

Pirka 望遠鏡を用いたイオ火山の噴火による
木星磁気圏への物質供給に関する研究

金野敦

学籍番号 : 20243064

大学院理学院 宇宙理学専攻 惑星宇宙グループ 修士2年

高橋・佐藤・高木研究室

指導教員 : 佐藤光輝

概要

木星の第一衛星イオは、活発な火山活動が起こっている天体の 1 つである。その駆動源として木星との強い潮汐作用、およびエウロパ、ガニメデとのラプラス共鳴によって地球の約 30 倍にも及ぶ熱流量を維持していることが挙げられる (Veeder *et al.*, 1994)。これまでの探査機観測および地上観測により、イオ表面では二酸化硫黄や塩化ナトリウムなどの火山噴出物が継続的に放出されていることが明らかになった (Lellouch *et al.*, 2003)。これらの噴出物は、イオの希薄な大気を形成したのち、毎秒約 1 トンのペースで宇宙空間へと脱出し (Dessler, 1980)、木星磁気圏内に中性ナトリウム星雲およびイオプラズマトーラスを形成すると考えられている。特に、地上可視光観測によって発見された中性ナトリウム星雲は、イオの公転軌道付近から数百木星半径にわたって広がる大規模構造を有しており、その輝度は 1 か月半から数か月の時間スケールで大きく変動することが報告されている (Morgenthaler *et al.*, 2024)。また、イオプラズマトーラスについても、紫外線および可視光観測により、硫黄・酸素イオンに由来する放射が強くなる現象が確認されている (Yoneda *et al.*, 2015; Koga *et al.*, 2018b; Morgenthaler *et al.*, 2024)。これらの増光イベントは、赤外観測による熱放射が活発な時期と対応しており (de Kleer *et al.*, 2019)、イオ火山の噴火に伴う物質供給の増加がその主因であると考えられてきた。しかし、火山噴火によって放出された物質が、イオ大気からどの程度の時間スケールで拡散していくのか、また、中性分子・中性原子・イオンなど、どのような状態で脱出しプラズマトーラスや中性星雲へ供給されるのか、といった初期輸送過程について、観測的に十分明らかになっていない。

これらの先行研究を踏まえ、イオ火山活動に伴う物質放出とその周辺空間への供給過程を観測的に同定することを目的として、北海道大学大学院理学院が所有する Pirka 望遠鏡を用い、中性ナトリウムに由来するナトリウム D 線 (~589.0 nm) および硫黄イオンの禁制線 (~672.5 nm) を観測対象とし、2024 年度および 2025 年度に可視光撮像観測を実施した。取得した画像に対して、バイアス補正、フラットフィールド補正、画像合成処理を施し、さらに木星の地球大気散乱光をモデル化して除去することで、ナトリウムおよび硫黄イオンの微弱な輝線放射成分を抽出した。イオ近傍および公転軌道上の複数領域において開口測光を行い、標準星を用いた相対測光により輝度の時間変動を評価した。

その結果、2024 年 9 月から 10 月の 1 か月半に渡り、ナトリウム輝線および硫黄イオン輝線の両波長で、相対測光強度が 4-5 倍ほど増光するイベントが検出された。これは、先行研究で報告されているナトリウム星雲およびイオプラズマトーラスの増光現象と整合的な時間スケールおよび強度値を示した。本増光イベントにおいて、開口領域における 2 波長成分の時間変動の同時性から、大気の脱出には火山噴火が駆動している可能性が高く、また、領域ごとの時間変動の応答性が異なることから、硫黄は一価の陽イオンの状態で大気を脱出し、ナトリウムは中性原子以外の状態で脱出している可能性が高いと推定された。

目次

1. はじめに	4
1.1. イオの特徴	4
1.1.1. ガリレオ衛星	4
1.1.2. イオの火山	6
1.1.3. イオ表面と大気	8
1.1.4. イオプラズマトーラスとナトリウム中性星雲	9
1.2. 研究の目的	12
2. 観測・解析	13
2.1. 観測	13
2.1.1. 観測波長	13
2.1.2. Pirka 望遠鏡	14
2.1.3. 可視光マルチスペクトル撮像観測装置	15
2.1.4. 観測視野	18
2.1.5. データリスト	19
2.2. 解析	23
2.2.1. 1次処理	23
2.2.2. 木星散乱光	24
2.2.3. 開口測光	31
2.2.4. レイリーへの変換	32
2.2.5. 相対測光	33
3. 結果	34
3.1. 輝度計算結果	34
3.2. 相対強度の時間変化	36
4. 考察	40
4.1. 先行研究との比較	40
4.2. 各開口エリアの相対強度の時間変化比較	42
4.3. 火山噴火現象との比較	45
4.4. 課題と今後の展望	46
5. まとめ	47
6. 謝辞	48
7. 参考文献	49

1. はじめに

1.1. イオの特徴

1.1.1. ガリレオ衛星

ガリレオが発見した木星の主要な4つの衛星である、イオ、エウロパ、ガニメデ、カリスト(図1)は「ガリレオ衛星」と総称される。これらの衛星の諸元は表1の通りである。そのなかでも、木星の第一衛星であるイオは、火山活動が活発な天体の1つとして知られている。また、木星から約421,700 km(5.9R_J)の距離を公転し、公転周期は約1.769日である(Weissman et al., 1999)。イオの半径は約1,821 kmで、地球の月と同程度の大きさを持ち、主に岩石で構成される(Anderson et al., 2001)。イオの表面では、溶岩流や巨大な噴煙が継続的に観測されており、その火山活動は地球を含む他の岩石惑星や衛星と比較しても極めて特異である。内部構造は金属核とケイ酸塩マントルを有し、部分的に溶融したマグマオーシャンの存在が示唆されている(Park et al., 2025)



図1. ガリレオ衛星(左からイオ、エウロパ、ガニメデ、カリスト) Credits: NASA/JPL/DLR

表1. ガリレオ衛星の諸元(Weissman et al., 1999)

衛星名	質量 10 ²³ kg	半径 km	平均密度 g cm ⁻³	軌道半径 R _J	軌道周期 日
イオ	0.893	1821	3.53	5.905	1.769
エウロパ	0.480	1565	2.99	9.397	3.551
ガニメデ	1.482	2634	1.94	14.99	7.155
カリスト	1.076	2403	1.85	26.37	16.69

イオに火山活動が存在する理由として、木星の潮汐力に加えて、イオ、エウロパ、ガニメデの衛星同士がラプラス共鳴していることが関係する。ラプラス共鳴が成り立つ衛星は、軌道上にある衛星同士の位相が以下の関係によって同期している (Yoder, 1979)。

$$\Phi_L = \lambda_{Io} - 3\lambda_{Eu} + 2\lambda_{Ga} = 180^\circ$$

ここで、 λ は各衛星の平均黄経である。この関係が常に成り立つため、3つの衛星は三重会合せず(図2)、周期的な潮汐変形を起こすことで、内部摩擦加熱を発生させ、膨大な内部エネルギーを生成する。(Peale et al., 1979)。

この強力な内部加熱が、イオのマグマ活動を駆動し、表面に多数の火山を形成していると考えられている。さらに、潮汐加熱の空間分布と実際に観測される火山活動の分布を比較する研究も行われており、両者の対応関係はイオ内部構造を制約する重要な情報を与えている (Veenstra et al., 2025)。

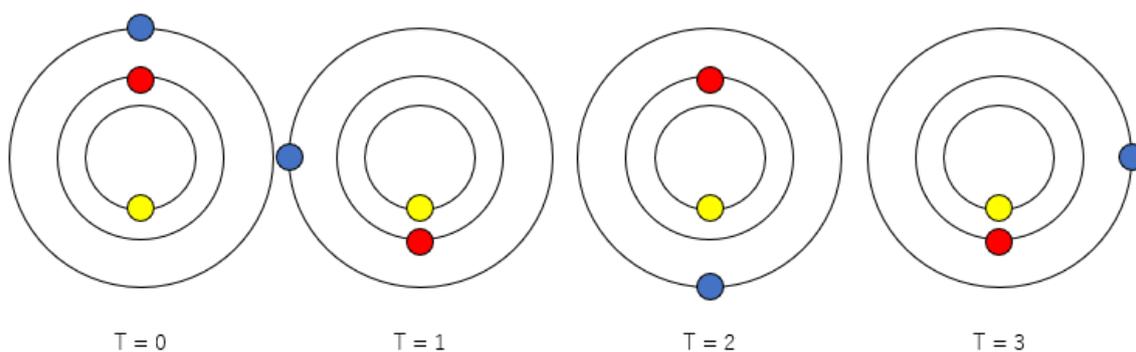


図2. イオの公転周期(T)ごとのエウロパ、ガニメデの位置。内側からイオ(黄色)、エウロパ(赤)、ガニメデ(青)。

1.1.2. イオの火山

イオの平均全球熱流量は 2.5 W/m^2 で地球の約 30 倍に相当する (Veeder *et al.*, 1994)。この高い熱流量はイオ全体に一様に分布しているわけではなく、その約 55% がホットスポットと呼ばれる局所的に高温な領域から放出されている (Veeder *et al.*, 2012)。イオでは 250 以上のホットスポットが確認されており (Davies *et al.*, 2024)、ホットスポットの中でも最大級の火口であるロキ・パテラは、火口の直径が約 200 - 220 km に達し、周期的な変動が継続することで知られている (McEwen *et al.*, 1998; Rathbun and Spencer, 2006)。近年でも木星探査機 JUNO により、新しいホットスポットの発見が報告されている (Veeder, *et al.*, 2015)。このような観測結果は、イオの火山活動が過去の一時的な現象ではなく、現在も全球的に活動し続けていることを示している。

de Kleer *et al.* (2019) は、火山熱放射の時間的・空間的分布から潮汐加熱が火山活動に与える影響を明らかにするため、2013 年 8 月から 2017 年 7 月にかけて、Keck 望遠鏡を用いた $2\text{--}5 \mu\text{m}$ の赤外線波長でイオ表面の熱放射を観測した。図 3 はその一例であるが、これらの画像は、標準星として恒星の測光計測が行われた場合には、その恒星を基準としてフラックス較正されている。そうでない場合は、イオの円盤上の火山のない領域を基準として較正されている。この観測期間中、ロキ・パテラが明るく輝く事例が 113 回と最も多く検出されており、800K を超える高温状態になっていることが確認された。観測で得た $3.78 \mu\text{m}$ の輝度値の時間変化を図 4 に示す。これらの近赤外波長画像は、この期間のイオの火山活動の全球規模の変動を理解するのに役立つ。しかしながら、この研究では、活発なホットスポットの分布や大きな熱放射イベントに関する知見は得られたものの、潮汐力と関連するような熱放射の経度依存や日周スケールの変化等については明確にされていない。

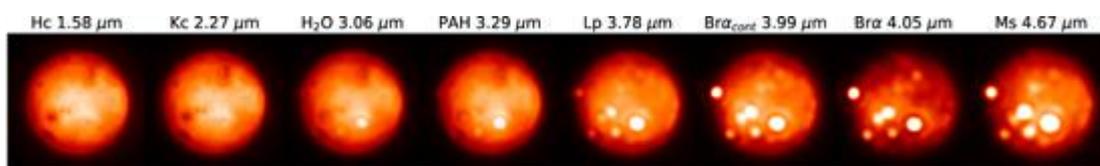


図 3. 2017 年 5 月 28 日に Keck 望遠鏡で撮影されたイオの画像。すべての画像は 30 分以内に撮影され、各画像にはフィルター名と中心波長がラベル付けされている。(de Kleer, *et al.*, 2019)

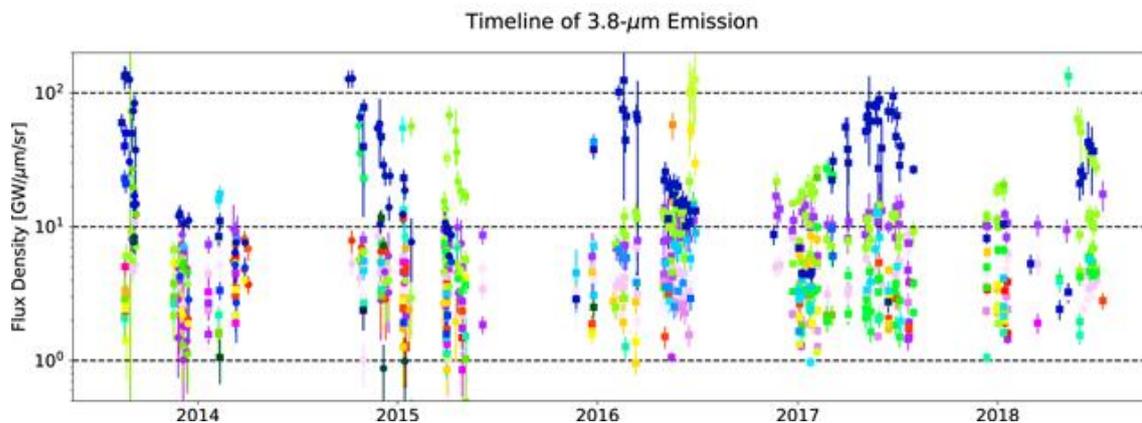
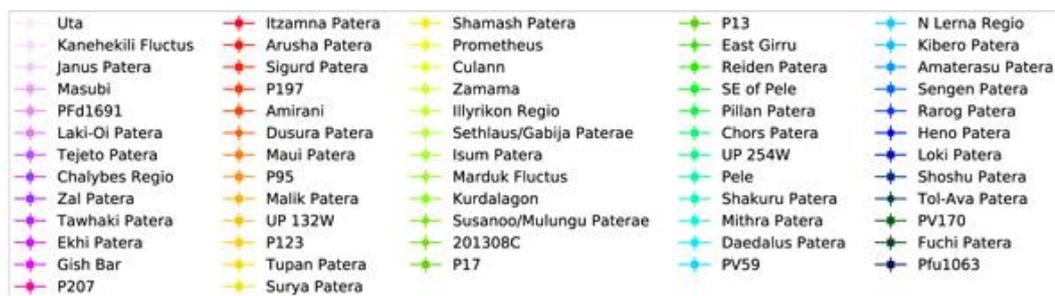


図 4. 2013 年から 2018 年までのイオの火山活動の時間変動。L' バンドで検出された火山中心からの熱放射がすべてプロットされており、各火山中心は異なる色で表示されている。(de Kleer, et al., 2019)

このようなイオのホットスポットに伴う火山活動では、ケイ酸塩マグマに由来する高温溶岩だけでなく、数百 km に達する大規模なプルームが形成される場合がある。これらのプルームは、主に二酸化硫黄を主体として塩化ナトリウムや塩化カルシウムを含むガスや微粒子を高高度まで噴き上げ、イオの地表環境や大気構造に大きな影響を及ぼすことが報告されている (Lellouch et al., 2003; McEwean et al., 1998)。

プルーム活動によって供給された物質は、イオ大気の局所的な濃度増加を引き起こすだけでなく、後に大気を脱出し木星磁気圏内へ供給する重要な物質源となる。

1.1.3. イオ表面と大気

イオの表面は硫黄化合物で覆われており、白色や赤褐色の地形模様を形成する。ガリレオ探査機による分光観測では、表層の主成分として二酸化硫黄や硫黄、硫酸ナトリウムなどが確認された(Williams et al., 2011)。

イオの大気は非常に希薄で主成分は二酸化硫黄であり、硫黄や酸素などの中性子原子も存在し、表面気圧は 10^{-8} bar と推定される(Lellouch et al., 1990)。

イオ大気の起源については、「表面氷の昇華」だけでなく、「火山噴出」起源の供給機構があるとされている。de Pater et al., (2023)は、ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)を用いて、イオが木星食の期間に近赤外観測を行った。食の期間は昇華による物質の大気供給が低く、火山噴火と関連した大気への物質流入の直接的な証拠となる。図5は、JWSTが捉えた近赤外放射と酸化硫黄の強度マップで、熱放射の強度の中心と酸化硫黄の強度の中心がよく一致している。この観測結果は、火山の噴出口から酸化硫黄が直接噴出している可能性が高いことを示唆しており、イオ大気中の成分比や空間分布もそれに応じて時間的に大きく変動することが明らかになった。

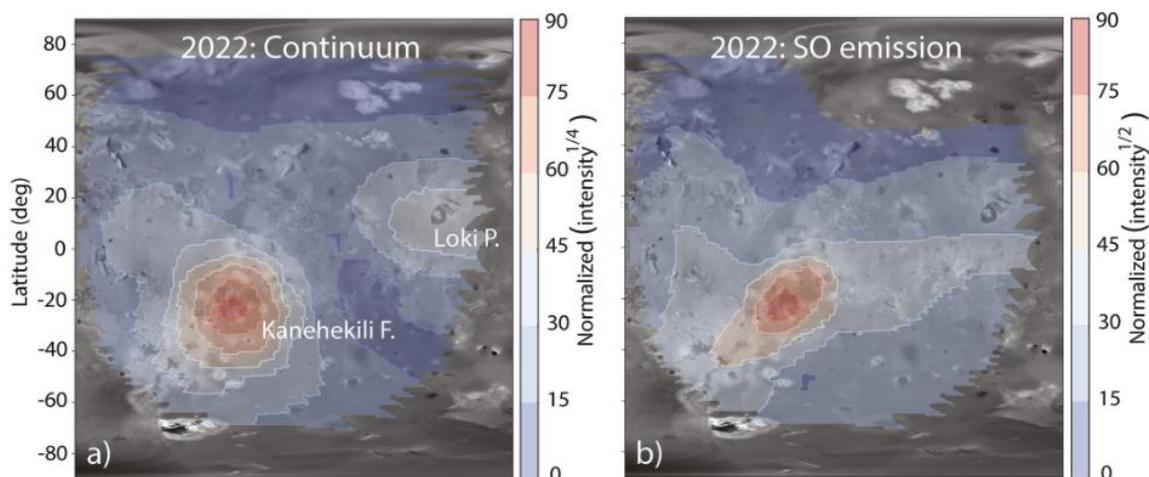


図5. (a) JWST によるイオの $1.66 \mu\text{m}$ 放射のマップ。強度の $1/4$ を 100 に正規化 (つまり、最大強度の $1/4$ を 100 に設定) し、USGS の衛星地図(<https://astrogeology.usgs.gov/maps/io-voyager-galileo-global-mosaics>) に重ねて表示。 (b) JWST データから得られたイオの SO 放射のマップ。バンドの中心 ($1.705\sim 1.709 \mu\text{m}$) で積分されている。強度の $1/2$ を 100 に正規化し、USGS の衛星地図に重ねて表示。(de Pater et al., 2023)

