

# ひさき衛星の始まりと当時の背景

吉川 一朗

〈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: yoshikawa@edu.k.u-tokyo.ac.jp

イプシロンロケット初号機で打ち上げられたひさき衛星は、極端紫外線光 (EUV) を観測することで惑星磁気圏や惑星大気を研究する革新的な惑星観測用の宇宙望遠鏡だった。観測波長は50–150 nmと地上望遠鏡では捉えられない領域で、定常的な惑星観測に特化していた。木星磁気圏の継続的な分光データの取得は惑星を観測する斬新な方法として注目を集めた。ひさき衛星としての開発は2007年に突然始まり、既存技術の活用と事前の検討のおかげで迅速な開発が可能となった。ひさき衛星特集の最初の記事として、本稿では開発当時のことを振り返り、他所では書ききれなかったことを述べる。

ひさき衛星は太陽系内の惑星をくまなく観測する惑星観測用の宇宙望遠鏡 (分光器) であり、特に木星の内部磁気圏の観測によって大きな成果を挙げた。ひさき衛星は全体が望遠鏡 (分光器) であり、直径20 cmの主鏡、スリット、回折格子と光検出器であるマイクロチャンネルプレートから構成されている (図1)。観測波長は50–150 nmにあり、紫外線とX線の狭間にある極端紫外光 (EUV) とよばれるニッチな波長領域である。通常、観測対象からの光を焦点面に集めるために何枚ものレンズや鏡を使うが、この波長域では光学素子での反射や透過のたびに大きく減光するため、ひさき衛星では2枚の反射面しか持たな

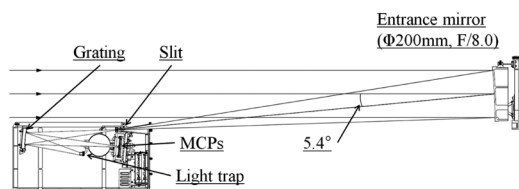


図1 ひさき衛星に搭載した望遠鏡 (分光器) の光学系の概略。主鏡 (Entrance mirror), 回折格子 (Grating), 検出器 (MCPs) からなる。

い (主鏡と回折格子)。反射面の材質は、CVD (Chemical Vapor Deposition) 法で作ったシリコンカーバイドであり、極端紫外領域では高い反射率を持つ [1]。観測器に入射した光を、軸外し放物面鏡で集め、スリットを通過した光だけをトロイダル型回折格子で分光する。ひさき衛星が観測した木星イオプラズマトーラスの観測例を図2に示す。横軸が波長であり、縦軸が空間方向を表す。地球から見て、木星の東西が縦方向になる。

ひさき衛星の開発は突然始まった。

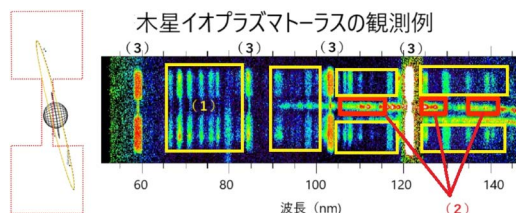


図2 ひさき衛星が観測した木星イオプラズマトーラスの例。横軸が波長、縦軸が空間方向を表す。ここには3つの成分が写っている。(1) 木星のイオプラズマトーラスの輝線 (主に、硫黄イオンからの発光) (2) 木星のオーロラ (主に、水素分子からの発光), (3) 地球大気からの発光。

2007年の正月休み、宇宙科学研究所の小型衛星シリーズを取りまとめる関係者の一人から突然の連絡があった。「イプシロン初号機の惑星望遠鏡衛星がこのままではあぶない。もっと魅力的なものにしてくれ」と。初夢でも見ているかのような気分になり、休み明けに事情を聴くことになったことだけは覚えている。当時、私は、宇宙科学研究所から東京大学に異動し、ベピコロンボ水星探査計画、月周回探査衛星かぐやをはじめとする大型計画の観測機開発に注力しており、地球を周回する小さな衛星に興味をあまり持っていなかった。惑星科学の分野で地球の周回軌道から惑星大気・プラズマを観測するという計画が進行中であるのは知ってはいたが、学会で話を聞く程度であり、協力や応援をするだけの体力もなかった。関係者から事情を聞くと、当時の設計は、可視波長域における惑星大気の観測に主軸を置き、地上の大型望遠鏡に勝る性能を、宇宙空間を飛翔する小型人工衛星で実現しようとしていたようである。一方、極端紫外光という領域は紫外線よりも波長は短く（エネルギーが高く）X線よりも波長は長く、X線天文学とはまた違うメンドクサイことが必要な波長領域である。しかし、この波長域は、惑星の大気分子が原子に乖離した状態や電離したイオンが散乱する光の波長が集中しており、1990年代の後半、地球のプラズマ圏が可視化された（ヘリウム一価イオンの共鳴散乱線波長30.4 nm）のもこの波長領域である [2]。この極端紫外光領域に観測の中心を置くことで話の筋はよくなった。この波長の光は大気に吸収されてしまうため、地上には届かず、地上の大型望遠鏡と性能を競う必要もない。そして、ハッブル宇宙望遠鏡などもこの波長域での観測が可能であるが、惑星観測専用の望遠鏡ではないため、定常的な観測は過去にほとんど例がないのである。

しかし、開発に残された時間が大きな問題だった。前述したように、すでに計画は何年前にスタートしていたが、突然の設計と責任者の変更、

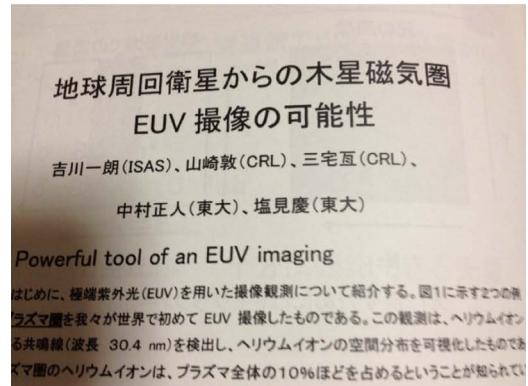
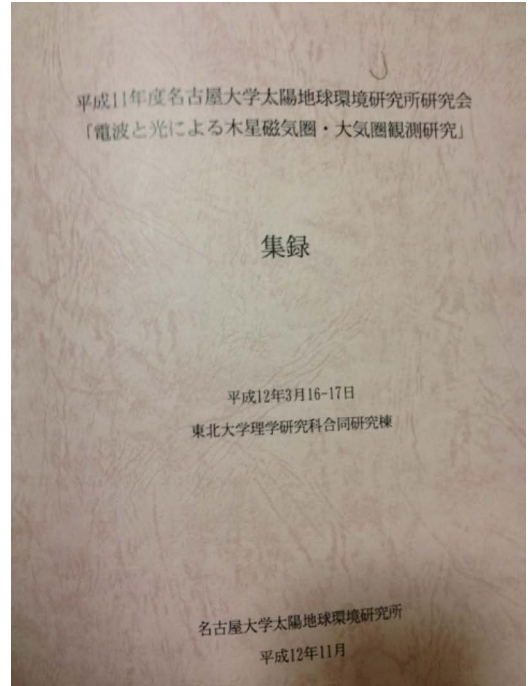


図3 ひさき衛星計画の原案となった資料。2000年3月に開催されたシンポジウムのプロシーディング。

「そんなに簡単に宇宙望遠鏡のデザインって決められるものなのか？」と思う方も多いと思う。

実は、2000年3月に東北大学でシンポジウム「電波と光による木星磁気圏・大気圏観測研究」があり、「地球周回衛星からの木星磁気圏 EUV 撮像の可能性」というお題を頂き、自分なりの検討結果を紹介する機会があった (図3)。1990年代は、世界各国が外惑星探査に乗りだした時代で

ある。火星や木星に数々の探査機が打ち上げられ、そのデータを何年間ものあいだ待ち続けた。日本も、固体ロケットM-Vを用いた火星探査を計画し、1998年に火星にむけのぞみ衛星を打ち上げ、1年足らずで到着の予定だったが、いくつかの原因が積み重なり、到着が延期になり最後は失敗に終わってしまった。米露の火星探査機が立て続けに失敗していたこともあり、火星には不吉なものがある、などという雰囲気になっていた。木星には、米国の探査機ガリレオが向かっていたが、通信機の不具合により、期待していたほどの成果は創出されそうになかった。なんの歯車が狂ったのか、うまくいかなくなり始めたのがこのころである。何年もかけて惑星まで巡行してもデータが取れない、というフラストレーションから生まれた発想は、まさに、「地球周辺から惑星の様子を望遠鏡で眺めたい」という欲求である。それができれば、待ち時間も節約できるし、巡行中に起こるかもしれないリスクを避けられる。

2000年3月に私は、極端紫外光を用いた地球周辺プラズマの撮像に成功した成果をもとに博士論文をまとめたところであったが、このころは惑星科学分野の将来に不安を感じていた。そんな中で開かれたシンポジウムで「地球周回衛星からの木星磁気圏 EUV 撮像の可能性」について意見を述べる事ができた。このときの設計案が、実はそのままひさき衛星に採用された。クイックな開発スタートができたのは(1)設計案を7年以上前に固められたこと(考える時間が十分にあった)、(2)この波長の光学系の設計に明確な限界があり、詳細検討の余地はそれほどなかった(あれこれ考える必要がなかった)、(3)光学系

部品のそれぞれは、何10年以上も前に確立された技術を元にしており、開発遅延のリスクがなかった(古いものを工夫して使う)、(4)これまでの衛星観測に対し、ひさき衛星の優位性が明らかだった(波長範囲と継続性)、点にある。

2000年3月に、ひさき衛星の設計原案になるアイデアを与えてくれたシンポジウム主催者には感謝したい。

## 参考文献

- [1] Yoshikawa, I., et al., 2014, Space Sci. Revi., 184, 237
- [2] Nakamura, M., et al., 2000, Geophys. Res. Lett., 15, 141

### The Beginning of the Hisaki Satellite Project and Its Background

**Ichiro YOSHIKAWA**

*Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8561, Japan*

Abstract: The Hisaki satellite, launched aboard the first Epsilon rocket, was an innovative planetary telescope designed to study planetary magnetospheres and atmospheres by the observations in the extreme ultraviolet (EUV) spectral region. Operating in a wavelength range of 50–150 nm, which is inaccessible to ground-based telescopes, Hisaki specialized in continuous planetary observations. It provided spectroscopic data of Jupiter's magnetosphere garnered attention as a groundbreaking method for planetary studies. The development of Hisaki began unexpectedly in 2007, enabled by the use of existing technologies and thorough preliminary assessments, which allowed for rapid progress. Reflecting on the development process, I will share insights and details that could not be fully conveyed in other writings.

# 「ひさき」衛星の開発戦略とつないだ櫛

山 崎 敦<sup>1,2</sup>

〈<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1〉

〈<sup>2</sup> 総合研究大学院大学 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1〉

e-mail: yamazaki@stp.isas.jaxa.jp

惑星分光観測衛星「ひさき」(SPRINT-A)は、宇宙航空研究開発機構の小型科学衛星として開発されました。「セミオーダメイド型バス」を導入することによって、開発着手から初観測まで5年という短期間で、タイムリーな科学観測を実施することに成功しました。2013年9月14日にイプシロンロケット試験機によって所定の軌道に投入され、同年12月から定常観測を開始しました。他ミッション・地上望遠鏡との協調観測を含む極端紫外分光観測を10年以上継続した後、経年劣化を理由に2023年12月8日に停波運用を実施し、惑星用の宇宙望遠鏡としての使命を終えました。本稿では、3つの柱で推進された「ひさき」衛星の開発戦略と「ひさき」衛星が次世代につないだ櫛を紹介します。

## 「ひさき」衛星の開発戦略

宇宙航空研究開発機構(JAXA)の小型科学衛星として開発された惑星分光観測衛星「ひさき」(SPRINT-A)は、3つの柱、惑星圏環境の研究・新しい衛星開発方法・新しい宇宙技術研究を開発戦略として推進されました。

まず、惑星圏環境の研究は、主要観測機器である極端紫外線分光器(EXCEED)によって、太陽系惑星の環境の維持と進化を理解することを目指し、非磁化惑星大気と太陽風の相互作用による物質輸送(散逸)過程の解明と、回転系磁気圏プラズマのエネルギー・物質輸送過程を解明することが目的です[1-3]。観測例がほとんどない高分解能・高感度の極端紫外分光観測を実施すること、同一システムで木星・金星など複数の惑星を観測できること、観測対象を太陽系内の惑星(特に木星・金星・火星)に限定し長期連続観測を実現することがコンセプトです。

次に、新しい衛星開発方法には、セミオーダメイド型バスであるSPRINTバスを使用することによって、短期間開発を実現しタイムリーな科学観測を実施する技術的な目的があります。ここで「バス」とは、各衛星で共通機能を実現する部分を示す言葉で、電力供給、地球との通信、姿勢、温度などを制御しています。過去の衛星では衛星毎に個別設計でしたが、SPRINTバスでは予め用意した標準的なモジュール群の組み合わせで実現し、かつ柔軟性を確保するべくモジュール群の組換えを容易にするためスペースワイヤと呼ばれる新しい衛星内通信ネットワーク規格で接続しています[4, 5]。独立に開発した搭載ミッション部を載せ替えるだけで別目的の衛星となることも特徴です。ただし、各ミッションからの個別要求には標準化のレベルを下げて対応可能となりますが、想定外に特殊性が増すとSPRINTバスの長所は徐々に失われることに留意する必要があります。図1にSPRINTバスの設計柔軟性を示します。

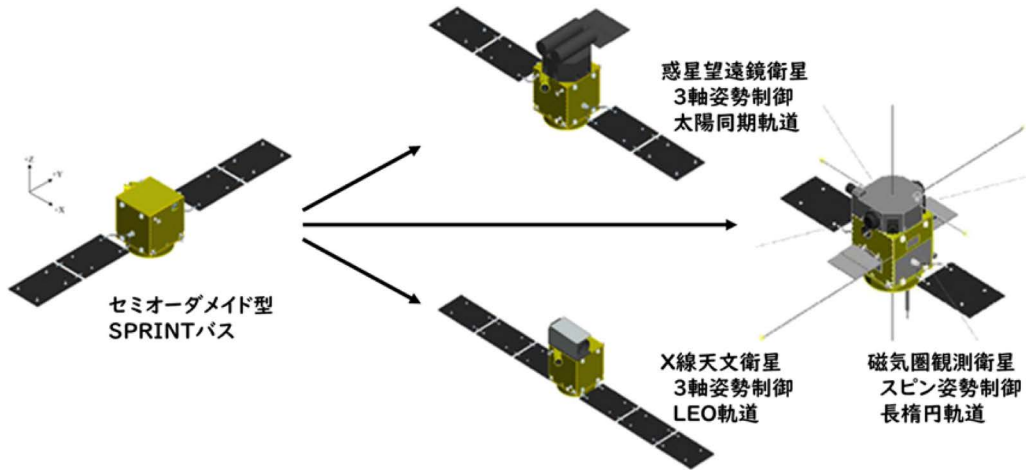


図1 様々なミッションに対応できるように柔軟性をもったSPRINTバス (©JAXA).

表1 「ひさき」諸元

国際標識番号		2013-049A
打ち上げ情報	日時	2013年9月14日14時00分(日本時間)
	射場	JAXA 内之浦宇宙空間観測所
	ロケット	イプシロンロケット試験機
衛星情報	質量	348kg
	寸法	高さ約4m×奥行き約1m×長さ約7m (長さは太陽電池パドル展開時の両翼端)
	指向精度(設計値)	±5秒(ガイドカメラ操作時)
軌道情報	投入軌道	高度近地点 947km, 遠地点 1157km
	傾斜角	29.7度
	周期	106分
極端紫外線分光器	観測波長	52-148nm
	波長分解能	0.4-1.0nm(使用スリット依存)
	視野角	360秒角

そして、新しい宇宙技術研究は、次世代電源技術の軌道上実証実験(NESSIE)による、薄膜太陽電池とリチウムイオンキャパシタの将来の電源系技術の獲得が目的です[6].

また、衛星内の技術開発だけではなく、モジュール化した新しい地上管制用ソフトウェアである「GSTOS」(Generic Spacecraft Test and

Operations Software; 汎用衛星試験運用ソフトウェア)をJAXA宇宙科学研究所の科学衛星運用・データ利用ユニット(C-SODA)と協力し開発しました[7]. 衛星打ち上げ前の試験から打ち上げ後の観測運用までを統一的に扱うことが可能となり、現在も数多くのプロジェクトで採用されています.

