

太陽近傍プラズマ環境下での科学衛星帯電に関する 粒子シミュレーション

三宅洋平、臼井英之（神戸大学）、ISSI 衛星プラズマ相互作用研究チーム

概要 将来の科学衛星探査ミッションに向け、人類未踏の極限宇宙プラズマ環境における衛星プラズマ相互作用を定量的に理解する必要がある。本発表では、そうした課題の一例として太陽探査衛星・プラズマ間相互作用に関する数値シミュレーション研究の取り組みを紹介する。太陽外部コロナ中など極太陽近傍環境では、高密度(7000 /cc)太陽風に起因する短デバイ長プラズマや、衛星表面からの大量の光電子・二次電子放出により、地球磁気圏近傍とは大きく異なるプラズマ環境が衛星周辺に形成される。これにより、光電子放出時にも関わらず衛星電位が負となるなど、特徴的な衛星帯電現象が見られる。本課題では Particle-in-cell 法に基づく大規模数値シミュレーションにより、現在 NASA で計画されている Solar Probe Plus を想定した定量解析を行う。衛星表面上に電位バリアが形成される条件下での衛星帯電の様相や、衛星周辺の電磁的じょう乱やそれがプローブ等の観測機器の動作に与える影響について最近の解析の進捗を報告する。

1. 太陽探査衛星 Solar Probe Plus

近年、科学衛星を用いた宇宙プラズマ探査計画は、太陽近傍や惑星圏、もしくは太陽系外縁部など、その対象の拡がりを見せつつある。それに伴い、衛星システムと周辺プラズマの相互干渉もこれまでに経験しなかったような様相を見せる可能性がある。

NASA が米国内の関連研究グループと共同で計画する Solar Probe Plus（以下 SPP）衛星は太陽半径のわずか 8.5 倍に相当する 590 万 km の位置まで太陽に接近して観測を実施し[1]、太陽近傍の磁場構造や太陽コロナ・太陽風プラズマの加熱／

加速機構の解明を目的としている（図 1）。衛星周辺環境はデバイ長が数 10 cm のオーダーの太陽コロナプラズマと衛星表面から放出される大量の光電子・二次電子により特徴づけられる[2]。通常、日照時の衛星は正に帯電するが、先行研究においては超高密度の光電子・二次電子が存在する場合には、衛星が逆に負に帯電する可能性が示唆された[2]。この現象は、プラズマ導体相互作用の特異性を示すものとして注目される。

