

放射線帯内帯を通過する中軌道衛星の帯電と二次電子放出係数の経年変化

中村 雅夫, 松井 大智 (大阪公立大学)

1. 研究背景・目的

宇宙機の表面帯電は、背景プラズマと宇宙機との相互作用によって生じる。また、表面帯電に伴う静電放電は、太陽電池の故障や劣化、電気回路の損傷や電磁ノイズによる衛星の故障を引き起こす可能性がある。本研究では、Van Allen Probes の観測データを用いた内部磁気圏における表面帯電の統計的研究[1]で見られた、衛星表面電位の観測期間依存性の原因を探ることを目的としている。

2. 解析データ

2.1. Van Allen Probes

Van Allen Probes は2012年8月30日に、NASA によって打ち上げられた2機編隊の無人探査機である。Probe A は、2019年10月18日にProbe B は、2019年7月19日に運用が完了している。表1に、衛星の軌道要素、図1に衛星の外観を示す。衛星は、放射線帯 (Van Allen 帯) における宇宙プラズマ環境の観測を主目的とし、中高度軌道での観測を行った。Van Allen Probes は衛星表面が全て導通されており、衛星表面の部材間に電位差が生じないようにしている。

表1. Van Allen Probes の軌道要素。

Launch date	30 Aug. 2012
End of Operations Date	Probe A : 18 Oct. 2019 Probe B : 19 Jul. 2019
Orbit	Medium Earth Orbit(MEO)
Inclination	~10 degree
Apogee	~30000 km
Perigee	~600 km
Period	~9 hours



図1. Van Allen Probes の外観[2].

2.2. Electric Fields and Waves (EFW)

Van Allen Probes 搭載の EFW は、電界、波動を測定するプローブセンサーである。EFW は、日照において、 ± 200 V の範囲での衛星電位を観測可能であるが、光電子を考慮したプローブ法で観測を行っているため、日陰においては、正確な計測ができない。

2.3. Helium Oxygen Proton Electron (HOPE)

Van Allen Probes 搭載の HOPE は、約 $1\text{ eV} \sim 50\text{ keV}$ のエネルギー帯を72個のチャンネルに分割し、各チャンネルで、ヘリウム、酸素、イオン、電子のフラックスを観測している。イオンフラックスのカットオフから衛星の負電位を推定することができる。

3. 衛星表面帯電原理

宇宙プラズマ (電子、イオン) の衝突により、衛星表面には、種々の電流が流入する。その結果、蓄積された電荷によって衛星表面が帯電することとなる。図2は、衛星への電流収支の模式図を示し、以下の

(1)式は、衛星に流出入する正味電流を表している.

$$I = \{I_i(\phi) + I_{se}(\phi) + I_{si}(\phi) + I_{be}(\phi) + I_{ph}(\phi) \pm I_a(\phi)\} - I_e(\phi) \quad (1)$$

I : 衛星表面に流入する正味電流
 I_e : 外部電子電流
 I_i : 外部イオン電流
 I_{se} : 電子衝撃二次電子電流
 I_{si} : イオン衝撃二次電子電流
 I_{be} : 後方錯乱電子電流
 I_{ph} : 光電子電流
 I_a : 能動的放射電流

$$Q = C\phi \quad (2)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{C} \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{C} I \quad (3)$$

また、正味電流 $I[A]$ に対して、蓄積した電荷量 $Q[C]$ 、衛星表面電位 $\phi[V]$ 、衛星表面と宇宙空間の間の静電容量 $C[F]$ の関係式(2),(3)式によって衛星電位が変化し、衛星表面に流入する正味電流がゼロとなるときに衛星電位が、定常状態での衛星電位となる。

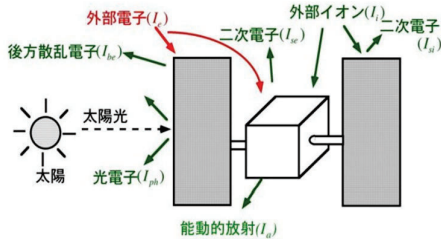


図2. 衛星へ流出入する電流の模式図[3].

外部電子、外部イオン電流の推定

HOPEの微分フラックスデータから、積分フラックスを計算し[5]、電流量に変換することで外部電子およびイオン電流の推定値を算出した。この際、衛星を球とみなす簡易モデルを採用し、全方位からプラズマが流入すると仮定して、電流量 $I[A]$ を推定した。

二次電子電流の推定

電子のエネルギーフラックスデータに対して、二次電子放出係数 $\delta(E)$ を掛け合わせたものを積分し、二次電子電流量へと変換した。

4. 解析結果

衛星運用期間を以下のように約2年ごとに前期(A)、中期(B)、後期(C)の3つの期間に分割して行った。

A : 2011/11/01~2014/11/30

B : 2014/12/01~2016/12/31

C : 2017/01/01~2019/07/16

(Probe A ~2019/02/23)

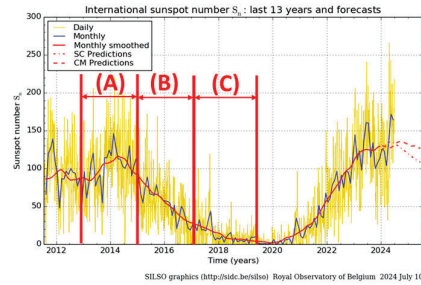


図3. 太陽黒点数の変動[4].

