

## 極域飛翔体周辺のプラズマじょう乱に関する粒子シミュレーション

佐々木紫\*, 臼井英之, 三宅洋平 (神戸大学), Wojciech J Miloch (オスロ大学)

\*E-mail: yukari1425b@gmail.com

極域電離圏では、様々な空間スケールをもつプラズマ密度の疎密構造が形成されることが知られている。しかし、飛翔体周辺に生じるウェイクやシースといったプラズマじょう乱が飛翔体による「その場」観測に及ぼす影響は、十分に理解されているとは言い難い。そこで、数値シミュレーションを利用し、飛翔体周辺のじょう乱を時間的及び空間的に解析することでその発生メカニズムを解明する。本論文ではプラズマ粒子シミュレーションの結果から見出された、ウェイク構造の歪みと電子の運動の関連性について報告する。

### 1. 目的および背景

ノルウェーでは極域電離圏における電磁気環境観測のために ICI キャンペーンと呼ばれるロケット実験が行われている[1]。飛翔体により宇宙空間にプラズマじょう乱が生じ、観測に干渉するおそれがあると考えられており、実際に ICI-3 ロケットにおいてプラズマじょう乱による観測データの誤差が確認された[2]。観測データの誤差要因を特定し、現象の本質を浮き彫りにするためにはプラズマ粒子の運動やそれによって生じる電磁場変動を仮想空間上で再現できる、数値シミュレーションが有効であると考えられる。本研究では3次元プラズマ粒子シミュレーションを実施することで、飛翔体周辺のじょう乱の発生メカニズムを明らかにすることを目的とする。

### 2. 計算手法とモデル

本研究では、PIC(Particle-in-Cell)法[3]を採用した3次元衛星環境シミュレータ「EMSES」を利用する。本手法では格子点上に与えられた電磁場と空間上の任意の位置・速度をとる粒子との相互作用を解き進める。

図1のように20cm立方の衛星を模した完全導体を128cm立方のシミュレーション空間内の中心に設置した。なお、本シミュレーションでは、衛星の代わりに周辺プラズマが相対的に衛星速度で流れる衛星静止系を採用している。

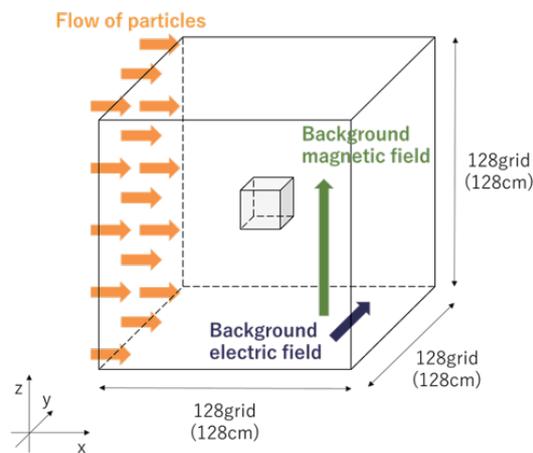


図1 シミュレーション空間モデル

パラメータは背景プラズマ密度  $n_0 = 1.0 \times 10^5$  [/cc]、背景電子温度  $T_e = 3000$  [K]、背景イオン温度  $T_i = 1500$  [K]、プラズマ流速  $v_{flow} = 3C_{ia}$  背景磁場強度  $B_0 = 50$  [ $\mu$ T] とした。ここで  $C_{ia}$  はイオン音速である。また、 $\mathbf{E} = -\mathbf{v}_{flow} \times \mathbf{B}$  を満たす  $\mathbf{E}$  を背景電場として与

えた。このような一様電場は磁場に凍り付いた (frozen-in) プラズマ流を導入するために必要であり、現実の衛星観測でも検出可能な電場である。

粒子一つ一つの運動を調べる際にはテスト粒子シミュレーションを利用する。テスト粒子シミュレーションとは、EMSES シミュレーションにより出力された定常状態での電磁場のデータを利用して、粒子の運動方程式のみを解くシミュレーション手法である。この手法では粒子の初速度  $v_0$  を自由に設定することができる。

