

## Van Allen Probes 衛星を用いた MEO 軌道の衛星電位とプラズマ環境の推定

寺岡 毅, 中村雅夫  
大阪府立大学

### 1. はじめに

人工衛星を運用中に、プラズマ環境に起因した表面帯電が起こり、放電する際に故障を引き起こすことがある。人工衛星の故障原因のうち約半数がプラズマ環境に起因するという報告[1]もあり、衛星軌道におけるプラズマ環境の解析は重要な課題といえる。しかしながら表面帯電の原因となるプラズマ環境は、GEO (Geostationary Earth Orbit) 軌道について解析された例は多いが、MEO (Medium Earth Orbit) 軌道について解析された例は少ない。それは放射線帯の高エネルギー粒子によりコンタミやノイズが激しく、プラズマ環境の精度の高い観測が技術的に困難であったからである。本研究では、2012年に打ち上げられ放射線の対策がなされた Van Allen Probes 衛星の観測データを用いて、表面帯電を引き起こす MEO 軌道プラズマ環境の解析を行った。本稿では、まず衛星搭載の観測機器 HOPE (Helium Oxygen Proton Electron) のイオンの観測データから、衛星が顕著に帯電している時の衛星電位を推定した。推定した衛星電位が $-50\text{ V}$ 以下となった衛星位置を GSE (Geocentric Solar Ecliptic) 座標系で示した。次にその時の表面帯電を引き起こすプラズマ環境の指標となるイオン・電子の密度・温度の推定を行った。そして観測値とシミュレーション結果の比較を行った。顕著な表面帯電が起きた時のプラズマ環境における、帯電解析ツール SPIS (Spacecraft Plasma Interaction System) で作成したシミュレーションモデルの衛星電位と

HOPE のイオン観測データから推定した衛星電位の比較・検討を行った。

### 2. Van Allen Probes 衛星

Van Allen Probes (VAP) 衛星は、NASA が地球周囲の放射線帯 (Van Allen 帯) の調査を目的として、2012年8月30日に打ち上げた2機編隊の衛星である。2機の衛星は、VAP-A, VAP-B と区別され、近地点約 700 km, 遠地点約 30,000 km, 軌道傾斜角  $10^\circ$ , 周期 8~9 時間の楕円軌道で MEO 軌道を周回する。MEO 軌道は、高度約 2,000 km から、約 36,000 km までの地球周回軌道であり、Low Earth Orbit (LEO) 軌道と GEO 軌道の中間に位置し、GPS 衛星などが運用されている。

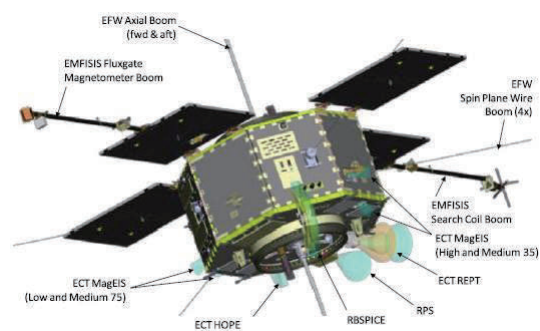


図1 VAP 衛星[2]

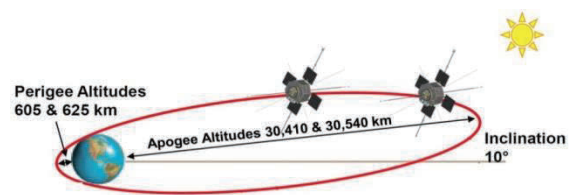


図2 VAP 衛星の衛星軌道[3]

表1 VAP 衛星の軌道要素

打ち上げ日時	2012年8月30日(UTC)
2機の衛星	VAP-A,VAP-B
近地点	約700km
遠地点	約30,000km
軌道傾斜角	10°
軌道	楕円軌道
周期	約8~9時間

