

# イオ火山活動の中間赤外線観測

米田 瑞生

〈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  
〒980-8578 宮城県仙台市荒巻字青葉6-3〉  
e-mail: yoneda@pparc.gp.tohoku.ac.jp



木星の衛星イオは太陽系で最も火山が活発な天体であり、その火山性ガスがイオから流出・電離して、木星の磁気圏プラズマとなっている。イオの火山活動が木星磁気圏に与える影響を調べるべく、東京大学チリ・アタカマ天文台において、イオの火山性熱輻射を観測する試みを現在進行形で行っており、すでに数日というタイムスケールでイオの火山活動が変化する様子をとらえることに成功している。将来同天文台に建設予定のTAO 6.5 m 望遠鏡では、イオの火山活動に加えて木星のオーロラなど、木星の磁気圏現象を直接観測して、「火山から宙空を結ぶ関係」を明らかにする研究の実現を目指す。

## 1. 木星磁気圏

磁場をもつ太陽系惑星は、太陽風との相互作用で磁気圏を形成する。その大きさは、その場での太陽風動圧の大きさと惑星固有磁場の強さでおおむね決定されるものである。地球の場合、地球と太陽側磁気圏界面までが、約10地球半径、60,000 kmといったところであろう。木星の場合、磁気モーメントが地球の20,000倍あるため、磁気圏界面までの距離は、約80木星半径(6,000,000 km)、地球の100倍にも及ぶ。

### 磁気圏プラズマの組成

地球磁気圏の組成は、おおよそ太陽風起源のプラズマ、すなわちプロトンを主体としている。太陽風の変化に地球磁気圏も応答し、太陽のフレア・CME (coronal mass ejection) が地球に向かえば、磁気嵐が起き、美しいオーロラが見えることもある。木星も同様の磁気圏を有することが予想されていた。初めて木星に接近した探査機は、米国のパイオニア10号である。ただ木星近傍を通過したに過ぎなかったが、特に大きな発見は以下

の二つであろう。一つ目は、前述の固有磁場の強度・磁気圏の大きさである。そして二つ目は、磁気圏中のプラズマが太陽風組成とは異なり、重イオンが予想外に多く含まれていたことだ。

その後、地上からの光学観測で、中性ナトリウム・カリウム原子が確認され、さらにKupoら<sup>1)</sup>によりイオの軌道に、硫黄イオンが分布していることが発見された。イオンは、木星磁場にトラップされ、自由に運動できないため、イオの軌道付近にあるということは、イオが重元素・イオンの供給源であることを強く示す観測結果だったのだ。

### イオ火山の発見

1979年、米国探査機ボイジャー1号が木星・イオに接近、転送されてきたイオの画像を解析していたNASAの研究者、リンダ・モラビトは意外なものを発見した。イオの地表からの噴出があったのだ。これは紛れもなく、イオに火山活動があることを示していた。これまでに確認されていた「木星磁気圏の重元素・イオンの存在」という謎が解決した瞬間でもあった。図1に示されて

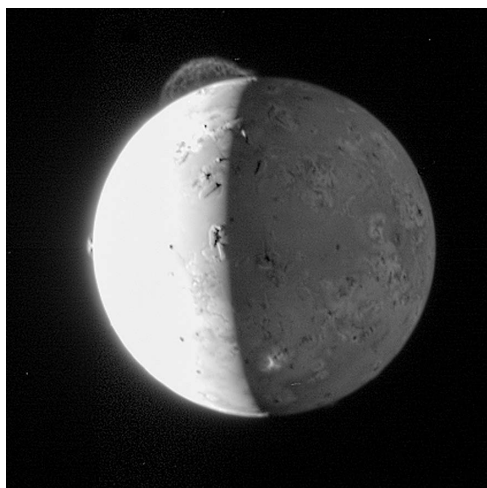


図1 NASA/JPLの探査機, New Horizons が木星フライバイ時にとらえたイオとその火山噴出. 多数の噴出があるなかでも, 左上に見えるものは, 高度350 kmに達する大規模なものである.

いるのは, NASAの冥王星・カイパーベルト天体探査機, New Horizonsが木星をフライバイした際にとらえたイオの画像である. 大きな火山性噴出が見えている. その到達高度は300 km, 電離圏高度に相当し, 噴出の初速度は, 約1 km/sにも及ぶ. 地球の火山は, 熱的な対流の助けを借りても, その噴煙高度は対流圏界面(高度約10 km)まで. イオの火山は地球のそれとは大分違うことが伺える.

