

XRISMニュース (4)

観測速報その3



藤田



佐藤



萩野

藤田 裕¹, 佐藤 浩介²,
萩野 浩一³, XRISMチーム

〈¹ 東京都立大学大学院理学研究科 物理学専攻 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1〉

〈² 京都産業大学理学部 宇宙物理・気象学科 〒603-8555 京都府京都市北区上賀茂本山〉

〈³ 東京大学大学院理学研究科 物理学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

XRISMによるケンタウルス銀河団と活動銀河核PDS 456の観測成果が、科学雑誌Natureに掲載されました！観測直後、研究チームの間には大きな興奮と驚き、そして予想外の発見に対する戸惑いも広がりました。今回は、これらの観測成果を舞台裏の研究者たちのリアルな声も含めてお届けします。

ケンタウルス座銀河団—XRISMが捉えた「ガスの揺れ」—

ケンタウルス座銀河団は近傍の明るい銀河団である。X線天文研究者にとってはおなじみの天体で、これまで数多くの観測が行われてきた。しかし、XRISMの高分解能X線分光器Resolveが捉えた姿は、銀河団という天体の奥深さを示すものだった。

ケンタウルス座銀河団の観測は、2023年の年末から2024年の年始にかけて行われた。XRISMの性能検証期間中のことである。我々の主な興味は、銀河団中心部の高温ガス（銀河団ガス）の物理状態を、これまでにない高い分光能力で調べることにあった。

観測直後の初期解析（quick look）では、重元素の輝線が非常に細く観測されていることがわかった。これは銀河団ガスの乱流速度が予想以上に小さいことを示唆していた。「これは面白い結果になりそうだ」と期待が高まった。しかし、ここからが忍耐の始まりだった。XRISMの精密なデータ較正には予想以上に時間がかかり、詳細な解析に必要なデータの下処理がなかなか完了しない。毎日のようにデータの到着を待ちわびる日々が続いた。新しい衛星の初期運用期間特有の、もどかしい時間だった。

ようやくデータが届き、本格的な解析を開始すると、確かに乱流速度は小さいことが確認された。銀河団中心部でも120 km/s以下という値は、ひとみ衛星のペルセウス座銀河団の観測よりもかなり小さく、それだけでも重要な発見だった。しかし、さらに驚くべきことに、銀河団ガスの輝線がすべて青方偏移していたのである。しかも、その偏移量は一様ではなく、中心部では130 km/s、南西部では310 km/sと、明確な空間勾配を持っていた。これは銀河団ガス全体が回転しつつ地球に向かって運動していることを意味していた（図1）。この結果を見たとき、正直なところ困惑した。銀河団の中心付近では、ガスは銀河団の重力ポテンシャルの底でほぼ静止しているはず、というのが我々の先入観だったからである。「解析にミスがあるのではないか」と何度もチェックを重ねたが、結果は変わらなかった。

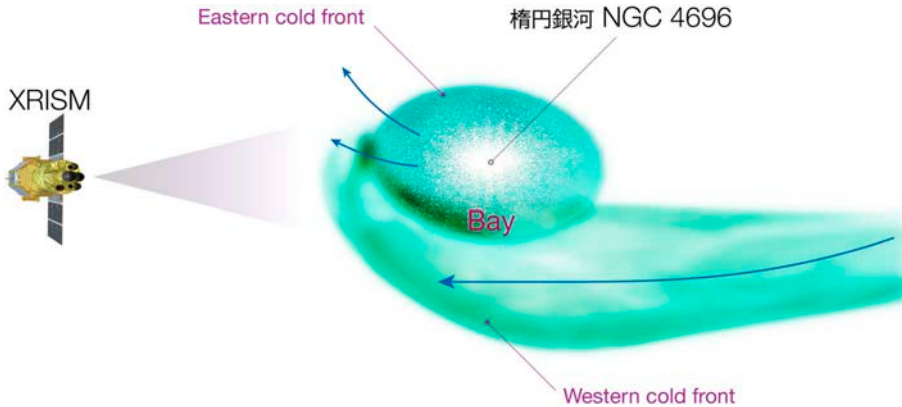


図1 観測された高温ガスの流れ。ケンタウルス座銀河団の中心に位置しているのがNGC 4696銀河。(クレジット: JAXA)

落ち着いて結果を再検討すると、一つの可能性が浮かんだ。過去の銀河団衝突に伴うガスの振動運動、いわゆる「sloshing (スロッシング)」である。銀河団は宇宙の構造形成の中で、小さな銀河団同士が衝突・合体を繰り返して成長してきた。その過程で、銀河団ガスは重力ポテンシャルの中で複雑な振動運動を起こす。ちょうど、グラスの中の水を揺らすと水面が波打つように、銀河団ガスも「揺れる」のである。実際、ケンタウルス座銀河団は主成分 (Cen 30) と副成分 (Cen 45) から構成されており、完全に緩和した状態にはない。過去の衝突の記憶が、まだガスの運動として残っているのかもしれない。

我々の観測結果を既存のコンピューターシミュレーションと比較してみると、見事に一致することがわかった。sloshingによって生じるガス運動は、確かに我々が観測したような速度場を作り出すことができる。さらに興味深いことに、この大規模なガス運動は銀河団中心部の冷却問題を解決する一つの鍵となる可能性が見えてきた。中心の活動銀河核 (AGN) が放出したエネルギーを、sloshingによって効率的に周囲に運搬し、ガスの冷却を防いでいるのである。

一方で、予想外だったのはAGNの影響の小ささである。多くの研究者は、銀河団中心のAGNが強力なジェットを放出し、周囲のガスに激しい乱流を引き起こすと考えていた。しかし、我々の観測では、AGN近傍でも乱流速度に顕著な増加は見られなかった。どうやらケンタウルス座銀河団では、AGNよりもsloshingの方が銀河団ガスの熱的平衡により重要な役割を果たしているようである。これは従来の理論的予想とは異なる結果で、銀河団進化の理解に新たな視点をもたらすものだった。

結果を論文にまとめ、Nature誌に投稿することにした。銀河団に関するXRISMの最初の重要な科学成果として、できるだけ多くの人に知ってもらいたいと考えたからである。査読プロセスは予想以上にスムーズだった。3人のレフェリー全員が我々の結果に好意的で、建設的なコメントをくれた。観測データの質の高さと、解釈の妥当性が評価されたのだと思う。

論文[1]の受理後、記者会見を開催した。その結果、NHKの全国ニュースをはじめ、多くのメディアで報道された。「銀河団のガスが揺れている」という表現で紹介されることが多く、一般の方々にも関心を持っていただけたようである。この発見は、銀河団の動力学の新たな章の始まりかもしれない。XRISMの高い分光能力があってこそ可能になった観測であり、今後の銀河団研究の方向性に大きな影響を与えるものと期待している。今後もXRISMは多くの銀河団を観測し、宇宙の構造形成の謎に迫っていくだろう。次はどのような「予想外」が待っているのか、今から楽しみである。

活動銀河核 PDS 456—精密分光が明らかにした超高速アウトフローの予想外の姿—

2024年4月20日（土）の朝7時過ぎ、活動銀河核（AGN）“PDS 456”のXRISM観測データのパイプライン処理完了を告げるメールが送られてきた。私はすぐにデータのダウンロードと解析処理を走らせ、期待と不安を抱きながら結果の出力を待った。正直なところ不安の方が大きかった。PDS 456は強力な超高速アウトフロー（UFO）による約 $0.3c$ で青方偏移したFe XXV/XXVIの吸収線が約8 keV（AGN静止系では約9.5 keV）に明瞭に観測されるため、UFOの物理や銀河進化への影響を調べる上で最適な天体である。一方で、 $z=0.184$ と比較的遠いため、NGC 4151など他の初期観測天体と比べると1桁近く暗い。当時はバックグラウンド推定用データベースもなく、バックグラウンドが想定よりも高ければPDS 456の吸収線がまともに観測できない可能性すらあった。

そんな不安を抱きながら、解析結果のX線スペクトルを見た第一印象は、「なんだこれは？」という困惑だった。8 keV付近に期待していたような強い吸収線は見られない。一方で、バックグラウンドの影響を強く受けたような顕著なスペクトルの歪みもない。困惑しながらも簡単なモデルで連続成分をフィットし、図2のようなUFOによる吸収成分のスペクトルを表示した段階で、ようやくXRISMの観測データが予想外の結果を示していることに気づいた。吸収線が見えないのではなく、今までは広がった1つの吸収線に見えていた構造の代わりに、いくつもの細い吸収線が見えていたのである。私は大急ぎで共同研究チームに第一報を渡し、XRISMによる予想外の発見を共有した。その後のチームメンバーの反応は凄まじく、その興奮のままに多数のメンバーが怒涛の勢いで解析を進めていき、約3ヵ月後には膨大な量の解析結果を含むNature論文のドラフトができあがった。ちなみに、このNature論文の責任著者の一人である福岡教育大の水本岬希氏は、最初にこのスペクトルを見た瞬間に、興奮のあまり部屋の中を歩き回ったらしい。

XRISMが発見した複雑な吸収線構造は、UFOの物質分布が一様ではなく、非常に非一様なclumpy構造であることを示している。より詳細には、視線方向に少なくとも5つのclumpが存在し、輝線強度からこのようなclumpがほぼ全方向に吹き出していると示唆される。さらに、このclumpy構造を考慮すると、UFOの運動エネルギーは少なくともEddington限界以上の極めて大きな値となり、PDS 456の銀河規模のアウトフローと比べても1000倍以上も大きい。これは、従来の単純なエネルギー駆動型/運動量駆動型のアウトフローモデルのどちらも整合しない結果であり、新たな理論モデルが必要となる。今後のXRISMを用いた研究によって、UFOの物理の理解が飛躍的に深まり、UFOのエネルギーの行き先やUFOの銀河進化への影響なども明らかになってくるのではないかと期待している。

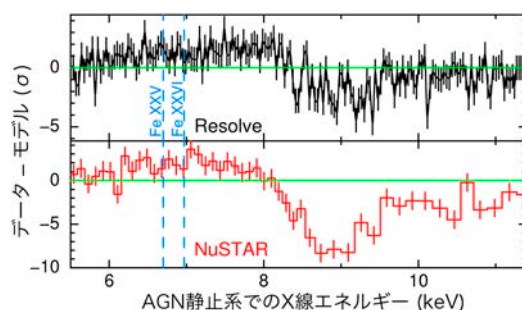


図2 XRISMの軟X線分光装置ResolveによるPDS 456の吸収線スペクトル（上）と、従来の観測装置（NuSTAR; 下）の同時観測結果との比較（[2]を一部改変）。

より詳細な観測結果については、以下の出版済論文[1, 2]にまとめられています。ご参照ください。

[1] XRISM collaboration, 2025, Nature, 638, 365

[2] XRISM collaboration, 2025, Nature, 641, 1132

多色同時撮像カメラ MuSCAT シリーズ 10年の歩み

成 田 憲 保^{1,2}

〈¹ 東京大学大学院総合文化研究科附属先進科学研究機構 〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1〉

〈² 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〉

e-mail: ¹narita@g.ecc.u-tokyo.ac.jp



MuSCATシリーズは、世界各地の4台の1.5-2 m望遠鏡に搭載された、3色ないし4色の同時撮像装置である。MuSCATシリーズは、主に系外惑星のトランジットを多色で同時にかつ高精度に観測することを目的として開発された。本稿ではMuSCATシリーズの開発の歴史と仕様、主なサイエンスと観測成果について、この10年の歩みとこれからの展望を紹介する。

1. はじめに

太陽以外の恒星を公転する太陽系外惑星（以下、系外惑星）のうち、惑星の軌道が主星の前面を通過する現象をトランジットと呼び、トランジットを起こす惑星をトランジット惑星と呼ぶ^{*1}。

2009年のNASAのケプラー望遠鏡の打ち上げ以降、トランジットによって新しい系外惑星を探索するトランジットサーベイが系外惑星発見の主流の方法となり、2025年現在までに発見された6,000個近くの系外惑星のうち、4分の3程度がトランジット惑星となっている。トランジット惑星の最大の特長は、半径・質量・密度・大気・軌道などの惑星のさまざまな性質を調べる、いわゆる「特徴付け」が詳しくできることである。

我々は多色で同時に高精度なトランジット観測

を行うことを目的として、これまでに世界各地の4台の1.5-2 m望遠鏡用に多色同時撮像カメラMuSCATシリーズを開発し、新たなトランジット惑星の発見と特徴付けに取り組んでいる。本稿では、これまでのMuSCATシリーズの大まかな開発の歴史について前半で紹介し、後半ではMuSCATシリーズの主なサイエンスと観測成果、そしてこれからの展望について紹介したい。

2. MuSCATシリーズの開発

2.1 MuSCATができるまで

MuSCATのような多色同時撮像カメラが欲しいと考える最初のきっかけとなったのは、2009年に赤色矮星周りのサブネプチューン^{*2}GJ 1214 b^[3]が発見されたことだった。この惑星の大きさはおよそ2.7地球半径で、主星が太陽系から約13パーセクとかなり近傍にあるため、トランジット観測

^{*1} トランジット惑星についての基本的な解説は、2012年1月の筆者の天文月報記事をご参照いただきたい^[1]。

^{*2} 発見論文のタイトルを含めて当時は「スーパーアース」と呼ばれていたが、2017年にFultonらによって惑星の半径ギャップ^[2]（系外惑星の半径のヒストグラムで1.5-2地球半径のところに存在頻度の谷間があり、水素大気を失った惑星と保持している惑星の境界と認識されている）が発見されて以降、2-4地球半径の惑星はスーパーアースではなくサブネプチューンと呼ぶのが定着している。

によって小型系外惑星（以下、小型惑星）の大気の特徴付けができる最初のターゲットとして注目されていた。特に、広がった水素大気によるレイリー散乱の兆候（波長が $1\mu\text{m}$ 以下の領域で、短波長側に行くほどトランジットが深くなる）が観測されるかどうかというのが世界的に注目を集める観測テーマとなり、筆者らもすばる望遠鏡のSuprime-CamやFOCAS、南アフリカのIRSF1.4 m望遠鏡を用いてGJ 1214 bのトランジット観測に取り組んでいた [4, 5]。

そして、2012年9月25日に当時岡山天体物理観測所の近くにあった遙照山ホテルで開催された研究会でGJ 1214 bの観測結果を発表し、今後も小型惑星の発見が増えると期待されることを考えると、可視から近赤外にかけて多色で同時にトランジットを観測できるような観測装置が欲しいという提案を行った。その後の議論を経て、岡山天体物理観測所の188 cm望遠鏡用に新しい観測装置を開発するため、科研費を提案することとなった。

その結果、2013年度に科研費・基盤研究（A）と、追加で井上リサーチアワードの研究費を獲得することができ、3色同時撮像カメラの開発予算を確保することができた。この観測装置は、岡山県の名産と元々の開発目的にちなんでMuSCAT（Multicolor Simultaneous Camera for studying Atmospheres of Transiting exoplanets）と名付けられた。MuSCATは2014年12月24日にファーストライトを迎え、2015年から岡山天体物理観測所の共同利用観測に供されることとなった。

2.2 MuSCATからMuSCAT2へ

MuSCATが完成してから我々がまず取り組んだのは、MuSCATの性能と有用性の実証である。

まず既知のトランジット惑星であるHAT-P-14 bのトランジットを観測し、 $V=10$ 等の天体に対して5分ごとにビニングしたデータで、残差の二乗平均平方根（rms）が0.03%を切るレベルの高精度測光が、3色同時に達成できることを実証した [6]。また、2014年からケプラー望遠鏡の第2

期のトランジットサーベイ計画であるK2が行われ、新しいトランジット惑星の候補が報告されていたため、そうした候補の追観測（3.1節で紹介する発見確認観測）にも取り組んだ。すると、トランジット惑星候補の減光をMuSCATで1回観測するだけで、本物のトランジット惑星と食連星由来の偽検出とを効率的に判別できることを確認できた。そして、2015年11月にアメリカ・サンタバーバラで開催された国際会議K2SciConでこうしたMuSCATの初期成果のポスター発表を行った。

そこでMuSCATに強く興味を持ってくれたのが当時カナリア天体物理研究所（IAC）の研究部長をしていたEnric Pallé氏であった。IACがテネリフェ島のティデ観測所で運用しているあまり使われていない1.52 m望遠鏡があり、そこにMuSCATのような装置が欲しいと言うのである。

筆者とPallé氏は共に2013年に採択されたNASAのTransiting Exoplanet Survey Satellite（TESS）の海外共同研究者として計画に参加していたため、TESSの時代にMuSCATのような装置があれば新しいトランジット惑星の発見確認で世界をリードすることができるということで考えが一致した。

このことをアストロバイオロジーセンターの田村元秀センター長と相談したところ、ありがたいことに4色同時撮像カメラに必要な開発予算をアストロバイオロジーセンターから出していただくこととなった。その後ティデ観測所の現地調査と観測時間配分などの諸条件の交渉をIACで行なった上で、2016年12月にアストロバイオロジーセンターとIACの間でMuSCAT2に関する国際共同研究の覚書が締結された。その後MuSCAT2の開発は順調に進み、2017年8月24日にティデ観測所でファーストライトを迎えることができた。

2.3 MuSCAT2からMuSCAT3へ

時差の離れた日本とスペインの望遠鏡にMuSCATシリーズを搭載することができたおかげ

げで、北半球で観測可能なトランジットが大きく増えた。こうなると、後はアメリカのどこかの望遠鏡に3台目を搭載できれば北半球にMuSCATシリーズのネットワークができるのに、と思わざるを得ない。

そしてそれが実現できるチャンスは意外と早く訪れた。2018年6月にMuSCAT3の開発計画を含んだ新学術領域研究の計画研究（研究代表者：生駒大洋氏）が採択されたのである。計画研究の予算に加えてアストロバイオロジーセンターからの装置開発予算と筆者が獲得していたJSTさきがけの予算を加えることで4色同時撮像カメラの開発の目処が立ち、アメリカの複数の研究機関の研究者らと望遠鏡への装置搭載の交渉を行うこととなった。

その中で、当初最も有力な候補だったのはハーバード大学がアリゾナ州・ホプキンス山で運用しているFred Lawrence Whipple Observatory (FLWO)の1.2 m望遠鏡である。この望遠鏡については、現地調査や装置設計の段階まで進んだものの、先方の事情により新装置の受入対応が困難になったとのことで、2019年5月4日にハーバード大学から受け入れできないという返事が届き、残念ながら振り出しに戻ってしまった。

そんな時、まさに渡りに船という出来事が起きた。ハーバード大学に装置受け入れを断られてから6日後の2019年5月10日にIACのEnric Palle氏からメールが届いた。曰く、Las Cumbres Observatory (LCO)の創設者であるWayne Rosing氏がテイデ観測所に1 m望遠鏡を設置するため現地視察に来ていて、案内したついでにMuSCAT2を見せたところ、LCOがマウイ島ハレアカラ観測所で運用している2 m望遠鏡にMuSCAT3を搭載することに興味を持ってくれたというのである。

そこからは急ピッチでLCOとの交渉が進んだ。幸いだったのは、FLWOの1.2 m望遠鏡用に準備していた光学設計がある程度LCOの2 m望遠鏡に流用できることがわかり、装置の設計と仕様を

早い段階で見通せたことである。2019年7月中旬にはLCO本部を訪問して2日間にわたってLCOの執行部に装置の説明を行い、8月上旬にはハレアカラ観測所の現地調査を行い、LCO側との調整を行いながら8月下旬までに装置の設計と仕様をほぼ固めることができた。

そして、9月7日にはLCOのLisa Storrie-Lombardi所長からMuSCAT3を受け入れるという連絡をいただいた。その後は観測時間配分などの諸条件の交渉をLCO側と行い、2019年12月にはアストロバイオロジーセンターとLCOの間でMuSCAT3に関する国際共同研究の覚書が締結された。

2020年に入るとコロナ禍が始まり、開発には大きな遅れは出なかったものの、ファーストライトのために現地に渡航できないという事態が起こってしまった。しかし、入念にファーストライトマニュアルを作成し、LCOの現地スタッフとハワイ大学の研究者の協力を得ることができたため、MuSCAT3は2020年9月28日にファーストライトを迎えることができた。

2.4 MuSCAT3からMuSCAT4へ

MuSCAT3の完成によって、北半球の時差の離れた3台の望遠鏡にMuSCATシリーズを搭載することができ、北天のターゲットはMuSCATシリーズで効率的に観測できるようになった。しかし、南天のターゲットへのアクセスはまだ限られていて、南半球の望遠鏡にもMuSCATシリーズを開発したいと考えていた。

一方、LCOはハレアカラ観測所で運用しているものと同じ型の2 m望遠鏡をオーストラリアのサイディングスプリング観測所でも運用していて、LCO側もその2 m望遠鏡用にMuSCAT4を開発することに意欲を持っていた。

MuSCAT4の開発が本格的に動き出したのは、2022年に入ってからである。2022年3月12日にLCOのLisa Storrie-Lombardi所長から連絡があり、アメリカのHeising-Simons財団からMuSCAT4の

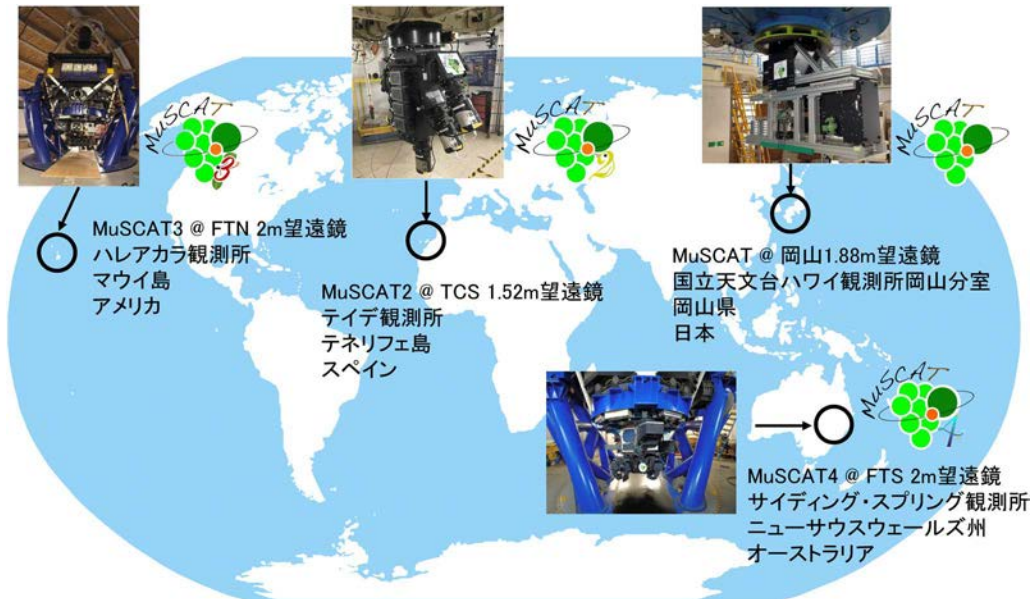


図1 MuSCATシリーズの写真と世界の中での配置.

