

ひさき衛星によるイオプラズマトーラスの観測



吉岡和夫

〈東京大学大学院新領域創成科学研究科 〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉
e-mail: kazuo.yoshioka@edu.k.u-tokyo.ac.jp

木星の磁気圏は、衛星イオの火山活動で放出されたプラズマとの相互作用を通して太陽系最大の粒子加速器として機能しています。また、これらの火山プラズマは木星の周囲にトーラス状に分布し（イオプラズマトーラス）、粒子加速に関わる様々な物理素過程の現場になっていると考えられてきました。2013年に打ち上げられたひさき衛星が取得した木星周辺の極端紫外スペクトルは、イオプラズマトーラスにおけるイオン組成や電子密度、温度分布など様々なパラメータの遠隔的な導出を可能にしました。その結果、イオプラズマトーラス内では遠心力駆動の不安定性により磁気圏内部に高温電子を侵入させていることが明らかになりました。本稿ではこれらの研究成果に加え、その解析を実現するための観測装置の工夫と解析手法についてもご紹介します。

1. 木星磁気圏と粒子加速

宇宙空間に遍く存在するプラズマは電磁場から影響を受けます。逆にプラズマの運動自体も電磁場に影響を与えます。またほとんどの場合プラズマは極めて希薄で互いの衝突がなく、粒子エネルギーを一定の範囲内に留めることができません。その結果、一部の粒子が極めて高いエネルギーを獲得できるようになります。我々が知る宇宙の高エネルギー粒子（宇宙線）は、星が一生の最後に起こす「超新星爆発」に伴う衝撃波で加速されたと考えられています。また、太陽大気であるコロナ中でも爆発現象を通して粒子の加速が起こり、それらの飛来により惑星周辺の宇宙環境を変動させています。

我々の太陽系は、太陽から噴出されるプラズマ（太陽風）で満たされています。一方、地球や木星は強大な磁場を持っています。これらの磁力線はプラズマを捕らえることができるので、太陽風

から見ると障害物です。こうして起こる太陽風と惑星磁場の衝突が、惑星周辺に「磁気圏」と呼ばれる領域を作ります。磁気圏の中は太陽風プラズマで変形された惑星磁力線と、太陽風や惑星大気に起源をもつプラズマで満たされています。地球を含めて数ある磁化惑星の中でも、木星の磁気圏は磁場が非常に強いこと、周期10時間という高速自転と共に磁力線も回転していること、衛星イオの火山から出たガスが高密度プラズマとして木星周辺を漂っていること、の3つの大きな特徴を持っています。

木星近傍の磁力線は太陽からの影響をほとんど受けず、惑星磁場本来の双極子に近い形状をしており（図1）、この領域を内部磁気圏と呼ばれています。一方、木星からある程度離れた領域では自転の遠心力で磁力線が引き延ばされます。ここでは磁力線が柔軟に変形できるため、通常は交錯し得ない磁力線同士が衝突・結合します（この現象を磁気リコネクションと呼びます）。その結果、

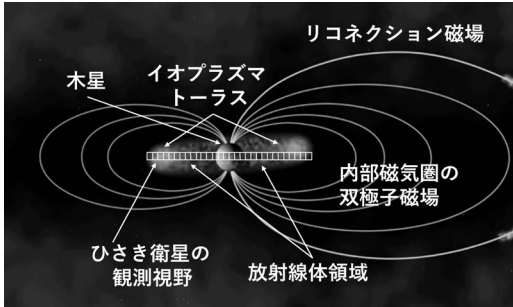


図1 木星磁気圏の概要。木星の内部磁気圏はイオプラズマトーラスで囲まれており、さらにその周りを強固な内部磁気圏磁場が取り囲んでいる。遠くに引き伸ばされた磁力線はリコネクションを引き起こし、数10 keVの高エネルギー電子を生み出す。ひさき衛星の観測視野(360秒角)はイオプラズマトーラスの観測に最適化されている。

