

ミュー粒子を利用した探査技術による土構造物の内部構造可視化 Visualization of internal soil structure in levees by exploration using cosmic-ray muon

19N3100034L 福田 竜平 (河川・水文研究室)
Ryuhei FUKUDA/ River Engineering and Hydrology Lab.

Key Words : levee ,muon, detector,tomography, visualization

1. はじめに

近年、豪雨災害や地震が頻発化しており、土木構造物の維持管理が重要になってきている。また、現存する多くの土木構造物は高度経済成長期に集中的に整備されたもので老朽化が進んでいる。土木構造物の耐用年数がおよそ 50 年と言われているなか、今後より多くの土木構造物の劣化が懸念される。よって老朽化の進む土木構造物を戦略的に維持管理する手法が求められている。土木構造物の維持管理において、その内部状況を明らかにしておくことは非常に重要である。構造物や地盤の内部を測定する既存の技術として物理探査がある。浅い地下の探査には地中レーダ探査がよく用いられる。物理探査の中でも作業性が良く、分解能が 20~30cm と非常に高いのが特徴である。しかし、探査深度が 2m 程度と短いのが欠点である。電気探査での調査では、地下水よりも上か下かで比抵抗が変化する。また、地盤間隙中の物質が空気と水の場合で比抵抗のあらわれ方が異なり、解釈が難しい。以上のように物理探査では、一つの探査手法で全てを明らかにできないため、目的や探査深さ、物性等において適宜使い分ける必要がある。

また、物理探査技術では、探査深度や分解能が十分でない場合がある。従来の物理探査技術では、数十mの探査深度でかつ数十 cm の分解能を実現できる探査手法は確立されておらず、探査空白域されている。この探査空白域を補完できる探査技術として、ミュー粒子を利用した探査技術が注目されている。

本研究の目的は、ミュー粒子を利用した探査技術を、河川堤防をはじめとした土木構造物へ適用することである。本稿では、ミュー粒子を利用した探査技術について紹介し、河川堤防を対象にミュー粒子を利用した探査を実施した事例について示す。

2. ミュー粒子

ミュー粒子は、高エネルギーの宇宙線が大気中の原子核に衝突することで発生する素粒子の1つである。素粒子は物質を構成する粒子の最小単位であると考えられている。現在の物理学では図-1 に示す素粒子の標準模型

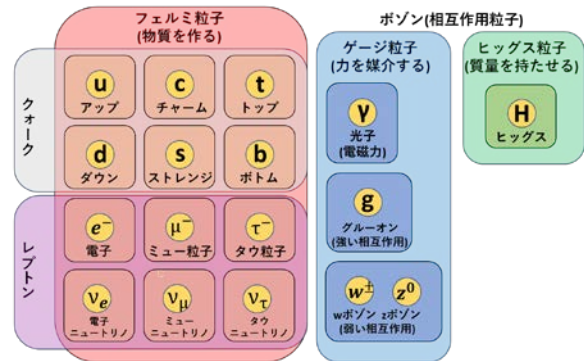


図-1 素粒子の標準模型

が考案されている。素粒子は物質を構成するフェルミ粒子、力を媒介するゲージ粒子、物体に質量を与えるヒッグス粒子と大きく分けられる。フェルミ粒子は物質粒子とも呼ばれ、文字通り物質を構成する素粒子群である。フェルミ粒子の中でよく知られている電子は、レプトンと呼ばれるもので、ミュー粒子も同じレプトンに属する。レプトンは強い相互作用をしないため、透過率が非常に高い。

ミュー粒子は電子の約 200 倍の質量と同じ電荷をもっており、寿命は約 2μ 秒である²⁾。宇宙線は非常に高速で飛来するため地表へ到達するだろうと思われるかもしれないが、計算してみると到達しないことがわかる。

仮にミュー粒子が光速で動くとしても、 $2\mu\text{s} \times 3 \times 10^8\text{m/s} = 600\text{m}$ となり、10km 以上ある大気を通することはできない。しかし、アインシュタインの特殊相対性

