

# ひさき衛星とJuno探査機のデータを用いた木星内部磁気圏の電子分布

東京大学

眞田聖光 吉岡和夫

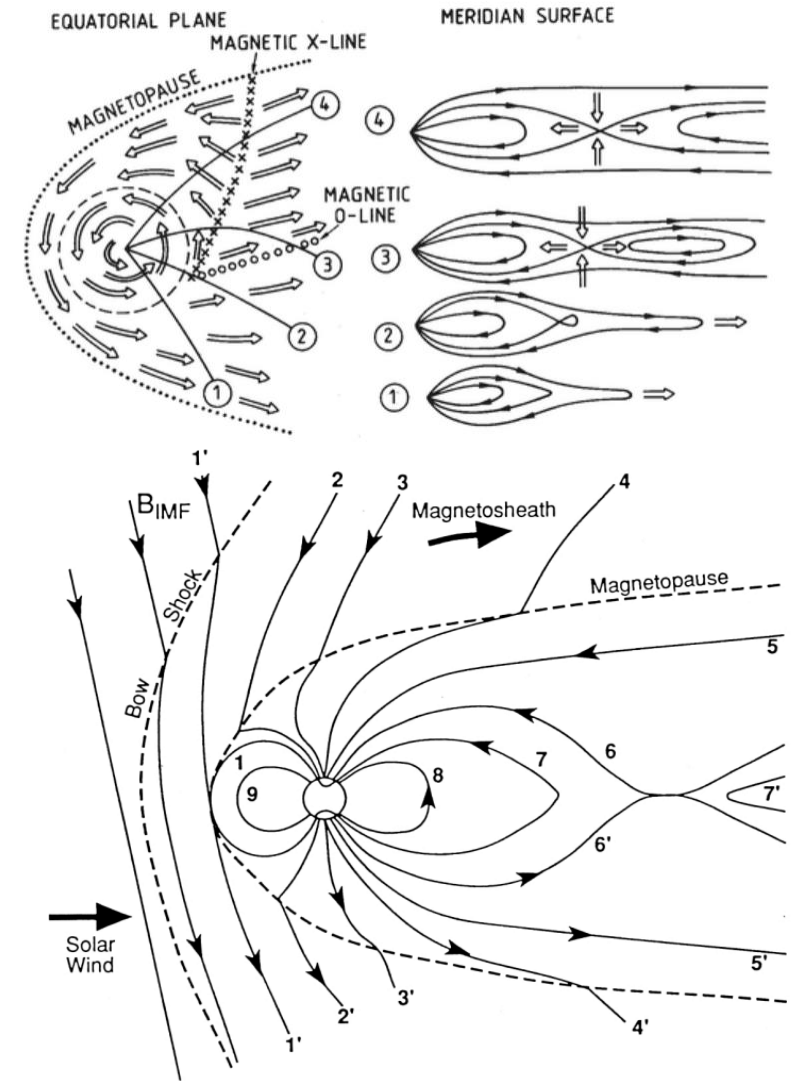
2023/2/20-22 惑星圏シンポジウム

これまでひさき衛星による極端紫外線観測データによりイオプラズマトーラスを含む木星の内部磁気圏の様子が見られてきた。その結果、イオの火山活動の活発化により、イオトーラス中のプラズマが磁気圏外向きに輸送されていることが示唆された。

これを確かめるため、ひさきの視野より遠方領域を軌道に持つJuno探査機の観測データを利用する。本研究では、ひさきとJunoの観測データの整合性を求めるため、電子エネルギーを共通のパラメータとし、ひさき衛星のスペクトルデータからプラズマ診断を行い、電子温度・密度を求めた。また、イオの火山活動活発化前後での電子エネルギー分布をJunoの観測データより求めた。これにより、ひさきとJunoのデータ検証を行うための共通のパラメータを求めることができた。今後、内部磁気圏でのパラメータの整合性を確認し、より遠方の磁気圏調査に応用する。

- 木星磁気圏と地球磁気圏の比較
- 地球磁気圏は主に太陽の活動に応じて変動する
- 木星磁気圏は内部駆動型のサイクルであり、太陽以外に木星衛星が磁気圏に影響を及ぼす特徴を持つ
- イオの火山活動が木星磁気圏の駆動に影響を及ぼすことが知られる

	木星	地球
太陽からの距離	1	5.2
磁気モーメント比	20000	1
サイクルモデル	Vasyliunas cycle	Dungey cycle



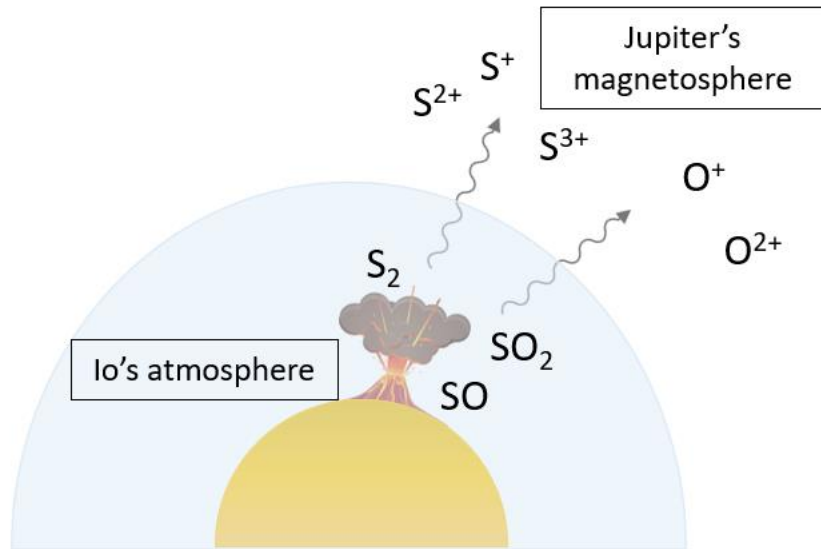
木星磁気圏<sup>[1]</sup>(上)と地球磁気圏<sup>[2]</sup>(下)の様子

[1]Vasyliunas et al.(1987) [2]Dungey, J. W. et al.(1961)

