

## ひさき衛星観測との比較を目指した木星内部磁気圏プラズマの動径方向拡散モデルの開発

# 山口 和輝 [1]; 坂野井 健 [2]; 土屋 史紀 [3]; 木村 智樹 [4]; 古賀 亮一 [5]; 鍵谷 将人 [6]

[1] 東北大・理・地物; [2] 東北大・理; [3] 東北大・理・惑星プラズマ大気; [4] Tohoku University; [5] 東北大・理・地物; [6] 東北大・理・惑星プラズマ大気研究センター

### Development of a radial diffusion model of Jovian inner magnetospheric plasma transportation for a comparison with HISAKI data

# Kazuki Yamaguchi [1]; Takeshi Sakanoi [2]; Fuminori Tsuchiya [3]; Tomoki Kimura [4]; Ryoichi Koga [5]; Masato Kagitani [6]  
[1] PPARC, Tohoku Univ.; [2] Grad. School of Science, Tohoku Univ.; [3] Planet. Plasma Atmos. Res. Cent., Tohoku Univ.; [4] Tohoku University; [5] Geophysics, Tohoku Univ.; [6] PPARC, Tohoku Univ

We developed a diffusion model that enables to examine interaction and radial transport of ions and electron in the Jovian inner magnetosphere, balance of mass and energy of plasmas, and temporal changes. We also aim to verify the observation result of the extreme ultraviolet spectroscopy satellite HISAKI using this model.

Jovian first satellite Io has active volcanoes and releases the plasma of the volcanic gas origin to the inner magnetosphere. The plasma is distributed in a donut shape along the revolution orbit of Io by co-rotating with Jupiter, and it is called Io Plasma Torus. 90% of total mass of Jovian magnetospheric plasma is supplied from Io and is transported on the time scale of several tens of days in the radial direction while obtaining energy from the rotation angular momentum of Jupiter. Revealing the mass and energy balance of plasmas in the Jovian inner magnetosphere is an important subject to understand the macroscopic physical phenomena of the magnetosphere.

The radial distribution model of steady state Jovian magnetospheric plasma has been developed based on observation results of Voyager 1, Voyager 2, Cassini spacecraft, but there is no research report on a model capable of tracking time variation of radial distribution.

The purpose of this research is to develop a model that can track the time change of the radial direction transport process of mass and energy of plasma and compare it with observation result of HISAKI.

In this study, a model that can track mass and energy balances of major heavy ions of Io origin ( $O^+$ ,  $O_2^+$ ,  $S^+$ ,  $S^{2+}$ ,  $S^{3+}$ ) and time evolution of radial transport was developed based on the Fokker-Planck equation. The equation system is based on the mass and energy transport model of steady state magnetospheric plasma developed by Delamere et al. (2005), and it was differentiated by FTCS method. The chemical interaction between ions and electrons is considered by charge exchange, electron impact ionization, electron recombination, Coulomb interaction, and radiation due to electron collision excitation, and radiative rate is calculated from the CHIANTI database based on the method shown in Delamere and Bagenal (2003). The initial values of temperature and density of each ion species and thermal electrons were given in Yoshioka et al. (2018) that obtained from the HISAKI satellite observations in November 2013 when the volcano activity was quiet. The neutral atoms (O, S) were parameterized by the inflow composition ratio of oxygen and sulfur and the total number of neutral particles. For the inner and outer boundary conditions, the spatial differentiation of the density was 0 and the ion temperature was 60 eV at  $6 R_J$ , and plasma density and temperature were fixed with extrapolated values of HISAKI observation results at  $30 R_J$ . In order to verify the validity of the model, the steady state temperature and density of ions and electrons in the region of 6-9  $R_J$  were compared with the observation results of HISAKI. Our model result showed that the density of ions is about 10% less than the observed value, and the temperature is about 20 times greater than the observed value (for example,  $O_+$  temperature exceeded 2 keV). Estimating ion and ion scale heights with the different distribution surfaces between neutrals and ions, we obtained the ion density which is 25% of the observed value and the temperature which is about 10 times greater than the observed value. As a result, the oxygen-sulfur ratio is 2.0, the inflow is  $50 \times 10^{-4} \text{ (m}^{-3}\text{)}$ , and the diffusion coefficient is estimated to be  $4.2 \times 10^{-8} \text{ (} R_J^{-2} \text{s}^{-2}\text{)}$  near Io. This result is consistent in the Io plasma whose main atmospheric composition is  $SO_2$ . In this presentation, the correspondence between the quantitative inspection results of each parameter and the observation results of HISAKI is described.

