

# 米国国立科学財団による 2026年度予算教書の発表について

土 居 守<sup>1</sup>・進 藤 美 和<sup>2</sup>・臼 田 知 史<sup>3</sup>・  
青 木 和 光<sup>4</sup>

〈<sup>1,2,3,4</sup> 国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: <sup>1</sup>naoj.dg@nao.ac.jp, <sup>2</sup>miwa.shindo@nao.ac.jp, <sup>3</sup>tomo.usuda@nao.ac.jp, <sup>4</sup>aoki.wako@nao.ac.jp

米国国立科学財団（NSF）は5月末に公表された予算教書で、TMTを最終設計段階に進めず、追加の資金提供を約束しないという方針を示しました。この予算教書は、連邦議会が歳出法案を作成する際の参考資料との位置づけであり、議会は自ら作成した歳出法案を可決し、大統領の署名を得ることで歳出法を成立させます。そのため、今後の議会の動向を注視しながら、コミュニティから強い支援の声を上げていくことが重要です。昨年のNSFの予算教書においても、US-ELTプログラムとしては、2基のうち1基を残す方針が示されましたが、上下両院の歳出委員会は2基の建設を支持する方針を表明しました。過去にはJWSTやローマン宇宙望遠鏡のように、行政府の予算教書には盛り込まれなかったものが連邦議会での審議を経て予算措置された事例も多くあります。TMTという世界最高水準の望遠鏡建設が我が国の科学技術の進展に極めて多くの貢献をもたらす重要な計画であることも踏まえ、国立天文台としては引き続き同計画の実現に向けて取り組んでまいりますので、皆様からもご支援いただきますようお願い申し上げます。

## 米国国立科学財団（NSF）の2026年度予算教書の内容

2025年5月30日（現地時間）、米国大統領より、国立科学財団（NSF：National Science Foundation）の2026年度予算教書[1]が米国連邦議会に提出されました。同書の11ページ（Overview-5）に、TMT/GMTを含む米国の超大型望遠鏡計画（US-ELTプログラム）に関する記載がありました。

【和訳】「数十億米ドル規模となる2基の望遠鏡への資金を負担し続けることが不可能であることから、NSFは巨大マゼラン望遠鏡（GMT）を大型施設最終設計段階に進めるが、30 m望遠鏡（TMT）は最終設計段階には進まず、NSFは追加資金提供を約束しない方針である。NSFはGMT計画から、追加投資なしに最終設計段階を完了で

きるという確約を得た。最終設計段階への移行は、プロジェクトの建設承認を保証するものではなく、NSFに更なる資金を提供する義務が発生するものでもない。2026年度予算要求は、米国のUS-ELTプログラムにおいて一基の望遠鏡の設計を継続することを支持する」

これは日本が参加しているTMT計画にとって厳しい記載内容ですが、まずこれに関係する事実についてご説明します。

### 事実1：米国の歳出は連邦議会が決定

まず、米国の予算編成における各役割について説明します。

大統領が各政府機関の概算要求を取りまとめた「予算教書」を連邦議会に提出することで、連邦議会での予算審議が始まりますが、大統領には法案提出権はなく、予算教書は「連邦議会への提

案」という位置づけになります。

それに対して、連邦議会は米国憲法第1条第9節第7項で「国庫からの支出は、法律で定める歳出予算によってのみ、これを行わなければならない」と定められ、毎年の歳出法（各政府機関の裁量経費に関する歳出を定める法律）の法案提出・審議を通じて財政面から行政府の活動全般を精査しコントロールする役割があります。大統領の予算教書を参考にしながらも担当省庁のヒアリングをし、自ら作成した歳出法案を両院で可決させ、大統領の署名を得ることで、歳出法を成立させます。

### 事実2：NSFは2024年も1基のみ支援を検討

NSFの意思決定機関であるNSB（National Science Board）は、2024年2月27日、NSFに対し、NSFが負担するUS-ELTの建設費の上限を16億ドルと設定する決議を採択し、2024年5月のNSB会合でUS-ELTプログラムへの支援の今後の計画について、NSFにNSBと協議すること等を勧告しました[2]。2024年5月2日のNSB会合で、NSF長官は次の報告をしています[3]。

- ・候補プロジェクトであるGMT、TMTのいずれか1基を最終設計段階に移行させるかどうかを検討するために、長官に助言を提供する外部審査会を招集する。
- ・外部審査会は、各プロジェクトについて質問事項に対する見解を提供する。
- ・予算手続きに情報が提供されるよう、外部審査会に対し、報告書を長官に2024年9月末までに提出するよう求める。外部審査会の調査結果は、連邦議会、OMB（Office of Management and Budget）、OSTP（Office of Science and Technology Policy）、NSBに報告される予定。

NSFはこの審査を2024年7月に実施し、12月9日、外部審査会報告書を公表しました[4]。同報告書では、US-ELTプログラムが米国の科学において重要であることが強調され、TMT/GMTのどちらかを選ぶことはなく、両計画共に最終設計段階に進む準備ができていると評価し、US-

ELTプログラムの成功には連邦議会の予算措置が必須であると結論付けました。さらに両計画が最終設計審査で成功する機会を得るよう税金を有効に利用すべきと長官に助言しました。

### 事実3：連邦議会はTMTとGMTの2基を支持

歳出法などの法案を審議する立法府である連邦議会は2024年度歳出法と、上下各院の2025年度歳出法案でTMTとGMTの2基を建設するUS-ELTプログラムの支持を繰り返し表明しています。2024年3月9日に成立した2024年度歳出法では、次回5月NSB会合で、US-ELTプログラムを大型研究設備施設建設（MREFC）勘定に含める検討をするようNSFに指示しました。また、US-ELTプログラムを2基の望遠鏡建設とするよう、NSBに強く促しました[5, 6]。

2025年度歳出法案では、上下両院ともにTMTとGMT両方の建設を強く支持する意向を表明しました。上院案[7]では、Astro2020（米国Decadal Survey on Astronomy and Astrophysics 2020）の優先計画の建設に係る資金が2026年度のMREFCに含まれるよう、2025年度中に設計を進めることも推奨しました。さらにAstro2020で提案された次世代天文学施設の開発を支援するために、前年度の3,000万ドルを大幅に上回る1億ドルを提供することを提案しました。また外国政府によるUS-ELTプログラムへの貢献にも言及され、対外関係をも意識した記述になっています。下院案ではUS-ELTプログラムを推進することで米国は天文学でリーダーシップを維持できるとし、進捗状況を定期的に連邦議会に報告するようNSFに指示し、また遅延を最小限にし、NSFにコスト増のリスクを軽減するよう促しました。

### 事実4：連邦議会による予算復活の例

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）：2011年7月6日、米国下院歳出委員会（商務・司法・科学小委員会）は、既に30億ドルが支出され、ハードウェアの75%が製造段階にあったにもかかわらず、JWST計画の中止を決議し、2012年

度歳出法案（NASAの総予算から19億ドルが削減され、そのうち約4分の1がJWST計画）を策定しました。同小委員会は、この計画が「数十億ドルの予算超過と管理の不備に悩まされている」と指摘しました。これに対し、アメリカ天文学会はJWSTが完成するまで支援するよう連邦議会に訴える声明をすぐに発表し、ミクルスキ上院議員（当時）も目先のこじか考えていない誤った判断と非難する声明を発表しました。また、海外メディアにもJWST計画を支持する論説が数多く掲載されました。同年11月、連邦議会はJWST計画の中止計画を撤回し、開発コストに上限を設定したうえで予算を措置しました[8]。

ナンシー・グレイス・ローマン宇宙望遠鏡：2019年度から2021年度までの大統領の予算教書では3年連続で予算要求が無く、計画の中止が懸念されました。しかし、連邦議会が支持した結果、2019年度には3億ドル、2020年と2021年度には5億ドルの予算が措置されました[9]。このように、行政府の予算教書には盛り込まれなかったものの、連邦議会での審議を経て大型予算が措置された前例があります。

#### 事実5：連邦議会はDecadal Surveyを支持し、これまですべての計画が実現

Decadal Survey on Astronomy and Astrophysicsは、全米アカデミーズの物理学・天文学部会と宇宙科学部会が協力してほぼ10年に一度行う大規模な調査研究です。その目的は、この研究分野の過去と現状を踏まえて、次の10年間にこの

分野が向かうべき方向について研究者間で合意された勧告を出すことにあります。勧告では次の10年間に行うべき大型計画の選定と順位付けが行われます。地上の大型計画で1位になった計画は1972年のVLA、1982年のVLBA、1991年のGemini、2001年のALMA、2011年のRubinとすべて実現しています。最近の2021年はUS-ELTプログラムが1位でした。宇宙の大型計画でも1972年のHubble、1982年のChandra、1991年のSpitzer、2001年のJWSTが全て実現され、2011年のローマン宇宙望遠鏡も2027年に打ち上げが予定されています[10]。

#### 事実6：TMTの科学的／技術的優位性

TMTが建設されるマウナケアは、欧州が建設を進める口径39 mのE-ELTやGMTのチリのサイトに比べて優れています（表1）[11]。また、TMTで得られる星像PSFは、主鏡セグメント鏡同士の隙間は2.5 mm、副鏡を支持するスパイダー構造による遮光は4%以下にまで抑えるといった、これまでの大型望遠鏡で実現している精度を上回る設計から、口径30 mの一体型開口望遠鏡に近い形状です。その結果、コンパクトで素性の良いPSFが実現し、明るい恒星の周囲を回る地球型の太陽系外惑星探査のような高解像度・高コントラスト観測に、最適設計になっています（図1）[12]。

すばる望遠鏡は米国のKeck望遠鏡より6年遅れて完成しました。しかし、他の8-10 m級望遠鏡にはない主焦点を活かした広視野観測をはじめ

表1 超大型望遠鏡の建設地の比較

|                | TMT（ハワイ）<br>マウナケア | GMT（チリ）<br>ラスカンパナス | E-ELT（チリ）<br>アルソネス |
|----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| 標高             | 4012 m            | 2514 m             | 3064 m             |
| 星像の大きさ（秒角、中央値） | 約0.5              | 約0.6               | 約0.5               |
| 地球大気の安定性       | 非常に安定             | 安定                 | 安定                 |
| 赤外線観測に適した時間の割合 | 約50%              | 約15%               | 約20%               |
| 快晴の夜間時間の割合     | 約70%              | 約65%               | 約85%               |

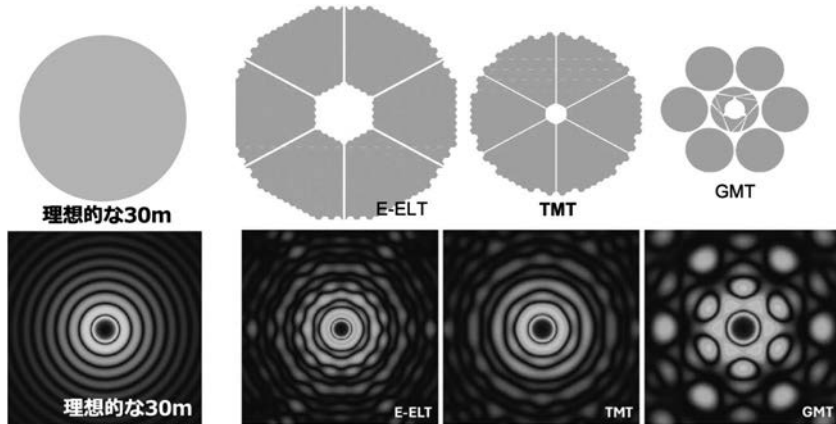


図1 超大型望遠鏡の建設地の比較

(上) 左から、理想的な 30 m、E-ELT、TMT、GMT の主鏡の形状（灰色部分）および副鏡とそれを支えるスパイダーによって生じる遮蔽（白色部分）。（下）望遠鏡によって得られる星（点光源）の像。TMT は周囲への回折光の影響小さく、左側の理想的な像に最も近い。

とする優れた性能により、引けを取らない科学的成果をあげています。日本だけでなく、米国、カナダ、インドの最先端の技術で支えられ、E-ELT よりも建設サイトや光学性能で優れており、更に北半球に位置する TMT は、たとえ E-ELT より 5 年程度遅れたとしても最先端の科学成果を挙げることができます。

