

# 準天頂衛星みちびき初号機の表面帯電解析の時間発展の解析

前田 紘孝<sup>\*1</sup>, 中村 雅夫<sup>\*1</sup>, 古賀 清一<sup>\*2</sup>, 松本 晴久<sup>\*2</sup>

MAEDA Hiroataka<sup>\*1</sup>, NAKAMURA Masao<sup>\*1</sup>, KOGA Kiyokazu<sup>\*2</sup>, MATSUMOTO Haruhisa<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> Osaka Prefecture University, <sup>\*2</sup> Japan Aerospace Exploration Agency

## 1. 研究背景・目的

宇宙空間において、人工衛星は周囲のプラズマとの相互作用により帯電する。帯電によって、衛星部材間の電位差（乖離電圧）が大きくなり、静電気放電が発生する。この放電は、太陽電池の故障や劣化、電気回路の損傷や電磁ノイズによる衛星の故障を引き起こす場合がある。このような帯電・放電による衛星の故障は、宇宙環境由来の衛星の故障のうち約半数を占めている<sup>[1]</sup>。そのため、衛星帯電を解析することは故障の原因究明や設計段階での故障の防止につながるため重要である。本研究では準天頂衛星みちびき初号機（Quasi-Zenith Satellite-1, QZS-1）について帯電解析を行った。準天頂衛星みちびき初号機は日本の航法衛星であり、測位の安定性の向上と測位精度の向上という役割を持つ準天頂衛星システム（Quasi-Zenith Satellite System, QZSS）を構成している。この衛星の軌道は、中緯度付近において天頂付近に長時間滞空するために、対地同期軌道でありながら 41° 程度の軌道傾斜角と離心率を持っている。この静止軌道と同じような高度である準天頂軌道を利用する衛星は、高エネルギーのプラズマが侵入することにより、帯電が頻発する可能性がある。本研究では、帯電解析ソフト Spacecraft Plasma Interaction Software (SPIS) を用いて、衛星構体と表面の誘電体に生じる各電位差を乖離電圧として、その平衡値だけではなく、時間発展についても解析する。そこから日照・日陰における乖離電圧の宇宙プラズマ環境に対する依存性を調べる。

## 2. 帯電解析ソフト

本研究では、欧州宇宙機関（ESA）協力の下、フランス国立航空宇宙研究所（ONERA）が開発した衛星帯電シミュレーションソフトの Spacecraft Plasma Interaction Software (SPIS) を用いる<sup>[2]</sup>。このソフトウェアは無償で利用でき、またソースコードが公開されている。解析とその結果の可視化だけでなく、ソフト内に CAD が組み込まれているので、数値モデル作成とメッシュ化も内部で行うことができる。また、SPIS は本研究で用いる範囲においては、動作が軽く汎用の PC でもシミュレーションを実行することができる。本研究では SPIS 5.2.4 バージョンを使用し、計算機として Intel Core i9-9900K CPU, 64GB RAM, Linux OS (Ubuntu 18.04 LTS) のものを使用している。

## 3. シミュレーションモデル

解析に用いるみちびき初号機のシミュレーションモデルを図 1 に示す。このシミュレーションモデルは 2.4 m(W) × 23.7 m(D) × 5.5 m(H) の大きさを持ち、ブラックカプトンで覆われた衛星構体とその両脇に CFRP パドル、そのパドル上に計六枚のカバーガラスに覆われた太陽電池が貼り付けられており、パドルと衛星構体はアルミニウムのブームで接続されている。構体側面には ITO でコーティングされた OSR とカバーガラス（素材は SiO<sub>2</sub>）に覆われた太陽電池が取り付けられている。また図 1 に示すとおり図の上側の構体の面には、ブラックカプトンに覆われたアンテナカバーがあり、そして帯電電位モニタ（POM）の位置

---

MAEDA Hiroataka and NAKAMURA Masao are with Osaka Prefecture University, Sakai, 5998531 Japan

(e-mail: [syb03105@edu.osakafu-u.ac.jp](mailto:syb03105@edu.osakafu-u.ac.jp), [nakamura@aero.osakafu-u.ac.jp](mailto:nakamura@aero.osakafu-u.ac.jp)).