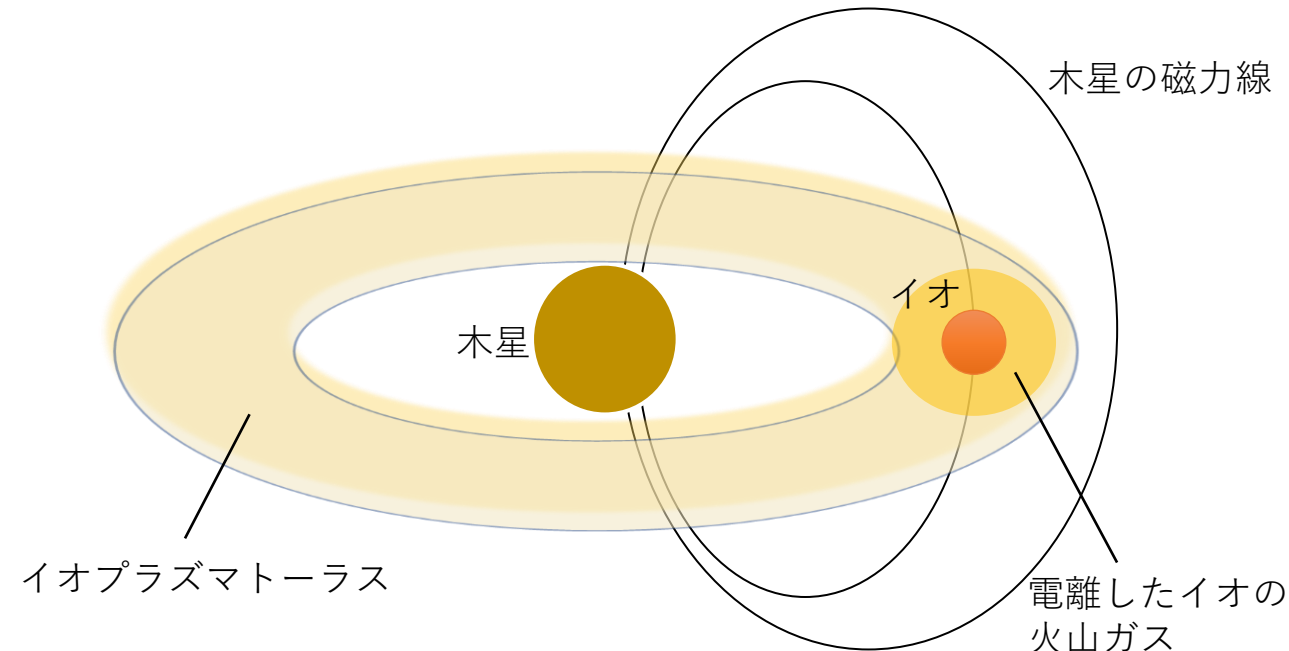
- 木星の内部磁気圏にはイオの火山活動によってイオプラズマトーラスが形成される



- 火山ガスは宇宙空間に放出され、電離してプラズマになる
- プラズマが木星の高速自転と共回転する磁力線に捕捉され、自转角運動量と遠心力のつり合いからトーラス状のプラズマ帯を形成する→イオプラズマトーラス(IPT)
- イオの軌道半径は約 $6R_J$ で、IPTの形成領域は約 $5.9\sim 8.2 R_J$

