

研究レポート

① 研究タイトル

ミュオグラフィ装置におけるミュオン検出数、温度及び内部ガス流量の関係

② 学校名

帝京大学可見高等学校

③ 氏名と学年

杉本 幸太郎 (高校3年)

④ 実験期間

2024年6月1日から2024年6月13日

1. 研究の背景

現在盛んにおこなわれている素粒子の応用研究の1つにミュオグラフィ技術がある。

ミュオグラフィは、地上に降り注ぐ宇宙線の中のミュー粒子(ミュオン)を用いて地殻や大型の構造物を透視する技術である。1970年代に写真乾板によりミュオンの透過率を計測する(第1世代)方式が開発されて以来、地球物理学を中心に地殻内部の探査に利用されてきた。近年、分解能の向上と計測時間の短縮を目的に、新しい検出技術に基づく計測装置が開発されている。東京大学地震研究所では、ミュオンの透過により発光するプラスチックシンチレータ(第2世代)により、火山のマグマの活動を監視し、噴火予知への適用可能性を示した。また、2018年には、小型・軽量化と高分解能を実現した多線比例計数管 MWPC(Multi-Wire-Proportional-Chamber) (第3世代)方式を開発し、桜島をはじめ国内外の火山の観測に適用している。[1][2]

ミュオグラフィは多岐にわたる分野に応用されつつある。考古学の分野においても例外ではなく、いくつかの試みが展開されている。特に有名になったのはピラミッドへの応用である。ピラミッドは、古代エジプト文明の代表的な建造物であり、その内部には謎が多く残されている。しかし、ピラミッドは一般的な非破壊的な技術では内部を調査することが困難であった。すでに述べてきたようにミュオグラフィは、宇宙線ミュオンを用いた非破壊的な技術であり、ピラミッドの内部を透視するの

に最適な方法の一つとなる。具体的には、ピラミッドの外壁をミュオンが透過し、ピラミッド内部に到達するミュオンの数を測定することで、ピラミッド内部の密度分布を解析する。このようにして、ピラミッド内部に何があるかを非破壊的に観察することができるのである。ミュオグラフィを用いたピラミッドの調査は、2016年に名古屋大学の森島邦博らを中心とした日本とエジプトの共同チームによって行われた[3]。この調査では、カイロのギザ地区にあるクフ王のピラミッドを対象に内部調査が行われた。調査の結果、ピラミッド内部に新たな空洞が存在することが判明し、これが多くの注目を集めた。このように、ミュオグラフィは非破壊的な方法でピラミッドの内部を調査することができ、ピラミッドの構造や秘密に迫る手がかりを得るために非常に有用な技術であることがここでも証明された。

岡山県にある造山古墳でもミュオグラフィが行われており、ミュオグラフィによって石棺の存在が示唆されている[4]。本研究では、ミュオグラフィを目的とするのではなく、ミュオグラフィに用いられている装置のミュオン検出数の変化を明らかにする。造山古墳のミュオグラフィではガス検出器が用いられており、ガスの濃度や温度、圧力によって検出に変化がみられることは前例研究に示されつつある。しかし、これらの要因と検出数の相関について調べた研究は数少ない。

東京大学の田中宏幸氏はミュオグラフィによって台風の動きを測定する試みをしている[5]。今後ミュオグ

ラフィによって動体をとらえるうえで、温度補正などが重要になると考えられる。本研究では、ガス検出によるミュオン検出数に与える影響を明らかにする。

2. 研究の目的

本研究では、ミュオンの検出数と装置内外の温度、装置内のガスの流量との相関を明らかにする。

3. 実験方法

使用したミュオグラフィ装置の内部構造を図1に示す。

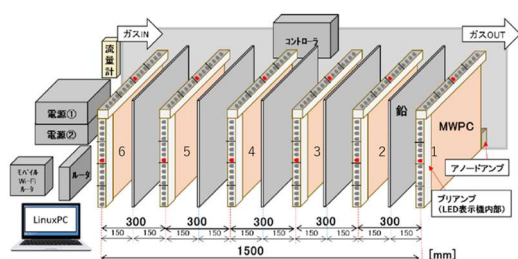


図1 ミュオグラフィ装置の内部構造

このミュオグラフィ装置は、東京大学とハンガリーのウイグナー物理学研究センターの共同で開発した装置である。この装置の検出器は、マルチワイヤー比例チェンバー（MWPC）ベースのシステムが組み入れられた装置である。検出器は80cm×80cmの大きさで6枚設置している。検出器の中には、1ないし2cm間隔で格子状のワイヤーが張り巡らされており、密閉されたワイヤー内部にはアルゴン・二酸化炭素の混合ガスを1分間に0.05リットルの割合で流している。

