

宇宙線ミュオンによる地震断層の透視

池田 大輔*

Tomography for seismic fault by cosmic ray muons

Daisuke IKEDA*

1. はじめに

地表には、宇宙空間より飛来した宇宙線によって生成された様々な粒子が降り注いでいる。特にミュオンと呼ばれる粒子は非常に透過力が高く、これを用いると山体のような巨大な構造物に対してレントゲン撮影のように内部を透視することができる。この手法はミュオグラフィと呼ばれ、近年、火山内部のマグマ[1]、クフ王のピラミッド[2]、アルプス氷河の基盤岩[3]など、様々な対象の透視に成功し、新たな観測技術として期待されている。

本研究では、この手法を地震断層に応用し、ミュオンを用いて地震断層を透視することで、断層の位置や姿勢、断層面の粗さを測定する、新たな測定手法の確立を目指している。断層の姿勢は、その断層で過去に起こった、もしくはこれから起きる地震や津波の規模を推定する上で必須の情報である。既存の主な断層姿勢測定手法としては、掘削孔（ボアホール）の検層、弾性波探査などがある。直径 10cm 程度の穴を掘削するボアホールによる検層は、ボアホールと断層が交差する面において正確な姿勢を得ることができる上、物性情報を知ることでもある。しかし、10cm 程度の領域の情報が断層全体を代表するとは限らないため、より広範囲の情報を得るためには複数のボアホールを掘削する必要がある。弾性波探査は広範囲・大深度（数十 km）までの断層姿勢の測定が可能であるが、多くの測定では断層の粗さを測定するのに十分な分解能を得ることは難しい。本手法では、測定の空白域となることの多い、断層浅部における 10m から数 100m スケールの断層の姿勢の測定が可能である。これらの情報を用いて、詳細な断層モデルを構築することで、より現実的な地震、津波の被害予測ができると期待される。

2. ミュオンを用いた地震断層の透視

宇宙線によって生成されたミュオンは、地表ではだいたい手の平を秒間 1 個程度通過する頻度で到来する。ミュオンは経路長と経路上の物質の平均密度の積である密度長に応じて数を減らす。地表でのミュオンのエネルギースペクトルや物質中でのミュオンのエネルギー損失はよく理解されており、これらを用いて得られた

通過密度長に対するミュオン数は観測値を良く説明する（図 1）。つまり、各方向からのミュオンの到来数を測定し、その方向の物質の経路長を与えることで、経路上の平均密度を得ることができる。これがミュオンを用いた透視の基本的な原理である。

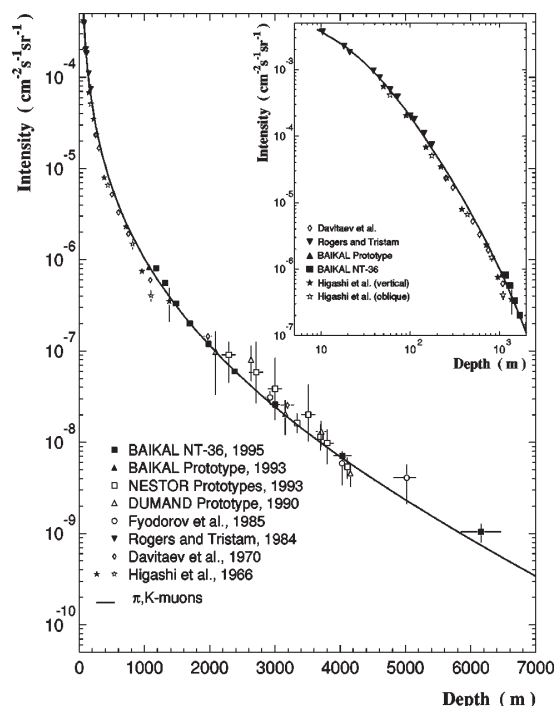


図 1 水等量の深さに対するミュオン到来頻度の実験値及び理論値 [4]