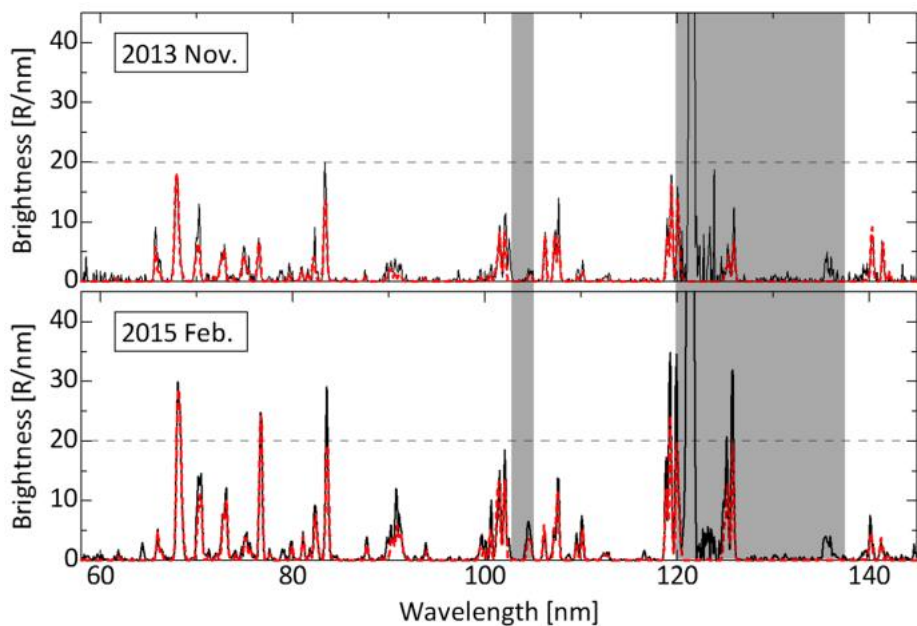


イオ火山の噴火後の様子

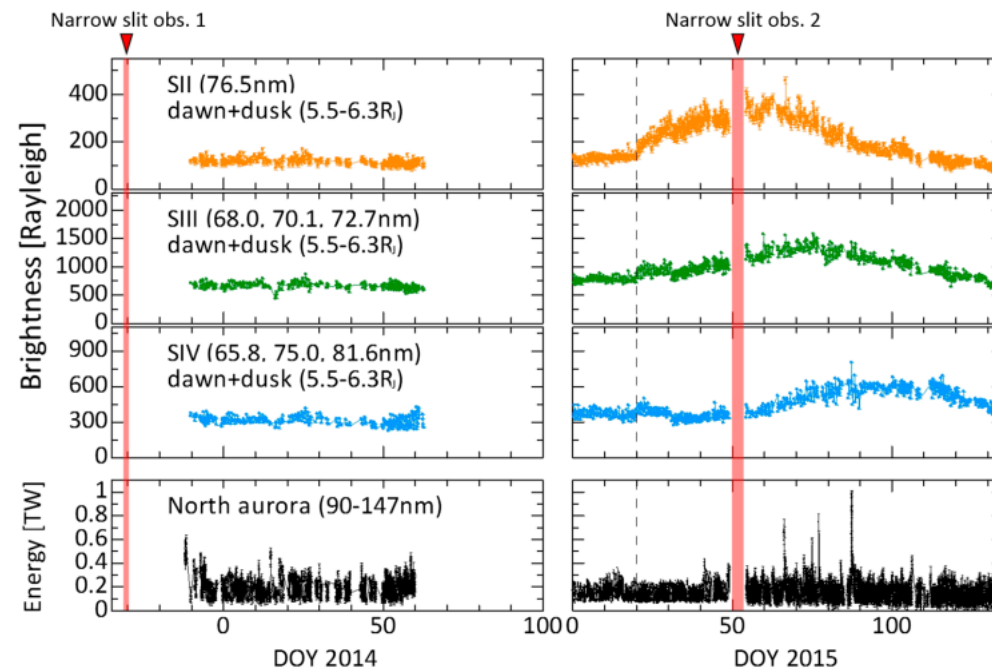


イオプラズマトーラス形成の様子

- 先行研究では、ひさきの観測データから、イオの火山活動が活発になったときに発光が増加することが分かった ([1]Yoshioka et al.(2018))
- また、火山活動の活発期に発生するプラズマの外向きの輸送が示唆された



火山活動の閑静期(上)と活発期(下)の発光量

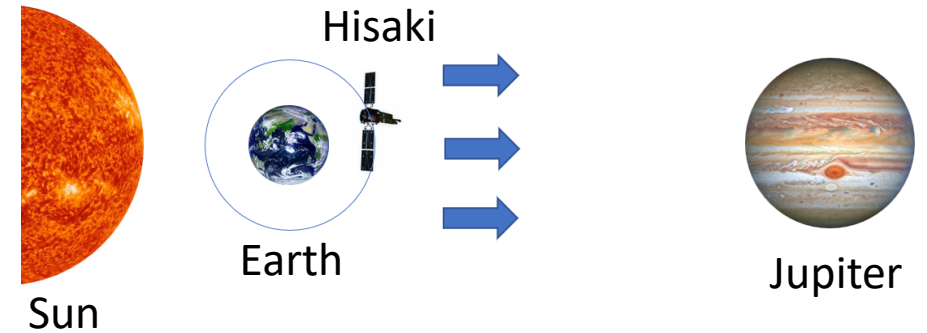


火山活動の閑静期(左)と活発期(右)のイオン別発光量

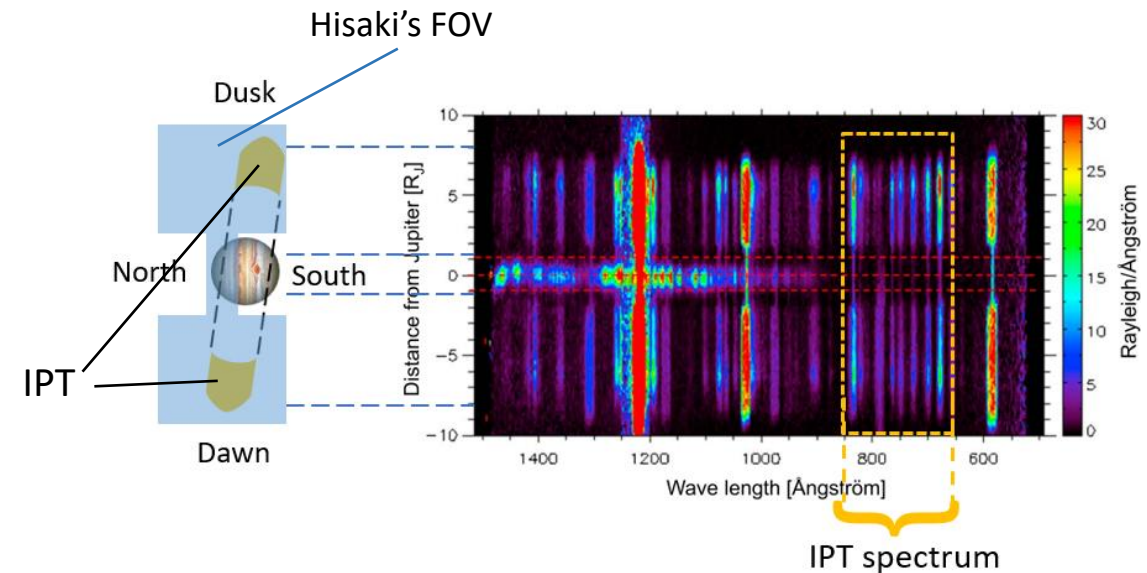
# 木星磁気圏の観測

## ひさき

- 地球周回型の惑星観測衛星
- 観測期間: 2013/11/19～現在
- 波長分解能と空間分解能を持つ
- 波長範囲 : 52～148nm(極紫外光観測)
- 観測視野 (FOV):木星の北極 + IPT ( $\leq 8R_J$ )  
→IPTの発光を観測
- 本研究ではダンベル型スリット (140+10+140arcsec)での観測データを使用
- ひさきが観測するIPT中の主要イオン  $S^{2+}$ ,  $O^{2+}$ ,  $S^{3+}$