KOGA Kiyokazu and MATSUMOTO Haruhisa are with Japan Aerospace Exploration Agency, Tsukuba, 3058505 Japan.

(e-mail: [koga.kiyokazu@jaxa.jp](mailto:koga.kiyokazu@jaxa.jp), [matsumoto.haruhisa@jaxa.jp](mailto:matsumoto.haruhisa@jaxa.jp)).

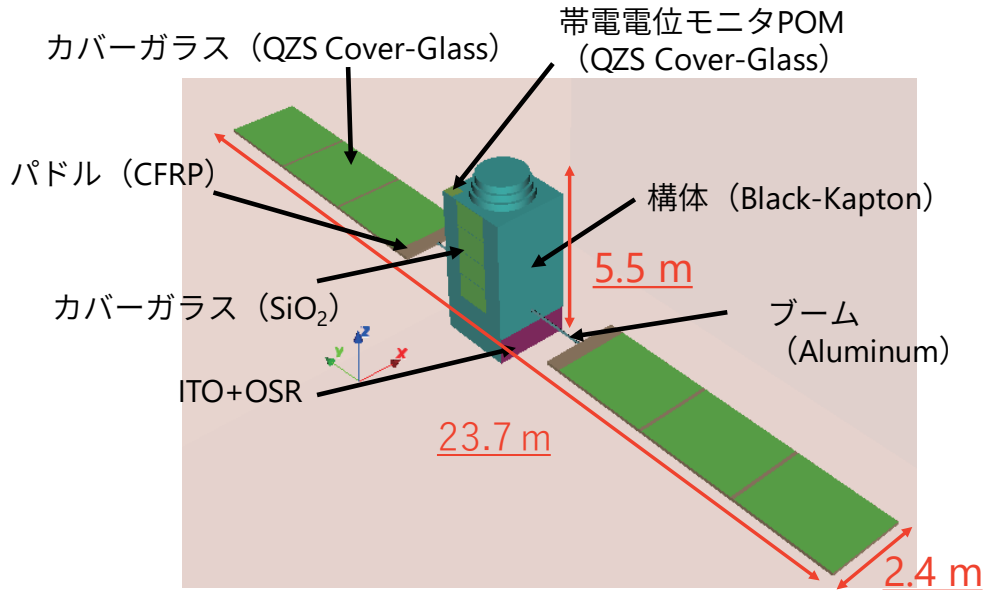


図1 みちびき初号機の数値衛星モデル

には、POMを模擬するためカバーガラスを貼り付けた。また、太陽電池パドルは太陽光の入射方向に合わせてブームを軸に回転させ計算することができる。本研究では、日陰・日照のどちらの場合も太陽電池パドルは図1の状態での解析を行った。日照の場合、太陽光は太陽電池に対し垂直に入射する図2のように設定した。

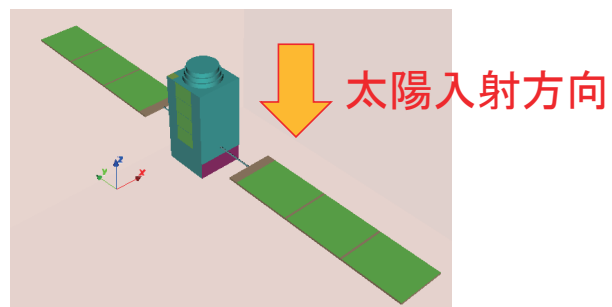


図2 太陽光入射方向

今回使用した計算領域を図3に示す。メッシュの作成はSPISにビルトインされているGmshで行った。領域全体は、楕円体の外部領域と直方体の中間領域から構成されている。それぞれの領域のサイズは、外部領域が36 m × 60 m × 36 m、中間領域が12 m × 30 m × 12 mである。また、それらの領域のメッシュサイズは、外部領域の外側境界は最大3.2 mと粗目に取り、中間領域の外側の境界は0.8 m、衛星構体表面付近は0.2 m、誘電体付近は0.1 m、POM付近は0.05 mとしている。中間領域と衛星本体付近のメッシュサイズが外部領域のそれと比べて細かいのは、計算領域内のメッシュ数を削減しつつも、空間ポテンシャルの計算精度を確保するためである。

