

# 静止軌道衛星が観測した高密度電子イベントの 衛星電位とプラズマ環境の解析

小田光信<sup>[1]</sup> 中村雅夫<sup>[1]</sup> 趙孟佑<sup>[2]</sup>

<sup>[1]</sup>大阪府立大学 <sup>[2]</sup>九州工業大学

## 要旨

人工衛星に発生する障害のうち、約半数が帯電に起因した放電によるものと報告されている。この人工衛星の帯電を引き起こす要因はプラズマ環境であるので、そのプラズマ環境の解析は重要である。静止軌道における衛星帯電について、衛星帯電シミュレーションの結果より数 keV ではあるが電子密度が高いプラズマが乖離電圧を発達させる可能性が示され、LANL 静止軌道衛星による観測で得られた LANL MPA キーパラメータのデータセットをもとに高密度電子プラズマの発生頻度解析が行われた。しかし、このデータセットには物理的に疑わしいデータが多数含まれている可能性がある。そこで本研究では LANL MPA キーパラメータで見られる高密度電子プラズマによる帯電イベントに注目してプラズマフラックスのエネルギースペクトラムデータから衛星電位解析を行い、疑わしい衛星電位の値を修正後に電子温度、電子密度を再計算するケーススタディーを行った。また LANL MPA キーパラメータで見られる高密度電子プラズマデータに関して衛星電位を解析し、高密度電子プラズマデータの割合の算出を行った。

## 1 序論

人工衛星に発生した障害の約半数がプラズマ環境の起因した人工衛星の帯電、放電によるものであるという報告がある [1]。そこで、どのような静止軌道プラズマ環境が放電を引き起こすか、という点に注目した研究が行われた。その研究の中に、静止軌道衛星の帯電や静止軌道プラズマ環境を想定した地上試験 [2] や、LANL (Los Alamos National Laboratory) 静止軌道衛星に搭載された MPA (Magnetospheric Plasma Analyzer) のキーパラメータの統計解析 [3] がある。LANL MPA キーパラメータのデータセットはプラズマ温度、プラズマ密度、衛星電位などのデータセットである。静止

軌道プラズマ環境を想定した地上試験により、太陽電池パネルのカバーガラスとの乖離電圧が 400 V を超えた場合に放電が起こる可能性が示された。この結果を考慮して行った衛星帯電シミュレーションより、電子密度が高く ( $n_e \geq 2.5\text{cm}^{-3}$ )、電子温度が高い ( $T_e \geq 3\text{keV}$ ) プラズマ (以後”高密度電子プラズマ”と呼ぶ) が放電を引き起こすのに十分な乖離電圧を発達させる可能性が示された。これらの結果から高密度電子プラズマは放電を引き起こす要因として考慮する必要があるといえる。そのため LANL MPA キーパラメータを用いた統計解析が行われ高密度電子プラズマによる帯電イベントの割合は小さいが、無視できな

い (0.17%) という結果であった。

しかしその LANL MPA キーパラメータのデータセットには物理的に疑わしいデータが多数含まれている可能性が示されており [4], 衛星電位の値が正しいか疑わしいデータ数は全体の約 34 パーセントを占めている。つまり疑わしいデータを除くか除かないかで統計結果に大きな影響が出る可能性がある。そのため高密度電子プラズマの割合を再確認する必要があると考えられる。

## 2 LANL MPA キーパラメータ

先行研究の統計解析で用いた LANL MPA キーパラメータは, LANL MPA 観測機が観測したイオン, 電子のエネルギースペクトラムから温度, 密度といったキーパラメータを算出している。算出されたプラズマ温度, 密度, 衛星電位といったキーパラメータのデータセットは NASA の Goddard Space Flight Center によってインターネットで LANL MPA キーパラメータとして一般に公開されている (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>)。LANL が観測に用いた 7 機の静止軌道衛星すべてのデータを合計すると約 38 年分のデータがある。

しかし, LANL MPA キーパラメータのデータセットには物理的に疑わしいデータが含まれている可能性がある。図 1 に電子温度と衛星電位の散布図を示す。これには LANL が観測に使用した衛星の一つである L4 衛星の観測により算出されたデータを用いている (衛星電位が -1000 V から 0 V までのデータのみを表示)。通常電子温度が高くなるほど衛星は深く負に帯電すると考えられる。しかし図 1 で赤い点でプロットしたデータはある特定の衛星電位の値をとり, 広い温度領域に分布している。これは, 他の点の分布傾向と大きく異なっており, 赤い点のデータは衛星電位の値が正し