このように開発された「ひさき」は、内之浦宇宙空間観測所からイプシロンロケット試験機で打ち上げられました。開発着手から初観測まで5年という短期間で、タイムリーな科学観測を実施することができました。特にNASAの木星探査機JUNOが木星に到着するまでのクルージング期の太陽風観測と「ひさき」による木星観測の協調観測の成果[8]は、現在も継続する木星研究の国際研究グループを推進する礎となっています。表1に「ひさき」の諸元を示します。

## 「ひさき」衛星の科学観測と停波運用

2013年9月14日に所定の軌道に投入された「ひさき」は、11月19日にファーストライトを取得し、12月から定常観測を開始しました。直後の2014年1月と4月には、ハッブル宇宙望遠鏡やX線観測衛星Chandra, XMM-Newton, 「すざく」と木星の協調観測に初めて成功し、その後も他ミッションとの木星協調観測を継続しました。特にJUNOとの協調観測は、JUNOの軌道をよく見極め、JUNOが木星赤道域において内部磁気圏に接近するタイミングを狙って実施しました。また、「ひさき」単独成果としては、長期間にわたるデータ蓄積が効力を発揮しました。木星観測では、イオの大規模噴火や太陽フレアなど発生予想のつかない自然現象イベントに伴う木星内部磁気圏プラズマやオーロラの観測に成功し、太陽風や磁気圏内磁場・圧力エネルギーの相互作用について研究を遂行することができました。火星観測では、上層大気の季節変動・太陽活動周期変動をとらえることに成功しました。また、さらに金星探査機「あかつき」との協調観測として、金星上層大気の大气光観測を実施し、酸素原子・水素原子発光量の昼夜非対称性、大气重力波によると予想される上層大气と下層大气のカップリングを確認しています。その他にも、小回りの利く観測計画立案体制を構築したことにより観測直前に軌道決定される彗星観測や、金星・火星・木星の太陽離

角が小さい観測不適期間には、天文学分野の研究者との分野間連携研究として、天文学観測を実施しました。上記の観測データはすべて既にリダクション済みで、JAXA宇宙科学研究所のData ARchives and Transmission System (DARTS)にアーカイブされています[9]。

このように記述すると順調な観測期間と思われませんが、いくつかのトラブルにも見舞われています。2016年6月には、視野ガイドカメラ(FOV)[3]が、設計寿命を全うしたものの検出器の放射線劣化により観測中の惑星像を捉えることができなくなり、最高精度の観測視野制御のための観測中の惑星追尾を断念しました。また、2017年12月には、極端紫外分光装置(EUV)[1, 2]のスリット動作不良が発生しましたが、惑星観測には適切な位置にスリットが保持されたため、その後の観測遂行には支障がありませんでした。さらに、2019年3月には、スタートラッカ(STT)の検出器の経年劣化に伴う姿勢制御異常が発生し一時観測中断をしましたが、STTのパラメータ更新により定常観測復帰しています。

打ち上げ以降10年以上にわたり、極端紫外分光観測を武器に惑星の磁気圏や高層大气観測から多くの成果をあげてきましたが、経年劣化により高い指向精度が要求される観測条件を満足する時間が徐々に短くなりました。姿勢制御の基準データを取得してきたスタートラッカーが、検出器の放射線劣化により感度低下やノイズレベル増加を引き起こしたため、軌道上での姿勢決定ができる時間が短くなったのです。この状態で観測運用を継続しても科学的に有意義な観測データを取得できないことから、その責務を全うしたと判断し、2023年12月8日停波運用を実施し、惑星用の宇宙望遠鏡としての使命を終えました。

## 「ひさき」衛星がつないだ樁

「ひさき」衛星は、セミオーダメイド型バスを用いた初めての衛星、スペースワイヤを本格的に

導入した初めての衛星、汎用衛星試験運用ソフトウェア (GSTOS) を初めて採用した衛星管制システム、そして打ち上げロンチャーとなったイプシロンロケットも試験機の位置づけとして初めての打ち上げと、初めてづくしのプロジェクトでした。セミオーダーメイド型のバスシステムは、ジオスペース探査衛星「あらせ」(ERG)、小型地球観測衛星である先進的宇宙システム (ASNARO, ASNARO-2) や、政府開発援助を活用したベトナムの地球観測衛星 (LOTUSat)、開発中の公募型小型科学衛星「深宇宙探査技術実証機 (Destiny+)」, 「高感度太陽紫外線分光観測衛星 (SOLAR-C)」などで採用または一部採用され、後続する複数の公募型小型科学衛星で採用提案を得ています。また、発展的な科学的な研究課題は、公募型小型計画6号機候補に選定された紫外線宇宙望遠鏡計画 (LAPYUTA) に受け継がれています。

後続のミッションに貢献することを目指した実験的な要素も強く、多方面からのご指導・ご指南がなければ、叶わぬミッションでした。プロジェクト発足から15年、打ち上げ・観測運用開始から10年、当初の設計期間をはるかに超えて長きに渡りご支援・ご協力・ご声援いただきありがとうございました。科学成果については、このあとに続く「ひさき」特集号の各投稿記事をご一読ください。また、主な成果リストは「ひさき」プロジェクトサイト [10] も合わせてご参照いただければ幸いです。

## 参考文献

- [1] Yoshioka, K., et al., 2013, Planet. Space Sci., 85, 250  
 [2] Yoshikawa, I., et al., 2014, Space Sci. Rev., 184, 237

- [3] Yamazaki, A., et al., 2014, Space Sci. Rev., 184, 259  
 [4] 福田盛介ほか, 2009, 宇宙技術, 8, 1  
 [5] Nakaya, K., et al., Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, 2012. 10, Tf\_5  
 [6] Kukita, A., et al., 2014, Proceeding of 33rd ISAS Space Energy Symposium.  
 [7] 西村佳代子 ほか, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 (JAXA-RR-14-009), 2015, 1  
 [8] Kimura, T., et al., 2017, Geophys. Res. Lett., 44, 4523.  
 [9] <https://darts.isas.jaxa.jp/missions/hisaki> (2025.2.25)  
 [10] <http://www.isas.jaxa.jp/home/sprint-a/> (2025.2.25)

## The Development Strategy of the 'Hisaki' Satellite and the Passed Baton

Atsushi YAMAZAKI<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara, Kanagawa 252-5210, Japan

<sup>2</sup>The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara, Kanagawa 252-5210, Japan

Abstract: The 'Hisaki' (SPRINT-A) satellite was developed by the Japan Aerospace Exploration Agency as an Epsilon M-class mission. Adopting the semi-custom flexible satellite bus, it was able to successfully carry out timely scientific observations in a short period of only five years from the start of development to the first observation. It was launched into its designed orbit by the Epsilon launch vehicle on 14 September 2013, and began regular observations in December. After more than 10 years of continuous extreme ultraviolet spectroscopic observations, including coordinated observations with other missions and ground-based telescopes, the satellite was decommissioned on 8 December 2023 due to time-dependent degradation, and completing its mission as a planetary space telescope. This article presents three strategies for the research and development of the Hisaki satellite and the baton that the Hisaki satellite has passed on to its successors.

# 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、



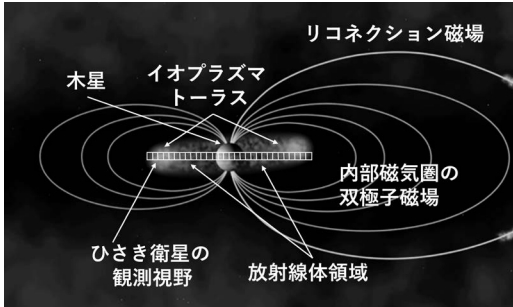


図1 木星磁気圏の概要。木星の内部磁気圏はイオプラズマトーラスで囲まれており、さらにその周りを強固な内部磁気圏磁場が取り囲んでいる。遠くに引き伸ばされた磁力線はリコネクションを引き起こし、数10 keVの高エネルギー電子を生み出す。ひさき衛星の観測視野(360秒角)はイオプラズマトーラスの観測に最適化されている。

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

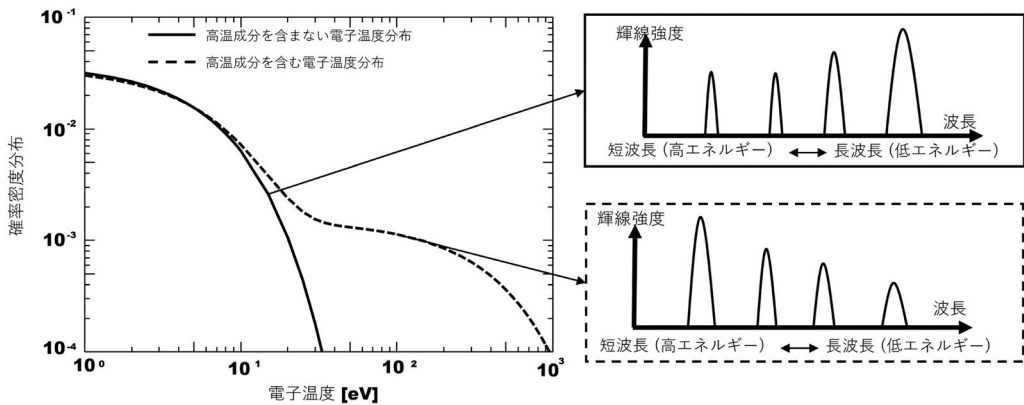


図2 スペクトル診断の原理。硫黄や酸素のイオン ( $S^+$ ,  $S^{++}$ ,  $S^{+++}$ ,  $O^+$  など) は極端紫外領域に多くの輝線をもつ。輝線強度から導出できるイオン組成比に加えて、励起源である電子温度分布によってイオンが発する輝線強度比が変わる。この性質を使って、輝線強度比から電子温度分布を導出することができる。

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

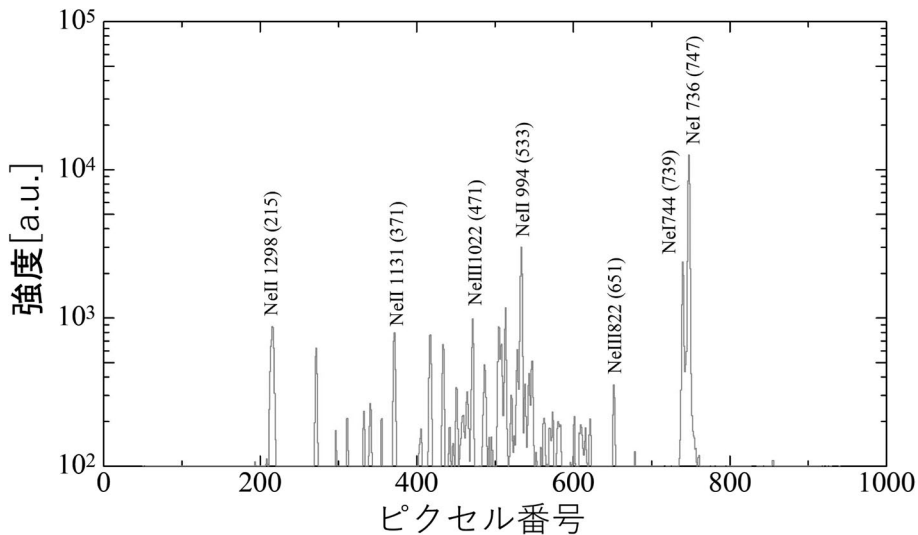


図3 ひさき衛星打ち上げ前の最終校正試験で取得したネオンガスの極端紫外スペクトル。横軸は波長ではなく検出器のピクセル番号となっている（この実験で取得した情報をもとに、ピクセル番号と波長の物理変換を行う）。また図中に示されている数字は、原子輝線データベースに記載されている波長（Å）と、その輝線の極大値に該当するピクセルの番号である。

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。

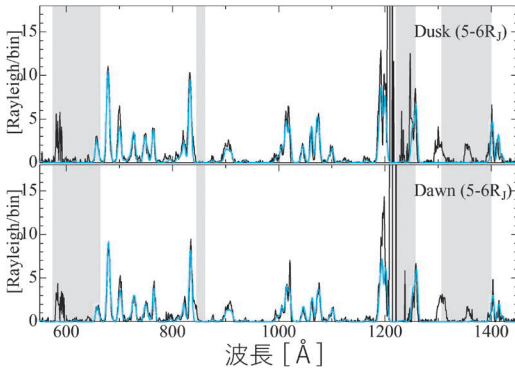


図4 ひさきが取得したイオプラズマトーラスの極端紫外スペクトル（黒）と、スペクトル診断によって最適パラメータを決定したときのモデルスペクトル（青）。木星の夕側（Dusk）と朝側（Dawn）をそれぞれ分離して示している（本稿では触れないが、高温電子分布のDawn/dusk非対称性に関する議論も展開されている[13]）。灰色のハッチ領域は、地球大気の影響（ジオコロナ）によるコンタミネーションが無視できないため、解析から除外している。

#### 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

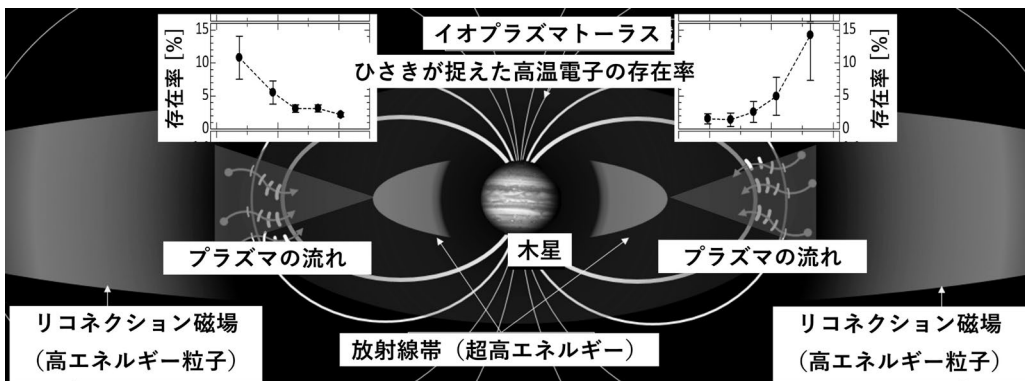


図5 ひさきの観測により明らかになったイオプラズマトーラス内部の高温電子密度。イオン密度の高いイオプラズマトーラス内でこの電子温度分布（勾配）を維持するためには、強力な磁場のバリアに逆らって外部磁気圏に由来する高温電子を継続的に内側（木星側）に向けて輸送する必要がある。なお、高温電子密度は電子温度分布関数に2温度成分（約5 eVの背景電子と、約300 keVの高温電子）を仮定し、スペクトルフィッティングで求まる最適な相対密度として導出している。

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し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っています.

### 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.

# 「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。

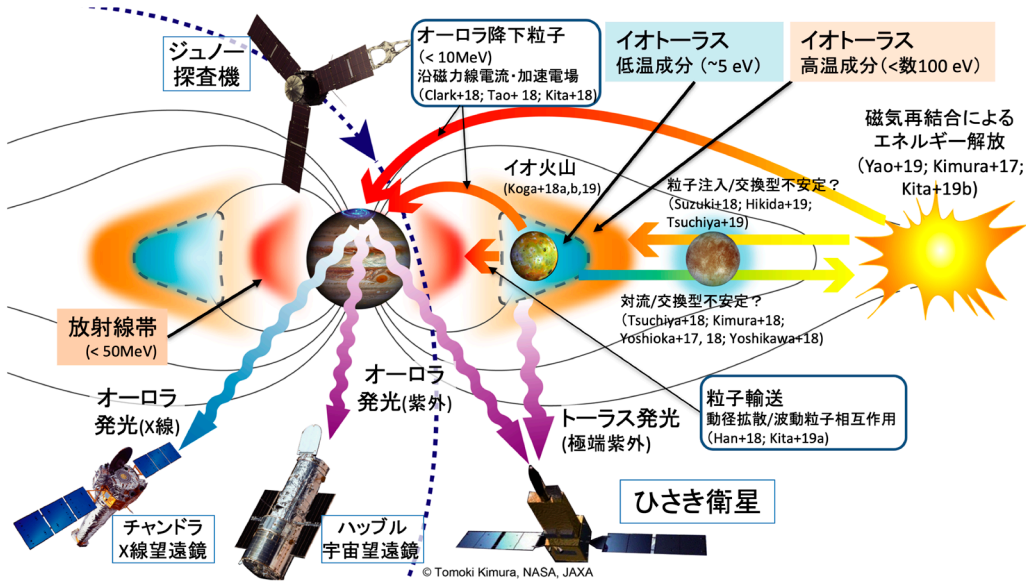


図1 木星系における物質・エネルギー輸送の概念図. イオの火山から放出された  $\text{SO}_2$  ガスが電離し,  $\text{S}^+$ ,  $\text{O}^+$  等のイオンと電子からなるプラズマが磁気圏にピックアップされた後, 遠心力や磁気張力によって磁気圏内を循環します. その過程で様々な加熱・加速過程を経験し, 一部の粒子は木星の極域に降り込みオーロラを発光させます. プラズマの循環を矢印で表しています. 著者らは, この物質・エネルギー輸送過程を「ひさき」を始めとした飛行体を連携させた国際協調観測で可視化し, 解明に取り組んできました. 図中で参照している論文は,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

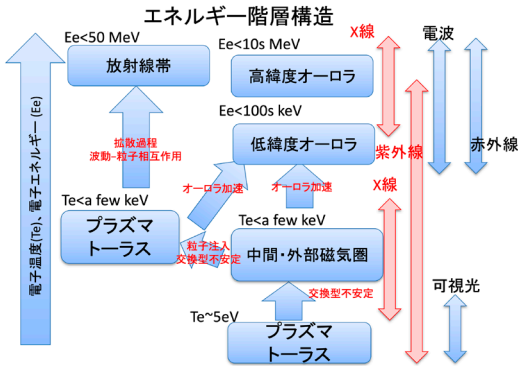


図2 木星系のプラズマのエネルギー階層構造. 下の領域は低エネルギー, 上の領域は高エネルギーのプラズマ粒子に対応します. エネルギーの値は電子の運動エネルギー (Ee) と温度 (Te) で表記しています. イオ火山起源のプラズマは, ピックアップ直後はプラズマトラス中の低温 (5 eV程度) 成分となり, その後木星系の各所へ輸送されます. この際に, 電磁的な加熱・加速を受け, 最高で50 MeV (放射線帯) に到達します. 図の右側には, それぞれの領域や粒子エネルギーに対応する発光の波長を示しています.

