

R011-23

C 会場 : 11/25 AM2 (11:05-12:35)

12:05~12:20:00

畳み込みニューラルネットワークを用いた人工衛星表面帯電自動検出システムの開発とプラズマ環境の調査

#升野 颯人¹⁾, 寺本 万里子¹⁾, 荒木 大智¹⁾, 飯田 佑輔²⁾, 花沢 明俊¹⁾, 奥村 哲平³⁾, 岡本 博之³⁾, 北村 健太郎¹⁾

(¹⁾九州工業大学, (²⁾新潟大学, (³⁾宇宙航空研究開発機構

Development of an Automatic Detection System for Spacecraft Surface Charging Using CNNs and Investigation of Plasma Environment

#HAYATO MASUNO¹⁾, Mariko TERAMOTO¹⁾, Daichi ARAKI¹⁾, Yusuke Iida²⁾, Akitoshi Hanazawa¹⁾, Teppei Okumura³⁾, Hiroyuki Okamoto³⁾, Kentaro KITAMURA¹⁾

(¹⁾Kyushu Institute of Technology, (²⁾Nigata University, (³⁾JAXA

Spacecraft surface charging is a critical issue in space development. In particular, during missions such as debris removal and on-orbit servicing, discharges caused by potential differences between a spacecraft and its target can cause severe damage to systems and instruments. Therefore, clarifying the mechanisms of charging and establishing technologies for its prediction and detection are strongly required.

Previous studies have indicated that surface charging in low Earth orbit mainly depends on high-energy auroral electrons and the surrounding ionospheric plasma density. Gussenhoven, (JGR, 1985) defined the following conditions as indicators of charging: (1) precipitating electron flux (>14 keV) exceeding 10^8 eV cm⁻² s⁻¹ sr⁻¹ eV⁻¹, (2) ionospheric plasma density below 10^4 cm⁻³, and (3) occurrence on the nightside. However, in practice, the conditions for surface charging differ among studies and have not been consistently defined. For example, some focus solely on auroral electron flux (Meng et al., IEEE, 2017; Enengl et al., IEEE, 2023), whereas others emphasize the role of ionospheric plasma density (Anderson, JGR, 2012; Yeh and Gussenhoven, JGR, 1985). Thus, the plasma conditions leading to spacecraft charging at ionospheric altitudes remain unclear. To deepen our understanding of the charging environment, it is necessary to develop detection techniques that are independent of fixed threshold conditions, thereby improving both accuracy and coverage.

As an indirect observational method of surface charging, auroral ion sensor data onboard satellites can be used (e.g., Anderson, JGR, 2012). During charging, a characteristic ion-line structure appears in the energy – time (ET) spectrogram, formed when ionospheric ions are accelerated by the spacecraft potential and enter the sensor with energies corresponding to the charging voltage. Although this feature is an effective indicator, previous studies relied heavily on visual inspection, making statistical detection difficult.

In this study, we developed an automatic detection system for surface charging using a convolutional neural network (CNN) applied to precipitating ion flux data from the SSJ/5 instrument onboard the DMSP-F16 satellite (altitude ~830 km) during 2009 – 2019. First, 1,147 charging events were visually identified based on ion-line structures, and data augmentation was performed by adding noise. A total of 11,256 charging cases and 12,312 non-charging cases were prepared, with 70% used for training and 30% for validation. The CNN achieved 99.6% accuracy and ≈ 0.015 loss for both datasets, demonstrating highly accurate automatic detection of charging events.

Applying the trained model to the full 11-year DMSP-F16 dataset yielded 1,663 charging events. Comparison with detections based on the criteria of Gussenhoven (JGR 1985) showed that 24% of the total events had been overlooked by the conventional method but were newly detected by our CNN model. Analysis of the detected events revealed that charging was concentrated between 17:00 and 03:00 magnetic local time, with strong charging (>100 V) frequently occurring in the pre-midnight sector. Approximately 90% of the events coincided with monoenergetic electron fluxes associated with inverted-V aurora, indicating consistency between spacecraft charging processes and inverted-V formation. Moreover, the occurrence frequency increased during solar minimum, in agreement with previous results (Anderson, JGR, 2012).

We further investigated the relationship among charging events, auroral electrons, and ionospheric plasma density using SSIES data. More than 90% of detected events occurred under densities below 10^4 cm⁻³, consistent with earlier findings (e.g., Gussenhoven, 1985). According to Enengl et al. (IEEE, 2023), auroral electrons associated with charging typically exhibit mean energies $>4 - 5$ keV and integrated energy fluxes $>2 \times 10^{11}$ eV cm⁻² s⁻¹ sr⁻¹. However, our results indicate that the electron conditions vary depending on plasma density. For charging above 100 V at densities around 10^3 cm⁻³, electrons exhibited integrated fluxes $>10^{13}$ eV cm⁻² s⁻¹ sr⁻¹ with mean energies near 10 keV. In contrast, at densities near 10^2 cm⁻³, charging was triggered by lower fluxes ($>3 \times 10^{12}$ eV cm⁻² s⁻¹ sr⁻¹) and lower energies (6 – 8 keV). These findings suggest that ionospheric ion currents play a suppressive role in spacecraft charging.

In conclusion, this study demonstrates that CNN-based automatic detection enables more accurate and comprehensive identification of surface charging events compared to conventional criteria. Furthermore, by considering both auroral electron flux characteristics and ionospheric plasma density, our results suggest the potential to redefine spacecraft charging conditions, including the threshold charging potential itself.