理論による高速で移動する座標系においては、物体間の距離が縮むローレンツ収縮が起こる。この座標系では距離が相対的に縮むため、その分時間が遅れないとつじつまが合わない。移動する座標系の時間 t' を求めるにあたり、高速を $c(=2.99 \times 10^8\text{m/s})$ 、物体の移動速度を v とし、静止座標の時間を t とすれば、

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (1)$$

となる。

ミュー粒子が光速の99%で移動すると仮定し、 $t=2 \times 10^6\text{s}$ を上式に代入すると $t'=10^6\text{s}$ となる。従って移動で

きる距離は43.7kmとなって、地表まで到達できることがわかる。

3. ミュー粒子による探査原理

宇宙線ミュー粒子を利用した探査の原理は、ミュー粒子の検出器をトンネル等の地下空間に置き、天頂角ごとにミュー粒子の数を計測し、その場所までの地盤の厚さから、それぞれの角度方向の面密度（密度×高さ）を計算するというものである。

ミュー粒子は常にほぼ一定の量が地表に到達しているため、地表が水平であり地盤の密度が一定であれば、透過距離が大きくなるほど地盤による吸収量も大きくなるため、検出器まで到達するミュー粒子の数は少なくなる。そのため、同じ深さでの計測においては、天頂角が大きくなるほどミュー粒子数は少なくなる。

一方、地盤の密度が一定ではなく、密度が小さい領域が存在する場合、そこを通過する測線では、地盤による吸収量が少なくなるため、検出器に到達するミュー粒子数が増えることになる。以上のように、天頂角ごとにミュー粒子の計測を行い、計数結果の天頂角分布を得ることで地盤の密度分布を求めることができる。

面密度とミュー粒子数の関係について、2つの実験式が提案されている。湊の式²⁾と三宅の式³⁾である。いま面密度を h [hg/cm²]、天頂角を θ とすると、単位時間、単位面積、単位立体角あたりのミュー粒子数(ミュー粒子フラックス)は、湊の式では

$$I_{\mu}(h, \theta) = I_{\mu 00} \cos^n \theta \cdot \ln \left(-\frac{h}{\Lambda(h)} \right) \quad (2)$$

となる。ただし、 $\Lambda(h)$ 、 n はそれぞれ次式で表される。

$$\Lambda(h) = A + Bh + Ch^2$$

$$n = \alpha + \beta h$$

$I_{\mu 00}=0.00723$ [cm²/s/sr], $A=17.61$ [cm³/hg], $B=0.1404$ [cm⁴/hg²],

$C=-7.06910^{-5}$ [cm⁶/hg⁴], $\alpha=1.495$, $\beta=0.02018$ [cm²/hg].

(2)式を用いると、ミュー粒子の入射角度が既知ならば、面密度 h が計算できる。

一方三宅の式では、

$$I_{\mu}(h, \theta) = \frac{A}{h+H} (h \sec \theta + a)^{-\alpha} \cdot \exp(-\beta h \sec \theta) \quad (3)$$

となる。ただし、

$A=174$ [cm²/s/sr], $H=400$ [hg/cm²], $a=11$ [hg/cm²], $\alpha=1.53$,

$\beta=8 \times 10^{-4}$ [cm²/hg]

である。

(2)式および(3)式から求められるミュー粒子フラックスは、面密度 h に対して同じような値を示すが、面密度 10hg/cm²以上の計算には三宅の式が、それ以下では湊の式がよく合う⁴⁾。このため本研究では湊の式を用いている。

