

衛星帯電環境下におけるダブルプローブ電場観測に関する プラズマ粒子シミュレーション

三宅洋平（神戸大学）、臼井英之（神戸大学）、小嶋浩嗣（京都大学）

概要 科学衛星による宇宙探査ミッションにおいては、ダブルプローブ法を用いた電場観測がしばしば行われる。ダブルプローブ法はプラズマ空間中の離れた2点の電位差を測ることを基本としており、広範なプラズマパラメータ領域もしくは周波数帯に適用可能であることが主な特長である。その半面、電位構造を著しく変化させる衛星周辺プラズマ擾乱の影響を受けやすく、較正誤差やスプリアス電界の観測例が報告されている。ダブルプローブ法による電場観測の信頼性を高めるために、プラズマ粒子シミュレーションを用いて、衛星帯電環境下におけるスプリアス電界発生やプローブ電気特性変化のメカニズム解明に取り組んでいる。本報告では特に、衛星表面からの光電子放出の影響に着目し、スプリアス電界の発生を数値的に再現することに成功した。また光電子電流影響下におけるプローブ電流電圧特性の解析を行った。

1. ダブルプローブ電場観測

ダブルプローブ法を用いた宇宙プラズマ中電場観測は科学衛星ミッションにおいて、幅広く用いられている[1, 2, 3]。その測定原理は、図1に示すように単純であり、プラズマ空間中の離れた2点の電位差を測ることを基本とする。この電位差をプローブ間距離で除することにより電場のプローブ伸展方向成分の強度が求められる。

ダブルプローブ法は、その適用範囲が広く、原理的には地球周辺の宇宙環境に見られる多様なプラズマパラメータ領域で使用可能である。また定常電場から数 MHz までに至る広い周波数帯で利用される。

一方で、空間電位を測定するという測定原理から、電位構造を著しく変化させる衛星周辺プラズマ擾乱の影響を受けやすいことが知られている。その代表的な例としては、衛星表面から放出される高密度の光電子や、対流プラズマ中で衛星の後方に形成されるウェイク領域により、プローブ電気特性の予期しない変化やスプリアス電界が測定されることが報告されている[4]。

我々はプラズマ粒子シミュレーションにより、こうした衛星周辺プラズマ環境を再現することで、ダブルプローブ電場観測への影響を評価することを試みる。本報告では特に、高密度の光電子によるスプリアス電界発生やプローブ特性変化のメカ

