

μ 粒子検出頻度の周期性と太陽活動との相関解析

Correlation analysis between the periodicity of muon detection frequency and solar activity

池本 雄途¹, 柴田 圭輔¹, 加藤 文也¹, 熊谷 洸希², 田中 香津生^{3,4}, 藤井 翼¹

Yuto IKEMOTO, Keisuke SHIBATA, Fumiya KATO, Kouki KUMAGAI, Kazuo S. TANAKA,
Tsubasa FUJII

秋田県立秋田高等学校¹, 東京大学教養学部², 早稲田大学理工学術院総合研究所³, 加速キッチン合同会社⁴
Akita Senior High School¹, College of Arts and Sciences, University of Tokyo², Waseda Research Institute for Science
and Engineering³, Accel Kitchen LLC⁴

Corresponding Author's e-mail: fujii-tsubasa@e-akita.ed.jp

(Received: 6 October 2023; Accepted: 17 October 2023; Released: 29 January 2024)

[要約]

秋田高校内に μ 粒子検出器 CosmicWatch を設置して測定してきており、これまでの観測データから μ 粒子検出頻度には周期性があることが示されている。先行研究から、宇宙線と太陽活動には負の相関があることが報告されている。本研究では、 μ 粒子検出頻度に周期性がある要因として太陽活動の影響があることを仮定し、太陽活動データと μ 粒子検出頻度のデータを用いて様々な解析を行った。太陽活動データとして、太陽活動定量評価と黒点相対数の2つの指標を用いて解析したところ、これらの年較差と μ 粒子検出頻度の年較差の解析から、太陽活動と μ 粒子検出頻度には負の相関があることが分かった。また、太陽活動の各データと μ 粒子検出頻度のそれぞれに共通した18日周期が検出されたことから、 μ 粒子検出頻度の周期性の要因として太陽活動が存在することが示唆された。精度の高い解析を行うには、今後、 μ 粒子の測定期間を年単位で延長してデータを収集することが必要であると考えられる。

[キーワード] μ 粒子, 太陽活動, 黒点相対数, 周期, 偏相関

Muon, Solar activity, Sunspot relative numbers, Periodicity, Partial correlation

1. はじめに

宇宙空間には高エネルギー放射線である宇宙線が存在し、地球上に降り注いでいる。この宇宙線が大気と衝突し、崩壊を繰り返す。この崩壊前の宇宙線を一次宇宙線といい、陽子や α 粒子などがある。大気粒子に衝突して崩壊することで発生する宇宙線を二次宇宙線とよび、 π 中間子やK粒子などがある。このような宇宙線が崩壊を繰り返していく過程を大気シャワー現象という。二次宇宙線である π 中間子やK粒子がさらに崩壊することで発生するのが μ 粒子である。

μ 粒子は透過性が非常に高く、人体にとって無害なのが特徴である。そのため、大規模構造物の探査に用いられており、地下資源探査や火山の断層構造の解析などへの応用が考えられている。また、スピン偏極した μ 粒子を物質に照射すれば、内部磁場の大きさ・ゆらぎを捕捉でき、様々な物質の性質を測定できる(小池, 2018)。これを利用すれば、核磁気共鳴法(NMR)のような応用が可能であると考えられている。

秋田高校理数科では μ 粒子の測定を2020年より行ってきたが(熊谷ら, 2021)、これまでの解析から μ 粒子検出頻度には周期性がある可能性が示唆されている。しかし測定が短期間であったため、 μ 粒子検出頻度の周期性の要因は、詳細には解明されていない。

宇宙線に影響を及ぼす因子として太陽活動があり、太陽活

動と宇宙線の飛来には負の相関があることが報告されている(宮原, 2009)。太陽活動が活発化すると、太陽フレアの温度上昇や太陽磁場強度が増加し、これにより宇宙線の飛来の進路が変更されて、地球への宇宙線の飛来が減少するという仕組みが考えられている(湯田, 2002)。

以上のような背景の下に、本研究では、 μ 粒子検出頻度には周期性があり、その要因として太陽活動が挙げられるという仮説を立て、様々な観点から解析を行った。太陽活動の指標として、太陽活動定量評価や黒点相対数を用い、 μ 粒子検出頻度とともにそれらの周期性や相関性を解析することで、相互の関連を考察した。