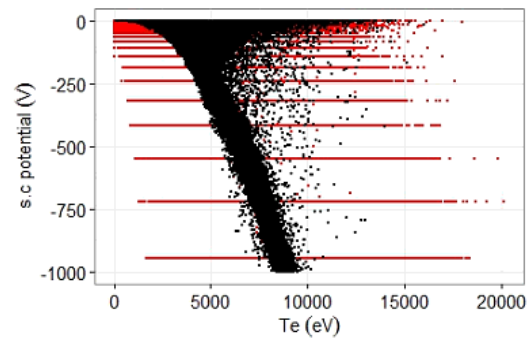


図 1: 電子温度と衛星電位の散布図

くないと考えられる。衛星電位の値が正しくない場合, 以降で述べるように, 観測されたプラズマフラックスのエネルギースペクトラムデータからキーパラメータを算出する際のアルゴリズムに何らかの不備があり, 温度, 密度の値も正しくない可能性があると考えられる。

## 3 衛星帯電電位の推定方法

### 3.1 プラズマフラックスのエネルギースペクトラム

MPA では 1 eV から 40 eV までの 40 個のエネルギーチャンネルで観測している。このプラズマフラックスのエネルギースペクトラムデータ (デジタルデータ) は一般には公開されていないが, L4 衛星が 2003 年 1 月 12 日, 2003 年 2 月 16 日に観測したフラックスのエネルギースペクトラム (デジタルデータ) を LANL から頂くことができたため, 本研究では, この 2 日間での高密度電子イベントに関してケーススタディーを行った。LANL MPA キーパラメータで確認すると, 2003 年 1 月 12 日のデジタルデータには高密度データが含まれていた。図 2, 図 3, 図 4 に LANL MPA キーパラメータでの L4 衛星による 2003 年 1 月 12 日の衛星電位, 電子温度, 電子密度の時系列データをそれぞれ示す。図中の赤い点で

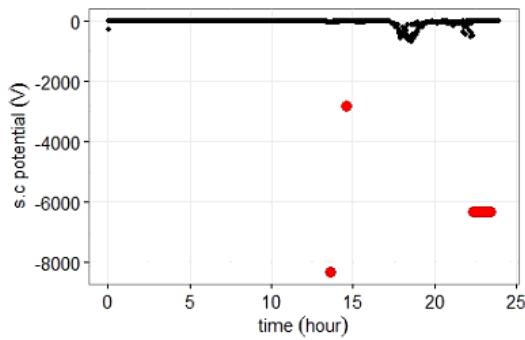


図 2: 2003 年 1 月 12 日 (L4) の衛星電位の時系列データ

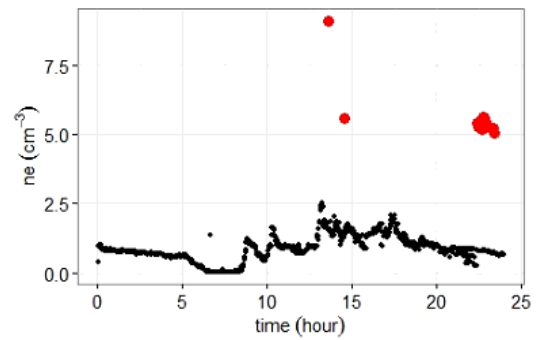


図 4: 2003 年 1 月 12 日 (L4) の電子密度の時系列データ

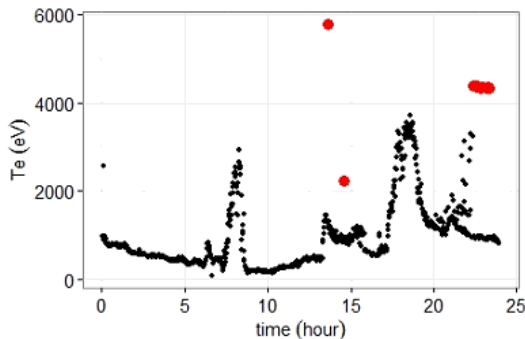


図 3: 2003 年 1 月 12 日 (L4) の電子温度の時系列データ

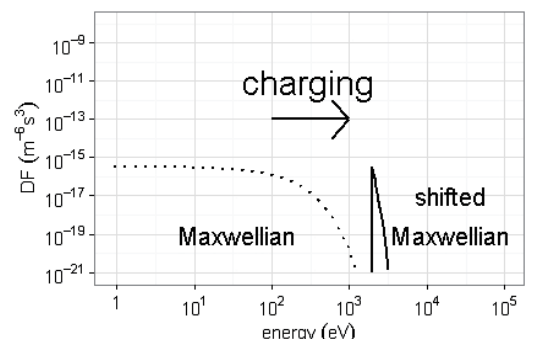


図 5: イオンの分布関数の変化

示したデータは、衛星電位、電子温度、電子密度に関して前後の時刻のデータと比べて極端に連続となっているデータである。これらのデータは衛星電位の値を過大評価した結果、以降で述べるように、電子温度、電子密度が本来の値より大きめに算出された可能性がある。

