

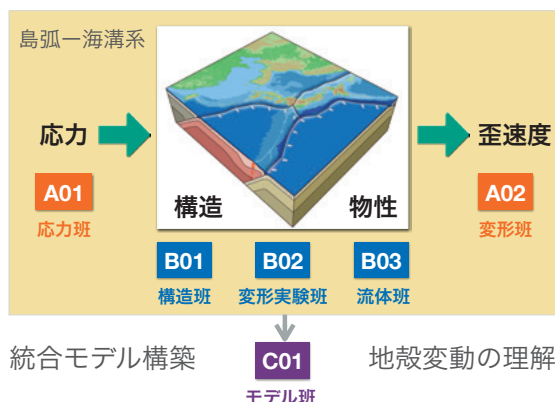


図3 新学術領域研究「地殻ダイナミクス」の構成。

より短期・長期的な歪・歪速度場を推定、天然の変形岩の観察および岩石変形実験により下部地殻・上部マントルの変形特性を推定、トモグラフィーデータ等から岩質や地殻流体の分布を推定、数値シミュレーション等により地殻流体の分布と温度構造を推定、これらの知見および(1)により推定された絶対応力場を参照した変形シミュレーションにより、観測された歪・歪速度場を再現する。

鳥 取県西部における総合調査

本研究で特筆すべき計画として、鳥取県西部地震(2000年)の余震域における総合的な調査が挙げられる。ここでは、80点の満点地震計によるやや長期的な観測と、今回新たに開発する簡易型の満点地震計による1000点の短期的な観測が予定されている。これにより、地震学的手法によ

うの解明が進むであろう。さらに、この地域では顕著な歪の集中がGPS観測により最近発見されており、歪と応力の関係を解き明かす上でも重要なプレイクスループが期待できる。

新 たな島弧地殻像の形成と地震の理解

プレートテクトニクスはそれまでの地球観を一新し様々な現象を統一的に説明したが、局所的な非地震性・非弾性的な変形など、説明が面倒な現象は無視され、それらを駆



著者紹介 飯尾 能久 Yoshihisa Iio

京都大学 防災研究所 教授

専門分野：地震学。地震観測データ等に基づき、内陸地震の発生機構と発生予測に関する研究を行っている。

略歴：京都大学理学研究科修士課程修了。防災科学技術研究所、東京大学地震研究所等を経て現職。著書に「内陸地震はなぜ起こるのか」(近未来社)などがある。

動するプロセスもほとんど検討されてこなかった。本研究によって新たな島弧地殻像が形成され、その中で地震現象等を適切に位置づけることにより、島弧の変動や地震の発生についての統一的な理解が得られるものと期待される。そして、この理解が正しければ、今後発生する現象を適宜「診断」することが可能となるだろう。

本研究は困難な課題に挑むものであり、曇りなきまなこ柔軟な発想を持つことが重要である。そのため、老若男女を問わず、多くの方々の関心と積極的な関与を切望している。詳しいことは領域HP (<http://cd.dpri.kyoto-u.ac.jp/>) を参照いただければ幸いである。

一参考文献一

飯尾能久・松澤暢(2012) 地質学雑誌, 118, 248-277.

Yoshida, K. et al. (2012) *Geophys. Res. Lett.*, 39, L03302, doi:10.1029/2011GL049729.

■一般向けの関連書籍

飯尾能久(2009) 内陸地震はなぜ起こるのか, 近未来社.

