

Van Allen Probes を用いた中高度軌道における 衛星電位の観測値と推定値の比較解析

長澤 恒聖, 中村 雅夫, 前田 紘孝

大阪府立大学

1. 研究背景と目的

人工衛星が軌道上を航行しているとき、その周辺プラズマを起因として衛星帯電を生じることがある。また溜まった電荷を放電することで故障することがある。実際、1973年～1997年にかけて調査可能な衛星について、宇宙環境由来の人工衛星の故障原因を調べたところ、衛星帯電・放電が約半数を占め、そのうち約半数が表面帯電によるものであると[1]報告されている。したがって、衛星帯電を誘起する宇宙プラズマ環境を解析することは重要な課題である。このプラズマ環境の解析は対地静止軌道(GEO: Geostationary Earth Orbit)、低軌道(LEO: Low Earth Orbit)について解析された例は多いが、中軌道(MEO: Medium Earth Orbit)について解析された例は多くない。それは地球周辺の放射線帯の高エネルギー粒子により生じるコンタミネーションやノイズが激しく、精度の良い長期の観測データが十分に存在しなかったためである。しかし最近では、放射線対策がなされた Van Allen Probes やあらせ衛星の観測により、長期の精度の良いデータを利用できるようになってきている。以上のことを背景として、本研究では Van Allen Probes の観測データを用いて中高度軌道の深い衛星帯電を誘起するプラズマ環境の解析を行った。また、衛星帯電解析ソフトを用いたシ

ミュレーション結果から導出した衛星電位の推定式を、今回解析した結果と比較して考察をおこなった。

2. Van Allen Probes の観測と解析条件

Van Allen Probes(以下 VAPs)は、NASA が地球周囲の放射線帯の調査を目的として、2012年8月30日に打ち上げた二機編隊の衛星である。表 2.1 は VAPs の基本データであり、図 2.1 は VAPs の外観である。本機は高精度観測を行うため表面が全て導通されている。全て導通されていることによって表面部材間に生じる局所帯電は発生しない。

表 2-1 VAPs の衛星データ

軌道高度	近地点:約600 km 遠地点:約30600 km
軌道傾斜角	約10°
軌道種類	楕円軌道
軌道周期	約9時間
質量	A: 647.6 kg, B: 666.6 kg



図 2-1 VAPs の外観 [2]

VAPsの軌跡を、地球中心を原点、太陽方向をX軸、公転方向逆向きをY軸、黄道面に垂直北方向をZ軸とする Geocentric Solar Ecliptic(GSE)座標に表すと、その楕円軌道の遠地点が約1年10カ月で一周する。図2-2は軌道投入後最初の一周期のGSE座標XY平面に投影した楕円軌道の遷移を表したものである。この最初の一周期で帯電の有無を解析した結果から、VAPsが深く帯電するイベントは、主に高度20000km以上で日陰に存在する時に観測されることが分かっている[3]。本研究では、そのような領域を軌道が横切る2013年3月1日～31日の一ヶ月間を解析期間として設定した。また地球の日陰にいる条件を満たすデータを内包するように、GSE座標において $X \leq 0, \sqrt{Y^2 + Z^2} \leq 6371$ (地球半径、単位はkm)の領域にVAPsが存在するときのデータのみを解析に用いた。図2-3はこの領域をGSE座標のZX平面に図示したものである。

観測衛星電位を求める手段として、VAPsでは Electric Fields and Waves(EFW)と Helium Oxygen Proton Electron(HOPE)の観測機器を用いることができる。EFWは日照で-200V～200Vの範囲の衛星電位を観測することができるが、日陰の深い帯電について解析するので、本研究ではHOPEを用いた。HOPEはヘリウム、酸素、イオン、電子の四つについて、エネルギーごとのフラックスを観測している。HOPEの観測エネルギー帯は1eV～50keVであり、等比級数的に72分割されている。このHOPEのフラックスデータを用いて、イオンのカットオフ(衛星が負に帯電した時に電場によってイオンが加速されて衛星電位程度のエ