### 3. シミュレーション結果

前章で述べた空間モデル及びパラメータで EMSES シミュレーションを行うと、時間が進むにつれて衛星電位の値は収束し、負に帯電することが分かった。したがって、本研究では  $5 \times 10^{-6}$  [s] 以降の状態を「定常状態」と定義する。

衛星-プラズマ空間でのじょう乱のうち代表的なものとしてウェイク領域[4]が挙げられる。これはプラズマ空間を進行する衛星の後方(プラズマ流の下流)にできるほぼ真空の領域を指し、衛星が壁となり後方に粒子が回り込みにくくなるため生じる。

無磁場の場合の電子密度分布及び電位分布を

図 2 に示す。図の中央に位置する正方形が衛星に相当する。衛星の右隣に青色、すなわち電子密度がほぼ 0 の空間が見られる。この空間がウェイク領域である。電子はイオンよりも熱速度が大きく衛星の後方に回り込みやすいため、ウェイク領域の電位は負で上下(Y 方向)に対称な形状であることが分かる。

一様磁場を与えた場合の電子密度分布及び電位分布を図 3 に示す。ただし電位分布に関しては、 $\mathbf{E} = -\text{grad}(\phi)$  を満たす背景電位  $\phi$  を取り除いた値を表示している。衛星の右隣にウェイク領域が広がっているが、その形状は電子密度、電位分布のどちらも図 2 のそれらとは異なり、衛星を貫く X 軸に対して、上下に非対称であることが判明した。この結果は、電子が磁化されることにより、ウェイク領域に歪みが生じることを示唆している。

定常状態では衛星およびウェイク領域はその周辺よりも電位が低いため、衛星近傍においては、図 4 に示すように周辺から衛星の向きの電場が生じる。本研究では磁場は常に +Z 方向であるため、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフトの方向は反時計回りとなる。このドリフト運動とプラズマ流のベクトル和をとると、その方向は図 3 におけるウェイク領域の歪む方向を説明できる。

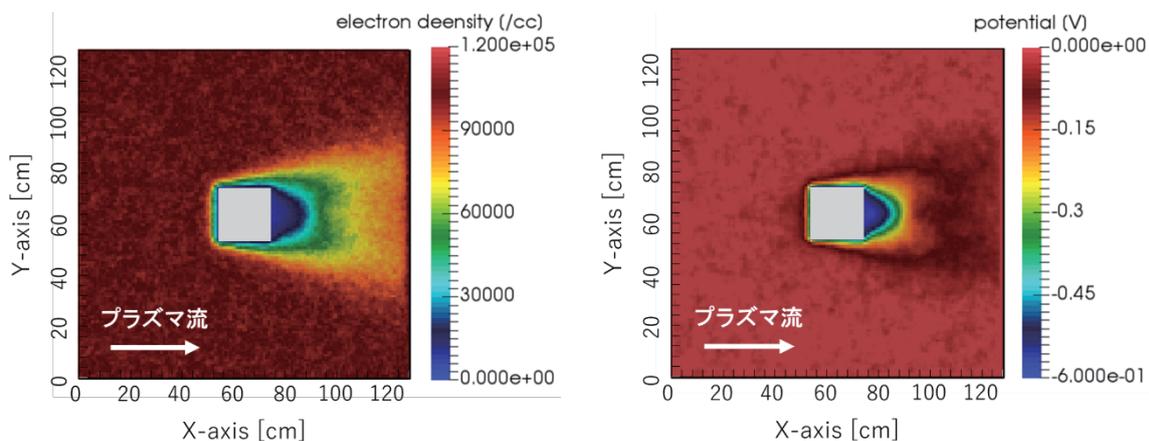


図2 無磁場での電子密度分布(左)及び電位分布(右)

