

The volcanic activity on the Io satellite and the associated outgassing into the Jupiter's magnetosphere fluctuate dynamically. The fluctuations of plasma densities inside the Io plasma torus (IPT) associated with the volcanic activities on Io were indicated by the spectroscopic observation by the Hisaki satellite. If the supply of plasma from Io increases, the plasma mass-loading enhances, and the magnetospheric dynamics is expected to be affected. The time continuity of the Hisaki observation made it possible to explore the sequence of magnetospheric dynamics from the activation of volcanoes to the recovery for the first time. In this study, we apply the analysis method called plasma diagnosis to the spectroscopic data obtained by Hisaki with the widest slit (140 arc seconds slit). The time variation of plasma densities and temperature has been determined from December 2013 to April 2014, from November 2014 to May 2015, from January 2016 to March 2016, from May 2016 to August 2016, and from November 2016 to December 2016. During the above periods, four significant events of volcanic activation occurred. In each event, there was a common tendency that the density of hot electrons (several hundreds of eV) increased several tens of days after the core electron density increased. The hot electron density can be considered as a tracer for the radial inward transport of magnetic flux tubes. This is because the timescale for thermal relaxation of the hot electrons is at most several days and the outer region is more abundant in the hot electrons. This study revealed the following three facts about the time variation of the hot electron density. Firstly, the radial distribution of mass density showed that the interchange motion of flux tubes inside the IPT subsided before the hot electron density started to increase. This indicates that the cause of the increase in the hot electron density exists in the outside region of the IPT. Secondly, it was found that the timescale from the start of the activation of the volcano to the rise of the hot electron density was 20-30 days at any event. Finally, the hot electron density on the dusk side was higher than that on the dawn side at least with two events of volcanic activation. This suggests that the radial inward transport of flux tubes might reach the dusk side more easily than the dawn side. In this presentation, the dynamics in Jupiter's magnetosphere will be discussed by using the above findings.

# “Dynamics in Jupiter’s inner magnetosphere revealed by Hisaki/EXCEED observations”

\*R. Hikida(1), K. Yoshioka(1), F. Tsuchiya(2), M. Kagitani(2),  
T. Kimura(2), F. Bagenal(3), N. Schneider(3), G. Murakami(4),  
A. Yamazaki(4), H. Kita(4), E. Nerney(3), F. Suzuki(1),  
and I. Yoshikawa(1)

(1)the University of Tokyo, (2)Tohoku University, (3) University of Colorado, (4)Japan Aerospace Exploration Agency(JAXA)

# イオプラズマトーラス (IPT)

- 主な構成要素

- ✓ イオン:

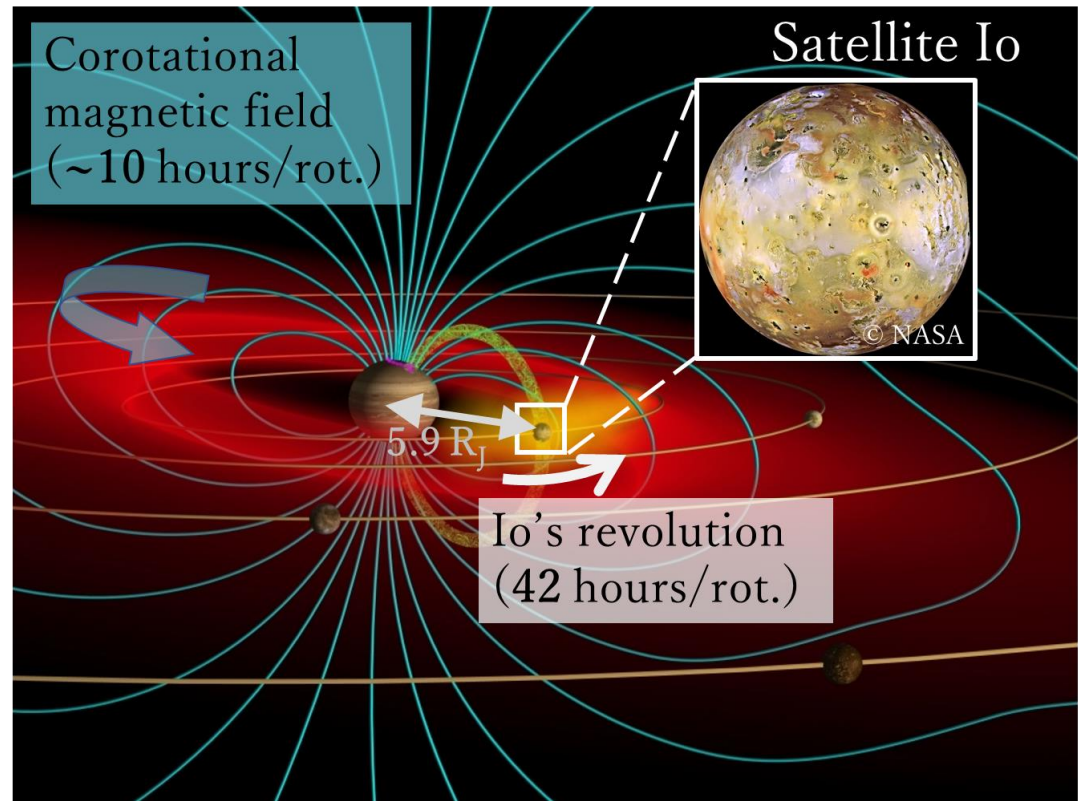
$S^+$ ,  $S^{2+}$ ,  $S^{3+}$ ,  $O^+$ ,  $O^{2+}$ ,  $H^+$ ...

- ✓ 電子:

背景成分 (数 eV)

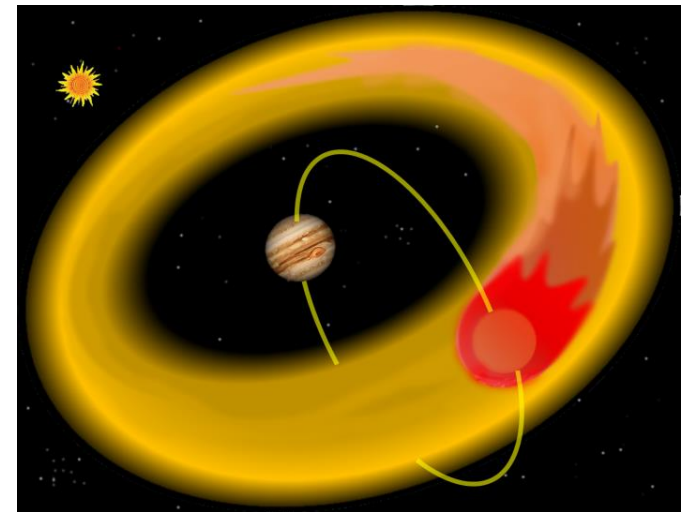
高温成分 (数百 eV)

- 木星中心から~6-~8  $R_J$ の領域で発光している。



# 高温電子の供給源： IPT外側からの輸送 and/or IPT内部での加熱

- IPT外側からの輸送による供給
  - 動径方向内向きの磁束管の輸送 (Yoshioka+18; Kimura+18)
  - Injection (Mauk+02)
- IPT内部での加熱
  - イオ-木星間結合によって発生した電子ビームによる加熱 (e.g. Tsuchiya+15)
  - 磁束管の輸送や変形によって生じた波動との相互作用による加熱 (Hess+11; Copper+16)

