

## 論文内容要旨

(No.1)

氏 名	野澤 宏大	提出年	平成 13 年
学位論文の 題 名	Study on the variability of the Jovian Io plasma torus using ground-based observations of sulfur ion emissions (硫黄イオン輝線観測に基づく木星イオプラズマトーラスの変動に関する研究)		

## 論 文 目 次

<b>Acknowledgements</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Io	1
1.2 The Io Plasma Torus	4
1.3 Purpose of This Thesis	17
<b>2 Instrumentation and Observation</b>	<b>19</b>
2.1 Instrumentation	19
2.1.1 Telescope	19
2.1.2 CCD Camera	21
2.1.3 Back Optics	22
2.1.4 Estimation	34
2.2 Observation	37
<b>3 Data Reduction</b>	<b>43</b>
3.1 Image Reduction	43
3.1.1 General Reduction	43
3.1.2 Scattered Light Subtraction	48
3.2 Intensity Calibration	51
3.3 Position Calibration	54
<b>4 Observational Results</b>	<b>57</b>
4.1 Intensity Variations	57
4.1.1 System III Variation	57
4.1.2 Long Timescale Variation	67
4.2 Dawn-Dusk Asymmetry	70
4.3 Radial Profile	75
4.4 Electron Density	81

<b>5</b>	<b>Periodicity Analysis</b>	<b>87</b>
5.1	Periodicity Longer than System III	87
5.2	Periodicity Search Method	89
5.3	Results	92
<b>6</b>	<b>Discussions</b>	<b>111</b>
6.1	Intensity Variation	111
6.2	Dawn-Dusk Asymmetry	118
6.3	Radial Profile	119
6.4	Electron Density	120
6.5	10.2 Hours Periodicity	121
6.6	Support data for Haleakala Observation	128
6.7	Future Plan	128
<b>7</b>	<b>Conclusions</b>	<b>131</b>
	<b>References</b>	<b>135</b>
<b>A</b>		<b>141</b>
A.1	CML	141
A.2	The Io Phase Angle	142
A.3	Plasma Supply Rate from Io	143

太陽系最大の惑星・木星は強い固有磁場と高速自転により特徴付けられる強大な磁気圏を形成しており、地球の磁気圏とは異なる様相を呈している。その中で、 $5.9 R_J$  ( $R_J$ : 木星半径) に位置する衛星イオの存在は木星磁気圏の電磁環境に多大な影響を与えている。イオには多数の活火山が存在し、火山性ガス(主成分: 硫黄酸化物)は木星磁気圏の主なプラズマ源となっている。イオから放出されたガスは磁気圏内でイオン化され、磁場の束縛の元で運動し、木星内部磁気圏にはイオプラズマトーラスと呼ばれる高密度のプラズマ雲を形成する。このプラズマトーラス内のイオンは電子衝突励起により、様々な波長で発光しており、地上観測も可能となっている。

イオプラズマトーラスの光学観測は、地上から木星磁気圏プラズマ環境を探る数少ない手法である。プラズマトーラス中のイオンの発光は、可視波長域では  $S^+$ イオンの禁制線(以下[SII]; 波長 673.1、671.6 nm) が特に観測しやすく、これまで多くの研究者によって観測されてきた。しかし、それらの多くは限られた短期間の観測であり、長い期間での時間変動を検出し、トーラスプラズマのダイナミクスを議論するに足る観測はほとんど行われてこなかった。我々は、このプラズマトーラスの発光を長期間にわたり観測し、磁気圏プラズマの供給、損失、及び輸送過程を探ることを目的として、可搬型の望遠鏡装置を開発しイオプラズマトーラスの撮像観測を行ってきた。その間、観測器機の改良、解析・校正方法の確立を行い、ほぼ一様な基準で比較しうる4年にわたるデータを取得するに至った。我々が特に注目しているのは、プラズマトーラスの発光強度及び空間構造に見られる変動現象である。

本研究で我々が抽出しているプラズマトーラスの発光強度とは、[SII] 発光の中で一般に最も明るい領域である ribbon と呼ばれる領域周辺の強度である。過去 4 年間の[SII] 673.1 nm 発光の観測から、プラズマトーラスの構造とダイナミクスに関して以下のような結果が得られた。