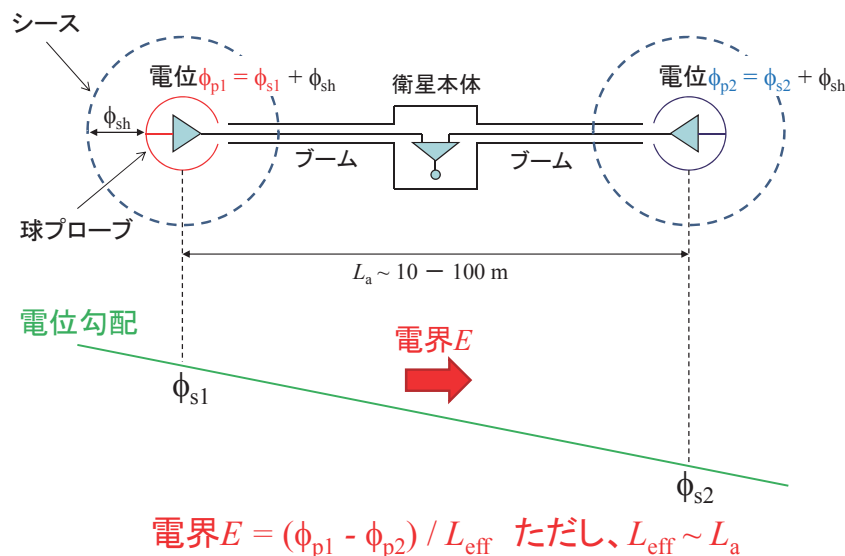


図1. ダブルプローブ法の電場測定原理

ニズムに関する解析例を紹介する。

2. 数値手法およびシミュレーションモデル

解析には、我々が独自に開発した数値ツールである EMSES (ElectroMagnetic Spacecraft Environment Simulator) [5] を用いる。本ツールは Particle-in-Cell 法に基づく、衛星プラズマ間相互作用解析ツールであり、静電界のみならず磁場の時間変化もセルフコンシステントに扱えることを特徴としている。ただし本報告で取り扱う現象は、静電近似で取り扱うことが十分に可能なため、EMSES を静電粒子コードとして使用し、計算時間の短縮を図っている。

図 2 にシミュレーションモデルを示す。衛星本体とダブルプローブ観測機器は完全導体としてモデル化した。ブームを含む衛星本体とプローブ部分は独立した電位を持つものとして扱っており、それぞれがプラズマ電流収支に基づく浮遊電位を有している。ただし実際の観測機器に搭載されているバイアス電流回路を考慮し、ある一定値の電荷量を毎計算ステップ衛星からプローブに供給している。これに加え、ブームとプローブの間に独立した光電子ガード電極とスタブ電極を配置している。これらの電極と衛星もしくはプローブとの電位差を入力パラメータで決定できるようにコーディングしてある。実際の電位設定については、ガード電極の効果に着目する 3 節で具体的に述べる。

上記の衛星モデルを希薄背景プラズマで満たされた計算空間の中央に配置した。そして太陽光照射方向を想定し、衛星やプローブの日照面から光電子放出を模擬した。このとき図 2 に示すように、光電子は背景プラズマに比べ高密度で低温であると設定した。3 節の解析では、太陽光照射方向を図のように変化させ、照射角度 θ に対する依存性に着目した。4 節では照射角度は $\theta = 0^\circ$ に固定した。このような初期条件の下、衛星・プローブ電位が定常状態になるまで、十分なタイムステップ数計算を行った。

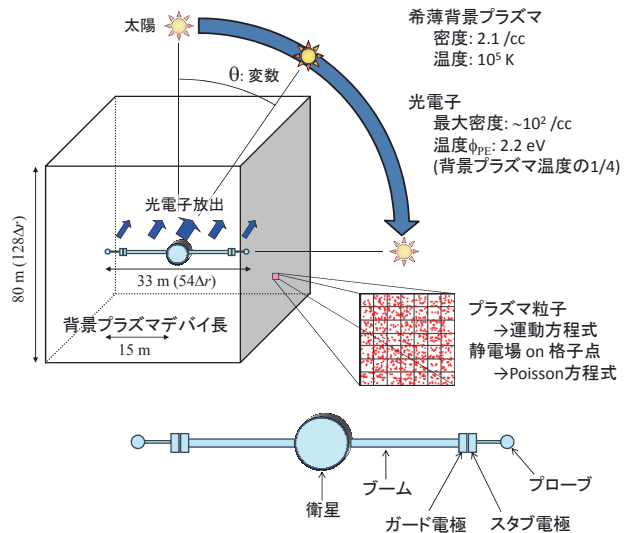


図 2. シミュレーションモデル

3. 高密度光電子に起因するスプリアス電界

図 3 に $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の 3 ケースにおける衛星周辺光電子密度分布を示す。各ケースにおいて衛星の太陽光照射面に光電子高密度領域が形成されていることが確認できる。ブームやプローブからも光電子は放出されているが、衛星に比べ表面積が小さいため、表面での光電子密度は衛星表面のそれより低くなっている。ただし右側のブーム表面の光電子密度は θ の増大に伴って明らかに高くなっている。これは衛星表面から放出された光電子がブーム表面に沿って移動していることに起因している。衛星およびブームは正に帯電していて光電子を捕捉するため、光電子の移動がブーム伸展方向に制限されているとみられる。