衛星電位の推定に用いることができる観測機器には、Electric Field and Waves Suite (EFW) と HOPE の2つが挙げられる。EFW は、衛星電位、電場、プラズマ波動を観測する機器である。衛星電位は、衛星構体から衛星回転軸方向に衛星に対して対象に伸びた長さ約 7m の 2 本のブームと回転面内に伸びた長さ約 50m の 4 本のブームの先についた 6 つのセンサーで観測されている。ただし、観測できる衛星電位は、 $-225 \sim 225$  V となっている。HOPE は、ヘリウム、酸素、イオン、電子の 1 eV~50 keV の範囲におけるフラックスを観測しており、それを用いて衛星電位を推定することができる。

Smith et al.が行った先行研究[4]では、EFW と HOPE から推定された衛星電位の検証ならびに EFW の観測データから衛星電位と衛星位置の関係が調べられた。 $-225 \text{V} \sim 225 \text{V}$  の範囲において、EFW と HOPE から求められた衛星電位の値を比較した結果、EFW から求められた衛星電位は、HOPE から求められた衛星電位よりも約 20% 過小な傾向にあることが確かめられた。ただし EFW は、観測可能な衛星電位が  $-225 \sim 225$  V と限られているため、顕著な表面帯電時に想定される  $-225$  V 以下の衛星電位について観測できない。そのため、 $-225$  V 以下の衛星電位の値及びその衛星電位を観測した時の衛星位置については、調べられていない。また、地球の影に入った時や衛星の姿勢次第では観測できない場合がある。以上の理由により、衛星が顕著に帯電し放電による故障の危険性が高い時の衛星電位の推定を行い、衛星電位と

衛星位置の関係を調べた。衛星電位の推定には、 $-225 \text{V}$  以下の衛星電位の推定も可能な HOPE のイオン観測データを用いた。

### 3.解析手法

#### 3.1.HOPE を用いた衛星電位推定方法

衛星電位の推定方法について、HOPE イオン観測データを例に挙げて示す。図 3 は、2013 年 2 月 20 日の VAP-A の HOPE の FPSA (Flux Proton Spin-Averaged) 観測データである。横軸に時間 [UT]、縦軸にエネルギー [eV]、カラーでフラックス [ $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{keV}^{-1}$ ]をとっている。図 4 に、帯電していないと考えられる時刻 (青) 12:12 と帯電していると考えられる時刻 (赤) 13:52 でのエネ

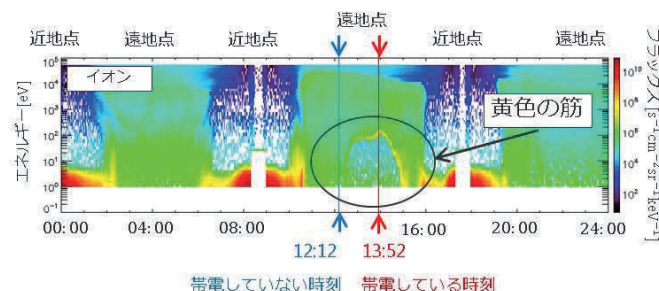


図3 HOPE のイオン観測データで見られる表面帯電時の特徴 (2013 年 2 月 20 日, VAP-A, FPSA)

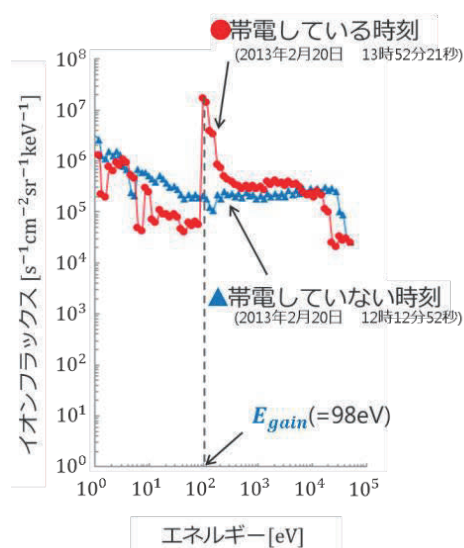


図4 衛星が帯電している時刻に見られるカットオフ (帯電している時刻 (赤) (2013 年 2 月 20 日 13:52, VAP-A), 帯電していない時刻 (青) (同日 12:12, VAP-A))