密度に感度がある測定となるため、本手法を用いて密度に特徴がある断層を測定することができる。具体的には、断層運動によって破壊された断層破砕帯と呼ばれる低密度領域を伴う断層や、上盤下盤で密度差のある断層が測定対象となる。

一方、ミュオンは上空から飛来するため、測定対象よりも下方にミュオン検出機を設置する必要がある。この制約のため、地下の断層を測定する場合、図 2 に示すように地中深くにミュオン検出機を設置する必要がある。しかし既存のミュオン検出器は一辺 1-2m 程度の大きさがあることから、トンネルの周辺や、断層が地表

*助教 物理学教室
Assistant Professor, Institute of Physics

に露出していてかつそれを見上げる位置に検出器を設置できる場合[5]など、測定対象が限られるという問題点があった。

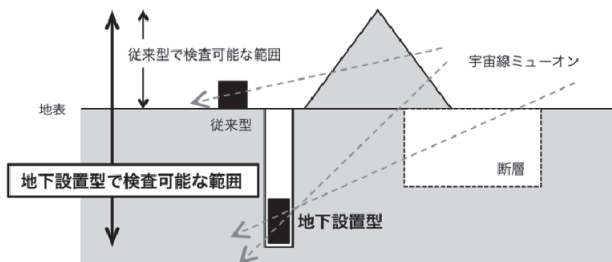


図2 地下設置型ミュオン検出器による断層測定の様式図

そこで本研究では、直径 10cm 程度のボアホール内部という極小のスペースに設置可能な小径縦長のミュオン検出器を開発した。ミュオンを用いた透視を行なうためには到来したミュオンの方向を知る必要があるが、このような形状の検出器を地下で運用する場合、到来するミュオンの天頂角分布は特定方向(～40度)にピークを持つことが分かっている。これは地表におけるミュオンの天頂角分布は垂直方向が多く、検出器は縦長であることから水平方向の感度が良く、地中でのミュオンの減衰は垂直方向の方が少ないためである。このような検出器を用いて、ボアホール内で深さを変えながら測定することで、ボアホールの周囲 100m 程度の地下の密度構造を 3 次元的にスキャンすることができる(図3)。

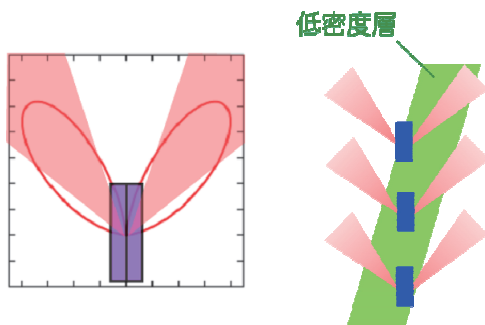


図3 ボアホール埋設型ミュオン検出器で観測されるミュオンの天頂角分布(左)と、地下密度構造スキャンの様式図(右)

3. ボアホール埋設型ミュオン検出器

本研究で開発したボアホール埋設型ミュオン検出器の様式図と内部写真を図4に示す。長さ 2m の耐圧容器内に長さ 1m のプラスチックシンチレータ 16 本を断面が内外 2 つの 8 角形を構成するように設置されている。ミュオンがシンチレータを通過する際、その通過距離に比例した光量でシンチレータは発光する。その光をシンチレータに這わせた波長変換ファイバーにより上下 2 つの 16ch マルチアノード型光電子増倍管(MAPMT)に導き、電気信号に変換する。信号は耐圧容器内に設置された測定用エレクトロニクス(Cosmo-Z, 特殊電子回路株式会社)上の FADC (12bit, 80MSps) を

用いてデジタル化する。ペダスタルを差し引いた ADC 合計値が 100 以上のチャンネルが 2 つ以上存在した事象のみ波形として記録する。検出器から地上まではケーブルで接続されており、光ファイバを経由したデータ通信や電力供給を行なうことができる。