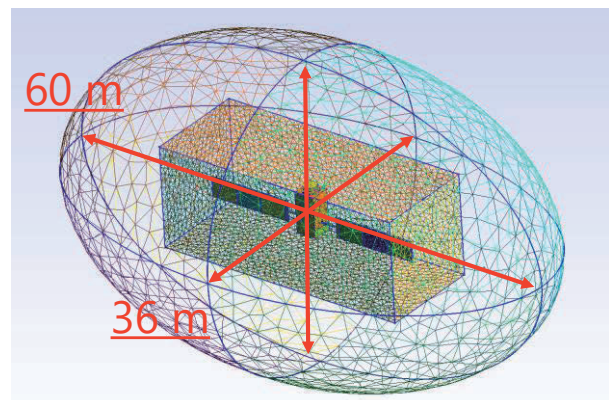


図3 計算領域

#### 4. 宇宙プラズマ環境モデル

本研究では、準天頂軌道と同じような高度である静止軌道の宇宙プラズマ環境を参考に表1のようなパラメータで解析を行った。電子密度とイオン密度は静止軌道での平均

表1 解析に用いた宇宙プラズマ環境

$T_e$ [keV]	$N_e$ [cc]	$T_i$ [keV]	$N_i$ [cc]
4~32	1	$1.9 \times T_e$ (max.32)	1

$T_e$ : electron temperature,  $T_i$ : ion temperature  
 $N_e$ : number of electron density,  $N_i$ : number of ion density

的な値と準中性を考慮して、それぞれ 1/cc とした。電子温度は衛星が帯電するような 4~32 keV の範囲とした。また、電子温度とイオン温度は静止軌道の観測値を参考にイオン温度は電子温度の 1.9 倍として解析を行った。ただし、イオン温度の上限は 32 keV とした。

### 5. シミュレーション結果

#### 5.1 衛星表面電位と電子温度の関係

衛星表面電位と宇宙プラズマ環境との関係を調べるために表 1 のように電子温度をパラメータとして、シミュレーションを行った。その結果、5000 s での衛星各部の電位と電子温度の関係は以下の図 4 のようになった。図 4 は左が日陰の場合、右が日照の場合を示しており、それぞれ電子温度に対して、構体電位、パドル上のカバーガラスと POM は最大電位、構体側面の SiO<sub>2</sub> は最小電位を取りプロットしている。5000 s においては、後で示すように日陰では衛星各部の電位は発展の途中の状態も含まれ、日照は平衡状態である。日陰・日照どちらの場合も最大電位はパドル上のカバーガラスの中央部となった。日照の場合では日陰の場合と比べ浅い帯電となっていることがわかる。図 4 の破線は構体電位についての回帰直線であるが、その破線のように衛星電位は電子温度に対し、1 次関数的な関係がある。日陰の衛星電位が負に大きく帯電し始める電子温度（臨界温度  $T_{e^*}$ ）は 4~5 keV、日照の臨界温度は 8~10 keV 付近にあることが分かる。