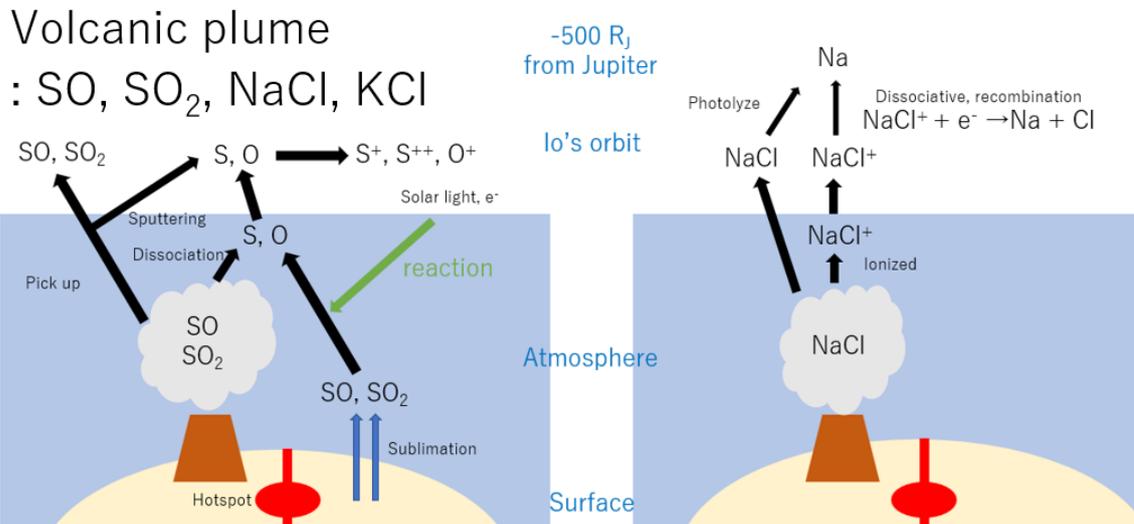


図 6. 火山噴出物の化学変化、電離と大気層脱出の模式図。

また、近年の ALMA による高感度観測でも、これら 2 つの起源が共存していることが示唆されており、火山活動が活発な領域では火山由来成分の寄与が増加する可能性が指摘されている (de Pater et al., 2020)。

このような物質の供給源が存在するにも関わらず、イオが希薄な大気であるのは、毎秒約 1 トンの物質を宇宙空間に放出しているからである (Dessler, 1980) (図 6)。こうして木星磁気圏へと放出された物質は、それぞれの粒子状態に依存して木星磁気圏内で異なる分布をする。

1.1.4. イオプラズマトーラスとナトリウム中性星雲

イオから放出された中性粒子は、その初期速度や生成過程の違いに応じて、イオ近傍に局在する中性雲と、より広範囲に拡散した中性星雲という異なる空間構造を形成する。また、イオン化した物質は、イオプラズマトーラスを形成する(図 7)。

イオ近傍に広がる中性雲に関しては、主として火山噴出・表面氷が昇華した物質が外気圏でプラズマ粒子によってスパッタリングされ (Delamere and Bagenal, 2003)、中性原子・分子となり供給される (Schneider, and Bagenal, 2007)。これらは比較的低速な中性粒子であり、イオの重力圏およびその周辺空間に一時的に束縛され、空間スケールは 10 イオ半径未満にとどまると考えられている。中性雲の主要な構成物質としては、二酸化硫黄や一酸化硫黄といった硫黄化合物に加え、酸素原子、硫黄原子、ナトリウム原子などが含まれる (Roth et al., 2025, Koga et al., 2018a)。

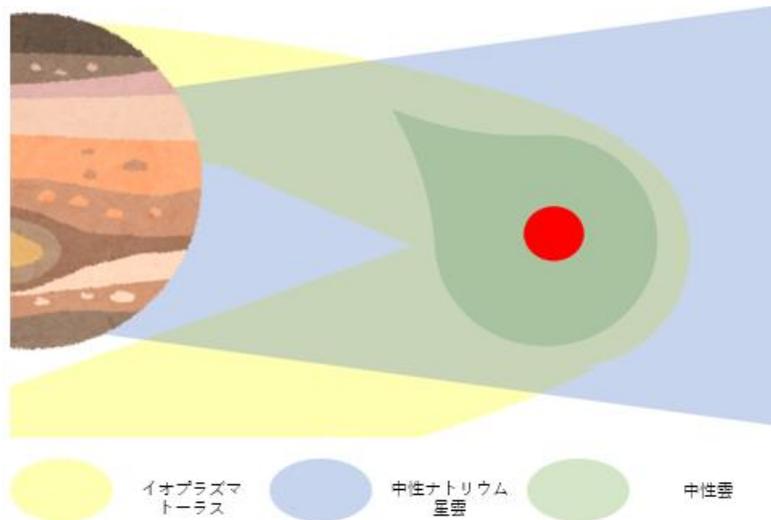


図7. 中性雲、中性星雲、イオプラズマトーラスの模式図。

イオン化した粒子は、木星の強い磁場に捕捉され、イオの公転軌道付近に沿ってドーナツ状に分布するイオプラズマトーラスを形成する。イオプラズマトーラスは主として硫黄および酸素のイオンで構成され、温度や密度の変動が激しいプラズマ領域として知られている (Nerney *et al.*, 2017)。イオ近傍中性雲は、電離を通じてイオプラズマトーラスへの主要な物質供給源として機能しており、トーラスの短期的な密度変動や組成変化に直接的な影響を与えると考えられている。

さらに、イオ大気においてプラズマトーラス粒子とのスパッタリングによって、粒子は中性雲を経由することなく即座に電離され、直接イオプラズマトーラスへ注入されることが考えられている (McGrath, and Jhonsen, 1987)。したがって、イオプラズマトーラスへの物質供給には、中性雲を介した間接的な経路と、スパッタリングなどによる直接的な流入経路の双方が存在すると考えられている。

また、イオ近傍、および中性雲から脱出した中性粒子の一部は、より大きな初速を持つことにより、木星磁気圏規模にまで拡散し、中性星雲を形成する。特に、ナトリウム原子は広範囲に拡散し、ナトリウム中性星雲を形成する (Schneider, and Bagenal, 2007)。ナトリウム中性星雲は、数十から数百木星半径に及ぶ空間スケールを持ち、最大で約 500 木星半径 (R_J) まで拡散することが報告されている (Yoneda *et al.*, 2015)。

地上望遠鏡観測や人工衛星「ひさき」による紫外線観測から、ナトリウム中性星雲の輝度や空間分布、ならびにイオプラズマトーラスの輝度が、火山活動の活発化と準同時的に変動することが報告されている (Yoneda *et al.*, 2015; Koga *et al.*, 2018b; Morgenthaler *et al.*, 2024)。

Morgenthaler *et al.* (2024) は、イオ火山活動由来の物質供給と昇華由来の供給の寄与を識別することを目的として、2017 年から 2023 年にかけて実施した地上望遠鏡観測データから、ナトリウム星雲およびイオプラズマトーラスの輝度変動を推定した (図 8)。この観測で

は、地上望遠鏡によるナトリウム輝線、およびプラズマトーラス硫黄イオン輝線の観測を実施した。その結果、輝度が増加するイベントでは、定常状態に対して約3-5倍の強度増加と、1.5から3か月の幅の持続時間を持つことが示された。一部の増光イベントでは、ナトリウム星雲の変動に対し硫黄イオン輝度が遅れて増加する傾向が見られ、それぞれ異なる物質供給過程を反映している可能性が示されたが、この研究では観測結果の提示を主とし、供給機構の定量的解釈には至っていない。

先行研究では、イオから脱出した物質が拡散されていく様子は明らかになりつつあるが、脱出の初期過程においては未解明な点が多い。例えば、イオ大気から脱出した中性粒子が、どの程度の割合で直接電離されてイオプラズマトーラスへ供給され、どの程度イオ近傍中性雲に滞留した後に電離されるのかについては、依然として明らかにされていない。また、火山噴出由来のナトリウム成分と、表面昇華に由来する硫黄・酸素成分が、それぞれどの段階で中性雲やプラズマトーラスの変動として現れるのかは、観測的制約から未解明の課題として残されたままである。さらに、噴火直後の大気の状態や、大気から脱出し拡散後の増光だけでは、ナトリウムおよび硫黄イオンの脱出直後の化学反応・電離過程のタイムスケールを考慮できない。広範囲な視野で木星磁気圏を観測するだけでなく、イオ近傍を高解像度で継続的に観測し、増光の強度・時間スケールを明らかにすることが、火山噴火によって大気を脱出した物質の初期過程を理解するうえで重要となる。

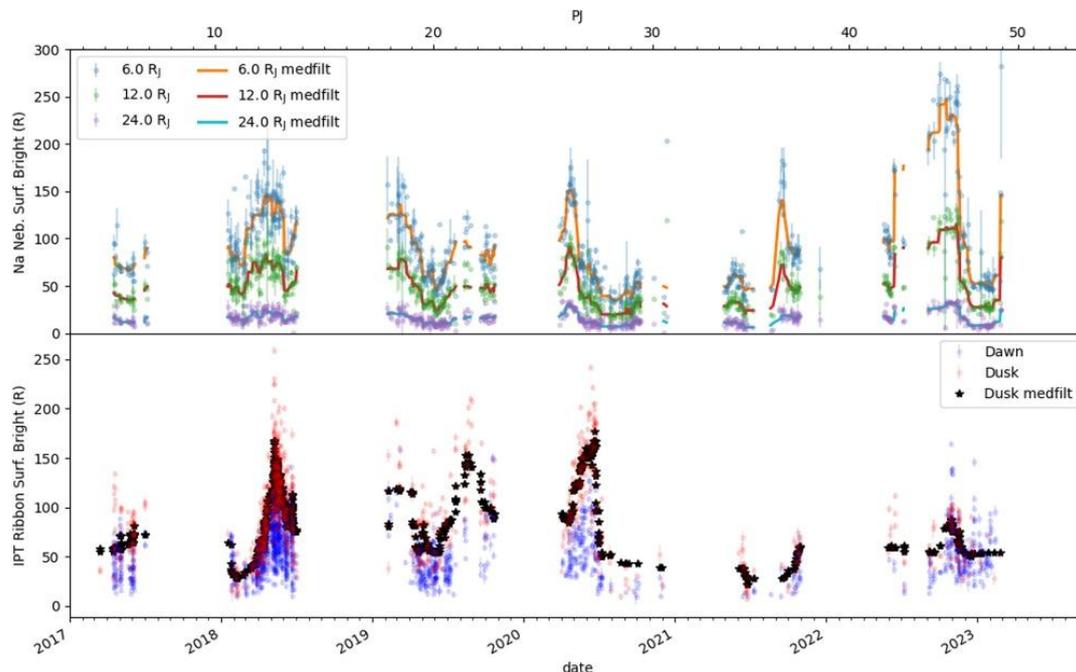


図8. プラズマトーラス・ナトリウム星雲の輝度変動。(上)木星からそれぞれの距離で開口したナトリウム輝線の平均表面輝度で、折れ線は観測日の中央値を示す。(下)水平成分と垂直成分の表面輝度のガウス分布から開口領域を設定した、木星の夜明け側と夕暮れ側の硫黄イオン輝度変動。(Morgenthaler et al., 2024)

1.2. 研究の目的

継続的に発生するイオの活発な火山噴火から噴出する物質は、希薄な大気層から脱出後、化学変化・電離を経て木星の磁気圏内に拡散し、中性ナトリウム星雲およびイオプラズマトローラスを形成する。特に中性ナトリウム星雲の形成に影響を与えるナトリウムは火山起源の物質供給とされているが、イオプラズマトローラスに影響を与える硫黄イオンは、火山噴火だけでなくイオ表面からの昇華によっても供給される。しかし、ナトリウムや硫黄などの粒子がイオ大気層から脱出する直前の化学的状態は十分に理解されていない。また、大気から脱出した物質は、中性雲を経由せずに直接ナトリウム中性星雲やイオプラズマトローラスへ流入するのか、あるいは一度イオ近傍中性雲に滞留し、物理・化学状態が変化した後に供給されるのかについても、明確な結論は得られていない。さらに、主に火山噴出に由来すると考えられているナトリウム成分と、火山噴出および表面氷の昇華の双方に由来する硫黄成分が、それぞれどの段階で中性星雲やプラズマトローラスの変動として反映されるのか、その時間的対応関係についても観測的な制約は十分ではない。これらの課題は、イオ大気層から周辺空間へ至る物質供給メカニズムを理解する上で本質的に重要な問題といえる。

以上の背景を踏まえ、本研究の最終目的は、火山由来および昇華由来の物質がどのように周辺空間へ拡散し、どのような時間スケールで中性星雲およびイオプラズマトローラスの構造や輝度変動として現れるのかを観測的に明らかにすることである。特に、イオ大気から中性星雲、さらにプラズマトローラスへ至る物質流入の初期過程に着目する。

この最終目的に至るために、本研究では、(1)地上望遠鏡による可視光撮像観測を行い、得られたデータを解析することによって、火山噴火に伴い放出されるナトリウム成分と、火山噴火および表面氷の昇華によって供給される硫黄成分について、それぞれの輝度変動を同定し、中性星雲およびイオイオプラズマトローラスの応答から短期的かつ大規模な物質供給の供給源を明らかにすること、(2)イオ大気から脱出した物質が、中性雲を経由して流入する経路と、大気層から直接イオプラズマトローラスやナトリウム中性星雲へ流入する経路の、それぞれの寄与を観測的に評価すること、(3)火山噴火に伴う物質放出から中性雲、中性星雲、プラズマトローラスへ至る過程において生じる化学変化や電離過程に要する時間スケールを推定するための観測的証拠を得ること、の3点を目的とする。

このため、北海道大学大学院理学院が所有する Pirka 望遠鏡による可視光撮像観測を、2024年度から2年度に渡り晴天夜に行った。Pirka 望遠鏡と搭載されている可視光マルチスペクトル撮像観測装置 (MSI) を用いることで、イオ近傍を高い空間解像度で撮像観測できる点は高い独自性を持つ。長期観測データから、イオ近傍における輝度の変動が推定可能となる。

2. 観測・解析

2.1. 観測

2.1.1. 観測波長

イオンや原子にはさまざまな量子状態があり、その間の遷移で決まった波長の輝線放射や吸収が生じる。原子などがエネルギーの高い状態に励起され、その後、低い状態に遷移することで特定の輝線で光が放射される。量子間のエネルギー差は遷移の種類によって大きく異なり、特徴的な波長帯を持つ。電子の遷移によるスペクトル線は主に紫外線から可視光の波長域に分布しており、分子の回転・振動に伴うスペクトル線は主に可視光の波長域から赤外線波長域にある(家ら, 2007)。

本研究では、イオおよびその周辺空間に存在する中性ナトリウムに由来する可視光輝線である NaD 線(波長 589.0 nm および 589.6 nm)、および硫黄イオンの禁制線(波長 673.1 nm および 671.6 nm) を対象とする。

これらの波長は地球大気の透過率が比較的高く (Villanueva et al., 2022) (図 9)、地上から捉えられる点で観測に適し、液晶波長可変フィルターを用いることで背景光の影響を抑えた観測をすることができる。

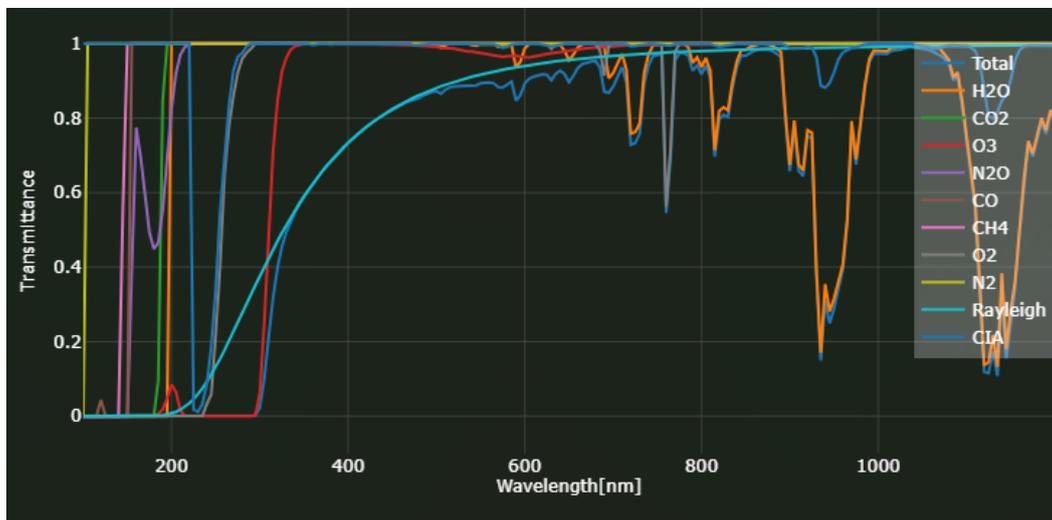


図 9. 地球大気の透過率(Planetary Spectrum Generator, <https://psg.gsfc.nasa.gov/>)

2.1.2. Pirka 望遠鏡

本研究で使用した Pirka 望遠鏡(図 10, 表 2)は、北海道大学大学院理学院が北海道名寄市に設置・運用している地上光学望遠鏡である。Pirka 望遠鏡の有口径は直径 1.6 m で、可視光領域において高い集光能力を持ち、安定した追尾性能を有する。



図 10. Pirka 望遠鏡

表 2. Pirka 望遠鏡の仕様

光学系	リッチークレチアン
焦点	カセグレン、ナスミス×2
主鏡有効径	1,600 mm
合成焦点距離	19,238 mm
合成 F 値	12.0
視野	直径 20 分角(カセグレン) 直径 10 分角(ナスミス A) 直径 3 分角(ナスミス B)
架台	経緯台

2.1.3. 可視光マルチスペクトル撮像観測装置

観測には、Pirka 望遠鏡に搭載された可視光マルチスペクトル撮像装置 (Multi-spectral Imager: MSI) を使用した(表 3、図 11)。本装置に内蔵された液晶可変フィルターを用いることで特定の輝線を選択的に分光撮像観測することができる。

本研究で用いた液晶可変フィルターのうち、可視波長域を透過させる VIS の透過率曲線と半値全幅を図 12、図 13 にそれぞれ示す。観測で用いた中心波長 589.0 nm での透過率は約 43 %、中心波長 672.5 nm での透過率は約 53 %である。また、半値全幅(Full Width Half Maximum: FWHM)は透過率最大値の半分となる波長幅であり、589.0 nm では、FWHM = ~11 nm、672.5 nm では、FWHM = ~15 nm である。この液晶可変フィルターの FWHM は、ナトリウム D 線の 2 波長、および硫黄イオン禁制線の 2 波長をそれぞれ含有することになる。

表 3. MSI の仕様(Watanabe et al. 2012)

波長域	360-1050 nm
視野	
通常撮像モード	3.3×3.3 分角
高分解能撮像モード	56×56 分角
フィルター	
液晶波長可変フィルター(LCTF)	VIS:波長域 400-720 nm, バンド幅約 10 nm SNIR:波長域 650-1100 nm, バンド幅約 10 nm
狭帯域フィルター	中心波長: 360, 365, 370, 380, 380 nm, バンド幅:約 10 nm 中心波長: 656.3 nm, バンド幅: 1 nm
広帯域フィルター	Jhonson-Cousins: U, B, V, R, I
カメラ(CCD 素子)	浜松ホトニクス C9100-13
アレイフォーマット	512×512 ピクセル
読み出しモード	EMCCD モード,通常 CCD モード
最短露出時間	0.031 s(EM), 0.122 s(通常)
検出器冷却方式・温度	電子冷却(空冷), -65°C