### イオからのプラズマ供給

オーロラ等の磁気圏現象では, 磁気圏中のプラズマが大きな役割を担っているから, 太陽風同様にイオからのプラズマ供給が木星磁気圏にさまざまな変動をもたらしていることが予想される. 私たち, 東北大学惑星プラズマ・大気研究センターではこれまでに, 木星周辺に分布する中性ナトリウム原子, 硫黄一価イオンの発光を観測してきた. 中性ナトリウム原子は, イオの火山性ガスに含まれる塩化ナトリウムが, イオの電離圏や木星電離圏でイオン化・解離の反応を経て供給され, 木星周辺1,000木星半径にわたって分布してい

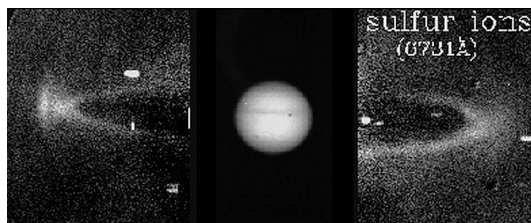


図2 Schneider and Trauger<sup>2)</sup>により得られたイオ・プラズマ・トーラスの硫黄一価イオンの発光. ほかに硫黄の多価イオン, 酸素の単・多価の発光が認められている. このトーラスプラズマは, 徐々に遠心力で磁気圏外部へ運ばれ, 磁気圏の広大な領域で木星オーロラなどのさまざまな現象にかかわっていると考えられる.

る. このナトリウム原子が, 太陽光を共鳴散乱して可視光線のD線波長で発光している. これは, 木星ナトリウム雲と呼ばれるものである. 一方, やはりイオの火山性ガスが起源であるイオンは木星の磁場にトラップされ, イオ軌道をすぐには離れることができず, イオ・プラズマ・トーラスと呼ばれる構造を形成する. この中に含まれる硫黄一価イオンは, 673.1 nmなどに電子衝突励起による可視光輝線をもっていて, 地上観測の対象となっている(図2参照).

私たちのこれまでの地上観測で, 木星ナトリウム雲やプラズマ・トーラスの発光にさまざまなタイムスケール(数日-数年)の変動をとらえてきた. 図3に示されるのは, 2007年に私たちが1カ月にわたって行ったナトリウム雲観測で得られた画像のうちの3例である. 短期間で得られた観測結果ながら, その発光強度が変化している様子がわかる. これはイオから磁気圏に供給される粒子の量が変化していることを示している. ナトリウム雲の発光は, 太陽光を共鳴散乱することによる発光であるので, 発光強度の変動はナトリウム原子の視線方向の柱密度やイオからの供給量の変化を直接私たちに伝えてくれるのだ.

ここで二つの疑問が生じる. 一つは「イオからのプラズマ供給の変化に対し, 磁気圏側はどのよ

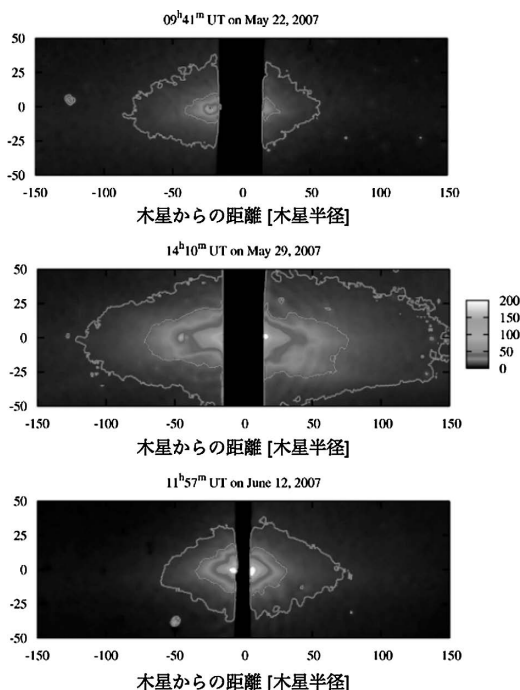


図3 中性ナトリウム原子のD線発光を観測したことで得られた木星ナトリウム雲 (Yonedaら<sup>3)</sup>、発光強度の単位は Rayleigh. 中段に示される5月27日はナトリウム雲がほかに比べて明るく観測されている。木星から6木星半径 ( $R_J$ ) にあるイオが、木星から100  $R_J$  を超える環境をダイナミックに支配している様子が示されている。