引き伸ばされたゴムのようにエネルギーを蓄えた磁力線がプラズマ粒子に運動エネルギーを与え、約10 keVの高エネルギー電子が作られます。

ところで、磁場の強い領域へプラズマが侵入すると電磁波が生じ、さらにこの波によって電子はさらに加速されます[1]。また「磁場強度と粒子の運動エネルギーの比(断熱不変量)は一定を保つ」というプラズマの性質を考慮すると、もし非常に磁場強度の高い木星内部磁気圏にプラズマが侵入できれば、特に大きな加速が期待できます。さらに、内部磁気圏の双極子磁場はプラズマにとってバリアのように振る舞いこれらを捕らえるため、木星の近傍では高エネルギー粒子を溜め込めるはずですが、このようにして高エネルギー粒子が捕獲された領域を放射線帯と呼びます。磁化惑星はもれなく放射線帯を保持しています(図1)。しかしその生成過程は惑星固有の環境により異なると考えられており、宇宙空間物理学の重要な研究テーマです。木星の場合、放射線帯の電子エネルギーは50 MeVにも達します[2]。すなわち木星は太陽系における最大・最強レベルの粒子加速器として働いているのです[3]。

さて、「強い磁場はバリアのように振る舞いプラ

ズマを捕らえる」と書きました。これは逆に言えば、「プラズマの侵入が容易でない」ことを意味します。つまり放射線帯粒子の加速メカニズムを理解する上での関門は、本当に「内部磁気圏への電子の侵入」が定常的に起きているのか、という疑問でした。我々はひさき衛星のデータを用いて世界で初めてその証拠をつかむことに成功しました。その鍵は衛星イオでした。

2. イオトーラスとスペクトル診断

2.1 衛星イオとプラズマトーラス

木星の内部磁気圏に位置する衛星イオでは、木星からの潮汐作用の影響により太陽系で最も激しい火山活動が起きており、その火山ガスはイオの重力を振り切り宇宙空間に達します。またこれらのガスは、宇宙空間で太陽紫外線の影響や周囲のプラズマとの衝突を介してイオン化します。その結果イオは毎秒1トンものプラズマ供給源の役目を果たしています。

ところでイオの公転速度は17 km/sです。一方イオ軌道(木星から5.9倍木星半径離れた円軌道)での木星磁場の回転速度は71 km/sもあります。つまり、ひとたびイオン化した火山ガスは、相対的に54 km/sでイオを追い越していく磁力線に捕らえられて加速されます。こうして木星磁場に捕捉されたプラズマは、イオの軌道に沿ってドーナツ状に木星を取り囲みます。これをイオプラズマトーラスと呼びます。

2.2 スペクトル診断

イオンや原子、分子は原子核の電子配置で決まる固有波長の光(輝線)を発します。ただし、輝線発光には太陽光共鳴や粒子との衝突により軌道電子のエネルギー準位を上げる(励起する)必要があります。高密度プラズマで満たされたイオプラズマトーラスでは、イオンと電子の衝突が頻繁に起こり、様々な輝線が発せられています。この輝線が木星内部磁気圏を探るための重要な指標になります。

輝線強度はイオン密度(正確にはコラム密度)

に依存します。さらに電子衝突励起による発光の場合は、イオン密度に加えて励起させる側の電子の温度分布や密度の情報も含まれます。ここでの鍵は、特定の種類のイオンが複数の輝線を同時に発するという事です。どの輝線が光りやすい、または光りにくいのかといった条件は、衝突電子の温度分布と密度で決まります。したがって複数の輝線の同時観測から、それ自体は発光することのない衝突電子の温度分布や密度を導出できるのです。大雑把に例えると、同じ密度の同種のイオンがあった時に、周囲の電子温度が高いほど短い波長の（すなわちエネルギーが高い）輝線が相対的に強くなり、電子温度が低いほど長い波長の（すなわちエネルギーが低い）輝線が強くなる、といった具合です（図2）。この手法はスペクトル診断とよばれ、空間構造の把握に長けた遠隔観測を通して電子やイオンの温度・密度を導出できるという大きなメリットがあります [4-8]。

なお、イオプラズマトーラスの主成分である硫黄イオンの輝線の多くは極端紫外と呼ばれる領域（波長50-150 nm）にあります。したがってこの波長帯における高分解能分光観測が、木星内部磁気圏の電子温度や密度分布の導出のために必要とされ、我々が待ち望んでいたものでした。ひさき

衛星は、装置や視野の設計（図1）から観測運用計画まで、まさにこのような観測を主目的の一つとして開発されました。

3. ひさき衛星の観測成果

3.1 ひさき衛星の特徴

高精度な極端紫外分光観測は容易ではありません。まず克服すべき課題は光学系の効率が低いという点です。極端紫外光は可視光に比べてエネルギーが高く鏡の表面奥深くまで侵入するため反射率が低くなりがちです。また、地球大気に完全に吸収されてしまうため、観測するためには宇宙空間まで出なければならず、十分な光量を得るための装置の大型化には不向きです。そのため、これまでスペクトル診断に適したデータはほとんど得られていませんでした。そこで開発チームは次の様な工夫をしました。

