

# NASCAP を用いた静止軌道衛星帯電解析 -WINDS と ETS-VIII- Evaluation of Geostationary Satellite Surface Charging -WINDS and ETS-VIII-

中村 雅夫、川北 史郎、高橋 真人、佐藤 哲夫 (宇宙航空研究開発機構)  
趙 孟佑 (九州工業大学)

Masao Nakamura, Shirou Kawakita, Masato Takahashi, Tetsuo Sato (Japan Aerospace Exploration Agency)  
Mengu Cho (Kyushu Institute of Technology)

Key Words: Spacecraft Charging, NASCAP, WINDS, ETS-VIII

**Abstract:** We evaluate the total duration in the condition that the Electrostatic Discharge (ESD) could occur and the number of expected trigger arcs for the secondary (sustained) arcs on solar array for the geostationary satellites, the Wideband InterNetworking engineering test and Demonstration Satellite (WINDS) and the Engineering Test Satellite -VIII (ETS-VIII). For the evaluation, we use NASA Charging Analyzer Program (NASCAP) with the statistical plasma parameters observed by the Los Alamos National Laboratory geosynchronous satellites.

## 1. 概要

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が開発中の静止軌道人工衛星の WINDS (超高速インターネット衛星) と ETS-VIII (技術試験衛星 8 号機) について、NASA Charging Analyzer Program (NASCAP) を用いて表面帯電解析をおこなった。衛星表面帯電の影響として、衛星構造体 (衛星アース) と誘電体、特に太陽電池表面のカバーガラスとの間の電位差により起こる放電 (Electrostatic Discharge: ESD) の可能性がある帯電時間と、日照時での放電をトリガーとする持続放電による太陽電池の劣化とを見積もった。静止軌道の宇宙プラズマ環境パラメータとして、Los Alamos National Laboratory (LANL) の 3 つの静止衛星の延べ約 12 年間分のデータの統計解析結果を用いた。その結果、衛星により帯電特性が異なることが明らかになった。

## 2. NASCAP を用いた静止軌道衛星帯電解析

### 2.1 衛星モデル

NASCAP/GEO は、静止軌道衛星の表面帯電を数値的に解析するプログラムである。縦横高さ  $17 \times 17 \times 33$  の格子状に用意されたオブジェクトを配置することで、衛星の簡易な 3 次元モデルを作成し、その表面の材料パラメータと衛星周辺のプラズマ環境を与え計算をおこなう。WINDS と ETS-VIII の形状とそれぞれの NASCAP モデル例を、図 1、図 2 に示す。これらモデルと材料・環境パラメータを用いて、衛星表面に流出入する全電流量を求め電位の時間発展を計算する。衛星の

各表面に流入する全電流:  $I_t = I_i + I_{se} + I_{si} + I_{be} + I_{ph} + I_s - I_e$  ( $I_i$ : イオン電流、 $I_{se}$ : 電子衝突による 2 次電子電流、 $I_{si}$ : イオン衝突による 2 次電子電流、 $I_{be}$ : 後方散乱電子電流、 $I_{ph}$ : 光電子電流、 $I_s$ : 表面電流、 $I_e$ : 電子電流) をその表面電位  $V_s$  の関数として求め、衛星表面の静電容量  $C$  を用いて電位の時間発展式  $dV_s/dt = I_t/C$  を解くことにより、次の時間ステップの電位  $V_s$  を求める。その電位を用いて全電流を求める計算を繰り返し、衛星の表面帯電値を求めていく。また、有限要素法 (FEM) を用いて宇宙空間の電位を計算している。

### 2.2 宇宙プラズマ環境パラメータ

LANL の 3 つの静止軌道衛星が観測した述べ約 12 年間分の電子とイオン (陽子) の密度と温度データを、図 3 に示したように、パラメータ毎のビンに分け統計処理をおこなった。表面帯電では、質量が軽く熱速度が大きい電子電流の寄与が大きい。そのため、各地方時 (太陽方向を正午の位置とし、経度をそのときの時刻として示したもの) における電子温度の存在確率を調べる。図 4 に、日陰と 0, 3, 6, 12, 15, 18, 21 時の各地方時を中心として  $\pm 1$  時間 (経度にして  $45^\circ$ ) の領域に分けて統計処理した結果を示す。どの地方時においても、大部分の時間は電子温度が 1.5keV のビンに入っている。しかし、日陰や夜側から朝側にかけて、高い電子温度の割合が比較的大きい。これは 2 つの理由が考えられ、1 つは、静止軌道が夜側でプラズマ温度の高いプラズマシ