ネルギー帯に生じるフラックスのピーク)を検出することによって衛星電位を決定した。またHOPEフラックスデータからモーメント法で計算した電子温度と電子密度が公開されており、本研究ではこの公開されている電子温度と電子密度を利用した。

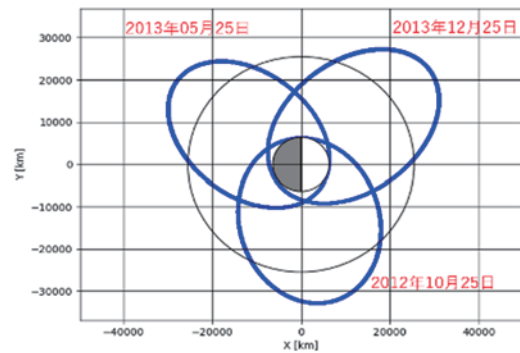


図2-2 GSE座標XY平面に投影したVAPsの楕円軌道の遷移

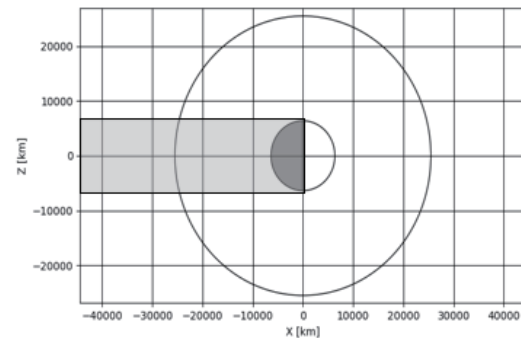


図2-3 GSE座標のZX平面において $X \leq 0, \sqrt{Y^2 + Z^2} \leq 6371$ [km]を満たす領域

3. 衛星電位と電子温度の関係:VAPsとLANL静止衛星の比較

VAPsの観測データより、中高度軌道での衛星電位と電子温度の関係を調べた。そして、LANL静止衛星の観測データによる静止軌道における衛星電位と電子温度の関係[4]と比較した。図3-1は両者を同じグラフに示した結果であり、黒点がLANL静止

衛星, 赤点が VAPs を示している. 縦軸に衛星電位の絶対値, 横軸に電子温度を取っており, 両軸とも対数スケールである. 深く帯電している箇所については概ね一致しているが, それ以外の所では明白な一致は見られない. また LANL 衛星では図中の垂直線で示した約 800 eV より大きくなると衛星電位の絶対値と電子温度が比例するのに対して, VAPs ではそのような明白な相関は見られない.

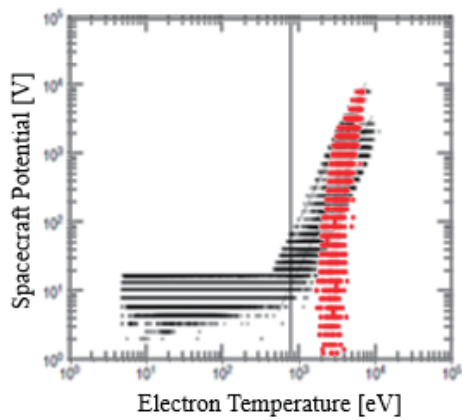


図 3-1 衛星電位と電子温度の関係(黒点: LANL 静止衛星[4], 赤点: VAPs)

4. VAPs の衛星電位と電子温度と電子密度の関係

VAPs の衛星電位と電子温度の关系到電子密度のパラメータを含めて解析をおこなった. 図 4-1 は, 図 3-1 の VAPs のデータを衛星電位は $10^0 \sim 10^4$ V, 電子温度は $10^3 \sim 10^4$ eV の範囲で切り出し, 電子密度を対数スケールのカラーバーとして $0.3 \sim 3.0$ /cc の範囲で表したグラフである. この図から, ある衛星電位に対して, 電子温度が低いと電子密度が大きく, 電子温度が高いと密度が小さい傾向があることがわかる. また, より深く帯電しているのは高温で比較的低密度の時である.

