

電離圏観測ロケットウェイク近傍のプラズマ波動励起に関わる電子の速度分布の数値実験的検討

遠藤 研 [1]; 熊本 篤志 [2]; 加藤 雄人 [1]
[1] 東北大・理・地球物理; [2] 東北大・理・地球物理

Simulation study of spatial distribution of hot electrons generating plasma waves around the wake of an ionospheric rocket

Ken Endo[1]; Atsushi Kumamoto[2]; Yuto Katoh[1]
[1] Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.; [2] Dept. Geophys, Tohoku Univ.

Ionospheric sounding rockets travel in plasma at supersonic velocity with rarefied regions called 'plasma wakes'. In a rocket wake, plasma waves with frequencies near the upper hybrid resonance (UHR) frequency, plasma frequency, and Z-mode cutoff frequency in the wake are observed as reported by Yamamoto [PhD, thesis, Tohoku University, 2001]. From the results of the S-520-26 rocket experiment, Endo et al. [JGR, 2015] suggested that the waves observed in the wake were electrostatic waves such as electrostatic electron cyclotron harmonic (ESCH) waves and UHR mode waves because plasma waves with long wavelengths cannot be generated in narrow region like the rocket wake. They also reported that the waves were observed more clearly when the dipole antenna was in the upstream-downstream direction of the plasma flow than the perpendicular direction. Besides, they showed that whistler mode waves were also observed in directions perpendicular and oblique to the wake axis. These results indicate that there was inhomogeneous spatial distribution of hot electrons with some anisotropic velocity distribution functions around the rocket wake.

In order to investigate inhomogeneity of hot electrons around the rocket wake, we are now developing a Vlasov-Poisson code. In the simulation with this code, we can calculate wake filling process of ambient ions and electrons in one-dimensional space along the x-axis. If we assume that plasma is also flown in y direction, the plasma distribution along x-axis as a function of time (evolution) can be understood as that as a function of distance in y direction.

A similar simulation was performed also by Singh et al. [JGR, 1987]. They focused on electron distribution function on the wake axis within the very near wake of an ionospheric satellite (about $0.1Y_0$ downstream; Y_0 is the distance to the ion convergence region), and showed that counter-streaming electron beams were in the region. This result coincides with the observational results that ESCH waves or UHR mode waves were most intensified when the dipole antenna was in upstream-downstream direction, which was reported in Endo et al. [JGR, 2015]. However, how large the unstable region can spread around the wake has not been revealed; therefore, the observational results in Endo et al. [JGR, 2015] cannot be explained enough.

In our simulation, we will investigate velocity distribution function of plasma around the wake including wake edges and the ion convergence region. In order to calculate longer evolution than Singh et al. [JGR, 1987], we have to suppress the numerical diffusion in the simulation. For this reason, the Vlasov and Poisson's equations are solved with using the splitting method, the leap-frog scheme, the semi-Lagrangian method, and the rational CIP scheme, which were also applied to the simulation of the lunar wake plasma by Abe [Master thesis, Tohoku University, 2006].

In this presentation, we will describe the configuration and scheme of our simulation, and initial results.

電離圏観測ロケットは電離圏大気中を超音速で運動するため、その後方に航跡（ウェイク）と呼ばれる低プラズマ密度領域を形成する。このウェイク中では、ウェイク中の UHR 周波数やプラズマ周波数、Z モードカットオフ周波数付近の周波数帯でプラズマ波動が観測されることが Yamamoto [PhD. thesis, Tohoku University, 2001] によって報告されている。その後、Endo et al. [JGR, 2015] では、S-520-26 ロケット実験でのプラズマ波動観測データをもとに、その波動のモードが短波長の静電波（静電的電子サイクロトロン高調波（ESCH）、UHR モード波動）であると結論された。この波動は、ダイポールアンテナがウェイクの上流-下流方向に向いているときに強く観測されていた。また、この実験ではホイッスラーモード帯でも波動が観測されており、それらはアンテナがウェイクに対し垂直及び斜め方向に向いているときに強く観測されていた。これらの結果は、速度空間上で異方性をもつ電子がロケット周囲のウェイクに対応した空間分布をもち、これに応じてそれぞれのプラズマ波動が励起・成長していたことを示唆している。しかし、ウェイク内外においていかなる速度分布のプラズマがどのような空間分布で存在していたかについては今後検証すべき課題となっている。

そこで我々は、ウェイク近傍における速度分布関数の空間分布について考察するため、一次元の真空中に両側からプラズマが流れ込む現象を模擬するシミュレーションコードを開発している。磁力線方向の1次元空間を仮定し、計算機で解く方程式を電子・イオンのブラソフ方程式及び電場を支配するポアソン方程式に限定する。シミュレーションで再現される粒子の速度分布関数及び電場の時間変化は、それらのウェイク軸方向の空間分布とみなす。

これに類似した数値実験は、既に Singh et al. [JGR, 1987] が電離圏の衛星ごく近傍のウェイク（約 $0.1Y_0$ 下流； Y_0 はウェイク尾部までの距離）について行っており、ウェイク軸上において電子の速度分布が二流体不安定型になることが示されている。これは、ウェイクの上流-下流方向でプラズマ波動が強く観測された Endo et al. [JGR, 2015] の結果を支持している。しかし、この数値実験ではプラズマ不安定の領域がウェイク端や下流域へどの程度広がっているのかは明らかにされておらず、観測結果を十分に説明することはできない。

本研究では、さらに長い時間ステップ数の計算を実施し、ウェイク端やウェイク尾部を含めたより広い空間範囲での速

度分布関数を求めるため、数値拡散を抑える手法を取り入れる。具体的には、ブラソフ・ポアソン方程式を `splitting` 法、`leap-frog` スキーム、セミラグランジュ法、有利関数 CIP 法を用いて解く。これらのスキームは、月ウエイクの密度構造に関する数値実験を行った阿部 [東北大学修士論文, 2006] の手法を参考にしたものであるが、グリッド数・スケール等のパラメータは変更している。

本発表では、シミュレーションの設定や手法について紹介し、数値実験の初期計算結果を報告する。