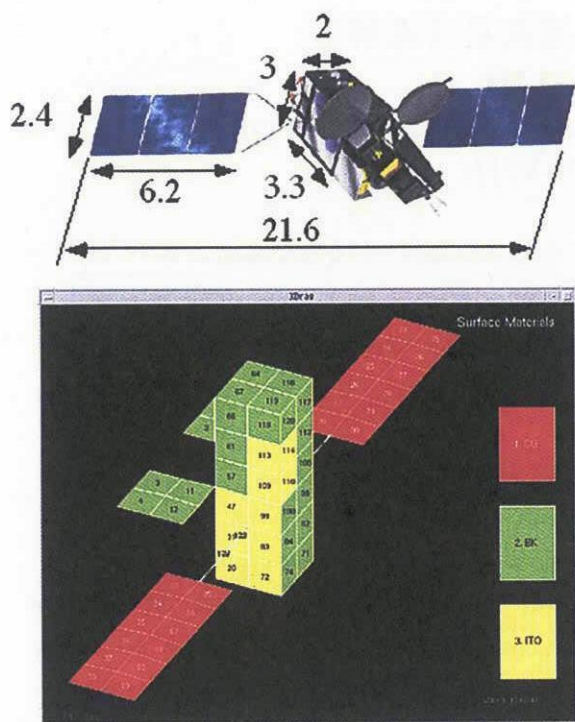


図1 WINDSの形状(上)とNASCAPモデル(下)。モデルの色は表面材料を表している

ート領域を横切ることがあるため、もう一つは、磁気圏擾乱現象のサブストームにより、磁気圏尾部から比較的高エネルギーのプラズマが夜側の静止軌道上に注入され、これら高エネルギーの電子が地球のダイポール磁場により夜側から朝側へとドリフト運動するためである。

これらの統計解析により求めた電子とイオンの密度と温度の各パラメータの組み合わせに対してNASCAPを用いた帯電解析をおこない、静止軌道上での帯電頻度を評価する。

### 2.3 帯電解析結果

LANL 衛星の統計解析から求めた宇宙プラズマ環境パラメータを用いて帯電シミュレーションをおこなった結果、WINDSとETS-VIIIのどちらの場合も衛星本体から一番遠いところにある太陽電池表面のカバーガラスと衛星構造体との電位差が最大となることがわかった。また、各衛星に使用する太陽電池を用いた地上真空チャンバー実験で、太陽電池の放電を起こす電位差の敷居値の下限が約400Vと求まっている。そのため、本計算でも衛星表面間の電位差が400Vを越えた場合に放電が起こるものと考え解析を進める。

はじめに、放電が起こる可能性がある時間を求める。放電を起こし得る電位差の敷居値を越える環境パラメータの組み合わせを足し合わせた確率から、1年間軌道上に予想される積算時間を求め、結果を図5に示した。ただし、NASCAP/GEO モデ

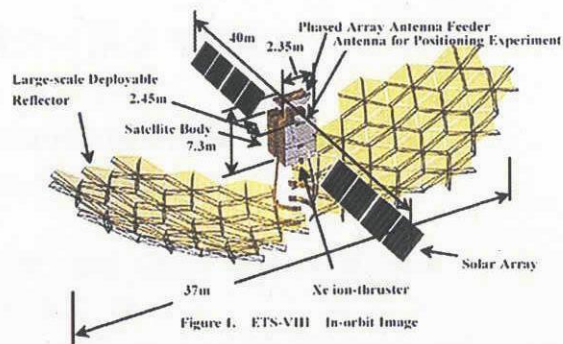


Figure 1. ETS-VIII In-orbit Image

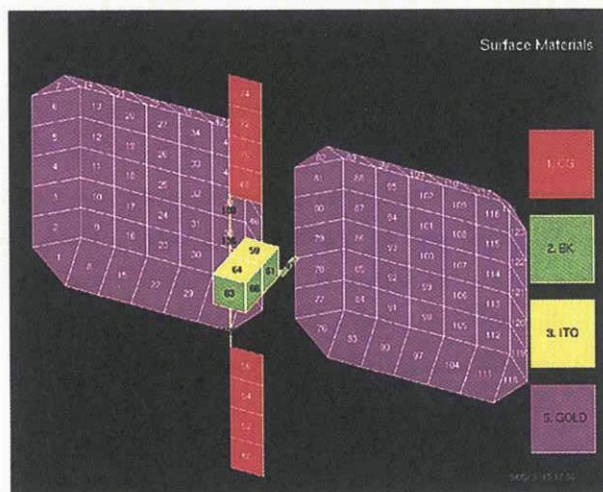


図2 ETS-VIIIの形状(上)とNASCAPモデル(下)。モデルの色は表面材料を表している

ルの制約により、日陰と地方時で0, 6, 12, 18時の領域のみ計算をおこなった。これらの結果で、特に日陰の電子温度が4.5keVのビンの帯電時間が飛びぬけて高い。これは、日陰では光電子放出が無いため、日照より低い電子電流により容易に表面帯電が起こってしまうことと、図4で示したように、夜側で4.5keVのビンに入る確率が高いためである。また、オーソドックスな通信衛星形状のWINDSと巨大な導体のメッシュアンテナ

