

研究奨励賞	旅と共に続く遠方銀河の研究	札本佳伸	74
欧文研究報告論文賞	近赤外線での順モデリング法を用いた精密視線速度測定 平野照幸・IRD 装置チーム		82
EUREKA	ほやけた像から本来の姿へ 画像逆畳み込み法の天文学応用	酒井優輔・山田真也	91
日本天文遺産	天文遺産紹介～三鷹 200 MHz 太陽電波望遠鏡	西村淳	99
天文教育普及賞	天文シミュレーションソフト「Mitaka」の開発ヒストリー ～20余年の歩み～	加藤恒彦	102
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11回：萬法すすみて自己を修証する			
		高橋慶太郎	111
シリーズ：海外の研究室から テーブルマウンテンの麓から South African Astronomical Observatory/University of Cape Town 反保雄介			
			121
雑報	日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書 <i>IAUS 397, "UniversAI: Exploring the Universe with Artificial Intelligence"</i> 大久保宏真		125
	日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書 <i>European Astronomical Society Annual Meeting 2025 (EAS2025)</i>	札本佳伸	126
	日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書 <i>Hinode-18/IRIS-16 meeting</i>	内藤由浩	128
	日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書 <i>Hinode-18/IRIS-16 meeting</i>	大津天斗	130
月報だより・寄贈図書リスト			132

#### 【表紙画像説明】

(上図) ジェームズウェップ宇宙望遠鏡により撮影された赤方偏移 0.73 (約 65 億年前) の銀河「ドラゴン」。銀河団エイペル 370 によって引き起こされる重力レンズ効果により、その見た目が長く引き伸ばされている。(下図) 「ドラゴン」の左側の領域で、1 年おきの 2 回の観測の比較を行った拡大図。2022 年に映っていた点源が 2023 年の観測では見えなくなっている、また反対に新たに現れる点源も存在している。それぞれが、マイクロレンズ効果により現れては消える赤方偏移 0.73 の銀河中の恒星を捉えている。実線の半十字および破線の半十字が 2022 年および 2023 年のみにみられる重力レンズされた恒星の位置を示している。

#### 【今月の表紙デザイン】

1 月は「初日の出」です。お雑煮を海に見立てて、日が昇ってきた様子を描いています。365 日、日は昇りますが、新しい年のスタートと重なって、より特別に感じられます。皆さまの一年が素敵なものになりますように！



# 旅と共に続く遠方銀河の研究

# 札 本 佳 伸

〈千葉大学先進科学センター 〒263-0022 千葉県千葉市稻毛区弥生町1-33〉  
e-mail: yoshinobu.fudamoto@gmail.com



ビッグバンにより宇宙が誕生した後の約10億年間、銀河がどのようにして誕生し、星を作り、その中で元素合成をしてきたのかを探ることは現代の天文学における最も重要な課題の一つである。特に、近年はALMA望遠鏡やジェームズウェップ宇宙望遠鏡を用いた観測が進むことで、多波長観測により得られる多角的なデータを用いた研究が急速に進展している。それらの研究の発展を紹介とともに、私がこれまでドイツとスイスにて経験してきた日本国外での大学院生活や、そのなかでどのように研究を進めてきたのかを紹介したい。研究の面でも国外での生活の面でも、予想もしなかった変遷が起きる様を共有できれば幸いである。

## スイスで始まった研究生活

2016年10月初頭、修士課程を終えドイツ・ミュンヘンを出発した長距離バスの中で、どのようなことを考えていたかはもうあまり定かには覚えていない。フランス語の勉強でも少しはしていたような気もする。しかし、その後到着したスイス・ジュネーブの、閑静な場所にある長距離バスのターミナルで、博士課程の指導教官 Pascal Oesch 氏（現・ジュネーブ大学教授）に初めて会い、挨拶もそこに彼が運転してきたレンタカーに乗り、市内から離れた場所にあるジュネーブ天文台に到着したときのことはまるで昨日の出来事のように覚えている。

私は、京都大学理学部を卒業後、思い立ってドイツ・ミュンヘンにて修士課程を過ごし、その後スイス・ジュネーブにて博士課程を修了した<sup>\*1</sup>。今回は大変貴重な機会をいただいたので、かいつ

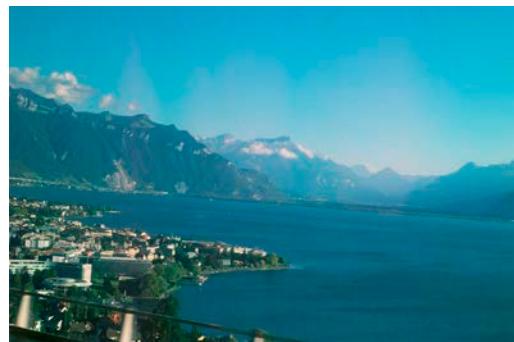


図1 ジュネーブに向かう道中、バスの窓から見えたスイス・ローザンヌ周辺の山々。2016年。

まんだかたちで自分の学生の間の経験を書き留めさせていただこうと思う。前半はあまり楽しい話題もないかもしれないが、少なくとも後半は自分の研究経験とともに盛り上がってくるように努める次第である。もし、本記事がいま進路や成績について何か悩んでいる学生の方などの参考や励みの一助となれば幸甚である。

\*1 欧州における大学院の仕組み上、学士と修士を終えたのち、博士課程からは社会人とほぼ同様の扱いになるため、ポスドク等と同様に公募に採用されることで博士課程に進むことが多い。そのため、修士課程から博士課程への段階で指導教官や専門が変わることは比較的一般的である。また国ごとに課程の長さは異なり、例えばイスラエルでは博士課程は4年間ある。

## 1. 日本国外での学位取得

日本国外にて学位を取得することは、経験する方の性格や人柄などによりそれこそ千差万別である。私にとっては大小さまざまな波にもまれ続けるような日々であった。研究の面でいうと、欧洲では国々の間を常に人々が行き交い、分野を代表する有名な研究者が多数活躍する。その研究室を出てきた新人のポスドクや学生が新たなチャンスを掴もうと常にしのぎを削っている。日常生活に目を向けると、海外旅行や出張での短期滞在では経験できないような出会いや、その土地独特の風景に満ちている。良いことも悪いこともたくさんあり、大きな喜びに繋がる出来事も多くあれば、さざなみのように細かなストレスとして心身を削ってしまうこともある。それらを乗りこなしていくためには、本人の努力や周囲の方々からのサポートなど並々ではないものが必要であり、挫けない気持ちと適度な遊び心が必要である。

学生としての立場では、欧洲においての学生生活は日本とはかなり異なる。学生が研究に本格的に参加していく機会が生まれるのは博士課程に入ってからとなることが多く、修士課程までのカリキュラムはとても緩やかである<sup>\*2</sup>。修士課程1年目は研究に触ることは全くないと言ってよく、現地の学部生よりはすこし発展的な授業や演習を受け試験をパスすることが目標となる。体感的には授業の内容などは日本の学部4年生程度のものを感じられた。修士課程2年目あたりから卒業のための簡単な研究を始めることになる。一方、日本の修士課程では1年目からすでに研究者として最初の段階に挑戦するため、望遠鏡の観測プロポーザルを作成することや、論文の執筆に取り掛かることは珍しくないのだと理解している。私はこのミュンヘンでの学生生活を送って

いる最中、SNSを見ては日本の学生と自分を比べていた。少し前まで同じように肩を並べていたはずの同学年の友人がどんどん研究者になっていく姿が見えた。このとき感じた私の焦りの気持ちは筆舌に尽くしがたいものがあった。

このとき実は、あまりの焦りや慣れない環境への負荷から、精神的に厳しい状態になり、うまく日常生活を送ることができなくなってしまった。自分自身に対して毎日無理な予定をたてて勉強をしたり、独自で研究をしようと努力していたことが空回りして、ノイローゼのようになったようであった。実際、一度日本に戻って半年ほどの静養が必要となってしまった。その間も休めばいいだろうに、何かせねば申し訳ないと実家近くの倉庫にてアルバイトなどをしていた。とんでもないほどの迷走ぶりであった。

この後なんとか再びドイツに戻り、無事に修士課程を修了することができたのは本当にありがたいことだった。両親をはじめ、ドイツにいてサポートしてくださった日本人研究者や現地の教官、そしてその周囲の皆様のおかげであり、本当に頭があがらない。迷走と空転ぶりを發揮し、あらゆる意味で回り道をしていたとはいって、このときの経験は今思い返すと何一つ無駄ではなかったと感じる。厳しいときを乗り越えるために、自分との付き合い方を真剣に考えた経験は今に至るまで自分の血肉として生きている。もし何か今の状況に辛いものを感じている学生の方などが本記事を読んでくださっているなら、こんなギリギリのところからでもまだなんとかやっている例があるということを知って、少しは励みにしていただければ幸いである。

<sup>\*2</sup> あくまで5年から10年以上のことなので現在では状況は大きく違うかもしれない。少なくとも私の経験した範囲内では、ということに留意していただきたい。

## 2. 研究を開始する

研究ができる！ジュネーブに到着して感じたこの思いは、修士課程で弱りきった経験をし、ようやく次の段階へ進んだ私にとって何よりも嬉しいものであった。さらに、欧洲ではすべての博士課程の学生に給料が出るので、自立した生活が可能となる<sup>\*3</sup>。研究ができ、それで生活できることは様々な面でも本当に解放されたような気持ちになつた。

引っ越しなども落ち着いた頃、指導教官とともにこれから進める研究テーマをどうするかという話になった。提示されたテーマは、ALMA望遠鏡を使って遠方銀河のダストの性質を調べる研究、もう一つは当時現役で活躍をしていたSpitzer宇宙望遠鏡のデータを使い、ハッブル宇宙望遠鏡（HST）では検出できないダストに隠された銀河を探査することだった。どちらのテーマを取っても、新たな挑戦が待ち受けていると感じ胸がときめいた。

もともと ALMA 望遠鏡での研究を修士課程で齧っていたこともあり、ALMA 望遠鏡による研究を選択した。今思うと、Spitzer を使った研究もその後のジェームズウェップ宇宙望遠鏡 (JWST) での観測などを見越した非常に優れたテーマであり、改めて素晴らしい研究テーマを提示してくださっていたと感じる。それからは、指導教官は彼のもともとの専門分野でもある HST を使った遠方銀河の静止系紫外光の観測的研究を行い [1]、そして私が ALMA 望遠鏡を使ったダストや微細構造線を用いた星間物質の観測的研究を行う、というチームわけで分担して研究を進めることとなつた<sup>\*4</sup> [2].

### 3. ALMA望遠鏡ラージプログラム とともにやってきた転機

研究を行うなかで全く予想していなかったものを見にし、驚きとともに心踊った経験は多くの研究者が持つのではないだろうか。私にとって、博士課程で始めたALMA望遠鏡を使った観測的研究は驚きの連続であった。毎日新しい風を感じる日々は、特にALMA望遠鏡のラージプログラムに参加したことにより強くなった。このような一国の規模を超えた大きなプロジェクトに多数加わり最先端の研究に携わっていくことは、欧州をはじめ日本国外で研究を行う醍醐味ではないかと思う。

### 3.1 ALPINE

初めに、ALMA Cycle-5 の遠方銀河観測ラージプログラム ALPINE[3-5] に参加することができた。ALPINEでは、その頃ちらほらと検出報告が上がり始めていた、赤方偏移4から6程度の銀河から放たれる一階電離した炭素からの輝線とダストからの連続光 [6] についての観測的研究を一挙に推し進め、合計118個の銀河の星間物質の性質を詳細にわたり観測する意欲的なプロジェクトであった。私はもともとはそのラージプログラムの共同研究者ではなく、また私の指導教官も大きくは関わっていなかった。幸運だったのは、ジュネーブ大学にはもう一つの銀河研究グループを率いる、ALPINEの共同PIの Daniel Schaerer 氏（現・ジュネーブ大学教授）がおり、自分たちの隣の部屋でいつも研究をしていたことである。

私は、部屋が隣であるということやたまにミーティングをしていたこともあり、機会を捉えて Daniel Schaeerer 氏に頼み込んでデータを見せて

\*3 逆に言うと、給料の出ない博士課程ではなく、財源は限られており博士課程に入るための競争も熾烈である。

\*4 ジュネーブ天文台はノーベル賞を受賞されたMichel Mayor名誉教授らを代表とする系外惑星観測のメッカであり、銀河の研究をしている研究者はかなり少数派である。私が所属したのもPascal Oesch教授、そして現在は研究職を離れられたStéphane De Barros研究員、そして博士研究員の私というとても小さい研究チームだったが、小さなグループだからこそ何を言っても挑戦させてくれる雰囲気があり、とても性に合った。

もらうことができた。その際、私がデータをじっくり見ているとき、ダスト連続光のデータがどうもおかしいことに気づいた。本来のALMA望遠鏡の観測時間から期待できる感度と比較するとほぼ半分ほどしか感度が得られていなかったのである。ALPINEのデータ処理チームに連絡をして事情を聞くと、基礎的なデータ解析のための人員が全く足りておらず手が回っていないようであった。ちょうどそこに現れた、比較的暇そうな学生である私はすぐに正式に共同研究チーム、それもデータ解析の中心的な役割を担うことになった。新たな挑戦を始めるためには、いるべき場所にいてあげるべき声をあげる、ということの重要性を強く感じた。

共同研究チームが皆でALPINEのデータを解析していくなかで、興味深いものがいくつも見つかってきた。その中でも最も興味深い結果として見えてきたのは、本来のALMAで期待していた成果や観測ターゲットの観測結果ではなく、その周辺に予想外にも映り込んできた現象であった。例えだとある銀河は、初めは1つの銀河だと思っていたものが、ALMAで観測してみると実は3つの銀河が合体する途中であるという珍しい状態にいることがわかった。さらに、その3つの合体途中の銀河のうち1つは、地上望遠鏡の可視・近赤外観測では検出できないほどに濃い星間ダストに埋もれていた[7]（図2）。高赤方偏移の銀河を観測していくなかで、ターゲットとして狙った銀河が複数の銀河を巻き込む合体の最中であり、そのうちの1つがそもそも地上観測では見えないほどダストに埋もれていた、というような現象は観測前には予想されておらず、観測して初めて判明したサプライズでもあり、それぞれがすぐに論文として出版可能な興味深い発見であった。このときに経験した、「観測して始めてみえる現象を観察し、そこから新たな研究テーマを開拓する」ことはそれ以来の私の研究にとって重要な指針の一つとなっている。

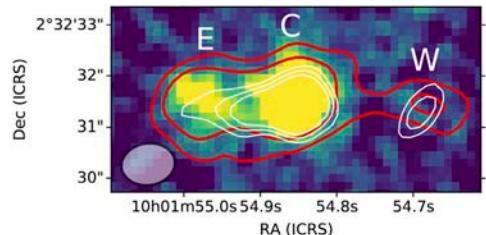


図2 ALMA ラージプログラム ALPINE にて観測された銀河の一つ。中央の C で示されている銀河が本来の観測ターゲットであり、E と W で示されている銀河は観測して初めて C と合体途中の銀河であることが判明した。特に W の銀河は K バンドで検出ができていないダストに隠された銀河である。背景は VISTA 望遠鏡による K バンドの画像、太い実等高線は一階電離した炭素からの輝線、細い実等高線はダストからの連続光を表し、左隅の楕円は ALMA のビームサイズを示す。[7] より引用。

### 3.2 REBELS

ALPINE のデータ解析と研究が早くも一段落したころ、次年度の ALMA ラージプログラムが決まった。これまでもたびたび共同研究をさせていただいていた Rychard Bouwens 氏（現・ライデン大学准教授）が獲得した REBELS という名の ALMA 望遠鏡ラージプログラムである[8]。内容は ALPINE と似ているようで大きく異なり、ALPINE よりもさらに遠方、赤方偏移 7 から 8 程度の銀河のダスト連続光と微細構造線の観測を行うものであった。

このとき、私にとって幸運だったことは、すでに ALPINE という似通った ALMA 望遠鏡の大型観測を経験していたため、どのようなテーマで研究をすれば面白い結果を残せるかについて、ある程度目星がついていたことである。それは上記 ALPINE を通して経験してきた「ターゲットにしている銀河以外の場所から見えてくる予想もない現象」である。

實際には、この研究テーマを選んだ理由はほかにもある。共同研究を進めるなかで研究者それぞれが担当する研究テーマを決めるのだが、その際

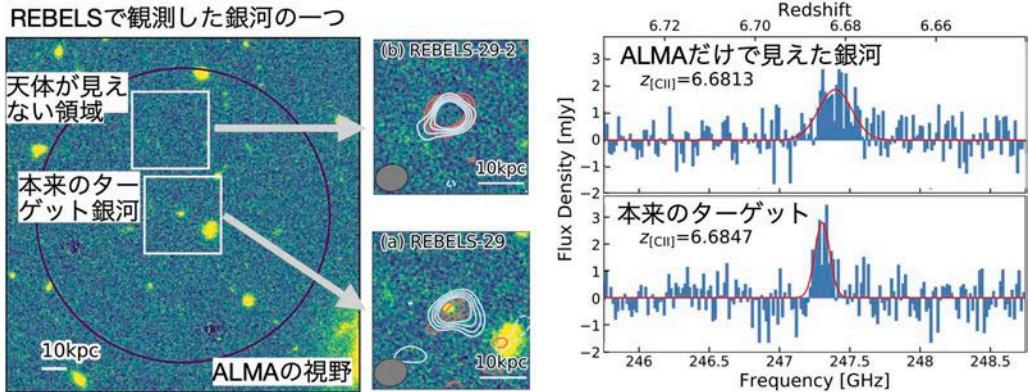


図3 REBELSにて私が発見した新たな銀河の一つ。左図はHSTの赤外観測画像を背景にALMA望遠鏡による観測視野を示し、中央と右の図にて、HSTで明るく見える本来のターゲット（右下図）とHSTでは全く見えない箇所（右上図）からALMA望遠鏡が輝線とダスト連続光を検出した様子を示している。

手堅い主要なテーマはPIとその学生が担当することがほとんどである。研究プロジェクトの立ち上げとその進行に最も貢献した方が、主要な「堅い」研究テーマを進めることは自然な流れだからだ。そのため外部から参加した私としては、共同研究者同士の間でも競争率の高い主要な研究テーマに食い込むことは難しいとすでに諦めていた。しかしながら、もともと狙っているターゲット以外になにか面白いものが見えたならそれを担当するということは、一見すると重要なテーマをそのほかの方に譲った形でいてその実、一番面白いところを取るものであると確信していた。実際に担当が決まったときには、もらった！と思ったものである。

実際に研究を始めてみたところ、自分が期待していたよりもはるかに面白いものが見えてきた。特に目立っていたのが、ALMA 望遠鏡で観測ターゲットとして狙った銀河以外にも、視野内に輝線とダスト連続光を出す銀河が赤方偏移 7 度程に検出されていたことである [9] (図3)。まさに観測して初めて見えてきたターゲットが浮かび上がりってきた形になる。この輝線とダスト連続光を出す銀河はどんな性質を持っているのだろうか、と調べ出したところどうもおかしい、今までそん

な位置に天体がいることはどこにも記録されていなかった。実際に、当時公開されていたHSTやSpitzer、すばるなど様々な観測データを見ても、この位置には天体などいないはずだった。しかし、実際にALMA望遠鏡により検出されているシグナルはあまりに強力で、誤検出ということはあり得ない。

様々なデータと比較し、可能性を検証していく結果、残された結論はこれがHSTを含め当時の可視・近赤外望遠鏡では検出できない、赤方偏移7程度にあるダストに隠された銀河であるということだった。当時、赤方偏移7を超えるような遠方銀河の観測はすばる望遠鏡やHSTをはじめとする可視・近赤外望遠鏡の独壇場であった。初期宇宙においては銀河はまだまだ若く、星間ダストなどを大量に生み出す時間は十分にはないため、遠方銀河はダストをあまり持っておらず可視・近赤外望遠鏡によりすべて検出可能である、ということが主流な前提として研究が行われていた[10]。そこでみると、このALMAでしか見えないダストに隠された遠方銀河の発見は、これまでの遠方銀河についての前提を覆すともいえる発見であった。

実はこの当時、長かった博士課程も残り1年と

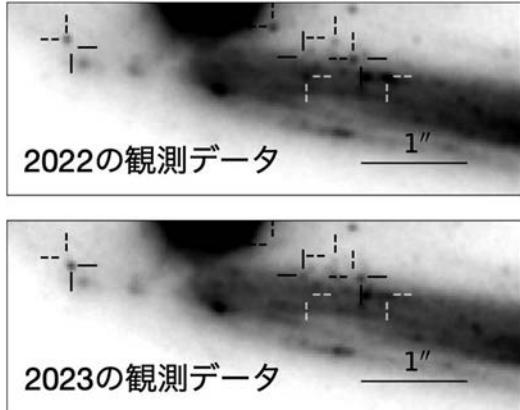


図4 JWSTで観測した赤方偏移0.73の銀河に見える個別星。重力レンズ効果の変動を利用して観測するため、個別星は観測を繰り返したときに現れる変動現象として観測される。2022年の観測と2023年の観測で現れている個別星をそれぞれ破線と実線を用いて位置示している。  
[11] より引用。

なっていて、指導教官から、博士課程の最後のプレゼントとして、アメリカに行って共同研究をすすめたり見識を広めてくるように、という機会をいただき3週間程度の予定でパサデナにあるカリフォルニア工科大学・IPACに出向いていた。忘れもしないあのとき、私はパサデナにあるSAGAモーテルという、いかにもモーテルという雰囲気の宿の一室に宿泊していた。この発見にとても驚き、チームとの相談の後すぐさまそのモーテルの一室でNatureに出すための論文を書きはじめた。その後は、新型コロナウイルスによるパンデミックが始まり、私の博士課程修了はその真っ只中となるなど様々な困難に見舞われたものの、大きな問題もなく修了することができ今に至る<sup>\*5</sup>。

#### 4. 重力マイクロレンズ

次に私の新たな扉を開いてくれた研究は、遠方銀河内部の個別恒星の観測である。約30年前の論文にて予言された現象であるが [12]、2016年になつて初めて観測例が報告された [13] という、天文学観測にとっても史上初めて出くわす観測対象であると言っても過言ではない。文字通り、遠方銀河内部の恒星を一つ一つ個別に検出し、その星種族などといった詳細を正確に調べることができる。

通常、宇宙論的な遠距離にある銀河は、それを構成しているガスや星などを一つの塊として観測することしかできず、どのような大口径の望遠鏡をもってしても、その構成要素を一つ一つ個別に分解して観測することは不可能である。しかし、2つの重力レンズ現象が重なり合った時、通常では不可能な観測が可能になる。1つ目は近傍の銀河団などに付随する巨大質量の暗黒物質による重力レンズ現象である。この暗黒物質の作る時空の歪みによる大規模な重力レンズ効果は、臨界曲線周辺において遠方にある銀河に対して約数百倍の増光効果を与えることができる。2つ目は、銀河団内部に存在する微小構造がピンポイントで作り出す小規模な重力レンズ効果である。この微小構造により、すでに増光を受けている遠方銀河内部の微小構造だけに対して数倍から10倍程度の増光効果が与えられる。この2つの重力レンズ構造による増光効果の掛け合わせにより、遠方銀河内部の極めて微小な点源に近い構造に対して数百倍の増光効果が与えられる。銀河団そのものの固有運動、またその内部の微小構造の固有運動があるため、2つ目のマイクロレンズ構造は常に時間変動する。そのため、遠方銀河内部の個別恒星は時

<sup>\*5</sup> パンデミック当時感じたことの記録としていくつか書き留めておくと、当時ヨーロッパはじめスイスでも大きな行動制限が課された。もともと手洗いはおろかうがいなどといったことをする人は少なかったものの、ようやく周囲の人々がパンデミック以前の日本人と同じ程度には手洗いをするようになったことに喜んでいた。行動制限はあまり長くは続かなかった。2020年の夏、魚釣りが好きな私に博士課程修了のお祝いとして天文台の皆が魚釣りツアーやプレゼントしてくれたので、釣ってきた魚をバーベキューで焼いて皆で楽しんだ。

間変動する構造、つまり突発性天体、として観測されることになる。

すでに自分が研究を始める前に、様々な天体の中の個別恒星の観測は報告されていた。正直なところ、自分が関わるとは思ってもみなかったのである。あるとき、共同で研究プロジェクトを進めていたFengwu Sun氏（現・ハーバード大学研究員）が、赤方偏移0.73にある天体の中で非常に数多くの突発性天体が起きていることを教えてくれた。何十個も遠方銀河の中で点滅している構造があり、そのすべてが重力レンズされた個別恒星であった。実際にJWSTの観測画像をみたとき、あまりにも現実離れした光景に見惚れていたことを覚えている。

通常、突発性天体の探査を除き、銀河の内部構造は時間変化しないことに慣れている。遠方銀河はいつも同じ姿をしていると頭の中で前提として思っている。ただこの時見た銀河は、これまで見られなかつたほど多数の個別恒星が現れては消えているため、その中の構造が1年以下という短い時間で大きく変化し、まるでアニメーションを見ているようであった。「これは新しい！」と思わずさま飛びついた。解析を進めれば進めるほどこの観測手法の可能性の大きさに気づくと共に、さらには過去最高数の個別恒星観測を短時間で可能にしているJWSTの観測能力に驚愕した[11]。

