

水星探査機 BepiColombo の保守用機器データの水星放射線環境研究への応用

木下岳 (東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 M2 g-kinoshita20686@g.ecc.u-tokyo.ac.jp)

上野遙、村上豪 (JAXA)、Marco Pinto (ESA)、吉岡和夫 (東大)、三好由純 (名大) (2025/3)

1. 序論

宇宙線とは数 100 MeV-数 GeV の宇宙放射線のことで、陽子が全体の 90% を占める (Simpson, 1983)。宇宙線は太陽系外の超新星爆発を起源とする銀河宇宙線と、太陽に由来する太陽宇宙線 (太陽高エネルギー粒子: SEP) に大別される。特に銀河宇宙線は定常的に惑星間空間を伝搬しているため、大気圏や磁気圏を持たない小天体や月、水星などの宇宙風化において重要な役目を果たす。本研究では水星近傍の宇宙線環境に着目するが、太陽-地球間の大きな重力ポテンシャル差などが原因で探査機の軌道投入が難しく、この領域での宇宙線実測例は少ない。Lawrence et al., (2016) は NASA の水星探査機 MESSENGER (2004-2015) に搭載された γ 線観測器 “Neutron Spectrometer (NS)” が >125 MeV の陽子にも有感であることを活かして、バックグラウンドカウントから銀河宇宙線変動を調査しているが、フラックスなどの物理量には変換できておらず、相対変動の追跡に留まっている。そこで本研究では水星探査機 BepiColombo に搭載された放射線保守用機器 “Solar Particle Monitor (SPM)” のデータを校正し、水星に降り注ぐ銀河宇宙線の観測手法を開発し、水星表層の風化研究への応用可能性について議論する。なお本研究の内容の一部は 2024 年 12 月に Journal of Geophysical Research: Space Physics にて出版しているため (Kinoshita et al., 2025)、そちらも参照されたい。

2. BepiColombo と SPM とは

水星探査機 BepiColombo とは JAXA と ESA が共同で進めている水星探査ミッションで、2018 年に打ち上げられ、2026 年の水星周回軌道投入を目指して内部太陽圏を巡航している。BepiColombo は水星磁気圏の探査を担う JAXA の Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO) (Murakami et al., 2020) と、水星表面の探査を主に担う ESA の Mercury Planetary Orbiter (MPO) (Benkhoff et al., 2021) という 2 つの探査機が合体した状態で巡航しており、水星周回軌道投入時に分離・独立して運用される予定である。

Solar Particle Monitor (SPM) とは MMO に搭載された放射線保守用機器で、探査機機能維持に影響を及ぼす高エネルギー放射線環境を把握するための機器である。理学機器でないため元々科学的な解析に用いる予定はなかったが、銀河宇宙線や SEP などの高エネルギー粒子観測に向いていることが巡航中に判明し、本研究で注目した。

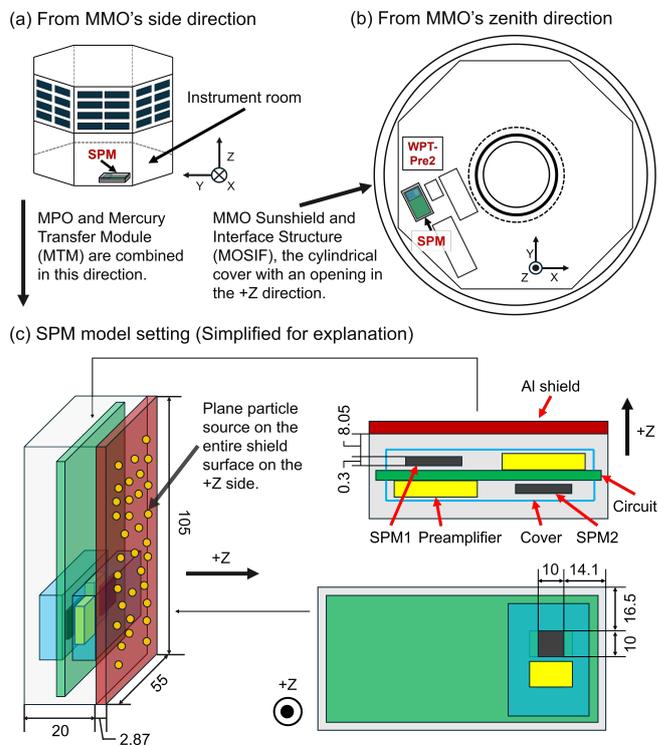


図 1 (a),(b):BepiColombo/MMO 内の SPM の位置、(c):Geant4 シミュレータに構築した SPM モデルの設定。図中に示した座標軸はすべて探査機座標系に基づく。(Kinoshita et al., 2025)

