

HISAKI 衛星による紫外線観測とハレアカラ T60 による可視光観測を用いたイオプラズマトーラスの朝夕非対称性の時間変化と太陽風応答の統計解析

#近藤 大泰¹⁾, 土屋 史紀¹⁾, 鎌谷 将人¹⁾, 佐藤 晋之祐¹⁾, 村上 豪²⁾, 木村 智樹³⁾, 山崎 敦²⁾, 吉川 一郎⁴⁾, 北元⁵⁾

⁽¹⁾ 東北大学・理・惑星プラズマ・大気研究センター, ⁽²⁾ ISAS/JAXA, ⁽³⁾ 東京理科大学, ⁽⁴⁾ 東京大学, ⁽⁵⁾ 東北工業大学

The temporal variation and the solar wind response of dawn-dusk asymmetry of IPT observed by HISAKI and Haleakala T60

#Hiroyasu Kondo¹⁾, Fuminori Tsuchiya¹⁾, Masato Kagitani¹⁾, Shinnosuke Satoh¹⁾, Go Murakami²⁾, Tomoki Kimura³⁾, Atsushi Yamazaki²⁾, Ichiro Yoshikawa⁴⁾, Hajime Kita⁵⁾

⁽¹⁾ Graduate School of Science, Tohoku University Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, ⁽²⁾ Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, ⁽³⁾ Tokyo University of Science, ⁽⁴⁾ Tokyo University, ⁽⁵⁾ Tohoku Institute of Technology

In Jupiter's magnetosphere, since the strength of a dipole magnetosphere is stronger and the rotating speed is faster, the co-rotation electric field is dominant in the inner magnetosphere, including in Io's orbit. The convective electric field is also known to exist in Jupiter's inner magnetosphere (a few percent of the co-rotating electric field), and the origin of convective electric fields has been discussed so far (Nakamura et al., 2023; Murakami et al., 2016; Barbosa & Kivelson; 1983, Ip & Goertz, 1983).

In Jupiter's inner magnetosphere, there are regions consisted of dense plasma from Io's volcanos, forming the Io-plasma torus (IPT). In the region slightly inside the Io orbit, there is a structure called "ribbon" in which Io-originated plasma spreads in the north-south direction along the magnetic field lines. The presence of a convection electric field causes the ribbon position to shift to the dawn side, providing a direct observation of the strength of the convective electric field. Due to the adiabatic change in electron temperature caused by the change in the drift orbit, the temperature is higher in dusk side than in dawn side. If the efficiency of ion excitation by electron collisions depends on the electron temperature, the strength of the convective electric field can be estimated indirectly from the difference in emission intensity between dawn and dusk sides of the IPT.

Schneider et al. (1995) reported a temporal variation of ribbon's radial position using 80 images at 673.1 nm observed by the Catalina telescope. The position fluctuational was asymmetry between the dawn and dusk sides, suggesting the non-uniformity of the electric field structure.

In this study, we analyzed the relationship between temporal variation of the ribbon's radial position in the IPT and the solar wind dynamic pressure to investigate temporal variation and inhomogeneity of the electric field in Jupiter's magnetosphere associated with the solar wind response. We used sulfur ion emission lines (SII, SIII, and SIV in 64.0-77.0 nm) observed by the HISAKI/ EXtreme ultraviolet spectroCope for Exospheric Dynamics (EXCEED) and sulfur ion visible images (SII 673.1 nm) obtained by the Visible Imager and SPectrograph with coronagraphy (VISP) with the 60cm aperture telescope (T60) at the Haleakala observatory of Tohoku University. The MHD simulation of the dynamic pressure of solar wind were introduced in Tao et al. (2005).

We analyzed the T60/VISP data observed in December 2014 – May 2017. We define the position of ribbon at a location where the brightest emission at 673.1 nm appears in the IPT. The 1,427 ribbon images are classified into two groups in terms of the dynamic pressure of the solar wind; those during quiet solar wind (<0.1 nPa) or disturbed solar wind (>0.1 nPa). We investigate the System III longitude dependence of the ribbon's position in the dawn and dusk sides and fit the result with sinusoidal functions. When the solar wind dynamic pressure was quiet, the ribbon's position is fitted with $5.761 \pm 0.042 \cos(\lambda - 133 \text{ [deg]}) [R_j]$ in the dawn side and $5.587 \pm 0.047 \cos(\lambda - 130 \text{ [deg]}) [R_j]$ on the dusk side (λ : System III longitude [deg]; R_j : Jupiter's radius 71,492 [km]). When it disturbed, it is fitted with $5.786 \pm 0.042 \cos(\lambda - 147 \text{ [deg]}) [R_j]$ in the dawn side and $5.558 \pm 0.049 \cos(\lambda - 123 \text{ [deg]}) [R_j]$ in the dusk side. The results indicate that there is a dawn-ward shift both in the dawn and dusk sides when the dynamic pressure increases: the shift is derived at 0.025 R_j and 0.029 R_j in the dawn side and the dusk side, respectively. To Estimate the convection electric field strength from this shift, we found that it averaged 2 [mV/m] during quiet, and tended to be larger when solar wind disturbed, which is consistent with the convection electric field strength derived by the HISAKI data: the strength is estimated at 3.8 [mV/m] on average and 8.6 [mV/m] for the particularly stronger solar wind (Murakami et al., 2016).