ルギーとフラックスの関係を示す。横軸にエネルギー[eV]、縦軸にフラックス $[s^{-1}cm^{-2}sr^{-1}keV^{-1}]$ をとっている。衛星が顕著に表面帯電した時、衛星電位は負となることが知られている。イオンは正の電荷であるため、観測されたイオンは衛星電位に引き付けられ加速して、衛星電位 $\Phi$ 相当の運動エネルギー $E_{gain}$ を得る。よって、 $E_{gain} = e|\Phi|$ の関係が成り立つ。衛星電位以下のエネルギーのイオンのフラックスは、観測機器の各エネルギーチャンネルのフラックス検出下限値まで低下する。この現象はカットオフと呼ばれる。図3では、衛星が帯電している時刻において、黄色の筋が観測される。また、図4では、帯電している時刻(赤)において、98 eVのエネルギーチャンネルでのフラックスが増加し、それ以下のエネルギーでは、観測機器の下限值まで低下していることが分かる。この場合、イオンが得たエネルギー $E_{gain}$ は98 eVとなり、衛星電位 $\Phi$ は、約-98 Vと推定される。

### 3.2. プラズマ環境推定方法

観測した電子とイオンのフラックスは、衛星電位の影響を受けているので、プラズマ環境の導出には、衛星電位の影響を補正したものを用いる必要がある。補正には Liouville の定理を用いた。図5に、図4で帯電している時刻(赤) 13:52における補正前と補正後を示した。補正前が衛星電位の影響を受けたイオンの観測データであり、補正後が衛星電位の影響を受けていない無限遠でのイオンのフラックス分布を表す。図5(上)のイオンの観測データを見ると、衛星電位の影響により生じたカットオフが解消されているのが分かる。一方で、図5(下)の電子の観測データを見ると、補正後のデータでは、負の電荷を持つ電子と負の衛星電位が反発して、衛星電位未満のエネルギー成分の無いフラックス分布となっているのが分かる。ここで留意すべき点は、補正前のデータに存在する衛星電位以下の成分は、二次電子などの衛星由来の成分と考えられることである。補正後のデー