この新しい観測分野は、自分自身も今後どのようなことが可能になっているかは予想しきれないほどの可能性があると考えている。共同研究者の作っている論文を読むたびにその適用範囲の広さに驚かされる [14]。ありがたいことに、JWST Cycle-4 にて、私を PI とする観測提案が無事に採択され、微力ながら引き続きこの新しい観測分野へも引き続き貢献できることとなった。

## 5. 今後の研究

ミュンヘンに一人きりでスーツケース一つで渡った頃からは想像もできない環境にいま、身を置いている。論文をいくつも発表できており、まだまだ研究してみたいものや、新しいものは途切れることなく次々と目の前に広がっている。こういう言い方は良くないかもしれないが、自分は周りと比べ特別優秀というわけではなく、ただ、人に比べて直感だけは冴えているように考えている。そもそもの始まりとして海外に渡り住もうとするときに、なぜ一度も行ったことがなく縁もゆかりもないミュンヘンを選んだのかの判断は、その多くの部分を直感に頼って決めており、詳しく説明することは難しい<sup>\*6</sup>。その後、スイスにいるPascal Oesch氏のところに是非行こう!と思った理由もかなりの部分が直感に依っている<sup>\*7</sup>。なんとなく、と言ってしまえば身も蓋もないが、直感に従ってそれが最善であると信じ、最後まで行動した結果には今のところ裏切られたことはなく、日本国外で大学院生を送ったのは人生最良の選択の一つである。

人によって得意なことや不得意なことはさまざまあると思う。人と比べて落ち込んでしまうのは多々あり仕方がない。ミュンヘンで同年代の学生の活躍に焦っていた自分にもし今声をかけるとしたら、焦らず自分を信じて思ったように頑張り、ただたまには力を抜いて遊んだり休むことが大切だ、と当たり前のこと伝えたいだろうか。少なくとももし、いま同じように同世代の他の人の活躍に焦るなどして、無理をしている若い学生がいるなら同じことを言うだろう。

私がこれまで行ってきた研究は、そのときの縁や出会いに支えられてきたものが多い。ALMA

\*6 授業料が無料で、かつ外国人にも入学しやすいシステムとなっていたことや、当時遠方銀河の観測的研究で非常に突出した成果を出していた研究グループがあったことは間違いない理由ではある。

<sup>47</sup> 私が修士課程で集中して勉強していたのはサブミリ波銀河など、Oesch 氏の専門とは分野的には真逆のものが多かった。

のラージプログラムに参加したことをはじめ、JWSTを使って遠方銀河内部の個別星を探査することなども、自分で見つけてきた面もあるものの、共同研究をしている方に引き込まれていった場面が多い。今後も、そのような研究も行うなかで、独自に研究したいことが数多くある。これまでできたような、天文学の新たな扉を開く一助となれば、全く言うことがない。

### 謝 辞

この度は、2024年度日本天文学会研究奨励賞という大変貴重な賞をいただくことができました。大変光栄に思うとともに、今後ますます研究を盛り上げていこうと身が引き締まる思いです。まず初めに京都大学で天文学へと導いてくださった太田耕司教授、そしてミュンヘンで学生をしているときに、無知な学生の私の話を親身に聞いていただき、その後もミュンヘンを出るまで暖かく見守ってくださった小松英一郎教授に心よりお礼を申し上げます。今回の記事は、ミュンヘン周辺とその後の私の生活を、恩人である太田教授、小松教授に報告をさせていただく気持ちで執筆しました。さらに、いまのことあるごとに世話を焼いてくださる指導教官のPascal Oesch氏に心よりお礼を申し上げます。Oesch氏の仔まいからは、研究者としてだけではなく人間としての落ち着いた生き方を学んだように思います。研究員として、ともに天文学に新たな扉を開ける手伝いをさせていただけた井上昭雄教授、大栗真宗教授にも特にお礼を申し上げます。すべての方の名前を挙げることは紙面の都合上不可能ですが、研究と私生活ともにこれまでお世話になってきた、故Adi Paudlach教授、市川幸平准教授、稻見華恵助教、梅畑豪紀助教、江上英一教授、太田一陽准教授、日下部晴香助教、菅原悠馬講師、田村陽一教授、Daniel Schaefer教授、任毅さん、橋本拓也助教、Fengwu Sun フェロー、Miroslava Dessauges-Zavadsky フェロー、Michele Ginolfi助教、

Mengyuan Xiao研究員、Rychard Bouwens准教授、Renske Smitフェロー（五十音順）にこの場をお借りしてお礼を申し上げます。また、故郷を出て以来、様々な場所を旅しながら研究をしてきた私をいつも支えてくださる私の両親、兄弟をはじめ親戚の皆さんに心よりお礼申し上げます。特に、加藤孝明氏には長年の多大なるサポートをいただきました。ここに心より感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1] Oesch, P. A., et al., 2018, ApJS, 237, 12
- [2] Fudamoto, Y., et al., 2017, MNRAS, 472, 483
- [3] Le Fèvre, O., et al., 2020, A&A, 643, A1
- [4] Faisst, A. L., et al., 2020, ApJS, 247, 61
- [5] Béthermin, M., et al., 2020, A&A, 643, A2
- [6] Capak, P. L., et al., 2015, Nature, 522, 455
- [7] Jones, G. C., et al., 2020, MNRAS, 491, L18
- [8] Bouwens, R. J., et al., 2022, ApJ, 931, 160
- [9] Fudamoto, Y., et al., 2021, Nature, 597, 489
- [10] Zavala, J. A., et al., 2021, ApJ, 909, 165
- [11] Fudamoto, Y., et al., 2025, Nature Astronomy, 9, 428
- [12] Miralda-Escudé, J., 1991, ApJ, 370, 1
- [13] Kelly, P. L., et al., 2018, Nature Astronomy, 2, 334
- [14] Li, S. K., et al., 2025, arXiv e-prints, arXiv: 2506.17565

### Researches in a Journey

**Yoshinobu FUDAMOTO**

*Center for Frontier Science, Chiba University,  
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan*

**Abstract:** The Universe has been born through the Big Bang  $\sim$ 13.8 billion years ago. Understanding how galaxies were formed, how they created stars, and how elements were synthesized within them during the first billion years after the Big Bang is one of the most crucial questions in modern astronomy. In recent years, observations with facilities such as the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) and the James Webb Space Telescope (JWST) have advanced our ability to explore these early galaxies through multi-wavelength data. In this article, I will introduce some of the recent progress in this rapidly developing field, as well as share my experiences pursuing graduate studies abroad in Germany and Switzerland. Both in science and in life, I have encountered many unexpected life-changing events. I would like to share some of those experiences.

# 近赤外線での順モデリング法を用いた 精密視線速度測定



平野 照幸<sup>1,2,3</sup>・IRD装置チーム

<sup>1</sup>アストロバイオロジーセンター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1

<sup>2</sup>国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1

<sup>3</sup>総合研究大学院大学 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1

e-mail: <sup>1</sup>hd17156b@gmail.com

M型矮星は液体の水を保持可能な軌道にある「ハビタブル惑星候補」が主星近傍に位置していることから、系外惑星探索において重要なターゲットとされてきた。しかし、特に低温度の中期-晚期M型矮星は可視光線で暗いため、視線速度法でそれらを狙うために2010年代以降近赤外線波長をカバーするドップラー装置が世界中で開発された。本稿では、すばる望遠鏡に設置されたIRDを含む近赤外線分光器で取得されたスペクトルから恒星の精密視線速度を取り出す方法論について紹介する。近赤外線では地球大気の吸収が強くなり、精密波長較正を可能にする適切な陰極線ランプがないなど特有の問題がある。ここではIRDスペクトルのための視線速度パイプラインを例に、近赤外線視線速度測定の問題点をいかに克服するかを解説する。

## 1. はじめに

系外惑星の探索法のうち、惑星重力による主星のふらつきをスペクトル線のドップラー偏移として捉える「視線速度法」は、最初の太陽型星まわりの系外惑星（ペガス座51番星b）の発見 [1] を含めて過去30年間に最も系外惑星を検出するのに成功した手法の一つである。特に、惑星の公転周期が長くなるにつれて発見確率が著しく低下するトランジット法とは異なり、視線速度法は比較的長周期の惑星にも検出感度を持つのが特徴である。また、視線速度観測によって質量という惑星を特徴づける最も基本的な物理量が制限されるため、トランジット法や直接撮像法など別の手法で惑星が発見された場合でも視線速度法による観測は惑星の確認や系の特徴づけにおいて本質的に重要な役割を果たす。

視線速度法による系外惑星探索では、伝統的に可視光波長域の高分散分光器（以下、ドップラー装置）が用いられてきた。系外惑星探索の主要なターゲットである太陽型恒星（スペクトル型でF, G, K型矮星）が可視光線（特に400–700 nm）で明るく、その波長域では地球大気による吸収等の影響も小さかったためである。系外惑星の発見以後、可視光分光器による視線速度観測の測定精度は、 $\sim 3 \text{ m s}^{-1}$ （1990年代後半）、 $\sim 1 \text{ m s}^{-1}$ （2000年代後半）、 $\sim 30 \text{ cm s}^{-1}$ （2010年代後半）と継続的に向上し、より長周期、低質量の惑星にまで感度を持つに至った。一方で、系外惑星探索における究極の目標である「第二の地球」（ここでは太陽に似た恒星のまわりのハビタブルゾーン内にある地球質量程度の惑星を指す）を発見するには、地球重力による太陽の速度変化の振幅である約 $9 \text{ cm s}^{-1}$ を下回る観測精度が必要であり、2025

年現在そのような精度（長期安定性）を持つドッpler装置は存在しない。

太陽型星のまわりでハビタブル惑星候補を発見するのは困難であることから、2010年頃より太陽よりもずっと低温のM型矮星のまわりで系外惑星を探索する試みが行われている。M型矮星は低温かつ半径も小さいため、太陽型星に比べてハビタブルゾーンが主星の近傍に位置する。そのため、ハビタブル惑星候補による主星の視線速度振幅が増幅され、例えば質量が0.1–0.2太陽質量のM型矮星ではハビタブルゾーン内の地球質量惑星による視線速度振幅は $1\text{ m s}^{-1}$ ほどになり、現在の観測精度でも狙うことが可能になる。

一方で、M型矮星、特に0.2太陽質量を下回る晩期M型矮星は可視光波長域では非常に暗く、高精度視線速度観測を行うのに必要な十分なS/N比を確保できないという問題があった。そこで我々は、2010年代初頭より近赤外線での高精度視線速度測定のため、近赤外線ドッpler（InfraRed Doppler: IRD）[2, 3] 装置をすばる望遠鏡に設置するプロジェクトを立ち上げ、5年以上に渡る開発と試験（観測）を経て、2018年中頃より科学観測を行っている。IRD分光器の装置詳細は天文月報2025年8月号の記事[4]を参照されたい。欧文研究報告論文賞の対象となった論文[5]は、IRDで取得された近赤外線スペクトルのデータ解析法（特に視線速度解析）と標準星の観測によるその実証結果を紹介した論文であるが、本稿では論文の多くを占める技術的な説明は少々省略して、近赤外線での視線速度測定の問題点（2章）やそれをいかに克服したか（3章）、さらに実際のデータ解析の結果（4, 5章）を中心に解説する。

## 2. 近赤外線での視線速度測定の問題点

視線速度測定は線幅の小さい恒星スペクトル線さえ存在していれば実施可能であり、その解析方法は可視光線でも近赤外線でも基本的に同様である。すなわち、精密視線速度測定では、観測され

た各スペクトルをテンプレートに対してマッチングまたは相互相関を計算することでテンプレートに対する相対的な波長のずれ（=ドッpler偏移）を導出する。さらに一般的には、高度に温度が安定化された分光器であっても一晩のうちにスペクトルが数 $\text{m s}^{-1}$ から数十 $\text{m s}^{-1}$ 程度検出器上でドリフトするため、天体スペクトルと同時に波長較正源からの光を分光器に入射させて検出器上での波長ドリフトを補正する手法・装置設計がドッpler装置では現在主流となっている（同時参照法）。IRD分光器でも同時参照法が採用されており、天体光を入射するファイバーとは別のファイバーを使って天文コム（後述）の光を分光器に入射させ、検出器上でそれらのスペクトルがお互いに隣り合うように配置させる。

近赤外線での視線速度測定の特有の問題としては地球大気の影響が強いことが挙げられる。図1は、IRD波長域での地球大気透過光スペクトルの理論モデルを示す。この波長域では一部の「大気の窓」と呼ばれる波長域を除いて、広範囲に地球大気の吸収線が存在することがわかる（大気の窓であってもそれなりに吸収線が混入する）。さらに、地球大気スペクトルは時間的に安定しておらず、観測天体のエアマス（望遠鏡に到達する天体

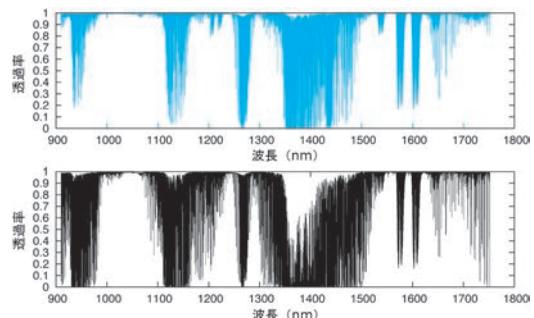


図1 理論モデル計算[6]による地球大気の透過光スペクトルの例。上下のパネルは、それぞれ大気中の水分量が少ない（上）と多い（下）場合の透過光スペクトル。透過光スペクトルは観測天体のエアマス等にも依存し、一晩の中でもかなり変化する。

光が通過してくる地球大気の厚み) や大気中の水分量(湿度)等の観測条件によってその形状が大きく変化することが知られている。特にターゲット星がM型矮星の場合、広範な波長域に地球大気のスペクトル線とブレンドする多数の分子線が存在し(水等の分子線は恒星と地球大気スペクトルで同様の場所に現れる), 一見するとそれらのスペクトル線を区別することができない。そのため、近赤外線での視線速度解析では観測されたスペクトルをそのまま恒星テンプレートスペクトルとマッチング(または相互相関を計算)してスペクトル線のドップラー偏移を測定することは難しく、地球由来のスペクトル線の影響を考慮しながら恒星スペクトル線のみのドップラー偏移を取り出す必要がある。

また、IRDプロジェクトが開始された当時、近赤外線では $1\text{ m s}^{-1}$ を下回るような精度で波長を較正可能な適切な較正光源がないことも大きな問題であった。可視光域では、同時参照法による視線速度解析ではトリウム・アルゴン(Th-Ar)陰極線ランプなどが伝統的に波長較正に用いられているが、Th-ArランプはIRDを含めた近赤外線波長では輝線の線密度が低く、十分な較正精度を確保するのが困難である。そこでIRDでは、周波数空間で一定間隔のコヒーレントな輝線を出力する「レーザー周波数コム」(天文コム)を独自に開発し、近赤外線1000–1730 nmの波長域で $0.04\text{ m s}^{-1}$ の波長較正精度を実現した[7]。

地球大気吸収・波長較正源の問題は、近赤外線での精密視線速度測定の一般的な課題であるが、IRD分光器については研究開発を進めるにつれて、我々が当初想定していなかった問題も発生した。特に問題となったのが、予想していたよりも大きなスペクトルの検出器上でのドリフトである。IRDは設計時の想定では、予想される分光器内の温度不安定性( $10\text{--}100\text{ mK}$ )をもとに見積もったスペクトルのドリフトが $10\text{--}20\text{ m s}^{-1}$ 程度となる予定だった。ところが、天文コムを用いた

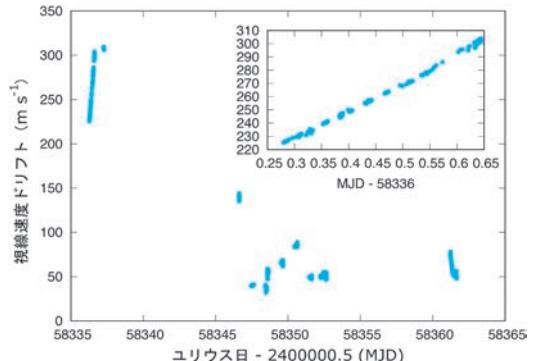


図2 天文コムの輝線の位置から求めたIRDの視線速度ドリフトの変化。IRDは分光器内の温度不安定性に起因して、一晩で $100\text{ m s}^{-1}$ 程度ドリフトすることがある(挿入図)。[5]をもとに改変。

安定性試験の結果、IRDでは想定の10倍を上回る速度ドリフト( $200\text{--}300\text{ m s}^{-1}$ )が観測され(図2)、数日程度のタイムスケールで不規則に変動していることが明らかになった。後の調査で、ドリフトが分光器チャンバー内(正確にはカメラレンズ)の温度と相關していることが明らかになっているが、そのような大きなドリフトが見られる原因については現在も正確には理解できていない。さらに、天文コムを用いた速度ドリフトの解析では、ドリフトの絶対量が大きい場合( $>100\text{ m s}^{-1}$ )、ドリフトが検出器上での場所に依存して大きく変化することも明らかになっている。これは、温度変化に起因した光学素子の変形が検出器上で(波長によらず)一定の平行移動を生じさせるのではなく、検出器上でのスペクトル像の点拡がり関数(PSF)に影響を与えていることを示唆している。

### 3. IRDの解析パイプライン

以上を踏まえて、我々が作成したIRDスペクトルの視線速度解析パイプラインのフローチャートが図3である。本パイプラインでは、天体光が地球大気に入射してから望遠鏡で集光、IRDで分光され、スペクトルとして検出器に記録されるま

での過程を順番にモデル化する「順モデリング法」を採用した。これは、IRDで取得された近赤外線スペクトルの場合、(i) 時間的に変化する地球大気による吸収の影響の除去、(ii) 各時刻の分光器の波長ドリフトを含めたPSFの変動の補正という、2点を同時に考慮する必要があり、従来のような単純なテンプレートマッチング法や相互相関法が機能しなかったためである。本パイプラインでは、IRDで観測された近赤外線スペクトル( $f_{\text{obs}}(\lambda)$ とする)を以下のようにモデル化する。

$$f_{\text{obs}}(\lambda) = k(\lambda) \times \left[ S\left(\lambda \sqrt{\frac{1+v_*/c}{1-v_*/c}}\right) T\left(\lambda \sqrt{\frac{1+v_{\text{tel}}/c}{1-v_{\text{tel}}/c}}\right) \right] * \text{IP} \quad (1)$$

ここで、 $S(\lambda)$ 、 $T(\lambda)$ 、 $k(\lambda)$ は、それぞれ地球大気等の影響を受ける前の恒星の本来のスペクトル、地球大気の透過スペクトル、分光器のブレーザ関数を含めた観測スペクトルの連続光成分を記述する多項式を表す。また、IPは分光器によるスペクトルの器械拡がり関数(検出器上での点拡がり関数を空間方向に積分して1次元化したもの)、\*は畳み込み積分を表す。IRDスペクトルの視線速度解析では、以下で述べる方法で式(1)に現れる $S(\lambda)$ やIPなどの各要素を最初に取り出し、それらを用いて観測で得られたスペクトルの小区間(セグメント、各1 nm程度)ごとに式(1)に従って最小二乗法でフィットする。地球

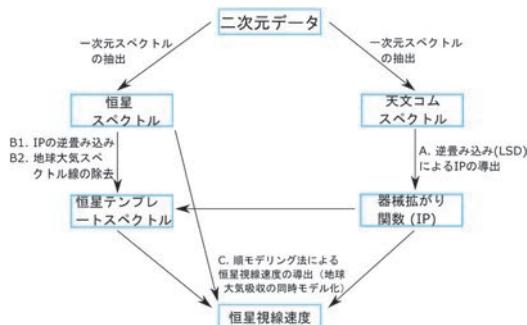


図3 IRDの視線速度導出パイプラインのフローチャート。[\[5\]](#)をもとに改変。

大気スペクトル $T(\lambda)$ には、理論計算[\[6\]](#)によって生成された大気モデルスペクトルを用いる(これによりターゲット星のエアマス、地球大気中の水分量が変化してもフィッティングによって透過光スペクトルを柔軟に最適化できる)。フィッティング・パラメータは、ターゲット星・地球大気スペクトルのドップラー偏移(式(1)中の $v_*$ 、 $v_{\text{tel}}$ )のほかに、連続光を表す多項式の係数、地球大気スペクトルの特性を記述するモデルパラメータなどが含まれる。

### IPの導出

IRDでは同時波長較正のため天体のスペクトルと同時に天文コムのスペクトルが得られるため、天体スペクトルの各セグメントごとの器械拡がり関数IPは同波長とほぼ同じ区間で取得された天文コムのスペクトルを用いることで導出可能である。詳しい説明は省略するが、セグメント内の複数の天文コム輝線を同時に解析するLeast-Squares Deconvolution(LSD)と呼ばれる手法によりこれを実行する[\[8\]](#)。天文コムの本来の輝線波長は非常に精密にわかっているため、LSDを実行して天体スペクトルと同時に取得された天文コムのスペクトルからIPを取り出す(図4)ことで、器械拡がり関数の形状の変化が取り出され

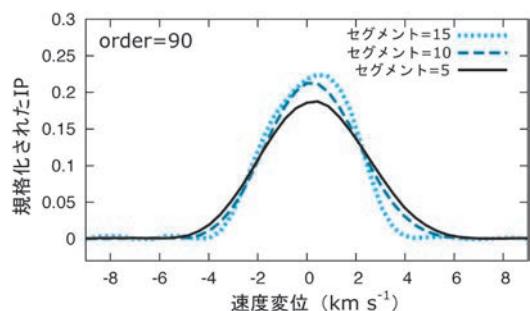


図4 天文コムのスペクトルにLSD(逆畳み込み計算)を適用して導出されたIRD分光器の器械拡がり関数(IP)の例。IPは検出器上での位置(波長)に依存するため、長さ1 nm程度の各セグメントごとにIPが導出される。[\[5\]](#)をもとに改変。

るだけでなく、（器械拡がり関数の中心位置の変化から）装置ドリフトに関する情報も抽出することができる。

### $S(\lambda)$ の導出

近赤外線観測で得られるスペクトルは常に地球大気による吸収と分光器による器械拡がりの影響を受けるため、視線速度解析で用いる恒星のテンプレートスペクトル  $S(\lambda)$  の導出にはこれらの影響を取り除く操作が必要になる。IRDのパイプラインでは上のステップで取り出されたIPを用いて、観測された天体スペクトルの逆畳み込み計算（= 分光器の波長分解能によるスペクトル線の広がりを取り除きシャープなスペクトル線輪郭を取り出す操作）を行う。さらに理論モデルまたは高速自転星の観測に基づいて地球大気スペクトル線を除去し、相互相関関数による簡易解析で各スペクトルを静止系にドップラー偏移させることで  $S(\lambda)$  を求める。一般には単一のスペクトルから  $S(\lambda)$  を取り出した場合逆畳み込み等によるノイズの増幅あまりクリーンなテンプレートは得られないため、異なる時期に取得された複数（ $>10$ ）のフレームを解析してそれらを組み合わせることで高いS/N比のテンプレート  $S(\lambda)$  を導出する。

図5に、上の操作で取り出された各要素を用いて観測天体スペクトル（GJ 436）をフィットする様子を示す。各フレームの最終的な視線速度は、図5同様にセグメントごとに導出された視線速度  $v_*$  を全てのセグメント（地球大気吸収の特に強い領域や視線速度が外れ値を示すセグメントを除いて400–500個程度）で集計して重み付き平均を取ることで算出する。

## 4. IRD 模擬スペクトルを用いたパイプラインの検証

視線速度パイプライン作成後は、実際にパイプラインが機能して期待される視線速度精度が達成できるかを検証した。順モデリング法による視線速度解析では、(a) 地球大気の理論スペクトル

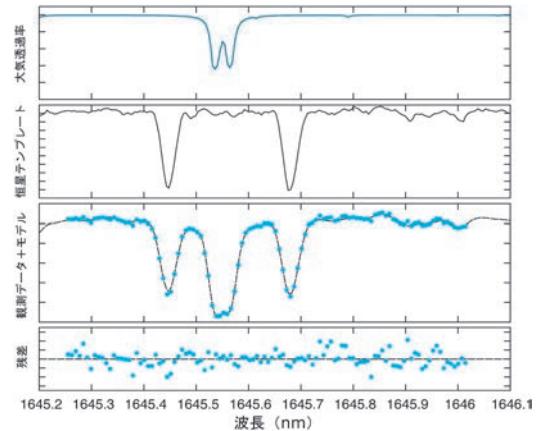


図5 IRDで取得されたスペクトルの一部（上から3つ目のパネルの青点）と視線速度パイプラインによるフィットの様子。順モデリング法では、各観測スペクトルを、別途抽出された恒星テンプレートスペクトル  $S(\lambda)$ （上から2つのパネル）、理論モデルによる地球大気透過スペクトル  $T(\lambda)$ （一番上のパネル）と分光器の器械拡がり（IP、図4の例など）を組み合わせてフィットする。一番下のパネルは、観測データと順モデリング法による最適モデル（破線）の残差。

$T(\lambda)$  によって、観測されるIRDスペクトル中の地球大気吸収線を正確にモデル化して恒星スペクトル線をフィットできるか、(b) 天文コムスペクトルから分光器の器械拡がり関数（IP）を取り出し、さらに逆畳み込みによって観測される天体スペクトル ( $f_{\text{obs}}(\lambda)$ ) から本来の恒星スペクトル  $S(\lambda)$  を抽出することができるか、などの確認が必要となる。そのため、パイプラインの検証は、(A) M型矮星の理論スペクトル [6] を元にした模擬IRDデータを用いた視線速度の再現性の確認、(B) 実際にM型矮星を観測しその視線速度安定性を評価、という二つのステップで実施した。