- 鏡の表面に高純度炭化珪素を化学蒸着し、さらに高精度に研磨することで反射率を向上させた。
- 主鏡と同じ高反射率鏡に対して、1 mmあたり1800本の割合で溝を掘り、高効率回折格子（分光素子）として用いた。
- 感度劣化を防ぐために検出器を常に真空保管するシステムを作り、打ち上げ直前まで真空引き

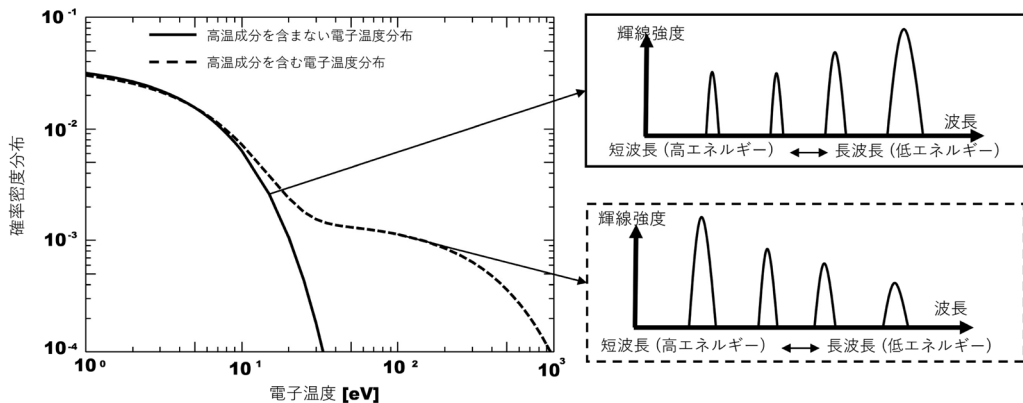


図2 スペクトル診断の原理。硫黄や酸素のイオン (S^+ , S^{++} , S^{+++} , O^+ など) は極端紫外領域に多くの輝線をもつ。輝線強度から導出できるイオン組成比に加えて、励起源である電子温度分布によってイオンが発する輝線強度比が変わる。この性質を使って、輝線強度比から電子温度分布を導出することができる。

を続けた。

- ・観測機が捉えた惑星像の位置情報を姿勢制御系にフィードバックすることで長時間にわたる高精度の指向安定性を実現した。

これらの工夫の結果、ひさき衛星の極端紫外分光器は従来のものと比べて数倍高い感度とスペクトル診断に適した高波長分解能（半値全幅約0.3 nm）を実現しました（図3）。これらの革新的技術に加えて、ひさき衛星が惑星専用の宇宙望遠鏡であり、同じ対象を長時間継続的に観測できるという点も優れたデータを得られた要因のひとつでした [9-11]。

3.2 ひさき衛星が取得したデータの解析

ひさき衛星が捉えたイオプラズマトーラスの極端紫外データに対して前述のスペクトル診断を適用した結果、当初の目論見通り、イオンの密度や電子温度分布を導出することに成功しました（図4）。さらにこの解析を空間方向に拡張して、プラズマパラメタの空間構造を導出することもできました（図5上）。その結果、外部磁気圏由来

と考えられる高温電子が徐々にその密度を減らしつつも、内部磁気圏の中にまで入り込んでいるという事実を世界で初めて突き止めました [12]。

なお、このとき導出されたプラズマのパラメタ（電子密度： $\sim 1000 \text{ cc}^{-1}$ 、背景電子温度： $\sim 5 \text{ eV}$ 、硫黄イオン密度： $50\text{--}500 \text{ cc}^{-1}$ ）は、ボイジャー探査機やガリレオ衛星が木星近傍で測定した値（その場観測）とよく整合しており、遠隔観測（スペクトル診断）によるプラズマパラメタ導出の意義を再確認することができました。

イオプラズマトーラス近傍の磁力線とプラズマは、木星の高速自転と共に回転しており強い遠心力（木星から離れる向きの力）が働いています。一方、トーラス中のプラズマは、イオの公転軌道を極大として非常に高密度な分布を形成していますが、そこから外側に遠ざかるにつれて密度は下がります。つまり、トーラスを構成するプラズマには外向きの遠心力が働いているにもかかわらず、内側ほど重いガスがある状態になっているのです。