2. 実験方法

μ 粒子検出器はCosmicWatch(加速キッチン合同会社)を用いた(田中, 2013)。仕組みは図1の通りであり、シンチレータとSiPM(シリコン光電子増幅器)で構成されている。CosmicWatchに μ 粒子が飛来すると、シンチレータが蛍光を発する。その光を半導体SiPMを用いて電気信号に変換し、Arduinoを通してそのデータがPCに保存されるという仕組みである。このようにして、電気信号の波高(adc)と、検出された時間が記録される。CosmicWatchによる μ 粒子の測定条件は、先行研究と同様の手法によって行った(熊谷ら, 2021)。

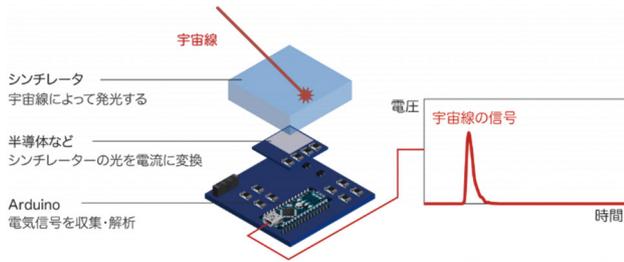


図1 μ粒子検出器 CosmicWatch の仕組み

太陽活動の指標として、太陽活動定量評価と黒点相対数を用いた。太陽活動定量評価とは本研究により定義した数値であり、国立研究開発法人通信研究機構宇宙天気予報内のレポートを参考にして太陽活動の活発さを定量的化したものである（国立研究開発法人通信研究機構、2022）。この値は太陽磁場、太陽風、太陽フレアの変動を総合的に評価し、4段階の指標で表されている。参照にしたレポートは9:00と21:00の1日2回発表されている。この際に、「静穏」を1、「やや活発」を2、「活発」を3、「非常に活発」を4とした。

黒点相対数とは、黒点と黒点群の総量を数値化したものであり、値は国立天文台太陽観測プロジェクト三鷹太陽地上観測のサイトを参照して求めた（国立天文台太陽観測プロジェクト、2022）。黒点相対数を求める式は下の式(1)のように表される。

$$R = k(10g + f) \dots (1)$$

R: 黒点相対数 k: 観測条件などによる補正定数
g: 黒点群数 f: 黒点数

これらの太陽活動の指標とμ粒子検出頻度の相関解析を行った。また、これらの解析の期間は2021年12月15日～2022年05月31日である。

μ粒子検出頻度の年平均、月平均、季節平均の解析では、気象庁のデータを用いた（国土交通省気象庁、2022）。3-5月を春、6-8月を夏、9-11月を秋、12-2月を冬として解析した。また、太陽活動の指標である黒点相対数の年較差も求め、太陽活動の活発さとμ粒子検出頻度がどのような因果関係を持つのか考察した。この解析の期間は、2020年9月1日～2022年10月31日である。

太陽活動の2つの指標とμ粒子検出頻度の周期解析の手法として、離散フーリエ変換(DFT)とLomb-Scargle Periodogram (Lomb-Scargle法)を用いた(Jacob T. VanderPlas, 2018)。離散フーリエ変換とは、横軸を時間、縦軸をデータの数値としてグラフにプロットし、そのグラフの変化を複数の波の重ね合わせとして分解し、周期を解析する方法である。Lomb-Scargle Periodogramとは、同様に横軸に時間、縦軸にデータの数値を取り、グラフにプロットし、得られたグラフを式(2)で最小二乗フィットする。

$$f(t) = A \cos \omega t + B \sin \omega t \dots (2)$$

A, B: 任意の定数 ω: 角振動数 t: 時間 (変数)

そして、グラフと式(2)の波の形が近くなるときに強い周期が得られる。Lomb-Scargle Periodogramは、不均一にサンプリングされたデータを解析することができ、天文学やその他の分野で不等間隔データの周期性を計算するためのよく知られた手法である。離散フーリエ変換はデータの観測を等間隔で行う必要があり、Lomb-Scargle Periodogramでは等間隔である必要はないという特徴を持つ。