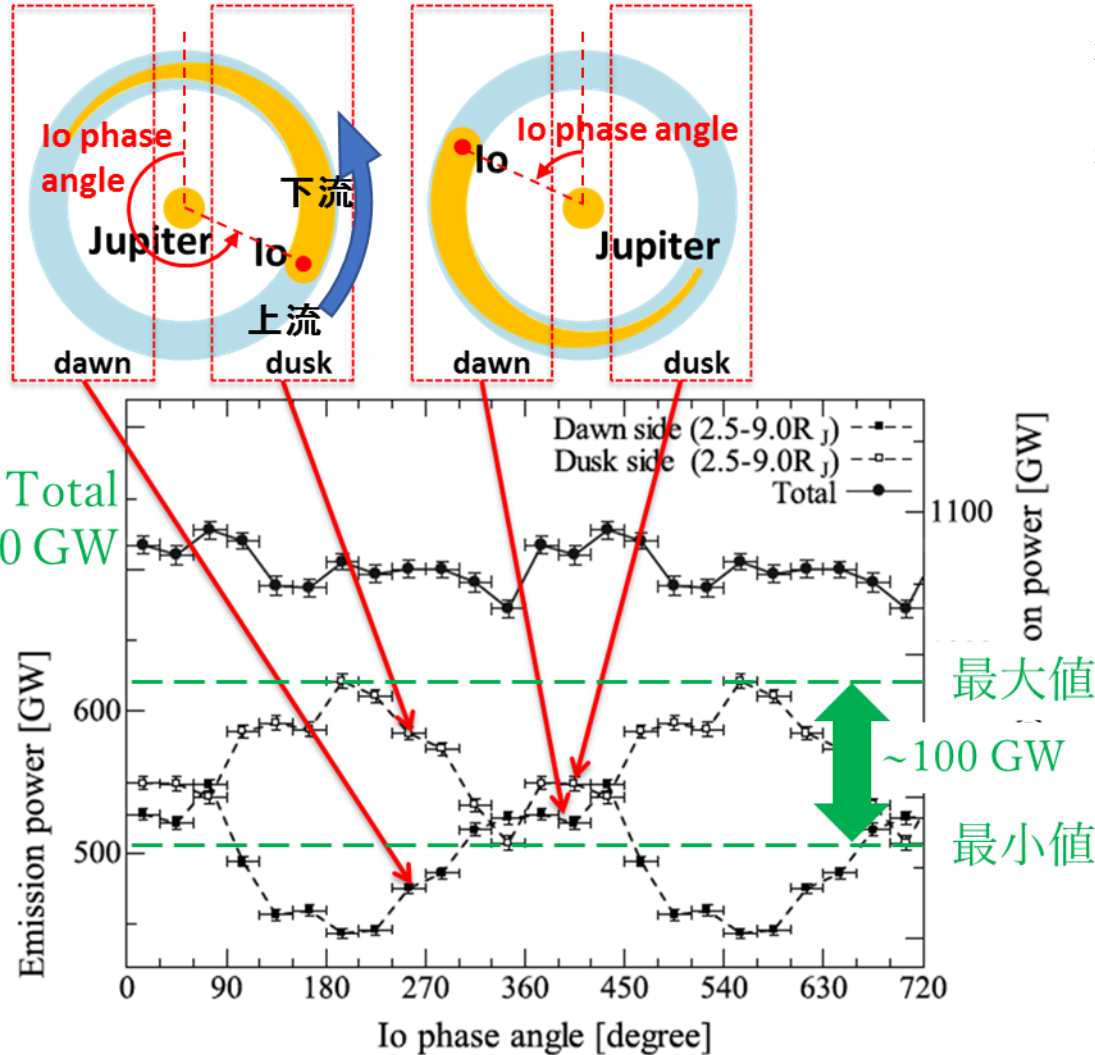


イオ-木星間結合によるIPT内部での加熱の模式図

# IPT内部での加熱の寄与

イオ位相角に依存する放射の変動率は10%程度であり、イオ付近での加熱のみでは、IPTに存在する高温電子のエネルギーを賄うことができない(Bagenal&Delamere11)。

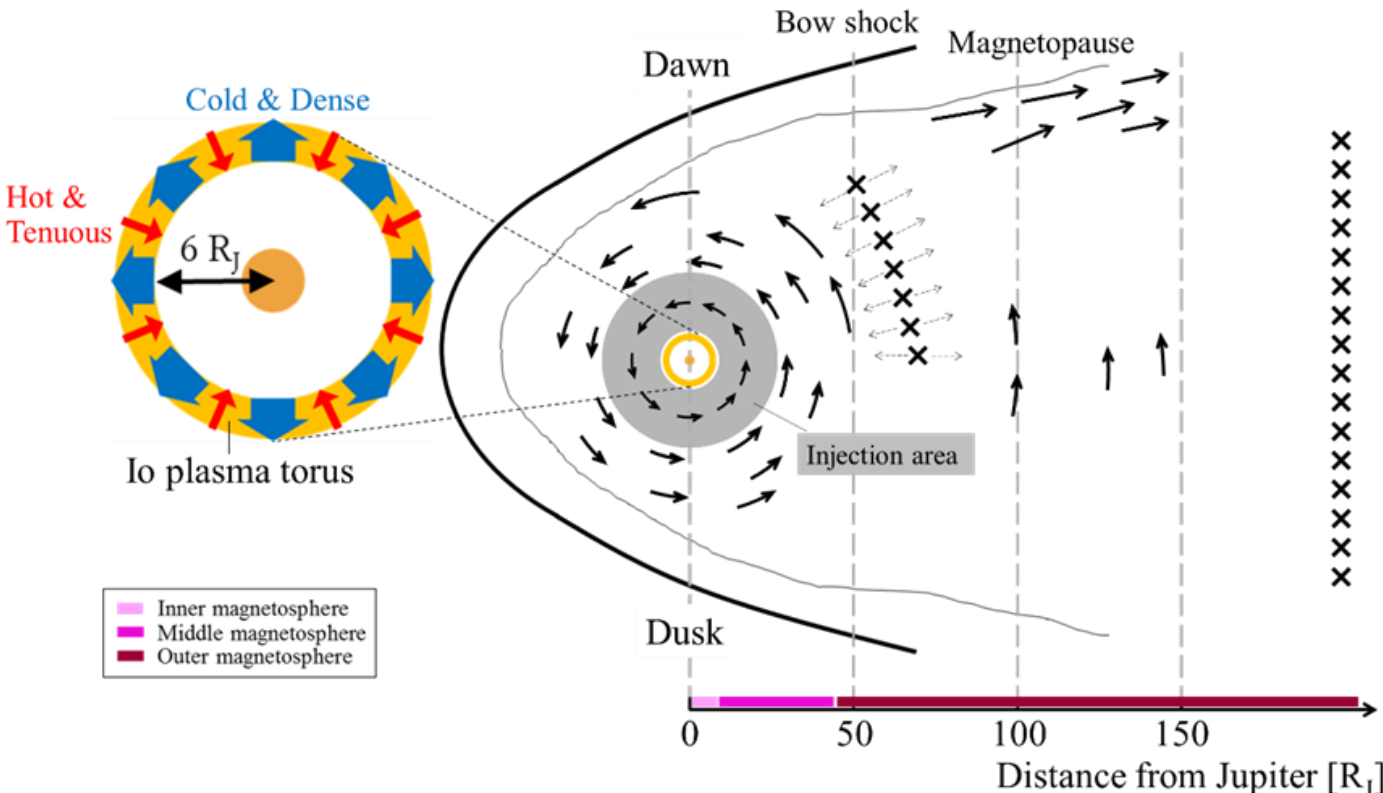
→他の供給機構が存在するはずである。



ひさき衛星の観測によって得られた、IPT放射のイオ位相角に対する依存性 (Tsuchiya+15)

# 動径方向内向きの輸送機構の候補

- 内部磁気圏における磁束管の交換型運動 (e.g. Thorne+97)
- 中間磁気圏におけるinjection (e.g. Mauk+02; Yoshikawa+17)