うに応答するのか？」という疑問だ。これを解決すべく、私たちは木星オーロラなど磁気圏現象とイオからの供給の変化を同時に観測しようという試みを計画している。もう一つの疑問、それは「観測されるイオからの供給変化は、イオの火山活動の変化によるものなのか？」というものです。これまでの観測事実は、イオの火山活動のダイナミックな変化を強く示唆しているが、その直接証拠を私たちはまだ得ていない。これを直接検証できれば、「イオの火山と木星磁気圏」すなわち、固体惑星と宇宙空間の関係を明らかにするユニークな研究ができるのだ。

### イオ火山の近赤外線地上観測

この30年間、イオの火山活動は実は地上から

も観測されてきた。イオの火山の中心部は1,500 K、一方の溶岩は600 Kほどの温度である。これらの温度をもつ黒体からの熱輻射のピークは、近赤外線帯にあり、よって、 $3.5 \mu\text{m}$ 前後の波長でイオを観測すれば、火山性熱輻射の変動を克明に得ることが出来る。実際、IRTFなどを用いた近赤外線観測で、イオの個々の火山を分離してその変動をとらえる研究が過去に複数行われている。

ただし、この観測には弱点がある。近赤外線ではイオの表面で反射する太陽光が無視できない。すなわち、任意の時刻にイオを観測して得られるのは、火山性熱輻射と太陽反射光の混合なのだ。太陽反射光を避けるためには、イオが木星の影に入り、太陽光の当たらない時刻を狙うほかない。地球から外惑星である木星の影にあるイオを観測するのは容易ではない。何よりの問題は、イオの公転と自転が同期していることである。つまり、近赤外線ではイオの木星側半球しか観測できないのだ。これは、イオの火山活動と木星磁気圏へのプラズマ供給の比較をするにあたっての大問題である。

### イオ火山の中間赤外線地上観測

イオ全球の火山活動を観測するにはどうしたらよいか、私たちは中間赤外線観測という答えにたどり着いた。例えば中間赤外線である  $10 \mu\text{m}$ 、これは約300 Kの輻射のピークに相当する。火山性の加熱にしては随分と低い温度に見える。惑星表面温度は次の近似できる。

$$T = \left[ \frac{S}{r^2} \frac{1-A}{\epsilon\sigma} \right]^{1/4}$$

$S$ は太陽定数 (地球軌道での太陽光エネルギーフラックス:  $1,366 \text{ W/m}^2$ )、 $r$ は日心距離 (AU)、 $\epsilon$ は黒体度、 $\sigma$ はシュテファン・ボルツマン定数、 $A$ はアルベドである。地球の場合、 $r=1$   $A=0.3$ を与えると、255 Kになる。大気層を仮定しない近似だから、幾分寒いように思えるが、そう悪い近似ではない。安定した大気をもたないイオの場

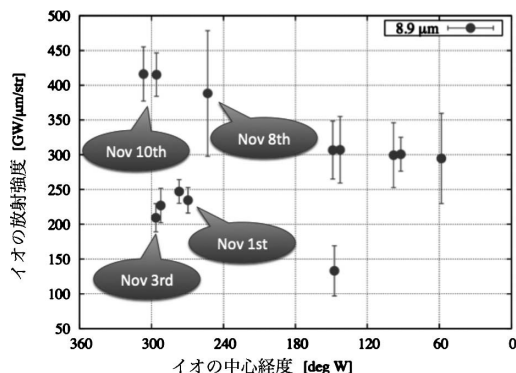


図4 miniTAO 1-m望遠鏡と中間赤外線検出器 MAX38 で得られた、 $8.9\ \mu\text{m}$ におけるイオのフラックス (2011年11月). 横軸は、観測時の地球から見たイオの中心経度. どの領域に活発な火山活動があるかを推測することができる. エラーバーは $1\sigma$ だから、 $150^\circ$ 付近の小さな値を示すプロットはおそらく真実ではない解釈される. 一方、 $300^\circ$ 付近からのフラックスは11月上旬の間増加しているが様子見えている. 数日スケールの変動がとらえられる中間線観測ならではの結果だ.

合、さらに良い近似になる. 木星軌道で $A=0.5$ を仮定すると、火山活動がない場合のイオの表面温度は $150\ \text{K}$ であることがわかる. これは有意に $300\ \text{K}$ より低いため、イオ表面からの熱放射は $10\ \mu\text{m}$ 帯では火山性熱放射よりも圧倒的に弱くなる. また、たいへん都合の良いことに中間赤外線におけるイオ表面の太陽反射光は、火山性熱放射のその1%にも満たないのだ. したがって、中間赤外線である $10\ \mu\text{m}$ でもイオの火山性熱放射を観測できることがわかる.