## さいごに

今回発表された NSF の 2026 年度予算教書の内容は、TMT 計画にとって厳しい記載内容です。しかし、上記のように米国の予算は、予算教書は参考情報との位置づけで、立法府である連邦議会が法律として制定します。今後の連邦議会の動向を注視しつつ、コミュニティから強い支援の声を上げていくことが重要です。6 月初めには、日本天文学会、光学赤外線天文連絡会運営委員会、日本惑星科学会から TMT 計画の推進と実現を強く支持するサポートレターをいただきました [13]。TMT という世界最高水準の望遠鏡建設が我が国の科学技術の進展に極めて多くの貢献をもたらす重要な計画であることを踏まえ、国立天文台としては引き続き、同計画の実現に向けて取り組んで

まいりますので、皆様からご支援いただきますようお願い申し上げます。

## 参考文献

- [1] <https://nsf.gov-resources.nsf.gov/files/00-NSF-FY26-CJ-Entire-Rollup.pdf>
- [2] [https://www.nsf.gov/nsb/news/news\\_summ.jsp?cntn\\_id=309171&org=NSB&from=news](https://www.nsf.gov/nsb/news/news_summ.jsp?cntn_id=309171&org=NSB&from=news)
- [3] <https://www.youtube.com/watch?v=LbXG5bYTzGA>
- [4] <https://nsf.gov-resources.nsf.gov/files/ELT-Evaluation-Panel-Report.pdf>
- [5] <https://docs.house.gov/billsthisweek/20240304/FY24%20CJS%20Conference%20JES%20scan%203.3.24.pdf>
- [6] [https://www.appropriations.senate.gov/imo/media/doc/fy24\\_cjs\\_report.pdf](https://www.appropriations.senate.gov/imo/media/doc/fy24_cjs_report.pdf)
- [7] <https://www.appropriations.senate.gov/imo/media/doc/FY25%20CJS%20Senate%20Report.pdf>
- [8] [https://en.wikipedia.org/wiki/James\\_Webb\\_Space\\_Telescope](https://en.wikipedia.org/wiki/James_Webb_Space_Telescope)
- [9] [https://www.nationalacademies.org/event/43043\\_11-2024\\_committee-on-astronomy-and-astrophysics-fall-2024-meeting#sectionWebFriendly](https://www.nationalacademies.org/event/43043_11-2024_committee-on-astronomy-and-astrophysics-fall-2024-meeting#sectionWebFriendly)
- [10] <https://www.nationalacademies.org/our-work/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020>
- [11] <https://www.tmt.org/page/119>
- [12] <https://www.tmt.org/page/did-you-know#dyn-mirror-eff>
- [13] <https://tmt.nao.ac.jp/info/1929>

※ URL はすべて 2025 年 7 月 1 日に確認済み

# アストロバイオロジーセンターでの装置開発

小 谷 隆 行<sup>1,2,3</sup>

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

〈<sup>2</sup> 国立天文台ハワイ観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

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

e-mail: t.kotani@nao.ac.jp



アストロバイオロジーセンター（ABC）では、太陽系外惑星探査のために様々な観測装置を開発・運用しており、ここではそれらの観測装置について紹介します。現在運用中の装置としては、すばる望遠鏡で視線速度法による惑星探査を実施するための近赤外線高分散分光器IRDと、系外惑星の直接撮像分光観測を行う極限補償光学装置SCEXAOがあります。開発中の装置としては、南半球での視線速度法による惑星探査を目指す近赤外線高分散分光器SANDがあり、また口径30メートル級望遠鏡TMT用の回折限界近赤外線分光器MODHIS・HISPECの開発にも参加しています。ABCでは、観測装置を開発するだけでなく、最先端のサイエンスを実現するために不可欠な要素技術の開発にも力を入れており、レーザー周波数コムや高効率のエシエル回折格子、ファイバー交換機なども独自に開発を行っています。

## 1. はじめに

アストロバイオロジーセンター（ABC）では、太陽系外惑星の探査とその特性を詳細に調べるための様々な観測装置を開発しています。また、最先端の観測装置に必要な基礎技術の開発も積極的に行っています。

## 2. 現在運用中の観測装置

### 2.1 赤外線精密視線速度測定装置IRD (Infra-Red Doppler)

IRD (InfraRed Doppler) は、すばる望遠鏡用に開発された近赤外線の高分散分光装置です。IRDは、M型星と呼ばれる太陽の数分の一以下の質量を持つ恒星の視線速度を、2 m/sという高精度で測定し、その周囲を公転する惑星を発見することを主目的としています [1]。IRDは2011年から開発を開始し、2018年からすばる望遠鏡の共同

利用観測装置に供されており、現在も運用中です。2019年からは、M型星周りの惑星探査のための、すばる望遠鏡戦略枠観測と呼ばれる大規模サーベイ観測を開始し、間もなく5年間の観測が終了します。IRDはこれまで、Ross 508というM型星のハビタブルゾーン（液体の水が存在できる領域）近くに、地球質量の4倍程度の惑星を初めて発見したり [2]、火星質量惑星の存在に制限を付けるなどの成果を挙げているほか [3]、ホットジュピターと呼ばれる惑星の大気中に初めてOHを発見したり [4]、宇宙望遠鏡によって発見された系外惑星の視線速度フォローアップ観測を行うなど、様々な成果を挙げています。また恒星物理の分野でも、IRDの高い分光能力を活かして、M型星や低金属量星の大気中の元素量測定 [5, 6] や、中性子星合体で生じる重元素による吸収線を恒星大気中に発見し同定するなど [7]、系外惑星だけでなく様々な分野においても使われています。

ここからは、IRDの観測装置としての特徴を述べていきたいと思います。IRDは、波長970 nmから1750 nmの近赤外線を最大70,000の波長分解能で同時分光できる、高分散分光器とよばれるタイプの装置です。望遠鏡で集めた光は、望遠鏡のナスミス台と呼ばれる場所で補償光学を用いて地球大気の乱れを取り除き、回折限界に近い星像を光ファイバーに入射させます。真空チャンバーに格納された分光器は、望遠鏡の真下にあるクーデ室と呼ばれる地下室に設置してあり、そこまで約65メートルの長さの光ファイバーを通して光を導きます(図1, 2)。IRDは、主分散素子として新規開発した長さ410 mm幅90 mm、ブレイズ角78.98°の大型エシエル回折格子を用いています。光学系全体は180 K、検出器は約80 Kまで冷却して装置由来の赤外線放射を小さく抑え、大フォーマット近赤外線2次元アレイ検出器HAWAII2-RG(ピクセル数2048×2048, ピクセルサイズ15  $\mu\text{m}$ )を用いることで、高感度・広波長域・高波長分解能を実現しています。

IRDは惑星探査を可能にするための独自の特徴があり、以下にそれを説明します。まず、IRDは高分散分光器としては非常に広い波長域を同時に観測することができます。恒星の視線速度測定では恒星スペクトル中の吸収線の波長変動を測定しますが、吸収線1本だけではせいぜい数百m/s程度

の測定精度しか出ません。そのため、できるだけたくさんの吸収線を同時に測定する必要がありますが、IRDではそれらをできるだけ漏らさず測定できるように広い波長域をカバーしています。次に、惑星を発見するには、視線速度を高精度で測定で

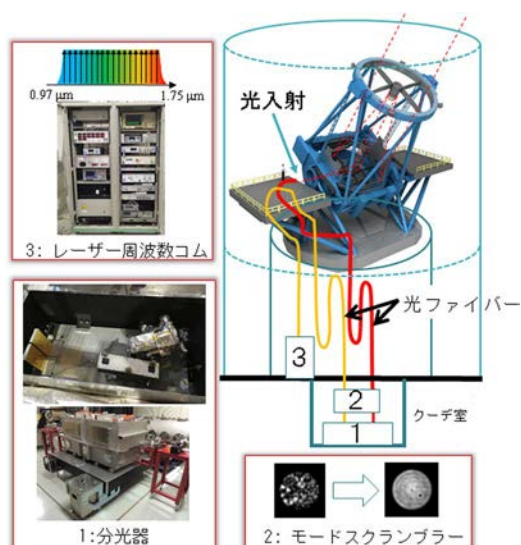


図1 IRD装置の概要。望遠鏡からの光は、ナスミス焦点にて光ファイバーに入射され、モードスクランブラーを通して安定化された光が、クーデ室と呼ばれる地下室に設置された分光器まで導かれます。精密な視線速度測定のために、波長安定な光源である、レーザー周波数コムを天体と同時に観測します。クレジット：ABC，国立天文台



図2 (左) IRDの真空チャンバーの外観。大きさは約1.5×1 mです。(右) 真空チャンバー内部に格納されている分光器光学系とそれを囲む、常温部からの輻射をカットする輻射シールド。クレジット：ABC

きるだけでなく、観測装置由来の系統誤差をできるだけ抑えて長期間安定して測定できる必要があります。IRDはそのために、分光器を極限まで安定化させています。まず、分光器は年間を通しての温度変化が約 $\pm 1.7^{\circ}\text{C}$ と安定したクーデ室と呼ばれる地下室に設置されています。加えて、分光器全体をヒーターで温度制御することで、光学定盤の温度変動を数週間の短期間では $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 、年間でも $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 以内に保っています。また、熱膨張率が非常に小さいゼロ膨張セラミックスを、光学定盤や放物面鏡、回折格子ホルダーなどに用いており、温度変化に対して変形しにくい構造としています。さらに、近赤外線での視線速度測定を行う際に大きなノイズ源となる「モダルノイズ」を低減する、独自に開発したモードスクランブラーと呼ばれる装置を搭載しています[8]。モダルノイズは、線スペクトル形状が時間変動し、偽の視線速度変動を引き起こすもので、装置の温度変化や地球大気の乱れ、望遠鏡の指向誤差など様々な要因で生じます。IRDは、光ファイバーに意図的に擾乱を与え続けたり、あえて500 m近い長さの光ファイバーに光を通したりなどの独自の工夫により、モダルノイズの影響を抑えています。

このようにして、できるだけ装置由来の視線速度変動を抑えるのですが、それだけでは惑星検出に必要な $\text{m/s}$ レベルの安定性は得られません。これらに加えて、波長の変化がほとんどなく、広い波長域でかつ密に輝線を出す光源を、恒星のスペクトルと同時に観測します。これにより、例えばスペクトルの位置が装置のせいで動いてしまっても、相対位置を測定することでその影響をキャンセルできます。私たちは、東京農工大学と共同で、天文観測に特化したレーザー周波数コムと呼ばれる極めて安定な、広帯域の波長較正光源を開発しました[9]。これによって、数年にわたり約 $2\text{ m/s}$ の視線速度測定の安定性を実現しています。

またIRDの特徴の一つとして、補償光学と組み合わせ使用することがあります。これにより分

光器をコンパクトにできるだけでなく、明るい恒星のすぐ近くにある惑星や褐色矮星のような暗い伴星を、主星から十分に空間的に分離したうえで、分光観測が可能になります。図3はIRDによって取得されたGl 229 Bと呼ばれる、主星がM型星のまわりを公転する褐色矮星の画像とスペクトルになります。IRDの高い波長分解能と広い波長域、そして補償光学のおかげで、主星からの光の漏れ込みをほぼ無視できるレベルまで抑え、褐色矮星の大気中にメタンや水蒸気などの分子を検出することができました[10]。さらに、次に述べる極限補償光学とIRDを組み合わせることで、より主星の近くに存在する惑星などの光を高精度で分光可能なREACH (Rigorous Exoplanetary Atmosphere Characterization with High dispersion coronagraphy) と呼ばれる観測モードもあります[11]。これはシングルモードファイバー (Single-Mode Fiber, SMF) と呼ばれる、光が通るコアが非常に小さい光ファイバーに光を導入してIRDの分光器まで導くことで、波長分解能約100,000の分光観測を実現します。SMFはコア直径が小さく、測定の邪魔になる恒星の散乱光の混入を抑え高精度な惑星光の分光観測を可能にします。この観測モードにより、褐色矮星のスペクトル測定と大気組成分析などに成功しています[12]。またSMFは出射光強度分布が安定しモダルノイズが存在しないという特徴を活かして、超高精度の視線速度測定が可能であると考えています。将来的には、太陽のような恒星のまわりを周回する、地球に似た惑星を検出するために、 $10\text{ cm/s}$ を切る精度の視線速度測定が望まれており、IRDはその実現に向けたテストベッドとしての役割も担っています。

