

2017 年から 2018 年にかけての木星広域ナトリウム雲の変動 米田瑞生^{1,2}, 土屋史紀², Carl Schmidt³, 鍵谷将人², 坂野井健²

1: 山陽学園大学地域マネジメント学部

2: 東北大学大学院理学研究科惑星プラズマ大気・研究センター

3: Boston University, Center for Planetary Science

1. 要旨

木星の衛星イオは、太陽系で最も火山活動が活発である天体として知られている。イオの火山活動は、その熱輻射を探査機や地上より赤外線観測したり、探査機から直接火山噴出を撮影することで、監視されてきた。イオの火山性ガスは、イオ・木星の重力圏を脱出して、木星の周囲に広く分布している。この広く分布しているガスには、中性のナトリウム原子も含まれる。木星周辺のナトリウム原子が、D 線の波長で発光している。この木星ナトリウム雲の発光強度を、我々の研究チームは、20 年以上にわたり地上観測している。これら蓄積してきた木星ナトリウム雲の発光輝度データの中でも、特に 2018-2019 年の期間については、ALMA によりイオの火山性噴出(Plume)の観測と同時期に得られたものもある。ALMA で行われた観測は、火山性ガスに含まれる SO₂ であり、ナトリウムを含む分子を観測したものではないが、ナトリウム雲の観測で得られた傾向と一定の一致が見られた。その詳細を報告する。

2. 背景

イオの火山性ガスは、地球同様に、SO₂ を主体とする。この火山性ガスは、磁気圏粒子によるスパッタリングで流出する他、電離・解離の後、木星の共回転磁場によるピックアップで、木星内部磁気圏へと流出する。イオンとして流出した粒子は、共回転磁場により捕捉され、その速度は木星の共回転速度（イオ起動で 74km/s）に達する。このうち、電子との結合などで中性化して発生した原子は、木星磁場の共回転速度を保っているため、高速中性粒子として、木星の重力圏外へと脱出することになる。

木星周囲に分布しているナトリウム原子は、イオの火山性ガスに含まれる NaCl 分子が起源である考えられている(Wilson et al, 2002)。NaCl 分子が、イオの電離圏で電離し、NaCl⁺となる。イオンは、木星の共回転磁場にピックアップされるため、共回転速度(74km/s)を達成する。しかし、NaCl⁺イオンは、イオプラズマトーラス内で、電子衝突することで、高速の中性ナトリウム原子が、木星周囲の宇宙空間へ放出される。これらのナトリウム原子は、太陽光をナトリウム D 線波長(589nm)で共鳴散乱していて、地上からでも観測することができる。木星の周囲 10° という広い領域で発光している様子は、Mendillo et al (1990)により初めて確認された。Yoneda et al. (2015)は、継続的に木星ナトリウム雲を観測し、ひさき衛星の木星観測期間中に、大規模な増光を同定している。本研究では、Yoneda et al. (2015)と同じ光学装置を用いて行った 2018 年の観測データについて扱う。

3. 観測

観測の詳細は、Yoneda et al. (2009)に述べられているが、木星の散乱光を防ぐためのオカルテーションマスク、ナトリウムD線の発光を得るための狭帯域干渉フィルター(598 nm)、木星の散乱光のパターンを得るための off-band フィルター(615 nm)を備えた口径 10cm の屈折望遠鏡を用いた。この装置は、東北大学大学院理学研究科惑星プラズマ・大気研究センターが、標高 3,050m のマウイ島ハレアカラ山山頂で運用するハレアカラ高高度観測所に設置されている。

4. 結果

観測結果を、Fig. 1. に示す。この図は、Yoneda et al. (2024)に用いられているもので、2018 年 9 月 2 日から 10 日間あまりにわたり、木星から 50 及び 100 R_J (R_J は、木星半径=71,400km), 木星の東側・西側でのナトリウムD線波長での発光強度をプロットしたものである。この期間、ナトリウム雲の発光強度が減少傾向であることがわかる。この減少傾向は、木星の東側でより顕著に見られる。

