

# 表面帯電を引き起こす MEO 軌道プラズマ環境と衛星電位の統計解析

寺岡 毅, 川内 諒太, 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、溜まった電荷が放電することにより故障を引き起こすことがある。人工衛星の宇宙環境由来の故障原因のうち、約半数が衛星帯電に伴う放電が原因で、さらにその約半分が表面帯電が原因という報告[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。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やノイズが激しく、精度の良いプラズマ環境の観測データが十分に存在しなかったからである。本研究では、2012年に打ち上げられ、放射線対策がなされた 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、まず表面帯電を引き起こすプラズマ環境と衛星電位との対応を明らかにするため、衛星電位と平均電子温度の相関を取り、その結果について述べる。次にプラズマ環境をより正確に再現できると考えられるイオン・電子を2成分の密度・温度によるプラズマ環境の算出を試行し、衛星電位と平均電子温度の相関を取り、その結果について述べる。2成分を求める際には、電子フラックスのエネルギー・スペクトラムに表れる2つの成分分布の分離度が最大となるように閾値を機械的に設定し、モーメント法を用いて電子を2成分として求めた。そし

て、算出したプラズマ環境下で、SPIS (Spacecraft Plasma Interaction System) による帯電シミュレーションを行い、シミュレーション電位と観測衛星電位の比較・検討を行った。

## 2. Van Allen Probes 衛星

Fig. 1 に示す Van Allen Probes 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、Van Allen Probes A, Van Allen Probes B と区別され、軌道要素は、Table1 に示すように近地点約 700 km, 遠地点約 30,000 km, 軌道傾斜角 10°, 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る。

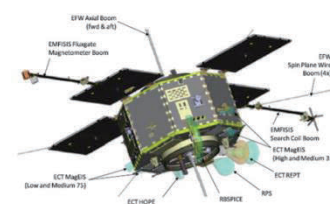


Fig. 1 Van Allen Probes 衛星外観

Table 1 Van Allen Probes 衛星軌道要素

打ち上げ日時	2012年8月30日(UT)
2機の衛星	VAP-A, VAP-B
近地点	約600km
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

観測衛星電位は、電場観測機器 EFW (Electric Field and Wave Instruments) と粒子観測機器 HOPE (Helium Oxygen Proton Electron) を用いた。EFW は、衛星電位、電場、プラズマ波動の観測している。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つのプローブセンサーから求められる。ただし、求められる衛星電位は、-200~200Vの範囲までである。また、地球の影に入った時や衛星の姿勢次第では正しく求めることができない。粒子計測機器HOPEは、1eV~50keVの範囲において、12~16%のエネルギーステップで、ヘリウム、酸素、イオン、電子を観測する。HOPE観測データは、データ内容に対応して、Levelで分けられ、各LevelについてそれぞれLevel0:生データ、Level1:カウントレイト、Level2:フラックスなど、Level3:密度、温度、ピッチなどとなっている。観測衛星電位は、EFWの観測レンジである-200V~+200Vについては、EFWの観測データを用い、-200V以下については、HOPEのイオン観測データに表れるフラックスのカットオフエネルギーから求めた値を用いた。

HOPE/Level2公開データのエネルギースペクトラムから、HOPE/Level3公開データの密度・温度を算出していると考えられる式を(1),(2)式に示す。等方性を仮定し、モーメントをとって、密度・温度を算出している。実際に、(1),(2)式を用いて算出した結果とHOPE/Level3公開データが一致することを確認した。

$$\begin{aligned} \text{密度 } n_{(e,i)} &= \frac{4\pi e}{m} \sqrt{\frac{2e}{m}} \int_0^\infty f(E_\infty) \sqrt{E_\infty} dE_\infty \\ &= 2\pi \sqrt{\frac{2m}{e}} \sum_{E>E_{\min}} \frac{F(E)}{E} \sqrt{E \mp \phi_m} \Delta E \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{温度 } \theta_{(e,i)} &= \frac{2}{3en} \pi m \left(\frac{2e}{m}\right)^{\frac{5}{2}} \int_0^\infty f(E_\infty) \sqrt{E_\infty}^3 dE_\infty \\ &= 2\pi \frac{2}{3n} \sqrt{\frac{2m}{e}} \sum_{E>E_{\min}} \frac{F(E)}{E} (E \mp \phi_m)^{\frac{3}{2}} \Delta E \quad (2) \end{aligned}$$