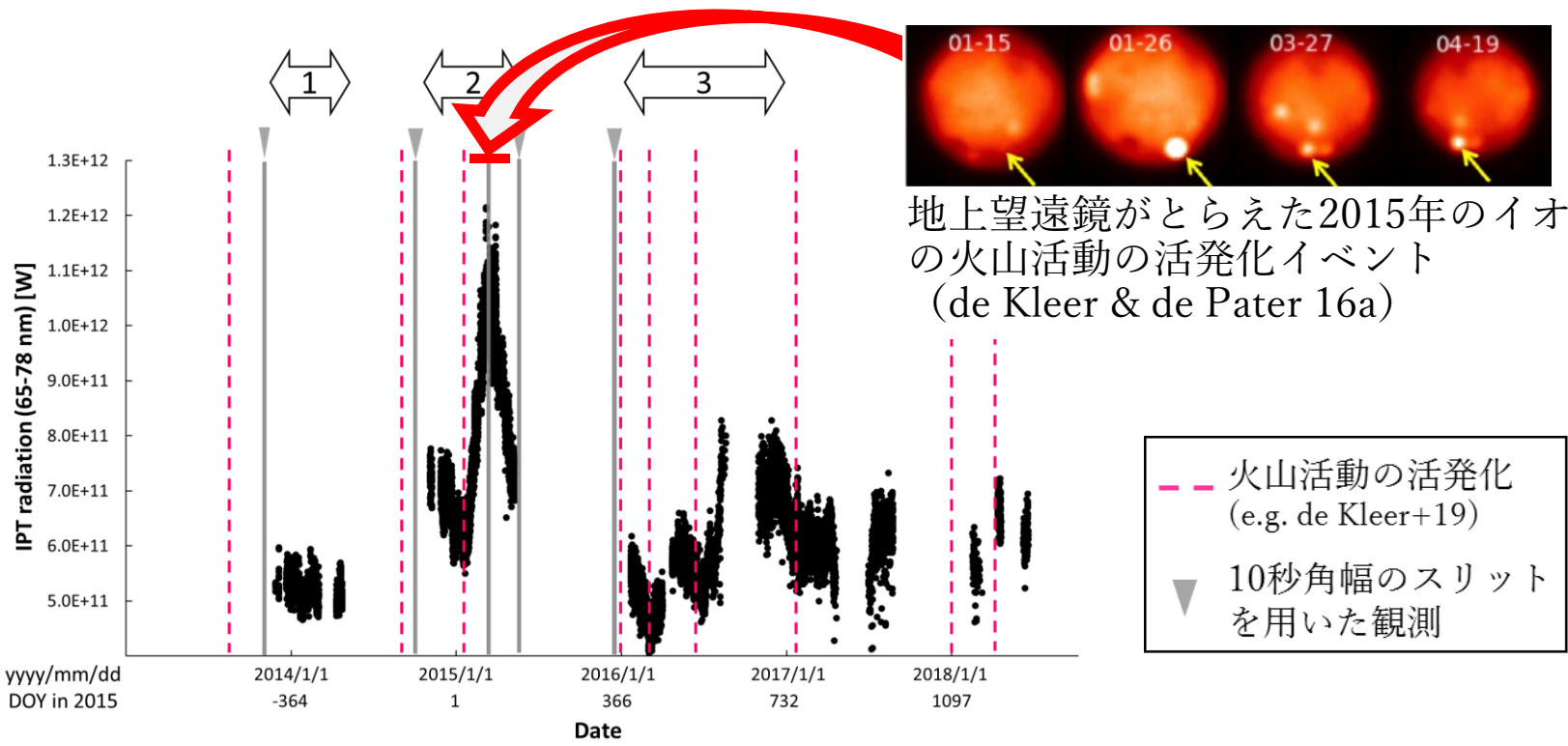
北極上空から見た木星磁気圏の概略図

# 地球周回衛星「ひさき」によるIPTの極端紫外波長域の分光観測

- 火山活動に伴ったIPT放射の長期変動がとらえられている。
- 異なる幅のスリットを用いた2種類の観測モードが用いられている。

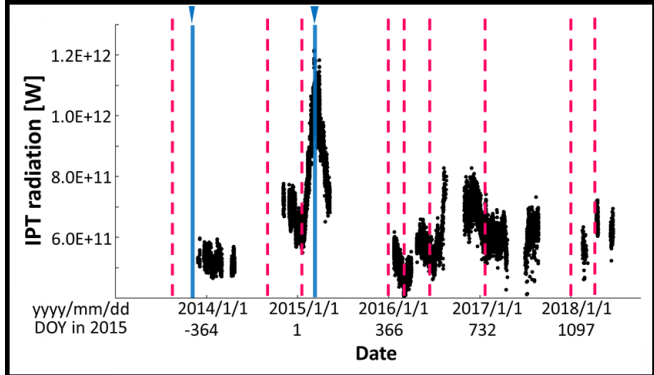
「ひさき」衛星のIPT観測の詳細

観測波長域	50-147 nm
軌道情報	地球周回軌道 (高度: ~1000 km) (周期: 106 min.)
スリット幅	10", 140"



