

宇宙線ミュオン粒子望遠鏡の開発 II

鈴木 昇¹ 丸山 智也² 上原 友宏² 安齋 綾子² 名執 杏美²

Development of the cosmic ray muon telescope II

Noboru SUZUKI¹, Tomoya MARUYAMA²,
Tomohiro UEHARA², Ayako ANZAI², Ami NATORI²

We carried out examination and the fundamental experiment to develop the geophysical exploration system using cosmic ray muons. Experimental muon telescope has been made to acquire angular distributions of cosmic ray muons. The telescope is used in the underground infrastructure to explore cavities or voids. Muon intensity in the ground depends on the bulk density above the measurement site. The experimental muon telescope is composed the four plastic scintillators (PS) equipped with a coincidence circuit. Spatial resolution and the efficiency of the exploration are restricted by the size of the detector and the distance between two detectors. Each PS has a diameter of 12.7cm and thickness 2cm, and the three PS were located at intervals of 128cm and 130cm. We produced two prototypes to miniaturize the diameter and the distance between detectors. We performed the calibration testing in the open air to confirm the performance of these three prototypes. We improved the precision of the density by the calibration testing. Furthermore, we obtained data in a school building and it was shown the shape of the school building.

キーワード : プラスチックシンチレータ, 宇宙線ミュオン粒子, 宇宙線ミュオン粒子望遠鏡:

Keywords : Plastic Scintillators, Cosmic Ray Muons, Muon Telescope

1. はじめに

平成 24 年度において、宇宙線のミュオン粒子 (μ) は透過した媒質の密度と長さ及び天頂角により計数が異なることが知られている。逆に計数と天頂角及び透過距離が分かれば密度を推定できることを利用した探査システムの開発を行ってきた。検出器は直径 12.7cm、厚さ 2cm のプラスチックシンチレータ (PS) に 5 インチ光電子増倍管 (PMT) を光学グリースで直接接着した。検出器の間隔は 130cm に固定して、上・下 2 台の同時計数を取った。検出器の特性を調べるため、①PS で吸収された信号を波高分析して、自然ガンマ (γ) 線と宇宙線 μ 粒子のエネルギー分布を計測した。②PS で低エネルギーの自然 γ 線などを除去するためシンチレータの厚さを調整して 2cm と決定した。③自然 γ 線と宇宙線 μ 粒子のエネルギー分布のピーク値の谷間にディスクリミネーションレベル (D.L) 2.7Mev を設定した。④空気中で μ 粒子の天頂角分布測定を行った。測定結果は宇宙線 μ 粒子の角度分布の理論値と 5%以内で一致した。

2. 宇宙線の基本事項

2.1 宇宙線とは

宇宙線は、1cm²あたり毎秒 1 個くらいの割合で地球に降ってくる。それは陽子に始まり自然の物質の組成によく似た各種の原子核で、10⁹ eV から 10²⁰ eV 以上までの広いエネルギー分布を持っている。地表の表面では一次宇宙線から約 10m の水の深さに該当する 1000g/cm² の厚みを持つ大気層により遮蔽されている。これは核相互作用の平均自由行程の 10 倍程度、輻射距離の 25 倍程度と非常に厚く、一次宇宙線がそのまま地上に到達することは全くない。素粒子の多くは、一次宇宙線が大気中で空気原子核との相互作用により 2 次的に発生する。大気中で起こる宇宙線現象はすべて核子カスケードと電磁カスケードシャワーとの集積であるといえる。一次宇宙線のエネルギーは何世代もの核子カスケードにより増殖され多数の π^{\pm} や K^{\pm} ($\pi^{\pm} \rightarrow (\mu^{\pm}, \nu)$, $K^{\pm} \rightarrow (\mu^{\pm}, \nu)$, $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$) を次々に発展させてエネルギーを失いながら地表に達する。

1 明星大学理工学部総合理工学科物理学系 准教授 宇宙線物理学 物理実験学

2 明星大学理工学部総合理工学科物理学系

2.2 宇宙線の強度測定

上下 2 台の検出器を距離 d 離して配置し、天頂角 θ 方向に向けたときの、検出器が見込む立体角 Ω に入射する宇宙線の測定原理を図 1 に示す。強度の単位は $\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}\text{sterad}^{-1}$ となる。