開発予算の助成提案を出すよう招待を受けたという知らせをいただいた。それからLCOと集中的にやり取りをして、3月末までに開発に必要なコストと開発スケジュールなどの提案内容を準備し、LCOは4月1日に助成提案を提出した。そして5月10日には、Lisa Storrie-Lombardi 所長から助成が認められたという連絡をいただいた^{*3}。

基本的にMuSCAT4はMuSCAT3のコピーであるため、光学設計には特に変更すべきところがないものの、夏の気温は特に高温になることと、常にダストが多いオーストラリアの環境を考慮し、CCDカメラは空冷式ではなく水冷式を採用することとなった。このため、これまで経験がなかった水冷CCDカメラで4台同時の動作試験を行うなど試験項目は増えたものの、開発自体はほぼスケジュール通りに順調に進み、MuSCAT4は2023年10月6日にファーストライトを迎えた^{*4}。

以上のようにして、約10年をかけて4台のMuSCATシリーズが完成し、日々これらを用いた観測を継続している。図1は4台のMuSCATシリーズの写真と所在地を示している。図2はMuSCATシリーズで観測されたトランジットライトカーブの例を示している。

2.5 MuSCATシリーズの仕様

表1はMuSCATシリーズの基本的仕様をまとめたものである。MuSCATシリーズの共通した装置設計思想は以下のようなものである。

- ・なるべく広視野であることが望ましい。
- ・なるべく多くの波長帯で同時に観測したい。
- ・各波長帯はなるべく高い効率で観測したい。

これらの希望を満たすため、まずなるべく広視野となるようF変換を施し、光路上にダイクロイックミラーを置くことで、概ねSDSSシステムの g, r, i, z_s バンドに相当する400–550 nm, 550–

^{*3} 日本の競争的資金では経験したことがない予算獲得のスピード感到に驚いた。

^{*4} 余談だが、ファーストライト観測で訪れたサイディングスプリング観測所では、初めて見た南半球の夜空に驚嘆するとともに、観測所内を普通にカンガルーが跳ね回っている光景にカルチャーショックを受けた。

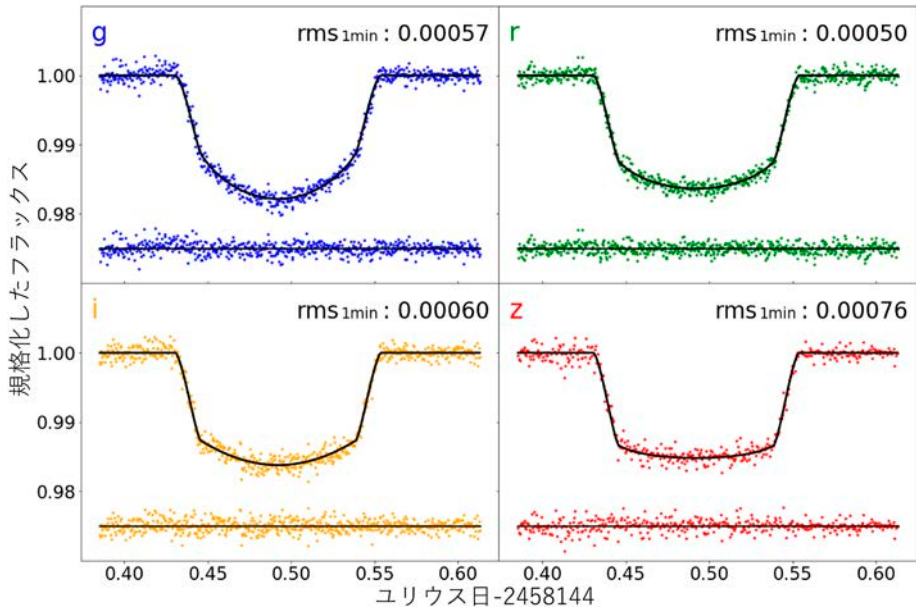


図2 MuSCAT2で観測した既知のトランジット惑星WASP-12 bのライトカーブ。MuSCAT2の装置論文 [8] の図13を改変。左上、右上、左下、右下のパネルがそれぞれ g, r, i, z バンドに対応している。各パネルの右上には1分ごとにビンニングした残差の二乗平均平方根 (rms) の値を示している。

表1 MuSCATシリーズの基本的仕様

装置名	MuSCAT [7]	MuSCAT2 [8]	MuSCAT3 [9]	MuSCAT4 [9]
設置場所	国立天文台 ハワイ観測所岡山分室	IAC ティデ観測所	LCO ハレアカラ観測所	LCO サイディング スプリング観測所
望遠鏡口径 (m)	1.88	1.52	2.0	2.0
座標	北緯34度34分37秒 東経133度35分38秒	北緯28度18分2秒 西経16度30分39秒	北緯20度42分27秒 西経156度15分22秒	南緯31度16分24秒 東経149度4分16秒
標高 (m)	372	2387	3055	1116
観測波長帯 (バンド)	g, r, z_s	g, r, i, z_s	g, r, i, z_s	g, r, i, z_s
観測視野 (分角)	6.1	7.4	9.1	9.1
ピクセルスケール (秒角)	0.36	0.44	0.27	0.27
ファーストライト日	2014年12月24日	2017年8月24日	2020年9月28日	2023年10月6日

700 nm, 700–820 nm, 820–920 nm の4つの波長帯 (MuSCATの場合は400–550 nm, 550–700 nm, 700–920 nmの3つの波長帯) に光を分け、高いスループットを持つ各バンドの天文観測用フィルターを特注し、各バンドで最も量子効率の高いCCDカメラを採用した。なお、トランジット観

測では測光精度を高めるためにわざとデフォーカス (ピンボケ) して観測することが多いため、結像性能については観測地のシーイングに収まる程度に緩めになっている。また、望遠鏡の焦点前にダイクロイックミラーを配置するスペースがない場合には、オフナーリレー光学系を追加して光路

長を延ばしている。このように望遠鏡ごとに装置を最適化した設計となっているため、MuSCAT3/4は同一の光学設計だが、MuSCAT・MuSCAT2・MuSCAT3/4は全く異なったものとなっている。

なお、フィルターについては、MuSCATとMuSCAT2は手動、MuSCAT3/4は電動・遠隔で別のフィルターとの交換が可能となっている。MuSCATの z_s バンドフィルターは i バンドフィルターに変更が可能な他、MuSCAT2/3/4では各バンドでナローバンドフィルター [10, 11] (g, i, z_s バンドでは地球大気吸収線を避けて波長帯を絞ったもの、 r バンドではナトリウムD線に特化したもの)との交換が可能となっている。

3. MuSCATシリーズのサイエンス

3.1 新たなトランジット惑星の発見確認

ここからは、MuSCATシリーズの主なサイエンスを得られた観測成果と共に紹介していきたい。

MuSCATの開発を科研費に提案した際の当初の研究目的は、MuSCATという名前の中にAtmospheresのAが入っているように、トランジット惑星の大気の特徴付けが考えられていた。一方、IACのEnric Pallé氏らとMuSCAT2の開発をすることとなり、アストロバイオロジーセンターからMuSCAT2の開発予算を出していただくこととなってからは、来るTESSの時代を見据えて(ハビタブルゾーンにある地球型惑星のような)トランジット惑星をいち早く発見するという新たなトランジット惑星の発見確認も主要な研究目的の一つとなった。

では発見確認とは何かというと、トランジットサーベイで発見されたトランジット惑星候補が本物のトランジット惑星であることを確認する(惑星以外の可能性を排除する)プロセスのことであ

る。なぜこのような確認プロセスが必要になるのかというと、トランジットサーベイで発見されたトランジット惑星候補の中にはかなりの割合で惑星ではないものが混入していて、すべてが本物のトランジット惑星であるとは限らないためである。

トランジットサーベイは多数の恒星の明るさを同時に観測して、周期的に減光するシグナルをもとにトランジット惑星候補を発見している。しかし、周期的な減光という現象は食連星でも起きている。通常は減光の深さ(減光率)から明らかに惑星ではないものは判別がつくものの、光球面の端をかすめるような減光率が小さい食連星の場合はそれだけでは見分けがつかない。また、トランジットサーベイは超広視野で行われることが多く、検出器の1ピクセルがカバーする視野(ピクセルスケール)が大きくなってしまう。すると近くにある食連星がターゲットの恒星と同じピクセルに混入した場合(重力的に束縛された階層的三重連星や、たまたま同じ方向にある恒星と背景の食連星の場合などがある)、トータルで見た減光率は惑星と見分けがつかない深さになってしまうことがある。これ以外にも、装置に起因する実在しない減光シグナル(false alarm)という場合もあり、トランジット惑星候補は追観測をしないと本物のトランジット惑星かどうかはわからない^{*5}。

そこで発見されたトランジット惑星候補に対して最初に行われるのが、減光が確かにそのターゲットで起きていて、その減光率が大きな波長依存性を示していないかを確認するための多色での測光観測である。なぜ多色での測光観測が発見確認につながるかというと、トランジット惑星の場合は恒星のように自分自身では光っていないため、(惑星大気に起因する小さな効果を見逃さず)基本的には隠した面積の割合だけ減光するの

^{*5} TESSでは減光の形状なども含めた情報から、機械学習を用いたvettingというプロセスで惑星候補を絞っているが、それでも発表されたトランジット惑星候補(TESS Objects of Interest: TOI)の半数程度は惑星ではないのが現状である。

で、どの波長で観測しても減光率に大きな波長依存性はない。一方、食連星の場合は減光の最中に前面を通過している恒星の光のスペクトルが残るため、減光率に大きな波長依存性が生じる。そのため、多色での測光観測によって食連星の混入を見破ることができる。ただし、両者がほぼ同一のスペクトルを持つ食連星では減光に波長依存性が生じないため、高分散分光観測で分光連星でないかの確認や、高空間分解能の撮像観測で近くに混入している天体がないかといった発見確認観測も追加が必要となる。

以上のような発見確認観測により惑星以外の可能性が統計的に排除されれば、その惑星候補は惑星として認められる（英語ではvalidation^{*6}という）。

この多色での測光観測において、単色の撮像装置を使うと複数回のトランジットを観測しなくてはならないものの、MuSCATシリーズを使えば一度の減光の観測で済み、さらに世界の4台の望遠鏡に搭載しているため効率的に発見確認を進めることができる。このことが世界の他のチームにはない特長となっている。

MuSCATシリーズでは2024年までに500個以上のトランジット惑星候補の発見確認観測を実施しており、そのデータは100個以上の新しいトランジット惑星の発見につながっている。以下ではその中から主要な観測成果を紹介する。

3.1.1 赤色矮星周りのトランジット惑星

2018年4月のTESSの打ち上げ前まで、赤色矮星を公転するトランジット惑星の発見数は少なく、赤色矮星周りの惑星の公転周期と半径の分布がどのようになっているのかや、スーパーアースやサブネプチューンと呼ばれる小型惑星の質量と半径の関係がどのようになっているのか、赤色矮星周りの小型惑星がどのような大気を持つのかな

どの観測的知見がほとんど得られていなかった。赤色矮星周りのトランジット惑星は、TESSによって発見数が急激に増え、発見された惑星の質量や大気などの特徴付けの追観測が行われ、その性質の理解が大きく進んできた。

MuSCATシリーズは、TESSで発見された赤色矮星周りのトランジット惑星候補の発見確認において、世界の中で大きな役割を果たしてきた。MuSCATチームのメンバーは、TESSの公式追観測プログラムであるTESS Follow-up Observing Programのサブグループ1 (TFOP-SG1)に参加し、MuSCATシリーズでの多数の観測結果を報告してきた。その結果、2024年までに発見確認に成功した赤色矮星周りの新たなトランジット惑星の数は50個を超える。

このうち、アストロバイオロジーセンターで開発された装置として最も重要な成果の一つは、赤色矮星LP 890-9 (別名SPECULOOS-2)を公転する2つのスーパーアースの発見だろう。主星のLP 890-9は太陽系から32パーセクの距離にある活動性の低い有効温度2850 Kの赤色矮星で、発見された2つのスーパーアースのうち外側を公転するLP 890-9 c (SPECULOOS-2 c)は、半径約1.37地球半径で岩石主体の惑星と考えられ、公転周期は約8.46日、惑星が主星から受け取る日射量は地球の約0.9倍であり、(楽観的なものより条件が厳しい)保守的なハビタブルゾーン内に位置していた[12]。これによりアストロバイオロジーセンターの目標の一つとも言える、赤色矮星周りのハビタブル惑星の発見を達成することができた。

MuSCATシリーズで発見確認された赤色矮星周りのトランジット惑星50個以上のうち、30個程度については筆者が研究代表者として提案したすばる望遠鏡IRDのインテンシブ観測により質

^{*6} 余談だが、最終的に高精度な視線速度測定により惑星質量の決定まで行われると、惑星としてconfirmationされたという。惑星以外の可能性が統計的に排除され、質量は決定されていない段階で発表された惑星発見論文をvalidation論文、質量の決定まで行われた惑星発見論文をconfirmation論文、validationされた後で追加で惑星質量を決定した論文はmass determination論文のように呼ばれている。

量の制限・決定も行なった。こうした観測により、岩石主体の地球型惑星と考えられる惑星^{*7}やJWSTでの大気の観測に適していると考えられるサブネプチューン [13, 14] などを多く発見することができた。

図3はTESS打ち上げ前の2017年末までと、TESS打ち上げ後を含めた2025年現在までに発見された赤色矮星周りのトランジット惑星の公転周期と半径の分布である。両者を見比べると、TESSの打ち上げ後に赤色矮星周りのトランジット惑星が多数発見されてきたことで、赤色矮星周りでもサブネプチューンやスーパーアース、地球サイズ程度の惑星が太陽型星周りと同様に豊富に存在することがわかった。これは赤色矮星周りの惑星形成を説明する従来の理論モデルの予言とも一致している。

しかし、TESSの打ち上げ前には存在が知られていなかった惑星として、赤色矮星周りにも短周期巨大惑星^{*8}の集団があることが明らかとなった。太陽型星周りでは以前から短周期巨大惑星（いわゆるホットジュピター）の存在は知られていたが、赤色矮星周りでは短周期巨大惑星はほとんど形成されないと理論では予言されてきたため、この観測的知見は惑星形成理論に一石を投じるものであると言える。MuSCATシリーズはこうした新しい惑星の集団の発見にも大きく貢献してきた [15-20]。

TESSによって明らかとなった赤色矮星周りの惑星の公転周期と半径の分布は、惑星形成理論がこれから説明すべき観測的知見として重要なものとなるだろう。

3.1.2 レアなトランジット惑星

MuSCATシリーズが発見確認観測を行ったトランジット惑星の中には、滅多に存在しないレア

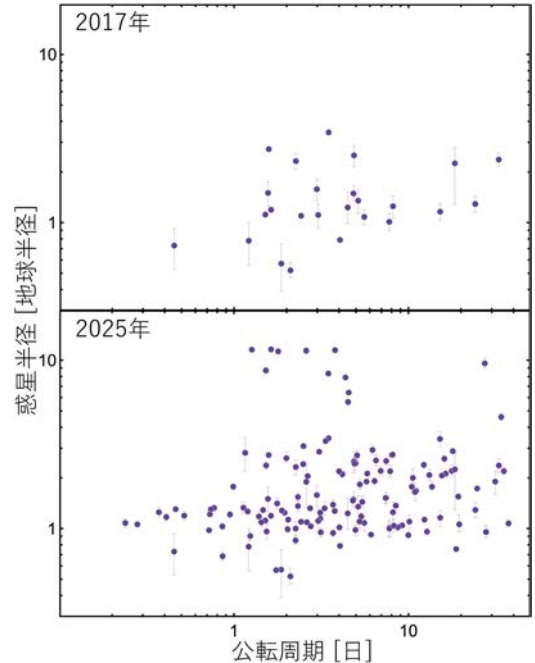


図3 発見された赤色矮星（ここでは有効温度2500–3500 Kの主星）周りのトランジット惑星の公転周期と半径の分布。上パネルは2017年末まで、下パネルは2025年5月現在までに発見されたものをプロットしている。NASA Exoplanet Archiveのデータをもとに作成。

なトランジット惑星も見つかっている。その中から2つの成果を紹介しよう。

一つは、太陽系から約25パーセクの距離にある白色矮星WD 1856+534（以下、WD 1856）を周期1.4日で公転する天体WD 1856 b [21] である。その天体の半径はほぼ木星と同じで、質量への制限は木星の約14倍以下となっているため、短周期の巨大惑星あるいは褐色矮星ということになる（褐色矮星である可能性は低いので、以下では巨大惑星と呼ぶことにする）。

白色矮星は、太陽の8倍程度より小さな質量を持つ恒星が核融合を終え、燃え尽きた後に残され

^{*7} 岩石主体の地球型惑星と考えられる惑星も20個以上発見できた。中でもすばる望遠鏡のIRDで質量決定まで行った超短周期惑星TOI-1634 bとTOI-1685 bについては、本特集8月号掲載の平野照幸氏の記事をご覧ください。

^{*8} 赤色矮星周りではそれほど惑星の平衡温度が高くないため、ホットジュピターとは呼ばず、GEMS (Giant Exoplanets around M-dwarf Stars) のように呼ばれることが多くなっている。

る地球程度の大きさのコンパクトな天体である。しかし、恒星が白色矮星になる前には大きさが1天文単位程度まで膨らんだ赤色巨星という段階を経るため、周期1.4日という軌道にある惑星は赤色巨星の段階で飲み込まれて破壊されてしまうはずである。

ではなぜこのような軌道に巨大惑星があるかという、赤色巨星の段階からその軌道にいたわけではなく、赤色巨星に飲み込まれないような軌道にあった巨大惑星が、主星が白色矮星となった後にその軌道へと移動してきたと考えられる。実際、白色矮星WD 1856は2つの赤色矮星G 229-20AとG 229-20Bとともに3重連星系を成していることが知られていて、これらの伴星の影響で移動してきたという説明がなされている [22, 23]。

これまでに発見された白色矮星周りのトランジット惑星はWD 1856 bの一つだけしかない^{*9}ものの、後から移動してくることで白色矮星にも短周期の惑星が存在するというのはとても面白い。

もう一つは、太陽系から約32パーセクの距離にある比較的年老いた太陽型星HD 110067で、この恒星の周りで発見された6つの惑星は、隣り合うそれぞれの惑星同士の公転周期の比が簡単な整数比（尽数関係）になっているというレアな惑星系である [24]。MuSCATシリーズはこの惑星系の内側から5番目の惑星HD 110067 fの発見確認観測に貢献した。

この惑星系では、TESSのデータに複数の周期のトランジットが検出されていたものの、公転周期がわからない1回だけのトランジットも検出されていた。周期の判明した内側の3つの隣り合う惑星の周期比がそれぞれ2:3という尽数関係にあったこと、既存のTESSのデータにトランジットがないことなどから、内側から5番目の惑星の公転周期は約41日と予想が立てられた。

このトランジットは減光率が0.1%程度しかなく、トランジットの継続時間は5時間以上、しかも予報の誤差も大きいという難度の高い観測で、2022年5月23～24日にかけて世界の複数のチームが協力してトランジットを観測するキャンペーン観測が実施された。その結果、MuSCATシリーズではMuSCAT2でトランジットの開始、MuSCAT3でトランジットの終了を精度よくとらえることができた。

このキャンペーン観測に参加したチームの中で、トランジットの開始と終了の両方をとらえることができたのは世界でMuSCATチームだけであり、地上最高レベルの測光精度を多色で同時に達成でき、時差の離れた複数の望遠鏡に装置を搭載しているというMuSCATシリーズの強みが活かされた成果となった。

3.2 トランジットタイミング変動（TTV）の測定

あるトランジット惑星があった時に、その惑星系にその惑星しかなければ、トランジットは一定の周期で起こる。一方、その惑星系には他にも惑星があった場合、惑星同士の重力相互作用によって惑星が主星をトランジットするタイミングが一定周期からずれてしまう。このトランジット時刻の一定周期からのずれをトランジットタイミング変動（TTV）と呼ぶ。TTVについての詳しいレビューは、2012年3月号の福井暁彦氏と2017年8月号の増田賢人氏による天文月報記事 [25, 26] をご覧いただきたい。

TTVを測定すると、そのTTVを引き起こしている別の惑星の質量に対して制限を与えることができる。複数の惑星がトランジットをする複数トランジット惑星系では、それぞれのTTVを測定することでお互いの質量に制限が与えられる。通常TTVのずれは観測誤差に対して無視できるほど小さいものの、惑星同士の公転周期の比が尽数

^{*9} 惑星由来の物質が白色矮星に降着したと考えられる観測結果は他にもあるものの、明確にトランジット惑星として発見されたのはWD 1856 bのみである。

関係に近い状態ではTTVのずれは大きくなる。特に尽数関係にある惑星ペアが両方トランジットをする場合には、TTVの測定によってそれぞれの質量を決定できる場合がある [27]。

