

惑星と衛星のなす系を、生命環境として理解する

東京理科大学 理学部第一部 物理学科 准教授 ^{きむら}木村 ^{ともき}智樹

■ 巨大惑星とその衛星がなす「ミニチュア太陽系」

皆さんは、地球の外に生命は存在していると思いますか？ 実は、世界中の多くの研究者が、「今、太陽系の中に地球外生命は存在する！」と考えています。生命が存在する環境の最有力候補となる場所は、木星や土星に代表される巨大ガス惑星の衛星です。

木星には、エウロパ、ガニメデ、カリスト、土星には、エンセラダスなど、氷の塊でできた衛星「氷衛星」が複数あります。それらの一部は、内部が高温高圧になっている領域があり、液体の水の海が存在する可能性があります。実際に、NASAのカッシーニ探査機は、土星の衛星エンセラダスの近傍を飛行した際、エンセラダスの南半球から水が噴出しているのを発見しました【図1】。これは、エンセラダス内部に液体の水の海が存在する可能性が非常に高いことを示しています。



【図1】土星の氷衛星エンセラダスの画像(左)と、水噴出の様子を疑似カラーで強調した画像(右)
<https://solarsystem.nasa.gov/news/13020/the-moon-with-the-plume/>

もし氷衛星内部に液体の水の海「内部海」があり、その海底が地球のように岩石でできていて、熱水噴出孔などの熱エネルギー源があった場合、そこは地球の海底のように太陽光を必要としない生物が住める環境かもしれません。しかし、氷衛星の内部海は厚さ3-150km以上ある氷地殻に覆われており、地球からはるか遠くの木星や土星に探査機を運び、氷衛星に着陸させ、氷地殻をとって内部海を直接探査するのは、技術的に困難を極めます。そのため、内部海が存在実証や、環境の状態などは全くといっていいほど理解さ

れていません。現在、世界中の多くの国が氷衛星の周囲や表面を探査機で探査し、間接的に内部海が存在を調査するためのミッションを実行しています。氷衛星とその内部海は、「地球外に生命が存在するか?」「なぜ地球に生命が誕生したか?」という、人類の最大の問いに答えを出してくれる重要な領域だと思われるのです。

氷衛星の周囲には、多様な天体が存在します。中心にある木星や土星といった巨大ガス惑星は、強い磁場や放射線をまとって、氷衛星にそれらを常に浴びせています。木星の衛星イオは、地球よりも大規模な太陽系最大の火山を持っていて、日々活発に二酸化硫黄(SO₂)等の火山ガスを噴出しています。毎秒1トンものガスが、宇宙空間に放出されていると考えられています。放出されたガスは電離し、プラズマというイオンと電子で構成されるガスになり、木星の磁場に捕まって、木星の周囲を回っています。その速度はイオ軌道で毎秒72kmもの速度になります(イオの軌道速度は17km/s)。イオ火山起源のプラズマは、宇宙空間を輸送されて、エウロパやガニメデ等の氷衛星に届けられ、表層に吹き付けます。氷衛星の表層は、氷でできた地殻の上に位置していて、表層に降り積もったプラズマは、地殻の活動に伴って内部海に運ばれている可能性があります。氷衛星の内部海は、惑星と衛星が相互作用する系の中に埋め込まれている生命環境なのです。

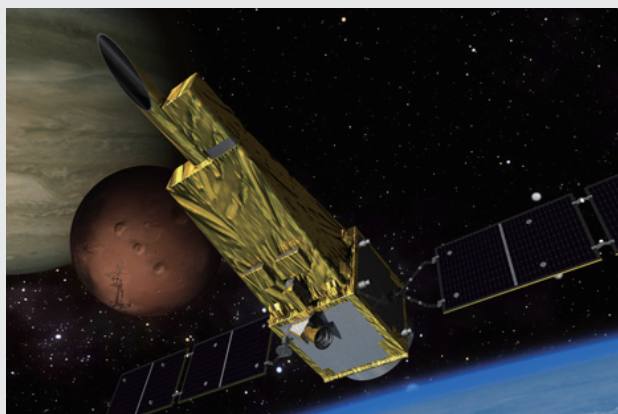
多様な衛星とその中心に位置する巨大ガス惑星は、太陽系の惑星と太陽を模した「ミニチュア太陽系」ということができます【図2】。太陽系の中心に太陽があるように、ミニチュア太陽系では中心に巨大ガス惑星が位置し、系を支配しています。太陽の周囲に多様な惑星があるように、巨大ガス惑星の周囲には多様な衛星が回っています。太陽系において生命を育む惑星は地球です。ミニチュア太陽系においては、その地球の役割を、氷衛星が担っているのです。