理論天体スペクトルを用いた検証では、式(1)に従って模擬IRDスペクトルを作成し、各ピクセルごとのノイズを考慮したモンテカルロ計算によって視線速度パイプラインの有効性を確認し

た。その際、観測される地球大気透過光のスペクトル線を理論スペクトル  $T(\lambda)$  で正しく記述できるかを調べるために、模擬スペクトルの作成には実際の高速自転星<sup>1</sup>のIRD観測で得られた“経験的”地球大気スペクトルを用いた。まずは順モデルリング法によるスペクトル解析と理論地球大気スペクトルによる経験的地球大気スペクトルのモデル化の有効性を確認するため、式(1)に現れる分光器の機械拡がり関数IPは模擬データ作成時と視線速度解析時で全く同じものを用いた（すなわち、天文コムスペクトルの解析で100%正確なIPを取り出せるものと仮定した）。

図6に、模擬データの解析結果を示す。上述したように、ターゲットがM型矮星の場合、地球大気スペクトルに含まれる吸収線と天体スペクトル中の吸収線（水の吸収線等）がブレンドしてほぼ同じ位置に現れるケースがあり（ターゲット天体の固有視線速度と太陽系重心から見た際の地球運動の視線速度成分による）、天体視線速度解析に少なからず影響を及ぼす可能性があったことから、模擬データの解析では入力する天体スペクトル  $S(\lambda)$  を観測者の静止系に対して系統的にドップラー偏移させて模擬スペクトルを作成し、視線速度解析パライプラインに入力した。図6（上パネル）の  $x$  軸は入力したドップラー偏移（速度）を表し、 $y$  軸は解析パライプラインで出力された視線速度  $v_*$  である。シミュレーションでは、有効温度  $T_{\text{eff}}=3000 \text{ K}$ 、自転速度  $v \sin i=1 \text{ km s}^{-1}$ 、金属量  $[\text{Fe}/\text{H}]=0.0$  の理論天体スペクトルを使用し、波長  $1000 \text{ nm}$  のピクセルの S/N 比が 100 となるように模擬データを作成した。図6（下パネル）は、入力と出力された  $v_*$  の残差を表している。出力された  $v_*$  の内部エラー（統計誤差）の平均は  $1.85 \text{ m s}^{-1}$  であるのに対し模擬データの解析を行った 51 点の  $v_*$  の標準偏差は  $2.10 \text{ m s}^{-1}$  であっ

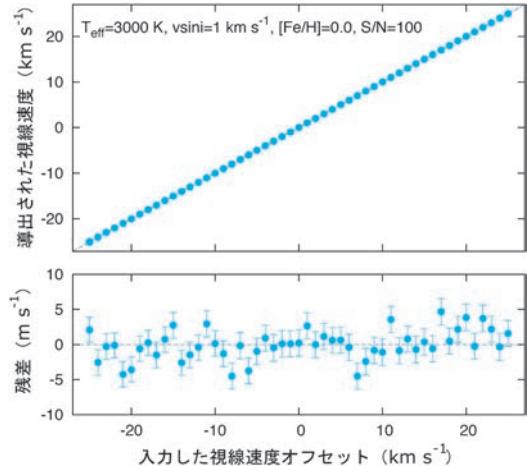


図6 IRD模擬スペクトルを用いた視線速度解析のモンテカルロ・シミュレーション。模擬スペクトル作成時に使用する理論スペクトルを意図的にドップラー偏移させて ( $1 \text{ km s}^{-1}$ ごとに等間隔に作成)，視線速度パライプラインに入力して出力される視線速度を記録した。模擬データの作成には実際に観測された地球大気透過光スペクトルを使用した。[5]をもとに改変。

た。概ね一致していると言えるが、標準偏差の方が若干 ( $\approx 14\%$ ) 大きくなっているのは地球大気スペクトルとして理論モデルで正確に記述できない吸収線が天体吸収線の視線速度測定にわずかながら影響を与えていていることを示唆している。

## 5. M型矮星の観測と視線速度測定

作成した視線速度解析パライプラインの最終的な検証のため、我々はすばる望遠鏡からIRDに割り当てられた試験観測時間を利用して、いくつかの視線速度の標準星となる恒星を観測した。特にIRDによる視線速度サーベイ観測の主なターゲットとなる中期-晚期M型矮星を入念に観測し、解析パライプラインに入力して出力される視線速度の安定性を調査した。前章で紹介した模擬スペクトルを用いた解析とは異なり、実際の観測データの

<sup>1</sup> 高速で自転する恒星 ( $v \sin i > 100 \text{ km s}^{-1}$ ) は自転によるライン広がりによって非常に平坦なスペクトルを持つため、地上の高分散分光器で観測することではほぼ地球大気の透過光スペクトルのみを取り出すことができる。

解析では天文コムスペクトルからのIPの取り出し、観測天体スペクトルをもとにした恒星のテンプレートスペクトル $S(\lambda)$ の導出というステップが入るため、より正確にパイプラインの有効性を議論できる。観測ターゲットには、視線速度が比較的安定しているとされるバーナード星(GJ 699、中期M型星)、極めて低温度( $T_{\text{eff}} \approx 2560$  K)の晚期M型矮星TRAPPIST-1などを選定した。

オプスカイの実証結果の例として、図7に2018年から2019年にかけてIRDで観測したバーナード星を当初の視線速度パイプラインで解析した結果得られた視線速度をプロットした。バーナード星の視線速度は2018年中は安定していたが、2019年のデータでは2018年の視線速度に比べて正の方向に $10 \text{ m s}^{-1}$ 程度のオフセットが見られた。当時ここまで大きな視線速度不安定性は我々も予期しておらず、M型矮星まわりの系外惑星探索のためのすばる戦略枠観測の(継続)可否が議論されているタイミングでもあったため、非常に焦ったことを記憶している。念のために補足しておくと、バーナード星には当長周期の惑星があることが他の装置の視線速度観測で報告されていたが[9]、その惑星による視線速度変化は数 $\text{m s}^{-1}$ であり、どのドップラー装置でも $10 \text{ m s}^{-1}$ もの大きな変動は観測されていなかった。

バーナード星の視線速度に見られたオフセットの原因を特定するため、解析パイプラインや分光

器の装置特性を再度総点検することになったが、様々な検証を行ううちに最終的に原因が「ドップラー偏移の計算に近似式を用いていたこと」だと明らかになった。すなわち、通常恒星のドップラー偏移では

$$\lambda' = (1 + v_*/c) \lambda \quad (2)$$

という近似式を用いることが多いためIRDの視線速度パイプラインでもこの近似式を用いていたが、これがバーナード星の視線速度のオフセットで見られる原因となっていたことが判明した。特に、バーナード星は固有視線速度の絶対値が大きく( $v_* \approx -110 \text{ km s}^{-1}$ )、静止系での恒星テンプレートスペクトルからのドップラー偏移を計算する際に近似式(2)を用いることの誤差が大きくなることで $10 \text{ m s}^{-1}$ を超えるほどのオフセットが観測されていた。パイプライン中のドップラー偏移の計算部分に厳密式

$$\lambda' = \sqrt{\frac{1 + v_*/c}{1 - v_*/c}} \lambda \quad (3)$$

を採用したところこのオフセットは解消され、図8に示したように観測エポックごとの視線速度の系統的なずれは見られなくなった。バーナード星の初期の176点の視線速度の解析では、内部エラーの平均が $2.06 \text{ m s}^{-1}$ だったのに対し、その標準偏差は $2.72 \text{ m s}^{-1}$ であった[5]。平均内部エ

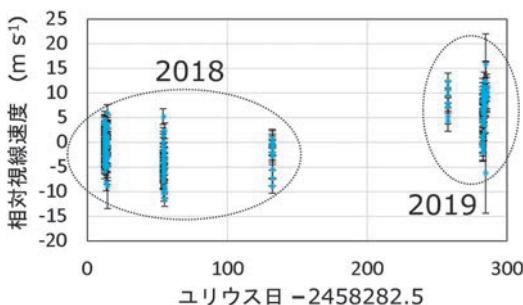


図7 IRDによって観測されたバーナード星の視線速度変化。ドップラー偏移計算時に式(2)を使用。

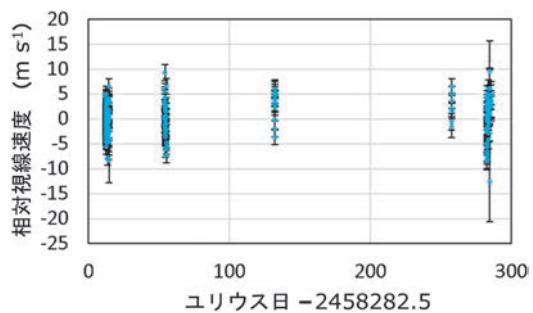


図8 図7と同様。ただし、ドップラー偏移計算時に式(3)を使用。

ラーよりも視線速度のばらつきが大きくなっているのは、4章で述べたフィッティング時の地球大気吸収の影響も考えられるが、バーナード星自身が惑星の存在や表面活動によって視線速度が変化している影響も寄与していると考えられる。

他の標準星やTRAPPIST-1などの惑星を持つM型矮星のIRD観測でも本研究で開発した視線速度パイプラインによる解析の結果、長期的な視線速度安定性としていずれも数 $m\ s^{-1}$ が達成され、近赤外線波長においても可視光域と遜色ない視線速度精度が達成できることが示された。2019年に開始されたIRDによるすばる戦略枠観測では、ハビタブル惑星候補の探索のため地球近傍の中期-晚期M型矮星の視線速度が大規模に調査（サーベイ）されている。天文月報2025年8月号で紹介したように[10]、IRDによるサーベイの結果、近赤外線視線速度観測での初の系外惑星（スーパーアース）の発見[11]や明るいM型矮星まわりの金星サイズの惑星の確認[12]など、すでにベンチマークとなるような重要な成果を収めている。

## 6. まとめ・今後の展望

惑星表面に液体の水を保持可能なハビタブルゾーン内に存在する小型惑星の探索では低温度・低質量なM型矮星が戦略的に重要なターゲットとなっているが、特に低温な晚期M型矮星は可視光線で暗く、近赤外線での観測が有効である。近赤外線での精密視線速度測定のため我々はすばる望遠鏡にドップラー装置IRDを設置したが、近赤外線では(i) 地球大気による天体光の吸収が強い、(ii) 高精度波長較正のための適切な較正光源がない、などの問題があった。また、IRDは想定よりも大きな装置ドリフトが観測され、検出器上での点拡がり関数が安定していない点も精密視線速度測定において課題であった。本研究では、これらの問題をクリアするために順モデリング法による近赤外線スペクトルの解析法を考案

し、IRDで取得されたデータから恒星の精密視線速度を抽出する解析パイプラインを作成した。我々は模擬データを用いたモンテカルロ・シミュレーションと試験観測で実際に得られたM型矮星のスペクトルの解析からパイプラインを検証し、当初目標としていた視線速度の長期的安定精度の $2\text{--}3\ m\ s^{-1}$ が近赤外線でも達成できることを示した。

IRDによるすばる戦略枠観測は2025年度後期で完了となるため、過去6年間あまりに渡って観測したM型矮星の視線速度データとそれらの解析結果（惑星系の発見を含む）を今後順次公開する予定である。並行して、解析パイプラインについては今後も継続的に視線速度測定精度の向上に努める計画である。特に、4章で述べたように、現在のパイプラインは近赤外線での地球大気による吸収線の影響を完全には除くことができおらず、主に観測された地球大気吸収線を理論計算で生成した大気吸収線でフィットすることによる系統誤差（追加のばらつき）が測定された視線速度データで確認されている。今後、理論モデルによるフィットではなく、過去のIRD観測で蓄積された高速自転星のスペクトルライブラリに基づく「経験的モデル」によるフィットを行うことでこれが改善される可能性がある。

本研究で開発した順モデリング法による精密視線速度解析の方法論は、IRDだけでなく別のドップラー装置（例えば、IRDと同様の近赤外線チャンネルを持つカラン・アルト3.5m望遠鏡に搭載されたドップラー装置CARMENESなど）で取得された高分解能スペクトルの解析にも応用可能である。また、よりグローバルな展望として、我々が開発した順モデリング法による視線速度解析法を可視光ドップラー装置で取得されたスペクトルに応用することも視野に入れている。可視光域では基本的に近赤外線ほど地球大気の吸収が広範囲に深く入ることはなく、一部の領域（特に地球大気吸収の大きい領域は視線速度解析から除外され

る)を除いて精密視線速度測定には軽微な影響しか及ぼさないとされてきた。しかしながら、極めて微小な地球大気吸収線(マイクロテルリック)による可視光視線速度観測への影響は数十 $\text{cm s}^{-1}$ に及ぶ場合があると見積もられており[13]、次世代の太陽型星まわりのハビタブル惑星候補の探索を念頭において超精密視線速度観測ではこれを考慮することが不可欠になるはずである。データ解析手法の継続的な改良によって、系外惑星探索のまさにフロンティアが開拓され得る。

### 謝 辞

この原稿は、日本天文学会欧文研究報告論文賞の受賞記事です。元の論文を論文賞に推薦していただいたPASJ編集部の皆様にはここでお礼を申し上げます。元の論文にあるIRDのデータ解析パイプラインは主にIRD装置チームを中心となって開発ましたが、装置の試験、観測では大学院生を含むIRDコンソーシアム全体の多くの方々にお世話になりました。また、天文月報編集委員の鈴木大介さん、志達めぐみさんには本原稿を丁寧に読んでいただき有益なコメントをいただきました。この場を借りて感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1] Mayor, M., & Queloz, D. 1995, Nature, 378, 355
- [2] Tamura, M., et al., 2012, Proc. SPIE, 8446, 84461T
- [3] Kotani, T., et al., 2018, Proc. SPIE, 10702, 1070211
- [4] 小谷隆行, 2025, 天文月報, 118, 454
- [5] Hirano, T., et al., 2020, PASJ, 72, 93
- [6] Clough, S. A., et al., 2005, J. Quant. Spec. Radiat. Transf., 91, 233
- [7] Serizawa, T., et al., 2024, J. Astron. Telesc., Instr.

Syst., 10, 025006

- [8] Donati, J. F., et al., 1997, MNRAS, 291, 658
- [9] Ribas, I., et al., 2018, Nature, 563, 365
- [10] 平野照幸, 2025, 天文月報, 118, 466
- [11] Harakawa, H., et al., 2022, PASJ, 74, 904
- [12] Kuzuhara, M., et al., 2024, ApJ, 967, L21
- [13] Cunha, D., et al., 2014, A&A, 568, A35

### Precision Radial Velocity Measurements by the Forward-Modeling Technique in the Near-Infrared

Teruyuki HIRANO<sup>1,2,3</sup>, IRD Instrument Team

<sup>1</sup>Astrobiology Center, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

<sup>2</sup>National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

<sup>3</sup>The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: M dwarfs have been important targets in exoplanet searches as they can host “habitable-planet candidates” capable of retaining liquid water in orbit close to their stars. However, particularly low-temperature, mid-to-late M dwarfs are very faint in visible light. Consequently, Doppler instruments covering near-infrared wavelengths were developed worldwide since the 2010s to target them using the radial-velocity method. This article introduces methodologies for extracting precise stellar radial velocities from spectra acquired with near-infrared spectrographs, including the IRD instrument installed on the Subaru Telescope. The near-infrared region presents unique challenges, such as strong absorption by Earth’s atmosphere and the lack of suitable hollow-cathode lamps enabling precise wavelength calibration. Using the radial-velocity pipeline for IRD spectra as an example, we explain how to overcome these difficulties in near-infrared radial-velocity measurements.

# ぼやけた像から本来の姿へ 画像逆畳み込み法の天文学応用

酒井 優輔・山田 真也

〈立教大学理学部物理学科 〒171-8501 東京都豊島区西池袋 3-34-1〉

e-mail: sakai.yusuke.d@rikkyo.ac.jp, syamada@rikkyo.ac.jp



酒井&山田



ブレ画像（光軸は+）

観測装置を通じて得られる天体像は、宇宙の姿を知る上で重要な手がかりとなります。ただし、その像は観測装置の性能や観測中に含まれるノイズの影響を受けるため、本来の姿がそのまま映し出されているとは限りません。こうした制約を緩和するために、これまでにさまざまな工夫が凝らされてきました。X線天文学では、観測画像に対して望遠鏡の点広がり関数（Point Spread Function）を利用した画像復元、すなわちデコンボリューション法がしばしば用いられます。本稿では、世界最高の空間分解能を誇るX線天文衛星Chandraを対象に、超新星残骸カシオペア座A（数分角スケール）とマイクロクエーサーSS 433（数秒角スケール）における、筆者らが開発・応用を進めてきたデコンボリューション法を紹介します。これらの応用により、カシオペア座Aではフィラメント構造や星周物質との相互作用の詳細がより明瞭に捉えられ、SS 433ではジェットの放射過程に関する新たな観測的証拠が得られました。これらの成果は、高い空間分解能を持つ可視・赤外線や電波観測との直接的な比較を可能にし、今後の多波長研究の展開にもつながると考えられます。

## 1. はじめに

X線天文衛星XRISMが2023年9月7日に打ち上げられ、最新のデータが続々と公開されています[1-3]。天文学といっても、私たちのように人工衛星のデータを主に扱う研究者は、意外と夜空を望遠鏡で眺める機会は少ないのでですが、2024年の1月初めにXRISM衛星が3C 273というクエーサーを観測するタイミングで、立教大学池袋キャンパスの屋上から望遠鏡で同時観測を試みました。残念ながら有名なジェットは解像できませんでしたが、少しでも解像度のよい画像を撮りたいという思いは、誰もが抱くのではないでしょうか。

ただ、観測装置には限界があります。光学系や検出器の性能、観測中に含まれるノイズなどに

よって、天体像は本来の姿をそのまま映してくれるとは限りません。身近な例として、ピントの合っていない望遠鏡で星団を観測したとき、広がった像が実際に広がった天体なのか、それとも星の集まりが重なって見えているだけなのかを観測像から見極めるのは難しいでしょう。著者欄に示すブレ画像（光軸から離れるほど像がぼやける）もその典型例です。

このような不鮮明な像から本来の天体像を正確に知るために、これまでにさまざまな工夫が試みられてきました。その一つが画像逆畳み込み法（image deconvolution）と呼ばれる手法です。語源的にいえば、観測像はレンズや鏡によって畳み込み（convolution）として記録されるものであり、その逆操作にあたる逆畳み込み（deconvolution）を行うことで、本来の像を取り出そうとい

う考え方になります。実際はノイズの影響が大きく、単純に逆畳み込みするだけでは解けないという課題もあり、この手法に関しても数多くの方法が提案されてきました。

本稿では、X線天文衛星Chandraに対するデコンボリューション法を、超新星残骸カシオペア座Aから、マイクロクエーサーSS 433まで、さまざまな空間スケールの天体に適用できるように開発した手法について紹介します。この研究は、筆者らが学部4年から約4年間にわたり取り組んできた事例[4-8]に基づいています。

## 2. Chandra衛星が拓いた高分解能の世界

X線天文衛星の歴史は、1970年に打ち上げられたアメリカのUhuru衛星に始まります。その後、世界各国で開発が進み、日本からもこれまでに7機が打ち上げられてきました。それぞれの衛星は独自の強みを持っています。例えば2023年に打ち上げられたXRISM衛星[9]では、マイクロカロリメータResolveが分光観測において世界最高水準の性能を有し、CCD検出器Xtendが広視野観測を可能にしています。また、1999年に打ち上げられたChandra衛星は、2025年現在も運用されており、X線天文衛星の中で最も高い空間分解能を誇っています。

集光の仕組みは波長によって大きく異なります。例えば、可視光観測ではレンズで光を屈折させて集光します。これに対してX線は、物質に対する屈折率がほぼ1であるためレンズで曲げることができず、物質表面に浅い角度で入射させる必要があり、代表的な光学系としてWolter-I型望遠鏡[10]がよく知られています。この光学系は、放物面と双曲面という二枚の反射面を組み合わせる仕組みであり、複雑な曲面を精密に加工し、正確に配置するなどの工程を高精度に実現するのは極めて難しいものでした。Chandra衛星では、この光学系を精密に再現することに成功し、秒角スケー-

ルの構造を鮮明にとらえる能力を実現しました。

Chandra衛星の優れた撮像性能は、打ち上げ前に行われた入念な地上試験のおかげでもあります。技術文書[11]によると、Chandra衛星の開発計画は1980年代末に始まり、打ち上げに向けて長期にわたる準備が進められました。較正計画は事前に緻密に立案されていましたが、試験を進める過程で得られるデータに応じて大幅な修正や更新が繰り返されました。このため、較正は24時間体制・週7日で行われ、各シフトには試験手順をその場で調整できる上級プロジェクト科学者が配置されていました。このような膨大な労力を思うと、決して簡単な道のりではなかったことがわかります。ちなみに、当初の計画であるAXAFでは撮像と分光の両方が構想されており、マイクロカロリメータ分光器も候補に挙がっていました。最終的には撮像ミッションであるAXAF-Iのみが進められてChandra衛星となりましたが、この流れは現在のXRISM衛星など、分光を主眼とする衛星へと受け継がれています。

観測装置の撮像性能は、点広がり関数(PSF: Point Spread Function)として表されます。PSFは、点源がどのように像として広がるかを示すものであり、撮像全般に共通して用いられる一般的な指標です。Chandra衛星のPSFは、長年にわたるキャリブレーションの蓄積に基づいて整備されたシミュレーションツールMARX[12]によって見積もることができます。そのPSFの特性は、光軸付近では広がりが約0.5秒角とほぼ対称である一方、光軸外では約2.5秒角程度まで劣化し、彗星状に伸びた非対称な分布を示します(図1、図2左も参照)。Chandra衛星は、XMM-Newton(約6秒角)やXRISM(約1分角)と比べても圧倒的に高い空間分解能を持ちますが、それでも光軸外では像の広がりが生じていることがわかります。筆者ら自身、図1を初めて見たとき、その整然とした構造的な美しさに感銘を受けると同時に、Chandraの性能がまだ限界ではないことを強く感

じたのを今でも覚えています。

### 3. デコンボリューション法とは

デコンボリューション法の実装方法は、観測される波長や観測条件によっても異なります。例えば、電波干渉計 Event Horizon Telescope を用い

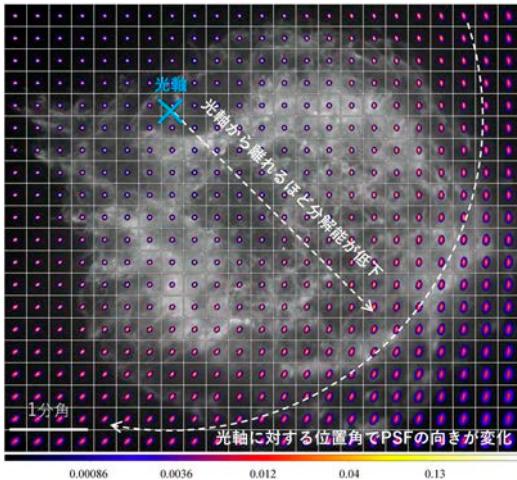


図1 Chandra衛星のPSFを任意の等間隔に配置したグリッドの中心でシミュレーション計算した例。背景はChandra衛星による超新星残骸カシオペア座Aの観測画像であり、各PSFはその位置に対応している。カラースケールはPSFの確率分布を示す。

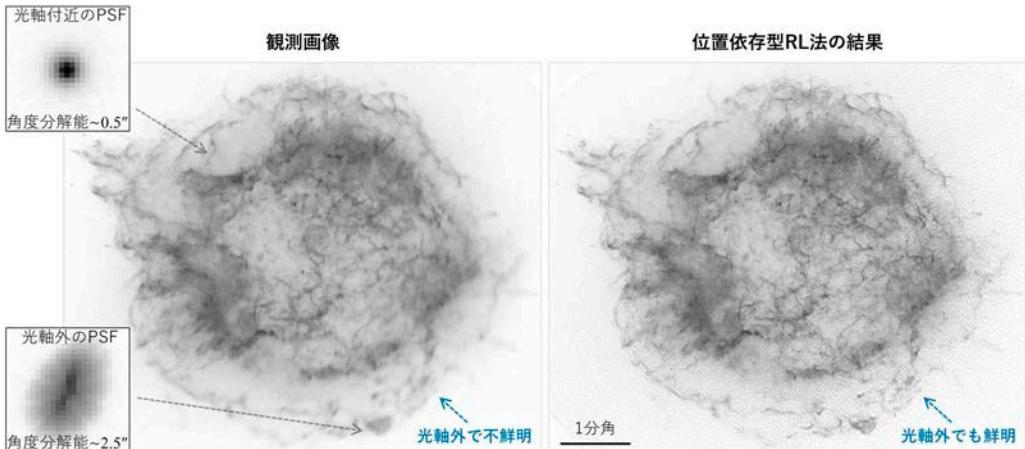


図2 (左) Chandra衛星による超新星残骸カシオペア座Aの観測画像 (0.5–7 keV)。(右) 観測画像に対し、図1に示す観測位置に応じたPSFを用い、位置依存RL法を200回反復して得られた結果。