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のボスドクであった筆者、埴千尋博士、サラ・バッド

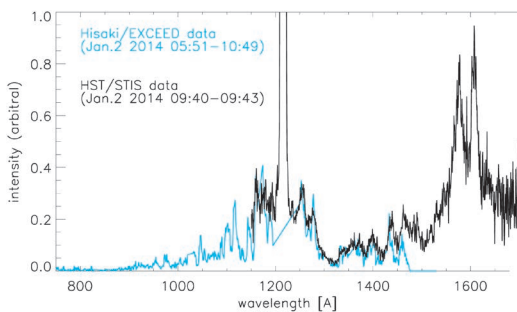


図3 協調観測中に「ひさき」とハッブル宇宙望遠鏡によって得られた木星オーロラの発光スペクトル[2]。青線が「ひさき」、黒線がハッブルのスペクトル。木星極域に降り込んだ磁気圏起源の電子が、水素大気と衝突して、水素原子の輝線であるLyman $\alpha$ 線(図中の1216 Å付近における強度が大きな輝線に相当)や、水素分子のバンド発光であるLyman-Werner band(図中のLyman $\alpha$ 線以外の発光)を励起します。

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良好なもの(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

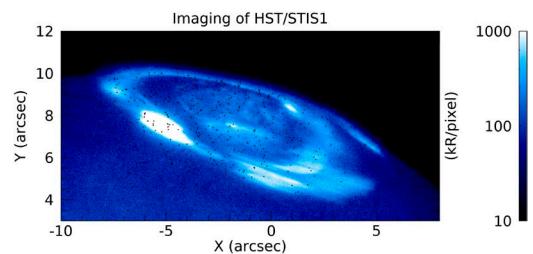


図4 協調観測中に得られたハッブル宇宙望遠鏡の木星オーロラの画像。横軸縦軸ともに秒角。色はオーロラの明るさ(kilo-Rayleigh/pixel)で、黒-青-白になるにつれて明るくなることを示します。ハッブル宇宙望遠鏡は最高で0.08秒角という世界最高解像度の撮像が可能です[9]。

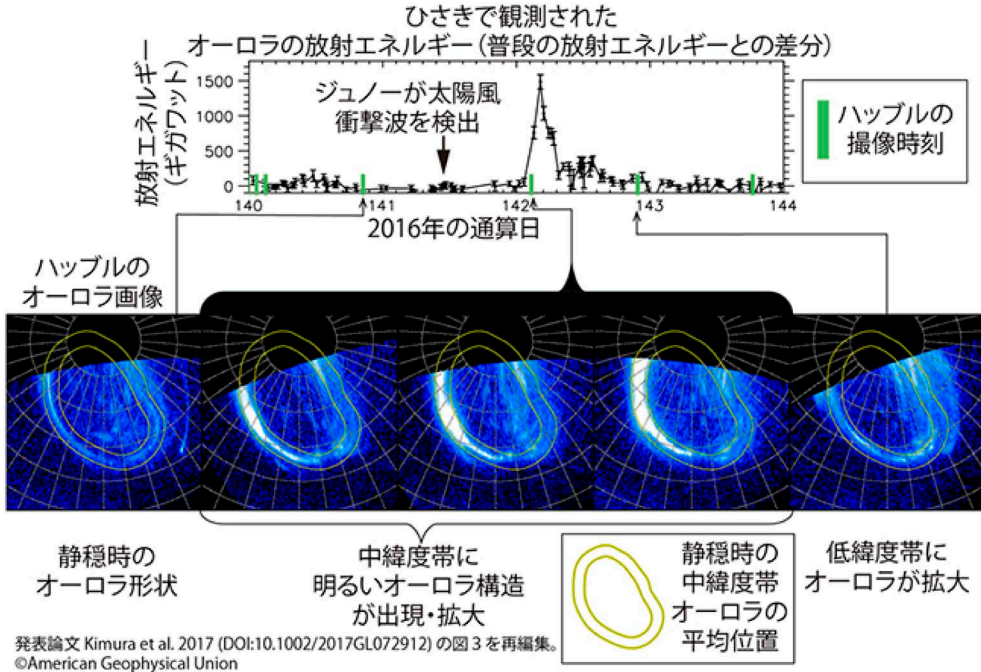


図5 「ひさき」によって連続監視された木星オーロラの放射エネルギーの時間変動(上)と、ハッブル宇宙望遠鏡によって撮像されたオーロラ形状の画像(下)。通算142日目の「ひさき」による観測において、オーロラの放射エネルギーが数時間で急激に増大し1500 GWのエネルギーに至った後、20時間程度をかけて減少していることがわかります。このエネルギーの増大時、木星極域の中緯度帯には明るいオーロラが出現(増光の開始)し、その後、低緯度方向にオーロラが拡大しました。これは木星系の磁気圏外縁部で何らかのエネルギー解放が起き、内側に輸送されたことを示します。理研の論文プレスリリース[10]より引用[11]。

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・化学的変化です。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.

# 銀河団 CIZA 1359 と Abell 1060 における 新しい電波構造の発見



藏原 昂平

〈国立天文台水沢 VLBI 観測所 SKA1 サブプロジェクト 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: k8791902@kadai.jp

銀河団からは、高温ガスから放たれる X 線や、光速に近い速さで運動する粒子（宇宙線）からの電波が検出されます。しかし、どのようにしてこれらの放射が生成されるのか、そのガスの加熱や粒子加速機構はまだ十分に理解されていません。我々は、特徴的な 2 つの銀河団の電波観測と分析を行いました。銀河団衝突の初期段階にあると思われる銀河団 CIZA J1358.9-4750（CIZA 1359）では、衝突中の 2 つの銀河団の間に初めて広がった電波放射を検出しました。この構造は弱い衝撃波によって生成された可能性があり、初期段階の合体銀河団でもマッハ数 1.7 の衝撃波で宇宙線が加速されることを示唆しています。衝突から時間が経った緩和期の銀河団 Abell 1060 においても、同様に新しい電波源を初めて検出しました。これらは、銀河団の進化や宇宙線の加速メカニズムの解明につながる結果です。ここでは私たちの研究成果を中心に、これからの電波を使った銀河団研究における期待も紹介したいと思います。

## 1. はじめに

銀河団は宇宙最大の自己重力系であり、銀河団同士が合体や成長をする過程でその莫大な重力エネルギーを乱流や熱、または粒子加速などのエネルギーに転換させていることが知られています。それゆえ、銀河団は宇宙最大の発電所・粒子加速器として機能し、その研究は銀河団や宇宙の進化と構造形成など宇宙の基本的な物理の理解に重要であると考えられています。

銀河団は大きさ数 Mpc、重さ  $10^{14-15} M_{\odot}$  の天体であり、質量の大部分はダークマターと考えられ、その重力によって多数の銀河や銀河間に存在する高温のガス（銀河団ガス）を閉じ込めた 1 つの系を成しています。これらは、銀河団に所属する銀河の分布や運動を可視光で観測することで確認されています。X 線による観測では、銀河団

ガスからの熱的放射を捉えることができ、実際に多くの銀河団が X 線の観測で見つかっています。この銀河団ガスは銀河の運動から推定されるエネルギーよりも高い温度を持っていることがわかっており、銀河団同士の合体衝突を通してその巨大な重力エネルギーの一部を変換することでガスを選択的に加熱していると考えられています。

しかし、そのエネルギー変換過程は未だよく理解されていません。銀河団の衝突では、各銀河の運動エネルギーだけでなく、銀河間に存在する銀河団ガスが重要です。銀河団同士が衝突することで、ガスが圧縮され巨大な衝撃波が形成されます。この衝撃波はガスを加熱し、数千万度以上もの温度に達する高温プラズマを生成します。また、衝撃波だけでなく、乱流も銀河団衝突によって誘発されます。この乱流が、ガスのエネルギーを広範囲に分散させたり、長時間にわたりガスを

再加熱する役割を果たすと考えられています。また、このような衝撃波や乱流はガスの加熱だけでなく、銀河団ガス中の電子や陽子などの粒子の加速にもエネルギーを使います。加速された粒子はシンクロトロン放射や逆コンプトン散乱による放射を生じます。この放射は「非熱的放射」と呼ばれ、銀河団の衝突のエネルギー変換の中核に位置します。

## 2. 電波で見た銀河団

銀河団の中では、衝撃波や乱流によって光速近くまで加速された非熱的電子と周辺磁場が相互作用することでシンクロトロン放射が生じ、電波帯で観測されます。これまでは、銀河団衝突の衝撃波（フェルミ1次加速）で形成された電波レリクク\*<sup>1</sup>、乱流（フェルミ2次加速）で形成された電波ハロー\*<sup>2</sup>などが報告されてきました [1]。また、銀河団中の銀河が非常に活発な場合、その銀河も宇宙線電子をたくさん持つため電波で観測することが可能であり、多くの銀河団ではそのような銀河からの電波放射も報告されています。

電波観測については、2020年代に入って新世代電波望遠鏡の活躍が顕著になってきました。これらの望遠鏡は、周波数1GHz以下の低周波を用いた観測により、これまで検出できていなかった非常に淡い電波構造の検出や、銀河団中の特徴的な細かい構造の検出などが次々報告されています。例えば銀河団 ZwCl 0634.1+4750 では、従来見つかった銀河団中心部の電波ハローに加えて、銀河団外縁部に薄く広がった電波構造（メガハロー）が見つかりました [2]。このメガハローの発見は、銀河団ガスも希薄である銀河団外縁部は中心部と異なり、乱流や磁場といった非熱的成分が構造形成に重要な役割を果たしていることを示唆しています。他にも、衝突銀河団 Abell 3376

では、銀河団ガスで作られた壁に沿って銀河から噴出したジェットが曲げられている様子が発見されました。これは、銀河団の磁場と活動銀河核ジェットが相互作用して形成された構造であると考えられており、近年発展した低周波電波望遠鏡で初めて達成できる高い感度と空間分解能が成しえた結果です [3]。

上述したように近年では、新世代の高感度低周波電波望遠鏡の活躍によって、これまで見つかっていなかった全く新しい研究・発見の機会が提供されています。これにより、未解決の銀河団の進化史や銀河団ガスの加熱問題について新しい視点から議論することが可能になります。そこで我々は、銀河団は衝突を繰り返す成長の中でガスをどのように加熱しているのかを調べるため、異なる衝突段階にある2つの銀河団について低周波電波観測・解析を行いました。

## 3. 衝突早期型の銀河団：CIZA 1359

CIZA J1358.9-4750 (CIZA 1359) は特徴的なX線構造を持っており、銀河団同士の衝突がまさに今始まろうとしている衝突銀河団です [4]。そのような銀河団を衝突早期型の銀河団と呼び、まさに衝撃波や乱流が形成されつつある段階と言えます。つまり、衝撃波や乱流起源の電波放射を検出できる可能性があることを示唆しており、先行研究 [5] では、早期段階の衝突の証拠を捉えようと、オーストラリアにある電波干渉計 Australia Telescope Compact Array (ATCA) の周波数1-2GHz帯でこの銀河団に付随する広がった電波放射を探索しましたが、見つかりませんでした。これは、CIZA 1359に付随する衝撃波や乱流は形成初期であると考えられるため、強度が十分に強くなく、それらをきっかけとして生成される電波構造もとても淡いことと矛盾しません。

\*<sup>1</sup> 銀河団外縁部に存在する円弧状に広がった電波放射

\*<sup>2</sup> 銀河団中心部に存在する円状に広がった電波放射

これまでに検出された電波放射は、銀河団同士の衝突が十分に進んだ衝突後期の段階の銀河団からが主であり、衝突が始まって間もない衝突早期段階の銀河団からはほとんど見つかっていませんでした。そのため、「粒子加速」のメカニズムがどのような銀河団の進化段階で、どの程度の衝撃波・乱流で機能するのかが大きな謎になっています。

### 3.1 低周波電波観測の実施とデータ解析

そこで本研究では、より淡い電波放射を検出できるようにインドの電波干渉計 upgraded Giant Metrewave Radio Telescope (uGMRT) の周波数 400 MHz 帯を使って CIZA 1359 の観測を行いました。狭帯域モードと広帯域モードと呼ばれる2つの観測モードで同時観測を行いました。後述するように、この2つのモードの観測を組み合わせることで、より高精度な画像が得られます。

この観測の特徴は、1 GHz よりも低い周波数帯を使っていることです。このような低い周波数帯では、空間分解能は悪くなりますが、観測視野が広く、より低いエネルギー帯の電子を観測することができます。低いエネルギー帯の電子は、高いエネルギー帯（高周波数帯）の電子に比べて数が多いため、より明るいシンクロトロン放射として観測されます。しかし、広い視野を持つ観測の場

合、視野内の明るい天体が視野全体の画質を低下させることに注意が必要です。これを防ぐためには、広い視野の各場所における大気や電離層の影響を細かく補正する必要があります。これは方向依存型較正と呼ばれ、その効果を図1に示しました。

我々は、当初は共同研究者が開発していた CASA ベースの解析パイプラインを使い解析していましたが、思っていた感度を達成できずその原因を探っていました。解析を進めるうちに、視野内に非常に明るい天体があり、それが感度を悪化させていることに気づきました。これを解決するためには、最新の解析手法である方向依存型較正を取り入れる必要があると判断しました。そのために、データの解析には Source Peeling and Atmospheric Modeling (SPAM[6]) と呼ばれる解析ツールを新しく使うことにしました。日本ではこのような低周波帯の解析は一般的でなく、インターネット上の情報をもとにソフトウェアのインストールと解析を進めましたが、うまくいきませんでした。そこで、SPAMの開発者にメールで連絡を取ったところ、SPAMで使う AIPS のバージョンが異なる（最新版を使用してはいけない）ことが原因で解析がうまくいかないという、とても単純な問題に長い議論を経て気づきました。そ

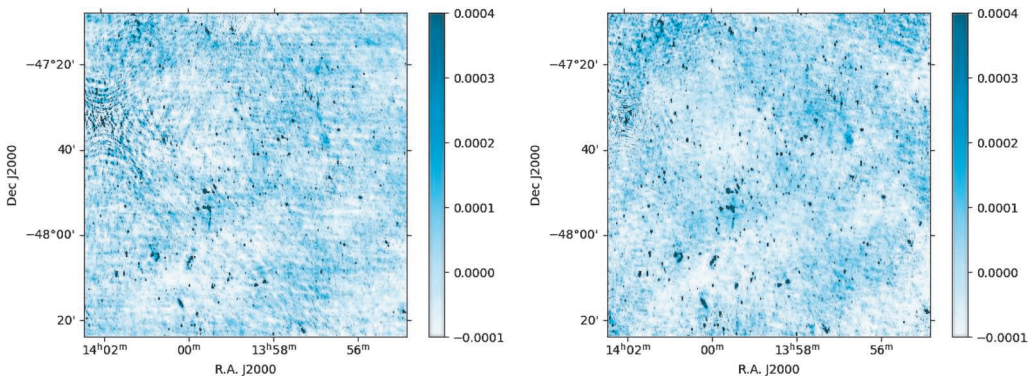


図1 同じ描画パラメータで見る方向依存型較正の前後の電波観測の比較。左は方向依存型較正前の電波画像であり、画像の左側に非常に明るい天体の周りにパターンがあることがわかる。右は方向依存型較正後の電波画像であり、左で見られたパターンが解消されていることがわかる。



して正しく SPAM で解析をすると、ついに、予想に近い感度を達成できました。

本解析は、先述した2つの観測モードのデータを利用し、2段階に分けて行いました。最初に狭帯域モードの観測データを解析し、それらの結果を使って広帯域モードの観測データをより精度よく解析します。狭帯域モードの解析では、同じ周波数帯ですでに作成されている天体カタログ TIFR GMRT Sky Survey (TGSS[7]) を用いて視野内の明るい点源リストを作成し、それをもとに背景 (sky) モデルを構築して方向依存型較正を行います。解析したデータの可視化においては、最終的に得られた FITS 画像に対して the Python Blob Detector and Source Finder (PyBDSF[8]) を適用し、観測視野における天体の新しいカタログを作成しました。この新しいカタログは、広帯域データの解析に利用されます。

広帯域データの解析にも狭帯域データと同様に、SPAM を用いた解析を行います。その際に狭帯域データで作成した新しい天体カタログを最初から使います。これによって、TGSS カタログで検出できていなかったような少し暗い天体についても、方向依存型較正を適用できるようになり、

画像の質が向上します。

### 3.2 広がった電波放射の発見

図2に uGMRT によって得られた CIZA 1359 の電波強度分布とスペクトル冪指数分布を示します。ATCA の先行研究 [5] で検出されたコンパクトな電波源はいずれも高い SN で検出されました。また、今回広がっていると考えられる天体候補が新たに 11 個検出されました。その中でも、2つの銀河団の間にある電波源は最も広がった大きな電波構造であり、これ以降はこの広がった電波源に注目します。

まず最初に、この広がった電波源が確かな電波源として検出されているのか、または、たまたまノイズの振る舞いでそのように見えているのかを確かめました。我々は電波源の広がった成分に注目したいため、点状電波源を差し引き、フラックス密度を測定しました。その結果、広がった成分のフラックス密度は  $24.04 \pm 2.48$  mJy であり、誤差に対して有意に大きい値を持っていることがわかりました。また、算出した電波フラックス密度を電波パワーの単位に書き換え、銀河団によく適用される X 線光度 - 電波パワー関係と照らし合わせると、他の銀河団に付随する電波構造 (レリッ

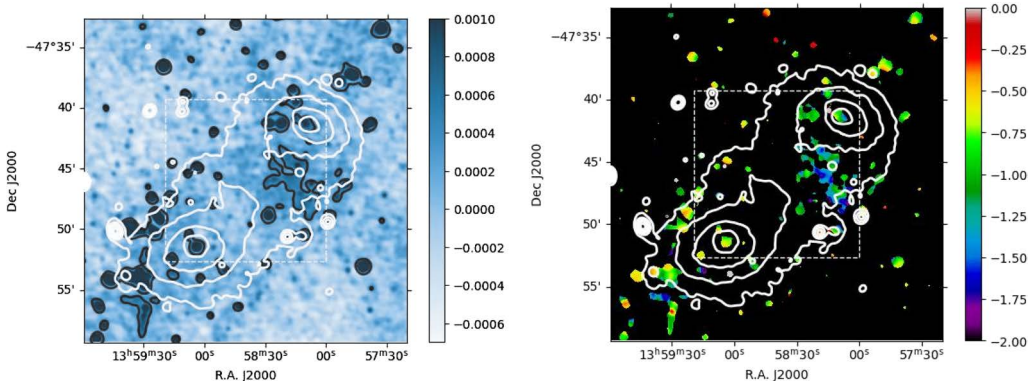


図2 (左) CIZA 1359 の広帯域 uGMRT 電波強度分布. 背景画像は、中心周波数 400 MHz、バンド幅 200 MHz の全電波強度分布を示す。分解能は  $14.''8 \times 5.''2$  であり、黒線は  $0.4 \text{ mJy beam}^{-1}$  の強度分布線を示し、25 秒角の分解能で平滑化した場合の雑音の 4 倍に相当する。白線は、すぐくの X 線表面輝度分布 [4] を、1.81, 3.64, 5.46, 7.28 の間隔で任意単位で示したものである。白破線は、図3で示す領域。(右) CIZA 1359 のスペクトル冪指数分布。白線、白破線は左図と同じである。(オンラインは右図がカラー)

クやハロー)の相関関係と大体一致することがわかりました。これらの結果から、広がった電波源はノイズ起源の構造ではなく、実際の電波天体であり、さらには、電波レリックや電波ハローのような銀河団由来の電波構造であると考えられます。

### 3.3 広がった電波源の起源は？

広がった電波源に関して、(1)位置、(2)構造、(3)電波エネルギー、(4)磁場の強さの観点からその起源を議論しました。まず、広がった電波源の位置は、X線で示される銀河団ガスの2つのサブクラスターの連結領域にあり、高温領域から示唆される北側の衝撃波位置(図3中の白線部分)[9]と一致しています。さらに、高温ガス領域の北西側(画像上で右上方向)は、CIZA 1359の高温ガス中で最もマッハ数<sup>\*3</sup>の高い( $M=1.7$ )領域であり、この領域のみから電波放射が検出されたことは、マッハ数が高いほど電子を加速しやすいという理論予測と一致する結果です。この電波源の構造は、南西-北東方向に伸びた形をしており、さらにはX線で示された衝撃波の前線によく沿っています。これは、広がった電波源が衝撃波によって形成された構造であること