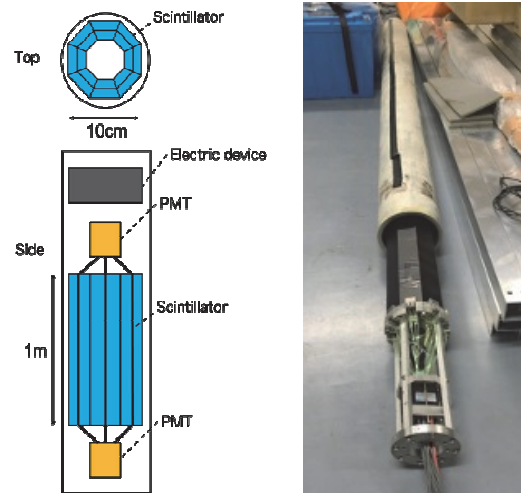


図4 ボアホール埋設型ミュオン検出器の様式図(左)及び検出器内部の外観(右)

4. 跡津川断層における測定

本手法の実証試験として、岐阜県飛騨市の跡津川断層を貫くボアホールで測定を行なった。跡津川断層及びボアホールの位置と、観測の様子を図5に示す。跡津川断層は岐阜県から富山県に跨がる全長約 70km に及ぶ横ずれの A 級活断層である。このボアホールは防災科学技術研究所が跡津川断層ドリリングプロジェクト[6][7]として掘削した物で、掘削コアのサンプリングやγ線検層が行われている。これらの測定から、このボアホールは断層破砕帯を貫いていることが分かっている。

測定は 2016 年から 2017 年にかけて行われ、深さ 10m から 100m まで 10m 刻みの観測データを取得した。

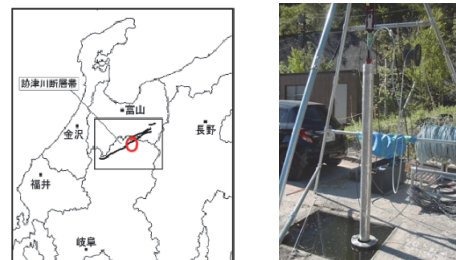


図5 跡津川断層(黒線)とボアホールの位置(赤丸)(左)とボアホール挿入直前の測定の外観(右)

5. 解析手法

データ解析の流れを図6に示す。最終的に、観測された各深さ、

各方位角のミュオン到来頻度と、断層破砕帯を加えた場合のミュオン到来頻度期待値を比較し、最も観測データを再現する断層破砕帯の形状、位置、走向、傾斜角、密度を探索する。以下に本解析で重要となる(1)ミュオン到来方向再構成(2)ミュオン到来頻度期待値の取得について述べる。

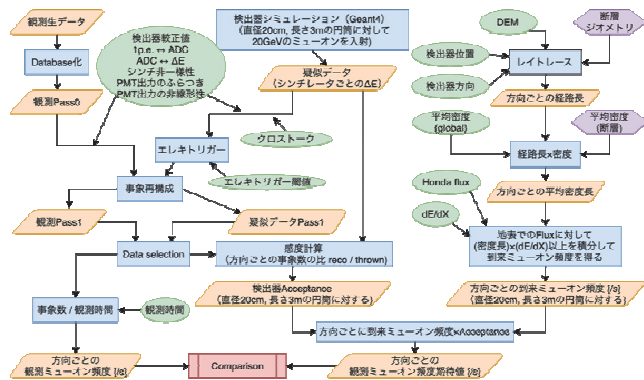


図 6 データ解析の流れ

5.1 ミュオン到来方向再構成

観測されたミュオン事象例を図 7 に示す。ミュオン到来方向の内、天頂角方向は 2 節で議論したように統計的に決まるので、観測事象から方位角を決定すれば良い。到来方位角は、どのシンチレータが光ったかという情報に加えて、各シンチレータの光量がそのシンチレータ内のミュオンの通過距離に比例することを用いて、最も観測データを再現する軌跡を最小二乗法で求める。ノイズ事象を減らすため、4 つ以上のシンチレータに信号がある場合のみ採用する。後述の検出器シミュレータを用いて見積もった所、到来方位角の再構成分解能は約 7 度であることがわかった。ただし本検出器ではミュオンの進行方向は分からないので、例えば方位角 30 度と 210 度の事象の区別はできない。そのため方位角は 0-180° の範囲で検出される。