## 2.2 すばる望遠鏡極限補償光学装置SCEXAO

太陽系外惑星を主星から空間的に分離して撮像・分光を行うには、地球の大気乱れを極限まで小さく抑え、主星の散乱光を惑星と同レベル以下の強度に小さくする補償光学が必須です。SCEXAO (Subaru Coronagraphic Extreme Adap-

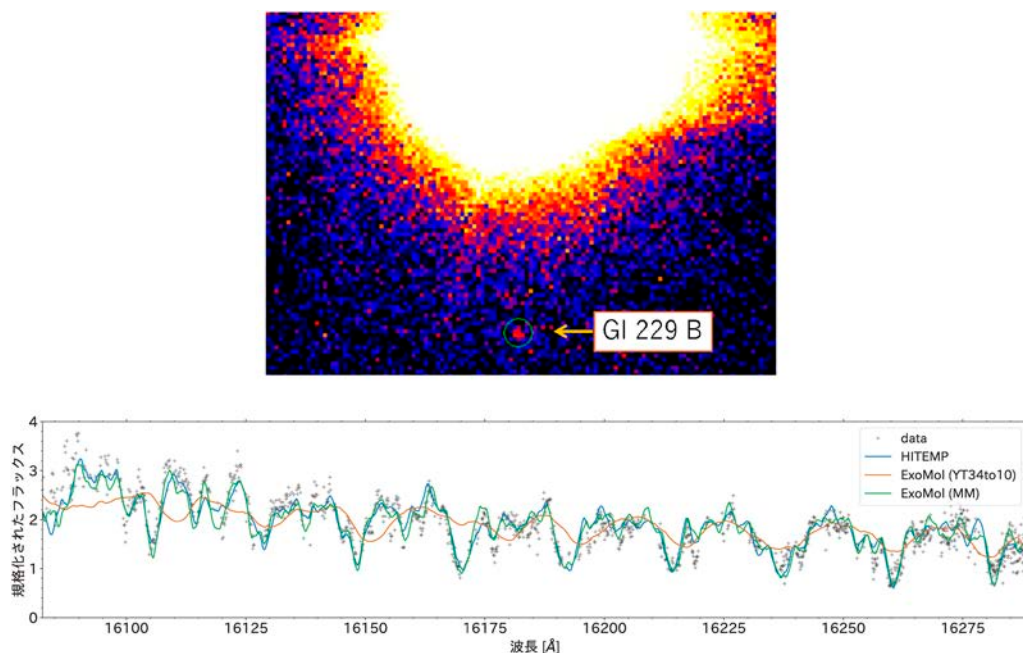


図3 (上) IRDのファイバー入射モジュールで撮像した褐色矮星 Gl 229 B. 円はIRDの光ファイバーの視野0.48秒角を示します。クレジット：ABC

(下) IRDで取得した Gl 229 Bの近赤外線スペクトル。点は観測データ、実線はいくつかのモデルによるフィットの結果[10]。

tive Optics) [13] は、大気の乱れをリアルタイムで測定・補正し、回折限界像を得る補償光学装置の中でも、極めて高速かつ高精度で波面を測定・補正することができる装置で、ABCのメンバーでもある、Olivier Guyon氏が主導して開発を進めてきました(図4)。SCExAOは、一連のユニークな観測装置と組み合わせることで、系外惑星の直接撮像や、原始惑星系円盤の高精度撮像などを実現してきました。ここでは、その観測装置を紹介したいと思います。CHARIS (Coronagraphic High Angular Resolution Imaging Spectrograph) は、プリンストン大学を中心に開発された、JHKバンドの高解像度面分光装置であり、SCExAOに搭載された観測装置の中で最も多く使用されてきた、撮像と低分散分光を同時に行うことが可能な装置になります[14]。またSCExAOは、その高い波面補正能力により、通常の補償光学では困難であった、可視光での回折限界レベルの補正を行うこと

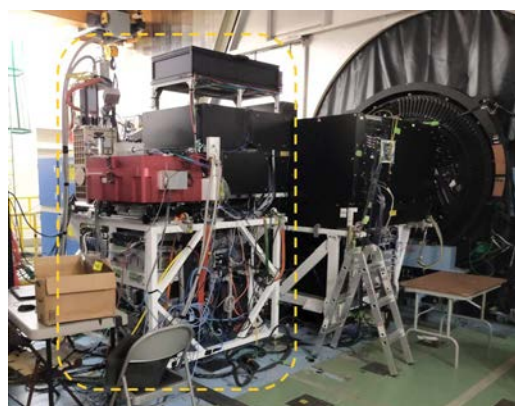


図4 SCExAOと付随する観測装置の外観(点線内)。SCExAOの右側にある筐体に収められた装置は、すばる望遠鏡の補償光学装置AO188(撮影当時)。クレジット：ABC

ができます。VAMPIRES (Visible Aperture Masking Polarimetric Imager for Resolved Exoplanetary Structures) は、まさにその可視光での回折限界撮像および偏光差分撮像を行うことができる

ユニークな観測装置です[15]。ほかにも、MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector) と呼ばれる、光子のエネルギーを直接測定する近赤外線フォトンカウンティング・撮像分光カメラもあり、光子の特性を利用したユニークな伴星検出が可能です[16]。また、高速カメラと高速で偏光軸の向きを変えられることができる偏光素子を組み合わせ、従来よりも偏光差分における系統誤差を低減できるFast PDI (Polarization Differential Imaging) と呼ばれる観測モードもあります。

SCEXAOには、その性能と観測装置だけではない、ユニークな特徴があります。それは、新しい技術のテストベッドとしての役割です。系外惑星を観測するのは、技術的に非常にチャレンジングであり、様々な技術開発を必要とします。しかも世界での競争も激しいため、開発とテスト、観測のサイクルをできるだけ早く回して、開発のスピードを上げることが重要です。SCEXAOは、新しい技術をキャッチアップし、すぐに試せる機会を提供しています。これは、将来の口径30メートル級望遠鏡に搭載される観測装置のテストベッドとしての役割も兼ねています。

### 3. 開発中の観測装置

#### 3.1 南アフリカ近赤外線ドップラー装置SAND

北天では、IRDなどの近赤外線でのドップラーサーベイが進んでいますが、南天ではそもそも近赤外線での高精度ドップラー測定が可能な装置が少なく、サーベイが手薄な状態にあります。そこで私たちは、南天での高精度ドップラー観測を進めるために、大阪大学が南アフリカ・サザーランド観測所に建設したマイクロレンズ法による系外惑星探査を目指す口径1.8メートルのPRIME望遠鏡に搭載する、近赤外線分光器SAND (South Africa Near-infrared Doppler) を開発中です[17]。SANDは、IRDと似た分光器ですが、IRDよりは短波長側の波長850-1080 nmのZ・Yバンドと呼ばれる波長域において、波長分解能65,000とい

う高分解能でスペクトルを同時に取得することができる設計になっています。この波長域は、次に述べるSANDの主目標である、M型星のまわりの地球型惑星探査と、若い恒星のまわりの惑星探査のために最適化されたものになっています。

SANDの目的は主に2つあります。一つは、近傍M型星のまわりに地球型惑星を発見することです。SANDの特徴としては、望遠鏡の口径が小さいかわりに、すばる望遠鏡のような大口径望遠鏡と比べるとフレキシブルに潤沢な観測時間を確保できる利点があるため、明るいM型星を集中的に観測するという戦略を取ります。これにより、既に惑星を持つことが知られている恒星系に対して長期間高頻度で追観測を行うことで、これまで知られていなかった惑星を発見するといったことが可能になると考えています。また、この高頻度観測は、第2の目標である、若い恒星のまわりの惑星探査に非常に有用です。近年、直接撮像などで原始惑星系円盤内に生まれたばかりの惑星が見つかってきましたが、若い惑星がその後どのような進化をたどり、成熟した惑星系に至るかは不明な部分が多く、解明が待たれています。

SANDは、PRIME望遠鏡と分光器を光ファイバーで接続して使用するのですが、PRIMEは銀河中心部分をモニター観測するため、望遠鏡の主焦点と呼ばれる部分に広視野赤外線カメラを取り付けており、通常の望遠鏡にある副鏡やカセグレン焦点・ナスミス焦点がありません。それではどうやって、光ファイバーに望遠鏡で集めた光を入れるのでしょうか。SANDでは、PRIMEの主焦点カメラのレンズとレンズの間に光を横に取り出すための出し入れ可能なミラーを設置し、トップリングと呼ばれる望遠鏡上部のリング状の構造に光を送り、そこで光ファイバーに光を入射させます。分光器は、望遠鏡ドームに隣接した温度コントロールされた安定な部屋に設置されます(図5)。

SANDは、PRIME望遠鏡とのファイバー結合により観測を行います。サザーランド観測所に

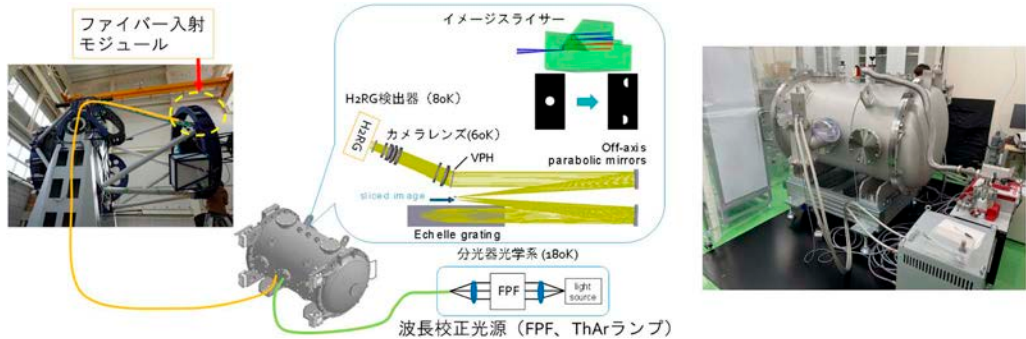


図5 (左) SANDの装置構成の概要。望遠鏡トップリングにて光をファイバーに入射し、真空チャンバー内の分光器へと導きます。分光器の近くにはモッドスクランブラーとレーザー周波数コムが設置されています。(右) SANDの分光器を収める真空チャンバー。クレジット: ABC

は、周辺に数多くの望遠鏡が設置されています。私たちは、その中のいくつかの望遠鏡とSANDをファイバーで結合して観測する計画を推進中です。これにより、さらにフレキシブルで多くの観測時間を得ることが可能になると考えています。これは、恒星の視線速度測定のような、高頻度かつ長期間のモニター観測には非常に役に立ちます。中でも検討が進んでいるのは、名古屋大学の口径1.4メートル望遠鏡IRSFとファイバー結合をする計画で、名古屋大学・鹿児島大学と共同で進めています。IRSFは、PRIME望遠鏡から約200メートル離れていますが、これを光ファイバーで繋ぐこととなります(図6)。私たちが使用する近赤外線用のファイバーは透過率が非常に高く、200メートル程度であれば大きな損失なく光を伝送することができます。また、サザランド観測所には、口径11メートルのSALTと呼ばれる大口径望遠鏡もあります。暗い天体の観測には、SALTの大口径は非常に魅力的であり、SALTとの結合には解決すべき技術的なハードルがありますが、ぜひ実現したいと考えています。これらが実現すれば、世界的に類を見ない、複数望遠鏡をファイバーで結合したユニークな観測装置となるでしょう。

### 3.2 TMT用観測装置の開発

ABCは、IRD、SCEXAOなどで開発した装置・



図6 PRIMEとIRSF望遠鏡。SANDはPRIME望遠鏡ドームに隣接した部屋に設置されます。PRIMEとIRSFを光ファイバーで結合する計画を進めています。クレジット: ABC

