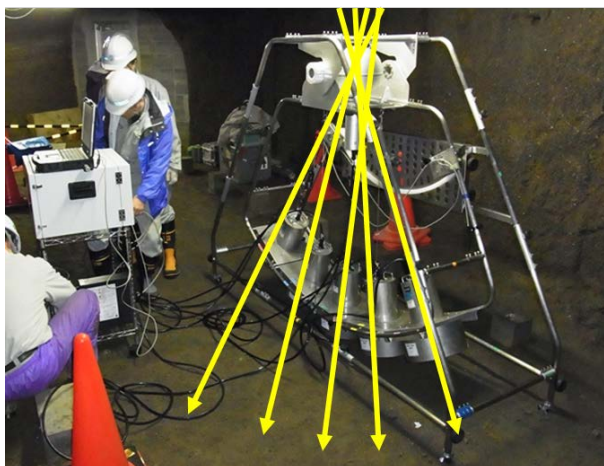


図-7 ミュー粒子検出器の例

図-7はミュー粒子検出器の例であるが、上にひとつの検出器を設置し、下方にも検出器（この場合は5台）を設置し、同時計数を行うことにより角度ごとの測定を行うことが可能である。

なお、ミュー粒子の検出方法は図-6に示すように、シンチレータと呼ばれるミュー粒子が通過すると発光する物質を用い、この発光を光電子増倍管で電気信号に変換したのち、環境中のガンマ線などによるノイズを除去するためのディスクリミネータを通して、同時計数により測定する。

4. 空洞に対するシミュレーション

令和2年10月東京都内の住宅地で直径5m、深さ5m程度の陥没事故が発生した。その直下では道路トンネルのシールド工事が行われていた。この工事と陥没事故との因果関係は現時点で不明であるが、このような空洞を陥没が発生する前に見つけることができれば、発注者と住民双方の安全・安心を確保することができる。

報道された情報などを元に図-8に示すような数値モデルを設定した。土被りを47m、空洞の直径を5mの球体、空洞中心の深さを25m、地盤の平均密度を $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ とした。測定は横断方向に展開し、天頂角 -40 度から $+40$ 度まで5度刻みとした。測定間隔は2mである。

図-8は空洞直下と空洞がない場所での天頂角分布である。空洞がある場合とない場合で明瞭な差が出ている。誤差は4%程度であるが、これに必要な計測時間は1地点当たり48時間である。測定時間を長くすれば密度の精度も向上する²⁾ことが知られている。

トンネルの横断方向に展開し、これを2m間隔で移動させて測定すると図-10のようなプロファイルが得られる。これは均質な場合との差を求めただけであり、特に解析をしなくても可視化ができることを示している。

5. 探査事例

探査事例についてはこれまで様々な成果が報告されている。地盤の空洞探査だけでなく大型構造物、例えば原

子炉やピラミッドである。図-11にはこれまで適用された事例と、今後適用が期待される分野を示したものである。講演の中ではこれらのいくつかを紹介する予定である。

これらの詳細については文献2), 3), 4)などで紹介されているので参照されたい。最近の事例としては河川堤防の内部構造を探索する試み⁵⁾が報告されている。

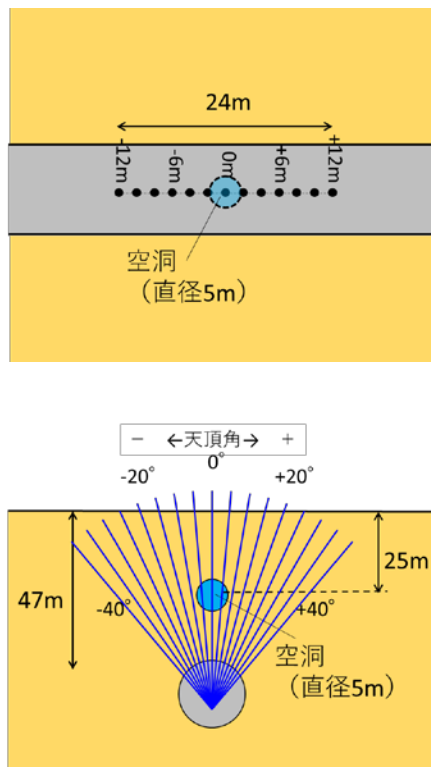


図-8 シミュレーションのための数値モデル（上：平面図，下：断面図（トンネル横断方向））

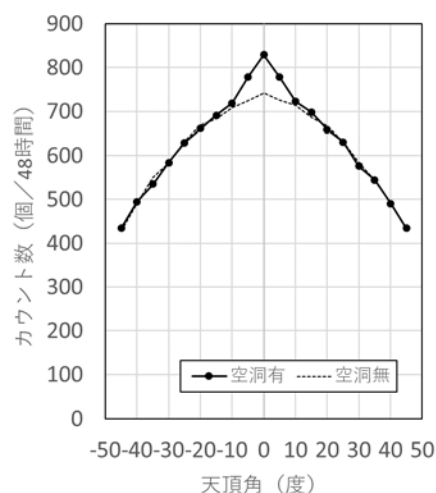


図-9 空洞中心直下と空洞の無い場所とのカウント数の比較

6. まとめと今後の課題

宇宙線ミュオン粒子を利用した空洞探査原理について紹介した。これまで様々な適用実績があるが、原理的に可能であっても実用化までにはいくつかの課題がある。地表に到来するミュオン粒子は一定の量であり、これをコントロールすることはできない。できるだけ広範囲を効率良く探査するには、検出器の数を増やすしかない。そのため安価な検出器の開発が必要である。それを解決する方法として原子核乾板や半導体と光ファイバを利用した検出器などの研究開発を行っている。また、検出器の移動を伴う場合には、検出器をロボット化するなどの方策も必要である。今後、それらの課題を解決することで、実用化が図れると考えられる。また、地下に検出器を設置する場所がない場合はボーリング孔を利用することも考えられ、現在研究を進めているところである。

図-10 天頂角分布の測線方向プロファイル

参考文献

- 1) 湊 進：宇宙線透視像，放射線，**19**，pp.49-56，1992.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 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.
- 5) 福田竜平・山田 正・鈴木敬一・草茅太郎：河川堤防の内部構造可視化へ向けたミュオン粒子観測，令和2年度土木学会全国大会講演論文集，VI-313，2020.

図-11 探査事例の適用実績と今後の展開