

# 「ひさき」による 国際協調観測でみえた木星オーロラ



木村 智 樹

〈東京理科大学理学部第一部物理学科 〒162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3〉

e-mail: kimura@rs.tus.ac.jp

「ひさき」を中心とした国際協調観測では、木星のオーロラとそれに対応する木星系内の全球的な物質・エネルギー輸送のメカニズムの解明に取り組みました。木星の衛星イオから放出されたガスが電離し、プラズマとなって木星の磁気圏を循環し、オーロラを発光させる過程を「ひさき」やハッブル宇宙望遠鏡を用いた同時観測で可視化しました。これにより、オーロラの爆発的増光現象を捉え、その背景にあるエネルギーの解放過程や動径方向輸送を明らかにしました。今後は、JUICEミッションやVoyage2050などの国際探査計画にも参加し、明らかにした物質・エネルギー輸送の知見に立脚しながら、氷衛星の内部海等の地球外生命環境の成り立ちの解明を目指しています。

## オーロラの科学的意義

### 巨大惑星系における物質・エネルギー輸送

木星は、地球の2倍以上の角速度（自転周期9時間55分30秒に相当）で自転しており、地球の約2万倍の磁気モーメントに相当する強力な固有磁場を持つ回転磁化天体です。これらの自転と磁場により、地球磁気圏の100倍以上の大きさを持ち、高速回転する巨大な磁気圏を形成しています。木星の衛星イオは、木星の重力による潮汐力によって内部が加熱され、活発な火山活動を続けています。イオの火山から噴出したガスは、主に二酸化硫黄（ $\text{SO}_2$ ）で構成されています。このガスは宇宙空間で磁気圏の電子との衝突や太陽紫外線等により電離し、硫黄イオン（ $\text{S}^+$ ）、酸素イオン（ $\text{O}^+$ ）、電子などから構成されるプラズマとなります。プラズマは、磁気圏の中を循環し、各領域において木星の自転や磁場がエネルギー源となって加熱・加速され、一部の粒子は最高で光速の99%以上の速度を得ます。よって、木星は巨

大な粒子加速器といえることができます。

本稿では、中心星である木星、木星を周回する衛星、それらの天体をつなぐ磁気圏や大気が成すシステムを「木星系」と呼ぶことにします。図1に示すような、木星系における物質とエネルギーの輸送は、各天体間の電磁的な複雑な相互作用（例：[1-8]）によって成り立っています。

イオの火山活動は、木星系への物質供給源として重要な役割を果たしています。イオの火山ガス起源のプラズマは木星の強力な磁場に捕らえられ（ピックアップ）、木星とともに回転（共回転）することで、イオプラズマトーラスと呼ばれるドーナツ状の領域を形成します。プラズマトーラスは磁気圏の内側に位置しており、イオの軌道半径である木星から6木星半径（1木星半径=71492 km）の距離が最も高密度（ $2000 \text{ cm}^{-3}$ 程度）です。イオプラズマトーラスのプラズマは、大別するとピックアップされたばかりの低温成分（5 eV程度の温度）と、木星磁気圏を循環して戻ってきた高温成分（数100 eVの温度）に分けられます。