図3に示した太陽黒点数の変動より、各期間は、A：太陽活動極大期、B：太陽活動減衰期、C：太陽活動極小期に相当する。

Van Allen Probesの遠地点は、約1年半で太陽方向を基準とした地球中心座標系において1時計回りするため、約2年の解析期間を取ると、内部磁気圏の磁気赤道面付近のほぼすべての領域をカバーする。

4.1. 衛星表面帯電発生領域と期間

地球近傍のプラズマ圏における高密度低温電子による帯電イベントを除外して解析するため、 $-10V$ 以下の帯電イベントに注目した。解析の結果、期間B,Cでは、帯電

イベントがほとんど存在せず、ほぼすべての帯電イベントは期間 A にしか存在しなかった。

しかし、期間 A の解析から衛星帯電を引き起こし得る電子プラズマフラックスの条件を満たすデータは、太陽活動減衰期の期間 B で約 1.2 倍、太陽活動極小期の期間 C でも約 0.4 倍あることが確認された。このことから、宇宙環境の変化ではなく衛星表面材料の経年劣化に原因があると考えられる。Van Allen Probes 衛星の表面帯電に影響する素材パラメータには、光電子放出係数と 2 次電子放出係数がある。日照では、両者の影響を分離できないため、日陰で 2 次電子放出係数に着目して解析をおこなった。

4.2. 日陰における帯電特性の変化

期間 A と期間 C の日陰で、電子フラックスなどプラズマ環境条件が似通ったイベントを探索し、衛星電位の比較を試みた。その結果、図 4 に示したように、プラズマ環境がほぼ同じなのに、前期の期間 A では -90 V 帯電しているが、後期の期間 C では帯電していないイベントが存在した。この結果は、2 次電子放出係数が経年変化により大きくなったことを支持している。

さらに、期間 A と期間 C の日陰で、外部電子、外部イオン電流、2 次電子を放出する電子フラックスの積分値を組み合わせ、負帯電を引き起こす閾値となる実効的 2 次電子放出係数を統計的に求めたところ、期間 A に比べて期間 C で大きくなっていることが明らかになった。ただし、すべての材料の影響をまとめて実効的 2 次電子放出係数としたため、どの材料の経年変化が影響しているかは明らかにできていない。

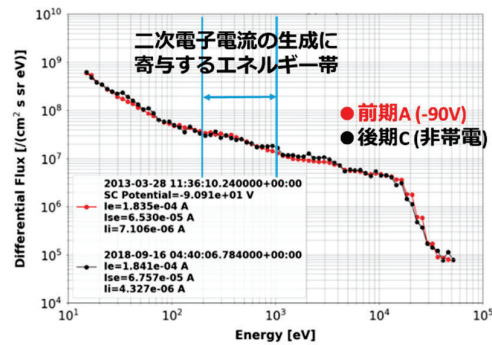


図 4.日陰における、期間 A (赤丸) と期間 C (黒丸) における電子フラックスが似通ったイベント解析結果。期間 A のイベントでは衛星電位が -90 V 、期間 C のイベントでは負帯電は観測されていない [5]。

5. まとめ

本研究では、Van Allen Probes の内部磁気圏における衛星表面帯電特性の経年依存性を明らかにするために、2 次電子放出係数に注目して日陰のデータを解析することで、同係数の値が経年変化し大きくなっていることを明らかにした。

静止軌道衛星の帯電では、調べた範囲では経年変化の報告事例は見当たらなかった。このことから、Van Allen Probes の軌道が放射線帯内帯を頻繁に横切っていることにより、内帯の高エネルギーイオンによる素材放射線劣化が促進されたと推測される。

6. 参考文献

- [1] 松井大智, 中村雅夫, “衛星表面帯電を引き起こす内部磁気圏プラズマ環境”, 第 18 回宇宙環境シンポジウムの講演論文集, 2024
- [2] NASA, “Van Allen Probes: Images”, <https://vanallenprobes.jhuapl.edu/Multimedia/Images.php>, Accessed 23 Oct. 2024.

[3] 宇宙航空研究開発機構, 「帯電・放電設計標準」, p45, 2012.

[4] SILSO, “Daily and monthly sunspot number”, Royal Observatory of Belgium, <http://sidc.be/silso>, Accessed 10 Jul. 2024.

[5] 松井 大智, “内部磁気圏における衛星表面帯電の研究”, 大阪公立大学 2024 年度修士論文.