

イオの火山噴火と中性酸素トーラス

古賀 亮一

〈名古屋市立大学データサイエンス学部 〒467-8603 愛知県名古屋市長区瑞穂区田辺通 3-1〉

e-mail: koga.ryoichi@ds.nagoya-cu.ac.jp



木星衛星イオは火山活動が太陽系で最も活発な天体である。イオの大気生成の主な要因は、地表の霜の昇華なのか、それとも火山からの直接供給なのかは、数十年前から議論されてきた。しかし、イオ起源の中性ガスやプラズマの大規模な変動はこれまでに観測されており、この現象は火山噴火によるガスの供給が一時的に大きくなること以外で説明することは難しいだろう。この記事では木星衛星イオの大気生成・散逸の大まかな仕組みについて説明する。その上で惑星分光観測衛星ひさきによって初めて観測された、イオの大気散逸によってできた中性酸素トーラスの時空間変動の研究成果とその後の研究の発展や課題を紹介する。

1. 木星衛星イオについて

筆者は2015年から大学院に進学し、5年間の大学院生時代の大部分を惑星分光観測衛星ひさき (SPRINT-A) が観測した木星衛星イオの中性トーラスのデータ解析に費やした。ひさきが打ちあがったのがちょうど学部4年生の頃であったので、研究のスタート時期から観測されたばかりのデータを扱うことができたのは幸運であった。その時は地球外生命の存在可能性がありそうな木星衛星エウロパに興味があり、氷の表面から散逸した酸素原子の発光が見えるのではないかと考えて解析したところ実際にOI 130.4 nmの発光が受かっていることに驚いたことが記憶に残っている。実際にはよく確認するとエウロパからではなくイオ起源であることが判明したのだが、ではイオはどんな天体だろうと思って調べたところ火山活動が太陽系で一番活発であることを知り、強い興味をもったのがこの研究を始めたきっかけである。その後も解析を進めていくうちにこれまで観測的な知見がほとんど得られていなかったイオの

大気散逸ガスの時空間変動の詳細に迫ることができた。ここでその解析で得られた結果や解釈と関連する研究を紹介する。

イオは木星の4つの大きな衛星のうち、一番内側（木星から5.91木星半径 (R_J)）を周回している（図1）。これらの衛星はガリレオ・ガリレイが1610年に発見した[1]ことからガリレオ衛星と呼ばれている。イオの直径は3643 kmであり、地球から見たイオの視直径はおおよそ1"である（木星は32"-49"）。1979年に探査機Voyager 1による観測が行われて以降、イオの表面には多数の火口や溶岩が存在し、火口からの噴出現象がお



図1 木星とリング、ガリレオ衛星（イオ、エウロパ、ガニメデ、カリスト）の位置関係 (<https://www.neomag.jp/mailmagazines/topics/letter201812.html>)

こっていることが広く知られるようになった(図2). 太陽系天体の中で溶岩の噴出する現象を活火山と定義するならば, その存在が明確に確認されているのは今のところ地球とイオのみである[2]. イオの溶岩の温度は900 Kになっている場所もあり, 真空下での硫黄の沸点(715 K)よりも大きい. このことが珪酸塩(シリケート)の火山活動が起こっている強い証拠となっている[3]. 一方で太陽から木星までの距離はおよそ5 AU(天文単位)離れているため, 火山噴火の起こっている場所以外の表面温度は昼面でも120 K程度である.

イオの大気の柱密度は昼面でも 10^{16} – 10^{17} cm $^{-2}$ 程度で非常に希薄であり, 大気の90%程度は二酸化硫黄(SO $_2$)である. イオの表面温度 T_{surface} と大気の飽和蒸気圧 P_{vap} には以下の関係がある[4].

$$P_{\text{vap}} = 1.516 \times 10^{13} \exp(-4510/T_{\text{surface}}) \text{ (Pa)}$$

すなわち, 火山噴火によるガスの放出が起こらない限り, 太陽光の当たらない環境(夜面や極域など)ではガスが少ない. 木星からの引力が原因で起こる潮汐固定によってイオの公転周期と自転周期は同じになっている. そのため公転周期約1.77日ど