3. SPM 校正手法開発

SPM は保守用機器であるため、観測できる情報は非常に限られている。SPM は 2 つの半導体検出器 (SSD) を持ち、それぞれ SPM1、SPM2 と呼称される。SSD は入射する粒子が経路上に残す損失エネルギー (Deposited Energy) を 4 つのエネルギー帯に分類し、各チャンネルで時系列カウントデータを記録するため、一次エネルギーを直接測れるわけではない。また図 1(a), (b) に示すように SPM は MMO の内部に設置されているため、周辺構造物の遮蔽効果によって入射粒子の一次エネルギーやフラックスは減衰し、さらに構造物が励起されて発生する二次放射線も混入した状態で SSD に到達することになる。よってこのように一次情報を失った SPM のデータを科学的に活用するには、逆問題を解いて元の粒子の情報を復元する必要がある。

図 1(c) に放射線シミュレーションツール “Geant4” (Allison et al., 2016) を用いて構築した SPM 物理モデルの概要図を

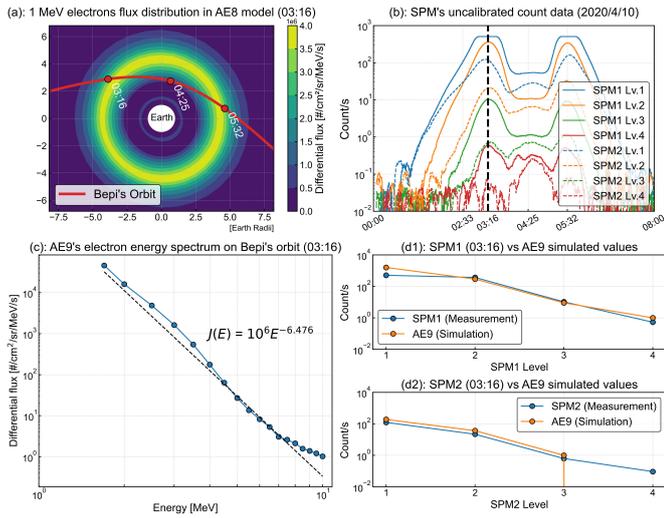


図2 (a):AE8モデル上の1 MeV電子の分布、(b):BepiColombo地球スイングバイ時のSPMの実測値、(c):AE9モデルで計算した2020/4/10 03:16(UTC)のBepiColombo軌道上の電子モデルエネルギースペクトル、(d1,d2):AE9モデルで計算した電子フラックスをSPM物理モデルに入射させた際のモデルカウントと実測値の比較。(Kinoshita et al., 2025)

示す。探査機周辺の放射線遮蔽効果をRay-Tracing法を用いて等価アルミニウム厚に換算した値をもとに、粒子の発射源とSPMモデルの間に2.87 mmのアルミニウム板を設置した。図1bに示す通り、巡航中はサンシールドによって視野が遮られているため、探査機座標系の+Z方向から放射状に粒子を発射するシミュレーションを行う。

まずモデル構築にあたって様々な仮定(アルミ板を用いた遮蔽効果再現、粒子の発射方向の設定など)を置いているため、モデルの応答が実際のSPMと一致するか実測値との比較を通して検証する。BepiColomboが地球スイングバイを実施した際(図2a)、地球放射線帯の外帯(高度20000 km付近に分布する、MeV帯の電子が支配的な領域)をSPMが観測している(図2b)。放射線帯の環境は経験的によく知られているため、AE9モデル(Ginet et al., 2014)でBepiColomboの軌道上の電子エネルギースペクトルを計算し(図2c)、外帯環境の電子フラックスをGeant4上で再現してSPMモデルに入射させて、その応答を調べる。その結果を図2d1、d2に示すが、モデルカウントとSPM実測値がよく一致しており、本研究で設定したシミュレーション条件が妥当であると証明できた。

次にSPM観測データから元の粒子のエネルギーとフラックスを復元する。10-1000 MeVの一次エネルギーを持った陽子を 10^6 個ずつ発射した際の検出効率を図3に示す。ピークを決定できる陽子の検出効率データに対しランダウガウス関数をフィッティングし、規格化して確率密度関数を導出した(図4)。図3の通りSPMの各チャンネルは多様な一次エネルギーに有感であるため、確率密度関数 $P(E)$ を用いて、SPMのあるチャンネルにあるカウントが記録

