

衛星帯電予報のための衛星表面電位のリアルタイム推定手法の開発

川内 諒太¹, 寺岡 毅¹, 中村 雅夫¹, 長妻 努², 石井 守²

¹大阪府立大学, ²情報通信研究機構

1. 研究背景・目的

宇宙空間のプラズマ環境が原因で、人工衛星が表面帯電・放電し、衛星障害を引き起こすことがある。宇宙天気予報による宇宙プラズマ環境の予測結果を用いて、リアルタイムで衛星表面電位を推定し、放電による衛星障害の予報を行うシステムを作れば、事前に障害発生を回避する対策を打つことが期待できる。このシステムを実現するためには、プラズマ環境を与えると瞬時に衛星表面電位を推定することが必要である。既存の衛星帯電シミュレーションソフトにより、表面電位を計算することはできるが、計算には時間がかかり、瞬時に電位を求めることはできない。そのため、本研究では、予め行なった表面帯電のシミュレーション結果を用いて、衛星表面電位を瞬時に推定する手法の開発を目的とする。

2. 衛星表面電位の推定手法

今回提案する手法を簡単に説明する。衛星ごとに宇宙環境に対する表面電位は異なるので、まず衛星帯電解析のシミュレーションソフトで、対象とする衛星のモデルを作成する。次に、環境パラメータの代表的な組み合わせの環境で、作成した衛星モデルを用いてシミュレーションを行い、その結果をまとめたテーブルを作成する。そして、予測したプラズマ環境について、作成したテーブルの値を用いた補間を行うことで、対応する衛星表面電位を瞬時に推定する。

3. Van Allen Probes 衛星を対象とした検証

本研究では、提案した手法のプロトタイプとして、衛星帯電解析ソフト Spacecraft Plasma

Interaction Software (SPIS)を用いて、日陰時の Van Allen Probes (VAP)衛星を対象として検証を行なった。

3.1. SPIS

SPIS はヨーロッパで開発された表面帯電の解析ソフトである。インターネット上[1]で会員登録をすれば無料でダウンロード・使用できる。これまでも、SPIS を用いた静止軌道衛星の表面帯電の研究が本シンポジウムで報告されている[2][3][4]。

3.2. Van Allen Probes 衛星

Van Allen Probes 衛星は 2012 年 8 月 30 日にアメリカで打ち上げられたもので、Van Allen 帯などの中高度軌道の宇宙プラズマ環境



Fig.1 Van Allen Probes 衛星のイメージ図[5]。

を観測・調査する衛星である。精密な観測を行うため、衛星表面に電位差が発生しないように、導電性に優れた素材・コーティングが表面全体に使われている。この Van Allen Probes 衛星の観測データはインターネット上[6]で公開されており、プラズマ環境と衛星電位の関係を調べることができる。プラズマ環境のうち、電子とイオンについては観測機器 Helium Oxygen Proton Electron (HOPE)で観測している。衛星表面電位については観測機器 Electric Field and Waves Suite (EFW)

Table 1 作成した Van Allen Probes 衛星モデルの寸法・形状および表面素材.

部材	寸法・形状	表面素材
本体 (緑色)	対辺の距離が 1.8m, 高さが 1.0m の正八角柱	Black Kapton
太陽アレイ (青色)	1.1m×1.2m×0.03m の直方体	受光面: ITO 裏面: CFRP 厚み部分: Aluminum
リング部 (紫色)	直径 0.9m, 側面の厚さ 0.05m, 高さ 0.15m の円筒	Aluminum

で観測しているが, 観測可能な範囲が $-200 \sim +200V$ であり, 日陰時では正しく観測されない. 本検証は日陰時で行うため, HOPE によるイオンフラックスの観測データから衛星表面電位を導出したものを使用する.

3.3. Van Allen Probes 衛星モデル, テーブルおよび補間方法

まず, SPIS を使用して Van Allen Probes 衛星のモデルを作成した. そのモデルを Fig.2 に示す. 表面素材・寸法については Table 1 に示す. この衛星モデルの表面はすべて通電させている. なお, 太陽電池と本体の接合部, ブーム等は省略している.