氷衛星の内部海はどのような環境なのでしょうか？直接探査が不可能な内部海を理解するために、私達はまず、少し遠回りをしました。惑星や氷衛星周囲の宇



【図2】木星(中央左)、火山衛星イオ(木星の左)、氷衛星ガニメデ(右上)、エウロパ(左下)、カリスト(右下)と、それらを探査する欧州宇宙機関の探査機JUICEの概念図 (JUICE Red Book https://sci.esa.int/documents/33960/35865/1567260128466-JUICE_Red_Book_i1.0.pdf)

宇宙空間「磁気圏」に注目したのです。磁気圏は、惑星の固有磁場が作り出すバリアであり、太陽からの高速プラズマ流「太陽風」から惑星や衛星を守ってくれています。磁気圏の内部には、惑星の磁場や自転のエネルギーが満ち溢れ、惑星の大気や衛星を起源としたプラズマが詰まっています。これらを観測して、氷衛星へ向かう物質やエネルギーの輸送を理解しようとした。そのために、人工衛星に望遠鏡を搭載し、惑星と衛星周囲の宇宙環境を監視することにしました。



【図3】筆者が開発と運用に参加してきたJAXA惑星分光観測衛星「ひさき」のCG図。 https://www.jaxa.jp/projects/sas/sprint_a/index_j.html

■ 惑星専用宇宙望遠鏡「ひさき」

筆者が開発・運用に参加してきたJAXAの惑星分光観測衛星「ひさき」【図3】は、紫外線を観測する望遠鏡を搭載した地球周回の人造衛星で、世界で初めての惑星専用の宇宙望遠鏡です。惑星の大気や、磁気圏

のプラズマから出る微弱な紫外線を分光測定し、大気やプラズマの温度や密度を診断します。紫外線は、温度や密度に敏感に反応する有用な光ですが、地球大気に吸収されてしまうため、地上の望遠鏡では観測が不可能です。「ひさき」は宇宙望遠鏡ですので、大気吸収に影響されずに惑星紫外線を観測できるのが強みです。その他の強みとしては、観測時間の連続性があります。他の宇宙望遠鏡(例：ハッブル宇宙望遠鏡)は基本的に公共の天文台であるため、限られた時間で多くの研究者が多くの天体を観測するため、観測時間が限られてしまいます(例えば、ハッブル宇宙望遠鏡は、1年あたり、一人の研究者が観測できるのは数千秒だけということもある)。「ひさき」は公共天文台ではないため、特定の惑星だけを何週間、何ヶ月も連続的に監視できます。これにより、惑星の大気やプラズマの時間変化を数分から数ヶ月追跡することができ、惑星や衛星周囲の物質・エネルギーの供給や輸送の仕組みをより詳しく解明できるのです。我々は、この「ひさき」を専有して木星磁気圏のプラズマを観測し、木星磁気圏内の物質・エネルギーがどのように循環し、氷衛星に向かって運ばれるか、解明に取り組みました。

ちなみに「ひさき」は、火星や金星の大気が宇宙空間へ逃げていくさまも連続監視しています。これにより、磁場を持たずに、太陽からの高速プラズマ流「太陽風」に吹きさらされる火星・金星が、地球のように磁場を持つ惑星に比べてどれほど大気を失いやすいのか？これからも維持できるのか？という、生命に大切な大気の進化についても取り組んでいます。

■ 「内部駆動型」物質・エネルギー輸送

筆者が「ひさき」を用いて最も力を入れたのは、木星のオーロラ観測でした。オーロラは、極域の大気上空で磁気圏から降ってきた電子などのプラズマが、大気と衝突して発生する発光現象です。オーロラは、惑星の固有磁場を介して、磁気圏とつながっています。オーロラの模様やその時間変化を測定することができれば、それと接続する磁気圏の広大な領域における、物質とエネルギーの流れを可視化できるのです。