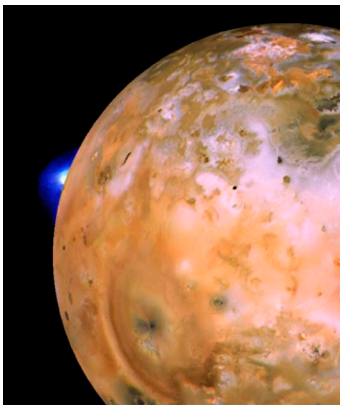


図2 Voyager 1探査機によって撮影されたイオ表面とLokiで起こった火山噴火の様子(NASA/JPL/USGS [7])

との昼夜のサイクルがあり, 表面の二酸化硫黄の霜の昇華と凝縮が繰り返される. 他の大気成分は太陽光や電子衝突によって解離した一酸化硫黄(SO)や二硫黄(S $_2$), 酸素(O)・硫黄(S)原子であり, 塩化ナトリウム(NaCl)や塩化カリウム(KCl)も微量に含んでいる. 非常に乾燥した環境であり, 水素(H)原子や水素を含んだ分子はこれまで観測されていない. このことからイオの水は大昔の枯渇したのだと想像できる(一方でエウロパ, ガニメデ, カリストの表面はすべて主に水の氷で覆われている). レビュー[5]によるとこれまでにイオの大気で発見されていない分子として一酸化炭素(CO), 硫化水素(H $_2$ S), OCS, 一酸化二硫黄(S $_2$ O), ClO, CS, 水酸化ナトリウム(NaOH)が挙げられている. 地殻に含まれているはずのCやNを含む分子が発見されていないのは驚きである. 最近ではALMA(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)電波望遠鏡で同位体 $^{34}\text{SO}_2$ や Na^{37}Cl のスペクトルマップが得られたことが話題になっている[6]. 研究チームの観測結果と詳細なモデリングによりイオ表層の硫黄と塩素の同位体比が求められ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}=0.0595 \pm 0.0038$, $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}=0.403 \pm 0.028$), 火山噴火による質量放出が45.7億年の歴史の大部分で起こっていることが推定された.

図3はイオの大気がどのように散逸するかを簡単に表したものである. 上層大気では主にトーラスイオン(イオ軌道周辺に分布するイオン)がイオ周辺の中性粒子と衝突し, それが他の中性粒子と衝突する過程(大気スパッタリング)が起こっている. この大気スパッタリングと熱散逸によってイオの大気からの散逸速度分布が決まっている[8]. 外気圏の原子のうち, 脱出速度(~ 2 km/s)を超えたものがイオ重力圏であるイオコロナ(地表から約5.8イオ半径(R_{Io})の範囲)を脱出し, 木星を取り囲むようにイオ軌道周辺を周回する. 散逸した酸素・硫黄原子は, イオンや電子との相互作用によって電離し, イオプラズマトーラスの

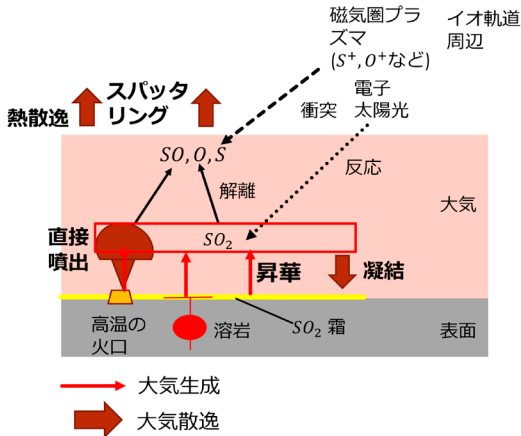


図3 イオの大気散逸過程を示す概略図。実際にはこの他にも散逸パス(例えばイオ近傍でSO₂⁺になる、SO₂のままイオ軌道まで飛来してから解離するなど)が存在する。

形成に寄与する。

イオの大気の観測は紫外、可視、赤外、サブミリ波といった多波長で行うことが可能である。しかし、当然ながら基本的にイオから離れるほどガスの密度が小さくなるため、観測の手段が限られるようになる。ひさきの打ち上げ以前では、中性酸素のトラスの観測は紫外線と可視の観測が数例報告されているのみであり(例えば[9])、そのどれもトラスの一部分の光の総量を観測したに過ぎなかった。イオから流出するガスは毎秒1トンに及び、木星磁気圏内のプラズマの質量の9割を担う主要なプラズマ源となっている。また、イオ由来のプラズマが他のガリレオ衛星の表面まで飛来して、スパッタリングや化学反応を起こしている。このため、イオからの大気の流出過程の明らかにすることは他のガリレオ衛星大気を理解する上でも重要である。

