

1次元静電ブラソフシミュレーションを用いた電離圏観測ロケットウェイク近傍の電子速度分布関数に関する考察

遠藤 研 [1]; #加藤 雄人 [1]; 熊本 篤志 [2]; 白井 英之 [3]
[1] 東北大・理・地球物理; [2] 東北大・理・地球物理; [3] 神戸大・システム情報

Study of electron distribution functions around the wake of an ionospheric sounding rocket by a 1D Vlasov-Poisson simulation

Ken Endo[1]; # Yuto Katoh[1]; Atsushi Kumamoto[2]; Hideyuki Usui[3]

[1] Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.; [2] Dept. Geophys., Tohoku Univ.; [3] System informatics, Kobe Univ

A sounding rocket moving supersonically in the ionosphere interacts with the surrounding plasma. It leads to the formation of a rarefied plasma region called plasma wake behind the rocket. Through several rocket experiments carried out previously, it has been suggested that plasma waves are excited around the rocket wake [Yamamoto, 2001; Endo et al., 2015]. Endo et al. (2015) classified plasma waves observed in the S-520-26 rocket experiment into three groups as Group A, B, and C. They concluded that Group A waves are electrostatic electron cyclotron harmonic (ESCH, ECH) or/and upper hybrid resonance (UHR) mode waves and that Group B and C waves are whistler mode waves. The intensities of these waves had spin-phase dependence which was different depending on kinds of plasma waves. Considering that the observed waves could be short-wavelength electrostatic modes, the obtained spin-phase dependence should represent the spatial distribution of free-energy sources for plasma wave instabilities. The actual distribution functions around the rocket wake, however, are not well known, and the relation with the wake formation process is unclear.

Singh et al. (1987) carried out a one-dimensional Vlasov-Poisson simulation and showed that two- or multi-stream electrons appear on the wake-axis up to 1.3 % of the near-wake region (ion void or the most diluted region nearest spacecraft). However, the electron distribution function in other part of the plasma wake could not be reported due to the effect from the boundaries [Singh et al., 1987], lack of computational resources, and large numerical errors from particle-in-cell (PIC) like calculation scheme in time development of the electron distribution function [Sakanaka et al., 1971; Singh, 1980].

In this study, we develop a one-dimensional Vlasov-Poisson code and carry out simulations on our own in order to investigate the distribution functions near the wake edges and the region more downstream. We assume a simulation model similar to that adopted by Singh et al. (1987), in which plasma expands into a void region along the magnetic field line. In this simulation, the time variation of plasma distribution was regarded as the spatial variation downstream. In order to suppress numerical errors, we adopted the time-splitting method [Cheng and Knorr, 1976] and the rational CIP method [Xiao et al., 1996] as used in Abe (2006). We perform simulations for two cases of ion-electron mass ratio: $m_i/m_e = 2.9 \times 10^4$ assuming O^+ dominated plasmas in the lower ionosphere and $m_i/m_e = 40$. In the latter case, we achieve calculation up to 43 % of near-wake region, and find six types of charge density disturbances including Langmuir waves propagating from the wake edge to the outside and inside of the wake. The obtained Langmuir waves are triggered by an oscillating electric field around the wake edge. The oscillating electric field generates electron beams associated with the Langmuir waves. The electron beams form non-Maxwellian distribution functions around the wake edge. At the wake center, we obtain two- or multi-stream electrons, which are produced mainly by the negative wake potential. These simulation results indicate that non-Maxwellian electrons are created due to both the inward polarization electric field formed close to the wake axis, and the oscillating electric field appearing more outside.

In this presentation, we will show the simulation results of the charge density disturbances and electron distribution functions, and will discuss their generation process showing the relationship with electric field.

電離圏を超音速で飛翔する観測ロケットは周囲のプラズマと相互作用しながら運動する。そのため、その後方には航跡(ウェイク)と呼ばれる低プラズマ密度領域が形成される。過去のロケット実験により、ロケットのウェイク近傍でプラズマ波動が励起することが指摘されている [Yamamoto, 2001; Endo et al., 2015]。Endo et al. (2015) は、S-520-26 ロケット実験で観測されたプラズマ波動を3種類 (Group A, B, C) にグループ分けし、Group A を静電的電子サイクロトロン高調波 (ESCH, ECH) 及び高域混成 (UHR) モード波動、Group B と C をホイッスラーモード波動であると結論した。それぞれの波動強度はロケットのスピンの位相角に応じて変化し、その変化の仕方はグループごとに異なることも明らかになった。観測されたプラズマ波動が短波長静電波であると考え、このスピンの位相角依存性はプラズマ波動を励起する電子の空間分布に対応していると考えられる。しかし、ロケットウェイク周囲の電子速度分布関数についてはあまりよく分かっておらず、ウェイク形成過程との関係も明らかになっていない。

Singh et al. (1987) は1次元の静電ブラソフシミュレーションを行い、near-wake 領域 (飛翔体近傍の最も希薄な領域) の約 1.3% までのウェイク軸上で、二流体・多流体型の電子速度分布関数が得られることを示した。しかしながら、シミュレーション境界の影響 [Singh et al., 1987] や計算機資源の制約、粒子法 (PIC) に似た計算スキーム [Sakanaka et al., 1971;

Singh, 1980] を用いていたことによる数値拡散のため、他の領域における速度分布関数については調べられなかった。

そこで、本研究ではウェイクのより下流やウェイク端での速度分布関数を調べるため、改めて1次元静電ブラソフコードを開発しシミュレーションを行った。モデルの置き方は Singh et al. (1987) を参考にし、一次元空間に設定した低密度領域の両側から背景の高密度プラズマが流れ込む現象を模擬した。シミュレーションで再現される粒子の分布の時間変化は、それらのウェイク下流方向の空間分布とみなした。本シミュレーションでは数値拡散を抑えるため、Abe(2006) を参考にして time-splitting 法 [Cheng and Knorr, 1976] 及び有理関数 CIP 法 [Xiao et al., 1996] を用いた。

シミュレーションは、低高度電離圏で見られる O^+ 主成分のプラズマを仮定した $m_i/m_e = 2.9 \times 10^4$ と、 $m_i/m_e = 40$ の、2パターンのイオン電子質量比で計算を行った。質量比 $m_i/m_e = 40$ の場合は near-wake 領域の 43% にあたる領域まで計算することができ、その結果、ウェイクの内外に向かって伝搬するラングミュア波など 6 種類の電荷密度擾乱が観測された。ラングミュア波はウェイク端で起こる振動電場によって駆動され、その振動電場はラングミュア波の伝搬に関わる電子ビームを生成するものであった。そのため、ウェイク端付近では電子ビームを伴う電子速度分布関数が得られた。一方、ウェイク中心では、主にウェイク中の負のポテンシャルによって作られる二流体・多流体型の電子速度分布関数が見られた。以上のシミュレーション結果は、ウェイク近傍の非マクスウェル型速度分布が、ウェイク内向きの分極電場とより外側にできる振動電場の両方によって生成することを示している。

本発表では、電荷密度擾乱及び電子速度分布関数の空間分布の結果を示し、その成因について電場分布との関係を示しながら議論を行う。