た観測では、天体像を直接得るのではなく、アンテナ間で取得されるフーリエ成分を利用します。観測局を増やしたり地球の自転を利用することで成分を補いますが、すべてを完全にそろえることはできず、欠損が生じます。この欠損を補いながら真の天体像を推定する手法が開発されています(e.g., [13])。

これに対して、X線観測で得られるデータは、通常位置情報を持った画像として記録されます。式で表すと、観測画像を $D$ 、真の天体像を $S$ 、PSFを $P$ 、ノイズを $N$ として、次のように書けます。

$$D = S * P + N, \quad (1)$$

ここで $*$ は畳み込み演算子を意味します。

最も単純な真の天体像の復元方法は、PSFの逆行列を用いた逆畳み込みです。式(1)をフーリエ変換 $\mathcal{F}$ で表すと次のようになります。

$$\mathcal{F}[D] = \mathcal{F}[S] \mathcal{F}[P] + \mathcal{F}[N], \quad (2)$$

$$\mathcal{F}[\hat{S}] = \frac{\mathcal{F}[D]}{\mathcal{F}[P]} = \mathcal{F}[S] + \frac{\mathcal{F}[N]}{\mathcal{F}[P]}, \quad (3)$$

ここで $\mathcal{F}[\hat{S}]$ はフーリエ空間における復元像を表

し、 $1/\mathcal{F}[P]$  は PSF のフーリエ空間での逆フィルタを意味します。ノイズが十分に小さい場合には  $\mathcal{F}[\hat{S}] \approx \mathcal{F}[S]$  となり、逆フーリエ変換することで元の像を再現できます。現実の観測データでは  $\mathcal{F}[N]/\mathcal{F}[P]$  が支配的となり、復元像は大きく劣化します。特に  $\mathcal{F}[P]$  は高周波数領域で急激に減少するため、ノイズが著しく増幅され、単純な逆畳み込みは極めて不安定になります。

この問題を緩和する方法として、信号対雑音比に基づいて最適化された Wiener フィルタが提案されています (e.g., [14, 15])。ただし、実際の天体画像ではノイズの性質が複雑なため、適用できる場面は限られます。また、すぐ衛星の解析では、まず PSF に基づく逆フィルタを適用し、その結果として増幅されるノイズ成分を抑えるために、各画素の信号対雑音比に応じてガウシアンカーネルの幅を変える“適応的平滑化”を施しています [16]。この処理で得られる像は、必ずしも真の天体像を直接復元したものではありませんが、構造の推定には有効であることが示されています。

このような非反復的な手法に対して、統計的な安定性を重視した反復的な推定法も広く用いられています。その代表が、観測がポアソン分布に従うことを前提に、最尤推定の枠組みで像を逐次的に改善する Richardson-Lucy (RL) 法 [17, 18] です。RL 法の反復式は次のように表されます。

$$S^{(r+1)} = S^{(r)} \cdot \left( \frac{D}{S^{(r)} * P} * P^\dagger \right), \quad (4)$$

ここで、 $\cdot$  は画素ごとの乗算、 $r=0, 1, 2, \dots$  は反復回数、 $S^{(r)}$  は  $r$  回目の推定像、 $D$  は観測像、 $P$  は PSF、 $P^\dagger$  は  $P$  を原点反転 (2 次元画像では 180° 回転) したカーネルを表します。推定像の初期値  $S^{(0)}$  には一様分布を用いることが一般的です。反復を進めることで推定像が収束し、その解を復元像として利用します。ただし過剰に反復するとノイズが増幅されるため、実際には適切な反

復回数で停止させることが重要です。式の直感的な理解としては、観測空間における  $D$  と  $S^{(r)} * P$  の類似度を、真の像空間へフィードバックするために、PSF の逆向きの演算として  $P^\dagger$  を用いて捉えることができます。導出や理論的背景については文献 [5] をご参照ください。

RL 法は、問題設定や観測条件に合わせて柔軟に拡張することができます。例えば、天体の空間構造がある程度事前にわかっている場合には、その情報を取り入れた拡張も可能です。ひとみ衛星のカニ星雲の解析では、カニパルサー (点源成分) とその周囲のパルサー風星雲 (広がった成分) という 2 成分の事前構造を組み込んだ RL 法の拡張が実装されています [19]。また、ガンマ線観測では、位置やエネルギーごとにモデル化された PSF を用いる拡張も提案されています [20]。RL 法はこのように幅広く応用されてきており、対象や目的に応じてさまざまな工夫が加えられています。私たちも Chandra 衛星の観測データへの応用を目指し、RL 法を拡張してきました。その内容について次節で紹介します。

## 4. Chandra 衛星へのデコンボリューションの応用

### 4.1 数分角の天体：超新星残骸カシオペア座 A

超新星残骸カシオペア座 A は、約 340 年前に発生した重力崩壊型超新星に由来し、地球から約 3.4 kpc に位置しています。直径はおよそ 5 分角に達し、フィラメント状構造や爆発噴出物が全体に広がっています (e.g., [21, 22])。また、順行衝撃波や逆行衝撃波といった特徴的な構造も明瞭に確認されています (e.g., [23–25])。

通常、RL 法は観測画像に対して单一形状の PSF を用いて適用されることが多いですが、Chandra 衛星の PSF は観測位置によって形状が変化するため、そのままでは真の天体像を正しく推定することが難しいという問題があります。そこで私たちは、式 (4) における PSF  $P$  を観測位置

ごとに切り替える位置依存型RL法を実装しました [4]。ただし、PSFをピクセルごとにモデル化すると計算コストが膨大になるため、サンプリングを間引きつつ境界の切り替えを工夫することで、現実的な規模で処理できるようにしました。間引きの影響についての詳細な検証は論文 [5] にまとめています。図2に、左に観測画像、右に位置依存RL法を200回反復した結果を示します。光軸外の領域でも像がよりはっきりと見えていることがわかります。

全域での鮮明化の利点の一つは、固有運動解析への応用です。固有運動解析とは、異なる時期の観測画像を比較して天体の移動量を推定する手法です。複数の移動成分が関心領域に含まれると推定が困難になるため、多くの場合、解析者が領域を人為的に選定する必要がありました。この制約を緩和するために、観測時期を増やしたり、全域で滑らかな移動場を導入することで頑健性を高める試みも行われています（e.g., [26]）。本研究 [6] では、画像の鮮明化によって複数の構造が混ざること

を抑制し、さらに複数時期の観測を組み合わせることで安定性を高め、視野全体を統一的かつ高精度に運動学的特徴を捉える手法を構築しました。

具体的な方法として、2000, 2009, 2019年の3回の観測データを活用しました。前処理として位置依存型RL法による鮮明化を行い、その後にポアソン統計に基づく複数観測を組み合わせた最尤推定を実装し、適用しました（図3左）。図では見やすさのためにベクトルを間引いて表示していますが、解析はピクセル単位で実行しています。その結果、順行衝撃波や逆行衝撃波を含む全域で精密な固有運動が得られました。さらに、推定された固有運動ベクトルに従って観測画像を画素単位で移動させ、その結果と対応する観測時期の画像との差分を比較することで、提案手法の妥当性を定量的に検証しました[6]。また、XRISM/Resolveの分光観測によるドップラーシフト解析から視線方向の速度を得て、Chandraの固有運動と組み合わせることで、3次元的な構造を高精度に調べることも可能です [7]。

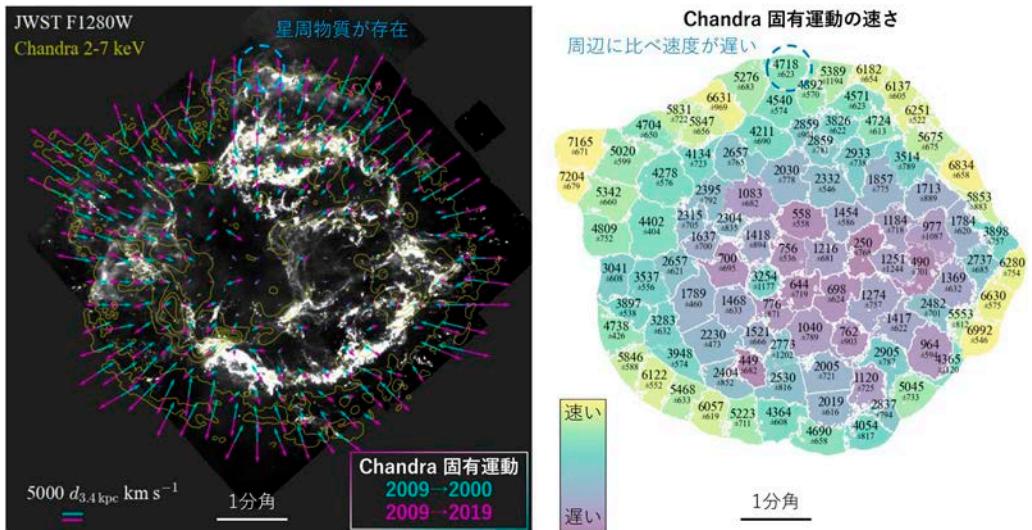


図3 (左) 超新星残骸カシオペア座Aの固有運動の結果。矢印はChandraによる固有運動ベクトル、コントアはChandraの観測画像(2-7 keV)、背景はJWST画像を示す。(右) Chandraの固有運動ベクトルをK-means法で100クラスタに分類した結果。図中に各クラスタの速さとその誤差をkm s<sup>-1</sup>単位で示す。青枠で示すようにJWST構造と関連した速度の非対称性がみられる。

こうして得られた高精度な固有運動は、多波長観測にも活用できます。例えば、JWST [27] の赤外線観測装置MIRI F1280 フィルター ( $12.8 \mu\text{m}$  帯域) で得られた像には、星周物質や爆発で生成されたダスト放射がとらえられています。図3左に示すように、JWSTの観測画像にChandraの固有運動ベクトルを重ね合わせることで、衝撃波との対応を比較することができます。

固有運動ベクトルを詳細に見ると、同じ方向を示す噴出物は空間的に関連した特徴として理解できます。しかし、このような特徴の分類を人手で全域に対して行うのは困難です。そこで本研究では、機械学習の手法として広く用いられるK-meansクラスタリングを導入し、固有運動ベクトルを100のグループに分類しました(図3右)。その結果、図中の青円で示す領域では、星周物質の存在に伴って固有運動速度が低下する傾向が確認され、カシオペア座Aの詳細な空間構造と時間発展をより明確に示すことができました[6]。

## 4.2 数秒角の天体：マイクロクエーサー SS 433

マイクロクエーサー SS 433は、1970年代の発見以来、その特異な性質から多波長で精力的に研究されてきた天体です。1997年には、あすか衛星の観測によって2本の高電離鉄輝線が初めて検出され、銀河系内で唯一、バリオン成分を伴う相対論的ジェットを持つ天体であることが示されています[28]。このジェットの速度は光速の約26%に達し、さらに約162日の歳差運動周期を示すことが知られています。距離はおよそ $5.5 \text{ kpc}$ と考えられており、電波星雲W50の中心に位置しています(図4左下)。近年はXRISMによる分光観測も行われ、ジェットの性質や時間変動の理解に向けた研究が進められています[29]。

SS 433の電波観測では、数秒角スケールに広がるらせん状の構造が鮮明にとらえられています[30]。X線でもChandra衛星によって同様のスケールでジェット方向への広がりが確認されています[31]。しかし、電波に比べると空間分解能が約1桁劣るため、その詳細な構造までは明らかに

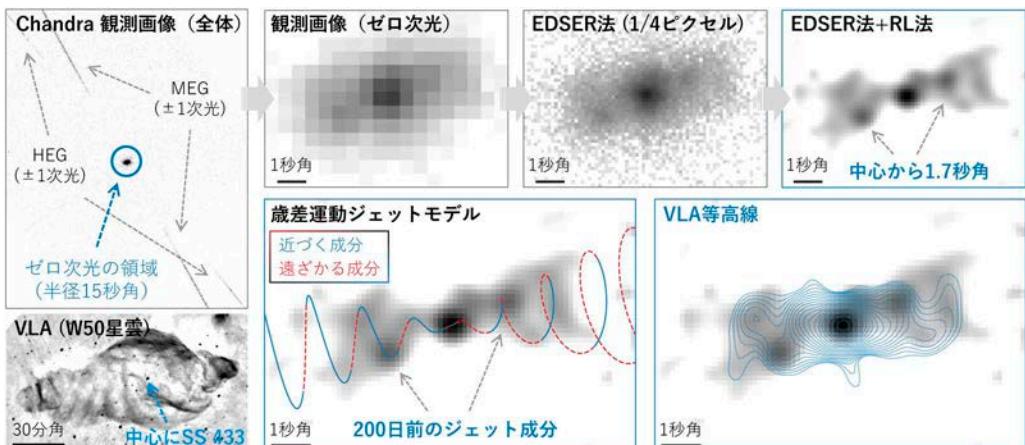


図4 Chandra/HETG 分光観測におけるSS 433のゼロ次光へのデコンボリューションの流れ。上段は左から順に、観測画像、ゼロ次光の拡大図 ( $0.5\text{--}8 \text{ keV}$ )、EDSER法によるサブピクセル補正した画像 ( $1/4 \text{ピクセルスケール}$ )、さらにその画像に対してRL法を30回反復適用した結果を示す。下段は左から順に、VLAによるW50電波星雲の画像、RL法適用後の画像に歳差ジェットモデルを重ねたもの、VLA観測との比較結果である(青枠内の3枚はいずれも同じRL法適用後の画像を背景にしている)。なお、VLAの観測(2003年)はChandra観測(2014年)とは同時期ではないが、両者はおおむね同じ歳差位相に対応している。VLAの画像は、Chandraの空間分解能に合わせて畳み込み処理を施している。

なっていました。このため、Chandraでの研究の多くは、撮像観測（ACIS）ではなく、回折格子分光器（HETG）による分光観測が中心となっていました。ただし、HETGも空間情報を完全に失うわけではなく、ゼロ次光については半径およそ15秒角まで撮像解析に利用できます。

本研究 [8] では、HETGのゼロ次光をイメージング解析に活用しました。図4に示すように、検出器のCCDチップは0.5秒角ほどのサイズに対応しますが、グレード情報などを利用することで1ピクセル以下の位置精度を得ることができます。Chandra衛星では、EDSER（Energy-Dependent Sub-pixel Event Repositioning）法 [32] が広く使われており、本研究でもこの手法によってサブピクセル補正を行いました。

PSFもサブピクセルスケールで用意することで、RL法による復元が可能になります。ただし、RL法は反復を重ねすぎるとノイズが増えることが知られています。さらに、推定像は真の分布に完全に一致するわけではなく、有限の幅を持って収束する傾向があります。そのため、SS 433の解析で電波観測など空間分解能の高いデータと比較する際には、得られた推定像の分解能を適切にそろえておくことが重要です。評価の詳細についてとは、本論文 [8] にまとめています。

EDSER法とRL法を組み合わせた結果、図4に示すように、中心から約1.7秒角離れた位置にピーク構造とらせん状の描像が確認されました。ピーク構造については、歳差運動ジェットを仮定したモデルと比較することで、およそ200日前に放出されたジェット成分に対応することがわかりました。さらに、らせん状の描像はVLA電波像と位置的に一致していることも確認されました。また、ゼロ次光のスペクトル解析から、1.7秒角の構造を含む外側の領域では輝線がほとんど検出されないことがわかりました。電波像との整合性を踏まえると、この領域には非熱的成分が含まれている可能性が示唆されます。

## 5. おわりに

本稿では、Chandra衛星の最高の空間分解能をさらに活用し、天体のスケールに応じた最適な応用方法を紹介しました。超新星残骸カシオペア座AやマイクロクエーサーSS 433など、さまざまな天体で詳細な空間構造が見えてくることで、物理的な解釈の幅が広がることを感じていただければ幸いです。

天文学における解析手法は今も進化を続けています。近年は機械学習を活用した研究（e.g., [33, 34]）が成果を挙げており、さらに量子機械学習の応用も始まっています（e.g., [35]）。観測装置の進歩や長期観測の蓄積とあわせて、こうした解析技術の発展が、宇宙の理解をさらに深めていくことを願っています。

## 謝 辞

共同研究者の佐藤寿紀氏、酒見はる香氏、町田真美氏、五十嵐太一氏、丹海歩氏、早川亮大氏、小湊菜央氏、日暮凌太氏、古山泰成氏に感謝いたします。また、吉田明広氏、佐々木雄一氏、見上敬洋氏からはデコンボリューション手法の応用について貴重な助言をいただきました。SS 433の解析に関しては、XRISM SS 433チーム（PI：志達めぐみ氏）、小谷太郎氏、河合誠之氏から有益なご意見をいただきました。さらに、山口大学での議論の場では、元木業人氏や学生の皆様から電波解析に関する助言をいただきました。

匿名査読者の方々からは有益なコメントをいただき、また『天文月報』編集部の方々には丁寧にご対応いただきました。日本天文学会という議論の場を提供いただいていることにも感謝いたします。

日々を共に過ごした研究室の仲間や同期、学部時代の友人にも感謝いたします。また、本学広報の方々には本研究を広く紹介する機会をいただきました。そして、研究生活を支えてくれた家族にも感謝いたします。

最後に、このような美しいX線画像を私たちが手にできるのは、Chandra衛星の開発・運用に携わった方々、観測提案を行ったPIの方々、そしてデータ公開の仕組みを整えてくださった多くの関係者の尽力によるものです。そのことを胸に刻みつつ、これからも光子一粒一粒を大切にしながら宇宙を眺めていきたいと思います。

## 参考文献

- [1] XRISMチーム, 2024, 天文月報, 117, 540
- [2] 鈴木寛大, 2024, 天文月報, 117, 592
- [3] 山口弘悦, 野田博文, 2025, 天文月報, 118, 328
- [4] Sakai, Y., et al., 2023, ApJ, 951, 59
- [5] 酒井優輔, 山田真也, 佐藤寿紀, 早川亮大, 日暮凌太, 小湊菜央, 2024, 宇宙科学情報解析論文誌JAXA-RR-23-007, JAXA, 83
- [6] Sakai, Y., et al., 2024, ApJ, 974, 245
- [7] Suzuki, S., et al., 2025, PASJ, 77, S131
- [8] Sakai, Y., et al., 2025, PASJ, 77, 1113
- [9] Tashiro, M. S., 2022, Int. J. Mod. Phys. D, 31, 2230001
- [10] Wolter, H., 1952, Annalen der Physik, 10, 94
- [11] Arenberg, J., et al., 2014, SPIE Conf. Ser., 9144, 91440Q
- [12] Davis, J. E., et al., 2012, SPIE Conf. Ser., 8443, 84431A
- [13] 秋山和徳, 2021, 天文月報, 114, 184
- [14] Starck, J. L., et al., 2002, PASP, 114, 1051
- [15] Puetter, R. C., et al., 2005, ARA&A, 43, 139
- [16] Sugizaki, M., et al., 2009, PASJ, 61, S55
- [17] Richardson, W. H., 1972, J. Opt. Soc. Am.(1917-1983), 62, 55
- [18] Lucy, L. B., 1974, AJ, 79, 745
- [19] Morii, M., et al., 2024, PASJ, 76, 272
- [20] Tajima, H., et al., 2007, AIP Conf. Ser., 921, 187
- [21] Hughes, J. P., et al., 1999, ApJ, 528, L109
- [22] Uchiyama, Y., & Aharonian, F. A., 2008, ApJ, 677, L105
- [23] Sato, T., et al., 2018, ApJ, 853, 46
- [24] Vink, J., et al., 2024, ApJ Lett., 964, L11
- [25] Kominato, N., et al., 2025, PASJ, 77, 802
- [26] Ichinohe, Y., & Sato, T., 2023, ApJ, 946, 87
- [27] Milisavljevic, D., et al., 2024, ApJ Lett., 965, L27
- [28] 小谷太郎, 1997, 天文月報, 90, 575
- [29] Shidatsu, M., et al., 2025, PASJ, 77, 1313
- [30] Blundell, K. M., & Bowler, M. G., 2004, ApJ, 616, L159
- [31] Marshall, H. L., et al., 2002, ApJ, 564, 941
- [32] Li, J., et al., 2004, ApJ, 610, 1204
- [33] Ichinohe, Y., & Yamada, S., 2019, MNRAS, 487, 2874
- [34] 高橋一郎, 2022, 天文月報, 115, 517
- [35] Kawamuro, T., et al., 2025, ApJ, 987, 105

## From Blur to Clarity: Image Deconvolution in Astronomy

**Yusuke SAKAI and Shinya YAMADA**

*Department of Physics, College of Science, Rikkyo University, 3-34-1 Nishi Ikebukuro, Toshima-ku, Tokyo 171-8501, Japan*

Abstract: Astronomical images provide vital clues to the nature of the universe, but they are inevitably affected by instrumental limitations and observational noise. To mitigate these effects, various image-processing techniques have been developed. In X-ray astronomy, a common approach is image deconvolution, which reconstructs the intrinsic structure of sources using the telescope's point spread function. Here, we present applications of such methods with the *Chandra* X-ray Observatory, renowned for its superb spatial resolution. Two cases are highlighted: the supernova remnant Cassiopeia A, on scales of a few arcminutes, and the microquasar SS 433, on scales of a few arcseconds. These applications have revealed filamentary structures and detailed circumstellar interactions in Cassiopeia A, and provided new observational evidence for jet emission processes in SS 433. They also enable direct comparison with high-resolution observations at other wavelengths, such as optical, infrared, and radio, paving the way for future multiwavelength studies.

# 天文遺産紹介～ 三鷹 200 MHz 太陽電波望遠鏡

西 村 淳

〒384-1305 長野県南佐久郡南牧村野辺山 462-2

はじめに

2024年度（第7回）日本天文遺産に、「三鷹200 MHz太陽電波望遠鏡」が認定されました。この望遠鏡は日本最初期の電波望遠鏡として、電気通信省電気通信研究所（現NICT）の通信工学者が開発し東京天文台（現国立天文台）の天文学者との協力により三鷹に設置され、1949年9月に太陽電波の観測を開始したものです。同時期に作られた電波望遠鏡の中で唯一廃棄を免れ、現在は

野辺山宇宙電波観測所にて復元され、同観測所の見学コースに展示されています。本望遠鏡の開発に携わった当時の方々、同時期に電波天文学を切磋琢磨し切り拓いてきた先人たち、また本望遠鏡の保護・復元に尽力頂いた皆さんに感謝と敬意を表したいと思います。

通信工学者と天文学者が協力して作り上げた電波天文学

現代の天文学では、世界第一線の観測をするた



写真1 野辺山宇宙電波観測所内に復元された「三鷹 200 MHz 太陽電波望遠鏡」

めに、世界最高の装置を作らなければなりません。そのために国立天文台には多くの技術者が在籍していますし、技術開発を手掛ける天文学者も大勢います。天文学業界の中にいる人からすればこの事は常識ですが、一般の方には意外に思う方が多く見学案内や講演会の時に紹介するといつも驚かれます。実は私自身も学生時代に初めて技術関連の研究会に参加したときには、作業着を着た技術者も多く参加していて、大学の先生とみんなで活発に議論を交わす様に驚いた一人です。

そんな中でも、電波天文学が扱う「電波」は通信などにも利用できる日常生活でも身近にある技術です。アンテナも受信機も、天文学者が使えば望遠鏡になりますし、通信工学者が使えば通信装置になります。電波天文学と通信工学には多くの共通点があり、今でも工学分野と天文分野を跨いで研究者が転職したり、両者で工場や施設を融通したりすることがよくあります。ちなみに私の観測範囲では、電波天文学を専攻する学生さんは、修士の学位を取った後に通信工学分野の技術者になる人が多い印象です。

そんな密接な関係がある電波天文学と通信工学ですが、その関係性の始まりは電波天文学の黎明期にまでさかのぼります。宇宙電波を初めて発見したのはアメリカの通信工学者カール・ジャンスキーで1931年のことでした。無線通信の実験中に地球外から飛来する電波ノイズに偶然気がついたのです。日本では第二次世界大戦の終戦後、すぐにいくつかのグループが電波望遠鏡の開発に着手します。そんな世界情勢の中、電気通信省電気通信研究所では無線通信の妨げになる地球外から来る電波を調査するべく「三鷹 200 MHz 太陽電波望遠鏡」を開発し1949年9月に太陽電波の観測に成功します。観測に成功した初日は運良く太陽活動がとても活発な日で、電波バーストがたくさん検出されたそうです。その後、本望遠鏡は東京天文台の天文学者に引き継がれ、天文学的な関心にもとづき太陽活動についてより詳しく知るた

めに太陽電波を継続的に観測することとなりました。このように、通信工学者の技術と、天文学者の天体现象に対する好奇心とが合わさることによって始動された電波天文学ですが、「三鷹 200 MHz 太陽電波望遠鏡」は日本でのそのような経緯を表す象徴的な装置といえます。

## 通信分野と天文分野の電波研究のその後

通信分野の関心は突発的な通信障害の予測など日々の生活への影響を知る事にあります。電気通信研究所は「三鷹 200 MHz 太陽電波望遠鏡」に続いて 1950 年には大井電波観測所太陽雑音観測アンテナを、1952 年には平磯電波観測所太陽電波観測アンテナを設置することで、太陽活動が引き起こす通信障害の解明と予測について研究が進められました。これらの装置により、太陽フレア等をきっかけに電離層の電子密度が増えることで発生する短波障害（デリンジャー現象）についての理解が進み、1949 年から電波警報を配信開始しました。その後も新たな電波観測装置を開発実用化することで、1988 年からは地球周辺環境の多様な情報を提供する宇宙天気予報を配信開始し、今日に至るまで通信・放送や宇宙システムを運用する事業者に役立てられています。この一連の功績により、その中心となった平磯電波観測所は電子情報通信学会マイルストーンに 2017 年に選定され、平磯電波観測所自体は 2016 年に閉所となったものの、最寄となるひたちなか海浜鉄道湊線 美乃浜学園駅には解説プレートが取り付けられています。

その一方で天文学者の方はとくに、太陽活動の多様な側面をより詳しく知るためにさまざまな電波望遠鏡を試作し投入していきます。1950年には三鷹 100 MHz・60 MHz 八木アンテナ、豊川 2.5 m パラボラアンテナ (3.75 GHz)、1952年には三鷹 2 m パラボラアンテナ (3 GHz)、1953年には豊川 4 GHz 干渉計 (1.5 m パラボラアンテナ 5基)、三鷹 10 m パラボラアンテナ (3 GHz) な

など. その後もアンテナや受信機, 分光計の改良は進み, 1969年には野辺山太陽電波観測所が開所することになります. さらには, それら技術を発展させ太陽より遙かに微弱な宇宙電波を観測対象とする野辺山宇宙電波観測所が45 m電波望遠鏡(150 GHz)の完成とともに1982年に開所しました. 45 m電波望遠鏡はブラックホールの発見に大きく貢献するなど世界の電波天文学を牽引し, それらの功績により2017年にIEEEマイルストーンに認定されています. その後もVERAやALMAなどが開発され, 日本の電波天文学は世界を牽引し続けていますが, その最初期の重要な一步こそが, 通信工学者と天文学者が協力して実現した「三鷹200 MHz太陽電波望遠鏡」であったことは間違ひありません.

