

コロナホール動画の形状保持型埋め込みによる外帯放射線帯電子フラックス異常増加の機械学習予測

#田村 伊織¹⁾, 近藤 蒼一郎¹⁾, 野口 怜莉¹⁾, 藤本 晶子¹⁾

⁽¹⁾九州工業大学

Shape-Preserving Embedding of Coronal Hole Sequences for Predicting Radiation Belt Electron Flux Enhancements

#Iori Tamura¹⁾, Soichiro Kondo¹⁾, Reiri Noguchi¹⁾, Akiko Fujimoto¹⁾

⁽¹⁾Kyushu Institute of Technology

Variability of relativistic electron flux in the Earth's outer radiation belt is closely linked to solar activity. In particular, high-speed solar wind streams from solar coronal holes frequently drive flux enhancements, which can cause severe impacts on geostationary satellites. Predicting such enhancements is therefore a key challenge in both satellite operations and space weather science.

In this work, we introduce a shape-preserving embedding framework that represents coronal hole dynamics in extreme ultraviolet (EUV) solar images for machine learning – based prediction of >2 MeV electron flux enhancements. The approach preserves the spatial morphology of coronal holes while reducing data dimensionality, embedding three-dimensional image sequences into two-dimensional time – vector arrays suitable for lightweight CNN models. We compare two representation strategies—presence/absence and occurrence ratio—and show that embedding quality plays a crucial role in classification performance.

Experiments using NASA's SDO/AIA 211 Å images (2016 – 2018 for training, 2019 for testing) and GOES-15 relativistic electron flux measurements reveal that the occurrence ratio embedding combined with a shallow CNN achieves the best results, with the optimal configuration— 4×4 grid partitioning, 3×3 convolutional kernel, and a 72-hour sequence length—yielding an F1 score of 0.6098. This demonstrates that, when effectively embedded, coronal hole morphology provides predictive information about outer radiation belt responses.

Our results indicate that shape-preserving embeddings of solar coronal hole structures can provide a computationally efficient approach for forecasting radiation belt electron flux enhancements. Future work will extend this method to advanced temporal architectures such as LSTM (Long Short-Term Memory) and Transformer and explore multimodal integration with additional solar and geospace parameters, aiming to develop a more general and scalable framework.

地球外帯放射線帯における相対論的電子フラックスの変動は太陽活動と密接に関係しており、特にコロナホールからの高速太陽風は電子フラックス異常増加の主要因である。これらの現象は静止軌道衛星に深刻な影響を与える可能性があるため、予測は宇宙天気研究および衛星運用における重要課題となっている。

本研究では、 >2 MeV 電子フラックス異常増加の予測を目的として、太陽極端紫外線 (EUV) 画像におけるコロナホール動態を表現する形状保持型埋め込み手法を導入する。本手法は、コロナホールの空間的形態を保持しつつデータ次元を削減し、3次元の動画データを2次元の時系列ベクトル配列に変換して軽量CNNモデルに適用するものである。また、コロナホール領域の表現方法として、閾値による存在判定と出現率利用を比較し、埋め込み品質が分類性能に及ぼす影響を明らかにする。

SDO/AIA 211Å 画像 (2016 – 2018 年を学習、2019 年をテスト) と GOES-15 電子フラックス観測を用いた実験の結果、出現率を用いた埋め込みと小規模CNNの組み合わせが最良の性能を示し、最良の設定 (4×4 グリッド、 3×3 カーネル、72 時間系列) において F1 スコア 0.6098 を達成した。この結果は、コロナホール形態が効果的に埋め込み表現された場合、外帯放射線帯応答の予測に有用な情報を提供することを示している。

以上の結果は、太陽コロナホール構造の形状保持型埋め込みが、放射線帯電子フラックス異常増加の計算効率的かつ高精度な予測を可能にすることを示しており、太陽観測と機械学習表現技術を組み合わせた宇宙天気予報能力の向上に資するものである。今後は、LSTM (Long Short-Term Memory) や Transformer などの高度な時系列モデルへの拡張や、他の太陽・地球空間パラメータとの統合を通じて、汎用的かつスケーラブルな枠組みへ発展させることを目指す。