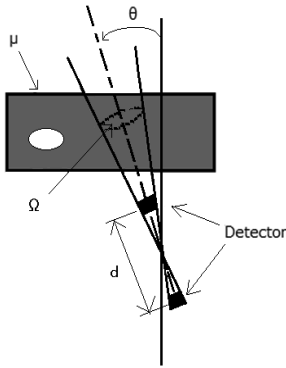


図 1.宇宙線の測定原理

天頂角 θ に対する宇宙線強度を j_θ とすると、粒子の数「全方向強度」 J は、

$$J = \int j_\theta d\Omega = 2\pi \int_0^{\pi/2} j_\theta \sin\theta d\theta$$

宇宙線の諸成分の天頂角 θ に対する強度は鉛直強度に対し $j_{\theta=0}$ で次式のように近似される。

$$j_\theta \approx j_{\theta=0} \cdot \cos^n\theta$$

n の値は、粒子の種類や高度により異なり、地上で μ 成分に対しては $n \approx 2$ である。物質を通過してきた宇宙線の強度⁽¹⁾ は次式により表される。

$$J = \int_\Omega F(\theta) \cdot G(\theta, l\rho) d\theta$$

ただし、 $F(\theta)$ は天頂角 θ 方向からの単位立体角あたりの宇宙線強度で次式で表される。

$$F(\theta) = F_V \cos^n\theta$$

ここで F_V は宇宙線の鉛直強度である。 $F(\theta)$ は O' Brien⁽²⁾ による海面レベルでの計算値である。 $G(\theta, l\rho)$ は物質中で距離 $l\rho$ を通過したときの θ 方向からの μ 粒子の減衰を示し、次式で近似される。

$$G(\theta, l\rho) = \exp(-k(\theta) \cdot l\rho)$$

ここで、 k は質量減衰係数、 ρ は物質の密度である。 θ を 0 度から 90 度まで変え宇宙線強度を測定し、計算値と比較することで物質の内部構造を調べることが出来る。

2.3 物質中における μ 粒子の天頂角分布の強度と深度

天頂角 θ で飛来する μ 粒子の強度と深度の関係は、物質層の面密度に依存する。

物質層の鉛直距離における面密度 h_d が次式

$$h_d = 6.613 \exp(0.02 \cdot \theta)$$

より小さい場合、実験式 $I_\mu(h, \theta)$ ^{(3),(4),(5)} は次式で表される。

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

$\Lambda(h)$ 及び n は次式で表される。

$$\begin{cases} \Lambda(h) = A + Bh + Ch^2 \\ n = \alpha + \beta h \end{cases} \quad (2)$$

(1)、(2) 式の係数は以下で与えられる。

$$I_{\mu 00} = 0.00723, A = 17.61, B = 0.1404, C = -7.069 \times 10^{-5}, \\ \alpha = 1.495, \beta = 0.002018$$

なお、面密度 h は、単位面積あたりの重量 (g/cm^2)

$$h = \rho l$$

で表せる。ただし、 ρ は密度 (g/cm^3)、 l は透過距離 (cm) である。

2.4 μ 粒子による探査原理

μ 粒子は地表付近での強度⁽⁶⁾ が既知であり、日本の海拔ゼロメートルでの強度を図 2 に示す。太陽の活動や超新星の爆発などにより宇宙線の量は変動するが、海拔ゼロメートル付近では $\pm 5\%$ 以下で一定と考えてよい。また μ 粒子は、物質中でも直進するため、屈折や反射などを考える必要がない。透過した物質の密度と長さ及び鉛直からの角度 (天頂角) によって単位時間・単位面積・単位立体角あたりの計数 (カウント数) が異なることが知られている。逆にカウント数と天頂角及び透過距離がわかれば密度を推定することができる。物質層の長さや密度の積 (面密度) は、定性的に面密度が小さければ μ 粒子の計数が大きく、面密度が大きければ計数は小さくなる。

