二次宇宙線計測データの気温効果と積雪効果を補正する新手法を開発

片岡　龍峰
Kataoka Ryuho

1. 研究の背景

陽子線やα線等の宇宙線（一次宇宙線）が宇宙から地球に降り注ぐと，地球大気中の原子核と核反応を繰り返しながらミューオンや中性子等様々な二次宇宙線を生成していく，いわゆる空気シャワーと呼ばれる現象が発生する。空気シャワーの中でも，ミューオンや中性子は透過性が高いために地上にまで到達するが，南極・昭和基地では，2018年2月から，このミューオンと中性子の観測を実施してきた。

一次宇宙線が比較的高いエネルギーの陽子（約25 GeV以上）に対応するミューオンと，比較的低いエネルギーの陽子（約5 GeV以上）に対応する中性子の両方を測定しているわけだが，この2つのデータを用いれば，一次宇宙線の強度やエネルギースペクトルを測定すること，また陽子のエネルギーによって宇宙空間を移動する際の挙動が異なることを利用して，太陽圏の磁場の状況を逆算的に推測すること等が可能である。

しかしながら，ミューオンや中性子はいずれも，大気中の空気シャワーによって生成する二次宇宙線であるため，地上での計数率は大気の変動や地上の状況の影響を受けて変化することが避けられない。気圧は，大気の物質量であるため，気圧が低いほど計数率が上がる「気圧効果」が最も良く知られるものである。ほかにも，気温上昇によってミューオン生成高度が上がるため，地上に来る前の崩壊によりミューオン計数率が下がる「気温効果」も知られている。これらを補正する手法については，多くの先行研究が認められる。

筆者らの研究では，気圧効果と気温効果に加え，観測器周辺の積雪中に，地面から跳ね返ってくる熱中性子が吸収されて中性子の計数率が下がる「積雪効果」の物理的な補正手法を新たに開発したのだが，その背景は，以下に示すような，昭和基地のユニークな測定環境によるものである。

以上，2022年12月に研究成果として発表したものを元に本記事へ寄稿する[1)]。

2. 研究の成果

まずは，これまで昭和基地において約4年間，観測を継続してきた結果を見ていただきたい（**図1**）。昭和基地のミューオン観測データ（気圧効果の補正済み）を見てみると，気温効果により，実際にミューオンの計数率（**図1b**）が成層圏（150 hPa～20 hPa）の気温（**図1a**）と反相関している様子が明らかである。この気温効果の物理的な補正については先行研究があり，**図1a**の気温データを用いて，**図1c**の青線のように補正ができる。本研究では，気温を入力データとし，計数率を出力データとした機械学習を行うことで，**図1c**赤線のように，物理的な補正と同様の補正が機械学習を用いても可能なことを確認した。

次に，中性子の観測データを見てみると，積雪量と反相関するように計数率が変化している様子が分かる（**図2**）。これは「積雪効果」の影響が大きいことを表している。