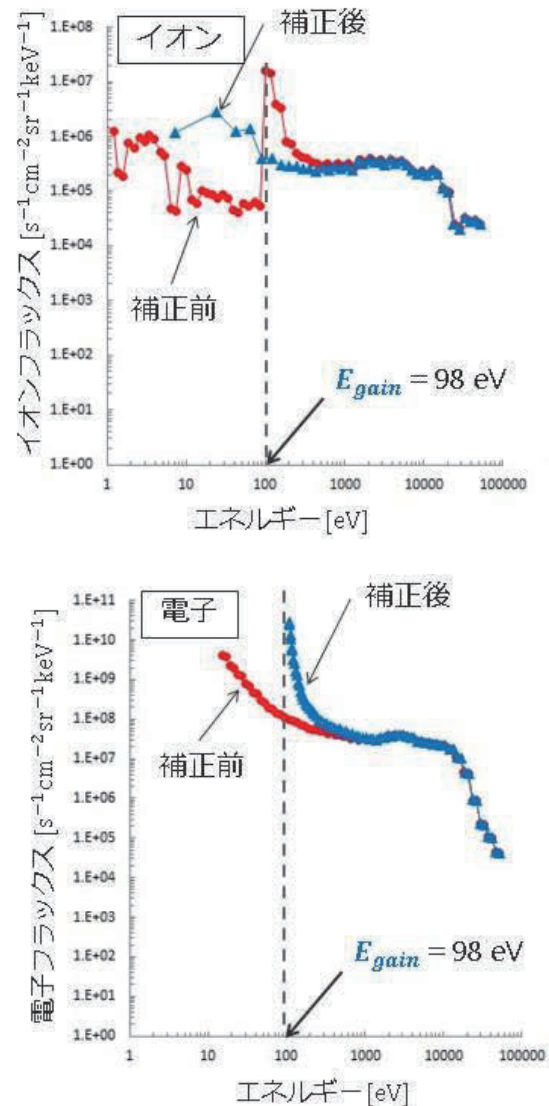


図5 イオン(上)と電子(下)の衛星電位の影響の補正した観測値(2013年2月20日 13:52(UT), VAP-A)

タにおいて、衛星由来の成分は、衛星電位付近にフラックスが集中したフラックス分布となる。よって、イオン・電子の密度・温度の推定には補正したデータを用いる際には、適切に衛星由来の成分を除く必要がある。補正したデータと Single Maxwellian もしくは Double Maxwellian のフィッティングを最小二乗法で行うことで、イオン・電子の密度・温度を推定した。



## 4. 研究結果と考察

### 4.1. MEO 軌道で衛星電位が $-50\text{ V}$ 以下を観測した時の衛星位置

2012 年 10 月 18 日～2014 年 3 月 23 日の約 1 年半の期間で VAP-A,B の HOPE 観測データを解析した。図 6 に衛星電位が  $-50\text{ V}$  以下を観測した時の衛星位置を示す。座標は、地球中心を原点とし、12 時を太陽方向に取ったもので、黄道面への軌道の投影を示した Geocentric Solar Ecliptic (GSE) 座標系である。また、地球中心からの距離の単位は  $\text{km}$  である。楕円軌道の長軸が時計まわりに約一年半で一周することになる。衛星電位

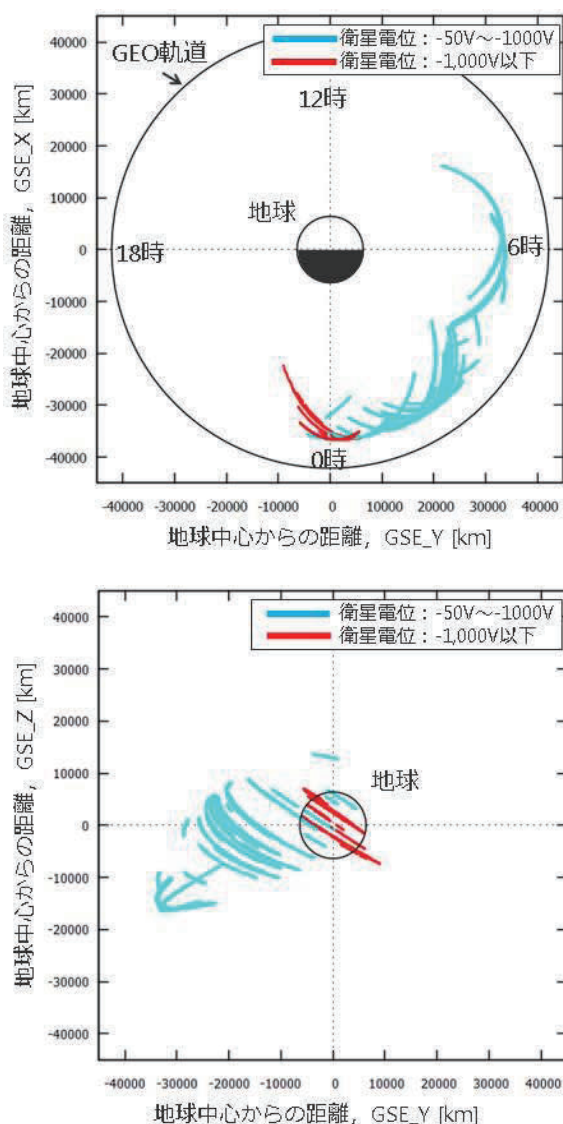


図 6 MEO 軌道で衛星電位が  $-50\text{ V}$  以下を観測した時の衛星位置（解析期間:2012 年 10 月 18 日～2014 年 3 月 23 日, VAP-A,B）

