

秋田県における地上での μ 粒子検出頻度と天気ごとの地上気温、湿度、気圧との偏相関

Partial correlation between the frequency of muon detection on the ground in Akita Prefecture and the surface temperature, humidity, and atmospheric pressure for each weather

熊谷洗希¹, 渋谷遥斗¹, 森内厚佑¹, 水谷凜都¹, 登藤成琉¹, 丸田京華^{2,6}, 秋山翔希^{3,6}, 西隆博⁴,
田中香津生^{5,6}, 遠藤 金吾¹

Kouki KUMAGAI, Haruto SHIBUYA, Kousuke MORIUCHI, Rinto MIZUTANI, Naru TODO,
Kyoka MARUTA, Shoki AKIYAMA, Takahiro NISHI, Kazuo S. TANAKA, Kingo ENDO

秋田県立秋田高等学校¹, 東北大学工学部², 東北大学理学部³, 理化学研究所⁴, ポール・シェラー研究所⁵,
加速キッチン合同会社⁶

Akita Senior High School¹, Faculty of Engineering, Tohoku University², Faculty of Science, Tohoku University³,
RIKEN (Institute of Physical and Chemical Research)⁴, Laboratory for Particle Physics, Paul Scherrer Institute⁵,
Accel Kitchen LLC⁶

Corresponding Author's e-mail: kinnoji@af.wakwak.com

(Received: 10 September 2021; Accepted: 14 October 2021; Released: 5 November 2021)

[要約]

本研究では、秋田県立秋田高等学校生物実験室内に μ 粒子検出器CosmicWatchを設置して主に宇宙線由来の μ 粒子を観測した。 μ 粒子が地球上の大気を通過してくるから、地球の気象と μ 粒子検出について何らかの関係があると考えた。先行研究から、地上気温と気圧がともに μ 粒子検出頻度と負の相関があることが分かっている。そこで先行研究で行われていない、気象要素の中から1つの要素のみを抽出するという解析を行い、新たに天気ごとの解析を行うことにした。

今回の研究では、1つの要素を抽出し、他の要素の影響を排除した場合でも、 μ 粒子検出頻度と地上気温、気圧との間に負の相関があること、地上気温の方が気圧に比べ μ 粒子検出頻度とより相関が大きいことなどが分かった。また、天気ごとにも μ 粒子検出頻度の違いや μ 粒子検出頻度と各気象要素との間の相関に違いが見られることが分かった。今回の研究を通じて、 μ 粒子観測時の気象条件の補正に関する基礎データを得ることができた。

[キーワード] μ 粒子, 気温, 気圧, 天気, 偏相関

muon, temperature, atmospheric pressure, weather, Partial correlation

1. はじめに

宇宙線とは、宇宙空間を飛び回る高エネルギーの陽子や α 粒子などの粒子（一次宇宙線）と、それが大気粒子に衝突することで発生する粒子（二次宇宙線）の総称である。例えば一次宇宙線は、高度約20 kmの大気中の窒素や酸素の原子核などと衝突すると、 π 中間子やK中間子などを発生させ、さらにこれらが崩壊することで電子や μ 粒子（ミューオン）などが発生する。これらを総称して二次宇宙線と呼び、この過程のことを大気シャワー現象という（川田 2019）。このような連鎖的な大気粒子との相互作用と粒子の崩壊に伴って、二次宇宙線強度は減衰していく。電子の約200倍の質量で負の電荷を持つ μ 粒子はエネルギー損失も緩やかである。また、光速に近い速度の μ 粒子は相対論効果によって本来約2マイクロ秒の寿命が大幅に伸びるため、多くが崩壊前に地表に到達する。

μ 粒子はX線をはるかに超える高い透過性を持つため、大

規模構造物の探査にしばしば用いられており、この透視手法はミュオグラフィと呼ばれる（田中 2012）。一般に、X線を用いたX線フोटोगラフィーは数mの対象物の内部構造を透視するのに対して、ミュオグラフィは数km~数十kmの構造物をも透視することができる。これを利用してピラミッド（Patel, S.S. 2008）やダム、地下資源探査（Malmqvist, L 1979）、火山や断層構造（Tanaka, H.K.M 2011）のイメージングなどへの応用が期待されている。