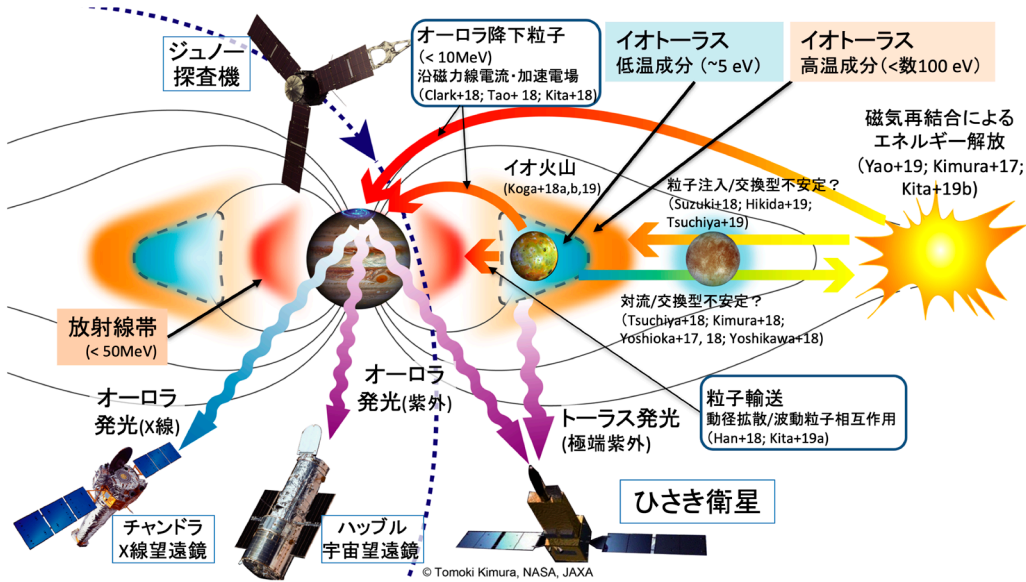


図1 木星系における物質・エネルギー輸送の概念図. イオの火山から放出された  $\text{SO}_2$  ガスが電離し,  $\text{S}^+$ ,  $\text{O}^+$  等のイオンと電子からなるプラズマが磁気圏にピックアップされた後, 遠心力や磁気張力によって磁気圏内を循環します. その過程で様々な加熱・加速過程を経験し, 一部の粒子は木星の極域に降り込みオーロラを発光させます. プラズマの循環を矢印で表しています. 著者らは, この物質・エネルギー輸送過程を「ひさき」を始めとした飛行体を連携させた国際協調観測で可視化し, 解明に取り組んできました. 図中で参照している論文は, 「ひさき」が貢献して明らかにした物質・エネルギー輸送の研究を示しています (例: [1-8]).

イオプラズマトーラス内のプラズマは, 木星の自転に近い角速度で木星と共回転しています. そのため, 遠心力によって駆動される交換型不安定やその他の対流により, 背景の磁力線とともに磁気圏の外縁部へ拡散していきます. この外向きの拡散に対応して, 磁気圏外縁部のプラズマが内側に運ばれます. これらの過程でトラスのプラズマは何らかの加熱メカニズムによってエネルギーを獲得し, 最終的にはバルクの成分が数 100 eV ~ 数百万度以上にまで加熱されます. 太陽コロナの加熱問題を想起させる, このプラズマ加熱のメカニズムは完全には解明されていません. 磁気圏外縁部での高エネルギー粒子の輸送 (粒子注入) や, 内向き輸送中の断熱的な加熱, 波動粒子相互作用等が候補になっています.

磁気圏の外縁部 (50-100 木星半径程度) に輸送されたプラズマは, 遠心力によって閉じた磁力線を引き伸ばします. 磁気圏は常にイオからの質

量供給 (マスローディング) を受けていますので, 磁気圏の外縁部に蓄積されているプラズマの量は時間とともに増えていき, 磁力線に加わる遠心力も増えます. とある時点で磁気張力が遠心力に耐えきれず引きちぎられ, 蓄積されたプラズマを塊 (プラズモイド) として放出します. この磁力線が引きちぎられる現象を磁気再結合と呼びます. 放出されたプラズモイドは, 磁気圏の質量を損失させる一方, 木星側の引き伸ばされた磁力線は, 磁気再結合で解放された磁気エネルギーによる粒子加速を伴いながら縮み始め, 磁気圏の内側に向かって高エネルギープラズマ (keV 帯) を輸送します. これが粒子注入です. 粒子注入はプラズマトーラスの高温成分の候補になっています.