地球周回衛星ひさきの様子

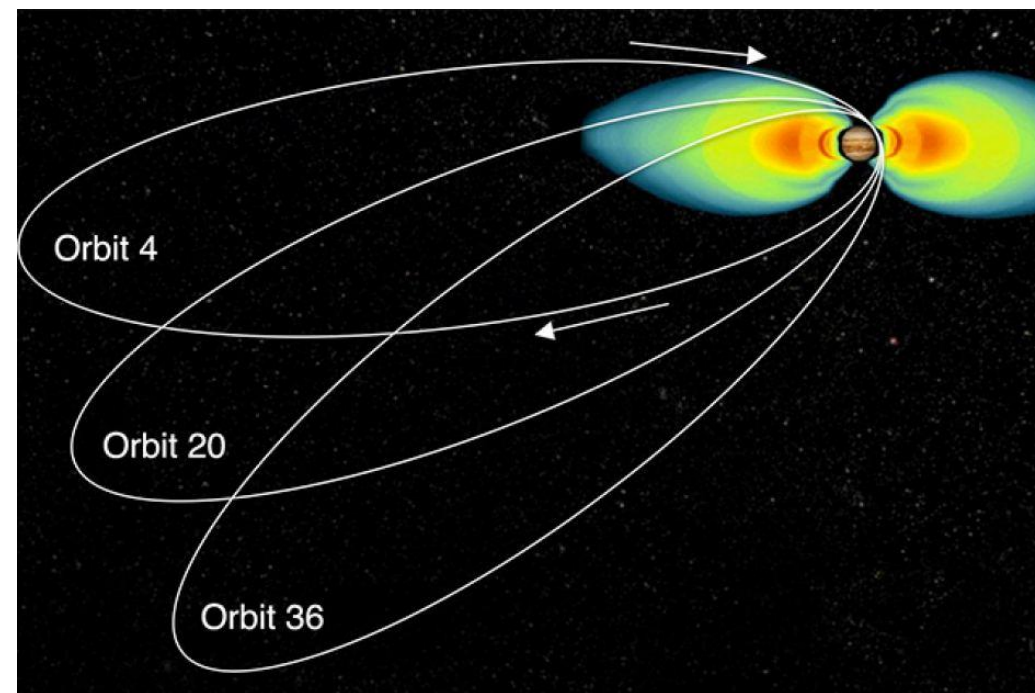


ひさきの観測視野と観測波長データ<sup>[1]</sup>の様子  
[1]F.Tsuchiya EXCEED X/Y-axes cal



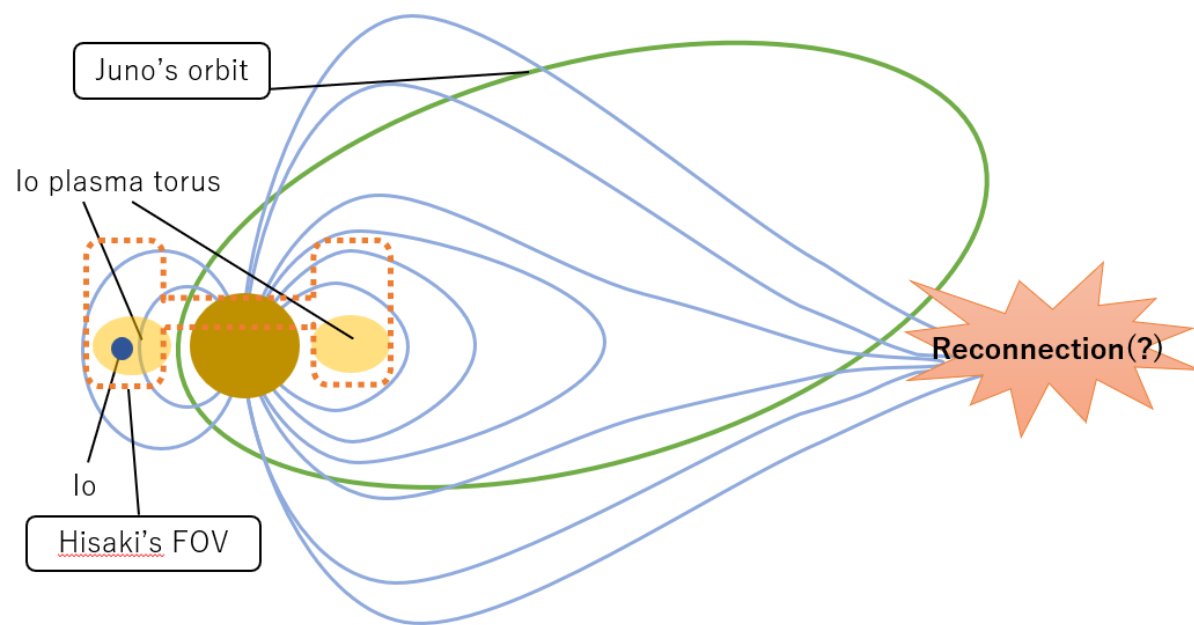
## Juno

- ・木星周りを楕円軌道で航行  
最長で木星から100RJの距離まで到達する
- ・観測期間：2016/7/5～Now
- ・複数の観測機器を搭載。本研究で用いた機器は以下
  - ・ JEDI：比較的高エネルギーの粒子エネルギー量を計測
  - ・ JADE：比較的低エネルギーの粒子エネルギー量を計測
- ・40日毎の頻度で木星に接近する(Perijove)



Credit: NASA

- ひさきは遠方観測で、イオの火山活動が活発化した後のイオン発光量の時間変化を観測できる
- Junoはその場観測で空間分解能に優れる
- 両観測データの利用により、内部磁気圏と外側の磁気圏のプラズマの分布に関するデータが得られる



ひさきとJunoの観測比較



## 背景

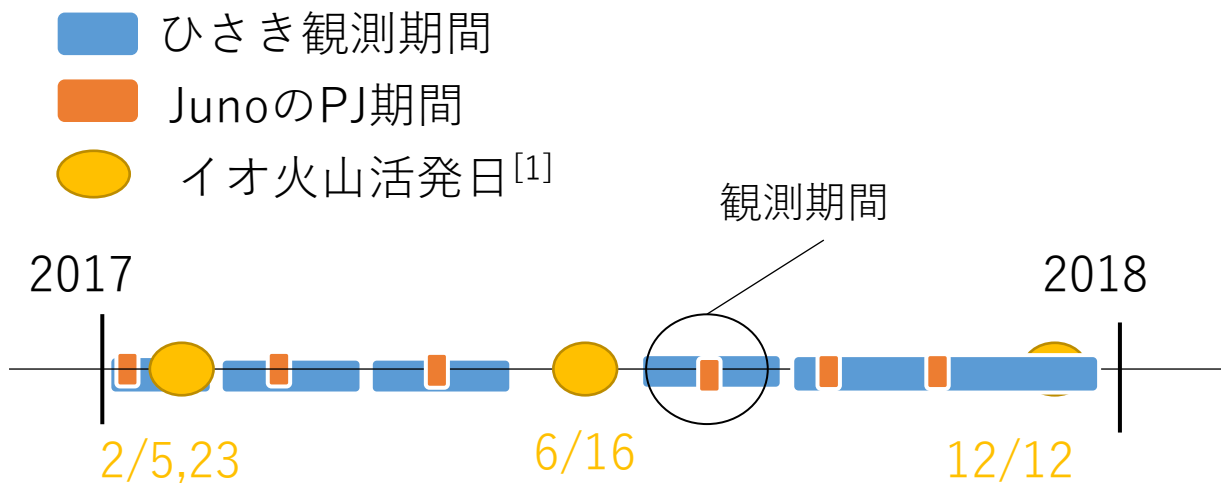
- 木星磁気圏はイオの噴火活動により駆動される
- イオ活発時に磁気圏外向きのプラズマの輸送が示唆された
- ひさきの視野外でのプラズマ分布データが必要