オーロラの時間変化を「ひさき」衛星で連続的に監視できれば、世界で初めて数分から数ヶ月の多様な時間スケールの物質・エネルギー輸送を捉えることができます。しかし、問題だったのが、「ひさき」の空間分解能です。空間分解能は、望遠鏡がどれくらい細かい構造まで測定することができるかを示す能力、つ

まりカメラの解像度にあたる能力です。「ひさき」は、木星のオーロラのすべての構造を分解できるほどの空間分解能を持っていませんでした。そこで筆者は、ランカスター大学、ボストン大学など、欧米の研究者らと協力して、世界最高の空間分解能をもつ撮像器を搭載するハッブル宇宙望遠鏡に提案を行い、「ひさき」とハッブルの完全同時協調観測を実現しました。これにより、オーロラの時間変化を「ひさき」で連続的に監視し、物質やエネルギーの輸送に変化が起きたタイミングを検出します。その時刻に、ハッブルで解像度の高いスナップショット画像を取得し、オーロラの空間構造を詳細に測定する、という相補的な観測を世界で初めて行うことができました【図4】。この協調観測は2014年と16年の2回に渡って実施されました。16年の観測では、NASAの木星探査機ジュノーが、木星の近傍で、「ひさき」とハッブルの観測と同時に、太陽風などを測定することに成功し、三者の協調観測が実現しています。



【図4】 惑星分光観測衛星「ひさき」(左側)とハッブル宇宙望遠鏡(右側)による木星オーロラ観測の想像図。木星の極域、青白いリング状に見えるものがハッブル宇宙望遠鏡で観測された木星のオーロラ。オーロラから伸びている磁力の線を青い筋で表しており、ハッブル宇宙望遠鏡の背後に見えている天体が木星の衛星イオ(図中央右側)。木星周囲の赤っぽい色に見えるものがプラズマであり、プラズマはオーロラ爆発を引き起こす磁気圏の乱れを表しています。 https://www.jaxa.jp/press/2015/03/20150325_hisaki_j.html

この観測の結果、オーロラが10時間程度の時間内に、通常の放射エネルギーの数倍以上も増加する、爆発的な変化を発見しました。この爆発的な増加は、2-3日周期で発生することが「ひさき」の連続監視でわかりました。これは、オーロラの時間変動の原因として広く受け入れられている、太陽風による磁気圏の圧縮

による物質・エネルギー輸送の変化とは、全く異なる振る舞いをしており、太陽風は直接的な原因ではないと考えられます。我々は、オーロラの緯度方向の構造や、増光の時間変化から、以下のような「内部駆動型」の物質・エネルギー輸送が発生していたと解釈しました。

1. 木星の自転・磁場のエネルギーや、イオから放出された火山ガスプラズマが、磁気圏の外縁部に蓄積される。
2. 蓄積された物質・エネルギーが、2-3日周期で自動的に開放されて、磁気圏のプラズマを加速・加熱しながら木星方向に輸送される。
3. 輸送される過程で、磁力線にそってプラズマが木星の大気へ降下し爆発的なオーロラ発光としてエネルギーを散逸する。

