

放射線シミュレーションを用いた水星表層-宇宙線の相互作用による宇宙風化の評価

#木下 岳¹⁾, 鈴木 雄大²⁾, 吉岡 和夫³⁾
(¹ 東大理, ²ISAS/JAXA, ³ 東大新領域

Assessment of Cosmic-Ray-Induced Space Weathering on Mercury's Surface Using Radiation Simulations

#Gaku Kinoshita¹⁾, Yudai SUZUKI²⁾, Kazuo YOSHIOKA³⁾

(¹Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, (²ISAS/JAXA,

(³Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

Understanding Mercury's evolution requires disentangling the effects of space weathering from remote sensing observations of the planetary surface. Space weathering processes fall into two broad categories: (i) stochastic micrometeoroid impacts and (ii) radiation effects from the solar wind and galactic cosmic rays (GCRs) (Mesick et al., 2018). This study focuses on the latter and aims to quantitatively evaluate GCR-induced space weathering using Geant4 radiation transport simulations (Allison et al., 2016).

GCRs consist mainly of protons with energies ranging from several hundred MeV to several GeV, originating from outside the solar system and accelerated by supernova explosions (Simpson, 1983). Previous work by Gurtner et al. (2004) explored GCR interactions with Mercury's surface using Geant4, but relied heavily on assumptions due to limited observational data from Mariner 10. With the advancements brought by MESSENGER and BepiColombo, a reassessment based on updated environmental and surface composition data is now necessary.

This study addresses two main objectives: (1) characterization of the near-Mercury GCR environment based on models and observations, and (2) simulation-based estimation of energy deposition by cosmic-ray protons into Mercury's surface. For (1), we assessed the effect of Mercury's magnetosphere on GCR penetration using the KT17 magnetic field model (Korth et al., 2017). We calculated Larmor radii and particle rigidity to estimate the shielding effect. We also analyzed high-energy particle data from the "SPM" radiation housekeeping monitor (Kinoshita et al., 2025) onboard BepiColombo/MMO (Murakami et al., 2020). The SPM continuously observes galactic cosmic rays (GCRs) during BepiColombo's cruise phase; in this study, we focus on measurements obtained during the Mercury swing-by. For (2), we constructed a model of Mercury-analog material in Geant4 and simulated incident proton trajectories (see Fig. 1). We recorded parameters such as incident energy, deposited energy, angle of incidence, and maximum penetration depth to examine their interdependencies. These results provide key insights for interpreting upcoming observations of Mercury's surface by X-ray, gamma-ray, and neutron spectrometers following BepiColombo's orbital insertion at the end of 2026.

水星のような大気が希薄で、小さく弱い磁気圏を持つ惑星の進化史を理解するうえで、宇宙風化の影響がどの程度の深さ・強度で及んでいるか把握し、惑星表層のリモートセンシングの結果から切り離して解釈することは重要である。宇宙風化プロセスは、(i) 太陽系全体に見られる小粒子やデブリによるランダムな衝突、または(ii) 太陽風、銀河宇宙線に関連する2つの大きなカテゴリーに大まかに分類することができる。本研究ではこのうち宇宙線に着目し、放射線シミュレーション (Geant4: Allison et al., 2016) を用いて宇宙線による水星表層の宇宙風化の定量的評価を目指す。

銀河宇宙線とは超新星爆発によって加速されて太陽系外から飛来する数百 MeV-数 GeV の高エネルギー粒子であり、ほとんどを陽子が占めている (Simpson, 1983)。Geant4 を用いた高エネルギー宇宙線と水星表層の相互作用の研究は Gurtner et al., (2004) が取り組んでいるが、当時はまだマリナー 10 号しか水星を観測しておらず、やむを得ず地球近傍の宇宙線のフラックスや地球磁気圏のモデルなどが使われており、かつ表面組成のモデルも仮定に基づいている。現在の MESSENGER & BepiColombo 時代においては、これらの情報を更新するための研究が必要である。

本研究では、(1) モデルと実測値に基づく水星近傍の宇宙線環境の評価と、(2) シミュレーションを元にした水星表層に模擬宇宙線が与えるエネルギーの概算、という2つの課題に取り組む。まず(1)に関して、水星磁気圏の宇宙線入射に対する影響を調査するため、KT17 水星磁場モデル (Korth et al., 2017) を用いて、宇宙線のラーマー半径を計算した。宇宙線フラックスとエネルギーの実測値としては、BepiColombo/MMO (Murakami et al., 2020) に搭載されている高エネルギー放射線観測機器"SPM" (Kinoshita et al., 2025) の時系列カウントデータを独自に較正して使用した。その結果、宇宙線は全球に渡って等方的に降り注ぐため、太陽風のような降下領域の地理的依存性 (e.g., Lavorenti et al., 2023) は生じえないことが分かった。次に(2)に関しては Geant4 のモデル空間に水星模擬物質のブロックを構築し、陽子を発射するシミュレーションを実施した (添付図)。入射エネルギー、Deposited Energy (粒子が侵入経路上に残すエネルギー)、最大侵入深度などのパラメータを記録し、それぞれの関係性を調べた。その結果、主に2次電子が最大で地下5 mまで影響を及ぼしうることが判明し、探査機の γ 線観測機器などの観測深度と重複することから (e.g., Wurz et al., 2025)、観測結果から宇宙風化作用を取り除く必要性を定量的に示すことができた。これらの結果を通じて、2026年末に迫る BepiColombo 水星軌道投入後に実施される水星表層観測の結果を解釈するうえで注意すべきポイントを整理する。