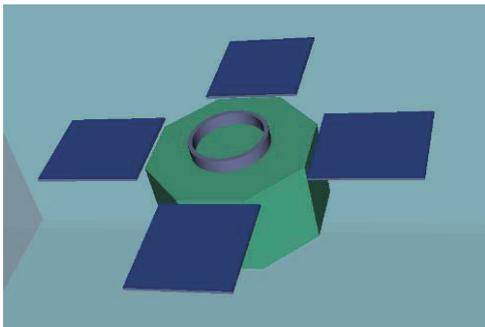


Fig.2 SPIS で計算を行う Van Allen Probes 衛星モデル.

次にテーブルを作成した. 今回は, 各プラズマ種が単一の温度を持つと仮定し, 入力するプラズマ環境のパラメータを「電子密度」, 「電子温度」, 「イオン密度」, 「イオン温度」の4つ (以下, 温度・密度環境とする) とした. そして, この温度・密度環境の代表的な値を選択した. 選択したそれ

ぞれの値を Table 2 に示す. 電子密度は4つ, 電子温度は6つ, イオン密度は4つ, イオン温度は3つを選び, これらの総当り的な組み合わせ ($4 \times 6 \times 4 \times 3$) の計 288 通りの環境について SPIS でシミュレーション計算した. そして, 温度・密度環境の組み合わせと衛星表面電位の計算結果をまとめたテーブルを作成した.

Table 2 テーブル用に選択した温度・密度環境の代表値.

電子密度 [cm^{-3}]	電子温度 [eV]	イオン密度 [cm^{-3}]	イオン温度 [eV]
0.10	1	0.10	1,000
0.20	2,500	0.25	5,000
0.50	5,000	0.50	30,000
1.00	10,000	1.00	
	25,000		
	50,000		

続いて, 作成したテーブルの値を用いた補間方法について述べる. 本研究では, 衛星表面電位を入力環境である温度・密度環境を変数とする4変数関数とみなした. そして, 補間方法はこの4変数での線形補間とした. n 変数関数の線形補間には 2^n 個のデータを用いるため, 今回は $2^4 = 16$ 個のデータを用いて表面電位を補間することになる. 温度・密度環境を入力すると, 作成したテーブルから補間に使う16個のデータを探し出し, 衛星表面電位を線形補間して求めるプログラムを作成した.

3.4. 表面電位の補間推定値と観測値の比較

作成したプログラムを使用して、Van Allen Probes 衛星が観測した温度・密度環境に対して衛星表面電位を補間推定し、観測値と比較した。比較に用いたデータ期間は、深い帯電時を含む 2013 年 2 月 1 日から 4 月 30 日の 3 ヶ月間とした。この期間のうち、日陰時かつ HOPE の観測データから衛星表面電位を導出できた時刻のデータのみを扱った (1870 個の時刻)。温度・密度環境の観測値は HOPE の Level3 の公開データを、衛星表面電位を導出する際に用いたイオンフラックスの観測値は HOPE の Level2 の公開データを使用した。表面電位の補間推定値と観測値を比較したものを

Fig.3 に示す。縦軸が観測値、横軸が補間推定値であり、水色が内挿で求めたところ、紫色が外挿で求めたところである。Fig.3 中の赤の直線は傾きが 1 の線であり、この線上のデータは補間推定値と観測値が等しいことを示す。この図を見てみると、大きく分けて 2 つのことがいえる。1 つ目は、観測ではあまり帯電していない環境でも、補間結果が正に大きく外れたところがあり、それらは外挿で求められた値ということである。2 つ目は、第 3 象限の点が赤の直線に乗らず、補間推定値と観測値がずれていることである。この 2 点について考察していく。