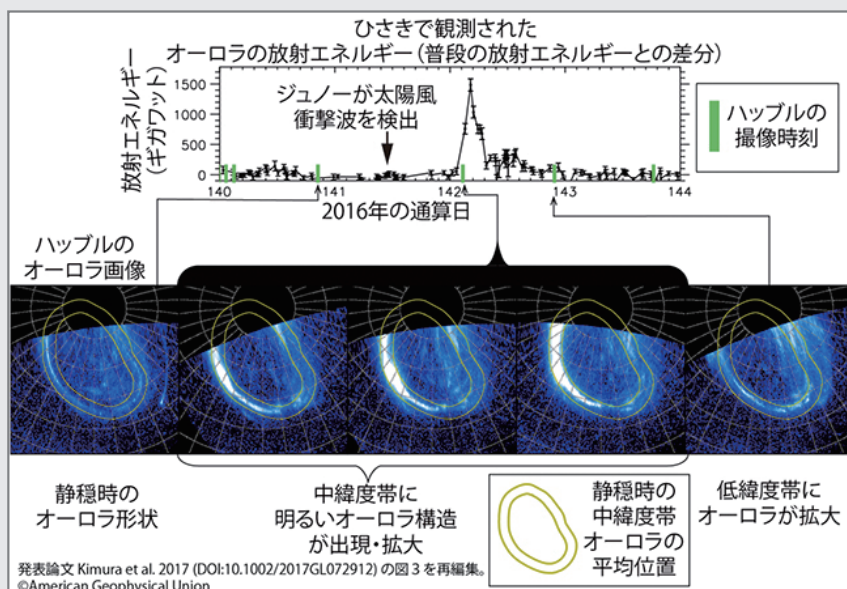
オーロラの爆発的な増光の中でも、最も大きな放射エネルギーを示すイベントが16年の協調観測で検出されました。このイベントでは、増光の15時間前に太陽風の衝撃波が木星磁気圏を圧縮していたことがジュノー探査機の観測からわかりました【図5】。上記の「内部駆動型」のシナリオでは、太陽風の圧縮が直接的な物質・エネルギー輸送の原因とはならないため、シナリオと一見矛盾したような観測結果になりました。しかし、オーロラの時間変動や構造は、「内部駆動型」のオーロラと一致しており、筆者らの頭を悩ませました。太陽風が上記の「内部駆動型」シナリオの2番における解放プロセスを「強制的に起動」しているという解釈をすれば、全ての観測事実を上手く説明できるという結論に至りました。この太陽風による解放プロセスは、地球では頻繁に発生するもので、その木星版が発生していることを示唆しています。

これらの観測結果から、筆者らは【図6】のような、「内部駆動型」の物質・エネルギー輸送が、木星磁気圏の広大な領域で発生していると予想しています。

現在筆者らは、この広大な領域で起きている物質・エネルギー輸送が本当に磁気圏の全体で発生しているかを検証する研究を継続しています。スーパーコンピュータの中で、プラズマの運動方程式などを数値的に解き、物質・エネルギー輸送を模擬し、ジュノー探査機などの探査機その場におけるプラズマ・磁場観測と比較することで、オーロラ観測と整合する輸送が再現できるか検証を重ねています。