$-50\sim-1,000\text{ V}$  を観測した時の衛星位置を青で、 $-1,000\text{ V}$  以下を観測した時の衛星位置を赤で表している。今回衛星電位を HOPE 観測データから推定するにあたり、カットオフがはっきりと判別できるエネルギーとして、 $-50\text{ V}$  という値を設定した。これは、衛星電位が  $-50\text{ V}$  の時には、イオンが得たエネルギーは  $50\text{ eV}$  となるが、図 4 において  $50\text{ eV}$  以下では観測機器の下限値のフラックスとイオンフラックスの増加が同程度であり、衛星電位の推定が困難であったためである。また、衛星が著しく帯電した時の衛星電位として、 $-1,000\text{ V}$  を閾値とした。図 6 (上)より、帯電は地方時 0 時から 6 時の領域に集中しており、地球中心から約  $25,000\text{ km}$  以遠の地点で帯電したことが分かる。これは、地球尾部の磁場の変動により流入してきた高エネルギー電子が、磁場勾配ドリフトにより朝方に流れ込んでくることが原因と考えられる。図 6 (下)に、12 時の太陽方向から見た衛星位置を示す。衛星電位が  $-1,000\text{ V}$  以下になった場所は、地球の影に入っている 0 時付近にのみ観測された。これは、地球の影に入り太陽光が遮られることで、光電子効果による衛星電位を正に緩和する作用が生じなくなったためと考えられる。

### 4.2. 観測値と帯電解析ツール SPIS を用いたシミュレーション結果の比較

HOPE のデータから推定した衛星電位と顕著な表面帯電が起きた時のプラズマ環境におけるシミュレーションモデルの衛星電位の比較・検討を行った。シミュレーションモデルの作成は、福田 [2016]により SPIS を用いて行われた。今回衛星帯電シミュレーションに用いた SPIS は、欧州で開発された衛星帯電シミュレーションソフトである。プラズマ環境（イオン・電子の密度・温度）を設定することで、そのプラズマ環境における人工衛星の衛星電位、乖離電圧、宇宙空間とやり取りする電流成分などのシミュレーションが行える。図 7 に帯電シミュレーションに用いたシミュレー

ションモデルを示す。衛星本体と4枚の太陽パネルから構成されている。ただし、VAP衛星表面に搭載された観測機器やブームを省略したシミュレーションモデルとなっている。

表2にシミュレーションを行ったプラズマ環境を示す。2013年3月21日6:39(UT)にVAP-Bが観測したVan Allen Probes衛星が最も帯電した日陰時のプラズマ環境である。プラズマ環境は、図9で示すようにフィッティングの精度が良かったDouble Maxwellianによる推定結果である。この時衛星電位は、HOPEの観測データから、 $-8.9 \times 10^3$  Vと推定された。図8に、HOPEの

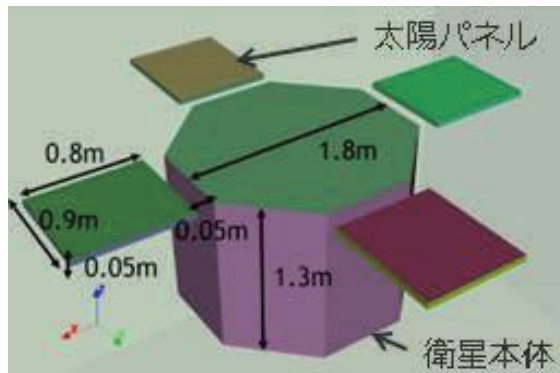


図7 衛星帯電ツールSPISで作成したシミュレーションモデル[5]

表2 シミュレーションを行ったプラズマ環境 (Double Maxwellian)