上記のイオ軌道から磁気圏外縁部に至る広範な木星系内の循環において, 一部のプラズマ粒子は磁力線方向に運動し, 一部は電磁場によって加速され, 木星の大気と衝突して大気分子・原子を励

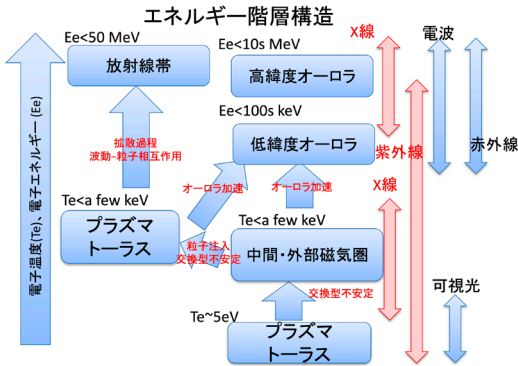


図2 木星系のプラズマのエネルギー階層構造. 下の領域は低エネルギー, 上の領域は高エネルギーのプラズマ粒子に対応します. エネルギーの値は電子の運動エネルギー (Ee) と温度 (Te) で表記しています. イオ火山起源のプラズマは, ピックアップ直後はプラズマトラス中の低温 (5 eV程度) 成分となり, その後木星系の各所へ輸送されます. この際に, 電磁的な加熱・加速を受け, 最高で50 MeV (放射線帯) に到達します. 図の右側には, それぞれの領域や粒子エネルギーに対応する発光の波長を示しています.

起・脱励起させ光を放出します. これがオーロラです. 木星のオーロラは地球のオーロラとは異なり, 太陽風ではなく主にイオ由来のプラズマ, 木星の固有磁場, 自転遠心力が駆動します. これは, 木星系内の物質・エネルギー輸送の結果起きる散逸であり, 輸送のエンドポイントといふことができます. オーロラの形状や時間変動を見ることができれば, それと磁力線を介して結合する広範な木星系全体の物質・エネルギー輸送を可視化できるのです.

### エネルギー階層構造と発光現象の波長

物質・エネルギー輸送過程では, イオの火山から供給されたプラズマが, 木星の磁気圏と相互作用しながらエネルギーを獲得し, 木星系の各所で段階的に高エネルギーへと遷移していきます. プラズマ粒子はエネルギー方向に階層構造を形成しています (図2). 各階層は, 温度や密度, 粒子の運動エネルギーなどが異なるプラズマで満たさ

れています.

プラズマは各階層において, 粒子エネルギーに対応した様々な波長の光を放射しています. 例えば, イオプラズマトラスにおいて, 数eV-数10 eV程度の低温の酸素や硫黄の中性粒子やイオンは, 紫外線や可視光の輝線として観測されます. 木星のオーロラは, 高エネルギーの電子やイオンが木星の大気と衝突することで発生し, X線から電波までの幅広い波長で光っています. 例えば, X線オーロラの一部は, 磁気圏起源の低価数の $O^+$ 等の酸素イオンが, 極域上空のオーロラ加速域で10 MeV帯まで加速され, 大気と衝突することで発生する $O^{6+}$ 等の高価数イオンから放出されます.

木星系におけるプラズマのエネルギー階層構造を理解するためには, 多様な波長帯での発光の観測が重要です. 紫外線や可視光の観測は, イオプラズマトラスやオーロラの構造や組成, プラズマの温度や密度などを調べるのに役立ちます. X線観測は, 高エネルギーのイオン・電子が分布するオーロラ領域や放射線帯における粒子加速メカニズムを解明する手がかりを与えてくれます. 電波観測は, 木星の磁場構造やオーロラ加速領域の微細構造と高度分布などを調べるのに有効です.

