

すばる望遠鏡の科学成果の概観



大栗 真宗

〈千葉大学先進科学センター 〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33〉

e-mail: masamune.oguri@chiba-u.jp

すばる望遠鏡の25周年の機会に、すばる望遠鏡を用いて得られた科学成果を概観します。すばる望遠鏡は多様な装置を備えており宇宙論から太陽系まで天文学の幅広い分野で活躍してきました。25年の歴史を振り返るとともに、最近の成果を中心にいくつかの科学成果を紹介します。

1. はじめに

すばる望遠鏡は共同利用施設であり、これまで多様な装置のラインナップにより宇宙論から太陽系に至る天文学の多様な分野で大活躍してきました。その科学成果を一人ないし数人でまとめるというのは土台無理な話なのですが、すばる科学諮問委員長最後の仕事として引き受けることにしました。紙面の限界と筆者の能力の限界により、重要なすべての科学成果を網羅することは到底できませんが、ご容赦いただければと思います。また、日本天文学会の宝である（と勝手に思っている）過去の天文月報の記事を積極的に引用しましたので、この機会に過去の記事を読んで研究当時の雰囲気を感じていただくのもよいでしょう。

2. 25年の成果の概観

科学成果は原著論文で主に発表されますので、まずはAstrophysics Data System (ADS)で査読付き論文を調査しました [1]。Abstract/Keywordsで「Subaru」を指定して論文を検索すると、2000編以上の論文がヒットします。この方法ではすばる望遠鏡のデータを用いたすべての論文を網羅することにはなっていませんが、すばる望遠鏡をメインに使った論文はだいたいカバーできていると期待しています。

図1が引用数でソートした結果ですが、この簡

単な調査からもさまざまなことが読み取れます。例えば、論文数は2007年ごろまで増え続け、その後は年間100編程度で安定して推移してきています。すばるユーザーズミーティングなどで報告される、ハワイ観測所が調査している論文の出版数は年間150編程度で、これよりやや少ないのは上記の通りすべての論文を網羅できていないことに起因すると思われるのですが、全体的な傾向はより詳しい調査と無矛盾であることがわかります。

論文の引用数は、単純平均すると1編あたり約50回で、天文学の原著論文の平均と比べても平均引用数はかなり多いのではないかと思います。引用数の高い論文を眺めると、Cosmic Evolution Survey (COSMOS), Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program (HSC-SSP), Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS), Subaru Deep Field (SDF)などのいわゆるサーベイ観測データを用いたものが多く、多くの観測時間を投入したサーベイ観測によってインパクトの高い科学成果が得られることが推察されます。

図2には、ADSの分析機能を用いて論文を分類して分析したものを示しています。この分析から、すばる望遠鏡を用いて得られた主要な科学成果として、(1) 遠方銀河、輝線銀河、再電離、(2) 系外惑星、原始惑星系円盤、(3) 遠方クエーサー、HSCサーベイ、(4) 銀河団重力レンズ、などがあるということがわかります。これらの時

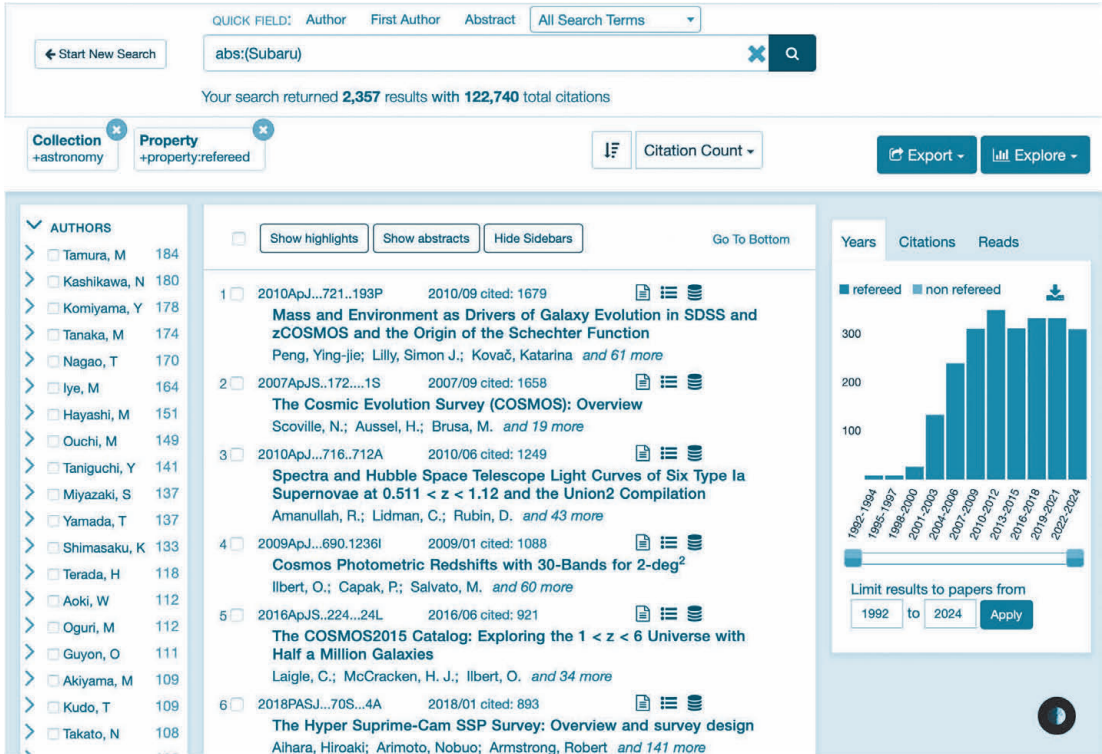


図1 ADSで調査した、すばる望遠鏡を利用したと思われる原著論文のリストを、引用数順にソートしたもの。

間進化を見ると、まず最初に (1) と (2) の成果が卓越し、その後 (4) の成果が目立ち、最後に (3) の HSC サーベイの結果が大きなピークとなって現れています。もちろんこれらに限らず、以下でいくつか紹介するように多様な科学成果がすばる望遠鏡によって得られています。

3. 科学成果の例

ここでは、最近の科学成果に重点を置きつつ、25年全体も振り返って、研究分野別に科学成果の例をいくつか紹介します。

3.1 宇宙論

すばる望遠鏡の特長の一つである視野の広さは、広い天域のサーベイ観測が重要となる宇宙論分野で威力を発揮します [2]。初代主焦点カメラ Suprime-Cam の時代には、遠方の Ia 型超新星の探査や、さらに2節でも触れられた、銀河団の弱

重力レンズ解析や COSMOS サーベイ天域の多色撮像サーベイなどで大活躍しました [3-5]。

Suprime-Cam をアップグレードし視野をさらに広げた主焦点カメラ HSC が 2014 年から本格稼働し、300 夜 (30 夜追加配分され最終的に 330 夜) のすばる望遠鏡観測時間を投入された戦略的サーベイ HSC Subaru Strategic Program (以下 HSC サーベイ) によって、宇宙論の研究にも大きな進展が得られました。観測は 2021 年末に完了し、最終的に約 1100 平方度の天域を、grizy の 5 バンドで約 26 等級の深さで撮像観測を行いました。サーベイ初期の興奮については、天文月報の特集記事でその様子を窺い知ることができます [6]。

HSC サーベイから多様な科学成果が得られていますが、宇宙論の研究でも重要な科学成果が得られています。その代表的な成果が重力レンズを用いた密度ゆらぎとその時間進化の測定です。弱

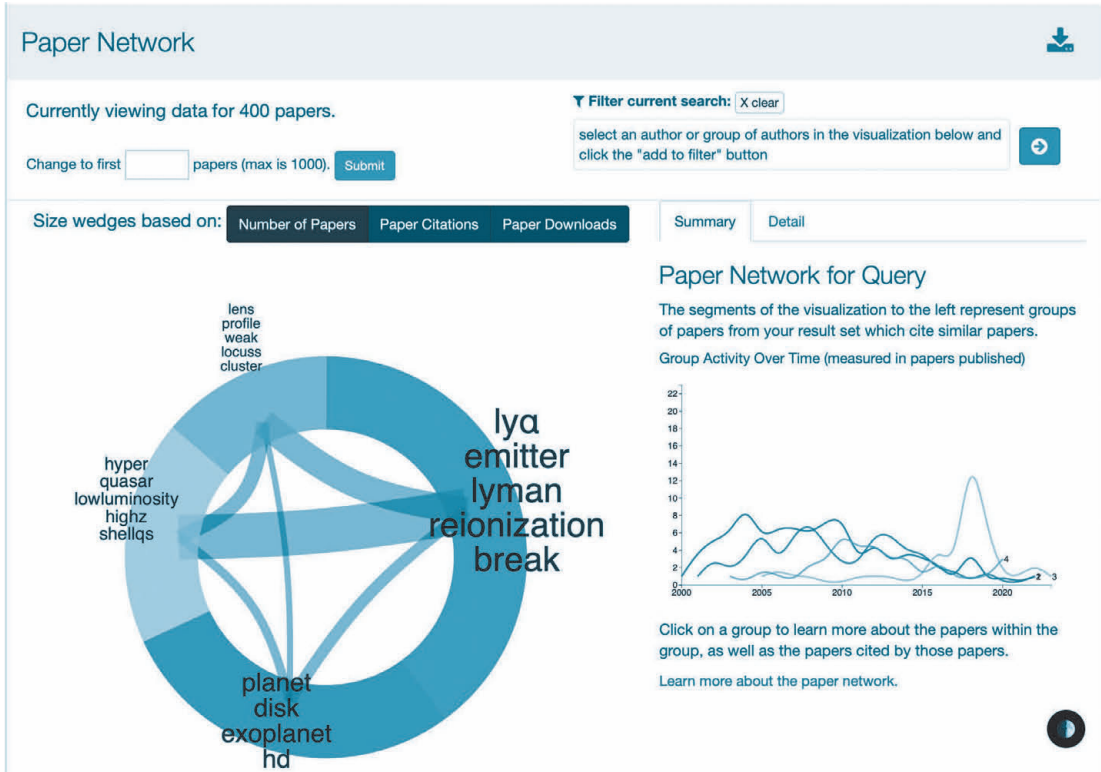


図2 ADSで調査した、すばる望遠鏡を利用したと思われる原著論文を分類して分析した結果。

い重力レンズによる銀河の形状ゆがみの統計解析、例えば2点相関関数やそのフーリエ変換に対応するパワースペクトルの測定によって、ダークマターが支配的な物質密度ゆらぎを直接測定することができます。この測定を宇宙背景放射から予想される現在の密度ゆらぎの値と比較することで、宇宙論パラメータを精密に測定し、標準宇宙モデルの検証を行うことができます。HSCサーベイによる測定によって、重力レンズで測定される密度ゆらぎが宇宙背景放射からの予想値とのずれが見えてきていますが、この測定のずれは S_8 問題とよばれ、宇宙論の重要問題の一つとなりつつあります [7, 8]。HSCサーベイの全サーベイデータはつい最近内部で公開されたばかりなので、宇宙論に限らず各研究分野でのHSCサーベイの最終解析結果が近いうちに報告されるでしょう。

HSCサーベイは撮像サーベイですが、観測的宇宙論のもう一つの柱は分光サーベイです。すばる望遠鏡が活躍した先駆的な分光サーベイとして、ファイバー多天体分光器FMOSを用いて行われた戦略的サーベイFastSoundがあります。赤方偏移ゆがみと呼ばれる銀河相関関数の非等方性を観測することで、赤方偏移1.4の高赤方偏移での銀河の運動の速度場の測定に初めて成功し、一般相対論の検証を行いました [9]。近い将来、超広視野多天体分光器PFSによってさらに大規模な分光サーベイが行われ、より高赤方偏移で銀河の運動の速度場が精密に測定されると期待されています。

3.2 銀河進化、恒星

すばる望遠鏡はその運用初期から特に遠方銀河の探査で大活躍しました。Suprime-Camの広い視野と狭帯域フィルターを用いることで赤方偏移お

よそ6から7の遠方銀河を数多く発見し、最遠方銀河発見の記録を次々と塗り替えました [10–13]. これらの輝線銀河の数密度の進化から、宇宙が中性だった時代から再電離する過程が見えてきました. また宇宙再電離の様子は、当時最高赤方偏移のガンマ線バースト観測となったGRB 050904の可視分光撮像装置FOCASを用いた分光観測によっても調べられました [14]. 再電離の研究はHSCサーベイでも引き続き行われており、巨大サンプルを用いた詳細な統計解析と多波長追観測が進められています [15, 16].

HSCサーベイは、遠方銀河に加えて遠方クエーサーの研究でも大活躍しました. 特に、HSCサーベイデータを用いた遠方クエーサー探査プロジェクトSHELLQsによって赤方偏移6から7の遠方クエーサーの発見数を飛躍的に増大させ、光度関数を暗い光度まで精密に測定することで、クエーサーの再電離の寄与の小ささを定量的に示すなど重要な成果が得られています [17, 18]. HSCサーベイから得られたクエーサーサンプルは、ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡でも追観測されており、母銀河の検出によってクエーサー形成の謎に迫りつつあります [19].

すばる望遠鏡の広い視野は、銀河団領域の観測による銀河の環境効果の研究や、銀河団探査においても有用です. Suprime-Camに加えて、近赤外カメラMOIRCSやHSCを駆使して、銀河団周縁部の銀河の性質や遠方銀河団の発見などの多くの研究成果が得られています [20–22].

私たちの天の川銀河に近い近傍銀河は、距離が近い分、天球面上で見かけ大きく観測されますので、視野の広いすばる望遠鏡がその観測に活躍してきました. Suprime-Camの時代から、近傍銀河を観測しその色等級図を調べることで、銀河の中心と周縁部で異なる星形成史を示すなど複雑な銀河形成の描像が得られました [23]. HSCサーベイでは例えば天の川銀河ハローの研究が進められ、非常に暗い衛星銀河の発見や青色水平分

枝星の観測による恒星ハローの「端」の観測などの成果が得られています [24].

恒星の研究では、高分散分光器HDSを用いた金属量や重元素組成の研究が行われてきました. 初代星の元素合成の研究に重要となる低金属星の発見や、新星のリチウム生成の観測などの成果が得られています [25–27].

宇宙の元素合成の研究で近年脚光を浴びたのが、中性子星連星合体です. 中性子星連星合体由来の重力波GW170817の可視光追観測にすばる望遠鏡も参加し、電磁波対応天体の同定及び光度曲線の測定に貢献しました [28, 29]. その視野の広さと集光能力を活かして、すばる望遠鏡は今後も連星合体重力波の電磁波対応天体の探査における活躍が大いに期待されています.

3.3 系外惑星、太陽系

上記の高分散分光器HDSは、系外惑星の発見法の一つであるドップラー法の観測でも活躍してきました. 例えば2000年代のHDSを用いた系統的なホットジュピター探査により、巨大なコアを持つ系外惑星が発見されました [30]. 地球型惑星の探査のためには、より波長の長い近赤外線でのドップラー法の観測が有効であり、そのために開発されたのが赤外線ドップラー装置IRDです. IRDを用いた、M型矮星の周りを系統的に探査する戦略枠サーベイは現在進行中であり、成果が期待されています [31].

すばる望遠鏡を用いた系外惑星と原始惑星系円盤の研究を牽引してきたのは、戦略枠サーベイSEEDSです. 125夜の観測時間を投入した系統的な観測により、原始惑星系円盤の渦巻き構造の発見や、直接撮像による系外惑星の発見などがなされました [32–34].

SEEDSで用いられた近赤外線高コントラスト撮像カメラHiCHAOは、その後コロナグラフ超補償光学系SCEXAOおよび検出器CHARISへと進化し、系外惑星と原始惑星系円盤の研究で活躍しています. 特に、最近ガイア衛星の位置天文学

観測データも援用することで、新たな系外惑星をSCEXAOおよびCHARISの直接撮像により発見することに成功しました [35]。位置天文学と直接観測を組み合わせた初の系外惑星の発見例となっています。また、SCEXAOと組み合わせて可視の観測装置VAMPIRESも利用でき、原始惑星系円盤のH α 輝線観測などで成果が得られています [36]。すばる望遠鏡の超補償光学系は今後もさらなるアップグレードが計画されており、将来にわたって活躍が期待できます。

視野の広いHSCは太陽系小天体の観測にも威力を発揮します。トロヤ群小惑星や太陽系外縁天体の観測などで活躍し、また仮想上の天体、第9惑星の探査にも用いられました [37]。また、NASAのニューホライズンズ探査機チームと協力してカイパーベルト天体の探査も行っており、既知のものより遠方のカイパーベルト天体も見つかりつつあります [38]。

4. ま と め

すばる望遠鏡の25年間で多くの科学成果が得られていますが、それではこの先の例えば25年間もすばる望遠鏡は安泰でしょうか？もちろん必ずしもそうではなく、ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡やローマン宇宙望遠鏡、30メートル級望遠鏡といった新型望遠鏡が稼働しつつあり、またルービン天文台やユークリッド衛星といった大型サーベイ計画が始動してきている状況において、すばる望遠鏡が世界の第一線で活躍し続けるためには、注意深く戦略を練る必要があるでしょう。

すばる望遠鏡の長期戦略はすばる科学諮問委員会でも議論されており、その一環として、すばる科学諮問委員会、ハワイ観測所、有志の協力のもと、すばる望遠鏡の未来を議論する研究会「すばる3研究会」を2024年8月29、30日に開催しました。またそれに先立ってすばるユーザーに対する無記名のアンケートも実施しました。研究会やアンケートから、すばる望遠鏡への期待はまだまだ

高いと感じましたので、今後もすばる望遠鏡が活躍していけるように議論を重ねていきたいと思っています。研究会の講演ファイルやアンケート結果は研究会のWebページで公開されています [39]。また、このすばる25周年特集号の宮崎氏執筆の記事でもすばる3の議論が紹介されますのでそちらも併せてご覧ください。

最後に、すばる望遠鏡の25年間で得られた「成果」は本稿で紹介したような原著論文に掲載された科学成果だけではないことを強調しておきます。すばる望遠鏡のデータを引っ提げて世界と戦うことで多くの若い研究者が育ち、その研究者が競争率の高いジェームズウェッブ宇宙望遠鏡の観測時間を獲得したり、ユークリッド衛星、ルービン天文台、ローマン宇宙望遠鏡などに参加してその中で存在感を示すなど、世界的に活躍しています。こうした、すばる望遠鏡で育った人材もまたすばる望遠鏡の重要な「成果」といえます。すばる望遠鏡で育った研究者がそれぞれの研究分野を世界的に牽引する活躍をして、その経験をもとにすばる望遠鏡をさらに有効活用し重要な科学成果をあげていくことになれば望外の喜びです。

謝 辞

すばる望遠鏡の建設、運用に関わってきたすべての方々に感謝します。本文中に個人的な体験を書くことはやや憚られたので、ここで筆者とすばる望遠鏡との関わりを書いておくと、筆者はすばる望遠鏡のファーストライトから間もない2000年に大学院に進学したため、いわばすばるネイティブ第1世代（より厳密には、以下に書く事情もあり第1.2世代くらいかもしれません）となります。ただ、筆者の最初のいくつかの研究は理論研究であったためすばる望遠鏡を使う機会はしばらくなく、最初にすばる望遠鏡を使ったのは2003年のことでした [40]。そこでビギナーズラック的に重要な発見ができ、観測研究の楽しさを知った筆者は引き続き重力レンズクエーサー候

補の追観測や銀河団の広視野観測などですばる望遠鏡を幾度となく使わせていただきました [41]. その後、HSCサーベイに深く関わるようになり、すばる望遠鏡との関わりはますます深くなりました。ただ、最近ではサーベイデータを解析するかキュー観測でデータを取得するのみで、山頂で観測する機会はめっきりなくなりました。空気が薄い山頂で辛い思いをすることが減ったのはよいことかもしれませんが、一方でやや寂しい気持ちもあります。

そうこうしているうちに、なぜかすばる科学諮問委員会の委員長を務めることになりました。大変な仕事でいろいろと文句も言いましたが、前々委員長の児玉さんが書いているように [42], 私もすばる望遠鏡に少しでも恩返しをという気持ちで委員長の任期を務めました。ただ終わってみると、これでもまだ恩は全然返しきれっていないような気もしていますので、今後もさまざまな形で少しずつ恩返しできれば、といったところです。

参考文献

- [1] <https://ui.adsabs.harvard.edu> (2024.9.20)
- [2] 宮崎聡, 2017, 天文月報, 110, 48
- [3] 土居守, 安田直樹, 2018, 天文月報, 111, 88
- [4] 岡部信広, 2018, 天文月報, 111, 18
- [5] 谷口義明, 2017, 天文月報, 110, 781
- [6] 小宮山裕, 2019, 天文月報, 112, 79
- [7] 日影千秋, 2019, 天文月報, 112, 720
- [8] 杉山素直, ほか, 2024, 天文月報, 117, 304
- [9] 奥村哲平, ほか, 2017, 天文月報, 110, 131
- [10] 谷口義明, 2004, 天文月報, 97, 621
- [11] 柏川伸成, 2006, 天文月報, 99, 562
- [12] 太田一陽, 2007, 天文月報, 100, 25
- [13] 家正則, 2014, 天文月報, 107, 232
- [14] 河合誠之, ほか, 2007, 天文月報, 100, 17
- [15] 大内正己, 2019, 天文月報, 112, 146
- [16] 播金優一, 2024, 天文月報, 117, 102
- [17] 松岡良樹, 2018, 天文月報, 111, 760
- [18] 長尾透, ほか, 2019, 天文月報, 112, 209
- [19] 尾上匡房, 2022, 天文月報, 115, 168
- [20] 田中賢幸, 2010, 天文月報, 103, 750
- [21] 小山佑世, 2012, 天文月報, 105, 332
- [22] 岡部信広, ほか, 2019, 天文月報, 112, 174
- [23] 小宮山裕, 2018, 天文月報, 111, 93
- [24] 千葉粧司, 2022, 天文月報, 115, 686
- [25] 青木和光, 2006, 天文月報, 99, 197
- [26] 本田敏志, 2006, 天文月報, 99, 358
- [27] 田実晃人, 2015, 天文月報, 108, 591
- [28] 内海洋輔, 2018, 天文月報, 111, 84
- [29] 田中雅臣, 2021, 天文月報, 114, 16
- [30] 佐藤文衛, 2009, 天文月報, 102, 98
- [31] 小谷隆行, 佐藤文衛, 2021, 天文月報, 114, 622
- [32] 田村元秀, 2016, 天文月報, 109, 243
- [33] 武藤恭之, ほか, 2013, 天文月報, 106, 195
- [34] 葛原昌幸, 工藤智幸, 2016, 天文月報, 109, 257
- [35] 葛原昌幸, 2023, 天文月報, 116, 360
- [36] 鶴山太智, 2023, 天文月報, 116, 416
- [37] 吉田二美, 2019, 天文月報, 112, 228
- [38] <https://subarutelescope.org/jp/results/2024/09/04/3439.html> (2024.9.24)
- [39] <https://sites.google.com/faculty.gs.chiba-u.jp/subaru3workshop2024> (2024.9.24)
- [40] 稲田直久, 大栗真宗, 2004, 天文月報, 97, 415
- [41] 大栗真宗, 2011, 天文月報, 104, 30
- [42] 児玉忠恭, 2019, 天文月報, 112, 858

Overview of Scientific Achievements of the Subaru Telescope

Masamune OGURI

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

Abstract: The overview of scientific achievements of the Subaru Telescope over the past 25 years is presented. The Subaru Telescope has been used in a wide area of research ranging from cosmology to the Solar System. We look back the 25 years' history of the Subaru Telescope and describe some research achievements with an emphasis on recent results.

