

火星電離圏界面におけるケルビン-ヘルムホルツ不安定のMHDシミュレーションの研究

相澤 紗絵 [1]; 寺田 直樹 [2]; 笠羽 康正 [3]; 八木 学 [4]
[1] 東北大・理・地物; [2] 東北大・理・地物; [3] 東北大・理; [4] 東北大 PPARC

An MHD simulation study of the Kelvin-Helmholtz instability at the Martian ionopause

Sae Aizawa[1]; Naoki Terada[2]; Yasumasa Kasaba[3]; Manabu Yagi[4]
[1] Geophysics, Tohoku Univ; [2] Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.; [3] Tohoku Univ.; [4] PPARC, Tohoku Univ.

Because Mars has no intrinsic magnetic field, the solar wind directly interacts with the planetary ionosphere. Under this circumstance, the planetary ionopause represents a density discontinuity surface and a velocity shear surface between the magnetized solar wind flow and the planetary ionosphere. The ionopause is subject to the Kelvin-Helmholtz (KH) instability [Amerstorfer et al., 2010], which is expected to play a role in removing ionospheric materials from the planet. In addition, the KH instability may cause a dawn-dusk asymmetry at the magnetopause because of the finite Larmor radius (FLR) effect of ions [Nagano, 1978]. At an ionopause, for the same reason, the KH instability may cause an asymmetry in the direction of the solar wind motional electric field.

Terada et al. [2002] pointed out using a global hybrid simulation that the KH instability at the Venusian ionopause develops asymmetrically through the acceleration of ionospheric ions in the direction of the solar wind motional electric field. It is known that the ion FLR effect, the gravitational stabilizing effect, the effect of the thickness of the boundary layer, etc. determine the initial growth of the KH instability. However, it was difficult to separately evaluate each contribution of these effects with the global hybrid simulation. At the Martian ionopause, the ion FLR effect is expected to be four times larger than that at Venus, because gyroviscous coefficient is two times larger and the obstacle size is about half that of Venus. The gravitational stabilizing effect, which prevents the KH instability from growing at low solar zenith angles (SZAs), is also one of the important effects to estimate the escape rate of the Martian atmosphere, but quantitative evaluations of these competing effects at the Martian ionopause have not yet been done.

In this study, we estimate the escape rate of the Martian atmosphere by the KH instability considering the ion FLR effect and the gravitational stabilizing effect. We have investigated contribution of each effect to the linear growth rate and non-linear evolution of the KH instability using parameters at the Martian ionopause. The preliminary results of our simulation show that the KH instability can grow sufficiently before reaching the terminator of Mars, suggesting that the non-linear saturation phase rather than the linear growth phase affects the escape rate of the Martian atmosphere. Considering the fact that the previous studies concentrated on the linear growth phase in estimating the escape rate, we have estimated it with a particular emphasis placed on the saturation phase of the KH instability.

What is more, to model a more realistic condition of Mars, we have performed simulation runs with a density gradient in the direction of the velocity shear (horizontal direction) in the Martian ionosphere. Our past simulations, which used a periodic boundary condition, had a peak of momentum at the ionopause in the initial condition, so that the growth rate of the KH instability can be over-estimated. This problem is partly resolved by employing this realistic condition. Accordingly, it is expected that the growth rate of the KH instability decreases near the subsolar point, but increases at high SZAs due to the horizontal density gradient compared to our previous results, resulting in a different atmospheric escape rate. In this presentation, initial results obtained from the numerical simulation that considers the horizontal density gradient will be presented.

火星は全球的な固有磁場を持たないため、太陽風と惑星電離圏が直接相互作用をする環境にある。このような環境下において、惑星電離圏界面では惑星電離圏と磁化太陽風プラズマの間に密度不連続と速度シアが形成される。これに伴い、電離圏界面にケルビン-ヘルムホルツ (KH) 不安定が励起される [Amerstorfer et al., 2010] が、これが電離圏イオンの流出過程の一端を担っている可能性が指摘されている。さらに KH 不安定は惑星磁気圏界面においてその速度シアの向きとイオンの旋回方向の関係から、朝夕非対称を引き起こすと考えられている [Nagano, 1978]。非磁化惑星においては同様の理由から太陽風対流電場方向に非対称を引き起こすと考えられている。

非磁化惑星の電離圏界面での KH 不安定は、グローバルハイブリッドシミュレーションによって研究された [Terada et al., 2002]。KH 不安定はイオンの有限ラーマー半径 (FLR) 効果や電離圏界面の境界層の厚みを考慮して扱われる [Huba, 1996] が、グローバルハイブリッドシミュレーションではその手法のために様々な効果の寄与がまとめて計算されるため、各々の効果がどの程度寄与するかといった点を見積もることは困難であった。特に、イオンの FLR 効果はイオンラーマー半径と惑星半径の比によって寄与の大きさが異なることが予想され、火星電離圏界面におけるパラメータでは、金星よりも約 4 倍強い FLR 効果が見込まれる。また、重力安定化効果は太陽天頂角が小さい領域で KH 不安定の成長を妨げるため、火星大気散逸率を見積もる上で重要な効果の一つであるが、火星電離圏界面における各々の寄与とその競合の定量的な評価は未だ行われていなかった。

本研究では、理想 MHD シミュレーションにイオンの FLR 効果や重力安定化効果を加えることで、各々の効果がどれほど KH 不安定の成長に寄与するか、また火星からの大気散逸率にどれほど寄与するかを見積もった。我々のシミュレーションの初期結果から、KH 不安定は火星の昼夜境界線に到達するまでに十分成長することが示唆され、火星からの

大気散逸には線形段階よりもむしろ非線形段階が寄与する可能性が指摘された。先行研究による大気散逸率の見積もりが KH 不安定の線形成長段階を主に考慮していた点を踏まえ、本研究では KH 不安定の非線形段階に注目して大気散逸率を見積もった。

さらに、より現実的な系を模擬すべく、火星電離圏の速度シア方向（水平方向）の密度勾配を考慮したシミュレーションを行った。これまでの周期境界系におけるシミュレーションでは初期状態において運動量が電離圏界面でピークを持ち、KH 不安定の成長が過剰見積もりされているという危惧があったが、現実的な系を模擬することでこの問題を改善することができるという利点がある。これに伴い、太陽直下点近傍における KH 不安定の成長は、先の結果と比較して遅くなることが示唆されるが、その一方で太陽天頂角が大きな領域において、速度シア方向（水平方向）の密度減少に伴う KH 波の振幅増加が期待されるため、大気散逸率が変化することが予想される。本学会においては、この速度シア方向の密度勾配を考慮したシミュレーションについての初期結果を発表する予定である。