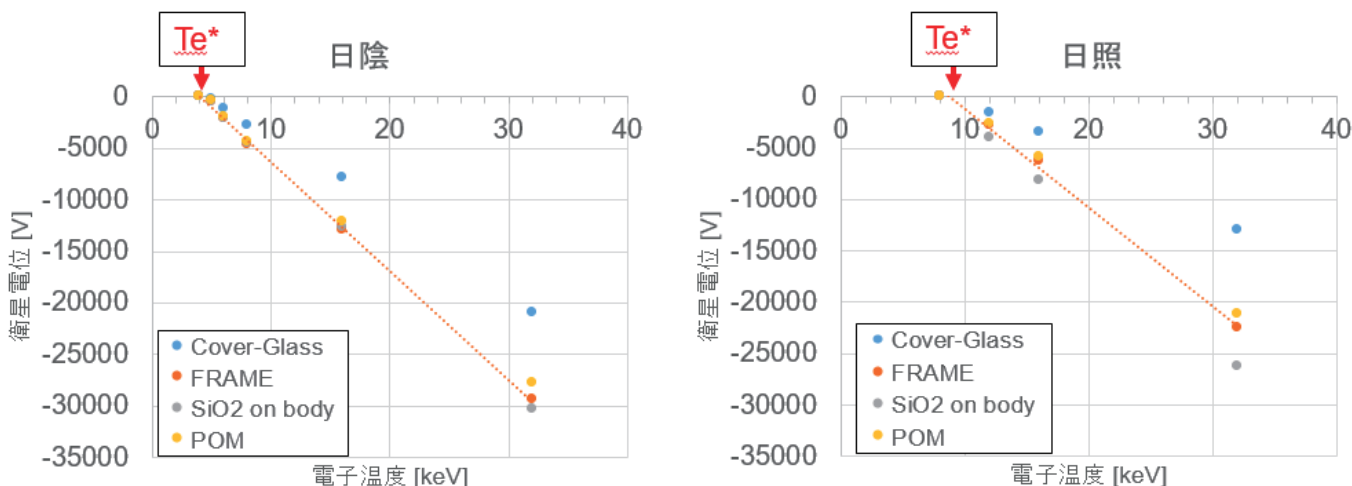


図 4 シミュレーション内時間 5000 s のときの電子温度と衛星電位の解析結果

#### 5.2 乖離電圧の時間発展と電子温度の関係

次に、衛星表面部材間の電位差と周囲の宇宙プラズマ環境の関係を調べる。乖離電圧が最大となるカバーガラスと構体の電位差に着目し、200 s、5000 s のときの日陰と日照の乖離電圧と電子温度の関係を図 5 に示す。この乖離電圧は日陰・日照どちらの場合でも 200 s から 5000 s にかけて発展している。電子温度が 16 keV

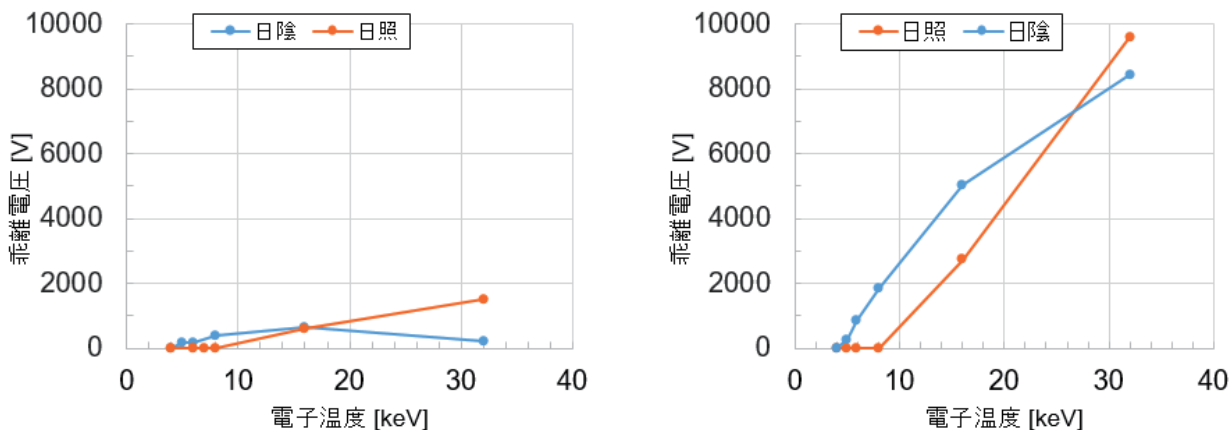


図 5 乖離電圧（カバーガラスと構体の電位差）と電子温度の関係（左：200 s、右：5000 s）

の場合、200 s では日陰の乖離電圧と日照の乖離電圧はほぼ同じ値であるが、5000 s では日陰の乖離電圧の方が日照の乖離電圧より大きくなっている。一方で、電子温度が 32 keV の場合、200 s、5000 s とともに日陰の乖離電圧が日照の乖離電圧より小さくなっている。