を示唆しています。また、この広がった電波源の構造に注目すると、斑な強度・スペクトル冪指数分布をしていることがわかります。広がった電波源中には、7つの点源が含まれ、そのうち4つはCIZA 1359と赤方偏移の近い銀河だと同定されました。これらの状況から、銀河団内に存在する銀河による種電子の供給があったことが期待されます。

CIZA 1359に関する研究をまとめると、広がった電波源を初めて発見し、その構造は銀河団衝突によって励起した衝撃波や乱流によって、銀河から供給された種電子を再加速して作られたものである可能性を示しました。これは、CIZA 1359のような衝突早期の弱い衝撃波や乱流によっても粒子加速が可能であることを明らかにし、銀河と銀河団ガスの相互作用を再確認する重要な結果です。

## 4. 超近傍銀河団：Abell 1060

次に、1億光年あまりという比較的近い距離にあるうみへび座銀河団(Abell 1060)で見つけた電波構造についてもご紹介します。Abell 1060は可視光やX線の観測によって、過去数十億年の間

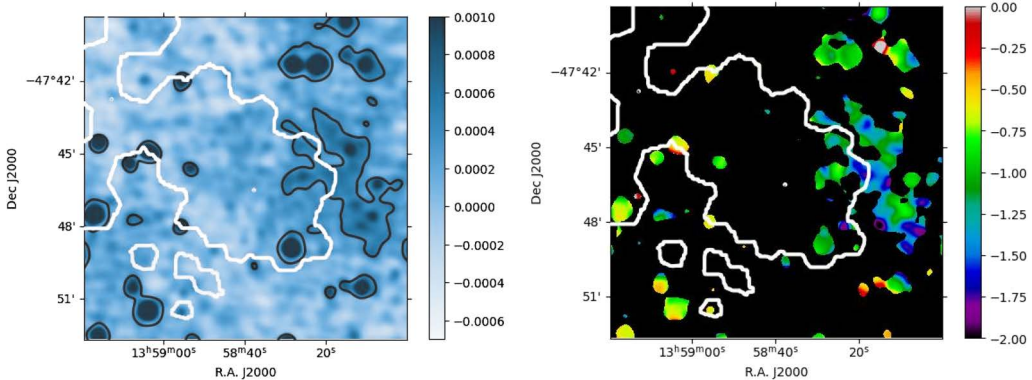


図3 広がった電波源を拡大した電波強度分布(左)とスペクトル冪指数分布(右)。黒線は図2と同じであり、白線はXMM-NewtonのX線観測[9]から推定された6 keV以上の温度を持つ高温領域を示している。(オンラインは右図がカラー)

<sup>\*3</sup> 流体の流れの速さと音速との比で定義される無次元数

に銀河団同士が衝突した痕跡が見つかるにもかかわらず、電波の観測では衝突の影響が見られないという謎がありました。

#### 4.1 低周波電波アーカイブデータの解析

我々は、電波観測から宇宙線電子や磁場の観測的証拠を掴もうと、世界中の低周波電波望遠鏡のアーカイブデータを解析しました。その結果、GMRTの2010年12月の観測データに、今まで報告されたことのない広がった電波放射が銀河団の中心付近に存在することを発見しました。この観測は、TGSSカタログに新しく見つかった電波源候補を長時間追観測したデータでしたが、結果については報告されていませんでした。我々の解析では、先述した最新の解析手法を用いることでより高い感度を達成し、今回の発見に繋がったと考えられます。

#### 4.2 未知の電波放射（オオコウモリ）の発見

図4に我々が解析したGMRTの結果と、一般に公開されているアーカイブデータGLEAM, RACSの電波画像を並べて示しています。我々はGMRTの電波画像で2つの明るい電波放射の間に、明確に輪のように淡く広がる放射を新しく発見しました。当初、この新しい天体は十分に明るかったため、特に新しいものでもないなど思っていたのですが、結果を共同研究者と共有し議論しているうち

に、これは新しい発見だ！ということに気づき盛り上がりました。その後、まずは議論をしやすいように愛称を決めようということになり、いくつか候補を考えました。当初は「鼓」や「繭」なども名前の候補にありましたが、最終的には、その形から「オオコウモリ (Flying Fox)」と名づけました。オオコウモリは、海外では「ジップライン (zip line)」というケーブルやロープに取り付けられた滑車を使って、高い地点から低い地点へ滑り降りるアトラクションのことを意味します。我々も当初はジップラインを想定していたのですが、議論が進むにつれて、有名なコウモリマークにも見えるのでは?! そちらの方がイメージが近いのでは?! と考えるようになり、最終的に動物をイメージした愛称を使うことにしました。

オオコウモリが本当に存在するのかを確認するため、より低い周波数の観測が可能な Murchison Widefield Array (MWA) のデータも調査したところ、同様の放射があることを見つけ、その存在に確信を持ちました。しかし、より周波数の高い Australian Square Kilometre Array Pathfinder (ASKAP) のデータには、同様の放射を見つかることができませんでした。このことから、オオコウモリは高い周波数で急激に暗くなる特徴を持っていることが示唆されます。明るさの周波数依存

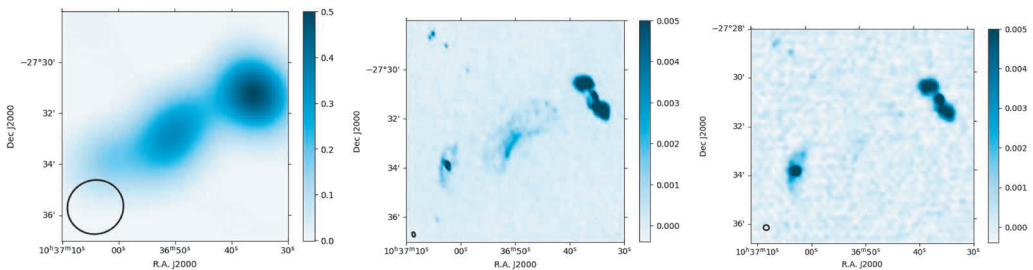


図4 (左) GLEAMデータ中のAbell 1060の電波強度分布。中心周波数は200 MHz, バンド幅60 MHzである。空間分解能は $2.2 \times 2.1$ であり、図中左下の黒丸で示している。(中) GMRTで得られたAbell 1060の電波強度分布。背景画像は、中心周波数338 MHz, バンド幅33 MHzの全電波強度分布を示す。分解能は $13.1 \times 7.2$ であり、図中左下の黒丸で示している。(右) RACSデータ中のAbell 1060の電波強度分布。中心周波数は887 MHz, バンド幅は288 MHzの全電波強度分布を示す。分解能は $13.6 \times 12.9$ であり、図中左下の黒丸で示している。GLEAMやGMRTの画像中央部の構造がオオコウモリである。

性を確かめるため、オオコウモリを検出した2つのデータで明るさを比較しスペクトル冪指数を調査したところ、 $-1.4$ 程度と他の典型的な電波放射( $-0.8$ 程度)に比べて非常に急峻な値を持つことがわかりました(図5左)。また、このオオコウモリは不思議なことに可視光やX線観測結果での明確な対応天体がないという特徴を持っていました(図5右)。これは、オオコウモリの形成シナリオを考える上でやっかいな特徴です。

### 4.3 オオコウモリの起源は？

#### 4.3.1 銀河団を構成する銀河によって作られたのか？

オオコウモリの輪構造と中央の棒状の構造は、銀河ジェットの電波ローブに似ていると考えられるため、ここではオオコウモリ近くの銀河がオオコウモリの起源である可能性について考えてみます。

NGC 3311は輪構造の端に位置しており(図5右参照)、オオコウモリはNGC 3311からたなびいた形の電波ジェットであり、明るいバーはジェット末端に見られるホットスポットによって形成されている可能性が示唆されます。このシナリオではNGC 3311が北西方向に移動していることを示唆します。ところが、NGC 3311はAbell 1060を構成する銀河集団の視線速度分布の中心付近に位置しており、X線表面輝度の中心付近にあること

から銀河団中をほぼ動いていないと予想できます。

では近くにあるもう一つの銀河NGC 3309はどうでしょうか。銀河団ガスとNGC 3309の相対運動が銀河団衝突などの影響によって時計回りまたは反時計回りの円運動をする場合、NGC 3309は過去にオオコウモリの位置に近い場所にあったと考えることも可能です。しかし、NGC 3309のジェットや電波ローブには明確なたなびき構造がないため、NGC 3309がそのような円運動をしている可能性は低いと考えられます。

最後に、NGC 3312によって形成されたというシナリオも議論します。NGC 3312はAbell 1060の手前側に位置し、その速度構造から私たちに向かって移動していることが示唆されています。NGC 3312がすでにAbell 1060の3次元的中心付近を通過したと仮定すると、オオコウモリはこの通過時に形成された可能性があります。しかし、このシナリオの場合、密度の高い銀河団中心を通る必要があるため、その痕跡がX線観測で検出されてもよいはずですが、同じ領域にX線輝度と温度の明確な上昇はありません。さらに、そもそもNGC 3312が近地点通過前でAbell 1060の背後に位置している場合、オオコウモリはNGC 3312と関連しません。

また、一般的に近くの銀河がこのような電波構

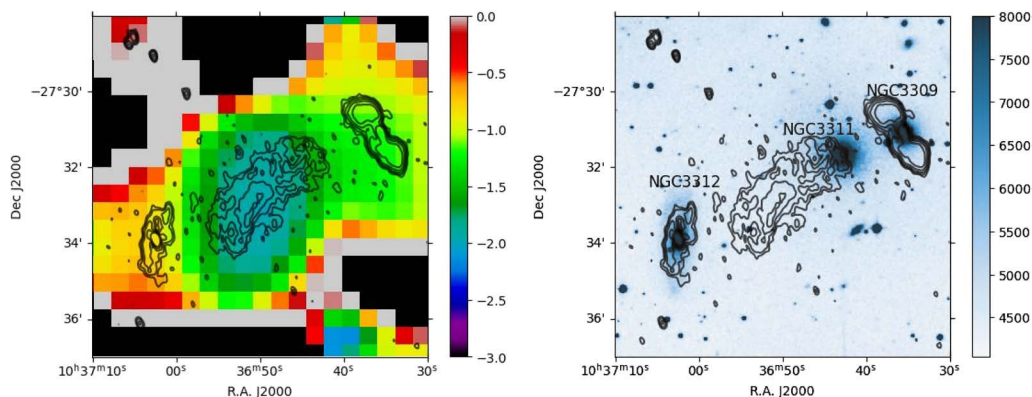


図5 (左) オオコウモリのスペクトル冪指数の分布。(右) 可視光の画像。両図とも黒線はGMRTで観測された電波強度分布を示しており、可視光画像には明るい領域に対応する銀河の名称を記載した。

造を作った場合、その銀河自体が光、赤外で観測されるはずですが、オオコウモリの中心付近に明確な銀河の対応天体は確認されていません。つまり、オオコウモリが近くに存在する銀河のジェットなどによって形成された可能性は薄いと考えられます。

#### 4.3.2 銀河団同士の衝突によってつくられたのか？

先述した通り、銀河によるオオコウモリの形成は考えにくいことから、次に銀河団由来の構造である可能性を議論します。Abell 1060のX線で観測される温度と金属量分布は、ある領域に高温・金属豊富な領域を持つことを示しています。これは銀河団同士の衝突によって加熱またはガスが混ぜられた結果であると考えられており、オオコウモリがこの高温・金属豊富な領域と一致していることから、銀河団衝突によって発生する古典的な銀河団の拡散電波放射、例えば電波ハローやレリックである可能性が考えられます。

NGC 3311の北東約500 kpcの位置には、よく知られた銀河群HCG 48が存在しています。HCG 48がかつてAbell 1060に衝突し、ガスをかき乱したのであれば、オオコウモリはその残骸である可能性があります。オオコウモリは天球面上で銀河団中心から約24 kpcしか離れておらず、電波ハローが銀河団中心に見られる特徴と一致します。しかし、オオコウモリのスペクトル冪指数は一般的な電波ハローよりも急峻な値であり、かつ、オオコウモリの細長い形状は電波ハローのものとは異なります。

電波レリックは一般的に銀河団外縁部で見られるため、銀河団中心近くにあるように見えるオオコウモリの特徴とは大きく異なります。一方で、視線方向の衝突によって電波レリックが形成される場合、オオコウモリが銀河団外縁部に位置し、合体速度が音速を超えるため衝撃波が発生するはずですが、その場合に予想されるX線での衝突の痕跡の兆候はなく、また、銀河の動きとも矛盾する点があります。さらに、Abell 1060の中心部分のガス密度が比較的均一なことから、

HCG 48はAbell 1060の中心部に大きな影響を与えていないことが示唆されます。例えばHCG 48がAbell 1060の外縁部を周回している場合、その痕跡としてオオコウモリを説明可能な場合もありますが、急峻なスペクトル冪指数などの特徴が一般的に観測される電波レリックの特徴とは異なることに注意が必要です。つまり、オオコウモリが銀河団同士の衝突起源である可能性も高くはないといえます。結果として、銀河団に従来見つけていた電波構造とは特徴が異なる新しい電波源を初めて見つけた可能性があります。

## 5. おわりに

### 5.1 新発見のまとめ

本稿では、我々が近年発見した銀河団中の新しい電波構造について紹介し、その起源を多角的に議論しました。簡単にまとめると、衝突早期型の銀河団CIZA 1359では、uGMRTによる高感度な観測と方向依存型校正によって達成した高いダイナミックレンジの電波画像から広がった電波源を発見しました。これは衝突早期の弱い衝撃波や乱流によっても銀河団ガス粒子が加速や加熱されることを示すものでした。近傍銀河団Abell 1060では、銀河団中心に低周波のみで見られるオオコウモリを発見しましたが、これまで観測されてきた銀河団に關係する電波天体には分類されないことが分かりました。これらの研究については、最新の電波／X線観測の双方向の協力によって効率的に研究が進みました。特に、銀河団の運動や力学的状態をX線観測結果から推測し、その痕跡を電波観測でさらに詳細化・定量化することで、より質の高い研究成果に結びつけられたと思っています。

### 5.2 今後の展望

研究を通して私は、銀河団研究では特にX線と電波の協力によって研究の新展開を生み出せることに気づきました。今後は、精密X線分光衛星X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM) と2020年代後半に本格運用が開始さ

れる次世代電波干渉計 Square Kilometer Array (SKA) の協力によって、今までに考えもしなかった事実が見られると期待しています。

XRISMは2023年に打ち上げに成功した日本のX線天文衛星であり、これまでのX線天文衛星に比べてそのスペクトル分解能が高いことが特徴です。この特徴を活かして、銀河団ガスの乱流の強さを直接測定したり、銀河団ガスの3次元的な運動をより詳細に決定したりすることが可能になります。これを用いてCIZA 1359については、衝突銀河団においてどのくらいの衝突エネルギーが衝撃波や乱流へ転換されているのかを定量的に算出し、Abell 1060についてはオオコウモリの起源を知るために銀河団ガスと銀河の相互作用をより詳細に調査したいと思います。

SKAは現状合計で16カ国が参加を表明しており、約10年前に天文月報でSKAが紹介された時[10]に比べて1.5倍以上の国数です。また、SKAの建設が2023年から始まり、初期観測が2026年から開始されることが予定されているため、この低周波電波観測の分野は今、世界的に盛り上がりを見せています。SKAは本稿で紹介したような周波数1 GHz以下の低周波帯でも観測が可能であり、その圧倒的な電波画像の感度と質によって新しい発見が期待されています。もちろん日本においても、日本SKAコンソーシアム (SKAJP) や国立天文台水沢VLBI観測所SKA1サブプロジェクト (SKAJ) が主導して、SKA参加へ向けた準備を進めています。私もその一員として、微力ながら貢献中です。皆さんも、今後SKAが開拓する多くの新発見にぜひ期待してください。

## 謝 辞

本稿の内容は、筆者らが発表した論文に基づいています [11, 12]。また、本研究は主にJSPS科研費JP21H01135の助成を受けたものであり、他一部JP20H00157, 17H01110からの助成を受けて進められた研究です。両関連論文に共通して、

一緒に研究を進めていただいた国立天文台の赤堀卓也氏、X線解析について協力していただき、かつ多くの助言をいただいた名古屋大学 中澤知洋氏、大宮悠希氏にこの場を借りて深謝申し上げます。最後に、この記事を作成するにあたって、たくさん相談にのっていただき助言いただいた天文月報編集委員の小山翔子氏、校閲・助言いただいた同委員の志達めぐみ氏にお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] van Weeren, R. J., et al., 2019, *Space Sci. Rev.*, 215, 16
- [2] Cuciti, V., et al., 2022, *Nature*, 609, 911
- [3] Chibueze, J. O., et al., 2021, *Nature*, 593, 47
- [4] Kato, Y., et al., 2015, *PASJ*, 67, 71
- [5] Akahori, T., et al., 2018, *PASJ*, 70, 53
- [6] Intema, H. T., 2014, *Astronomical Society of India Conference Series*, 13, 469
- [7] Intema, H. T., et al., 2017, *A&A*, 598, A78
- [8] Mohan, N., & Rafferty, D., 2015, *PyBDSF: Python Blob Detection and Source Finder*, *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1502.007
- [9] Omiya, Y., et al., 2023, *PASJ*, 75, 37
- [10] 赤堀卓也, 2013, *天文月報*, 106, 539
- [11] Kurahara, K., et al., 2023, *PASJ*, 75, S138
- [12] Kurahara, K., et al., 2024, *PASJ*, 76, L8

## Discovery of Diffuse Radio Emission in CIZA 1359 & Abell 1060

Kohei KURAHARA

*National Astronomical Observatory of Japan, Mizusawa VLBI Observatory, SKA1 promotion Group, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

**Abstract:** We performed radio observations and analysis of two characteristic galaxy clusters. In the early phase merging galaxy cluster CIZA 1359, we detected for the first time a diffuse radio emission between the two sub-structures. A weak shock may have produced this structure, implying that cosmic rays can be accelerated even at Mach numbers of 1.7 in early-phase merging clusters. For the relaxing galaxy cluster Abell 1060, we also detected for the first time a diffuse radio source in the central region which has an ultra-steep radio spectrum without any counterpart. In this article, we would like to share the radio properties of these two galaxy clusters and discuss the role of the non-thermal component in the structure formation of galaxy clusters.