#### miniTAO と MAX38 を用いたイオ火山の観測

イオの観測にいかにも有用であるとはいえ、中間赤外線に感度のある装置を備える望遠鏡は限られるし、われわれのような数日スケールの変動をとらえるためには、長大なマシンタイムが必要である. そこで私たちが目をつけたのが、miniTAO 1 m望遠鏡と中間赤外線観測装置 MAX38だ. イオの視直径は1秒角、一方、miniTAO の $10\ \mu\text{m}$ での回折限界は2.5秒角、つまりイオの個々の火

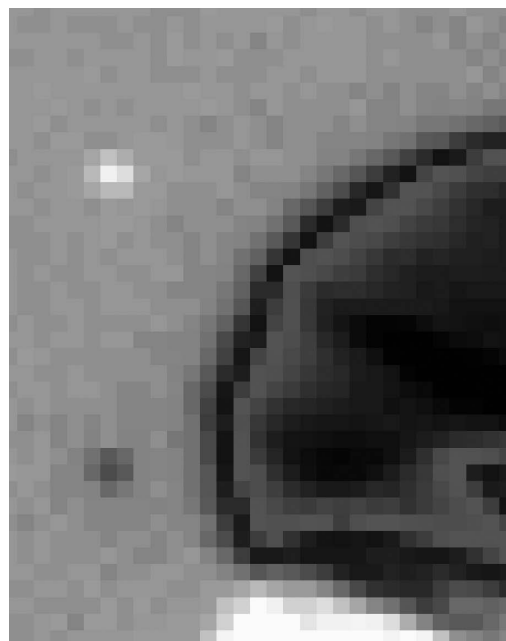


図5 miniTAO 1-m望遠鏡と中間赤外線検出器 MAX38 で得られた、 $8.9\ \mu\text{m}$ に於ける木星・イオの画像 (2011年11月). 中間赤外線での観測に必要な「noddin・chopping」という操作により、イオ・木星の正負の画像がそれぞれ1ヶずつ見えている. 四つのガリレオ衛星を含め、木星周辺は中間赤外線で複数天体が同時に観測される数少ない領域である.

山を見分けることはできないが、イオ全体の火山活動をとらえることは可能だ.

2009年以降、われわれはこのminiTAOを用いたイオの火山活動の監視観測を行っている. miniTAOの運用が始まって間もない頃は、天候悪化で観測所への道が閉ざされ、宿のあるサンペドロ・デ・アタカマの街で、チリワインを飲みながら雪融けを待ったり、あるいは機器の調整のため、標高 $5,640\ \text{m}$ 、 $0.5$ 気圧、 $-20\sim-15^\circ\text{C}$ の極限の地での作業が毎日続いたり、データ取得まではたいへんな苦勞があった. それらを乗り越え、2011年11月の観測では、遂にイオの火山活動が劇的に変化する様子をとらえることに成功した.

図4の横軸は、観測者から見たイオの中心経度を表す. 経度 $300^\circ$ 付近からの放射が、2011年



11月中旬の間に増加している様子がわかる。経度308度にイオでも最も活発な火山、Lokiが存在する。よって、この現象もLokiによるもののだと思われる。望遠鏡の回折限界の都合上、個々の火山を分離できなくても、イオのどの面を観測しているかである程度、どの火山に変化があったかまで予想をつけることができるのだ。

これまでイオの火山活動はIRTFなどの大型望遠鏡や木星に接近した探査機で観測されてきたことを考えれば、一方、miniTAO 1 m望遠鏡でイオの変化をとらえることに成功したのは画期的であると言ってよい。従来に比べ、圧倒的な低コストでイオ火山の変化の検出に成功したのである。

この火山性の変化がイオの大気や木星磁気圏プラズマをどのくらい変化させたのかが気になるどころだ。これらを監視する私たちのハワイの装置は同時期に稼働状態にあった。しかし残念ながら、天候不順のためチリ・ハワイの同時観測はならなかった。探査機・宇宙望遠鏡に対して圧倒的な経済性を誇るわれわれの地上観測だが、天候不順という問題からは逃れることができない。

## 2. 今後について

ハワイ・チリの同時観測を成功させる大目標は譲ることができない。木星磁場との相互作用によるイオ大気の流れは、無磁場惑星が太陽風によってその大気を失う様子を再現していると言われる。かつて大気を豊富にもちながら、無磁場惑星であるため、その大部分を失ったと言われる火星、同様に無磁場ながら地球を凌駕するほどの大気をもつ金星、磁場をもち、生命を維持するにちょうど良い大気を維持する地球、これらの謎に満ちた歴史をひも解くのに、ハワイ・チリ同時観測は大きなヒントをもたらしてくれるはずである。