ここで、電子温度が 32 keV の場合の衛星各部の電位の時間発展を図 6 に示す。図 4 の説明でも述べたように、図 6 から、日陰の衛星各部の電位は 5000 s においても発展の途中と考えられる。一方で日照の衛星各部の電位は日陰に対して発展が早く、5000 s においてほぼ平衡状態にあると思われる。したがって、日陰の衛星各部の電位が 5000 s を超えて十分発展すると、日陰の乖離電圧が日照の乖離電圧より大きくなると考えられる。

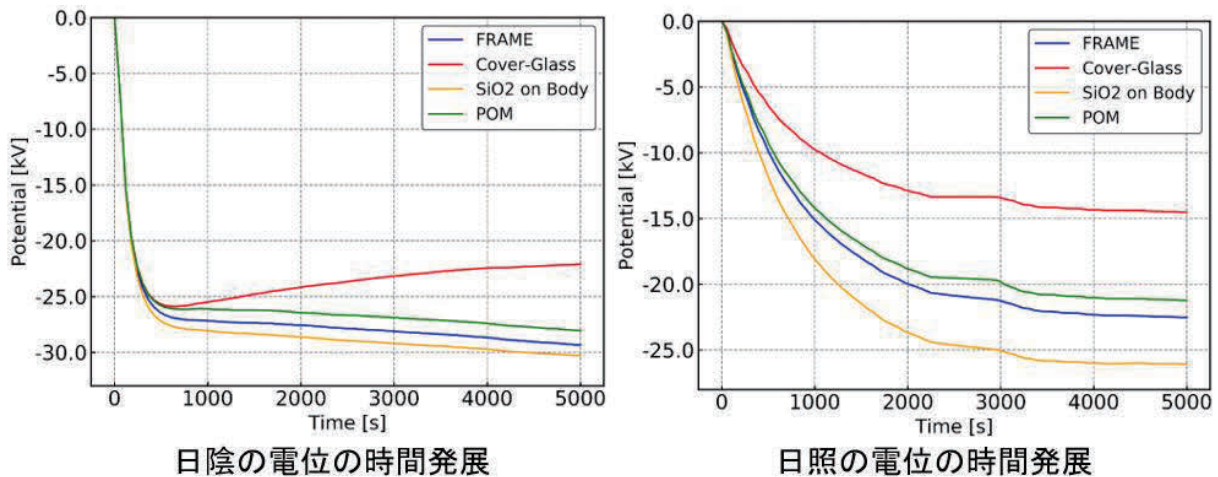


図 6 電子温度 32 keV のときの乖離電圧の時間発展 (左：日陰，右：日照)

次に電子温度 16 keV のときの衛星各部の電位の時間発展を図 7 に示す。日陰の場合、衛星各部の電位は約 50 s から発展し始める。日照の場合、衛星各部の電位は 0 s 付近から発達し始めている。そのため、約 50 s までの間は日陰の乖離電圧が日照の乖離電圧より小さくなっているが、衛星各部の電位が発展し始めた約 50 s から 5000 s の間は日陰の乖離電圧が日照の乖離電圧より大きくなった。