すばる望遠鏡のメンテナンス

早野 裕

〈国立天文台ハワイ観測所 650 North Aohoku Place Hilo HI 96720 USA〉

e-mail: y.hayano@nao.ac.jp



すばる望遠鏡は運用開始から25年が経過しました。すばる望遠鏡が毎晩観測して天文学の成果をあげ続けるためには、望遠鏡の機能や性能を維持し、運用し続ける必要があります。この記事では、すばる望遠鏡の機能や性能を維持するためのメンテナンスについて、まずメンテナンスする対象となる望遠鏡の構成要素を概説します。次に、運用開始期に示されたメンテナンスの考え方と実施状況、そして、現在取り組んでいる望遠鏡更新計画の現状について簡単に紹介します。最後にすばる望遠鏡のメンテナンスを今後どうしていくのか、私なりの考えを述べたいと思います。

はじめに

すばる望遠鏡25周年の特集として、望遠鏡メンテナンスというテーマをいただきました。私は、11年間、ハワイ観測所で主にレーザーガイド星補償光学の開発をしてきました。2015年にTMT(30m望遠鏡)の第1期観測装置である近赤外線撮像分光装置(IRIS)の開発に加わるため、ハワイを離れました。そして、2022年からハワイ観測所の望遠鏡技術担当責任者として再びハワイに赴任をいたしました。

今の役割になって、これまでは装置開発の立場ですばる望遠鏡を見ていたことに気がつきました。装置開発者や共同利用観測者は、望遠鏡が常に正常な状態で、所定の性能通りに機能することを前提としています。望遠鏡をそのような状態に維持し、毎晩観測して天文学の成果をあげつづけるためには、手入れ、つまりメンテナンスがとても大事になります。

すばる望遠鏡は米国ハワイ島の標高約4000mのマウナケア山頂域に設置されています。0.6気圧と空気が薄く、強風や悪天候にも左右される厳

しい環境です。また、ハワイ島は大陸から遠く離れた島嶼部なので、物品等の調達に時間がかかることが多々あります。それから、米国やハワイ州のルールに沿う必要があります。このように、すばる望遠鏡のメンテナンスを実施する際に、これらの特殊な事情に対応することが重要になります。

この記事では、すばる望遠鏡技術担当責任者として3年ほどの間に把握できた範囲にはなりますが、すばる望遠鏡のメンテナンスの25年を簡単に振り返り、現在進行中のメンテナンス、改修、更新について紹介します。最後にすばる望遠鏡メンテナンスの今後はどうなるのか、感じていることを述べさせていただきます。

メンテナンスの対象

まず、メンテナンスの対象となるすばる望遠鏡について、どのような構成になっているか、簡単に説明いたします。

すばる望遠鏡は4つの主要な部分から構成されています。鏡筒・架台、ドーム上部構造、制御系、付帯設備です。

鏡筒・架台

鏡筒・架台は、筒頂部構造、鏡筒部構造、主鏡部構造、架台部構造、ナスミス部構造から構成されます。図1のすばる望遠鏡のイラストにそれぞれの部位が示されています。

筒頂部構造は、外側のリング状の筒頂外環と中心部にある筒頂内環、それらをつなぐ筒頂スパイダーが主要な機械構造になっています。筒頂内環の上側には、超広視野撮像カメラ（HSC）と広視野多天体分光装置（PFS）という主焦点観測装置のための主焦点ユニットとレーザーガイド星を作るためのレーザー送信望遠鏡が取り付けられます。下側には、副鏡ユニットが取り付けられます。

鏡筒部構造は、四角形のセンターセクションと、それを筒頂部構造および主鏡部構造とつなぐ梁（トラス）から構成されています。鏡筒部構造の中央部には、ナスミス焦点に天体の光を導くための第3鏡ユニットとそれを格納する第3鏡内環があり、その内環は第3鏡スパイダーで支えられています。

主鏡部構造は、主鏡の形状を常に維持するための能動支持機構とそれらを格納している主鏡セ

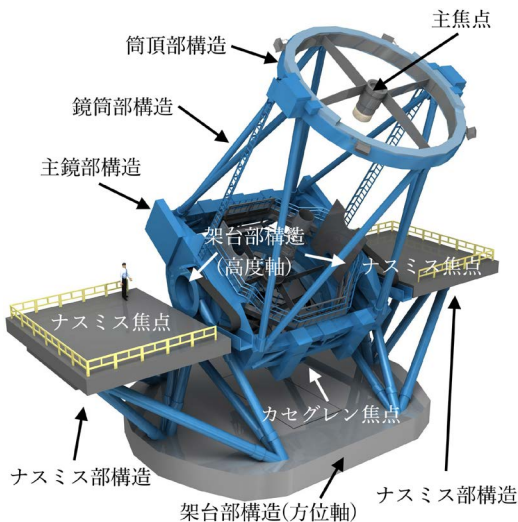


図1 すばる望遠鏡の鏡筒・架台

ル、そして、カセグレン焦点ユニットから構成されます。カセグレン焦点ユニットには、これまで可視光から中間赤外線までの波長に対応する様々な観測装置が取り付けられてきました。

架台部構造は、望遠鏡を天体の方向に向けて追尾するための2つの駆動軸（仰角を決める高度軸と、水平方位を決める方位軸）からなります。

ナスミス部構造は、望遠鏡の両側にあるナスミス台から構成されています。

すばる望遠鏡には4ヵ所の焦点があります。主鏡で反射された天体の光が最初に結像する主焦点、主鏡と副鏡で反射された天体の光が結像するカセグレン焦点、主鏡と副鏡と第3鏡で反射された天体の光が結像するナスミス焦点があります。ナスミス焦点は望遠鏡の左右2箇所あります。それぞれの焦点部には、観測を補助する装置があります。視野回転補正装置、大気分散補正装置、鏡面検査装置、天体追尾視野確認装置です。

ドーム上部構造

ドーム上部構造は、望遠鏡のドームそのものとなる基本構造、ドーム全体の回転駆動機構、ドームの開閉やドーム内の空気の流れを制御する機構、ドーム内の熱を制御する機構、保守運用のための機構が主要なものとなります。図2にドーム

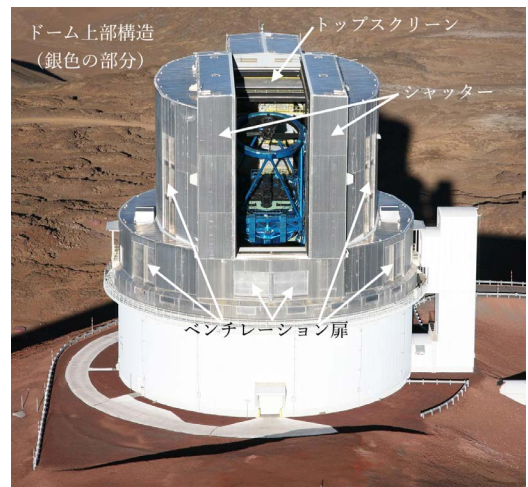


図2 すばる望遠鏡のドーム外観

の外観の写真を示しました。白いドームの下部よりも上の部分がドーム上部構造になります。

ドームの基本構造は外界から雨や霧や雪の侵入を防ぎ、ドーム内壁に断熱材を張り巡らして温度変化から望遠鏡や観測装置などを守る役割をします。

ドーム回転機構は、望遠鏡の方位角に同期させてドームの向きを変化させます。望遠鏡鏡筒・架台構造とドーム構造は建築物として独立になっています。互いに衝突しないように同期させてドームの回転を制御して駆動する必要があります。

観測開始時にはドームのシャッターを開け、観測終了時に閉めます。また、夜間の外気温にドーム内部を馴染ませるために、必要に応じてドームの側面にあるベンチレーション扉から風を取り入れます。

積極的にドーム内部の熱を制御して、素早く夜間の外気温に馴染ませるために、空調設備によってドーム内部の温度を夜間温度予測に設定しています。特に、温度が変化しにくい主鏡は、専用の空調設備を用いています。

トップスクリーンは望遠鏡を保護する移動式天板です。普段は望遠鏡の真上を覆って、落下物から望遠鏡を守ります。観測時にはトップスクリーンを移動させて、天体の光が望遠鏡に入るようにします。

保守運用のための機構には、筒頂部（トップユニット）に主焦点ユニットや副鏡を取り付けるた

めのトップユニット交換装置、カセグレン焦点ユニットに観測装置を着脱するためのカセグレン装置交換台車、主鏡を再蒸着するとき、主鏡セルを運ぶ運搬台車、主鏡セルを吊るための治具、クレーン類が含まれます。図3に副鏡の取り付け作業中の写真を示しました。上に見える四角い梁のような構造がブリッジクレーンです。望遠鏡の斜めのトラスの間の向こうに見えるL字のような構造物がトップユニット交換装置で、望遠鏡のトラスの間に副鏡を載せているユニットローダ部分が見えます。

制御系

制御系は、望遠鏡架台駆動制御装置、望遠鏡静圧装置、主鏡能動支持機構制御装置、副鏡制御装置、各焦点にある視野回転制御装置、大気分散補正制御装置、鏡面検査装置、天体追尾視野確認装置、それから、ドーム駆動制御装置、観測装置制御装置などがあります。これらは、制御用計算機システムによって統括的な制御が行われています。

望遠鏡制御統括計算機（Telescope Supervise Computer, TSC）が中心となり、望遠鏡制御ワークステーション群（Telescope Work Stations, TWS）からオペレータが制御を行います。望遠鏡制御統括計算機TSCには、役割の異なる中間制御計算機（ミッドレベルプロセッサ, Mid-Level Processor, MLP）が3つ接続されていて、それぞれ望遠鏡駆動制御用計算機（MLP1）、主鏡能動支持機構制御用計算機（MLP2）、空調保守制御用計算機（MLP3）という機能を主に担当しています。

望遠鏡駆動制御用計算機MLP1には架台駆動制御装置などのそれぞれの装置のローカル制御ユニットが繋がっていて、そこから指令値をモータドライバに伝えてモータを駆動しています。図4に、一例として第3鏡ユニットの着脱制御系のブロック図を示します。望遠鏡制御統括計算機TSCから指令を受けたミッドレベルプロセッサMLP3が第3鏡ユニット着脱制御ユニットに指令

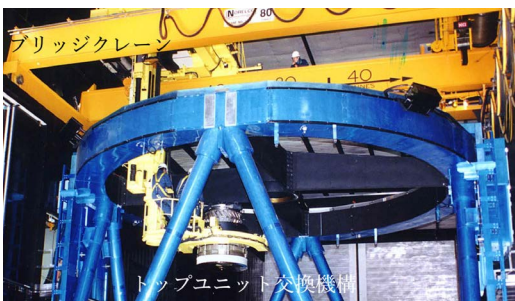


図3 トップユニット交換装置による副鏡交換

第3鏡ユニット着脱制御系

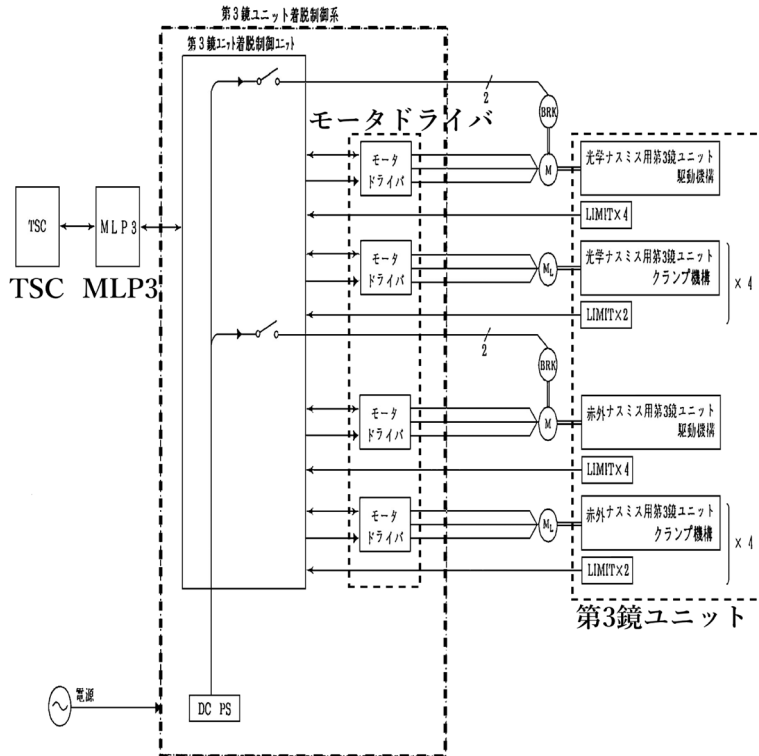


図4 第3鏡ユニット着脱制御系ブロック図

をし、着脱の駆動機構のモータを動かす構成になっています。

付帯設備

付帯設備には、真空蒸着設備、電源設備、通信設備、冷媒循環設備（チラー）などがあります。

真空蒸着設備はドーム下部の1階部分に設置されていて、数年に1度の主鏡再蒸着のときに使われます。主鏡が格納できる大型真空蒸着装置、主鏡に蒸着されたアルミニウムをはがす大型鏡面洗浄装置、主鏡セルから主鏡だけを取り外すための主鏡ハンドリング装置、望遠鏡から取り外された主鏡セルを載せる台車があります。

日本の電力事情と異なり、マウナケア山頂では、悪天候などにより、1年に50回以上の頻度で瞬時あるいは短時間の停電が発生します。そのため、電源設備は商用電源に加えて、無停電電源と

発電機を備えています。瞬時あるいは短時間の停電が起きても、電力の供給を維持します。停電が続くと発電機が始動して、容量に限りのある無停電電源装置から切り替わります。発電機で電力が維持できている間に停電が長期化することを想定した対処をすることになります。

すばる望遠鏡建設当初は、今から比べると圧倒的にネットワークの通信速度が限られていました。制御系の通信はシリアルかパラレルの通信経路を用いていました。ネットワークが高速化し、制御系、観測データ転送、望遠鏡と観測装置の状態を監視するために使われてきています。

冷媒循環設備は望遠鏡や観測装置で発生した熱を回収するシステムです。冷媒循環には4系統あり、望遠鏡、主鏡、観測装置、方位高度軸の静圧軸受への作動油の冷却に使われています。

すばる望遠鏡のメンテナンス

メンテナンスの必要性と内容

すばる望遠鏡で每晚観測をし、クオリティーの高い観測データを得て、天文学の科学成果を生み出し続けるためには、前章で説明した望遠鏡本体の鏡筒・架台をはじめとするすべての要素が整合性をたもつことで、総合的な性能・機能を満たすことができるように、適切なメンテナンスを実施することが重要になります。これが基盤となつて、観測装置の性能を最大限に引き出すことができます。また、新しい観測装置を考案するときにも、この基盤を少なくとも維持できていることが前提となります。

観測運用を円滑に行うためには、故障してから対処することよりも、故障を未然に防ぐ予防処置として、適切な保守点検と部品交換が大事となります。すばる望遠鏡では、総括編取扱説明書(1999年11月作成)に、望遠鏡を構成する鏡筒・架台、ドーム上部構造、制御系、付帯設備などに対して、保守作業項目表と交換部品のリストが示されています。保守作業項目は400余あります。保守作業項目の一例を図5、図6に示しました。この図を見ていただくと、ほとんどが1年ごとに「当社現地拠点」、つまり、すばる望遠鏡の製造会

社が実施することになっています(図5)。

機械構造部の保守作業は、主に外観検査、清掃、給油、ボルト締結確認です。

一方で、制御系の保守作業項目は、表示パネル、エレクトロニクスユニットやカードの点検、コネクタの接続状況確認、電源電圧の測定、駆動範囲・駆動電流の測定、速度や加速度を含めた動作確認などがあり、機械系部品とはかなり違う内容になっています(図6)。

一方で、日常または短期間で実施する点検項目には、異常音及び異臭の有無、顕著な埃の有無、油漏れ、水漏れ、照明設備不良、扉及びカバーの開閉状態、駆動周辺の障害物の有無、ケーブル外観の異常の有無などがあり、これらは国立天文台の望遠鏡技術者も担当します。

メンテナンスの実施状況

最初にメンテナンスを実施したのはファーストライトがあった1999年でした。1999年の5月に保守計画書が提出され、翌月の6月から年度末までの10ヵ月間をかけて、約250項目が実施されました。2000年度から2022年度までは毎年約300項目が実施されました。2023年度は200項目に減少、2005年度は100項目以下になりました。

項目数を減らした意図がわかる文書が見つけれられていないので、推測になりますが、立ち上げ期

表 17.1-1 大型光学赤外線望遠鏡 保守作業項目表(鏡筒・架台) (5/7)

ブランク：作業なし N：天文台または専門業者 M：当社及び当社現地拠点 O：当社現地拠点 ◎：保守会社(専門業者)

構成品名	保守作業項目	日常又は 適宜	1ヶ月	3~6ヶ月	6ヶ月	1年	備考
1.4 架台部構造							
1.4.1 高度軸部							
(1) 高度軸	a. 外観検査					○	抜き取り検査
(2) 高度軸受	a. フィルターの清掃			○(3ヶ月)			
	b. 油圧発生装置の重点点検					◎	専門業者に委託
(3) ケーブル巻取機構	a. 駆動部給油					○	
	b. ケーブル巻取り状況確認					○	
1.4.2 高度軸駆動部							
(1) 高度軸駆動機構	a. 外観検査					○	抜き取り検査
	b. 清掃					○	永久磁石に付いた金属粉の除去
(2) リミット機構						○	
(3) 絶対角度検出機構	a. 清掃、外観検査					○	テープ面の清掃、傷のチェック
(4) 相対角度検出機構	a. 清掃、外観検査					○	同上
(5) トルク検出機構	a. 外観検査・給油・ギア清掃					○	抜き取り検査
(6) 滑り止め機構	a. 外観検査					○	抜き取り検査
	b. 駆動部給油					○	

図5 保守作業項目表の一例(架台部構造)

表 17.1-2 大型光学赤外線望遠鏡 保守作業項目表 (制御系) (1/8)

ブランク：作業なし N：天文台または専門業者 M：当社及び当社現地拠点 O：当社現地拠点 ◎：保守会社(専門業者)

構成品名	保守作業項目	日常又は 適宜	1ヶ月	3~6ヶ月	6ヶ月	1年	備考
2. 制御系							
2.1 望遠鏡制御系							
2.1.1 望遠鏡架台駆動制御							
(1) 架台駆動制御パネル	a パネル/ケーブル類の点検					○	
	b コネクター等の接続状況確認					○	
	c 電源電圧の測定					○	
	d 機能確認	NM				○	
(2) 方位軸駆動制御部	a 最大速度、加速度の測定					○	
	b ステップ応答					○	
	c 駆動範囲の測定					○	
	d 駆動電流の測定					○	
	e 絶対角度検出器特性測定					○	

図6 保守作業項目の一例 (架台の制御系)

は、初期不良が多い期間のため、多くの保守項目を実施して、故障の早期発見・対応をし、次第に安定運用期になってくると、必要な保守項目の絞り込みができ、その分、望遠鏡機能の更新に力を入れたのではないかと思います。事実、2006年度以降、10年ほど必要最小限の保守が続きました。その間、望遠鏡計算機やソフトウェアの更新、制御機器の更新、観測機能の強化が進められました。超広視野主焦点カメラを搭載するための新しい主焦点ユニット(通称POpt2)を製造したのもこの時期です。

安定運用期のメンテナンス

安定に運用している期間でも、機器等は故障します。特に可動部のモータ類、それを駆動するドライバ、電源系統です。故障には、まず交換部品で対応することが多く、その後、取り出した故障品を調査し原因を探ります。原因によっては修理をして、再び交換部品として復活させます。

すばる望遠鏡建設時に設置された機器は2000年より前に製造されています。2015年には15年以上経過していることとなります。そのため、交換部品が徐々に製造中止になります。そうすると、同じ機能をもった新しい交換部品を探す、あるいは同じ機能をもった交換部品を新たに作るしかなくなります。これには、時間と労力と費用がより多くかかることとなります。交換部品が残り少な

くなると、新しい代替の交換部品を早めに準備する必要があります。これは保守作業とは違って開発を含む新しい仕事です。

望遠鏡や観測装置を支える電源、冷却水循環装置、空調装置も、故障品の交換によってメンテナンスをしてきていますが、15年以上経過すると交換部品は製造中止になり、システム自体もサポートされなくなります。新規に支援設備を開発するとなると、仕様確認、設計、製造、試験を経てから、ようやく設置となります。従来のシステムが稼働しているうちに、新システムの設計・製造・試験を完了させ、準備を万全にして一気に新旧のシステムを切り替えることで、観測停止期間を短くすることは極めて重要なことです。

機器故障と観測への影響

望遠鏡を構成する機器の状態は、望遠鏡制御統括計算機(TSC)に集められて、正常であるかどうかを判断しています。機器に不具合があるとTSCがアラームを発し、望遠鏡制御ワークステーション(TWS)に表示します。不具合の詳細はTSCに保存された履歴データ、あるいはTSCの下の中間制御計算機MLPやローカル制御装置の表示や保存されているデータを元に、状況をよく診断して、故障箇所と故障理由を絞り込んでいきます。運用開始した1999年から、このようなトラブルシュートをすばる望遠鏡の製造会社の現地

拠点の技術者とハワイ観測所の望遠鏡技術者が協力して進めてきました。現在、現地拠点はなくなり、日本拠点の製造会社とハワイ観測所とでオンラインで連絡を取り合っており、トラブルシューティングに対応しています。

故障に対するトラブルシューティングの診断方法と解決方法は運用開始時からその履歴が蓄積されて、マニュアルとして共有されています。これらを参照することで、過去に発生した同じ不具合は解決できるようになっています。

復旧の方法は様々です。まず、機器の不具合を取り除いて目視等で安全確認をしたのちに、特定された機器のアラームをリセットする、いったん電源を落として再投入する、故障機器を交換部品に置き換える、センサー等のクリーニングをする、破損箇所を修復する、など、その場に応じて使い分けます。夜間にトラブルが発生したら、山頂にいる望遠鏡オペレータがこのマニュアルをみて、適切な方法を見つけて対応します。新たな故障や不具合については、夜間電話サポートに連絡をし、状況を報告し、サポート者からの指示を仰ぎます。問題が解決すれば、観測が続行され、故障と対処方法をマニュアルに追加します。

問題が解決できない場合、観測を中止し、翌日の日中にハワイ観測所の望遠鏡技術者たちがトラブルシューティングをし、復旧を目指します。状況によっては、日本の専門業者などに連絡をし、技術情報を集めます。翌日の観測再開を最優先にした応急的な復旧作業を優先します。しかし、故障の重度によっては、長期間復旧にかかる場合もあります。

参考までに2014年以降、観測が中止となった故障内容を表1にまとめました。

2014年から2017年までは年間2から4件の故障がありました。ただ、2016年のミラーハッチの故障と2017年のウィンドスクリーンの故障は規模が大きく観測が複数日停止しました。2018年以降は3から6件とわずかに増えているように見

えます。また、シャッター、トップユニット交換装置、副鏡、方位・高度軸、電源系統は、複数回、故障が発生しています。これは、大きな故障が発生する兆候と考えられ、特別な対策を考えるべき時期になりつつあることを示しています。また、昨年度主鏡のトラブルで5ヵ月あまり、望遠鏡が使用不能となりました。望遠鏡メンテナンス中に発生した事象であり、メンテナンスの実施方法についても、再検討する必要があることを示しています。

すばる望遠鏡の長期更新計画

長期更新計画の対象項目

発生頻度が比較的多い故障に対しては、より深く原因を調査し、抜本的な対処が必要となります。故障が多い構成部分を取り出して、実地現状調査、対処の方針の決定、その方針の実施という長期的な計画を立案して遂行することになります。長期更新計画の策定が始まったのは2017年です。そして、電源系統、温度環境維持、ドーム等駆動設備、主鏡蒸着装置、望遠鏡可動部、望遠鏡駆動制御部という大項目を立て、優先度・緊急度の高い機器や装置を選んで、抜本的な対処の対象としました。

電源系統は、無停電電源装置、配電盤、筒頂部の主焦点ユニット・副鏡のためのコネクタ・ケーブル類を、温度環境維持は、冷却水循環装置(チラー)・排熱機構、ドーム空調設備、ドームの漏水対策のための気密性維持を、ドーム等駆動設備はシャッター、トップユニット交換機器(Top Unit Exchanger, TUE)、ドーム回転機構、トップスクリーンを、主鏡蒸着装置は、主鏡洗浄装置、主鏡運搬装置、主鏡ハンドリング装置、真空蒸着装置を、望遠鏡可動部は、天体微動追尾機構、電動ジャッキボルト(電気で長さを変えるアクチュエータ)を、望遠鏡駆動制御部は、方位・高度軸駆動部、望遠鏡静圧装置、各種駆動制御ボード等、制御計算機を対象としました。次節からは、

表1 2014年以降、観測停止となった故障一覧*1

日付	観測停止となった故障内容	日付	観測停止となった故障内容
2014/2/15	第3鏡が正しい位置にセットできない。	2019/5/29	シャッターの開閉時に異音がある。
2014/8/23	シャッターが動作しない。	2019/7/1	シャッターが動作しない。
2015/8/3	シャッターの開閉が極端に遅い。モータの動作に異常あり。	2019/11/2	シャッターが動作しない。(11/3まで観測キャンセル)
2015/9/4	ドームのエンコーダアラームにより、ドームを駆動できない。	2020/6/22	主鏡支持のためのアクチュエータの不具合が復旧できない。
2015/12/11	トップユニット交換装置の不具合とトラブルシュートで主焦点ユニットに交換できない。	2020/10/12	冷却水の滴りを発見。漏洩箇所の特定が完了できない。
2016/2/22	ミラーハッチのトラブル(2/28まで観測キャンセル)。	2020/11/4	高度軸が駆動できない。
2016/9/15	トップユニット交換装置の不具合で、副鏡が交換できない。	2021/5/13	高度軸が駆動できない。
2016/9/20	副鏡のティップティルトドライブに不具合があり、副鏡が動作しない。	2021/5/23	シャッターが動作しない。
2016/11/18	高度軸のケーブル巻取(赤外側)の不具合で、望遠鏡が駆動できない。	2021/8/16	副鏡のティップティルトドライブに不具合があり、副鏡が動作しない。
2017/3/4	副鏡の制御系の不具合により、副鏡が復旧できない。	2021/8/18	電源供給に問題がある。(8/19まで観測キャンセル)
2017/3/22	副鏡の制御系の不具合により、副鏡が復旧できない。	2021/10/2	シャッターが動作しない。
2017/4/10	ウィンドスクリーンの故障(4/17まで観測キャンセル)	2021/11/22	副鏡が動作しない。
2018/2/23	トップユニット交換装置の不具合で、副鏡に交換できない。(2/25まで観測キャンセル)	2022/1/4	副鏡のティップティルト機能が動作しない。
2018/4/10	シャッターが正常にクローズ動作できない。	2022/6/7	空調ダクトが高度軸に噛み込み、高度軸が駆動できない。(6/14まで観測キャンセル)
2018/7/14	シャッターの不具合。(7/15まで観測キャンセル)	2022/6/22	トップユニット交換装置の不具合で、副鏡に交換できない。
2018/8/2	電源フリッカーにより停止した一部の機能が復旧できない。	2023/1/12	方位軸駆動にトラブル。
2018/9/13	前夜に発生した停電からの復旧ができない。(10/1まで観測キャンセル)	2023/6/15	方位軸駆動にトラブル。
2018/11/3	停電からの復旧が間に合わない。	2023/9/15	主鏡トラブル(2024/2/28まで観測キャンセル)
2019/2/18	高度軸の角度読取機能が不調で望遠鏡が適切に駆動できない。	2024/3/6	大気分散補正光学系駆動時に異音あり。
		2024/4/1	主焦点ユニットが動作しない。
		2024/5/20	シャッターの機器が浸水したため駆動できない。
		2024/8/26	副鏡が動作しない。