系外惑星の質量を測定する代表的な方法は視線速度法であるが、いくつかの場合にはTTVの方が質量の制限・決定に適している。

例えば、比較的長周期の小型惑星の質量を決定することを考えた場合、視線速度法では長周期になるほど視線速度のシグナルが小さくなり、質量の決定が難しくなる。一方、尽数関係にある惑星ペアの場合は、長周期になるほどTTVのシグナルは大きくなるため、TTVの測定は視線速度法と相補的なよい質量決定方法となる。

また、若い恒星では黒点などの恒星表面の活動性に起因する見かけ上の視線速度変動が、惑星由来の視線速度変動より大きくなってしまふ。そのため、若い恒星の周りのトランジット惑星の場合には、系統誤差の影響で視線速度法では正確な質量決定が困難となってしまう。一方、若いトランジット惑星では尽数関係にあるペアが多いことが知られていて [28]、尽数関係にあるペアのTTVによる大きなトランジット時刻のずれに比べると、トランジット時刻決定の系統誤差は小さい。そのため、若いトランジット惑星ではTTVの方が系統誤差が小さく正確な質量決定をすることができるといふ利点がある。

一方、サイエンスとしてのTTVの難しい点として、トランジットの継続的な観測が必要となり、特に長周期の惑星になるとトランジットの観測機会が少なくなるため、結果が出るまでに長期間のTTVの観測が必要となることが挙げられる。そのため、長期間にわたって多くの観測が必要となる。

MuSCATシリーズは、多色でトランジット観測ができるため1回ごとのトランジット中心時刻の決定精度が高いことや、時差の離れた望遠鏡に設置されているためトランジットの観測機会を稼

げること、豊富な観測時間を確保していることから、TTVを長期的に測定するのに適した観測装置となっている。これは世界の他のチームにはない強みであるため、MuSCATチームでは新しいトランジット惑星の発見確認と並行して赤色矮星周りの小型惑星や若いトランジット惑星のTTVの測定にも力を入れている。

3.3 トランジット惑星大気の特徴付け

MuSCATシリーズは地上の1.5-2 m望遠鏡に搭載されているため、トランジット惑星大気の特徴付けとしてできることは地上大型望遠鏡や宇宙望遠鏡に比べると限られている。しかし、豊富な観測時間があることから、同じ惑星のトランジットを繰り返し観測することで可能な限り精度を高め、 g, r, i, z バンドでトランジットの深さがどのようにになっているかを調べることに取り組んできた。

トランジット惑星の空が雲で覆われていると、主星からの光が惑星の大気を透過してこれなくなってしまう。すると、どのバンドで観測してもトランジットの深さは変わらず、その波長依存性はフラットとなる。一方、晴れた空のホットジュピターでは高層にあるナトリウム大気による吸収や水素大気のレイリー散乱などの影響を受けるため、トランジットの深さはフラットにはならない。

こうしたことから、トランジットの深さの波長依存性がフラットになるか、あるいは何かしらの大気の兆候が見えるかどうかを調べるため、重力が小さくて惑星大気の兆候が観測しやすいホットジュピターのトランジットを繰り返し観測してきた。その結果、WASP-74 bというホットジュピターでは、レイリー散乱よりも急激に短波長側ほどトランジットが深くなる兆候が見られることを発見した [29]。これは惑星大気上層にヘイズ（もや・エアロゾル）があることを示唆している。

ただ、ブロードバンドフィルターではナトリウム大気による吸収の効果がなまされてしまうことから、2023年にはナトリウムに特化したナローバンドフィルターを製作した。現在は2029年以降

打ち上げ予定の欧州の系外惑星大気観測専用の宇宙望遠鏡Arielを念頭に、ナローバンドフィルターを使って曇っていないホットジュピターをスクリーニングするための観測を始めている。

また、トランジット惑星大気の特徴付けとしては、トランジットの観測だけではなく惑星が主星の裏に隠れる二次食（セカンダリエクリプス）の観測もある。ただ、 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下の波長では二次食の深さがとても小さくなるため、これまでに検出された例はまだ少ない。

我々は史上最も熱い惑星として知られているKELT-9 bの二次食をMuSCAT2で観測し、 i , z_s バンドで二次食を検出した。測定されたそれぞれのバンドでの二次食の深さは0.038% (i バンド)と0.064% (z_s バンド)であり、非常に小さなシグナルを検出することができた。特に i バンドの地上観測でトランジット惑星の二次食を検出したのは世界初である。この二次食の深さの波長依存性のモデリングから、大気中のTiO（酸化チタン）やVO（酸化バナジウム）の存在度に制限を与えることができた [30]。

3.4 時間軸天文学・太陽系小天体への貢献

MuSCATシリーズの持つ3色あるいは4色で同時に天体を撮像・測光観測できるという機能は、系外惑星のトランジット観測以外の観測的研究にも活用することができる。想定されるのは、超新星爆発や突発天体のような時間軸天文学の観測や、太陽系小天体（太陽系外からやってきた恒星間天体を含む）の観測などである。

もちろん大型望遠鏡に比べれば明るいターゲットに限られてしまうものの、MuSCATシリーズの利点もいくつかある。例えば天体の色の変化を見るため複数のバンドで観測したい場合、単色の装置ではフィルターを切り替えて観測するため同時性が保証できないのに対し、MuSCATシリーズでは同時に観測することができる。また、時差の離れた世界の複数の望遠鏡に設置しているため、1ヵ所からの観測に比べて短い時間間隔で

データの取得が可能である。さらに、太陽系小天体の場合は北天と南天を行き来することがあり、1ヵ所からでは観測が継続できなくなってしまうことがある。MuSCAT3/4は北半球と南半球に同じ装置が設置されていることから、同じ装置での観測が継続できる。

こうした時間軸天文学や太陽系小天体の観測、あるいはそれに限らずMuSCATシリーズの性能を活かした観測のアイデアをお持ちの方は、ぜひご連絡をいただければ幸いである。

4. これからの展望

最初のMuSCATの開発から10年あまりが経過し、時と共にMuSCATシリーズの主なサイエンスや観測ターゲットも移り変わってきた。2018年にTESSが打ち上げられてからは、TESSと連携した新たなトランジット惑星の発見確認が主なサイエンスとなっているが、赤色矮星周りのトランジット惑星については新たに50個以上発見することができ、赤色矮星周りの惑星の公転周期と半径の分布がどのようになっているかなどの観測的知見が得られ、ひと段落ついたと考えている。

MuSCATシリーズでの発見確認観測のターゲットとして次に注目しているのは、（年齢がおよそ10億年より）若いトランジット惑星と長周期のトランジット惑星である。

TESSによる全天のトランジットサーベイが始まるまで、若いトランジット惑星の発見数は赤色矮星周りのトランジット惑星の発見数よりもさらに限られていた。TESSのサーベイが始まってからも、若いトランジット惑星の発見数はすぐには増えてこなかったが、位置天文観測衛星のGAIAによって新しい星団が同定され実は主星が若いことがわかるなどして、若いトランジット惑星の発見数はこの数年でようやく増えてきた。このように、若いトランジット惑星はまだ新しい研究対象であるだけでなく、年老いた惑星とは異なり、惑星が質量・半径・軌道・大気といった点でまだ進

化段階にある（変化している過程にある）惑星という点で面白い研究対象である。

MuSCATシリーズは、こうした若いトランジット惑星の発見確認で高精度な多色同時観測の強みを活かすことができる。また、特に年齢が数千万年以下の若いトランジット惑星は尽数関係にある惑星ペアが多いことが知られているため、TTVによる質量決定のよいターゲットでもある。

MuSCATシリーズによる発見確認観測とTTVの観測により、若いトランジット惑星の公転周期と半径の分布が年齢とともにどのように進化（時間変化）しているのかや、それぞれの惑星の質量・半径・密度などを特徴付けることができれば、惑星形成理論に対して重要な新しい観測的知見をもたらすことが期待できる。

一方、公転周期が数十日以上、長周期のトランジット惑星もまだ発見数が少ないが、TESSで発見された長周期トランジット惑星候補については、HD 110067 fの発見確認のように世界の観測チームに対してTFOP-SG1の中で呼びかけが行われ、キャンペーン観測が行われることがある。こうしたキャンペーン観測に参加することで、長周期のトランジット惑星の発見確認にも継続して貢献していく。

また、2026年以降に打ち上げ予定の欧州のトランジットサーベイ衛星PLATOは、TESSよりも長期間（約2年間）にわたって同じ領域を連続観測する予定のため、長周期のトランジット惑星候補（K型星周りのハビタブル惑星候補を含む）の発見が今後数年で増加すると期待される。MuSCATチームはPLATOと連携した発見確認観測も行い、長周期のトランジット惑星の発見確認に取り組んでいく予定である。

さらに、2029年以降打ち上げ予定の欧州の衛星計画Arielでは、筆者を始めとするMuSCATチームは地上観測支援という形でArielコンソーシアムに参加している。MuSCATシリーズはその性能を活かして、Arielの観測ターゲットのト

ランジット予報時刻の精度向上や、新たな観測ターゲットとなるトランジット惑星の発見、Arielでの詳細観測に適した惑星のスクリーニング観測などに取り組んでいく。また、Arielの観測開始後は、観測ターゲットとなる恒星の活動性のモニタリング観測をアレンジするなどして、Arielの観測に対する支援を行っていく。

以上のように、今後も宇宙望遠鏡や世界各地の地上望遠鏡と連携して、高い研究成果をあげていきたいと考えている。

謝 辞

本稿の執筆を提案していただいた天文月報編集委員の日下部展彦氏に感謝いたします。また、初期の頃からMuSCATシリーズの開発・運用を支えてくれた福井暁彦氏を始めとするMuSCATチームの全メンバーと、オプトクラフトの山室智康氏に深く感謝いたします。MuSCATシリーズの開発・運用のための予算獲得においては、田村元秀氏、生駒大洋氏、岡田真人氏から多大なご支援をいただきました。MuSCATシリーズの資産管理や輸出・修理などにおいてお世話になっているアストロバイオロジーセンターのスタッフの皆様と、MuSCATシリーズを設置させていただいている国立天文台ハワイ観測所岡山分室、IAC、LCOのスタッフの皆様にこの場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 成田憲保, 2012, 天文月報, 105, 7
- [2] Fulton, B. J., et al., 2017, AJ, 154, 109
- [3] Charbonneau, D., et al., 2009, Nature, 462, 891
- [4] Narita, N., et al., 2013a, PASJ, 65, 27
- [5] Narita, N., et al., 2013b, ApJ, 773, 144
- [6] Fukui, A., et al., 2016, ApJ, 819, 27
- [7] Narita, N., et al., 2015, J. Astron. Telesc., Inst. Syst., 1, 045001
- [8] Narita, N., et al., 2019, J. Astron. Telesc., Inst. Syst., 5, 015001
- [9] Narita, N., et al., 2020, Proc. SPIE, 11447, 114475K
- [10] Fukui, A., et al., 2024, Proc. SPIE, 13096, 130963U

- [11] 川内紀代恵, 2024, 日本惑星科学会誌遊星人, 33, 67
- [12] Delrez, L., et al., 2022, A&A, 667, A59
- [13] Mori, M., et al., 2022, AJ, 163, 298
- [14] Kawauchi, K., et al., 2022, A&A, 666, A4
- [15] Parviainen, H., et al., 2021, A&A, 645, A16
- [16] Gan, T., et al., 2022, MNRAS, 511, 83
- [17] Gan, T., et al., 2023, AJ, 166, 165
- [18] Hartman, J. D., et al., 2023, AJ, 166, 163
- [19] Kagetani, T., et al., 2023, PASJ, 75, 713
- [20] Triaud, A. H. M. J., et al., 2023, MNRAS, 525, L98
- [21] Vanderburg, A., et al., 2020, Nature, 585, 363
- [22] Muoz, D. J., & Petrovich, C., 2020, ApJ, 904, L3
- [23] Stephan, A. P., et al., 2021, ApJ, 922, 4
- [24] Luque, R., et al., 2023, Nature, 623, 932
- [25] 福井暁彦, 2012, 天文月報, 105, 138
- [26] 増田賢人, 2017, 天文月報, 110, 522
- [27] Holman, M. J., et al., 2010, Science, 330, 51
- [28] Dai, F., et al., 2024, AJ, 168, 239
- [29] Luque, R., et al., 2020, A&A, 642, A50
- [30] Hayashi, Y., et al., 2024, PASJ, 76, 1131

The MuSCAT Series: A Network of Multi-color Simultaneous Cameras

Norio NARITA

¹*Komaba Institute for Science, The University of Tokyo, 3-8-1 Komaba, Meguro, Tokyo 153-8902, Japan,* ²*Astrobiology Center, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: The MuSCAT series is a network of multi-color simultaneous cameras, capable of 3- or 4-color simultaneous imaging, installed on four of 1.5–2 m telescopes around the world. The MuSCAT series was primarily developed for simultaneous multi-color, high-precision observations of exoplanetary transits. This article introduces the history of development and specifications of the MuSCAT series, as well as the main science cases and observational achievements over the past decade.

天の川銀河中心にある分子雲の“速度計測”

酒 井 大 裕

〈東京エレクトロン テクノロジーソリューションズ株式会社

〒023-1101 岩手県奥州市江刺岩谷堂字松長根 52〉

e-mail: daisuke2.sakai@tel.com



私たちが住む天の川銀河の中心から数百pcにわたる領域には、銀河の形成過程を調べたり現在の星形成理論をより一般的に発展させていくうえで有用な観測対象となる分子雲領域（Central Molecular Zone: CMZ）が広がっている。太陽系が存在する天の川銀河の円盤部分では恒星や星間ガスは円運動に近い運動で天の川銀河の中心を回っているが、CMZに属する分子雲は円運動から大きく外れた特異運動を持つと考えられている。私たちは超長基線電波干渉計（VLBI）を用いた位置天文観測を通してCMZ中の分子雲の位置と運動を測定するプロジェクトを進めている。本稿で紹介するのはその1つ目の成果となるSgr B2に対する研究成果であり、CMZの中で正の銀経方向の端に位置しているSgr B2は天の川銀河の中でも屈指の星形成領域だ。今後さらに多くの位置天文観測の結果を加えることで現在提案されているさまざまなCMZの軌道モデルについて切り分けが進むことが期待される。

1. 天の川の中心

「先生は中にたくさん光る砂のつぶの入った大きな両面の凸レンズを指しました。『天の川の形はちょうどこんなのです。…（後略）』」宮沢賢治の『銀河鉄道の夜』の冒頭、ジョバンニらが授業を受ける場面でこう書かれている。宮沢賢治がこの作品の初稿を書いたのは1924年と言われており、今から約100年前のことだ。しかもその後続く文章には太陽系が銀河の中心にないことが既に理解されていることがわかる記述も見られる。天文学の世界でもちょうどこの頃から天の川銀河やその中心と太陽系との位置関係について考えられ始めていた。時は流れ、現代では観測や理論の発展により100年前に比べると遥かに多くのことがわかってきた。

天の川銀河は我々が住む太陽系が属する銀河で、バーと呼ばれる棒状の構造と複数の渦巻き状

の腕を持つ棒渦巻銀河であり、その中心には超大質量ブラックホールが存在していると考えられている[1]。言わずもがな、天の川銀河の中心は宇宙に数ある銀河のどれよりも我々の近くに存在する銀河中心だ。このことから天の川銀河中心では、中心ブラックホールの性質のみならずブラックホールと銀河全体との関係性を探るために研究が行われてきた。その1歩目となるのは、天の川銀河のバー構造のさらに内側の領域における星やガスの分布と運動を知ることだ。しかし、私たちが住む太陽系が天の川銀河の中に存在してしまっているがゆえに、天の川銀河の中心部分を俯瞰的に観測することができない。こういった、対象が近すぎるがゆえに生じる問題が私たちを困らせてきた。

そしてさらに、星間空間に存在するダストの影響で可視光や赤外線では光の減衰を大きく受けるため、観測的に得られる情報が非常に限られると

いう問題もある。こういった問題を乗り越え、星やガスの分布と運動を知ることができれば、銀河の外側から内側にどのように物質が運ばれブラックホールに落ちていくのか、あるいは逆にブラックホールの活動が内側から外側へ向かってどのように銀河に影響を与えているのかを知ることができるようになる。

2. 中心分子雲領域

天の川銀河の中心から約200 pcの半径ところにCentral Molecular Zone (CMZ) と呼ばれる、分子雲が多く存在する領域がある。CMZに属する分子雲は円盤部の分子雲とはさまざまな点で特徴が大きく異なる。基本的な物理量である温度、密度、圧力は天の川銀河の円盤部に比べて1桁以上大きく、検出される分子輝線の速度幅も10倍程度広い。この領域の構造や領域内の天体の分布は天の川銀河の中央部にあるバー構造の重力ポテンシャルの影響を受けたものであると考えられているが、それでは説明しきれない天体や現象も存在しており全体の形状や形成メカニズムについては議論が続いている。CMZに属する天体の3次的な分布や運動は、そこで起きている現象を調べる上での基本的な情報で、より精度よく測定するために様々な理論的・観測的な手法を通して研究が行われている。運動学的な理解が進んでいけば、天の川銀河の円盤部から中心ブラックホールへ向けたガスの降着プロセスやブラックホールからのフィードバックについてより具体的に調査ができるようになる。

天の川銀河のCMZについて、その構造や運動以外で特筆すべき特徴は星形成活動に関するものだ。星形成の研究は主に私たちから距離が近い太陽近傍の天の川銀河円盤部に対して進められ、星間ガスの量と星形成効率の間に確かな相関性が認められてきた。しかしながら、天の川銀河中心でのガスの量と星形成活動はこの相関関係から外れていることが知られており、ガスの量から期待さ

れるよりも10分の1程度の少ない数の星しか生まれていない [2]。

この不整合の原因を突き止めることは、太陽近傍の研究によって発展してきた星形成理論をより一般的な環境で使用可能な理論に発展させることを意味する。さらに、近年の研究ではCMZの物理環境は宇宙初期の銀河で見られるものに近いことが主張されている [3]。しかし、宇宙初期の銀河は天の川銀河の中心に比べて桁違いに距離が遠く、個々の星形成について観測的に調べることは極めて難しい。一方で天の川銀河のCMZは距離が近く、このような特殊な条件下にある星形成を研究できるほとんど唯一の領域だといえる。

近年では、CMZでの星形成活動がこの領域の特異な運動と関係しているという研究成果も報告されており、構造・運動に関する研究とそこでの星形成の研究を組み合わせることで天の川銀河中心の環境についての理解が進められつつある [4]。

3. 複数のCMZモデル

CMZがどのような形をしており、その中を分子雲などの天体がどのように運動しているかについてはこれまで多くのシナリオが提唱されてきた。1970年代には一酸化炭素から発せられる電波輝線の観測によって得られた分子雲の速度構造を解釈するためにh88回転膨張モデルが提唱された [5, 6]。その後、理論の発展と観測精度の向上により天の川銀河のバー構造の影響によって形成される共鳴軌道に沿った分子雲の分布と運動のモデルが広く受け入れられてきた [7]。天の川銀河の棒状構造と並行な方向に伸びたx1軌道群から落ちてきた分子雲が、より内側にあるx1軌道に対して垂直方向に伸びたx2軌道群の外側に溜まりCMZを形成しているという解釈だ (図1)。2000年以降はこの理論的な解釈をベースとし、観測的な特徴と照らし合わせてさまざまなモデルが構築されてきた。図2に天の川銀河の軸方向から見た3つの代表的なモデルを表す簡易的なイラ

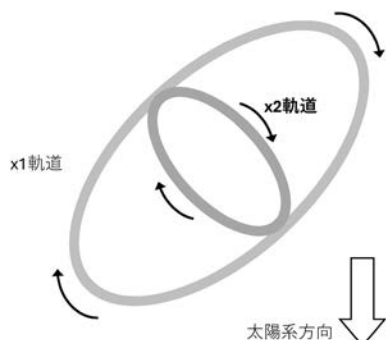


図1 天の川銀河の中心部を軸方向から見たもの。天の川銀河棒構造に並行なx1軌道群のうち最も内側の軌道とその内側に存在すると考えられているx2軌道群のうち最も外側の軌道。図中のx2軌道上にCMZの分子雲が存在すると考えられている。

ストを示している。これらは閉じたモデルと開いたモデルの2つに大別できる。前者は赤外線観測によるダストの分布をもとに提唱されたモデルである(図2a, b) [8]。このモデルでは分子雲はリングのどの部分でも約 80 km s^{-1} の軌道速度で運動しており、前述のx1軌道とx2軌道が交差するポイントで分子雲の衝突が発生し星が形成される。後者のモデルは分子雲で構成されるリングが閉じておらず開いた軌道を取るというものだ(図2c) [9]。前者のモデルとは異なり軌道上で速度は一定ではなく天の川銀河中心に近い位置では速度が速く、遠い位置では遅くなる。この影響で減速が起きる場所ではガスが圧縮されてそこで星形成がトリガーされる。

これらのモデルを構築するうえでの共通点は、分子輝線の視線速度の情報をもとに奥行き方向の位置関係を推定していることだ。視線速度の情報をもとにした奥行き方向の位置推定にはあらかじめ軌道の形を仮定する必要があるため、提示した3つのモデルのように全く異なる形状であっても属する天体の天球面上の位置や視線速度の情報に対して矛盾のないモデルが存在しうる。そのため、これらのモデルを切り分けるうえでは既存の

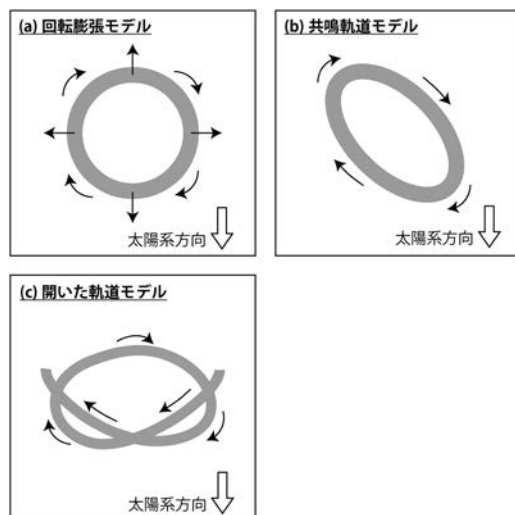


図2 提案されたCMZの軌道と運動モデルの例。(a) 回転膨張モデル。(b) 共鳴軌道モデル。(c) 開いた軌道モデル。

情報に加えて追加の情報が必要となる。この追加の情報としてはさまざまなものが考えられる。先行研究でも、輝線の吸収量を用いた天体の前後位置関係の推定や、X線反射星雲の到達時間からの天体位置推定などが行われている [10, 11]。その中で、我々は電波望遠鏡同士の距離を数千kmまで離すことにより極めて高い空間分解能を達成可能なVLBI (Very Long Baseline Interferometry) 観測を実行した。その精密な位置測定能力を活かし、天球面上の位置と視線速度に年周視差による距離情報と固有運動を加えた6次元情報を用いたCMZの軌道・運動の解明を目指している。