光電子密度分布図より θ が増大するのに伴い、より多数の衛星起源光電子が右側のプローブに接近していると考えられる。この傾向がプローブ電位に及ぼす影響を調査するため、左右それぞれのプローブ電位およびその間の電位差の θ 依存性を図 4 に示す。右側のプローブの電位は θ の増大に伴って、急速に低下していることがわかる。これは、光電子密度分布図から想定されるように、多数の光電子が右側プローブに向かって移動しているためである。またこれとは反対に右側のプローブ電位は θ の増大とともに若干の上昇傾向を示している。この原因としては $\theta = 0^\circ$ において左側プローブに向

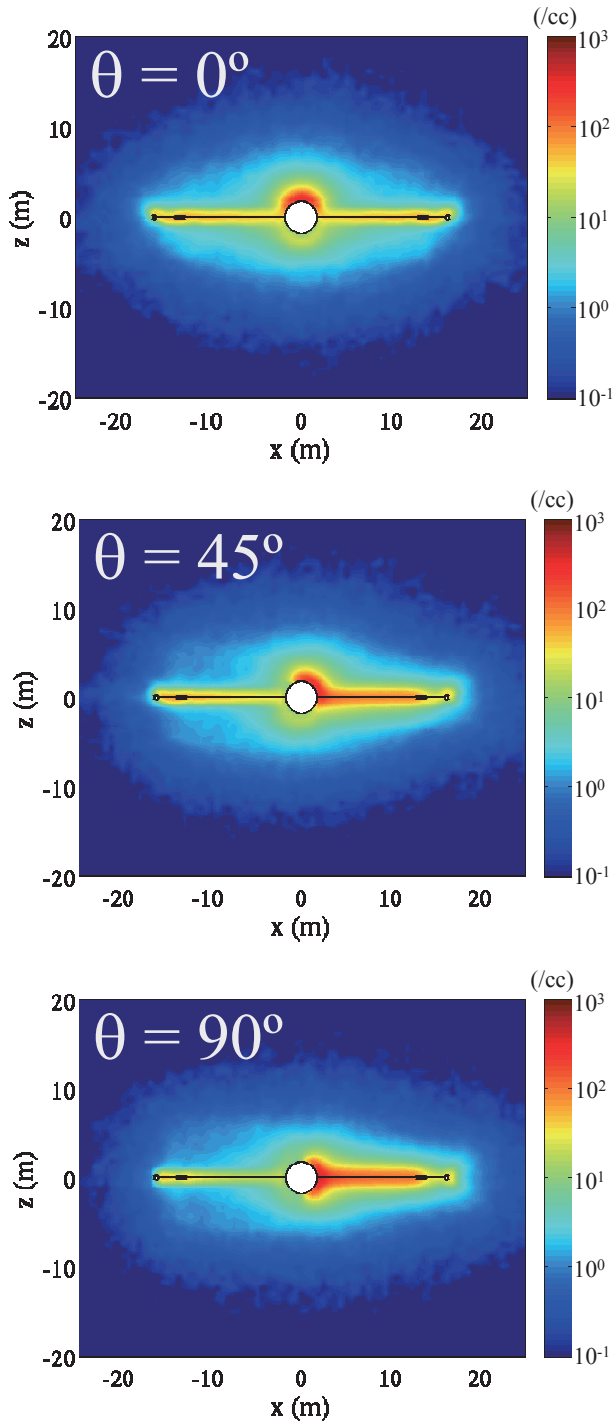


図3. $\theta=0^\circ$ 、 45° 、 90° の3ケースにおける衛星周辺光電子密度分布

かって移動していた少数の光電子が、 θ の増大とともにさらに少なくなったことが考えられる。これらの結果として発生する両側のプローブ間の電位差は、有限の強度のスプリアス電界として測定される。なお、図4より電位差すなわちスプリアス電界強度はおおよそ θ の \sin 関数となっていることから、スピン面内で回転するダブルプローブの