# 日江井榮二郎氏ロングインタビュー

## 第1回：少年時代～中学時代



### 高橋慶太郎

〈熊本大学大学院先端科学研究部 〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1〉  
e-mail: keitaro@kumamoto-u.ac.jp

今月より、日江井榮二郎氏のインタビューを連載いたします。日江井氏は東京大学天文学教室にて萩原雄祐氏、鍋木政岐氏、藤田良雄氏の薫陶を受け、大学院修了後には東京天文台に職を得て、末元善三郎氏とアインシュタイン塔望遠鏡で太陽フレアの観測・研究を行いました。その後、乗鞍コロナ観測所の所長を務め、太陽観測衛星「ようこう」をリードするなど、日本の太陽研究を強力に推進してきました。国立天文台を退職した後は明星大学に勤めて天文学教育に従事し、学長にも就任しました。また日江井氏はこれまで数十年にわたり数多くの日食を観測してきており、ご本人曰く「日食病」（日食の魅力に取り憑かれること）にかかっておられるということです。今回は中学生までのお話で、中学生のときに東京大空襲に遭い敗戦を迎えた体験を話していただきます。中学生の多感な時期に、これらの経験はその後天文学者になる少年にどのような影響を及ぼしたのでしょうか。

### 日江井榮二郎氏略歴

- 1931 東京都生まれ
- 1953 東京大学理学部物理学科天文学専攻 卒業
- 1955 東京大学大学院数物研究科修士課程 修了  
東京大学東京天文台 助手
- 1965 東京大学東京天文台 助教授
- 1979 東京大学東京天文台 教授
- 1982 東京天文台乗鞍コロナ観測所 所長
- 1992 国立天文台 停年退職  
明星大学 教授
- 1998 明星大学 学長
- 2002 明星大学 定年退職
- 2022 瑞宝中綬章 受章



日江井榮二郎氏近影（2024年3月撮影）。

### ●少年時代

高橋：インタビューをお引き受けいただき、どう

もありがとうございます。よろしくお願ひします。では子供の頃のお話から始めさせてください。先生は昭和6年、東京生まれということですね。東京のどのあたりですか？

**日江井:** 下町ですよ、江東区ですからね、私が生まれた昭和6年っていうのは、昭和5年辺りから不況があり、満州事変があり、その後2・26事件があったり、それから海軍の軍縮条約破棄があった。そしてシナ事変になり、大東亜戦争に入って、敗戦となった。その前後を生きてたわけです。

**高橋:** 大変な時期を少年時代として過ごしたわけですよ、先生のおうちはどういうおうちだったんですか？

**日江井:** 父が布を扱う仕事をしてました。今回あなたからインタビューを受けるということでね、わが一生を考えるのにちょうどいいかなと思ってね、振り返ってみたいと思ったんですよ。ちょうど天文屋が宇宙の起源はいつごろかと思うのと同じようにね、自分の始まりはどこまで記憶が辿れるかなあと想着まして。私は妹が生まれたのを



3歳のとき、お祭りにて (日江井氏提供)。

覚えてるんです。うちの中、あの当時はお産婆さんが来てうちの中が急に騒がしくなった。そのとき私が3歳。だから3歳の記憶が最初です。

**高橋:** じゃあ妹さんがお生まれになったのを覚えてらっしゃって。

**日江井:** それは記憶であって、それから幼稚園へ行って小学校へ行ったわけですよ、

**高橋:** 幼稚園は地元の幼稚園に行ったんですか？

**日江井:** 6歳上の姉と、3歳上の兄が地元の幼稚園に行ったから、親としてもその幼稚園に頼んでくれたわけです。でも私、1日で帰ってきちゃった。もう嫌だよ。

**高橋:** そうなんですか。

**日江井:** 幼稚園では女の子と一緒に、チッチッパッパって遊戯するわけですよ。それが嫌いでしたね。つまりそうやって女の子と一緒に遊ぶデリカシーがなかったのかもしれない。それよりも近くのガキ大将、ガキ大将っていうのが結構よくみんなの面倒を見てくれたんですよ。ザリガニを獲るエサは何をどう釣り紐に付けるかとか、ベーゴマはバケツに夏の座布団を置いてそれを凹面にへこましてするだとか、崖のぼりの遊びをしに市川に行くんですが、省線にはこうやって切符買って乗るんだとか、そういう遊び方を教えてくれた。省線って今のJRですが、そういう体を動かす遊びが好きだったんでしょうねえ。だからお祭りがあれば山車を引いてみたり、相撲をしたり、それからベーゴマをしたり、そういう遊びばかりやりましたね。それでまあ幼稚園を辞めちゃった。

**高橋:** あっ、じゃあもう幼稚園に行かずに？

**日江井:** 行かずに。全然行かない (笑)。

**高橋:** 親は何も言わなかったんですか？

**日江井:** あの当時の親は怖いですからね、体罰なんてのは当たり前がありましたからね。だけどもいわれなかった。あいつには向いてないんだと思ったんでしょうね。よかったですよ。

**高橋:** へえ～、じゃあ幼稚園に行かずに小学校に行くということなんですか。



日江井: そうですね、昭和13年です。姉に連れられて小学校に行ったんですけどまずね、「ここで頭を下げるのです」って言うんですよ。見るとこんな祠みたいなのがありましてね、奉安殿ですよ。奉安殿は知ってる？

高橋: 天皇陛下のですかね？

日江井: そうそう、御真影と、それから教育勅語が入ってるんですよ。どうして頭下げるのかなあと思いましたがでもね、そうやってだんだんだんだん洗脳されたんでしょうね。それでまあ小学校はもう勉強もしないで遊んでばかりいて、駆け足が速かったり相撲が好きだったりしてましたけれどもね。あっそう、字が下手なので、習字を習いに行かされました。2年生の頃です。4年生ごろにはそろばん塾に1年くらい行ったかなあ。そこでは5つ玉を使ったそろばんをやってたんだけど、学校では4つ玉を使わせたわけですよ。

高橋: 下の段に玉が4つあるか5つあるかっていうことですね。今はまあそもそもそろばんを使っている人はかなり少ないと思いますが、普通は4つ玉ですかね。

日江井: で、私は5つ玉を持ってるから要らないって言ったらね、じゃあ5つ玉の最後のところを動かないように紐で結わきなさいと学校で言われた。確かに一番下の玉を使わなくてもできるんですが、有ることによって計算しやすいんです。無駄しちゃういけないよって4つ玉が流行った。

高橋: そういうことなんですか。

日江井: 今ずいぶん世の中がエフィシェンシーを追っかけてるけどね、ああここにもそういうのがあったかと。効率的に言えば4つ玉でいいじゃないかと言われたときに、いやあ5つ玉がいいんだよって言ったって人々は納得しない。5つ玉っていうのは老子がいつてる無用の用。用はなきないんだけど、大事な用がある。その頃の小学校からそういうのがだんだんなくなって。でまあそのうちにそのそろばんの先生は出征したので行かなくなっちゃいました。

## ●太平洋戦争

日江井: それで小学校4年のときに太平洋戦争が始まったわけですよ。私よく覚えてるんだ、それは、寒い日でした。ね。「臨時ニュースを申し上げます、臨時ニュースを申し上げます」って。

高橋: ラジオですか？

日江井: ラジオですね。それで「大本営陸海軍部、12月8日午前6時発表」って。「帝国陸海軍は、本8日未明、西太平洋においてアメリカ・イギリス軍と戦闘状態に入れり」というわけですよ。非常に甲高い声でね、いやあな響きだったんですけどね。西太平洋ってどこかなあってそのときチラッとと思って、今でもよくわかりませんが(笑)。それでその日学校に行く途中に勤めに行く人々の歩きを見てね、何となく、人々がせかせか歩いているように感じましたよね。まあ寒さもあるかもしれませんが。それがその後酷いことになるというのは全然わかりませんでした。最初は軍艦マーチかなんかかけて、戦果華々しいことが報道されてね、そのうちにだんだん品物がなくなっただけね。あるとき、乾燥バナナというのが配られました。このくらい小さくてね、先生がこれは南のジャワの兵隊さんから送ってもらったんだとか言って。ずいぶん甘いなあと思った。そういう甘いのがだんだん少なくなってですね、配給制度になって、だんだん世の中が灰色になっていきましたね。

高橋: バナナも配給なんですか？

日江井: 学校でくれた。だから全員にくれたんじゃないですか。軍の配慮じゃないかなあ。1回だけでしたけどね。

高橋: 中国との戦争はその前から始まっていましたけど、それはそんなに影響なかったですか？

日江井: シナ事変の最初くらいはそんなに影響なかったんですけど、小学校4年で大東亜戦争が始まってからだんだん世の中が暗くなってきて、欲しいものがだんだんなくなってきたという感じで

すので、小学校4年くらいからそういう戦争の影響を感じましたね。出征兵士だとか言って、みんなを送るわけですよね。近くの人で新婚早々でおなかに赤ちゃんがいるっていう人がいて、その奥さんはどういう気持ちだったのかなと思ってね。後から聞いたら、赤ちゃんは生まれたけどもご主人は戦死されたなんてね、そういうことが耳に入ってくるわけですよ。それから私の叔父が兵隊で中国に行ったんですが、弾に当たって、国府台の陸軍病院に入院したので見舞いに行ったりね。ああ戦争っていうのは酷いなあなんていう記憶がありましたねえ。

高橋: だんだん身近にも戦争の影響が出てきたんですね。

日江井: ええあのね、私チョウチョを採るのが好きだったんですよ、小学校の頃。よく山奥っていうか溪谷のところへ行ったら、チョウチョを採ってたんですよ。それが小学校4年くらいまで続いた。ところがね、5年になったらもう行けなくなりましたね。それこそ「ぜいたくは敵だ」とかかってね。

高橋: 「欲しがりません」とか?

日江井: 「欲しがりません、勝つまでは」とかね、まさにそうだ。それから、「足りぬ足りぬは工夫が足りぬ」だったかね。そんなことを言ってだんだんやっぱり世の中が厳しくなっていくのを肌で感じましたね。それで山にも行けなくなっちゃいましたよね。チョウチョを採るのもできなくなっちゃった。だから小学校の後半なんてのは、なんかあんまりいい思い出はないですね。ああ剣道がありました。剣道は好きでした。しかし、戦後は日本の武道教育が禁止されましたので、できなくなりました。

高橋: じゃあその小学生の頃、何か宇宙に興味を持ったとかいうのはなかったんですか?

日江井: そうですね、東日天文館っていうのがあったんですよ。

高橋: 東日天文館?



小学校2年ごろ、法師温泉にて(日江井氏提供)。左から二番目が日江井氏。

日江井: うん。昭和12年の頃かな、大阪に日本で一番最初のプラネタリウムができたんです。その次の年、昭和13年だと思いますけど、東京の有楽町に毎日新聞の建物があって、その屋上にプラネタリウムができたんです。私は小学校の5年くらいにときに行ったんじゃないのかなあ。有楽町に行っても、あのう何となく街の華やかさがなかったんですよね。そこで1人でプラネタリウムを観たんです。ところがそこは東京空襲で焼けちゃったんです。

高橋: じゃあ星とか天文とかに興味があったってことなんですか?

日江井: はい。でも星のこと、星座のことを知ってるかというところ知らないんですよ。プラネタリウムに行っていたながらですね、星座のことはあんまり覚えてない。行ったので嫌いではなかったと思うんですけど。それでその後ですね、あれいつだろうなあ、上野の科学博物館で広瀬(秀雄)先生が彗星を見つけたので表彰するっていうのを聞いて会場にでかけました。だから天文学会っていうのがあるのを何かで知ったんでしょうね。

高橋: 広瀬さんっていうのは東京天文台の?

日江井: 天文台の台長をやった方ですけどね。

高橋: なんか本を読んだりとかそういうのはありましたか?

日江井: 本は野尻抱影さんの本をまあちらっと読

むくらいのもんだったんですけども、野尻抱影さんってやっぱりうまいですね、書き方が。天文には潜在的になんか惹かれるものがあったんでしょうけども、小学校の頃は星っていうよりもむしろチョウチョの方が好きだったわけです。

**高橋:** お家は商売をされてたということですけど、割と裕福な家庭だったんですか？

**日江井:** まあ裕福ではありませんが、よくはわかりませんがねえ、子供の頃年末には浅草の落語に連れて行ってくれて、こんな厚いトンカツをごちそうになって帰りはタクシーで帰ってきた。チョウチョを採るといっても、法師温泉というところに行ってたんです。電灯線もなく夜はランプで明かりをとるといもうひなびたところに、夏中ずうっと行っててね。それでチョウチョを採って遊んだりしてたんですね。だからまあある意味じゃそうは困ってなかったんでしょうね。

## ●中学進学

**高橋:** 先生は小学校の後、江戸川中学ということに進学したわけですね。

**日江井:** はい、そうです。江戸川にあるからね。

**高橋:** それはお家の近くなんですか？

**日江井:** そうですね。国電（日本国有鉄道の電車）に乗って2つか3つ行ったところ。中学に入った年に私の姉が亡くなったんですが、結核だったんです。その当時まあ結核といえばほぼ亡くなると聞いていたんですが、ストレプトマイシンというのが特效薬だっというのを耳にするんですよ。どうしてそういう情報が入ったのかわからないけど、それがイギリスにはあると。そしてそのイギリスと戦争をしてるっていうんで、そんな文明国と争っていいのかなあと思ったんですね。結局姉は亡くなったんですけども、その姉が亡くなる前、私の中学入学祝いに、ラムが書いた子供向きのシェークスピアの本を丸善から買ってくれましてね。イギリスからの輸入本でしょうね。香りが漂って、コットンペーパーらしく軽い

けれども立派な装丁で、何か外国を感じました。中学1年のときにそれを読んで、ああ英語で読むと訳本で読むの違って、英語のニュアンスがいいなど思いましたね。カルチャーショックでしたよね。

**高橋:** 英語で読めたんですか？

**日江井:** 辞書を引き引き読めたんだな、子供用に書いてくれた本だから読めたんですよ。その本は空襲で燃えてしまったので、後でアメリカに行ったとき探しましたが見当たりませんでした。太陽磁場の観測をしていたHowardさん宅に呼ばれたときにそんな話をしたら、奥さんが「その本を持っている、あげる」と言って頂いたんです。それは文庫本並の小さな本で、探していた本とは違ったけれど、嬉しかったな。

**高橋:** そんなことがあったんですね。先生の頃は中学は義務教育ではなかったわけですよね。

**日江井:** そうそう、義務教育は小学校だけで、中学は義務教育じゃなかったですよ。

**高橋:** 中学に行くというのは先生自身が希望したんですか？

**日江井:** なんか知らないけどまあ中学へ行くのが当たり前かなあと思ってね。

**高橋:** やっぱり勉強がよくできてということですか？

**日江井:** ある程度できたからなんじゃないかなあ。自分で行きたいとは言わなかったけれども、親から、というか学校の先生からかなあ。まあこれくらいの成績なら中学行けるんじゃないかなあということじゃないかなあ（笑）。覚えてません。

**高橋:** 先生が中学に入ったのは1944年ですね。太平洋戦争も末期に近づいていた頃だと思いますが、中学ではやっぱり軍国的な教育っていうのがあったわけですか。

**日江井:** そうなんです。だって国全体がその方向に動いてたじゃないですか。

**高橋:** 軍事教練もありましたか？

**日江井:** 中学のときには軍事教練がありました。

配属将校っていうのがいて軍事教練をやるんです。三八式銃って明治38年にできた銃がもうなくて、木の銃をこう担がされて軍事教練やらされてね。クラスの誰かがへまをすると、全員がピンタをくろう。いやぁ厳しい訓練だったですね、それは。

高橋: 中学に入った頃っていうのはもう負けそうだっていう頃ですよ。

日江井: そうです。本当に暗かったですよ。新聞に「ガダルカナル転進」と書いてあってね、子供心にね、「転進」っていうのはどういうことかなあと、よく分からなかったですね。

高橋: 「撤退」を「転進」に言い換えるというものです。

日江井: だからだんだんその頃から暗くなって圧迫されてきた感じをうけました。だんだん食べ物も少なくなって。そうそう、ゾルゲ事件だとかあったね。何となく世の中が怖くなりましたよね。「特高に聞かれると大変だよ」とか言ってね。そういう世の中だったな。

高橋: そうするとやっぱり将来自分は兵隊になるんだとか、そういう思いはあったんですか？

日江井: まあその年になれば、行けと言えれば行かざるを得ないだろうという気持ちだったですね。あの頃、20歳になると徴兵検査が行われると聞いていたけどそれがだんだんだんだん19とか18になってね、国のためだよとかいってですね。

## ●東京大空襲

日江井: 昭和20年の3月10日、中学1年のとき、実際は3月9日の夜中からですけれども、東京大空襲があった。約10万の人が亡くなったり負傷したりとかで100万の人が罹災しました。3月ですから、東京のあたりは北風ですよ。北の方からこう風が来るんですよ。その頃、家の庭に防空壕っていうのを作らされてね、空襲警報が鳴ったので、ゲートルを脚に巻いて、防空壕に避難しました。しばらくすると、今夜はもう爆弾投下はな

いから外に出て消火の準備をするようにと言われた。でも大火だから消火どころでなくて、もう逃げろって言うわけだね。

そのとき家には父と母と私がいたんです。父は徴兵されるには年を取ってたから兵隊には行ってくなくて、町内の面倒を見ていました。それでまず私と母と2人で逃げたんです。避難訓練の通りに約10の家族が長いロープにつかまって、先頭にいる町内会役員の先導で近くの大通りに出ました。千葉街道（今の京葉道路）とそれと交差する天神通り（今の明治通り）の十字路で、もう大勢の人がねえ、どこへ逃げたらいいのかわからずごったがえししてるんですよ。みんな食べ物とか衣服とか荷物を持ってね。そのうち大火が西北から迫ってきた。私たちはロープから離れてしまって町内の人ともはぐれちゃった。どうしたらいいか、どっちへ行っていいかわからない。上を見ると燃えている煙の中をB29の銀色の機体がサメのように悠々と動きまわっているのが見えました。

そのとき運よく父と会うことができたんです。父は「こっちへ行こう」って厳しい声で叫びました。こっちっていうのは西方向、風上なんです。風上から大火が迫って来るからみんなは風下の方に逃げる。風上に逃げたのは私たちともう1家族だけだった。結局、十字路でほかの3方向に逃げた人はかなりの人が亡くなったんです。私たちは風上に逃げた。後で考えれば風上っていうのはもう燃えた後だからね、それ以上燃えようがないっていうことなんですね。どうして父がそれを知ってたか聞きそこないましたけどね。

逃げる途中は大変ですよ。もう建物は非常によく燃えて炎が見える。大火事になると風が強く吹くんです。台風ようになってね、屋根瓦が飛んできました。屋根瓦が飛んできて、地面に落ちこちてパーンと音を立てていたんです。あの頃僕らは防空頭巾を被ってたから、屋根瓦が頭に落ちこちてきても大丈夫かなと思った。そんなふうには屋根瓦が飛んでくる間をこう縫ってね。そうする

