

富士山での宇宙線観測
～CosmicWatchによる連続的な測定～

平 悠人¹、帆足莉子²

¹開成高等学校1年、東京都

²東北大学、宮城県

小型で軽量の宇宙線検出器 CosmicWatch を携帯して富士山に登り高度による宇宙線到来頻度の変化を観測した。1台の宇宙線検出器で測定すると、地上から5合目である標高2300mまでの標高と宇宙線到来頻度の変化は見られなかったが、縦に重ねた2台の測定器を通過した宇宙線のみを検出する2台同時測定を行うと高度による宇宙線到来頻度の増加が見えた。そこで2台同時測定を行いながら地上から富士山頂上まで宇宙線到来頻度の測定を行い標高との相関を調べた。今回の研究を通じて、小型で軽量の宇宙線検出器を用いて宇宙線到来頻度の高度変化の連続的な実測データを得ることができた。

1. 背景

宇宙から地球に降り注ぐ高エネルギー粒子である宇宙線は、連鎖的な大気粒子との相互作用と粒子の崩壊に伴い大気を通過する過程でその強度は減衰していく。そのため標高が高くなるほど、宇宙線到来頻度が増加することが一般的に知られている¹⁾。

今まで環境放射線による生体への被曝線量とその影響を評価することを目的として、宇宙線強度の高度変化が測定されてきた^{2, 3)}。このとき使用された宇宙線測定器は重さや嵩があり持ち運びが容易とはいいがたいものであった。またこれらの測定において高度別測定点の間隔は概して粗い。

加速キッチンが提供している小型で簡易に扱える宇宙線検出器 CosmicWatch⁴⁾を使用した実験では、新井が高度10000mまでの宇宙線到来頻度の変化を測定している⁵⁾が、十分な高度での解析が不十分であった。本研究では小型で軽量であるため携帯に有利な宇宙線検出器である CosmicWatch を用いて宇宙線到来頻度の高度変化を富士山に登り地上から頂上まで連続的に測定し、宇宙線の到来頻度の増加を観測できるかを調べた。

2. 方法と結果

2.1. 実験装置

宇宙線検出器は CosmicWatch (図1: 加速キッチン合同会社より提供) を用いた。大きさは横66.5 mm、高さ52.0 mm、奥行74.0 mm、重さは125 g と小型で軽量である。CosmicWatch はプラスチックシンチレーターと SiPM (シリコン光電子増幅器) で構成されている。宇宙線がプラスチックシンチレーターを通過すると、シンチレーター内の原子の軌道電子が、宇宙線のエネルギーによってよりエネルギーが高い状態の電子軌道に遷移 (励起) し、その電子が元の基底状態に戻る際に、蛍光が発生し、これを SiPM によって電気信号へと変換する。この電気信号はアンプ回路で増幅され、Arduino によって 10 bit のデジタル値に変換して「電気信号の波高」として USB-Micro B ケーブルを通して Windows PC、または検出器付属の microSD カードに保存される (図2)。経路や高度の測定は小型軽量のアウトドア向け GPS 受信機である GARMIN ETREX 32 x を用いた。



図1 宇宙線検出器 CosmicWatch

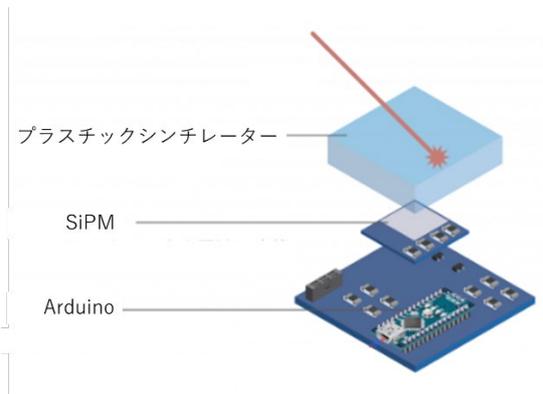


図2 CosmicWatch の内部構造⁴⁾



図3 GPS 受信機 GARMIN ETRIX 32 x

2.2 実験 1

2022年4月29日千葉県の自宅（標高3 m）から富士スカイラインを通り富士宮口新5合目（標高2300m）まで車で往復し車内に固定したCosmicWatchで宇宙線到来数を連続的に測定した。CosmicWatchは図3のように2台を縦に重ね、上の検出器を通過した宇宙線到来数と上下両方の検出器を同時に通過した宇宙線到来数を測定しそれぞれをPCに記録した。

上下両方の検出器を同時に通過した宇宙線到来数を測定することを今後2台同時測定という。2台同時測定では図4のように青い円で示す立体角の範囲から入射した宇宙線のみを計測する。