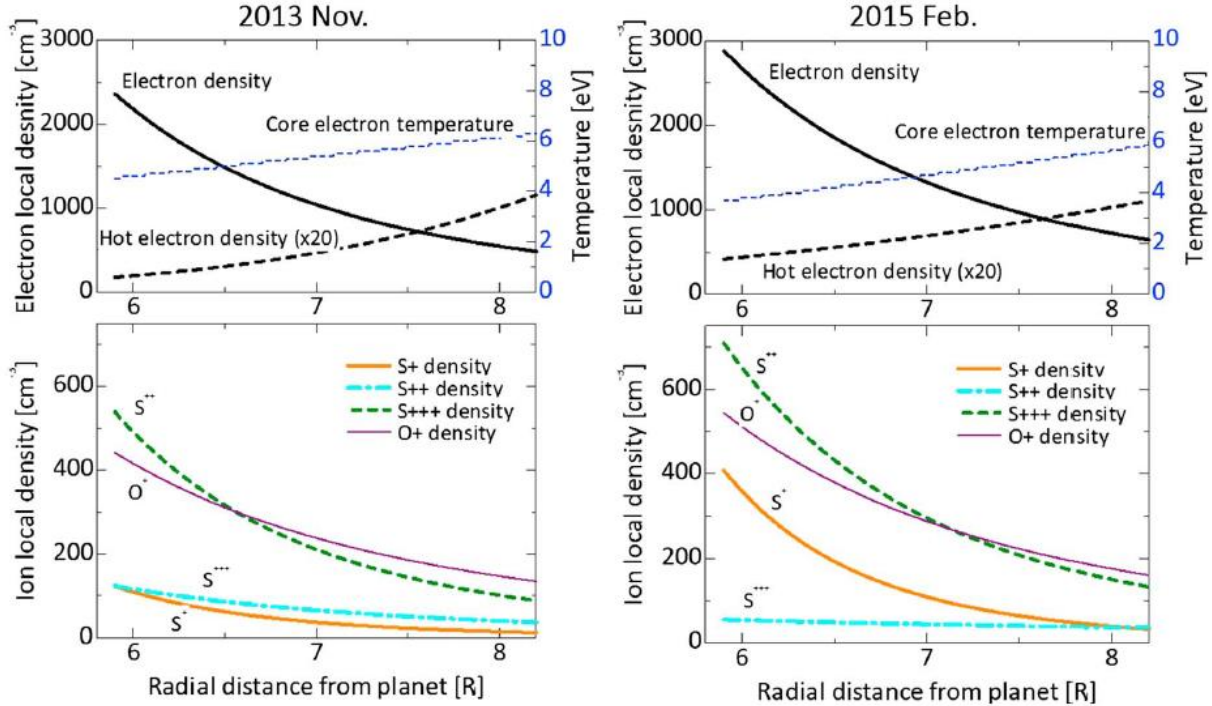
「ひさき」衛星がとらえたIPT放射エネルギーの時間変動

# 「ひさき」衛星の高波長分解能のデータから示唆される高温電子存在率の時間変動



- 火山活発期には、IPTの内側の高温電子の存在率が上昇することを示した。

- 磁気圏のダイナミクスが火山静穏期と活発期で異なる可能性を示唆した。

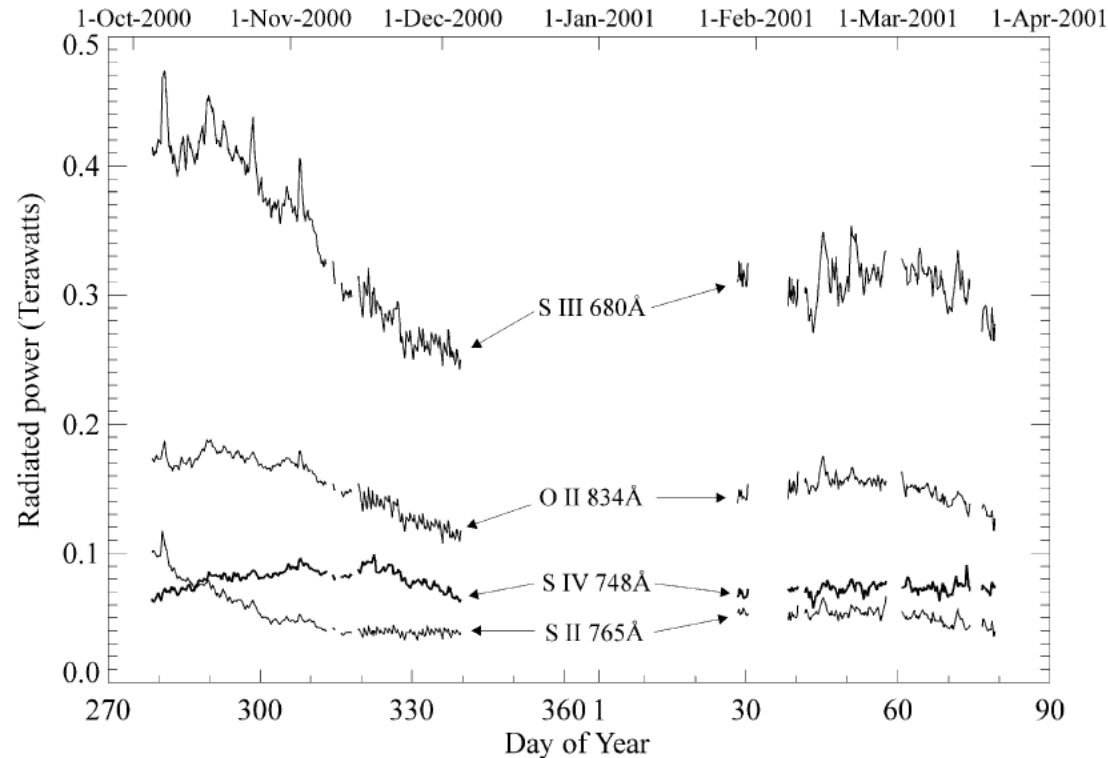


2013年11月（静穏期）と2015年2月（活発期）における、IPT内部のプラズマの密度・温度の動径分布 (Yoshioka+18)



# Cassini探査機の紫外分光観測から示唆される高温電子存在率の時間変動

- イオ衛星の火山活動に伴うIPT放射の変動が確認された。
- イオン組成比の観測結果を再現するためには、IPTへのプラズマ供給量の増加後に高温電子存在率の上昇が必要であることが示唆された (Steffl+08)。

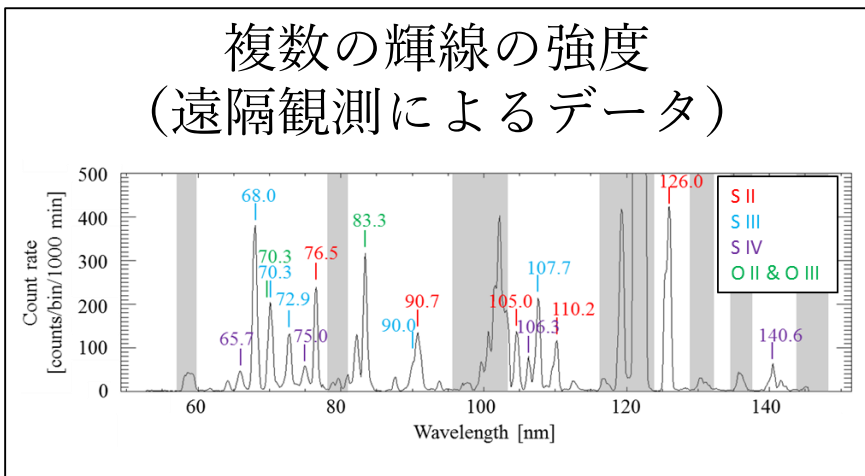


2000年10月～2001年3月における、各輝線の放射エネルギーの時間変動 (Steffl+04a)

# 本研究の目的

- これまでの研究で、火山活発期に高温電子の存在率が上昇することがわかっている。しかし、プラズマパラメタの詳細な時間変動および空間依存性に関する情報が得られていないため、高温電子存在率の上昇のメカニズムについて議論することができなかった。本研究では、解析手法を開発することにより上記の問題に取り組む。
- 高温電子の存在率をトレーサとして用いることにより、磁気圏へのプラズマ供給量が変化した際の磁気圏ダイナミクスへの影響を明らかにする。

# プラズマ診断の概要



プラズマの密度・温度  
(「その場」の物理量)

自然遷移確率

$$I(\lambda_{ji}) = 10^{-6} \int N_j A_{ji} dl \text{ [Rayleighs]}$$

j 番目のエネルギー状態に  
存在するイオンの密度  
(右式を解くことで計算可能)

$\alpha_{11}$	$\alpha_{21}$	$\alpha_{31}$	$\alpha_{41}$	$\cdot$
$\alpha_{12}$	$\alpha_{22}$	$\alpha_{32}$	$\cdot$	$\cdot$
$\alpha_{13}$	$\alpha_{23}$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$
$\alpha_{14}$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$
$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$

 $\begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix} = \mathbf{0}$

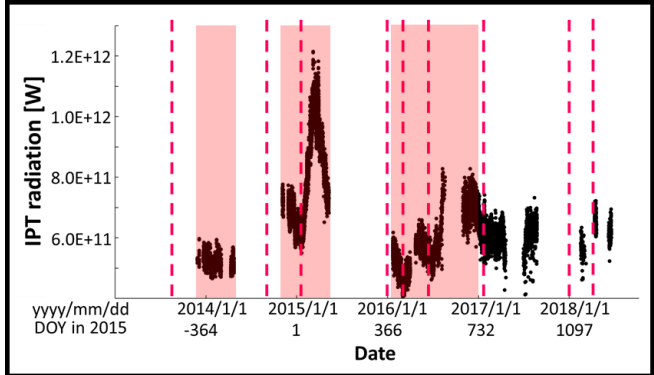
$\alpha_{ij} = A_{ij} + N_e \int_0^\infty \widehat{g}_e v \sigma_e dv$   
 自然遷移確率

$\widehat{g}_e v \sigma_e dv$   
 衝突断面積  
 電子の速度分布関数

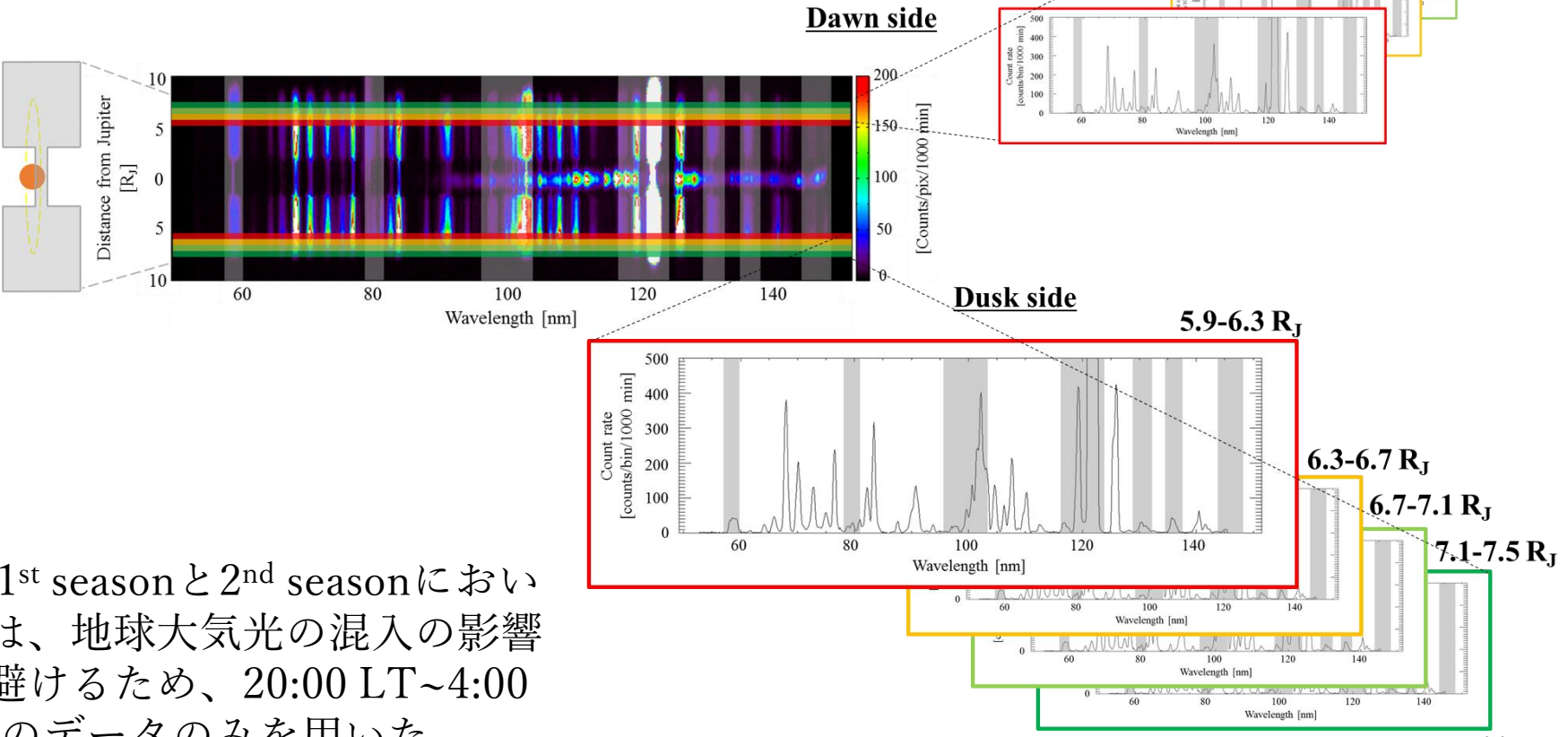
計算には、CHIANTI atomic database Ver. 8.0.7 (Dere+97)を用いた。