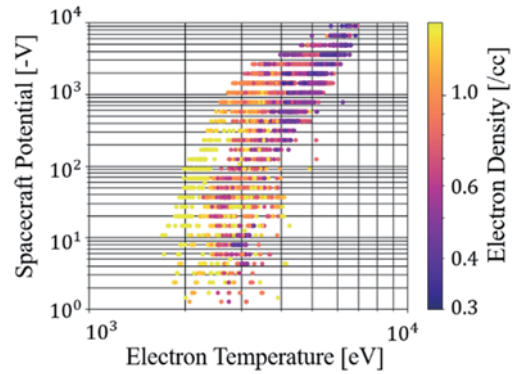


図 4-1 VAPs の衛星電位と電子温度と電子密度の関係(カラーは電子密度)

図 4-1 で示されているデータは帯電を生じている場合であるが, 帯電を生じていない場合のデータを含めた解析をした. 図 4-2 は, 縦軸は電子温度[eV], 横軸は電子密度[/cc]に取り, 共にリニアスケールで表した. また衛星電位をカラーで対数スケールを取って表した. カラーによって表される点は衛星が帯電している場合であり, 一方で灰色の点は衛星が帯電していない場合を表す. ただしここでは, 衛星電位が -10 V 以下である場合を帯電が生じているとする. この図から電子温度が約 2 keV

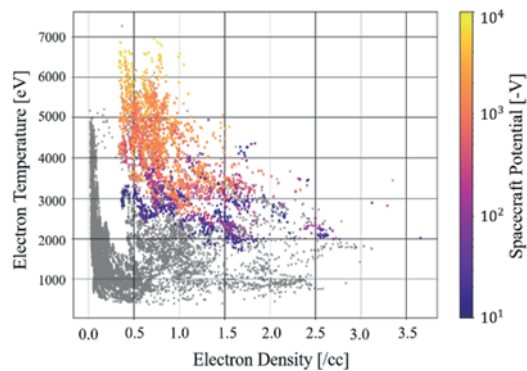


図 4-2 VAPs の衛星電位と電子温度と電子密度の関係(カラーは衛星電位)

より高く, 電子密度が 0.3 /cc より大きくな

ければ、帯電を生じないことがわかった。ただしここでの温度はモーメント温度であることに注意する必要がある。一般に、高温電子が衛星帯電を引き起こすことが知られているが、0.3/cc以下の低密度で高温となっているものは、低エネルギー電子フラックスがHOPEの観測レベル（ワンカウントレベルのフラックス値が高い）以下になる一方、高エネルギーの電子フラックス（ワンカウントレベルのフラックス値が低い）が少量でも観測された結果高温と計算されている可能性がある。この場合、本当の温度はもっと低いと考えられる。

5. 衛星電位の推定式と解析結果の比較と考察

VAPsの衛星電位、電子温度、電子密度についての解析結果を、帯電シミュレーションの結果から得られた日陰の電子温度に関するVAPsの電位の推定式[5]と比較・考察する。

シミュレーションは、次の仮定のもとにおこなわれた。①電子・イオン密度はいずれも1/cc、電子温度は4~32 keV、イオン温度は電子温度の1.9倍 ②プラズマ速度はシングルマクスウェル分布にしたがう。この結果から衛星電位の推定式が式(5.1)のような形で求まる。

$$\Phi_{VAPs}(T_e) = AT_e + B/T_e + C \quad (5.1)$$

ここでA, B, Cは定数であり、シミュレーション結果から値を決定された。

図5-1に、シミュレーションの結果と推定式を表す。縦軸は衛星電位[V](負)、横軸は電子温度 [keV]であり、両軸ともスケール

はリニアスケールである。図5-2はこの推定式を図4-1に重ねてプロットした結果である。図5-2から観測による衛星電位は推定式を上限としてより深く帯電する側に分布することがわかった。したがって推定式は観測分布と比較して衛星電位を低く見積もっている。