4. 天の川銀河中心でのVLBI位置天文観測

このような背景から、我々はCMZ領域の天体の位置関係や3次元的な動きを捉えるために、極めて高い精度で天体の位置を測定できるVLBIを用いて位置天文観測を行うことを計画した。用いた望遠鏡は日本国内のVLBI観測網: VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry) である。VERAは位置天文観測に特化しており、2つの天

体を同時に観測可能なデュアルビームの受信システムを搭載している。これによりターゲット天体と位置の基準となる背景系外電波源を同時に観測することができる。相対VLBI観測では基準天体に対するターゲット天体の信号の位相のズレから位置を測定するため、「ターゲット天体と基準天体からの信号が通過する地球の大気が同等である」とみなせることが重要である。そのため、ターゲット天体に対して天球面上で十分近い基準天体を選ぶ必要がある。

通常の相対VLBI観測では大気の状態が変化しない短い時間スパンで望遠鏡を駆動して2つの天体を切り替えて観測する必要がある。この時間スパンは観測する周波数帯によって異なるが、22 GHz帯では2-3分程度の短い時間間隔で切り替える必要がある。天体の切り替えには30秒から1分程度かかるため、天体切り替え時の望遠鏡の駆動時間によるタイムロスが大きくなる。さらに、切り替え前後の大気の変動の影響を少なからず受けてしまう。VERAでは2天体を同時に観測するため駆動ロスはなく、大気の影響も回避し、高い位置決定精度で観測することが可能だ。

ターゲット天体の条件は、「VERAの合成ビームよりもサイズが小さく点源として見えること」と「VLBIで観測可能な高い輝度をもつこと」。1つ目の条件は天体の構造の変化による天体位置の不確定性を避けるために必要なものである。2つ目の輝度に関する条件はVLBIがその特性により感度が低く熱的な放射は検出できないことが要因だ。さまざまな分子から特定の環境で発せられるメーザー放射がこれらの条件を満たし、VERAでの観測に適したターゲットとなっている。私たちはその中でも水分子から発せられる22 GHz帯のメーザー放射に対して観測を実施した。この周波数の水メーザー放射は星形成領域や晩期型星からのアウトフローに付随して発生すると考えられている。

一方の基準天体は、年周視差が無視できるほど十分遠方の天体である必要があるため、通常遠方

のクエーサーが選択される。我々が行う天の川銀河中心に対する観測では、巨大ブラックホール・いて座A* (Sgr A*) から投影距離で約 0.67° 離れた位置にあるJ1745-2820を基準天体として使用した。

観測結果の紹介に移る前に、位置天文観測がCMZの軌道やその中で各分子雲の位置関係の決定という目的に対してどのような役割を持ちうるか少し具体的に述べておきたい。位置天文学でユニークに取得可能な情報は主に年周視差と固有運動の2つの情報であり、それぞれ天体の距離と速度に関して他の方法では得難い情報を仮定の少ない方法で与えてくれる。太陽近傍での年周視差計測を含む位置天文観測では、年周視差からの距離と天体位置の3次元位置情報と、固有運動に輝線からの視線速度を加えた3次元速度情報を組み合わせた6次元の位置・速度情報を獲得できる。しかしながら、現代のVLBIによる年周視差の測定限界はまさに天の川銀河中心までの距離程度であり、年周視差については十分な精度で測定することは難しい。実際、距離測定の精度としては現状の装置での最もよい精度である数十 μ 秒角程度で年周視差の測定が達成できたとしても約10%程度の精度であり、天の川銀河中心の距離(約8.3 kpc)に対して実スケールに変換しても800 pc程度の距離誤差は残る。これは、CMZのサイズが約200 pcであることを思い出すと、CMZの中での分子雲同士の位置関係を年周視差のみから突き止めるには不十分である。

年周視差の測定結果に利用価値がないわけではなく、天の川銀河中心天体とそれ以外の前景・背景を区別するために利用される。私たちが天の川銀河中心方向を観測するとき、銀河の中で最も星やガスが多い方向を見通しているため様々な距離にある天体が同一の視野内に混ざり込む可能性がある。天の川銀河の中心方向以外を対象とする場合、銀河の回転速度を用いた運動学的距離をもとに天体の奥行き方向の位置関係を大まかに推測す

る。しかしながら、中心方向を観測するときには視線方向が天体の銀河回転の方向に対して直行しているため、天の川銀河中心方向を見たときに見通している(1) 中心に対して前景にある天体(2) 天の川銀河中心の天体(3) 中心に対して背景にある天体の視線速度がゼロ付近に集中し運動学的距離によって天体の距離を推定することは難しい。

そのため、天の川銀河中心のCMZのスケールで天体の位置の同定を行うには、(1) 年周視差を用いて前景・背景天体との切り分けを行い、(2) 固有運動を用いて仮定した軌道モデルとの整合性からモデルの選択・修正を行う、という2つのステップが必要になる。

5. Sgr B2での水メーザー観測

CMZの中で水メーザー放射は星形成が進行中の分子雲起源であると考えられている。私たちはその中でもっとも激しく星形成している分子雲Sgr B2に付随する水メーザーを対象として観測を行った。年周視差と固有運動の測定のため観測は2ヵ月に1度程度の頻度で、2014年から2017年にかけて全15回行われた。位置基準天体として使用した系外電波源J1745-2820はSgr B2から離角が 0.33° 離れた位置にあり、Sgr B2と同時にデュアルビーム受信システムで観測している。

私たちの住む天の川銀河中心に対する位置天文観測プロジェクトの1つ目の天体としてこの天体を選んだ理由は、(1) 非常に活動的な星形成領域でターゲットとなる水メーザーの強度に時間変動はあるが検出可能な強度が維持されていること。(2) 軌道モデルの中でのSgr B2の運動を比較すると、固有運動で有意な違いが現れると期待されることである。そのため、固有運動の測定結果を用いることで、視線速度のみでは切り分けが難しかった軌道モデルの制限へ向けて示唆を得られる可能性があると考えた。

Sgr B2は天の川銀河の中でも最も活動的な星形成領域の1つである。星形成が比較的抑制されて

いる天の川銀河中心領域においてSgr B2での星形成は特異的だ。この領域はさらに細分化され、広範囲のエンベロープと呼ばれる分子雲の中に高密度なコアが存在する。そのコアは3個並んでいてSgr B2N, B2M, B2Sと呼ばれている(図3左)。天球面上で約45秒角間隔で並んでおり、天の川中心までの距離8.3 kpcを仮定すると、約2 pcの間隔で並んでいることになる。それぞれの性質については本稿では詳しくは述べないが、Sgr B2NはB2Mよりも年齢が若く、複雑な有機分子からの輝線が多く検出されている。一方、Sgr B2Mではより進化したHII領域のような大きな構造が多く確認されている。Sgr B2Sを含む3ヵ所全てから水メーザーは検出されているが、我々は中央のSgr B2Mに付随している水メーザーについてモニター観測を実施した。

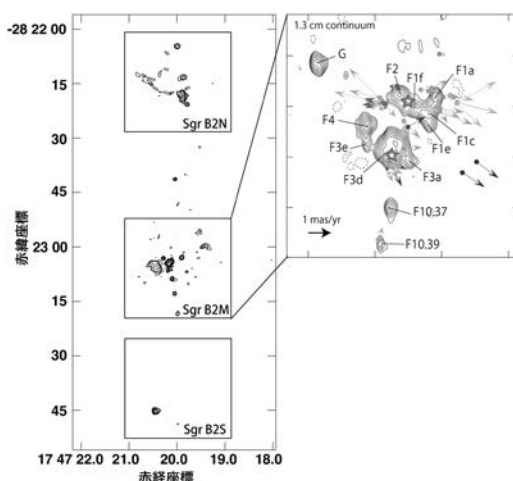


図3 (左) ALMAによる波長3 mmの電波連続波イメージ。Sgr B2領域の中の3つのコアSgr B2S, M, Nが約45秒角の間隔で南北に並んでいる。(右) Sgr B2Mから発せられた水メーザーの位置と運動を示している。星が生まれている場所から発せられているアウトフローに付随した水メーザーの動きが見られる。矢印の始点が水メーザーの検出位置であり、方向と長さは固有運動を示している。背景の等高線は米国の電波干渉計VLAによって観測された波長1.3 cmでのダスト放射の強度。アルファベットはダスト放射により検出されたHII領域を示している。

Sgr B2の水メーザーについては過去に米国のVLBI観測網であるVLBAによって位置天文観測が行われており、Sgr B2Nに対して 0.128 ± 0.015 mas, Sgr B2Mに対して 0.130 ± 0.012 masという高い精度の年周視差の結果が得られている [12]. 一方で、固有運動についてはアウトフローに付随するという水メーザーの性質から見積もられる数 10 km s^{-1} 程度の内部運動の影響が考慮されておらず、天の川銀河中心に対するSgr B2分子雲の運動をとらえるという目的に対しては精度が不十分だった。

図3(右)はVERAによって検出されたSgr B2Mでの水メーザーの分布で矢印は内部運動の大きさと方向を表している。矢印の大きさの平均値は 1.14 mas yr^{-1} で、天の川銀河中心の距離では 43 km s^{-1} に相当する。図に示されているように、水メーザーの運動は等高線で見えているHII領域から外側に向かって膨張するような運動を示している。22 GHz帯の水メーザーは衝撃波領域で励起すると考えられているため、水メーザーは膨張しているHII領域とその外側の分子雲との間の相互作用を反映している可能性が高い。

水メーザーが発生しているHII領域を特定するために、「水メーザーがHII領域に付随しており、その中心に対して双極的あるいは球対称に放射状に運動をしている」という仮定をおいて解析を行った。その結果、Sgr B2Mには少なくとも2つ以上の水メーザーが付随するHII領域が存在することを突き止めた。モデルを使って推定した水メーザー発生源は図3(右)の星マークで示している。1つは北側のHII領域F1f、もう1つは中央のHII領域F3dの近くにあり、F1fからは東西方向に、F3dからは南北方向に水メーザーがアウトフローに付随して検出されている。

電波再結合線で得られた視線速度の情報を考慮すると、2つのHII領域は視線速度が異なり物理的には相互作用していないと推測される。メーザーの内部運動の詳細な研究は、より多くの観測エポックのデータを用いた解析と高解像度な分子

輝線イメージを組み合わせることで可能になると期待される。

6. 年周視差による距離の測定

図4はSgr B2M領域の水メーザー放射の位置天文観測の結果である。(c)は年周視差の測定結果であり、結果は 0.133 ± 0.038 masであった。これは距離に変換すると $7.5_{-3.0}^{+1.7} \text{ kpc}$ であり、水メーザーが天の川銀河中心の距離にありSgr B2に物理的に付随していることを支持している。図4で取得した水メーザーの固有運動は、メーザーの発生源の星形成領域自体の天の川銀河中心に対する運動に、天の川銀河中心に対する太陽の運動と星形成中心に対するメーザーの運動(内部運動)が加わっている。私たちが得たいのは星形成領域自体の運動で、これを得るには残りの2つの寄与を推定して取り除く必要がある。太陽の運動は過去の研究によって既にわかっているが、問題はメーザーの内部運動で、これを推定する必要がある。

メーザーの内部運動はその分布と運動を用いて推定した。前節で述べたように、Sgr B2Mでは少なくとも2つのHII領域の膨張運動に水メーザーが付随しており、それぞれのHII領域の中心に対して対称に運動していると考ええる。このような仮定を置くことで年周視差の測定に使用したメーザー放射がSgr B2Mの中でどれだけ内部運動を持っているかを推定した。その結果得たメーザースポットの内部運動は東西方向と南北方向にそれぞれ $(\mu_{\alpha} \cos \delta, \mu_{\delta}) = (0.13 \pm 0.16, 0.13 \pm 0.09) \text{ mas yr}^{-1}$ であった。この「内部運動」と前述の「天の川銀河中心に対する太陽の固有運動」を差し引くことで得た「Sgr B2Mの天の川銀河中心に対する固有運動」は天球面上での銀河座標で $(\mu_{\text{gc}}, \mu_{\text{bgc}}) = (2.86 \pm 0.18, 0.75 \pm 0.08) \text{ mas yr}^{-1}$ となった。年周視差から得た距離の結果と視線速度を組み合わせ、図5に示した座標系での3次元運動は $(V_x, V_y, V_z) = (-120 \pm 7, 63 \pm 5, 27 \pm 5) \text{ km s}^{-1}$ という結果となった。

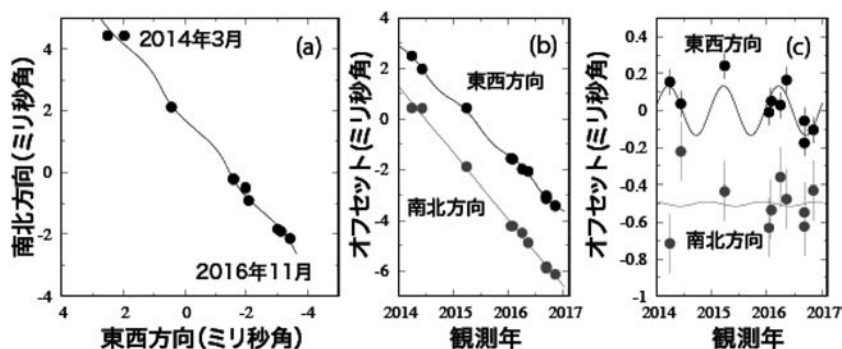


図4 VERAによる位置天文観測の結果. (a) 2014年から2016年までのSgr B2Mの水メーザーの天球面上での位置の変化. (b) 東西・南北方向の位置変化を時間に対して示したもの. (c) 位置変化から年周視差による成分のみを抽出したもの.

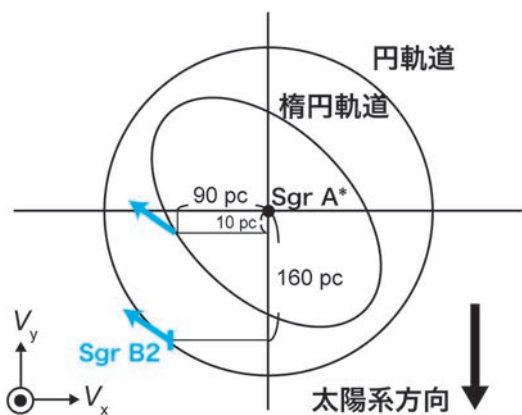


図5 円軌道と楕円軌道を仮定した時のCMZの中でのSgr B2の推定位置.

7. Sgr B2Mの“速度計測”

年周視差の測定によって得た固有運動と、Sgr B2M全体でのメーザーの分布と運動の測定から得た年周視差測定した水メーザーの内部運動の情報を組み合わせて、天の川銀河中心に対するSgr B2Mの位置と中心に対する運動を求めた. 今回は天の川銀河中心CMZに対して2つの非常にシンプルな軌道モデルを仮定し、その中でのSgr B2の位置を上記の情報から推測した. 1つは最もシンプルな円軌道で、もう1つは共鳴軌道モデルの内側の軌道のように楕円形に伸びた軌道である. 両方のケースの軌道とSgr B2の推測位置

は図5に示されている. 円軌道の場合、Sgr B2の位置は天の川銀河中心から約160 pc、楕円軌道の場合は約10 pc手前側にあるという結果が得られた. 天の川銀河中心に対するSgr B2の相対速度はどちらの場合も 138 km s^{-1} であった. これは先行研究によって予測されている値と矛盾しないものであり、図2で提示した3つのモデルで予測されているSgr B2の3次元速度の予測の中では「開いた軌道モデル」での予想値に最も近い値であった.

年周視差・固有運動測定によるCMZの分子雲軌道の研究は、今回のSgr B2の研究によって始まったところだ. 今の時点でCMZの分子雲の中で私たちが有している3次元速度の測定データはSgr B2のみであり、CMZのモデルの切り分けに対して言えることは多くはない. 今後CMZの他の分子雲に付随するメーザー天体の位置天文観測を実行していき、データ点数を増やしていくことで目的を達成していけると考えている. 特に本稿で紹介したSgr B2とはCMZ中で位置が離れている天体に対して測定を行うことでより効率的に軌道モデルに制限をかけられる. たとえば、CMZの負の銀経の端にあるSgr C分子雲やSgr CからSgr B2までに伸びるダストリッジ領域に付随している分子雲に対してVLBI位置天文観測を行うことでCMZ軌道内の速度変化を正確に追えると期待される.

8. ま と め

今回私たちはVERAを使って高精度な位置天文観測から天の川銀河中心の分子雲領域にあるSgr B2の年周視差の測定と固有運動の測定に成功した．年周視差の測定結果は 0.133 ± 0.038 masであり，距離にすると $d = 7.5_{-3.0}^{+1.7}$ kpcであった．また，HII領域の外縁に付随して膨張する運動を持つSgr B2の水メーザーの内部運動を詳細なマッピングによって補正し，正確な3次元の速度を手に入れることに成功した．結果として，Sgr B2はSgr A*に対して正の銀経方向に約 120 km s^{-1} で離れるように動き，視線速度の情報を組み合わせると天の川銀河中心に対する相対速度 138 km s^{-1} を得た．シンプルな軌道モデルを仮定した結果，Sgr B2が天の川銀河中心から10–160 pc手前側に位置していることが示唆された．

本稿で紹介した観測に加えて新たな観測をVERAや東アジアVLBI観測網を用いて実施している．これらの観測データの解析によって今後CMZの多くの星形成領域について年周視差による距離や3次元運動の測定が達成できれば，CMZの軌道モデルの切り分けに大きく貢献することが期待される．

参 考 文 献

- [1] <https://astro-dic.jp/barred-spiral-galaxy-2/> (2025.6.21)
- [2] Barnes, A. T., et al., 2017, MNRAS, 469, 2263
- [3] Kruijssen, J. M. D., & Longmore, S. N., 2013, MNRAS, 435, 2598
- [4] Henshaw, J. D., et al., 2023, ASP Conf. Ser., 534, 83
- [5] Kaifu, N., et al., 1972, Nat. Phys. Sci., 238, 105
- [6] Scoville, N. Z., 1972, ApJL, 175, L127
- [7] Binney, J., et al., 1991, MNRAS, 252, 210
- [8] Molinari, S., et al., 2011, ApJL, 735, L33
- [9] Kruijssen, J. M. D., et al., 2015, MNRAS, 447, 1059
- [10] Sawada, T., et al., 2004, MNRAS, 349, 1167
- [11] Ryu, S. G., et al., 2013, PASJ, 65, 33
- [12] Reid, M. J., et al., 2009, ApJ, 705, 1548

Speed Measurement for a Molecular Cloud in the Galactic Center

Daisuke SAKAI

Tokyo Electron Technology Solutions LTD., 52 Matsunagane, Esashiiwayado, Oshu, Iwate 023-1101, Japan

Abstract: The Central Molecular Zone (CMZ), which serves as valuable observational targets for investigating the galaxy formation process and advancing current star formation theories. Molecular clouds belonging to the CMZ are thought to exhibit peculiar motions that deviate significantly from circular motion. We introduce the first result of this effort, focusing on VLBI astrometric observations of Sgr B2, located at the positive Galactic longitude edge of the CMZ. By incorporating additional observations in the future, it is expected that we will be able to further distinguish between the various CMZ orbital models currently proposed.