ここで、 $F(E)$ :フラックスの相乗平均 [ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{keV}^{-1}$ ],  $E$ :エネルギーの相乗平均[eV],  $\Delta E$ :エネルギーチャンネルの幅[eV],  $\phi_m$ :衛星電位

[V],  $e$ : $1.6 \times 10^{-19}$ [C],  $n$ :密度 [ $\text{cm}^{-3}$ ],  $m$ :イオン電子質量[kg],  $\theta$ :温度[eV]を表す。

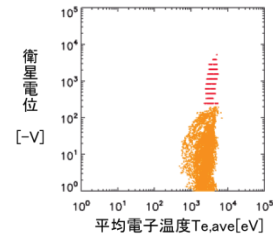
### 3. 電子温度と衛星電位の相関

静止軌道プラズマ環境において、LANL衛星の観測データを用いた平均電子温度 $T_{e,ave}$ と衛星電位の対応を表す経験的な相関関係[4][5]があると報告された。具体的には、 $T_{e,ave}$ が、約800eV以上のときに、衛星電位と良い線形の相関がみられる。

ここで、平均電子温度 $T_{e,ave}$ は、(3)式で表され、低温成分温度 $T_{e,low}$ と高温成分温度 $T_{e,high}$ の2成分の温度を密度比 $n_{e,low}:n_{e,high}$ で内分した温度と定義される。ただし、電子低温成分密度は、準中性状態を仮定し1~100eVのイオン密度を代用し、電子低温成分温度は、5eVと仮定している。これは、低温成分は、観測データにおいて二次電子成分や光電子成分など低エネルギーで大量に観測される衛星由来成分と分離することができないため、宇宙環境由来の電子低温成分密度・温度を正確に算出することができないためである。高温電子成分は、30eV~45keVのエネルギースペクトラムから、算出している。

$$T_{e,ave} = \frac{n_{e,low} \times T_{e,low} + n_{e,high} \times T_{e,high}}{n_{e,low} + n_{e,high}} \quad (3)$$

中軌道においても平均電子温度 $T_{e,ave}$ と衛星電位との対応を表す関係が成り立つか確かめる。そこで、平均電子温度 $T_{e,ave}$ の算出に用いる低温成分



VAP衛星Level3データを用いた平均電子温度と衛星電位の関係

LANL衛星データを用いた平均電子温度と衛星電位の経験的な関係式[4]		VAP衛星Level3データを用いた平均電子温度と衛星電位の関係
低温成分密度	$n_{p,low}$	イオン密度(1eV~100eV)を代用
低温成分温度	$T_{e,low}$	5.0eV
高温成分密度	$n_{e,high}$	30eV~45keVのエネルギースペクトラムから算出
高温成分温度	$T_{e,high}$	200eV~45keVのエネルギースペクトラムから算出

Fig. 2 Van Allen Probes衛星Level3データを用いた経験的な関係)

電子密度は、1~100 eV のイオン密度を代用し、電子低温成分温度は、5 eV と仮定した。高温成分については、200eV~45keV のエネルギースペクトラムから算出した。このようにして HOPE/Level3 データから算出した平均電子温度 $T_{e,ave}$ と衛星電位との対応を表す関係を Fig.2 に示す。平均電子温度 $T_{e,ave}$ が約 600 eV から衛星電位が-1 V 以下の帯電を引き起こすことが見て取れる。ただし、平均電子温度と衛星電位の間に明確な相関があるとは言えない結果となった。