イオの大気生成の主な要因は、地表の霜の昇華なのか、それとも火山からの直接供給なのかは、数十年前から議論されてきた。近年は、主にハッブル宇宙望遠鏡による紫外線観測や地上中間赤外観測、電波観測によって少なくとも通常時は昇華大気がメインであるという証拠が積み重なってい

る。例えば過去の赤外観測はイオが木星の陰に入る食の時期に、地表の温度低下によって大気が急速に崩壊する現象を明らかにした[10]。火口からの直接噴出の寄与が大きい場合は地表面温度が低下しても供給が持続するため、大気の崩壊は起こりにくい。しかし、次に示すようにイオ起源の中性ガスの大規模な変動がこれまでに観測されており、筆者たちはこの現象は火山噴火によるガスの供給が一時的に大きくならなければ説明がつかないだろうと考えている。

2. イオからの散逸ガス増大イベントと火山噴火の対応関係

これまでの研究では主にイオ起源の塩化ナトリウムやNaCl⁺が解離してできたナトリウム(Na)原子の発光を地上観測することで大気散逸ガスの変動を明らかにしようとした。大きな理由としては次の二つが挙げられる。一つ目は地上観測によって火山活動を示すイオからの赤外熱放射量とナトリウム原子の発光量に相関があることがわかったからである[11]。二つ目は酸素や硫黄の原子の発光は暗いのに対し、ナトリウム原子は可視光の589.0 nm, 589.6 nmにおける共鳴散乱断面積が大きく、とても明るく発光することである。これにより、天候さえよければ地上から長期間連続観測することが可能である。東北大学では長年イオから散逸して遠方に広がったナトリウム原子発光の地上観測を継続的に行っており、最近でも米田瑞生氏によってナトリウム雲の突発現象の観測結果が報告されている[12]。しかし、外気圏大気の大部分を占める酸素や硫黄原子の発光の連続的な地上観測が困難であるため、これらの振る舞いについて観測的なアプローチはされてこなかった。

惑星分光観測衛星ひさきは惑星電離圏・磁気圏の変動する姿を連続観測により明らかにすることを目的として開発され、2013年9月に打ちあがった。特に木星磁気圏は重要なターゲットであり、

木星のオーロラとイオプラズマトーラスを同時に紫外線分光観測ができるように設計された。これらの遠紫外線の発光は地球大気で吸収されるため、地上観測でとらえることはできない。ひさきの広い視野と長時間の連続観測のおかげで、当初想定されていたイオトーラスのプラズマの発光の時空間変動だけでなく、酸素原子発光の時空間変動も観測された。

ひさきの1回目の木星系の連続観測の期間では大規模なイオプラズマトーラスの変動は起こらなかった(表1)。ひさきの2回目の連続観測は2014年11月から始まった。解析チームによると、2015年1月10日を過ぎたところからだんだんとイオプラズマトーラスの明るさが増していき、1月30日には、この明るさの増加ははっきりとしたものになったようだ。ひさきチーム内でもこれが機器の不具合や人工的なものではなく、本物の自然現象を捉えていると信じられるようになった[13]。筆者はイオの大気変動に関心があったため、ひさきのデータを用いてイオを中心として木星半径程度の範囲に限定して、2013年から2015年の観測データ(表1)から130.4 nm酸素原子の変動を解析した。イオ本体と同程度に範囲を小さくすることができないのは、ひさきの空間分解能に制約があるためである。OI 130.4 nmはイオ軌道では太陽光による共鳴散乱(太陽からの紫外線が原子のエネルギー準位と一致するとき、その光子を吸収すること)の直後原子が光を再放出する過程と電子衝突による励起後に安定した基底状態に戻る際に光を放出する過程の両方が存在する。ひさきに搭載された分光器の検出器には太陽共鳴