μ 粒子は、一次宇宙線と大気粒子との相互作用によって生じたものであるため、地上で検出される μ 粒子の数は大気の状態が影響していると考えられている。また、透過力が強いとはいえ、 μ 粒子は大気層を通過してくるので、その間に大気粒子との相互作用が起こることも考えられる。過去に、京都府舞鶴市内において高層気温、地上気温と μ 粒子検出数との間に負の相関が見られたということが報告されている（藤波 1994）。また、気圧と μ 粒子検出数との間にも負の相

関が見られたということが報告されている (藤波 1994)。しかし、高層気温、地上気温と気圧との間には相関関係があることをはじめ、様々な気象要素が相互に影響を及ぼし合っている。そのため、先行研究では純粋に気温のみ、気圧のみのように他の気象要素を除外して1つの要素と μ 粒子検出数との相関を検討することはできていなかった。

このことを踏まえ、本研究の目的を以下のように設定した。まず、先行研究では用いられていなかった偏相関係数を導入し、複数の気象要素の中から1つの要素の影響のみを検証することを第1の目的とした。また、先行研究では行われていなかった天気ごとの解析を行い、天気と μ 粒子検出数がどのような関係にあるのかを明らかにすることを第2の目的とした。そして、気象と μ 粒子検出数との関係を総合的に理解し、地上での μ 粒子の解析を行う際の補正の基礎となる情報を公開することを第3の目的とした。本研究では、安価で小型である利点を持った μ 粒子検出器 CosmicWatch (S. N. Axani 2018) を採用した。これにより、宇宙線研究の裾野を拡大し、宇宙線を利用した技術開発、宇宙や素粒子に関する研究の促進に貢献することを第4の目的とした。

2. 実験装置と手法

2-1 実験装置

μ 粒子検出器はCosmicWatch (図1: 加速キッチン合同会社より提供) を用いた。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。 μ 粒子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、 μ 粒子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ときに、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 に保存される (図2)。



図1 μ 粒子検出器 CosmicWatch

外箱のサイズは、横66.5 mm、高さ52.0 mm、奥行き74.0 mmである。写真のUSB Micro-B ケーブルは背面に接続されており、これにより電源供給及びパソコンとの間でシリアル通信を行う。パネルには、電気信号の総カウント、測定時間、カウントレートが表示される。

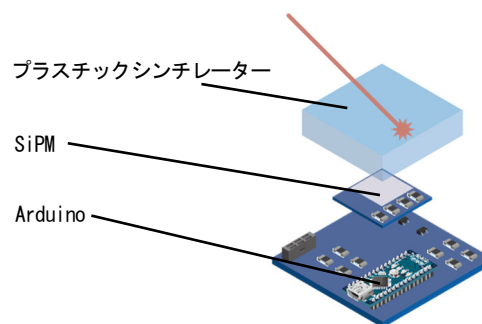


図2 CosmicWatch の内部構造 (田中 2019)

μ 粒子によって発光するプラスチックシンチレーターのサイズは50 mm × 50 mm × 10 mm、プラスチックシンチレーターからの光を電気信号に変換するSiPM受光面のサイズは6 mm × 6 mmである。SiPMからの電気信号を10 bit のデジタル値に変換するArduinoにはUSB Micro-B 端子接続部があり、ここよりWindows PC にデータが送られ、保存される。また、Arduinoには温度計も搭載されており、周囲の空気の温度も測定できる。

2-2 実験1

秋田県秋田市に位置する秋田県立秋田高等学校理科棟1階にある生物実験室に μ 粒子検出器 CosmicWatch を設置した。これにより、2020年10月17日～10月31日の期間、24時間体制で電気信号の検出を行い、PC に記録した。同時に、CosmicWatch 内蔵の温度計 (Arduino Nano 33 BLE Sense) を用いて、実験室内の室温を測定し、PC に記録した。