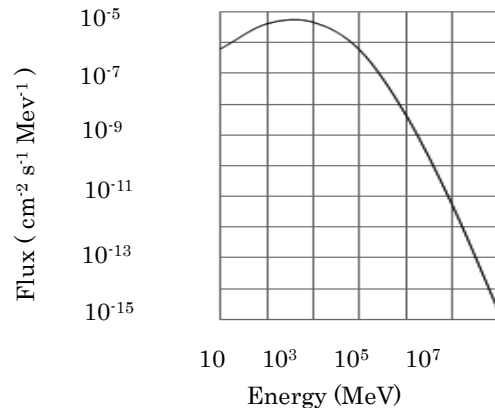


図 2.地表付近での μ 粒子の強度

3. 宇宙線の基本事項

3.1 装置の概要

μ 粒子は PS を透過するときにエネルギーの一部を失いシンチレーション光を発生する。この光を PMT で電気信号に変換し、プリアンプ (Pre.Amp) で増幅してパルス信号として取り出す。この中には自然放射能などのノイズが含まれている。これらを除去するためにディスクリミネータ (波高弁別器) で μ 粒子成分を取り出す。今回試作した 3 組の PS 配置で同時計数を取ると、一度の計測で 3 方向からの天頂角分布が得られる。真上 ($\theta = 0$) 方向からの粒子は PS1-PS3、 $\theta = +30^\circ$ は PS1-PS2、 $\theta = -30^\circ$ は PS1-PS4 からの信号を同時

計数する。各 PS からの信号と各同時計数した信号をスケラに取り込み USB ケーブルで PC に取り込み解析を行う。各 PS のエネルギー分布は、マルチチャンネル・セクタ (M.S) を使い波高分析器 (MCA) で計測する。μ 粒子望遠鏡は 4 台の PS と PMT から構成され、μ 粒子の角度分布測定は検出器 PS2 と PS4 の中間点を軸にして回転させて行った。各 PS の間隔は PS1-PS2 が 130cm、PS1-PS3 が 128cm、PS1-PS4 が 131cm に設定した。検出器はアルミで作られた円形型暗箱容器内の底面に直径 12.7cm、厚さ 2cm の PS を固定した。容器内のシンチレータの底面および周囲は白色シリコン・テープシールで高反射率とした。また、PS 面と PMT 面は光学グリースで直接接着することで光の損失が大幅に減少した。μ 粒子望遠鏡のシステムブロックを図 3 に示す。PS 検出器の仕様を図 4、図 5 に示す。

3.2 μ 粒子望遠鏡の設計・制作

μ 粒子の計測では、密度の大きくあるいは物質層が厚くなる程、単位時間あたりの μ 粒子の数が減るため計数誤差が生じる。このため測定には一定以上の計数値が必要となる。昨年度は一对の検出器で計測する装置であったため各測定に時間がかかった。今回は同時に 3 方向 (−30°, 0°, +30°) の測定ができる装置を試作したため、計測時間は単純に 1/3 に短縮できた。PS の全表面をドライヤーの熱で少し溶かして、鏡面仕上げすることで PS からの光の減衰を少なくすることができた。μ 粒子望遠鏡の試作機を図 6 に示す。

