

東京大学大学院新領域創成科学研究科

複雑理工学専攻

2023 年度

修士論文

イオの火山活動が及ぼす木星内部磁気圏の
プラズマダイナミクスへの影響に関する研究

2024 年 1 月 23 日提出

指導教員 吉岡 和夫 講師

眞田 聖光

要旨

木星磁気圏の挙動はイオの火山由来のプラズマによって駆動されると考えられており、そのダイナミクスを理解は、太陽風によって駆動される地球磁気圏と比較することで、惑星一般における磁気圏構造を理解することができると考えられている。イオの火山活動前後でのプラズマ分布やその動きの変化から、磁気圏内プラズマの輸送状況を理解することができる。火山イベントの前後で電子の移動の特徴がつかめれば、プラズマのよりタイムスケールの短い挙動の解明につながる。本研究では、地球衛星ひさきによって観測された木星とイオトーラス周辺の極紫外線スペクトルデータと、探査機 **Juno** によって取得された電子エネルギー分布観測データを解析し、木星内部磁気圏内の電子分布のPJごとの変化を明らかにし、火山から発生したプラズマの輸送速度を導出した。更に、先行研究の木星磁気圏内プラズマ輸送シミュレーションと比較することで、この輸送速度について議論した。

ひさき衛星は地球周回軌道から木星とイオの火山が形成するプラズマ帯であるイオプラズマトーラスをリモートセンシング観測している。一方で木星探査機 **Juno** は木星の周回軌道上で木星の観測を行うため、ひさきの観測データと組み合わせることでより詳細なプラズマダイナミクスが明らかになると考えた。本研究では、両観測データの比較を行うためにひさきのイオンスペクトルデータにプラズマ診断を適用し、電子パラメタを得た。また、**Juno** 探査機と共通の視野比較を行うことで類似傾向が確認できた。イオの火山イベントの前後の観測期間で比較することで、イベント後プラズマが遠方に輸送されることを確認した。また、**Juno** から求めた電子分布を平均することで電子が定常的に $8\sim 9 R_J$ に存在することを確認した。またこのデータを用いてイベント前後での分布位置を比較することで、大規模な噴火における電子の平均速度は 160 m/s と求められた。これはシミュレーション結果と一致し、過去の火山イベントで観測されたイオン輸送速度と比較したところ平均速度は大きかった。しかし、噴火規模で比較したところ、過去の火山イベントは本研究で観測したものよりも小さかった。よって、磁気圏内のプラズマシミュレーションで過去に示されたように、火山から排出されるプラズマ量が大きいほど電子速度が速くなるということと、イオンと電子の速度差の二つの要因が考えられた。

目次

1. 背景.....	4
1.1 磁気圏.....	4
1.1.1 Dungey cycle.....	6
1.1.2 Vasyliunas cycle	7
1.2 木星磁気圏.....	9
1.2.1 イオプラズマトーラス	9
1.2.2 イオの火山イベント	11
1.3 過去の木星観測.....	13
1.3.1 地上観測	13
1.3.2 地球周回観測.....	14
1.3.3 近接観測	14
1.4 研究の目的	16
2. データセットと解析手法	18
2.1 Juno 探査機の観測データ	18
2.1.1 軌道変化	18
2.1.2 観測位置での L 値算出.....	18
2.1.2 JADE による観測.....	19
2.2 ひさき衛星の観測データ	21
2.2.1 データ校正.....	23
2.2.2 ローカルタイムの影響	24
2.2.3 プラズマ診断.....	25
2.3 観測時期の選定.....	27
3. 結果.....	29
3.1 Juno の観測結果.....	29
3.1.1 火山イベント 1 について.....	31
3.1.2 火山イベント 2 について.....	32
3.2 ひさきの観測結果	33
4. 考察.....	36
4.1 Juno とひさきの観測結果比較.....	36
4.2 火山イベント前後での観測結果比較	36
4.3 過去のシミュレーション結果との比較	36
5. まとめ	40
参考文献	43
謝辞.....	47

1. 背景

1.1 磁気圏

磁気圏とは、天体の周囲に形成される天体固有の磁場に影響を受ける領域のことで、太陽系惑星や衛星にも磁場を持つ天体には磁気圏が形成される。宇宙空間にはプラズマが存在し、磁気圏内ではこのプラズマが天体の磁場に支配される。太陽系の惑星においては水星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星に磁気圏が存在するとされている。双極子磁場を持つ地球、木星、土星のそれぞれの磁気圏を比較したものが図 1-1 と表 1-1 である (F. Bagenal et al. 2017)。磁気圏の大きさは木星、土星、地球の順に大きいことが分かる。また、木星は 4 つのガリレオ衛星を、土星はエンセラダスを含む複数の氷衛星とタイタンを磁気圏領域内に持つという特徴がある。表 1-1 より、自転の速さについて地球が 24 時間である一方で、木星は約 9.9 時間 (May, Carr, and Desch 1979)、土星は約 10.6 時間 (Anderson and Schubert 2007) と高速である。磁場の大きさは木星が最大となっており、磁気モーメントは地球の 18,000 倍である (Connerney and Acuna, n.d.)。また、太陽風動圧は、地球に対して木星と土星の値が小さくなっている。これは、地球と比較して木星と土星が太陽から遠方に位置することが起因している。磁気圏内に供給されるプラズマ源の量としては、地球と比較して木星と土星が大きくなっている。これは、地球磁気圏の主なプラズマ供給源が電離層である一方で、木星と土星の磁気圏は、その領域が内包する衛星の潮汐活動により発生するプラズマを主な供給源としている。木星はイオの火山活動から、土星はエンセラダスのプルーム噴出からプラズマが供給されている。イオによるプラズマ供給の詳細は 1.2.1 章に記載している。

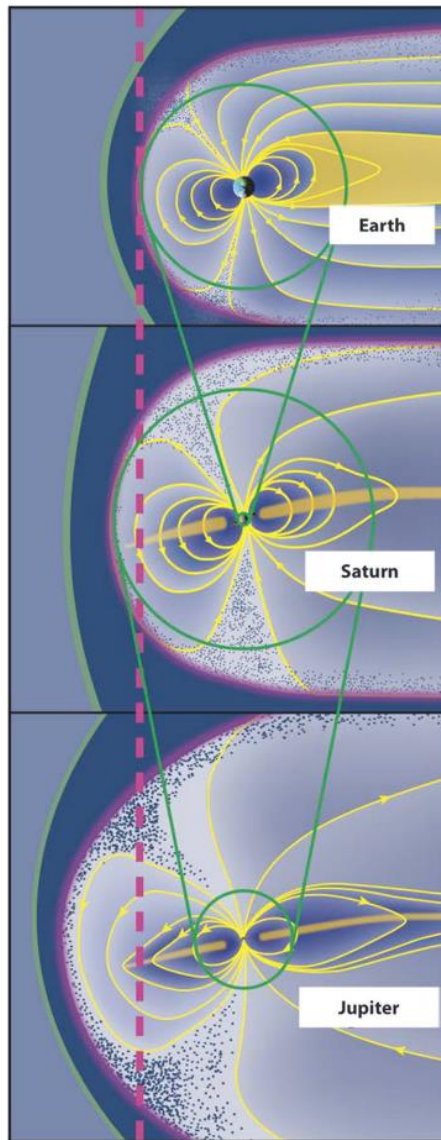


図 1-1: 地球・土星・木星の磁気圏構造 (F. Bagenal et al. 2017)

表 1-1: 地球・木星・土星の磁気圏性質

	Earth	Jupiter	Saturn
Planetary radius (R_p) [km] ^a	~6400 ^a	~72000 ^a	~60000 ^a
Rotational period [hours]	24	~9.9 ^b	~10.5 ^c
Magnetic moment / M_{Earth}	1	~18000 ^d	~550 ^e
Plasma source [kg/s]	~5 ^a	~260-1400 ^f	~12-250 ^f
Subsolar magnetopause distance [R_p]	~10 ^a	~60-90 ^a	~22-27 ^a
Solar wind P_{dyn} [nPa]	~2 ^a	~0.08 ^a	~0.03 ^a

^a Jackman et al. 2014; ^b May, Carr, and Desch 1979; ^c Anderson and Schubert 2007; ^d Connerney et al., 1982; ^e Acuña et al., 1983; ^f F. Bagenal and Delamere 2011

磁気圏構造は、プラズマの供給源とその駆動過程の違いから **Dungey cycle** と **Vasyliunas cycle** に分類される。

1. 1. 1 Dungey cycle

Dungey cycle は太陽風によって駆動される磁気圏構造を指し、地球の磁気圏は主に太陽風の影響を受け、太陽の活動や太陽風の飛来方向により太陽風プラズマが流入し、磁気圏の構造が変化することからこれに分類される(**Dungey 1961**)。この構造を示したのが図 1-2, 1-3 である(**Cowley 1982**)。地球における **Dungey cycle** では、太陽風が強まる、あるいは南方向の太陽風が飛来することで班平行磁場により磁気リコネクションが起きる。そこに磁気圏内に太陽風プラズマが流入し、内部磁気圏にプラズマシートとして蓄積する。太陽風プラズマとつながり変わった磁力線は磁気圏尾部に流され、反平行磁場が生じることで磁気リコネクションが発生する。この際磁場のエネルギーが蓄積されたプラズマの運動エネルギーに変わり、加速された高エネルギープラズマが内側に注入される。

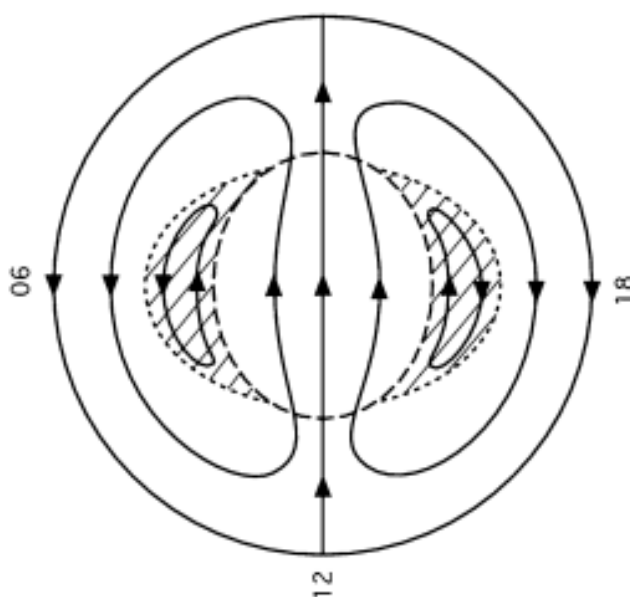


図 1-2 : Dungey cycle と viscous cycle の北側高緯度電離層の流れの様子 (Cowley 1982)

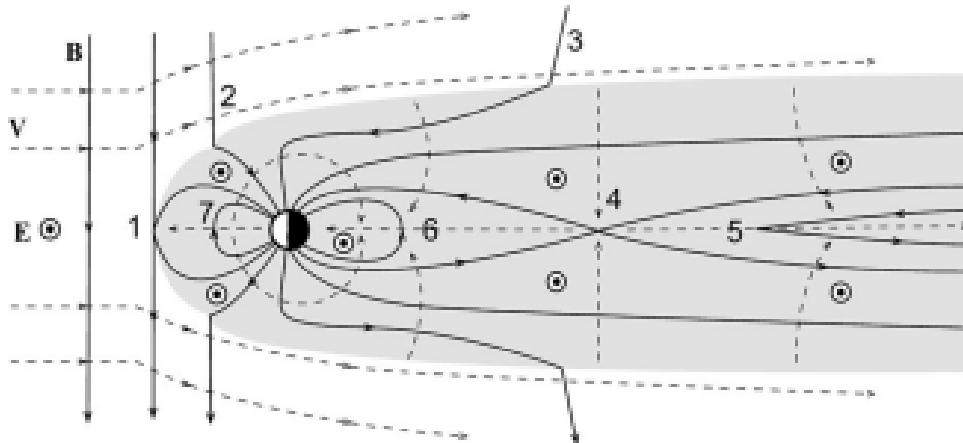


図 1- 3: Dungey cycle の地球型モデル図 (Cowley 1982)

1. 1. 2 Vasyliunas cycle

Vasyliunas cycle は、惑星の自転により磁気圏内部でプラズマが生成され、このプラズマに伝達されるエネルギーにより駆動される磁気圏構造を指す (Vasyliunas 1983)。この構造を図 1-4 に示す。木星や土星の磁気圏は地球よりも太陽から離れており、太陽風プラズマから受けるエネルギーよりも惑星の自転によるエネルギーが卓越することからこれに分類される。木星・土星ともに高速で自転しており、磁力線もそれに伴い高速で回転する (共回転)。また、巨大な潮汐力により衛星の火山噴火あるいはプルームの噴出が起これ、磁気圏内に大量のプラズマを供給する。このプラズマは惑星の磁場に捕捉され、捕捉した磁力線はフラックスチューブと呼ばれる。磁気圏内の内側にプラズマの供給が起こると、内部磁気圏の低温プラズマ密度・圧力が大きくなり、圧力勾配が生じることで磁場曲率が小さくなる交換型不安定性が起こる。このとき、供給されたプラズマを捕捉した磁力線 (磁気フラックスチューブ) の移動交換が生じる。この現象を式で表すと以下の式 (1-1) になる (Hill 1976)。

$$\frac{\partial}{\partial r_e} \left(\frac{\rho_e r_e g}{B_e} \right) < 0 \quad (1-1)$$

ここで、 ρ_e は質量密度、 r_e は半径距離、 B_e は赤道面での磁場の強さをそれぞれ表す。また、 g は以下の式 (1-2) で与えられる。

$$g = \int \frac{ds}{r} \quad (1-2)$$

ここで、 r は磁気フラックスチューブの半径距離、 s は磁気フラックスチューブ

の長さを表す。

交換型不安定性により、内部磁気圏では増加した低エネルギープラズマが半径方向外側に輸送され、高エネルギー粒子が内部磁気圏に注入される。外部磁気圏では、磁力線同士が平行になることで磁力線が繋ぎ変わる現象が起きる（リコネクション現象）。この時、磁気圏の最も外側に存在する磁気圏尾部へプラズマが放出され、反対に内側へフラックス供給が起きる。

このプラズマは、噴出時のイオンの公転速度よりも大きい共回転速度を持つ磁場によって加速される。この加速と同時に遠心力により遠方へ輸送され、磁力線が夜側（太陽と反対側）方向に引き延ばされることでリコネクションが発生し、高エネルギープラズマが内側に流入する。

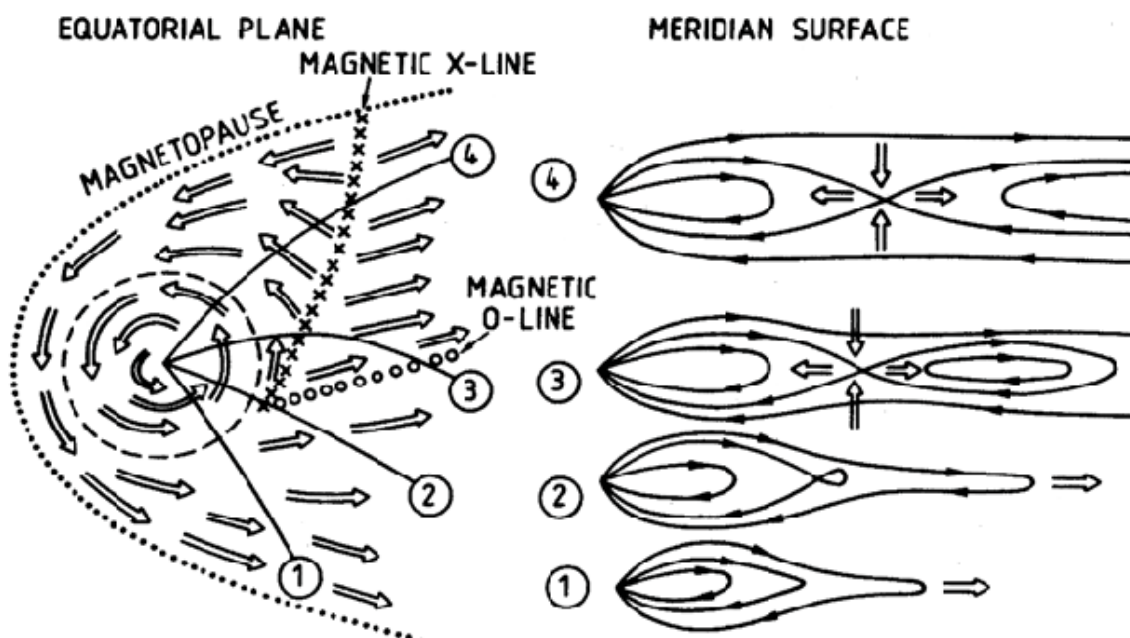


図 1-4: Vasyliunas cycle のモデル図 (Vasyliunas 1983)