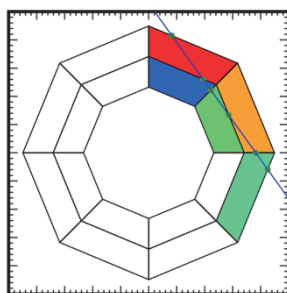


図 7 観測されたミュオン事象の一例。色は各シンチレータの信号の大きさを示しており、青から赤になるにつれて信号が大きくなる。線は再構成されたミュオンの軌跡を示す。

5.2 ミュオン到来頻度期待値

検出器に到来するミュオンは断層だけでなく周囲の地形の影響

を受けるため、期待値計算にはこの影響を取り込む必要がある。ポアホール周辺の地形は国土地理院の数値標高モデル(DEM)から得た(図 8)。地下 10m から 100m まで 10m 刻みの位置における各方向の経路長を計算し、地中の平均密度を乗じることで密度長を得る。地上でのミュオンのエネルギースペクトル[8]を、各密度長におけるエネルギー損失量[9]より高いエネルギーに対して積分することで、検出器位置における各方向のミュオン到来頻度を得る。一例として図 8 に断層がないとした場合の地下 10m における各方向からのミュオン到来頻度を示す。

得られたミュオン到来頻度に対して、検出器の感度及び事象再構成の精度など、検出の特性を考慮することで、観測データと直接比較可能な方位角ごとのミュオン頻度期待値を得る。検出器の特性を理解するため、Geant4[10]という粒子相互作用シミュレータを用いた検出器シミュレータを用いて疑似事象を生成する。耐圧容器やシンチレータの形状、位置、組成を再現した検出器モデルに対し、20 GeV のミュオンを入射した場合の各シンチレータにおけるエネルギー損失量を得て、検出器較正値を用いて実データと同じ形式の疑似事象を生成する。これらに対して実データと全く同じ再構成プロセスを通すことで、実観測と同様の検出特性におけるミュオン到来方向ごとの感度を得る。

上述の密度長の計算に対して任意の形状、密度の立体を加えることが可能であるため、任意の断層モデルにおけるミュオン到来頻度期待値を得ることができる。

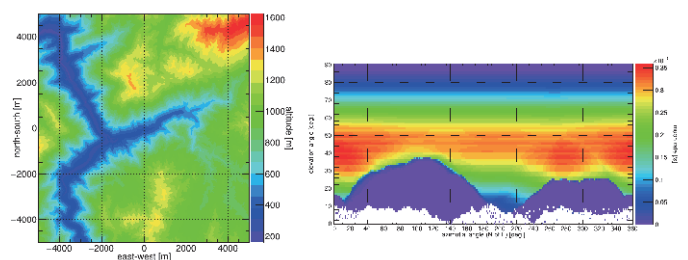


図 8 ポアホール周辺の地形(左)と地下 10m におけるミュオン到来頻度(右)

6. 結果

断層破砕帯を 1 枚板であると仮定し、実データを最も良く再現する断層の走向、傾斜角、位置、厚み、破砕帯内部及び外部の密度の 6 つのパラメータを探索する。観測された全ての深さ、方位角のミュオン頻度と誤差から χ^2 を計算し、Minuit[11]を用いてこれが最小となるパラメータとその誤差を得る。 χ^2 が最も小さくなった場合の実データと期待値の比較を図 9 に、そのときのパラメータと誤差を表 1 に示す。このときの χ^2 を自由度で割った値は 2.37 である。全体の傾向として、どの深さにおいても東西方向より南北方向の方がミュオン到来頻度は小さいが、これは図 8 に示したようにポアホールは谷底にあり、周辺の地形は東西方向に開けていることから、東西方向の物質が少ないためである。本測定で得られた断層破砕帯を含めた期待値は深さ 10-100m における観測値を良く再現している。