### 3.2 プラズマフラックスと衛星電位

一般的に衛星が放電を引き起こすのは負に深く帯電する場合である。図5に人工衛星が帯電した場合に観測されるイオンの分布関数の変化の様子を模式的に示す。図5は両対数軸で描かれている。左側の点線で描かれた曲線は帯電前のイオンの分布関数

(マクスウェル分布)を表し、右側の実線で描かれた曲線は帯電後のイオンの分布関数(加速されたマクスウェル分布)を表している。衛星ポテンシャルによってイオンは加速されて衛星に向かってくる。このとき各イオンは  $E_c$  (eV) のエネルギーを得る。帯電後に観測される分布はマクスウェル分布が  $E_c$  だけ平行移動したもので、shifted-Maxwellian と呼ばれる。図5の実線のようにあるエネルギー ( $E_c$ ) より低いエネルギー値の粒子が理想的には存在しなくなる(カットオフ)。無限遠を基準にした衛星の電位を  $\Phi$  (V) とすると、このカットオフを検出することで人工衛星の電位を  $\Phi = -E_c$  として算出することができる。

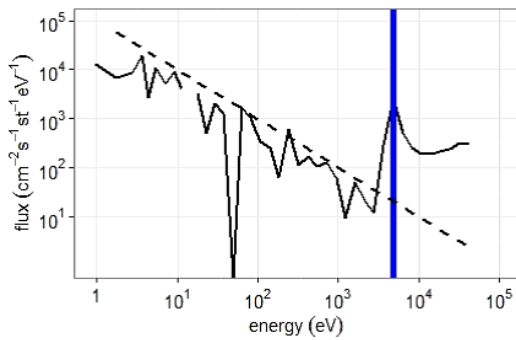


図 6: 2003年2月16日 UT=14:30:24 (L4)に観測されたエネルギー Spektrum (デジタルデータ)

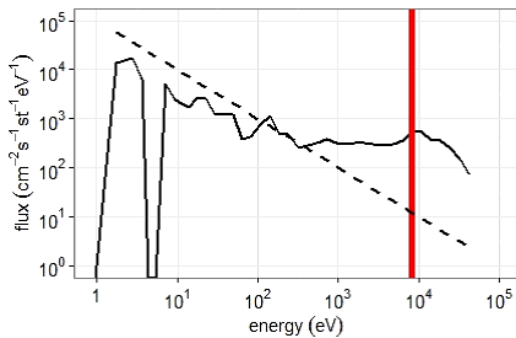


図 7: 2003年1月12日 UT=13:37:55 (L4)に観測されたエネルギー Spektrum (デジタルデータ)

### 3.3 観測データを用いた衛星電位の解析

図 6, 図 7 に L 4 衛星が深い帯電を観測した時刻のイオンフラックスのエネルギー Spektrum を示す. 図 6 は 2003 年 2 月 16 日 UT=14:30:24 に観測されたエネルギー Spektrum (デジタルデータ), 図 7 は 2003 年 1 月 12 日 UT=13:37:55 に観測されたエネルギー Spektrum (デジタルデータ) を示している. 図 6, 図 7 の実線は観測されたイオンのフラックス (微分フラックス) を表し, 点線はワンカウントと呼ばれる観測限界値を表している. また図 6 の青色の縦線, 図 7 の赤色の縦線はそれぞれの

時刻の LANL MPA キーパラメータの衛星電位を表している. 図 6 では, 青い縦線のエネルギー以下のエネルギー領域でフラックスがワンカウント以下まで下がっていること (カットオフ) が確認できる. つまり, この時刻での LANL MPA キーパラメータの衛星電位は正しいと考えられる. しかし, 図 7 では, 観測されたフラックスがワンカウント以下に下がっていないエネルギー帯が赤い縦線の左側のエネルギー帯に存在する. つまり, この時刻での LANL MPA キーパラメータの衛星電位は正しくないと考えられる. この例のように, MPA キーパラメータの中には正しくない衛星電位の値が多く含まれていると考えられる.