#### 4. 2 成分密度・温度プラズマ環境導出の検討

中軌道において平均電子温度と衛星電位の間に明確な相関が見られなかった原因について、平均電子温度の算出に用いた観測値に着目した。今回用いた観測値 HOPE/Level3 公開データは、モーメント法による 1 成分のイオン・電子の密度・温度である。1 成分で表された密度と温度は、HOPE/Level2 公開データのエネルギースペクトラムを正確に反映した値ではなく、200 eV~45 keV までのエネルギーチャンネルごとで求めた密度・温度を積分した結果となっている。よって、エネルギースペクトラムで観察されるプラズマの分布状態の情報が失われた値となっている。実際に Fig.3 に示す電子のエネルギースペクトラムを見ると、14 eV~約 50 eV と約 1 keV~45 keV の範囲に一つずつ山なりの分布が存在していること

200 eV~45 keV までのエネルギースペクトラムから、200 eV~1 keV の成分と 1 keV~45 keV の高温成分を分けることなく、1 成分の密度と温度として算出していると考えられる。そのため、1 keV~45 keV の高温成分を、HOPE/Level3 データの示す密度と温度に反映できていないと考えられる。

実際に、本シンポジウムの川内ら[6]の発表で、HOPE/Level3 データ、シングルマクスウェル分布でフィッティングしたプラズマ環境、ダブルマクスウェル分布でフィッティングしたプラズマ環境での衛星帯電シミュレーションによる衛星電位の観測衛星電位との比較・検討が行われた。その結果、電子とイオンをそれぞれ 1 つの温度成分とするプラズマ環境より、2 つの温度成分とするプラズマ環境の方が、表面電位のシミュレーション計算結果が観測衛星電位に近い結果となった。つまり衛星帯電を引き起こすプラズマ環境をより適切に表すには、電子とイオンの温度・密度をそれぞれ 2 成分として、算出する必要があることが示唆された。シミュレーション結果は、観測衛星電位よりも正に大きい結果となったため、電子のエネルギースペクトラム見られる高温成分を適切に表すことができれば、観測衛星電位とシミュレーション結果が近い値となると考えられる。そこで HOPE/Level2 データから、モーメント法によりプラズマ環境を 2 成分で表す方法を試行した。モーメント法による 2 成分の算出では、低温成分と高温成分を分けるエネルギーの閾値を設定することで、機械的にプラズマ環境を算出することができる。しかし、エネルギースペクトラムにマクスウェル分布のフィッティングを行うことでプラズマ環境を求める場合は、エネルギースペクトラムの素性をよく表す目的関数の設定が難しいことやエネルギースペクトラムに 2 つの分布をフィッティングする際には、低温成分密度と温度、高温成分密度と温度の計 4 変数となり、目的関数を最小に

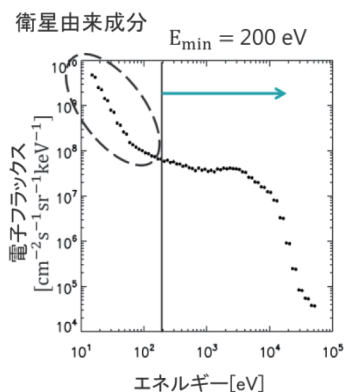


Fig. 3 HOPE/Level2 公開データのエネルギースペクトラムの一例

が分かる。14 eV~50 eV は、二次電子成分や光電子成分など低エネルギーで大量に観測される衛星由来成分によるものと考えられる。

HOPE/Level3 データにおいては、

する最適解を見つけることが困難であると考えられる。

今回は、2つの分布の分散が最大となるように閾値を設定する判別分析法[7]を参考にして、閾値を設定した。なお、この方法は画像の白黒化などの二値化処理に広く用いられ、大津の二値化とも呼ばれている。その閾値設定方法について概説する。今、HOPE/Level2データの72ステップに分けられたエネルギーチャンネルを14 eVから順に0から71まで番号を振る。閾値となるエネルギーチャンネルを $t(0 \leq t \leq 71)$ 番目とする。0 ≤ tの範囲をbackgroundクラスとし、そのフラックス: $\omega_b$ , 平均: $\mu_b$ , 分散: $\sigma_b^2$ と定義する。同様に  $t \leq 71$ の範囲をforegroundクラスとし、そのフラックス: $\omega_f$ , 平均: $\mu_f$ , 分散: $\sigma_f^2$ と定義する。0 ≤ t ≤ 71におけるフラックスを $\omega_t$ と定義すると、backgroundクラスとforegroundクラスの重みは、それぞれ