解析には、Google Colaboratory を利用してPython で記述したコードを用いた。実験室内の室温と電気信号の検出回数とを比較し、以下の式(1)を用いて相関係数 r を算出した。

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} \quad \text{式(1)}$$

(s_{xy} は x と y の共分散、 s_x 、 s_y はそれぞれ x 、 y の標準偏差)

2-3 実験2

実験1と同様の実験セットアップで、2020年10月1日～2021年6月30日の期間、24時間体制で μ 粒子の検出を行い、PC に記録した。本研究の測定期間には冬季が多く含まれることから、CosmicWatch 内蔵の温度計、湿度計、気圧計を用いた場合、校舎内の暖房によって室温や湿度が屋外よりも大きく変動してしまう。よって、気象庁で公開している秋田地方気象台での地上気温、湿度、気圧のデータを用いることとした。

解析には、Google Colaboratory を利用してPython で記述したコードを用いた。そして、 μ 粒子検出頻度と地上の気温、気圧、湿度とを比較し、相関係数 r は式(1)を、偏相関係数 r_{ij} は式(2)を用いて算出した。

$$r_{ij} = \frac{-c_{ij}}{\sqrt{c_{ii}} \sqrt{c_{jj}}} \quad \text{式(2)}$$

(ただし c_{ij} は相関行列の逆行列の (i, j) 要素である)

2-4 実験3

2020年10月1日～2021年6月30日の期間の μ 粒子検出頻度と、地上の気温、気圧、湿度、天気とを比較した。また、天気ごとの μ 粒子検出頻度の平均値を算出し、有意水準5%の一元配置分散分析で検定を行った。この際、地上の気温、気圧、湿度は秋田地方気象台で公開されている秋田市の1時間あたりのデータを用いることとし、相関係数 r は式(1)を、偏相関係数 r_{ij} は式(2)を用いて算出した。これらの解析コードはGoogle Colaboratoryを利用してPythonで記述した。

3. 結果と考察

3-1 実験1

2020年10月17日～10月31日の期間のCosmicWatchに流れた電気信号の波高と電気信号の検出回数との関係は図3のようになった。CosmicWatchに流れた電気信号の波高が200ch以下の領域で、検出回数が非常に多くなっていた。

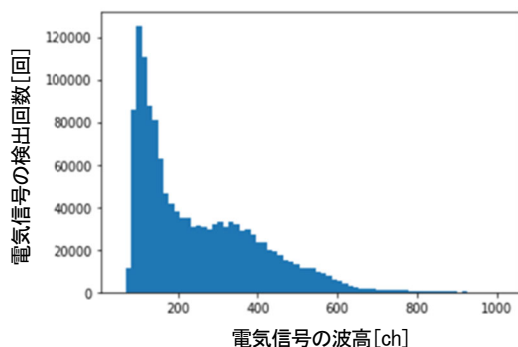


図3 電気信号の波高と電気信号の検出回数との関係

本研究における μ 粒子の検出・データ収集の原理に照らし合わせると、得られたデータの中には、 μ 粒子検出に由来する電気信号だけでなく、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が含まれる可能性が考えられた(以後、これを「ノイズ」と呼ぶ)。実際、CosmicWatchを用いた他の研究において、次のような報告がある。2台のCosmicWatchで同時に計測を行うと、大気シャワーに由来する μ 粒子は2台のCosmicWatchで同時に電気信号として検出される。しかしながら、一方のCosmicWatchのみで検出される電気信号もある。その場合、概ね電気信号の波高が200ch以下であり、これをノイズであると結論付けている(早坂2020)。そこで本研究で用いるCosmicWatchにおいても、純度の高い μ 粒子由来のデータを解析するために、ノイズと考えられるデータをカットする基準を検討することとした。

先行研究(藤波1994)では、地上気温と μ 粒子検出数との間に負の相関が見られたが、熱電流由来のノイズは、CosmicWatch内蔵の温度計の示す値が高いほど多くなる傾向があると考えられ、実験室内の室温とノイズの検出回数との間には正の相関が見られるはずである。よって、熱電流由来