本研究ではこの特性を利用し、太陽活動定量評価の周期解析の際には離散フーリエ変換を用い、μ粒子検出頻度や黒点相対数の周期解析の際にはLomb-Scargle Periodogramを用いた。この解析の期間は2021年9月1日～2022年5月31日である。また、周期グラフの縦軸はpower、横軸はperiod(day)で表す。

また、μ粒子には気温効果があることが知られている(湊、2013)。気温効果とは気温が上昇することに伴い、μ粒子検出頻度が減少するというものである。高層気温が上昇し、π中間子の崩壊高度が上昇する。これに伴いμ粒子の発生高度が上昇し、地上に到達するμ粒子の数が減少する。このような仕組みによって、気温効果が説明される。μ粒子検出頻度の周期を解析する際には、気温効果を線形関数を用いて補正した。これは、気温効果が影響することで整数日の周期が本来よりも強く見られることを防ぐためである。

そして、前述のように秋田高校1階の生物実験室でμ粒子の検出を行った。μ粒子の検出について、一台観測(図2)とcoincidence法を用いた二台観測(図3)を行った。coincidence法とは、CosmicWatchを縦に2台重ねて設置してμ粒子の検出を行う手法である。このcoincidence法を用いることによって、一台観測よりも精度が高く、ノイズを除去して観測を行うことができる。また、一台観測のデータを用いる場合にはノイズの除去が必要である。今回は波高分布を参考に、adc200以下のデータを除去した(熊谷ら、2021)。



図2 CosmicWatchの一台観測の様子

μ粒子を検出すると右下のLEDが発光する。検出データを電気信号に変換し、データをPCに集積する。



図3 CosmicWatch の coincidence 法での観測の様子

coincidence 法での観測期間は2021年9月1日～2022年5月31日、一台観測での期間は2020年9月1日～2022年10月31日である。

解析の際にデータ量が膨大になることを防ぐため、 μ 粒子検出頻度を1時間平均し、データを処理した。この際、 μ 粒子検出頻度の単位はすべて検出回数 (times) / 秒 (second) に統一した。得られたデータは、Google Colaboratory を利用して Python で記述したコードを用いて解析し、計算には Microsoft Excel を用いた。

3. 結果と考察

3-1 μ 粒子検出頻度と太陽活動との相関解析

太陽活動定量評価を計算したデータを求め、 μ 粒子検出頻度との関連を解析するために散布図を作成した(図4)。解析に用いたデータ期間は、2022年4月1日～30日の1ヵ月間である。図4のように、散布図からは太陽活動定量評価と μ 粒子検出頻度の間には明確な関連は観察されなかった。これら2つの間の相関係数を計算したところ、値は-0.0367となり、有意な相関は見られなかった。

図4の結果より、太陽活動定量評価の値が2と3であるとき、 μ 粒子検出頻度の値にばらつきが観察された。そこで、太陽活動定量評価の値が1と4であるときに着目して解析を行った。この解析に用いたデータ期間は2021年12月15日～2022年5月31日の約半年間であり、図4の解析より長めに取った。太陽活動定量評価の値が1と4のときの各 μ 粒子検出頻度を表したグラフを図5に示した。グラフ中のエラーバーは標準誤差の2倍の値を表している。

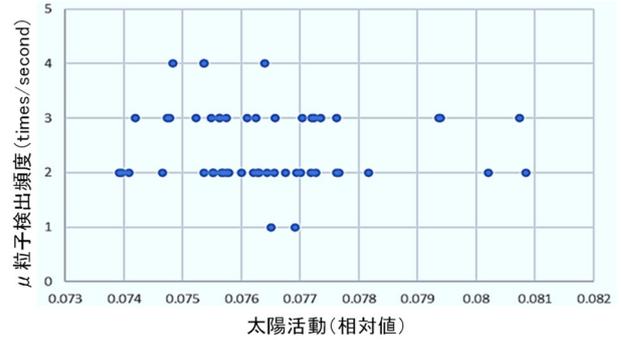


図4 太陽活動と μ 粒子検出頻度の散布図による相関性の解析

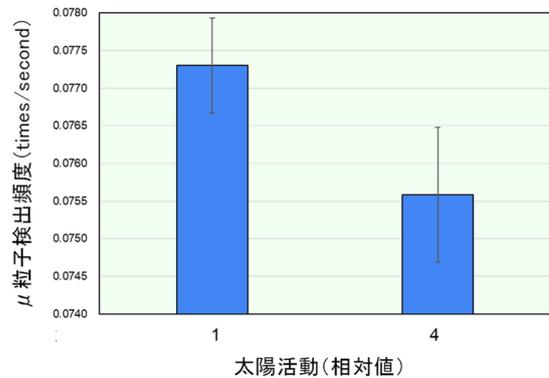


図5 太陽活動が高い時期に μ 粒子検出頻度が減少 (グラフの値は測定値の平均値±標準誤差x2を示す)

