

16. ミュー粒子を利用した探査技術の河川堤防への適用へ向けた考察

福田 竜平^{1*}・合田 明宏^{2*}・山田 正^{3*}

¹中央大学大学院 理工学研究科 都市人間環境学専攻 (〒112-8551東京都文京区春日1-13-27)

²中央大学大学院 理工学研究科 都市人間環境学専攻 (〒112-8551東京都文京区春日1-13-27)

³中央大学 理工学部 都市環境学科 (〒112-8551東京都文京区春日1-13-27)

* E-mail: a15.a6aa@g.chuo-u.ac.jp

気候変動による降雨の極端化などにより、河川災害が多発している。河川災害を予防するためには、堤防内部の変状を把握することが重要である。河川堤防の内部状態や弱点箇所を調査するため、電気探査と表面波探査による統合物理探査が実施されているが、緩やかに進行する堤防内部の変状を連続把握する技術としては不向きである。一方、宇宙線ミュー粒子による探査は、ミュー粒子の検出器を設置さえすれば、構造物の内部をリアルタイムでモニタリングできる。しかし従来の検出器はトンネルほどの地下空間を必要とする規模であり、河川堤防に適用するのは難しい。そこで光半導体とシンチレーションファイバを用いて小型化した新型検出器を開発中である。本研究ではミュー粒子による探査技術を紹介するとともに、河川堤防の新たな物理探査として適用できる可能性について示す。

Key Words : Cosmic-ray muon, Radiography, Levee

1. はじめに

近年、気候変動による降雨の極端化などにより、甚大な河川災害が頻発している。河川災害は、越流によるものと浸透によるものに大別される。それぞれの予防には、河川堤防の幾何形状の空間的な連続把握、堤防の内部状態の空間的な連続把握が重要である。

現在、河川堤防の内部状況や弱点箇所を調べる方法として、統合物理探査が実施されている。統合物理探査とは、複数の物理探査を実施して異なる物性値を求め、既存資料も加味して総合的に解析を行う手法である。河川堤防では主に、電気探査と表面波探査の統合物理探査が採用されている。しかし、電気探査や表面波探査では、堤防内部の時間的な変状には対応できていない。

一方、宇宙線ミュー粒子を利用した探査が、原子炉の内部を透視できたとして、構造物の内部透視技術として注目されている。ミュー粒子による探査は、振動や電気の影響を受けない、リアルタイムで観測できる、人手を必要としない、密度分布を知ることができるといった特徴があり、現技術する可能性を秘めている。

本稿では、宇宙線ミュー粒子を利用した探査技術を紹

介するとともに、河川堤防をはじめとした土木構造物の新たな物理探査技術として適用できる可能性を示す。

2. 河川堤防における物理探査

河川堤防の内部変状や弱点箇所を調査するために、電気探査と表面波探査の統合物理探査が必死されている。

電気探査は、地盤の電氣的性質を測定することで、地盤状況を把握する物理探査手法である。地表に設置した一対の電流電極から電流を流し、異なる一対の電位電極の電位差を測定することによって、地下の比抵抗値分布を推定できる。比抵抗値は、岩石の構成鉱物の種類、間隙率、飽和度、温度に依存しているため、比抵抗値分布から土質構造を推定することができる。また、比抵抗値と透水係数の相関から、地盤の透水性を評価できる。

表面波探査は、地表面を伝わる表面波（レイリー波）を測定・解析することで、地盤のS波速度分布を求める物理探査手法である。S波速度はN値と相関があり、地盤の硬さを示す指標として扱われるため、S波速度分布

から堤防の緩み箇所を推定することができる。

統合物理探査の結果から堤防の弱点箇所を特定する際の課題として、観測値の妥当性と、閾値の設定が挙げられる。測定したデータの妥当性を精査する必要がある。また、対象河川の特長、既存の物性値データや土質の特徴を考慮し、目的にあった閾値を設定することが重要とされている。よって、統合物理探査で得られる比抵抗値とS波速度が、従来、対象河川の安全性評価に用いられてきた指標とどのような関連性があるのか見出す必要がある。また、統合物理探査は特別点検として実施されるのみであり、堤防内部の時間的な変状には対応しきれていない。