惑星分光観測衛星ひさきは衛星イオの火山活動の変化に伴う木星内部磁気圏でのプラズマ増大・減少を捉えた。本研究は、木星内部磁気圏の複数のイオンおよび電子間の相互作用と動径方向輸送を理解することを目的とし、プラズマの質量及びエネルギーの収支と時間変化の追跡が可能な拡散モデルを開発した。モデル結果とひさき衛星の観測と比較を行い、観測に整合的な中性粒子流入量と拡散係数が得られた。

木星第一衛星イオでは活発な火山活動があり、内部磁気圏のプラズマは質量の9割がイオの大気から供給される。プラズマは木星と共回転することでイオの公転軌道に沿ってドーナツ状に分布し、イオプラズマトーラスと呼ばれている。プラズマは木星の自転角運動量からエネルギーを得ながら動径方向に数十日の時間スケールで輸送される。この輸送は、遠心力による交換型不安定により駆動されていると考えられており、輸送の過程で、衛星起源の重イオンプラズマは化学的な相互作用によって組成比、エネルギーが変化する [Delamere & Bagenal, 2003]。内部磁気圏におけるプラズマの質量とエネルギーの収支を知ることは、磁気圏のマクロな物理現象を理解する上で重要な課題である。

定常状態の内部磁気圏プラズマの動径方向分布モデルは Voyager1, Voyager2, Cassini 探査機の観測結果に基づいて開発

されている [Delamere et al., 2005]。しかし、動径方向分布の時間変動を追跡できるモデルは研究報告がない。その背景として、これまでの探査機が、イオプラズマトーラスの空間分布を長期観測できなかったことが挙げられる。ひさき衛星は惑星観測専用の宇宙望遠鏡として連続運用されており、木星内部磁気圏の長期観測が可能である。実際に 2015 年 1 月下旬から 4 月上旬の約二か月間にわたって、イオからのプラズマ供給の増加に伴うイオプラズマトーラスの空間分布の変化が捉えられた [Tsuchiya et al., 2018, Yoshioka et al., 2018]。

本研究ではイオ起源の主要な重イオン ( $O^+, O^{2+}, S^+, S^{2+}, S^{3+}$ ) の質量およびエネルギーの収支と動径方向輸送の時間発展を追跡可能なモデルを Fokker-Planck 方程式に基づき開発した。方程式系は Delamere et al. (2005) が開発した定常状態の磁気圏プラズマの質量およびエネルギー輸送モデルを基に、Forward Time Central Space (FTCS) 法により差分化した。イオン、電子間の化学的な相互作用は Delamere & Bagenal (2003) で用いられている電荷交換、電子衝突電離、電子再結合、クーロン相互作用を採用し、電子衝突励起による体積放射率は CHIANTI データベースを利用して算出した。各イオン種と熱的電子の温度、密度の初期値は、イオ火山活動が静穏であった 2013 年 11 月のひさき衛星観測結果を用いた [Yoshioka et al., 2018]。中性原子 ( $O, S$ ) は流入する酸素・硫黄の組成比と単位時間あたりに流入する中性粒子の総数をパラメータとした。内側境界条件は  $6R_J$  で密度の空間微分を 0、イオン温度を  $60\text{eV}$  とし、外側境界条件は  $30R_J$  で密度、温度ともにひさき観測結果の外挿値で固定した。この設定の下でモデルの妥当性を検証するため、 $6-9R_J$  の領域における各イオン種と電子の定常状態の温度、密度をひさき衛星の観測結果と比較した。この結果、定常状態におけるイオンの密度は観測に対し 10%程度しかなく、また温度は  $O^+$  が  $2000\text{eV}$  以上となるなど、観測の 20 倍ほど大きな値となった。木星は自転軸と磁軸が一致していないため、荷電粒子と中性粒子の分布面に約  $7^\circ$  の傾きがある。これは、電子衝突励起などの化学的相互作用に影響を与えと考えられる。今回の発表では新たにこの分布面の傾きを計算に反映させ、また各中性粒子、イオンの相対的スケールハイトを再定義することでイオン密度を観測の 25%、温度を観測の 10 倍程度と、より現実的な値を得ることができた。

さらに、中性原子の酸素・硫黄比、中性原子流入量、拡散係数をパラメータとし、観測に最も合致する値を求めた。この結果、酸素・硫黄比が 2.0 で、流入量、拡散係数はイオ近傍でそれぞれ  $50 \times 10^{-4} (/m^3)$ 、 $4.2 \times 10^{-8} (/R_J^2 \cdot \text{sec})$  と見積もられた。この結果は  $SO_2$  を主要大気組成とするイオプラズマにおいて整合的である。本発表では各パラメータの定量的な検証結果とひさき観測結果との対応について述べる。