図 11. MSI の写真

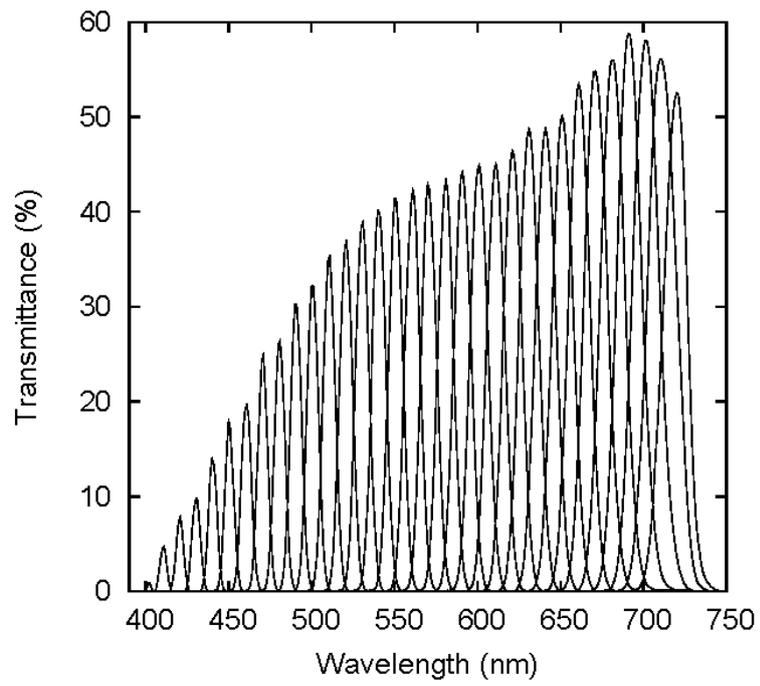


図 12. VIS の透過率曲線。(Watanabe et al. 2012)

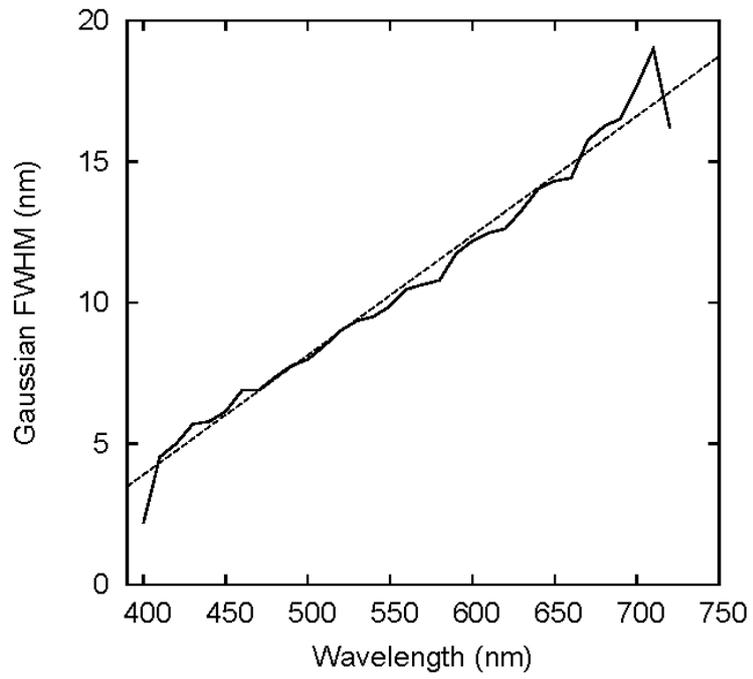


図 13. 液晶波長可変フィルター(VIS)の半値全幅。(Watanabe et al. 2012)

2.1.4. 観測視野

Pirka 望遠鏡に搭載された観測装置の観測視野 (Field of View: FOV) は、3.3 分角 × 3.3 分角である。この視野サイズは、イオ近傍およびイオ公転軌道周辺のイオプラズマトーラスの一部を捉えるには十分である。一方で、イオプラズマトーラス全体を一度に撮像するには視野が狭すぎて不十分である。

そのため本研究では、イオの公転軌道上において、イオが位置する側の領域と、木星を挟んで反対側に位置する領域を、それぞれ複数回に分けて撮像した(図 14)。これにより、イオプラズマトーラスの東西方向における空間構造および輝度分布を部分的に取得し、相互に比較することが可能となる。

また、木星本体の発光強度は地球大気によって散乱され、イオプラズマトーラス・中性星雲の観測波長帯における背景光として影響を与える。この散乱光成分を適切に評価・除去するため、各観測領域に対して、対象領域の上下方向にも追加の撮像を行った(図 14)。これらの画像は、後述する解析において木星散乱光の空間分布を推定するために用いられ、プラズマトーラスおよび中性星雲の輝線放射を抽出する際の補正データとして利用した。

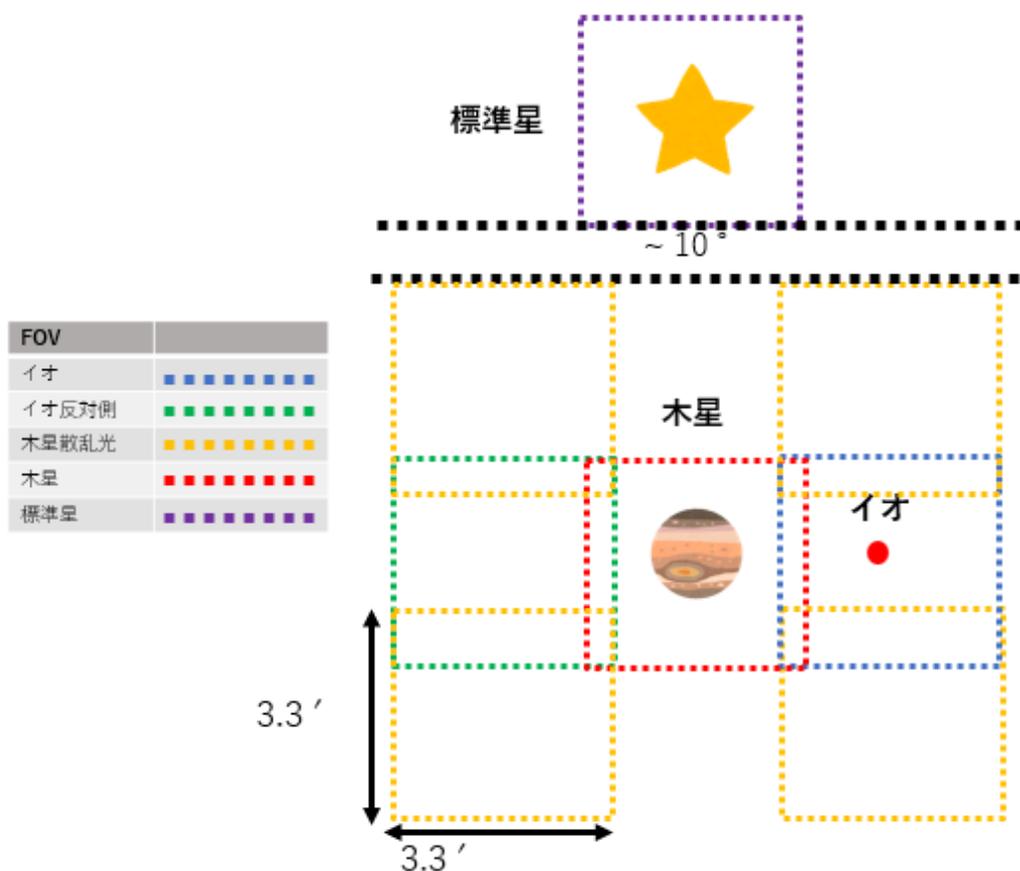


図 14. 観測視野(FOV)の模式図。

2.1.5. データリスト

本研究では、2024年9月から2025年12月にかけて分光撮像観測を実施した。これにより、複数の観測夜にわたる観測データを取得することに成功した。

図15、図16は観測実施日のそれぞれの波長におけるFOVのエアマスである。エアマスはある入射角を持って入射した光が地球大気を通過する距離(L_1)を、天頂角 0° で入射した光が大気を通過する距離(L_0)によって規格化した量($= L_1/L_0$)であり、観測天体の高度に依存して変化する。天頂に位置する場合のエアマスは1と定義され、天体高度が低くなるにつれてエアマスは増加する。エアマスの増加に伴い、大気による吸収および散乱の影響が強くなり、観測される輝度は減少する。そのため、相対測光(2.2.5節を参照のこと)をする際は対象のエアマスに近い値をもつ標準星を選び観測を行う必要がある。天体の観測可能時間および望遠鏡使用可能時間、天候などの制約によって、2024年9月9日と2025年3月9日の両日は、標準星のエアマスと木星近傍のエアマスでは大きな差がある点に注意が必要である。

表4では、本研究で解析に用いた観測データの一覧を示す。各観測データについて、観測日、観測波長、観測対象、波長ごとの総露光時間をまとめている。

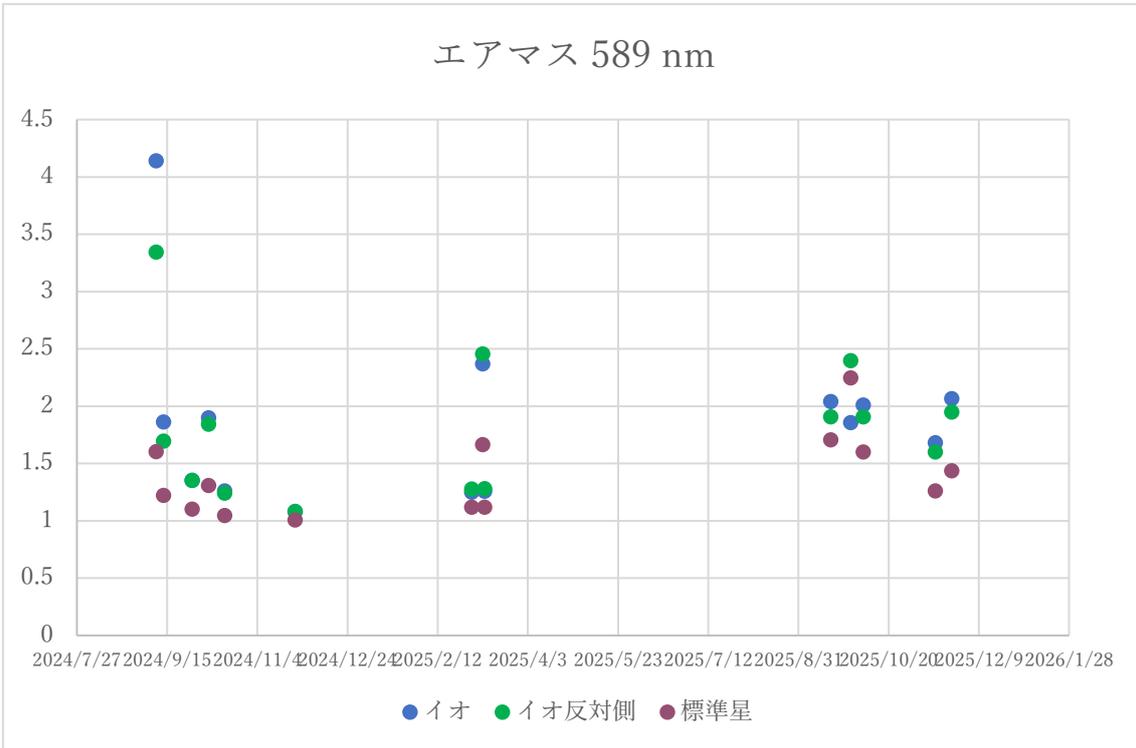


図 15. 589.0 nm 観測時のエアマス

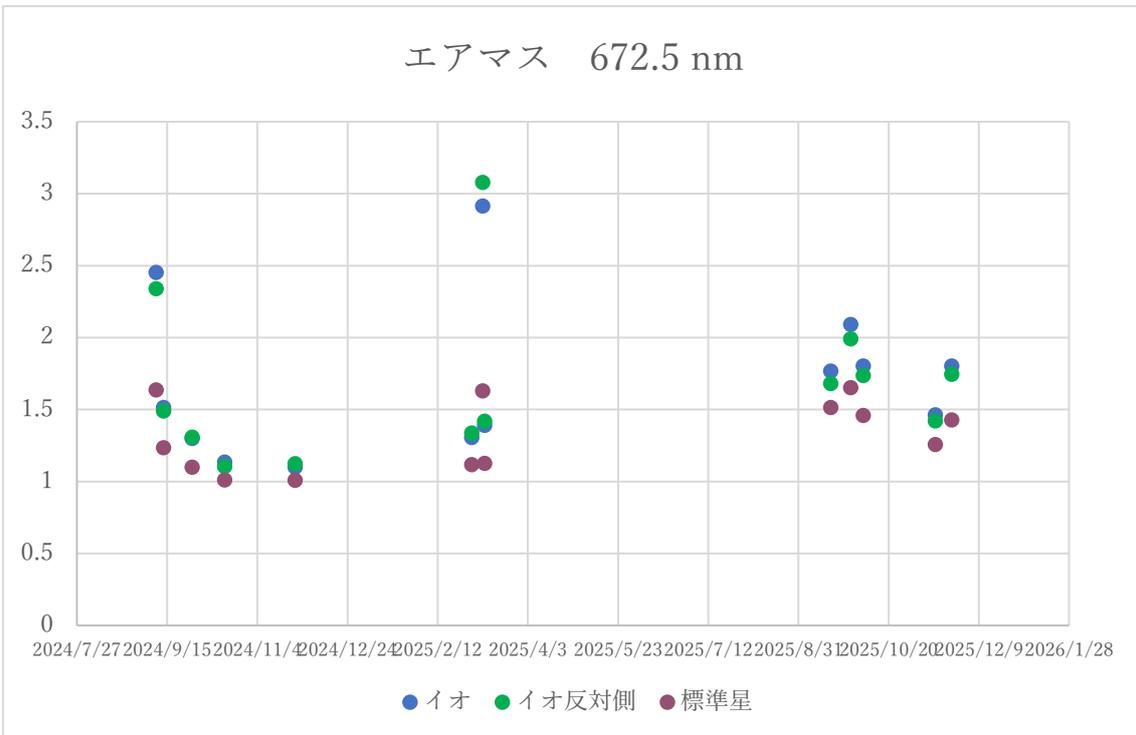


図 16. 672.5 nm 観測時のエアマス

表 4. データリスト

日時	波長(nm)	対象	総露光時間(秒×枚数)
09 Sep. 2024	589.0, 672.5	Io	15×5 (589.0), 5×5 (672.5)
		Opposite	15×5, 5×5
		HR1729	3×1, 2×1
13 Sep. 2024	589.0, 672.5	Io	15×5, 5×5
		Opposite	15×5, 5×5
		HR1729	3×1, 2×1
29 Sep. 2024	589.0, 672.5	Io	15×5, 10×5
		Opposite	15×5, 15×5
		HR1729	10 5, 10×5
08 Oct. 2024	589.0	Io	10×10
		Opposite	10×10
		Standard star	5×10
17 Oct. 2024	589.0, 672.5	Io	7×10, 4×10
		Opposite	15×10, 15×10
		Scatter light	15×5, 15×5
		HR1729	4×5, 5×5
25 Nov. 2024	589.0, 672.5	Io	5×5, 2×5
		Opposite	15×5, 15×5
		Scatter light	15×5, 15×5
		HR1729	3×5, 3×5
03 Mar.2025	589.0, 672.5	Io	7×5, 7×5
		Opposite	15×5, 15×5
		Scatter light	15×5, 15×5
		HR1729	3×5, 3×5
09 Mar. 2025	589.0, 672.5	Io	10×3, 10×3
		Opposite	15×3, 15×3
		Scatter light	15×3, 15×3
		HR1729	5×3, 5×3
03 Mar. 2025	589.0, 672.5	Io	10×3, 10×3
		Opposite	15×3, 15×3
		Scatter light	15×3, 15×3
		HR1729	1×3, 1×3

18 Sep. 2025	589.0, 672.5	Io	10×10, 10×10
		Opposite	10×10, 10×10
		Scatter light	10×10, 10×10
		HR2569	10×5, 10×5
29 Sep. 2025	589.0, 672.5	Io	10×10, 10×10
		Opposite	10×10, 10×10
		Scatter light	10×5, 10×5
		HR2569	10×5, 10×5
06 Oct.2025	589.0, 672.5	Io	10×10, 10×10
		Opposite	10×10, 10×10
		Scatter light	10×5, 10×5
		HR2569	15×5, 10×10
15 Nov. 2025	589.0, 672.5	Io	5×15, 2×30
		Opposite	15×5, 15×5
		Scatter light	15×5, 15×5
		HR2569	5×5, 5×5
24 Nov.2025	589.0, 672.5	Io	10×10, 5×15
		Opposite	10×10, 5×15
		Scatter light	15×5, 15×5
		HR2569	10×5, 5×5

2.2. 解析

2.2.1. 1 次処理

望遠鏡光学系および観測器の影響を取り除くため、生画像データに対しバイアス補正およびフラットフィールド補正を行った。また、バイアス・フラット補正の後、同じ天体を撮像した複数枚の画像を加算し、総露光時間を増やす処理をした。

CCD 画像データには、天体からの信号とは無関係に、検出器および読み出し回路に起因するバイアス値が含まれている。バイアス画像は、各観測夜に CCD カメラに光が入らないよう入射口に蓋をして、最短露光時間である 0.488 秒で撮像することで取得される。バイアス補正では、その取得した画素ごとのバイアスの中央値を天体画像から減算する。

また、光学系によって周辺減光が起きるため、視野内の入射光量が一樣であっても CCD 画像上のカウント値には空間的な不均一が生じる。これらの影響を補正し、天体の真の輝度分布を正確に評価するため、本研究ではフラットフィールド補正を実施した。フラット補正ではドームの天板を利用したドームフラット画像を取得し用いた。各画素のカウント値からバイアスを引いた中央値を求め、中央値で規格化した値をフラット値とした。これらの補正により求めた各画素のカウント値(C_{ij})は以下の式で表される。

$$C_{ij} = \frac{\text{raw data}_{ij} - \text{bias}}{\text{flat}_{ij} - \text{bias}}$$

ここで、 C_{ij} は補正後のカウント値、*raw data*は生画像のデータのカウント値、*bias*はバイアス値、*flat*はフラット値である。

その後、信号対雑音比 (Signal-to-Noise Ratio: SN 比) の向上ため、同一観測条件下で取得された複数枚の画像に対して重ね合わせ処理を行った(図 17)。画像合成では、連続して撮像した同エリアのカウント値を画素ごとに加算していく。これは、イオに比べてプラズマトーラスや中性星雲が暗く、イオを捉えた画素がサチュレーションする前に十分な信号を捉えるのが困難であるためである。そのため、カウント値を加算し総露光時間を増やすことで、信号強度を上げる処理をした。