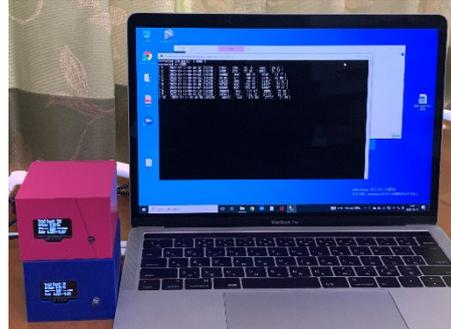


図3 車内に設置した計測装置

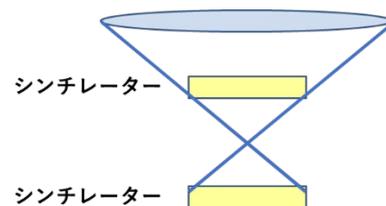


図4 2台同時測定の配置
プラスチックシンチレーターの大きさ
 $5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$
プラスチックシンチレーター間の距離（中心線間）5.2 cm

2.3 実験 2

2022年8月18日に東京駅八重洲口前（標高3 m）をバスで出発し、富士宮口新5合目2300 mより登山を開始、8合目で1泊した後、19日明け方に山頂（標高3740 m）に至り、富士宮口新5合目に下山し往路を戻った。測定は東京駅八重洲口前より開始し東京駅八重洲口前に到着するまで連続的に行った。測定ルートは図8に、携帯した測定装置は図5に示す。宇宙線到来数の測定はCosmicWatchを用い2台同時測定で行った。電源はモバイルバッテリーを使用した。データは2つ重なっている検出器のうち下の検出器に接続している

microSD カードに記録した。測定点の標高はトレッキング用 GPS ナビゲーション Garmin32x により測定した。



図5 登山に携帯した計測装置



図8 測定ルート

3 結果と考察

3.1 実験1

実験1に先立ち2021年末に検出器1台で千葉県自宅から富士スバルライン4合目(標高2045 m)までの宇宙線到来数の測定を行ったが、標高が上がることによる宇宙線到来頻度の増加傾向は観察することが出来なかった。先行研究と照らし合わせて2000 m程度の標高であれば地上との差は見えるはずなので、変化が見えない原因としてノイズが高いため高度依存性が隠されてしまっているのではと考えた。ノイズとしては装置内の熱によって生じた微弱な電流(熱電流)などに由来する電気信号や周りの物質からの放射線が考えられた。より純度の高い宇宙線由来のデータを解析するために2台の検出器を縦に重ねて両方

の検出器を同時に通過した宇宙線のみを測定することで宇宙線以外のノイズを除く検出器の2台同時測定を試みた。

図6(A)が縦に重ねた検出器のうち上の1台での測定の際の宇宙線到来頻度と標高の関係をプロットしたものである。往路と復路のグラフを重ねて示している。宇宙線到来頻度は宇宙線到来数を15分ごとに平均化し1分あたりの値とした。1台で測定したときは宇宙線到来頻度の標高依存性は見えなかった。宇宙線到来頻度と標高の関係を直線で近似したが高度依存性は見ることが出来なかった。往路での宇宙線到来頻度に比べ復路ではその数が増加した。このことについては、天候の違いによるものではないかと考えている。2022年4月29日当日、朝は曇天であったがスカイラインの終点近くで雨が降り始め、復路はまとまった降雨があった。空間放射線率は大気中のラドン-222子孫核種が降雨等により地表面に降下するため増加することが知られている⁶⁾。