1.2 木星磁気圏

これまでの探査により、木星磁気圏では 1.1 章で述べた、交換不安定性によるフラックスチューブの内側への移動が木星から 6~9R_J の距離で観測された (Thorne et al. 1997)。ガリレオ探査機が捉えた様子を図 1-5 に示す。この図より、突発的に高エネルギープラズマが発生したと同時に電子密度が下がっており、フラックスチューブの交換が起こった可能性が高い。このような交換型不安定性の発生には、イオの噴火によるフラックスチューブへのプラズマ供給が要因として挙げられ、イオの活動変化と密接に関係している。

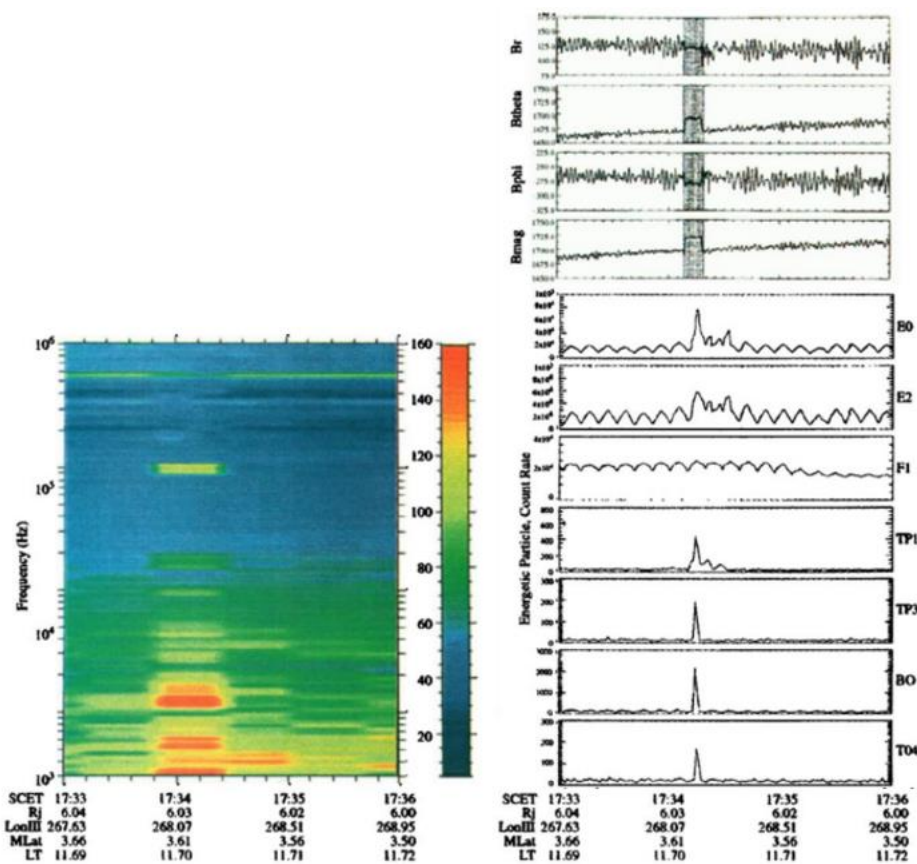


図 1-5: ガリレオ探査機が観測したフラックスチューブの内側輸送の様子
((Thorne et al. 1997)を改訂したもの)

上段 4 つのグラフは磁場強度を、中段 7 つのグラフは上から 3 つが電子(それぞれ 0.015-0.029, 0.042-0.055, 0.174-0.304 [MeV])、3 つが陽子(0.08-0.22, 0.54-1.25, 3.2-10.1 [MeV])、1 つが酸素(1.8-9.0 [MeV])を、下段はプラズマ周波数を表す

1.2.1 イオプラズマトーラス

衛星イオは、木星から 5.91R_J の距離を 42 時間の周期で公転しており、400 個を越える火山が存在する(Lopes et al. 2004)。イオは、火山の噴火により噴出ある

いは昇華するガスの存在により、大気の主成分が二酸化硫黄である。この二酸化硫黄は電子衝突や光解離などにより硫黄原子・酸素原子に分離し、脱出するのに十分なエネルギーを得た原子はイオの周囲に中性雲を形成する(Thomas et al. 2004)。この原子は電子の衝突や電荷交換、再結合を繰り返し、木星の磁場に捕捉される。この捕捉されたプラズマは共回転磁場によって加速され、木星周りにトーラス状のプラズマ帯を形成し、これをイオプラズマトーラスと呼ぶ。この構造を示したのが図 1-6 である。

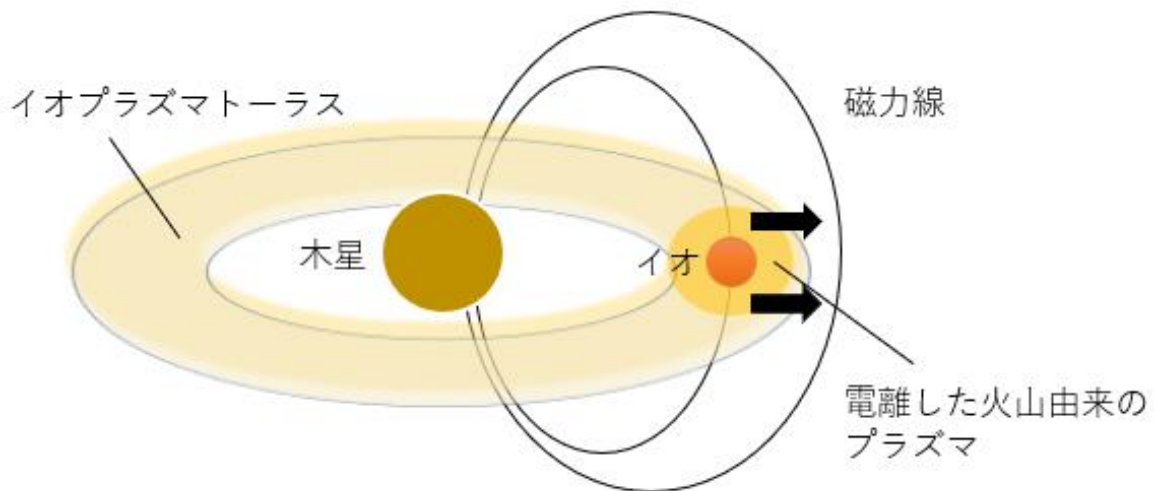


図 1-6: イオプラズマトーラスと木星の磁気フラックスチューブの様子

イオプラズマトーラスを構成する主なイオンは S^+ , S^{2+} , S^{3+} , O^+ , O^{2+} , H^+ である(F. Bagenal, n.d.)。実際に観測されたイオプラズマトーラスのイオンスペクトルは図 1-7 のようになる(Steffl 2004)。

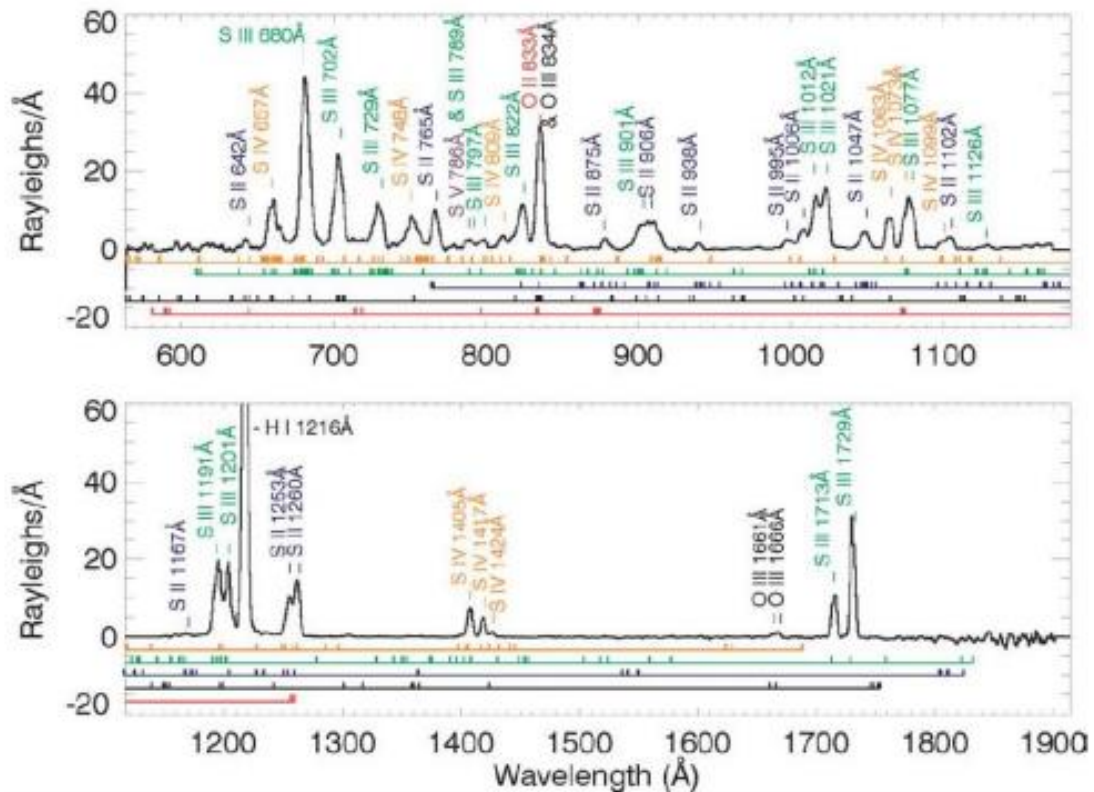


図 1-7: Cassini の UVIS による波長範囲 561-1913 Å のスペクトル図 (Steffl et al., 2004)
半径方向 4-8 R_J を平均したもの

1.2.2 イオンの火山イベント

木星磁気圏では、イオンの火山の活動によって磁気圏内へのプラズマ供給が増加することで、プラズマの外側輸送・内側輸送が起こる。これは、1.2章の冒頭で説明したフラックスチューブ内のプラズマの増加により引き延ばされることと、フラックスチューブの交換が起こることに起因する。イオンの火山活動について、Gemini N、Keck 地上望遠鏡を用いて 2013 年の 8 月から 2018 年の 7 月までイオンの複数の火山の輝度から活動規模を観測した様子を図 1-8 に示す(de Kleer et al., 2019)。横軸は時間を表し、縦軸が発光強度を表す。この図から 2015 年 1 月前後で Loki Patera にて火山イベントが発生していることが分かる。同時期にひさきによる観測も行われており、2015 年に火山が活発化した後、数週間にわたりトラスから発生したイオンの発光が増加し、その発光が外側に広がっていく様子が見られた(Tsuchiya et al., 2018)。この発光の移動の様子を図 1-9 に示す。同時に、交換型不安定性により、火山が活発化している時期に高温電子が内側に輸送されるという観測もされた(Yoshioka et al. 2018)。この結果を図 1-10 に示す。

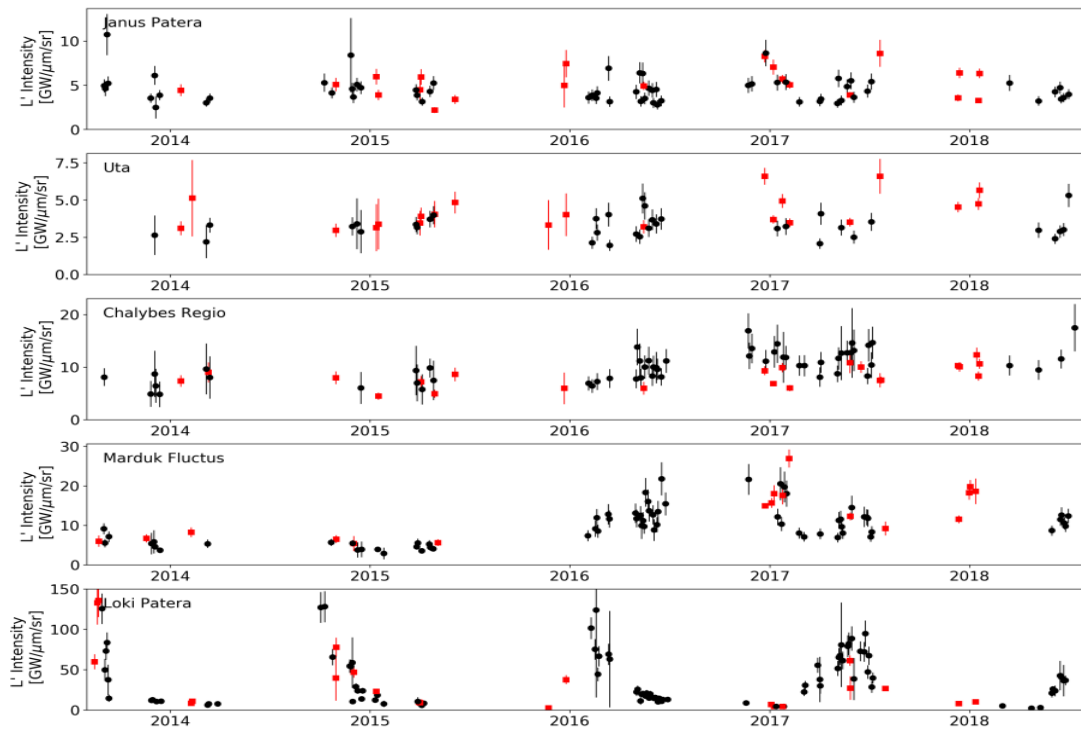


図 1-8: イオ火山の輝度の時間変化 (de Kleer et al., 2019)

黒点は Gemini N、赤点は Keck 望遠鏡の結果を表す

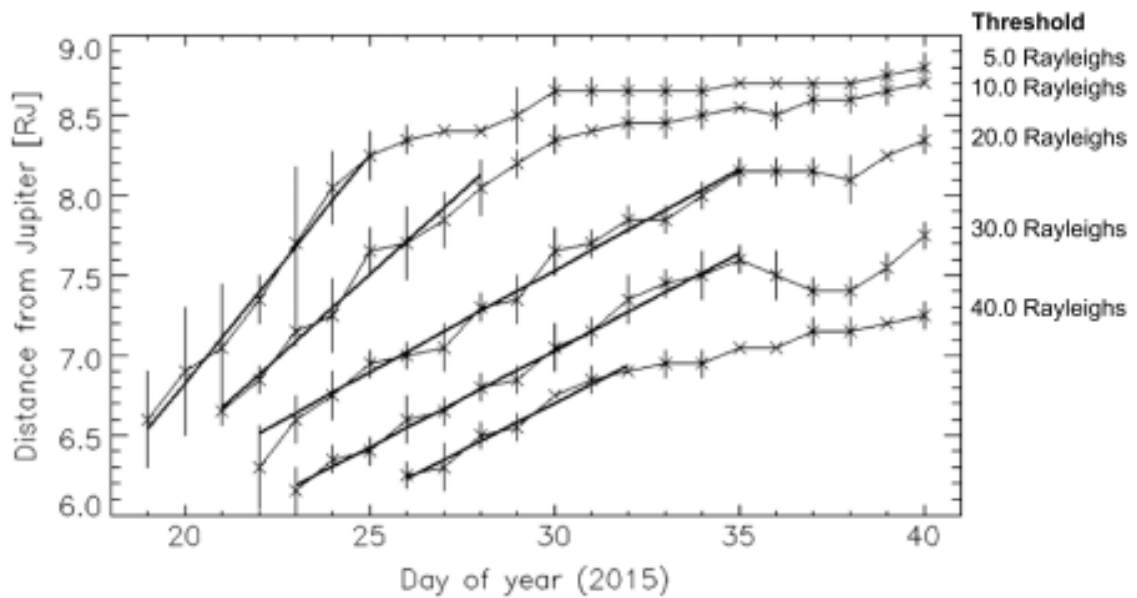


図 1-9: 2015 年 DOY19-40 における S 76.5-nm 輝線の発光強度の半径方向変化 (Tsuchiya et al., 2018)