### 未解決の問題点

パイオニア探査機, ボイジャー探査機の時代から, 連綿と探査機観測や望遠鏡観測, 理論的なモデリングが積み重ねられてきた木星系の物質・エネルギー輸送ですが, 多くの未解決問題が存在します. 例えば:

1. 物質・エネルギー輸送はどのように時間的・空間的に変化するのか? 特に物質供給源であるイオの火山噴火にどう応答するのか?
2. そもそも強力な磁場をもって高速共回転する系で, 動径方向に物質やエネルギーは輸送できるのか?
3. 他の天体では主要な太陽風によるエネルギー入力, 木星系の物質・エネルギー輸送にど

のような影響を及ぼすのか？

などです。これらの問題を観測的に明らかにするには、いずれも木星系全体を全球的に俯瞰し、なおかつ時間的にも連続的に測定する必要があります。しかし、そのように時空間構造を網羅した観測は今まで存在しなかったため、未解決になっていました。「ひさき」は世界初の惑星専用の連続監視望遠鏡として、これらの問題に取り組みました。

## 「ひさき」はどう取り組んだか？

### ハッブル・ジュノーとの国際協調観測

「ひさき」の最大の強みは、惑星専用の小型宇宙望遠鏡であり、観測対象を自由に選び、長期間にわたり連続的に観測できる点です。これにより、他の公共の大型望遠鏡と違い、切れ目なく、かつ、宇宙空間から天気左右されずに特定の対象の変動を監視できます。

この独自性は、他の宇宙望遠鏡との連携にも大きな役割を果たしました。特筆すべきなのは、2014-16年に複数回実現した、ハッブル宇宙望遠鏡などの国際協調観測です。この時、JAXAのポストドクであった筆者、埴千尋博士、サラ・バッド

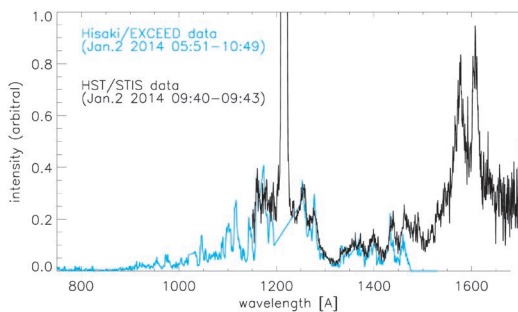


図3 協調観測中に「ひさき」とハッブル宇宙望遠鏡によって得られた木星オーロラの発光スペクトル[2]。青線が「ひさき」、黒線がハッブルのスペクトル。木星極域に降り込んだ磁気圏起源の電子が、水素大気と衝突して、水素原子の輝線であるLyman $\alpha$ 線(図中の1216 Å付近における強度が大きな輝線に相当)や、水素分子のバンド発光であるLyman-Werner band(図中のLyman $\alpha$ 線以外の発光)を励起します。

マン博士や、英国レスター大学のジョナサン・ニコルズ博士らの若手研究者が協力し、「ひさき」とハッブル宇宙望遠鏡を使って木星を合計1ヵ月以上にわたって同時観測する機会を得ました。また、2016年の観測では、折よくジュノー探査機が惑星間空間を木星に向かって航行中で、木星から見て太陽風のすぐ上流において、太陽風を観測していました。

図3は、協調観測中に得られた「ひさき」とハッブル宇宙望遠鏡の紫外線オーロラスペクトルの例です[2]。「ひさき」の空間分解能は比較的よくないものの(20秒角程度)このスペクトルを10分置きに1ヵ月以上連続的に測定し、密な時系列データを取得できました。図4は協調観測期間中にハッブル宇宙望遠鏡で撮像されたオーロラ画像の例です[9]。世界最高解像度の0.08秒角の空間分解能で1日1枚程度の頻度で撮像を実施しました。この相補的な観測によってオーロラの時空間構造を網羅し、物質・エネルギー輸送のメカニズムに関する重要な情報が得られました。

この観測で、「ひさき」とハッブルは木星極域でのオーロラが数時間にわたって爆発的に増光していることを発見しました(図5, [10])。これまでの時間的に疎な観測では捉えられなかった急激な変化を、「ひさき」の連続監視が初めて捉えた