福井工業大学学部生による 手作り望遠鏡を用いたパルサー観測報告



宮本

宮本 祐介¹・阿部 直央¹・北原 陽向¹・
黒川 達也¹・坂野 友哉¹・佐々木 考晃¹・
高田 友一¹・畑 佐隆文¹・濱田 星矢¹・
増永 裕人¹・濤崎 智佳²・浅山 信一郎³

〈¹ 福井工業大学工学部電気電子情報工学科 〒910-8505 福井県福井市学園 3-6-1〉

〈² 上越教育大学自然・生活教育学系 〒943-8512 上越市山屋敷町 1 番地〉

〈³ SKA Observatory, Jodrell Bank, Lower Withington, Macclesfield, SK11 9FT, UK〉

e-mail: ymiyamamoto@fukui-ut.ac.jp

福井工業大学学部生が自作した3Dコーナリフレクタアンテナで、413 MHz帯において電波パルサー（PSR B0329+54）の検出に成功したのでそれを報告する。学生の手作り望遠鏡では本邦初のパルサー検出に至ったという点だけでなく、無線周波数干渉（RFI: Radio Frequency Interference）が大きな市街地においてもパルサーの検出を実証できた点でも本実験成功の意義は大きい。市街地にある大学構内、かつ、ネット通販で購入できる部材のみ用いた簡易で安価な望遠鏡でもパルサー観測を行えることを示した本結果は、日本国内の大学等における学生実験やデータ解析実習課題にも活用できるだろう。

1. はじめに

近年の天文アーカイブデータの充実は、学部生でも最先端の研究に容易に触れることを可能にしており、天文学の発展という意味では非常によい時代となっている。その一方で、天文プロジェクトの国際化及び大型化により、大学・研究室規模で電波望遠鏡を作製・運用する機会は減少し、学生が電波望遠鏡のハードウェアや観測手法、生データに触れる機会が少なくなっているという側面もある。第117巻2号[1]にて報告された3Dコーナリフレクタアンテナ（以下3DCR）によるパルサー検出を、大学における学生実験等の題材とすることを念頭に、福井工業大学の有志の学部2,3年生と実践した。

実際の作業は2025年1月30日（木）の午前か

ら開始した。3DCRの作製にかかった時間は、学生へのブリーフィング、アンテナ設置場所（福井工業大学屋上）の整地も含めて実質1日半程度であり、1月31日（金）の夕方から観測を開始することができた。

2. 福井工業大学での3DCR製作

電波天文観測で受ける無線周波数干渉（RFI: Radio Frequency Interference）は近年深刻な問題となっている[2]。天体からの電波は極めて微弱であるため、人間活動に伴う人工電波が混信するとかき消されてしまう。また電波天文観測では微弱な天体信号を検出するために高感度な受信システムが必要となる。そのため強烈な人工電波が直接混入すると受信部が飽和して感度抑圧が起きたり、最悪の場合には受信部が破壊される可能性

もある。福井市の中心部に位置する福井工業大学にて3DCRによるパルサー観測を行う際の観測周波数として、3DCRの寸法を考慮し、また408 MHz帯が電波天文業務が優先的に使用できるよう周波数が割り当てされているため[3]、410 MHz付近とした。

3Dコーナリフレクタアンテナ[4]は、一辺が3波長以上の直交する3枚の反射面と一次放射器であるモノポールアンテナから構成され、非常に簡単な構造であるため安価で容易に製作が可能であ

る。410 MHzにおいては一辺が2.2 m (3波長) 程度となる。アンテナ工学に対する理解を深めるための実践演習として、3DCRの電磁界シミュレーションを学生達に行ってもらった。学生のWindows PCにフリーの電磁界解析ソフトOpenMOM Version3.0.1 [5]をインストールしてもらい、モーメント法による電磁界解析を行って3DCRの寸法や共振周波数が410 MHz付近となっていることを確認してもらった(図1)。

教育用望遠鏡としての応用のため、3DCRは誰でも入手可能な物品で手軽に安価に製作できることが望ましい。そのため3DCRの枠組みには通販サイトの軽量ラック支柱Lアングル(長さ2.4 m)を用いた。また、反射板として目開き10 mm, 線径0.7 mmの亜鉛亀甲金網を用い、これを結束バンドでLアングルに固定した。3DCRの設置場所として福井キャンパス屋上を選定したが、組上げ前に、屋内でLアングルをどのような組めば枠が安定するか、など学生達に意見交換してもらいながら仮組みを行った。屋上でアンテナを組み上げる際、降雪はほとんどなかったものの、前日までの雪が残し、寒風吹きすさぶ悪条件の中、学生達は雪かきも厭わず、3DCR製作に取り組んだ(図2)。

また、電波受信部であるモノポールアンテナの製作を通して、簡易ベクトルネットワークアナライザ(nanoVNA [6])にて共振周波数を確認しな

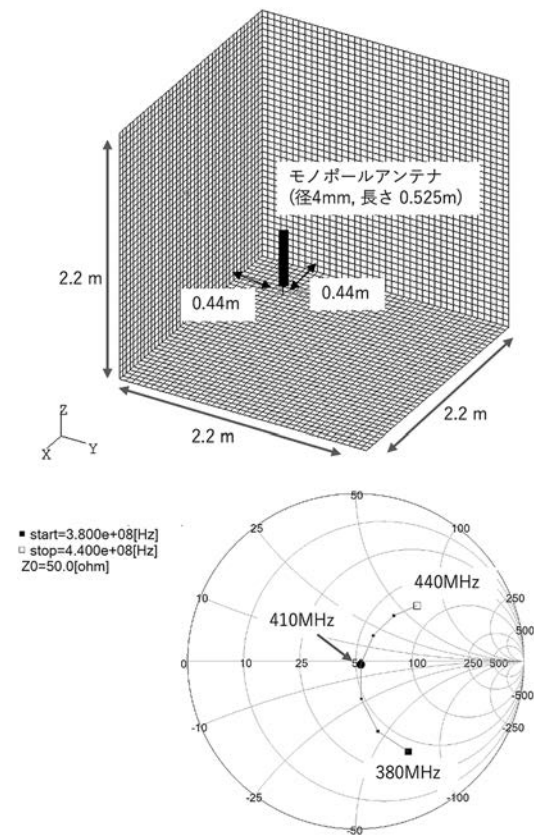


図1 (上) OpenMoMでの3DCRの3次元モデル。設計中心周波数410 MHzでは1片の長さが2.2 mとなる。4 mm径で長さ0.525 mのモノポールを、反射面から0.44 mの位置に配置している。(下) 電磁界解析結果(スミスチャート)。410 MHzがスミスチャートの中心に位置し、インピーダンスマッチングが取れていることが確認できる。



図2 (左) 屋内での3DCR仮組みの様子、(右) 屋上での3DCR組み立ての様子。

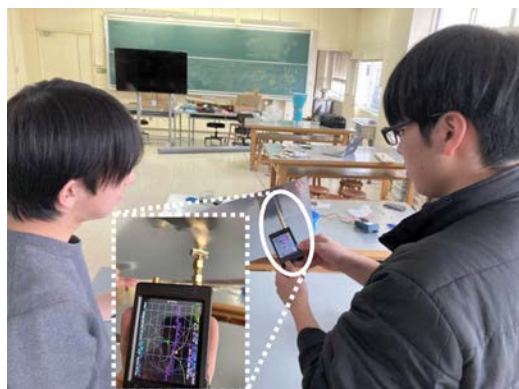


図3 簡易ベクトルネットワークアナライザによって作製したモノポールアンテナの共振周波数の確認。

からエレメント長を調整するという実習を通して電波観測装置の評価手法を学んでもらった(図3)。

福井市の中心部にある福井工業大学福井キャンパスはラジオや地上デジタルTV放送、携帯電話や無線LANなど電波を使ったサービスがあふれており、宇宙からの微弱な信号を覆い隠してしまう。学生達により作成されたモノポールアンテナを用いてRFIの確認を行ったところ、あまたの強力な人工信号が受信された(図4左下)。非常に大きなRFI信号が初段の低雑音増幅器(Low Noise Amplifier: LNA)を飽和させてしまい、このままでは観測ができないことが確認できたので、初段のLNA前にRFIを除去するためのフィルタを挿入する必要が生じた。初段のLNA前の損失はそのまま観測システムの雑音指数(Noise Figure: NF)の悪化となり検出感度が劣化するため、挿入するフィルタの損失は出来る限り小さくする必要がある。そのためmini-circuit社の低損失Low-Pass Filter (SLP-450+)を3DCRとLNAの間に挿入し、地上デジタルTV放送で使用されている470-710 MHz帯や700, 800及び900 MHzで携帯電話等で利用されている周波数帯(プラチナバンド)のRFIを抑制した(図4右下)。410 MHz付近のRFIの混信状況を精査した結果、413 MHz付近が比較的RFIが少ないのでこの周波数を観測

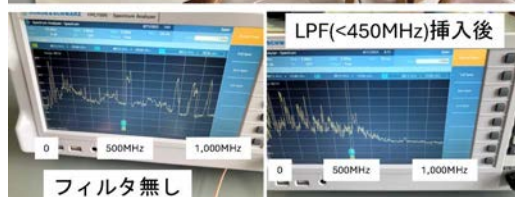


図4 (上) スペクトラムアナライザと作製したモノポールアンテナによるRFI確認の様子。(左下) 福井工業大学福井キャンパスにおける平日日中のRFI確認結果。非常に多くの人工電波が飛び交っていることがわかる。(右下) LPFをアンテナと初段のLNAに挿入した結果。450 MHz以上のRFIが抑制されていることが確認できる。

周波数として採用した。

3. パルサー (B0329+54) 観測

図5に観測システムのブロック図を示す。LNAは3DCR直下に設置するため、バイアス-Tを用いて同軸ケーブルにDC-5 Vを重畳して電源供給している。LNAはmini-circuit社のZKL-33ULN-S+を用いた。3DCRの受信信号はLNAの後、SMA同軸ケーブルコネクタ(30 m)で屋上から実験室に引き込んでいる。受信信号はBand Pass Filter(中心周波数 $f_c=408$ MHz, 帯域幅(BW)=20 MHz)でさらなるRFI除去を行いソフトウェア無線(SDR: Software Defined Radio)受信機(Airspy mini[7])に入力している。観測用PCとしてMacbookを使用し、USBポートからLNA用のDC-5 Vを供給することで観測システムを簡素化

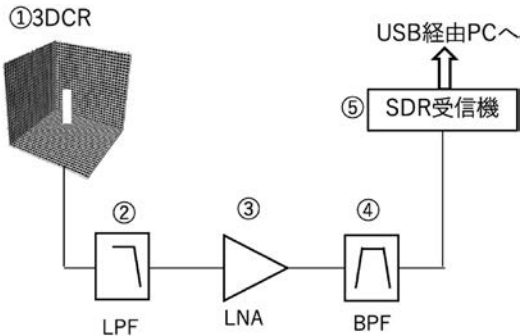


図5 観測システムのブロック図. ①3D コーナリフレクタアンテナ, ②LPF (SLP-450+), ③LNA (ZKL-33ULN-S+), ④BPF (中心周波数: $f_c=408$ MHz, BW=20 MHz), ⑤SDR 受信機 (Airsy mini).

している。

Google Map から福井工業大学の緯度と経度 (36.1°N , 136.2°E) を取得し, Python の天文データ解析パッケージである Astropy[8-10] を用いてパルサー B0329+54 の北中高度を計算した. 福井工業大学での B0329+54 の北中高度は 71° であり, 3DCR の主ビームは各反射板に対し 45° 傾いた方向を向いているため, 3DCR は 26° 傾けて北向きに設置した (図6). 3DCR のビームサイズは約 25° と大きくポインティング精度への要求が厳しくないため, スマートフォンのコンパスと計測アプリでアンテナの方位角と仰角の位置合わせを行った. 観測時間は先行事例[1]と同じく2時間とした. 感度計算や観測時間の設定については, 第116巻第8号の報告[11]を参照されたい.

初観測は1月31日 (金) の夕方から開始した. Astropy と Python のタイマーモジュールを用いて B0329+54 北中時刻の1時間前から観測を開始し, 2時間のデータを取得する観測プログラムを用いた. 観測には gqrx[12] という SDR ソフトウェアを用い, SDR のサンプリング周波数 6 MHz で, 周波数帯域 413 ± 3 MHz の電圧データを単精度浮動小数点複素数によりハードディスクに保存した. 記録された時系列データは高速フーリエ変換



図6 完成した3DCRの設置状況. 北に向けた3DCRの仰角を B0329+54 の北中高度に固定している.

(FFT) により 1 ms ごとのパワースペクトルへと変換し, さらにソフトウェアパッケージ YOUR [13] を用いて PSRFITS 形式に変換した. その後, 国際的に広く用いられているソフトウェア PRESTO [14] を用いて, 群遅延補正 (De-dispersion) を実施した. ここで, De-dispersion とは, パルサーから放射された信号が星間空間を伝搬する過程で受ける遅延を補正する処理である. この遅延は, 周波数の逆数の二乗と, 星間プラズマ中の自由電子密度の視線方向積分値との積 (分散量: Dispersion Measure, DM) に比例する. 今回の観測では B0329+54 に対して既知の DM 値である $26.7641 \text{ cm}^{-3} \text{ pc}$ を採用した. De-dispersion 処理後, パルスの信号/雑音比を向上させるため信号を周期ごとに分割し畳み込む (Folding) 処理を行った結果, パルス信号が確認された. しかし, 観測地である福井市内は, RFI (電波干渉) の影響が大きかったため, PRESTO による RFI マスク処理を追加で実施した. その結果, 明瞭なパルス検出に成功し, 学生が自作した 3DCR を用いた都市部での観測としては, 本邦初の成果となった (図7, 8).

観測は引き続き土日も継続し, RFI の状況がどのように変化するかを確認した. 1月31日 (金) は比較的 RFI が少なくパルサーを明確に検出することができたが, 2/1 (土) 及び 2/2 (日) には

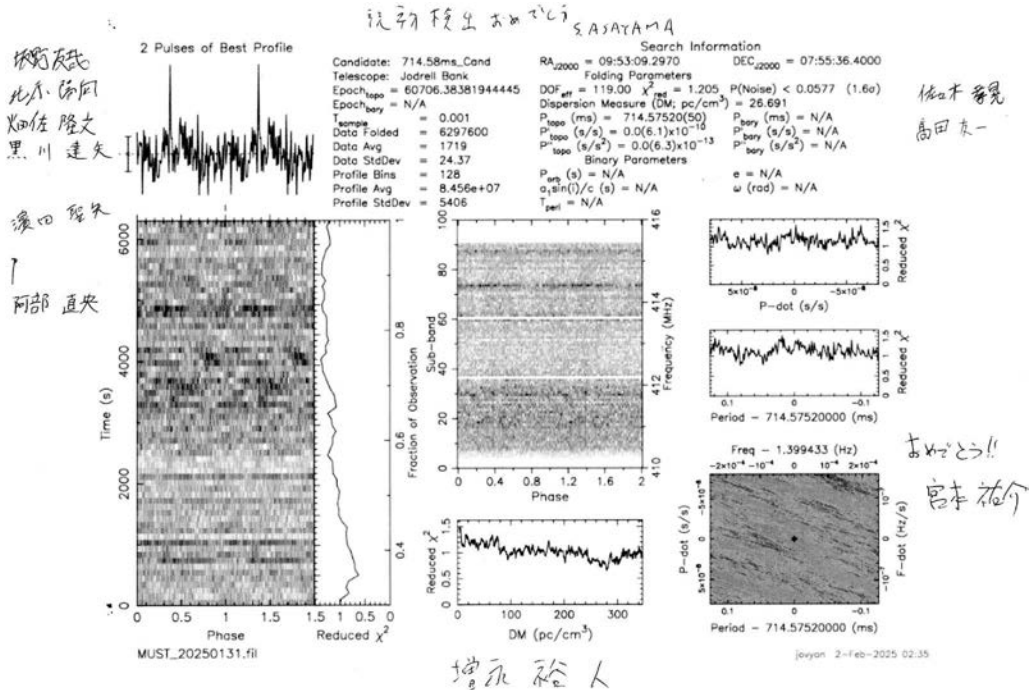


図7 福井工業大学での学生手作り3DCRによる電波パルサー（PSR B0329+54）初検出のプロット。

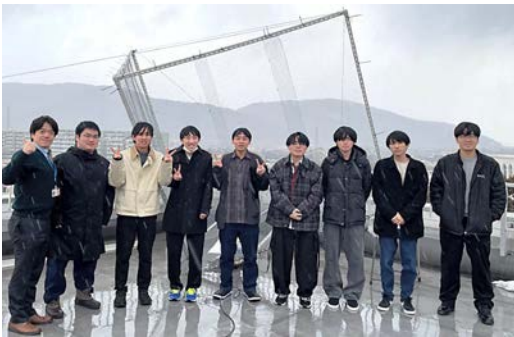


図8 作成した3DCRとの集合写真。

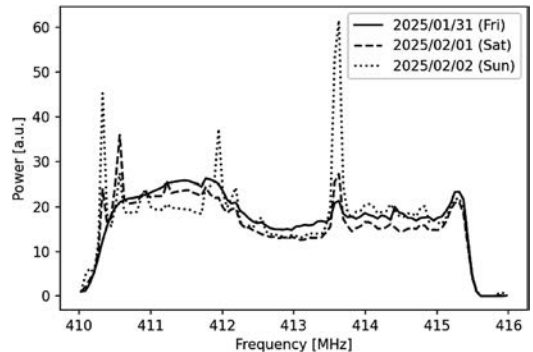


図9 2025年1/31（金），2/1（土）及び2/3（日）における2時間の平均パワースペクトル。

413.7 MHz付近に非常に強いRFI信号が混信しており，さらに410 MHz，また412 MHzにもRFIが見受けられた（図9）．非常に強いRFIのために2/2（日）のデータではパルサーの検出が明瞭にできなかった．総務省の周波数の割り当て [3]によると413.7 MHzは小電力無線電話に割り当てられているため，福井工業大学近辺で土日に無線電話を使った業者か個人がいたことが推測される．また410 MHzや412 MHzも固定陸上移動

（公共業務用／一般業務用）で貨客運送事業用等に割り当てられているので，休日における人々の移動に伴うRFIが増えたものと考えられる．都市部での電波天体観測においては人間活動に起因するRFIをなくすことは不可能なので，人の活動が静まる深夜から早朝に天体が正中する季節での観測を行うなど，運用での対応が現実的であろう．

4. おわりに

今回実施した、手作り望遠鏡でのパルサー検出例は、望遠鏡製作に学生が主体的に関わることで、電波天文学をより深く理解するだけでなく、データ処理・解析といった面で新たなアルゴリズムを開発するためのプラットフォームとして活用できるポテンシャルを有している。また、アンテナ工学から観測天文学の多岐にわたる範囲をカバーしており、Pythonを用いたデータ解析やデータの視覚化、さらにAIを用いたRFI除去処理などの題材としての応用も考えられる。簡易で安価な装置を用いて市街地にある大学構内でパルサーの検出に成功した本結果は、国内の大学等における学生実験やデータ解析実習の課題としても活用できるであろう。

謝 辞

400 MHz帯の電波利用状況についての情報提供をいただいた日本流星研究会の矢口徳之氏および横川英彰氏に感謝申し上げます。本活動はJSPS科研費24K21474の助成を受けたものです。

参 考 文 献

- [1] 矢口徳之他, 2024, 天文月報, 117, 109
- [2] 平松正顕, 2025, 天文月報, 118, 177
- [3] 総務省電波利用ポータル, <https://www.tele.soumu.go.jp/search/wari/index.htm>(2025.2.23)
- [4] Inagaki, N., 1974, IEEE Trans. Antenna. Propagat., 22, 580
- [5] <https://www.rf-world.jp/bn/RFW39/RFW39O.arc/www.e-em.co.jp/OpenMOM/index.html>(2025.2.23)
- [6] <https://nanovna.com/>(2025.2.23)
- [7] <https://airspy.com/airspy-mini/>(2025.2.23)
- [8] Astropy Collaboration, et al., 2013, A&A, 558, A33
- [9] Astropy Collaboration, et al., 2018, AJ, 156, 123
- [10] Astropy Collaboration, et al., 2022, ApJ, 935, 167
- [11] 矢口徳之他, 2023, 天文月報, 116, 426
- [12] <https://gqrx.dk/>(2025.2.23)
- [13] Aggarwal, K., et al., 2020, Journal of Open Source Software, 5, 2750
- [14] Ransom, S., 2011, Astroph. Sour. Code Lib. ascl:1107.017

Successful Detection of a Radio Pulsar (PSR B0329+54) in the 413 MHz Band Using a 3D Corner Reflector Antenna Made by Students at Fukui University of Technology

Yusuke MIYAMOTO¹, Nao ABE¹, Hinata KITAHARA¹, Tatsuya KUROKAWA¹, Tomoya SAKANO¹, Takaaki SASAKI¹, Yuuichi TAKADA¹, Seiya HAMADA¹, Takafumi HATASAKI¹, Yuto MASUNAGA¹, Tomoka TOSAKI² and Shin'ichiro ASAYAMA³

¹Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Fukui University of Technology, 3-6-1 Gakuen, Fukui, Fukui 910-8505, Japan

²Department of Geoscience, Joetsu University of Education, Yamayashiki-machi, Joetsu, Niigata 943-8512, Japan

³SKA Observatory (SKAO), Jodrell Bank, Lower Withington, Macclesfield, SK11 9FT, UK

Abstract: We report the successful detection of a radio pulsar (PSR B0329+54) in the 413 MHz band using a 3D corner reflector antenna made by students at Fukui University of Technology. This pulsar detection is not only the first detection of a pulsar by a student's handmade telescope in Japan but also the first demonstration of pulsar detection in a Japanese urban area with significant Radio Frequency Interference (RFI). The results show that pulsar observations can be carried out even with a simple and inexpensive telescope using only commercially available components purchased through the Internet. These findings will be useful for student experiments and data analysis training at universities and other institutions in Japan.

