

磁気嵐による人工衛星・宇宙デブリ軌道低下の確率過程的モデリングと機械学習による予測

#Fukuda S¹⁾, Emoto M¹⁾, Fujimoto A¹⁾

¹⁾九州工業大学

Stochastic Process-Based Modeling of Storm-Induced Orbital Decay with Machine Learning Prediction

#Soushi Fukuda¹⁾, Mayuri Emoto¹⁾, Akiko Fujimoto¹⁾

¹⁾Kyushu Institute of Technology

With the growing utilization of outer space, the safe operation of satellites and the mitigation of space debris have become critical challenges. Geomagnetic storms, triggered by the interaction between the solar wind and Earth's magnetosphere, cause a rapid increase in upper atmospheric density, enhancing atmospheric drag and accelerating orbital decay of satellites and debris. The mass deorbiting of Starlink satellites in 2022 highlighted that storm-induced altitude loss can directly shorten satellite lifetimes and lead to loss of control.

This study aims to quantitatively evaluate storm-induced orbital decay of satellites and debris within a stochastic process framework. We define the “cumulative altitude loss” as the total decrease in orbital altitude from the onset of a storm up to n days, and statistically characterize its probability distribution across altitude-inclination bins. Based on multiple storm events, the cumulative altitude loss is assumed to follow a normal distribution, from which the mean (μ) and standard deviation (σ) are derived. Furthermore, we construct a machine learning model trained on storm-event datasets to predict μ and σ as functions of altitude, inclination, elapsed days, and storm parameters. The resulting distributions $N(\mu, \sigma)$ are then used to calculate the probability of exceeding a given threshold of altitude loss, thereby providing a probabilistic risk assessment.

Through this framework, we demonstrate that storm-induced orbital decay can be captured and predicted using a stochastic process-based modeling approach combined with machine learning. The results are expected to serve as a new tool for optimizing satellite operations and developing risk mitigation strategies for debris collision avoidance under space weather disturbances.

近年、宇宙空間の利用拡大に伴い、人工衛星の安全な運用と宇宙デブリの低減は重要課題となっている。特に、太陽風と地球磁気圏の相互作用によって発生する磁気嵐は上層大気の密度を急増させ、その結果として大気抵抗を強め、衛星やデブリの軌道低下を加速する。2022年のスターリンク衛星大量落下事例は、磁気嵐による高度低下が衛星寿命の短縮や制御不能化を直接引き起こし得ることを示した。

本研究では、磁気嵐に起因する人工衛星および宇宙デブリの軌道高度低下を確率過程的枠組みで定量評価することを目的とする。具体的には、磁気嵐開始から n 日目までの軌道高度減少量を「累積高度低下量」と定義し、初期高度と軌道傾斜角によるビンごとにその確率分布を統計的に特徴づける。複数の磁気嵐イベントに基づき、累積高度低下量が正規分布に従うと仮定して平均値 (μ) と標準偏差 (σ) を導出する。さらに、磁気嵐データセットを用いて機械学習モデルを構築し、高度・傾斜角・経過日数・磁気嵐パラメータを入力として各ビンにおける (μ, σ) を予測可能とする。この結果得られる確率分布 $N(\mu, \sigma)$ を用いて、累積高度低下量が特定閾値を超える確率を算出し、リスクを定量的に評価する。

本研究により、磁気嵐に伴う軌道低下を確率過程的に捉え、機械学習により予測可能であることを示す。この枠組みは、宇宙天気擾乱下における衛星運用計画の最適化や、宇宙デブリ衝突回避のためのリスク低減戦略の策定に寄与することが期待される。