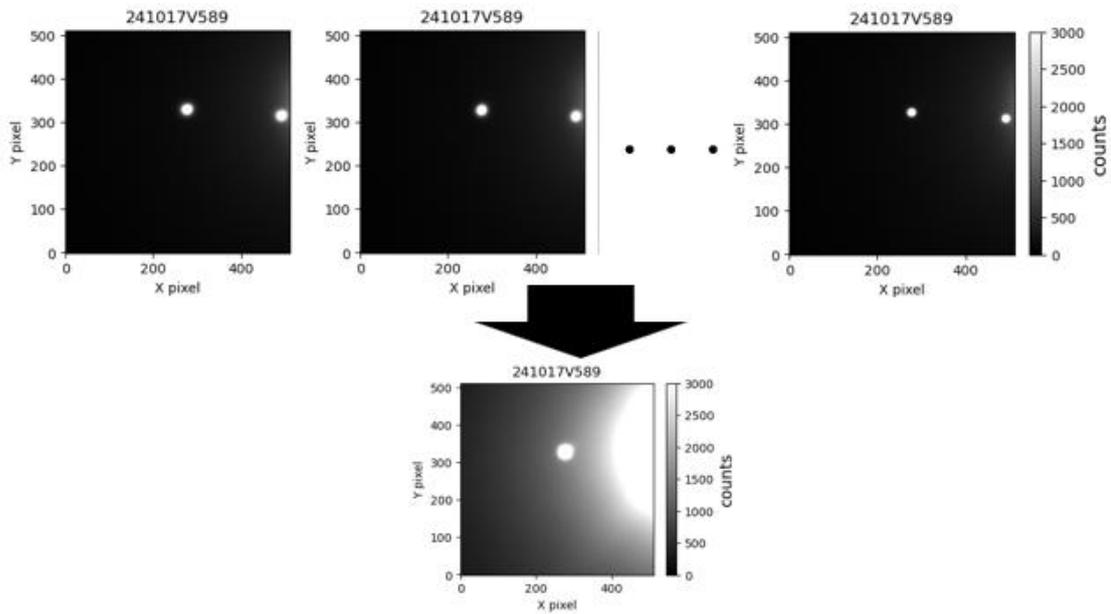


図 17. 画像重ね合わせによる信号増加の模式図

2.2.2. 木星散乱光

イオプラズマトーラスとナトリウム中性星雲における、硫黄イオンおよびナトリウムの可視輝線放射強度は、木星の太陽反射光強度に比べて非常に微弱である。そのため、地球大気で散乱した木星の太陽反射光の影響を強く受ける。本研究で用いた観測波長帯（ナトリウム 589.0 nm、硫黄イオン 672.5 nm）においても、木星散乱光はトーラス輝線の測定精度を制限する主要な要因である。そのため、定量的な解析を行うためには、木星散乱光を適切に推定し、画像から除去する必要がある。

木星散乱光強度を決めるため、視野内で輝線による増光の影響、CCD のスミア現象、鏡の支持機構による回折光の影響がないエリアの観測データを用いる(図 18)。

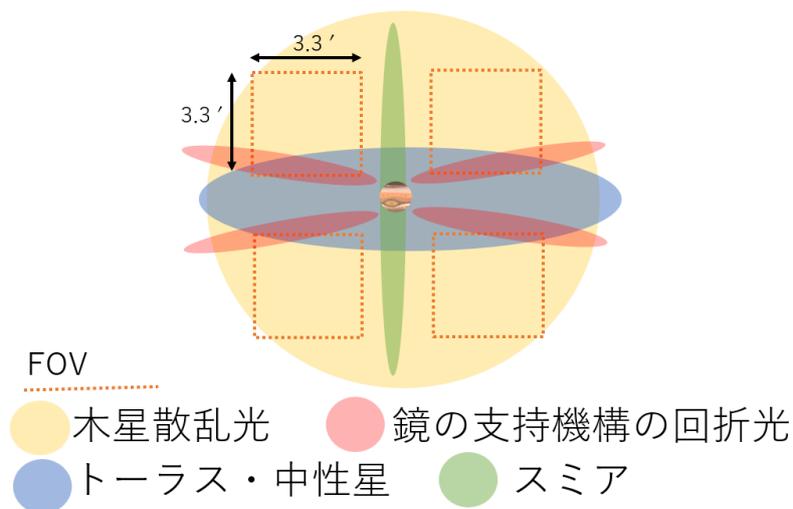


図 18. 木星周辺の可視光線信号

まず、各観測画像における木星の位置を正確に把握するため、画像ヘッダーに記録された指向情報と、JPL Horizons (*Giorgini et al., 1996*)により計算した木星の視位置を比較した。その結果、ヘッダー情報に基づく木星位置と実際の画像上の木星位置との間には、最大で150ピクセル程度のずれが存在することが確認された。これは望遠鏡の指向誤差や追尾誤差に起因すると考えられる。この位置ずれを補正するため、画像解析ソフトウェア「マカリ」(<https://makalii.mtk.nao.ac.jp/index.html.ja>)を用いて、画像中の木星輝度が最も高くなる位置を木星の中心位置とした。その後、Horizons モデルによる予測位置と一致するように座標系を補正した。

例として、2024年11月25日の589.0 nmの波長で実際に位置のずれを求めた結果を示す(図 19)。マカリを用いた画像では、木星中心位置座標(x, y)は、(210, 313)であるが、Horizonsによると木星の中心は、(261, 179)である。よって、木星中心のx座標はHorizonsの中心から51 pixel、y座標は-134 pixel ずらした位置となる。

以降の解析では、このような補正後の木星中心を基準として、各画素の木星中心からの距離を定義した。

また、木星を捉えた画像がない2024年の10月17日の木星中心位置に関しては、後述する木星散乱光の関数化の後、木星中心位置を決定する別の方法を用いる。

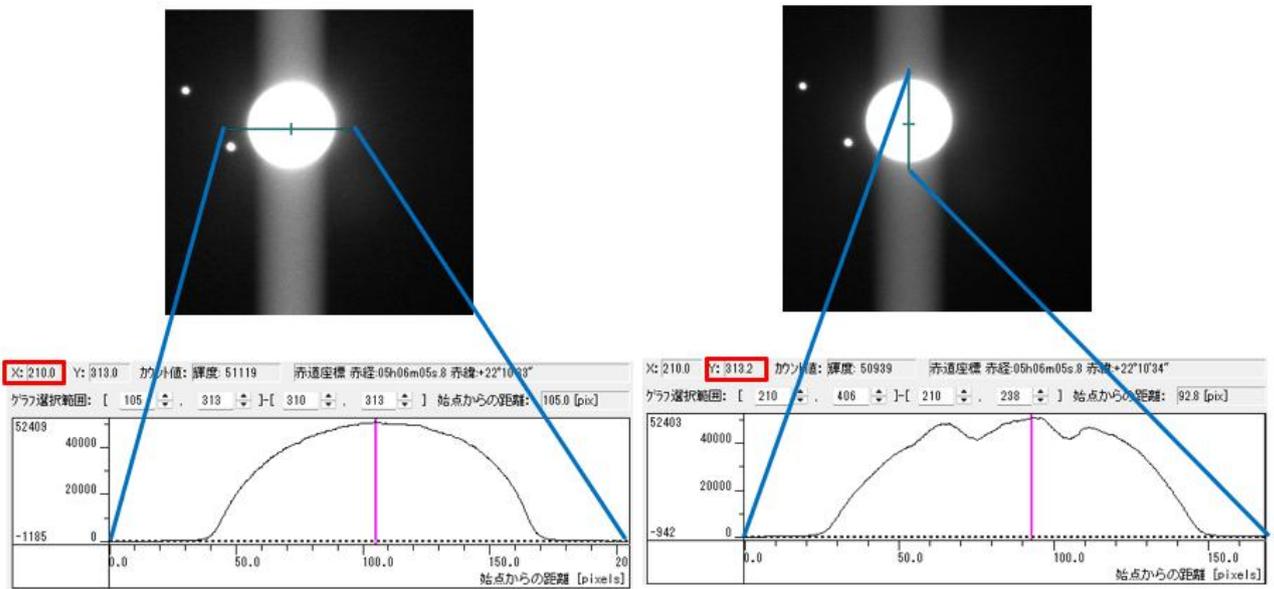


図 19. マカリによる木星中心位置の決定。2つの画像は2024年11月25日の589.0 nmの波長の画像で、輝度の中心位置は $(x,y) = (210, 313)$ とした。

取得した散乱光領域において、各画素の木星中心からの距離とカウント値の関係を散布図としてプロットする。その後、木星散乱光の空間分布を表す関数として、距離に対して単調減少する関数を用いてフィッティングを行った(図 20)。この関数は、各日付・各波長で独立に求めた。この木星散乱光を表す関数 f を

$$f = \frac{a}{d^2} + \frac{b}{d} + c$$

と定義する。ここで、 d は木星からの距離、 $a \cdot b \cdot c$ はフィッティングによって決めた係数・定数である。 c は背景光(スカイ)の影響および地球大気中のナトリウム層を取り除くために設定した定数である。

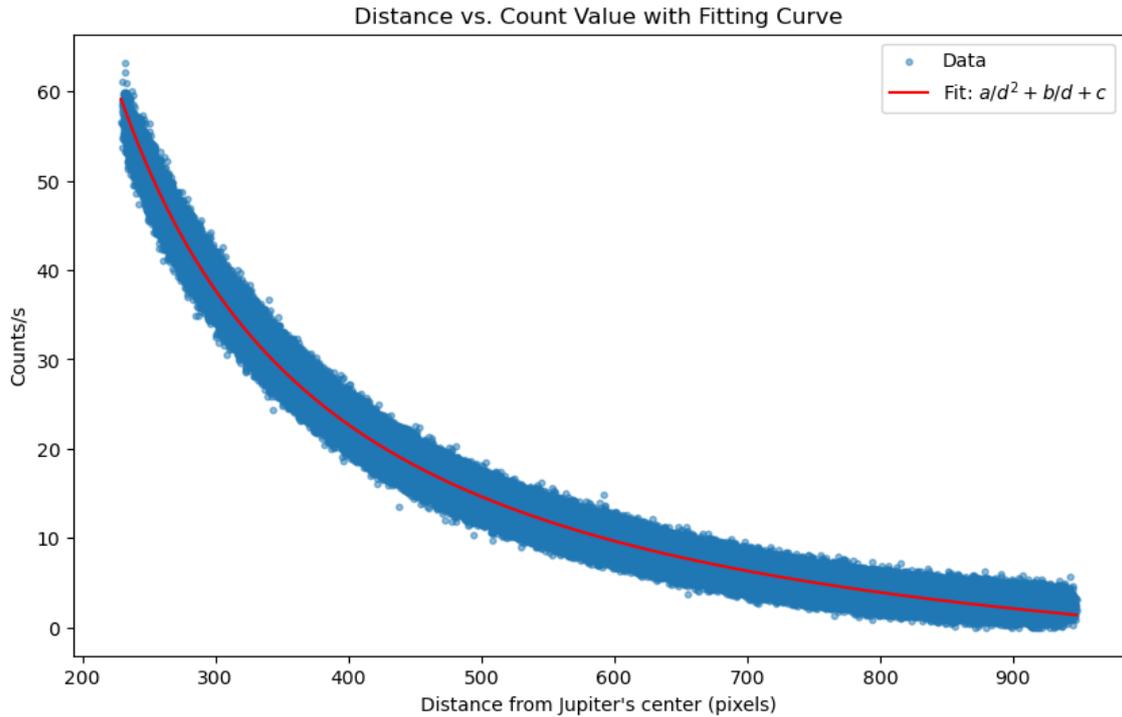


図 20. 2024 年 11 月 25 日の 589.0 nm 画像における、木星中心からの距離とカウント値の散布図（青点）とそのフィッティングカーブ（赤線）。

木星の撮像が不可能であった日(2024 年 10 月 17 日)では、木星中心の位置ずれを補正せず、木星からの距離とカウント値の関係を示す散布図をそのままプロットすると、距離 d が $100 < d < 300$ の時、同一距離に対しカウント値の分布が二極化する(図 21)。これは、木星位置の微小なずれに起因するものであり、物理的に異なる散乱光成分を示しているものではないと判断した。これら二つの分布が同一の物理的性質を持つ木星散乱光成分であるという仮定のもと、散布図上における分布が一致するように位置補正を行った。この時、フィッティングカーブと散布図の関係を評価するため、以下の式により決定係数(R^2)を求めた。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_d C_d - f_d}{\sum_d C_d - \bar{C}_d}$$

ここで、 f_d は距離に応じたフィッティング関数の値、 \bar{C}_d は距離ごとの平均カウント値である。

2024年10月17日の589.0 nmの波長において、木星の位置ずれ補正をする前と、x方向に-125, y方向に70ずらした後の散布図とフィッティングカーブは図21のようになり、決定係数はそれぞれ0.86、0.98であった。この補正により、二極化していた分布は単一の連続した関係として再構成され、以降の木星散乱光減光に用いた。

得られた散乱光モデルを用いて、画像中の各画素における木星からの距離に応じた散乱光強度を計算し、一次処理済み画像から減算した。この処理により、木星散乱光による緩やかな輝度勾配が除去され、イオ軌道周辺に分布する微弱な輝線放射が確認できた。図22は木星散乱光除去前と後のイオを撮像した画像である。

開口測光を行うイオ側を撮像した画像とイオの木星をはさんで反対側を撮像した画像において、各波長・各日付で木星散乱光の除去を行い、開口測光(2.2.3節を参照のこと)を行う。また、木星散乱光のデータがない日は標準星の開口測光で測光値が一番近い値であった日のデータを大気の状態が近い日と仮定して適用した。

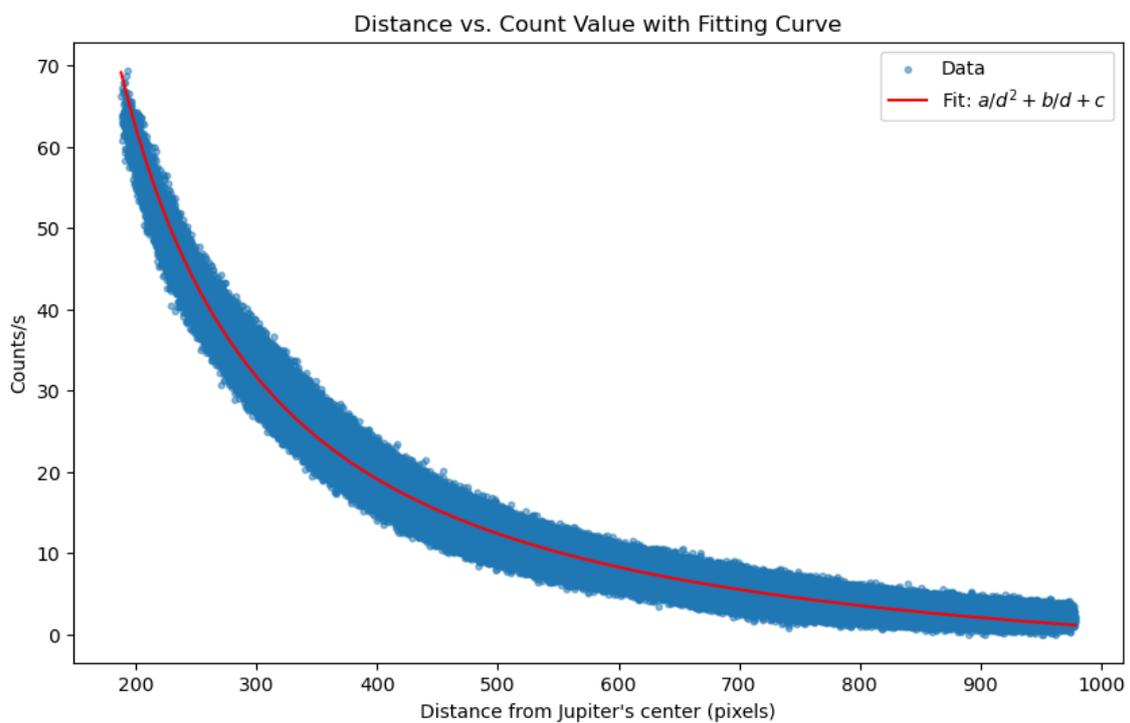
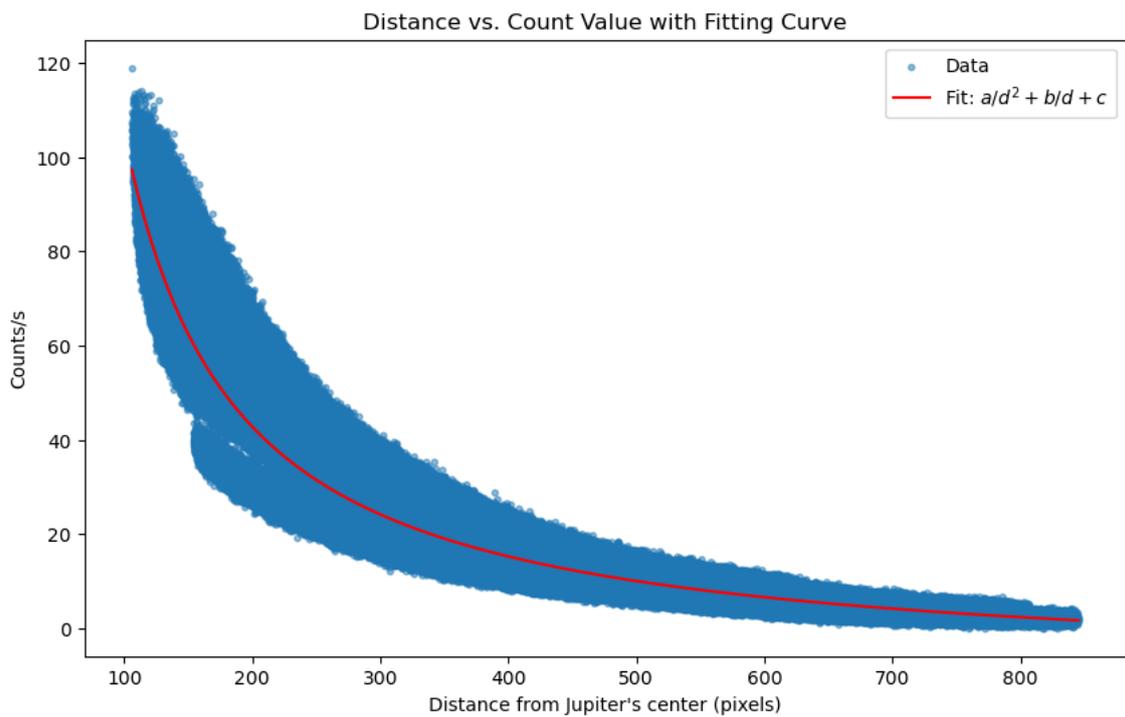


図 21. 2024 年 10 月 17 日の 589.0 nm における、木星中心からの距離とカウント値の散布図 (青点)とそのフィッティングカーブ (赤線)。(上)木星中心の位置ずれ補正前。(下)木星中心の位置ずれ補正後。