技術をベースとして、将来の口径30メートル望遠鏡TMT (Thirty Meter Telescope) 用観測装置の開発にも深く関わっています。

MODHIS (Multi-Object Diffraction-limited High-resolution Infrared Spectrograph) はTMT第1期装置として、米国・カナダ・日本などの国際協力で開発中の、シングルモードファイバーを用いた近赤外線回折限界高分散分光器です[18]。MODHISに先立って、ほぼ同じ機能を持つ分光器部分の技術実証を兼ねて、Keck望遠鏡用近赤外線回折限界分光器HISPEC (High resolution Infrared Spectrograph for Exoplanet Characteri-

zation)の開発が進んでおり、2026年以降の観測開始を目指しています。ABCは、分光器の核心部分とも言える、高効率かつ回折限界性能を持つエシエル回折格子と、シングルモードファイバーの接続を自動で切り替え、高頻度な分光器の較正を行うためのファイバー交換機を新規に開発し、提供しています。

HISPEC・MODHISの目標は、直接殺属された惑星やトランジット惑星に対して高感度な近赤外線高分散分光観測を行い、惑星大気組成や構造の解明を目指すことと、30 cm/sという超高精度かつ高安定な視線速度測定により、M型星まわりの地球型惑星の検出することになります。またHISPECとMODHISの分光器部分は、TMTの第2期装置として提案中の、系外惑星系直接撮像分光装置PSI (Planetary System Imager) [19]の分光器へと発展させることが想定されており、これによりM型星まわりの地球型惑星の直接撮像分光観測とバイオシグネチャー探査が可能になると考えています。

HISPEC・MODHISは、極めて高い視線速度安定性を実現したり、高精度に惑星大気分光を行ったりするために、分光器光学系の性能に対する要求は非常に厳しいものがあります。特にエシエル回折格子は、これまでの分光器ではあまり追及されてこなかった、回折限界を達成できる回折波面平坦性(<30 nm rms)と、暗いM型星や系外惑星を観測するために、非常に高い回折効率を達成することが求められます。私たちが開発したエシエル回折格子は、高い回折波面の平坦性を実現するために、切削性が非常に良いゲルマニウムを基板とし、基板に直接回折格子を刻み込む方式を取っています。ゲルマニウムは、光を基板内に透過・反射させるイマージョン型回折格子として使用されることが多いですが、私たちはゲルマニウム製回折格子の回折波面の平坦性に着目し、反射型の回折格子として使用します。切削性に優れた材料とキャノンによる高精度加工機のおかげ

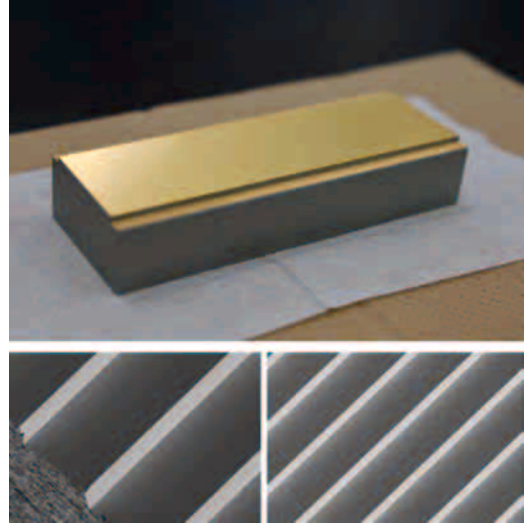


図7 (上) 開発したHISPEC用エシエル回折格子。(下) 電子顕微鏡で撮影した格子の様子(左図は倍率1000倍、右図は倍率500倍)。表面が極めて高精度に製作されているのがわかる。クレジット: ABC, キヤノン

で、極めて波面平坦性が高く、また理論的な回折効率に限りなく近い、非常に高性能なエシエル回折格子を開発することができました[20](図7)。またこの回折格子は、ほぼすべてが単結晶ゲルマニウムでできているため、冷却した場合の歪みが極めて小さいことも、試作回折格子により確認しています。

また、HISPECは様々な較正用光源を分光器内に導き、高頻度で分光器の較正を行うことで、装置由来の視線速度変動をモニターし補正することになっています。そのためには、高効率かつ安定的に、コア直径が数ミクロンしかないシングルモードファイバーに、天体や較正用光源を入射させる必要があります。これを実現するのが、私たちが開発したファイバー交換機と呼ばれる装置です。このファイバー交換機は、元々IRD・REACH用に開発したものを、さらに高機能化したものになります。

最後に、2027年ごろ打ち上げ予定のRoman宇宙望遠鏡に対して、日本からは、ABC・東京大

学・JAXA・北海道大学・国立天文台などが協力して、偏光素子・コロナグラフマスク基板・カメラ光学系の一部といった光学素子の提供に貢献しています。

このように、ABCは、最先端の系外惑星研究を推進するために、観測装置と基礎技術開発を重視しており、また装置開発・観測・理論が歩調を合わせて、系外惑星分野を発展させることが重要だと考えています。

## 参考文献

- [1] Kotani, T., et al., 2018, Proc. SPIE, 10702, id. 1070211
- [2] Harakawa, H., et al., 2022, PASJ, 74, 904
- [3] Kuzuhara, M., et al., 2024, ApJL, 967, L21
- [4] Nugroho, S. K., et al., 2021, ApJL, 910, L9
- [5] Ishikawa, H. K., et al., 2020, PASJ, 72, 102
- [6] Aoki, W., et al., 2025, PASJ, Advance Access
- [7] Tanaka, M., et al., 2023, ApJ, 953, 17
- [8] Ishizuka, M., et al., 2018, PASP, 130, 065003
- [9] Serizawa, T., et al., 2025, JATIS, 10, 025006
- [10] Kawashima, Y., et al., 2025, accepted for publication in ApJ, arXiv:2410.11561
- [11] Kotani, T., et al., 2020, Proc. SPIE, 11448, 1144878
- [12] Kasagi, Y., et al., 2025, submitted
- [13] Jovanovic, N., et al., 2015, PASP, 127, 890
- [14] Groff, T. D., et al., 2016, Proc. SPIE, 9908, 99080O
- [15] Norris, B., et al., 2015, MNRAS, 447, 2894
- [16] Walter, A. B., et al., 2020, PASP, 132, 125005
- [17] Takahashi, A., et al., 2024, Proc. SPIE, 13096, 1309669
- [18] Mawet, D., et al., 2024, Proc. SPIE, 13096, 130960W
- [19] Fitzgerald, M. P., et al., 2022, Proc. SPIE, 12184, 1218426
- [20] Kotani, T., et al., 2024, Proc. SPIE, 13100, 131005T

## Instrumentation at the Astrobiology Center

Takayuki KOTANI<sup>1,2,3</sup>

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

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

<sup>3</sup>*Astronomical Science Program, The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: At the Astrobiology Center (ABC), a variety of instruments are being developed and operated for the exploration of exoplanets. This article introduces these instruments. Currently operational systems include the InfraRed Doppler (IRD), a high-resolution near-infrared spectrograph used with the Subaru Telescope for planet detection via the radial velocity method, and SCExAO, an extreme adaptive optics system for direct imaging and spectroscopy of exoplanets. Instruments under development include SAND, a high-resolution near-infrared spectrograph designed for radial velocity surveys in the Southern Hemisphere, and MODHIS and HISPEC, diffraction-limited near-infrared spectrographs for the future Thirty Meter Telescope (TMT). In addition to developing instruments, ABC is also actively engaged in the development of key enabling technologies essential to achieving state-of-the-art science, such as laser frequency combs, high-efficiency echelle gratings, fiber switchers, etc.

# 近赤外線分光観測とアストロバイオロジー

平野 照幸<sup>1,2,3</sup>

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

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

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

e-mail: [hd17156b@gmail.com](mailto:hd17156b@gmail.com)



太陽系外惑星（系外惑星）と高分散分光観測の関わりは歴史的に深く、視線速度法による惑星探査に加えて、高分散分光観測はトランジット惑星候補の発見確認や惑星軌道・大気等の特徴づけにおいても重要な役割を果たしてきた。2010年代中盤以降は、近赤外線での高分散分光を用いた系外惑星観測が注目されており、低温度星（主にM型矮星）や年齢の若い恒星を対象とした惑星探査や惑星軌道・大気の観測において近赤外線分光観測は強力なツールとなっている。本稿では、アストロバイオロジーセンターで展開している系外惑星の観測研究の中でも、主に近赤外線高分散分光観測を通じて得られた成果を概説する。

## 1. はじめに

太陽系外惑星（以下、系外惑星）探査の中でも、「宇宙における生命」の発見につながる地球に類似した小型惑星を探索することはアストロバイオロジーセンターの設立当初から中心的な課題となっている。また、我々の住む太陽系・地球を含め「惑星（系）がどのように誕生して進化してきたのか」を理解することも宇宙における生命の起源・普遍性を論じるうえで不可欠な要素である。アストロバイオロジーセンターでは、これらの中心課題に正面から取り組むべく、系外惑星を対象とした天文観測・装置開発・理論研究を多角的に実施しているが、本稿ではこのうち分光観測、特に近赤外線高分散分光を用いた小型惑星探査および惑星形成進化モデルの検証を目的とした系外惑

星系の特徴づけについて紹介する。

## 2. 近赤外線分光観測とアストロバイオロジー

小型惑星の中でも、水が液体として存在しうる軌道領域である「ハビタブルゾーン」内にある惑星は系外惑星探査でも最も重要なターゲットとなっているが、太陽のようなG型矮星のまわりのハビタブルゾーン内にはこれまで地球型惑星はほとんど発見されていない<sup>\*1</sup>（図1）。これは、系外惑星の主要な探査法である視線速度法・トランジット法において、ハビタブルゾーン内の小型惑星に対する観測シグナルや検出確率が非常に小さく、長期間の観測を必要とすることも相まって極めて発見が困難となっているためである（例えば、周期1年の惑星の発見には少なくとも2,3年の観測を必要とする）。

<sup>\*1</sup> Kepler-452bのように、トランジットで発見されたハビタブルゾーン付近に存在する長周期の小型惑星はごく少数報告されているが、いずれも地球よりも半径等が大きく、中心星も地球から離れていて暗い天体であるため将来の追観測が困難である。

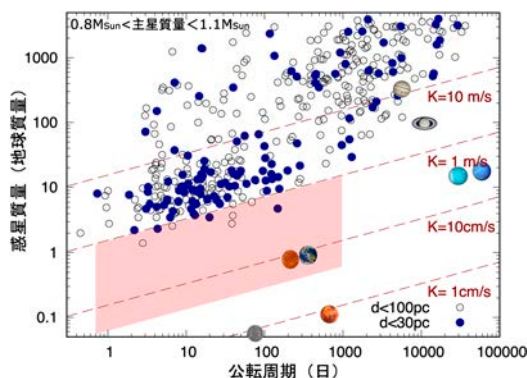


図1 100パーセク以内の太陽型星まわりの系外・系内惑星の周期-質量分布. 右上に向かう各破線は1太陽質量 ( $M_{\text{Sun}}$ ) の恒星を公転する惑星の予想される視線速度振幅. 長周期惑星でなくとも, 視線速度振幅が  $1 \text{ m s}^{-1}$  を下回る領域 (影付きの範囲) ではほとんど惑星が発見されていない. 系外惑星データはNASA Exoplanet Archive[1] による.

そこで2010年頃から, ハビタブルゾーン内の小型惑星探査の対象として, M型矮星などの低温度・低質量の恒星 (以下, 低温度星) が注目を集めている. 低温度星は半径も小さい (= 地球からの放射エネルギーが弱い) ため, G型矮星に比べてハビタブルゾーンが中心星に近く, さらに小さい恒星質量にも対応して視線速度法による観測シグナル (視線速度振幅) も大きくなるため, ハビタブルゾーン内の小型惑星の発見において非常に有利に作用する. 例えば, G型矮星を公転周期1年でまわる地球質量惑星による中心星の視線速度振幅がわずかに  $8.9 \text{ cm s}^{-1}$  であるのに対し, 質量が0.15太陽質量の晩期M型矮星まわりのハビタブルゾーン内の同質量惑星はおおよそ  $1 \text{ m s}^{-1}$  となり, 現在の視線速度観測における世界最高精度 ( $20\text{--}30 \text{ cm s}^{-1}$ ) であれば十分に検出可能な大きさとなる.