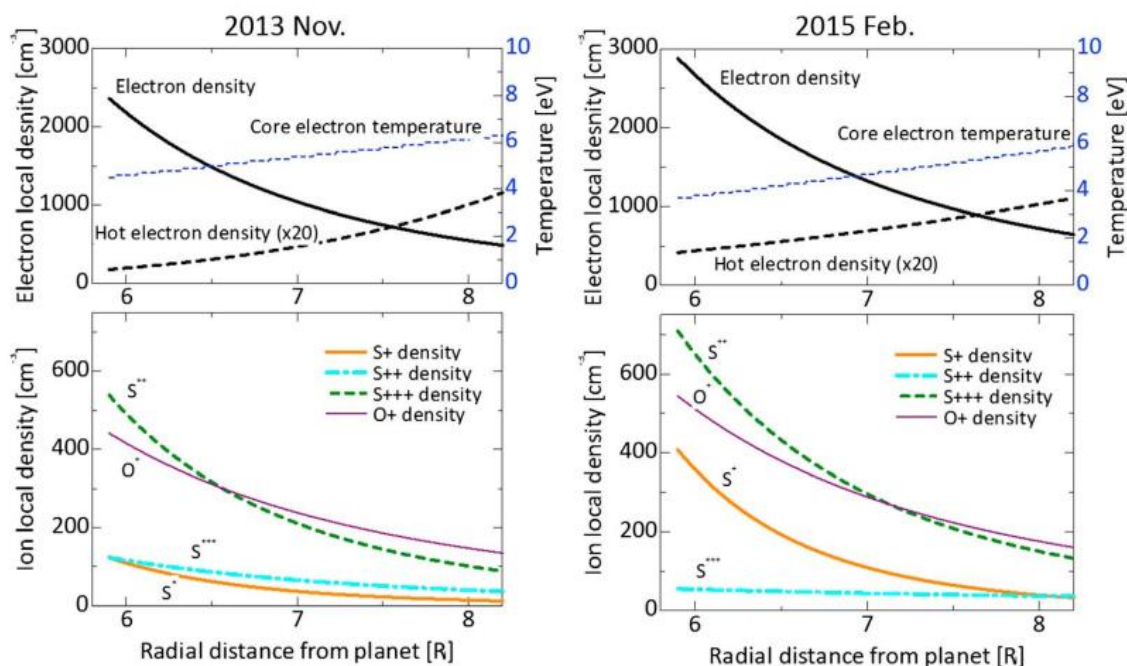


図 1-10: (左側)火山の静寂期、(右側)火山の活発期、におけるそれぞれのプラズマの密度と温度の半径方向変化 (Yoshioka et al., 2018)

1.3 過去の木星観測

1.3.1 地上観測

木星は肉眼でもその存在を地上から確認することができるが、木星の衛星が発見されたのは、1609年のガリレオガリレイによる望遠鏡を用いた観測であった。木星の磁力線は木星と共回転しており、このとき電波を発するので、地上の電波望遠鏡はこの振動信号を追跡することで木星の自転速度を測定することができる。また、電波望遠鏡により木星の放射線帯も発見された。これは、望遠鏡が木星を取り巻く帯状領域で、電子が光速に近い速度で移動する際に発生する、シンクロトロン放射という信号を検出したことで見つかった。木星磁気圏が最初に発見されたのは、1954年の地上電波観測によるもの(Franklin 1955)で、続く観測により磁気圏に捕捉された電子の放射光を確認した(Drake and Hvatum 1959)。これらの観測により、木星は強力な磁場を持っていることが示された。また、地上観測によって木星の周回軌道上の衛星に沿った場所での電波放射が見つけれ、イオの木星磁気圏における特異な役割について発見された(Bigg 1964)。それ以降も地上望遠鏡としては大気による吸収を避けるために、可視光や赤外線などの手法も用いられている。

地上観測における課題点として、地球大気が厚いことから観測時にこの大気成分を除去して考える必要があり、木星磁気圏内に存在する酸素原子などを観測する際にはこのバックグラウンド処理が必要になる。

1.3.2 地球周回観測

地上観測の大気成分の影響を考慮して、宇宙空間にて地球周回軌道上からの観測も行われてきた。この軌道上では主に可視光・赤外線・紫外線・X線などが用いられる。地球周回観測による木星の観測例として、ハッブル宇宙望遠鏡が挙げられる。ハッブル宇宙望遠鏡は、1990年に打ち上げられて以来、可視光を主に用いた観測を続けており、木星を含めた太陽系惑星や太陽系外の惑星系・銀河の観測も行っている。ハッブル望遠鏡の木星のオーロラ撮像データを用いることで、磁気圏のダイナミクスに関する知見を与えている。また、JAXAが打ち上げたひさき衛星は、2013年から地球周回軌道上での極紫外光を用いた観測を行っており、観測対象の1つとして木星とイオプラズマトーラスが含まれる。ひさきによる木星の観測により、固定視野での連続的なイオプラズマトーラスの観測が可能になり、トーラスに含まれるイオンの構成や電子の時間変化がこれまで明らかになった。ひさきの観測ミッションについての詳細は2.2章で述べる

1.3.3 近接観測

より詳細な観測を目指して木星のフライバイを行ったのは、NASAが外惑星探査を目的として1970年代に打ち上げたパイオニア10号・11号が初めてである。パイオニア10号は搭載された磁力計と粒子検知器により木星磁気圏の大きさやエネルギーを持った電子やイオンのその場観測を行い、ヴァン・アレン帯の観測にも成功した(J. H. Wolfe., et al 1974)。また、木星から20万kmの距離まで接近しており、最接近の際には詳細な木星の姿を撮影した。パイオニア11号は、木星の3万4000kmまで接近した。その後、太陽系の外惑星と太陽系外の探査を目的としてNASAが打ち上げたボイジャー1号・2号が1979年に木星のフライバイを行った。ボイジャー1号に搭載されたPlasma science experiment (PLS)のデータによって木星磁気圏中の鉛直方向のプラズマ速度が得られ、地球上の火山と比較して大規模なイオの火山活動が観測された。その後、NASAのガリレオ探査機が1995年から2003年までの期間で計33回に及ぶ木星周回を行った。ガリレオ探査機による観測結果から、赤道面磁気圏構造をマッピングし、その時間変化を観測した。また、この期間中に、土星探査機カッシーニが2000年に木星をフライバイする予定だったため、ガリレオ探査機と共同で木星磁気圏を観測するミッションを行った。その後、NASAが太陽系外縁天体の探査を目的として打ち上げたニューホライズンズが、2007年に木星をフライバイした。この際木星とガリレオ衛星の撮影を行っており、イオの3つの火山が同時に噴火する様子を収めた。これらの観測により赤道面における木星磁気圏についての知

見が得られ、1.1 章で述べたような内部磁気圏のフラックス交換や外部磁気圏のリコネクションなどの証拠となる現象を観測した。

一方で、木星の極域での磁気圏構造の観測データがないことから、この領域を含めた磁気圏全体の観測を行うことを目的として、ガリレオ探査機の後継機である、NASA の木星探査機 **Juno** が 2016 年から木星周回軌道に投入された。**Juno** は初期ミッションでは、極域に接近した観測を行い、その後の拡張ミッションではイオを始めとするガリレオ衛星のフライバイキャンペーンを行っている。パイオニアからガリレオ探査機までのミッションで近接観測の軌道と **Juno** の初期ミッション軌道を示したのが図 1-11。そのため、軌道は図 1-12 のように変化しており、2020 年代からイオプラズマトーラス付近の観測も行うようになった。この軌道は、ひさきの観測視野と運用期間が重なるため、比較観測が可能になる。**Juno** のミッション編成については 2.2 章で詳しく述べる。

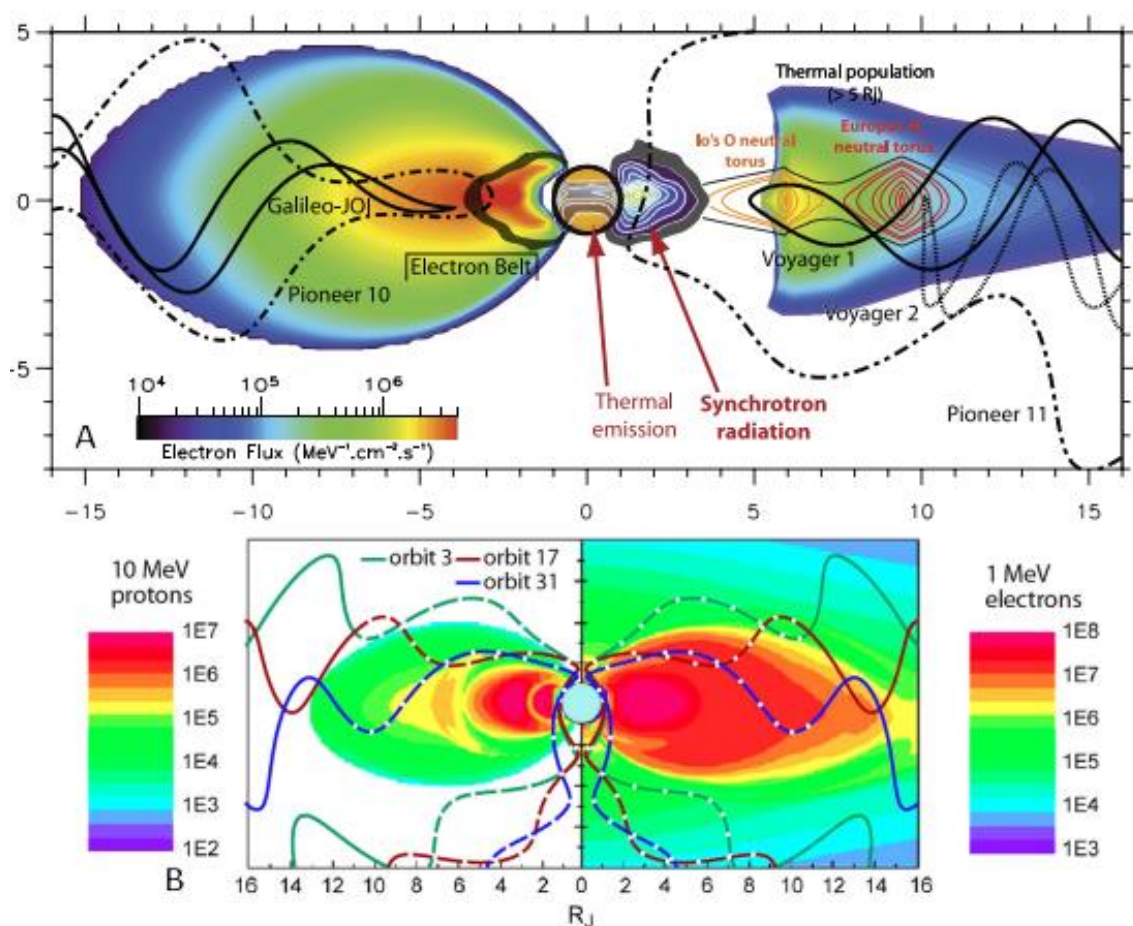


図 1-11: (上段) **Juno** のミッション以前の木星磁気圏探査軌道の様子
左側は高エネルギー電子の流量を示し、右側の赤線が中性雲、青から黄色のコンターマップが熱的プラズマを表す

(下段) Juno の軌道 3, 17, 31 での軌道と、左側は陽子、右側は電子の内側放射線帯での流量をシミュレーションしたもの。(F. Bagenal et al. 2017)

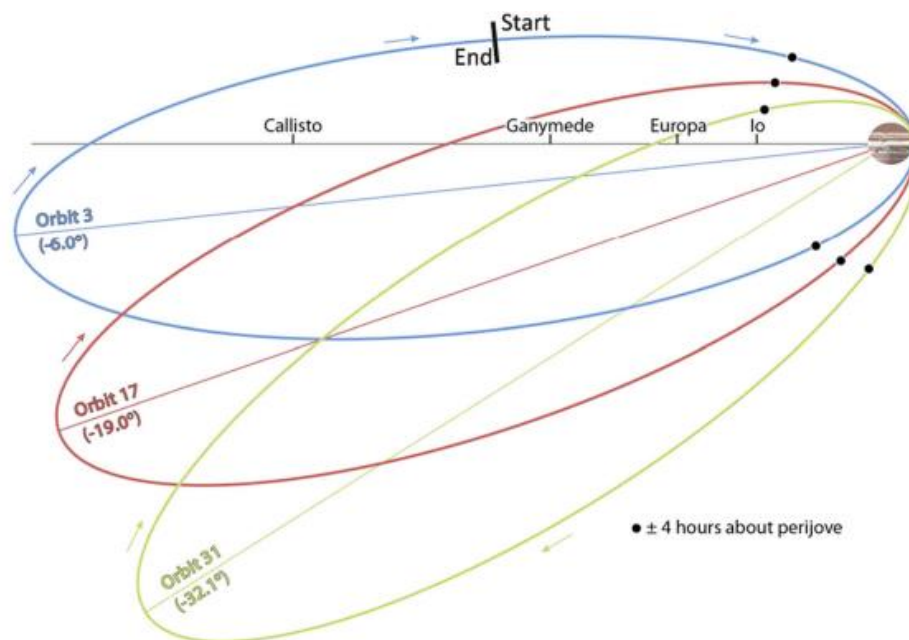


図 1-12: Juno の軌道例 (F. Bagenal et al. 2017)

前期(PJ3 2016年11月10日16時46分)、中期(PJ17 2017年4月13日7時27分)、後期(PJ31 2017年9月21時49分)

1.4 研究の目的

これまでの地上観測やその場観測を通して、プラズマが外側に輸送された結果、内部磁気圏において高温電子の内側への流入や、外部磁気圏においてリコネクションが起これると考えられている。実際にこれらの現象を示す観測事実はあるが、イオ由来のプラズマの具体的な輸送・加速メカニズムと、イオの火山活動と磁気圏の相互作用が不明である。この輸送メカニズムの理解には、イオと IPT から木星遠方領域の観測が必要である。また、イオの火山活動前後でのプラズマ分布やその動きの変化から、磁気圏内プラズマの輸送状況を理解することができる。

木星は、地上あるいは地球周回上からのリモート観測と木星周回軌道上からの近接観測の両方が行われてきた。これらの探査を経て、木星磁気圏はイオの火山由来のプラズマによって駆動され、プラズマの外側輸送により磁力線が引き延ばされることで磁力線の再結合やプラズマの内側輸送が発生するという構造を持つと考えられている。過去にひさきの観測データを用いて、イオの火山が活発化する前後の $6\sim 8 R_J$ の内部磁気圏におけるプラズマ変遷について調べた

研究では、火山活発後にイオンは数週間に分かって発光が増加し、その発光が外側に広がっていく様子が見られた(Tschiya et al., 2018)。また、火山が活発化している時期に高温電子が内側に輸送されるという研究もある(Yoshioka et al. 2018)。本研究は、木星磁気圏を駆動するイオンの火山由来のプラズマの輸送を明らかにすることを目的とし、イオンの火山活動前後でのプラズマ空間分布について明らかにする。ひさきの観測視野は $\sim 8R_J$ であり、2020年以降にイオトーラス付近を通過するようになった Juno の観測と組み合わせることで、より広範囲かつ高解像度な電子分布が観測できると考えた。そこで本研究では、イオンプラズマトーラスの観測を行うひさきと Juno の観測データを用いる。また、ひさきの観測データの解析手法においては、これまでプラズマ診断には解像度の高い $10''$ スリットか、 $10''$ よりも解像度が劣る $140''$ スリットを用いた輝線抽出の手法が用いられてきたが、本研究では Juno の観測データと比較することで、ひさきの $140''$ スリットデータを用いたフィッティング結果についても議論したい。

2. データセットと解析手法

2.1 Juno 探査機の観測データ

2.1.1 軌道変化

Juno は木星磁気圏内を航行する NASA の探査機で、2011 年に打ち上げられ、2016 年から木星の周回軌道に投入された。木星に接近することを Perijove（以下 PJ）、木星から最も離れることを Apojove(AJ)と呼び、Juno は打ち上げ当初、初期計画のミッションでは PJ0-35 までの観測予定だった。しかし、PJ36 以降もミッションが継続され、最大で 2025 年までの観測が予定されている。拡張ミッションにはガリレオ衛星のフライバイも含まれる。初期ミッションでは木星の極域探査を目的としており、Juno の PJ は極軌道のみであったが、ミッションの拡張後は図 2-1 で示すように、木星の赤道面上における木星からの半径距離が小さくなっている。