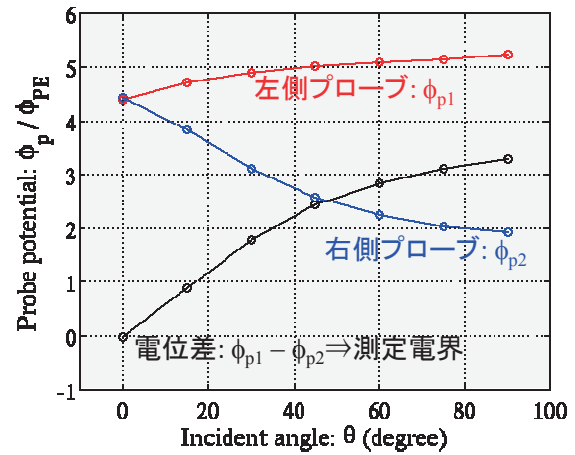


図4. 左右プローブ電位およびその間の電位差の太陽光照射角度依存性（ガード電極未使用）

場合、スプリアス電界は太陽方向電界として観測されることが示唆される。これは Cluster 衛星等で報告されているスプリアス電界の観測例と一致している[6]。

本解析で再現されたスプリアス電界の形成要因を細かく検討すると、次の2つに分別することが可能である。一方は、衛星の右側に形成されている高密度光電子雲の負電荷により正方向の電界が発生し、観測されているものである。他方は、衛星起源の光電子が右側のプローブ位置まで到達して吸収されることにより、直接にプローブ電位を引き下げているものである。そこで光電子雲の電荷とプローブ表面電荷が作る電位構造を区別し、詳細に分析した結果、後者の要因がより大きくスプリアス電界の形成に寄与していることを見出した。このことから、スプリアス電界の抑制には、衛星起源の光電子がプローブに流入するのを防ぐことが重要であり、衛星右側のブーム周辺に形成される光電子雲を除去する必要は必ずしもないことが判明した。

そこで次にブームとプローブの間に設置したガード電極に負の電位を与えることで、衛星起源の光電子のプローブ流入を抑制することを試みた。今回はガード電極に、衛星に対して $8\phi_{PE}$ 低い電位を与えることとした（ただし ϕ_{PE} は光電子温度に対応する電位）。一方でスタブについてはプローブに対して $2\phi_{PE}$ 高い電位を与えた。このガード電極を

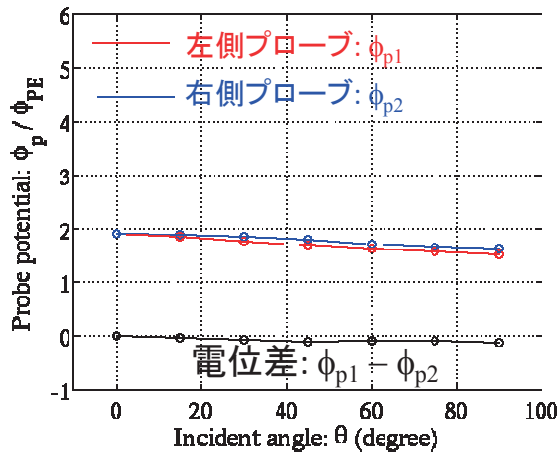


図5. 左右プローブ電位およびその間の電位差の太陽光照射角度依存性（ガード電極使用）

使用した際のプローブ電位およびその間の電位差の θ 依存性を図5に示す。図より明らかなように、 θ の変化に伴うプローブ電位変動が抑制され、結果としてスプリアス電界が非常に小さい値に抑えられていることが確認できた。本シミュレーション解析により、衛星起源の光電子に起因するスプリアス電界の抑制にプローブ周辺に設けたガード電極の使用が効果的であることが実証された。

4. プローブの電流電圧特性解析

次に、光電子がプローブの電流電圧特性に及ぼす影響について解析を行った。ダブルプローブ法では、プローブに与えるバイアス電流の値を制御することにより、電流電圧特性カーブ上でのプローブ動作点を決定する。動作点における電流電圧特性カーブの傾きはプローブ・プラズマ間の抵抗を与えることが知られているが、この抵抗値は電場計測の較正時に必要なパラメータとなる。また電流電圧特性カーブを利用することで衛星の帯電値を実測することも可能である。上記のことから、プローブの電流電圧特性を正確に把握しておくことは重要である。