## 目的

- Junoによる内部磁気圏外の観測データを利用し、外向き輸送の様子を調べる
  - ひさきとJunoのデータから得られる共通のパラメータを求める
  - 同じ観測領域で得たパラメータの整合性を確認する
  - 内部磁気圏と外側磁気圏における両パラメータを比較し、磁気圏全体の電子分布を得る

- ・イオの表面温度が上昇した時期を火山活動活発期とした
- ・火山活発化から20日前後経過時にIPTでの発光増加が始まる<sup>[1]</sup>
- ・20日経過時にひさきの観測時期とJunoのPJがある時期を選定
- ・6/16のイオ活発化日後の6/29,7/7,7/14のデータを使用

- ・IPT中の主要イオンの中から、本研究ではSイオンの波長別発光量を求める
- ・Sイオンのスペクトルのみを見るため、本研究ではジオコロナの影響は小さいと考え、考慮しない



[1]de Kleer et al. 2019

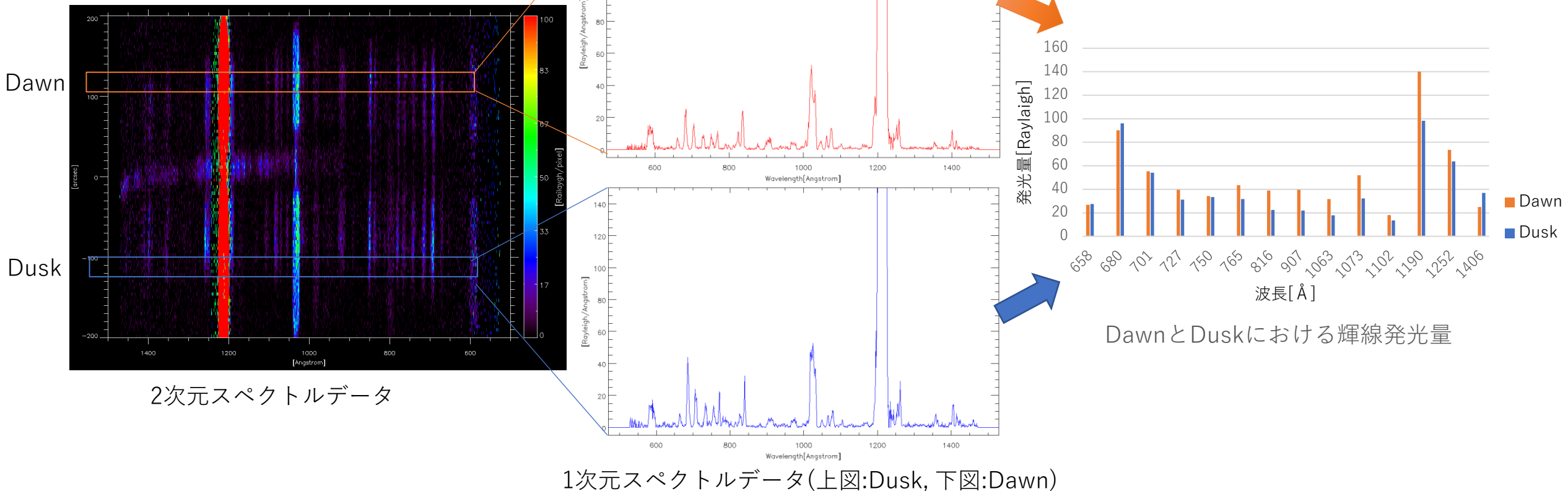
2013-2017でのイオ表面温度<sup>[1]</sup>  
 High-temperature Eruptions\*, 2013-2018

Site	Date (UT)	$\mu$	$T^b$ (K)	References
Shamash Patera	2016 Jun 20	0.81	1000 ± 110	
	2016 Jun 27	0.74	850 ± 80	
Culann	2017 Jun 16	0.81	860 ± 140	
	UP 254W	2018 May 10	0.63	960 ± 100
PV170	2014 Dec 2	0.42	850 ± 40	(c)
Isum Patera	2018 May 27	0.48	1200 ± 220	
	2018 May 31	0.70	1180 ± 120	
	2018 Jun 16	0.84	1120 ± 100	
	2018 Jun 18	0.43	1440 ± 410	
	2018 Jun 23	0.85	980 ± 70	
	2018 Jun 25	0.62	1230 ± 280	
	2018 Jun 30	0.85	1010 ± 80	
PFd1691	2018 Jan 19	0.98	830 ± 80	
Rarog Patera	2013 Aug 15	0.60	1300 ± 200	(d)
	2014 Feb 10	0.78	890 ± 120	(c)
	2015 Mar 31	0.76	950 ± 60	(c)
PV59	2014 Oct 31	0.59	950 ± 200	(c)
P95	2016 May 17	0.39	1020 ± 180	
Kurdalagon Patera	2015-Jan-26	0.54	1200 ± 150	(c)
	2015 Mar 31	0.26	820 ± 110	(c)
	2015 Apr 5	0.57	1300 ± 200	(c)
Tawhaki Patera	2014 Mar 11	0.54	900 ± 170	(c)
	2018 Jan 19	0.97	800 ± 90	
P197	2014 Mar 11	0.67	1000 ± 250	(c)
N Lerna Regio	2014 Dec 2	0.50	820 ± 180	(c)
	2015 Mar 31	0.54	940 ± 120	(c)
Reiden Patera	2017 Dec 12	0.90	1170 ± 100	
201308C	2014 Dec 2	0.64	850 ± 160	(e)
SE of Pele	2017 Dec 12	0.79	950 ± 160	
P123	2015 Jan 11	0.74	820 ± 160	(c)
Illyrikon Regio	2016 Jun 20	0.24	1210 ± 690	
	2016 Jun 27	0.17	1060 ± 340	