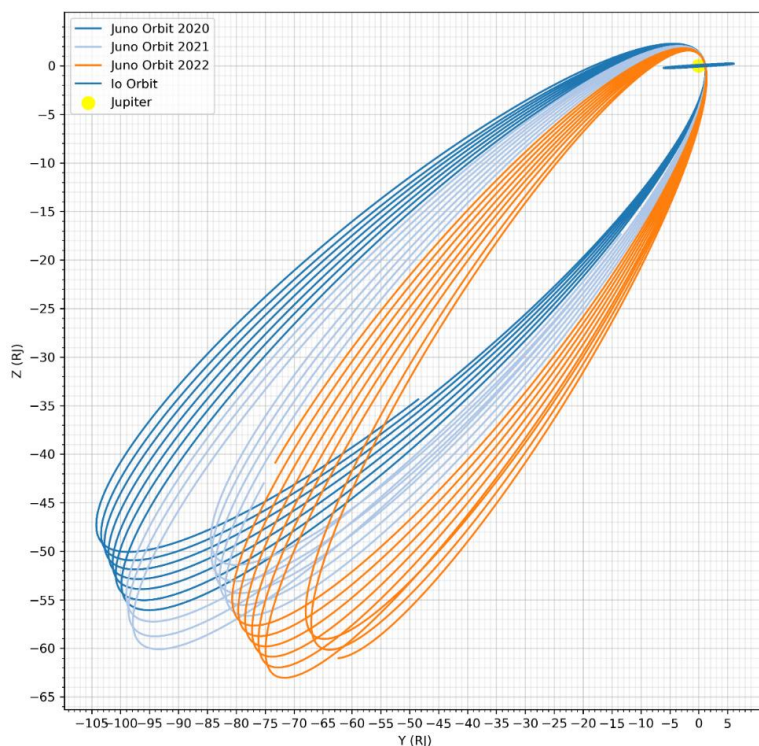


図 2-1: Juno の 2020-2022 年間の軌道

2.1.2 観測位置での L 値算出

Juno の観測軌道から示されるように、IPT 付近を通過する際には、赤道面からの垂直方向距離が変化する。そのため、地軸座標において Juno とひさきの観測位置は異なる。そこで本研究では、L 値を用いてひさきと Juno の電子分布を比較する。L 値とは、磁気圏を構成する磁力線の磁気赤道面上における木星からの距離を木星半径で割った数である。Juno とひさきの観測対象の座標での L 値

が等しい時、その座標には同じ磁力線が通過している。本研究では Juno の座標から木星磁気圏モデル'JRM33'を用いて L 値を算出した。

2.1.2 JADE による観測

Juno には磁力計や重力測定装置など複数の観測装置が搭載されている。本研究では、搭載機器の 1 つであるオーロラ分布観測実験システム(Jovian Auroral Dynamics Experiment, 通称: JADE)の観測データを用いた。JADE は、3 つの電子センサー(JADE-Es)、1 つのイオン構成センサー(JADE-I)、およびそれら 4 つのセンサーに対応する共通電子ユニット (Ebox)から構成される。本研究では、電子の分布について調べるため、この中の JADE-E の観測データを用いた。JADE-Eは図 2-2 のように観測装置が設置されており、すべての位相で観測が可能である。また、表 2-1 に JADE-E の性能表を示す。

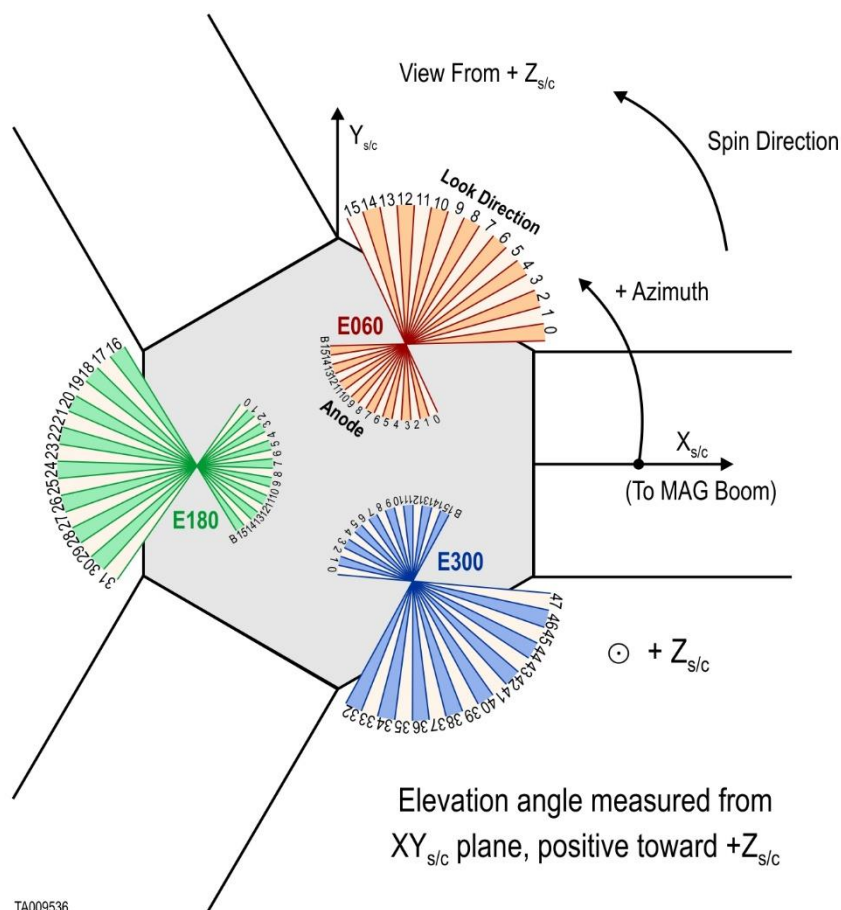


図 2-2: JADE-E の電子センサー構造 (McComas et al., 2013)

表 2-1: JADE-E の性能表 (McComas et al., 2013)

Quantity	Performance	Notes
Total mass [kg]	5.240	Per sensor Includes radiation shielding
Total power [W]	1	Per sensor
Overall dimension [cm]	21 × 21 × 21	Per sensor
Energy range [keV]	0.1 to 95	Upper limit by analysis (tested up to 30 keV)
Energy resolution [%]	10.4 to 13.2	At zero elevation angle between 0.2 and 40 keV, cf. Table 11
Geometric factor × ε [cm ² sr eV/eV]	~2 to 5 × 10 ⁻⁵	Measured values convolved with detector efficiencies, cf. Sect. 3.2.1.3
Analyzer constant [eV/V]	9.095 to 9.182	At 10 keV for E060, cf. Table 9
Pixel (azimuth × elevation)	7.5° × 3-6°	Elevation angle dependent
FOV (azimuth × elevation)	360° × ±35°	~16° for 100 keV, up to 30° for <50 keV

JADE-E は球形のトップハット型静電アナライザー (ESA)、2 つの偏向器、陽極リングを下部に持つ MCP 検出器により、約 0.1~約 100keV の電子のピッチ角分布を測定する 3 つの同一のセンサー JADE E60, JADE E180, JADE E300 から構成されている。概略断面の概要を図 2-3 に示す。JADE E300 は、2016 年初めに観測を停止して以来使用されておらず、JADE E60 と E180 のみが稼働している。ESA は、電子のエネルギーの選別、方位角測定の際の鏡像面に存在する電子への注目、MCP に影響を及ぼす UV 放射の減衰、という 3 つの機能を持つ。

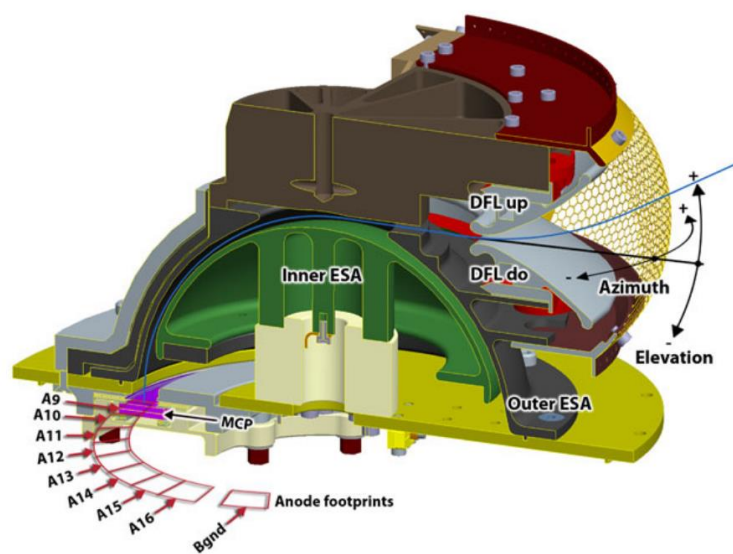


図 2-3: JADE-E 装置の断面図 (McComas et al., 2013)

検出器と陽極の概略図を以下の図 2-4 に示す。検出器は二次電子抑制グリッド (SE sup)、MCP と抵抗分割器、16 個の隣接する 7.5° の離散撮像陽極(discrete imaging anodes)と 1 個の 7.5° 背景陽極で構成される。二次電子抑制グリッドは ESA に面しており、この領域で放出される低エネルギー($\sim 2\text{V}$)の二次電子をはじく。ESA を透過した電子($\sim 100\text{eV}$)はこの障壁を超えて MCP まで容易に到達する。

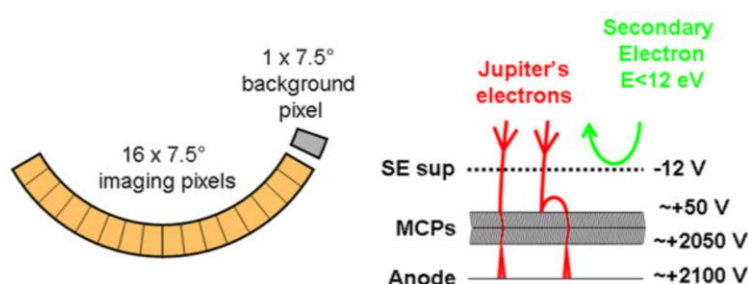


図 2-4: 検出器の概略図 (McComas et al., 2013)

また、JADE-E の観測には高解像モード(HRS)と低解像モード(LRS)との 2 つのモードがある。HRS モードの際には、すべての観測装置をオン(JADE E300 以外)にして計測する一方、LRS では稼働している観測機のどれか 1 つ(E60 か E180)で計測している。HRS モードと LRS モードの切り替えのタイミングは各 PJ で異なるが、本研究で使用した 2020-2022 年のデータでは、6-12R_J のイオ軌道以遠では HRS モード使用のケースが多かったため、本研究でもこの HRS モードの観測データを用いた。

2.2 ひさき衛星の観測データ

地球周回軌道上から木星を継続して観測するひさき衛星の観測データを用いる。イオトラス中のプラズマを調べる手法として、ひさき衛星に搭載された極紫外線分光器 EXCEED の観測スペクトルデータを用いた。EXCEED の構造を図 2-5 に示す。光子が入射鏡に入るとスリットに収集される仕組みである。また、ひさきの性能を示したものは表 2-1 である。

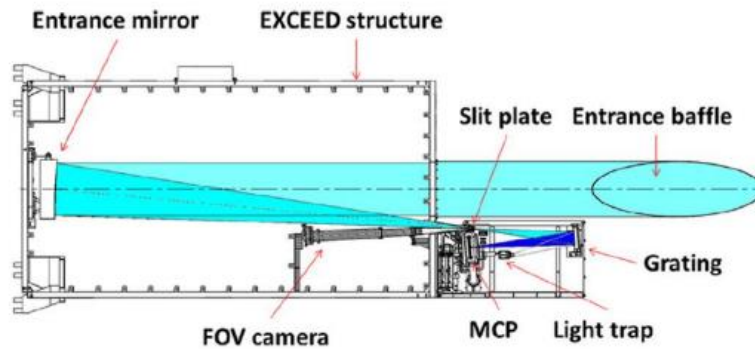


図 2-5: EXCEED の設計図 (Yoshioka et al. 2013)

表 2- 2: EXCEED の主要な装置パラメタ (Yoshioka et al. 2013)

Wavelength range	52–148 nm
Entrance mirror	Shape: off-axis (5.4°) parabolic Effective diameter: 203 mm Reflecting surface: CVD-SiC Focal length: 1600 mm
Grating	Shape: toroidal ($R_H=400$ mm, $R_V=393$ mm) Effective diameter: 50 mm Surface: CVD-SiC Lines: laminar, 1800 mm^{-1}
Slit widths	0.08 mm (10") 0.50 mm (60") 1.10 mm (140") ^a
Filters	Blank Indium thickness= 100 nm CaF ₂ thickness=3 mm
Detector	MCP with CsI and RAE
Field of view	400" × (10", 60", 140")

^a Dumbbell like shapes.

ひさきの観測スリットの幅は、10"，60"，140" があり、本研究では最も使用された期間が長い 140" スリットを使用した。このスリットは他の長方形型のスリットとは異なり、ダンベル型の観測視野を持つ。スリットの違いについては図 2-6 に示した。最も視野が細い 10" スリットでは、 $\sim 0.3\text{nm}$ のスペクトル解像度が得られ、視野の幅が最も大きい 140" スリットでは波長分解能が 10" スリットよりも低くなる。

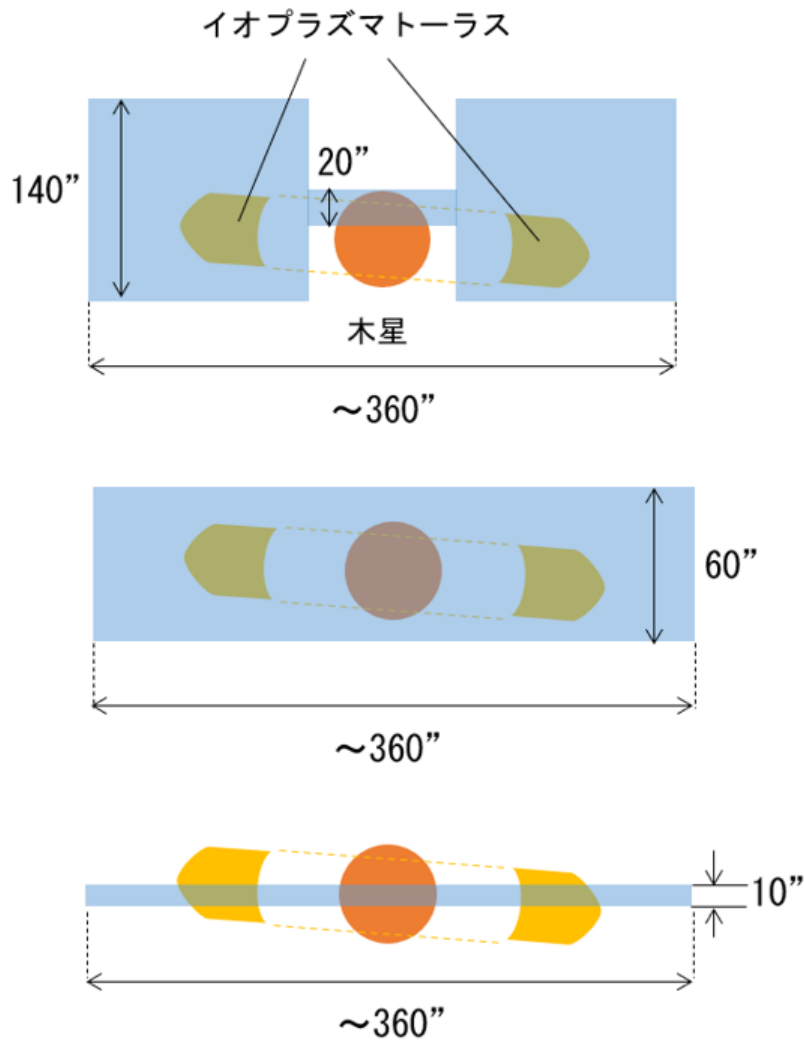


図 2-6: ひさきの観測スリットの視野の違い
 (上段)140'' スリット、(中段)60'' スリット、(下段)10'' スリット

2.2.1 データ校正

ひさきの観測データを図 2-7 に示す。上段の二次元スペクトルデータは横軸が波長を、縦軸が空間方向を表す。空間座標において、 $0 R_J$ は木星の位置を表す。2017 年から観測の姿勢制御の役割を持つガイドカメラが故障し、本研究で用いる 2020-2022 年の観測データは必ずしも空間座標の原点が木星を示すわけではなくなった。そのため、オーロラあるいはイオプラズマトーラスの位置から木星の位置を算出して空間補正を行った。この補正を行った上で、 $6.0-8.0 R_J$ での 1 次元スペクトルを用いる。