本解析では θ の値を 0° に固定し、バイアス電流を様々に変えた複数のシミュレーションを行うことにより、数値的にプローブ電流電圧特性カーブを取得した。シミュレーションによって得られた特性カーブを図6赤線に示す。これに加え、光電

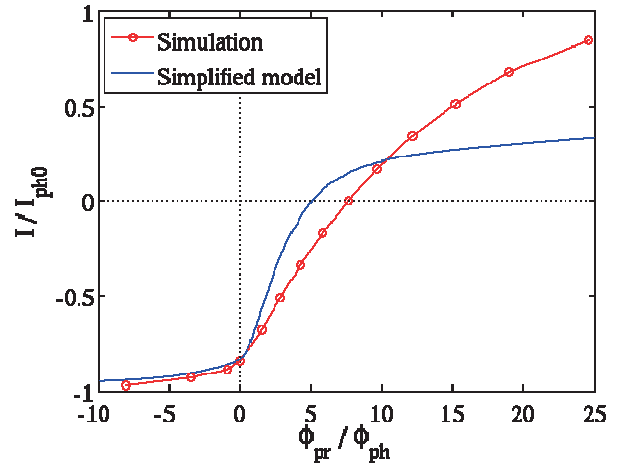


図6. プローブ電流電圧特性（赤：シミュレーション結果、青：単純化モデル）

子環境下におけるプローブ電流電圧特性が、一般的には光電子放出電流と背景電子流入電流でモデル化されることを考慮し、この単純化モデルにより求まる特性カーブも青線で示した。

図から明らかなように、シミュレーションによって求まった特性カーブは単純なモデルによるそれとは大きく異なっている。具体的には①シミュレーション結果では、プローブ電位 $0 < \phi_{pr} / \phi_{PE} < 5$ において、カーブの勾配が緩やかになっている。②単純化モデルで $\phi_{pr} / \phi_{PE} \sim 5$ に見られる勾配の変化がシミュレーションではほとんど見られず、 ϕ_{pr} の増大に伴って急速に電流 I が増加している。実際の電場計測では $\phi_{pr} > 0$ かつ $I < 0$ の領域にプローブ動作点を設定するため、①で述べたシミュレーションとモデルでの勾配の差（プローブ・プラズマ間抵抗の差）は重要な結果である。

この差異の原因を調査するため、プローブの電流電圧特性カーブを光電子や背景プラズマ電子など電流成分毎に分離して解析を行った。図7にその結果を示す。図7(a)には光電子放出電流と背景プラズマ電子流入電流成分を示した。シミュレーション結果と重ねてプロットした理論解との比較により、これら両電流成分に関しては、解析なモデルによく一致する傾向が得られていることが確認できる。一方、図7(b)には上記以外の電流成分、すなわちプローブと他の導体要素との光電子を介

