

速い抵抗性リコネクションによる金星電離圏フラックスロープの生成

阪本 仁 [1]; 寺田 直樹 [2]
[1] 東北大・理・地球物理; [2] 東北大・理・地物

Formation of flux ropes in the Venusian ionosphere by fast resistive magnetic reconnection

Hitoshi Sakamoto[1]; Naoki Terada[2]
[1] Geophysics, Tohoku Univ; [2] Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.

<http://pat.gp.tohoku.ac.jp/wordpress/>

Although Venus has no intrinsic magnetic field, magnetic field exists in the upper atmosphere through the interaction with the solar wind. In the dayside ionosphere of Venus, small magnetic rope-like structures called flux ropes were often observed when solar wind dynamic pressure was low. Pioneer Venus Orbiter (PVO) observed flux ropes on more than 70% of the orbits passing through the dayside lower ionosphere, and found its occurrence rate maximizes at 170km altitude [Elphic et al., 1983].

So far some models to generate the flux ropes in the dayside ionosphere of Venus have been proposed (K-H instability [Wolff et al., 1980], nonlinearity associated with the Hall effect [Kleeorin et al., 1994]), but the generation mechanism is yet to be understood. In this study, we propose a new model to generate flux ropes based on recently proposed fast resistive magnetic reconnection [Loureiro et al., 2007]. This fast resistive reconnection occurs in a very long Sweet-Parker (SP) current sheet. The growth rate in the linear stage is proportional to the one-quarter power of the Lundquist number, and the current sheet is unstable under the condition that the Lundquist number is more than 10 to the power of 4. According to MHD simulation results [Samtaney et al., 2009], a chain of plasmoids is formed after reconnection at many points in the current sheet. Such a chain structure is similar to flux ropes. In the dayside ionosphere of Venus, a very long current sheet can form when the polarity of the interplanetary magnet field (IMF) is reversed, where the fast resistive magnetic reconnection occur. Therefore, we considered a model to generate flux ropes through the formation of a very long current sheet and subsequent fast resistive reconnection in the dayside ionosphere of Venus, and then examined its applicability. The outline of the generation model we propose in this study is as follows: First, IMF carried by the solar wind penetrates into the dayside lower ionosphere when solar wind dynamic pressure is high. Then, the field reversal structure resulting from an IMF turning penetrates there, and a very long SP current sheet is created. Finally, flux ropes are generated through the fast resistive reconnection in the current sheet.

In order to examine the applicability of our model, we have estimated the altitude profiles of the Lundquist number, the growth rate of the fast resistive reconnection, and the SP current sheets thickness by using the result of a hybrid simulation in the upper atmosphere of Venus [Terada et al., 2002]. From the profiles, we have chosen the altitudes corresponding to specific Lundquist numbers, and considered that the fast resistive reconnection can occur if the following conditions are satisfied at the chosen altitudes. First one is that the fast resistive reconnection can grow sufficiently. Second one is that the SP current sheet thickness is larger than the observed minimum current sheet thickness [Elphic et al., 1983]. Consequently, we have found that our model is applicable at altitudes near 170 km (Lundquist number is 10 to the power of 5 at this altitude).

Based on this result, we have performed an MHD simulation with the parameters at 170km altitude to compare our model with the PVO observation. Our simulation results show that flux ropes are generated by the fast resistive reconnection, and the growth time is approximately 300s. In the nonlinear stage, the coalescence between the flux ropes occurs in several times the growth time. This coalescence has an effect to broaden the spatial interval between the flux ropes. The resultant spatial interval is approximately 200~300km, which is consistent with the PVO observation. These results suggest the validity of our model.

金星は固有磁場を持たない惑星だが、太陽風との相互作用により、超高層大気中には磁場が存在する。金星の昼側の電離圏では、太陽風の動圧が低い時に磁力線がロープのようにねじれたフラックスロープと呼ばれる微細構造がしばしば観測される。Pioneer Venus Orbiter (PVO) は、昼側の下部電離圏を通過する軌道の 70 パーセント以上でフラックスロープを観測し、その観測頻度が 170km で最大となることを報告した [Elphic et al., 1983]。

フラックスロープに関して、これまでにいくつかの生成モデル (K-H 不安定 [Wolff et al., 1980], ホール効果に起因する非線形効果 [Kleeorin et al., 1994]) が提案されたが、いまだにその生成メカニズムはよくわかっていない。本研究では、最近提案された速い抵抗性の磁気リコネクション [Loureiro et al., 2007] に基づく、新しいフラックスロープの生成モデルを提案する。最近提案された速い抵抗性リコネクションは、非常に横に長い Sweet-Parker タイプの電流シートの中で起こる。その成長率はルンキスト数の 4 分の 1 乗に比例し、ルンキスト数が 10 の 4 乗より大きいときに、横長の電流シートは不安定となる。MHD シミュレーションの結果 [Samtaney et al., 2009] によれば、電流シート内の多数の点でリコネクションが起きたのちに、鎖状にたくさんのプラズモイドが形成される。このような鎖状の構造はフラックスロープに似ている。金星の昼側の下部電離圏においても、惑星間空間磁場の極性が反転する時に、速い抵抗性リコネクションが起こる非常に横に長い電流シートが形成される可能性が考えられる。そこで我々は、金星の昼側電離圏において、横に長い電流シートの形成によって生じる速い抵抗性リコネクションを介したフラックスロープ生成のモデルを考察し、その

適用可能性を検討した。我々が今回提案するモデルの概要は次の通りである。まず太陽風の動圧が高い状態を考えると、太陽風が運んでくる惑星間空間磁場が下部電離圏まで潜り込む。次に惑星間空間磁場の向きが変化し、反平行に並んだ磁場が潜り込めば、金星の昼側の電離圏で、横長の電流シートが形成される。形成された電流シートの中で、速い抵抗性リコネクションが起きることにより、フラックスロープが生み出される。

我々はこのモデルの適用の可能性を検討するために、まず先行研究の金星超高層大気のハイブリッドシミュレーションの結果 [Terada et al., 2002] を用いて、金星電離圏におけるルンキスト数、速い抵抗性リコネクションの成長率、Sweet-Parkerタイプの電流シートの厚み、それぞれの高度分布を求めた。得られた高度分布から、ルンキスト数に関して典型的な大きさを持つ高度をいくつか抽出した。そして、抽出したそれぞれの高度で、以下の2つの条件を満たすときモデルが適用可能と考察した。1つ目の条件は、速い抵抗性リコネクションが十分速く成長するという時間的な条件であり、2つ目の条件は電流シートの厚みが観測で得られている電流シートの最小の厚み [Elphic et al., 1983] 以上になるという空間的な条件である。結果によると、およそ高度 170km (ルンキスト数が 10 の 5 乗) 付近で、我々のモデルは適用可能ということが予測された。

この結果を踏まえ、PVO の観測結果とモデルの描像を詳しく比較するために、我々は高度 170km におけるパラメータを用いた MHD シミュレーションを行った。計算結果によれば、速い抵抗性リコネクションにより、フラックスロープが生成され、成長時間は 300s 程度であった。非線形段階では、隣り合うフラックスロープの合体も見られた。合体は成長時間の数倍程度の時間で起こり、フラックスロープの空間間隔を広げる効果があることが確かめられた。十分時間発展した後では、フラックスロープの空間間隔は 200~300km 程度であり、PVO の観測で得られ空間間隔とおよそ一致しており、これらの結果は我々のモデルの妥当性を示唆している。