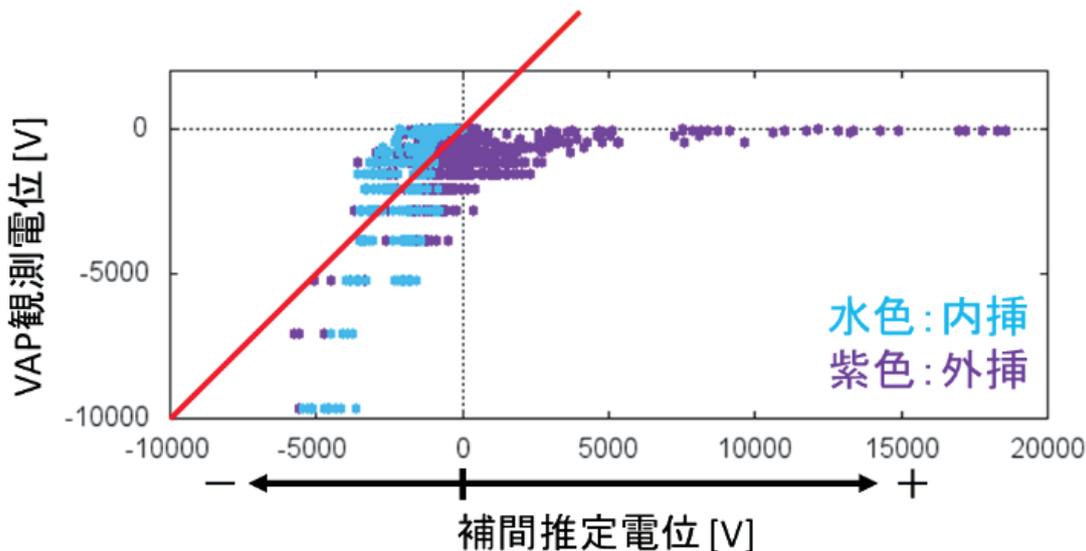


Fig.3 表面電位の補間推定値（水色：内挿，紫色：外挿）と観測値の比較。赤線は傾き 1 の直線。

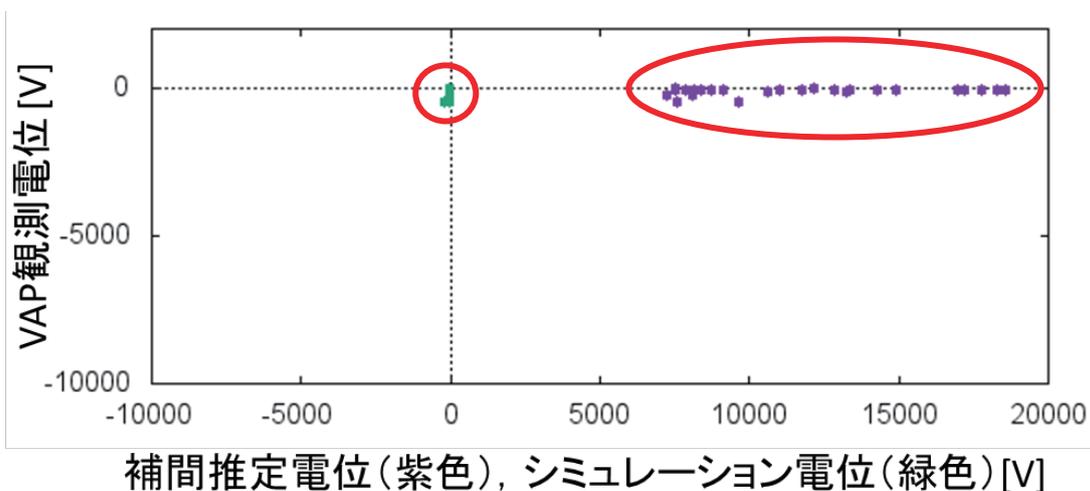


Fig.4 表面電位の補間推定値が正に大きく外れた環境について、補間推定値（紫色）と個別にシミュレーションをして求めた値（緑）の比較。補間結果と比べて、シミュレーション結果は観測値に近い値であった。

まず、補間推定値が特に大きく外れた外挿による値を考えていく。この時刻の環境について、実際にシミュレーション計算した結果と補間結果を比較したものを Fig.4 に示す（シミュレーション結果を緑色で示している）。これを見ると、外挿の結果では衛星表面電位が正に大きくなった環境でも、実際にシミュレーション計算すると、観測結果に近い値になっていることが分かる。つまり、テーブルが不完全なために、外挿の精度がよくなかったと考えられる。また、Fig.4 で比較した時刻の環境以外の、補間結果が正になった環境についても、テーブルを改善することで補間結果も改善されると考えられる。