本研究では、プラズマ粒子シミュレーション手法を駆使して衛星と太陽近傍プラズマ環境間の相互作用の様相を事前評価する。特に、科学衛星探

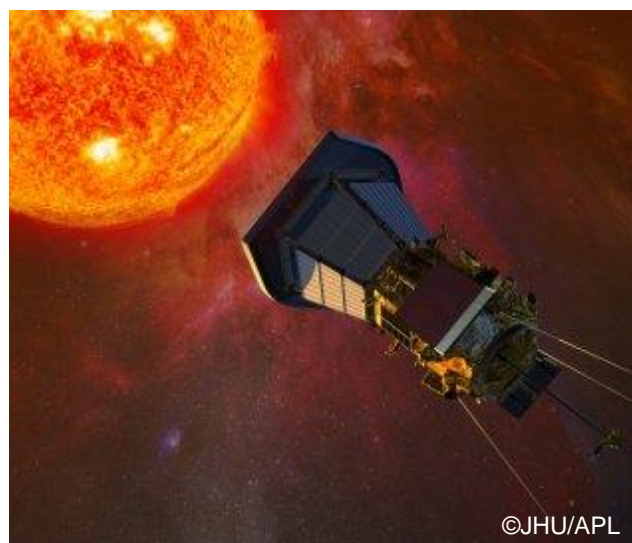


図 1. Solar Probe Plus ミッションの想像図

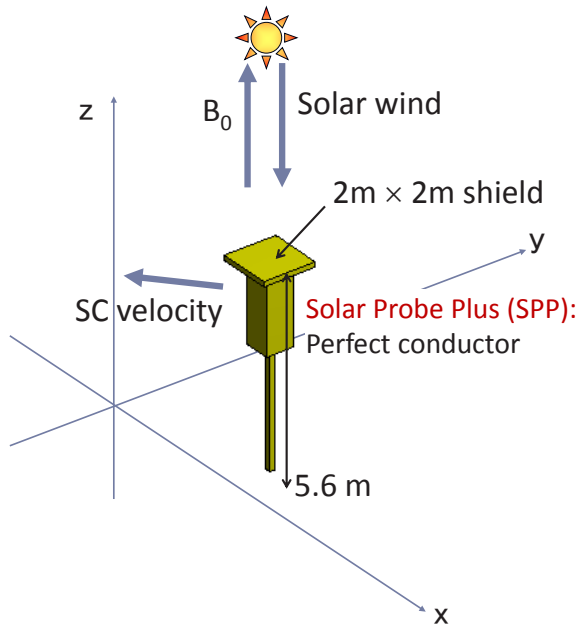


図 2. シミュレーションモデル

査の主目的がプラズマや電磁場の「その場」観測であることに鑑み、衛星自体の帯電値のみならず周辺のプラズマ環境のじょう乱にも着目した詳細解析を行う。

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) [3]を用いる。本ツールは Particle-in-Cell 法に基づく、衛星プラズマ相互作用解析ツールである。衛星帯電解析用の数値ツールとしては、我が国で開発された MUSCAT を初め、NASCAP や SPIS など各国で精力的に開発が行われているが、本コードでは特に静電界のみならず磁場の時間変化をもセルフコンシステントに扱えること（電磁モデル）を特徴としている。

図 2 にシミュレーションモデルを示す。本衛星モデルは衛星本体に加え、衛星を熱から保護するシールドと磁場センサーを伸展するためのブームから成る。現状では簡単化のため、各物体表面は完全導電性物質でコーティングされていると仮定する。同図中 z 軸正方向に太陽があることを想定し、シールドからの光電子放出を模擬している。また衛星表面からの二次電子フラックスは一次電

Background plasma	
Distance from the Sun	0.044 AU
Density: n_0	7000 /cc
Electron temperature: T_e	85 eV
Proton temperature: T_i	82 eV
Flow speed: v_{flow}	300 km/s
Photoelectron	
Current density: J_{ph}	16 mA/m ²
Temperature: T_{ph}	3 eV
Secondary electron	
E_{max}	300 eV
δ_{max}	2.5
Temperature: T_{se}	2 eV
Other parameter	
SC orbital velocity: v_{orb}	150 km/s
Static magnetic field: B_0	2 μ T

表 1. シミュレーションパラメータ

子のエネルギー E と入射方向 θ から次の式で計算している[4]。

$$\delta(E, \theta) = \frac{1.114\delta_{\text{max}}}{\cos \theta} \left(\frac{E_{\text{max}}}{E} \right)^{0.35} \times \left\{ 1 - \exp \left[-2.28 \cos \theta \left(\frac{E}{E_{\text{max}}} \right)^{1.35} \right] \right\}$$

ここで E_{max} と δ_{max} は二次電子放出量が最大値をとる一次電子エネルギーとそのときの放出個数である。背景プラズマには太陽風速度 300 km/s と衛星軌道速度 150 km/s を考慮した斜めの (z 軸方向から 27° 傾いた) フローを与える。また太陽風の磁場が z 軸と平行な方向に存在することを想定する。具体的なシミュレーションパラメータを表 1 に示す。

本解析はスイスに本拠地を置く International Space Science Institute (ISSI)の国際研究プログラムの一つに採用されており、各国の衛星プラズマ相互作用研究者による共同研究として実施されている。この活動の一環として、SPIS と EMSES を含む 5 つの衛星帯電解析ツールを用いた Cross Code Comparison を実施しており、コード間の誤差が数%以内に収まることを確認している[5]。

