

帯電解析ソフトの計算結果を活用した衛星表面電位の瞬時推定手法

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、人工衛星表面が帯電・放電し、衛星障害を引き起こすことがある。この障害を防ぐために、衛星形状・表面素材を考慮して衛星表面電位をシミュレーション計算できる解析ソフトが開発され、衛星設計の際に利用されている。これらソフトで衛星表面電位を求めるには数時間～数日の計算時間が必要である。一方、現在は宇宙天気予報の一環としてプラズマ環境の予測と、その予測結果を利用した衛星帯電警報の研究が行われている。この警報を行うには、衛星表面電位を瞬時に推定する必要がある。

本研究では、帯電解析ソフトで予め計算した表面帯電のシミュレーション結果を用いて、表面電位を瞬時に推定する手法の開発を目的としている。その手法のプロトタイプとして、日陰時の Van Allen Probes 衛星を対象とし、解析ソフト Spacecraft Plasma Interaction Software (SPIS) の計算結果を用いた手法を開発・検証した。

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。



Fig.1 Van Allen Probes 衛星のイメージ図[1].

3. 帯電解析ソフト 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[2]で登録をすればフリーでダウンロード・使用できる。SPIS を用いて、解析対象衛星のシミュレーション計算用モデルを作成し、想定したいプラズマ環境で衛星表面電位をシミュレーション計算できる。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[3][4][5]。

4. Van Allen Probes 衛星モデル

解析ソフト SPIS で Van Allen Probes 衛星の表面帯電のシミュレーション計算を行うために、Fig.2

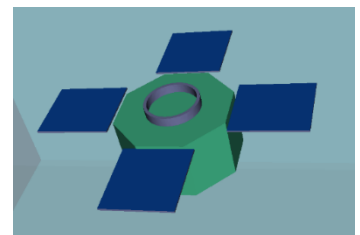


Fig.2 SPIS で作成した Van Allen Probes 衛星モデル。

下のリング部からなる衛星モデルを作成した。このモデルの表面素材・寸法を Table 1 に示す。SPIS には各表面素材の物性値が用意されており、本研究ではそれらを使用した。なお、この衛星モデルの表面はすべて導体として通電させ、等電位にした。また、太陽電池と本体の接合部、ブーム等は省略した。

なお、作成した Van Allen Probes 衛星モデルを用いて、日陰時を想定した衛星表面電位のシミュレーション計算には、一回当たり数十分～数時間の計算時間がかかる。

5. プラズマ環境のパラメータ

本研究では、プラズマ（電子、イオン）環境を、

Table 1 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

シングルマクスウェル分布とし、電子密度 N_e 、電子温度 T_e 、イオン密度 N_i 、イオン温度 T_i の組み合わせで表した.

6. 衛星表面電位の瞬時推定手法とその検証

6.1. 衛星表面電位の瞬時推定手法の開発

本研究では、以下に示した流れで衛星表面電位の瞬時推定を行うために必要な手法を開発する.

1. 衛星表面電位のシミュレーション結果をもとに、表面電位推定に用いる N_e , T_e , N_i , T_i の代表的な組み合わせを決定する.
2. 決定した組み合わせ環境に対する衛星表面電位のシミュレーション結果をまとめたルックアップテーブル（以下、テーブルとする）を作成する.
3. 衛星表面電位を N_e , T_e , N_i , T_i の関数とみなし、作成したテーブルの値を用いた補間・補外を行なって、任意の N_e , T_e , N_i , T_i の組み合わせに対する衛星表面電位を推定する.

6.2 線形補間を用いた推定手法の考察

前回の第 14 回宇宙環境シンポジウムで、手順 3 の補間・補外方法として線形補間・補外を用いたときの表面電位の推定結果について報告した[6]. テーブルの環境パラメータの値の間隔が広い区間の環境について表面電位を推定した場合、推定結果とシミュレーション結果を比較すると、10%以上の無視できない誤差が発生する場合があること

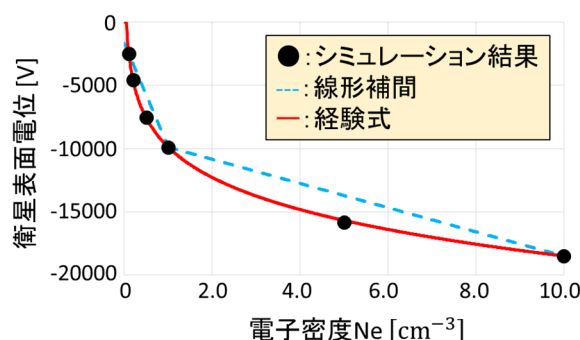


Fig.3 電子密度 N_e と衛星表面電位の関係（電子温度 $T_e = 5000$ eV, イオン密度 $N_i = 0.1$ cm $^{-3}$, イオン温度 $T_i = 5000$ eV で固定）