太陽の家ハレアカラから太陽観測

U.S. National Science Foundation's National Solar Observatory

国立太陽観測所（アメリカ、ハワイ州）

<https://nso.edu>

阿南 徹（Associate Scientist）

最初の海外出張は、アメリカ合衆国ハワイ州のマウイ島であった。2010年のことである。私は修士2年生であった。日付を間違え研究会開始の2日前に研究会会場のリゾートホテルにチェックインし、ポスター発表の結果がまだ出ていなかったで、プールにもビーチにも行かずホテルの部屋に籠って必死に解析した。3分間割り当てられた口頭講演では、時間配分ができず、イントロダクションの説明で終わってしまった。散々の出来であったが、National Solar Observatory (NSO) の Thomas Rimmele さんに「(悪い意味で) 面白い発表だった」と、一緒に参加していた指導教官に話しかけていたと後から聞いた。見学会では、ハワイ語で「太陽の家」を意味するハレアカラ山の山頂に行き、世界最大の太陽光学望遠鏡 National Science Foundation's Daniel K Inouye Solar Telescope (DKIST) の建設予定地を見学したことを覚えている。当時はまだ更地であった。

あれから15年、私は、NSOで、DKIST代表の Thomas Rimmele さん、David Boboltz さんの下、Associate Scientistとして、DKISTに関わる仕事をしている。本記事では、成り行きやハワイでの生活、アメリカの観測所での仕事について紹介する。

研究員採用

修士2年生からポスドク4年目まで、私は京都大学の飛騨天文台で、口径60 cmのドームレス太陽望遠鏡に設置する偏光分光観測装置の開発、観測運用、データ処理、データ公開、データ解析、研究、学生や外部から来られた観測者のサポート

を行っていた。毎年1,2ヵ月くらいは、自由に望遠鏡を使わせていただき、その日の太陽の様子を見ながら、一番適した科学課題を考えて観測に行った。スペクトル線も可視光から近赤外まで選び放題だった。地球大気の揺らぎによってどうしても画質が悪いので、アイデア勝負で装置の自由度を活かした科学課題を考えたことが楽しかった。この経験によって、私は太陽偏光分光観測のあらゆることと様々な研究課題に精通することができるようになったと思う。

2016年12月、NSOから、2019年にファーストライトを迎えるDKISTに関わる研究員の公募が2枠出た。もともと国内にこだわっていなかったで、世界最大の太陽望遠鏡の完成と初期データに関われる大チャンスだと思い、勇んで応募した。書類審査の後、オンラインでの面接が1つあった。今思えば、サマータイムの切り替えの時期で、あろうことか面接時間を1時間遅い時間だと勘違いしてしまい、服装など準備していたところに「面接開始時間を過ぎているけど、参加できるのか？」というEメールが来て、慌てて髭を剃って面接に入った。Rimmele さんも含めて6人の研究者の前で、今後の研究内容について質問を受け、取り組みたい科学課題やDKISTに取り付ける新しい装置のアイデアを答えた。2回ほど、質問の英語がわからず聞き返しても意味がわからなかった。英語のコミュニケーションができないことも伝わったと思う。面接は早朝5時か6時で、出張中のホテルの部屋で受けた。家族同伴だったので、0歳の娘の声も聞こえていたらしい。

その後、Rimmeleさんとオンライン面接を行い、就職の意志などを聞かれた後、その場で雇ってもらえることを告げられた。聞いたところによると、もともと2枠のところを1枠新たに作って私を雇ってくれたらしい（勘違いかもしれない）。思い返してみると色々と不完全な面接だったので、この記事を書くにあたって、面接官だった今の同僚に私が雇用された理由を聞いてみた。DKIST完成前で焦点面装置の開発が始まる時期だったので、私の偏光分光観測装置の開発から研究まで、ほぼ一人ですべて行った経験がNSOの需要と一致したのがよかったらしい。装置開発を十分経験した若い人材は世界でも少ないので、意図してはいなかったが、私の経験は貴重だった。また、研究成果は少なかったが、内容はよかったし、今後の研究計画に将来性を感じることができたようである。最後に、マウイ島に住みたいというのもよかったらしい。日本人からしたら不思議かもしれないが、NSOに採用されてもマウイ島に住みたい研究者は少ない。自分がNSOで働き始めてから、新たにマウイ島に来た研究員は1人だけである。ほかの採用された研究員はNSO本部があるコロラド州を選んでしまう。

ハワイへ

2017年12月にハワイ州のマウイ島に家族と一緒に移住した。素晴らしかったことは、私と娘のアトピー性皮膚炎が1ヶ月以内に完治したことである。自分は入院直前まで悪化していたのが、あっという間に薬が必要なくなった。気候が合っているのか、なんなのか、はっきりと原因はわかっていないが、ハワイが体に合っていることを実感している。

我が家には2匹の猫がいる。移住前は、任期3年だし、猫は日本の知人に預けようかと悩んだが、一緒に移住することを決意した。ハワイはこれまで狂犬病が報告されていないため、規制が厳しい。まずマイクロチップを埋め込み、2回の狂

犬病予防接種をし、狂犬病抗体価検査を受ける。これを渡航の120日前にやっておかなくてはならない。もし失敗すると猫はホノルルで120日間施設に収容されてしまう。その後、健康診断書を自分で下書きして動物病院に作成してもらったり、寄生虫駆除をしたりした。すべての証明書を10日前までにハワイ州に提出してチェックしてもらわないといけなかったが、忘れてしまいハワイ州に電話したところ、直接提出でも不備がなければ大丈夫とのだった。これとは別に日本側に対しても、狂犬病予防法に基づく動物の輸出検査申請書を出発空港の動物検疫所に送ったりした。渡航日も動物検疫所に行ったり、貨物室の手配を空港チェックインカウンターでしたり、色々な手続きを経て、ホノルル空港で猫と対面できた時は、およそ半年の作業が報われてホッとした。

猫が日本に帰国するためには、狂犬病ワクチンの接種を海外でも継続的に続ける必要がある。ハワイに来て、狂犬病ワクチンを打ってきたつもりだったが、4年くらいして、動物病院にもウチにも、最初の狂犬病ワクチンの証明書がないことがわかった。違うワクチンを打たれていたようである。もし自分が日本に帰ることになったとしても、猫は永住しないといけない（かも）。

ホノルルほどではないが、マウイ島にも多くの日本人が昔から住んでいる。日本の伝統文化が日本国内とは違う形で残っているようである。例えば、夏になると2ヵ月間毎週末どこかのお寺で盛大な盆踊りが開かれる（写真1）。和太鼓クラブが子供の習い事として人気だったり、古い神社の内装を見れば、忠臣蔵の各場面の絵が飾ってあったりする。

日本では気軽に友達や知り合いを作るのは難しい。こちらでは、通りすがりの人でも日本人と分かれば、すぐに交流が始まり、知り合いになれる。相手が日本人じゃなくても、気楽に声をかけて話したりできる。世界規模で様々な人生経験をしてきた人、様々な考え方を持つ人と交流でき



写真1 盆踊りの様子。

る。また、コロナ禍や火事での行政や人々の反応、政権交代によって給料が出るのかどうか不透明になったり、ビザの発行が遅れたり、日本との違いを日々体験し興味深い。

こちらでは、研究員でもボーナスがもらえ、毎年給料を3%ずつくらい上げてもらえる。ところが、ハワイの元々の物価が高く、さらに物価の上昇も大きい。貯金を崩しながら、慣れない社会で生活を整えることに時間がかかる。海外に住むつもりが全くなかった妻には苦しい思いをさせた。次に移住するときは、単身で生活環境を整えてから家族を呼ぶようにしようと反省している。また、家族で日本に帰ること、島を出ることが金銭的な理由で最初の5年間でできなかった。閉ざされた環境で海以外娯楽が少なく、家族にストレスがどんどん溜まっていった。時々日本に家族で帰国することが我が家の最優先事項となった。

そんななか、2018年7月にNSOのDKIST部門でテニュアトラック・サイエンストラックの公募が出た。書類審査を通り、研究発表と面接を行った。手応えはあったが、結果は不合格だった。

再び、2020年にNSOのDKIST部門からサイエンストラックの内部公募が出たので応募した。面接を経て採用していただいた。サイエンストラックは、組織へのサポートが75%、自分の研究が25%の役職で、3年ごとに更新が必要。3回昇進

すると任期のない研究者になれる。テニュアトラックと違って無期雇用となるまでの期間は決まっていない。またテニュアトラックよりも自分の研究に使える時間は短い。2024年に1つ昇進し、現在は、Associate Scientistという役職になっている。貯金はまだできないけれども、移住当時の金銭的な心配も今はほぼなくなった。1年に1度、自分以外の家族を日本に帰国させることもできるようになった。

職場環境

NSOのDKIST部門では、技術者、事務職員も含めて、およそ100名が働いている。仕事は細かく分担されており、各種技術者、施設管理、安全管理、広報など。日本にいたときは、色々な仕事を抱えて、夜や休日でも仕事のことで頭がいっぱいであった。分担のおかげで、今のところ、プライベートの時間を作ることに抵抗がなくなり、よいのか悪いのかお酒がなくても研究のことを忘れるようになった。その余裕は、研究面においても視野を広げることに役立っていると思う。

マウイ島にはサイエンティストが8人おり、それぞれが、色々な形で装置開発や運用に関わっている。みな同年代で、とても気楽に交流できる。いまだに自分が一番年下の後輩な気持ちである。観測所なので、学部生・大学院生の教育や授業を担当する義務はない。この夏、初めてインターンの担当をするくらいである。学生とともに大きな研究グループを形成していくには不向きかもしれない。一方で、最新の観測データを使って自分のやりたい研究を進めていくには適した環境だと思う。個人的に研究費を取れるに越したことはないが、大きな望遠鏡運用資金の中で活動しているので、研究費を取らないと研究ができない、生活できないということはない。

私の仕事は、大きく分けて、DKISTの運用、DKISTの焦点面装置 Diffraction-Limited Near-Infrared Spectropolarimeter (DL-NIRSP) の開発、

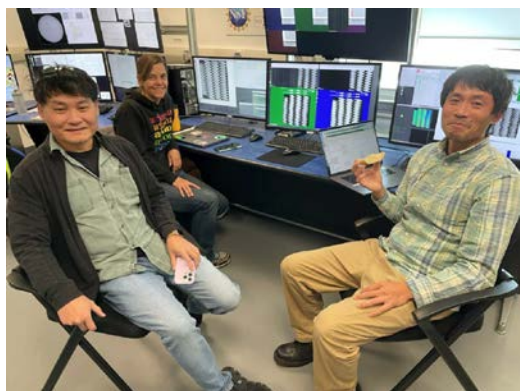


写真2 DL-NIRSP開発に関わる主なサイエンティスト。面分光ユニットをファイバー方式からイメージスライサー方式に変更し、光学試験をしている様子。右が筆者。

自分の科学研究の3つである。

DKISTは、応募され採択された観測提案書を基に科学的観測を行っている。私の運用の仕事としては、まず、提案された観測が技術的に実行可能かどうかの審査を行っている。次に、採択された提案書を基に、PIと話し合いながら、観測プログラムの作成を行う。最後に、DKISTで天候や太陽の様子、装置の状態などを見ながら、観測の指示をする。望遠鏡操作担当の人がいるので、自分で望遠鏡を操作することはない。私が観測当番の時は、空も晴れ、地球大気ゆらぎの状態もよく、太陽表面の爆発現象フレアが発生すること多いと、観測グループ内でも認識されている。観測運のよさが一番NSOに貢献しているかもしれ

ない。

焦点面装置の開発では、DL-NIRSPプロジェクトを主導しているサイエンティストをサポートする形で仕事している。私は、主に光学的なテストの計画、データ取得、性能評価、ソフトウェアの開発を行っている。私がNSOに所属して半年くらい経ってから、DL-NIRSPの各部品がNSOの隣にあるハワイ大学の開発室に納品され始めた。部品のデザインには関われなかったが、部品の組み立てから立ち上げ、運用、アップグレードと貢献できたので、とてもよい時期にNSOに採用されたと思う。

残りの時間で、DKISTのデータ解析や次世代の装置の構想を夢想したりしている。詳しいことは別の機会に。

最後に

日本とは違う言語、違うシステムなので、生活でも仕事でも小さなことでも、何かできた時の達成感が大きくて気持ちよい。「日本だったら簡単にできることなのに！」という場面がよくあるが、言語の違いや日本の素晴らしさと特殊さを思うと同時に、「もともと人間の生活ってこんなだよ」とそれを受け入れる余裕が生まれる気がする。また、周囲から聞こえてくる言葉、見えてくる文字を全部わからなくてよい気楽さ。そんな不便なところが、私にとっては（今のところ）住み心地がよいのだと思う。

日江井榮二郎氏ロングインタビュー第6回： 日食観測（2）



高橋 慶太郎

〈熊本大学大学院先端科学研究部 〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1〉

e-mail: keitaro@kumamoto-u.ac.jp

日江井榮二郎氏のインタビューの第6回です。前回に引き続き、日食観測についての様々な体験を語っていただきます。日食観測では過酷な環境の中で各国の観測隊と助け合い、現地の人々と交流する機会が多くありました。そこには当時の社会的背景や歴史的背景が色濃く反映されており、太平洋戦争の記憶や異国の生活文化を読み取ることができます。さらに日江井氏は国立天文台を退職した後、明星大学で学生をはじめとする92名の大規模な団体を引率してパラグアイでの日食観測を行いました。現地で学生たちは日本人移民からの温かなサポートを受け、日食観測に積極的に取り組むとともに学生同士の国際交流も行うなど、大成功といえるイベントとなりました。前回と今回の内容を通して、日食観測は科学的発見の場であると同時に多様な文化や歴史と向き合い、人と人をつなぐ学びと交流の機会として豊かな側面を持つことがわかります。

●モーリタニアとインドネシア

高橋：前回から日食観測のお話を伺っております。皆既日食はコロナや彩層など普段は観測しにくいような表面の現象を観測するよい機会であったということですね。先生が初めて皆既日食の観測に行ったのが1958年のスワロフ島で、その後も10回以上観測に行かれたということでした。前は1962年のニューギニアのラエでの観測についてもお話ししていただきました。他にも印象に残っている観測はございますか？

日江井：前回お話ししたようにコロナと光球の間に彩層という海のような層があるんですが、そこにスピキュール（太陽の彩層に存在する針状の構造）というのが出てくるわけです。太陽の表面から細く伸びているスピキュールの間から、奥に広がっているコロナの明るい部分が見えるんですね。この様子を撮ろうと思ってですね、モーリタ

ニアでもトライしたし（1973年）、インドネシアでもトライした（1983年）。でもモーリタニアではハルマッタンという砂嵐にあっちゃいましたし、インドネシアでは少し薄雲でよくなかったね。

高橋：スピキュールを撮ろうとしたんですね。あまりうまくいかなかったと。

日江井：一番辛かったのはモーリタニア（写真1）。サハラ砂漠西端のアタルってところなんです。気温が43度、44度、もう仕事にならないですね。だから朝早く行ってね、宿舎に帰ってくると水で体を洗うわけ。でもバケツ一杯の水しか使えない。それを頭から水をかけてもらってうわーとさっぱりしましたが、つらかったなあ。モーリタニアには世界各国の人が来ましてね、イタリア・ソ連・ドイツ・スイス・フランス・オランダ・アメリカ、そんなところかな。我々はフランスと同じ宿舎に住まわせられて、その近くの広場で観測をやったんです。

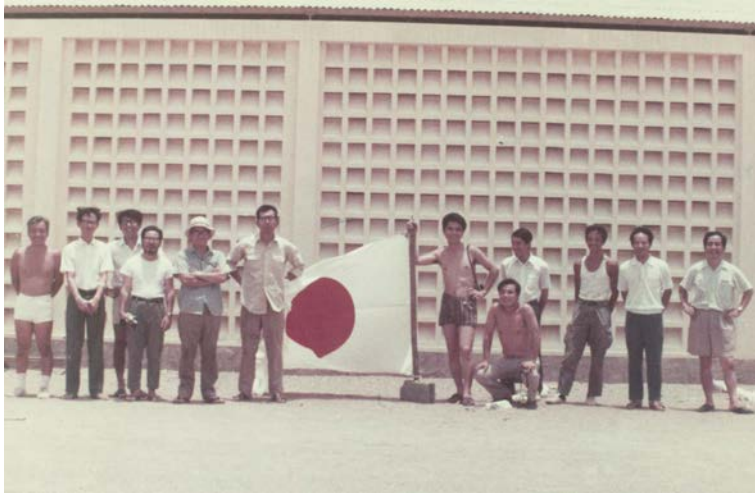


写真1 東京天文台，水路部，京都大学，緯度観測所によるモーリタニア日食観測隊（日江井氏提供）。左から森巧（水），石井明（東大医科研），宮崎英明（東），徳屋厚（東），日江井榮二郎（東），守山史生（東），椿都生夫（京），黒河宏企（京），我如古康弘（水），角田忠一（緯），岩館健三郎（緯），神野光男（京）。

観測機材はセネガルまで船で運んで、その後陸路でアタールまで運びました。イタリア隊は、飛行機で観測地近くに着陸したんですね。観測が終わると飛行機がまた迎えに来てね、羨ましいと思いましたね。

高橋：モーリタニアはかなり遠いので運ぶのも大変ですね。それで結局観測のときは砂嵐になってしまったと。

日江井：ハルマッタンになっちゃってね。強風が吹いて砂嵐が舞い上がって、オランダ隊の観測テントなんか飛ばされちゃってね。よい観測ができませんでした。アマチュアの人はいちやうと離れたところにいてちゃんと観測していましたけど。

高橋：アマチュアもいたんですか。

日江井：アマチュアの人たちはもっと離れたアフリカの中央部にいました。そっちの方が晴れたようですね。プロの天気予報はあてにならないって噂されたけれど（笑）、まあそれはしょうがない。たまたまそんなことになっちゃいましたね。

それからそのときソ連の観測隊が我々から一週間ほど遅れて20人くらいで来ました。僕らが先

に現地に入ってたわけですが、我々の宿舎に冷蔵庫があったんです。冷蔵庫っていってもこんなところに電気はないからね、温めて冷やす冷蔵庫。ケロシンであつたためですね、蒸気を作ってプレッシャーをかけるんですね。そういう冷蔵庫が昔あった。それで冷やした水をソ連の人たちに飲ませたら非常に喜んでくれてね。それで彼らはコロナ直接像を撮るんですけども、そのときに感心したのはソ連の赤道儀の望遠鏡。回転するウォームギアがこんな大きくて立派でね、やっぱりロシアっていうのは日食だけじゃなくていろいろな天文の観測を昔からやってると聞いてましたからね。プルコヴォ天文台もありますから。立派な望遠鏡を持ってきて、いやああれには感心したね。

高橋：そういうところで仲良くなるわけですね。

日江井：各国の観測者と食後には楽しみましたね。特にイタリア隊の連中は面白かった。それからインドネシアのときには私が日食の観測隊長をやったんですよね。一緒に行ったのは京都大学、東北大学、緯度観測所とか宇宙研、水路部とかですね。そのときはバルーンを上げて観測しました。皆既日食の本影の中に気球を飛ばすのは容易



写真2 インドネシアでの住民との交流（日江井氏提供）。

ではないんですね。でも宇宙研とか、京大、天文台の観測員の努力でうまく観測ができたんです。それで太陽Fコロナの端っこの方にダストを見つけたんです。でも東の方では見つけたけど西の方では見えない。あれおかしいんじゃないかって文句を言われたんですが、いまだもってよくわかんないんです。

●現地の人たちとの交流

日江井： 僕は日食観測で現地へ行けばですね、モーリタニアの人、インドネシアの人、各々の人たちと交流するわけです（写真2）。インドネシアでは我々天文台の観測隊はセップっていうところに滞在して、石油会社の社宅の中に観測地をとったんですけども、その人たちがいろいろ面倒見てくれるわけです。こんなお菓子があるよとかね。で、そのお礼に僕は望遠鏡でお月様を見せた。お月様っていうのは肉眼で見るときれいなんですけど、望遠鏡で見せるとあばたがいっぱいあるわけです。それを見たインドネシアの女の子から、「ああ、こんなの見るんじゃないかって言われましたね（笑）。

高橋： クレーターがボコボコあってっていうことです。

日江井： それでインドネシアってのはその頃まだ



写真3 インドネシア日食荷物（日江井氏提供）。

まだ治安がよくなってですね。入国のときにはジャカルタの空港に日本大使館の方が出迎えて来てくれてよかったんですが、ジャカルタからスラバヤに行くときは我々だけだったんですね。そして荷物検査のところで係の人が「通せませんよ」とか言ってね。日食観測の機材（写真3）だなんて言ってもダメで、要するにunder the tableを要求されるわけよ。しょうがないからこっちはお金を出して通してもらってさ。それでこれは大事な日食の機材だよって行って保税の場所に置いてもらった。ところが保税の場所に泥棒が入っちゃってね、木箱に穴を開けられた。もちろん金目のものなんか何にもないわけ。でもちょっと装置を壊されちゃって、それはこっちとしては困るわけ。だから商社の人に連絡したんです。当時FAXがもうあったから、ここが壊れちゃったんでこういうものを送ってくれて機械の図を書いてFAXを送ったんです。するとその商社を通してね、すぐ送ってもらえた。あれはすごいなあと思って、ずいぶんそういう商社のお世話になりました。そういうところに幸いに日本の商社の人がいてね。ペルーもそうだし、モーリタニアでもインドネシアでも、ずいぶん助けていただきましたね。

高橋： 先生が一番思い出深いのはどこですか？

日江井： いやあやっぱりスワロフですよ。それにペルーもよかったなあ。ペルーのアレキパというところから東に20 kmくらい離れたチグア

タという村の学校跡地を観測地にしたんです。それで僕らだけでは準備ができないからチグアタで人夫を雇ったわけですよ。そこでは現金収入がないんでしょうねえ、雇うのはいくらがいいかっていうのは現地の人に聞きました。それで1人よさそうな農家の人を雇って、観測機材の組み立てを一緒にやったんです。彼はよく働いてくれました。それで日食が終わって明日はお別れというときにその人がね、うちへいらっしゃいよと。それでその人の家へ行ったらね、食事を出してくれたんです。モルモットを丸ごと焼いた料理。そこではそれがいいおもてなしだそうです。

高橋: モルモットですか。それで食べたんですか？

日江井: 歯がこんな出てね、初めは気味が悪かったけど食べました。鶏のような味がしてね、結構おいしかったですよ。

高橋: 顔もついてるってことですか？

日江井: 顔ついてる(笑)。だからまあそこではそういう食べ方なんでしょうねえ。でもそうやって彼らは一生懸命感謝をしてくれてるわけよね。そういうなんていうか、言葉は通じなくても気持ちが通ずるような、というところがよかったですね。

高橋: 現地の人ということ言えば、例えばニューギニアは太平洋戦争の激戦地でラエにも日本軍が上陸していますよね。日食観測が1962年

ですからまだ戦後という感じが残っていたと思うのですが、日本人として何か感じるものはありましたか？

日江井: ありました。確かにラエというところは激戦地でしてね、日本の兵隊さんがずいぶん死にました。観測場所は海岸に近いところだったんです。そこに船が一隻、船首を上にして全体の3分の1ほどが水面から顔を出していましたね(写真4)。近くの森の奥地には戦車が放置されていました。

高橋: そうなんですか。まだそういう残骸が残っていたわけですね。

日江井: それで海岸に立派な樹木が1本立っていたんですね。その樹は20年ほど前の激戦を見てきたんだろうなと思いましたね。私の知人のご家族の方にラエで戦死された方がおられましてね、その方からラエの様子を知らせてくれ、海岸の小石を遺骨代わりに持ってきてくれて頼まれましたね。現地の人にも「これは日本の兵隊からもらった」って、昔の1円札を見せてもらいました。だからまだ戦後の雰囲気が残っていましたね。