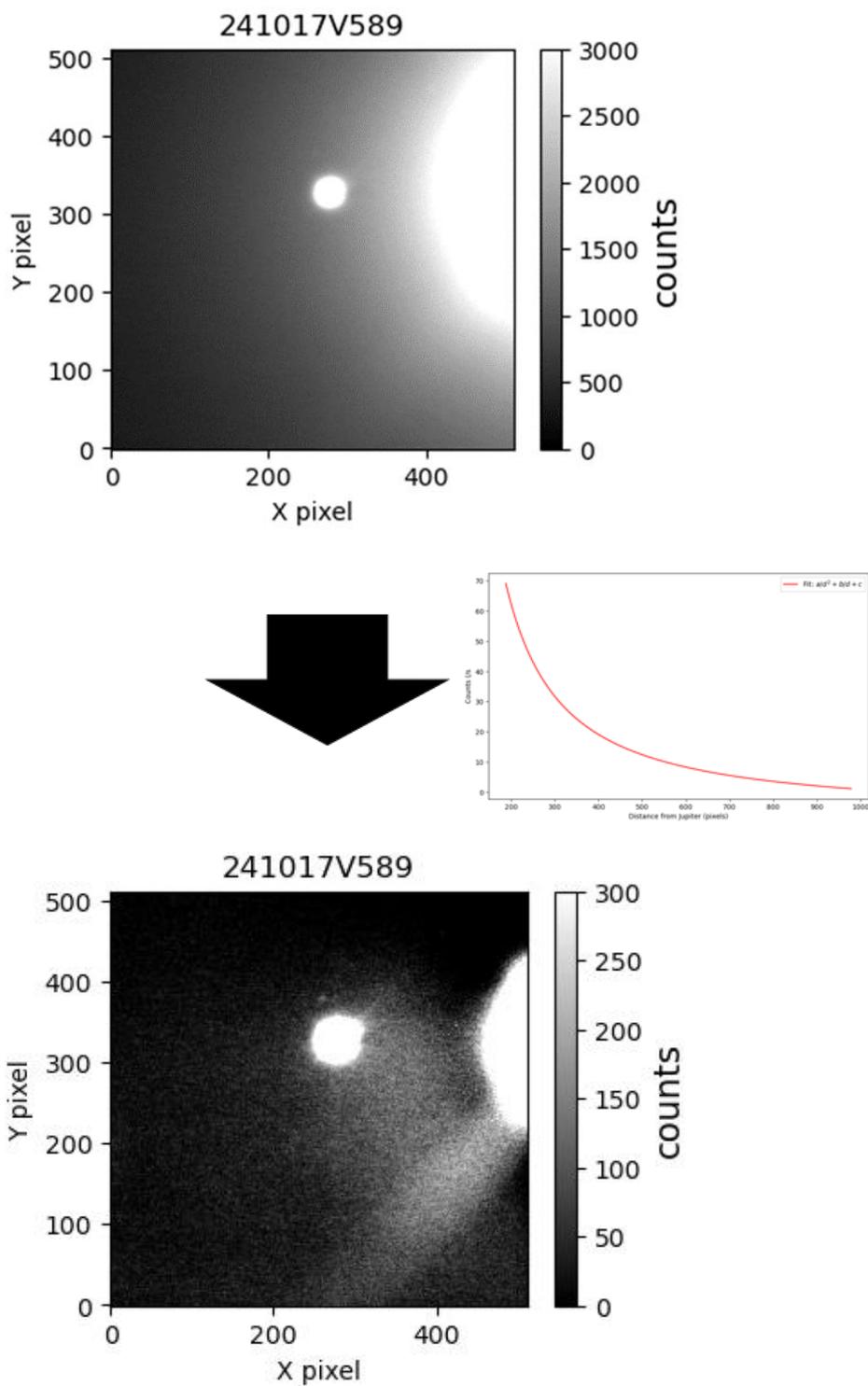


図 22. 2024 年 10 月 17 日 589.0 nm における散乱光除去前（上）と除去後(下)のイオ周辺画像

2.2.3. 開口測光

イオ大気層から脱出した、あるいはイオ公転軌道上に拡散した後の物質の変動量を観測的に同定するために、イオを中心とした半径 20-40 pixel の同心円(エリア 1)、イオ公転軌道上であるイオ側であり木星から 300 pixel 離れた地点を中心とする半径 20 pixel の円内(エリア 2)、イオと木星をはさんで反対側であり木星から 300 pixel 離れた地点を中心にもつ半径 20 pixel の円内(エリア 3)の 3 つの領域に分けて開口測光を行った(図 23)。開口測光値(n_c)は、

$$n_c = \sum_{ij} C_{ij}$$

と表す。ここで、 n_c は開口測光値、 C_{ij} は測光エリア内の各ピクセルのカウント値である。エリア 1 でイオが木星や他のガリレオ衛星と被ってしまう場合は、イオ近傍の開口測光値は除外する。

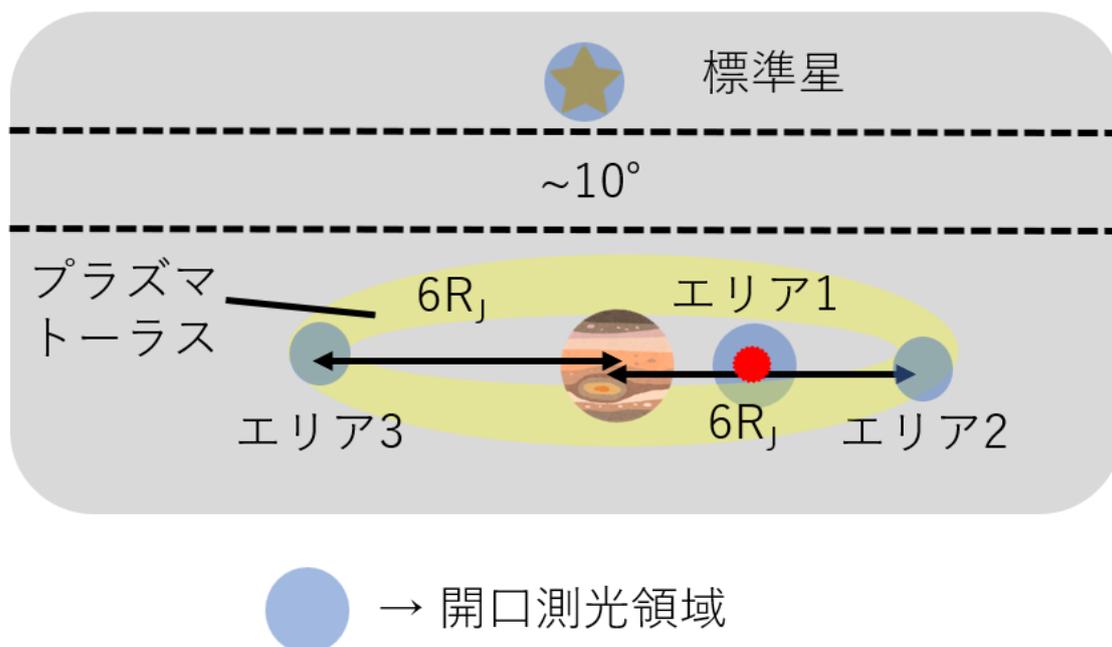


図 23. 開口測光領域の模式図

標準星の測光では、年度ごとに異なる標準星を用いているため、2024年度のHR1729では15 pixel、2025年度のHR2569では10 pixelを開口半径とした。また、標準星にはスカイの明るさが含まれているため、内径を開口測光半径、外径をそれに10 pixelとした同心円での輝度積算値の中央値をスカイの値とした。よって、標準星の開口測光値は、

$$n_c = \sum_{ij} (C_{ij} - \text{median}(\text{sky}))$$

で求める。

2024年9月29日の589.0 nmの標準星観測では、他の観測日の開口測光値が平均して1秒あたり70万カウントであるのに対し、1秒あたり1万7千カウントと極端に低い測光値が得られた。これは標準星観測中に通り雲がかかったためだと考えられる。そこで、この日に限り589.0 nmの開口測光値($n_{c,589.0}^{(24/09/29)}$)を

$$n_{c,589.0}^{(24/09/29)} = n_{c,672.5}^{(24/09/29)} \times \text{median} \left(\frac{n_{c,589.0}^{(\text{other days})}}{n_{c,672.5}^{(\text{other days})}} \right)$$

と仮定する。ここで、 $n_{c,672.5}^{(24/09/29)}$ は2024年9月29日の672.5 nmの開口測光値、 $\text{median} \left(\frac{n_{c,589.0}^{(\text{other days})}}{n_{c,672.5}^{(\text{other days})}} \right)$ は、同じ標準星を観測した他の日付における589.0 nmと672.5 nm開口測光値の比の中央値である。

2.2.4. レイリーへの変換

開口測光によって得られたカウント値を物理量として解釈するため、本研究では測光結果を輝度の単位であるレイリー (Rayleigh) へ変換した。レイリーは、拡散光や発光現象の強度を表す標準的な単位であり、惑星大気やプラズマトーラスの輝線放射の定量評価に広く用いられている。

はじめに、得られたカウント値を検出された光子数(n_p)に変換した。

$$n_p = \frac{n_c}{\text{ADU} \times \text{Ref}_m \times T_f \times T_a}$$

ここで、ADUはAnalog to Digital Unit、 Ref_m は鏡の反射率、 T_f はフィルターの透過率、 T_a は大気の透過率である。

この光子数から、輝度(I)は

$$I = \frac{n_p}{S \times t \times \Omega \times 10^6}$$

と表すことができる。ここで、 S は主鏡の面積(cm^2)、 t は露光時間(s)である。

立体角 Ω (sr)は、

$$\Omega(r) = 2\pi\left(1 - \cos\frac{\pi r}{180 \times 3600}\right)$$

と表せ、 r は開口半径(秒角)である。

2.2.5. 相対測光

時々刻々と変わる地球大気の影響や鏡の反射率など未知の定数を除き、観測期間にわたる輝度変動を定量的に比較するため、本研究では相対測光を行った。

相対測光に用いる標準星として、標準星 HR1729(2024 年度)と HR2569(2025 年度) を撮像した。標準星は、観測期間中に明るさ変動が小さく、対象波長帯において十分な信号対雑音比が得られる恒星を基準として選定した。また、標準星と対象領域のエアマス差ができるだけ小さくなるよう配慮して観測を行った。

相対測光値(I_R)は、対象領域の輝度(I_{obj})を同一観測日に取得された標準星の輝度(I_{SS})で規格化することにより求めた

$$I_R = \frac{I_{obj}}{I_{SS}} = \frac{n_{p\ obj} \times t_{SS} \times \Omega_{SS}}{t_{obj} \times \Omega_{obj} \times n_{p\ SS}}$$

ここで、 obj は開口測光の対象エリアの値、 SS は標準星の値である。

また、ショットノイズ値を推定するために、バイアス、フラット補正後の重ね合わせ前画像でも、重ね合わせ後画像と同様の手順で測光値を算出した。そして、同一条件で得たデータの相対強度から標準偏差を求めた。得られた測光値の標準偏差(σ)は、以下の式により計算した。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I})^2}$$

ここで、 N は撮像枚数、 I_i は各画像から得られた輝度、 \bar{I} はそれらの平均値である。相対測光値の誤差(σ_R)は、対象領域および標準星それぞれの開口測光誤差を考慮した誤差伝播によって評価した。

$$\sigma_R = |I_R| \sqrt{\left(\frac{\sigma_{obj}}{I_{obj}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{SS}}{I_{SS}}\right)^2}$$

ここで、 σ は重ね合わせ前の画像から導出したものであるが、 I は重ね合わせ後の画像から導出した値である。

このようにして求めた相対測光値およびその誤差を用いることで、輝度の時間変動を定量的に評価した。

3. 結果

3.1. 輝度計算結果

図 24 に、バイアス補正、フラットフィールド補正、画像重ね合わせ、および木星散乱光除去後の観測画像の一例を示す。2024 年 10 月 17 日 16:00 UT に 589.0 nm および 672.5 nm それぞれの波長で取得したデータで、いずれの画像も、イオの反射光成分とその周辺に分布する微弱な輝線放射が確認できる。輝線放射において青い円で示したイオ近傍(エリア 1)、イオ側 6R_J 地点(エリア 2)、イオ反対側 6R_J 地点(エリア 3)の 3 領域に分類し、開口測光を行った。

木星近傍では、木星本体の太陽反射光が地球大気で散乱した光をモデルにより除去したが、一部で散乱光除去が困難な領域も存在した。特に、木星近傍ではスミアやイオプラズマトーラス由来の輝線放射が重なり、その距離での散乱光の正確なカウント値を実測することが困難で、モデルでも完全に除去できない領域が生じた。その結果、木星に最も近い部分では、木星散乱光の引き残りが確認される。しかし、本研究における開口測光は、これらの影響が顕著な木星近傍領域を避けて設定しているため、測光結果に対する散乱光引き残りの影響は無視できる範囲にある。よって、木星近傍における散乱光の影響については、本研究の解析および結果には大きく影響しないと判断した。

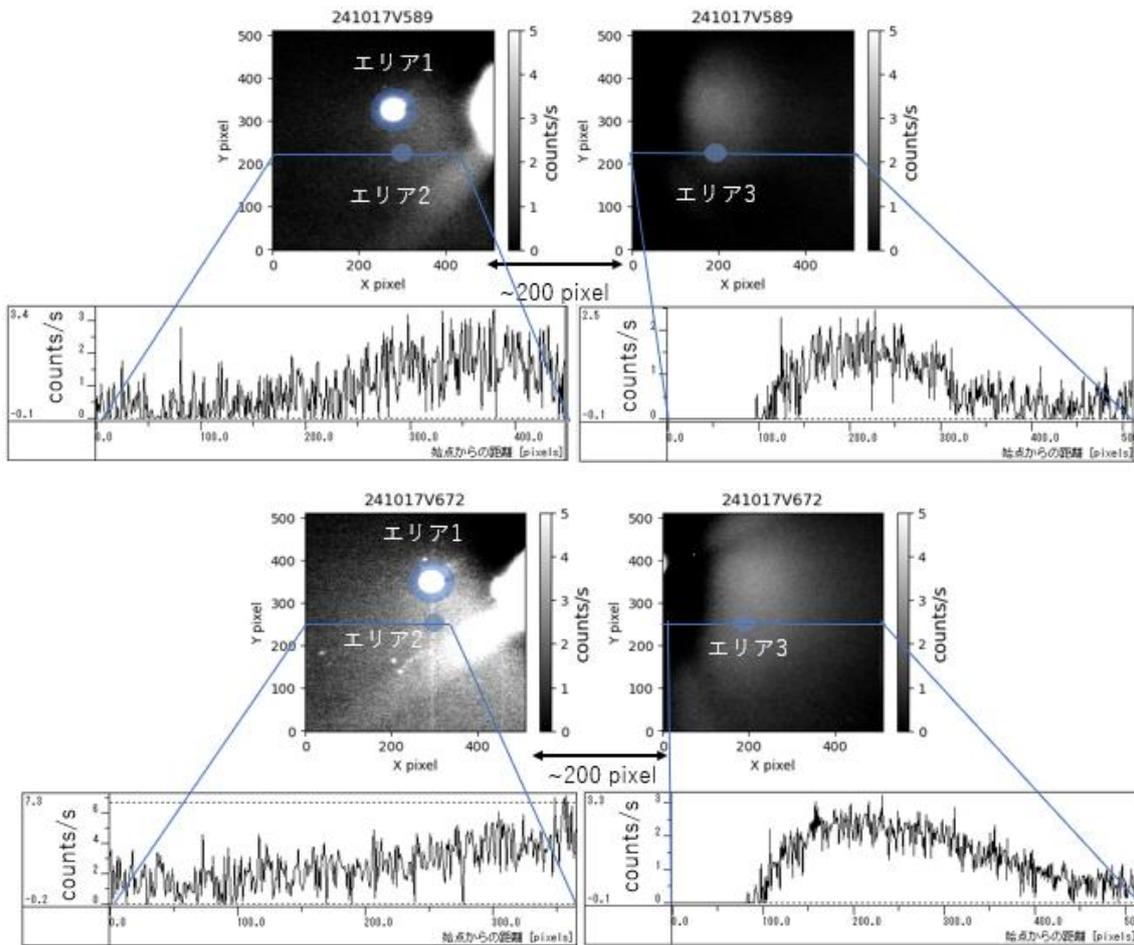


図 24. 2024 年 10 月 17 日 16:00 UT に取得いたデータに対し、一次処理・木星散乱光除去処理を施したもの。(上)589.0 nm、(下)672.5 nm 波長の画像で、ともに左列はイオ周辺画像、右列はイオから木星を挟み反対側周辺の画像。青い円は開口測光エリアを示し、各画像の下のグラフは図中の青線上のカウント値のプロットを示す。

次に、図 24 の各青色マーキング領域における開口測光値を求め、輝度(Rayleigh)に変換した結果を表 5 に示す。ここでは地球大気の吸収を一定と仮定した。

また、ADU は 1.69(Watanabe et al.,2012)、 T_f は 589.0 nm で 0.43、672.5 nm で 0.53(Watanabe et al.,2012)、 T_a は 589.0 nm で 0.83、672.5 nm で 0.94(*Planetary Spectrum Generator*)とし、 Ref_m は 0.8 と仮定した。

本推定は、厳密な絶対輝度較正を目的としたものではなく、観測・解析手順に起因する系統的な誤りの有無を検証するための確認として実施した。その結果、すべてのエリア・波長帯で 10^2 程度のオーダーに収まることを確認した。

表 5. エリア 1・2・3 における 589.0 nm・672.5 nm の輝度推定値

エリア	波長(nm)	強度(Rayleigh)
エリア 1	589.0	5.17×10^2
エリア 2	589.0	1.77×10^2
エリア 3	589.0	1.91×10^2
エリア 1	672.5	4.84×10^2
エリア 2	672.5	2.88×10^2
エリア 3	672.5	1.61×10^2

3.2. 相対強度の時間変化

木星散乱光除去後の 589.0 nm (ナトリウム) および 672.5 nm (硫黄イオン) の各画像に対して開口測光を行い、得られた相対強度の時間変化を調べた。図 25 から図 30 はエリア・年度別のナトリウム輝線、および硫黄イオン輝線の相対強度の時間変動である。2024 年度と 2025 年度では、それぞれ異なる標準星を用いて相対測光を実施しているため、縦軸の強度幅は異なることに注意が必要である。

2024 年度の図を見ると、すべてのエリアで 9 月 29 日にピークを持つ増光イベントが見られた。図 25 に示すとおり、イオ近傍のエリア 1 におけるナトリウム輝線波長の相対強度は、9 月の 1 ヶ月で、4-5 倍に急増する急増期を経て、10 月 17 日に減少している。それに対し、硫黄イオン輝線波長の相対強度は、9 月 9 日からナトリウム輝線強度が増加する 9 月 29 日までほぼ横ばいの高い値を示し、10 月 17 日におよそ半減している(図 25)。また、エリア 2 では増光の振る舞いが 2 つの輝線波長で逆転し、9 月中のナトリウム輝線強度は横ばいであり、硫黄イオン輝線は 9 月 29 日にかけて急増している(図 27)。そして、エリア 3 に関しては、どちらの輝線波長においても 9 月 29 日にかけて相対強度が 4 - 5 倍に急増している様子が分かる(図 29)。