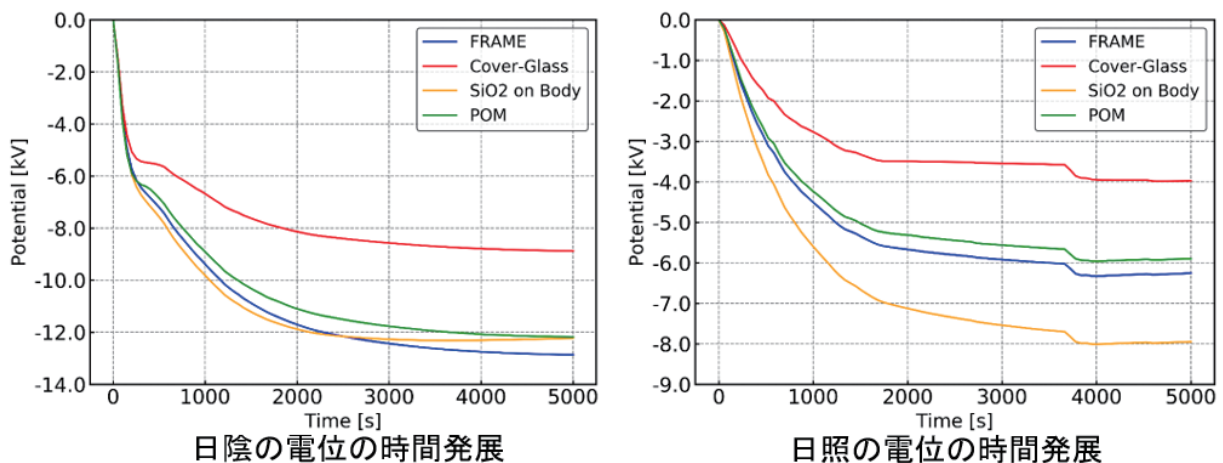


図 7 電子温度 16 keV のときの衛星各部の電位の時間発展 (左：日陰，右：日照)

つまり、16 keV や 32 keV のような高い電子温度では、日陰の衛星各部の電位より日照の衛星各部の電位が速く発展し、一時的に日陰の乖離電圧より日照の乖離電圧が大きくなる場合がある。そして、時間が経過し衛星各部の電位が十分に発展すると日陰の乖離電圧が日照の乖離電圧より大きくなると考えられる。このように、日照の乖離電圧が日陰の乖離電圧よりも放電閾値に達するのが早くなる場合があり、結果として放電回数が増加する可能性がある。

## 6. まとめ

衛星帯電解析ソフト SPIS を用いて準天頂衛星みちびき初号機のシミュレーションモデルを作成し、表面帯電のシミュレーションを行なった。まず、日陰・日照における電子温度をパラメータとした宇宙プラズマ環境と衛星各部の電位の関係を調べた。電子・イオン密度を  $1/\text{cc}$  に固定した条件では、みちびき初号機が負に大きく帯電し始める臨界温度( $T_{e^*}$ )は日陰の場合  $4\sim 5\text{ keV}$ 、日照の場合  $8\sim 10\text{ keV}$  であった。電子温度が臨界温度以上の場合、衛星電位は電子温度に対して1次関数的に増加した。そして、電子温度をパラメータとした宇宙プラズマ環境と乖離電圧の時間発展の関係を調べた。同じ高温の電子温度においては、日陰に比べ日照の衛星各部の電位の発展が速く、帯電の初期段階で日陰の乖離電圧が日照の乖離電圧より小さくなる場合があることが判明した。しかし、最終的に衛星各部の電位が十分に発展すると、日陰の乖離電圧が日照の乖離電圧より大きくなると考えられる。このように日照の衛星各部の電位の発展が速いとき、乖離電圧が放電閾値に達するような条件においては、日照の乖離電圧が放電閾値に早く到達するため、結果として放電回数が増加する可能性があることが分かった。今後は、電子温度だけでなく密度もパラメータとして、宇宙プラズマ環境と衛星各部の電位や乖離電圧の時間発展との関係を調べる必要がある。

### 謝辞

本研究は、科学研究費補助金新学術領域研究「太陽地球圏環境予測」(PSTEP) 予報システム班 (A01)、次世代宇宙天気予報のための双方向システムの開発 (MEXT/JSPS 科研費 15H05813) の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] H.C.Koons , J.E.Mazur , R.S.Selesnick , J.B.Blake , J.F.Fennell , J.L.Roeder , and P.C.Anderson , “The Impact of the Space Environment on Space Systems”, 6th Spacecraft Charging Technology Conference , 1 September 2000
- [2] SPIS ホームページ, <http://dev.spis.org/projects/spine/home/spis>