観測イオンとその波長

輝線	波長(Å)
SIV	658
SIII	680
SIII	701
SIII	727
SIV	750
SII	765
SIV	816
SII	907
SIV	1063
SIV	1073
SII	1102
SIII	1190
SII	1252
SIV	1406

- 2017/7/7のひさき観測スペクトルデータを求めた
- Dawn側とdusk側のそれぞれ6~7.5 $R_J$ の1次元スペクトルデータを用いてSイオンの輝線発光量を求めた
- 発光量は先行研究<sup>[1]</sup>の傾向とおおむね一致した([1] Hikida et al.(2020))  
→816 ÅはO<sup>+</sup>の輝線混入が考えられる

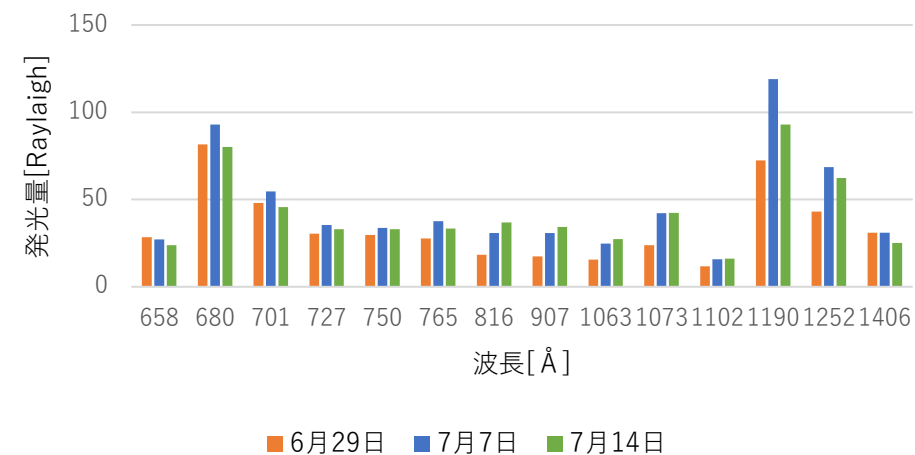


# 輝線発光量の時間変化

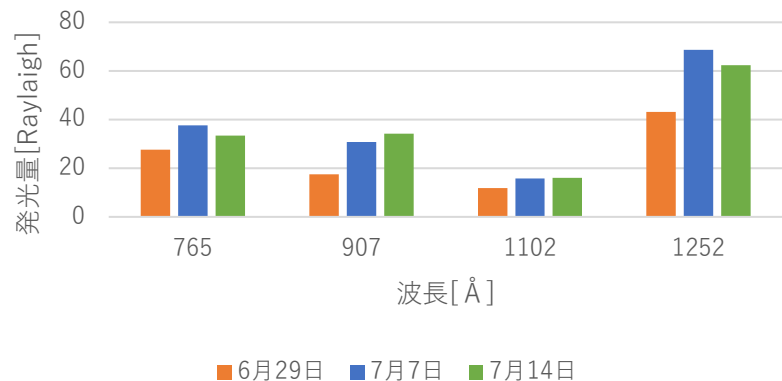
- 6/29,7/7,7/14のSイオン輝線発光量を求めた
- 短波長・長波長の発光量はイオ活発化後3週間の7/7が最も大きくなった
- 中波長は、活発化後4週間の7/14が最も大きくなった
- イオン別に各日の発光量を求めた結果を示す
- この結果より、イオンの組成比に関わらず短波長・長波長の発光量は日ごとに減少し、中波長は増加することがわかる

→電子温度が日ごとに小さくなることを示唆する

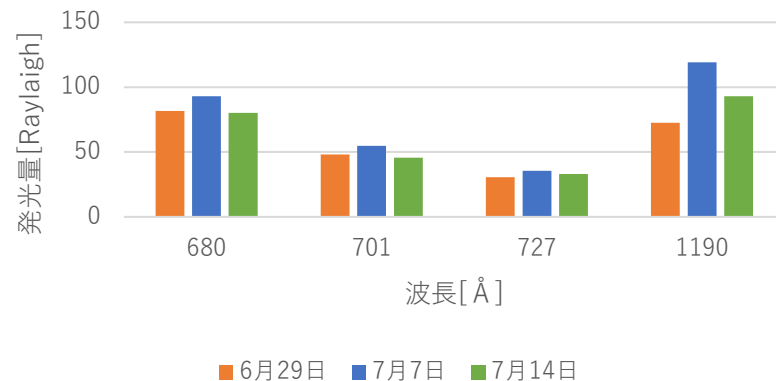
日別の輝線発光量



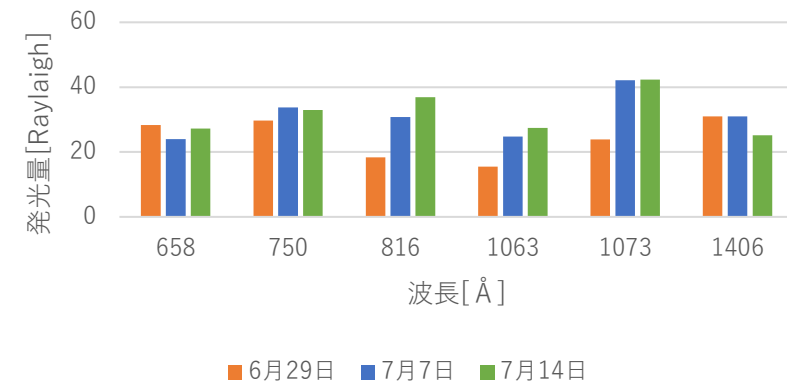
SIIの日別発光量



SIIIの日別発光量



SIVの日別発光量



## 電子温度・密度の算出

- 輝線発光量を表す式([1] Andrew J. Steff et al.(2004) )

$$B = 10^{-6} \int N_j A_{ji} dl \quad [\text{Rayleigh}]$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{21} \\ \alpha_{12} & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_1 \\ \vdots \end{pmatrix} = 0$$