図5のように、太陽活動定量評価の数値間で比較すると、太陽活動が低レベルの1の場合の方が太陽活動が高レベルの4の場合に比べて μ 粒子検出頻度が有意に高いことが分かった。

太陽活動と μ 粒子検出頻度との関連をさらに明らかにするために、 μ 粒子検出頻度と太陽活動定量評価及び黒点相対数の偏相関係数を計算した(表1)。解析に用いたデータ期間は、図5と同様の2021年12月15日～2022年5月31日の約半年間である。

表1の結果のように、太陽活動定量評価と黒点相対数の間には正の相関があることが示されたが、これは事前に予想された通りであった。一方で、 μ 粒子検出頻度と太陽活動定量評価及び黒点相対数のそれぞれ2つの指標の間には弱い負の相関があることが分かった。しかし、これらの μ 粒子検出頻度と太陽活動2指標との間の負の相関は、太陽活動2指標間の正の相関よりも弱いものであった。

表1 各因子の偏相関係数

	$r_{xy.z}$	$r_{yz.x}$	$r_{zx.y}$
偏相関係数	-0.157	0.297	-0.111

x: μ 粒子検出頻度、y: 太陽活動定量評価、z: 黒点相対数
($r_{xy.z}$: z の要素を取り除いた x と y の偏相関係数)

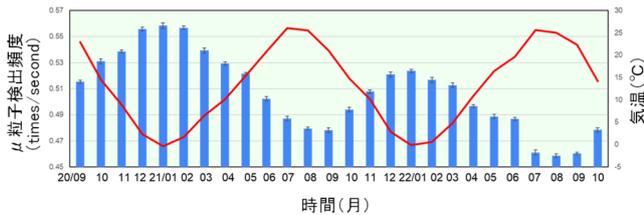


図6 μ 粒子検出頻度と気温の月平均の変動の負の相関
(青棒は μ 粒子検出頻度であり測定値の平均値 \pm 標準誤差 $\times 2$ 、赤折れ線は気温の平均値を示す)

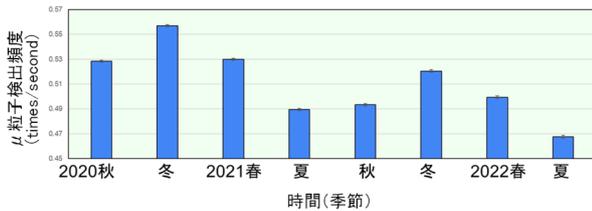


図7 μ 粒子検出頻度の季節変動は夏に低値・冬季に高値を示す
(グラフの値は測定値の平均値 \pm 標準誤差 $\times 2$ を示す)

太陽活動定量評価は、太陽風や太陽磁場、太陽フレアの変動を総合的に判断して決定される離散データである。本研究では、4 段階の値で評価を行ったため、データの不均一性が起こっていることが弱い相関性の一因である可能性がある。実際には異なる条件下でも同じ値と判定されてしまう事が多く起こってしまうので、精度を高めるにはこのような影響をできるだけ排除できるような解析を行う必要がある。

黒点相対数のデータには観測が行われなかった期間が計測期間の約 3 割程度存在し、太陽活動の影響が顕著に見られる日のデータが不足していることなどが今回の解析に影響している可能性がある。今後、さらに観測データを増やして解析の精度を高めていく必要があると考えられる。

図 6 に μ 粒子検出頻度の月毎の変動を示した。解析に用いたデータ期間は、2020 年 9 月 1 日～2022 年 10 月 31 日の 2 年間である。グラフに示されたように、 μ 粒子検出頻度の月毎の変動には規則的な周期があり、気温の変動との間には負の