$$W_b = \frac{\omega_b}{\omega_t}, W_f = \frac{\omega_f}{\omega_t}$$

をつけたクラス内分散 $\sigma_W^2$ を $\sigma_W^2 = W_b \sigma_b^2 + W_f \sigma_f^2$ と定義する。クラス内分散 $\sigma_W^2$ を最小とするtを閾値tとする。また、2つのクラス間の広がりを表すクラス間分散 $\sigma_B^2$ が、最大となるtを閾値tとしてもよい。クラス間分散 $\sigma_B^2$ は、

$$\begin{aligned} \sigma_B^2 &= \sigma_f^2 - \sigma_W^2 \\ &= W_b(\mu_b - \mu)^2 + W_f(\mu_f - \mu)^2 \\ &= W_b W_f (\mu_b - \mu_f)^2 \end{aligned}$$

ここで、 $\sigma_f^2$ は、0 ≤ t ≤ 71における分散、 $\mu$ は、 $\mu = W_b \mu_b + W_f \mu_f$ である。

Fig.4に閾値設定を行った結果の一例を示す。データは、2013年2月20日14時19分のVan Allen Probes-Aで、観測衛星電位は-63 Vである。この例では、832 eVでクラス間分散が最大となり、閾値となった。よって、200 eV~832 eV(閾値)と832 eV(閾値)~46 keVの範囲で、それぞれモーメント法により算出を行い、それぞれ中温成分と高温成分と定義した。Fig.5に、2013年2月8日のVan Allen Probes-AのHOPE/Level3データ

(黒)と中温成分(青)と高温成分(赤)について時系列の変化を示した。電子密度については、中温成分と高温成分の和を緑色で示している。3時42分~5時48分において、HOPE/Level3データでは、4時に電子密度が $2 \text{ cm}^{-3}$ に達した後、5時48分にかけて電子密度が減少していることが分かる。ただし、中温成分と高温成分の2成分でみると、3時42分から4時48分で高温成分が約6割を占め、電子温度については、HOPE/Level3データ

(黒)に対して、高温成分温度(赤)が高く算出されており、高温成分を適切に算出されていると考えられる。

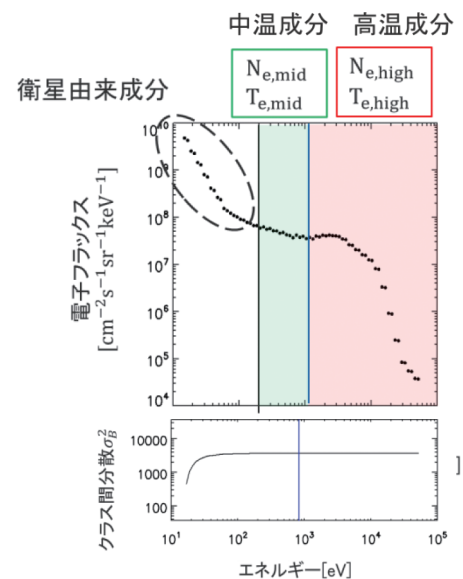


Fig. 4 クラス間分散と閾値の設定方法と中温成分と高温成分のエネルギー範囲

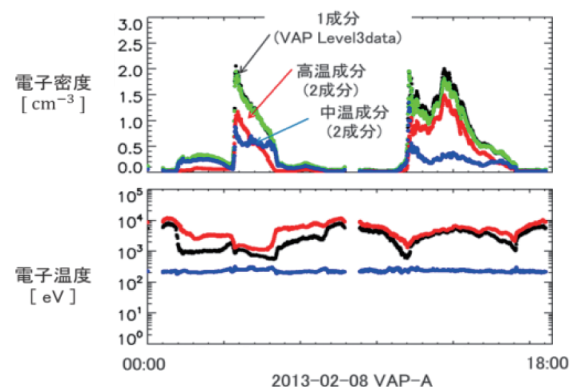


Fig. 5 HOPE/Level3 データ(黒)と中温成分(青)と高温成分(赤)の電子密度(上)と電子温度(下)の時系列データ (Van Allen Probes A, 2013年2月8日0時から18時まで)

