

ミュオグラフィによる砂防関係インフラの健全性分析技術の開発に関する研究（その1）

一般財団法人砂防フロンティア整備推進機構 森俊勇・○酒谷幸彦

東京大学 田中宏幸・László Oláh

Wigner Research Centre for Physics, Budapest, Hungary Dezső Varga

はじめに

ミュオグラフィは、素粒子ミュオンを使って巨大な物体の内部を描き出す最先端の技術である。

その原理はX線レントゲン撮影法とほぼ同じである。X線は物体が1mを超えると透過できないが、ミュオンは1,000m単位の物体も透過することができ、直進性が高くしかも無害であるため扱いやすいことから、火山から地震断層、洞窟、氷河、地下鉱山資源などの調査への応用可能性が急速に広がり、近年ではインフラの内部透視にも対象が拡大し、原子炉、溶鉱炉、道路床版の内部透視技術として応用する研究が始まっている。

砂防関係では、古い砂防堰堤の健全度を調べる場合、まず、目視して外見の状態で判断しているが、目視ではわからない堤体内部の健全度を非破壊で調べる手段として「弾性波トモグラフィ」を使う手法がある。しかしながら、この調査にも相当な経費と時間を要しているとともに、堰堤を越流する水の処理や堰堤下流法尻からの起震など技術的にも困難な課題を抱えている。

そこで、古い砂防堰堤の健全度を非破壊で調べる手段としてミュオグラフィは利用できるのか確認するため、稲荷川筋滝尾砂防堰堤に検出器を設置し観測、分析を行った。

1. ミュオグラフィの原理

ミュオンは宇宙を構成する12個の素粒子の一つで、超新星の爆発などにより常時高速で飛来する宇宙線が地球の大気中で二次的に生産する素粒子である。その数は1m²当り1秒間に100個程度であるが、必ずしも安定的に飛来しているわけではない。あらゆる方向から飛来しており水平に近い方向から飛来してくるミュオンも利用できる。ミュオンは物体の密度に応じて貫通量が減ってくるので、物体を透過してくるミュオンの数からミュオンが通ってきた経路に沿った物質質量（密度）を見積もることができる。

今回使用するミュオン検出器は、「多線式比例計数管」(Multi-Wire Proportional Chamber MWPC)である。MWPCは検出器が特殊なガスで満たされており、この中をミュオンなどの荷電粒子が通過するとガス分子をイオン化する。検出器の中にある細いワイヤーに高電圧を流すことで周辺に高い電場勾配を形成する。ガスのイオン化でできた電子がワイヤ

ーに寄ってくると電場からエネルギーをもらって加速される。加速された電子は他のガス分子を電離することでさらに多くの電子を発生させる。MWPCはこのような過程を繰り返して電子を増幅させ、通過ミュオンを電子パルスとして取り出す粒子検出器である。

2. MWPCを用いた観測システム



写真-1 MMOS

今回、日光砂防事務所の現場では40cm×40cmのサイズのMWPCを6枚使用し、これにデータ収集、解析装置DAQを含め、三方50cmのポリカーボネートの箱(MMOS)にセットした(写真-1)。重さは約60kgである。装置は鉄製の倉庫に入れ

風雨等を防いだ(写真-2)。消費電力は時間5-6Wである。ガスは不燃性で環境に対し無害のAr 80%、CO₂ 20%を使用している。0.05MPaでMWPCに供給し、使用量は3L/h程度であった。



写真-2 観測倉庫と滝尾砂防堰堤

検出したデータはUSBに一時保存され、3Gの電波で伝送される。検出範囲は検出器中心から水平、垂直方向に45度の範囲である。

3. ミュオン検出結果

これまで3ケースの検出を行った。Case-1は試行として行ったので、ここではCase-2と3の結果を述べる。Case-2は堰堤正面向き上方30°向き、写

真-2 の赤枠で示す部分を対象に、Case-3 は堰堤に向かい右 45° に振り、上方 13.1° 向き、写真-2 白枠で示すように水通し部全体をカバーするように配置した。表-1 に測定期間とミュオン検出数、6 枚の MWPC の内 5 枚通過数(有効軌跡数)を示す。Case-3 では検出器の中心方向が左岸を向き、ミュオンが地中を長距離通過するため、観測期間に比べ有効軌跡数が少なくなっていると推測される。

表—1 各ケースの検出期間とミュオン軌跡数

	測定期間	検出数	有効軌跡数
Case-1	89 時間	5,023,158	645,345
Case-2	240 時間	13,728,372	2,119,010
Case-3	214 時間	9,108,433	661,314