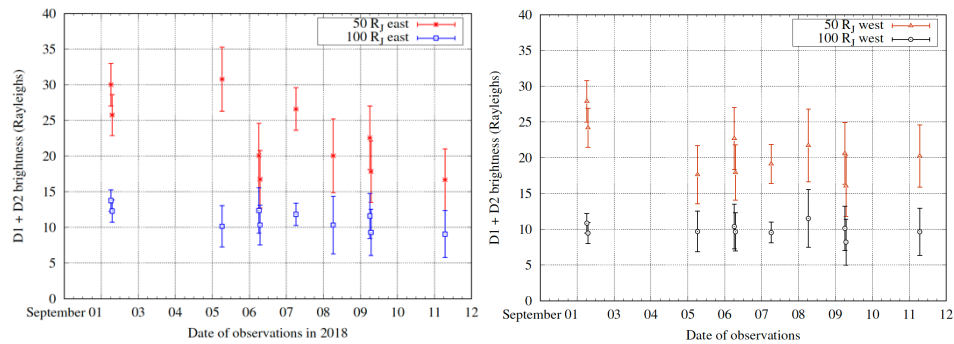


Fig. 1. 2018 年 9 月上旬の木星ナトリウム雲の D 線での発光輝度。左は木星の東側、右は西側での観測データである (Yoneda et al., 2024)。

Fig. 2. も、Yoneda et al. (2024) が示した木星東西それぞれのナトリウム雲強度を示したものであるが、2017-2019 年の期間について示している。我々の観測データに加えて、Morgenthaler et al. (2024) による、木星から 12 R_J での観測データも示されている。異なる観測ではあるが、発光強度の増減について、同様の傾向が見られる。キャリブレーションが妥当に行われている証左になる。

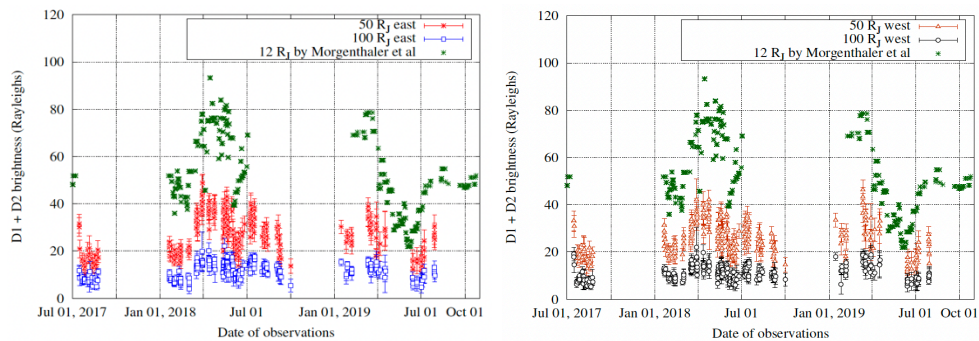


Fig. 2. 2017 年から 2019 年にかけての木星ナトリウム雲の D 線での発光輝度。左は木星の東側、右は西側での観測データである (Yoneda et al., 2024)。12 R_J での観測データは、Morgenthaler et al. (2024) に基づく。

Pater et al. (2020)は、ALMA を使ったイオの観測をしていて、2018 年 9 月 2 日には、plume から放出される SO₂ を観測しているが、9 月 11 日は plume が見られないことを報告している。Fig. 1. でも、木星ナトリウム雲の発光強度が、9 月 2 日が 11 日と比較して大きいことがわかる。ただし、減少傾向は、木星の東側においてより顕著であり、西側においては、エラーバーを超えるような有意な変化が認められない。

5. 考察

Yoneda et al. (2009)は、観測結果と数値シミュレーションを組み合わせ、NaCl 分子の電離が、イオの昼間側半球で発生しやすく、また昼間側半球が、イオの公転の進行方向側にあるときに、NaCl+イオンが木星の共回転磁場によるピックアップされ、結果的にナトリウム原子の放出が増えることを示した。Moses et al. (2002)らによるモデルシミュレーションでも、NaCl の電離がイオの昼間側半球で発生することが示唆されている。