	低温成分		高温成分	
	密度[ $\text{cm}^{-3}$ ]	温度[keV]	密度[ $\text{cm}^{-3}$ ]	温度[keV]
電子	0.79	6.4	0.17	24
イオン	0.23	5.9	0.22	37

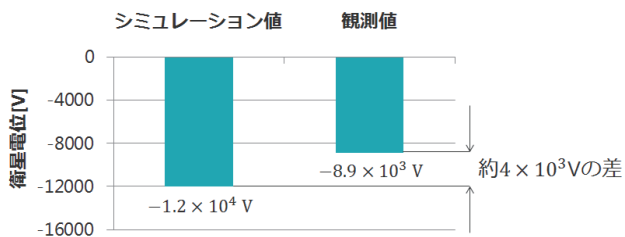


図8 HOPE観測データから推定された衛星電位とシミュレーションによる衛星電位

観測データから推定された衛星電位とシミュレーションによる衛星電位を示す。HOPE観測データから推定された衛星電位は、 $-8.9 \times 10^3$  Vであり、シミュレーションによる衛星電位は、 $-1.2 \times 10^4$  Vであり、 $4 \times 10^3$  V程度 HOPE観測データから推定された衛星電位よりも、シミュレーションによる衛星電位が低くなる結果となった。

この原因について、シミュレーションと観測値導出過程の2つ面で考察を行う。シミュレーションでの原因には、SPISで初期値として設定されている二次電子放出率などの素材パラメータが実機と異なる可能性や衛星形状が簡易的すぎる可能性などが挙げられる。観測値導出過程での原因考察としては、HOPEを用いた衛星電位推定の精度による影響とフィッティングに用いる観測値の選択

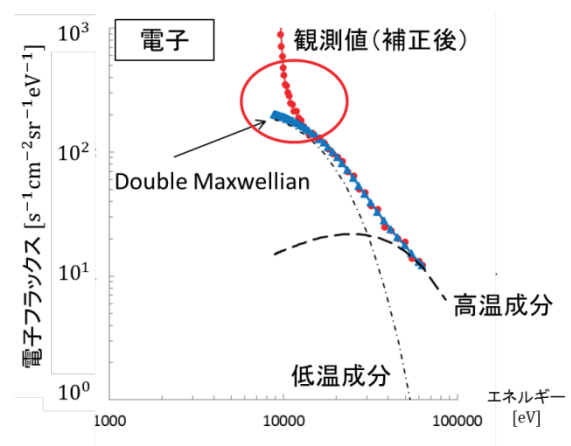
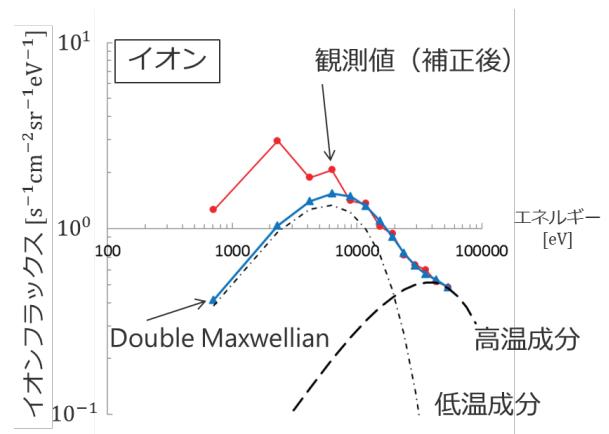


図9 衛星電位の影響を補正した観測値とDouble Maxwellianのフィッティング結果((上)イオン,(下)電子)(2013年3月21日06:39(UT),VAP-B)