2025 年度では相対強度が 2024 年と比べると 1/10 の値を取ることもあるが、これは、2024 年度より明るい標準星で相対測光をしているためである。これらの観測では、エリア 1、およびエリア 2 で 9 月 18 日から 10 月 6 日にかけて相対強度が増加している様子が確認できるが(図 26, 図 28)、エリア 3 では硫黄イオン輝線の相対強度の増加が確認できない(図 30)。2025 年度の観測では、気象条件等の制約により、欠測期間が生じたため、相対強度の時間変動を正確に捉えることが困難であった。そこで本研究では、2024 年の 9 月に発生した増光イベントに特に焦点をあてて考察を行う。

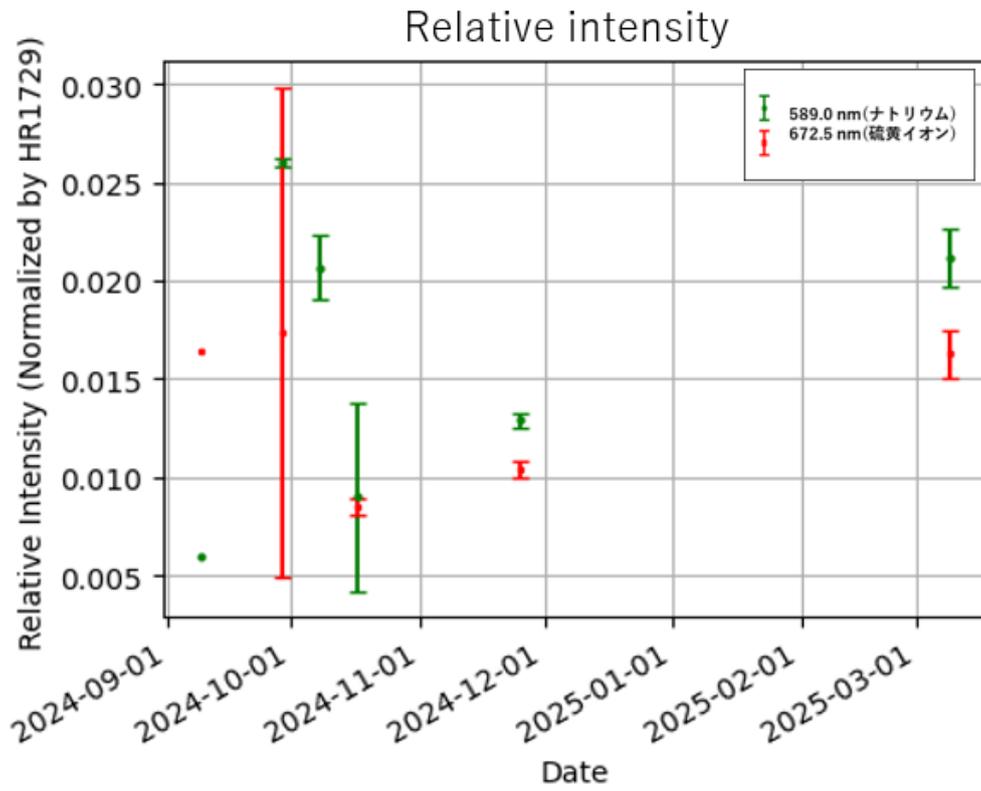


図 25. 2024 年度のエリア 1 における相対強度時間変化。

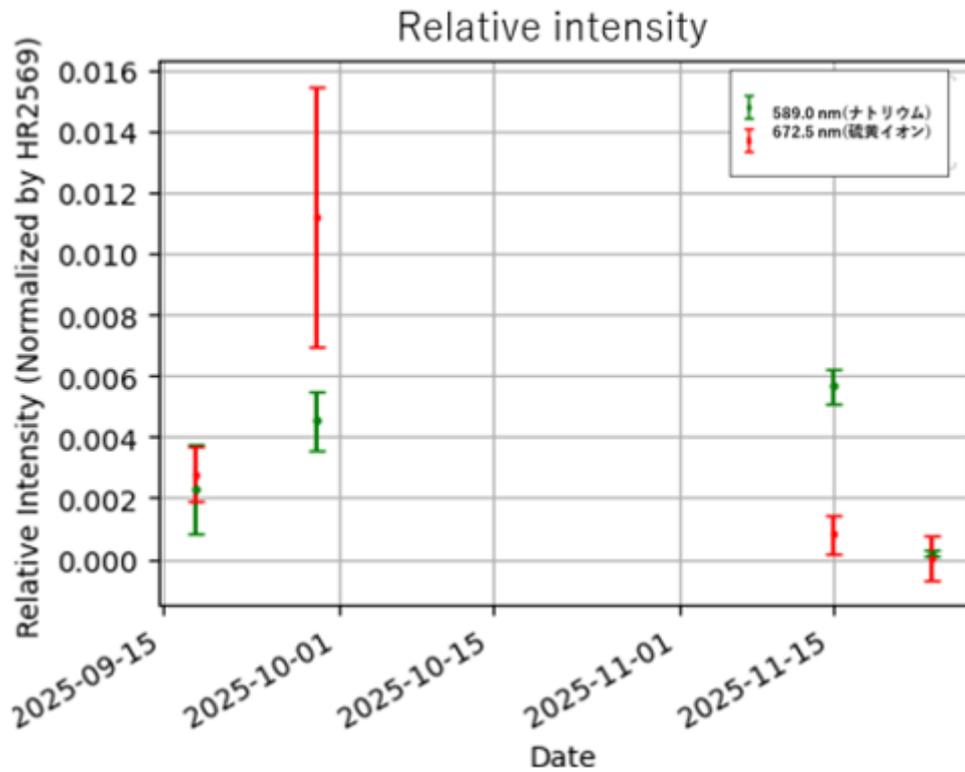


図 26. 2025 年度のエリア 1 における相対強度時間変化。

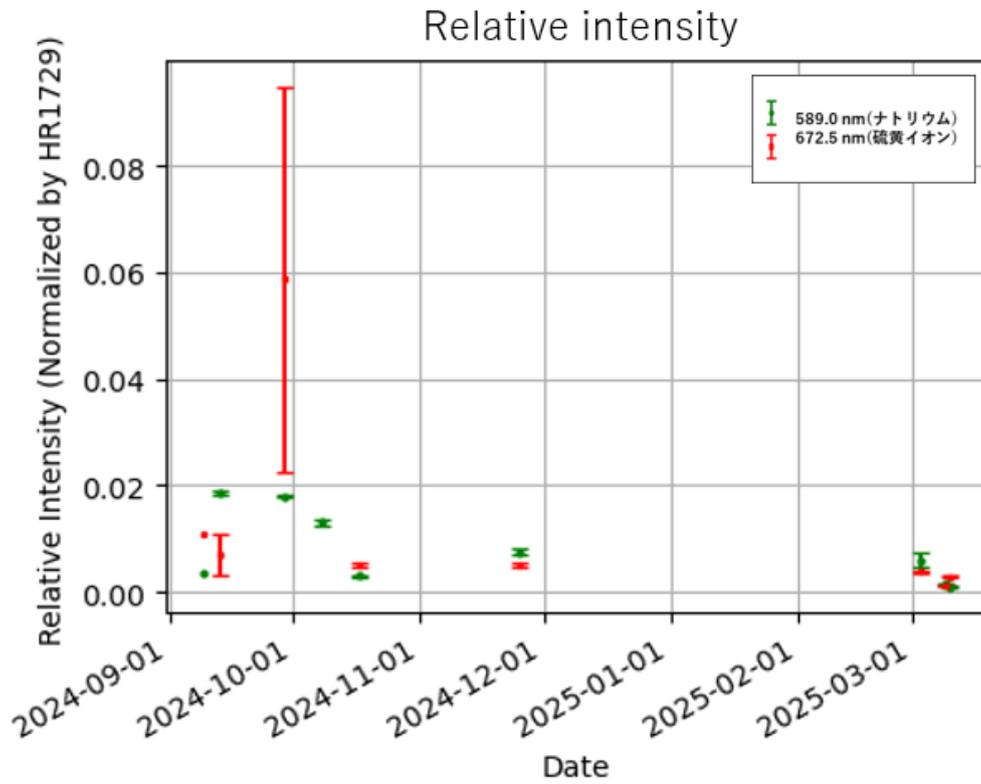


図 27. 2024 年度のエリア 2 における相対強度時間変化。

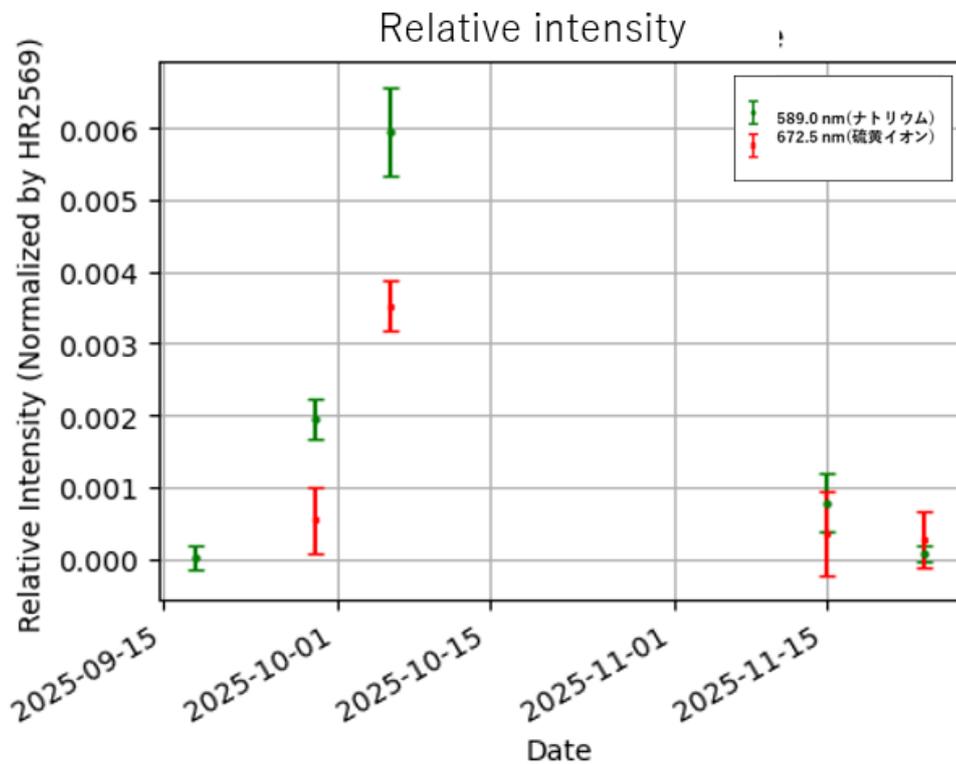


図 28. 2025 年度のエリア 2 における相対強度時間変化。

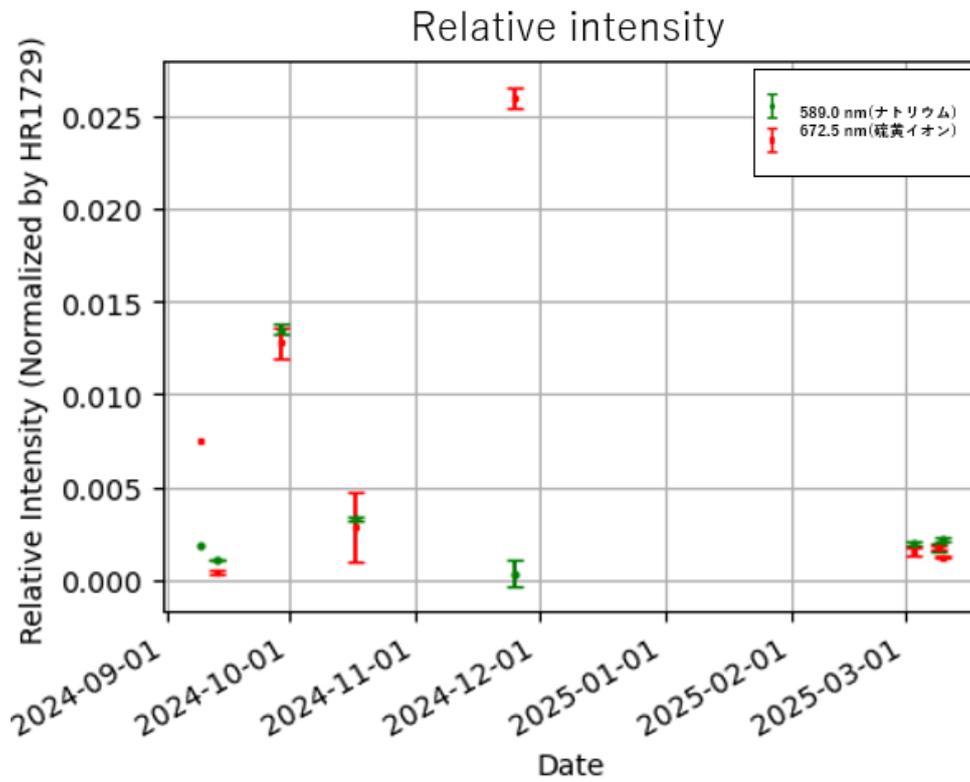


図 29. 2024 年度のエリア 3 における相対強度時間変化。

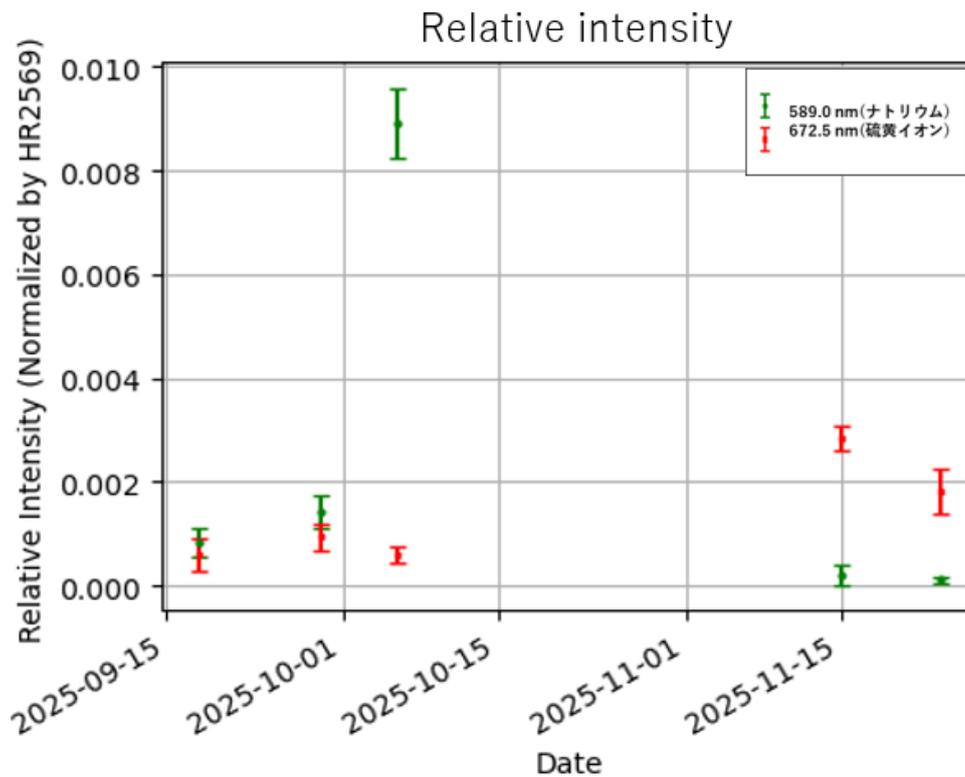


図 30. 2025 年度のエリア 3 における相対強度時間変化。

4. 考察

4.1. 先行研究との比較

図 25、図 27、図 29 に示す 2024 年 9 - 10 月に検出したイオ周辺の過渡的な相対強度増加イベントについて、その妥当性を確認するために Morgenthaler et al. (2024) の観測結果と比較を行った。比較にあたって、まずは相対強度ではなく、レイリー値に変換した絶対強度での比較を行った。観測値から地球大気減衰率を単純な波長依存吸収として補正した概算値になるが、本研究の観測結果から推定されるプラズマトーラス・ナトリウム中性星雲の絶対輝度は 10^2 Rayleigh のオーダーとなり、先行研究で示される ~ 50 Rayleigh よりやや高い値を示した。この差はフィルターの半値全幅や大気の影響の違いによる影響と考えられる。Morgenthaler et al. (2024) らの観測では、半値全幅が約 1 nm のフィルターを用いてナトリウムおよび硫黄イオンの各輝線を観測しているのに対し、本研究で用いた VIS フィルターの半値全幅は 589.0 nm で FWHM=11 nm、672.5 nm で FWHM=15 nm と広い。地球大気の影響を削減するために先行研究では、他輝線の影響を受けない波長で木星散乱光を推定している。それに対し、本研究では、観測する輝線に対し半値全幅が広いため、異なる方法を用いており、対象の輝線以外の連続光が混入したことで見かけの輝度が増大した可能性が高いと考えられる。

次に、相対強度の増加イベントの継続時間について比較すると、本研究では約 1.5 月にわたって広域的に相対強度が増加し減衰していく様子が確認された。これは、Morgenthaler et al. (2024) らの観測において報告されている増光イベント（約 1.5 - 3 か月）とほぼ一致しており、時間スケールは先行研究で確認された増光イベントと整合的である(図 31)。さらに、定常状態からピークまでの強度増加率についても、本研究では約 3 - 5 倍の相対強度の増加が見られ、先行研究で示されている典型的な変動幅の範囲内に収まっている。したがって、本研究で観測された相対強度の増加現象は、輝度スケールおよび時間変動の両面において、既知のナトリウム星雲・イオプラズマトーラス増光イベントと整合的であると結論づけた。