# プラズマ診断の手順①

## 140秒角幅スリットデータを用いた一次元スペクトルの作成



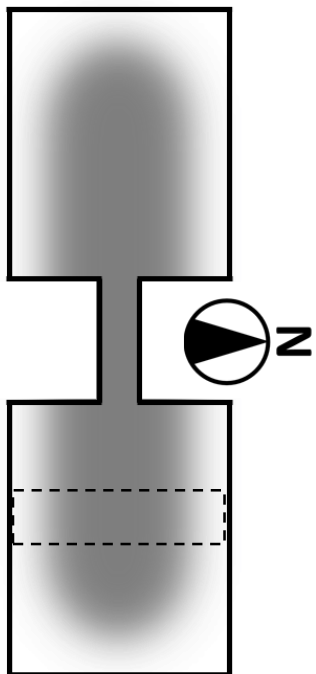
分光画像を~5日間ごとに積分し、一次元スペクトルを作成した。



※ 1<sup>st</sup> seasonと2<sup>nd</sup> seasonにおいては、地球大気光の混入の影響を避けるため、20:00 LT~4:00 LTのデータのみを用いた。

# プラズマ診断の手順② 輝線の強度の導出

←140'' : 6~8 R<sub>J</sub>に相当

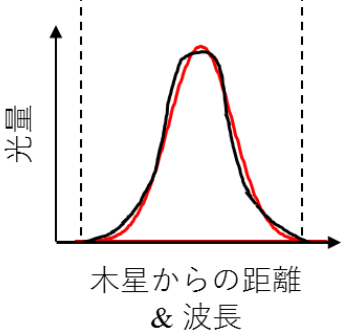


140秒角の幅のスリットを用いた観測では、視野内のIPTの発光が非一様である。

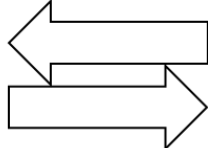
→逆畳み込み演算によりIPT発光の空間分布を推定し、総放射から赤道領域の輝線強度への変換式を求めた。

本研究で用いた輝線のリスト

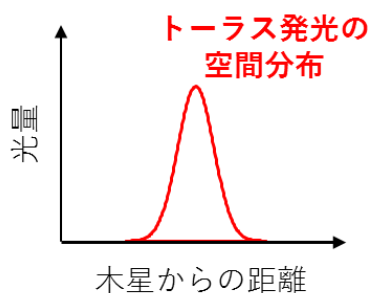
(1)	S IV	65.7 nm
(2)	S III	68.0 nm
(3)	S III	72.9 nm
(4)	S IV	75.0 nm
(5)	S II	76.5 nm
(6)	O II & O III	83.3 nm
(7)	S III	90.0 nm
(8)	S II	90.7 nm
(9)	S II	104.6 nm
(10)	S IV	106.3 nm
(11)	S IV	107.3 nm
(12)	S III	107.7 nm
(13)	S II	110.2 nm
(14)	S II	126.0 nm
(15)	S IV	140.6 nm



装置関数・ブレンド  
輝線との畳み込み



逆畳み込み演算

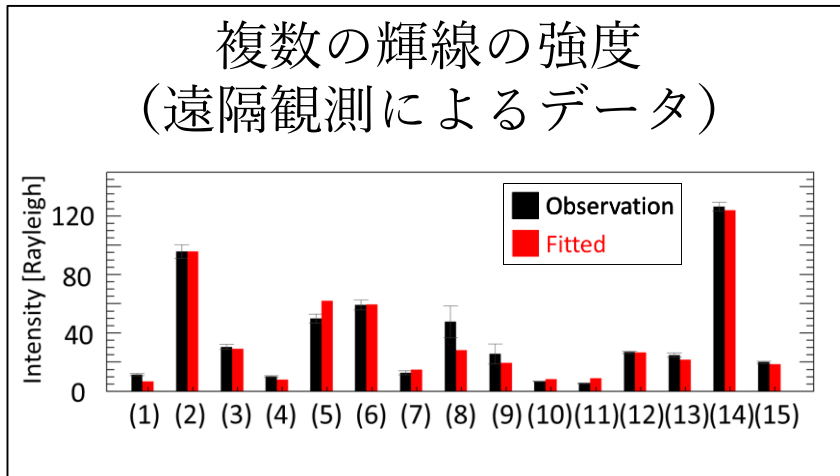


トーラス発光の  
空間分布

# プラズマ診断の手順③ 数密度・温度の推定

カイ二乗最小フィッティングを行い、**観測された輝線強度を最もよく再現することのできるプラズマのパラメタ**を探索する。

$$\chi^2(T_c, n_c, \dots) = \sum_{i=1}^{15} \left[ \frac{\overset{\text{観測値}}{y_i} - \overset{\text{モデル}}{y(i; T_c, n_c, \dots)}}{\sigma_i} \right]^2$$



プラズマの柱密度・温度  
(「その場」の物理量)

- 背景電子の柱密度
- 背景電子の温度
- 高温電子の柱密度
- イオンの柱密度 ( $S^+$ ,  $S^{2+}$ ,  $S^{3+}$ ,  $O^+$ )

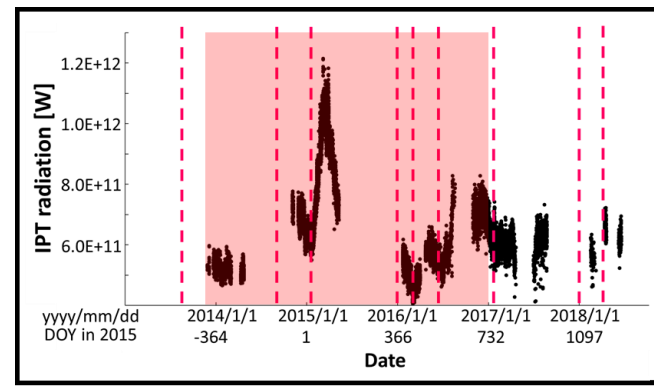
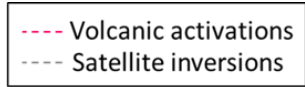
## ※仮定

- $[H^+]/[e^-] : 0.1$  (Bagenal94)
  - $[O^{2+}]/[O^+] : 0.1$  (e.g. Steffl+04b)
  - 電荷の中性
  - 高温電子の温度 : 200 eV (e.g. Bagenal94)
  - $[O^+]/[S^{2+}] : 1.0$  (e.g. Steffl+04b)
- (3rd seasonのみ)