Next, we investigated the change of the solar wind dynamic pressure and the shift in the ribbon's radial position. We

focused on events in which the solar wind pressure was continuously quiet (<0.05 nPa) for several days and then increased to more than 0.1 nPa. We derive the shift of the ribbon's position in response to the increasing dynamic pressure at every 10 [deg] of the central meridian longitude (CML). The results showed that when solar wind dynamic pressure increases, the ribbon's position tends to shift toward the dawn side in more than 90% of the events in the dawn side, whereas in dusk side, the variation of the ribbon's position were divided into cases where it shifted to the dawn side and the dusk side. This indicates that the response of the convection electric field induced by solar wind dynamic pressure was asymmetric between the dawn and dusk sides of the IPT, during the events. It was also shown that the convection electric field may have a non-uniformity, may have a non-uniformity.

木星磁気圏では、双極子磁場が強く、自転は速いため、衛星イオ軌道のある内部磁気圏では共回転電場が支配的である。一方、木星内部磁気圏には共回転電場の数%程度の対流電場が存在することが知られており、対流電場の起源と大域的な磁気圏構造との関係が議論されている (Nakamura et al., 2023; Murakami et al., 2016; Barbosa & Kivelson; 1983, Ip & Goertz, 1983)。

木星内部磁気圏にはイオ起源のプラズマが濃い領域が存在し、イオプラズマトーラス (IPT) を形成している。イオ軌道より少し内側には、イオ起源のイオン温度が高い領域が存在する。このイオンの発光を地球から観測すると、磁力線に沿って南北方向に広がりをもつシャープな構造が IPT の朝側と夕方側で捉えられる。これを "Ribbon" と呼ぶ。対流電場が存在すると、荷電粒子のドリフト軌道の変化に伴って Ribbon の位置が朝側にシフトするため、対流電場の強さを直接観測する手段となる。ドリフト軌道の変化によって、電子温度が断熱的に変化することで、電子の温度は夕方側で高くなる。電子衝突によるイオン励起効率が電子温度に依存する場合は、IPT の朝側と夕方側の発光強度の違いから間接的に対流電場の強さを推定できる。

Schneider et al. (1995) では、Catalina 望遠鏡 (1.5m) で観測された S II 6731Å の 80 の image を用いて、Ribbon の位置が動径方向に時間変化することを報告した。その位置変動は朝側と夕方側で挙動が異なり、電場構造の非一様性を示唆するものであった。しかし、Ribbon 位置の変動の報告例はこの 1 例にとどまっておらず、Ribbon 位置の変化と太陽風動圧との関係は明らかとなっていない。

本研究では、木星内部磁気圏の電場構造の (1) 太陽風応答と (2) 非一様性を明らかにすることを目的とし、対流電場の強さを直接反映する IPT の Ribbon の動径位置の時間変動と太陽風動圧の関係と、朝側と夕方側の挙動の相違について調べた。解析には、HISAKI/ EXtreme ultraviolet spectroscopy for Exospheric Dynamics (EXCEED) で観測された硫黄イオンの電子衝突励起輝線 (S II, S III, S IV (640-770Å)) とハワイ・ハレアカラ山頂にある東北大の口径 60cm の望遠鏡 (T60) に取り付けられた複数の分光器撮像機で得られた硫黄イオンの可視イメージ画像 (S II 6731Å)、太陽風動圧データとしては、Tao et al. (2005) の MHD シミュレーション結果を使用した。

T60 のデータから、硫黄イオン発光強度を南北方向に積分した分布が動径方向に最大となる位置を Ribbon と定義し、朝側、夕方側の Ribbon の動径位置を決定した。2014 年 12 月から 2017 年 5 月の期間に得られた 1427 の image のうち、太陽風動圧が静穏なとき (<0.1 nPa) と強いとき (>0.1 nPa) で分類し、Ribbon の平均動径位置を導出した。木星の磁気双極子の位置が自転軸からオフセットしていることにより、Ribbon の位置は木星の磁気経度 (system III) により周期的に変化するため、朝側、夕方側のそれぞれの Ribbon の動径位置について、system III 経度を変数とする正弦関数でフィッティングを行った。動圧が静穏な時は、朝側で $5.761 \pm 0.042 \cos(\lambda - 133^\circ)$ [Rj]、夕方側で $5.587 \pm 0.047 \cos(\lambda - 130^\circ)$ [Rj] であった (λ : System III 経度 [deg]; Rj: 1 木星半径=71,492 [km])。一方で、動圧が強い時は、朝側で $5.786 \pm 0.042 \cos(\lambda - 147^\circ)$ [Rj]、夕方側で $5.558 \pm 0.049 \cos(\lambda - 123^\circ)$ [Rj] となった。動圧の増大によって、朝側では $0.025R_j$ 、夕方側では $0.029R_j$ 朝側にシフトすることが初めて明らかになった。このシフト量から対流電場強度を見積もると、静穏な時で平均 2 [mV/m]、動圧が強い時はそれよりも大きな値を示す傾向が見られた。これは、HISAKI の朝夕発光非対称性から推定された対流電場強度が、平均で 3.8 [mV/m]、動圧が特に強い時で 8.6 [mV/m] であり (Murakami et al., 2016)、対流電場が太陽風動圧により増大することを示した HISAKI の結果を支持するものである。

次に、太陽風動圧の変化量と Ribbon の位置のシフト量について、朝側と夕方側の相違を詳しく調査した。太陽風動圧が静穏 (0.05 nPa 未満) である状態が数日間続き、その後 0.1 nPa 以上へ上昇したイベントに着目した。Ribbon の位置には System III 経度依存性があるため、経度 10° 毎に分けて Ribbon の位置の変化を評価した。朝側の Ribbon の動径位置は、太陽風動圧の上昇とともに、9 割以上のイベントで朝側に移動する傾向が見られたのに対し、夕方側では朝側と夕方側にシフトする場合に別れる結果となった。これは太陽風動圧に対する対流電場の応答が朝側と夕方側で異なっていることを示しており、対流電場の不均一性を示すものとなった。