## 復元されたアンテナ

そんな「三鷹 200 MHz 太陽電波望遠鏡」ですが、野辺山の地で復元・補完されたのにはいくつ

かの偶然が重なります。この望遠鏡は、鉄塔に金属の軸が付けられ、そこに木製の枠が乗り、その木枠に金属のダイポールアンテナが取り付けられている、という構造でした。元々は木製だったのです。長い年月が過ぎ1990年頃には木の部分は朽ちて無くなってしまいました。また、残された金属部も鏽だらけで、当時、再開発が進む三鷹では不用品として処分される直前でしたが、偶然、望遠鏡開発の経緯を知る野辺山宇宙電波観測所員が見つけ野辺山へ運び出しました。野辺山へ持ってきたものの、そのまま時は流れ、2003年には再び処分されてしまいそうに。その年、新たに採用された工作室の職員が復元を申し出て、集まった有志が本務の観測所運営に支障がない範囲で作業を進めました。そんな糾余曲折を経て、2007年には復元品が完成し、以降、野辺山宇宙電波観測所の一般見学コースに展示されています。読者の皆さんも、ぜひ野辺山まで見学にお越しいただければと思います。



## 天文シミュレーションソフト「Mitaka」の 開発ヒストリー ~20余年の歩み~

加藤恒彦



〈立教大学大学院人工知能科学研究科〉

2025年3月に、「4次元デジタル宇宙ビューワー Mitakaの開発」に対して2024年度日本天文学会天文教育普及賞を受賞しました。このような栄えある賞を頂戴し大変光栄に思っております。「Mitaka」は「科学に裏付けされた最新の宇宙像」をリアルな3次元のCGを用いて分かりやすく見せることを主な目的として、20年余りにわたり私が開発を行ってきたソフトウェアです。この度の受賞は天文教育普及に携わる方々をはじめ多くの方々にご活用いただいたおかげであり、感謝の念に堪えません。本稿では、Mitaka開発の原点およびその歩みについて振り返りたいと思います。

はじめに

「Mitaka」とは、天文学の様々な観測データや理論的モデルに基づき、「最新の宇宙像」をリアルな3次元のコンピュータ・グラフィックス(3DCG)で描き出すソフトウェアです。PCの画面上やスクリーン等で、地球から出発して太陽系、恒星の世界、銀河の世界、そして観測可能な宇宙の果てに至るまで、広大な宇宙の階層構造の中を思いのままに探訪し、その姿を眺めることができます。地上から見た星空を再現したり、時間を進めたり戻したりすることも可能です。

もともとはシアター上映用に2003年に開発をスタートしたソフトウェアですが、2005年に公式サイト [1]においてフリーソフトとして公開を開始して以降は、天文学の教育普及に携わる方々をはじめ、多くの方々に広く使っていただくなっています。2023年の時点でダウンロード数は累計で110万件に達しています。

この度、「日本天文学会天文教育普及賞」という栄誉ある賞をいただくことができましたのも、Mitakaをご活用くださった皆様のおかげと考えており

ます。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

子どもの頃より「コンピュータの中に宇宙を再現したい」という夢を持っていました。その夢が「Mitaka」という形で実現したことを嬉しく思うとともに、それが天文教育普及の場でも広くご活用いただけるソフトとなり、さらにこの度の受賞へとつながったことに、万感の思いを抱いております。

本稿では、Mitakaがどのような背景や経緯で開発されてきたのか、いくつかのエピソードやこだわった点の説明なども交えて概観します。

開発の原点

Mitaka開発の原点は三つあると考えています。第一に、いわゆる天文少年だったことです。幼少の頃、両親に星や宇宙の綺麗な写真や図が載っている図鑑を買ってもらい、夢中になって眺めていました。小学生の頃に渋谷にあった五島プラネタリウムに何度も連れて行ってもらったこともよい思い出で、特に月面の解説などに大変興奮したこと覚えてています（もしかしたら、今回同時に受賞された村松修さんの解説がだったかもしがれませ

ん). こうして天文に興味を持った私は、友人と双眼鏡で星を見たり、天文の本を読んだり、月食の際にはその観察ノートを作るようになりました。このような天文への関心も影響して、後に宇宙物理学の研究の道に進むことになります。

第二に、コンピュータやプログラミングが好きだったことです。父の仕事の関係で自宅にPCがあり、幸運にも小学生の頃からプログラミングをする環境がありました。「パソコン」（当時は「マイコン」と呼ぶことも多かったです）が普及し始めた時代で、PCはNECのPC-8001やPC-8801を使い、プログラミング言語にはN-BASICやN88-BASICを用いて、本や雑誌に載っている1,2ページほどのソースコードを入力して遊んだり、父にも教わりながら簡単なプログラムを自作するなどして楽しんでいました。中学生・高校生の頃にはPC-9801を使ってBASICで自作した簡単な対戦型ゲームなどで友人と遊んだりしたものでした。大学生になると自分で購入したPC-9821で、C言語やアセンブリ言語を用いて3DCG用のライブラリの自作などを行い、Windowsの時代になって高機能な3DCGライブラリOpenGLが登場してからは、布の動きの物理シミュレーションなど、3DCGを使用した多種多様なプログラムを作成しました。このようにして身に付けた様々な開発経験が後のMitakaの開発の礎になったと考えています。

第三に、物理学を学んだことです。大学では物理学を専攻し、その後宇宙物理学の研究に携わりました。物理学や宇宙物理学・天文学の知識は Mitaka の多岐にわたる要素の開発に役立っています。特に、宇宙物理学の放射過程の教科書として有名な「Radiative Processes in Astrophysics」(Rybicki & Lightman 著) で学んだ輻射輸送（光の伝搬）の理論は、Mitaka での「物理学に基づいた可視化」の基礎になっています。

Mitaka の開発に直接的につながる原体験も二つあります。一つは、小学生か中学生の頃に電気

店の店頭で見かけたPC（おそらくApple IIシリーズ）のデモンストレーション映像です。当時は画面の解像度も低く、表示できる色数も8色程度でしたが、画面上にはゆっくりと自転する木星が映し出され、時折、ガリレオ衛星が木星表面に影を落とす様子までもが再現されていました。その映像にしばらく見入ってしまったことを覚えています。このときの感動は、「コンピュータの中に宇宙を再現したい」という夢を抱くきっかけとなりました。もう一つは、Mitakaの開発に着手する数年前に登場した宇宙シミュレーションソフト「Celestia」です。3DCGによるリアルタイムの宇宙旅行シミュレーションとその描画のアーティスティックに深い感銘を受けました。これらの原体験と心に抱いた夢が、Mitaka開発の根幹にある強い原動力であり続けています。

開発の歩み

## Mitaka の黎明期（第1期プロジェクト）

2001年12月、国立天文台で「4次元デジタル宇宙（4D2U）プロジェクト」が開始され、同時に研究開発に実際に携わる研究員（ポスドク）も公募されました。具体的な職務内容は「天文学の観測データや数値シミュレーションのデータを可視化して立体視シアターで見られるようにする」ことで、上述のように天文+プログラミング+3DCGが好きだった私は「これは面白そうだ」と思い応募しました。結果、幸いにも採用され、2002年5月に、林満さん、武田隆顕さん、私の3名が着任し、プロジェクトが具体的に動き始めました。当時は全員が天文学の研究者で、研究者自身が開発・制作を手がけることがプロジェクトの特色の一つであり意義であったように思います。

同年8月、開発室があるプレハブの建物内に、1辺2m弱の正方形スクリーンを3枚接続した偏光方式の立体視シアターが完成しました。そこで、まずは天文学の数値シミュレーションの立体観動画を作つてそれを上映することが目標とな

り、林さんと武田さんが自らのシミュレーションデータなどを可視化した立体視動画の制作を担当し、私はその動画を3面のスクリーンに同期再生<sup>\*1</sup>するソフトウェアの開発を行いました。こうしてシアターのハードウェアとソフトウェアが揃い、その年の国立天文台三鷹地区特別公開で一般の方々に向けて初上映されました。概ね好評ではありましたが、アンケートを見ると、夜空の星々や太陽系の天体など、馴染みのある話題と結びつく上映コンテンツが求められていることが伺え、このことがMitakaの開発を始める発端となります。

翌2003年2月、一般向けにわかりやすいコンテンツとして「太陽系近傍の恒星の3次元的な配置を3DCGとして立体視シアターに映し出して見せる」という案が浮上し、そのためのソフトウェアの開発を私が担当しました。これが現在のMitakaの原型です。データとして使用したHipparcos星表の名前を取って、当時は「Hipparcos プラネタリウム」と呼んでいました。

その後、「コンピュータの中に宇宙を再現したい」という夢を長年抱いてきたこともあり、恒星分布のスケールだけではなく、太陽系、銀河系、近傍銀河、宇宙の大規模構造に至るまで、観測されている宇宙全体の各階層のスケールの天体も表示できるように拡張を重ね、さらに地上から見た星空を表示する「プラネタリウムモード」も搭載し、現在の形の Mitaka に進化していくことになります。

Hipparcos プラネタリウムの開発を始めてから2ヵ月ほど経った同年4月、1つの“事件”がありました。朝日新聞に掲載された「夢の3次元プラネタリウム」と題された記事でプロジェクトが紹介されたのですが、そこには立体視シアターの

「6月からの一般公開」が告知されていたのです。現場には寝耳に水の話だったことから大変慌てましたが、その期日へ向けて“怒涛の開発”を開始することになりました。その直後の5月にはNHKのテレビ番組「おはよう日本」でも「新しい形態のプラネタリウム」としてシアターが生中継で紹介され、注目と期待の中で（嬉しい）悲鳴を上げながら必死で開発を行いました。過去に趣味で自作した3DCGのプログラムや関数ライブラリなどにも助けられ、なんとか6月の期日までに開発を間に合わせることができ、立体視シアターの一般公開は無事に初日を迎えることができました。

この一件は、結果的には実験用プロトタイプから一般向けシアター上映用に使えるソフトウェアに移行するよい転機となったと振り返ります。そして、この頃までには、画面上で「宇宙の階層構造のスケール間を連続的に移動できる」ようにしたり、「現在見ているスケールを『スケール円』によって表示する方式」を採用したり、ライブ上映でも使えるように「ゲームコントローラでインタラクティブに操作を行う機能」を実装するなど、Mitakaの基本的な構成要素はすでにできあがっていたと言えます。

その後、それまで銀河系の絵を貼り付けた板（ビルボード）で簡易的に表現していた銀河系を、点群を用いた立体的なモデル（図1）に更新しました<sup>\*2</sup>。このモデルは当時としては画期的なものだと自負していましたが、100万点以上の点群を用いていたため当時のPCの性能では描画がとても遅いという課題もありました。そのほか、それまで別ソフトで行っていた立体視動画の同期再生機能もHipparcos プラネタリウムに内蔵し、単体でシアター上映をすべて行えるように改良しました。その後も機能追加や改良を重ね、2004年11

\*1 シアターは複数台のPCとプロジェクタにより構成されているため、PC間の同期を取って動画の再生をする必要がありました

\*<sup>2</sup> 銀河系全体の観測はされていないため、「想像図」としてのモデルです。

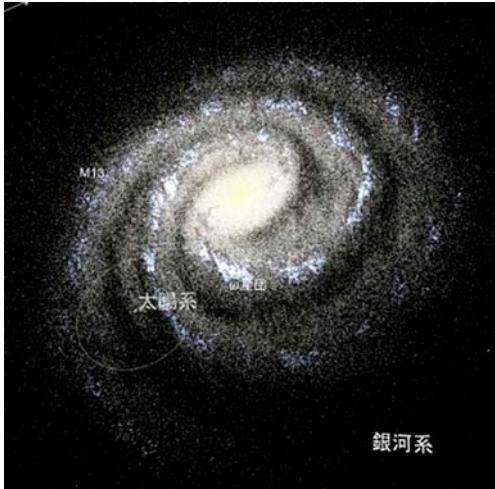


図1 点群で表した銀河系の立体モデル。  
(Mitaka: ©2005–2023 加藤恒彦, 4D2U Project, NAOJ)

月に第1期の4D2Uプロジェクトが終了します。プロジェクト終盤の頃には、Hipparcos プラネタリウムは開発場所である国立天文台三鷹キャンパスにちなみ、開発コードネーム「Mitaka」の名前で呼ばれるようになっていました<sup>\*3</sup>。

## 第2期プロジェクト

2004年12月から、引き続き第2期の4D2Uプロジェクトが開始されました。国立天文台に加えてコニカミノルタプラネタリウムや五藤光学研究所、理化学研究所などの企業・組織も参画する共同プロジェクトで、主な目標は、立体視が可能なドームシアターの構築、それに対応するソフトウェアの開発、上映コンテンツの制作でした。

まずMitakaを一般ユーザーでも使えるように整備して、フリーソフトとして公開することになり、この際に開発コードネームだった「Mitaka」が正式な名称として採用されました。そして2005年2月にMitakaの公式サイトを開設し、ベータ版である「Mitakaバージョン1.0ベータ1」の

公開を開始しました。

公開直後にフリーソフト紹介サイト「窓の杜」で早速取り上げられたこともあり[2]、ブログなどでも感想が広がりました。そこには、「宇宙の広大さがわかった」「宇宙の中での地球がとてもかけがえのない存在に思えた」「たまには星でも見てみようと思った」などの声が並び、予想を超える好意的な反響でした。皆様からいただいたこれらのお声は、その後のMitakaの開発を続ける上での何よりの励みとなりました。そして同時に、シアター用としてだけではなく、一般向けのフリーソフトとしての側面も重視して開発を進めていく契機になりました。

「物理学を学んだ研究者が開発する可視化ソフト」であるという自負もあり、「物理学に基づいた可視化」も積極的にMitakaに取り入れました。輻射輸送の理論と人の目で見た時の見え方のモデル（等色関数<sup>\*4</sup>）に基づいて、まず導入したものが地球大気と銀河系の可視化です。「地球大気（空）の見え方」については、近似的に多重散乱の効果も取り入れたレイリー散乱モデルに基づいて可視化計算を行うことで、プラネタリウムモードでは太陽の位置に応じて自動的に青空や夕焼け空が再現されるようになりました。「銀河系の見え方」については、前述の点群を使用したモデルに代えて、発光体（恒星）と吸収体（塵）の空間的分布の理論モデルと腕のパターンを表すミュレーションマップ、そしてリアルタイムのボリュームレンダリング手法を組み合わせた新しいモデルと描画法を発案して実装しました。この際、ピクセルごとに輻射輸送の計算をしていたのでは時間がかかりすぎるため、銀河系モデルの形状に基づいて7000点ほどの評価用サンプル点を生成してその点の方向のみ計算を行い、サンプル点から作られる三角形ポリゴンを描画してその内

<sup>\*3</sup> 小久保英一郎氏命名。

<sup>\*4</sup> 光のスペクトルと人の目で見た色を関連付ける関数で、国際照明委員会（CIE）により定義されています。

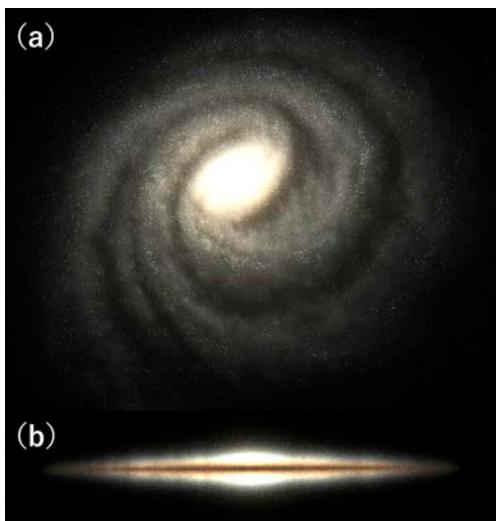


図2 銀河系のボリュームレンダリングモデル。  
 (a) 斜めから見たところ, (b) 横から見たところ.  
 (Mitaka: ©2005-2023 加藤恒彦, 4D2U Project,  
 NAOJ)

部は補間する、という工夫を取り入れました。この結果、点群モデルに比べて格段にリアルかつ美しい描画が可能になり（図2a）、描画速度も大きく向上しました<sup>5</sup>。銀河系を横から見た時の塵（暗黒星雲）による光の吸収で生じる暗い筋（ダストレーン）も再現されます（図2b）。このようにして、「見え方についても可能な限り科学に基づいて行う」という Mitaka の1つの柱（こだわり）も確立していきました。

Mitakaの操作感や見た目については、当時、理化学研究所から4D2Uプロジェクトに参加していた額谷宙彦さんの協力で大きく改善されました。操作感については、額谷さんからの「視点移動が急に止まるのは体感上良くない」という指摘を元に、視点移動に慣性と摩擦を導入して滑らかに停止するように改良しました。また、軌道線の配色、メニューのデザイン、起動時に表示される

スプラッシュウインドウの作成などを額谷さんに担当していただきました。

そして、第2期プロジェクトの大目標である立体視ドームへの投影にも無事に対応しました。こうして、立体視ドームシアター（「4D2Uドームシアター」と命名）は完成し、第2期プロジェクトは2007年3月に終了、同年4月にはドームシアターの一般公開も開始されました。4D2Uプロジェクトはこの第2期までは外部予算のプロジェクトでしたが、その後は国立天文台内部のプロジェクトとして存続することになります。

ボランティア時代

2007年4月に私は大阪大学へ、2011年には広島大学へと移動しましたが、宇宙物理学の研究の傍ら、可能な範囲で個人（ボランティア）としての開発・発信を継続しました。2007年5月には「Mitakaバージョン1.0」の正式版をリリースし、同時にそのソースコードも公開しています。このソースコードに基づき、移動後しばらくは「Mitaka++」という派生版<sup>\*6</sup>の形で開発を行いましたが[3]、これは後に国立天文台版のMitakaに統合をしています。バージョン1.0リリース後の2007年12月には、窓の杜が主催する「窓の杜大賞」でMitakaが銀賞を受賞しました[4]。

2009年には、オーストリア・ウィーンの国連本部で開催された国連宇宙空間平和利用委員会(COPUOS)において、「日本における宇宙・天文教育ツールの一例」として Mitaka のプレゼンテーションを行う機会をいただきました。会場ではゲームコントローラを用いて Mitaka のリアルタイム操作デモを行い、リアルな天文データのインタラクティブな可視化の教育的有用性をアピールしました。

\*<sup>5</sup> 点群データ自体は立体銀河系モデルのレーザー彫刻用として今も活用されていて、国立天文台の寄付返礼品のほか、いくつかの製品でも使用されています。

\*6 派生版とは、オリジナルのソースコードに改変を行ったバージョンのことです。「Mitaka++」は私自身が開発したものですが、オリジナルのMitakaの開発には関係していない第三者による派生版も存在しました。

2012年には、当時市場に出回っていた立体視テレビ向けの立体表示機能の追加等を行い、Mitsakaの大きな特長の一つである「立体視機能」の強化も行っています[5].

## 本務としての開発再開

2014年10月に私は再び国立天文台4D2Uプロジェクトに着任し、Mitakaの開発を本務として再開しました。それから2023年3月にプロジェクトを離れるまでの8年半の間、集中して開発に取り組みました。ここではその主なものを紹介します。

まず、かねてより要望があった多言語に対応しました。このために、Mitakaで扱う文字列をすべてユニコード<sup>\*7</sup>で定義するようにし、その「文字列定義ファイル」を差し替えることで多様な言語に対応できる仕組みを導入しました。文字列定義ファイルの大部分は国立天文台天文情報センターの縣秀彦さんや臼田-佐藤功美子さんをはじめとした多くの方々（当時）の協力のもと作成され、9ヵ国語、11言語に対応できるようになりました。これにより、Mitakaを海外の多くの国でも広く使っていただくことが可能になりました。

「物理学に基づいた可視化」にもさらに力を入れて開発を重ねました。「天の川の見え方」については、当時公開されたばかりのGaia宇宙望遠鏡により得られた約13億個もの恒星の観測データ（測光データ）に基づいて全天の輝度マップを生成し、それを天の川画像として使用することにしました。この結果、非常にリアルで高精細な天の川を表示できるようになりました（暗黒星雲も精緻に再現されています）。もともと、実際の天の川は無数の星々の集合を見ているものなので、観測された個々の星の光を足し上げて画像にすれば天の川が自然と現れるはずだと思ってはいましたが、Mitaka上に映し出された天の川画像を初めて見た時には、想像以上のリアルさに息をのみました。

また、土星リングや月面の「見え方」についても、微小粒子による光の散乱の物理モデルを導入して可視化の計算を行うことで、その反射特性、特に衝効果<sup>\*8</sup>も再現されるようになりました。

さらに、銀河系中心（いて座A\*）に近づくとブラックホールの重力レンズ効果により背景の星々の像が歪んで見える様子もシミュレーションして見ることができるようにしました。このシミュレーションでは、シュヴァルツシルト・ブラックホールを仮定し、事前に光の測地線方程式を数値的に解いた結果をテーブル化しておくことでリアルタイムでの可視化を実現しています。

特に、観測の進展と同時進行でわくわくしながら開発を行ったのは冥王星表面の表示についてです。2015年7月14日にNASAの探査機ニュー・ホライズンズが初めて冥王星の近傍を通過し、それまで謎であった冥王星の姿が明らかになりました。この瞬間を長年楽しみに待っていた私は、Mitakaユーザーの皆さんにも一刻も早くMitakaで真の冥王星の姿を見ていただきたいと思い<sup>\*9</sup>、冥王星表面の画像が入手出来次第すぐにMitakaに反映させてリリースできるように事前に準備を済ませスタンバイしていました。ニュー・ホライズンズからのデータ転送に要する時間とそれが表面画像として使える形になるまでの時間があるため、観測日直後とはなりませんでしたが<sup>10</sup>、2週間後には観測したての冥王星とその衛星カロンの表面画像を実装したMitakaをお届けできました。

そして、Mitakaに導入した大きな機能の1つが「ユーザーによるカスタマイズ機能」です。コマンドを使ってMitakaの設定や動作をカスタマイズできる「コマンド実行機能」や、メニューのカスタマイズ機能、さらに星座線やアステリズムを自由に定義できる機能などを追加しました。これにより、Mitakaの活用の幅が大きく広がったこ

\*<sup>7</sup> 世界中の様々な文字や記号を統一的に扱うための文字コード規格。

\*<sup>8</sup> 光源を背にして対象を見た時に特に明るく見える現象。

<sup>\*9</sup> それまでは冥王星の表面画像には「想像図」が使われていました。

とと思ひます。

バーチャルリアリティー（VR）用ゴーグルが市場に出始めた頃には、その新たなデバイスの可能性に期待を膨らませ、いち早く「VR版」の開発に着手し、Mitakaをより没入感の高い仮想空間で体験できるようにしました。各地で開催したVR体験会では、従来の立体視をはるかに凌駕する宇宙体験が大変好評を博し、多くの方々が感嘆の声を上げていました。VR技術は、ゴーグルを着けることで「コンピュータの中の宇宙」をまるでそこに実在しているかのように出現させます。土星や銀河系が眼前に浮かぶ光景は、まさに目覚ましい技術の進歩を体現するものであり、深い感慨と胸の高鳴りに満ちた開発となりました。

ほかにもここでは紹介しきれなかった機能がたくさんあります。ご興味のある方はMitakaのマニュアルや公式サイトの「更新履歴」をぜひご覧ください。

今後の展望

2023年4月に私は立教大学へ移動し、再び個人（ボランティア）としてMitakaの開発を行うことになりました。今後も可能な範囲で、これまでにいただいた要望にも応えるべく開発を続け、さらに進化させて皆様にお届けしていく所存です。また、現在は主に人工知能（AI）に関わる研究に携わっているので、MitakaについてもAI技術を応用した新たな展開を考えています。

## おわりに

Mitakaの開発に取り組み始めてから、早いもので二十年以上の歳月が流れました。今日に至るまで多くの方々にご愛用いただいたことに深く感謝するとともに、観測の進展や技術の進歩と歩調を合わせながら開発を続けてこられましたことに深い感概を覚えております。

かつて私が子どもの頃に画面に映し出された「宇宙」に心を躍らせたように、今度は Mitaka が若い世代にとっての宇宙への架け橋となり、未来

へつながる夢を育む一助となれたなら、これに勝る喜びはありません。

天文学の研究も観測技術もコンピュータも、日進月歩で発展を続けています。こうした進化の恩恵を取り入れながら「コンピュータの中に宇宙を再現する」という原点の夢を、これからも私自身のライフワークとして追求し続けてまいります。

余談

実は、天文教育普及賞の副賞のトロフィー(図3)は、同賞の設立時に当選考委員長だった土居守さんから依頼を受け、私がデータ制作を担当したものです(土居さんの「天文月報」の記事にも触れられています[6])。このトロフィーは、実際の観測に基づくリアルな天球儀をクリスタルの内部に立体的にレーザー彫刻をして作られています。彫刻用のデータは、明るい恒星にはHipparcos衛星の観測データを、天の川部分にはGaia宇宙望遠鏡の観測データから作成した輝度マップ(Mitakaと同様にして作成)を用いて制作しました。レーザー加工会社を選定して複数回足を運び、仕様やデータの説明、加工条件の調整も重ねました。期限が迫る中なんとか完成し、2019年3月の第1回授賞式に無事に間に合いました。この制作当時から「いつの日かMitakaで私もこのトロフィーを手にできたら」と内心思っていましたので、この度その願いが叶った感無量です。

本稿の冒頭で天文少年時代の話に少し触れましたが、小学生の頃には、2019年度の天文教育普及賞を受賞された藤井旭さん[7]の著書にも大きな影響を受け、特に2冊の本は熱心に読みました。1冊は「藤井旭の天体望遠鏡ABC教室」（誠文堂新光社）で、天体望遠鏡を欲しがっていたら母が買ってくれたものです。望遠鏡の仕組みや構成部品、使い方などをわくわくしながら読んでいました。もう1冊は「星になったチロ」（ポプラ社）で、藤井さんと飼い犬のチロ、そして星仲間との交流に感動し、その影響で当時飼っていた

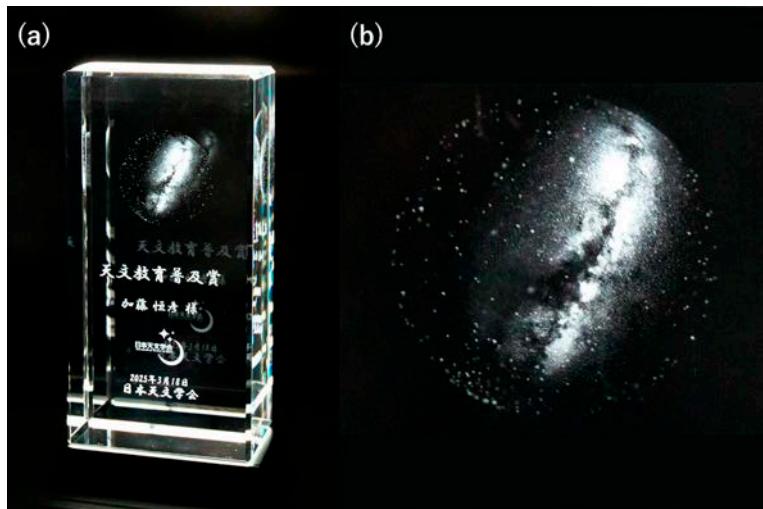


図3 天文教育普及賞のトロフィー。

(a) 全体, (b) 天球儀部分のズームアップ.