と途中で白い肌のひとがこううつ伏せに倒れているのが目に入ったんです。道路の真ん中でね。近づいて見ると若いお母さんなんです。両手で下に赤ちゃんを抱いてるんですよ。その方はたぶん煙にまかれて倒れて亡くなったんでしょう。そこに火がぱーとこうきて、火は風にあおられて道路をなめますからね。火がその方の衣類を焼いて、裸体に近い白い肌になった。中学1年生ながらね、なまめかしかったですね。そういうのをまたぎながら逃げたんですよ。

その逃げる先はですね、当時、避病院とって墨東病院なんです。その傍は横十間川なんです。そこへ行ったらもう大火事が風下へ行っただけでね、助かったんです、私は。だから確率4分の1で生きてるんじゃないかと思っています。

さっきの十字路の北側には省線の駅があって、風下の東方向には精工舎のコンクリートの建物があったんです。コンクリートの建物は燃えないと思って多くの人が行ったんですが、みんな焼死したんです。燃えない建物は安全という思いに駆られたんでしょう。でも実際は避難した人々が持っている荷物が燃えた。生き延びた人に聞くと、駅に入ろうとしたけど中の人からもう一杯だからダメと言われたと。それから十字路を南に行った人は、南からも火が迫ってきたから川に飛び込んで、多くの方が亡くなりました。

高橋: 先生のご家族は十字路の風上の方向に逃げて助かった、ということなんですか。

日江井: 十字路でね。今でも地震が起こると大都会では大火事が起こる恐れがありますよね。私は若い人みんなに「そのときは風上に逃げろ」って言ってるんです。風上に逃げるのは怖いけども、逃げられれば生き延びられますからね。

逃げたあとも大変でした。少し明るくなって、喉が渴いたから親父が水を汲んできてくれたんですけども、それをおいしいってガブガブと飲んだら、「あまり飲むな」って言うわけです。その当時は防火用水を各町内に用意しろと言われてそ

れを汲んできたんですが、そこにはボーフラがいるかもしれない。まあ3月だからいなかったのかもしれないけどまあきれいではない。その水を飲んだ。それから目が開けられなかったですね。たぶん煙でやられたんでしょう。しばらくしてやっと開くようになったら白い太陽が見えました。まだ地面は燻ってたから、それで周りを見ると目の前の川に死体が浮いてるし、ちょっと町を歩くと黒い焼死体をたたくさん見ました。川に浮いた死体は長い棒で引っ掛けて持ち上げてトラックに積んでいましたね。近くの駅はコンクリートだっていうんでそこにみんな逃げたんでしょう。そこでも山なりに人が亡くなってました。駅の壁に人の死体の油痕がついて、その死体の臭いっていうのは嫌なもんでね。その後10年間くらいそこを通るとその匂いを感じました。非常に嫌だった。

高橋: 先生のご家族も皆さんご無事だったんでしょうか？

日江井: 家族はみんな無事だったんですが、親戚の人が亡くなってね、大変だったですね。

高橋: 学校のお友達とかも…

日江井: 亡くなりましたよ。亡くなりましたね。かわいそうなのは、その数日前、3月8日かな。学童疎開で山形の方に疎開してた子達、受験のために戻って来たんですね。彼らは小学6年生。戻って来て空襲に会って、亡くなっちゃった人がいるんですよ。数日後に帰京したら生きてられたんでしょうけど。そんなことがあってね。

## ●終戦

日江井: まあそれで中学2年になって、日本が負けたわけですよ。あの天皇の放送っていうのが、初めはよくわからなかったですけど、日本が負けたと親から聞きました。それまで家の中では空襲警報だなんていうと、電球にこう黒い布かぶせて真っ暗にして、勉強もできなかったんですけど、それができるようになった。まあ安堵感もあったし、解放感もあったね。

高橋: 放送はどこでお聞きになったんですか?

日江井: 家ですね。学校で家へ帰って聞くようにと言われてね、家へ帰った。その放送の後、すぐ近くの友達が出来たんです。私そのとき市川にいたんですけどね、市川の土手で太陽の沈むのを見て、まっかっかだね。私は覚えてないんですが、友達が「お前はあのときに気がふれたように『太陽が赤いなあ、まっかっかだなあ』なんて言った」というのを言ってくれたんです。

高橋: 終戦の日の夕日を見たんですね。

日江井: それから前の話に戻りますが、小学校2年生のときの担任の先生が、「君は小学校2年の作文で『太陽』っていうのを書いてるよ」と。私は全然覚えてないのに先生が覚えててね。内容を知りたいんだけどそれは燃えちゃったから何を書いたんだかわかんない。私はずっと太陽の研究をやってきたけれども、太陽をやりたいから太陽に行ったんじゃないで、なんかそうやって太陽に惹かれていったんじゃないかしらと思うことがあるんですね。

高橋: 自然と太陽に惹かれていったんですね。原爆についてはニュースとかで聞きましたか?

日江井: 原爆はねえ、わかんなかったです。だけどすごい爆弾が広島に落ちたよっていうのは周りから聞いた。それは中学2年だよ。原子爆弾だっていうのはその頃はわかりませんでした。

それで戦争に負けたときのね、先生の態度や社会の空気がその前日と全然違ったのにさ、びっくりしたわけですよ。もうねえ、大人の言うこと、世間で言われていることは何を信用していいのかわからないと思った、そのとき。

高橋: 終戦を境に先生の態度がガラッと変わったということですか。

日江井: 変わりましたよね(笑)。そりゃあねえ、突然、民主主義だよ、自由だよとかね。なんか急に変わりましたね。

高橋: 教科書を墨で塗ったりしましたか?

日江井: ああ塗った。よく覚えてる。何ページの

何行目から何行目まで墨で塗れっていうわけですよ。それで塗るわけですよ。だけど塗る前にそこになんて書いてあるかど見るから、かえってそれはよく読みましたよ(笑)。

高橋: それはやっぱり戦争に関するところとかですか?

日江井: なんでしょうねえ。鬼畜米英だとかね。鬼畜米英というのは実は小学校の頃に聞いてね。小学校の先生が言うには「彼らは毛むくじゃらだよ」と。確かに写真を見ると体が毛むくじゃら。それで「赤ら顔してるよ、風呂に入らないよ」って。だから鬼畜米英っていうのもう鬼のようでも不潔なんだなあなんて思っちゃったの。でも後になってアメリカに行ったら彼らはシャワーを浴びて身ぎれいにしてるんですよ。だからね、それはこちらの理解の仕方がいけなかったんですね。まあ確かに風呂には入らないかもしれないよ。風呂には入らないけどもシャワーに入るとはそのころ気がつかなかったですからね(笑)。だから人の言うことで、何が本当で何が本当でないのかっていうのは難しいなど思ったんですね、子供心にね。

でも、尊敬する先生もいた。もう戦争中は戦争反対なんて言えないですよ。言ったら大変だから。でもその先生は戦争反対とは言わないけども、戦争は大丈夫かなと思ってるんだなあというのが子供心にわかるわけですね。そういう先生が終戦後によく教えてくれましたよね。そういう先生は僕らも尊敬していましたね。「あの先生の授業はいいよ」とかね。

高橋: 気骨のある先生もいらっしやったんですね。

日江井: いた。いましたよ。だけどそういう戦時中の時代に流れていた思いというのはねえ、大人になるとなかなか元に戻せないですね。私はまだ子供で柔軟性があったからね。中学2年、13か14かそこらへんだからまだ柔軟に対応できたのかもしれないけど、大人は大変だよ。人間って保守的だからつい解析接続をしていくじゃないで

すか、個人的には、だけど国家は解析接続できないのね。負けたんだから。だから大人は大変だったに違いないと思いますよ。学校教育も変わったわけだよ。6・3・3・4でしょう。文部省は教育の枠組をどうするか、教育をする先生をどうするか、校舎はどうするか、とかいうのに悩んだに違いないですよ。

**高橋:** そうですね。急にいろいろと変わっていくわけですよ。戦中と終戦後と食料がなくなってくると思うんですけど、いかがでしたか？

**日江井:** 戦争中は何とか食べ物があった。戦後ですよ、大変だったのは、家は燃えちゃって商売ができなくなったからね。母親は本当にずいぶん苦労したに違いないと思いますね。それこそタケノコ生活で、着物を売っちゃあお米と換えたんじゃないかなあとと思います。

**高橋:** 街に占領軍はいましたか？

**日江井:** ああ、負けたときには占領軍が来てびっくりした。当時彼らをGIと呼んでましたけども、体格がよくてね。それでねえ、街へ行くと十字路の交差点で、GIと日本の警察官が立って、信号機の代わりをしているんですよ。占領軍がこう非常にかっこよくてね、そのそばに日本人がいるんですけど、日本人はやっぱり体格が悪かったですよね。ああアメリカ軍はすごいなあ、ああいうのに負けたのかなあってね。

**高橋:** 怖くはないんですか？

**日江井:** 怖いとは思わなかった。負ける前はいろんな噂が飛びましたよ。女子はどっかへ逃げないと危ないという。でも私は怖いとは思わなかった。彼らはジープを乗り回して、あっちこっち闊歩してましたからね。あんなのと戦争したんだからなあと思いましたけどもね。

**高橋:** 占領されてるっていう感じはあったんですか？

**日江井:** それはそうでしょうよ。教科書を黒く塗れだとか、手紙のコントロールもあったようですし、それから新聞の検閲もあったようですよね。

マッカーサーがきて、飛行機から降りる写真なんかかっこいいのが出てね、天皇がマッカーサーのところに行ったじゃないですか。ああ日本は負けたんだなあ。天皇が一番偉いと思ってたわけよね。それよりも偉い人がいるんだと思ってね。負けを実感しましたよね。

それよりも毎日の食べるものすら欠けて大変だったですからね。戦時中、戦時国債っていうのを父が買われたたんでしょね。戦後にインフレが進んで新円切り替えだとかいってね、「こんな国債は紙屑だよ」なんて言って嘆いてたのをちらっと見てましたからね。いやあだからやっぱり負けたんだなあと思いましたよね。あもう、GIは上手ですねえ。小さい子に坊や坊やって、チューインガムやチョコレートをあげたりしましたね。

**高橋:** ああ、先生ももらいましたか？

**日江井:** 私はあんまりもらわなかった。でもそういうGIのアメリカ人ってのは明るくて人懐っこさそうだなと思った。アメリカ人は表面的には柔らかくしてね。一方、新聞なんか締めるところではちゃんと検閲やったりしてね。憎む相手という気が全然しなかったのは占領政策がうまかったからでしょうね。

**高橋:** ちょっと前まではアメリカ人というのは敵だったわけですよ。

**日江井:** まあそうだったんでしょうけれども、軍国教育というのはそれよりも「お国のために」とか、「生きて虜囚の辱を受けず」という話でした。そういう厳しくて、気持ちをがんじがらめにする言葉が頭に入っていたけれども、戦争が終わってこれからはもっと自由に動けるよっていう空気が広がったんで、敵を憎むというセンスではなかったですねえ。私は戦争に行かされなかったからそう思ったのかもしれませんがね。日本人をたくさん殺した相手、沖縄での本当の生死の状況というのは伝わってこなくて、憎々しいという気は起こらなかったですね。

## ●戦後の中学校

高橋: では終戦を迎えて、その後は中学の授業もちゃんとやるようになったんですか?

日江井: 授業をやるようになったけれども、教科書もろくになくてですね。今覚えているのは、国語の先生がいい先生でね。その先生がですね、万葉集だとか源氏物語だとか、平家物語だとか奥の細道だとかね、最初のところだけを黒板に書くわけ。それを我々はノートに手書きして教科書としました。「祇園精舎の鐘の声」だとか、「月日は百代の過客にして」だとかですね、そういう最初の文だけは今でも覚えているわけですね。その先生は気骨のある先生だったんですね。

高橋: 戦後すぐ、憲法ができますね。憲法については学校で何か説明があったんですか。

日江井: 憲法を学んだという記憶はありませんね。というのも、軽蔑とっちゃあおかしいけども、あの先生の言うことは聞かまいと思った先生が社会という教科を教えだしたんですよ。それで私は社会の授業で「社会は複雑なので、授業にはなじみません」って先生に平気で言ったの。そしたら先生が、「じゃあお前は出て行って自分で好きな勉強をしろ」って言って教室から出された。だからもしかしたら憲法の話があったのかもしれない。私は憲法よりも軍事裁判の方を聞いて、辛かったですよね。

高橋: それもニュースで聞いたんですか?

日江井: ニュースで出ました。テレビなんかないから新聞ですよ、その頃。新聞で写真が出てね。それでインドのパールという判事ですか、その人が皆と違った意見を言ったっていうんで、ああインドっていうのはすごい国だなあ、そういう人がいるんだなあと思いました。

高橋: 中学の後半は高校受験の勉強でしょうか。高校に入るのは戦後でまだ日本が落ち着く前ですかね。

日江井: そうです。落ち着く前だったなあ。ちょうど学制が変わったわけです。



中学3年生、一番右が日江井氏(日江井氏提供)。

高橋: 高校受験はやっぱり大変でしたか?

日江井: そう。姉が亡くなってから、ああいう不条理はどうしようもないですよ。それを勉強に向けたっていうところから勉強しだしたなあという気がします。今思うと、僕らのときにはアチーブメントテストっていうのがあったんですよ。理系と文系の問題が出ました。理系はできた。ところが文系はできなかったからね、だからやっぱり自分は文学的センスがなかったのかなあという気がしましたね。

高橋: それで先生は理科系に。

日江井: 理科系だったですね。でもその当時は化学の実験だとか何にもない、実験は何にもできなかったですよ。

高橋: アチーブメントテストっていうのはみんな共通で受けたんですか?

日江井: 共通で受けたんです。そのときは中学校4年と5年が旧制高校入試を受けられたから、4年生と5年生と一緒に全員が受けさせられたですね。

高橋: 先生は4年で修了されたんですね。

日江井: そうです、4年で。

高橋: いわゆる4修5卒っていう。

日江井: そうです。そのときだったですね。

高橋: 4年生で修了できる人はそんなにいないわけですよ。

日江井: 中学で10人くらいいたかな。

高橋: 大部分は5年生で卒業すると。



日江井: そうです, そうです. それで中学4年生で修了した人の大部分は新制高校2年生になったんですが, 私は旧制高校の1年生になった.

高橋: そうなんですか, ええと, 中学5年生まで行った人は?

日江井: 5年生で卒業した人は, 新制高校の3年生になる.

高橋: ああ, そうなんですね.

日江井: 難しいんだよ.

高橋: ちょうど旧制と新制が切り替わるころだったんですね. じゃあ先生は中学を4年生で修了して, 旧制高校の1年生になったわけですね.

日江井: そうですね.

高橋: 戦後の頃はかなり食糧が厳しかったっていうことで, その中で苦労して勉強されて.

日江井: ああ, 食料は厳しかったですね. 本当に食うや食わずだった. ひもじい思いをしてね, 親友が筑波に引っ越して, 「俺のところに遊びに来いよ」って言うから筑波に行ってですね, 帰りにお米をもらって帰るんですね. 下手に持ってくるとおまわりさんに捕まっちゃうわけです. だから少しもらってきてね, 白米が食べられるっていうのはうれしかった. ちょうど中学生だから食い盛りだったわけですね. 食料不足だから私, 栄養失調になったらしくてですね, 脚気になっちゃったんですね. だからたぶん栄養失調だったんでしょうね.

高橋: じゃあそういう中で勉強をしてっていう.

日江井: 勉強をしたんです. それからあの頃は停電がしょっちゅう起こった. でも停電が起こってもね, 誰かが教えてくれたのかもしれませんが, 1つの線をつなぎかえるとね, 薄暗いけれども電気がぼーとつくんですよ.

高橋: え, そうなんですか.

日江井: それで勉強しましたよ. 暗いところで勉強, それで目を悪くしたのかもしれないですけどね. しょっちゅう停電が起こって暗い中で勉強をしました. それでね, 山手線に乗ればずうっと

明かりがついてるからね, 山手線に乗って本を読んだこともある.

高橋: ええっ, そうなんですか.

日江井: うん, あるある. 勉強が好きだったというか, いや, 勉強しかすることなかったですよ. その当時は遊ぶことなんかほとんどなかったですもん. 食べ物はいいしね.

(第2回に続く)

## 謝 辞

本活動は天文学振興財団からの助成を受けています.

### A Long Interview with Prof. Eijiro Hiei [1] Keitaro Takahashi

*Faculty of Advanced Science and Technology,  
Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami,  
Kumamoto 860-8555, Japan*

Abstract: This is the first article of the series of a long interview with Prof. Eijiro Hiei. He studied under the guidance of Prof. Yusuke Hagihara, Prof. Masaki Kaburagi, and Prof. Yoshio Fujita in the Department of Astronomy at the University of Tokyo. After graduating the University of Tokyo, he worked on solar physics at Tokyo Astronomical Observatory of Japan, where he had observed solar flares at Einstein Tower telescope with Prof. Zenzaburo Suemoto. Then he served as the director of the Norikura Solar Observatory at the Tokyo Astronomical Observatory and played a leading role in the solar observation satellite “Yohkoh”, significantly advancing solar research in Japan. After retiring from the National Astronomical Observatory of Japan, he joined Meisei University, where he dedicated himself to astronomy education and even served as the university president. Moreover, Prof. Hiei has observed numerous solar eclipses over several decades. He describes himself as being afflicted with “eclipse fever”, a term he uses to describe being captivated by the allure of solar eclipses. This time, he shares his experiences from his junior high school days, including surviving the Tokyo Great Air Raid and witnessing the end of World War II. How did these experiences during his formative years as a junior high school student influence him?

