

DMSP 衛星とあらせ衛星の観測データの解析による衛星表面帯電とコーラス波動の 関係の調査

#荒木 大智¹⁾, 寺本 万里子¹⁾, 升野 颯人¹⁾, 笠原 禎也²⁾, 熊本 篤志³⁾, 松岡 彩子⁴⁾, 松田 昇也²⁾, 堀 智昭⁵⁾, 新堀 淳樹⁵⁾, 山本 和弘⁵⁾, 三好 由純⁵⁾, 篠原 育⁶⁾, 奥村 哲平⁷⁾, 古賀 清一⁷⁾, 岡本 博之⁷⁾, 谷嶋 信貴⁷⁾, 北村 健太郎¹⁾, 土屋 史紀³⁾
(¹ 九工大, (² 金沢大, (³ 東北大, (⁴ 京都大, (⁵ 名古屋大, (⁶ 宇宙機構/宇宙研, (⁷ JAXA

Investigation of the relationship between satellite surface charging and chorus waves using DMSP and Arase satellite data

#Daichi Araki¹⁾, Mariko Teramoto¹⁾, Hayato Masuno¹⁾, Yoshiya Kasahara²⁾, Atsushi Kumamoto³⁾, Ayako Matsuoka⁴⁾, Shoya Matsuda²⁾, Tomoaki Hori⁵⁾, Atsuki Shinbori⁵⁾, Kazuhiro Yamamoto⁵⁾, Yoshizumi Miyoshi⁵⁾, Iku Shinohara⁶⁾, Teppei Okumura⁷⁾, Kiyokazu Koga⁷⁾, Hiroyuki Okamoto⁷⁾, Nobutaka Tanishima⁷⁾, Kentarou Kitamura¹⁾, Fuminori Tsuchiya³⁾

(¹ Kyushu Institute of Technology, (² Kanazawa University, (³ Tohoku University, (⁴ Kyoto University, (⁵ Nagoya University, (⁶ Japan Aerospace Exploration Agency/Institute of Space and Astronautical Science, (⁷ Japan Aerospace Exploration Agency

The presence of a surrounding plasma environment can result in surface charging for satellites in space. Surface charging and discharges represent typical examples of satellite malfunctions induced by the space environment. The avoidance of risks associated with charging and discharges represents a crucial aspect of ensuring the safe operation of satellites. It is therefore anticipated that the prediction of satellite surface charging will become a reality in the near future. The present study investigates the relationship between satellite surface charging and chorus waves, which are postulated to be a factor in increasing the number of energetic electrons that cause surface charging, with a view to achieving the aforementioned prediction.

Chorus waves are a type of naturally occurring plasma wave in space. Chorus waves precipitate energetic electrons along the magnetic field lines through pitch angle scattering. In contrast, satellite surface charging can occur when the flux of high-energy electrons in the range of several keV to tens of keV increases in the plasma environment surrounding the satellite. Consequently, one potential scenario is that surface charging occurs when a satellite passes through regions where high-energy electrons are precipitated along magnetic field lines due to chorus waves.

In this study, we used plasma observation data from the DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) F16 satellite to identify surface charging events on low-Earth orbit satellites. Furthermore, we analyzed data from the Arase satellite to examine the potential role of plasma waves in surface charging. The data from these satellites were statistically analyzed over the period from March 2017, when nominal observations by the Arase satellite began, through December 2022.

To identify surface charging events, we utilized the event list for 2017-2022 identified by the following criteria, which is applied in Meng et al. [2017], : 1) a distinct ion line structure is visible in the ion spectrogram, 2) the flux of high-energy electrons (above 14 keV) exceeds 10^8 electrons cm^{-2} s^{-1} sr^{-1} , 3) the satellite's charging potential is between -2040 V and -95 V, and 4) the duration of the surface charging event was 3 seconds or longer. Arase-DMSP conjunctions were defined as instances where the two satellites were on the same magnetic field line. Surface charging events that occurred concurrently with conjunctions were designated as surface charging-conjunction events. Additionally, we checked whether the Arase satellite observed chorus waves during these events.