高橋: そうですか。

日江井: それにニューギニアには日本軍と戦って戦死されたオーストラリア人もたくさんいたわけです(注: 太平洋戦争以前、ラエを含むニューギニア島北東部はオーストラリア委任統治領であり、ニューギニア戦線で日本軍はオーストラリア軍やアメリカ軍と戦った)。ラエにはホテルが1つありましてね、僕と相棒はそこのホテルに住んでいました。住むところはそこしかなかったんです。そこにはレストランがあって、あるとき昼飯を食べてたら隣の席のオーストラリア人の女性が私を憎々しげに眺めるわけですよ。私もそれに気づきました。そしたらね、後でそのホテルの人が来て、「申し訳ない」と。「あの方はご主人があなたに似てる日本兵に殺されたと思って憎しみの眼をやった。お許しください。」と謝りに来てね。まあ日本人を見れば兵隊を思い出したんでしょうから、だからやっぱりニューギニアはそういうと



写真4 ラエ沈没船(日江井氏提供)。

ころでした。

高橋: 両軍ともかなり被害が大きかったわけですよ。そういうことはよくあったんですか？

日江井: そうだなあ、そういう体験をしたのはその食堂だけだったですかね。僕らが行くときには公用旅券だから大使館が動いてくれてですね、やっぱり守ってくれてたんじゃないかと思いますね。だから何か実際に危害に合うようなことは一度もなかったですね。

それからホテルのプールで水泳大会があってね、トビウオの日本人とオーストラリアの少年4人ずつです。リレーの競争をしたんです。僕らはもうアマチュアですからね、1人なんかクロールができないから平泳ぎでやってね。もちろん負けました。あとニューギニアでは現地の人たちのお祭りで踊りを見てね、シンシンというんですけど、そしたら人類学の先生がそれを聞きつけて、「その写真を見せてくれ」って、その当時の現地の様子をとっておきたいとか言ってね。だからまあそうやって国際交流もやりました。

●病気の話

高橋: 日食観測の旅行中に病気とかはされなかったですか？

日江井: 私は病気しなかった。でもそういえばモーリタニアでは隊長が守山（史生）さんだったんですけども、守山さんが肝炎になっちゃってね。当時モーリタニアっていうのは衛生状態があまりよくない。とにかく砂漠でしょ、大使館の人に聞くと、砂がバーッと舞って目に入ったりしてね、眼病になる人が多い。だから医者を連れて行った方がいいよっていうんで、東大の医科学研究所の先生を連れて一緒に行ったんです。

それで観測が無事に済んで、帰りにパリに寄ったんです。パリで我々はもう大丈夫だからってお医者さんと別れて、それで僕らはスイスへ行ったんですね。スイスに天文台があって、ワルドマイヤー（M. Waldmeier）がいたりするからね。そ

したらそこで守山さんの調子が悪くなって、食べ物が食えなくなった。それでねえ、もともと僕らはその後イタリアへ行ってロカルノの天文台を見てから日本に帰ろうとしてたんです。でも守山さんが調子悪いっていうんで、守山さんと私が先に日本に帰って、後の2人にはイタリアを周って帰りなさいと。それで私と守山さんは日本に帰ったんです。そういう報告を天文台に電報で送ってたんですが、また運が悪いことに天文台で電報の紙が重なっちゃってあまりよく読めなかったらしくて、なんか守山さんが病気で急に帰るとかいうんで心配しちゃってね。それでまあ羽田空港へ天文台の人が来てくれて、守山さんはすぐ病院に行ってひと月くらい入院されたかなあ。大沢（清輝）先生が台長だったんですけど、後で「君、重要な電報は2通打たなきゃいけないんだよ」って言われてもうすいませんと。病気に関してはそのときくらいだったかなあ、私を知ってる限りは。

高橋: お医者さんは毎回一緒に行くわけじゃないんですか？

日江井: いいや、毎回行くわけじゃない。ほとんど行かない。モーリタニアは砂漠で孤立したところなんで、特別に行ったんだ。

高橋: 東南アジアとか南米もちょっと不安な気がします。

日江井: まあそういうところはだいたい日本人会というのがあってね、いざとなったらそこへ頼めばいいよ、ということで医者は行かなかった。スワロフも本当は危なかったんだっけども医者は行かなかったですね。船医はいましたけど、島生活のときにはいませんでした。まあそれくらいの健康な男じゃないとだめだよ。スワロフのときには本当は斎藤（国治）先生も行く予定だったんですが、そのときは体が良くないからダメだってもう天文台から止められちゃってね。ていうんで山下（泰正）君が代わりに行ったんです。だけどその後、斎藤先生も体が治ったのかな、もうその後ずうっと行ってらっしゃいますよね。

高橋: 日本では日江井先生が一番多く日食観測に行ってる感じですか？

日江井: いや、そんなことない。一番行ってるのは斎藤先生じゃないですか。斎藤先生が9回、私は7回です。斎藤先生はほとんど日食の度にコロナの写真を撮りに行っていました。東京天文台から行く人間というのは、守山さんがいて私がいて牧田（貢）君がいて平山（淳）さんがいて田中（捷雄）さんがいて、順番に行っていましたね。今度はお前の番だよ、とかいってね。私が現役のときにはですね、乗鞍コロナ観測所に関与してる連中には本当のコロナを見せようと思ひましてね、とにかく全員が見られるように行ってもらいましたね。

高橋: 先生は割と行きたい感じだったんですか？

日江井: できればね。私は嫌いではなかったですね。体もそう悪くはなかったし、日食の前になるとこう体を鍛えるようなことをやりましたからね。

高橋: 斎藤先生も太陽の研究をされていた方なんですか？

日江井: そうです。太陽コロナのね。斎藤先生は秦茂さんと組んで太陽コロナの測光学的研究をされて、強度分布の時間的な変化を調べようとしてましたね。11年周期があるからね。斎藤先生は偏光も調べてまして、大変いい観測をしたんですよ。偏光を見るとストリーマー（コロナ中で閉じた磁場構造をもち密度の濃い領域）がこっちを向いてるとかあっち向いてるとかわかってですね、いい仕事されましたね。

斎藤先生もそうですが、当時のこういう日食観測はですね、今思うと発見の時代だったと思いますね。私の場合だと、彩層がどんな状況かよくわかってなかったのを調べようというような時代だったんです。発見っていうのは面白いですよ。今は幸いにロケットだ、バルーンだ、科学衛星だ、と進んでますからね。それでも太陽の光球の近くはわかんないから、今でも日食は観測に行っ

てますよね。今だったらオートマティックにすべて撮れるでしょうけどね。

●IAU日食委員長

日江井: そんなことで一生懸命やってたときに、IAUの方から日食委員会の委員長をやれよという話がきたんです。

高橋: もともと委員ではあったんですか？

日江井: IAU日食委員会にはもともと出てました。今はどうなってるかよく知らないけど、昔は太陽っていう大きな部門があってその中に日食委員会が属してましたね。私の前の委員長はルロア (J. L. Leroy)、その前はニューカーク (G. Newkirk) だとか、リグッチ (M. Rigutti)、ハウトガースト (J. Houtgast)、レッドマン (R. O. Redman) だとかね、とにかく太陽の観測をよく知ってる連中がやってた。ルロアというのはフランスのピック・ド・ミディ天文台にいた男ですけどそれに頼まれてね、「お前、委員長やれ」と。はいって言って2期6年やることになった (1985-1991年)。そして私が2期終わったときにアメリカのパサコフ (J. M. Pasachoff) に渡したわけ。パサコフは喜んでね。

高橋: (リストを見ながら) パサコフはそれからずっとやってますね。

日江井: ずっとやってるでしょ。ニューカークあたりのときに1人2期やろうじゃないかということになったんです。ニューカーク自身も2期やって、ルロアも2期やって、私も2期で。それでパサコフにも2期だよと言ったんだけど (笑)。

高橋: IAUの間では日食についてどういう話し合いがされるんですか？

日江井: IAUは3年に1度だけでも、この期間にどういう観測をしたか、どういう結果を出したかという話はもちろんした。会議の間の期間は手紙でやり取りね、その当時は、ここで日食があるけど誰が行く予定かとか、どこへ行ったらいいかとかね。ともかく日食っていうのは世界のどっかであってね、だいたい僻地でしょ。そこの国の治

安・気象だとか、それからどこに泊まったらいいかとってというのはね、IAUを通してその国の天文屋に連絡して情報をもらう。その情報を世界中の日食に行こうという連中に配るという役割をやったわけ。

高橋: 委員長としてはそういう調整のとりまとめをするということですか？

日江井: 委員長としては、調整のために手紙で国際的にずいぶんやり取りしました。今のようにe-mailでできないから手紙だったんですね。その国の政府にも送る。

高橋: 政府にも送るんですか？

日江井: そうです。観測装置を持ていきますから、その国の税関の検査を通らないといけないですよ。それをスムーズにしてくれよだとかね。そのときに天候はどこがいいんだというのが重要ですから、その国の気象庁に気象データをもらって、それを皆さんに示してじゃあどこに行こうじゃないかと相談したり。日本の気象庁には私の友達がいたからね。どういうふうにやればいいのかって相談して、助かりましたよね。そんな感じで各グループがどこで観測してどこに泊まるとかね、国際的に調整しました。

●学生を連れてパラグアイへ

日江井: 国立天文台を定年で辞めてから、私はプロとしては行ってないんです。スワロフで見た数秒のコロナが美しかったんでね、その後はもっぱら鑑賞をしようと思ひましてね。国立天文台の後に明星大学に行ったんですが、学生たちをパラグアイに連れて行ったことがあります。92名連れて行ったの。

高橋: そんなにですか？

日江井: そうそう。明星大学に行ったらしくしてからだね、1994年にパラグアイで皆既日食があったんです。パラグアイってのは日本のまさに真裏なわけよ。一番遠いところでね、当時はほとんどパラグアイってどんな国だかわからなかつ

た。今でこそサッカーで少しわかったりするけれどもね。どんな国だかわかんないところをアメリカ回りでいったんですね。それで帰りにハワイへも寄って、ハワイはそのときまだすばる望遠鏡が建設途中だったんだけど、まあみんな無事に戻ってきた。

高橋: その92名っていうのは、大学生だけでですか？

日江井: いや、92名はね、中学生、高校生、大学生、それからOB、教員、事務の人も含めて。小学校以下はいなかったけどね。全員で92名。それは大変だったですね。

高橋: みんな自分のお金で行ったんですか？

日江井: 学生は自分の費用ですよ。私は大学の方から出してもらいましたけど。学生は外国に行きたいわけよ。その頃はちょうど学生が外国に行くような時代になってきた頃だったからね。アルバイトをして捻出した学生もいたし、親が面倒を見てくれた学生もいた。ところが親としてはね、1人で行かせるわけにはいかないと。でも大学のイベントとして行くんだしたらお金を出してもいいよというような親もいたんでしょうね。親は大変だったろうけど、行かせてくれたんだと思いますよ。学生は外国に行けてよかったなんて言ってくれてましたね。

高橋: そもそも、どうしてそんな大人数で行くことになったんですか？

日江井: 明星大学のある先生にね、「今度パラグアイで日食があるんで私は学生と一緒にいきたい」なんて言ったら、それが事務を通じて理事にも伝わったようなんですね。それでいつの間にか理事長の耳に達しててさ、私が直接言ったわけじゃないんだけどね。明星学苑は体験教育というのは大切にしているし、その頃ちょうどね、明星学苑の創立70周年記念と明星大学創立30周年記念というので、理事長も何かいい事業がないかっていう想いがあったんでしょうね。それで理事長が賛成してくれてね。学苑全体として応援してく

れたんです。

高橋: 記念事業として、ということなんですね。

日江井: 当時の理事長が偉かったんだよ。児玉三夫先生っていうすごい先生がいてね。私がびっくりしたのは、児玉三夫先生は教育をやった先生で、天文の日食のことなんか全然知らないだろうと思ってたらね、「日江井さん、皆既日食はわずか数分だから、そのときに曇ったらどうするの。だからできれば何ヵ所かに派遣したい」って言ってくれたんです。

高橋: わずか数分とか、曇るかもしれないとかいうのを知っていたんですね。

日江井: そうなんです。すごく物知りの先生だなと感心しましたね。児玉三夫先生てのは学問に対して真摯に向き合う方なんです。それで3つのグループに分けて行くことにして、一本(潔)君だとか天文台の人がチリのプトレに行くっていうので、「頼むからうちの学生も一緒に連れて行ってくれ」ってお願いしました。それでね、理事長は望遠鏡を買うお金を出してくれてさ、いやあ嬉しかったよな。だからその1994年のパラグアイの日食を観測できたのはやっぱり児玉三夫先生の配慮があったからですね。

高橋: 3つのグループでパラグアイとチリに行ったんですか。

日江井: 1つはチリ、それからパラグアイに2ヵ所ですね。

高橋: 3ヵ所に30人ずつくらい行ったということなんですか？

日江井: いや、そうじゃない。メインはパラグアイのアスンシオンで、そこに大部分が行った。パラグアイのもう1つはね、チャコっていう田舎で10人くらいのグループ。そこの農林試験場か何かの所長がね、日系人で助けてくれてさ。チャコはもう本当にワイルドなところで、食料は近くの森に行つて動物を銃で仕留めて食べるっていう生活だったって聞きました。鹿の血抜きをして、これは翌日の食事用だと言われたとかね。学生は馬

に乗って楽しんだようです。

それで行くときにある商社にお願いしたんだよ。南米に支店があって、私はその商社の偉い人を知ってて、「これから行くんだけど何とかよろしく」って言ったら、パラグアイまで連絡してくれてさ、ホテルを1つ全部借り切ってくれた。部屋を取れだとか場所を探せだとか、いろんな観測装置を現地で調達したいときにもすぐ動いてくれた。

それから、私が東大の学生だったときに入ってた山岳部の後輩がちょうどアスンシオンで養鶏場をやっててね。で、バッテリーとかテントとか、重たいものを日本から持っていくのは大変だから、その後輩に「これ買っといて」ってFAXして頼んだんです。現地で全部材料を揃えてもらって、本当に助かった。その後輩のお嬢さんには通訳をお願いしましたしね。

高橋: 遠いから準備も大変ですよ。それでパラグアイにみんなでいったと。

日江井: やっぱり団長として心配したのは全員が無事に帰れるかどうか。学生が何かのトラブルに巻き込まれたりしたら困るからね。でも商社の人たちがいろいろ手配してくれて、スムーズにいきましたよ。それに日本のパラグアイ大使館にもお世話になったし、現地の日本の大使もホテルに来てくれたりしてね。

それでパラグアイってのは、日本人が昭和の初期から移民として結構行ってる国なんだよ。だから日食で日本から学生が大勢来てるって、テレビとか新聞で報道されるとパラグアイで農業をやっている日本人たちが来てくれてさ。おにぎりだとか海苔巻きだとか差し入れしてくれるわけ。学生もやっぱりパラグアイ料理ばかり食べてる中で日本人の作ったおにぎりや海苔巻きを食べてね、「これで力が出た」っていうわけ。そうすると農家の人も喜んでくれてね。逆にこっちもそういう日本人の方々を観測の場所に招待して一緒に日食を見ていただきましたね。

高橋: 観測の方はどうだったんですか？



写真5 1994年、パラグアイで学生と観測法を打ち合わせする日江井氏（日江井氏提供）。白ズボンが日江井氏。

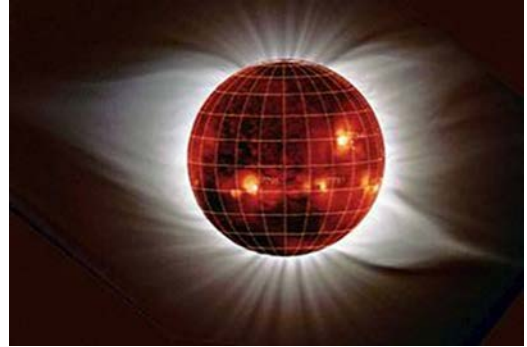


写真6 学生が撮影したコロナ（外側）と太陽観測衛星「ようこう」が取得したX線コロナ画像（内側）の合成画像（日江井氏提供）。

日江井：普段、私が大学で授業やってるときの態度とは大違いでね、私が「せっかくパラグアイに来てるんだからアスンシオンの街でも見物してこいよ」と言ったら、「いや先生、まだフォーカスの位置決めが終わってない」と、学生が自分たちでこういうことをやろうって、すごく熱心なんだよ（写真5）。それを見て私は学生を見直しましたよ。

高橋：なるほど、学生が積極的に取り組んでたということなんですね。その日食のときは晴れたんですか？

日江井：晴れましたよ。いやあ、みんな本当に感激していましたね。そうそう、私の名刺は今も学生が撮ってくれたパラグアイの日食の写真を使ってるんですよ。外側は学生たちが撮った日食、内側が「ようこう」のX線コロナで撮ったやつ。それをモニタージュしたものなんだ。この当時は珍しいものだったんだよ。

高橋：ああ、これですね（写真6）。

日江井：それと、せっかく学生がいるんだから、アスンシオン大学の学生とも交流したんです。講演会をやって、アスンシオン大学の天文の先生にしゃべってもらったり、私もしゃべったり、大使もしゃべって、学長もしゃべって、その後はパーティやダンスもあった。言葉はあちらはスペイン語でこちらは英語だったけど、若い人同士だと

なんとなく通じ合うみたいだね。若い連中同士で結構交流してましたよ。

高橋：それは学生にとってはいい経験ですね。

日江井：やっぱり海外に行けて日食も見られて、現地の人たちとも触れ合っている経験だったと思います。帰りにハワイにも寄って、建設中のすばる望遠鏡見学もしました。

高橋：あ、そうなんですか。その頃はちょうど建設中ですね。

日江井：そうなんです。それで家族の方も大学のイベントだから安心だっただろうし、行かせてよかったってみんな言っていましたよ。学生だけでなく教職員やOBもいてね、92名で行って全員無事に帰ってこられたのが一番よかった。

高橋：それはよかったですね。先生ご自身も観測したんですか？

日江井：自分自身は観測しないで学生に望遠鏡のセットアップの仕方とか日食観測の仕方を教えました。日食のときに頭が真っ白にならないように全員で秒を唱えるとか、今からあと何分何秒で皆既になるから準備しろとかの指令もしましたね。

それでね、パラグアイでの日食観測の評判がすごくて、そのおかげで僕は学長にまでなっちゃったんだよ。自分では学長に向いてる人間じゃないと思うんだけど、選挙になると「あいつを学長にしよう」とって話になったみたいで。日食のおかげ



写真7 アスンシオン大学名誉博士授与式にて、学長と学部長の間で名誉博士の衣装を着た日江井氏（日江井氏提供）。

で健康にもなったし、ずいぶんいろんなおかげを受けてるんだよね。日食には感謝してますよ。

高橋：それで後々学長に。学長としてのお話はまた後ほどお聞きします。

日江井：そうそう。それでその頃アスンシオン大学には望遠鏡がなかったの。当時、日本がODAで外国に望遠鏡とかプラネタリウムを配ってた時代で、北村（正利）さんがよくやってたんです。「じゃあアスンシオン大学にも配ろう」ってことになって、商社の人にも動いてもらって望遠鏡を贈って、アスンシオン大学に天文台を作ったんだよ。だから明星大学とアスンシオン大学とに関係ができたんです。

その後、ブラジルで国際会議があったときに、せっかくだからアスンシオン大学にも寄ろうって寄ったら、アスンシオン大学から名誉博士の学位をもらってね（写真7）。ちょうど私の誕生日で、ケーキも出してくれて。「あなたの誕生日ですよ」って。あれも日食のおかげですよ。

高橋：アスンシオンの側からもとても感謝された。じゃあ、そのイベントは本当に大成功だったんですね。

日江井：大成功だったなあ。今ではその明星大学の学生も結婚して子供が生まれて、家へ遊びに来たりしますよ。



写真8 船上で握手する藤田氏（右）と日江井氏（左）（明新会報第57号）。藤田氏のご子息、藤田明雄氏による撮影。

●アジア日食学校

高橋：そういうお話を聞くと、日食観測というのは研究はもちろんですけど教育というか、体験学習としてもとてもいい題材ですね。

日江井：そうなんです。それで明星大学を辞めてからですね、2009年に硫黄島沖でばしふいっこびいなす号って船の上で皆既日食を見たんです。船だと雲を避けて動けますから、晴天下でコロナがよく見えたんです。

高橋：それはいいですね。

日江井：実際にですね、当日、雲が流れていたんですが、私はブリッジで船長と相談して、何分後には皆既になるからって、雲の動きを監視しながら船の進路を変えたりしてたんです。そしたら、観測者から「船の向きを変えないで、まっすぐ進行してくれー」っていう叫び声が聞こえてきたんです。赤道儀は極軸を合わせて観測する装置ですから、せっかく合わせたのに方向がずれると、太陽のガイドが崩れてしまうわけですね。でも雲の中に入るよりは晴天下でコロナの観測ができる方がいいですから、ゆっくりと蛇行をすることにしました。それで非常によく見えたんです。

それで実はこのとき藤田（良雄）先生も船にお乗りになったんです。100歳でね。

高橋：え、それはすごいですね。

日江井: 藤田先生が私が大学生のときにコロナのことを教えてくれた先生なんでね, 「先生, 乗りませんか」ってお誘いしたら, 「じゃあ行きましょう」って息子さんたちと一緒に船に乗って見に行ってくれたんです。

高橋: 100歳でそんなにお元気でいらしたんですね。確かお亡くなりになったのは104歳とかですよ。

日江井: はい。それでこのときにですね, 和田昭允先生を通して東京倶楽部というところから援助していただいて, アジア日食学校というのを開いたんです。それで韓国・台湾・中国・インドから高校生を呼んだの。日本の高校生も呼んで同じ部屋に住ませてね, スクールを開いた。ぱしふいっくびいなす号上のアジア日食学校というのを開いたんです。そのときに台湾からなかなか出来がいい子が来たりね, それからインドの子は哲学的な話をしたりね。どうやって高校生を選んだかっていうと, 各国の知ってる天文台へ頼んでね, 2人ずつ金を出すから送ってくれってお願いしたんですね。そしたら皆さん喜んで来てくれてですね, そのうちの1人の子はいまだもってアマチュアで星とか日食を見るのが好きで, メールを送ってきますよ。まあだから若い人たちにも機会があれば日食を見せたいなと思っているんです。

(第7回に続く)

A Long Interview with Prof. Eijiro Hiei [6]

Keitaro TAKAHASHI

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

Abstract: This is the sixth article of the series of a long interview with Prof. Eijiro Hiei. Continuing from the previous article, we hear about various experiences related to solar eclipse observations. During these expeditions, there were many opportunities to cooperate with observation teams from other countries and to interact with local people, even in harsh environments. These experiences strongly reflected the social and historical backgrounds of the time, revealing memories of the Pacific War and insights into life and culture in foreign lands. Furthermore, after retiring from the National Astronomical Observatory of Japan, Prof. Hiei led a large group of 92 people, including students, from Meisei University to observe a solar eclipse in Paraguay. There, the students received warm support from Japanese immigrants, enthusiastically engaged in eclipse observations, and participated in international exchanges with fellow students, making the event a great success. Through both the previous and current articles, we see solar eclipse observations are not only opportunities for scientific discovery, but also offer rich experiences in learning and cultural exchange, connecting people across diverse cultures and histories.