これは、重力が働く中で、重い流体が軽い流体

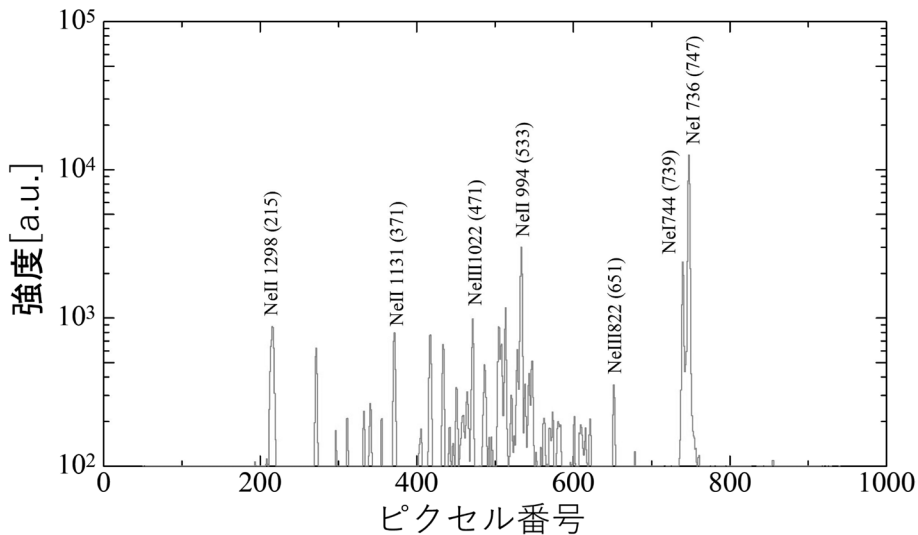


図3 ひさき衛星打ち上げ前の最終校正試験で取得したネオンガスの極端紫外スペクトル。横軸は波長ではなく検出器のピクセル番号となっている（この実験で取得した情報をもとに、ピクセル番号と波長の物理変換を行う）。また図中に示されている数字は、原子輝線データベースに記載されている波長（Å）と、その輝線の極大値に該当するピクセルの番号である。

の上に乗っている状況と似ています。そのような状態では軽いものは上へ、重いものは下へと移動し、複雑な対流現象（不安定性）を引き起こします。このような考えに基づくと、イオプラズマトーラスとその外側の領域の間では（重力の代わりに）遠心力が駆動する不安定性がプラズマの流

れを引き起こしているのではないかと、という予想が成り立ちます。ひさき衛星のデータから導かれた高温電子の分布は、このような対流が駆動する高速輸送を仮定すると、とてもよくつじつまが合うものでした。この結果は言い換えれば、高密度なイオプラズマトーラスがあるからこそ（つまり、イオがあるからこそ）、強力な磁場のバリアを破るほどの大規模な対流（不安定性）が誘発されるということを示唆します。こうして侵入した高温電子は、さらに効率よく電子を加速する電磁波動現象を引き起こし、結果的に太陽系最強の木星放射線帯が形成・維持されている、と考えることができます。

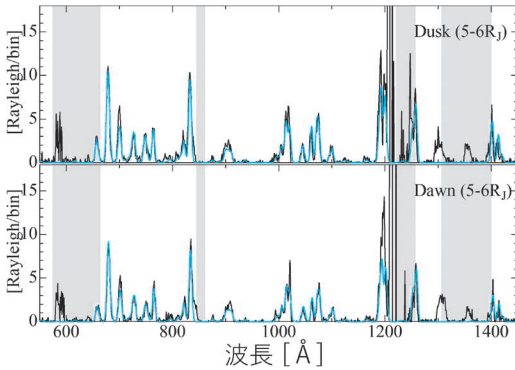


図4 ひさきが取得したイオプラズマトーラスの極端紫外スペクトル（黒）と、スペクトル診断によって最適パラメータを決定したときのモデルスペクトル（青）。木星の夕側（Dusk）と朝側（Dawn）をそれぞれ分離して示している（本稿では触れないが、高温電子分布のDawn/dusk非対称性に関する議論も展開されている[13]）。灰色のハッチ領域は、地球大気の影響（ジオコロナ）によるコンタミネーションが無視できないため、解析から除外している。

4. まとめ

これまで述べたように、木星周辺の磁気圏は、太陽系最強レベルの高エネルギー粒子の加速機構になっています。ひさき衛星は、その加速メカニズムの謎に対して衛星イオの火山噴出物が作り出す輝線を用いた極端紫外光のスペクトル診断という手法を通して迫りました。