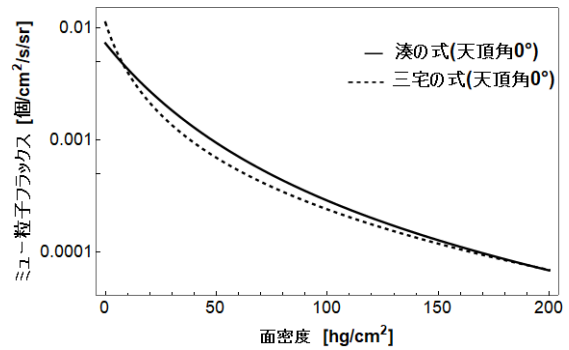


図-2 ミュー粒子フラックスと面密度の関係

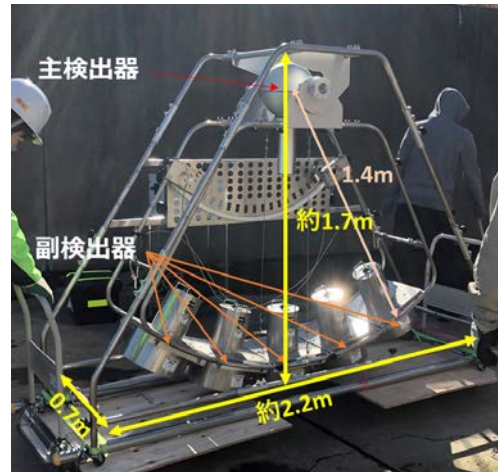


写真-1 ミュー粒子マルチ検出器

4. 統計的分布

宇宙線の発生はポアソン過程というランダムな現象に従うと仮定でき、同じ場所、同じ計測期間でも得られるミュー粒子数にはばらつきがある。放射線計測において、ミュー粒子フラックスから面密度を計算するには、統計的に十分な精度が必要であるミュー粒子が N 個計測されたとき、計数 N の標準偏差 σ と変動係数 ε はそれぞれ以下の式で表せる⁵⁾。

$$\sigma = \sqrt{N} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{N}}{N} \times 100(\%) \quad (5)$$

例えば、ミュー粒子を 100 個計測したときの変動係数は約 10%、1000 個のときは約 3%、10000 個なら約 1% となる。

5. 河川堤防におけるミュー粒子観測

本章では、ミュー粒子を利用した探査の河川堤防への適用へ向けて実施した、河川堤防でのミュー粒子観測について示す。

(1) 観測概要

ミュー粒子の検出器は鈴木他が開発したマルチ検出器⁶⁾を用いた。写真-1にマルチ検出器の写真を示す。マルチ検出器は球形の主検出器と5つの副検出器で構成されており、同時に5方向から飛来するミュー粒子を計測

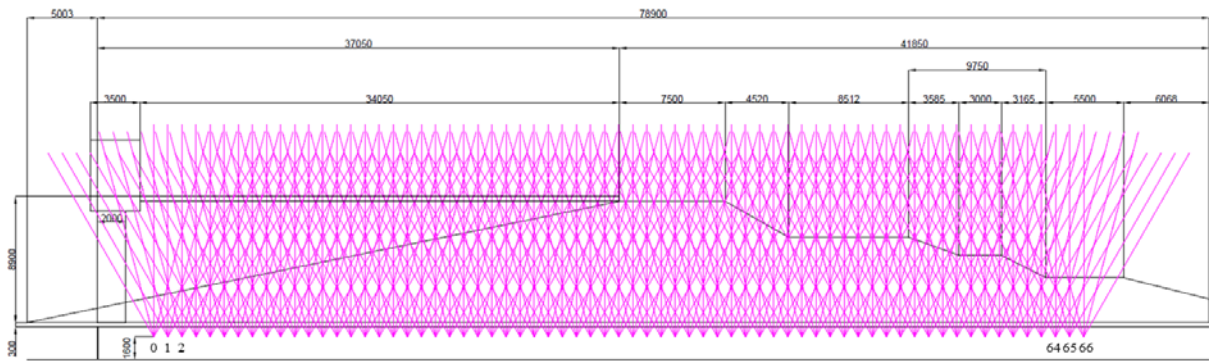


図-3 観測場の断面図と波線図

することができる。いずれの副検出器から見ても主検出器の断面積が同じになるように主検出器は球形となっている。いずれの検出器も直径は24.5cm、主検出器と副検出器の間隔は1.4mであり、主検出器の中心と5つの副検出器との角度は15°ずつである。図-3に観測場の河川堤防の断面図と波線を示す。波線は主検出器と副検出器の中心同士を結んだ線と定義する。観測場の堤防は天端高約9mで、全長およそ80mの樋管が通っている。測点の間隔は1.0mであり、全67地点(測点番号0~66)でミュオン粒子観測を実施した。計測時間は変動係数を考慮して奇数の測点で8時間、偶数の測点で15時間とした。