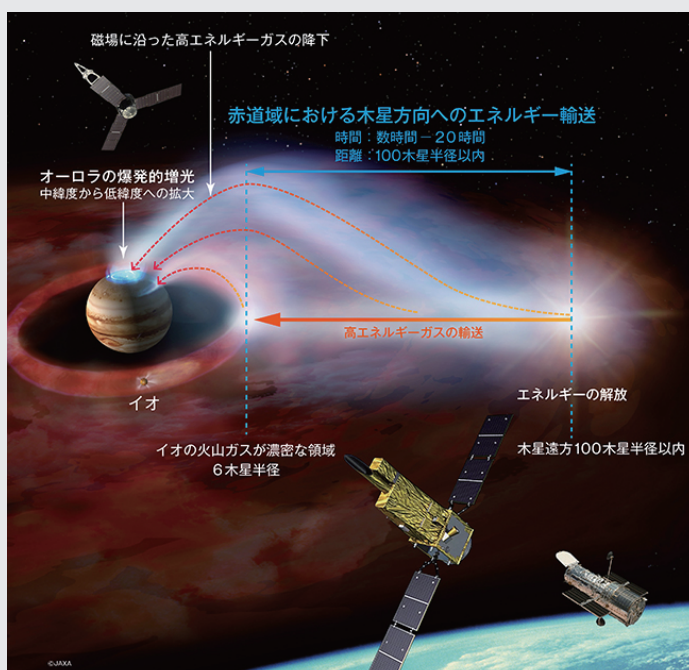
■ 氷衛星の宇宙風化と表層・内部進化

筆者らが明らかにした物質・エネルギー輸送の経路



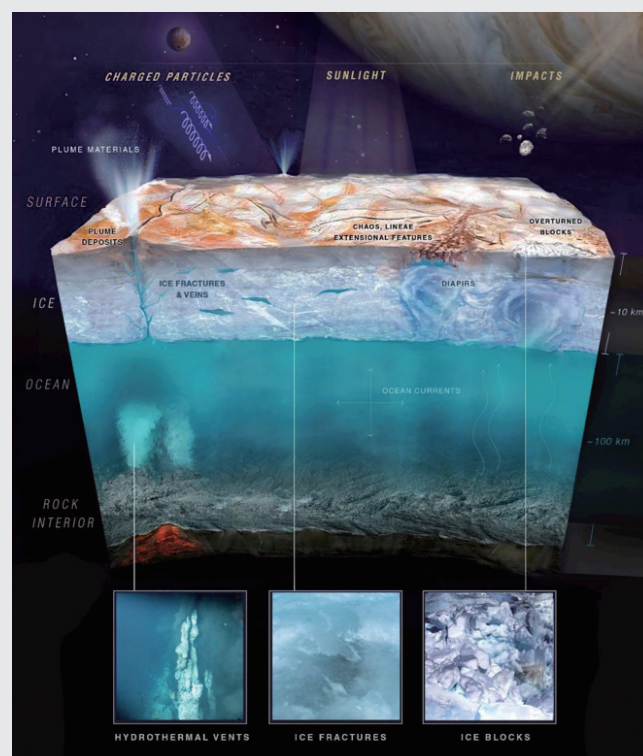
【図5】

ひさき衛星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）。ひさきの通算142日目の観測において、オーロラの放射エネルギーが数時間で急激に増大し1,500ギガワット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分かります。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。
https://www.riken.jp/press/2017/20170523_1/



【図6】筆者らのオーロラ観測から推定される木星のエネルギー解放・輸送過程の概念図。本研究での観測により推定される木星のエネルギー解放・輸送の概念は以下の通りです。木星遠方（100木星半径以内）に大量に蓄積された火山ガスと木星磁場のエネルギーが、太陽風によって開放（磁場のエネルギーがガスに移動）され高エネルギープラズマを生み出し、赤道域を木星まで輸送されます。高エネルギープラズマの輸送は、イオの火山ガスが濃密な領域（6木星半径）に到達します。輸送の最中、高エネルギープラズマは木星磁場に沿って、極域へ降下していきます。極域に到達した高エネルギープラズマはオーロラを爆発的に増光させます。青・黄・橙・赤の色はプラズマが加速されて、高エネルギーになっていくことを示しています。
https://www.riken.jp/press/2017/20170523_1/

上には、氷衛星が存在します。木星の磁気圏に蓄積・開放された物質・エネルギーが、氷衛星へと運ばれ、表層物質に変化をもたらしているかもしれません。氷衛星の表層には、地殻活動などを通して内部海から噴出した海水起源の氷や硫酸塩、食塩と思われる物質が



【図7】木星氷衛星エウロパの内部海、氷地殻、宇宙環境を示した模式図。宇宙空間からは、磁気圏プラズマや、太陽紫外線、イオ火山などを起源とする微小隕石が飛来し、氷地殻の表層に照射される。照射により供給された物質・エネルギーは表層の物質に物理・化学変化をもたらす。変化した物質は氷地殻のテクニクス等によって内部海に供給される可能性がある (Credit: K.P. Hand et al. / NASA)。

堆積しています。太陽光（紫外線やX線）、磁気圏プラズマ、イオ火山などが起源の塵（微小隕石）が常に降り注ぎ、表層物質を物理的・化学的に変化させる「宇宙風化」という過程が存在していると考えられています【図7】。我々が発見した物質・エネルギー輸送も、この氷衛星表層の宇宙風化を駆動していると考えられます。
木星の氷衛星においては、宇宙風化の原因の中でも

プラズマが最も大きなエネルギーフラックスを持っています。プラズマが駆動する宇宙風化による表層物質の変化は、多岐にわたります。代表的なものを以下にまとめます。

1. 電離：プラズマ中のイオンと電子が、表層の物質の分子や原子と衝突し、電離させます。
2. 解離：イオンと電子が、表層の物質の分子と衝突し、分子の構造を破壊してより小さな分子や原子を生成します。
3. スパッタリング：イオンと電子が、表層の物質の分子や原子と衝突して、表層物質が宇宙空間へ叩き出されます。
4. 結合：上記の電離や解離の結果、表層物質の分子の一部がつなぎ代わり、新しい種類の物質が合成されます。