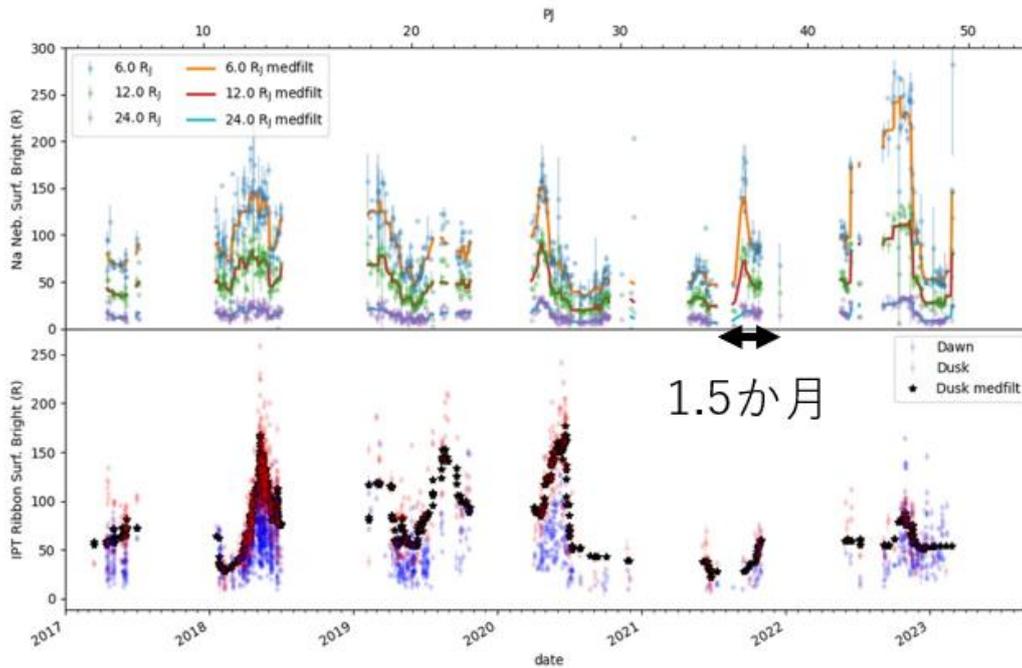
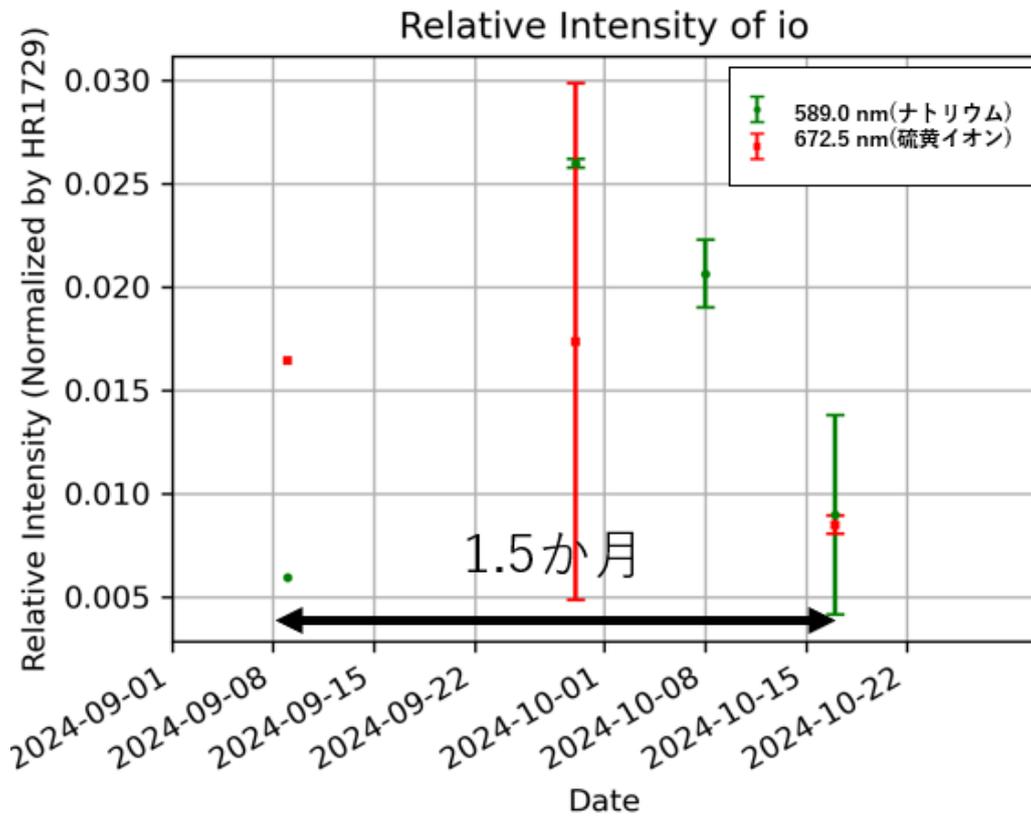


図 31. 本研究（上）と *Morgenthaler et al.*(2024)(下)の強度および時間変化の比較。

4.2. 各開口エリアの相対強度の時間変化比較

本研究で得られた各開口領域の相対強度の時間変化を比較することで、イオ起源物質の供給機構および初期状態に関して議論する。

まず、物質の供給機構に関して考察する。観測期間を通して、硫黄イオン輝線(672.5 nm)のみが単独で顕著に増光したイベントは確認されなかった。大規模な増光はナトリウム輝線(589.0 nm)の増光と同時、あるいはそれに伴う形で発生している。中性ナトリウムはイオ火山噴火によってイオの大気から脱出し、中性星雲へと供給される。一方、硫黄イオンは昇華および火山噴火でイオプラズマトーラスへと供給される。このことは、トーラスや中性雲の短期的な増光は、昇華起源の定常供給では説明できず、火山噴火による突発的な物質放出に強く支配されていることを示唆する。すなわち、観測された増光現象の主要な駆動源は火山活動由来である可能性が高いと考えられる。

次に、エリア1(イオ近傍)とエリア2(イオ側公転軌道上)の相対強度の増加量の違いから、ナトリウムと硫黄イオンのイオ大気層から脱出した直後の状態を議論する。図32、図33は2024年9月に発生した相対強度の増加イベントに期間を絞り、エリア1とエリア2の相対強度時間変化をそれぞれプロットした図である。ナトリウム輝線では、増光開始が検出された9月9日においてエリアの相対強度は低い一方(図32の(a)の変化)、エリア2では既に高い値が観測されている(図33の(c)の変化)。この空間的なずれは、ナトリウムがイオ大気から脱出する段階では観測可能な中性ナトリウムとして存在せず、一度中性雲内で塩化ナトリウムなどの状態で留まり、化学変化あるいは電離からの再中性化された後に広域へ拡散していることを示唆する。すなわち、ナトリウムは「イオ近傍で直接中性として放出される」のではなく、「中性雲内で生成される成分」が支配的であると考えられる(図34)。

一方、硫黄イオンでは、増光開始期にエリア2では相対強度が低いにもかかわらず(図33の(d)の変化)、すでにエリア1で高い相対強度が観測されている(図32の(b)の変化)。このことは、硫黄がイオ近傍において初めから電離状態(S^+ あるいはそれ以上の多価イオン)で放出され、その後公転軌道上に存在するトーラス領域へ拡散していることを示唆する。したがって、硫黄はイオ大気脱出時点で既にイオンとして供給される割合が高いと解釈でき、ナトリウムとは供給形態および生成領域が本質的に異なると考えられる(図35)。

以上より、本研究の観測結果は、(1)増光の主因が火山噴火であること、(2)ナトリウムは中性雲内生成が支配的であるのに対し、硫黄はイオンとしてイオ近傍から直接供給が支配的であることを示唆している。

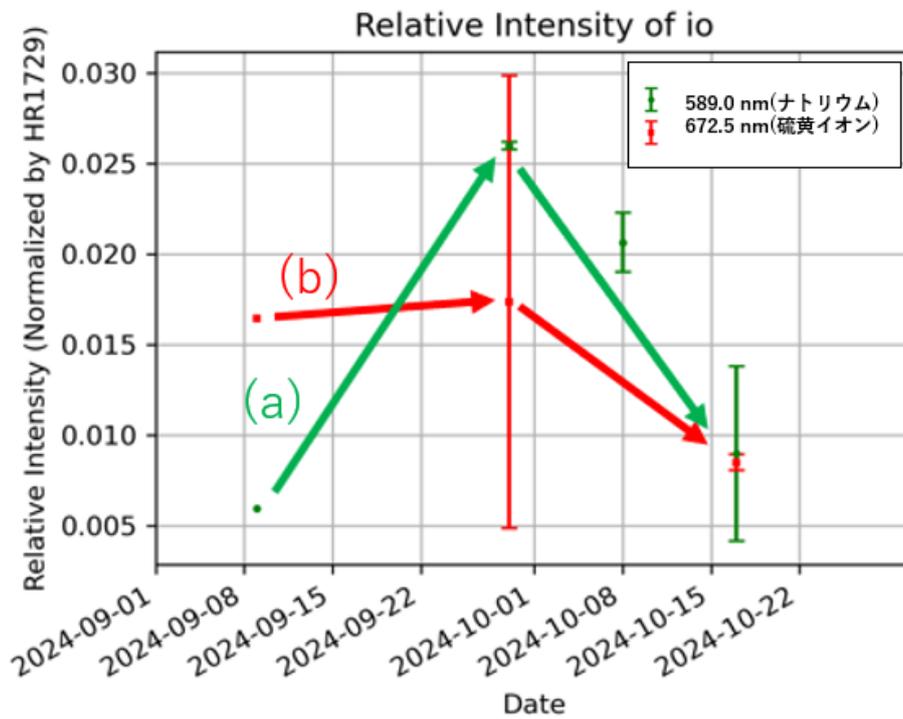


図 32. 2024 年 9 月 9 日から 10 月 17 日にかけてエリア 1 における相対強度時間変化。

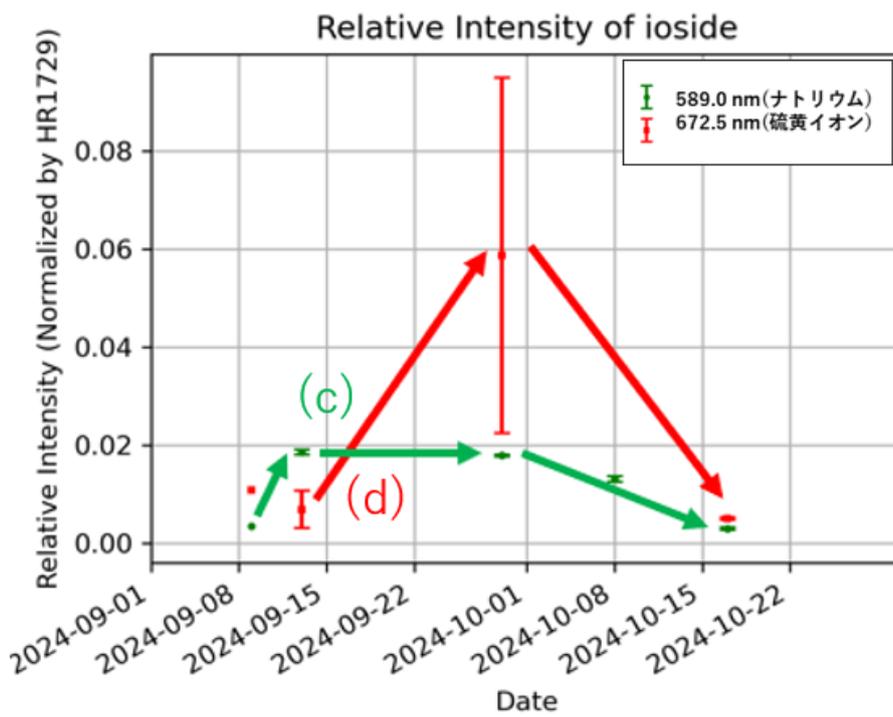


図 33. 2024 年 9 月 9 日から 10 月 17 日にかけてエリア 2 における相対強度時間変化。

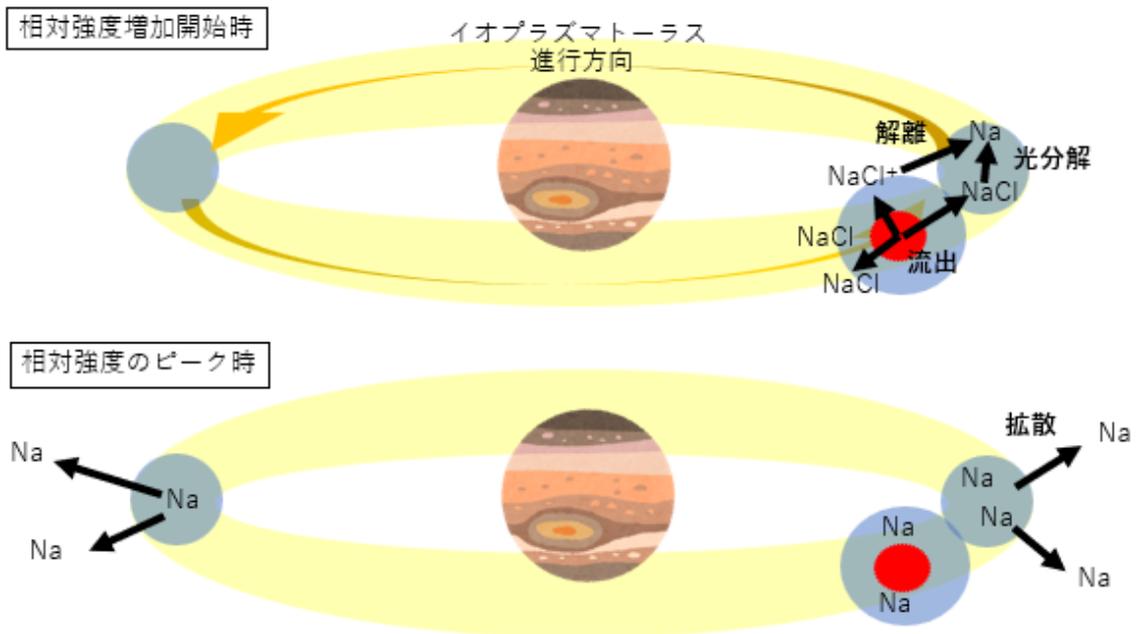


図 34. 相対強度増加時(上)と相対強度ピーク時 (下) のナトリウム成分の模式図。

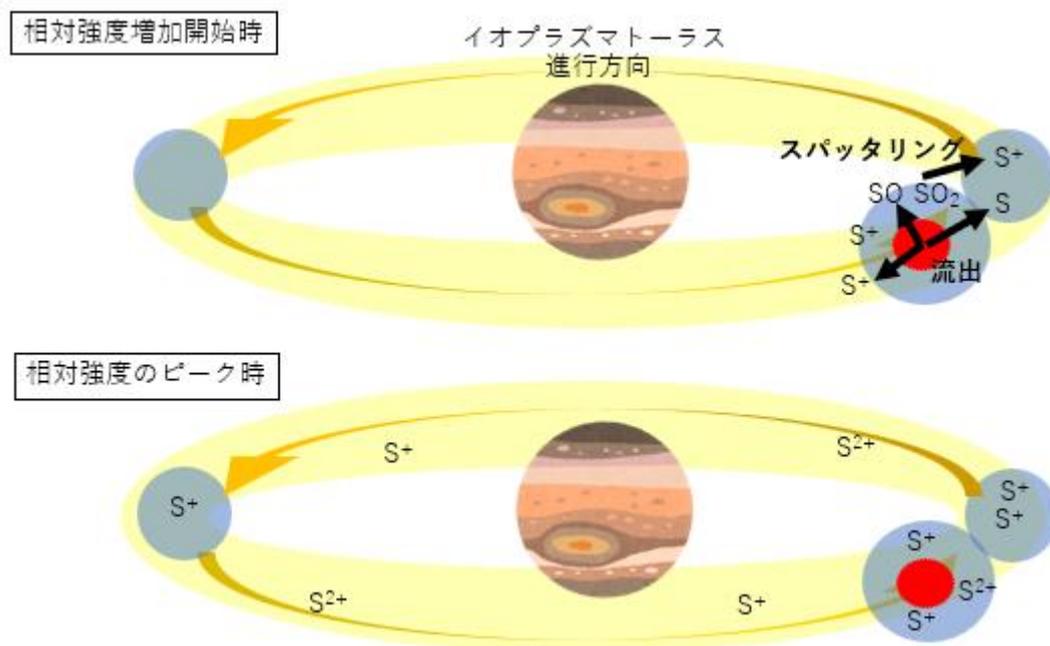


図 35. 相対強度増加時(上)と相対強度ピーク時 (下) の硫黄成分の模式図。

4.3. 火山噴火現象との比較

本研究で検出したナトリウムおよび硫黄の増光が、実際の火山活動と対応しているかを検証するため、Keck 望遠鏡により公開されているイオ表面のホットスポット熱放射画像 (<https://www2.keck.hawaii.edu/inst/tda/TwilightZone.html>)との比較を行った。Keck 望遠鏡では近赤外波長帯における高空間分解能観測を行っている。図 36 は $3.8 \mu\text{m}$ 帯の画像であり、強度は「 $\text{GW } \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ 」で表される (*de Kleer et al., 2019*)。

図 36 から、Keck 望遠鏡による観測では 2024 年 9 月 30 日にイオ全域において顕著な熱放射が検出されているのと同時に、既知の活発火山域でも強い赤外輝度の増加が確認されている。この時期は、本研究でナトリウム星雲、およびイオプラズマトーラス輝度の増光が検出された期間と良く一致する(図 32、図 33)。ただし、現時点で公開されている Keck 望遠鏡のデータは、画像のみで、カウント値などのデータも格納されている生データの公開はされていない点に注意が必要である。

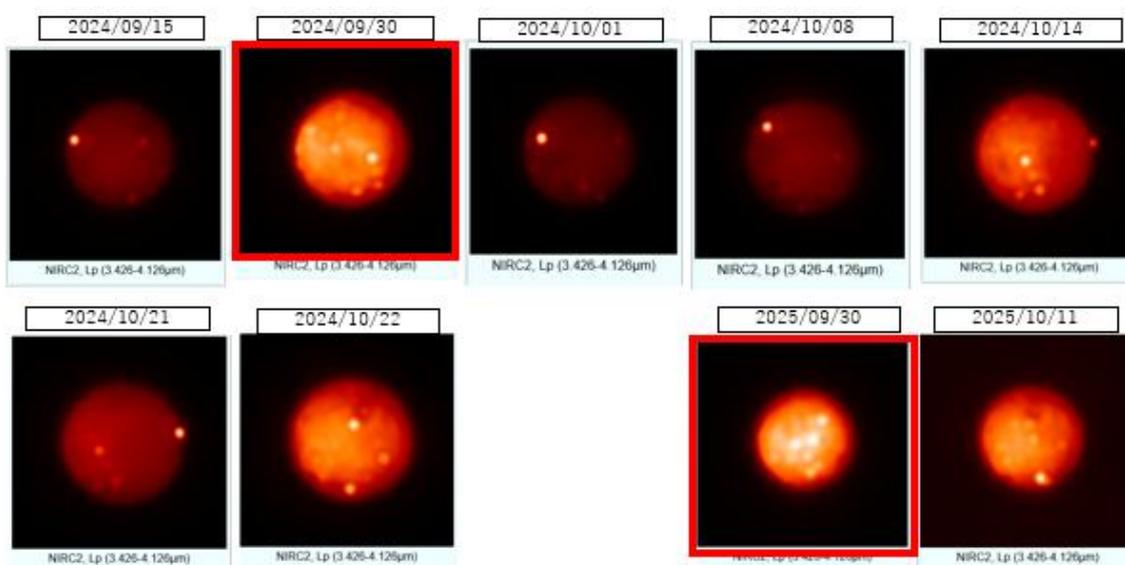


図 36. Keck 望遠鏡のホームページ上で公開されている $3.8 \mu\text{m}$ 波長帯のイオ表面のフラックス密度強度。赤枠囲みの画像は、他の日付と比べて強度が高い日を示す。 (<https://www2.keck.hawaii.edu/inst/tda/TwilightZone.html>)