が分かっている. 例として, $T_e = 5000$ eV, $N_i = 0.1$ cm $^{-3}$, $T_i = 5000$ eV の条件で N_e の値のみを変えたときの衛星表面電位の結果を Fig.3 に示す. SPIS でのシミュレーション結果を●で表し, $N_e = 0.1$ cm $^{-3}$, 1.0 cm $^{-3}$, 10.0 cm $^{-3}$ の三点のデータ間を直線で結んだものを水色の破線で表している. 破線と●の差が補間誤差になる. このことから, 線形補間に三点だけを用いた場合では, 三点の近傍以外でこの誤差が大きく, 精度を上げるためにさらに多くの点を用いて補間する必要がある.

6.3 経験式を用いた補間推定手法

線形補間・補外と比較して、より少ないデータで高精度の補間・補外を行うために、衛星表面電位の変化を近似できる経験式を導出し、表面電位の推定に用いる.

6.2.1. Orbital-Motion-Limited (OML) 理論

衛星表面電位を求める理論である OML 理論に

ついて述べる．衛星を導体球と近似したときに，「プラズマのシース厚さ ≫ 衛星の大きさ」の条件下で，衛星に流出入する電流を外部電子・イオン電流のみと考え，衛星表面電位 ϕ が負の場合，衛星に流入出する電流の密度 j は ϕ の関数として以下のように表される．

$$j(\phi) = -eNe \sqrt{\frac{eTe}{2\pi m_e}} \exp\left[\frac{\phi}{Te}\right] + eNi \sqrt{\frac{eTi}{2\pi m_i}} \left(1 - \frac{\phi}{Ti}\right) \quad (1)$$

ここで， e は電気素量， m_e は電子の質量， m_i はイオンの質量であり，電子温度とイオン温度の単位は eV である． $j(\phi) = 0$ として平衡電位を求めると，以下ようになる．

$$\begin{aligned} \phi &= Te \ln \left[\frac{Ni}{Ne} \sqrt{\frac{Ti m_e}{Te m_i}} \left(1 - \frac{\phi}{Ti}\right) \right] \\ &= Te \ln Ni - Te \ln Ne - \frac{1}{2} Te \ln Ti \\ &\quad - \frac{1}{2} Te \ln Te + \frac{1}{2} Te \ln \frac{m_e}{m_i} + Te \ln(Ti - \phi) \end{aligned} \quad (2)$$

6.2.2. 経験式の導出と環境パラメータの代表値の決定

実際の衛星表面電位のシミュレーション計算では，衛星形状や二次電子などの影響を受けて OML 理論は成り立たないが，式 (2) を参考に， Te ， Ni ， Ti を固定したときの Ne と衛星表面電位の関係を表す式として，以下の式を導出した．

$$\phi(Ne) = A_{Ne} \ln Ne + B_{Ne} \sqrt{Ne} + C_{Ne} \quad (3)$$

第一項は式(2)の主変動項，第三項は定数項，第二項は追加の補正項を表す．各係数 A_{Ne} ， B_{Ne} ， C_{Ne} は3組の Ne に対する衛星表面電位のデータから求める定数である．Fig.3の赤の曲線は， $Ne = 0.1 \text{ cm}^{-3}$ ， 1.0 cm^{-3} ， 10.0 cm^{-3} の三点を用いて式(3)の係数を求めて描いたものであり，これら三点以外の点でも近傍を通り，表面電位の値を精度よく近似できている．よって，式(3)を Ne と衛星表面電位の関係を表す経験式とし， 0.1 cm^{-3} ， 1.0 cm^{-3} ， 10.0 cm^{-3} をテーブルの Ne の代表値とした．

ただし，固定する Te ， Ni ， Ti の値の組の組み合わせによっては，経験式の係数を求めるにあたって，

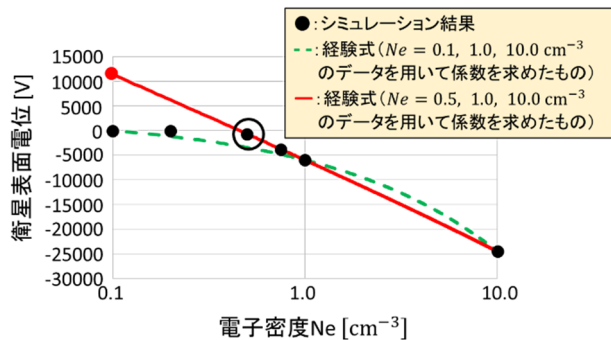


Fig.4 電子密度 Ne と衛星表面電位の関係（電子温度 $Te = 10000 \text{ eV}$ ，イオン密度 $Ni = 1.0 \text{ cm}^{-3}$ ，イオン温度 $Ti = 10000 \text{ eV}$ で固定）