得られた断層パラメータの妥当性を確認するため、既知の値と比

較する．トレンチ調査[12]や断層露頭調査[13]からこの地域の走向は N60-70° E, 傾斜角は 70-90° であることが分かっており, 本測定結果と一致している．この露頭の位置は, 得られた断層破砕帯と地上面が交わる面内にあり, こちらも矛盾がない．またボアホール掘削時に行われた γ 線検層の結果, ボアホール近辺の密度は, 破砕帯に到達していないと思われる深さ 22-40m の密度が 2.46 g/cm³, 深さ 40m-350m の加重平均が 2.28 g/cm³であることが分かっており, こちらも本測定結果と良く一致している．結果として, ミューオンを用いて得られた断層パラメータは, 既知の走向, 傾斜角, 密度, 露頭の位置において良く一致しており, 本測定で確かに断層が観測されたという傍証と言える．

一方で, 断層の厚みに関する情報はこれまでに余り得られておらず, 新たな知見となる可能性がある．現在の測定では約 140m と想定よりも大きい値が得られているが, 誤差も 39m と大きい．これは破砕帯のボアホール側の位置に関しては良く拘束されるが, 逆側の面は検出器の主要な視野の外側となっていることから拘束が強くないためである．

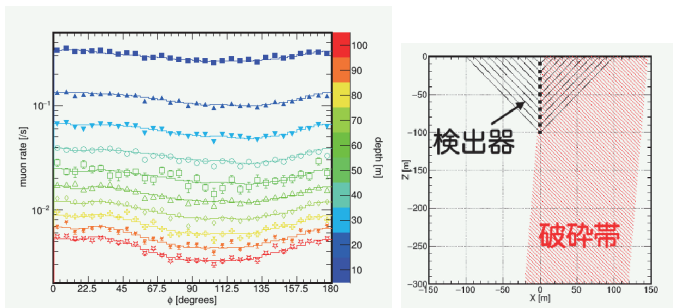


図 9 (左) 表 1 のパラメータにおける実データと期待値の比較．点が観測値, 線が期待値, 色が測定深さを示す．横軸は方位角で 0 度が東西方向, 90 度が南北方向であり, 縦軸は観測されたミューオン到来頻度を検出器の感度で補正した物である．(右) 得られた断層破砕帯の断面図．横軸は破砕帯を断面で切った場合の長さで縦軸は深さを示す．黒点が検出器位置, 黒線が観測されるミューオンの天頂角, 赤斜線の領域が本測定で得られた破砕帯を示す．

表 1 断層破砕帯を 1 枚板であると仮定した場合に実データを最も再現するパラメータ．誤差は統計誤差を示す．

パラメータ	値
走向	N 72.5 ± 0.4° E
傾斜角	85.1 ± 0.4° N
断層とボアホールの交点 (上端)	-57.5 ± 3.3 m
断層の厚さ	140.2 ± 38.7 m
密度 (断層)	2.33 ± 0.01 g/cm ³
密度 (断層以外)	2.48 ± 0.01 g/cm ³

7. 今後の展望

今回は断層破砕帯を 1 枚板であると仮定したモデルについての解析を行なったが, 破砕帯内部の厚み方向の密度プロファイルや, 複数枚の板モデルの評価などを調べることで, 断層に関するより詳細な情報が得られる可能性がある．しかし現在の手法では, モデルを複雑にすると, χ^2 が最小となるパラメータを探索する際に局所最小点に落ちてしまう問題があることが分かっている．これは測定による拘束が不十分であることも理由であると考えられるが, パラメータ探索の方法の工夫で改善する可能性があるため, マルコフ連鎖モンテカルロ法, 特にレプリカ交換法など, より工夫された手法を取り入れる予定である．