(2) 観測結果

図-4に各測点におけるミュオン粒子の計数率(1時間当たりのミュオン粒子計数)の結果を示す。同図より、表のりでは徐々に計数率が減少し、天端である図面中央でミュオン粒子の計数率が最小をむかえ、裏のりで徐々に増加している。図-5に計数率をもとに(2)式を用いて計算した面密度を示す。図-5より、表のりでは徐々に面密度が増加し、裏のりでは徐々に面密度の値が小さくなる。図-6に、面密度の移動平均を示す。同図より、いずれの波線でも裏のりの小段が明瞭に見えている。これらのデータから、ミュオン粒子を利用した探査技術により、河川堤防の幾何形状を捉えられたといえる。

6. トモグラフィ解析による河川堤防の密度分布の可視化

ミュオン粒子観測で得たデータをもとに、トモグラフィ解析を行い河川堤防の密度分布を可視化した結果について示す。9m×66mの長方形領域を1m四方の正方形の要素で分割した。波線が要素の中心を通るように領域を設定した。逆解析手法には非線形最小二乗法を用いた。密度の初期値には、地盤には1.6g/cm³を、空気には0.0g/cm³をそれぞれ与えた。

図-7にミュオン粒子によるトモグラフィ解析による可視化結果を示す。縦9m、横66mの長方形領域のうち、堤防地盤領域の密度分布を示している。同図より、地盤

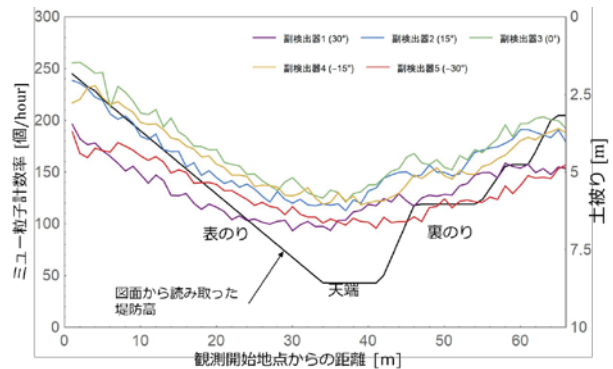


図-4 ミュオン粒子の計数率

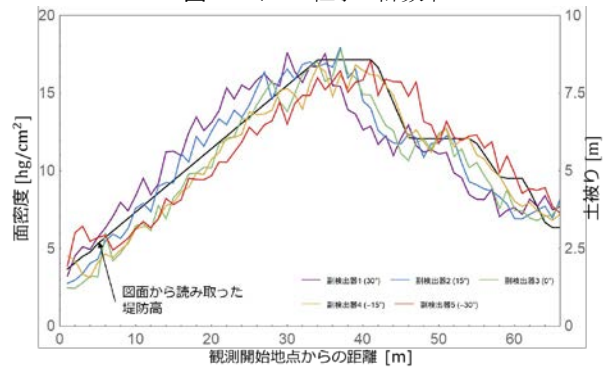


図-5 計数率から求めた面密度

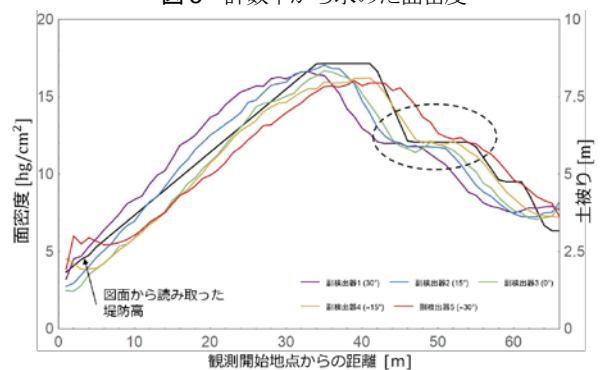


図-6 面密度の移動平均

の密度は1.5~1.6g/cm³を示している。空洞のような密度が著しく小さい領域は見られない。中央下部には、周りに比べて高密度な領域が見られる。これは堤防を通る樋管の壁材であるコンクリートの影響だと思われる。