相関があることが確認された。

μ 粒子検出頻度の変動について、3 ヶ月毎の春夏秋冬の季節において平均値を計算した結果を図 7 に示した。これらのグラフから、 μ 粒子検出頻度は夏に小さく、冬に大きいという傾向が観察された。以上のように、 μ 粒子検出頻度には周期性のある季節変動があることが分かった。

太陽活動の指標である黒点相対数を図 8 に示した。解析に用いたデータ期間は、2020 年 9 月 1 日～2022 年 10 月 31 日の 2 年間で、2020 年 9 月 1 日～12 月 31 日、2021 年 1 月 1 日～12 月 31 日、2022 年 1 月 1 日～10 月 31 日の 3 年分の区分でそれぞれ平均値を求めた。今回の測定期間では、黒点相対数の平均は年々増加していた。

2021 年と 2022 年の同時期 1 月 1 日～10 月 31 日 (10 ヶ月) の μ 粒子検出頻度の平均値を比較した結果を図 9 に示した。 μ 粒子検出頻度の平均値は 2021 年と比較して 2022 年では低下していた。これらを図 8 の結果と比較すると、黒点相対数と μ 粒子検出頻度の間には負の相関が存在する可能性が示唆された。

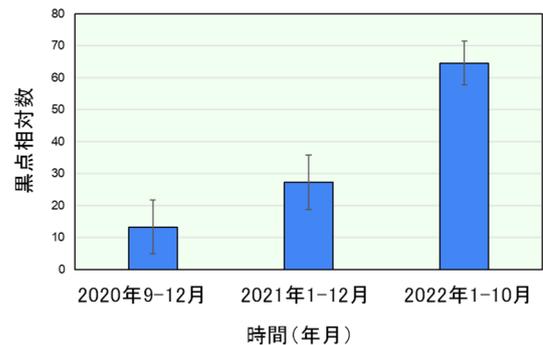


図8 黒点相対数の平均数の年進行による増加
(グラフの値は測定値の平均値 \pm 標準誤差 $\times 2$ を示す)

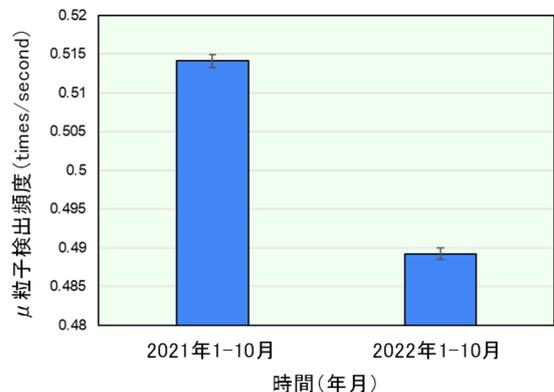


図9 2021 年と 2022 年の同時期の μ 粒子検出頻度の比較
(グラフの値は測定値の平均値 \pm 標準誤差 $\times 2$ を示す)

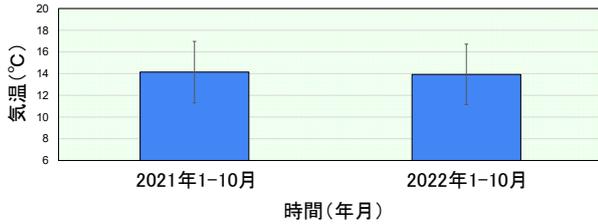


図 10 2021 年、2022 年同時期の気温比較
(グラフの値は測定値の平均値±標準誤差 x2 を示す)

図 6 の赤折線に気温の月平均値の変動を示したが、 μ 粒子検出頻度と比較するために、図 9 と同様の期間で計算した結果を図 10 に示した。2021 年と 2022 年の同時期 1 月 1 日～10 月 31 日 (10 ヶ月間) の気温の平均値を比較した。気温は 2021 年よりも 2022 年の方がわずかに低かったが、有意な年較差は見られなかった。以上のように図 9 と図 10 を比較すると、少なくとも μ 粒子検出頻度の年較差は気温とは関連しないと考えられる。