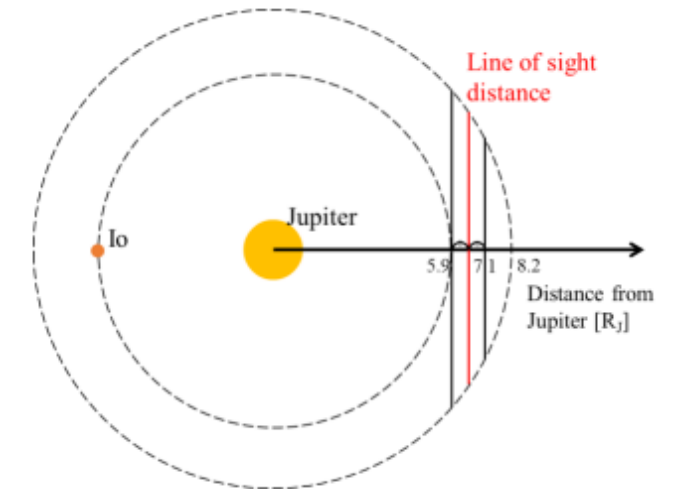
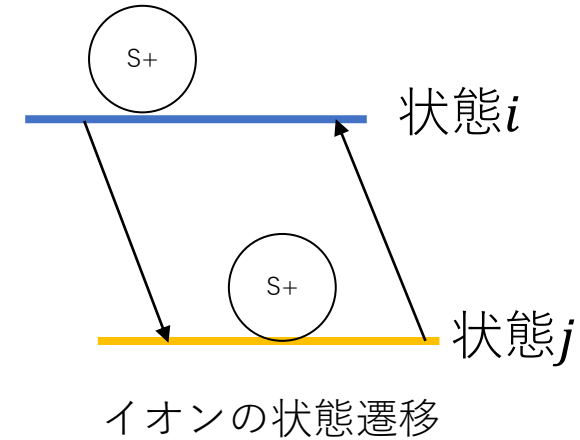
$$\alpha_{ij} = A_{ij} + N_e \int_0^\infty \widehat{g}_e v \sigma_e dv$$

$A_{ji}$ :アインシュタイン係数, (状態jからiに遷移する確率),

$N_j$ :状態jのイオン密度,  $N_e$ :電子数密度,  $\widehat{g}_e$ :正規化した電子速度分布,

$v$ :電子速度,  $\sigma_e$ :衝突断面積,  $l$ :視線方向距離

- 原子データベースCHIANTI(ver.10.0.2)を用いて $A_{ji}$ と $\sigma_e$ を計算
- ひさき観測で得られた発光量を示すのときの各パラメータを求める



視線方向距離の計算[2]  
[2] Hikida et al.(2020)

- イオンと電子のパラメータを設定し、CHIANTIを利用して各輝線の発光量を求めた
- パラメータ値を変更しひさき観測で得た輝線のフィッティングを行った
- 誤差評価は最小二乗法で行った

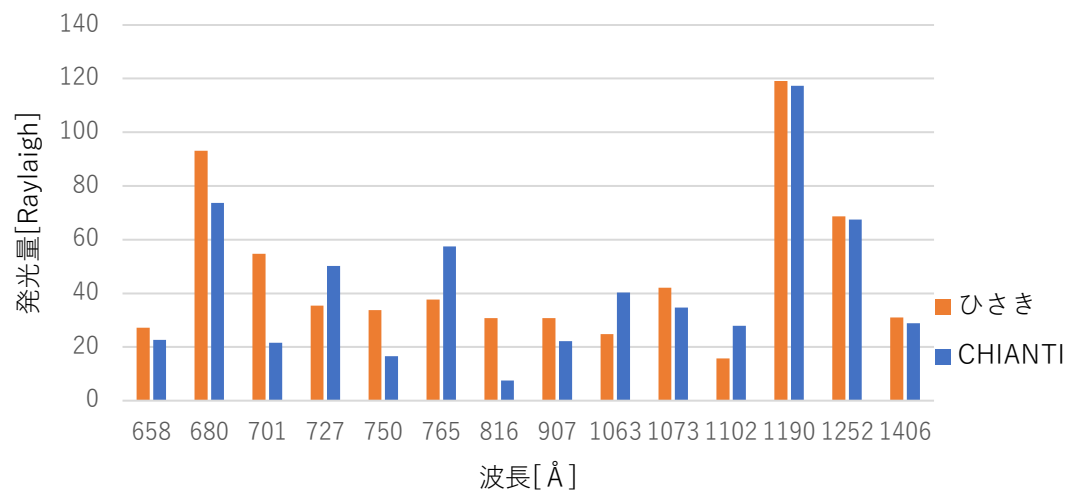
$$(\text{最小二乗}) = \sum_0^n \left\{ \left( \frac{(B_H) - (B_C)}{B_H} \right)^2 \right\}$$