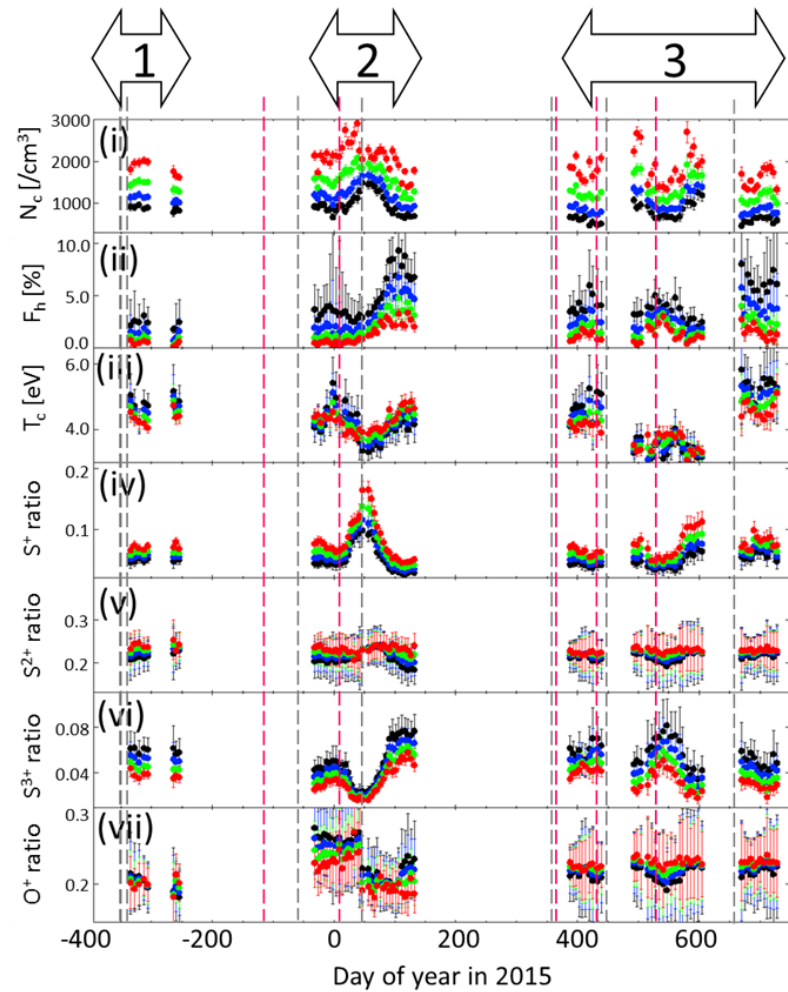
プラズマの数密度・温度

※数密度は動径距離の冪乗分布で表されると仮定し、柱密度から数密度への変換を行った。

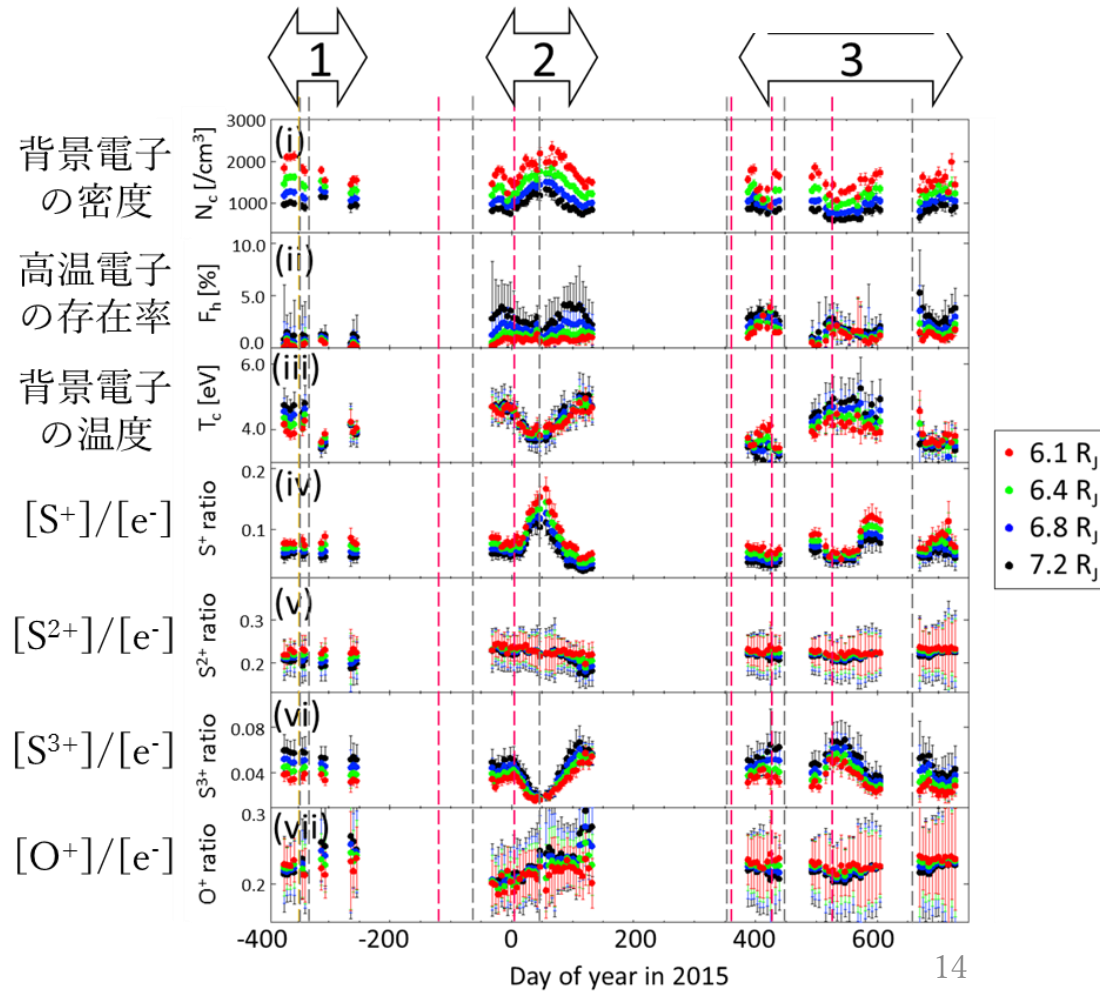
# プラズマ診断の結果 (全期間)