日本でも, 低温度星まわりの小型惑星探査を主な目的としてすばる望遠鏡に新たな近赤外線分光器 (InfraRed Doppler 装置: IRD [2, 3]) が計画され, 2015年以降はアストロバイオロジーセン

ターが中心となってその開発・運用を行っている. IRDは低温度星が相対的に明るくなる近赤外線を幅広くカバー (波長  $0.97\text{--}1.75 \mu\text{m}$ ) する高分散分光器 (波長分解能  $\sim 70,000$ ) で, 温度安定性のため分光器全体を密閉容器内に封入してある. その他, 補償光学系を用いたファイバー入射や精密波長較正のためのレーザー周波数コムを用いるなど, 視線速度観測のための多くの先進的な要素を組み込んだ装置となっている. 装置としてのIRDの詳細は本特集の別記事にて解説されるため, 天文月報本号別記事「アストロバイオロジーセンターでの装置開発」(小谷隆行) を参照されたい.

アストロバイオロジーセンターでは設立から現在に至るまで, すばる望遠鏡/IRDを主力の観測装置の一つとして小型惑星に焦点を当てた系外惑星の観測研究を実施してきている. IRDによる惑星探査 (発見) の主なターゲットは, 上述したようにM型矮星や褐色惑星などの近赤外線で見える低温度星であるが, このほかにも, 黒点などの恒星活動領域が近赤外線 (可視光線に比べて) コントラストが改善するなどの性質を利用して, 活動性の高い若い (年齢10億年未満の) 恒星なども重要なターゲットとされている. またIRDは, 宇宙から実施が困難な高分散分光観測という強みを活かして, 系外惑星の軌道・大気などの特徴づけにおいても重要な成果を収めている. 以下では, アストロバイオロジーセンターが過去に実施した研究のうち, 主にIRDなどによる近赤外線分光観測を通じて得られた成果を概観する.

### 3. 近赤外線分光観測による系外惑星研究の成果

#### 3.1 低温度星まわりの小型惑星探査

アストロバイオロジーセンターが主導する低温度星まわりの惑星探査は, 主に (A) 視線速度法による「ブラインド」のサーベイ観測と, (B) 大規模なトランジットサーベイを実施する衛星ミッションとの連携によるフォローアップ観測に

大別される。ここでいうブラインドとは、惑星探査においてトランジットなどの惑星の兆候を示す事前情報が全くない状態を指し、そのサーベイで小型惑星の発見確認を行うには通常非常に多くの観測時間が必要となる。一方、トランジットサーベイとの連携観測では、トランジット惑星候補の検出が衛星による測光観測によって得られている状態で候補天体の観測を行うことになるため、効率的に新規系外惑星の発見確認を行うことが可能となる。その反面、惑星候補の提供が（主に国外の）別のミッションに依存しているため、それらミッションの進捗や同様のフォローアップ観測を実施するチームとの国際競争に晒されるというデメリットも存在する。

上記(A)のブラインドサーベイ観測については、アストロバイオロジーセンターが中心となって国内の複数の機関と共同で低温度星、特に晩期M型矮星（質量0.1–0.3太陽質量程度）を対象としたIRDを用いた「すばる戦略枠観測」(IRD-SSP)を2019年より実施している。IRD-SSPは、約5年間にわたる計175夜を用いたサーベイ観測を行い、晩期M型矮星のハビタブルゾーン内をまわる地球型惑星を複数発見することを目標としている<sup>\*2</sup>。2024年度までの観測で予定されていたサーベイはほぼ完了し、望遠鏡トラブル等によって失われた時間を補償するための観測のみが残っている状況である。これまでのサーベイでIRDが観測したM型矮星は約100天体に上るが、それらの天体の中には、(近接)実視連星あるいは分光連星であることが判明した天体も含まれるため、このうちおよそ80天体に対して視線速度測定が実施されている。さらにその中でも、恒星表面活動や恒星自転による影響が大きい天体は精密視線

速度測定には不利であるため除かれており、現在最終的に50–60天体が長期間の視線速度モニター観測の対象となっている。我々は、後述するようにIRD-SSP観測を通じて、すでにハビタブルゾーン近傍のスーパーアース(Ross 508b)を含む複数の小型惑星を発見しており、サーベイ期間の正式終了後に今後順次新たな惑星の発見報告を行う計画である。

一方、上記(B)のトランジットサーベイ探査との連携による低温度星まわりの惑星探査では、2019年ごろまでは主にケプラー望遠鏡(第二次ミッションである「K2」[4]を含む)で見つかった惑星候補のフォローアップ観測が実施され、2019年以降はトランジット系外惑星探査衛星「TESS」[5]によって同定されたトランジット惑星候補が主なターゲットとなっている。アストロバイオロジーセンターで実施されているトランジット惑星探査、特にMuSCATシリーズを用いた地上測光観測によるフォローアップの概要については本特集号の別記事(9月号)に掲載されることになっている。本稿では、IRDによる集中的な観測がトランジット惑星候補の発見確認に重要な役割を果たしたいくつかの惑星系についてその成果を紹介したい。

## 3.2 アストロバイオロジーセンターが発見を主導した小型系外惑星たち

### 3.2.1 Ross 508b

IRD-SSPによるブラインドサーベイ観測で発見されたM型矮星まわりの小型惑星の代表例がRoss 508bである。Ross 508は地球から約11.2パーセクにある近傍のM4.5型星で、2019年2月のSSPサーベイ開始当初から視線速度が測定されていたターゲットであった。2021年秋までの

<sup>\*2</sup> 早期M型矮星（質量0.3–0.6太陽質量程度）を含めず、晩期M型矮星にのみ特化しているのは、早期M型矮星の場合可視光域（波長400–800 nm）での視線速度精度の方が近赤外線領域での測定精度よりも高く、(恒星活動による影響を軽減できる以外の)近赤外線観測のアドバンテージがないためである。また、晩期M型矮星は近傍の恒星であっても非常に暗く、3–4 m級望遠鏡では十分な観測精度を確保するのが困難である。

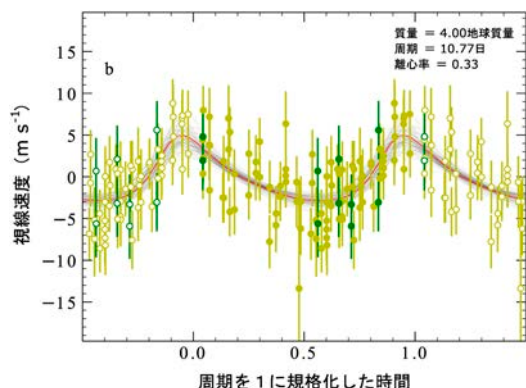


図2 Ross 508の視線速度変化(惑星bの周期10.77日で折たたんだもの)。データ点の色の違いは視線速度を測定した時期の違いを表す。[6]をもとに改変。

IRD観測で約100フレーム(スペクトル)がRoss 508に対して取得され、視線速度データの周期解析の結果、公転周期10.77日のところに小型惑星候補が検出された(図2)。こうしたブラインドの視線速度観測のみで惑星候補が検出された場合、一般にその存在の確認は難しく、黒点等の恒星活動による偽検出ではないことを丁寧に検証する必要がある。我々は、恒星活動と強い相関を持ついくつかのスペクトル指標やMEarthプロジェクトなどによる測光観測データを詳細に調査し、10.77日の周期性が恒星活動のいずれの周期性とも一致しないことを示し、最終的に惑星由来であることを確認した[6]。

発見された惑星Ross 508bは、視線速度変化からその(射影)質量がおおよそ4地球質量と見積もられ、地球よりも少し大きいいわゆる「スーパーアース」に分類されている。また、軌道はわずかに楕円軌道(ただし軌道離心率は0.4程度以下)の可能性があることがわかっている。比較的長周期であることと中心星の光度が太陽光度の0.0036倍程度しかないことなどから、Ross 508bの軌道はハビタブルゾーンの内側境界付近に存在しており、惑星が中心星から受け取る平均フラックスは地球のおおよそ1.4倍と見積もられている(楕円軌

道の場合は一部がハビタブルゾーン内に入っている可能性がある)。質量が4地球質量程度の惑星は地球と同様に主に岩石でできた惑星である可能性が高く[7]、Ross 508bは将来の「バイオシグネチャー探査」において有望なターゲットとなる。なお、近赤外線での視線速度サーベイ観測によって惑星が新規に発見されたのはRoss 508bが初のことであり、本発見は世界的にも貴重な成果となっている。

### 3.2.2 TOI-1634b, TOI-1685b

アストロバイオロジーセンターはIRD-SSPによる低温度星を対象としたブラインドの視線速度サーベイと並行して、低温度星まわりのトランジット惑星候補のフォローアップ観測も実施しており、これまでに発見に関わった低温度星(M型矮星)まわりのトランジット惑星は数十を数える。このうち、TOI-1634bとTOI-1685bと呼ばれる惑星は、いずれも有効温度3400–3500 KのM型矮星をまわる公転周期が1日未満の「超短周期惑星」であり(公転周期と惑星半径は、それぞれ0.989日、0.669日と1.75地球半径、1.46地球半径)、TESSミッションによるトランジット探査とIRDなどによる地上装置を用いたフォローアップ観測を通じて発見確認された[8]。

超短周期惑星はその中心星から受け取るフラックスの大きさから「ハビタブル環境」とは無縁の存在と言えるが、なぜそのような短周期の惑星が存在するのかその起源については統一的な見解は得られていない。超短周期惑星は、そのほとんどが半径が地球の2倍未満で大気をほぼ持たない岩石惑星であることが知られており、TOI-1634bおよびTOI-1685bについても我々はIRDを用いた視線速度測定による質量測定から、内部組成が地球と同様に主に岩石と鉄でできた惑星である可能性が高いこと示した(図3)。超短周期惑星の起源は小型惑星の形成・長期進化と密接に関連しており、特にハビタブルゾーンが中心星近くに存在する低温度星では重要なテーマである。

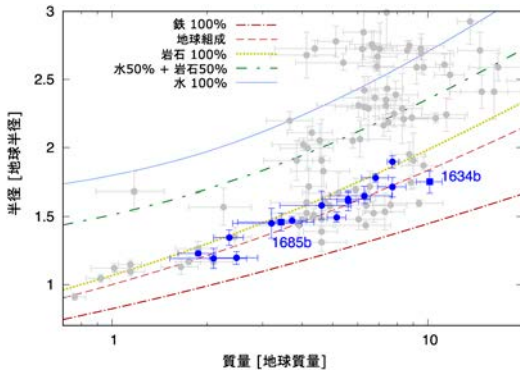


図3 系外惑星の半径と質量の分布. 半径と質量の関係から系外惑星の内部組成を制限することが可能で、ここでは図中左上にある各組成を仮定した場合の理論曲線が描かれている. 超短周期惑星とそれ以外の既知の惑星をそれぞれ青と灰色の点でプロットしてある. [8] をもとに改変.