散乱で光る地球外気圏の酸素原子による発光や放射線からの高エネルギー粒子によるノイズも存在した。そのためこれらのノイズを排除するため、太陽の光が当たらない衛星が地球の陰に入っているデータのみに制限し、イオトーラスの観測データをキャリブレーション用に木星から数分角外した場所を観測したデータで差分した。

図4は2014年11月下旬から2015年5月上旬にひさきによって観測されたイオ周辺の酸素原子発光の変動[15]と、同時期にハワイ・ハレアカラ山頂の望遠鏡で地上観測されたイオ起源のナトリウム発光の変動[16]を表している。この図で表されている面輝度の単位Rayleigh(以下Rと表記)は惑星科学の分野で広く用いられているものであり、 $1R=10^6/4\pi \text{ photons cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$ である。酸素原子の発光がナトリウム発光から推定される火山活動が静穏な時(2014年11月-12月=Day of year(DOY)-50-0)と比べて、活発な時(2015年2月=DOY 30-60)は2-3倍明るくなったことが分かる。これはイオ周辺の酸素原子量が増大し

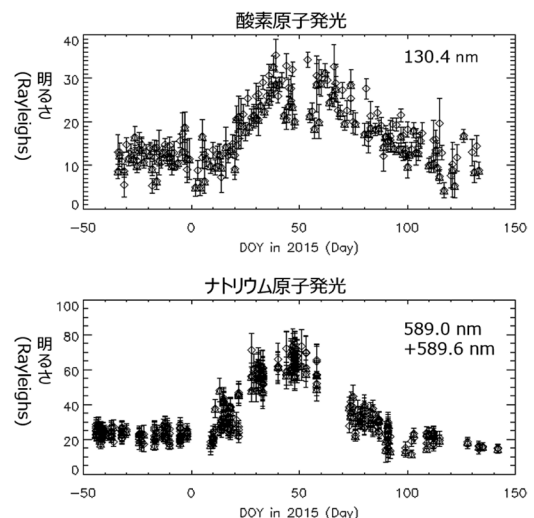


図4 2014年11月-2015年5月の間に観測されたイオ周辺の酸素原子発光の面輝度の変動(上)とイオ起源のナトリウム原子発光の面輝度の変化(下)。横軸は2015年1月1日からの経過日を表している。

表1 ひさきデータ解析期間の概要

期間	酸素原子発の 面輝度	主な火山の 熱放射 [14]
2013/11-2014/4	静穏	(特になし)
2014/11-2014/12	静穏	Loki (311°W, 10°N)
2015/1-2015/5	活発	Kurdalagon (221°W, 49°S)

ていることを示している．先行研究ではナトリウムの変動に対応するようにイオトーラスの硫黄イオンの変動する様子が観測されている [17, 18]．ひさきの酸素原子発光の観測結果は先行研究よりも火山噴火によってイオからの大気散逸の量が増大する現象に迫っている．

酸素原子発光とナトリウム発光の変動を比較したとき，酸素原子発光の面輝度のピークが平穏時の明るさに戻るまでの期間がナトリウム原子発光と比べて長いことがわかる．もし，火山活動が低下することで火口の温度が徐々に低下するならば，それに伴って火山から大気へのガスの供給量も徐々に減少するだろう．解析当初はこの供給量の減少する早さが二酸化硫黄と塩化ナトリウムで異なるかもしれないと考えた（図5）．塩化ナトリウムは昇華温度が高い（ 10^{-12} bar の環境下で 650 K [19]）ため，高温の火口からの噴出が静まるとすぐに供給量が減る．一方，二酸化硫黄は昇華温度が低いいため，高温の火口の噴出物のみならず，より低温の溶岩によるイオ表面の昇華（蒸発）によって，供給が持続すると思われる．実際には酸素原子発光は衝突するイオトーラスの電子の密度・温度変化の影響を受けた可能性もあるため，この仮説が必ずしも正しいとは限らない．しかし，この考察はその後の筆者のイオ大気の ALMA 観測プロポーザル提出やアーカイブデータ解析の研究 [20] に強いモチベーションを与えた．