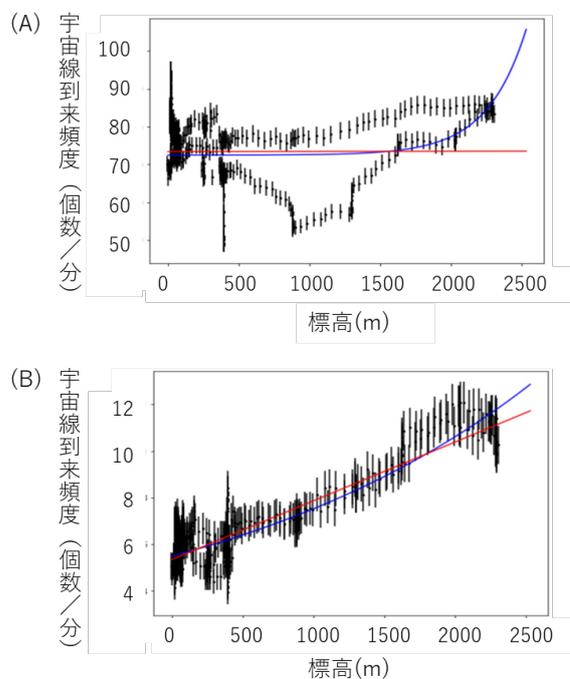


図6 2300 mまでの標高と宇宙線到来頻度
(A): 1台測定
(B): 2台同時測定

図 6 (B) は 2 台同時測定を行ったときの宇宙線到来頻度と標高の関係をプロットしたものである。2 台同時測定を行い両方の検出器を通過した宇宙線のみを測定することにより、往路と復路での同標高での宇宙線到来頻度の違いは小さくなった。このことより往路と復路での同標高での宇宙線到来頻度の違いは宇宙線由来以外の電気信号であったと考えられる。2300 mでの宇宙線到来頻度は地上でのものに対し 2.1 倍となった。

CosmicWatch では宇宙線によってシンチレーターで発光した光を電流に変換し、その電気信号を収集・解析する。この電気信号の強さを ADC 値という。CosmicWatch を用いた先行研究において電気信号の ADC 値が 200 以下のイベントはおおむね宇宙線由来ではないノイズであると結論づけているものがある⁷⁾。ADC 値が 200 以下のイベントがノイズであるかを調べるため、今回得られたデータから ADC 値 200 以下の電気信号を排除して宇宙線到来頻度と高度の関係をみてみた。

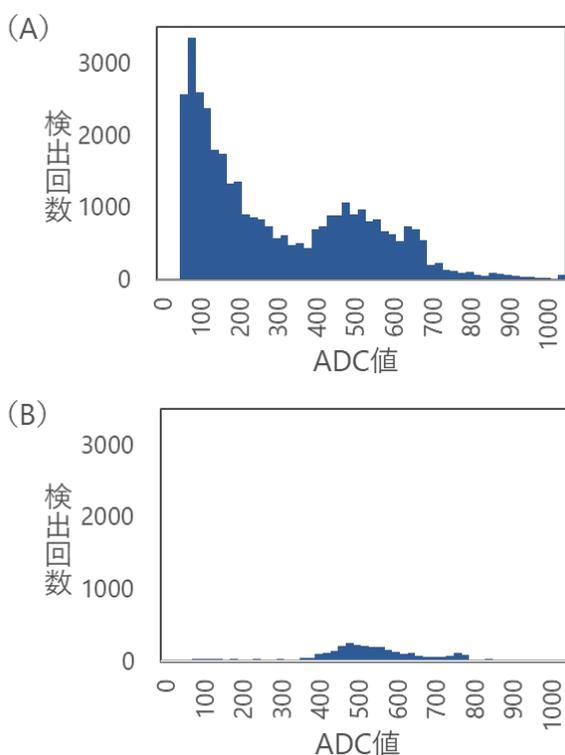


図 7 検出回数と ADC 値との関係
(A) : 1 台測定
(B) : 2 台同時測定

表 1 測定法による検出数

| | 1台測定 | 2台同時測定 |
|-----------------------|-------|--------|
| 全検出数 | 36153 | 3298 |
| ADC200以下検出数 | 15748 | 183 |
| ADC200以下の検出数 /全検出数 | 43.6 | 5.55 |

図 7 (A) は 1 台測定、図 7 (B) は 2 台同時測定を行ったときの宇宙線到来数の ADC 値の分布をみたものである。全データに対する ADC 値 200 以下の電気信号は、1 台測定で 43.6%、2 台同時測定で 5.55%となり 2 台同時測定では大幅に減少した(表 1)。この結果より 1 台測定では約 4 割が ADC 値 200 以下の電気信号であり、1 台測定では ADC 値 200 以下の電気信号が高度の増加による宇宙線到来頻度の増加が見えにくくしていることが明らかになった。

3.2 実験 2

富士山頂上まで登った時の宇宙線到来頻度と標高の時間ごとの変化を示したのが図 9 である。地上レベルから富士山頂上まで連続的にデータを得た。GPS ナビゲーションの測定が停止したため帰路で一部標高データが取得できなかった区間があった。宇宙線到来頻度は高度を増すごとに大きくなり、山頂で最大となり地上の 3.1 倍となった。この結果は球形 NaI(Tl) シンチレーターを用いて富士山で宇宙線の測定を行った先行研究²⁾ で得られた 3.6 倍と近い値となった。この差については本実験では移動しながらの測定のため、標高の誤差とサンプリングの誤差も大きくなっているためと考えた。移動速度をさらに小さくするかまたは測定時一定時間停止することにより誤差は小さく出来るだろう。また宇宙線の到来数は、入射する角度(天頂角)に依存するため、2 台同時測定の測定器の距離を離し宇宙線入射の立体角を絞ることでより高度依存性が見やすくなるだろう。