3-2 μ 粒子検出頻度と太陽活動の周期

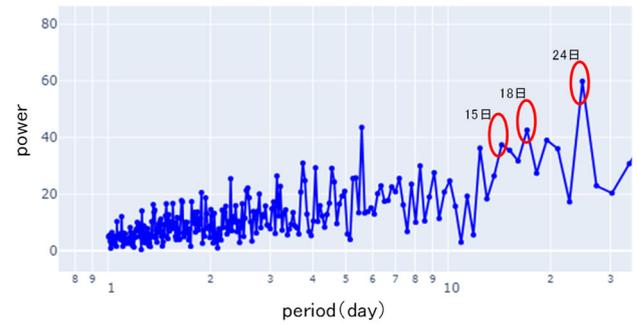
3-1 の結果より、 μ 粒子検出頻度の変動の要因として太陽活動の強度がある可能性が示唆された。そこで、 μ 粒子検出頻度と太陽活動定量評価及び黒点相対数の 3 つの指標について、それぞれ周期の解析を行って比較した。その結果を図 11 に示したが、A) は離散フーリエ変換で解析した太陽活動定量評価、その他は Lomb-Scargle Periodogram を用いて解析した結果で B) は黒点相対数、C) は μ 粒子検出頻度である。

図 11 の解析は、全て期間は 2021 年 9 月 1 日～2022 年 5 月 31 日までの 9 ヶ月間である。周期性が強いと縦軸の power の値が大きくなるが、いずれのグラフでも短く弱い周期が非常に多く観察された。一方で、長すぎる周期はフィットの試行回数が少なく信頼性が低いため、本研究では 10～30 日を有効な周期の長さとし、その中で最大値の 1/3 以上の power を持つ周期を有意な周期として抽出した。

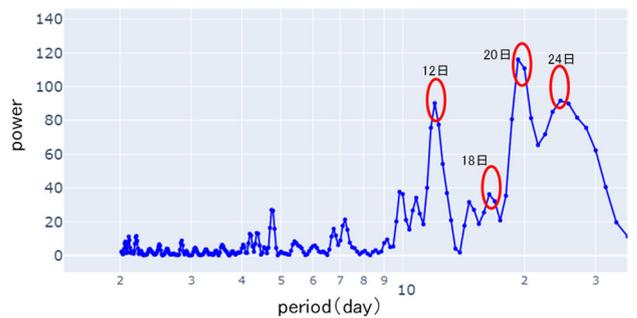
解析の結果、A) 太陽活動定量評価では、15 日、18 日、24 日の 3 種類の周期が観察された。B) 黒点相対数 12 日、18 日、20 日、24 日の 4 種類の周期が観察された。これらの太陽活動の指標で共通して観察された周期は 18 日と 24 日の 2 つであった。一方で、C) μ 粒子検出頻度では、12 日、18 日の 2 種類の周期が観察され、太陽活動の指標で共通して観察された 18 日の周期が観察された。

図 11 から観察された周期解析の結果を表 2 にまとめた。 μ 粒子検出頻度と太陽活動定量評価及び黒点相対数の 3 つの指標には、共通して 18 日の周期が存在することが明らかとなった。以上より、 μ 粒子検出頻度の周期性の要因として太陽活動が挙げられることが示唆された。

A) 太陽活動定量評価



B) 黒点相対数



C) μ 粒子検出頻度

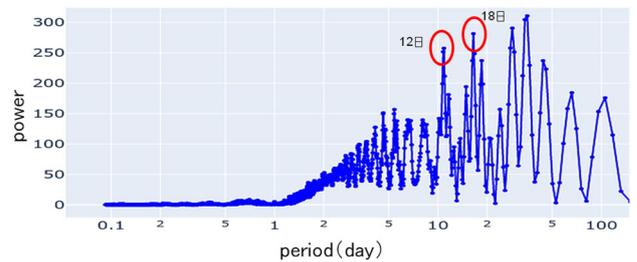


図 11 太陽活動と μ 粒子検出頻度の周期解析による
共通の 18 日周期の検出
(期間 : 2021. 9. 1～2022. 5. 31)

表 2 周期解析による共通の 18 日周期の検出

指標	周期
太陽活動定量評価	15, 18, 24
黒点相対数	12, 18, 20, 24
μ 粒子検出頻度	12, 18

(期間 : 2021. 9. 1～2022. 5. 31)