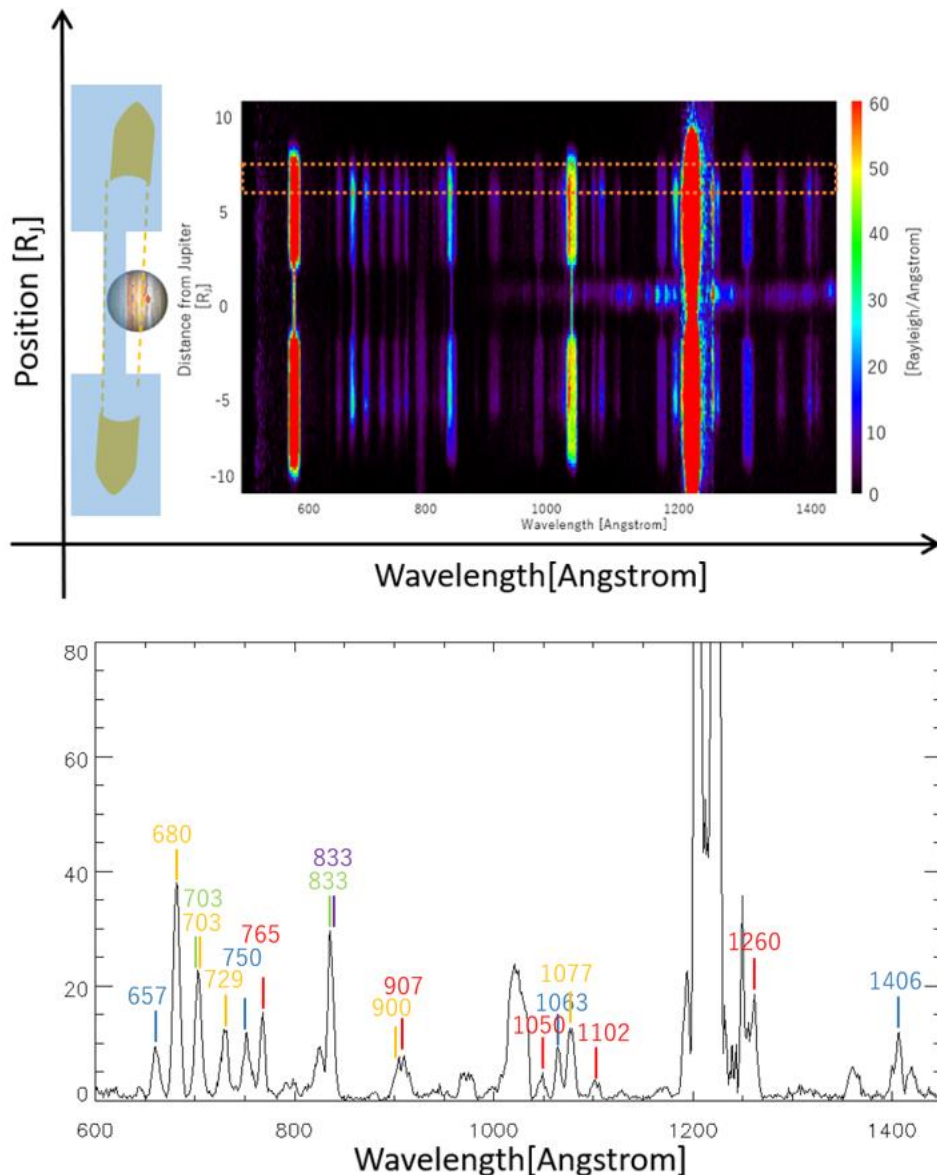


図 2-7: (上段)ひさきの 2 次元スペクトルデータ,
 (下段)空間方向 6-8R_J 平均での 1 次元スペクトルデータ

2.2.2 ローカルタイムの影響

地球におけるローカルタイム (以後 LT) とは、地球が太陽正面を向いている場所を昼の 12 時 (LT12)、反対側を深夜 0 時 (LT0) と定義している。

ひさきは地球周回軌道上にあり、木星の観測を行う際の地球上での LT によっては、地球大気の影響を大きく受ける。この影響について図 2-8 に示す (Yoshioka et al. 2017)。この図より、H 121.6nm は地球大気の高層部に存在するため、LT0 付近でもカウント値は大きくなる。一方で、He と O⁺ は LT の夜時間 (LT=20-4) においてカウント値がほぼ無視できる値になる。後に述べるひさきのスペクトル

フィッティングにおいて、 O^+ の輝線発光量を考慮するので、地球大気の影響を無視できるLT20-4のデータのみを取り扱う。

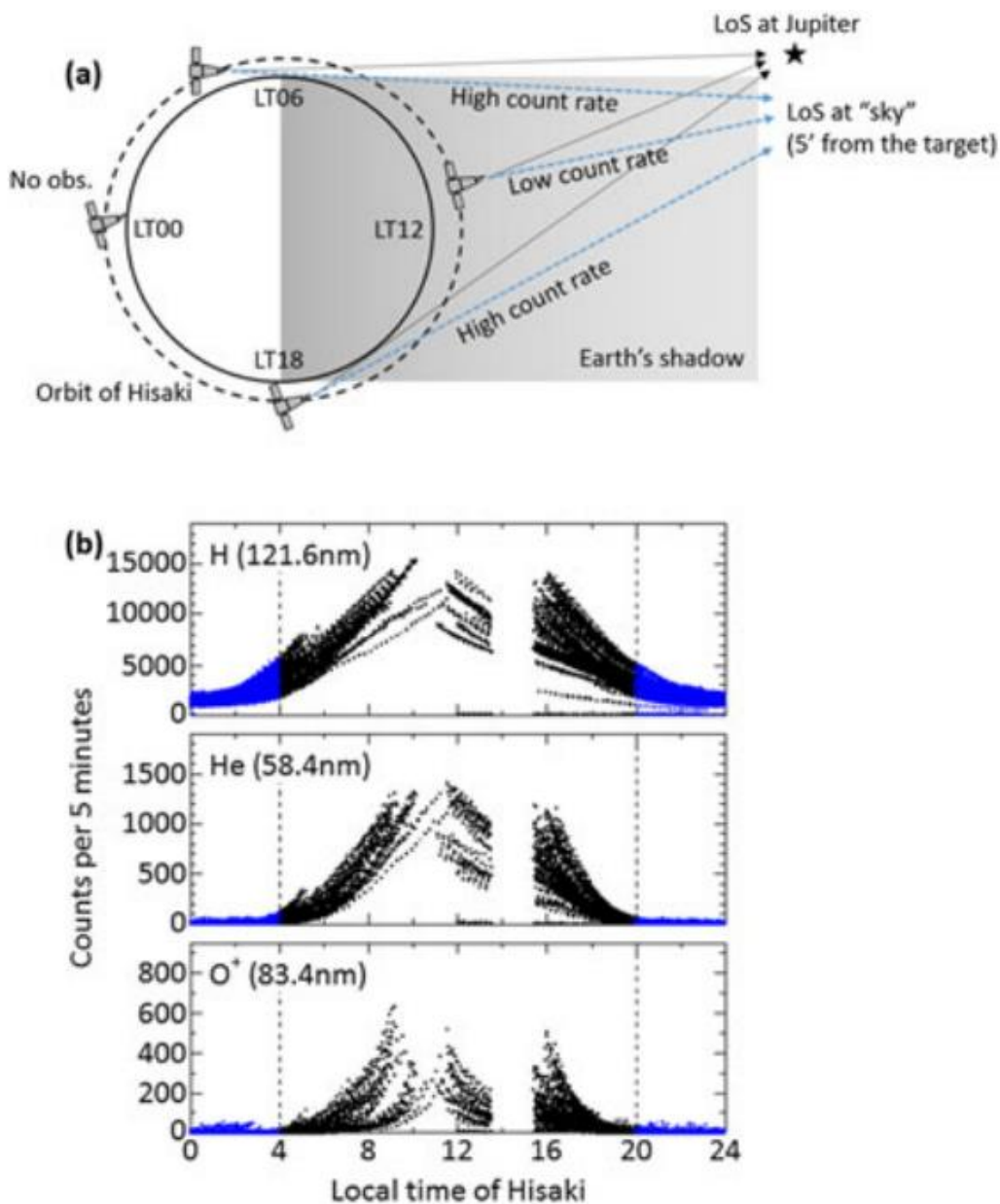


図 2-8: (a) 北側から見たひさきの観測平面

(b) 地球の高層大気に含まれる(上段)H121.6nm, (中段)He 58.4nm, (下段) O^+ 83.4nm のローカルタイムごとのカウント値の変化 (Yoshioka et al. 2017)

2.2.3 プラズマ診断

スペクトルデータからプラズマの密度と温度の情報を求める方法として、プ

ラズマ診断がある。本研究では、イオンスペクトルデータから電子パラメタを得るため、ひさきの観測結果にプラズマ診断を適用する。イオンの発光量 B は式(2-1), (2-2), (2-3)で表される(K. P. Dere et al. 1997; K. Dere et al. 2023)。なお、エネルギー準位が j のイオン数密度を N_j とし、 A_{ji} は状態 j から i への遷移確率を表す。 l は視線方向の長さを示す。

$$B = 10^{-6} \int N_j A_{ji} dl \quad [\text{Rayleigh}] \quad (2-1)$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{21} \\ \alpha_{12} & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_1 \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (2-2)$$

$$\alpha_{ij} = A_{ij} + N_e \int_0^{\infty} \widehat{g}_e v \sigma_e dv \quad (2-3)$$

ここで、 N_e は電子密度、 \widehat{g}_e は電子速度正規分布、 v は電子速度、 σ_e は衝突断面積を表す。

この式から、観測された発光スペクトルよりイオプラズマトーラス中の密度と温度が分かる。イオンの遷移確率と衝突断面積を求めるため、本研究では CHIANTI 原子データベース ver. 10.0.2 を用いた。イオプラズマトーラス中に存在する主なイオン S^+ , S^{2+} , S^{3+} , O^+ , O^{2+} それぞれの発光量を足し合わせ、イオンのスペクトルグラフを作成した。このグラフと観測されたイオンスペクトルを比較することで観測時の電子パラメタを取得する。フィッティングの際、モデルスペクトルの FWHM は、10" スリットデータを用いた場合は 3.0 であったが、140" スリットを使用するため 5.5 に固定した。また、 O^+ と O^{2+} は輝線の分離が困難であるため、密度比 $[O^{++}]/[O^+]$ は 0.1 に固定した。更に、観測に基づくモデル(Fran Bagenal 1994)から、全密度の 10%の密度の陽子を加えた。また、モデルスペクトルには装置関数としてガウス関数を適用した(Yoshioka et al. 2013; Yoshikawa et al. 2014)。このフィッティングの際に高温電子の存在を考慮してパラメタを算出するが、温度に関しては 200 eV 以上では輝線の発光量に影響しないことが示されているため(Hikida et al. 2020)、350 eV に固定した。このパラメタ値と輝線発光量の関係を示したものが図 2-9 である。波長領域について、ジオコロナの影響を受ける 120.0-137.0、120-130 nm の範囲の波長は除外した。

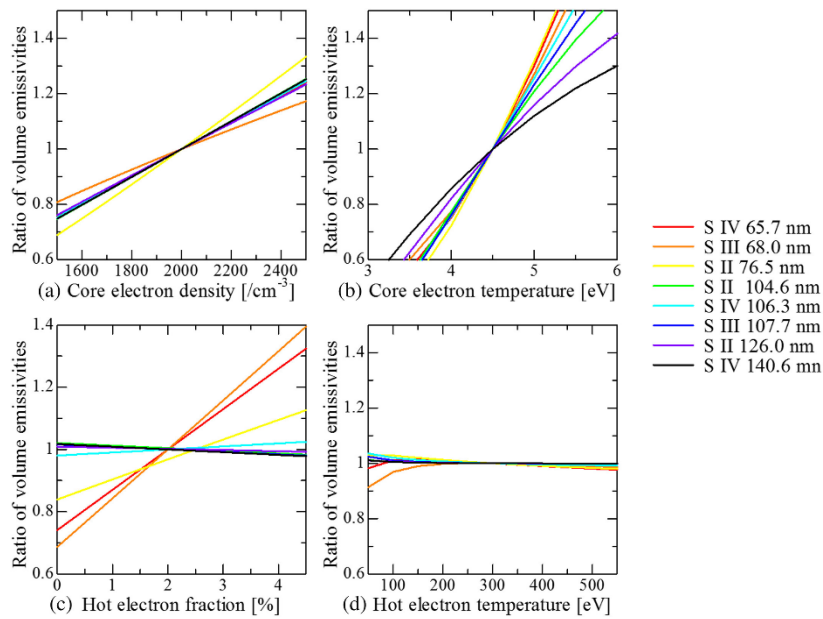


図 2-9: 電子パラメータとプラズマ診断で算出される輝線発光量の関係 (Hikida et al. 2020)

実際の観測データと CHIANTI から作成したスペクトルを比較した様子を図 2-10 に示す。

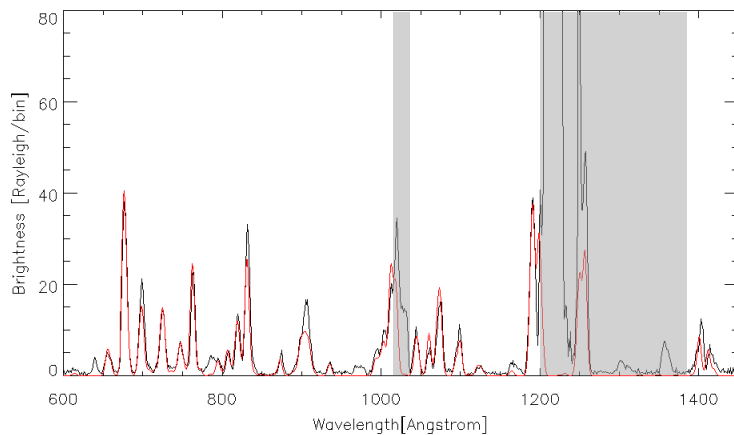


図 2-10: フィッティング結果の例
灰色の波長領域はフィッティングに考慮しない

2.3 観測時期の選定

ひさきの運用期間は 2013 年から 2023 年までであり、Juno の探査は 2016 年から現在まで続いている。Juno は 2020 年代からイオプラズマトラス付近を通過するようになったため、この時期以降の観測を用いる。この期間でのイオの火山活動時期を特定するため、イオの火山活動度を評価した Tate et al. 2023 で定義されている基準を用いた。この活動度評価の様子は図 2-11 と表 2-3。これより、

最もイオの発光が大きくなる outburst は 2020 年 10 月 15 日と 2021 年 8 月 27 日に発生したことが分かった。これらの火山活発時期を時系列順にイベント 1、イベント 2 とし、この期間を含む 2020 年 9 月から 2022 年 12 月までを観測対象とした。

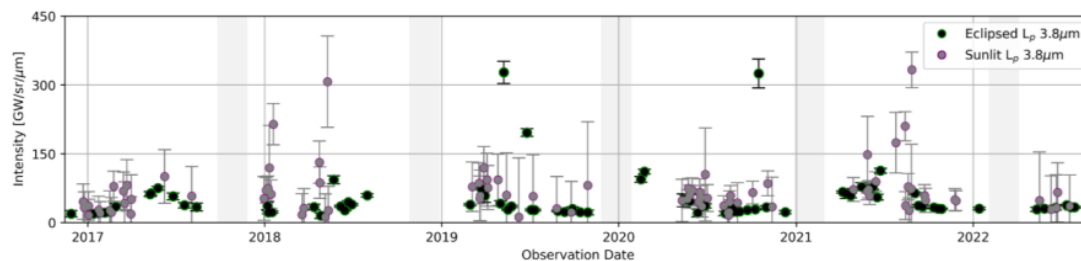


図 2-11: 2017-2022 年の地上観測によるイオの火山発光強度の時間変遷 (Tate et al. 2023)

表 2-3: 2018-2021 年のイオの代表的な火山活動 (Tate et al. 2023)

Universal Time	Event Name	Closest hot spot	Observing Mode	Intensity Lp	Intensity M	Intensity Lp corr.	Temp [K]	Area [km ²]	Power [TW]
2018-01-18 16:10	201801A	<i>Mulungu Patera?</i>	Sunlit imaging	183 ± 45	–	194 ± 48	–	–	–
2018-05-10 10:20	UP 254W	<i>UP 254W</i>	Sunlit imaging	275 ± 99	–	331 ± 119	–	–	–
2019-05-08 14:25	201905A	<i>Acala Fluctus</i>	Eclipse occult.	295 ± 24	316 ± 67	298 ± 24	1148 ± 49	52 ± 11	5.1
2019-06-25 10:10	201906A	<i>Acala Fluctus</i>	Eclipse & Sunlit	164 ± 10	116 ± 41	199 ± 12	1265 ± 45	20 ± 3	2.9
2020-10-15 7:10	202010A	<i>(not constrained)</i>	Eclipse occult.	303 ± 32	183 ± 62	309 ± 33	1281 ± 37	37 ± 6	5.6
2021-08-13 11:30	202108A	<i>Pillan Patera</i>	Sunlit imaging	151 ± 32	234 ± 164	182 ± 38	–	–	–
2021-08-27 10:0	202108D	<i>Pfu1410?</i>	Sunlit imaging	301 ± 39	475 ± 100	399 ± 52	–	–	–