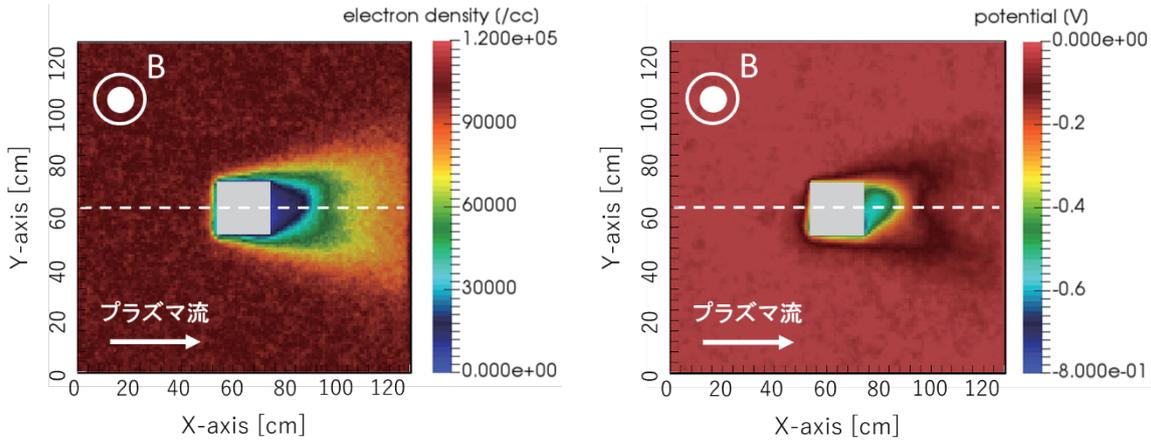


図3 一様磁場を与えた場合の電子密度分布(左)及び電位分布(右)

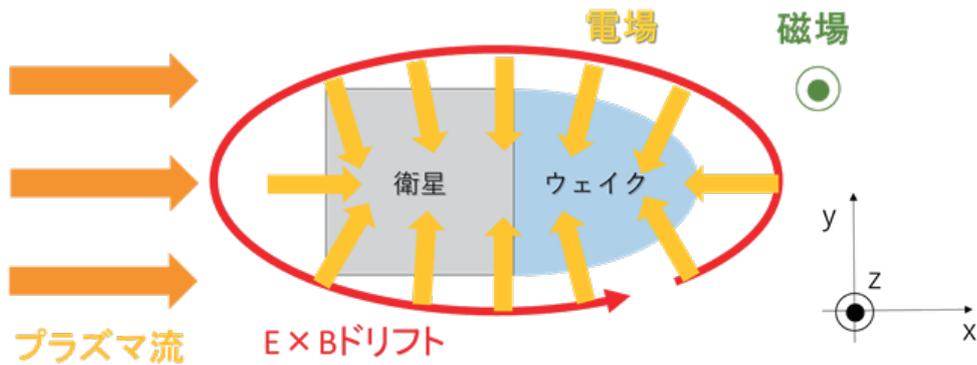


図4  $E \times B$ ドリフトの概念図

なお、 $E \times B$ ドリフトの方向は電荷の正負によらないが、イオンは電子と比べて熱速度がはるかに小さいため、ウェイク領域の非対称性にはほぼ寄与しないと考えられる。

テスト粒子シミュレーションを実行したときの電子の運動の軌跡を図5に示す。ただし  $v_{th} = (\sqrt{8k_b T_e / \pi m_e}, 0, 0)$  とする。初期座標は赤色の十字で示した地点である。衛星より上に配置した電子は反時計回りの円運動をしながら+X方向に進むが、衛星近傍に到達すると押し戻され衛星に吸収される(青色の軌跡)か、衛星近傍を反時計回りに運動し、衛星より下に到達する(赤色の軌跡)ことが判明した。また、衛星より