2. 宇宙線ミュオン粒子

ミュオン粒子は、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ひとつである。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おり、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に大きく分けられる。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最もよく知られている電子は、レプトンという素粒子群に分類されており、ミュオン粒子も同じレプトンである。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。

宇宙線は宇宙空間から飛来する高エネルギーの粒子であり、これを一次宇宙線という。一次宇宙線は大気中の分子や原子核に衝突し、様々な粒子および素粒子を発生させる。発生した新たな粒子を二次宇宙線というが、そのほとんどは寿命が短いため、すぐに別の粒子に壊変するもしくは、待機中に吸収される。しかしミュオン粒子は壊変や吸収による減衰が少ないため、地下数kmまで到達する。

3. ミュオン粒子による探査原理

宇宙線ミュオン粒子を利用した探査の原理は、ミュオン粒子の検出器をトンネル等の地下空間に置き、角度ごとにミュオン粒子の数を計測し、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²⁾。このときの角度は天頂角といい、鉛直方向を0°とし、水平に近くなるにつれて数値が大きくなる方向として定義される。

宇宙線ミュオン粒子は、常にほぼ一定の量が地表に到達している。そのため地表面が水平であり地盤の密度が一

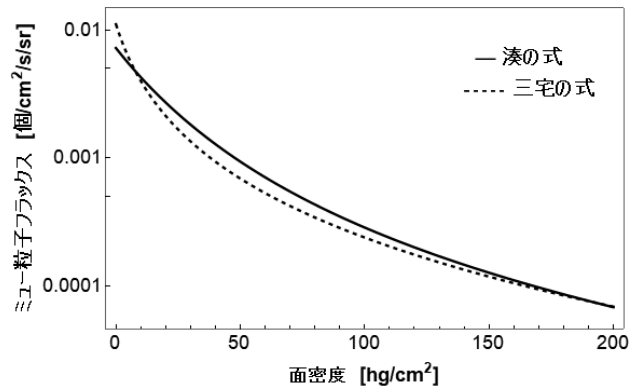


図-1 鉛直方向のミュオン粒子フラックスと面密度の関係

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り、検出器まで到達するミュオン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オン粒子の計数は少なくなる。

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オン粒子数が増えることになる。以上のように、天頂角ごとにミュオン粒子の計測を行い、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。

面密度とミュオン粒子フラックス（単位時間・単位面積・単位立体角あたりのミュオン粒子数）の関係について、2つの実験式が提案されている。湊の式³⁾と三宅の式⁴⁾である。いま面密度を $h(\text{hg}/\text{cm}^2)$ 、天頂角 θ とすると、ミュオン粒子フラックスは、湊の式では

$$I_{\mu}(h, 0) = I_{\mu 00} \cos^n \theta \cdot \ln \left(-\frac{h}{\Lambda(h)} \right) \quad (1)$$

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

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

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

$$I_{\mu 00} = 0.00723(\text{/cm}^2/\text{s/sr}), A = 17.16(\text{cm}^3/\text{hg}),$$

$$B = 0.1404(\text{cm}^4/\text{hg}^2), C = -7.069 \times 10^{-5}(\text{cm}^6/\text{hg}^3), \alpha = 1.495, \beta = 0.02018(\text{cm}^2/\text{hg})$$

$$/ \text{hg}^3), \alpha = 1.495, \beta = 0.02018(\text{cm}^2/\text{hg})$$

一方、三宅の式では、

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

となる。ただし、

$$A = 174(\text{/cm}^2/\text{s/sr}), H = 400(\text{hg}/\text{cm}^2),$$

$$a = 11(\text{hg}/\text{cm}^2), \alpha = 1.53, \beta = 8 \times 10^{-4}(\text{cm}^2/\text{hg})$$

である。

(1)式及び(2)式は、どちらも入射する角度と面密度に応じて、指数関数的にミュー粒子フラックスが減少することを示している。ミュー粒子の入射角度がわかれば、(1)式または(2)式を用いることで、面密度を計算できる。透過距離は測量や図面から得ることができるため、面密度を透過距離で除することで、透過経路の平均密度を求めることができる。(1)式、(2)式から求められるミュー粒子フラックスは、同じ面密度に対してほぼ同じような値となるが、浅い地下では湊の式が、地下数百m以深では三宅の式がよく合う⁹⁾。