3.結果

3.1 Juno の観測結果

イオの火山活動が最も顕著になる **outburst** 期間は2020年10月15日と2021年8月13, 27日であり、この2つの火山イベント前後でのPJを観測対象とした。観測期間はPJ29-47で2020年9月-2022年12月。この期間における電子の流量とその位置についての一例を図3-1に示す。右側が火山イベントのない時期であるPJ46の様子で、左側はイオをフライバイするPJ41の様子である。上段の図について、エネルギーの大きさは、水色、オレンジ色、緑色、赤色、紫色の順に $5.0E-02$ 、 $1.2E-01$ 、 $2.9E-01$ 、 $1.7E+00$ 、 $9.6E+00$ keV/qとなっており、縦軸は毎秒のカウント値を表す。また、下段はそれぞれのPJにおける位相角(青線)と木星の赤道面からのJunoのz方向距離(赤線)の半径方向変化を示す。このとき位相角は、木星の赤道面上での木星を中心としたJuno-木星-イオがなす角を表している図3-2。観測期間すべてについて位相角とz方向距離を求めたが、NASAが定めたイオやエウロパのフライバイイベント以外でJunoが衛星に接近することはなく、イオの近接観測によるエネルギーや電子流量への寄与は否定できる。z方向距離の変化は、JunoのPJ数の増加に伴って5-12PJでのz方向距離が小さくなっているが、その変化は1年で約 $0.3-0.6R_J$ であり、火山イベントの前後で観測場所に大きな違いはないことが分かった。観測期間すべてのPJについての結果は補遺に記載している。

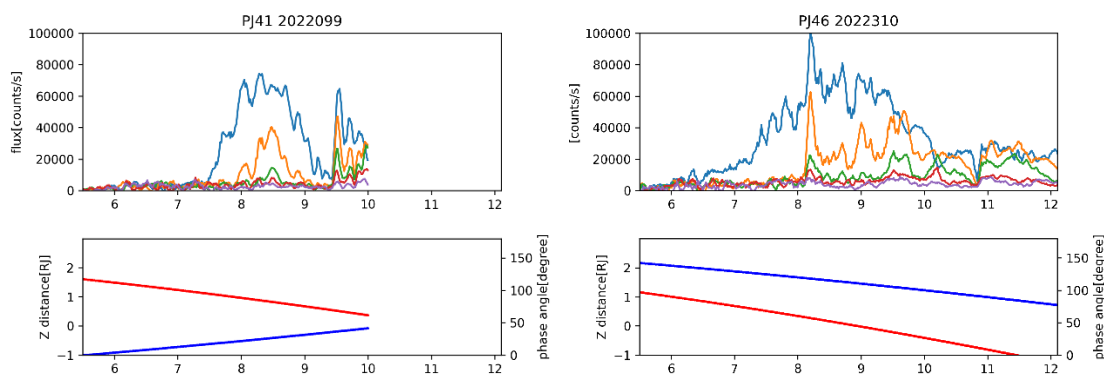


図3-2: (上段)左側がPJ41(イオフライバイ)、右側がPJ46の電子カウント分布
(下段)赤線が赤道面からのJunoのz軸方向距離、青線がJuno-木星-イオの位相角

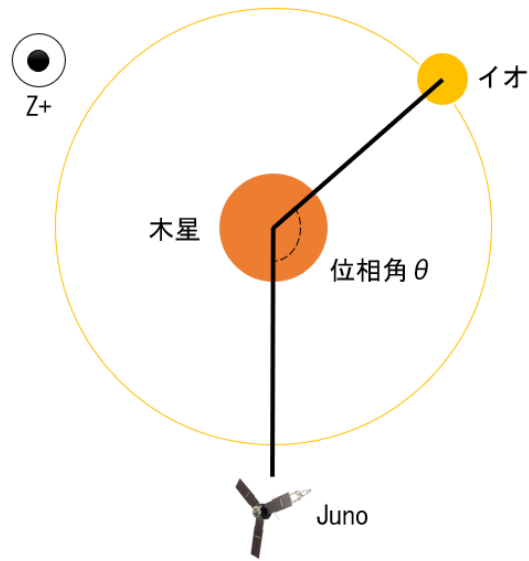


図 3-1: Juno-木星-イオの位相角

火山の前後での分布変化を議論するために、標準の分布として各 PJ のデータを足し合わせたものを PJ 数で割り、この期間における電子分部平均を求めた。その結果を以下の図 3-3 に示す。この平均では、電子は主に $7\sim 12 R_J$ に存在し、最もカウント値が大きい距離は $8\sim 10 R_J$ となった。

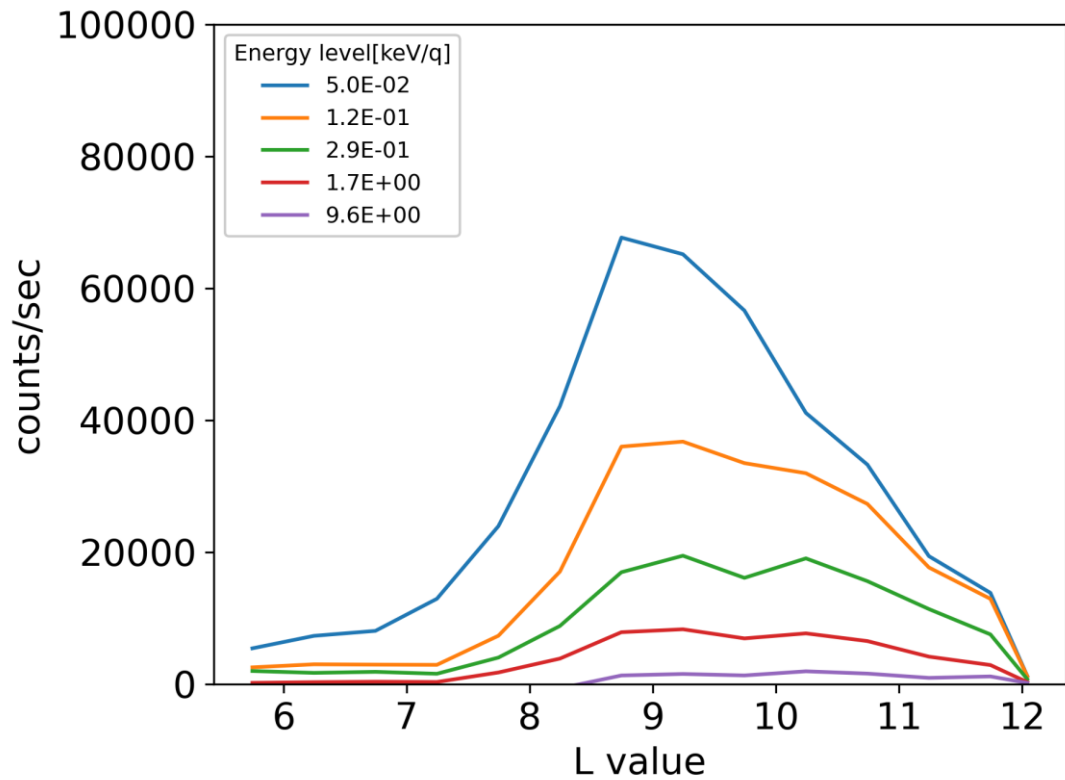


図 3-3: 観測期間中の電子分布平均

3.1.1 火山イベント 1 について

2020 年 10 月の火山イベント 1 の結果は図 3-4。噴火の 30 日前に当たる PJ29 から、イベントの 21 日後に観測した PJ30 にかけて電子が磁気圏遠方方向に移動していることが分かる。

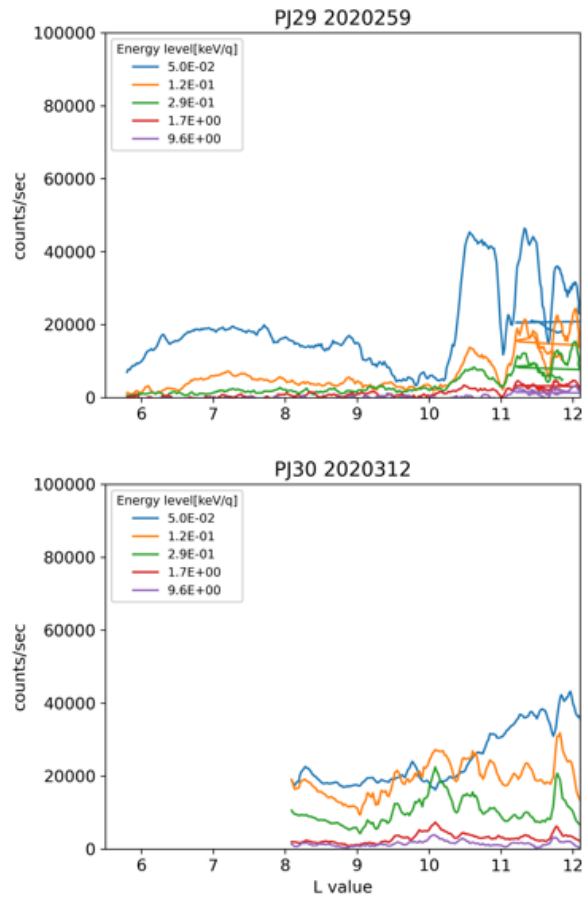


図 3-4: イベント 1 前後の PJ での電子分布比較

3.1.2 火山イベント 2 について

2020 年 8 月の火山イベント 2 の結果は図 3-5。イベントの 6 日前の PJ35 では、L 値 7~8 の間にピークを持つ分布を取り、PJ36 では、L 値 9 にかけてピークを持つ分布である。

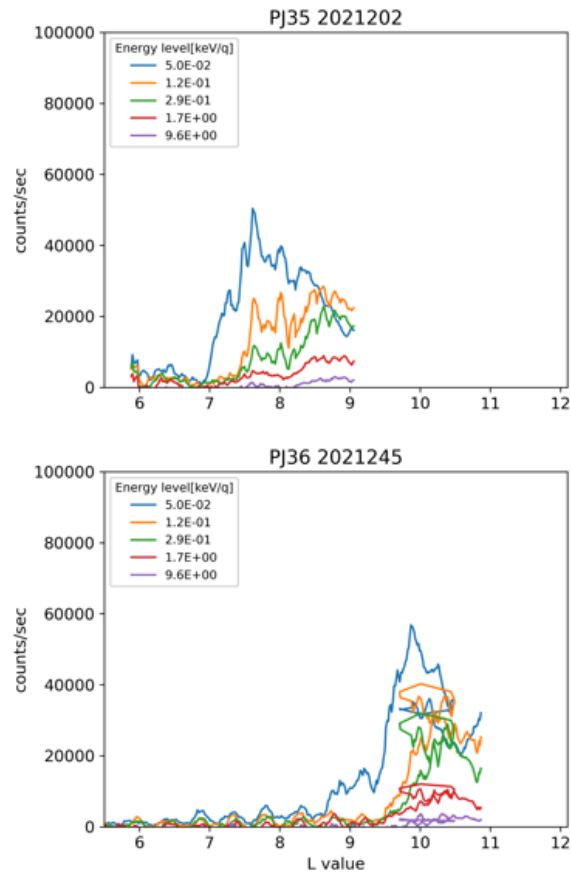


図 3-5: イベント 2 前後の PJ の電子分布比較

3.2 ひさきの観測結果

火山イベント 2 前後の PJ 時におけるひさきの観測結果を図 3-6, 3-7, 3-8 に示す。図 3-6 が電子密度、図 3-7 が電子温度、図 3-8 がホットエレクトロンの密度割合である。橙色の点は PJ35 を、青色の点は PJ36 を表す。電子密度はどちらも木星から離れるほど小さくなるが、温度は PJ35 では $7.5 R_J$ まで $5\sim 5.5$ eV だったのが $8 R_J$ 付近で 4 eV に下がった。PJ36 では $6.5 R_J$ 以遠で 6 eV 付近から 5 eV まで減少していることが分かる。ホットエレクトロン割合は PJ35 のとき木星から離れた場所で大きくなっており、PJ36 の割合よりも大きくなった。イベント 1 の期間に関しては、ひさきの観測時の姿勢が木星中心から大きくずれたため、補正しても正確な輝線が得られず、プラズマ診断を適用できなかった。

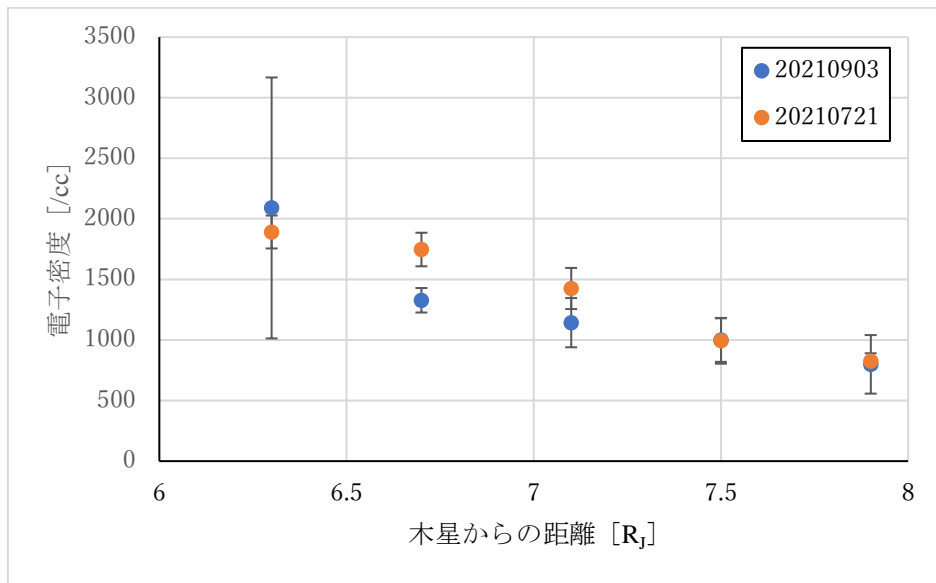


図 3-6: 電子密度分布

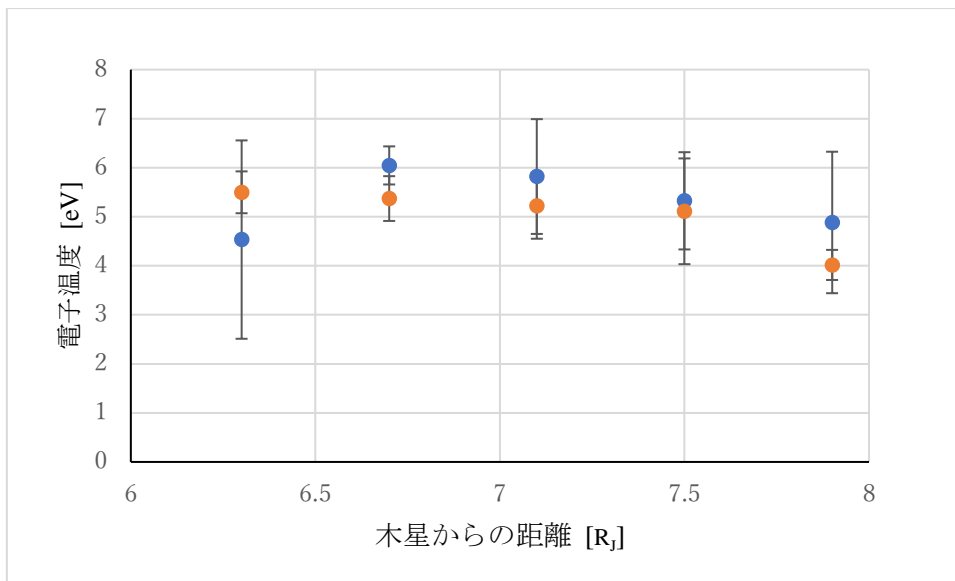


図 3-7: 電子温度分布

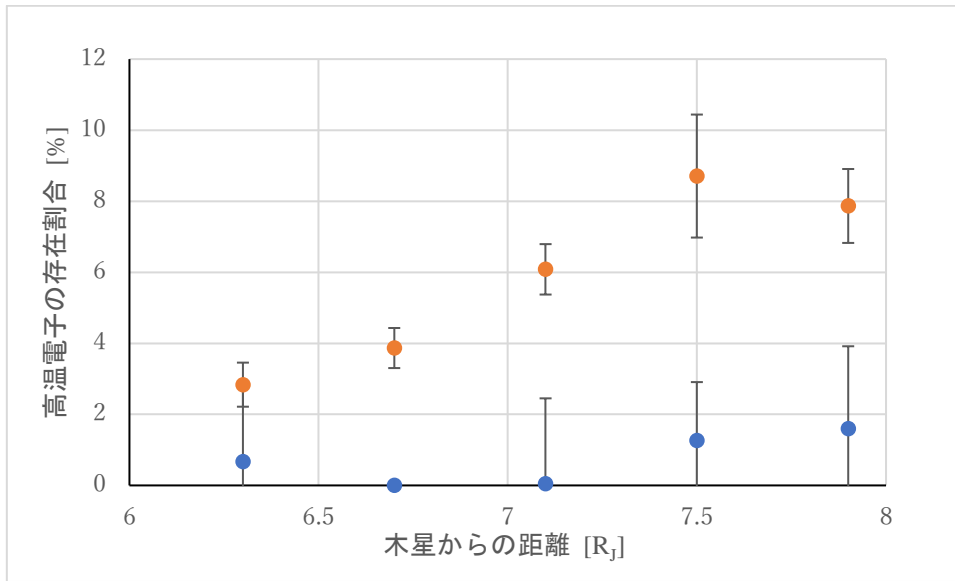


図 3-8: 高温電子分布

4. 考察

4.1 Juno とひさきの観測結果比較

図 3-3, 3-8 より、Juno とひさきの観測結果比較を行う。Juno の観測結果では、数 $10\text{eV}\sim 1\text{keV}$ のエネルギーを持つ電子が L 値 $6\sim 8$ の位置で高温電子が増加したあと L 値 9 でピークをとり、その後減少するという分布が求められた。また、ひさきの観測結果からは、 40eV 以上のエネルギーを持つ高温電子の割合が L 値 $6\sim 8$ において増加しており、同位置における Juno 観測結果の電子カウント数も増加していることから、遠隔観測と直接観測の観測結果に同様の傾向が示された。また、図 3-3 の Juno の平均電子分布の様子から、IPT 付近における 10eV 以上のエネルギーを持つ電子は L 値 9 付近でピークを持つ分布であることが明らかになった。