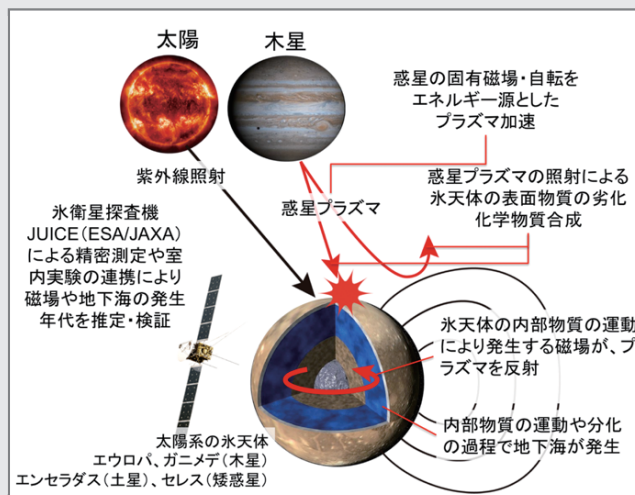
これらの物理・化学変化により、もともと氷衛星の内部海にあった物質と異なる分子構造や物理状態の物質が表層で生まれます。これらは、氷地殻の活動などにより内部海へ輸送される可能性があります。輸送された物質は、内部海がもともと持っていた物質と異なるものを含みますので、内部海の組成を変化させるのです。筆者は、内部海が生命を育みながら進化してきたとすると、その生命環境の状態を、上記の内部海—表層の物質循環や、表層の宇宙風化が左右しているのではないかと考えています。

もう一つの大きな謎は、内部海はそもそもいつできたのか？という点です。土星衛星エンセラダスのように、現時点で内部海が高確率で存在していても、100年前や1000年前など、天体進化の上では「最近」に内部海ができたとしたら、その中で生命が発生・進化することは不可能です。内部海が現時点で生命を育んでいるためには、氷衛星が形成されたあとで、なおかつ充分昔のある時点で内部海が発生し、安定的に長期間継続し、現在に至る必要があるのです。

そこで我々は、上述のプラズマの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。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を表層に噴出したとすると、その海水起源の物質は表層でゆっくりと宇宙風化していきます。これを実験室におけるプラズマ照射実験でリアルに再現し、望遠鏡観測や過去の探査機その場観測によって得られた実際の氷衛星の表層の特徴と比較することで、海水が噴出した時期を特定するのです。これにより、氷衛星が形成されて進化してきた中で、いつ

表層へ水噴出できる深さに内部海が存在し、どのように噴出していたか？を解明しようとしています【図8】。

我々の実験は、表層で風化を受けた物質が物理・化学変化を受ける過程をリアルに再現するため、前述の表層—内部海の物質循環と、内部海の組成進化の解明にも大きく貢献できます。



【図8】筆者の氷衛星宇宙風化研究の概要図。木星の自転や磁場をエネルギー源として加速されたプラズマは、惑星周囲の宇宙空間を輸送された後に、氷衛星エウロパ・ガニメデに照射されます。照射されたプラズマは地下海から噴出した水や塩で構成される表層物質の解離や合成（宇宙風化）を担います。本研究では、宇宙風化で新たに発生した物質を定量化し、その蓄積量から地下海物質の噴出時期を制約します。
https://member.ipmu.jp/SpaceTech_to_QuantumBeam/publicly-offered-research/2019-d01-1/index.html

筆者は、2017年頃から予備実験を重ね、18年からプラズマ照射実験のための独自装置の開発を開始しました。長時間の実験を行い、大量のプラズマを照射させることで、氷衛星における時間を早送りしつつ長期の宇宙風化を再現するのが狙いです。しかし、そのような実験は世界的にも前例がなく、既存の装置や設備では実現できません。独自の装置開発が必要だったのです。ノウハウゼロ、開発資金もゼロから開発に取り組みました。科学研究費助成や、各大学が実施する若手研究者支援事業の予算などを組み合わせ、資金調達と開発を同時並行で少しずつ地道に積み上げた結果、21年の秋頃ようやく装置は完成しました【写真】。

21年は、東京理科大学で新しく自分の研究室を設立した年でもあります。しがらみなくゼロからスタートしたまっさらな研究室において、自分が指導する学生とともに、志やモチベーションを共有しつつ、装置の組み上げや性能試験、初期実験を協力して行えたことは本当に幸運でした。現在は学生らとともに、氷衛星の表層の宇宙風化を独自装置の実験で再現しつつ、