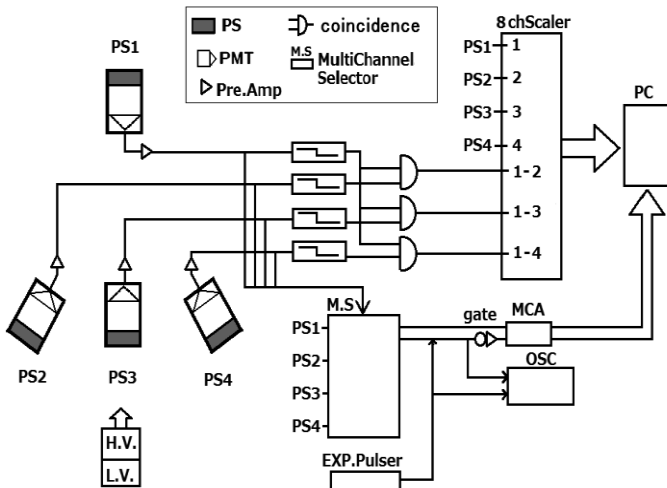


図 3. μ 粒子望遠鏡のシステムのブロック

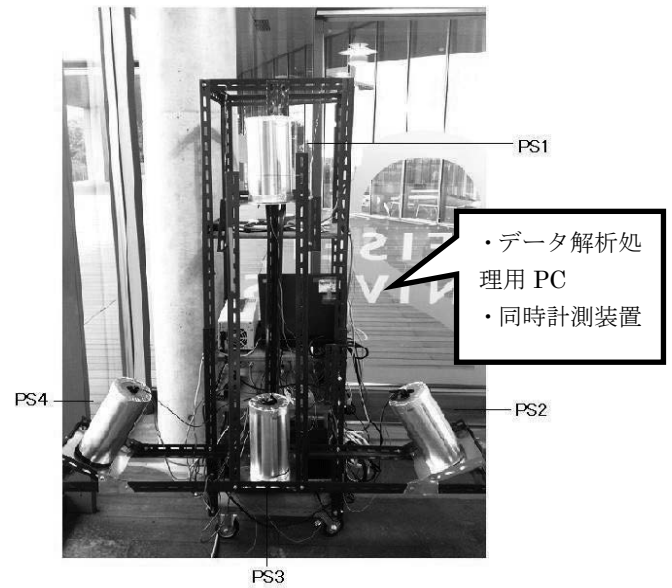


図 6. μ 粒子望遠鏡の試作機

| 検出器 | 高電圧(-V) | D・L(-mV) |
|-----|---------|----------|
| PS1 | 845 | 167.8 |
| PS2 | 832 | 376.7 |
| PS3 | 897 | 381.3 |
| PS4 | 877 | 183.4 |

図 4. PS 検出器のディスクリレベル

| 検出器の対 | 検出器間の距離(cm) | 測定天頂角(度) | 立体角(s.r) |
|---------|-------------|----------|----------|
| PS1-PS2 | 130 | 30 | 0.0298 |
| PS1-PS3 | 128 | 0 | 0.0307 |
| PS1-PS4 | 131 | -30 | 0.0293 |

図 5. PS 検出器の立体角

3.3 平成 24 年度からの変更点

- ① PS 内での光の透過率をアントラセンに対して 48% から 64% に改善した。
- ② シンチレータの直径を 5" PMT の光電面の直径と一致させ光の損失を減らした。
- ③ PS の波高分布分析より PS 内部及び表面での光の透過率を上げ、厚さを 2cm とすることで、安定した μ 粒子の計測が得られた。
- ④ 検出器間の距離が 130cm で立体角は $2.98 \times 10^{-2} \text{sr}$ となった。平成 24 年度は、検出器間の距離 100cm、150cm で各立体角は $1.26 \times 10^{-2} \text{sr}$ 、 $5.62 \times 10^{-3} \text{sr}$ であった。
- ⑤ PS による宇宙線のシングルピークの半値幅から分解能を求めた。それぞれ、PS の半値幅は 24 年度で 81%、25 年度は 56% になり 31% 改善率された図 7、図 8。