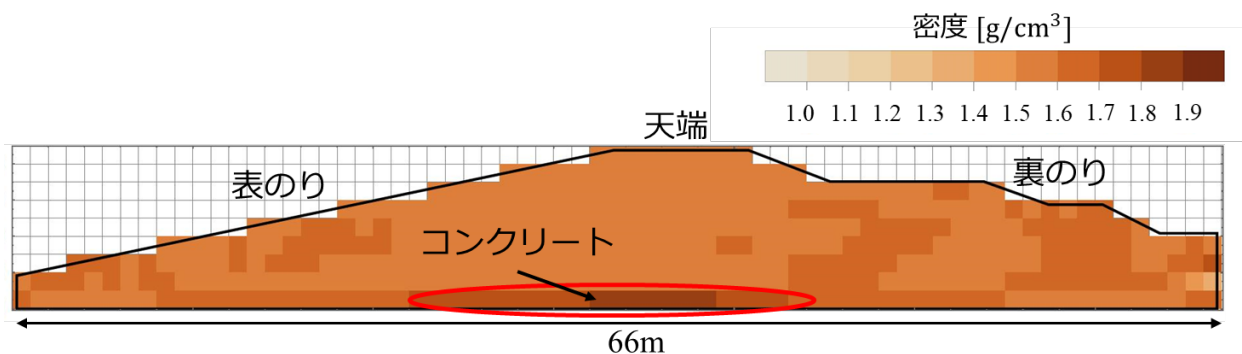


図-7 トモグラフィ解析による河川堤防の密度分布の解析結果

図-3より樋管の壁(コンクリート)の厚さは30cmである。高密度領域の要素の70%が地盤、30%が密度 2.3g/cm^3 のコンクリート³⁾であるとして計算すると、要素の平均密度は 1.81g/cm^3 となり、解析結果と計算値が合う。

7. 半導体小型検出器

本研究で用いたミュオン粒子マルチ検出器を使用するためには、地下にトンネルのような大きな空間が必要である。樋管のような地下空間のある河川堤防は限られており、適用範囲を広げるためには、地下空間がないもしくは小さい場所でもミュオン粒子観測を行うために、検出器の小型化が課題である。この課題を解決するために、シンチレーションファイバと光電子半導体を用いた半導体小型検出器を開発中である。写真-2に半導体小型検出器の試作機の写真を示す。

半導体小型検出器の実用化へ向けて、試作機の精度検証実験を実施中である。写真-3に実験の様子を示す。半径0.6m、高さ0.75mの土槽の下に半導体小型検出器を設置し、ミュオン粒子を計測する。乾燥状態、半飽和状態、飽和状態の3つの土槽状態でそれぞれ計測を実施し、結果を比較する。半飽和状態は土槽の半分の高さまで注水した状態、飽和状態は満タンまで注水した状態と定義する。土槽の材料には珪砂7号を用いた。なお、乾燥時の間隙率は40%である。

8. まとめ

ミュオン粒子を利用した探査技術の土木構造物への適用へ向けて、河川堤防にてミュオン粒子計測を実施した。計数率のデータから、河川堤防の幾何形状を捉えることができた。計測データをもとに、トモグラフィ解析を行った。1m×1mの分解能で河川堤防の密度分布を可視化することができた。空洞のような密度が極端に小さい領域は見られなかった。コンクリートと思われる高密度領域を確認できた。以上より、ミュオン粒子を利用した探査により、土木構造物の内部を可視化することができた。また、適用範囲を広げるために、半導体小型検出器を開発中である。半導体小型検出器の試作



写真-2 半導体小型検出器の試作機



写真-3 精度検証実験に用いる土槽

機を用いた精度検証実験を実施中である。

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, 第57巻, 2012
- 2) 湊進: 宇宙線透視像, 放射線, 第19巻, 第1号, pp.49-56, 1992
- 3) 三宅三郎: 地下深部における宇宙線研究, 日本物理学会誌, 第34巻, 第4号, pp.292-301, 1979
- 4) 湊進: 地下宇宙線強度の経験式について, 方地研特別寄稿シリーズ, SCS-0121.
- 5) 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, 第65巻, 第4号, pp.251-259, 2017
- 6) 鈴木敬一, 大沼寛, 奥村忠彦, 宮川彰彦: 宇宙線ミュオン粒子を利用したマルチ計測器と三次元トモグラフィ技術の開発, 平成23年度土木学会全国大会第66回年次学術講演論文集, 2011