この積雪効果を計算するため，本研究では大気圏

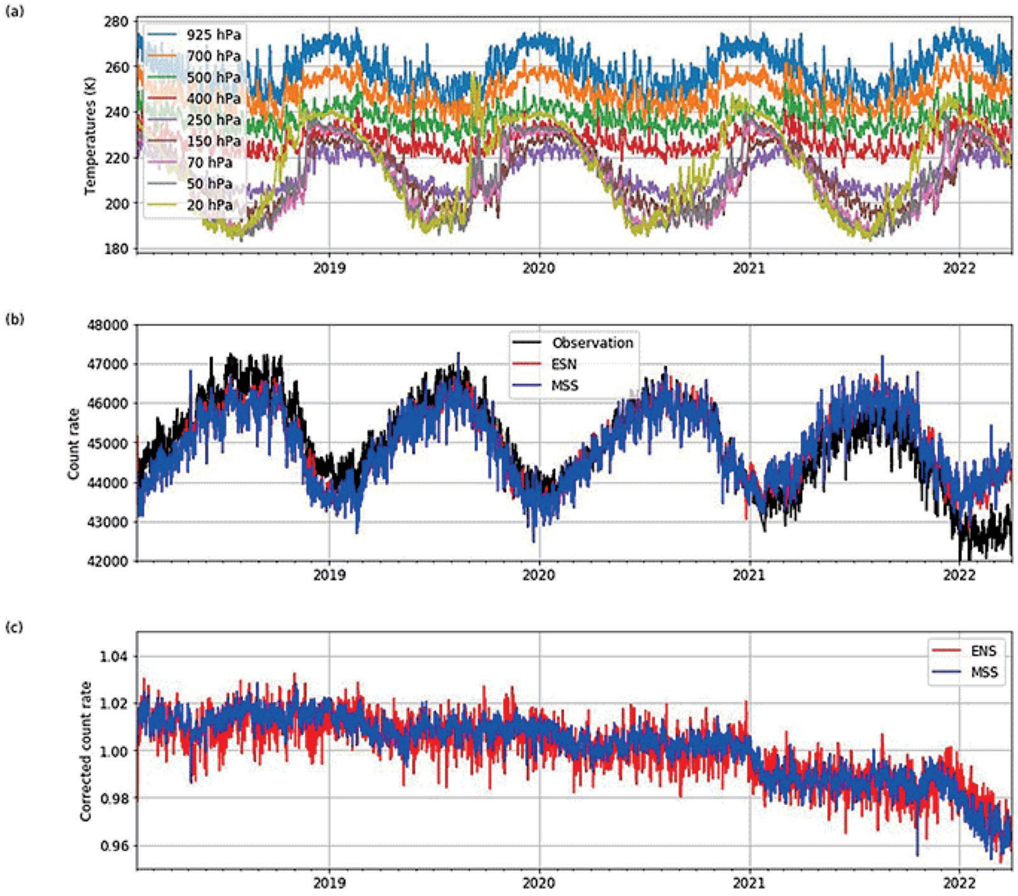

図 1　昭和基地におけるミューオンの計数率と補正値

（a）成層圏の気温，（b）ミューオンの計数率。単位はカウント / 分，（c）補正したミューオン計数率。青は従来の方法（MSS）での補正。赤が本研究での機械学習（ESN）による補正