# 日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

## *Nuclear Physics in Astrophysics XI (NPA-XI)*

氏 名：深川奈桜（国立天文台特別客員研究員）  
 渡航先：ドイツ ドレスデン，フランス パリ  
 期 間：2024年9月13～29日

私は、2024年9月15日から20日に開催された研究会“Nuclear Physics in Astrophysics XI (NPA-XI)”においてポスター発表を行いました。また、パリ天体物理学研究所にて論文共著者と将来の研究等について議論しました。

初めに、対面での研究会への参加と共同研究を通し、多様な分野やコミュニティの研究者と接する機会をいただき、誠にありがとうございました。早川基金と研究会主催者からの部分援助に加え、研究会や研究所の方々に受け入れていただき実現した渡航でした。

13日金曜日の飛行機で経由地のフランクフルトに無事到着後、さらに長距離バスで数時間移動し、研究会の会場があるドレスデンに着きました。NPAは隔年開催であり、核物理や星の元素合成、化学進化等の分野に関連する実験・理論・観測的研究の成果について、70以上の講演が行われました。私は、元素の供給源や発生頻度の低い現象（レアイベント）の元素組成へのインパクト等に焦点をあて、矮小銀河の化学進化について議論した成果（Fukagawa N., Prantzos N., 2023, MNRAS, 524, 4688, 参考文献含む）について、“Contribution of individual astrophysical events to chemical evolution of dwarf galaxies”という題目で発表しました。

この研究において取り組んだのは、矮小銀河が小質量銀河の合体により形成される場合の元素組成比を化学進化モデルを用い予測し、その結果をもとに、低金属量環境における元素の供給源とレアイベントの役割について議論する、ということ

です。詳しくは出版論文を見ていただきたいのですが、面白いのは、化学進化モデルにおける元素の供給源の中に、低金属量環境における窒素やフッ素、鉄より重い元素などの供給源の一つであると言われている自転速度の大きい大質量星（高速自転星）が含まれるため、矮小銀河における鉄より重い元素（ストロンチウムやバリウムなど）の組成の予測に、高速自転星内部で起こる遅い中性子捕獲過程（sプロセス）の寄与が現れうることです。また、小質量銀河では星形成率が平均的に低く、単位時間当たり形成される星の数が少ないため、発生頻度が低い速い中性子捕獲過程（rプロセス）の候補天体以外の供給源もレアイベントになりうるといふ点です。

実際に、矮小楕円体銀河が小質量銀河の合体により形成されることを仮定し、レアイベントが散発的に発生するような化学進化モデルを用いて元素組成比（ $[\text{Sr}/\text{Fe}]$ ,  $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ ,  $[\text{A}/\text{B}]$ は元素Aの存在量のBに対する比の対数）を予測したところ、小質量銀河で発生する個々の現象による元素組成比へのインパクトが合体後の矮小銀河の元素組成比に反映されうるといふ結果が得られました。rプロセス天体等のレアイベントによるインパクトが低金属量で大きいことに加え、質量、金属量、自転速度の異なる大質量星でのsプロセスによる寄与により、合体後の矮小銀河の元素組成比の分散の一部が作られうること、つまり、自転速度の異なる個々の大質量星が、sプロセスにより鉄より重い元素の組成に寄与する可能性を、単純なモデルを用い明確に示しました。

ポスター発表では、この結果に対し異なる観点から質問を受け議論しました。例えば、合体する小質量銀河の個数の見積りについての質問に対し手法を説明しましたが、視野を広げると、銀河の

個数や分布はダークマターの性質などによるはず  
です。銀河群より小さい規模では、宇宙論モデル  
による予測と観測が必ずしも一致しないことが指  
摘されているので、そのような問題が念頭にあっ  
ての質問だったのかもしれませんが。また、実験に  
より測定される核反応率の不確かさが、星の元素  
合成計算を介し、結果に反映される可能性につい  
ての質問を受けました。異なる分野の研究者との  
議論を通し研究の可能性を広げることができたの  
と同時に、低金属量環境における元素の供給源に  
関し議論すべき点が多くあることを再認識しまし  
た。

セッションにおいても、元素や核種に関する講  
演を通し、研究の参考になる情報を多く得るこ  
うことができました。日程が比較的密だったので、会  
場で議論まで至らず残った質問もあります。それら  
は、今後文献調査や講演者との連絡等を通し解決  
したいです。また、主に高校生を対象としたアウト  
リーチ活動についての講演では、プログラム参  
加者を指導する人への教育についての質問と議論  
がありました。

NPA-XIの参加者全体に対し、日本の研究機関  
からの参加者は多くはありませんでした。また、  
化学進化モデルを用いた研究についての講演が複  
数あるような環境で、周りの研究者を尊敬しつ  
つ、自分の研究や自分自身の独自性を出せるかど  
うかが課題の一つでした。幸い、参加者の中に過  
去に議論したことがある方や共同研究者の知人が  
いらして、頻繁に声をかけていただいたので、緊  
張が和らぎました。その助けがあり、星の元素合  
成に関する講演への質問や、研究会の一部として  
開催された公開講演会への出席などを通し、研究  
会に貢献できたのではないかと思います。

研究会終了後、夜行バスでドレスデンからパリ  
へ移動しました。ドイツとフランスとの国境の近

くで、窓から農園が見えました。白ワインになる  
ぶどうの木かもしれません。手元にパスポートを  
用意していましたが、国境での手続きはありません  
でした。

長距離バスでの移動には、安価であり乗車時の  
手続きが簡単であるという利点があります。同時  
に、道路状況により出発・到着時刻が遅れること  
がありました。移動中は資料を読んでいましたが、  
乗車時間が長いので、時間の点では列車や飛行機  
の方が効率が良い場合があると思います。

渡航期間後半は、パリ天体物理学研究所におい  
て論文共著者である Nikos Prantzos 氏と議論し、  
次の研究につながるようなアイデアを得ました。  
銀河で重要となりうる物理過程について惑星  
の運動を例に教えていただいたり、元素の供給源  
に関し星の質量放出について説明していただいたり、  
幅広い視点から議論してくださいました。短  
時間ではありましたが、様々な研究課題の可能性  
を探り、化学進化モデル作成の基礎部分にも取り  
組みました。

研究所からセーヌ川の方へ歩いていくと、パン  
テオンの近くを通り、ノートルダム大聖堂のそば  
に出ます。2019年に起きた火災後の修復のため、  
まだ作業用のクレーンが見えましたが、12月上旬  
に公開が始まると聞きました（編集部注：  
2024年12月8日に一般公開を再開しました）。大  
聖堂のように、化学進化モデルも研究者から研究  
者へ伝えられてきた遺産のような面があるのかも  
しれないと思いました。また、立ち寄ったパン屋  
には出身等の異なるスタッフがいて、店名の通り  
理想郷のように雰囲気の良いところでした。帰  
国後、研究の理想郷はどのようなところか思いを  
めぐらせつつ、渡航での議論を活かし研究計画を  
作成しています。これらを実行し、将来の議論に  
つなげたいと思います。

# 日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

## *Born in Fire: Eruptive Stars and Planet Formation*

氏 名：山室良太（東京科学大学理学院地球惑星  
科学系（渡航当時））

渡航先：チリ共和国 サンティアゴ

期 間：2024年9月22～27日

チリで開催された国際研究会“Born in Fire: Eruptive Stars and Planet Formation”に参加し、“Massive Protostellar Disks as a Hot Laboratory of Silicate Grain Evolution”というタイトルでポスター発表を行いました。本研究会の主題は、FU Ori型天体をはじめとした突発的なアウトバースト現象と、それに伴う惑星形成への影響を議論することでした。会全体を通じ、赤外から電波波長帯を活用した観測的、解析的手法や、シミュレーションによる理論的アプローチが、アウトバースト現象の理解を深める上でどのように進展しているかと、今後の展望が主な話題となりました。

私のポスターでは、大質量原始星円盤におけるダスト成長に関する発表を行いました。この研究のモチベーションは、原始惑星系円盤における岩石ダスト成長や岩石微惑星形成に示唆を与えることです。惑星は、若い星を取り巻くガスとダストからなる原始惑星系円盤の中で誕生します。この円盤において、氷や岩石からなるミクロンサイズのダストが衝突・合体により成長し、キロメートルサイズの微惑星が形成されます。この微惑星形成過程は、惑星形成の第一段階として非常に重要です。特に地球のような岩石惑星は、原始星近傍で氷が昇華するほど高温の岩石ダスト領域で形成されることが期待されています。そのため、岩石ダストの衝突合体時の付着力など、成長特性を明らかにすることが重要です。この特性を解明するために、多くの理論的・実験的手法による研究が

進められてきましたが、未だ明確な結果は得られていません。これには、典型的な原始惑星系円盤における岩石ダスト領域を、現存する電波干渉計で空間分解することが難しいという理由もあります。そこで我々は、大質量原始星周囲の円盤に着目した研究を進めてきました。これらの円盤は、中心星の強い輻射により全体の温度が高く、ALMA望遠鏡で岩石ダスト領域を十分に解像できるほど広いのが特徴です。私たちは、大質量原始星円盤モデルとALMA観測を比較することで、岩石ダストの成長特性を制約し、観測を再現できるモデルを作成しました。この成果を基に、原始惑星系円盤における岩石微惑星形成過程について議論しました。加えて、この成果により強い制約を与えるために計画した、私がPIを務めるALMA観測と、円盤モデルの輻射輸送計算に使用した新たな解析的手法も紹介しました。後者の解析的手法はFU Ori型天体周囲の円盤やその他原始惑星系円盤の観測モデリングに応用可能なため、聴衆には積極的にこの式の宣伝を行いました。

研究会では、岩石ダストの成長過程を制約するためにFU Ori型天体に着目した研究を行っているHauyu Baobab Liu氏と議論を行いました。氏の研究と私の研究は対象天体が異なるものの、岩石ダストの成長過程において比較的近い制約を得ることができています。氏との議論を通じ、大質量原始星円盤に着目する私の研究の強みを再確認することができました。また、形成初期円盤における二次元流体シミュレーションを可能とするFEOSADコードを開発したEduard Vorobyov氏ともコンタクトを取ることができました。私は氏のコードを大質量原始星円盤に応用した研究を行う予定です。氏は遠隔参加でしたが、後日、個別

にミーティングをする機会を得ました。さらに、このコードを用いた研究発表も複数見られたため、競合する他者との比較において有意義な視点を得ることができました。私の研究対象である大質量原始星円盤は研究会の主題からはやや外れる内容でしたが、同様の天体を対象とした研究者も複数参加していたため、意義ある発表となりました。大質量原始星円盤においてダスト成長が起り得る可能性は、近年、我々の研究によって初めて理論的に示されました。この現象について、大質量原始星円盤を専門とする外部の研究者と共有できたことは大きな成果です。特に、Verrena Wolf氏が実施していた赤外波長のSEDを用いた

大質量原始星の中心星光度推定は、今後、私も取り組むべき重要な領域であると認識しました。

このように、今回の渡航では、自身の研究と関連する多くの研究者と有意義な議論を交わすことができました。それだけでなく、自分の研究の立ち位置を再確認し、新たな研究アイデアを複数得ることができました。また、単独での海外渡航と学会参加の経験は、今後の海外出張に対する貴重な経験と自信を得る機会となりました。

今回の非常に有意義な渡航は、早川基金のご支援がなければ成し遂げられなかったものです。深く感謝申し上げます。

### Hayakawa Satio Fund

#### 早川幸男基金とは

「早川幸男基金」は、日本天文学会元理事長・故早川幸男氏のご遺志に基づき、ご遺族から日本天文学会に寄付された750万円を創設基金として、1993年に設けられました。若手天文学研究者の海外学術研究援助を目的としています。

毎年4回（3, 6, 9, 12月の10日が締め切り）募集を行い、一年に総額600万円程度の渡航費の援助を行っています。渡航期間は、締め切り月の翌月の1日から3ヶ月後の月末までが対象となります（例えば、3月10日締め切りの場合、4月1日から6月30日まで）、前回の募集に間に合わず渡航した場合、納得する事情説明がある場合には、その直後の回の締め切りに応募することが可能です。

当基金は現在も寄付金によって継続され、毎年多くの若手天文学研究者の海外研究活動を支えています。この基金を活用し、ぜひ、世界に向け研究活動の幅を広げてください。詳しくはホームページをご覧ください。

#### 早川幸男基金ホームページ

[https://www.asj.or.jp/activities/expenses/hayakawa\\_fund/](https://www.asj.or.jp/activities/expenses/hayakawa_fund/)

### 寄贈図書リスト

- ① シリーズ〈理論物理の探求〉3 重力レンズ, 大栗真宗, A5判, 256ページ, 4,000円+税, 朝倉書店

- ② シリーズ現代の天文学8 ブラックホールと高エネルギー現象 [第2版], 小山勝二 嶺重慎 馬場彩, A5判, 312ページ, 2,800円+税, 日本評論社

## 月報だより

月報だよりの原稿は毎月20日に締切り、翌月に発行の「天文月報」に掲載いたします。校正をお願いしておりますので、締切日よりなるべく早めにお申込みください。

記事の投稿は、e-mailで [toukou@geppou.asj.or.jp](mailto:toukou@geppou.asj.or.jp)宛にお送りください。折り返し、受領の連絡をいたします。

### 人事公募結果

#### 東京都立大学理学研究科物理学専攻 准教授

1. 掲載号: 2024年9月(第117巻9号)
2. 結果(前所属): 本橋隼人(工学院大学)
3. 着任時期: 2025年4月1日

### 人事公募

#### 東京大学宇宙線研究所 准教授

1. 職名及び公募人員: 准教授 1名
2. 職務内容(専門分野)等:  
本研究所属神岡宇宙素粒子研究施設に所属し、同施設が推進するハイパーカミオカンデ検出器の建設とコミッションングの中心となる方を求めます。さらにニュートリノ物理学および天文学、核子崩壊探索などでの研究成果導出を行っていただきます。また本研究施設の維持・運営にも参加していただきます。  
※変更の範囲: 配置換、兼務及び出向を命じることがあります。(意に反して命じられることは原則ない。詳細は東京大学教員の就業に関する規程第4条による。)
3. 勤務地: 宇宙線研究所附属神岡宇宙素粒子研究施設(岐阜県飛騨市神岡町)  
※変更の範囲: 本学の指定する場所(配置換又は出向を意に反して命じられることは原則ない。詳細は東京大学教員の就業に関する規程第4条による。)

4. 応募資格: 雇用の時点で博士号を取得していること
5. 着任時期: 決定後なるべく早い時期
6. 待遇: 給与は本学の規定に基づき経歴等により決定します。保険は文部科学省共済組合と雇用保険に加入します。
7. 任期: 5年, 再任可
8. 就業日・就業時間: 専門業務型裁量労働制により, 1日あたり7時間45分・週5日勤務したものとみなされます。
9. 休日: 土・日, 祝日, 年末年始(12月29日~1月3日)
10. 選考: 選考委員会による書類選考(第一次審査)を行い, 最終選考は, 面接によります。(面接を受けていただく方には詳細を連絡します。)
11. 応募書類: 以下(1)~(7)の書類をEメールに添付で提出してください。(6)の推薦書または意見書は, 作成者からEメールに添付で応募締切日までに提出してください。応募書類・推薦書・意見書の電子ファイル形式はpdfとします。(応募書類の提出に対しては, 受信した旨の返信をいたしますので, 必ず当方からの返信の有無を確認してください。)
  - (1) 履歴書(市販の様式相当, 博士号の有無, 電子メールアドレスを必ず記入のこと)
  - (2) 研究歴(A4判で3ページ以内)
  - (3) 業績リスト(論文リスト, 研究発表リスト等), 及び主要論文(3編以内)。提出する論文については論文リストに印を付け, 一目でわかるようにすること。
  - (4) 着任可能時期
  - (5) 着任後の研究計画(A4判で3ページ以内)
  - (6) 推薦書又は意見書2通
  - (7) 学生に対するセクハラ・性暴力等を原因とす

る過去の刑事罰、行政処分及び懲戒処分にかかる申告書

※(7)については、以下URLから様式をダウンロードしてください。

<https://proself.icrr.u-tokyo.ac.jp/public/kv2cAAnP9ERAtf0B4m-PaXyksfRZ0XTwTKCHopOB5XHB>

12. 応募締切：2025年4月2日(水) 正午必着

13. その他：

- (1) 「東京大学男女共同参画加速のための宣言」に基づき、女性の応募を歓迎します。
- (2) 外為法等の定めにより、採用時点で、海外との兼業や、外国政府等からの多額の収入がある場合、研究上の技術の共有が制限され、本学教職員としての職務の達成が困難となる可能性があることから、このような場合、兼業等については、本学における研究上の技術の共有に支障のない範囲に留める必要があります。
- (3) 試用期間あり（14日間）
- (4) 受動喫煙防止措置の状況：敷地内禁煙（屋外に喫煙場所あり）

14. 送付先：

Eメール [application\\_at\\_icrr.u-tokyo.ac.jp](mailto:application_at_icrr.u-tokyo.ac.jp)

（メールを送信する際は\_at\_を@に直してください）  
メールの件名に公募番号の「ICRR2024-12」を明記してください。

15. 問い合わせ先：

神岡宇宙素粒子研究施設長 塩澤真人

電話 0578-85-9611

Eメール [masato\\_at\\_km.icrr.u-tokyo.ac.jp](mailto:masato_at_km.icrr.u-tokyo.ac.jp)

（メールを送信する際は\_at\_を@に直してください）

16. 募集者名称：国立大学法人東京大学

原則ない。詳細は東京大学教員の就業に関する規程第4条による。）

3. 勤務地：宇宙線研究所（千葉県柏市柏の葉5-1-5）

※変更の範囲：本学の指定する場所（配置換又は出向を意に反して命じられることは原則ない。詳細は東京大学教員の就業に関する規程第4条による。）

4. 応募資格：雇用の時点で博士号を取得していること

5. 着任時期：決定後なるべく早い時期

6. 待遇：給与は本学の規定に基づき経歴等により決定します。保険は文部科学省共済組合と雇用保険に加入します。

7. 任期：任期5年。着任後約3年間をテニュアトラック期間とし、3年近く経過した時点でテニュア着任の審査を行い、審査で認められれば任期なしに移行します。テニュアトラック期間は、研究予算100万円/年のスタートアップ支援をいたします。

8. 就業日・就業時間：専門業務型裁量労働制により、1日あたり7時間45分・週5日勤務したものとみなされます。

9. 休日：土・日、祝日、年末年始（12月29日～1月3日）

10. 選考：選考委員会による書類選考（第一次審査）を行い、最終選考は、面接によります。（面接を受けていただく方には詳細を連絡します。）

11. 応募書類：以下（1）から（7）までの書類をEメールに添付で提出してください。（6）の推薦書又は意見書は、作成者からEメールに添付で応募締切日までに提出してください。応募書類・推薦書・意見書のファイル形式はpdfとします。（応募書類の提出に対しては、受信した旨の返信をいたしますので、必ず当方からの返信の有無を確認してください。）

(1) 履歴書

(2) 研究歴（A4判で3頁以内）

(3) 着任後の研究計画（A4判で3頁以内）

(4) 業績リスト（論文リスト、研究発表リスト、外部資金獲得状況等）及び主要論文（5編以内）。提出する論文については論文リストに印を付け、一目でわかるようにすること。