- (1) イオプラズマトーラスの外形は System III に固定されているが、[SII]発光強度自体には System III 経度(  $\lambda$  )依存性は見られない。
- (2) System III 経度 120° から 180° の領域で突発的な増光が時折存在する。
- (3) [SII]の発光強度には、日々(木星数自転程度の時間幅)の変動がある。
- (4) [SII]の発光強度は年を追う毎に緩やかな減少を示し、2000 - 2001 年の観測では特に大幅な強度減少が確認された。
- (5) 発光強度と ribbon 位置の両者に dawn-dusk 非対称性が確認された。ribbon は各年を通じて dawn 側の方が dusk 側に比べて、0.2  $R_J$  程度外側に位置していた。
- (6) [SII]発光の平均的な動径方向分布は年々変化を示す。1998 年及び 1999 年の観測時には ribbon 位置に強度のピークが存在したが、2000 - 2001 年度には、ribbon 位置とその内側(cold torus)の 2 つのピークが確認された。
- (7) [SII] 673.1 nm と[SII] 671.6 nm の強度比から、平均的な電子密度分布の推定を行った。その結果、観測された[SII] 673.1 nm の発光強度減少に伴い、電子密度も減少していることが確認された。
- (8) Lomb-Scargle periodogram を用いた周期解析により、プラズマトーラス中の[SII] 673.1 nm の発光強度には約 10.2 時間の周期性が存在することが確認された。本研究では新たに System IV (2001) 経度を定義した。この経度により 1998 年から 2000 - 2001 年までの発光強度変動に共通する特性が確認された。

我々の観測結果から、トーラス内のプラズマ環境が、短期及び長期の両方の時間スケールで大きく変動していることが示された。特に 2000 - 2001 年の観測時には、大きな変化があったことが示された。観測結果に基づいた考察から、以下の結論が導かれた。

- (1) イオプラズマトーラス内の[SII] 673.1 nm 発光強度には System III 依存性はなく、System III よりやや遅れた、約 10.2 時間の周期性が存在する。
- (2) 突発的な増光現象は System III - System IV ダイアグラムにおいて、特定の狭い領域に限られて存在している。この増光は、System III の 9.925 時間周期と System IV の 10.2 時間周期の会合周期に関連すると考えられる。しかしこれは必要条件であり、実際にはさらに何らかの付加条件に伴いこの増光が発生すると考えられる。
- (3) 発光強度の長期変動から、イオからのプラズマ供給に関して、定常的な供給と突発的な供給の 2 つの成分が存在する。
- (4) [SII]の平均発光強度が示す年々緩やかな減少から、最近 4 年間はイオの火山活動が静穏な状況に向かいつつあったことが示唆される。
- (5) 平均強度と密度一様モデルに基づいて求められるトーラス全域での[SII] 673.1nm 発光の放射エネルギーは  $10^{10}$  W オーダーである。

- (6) dawn-to-dusk 電場の規模は、発光強度の大幅な変動にもかかわらず、観測装置の空間分解能の範囲で一定である。
- (7) [SII]発光の動径方向分布は、ribbon 位置付近で特に激しく変化する。この事実は、今後トラス内でのプラズマの物理的な輸送・拡散過程を考えていく上で重要な手がかりとなる。
- (8) [SII]の2波長強度比から推定された2000 - 2001年の電子密度からは、実際の観測で得られた[SII]発光強度を説明することが出来ない。この原因として高温電子の励起への寄与が示唆される。
- (9) 本研究では10.2時間周期の物理的な説明は提唱されていないが、この周期性は木星固有に存在するSystemによるもの(System IV)であると考えるのが適当であると結論される。

# Abstract

The innermost Galilean satellite, Io, is known as the most active volcanic body in our solar system because of the strong tide caused by Jupiter. The interaction between Io and Jovian magnetosphere produces some pronounced phenomena in the planetary electromagnetic environment. Volcanic material of Io (mainly S and O species) is continuously ejected from Io and becomes the major plasma source in the Jovian magnetosphere. As soon as they are ionized, they are trapped by the Jovian magnetic field. In this way, the Io plasma torus is created surrounding Jupiter.