これまで実施してきた各装置の更新のいくつかを説明します。

無停電電源装置の更新

無停電電源装置(Uninterruptible Power Supply, UPS)は瞬間の電力停止や停電時にドーム内の望遠鏡や観測装置、制御棟内の機器に電力を途

切れず供給する重要な役割をもちます。制御棟の1階に設置されています。UPSの経年劣化が進んでいた中で、2018年8月に発生したハリケーンによる停電と9月に発生した大規模停電により、2台ある望遠鏡UPSの内の1台が故障しました。確認したところ、1台のUPSのバッテリーの多く

*1 ほとんどの場合、故障があった翌日の昼に対処して、その日の夜の観測を再開しています。

が消耗しているという警告が出ていて、もう1台のUPSの半数近くのバッテリーが故障していました。このままUPSの提供できる電力が限られている状態で望遠鏡を運用すると、瞬間の停電で電力供給が足りずUPSでサポートされているはずの望遠鏡システムの一部がダウンする可能性が高まりました。これは、観測に影響があるだけでなく、機器の故障や事故を誘発する可能性が高く、かなり危機的な状態にありました。そこで、ただちに応急処置として、交換するバッテリーの手配を急ぎ、12月末には交換が終了しました。恒久的な対策として、2018年3月の現地調査で推奨されていました、2つのUPSを新規更新することにしました。UPSの更新は2020年から検討が開始され、2021年に完了しました(図7)。

ドーム空調設備の更新

ドームの空調は、ドーム内の温度を夜間の予測温度に合わせ、温度差による星像の乱れを抑止する役割があります。ドーム空調はドームの左右対称に配置されている2ユニットで構成されています。1999年運用開始時から、この役割を達成するため、ドーム内壁の断熱材の補強や空調設備の調整によって継続的に空調機能の向上・効率化が実施されてきました。ただし、低温高湿度環境で稼働すると、凝結水が熱交換器で凍り始めます。

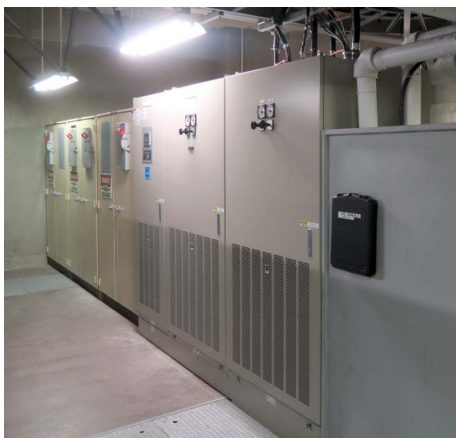


図7 新設された無停電電源装置(UPS)

それを防止するためのデフロスト機能(ヒーター)が動作しているのですが、能力不足のため空調をフル稼働すると凍結が進んでしまいます。そこで、凍結しないようにフル稼働の半分能力で動かしてきました。また、軽微な不具合の発生には、部品交換などの修理で対応してきていましたが、1つのユニットの制御通信機器に故障が生じ、これは製造中止となった製品のため部品交換ができず、遠隔制御ができなくなりました。

また、空調の経年劣化と、近年の空調技術の発達を考慮すると、現状品を新製品に置き換えたときの効率改善は2倍程度が見込め、ランニングコストを含め大きなメリットがあるため、ドーム空調の新規更新を進めることを決断しました。2020年に検討を開始し、2022年にはドーム空調が新設されました。その際、施設内の通信網を統一して、設備を一元的に管理・制御するインテリジェントビル技術を活用した制御システムの導入と、除湿機能の追加により、エネルギー消費をリアルタイムで制御する効率的な空調制御が実現可能となりました。

冷却水循環装置(チラー)・排熱機構

チラーは3台あり、不凍液(エチレングリコール)の冷媒を循環させて、望遠鏡、主鏡、ドーム、観測装置の発熱を吸収し、適切な温度になるように管理をしています。チラーが不具合をおこしたときのバックアップとしてもう1台のチラーを用意しています。すべてのチラーは制御棟1階に設置されています。バックアップがあるため、故障からの復旧には時間的な余裕があり、観測が止まることはないのですが、運用開始時から稼働し続けており、冷却機能とポンプ機能の経年劣化、故障頻度の上昇が問題となっていました。チラーの故障・不具合の頻度が高くなると1台のバックアップではカバーできなくなり、稼働できるチラーが2台以下となります。チラーの冷却水が止まってしまった機器や装置は、過剰な発熱などによって運用の停止、高温によるダメージが懸

念されます。また、冷媒が装置から奪った熱を、外気との熱交換によって排出させるために排熱機構も必要となります。排熱機構が停止すると、冷媒の温度が下がらず、望遠鏡や装置の発熱を吸収できなくなり、チラーが停止した時とおなじ問題がおきることになります。このようにチラー・排熱機構は観測遂行に必須の機能なので、新規更新することになりました。その際、現在の望遠鏡・観測装置に必要な冷却機能と将来の拡張を予測して、チラーに求められる冷却能力を検討する必要がありました。

2021年から検討を開始、設計を進めた結果、それぞれが2台分の機器を内蔵し、互いにバックアップ機能を持つ最新のチラーユニット4台を新設することになりました。そのことにより信頼性と冗長性を格段に改善することができます。2023年に4台のチラーが新規設置されました(図8)。また、ドーム空調設備と合わせて、一元的な管理・制御システムに統合され、遠隔から稼働状況の効率的な管理監視が実現できるようになりました。定期的に2台分の機器を交互に稼働して、片方の機器に頼らない運用をし、経年劣化の低減と定期的な機能点検ができるようにしています。



図8 新設されたチラー(冷媒循環装置)

シャッター改修

シャッターは観測開始時に開けて、終了後に閉じます。高湿度、霧、降雨のときはシャッターを閉じて水や水蒸気の侵入を防ぎます。2014年ころからシャッターの開閉時にスタックするようになり、次第にその頻度が高まりました。そのため、観測開始が遅れたり、シャッターが開けられず観測が停止したりすることもありました。また、天候悪化の時にシャッターが閉められなくなると、望遠鏡や観測装置は雨や霧や高湿度にさらされてしまい、ダメージを受ける可能性があります。2018年の大きな地震の後、シャッターが開閉移動中に、ガイドローラとレールの当たり方が一定にならなくなり、さらに頻繁にスタックするようになりました。そこで、2018年からガイドローラ部分の機械的な構造と駆動部の改修の検討をはじめ、2019年に改修が完了しました。その結果、駆動中のスタックの件数は劇的に減少しました。その後、コロナ禍で一旦計画が中断しましたが、コロナ禍が明けてからシャッターのリミットセンサーを光学式から機械式に変更し、センサーの誤動作を減らし、開閉終了時の不具合を軽減させることができています。

トップユニット交換装置(TUE)の改修

トップユニット交換装置(Top Unit Exchanger, TUE)は、望遠鏡の筒頂内環に装着するトップユニット(主焦点ユニット・副鏡)の交換や格納を行います。トップユニットを格納するための装置TUE1と望遠鏡に着脱する装置TUE2に分けられます。

TUE1はドーム上部構造の4階に設置されていて、ユニットセレクトとユニットトランスポータからなります。TUE2は80トンブリッジクレーンにぶら下がっている装置でユニットローダ(UL)と呼びます。格納されたトップユニット(主焦点ユニット・副鏡)はユニットセレクト(US)に搭載されています。その中で観測に用いるものを1つ選択してユニットトランスポータ

(UT)に渡し、次にUTからユニットローダ(UL)ののせかえます。ULは望遠鏡に接触しないように並行移動や回転移動を組み合わせながら、トップユニット(主焦点ユニット・副鏡)を筒頂内環まで運んで、所定の場所に精度よく取り付けます。一連の交換作業は要所要所で人間が判断しますが、その間の動作は自動で進められています。

2016年9月に、副鏡を取り外しに行った際、ULのモータの一つが動かなくなり、副鏡を取り外すことを断念し、観測がキャンセルになりました。翌日、モータの交換で復旧し、1日遅れで副鏡を交換しました。2017年3月7日に、ULのクランプが動かなくなりました。テストドライバを接続したところ、クランプが正常に動作し、なんとかその日のうちに副鏡交換作業を完了させることができました。後日の調査で、クランプ用ケーブルの断線とクランプ用モータードライバが故障していました。ケーブルの修復とドライバ交換で復旧させています。2つのケースとも、幸いにして、故障を回避できましたが、故障のタイミング次第では、デッドロックになりえます。その後も自動駆動中に動作が停止したり、リミットの誤検出といった不具合が稀に発生しています。原因はケーブル断線、ナットの緩み、センサーカメラのミスアライメントなど多様となっています。

トップユニット交換装置(TUE)の故障は、トップユニット交換が長期間できなくなることを意味しています。特にULの故障は深刻で、トップユニットを取り外した直後、取り付ける直前といった望遠鏡に近い位置での不具合発生は、安全な復旧方法を策定するまで時間がかかり、長期の望遠鏡閉鎖が予想されます。そのため、早急に製造中止品の新規置き換えを含めたオーバーホールが必要であり、特に、モータとそれに適合するモーションコントローラ、ケーブル、センサーの更新、更新後の一連の動作試験は必須となります。

2022年からオーバーホールの検討を開始し、2023年度までに完了させました。格納されて見

えなかったケーブルの被覆が破れているなど、老朽化は激しく、そのまま使っていれば、内部断線が起きていた可能性が非常に高いことがわかりました(図9)。

さいごに

定期メンテナンスから予知保全、そしてその先へ

すばる望遠鏡の運用が始まってから25年が経ちました。多くの機器・装置が安定した偶発的な故障期をこえて、故障頻度が高くなる摩耗故障期に差しかかっています。これまで、必要な部品交換、改修、更新を実施して、なんとか望遠鏡を維持してきました。すばる望遠鏡の長期更新計画は、主としてドーム駆動系、電源設備、空調設備、冷却水循環設備、トップユニット交換装置といった基本インフラ、環境維持、装置交換設備から着手しました。これから望遠鏡駆動部、望遠鏡制御部といった重要な部分に取り掛かります。

しかし、すばる望遠鏡の長期更新計画に含まれていないけれども、建設当初のままになっている機器、装置がほかにも多く残されています。すでに故障の予兆を示しているものや、そうでないものもあります。予兆を示していないものも、突然不具合を起こす可能性もあります。2030年代まですばる望遠鏡の性能を維持して、最先端の天文学に貢献するためには、今の長期更新計画を、第2次、第3次と、適宜計画を見直して、望遠鏡の

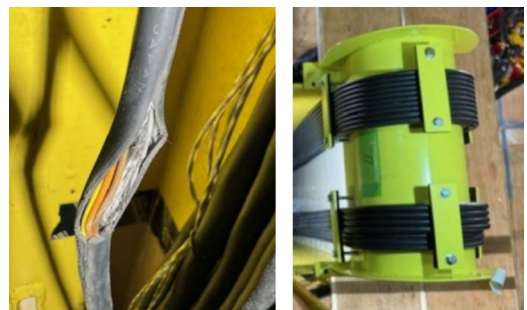


図9 被覆が破損したケーブル(左)と新設ケーブル(右)

機能・性能を維持することが必須となるでしょう。さらに将来を見据えて、望遠鏡の機能・性能向上についても取り組む必要があると考えています。

運用開始時に考えられたメンテナンス項目をすべて実施するのは、時間も人材も限られたなかでは、非現実的です。また、新たなメンテナンス項目も増えています。理想的には、もっともリスクの高い要因を見極めて、そこにリソースを投入することです。まだ私は勉強不足なのですが、それを現実に落とし込むには、すでに世の中では実践されている予知保全を取り入れつつ、予知の精度を上げていく試行錯誤をしていくことが大事かもしれないと考えています。これは私をはじめハワイ観測所の課題でもあり、これからすばる望遠鏡を利用する皆さんと共に考えていくことではないかと思っております。

Subaru Telescope Maintenance

Yutaka HAYANO

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan, 650 North Aohoku Place, Hilo, HI, 96720, USA

Abstract: The Subaru Telescope has been in operation for 25 years. The mission and goal of the Subaru Telescope are to produce cutting-edge astronomical research and discovery. To meet this goal, it is necessary to maintain the telescope's functionality and performance and keep it in operation. In this article, we first outline the components of the Subaru Telescope that need to be maintained for its functionality and performance. Next, we briefly introduce the maintenance concept and plan presented during the first years of operation, the status of its maintenance and execution, and the current status of the telescope refurbishment plan that we are currently working on. Finally, I will present my thoughts on the future of Subaru Telescope maintenance.

運用の裏舞台

神戸 栄 治¹・
新井 彰²・

Vera Maria Passegger³

〈^{1,2,3} 国立天文台ハワイ観測所 650 North A'ohoku Place, Hilo, HI 96720, USA〉

e-mail: ¹kambe@naoj.org, ²arai@naoj.org, ³vmpas@naoj.org



神戸



新井



Passegger

すばる望遠鏡25周年特集号を組むということで、運用の裏舞台について何か書くようにと編集委員会から依頼を受けた。しかしながら、科学研究や観測装置開発のそれであれば読者の興味をそそることはあっても運用のそれについては？ではないかと思う。そこで本稿では、舞台や役者そのものについても紹介しながら、裏舞台としてはコロナ禍への対応と新人2名のサポートアストロノマーの日常をとりあげてみた。

きっかけ

前任者からの流れ^{*1}か、同じ観測所で新しい運営・運用方法の策定のお手伝いをしていた [1] からかなのかはよくわからないが、お声がかかって、2018年からハワイ観測所の運用を担当させて頂くことになった。すばる望遠鏡に関わるのは約20年ぶりで、全く想像していなかったことであった。しかしながら、建造時に献身的な努力をされていた先達や同輩の姿が目につかび、少しでもお役に立てるならとハワイに移り住んだ……というような事情もあり、過去25年余りの観測所の運用について俯瞰するようなことは私の身に余る。そこで、本稿ではこちらに来て感じたハワイ観測所、言い換えれば、国外を活動拠点とする日本の機関での、運用の特徴やいくつかの話題について紹介してみたい。なお、本稿のタイトルを見て「日々観測所で起こるエピソード」を期待され

た方には、新人のサポートアストロノマー2名による本稿のコラムや観測所のホームページ（トピックス）（[2] から検索可能）を是非ご覧いただきたい。観測所の活動に少しでも興味をもって頂けたら幸いである。

観測所の運用

私のハワイ観測所での運用担当としての役割は「運営側の諸事情を踏まえつつ、観測所内の各部署やグループとさまざまな調整を行って科学観測運用を実施し、結果としてすばる望遠鏡による科学成果が最大になるようにすること」だと思っている^{*2}。運営側の諸事情としては、予算的、人的資源に関することはもちろんのこと、雇用などについての米国の方針やハワイ州によるマウナケア天文台群（Maunakea Observatories; MKO）の運営に関する方針（「観測所をとりまく社会的な状況の変化」の節を参照）なども重要で、これらの

^{*1} 初期の頃、多くの技術者などが旧岡山天体物理観測所からハワイ観測所に異動したが、前任者も2000年代後半に異動した後、運用を担当していた。

^{*2} 国立天文台として定義している、ハワイ観測所の科学目標とミッション [3] も参照されたい。

変化に運用も適応していく必要がある。また、すばる望遠鏡の科学成果の最大化を図る議論はすばる科学諮問委員会を始めとする（主に日本の）研究者が中心となって行っているの、運用側としては提案（要請）されたことをどのように運用に落とし込めるかを検討して、形にするようにしている（すべてはとて無理ですが……）。

安定した運用を行うには、実際に運用を担う各部署やグループの機能性が高いこと、各部署間の交通整理ができていること、が不可欠である。元所長の唐牛宏氏の天文月報の記事[4]によると、運用体制を本格的に検討し始めたのは怒涛の望遠鏡立上げ期がひと段落しかけた2002年頃とのことであるが、いわゆる「ハコ」については当時と大きな違いはなさそうである。（観測所執行部は除いて）望遠鏡、観測装置、そして科学運用を担当する部署（計算機、ネットワーク、ソフトウェアなどを含む）が存在することは、観測所と聞けばすぐに想像できるであろう。国立天文台三鷹キャンパスにあるすばる共同利用係（最近、科学コミュニティグループを設置し、その中に取り込んだ）も研究者の皆様にはなじみがあることと思う。事務、という部署の存在もある程度は自明であろう。一方で、ヒューマン・リソース（HR）やセフティ・オフィス（安全室）は日本の機関での活動とはかなり異なっている。ハワイ観測所の現地職員の3分の2、約60名はハワイ大学の人材派遣会社（The Research Cooperation University of Hawaii; RCUH）経由で雇用しており、現地の法律・規則に従って雇用をする必要がある。また、ハワイ島での活動は完全に米国の安全規則に則って行う必

要がある。米国は契約社会・訴訟社会なので、これらの部署に専門家がいないことは不可欠である*3。

安定した運用を行うために「ハコ」と同じく重要なのが、各部署間の交通整理ができていること、である。観測所員は主に夜間に働いていると思われがちだが、実際には観測の準備や、機器の保守、開発などの作業のために昼間の方がずっと立て込んでいる。実際に、2010年代には相当の混乱があったようだが、私が赴任したときにはちょうど山頂作業コーディネータがおかれて收拾が図られ始めた時期であった*4。その後、山頂作業を制限せざるを得ない事態（次節で説明）を経て、いまでは山頂作業の申請許可制が浸透し、状況は落ち着いている（と思っている）。

ハワイ観測所はハワイ州の指定する保護地区（Conservation District）の中にあるため、環境や文化に特に配慮した運用を行っていることも、特徴の1つである。現在は、ハワイ大学がハワイ州からマウナケア山頂域を借用（マスターリース）してその一部を各天文台に又貸し（サブリース）しているが、山頂域の管理を州から任されているのはハワイ大学である。そこで、ハワイ大学はマウナケア管理マスタープラン（主に、土地や建物に関すること）やマウナケア総合管理プラン*5（主に、借用地の利用に関すること）を作成し、管理組織の実体としてマウナケア中央管理組織（Center for Maunakea Stewardship; CMS）を大学内に設置して、山頂の管理を行っている*6。このような背景から、観測所の運用では、山頂施設の外観が少しでも変わる工事を実施するときや観測所敷地内にもものを設置するときには必ず

*3 赴任早々、雇用関係の訴訟、安全義務違反による罰金などの問題に直面した……

*4 ハワイ観測所に来て意外だったことの1つは4200 m以上の高山であるのにもかかわらず、職員が割と自由に山頂に上がって作業をすることであった。

*5 CMP（Comprehensive Master Plan）のことであるが、その策定の経緯については元所長の林正彦氏の記事[5]に詳しい。

*6 日々観測所の運用でお世話になっているマウナケア共有サービス（Maunakea Shared Services; MKSS）はCMSの下部組織であり、ハワイ観測所はその諮問委員会の一員であるとともに運用経費も応分負担している。MKSSは、道路整備（整地や除雪）、ハレポハク宿泊施設運営、ビジターセンターの運営、山頂インターネットやマウナケア気象センサーへの資金補助などを行っている。

CMSに許可を得ているし、侵襲的な動植物を山頂に持ち込まないように自動車をクリーンに保っている。また、速度違反を起こせば、CMSから注意がくる。

コロナ禍への対応

編集委員会にお勧めされた話題の一つが、ハワイ観測所のコロナ禍（以後、Covid-19）への対応について、である。実は、これは、私がハワイ観測所で働き始めてから長期的に対策本部が設置されることとなった4度目（！）の事例であった。1度目は私の赴任直後の2018年5月に発生したマグニチュード6.9の地震とその後8月にかけてほぼ毎日発生したマグニチュード4から5程度の地震（キラウエア山の噴火口の壁が崩れ落ちる）への対応である。このときには主焦点装置を安全に望遠鏡に装着することが危ぶまれたので、地震の状況を日々精査しつつ装置交換の可能性を探ることとなった*7。2度目は、上記の対応の直後、2018年9月のハリケーン通過時に発生した、望遠鏡用の大型無停電電源装置（UPS）の不具合への対応である。発生後、UPSの不具合そのものの原因調査と復旧計画の検討に加えて、予備UPSの導入による主焦点装置の交換の再開やUPSなしによる望遠鏡速度を制限した観測運用などを行った。望遠鏡を通常運用に戻すことができたのは年末であった（対応としては2021年8月にUPSを新替するまで続いた）。3度目は、2019年7月に起こったTMT反対運動、すなわち地元住民によるマウナケアアクセス道路の封鎖への対応である。上記2件への対応では観測所員、特に技術者が復旧作業で活躍したが、道路封鎖ではCMSやMKO（さらには州）との連携が重要であった*8。封鎖後、まずは反対者と少しでも関係を築き、天

文台の運用を継続する重要性を理解してもらい、迂回路を作り、毎日山頂に上がる職員の目的を伝えて平和的にそこを通ることで、運用を続けた。収束したのは2019年の年末のことである。

前置きが長くなってしまったが、本題のCovid-19の話題に戻ろう。といっても、初期の対応については観測所のホームページのトピックス [6] によくまとめられているので、そちらを参照して頂ければと思う。経緯のみをかいつまんで書くと、Covid-19の拡がり懸念され始めた2020年3月初旬頃からハワイ観測所では対応策を本格的に協議し始め、3月24日のハワイ州の自宅待機命令を受けて望遠鏡の運用と観測を中止した。その後Covid-19への対応に少し落ち着きが見られ始めた4月後半には運用再開後の対応について協議し始め、5月7日のハワイ州による天文台運用再開の許可を受け、速やかに機器の点検や準備を進めて5月18日の観測再開にこぎつけた、ということである。しかしながら、Covid-19の感染の波はその後何度も訪れ、観測所でも2023年5月の米国の非常事態宣言の解除まで対応を続ける、という長期戦となった。特に最初の2年近くの間観測所員は、孤島に閉じ込められた状態という精神的な負担を抱えつつ、山頂業務や開発業務に対する大きな制限（例えば、ハレポハク宿泊施設、自動車の乗車人数、一部屋に入ることのできる人数の制限）がある中で、三鷹リモート観測の整備などを進めて、共同利用観測を継続した。

Covid-19への対応で先導的役割を果たしたのは観測所の安全室である。ハワイ観測所では荒天時の対応や山頂作業の安全の確保など、安全に関する課題を長年抱えてきていたが、おりしも2019年秋から専門の国立天文台職員がセフティ・オフィサーとして現地に赴任してきていた*9。そ

*7 結果的には、8月に入って地震の回数が突然激減し、観測所の特別な対応も終わった。自然は本当にわからないものである。

*8 個人的にはこの経験がその後のコロナ禍への対応でも活きた。

*9 2020年秋からは、後任の専門の国立天文台職員に引き継がれている。

ここで観測所ではこのセフティ・オフィサーを中心とした新型コロナウイルス対策本部を設置し、感染がハワイ島に拡がるという来たるべき事態に備えて、感染の状況に応じた観測所の対応を整理した(表1)。この表では、移動を伴う業務について対応が細かく分かれているが、これは「基本的にアメリカ疾病予防管理センター(Centers for Disease Control and Prevention; CDC)のガイドラインに沿いつつ、ハワイ州政府や保健局などの指示やMKOのルール(例えば、ハレポハク宿泊施設の利用など)に従い、さらには日本国内のルールにも従った対応をしなければならない」というハワイ観測所の少し複雑な事情を反映したものである。なお、個別の対応については、状況に応じて毎週のように見直した。また、観測所の安全室が主導して、数十ページにおよぶ「Covid-19感染対策ガイドライン」を発行して、観測職員に詳細な対応の仕方を知らせた。こちらのガイドラインも在宅勤務、ワクチン接種、移動(帰国)制限などの条件が変わるたびに改訂し、最終版(2023年2月発行)は第23版にもなった。

より安定した持続可能な運用に向けて

与えられた題目は運用の裏舞台であるが、長期にわたって運用がうまくいくためには、各部署やグループの活発な表舞台での活動が不可欠である。ここでは、各部署の紹介をかねて、より安定した、持続可能な運用に向けての活動^{*10}をいくつか記してみる。もし興味のある話題があれば、ぜひお声がけや協力をお願いしたい。

まず、望遠鏡やドームについては、建造後約30年が経過しあちらこちらに不具合がみられている。同じ自動車に30年間も乗っているようなものであるから、当然ながら、日常的な保守作業

に加えて、さまざまな部分でオーバーホールや新替が必要となっている。いわゆる老朽化問題に対する対応については、本特集号の早野氏の記事[7]に詳しい。また、望遠鏡の観測運用については、山頂無人観測化を進めている。動機として、職員の安全の確保^{*11}や経費削減を図るという目的もあるが、計画を通じて機器の保守や科学支援の強化を行っていくことも重要である。現在は設計段階であるので、夜間観測のことを熟知している科学運用部署の職員が中心となってこの計画を進めている。なお、この計画が始まったことにより、昼間と夜間の作業者がお互いの仕事内容を理解しあい、コミュニケーションが円滑になるという効果ももたらされている。

科学に直結する観測装置については、新規主力装置である超広視野多天体分光器PFSの共同利用開始を間近に控えて、観測装置、科学運用、計算機ネットワーク、ソフトウェア開発などの部署が最後の追い込みの最中である。次の記念号には、運用(や開発)に関して振り返りの記事が載ることを期待している。また、2030年代に向けては、主力装置となる予定のULTIMATE計画が進んでいるし、多くの装置(持ち込み装置)の提案がなされている。このこと自体は素晴らしいことであるが、今後は、開発のためだけでなく、これらの装置を運用をするための予算や人の獲得にも今まで以上に皆様の協力を必要としている状況であることは強調しておきたい。

観測所の抱えている課題の一つは文書化である。職員の入れ替わりが頻繁にあり、定年を迎える職員も増えていることから、以前のように経験を生かした作業や現場教育を中心とした引き継ぎを行うことが困難になっている。安全室の専門職員が赴任してからは、特に安全に深く関係してい

^{*10} すべての部署に共通の悩みは、いうまでもなく昨今の米国の物価高と円安による予算の逼迫であるが、それに対する努力はここではおいておく。

^{*11} 高山病のリスクだけではなく、現在ほとんどの天文台が無人山頂観測に移行しつつあるので、緊急時に支援を求めることが困難になっているという事情がある。

表1 Covid-19の感染が拡がる直前に観測所内で検討した業務の対応の表. 3/6にはハワイ州で感染が確認され、対応のフェーズが変わった.