また，散逸した酸素原子発光の増大が始まる

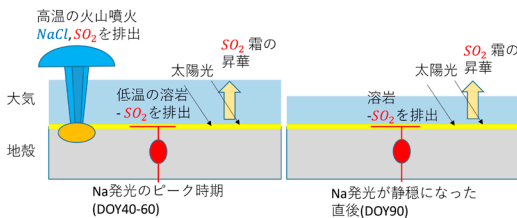


図5 筆者が想像した2015年2月の火山噴火活発イベント時（左）とその30日後（右）のSO₂とNaClガスの生成過程の様子。

2015年1月下旬に，イオのKurdalagon Pateraとよばれる火山地帯において赤外熱放射量（3.8 μm ）の増大が観測された [21]．同じ場所で4月にも赤外放射量の増大が見られたが，ひさきでは対応するイオ周辺の酸素原子発光の大規模な増大は見られなかった．意外なことに最大級の規模の火山地帯であるLoki Pateraでは赤外放射量が12月に最大になったが，この時期は中性酸素原子の発光の強度の変化はほぼ見られなかった．これらの結果は火山活動の熱放射のイベントによってガスの放出を伴う場合と伴わない場合が存在することを示唆している．最近ではKeck望遠鏡の観測によってLokiの火口の熱放射量と高温のSOの禁制遷移（ $a^1\Delta X^3\Delta^-$ 1.9 μm ）の発光強度に相関がみられないことが示されている [22]．そのため，前述した火山の赤外放射とイオから散逸したナトリウム雲の相関関係も疑問視する見方がある．

3. イオ中性トーラスの空間分布

3.1 ひさきによる中性酸素トーラス分布の初観測

筆者は文献調査や関係者との議論を通じて，これまで中性トーラスの構造がナトリウム原子を除けば観測的に確かめられていないことを知った．そこでひさきが観測した酸素原子発光の経度・動径分布を詳細に解析したところ，酸素原子の空間分布を推定することができた [23, 24]．まずイオがひさきの分光器のスリット上でどのように動くかを簡単に説明しよう（図6）．イオ位相角（phase angle）は地球から木星に向かうベクトルと，木星からイオに向かうベクトルの成す角で，木星を北から見て反時計回りに定義される．望遠鏡から見ると位相角が0°のとき，地球-木星-イオの順に一直線に並ぶ．イオはまずdawn側（夜明け側）に移動し，90°を過ぎたところで引き返して，木星の前を通り過ぎる．その後dusk側（夕暮れ側）に移動して，270°のところでまた引き返して木星の場所に戻る．これを公転周期（おおよそ1.77日）ごとに繰り返すのである．

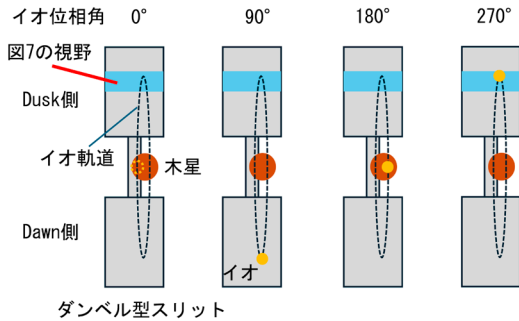


図6 イオの位相角と分光器のスリット内での位置の対応関係。イオは公転周期でdawn側とdusk側を行き来する。dawn側とdusk側は観測時期によって上下が反転する。

筆者はまず面輝度の変動が少ない（静穏な）時期の2024年12月データを使ってdawn側とdusk側の木星から5-6 R_J 、6-7 R_J の発光の面輝度がイオの位相角によってどう変化するかを検証した。この文章内では理解しやすくするためdusk側の5-6 R_J の範囲に絞って説明する（図7）。上図を見るとイオが視野に近い位相角270°付近では15-20 Rと面輝度が大きく、視野から遠くにいる0-180°では4-6 R程度で比較的同じくらいであることがわかる。下図のように酸素原子の密度の濃い領域がイオ周辺に広がり、密度の薄い領域がイオ軌道周辺に沿って分布しているとこの観測結果と整合的である。特に濃い領域の形状はナトリウムの地上観測でも見られており、論文によってはバナナの形をしていることから“banana cloud”と呼ばれている（例えば[25]）。先行研究の数値シミュレーションが出した結果[3]ではイオ付近の領域に対して、イオの反対側（例えばイオが位相角90°にいるときのdusk側5-6 R_J の範囲）の柱密度は十分の一程度になっていたもので、ひさきでこのようにほぼ均一にトラス状に広がっている分布が観測されたのは驚きである。dawn側も似たような酸素原子発光の面輝度のイオ位相角依存性が確認された。しかし、イオが視野に入っている時の面輝度はdawn側よりdusk側の方が大きかった。これは原子に衝突するイオトラスの電