下に配置した電子は下流、すなわちウェイク領域付近では右上に運動する(黄色の軌跡)傾向にある。

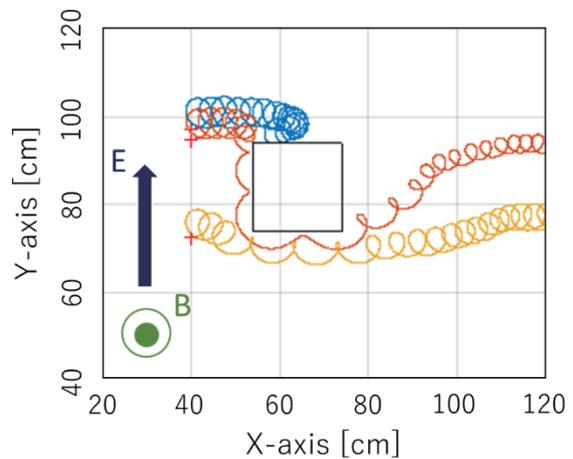
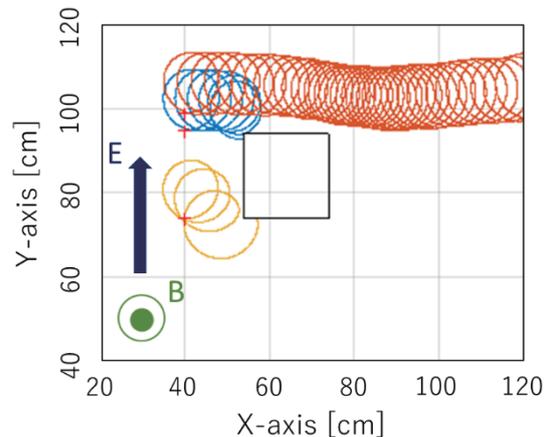
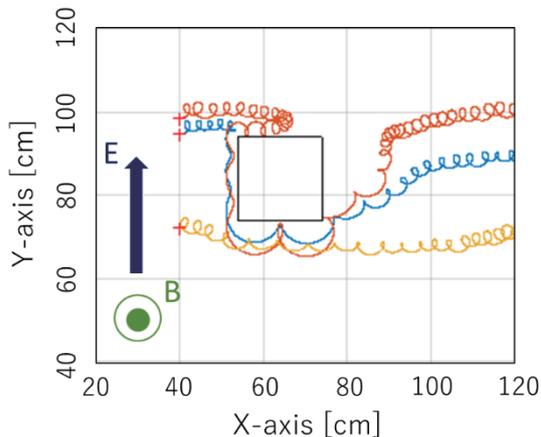


図5 電子の運動の軌跡( $v_0 = v_{th}$ )図6 電子の運動の軌跡( $v_0 = 0.5v_{th}$  (左),  $v_0 = 2v_{th}$  (右))

続いて、初速度を $v_0 = 0.5v_{th}$ 及び $v_0 = 2v_{th}$ に変更して同様のシミュレーションを行ったときの電子の運動の軌跡を図6に示す。 $v_0 = 0.5v_{th}$ とすると、衛星より上に配置した電子が反時計回りに運動する様子が図5と同様に見られた。しかし、 $v_0 = 2v_{th}$ とすると、この傾向が見られなくなった。初速度を大きくすることでラーマー半径が大きくなり電子が衛星近傍に滞在する時間が短くなる。衛星から遠ざかると周辺から衛星の向きの電場の値が減少し、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトの影響も小さくなる。以上の理由から $v_0 = v_{th}$ 及び $v_0 = 0.5v_{th}$ と運動方向の傾向が異なると考えられる。

#### 4. 結論と今後の課題

宇宙飛翔体周辺に生じるプラズマじょう乱が、極域電離圏観測ロケットによる「その場」観測に及ぼす影響を明らかにするため、PIC法に基づくプラズマ粒子シミュレーションを実施した。

その結果、磁化された電子のダイナミクスに起因して、衛星後方に非対称のウェイク構造が形成されることが明らかになった。このことは、衛星近傍に生じる電場と一様磁場による $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトと、プラズマ流とのベクトル和により説明できる可能性が示唆された。また、テスト粒子シミュレーションにより、衛星近傍に到達する電子は、その速度によって運動方向の傾向が異なることが分かった。