(1) Dusk side

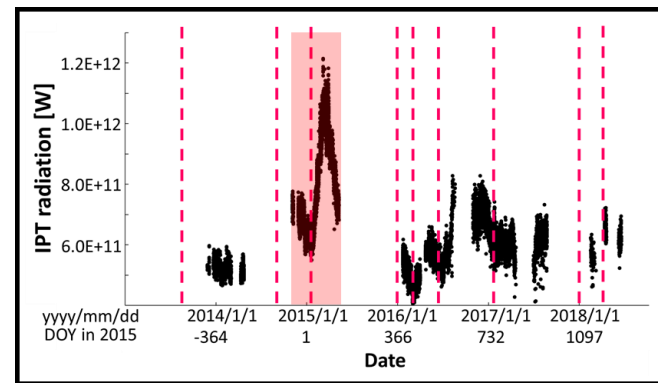


(2) Dawn side

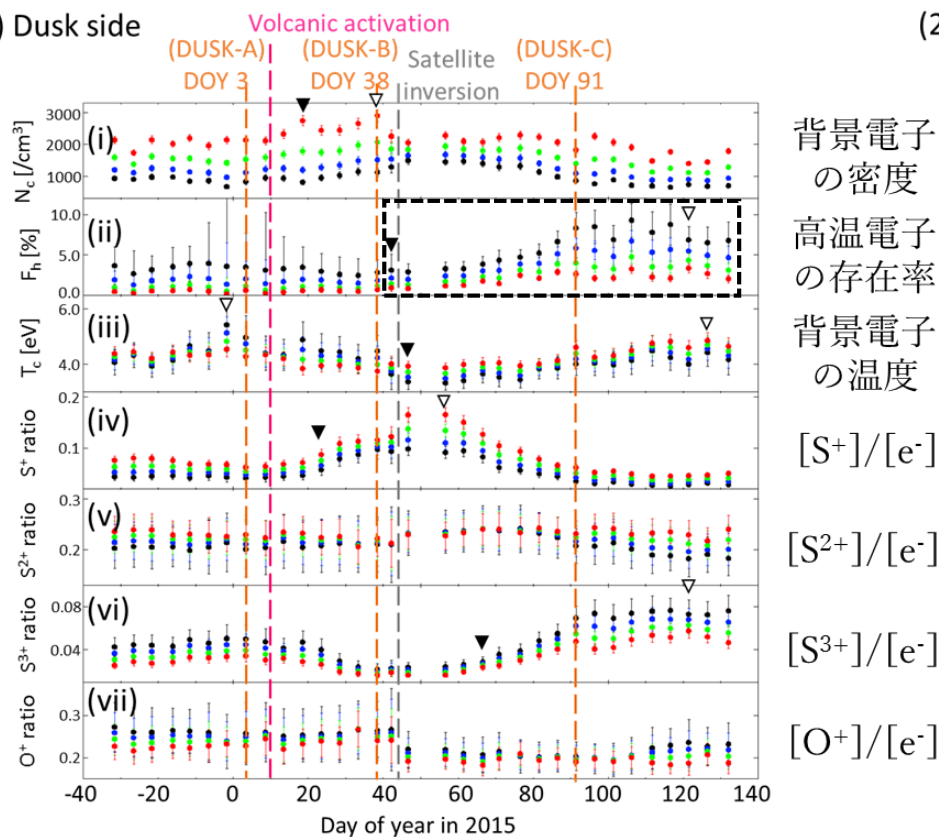


# プラズマ診断の結果 (2<sup>nd</sup> season: DOY -32~132)

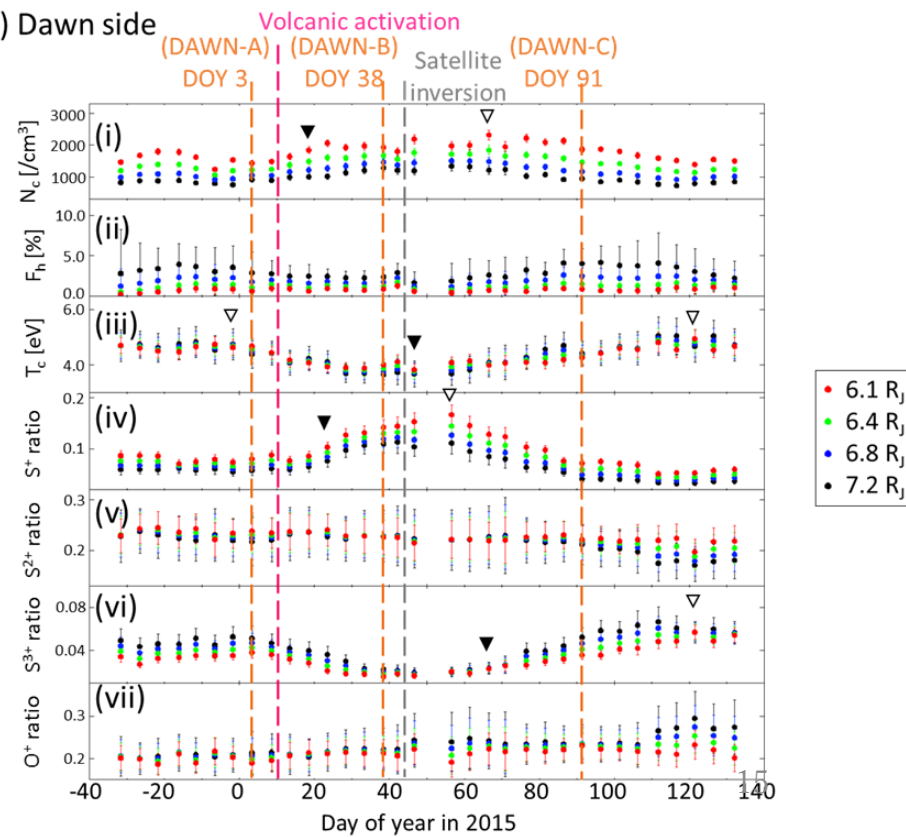
- 火山活動の活発化に伴った各パラメタの変動が見られる。
- 火山活発化開始の~30日後から、dusk側のみで高温電子の存在率が上昇している。



(1) Dusk side

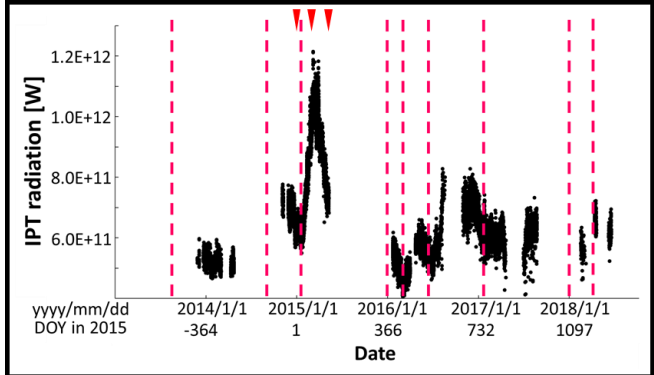


(2) Dawn side



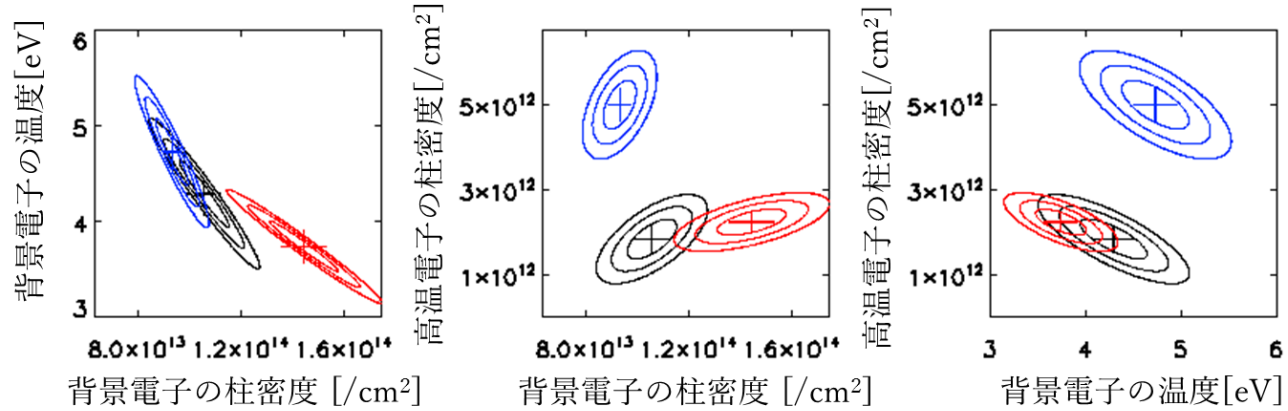


# 結果の妥当性の評価



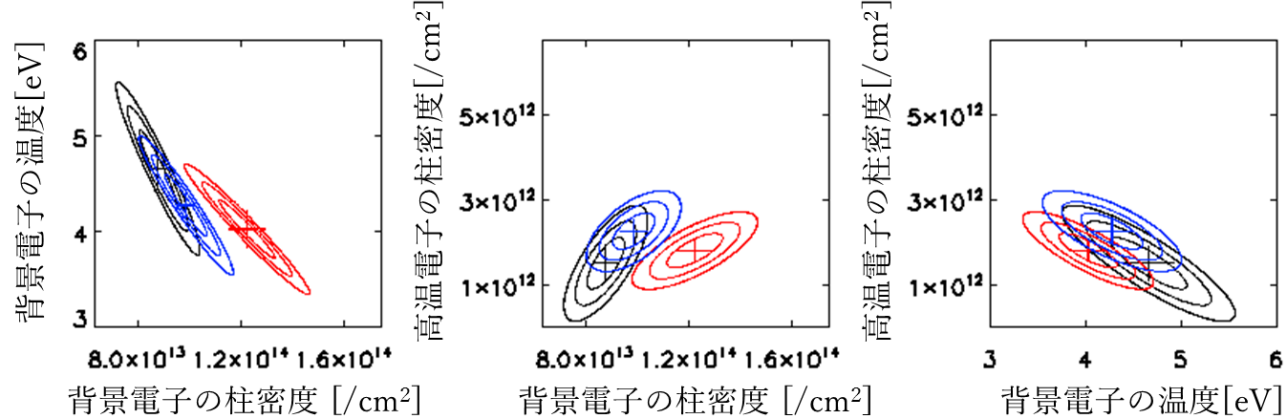
— DOY 3 (静穏期)  
 — DOY 38 (背景電子密度が最大)  
 — DOY 91 (高温電子の存在率が最大)