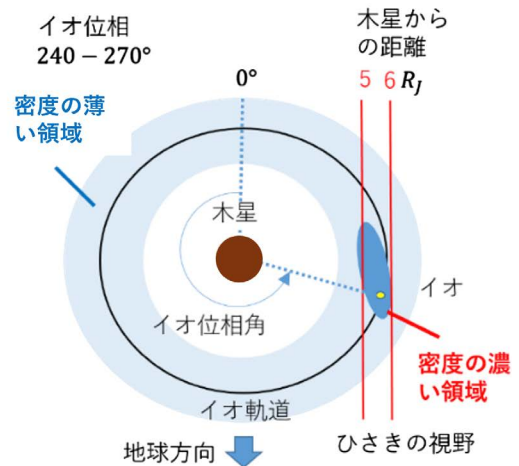
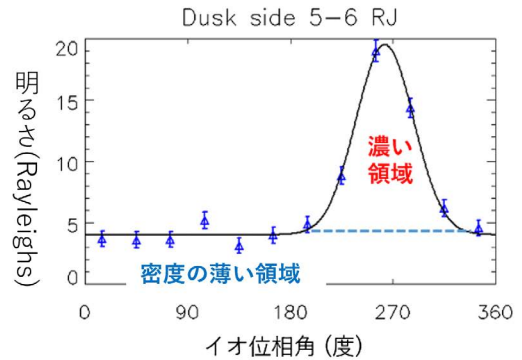


図7 2014年12月の間に観測された、木星からイオ周辺の酸素原子発光の面輝度のイオ位相ごとの面輝度の変化（上）と上図を説明可能な中性トラスの構造の概略図（下）。

子の温度がdawn側よりdusk側の方が大きいことを反映していると思われる[26]。また、酸素原子発光の動径分布を見てみるとイオ軌道より外側では、イオ軌道から離れていくほど面輝度は小さくなり、木星から7.6 R_J 以遠では発光が検出されなくなった。

次に火山活動が活発であると思われる2015年1月から4月までのデータを使って10日ごとに酸素原子発光の空間分布を解析した。その結果、イオ軌道全体で発光が明るくなる様子を捉えることができた。発光の範囲は木星から最大で8.6 R_J まで広がっていることがわかった。これはエウロパの軌道（木星からおおよそ9.4 R_J ）に近い場所であ

る。この時イオから排出された酸素原子がイオン化せずに直接エウロパに衝突している可能性があるため、通常とは異なる化学反応がエウロパ表面でも起こっていてもおかしくなさそうである。

イオトーラスの分布のより定量的な評価を行うために太陽共鳴散乱と電子衝突の発光効率を計算し、これらの発光の面輝度の分布を密度（数密度）に変換した。この情報から二つのことがわかる。一つは酸素原子と電子の衝突や電荷交換反応によってイオトーラスに酸素イオンを供給する量である。酸素原子とイオンの反応係数とこれまでに観測されたイオトーラスのイオン・電子の密度から、供給量を計算したところ火山活動が静穏な時期で460 kg/sであった（イオ軌道より内側のプラズマデータがなかったため活発期の供給量の推定はできなかった）。この情報は先月吉岡和夫氏の記事で示されたようなプラズマ診断の結果を裏付ける上で重要である。もう一つは次の章で示すようにイオからトーラスへの原子の放出過程である。

3.2 シミュレーション計算との比較

筆者は博士課程から衛星・土星磁気圏のモンテカルロシミュレーションを専門とする Johns Hopkins 大学の Howard Todd Smith 氏と共同研究を行っている。筆者はまず火山活動が静穏な時期の酸素原子発光から柱密度分布に直したデータ

を用意した。次に Smith 氏が様々な放出量や方向の条件で粒子の軌道計算を行い、得られた結果から同様に柱密度分布を計算し、上記のひさきのデータと比較した[27]。その結果従来のシミュレーション計算では前提とされていたイオから等方的に粒子が放出する条件では観測結果とモデルを合わせることができなかった。一番両者が合う条件は、粒子が木星側かつイオの進行方向に放出したケースであった。この非等方的な放出に対して十分納得できる説明はまだできていないが、原因の一つとしてイオコロナの密度が非対称的であることが挙げられる。