Table 2 補間・補外用テーブルの各環境パラメータの代表値

電子密度 $Ne [\text{cm}^{-3}]$	電子温度 $Te [\text{eV}]$	イオン密度 $Ni [\text{cm}^{-3}]$	イオン温度 $Ti [\text{eV}]$
0.1	5000	0.1	1000
1.0	10000	1.0	5000
10.0	25000	10.0	30000

使用するのに不適切なシミュレーション結果が存在する．例として， $Te = 10000 \text{ eV}$ ， $Ni = 1.0 \text{ cm}^{-3}$ ， $Ti = 30000 \text{ eV}$ の条件で Ne を変えたときの表面電位の分布を Fig.4（横軸は対数）に●で示す． $Ne = 0.1, 1.0, 10.0 \text{ cm}^{-3}$ のデータを用いて式(3)の係数を求めて描いた曲線を破線で示している．二次電子の影響で， Ne が小さい値のときに衛星表面電位が 0 V 近くで一定になる範囲がある．この範囲内にある $Ne = 0.1 \text{ cm}^{-3}$ のデータを用いて係数を求めて描いた曲線（破線）上に●が分布していない．この対処法として，0 V 近くで一定にならない領域にある $Ne = 0.5 \text{ cm}^{-3}$ のデータ（○で囲んだデータ）を用いて式(3)の係数を求めた曲線（実線）を使用して，外挿した正の表面電位 ● で $Ne = 0.1 \text{ cm}^{-3}$ のデータを代用することにした．これによって，表面電位が負の領域は経験式を用いて近似的に求めることができる．また，経験式の値が正になるところは，●が 0 V 近くで一定になる領域であるため，経験式を用いて表面電位が正の値で求めたときに 0 V と置けばよい．

そして、 Te , Ni , Ti についても同様に、以下に示す経験式を導出し、表面電位の推定に用いた。また、各環境パラメータの代表値を決定し (Table 2)、テーブルを作成した。

$$\phi(Te) = A_{Te} Te + B_{Te} \sqrt{Te} + C_{Te} \quad (4)$$

$$\phi(Ni) = A_{Ni} \ln Ni + B_{Ni} \sqrt{Ni} + C_{Ni} \quad (5)$$

$$\phi(Ti) = A_{Ti} \ln Ti + B_{Ti} \sqrt{Ti} + C_{Ti} \quad (6)$$

6.2.3. 経験式を用いた補間・補外方法

経験式(3)~(6)と、テーブルのデータを用いた表面電位の補間・補外方法を説明する。簡単のため、 Ni と Ti を固定し、Fig.5を使って Ne と Te の2変数で説明する。テーブルのデータがある点を●、表面電位を推定したい環境 ($Ne0$, $Te0$) の点を★で示している。まず、 Te を5000, 10000, 25000 eVそれぞれで固定したときの各三点●のデータを用いて式(3)の係数を求め、これらの式から $Ne = Ne0$ の三点▲の表面電位を求める。次に、求めた三点▲の表面電位を用いて式(4)の係数を求め、この式から $Te = Te0$ の位置である点★の表面電位を求める。なお、計算途中 (▲) の表面電位が正の値で求めたときは0 Vと置かず正のまま使用し、計算の最後の点 (★) で表面電位が正で求めたときに0 Vと置いた。残りの2変数 Ni , Ti でも同様に補間・補外を行い、表面電位を推定する。

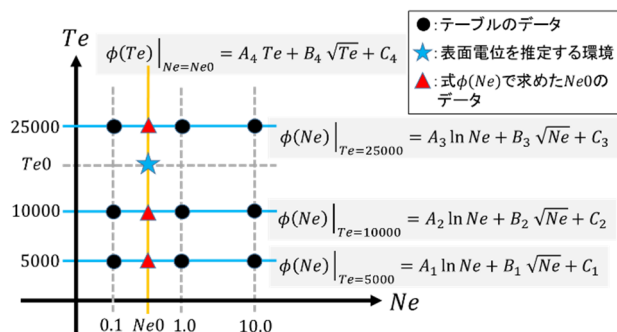


Fig.5 経験式を用いた表面電位の補間・補外のイメージ

6.2.4. 経験式を用いた推定手法の検証

Table 2 の各環境パラメータのほぼ中点の値の組み合わせ環境 (Table 3) に対して、経験式を用いた衛星表面電位の推定結果と、その組み合わせ

Table 3 表面電位推定を行なった環境パラメータの組み合わせ

電子密度 Ne [cm^{-3}]	電子温度 Te [eV]	イオン密度 Ni [cm^{-3}]	イオン温度 Ti [eV]
0.5	7500	0.5	3000
5.0	17500	5.0	17500