また、各ワイヤーには2000V近い電圧をかけており、ミュオンの衝突でガスのイオン化で生じた電子が作用して、その部分に微弱の電流が流れる。それを検出することでミュオンの通過が検出できる。この装置の別の特徴の一つとしてステンレススチールケースに収納された厚さ2cmの鉛板が挿入されている。この鉛板は5枚あり、検出器の間に設置している。これにより、ミュオン以外の宇宙線をカットしてノイズを大幅に低減できる。もう一つの特徴は、電気的に検出できるため、そのデータをWiFiを介してPCやWebに送信できる点である。[2]

装置は、図2に示す岡山県岡山市の造山古墳の後円部東側に設置した。



図2 実験装置の設置場所

ミュオンの検出数と装置内外の温度の相関を調べるため、装置に温度計を設置した。温度計は、株式会社カスタムのデータロガー4チャンネル温度計（CT-05SD）を使用した。図3の赤丸で示したMWPCの1番、3番、6番の3か所と装置の外の地上から30cmのところの端子を設置した。

（以下では、装置の外の地上から30cmのところの温度を外気温と呼ぶ）



図3 温度計の端子の設置場所

図4に示すようにアルゴン・二酸化炭素ガスの流量は、ガスボンベの出口の圧力と検知板入り口近くに設置した流量計で制御した。



図4 流量計の設置場所

実験は、2024/6/1から2024/6/13まで行った。この期間、ガスの流量を表1に示すように変化させながら、ミュオンの検出数と四か所の温度（一時間ごと）を測定した。

表1 ガスの流量の変化

日時	ガスの流量の変化
2024/06/01/09:09	0.10L/min にセット
2024/06/07/09:04	0.75L/min にセット
2024/06/09/15:29	0.05L/min にセット
	ガスがなくなり 順次流量が下がる
2024/06/12/10:23	ガスボンベを交換 0.05L/min にセット
2024/06/13	実験終了

ガスの流量を変化させても、ガスの濃度が一定になるには1日から2日かかる。そのため、ガスの流量が

0.1L/min 時のデータは
2024/06/03/09:09 から
2024/06/07/09:03 までとする。

4. 結果と考察

4.1 全期間の結果と考察

以下の結果を得た。

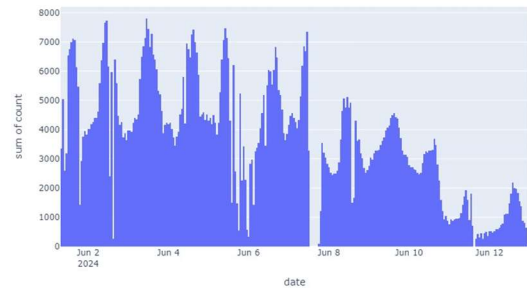


図5 一時間ごとのミュオン検出数

一日を周期として、ミュオンの検出数が変化している。また、ガスの流量が減っていった2024/06/09/15:29以降ミュオンの検出数は減少している。ガスの流量が0.1L/minと0.75L/minの時はミュオンの検出数の変化はあまり見られない。