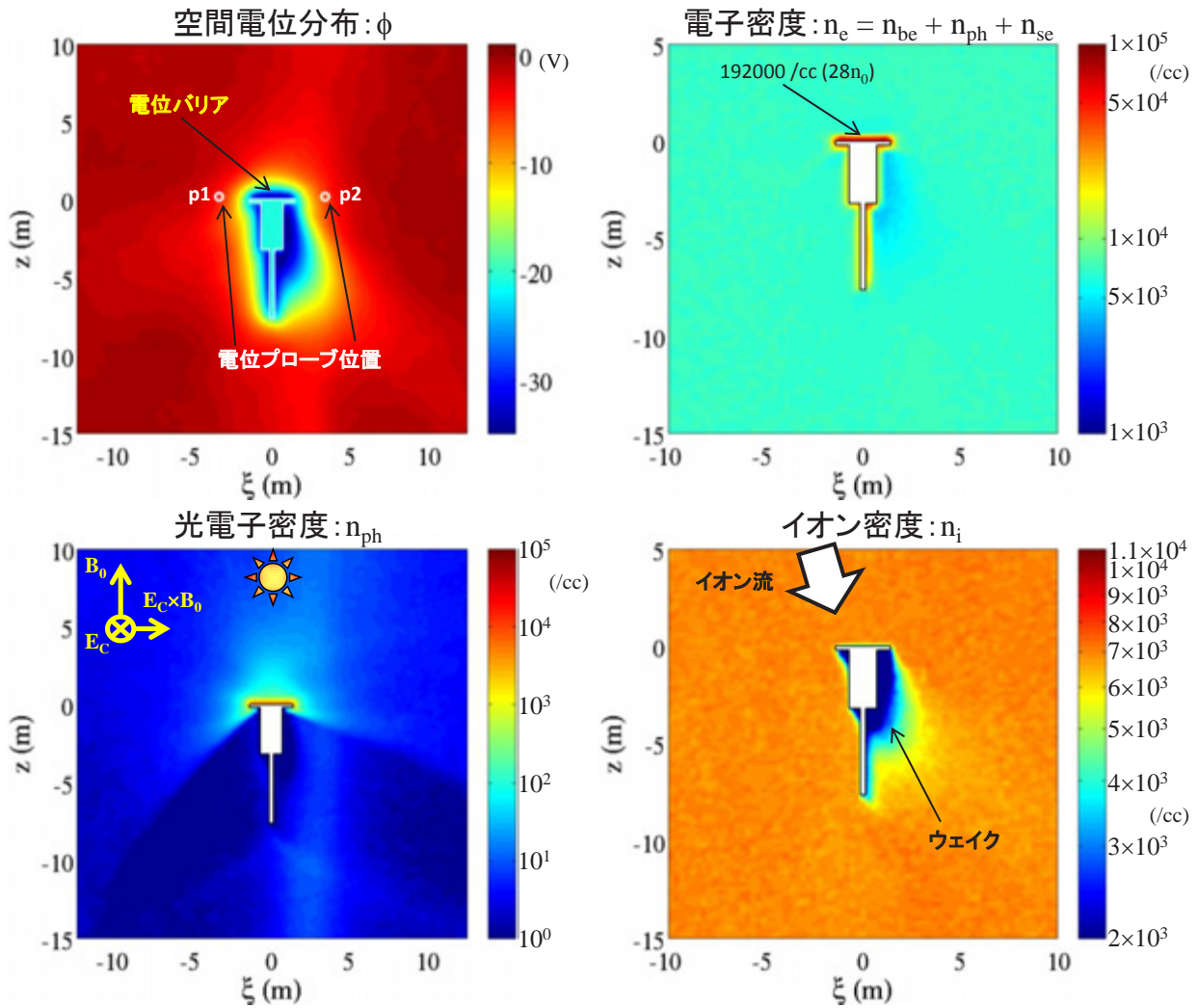


図 3. EMSES シミュレーションによって得られた空間電位分布、電子密度分布、光電子密度分布、およびイオン密度分布

3. SPP 周辺の空間電位およびプラズマ分布

図 3 は、EMSES コードによって得られた SPP 衛星周辺の空間電位分布と全電子／光電子／太陽風イオン分布のシミュレーション結果である。計算結果より衛星の定常電位は -20.5 V となり、背景プラズマと比較して負に帯電していることが確認される。しかし、衛星表面から放出される光電子と二次電子フラックスを考慮し、衛星表面における電荷流出入バランスに基づいて簡易評価を行うと、衛星は正に帯電すると予想され、本シミュレーション結果とは異なる。この原因としては、衛星表面に存在する超高密度の光電子および二次電子層とそれに伴って形成される負の電位バリア