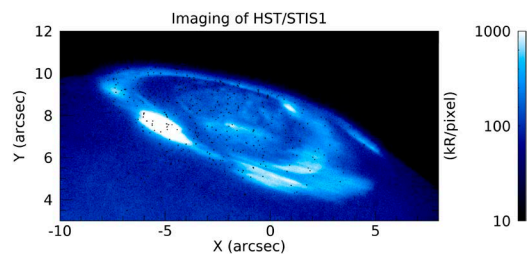


図4 協調観測中に得られたハッブル宇宙望遠鏡の木星オーロラの画像。横軸縦軸ともに秒角。色はオーロラの明るさ(kilo-Rayleigh/pixel)で、黒-青-白になるにつれて明るくなることを示します。ハッブル宇宙望遠鏡は最高で0.08秒角という世界最高解像度の撮像が可能です[9]。

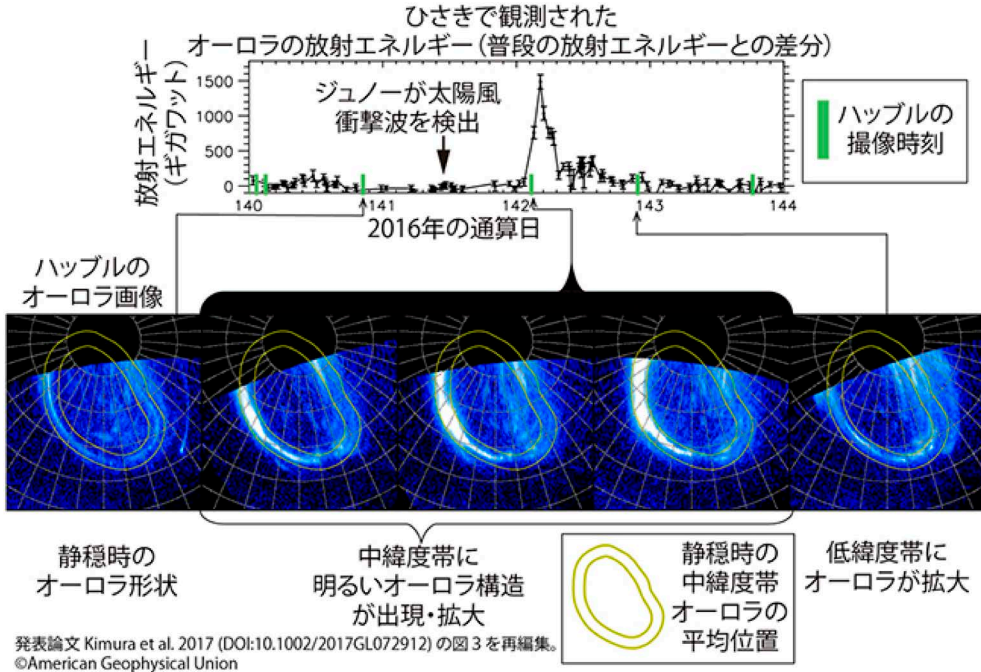


図5 「ひさき」によって連続監視された木星オーロラの放射エネルギーの時間変動(上)と、ハッブル宇宙望遠鏡によって撮像されたオーロラ形状の画像(下)。通算142日目の「ひさき」による観測において、オーロラの放射エネルギーが数時間で急激に増大し1500 GWのエネルギーに至った後、20時間程度をかけて減少していることがわかります。このエネルギーの増大時、木星極域の中緯度帯には明るいオーロラが出現(増光の開始)し、その後、低緯度方向にオーロラが拡大しました。これは木星系の磁気圏外縁部で何らかのエネルギー解放が起き、内側に輸送されたことを示します。理研の論文プレスリリース[10]より引用[11]。

のです。このイベントでは、オーロラのエネルギーが数時間で急激に増加し、1500 GWに達した後、徐々に減少しました。これは通常の放射エネルギーの約4倍で、「ひさき」の観測史上最大の明るさの増光でした。また、ハッブルの観測によって、増光が中緯度から低緯度に広がっていく様子が明確に捉えられました。