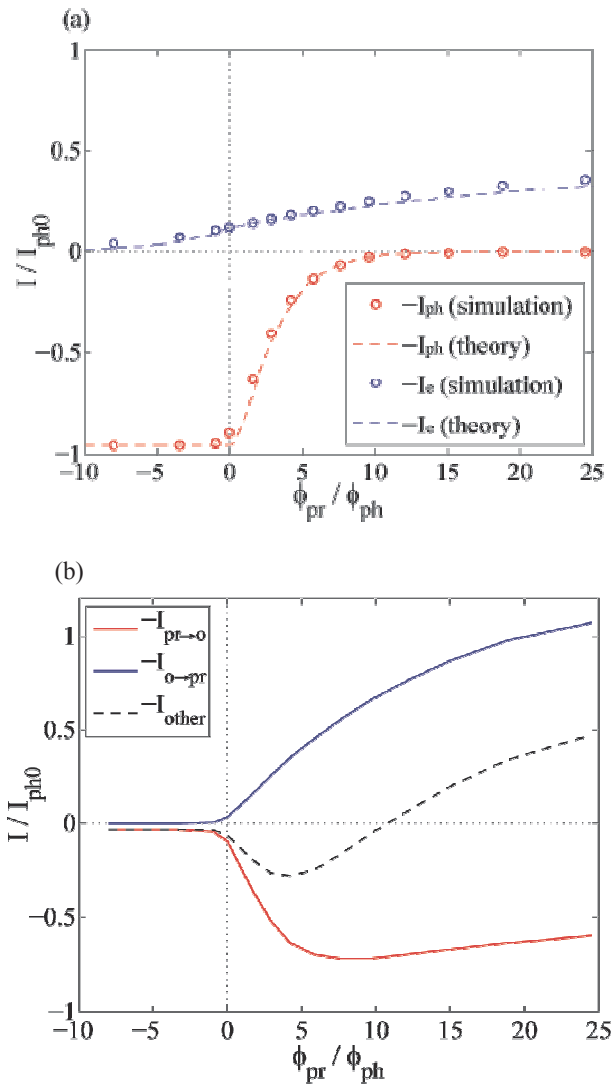


図7. (a) 光電子放出電流および背景プラズマ電子電流、(b) プローブ・他の導体要素間に流れる光電子電流

した電流のやり取りの寄与を示した。これはさらにプローブから他の導体要素へ流れる光電子電流とその逆方向の光電子電流に分離することが可能である。図より、こうした光電子を介した導体間電流成分が相当量存在しており、これが全体のプローブ電流電圧特性に影響を及ぼしていることが判明した。

こうした光電子電流がどのように流れているかを調査するため、衛星システムを構成する各導体要素から放出される光電子の軌道をテスト粒子法により解析した。光電子電流が特に顕著にプローブ電流電圧特性に影響を及ぼしている $\phi_{pr}/\phi_{pe} = +8$ における光電子軌道解析結果を図8に示す。図中