ハワイ観測所における新型コロナウイルス対応概要表					
		現時点(3/3)	三鷹勤務者に感染者が確認された場合 1)	ハワイ州に感染が確認された場合	ハワイ観測所で感染者が確認された場合
体制	対策本部(方針決定、指示)	設置	設置	設置	機能維持
	連絡会議(情報収集、情報通知)	設置準備	設置	設置	機能維持
就業	職員の出勤	通常	通常	通常	一部を除いて在宅勤務
	米国内出張	通常	通常	CDCガイドラインに従う	禁止
	海外出張	通常	三鷹への出張は所長承認	通常	原則禁止
	海外出張中の職員への対応	通常	三鷹への出張者は、健康状態確認と所長による帰国命令を検討	通常	対策本部より指示
業務	共同利用	リモート運用への推奨	三鷹以外のリモート運用への推奨	リモート運用のみ	禁止
	国際研究会(主催/参加)	通常	通常	通常(注意) 2)	禁止
	米国内研究会	通常	通常	通常(注意) 2)	禁止
	ハワイ観測所内での会議	通常	通常	一部の会議を除いてWEB会議	中止(必要に応じて自宅から参加)
	ネットワークの保守、運用	通常	通常	通常	一部職員のみ対応
	一般ツアー、特別ツアー	一般ツアー停止中、特別ツアー通常	一般ツアー停止中、特別ツアー自粛	原則禁止	ツアー禁止
	山頂作業	通常	通常	通常	禁止
	山麓作業	通常	通常	通常	禁止
	ハレボハクの利用	通常	通常	通常	禁止
	海外からの訪問者の受け入れ	通常	三鷹からの出張者受け入れ停止	CDCガイドラインに従う	禁止
教育	講義、セミナー	通常	通常	通常	禁止
	各種講習会	通常	通常	必須講習以外中止/延期	禁止
その他	必需品の備蓄	備蓄準備	備蓄準備	状況に応じて継続	停止(配布のみ)
	近接機関との連携	通常	通常	連携開始	連携継続
注) 米国/日本政府、地方自治体の指示が優先					
三鷹の対策本部からの指示により逐次修正					
1) 日本国内他地区にて発生した場合は、三鷹でのリモート運用の処置以外は他地区に読み替える					
2) COVID-19に関連したCDC travel guidelines と外務省の海外安全ページを読み渡航制限を確認すること。					

ること(装置交換, 荒天時や緊急時の対応など)については作業マニュアルや安全マニュアルの改訂が進んでいるが、まだ道半ばといえる。観測所では、能力の高い職員の雇用も大きな課題である。特にダイクルーなどのテクニシャンは現地雇用が基本なので、コミュニティーカレッジに宣伝に出かけたり、ローコンテキストな(詳しく丁寧な)コミュニケーションを試みてはいるが、職業に対する考え方の違い^{*12}もあり、一筋縄ではいかない課題だと感じている。HRなどと協力して、より安心できる人員プランを立てることができればと考えている。

新しい組織である科学コミュニティーグループについては、まだその役割を詰めているところであるが、日々の観測運用を超えて研究者の支援をする部署といえる。新しいリーダーのもと、早

速、学部学生向けのすばる体験企画の復活などが模索されている。広報室の活動については、本特集号の白田-佐藤氏の記事[8]に詳しい。

観測所をとりまく社会的な状況の変化

現在、ハワイ観測所をとりまいている社会的な状況が大きく変わりつつあり、その中でどのような運用が可能かの検討が進んでいる。これらは基本的には運営に関することであるが、数年後の観測所の運用に大きな影響を与える可能性が高いので、ここで少しだけ触れておきたい。

変化の1つ目は、MKOとハワイ州との関係である。現在のマウナケア管理体制は先に述べたが、先住民を含めたハワイ州のコミュニティーの意思により、いまこの体制が大きく変わろうとしている。ハワイ州はマウナケア管理諮問局

^{*12} 業務内容を明確かつ詳細に記述する必要がある、とか、(善悪論は別にして)労働における人の価値=給料である、とか。

^{*13} 関係した観測所の活動や関連した状況については、本特集号の白田-佐藤氏の記事[8]も参照のこと。また、「地元へ溶け込んだ観測所」は初代所長の海部宣男氏の目指したところである[9]。

(Maunakea Stewardship and Oversight Authority; MKSOA) を立ち上げて、2028年7月までにマウナケア山頂域の管理をハワイ大学から新組織に移行する予定であり、CMSに相当する組織もその傘下に入るであろう。この動きは、ハワイ州のコミュニティの中でMKOの位置づけを考え直して共有することを意味し、ハワイ観測所の存続にも関係した重要な課題である。今後新管理体制のもとで観測所との土地借用契約が結ばれることになると思われるが、科学のみならずそれを越えた大きな枠での貢献(コミュニティ・ベネフィットと呼ばれている)が期待されている^{*13}。

変化の2つ目は米国のビザの問題である。これまでは国立天文台職員は特に年数に制限なく米国に赴任できたが、方針の転換により、連続して5年程度しか滞在できない可能性が高くなっている。この規則が適用されると望遠鏡やドームの運用保守の体制に大きな影響を与えることになるので、運用側としても事前に対応策を検討している。

さいごに

私が勤め始めた2018年以降、発生するいろいろな問題(トラブル)にできる限り対応してきたものの、運用に関して大変革が起こることはなかった。今回編集部から提案された話題の中に30m望遠鏡(国立天文台のTMTプロジェクト)との一体的な運用があり、私自身も赴任当初は大仕事になると思っていたのだが、TMT(だけでなくMKO)が大きな社会問題となっているために、運用の検討はほぼ机上の話に留まってあまり進んでいない。また、観測所の(国際)共同運営の話もCovid-19のために停滞してしまい、ようやく議論が再開したところである。もちろん、マ

ルチメッセンジャー天文学などからの科学的な要請への対応も、課題として控えている。これらの話題については次の記念号に譲りたい。最後に、今後も引き続き運用へのご理解とご協力をお願いするとともに、一人のファンとしてすばる望遠鏡の明るい未来が開けることを期待して、筆をおくことにする。

謝辞

2022年度頃までの出来事について、当時観測所の所長であった吉田道利さんから貴重な情報をいただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 泉浦秀行, 2018, 天文月報, 111, 824
- [2] <https://www.naoj.org/jp/news/> (2024.11.25)
- [3] <https://www.nao.ac.jp/recommend/mission/hawaii.html> (2024.11.25)
- [4] 唐牛宏, 2010, 天文月報, 103, 176
- [5] 林正彦, 2010, 天文月報, 103, 181
- [6] <https://subarutelescope.org/jp/news/topics/2020/09/30/2902.html> (2024.11.25)
- [7] 早野裕, 2025, 天文月報, 118, 81
- [8] 白田-佐藤功美子, 2025, 天文月報, 118, 16
- [9] 海部宣男, 2010, 天文月報, 103, 169

Title Backstage of Subaru Operation

Eiji KAMBE, Akira ARAI, and
Vera Maria PASSEGER

*Subaru Telescope, National Astronomical
Observatory of Japan (NAOJ), 650 North
A'ohoku Place, Hilo, HI 96720, USA*

Abstract: Celebrating 25th year anniversary of Subaru Telescope, we here introduce the players, some imposed rules and directions of Subaru's Operation, respectfully and humbly disclosing what's happening behind the scenes.

〈コラム1〉 サポートアストロノマーから見た すばる25周年

私がハワイ観測所のサポートアストロノマー (Support Astronomer; SA) として異動してきたのは2021年8月で丸3年が経過しました。学生時代以来、過去にときどき可視高分散分光器 (HDS) などでユーザーとしてお世話になったことがありますが、私個人は国内の1-2 mの中口径望遠鏡を持つ大学の天文台で研究の側で望遠鏡や装置の運用を行うポジションにいました。

SAの主な仕事は公募 (Call for Proposals) 時の装置面情報提供から観測完了まで共同利用課題に携わり、ここでしか撮れない生データを生み出すことです。具体的に我々が主研究者 (Principal Investigator; PI) の方と直接関わるのは観測準備の段階になってからです。できる限り効率的に遂行できる観測プランをPIと議論して検討する必要があります。その観測目的に合わせて、装置や望遠鏡の状況に応じて装置部門や望遠鏡関係部門の方々と観測に向けた準備も行います。観測当日は同じ部署である望遠鏡オペレータ (望遠鏡と山頂での安全管理を担当する) とコンビで日没の約1時間前には山頂に上がり、望遠鏡や装置の準備を行い、必要なキャリブレーションデータを取得して日没を待ちます。観測の内容やシーイングなど環境条件は毎回異なるので、2つとして同じ観測はありません。毎回の観測を一期一会として取り組むことで少しずつ観測の効率化や運用の改善にもつながります。SAの仕事の大部分は観測実行にまつわるソフト面の作業となりますが、装置によっては保守や改良にも装置部門の方々と取り組むことも多くあり望遠鏡運用のインフラ業務と言えます。どの現場仕事もそうですが、SAも肉体的にややハードなことも多くありますが、天候



山麓施設のリモート観測室にて

にも恵まれ想定した通りの良質なデータが得られたとき、稀に想定を超える面白いデータが得られた時、あるいは装置の問題を解決できた時の達成感、この仕事の醍醐味と言えるでしょう。

観測実行それ自体のみを切り出すときほど苦勞のないように見えるかもしれませんが、そもそも夜の観測は、昼間に行われている様々な設備の保守、確認、装置交換など無数の仕事が達成されて初めて実現します。安全管理、冷凍機や水冷チラーなどの基本的なインフラの維持、望遠鏡と装置のほぼ全ての機能がオールグリーンとならないと満足な観測ができません。SAとして、またユーザーの一人として大量の設備を有するすばる望遠鏡を25年間の間、継続的に維持されてこられた多くの関係者の皆様にまずこの場を借りて感謝を申し上げたいと思います。また各装置で優れたプロポーザルを提案し続けてくださっているユーザーのみなさまにも引き続きの活用提案や改善すべき点についてのご意見を賜りたいと思います。

現時点では、装置トラブルの対応やデータの質の確保の観点で、多くの装置で開所当時と同様に山頂での観測が行われていますが、他の大型望遠鏡と同様に山頂を無人化して運用する計画が進められています。様々な理由からすばる望遠鏡の観

測のあり方やリソースの割き方が変化していくのは必定でしょう。一方で単なる省力化・人員削減になればこれまでの観測データの質を維持することは難しいでしょう。そうならないようよい落としどころを見出すのがSAの腕の見せどころだろうと思います。

最後に、2020年のコロナ禍をきっかけにすべての共同利用観測は、Zoomや望遠鏡遠隔制御システム (Gen2 Extended Remote System; GERS) あるいは三鷹リモート室からの参加となり、観測者の方々に直接お会いすることが困難になっています。そのような中、2023年度から担当者のご尽力もあり学生PIの観測課題限定にはなりますがハワイに来て観測をしていただけるようになり、以前のような賑わいが少しずつ戻ってきたと感じています。ここ2,3年の急激な円安とハワイの異常なまでの物価高騰もあり、コロナ禍以前と比べて日本からの往來が容易ではなくなっていますが、次世代を担う若者をはじめとして、観測に興味をお持ちのユーザーに、すばる望遠鏡の観測現場を体験していただける機会が増えることを願っています。

(新井 彰)

〈コラム2〉

観測者からサポートアストロノマーへ

私は2023年12月からハワイ観測所のサポートアストロノマー (SA) をしていますが、その前はオーストリア、ドイツ、スペイン、チリなどの天文台で働いていました。例えば、チリのラ・シーア天文台では3.6 m望遠鏡で、スペインのラ・パルマ天文台では2.56 m北欧光学望遠鏡 (NOT) で観測をしました。また、チリのパラナルにあるヨーロッパ南天天文台 (ESO) では、最大4台の8.2 m望遠鏡から光を集めて系外惑星探索を行う、有名なESSPRESSO観測装置も利用し



ESO 3.6 m (左上), NOT (右上), マウナケアの望遠鏡群 (下) のサイトにて

ました。

当時は私は観測者として科学的な作業に集中しており、毎晩、観測天体の決定や観測プランの作成をしていました。観測天体の天球上の位置から観測スケジュールを考え、必要な露出時間を決め、データ解析などで必要となる参照星の取得プランを作成する、ことなどです。また、天気が悪い時のためにバックアッププランを立ておくことも重要です。空が薄い雲で覆われていたり、星像がよくない時のために、明るめの天体を選んでおきます。観測者としては、自分自身の科学目標を達成するために観測装置のことについて学んでおく必要もあり、観測プロポーザルを書く段階では装置担当のSAの方に相談をしていました。

すばるに来て、私は全く逆の立場になったといえます。SAとして観測の運用の方に集中し、観測装置の準備を行ったり観測者の準備した観測プランを実行したりしています。もちろん、使用する観測装置によって観測者が達成しようとしている科学研究ができるのかどうか確認します。このようなときに、私の観測者としての長年の経験はとても役に立っています。そのような経験があるからこそ、観測者のニーズや期待がよく理解で

き、彼らが観測時間を最大限に活かすための支援ができています。

観測者が参加するクラシカル観測では、観測中常に観測者とZoomなどで会話をし、観測条件の変化や観測中に生じる問題に応じて観測内容を柔軟に変えています。一方、すばる望遠鏡のいくつかの観測装置で実施されているキュー観測では、観測時間が最も有効に利用できるように、観測所が事前に複数の観測プログラムの中から観測する天体の順番を決めておきます。この観測では観測者はおらず、SAが観測を実行します。キュー観測では、観測者の事前の準備が重要になります。なぜなら、夜中に露出時間や観測天体を変更できないからです。観測中にSAは、可能な限り有効なデータが取れているかを自らの責任で確認し、また、天気がよくないときにはバックアッププログラムに移行するかどうかの判断を行っています。

口径8.2 mのすばる望遠鏡は私が携わった最も巨大な望遠鏡の1つですが、そういう大きい望遠鏡では操作が複雑で難しくなるために、望遠鏡の操作や状態の監視を行う専属のオペレータがいます。ですから、SAは観測装置の操作や観測に集中できますし、観測者は観測の実施状況をモニターし、取得されたデータのチェックを行うことができます。一方、2.56 m NOTでは、オペレータ、SA、観測者の役割を一人でこなす必要があります。観測者は、観測の前にSAから望遠鏡や観測装置の立上げ、観測実施、終了の方法やトラブル発生時の簡易的な対処方法のレクチャーを受けます。その後は、SAはオンコール待機となり、観

測者は一人で一晩を過ごすことになります。このような観測は、観測者、特に慣れていない人にとってはストレスを感じるかもしれませんが、私にとってはとても楽しい経験でした。昼間にはラ・シーアのような緑に覆われた山頂であったり、アタカマの砂漠であったり、そして休火山であるマウナケアであったりと、観測所ごとに異なる、息をのむような景観を楽しむことができます。また、夜間には昼間とは全く異なる経験をすることができます。いま、マウナケアで働くことができます、とてもうれしく思っています。

望遠鏡の近くで働いていると、伝統的な天体観測の方法についての懐かしい思いがよみがえってきます。それは私が、オーストリアのウィーンにある150年の歴史のある天文台で、手動によるミラーカバーの開閉、観測フィルターの交換、ドームの操作などの方法を学び、望遠鏡のすぐ下にある操作室で幾多の夜を過ごしたからです。望遠鏡の近くにいれば、その場ですぐにトラブルへの対応ができます。また、午前2時に、誰もいない外に出て、冷たい風を受けながら、漆黒の夜空に輝く無数の星を見上げることは、ほかでは得ることができない経験です。

2020年のコロナ禍以降観測者が山頂に行って観測することができなくなったことは少し残念ですが、最近、プロポーザルが採択された学生の山頂観測ができるようになったことはうれしく思います。望遠鏡のある場所で観測を実行することは天文学者にとって大切な経験だと思っています。

(Vera Maria Passegger; 日本語訳 神戸)

すばる3時代

宮崎 聡^{1,2}

〈¹ 国立天文台ハワイ観測所 650 N Aohoku Place Hilo Hawaii 96720, USA〉

〈² 総合研究大学院大学 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: satoshi@naoj.org



すばる望遠鏡の観測装置の歴史を振り返り、すばる3時代の観測装置の検討状況を紹介します。また、その時代において、観測所運用で留意すべきことについてまとめる。

国立天文台ハワイ観測所は、大規模学術フロンティア促進事業の1つとして、2022年4月から始まる10年計画で「すばる2」を推進することを文部科学省に認められ、現在はそれに基づき運用されている。「すばる3」は、その次の2032年4月から始まる10年間に行う事業を指す。予算申請の枠組みが、今後変更されることも考えられるが、本稿では2030年代、すなわちTMTをはじめとする口径30 m望遠鏡の時代に、すばる望遠鏡はどのような観測装置を装備すべきか等、これまで議論されてきていることを報告する。また、2030年代という、すばる運用開始から30年以上経過していることになる。その際に留意しなければならない事柄についてもまとめる。

1. すばる望遠鏡の観測装置：ファーストライトから現在まで

すばる望遠鏡には、主焦点、カセグレン焦点に加え、さらに2つのナスミス焦点（それぞれ可視ナスミス、赤外ナスミスと呼ぶ）がある。これは、マウナケア山でお隣のKeck 10 m望遠鏡がナスミス焦点のみ、Gemini 8 m望遠鏡が（ベント）カセグレン焦点のみで運用されていることと、対照的である。ここに、各種焦点面観測装置が取り付けられて、多彩な観測モードを可能にしてい

る。特に、短焦点距離（約15 m）の主焦点は、現在科学観測運用されている8 m級望遠鏡群の中では世界一の広視野（直径1.5度角）観測を実現し、すばる望遠鏡の特徴のひとつとなってきた。

表1にすばる望遠鏡の観測装置をまとめた。また、図1に、それぞれの観測装置が運用されてきた時期を示す。表中、「汎用」というのは、幅広い研究分野で用いられる装置を指し、それ以外のものは、主として太陽系外惑星の研究に用いられている。また、AO36, AO188, SCEXAOは、大気揺らぎを検出・補正する補償光学装置ユニットの名称で、AO36, AO188はIRCS, CIAO, HiCIAOのいずれかと組み合わせて使用される。SCEXAOはAO188が補正した像をさらに改善し、CHARISと組み合わせて使用されている。

この表と図から、FOCAS, IRCS, HDSといった汎用の分光ができる装置は、すばる望遠鏡観測開始以来、現在に至るまで長期にわたり使われてきていることがわかる。MOIRCSは2006年より共同利用に供されたが、同様に長期間運用されている。また、主焦点の撮像カメラは、Suprime-CamからHSCと強化されたが、これもすばるの定番観測装置のひとつに数えられるだろう。一方、特別な性能や用途を持った装置群は、一定程度の研

表1 これまでのすばる望遠鏡の観測装置

名前	説明	波長帯	焦点	汎用	PI型
Suprime-Cam	広視野カメラ (0.5度角)	可視光	主焦点	○	
HSC	広視野カメラ (1.5度角)	可視光	主焦点	○	
FOCAS	多天体分光撮像	可視光	カセグレン	○	
HDS	高分散分光	可視光	可視ナスミス	○	
IRCS	分光撮像	近赤外	カセグレン	○	
			赤外ナスミス		
CISCO/OHS	分光撮像	近赤外	赤外ナスミス	○	
CIAO	コロナグラフ撮像	近赤外	カセグレン		
COMICS	分光撮像	中間赤外	カセグレン	○	
MOIRCS	多天体分光撮像	近赤外	カセグレン	○	
FMOS	多天体分光	近赤外	主焦点	○	
AO36	補償光学 (36素子)	近赤外	カセグレン	○	
AO188	補償光学 (188素子)	近赤外	赤外ナスミス	○	
SCEXAO	極限補償光学	近赤外	赤外ナスミス		○
HiCIAO	コロナグラフ撮像	近赤外	赤外ナスミス		○
CHARIS	コロナグラフ用分光撮像	近赤外	赤外ナスミス		○
IRD	高分散分光	近赤外	赤外ナスミス		○
SWIMS	多天体分光撮像	近赤外	カセグレン	○	○
MIMIZUKU	分光撮像	中間赤外	カセグレン	○	○

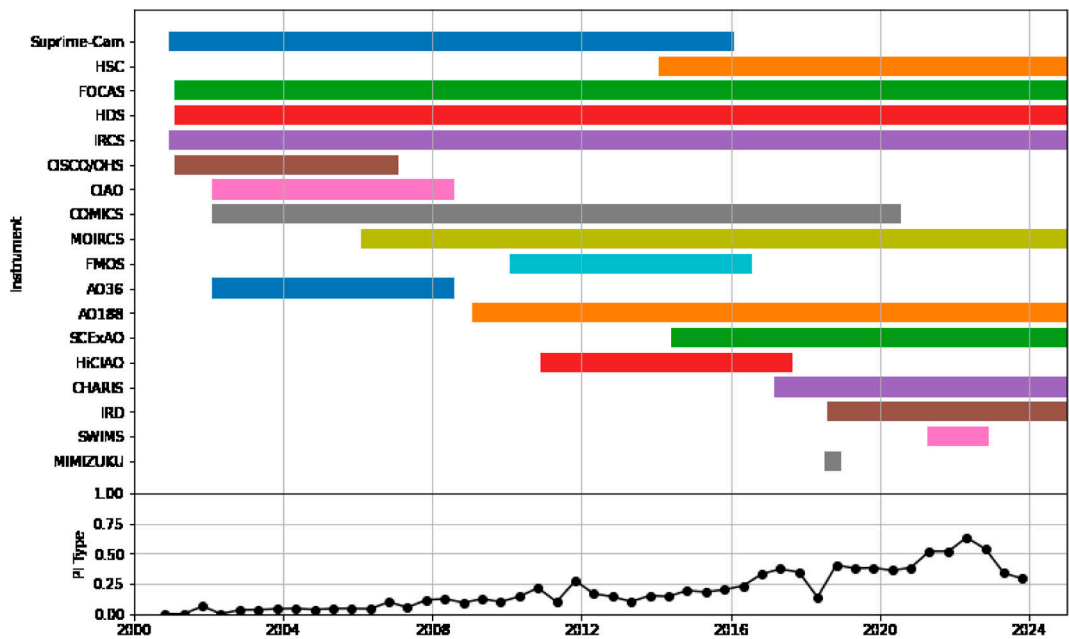


図1 すばる望遠鏡の観測装置の歴史。右端に達している装置は、現在運用中のものである。最下段MIMIZUKUをのぞいて、全て共同利用装置である。SCEXAO以下は、PI型の装置であり、図下段にPI型装置が共同利用で用いられる割合の推移を示している(本文参照)。

研究成果があがると引退し、その運用期間はおよそ6-7年である。

PI型と分類される装置は、装置開発グループ

が観測装置の維持・観測・取得データ整約に主として責任を持ち、運用されている。PI型装置の利用を希望する観測者は、プロポーザル提出前

に、装置PIの同意を得ることが必要となっている。その他の装置は観測所運用装置（Facility装置）と区分され、観測装置が引き渡された後は、運用の責任は観測所が持つ。

PI型装置というカテゴリーは、もともと、試験的な要素を持つ観測装置を受け入れるために導入された。図1下段にPI型装置が観測に用いられる夜数の割合を示したが、初期のころは割合は低かった。しかしその後、2010年にHiCIAOがPI装置として導入され、それが共同利用に供されるようになってから、PI型装置の割合が増大している。実際、表1で、SCEXAO以下に挙げている装置は全てPI型となっており、主として系外惑星の研究用である。

なお、PI型のうち、SWIMSとMIMIZUKUは、東京大学アタカマ望遠鏡（TAO）用に開発された観測装置で、ある一定期間、すばる望遠鏡が受け入れて、試験観測を行った。SWIMSについては、一部共同利用観測にも供されたが、装置の性格がSWIMSと重なるMOIRCSは、この間運用を停止していた。そのため、この期間はPI装置の利用が50%を超えていた。