Pater et al. (2020)が 2018 年 9 月 2 日に観測した plume は木星側半球にあり、即ちこの plume から発生したガスに含まれる NaCl 分子は、木星側半球が昼間側半球に相当する時に、電離しやすいことが期待される。例えば、Io Phase angle が、0 度付近であれば、この条件が成立する。このとき (Io Phase angle が 0 度付近) のイオでの、木星磁場の共回転方向は、東向きである。即ち、高速のナトリウム原子も東側に供給される。一方、Io Phase angle が、180 度付近にある時、この plume は、夜側半球に位置する。すなわち、plume から供給される NaCl は、電離せず、高速ナトリウム原子が西側には供給されにくい状況が発生することになる。このように、plume の位置により、木星ナトリウム雲の東西間の非対称的な変化が発生すると説明することができる。残念ながら、Pater et al. (2020)は、plume から発生した SO₂ のみを観測していて、この plume が、NaCl を供給しているかはわからない。よって、このシナリオを確定的なものとすることもできない。

6. 結論

我々の行ってきた木星ナトリウム雲の発光強度の継続観測は、他の研究グループとも齟齬のない結果を示している。本研究で示した期間以前も 20 年にわたり、観測データを蓄積し、また同様の方法でキャリブレーションを行ってきたため、過去のデータについても、観測精度が担保されたと言って良いだろう。

また、2018 年 9 月上旬に木星ナトリウム雲に見られた発光強度の減少は、Pater et al. (2020)によって、ALMA で観測された plume の消失により引き起こされた可能性がある。特に、木星の東側にてナトリウム雲の発光強度の減少が顕著であった。これは、Pater et al. (2020)により確認された plume が、イオの木星側半球にあることが、原因であるというシナリオが考えられる。

7. 参考文献

- de Pater, I., Luszcz-Cook, S., Rojo, P., Redwing, E., de Kleer, K., Moullet, A., 2020. *ALMA observations of Io going into and coming out of eclipse. Planet. Sci. J.* 1, 60.
<http://dx.doi.org/10.3847/PSJ/abb93d>
- Mendillo, M., Baumgardner, J., Flynn, B., Hughes, J., 1990. *The extended sodium nebula of jupiter. Nature* 348, 312–314. <http://dx.doi.org/10.1038/348312a0>
- Mendillo, M., Wilson, J.K., Spencer, J., Stansberry, J., 2004. *Io's volcanic control of jupiter's extended neutral clouds. Icarus* 170, 430–442.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2004.03.009>
- Morgenthaler, J., Schmidt, C., Vogt, M., Shhneider, N., Marconi, M., 2024. *Jovian sodium nebula and io plasma torus S+ and brightnesses 2017–2023: Insights into volcanic versus sublimation supply. J. Geophys. Res.: Space Phys.* 129, 2023JA03208
<http://dx.doi.org/10.1029/2023JA032081>
- Moses, J.I., Zolotov, M.Y., Fegley, Jr., B., 2002. *Alkali and chlorine photochemistry in a volcanically driven atmosphere on Io. Icarus* 156, 107–135.
<http://dx.doi.org/10.1006/icar.2001.6759>
- Schneider, N. M., M. H. Taylor, F. J. Crary, and J. T. Trauger (1997), *On the nature of the IIII brightness asymmetry in the Io torus, J. Geophys. Res.*, 102, 19,823–19,833.
- Wilson, J.K., Mendillo, M., Baumgardner, J., Schneider, N.M., Trauger, J.T., 2002. *The dual sources of Io's sodium clouds. Icarus* 157, 476–489.
<http://dx.doi.org/10.1006/icar.2002.6821>
- Yoneda, M., Kagitani, M., Tsuchiya, Okano, S., 2009. *Shorr-term variability of jupiter's extended sodium nebula. Icarus* 204, 589–596,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2015.07.037>
- Yoneda, M., Kagitani, M., Schmidt, C., Kagitani, M., Sakanoi, T., 2024. *Major brightening events in Jupiter's sodium nebula during Juno era. Icarus* 425, 116301,
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2024.116301>