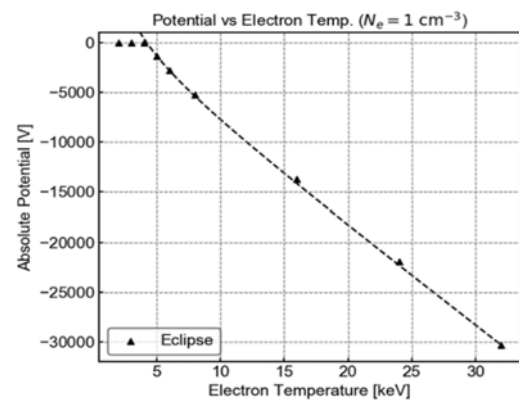


図5-1 VAPsの帯電シミュレーションの結果とその結果から得た衛星電位の推定式のグラフ

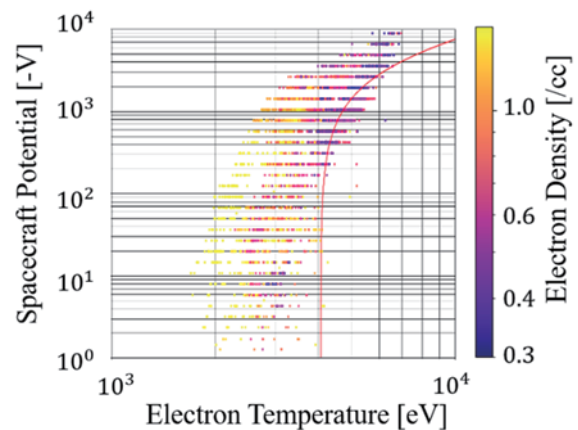


図5-2 図4-1に推定式を書き加えたグラフ

推定式では、衛星帯電が生じ始める電子温度（臨界温度）は図5-1から約4 keVであるが、この温度が2~3 keV付近と仮定して推定式のグラフ全体を負の方向に1~2 keVシフトすると、帯電分布と良い一致が

得られると考えられる。つまり VAPs では衛星帯電の臨界温度が 2~3 keV と LANL 静止衛星より高く、臨界温度付近では推定式のグラフで表されるように対数スケールの図では急峻に変化したと考え、電子温度と明白な相関が見られなかったことが説明できる。また推定式が臨界温度分ずれる理由としては次のことが考えられる。①速度分布の仮定が誤っている ②電子密度などの周辺プラズマの仮定が、実際の環境と異なっている ③衛星に用いられている素材のパラメータが正しくない。これらが実際に影響しているかどうかを、今後確認する必要がある。

6. まとめ

本研究では深い衛星帯電を誘起する中高度軌道のプラズマ環境の解析をおこなった。中高度軌道の VAPs では、深い帯電は高度 20000 km 以上の日陰でおこるため、そのような領域の衛星電位、電子温度、電子密度の関係を解析した。また解析結果を帯電シミュレーションの結果から得た衛星電位の推定式と比較し、考察をおこなった。静止軌道の LANL 衛星の観測では衛星電位と電子温度に相関が見られるが、VAPs の衛星電位と電子温度に一見相関が見られないのは、VAPs では衛星帯電を生じ始める温度(臨界温度)が高い(2~3 keV)ためであるという可能性が示唆された。また、帯電は電子密度が 0.3/cc 以上かつ電子温度 2 keV 以上で起こるといった結果が得られた。シミュレーションの推定式の臨界温度が、観測結果より高めにずれてしまう原因は、今後調べる予定である。

7. 参考文献

- [1] H. C. Koons et al., "The impact of the space environment on space systems", Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Technology Conference, Air Force Research Laboratory, 77 AFRL- VS-TR-20001578, pp.7-11 (1998)
- [2] NASA Van Allen Probes Mission Overview 2011-2014
https://www.nasa.gov/sites/default/files/arraydeployment-orig_full.jpg
- [3] Lois K. Sarno-Smith et.al., "Spacecraft surface charging within geosynchronous orbit observed by the Van Allen Probes", Space Weather, 2016, doi:10.1002/2015SW001345.
- [4] M.F.Thomsen et.al., "Statistical properties of the surface-charging environment at geosynchronous orbit", Space Weather, VOL.11, 237-244, doi:10.1002/swe.20049,2013.
- [5]前田 紘孝 "静止軌道衛星の表面帯電性評価のための電位推定法の開発" 大阪府立大学 2019 年度修士論文