Dusk side



Dusk側での高温電子の柱密度の上昇が有意であると考えられる。

Dawn side

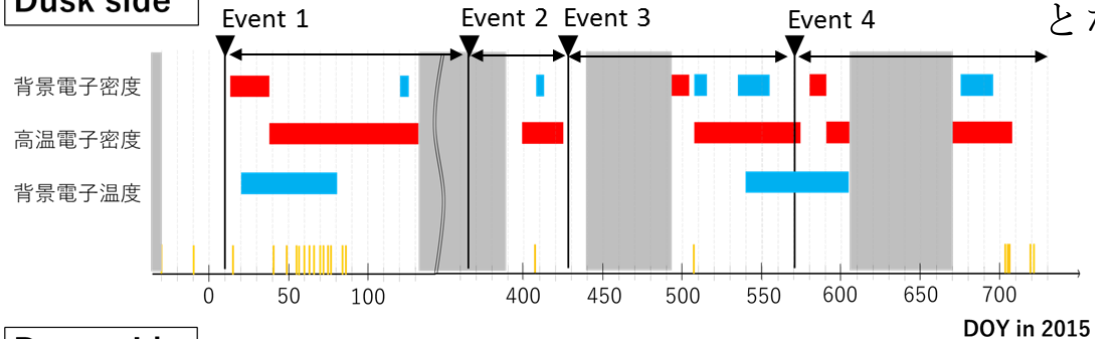


木星からの距離6.1 R<sub>J</sub>における、電子のパラメタについての二次元カイパラメタマップ。68.3%信頼区間・95.4%信頼区間・99.7%信頼区間 (1σ・2σ・3σに対応)を表す。

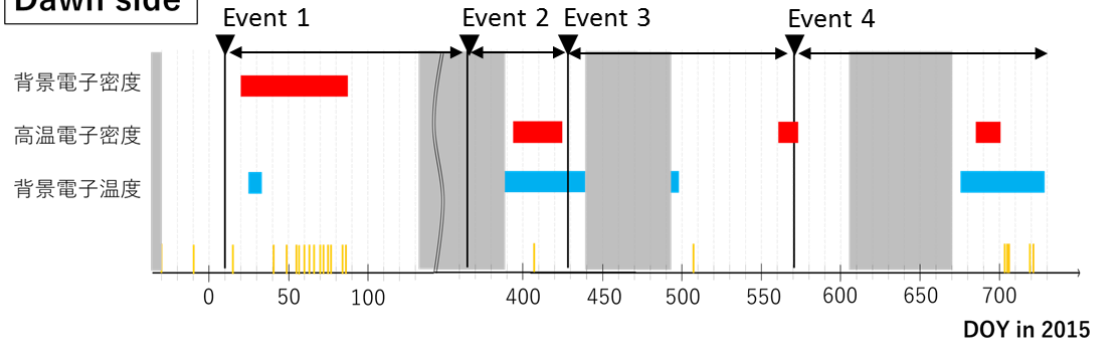
# 火山活動に伴ったプラズマ密度・温度の変動 の大まかな傾向

※電子パラメタの増加・減少の判定条件：  
火山静穏期の平均値から±1σの範囲外の値  
となる点が2点以上続くこと。

## Dusk side



## Dawn side



- ▼ 火山活発化が開始した時期
- パラメタが増加した期間
- パラメタが減少した期間
- 非観測期間
- オーロラ大増光が発生した時期

火山活発化から元の状態への回復までの一連の流れをとらえられているEvent1では、以下のような電子パラメタの変動がとらえられている。

※観測期間の都合で見にくいですが、他のEventでも概ね同様の傾向である。

### 火山活発化

- 背景電子密度の上昇 & 背景電子温度の下降
- 高温電子密度の上昇



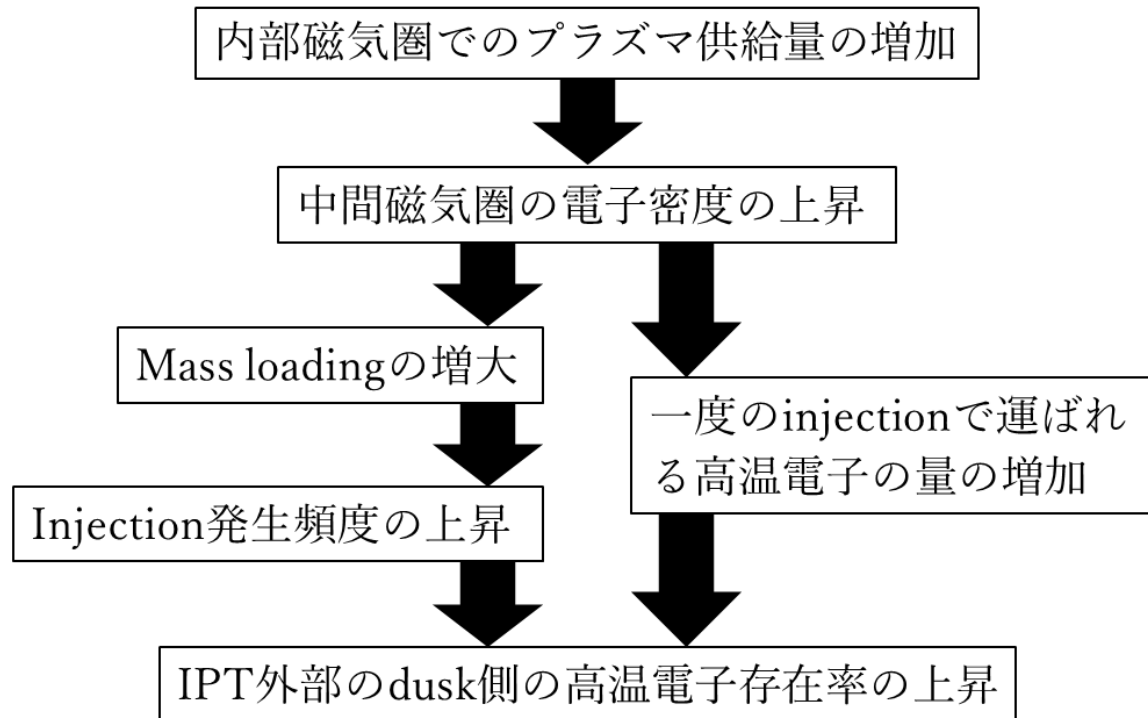
# 議論②高温電子密度が上昇するまでの時間スケール

Event number	IPT放射のピーク値 [GW]	上昇までの時間スケール [日]	
		Dusk	Dawn
1	1200	$28 \pm 3$	<del><math>28 \pm 3</math></del>
2	620	$33 \pm 3$	$28 \pm 3$
3	660	$73 \pm 3$	$126 \pm 3$
4	820	$21 \pm 3$	$115 \pm 3$

- 上昇のタイミングがdawn側より遅いイベントは確認されなかった。  
→Dusk側の高温電子密度が上昇するまでの時間スケールは、Dusk側に高温電子が供給されるまでの時間スケールを示す。
- 火山活発化から高温電子がdusk側に供給されるまでの時間スケールは、20~70日程度である。

※高温電子密度の増加・減少の判定条件：  
静穏期の平均値から $\pm 1\sigma$ の範囲外の値となる点が2点以上続くこと。

# 本論文で新たに得られた知見に基づく、 内部磁気圏ダイナミクスの変動についての示唆



(※オーロラ・IPT突発増光現象の観測結果 (Suzuki+18) から、injectionはdusk側に入り込みやすいことが示唆されている)

# まとめ

- イオ衛星の火山活動に伴った、IPT内部の各種のプラズマパラメタの時間変動を明らかにした。
- 高温電子をトレーサとして用いることにより、磁気圏へのプラズマ供給量に伴うダイナミクスの変動についての情報を得た。