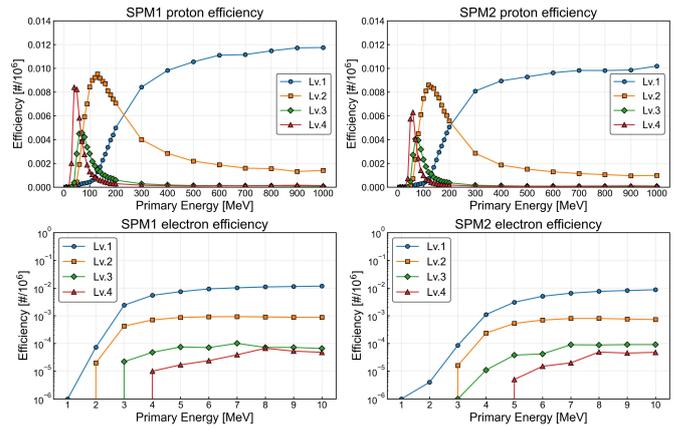


図3 10-1000 MeVの陽子、1-10 MeVの電子をエネルギーごとに 10^6 個ずつ発射した際の各SPMチャンネルの検出効率。(Kinoshita et al., 2025)

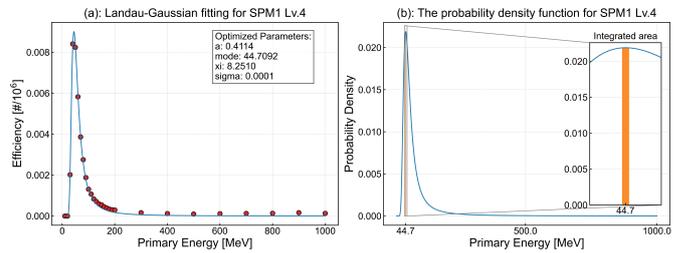


図4 確率密度関数導出手法の一例。(a):SPM1 Lv.4チャンネルの検出効率に対するランダウガウス関数フィッティング結果、(b):(a)を規格化して求めた確率密度関数とピーク付近1 MeV区間での積分の様子。(Kinoshita et al., 2025)

された際に、どれくらいの割合の粒子が目的の一次エネルギー帯に由来するのか推定する(式1の分子)。最後にカウントとフラックスをつなぐ係数である“g-factor”(Sullivan, 1971)を同じくシミュレーションベースで求め、カウントの値を割るとフラックスに変換できる(式1)。なおSensitive Energyとは検出効率が最も高い陽子の一次エネルギーのことを指す。

Differential flux (@ Sensitive Energy [MeV])

$$= \frac{\text{SPM count} \cdot \int_{\text{Sen.} - 0.5 [\text{MeV}]}^{\text{Sen.} + 0.5 [\text{MeV}]} P(E) dE}{g - \text{factor} (@ \text{Sen.} [\text{MeV}])} \quad (1)$$

本手法の妥当性を検証するため、2022/3にBepiColomboがSEPを観測した際のSPMデータを校正し、他機器と比較する。図5にはSPMより低エネルギー帯を観測するMPO/BERM(Pinto et al., 2022)とSPMの時系列フラックスデータ、および1、2の時間のエネルギースペクトルを示している。先行研究(Zhao et al., 2016)などでSEPのエネルギースペクトルはDouble-Power Lawに従うことが経験的に知られており、本校正手法は妥当であると判断した。本研究によりSPMはBepiColombo中最も高い40-130

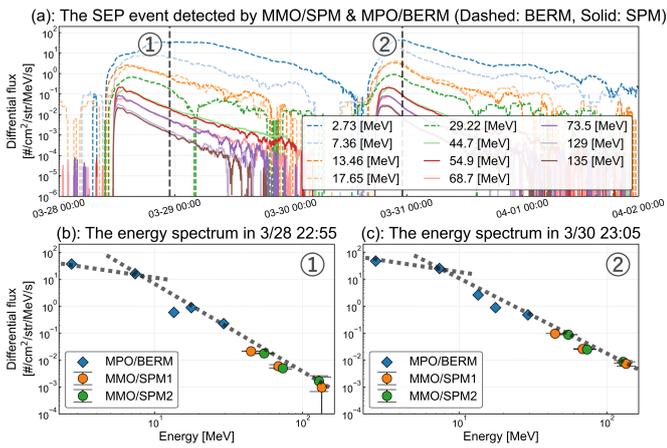


図5 BepiColombo が 2022/3 に観測した SEP。(a): MMO/SPM と MPO/BERM の校正済み時系列データ、(b) & (c): 1、2 の時間のエネルギースペクトル。(Kinoshita et al., 2025 より一部改変)