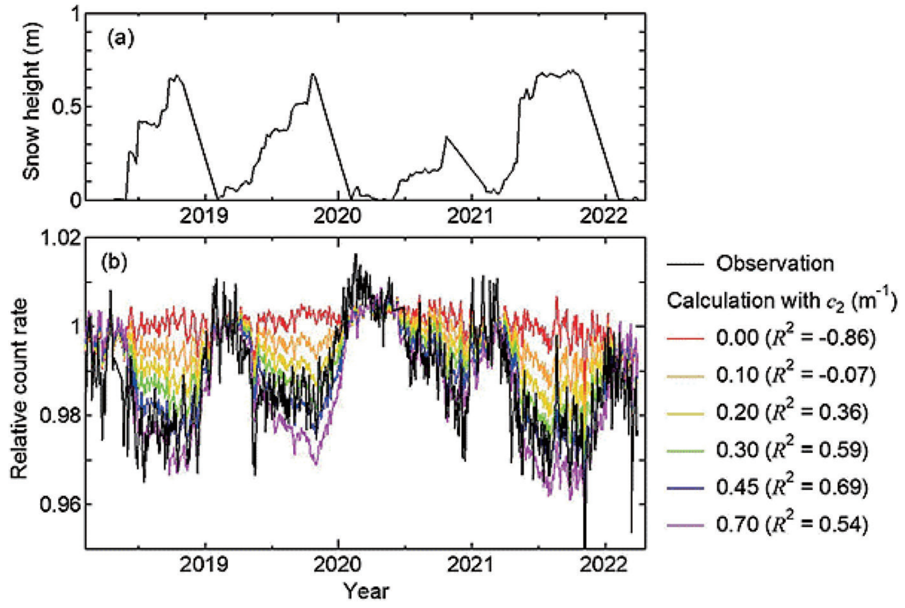

図 2　（a）積雪量，（b）中性子の計数率。気圧の影響を補正した後の値

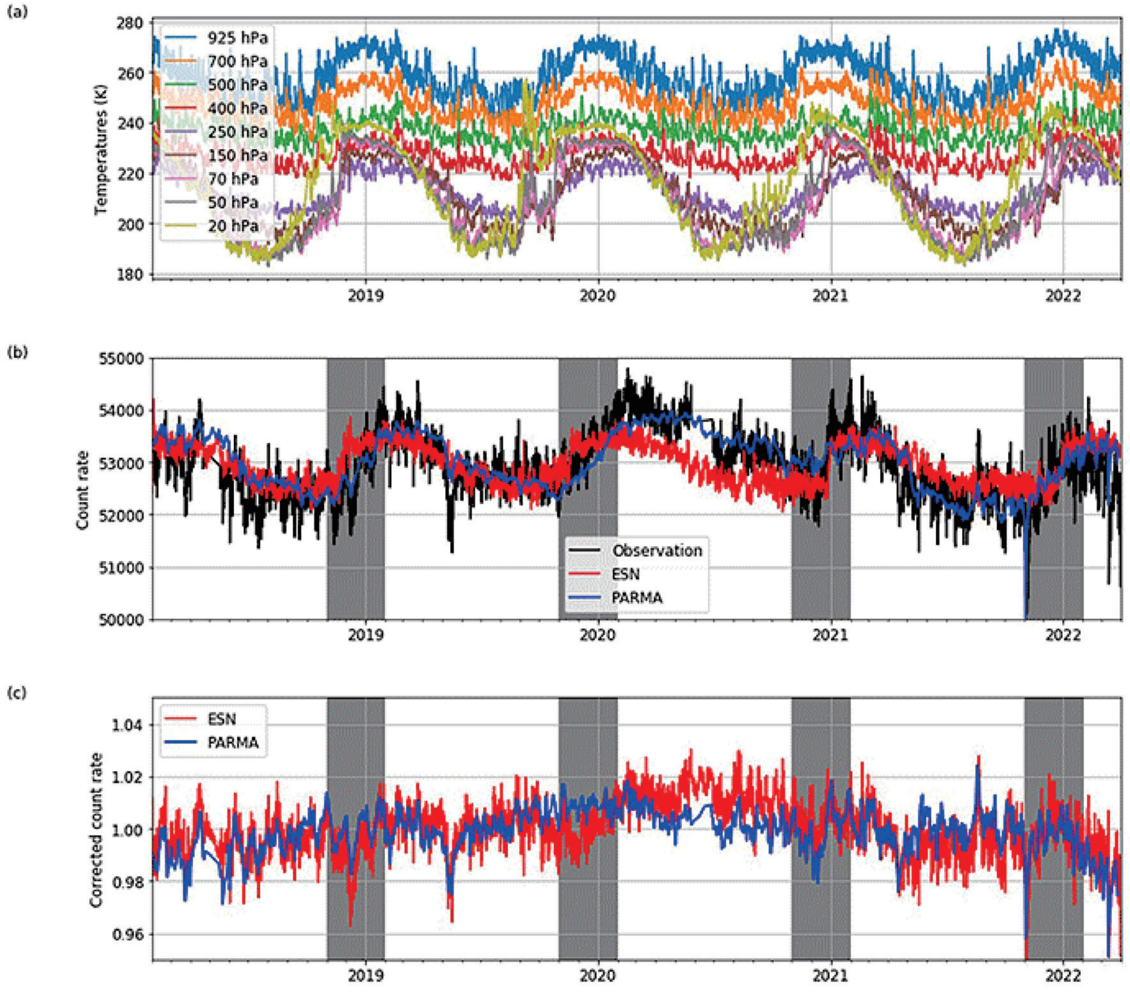

図 3　昭和基地における中性子の計数率と補正値

（a）成層圏の気温（**図 1a** と同じ），（b）中性子の計数率。単位はカウント / 分，（c）補正した中性子計数率。青は PARMA モデルを用いた補正。赤は機械学習（ESN）による補正