また 6 節で述べたように, 断層破砕帯の幅についての情報は有用となる可能性があるが, 現在の測定では強く拘束されていない．これはより深部まで測定範囲を伸ばすか, 近傍に掘削したボアホールで測定する方法により改善されるはずである．

また本手法は 2 節で述べたように, 今回測定を行った断層破砕帯と呼ばれる低密度領域を伴う断層以外に, 上盤下盤で密度差のある断層も測定対象となる．今後, 後者に相当する断層である, 南房総に位置する石堂断層の測定を検討している．

加えて, 現在の検出器は業界標準である 86 コアと呼ばれる 86 mm 径のボアホール内部に埋設するには大きいため, 検出器の小型化を進めている．86 コアに対応することで, より安価に, より多くの条件下における断層の測定が可能となる．本測定手法は本質として地下の密度構造を測定しているため, 断層以外にも様々な応用が期待される．86 コアへの対応はそのような応用の可能性を広げる物でもある．

8. まとめ

断層浅部の断層の傾斜角や形状を測定する新たな手法である, ボアホール内部からのミューオンによる断層透視を実証するため, ボアホール埋設型ミューオン検出器を開発し, 跡津川断層の測定を行なった．測定された断層パラメータは既知の値と良く一致していることから, 断層の測定に成功したと言える．本手法は既知の手法と比較して, ボアホールさえあれば安価に広範囲の断層の測定を行なうことが可能であり, より現実に即した断層モデルによる地震や津波の強度予測の高精度化など, 防災という観点での貢献が期待される．また地下密度構造の測定手法という観点から, 断層以外の様々な応用も考えられる．今後, より詳細な断層パラメータの取得や業界標準の 86 コアに対応した新型検出器の開発を進め, 本手法を確立させたい．

参考文献

- [1] H. K. M. Tanaka, T. Kusagaya and H. Shinohara, Radiographic visualization of magma dynamics in an erupting volcano, Nature communications, 5, 3381 (2014)
- [2] K. Morishima et al., Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons, Nature, 552, 386-390 (2017)
- [3] R. Nishiyama et al., First measurement of ice - bedrock interface of

alpine glaciers by cosmic muon radiography, *Geophysical Research Letters*, 44, 6244-6251 (2017)

[4] E. V. Bugaev et al., Atmospheric muon flux at sea level, underground, and underwater, *Physical Review D*, 58, 054001 (1998)

[5] H. K. M. Tanaka et al., Cosmic muon imaging of hidden seismic fault zones: Rainwater permeation into the mechanical fractured zones in Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, Japan, *Earth and Planetary Science Letters*, 306, 156-162 (2011)

[6] 小村健太郎, 山下 太, 山田隆二, 松田達生, 福山英一, 久保篤規, 高井香里, 跡津川断層ドリリング (1) —跡津川地区断層破碎帯コアと物理検層—, 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会予稿集, J078-006 (2004)

[7] 松田達生, 小村健太郎, 山田隆二, 田中秀実, 島田耕史, 大谷具幸, 小林健太, 跡津川断層クリーブ域における NIED 活断層掘削, 日本地震学会 2005 年度秋季大会講演予稿集, 236 (2005)

[8] M. Honda et al., Calculation of atmospheric neutrino flux using the interaction model calibrated with atmospheric muon data, *Physical Review D*, 75, 043006 (2007)

[9] D. E. Groom, N. V. Mokhov and S. Striganov, Muon stopping power and range tables 10 MeV-100 TeV, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 76, 2, LBNL-44742 (2001)

[10] S. Agostinelli et al., Geant4 - a simulation toolkit, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506, 3, 250-303 (2003)

[11] F. James and M. Roos, Minuit - a system for function minimization and analysis of the parameter errors and correlations, *Computer Physics Communications*, 10, 6, 343-367 (1975)

[12] 跡津川断層発掘調査団, 1982 年跡津川断層(野首地区)トレンチ調査, *活断層研究* 3, 59-64 (1986)

[13] ハスパートル他, 跡津川断層中部で新たに確認された断層露頭, *活断層研究* 20, 46-51 (2001)