ペットのインコの名前も「チロ」に改名したほどでした。今回、小学生の頃からの憧れの存在だった藤井旭さんと同じ賞をいただけたことは深い喜びであります。また、私がデータ制作を担当したトロフィーを藤井さんにご覧いただけたことも大変嬉しく思っております。

## 謝 辞

まず、天文・宇宙のデータを無償で公開している世界中の研究機関に対して感謝の意を表します。こうしたオープンなデータは、天文学の研究のみならずその教育普及に対しても多大な恩恵を与えています。それを享受することで、私も Mitaka の開発という形で天文学の教育普及に微力ながら貢献することができました。

国立天文台の4次元デジタル宇宙プロジェクトでは合計で13年5ヵ月もの長い間お世話になりました。その間、比較的自由に開発を行う機会を与えていただいたこと、3Dモデルの作成などでご協力いただいたこと、そして現在もサポートをしていただいていることに感謝しております。

また、プロジェクト以外にも実に多くの方々にご支援をいただきました。開発やその普及活動に

関わることなど多方面にわたってサポートをして  
くださった国立天文台天文情報センターの皆さん、波田野聰美さんをはじめとする日本天文教育  
普及研究会「Mitaka ワーキンググループ」の皆さん、特に、教育の観点からご教示いただき科研費  
による共同研究でもお世話になりました松村雅文さん、そのほかご協力やアドバイスをいただ  
いた多くの方々に心より感謝申し上げます。

教育や普及の現場で Mitaka をご活用いただいている皆様にも厚く御礼申し上げます。様々な場所で、世代を問わず多くの方々から「Mitaka を知っています」「授業で見ました」というお声を伺い、その度に Mitaka が天文教育普及の一助となっていることを実感いたします。それはまさに開発者冥利に尽きることであり、皆様には感謝の念に堪えません。

そして、Mitakaを使ってくださったすべての皆様にも心よりお礼を申し上げます。皆様からのご声援が大きな励みとなり、これまで開発を続けることができたと言っても過言ではありません。

最後に、Mitakaの開発につながる様々なきっかけを与えてくれた両親と、いつも支えてくれている妻に心からの感謝を伝えたいと思います。

## 参考文献

- [1] <https://4d2u.nao.ac.jp/mitaka/> (2025.10.14)
- [2] <https://forest.watch.impress.co.jp/article/2005/02/07/mitaka.html> (2025.10.14)
- [3] <http://www.magneticfield.jp/mitaka/> (2025.10.14)
- [4] <https://forest.watch.impress.co.jp/prize/2007/result.html> (2025.10.14)
- [5] 林満, 加藤恒彦, 2012, 天文教育, 24, 50
- [6] 土井守, 2019, 天文月報, 112, 730
- [7] 藤井旭, 2021, 天文月報, 114, 216

## The Development History of the Astronomical Simulation Software “Mitaka”: A Journey of Over 20 Years

**Tsunehiko KATO**

*Graduate School of Artificial Intelligence and Science, Rikkyo University*

Abstract: I am deeply honored to receive the 2024 ASJ Award for Education and Public Outreach in Astronomy for the “Development of the 4D Digital Universe Viewer Mitaka.” For over 20 years, I have developed this software to clearly visualize the latest, scientifically-backed universe using 3D CG. This paper reviews the origins and journey of its development.

# 日江井榮二郎氏ロングインタビュー

## 第11回：萬法すすみて自己を修証する

高橋慶太郎

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



日江井榮二郎氏のインタビューの最終回です。まず前回の国立天文台改組の話題を受け、法人化や昨今の情勢によるさらなる天文台の変化に対する日江井氏の意見を伺います。また、日江井氏は国立天文台を退職した後、明星大学に移り、学長も務めました。天文学に熱心な学生、貴重な古典籍や異分野の研究者との出会い、そして学長としての経験を回想します。最後に、太陽フレアや皆既日食の観測や乗鞍コロナ観測所のことなど、ご自身の研究生活を振り返っていただき、読者へのメッセージをいただきます。

### ●天文台改組を振り返って

**高橋：**前回は東京天文台から国立天文台への改組のお話を伺いました。今は法人化して、さらに変わっていますけども、最近の天文台について何か思うところはございますか？

**日江井：**東京天文台が国立天文台になって、東京大学から離れましたね。それから今度は国立大学が法人化してね、国立天文台も自然科学研究機構に入って、大学みたいな法人化の枠の中に入った。そうすると運営費交付金というのをもらうことになって、それが毎年何%減少するということになったんだよね。それは予測できなかったねぇ。改組のときに、私自身もそうだけども、誰もですね、大学と同じような枠に入ることになって悪いとは思わなかった。

**高橋：**え、どういうことですか？ そうならないこともできたんですか？

**日江井：**できたかどうかはわかりません。でも我々は水沢緯度観測所を引き受けるんじゃなくて、我々の方が緯度観測所みたいに大学とは別枠

の機関になるべきであったなあと反省してるので。これはね、私自身もそのときの教授会のメンバーも全然気がつかなかった。

**高橋：**なるほど、緯度観測所は文部省の直轄研究所でしたよね。だから大学とか大学共同利用機関とは予算とか人事の扱いも違ったんでしょうね。そのようになる選択肢もあったかもしれないということですか。

**日江井：**だからそのときに何かもう少しうまい考えがあればね。天文の機器はですね、普通の実験機器や施設と違ってもっと長生きをするんですね。物理的な実験装置と天文の観測装置は違うんです。それに国立天文台は研究だけではなくて、国家に極重要な暦の仕事もしているわけですから、理化学研究所などのように予算が安定して、減少することがない機関になった方がよかったですから、なかつたかと。

**高橋：**国立天文台は大学共同利用機関ですけど、ある意味で大学と同じような立場の機関になってしまったということですね。

**日江井：**そうです。それ以外にどういう種類の機

関があるかというのはその当時はわからなかった。だからね、国立天文台は法人化して運営費交付金を減らされてそのためにずいぶん苦しんでいる。今それが現役の人を苦しめてるから、改組のときにもっと知恵があって、いい形にできなかつたのが本当に申し訳ないなと思うなあ。

高橋：まあだいぶ苦しんでいるとは思いますけど、でも1988年の時点で後々そうなるとは想像できないですよね。

日江井：想像できないでしょ。だけども、普通の実験施設と違ってさ、天体望遠鏡は長く使えるんだよ。タイムスケールの長い天体现象を調べるものですね。岡山を見てごらんなさい、74インチの立派な望遠鏡なんだけどもさ、岡山は今ハワイ観測所岡山分室って名前を変えて、そうでないと生き延びられないくらい。だけども望遠鏡はまだ使えるんだよね。ハワイのすばるだってそうだよ。もうできてから25年くらい経つでしょう。そうするとやっぱりあちこちが傷んでくるよ。そっちも予算が削られるというのは辛いよ。

高橋：そうですよね。野辺山の45m電波望遠鏡とか木曾観測所のシュミット望遠鏡ももうできてから40年とか50年だと思いますけど、まだ活躍していますからね。

日江井：そうでしょう。東京天文台というのはもともと1878年にできたんですね。その120周年のときに当時の蓮見（重彦）総長が東京大学のヒストリーをお示しになったんですよ。それを見るとね、天文台というのは遙か昔にたどれるわけ。『天地明察』っていう渋川春海を描いた小説がありますね。

高橋：ああ、江戸時代の改暦の話ですね。

日江井：あれは日本がそれまでは中国の暦をずっと使ってたけど、渋川春海が一生懸命苦労して日本の暦をつくった。ところがそのとき部分日食が京都で起こったのかな、その予報が合わなかつたんです。それでまた渋川春海は考え直して、日本の暦（貞享暦）を完成させたんですね。

それが認められて渋川春海は江戸幕府の初代の天文方になって、それから日本の天文の伝統はずうっと伝わってると。暦は大事なんですね。暦っていうのは農業とか人々の生活だけじゃなくてね、政治にも大事だよな。東京天文台、国立天文台というのは暦を作ることを任されてて、そういう意味で渋川春海から今に受け継いでるわけだよ。

高橋：そうですよね、渋川春海から数えれば、300年とか400年くらいですかね。

日江井：そうなんです。さらに遡れば、日本が律令国家になったとき天文博士というのがおかれたようですね。だから天文の歴史は長い。

物理の場合にはね、誰かが何か理論を立てて、それが正しいかどうかっていうのを実験で確かめるわけだよね。そのときは5年なり10年なりでできるだけ早く決めようとするわけだよ。それであの説は合ってるとか間違ってるとかいってどんどん進むわけだ。だからね、物理実験というのは人間のつくった理論に対する証左を得る実験ですから、期間が短かいんです。

ところが天文、天の文（あや）を調べるのはタイムスケールが違うわけだよ。だから天文の望遠鏡は結構丈夫にきてるんだよね。岡山の望遠鏡にせよ、すばる望遠鏡にせよ。しかし長く使えばどこかの部品が老朽化してランニングコストが必要なわけだよ。

高橋：そうですね、何十年も維持するのは大変でしょう。

日江井：とにかく天文台もそうだけど、全国のどの国立大学でも運営費交付金が減ってるわけでしょう。どれくらい減ってる？

高橋：年々1%くらいずつ減っていって、それが10年続いたら10%減っているとか、そういう感じですよね。

日江井：でしょう。国立天文台もそういうことでよ。これはねえ、運営費交付金を競争的資金の方に移して、努力して成果が出てるところにはた

くさん出して、そうでないところには少なくするのが当然ではないかという議論がどっかであったようですね。努力と成果に応じてお金を出すという、そのアイディアはいい。アイディアはいいけど、それがゆえにですね、研究者は競争をしなきゃいけない。まあ一生懸命切磋琢磨しなくちゃいけないことは確かだ。でも研究者に余裕がなくなっちゃったのがまずいんじゃないかなと 思いますね。

ノーベル賞を受けた人がさ、昔はお金はなかつたけど自由はあったと言いますよね。つまり自分の研究で5年後に成果が出るか、もしかしたら成果が出ないかもしれないけども、これが面白いよ、これに魅きつけられたよといつて研究する自由があったわけよ。そうするとそのうちに何かふっとひらめいてノーベル賞をもらうような創造的な研究となる。ひらっとひらめくというのをセレンディピティというよね。

**高橋:** 思いがけないような発見ということですね。

**日江井:** 湯川（秀樹）先生だってそうじゃない。湯川先生があのノーベル賞をもらう研究のアイディアをずっと考えててね、寝ようとしたときにふっと何か浮かんだと、それがセレンディピティ。そういうのがあるっていうのはまあ研究者ならみんな知ってるし経験していると思うよ。自分のアイディアを一生懸命しおっちゅう考えてる。だけど考えてるときには出なくて、並木道を歩いてるときとかさ、あるいはコーヒーをちょっと飲もうなんていうときにふっとひらめきが現れる。研究にはそういうのが大事ではないかなと私は思う。

座禅は静寂な環境で行いますね。同じように、ひらめきは外からのプレッシャーのない、空の澄んだこころにやってくるのではないか。でも今はそういう静かな環境が少なくなってるんじゃないかな。だから今までノーベル賞を受けた人が心配して研究に余裕がなくなったと。

**高橋:** そうですね。たぶん気持ちに余裕がないと、あるときふっと何か思い浮かぶというのもなさそうですよね。

**日江井:** なさそうだよね。しかも若い連中は3年だと5年だとかの任期でさ、もうとにかく何か論文になるものを書かなきゃいけない。5年先に結果が出るか出ないかわからないような長い期間にわたる研究なんかできないわけだよね。だからね、競争的資金というアイディアは理屈ではいいんだけど、研究者のそういう余裕とか雰囲気を壊したのはよくないんじゃないかなと思うんですよ。そういう研究者の辛さをね、政治家にわかって欲しいなあ。日本の研究力が世界に比べてどんどん落ちていますよね。やっぱり余裕がないんだよ。

## ●明星大学

**高橋:** 先生は1992年に国立天文台を退職されて明星大学に移りますね。以前、明星大学の学生をたくさん引き連れてパラグアイに日食観測を行ったというお話を伺いました（第6回参照）。それ以外にも学長を務めたり、いろいろあると思いますので、明星大学時代のお話を伺ってもよろしいでしょうか。

**日江井:** はい。私が明星大学に移ったのは野附（誠夫）先生のおかげなんです。野附先生が明星大学で天文学を教えていたんですね。まだ私が東京天文台にいたころ、野附先生が来られて、「日江井君、ちょっとこの期間悪いんだけど面倒見ててくれ」って言われて明星大学に行って授業をしたことがあったんです。1セメスターくらいかな。明星大学がそのことを認めてくれたのかもしれません、それで国立天文台を辞めてすぐ採ってくれたんですね。

**高橋:** 天文学の授業をされたんですか？

**日江井:** 天文の授業です。

**高橋:** 日江井先生はそれまでずっと天文台にいらっしゃったわけじゃないですか。もう30年以



写真 日江井研20周年記念会（日江井氏提供）。

上ですよね。そこから私立大学に行くと、環境というか雰囲気が全然違うと思うんですけど、どうでしたか？

**日江井：**まずはコロナ観測所の重荷から解放されたことですね。森下仙人もリタイアした後でしたしね、天文台にいるときはやっぱり心配で、交代者が無事に観測所に着いたよ、無事に鈴蘭へ降りたよというのを聞いてほっとしていました。だから国立天文台を辞めて、まず肩の荷が降りた感じ。

**高橋：**天文台退職までずっと所長ですか？

**日江井：**そうです。それを今度は桜井（隆）君にやってもらったのかな。その次が末松（芳法）君ね、末松君が最後に観測所を閉めてくれたんだけどね（2010年）。最後まで人的な災禍がなくてほっとしましたね。それが1つ。

もう1つは天文台にいるときはね、ちょうど改組のこともあったんだけどもね、内田（豊）君からしおり電話がかかってきた。教授会が終

わった後とかですね、夜の10時とか11時くらいとかさ。つまり僕らは自分の研究とか生活もあるけれども、天文台全体のことですいぶん時間を取られてた。用事があれば夜中だって対応するものだと思っていましたね。ところが明星大学に行ってですね、ある先生にちょっと頼みごとがあつてさ、夜の9時くらいに電話かけたら「夜9時はもうプライベートの時間です」って言われちゃってさ。ああそうか、私はまだ頭が切り替わっていないと思いましたね。

**高橋：**その辺の意識が違うわけですね。

**日江井：**それで明星大学に来て楽になったと思ったら、そのうちに物理学科の主任をやれだとか、それから理工学部の学部長をやれとか、最後には学長をやれということになって、結局似たようなことになったね。

**高橋：**まずは普通の教員として、授業をしたり学生の指導をしたりするわけですね。

**日江井：**そうです。4年生の卒業研究の面倒を見

ましたね。物理学科の学生には宇宙天文というものに興味がある学生がかなりいたのね。それで私の研究室に結構できのいいのが来てくれたの。できがいいからね、卒業のときに物理学科の総代になった学生もいたね。

それがねえ、日江井研の第1期の連中の中には本当に天文が好きで好きで天文台を見学に行きたいという学生がいてね。ところがその頃の天文台はね、一般の人の見学には許可が必要だったんです。だからね、じゃあ連れて行ってあげると言つて日江井研の4年生を天文台に連れて行きました。そしたら「うわー、天文台が見られて嬉しい！」と言ってくれたわけよ。非常に素直だね、明星大の学生は。

**高橋：**今は割と自由に見学できますよね。当時はそうではなかったんですね。

**日江井：**それでそのときすでに「ようこう」衛星が打ち上がって活躍してたわけ（1991年打ち上げ）。その当時は内之浦でデータを取らなきゃいけなかつた。数十分くらい、内之浦から通信が可能のうちにデータを受け取って、すぐに衛星に指示命令を送るわけよ。そういう仕事があつてね、宇宙研・天文台の職員だけでは足りなくて、宇宙研でその仕事をしてくれる人を求めてたわけよ。それでそういうのがあるよってうちの学生にちょっと声かけたら、やるやるって言ってくれてさ。だから結構みんなね、東京から九州の内之浦へ行ったわけだよ。宇宙研が旅費を出してくれたし、現地の宇宙研の人もよく面倒をみてくれたって学生から聞きましたね。

**高橋：**そういうことができたんですか。

**日江井：**はい、日江井研の第1期の連中というのは非常によくやてくれた。その後も学生が「ようこう」の観測をすいぶん手伝ってくれましたね。彼らにしてみればね、自分が衛星に指令を出せるなんて嬉しいわけだよ。おもちゃじゃないんだもんね、本チャンが動かせるんだからね。宇宙研・天文台としてもね、衛星の運用の手伝いをし

てくれたからずいぶん助かったわけね。そのデータを使って卒論にした学生もいましたね。

**高橋：**それは学生にはいい経験ですね。

**日江井：**それから話は変わりますが、明星大学で驚いたのはですね、明星大学にはシェイクスピアのフォリオ版が12冊あるんです。

**高橋：**え、当時（17世紀）出版されたものってことですか？

**日江井：**そうです。理事長・学長の児玉三夫先生はそういう稀観本を集めるのが大好きだったのね。若者には早くから本物を見せることが重要だってね。そのフォリオ版というのはね、80冊くらいがワシントンD.C.のライブラリーにある。明星大学には1ダース、12冊あって世界で2番目なんだ。へーって思って。

ほかにも欽定訳聖書があって、2冊、「He版」と「She版」っていうのがあった。藤田（良雄）先生はクリスチャンでね、「先生、こういう珍しい本がありますよ」って言ってお招きして、稀観本ライブラリーに来ていただいたんです。それで東大の図書館長をされた今井功先生とか、私の同期だった学生を数人連れて来られました。稀観本の部屋へ入るとね、先人の知の偉大さ・莊厳さが心身に押し寄せてきてね、歴史の重みを感じますね。心がすうっと透明になるんです。あれ、不思議な体験だね。その中にはケプラーの『新天文学』はあるし、ガリレオの『天文対話』はあるし、ニュートンの『プリンキピア』もあった（<https://library.meisei-u.ac.jp/collections/>）。

**高橋：**え、なんですか？ 那はすごいですね。

**日江井：**そうなんです。児玉三夫先生がシェイクスピアの本を買うときに、そういうサイエンスの本もお買いになつたんだそうです。それからキュリー夫人の実験ノートがあつてね、それを原子核研究所所長の坂井（光夫）先生にお見せしたら、感動されてましたね。明星大の教員がそのノートの放射能を測定しましたら、まだわずかですが



小惑星ヒエイ (撮影者：渡邊将玄、吉田朋子、武藤朋樹、協力：明星大学).