The Io plasma torus is a high-dense plasma cloud. Ions in the plasma torus make emissions by collisional excitation with electrons. These emissions can be observed with the ground-based telescope and has significant information on the transportation and dynamics of both gas and plasma in and around the Io plasma torus. Therefore, an optical observation of the plasma torus becomes a useful probe to investigate the Jovian plasma environment from the ground.

In this study, we made imaging observations of [SII] 673.1 nm and [SII] 671.6 nm emissions from the Io plasma torus during 4 years. To come true such observations, we developed the transportable telescope system and observation method.

We extracted variations from imaging data of the [SII] 673.1 nm emission from the Io plasma torus, and obtained following results.

- (1) [SII] intensity has little dependence on the System III longitude ( $\lambda_{\text{III}}$ ), although the apparent motion of the entire torus structure is synchronized by the System III Jovian rotation period. This result requires the alternative interpretation on the longitudinal asymmetric distributions of the plasma torus.
- (2) There are sporadic enhancements of intensity around the region of  $120^\circ \leq \lambda_{\text{III}} \leq 180^\circ$  in the 1998 and 1999 observations, indicating that the plasma injection is developed in a peculiar phase of the planetary rotation.

- (3) [SII] intensity shows day-to-day variation without the relation to the planetary rotation phase. This variation is probably thought to be mainly caused by temporal variations in the volcanic activity.
- (4) [SII] average intensities show yearly variation exhibiting the gradual decrease for these 4 years, especially in the 2000 - 2001 observation.
- (5) The dawn-dusk asymmetry was confirmed both in position of the ribbon and emission intensity. Positional difference between the dawn and the dusk of  $\sim 0.2 R_J$  ( $\sim 0.1 R_J$  displacement toward the dawn) was derived from the 1998 to 2000 - 2001 observations.
- (6) The radial profile of [SII] 673.1 nm varied from a single peak structure in the position of the ribbon to twin peak structure in the cold torus and ribbon during the period from 1998 to 2001.
- (7) Using the ratio of averaged radial profile of [SII] 671.6 nm to [SII] 673.1 nm, the statistical electron density profiles were estimated along the centrifugal equator. The electron density showed large decrease in the 2000 - 2001 observation.
- (8) From the periodicity search using the Lomb-Scargle periodogram, we found  $\sim 10.2$  h periodicities in [SII] 673.1 nm emission intensity between the 1998 and 2000 - 2001 observations. [SII] 673.1 nm intensity showed good relation to the newly defined System IV (2001) longitude.

The observational data showed dynamical feature both in short and long term, indicating the various changes in plasma environment in the plasma torus. Based on the observational results and physical discussions, we derived following conclusions.

- (1) [SII] 673.1 nm emission intensity does not have the System III dependence, but has the 10.2 h periodicity.
- (2) Sporadic enhancement takes place in the particular domain in System III - System IV diagram. This is thought to be caused when a combination of the synodic period of 10.2 h period with System III period of 9.925 h and some additional conditions such as volcanic activity of Io are satisfied.

- (3) It is suggested from long term variation that there are two components in the plasma source. The one is the steady supply, and the other is the sporadic one.
- (4) Gradual yearly decrease of [SII] 673.1 nm intensity suggests that volcanic activity of Io seemed to be in the declining phase in the recent four years.
- (5) Total emitting power of [SII] 673.1 nm was estimated to be an order of  $10^{10}$  W, on average.
- (6) The magnitude of the dawn-to-dusk electric field was kept constant within the spatial resolution of our instrument, in spite of large changes in [SII] emission intensity.
- (7) The average radial profiles showed large change near the position of the ribbon, which the positions of  $r > 5 R_J$  and  $r \sim 7 R_J$  were not so changed. This result is important in considering the plasma transport and loss mechanisms in the plasma torus.
- (8) The estimated electron density in the 2000 - 2001 observation was too small to account for the observed emission intensity. Although this may partly be because of the small problem in data reduction, the inclusion of suprathermal electrons for excitation of ions is suggested.
- (9) Although the physical explanation for the cause of 10.2 h periodicity could not be proposed in this study, it is certain that the periodicity as the Jovian system exists and related to the same plasma phenomena and the generation of some kind of Jovian radio waves.