### 5. 2成分電子密度・温度と衛星電位の相関

Fig.6 に中温成分と高温成分の密度・温度と衛星電位の散布図を示す. Fig.7 に中温成分と高温成分の2成分を用いた平均電子温度 $T_{e,ave}$ と衛星電位の散布図を示す. Fig.7 より, 中温成分密度・温度と高温成分密度・温度と衛星電位との間に明確な相関関係は見られなかった.

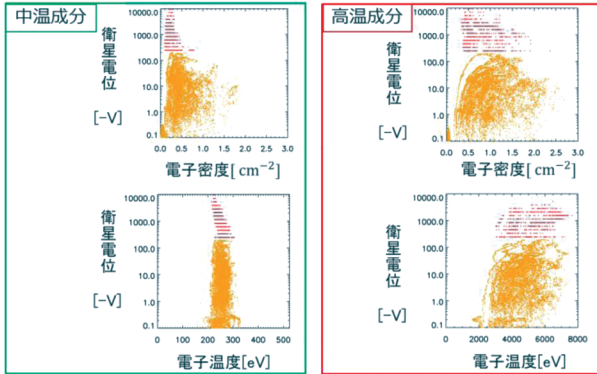
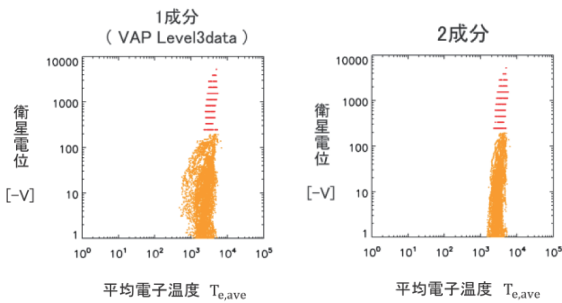


Fig. 6 中温成分電子密度 (左上), 中温成分電子温度 (左下), 高温成分電子密度 (右上), 高温成分電子温度 (右下) と衛星電位の関係図, (2013年, Van Allen Probes A)



$$T_{e,ave} = \frac{n_{p,low} \times 5eV + n_{e,high} \times T_{e,high}}{n_{p,low} + n_{e,high}} \quad T_{e,ave} = \frac{n_{e,mid} \times T_{e,mid} + n_{e,low} \times T_{e,high}}{n_{e,mid} + n_{h,high}}$$

Fig.7 中温成分と高温成分の2成分を用いた平均電子温度 $T_{e,ave}$ と衛星電位の散布図(Van Allen Probes A,2013,4<L)

### 6. 帯電シミュレーションの2成分密度・温度使用の検討

川内ら[6]が行ったシミュレーションの入力として, 本研究結果を利用した結果を検討する. Table.2 に表面帯電を引き起こしたプラズマ環境について, HOPE/Level3 データの示す電子密度・温度と本手法により, 2成分で算出した電子密度・温度の結果を示す. シミュレーションに用いるソフトの SPIS は, 欧州で開発された衛星帯電シミュレーション

ユ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, 帯電電圧, 宇宙空間

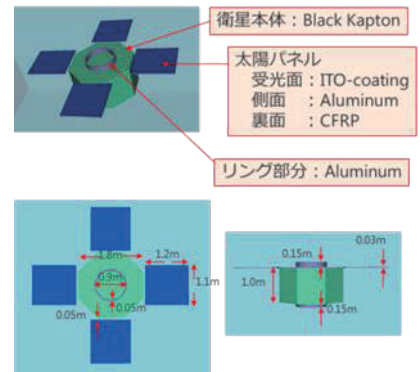


Fig. 8 SPISを用いた Van Allen Probes 衛星のシミュレーションモデル

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. Fig.8 に衛星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.