の影響であると考えられる (図 4)。

すなわち衛星表面から放出された大量の光電子や二次電子のほとんどは空間電荷効果により衛星表面に押し戻されてしまうため、正味の電子放出量としては背景プラズマ電子の流入量より小さくなり、結果として衛星が負に帯電していると説明できる。衛星と電位バリア部分の電位差はおよそ 10 V 程度であり、 3 eV もしくは 2 eV の温度を持つ光電子や二次電子を反射するのに十分な電位差である。実際にシミュレーションデータより 87.0% の光電子と 85.8% の二次電子が電位バリアの影響により衛星内に再吸収されていることが確認され、この解釈を裏付ける結果となった。

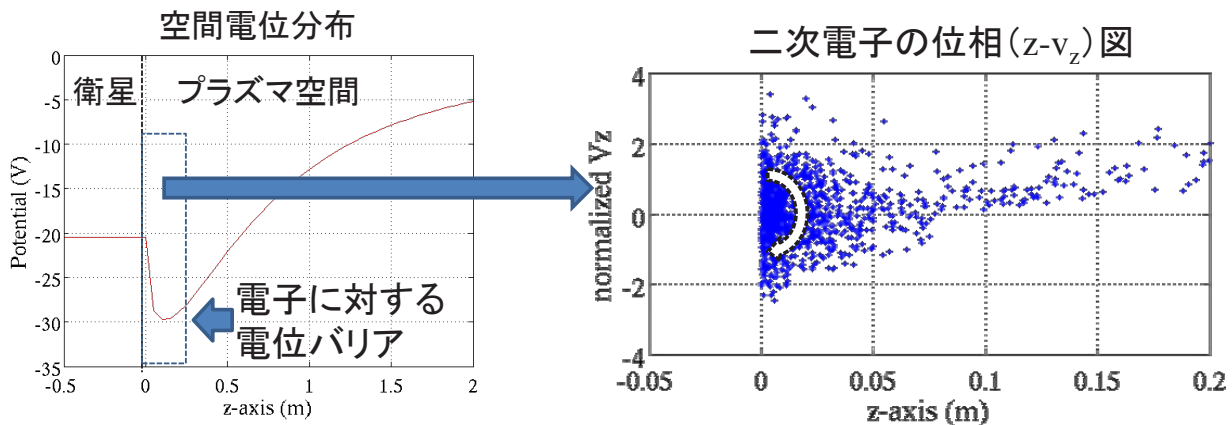


図 4. 1次元空間電位分布（左図）および放出二次電子の位相プロット（右図）。衛星表面から放出された二次電子の大部分が衛星表面に再吸収されている。

このような電位バリアの形成は衛星表面電子密度に対応するデバイ長が衛星のサイズや背景プラズマのデバイ長に比べて小さくなる場合に顕著になることが示唆されている[2]。本シミュレーションで得られた衛星表面での最大電子密度に対応するデバイ長は4~5 cmと見積もられ、この条件に合致することがわかる。また本条件下では衛星帯電値が衛星サイズに強く依存する（衛星サイズが大きい程、より低電位となる）ことも、追加シミュレーションにより明らかになった。これは地球磁気圏環境における静電プローブ理論とは異なる知見であり、衛星搭載観測機器の設計上留意すべき点である。

次にプラズマの分布、特に背景プラズマイオンと光電子密度に着目する。背景プラズマイオンに関しては、熱速度がフロー速度に比べて小さいため、衛星の後方に低密度領域すなわちウェイクが形成されていることがわかる。ウェイク長は熱速度とフロー速度の比（より正確には熱速度とイオン音波速度との比）から見積もられる長さより短くなっているが、これは衛星の負電位によりイオン軌道が偏向させられ、より衛星に近い領域で収束点を形成するためである。

光電子については先述したようにそのほとんどは衛星表面に再吸収されるが、高エネルギーを持つ一部の電子は電位バリアを乗り越え、衛星シールド部分から放射状に拡がっている。特に電位バ

リアに反射された一部の電子は下流方向の速度成分を持って衛星から遠ざかっている。より詳細にみると光電子は衛星軸（z軸）を中心に左右で非対称な分布をもっていることがわかる。これは背景プラズマフロー方向が背景磁場方向（z軸）から傾いていることに起因する対流電場が紙面垂直方向に存在するためである。光電子はこの対流電場と背景磁場による $E \times B$ ドリフトにより図中z軸正方向へと流れるため、左右で非対称な分布となる。