## 4 プラズマ密度と温度の修正

プラズマのエネルギー Spektrum のデジタルデータを用いて電子温度, 電子密度の再計算を行った. 図 7 に示した時刻のデジタルデータはその前後の時刻でデジタルデータと比べて大きな変化は見られなく, 図 7 の時刻の前後の時刻の衛星電位 (LANL MPA キーパラメータ) はデジタルデータではワンカウントに埋もれてしまうエネルギー帯であった. そこで図 7 に示す時刻衛星電位の値として, 前後の時刻の衛星電位の値 (LANL MPA キーパラメータ) の平均値を用いた. 電子温度, 密度の再計算には, 以下の式を用いた. 式 (1) は密度の算出式, 式 (2) は温度の算出式である. ここで,  $e$  は単位電荷,  $m$  は電子の質量,  $F$  は観測されたイオンフラックスのエネルギー Spektrum,  $\phi$  は衛星電位,  $E$  は観測チャンネルのエネルギー,  $\Delta E$  は各エネルギーチャンネルの幅を表している.  $E_{\min}$  は二次電子のエネルギーを考慮して決定する必要がある. 本研究では, 衛星が深く負に帯電するほど  $E_{\min}$  の値を大きく設定した. 式 (1) は密度の算出式, 式 (2) は衛星電位の値が式の中に含まれており, 衛星電位の影響

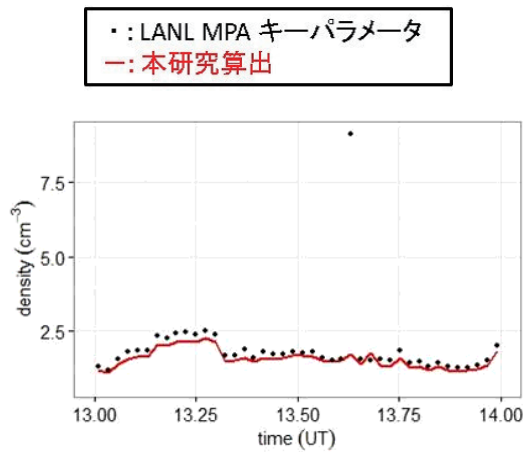


図 8: 2003年1月12日 UT=13:37:55 (L4)の時刻の電子温度の比較

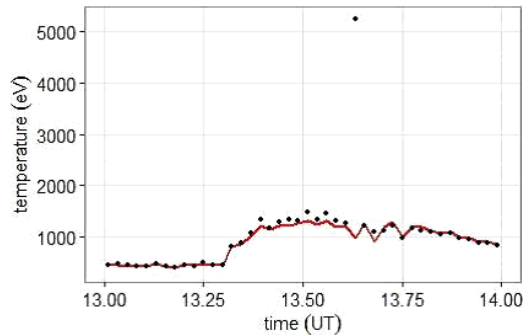


図 9: 2003年1月12日 UT=13:37:55 (L4)の時刻の電子密度の比較

を受けることを示している。

$$n_e = 2\pi \left(\frac{2m}{e}\right)^{1/2} \sum_{E>E_{\min}} \frac{F(E)}{E} (E-\phi_m)^{1/2} \Delta E \quad (1)$$

$$T_e = \frac{4\pi}{3n_e} \left(\frac{2m}{e}\right)^{1/2} \sum_{E>E_{\min}} \frac{F(E)}{E} (E-\phi_m)^{3/2} \Delta E \quad (2)$$

式 (1), (2) を用いて 2003 年 1 月 12 日の 13:00 から 14:00 までの電子温度, 密度を再計算した結果を図 8, 図 9 に示す。図 8 が電子温度, 図 9 が電子密度の計算結果を示している。図 8, 図 9 より正しくないと考えられる衛星電位を修正することで間違っ算出された高密度電子データが修正できることが分かる。

## 5 高密度電子データの発生割合の推定

著者らが保有しているエネルギースペクトラムデータ (デジタルデータ) は 2 日分であり, すべての高密度電子データの解析を行うには不十分である。しかし, デジタルデータを用いて画像化されたエネルギースペクトラムデータ (プロットデータ) が web (<http://www.mpa.lanl.gov/>) で公開されている。そこに公開されているエネルギースペクトラムデータ (プロットデータ) を用いて高密度電子データの衛星電位の値に矛盾がないかを調べることで発生割合を推定した。web でエネルギースペクトラムデータ (プロットデータ) を取得することが出来る期間から 991 データの高密度電子データに関して衛星電位解析を行った。