### 3.2.3 K2-415b, GJ 12b

低温度星まわりの系外惑星探査では、IRD-SSPで観測されていた天体が独立なトランジット惑星探査によって（トランジット）惑星候補を持つと報告され、SSP観測による過去の視線速度データがすぐさま惑星の発見確認に役立ったというケースもある。例えば、晩期M型矮星K2-415はK2ミッションで観測され、その測光データの解析からトランジット惑星候補が検出されていたが、2019年から始まったIRD-SSP観測でもLSPMJ0908+1151という天体名で視線速度が測定されていた。我々は、K2により惑星候補が見つかった天体とIRD-SSPの観測対象となっている天体リストの相互参照を行い、IRDによる視線速度データを確認することでK2で検出されていた公転周期4.02日のトランジット惑星候補の偽検出シナリオ（食連星などの可能性）を排除した [9]。確認されたトランジット惑星K2-415bは半径がほぼ地球と同じ大きさ（1.015地球半径）の惑星

で、K2-415は地球サイズの惑星を持つ最も低温・低半径の恒星の一つであることから（＝トランジットが相対的に深くなる）、地球型惑星を対象とした将来の大気観測において優先順位の非常に高いターゲットとなっている。

2024年に発見されたGJ 12bは、TESSミッションでトランジットが報告された金星サイズ（0.96地球半径）の惑星で、こちらも独立にGJ 12の惑星探査を実施していたIRD-SSPの視線速度データなどを参照することで発見確認を行った<sup>\*3</sup>。GJ 12bは周期12.76日でM型矮星GJ 12を公転し、中心星の光度から見積もられるハビタブルゾーンの内側境界付近に軌道が位置することがわかっている（惑星のアルベドが0の場合のGJ 12bの平衡温度は約315 K） [10]。特に、GJ 12は地球から約12パーセクという近傍に位置しており、地球以下の小型惑星を持つ天体としては将来の追加観測の極めて有望なターゲットである。予想される惑星質量および視線速度振幅が小さいことから、IRDによる視線速度測定では現時点で惑星質量の上限のみ（ $3\sigma$ 上限で3.9地球質量）が得られている状況であるが、我々は最近もIRDによる観測を継続しており、今後GJ 12bの精密な軌道や物理特性（平均密度など）を明らかにする計画である。

### 3.3 系外惑星の軌道傾斜角測定

上述したように、アストロバイオロジーセンターでは将来のバイオシグネチャー探査を念頭に置き、生命を宿する惑星（系）の発見に向けた探査を推し進めているが、同時に惑星系の起源と進化を研究することで生命を宿する惑星系の必要条件などの解明にも努めている。系外惑星の観測研究で惑星発見と並んで重要なのが、見つかった惑星系に対する特徴づけ（characterization）であり、特徴づけによって惑星の形成進化史や惑

<sup>\*3</sup> TESSによる測光観測では一部観測されてない時期にトランジットを起こしていたため公転周期が曖昧であった。公転周期の決定にはMuSCATシリーズによる地上トランジット観測が重要な役割を果たした。

星大気の獲得（喪失）機構、惑星系内での物質進化等の理解が進むと考えられている。

例えば、惑星の軌道傾斜角（ここでは惑星の公転軸と中心星自転軸のなす角度）は系外惑星系の角運動量進化、長期安定性を議論するうえで重要な観測量である。主にトランジット惑星系に対する「ロシター効果」\*4の観測によって系外惑星の軌道傾斜角は制限されており、巨大惑星に対する過去の観測で系外惑星系では中心星の自転軸と惑星の公転軸が揃っていないものが一定数（3分の1程度）含まれていることが明らかになっている [13]。これは、惑星が太陽系のように原始惑星系円盤内で誕生し、大きく軌道が不安定化することなく進化してきたという従来の仮説に疑問を投げかけるものとなっており、系外惑星系の形成進化史についてはいまだに議論が続いている。

我々は、IRDなどを用いた既知の系外惑星系の特徴づけを通じて惑星の形成過程、力学進化等の解明を進めており、特に近赤外線観測を活かした低温度星や年齢の若い恒星をまわる惑星の軌道傾斜角測定でいくつかの鍵となる成果を収めた。2018年にIRDで観測したTRAPPIST-1系は、中心星が0.1太陽質量を下回る極めて低質量・低温な恒星で、そのまわりを7つの地球型系外惑星がトランジットしていることが知られている。その中でも惑星d（公転周期4.05日）、e（周期6.10日）、f（周期9.21日）は古典的なハビタブルゾーンの内部にある可能性がある。我々は、TRAPPIST-1系の3つの惑星（トランジットを起こした順に惑星e, f, b）が一晩にトランジットするという稀有な機会が偶然にもIRDが共同利用観測を開始した直後の2018年8月31日（UT）にあったため、その機会を活用してIRDによるトランジット分光観測を実施した（図4）。ロシター効果に加え

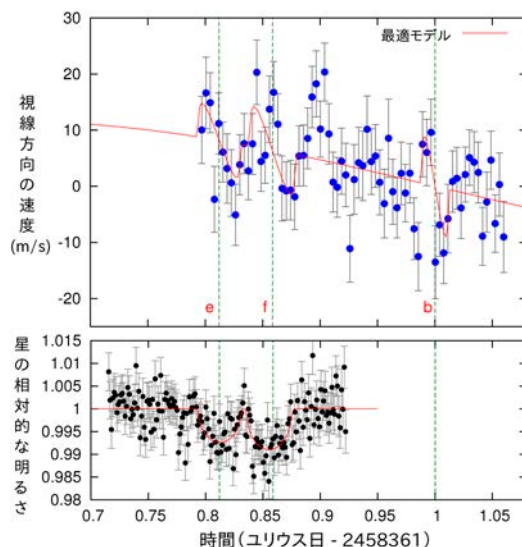


図4 （上）IRDで観測したTRAPPIST-1の視線速度変化（2018年8月31日）。（下）マクドナルド天文台1m望遠鏡による同時測光観測データ。各パネルでは、最適モデルを実線で描いてある。縦の破線は、各惑星のトランジット中心時刻を表す（トランジットした順に惑星e, f, b）（クレジット：アストロバイオロジーセンター）。

て「ドップラートモグラフィー」と呼ばれる吸収線プロファイルの変化を可視化する手法を用いて3つの惑星の軌道傾斜角を測定し、TRAPPIST-1の自転軸が惑星公転軸に対してほとんど傾いていないという結果を得た（惑星が同一軌道面を公転していると仮定した場合の軌道傾斜角（天球面に射影）は $\lambda = 19^{+13}_{-15}$ ） [14]。この結果は、ハビタブル惑星候補を持つTRAPPIST-1系が太陽系と同様に、原始惑星系円盤内で誕生後に目立った軌道の攪乱を経験することなく現在まで進化してきたことを示唆している。これは太陽系基準では当然に思えるが、傾いた軌道が多数観測されている系外惑星系においてはハビタブル惑星候補に関する貴重な観測事実と言える。

\*4 惑星のトランジット中に中心星の視線速度を測定すると、恒星自転と惑星による恒星面の一部掩蔽が起こる影響でスペクトル線が歪み、特徴的な視線速度変化として観測される現象。ロシター効果の観測から天球面上での惑星の軌道傾斜角（ $\lambda$ ）を測定することできる [11, 12]。

TRAPPIST-1のほかにも、IRDはいくつかの低温星まわりの系外惑星に対して軌道傾斜角の測定に成功している。一般に褐色矮星を除く低温の恒星は自転速度が小さく（自転周期が長いものが多いのに加えて恒星半径が小さいため）、ロシター効果の観測等による軌道傾斜角の測定が困難であるが、誕生直後の若い恒星に関しては自転周期が短く、トランジット分光観測による測定が可能になる。年齢が若い系外惑星は軌道傾斜角測定による惑星系の軌道進化の研究において特に重要なターゲットとされ、中心星の潮汐力による角運動量進化を経験する前の原始的な軌道の特徴を探れるという特筆すべき利点がある。我々は2020年以降、AU Mic b, K2-25b, K2-33bなどの若い系外惑星（年齢約1000万年–6億年、半径は地球の3–5倍程度の海王星型惑星）をIRDで観測し、惑星軌道傾斜角の制限によっていずれの惑星系でも惑星公転軸と中心星自転軸がほぼ揃っている可能性が高いことを突き止めた。いずれも惑星形成時の角運動量の初期条件を議論するうえで重要な結果だと言えるが、近年はほかの若い惑星の観測からも一般に年齢1億年未満の惑星系では惑星軌道は形成時の角運動量を反映して中心星自転軸と直交しているものが支配的であることが判明している<sup>\*5</sup>。

### 3.4 惑星大気の観測

近赤外線を含む系外惑星系の分光観測では、軌道傾斜等の惑星の物理的特性に加えて、大気観測を通じて惑星の化学特性についても調査が可能である。系外惑星の大気観測は惑星の形成環境や大気進化の過程を明らかにするうえ、将来のバイオシグネチャー探索においても中心的な役割を果たすと期待される。現時点で惑星大気が主に検出・調査されて

いるターゲットは木星型・海王星型の巨大惑星がほとんどであり、アストロバイオロジーセンターが進める系外惑星大気研究においてもそうしたガス惑星を対象とした観測がこれまで実施されてきた。

地上大型望遠鏡を用いた高分散分光による系外惑星大気の観測は、(1) 個別のスペクトル線の解析によって系外惑星の上層大気（水素、ヘリウム、アルカリ元素など）を探索する手法と、(2) 相互相関法によって（個別には同定が難しい）多数のスペクトル線を同時に解析し、大気モデルとの比較を行う手法の二つに大別される。(1) は主にトランジット惑星系に対する「透過分光」を通じて実施され、(2) は透過分光に加えて惑星からの微弱な熱放射を捉える「放射分光」もしばしば用いられる。これらの手法は、ターゲットや解き明かしたい大気の特性にに応じて使い分け（あるいは組み合わせ）られる。

近赤外線領域にある中性ヘリウムの三重線（波長1083 nm）は、水素に次いで多いとされるヘリウムをガス惑星の大気中で調べる上で格好のプロブとなっており、トランジット惑星系に対するヘリウム線の透過分光観測によって大気散逸を含む外層大気の広がりを定量化することが可能である。特に、1083 nmのヘリウム三重線を生成する励起状態の形成には恒星からのX線・紫外線（XUV）による基底状態からの遷移（一度イオン化したものが再結合する場合も含む）が寄与するため、中心星放射による長期間の惑星大気加熱・散逸を議論するうえで本観測は非常に有用とされている [17]。我々は、短周期系外惑星に見られるスーパーアースの統計的欠乏（半径ギャップ）<sup>\*6</sup> と中心星放射による惑星大気散逸機構の関係を調

<sup>\*5</sup> ただし、ごく最近年齢300万年程度の遷移円盤を持つ IRAS 04125+2902 という T-タウリ型星のまわりで誕生直後のトランジット惑星が発見され、惑星の公転面と円盤面が有意にずれていることが報告された [15]。惑星の誕生後に軌道がそのような短時間でどのようにしてずれたのかははっきり分かっていない。

<sup>\*6</sup> 半径が1.5地球半径から2.0地球半径の範囲の惑星の存在頻度がその前後のサイズの惑星（1.5地球半径以下または2.0地球半径以上）に比べて統計的に有意に少ない特徴は半径ギャップと呼ばれる [18]。現在の標準シナリオでは、もともと薄い大気を持っていた惑星が中心星からの放射等によってほとんどの大気を喪失することで半径ギャップが形成されたと考えられている。

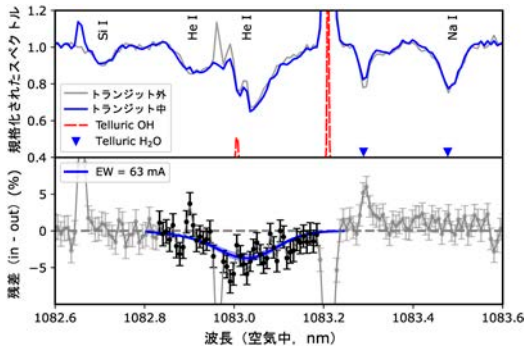


図5 K2-33bの透過分光観測。(上)トランジット中とトランジット外の複数のフレームをそれぞれ平均して比較したもの。(下)トランジット内外の平均スペクトルの残差。ヘリウム線(He I)で数%の超過吸収が確認できる。[16]をもとに改変。

査するため、IRDを用いた透過分光観測をいくつかのトランジット惑星系で実施してきた。これまでに十数個の系外惑星に対してヘリウム線の透過分光観測が行われたが、そのほとんどの惑星ではヘリウム大気による超過吸収は検出されず大気散逸等の兆候は見られなかった。ただし、年齢が特に若い系外惑星(K2-33b, HIP 67522b)では図5に例を示したように、ヘリウム三重線での強い超過吸収が観測され、大規模な大気散逸が発生している可能性が高いことを明らかにした[16]。この結果は、惑星大気の散逸・進化が主に中心星からのXUV照射によって駆動されるという「光蒸発」仮説と整合的であるが(恒星XUV放射は年齢が1億年未満の特に若い時期に強力であるため)、観測されている系外惑星の分布を説明するには系の年齢とともに大気散逸率がどのように変化するかなど、さらなる観測を通じた検証が必要である。