図8はシミュレーション計算によって得られた、北からみた中性酸素・硫黄トーラスの分布である。筆者が推測した中性酸素トーラスの構造がシミュレーションによっても再確認された。シミュレーションで予想された硫黄原子の分布の範囲が狭いのは、硫黄原子のイオン化までの life-time が酸素原子よりも短い[8]ためである。この構造が本当に正しいかどうかは将来の観測で確かめる必要がある。現在火山活動が活発な時期のひさきの観測結果とシミュレーション計算の比較を行っている。この比較がうまくいけば、中性トーラスの変動とイオからの放出粒子のパラメータの変動の対応関係がわかるかもしれない。

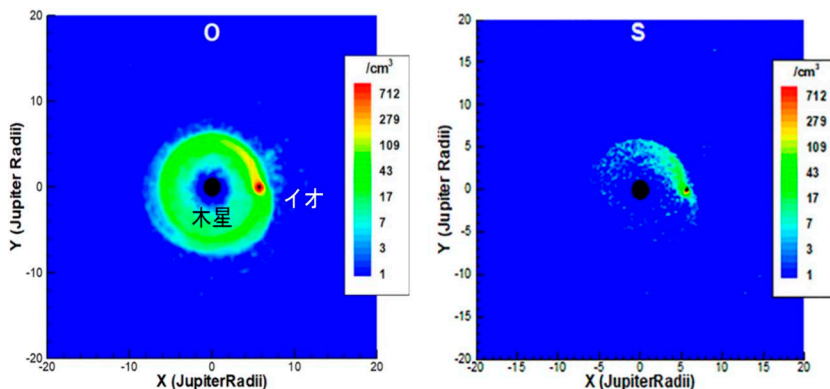


図8 数値シミュレーションによって明らかになった火山活動が静穏な時期の中性酸素（O）トーラスの数密度分布（左）と予想される中性硫黄（S）トーラスの分布（右）[22]。xy平面はイオ軌道で、この図はz軸正方向から見ている。

4. ひさきからLAPYUTAへ

ひさきの数か月におよぶ紫外線連続観測によって、今までナトリウム原子以外はシミュレーションに頼らざるを得なかったイオ的中性トーラスの時空間変動の研究が観測によっても可能であることが示された。しかし、次世代紫外線望遠鏡計画LAPYUTAで新たに将来観測すべきターゲットがいくつか追加されることになった。まず、今回イオトーラスの酸素原子発光はOI 130.4 nmしか検出できなかった。グレーティングの二次光がなければOI 135.6 nmも検出することができ、より正確な酸素原子の密度分布が得られたであろう。また、ひさきでは観測されなかった硫黄原子の発光の分布も検出できれば、中性トーラスの原子やプラズマ供給量の総量も求められる。エウロパの中性酸素トーラスも数値シミュレーションによって存在が予想されている[28, 29]が、1Rを下回る暗い発光であるため筆者の解析では有意なシグナルを捉えることができなかった。この発光の検出は今でも東北大学で試みられているが、詳細な構造を明らかにするのはLAPYUTAの役目となるだろう。

ひさきが観測した2015年のイオ中性酸素トーラスの増大イベントは火山噴火によるガス放出量の増加と関係していると思われるが、その両者のつながりを示す決定的な証拠は得られていない。実際に、筆者の筆頭論文[24]の査読でも、イオ中性トーラスの変動が火山噴火によるものであるという根拠が乏しいのではないかという指摘もあった。紫外線望遠鏡の空間分解能が0.1"あれば、イオの大気・コロナの分布を十分に捉えることができる。もし大気・コロナと中性トーラスを同時期に連続観測することができれば、火山噴火によるガス放出が起こってからイオ軌道全体に広がるまでの過程を詳細に明らかにすることができるだろう。