次に、Fig.3 の補間推定値も観測値も負の帯電を示す第 3 象限の点が赤の直線に乗らず、補間推定値が観測値とずれているところをみていく。この中の 1 つの時刻（2013 年 3 月 21 日 6 時 39 分 49 秒、世界標準時）を例に考えていく。この時刻に観測された温度・密度環境を 3 つの方法（モーメント法、シングルマクスウェル分布でフィッティング、ダブルマクスウェル分布でフィッティング）で求め、それぞれの環境を入力してシミュレーション計算を行なった。なお、補間推定するときに入力した温度・密度環境の観測値の公開データは、モーメント法で求められたものである。それぞれの衛星表面電位の計算結果と観測結果を Table 3 に示す。ダブルマクスウェル分布にフィッティングして求めた温度・密度環境を入力した結果が、観測結果に一番近かった。つまり、電子とイオンをそれぞれ 1 つの温度成分として入力するより、2 つの温度成分として入力したほうが、表面電位の計算結果が観測結果に近くなった。今回は 1 つの時刻についてのみ、温度・密度環境の算出方法別で比較したが、他の時刻についても同様に、電子・イオンをそれぞれ 2 つの温度成分として入力することで、表面電位のシミュレーション計算結果と観測値のずれが小さくなっていくと考えられ

る。そのため、モーメント法で求められた温度成分が 1 つの観測値の公開データは、衛星表面電位を評価するのに適切ではない場合があると考えられる。

Table 3 3 つの算出方法による温度・密度環境に対する表面電位のシミュレーション結果、および観測結果。

入力プラズマ環境の算出方法	衛星表面電位[V]
モーメント法 (公開データ)	-1,935
シングルマクスウェル分布でフィッティング	-16,993
ダブルマクスウェル分布でフィッティング	-13,216
Van Allen Probes 衛星の観測結果	-9,632

4. まとめ

衛星表面電位のリアルタイム推定のため、温度・密度環境を入力したときに、衛星表面電位のシミュレーション結果をまとめたテーブルを用いて補間し、瞬時に表面電位を推定する手法を開発した。そのプロトタイプとして、日陰時の Van Allen Probes 衛星を対象とし、観測値との比較検証を行なった。その結果、補間に用いたテーブルがまだ不完全で、特に外挿による補間結果が正に大きく外れることがあり、テーブルを改善する必要があると考えられる。また、衛星帯電時の評価には、電子・イオンは温度・密度 1 成分では不十分で、2 成分として考慮する必要があると考えられる。

今後は、補間用のテーブルの改善、および電子とイオンの温度・密度を 2 成分として評価する手法を考えていく。また、今回は日陰時のみであるので、日照時のテーブルを作成する予定である。さらに、Van Allen Probes 衛星だけでなく、静止軌道衛星などに対象を広げていく予定である。

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] SPINE のホームページ,
<http://dev.spis.org/projects/spine/home/spis>.
- [2] SPIS を用いた衛星帯電解析, 岡本 好実, 中村真弥, 中村雅夫, 第 11 回宇宙環境シンポジウム講演論文集, JAXA-SP-14-012, 199-204, 2014.
- [3] SPIS を用いた最悪プラズマ環境下の静止軌道衛星表面帯電解析, 中村真弥, 中村雅夫, 第 12 回宇宙環境シンポジウム講演論文集, JAXA-SP-15-012, 203-211, 2015.
- [4] 衛星帯電解析ツール SPIS による静止軌道衛星の数値モデルの作成と表面帯電解析, 中村真弥, 中村雅夫, 第 13 回宇宙環境シンポジウム講演論文集, 133-139, 2016.
- [5] NASA のホームページ,
https://www.nasa.gov/mission_pages/rbsp/missi mi/index.html.
- [6] Radiation Belt Storm Probes ECT のホームページ, <https://www.rbsp-ect.lanl.gov/>.