MeV の陽子を計測する能力を得ることになり (表 1)、宇宙線観測機器としての新たな付加価値が与えられた。

表 1 SPM 各チャンネルが計測する損失エネルギー (Deposited)、一次エネルギー (Sensitive)、および g-factor (Kinoshita et al., 2025)

| | SPM1 Lv.2 | SPM1 Lv.3 | SPM1 Lv.4 |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Deposited [keV] | 343.5-796.2 | 796.2-1148.1 | >1148.1 |
| Sensitive [MeV] | 135 | 68.7 | 44.7 |
| g-factor [$cm^2 \cdot sr$] | 2.59 | 1.28 | 2.45 |
| | SPM2 Lv.2 | SPM2 Lv.3 | SPM2 Lv.4 |
| Deposited [keV] | 354.9-816.0 | 816.0-1169.5 | >1169.5 |
| Sensitive [MeV] | 129 | 73.5 | 54.9 |
| g-factor [$cm^2 \cdot sr$] | 2.17 | 1.13 | 1.85 |

4. SPM 宇宙線データの水星宇宙風化研究への応用

本研究により BepiColombo/SPM は水星近傍の宇宙線をその場観測できるようになったため、宇宙線-水星表層相互作用の研究に応用できると考えている。水星は極端に大気が薄く、磁気圏も小さく弱いことから、数 100 MeV の宇宙線に対する遮蔽効果はほとんど働かず、表層に衝突すると考えられる。宇宙線が地中にどれくらいの深さまで入り込めるのか?、どれくらいのエネルギーを損失エネルギーとして残すのか?、これらに地域差はあるのか?、といった問に迫ることは水星表層の進化史を知るうえで不可欠である。手始めに、図 6a に示した水星の模擬物質ブロックを Geant4 上に構築し、上部に設置した板状の発射源から 100-1000 MeV の陽子を 100 MeV 刻みで 10^4 個発射する簡易的なシミュレーションを実施した。図 6b には粒子が停止

した位置と一次エネルギーの関係、図 6c は停止位置と粒子が経路上に残した総損失エネルギーの関係を示している。レゴリスを想定して模擬物質の密度を 1.3 g/cm^3 と低く設定していることもあるが、数 m オーダーまで貫入できていることは、宇宙線の影響範囲を知るうえで重要である。また図 6b によると必ずしも一次エネルギーが大きければ深くまで侵入できるわけではないことも興味深い。これは粒子のエネルギー損失が経路長に強く依存することが原因と推察されるが、今後別パラメータとの比較などを通してさらに検討を進める。

5. 結論と今後の展望

本研究では水星探査機 BepiColombo/MMO 搭載の放射線モニタ機器を校正し、宇宙線などの高エネルギー粒子観測へ活用する手法を開発した。放射線保守用機器は探査機に一般的に搭載されているため、本手法を他の探査機と同様の機器にも適用できれば、太陽系内の宇宙線観測網の拡大に貢献しうる。

また簡易的な水星模擬物質を使った放射線シミュレーションを通して、宇宙線-水星表層相互作用の再現にも取り組んだ。今回はフラットなエネルギースペクトルで陽子を入射させたが、いずれは SPM 実測値に基づいた入射条件を設定する予定である。また模擬物質も簡易的に定めているため、MESSENGER や BepiColombo の新しい観測データを反映したものに更新し、より現実に即した宇宙風化シミュレーションに改良していきたい。

6. 謝辞

本研究は名古屋大学宇宙地球環境研究所の共同利用・共同研究事業の助成を受けて行われました。また本研究で使用した MMO/SPM のデータは同研究所みおサイエンスセンター (<https://miosc.isee.nagoya-u.ac.jp/>) が運用するデータアーカイブシステムから取得しました。

参考文献

- Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Arce, P., Asai, M., Aso, T., et al. (2016). Recent developments in Geant4. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 835, 186–225. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>
- Benkhoff, J., Murakami, G., Baumjohann, W., Besse, S., Bunce, E., Casale, M., et al. (2021). Bepicolombo - mission overview and science goals. Space Science Reviews, 217(8), 90. <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00861-4>
- Ginet, G., O'Brien, T., Huston, S., Johnston, W., Guild, T., Friedel, R., et al. (2014). Ae9, ap9 and spm: New models for specifying the trapped energetic particle and space plasma environment. The van allen probes mission, 179(1–4), 579–615. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9964-y>
- Kinoshita, G., Ueno, H., Murakami, G., Pinto, M., Yoshioka, K., and Miyoshi, Y. (2025). Simulation for the calibration of radiation housekeeping monitor onboard BepiColombo/MMO and application to the inner heliosphere exploration. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 130, e2024JA033147. <https://doi.org/10.1029/2024JA033147>