4.2 火山イベント前後での観測結果比較

図 3-5 より、Juno の結果からイベント前は L 値 7 から電子カウント数が増加しはじめ、L 値 $7\sim 8$ でカウント数が約 50000 counts/s のピークを持つ分布で、イベント後はより遠方の L 値 $9\sim 10$ でカウント数が増加しはじめ、L 値 10 付近でカウント数が約 60000 counts/s のピークを持つ分布であった。図 3-8 より、ひさきの観測結果は、イベント前は L 値 $7\sim 8$ にかけて高温電子の割合が 6% から 8.7% に増加し、そこでピークを取る。これは Juno 観測で見られた L 値 7 から増加しはじめ L 値 $7\sim 8$ でピークを持つ形と同様の増減傾向を示した。ひさきの観測結果から、イベント後は L 値 $7\sim 8$ にかけて高温電子の割合が 0.1% から 1.6% に単調増加し、この区間においてピークは発生しなかった。また、同区間のイベント前と比較して $6\sim 7\%$ ほど高温電子の割合が小さい。これは Juno 観測で見られた、L 値 $9\sim 10$ でカウント数が増加しはじめる前に L 値 9 以下ではカウント数が約 5000 counts/s で変化せず、小さい値を取った結果と一致する。

4.3 過去のシミュレーション結果との比較

図 4-1, 4-2 よりイベント前後の分布位置が変化していることが分かる。特に電子カウント数が大きい領域の変化について議論するため、カウント数が大きい 10eV 以上のエネルギーを持つ電子分布の最初のピークの左側接線の中点を変位の基準位置として考える。

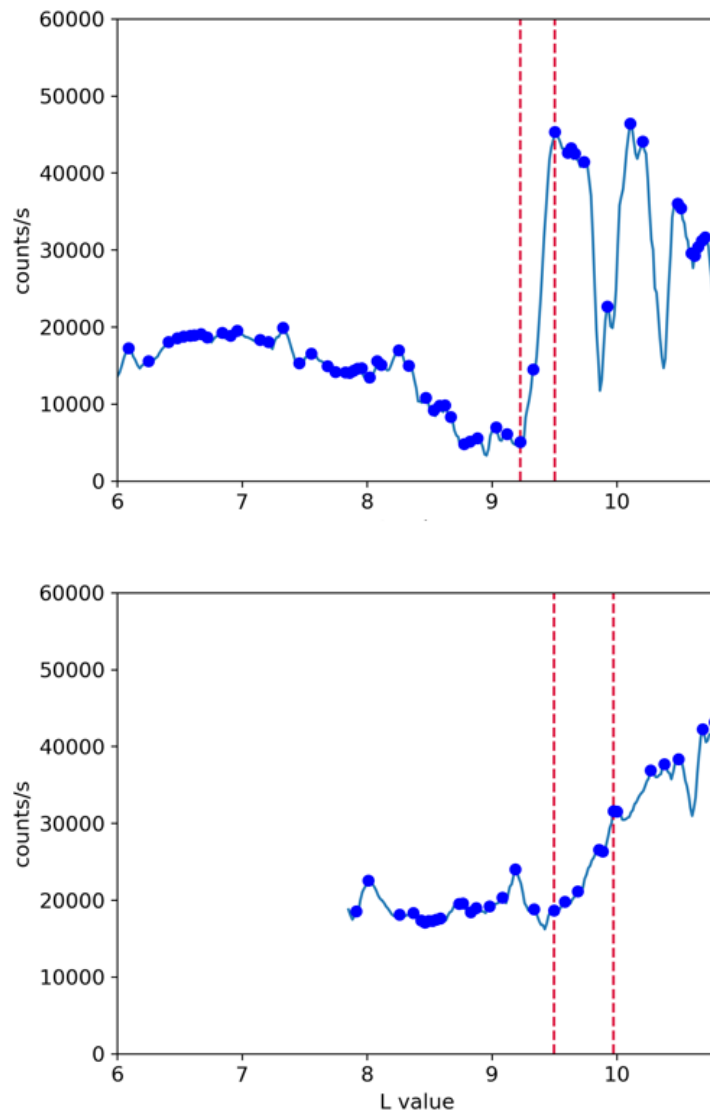


図 4-1: イベント 1 での電子輸送距離の推定 (上段)PJ29, (下段)PJ30

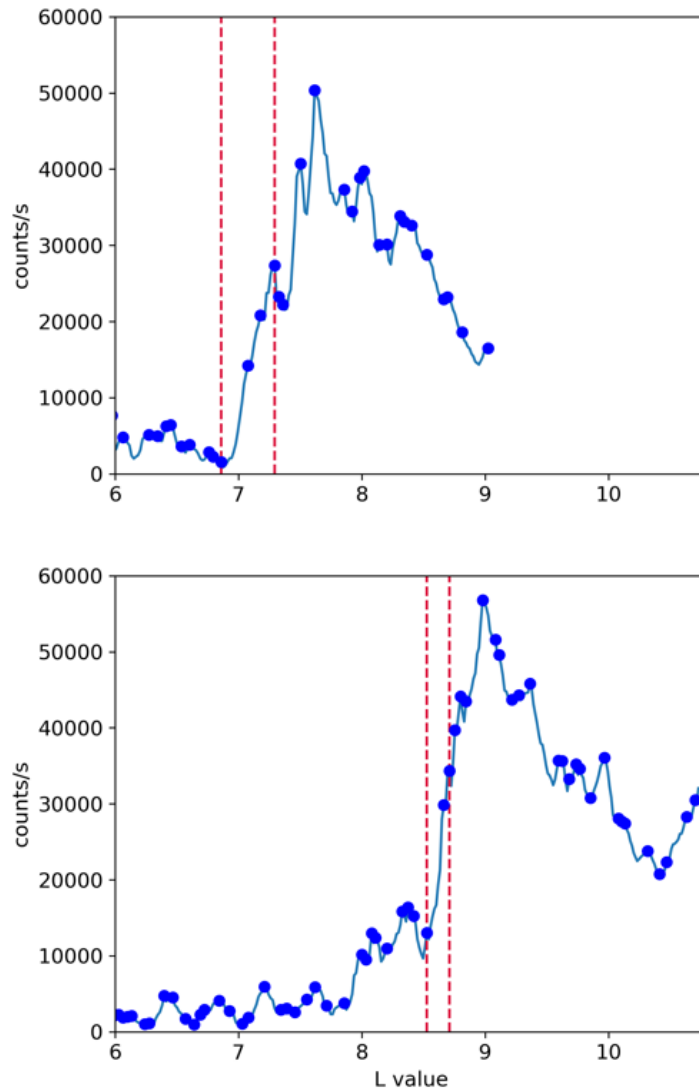


図 4-2: イベント 2 での電子輸送距離の推定(上段)PJ35, (下段)PJ36

イベント 1 では図 4-1 で示すように L 値 10.3 から 10.8、イベント 2 では図 4-1 で示すように L 値 7.3 から 8.8 と電子分布位置が変化する。先行研究 (Tsuchiya et al., 2018) から火山活発後にプラズマの木星遠方方向への輸送があったことが示されており、この分布変化もプラズマ輸送が要因である可能性がある。そこで、イベント発生時の電子分布がイベント前の PJ のものと同様であると仮定して、上記で定義した基準位置の変位とイベント発生から経過した日数を基に輸送速度を算出した。その結果、輸送速度がイベント 1 では 30 m/s、イベント 2 では 160 m/s となった。イオから発生するプラズマの輸送速度については、先行研究において理論計算結果が存在する (Bagenal and Delamere 2011)。輸送速度の算出については、以下の式 (4-1), (4-2) で表される。なお、式 (4-1) につ

いて、 $M(R)$ は半径方向のプラズマ質量分布を、 n_0 はプラズマ密度、 A_i は平均のイオン質量、 m_p は陽子の質量、 H はスケールハイトを表す。また式(4-2)において、 $V_R(R)$ が半径方向の外側への輸送速度を表す。式(4-2)から $V_R(R)$ について求め、グラフで示したものが図4-3である。

$$M(R) = 2\pi^{3/2}n_0A_im_pHR \quad [kg/m] \quad (4-1)$$

$$Flux = \dot{M} = M(R)V_R(R) \quad [tons/s] \quad (4-2)$$

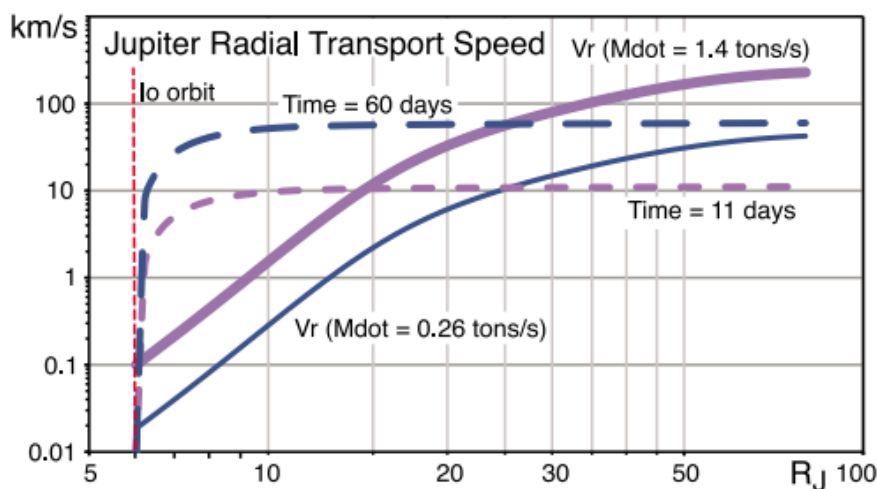


図4-3:木星磁気圏内の電子輸送速度シミュレーション(F. Bagenal and Delamere, 2011)

このとき、プラズマ円盤の密度モデルから、木星磁気圏を通過する質量の流れを見積もることができ、プラズマ生成量は0.26~1.4 tons/sと推定される。そこで図4-3ではイオからのプラズマ供給量が1.4 ton/sと0.26 ton/sのときの輸送速度をそれぞれ求めており、L値(図4-3上ではR_J)の変化により輸送速度が変化する。イベント1について、基準位置が10R_Jのときの理論速度は、プラズマ供給量が1.4 ton/sのとき1.5~2.0 km/s、プラズマ供給量が0.26 ton/sのとき200~300 m/sである。またイベント2について、基準位置が7~8 R_Jのときの理論速度はプラズマ供給量が1.4 ton/sのとき200~400 m/s、プラズマ供給量が0.26 ton/sのとき30~80 m/sである。この結果から、イベント1発生時のプラズマ供給量は0.26 ton/sより小さく、イベント2発生時のプラズマ供給量は0.26~1.4 ton/sの間だと考えられる。

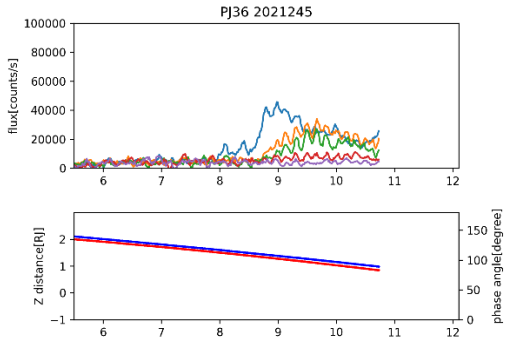
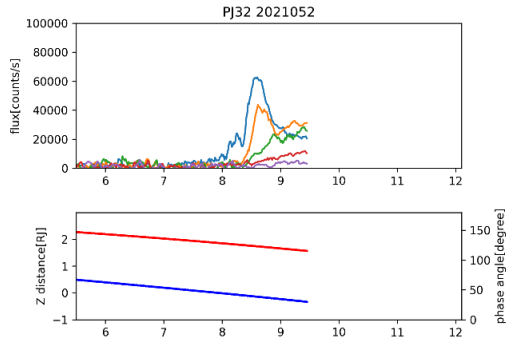
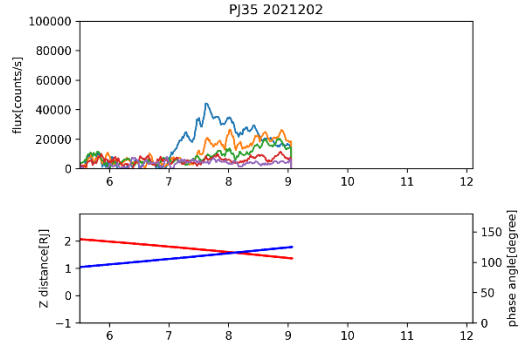
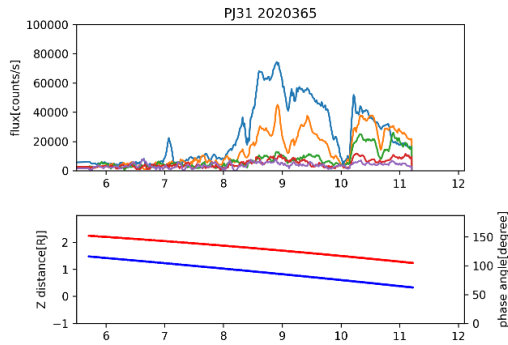
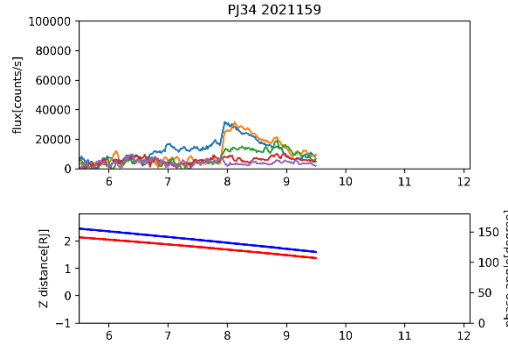
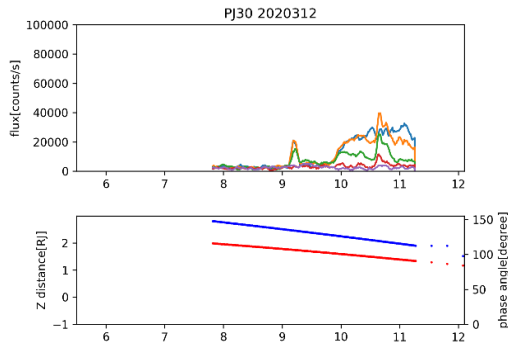
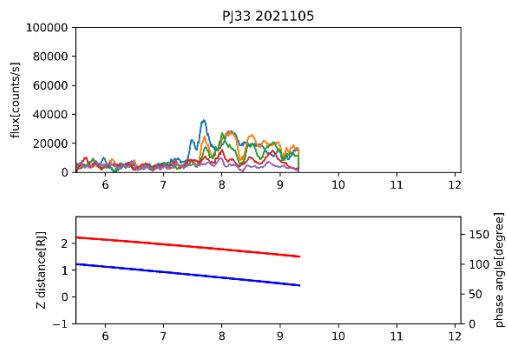
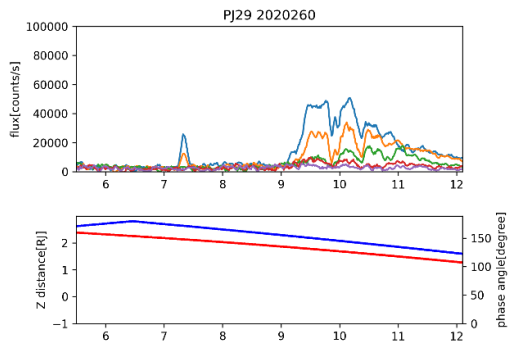
5.まとめ