図 10 に web で公開されている図から, イオンのエネルギースペクトラムの一部を抜き出し加工したもの示す。図 10 は横軸が時間, 縦軸が観測エネルギー, カラーがフラックス (図 10 はイオンフラックス) を表している。上の図に LANL MPA キーパラメータの衛星電位の値を図に赤い点で重ねることで, 公開されているエネルギースペクトラムデータ (プロットデータ) の衛星電位と LANL MPA キーパラメータの衛星電位が矛盾するか解析を行った。図 10 の下側の図の 12 時の  $10^2$  のエネルギー帯に薄い青色の筋が確認できる。これは衛星電位のエネルギー帯にみられるイオンフラックスのピークである。

### 5.1 衛星電位確認結果

抜き出した高密度電子データ 991 データに関してキーパラメータの衛星電位が正しいか確認を行った結果, 矛盾のないデータは 27 データであった。つまり, 大部分が疑わしいデータであった。先行研究で算出さ

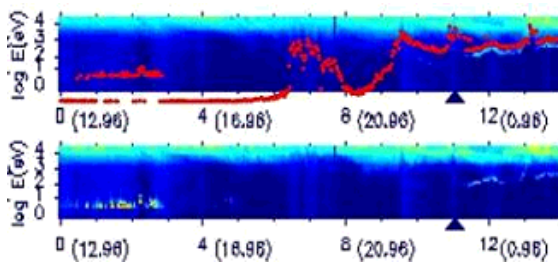


図 10: 2003 年 3 月 29 日 (L0) に観測されたエネルギー Spektrum (プロットデータ) の一部

れた高密度電子データの割合は 0.17 % であるので、高密度電子データ中の矛盾のないデータの割合 2.7 % をそれぞれ独立事象を考え掛け合わせて高密度電子データを再計算した結果、0.0046 % となった。これは 1 年間で約 24 分間高密度電子に曝される可能性があることを示している。この結果から高密度電子データの割合は先行研究よりも 1/100 程度であるが、衛星運用中に合計数時間は高密度電子に曝されることを想定した衛星設計が必要であるといえる。

## 6 まとめ

先行研究により高密度電子データが放電を引き起こす可能性に着目して静止軌道衛星観測データを用いた統計解析より高密度電子データの割合が算出されたが、使用された LANL MPA キーパラメータのデータセットには物理的に正しくないと考えられるデータが多数含まれていた。そこでプラズマフラックスのエネルギー Spektrum データ (デジタルデータ) を用いて高密度電子データを解析したところ衛星電位の算出に失敗しているケースが存在していることが確認できた。そこで衛星電位の値を修正して電子温度、密度を再計算したところ、間違って算出された高密度電子データを修正できることを示した。しかし現在著者らが保有している 2 日分のエネルギー Spektrum データ以外は公開されていないため、

web に公開されている画像化されたエネルギー Spektrum データ (プロットデータ) を用いて高密度電子データの衛星電位解析を行った。その結果解析した高密度電子データの大部分が、LANL MPA キーパラメータの衛星電位の値が公開されているエネルギー Spektrum データ (デジタルデータ) と矛盾する結果を得た。少ないが矛盾したデータの数から再計算した高密度電子データの割合は 0.0046 % であり、1 年間に約 24 分間高密度電子データに曝される可能性があることを示している。公開されていないエネルギー Spektrum データ (デジタルデータ) を入手することができれば、さらに正確な解析が可能である。

## 参考文献

- [1] H. C. Koons et al, The impact of the space environment on space systems, Aerospace Report TR-99(1670)-1, (7/20/1999).
- [2] Cho et al., "Laboratory Tests on 110V Solar Arrays in a Simulated Geosynchronous Orbit Environment," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 40, No. 2, 2003, pp. 211220.
- [3] Cho et al., "Number of Arcs Estimated on Solar Array of a Geostationary Satellite", JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS Vol. 42, No. 4, July/August 2005
- [4] 米田麻人, サブストームに伴う最悪宇宙環境の極値統計解析, 平成 26 年度大阪府立大学修士論文, 2014
- [5] V. A. Davis, M. J. Mandell, M. F. Thomsen, Representation of the measured geosynchronous plasma environment in spacecraft charging calculations, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 113, A10204, doi:10.1029/2008JA013116, 2008