内の宇宙線強度計算モデル「PARMA」と実際の積雪データを用いて，積雪量に比例した地面の水分量による中性子計数率の変化を再現できる物理モデルを開発した。

大気圏内の宇宙線強度計算モデル「PARMA」は，大気圏内の任意地点における宇宙線強度を地表面の状態（積雪・地中水分含有率）等を考慮して計算可能な数値モデルである。ちなみに，PARMA モデルを含む宇宙線計算ソフトウェア EXPACS は原子力機構の Web サイトに公開されている [2)]。

本研究では，更に，ミューオンの気温補正と同様の気温を用いた機械学習による方法でも，積雪効果の補正が，ある程度はできることも確認した（**図 3**）。

3. 今後の展開

本研究によって，ミューオンと中性子の補正が複数の手法で可能となった。中性子の場合には，例え積雪や地下の水分量を計測していない場合にも，機械学習の助けを借りた補正が可能である。今後は，補正後の宇宙線計測データを用いて，太陽フレアに伴う宇宙天気現象の影響を受けて変動する宇宙線の精密測定から，宇宙環境を診断できるようになる。その具体的な一例として，昭和基地を含む多地点における中性子とミューオンの測定結果と整合する（**図 4**）宇宙線の「流れ」までを検出することで，一時的な宇宙線の減少を引き起こした太陽風磁場の

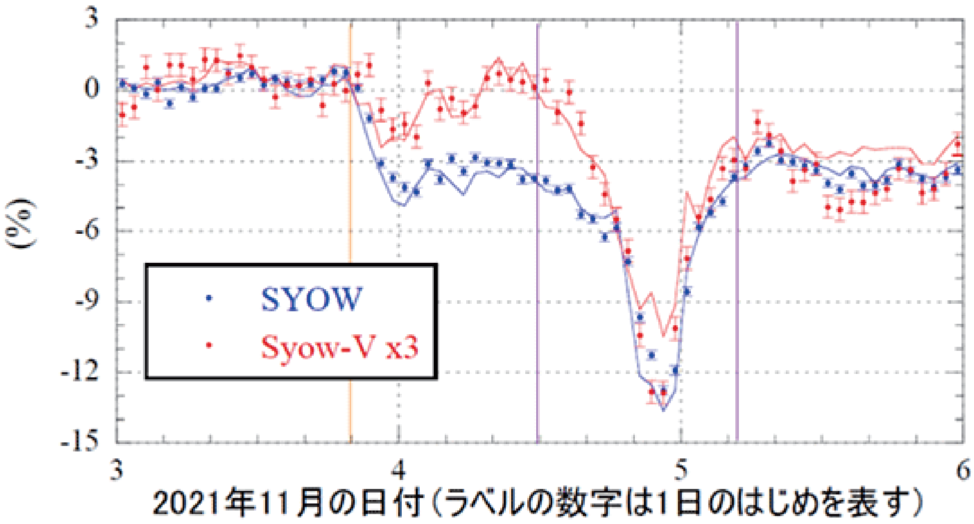

図 4　昭和基地の中性子モニター（青丸）とミューオン計（赤丸）の値

ミューオン計（赤丸）のデータは，平均的エネルギー依存性を補正するために 3 倍されている。それぞれの色の線はモデルによる算出値

大規模構造を考察できる，という研究成果も同時期に発表しているので参考にしていただきたい[3)]。

参 考 文 献

1）R.Kataoka, *et al.*, *Journal of Space Weather and Space Climate.*, Vol.**12**（2022）

2）EXPACS（Excel-based Program for calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum）
http://phits.jaea.go.jp/expacs/jpn.html

3）K. Munakata, *et al.*, *ApJ.*, **938,** 30, DOI 10.3847/1538-4357/ac91c5（2022）

（国立極地研究所　宙空圏研究グループ）