4. 科学衛星観測への影響

太陽近傍環境における衛星周辺プラズマじょう乱が衛星による「その場」観測に与える影響を評価するため、衛星ブーム位置での磁場強度と衛星から伸展されるプローブ位置での電位に着目した。ただし今回はプローブ自体の電流収支を考慮しておらず、プローブ位置での空間電位による簡易評価である。

前節で紹介したシミュレーションにおいては、背景磁場からの変化分として数 nT の磁場構造が衛星ブーム周辺に形成されることが判明した。磁場はブームを取り囲むように環状に発達しており、沿ブーム電流を示唆するような磁場構造となっている。実際に、これはブームに沿って二次電子が下流方向に流出することによって発生する磁場であることが確認された。数 nT の磁場は地球周辺

環境では無視できない強度だが、太陽近傍では太陽風磁場強度やアルフベン乱流による磁場変動のオーダーが数 μT と予測されていることから、今回判明した磁場変動の影響は直ちに問題となるものではないと考えられる。

一方、SPPの電場計測においてはシールドの裏側から径方向に伸展した2対のプロープの電位差を計測する。本シミュレーションでは衛星から \pm 方向に進展した一対のプロープ間に1~2 Vの電位差が生じることが判明した。背景プラズマ中には \pm 方向に電場は存在しないため、これは衛星周辺のプラズマじょう乱に起因する電位差である。この電位差はプロープで計測される電場としては数100 mV/mに相当し、100 mV/mのオーダーの対流電場や1 V/mのオーダーのアルフベン波およびショック由来電場に比べても無視できない水準である。先行研究においては衛星の下流においてウェイク構造の非対称性に起因する電位差がプロープ電位に影響する可能性が示唆されているが[6]、今回のシミュレーションにおいては衛星シールド周辺に配置したプロープ位置においても無視できない電位差が生じうることを示した。この原因の一つとして、前節で紹介したように、光電子や二次電子の分布が背景磁場と対流電場が関与する $E \times B$ 効果により非対称になることが挙げられる。

5. まとめ

本研究では、太陽近傍におけるプラズマ環境が科学衛星システム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衛星表面から大量の光電子および二次電子が放出されるにもかかわらず、衛星は負に帯電する。
- ②上記の結果は、衛星表面に超高密度の電子層が存在し、負の電位バリアが形成されることによる。衛星からいったん放出された電子の85%以上がこの電位バリアに反射され、衛星に再吸収される。
- ③電位バリアが形成される条件下における衛星電位は衛星サイズと衛星表面電子層のローカルデバイ長の間の比に強く依存する。

④SPP衛星から流出する二次電子が作る電流により、ブーム周辺で数 nT の磁場変動がみられる。

⑤SPP衛星下流のウェイクおよびシールド付近の光電子・二次電子分布の非対称性により、数100 mV/mのスプリアス電場が発生する。

上記のうち、スプリアス電場の発生は科学衛星観測計画に相応の影響を及ぼす可能性がある。今後はプロープ部分を含めたより現実的な数値モデルを作成し、定常電場のみならず変動電場も含めた定量解析を行う予定である。

6. 参考文献

- [1] Solar Probe Plus: Report of the Science and Technology Definition Team, NASA Technical Memorandum 214161, July 2008.
- [2] Ergun, R. et al., Spacecraft charging and ion wake formation in the near-sun environment, *Phys. Plasmas*, 17, 072903, 2010.
- [3] Miyake, Y. and H. Usui, New electromagnetic particle simulation code for the analysis of spacecraft-plasma interactions, *Phys. Plasmas*, 16, 062904, 2009.
- [4] Katz, I. et al., NASCAP, a three-dimensional charging analyzer program for complex spacecraft, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-24, 2276-2280, 1977.
- [5] Marchand, R. et al., Cross-comparison of spacecraft-environment interaction model predictions applied to Solar Probe Plus near perihelion, submitted.
- [6] Bale, S. D., The FIELDS Experiment for Solar Probe Plus: Science, Measurements, Overall Concept, 4th Solar Orbiter Workshop, 2011.