ナトリウム星雲の増光は火山噴出物に起因すると考えられており、火山活動の活発化に伴い中性ナトリウムの供給量が増加する。そのため、Keck 望遠鏡で観測されたホットスポットの増光と、本研究で確認された開口測光エリアにおける相対強度の増加は、同一の火山噴火イベントに由来している可能性が高いと考えられる。

また、図 36 から 2025 年の 9 月 30 日にも全球的にイオ表面の温度が上昇している。この時期に関しても本研究では相対強度増加現象を捉えているが(図 26、図 28)、Keck 望遠鏡の公開データが十分に存在しないため、火山活動との関連を強く裏付けるには至っていない。

2024 年度のデータから、本研究で観測された広域的なナトリウムおよび硫黄イオン輝線波長の増光は、Keck 望遠鏡により確認されたイオ表面の火山活動と整合的であり、火山噴火と木星磁気圏環境の変動を関連付けるものといえる。

4.4. 課題と今後の展望

本研究では、火山活動の評価に Keck 望遠鏡による赤外画像データを用いたが、この画像データから強度を推定することは困難で、熱放射の定量的な推定には至っていない。今後は、赤外波長における生データのアーカイブが公開され次第、フラックス密度の計算を実施し定量的な推定へ拡大していく必要がある。

また、研究目的(3)にあげていた時定数の解釈について、本研究の観測では、天候による制約のため時間解像度は増光現象の 1 イベントを捉えるには十分である一方、図 37 のように、そのピークを捉えるには不十分であった。この制約は、時定数というより短い時間の推定をするには、大きな課題となる。今後の展望として、天候が悪化する冬場の観測を避けて観測ができる年度に、可能なら毎日、少なくとも 2 日に 1 回のデータの取得を実施する。

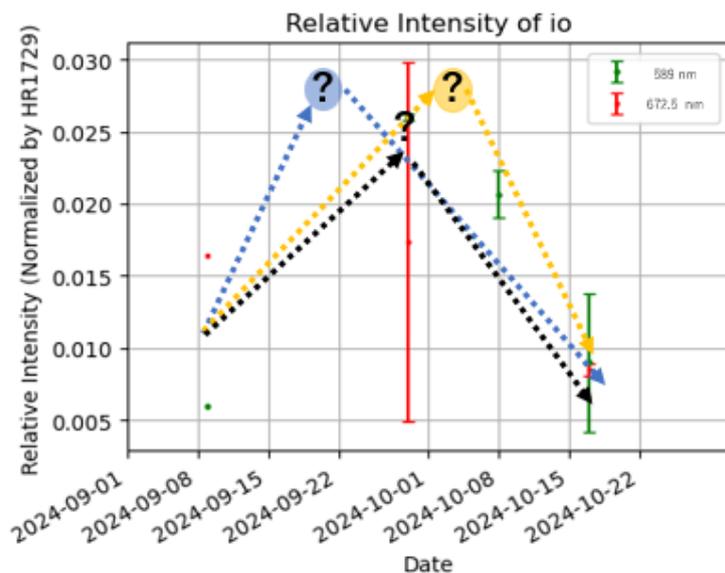


図 37. 増光イベントからピーク推定の模式図。

5. まとめ

木星の第一衛星イオは、活発な火山活動を示す天体の 1 つとして知られている。イオ大気層から毎秒約 1 トンのペースで宇宙空間へと物質が流出し(Dessler, 1980)、木星磁気圏内に中性ナトリウム星雲およびイオプラズマトーラスを形成する。地上望遠鏡や探査機観測によって、物質が拡散していく様子を捉えるための撮像観測は多く行われてきたが、放出された物質の初期輸送過程については、観測的に十分明らかにされていない。

そこで、本研究では、イオ火山活動に伴う物質放出とその周辺空間への供給過程を観測的に同定することを目的として、北海道大学大学院理学院が所有する Pirka 望遠鏡を用いて、中性ナトリウムに由来するナトリウム D 線 (589.0 nm) および硫黄イオンの禁制線 (672.5 nm) での可視光撮像観測を、2024 年および 2025 年に実施した。取得した画像データに対し、バイアス補正、フラットフィールド補正、画像合成を行い、ノイズ成分を抑える処理を施した。さらに、それらの輝線放射強度と比較して非常に強い強度を持つ木星散乱光を取り除くため、木星中心からの距離を変数とした木星散乱光強度の関数を推定した。この木星散乱光を撮像画像から除去することで、微弱な輝線放射成分を抽出することに成功した。イオ近傍および公転軌道上の複数領域において開口測光を行い、標準星を用いた相対測光により輝度の時間変動を推定した。

その結果、2024 年 9 月 9 日から 9 月 29 日にかけて、ナトリウム輝線および硫黄イオン輝線の両波長で強度が 4 - 5 倍ほどに急増した後、10 月 17 日にかけて急増前の強度に減衰するような変動を示す 1 か月半に渡る増光イベントが検出された。これは、*Morghenthaler et al. (2024)*で報告されているナトリウム星雲およびイオプラズマトーラスの増光現象と整合的な時間スケールおよび強度スケールを示す。また、Keck 望遠鏡のホームページで公開されているイオ観測画像との比較を行った結果、イオ表面の赤外熱放射のフラックスが増加した時期と増光イベントの時期が一致することから、このイベントは火山噴火との関連が強いと考えられる。

本研究では、開口測光領域におけるナトリウム輝線の増光時にのみ硫黄イオン輝線が増光しているという同時性から、激しいトーラスや中性星雲の増光を伴う大気の脱出は、火山噴火が原因である可能性が高く、さらに、領域ごとの応答の違いから硫黄は一価の陽イオンの状態で大気を脱出し、ナトリウムは中性原子以外の状態で脱出して中性雲内で中性ナトリウム原子になっている可能性が高いと推定した。

しかし、増光のピーク時間同定による物質の化学変化や電離にかかる時定数の推定や、赤外波長域での光量変化など、より定量的な解析には至っていない。そのため、今後は少なくとも 2 日以内の連続したデータ取得や、Keck 望遠鏡のアーカイブデータの解析が必要となる。

6. 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にお世話になりました。

指導教員である佐藤光輝教授には、多くの助言をいただき、議論を重ねることで研究の方向性を定め、進めていくことができました。また、学会などの研究発表の前に資料の構成や改善点など、お忙しいなかご指導いただき、自分の研究を伝えることの重要性も理解することができました。心より感謝申し上げます。

高木聖子講師には、Pirka 望遠鏡の操作方法だけでなく、資料作成の作法などもご指導していただきました。厚く御礼申し上げます。

高橋幸弘教授には、研究者としての心構えを一から教えていただいただけでなく、セミナーの発表時には多くのご助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

久保田尚之特任准教授には、Pirka 望遠鏡の保守・運用をしていただき、セミナーの発表時も多くのご助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

名寄市天文台の皆様には、望遠鏡や撮像装置などの設備管理を行なっていただき、円滑な観測のご助力をしていただきました。深く感謝いたします。

研究室の先輩・同期・後輩の皆様におかれましては、普段の観測からセミナーの際の議論まで、日ごろから研究の助けをしていただきました。深く感謝いたします。

最後に、私の学業・生活を支えていただいた、家族・友人には心から感謝申し上げます。

7. 参考文献

- Anderson, J. D., R. A. Jacobson, E. L. Lau, W. B. Moore, and G. Schubert(2001), Io's gravity field and interior structure, *J. Geophys. Res.*, 106, 32963-32970. doi: 10.1029/2000JE001367.
- Charles F. Yoder(1979), How tidal heating in Io drives the galilean orbital resonance locks, *Nature*,279, 767-770. doi: 10.1038/279767a0.
- Davies, A. G., J. E. Perry, D. A. Williams, and David M. Nelson(2024), Io's polar volcanic thermal emission indicative of magma ocean and shallow tidal heating models, *Nat. Astron.*, 8, 94–100. doi: 10.1038/s41550-023-02123-5
- Delamere, P. A., A. Steffl, and F. Bagenal(2004), Modeling temporal variability of plasma conditions in the Io torus during the Cassini era, *J. Geophys. Res.* 109, A10. doi: 10.1029/2003JA010354.
- Delamere, and P. A., F. Bagenal(2003), Modeling variability of plasma conditions in the Io torus, *J. Geophys. Res.*,108, A7, doi: 10.1029/2002JA009706.
- Desslerer, A. J.(1980), Mass-injection rate from Io into the Io plasma torus. *Icarus*, 44, 2, 291–295, doi: 10.1016/0019-1035(80)90024-X.
- J.D. Giorgini, Yeomans, D.K., Chamberlin, A.B., Chodas, P.W., Jacobson, R.A., Keesey, M.S., Lieske, J.H., Ostro, S.J., Standish, E.M., Wimberly, R.N.(1996), "JPL's On-Line Solar System Data Service", *Bulletin of the American Astronomical Society*, 28, 3, 1158.
- Koga R., F. Tsuchiya, M. Kagitani, T. Sakanoi, M. Yoneda M, K. Yoshioka , T. Kimura, G. Murakami, A. Yamazaki, I. Yoshikawa, and H. T. Smith(2018a), Spatial distribution of Io's neutral oxygen cloud observed by Hisaki, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 123(5), 3764–3776, doi: 10.1016/j.icarus.2017.07.024.
- Koga R., F. Tsuchiya, M. Kagitani, T. Sakanoi, M. Yoneda, K. Yoshioka, T. Kimura, G. Murakami, A. Yamazaki, I. Yoshikawa, and H. T. Smith(2018b), The time variation of atomic oxygen emission around Io during a volcanic event observed with Hisaki/EXCEED, *Icarus*, 299, 300–307, doi: 10.1016/j.icarus.2017.07.024.
- Lellouch, E., G. Paubert, J. I Moses, N. M. Schneider, and D. F. Strobel (2003), Volcanically emitted sodium chloride as a source for Io's neutral clouds and plasma torus. *Nature*, 421, 45-47. doi: 10.1038/nature01292.
- Lellouch, E., Michael Belton, Imke de Pater, Samuel Gulkis, and Thérèse Encrenaz (1990), Io's atmosphere from microwave detection of SO₂, *Nature*, 346, 639-641, doi: 10.1038/346639a0.
- M.A. McGrath, Johnson R.E.(1987), Magnetospheric plasma sputtering of Io's atmosphere. *Icarus*.69, 3, 519-531, doi: 10.1016/0019-1035(87)90021-2
- McEwen A. S., L. Keszthelyi, J. R. Spencer, G. Schubert, D. L. Matson, R. Lopes-Gautier, K. P. Klaasen, T. V. Johnson, J. W. Head, P. Geissler, S. Fagents, A. G. Davies, M. H. Carr, H. H. Breneman, and M. J. S. Belton(1998), High-Temperature Silicate Volcanism on Jupiter's Moon Io, *Science*, 281, 5373, 87-90, doi: 10.1126/science.281.5373.87
- McEwen Alfred S., Laszlo Keszthelyi, Paul Geissler, Damon P. Simonelli, Michael H. Carr,

- Torrence V. Johnson, Kenneth P. Klaasen, H. Herbert Breneman, Todd J. Jones, James M. Kaufman, Kari P. Magee, David A. Senske, Michael J.S. Belton, Gerald Schubert(1998), Active Volcanism on Io as Seen by Galileo SSI, *Icarus*, 135, 1, 181-219. doi: 10.1006/icar.1998.5972.
- Morgenthaler, Jeffrey P., Schmidt, A. Carl, Vogt, F. Marissa, Schneider, M. Nicholas, and M. Marconi (2024), Jovian Sodium Nebula and Io Plasma Torus S+ and Brightnesses 2017-2023: Insights Into Volcanic Versus Sublimation, *JGR Space physics*, 129, 3, doi:10.1029/2023JA032081.
- N.M. Schneider, Bagenal, F. (2007), Io's neutral clouds, plasma torus, magnetospheric interaction. In: *Io After Galileo . Springer Praxis Books*. Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-48841-5_11
- Nerney, G. Edward, F. Bagenal, and Andrew J. Steffl(2017), Io plasma torus ion composition: Voyager, Galileo, and Cassini, *JGR Space physics*, 122, 1, 727-744. doi: 10.1002/2016JA023306.
- Park, R. S., R. A. Jacobson, L. Gomez Casajus, F. Nimmo, A. I. Ermakov, J. T. Keane, W. B. McKinnon, D. J. Stevenson, R. Akiba, B. Idini, D. R. Buccino, A. Magnanini, M. Parisi, P. Tortora, M. Zannoni, A. Mura, D. Durante, L. Iess, J. E. P. Connerney, S. M. Levin and S. J. Bolton (2025), Interior structure and magma ocean in Io from Juno gravity, *Nature*, 638,69-73. doi: 10.1038/s41586-024-08442-5
- Peale, S. J., P. Cassen, R. T. Reynolds(1979), Melting of Io by Tidal Dissipation, *Science*, 203, 4383, 892-894. doi: 10.1126/science.203.4383.892
- Rathbun, J. A., and J. R. Spencer(2006), Loki, Io: New ground-based observations and a model describing the change from periodic overturn, *J. Geophys. Res.*, 33, 17. doi: 10.1029/2006GL026844.
- Smith H. T., R. Koga, F. Tsuchiya, V. J. Dols(2022), Insight into Io enabled by characterization of its neutral oxygen torus. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 127(8), e2022JA030581, doi: 10.1029/2022JA030581.
- Veeder Glenn J., Dennis L. Matson, Torrence V. Johnson, Diana L. Blaney, and Jay D. Goguen(1994), Io's heat flow from infrared radiometry: 1983–1993, *J. Geophys. Res.* 99, E8, 17095-17162. doi: 10.1029/94JE00637.
- Veeder, Glenn J., Ashley Gerard Davies, Dennis L. Matson, Torrence V. Johnson, David A. Williams, and Jani Radebaugh(2012), Io: Volcanic thermal sources and global heat flow, *Icarus*, 219, 2, 701-722. doi: 10.1016/j.icarus.2012.04.004.
- Veeder, Glenn J., Ashley Gerard Davies, Dennis L. Matson, Torrence V. Johnson, David A. Williams, and Jani Radebaugh(2015), Io: Heat flow from small volcanic features, *Icarus*, 245, 379-410. doi: 10.1016/j.icarus.2014.07.028.
- Veenstra, A., M. Rovira-Navarro, T. Steinke, A. G. Davies, and W. van der Wal(2025), Lateral melt variations induce shift in Io's peak tidal heating. *Nat Commun*, 16, 6798. doi: 10.1038/s41467-025-
- Veenstra, A., M. Rovira-Navarro, T. Steinke, and A. G. Davies(2025), Lateral melt variations induce shift in Io's peak tidal heating, *Nat Commun*, 16, 6798,doi: 10.1038/s41467-025-62059-4

- Villanueva G. L., G. Liuzzi, S. Faggi, S. Protopapa, V. Kofman, T. Fauchez, S. Stone, and A. Mandell(2022), *Fundamentals of the Planetary Spectrum Generator*, ISBN 978-0-578-36143-7
- Watanabe M., Y. Takahashi, M. Sato, S. Watanabe, T. Fukuhara, K. Hamamoto, and A. Ozaki(2012), MSI: a visible multi-spectral imager for 1.6-m telescope of Hokkaido University. *SPIE Proceedings*, 8446, 84462O-. doi:10.1117/12.925292 .
- Williams, A. David, Laszlo P. Keszthelyi, David A. Crown, Jessica A. Yff, Windy L. Jaeger, Paul M. Schenk, Paul E. Geissler, and Tammy L. Becker(2011), Volcanism on Io: New insights from global geologic mapping, *Icarus*, 214, 1, 91-112, doi: 10.1016/j.icarus.2011.05.007.
- Williams, P.R., L. A. Mcfadden, and T.V. Jhonson, *Encyclopedia of the Solar System*, London, Academic Press, 1999.
- Yoneda M., M. Kagitani, F. Tsuchiya, T. Sakanoi, S. Okano(2015), Brightening event seen in observations of Jupiter's extended sodium nebula. *Icarus*, 261, 31–33, doi: 10.1016/j.icarus.2015.07.037
- Yoneda, M., M. Kagitani, F. Tsuchiya, T. Sakanoi, and S. Okano(2015), Brightening event seen in observations of Jupiter's extended sodium nebula, *Icarus*, 261, 31-33, doi: 10.1016/j.icarus.2015.07.037.
- de Kleer K., I. de Pater, E. M. Molter, E. Banks, A. G. Davies, C. Alvarez, R. Campbell, J. Aycock, J. Pelletier, and T. Stickel(2019), Io's Volcanic Activity from Time Domain Adaptive Optics Observations: 2013–2018. *The American Astronomical Society*, 158, 29, doi: 10.3847/1538-3881/ab2380
- de Kleer K., and I. de Pater(2016), Time variability of Io's volcanic activity from near-IR adaptive optics observations on 100 nights in 2013–2015. *Icarus*, 280, 378–404, doi: 10.1016/j.icarus.2016.06.019.
- de Pater I., C. Laver, A. G. Davies , K. de Kleer, D. A. Williams, R. R. Howell, R. A. Julie, and R. S. Spencer(2016), Io: eruptions at Pillan, and the time evolution of Pele and Pillan from 1996 to 2015, *Icarus*, 264, 198–212, doi: 10.1016/j.icarus.2015.09.006.
- de Pater I., E. Lellouch, D. F. Strobel, K. de Kleer, T. Fouchet, M. H. Wong, J. H. Bryan, S. John, M. F. Patrick, E. B. Michael, Bockelée-Morvan Dominique, K. T. Samantha, L. N. Fletcher, M. H. Matthew, M. M. Edward, S. Mark, S. T. Matthew, Stéphanie Cazaux, Ricardo Hueso, Stacia Luszcz-Cook, Henrik Melin, Chris Moeckel, Alessandro Mura, Glenn Orton, Lorenz Roth, Joachim Saur, and Federico Tosi (2023), An energetic eruption with associated SO 1.707 micron emissions at Io's Kanehekili Fluctus and a brightening event at Loki Patera observed by JWST, *J. Geophys. Res.*, Planets 128(8), e2023JE007872, doi: 10.1029/2023JE007872.
- de Pater I., S. Luszcz-Cook, P. Rojo, E. Redwing, K. de Kleer, and A. Moullet (2020), ALMA observations of Io going into and coming out of eclipse, *Planet. Sci. J.*, 1(3)60, doi: 10.3847/PSJ/abb93d.
- 家 正則, 岩室 史英. 舞原 俊憲, 水本 好彦, 吉田 道利.宇宙観測 I , Japan. 2007.
- Jet Propulsion Laboratory Horizons System, [#/](https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/app.html) (最終閲覧:2025/01/05)

スバル画像処理ソフト:マカリ (Makali'i) , <https://makalii.mtk.nao.ac.jp/index.html.ja> (最終
閲覧:2025/01/05)

Planetary Spectrum Generator, <https://psg.gsfc.nasa.gov/> (最終閲覧:2025/01/20)

W. M. Keck observatory, <https://www2.keck.hawaii.edu/inst/tda/TwilightZone.html> (最終
閲覧:2025/01/05)