4. 結論

秋田高校内に設置した μ 粒子検出器 CosmicWatch によって 2020 年～2022 年に測定したデータを用いて μ 粒子検出頻度を分析し、通信研究機構と国立天文台から入手した太陽活動に関するデータとの相関を解析した。太陽活動定量評価及び黒点相対数のいずれも μ 粒子検出頻度と負の相関があることが示された。周期性の解析では、これら 3 つの指標に共通した 18 日周期が検出されたことから、 μ 粒子検出頻度の周期性の要因として太陽活動が存在することが考えられた。

これらの解析の過程では、データ取得期間が短いことによる不正確さが見られた。精度の高い解析を行うには、今後、測定期間をより延長し数年単位で解析を行うことが必要である。太陽活動周期が 11 年であるのに対し、秋田高校での計測開始から 3 年程度と期間がまだ短いこともあるので、後輩に引き継いで観測を継続することを計画している。

太陽活動と μ 粒子検出頻度との関係をより明確にするため、極地や赤道直下など太陽活動の強弱が明瞭な地点、秋田高校と同緯度の太陽活動のもたらす影響の比較がしやすい地点での解析日中と夜間とにデータを分割して解析などの方法も取り入れられれば、より精度の高い解析ができると考えられる。

今後の展開として、 μ 粒子の性質を利用した様々な測定が考えられる。 μ 粒子は透過性が非常に高いので、大規模構造物の探査に用いられており、秋田県の地下資源や断層構造の解析などへの応用が考えられる。

また、スピン偏極した μ 粒子（ミュオンビーム）を物質に照射すれば、 μ 粒子スピンの感知する内部磁場の大きさや揺らぎを捕えることができ、様々な物質の性質を調べることができる（平石ら、2022）。高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所には大強度陽子加速器施設があり、強度の高いミュオンビームを照射可能である（河村、2015）。現在、透過型ミュオン顕微鏡が開発中であり（永谷ら、2023）、学術分野だけでなく産業分野への利用も考えられており、医学・生命科学への応用も期待される。

謝辞

本研究は秋田県立秋田高等学校理数科の課題研究として実施したものであり、担任の西村航平教諭はじめサポートいただきました皆様に感謝申し上げます。

引用及び参考文献

小池洋二 (2018) ミュオンスピン回転法；謎の粒子ミュオンが拓く物質科学. *日本物理学会誌* 73, 48

熊谷洗希, 渋谷遥斗, 森内厚佑, 水谷凜都, 登藤成琉, 丸田京華, 秋山翔希, 西隆博, 田中香津生, 遠藤金吾 (2021) 秋田県における地上での μ 粒子検出頻度変動と天気ごとの地上気温、湿度、気圧との偏相関. *Journal of Science EGGs* 4, 2110004, 1-6.

宮原ひろ子 (2009) 太陽活動と宇宙線、そして気候変動、*科学* 79 (12) 特集 太陽活動の謎と発見, 1380-1382.

湯田利典 (2002) 銀河宇宙線が作る”太陽の影”と太陽活動, 2002 年 8 月天文月報, 391-398.

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>.

国立研究開発法人通信研究機構, 宇宙天気予報, <https://swc.nict.go.jp/> (最終閲覧: 2022 年 12 月 24 日) .

国立天文台太陽観測プロジェクト, 三鷹太陽地上観測, https://solarwww.mtk.nao.ac.jp/jp/db_sunspot.html (最終閲覧: 2022 年 12 月 24 日)

国土交通省気象庁, <https://www.jma.go.jp/jma/index.html> (最終閲覧: 2022 年 12 月 24 日) .

Jacob T. VanderPlas (2018) Understanding the Lomb-Scargle Periodogram, *The Astrophysical Journal Supplement Series* 236:16 (28pp) .

湊進 (2013) 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, 375-383.

平石雅俊, 岡部博孝, 門野良典 (2022) ミュオンで探る酸化物材料中の水素の両極性. *日本物理学会誌* 77(5), 278-286.

河村成肇 (2015) ミュオン科学への招待 日本に誕生した大強度ミュオン源. *日本原子力学会誌 ATOMO* 57(7), 475-479.

永谷幸則, 下村 浩一郎 (2023) 透過型ミュオン顕微鏡. *日本結晶学会誌* 65(1), 33-41.