The analysis revealed that 21 of the 24 detected surface charging-conjunction event exhibited valid data. Among these, 8 events were identified in which the Arase satellite observed chorus waves. The locations of the Arase satellite during these observations were near the magnetic equator, in the morning sector (MLT around 1-7 hours), and 4 - 6 RE. This region is consistent with generation regions of the chorus waves. Furthermore, for 2 of the 8 events where electron density data were available, we estimated the energy of electrons resonating with chorus waves from the magnetic equator to the satellite's position. The estimated energies were 7.41-81.20 keV and 3.28-10.29 keV, respectively. We also confirmed that the electron flux observed by the electrostatic analyzer (SSJ5) onboard the DMSP F16 satellite in the corresponding energy range increased. These findings indicate that electrons in the energy range responsible for surface charging precipitate into the Earth's atmosphere due to chorus waves. This suggests that surface charging may be caused by electrons originating from precipitation induced by chorus waves.

宇宙空間を飛行する人工衛星は、周辺のプラズマ環境に応じて表面帯電が起こることがある。表面帯電と、表面帯電によって引き起こされる放電は、宇宙環境が原因となる衛星障害の代表例である。人工衛星を安全に運用する上で、帯電・放電によるリスクとそれを未然に防ぐことは重要な課題であり、将来的な衛星表面帯電予測の実現が期待される。そこで、本研究では予測の実現に向けて、衛星表面帯電とそれを引き起こす高エネルギー電子を増加させる要因として考えられるコーラス波動の関係を調査した。

コーラス波動は、宇宙空間で自然発生するプラズマ波動の一種である。コーラス波動は、ピッチ角散乱によって磁力線沿いに高エネルギー電子を降り込ませる。一方で、衛星の表面帯電は、衛星周辺のプラズマ環境において数 keV~数十 keV の高エネルギー電子のフラックスが増加することで起こることがある。そのため、コーラス波動によって高エネルギー電子が磁力線沿いに降り込むとき、その降り込み先を衛星が通過することで表面帯電が起こるシナリオが考えられ

る。

本研究では、低軌道衛星の表面帯電イベントを検出するために、DMSP(Defense Meteorological Satellite Program: 防衛気象衛星計画)衛星 F16 のプラズマ観測データを用いた。加えて、表面帯電を引き起こすと考えられるプラズマ波動を解析するために、あらせ衛星の観測データを用いた。それぞれの衛星の観測データについて、あらせ衛星の定常観測が開始した 2017 年の 3 月以降、2022 年 12 月までを統計的に解析した。

表面帯電イベントについて、Meng et al. [2017] で定義された条件のもと、2017~2022 年のイベントを検出した。検出条件は、1) イオンスペクトログラムのイオンラインの構造を確認できること、2) 14 keV 以上の高エネルギー電子のフラックスが $10^8 \text{ electrons cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ より大きいこと、3) 衛星の帯電電位が $-2040 \text{ V} \sim -95 \text{ V}$ であること、4) 表面帯電イベントの継続時間が 3 秒以上であること、をすべて満たすとき表面帯電イベントとして検出した。2 つの衛星が同一磁力線にある conjunction を定義し、conjunction イベントを検出した。表面帯電と conjunction が同時発生しているイベントを表面帯電-conjunction として検出し、このとき、あらせ衛星がプラズマ波動を観測しているかどうかを確認した。

解析の結果、検出された表面帯電-conjunction イベント全 24 回のうち、有効データの揃った 21 回のイベントについて、あらせ衛星がコーラス波動を観測しているイベントを 8 回検出することができた。このとき、あらせ衛星の観測位置は、磁気赤道面付近、朝側領域 (MLT が 1~7 時付近)、地球中心から地球半径の 4~6 倍の距離であり、過去の研究によって確かめられたコーラス波動の発生領域と一致していることを確認できた。また、コーラス波動を観測している 8 例のイベントのうち、電子密度のデータのある 2 例のイベントにおいて、磁気赤道面~衛星位置までのコーラス波動と共鳴する電子が持つエネルギーを推定したところ、それぞれ 7.41~81.20keV、3.28~10.29keV となった。また、これらの電子の降り込む DMSP 衛星 F16 に搭載された静電分析器 (SSJ5) において、対応するエネルギー帯の電子のフラックスが増加していることを確認できた。以上より、表面帯電を引き起こすエネルギー帯の電子がコーラス波動によって地球大気へと降り込んでおり、コーラス波動による降下電子由来の表面帯電の発生を示唆している。