PI装置の問題点を1つあげるとすると、その運用がPIグループの資源リミットになってしまうことであろう。例えば、将来第三者が観測データの再利用・再検証を行うためには、データの適切なアーカイブと解析ソフトの標準化が必要となるが、そのような仕事はどうしても後回しになりがちであろう。共同利用開始から8年近く経過する、SCEXAO+CHARISは、今後も需要が見込まれるのであれば、Facility装置として運用すべきである。

2. これからの観測装置

表2にすばる2時代に新たに導入される観測装置を示した。PFSは約2400天体同時分光ができる装置で、FOCASと比べるとおよそ約100倍の効率向上になる。また、可視光から近赤外線の一部までの波長域をカバーしていることも特徴で、世界的にみても極めて高い競争力を有している。2025年2月から共同利用観測を開始する予定であるが、大きな注目を集めている。広視野撮像観測の世界を牽引してきたHSCは、南天で立ち上げ中の米Rubin天文台の専用広視野カメラに近々凌駕されてしまう見通しであるが、PFSにライバルする観測装置はしばらく現れそうにない。

GLAOは、複数の参照星を用いて、主として地表に近い大気で生じている波面揺らぎを補正する補償光学装置であり、0.3度角という広い視野に渡り良好（0.2秒角）な星像を実現する。大気条件にもよるが、マウナケア山ではおよそ半分の確率でこの結像性能を実現できる見通しである。WFIはGLAOと組み合わせる赤外線撮像カメラである。GLAO、WFIともに開発フェーズにあり、2028年に試験観測を開始し、2029年より共同利用開始を目指している。この性能を持つ赤外線カメラは世界的にも他に存在せず、様々なオリジナル成果が期待出来る。GLAOは2023年に予算を獲得し、詳細設計や製造がはじまったが、運用を始めるまでに6年間はかかるわけで、GLAO+WFIはすでにすばる3時代に活躍する装置と言えるだろう。

表2 これからのすばる望遠鏡の観測装置

名前	説明	波長帯	焦点	汎用	PI型
PFS	多天体分光	可視光・近赤外	主焦点	○	
GLAO	地上層補償光学	近赤外	カセグレン	○	
WFI	広視野撮像（0.3度角）	近赤外	カセグレン	○	

3. すばる3時代の観測装置

さらに新しい装置構想も始まっている。2023年8月にすばる科学諮問委員会主催で、二日間にわたり、「すばる3研究会」が開催された [1]。PFSに現在欠けている高分散分光モードへの期待、GLAOと組み合わせる分光装置、GLAOの性能強化提案、HSCの1/100の時間で読み出せるCMOSセンサーを用いて高速に変動する天体を探査する提案等、多くの若手の研究者らが構想を話し、それらについて議論が行われた。

これらの装置開発を検討しているグループの下に、興味を共にする研究者が次第に集まり、より詳細な技術的可能性や研究の意義等の議論が進められ、その中から、有望そうな装置が、順番に開発予算の獲得に成功して、実現に向かうことが理想である。天文学のような科学研究は、このようにボトムアップ的な進め方が自然であり、実際、これまでのすばるの観測装置はすべてこのように開発されてきた。開発予算については、初期の観測装置については、主として国立天文台から支給されていたが、概ね2011年以降に運用を開始した観測装置は、科研費等の外部資金を装置グループが獲得して、開発を行ってきた。すばる3時代も、それは変わらないだろう。一方、国立天文台やハワイ観測所には、そのような開発グループの、支援や必要な調整を行う役割が期待されており、それらにはできる限り応えて行く必要はある。

運用する装置群を考えるうえで注意すべきことは、表・図1からわかるように、可視・近赤外の汎用的な観測装置は、常に需要があるということだ。基本装置は、先進的な性能・機能を有さないからと、すぐに運用停止をしないほうがよい。一方、新しい観測装置を考える時は、世界に類がない性能や機能を有する装置を目指すべきである。世界にほかにないものであれば、世界中の研究者が利用を希望するので、そこで新しい国際協

力が生まれる。実際、HSCやPFSは多くの海外研究者の興味を引きつけ、日本人研究者の独eROSITA衛星、欧Euclid宇宙望遠鏡、米Rubin天文台等の最先端観測データへのアクセスを実現した。また、米Roman望遠鏡とすばる望遠鏡は協調観測が予定されており、これも日本人研究者にこれまでにない新しい研究機会を与えるだろう。

また、かつてMIMIZUKUやSWIMSといった装置を受け入れたように、テストベンチとしての役割も、すばる望遠鏡にとって重要である。カセグレン装置はその交換の人手を考えるとハードルが高いが、ナスミス焦点はより自由度があろう。例えば米側とすりあわせが始まっている、米Habitable Worlds Observatory (HWO) 衛星用の赤外線コロナグラフシステムの開発等は、大変重要で、おもしろい。

4. すばる3時代の望遠鏡運用

新しい観測装置の構想に加えて、すばる3時代には、他にも留意すべきことがある。それは、まず第一に、望遠鏡やドームの老朽化への対応である。図2に、2000年11月の共同利用開始以降に生じた、一晩以上の望遠鏡運用休止の履歴を示している。棒の幅が運用停止夜数を表しており、休止の理由毎に分けて表示している。Regular Maintenanceは主として主鏡の再蒸着で、同時期に合わせて行われる保守作業の内容にもよるが、概ね50-60日程度の期間が3から4年に一度の割合で割かれている。Planned Upgradeは、機能向上のための休止期間で、HSC、レーザーガイドシステム、PFSなどを新たに搭載するために使われている。Natural Disasterは、主として地震に起因するもので、2020年のコロナ禍によるもの(55日)も含めてある。以上までは、必要もしくは避けがたい理由による休止である。Instrument TroubleはいずれもHSCの機械系故障で生じている。

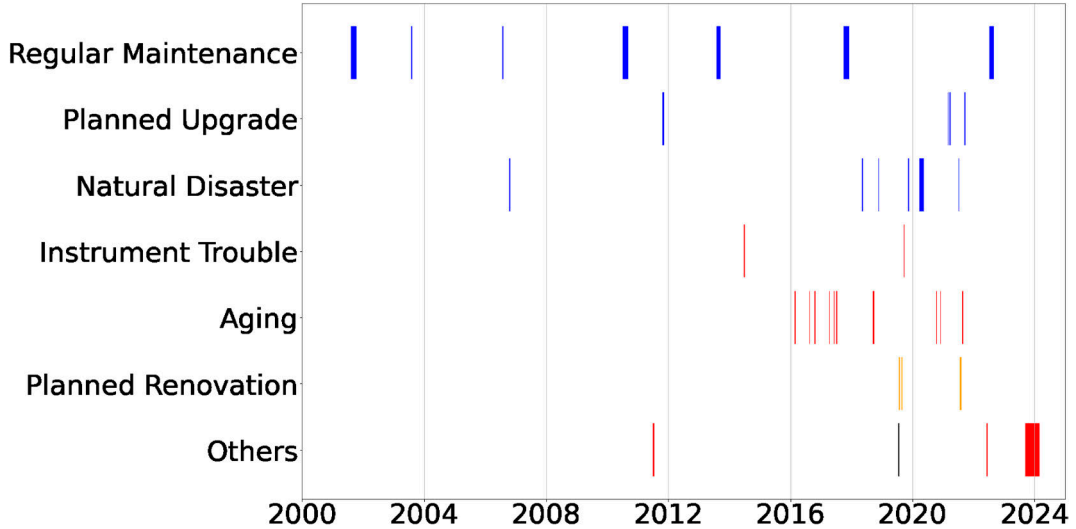


図2 望遠鏡運用休止期間の原因別履歴. 一日以上休止した場合をカウントし、夜の一部分が休止した場合は含まれていない。また、曇天による休止も含まれない。

注目すべきは、設備の経年劣化に起因していると思われる事象 Aging で、以前は皆無であったのに、2016年頃から多発し始めていることがわかる。主鏡のミラーハッチや、ウィンドスクリーン等の大型可動部や無停電電源（UPS）等で生じた。この老朽化対策のための予算を、2018年度より措置いただいたので、その作業に伴う休止期間を Planned Renovation として示した。行われている老朽化対策については、本特集の早野氏の記事 [2] に詳述されている。この老朽化対策を予定通り完了させ、2016年から生じている Aging による休止を可能な限り抑え込むことが、現在ハワイ観測所に与えられている重要な使命である。

望遠鏡・ドームの制御系では、その制御の様子、あるいは発生したイベントが、ログデータとして記録・保存されている。そのデータ数は、18,000チャンネル以上と多く、かつ中には0.1秒や1秒という高頻度で出力されており、これらの記録はビックデータである。これを解読して、上記のトラブルが生じるより前に、どこかに兆候が残されていないかを調べてみるのは、将来における故障を未然に防ぐうえで、有効かもしれない。

い。現在過去10年分の記録のデータベース化を望遠鏡運用部門で行っており、それを最新のデータ科学の手法を用いて解析するのは興味深いだろう。

図2最後の段の Others であるが、これまで説明したカテゴリーに含まれない原因による休止を示している。この Others のうち、2019年のものを除く3件については、事前の準備・トレーニング・技量不足を要因とする、操作や施工の間違いにより生じた休止期間で、最近生じた主鏡事象が170日と他のどの休止期間より長い。発生してしまうと、インパクトは果てしなく大きく、人の教育、作業手順の整備と徹底により、再発を防止しなければならない。

4.1 予想される運用経費や人員削減への対応

一方、TMTの運用がはじまるすばる3時代には、すばる望遠鏡を運用する経費や人員がこれまで以上に増えることは、期待出来ない。これが二つ目の運用における留意点である。最初に述べたように、すばる望遠鏡はKeck望遠鏡やGemini望遠鏡に比べて多機能であり、それが故に運用に人手がかかっている。その最たる例がトップユ

ニット交換（トップユニットとは望遠鏡のトップリング中央部に取り付けられる副鏡やHSC等の主焦点観測装置を指す）である。作業は主鏡の上の高所で行われ、ユニットと望遠鏡間のクリアランスの目視確認・微調整をその工程に含み、熟練したスタッフが複数名必要となっている。毎月複数回、このような職人技による作業のおかげで、すばる望遠鏡の特徴が活かされている。

予想される観測所運営環境の変化により、すばる3時代に今と同じ運用スタイルが維持できるとは思えない。そこで、いくつか新しいことを考える必要がある。まず第一に、負担の大きいトップユニット交換の回数を現在の月数回から年数回以下に減らしたい。この回数であれば、日本からの出張者で対応が可能であり、現地に熟練作業者を雇用し続ける必要がない（熟練者の雇用維持が大変難しい）。

こうすると、今後も需要が見込まれる主焦点観測装置と新たに開発が進むGLAO用の副鏡は、数ヶ月の単位にわたり望遠鏡につけたままになる。月の明るさ変化を考えると、科学運用的には最適解ではないかもしれないが、熟練者不足により事故が起きることが最も恐ろしいので、頭を切り替える必要がある。

主焦点装置を取り付けたまま、その前にセラミック製の軽量副鏡が設置できれば、可視・赤外ナミス焦点の観測装置でこれまでどおり観測ができるようになる。この取り付けは望遠鏡を倒して、新たに作成する専用ステイを用いて行えば、トップユニット交換よりリスクは低いはずだ。主焦点装置の補正光学系第一レンズ頂点と、副鏡頂点の距離が800 mmはあるので、700 mm程度のスペースにセラミック鏡と位置調整用の6本ジャッキを取めることができればよい。この新副鏡ハウジングは、筒頂内環の外部に直接ボルト留めすることになる。HSC用のフィルター交換機構は重量300 kgなので、これが外れてい

れば、300 kgの重量マージンができ、新副鏡の重量をこれ以下に収めればよい。

また、現在、ほぼ全てのマウナケアにある望遠鏡では、夜間山頂無人観測が行われている。大型望遠鏡で実施していないのは、すばる望遠鏡とKeckであるが、Keckについても2025年より無人体制に移行予定である。ハワイ観測所でも、検討は進められているが、すばる望遠鏡は他に比べてはるかに複雑なため、時間を要している。しかしながら、山頂無人観測は、職員の負担を減らし、安全にも資するため、できるだけ早期実現を目指したい。

5. ま と め

本稿後半、すばる3時代に備えて、ハワイ観測所が主体となって行うべき運用上の改善点をまとめた。一方、新観測装置開発の主体は研究者の皆さんである。世界のどこにもないユニークな観測装置を開発して、人々を驚かせてほしい。世界のどこにもないものを作るには、勇気が必要であるが、想像力をたくましくし、知恵を絞って、仲間を増やして、挑戦してほしい。

参考文献

- [1] <https://sites.google.com/faculty.gs.chiba-u.jp/subaru3workshop2024>
- [2] 早野裕, 2024, 天文月報, 81

Phase Subaru 3

Satoshi MIYAZAKI

¹Subaru Telescope NAOJ, 650 N Aohoku Place Hilo Hawaii 96720, USA

²The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, 2-21-1 Osawa, Mitaka 181-8588, Tokyo

Abstract: Instruments history of the Subaru telescope is reviewed. New instruments in the era of Subaru 3 are argued as well as important points of attention in the operation of telescope during that era.

欧文研究報告論文賞受賞に寄せて

浜名 崇

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: hamana.tk@nao.ac.jp

私たちがコスミックシア二点相関関数測定による宇宙論パラメータ推定を報告した2020年出版の論文 [1] が欧文研究報告論文賞に選ばれました。著者総勢20名は日本天文学会からこのような高い評価をいただいたことをたいへん喜んでいますが、著者20名というだけでかなり大人数ですが、この研究はすばる戦略枠プログラムとして実施されたハイパーシュープリムカムサーベイ（HSCサーベイ）の初年度データを用いたものであり、多数の関係者の貢献により成り立っています。本記事では受賞論文の概略と、本研究の実現に不可欠であった関連研究について述べます。

1. はじめに

コスミックシアとは遠方銀河の像がその手前の構造による重力レンズ効果により歪められる現象です。重力レンズ効果による銀河像の歪みというと銀河や銀河団のごくごく近くに現れる重力レンズアーク像やアインシュタインリングといった、いわゆる強い重力レンズ現象 [2] が視覚的なインパクトをもって思い起こされるわけですが、コスミックシアはより弱い重力レンズ現象によって引き起こされるほんのわずかに像が歪む現象です。弱重力レンズ効果とも呼ばれています。強い重力レンズ現象がごくごく限られた領域でのみ生じるのとは異なり、弱重力レンズ効果はすべての遠方銀河が（程度の違いはあるにせよ）その影響を受けています。ただし弱重力レンズ効果の典型的な大きさは数パーセント（銀河像が円形であった場合、長短軸比が数パーセントの楕円形に歪められる）と銀河像の典型的な長短軸比である数10パーセントに比べてとても小さいので個々の銀河像にその効果を認識することはできません。しかし、弱重力レンズ効果による遠方銀河像の歪みは、重力

レンズ源である宇宙の構造の潮汐場に沿ったコヒーレントなパターンを持っているので多数の銀河像を解析することにより統計的シグナルとして検出することができるのです。このシグナルから潮汐場情報が引き出され、それから潮汐場を作り出している宇宙の物質分布情報に繋がり、さらにそれから宇宙の平均密度や物質分布の揺らぎの度合いなどが推定できます。この統計解析をコスミックシア宇宙論解析と呼んでいます。

本記事を書くきっかけとなった研究はHSCサーベイのデータを用いたものです。HSCサーベイについては、2019年に天文月報で特集が組まれ [3]、その概要 [4] に加えてデータ解析や天体カタログ作成、期待される研究などについて14本もの記事にまとめられています。そんな大掛かりなプロジェクトをあえて一文でいうならば、トータルで1100平方度の領域を複数バンドで撮像観測し、得られたデータでもって研究者（あるいはグループ）が各々の研究を行う、というものです。サーベイデータはデータリダクションチームが解析し、検出された天体カタログはチーム内で共有され一定期間後には公開されま

す。また各々の研究で作られたデータのうち汎用性の高いものは公開されています [5]。可視光銀河団カタログ [6] や銀河の測光的赤方偏移カタログ [7] などがその例です。このサーベイプロダクトの共有がHSCサーベイを単に複数の研究の寄せ集めではなく、そこから自ずと相乗効果が生み出されるプロジェクトにしていると私は感じています。次章で述べますように私たちがコスミックシア解析を行ううえでも、天体カタログに含まれている各種付随情報や、測光的赤方偏移カタログが重要な役割を果たしています。私たち弱重力レンズ効果を用いた科学研究を行う研究者も弱重力レンズワーキンググループとして弱重力レンズ解析に必要なデータ解析やカタログ作成などを行っています [8]。

そろそろ本題に入っていきます。私たち弱重力レンズワーキンググループはHSCサーベイの初年度データを用いてコスミックシア二点相関関数による宇宙論解析を行いました。その論文 [1] は2020年にPASJより出版され、2023年度の欧文研究報告論文賞に選ばれこの記事を書く機会をいただきました。この受賞については関係者一同おおいに喜んだのですが、私はこの記事を書くことになっていたので正直「困ったことになったな」という気持ちでいました。と言いますのも、この論文とは別に、全く同じデータを使って基本的には同じ解析をコスミックシア統計量だけ別もの（二点相関関数とフーリエ変換関係にあるパワースペクトル）で行った論文 [9] があって、その解説記事はすでに天文月報に掲載されているのです [10]。同じデータを使っているためデータから抽出される情報には異なる部分があるので（本研究の場合、二点相関関数の方がより広い範囲のフーリエモード情報を使っている）結果が一致するかは自明ではありません [11]。ところが2つの論文は結果も整合的なので、ここで普通に解析記事を書いたのでは2番煎じにしかならないわけです。さらに喜ばしくも

困ったことに、弱重力レンズワーキンググループはHSCサーベイ3年目までのデータを用いた弱重力レンズ解析を完成させ2023年にシリーズ論文として発表しているのです [12-18]。その解説記事もすでに天文月報に掲載されており [19]、ここでは“今後の展望”まで丁寧に記述されているのである。なんやねんほんまに、である。今さら何を書くねん、もうええやん…すみません、やさぐれて文体が乱れました。というわけで、当該研究の解説やその後の進展と今後の展望については過去の記事 [10, 19] を読んでもらうとして、この記事ではこの研究に重要な貢献をしているがまだ取り上げられていない関連研究を紹介します。

2. 弱重力レンズ銀河カタログ作成の産業革命

はじめはHSCデータリダクションチーム関係者のおかげで弱重力レンズ銀河カタログ作成が大幅に自動化されてとても感動した話をします。

弱重力レンズ銀河カタログというのは、コスミックシア統計を含む弱重力レンズ解析をする際に不可欠な銀河の形状情報を含んだカタログです。これを観測データから作成する手順は大雑把に以下のようなステップになります。

- 1) 撮像データ処理
- 2) 天体検出と明るさやサイズ等の測定
- 3) 星と遠方銀河の選択
- 4) 点像分布関数（point spread function, PSF）の測定とその2次元空間変動のモデル化
- 5) 銀河像の形状測定とPSF補正

ステップ2) までは他の系外銀河観測研究と変わりませんがステップ3) はちょっと特別な注意が必要です。というのは、弱重力レンズ解析では銀河像の非等方性を表面輝度分布の四重極モーメントで定量化するのですが、その際に測定したい銀河以外からの光が混じっていると正確な測定ができないので、測定に影響を及ぼすような光の混入がありえる領域を除外する必要があります（マ

スキングと呼びます)。その代表的なものは、明るい星や銀河の周りのハローやブルーミングトレイルと呼ばれる領域、飛行機や人工衛星の反射光トレイル、何らかの理由でデータ処理がうまくできていない領域などです。

私は2000年頃から弱重力レンズ解析を行ってきたのですが、HSCサーベイ以前はこのマスク処理は手作業でした。私の場合はds9という天文業界でおなじみのイメージビューアーで画像を表示して、ds9のregion機能を使って除外すべき領域（マスク領域）のマスクリストをあらかじめ作っておいて、ステップ2)で検出された天体のうちマスク領域内のは除外するという手順で行っていました。その当時自動化できていたのは明るい星のハローのマスクだけで、それは国立天文台の宮崎聡氏が作った星の明るさとハロー半径の半経験則関係を使ったスクリプトでした。当初自分のマスク作成に不安を感じていた私は、Canada-France-Hawaii Telescopeのデータを使って弱重力レンズ解析を行っていたフランスのチームでデータ解析を主導していたYannick Mellier氏に助言を求めました。私のマスク領域を確認したMellier氏は問題なく作られていると言ってくれましたが、マスク領域としてポリゴン（多角形）を使うことを強く推奨しました。私はボックス（長方形）領域を使っていたのですが、ポリゴンの方がより細かい領域指定ができるのです。しかし二点だけ指定すればよいボックスに対し、多角形の頂点を指定するポリゴンの細かいマスクファイル作成は私のずぼらな性格にはまったく合わず、結局ボックスを使い続けることになったのです。このことはポリゴンへの後ろめたさとして後々まで私の心に引っかかり続けました。ちなみに、2015年に出版された論文 [20] ではおよそ10平方度のシュプリームカムアーカイブデータの弱重力レンズ解析を行い、この時は1日3時間ほどds9にとらめっこして1-2平方度分のマスク領域リストを作る（これ以上続けると集中が切

れてミスが多発する）という作業を1週間ほど続けるという完全なる家内制手工業体制でした。

HSCサーベイデータの弱重力レンズ解析ではマスク処理は完全に自動化されています。これはHSCデータリダクションチームならびに関係者の多大な労力によるものです。私の記憶では、初めはJean Coupon氏らによる明るい星のマスクでした [21]。Coupon氏らは明るい星周辺の輝度分布を詳細に調べ、星の明るさとマスクすべき領域の関係をフィルターごとに求めました。その後、HSCデータリダクションチームが明るい銀河に対するマスク処理、何らかの理由で光の混入やデータ処理がうまくできていない領域のマスク処理をパイプラインに実装し、検出された天体がそういったマスク領域にあった場合は対応するマスクフラグが立つようになりました [21-24]。これによりマスク処理は元の銀河カタログから該当するフラグが立っている銀河を除外する処理をするだけでよくなりました。私にとってこれはまさに産業革命でした。なにより素晴らしかったのは、私はこれによりポリゴンへの悔恨の念から解放されたのです。RCサクセッションの“ヒッピーに捧ぐ”という曲に「空を引き裂いて 君がやってきて 僕らを救ってくれと言った」という一節がありますが、私の心情はまさにこれで、Coupon氏はじめ関係者の皆さまはまさに救世主だったのであります。サンキュー関係者ー！サンキューベイビー！愛してるぜー！すみません、感謝のあまりキヨシローが憑依してしまいました。

正気に戻ります。また、上記弱重力レンズ解析手順のステップ4)もHSCデータリダクションチームのおかげで大変な省力化が実現しました。まずステップ4)と5)を簡単に説明します。遠方銀河の像は地上で観測されるまでに、(1) 重力レンズ効果、(2) 地球大気の大気乱流層による波面乱れ、(3) 望遠鏡カメラ光学系の収差、という3つの原因によって歪められます。(2)と(3)は弱重力レンズ解析ではノイズとなりますので取

り除く処理をします (PSF補正と呼びます)。ちなみにHSCの先代のシュープリームカム画像を使ったPSF歪みの解析では(3)の光学系起源の像歪みは典型的にはコスミックシア起源のその数倍だが画像中でスムーズに変化する、一方(2)の大気乱流起源の像歪みはHSCサーベイの積分時間の場合コスミックシアの数分の1だが乱流起源なので画像中で複雑な変化をする、ということがわかっています [25]。HSCの画像でも(3)は同程度で(2)は同じ望遠鏡なので変わりません。どちらも無視できない大きさなのです。

PSFによる像変形は元々の銀河像にPSFが畳み込まれた結果なので、その補正は基本的には画像内の各銀河位置でのPSFを求めてその影響を除去する、という処理になります。まず画像内の多数の星像に対してそれぞれのPSF形状を測定し、それらの画像内での変化を多項式で表現するモデルを作ります。このモデルから銀河の位置でのPSFを求めるのです。当然PSFモデルは十分正確に作られていなければいけません、何らかの原因でそうっていない領域がまれにあります。弱重力レンズ解析ではそういった領域は除外します (これもマスキングの一部です)。問題はそのようなマスク領域をどうやって見つけますか。弱重力レンズワーキンググループの検討の結果、HSC天体カタログに含まれている星の位置での真のPSFとモデルPSFの輝度分布の差 (具体的には星像PSFとモデルPSF像の四重極モーメント行列のトレースとトレースなし対称成分の大きさの差) がPSFモデルの精度のよい指標になることを見つめました。その差があるしきい値より大きな領域はPSFモデルに問題がある領域なので除外します。この処理も、HSCデータリダクションチームがパイプラインにPSFモデル作りを実装しており、天体カタログに必要な四重極モーメントの情報を付加してくれたおかげで、ほぼカタログから必要なデータを読み込んで簡単な処理をするだけで済んでいます。

この章で紹介したのは弱重力レンズ解析のほんの一部ですが、私は一連の解析を通して大規模サーベイにおいては共有されるカタログの充実がそこから生み出されるサイエンスの生産性に直結するということを実体験をもって学びました。カタログの充実には多様な測定値があることに加えて、その定義や測定法を説明する解説がよく整えられていることも含まれます。HSCデータリダクションチームの貢献を記述してきましたが、とても使い勝手のよいカタログと解説をwebに整備してくれているHSCデータアーカイブチームの貢献もとても大きいです、感謝します。