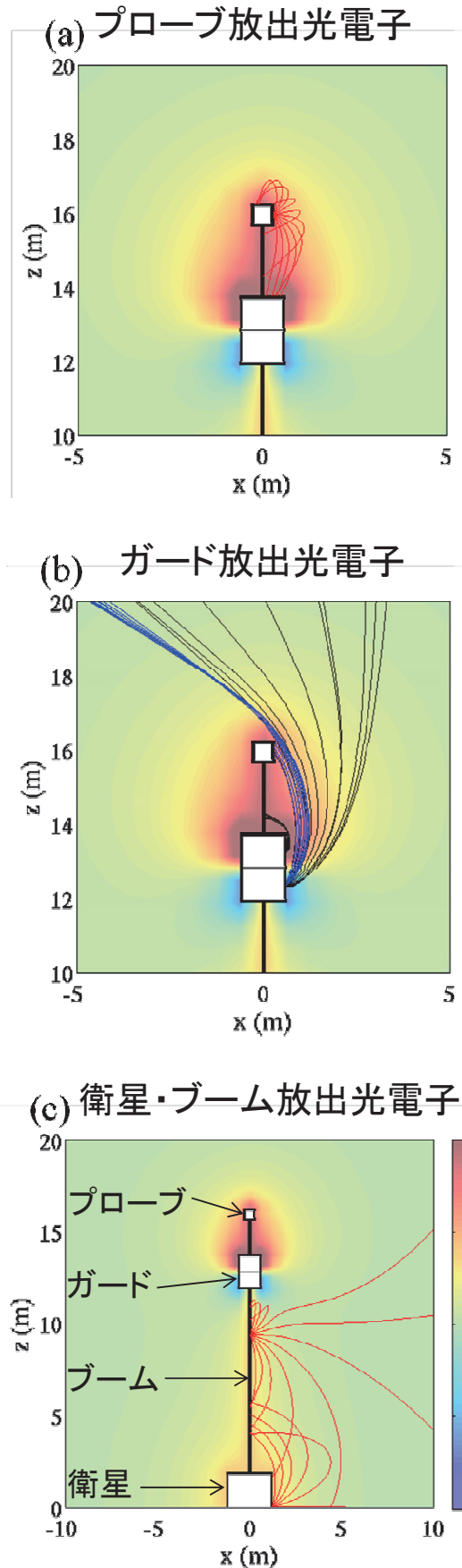


図8. $\phi_{pr}/\phi_{pe} = +8$ における光電子の軌道解析。背景のコンター図は空間電位分布を示す。

の(a)～(c)はそれぞれプローブ、ガード電極、そして衛星本体およびブームから放出される光電子の軌道を示している。まず(a)よりプローブから放出された光電子はほとんどスタブ電極に吸収されていることが分かる。このときプローブは背景プラズマより高電位を持つため、光電子はほとんど背景プラズマ中に逃げることができず、プローブより若干高い電位を持つスタブ電極に吸収されていると考えられる。次に(c)から明らかのように、衛星およびブームから放出された光電子はガード電極の効果により、はじき返されプローブにはほとんど到達していない。一方そのガード電極そのものから放出された光電子の一部は高電位をもつプローブに到達していることが(b)より確認できる。

以上の結果より、ガード電極は衛星起源の光電子のプローブへの到達を防ぐには有効であるが、ガード電極自体から放出される光電子について注意を払う必要があることが示された。

5. まとめ

本研究では、衛星周辺に形成される高密度光電子環境がダブルプローブ法を用いた電場測定に及ぼす影響を明らかにするために、プラズマ粒子シミュレーション解析を行った。結果として以下の知見が得られた。

- ①衛星表面から放出された光電子は、衛星と同じく正に帯電しているブームに沿って遠距離まで到達する。
- ②太陽光がプローブ伸展方向から照射する場合、ブームに沿って移動した光電子が片方のプローブに過大に流入し、両側のプローブ間に電位差が生じる。これが結果として太陽光照射方向のスプリアス電界として観測される。
- ③プローブとブームの間に設置したガード電極を負に帯電させることで衛星起源光電子のプローブへの流入を低減し、スプリアス電界発生を抑制できる。
- ④プローブ電位が背景プラズマ電位より高いときに、プローブと他の導体要素の間に光電子を介し

た電流経路が形成され、プローブ電流電圧特性を変化させる。

- ⑤光電子ガード電極は衛星起源光電子のプローブ流入を抑制するのに有効であるが、一方で電極自体から放出される光電子に注意を払う必要がある。

以上の結果を踏まえ、ガード電極自体が放出する光電子の影響を最小化できるような電極形状や配置の検討を今後の課題とする。また光電子とともにスプリアス電界の原因とされる衛星ウェイクの電場観測への影響についても取り組む。

6. 参考文献

- [1] Fahleson, U., Theory of electric field measurements conducted in the magnetosphere with electric probes, Space Sci. Rev., 7, 238-262, 1967.
- [2] Pedersen, A. et al., Quasistatic electric field measurements with spherical double probes on the GEOS and ISEE satellites, Space Sci. Rev., 37, 269-312, 1984.
- [3] Tsuruda, K. et al., Electric field measurements on the GEOTAIL satellite, J. Geomagn. Geoelectr., 46, 693-711.
- [4] Pedersen, A. et al., Electric field measurements in a tenuous plasma with spherical double probes, in Measurement Techniques in Space Plasmas - Fields, edited by R. F. Pfaff et al., 1-12, AGU, Washington DC.
- [5] Miyake, Y. and H. Usui, New electromagnetic particle simulation code for the analysis of spacecraft-plasma interactions, Phys. Plasmas, 16, 062904, 2009.
- [6] Khotyaintsev, Calibration Report of the EFW Measurements in the Cluster Active Archive (CAA), Issue 2, available at http://caa.estec.esa.int/documents/UG/CAA_EST_UG_EFW_v20.pdf.