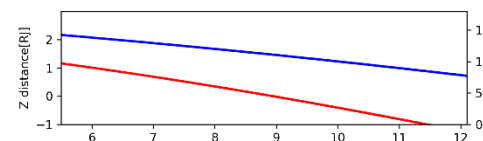
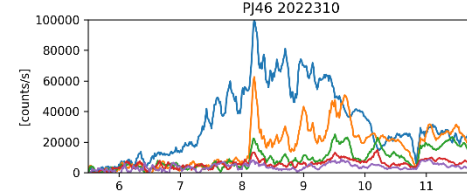
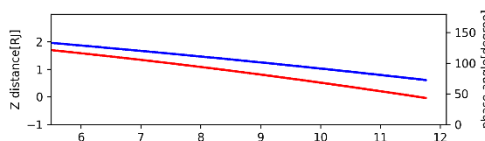
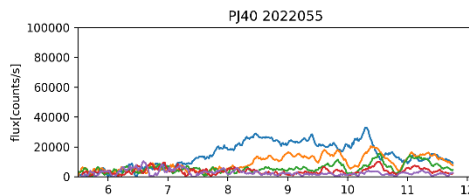
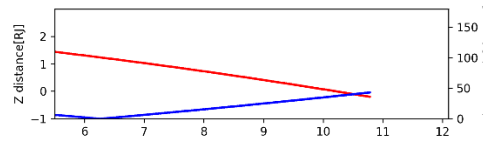
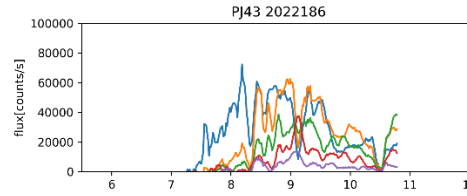
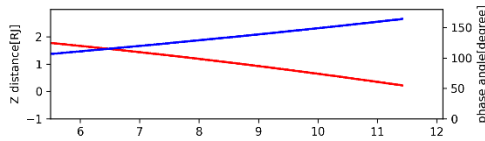
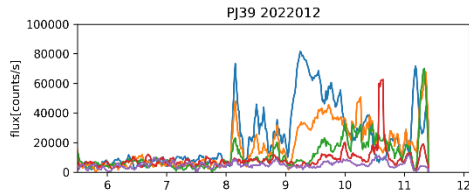
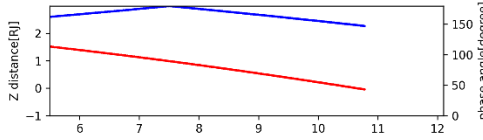
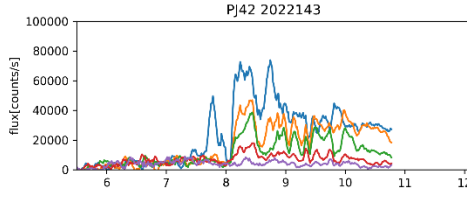
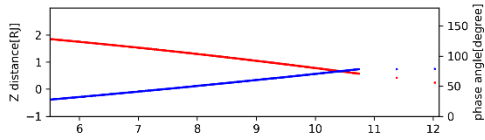
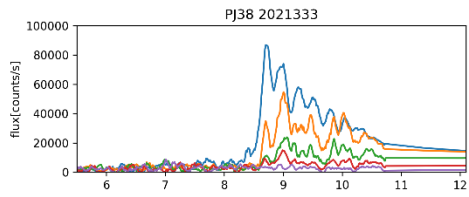
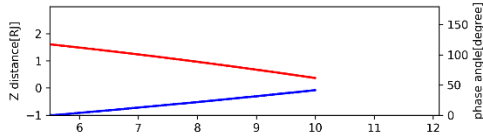
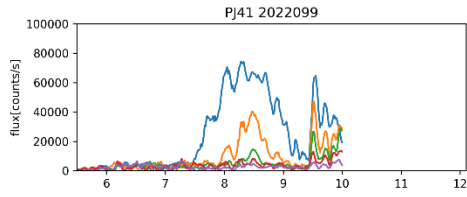
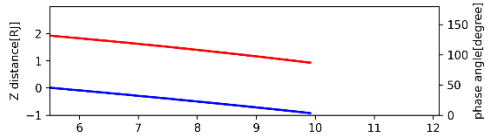
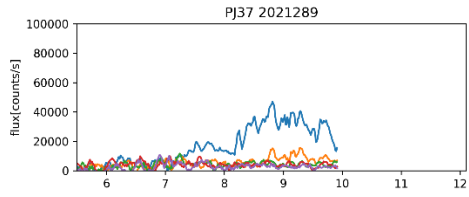
木星磁気圏の挙動はイオの火山由来のプラズマによって駆動されると考えられており、そのダイナミクスの理解は、太陽風駆動型の地球磁気圏と比較し、惑星一般での磁気圏構造を理解するうえ上で非常に重要である。イオの火山活動前後でのプラズマ分布やその動きの変化から、磁気圏内プラズマの輸送状況を理解することができる。火山イベントの前後で電子の移動の特徴がつかめれば、プラズマのよりタイムスケールの短い挙動の解明につながる。本研究では、地球衛星ひさきによって観測された木星とイオトーラス周辺の極紫外線スペクトルデータと、探査機 **Juno** によって取得された電子エネルギー分布観測データを解析し、木星内部磁気圏内の電子分布の PJ ごとの変化を明らかにし、IPT 以遠の平均的な電子分布の描像を明らかにした。また、火山イベント前後の電子分布の様子の変化から、火山から発生したプラズマが移動している可能性が示唆された。このイベント前後の分布位置から輸送速度を導出した。更に、先行研究の木星磁気圏内プラズマ輸送シミュレーションと比較することで、この輸送速度について議論し、各火山イベントでのプラズマの供給量の違いを確認した。

ひさき衛星はイオンのスペクトルデータを取得するため、**Juno** 探査機との比較を行うためにイオンスペクトルのプラズマ診断を行い、電子情報を得るプラズマ診断手法を 140° スリットにおいて実行し、**Juno** 探査機と共通の視野比較を行うことで類似傾向が確認できた。また、**Juno** の内部磁気圏における電子分布を平均し、火山イベント前後で比較することで、イベント後にプラズマが木星の遠方領域に輸送されることが明らかになった。また、2020~2022 年の電子分布を平均することで、電子が主に 8~9 R_J に分布することを確認した。またこのデータを用いてイベント前後での分布位置を比較することで、大規模な噴火における電子の平均速度は 30 m/s、160 m/s と求められた。

今後の研究の課題として、同火山イベントにおけるプラズマ輸送の速度をイオンに対しても導出し、電子とイオンの輸送速度差について議論したい。また、このイオン速度と過去の火山イベントで導出されたイオン速度を比較し、火山活動の規模に対する輸送速度の関係を求めたい。更に、本研究でひさきのスペクトルフィッティングにおいて、**Juno** との共通視野内での傾向の一致が確認できたことから、今後更に他の PJ においても電子分布の傾向を確かめたい。また、局所解に陥らない大域的解の探索を行う手法を試して、フィッティング精度の向上を図りたい。

補遺





ひさきのスペクトルフィッティングについては、表に過去にひさきの観測データにプラズマ診断を適用した際に算出されたパラメタと今回の条件で算出したパラメタ結果を示す。本研究と(Hikida et al. 2020)では140”スリットを用いており、(Yoshioka et al. 2018)では10”スリットを用いている。

表 4-1: プラズマ診断結果の比較

	Yoshioka 2015/2(5.9~6.1RJ)	Sanada 2015/2/7(5.9~6.2RJ)	Hikida 2015/2/7(5.9~6.2RJ)
Electron dens[/cc]	2860±260	2929±230	2900±200
Electron temp[eV]	3.7±0.6	4.7±0.3	3.8±0.2
Hot electron dens[%]	0.7±0.2	0.5±0.4	0.7±0.2
S+[/cc]	400±35	344±26	348±29
S++[/cc]	700±60	662±6.7	437±116
S+++[/cc]	54±9	69±4.6	49.3±5.8
O+[/cc]	540±70	806±73	696±116

参考文献

- Acuña, M. H., J. E. P. Connerney, and N. F. Ness. 1983. “The Z_3 Zonal Harmonic Model of Saturn’s Magnetic Field: Analyses and Implications.” *Journal of Geophysical Research* 88 (A11): 8771-78.
- Anderson, John D., and Gerald Schubert. 2007. “Saturn’s Gravitational Field, Internal Rotation, and Interior Structure.” *Science* 317 (5843): 1384-87.
- Bagenal, F. n.d. “Empirical Model of the Io Plasma Torus: Voyager Measurements.” *Journal of Geophysical Research, [Space Physics]*. <https://doi.org/10.1029/93JA02908>.
- Bagenal, F., A. Adriani, F. Allegrini, S. J. Bolton, B. Bonfond, E. J. Bunce, J. E. P. Connerney, et al. 2017. “Magnetospheric Science Objectives of the Juno Mission.” *Space Science Reviews* 213 (1-4): 219-87.
- Bagenal, F., and P. A. Delamere. n.d. “Flow of Mass and Energy in the Magnetospheres of Jupiter and Saturn.” *Journal of Geophysical Research*. <https://doi.org/10.1029/2010JA016294>.
- Bagenal, Fran. 1994. “Empirical Model of the Io Plasma Torus: Voyager Measurements.” *Journal of Geophysical Research* 99 (A6): 11043-62.

- Bigg, E. K. 1964. "Influence of the Satellite Io on Jupiter's Decametric Emission." *Nature* 203 (4949): 1008-10.
- Connerney, J. E. P., and M. H. Acuna. n.d. "Voyager 1 Assessment of Jupiter's Planetary Magnetic Field." *Journal of Geophysical Research*. <https://doi.org/10.1029/JA087iA05p03623>.
- Cowley, S. W. H. 1982. "The Causes of Convection in the Earth's Magnetosphere: A Review of Developments during the IMS." *Reviews of Geophysics* 20 (3): 531-65.
- Dere, K. P., E. Landi, H. E. Mason, B. C. Monsignori Fossi, and P. R. Young. 1997. "CHIANTI - an Atomic Database for Emission Lines." *Astronomy & Astrophysics. Supplement Series* 125 (1): 149-73.
- Dere, Kenneth, Giulio Del Zanna, Peter Young, and Enrico Landi. 2023. "CHIANTI -- an Atomic Database for Emission Lines -- Paper XVII: Version 10.1, Revised Ionization and Recombination Rates and Other Updates." *ArXiv [Physics. Atom-Ph]*. arXiv. <http://arxiv.org/abs/2305.15221>.
- Drake, F. D., and S. Hvatum. 1959. "Non-Thermal Microwave Radiation from Jupiter." *The Astronomical Journal* 64 (January): 329-30.
- Dungey, J. W. 1961. "Interplanetary Magnetic Field and the Auroral Zones." *Physical Review Letters* 6 (2): 47-48.
- Franklin, Kenneth L. 1955. *Observation of a Variable Radio Sources Associated with the Planet Jupiter*. William Byrd Press for John Hopkins Press.
- Hikida, R., K. Yoshioka, F. Tsuchiya, M. Kagitani, T. Kimura, F. Bagenal, N. Schneider, et al. 2020. "Spatially Asymmetric Increase in Hot Electron Fraction in the Io Plasma Torus during Volcanically Active Period Revealed by Observations by Hisaki/EXCEED from November 2014 to May 2015." *Journal of Geophysical Research. Space Physics* 125 (3): e2019JA027100.
- Hill, T. W. 1976. "Interchange Stability of a Rapidly Rotating Magnetosphere." *Planetary and Space Science* 24 (12): 1151-54.
- J. H. Wolfe, J. D. Mihalov, H. R. Collard, D. D. McKibbin, L. A. Frank, D. S. Intriligator. 1974. "Pioneer 10 Observations of the Solar Wind Interaction with Jupiter." *Journal of Geophysical Research (1896-1977)* 79 (25): 3489-3500.
- Jackman, C. M., C. S. Arridge, N. André, F. Bagenal, J. Birn, M. P.

- Freeman, X. Jia, et al. 2014. "Large-Scale Structure and Dynamics of the Magnetotails of Mercury, Earth, Jupiter and Saturn." *Space Science Reviews* 182 (1-4): 85-154.
- Kleer, K. de, F. Nimmo, and E. Kite. n.d. "Variability in Io's Volcanism on Timescales of Periodic Orbital Changes." *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2019GL082691>.
- Lopes, Rosaly M. C., Lucas W. Kamp, William D. Smythe, Peter Mougini-Mark, Jeff Kargel, Jani Radebaugh, Elizabeth P. Turtle, Jason Perry, David A. Williams, and R. W. Carlson. 2004. "Lava Lakes on Io: Observations of Io's Volcanic Activity from Galileo NIMS during the 2001 Fly-Bys." *Icarus* 169 (1): 140-74.
- May, J., T. D. Carr, and M. D. Desch. 1979. "Decametric Radio Measurement of Jupiter's Rotation Period." *Icarus* 40 (1): 87-93.
- Steffl, A. 2004. "Cassini UVIS Observations of the Io Plasma Torus. II. Radial Variations." *Icarus* 172 (1): 91-103.
- Tate, Christian D., Julie A. Rathbun, Alexander G. Hayes, John R. Spencer, and Madeline Pettine. 2023. "Discovery of Seven Volcanic Outbursts on Io from an IRTF Observation Campaign 2016 to 2022." *ArXiv [Astro-Ph.EP]*. arXiv. <http://arxiv.org/abs/2308.07864>.
- Thomas, N., F. Bagenal, T. W. Hill, and J. K. Wilson. 2004. "The Io Neutral Clouds and Plasma Torus." In *Jupiter. The Planet, Satellites and Magnetosphere*, edited by Fran Bagenal, Timothy E. Dowling, and William B. McKinnon, 1:561-91.
- Thorne, R. M., T. P. Armstrong, S. Stone, D. J. Williams, R. W. McEntire, S. J. Bolton, D. A. Gurnett, and M. G. Kivelson. 1997. "Galileo Evidence for Rapid Interchange Transport in the Io Torus." *Geophysical Research Letters* 24 (17): 2131-34.
- Tsuchiya, F., K. Yoshioka, and T. Kimura. n.d. "Enhancement of the Jovian Magnetospheric Plasma Circulation Caused by the Change in Plasma Supply from the Satellite Io." *Journal Of*. <https://doi.org/10.1029/2018JA025316>.
- Vasyliunas, Vytenis M. 1983. "Plasma Distribution and Flow." *Physics of the Jovian Magnetosphere* 1: 395-453.
- Yoshikawa, Ichiro, Kazuo Yoshioka, Go Murakami, Atsushi Yamazaki, Fuminori Tsuchiya, Masato Kagitani, Takeshi Sakanoi, et al. 2014. "Extreme Ultraviolet Radiation Measurement for Planetary

- Atmospheres/Magnetospheres from the Earth-Orbiting Spacecraft (Extreme Ultraviolet Spectroscope for Exospheric Dynamics: EXCEED).” *Space Science Reviews* 184 (1-4): 237-58.
- Yoshioka, K., G. Murakami, A. Yamazaki, F. Tsuchiya, M. Kagitani, T. Sakanoi, T. Kimura, K. Uemizu, K. Uji, and I. Yoshikawa. 2013. “The Extreme Ultraviolet Spectroscope for Planetary Science, EXCEED.” *Planetary and Space Science* 85 (September): 250-60.
- Yoshioka, K., F. Tsuchiya, M. Kagitani, T. Kimura, G. Murakami, D. Fukuyama, A. Yamazaki, I. Yoshikawa, and M. Fujimoto. 2018. “The Influence of Io’s 2015 Volcanic Activity on Jupiter’s Magnetospheric Dynamics.” *Geophysical Research Letters* 45 (19): 10,193-10,199.
- Yoshioka, K., F. Tsuchiya, T. Kimura, M. Kagitani, G. Murakami, A. Yamazaki, M. Kuwabara, et al. 2017. “Radial Variation of Sulfur and Oxygen Ions in the Io Plasma Torus as Deduced from Remote Observations by Hisaki.” *Journal of Geophysical Research, [Space Physics]* 122 (3): 2999-3012.

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご協力をいただきました。指導教員である吉岡和夫講師には、データ解析の基礎や論文の読み方など研究者として必要な技術についてたくさん教えていただきました。また、学会やセミナーでの発表の際には、資料の作成や練習など、大変多くのご指導をいただきました。研究室の先輩である鈴木雄大博士には、まだデータ解析について何の知識もなかった私をいつも気にかけていただき、研究に関する非常に多くのアドバイスをいただきました。吉川一朗教授、今村剛教授、青木翔平講師には、セミナーにおいて多くのアドバイスを頂きました。同じ研究室の佐々木優斗様、山崎朝様、松本樹希様、合田和司様、木下岳様、ともに最後まで修論を書いた仲間である関すおみ様、寺本駿一郎様、またアストロバイオロジーグループの皆さまには、様々なご意見や、解析へのご協力を頂きました。皆様のおかげで研究がうまくいかず辛い時も頑張ることができました。心より感謝申し上げます。

最後に、研究生生活を支えてくださった両親、学部生時代の友人たち全ての方々に厚く御礼申し上げます。