残っているんだそうです。明星大学にはそういう貴重な本のコレクションがあるわけよね。

**高橋：**すごいコレクションですね。

**日江井：**あと明星大学で魅力的だったのは、明星大学にはいろんなフィールドの人がいるわけね。医学部はないんだけどあとはほとんどある。生活芸術学科っていうのが明星大の青梅のキャンパスにあってさ、佐々木豊さんという油絵の先生がいたわけですよ。その人は今はもうリタイアされたけど、当時日本でも有名な洋画家・日本画家50名に選ばれて、その展覧会に招かれたことがありましたね。

それから陶芸の高橋紘先生がいてね、その人のお皿はデパートで高く売ってるような先生。藤田先生だと平山淳君だとと一緒に陶芸の教室を訪ねたらね、急に急須を造ることになったんです。藤田先生は初め泥を捏ねるのを躊躇されてたんですけど、そのうち「日江井君、陶芸は面白いですね」とおっしゃってましたね。作ったものに高橋先生が釉薬を塗ってくれて、焼いてくれてま

した。

明星大学青梅キャンパスにはね、備前焼の人間国宝の藤原雄さんの陶板の絵があるんです。「明星から世界へ、愛と力をこめて」っていう藤原先生直筆の陶板も添えてあるんですね。青梅校の敷地にはトウキョウサンショウウオがいたり自然が豊かでね、行くのが楽しみだったね。天文台ではお会いできないような、とにかくいろんなフィールドの人を知ることができた。それが私にとってよかったです。

**高橋：**1998年から4年間学長ですね。日食観測のおかげでなれたっておっしゃってましたけど、学長のお仕事はどうでしたか？

**日江井：**学長は大変よ。学生や教員などの教学のことだけじゃなくて、理事として学苑全体の運営にも関わるんですね。さっき言ったように私立大学の先生方っていうのは天文台に比べると自分の生活を大事にされる先生が多いわけよね。だから私はね、事務の人とよく話をしました。事務は大学の運営を実質的に支えてくれてたし、明星学苑



明星大学学長室にて（日江井氏提供）。

のことをよく知っている人が多くいましたからね。

明星大学のキャンパスって多摩モノレールの中央大学・明星大学駅のすぐ前で、駅をはさんで両大学があるんです。そこにトンネルがあるんだよ。それでその中央大学側の看板は中央大学の学長が書いて、こっち側は明星大学の学長が書きなさいって依頼が来るわけよ。私は太い筆なんか持ったことないけれど学長として書かざるを得ないわけだよね。だからこんな太い筆でね、今もって私が書いた看板が見えるわけ。恥をかいてることなんだけど。

**高橋：**そういう仕事もあるわけですか。

**日江井：**それからその当時、大学の中には警官が入らないというのが不文律だったよね。だけども警察にお願いして周りを見てもらってたね。学生を守るためににはやらざるを得なかったですね。

あとときどき新聞社の記者が来てですね、「学長として最近何かないか」っていうからさ、逆にこちらから、「どうして新聞は事件ばかり書いて、誰かが善行をしたことを書かないのか」と。するとその新聞記者は、「いやあ、警察に行くとこういう犯罪があったとかいうのが出ていてそれを書けばいい。だけど善行というのはこっちを立てたらあっちも立てないといけない。どれを選ぶか難しい」ってね。それでもいいから善行を書けばいいと思ってるんですけどもね。

ほかにもスポーツで学生がどっか行くから励ましてやってくれとかね。それから大学名に「星」ってついてるから、学生が通う道に「星の道」って名前をつけたりですね。入学式や卒業式をどのように行うかとか、慣れないことが多かったですから、事務員と相談しながらしましたね。三ヶ月章先生や高幡不動の貫主の川澄祐勝さんに式典の講演をお願いをしたこともあります。

**高橋：**明星大学って天文系の先生がいつもいるようなイメージがありますね。

**日江井：**そうです。結局野附先生が天文の講義をされて、それに引き続いだ私が入って、その後ずっと尾崎（洋二）さん、佐藤（勝彦）さん、井上（一）さんとか、天文関係の人たちがずっと行くようになったね。

## ●研究生活を振り返って

**高橋：**では先生の研究生活を振り返っていただけますでしょうか。以前のお話で、先生が終戦の日に夕日を見て赤いなあと言ったというお話がありましたね（第1回参照）。そういう意味では先生はもうずっと太陽に惹かれて、ということなんですね。

**日江井：**私はずっと太陽に惹かれていきましたね。特に皆既日食と乗鞍のコロナ観測所です。乗鞍のコロナ観測所は科学者として、皆既日食も初めは研究対象でしたけども、明星大に移ってからは一人間として、自然界の壮大さと神秘さに魅かれましたね。皆既日食のときはですね、第二接触が近づくと異次元に連れていかれるような感覚になるんですね。黒い本影が近づいて、宇宙のマントに包み込まれるような、大宇宙に抱かれるような不思議な感覚があるんです。

**高橋：**それは実際に体験しないとわからないでしょうね。

**日江井：**一方、コロナ観測所の勤務は私の人生で大きなウエイトをしめていますね。その村の村長さん、福島清毅さんに会えて、「山は人を育てる」

という言葉を聞けたことも大きかったですね。乗鞍コロナ観測所というのは自分で研究するだけじゃなくて、それをサポートするいろんな方がいたわけですよ。食事を作る人もいれば、電力を起こす人、いろんな人が助けてくれたんですね。ありがとうございます。

高橋：たくさんの人のサポートがあったと、このインタビューでも技官が大事だというお話が繰り返し出てきましたね。

日江井：そうなんです。あと、人命を失うような大きな事故がなかった、それは本当にありがたいことでね、よかったなあと思っております。

高橋：それは本当に素晴らしいことですね。

日江井：それで今、観測所を撤去しようとしてるわけですよ。去年（2024年）の夏には大きなドームを取り外した写真を見せてもらいましてね、ああだんだん撤去してるんだなあと。営林署との約束がありましてね、土地を借りて観測所を建てましたので、終わったらきれいに撤去して返すというのが約束で、それが今になってしまったんですけども。

高橋：1949年に建設されて、2010年に閉鎖ということで60年ですね。先生は1955年に東京天文台の助手になって、1992年に退職ですから、コロナ観測所の歴史のかなりの部分を見てきたということになるわけですね。

日江井：そうですね。乗鞍は梅雨が明けたときの1週間だけシーアイングも天気もよくて、いつもそれをねらって観測しました。そういうときは世界に負けないようないい画像が撮れましたけど、やっぱりなかなか外国にはかなわなかったですね。

高橋：天候がよくないながらも観測を続けて、ルーティンと研究と両方ですよね。

日江井：はい、研究としては、私は若いときにフレアをずっと観測してたわけです。やっぱりフレアに関心があって、フレアの中でも特別な大きな白色光フレア、そのスペクトルを取ろうと一生懸命やりました。

だけどもね、やっぱり観測日数が少ないですね。だから後になって科学衛星を飛ばしたり、バルーンで観測したり、それからロケットで観測したりするようになりました。そうなると、コロナ観測所はもう閉じてもしょうがないなと思いますよね。だから研究施設でも変えるべきものと変えざるべきものとあって、変えるべきものがコロナ観測所だったんですね。

高橋：でも60年も続いたわけですよね。先ほど、物理実験とかに比べて天文の装置は長く使えるんだということでしたけど、1人の研究者人生よりも長く使えるわけですね。太陽研究は今でも発展し続けているわけですけど、先生としては今後こういうことがわかれればいいとか、こういうことを知りたいとか、そういうのはございますか？

日江井：そうですね、17世紀初頭以来の黒点観測が示している太陽活動の本質、特に磁場の発生メカニズムとか、地上ではできない宇宙環境下におけるプラズマの微細な現象なんかを知りたいと思いますね。磁場はいろんな活動現象を起こす大切な役割を持っているよね。

太陽はすぐ近くにある恒星ですからね、微細な現象が見えるんですね。シーアイングがよいときには、地上から見て1秒角で見えました。角度の1秒というと太陽では700 kmんですよ。一方で表面でのスケールハイトは70 kmくらいですからね、だから僕らの頃は10倍ばやっとしたものを観測して研究してたわけです。それが今はみんな努力して、どんどん分解能を上げてそのスケールハイトに迫る細かいところまで観測が可能になりましたあるわけです。

高橋：そうですね、そんなに細かく観測できる天体なんてほかにないですよね。

日江井：それができるのがやっぱり太陽なんですね。星じゃ遠くてできないですからね。だから太陽は天文学の基礎的な現象を研究する階段の1歩なんじゃないかと。その太陽の研究を使って恒星や銀河に進んで宇宙の謎の解明に繋がることを期



崇禪寺（桐生市）の銘々碑「太陽は青年 若き光いのち育む」（日江井氏提供）。

待しています。

私は太陽の恩恵を人一倍受けているんです。今から6年ほど前に桐生の崇禪寺から石碑を建てるので、協力してほしいっていう話がありましてね。境内に弥陀の小径っていうのがあって、1980年に21基の銘々碑が建立されたんですが、2019年に7基が新たに付け加わったんですね。私は、青年期の太陽と同時代に生を享けているっていう恩寵への感謝を石碑に込めまして、建てていただきました。

## ●読者へのメッセージ

**高橋：**では最後に読者の皆さんにメッセージをお願いします。

**日江井：**私は定年間際にですね、道元の『正法眼藏』の言葉を思い出したんですよ。「自己をはこびて、萬法を修証するを迷いとす。萬法すすみて、自己を修証するは悟りなり」と。つまり自分の方から天文学でもなんでも自然の現象を理解しよう、研究しようというのは迷いだよと。逆にですね、自分が自然と一体の状態となると、様々な天のきまりというのが自分の中に入り込んでくるよと、そういうのが悟りだよ。そう言ってるんではないかしらと勝手に思ってるんだけれども。

**高橋：**自然の法則がこちらに入ってくるというこ

とですか。

**日江井：**朝永（振一郎）先生もそれに似たことを言っててね。『物理学とは何だろうか』って、あの岩波の名著ね。あそこにさ、「一生懸命一生懸命、物の奥のその奥のその奥まで考えていると、自然の女神がちらっと本物を見せてくれる」と書いてあるんですよ。それと同じようにね、先ほども湯川先生の話を出しましたが、1週間かあるいは1ヵ月か数年か、もう考えに考え抜いてると、ちらっとそういうアイディアが自分に入ってくることがある。物事を一生懸命考えていると自分が自然と一体化する。それが悟りなんじゃないかと思うんですね。

**高橋：**科学の研究に通じるところがあるわけですね。

**日江井：**ところが、与えられた式をただ当てはめて使ってやれば自然現象を理解できるのではないかと、そういう研究をしてればそれはもう迷いだよと。私なんかずいぶん迷いの研究をやってたんだなあと思ってですね、若い人たちは湯川先生とか朝永先生のように本当に考え抜くといいんだろうと思いますね。道元っていうのはすごいことを言ったなあと思っておりましてね、若い人も一生懸命研究に研鑽してほしいなあと思っております。

**高橋：**先生の現役の頃と比べると、今はだいぶ違う研究環境になっていると思いますが、いかがでしょうか？

**日江井：**私が現役の頃の東京天文台は、職員も少なくて（1987年の職員数は216名）、事務の人と一緒に運動会を開いたりして、全員の顔がわかつっていたんです。今は職員がもう倍以上ですね（2025年は518人）。観測装置も大型になって、予算要求をするにも国内外の様々な事情を考慮しなきゃいけないというような複雑多岐な組織になったようです。社会のいろんな面で多様化が進んでいますからね、そういう時代のやり方というのがまたあるんでしょうね。

今の時代、情報がとても豊富になってきましたけど、世の中の流れにあまり流されないようにして欲しいと思います。私が昭和20年8月15日に、理屈はわからなかったけど体に感じたようにね、世の中の言うことをそのまま信用しないでですね、やっぱり自分がよいと思う方向に進んで欲しいなと思っております。

私は日本が戦争に向かっていく風の中で、小・中学校時代を過ごしました。時代の風にさからうと特高（特別高等警察）に連れていかれるよと脅かされてね、特高は怖い存在としてプレッシャーとなっていましたね。それで昭和20年8月15日の敗戦を境に世の中が混乱しました。私共日本人は、かつては和魂漢才、明治時代には和魂洋才、敗戦後はアメリカからいろんなことが入り込んで、外国の知識や技術の吸収に努力してきましたね。しかし、多くの場合、知識や技術の表層を学んだだけで、それらを生んだ文化の深奥ではなかったんじゃないかと思います。外国では通用しても、日本ではなじめない制度も入ってきましたからね。

今日、日本では学問の本流から外れて、ややもするとすぐ役立つことや、目に見える結果が得られることが重視されがちです。自分が現役のころ、30~40年ほど前には、そういう今の研究環境の厳しさを予想できませんでしたね。今は、当時より情報が多くて将来の予測は難しいけれども、数年先、数十年先、数百年先の将来に向けて、喜びながら天文学の研究をしていただいて、自由で創造的な思考と深い洞察を發揮していただ

きたいと願っています。萬法すすみて、自己を修証することを期します。

高橋：どうもありがとうございました。

## ●おわりに

日江井先生へのインタビューは国立天文台にて2019年から2025年にかけて9回にわたって行われました。三鷹の塔望遠鏡や第一赤道儀室を案内していただいたこともありました。長いインタビューに付き合っていただいた日江井先生、また写真の掲載に協力したいただいた方々に感謝いたします。

### A Long Interview with Prof. Eijiro Hiei [11]

Keitaro TAKAHASHI

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

Abstract: This is the eleventh article of the series of a long interview with Prof. Eijiro Hiei. First, following on from the previous discussion about the reorganization of the National Astronomical Observatory of Japan, Prof. Hiei gives his views on further changes at the observatory brought about by incorporation and recent developments. After retiring from NAOJ, Prof. Hiei moved to Meisei University, where he also served as president. He looks back on his encounters with students passionate about astronomy, with valuable classical books and with researchers from other fields, as well as on his experiences as university president. Finally, he reflects on his research career, including observations of solar flares and work at the Norikura Solar Observatory, and gives a message to the readers.

テーブルマウンテンの麓から

## South African Astronomical Observatory/ University of Cape Town

南アフリカ天文台・ケープタウン大学（南アフリカ共和国、ケープタウン）

<https://www.saaو.ac.za/>

### 反保雄介（Postdoc fellow）

私は2024年3月に京都大学大学院宇宙物理学教室で学位を取得し、同年5月よりSouth African Astronomical Observatory (SAAO=南アフリカ天文台)とUniversity of Cape Town (UCT=ケープタウン大学)にてPostdoc fellowとして勤務しています。本稿では、こちらに来て1年半ほど過ごした中での日々の様子や経験を紹介します。

### 南アフリカと天文学

南アフリカ共和国（以下、南アフリカ）・ケープタウンで天文学者をしている、と天文コミュニティ外の知人に近況報告すると（良い意味でも悪い意味でも）クレイジーな人間だと思われることが多いですが、天文月報の読者の皆様だといかがでしょうか？名古屋大学のIRSF望遠鏡や大阪大学のPRIME望遠鏡は、SAAOが管理するザザーランド観測所に設置されており、また、アフリカ初開催となったIAU General Assembly（2024年）やIAA Planetary Defense Conference（2025年）を始めとして多くの学会・研究会がケープタウン近郊で開催されているので、実際に訪れたことがあるという方、間接的に繋がりがある方も意外と多くいらっしゃるのではないかと思います。

SAAOは、1820年に当時のイギリス政府が設立したRoyal Observatory at the Cape of Good Hopeが前身となった、南半球では最古の近現代自然科学研究機関です（詳しくは天文月報88巻-1995年8月号の関口和寛「南アフリカの天文学」）。ケープタウンのオフィスは現在は国立天文台三鷹

キャンパスのように天文台本部となっており、ケープタウンから車で5時間ほど内陸に移動したザザーランド観測所がメインの観測所となっています。南半球最大の可視近赤外線望遠鏡であるSouthern African Large Telescope (SALT)と、口径1.0-1.9 mの中口径望遠鏡3台がSAAOが運営母体となっている望遠鏡としてザザーランド観測所に設置されています。これらはケープタウンからリモートでの観測も可能で、中口径望遠鏡は比較的競争率も低いため自由度高く観測することができます。これらに加えて大小10台以上の主にサーベイ望遠鏡がSAAOとの共同で運営されています。また、ケープタウンのSAAOの敷地内にはIAU Office of Astronomy for Development (OAD) や African Astronomical Society (AfAS) の事務所があり、天文学の教育普及活動も非常に盛んで、隔週土曜日夜には一般公開と観望会が実施されています。ちなみに電波望遠鏡のMeerKATや建設中のSquare Kilometre Array (SKA)はSouth African Radio Astronomy Observatory (SARAO=南アフリカ電波天文台)という別団体が中心となって運営されています。

SAAOやUCTのスタッフのバックグラウンドは様々で、欧米圏出身の方もいれば、南アフリカ出身でも博士号は欧米で取得して戻ってきたという方もいらっしゃいます。私が着任して以降のSAAOのポスドクの同僚に限って言えば（出入りはありますが）ルワンダ人1人、イラン人1人、インド人2人、そして私日本人1人とアフリカの



SAAOのケープタウンオフィスからのテーブルマウンテンの眺め。

端でなぜかアジア人と仕事をしているという不思議な光景です。修士・博士学生ではやはり南アフリカ人の割合が最も多いですが、アフリカ各国からの留学生も多く在籍しています。

## ケープタウンの研究環境

私のポスドクポストの内容は、Rubin Observatory LSSTをはじめとする時間軸サーベイによって発見されるコンパクト天体連星系、特に降着する白色矮星を主星に持つ激変星の観測的研究です。ホストであるDavid BuckleyはLSST compact binaries working groupのco-Chairを務めており、彼のJunior AssociateとしてLSSTのフルデータへのアクセス権を付与して頂きながら、2025年末の観測開始に備えて擬似観測シミュレーションの論文をともに執筆するなど研究を進めています。京都大学大学院での院生時代は野上大作さん・加藤太一さんのもと激変星の可視追観測に精力的に取り組んできたこと、Davidが専門としてきた白色矮星磁場の強い激変星とは違い、私が磁場の弱い激変星の観測経験が豊富であること、その2点を評価して頂き採用されたのだと思っています。また、学部の卒業研究では東北大の田中雅臣さんのもとでSubaru HSC-SSP transient surveyのデー

タを触っていたことも、それと同様以上のことを行われるLSSTに絡めて面接の際には話題にあがりました。Davidの人柄と、こういった背景もあってか比較的大きく研究活動をすることができます。

日々の仕事のスケジュールは人によってまちまちですが、毎日10時半から30分ほどはティータイムとなっておりスタッフ、学生みなでコーヒーやお茶を片手に雑談を楽しめます。研究の話題になることもありますが、もっとたわいない週末のお出かけや日頃の出来事、スポーツ（未だにラグビーワールドカップ2015での日本の勝利は話題になります）、互いの文化の違い、政治、などなど多岐に渡ります。特に渡航当初は毎日代わる代わる様々な人と自己紹介をして、より多くの人に認識してもらえるよい時間になりました。

2025年の前期にはUCTにてHonour向け（日本の学部4年相当；南アの高等教育ではUndergrad. 3年, Honour 1年, Master 2年, PhD 3年以上が一般的です）の可視赤外線天文学の授業の一部を担当しました。そもそも日本語でも講義をしたことがない（そして英語でも受けたことがない）内容を英語で講義することはかなり挑戦的でしたが、学生の興味にも助けられて無事に終えることができました。数年後にこの学年の学生の理解度が低い、なんてことを言われないよう祈るばかりです。

一方でやはり南アフリカならでは、発展途上国ならではの大変さもあります。SAAOやUCTといった比較的実績の伴った研究機関では天文学が盛んですが、南アフリカ全体で見ればやはり天文学者人口は少なく研究資金も乏しいため、国内の研究会も多くはありません。（南）アフリカ国籍の人々はシェンゲン圏やイギリス、アメリカ、日本への渡航は学会の参加のみであっても数ヶ月前からビザを準備する必要があり、時にはビザが取得できずに学会参加を断念した例も目にしました。また、ここ2年ほどはかなり頻度が減りました。

たが、load sheddingと呼ばれる計画停電が頻発していた際には、停電で数値計算が途中で止まってしまって仕事にならない、なんてこともあったそうです。当の本人は笑い話として話してくれましたが、実際計画停電が起こると1日のスケジュールが停電のスケジュールで決まってしまうため、日常生活にもかなりストレスが溜まります。

## 南アフリカの日常生活

「南アフリカ」と検索すると、大型ほ乳類が自由に闊歩するサファリの雄大な景色がみられる一方、世界でも最も凶悪犯罪件数の多い国のひとつといった不名誉な情報も出てきますが、ケープタウンはテーブルマウンテンとビーチに囲まれた、自然豊かな美しい観光都市です。SAAOのケープタウンオフィスやUCTのメインキャンパスは街の外れにあり、車を15-30分ほど運転すれば、観光地のモールにも、山にもビーチにもアクセスできます。もちろん日本と比較すると治安はかなり悪いですが、日々の行動に気をつければ友人と外食を楽しんだり、週末に遠出したりと快適に過ごすことができます（幸い私はまだ危険な目に巻き込まれたことはありません）。スーパーマーケットでの買い物やレストランでの食事、役所での書類仕事なども含め日常生活はすべて英語で済むことができます。一方で、英語が母語である人は実は人口の10%以下とほとんどの人が第2言語として英語を話すため、英語のハードルは米英よりも少し低いかもしれません。食事も欧州系、アフリカ系、アジア系と多国籍で、隣町のステレンボッシュ産の美味しいワインを安く手軽に楽しむことができます。私が南アで最も驚いたことの一つは、Sushiレストランが文字通り数ブロックに一つあり、中にはSushi and Thai cuisineという日本人からすると信じられない組み合わせもあります。なお、もちろんそのほとんどではカリフォルニアロールかポキしか出てきません。



Vasto Accretion Meeting 2025 (Vasto, Italy) に参加した南アフリカ関係者メンバーでの集合写真。写真左端が筆者。

個人的には、日本よりも南アフリカの方が天文学に対して興味を持っている一般層が多いように感じます。例えばUberの運転手と話しているとザガーランドに望遠鏡と星空を見に行ったことがあるよという話になったり、レストランでたまたま喋った人が電波望遠鏡のソフトウェア関係の仕事をしていたりと、意外と話が広がります。2024年には日本の観光省と文部科学省に相当する政府部門が主導となって、南アフリカのアストロツーリズムに関する国家戦略が策定されたこともあります。より多くの市民が天文学に触れる機会を持つことが期待されます。

また、南アフリカ在住の日本人の多くは企業駐在員とその家族としてヨハネスブルグ、プレトリア、ダーバン周辺に滞在されていますが、ケープタウンにも小さなながら日本人コミュニティがあり、ブライ（南部アフリカ式BBQ）など季節の行事もあります。

このコミュニティ向けに日本語での天文台ツアーを開催したり、隣町のステレンボッシュ大学に設置されているJICAのJapan Centreでセミナートークをさせて頂いたりと、より広いコミュニティにも天文学における日本と南アフリカの繋がりを紹介する機会を頂きました。小さいコミュニティだからこそ実現できたことではあります

## ◆シリーズ：海外の研究室から

が、いわゆる経済協力や企業連携とは少し目線の違う分野での2国間の繋がりの発展に貢献できていれば幸いです。

最後に、なぜそもそもケープタウンを選んだのかと考えると、もちろんLSSTの追観測を含め南アフリカでできるサイエンスに魅力を感じたからということが最も大きいですが、せっかく海外に長期間滞在するのであれば、天文学者でなくとも滞在する可能性のあるヨーロッパやアメリカでは物足りないという気持ちもどこかありました。これまでの経験や、博士課程での4ヵ月間のイギリス・サウサンプトン滞在を通して、自分自身が環境変化に対して比較的順応しやすい人間であるという感覚も後押しになったように思います。ま

た、学部生時代に知り合った南アフリカ人の友人がヨハネスブルグに住んでいることを知っていたので、何か本当に困ったらこの人に頼ればどうにかなるだろう、という謎の（？）安心感があったことも心の支えとなりました。様々な要因があるなかで、全ての人が満足のいく海外ポスドクを送れる訳ではないとは思いますが、私自身はホストやSAAOのメンバー、現地の友人、生活環境に恵まれ、比較的ストレスを感じずに海外ポスドクを楽しんで過ごしている部類に入るかと思います。研究時間だけでなく、余暇の時間を含めた「人生」を楽しむことが海外ポスドクの1番の魅力だと感じています。

# 日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

IAUS 397, "UniversAI: Exploring the Universe with Artificial Intelligence"

氏 名：大久保宏真（筑波大学数理物質科学研究  
群 物理学専攻 D1（渡航当時））

渡航先：ギリシャ アテネ

期 間：2025年6月2-6日

## 本渡航の概要

2025年6月2日-6日にギリシャ・アテネのHarokopio大学で開催されたIAUS 397, "UniversAI: Exploring the Universe with Artificial Intelligence" で口頭発表を行った。本シンポジウムは、IAU初のArtificial Intelligence (AI) をテーマとしたものである。私は、銀河進化研究・ビッグデータ時代における天文研究の発展を支えるために、機械学習と説明可能なAI (XAI) を駆使した新たな解析方法を発表した。この発表を通して、本研究の役割と意義を発信できた。さらにシンポジウム全体を通して、AI活用研究の課題を世界規模で共有・議論でき、新たな視点を取り入れる貴重な機会となった。

## IAUS 397, "UniversAI" の主旨

本シンポジウムの目的は、天文学・宇宙物理学×AIの学際的な連携の促進である。この背景には、ビッグデータとマルチセンジャー観測の新たな時代に突入しつつあることが挙げられる。このような時代に突入しつつある今、データ量は増加し続けるため、新たな構造化・処理・可視化手法を確立しなければ、最大限にデータを活用できない。そのため、この問題を解決できるAIの導入は不可欠であり、本シンポジウムはその一助として、研究成果の報告や議論によるAIを駆使したデータ活用の推進を目指している（詳細はUniversAI公式サイトを参照）。

## 研究内容と成果

私は "Potential of Feature Extraction Methods Using Kernel PCA and Kernel SHAP in Astronomy" というタイトルで口頭発表を行った。本研究は、銀河の多輝線解析において輝線間の非線形関係を捉えることで、物理現象ごとのデータに再構築・可視化するための手法の確立を目的としている。

具体的には、輝線間の非線形関係を捉えることが可能な教師なし機械学習であるカーネル主成分分析 (kernel PCA) を、近傍銀河NGC 1068のALMA Band3多輝線データに対して適用する。このデータはOkubo et al. (2025) で線形的なPCAに適用されているため、kernel PCAとPCAの比較が可能になる。kernel PCAはPCAでは捉えられない非線形関係の可視化を可能にする一方で、その結果と輝線の対応関係を把握できない。そのため、得られた結果の物理的な意味付けは容易ではない。そこで、XAIのkernel SHapley Additive exPlanations (kernel SHAP) を導入する。XAIとは、機械学習や深層学習の持つブラックボックス性を解消することで注目されている情報科学の一分野であり、kernel SHAPはXAIにおける新しい手法である。

本研究の成果は主に二つある。

(1) kernel PCAを適用した結果、PCAでは得られなかったNGC 1068のAGNアウトフローの特徴を可視化することに成功した。この結果は主観的な視認に基づくだけでなく、二標本のt検定によって統計的にも有意であることが確認された。

(2) kernel SHAPを用いてkernel PCAのブラックボックス性を解消し、輝線の寄与を定

量化することでkernel PCA結果に物理的意味を与えることに成功した。これは、単にkernel SHAPを適用しただけに留まらず、先行研究との比較や推定した物理量との相関を取ることで、物理的に意味を持つことを明らかにした重要な結果である。

(1), (2) より、物理現象ごとにデータを再構築することで今まで見落とされていた現象の発見が期待される (Okubo et al. 2025)。また (2) より、ブラックボックス性を解消することで、機械学習や深層学習を用いた研究のさらなる進展が見込まれる。さらに本手法はデータの質と量にほどんど制限がなく、ビッグデータとマルチメッセンジャー観測の新時代にも対応できるため、まさに本シンポジウムが求めている手法と言える。

## シンポジウム全体を通して得られた成果

聴講を通して、天文学・宇宙物理学×AI研究における最先端の動向と今後の期待を把握できた。特に興味深かったのは、招待講演者である Jean-Luc Starck 氏の講演である。過去・現在・未

来における imaging の概観を話されており、深層学習 (特に U-Net, SU-Net) を用いた deconvolution による高精度なデータ作成を期待されていた。

また、多くの研究者との議論を通して、AI 活用研究における課題を共有できた。大半の研究者が、機械学習や深層学習の持つブラックボックス性を問題視していた。天文学や宇宙物理学においては、むしろ結果の解釈が重要になるため、この問題への対処方法が常に議論の中心であった。その中で私の研究は、kernel SHAP を用いて解釈性を担保できることを、物理的観点との整合性を明らかにした点が評価され、関心を持っていただいた。