3. 全天重力レンズシミュレーションと働き者の妖精たち

次はHSC弱重力レンズ宇宙論解析の中で重要な役割を果たしている擬似HSCサーベイ弱重力レンズカタログにまつわる話です。これは全天重力レンズ数値シミュレーションをもとに作られています。その数値計算コードを書いたのは私なのですが、素晴らしい先見の明を持つ方に使っていただいたおかげで世界的に重用されるシミュレーションデータセットが作られた、というコード開発者にとってうれしい展開がありました。

まず重力レンズ数値シミュレーションについて簡単に解説します。重力レンズ現象は重力による光軌跡の曲がりなので、光の測地線を解くこととなります。弱重力レンズ現象は微小な効果なのでほとんどの場合、重力ポテンシャルに対して線形化した方程式を解けば十分に正確な答えが得られます。さらにもし重力ポテンシャルを作る宇宙の物質分布が線形成長段階であれば、コスミックシアパワースペクトルなどのコスミックシア宇宙論解析に直結する統計量は線形物質パワースペクトルを介して解析的に得られます。しかし実際に弱重力レンズ現象に寄与する構造は非線形成長段階にあるので線形モデルは使えません。コスミックシア統計量の正確な理論モデルの構築のためには

現実的な重力レンズ数値シミュレーションが必要なのです。コスミックシア以外にも銀河分布と弱重力レンズ効果との相互相関関数や弱重力レンズ効果から得られる宇宙の射影密度場を用いた宇宙論解析など、重力レンズ数値シミュレーションの応用範囲は広いです。

このような動機から私は20世紀おしまいの頃から重力レンズ数値シミュレーションを行ってきました [26]。これは宇宙論的N体計算を行って作られた構造の重力場中で光を伝搬させる計算なのですが、当初は計算能力の関係でN体計算のボックスサイズが数100メガパーセク程度だったのと、天球面を平面で近似する手法を使っていたので、重力レンズシミュレーションで計算できる領域はせいぜい 5×5 平方度程度でした。ちなみに、21世紀初めに私はすばる望遠鏡シュープリームカムの開発者観測時間(GTO)で撮られたデータにアクセスする機会を得て、そのコスミックシア宇宙論解析を行ったのですが [27]、そのデータ領域は約2平方度でした。 5×5 平方度でもアクセス可能な実データよりずっと広がったのです。天球面上のデータ領域を平面と近似して問題なかった古きよき時代でした。

さて時間を10年ほど進めます。HSCサーベイが現実のものとなってきた2013年ころ、さすがに 5×5 平方度領域では実データより小さくなってしまいますので、シミュレーション領域の拡大を考え始めました。検討していくと実は計算領域を全天にしてしまうのが一番簡単だということがわかりました。というのは数値シミュレーションの多くのプロセスが球面調和変換を使って高速化できると、それに伴い平面近似をしなくて済むからです。計算機の能力も発展していましたし、国立天文台天文シミュレーションプロジェクト(CfCA)のスーパーコンピュータも利用できたので十分な空間分解能を持ち高赤方偏移までカバーできる大規模なN体計算も現実的な時間で行えるようになっていました。そういったわけ

で、全天重力レンズ数値シミュレーションを実施して数セットのデータを作りました。私はこのデータを前章で述べた10平方度の弱重力レンズ宇宙論解析(射影密度場から検出された銀河団の数計測)の誤差評価に用いました [20]。今にして思うとこの研究は小グループで自前の観測データ解析とシミュレーションデータを使って行ったユニークな仕事でしたが、それゆえ観測データ領域そしてその成果も限られたものでした。ちなみに、弱重力レンズ効果により検出された銀河団を用いた宇宙論研究は先述のシュープリームカムGTOデータを用いた宮崎聡氏らによる研究 [28]で切り拓かれました。これもコスミックシアと同じく弱重力レンズ解析ではあるのですが、より多くの遠方銀河数密度が要求されるため、現状では深い撮像データが得られているHSCサーベイがこの分野をリードしています [29]。

話を戻しますと、これをおおいに活用してくれたのが弘前大学の高橋龍一氏です。彼は全天重力レンズシミュレーションの大規模なデータセットを作ったのですが、その優れている点は、(1) 銀河に対する重力レンズ効果だけではなく宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の温度マップへの重力レンズ効果まで計算した、(2) レンズ源となるN体シミュレーション物質分布中の暗黒物質ハローの空間分布データも作った、(3) 108もの独立なデータセットを作り、そして(4) すべてのデータをwebからダウンロード可能な環境を作ったことです [30]。彼からその計画を初めて聞いた時はその計算量とそれに伴うデータ処理作業の多さにおののき、こんなややこしい作業ができるのは妖精なんかだけやろ、とその実現を疑問視していました。もちろん几帳面な高橋氏はきっちりと完成させたのです。私の中で高橋氏イコール妖精という等式が成立した瞬間でした。

その論文は2017年に出版されたのですが、現在でもこれに匹敵するデータセットは作られておらず国内外の宇宙論研究で広く用いられ重要な役

割を果たしています。応用範囲も広く、荒く分類すると (1) 理論モデルの検証, (2) 観測データ解析手法の開発や検証, (3) 測定データの (主にサンプルバリエーションに起因する) 誤差評価, などです。銀河に対する弱重力レンズ効果のみならず, CMB に対する弱重力レンズ効果の研究にも使われています。実際このデータセットは現在までに 80 編以上の査読論文で使われています。さすがにそろそろこれを凌駕するデータが作られると思われるのですが, 現時点では弱重力レンズ宇宙論研究の基盤データの一つとなっています。

この高橋氏のデータセットを使って擬似 HSC サーベイ弱重力レンズ銀河カタログを作ったのが国立天文台/統計数理研究所の白崎正人氏です。彼は HSC サーベイの本物の弱重力銀河カタログと同じ天球面分布を持つが, 赤方偏移と固有の銀河形状は異なる (ただしそれらの統計的分布は本物のカタログと同じ) 擬似銀河のカタログを作り, それに重力レンズシミュレーションデータの対応する位置 (天球面位置と赤方偏移) の重力レンズ効果データ値を割り当てることで擬似 HSC サーベイ弱重力レンズ銀河カタログを作成しました [31]。HSC サーベイは全天の一部の領域を占めるのみなので, HSC サーベイ領域を重複がないように平行移動コピーすることで一つの全天データから独立な 13 個の擬似カタログを作り, トータルで 1,404 個もの擬似カタログを作りました (HSC サーベイ 3 年目弱重力レンズ銀河カタログの場合)。この作業もかなりややこしく, 当然白崎氏イコール妖精です。

この擬似カタログは HSC サーベイの弱重力レンズ宇宙論解析の様々な段階で重要な役割を果たしています。代表的なのは弱重力レンズ統計量を使った宇宙論パラメータ推定が正しい値を求めることができるか確認するテストです。宇宙論解析では測定値とモデル予言値をベイジアン統計の枠組みを使って統計解析して宇宙論パラメータを求めるのですが, 宇宙論パラメータ以外にも多数の

モデルパラメータを同時に扱うので正しい宇宙論パラメータが得られるかは自明ではありません。擬似 HSC サーベイ弱重力レンズ銀河カタログでは使われている宇宙論パラメータがわかっているので (重力レンズシミュレーションを行う際に指定されている) このテストを行うのに最適なわけです (もちろんテストには合格しています)。そして, もっとも重要なのは HSC サーベイ弱重力レンズ統計量データの共分散行列がこの擬似データを使って求められているということです [19]。宇宙論パラメータ推定で一番重要なのはいわゆる信用区間を正しく求めることですが, それには適切な共分散行列を用いる必要があります。白崎氏の擬似カタログは全天シミュレーションを基にしているのでサンプルバリエーションと非線形構造形成効果が自然に含まれているのに加えて, 銀河の固有形状や赤方偏移分布といったパラメータ誤差にもっとも寄与する要素が統計的に正しく取り込まれているために宇宙論解析に最適なのです。

HSC サーベイデータはもちろんすばる望遠鏡による観測から得られたのですが, 先述の通り宇宙論解析では国立天文台 CfCA のスーパーコンピュータを使って作られたシミュレーションデータが重要な役割を果たしています。現在の理論天文学・宇宙物理学においてスーパーコンピュータによる数値シミュレーションは不可欠になっていますが, 大規模観測プロジェクトにおいても大きな役割を果たしており, HSC サーベイ弱重力レンズ宇宙論解析はまさにその一例です。

4. むすびにかえて

この記事を書いていて, 私のこの 10 年間の弱重力レンズ研究は, 自前で観測データを処理して (あるいはアーカイブデータを活用して) 研究を進めるスタイルから, 複数の研究グループで大規模サーベイデータを共有しデータ処理を分担して各々の研究を進めるというスタイルへの移行を体験してきた時期であったのだということ改めて認

識しました。もちろん前者がなくなったわけではなく、各々の独自の研究活動から次の大規模プロジェクトの芽が出てくるのだと思いますし、育てていかなければならないのだと思います。私自身もなにかよい実がなる木を育てようと相変わらずの家内制手工業で試行錯誤を重ねています。

本記事でも述べましたとおり、HSCサーベイでは基本的な天体カタログに加えて各研究グループが生産したデータがアクセスしやすい形で整備されており、それにより弱重力レンズ宇宙論解析は大きな恩恵を受けました。これはもちろん偶然そうだったわけではなく、HSCデータリダクションチームやデータアーカイブチームをはじめとするHSCサーベイチーム関係者の入念な準備やそれを実現する多大な労力によるものです。改めて感謝します。

HSCサーベイ弱重力レンズ宇宙論解析で重要な役割を果たしている全天重力レンズシミュレーションは、国立天文台CfCAプロジェクトのスーパーコンピュータやファイルサーバーなくしては実現できませんでした。各種計算機を安定運用し提供してくれているCfCA関係者に感謝します。最後にすばる戦略枠プログラムを育ててきた多くの方々に感謝します。MOIRCSおよびいわゆる第2期装置の登場によってこういった枠組みが有効で必要だということが認識されて以来、一般の共同利用と戦略枠のバランスを保ちながら運用を行っているハワイ観測所スタッフ、およびそれをサポートしているコミュニティの皆様へ感謝します。

今現在HSCサーベイ弱重力レンズワーキンググループはすばる望遠鏡戦略枠の330夜という貴重な投資から得られた最終データの弱重力レンズ解析を慎重に進めています。科学成果の発表までもうしばらくお待ちください。

参考文献

[1] Hamana, T., et al., 2020, PASJ, 72, 16 (Erratum: 2022, PASJ 74, 488)

[2] 大栗真宗, 2019, 天文月報, 112, 167
 [3] 小宮山裕, 2019, 天文月報, 112, 79
 [4] 高田昌広, 2019, 天文月報, 112, 89
 [5] <https://hsc.mtk.nao.ac.jp/ssp/survey/>
 [6] 岡部信広, 他, 2019, 天文月報, 112, 174
 [7] <https://hsc.mtk.nao.ac.jp/ssp/science/photometric-redshifts/>
 [8] 梅津敬一, 他, 2019, 天文月報, 112, 117
 [9] Hikage, C., et al., 2020, PASJ, 71, 43
 [10] 日影千秋, 2019, 天文月報, 112, 720
 [11] Hamana, T., et al., 2022, PASJ, 74, 923
 [12] Zhang, T., et al., 2023, MNRAS, 518, 709
 [13] Li, X., et al., 2022, PASJ, 74, 421
 [14] More, S., et al., 2023, Phys. Rev. D, 108, 123520
 [15] Miyatake, H., et al., 2023, Phys. Rev. D, 108, 123517
 [16] Sugiyama, S., et al., 2023, Phys. Rev. D, 108, 123521
 [17] Li, X., et al., 2023, Phys. Rev. D, 108, 123518
 [18] Dalal, R., et al., 2023, Phys. Rev. D, 108, 123519
 [19] 杉山素直, 2024, 天文月報, 117, 304
 [20] Hamana, T., et al., 2015, PASJ, 67, 34
 [21] Coupon, J., et al., 2018, PASJ, 70, S7
 [22] Bosch, J., et al., 2018, PASJ, 70, S5
 [23] Aihara, H., et al., 2019, PASJ, 71, 114
 [24] Aihara, H., et al., 2022, PASJ, 74, 247
 [25] Hamana, T., et al., 2013, PASJ, 65, 104
 [26] Hamana, T., & Mellier, Y., 2001, MNRAS, 327, 169
 [27] Hamana, T., et al., 2003, ApJ, 597, 98
 [28] Miyazaki, S., Hamana, T., et al., 2002, ApJ, 580, L97
 [29] Chiu, I., et al., 2024, OJAp, 7, 90
 [30] Takahashi, R., et al., 2017, ApJ, 850, 24
 [31] Shirasaki, M., et al., 2019, MNRAS, 486, 52

Cosmological Constraints from Cosmic Shear Two-Point Correlation Functions with HSC Survey First-Year Data

Takashi HAMANA

National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Our paper, published by PASJ in 2020, on the cosmological constraints from the cosmic shear two-point correlation function, won the PASJ excellent paper award. All 20 co-authors are delighted and grateful for this high recognition. This research used data from the first year of the Hyper Suprime-Cam survey (HSC survey), which was conducted as the Subaru Strategic Survey Program. This article provides an overview of the award-winning paper and describes related research that was essential to the realization of this research.

上海の風に吹かれて

Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai Jiao Tong University

上海交通大学李政道研究所（中華人民共和国，上海）

<https://web.tdli.sjtu.edu.cn/mizuno/>

水野陽介（T. D. Lee フェロー / 准教授）

世界中で新型コロナウイルスが蔓延していた2020年9月に、私は家族とともにドイツからゼロコロナ政策下の中国へ渡航しました。2週間に及ぶ隔離ホテルでの隔離期間を経た後、上海市にある上海交通大学李政道研究所（TDLI）の天文グループにT. D. Leeフェロー（テニュアトラック准教授）として赴任しました。

私は2004年に博士号を所得し、1年間所属研究室でポストドクをやった後、海外へ出ました。今までに6年半アメリカ、3年台湾、そして6年ドイツでポストドク及び研究員をやってきました。ドイツでは、国際共同研究プロジェクト「Event Horizon Telescope」に参加し、理論作業班の世話人としてブラックホールの影画像の理論的解釈に貢献してきました。ドイツでの契約期間残り1年を切った頃、次の研究職を日本で探していましたが、なかなか声がかからずにいました。息子の教育のことを考えて、日本人学校のある都市での研究職を候補に挙げて探していたとき、AAS Job registerに出ていた上海の李政道研究所の公募が目にとまりました。応募をする前に、研究所に問い合わせのメールを送ったところ、興味があるのでぜひ応募してくださいとの返事を受けました。その後、公募書類を送り、2回の面接（天文グループ及び研究所全体）を経て採用されました。

奇しくも2020年1月初め、1回目の面接で上海を訪れていたとき、ホテルで見っていたニュースで武漢での新型コロナウイルスの発生が伝えられていました。あのときはここまで新型コロナウイルスの感染が拡大するとは思っていませんでした。



写真1 李政道研究所の外観

2020年9月終わり、パンデミック下で他国間の移動が大きく制限されている中での中国への赴任は非常に大変でした。中国到着後、すぐに隔離ホテルへ連れて行かれて2週間の厳格な隔離を受けてからの解放でした。

中国へ移動した2020年10月頃は、政府によるゼロコロナ政策がうまく機能しており、中国国内での感染は非常によく抑えられていました。市を跨いで移動制限はありましたが、上海市内での移動には何も制限がありませんでした。そのため私も大学の閔行（Minhang）キャンパスにある研究所まで毎日出勤し、対面でのセミナーや授業を行っていました。感染力の強いオミクロン株が現れるようになると、市内での感染数が徐々に増えだし、2022年の春には2ヵ月以上に及ぶ市全体でのロックダウンも経験しました。その後2022年末の規制緩和（PCR検査と行動制限の廃止）、そしてその後の大流行を経てようやく制限



写真2 研究所建物の中の様子（センターホール）

のない普通の生活状態に戻りました。今は海外へも問題なく行くことができます。

私が所属する李政道研究所は、1957年にノーベル物理学賞を受賞した中国出身の物理学者の李政道（Tsung-Dao Lee）氏が2014年に中国国内における世界最高水準の科学研究施設の必要性を中国政府に提唱し、2016年に中国政府や上海市政府の支援を受けて設立された比較的新しい基礎物理学の国際研究所です。研究領域として、素粒子・原子核物理学、天文学・天体物理学、量子基礎科学の3つの分野に焦点を当てています。李政道研究所の天文グループには現在9名のテニユアトラック准教授、15名のポスドクそして20名の博士課程の学生が所属しています。天文グループでは主に宇宙惑星科学、高エネルギー宇宙物理学そしてレーザーを用いた実験室宇宙物理学の研究を行っています。この中に日本人研究者として私（高エネルギー宇宙物理学）と荻原正博氏（宇宙惑星科学）の2名が所属しています。研究所全体で、ファカルティの約4割が外国籍です。研究所内では英語が基本言語として使われており、中国国内では非常に珍しい国際化された研究所です。また上海交通大学には研究所とは別に天文学科があり、主に銀河や宇宙論の研究が盛んに行われています。多くのファカルティが連携教員として天文学科と研究所の両方に所属しており、相互研究交流が行われています。2022年に研究所が上海

浦東新区の張江地区に建てられた新しい建物に移ったため、天文学科のある上海交通大学閔文キャンパスとは車で1時間程度の距離に離れてしまったのは残念なところです。

研究所では、各分野で大型研究計画が進行しています。天文グループでは高精度分光器を搭載した口径4.4メートルの光学望遠鏡JUST（Jiao Tong University Spectroscopic Telescope）を青海省の冷湖に建てることを計画しています。他のグループでは、南シナ海に建設予定のTRIDENTニュートリノ望遠鏡やキセノン検出器を用いたダークマターの直接探索PandaXプロジェクトも進行しています。また研究所には、6万コア以上のスーパーコンピュータ思源一号もあり、多くの研究に使用されています。研究所はさらなる研究拡充を計画しており、各グループで毎年数名程度の若手研究者（T. D. LeeフェローまたはTDLIポスドクフェロー）が採用されています。

私の仕事は主に研究活動と教育活動です。今のところ研究所内の業務に関する仕事は天文グループが持つコンピュータ・クラスタの管理担当のみで、天文学科に所属するファカルティに比べて少ないですが、研究所に所属するファカルティにも1年間に3クレジット分の講義をする義務があります。ちなみに1クレジット分の講義は、1回45分の講義を合計16回（16週）行います。現在学部の講義は主に中国語で行われていますが、大学院の講義は英語でも行われています。私は大学院の講義を担当しています。将来的には英語で教える学部生向けの講義の担当も回ってくる可能性があります。ほとんどの講義は上海交通大学の閔文キャンパスで行われています。博士課程1年の学生や学部生は講義を受けなければならないため主に閔文キャンパスの学生寮に住んでいます。そのため私も週に複数回閔文キャンパスに行き、講義や学生との研究議論を行っています。

私の研究グループには、現在4名のポスドクと6名の博士課程の学生、1名の学部生が所属して



写真3 研究所でのグループ会議の様子(筆者が一番左)

います。かなりの大所帯になりました。ポスドクの内2名は研究所のポスドクフェロー（TDLI prized postdoc fellow）で私の科研費で雇われているポスドク（project postdoc）ではないため研究グループに所属する必要はないのですが、研究内容が近いため、私の研究グループに呼び込みました。所属メンバーは主にシミュレーションを用いたブラックホール周りでの降着流やジェットの研究を精力的に行っています。またブラックホールシャドウを用いた重力理論の研究やダークマターなど素粒子物理学の方面にも研究の幅を広げています。研究所内のほかのメンバーとの交流も多く、分野を超えた共同研究も行われています。

昨今、中国の研究の発展について耳にする機会が増えたと感じています。中国は国家としてここ20年近く基礎研究を含む科学技術の推進に力を入れてきました。現在この発展に多く寄与しているのが海外から中国国内へ戻った優秀な若手中国人研究者達です。中国は国策として、優秀な研究者を招致することを目的として人材プログラムを立ち上げました。現在では、国だけではなく、多くの省や市で独自の人材プログラムがあります。この多くが40歳以下の若手に向けたものです。

中国で研究者としてステップアップしていくためには、年齢や経歴に応じた人材プログラムや科研費の取得が求められます。そのため多くの優秀

な研究者が生き残りをかけて高インパクトな研究成果の創出を目指しています。昔の官僚登用試験である科挙と同じように、中国では優秀な人材を獲得するための競争の仕組みがあります。この競争が中国での研究の発展を支えています。私のような外国人研究者も同じ競争の中で科研費を取得しなければなりません。研究所では、外国人向けに科研費プロポーザルの説明会開催や教授達によるプロポーザルへのコメントなど科研費の取得をサポートしてくれますが、年々科研費の取得が難しくなっていると感じています。しかし、科研費には、国、市（省）、大学と色々な応募先があり、所属メンバーの科研費の取得状況などをみて応募の優先権が与えられたりもします。

中国では天文学に対するサポートも大きく、複数の大型プロジェクトが進行しています。これに伴い天文学科を開設する大学が年々増えてきました。その関係で毎年、ある程度の数の天文学のファカルティポジション公募が出ています。中国国内の経済の悪化が懸念されますが、この傾向はあと5年程度続くのではと私はみえています。

上海へ来てから約4年、生活の立ち上げやゼロコロナの対応などで困難な場面も色々ありましたが、同僚や事務方のサポートのおかげで、現在は楽しく研究に取り組むことができます。上海には、沢山の日本食レストラン、日系のスーパーなどもあり、日本のものが簡単に手に入ります。日本へも上海市内にある2つの国際空港から沢山のフライトがあり、行き来も非常に楽です。ほかの中国の都市に比べて、上海は日本人にとって暮らしやすい街だと思います。上海周辺には多くの日本人研究者がおられ、他分野の日本人研究者との交流や情報交換等も盛んに行われています。中国への渡航には、ビザの取得など煩雑な作業がまだまだ必要ですが、皆さんに一度中国へ来て中国の研究の現状を見てもらいたいと思っています。もし中国での研究に興味がありましたらいつでもご連絡ください。

みんなで天文学の未来を語ろう！ ～日本天文学白書委員会発足～



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

2024年5月に「日本天文学白書委員会」が発足しました。これは日本の天文学の将来についてコミュニティ全体で楽しく話し合う場を作り、白書としてまとめるための委員会です。2024年9月の秋季年会でキックオフ的な特別セッションが開催され多くの会員に参加していただきましたが、本稿であらためて委員会設置の背景、目的やスコープなどを説明します。会員の皆さんにはぜひ趣旨をご理解いただき、暖かく見守る、だけではなく積極的に関わっていただけたらと思います。

1. はじめに

観測技術や計算機などの発達とともに天文学はこれまでにない速度で発展し続けており、我々は息をつく間もなく研究に邁進しています。今後もさらに進化を加速させ真のブレークスルーを達成するためには、共に夢を語り合い、知識や経験を共有し、多様な視点から議論できるコミュニティを築いて次世代につないでいくことが重要です。そこで広く天文学コミュニティが日本の天文学の将来について話し合い、その結果を「日本天文学白書」という形でまとめるために日本天文学白書委員会が立ち上がりました。2024年9月の秋季年会にて本委員会のキックオフ的な特別セッションが開かれ趣旨説明などが行われましたが、本稿であらためてこの委員会の設立背景、目的、活動内容などを説明します。

2. 委員会設置の背景

本委員会の第一の目的は、天文学の将来についてコミュニティ全体で楽しく語り合う場を作ることです。これまで日本の天文学コミュニティにおいては、波長や分野ごとのサブコミュニティ、日

本学術会議、国立天文台など、様々なレベルで将来計画の議論が行われてきています。将来計画を考えるうえで、我々が何に興味があるのか、将来どのようなサイエンスをしたいのが最も重要なことは言うまでもないですが、特に大型観測装置の実現のためには技術的実現性、運用体制、人材育成、国際協力、そして予算の獲得などについても多面的に議論していかなくてはなりません。技術的実現性や運用体制については特にサブコミュニティで詳細かつ広範囲に行われることが多い一方、日本学術会議のかつてのマスタープランは大型予算獲得という文脈でコミュニティの意見をまとめあげたものでした。また、国立天文台では現在サイエンスロードマップの作成が進められていますが、これは日本の天文学の中で国立天文台が果たすべき役割に焦点が置かれています。

本来、将来の話というのは楽しいものなのですが、昨今の厳しい予算の制約やコミュニティの興味の広がりなどにより、多数ある魅力的な将来計画をごく少数に絞り込まざるを得ない状況にあります。それゆえに将来計画の議論は楽しい側面ばかりではなく、むしろ楽しくない側面の方を感じ

ている人もいます。

このような状況の中、天文学の将来を波長横断・分野横断、天文学コミュニティ全体で楽しく語れる場を作りたい、というのが筆者ははじめ発起人たち（後述）の思いでした。予算や実現性のことはいったん置いておいて、純粋にサイエンスの話をして夢を語り合おうというものです。特に、学生や若手の研究者に、「自分の将来は天文学にある」と思ってもらえるようなものを目指しています。そしてそのような話し合いや夢を「日本天文学白書」としてまとめていきます。