のノイズが多く検出されていると予想された電気信号の波高200ch前後の領域について、電気信号の波高の範囲を区切って実験室内の室温と検出頻度との間の相関係数を算出した。その結果、2020年9月16日～9月30日の期間の電気信号の検出頻度(1時間あたりの検出回数)と実験室内の室温との間の相関係数は、電気信号の波高が100～200chの範囲では0.59(図4(A))と正の相関であった。しかし、電気信号の波高が200～300chの範囲では-0.03(図4(B))、電気信号の波高が300～400chの範囲では-0.30(図4(C))となり、電気信号の波高が200ch付近を境にして、先行研究と同様の傾向である負の相関へと傾向が逆転していった(図4A～C)。

以上のことを総合的に考え、電気信号の波高が200ch以下の大量に検出されたデータの大部分はノイズだと判断した。以後は電気信号の波高が200ch以下のデータを除外したものを μ 粒子を検出したデータとして解析することとした。

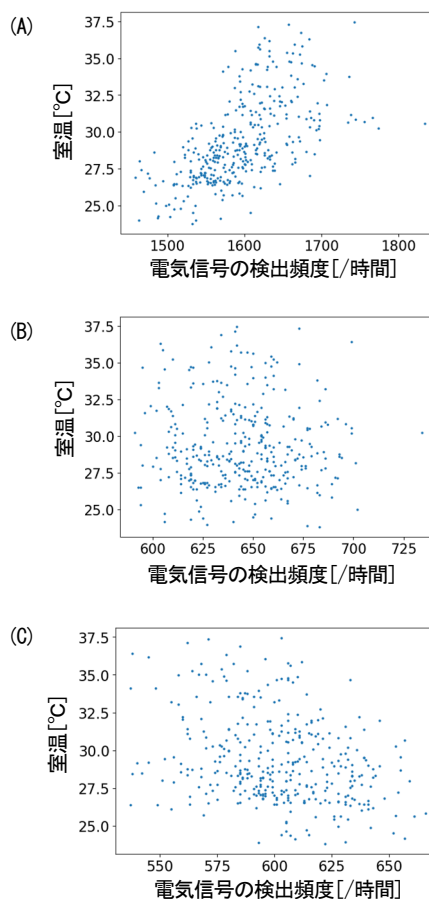


図4 電気信号の検出頻度と実験室内の室温との関係
電気信号の波高が、(A) : 100～200 chの範囲、(B) : 200～300 chの範囲、(C) : 300～400 chの範囲におけるデータを示している。

3-2 実験2

地上気温と μ 粒子検出頻度との間の相関係数は-0.73であった(図5(A))。湿度と μ 粒子検出頻度との間の相関係数は0.08であった(図5(B))。気圧と μ 粒子検出頻度との間の相関係数は0.06であった(図5(C))。