## 謝 辞

AI の原理は理解できても、それを天文・宇宙物理研究にどのように応用するかが難しいところです。本シンポジウムを通して応用方法を一举に把握でき、新たな視点を取り入れることができました。この貴重な機会に参加できたのは、渡航援助あってこそです。関係者の皆様、そして早川幸男基金に深く感謝申し上げます。ありがとうございました。

# 日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書 *European Astronomical Society Annual Meeting 2025 (EAS2025)*

氏 名： 札本佳伸（千葉大学先進科学センター  
特任助教（渡航当時）  
渡航先： アイルランド コーク  
期 間： 2025年6月21-28日

本渡航では、2025年6月23-27日にアイルランド・コークにて開催された European Astronomical Society Annual Meeting 2025 (EAS2025) に出席し、1件の招待発表と1件の口頭発表の計2件の発表を行いました。その中でも、EAS2025における「S10 Science with gravitational lensing in

the multi space-telescope era: new prospects and opportunities」において招待講演の依頼をいただき、「Opening Extreme Galaxy Observations through Individual Stars in Cosmological Distances」という題目にて発表を行い、またスペシャルセッション「SS16 A new picture of galaxy evolution from Cosmic Dawn to Cosmic Noon: after the first years of JWST operation and towards the ELT」において、口頭講演を受理していただき「Galaxy Over-Density in the Heart of Cosmic Reionization at  $z=8.47$ 」という題目にて発表を行

いました。EAS2025は欧州のみならず米国やアジアから多数の研究者が参加する、欧州最大の研究集会の一つであり、総計で1000件を超す口頭発表と900件を超すポスター発表が行われました。筆者自身が発表を行ったセッションのみならず、そのほかのセッションにも参加することで多様な天文学研究についての発表を聞くことができ、現在急速に進展しつつある様々な分野の進展に触れるとともに、多数の研究者との議論を通して極めて有意義な国際研究会参加となりました。

「S10 Science with gravitational lensing in the multi space-telescope era: new prospects and opportunities」における招待発表では、強力な重力レンズ効果を利用した遠方銀河内部における恒星の観測的研究における最前線について講演を行いました。特に、ジェームズウェップ宇宙望遠鏡(JWST)を用いた時間軸観測により遠方銀河内部においてマイクロレンズ効果により発生する明るさの時間変動を多数捉えることによる進展は目覚ましく、私も先日発表した遠方銀河内部の個別恒星の検出についての研究などを取りまとめ紹介しました。また、新たに得られた観測データについて議論を行うとともに、筆者がPIとして行う2025年12月から2027年12月にかけたJWSTの観測についての議論を行いました。発表後には、同分野の専門家から観測手法やデータ解析・今後の展望に関する質問を多数いただくとともに、現地にて共同研究についての提案なども受け、活発な議論が行われました。また、他の発表者の講演にて数多くの刺激的な研究成果に出会うことができました。特に、これらのマイクロレンズ効果により捉えられた遠方銀河内部の個別星の検出を元に遠方銀河の星形成活動における初期質量関数(Initial Mass Function; IMF)の制限に応用するための研究を行なっている香港大学のSung Kei Li氏の発表では、実際にIMFへの強力な制限が可能であることを示していることを知り、自身の研究への実装と、今後行われるJWSTの観測への

新たな指針とともに、今後同氏との共同研究への契機となる議論を行うことができました。

「SS16 A new picture of galaxy evolution from Cosmic Dawn to Cosmic Noon: after the first years of JWST operation and towards the ELT」において行った口頭発表では、JWSTを用いた観測により宇宙再電離中期( $z=8.47$ )における銀河過密領域の発見とその性質について報告しました。本研究ではJWSTを用いた高感度の面分光観測により、現在知られている中で最遠方の銀河過密領域を同定しました。特に、現状理論的に予測されている銀河過密領域の個数密度と、今回の発見に齟齬がある可能性を指摘し、今後の更なる観測的研究の重要性とそれに向けた議論を行いました。また、本発表を通じ、4-5年後にファーストライドを迎えるExtremely Large Telescope(ELT)を用いた多天体分光観測を用いた追観測の重要性について指摘し、多くの研究者と議論を行いました。特に、JWSTよりも感度、波長・空間分解能に優れるELTを用いることはこれら銀河過密領域がどのように宇宙再電離に寄与したのかを理解する上で欠かせないことを多くの研究者との議論を通して確認することができました。

今回、EAS2025への参加を通して最も印象に残ったことはJWSTを通して得られた様々な驚くべき研究成果もさることながら、いよいよ2029-2030年にファーストライドが迫り、次第に大きく盛り上がっている、人類初の40m級望遠鏡ELTへの期待とその研究課題の探究に関連した議論が熱意を持って盛んに行われていることでした。筆者自身、2件の発表を通して今後のELTが果たす重要な役割を指摘するとともに、本研究会参加を通して具体的にELTで計画されている検出器の性能をより詳しく知る機会に恵まれ、これまでにない強力な空間分解能・感度に圧倒されるとともにそこから広がる将来の天文学研究に魅了されました。その研究計画に少しでも貢献し、そして自身の研究でも活かすためにも、欧州研究者

との更なる交流・共同研究は今後欠かすことができないものであることを実感しました。

このように現地で自身の発表を基に交わす議論だけでなく、そのほかに参加する人々の発表や、将来の望遠鏡計画への熱意を目の当たりにすることは国際研究会に現地参加ができる初めて得ることのできる極めて貴重な経験であると考えています。本渡航は、日本天文学会早川幸男基金による援助があって初めて可能となったものであり、そ

のような貴重な経験を得る機会を与えてくださった関係者の方々に心より感謝いたします。今回の国際研究会参加においては当初期待していた以上の成果を上げることができ、そこで得た知見を基に、自身の今後の観測や研究に反映させることはもとより、日本で行われている天文学研究にその欧州で感じた将来研究への熱意を伝えていきたいと考えています。

## 日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書 *Hinode-18/IRIS-16 meeting*

氏 名：内藤由浩（総合研究大学院大学 D2（渡航当時））

渡航先：イギリス ロンドン

期 間：2025年6月21-28日

本渡航では、2025年6月23-27日にかけて、イギリス・ロンドンのUniversity College Londonで開催された太陽物理学分野に関する国際研究会“Hinode-18/IRIS-16 meeting”に参加しました。当研究会では、太陽観測衛星「ひので」および「IRIS」による結果を中心とした太陽物理学分野の最新の研究成果についての議論が行われました。

申請者は当研究会において、“Penetrating waves along spicules to the corona”という題目で口頭発表を行いました。本研究では、太陽の低層大気である光球・彩層からコロナまで、磁力線に沿って伝播するアルヴェン波の彩層における伝播過程に着目しました。アルヴェン波は、惑星間空間まで開いた磁力線が占めるコロナホールにおいて、高速太陽風の追加速とコロナ加熱のためのエネルギー源をコロナまで輸送すると考えられています。しかし、コロナ手前の遷移層で反射されてしまう波動のエネルギー量の評価が観測からなされていないという課題があり、光球・遷移層間の彩

層を伝播する波動がコロナへ運ぶエネルギー量は、観測から定量的に得られていないのが現状です。本研究では、彩層・遷移層下部のアルヴェン波を時空間分解が可能な「IRIS」のSi IV輝線による分光観測を用い波動ごとにエネルギーfluxを導出し、反射波・進行波の平均したエネルギーfluxを求ることで、コロナへ輸送されるエネルギーfluxを定量的に評価しました。結果として、分光スリットに沿って伝播する、視線方向に横揺れを示すような横波が示す輝線のドップラー速度の特徴的な時空間変動から120例の波束を検出することに成功しました。遷移層で反射された上昇波が下降波として観測されると仮定すると、遷移層を通過したアルヴェン波がコロナへ輸送するエネルギーfluxは $1.0 \times 10^5 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ となり、上昇波が輸送するエネルギーfluxの半分が、遷移層を透過してコロナへ輸送されることを初めて示しました。さらに、Si IVスペクトル形状の時間変動に着目すると、波束由来の速度成分は見積もられた速度振幅より2-3倍の大きさを持つ可能性があり、現在の値は過小評価されていることが示唆されました。速度振幅の2乗がエネルギーfluxの値に比例することから、本研究で求めた値はコロナ加

熱・太陽風加速に必要とされる  $5 \times 10^5 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Withbroe 1988) と同程度になる可能性があります。このように、本研究では、遷移層における反射を加味しても、彩層を伝播するアルヴェン波がコロナホールの太陽風加速・コロナ加熱のための十分なエネルギーfluxをコロナへ輸送していることを初めて観測的に実証しました。

私の発表は現地時間の25日午後1つ目のセッションに行われました。本発表のセッション前後や発表後の質疑応答において、太陽大気中の波動についての理論・観測研究が盛んなイギリスのノーザンブリア大学、アルヴェン波による太陽風形成の数値計算についての研究が盛んなベルギーのルーベン・カトリック大学、「IRIS」衛星の開発母体であるロッキード・マーティン太陽物理学研究所（以下、LMSAL）などの研究者の方々と活発な議論をすることができました。特に、ノーザンブリア大学のRichard Morton氏とJames McLaughlin氏からは、本研究で検出した遷移層で反射される前のアルヴェン波の速度振幅と、SDO衛星のコロナの撮像観測で計測できる、遷移層を通り抜けてコロナへ伝播した後の波動の速度振幅を、周波数に関して比較することで、遷移層での波動の反射率についてより詳細に知れるのではないかというご助言をいただきました。また、SDO衛星のコロナの撮像観測を用いて波動を検出する際に彼らが用いているNUWT (Northumbria University WaveTracking) コードも提供していただき、本研究成果を論文化した後の発展的研究のための足がかりを築くことができました。さらに、LMSALのBart De Pontieu氏とは、本研究で議論していたSi IV輝線スペクトル

の複数の視線方向速度成分の重ね合わせによるLOS速度の過小評価について意見を交わすことができました。複数速度成分の重ね合わせが存在する場合はスペクトルがガウス関数的な形状から逸脱しますが、そのようなスペクトルを機械的に判断するため、まずはスペクトル形状の非対称性を指標として使うとわかりやすいのではないか、というご助言をいただきました。

私が主に研究を進めている波動についての発表や、「ひので」・「IRIS」衛星に関連した発表以外にも、ここ数年で観測を本格的に開始し、多大な研究成果を出し始めている探査機「Solar Orbiter」や、口径4 mの太陽望遠鏡「DKIST」といった、日本の研究者の間ではまだ研究が進んでいない観測データを用いた発表も多く存在しました。そのため、ひとつひとつの講演が非常に刺激的で、自身の研究を進める上で視野が広がったと感じました。

私自身にとっても、国際学会における口頭発表を初めてするとともに、今まであまり議論をする機会のなかったイギリスの研究者の方と活発に議論ができた素晴らしい経験となりました。また、現在ノーザンブリア大学に在籍している国吉秀鷹氏には、海外での研究生活についての貴重な経験をお聞きするとともに、ノーザンブリア大学に所属している研究者の方とのコミュニケーションのきっかけ作りなどで手助けをしていただきました。改めて、ここに深く感謝の意を表します。最後になりますが、今回の渡航に際し多大な援助をしてくださった日本天文学会早川基金の関係者の皆さんには心からお礼申し上げます。本当にありがとうございました。

# 日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

## Hinode-18/IRIS-16 meeting

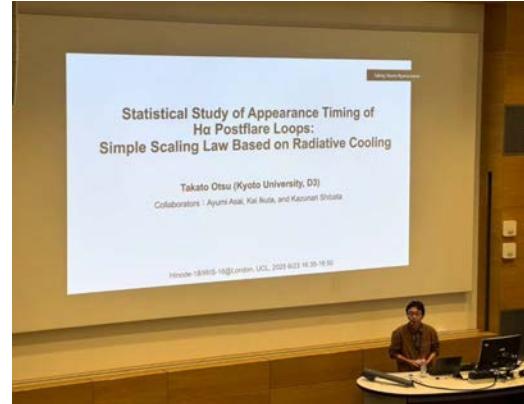
氏 名：大津天斗（京都大学理学研究科附属天文台 D3（渡航当時）

渡航先：イギリス ロンドン

期 間：2025年6月22-28日

本渡航では、イギリス／ロンドンにおいて2025年6月23-27日の期間で開催された“Hinode18-IRIS16 meeting”に参加した。Hinode-IRIS meetingは太陽物理に関する権威ある国際会議であり、私は今回が3回目の参加である。今回の開催では、太陽物理に関する最先端の研究のみならず、自身の研究と直接的に関わる太陽-恒星をつなぐような研究についても複数の講演が行われ、良い刺激を受けることができた。

私は本会議において、“Statistical Study of Appearance Timing of H $\alpha$  Postflare Loops: Simple Scaling Law Based on Radiative Cooling”という題目で口頭発表を行った。磁気的に活発な恒星では恒星フレアと呼ばれる突発的な増光現象がしばしば観測され、太陽フレアと同様のモデルで統一的に説明できると期待されている。恒星フレアにも太陽フレアで観測されるような多様な活動性が関与していることが観測的に示唆されており、その放射には様々な現象からの寄与が含まれていると考えられる。私は近年の研究において、ポストフレアループと呼ばれるループ状のプラズマからの放射がフレアの総H $\alpha$ 線放射に無視できない寄与を与えることを明らかにした(Otsu et al. 2024)。本研究では、太陽・恒星のポストフレアループについてより定量的な比較を可能にすることを目的として、太陽H $\alpha$ 線ポストフレアループの出現時刻の統計的な調査を行った。結果として、軟X線のピーク時刻からH $\alpha$ 線ポストフレアループ出現時刻の時間差 $\Delta t$ と軟X線ピークフラックス $F_X$ が負の相関を示すことを明らかにした。 $\Delta t$ と $F_X$ の



Hinode-18/IRIS-16 meetingにおける口頭発表の様子

関係は、電子密度 $n_e$ に対する放射冷却時間 $\tau_{\text{rad}}$ の依存性； $\tau_{\text{rad}} \propto n_e^{-1}$ 、および軟X線フラックスの依存性； $F_X \propto n_e^2$ から導かれる $\tau_{\text{rad}} \propto F_X^{-1/2}$ と整合的である。この結果は、H $\alpha$ 線ポストフレアループの出現時刻が放射冷却によって決定されることを示している。恒星フレア観測においても、軟X線ピークとH $\alpha$ 線での2つのピークが検出され、さらに軟X線フラックス $F_X$ とH $\alpha$ 線第2ピーク出現時刻までの時間差が上述のスケーリング則に従うなら、恒星フレアに伴う彩層温度のポストフレアループを検出したと結論づけることができる。H $\alpha$ 線ポストフレアループに関して、このような定量的スケーリング則を与えたのは本研究が初めてであり、太陽・恒星ポストフレアループの定量的比較の基礎となり得る。また、このスケーリング則の空間スケール依存性にも注目し、ポストフレアループの出現タイミングと軟X線観測から、恒星フレアの空間スケールを評価する方法も提案した。

本渡航では、口頭発表を通して本研究の内容を周知することを主目的としていた。実際に、講演中のみならず講演後にも本研究について多くの研

究者らと議論することができ、当初の目的を達成できたと言える。特に、アメリカ・ハワイ大学のJ. Reep氏からはフレアループに沿った下降流に由来する電子密度の減少について有益なコメントをいただいた。また、イギリス・ノーザンブリア大学のP. Antolin氏からは本研究を他の温度帯(e.g., HeII 304 Å: 10<sup>5</sup> K)へ拡張できるかについて議論を行った。近年、P. Antolin氏はSDO/AIAの304 Åデータから10<sup>5</sup> Kのプラズマ成分を抽出する手法を開発された(Antolin et al. 2024)。この手法をもとに本研究を他の波長に拡張できると考えている。今回の議論をもとに、今後の共同研究を推進していきたい。

また、本会議では私の専門である太陽-恒星の比較研究を行っている、ドイツ・ポツダム天体物理研究所のA. Pietrow氏、中国・南京大学のX. Liu氏、中国・北京大学のZ. Hou氏と議論を行うことができた。これほど多くの太陽-恒星の比較研究を推進する研究者らと同時に議論することができたのは、私にとって初めてのことであり、非

常によい刺激となった。私と同氏らは、全員が異なる観測装置を用いており、それらの観測装置をどのように組み合わせていくかが、本研究分野の今後の展開において鍵になるとを考えている。本会議で同氏らと対面で議論を行い、交流を深めることで、今後の国際協力を推進していく上での基盤を構築できたと確信している。

さらに、本会議において、かねてから交流のあった国吉秀鷹氏(学振PD: イギリス・ノーザンブリア大学)と再会することができた。国吉氏からは研究についてコメントをいただいたのみでなく、海外での研究生活について実際の体験談を伺うことができた。自身の今後のキャリアについて検討するうえでの重要な判断材料となる、貴重な機会であったと実感している。

以上のように、本渡航は、自身の研究の周知、同分野の研究者らとの交流、海外で活躍する日本人研究者との交流を通して、非常に実りあるものとなった。本渡航を援助していただいた早川幸男基金の関係者の方々へ心より感謝の意を表する。

**寄贈図書リスト**

理科年表 2026, 国立天文台編, ポケット版: A6

判・机上版: A5判, 1224ページ, ポケット版:  
1,500円+税・机上版: 3,200円+税, 丸善出版



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。ご投稿いただいた記事は、翌月初旬に一度校正をお願いいたします。

記事の投稿は、e-mailで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。

**研究助成**

**公益財団法人天文学振興財団**

**2026年度研究助成等応募**

当財団は、天文学の振興に寄与することを目的として、天文学に関連する分野の研究、教育および普及活動への必要な経費を助成いたします。

公益財団法人天文学振興財団 理事長 観山正見

1. 応募種目

[1] 国際研究支援事業

(1) 研究に対する助成

- ・対象: 天文学に関する研究に従事する若手研究者（申請者は原則35歳以下とする）
- ・助成: 研究経費（設備備品費、消耗品費、その他）1件あたり100万円以下

(2) 国際交流に対する助成

- ・対象: 天文学に関する海外での国際交流活動（1ヵ月以内）に2026年6月以降参加する研究者
- ・助成: 参加に要する往復航空運賃および滞在費

(3) 国際研究集会開催および参加に対する助成

- ①国際研究集会開催に対する助成
  - ・対象: 2026年7月以降に国内外において天文学に関する国際研究集会を開催する研究者グループ
  - ・助成: 1件あたり100万円以内。
- ②国際研究集会参加に対する助成
  - ・対象: 2026年6月以降に海外で開催される天文学に関する国際研究集会に参

加、発表する研究者

- ・助成: 派遣に要する往復航空運賃および滞在費

[2] 普及・啓発支援事業

(1) 普及・啓発活動に対する助成

- ・対象: 天文学および関連分野の普及・啓発事業を行う個人、団体
- ・助成: 事業経費（設備備品費、消耗品費、その他）1件あたり100万円以内。

(2) 「スター・ウィーク協力イベント」に対する助成

- ・対象: 「スター・ウィーク 2026」に協力する団体
- ・助成: 開催経費等

2. 申込期限:

・[1]-(1)・(2)・(3)-②, [2]-(1)は、2026年5月末日、9月末日、2027年1月末日の計3回

・[1]-(3)-①は、第1回が2026年5月末日（対象期間が2026年7月以降の開催）

第2回が2026年9月末日（対象期間が2026年11月以降の開催）

第3回が2027年1月末日（対象期間が2027年3月以降～2027年6月末日迄の開催）

・[2]-(2)は、2026年5月末日

3. 選考結果: 選考委員会で審査の上、採択の可否について各申込期限の約1ヵ月後に文書で通知します。

4. 報告: [1]-(1)は年度末、それ以外の助成は帰国後または開催後1ヵ月以内に報告書を提出すること。

5. 申請方法: 天文学振興財団ホームページ上にWordファイルとPDFファイルを掲載します。

申請書類は、一つのPDFファイルにまとめて電子メールに添付し、締切期限までに以下のメール

アドレス宛にお送りください。  
 shinsei@fpastron.jp  
 天文学振興財団より受理確認メールを返信いたします。

6. 問合せ先：公益財団法人天文学振興財団 事務局  
 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1  
 国立天文台内  
 Tel: 0422-34-8801  
 Fax: 0422-34-4053  
<http://www.fpastron.jp/>

### 賞の推薦

## 公益財団法人天文学振興財団 2026年度天文学業績表彰応募

当財団は、社会における天文学の振興に寄与するため、天文学に関連する分野での顕著な業績に対して表彰をいたします。

公益財団法人天文学振興財団 理事長 観山正見

### 1. 応募種目

#### [1] 古在由秀賞

- (1) 選考基準（以下のいずれかに該当する者）
- ①広い意味で理論天文研究において顕著な業績をあげた研究者
  - ②天文学の広報普及に貢献した者（アマチュアも含む）
  - ③広い意味で重力波天文学の貢献に顕著な業績をあげた研究者
  - ④国際的に天文学の推進（特にアジアの天文学）に貢献した者
  - ⑤天文学の推進に関して管理運営等において優れた業績をあげた者

#### (2) 対象

- ・当該年度当初において45歳以下であること（個人または研究グループの代表者）。また、応募は推薦に依るものといたしますが、他薦・自薦の別は問いません。

#### [2] 吉田庄一郎記念・ニコン天文学業績賞

- (1) 選考基準 以下のいずれかに該当する者
- ・新たな天体観測手法の研究・開発で顕著な業績をあげた者
  - ・天体観測技術の研究または開発分野で顕著な業績をあげた者
  - ・新たな天体観測手法・装置の研究・開発を

通じて産業界の発展に顕著な寄与をなした者

### (2) 対象

- ・当該年度当初において50歳以下であること（個人またはグループの代表者）。また、応募は推薦に依るものといたしますが、他薦・自薦の別は問いません。

2. 表彰件数：両賞とも原則として1件／年
3. 応募期限：両賞とも2026年10月末日
4. 選考結果：両賞とも選考委員会で審査の上、結果について2027年1月下旬に文書で通知します。
5. 申請方法：天文学振興財団ホームページ上にWordファイルとPDFファイルを掲載します。応募書類は、できるだけ一つのPDFファイルにまとめて電子メールに添付し、応募期限までに以下のメールアドレス宛にお送りください。

shinsei@fpastron.jp

天文学振興財団より受理確認メールを返信いたします。

6. 問合せ先：公益財団法人天文学振興財団 事務局  
 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1  
 国立天文台内  
 Tel: 0422-34-8801  
 Fax: 0422-34-4053  
<http://www.fpastron.jp/>

### 会務案内

## 第9期日本天文学会代議員選挙 開票結果報告

公益社団法人日本天文学会第9期代議員（任期2026-2029年度）の選挙の開票を2025年12月11日に行いました。有権者数2,377人のうち978人から投票があり（投票率41.1%）、投票総数9,780のうち、有効票数8,050、無効票（白票）数1,730でした。

代議員選挙施行細則第10条に基づき、定数24名の当選者を得票順に決定し、「当選しなかったもののうちで2番目までの得票のものを補欠とする」に従い、25-26番目の得票者2名を補欠として順位と共に定めました。

本選挙により選出された代議員および補欠代議員の方々は以下の通りです。

選挙管理委員会委員長 山崎 了

当選代議員			補欠代議員		
順位	氏名	得票数	順位	氏名	得票数
1	泉 拓磨	246	1	浅野勝晃	132
2	犬塚修一郎	243	2	東谷千比呂	122
3	野村英子	237			以上
4	井岡邦仁	223			
5	石川遼子	209			
6	大栗真宗	204			
7	坂井南美	202			
8	志達めぐみ	201			
9	鈴木 建	192			
10	河野孝太郎	188			
11	高橋慶太郎	187			
12	町田真美	184			
13	児玉忠恭	175			
14	仏坂健太	169			
15	平松正顕	163			
16	井上剛志	161			
16	富田賢吾	161			
18	久保真理子	157			
19	勝川行雄	144			
20	安井千香子	143			
21	栗田光樹夫	138			
22	下条圭美	136			
23	伊藤洋一	135			
23	吉田二美	135			

## 天文月報 119巻3月号 主な掲載予定記事

研究奨励賞：連星中性子星合体の物質放出と重元素合成【藤林翔】

ASTRO NEWS: X-RISM ニュース (7): X-RISM International Conference 2025 開催【山口弘悦・榎戸輝揚】

EUREKA: 同時代観測記録から見るダルトン極小期【早川尚志】

天球儀：福島県立白河旭高校での手作り電波望遠鏡を用いた中性水素21 cm輝線の全天観測と電波地図作成【根本靖彦・蓮見咲弥・橋本真実・菅野晃生・菊地佑真・小林優斗・塙田涼雅・百瀬宗武・浅山信一郎】

〈シリーズ〉天文学者たちの昭和：番外編・これまでの連載まとめ【高橋慶太郎】

編集委員：日下部展彦（編集長）、岡本丈典、小山翔子、志達めぐみ、鈴木大介、高橋葵、田中壱、谷川衝、鳥海森、中島亜紗美、信川久美子、橋本拓也、福島肇、藤澤幸太郎、宮武広直、宮本祐介、守屋亮  
 令和8年1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 日本文学会  
 三菱UFJ銀行 三鷹支店（普）4434400 公益社団法人 日本文学会  
 日本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  
 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 2026年（本誌掲載記事は無断転載を禁じます）