JAXA、東北大学、東京大学が主導で行う紫外線惑星望遠鏡搭載の人工衛星ミッションEXCEEDの打ち上げが、平成25年8月に予定されて

いる。このミッションの主なターゲットは、木星内部磁気圏のイオ起源のイオンである。酸素や硫黄の単価・多価イオンは多くの輝線を紫外線域にもつ。これらを観測することで、磁気圏中のイオン・電子の密度・エネルギーを得ること、木星オーロラをとらえることがこのミッションの目的に含まれている。

ただし、このミッション単体ではイオからのプラズマ供給の変化、火山活動の貢献度を調べることはできない。EXCEEDミッションがとらえるであろう、さまざまな磁気圏プラズマの変動にどのようにイオがかかわっているかを調べるには、われわれのハワイ・チリの観測を、EXCEEDに併せて行うしかないだ。miniTAOによるイオの観測は、日本の直近惑星探査ミッションの強力なサポーターであると言える。

数年後のTAO計画の集大成、6.5 m望遠鏡はイオ・木星観測には冗長かと言えば、決してそうではない。例えば、先に紹介した二酸化硫黄は200-300 Kで昇華するのに対して、塩化ナトリウムの昇華は1,000-2,000 Kで起きる。これは火山の温度によって磁気圏プラズマの組成が支配される可能性を意味する。6.5 m望遠鏡の空間分解能を活かし、火山性高温部を分離して観測すれば、それぞれの火山が達成した温度がわかるし、すなわちどのような物質が昇華して、どのイオンが磁気圏に供給され得るかを調べることができる。TAO 6.5 m望遠鏡とわれわれのハワイやEXCEEDのデータを合わせれば、「イオの火山温度と磁気圏組成の関連」を追求できるのである。「固体温度と宙空の関係」、これはいまだかつて調べられたことのない、しかし興味深い研究対象だ。

磁気圏の代表的な現象として、オーロラを欠くことはできない。木星のオーロラは赤外線・紫外線域の複数の輝線で観測されている。木星オーロラは、ハッブル宇宙望遠鏡や探査機、地上大型望遠鏡による観測で、たいへん微細で複雑な構造を

もっていることが知られている。この木星オーロラが「太陽風やイオの火山活動にどのように影響されているのか?」という疑問ははまだ解決されていない。しかし、前述の EXCEED 衛星の空間分解能は、この詳細な構造を見るにはいささか不十分である。TAO 6.5 m 望遠鏡は、単一大学所有の望遠鏡であるため、長期のマシントime確保が期待できるし、その空間分解能により、オーロラの詳細な変化を追うこともできる。TAO 望遠鏡の活用で、イオの火山から木星のオーロラまで、広範な現象の同時観測が実現し、探査機ミッションに劣らない研究成果が期待される。

## 謝 辞

学生時代の筆者が唐突に「イオを赤外線観測させて欲しい」とお願いして、それを受け入れてくださった東京大学天文学教育センター・宮田隆志准教授、チリでの観測をサポートして下さる同チームの皆様のご協力・ご厚意なしでは、これまでの成果はありえないものである。ここに深く御礼申し上げます。本研究の一部は、JSPS 科研費 2103188 および 24403007 の助成を受けている。

## 参考文献

- 1) Kupo I., Mekler Y., Eviatar A., 1976, *Astrophys. J.* 205, L51
- 2) Schneider N. M., Tauger, J. T., 1995, *Astrophys. J.* 450, 450
- 3) Yoneda, M., Kagitani M. Okano, S., 2009, *ICARUS* 204, 589

## Mid-Infrared Observations of Io's Volcanism

Mizuki YONEDA

*Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University, Aramaki Aza Aoba, Sendai 980-8578, Japan*

Abstract: Io is well-known as the most volcanically powerful body in the solar system. This volcanic gas becomes Jupiter's magnetospheric plasma through atmospheric escape and ionization. Therefore, it is expected that Io's volcanism controls Jupiter's magnetospheric activity. As the first step of the study to reveal the relations between Io's volcanism and Jupiter's magnetosphere, we are making observations of Io's volcanic thermal emission using the mini TAO 1-m telescope at wavelengths in mid-infrared. Furthermore, we can observe details of Jupiter's infrared aurora with the planned TAO 6.5 m telescope in addition to volcanism on Io. It can be said that use of the TAO telescopes is very effective method for the study of Jupiter's magnetosphere.