$B_H$ : ひさき観測での輝線発光量,  $B_C$ : CHIANTIでの輝線発光量

- 今後Levenberg-Marquardt(LM)法を手法として用いて、より誤差の小さいパラメータを求める

設定したパラメータ値

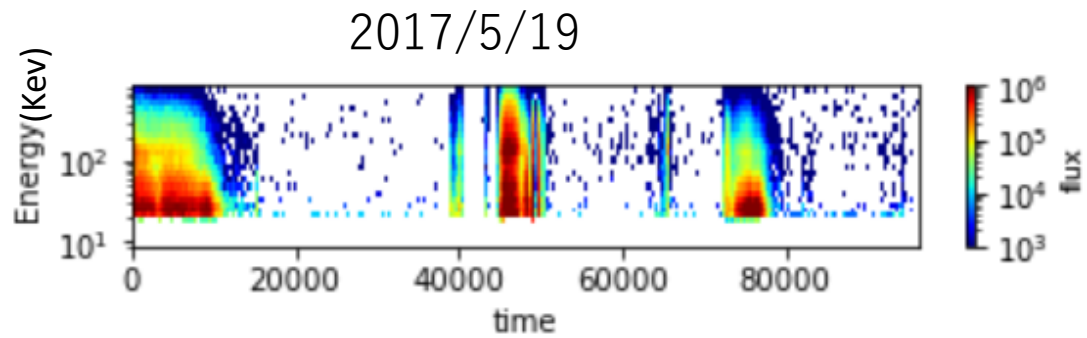
パラメータ	設定した値
電子密度[#/cc]	2570
SII密度[#/cc]	150
SIII密度[#/cc]	722
SIV密度[#/cc]	60
SV密度[#/cc]	15
電子温度[eV]	5.3



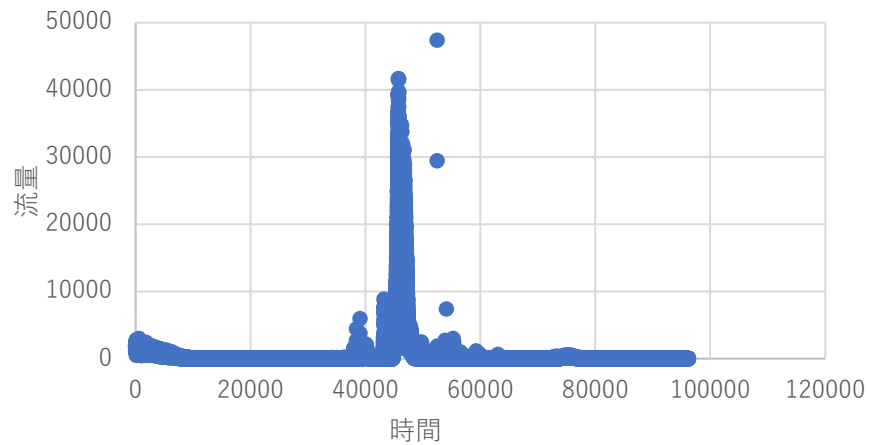
Sイオンの輝線発光量



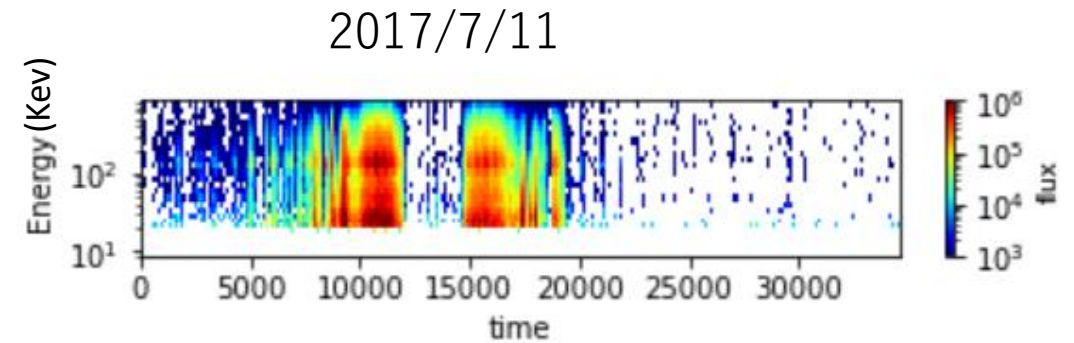
- JEDIのイオ活発期前後のPJ時観測データ
- 高エネルギー粒子の流量が5/19から7/11で3～5倍に増加した
- Juno観測においても、内部磁気圏でイオ火山活発後に電子エネルギーが増加することが示された



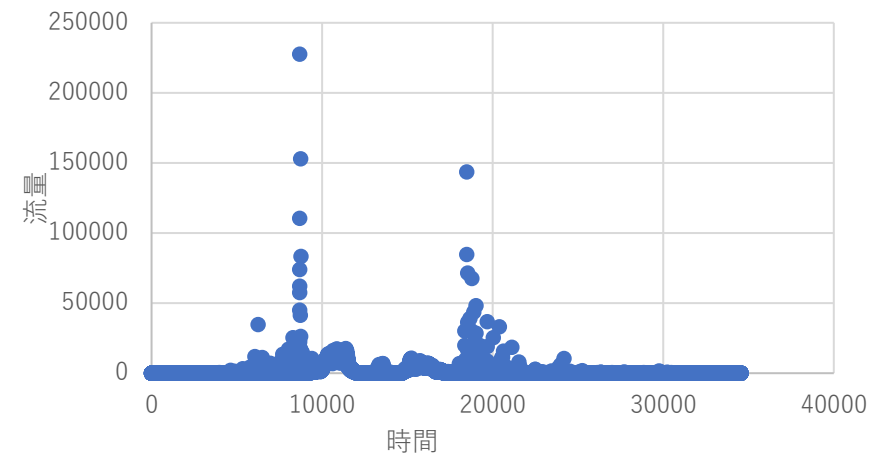
電子のエネルギーごとの流量分布図



2017/5/19 806.5~1185.46eVのFLUX



電子のエネルギーごとの流量分布図



2017/7/7 806.5~1185.46eVのFLUX

- ひさき観測から、イオの火山活発化でIPT中の増光がみられ、外向きのプラズマ輸送が示唆された
- ひさき視野外の輸送を調べるため、Junoの観測データを利用する必要がある
- 本研究では、ひさきとJunoのデータ整合性を求めるために、ひさきデータから電子の温度、密度パラメータを求めた
- さらに同時期でのJunoの電子エネルギー分布についても求めた
- 今後、ひさき観測データからの電子温度、密度導出をLM法により求め、誤差を最小にする
- ひさきとJunoの電子エネルギーを比較し、整合性について評価する
- 内部磁気圏の内外における電子エネルギー分布を比較し、磁気圏全体での電子エネルギー分布を求める