我々は、これらの一連のオーロラの時空間変動を、以下のように解釈しました。

1. **中緯度オーロラの増光:** オーロラは高緯度であればあるほど、固有磁場の磁力線を介して遠方の磁気圏領域と結合しています。比較的緯度が高い中緯度オーロラから増光を開始したということは、磁気圏の中間部や外縁部で、何らかのエネルギーの解放が起こり、プ

ラズマが加速されて大気に降り込んだことを示します。

2. **低緯度オーロラへの拡大:** 中緯度オーロラが低緯度へ拡大しているということは、磁気圏の中間部や外縁部からプラズマトラス付近に向かって、解放されたエネルギーや加速されたプラズマが動径方向に輸送されていることを示します。

3. **短時間の変動:** 自転周期10時間よりも有意に短い数時間で上記1-2のエネルギーの解放と輸送が起こったということは、内向きの動径方向輸送が、共回転による物質輸送に対して有意に高速であることを示しています。

これらの観測結果や解釈から、木星の磁場やイオ起源のプラズマが、磁気圏の中間部や外縁部に

蓄積し、とあるタイミングで磁気再結合をトリガーすることによって一連のエネルギー解放・輸送現象が発生したと考えられます。オーロラの形状や増光の時間スケールから、動径方向輸送は毎秒400–800 kmという速度で進行していた可能性があります。これは磁気圏外縁部において、共回転する磁気圏プラズマの速度よりも数倍早いものです。本稿の「**未解決の問題点**」で説明したように、共回転方向の輸送が主要な系での動径方向輸送は有意性が未解明でしたが、この協調観測で実際に有意に発生していることが明らかになったのです。

このオーロラの爆発的増光の直前、ジュノー探査機は太陽風の衝撃波を検出し、太陽風の運動エネルギー等が木星磁気圏に供給されていることが確認されました。イオ起源プラズマのような自励的な要因だけでなく、外的駆動源である太陽風が輸送をトリガーしている可能性が指摘されました。本稿の「**未解決の問題点**」で説明した太陽風は、輸送過程に対して重要な関わりがある事がわかったのです。

協調観測以外の期間も観測を積み重ねていた「ひさき」は2015年の観測シーズンに、イオ火山の巨大噴火によって質量供給が増大するイベントを、火山噴火前から噴火後まで連続的に捉えることに成功しました(例: [1, 8, 12])。このとき、上記のオーロラの爆発的増光が頻発し、2–3日に1回程度の頻度で発生していることが発見されました。これは、本稿の「**未解決の問題点**」で説明したイオの火山噴火が、物質・エネルギー輸送を活発化させ、上述の動径方向輸送を頻発させていることを示しています。

「ひさき」はイオの質量供給と、太陽風という対照的な物質・エネルギー源が、両方とも輸送過程を有意に制御していることを初めて示したのです。また、これは本稿の「**エネルギー階層構造と発光現象の波長**」の図2における下部から中部にわたる広い範囲の輸送・加速について多くのこと

がわかったことにも対応しています。

### 天文分野との学際連携

次に取り組んだのは、天文学分野の望遠鏡との連携です。特に、惑星観測の経験が少ないX線天文学の宇宙望遠鏡を「ひさき」と同時に木星に向けることで、様々な新しい情報を引き出そうとしました。この同時観測を実現するために、筆者は日米欧の天文学者と協力し、チャンドラX線宇宙望遠鏡や、XMMニュートンなどのX線望遠鏡に観測提案を行い、2014年4月に実施しました[13]。この観測では、木星の最も高緯度に位置するX線オーロラを測定しました。

ひさきが観測している木星のオーロラは、太陽風の変動と強い相関を示すため、この協調観測では、太陽風の変動を把握する指標として活用されました。一方、チャンドラなどのX線望遠鏡が捉えるオーロラは、MeV帯の高エネルギー酸素イオン等から放射されるX線であり、これらを撮像や分光で測定しました。これらの観測から、以下の2つの事実がわかりました。