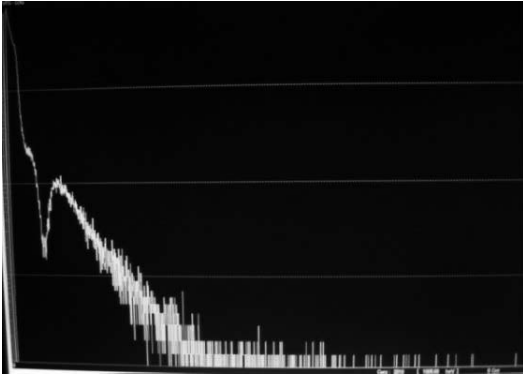


図 7 H25 年度の PS の波高分布特性

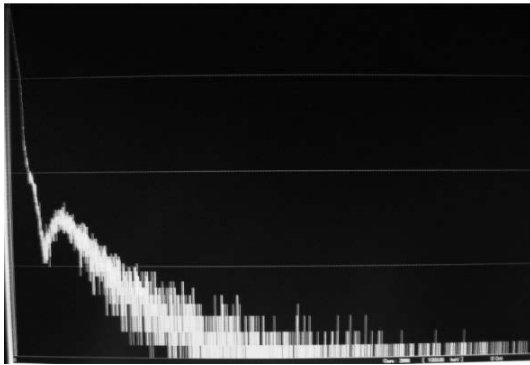


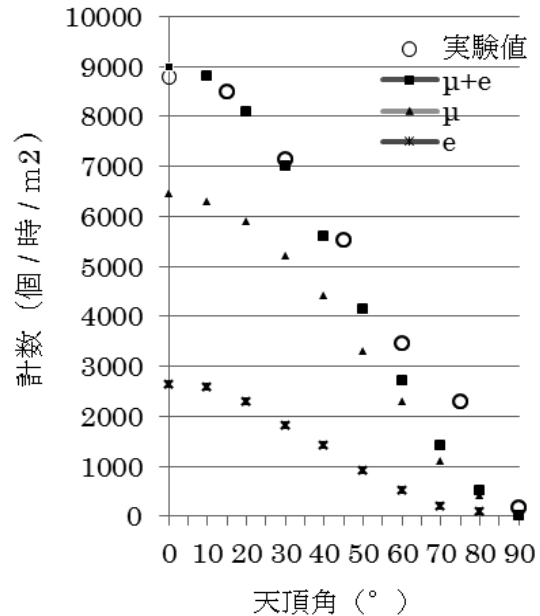
図 8 H24 年度の PS の波高分布特性

4 結果

4.1 天頂角分布の測定

検出器間の距離を一定間隔に保ち、検出器間の中心を回転することにより、天頂角分布の測定を行った。測定場所の屋根はスレートタン張り、測定時間は各角度で 24 時間計測した。空気中の計測においては、2 次宇宙線の中に μ 粒子以外の電子成分が存在する。測定値及び μ 粒子と電子成分を合わせた値を図 9 に示す。

天頂角の小さいところでは電子成分が多く認められているが、理論値より計測値が小さくなっている。これは PS に入射した電子が、PS 内部で散乱して、進行方向を変える。このときエネルギーの低い軟成分は PS で吸収されるが、エネルギーの高いノックオン電子などは方向を変えながらも PS を透過する。これが同時計数に影響を与え、理論どおりの結果が得られない原因のひとつと考えられる。空気中の実験では、電子成分を評価する必要があるが、建物内や地下においては軟成分の寄与はほとんどないと考えてよい。

図 9. 測定値及び μ 粒子と電子成分の計算値

4.2 29 号館建物内での実験

建物内による μ 粒子カウント数の変化を調べるために、各階で計測を実施した。計測は各階エレベータホール横で検出器の設置方向は南北とした。3 方向の同時計数は天頂角 -30 度 (北方向に 30 度傾斜), 0 度, $+30$ 度 (南方向に 30 度傾斜) で測定した。各計測時間は 96 時間とした。計測結果を図 10 に示す。建物の断面図を図 11 に示す。天頂角 $\theta=0$ では地下 2 階から 15 階において各フロアの厚み分だけ面密度が減少するため、 μ 粒子のカウント数が増加している。天頂角から -30 度方向からの μ 粒子は地下 2 階から地上 12 階において建物の側壁とエレベータシャフト構築用鉄筋コンクリート製ガイド及び各フロアの厚み分を通過するためカウント数が同じ割合で増加している。地上 13 階から 15 階までは建物の側壁とフロアごとに面密度が減少するため、カウント数が大幅に増加している。天頂角から $+30$ 度方向ではエレベータシャフト構築用鉄筋コンクリート製ガイドが無い分だけカウント数が増加している。さらに地下 2 階から地上 11 階までは建物の側壁と各フロアの厚み分を通過するため、カウント数が同じ割合で増加している。地上 12 階から 15 階までは各フロアだけの層となるためカウント数が大幅に増加していることが確認できた。