寄贈図書リスト

未来の夜空はどう見える？ 銀河が教えてくれるこ

と、谷口義明，新書版，212ページ，940円＋税，
岩波書店

月報だより

月報だよりの原稿は毎月20日に締切り，翌月に発行の「天文月報」に掲載いたします。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。

人事公募

核融合科学研究所 教授／准教授／助教

- 募集人員：①若干名 ②（女性限定）1名程度
- (1) 所属分野：核融合科学（学際）
(2) 勤務地：岐阜県土岐市下石町322-6
- 3, 4. 専門分野／職務内容・担当科目：核融合科学研究所は，学際的展開による大学等との連携の強化及び広い分野への頭脳循環の拡大による核融合開発研究の持続的な推進のため，ミクロ集団現象プロジェクトの推進及び研究プラットフォームの整備・運用・拡充を進めています。独創性とともにより高いコミュニケーション能力をもち，核融合科学の学際的展開を先導でき，ミクロ集団現象プロジェクトの推進及び研究プラットフォームの整備等にも貢献できる研究者を募集します。
- (1) 着任時期：採用決定後のなるべく早い時期
(2) 任期：任期無し
- 応募資格：博士の学位を有すること 等
- 提出書類：
 - (1) 履歴書
 - (2) これまでの研究内容
 - (3) 就任後の抱負：所属を希望するユニット名，ユニットにおける研究計画，及び希望する職種（教授，准教授又は助教）を記入。
 - (4) 研究業績発表論文リスト
 - (5) 論文別刷：直近3年間に出版された3編以上を含む，計5編程度。（助教応募者のみ学位論文及び投稿中又は投稿予定でも可，3編程度。）
 - (6) (5)の概要と本人の貢献を記載した文書
 - (7) 推薦書：推薦書2通以上（助教を希望する応募者のみ，推薦書1通。）

(1)～(6)についてはPDFファイルとしてE-mailに添付して，①「研究教育職員 応募希望」②「研究教育職員（女性限定）応募希望」という件名で提出。(7)は推薦者がPDFファイルをE-mailに添付するか，郵送にて提出。

8. 応募締切：令和7年9月22日(月) 17時必着
9. (1) 提出先：核融合科学研究所管理部総務企画課人事係
E-mail: nifs-jinji@nifs.ac.jp
(2) 問合せ先：
 - ・提出書類について
核融合科学研究所管理部総務企画課人事係
電話0572-58-2022（直通）
 - ・研究内容等について
核融合科学研究所 副所長 藤堂 泰
E-mail: todo@nifs.ac.jp
10. その他（待遇など）：
その他詳細は以下を参照ください。
<https://www.nifs.ac.jp/about/recruit/>

研究会・集会案内

「東京大学木曽観測所及び名古屋大学宇宙地球環境研究所」 特別公開・特別講演会のお知らせ

東京大学木曽観測所及び名古屋大学宇宙地球環境研究所では，9月27日(土)に施設の特別公開を行います。望遠鏡や観測装置を間近に見ることができる他，夜には天体観望会も行います。9月28日(日)には木曽文化公園の広い会場へ場所を移し，渡部潤一先生の講演会を開催します。講演会はYouTubeでの中継も行いますので，会場へ来られない方もぜひお楽しみください。

【施設公開】

- ・開催日時：2025年9月27日(土) 13時～20時30分
- ・プログラム：
 - *13:00～17:30 望遠鏡デモンストレーション、研究紹介など
 - *14:30～15:30 ミニ講演会
講師：高橋英則（東京大学木曽観測所 助教）
タイトル：『天文学者は高いところが好き!』
 - *18:30～20:30 天体観望会（雨天中止）
- ・開催場所：東京大学木曽観測所（長野県木曽郡木曽町三岳 10762-30）
- ・交通：JR中央西線木曽福島駅または上松駅から車で約30分

【特別講演会】

- ・開催日時：2025年9月28日(日) 14時30分～16時（14時開場）
 - ・講演内容：
 - 講師：渡部潤一氏（国立天文台 上席教授）
 - タイトル：『彗星の謎—予測通りにならないから面白い—』
 - ・開催場所：木曽文化公園 文化ホール（長野県木曽郡木曽町日義 4898-37）
 - ・交通：JR中央西線木曽福島駅から車で約10分
または路線バス 木曽駒高原線「文化公園入口」下車
- 共催：木曽広域連合、木曽文化公園
問い合わせ先：木曽観測所 TEL: 0264-52-3360
木曽観測所ホームページ：

<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/>

名古屋大学宇宙地球環境研究所 ホームページ：

<http://stsw1.isee.nagoya-u.ac.jp/>

※施設公開・特別講演会ともに事前申し込みは不要で、入場無料です。

※講演会はYouTubeでもライブ配信します。

賞の推薦

公益財団法人天文学振興財団 令和7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挙げた者
 - ・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. 応募期限：両賞とも令和7年10月末日

3. 選考結果：両賞とも選考委員会で審査の上、結果ついて令和8年1月下旬に文書で通知します。

4. 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、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。

5. 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/>

2025 年度日本天文学会林忠四郎賞受賞候補者 および欧文研究報告論文賞受賞候補論文推薦 のお願い

林忠四郎賞選考委員会

標記の二つの賞について、受賞候補者と論文の推薦をお願いします。締切は両賞とも2025年11月4日(火)(必着)です。以下に述べるそれぞれの要領に従って記入した推薦書を、〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1 国立天文台内 日本天文学会宛に郵送してください(論文賞についてはe-mailも可)。なお、封筒には「林忠四郎賞候補者推薦書」または「欧文研究報告論文賞候補推薦書」と表記してください。特に返送等のお申し出がない限り、推薦書類は選考後に破棄します。授賞式は、林忠四郎賞については春季年会時、欧文研究報告論文賞については秋季年会時の会員全体集会にて行う予定です。林忠四郎賞の推薦は2年間有効です。欧文研究報告論文賞の推薦は毎年リセットされます。「原則として1年に2件以内」と内規に定めがありますので、優れた論文であっても受賞に至らない場合があります。その場合、優れた論文は複数回推薦していただくことを奨励します。

2025 年度(第30回) 林 忠四郎賞推薦要領

この賞は、林忠四郎博士が1995年11月に第11回京都賞を授与されたのを記念し、「後進の天文学研究を奨励するため」として同博士より日本天文学会にいただいた寄付を基金にして設定されたものです。なお、本賞は、他薦のみとなっています。

対象：広い意味での天文学(天体物理学、宇宙物理学、他の関連テーマも含む)における独創的でかつ分野に寄与するところの大きい研究業績に対して授与する。

受賞資格：本年度当初においてすでに本会正会員である者(個人または少人数の研究グループ)。

授賞件数：原則として1件。

賞状等：本賞として賞状、副賞として賞牌(メダル)および賞金(30万円)を授与する。

推薦書の形式：表題は「2025年度林忠四郎賞候補者推薦書」としてください。A4サイズ用の用紙に、次の順序で横書きにしてください。

- 1) 候補者(被推薦者、連名授賞可)について：氏名(ふりがな)、生年月日、大学卒業年、現職および連絡先(電話、FAX、e-mail)

- 2) 授賞対象とする研究の表題(英語表記も併記)
- 3) 推薦者について：氏名(ふりがな)、現職、連絡先(電話、FAX、e-mail)、被推薦者との関係
- 4) 推薦理由の要旨(300字以内)
- 5) 推薦理由
- 6) 関連する論文のリスト
- 7) 添付資料として、推薦に関連して最も重要な論文のコピー(3編以内)

2025 年度(第30回) 欧文研究報告論文賞推薦要領

この賞は、日本天文学会欧文研究報告(Publications of the Astronomical Society of Japan (PASJ))に出版された優れた論文を称賛し、今後も優れた論文が投稿・出版されることを奨励するために設定したものです。なお本賞の選考委員会は、林忠四郎賞選考委員会が兼ねています。

本賞は論文を対象とした賞であり、論文の著者(共著者を含む)からの推薦も可能です。

対象論文：原則として2020年12月から本賞締め切りまでに発行されたPASJに掲載された論文の中で、独創的で天文学分野に寄与の大きい、特に優れた論文をその対象とする。

授賞件数等：原則として2件以内。受賞論文の著者(共著の場合は、すべての共著者)に賞状を授与するとともに、受賞記念講演日より3年以内に投稿された論文一編について、その本文掲載料を無料にするともに、フリーアクセスにて公開する。

推薦書の形式：表題は「2025年度欧文研究報告論文賞候補推薦書」としてください。A4サイズの用紙(e-mailでも可)に、次の順序で横書きにしてください。

- 1) 候補論文について：論文題目、筆頭著者名、出版された巻、ページ、発行年
- 2) 推薦理由(1,000字程度)
- 3) 推薦者について：氏名(ふりがな)、現職、連絡先(電話、Fax、e-mail)
- 4) e-mailで推薦する場合はjimu@asj.or.jp宛に送信して、受領メールを必ず確認してください。

2025 年度（第 37 回）研究奨励賞候補者推薦のお願い

研究奨励賞選考委員会

本会は、優れた研究成果を上げている若手天文学者に対して、日本天文学会研究奨励賞を授与しています。受賞資格は

- 1) 日本天文学会正会員で、最近おおよそ5年間（※以下参照）における天文学への寄与が顕著なる者
- 2) 当該年度初日（2025年4月1日）にすでに正会員であってかつ博士学位取得後8年以内の者。ただし、産休・育休等やむを得ない事情により天文分野での活動に空白期間があれば、その年月は考慮する。

です。毎年3名以内を対象とし、賞状、賞牌（メダル）および賞金（10万円）を併せて授与しています。皆様からの多数の候補者の推薦（自薦も可）をお待ちしております。近年は女性候補者の推薦が少なくなっております。女性候補者の積極的な推薦をお願いします。選考委員会では推薦された方の中から、研究奨励賞内規に基づき選考を行い、候補者を代議員総会に推薦します。推薦にあたっては、被推薦者が当該年度の学会年会費を納入済みであることを確認してください。受賞候補者の推薦要領は以下の通りです。

- (1) 締切：2025年11月5日(水) 必着
- (2) 提出書類：○候補者氏名、会員番号、現職、博士学位取得年月日（産休・育休等やむを得ない事情により天文分野での活動に空白があることを考慮する場合にはその期間を記載してください）、○授賞対象とする研究の表題（英語表記も）、○推薦者の氏名、現職、連絡先（自薦の場合には候補者について聞くことのできる方を記載してください）、○推薦理由（300文字程度の要旨とA4で2～3枚程度の本文、※最近おおよそ5年間の業績を基本とし、それを遡る数年間にも主業績に至る一連の萌芽の研究があれば積極的に記載して下さい）、○関連論文リスト、○推薦に関連して最も重要な論文のコピー（3編以内）
- (3) 提出先：下記webサイトへのPDFファイルアップロード
webサイト：<https://www.asj.or.jp/jp/activities/prize/shorei/> を通じてPDFファイルをアップロードしていただきます。提出書類を一つのPDFにまとめ、ファイル名を「2025kenkyushorei_full_name」として頂き、webサイトから必要事項をご記入の

上でアップロードして下さい。“full_name”は候補者の氏名です。

2025 年度（第 25 回）天文功労賞 候補者推薦のお願い

天体発見賞選考委員会

この賞は、研究機関外での天文活動、例えば長年に亘る天体観測や、突発的な現象の検出・通報などを称賛し、奨励するためのものです。賞の対象となる功績は、天体発見賞・天体発見功労賞の枠に収まらない天文観測・研究活動です。対象者は、日本在住者、日本国籍を有する個人、または日本に本拠地を置く団体であって、天文学研究を主たる業務としない者（団体）とします。日本天文学会の会員であるかどうかは問いません。選考は、天体発見賞選考委員会が行い、候補者（団体）を代議員総会に推薦します。

この天文功労賞につきまして、日本天文学会の会員の方々からの候補者（団体）の推薦を、広く募集します。A4紙1枚程度で、候補者（団体）名、功績題目（1行程度）、功績の説明を書いていただき、日本天文学会事務所（〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1 国立天文台内、Fax: 0422-31-5487, e-mail: jimu@asj.or.jp）までお送りください。郵便・Fax・電子メールのいずれでも結構です。推薦は随時受け付けておりますが、今回の選考に確実に乗せるには、2025年11月14日(金)までにお送りください。なにとぞ多数のご推薦をよろしくお願いいたします。なお、推薦された候補について、2025年度に受賞対象とならなかった場合でも、当選考委員会において候補リストに登録し、翌年度以降の選考対象とします。このため、同一の推薦を翌年度以降に重ねて行う必要はありません。ただし、推薦内容に変更がある場合は、再度の提出をお願い致します。

2025 年度（第 8 回）天文教育普及賞候補者推薦のお願い

日本天文学会天文教育普及賞は、天文教育や普及活動の分野で特に顕著な貢献をされた個人や団体を顕彰し奨励して、教育普及活動のさらなる発展を期するものです。対象者は、日本国内・国外またはその両方で活動を行った日本在住者や日本国籍を有する個人、または日本に本拠地を置く団体、及び日本国内で行われた教育普及活動を実施した外国の個人または団体です。教育普及活動が本務の場合も、本来の業務を大きく超え、社会に強い影響を与え、多大な貢献をした場

合は対象となります。また、日本天文学会の会員であるかどうかは問いません。選考は天文教育普及賞選考委員会が行い、候補者を代議員総会に推薦します。

つきましては、日本天文学会正会員・準会員の方々から、候補者（団体）の推薦を広く募集します。A4紙1枚程度で、候補者（団体）名、活動名（1行程度）、活動内容の説明を記載し、必要に応じて補足資料（A4紙5枚程度まで）を添付のうえ、日本天文学会事務所（〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1 国立天文台内/Fax: 0422-31-5487/jimu@asj.or.jp）にお送りください。フォーマットの指定は特にありません。郵便・Fax・電子メールのいずれでも結構です。

なお、連名で推薦される場合は全員が会員である必要はありません。推薦は随時受け付けておりますが、第8回の選考に確実に間に合わせるには、2025年9月30日(火) までにお送りいただくようお願いいたします。なお昨年度推薦いただいた候補者に関しては再推薦の必要はありません。なにぞご多数のご推薦をよろしくお願いいたします。

会 務 案 内

1. 公益社団法人日本天文学会2024年度（2024年4月1日～2025年3月31日）事業および決算の報告

事業・決算報告書の電子版を日本天文学会ホームページ上で公開しておりますが、書面による配布を希望される方には別途郵送いたしますので、学会事務局までご連絡ください。

1. 2024年度事業の報告

2024年9月の秋季年会（関西学院大学）、2025年3月の春季年会（水戸市民会館）ともに、現地での講演を基本としてオンラインでも聴講できるハイブリッドで開催しました。助成金では、早川基金として海外研究活動のための渡航補助を29名（うち4名辞退）に総額約591万円、学術交流費として年会学生発表者に総額約47万円を支給しました。それ以外の活動内容はおおむね例年通りでした。欧文研究報告、天文月報、年会予稿集、ジュニアセッション予稿集、シリーズ現代の天文学の刊行、各種委員会活動、各賞の授与、後援事業を行いました。学会としての「ハラスメント防止ガイドライン」策定に先立ち、「日本天文学会行動規範」を制定しました。詳しい事業報告は学会ホームページを参照して下さい。2025年3月31日現在の会員数は以下の通りです。

	正会員 (内学生)	準会員	団体 会員	賛助 会員	合計
2024年3月31日	2,314 (646)	968	35	46	3,363
入会	279 (249)	41	0	1	321
退会・除籍等 (うち除籍) ^{注1}	△189 (117) (△26 (0))	△81 (△13)	0 (0)	△1 (0)	△271 (△25)
移籍(増) ^{注2}	5(1)	8	—	—	13
移籍(減) ^{注2}	△8(0)	△5	—	—	△13
正会員へ (学生減) ^{注3}	(△106)	—	—	—	—
2025年3月31日	2,401 (673)	931	35	46	3,413

(注1：除籍とは会費未納による資格喪失を指す)

(注2：移籍とは正会員、準会員との間の移動のことを指す)

(注3：学割扱いの正会員から通常の正会員への移動を指す)

2. 2024年度決算の報告

2024年度の経常収益は前年度より975,070円増、経常費用は同61,218円増、学会の正味財産は2,335,808円増加し144,911,591円となりました。受取会費は前年度より418,000円増加し42,256,000円でした。

欧文研究報告（PASJ）事業では、物価高の影響で経費が増加し、ポンド建ての収支は前年度と比較して減少しましたが、円安が進行した影響で本年度も収益が経費を上回りました。出版頁数は微増でした。年会事業では、秋季春季両年会共に現地＋オンラインのハイブリッド開催となりました。年会のハイブリッド開催の経験が蓄積されたことから、収益と経費の見通しの確度が高まりました。賛助会費と寄付で運営されている助成事業では、学術交流費基金、国内研修支援基金、研究奨励賞基金、早川幸男基金、林賞基金に寄付をいただきました。支援に感謝いたします。

2024年度の公益目的事業会計は1,663,461円の赤字となり、昨年度に続き赤字となりました。2021年度、2022年度と続いた黒字とバランスする形となり、公益社団法人の要件である、中期的期間での収支の均衡が達成されています。今年度の公益目的事業会計は、リモート会議の普及による旅費の削減、年会開催地及び開催形式に依存した年会コストの変動、物価高、PASJ事業への為替の影響等、様々な要因が積み重なった結果として赤字となったと分析しています。物価高、円安等外部要因に大きく影響を受ける側面は否めませんが、社会の状況を注視しつつ、適正な予算策定と公益社団法人の趣旨に沿った柔軟な予算執行を行うことで、健全な財政の維持に努めてまいります。事業別決算書内訳は以下のとおりです。

事業別決算書内訳表

2024年4月1日から2025年3月31日まで

公益社団法人 日本天文学会 (単位: 円)

科 目	公益目的事業					
	一般事業					
	共通事業	欧文事業	月報事業	年会事業	その他の事業	小 計
経常収益計	20,417,803	47,764,370	1,844,757	11,748,300	985,565	82,760,795
経常費用計	16,668,365	35,798,845	14,484,686	11,425,709	6,541,934	84,919,539
当期経常増減額	3,749,438	11,965,525	△ 12,639,929	322,591	△ 5,556,369	△ 2,158,744

科 目	公益目的事業会計						公益目的 事業計
	一般事業						
	学術交流費 事業	国内研修 支援金事業	研究奨励賞 事業	早川基金 事業	林賞事業	小 計	
経常収益計	725,797	550	721,281	4,043,947	451,693	5,943,268	88,704,063
経常費用計	481,207	550	470,588	4,043,947	451,693	5,447,985	90,367,524
当期経常増減額	244,590	0	250,693	0	0	495,283	△ 1,663,461

科 目	法人会計	内部取引 消去	合 計
経常収益計	20,613,459	0	109,317,522
経常費用計	17,733,473	0	108,100,997
当期経常増減額	2,879,986	0	1,216,525

入会・移籍・退会のお知らせ

2025年6月17日に開催された公益社団法人 日本天文学会理事会において、正式に入会・移籍が承認された方、退会が報告された方の人数をお知らせします。

入会 正会員：43名 準会員：6名
退会 正会員： 6名 準会員：1名
移籍 準→正： 1名

2024 年度ご寄付者名

2024年度に日本天文学会へご寄付をいただいた方々です。深く感謝申し上げます。

(敬称略／受付順)
土肥明, 泉奈都子, 秋山和徳, 阿部昭, 星の手帖社,
宮崎聡, 早野裕

天文月報 118巻10月号 主な掲載予定記事

アストロバイオロジーセンター10周年特集 (3): 太陽系外における生命の天文学的探査【ビクトリア・メドウズ】

EUREKA: 宇宙線の「超新星残骸起源」を検証する【福井康雄・佐野栄俊】

天球義: ALMA 較正用天体の自動解析ツールの開発とその科学的応用【成田佳奈香・西田明正】

〈シリーズ〉海外の研究室から: 英国ハートフォードシャー大学でZ-groupを始めた【小林千晶】

〈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7回] アメリカ滞在【高橋慶太郎】

編集委員: 日下部展彦 (編集長), 岡本文典, 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, 信川久実子, 橋本拓也, 福島肇, 藤澤幸太郎, 宮武広直, 宮本祐介, 守屋堯

令和7年8月20日 発行人 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1 国立天文台内 公益社団法人 日本天文学会

印刷発行 印刷所 〒162-0801 新宿区山吹町332-6 株式会社 国際文献社

定価733円 (本体667円) 発行所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1 国立天文台内 公益社団法人 日本天文学会

Tel: 0422-31-1359 (事務所) / 0422-31-5488 (月報) Fax: 0422-31-5487

振込口座: 郵便振替口座00160-1-13595 日本天文学会

三菱UFJ銀行 三鷹支店 (普) 4434400 公益社団法人 日本天文学会

日本天文学会のウェブサイト <https://www.asj.or.jp/> 月報編集 e-mail: toukou@geppou.asj.or.jp

会費には天文月報購読料が含まれます。

©公益社団法人日本天文学会 2025年 (本誌掲載記事は無断転載を禁じます)