人工衛星「ひさき」による太陽系惑星の観測を振り返る

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 吉川 一郎

一昨秋、イプシロンロケットが惑星分光観測衛星「ひさき」を地球の周回軌道に打ち上げた。太陽系の惑星を概観し科学的に未解決の問題に挑むという野心的な計画である。極端紫外という未開の波長帯に観測の焦点を絞り、ユニークな成果を挙げている。本稿では、探査機を送り込むことが難しい木星について、ひさき衛星の観測から得られた新しい知見を紹介する。

ひ さき衛星打ち上げ

2013年9月14日日本時間14時、内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられたイプシロンロケットは高度約1,000kmの周回軌道に、ひさき衛星を送り込んだ。ひさき

衛星は極端紫外線という波長帯(波長52-148nm)で、太陽系の惑星を観測する。惑星からの極端紫外線は、地球大気のため地上には届かない。しかも、紫外線とX線との間のエネルギーをもち、鏡でもレンズ

でも光を集めることが難しい。しかしながら、超高層大気やプラズマが発する光の波長が集中しているため、極端紫外線領域は惑星磁気圏の研究の発展のために何とかして「明るく」しなければならない帯域である。ひさき衛星は革新的な技術を採用した惑星専用の宇宙望遠鏡であり、これまで見えなかった波長帯を対象を長時間継続的に観測できる。

本稿ではこれまで得られた成果の中から、木星磁気圏における粒子加速(Yoshioka et al., 2014)と木星オーロラと磁気圏の活動の

理解 (Kimura *et al.*, 2015) について紹介する。

木星磁気圏で起こる粒子加速への関心

太陽から噴出したプラズマ (太陽風) は太陽系を満たしている。地球や木星のもつ強い惑星固有磁場は太陽風にとって障害物である。太陽風と惑星磁場の衝突が惑星の周囲に磁気圏を作る。木星の磁気圏は、次の3点において地球のものとは異なっている。(1) 磁場が非常に強い。(2) 自転周期が高速 (10 時間) でかつ磁力線も同程度の速さで自転する。(3) 衛星イオの火山から噴出した高密度なガスが、公転軌道 $6R_J$ (R_J : 木星半径) にドーナツ状に分布し、遠方の磁気圏までを満たしている (プラズマトーラスと呼ぶ; 図 1A)。

木星に近い領域の磁力線は、太陽風の影響を受けないため双極子に近い形状をしている (内部磁気圏)。一方、木星から遠い領域は、遠心力により磁力線が円盤状に引き延ばされている (外部磁気圏)。磁力線が柔軟に変形し、プラズマを数十キロ電子ボルトにまで加速している領域である。

磁場の弱い領域から強い領域へとプラズマが移動すると、電磁波との共鳴効果と断熱加速の過程を経て、高いエネルギーにまで加速される。内部磁気圏は磁場が強いため、もし粒子が侵入できれば大きな加速を受け、エネルギーが高くなる。そして、内部磁気圏の磁場はプラズマにとって障害物であるた

め、高エネルギー粒子をその境界域近傍に溜め込む。このようにして高エネルギー粒子が木星近傍に捕獲された領域が「放射線帯」である。木星は、太陽系における最大・最強の粒子加速器である。

惑星の強い固有磁場は太陽風を遮る一方、内部磁気圏の磁場はプラズマを捕らえる可能性がある。放射線帯粒子の加速メカニズムを理解する上での第一の関門は、外部磁気圏のプラズマが内部磁気圏に侵入しているのか、という疑問に答えることである。今までそれに関する証拠は捉えられていなかったが、ひさき衛星が世界で初めてその証拠をつかんだ。

スペクトル診断

イオンは内部の電子軌道間の遷移エネルギーと等価な波長をもつ光を発する (地球のオーロラを考えると解りやすい)。イオのプラズマトーラスでは、イオンと電子の衝突がエネルギー励起の主な要因であり、この輝線の情報が木星内部磁気圏を探るための重要なデータとなる。明るさから元素の密度を推定する手段は地球物理学に共通した常套手段であるが、さらに面白いことは、電子とイオンの間の衝突断面積が電子のエネルギーに依存するため、同じ元素から複数の輝線の明るさの差に注目すると、電子温度を導出できるということである (スペクトル診断と呼ばれる。波長の長い輝線はエネルギーの低い電子との衝突から発せ