図7に示すように、衛星の中心をX方向に貫く軸上(図3の破線部)の電位をプロットすると、ウェイク領域内に衛星( $54 \leq X \leq 74$ の範囲)よりも電位の低い空間があるという結果が得られる。つまり、衛星からウェイク領域に向かう向きにも電場が生じており、図8の破線部のようなドリフト運動をしてウェイク領域に入り込む電子が存在する可能性がある。

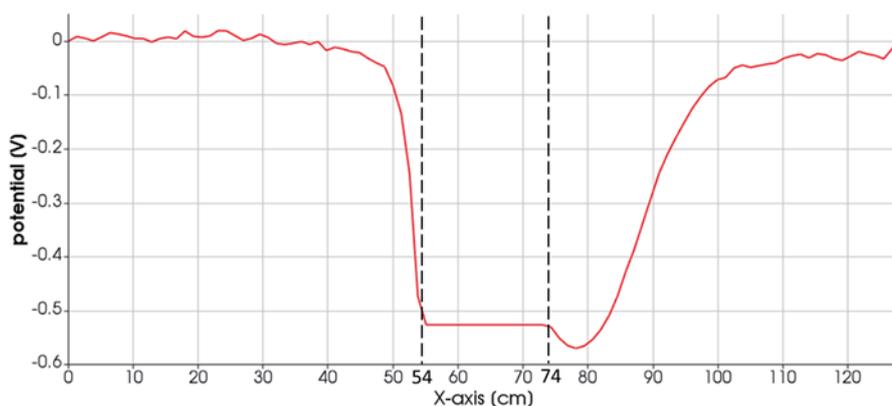


図7 衛星の中心を X 方向に貫く軸上の電位

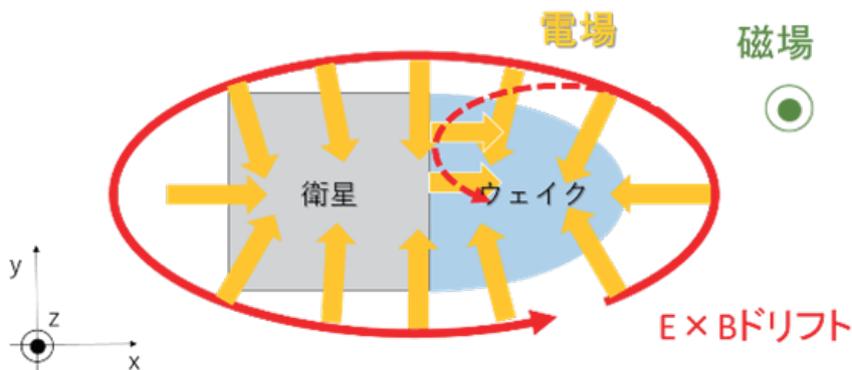


図8  $E \times B$ ドリフトの概念図

ウェイク領域内を通るプローブが検出する電流の値のうち、誤差がどれだけ含まれるか予測するためには、ウェイク領域に侵入する電子の軌跡、速度、数量といった情報が必要である。引き続きテスト粒子シミュレーションを行うことにより、それらの特徴づけることを今後の課題としたい。

参考文献

[1] Ui0: Department of Physics, “The ICI series of sounding rockets,”  
<https://www.mn.uio.no/fysikk/english/research/projects/ici/>  
 [2] Darian, D., Marholm, S., Paulsson, J. J. P., Miyake, Y., Usui, H., Mortensen, M. and

Miloch, W. J., “Numerical simulations of a sounding rocket in ionospheric plasma: Effects of magnetic field on the wake formation and rocket potential,” *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-SPACE PHYSICS*, Vol. 122, No. 9, pp. 9603-9621 (2017)  
 [3] Pritchett, P. L., “Particle-in-cell simulation of plasmas - A tutorial,” *SPACE PLASMA SIMULATION*, Vol. 615, pp. 1-24 (2003)  
 [4] Svenes, K. R. and Trøim, J., “Laboratory simulation of vehicle-plasma interaction in low Earth orbit,” *PLANETARY AND SPACE SCIENCE*, Vol. 42, No. 1, pp. 81-94 (1994)