(5) 着任可能時期

(6) 推薦書又は意見書2通

(7) 学生に対するセクハラ・性暴力等を原因とする過去の刑事罰、行政処分及び懲戒処分にかかる申告書

## 東京大学宇宙線研究所 准教授

### （テニュアトラック）

1. 職種及び公募人員：准教授（テニュアトラック）1名

2. 職務内容（専門分野）等：国際ガンマ線天文台CTAOの大口徑望遠鏡アレイの建設を推進し、望遠鏡の管理・運用を担い、高エネルギーガンマ線の観測的研究によって、宇宙物理学、宇宙素粒子物理学、マルチメッセンジャー天文学の発展に貢献できる方を求めます。

※変更の範囲：配置換、兼務及び出向を命じることがあります。（意に反して命じられることは

※(7)については、以下URLから様式をダウンロードください。

<https://proself.icrr.u-tokyo.ac.jp/public/kv2cAAnP9ERAtI0B4m-PaXyksfRZ0XTwTKCHopOB5XHB>

12. 応募締切: 2025年3月24日(月) 正午必着

13. その他:

- (1) 「東京大学男女共同参画加速のための宣言」に基づき、女性の応募を歓迎します。
- (2) 外為法等の定めにより、採用時点で、海外との兼業や、外国政府等からの多額の収入がある場合、研究上の技術の共有が制限され、本学教職員としての職務の達成が困難となる可能性があることから、このような場合、兼業等については、本学における研究上の技術の共有に支障のない範囲に留める必要があります。
- (3) 試用期間あり (14日間)
- (4) 受動喫煙防止措置の状況: 敷地内禁煙 (屋外に喫煙場所あり)

14. 送付先:

Eメール [application\\_at\\_icrr.u-tokyo.ac.jp](mailto:application_at_icrr.u-tokyo.ac.jp)  
(メールを送信する際は\_at\_を@に直してください)  
メールの件名に公募番号の「ICRR2024-14」を明記してください。

15. 問い合わせ先: カナリア高エネルギー宇宙物理観測研究施設長 窪 秀利

電話 04-7136-3136

Eメール [kubo\\_at\\_icrr.u-tokyo.ac.jp](mailto:kubo_at_icrr.u-tokyo.ac.jp)  
(メールを送信する際は\_at\_を@に直してください)

16. 募集者名称: 国立大学法人東京大学

## 東京大学宇宙線研究所 特任助教 【女性限定】

1. 職種及び公募人員: 特任助教 1名
2. 職務内容(専門分野)等:

本研究所の高エネルギー宇宙線研究部門に所属し、最高エネルギー・超高エネルギー宇宙線、ならびに超高エネルギーガンマ線の観測的研究を推進していただける方を求めます。本研究所で進めているテレスコープアレイ実験とチベット ASy 実験・アルパカ実験の維持・運用・建設とデータ解析を推進していただきます。

※変更の範囲: 配置換、兼務及び出向を命じることがある(意に反して命じられることは原則ない。詳細は東京大学教員の就業に関する規程第

4条による。)

3. 勤務地: 宇宙線研究所(千葉県柏市5-1-5)

※変更の範囲: 本学の指定する場所(配置換又は出向を意に反して命じられることは原則ない。詳細は東京大学教員の就業に関する規程第4条による。)

4. 応募資格:

・雇用の時点で博士号を取得しているか、確実に取得できる見込みであること

※国籍・研究経歴によらず、広く関連する研究分野から活発な応募を期待します。

・女性であること

※東京大学は男女共同参画を推進しており、本公募では「男女雇用機会均等法」第8条の規定(女性労働者に係る措置に関する特例)に則り、女性教員の割合が相当程度少ない現状を積極的に改善するための措置として、女性に限定した公募を実施します。

5. 着任時期: 決定後できるだけ早い時期

6. 待遇: 「東京大学特定有期雇用教職員の就業に関する規程」(平成16年4月1日制定)に定める特任助教とします。同規程に基づき、給与は経歴により決定します。保険は文部科学省共済組合と雇用保険に加入、手当は通勤手当を支給します。

7. 任期: 雇用は年度ごとに更新し、最長で5年間とします。

8. 就業時間: 専門業務型裁量労働制により、1日7時間45分・週5日勤務したものとみなされます。

9. 休日: 土・日、祝日、年末年始(12月29日~1月3日)

10. 選考: 選考委員会による書類選考(第一次審査)を行い、最終選考は、面接によります。(面接を受けていただく方には詳細を連絡します。)

11. 応募締切: 2025年3月28日(金) 12時必着

12. 応募書類: 以下(1)から(6)までの書類をEメールに添付で提出してください。(7)の推薦書又は意見書は、作成者からEメールに添付で応募締切日までに提出してください。応募書類・推薦書・意見書の電子ファイル形式はpdfとします。(応募書類の提出に対しては、受信した旨の返信をいたしますので、必ず当方からの返信の有無を確認してください。)

(1) 履歴書(市販の様式相当、博士号の有無・取得見込み、電子メールアドレスを必ず記入のこと)

(2) 研究歴(A4判で3ページ以内)

(3) 業績リスト(論文リスト、研究発表リスト



等), 及び主要論文 (3編以内). 提出する論文については論文リストに印を付け, 一目でわかるようにすること.

- (4) 着任可能時期
- (5) 着任後の研究計画 (A4判で3ページ以内)
- (6) 学生に対するセクハラ・性暴力等を原因とする過去の刑事罰, 行政処分及び懲戒処分にかかる申告書
- (7) 推薦書又は意見書2通

※(6)については, 以下URLから様式をダウンロードしてください.

<https://proself.icrr.u-tokyo.ac.jp/public/kv2cAAnP9ERAtf0B4m-PaXyksfRZ0XTwTKCHopOB5XHB>

### 13. その他:

- (1) 採用時点で, 外国法人, 外国政府等と個人として契約している場合や, 外国政府等から金銭その他の重大な利益を得ている場合, 外為法の定めにより, 一定の技術の共有が制限され, 結果として本学教職員としての職務の達成が困難となる可能性があります. このような場合, 当該契約・利益については, 職務に必要な技術の共有に支障のない範囲に留める必要があります.
- (2) 試用期間あり (14日間)
- (3) 受動喫煙防止措置の状況: 敷地内禁煙 (屋外に喫煙場所あり)

### 14. 送付先:

Eメール [application\\_at\\_icrr.u-tokyo.ac.jp](mailto:application_at_icrr.u-tokyo.ac.jp)  
(メールを送信する際は\_at\_を@に直してください)  
件名に公募番号の「ICRR2024-16」を明記してください.

### 15. 問い合わせ先:

高エネルギー宇宙線研究部門 荻尾彰一  
電話 04-7136-3100

Eメール [sogio\\_at\\_icrr.u-tokyo.ac.jp](mailto:sogio_at_icrr.u-tokyo.ac.jp)  
(メールを送信する際は\_at\_を@に直してください)

### 16. 募集者名称: 国立大学法人東京大学

## 会務案内

### 2024年度日本天文学会日本天文遺産について

2025年1月14日の代議員総会において, 次のように決定しましたのでご報告いたします.

#### ◇臨時緯度観測所本館 (木村榮記念館)

所有者: 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 (国立天文台)

管理者: 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 (国立天文台 水沢VLBI観測所)

#### ◇三鷹200MHz太陽電波望遠鏡

所有者: 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 (国立天文台)

管理者: 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 (国立天文台 野辺山宇宙電波観測所)

#### ◇花山天文台 (本館、別館、子午線館)

所有者: 国立大学法人 京都大学

管理者: 国立大学法人 京都大学 (大学院理学研究科附属天文台)

### 「日本天文学会行動規範」の制定について

「日本天文学会行動規範」(日本語版)が制定されましたので, お知らせします.

「行動規範」の策定を担当する当タスクフォースは, 2024年6月に実務理事会からの諮問により発足し, 秋季年会における活動や若手の会へのアンケート, 下記に報告する tennet での大規模アンケート等の結果を踏まえ, 2024年12月17日に最終案を実務理事へ答申しました. 2024年12月26日の理事会承認, 2025年1月14日の代議員総会における承認を経て, 井田茂会長から報告 (tennet#2005 2025年2月6日発; 学会ウェブサイトお知らせ欄2月10日付)がありましたように, 「日本天文学会行動規範」が制定されました. すでに学会ウェブサイトに掲載されています (<https://www.asj.or.jp/about/code-of-conduct/>).

我々タスクフォースの行動規範の策定の大方針は, <大多数の会員にとって「本当に必要な最小限」とすること>でした. 従って, 何が会員にとってあるいは学会にとって大切なのか, 多様なメンバーの視点から, 密に議論を重ねました. 発足以来, 月に1~3回のペースで合計12回のオンライン会合とメール審議, ならびに実務理事会や関連委員会との意見交換等を適宜行い, 最終案の策定に至りました.

tennet アンケートの結果概要は, タスクフォースからの『「行動規範」アンケートご協力への感謝と結果のご報告』(tennet#1845 2024年12月26日発; 学会ウェブサイトお知らせ欄2025年1月7日付)で報告しましたが, 天文月報誌面でもお知らせします.

アンケート実施期間: 2024年10月28日~11月25日

回答数: 628

回答率: tennetに登録されている正会員数 (2,039名) の31%

「行動規範」導入への賛成割合: 96%

コメント総数: 226

通常、回答率30%がアンケート成功の目安とされますので、上記回答率により、結果はおおむね会員の総意を表していると考えられます。ここで、「正会員」とは、日本天文学会定款で「本会の運営に責任を持つ個人」と定義されている会員です。タスクフォースでは、tennet調査で会員から頂いたご意見をすべて分析・検討し、必要に応じて最終案に反映されるよう、努力しました。多くの会員の方々からの貴重なご意見を、あらためて感謝致します。

この記事の投稿時点(2025年2月20日)において、日本語版に続いて、2025年春季年会時の理事会および代議員総会において英語版の日本天文学会行動規範(Code of Conduct)が承認されることを目指しています。このたび制定された「行動規範」、ならびに制定される見込みの英語版「Code of Conduct」が、ともに日本天文学会の礎となり、会員の自由闊達な活動を明るく照らしていくことを、タスクフォースメンバー一同、願っております。

行動規範に係る、より細かな内容に関しては、今後、会長をはじめとする実務理事のリーダーシップのもと、細則等に反映されていくことと思います。英語版の「Code of Conduct」が制定されたのちは、実務理事会からの諮問により、当タスクフォースは、「ハラスメント防止ガイドライン」(案)の策定にうつる予定です。実務理事会からの諮問にいたる経緯の説明は、上述の『「行動規範」アンケートご協力への感謝と結果のご報告』にありますので、会長からの報告とあわせて、ご参照ください。

Code of Conduct/ハラスメント防止ガイドライン策定タスクフォースメンバー一同:

望月優子(理研:座長), 片岡章雅(NAOJ), 日下部晴香(NAOJ), 小松英一郎(MPA), 新永浩子(鹿児島大), 野村英子(NAOJ), 林左絵子(Kavli IPMU)

## 欧文研究報告(PASJ)からのお知らせ

### (1) 本文掲載料の半額化

より多くの皆様にご投稿いただくため、期間限定で本文掲載料を半額とするキャンペーンを実施します。

対象となるのは2025年4月1日から2026年3月31日までの期間に投稿された論文です。この期間の投稿

であれば会員資格に関係なくどなたでも掲載料が半額となります。従来通り、条件を満たす場合はさらに正会員割引が適用されます。対象期間中の本文掲載料は以下の通りです。

一般3,000円/頁, 正会員割引後2,100円/頁

正会員割引は、筆頭がどうかにかかわらず著者に正会員が含まれており、投稿査読システムに正会員の方の会員番号を入力した場合にのみ適用されます。

本文中に挿入し難い長大な表や大量の図、動画が付随する場合、それらを電子付録(supplementary data)として無料で掲載することができます。Supplementary dataの利用により、本文掲載料の半額化に加えて更に経済的に論文の掲載が可能ですので是非ご活用ください。

なお、オープンアクセス論文掲載料は半額化の対象外です。

### (2) オープンアクセス(OA)論文の出版支援制度(Read & Publish)

出版委託先のOUP社では複数の大学と購読料とOA論文掲載料の前払いを一括するRead & Publish契約を結んでいます。契約大学数は年々増え、2025年3月現在では25大学となりました。

Read & Publishは、OUPと各大学間で設定の利用条件により論文掲載料の支払が免除または割引となる制度で、投稿時に契約大学に所属される方が連絡担当著者である場合に利用可能です。各大学での利用条件の詳細は大学図書館へお尋ねください。契約大学に所属される方には、この制度の利用をお勧めします。

利用時の案内や契約大学一覧などの情報は下記ページをご覧ください。

<https://www.asj.or.jp/jp/activities/pasj/>

### (3) 各種指標の提供

電子版サイトでは、各掲載論文の影響力を可視化するために以下の指標を提供しています。これらの指標により論文の評価や広がりを客観的に把握することができます。論文の閲覧制限の有無に関係なくどなたでもご覧いただけますので、ご活用ください。

- Citations

書誌情報を含む多様な研究情報を網羅するデータベース「Dimensions」による被引用数の分析。

- Views

電子版サイト上での閲覧およびダウンロード数。

- Altmetrics

SNSやウェブニュース、Mendeleyでの文献保存数などWeb上での反響指標。

何かご不明な点がございましたらPASJ編集部へお問い合わせください (office@pasj.asj.or.jp)。

今後も、研究成果を発信する魅力的な論文誌となるよう、さらなる充実を図ってまいります。

皆様からの積極的な投稿をお待ちしております。

欧文研究報告編集委員会

## 現代の天文学 英語版「Position and Motion of Celestial Bodies」刊行のお知らせ

日本天文学会では創立100周年記念出版事業である「シリーズ 現代の天文学」の英語版刊行を以前より計画しておりました。

このたび第13巻「天体の位置と運動」の英語版として「Position and Motion of Celestial Bodies (ed. Toshio Fukushima)」をSpringer Nature社より刊行いたしました。

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-97-5448-9>

日本語版と同じく大学院生の教科書と位置付けていますが、単なる英訳本ではなく新たに執筆されたコラムや演習問題も含まれているのが特徴です。

この本の出版にご尽力いただいた執筆者および編者の皆様に深く感謝申し上げます。

是非、広く皆様に読んでいただけると幸いです。

日本天文学会第2版化WG 代表 茂山俊和

### 編集委員より

## 天文月報オンライン記事全公開のお知らせ

天文月報オンラインでは、これまで一部の記事を発行後一年間アクセス制限することにより、会員限定で公開していました。2025年4月号よりアクセス制限をやめ、過去一年間のバックナンバーも含めすべての記事をパスワード無しで読めるようになります。

今後一層、天文月報オンラインを日本の天文学の普及にお役立ていただければ幸いです。

## 天文月報記事投稿用アップローダー

[https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/author\\_submission/](https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/author_submission/)

### ■ログイン

ユーザー名: geppou パスワード: toukou

### ■アップロードの仕方

アップロード画面で必要事項を埋めてください。するとアップロードに進むことができます。できる限りファイルは1つにまとめてください。ファイルが複数ある場合は「複数のファイルを投稿する」ボタンを押してください。押すたびに欄が増えます。1回あたり全部で最大50 Mbyteまで、個数は20個まで送信できます。それ以上の巨大なファイルのアップロードは推奨されませんが、やむをえない場合は分割してお送りください。

### ■注意

投稿者の個人の認証はcookieを利用しています。したがってcookieを受け取らないブラウザでは使えません。

またフォームのチェックや可変個数のアップロードボックスはjavascriptを利用していますのでjavascriptが使えなければこのアップローダーは使えません。

その場合はtoukou@geppou.asj.or.jpまでメールでご投稿ください。

### ■連絡先

アップローダーに関するご質問はtoukou@geppou.asj.or.jpまでお願いします。

(天文月報編集長)

## 天文月報記事ご執筆用テンプレート

SKYLIGHT, EUREKA, 天球儀などのご執筆にあたりましては、日本天文学会HP内「天文月報」のページにあります「投稿用テンプレート」をご活用ください。

[https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/author\\_template/](https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/author_template/)

TeX・LaTeXで執筆される方はテンプレートをオンライン上またはダウンロードしてご利用ください。MSWordで執筆される方はwordテンプレートをダウンロードしてご利用ください。また、ご執筆の前に必ず「執筆マニュアル」をご一読ください。

[https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/author\\_manual/tex](https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/author_manual/tex)をご利用される場合は、あわせてreadmeもお読み下さい。

また、ご利用にあたって不具合を発見された方は、編集委員会までご連絡をお願い申し上げます

訃報

会員の白井正明氏は2024年11月11日に逝去されました。満86歳でした。ご冥福をお祈り申し上げます。

天文月報118巻5月号 主な記事

ひさき特集(2): イオの火山噴火と中性酸素トラス【古賀亮一】 ひさき衛星の火星・金星上層大気観測の成果【益永圭】 ひさき衛星で解き明かす 彗星の核近傍のガス中で生じる物理現象【鈴木雄大】

EUREKA: 超新星残骸での宇宙線加速効率の探求【霜田治朗】

〈シリーズ〉天文学者たちの昭和: 日江井榮二郎氏ロングインタビュー [第2回] 高校時代~大学院時代【高橋慶太郎】

〈シリーズ〉2040年のスペース天文学へ: MeVガンマ線天文学—2040年代への展望—【高田淳史, 小高裕和】

編集委員: 津村耕司(委員長), 岩崎一成, 小野寺仁人, 勝田哲, 川中宣太, 西澤淳, 仏坂健太, 岡本文典, 日下部展彦, 小山翔子, 志達めぐみ, 鈴木大介, 鳥海森, 信川久美子, 橋本拓也, 宮本祐介  
令和7年3月20日 発行人 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1 国立天文台内 公益社団法人 日本天文学会  
印刷発行 印刷所 〒162-0801 新宿区山吹町332-6 株式会社 国際文献社  
定価733円(本体667円) 発行所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1 国立天文台内 公益社団法人 日本天文学会  
Tel: 0422-31-1359 (事務所) / 0422-31-5488 (月報) Fax: 0422-31-5487  
振込口座: 郵便振替口座00160-1-13595 日本天文学会  
三菱UFJ銀行 三鷹支店(普) 4434400 公益社団法人 日本天文学会  
日本天文学会のウェブサイト <https://www.asj.or.jp/> 月報編集 e-mail: [toukou@geppou.asj.or.jp](mailto:toukou@geppou.asj.or.jp)  
会費には天文月報購読料が含まれます。

©公益社団法人日本天文学会2025年(本誌掲載記事は無断転載を禁じます)