1. X線オーロラが太陽風の速度に対して非常によい相関を持っている。
2. X線オーロラが光っている磁力線は、磁気圏と太陽風の境目につながっている。

これらの観測事実から、X線オーロラを光らせるMeVオーダーの強力なプラズマ粒子加速は、太陽風と磁気圏の相互作用(ケルビン・ヘルムホルツ不安定等)によって引き起こされる可能性が指摘されました。本稿の「**エネルギー階層構造と発光現象の波長**」の図2における上部「高緯度オーロラ」の加速過程の一端が明らかになったこととなります。

## 氷衛星の生命環境へ

### 氷衛星への物質・エネルギー輸送

著者らが明らかにした物質・エネルギーの輸送経路には氷衛星が存在しています。木星の磁気圏に蓄積され、放出された物質やエネルギーが氷衛

星に運ばれ、表層物質に変化をもたらしています。氷衛星の表層には、地殻活動などを通じて内部海から噴出した海水由来の水や硫酸塩、塩分などの物質が堆積しています。それらには太陽光、磁気圏プラズマ、イオ火山由来の塵が常に降り注ぎ、物質を物理的・化学的に変化させています(宇宙風化)。我々が発見した物質・エネルギーの輸送も、この氷衛星表層の宇宙風化を促進していると考えられます。

氷衛星の大きな謎の一つは、内部海がいつ形成されたかという点です。例えば、土星の衛星エンセラダスのように、現在内部海が存在していても、天体が小さく冷えやすいため、進化の観点から見れば「最近」に内部海が形成された可能性が高いと考えられています。そのため、エンセラダスの内部海中で生命が発生・進化することは難易度が高いと思われています。現在の内部海に生命が存在するためには、内部海が発生した後、安定的に長期間存在し続ける必要があります。しかし、内部海は地下深くにあるため、探査機で直接探査することはできません。そのため情報が不足しており、内部海の形成時期は未だに解明されていない大きな問題です。

そこで我々は、宇宙風化に注目しました。宇宙風化は、例えば100年以上の時間スケールでゆっくりと進行する表層物質の物理的・化学的变化です。太陽光や磁気圏プラズマが表層に照射されることによって駆動されます。もし、天体進化のある時点で内部海が存在し、地殻活動などで海水が表層に噴出したとすると、その海水由来の物質は表層でゆっくりと宇宙風化していきます。これを実験室でのプラズマ照射実験で再現し[14]、望遠鏡や探査機による観測データと比較することで、海水が噴出した時期を特定します。これにより、氷衛星が形成され進化する過程で、表層に水を噴出できる深さにいつ内部海が存在し、どのように噴出していたかを解明しようとしています。我々の実験は、表層と内部海の物質循環や内部海の化

学組成の解明にも大きく貢献できます。

### 氷衛星の国際探査

我々は室内実験だけでなく、国際探査計画にも参加することで、氷衛星の表層や内部の進化の解明をさらに進めようとしています。著者は、欧州宇宙機関の木星氷衛星探査ミッションJUICEの搭載装置(電磁波動計測器)の開発メンバーとして、2030年代の初頭から、JUICEを用いてガニメデやエウロパの探査に参加する予定です。JUICEを使って、内部海の深さをレーダーで探査したり、表層のスペクトルや周囲のプラズマ粒子の測定を行います。これにより、我々の室内実験で推定した内部海の深さ、年代、化学組成などを精密に検証することができます。我々は実験、望遠鏡観測、探査機観測など、あらゆる手法を総動員して、氷衛星内部海の進化を解明しようとしています。NASAもエウロパ・クリッパーという氷衛星探査機を使って、2030年代初頭にエウロパを探査する予定です。その探査の観測結果を解釈する際にも、我々の室内実験の結果が大いに役立つと考えられます。