【写真】

筆者の研究室で開発したプラズマ照射装置。装置の上部にイオン銃と電子銃が設置されており、写真中央の真空チャンバに設置したサンプルに向けて、惑星や太陽風のプラズマを模擬したイオン・電子を照射します。これにより氷衛星やその他の天体表層における宇宙風化を再現します。

表層の物質の物理・化学変化の再現や、それを通した内部海物質の噴出年代の特定に本格的に取り組んでおり、新しい結果が次々と生まれています。

また、我々の装置は、天体の表層と宇宙空間が直接触れている環境の宇宙風化に普遍的に応用できるものです。氷衛星の研究を展開すると同時に、水星や火星の進化の解明にも取り組んでいます。灼熱の惑星である水星の表面に、太陽風が照射されることで水が生成される過程の解明や、火星大気起源の水素、酸素、炭素が衛星フォボスに降り積もる過程を実験で再現して、過去に火星にあった海洋や大気の進化の解明を狙っています。

■ 氷衛星の国際探査へ乗り込む

我々は室内実験にとどまらず、国際探査計画に参加することで、氷衛星の表層や内部の進化の解明を更に進めようとしています。筆者は、欧州宇宙機関の木星氷衛星探査計画JUICEの搭載装置（電磁場計測器）の開発メンバーです。2030年代の初頭から、JUICEを用いてガニメデ、エウロパの直接探査を行う予定です。JUICEにより、内部海の深さをレーダーで探査し、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、組成などを精密に検証することができます【図8】。我々は実験、望遠鏡観測、探査機観測など、ありとあらゆる手法を総合的に総動員して、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、30年代初頭にエウロパを探査しようとしています。その探査の観測を解釈する時にも、我々の室内実験の結果が大いに役に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。欧州宇宙機関は昨年、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ことを発表しました。この計画は、Voyage2050と呼ばれています (<https://www.cosmos.esa.int/web/voyage-2050>)。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無数に提案されましたが、その中の一部に巨大惑星の氷衛星探査が多く提案されました。筆者もその提案チームの1つのメンバーとして提案書を執筆しました (<https://link.springer.com/article/10.1007/s10686-021-09810-z>)。Voyage2050では、JUICEで得られた氷衛星の知見を更に深め、地球外生命環境の成り立ちをより深く解明していくミッションになるでしょう。筆者の研究室では、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、万端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継続しています (<https://dept.tus.ac.jp/tomoki-kimura/>)。

■ 最後に：太陽系大航海時代

今、世界は「太陽系大航海時代」を迎えています。氷衛星に限らず、火星、金星、水星、天王星、小惑星、小天体など、多くの太陽系天体に各国が競って探査機を打ち上げ、太陽系の成り立ちや、地球外生命環境の探査に乗り出しています。日本も、社会や経済の状況が厳しいものの、その流れに必死に追いつきしがみつこうと、多くの研究者、研究機関、関連省庁が努力を重ねています。筆者と学生らも、研究室という小さな船ではありますが、航海に乗り出し「地球外に生命が存在するか?」「なぜ地球に生命が誕生したか?」という人類最大の問いに答えようとしています。もし、この拙文を読んでくださる若い読者のなかで、興味を持った方がいらしたら、我々の船のクルーになってみませんか。一緒に太陽系を航海して冒険しましょう。

参考文献

- 1) Kimura, T., *et al.* (2015), Transient internally driven aurora at Jupiter discovered by Hisaki and the Hubble Space Telescope, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 1662–1668, doi:10.1002/2015GL063272.
- 2) Kimura, T., *et al.* (2017), "Auroral brightening at Jupiter observed by the Hisaki satellite and Hubble Space Telescope during approaching phase of the Juno spacecraft", *Geophysical Research Letters*, Special Issue Early Results: Juno at Jupiter, doi: 10.1002/2017GL072912.
- 3) Sulaiman, A.H., *et al.* (2021). Enceladus and Titan: emerging worlds of the Solar System. *Exp Astron.* <https://doi.org/10.1007/s10686-021-09810-z>