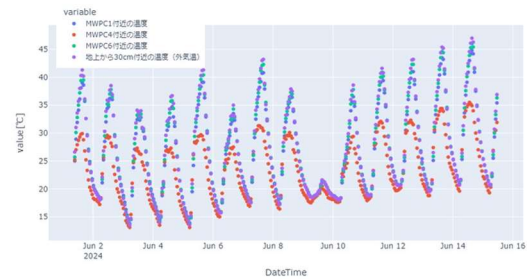


図6 一時間ごとの温度の変化
各プロットはMWPCの1番、3番、6番の3か所と装置の外の地上から30cmのところの温度

ミュオンの検出数のピークと温度のピークが一致しているように見える。

4.2 ミュオンの検出数と温度の相関

2024/06/03-2024/06/05 では、以下のデータを得た。

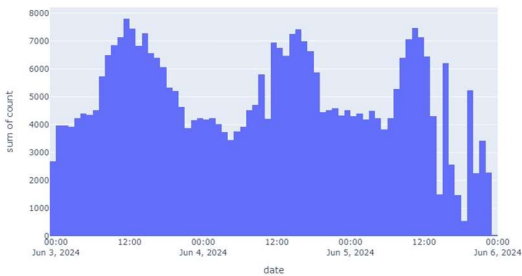


図7 ガスの流量が 0.1L/min 時のミュオンの一時間ごとの検出数

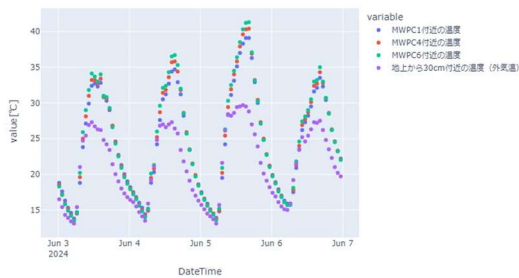


図8 ガスの流量が 0.1L/min 時の温度の変化

表2 ガスの流量が 0.1L/min 時の温度とミュオンの検出数の相関係数

温度計の設置場所	相関係数
MWPC1 付近	0.23
MWPC4 付近	0.24
MWPC6 付近	0.27
外気温	0.39

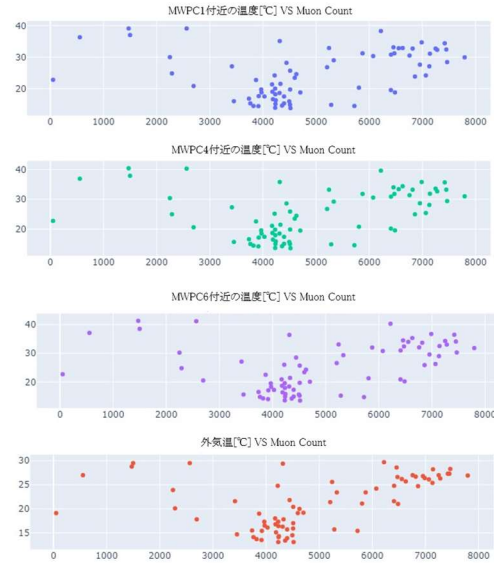


図9 ガスの流量が 0.1L/min 時の温度とミュオンの検出数の相関図

外気温とミュオンの検出数との相関がもっとも強かった。2024/06/05-2023/06/06 の期間では、欠損値が見られたため、2024/06/03-2024/06/04 の期間で解析し直した。