- 5) Lawrence, D. J., P. N. Peplowski, W. C. Feldman, N. A. Schwadron, and H. E. Spence (2016), Galactic cosmic ray variations in the inner heliosphere from solar distances less than 0.5 AU: Measurements from the MESSENGER Neutron Spectrometer, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, <https://doi.org/10.1002/2016JA022962>
- 6) Murakami, G., Hiroyuki, O., Shoya, M., Taeko, S., Yasumasa, K., Yoshifumi, S., et al. (2020). Mio—First comprehensive exploration of mercury’s space environment: Mission overview. *Space Science Reviews*, 216(7), 113.
- 7) Pinto, M., Sanchez-Cano, B., Moissl, R., Benkhoff, J., Cardoso, C., Gonçalves, P., Assis, P., Vainio, R., Oleynik, P., Lehtolainen, A., Grande, M., and Marques, A. (2022). The BepiColombo Environment Radiation Monitor, BERM. In *Space Science Reviews* (Vol. 218, Issue 7). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s11214-022-00922-2>
- 8) Simpson, J. A. (1983). ELEMENTAL AND ISOTOPIC COMPOSITION OF THE GALACTIC COSMIC RAYS. In *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci* (Vol. 33). <https://doi.org/10.1146/annurev.ns.33.120183.001543>
- 9) Sullivan, J. D. (1971). Geometric factor and directional response of single and multi-element particle telescopes. *Nuclear Instruments and Methods*, 95(1), 5-11. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(71\)90033-4](https://doi.org/10.1016/0029-554X(71)90033-4)
- 10) Zhao, L., Zhang, M., and Rassoul, H. K. (2016). Double power laws in the event-integrated solar energetic particle spectrum. *The Astrophysical Journal*, 821(1), 62. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/821/1/62> *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 10.1029/2024JA033147

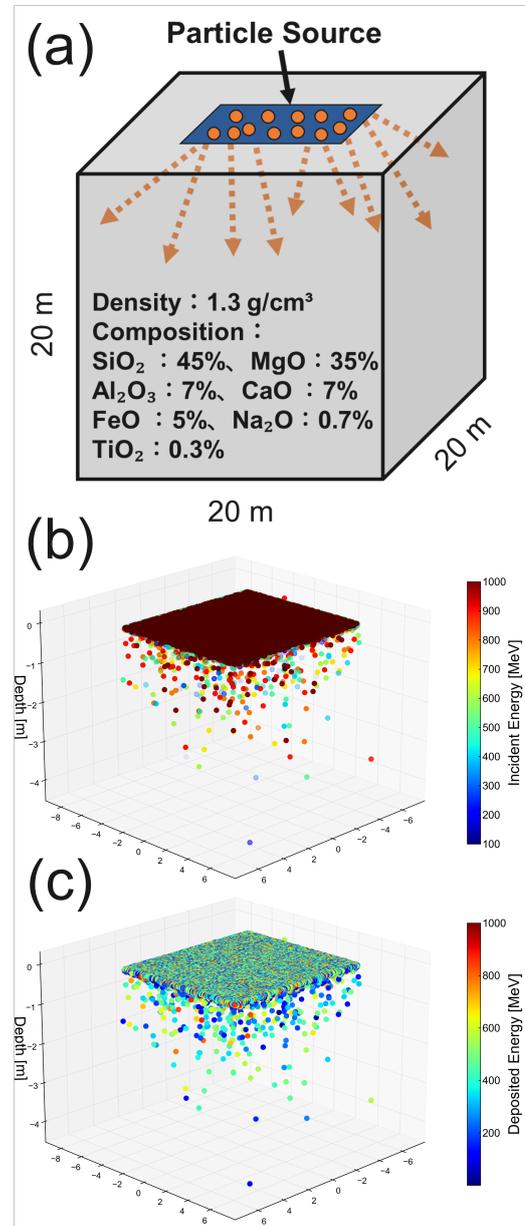


図6 水星模擬物質を用いた簡易的な放射線シミュレーション。(a): シミュレーションの設定、(b): 入射粒子の停止位置の空間分布と一次エネルギーの関係、(c): 入射粒子の停止位置の空間分布と経路上に残した総損失エネルギーの関係