本稿で紹介したスナップショット的なひさき衛星データ解析に加えて、長期観測を通じたイオ火

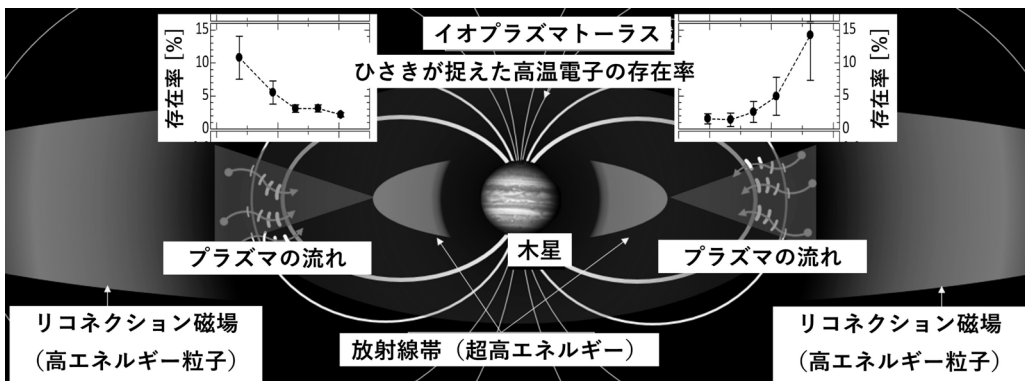


図5 ひさきの観測により明らかになったイオプラズマトーラス内部の高温電子密度。イオン密度の高いイオプラズマトーラス内でこの電子温度分布（勾配）を維持するためには、強力な磁場のバリアに逆らって外部磁気圏に由来する高温電子を継続的に内側（木星側）に向けて輸送する必要がある。なお、高温電子密度は電子温度分布関数に2温度成分（約5 eVの背景電子と、約300 keVの高温電子）を仮定し、スペクトルフィッティングで求まる最適な相対密度として導出している。

山活動の変動に伴うプラズマダイナミクスの変動など、興味深い物理現象がたくさん報告されています [14, 15]. さらに, Juno 探査機による直接探査との協調観測を通じたより詳細なプラズマ密度や温度分布の成り立ちなどについても研究は進んでおり, おもしろい報告ができていると思います.

参考文献

- [1] Horne, R., et al., 2008, *Nature Phys.*, 4, 301
- [2] Ezo, Y., et al., 2010, *ApJ*, 709, L178
- [3] Bolton, S., et al., 2004, in *Jupiter* (Cambridge Univ. Press)
- [4] Shemansky D. and Smith G., 1981, *J. Geophys. Res.*, 86, 9179
- [5] Hall, D., et al., 1994, *ApJ*, 426, L51
- [6] Feldman, P., et al., 2004, *ApJ*, 601, 583
- [7] Steffl, A., et al., 2004, *Icarus*, 172, 91
- [8] Yoshioka, K., et al., 2017, *J. Geophys. Res.*, 122, 2999
- [9] Yoshioka, K., et al., 2013, *Planet. Space Sci.*, 85, 250
- [10] Yamazaki, A., et al., 2014, *Space Sci. Rev.*, 184, 237
- [11] Yoshikawa, I., et al., 2014, *Space Sci. Rev.*, 184, 259
- [12] Yoshioka, K., et al., 2014, *Science*, 345, 1581
- [13] Hikida, R., et al., 2020, *J. Geophys. Res.*, 125, e2019JA027100
- [14] Tsuchiya F., et al., 2018, *J. Geophys. Res.*, 123, 6514
- [15] Yoshioka, K., et al., 2018, *Geophys. Res. Lett.*, 45, 10,193

Io Plasma Torus observation by Hisaki

Kazuo YOSHIOKA

*Department of Complexity Science and Engineering,
Graduate School of Frontier Sciences, The University
of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba
277-8561, Japan*

Abstract: Jupiter's magnetosphere is the largest particle accelerator in the solar system through interactions with plasma released by volcanic activity on its moon Io. This plasma forms a toroidal distribution around Jupiter, known as the Io Plasma Torus, which is considered as a key site for various physical processes related to particle acceleration. Observations in the extreme ultraviolet spectrum by the "Hisaki" satellite remotely derived parameters such as electron temperature and density in the Io Plasma Torus. These findings revealed that high-energy electrons penetrate the magnetosphere due to centrifugal instabilities within the torus.