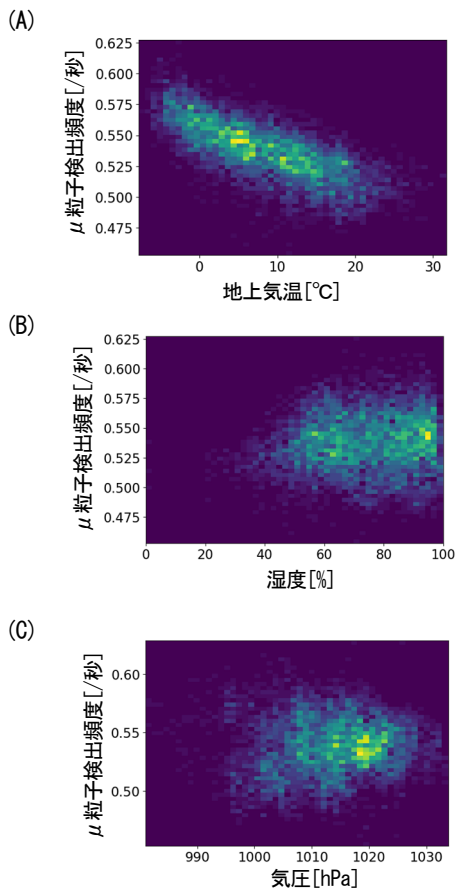


図5 μ 粒子検出頻度と気象要素との関係

- (A) : μ 粒子検出頻度と地上気温との関係
 (B) : μ 粒子検出頻度と湿度との関係
 (C) : μ 粒子検出頻度と気圧との関係

ある特定の要素の影響を除いた偏相関係数を求めたところ、地上気温と μ 粒子検出頻度との間の偏相関係数(±標準誤差)は-0.75(±0.01)であった。湿度と μ 粒子検出頻度との間の偏相関係数は-0.08(±0.01)であった。気圧と μ 粒子検出頻度との間の偏相関係数は-0.24(±0.01)であった(表1)。

地上気温、湿度、気圧の中では、地上気温のみが μ 粒子検出頻度との間で強い負の相関が見られ、湿度や気圧は μ 粒子検出頻度との間にごく小さな正の相関しか見られなかった。一方で、偏相関係数を調べたところ、地上気温及び湿度と μ 粒子検出頻度との間の偏相関係数は相関係数ほとんど変わらないものの、気圧と μ 粒子検出頻度との間の偏相関係数は相関係数より変化し、負の相関を示すようになった。(表1)。

表1 地上気温、湿度、気圧と μ 粒子検出頻度との間の相関係数と偏相関係数。誤差は標準誤差である。

気象要素	相関係数	偏相関係数
地上気温 [°C]	-0.73 ± 0.01	-0.75 ± 0.01
湿度 [%]	0.08 ± 0.01	-0.08 ± 0.01
気圧 [hPa]	0.06 ± 0.01	-0.24 ± 0.01

地上気温と μ 粒子検出頻度との間の負の相関については、これまで以下のように考えられてきた。一次宇宙線が窒素や酸素などの大気粒子と相互作用することで μ 粒子などの二次宇宙線が発生する。地上気温の上昇により空気が膨張すると、より高高度で一次宇宙線と大気粒子との相互作用が起こることとなり、より高高度で μ 粒子が発生することとなる。すると、 μ 粒子が地上に到達するまでの大気中の走行距離が長くなり、その間に崩壊する μ 粒子が多くなる(藤波 1994, 湊 1993)。このことを一般に「気温効果」と呼ぶ。

また、気圧と μ 粒子検出頻度との間の負の相関については、これまで以下のように考えられてきた。気圧が高いということは、上空にある大気が重い、すなわち上空にある大気粒子数が多いということである。これにより、大気中を走行してくる μ 粒子は大気粒子と相互作用しやすくなり、 μ 粒子のエネルギーが減少し μ 粒子が崩壊しやすくなる(藤波 1994, 湊 1993)。このことを一般に「気圧効果」と呼ぶ。

偏相関係数同士を比較すると、地上気温と気圧では、地上気温の方がより強く μ 粒子検出頻度に影響していた。従来から言われていた「気温効果」、「気圧効果」は見られたものの、影響としては「気温効果」の方が大きいことが明らかとなった。

地上気温に関しては、相関係数と偏相関係数がほぼ等しく、除外した気圧の影響は地上気温と比してごく僅かであると考えられた。また、気圧に関しては、相関係数よりも偏相関係数の方が、負の方向に補正されていた。一般に、地上気温と気圧との間には負の相関があることは広く知られていることから、除外した地上気温が気圧を通して μ 粒子検出頻度に影響を及ぼしていたのだと考えられた。

3-3 実験3

天気ごと(晴れ:933時間、雨:689時間、曇り:1815時間、雪:680時間)に1秒あたりの μ 粒子検出頻度の平均値を求めたところ、表2のようになった。

表2 天気ごとの1秒あたりの μ 粒子検出頻度

天気 ^a	晴れ ^b	曇り	雨	雪
μ 粒子検出頻度[1/秒]	0.53	0.54	0.54	0.57

^a: 晴れ・快晴、曇り、雨、雪以外の天気は本集計から除外した。
^b: 秋田地方気象台のデータは快晴も晴れとして集計されており、これに従った。

また、天気ごとに、1秒あたりの μ 粒子検出頻度とその頻度で検出した回数(度数)をヒストグラムに表したところ、図6(A)のようになった。これを、地上気温が $-2.5\sim 0$ °Cのデータのみ抽出してヒストグラムに表したところ、図6(B)のようになった。なお、一元配置分散分析を用い、5%有意水準で検定を行ったところ、地上気温抽出前後ともに雪のときの μ 粒子検出頻度は他の天気のとときと比べて、有意に差があった(図6(A)(B))。

