

Atmospheric escape induced by magnetic reconnection in the dayside ionosphere of an unmagnetized planet

Hitoshi Sakamoto[1]; Naoki Terada[2]; Yasumasa Kasaba[3]

[1] Geophysics, Tohoku Univ; [2] Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.; [3] Tohoku Univ.

The ionospheres of unmagnetized planets such as Venus and Mars directly interact with the solar wind. At an unmagnetized planet, magnetic reconnection can occur in the dayside ionosphere, induced magnetotail, and regions around crustal magnetic fields. We have studied magnetic reconnection caused by the rotation of the interplanetary magnetic field (IMF) in the ionospheres of Venus and Mars by performing local numerical simulations.

At Venus and Mars, some satellites have observed Hall magnetic fields [Eastwood et al., 2008; Halekas et al., 2009], plasmoids and flux ropes [Zhang et al., 2012; Eastwood et al., 2012] generated by magnetic reconnection, but the effects of the magnetic reconnection on the atmospheric escape and the structure of their ionospheres have been unclear. Dreher et al. [1995] suggested that the ejections of ionospheric plasma clouds [Brace et al., 1982] can be caused by magnetic reconnection in the dayside ionosphere based on the result of Pioneer Venus Orbiter observation, which showed a correlation between the rotation of IMF and the cloud ejections [Ong et al., 1991]. However, performing a linear analysis and an MHD simulation, Dreher et al. [1995] estimated only the linear growth time of magnetic reconnection at the Venus ionopause, so its nonlinear stage and the resultant loss rate of ionospheric ions have yet to be investigated.

In this study, using 2-D multi-species MHD simulations, the spatiotemporal evolutions of magnetic reconnection in the ionospheres of Venus and Mars are examined and the loss rates of the ionospheric ions are also estimated.

In the case of Venus ionosphere, our simulation result shows that plasmoid instability [Loureiro et al., 2007] occurs in a Sweet-Parker (SP) current sheet above 240 km altitude where Lundquist number exceeds 10^6 , and consequently many plasmoids are generated. In the nonlinear stage, some monster plasmoids [Loureiro et al., 2012], which are larger in size than the initial current sheet thickness, are generated through plasmoid coalescences. These monster plasmoids are as large as the giant ropes observed by Venus Express [Zhang et al., 2012], and it is suggested that the giant flux ropes can be generated by the plasmoid instability.

As a result of the acceleration due to the reconnection, ionospheric plasma is ejected to the outside of the current sheets with a local Alfvén velocity. According to our simulation results, the loss rate at the Venus ionopause is about 10^{24} [s⁻¹]. This value is smaller than that estimated by Pioneer Venus Orbiter observation (1.7×10^{26} [s⁻¹] [Brace et al., 1982], 1×10^{25} [s⁻¹] [Lammer et al., 2006]), but is of the same order as that estimated from Venus Express observation (2.7×10^{24} [s⁻¹] [Fedorov et al., 2011], 4.9×10^{24} [s⁻¹] [Masunaga et al., 2013]).

The magnetic reconnection in the dayside ionosphere of Mars has been also studied. The estimated Lundquist number in the Mars ionosphere exceeds 10^6 above 200 km altitude and it is expected that plasmoid instability can occur also in the Mars ionosphere. In the presentation, the loss rate for the case of the Mars ionosphere will be reported.

金星・火星を始めとする非磁化惑星では、太陽風と電離圏が直接相互作用する環境にあり、昼側電離圏、誘導磁気圏の尾部付近、残留磁場付近で磁気リコネクションが起こると考えられている。我々は、中でも惑星間空間磁場 (IMF) が回転した時に昼側電離圏で起きる磁気リコネクションをローカルシミュレーションによって調査している。

金星および火星では、いくつかの人工衛星により無衝突リコネクションに起因する Hall 磁場 [Eastwood et al., 2008; Halekas et al., 2009] や、リコネクションにより形成されたプラズモイドやフラックスロープが観測されているが [Zhang et al., 2012; Eastwood et al., 2012]、惑星大気の散逸や電離圏の構造に対する磁気リコネクションの影響は、いまだに不明確な点が多い。Dreher et al. [1995] は、Pioneer Venus Orbiter の観測において、IMF の回転と電離圏からプラズマ雲の放出に相関があった [Ong et al., 1991] ことから、昼側電離圏での磁気リコネクションがプラズマ雲の放出 [Brace et al., 1982] に関連する可能性を示唆した。しかしながら、同研究では、線形解析と数値シミュレーションに基づいた金星の電離圏界面における磁気リコネクションの線形成長時間の見積りに留まり、非線形発展ならびにその帰結として生じる電離圏イオンの散逸率は見積もられていない。

本研究では、金星ならびに火星の昼側電離圏で生じる磁気リコネクションを二次元多成分磁気流体力学シミュレーションにより再現し、現象の時空間発展を調査するとともに、電離圏イオンの散逸率の見積もりを行う。

シミュレーションの結果によれば、金星の電離圏について、Lundquist 数が 10^6 を超える高度 240 km 以上において、プラズモイド不安定 [Loureiro et al., 2007] が発生し、Sweet-Parker 型電流シート内の多数の点でリコネクションが起こり、多数のプラズモイドが発生することが確認された。非線形段階においては、プラズモイド同士が互いに合体することで初期の電流シートの厚みを超えるモンスタープラズモイド [Loureiro et al., 2012] が形成されることも確認された。このプラズモイドは、Venus Express 衛星で観測された巨大なフラックスロープ [Zhang et al., 2012] に匹敵するサイズであり、プラズモイド不安定と巨大フラックスロープの関係が示唆された。リコネクションによる加速の結果、電離圏のプラズマはアルフベン速度程度で電流シートから放出されることが確認され、金星の電離圏界面付近におけるこの過程による O⁺ の散逸率は 10^{24} [s⁻¹] 程度となることが見積もられた。この値は Pioneer Venus Orbiter の観測で見積もられたプラズマ雲による散逸率 1.7×10^{26} [s⁻¹] [Brace et al., 1982]、 1×10^{25} [s⁻¹] [Lammer et al., 2006] よりも小さな値だが、Venus Express の観測による見積もり 4.9×10^{24} [s⁻¹] [Masunaga et al., 2013]、 2.7×10^{24} [s⁻¹] [Fedorov et al., 2011] とは同程度の散逸率であった。

現在、火星における昼側電離圏の磁気リコネクションも調査を行っている。火星電離圏における Lundquist 数を調べたところ、高度 200km 以上の領域では Lundquist 数は 10^6 を超えており、火星においても同様にプラズモイド不安定が起こることが予想される。発表においては、火星における電離圏イオン散逸率も報告する予定である。