3. 委員会設置までの経緯

2023年9月の日本天文学会代議員総会において、「日本天文学白書委員会」の設置が発起人たちにより提案されました。そこでまず委員会設置準備のためのワーキンググループが立ち上がりました。メンバーは発起人の10名です。ワーキンググループではシンポジウムの実施方法や方向性、白書の内容やスコープ、委員会の在り方や委員の決め方、スケジュールなどを具体的に話し合いました。そして理事会や代議員総会、2024年春季年会の全体集会などでの中間報告を経て、2024年5月の理事会で正式に「日本天文学白書委員会」の設置が認められました。内規は日本天文学会ウェブページで見られます。

第1期委員は発起人でありワーキンググループのメンバーでもある以下の10人です（五十音順）。

- 赤堀卓也（国立天文台）
- 石川遼子（国立天文台）
- 岡本桜子（国立天文台）
- 河原 創（JAXA / 宇宙科学研究所）
- 高橋慶太郎（熊本大学・委員長）
- 田中雅臣（東北大学）
- 富田賢吾（東北大学）
- 野田浩司（千葉大学）
- 野田博文（東北大学）
- 米徳大輔（金沢大学）

通常、将来計画を決める委員会では委員の選挙をしたり、分野のバランスを考えたりしますが、本委員会は将来計画の評価や何らかの意思決定をするものではなく、コミュニティを活気づけ盛り上げることを目的としています。したがってまずはその趣旨をよく理解しているワーキンググループメンバーが委員となるのが良いと判断しました。

以下では委員会、白書、シンポジウムについて、検討状況を説明します。まだ具体的に決まっていない部分もあり、皆さんのフィードバックを歓迎します。

4. 委員会

日本天文学白書委員会の第一の目的は、天文学会全体で将来のサイエンスを議論できる場を作ること、特に学生や若手研究者が天文学を自分の将来であると思えるような機会を作ることです。そして会員が天文学全体について広い視野を持ち、天文学コミュニティが成熟していくことを図ります。成果物として作る白書は日本の研究者の興味を集約したものとなり、国立天文台や宇宙科学研究所などで将来計画を議論するうえでの良いリファレンスとなるでしょう。

委員会の具体的な任務は、日本天文学白書の編集と執筆に責任を持って関わり適宜会員に執筆の協力を依頼すること、そしてシンポジウムの企画運営を行うことです。

委員の構成は、先述の通り第1期についてはワーキンググループメンバーとし、今後は世代や分野などの多様性を考慮しつつ広く天文学会員から委員を募集することを考えています。繰り返して述べているように本委員会の目的はコミュニティを盛り上げることで、「厳正なる選挙のうえで決める」や「広い学識があり経験を積んだ人を選ぶ」というよりは一緒に盛り上げる仲間を募集するということとなります。このような趣旨を理解していただき、第2期からは広く会員から委員を募りたいと考えています。

5. 白書の方向性とスコープ

白書は日本における過去からの積み上げ、現状、新しい機運、国際的な位置付けなどを踏まえ、日本のコミュニティが関心を持つ長期的なサイエンスとそれを支える諸要素を整理するものです。これは日本が進むべき方向を示す良いリファレンスになると期待していますが、あくまでもサイエンススペースの白書であり、将来計画を評価・選別することはせず、また大型観測装置と直接結びつかないトピックも含まれます。

規模としては200-300ページで10の章からなり、各章が20-30ページ程度と想定しています。各章に対して委員を中心として10名程度の執筆チームを編成し、委員がその章の編集責任者となります。各章ではその分野の背景と現状が学部生程度でも理解できるようなレベルで記述され、10-20年スケールの将来の展望が描かれます。目標としては2026年度末に初版を作成し、以降は必要に応じて適宜小改訂・大改訂していく予定です。

章立てとしては天文学会のセッションを参考に、より大枠で、境界領域や天文学を支える諸要素も含む予定です。現在のところ考えられている章立ては表のようになっています。

まず最初の5つが天文学のサイエンスに関する

章ですが、それぞれかなり広い分野を含んだものになっています。簡単に説明すると、まず「太陽と恒星」では太陽活動と地球圏への影響、恒星としての太陽、恒星進化の過程などを扱い、太陽や恒星が宇宙の中で果たす役割について記述します。次の「星と生命」では星間物質から恒星や惑星が形成されるプロセス、そして系外惑星やこれらを探るヒントとなる太陽系天体なども扱います。さらに宇宙生物学の文脈で生命に関する分子やハビタブル惑星、地球外生命の探索なども含みます。「高エネルギー現象」では中性子星やブラックホールなどのコンパクト天体、超新星や超新星残骸、活動銀河核など高エネルギー現象を扱います。「銀河と銀河団」では銀河系を含む銀河や銀河団の形成と進化を扱い、星間現象や活動銀河核からのフィードバック、大規模構造との関わりなども含みます。最後の「宇宙論」では宇宙のはじまりと進化、構造形成や物質の起源、暗黒物質や暗黒エネルギーの謎、重力や素粒子など基礎物理の探究を扱います。

以上のように、前半の5章では既成の枠にとらわれず、境界領域も含んだ大きなビジョンとストーリーを提示したいと考えています。トピックによっては複数の章に様々な文脈で登場することもあり、どのトピックをどこに含むかは柔軟に対

章タイトル	内容・キーワード
太陽と恒星	太陽, 太陽地球圏, 恒星・恒星進化
星と生命	星・惑星形成, 星間現象, 系外惑星, 太陽系天体, 宇宙生物学
高エネルギー現象	コンパクト天体, 星間現象, 宇宙線
銀河と銀河団	銀河系, 銀河, 活動銀河核, 銀河団, 銀河形成・進化
宇宙論	構造形成, 物質の起源, 暗黒物質, 暗黒エネルギー, 重力, 素粒子
天文学を支える技術と実験	観測機器, 地上実験
ICTで飛躍する天文学	計算機, データサイエンス, ソフトウェア, データベース, プラットフォーム
天文学史	天文学史, 天文遺産, 天文学と歴史学のシナジー
持続可能なコミュニティ	コミュニティの健全性, 多様性と包摂性, 若手のキャリア, 大学と共同利用機関
天文学と社会	広報普及, 天文教育, 地域・歴史・環境への配慮

応していきます。宇宙にはこんな謎があるのか、ぜひチャレンジしたい、と学生に思わせるような内容になればと願っています。

残りの5つの章は天文学を支える様々な要素です。観測機器や地上実験、天文学史、広報普及、天文教育などは年会のセッションにもなっていて馴染み深いものでしょう。一方であまり馴染みのない項目もあることと思います。これは、天文学者の果たすべき役割が広がりつつあるという委員会の認識を反映しています。

自分達が達成したいサイエンスのための観測装置を自分達で立案し、技術開発を行うことは今ではごく当たり前のことです。しかしかつては、天文学者はあくまで観測をする人で、観測装置を作る人ではありませんでした。本当にやりたいことをやるためには観測装置から自分達で作っていかなければならない。日本でその嚆矢となったのは野辺山45 m電波望遠鏡でした。その思想はすばる望遠鏡やALMA望遠鏡などに受け継がれ、日本が世界で天文学の第一線に立つことができた大きな要因となりました。

その後、観測装置だけでなくデータ解析のためのソフトウェアやアルゴリズム、数値シミュレーションの専用計算機などの開発も天文学者の大切な役割であるとみなされるようになりました。近年では観測装置の大型化と国際化により、膨大な観測データに世界中の研究者がアクセスできるようなプラットフォームを作ることも重要になってきています。広報普及も、かつては天文学者がやることではないとみなされていた時期がありました。しかしこれも現在では多くの天文学者が情熱を持って取り組むとともに社会から強く望まれていることをご承知の通りです。

今後、天文学者の役割はさらに広がっていくというのが委員会の認識です。例えば現在、日本天文学会で「日本天文学会行動規範」の作成が進んでおり、それに続いて「ハラスメント防止ガイドライン」も議論されていく予定です（2024年11月

執筆時）。天文学の将来を考えるとき、コミュニティが今後数10年にわたって安定的に維持発展していくことが大前提になります。そのためには会員の相互理解を支えるコミュニティの健全性、天文学に新しい視点をもたらすコミュニティを拡大させるための多様性と包摂性、そして若手研究者が安心して研究できる環境が必須です。こうした働きは天文学コミュニティに限らず社会全体で推進されていますが、実現は容易ではありません。日本天文学会は正会員と準会員合わせて3,400名程度、全員の顔と名前がわかるまでとはいきませんが、ほとんどの人が「知り合いの知り合い」となる程度のコンパクトなコミュニティです。天文学の将来を考える前提となるコミュニティ作りは、我々の努力次第で実現可能であると考えられます。このような問題意識のもとに「持続可能なコミュニティ」という章を設けました。

日本ではこれまで天文教育や広報普及はさかんに行われてきており、「天文学と社会」という言葉には馴染みがあることでしょう。しかしここでも天文学者の新たな役割が認識されてきています。それは「地域・歴史・環境への配慮」です。天文の観測装置は海外の人里離れた僻地に作られることが多いですが、そのような場所はその土地の先住民の居住地であることが多々あります。日本で望遠鏡を作る際にも地元の理解を得ながら建設・運用することは大事ですが、南北アメリカ・ハワイ・オーストラリア・アフリカなど旧植民地においては単に「土地を借りるのだから誠意を持って先住民に接し感謝しよう」というレベルの話では済みません。そもそもなぜ先住民が僻地に住んでいるかという点、そこに追いやられたからにはほかなりません。そうした国では差別や貧困などの先住民問題が現在でも国家レベルで取り組まれており、先住民をめぐる分厚い歴史的な文脈の中で観測施設建設というものがあるわけです。だから建設地問題は単に「先住民に感謝しよう」ということではなく、天文学が先住民に対する歴史的

過ちを正す一環であると位置づけられていることを認識すべきなのです。

以上のように天文学者がサイエンスをするために必要なこと、やるべきことは今後ますます広がっていきます。このように書くと、「好きなことをするためには面倒なこともしなくてはならない」というふう聞こえるかもしれませんが決してそうではありません。観測装置のための技術開発はそれ自体面白い研究活動ですし、広報普及や天文教育もみなさん楽しみながらやっているはずです。みんなが安心して研究できる環境・コミュニティを作っていくこと、観測施設の建設地や共同研究者の国の歴史を深く理解して天文学を全世界に広げていくこと、ともに大変やりがいのある課題ではないでしょうか。「サイエンスと技術の両輪」というふうに言うことができますが、前半5章と後半5章がこれからの天文学の両輪であると委員会では認識しています。

6. シンポジウム

会員が集まって将来を語り合う場、シンポジウムは本事業のメインの1つであり、単なる白書の準備のための集まりではありません。今後、毎年の春季年会と秋季年会のそれぞれで2時間程度の特別セッションを開いたり、必要に応じて別途シンポジウムなどを開催したりする予定です。委員会が世話人となってプログラム作成や講演者選定を行います。講演者にはサイエンススペースの広い視野を持ち、将来を魅力的に語れる人を幅広い世代から選定します（自薦他薦お願いします!）。そして特定の観測装置や目先の科学目標でなく10-20年スケールのビジョンや夢を語ってもらいます。講演内容は必ずしも白書の章立てにとらわれず、複数のテーマをまたいでも構いません。また各回終了後、1-2ページ程度のレポートを作成して天文月報で掲載することも考えています。

2024年12月号で報告されたように、2024年

9月の秋季年会にて本委員会のキックオフ的な特別セッションが開かれました。現地参加が約65名、オンライン参加が約90名と多くの方に参加していただき、趣旨説明や委員による講演、そして活発な意見交換が行われました。その中で早速講演者や白書の執筆者として協力してくれそうな方々が見つかっており、委員会としては手応えを感じております。

7. 終わりに

ここまでの文章で本委員会についてだいたいおわかりいただけたと思いますが、将来を語り合い白書を作っていくのは委員会だけではなく天文学コミュニティのみなさんとの共同作業です。日本の天文学の明るい未来を作っていくために、会員のみなさんにはぜひ白書の趣旨をご理解いただき、暖かく見守る、だけではなく積極的に関わっていただければと思います。白書やシンポジウムの方向性に関する意見を言いたい、講演者や執筆者として参加したいなどありましたら筆者までご連絡ください。

Let's Talk about the Future of Astronomy ~White Paper Committee~

Keitaro TAKAHASHI

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

Abstract: The "Japanese Astronomy White Paper Committee" was established in May 2024. This committee aims to create an enjoyable forum for the entire community to discuss the future of Japanese astronomy and to compile our interests into a white paper. A special kickoff session was held at the autumn annual meeting in September 2024, attracting many members. In this article, we will once again explain the background, objectives, and scope of the committee. We hope that all members will not only understand the purpose and warmly support the committee but also engage actively in its activities.

私たちの住んでいる銀河はなぜ銀河系と呼ばれるのか？

谷口 義明¹・ 縣 秀彦²・ 佐藤 大器³

〈¹ 放送大学・自然と環境コース 〒261-8586 千葉県千葉市美浜区若葉 2-11〉

〈² 国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈³ 日本評論社 〒170-0005 東京都豊島区南大塚 3-12-4〉

e-mail: ¹ Yoshiaki-taniguchi@ouj.ac.jp, ² h-agata@nao.ac.jp, ³ dsato@nippyo.co.jp

私たちはダークマター・ハローに取り囲まれた天の川銀河に住んでいる。この銀河の名前に「系」が付けられ、「銀河系」と呼ばれている。天の川は銀河（中国名）なので「銀河系」と呼ぶ明確な理由はない。ところが天文関係の教科書には決まり文句のように「銀河系」が使われているのが現状である。そこで、次の二つの問題について調べてみた。

(1) 銀河系の「系」は何を意味するのか？

(2) いつ、誰が「銀河系」という名前を提案したのか？

(1) についてはハッブルの著書『The Realm of the Nebulae』（Edwin Hubble, Yale University Press, 1936年）[1]に「The Galactic System」という表現があり、「銀河系は非常に扁平に分布している星々、ダスト、ガスから成るシステムである」と説明されている。この「The Galactic System」の訳語として「銀河系」という言葉があると理解されることが多い。

一方、問題（2）については明治、大正、昭和初期の教科書を調べてみたが、解答を得ることはできなかった。この事情に鑑み、著者らは「天の川銀河」という言葉を使う立場をとることにした。

「銀河系」という言葉の意味を考える

「系」。私たちはこの言葉を「システム」と理解している。最も馴染みのある使い方として「太陽系」がある。「太陽系」は太陽を意味しない。太陽系は太陽の他に惑星や小惑星や太陽系外縁天体などの太陽系小天体を含めたシステムのことを意味する。実際、私たちは太陽と太陽系という言葉で区別して使っている。では、銀河と銀河系はどうだろう。今度は意味していることが同じである。いずれも私たちの住む銀河のことだからだ（表1）。

銀河は中国語で天の川のことを意味する。そのため銀河＝銀河系である。ところが、一つ問題が生じた。宇宙には銀河と同じ天体が1兆個程度ある。それらはすべて銀河と呼ばれる。つまり、銀

河は一般名詞としても使われているのである。ところが、第一義的に銀河は固有名詞である。ここで、矛盾が生じてしまうのである。

『天文学辞典』にある説明

ここで、日本天文学会が運用している『天文学

表1 (左) 太陽-太陽系。太陽は一個の星だが、太陽系は太陽、惑星、小天体などを含むシステムを指す。(右) 銀河-銀河系の対応関係。銀河も銀河系も私たちの住む銀河のことを指す。

名称	対象	名称	対象
太陽	星	銀河	銀河
太陽系	太陽 惑星 小天体	銀河系	銀河

The Galactic System.²

THE galactic system is a highly flattened swarm of stars, dust, and gas, in rapid rotation about an axis perpendicular to the galactic plane. The sun is a star nearly in the galactic plane, but far out, possibly 30,000 l.y., from the center of rotation. Details of form and structure are difficult to determine, partly because of the observer's interior position, but more especially as a result of the obscuration produced by the dust. Nevertheless, it is possible, by a combination of facts, analogies, and speculations, to construct a reasonable working hypothesis.

図1 “The Realm of the Nebulae” (Edwin Hubble, Yale University Press, 1936年) の129頁の一部。

辞典」の「銀河系」の項目を見てみると、次のように書いてある。

「銀河」は今日英語では「galaxy」と表記されるので、一般の銀河と区別して太陽系が属している銀河（歴史的にはGalactic Systemと表記されていた）を指すときには「(the) Galaxy」あるいは「(our) Galaxy」の英語表記が使われた。それには日本語で「銀河系」あるいは「天の川銀河」という訳語が当てられ（文部省「学術用語集 天文学編 1974年）、一般には「天の川銀河」よりも「銀河系」が多く用いられてきた。しかし近年英語では、「銀河系」を「Milky Way Galaxy」とする表記が増えてきており、これに対して日本語では「銀河系」よりも「天の川銀河」を当てることが増えてきた。

<https://astro-dic.jp/the-galaxy/>

非常にわかりやすい説明である。この説明によると、「銀河系」は「Galactic System」の訳語であることがわかる。では、「Galactic System」は誰が使い始めたのだろうか？ それは、銀河研究の泰斗、エドウィン・ハッブルとされることが多い*1。銀河研究者のバイブルとも言えるハッブルの『The Realm of the Nebulae』[1]に次の説明がある（図1）。

ハッブルの説明によれば、「The Galactic System」は次のように定義される。

銀河系は非常に扁平に分布している星々、ダスト、ガスから成るシステムである。

つまり、星だけでなく、ダストやガスを含んだシステムを銀河系という言葉で表現している。そ

*1 しかし、1936年以前の天文学の教科書に「銀河系」という言葉が出てくる。

実のところ、ハッブルの『The Realm of the Nebulae』以前に「The Galactic System」という表現は以下の三つの研究論文で用いられている。〈1〉「A New Theory of the Milky Way」, Easton, C. ApJ, 12, p. 136-158 (1900年) コーネリアス・イーストン (1864-1929) はオランダのアマチュア天文学家。〈2〉「On the Galactic System With Regard to Its Structure, Origin, and Relations in Space」 Bohlin, Karl, Upsala & Stockholm Almqvist & Siksells Boktryckeru, -A.-B. (1909年) カール・ボーリン (1860-1939) はスエーデンの天文学者。ウプサラ天文台での球状星団の観測に基づいて銀河の構造を議論した。〈3〉「Globular Clusters and the Structure of the Galactic System」 Shapley, H. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Vol. 30, No. 173, p. 42 (1918年) ハーロー・シャプレー (1885-1972) はアメリカの天文学者。球状星団の分布の異方性から天の川の構造を議論した。

これらの論文を考慮すると、「The Galactic System」という言葉自体は1900年頃から使われ出していたことに注意されたい。

れは私たちが認識している銀河そのものであり、特に「系」を付けて呼ぶ必要はない。アンドロメダ銀河にも、ダストやガスはある。銀河系という表現を採用するのであれば、アンドロメダ銀河もアンドロメダ銀河系と呼ぶべきである。しかし、そう呼ぶことはない。

『銀河系』という名前はいつから使われてきたか？

では、「銀河系」という言葉が「The Galactic System」の訳語の場合、1936年以降に登場したことになる。ところが、日本ではそれ以前から「銀河系」という言葉が使われていた。そのよい例は宮沢賢治の詩に見ることができる。

きしやは銀河系の玲瓏レンズ
 巨きな水素のりんごのなかをかけてゐる
 (『【新】校本 宮澤賢治全集』第二巻、筑摩書房、1995年、156頁) [2]

これは「青森挽歌」という詩の一部である。この詩が書かれたのは、賢治が1923年の夏にサガレン（サハリン、樺太）を旅行したときのことだ。つまり、日本では1923年には「銀河系」という言葉が流布していたと考えてよい。

では、「銀河系」という言葉は、いつ、誰が定義して使い始められるようになったのだろうか？これを知らするために、明治、大正、および昭和初期に出版された天文学の教科書や論文を調査してみることにした（文末の補遺を参照されたい）。

調査の結果、「銀河系」という言葉が使われ始めたのは1916年から1917年の頃であることがわかった。

〈1〉新城新蔵「天体の回転運動」、『天文月報』第9巻、第1号、大正五年（1917年）、1-4頁 [3]

〈2〉『天文学六講』一戸直蔵、現代之科學社、大正六年（1917年）[4]。銀河と銀河系は区別なく用いられている（第五講の中、例えば227頁）。また、

「吾が銀河系」という言葉も出てくる（230頁）。

ただ、これらの文献には「銀河系」という言葉の定義やその由来についての説明はない。結局、「いつ、誰が？」という疑問は残されたままとなった。

「銀河系」の意味

神田茂の『宇宙研究新天文学概論』（古今書院、1925年）[5]にある「銀河系」の説明は理解しやすい。

天の川銀河の中には太陽、そのほかの多数の星々（変光星、連星を含む）、星団、ガス状星雲がある。この星の系統を銀河系と称する」。

先に紹介したハッブルの定義と同質のものである。このような定義で私たちの住んでいる銀河を「銀河系」と呼ぶのはよい。しかし、この定義を採用すると、宇宙にあるすべての銀河は銀河系になる（表2）。ところが、「系」をつけるのは、なぜか私たちの住んでいる銀河だけなのだ。次に、「系」を用いない立場を採用すると、表3のようになる。アンドロメダ銀河やソムブレロ銀河の名称に倣えば、私たちの住んでいる銀河は「天の川銀河」と呼ぶ方が自然であることに気づく。

著者らは「天の川銀河」を選ぶことにした

以上の考察に基づき、著者らは「天の川銀河」を選ぶことにした。もちろん「銀河系」という言葉を選ばれる方もたくさんおられるだろう。実際のところ、「天の川銀河」でも「銀河系」でも私たちの住んでいる銀河を指すことはわかるので、誤解が生じることはない。しかしながら、なぜ「銀河系」という言葉を用いるのか、その定義と共に、理由を明示しておくことは重要であろう。

表2 「系」を用いる銀河の統一的な呼び名

対象	構成する天体	構成する天体の多様性を考慮した名称
銀河＝天の川	星、星雲、星団からなる系	銀河系
一般の銀河	星、星雲、星団からなる系	一般銀河系
アンドロメダ銀河	星、星雲、星団からなる系	アンドロメダ銀河系
ソンプレロ銀河	星、星雲、星団からなる系	ソンプレロ銀河系

註：構成する天体には「星間物質」と「暗黒物質（ダークマター）」も含まれる。

表3 「系」を用いない銀河の統一的な呼び名

対象	構成する天体	構成する天体の多様性を考慮した名称
銀河＝天の川	星、星雲、星団からなる系	天の川銀河
一般の銀河	星、星雲、星団からなる系	一般銀河
アンドロメダ銀河	星、星雲、星団からなる系	アンドロメダ銀河
ソンプレロ銀河	星、星雲、星団からなる系	ソンプレロ銀河

註：構成する天体には「星間物質」と「暗黒物質（ダークマター）」も含まれる。

ハッブルも銀河系問題に悩んでいた！

『The Realm of the Nebulae』 [1] に「Nebulae and External Galaxies（星雲と系外銀河）」という節がある（16-17頁）。この部分を読むと、ハッブルも銀河系問題に悩んでいたことがわかる。以下に著者による訳文を載せる。

星雲は恒星系であることがわかってきた。そのため、ガス雲や霧状の天体ではないので、nebulaeではなく、他の名称を使うべきだと考える人がいる。有益な提案ではあるが、今のところよい名称は提案されていない。結局、「系外銀河」という名称が最も頻繁に使われているのが現状である。

厳密に言えば、galaxyは天の川のことである。形容詞のgalacticはまさにその意味で用いられている。しかし、その使用法は元々の

意味から外れてきている。そして、私たちの住む天の川銀河を「銀河系（the galactic system）」と呼び、天の川銀河以外の恒星系を「銀河（galaxy）」と呼ぶようになってきた。この流儀に従う人たちは「系外銀河（external galaxies）」という言葉を使う。

しかしながら、「系外銀河（external galaxies）」という言葉の使用には反対意見もある。私たちの住む天の川という恒星系は「銀河系」であり、「銀河」ではないと主張する人たちもいるのだ。また、古い言葉に新しい意味を与えるのは、ときには便利ではあるが、両方の意味で用いるのは混乱を招くのでよくない。用語というものは常に論理で決められるものではないのだ。使い慣れた定義は捨て去られ、さまざまな新しい意味が重宝される。今後どうなっていくのか、定かではない。

もともとギリシア語の「乳」に由来する英語「galaxy=天の川」を一般の銀河を指すように用い始められた。ハッブルが言うように、その使用法は元々の意味から外れてきたことになる。そして、現在では、それがすっかり定着してしまった。ここに、この問題の複雑さがある。また、厳密さを追求する姿勢を貫くと、「天の川銀河」は中国語では「銀河銀河」になる、と主張する人も出るかも知れない。

さて、どうしたものか。

謝 辞

本稿のテーマである銀河系の名前の問題について有益な議論をしてくださった岡村定矩氏に深く感謝させていただきます。

参 考 文 献

- [1] Hubble, E., 1936, The Realm of the Nebulae (Yale University Press)
- [2] 宮澤賢治, 1995, 【新】校本 宮澤賢治全集 第二巻, 宮沢清六, 天澤退二郎編 (筑摩書房), 156
- [3] 新城新蔵, 1916, 天文月報, 9, 1
- [4] 一戸直蔵, 1917, 天文学六講 (現代之科學社)
- [5] 神田茂, 1925, 宇宙研究 新天文學概論 (古今書院)