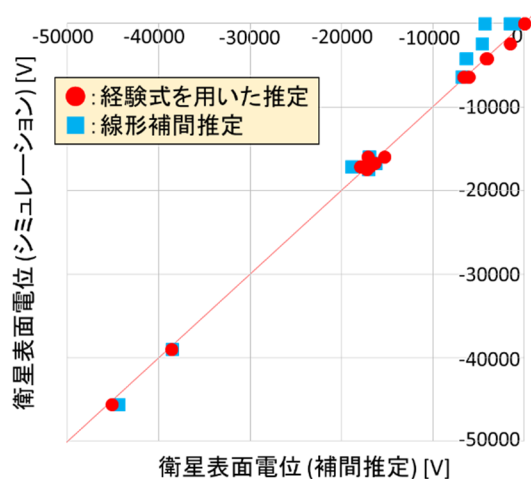


Fig.6 Table 3 の組み合わせ環境に対する衛星表面電位の補間推定結果とシミュレーション結果の比較

環境でシミュレーション計算した結果を比較した。その結果を Fig.6 に●で示す。横軸が補間で推定した結果、縦軸がシミュレーション結果であり、赤い直線上のデータはそれらが一致することを示す。Table 2 の環境のデータを用いて線形補間で推定した結果を同じグラフ上に■で示している。表面電位が-10000 V より深いところは線形補間でも精度は悪くないが、経験式を用いた方が、誤差が小さい。-10000 V より浅い領域についても経験式を用いた方が、明らかに誤差が小さい。

また、以前の研究で作成したテーブルの環境 (Table 4) の中点の値 (Table 5) の組み合わせ環境について、Table 2 の環境のテーブル (81 のデータ) と経験式を用いた推定結果と、Table 4 の環境のテーブル (192 のデータ) と線形補間を用いた推定結果の比較を行なった。その結果を Fig.7 に示す。経験式を用いた方が、テーブルのデータ数が少ないにもかかわらず、精度よく衛星表面電位

Table 4 線形補間・補外用テーブルの各環境パラメータの代表値

電子密度 Ne [cm^{-3}]	電子温度 Te [eV]	イオン密度 Ni [cm^{-3}]	イオン温度 Ti [eV]
0.1	2500	0.1	1000
0.2	5000	0.2	5000
0.5	10000	0.5	30000
1.0	25000	1.0	

Table 5 表面電位推定を行なった環境パラメータの組み合わせ

電子密度 Ne [cm^{-3}]	電子温度 Te [eV]	イオン密度 Ni [cm^{-3}]	イオン温度 Ti [eV]
0.15	3750	0.15	3000
0.35	7500	0.35	17500
0.75	17500	0.75	

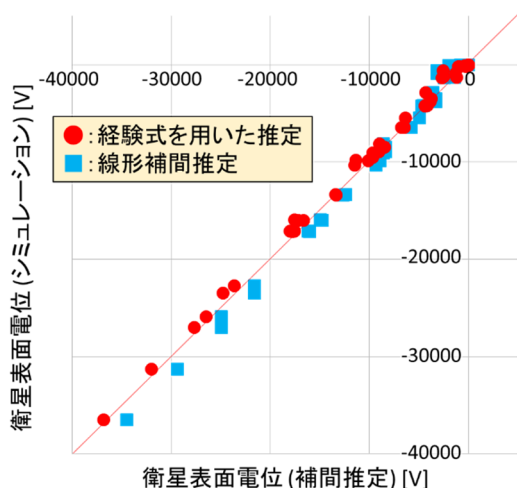


Fig.7 Table 5 の組み合わせ環境に対する衛星表面電位の補間推定結果とシミュレーション結果の比較

を推定できた。

以上より、経験式を用いる手法は、線形補間手法と比較して少ないテーブルのデータで精度よく衛星表面電位を推定できる。

7. まとめ

帯電解析ソフトのシミュレーション結果と補間手法を用いて、プラズマ環境パラメータ Ne , Te , Ni , Ti の任意の組み合わせに対する衛星表面電位

のシミュレーション結果を推定する手法を開発し、日陰時の Van Allen Probes 衛星を対象に検証した。各 Ne , Te , Ni , Ti と衛星表面電位の関係を表す経験式を導出し、これらを補間に用いることで、線形補間を用いた結果と比較して、より少ないシミュレーション結果で精度よく衛星表面電位を推定できた。

今後は、Van Allen Probes 衛星の日照時、誘電体の表面素材をもつ静止軌道衛星の日陰・日照時についても同様に、衛星表面電位の瞬時推定手法を開発・検証する予定である。

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] NASA のホームページ,
https://www.nasa.gov/mission_pages/rbsp/mission/index.html
- [2] SPINE のホームページ,
<http://dev.spis.org/projects/spine/home/spis>
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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、寺岡毅、中村雅夫、長妻努、石井守、第 14 回宇宙環境シンポジウム講演論文集, 29-33, 2017.