範囲による影響の2つが挙げられる。まず、衛星電位推定の精度による影響について説明する。

HOPE は、1 eV~50 keV のエネルギー帯を 72 分割したエネルギーチャンネルを観測点としている。各観測点のエネルギーは等比数列的に 12~16% の増加率で増えるように設計されている。よって、イオンが得たエネルギー  $E_{gain}$  は、12~16% の誤差を含むことになる。つまり、イオンが得たエネルギー  $E_{gain}$  から推定される衛星電位  $\Phi$  も同様に本推定方法では、大きさとして小さいほうに 12~16% の誤差が生じることになる。次にフィッティングに用いる観測値の選択範囲による影響について説明する。図 9 に衛星電位の影響を補正した観測値について、Double Maxwellian とのフィッティングの図を示す。イオン・電子ともに赤で衛星電位の影響を補正した観測値、青で低温成分と高温成分の重ね合わせである Double Maxwellian を表している。イオン・電子ともに補正した観測値とのフィッティングは精度よく行われているように見える。ただし、電子のフィッティングについては注意する必要がある。図 9 の電子において、赤い丸印で囲まれた補正した観測値は衛星電位以下のエネルギーをもった二次電子などの衛星由来の成分で宇宙空間のプラズマ環境を示す成分ではない。よって、Double Maxwellian を用いてフィッティングを行い、衛星周辺のプラズマ環境を再現する際には、衛星由来の成分を精査した後、取り除いてから行う必要がある。シミュレーションによる衛星電位が観測値よりも負に大きくなったことから、今回のシミュレーションに用いたプラズマ環境の導出では、二次電子成分を本来のエネルギー帯よりも大きく見積もり除いた可能性がある。すなわち衛星周辺のプラズマ環境のうち低エネルギー成分を適切に評価せずにフィッティングを行った結果、Double Maxwellian で推定される低温成分の電子の温度が高く推定され、シミュレーションによる衛星電位の結果が観測値よりも負に大きくなったと考えられる。

## 5.まとめ

MEO 軌道での衛星帯電電位とそれを引き起こすプラズマ環境の解析を行った。その結果、MEO 軌道で衛星電位が -50 V より負に大きくなった領域は、地方時 0 時から 6 時であると分かった。特に衛星が深く負に帯電し、衛星電位が -1,000 V 以下となった領域は、地球の影に入っている時であると分かった。そして、HOPE から観測推定した衛星電位とシミュレーションによる衛星電位の比較を行った。その結果、シミュレーションによる衛星電位が観測された衛星電位よりも負に大きく算出された。この原因の一つとして補正した観測値を用いたプラズマ環境推定の際には、二次電子成分などの衛星由来の成分が推定結果に影響を与える可能性があるため、精査する必要があることが分かった。

## 6.今後の予定

プラズマ環境の推定精度を高めるために、補正した観測値を用いたプラズマ環境の推定の際の二次電子成分などの衛星由来の成分を正しく評価する手法を開発する。

さらにプラズマ環境の解析数を増やすことで、人工衛星設計やシミュレーションの際に、汎用的に使える MEO 軌道でのプラズマ環境のモデルを作成することで、MEO 軌道で運用する人工衛星設計段階での帯電故障防止に貢献する。

## 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] Karen Kirby et al. "Radiation Belt Storm Probes—Observatory and Environments" URL:<http://link.springer.com/article/10.1007/s11214-012-9949-2>

- [3]SPACEFLIGHTIOI.COM,URL:<http://spaceflight101.com/rbsp/mission-desgin-timeline/>
- [4] Sarno-Smith, L. K., B. A. Larsen, R. M. Skoug, M.W. Liemohn, A. Breneman, J. R. Wygant, and M.F. Thomsen ( 2016 ) , Spacecraft surface charging within geosynchronous orbit observed by the VanAllen Probes, Space Weather, 14, 151–164,doi:10.1002/2015SW001345.
- [5] 福田 将也, “帯電解析ツールを用いた Van Allen Probes 衛星の帯電解析”,大阪府立大学卒業論文, 2016
- [6] Da Vis, V.A., M.J. Mandell, M.F. Thomsen ( 2008 ) .Representation of the measured geosynchronous plasma environment in spacecraft charging calculations, Journal of Geophysical Research, 113 ( A10204 ) ,doi:10.1029/2008JA013116.