アストロバイオロジーセンターでは、(2)の相互相関法を用いた惑星大気観測も推進してい

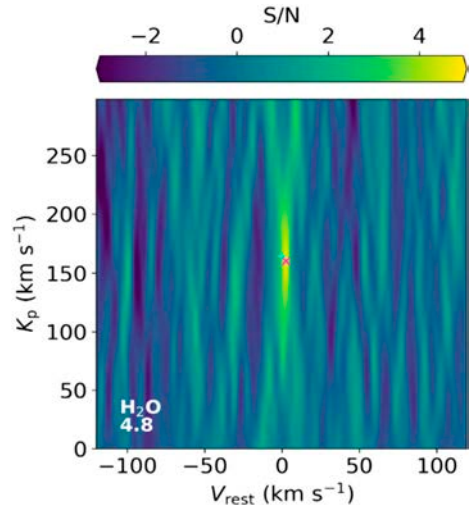


図6 検出されたHD 149026b大気中の水のシグナル(検出S/N比のマップ)。相互相関法を用いた大気観測については、惑星大気の個別のスペクトル線を分離できないため、モデルスペクトルと観測スペクトルの相互相関関数のピークを解析して検出を議論する。その際、この図のように惑星の視線速度の振幅( $K_p$ )と恒星の固有視線速度( $V_{\text{rest}}$ )を変数とする場合が多い(クレジット: アストロバイオロジーセンター)。

る。本大気観測は、ターゲットとなる惑星の放射光(または透過光)スペクトルの理論テンプレートを作成し、それと実際に高分散分光観測で取得される恒星(＋惑星)スペクトルとの相互相関関数を計算してその時系列データを解析することで、恒星スペクトル中に現れるわずかな惑星大気シグナルを探る手法である[19]。これまでの観測では、IRDを用いたウルトラホットジュピター<sup>\*7</sup> WASP-33bなどの放射分光観測が行われ、系外惑星大気として初めてヒドロキシラジカル(OH)分子を検出するなどの成果を上げている[20]。ヒドロキシラジカル分子は、極端に高温な環境で水分子が解離して生成されたと考えられており、WASP-33bのような極限環境を持つ惑

<sup>\*7</sup> 高温な中心星のごく近傍を公転する特に高温のホットジュピターを指し、中性原子・イオン状態の金属を大気中に持つなど通常の惑星とは異なる大気特性を持つ。

星は大気中の化学反応や循環等を調査するテストベッドとなっている。WASP-33bのほかにも、相互関連法を用いた大気観測としてHD 149026bと呼ばれるホットサタンが調査されており（観測にはスペイン・カラルアルト天文台3.5 m望遠鏡の近赤外線分光器CARMENESが使用された）、透過分光データからの解析からHD 149026bの大気中に水（水蒸気）が検出されている（図6）。高分散分光観測による系外惑星大気中の水の検出は、将来の30–40 m級望遠鏡を用いた地球型惑星を対象としたバイオシグネチャー探査において重要なマイルストーンにもなっている。なお、HD 149026bのデータ解析はアストロバイオロジーセンターの大学院生が主導した [21]。

#### 4. まとめ・今後の展望

本稿では、アストロバイオロジーセンターが実施してきた研究の中でも、2010年代半ばから急速に発展した近赤外線高分散分光を用いた系外惑星観測について概観した。近赤外線観測は低温度星や若い恒星に対して強みを持ち、これらの天体はハビタブル惑星候補の探査と惑星形成進化論の検証等で極めて重要な役割を果たす。小型惑星探査では、我々はすばる望遠鏡の近赤外線分光器IRDを用いた晩期M型矮星まわりのブラインドの視線速度サーベイを実施している。その成果として、すでにRoss 508bなどのユニークな小型惑星を発見しており、サーベイ終了後の今後数年以内にさらなる発見報告を予定している。また、IRDを用いた視線速度測定は、K2、TESSなどの衛星によるトランジット惑星探査との連携観測でも強力なツールとなっており、我々は2030年代、2040年代のハビタブル惑星候補の特徴づけを目的とした将来観測において最優先となりうる惑星（K2-415b、

GJ 12b等）の発見確認に貢献している。

惑星探査と並行して、アストロバイオロジーセンターでは見つかった惑星の特徴づけにも努めており、近赤外線高分散分光という文脈では、ロスター効果等を用いた軌道傾斜角測定や透過分光・放射分光による系外惑星大気の観測でも、惑星系の形成・進化、大気モデル等の検証で鍵となる成果を上げた。本稿では紹介しきれなかったが、系外惑星以外にもIRDや関連装置であるREACHを用いた褐色矮星の大気観測でも新規性の高い結果 [22] を発表している。

アストロバイオロジーセンターでは今後も高分散分光による系外惑星探査は継続する。特に高精度視線速度観測は、「質量」という惑星の持つ特性の中でも最も基本的な物理量を提供するため、今後もその重要性が失われることはなく<sup>\*8</sup>、継続的な装置開発とデータ解析技術の開拓が不可欠となっている。アストロバイオロジーセンターでは、2040年代に稼働を予定しているHabitable Worlds Observatory (HWO) などによる将来のハビタブル惑星候補の特徴づけを実施するための準備として、その観測対象となる惑星の発見を目指して太陽型星まわりの地球型惑星探査を2030年代に実施する計画である。具体的には、高効率かつ超広帯域の可視光高分散分光器を開発し、太陽型星で未踏領域である視線速度振幅が「 $\text{cm s}^{-1}$  オーダー」の小型惑星（図1の影付きの領域）の探査を行う。こうした系外惑星探査における「低温度星から太陽型星への回帰」を通じて、我々の住む太陽系の惑星系としての位置づけの再確認も目指している。

<sup>\*8</sup> トランジット観測との連携や将来の直接撮像観測による地球型惑星探査においても、惑星質量の測定は最も重要なステップの一つである。特に、直接撮像観測では観測量である惑星の反射・放射フラックスのみからは精密な質量推定が困難であり、惑星質量の不定性は惑星大気の特徴づけにも不定性を生む。

## 謝 辞

この原稿の執筆は、天文月報編集委員であるアストロバイオロジーセンターの日下部展彦さんに提案していただきました。また、天文月報編集委員の鈴木大介さん、宮本祐介さんには本原稿を丁寧に読んでいただき有益なコメントをいただきました。この場を借りて感謝いたします。

## 参 考 文 献

- [1] <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/> (2025, 04.02)
- [2] Tamura, M., et al., 2012, Proc. SPIE, 8446, 84461T
- [3] Kotani, T., et al., 2018, Proc. SPIE, 10702, 1070211
- [4] Howell, S. B., et al., 2014, PASP, 126, 398
- [5] Ricker, G. R., et al., 2014, Proc. SPIE, 9143, 914320
- [6] Harakawa, H., et al., 2022, PASJ, 74, 904
- [7] Zeng, L., et al., 2019, PNAS, 116, 9723
- [8] Hirano, T., et al., 2021, AJ, 162, 161
- [9] Hirano, T., et al., 2023, AJ, 165, 131
- [10] Kuzuhara, M., et al., 2024, ApJ, 967, L21
- [11] Winn, J. N., et al., 2005, ApJ, 631, 1215
- [12] 平野照幸, 2012, 天文月報, 105, 131
- [13] Albrecht, S. H., et al., 2022, PASP, 134, 082001
- [14] Hirano, T., et al., 2020, ApJ, 890, L27
- [15] Barber, M. G., et al., 2024, Nature, 635, 574
- [16] Hirano, T., et al., 2024, MNRAS, 530, 3117
- [17] Oklopčić, A., & Hirata, C. M., 2018, ApJ, 855, L11
- [18] Fulton, B. J., et al., 2017, AJ, 154, 109
- [19] Brogi, M., et al., 2012, Nature, 486, 502
- [20] Nugroho, S. K., et al., 2021, ApJ, 910, L9
- [21] Rafi, S. A., et al., 2024, AJ, 168, 106
- [22] Kawashima, Y., et al., 2024, arXiv e-prints, arXiv: 2410.11561

## Near Infrared Spectroscopy and Astrobiology

Teruyuki HIRANO<sup>1,2</sup>

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

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

<sup>3</sup>*SOKENDAI, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: Exoplanets and high-dispersion spectroscopy have historically had a close relationship, and high-dispersion spectroscopy has played an important role not only in exoplanet searches using the radial velocity method, but also in confirmation of transiting-planet candidates and characterization of planetary orbits and atmospheres. Since the mid-2010s, exoplanet observations using high-dispersion spectroscopy in the near-infrared have been attracting attention, and it has been proved to be a powerful tool in planet searches and planet characterization for cool stars (mainly M dwarfs) and very young stars. In this article, we review the research activities at the Astrobiology Center and present results of exoplanet explorations obtained through near-infrared high-dispersion spectroscopy.

# 赤外線で光合成～南極藻類に見つかった アップヒル型励起エネルギー移動～

小杉 真貴子

〈自然科学研究機構 基礎生物学研究所 環境光生物学研究部門 〒444-8585 愛知県岡崎市明大寺町字西郷中 38〉  
e-mail: mkosugi@nibb.ac.jp



太陽系外惑星における生命探査において、光合成由来の酸素がバイオシグネチャーの候補のひとつとされています。光合成には通常可視光が利用されますが、見つかる惑星の多くは太陽より暗い低温度星の周りにあり、地球より可視光が少なく赤外線が多い環境です。そこで私たちは、赤外線が卓越する環境に生きる光合成生物に着目し、その光合成メカニズムを明らかにすることで低温度星周りの惑星における酸素発生型光合成の可能性を探っています。私たちは、緑藻のナンキョクカワノリが可視光より長波長の光をアップヒル型の励起エネルギー移動により可視光のエネルギーに変換することで、光合成に利用していることを発見しました。これまでに明らかになった光合成の特徴とメカニズムについて御紹介します。

## 1. はじめに

私は植物生理学を専門とする研究者です。南極や北極など厳しい環境に生育する光合成生物に興味があり、特に光合成の初期過程（光を吸収して化学エネルギーに変換する過程）に関する研究をしています。天文分野とは全く接点がありませんでしたが、アストロバイオロジーセンターが設立された当初、宇宙生命探査プロジェクト室の滝澤謙二さんに声をかけていただき三鷹で行われた研究会に参加して以降、自身の研究とアストロバイオロジーとの接点が次第に増えていき、2019年度から3年間は同センターの特任研究員として研究させていただきました。生物の細胞やタンパク質を扱う研究室と、天文分野の先駆的な装置開発や観測、理論研究が行われているアストロバイオロジーセンター、話のスケールが全く異なる2つの世界を行き来するのは刺激的でとても楽しく過ごしました。本稿では同センターに在籍した際に

研究していた、南極藻類に見つかった赤外線利用型の光合成メカニズムについて紹介します。

## 2. アストロバイオロジーと光合成

地球外生命を探索することはアストロバイオロジー分野における重要な課題のひとつですが、太陽系外の惑星へ実際に行くことは難しいので、地球から生命の痕跡（バイオシグネチャー）を観測するしかありません。「観測可能なバイオシグネチャーは何か」という議論がされる中で、地球と同様の生命進化が起きた場合に光合成によって大気中に放出されるであろう酸素が有力な候補のひとつとされてきました。

私たちは生物が存在する惑星をひとつしか知らないのです。惑星に生命が誕生する可能性や光合成生物が進化する可能性がどの程度のものなのか知る由がありません。地球と同じ環境の惑星であれば、同じように生命が誕生する可能性があると言えますが、宇宙に存在する惑星のうち圧倒的に数

が多く発見されやすいのは太陽より暗いM型星周りの惑星です。観測できる惑星数が多いほど生命が存在する確率が上がるため、M型星周りの惑星が重要な観測対象とされています。