さらに、天気ごとに地上気温、気圧、湿度と1秒あたりの μ 粒子検出頻度との間の偏相関係数(±標準誤差)を求めたところ、表3のようになった。

表3 天気ごとの地上気温、湿度、気圧と1秒あたりの μ 粒子検出頻度の間の偏相関係数。誤差は標準誤差である。

天気 ^a	晴れ ^b	曇り	雨	雪
地上気温 [°C]	-0.58 ± 0.02	-0.71 ± 0.01	-0.56 ± 0.03	-0.43 ± 0.03
湿度 [%]	-0.06 ± 0.02	-0.12 ± 0.02	-0.10 ± 0.03	-0.10 ± 0.04
気圧 [hPa]	-0.03 ± 0.02	-0.14 ± 0.02	-0.01 ± 0.03	-0.38 ± 0.03

^a: 晴れ・快晴、曇り、雨、雪以外の天気は本集計から除外した。
^b: 秋田地方気象台のデータは快晴も晴れとして集計されており、これに従った。

これまでほとんど行われてこなかった天気ごとの μ 粒子検出頻度を検討するため、 μ 粒子検出頻度の平均値を算出したところ、雪のときは他の天気のとときよりも有意に μ 粒子検出頻度が高かった(図6(A)、表2)。これに関して、雪は冬季の特に気温が低い日に限定される傾向にあるため、雪であるということよりも、気温が低いことによって μ 粒子検出頻度が高くなっている可能性が考えられた。そこで、地上気温を 2.5 °Cずつ区切り、雪が降りうる気温で、データ数の多い $-2.5\sim 0$ °Cの範囲で同様の解析を行った。その結果、依然として雪のときは他の天気のとときよりも有意に μ 粒子検出頻度が高いことが明らかになった(図6(B))。

天気ごとに、地上気温、湿度、気圧と μ 粒子検出頻度との間の偏相関係数を比べたところ、雪のときのみ気温効果が低くしか表れていなかった(表3)。これは、雪は冬季にしか見られず、地上気温の取りうる範囲が限定されており、相関が見えにくくなっていたためであると考えられた。

また、気圧効果は雪のときのみ見られ、その他の天気ではごく弱い相関しか見えなかった(表3)。晴れのときは一般に高気圧である、曇りや雨のときは一般的に低気圧であるなど、気圧のとり得る範囲が限定されており、気圧効果が見えにくい状況にあることが原因だと考えられた。雪のときに関しては、日本海側での降雪は、発達したシベリア気団からの季節風によるものと、移動性の低気圧によるものに分類され(力石 2009)、一概に雪と言っても様々な気圧を取りうることで気圧効果を見ることができたと考えられた。今後、これを詳細に検証していくために、シベリア気団からの季節風による降雪が起りにくい太平洋側のデータとの比較を行うなど、解析を進めていく必要がある。