4. ミュー粒子の検出原理

宇宙線ミュー粒子は放射線と同様の方法で検出できる。それはシンチレータという、荷電粒子が通過すると光を発する物質を用いる方法である。シンチレータは、放射性物質の分析における、ガンマ線の検出によく用いられている。

シンチレータを用いる方法では、シンチレータと光電子倍增管を組み合わせたものを、検出器と呼ぶ。シンチレータとして機能する物質は多々存在するが、重量や加工の容易さから、プラスチックを利用することが多い。シンチレータから発せられた光は、光電子倍增管によって電気信号に変換され、それをパルス信号として読み取ることによってミュー粒子をカウントする。

同時計数法という計測方法がある。二つのシンチレータを同時に通過したミュー粒子のみをカウントする方法である。二つのシンチレータによって作られた立体角空間の範囲のミュー粒子フラックスを計測するため、その方向の平均密度を計算することができる。

また、原子核乾板を用いる検出方法もある。原子核乾板は、写真フィルム的一种であり、臭化銀結晶により素粒子の軌跡を3次元的に記録・定着することにより可視化する。それを顕微鏡システムで読み取りデジタルデータ化することで、ミュー粒子の角度分布を得ることが出来る。ミュー粒子以外の宇宙線（ノイズ粒子）の分別については、複数の乾板の間に鉛板を挟み込み、散乱を誘発することで、ノイズ粒子をほぼ完全に区別することができる。原子核乾板を用いる利点としては、電源が不要である、軽量である、高い防塵性・防水性を持つ、高解像度であることが挙げられる。欠点は、データを得るのに現像工程が伴うため、リアルタイム性がない点である。

5. 統計的分布

宇宙線の計数は、統計的な分布をもつ。これは宇宙線の発生が、放射性壊変と同様、時間的にランダムな現象であるためである。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を必要とする。

宇宙線の計数は、ポアソン分布に従うとされている。ミュー粒子の計数をNとすると、その標準偏差 σ は次式で表される。

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

従って、計数Nの変動係数は、

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{N}}{N} \times 100(\%) \quad (4)$$

となる。ミュー粒子フラックスから面密度を計算する際は、変動係数を小さくし、精度を良くすることが不可欠である。

6. 適用事例

ミュー粒子を利用した探査の適用事例を紹介する。

(1) 火山の内部構造透視

2006年、原子核乾板を用いたミュー粒子探査（ミュオグラフィ）によって、浅間山内部構造が透視された⁹⁾。この観測によって、2004年に噴出したマグマが火口底に固結した様子が高密度の領域として発見されている。加えて、マグマ流路上部に溜まったマグマが吹き飛ぶ現象も確認された。ミュー粒子による探査は、火山の噴火現象の解明に大きく貢献する可能性がある。

(2) 3次元トモグラフィ

ミュー粒子による探査を複数地点で行い、天頂角ごとのデータを得ることで、水平方向、高さ方向、奥行き方向それぞれの密度分布を得られる、3次元トモグラフィによる可視化が可能である。ミュー粒子は、物質を透過する際にクーロン散乱によってわずかに軌道を曲げられるが、分解能の観点からは無視できる程度のものであり、ほとんど直進している。そのため、屈折を考慮する必要がなく、トモグラフィ解析の精度が良い⁷⁾。また、放射線や宇宙線による可視化をラジオグラフィという。

(3) 原子炉内部状況の可視化

福島第一原子力発電所の燃料デブリの状況把握へ向けた炉内可視化の技術開発として、同時計数法によるミュオン粒子探査が実施された⁸⁾。結果、原子炉圧力容器および原子炉格納容器の外側から、炉心および炉内構造物の可視化に成功した。