られている)。リモートセンシングという手法は、元々、大局的な物質の分布を知ることを得意とするが、スペクトル診断を併用すれば電子やイオンの温度・密度という直接観測でしか得られなかった物理量も導出できる。極端紫外線と呼ばれる光の帯域 (50 – 150 nm) には、イオのプラズマトーラスの主成分である硫黄イオンの輝線が多く存在し、プラズマ診断が威力を発揮する。木星の光のスペクトルの情報とスペクトル診断を用いた研究は、木星内部磁気圏の探査には有効であり、我々が長い間待ち望んでいたことであった。

内部磁気圏への高温電子侵入の証拠

ひさき衛星が捉えたイオプラズマトーラスの光をスペクトル診断した結果、外部磁気圏に由来すると考えられる高温の電子が、徐々にその密度を減らしつつ、内部磁気圏の中にまで入り込んでいるという新しい事実を世界で初めて突き止めた。図 1 (b) にはイオの軌道面に沿って、極端紫外線スペクトルの空間変化 (木星からの距離に応じた変化) を示した。そして一定区間ごとにプラズマ診断を行い、背景電子の柱密度と温度、高温の電子の存在比を導出した結果を図 2 に示す。

トーラスのプラズマ密度は高く、木星から離れるにつれて密度は低くなる。この配置は、トーラスのプラズマに外向きの遠心力が加わっているにもかかわらず、内側ほど重いガスが詰まっていることから、力学的に「不安定な」状態にある。軽い油の上に重い水が

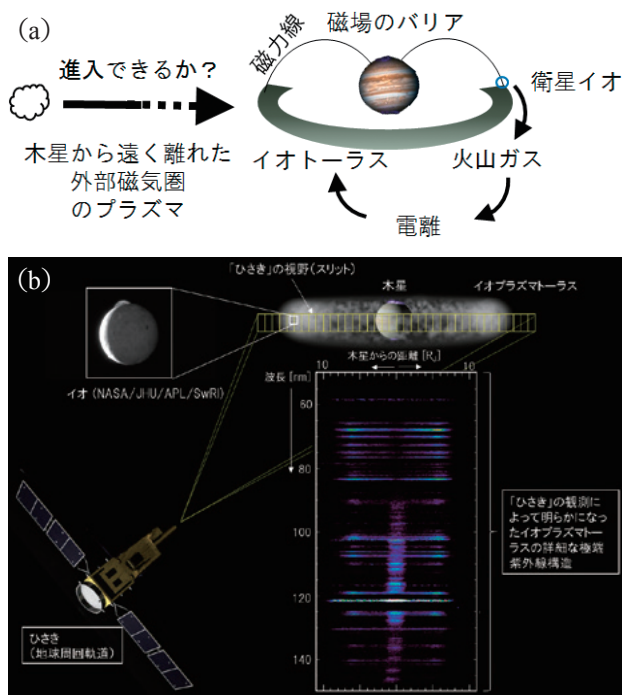


図 1 (a) イオプラズマトーラスの生成。(b) ひさき衛星によるイオプラズマトーラスの観測結果。観測の視野 (スリット) をイオプラズマトーラスに沿わせ、光のスペクトルを取得した。