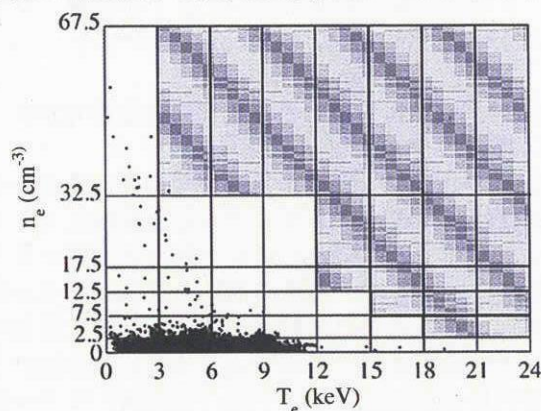


図3 プラズマパラメータ分類の例(電子の温度と密度)



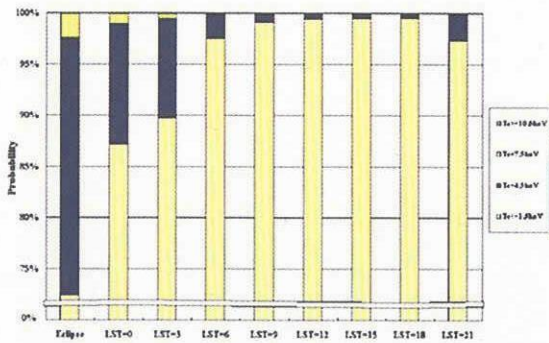
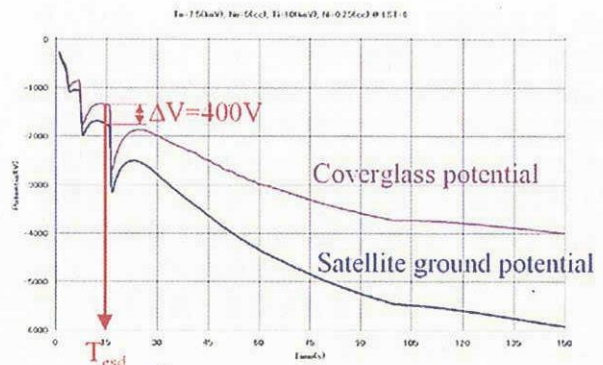


図4 地方時別の電子温度分布

を持った ETS-VIII という衛星毎の違いを比べると、WINDS は昼側（地方時 12 時）領域が日陰について帯電時間が長いのにに対し、ETS-VIII は朝側（地方時 6 時）領域が長いことがわかった。通常、高温の電子の存在確率が高い朝側で帯電時間が長くなることが予想される。しかし、LANL の統計解析では、朝側領域で電子温度が 4.5keV のビンにありかつ、電子密度が非常に大きな場合が比較的多く、電子電流が密度に比例することから、帯電を引き起こしていることを示している。また、衛星毎の違いは、表面素材と地球向きのメッシュアンテナを持つ ETS-VIII の特徴に強く依存しているものと考えられる。今後さらに高精度な帯電計



- $T_{esd}$ : Time to reach  $\Delta V=400V$
  - $T_{chrg}$ : Charging duration
  - $N_{arc}$ : Number of arcs
- $$N_{arc} = T_{chrg} \div T_{esd}$$

図6 衛星帯電の時間変化と放電回数の見積り

算モデルを用いてシミュレーションをおこない検証する必要がある。

また、日照中で放電が起こった場合、それをトリガーとして持続放電が起こり、太陽電池を劣化させることがある。このため、1 年間の積算放電回数を求める。放電回数を計算するため、まず図 6 に示すように NASCAP の計算で衛星帯電の時間変化プロファイルを調べ、衛星内の電位差が