巨大惑星の氷衛星の探査はまだまだ続く予定です。欧州宇宙機関は2021年に、2050年までに行う世界最大級の科学探査ミッション候補として3つの計画の検討を開始すると発表しました。この計画はVoyage2050と呼ばれています。3つの候補のうちの1つが、JUICEの後継となる巨大惑星の氷衛星探査です。候補となる計画の提案書は欧州や関係各国から多数提案されました。著者もその提案チームの一員として提案書を執筆しました[15]。Voyage2050では、JUICEで得られた氷衛星の知見に立脚し、地球外生命環境の成り立ちをより深く解明するミッションになるでしょう。著者らは、2050年代の探査に貢献できるよう、若手研究者や学生を巻き込みつつ、万全の準備を整えるため、実験、探査、望遠鏡観測など多様なアプローチで研究を続けています。ご興味を持った読者の皆様もこの流れに参加してみませんか？

## 謝 辞

「ひさき」の国際協調観測を実施するにあたって、多くの同僚にご協力いただきました。特に、埴千尋博士（情報通信研究機構）、サラ・バッドマン博士（ランカスター大学）、ジョナサン・ニコルズ博士（レスター大学）、ラルフ・クラフト博士（ハーバードスミソニアン天体物理学センター）各氏には、ハッブル宇宙望遠鏡やチャンドラX線望遠鏡の観測提案をリードしていただくなど、多大な貢献をいただきました。埴博士には本稿に使用された図3の高次データもご提供いただきました。感謝申し上げます。また「ひさき」の開発・運用コアメンバーである、山崎敦博士（JAXA宇宙科学研究所）、土屋史紀博士（東北大学）、吉岡和夫博士（東京大学）、村上豪博士（JAXA宇宙科学研究所）には、「ひさき」プロジェクトの提案から停波までの全てをリードしていただき、開発や運用に伴う多くの困難を、著者らと一緒に乗り越えていただきました。心から感謝申し上げます。

## 参 考 文 献

- [1] Kimura, T., et al., 2018, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 123, 1885
- [2] Tao, C., et al., 2016, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 121, 4041
- [3] Tao, C., et al., 2016, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 121, 4055
- [4] Tao, C., et al., 2018, *Geophys. Res. Lett.*, 45, 71
- [5] Tao, C., et al., 2021, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, e2020JA028575
- [6] Yoshioka, K., et al., 2017, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 122, 2999
- [7] Yao, Z. H., et al., 2019, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 11632
- [8] Tsuchiya, F., et al., 2018, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 123, 6514
- [9] Kimura, T., et al., 2015, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 1662
- [10] [https://www.riken.jp/press/2017/20170523\\_1/](https://www.riken.jp/press/2017/20170523_1/) (2025.3.10)
- [11] Kimura, T., et al., 2017, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 4523
- [12] Koga, R., et al., 2018, *Icarus*, 299, 300
- [13] Kimura, T., et al., 2016, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 121: 2308
- [14] Kimura, T., et al., 2023, *Earth Planets Space*, 75, 150
- [15] Sulaiman, A. H., et al., 2021, *Exp. Astron.*, 54, 849

### Jupiter's Aurora Observed Through Coordinated International Observations Led by the Hisaki Satellite

Tomoki KIMURA

*Tokyo University of Science, 1-3 Kagurazaka, Shinjuku, Tokyo, 162-8601, Japan*

Abstract: Through international collaborative observations by the Hisaki satellite, we tried to elucidate the mechanisms of Jupiter's auroras and the corresponding global material and energy transport within the Jovian system. The volcanic gas originating Jupiter's moon Io gets ionized, forming plasma that circulates within Jupiter's magnetosphere and generates auroras. This process was visualized through international collaborative observations using Hisaki, the Hubble Space Telescope, and other spacecraft. We successfully captured the explosive auroral brightening and clarified the underlying energy release processes and radial transport. We participate in international exploration missions such as the JUICE project and Voyage2050 to further understand the evolution of subsurface oceans in the gas giant's icy moons and the potential for extraterrestrial life environments.