補遺：今回調査した文献

明治から大正、昭和の初め頃の天文学の教科書・解説書で使用されている天の川銀河の名称（2024年6月30日までの調査）。天の川、銀河、銀河系は使用されていれば○、使用されていない場合は×とした。天の川、銀河、銀河系以外の名称が使用されている場合、別名として示した。

文献番号	書名	発行年	天の川	銀河	銀河系	別名
1	天文学 (上冊)	明治12年 1879年	○	○	×	—
2	天文講話	明治35年 1902年	×	○	×	—
3	星學 (全)	明治36年 1903年	×	×	×	星河
4	高等天文学	明治39年 1906年	×	×	×	—
5	天文地学講話	明治42年 1909年	×	×	×	—
6	星	明治43年 1910年	○ アマノガハ	○	×	天河、河漢、銀漢
7	宇宙発展論	大正3年 1914年	×	○	×	—
8	趣味の天文	大正5年 1916年	○ アマノガハ	○	×	天河、河漢、銀漢
9	天文月報	大正5年 1916年			○	
10	天文学六講	大正6年 1917年	○ 天河	○	○	—



文献番号	書名	発行年	天の川	銀河	銀河系	別名
11	通俗講義天文学下巻	大正9年 1920年	×	×	×	—
12	最近の宇宙観	大正9年 1920年	×	○	○	—
13	天文学汎論	大正11年 1922年	○ 天之川	○	○	—
14	星の科学	大正11年 1922年	○ 天の河	×	○	—
15	肉眼に見える星の研究	大正11年 1922年	○ 天の河=銀河	○	○ 銀河系宇宙	—
16	天文界之智囊	大正12年 1923年	○ 天の川=銀河	○	○ 銀河系	—
17	宇宙の旅	大正13年 1924年	×	○	○	—
18	星のローマンス	大正13年 1924年	×	○ 宇宙系統	×	—
19	新天文学概論	大正14年 1925年	○ 天の河	○	○	—
20	天界片信	大正15年 1926年	×	○	○	—
21	空の神秘	昭和4年 1929年	○ 天の河	○	○	—
22	天文学概論	昭和6年 1931年	×	○	○ galactic system	—

- 『洛氏天文学』文部省。上冊・下冊の二分冊。『Elements of Astronomy』(J. N. Lockyer, 1870年)の翻訳本。著者のLockyer (ロックヤー)を洛氏としている。『Elements of Astronomy』の原著の索引を見ると、銀河関係では「Galaxy」と「Milky Way」が出ている。
- 『改訂 天文講話』横山又次郎, 早稲田大学出版部, 明治三十五年が初版だが、購入したものは昭和二年刊のもの(貳圓八十銭)
- 『星学 全』須藤傳次郎, 博文館, 明治三十六年(三十五銭, 改正定價四十銭の印鑑あり)
- 『高等天文学』一戸直蔵, 博文館, 明治三十九年(六十銭)太陽, 月, 地球, および観測天文学を詳細に解説した教科書だ、銀河や星雲に関する記述はない。
- 『改訂 天文学講話』横山又次郎, 早稲田大学出版部, 明治四十二年が初版だが、購入したものは大正十二年刊のもの(貳圓八十銭)
- 『星』一戸直蔵, 裳華房, 明治四十三年(壹圓五十銭)
- 『宇宙発展論』『最近の宇宙観』スヴァンテ・アレニウス 著, 一戸直蔵 訳, 大倉書店, 大正三年(壹圓八十銭) 銀河は天の川銀河と螺旋星雲の二つの意味で用いられている。
- 『趣味の天文』一戸直蔵, 現代之科学社, 大正五年(壹圓二十銭)倉書店, 大正三年(壹圓八十銭) 銀河は天の川銀河の意味で用いられている。アンドロメダ星雲までの距離は十九光年になっている。
- 日本天文学会の学会誌『天文月報』第9巻, 第1号に掲載された新城新蔵による「天体の回転運動」という記事の中に『銀河系』という言葉が出てくる。
- 『天文学六講』一戸直蔵, 現代之科学社, 大正六年(価格は不明) 銀河と銀河系は区別なく用いられている(第五講の中, 例えば227頁)。また、「吾が銀河系」という言葉も出てくる(230頁)。
- 『通俗講義 天文学 下巻』一戸直蔵, 大鑑閣, 大正九年(三圓五十銭)
- 『最近の宇宙観』スヴァンテ・アレニウス 著, 一戸直蔵 訳, 大鑑閣, 大正九年(四圓七十銭)
- 『天文学汎論』日下部四郎太, 菊田善三, 内田老鶴圃, 大正十一年(価格は不明) 第27章では, 章のタイトルに「銀河系」が使われているが, 冒頭に「銀河は天之川とも称せられ…」とあるだけで, 銀河系という言葉の説明はない。
- 『星の科学』原田三夫, 新光社, 大正十一年(価格は不明)
- 『肉眼に見える星の研究』吉田源次郎, 警醒社, 大正十一年(参圓五十銭)
- 『天文界之智囊(ちのう)』古川龍城, 中興館書店, 大正十二年, (貳圓五十銭) 天の川=銀河という記述があるが, 銀河系という言葉も使われている(242頁)

- 17 『宇宙の旅』 H. H. ターナー 著, 大沼十太郎 訳, 新光社, 大正十三年(貳圓六十錢) 銀河が用いられているが, 一箇所次記述がある。“吾々の集団(銀河系の宇宙)”(355頁)。監修は東京天文台の平山清次(きよつぐ), 翻訳者の大沼十太郎は平山の親戚とのことである。なお, 平山(1874-1943)は太陽系の小惑星の中で同じ運動学的な性質を持つ「平山族(ヒラヤマ・ファミリー)」という小惑星の一群を同定したことで, 国際的に有名である。
- 18 『星のローマンス』古川龍城, 新光社, 大正十三年(貳圓) 宇宙系統という言葉が出ているが(32頁), 現代風に言うと系外銀河のことである。
- 19 『宇宙研究 新天文学概論』神田茂, 古今書院, 1925年(壹圓五十錢)
- 20 『天界片信』関口鯉吉, 興学会出版部, 大正十五年(貳圓五十錢) 大銀河系と小銀河系という用語あり。球状星団を含むものが大銀河系。
- 21 『空の神秘』(誰にもわかる科学全集第二巻)原田三夫, 国民図書, 昭和四年(壹圓) イーストンの天の川の渦巻形状(図9)が紹介されている(302頁)。
- 22 『天文学概論』本田親二, 教育研究会, 昭和六年(貳圓五十錢) ハッブルの1926年の論文(The Astrophysical Journal, 64, pp. 321-369 “Extra-Galactic Nebulae”)を引用してハッブル分類について説明してある。

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

Challenging Theory with Roman: From Planet Formation to Cosmology

氏 名：布田寛介（大阪大学理学研究科宇宙地球
科学専攻 M2（渡航当時））

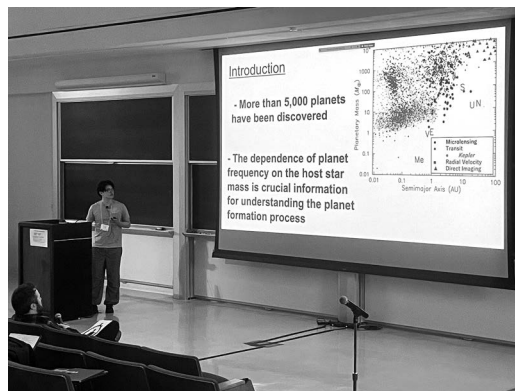
渡航先：アメリカ ロサンゼルス

期 間：2024年7月8～13日

本渡航では、7月9–12日にアメリカで行われた国際研究会“Challenging Theory with Roman: From Planet Formation to Cosmology”に参加し、“Toward the host star mass dependence of the planet frequency in Roman era”という題目で口頭発表を行いました。

本研究会は、NASAが2026年後半に打ち上げを予定しているNancy Grace Roman望遠鏡による観測が、系外惑星から宇宙論までどのようにして理論に挑戦するかを議論することを目的としています。この目的の通り研究会には、系外惑星から宇宙論までの幅広い分野の研究者が参加し、最新の研究成果や進展を共有し合うとともに、将来のコラボレーションの可能性についても活発な議論が行われました。この研究会を通じて、私自身も多くの刺激を受け、今後の研究活動における新たな視点やアプローチを得ることができました。

当講演は、2日目の系外惑星のセッションで行われました。内容は、重力マイクロレンズ法と呼ばれる系外惑星発見手法によって見つかった系外惑星サンプルを用いて、惑星存在量の主星質量依存性を測定する新手法の紹介です。重力マイクロレンズ法では、惑星系の重力がその背後の星の光を曲げることによって引き起こされる、星の明るさの一時的な増光を捉えることで惑星系を発見します。トランジット法や視線速度法とは異なり、この方法は主星の明るさの測定を用いないため、M型星などの暗い星の周りの惑星を多く発見できるという特徴があります。そのため、暗い星の周



研究会での発表の様子

りの惑星の存在量と主星の質量との関係性の解明は、重力マイクロレンズ法でしか成し得ない重要な研究課題です。一方でその解明には一つの大きな問題があります。それは、重力マイクロレンズ法では多くの場合で、主星の質量が測定できないということです。その問題のため、これまで惑星存在量の主星質量依存性に制限を与えることに成功した先行研究は存在しませんでした。そこで私たちの研究グループは、“アインシュタイン時間”と“レンズ・ソース相対固有速度”という、惑星イベントで普遍的に測定される2つのパラメータに着目し、それらの二次元の分布と銀河モデルを用いたシミュレーションから予測される分布を比較することで、主星質量の測定を必要とせずに惑星存在量の主星質量依存性に制限を与えられる手法を開発しました。さらにその手法をMOA-IIマイクロレンズ探査による惑星サンプルに適用することで、主星質量の増加に伴って惑星存在量が増加する可能性を示唆しました。しかしこの結果にはいまだに不定性が大きく、この結果の確証を得るためには、より多くのサンプルが必要です。そこで、1,000個以上の惑星の発見が期待されてい

る Roman 望遠鏡のサンプルを解析することが重要になります。講演ではこの新手法を紹介し、Roman 望遠鏡のサンプルを用いた場合に主星質量依存性の制約がどれほど厳密になるかについて、シミュレーションをもとに議論しました。

講演後は、幅広い分野の専門家から様々な質問をいただきました。特に、惑星形成理論を専門とする Eve Lee 氏 (McGill University) からは詳細な質問をいただき、深い議論を行うことができました。それ以外にも、食事の機会やコーヒー休憩の時間を通して様々な方々と交流をすることができました。特に、重力マイクロレンズ分野の第一

人者である David Bennett 氏 (NASA GSFC) や、同年代の Natasha Abrams 氏 (UC Berkeley) との交流は、大きな刺激となりました。

今回の講演を通じて得られたフィードバックや新たな視点は、私たちの研究を一層深めるための重要な手がかりとなりました。また、専門家の皆様との交流を通じて、今後の共同研究の可能性や新たなアイデアを見つけることができ、大変有意義な時間を過ごすことができました。これからも精進し、さらなる研究成果を発表できるよう努めて参ります。この度は本渡航を援助していただき、誠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 COSPAR 2024 45th Scientific Assembly

氏 名: 有田淳也 (東京大学理学系研究科天文学専攻 D1 (渡航当時))

渡航先: 韓国 釜山

期 間: 2024年7月14~18日

本渡航では、7月13日から21日にかけて韓国で行われた国際研究会“COSPAR 2024 45th Scientific Assembly”の Scientific Program のひとつである“Coevolution between High-redshift Quasars and Galaxies in the Era of JWST”に参加し、“Quasars reside in massive dark matter halos at redshift 6”という題目で口頭発表を行いました。本研究会では高赤方偏移クェーサーを対象としており、JWST を用いた観測的研究を行っている研究者に加えてシミュレーションを用いた理論的研究に取り組んでいる研究者も多く参加していました。特に、JWST が発見して以来注目を集めている Little Red Dot (LRD) に関する研究は数多く発表されており、活発な議論が行われました。

当講演では前半で Arita et al. (2023) に基づく $z \sim 6$ のクェーサーを用いたクラスター解析に

ついて発表を行いました。この研究では、すばる望遠鏡の HSC による大規模サーベイである HSC-SSP のデータから高赤方偏移クェーサーを検出するプロジェクト (SHELLQs) によって $z \sim 6$ においてクェーサーの表面数密度が飛躍的に上昇したことに着目し、クラスター解析から $z \sim 6$ のクェーサーの典型的なダークマターハローの質量を初めて制限しました。得られた結果からは、 $z \sim 6$ のクェーサーは当時の大質量ハロー ($\sim 10^{12-13} h^{-1} M_{\odot}$) に存在することが示唆されました。近年では、JWST の NIRCам の WFSS を用いて検出されたクェーサー周辺の酸素輝線銀河を用いたクラスター解析も行われていますが、この研究と矛盾しないダークマターハローの質量が推定されています。また、 $z < 4$ のクェーサーを用いたクラスター解析を行った先行研究もクェーサーの存在する典型的なダークマターハローの質量を $\sim 10^{12-13} h^{-1} M_{\odot}$ と報告しており、クェーサーの発現メカニズムにダークマターハローの質量が関わっていることが示唆されました。さらに、後半では JWST によって新たに発見された低光度 AGN を



研究会でのプレゼンテーション

用いたクラスタリング解析についても紹介をしました。これらの低光度AGNはX線でほとんど受からなかったり、特異的なスペクトルをしているものもあったりと、その性質を理解するために観測・理論の両方から盛んに研究が行われています。特に、光度関数を調べるとクェーサーの外挿よりも1-2桁程度高い数密度を示しており、クェーサーとJWSTで発見された低光度AGNの差異を調べることが重要な課題となっています。そこで、JWSTで発見された低光度AGNを可能な限り集めクラスタリング解析を行ったところ、その典型的なダークマターハローの質量が同じ赤方偏移のクェーサーよりも1桁程度軽いことがわかりました。その結果をもとにJWSTで発見されたAGN

の正体についていくつかの可能性を議論しました。

講演のあとには主に後半の内容について参加者から多くの質問をいただき、議論も活発に行うことができました。特に、近年高赤方偏移クェーサーの環境に注目しているJoseph Hennawi氏(UC Santa Barbara)からは解析について様々な提案をしてくださり、今後の研究の大きなヒントを得ることができました。また、Hennawi氏のチームでは理論的アプローチからJWSTで発見された低光度AGNのダークマターハロー質量を推定する試みも行われており、その手法や暫定的な結果についても知ることができ、講演で発表した結果と大きく矛盾していないことを確認することができました。さらに、高赤方偏移クェーサーの環境を調べるためのアイデアについても意見を交換しあい、共同研究の可能性も出てくるなど充実した議論ができました。

このように本渡航ではJWSTを用いた高赤方偏移クェーサーの研究に取り組んでいる研究者と深い議論ができた貴重な機会となりました。加えて、今後の共同研究の可能性も出てくるなど博士課程の間の研究に大きなプラスとなるような実りある渡航となりました。今回のような非常に有意義な渡航の実現に協力してくださった早川基金に深く感謝申し上げます。誠にありがとうございました。

寄贈図書リスト

- ①シリーズ現代の天文学6 星間物質と星形成, 福井康雄 犬塚修一郎 大西利和 中井直正 舞原俊憲 水野亮 編, A5判, 336ページ, 2,500円+税, 日本

評論社

- ②マンガでわかるカルロ・ロヴェッリの物理学, ルーカ・ポッツィ著, エリーザ・マチェッラーリ イラスト, 花本知子 訳, B5変形判, 168ページ, 2,400円+税, 山と溪谷社

月報だより

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

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

東北大学・海洋研究開発機構
変動海洋エコシステム高等研究所 (WPI-AIMEC)
AIMEC 研究員もしくは
AIMEC ポストドクトラル研究員

WPI-AIMECでは, 地球環境変動に対応する海洋生態系の応答・適応メカニズムを解明し, ステークホルダーにとって有益な海洋生態系変動の将来予測の実現を目指しています。

着任初年度に研究スタートアップ経費としてAIMEC研究員は300万円, AIMECポストドクトラル研究員は200万円が支給されます。(以後の支給はありません。)

詳細は各募集要項をご確認ください。

- ①海洋環境統合解析ユニット:
<https://www.jamstec.go.jp/recruit/j/details/wpi20250126/>
- ②海洋環境統合解析ユニット・生態複合研究ユニット・沿岸生態系サービス研究ユニット・海洋-固体地球変動統合研究ユニット・海洋生物統合研究ユニット・海洋微生物生態系変動研究ユニット・海洋物質循環観測統合解析ユニット・海洋地球システム統合数理解析ユニット・海洋生態系モデリング評価研究ユニット
https://www.jamstec.go.jp/recruit/j/details/wpi20250126_2/
- ③沿岸生態系サービス研究ユニット
https://www.jamstec.go.jp/recruit/j/details/wpi20250126_3/
1. 募集人数: ①・③1名, ②12名

2. 勤務地:

①・③ 東北大学 青葉山キャンパス 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-3

② 東北大学 青葉山キャンパス 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-3

または, 海洋研究開発機構 横浜研究所 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173番25

3. 専門分野: 海洋物理学, 海洋生態学, 地球化学, 海洋工学, 地球微生物学, 計算機科学, 気象学, 気象及び海洋モデリング, 地球科学, 分析化学, プロテオミクス, 有機地球化学, 生物地球化学, 同位体地球化学, 環境(微)生物学, (同位体)生態学等

4. 応募締切: 2025年1月26日(日)

5. 問合せ先: 変動海洋エコシステム高等研究所 (WPI-AIMEC)

研究推進企画部 採用担当

wpi-aimec_hr@jamstec.go.jp

京都大学大学院理学研究科 助教

1. 募集人員 (ポスト・人数など): 助教1名
2. (1) 所属部門・所属講座, (2) 勤務地:
(1) 京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第二分野 宇宙線研究室
(2) 京都市左京区北白川追分町
- 3.4. 専門分野・職務内容・担当科目: 飛翔体を用いた手法を中心に, 現教員と協力して高エネルギー宇宙物理学(実験)に関する研究・教育を行う
5. (1) 着任時期, (2) 任期:
(1) 採用決定後できるだけ早い時期
(2) 任期なし
6. 応募資格: なし

7. 提出書類:
- ①履歴書(顔写真, e-mailアドレス, 着任可能時期を明記)
 - ②研究業績リスト
 - ③主要論文3編以内
 - ④研究業績概要
 - ⑤着任後の研究計画(教育に対する抱負も含む)
 - ⑥推薦書または意見書
8. 応募締切・受付期間: 2025年3月28日23:59(金)(JST)
9. (1) 提出先, (2) 問合せ先:
- (1) 書類送付先: 京都大学大学院理学研究科 物理・宇宙物理学系 学系長 山本 潤 電子メールにてapply_at_scphys.kyoto-u.ac.jp宛にpdf(最大サイズ20MB)を送付する(「_at_」を「@」に変えてください). Subject欄は「宇宙線研究室 助教」とし, ファイル受領の返信を必ず確認のこと.
 - (2) 問合せ先: 京都大学大学院理学研究科 物理学第二教室 教授 鶴 剛 電話: 075-753-3868 e-mail: tsuru_at_cr.scphys.kyoto-u.ac.jp(「_at_」を「@」に変えてください)
10. 応募上の注意:
必要と判断した場合, セミナーをお願いする場合があります.
11. その他(待遇など):
http://www.scphys.kyoto-u.ac.jp/news/public.html#koubo_20241223_1を参照のこと.

賞の推薦

2025年度第20回「ロレアルーユネスコ女性科学者 日本奨励賞」募集要項

1. 趣旨: ロレアルグループとユネスコが世界規模で展開する女性科学者を支援する共同プロジェクトの理念を継承し, 将来を担う若手女性研究者が国内の教育・研究機関において研究を継続できるよう, 奨励しています.
 2. 対象: 生命科学, 物質科学の分野において, 日本国内で博士後期課程に在籍あるいは, 博士後期課程に進学予定で, 40歳未満(応募締切日2025年3月31日時点)の女性を対象とします.
 3. 奨学金授与の件数: 生命科学, 物質科学の分野からそれぞれ原則1年2件(2名), 計4件(4名)を選考し, 受賞者に賞状および奨学金100万円を贈呈します.
4. 受付期間: 2024年12月20日(金) から2025年3月31日(月) 23時59分まで
 5. 応募方法: 下記必要書類を「ロレアルーユネスコ女性科学者 日本奨励賞」事務局宛にe-mailにてお送りください. 1つのフォルダに下記必要書類をまとめて格納のうえ, お送りいただく際はフォルダにパスワードをかけ, 10 MBを超える場合は, 所属大学・機関で推奨されているファイル転送サービスをご使用ください.
*個人のe-mailにてパスワード設定が不可の場合, 指導教員または大学のe-mail代用可
【フォルダ名の表記について】
研究分野(生命科学はLS, 物質科学はMSと表記), 氏名と所属大学・機関は英語表記でお願いします.
記載見本: LS_Yamada Hanako_Japan University
【書類名の表記について】
該当書類の番号, 研究分野(生命科学はLS, 物質科学はMSと表記), 氏名と所属大学・機関は英語表記でお願いします.
書類aの記載見本: a_LS_Yamada Hanako_Japan University
- (1) 必要応募書類 ※ファイル形式は全てPDFにてご提出ください.
 - a) 応募申請書
募集要項, 応募申請書, 指導教員からの推薦状は, 日本ロレアルホームページ
<https://www.loreal.com/ja-jp/japan/articles/commitments/fwis-japanfellow-award-application/>
2025年度 第20回「ロレアルーユネスコ女性科学者 日本奨励賞」募集開始日(12月20日以降)からダウンロードできます.
 - b) 履歴書(書式自由, 身分証明書サイズの顔写真貼付)
 - c) 指導教員からの推薦状
 - d) これまでの研究内容の概要(A4版 2頁以内)
*および別添(A4版 1頁以内)に, 研究タイトルとアブストラクトを日英で併記ください(和文500字/英文200 words)
 - e) 今後一年間の研究題目とその概要および今後の展望(A4版 2頁以内)
 - f) 発表論文リスト(口頭発表含む) 著者名は可能なかぎり全員記載
*応募者本人がFirst authorではない論文は, First authorの役職名(発表当時)と, 本人

の寄与分 (%) を明記ください。

g) 論文別刷

g-1) 既刊および刊行予定の論文 (Acceptance Letter 添付) 3編以内

g-2) 学会発表論文 (アブストラクト)

*上記g-1), g-2) に該当する書類がない場合, 修士論文で代用可

*複数の論文がある場合は, まとめて1つのPDFでご用意ください。

(2): 書類提出先・お問い合わせ先

「ロレアル・ユネスコ女性科学者 日本奨励賞」事務局 loreal-fwis-japan@kreo.jp
事務局より書類受取のご連絡を1週間以内にいたします。

6. 選考: 1次審査 (書類選考), 2次審査 (ヒアリング) 日本ロレアル(株)新宿オフィスにて対面にて実施予定), 選考委員会による厳正なる審査を経て, 2025年7月中旬から8月を目途に採否をご連絡します。

7. 授賞式: 採否のご連絡後, 関西で授賞式を開催 (10月2日予定) し, 正式に受賞者の発表を実施します。(※受賞者は式典への出席は必須とさせていただきます。)

会務案内

「掲載論文の無料公開期間の変更」

PASJでは, 2025年からオープンアクセス論文以外の論文については, アクセス制限の解除期間を従来の「出版後3年目から期限なし」から「出版後3-10年目の7年間」へ変更することになりました。

これは, 各出版社から購読機関へ提供される電子版利用統計の統一基準 (COUNTER5.1) の方針変更により, 2025年から無料公開論文が統計の対象外となることに対応するためです。この統計は購読機関が契約更新を行う際の判断材料となっており, PASJの利用数が実際よりも少なく見えることになり, 今後の機関購読契約更新に影響を与えるおそれがあります。そのため, 出版委託先のOUP社との協議や編集委員会での議論の結果, 読み手や著者の不利益をできるだけ抑えつつ, 購読契約維持のため, 止むを得ず無料公開に期間を設けることになりました。

皆様にはご不便をおかけしますが, 何卒ご理解の程, よろしくお願いいたします。

欧文研究報告編集委員会

編集委員より

天文月報記事投稿用アップローダー

https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/author_submission/

■ログイン

ユーザー名: geppou パスワード: toukou

■アップロードの仕方

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

■注意

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

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

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

■連絡先

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

(天文月報編集長)

天文月報記事ご執筆用テンプレート

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

https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/author_template/

TeX・LaTeXで執筆される方はテンプレートをオンライン上またはダウンロードしてご利用ください。

月報だより

MSWordで執筆される方はwordテンプレートをダウンロードしてご利用ください。また、ご執筆の前に必ず「執筆マニュアル」をご一読ください。

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

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

天文月報オンラインのユーザ名とパスワード

ユーザ名: asj2025

パスワード: 雑誌コード (5桁の数字) と **vol118** (6文字) の計 11文字を入力してください。「雑誌コード」とは印刷版の月報の裏表紙の右下に書かれている「雑誌○○○○○-▲」の○○○○○の部分です。○○○○○は各号共通の数字です。

編集委員: 津村耕司 (委員長), 岩崎一成, 小野寺仁人, 勝田哲, 川中宣太, 西澤淳, 仏坂健太, 岡本文典, 日下部展彦, 小山翔子, 志達めぐみ, 鈴木大介, 鳥海森, 信川久美子, 橋本拓也, 宮本祐介

令和7年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)