標高と宇宙線到来頻度の関係をグラフにまとめ、フィッティングを行った(図10)。標準誤差を評価してエラーバーをつけた。相関を直線で近似すると

$$y=0.32*0.01x+5.72$$

となりカイ2乗値は3.29となった。指数関数で近似すると

$$y=2.546*\exp((0.05110*(0.01x-1.950))+4.233)$$

となりカイ2乗値は2.2となった。3740mまでデータを取ることで、標高が高くなるにつれ宇宙線到来頻度増加の傾きが大きくなる傾向を見ることが出来た。気象庁の過去の気象データ検索によると2022年8月18から19日の間の宇宙線測定中の富士山周辺の大気圧は安定していた⁸⁾。したがって、測定された宇宙線強度の変化は気圧の水平分布の変動にともなうものではないと判断される。以上のことから測定結果は地上レベルから標高3740mまでの区間における宇宙線強度の高度変化を示していると考えられる。

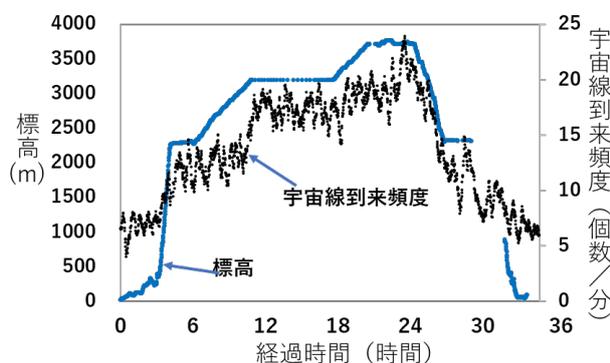


図9 富士山頂上までの標高と宇宙線到来頻度

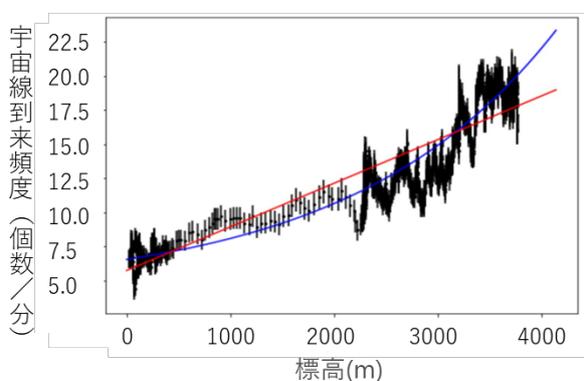


図10 富士山頂上までの標高と宇宙線到来頻度

4. 結論

小型で軽量の検出器を携帯して連続的に2台同時測定を行いながら富士山に登頂し高度3740 mまでの宇宙線到来頻度の高度変化に関する連続的なデータを得た。今回得た結果は分かりやすく直観と一致しやすいため、公表していくことで宇宙線研究の裾野を拡大に貢献できると考えている。

5. 展望

宇宙線到来頻度の高度依存性に関する測定実験では気球を使つての観測の事例もあるため、CosmicWatchの小型軽量の特性を生かしてさらに高高度での計測を行い宇宙線到来数が劇的に増加するさまを観測してみたいと考えている。さらに機会があれば地磁気緯度による宇宙線強度の変化も見てみたい。また、降雨による検出器の電気信号の検出頻度の変化についても興味がある。

6. 参考文献

- [1] 高エネルギー加速器研究機構 (KEK), 宇宙線を見る
<https://www2.kek.jp/ja/newskek/2003/sep/oct/sparkchamber.html> (2022年12月15日閲覧)
- [2] 古川雅英, 松本雅紀, 床次眞司, 藤高和信, 岡野眞治, ”富士山における宇宙線強度の高度変化” *RADIOISOTOPES*, 44, 19-22 (1995)
- [3] 藤高和信, ”航空機搭乗中の宇宙線被曝”, *保健物理*, 31(4), 463-471 (1996)
- [4] 加速キッチン, <http://accel-kitchen.com/> (2022年11月20日閲覧)
- [5] 新井詩乃, 末廣和夏, 森本結衣: ”高度による宇宙線到来頻度の違い”
<https://accel-kitchen.com/cosmicray/> (2022年12月15日閲覧)

[6] 吉本高志, 内田賢吾, “降雨による空間放射線量率の変動についての考察”, 石川保環研報 第 58 号 (2021)

[7] 澤井愛実, “霧箱と放射線検出器による放射線観測”, ハイスクール・ラジエーションクラス発表会(2022年10月30日)

[8] 気象庁ホームページより過去の気象データ, <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/e/trn/index.php>(2022年11月20日閲覧)