Fig.9 に HOPE/Level3 データの示す電子密度・温度と本手法により 2成分で算出した電子密度・温度のプラズマ環境で SPIS によるシミュレーションを行った結果を示す. 2013年3月17日22時19分と2013年3月28日0時49分の Van Allen Probes-A で観測した日陰時のデータで, 観測衛星電位はそれぞれ-5,226 V と -9,623 V ある. Fig.9 から, 2013年3月17日22時19分について

Table 2 シミュレーションを行ったプラズマ環境

	イオン		電子			シミュレーション電位[V]	観測衛星電位[V]
	密度 [cm <sup>-3</sup> ]	温度 [eV]	密度 [cm <sup>-3</sup> ]	温度 [eV]	密度 [cm <sup>-3</sup> ]		
1成分 (VAP Level3data)	0.88	14369	0.62	5972	-789	-5,226	
2成分	0.88	14369	0.17	230	-3,440	-3,440	
2013-03-17/22:19							
	イオン		電子			シミュレーション電位[V]	観測衛星電位[V]
	密度 [cm <sup>-3</sup> ]	温度 [eV]	密度 [cm <sup>-3</sup> ]	温度 [eV]	密度 [cm <sup>-3</sup> ]		
1成分 (VAP Level3data)	0.56	14086	0.76	6958	-5,482	-9,632	
2成分	0.56	14086	0.23	222	-6,454	-6,454	

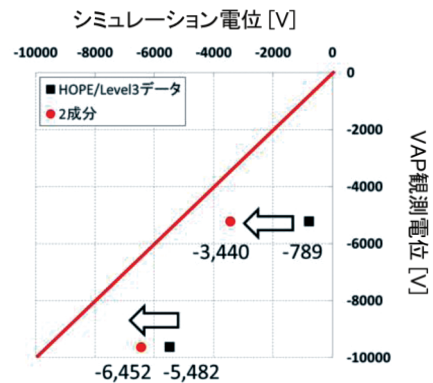


Fig. 9 HOPE/Level3 データとモーメント法により算出した 2成分のプラズマ環境下でのシミュレーション結果

HOPE/Level3 データプラズマ環境下でのシミュレーション電位は-5,482 V であり, 2 成分プラズマ環境下でのシミュレーション電位は-6,454 V となり, 観測衛星電位-9,632 V に近づいたことが分かる. 2013 年 3 月 28 日 0 時 49 分については, HOPE/Level3 データプラズマ環境下でのシミュレーション電位は-789 V であり, 2 成分プラズマ環境下でのシミュレーション電位は-3,440 V となり, 観測衛星電位-5,226 V に近づいたことが分かる. 両方のケースで, 本結果を用いた方が, 良い結果となることが示された.

## 7. まとめ

衛星帯電を引き起こすプラズマ環境をより適切に表すため, 電子の温度・密度をそれぞれ 2 成分として, 算出し利用する検討をおこなった. 本稿では, HOPE/Level2 データのエネルギースペクトラムで 2 つの分布の分離度が最大となるように閾値を機械的に設定し, モーメント法を用いて電子を 2 成分として求めた. 平均電子温度と衛星電位の関係について調べた結果, 電子 1 成分, 電子 2 成分ともに静止軌道の研究結果でみられるような良い相関が得られなかった. しかし, SPIS によるシミュレーションの入力パラメータとして検討したところ, 電子を 1 成分 (HOPE/Level3 公開データ) とした環境よりも, 今回求めた電子を 2 成分として環境の方が, 観測衛星電位に近づく結果となり, 2 成分で表すことの重要性が明らかになった.

## 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] 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-design-timeline/>
- [4] V.A.Davis, 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.
- [5] M.F.Thomsen et.al., "*Statistical properties of the surface-charging environment at geosynchronous orbit*", in Space Weather, VOL.11, 237-244, doi:10.1002/swe.20049,2013
- [6] 川内諒太, 寺岡毅, 中村雅夫, 長妻努, 石井守, 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, 第14回宇宙環境シンポジウム, 2017
- [7] Nobuyuki Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms", IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, VOL. SMC-9, NO.1, JANUARY, p62, 1979