

R011-05

C 会場 : 11/24 PM1 (13:45-15:45)

15:00~15:15:00

太陽サイクルを考慮した ISS 放出 1U CubeSat の軌道寿命に関する Weibull-ガウス過程回帰モデリング

#藤本 晶子¹⁾, 福田 創士¹⁾, 江本 菜由莉¹⁾, スーリアンシャ ムハンマド^{1,2)}, 春藤 賢冴¹⁾

(¹ 九州工業大学, (² ディポネゴロ大学

Weibull-Gaussian Process Regression Modeling of Orbital Lifetime for 1U CubeSats Released from the ISS with Solar Cycle Effects

#Akiko Fujimoto¹⁾, Soushi FUKUDA¹⁾, Mayuri Emoto¹⁾, Muhammad Suriansyah^{1,2)}, kengo Shundo¹⁾

(¹ Kyushu Institute of Technology, (² Diponegoro University

The orbital lifetime of 1U CubeSats deployed from the International Space Station (ISS) is strongly influenced by short-term disturbances such as geomagnetic storms and long-term variations associated with the solar cycle. In this study, we explicitly define orbital lifetime as the elapsed time from ISS deployment until atmospheric re-entry (≈ 150 km altitude), and formulate it as an orbital lifetime function. We then design a predictive model to estimate this orbital lifetime function—that is, the relationship between orbital altitude and elapsed time—based on solar activity conditions. The model is developed using 23 cases of 1U CubeSats launched between 2012 and 2024.

We adopted the Weibull cumulative distribution function to represent orbital decay, since altitude decreases gradually at first but accelerates exponentially with elapsed time, a behavior well captured by the flexible shape of the Weibull form. The trajectory from initial release to atmospheric re-entry was modeled with high fidelity (coefficient of determination $R^2 \approx 0.99$). Furthermore, the parameters of the Weibull function were estimated using a Gaussian Process Regression model with explanatory variables including solar activity (F10.7 index), release altitude, and a normalized solar cycle phase, thereby constructing a trained predictive model of the orbital lifetime function based on solar activity. The regression enabled accurate reconstruction of the orbital lifetime function, with a coefficient of determination $R^2 > 0.8$.

The derived predictive function enables orbital lifetime estimation across solar cycle phases, with an error of 0.5 – 2 months relative to observed lifetimes. A distinctive contribution of this study is the application of a Weibull-based model, adapted from reliability engineering, which naturally captures the accelerated, non-linear decay of orbital altitude with only two interpretable parameters. Furthermore, the introduction of a normalized solar cycle phase as an explanatory variable extends predictive capability beyond conventional activity indices by enabling the model to implicitly capture phase-dependent solar wind structures.

国際宇宙ステーション (ISS) から放出される 1U CubeSat の軌道寿命は、磁気嵐のような短期的な擾乱や太陽サイクルに伴う長期的変動の影響を強く受ける。本研究では、軌道寿命を「ISS からの放出から大気圏再突入 (高度約 150 km) までの経過時間」として明示的に定義し、これを軌道寿命関数として定式化する。そして、太陽活動に基づいて軌道高度と経過時間の関係 (軌道寿命関数) を推定する予測モデルを設計した。本モデルは、2012 年から 2024 年に ISS から放出された 23 基の 1U CubeSat のデータを用いて構築する。

軌道高度の減衰は、初期には緩やかであるが、時間の経過とともに指数関数的に加速する特性を持つため、本研究では Weibull 累積分布関数を適用する。この関数は柔軟な形状を有し、軌道減衰を高精度に表現できる (決定係数 $R^2 \approx 0.99$)。さらに、Weibull 関数のパラメータを、太陽活動度 (F10.7)、放出高度、正規化した太陽サイクル位相を説明変数とするガウス過程回帰モデルにより推定し、その結果、太陽活動に基づく軌道寿命関数の学習済み予測モデルを構築する。その結果、決定係数 $R^2 > 0.8$ で軌道寿命関数を高精度に再現できることを確認した。

導出された予測関数は、太陽サイクルを通じて軌道寿命を推定可能であり、実観測値に対して 0.5~2 か月程度の誤差に収まることを示した。本研究の新規性は、信頼性工学における寿命解析に用いられてきた Weibull モデルを軌道寿命解析に応用し、少数のパラメータで高度減衰の加速的・非線形的挙動を表現した点にある。さらに、正規化太陽サイクル位相を説明変数に加えることで、従来の太陽活動度指標を超えて、位相依存的な太陽風構造をモデルに間接的に学習させ、予測能力を拡張できた。