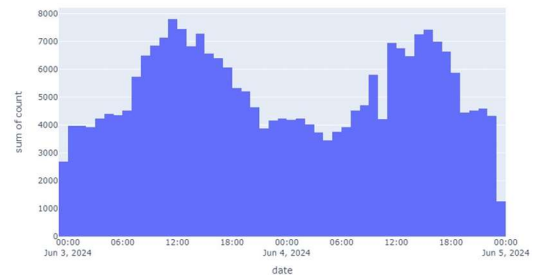


図10 2024/06/03-2024/06/04 での1時間ごとのミュオンの検出数

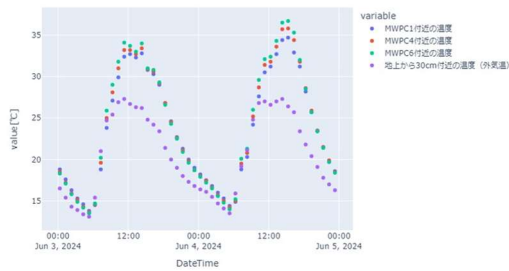


図 11 2024/06/03-2024/06/04 での温度の変化

表 3 2024/06/03-2024/06/04 での温度とミュオンの検出数の相関係数

温度計の設置場所	相関係数
MWPC1 付近	0.77
MWPC4 付近	0.79
MWPC6 付近	0.80
外気温	0.86



図 12 2024/06/03-2024/06/04 での温度とミュオンの検出数の相関図

この期間に絞って解析をすると、ミュオンの検出数と外気温には強い正の相関があることが分かる。ミュオン検出数と外気温のフィット関数を求めた。

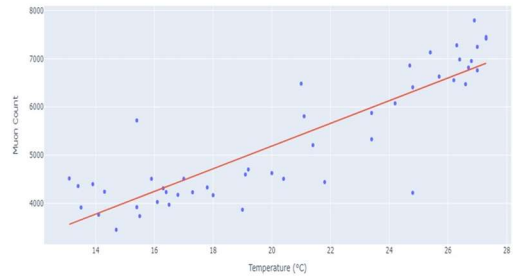


図 13 2024/06/03-2024/06/06 でのミュオン検出数と外気温の相関図とフィット関数

フィット関数は式 1 のようになり、線形性があることが分かった。

$$\text{式 1 } y = 484.48 + 235.21 \times x$$

4.3 ミュオン検出数とガスの流量

式 2 より、ミュオンの検出数を温度を 24°C に固定して、補正を行った。

式 2

$$\text{count}(\mu) = \text{Intercept} + 484.48 \times (24 - \text{temperature})$$

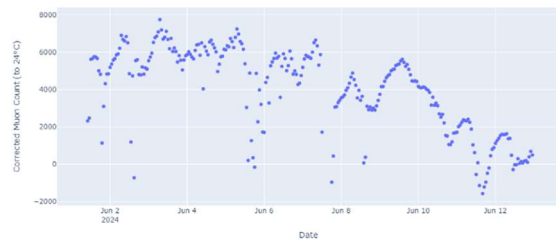


図 14 補正後のミュオン検出数

ガスの流量が小さくなるほど、ミュオンの検出数が小さくなる。一方、0.75L/min のときにはミュオンの検出数は、0.1L/min のときとの変化が見られなかった。

5. 結論

外気温とミュオンの検出数には、強い正の相関があった。ガスの流量が少なくなると、ミュオンの検出数が減少した。

6. 今後の展望

今回の実験では、欠損値が目立ち、使用できるデータの数が減ってしまった。その原因を明らかにしていくとともに、欠損値が少なくなるような実験方法を考えなければならない。ガスの流量についても十分な実験が行えたとはいえない。長期間実験を行い、外気温とミュオンの検出数のより正確な関係式を導き、その式を利用してミュオンの検出数とガスの流量との関係を明らかにしていく。

7. 謝辞

本研究の遂行にあたりましては、様々な方にご協力いただきました。山形大学理学部4回生 赤尾亮伍氏にはメンターとして実験と論文執筆のご指導をいただきました。早稲田大学 田中香津生氏には、基本解析プログラムをご提供いただきました。国際ミュオグラフィ研究所 角谷賢二氏には実験に協力していただきました。また、東京大学 田中宏幸氏、ハンガリーウイグナー物理学研究所 センターの研究者の方々が開発したミュオグラフィ装置をお借りして実験を行いました。皆様に深く感謝いたします。

8. 参考文献

[1]László Oláh et al.: AGU Geophysical Research Letters ” Muon Imaging of Volcanic Conduit Explains Link Between Eruption Frequency and Ground Deformation” (Sakura-jima, 2023). <https://doi.org/10.1029/2022GL101170>

[2] 稲葉望, 林武文, 角谷賢二, 一色正晴 : “ミュオグラフィによる古墳の内部調査に関する研究 —ミュオンの透過シミュレーションと計測結果の比較—”, 電気学会 電子・情報・システム部門大会, TC4-2, pp.128-133 (2021)

[3]Kunihiro Morishima et al, Discovery of a big void in Khufu’s Pyramid by observation of cosmic-ray muons. Nature, 552, pp.386-390, 2017. DOI: <https://www.nature.com/articles/nature24647>

[4]角谷賢二・林武文・田中宏幸. 「ミュオグラフィの最近の動向と造山古墳への応用」.
<http://sumiyakenji.xsrv.jp/data/pdf/muo_okadai.pdf>(参照日 2024年8月27日)

[5]Hiroyuki K.M. Tanaka et al. :” Atmospheric muography for imaging and monitoring tropic cyclones” DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20039-4>