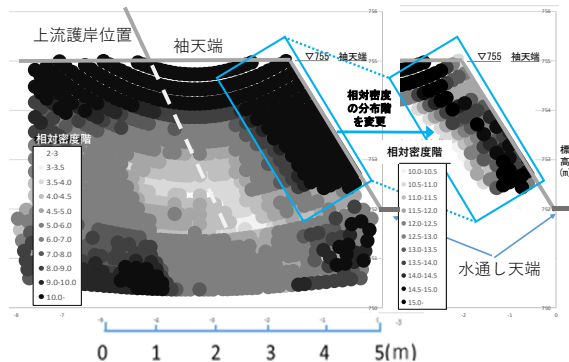
測定により Case-2 では 56×56 メッシュの密度長(水深換算深さ:m.w.e.(meter water equivalent))、Case-3 では 28×28 メッシュの密度長が得られた。密度長はミュオンが透過する物体の密度×透過長を表すので、砂防堰堤を透過する直線距離をメッシュ毎に算出し、各メッシュの相対的な密度を求めた。ミュオンは、上流護岸工より川側の袖部はコンクリートのみを透過し、水通しより下部は堰堤本体と堆砂している土砂の部分も透過しているが、堆積土砂の浅い部分を透過しているので、堆積土砂の分離は行わず、堰堤断面の透過のみとして透過長とした。

位置分解能は、角度分解能×検出器と対象物との距離であり、Case-2 では MWPC の中心方向では約 12cm($\tan(90/56) \times 4.5\text{m}$)。Case-3 では中心方向では約 32cm($\tan(90/28) \times 5.7\text{m}$)となる。角度が鉛直、堰堤軸方向に振れると堰堤との斜距離が変わり、それに伴い位置分解能が異なってくる。

また、密度長は大気のみを通過してくる方向では 15 程度、日光山系の山体を通過してくる方向では 50－100 の値を示している。このため絶対密度ではなく相対的な密度として分析した。

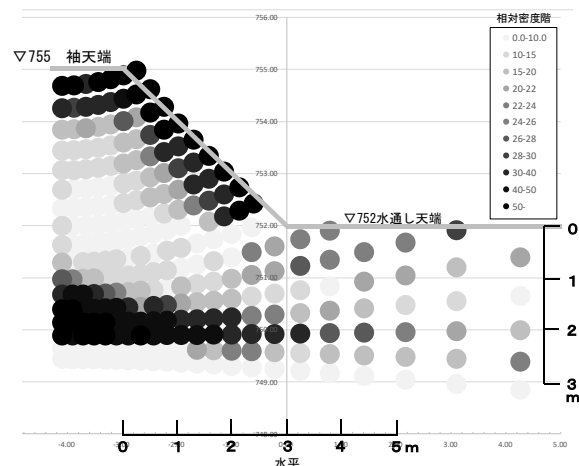
Case-2 及び Case-3 の相対密度分布を図-1、図-2 に示す。各メッシュの相対密度を堰堤軸の垂直面をミュオンが通過する位置に円として示した。濃い円は相対密度が大きく、薄い色の円は小さいことを示している。袖部では表面から 2m 程度が内部よりも値が大きくなっている。これは表面に施工してある自然石の影響と思われる。また水通し小口の部分については相対密度階が 10 以上に分類されるために図-2 右側に 10 から 15 までは 0.5 刻みで細分化した。相対密度は細かく変化しており、水通し袖部に施工された石材の材質等の変化による密度の変化を表していると推定される。

Case-3 では袖の部分は Case-2 と同じような相対密度分布が表現される。ここでは幅 45m の水通し断面すべてをカバーするように検出器を設置したので、



図—1 Case-2 における相対密度分布

右岸から離れるほど分解能は大きくなり、左岸側に 13m 離れた地点では 1 メッシュの分解能が 1m となる。位置分解能を高めるためには角度分解能を細かくするか検出器を近づけるか検討する必要がある。



図—2 Case-3 における相対密度分布

4. 考察

- ①ミュオン検出により、堰堤コンクリートの相対的な密度分布を把握することができたことが分かったが、有効軌跡数を確保するため計測時間、溪岸の地形を考慮した設置方法を検討する必要がある。
- ②精度を上げるため堆砂土砂や地山の透過を考慮し、堰堤に周辺地形、地質を含めた分析を検討する。
- ③堰堤の部位により相対密度は 5 倍の差異があった。他の方法との比較評価など検討を行う。
- ④山岳地帯での使用に適した開発、設置方法、分析方法の整備を行う必要がある。

最後に、本計測では検出器の MWPC を Wigner RCP からお貸し頂いた。また、試験場所、電力の提供など国土交通省日光砂防事務所にご協力いただいた。ここに謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) ミュオグラフィ ピラミッドの謎を解く 21 世紀の鍵, 田中宏幸 大城道則, 2017
- 2) Overview of muographers, Hiroyuki K. M. Tanaka and László Oláh, 2019