

多探査機観測データを用いたSEP加速・輸送モデルのパラメータ自動最適化フレームワークとCME伝搬モデルSUSANOOへの拡張

○加藤 裕太^{1,2} 石川 裕之¹ 藤田 菜穂¹ 栗原 明稀¹ 杉本 悠斗^{1,3} 蓑島 敬⁵ 塩田 大幸^{2,4} 岩井 一正² Pinto Marco¹ Gomes António Pessanha^{6,8} 村上 豪⁷ 草野 完也² 光田 千紘^{1,2} (1.富士通株式会社 富士通研究所 宇宙データフロンティア研究センター 2.名古屋大学 宇宙地球環境研究所 3.東北大学 大学院理学研究科 物理学専攻 原子核理論研究室 4.情報通信研究機構 電磁波研究所電磁波先進・基盤研究センター 宇宙環境研究室 5.海洋研究開発機構 数理科学・先端技術研究開発センター 6.Laboratory of Instrumentation and Experimental Particle Physics, Av. Prof. Gama Pinto, n.2, 1649-003 Lisboa, Portugal 7.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan 8.Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal)

太陽高エネルギー粒子（SEP: Solar Energetic Particles）事象は衛星運用や有人宇宙活動に深刻な放射線リスクをもたらすため、物理ベース予測モデルの確立が急務である。しかし粒子加速・輸送モデルは、粒子注入効率や平均自由行程など観測から直接拘束困難な多数の自由パラメータを含んでおり、予測モデルとしての運用化へはこれらのパラメータの数理科学的な推定が必要となる。本講演では、これらを多探査機観測データから同時推定するフレームワーク（Fujitsu SEITEN: Solar Energetic particle Intelligent Tuning and Evaluation Network）を、2021年10月9日のSEPイベントに適用した結果を報告する。SEITENは、SUSANOO (Shiota et al. 2014, Shiota & Kataoka 2016) による背景太陽風・CME伝搬と、衝撃波統計加速(DSA: Diffusive Shock Acceleration)と Focused Transport 方程式に基づいて衝撃波と磁力線に沿った粒子加速・輸送を解く SEPIF (Solar Energetic Particle Injection and Focused transport model) を結合し、磁力線ごとの平均自由行程係数7個と経度ピンごとの衝撃波位置での粒子注入効率12個の計19パラメータを、ブラックボックスベイズ最適化（QMC: Quasi-Monte Carlo および TPE: Tree-structured Parzen Estimator の2段階探索）により推定する。最適解はBepiColombo、Solar Orbiter、PSP、STEREO-A、SOHO の5地点で観測されたプロトンフラックス時間変化を対数空間 MAE 約0.43で再現し、平均自由行程には準平行衝撃波側（東側）で強い散乱、準垂直側（西側）で弱い散乱という物理的に解釈可能な東西構造が得られた。一方、注入効率の最適値はMHD背景場の選択に強く依存し、MHD-SEP同時推定の必要性が示された。これを受け、上流側のSUSANOO-CME初期パラメータ5個（CME速度、磁束量、角度幅、動径幅、磁気軸の傾き角）についても、4機の磁場およびプラズマ観測計13データが示す衝撃波到来時刻を用いて同様の最適化を実施した。最適解は計13データでの平均の時刻絶対誤差を約3時間で再現し、CME速度と磁束量が重要度の約94%を占めることを示した。両モデルの統合および、本最適化手法によるパラメータ推定は end-to-end 物理ベースSEP予測モデル構築への重要な一歩である。今後はSEITEN フレームワークおよびSUSANOO、SEPIFを用いて未知のSEP事象に対して不確実性付きSEP時間プロファイルの予測を行うモデル開発を推進する。