謝 辞

この記事は筆者の博士論文及び論文[15, 23, 24, 27], 記事[30]の内容を基に執筆しました。データ解析および元論文の執筆には指導教員の坂野井健氏、土屋史紀氏をはじめとしたひさきチームの皆様および東北大学惑星プラズマ・大気研究センター(PPARC)の皆様の世話になりました。論文の共著者になっていたいただいたFran Bagenal氏、Todd Smith氏には貴重なアドバイスをいただきました。この研究は科研費JP19J10742, JP20KK0074, JP21J00734の支援を受けて行われました。

参考文献

- [1] ガリレオ・ガリレイ, 2017, 星界の報告, (講談社)
- [2] https://www.stp.isas.jaxa.jp/venus/sci_volcano.html (2025.3.10)
- [3] Johnson, T. V., et al., 1988, *Science*, 242, 1280
- [4] Wagman, D. D., 1979, Sublimation pressure and the enthalpy of SO₂. *Chem. Thermodyn. Data Cent.*, Natl. Bur. of Stand., Washington, DC
- [5] Lellouch, E., et al., 2006, in *Io After Galileo*, eds. Lopes, R. M. C., & Spencer, J.R., (Springer, Berlin), 231
- [6] de Kleer, K., et al., 2024, *Science*, 384, 6696, 682
- [7] https://www.nasa.gov/mission_pages/voyager/multimedia/pia00010.html (2025.3.10)
- [8] Smyth, W. H., & Marconi, M. L., 2003, *Icarus*, 166 (1), 85
- [9] Durrance, S. T., 1983, *ApJ*, 267, 125
- [10] Tsang, C. C. C., et al., 2016, *J. Geophys. Res.: Planets*, 121, 8, 1400
- [11] Mendillo, M., et al., 2004, *Icarus*, 170, 430–442.
- [12] Yonda, M., et al., 2025, *Icarus*, 425, 116301
- [13] 吉川一朗, 特集: 惑星分光観測衛星「ひさき」3. イオの火山爆発とイオプラズマトーラス, オーロラの関係, *ISASニュース* 2018年2月号 (No. 443).
- [14] de Kleer, K., & de Pater, I., 2016, *Icarus*, 317, 104
- [15] Koga, R., et al., 2018, *Icarus*, 299, 300
- [16] Yoneda, M., et al., 2015, *Icarus*, 261, 31
- [17] Brown, M. E., & Bouchez, A. H., 1997, *Science*, 278, 268
- [18] Yoneda, M., et al., 2010, *GRL*, 37, 11202
- [19] Ewing, C. T., & Stern, K. H., 1974, *J. Phys. Chem*, 78, 1998
- [20] Koga, R., et al., 2021, *ApJ*, 907, L6.
- [21] de Kleer, K & de Peter, I., 2016, *Icarus*, 280, 378
- [22] de Kleer, K., et al., 2019, *Icarus*, 317, 104
- [23] Koga, R., et al., 2018, *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 123, 3764

- [24] Koga, R., et al., 2019, J. Geophys. Res.: Space Physics, 124, 10318
- [25] Mendillo, M., et al., 2007, Nature, 448, 330
- [26] Yoshioka, K., et al., 2014, Science, 345, 1581
- [27] Smith, H. T., et al., 2022, J. Geophys. Res.: Space Physics, 127, 8, e2022JA030581
- [28] Smyth, W. H., & Marconi, M. L., 2006, Icarus, 181, 510
- [29] Smith, H. T., et al., 2019, ApJ, 871, 69
- [30] 古賀亮一, 特集: 惑星分光観測衛星「ひさき7. 火山活動に伴う衛星イオ大気の変動, ISASニュース2018年2月号 (No. 443)

Io's Volcanism and Neutral Oxygen Torus

Ryoichi KOGA

*Nagoya City University, 3-1 Tanabe-dori,
Mizuho-ku, Nagoya, Aichi 467-8603, Japan*

Abstract: Jupiter's moon Io is the most volcanically active body in the solar system. It has been debated for decades whether the main source of atmospheric generation on Io is sublimation of frost on the surface or direct supply from volcanoes. However, large-scale fluctuations in neutral gas and plasma originating from Io have been observed, and it would be difficult to explain this phenomenon by anything other than a temporarily larger supply of gas from volcanic eruptions. This article describes the atmospheric production and escape of Io. And then, I present the results of the spatio-temporal variability of Io's neutral oxygen torus, which was first observed by the Hisaki UV space telescope, and the subsequent developments and future works.