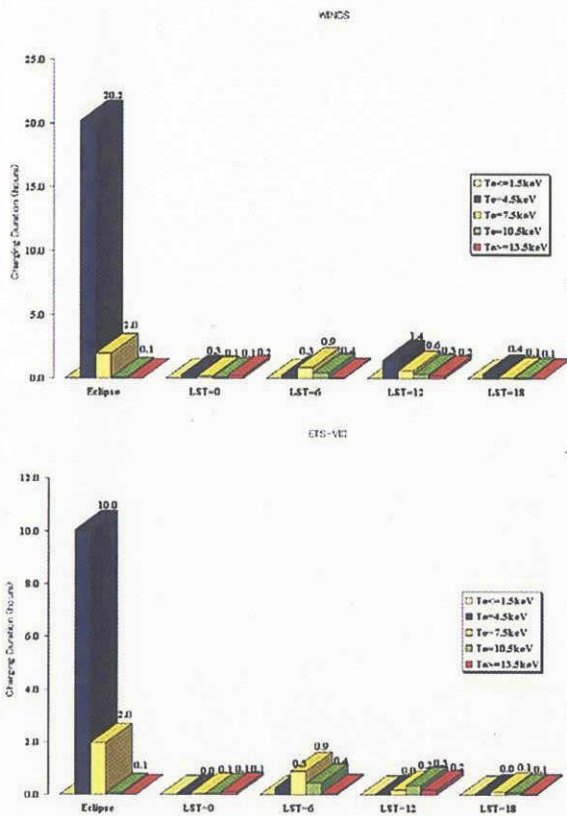


図5 WINDS (上) と ETS-VIII (下) の地方時毎の 1 年間の積算帯電時間

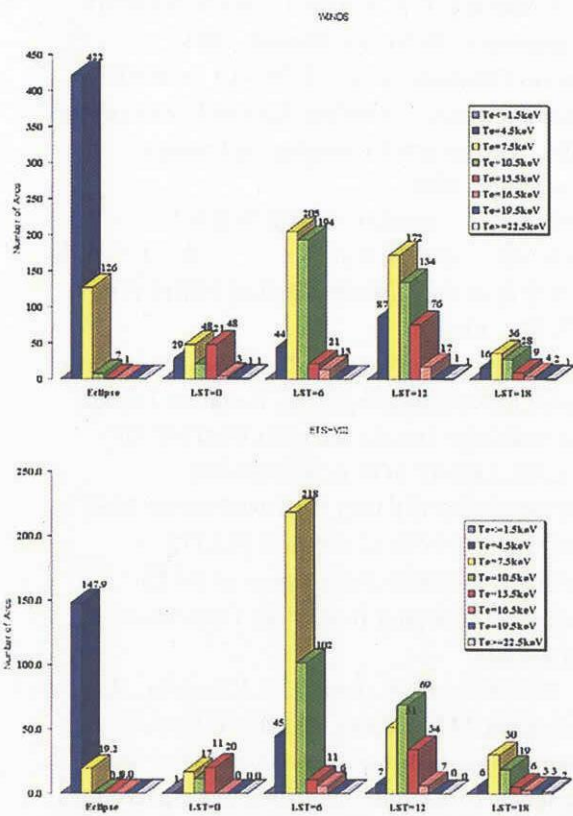


図7 WINDS (上) と ETS-VIII (下) の地方時毎の 1 年間の積算放電回数

400V 以上に達するまでの時間を求めた。次に、その時間で、求めた環境パラメータの 1 年間の積算時間を割ることで 1 年間の積算放電回数を求めた。その結果を図 7 に示す。参考のため、日陰の放電回数も示した。この結果でも WINDS は昼側領域での放電回数が、朝側領域での放電回数の回数を上回っている。一方、ETS-VIII では、朝側領域が日陰領域と昼側領域に比べ放電回数が多いことがわかった。これも、衛星表面素材と衛星形状に依存していると考えられる。

### 3. まとめ

本研究では、静止軌道上のプラズマ環境の統計的データと NASCAP を用いて、静止軌道衛星の WINDS と ETS-VIII の表面帯電解析をおこなった。その結果、衛星により帯電特性が有意義に異なることがわかった。今後、新しい衛星帯電解析ツールを用いてより正確な帯電解析を進めるとともに、観測値との比較を強化し各プラズマ環境時の磁気圏変動の様子を明らかにして、衛星毎最適化された衛星帯電予報を確立することが必要である。

### 参考文献

- [1] M. J. Mandell, P. R. Stannard, I. Katz, NASCAP Programmer's Reference Manual, 1984
- [2] Masato Takahashi, et al., ETS-VIII Solar PDL Plasma Interaction Problem Approach, Proceedings of the 7th Spacecraft Charging Technology Conference, 2001
- [3] 中村雅夫, "NASDA の衛星帯電研究 - NASCAP と宇宙環境計測 -", 平成 14 年度京都大学電波科学計算機実験共同利用研究成果報告書, 2003 年
- [4] Tetsuo Sato, Masato Takahashi, Masao Nakamura, Shirou Kawakita, Mengu Cho, Kazuhiro Toyoda and Yukishige Nozaki, DEVELOPMENT OF SOLAR ARRAY FOR A WIDEBAND INTERNETWORKING ENGINEERING TEST AND DEMONSTRATION SATELLITE: SYSTEM DESIGN, Proceedings of the 8th Spacecraft Charging Technology Conference, in press, 2003
- [5] M. Cho, N. Aoki, K. Toyoda, S. Kawakita, M. S. Nakamura, M. Takahashi, T. Sato, Y. Nozaki, Estimate on number of arcs on solar array for a geostationary satellite, submitted to J. Spacecraft and Rockets, 2003