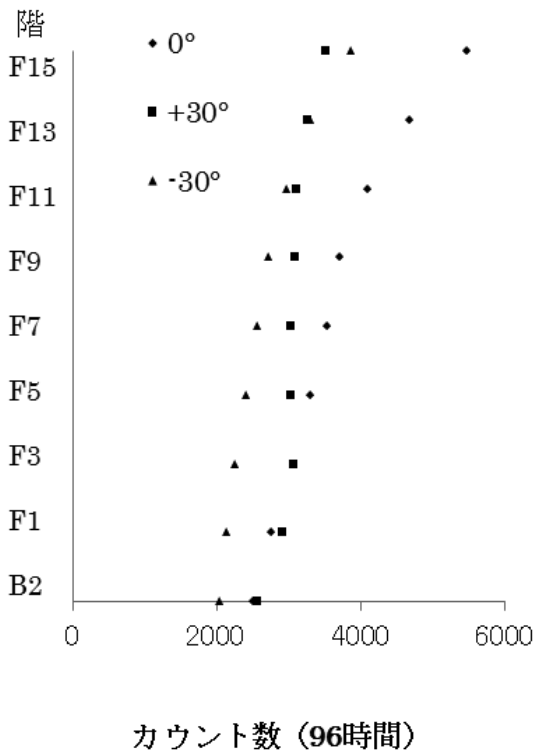


図 10. 29 号館における各階の計数値

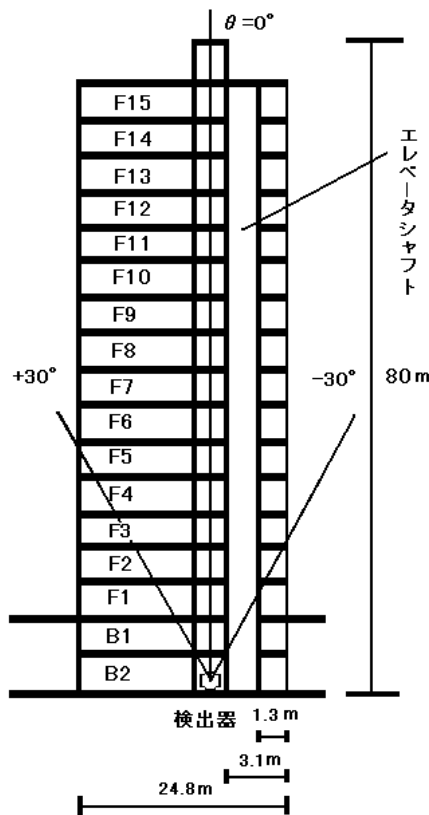


図 11. 29 号館の断面図

5 結論

宇宙線 μ 粒子を利用して建物や地中の密度変化や空洞探査が可能であることが示された。 μ 粒子を利用する場合、時間をかけて測定し、一定以上の計数を取らないと面密度の違いとして認識することが難しい。また、物質層の密度が大きくなるほど μ 粒子の計数が減るため、計測に時間がかかる。2 台の PS の同時計数法による 3 方向同時計測宇宙線角度分布測定装置を開発して、天頂角分布測定を行った。宇宙線 μ 粒子の角度分布による計測値は理論値と誤差の範囲内であった。また 29 号館建物内での測定においては、工事記録と比較すると建物の内部や形状を良く表す結果が得られた。公共の施設や地下空間への適用の可能性が実証された。

6 今後の課題

今後は、以下のような課題を検討し、物質層探査システムとして実用化に向けて開発を進めたいと考える。

- ① トモグラフィ技術を応用した物質層の可視化。
- ② リアルタイムにデータの 3 次元可視化。
- ③ マルチチャンネル化で同時多数測定による効率化。
- ④ PS の小型化 (全長 40cm, 立体角 0.03sr), 携帯型バッテリー駆動によるシステムの開発。

謝辞

本研究したプラスチックの加工は明星大学理工学部総合理工学部機械工学系実習指導員三尾政治先生に御協力、御助言を頂きましたことに感謝いたします。実験に便宜を図っていただいた明星大学理工学部支援室関係各位に深謝する。

参考文献

- (1) 鈴木昇、明星大学理工学部研究紀 No.49,pp19-24(2013)
- (2) Minato, S. , Minakuchi, S. :Health Phys. ,46, 1134-1136(1984)
- (3) O' Brien,K. :U.S. Dept. of Energy Rep., EML-338(1978)
- (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、34、4、pp292-301
- (5) 湊進、宇宙線透視像、放射線、19、1、PP49-56(1992)
- (6) Tanaka, H. et. Al: Nucl. Instruments and Physics Res., A575,pp489-497(2007)
- (7) 小田稔、宇宙線、裳華房、pp229-234