7. 河川堤防への適用へ向けた課題に対する検討

既存のミュオン粒子による探査を河川堤防の内部状態の観測に適用するには、いくつかの課題がある

河川堤防の内部状態を観測するには、検出器を堤体深部へ設置する必要がある。そのため、検出器は堤体を損傷させない程度の規模でなければならない。しかし、既存のシンチレータ型検出器は、人間の大人ほどの高さがあり、可搬性に欠ける。また、原子核乾板は、高解像度、電源不要という利点を有しているものの、データを取得するためには原子核乾板自体を回収する必要がある、連続把握の観測には向いていない。

ミュオン粒子による探査の空間解像度は、ミュオン粒子の計数によって決まる。つまり解像度は、同じ計測時間の場合、検出器の感光面積が大きいほど向上し、同じ感光面積の検出器を用いる場合、計測時間が長いほど向上する。既存のミュオン粒子による探査では、十分な解像度を得るのに、数日から数週間の計測時間を要する。河川堤防の内部状態が緩やかに変化し続けていることを考慮すれば、計測時間の短縮は解決すべき課題である。

これらの課題を解決するために、新型検出器を開発中である。新型検出器は、ミュオン粒子の検出部にシンチレーションファイバを用いることで、可搬性、形状の自由度を向上する。光電子変換部は、光半導体であるMPPC (Multi-Pixel Photon Counter) へ置換することで、受光効率を向上させ、計測時間の縮減が見込める。

8. 数値実験

新型検出器の感光面積を検討するため、数値実験を行った。土被りが5mにおける、感光面積と計測時間の関係を示す。ここでの計測時間は、ミュオン粒子を必要数捉えるまでの時間と定義しており、ミュオン粒子の必要数は、変動係数を考慮して10000個とした。

図-2より、感光面積が大きいほど、計測時間が短くなることがわかる。検出器が一辺4cmの正方形である場合、計測時間は約15時間という結果となった。

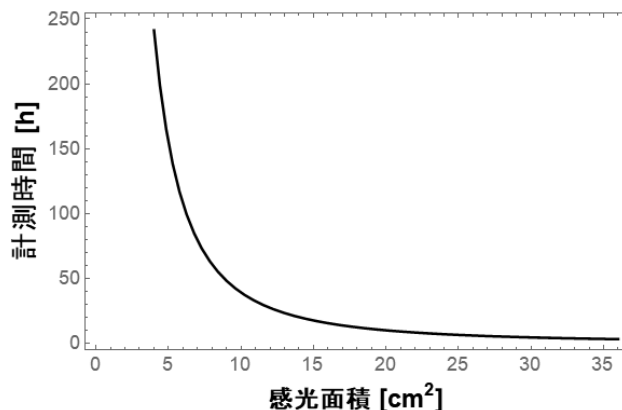


図-2 計測時間と感光面積の関係

9. 今後の展望

本稿では宇宙線ミュオン粒子を利用した探査技術について述べてきた。また、河川堤防へ適用するため、シンチレーションファイバと光半導体を用いた新型検出器を紹介した。新型の検出器は、堤体内部またはより深部の地盤へ埋設することを考えているため、検出器の耐久性、耐水性などを今後検討していく必要がある。加えて、地震等により検出器の位置、角度がずれることが考えられる。ミュオン粒子フラックスから面密度を計算するには、ミュオン粒子の入射角度は重要な要素であるため、検出器の位置、角度を固定する方法を考える必要がある。これらは、模型堤防を用いた実験を行い、検討していく予定である。

参考文献

- 1) 豊原 裕子：河川堤防における統合物理探査手法を用いた安全性評価について、
http://www.mlit.go.jp/chosahokoku/giken/program/kadai/pdf/jusyo/H25/anzen2_03.pdf
- 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，第65巻，第4号，pp.251-259,2012
- 3) 湊 進：宇宙線透視像，放射線，第19巻，第1号，pp.49-56,1992
- 4) 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
- 5) 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-0121,2017
- 6) 田中宏幸：地球内部のミュオグラフィ観測の現状と展望，
<http://www.jahep.org/hepnews/2014/14-1-1-muography.pdf>
- 7) 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，2017
- 8) Takamatsu, K., Takegami, H., Ito, C., Suzuki, K., Ohnuma, H., Hino, R., and Okumura, T.: Cosmic-ray muon radiography for reactor core observation., Annuals of Nuclear Energy, No.78, pp.166-175, 2015