人工衛星の表面帯電は宇宙開発における重要な課題である。特に、デブリ除去や軌道上サービスといったミッションで

は、衛星とターゲット間の電位差による放電がシステムや機器に深刻な損傷を与える可能性がある。そのため、帯電の発生メカニズムを解明し、予測・検出する技術の確立が強く求められている。

従来の研究によれば、低軌道における衛星の表面帯電は主に高エネルギーのオーロラ電子と周囲の電離圏プラズマ密度に依存しており、(1) 降下電子 (>14 keV) のフラックスが $>10^8$ eV cm⁻² s⁻¹ str⁻¹ eV⁻¹ であること、(2) 電離圏プラズマ密度が 10^4 cm⁻³ 以下であること、(3) 衛星が夜側にあること、が帯電の指標条件として定義されてきた (Gussenhoven, JGR, 1985)。しかし、実際には表面帯電の条件は研究ごとに異なり、必ずしも統一的に示されていない。例えば、Meng et al. (IEEE, 2017) や Enengl et al., (IEEE, 2023) はオーロラ電子フラックスのみに着目している一方で Anderson (JGR, 2012) や Yeh and Gussenhoven (JGR, 1985) は電離圏プラズマ密度の影響を指摘している。このように、電離圏高度のプラズマ環境下での衛星表面帯電の発生条件は未だ明確に定義できていない。帯電を引き起こすプラズマ環境の理解を深めるためには、特定の閾値条件に依存した帯電検出ではなく、固定的な条件設定に頼らない帯電検出手法を構築し、帯電イベントの検出精度と網羅性を高める必要がある。

表面帯電の間接的な観測方法として、衛星に搭載されたオーロライオンセンサの観測データを用いる方法がある (e.g. Anderson, JGR, 2012)。表面帯電発生時にはオーロライオンセンサのエネルギー・時間 (ET) ダイアグラムには、イオンライン構造と呼ばれる特徴的なパターンが出現することが知られている。これは、衛星が負電位に帯電した際に、周囲の低エネルギーイオンが衛星電位によって加速され、帯電電位に対応したエネルギーをもってセンサに入射することで形成される。この特徴は帯電イベントの検出においての有効な指標となるが、従来研究では統計的検出が難しく、最終的には目視による確認に依存していた。

そこで本研究では、高度 830km を飛行する DMSP 衛星 F-16 号機のオーロラ電子・イオン計測器である SSJ 5 が 2009 ~ 2019 年に取得した降下イオンフラックスデータを用い、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) による表面帯電の自動検出システムを構築した。まず、イオンライン構造が確認された 1147 例の帯電イベントを目視によって抽出し、ノイズ付加によるデータ拡張を実施した。最終的に、帯電 11,256 例と非帯電 12,312 例を学習に用い、うち 7 割を学習データ、3 割を検証データに使用した。その結果、学習データ・検証データの両方において accuracy 99.6%、loss ≈ 0.015 を達成し、CNN によって極めて高精度に帯電を自動検出できることが確認された。

さらに、本モデルを DMSP-F16 衛星の 11 年間の観測データに適用した結果、1663 件の帯電イベントを自動検出することに成功した。Gussenhoven (JGR, 1985) の定義による帯電の検出と CNN による検出を比較したところ、全帯電イベントの 24% が従来手法では見逃されており、本モデルによって新たに検出された。CNN によって抽出された帯電イベントの解析から、空間分布は特に 17 時~3 時のローカルタイムに集中し、とりわけ premidnight 側に 100V 以上の帯電が多く出現する傾向が見られた。帯電の約 9 割は inverted-V 型オーロラに伴うモノエネジェティックな電子フラックスと同時に出現しており、衛星の高電位帯電形成過程と inverted-V 構造形成過程の一致が示された。さらに DMSP 衛星に搭載された SSIES を用い電離圏プラズマ密度と、帯電イベント、オーロラ電子との関係を調べた。検出されたイベントの 9 割以上が従来の研究で確認されているように (e.g. Gussenhoven, JGR, 1985) 電子密度 10^4 cm⁻³ 以下の条件下で発生しており、太陽活動極小期に帯電イベントが増加する傾向も確認された (Anderson, JGR, 2012)。また Enengl et al. (IEEE, 2023) によれば、帯電時のオーロラ電子は平均エネルギー 4 - 5 keV 以上、積分エネルギーフラックス 2×10^{11} eV cm⁻² s⁻¹ sr⁻¹ 以上を持つとされているが、本研究では、電離圏プラズマ密度によって帯電を引き起こすオーロラ電子の条件に差異がみられた。具体的には、100 V 以上の高電位帯電の発生において、プラズマ密度が 10^3 cm⁻³ 付近では、オーロラ電子の積分エネルギーフラックスは 10^{13} eV cm⁻² s⁻¹ sr⁻¹ 以上、かつ平均エネルギー約 10 keV であった。一方で、プラズマ密度が 10^2 cm⁻³ の場合には、積分エネルギーフラックスは 3×10^{12} eV cm⁻² s⁻¹ sr⁻¹ 以上、平均エネルギー 6 - 8 keV 程度でも帯電が発生していた。この結果は、電離圏プラズマのイオン電流が衛星の帯電を抑制する役割を果たしていることを確認できた。以上の結果から、本研究は、CNN を用いた自動検出により衛星表面帯電イベントを従来より高精度かつ網羅的に捉えることに成功した。また、オーロラ電子のフラックス量・スペクトル形状と電離圏プラズマ密度を同時に考慮することで、帯電電位を含む新たな表面帯電条件を定義できる可能性を示した。