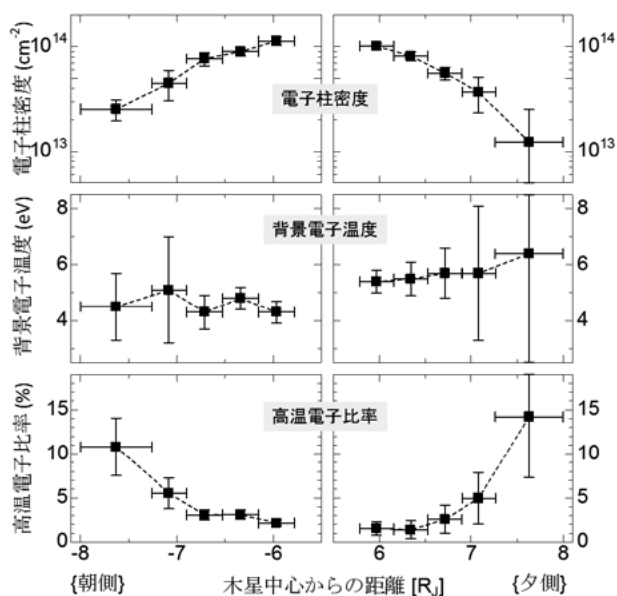


図 2 スペクトル解析から導き出した背景電子の柱密度と温度、高温電子比率 (%). 左と右はそれぞれ木星の朝と夕方方面の動径距離を示す。

のっている状況と似ている。力学的な観点からは、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活発な対流を引き起こし、外部磁気圏から内部磁気圏に向かうプラズマの流れを引き起こしている、という予想が成り立つ。ひさき衛星のデータから導かれた高温電子の分布は、この力学的不安定に基づく流れを仮定すると、とてもよくつじつまが合う。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、固有磁場という障害を乗り越えて大規模な対流が維持され、その結果、太陽系最強の木星放射線帯が形成・維持されている、という結論が導かれた。この成果は、吉岡和夫ら（現 立教大学）が2014年に *Science* 誌に発表した。

木星のオーロラ

オーロラ発光は磁気圏中の電磁的エネルギーの解放過程を可視化できる現象である。地球には、太陽起源のプラズマや電磁的エネルギーが磁気圏内に蓄積・解放されて駆動される「外部駆動型」と呼ばれるオーロラが現れる。これに対して、木星には、衛星イオのプラズマと強力な固有磁場が高速に自転する効果によりエネルギーを自給できる「内部駆動型」のオーロラが現れるはずである。しかし、このタイプのオーロラの確認には、連続的な観測が必要であり、ひさき衛星の観測が行なわれるまで発見されていなかった。

2013年の年末から2ヶ月以上にわたり、ひさき衛星は木星オーロラを連続的に観測し、太陽風による外部駆動型の変動を分離し、内部駆動型の変動を抽出することに成功した。それと同時期に、総計25件以上の地上望遠鏡、宇宙望遠鏡による木星協調観測を実施した。なかでも、ハッブル宇宙望遠鏡は世界最高の解像度でオーロラを撮像し、オーロラと磁力線を介して繋がる磁気圏の領域の活動度を特定した。木星周辺を飛翔する探査機が現存しないため、地球近傍での太陽風の測定値を木星近傍まで外挿し、太陽風の変動を推定した（Tao et al. (2005)の数値実験手法による）。まさに、世界各国の研究者の総力戦である。

その結果、太陽風の静穏時に、内部駆動型と考えられる突発的なオーロラの増光が見つかった（図3A）。これは、太陽風衝撃波の間隙である「希薄領域」等の静穏領域が木星に到達している時間帯（図3B）と一致している。オーロラから放射されるエネルギーが急速に増加し、その後減衰する特性を持つことが分かった。継続時間は3–11時間程度であり、太陽風関連の時間スケール（2–3日）よりも急速な時間発展である。今ま