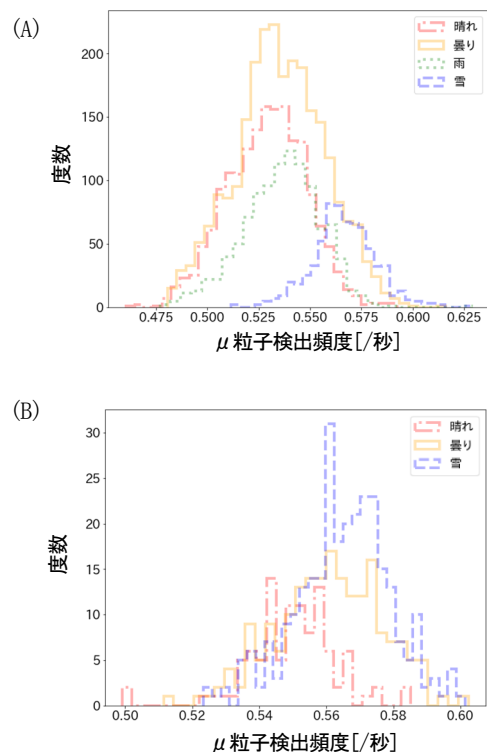


図6 天気ごとの1秒あたりの μ 粒子検出頻度とその度数

(A): 地上気温で区別せずに集計したもの。
 (B): 地上気温が $-2.5\sim 0$ °Cのデータのみを集計したもの。なお、氷点下における雨の観測結果はほとんどなかったため、雨のデータは示していない。

4. 結論

本研究でも、これまでの研究で言及されていた「気温効果」「気圧効果」を観測することができた。また、この両者を比べると、「気温効果」の方が μ 粒子検出頻度により強い負の相関をもたらしていることが明らかになった。

また、雪のときに地上気温の μ 粒子検出頻度への影響は弱くなり、雪以外のときに気圧の μ 粒子検出頻度への影響は弱くなることも明らかになった。しかし、これは雪自体の影響というよりも、気温が低温の狭い範囲に限定されていること、天気と気圧との間の相関によるものだと考えられた。

本研究で集められた気象要素と μ 粒子検出数に関するデータは、今後の宇宙線観測および解析において気象要素による影響を考慮して補正を行う際の基礎的な資料として活用できる。ミュオグラフィのような宇宙線を活用した技術を発展させていくことにも、本研究で得たデータは貢献できると考えている。また、本研究では比較的安価な検出器であるCosmicWatchを用いたが、今回得た成果を公表していくことで、宇宙線研究の裾野を拡大し、宇宙線研究の分野がさらに発展していくことにも貢献できると考えている。

引用及び参考文献

- 川田和正 (2019), チベット空気シャワー実験による高エネルギー宇宙線観測—銀河系内宇宙線起源の探求—, *RADIOISOTOPES*, 68, p829-841.
- 田中香津生, 中高大・研究所による宇宙線観測活動コンソーシアム活動計画書 <https://tanq.kaduo.jp/tanq-pamflet-2020-A4-lite.pdf>
- 田中宏幸 (2012), ミュオグラフィの現状と将来について, *物理探査*, 65, 1&2号 p93-102.
- 早坂大弥, 後藤くるみ, 倉嶋太郎, 田中悠太郎, 上林大悟 (2020), 宇宙線を介して見る太陽活動の雲量への影響, 山形県立山形東高等学校校内発表会資料.
- 藤波直人, 渡辺哲也, 伊吹勝蔵, モニタリングポストのNaI(Tl)検出器で測定された宇宙線強度に対する気圧と気温の影響, *保健物理*(1994)29, p309-313.
- 湊進(1993), 地下 μ 粒子計数率の時間変動に関わる因子ごとの効果係数, *RADIOISOTOPES*, 62(6), p375-383.
- 力石 國男, 北村 卓也 (2009), 日本海側における季節風型降雪と低気圧型降雪の発生割合の地域性, 雪氷研究大会講演要旨集.
- Malmqvist, L., Jönsson G, Kristiansson K and Jacobsson, L. (1979): Theoretical studies of in-situ rock density determination using cosmic-ray muon intensity measurements with application in mining geophysics, *Geophysics*, 44, p1549-69.
- Patel. S.S. (2008): Ghost particles and pyramids, *Archaeology*, p30-35.
- S.N. Axani1, K. Frankiewicz, J.M. Conrad (2018), The CosmicWatch Desktop Muon Detector: a self-contained, pocket sized particle detector, *Journal of Instrumentation*, 13(03), P03019.
- Tanaka, H.K.M., H. Miyajima, T. Kusagaya, A Taketa, T. Uchida, M. Tanaka (2011): 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, p156-162.