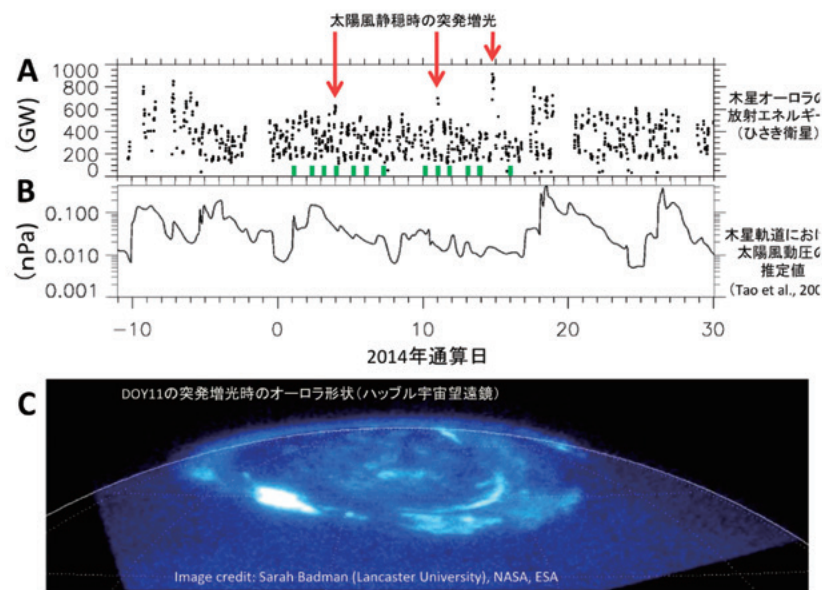


図3 ひさき衛星とハッブル宇宙望遠鏡がとらえた内部駆動型オーロラ変動。(A) ひさきが測定したオーロラの放射エネルギー。緑色の帯はハッブル宇宙望遠鏡によるオーロラ撮像が行われた時間帯を示す。(B) Tao et al. (2005)の数値実験手法に基づき推定した木星近傍における太陽風の動圧。(C) 1月11日にハッブル宇宙望遠鏡が撮像した突発増光中のオーロラ。

での観測では、しばしば太陽風衝撃波の到来に伴うオーロラの増光現象が報告されており（例えば Clarke et al., 2009）、外部駆動型変動と解釈されてきた。これに対して我々は、太陽風希薄領域が到来している期間において、突発増光が起きていることから、外部駆動型ではなく内部駆動型の変動現象であると解釈できることを明らかにした。

ハッブル望遠鏡が撮影したオーロラを図3Cに示す。磁力線を介して異なる磁気圏領域と結合している高緯度、中緯度、低緯度領域の各種オーロラが、同時に増光していることが判明した。これは、最深部から外縁部における磁気圏の各領域において、プラズマや電磁場の変動を介したエネルギー解放過程が全球的かつ急速に発生していることを示唆している。この成果は、木村智樹（ISAS/JAXA, 理研）らが今年3月に *Geophys. Res. Lett.* 誌に発表した。

他の惑星の観測

ひさき衛星は、2013年12月から定常的な観測に入り、2015年3月までの約15ヶ月の間に、水星、金星、火星、木星と土星の超高層大気・プラズマを概観した。今

後はこれらの惑星の特徴を精査するための観測を続ける。さらに、現在では、太陽系外の惑星の観測にも挑戦している。新しい発見にはまだ時間がかかるが、未開の波長帯での系外惑星の大気の発見に注目してほしい。

参考文献

- Clarke, J., et al. (2009) *J. Geophys. Res.*, **114**, doi:10.1029/2008JA013694.
- Kimura, T., et al. (2015) *Geophys. Res. Lett.*, doi: 10.1002/2015GL063272.
- Tao, C., et al. (2005) *J. Geophys. Res.*, **110**, doi:10.1029/2004JA010959.
- Yoshioka, K., et al. (2014) *Science*, **345**, doi: 10.1126/science.1256259.

一般向けの関連書籍

大家 寛 (1980) *巨大惑星の宇宙—太陽になれなかった星たち*, 講談社ブルーバックス.



著者紹介 吉川 一朗 Ichiro Yoshikawa

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻 教授

専門分野: 惑星磁気圏物理学, 太陽系探査. 太陽系の惑星探査, 特に磁気圏のリモートセンシングに重点をおき研究を進めている。ひさき衛星, かぐや衛星, 国際宇宙ステーション等に観測機を搭載し, 惑星磁気圏の研究を進めてきた。

略歴: 2000年東京大学博士(理学)取得。宇宙科学研究所助手, 東京大学大学院理学系研究科准教授を経て, 2015年より現職。