M型星周りの惑星はハビタブルゾーンが太陽系より恒星に近づくために、潮汐ロックやフレアの影響が懸念されていますが、ここでは光合成メカニズムに最も影響を与えるであろう光条件に焦点を当てます。M型星は太陽より温度が低いために惑星に届く光の波長スペクトルが地球と大きく異なります。太陽光は波長400-700 nmの可視光の割合が多いですが、M型星は700 nmより長波長の赤外線の影響が大きくなります。地球において酸素発生型の光合成生物は、光合成を駆動するエネルギーとして可視光を利用しており、700 nmより長波長の赤外線はエネルギーが低く光合成効率が著しく低下します。一方で、赤外線が卓越する環境に生育する一部のシアノバクテリアや藻類では赤外線の一部である遠赤色光(700-800 nm)で光合成を行う種が報告されています。こうした生物の光合成メカニズムを調べることで、M型星周りの惑星で酸素発生型光合成生物が進化する可能性と光合成由来の酸素が検出される可能性を探ろうとしています。

### 3. 地球の生物進化と光合成

地球が誕生してまだ生命が存在していなかったころ、地球は水や二酸化炭素、窒素、鉱物、金属などを中心とした無機質な環境でした。生物の体は炭素、酸素、窒素などが複雑に結合した有機物でできていますが、有機物を作るためにはエネルギーを使って二酸化炭素を還元して(炭素と酸素の結合を切る)炭素源とする必要があります。初期生命は環境中に存在する化学エネルギーや光エネルギーを使って二酸化炭素を還元して有機物を作り、細胞の材料やエネルギーの貯蔵物質として利用しました。こうした化学合成、光合成を行う生物は、現在に至るまで生産者として地球上の生

態系を支えています。特に酸素発生型の光合成生物の誕生は、地球環境に大きな影響を与えました。光合成により発生した大量の酸素が、還元的だった地球環境を酸化し、大気中にも酸素が放出されました。そのため地球では呼吸を行う生物が繁栄し、酸素発生型光合成生物はシアノバクテリア、藻類、コケ類、シダ類、種子植物へと進化を遂げ現在に至ります。

### 4. 植物の光合成メカニズム

酸素発生型の光合成は、水から得た還元力で二酸化炭素を同化(還元)して糖を合成する反応ですが、安定な二酸化炭素を還元するには水から得られる還元力では足りません。そこで光エネルギーが利用されます。光エネルギーを利用する反応は葉緑体のチラコイド膜上に存在する光化学系Iと光化学系IIという2つのタンパク質を介して行われます。この2つのタンパク質は光を吸収するクロロフィルやカロテノイド色素を結合していて、吸収した光エネルギーを反応中心と呼ばれる特別なクロロフィルへ伝達し、電荷分離反応によって還元力の高い分子へ電子を渡します。まず光化学系IIの電荷分離反応では水が電子供与体となり、電子を電子伝達系へ供給します。この時、水の分解で生じた水素( $H^+$ )は電子伝達系で利用されますが、酸素は光合成には使われないため細胞外に放出されます。電子は複数の電子伝達物質を介して光化学系Iへ渡され、2回目の光エネルギーによる電荷分離反応で、 $NADP^+$ という物質を還元してNADPHを生成し、これが二酸化炭素を固定するための還元力として利用されます。

シアノバクテリアから植物にいたるすべての酸素発生型光合成生物で光化学系IIとIの相同性は高く、反応中心は680 nmと700 nmに相当する光エネルギーでそれぞれ励起されます。水から得た還元力で $NADP^+$ を還元するためには、1回の電荷分離では足りず2回の電荷分離反応が必要です。反応中心の励起波長が長波長になるほど得ら

れる酸化還元電位差は小さくなるので、2回の電荷分離反応で $\text{NADP}^+$ を還元することが難しくなります。

## 5. 赤外線で光合成

### 地球に見られる2つのタイプ

酸素発生型光合成生物のほとんどは可視光を利用し、700 nm より長波長の遠赤色光では酸素発生型光合成を行うことができませんが、一部のシアノバクテリアと藻類において遠赤色光で光合成を行う種が報告されています [1-4]。シアノバクテリアでは遠赤色光に吸収を持つクロロフィル *d* や *f* を産生する種が報告されており、クロロフィル *d* を持つことが最初に報告されたシアノバクテリアのアカリオクロリスでは光化学系IIとIの反応中心が713と740 nmで励起されることがわかっています。この場合、2回の電荷分離反応で得られる還元力が小さくなってしまわずですが、アカリオクロリスは遠赤色光のみで光合成し増殖することが可能です。図1に一般的な植物とアカリオクロリスの電子伝達系の反応を示しました。電子は酸化還元電位のマイナス側からプラス側へ移動します。アカリオクロリスは電荷分離反応の上向きの矢印が短くなり、FNRとの電位差が少なくなります。これまでに、アカリオクロリスより長波長光で励起される反応中心を持つ酸素発生

型光合成生物は見つかっていません。720-740 nm くらいが酸素発生型光合成における反応中心の励起波長の長波長限界なのかもしれません。

真核の藻類の中にも遠赤色光で光合成を行う種が報告されています。これまでに報告されているのは、緑藻、珪藻、アルベオラータ、黄緑藻、真眼点藻で計7種ほどです [5-10]。クロロフィルの一部が700-750 nmの遠赤色光に吸収を持ちますが、アカリオクロリスとは異なり光化学系IIとIの反応中心は一般的な植物と同じく680と700 nmの光エネルギーで励起されます。光捕集アンテナから反応中心までの色素間のエネルギー移動は、川の流れと同じように励起エネルギーレベルの高いクロロフィルから低いクロロフィルへと起こるのが普通です。これを「ダウンヒル型のエネルギー移動」と呼びます。励起エネルギーレベルの低い方から高い方への移動は「アップヒル型のエネルギー移動」と呼ばれ、周囲の熱エネルギーによりエネルギー差が補填される範囲で起こるとされています (図2)。通常、アップヒル型のエネルギー移動は非常に限られた範囲で起きる反応ですが、遠赤色光を積極的に利用する藻類は、吸収した遠赤色光のエネルギーをアップヒル型の励起エネルギー移動により積極的に光合成に利用しています。しかし、そのメカニズムの詳細は調べられていませんでした。このような藻類の

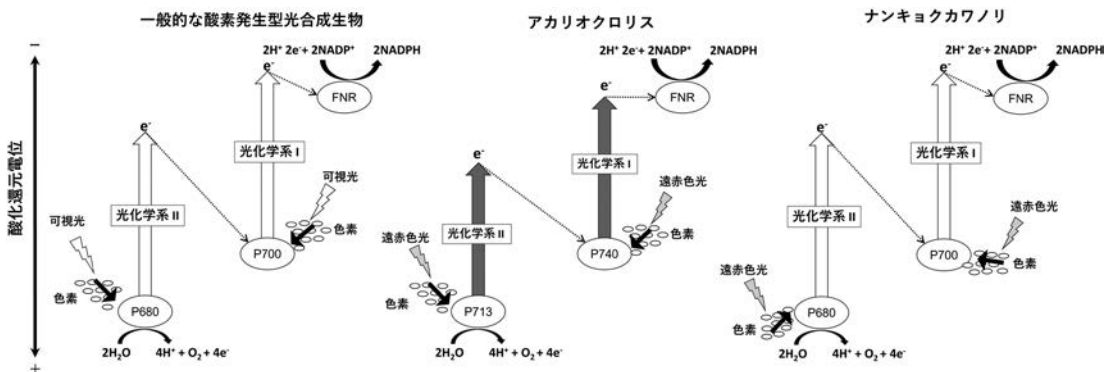


図1 光合成電子伝達系における電子の流れ。一般的な酸素発生型光合成と遠赤色光利用型のアカリオクロリスおよびナンキョクカワノリの電子伝達系における電子の流れを簡略に示した。

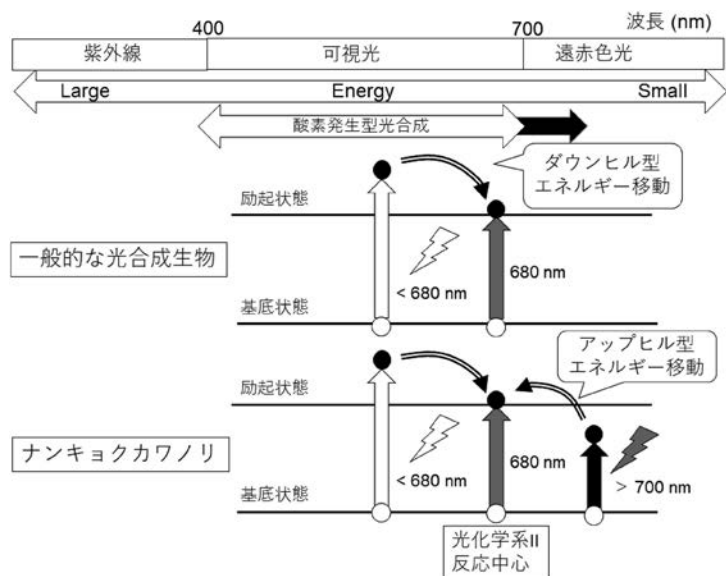


図2 光化学系IIにおける励起エネルギー移動。一般的な光合成におけるダウンヒル型のエネルギー移動とナンキョクカワノリに見つかったアップヒル型のエネルギー移動の違いを示した。

光合成メカニズムを明らかにすることは、可視光が少なく赤外線の割合が多いM型星周りの惑星に酸素発生型光合成生物が存在する可能性について考えるうえで重要な知見を与えてくれます。

## 南極緑藻における発見

私は、ナンキョクカワノリ（*Prasiola crispa*）という緑藻を使って、遠赤色光利用型の光合成の研究を行ってきました。研究を始めたきっかけは、学生の時にたまたま実験室にあったナンキョクカワノリの吸収スペクトルを測定した際に、普通の緑藻には見られない吸収帯を710 nm付近に見つけたことでした[10, 11]。その当時は、遠赤色光は光化学系Iを励起することは可能でも光化学系IIを励起することはエネルギー差が大きすぎるため不可能だと考えられていたので、光化学系Iを励起するための光捕集に使われているのだらうと思ひ、それ以上追及しませんでした。その後、博士研究員として国立極地研究所（極地研）に所属することになり、ナンキョクカワノリを詳しく研究するチャンスが訪れました。第54次日本南極地域観測隊の夏隊に同行し、生育地の調査と生物

試料の採集を行いました。ナンキョクカワノリは南極の陸上環境に生育しており、ワカメのように細胞が2次元に広がったシート状の形態をしています。生育環境ではシート状の藻体は何層にも重なって厚さ5 mm程度のコロニーを形成します。コロニーの表面の細胞は直射日光に晒され、紫外線のダメージを受けて白っぽくなっていました。重なっている藻体を剥がして一枚ずつ吸収スペクトルを測定してみると、遠赤色光の吸収帯は表層近くの藻体には見られず、下層ほど顕著になることがわかりました。コロニーに入射した光は各層の細胞に吸収されて徐々に減光することが予測できたので、コロニーの下層に到達する光の波長を解析してみることにしました。ソーラーシミュレーター（太陽光に近い波長スペクトルを再現した人工光源）を使ってコロニーを透過する光の波長スペクトルを測定すると、可視光は大きく減衰し700 nm以上の遠赤色光の割合が多くなっていることがわかりました[12]。この結果から、遠赤色光の吸収帯は可視光が使えなくなった環境において遠赤色光を光合成に利用するために

使われていると考えるようになりました。

### アップヒル型のエネルギー移動

遠赤色光で酸素発生型光合成を行うには、680 nmで励起されるはずの光化学系IIが遠赤色光で励起されなければいけません。私達は基礎生物学研究所にある大型スペクトログラフという分光装置を使ってナンキョクカワノリの酸素発生活性の波長依存性を測定しました。そして、藻体に吸収された遠赤色光が可視光と同様に光化学系IIを励起して光合成を駆動していることを確認しました。このことから、ナンキョクカワノリはアップヒル型のエネルギー移動により遠赤色光を可視光のエネルギーに変換して利用していることが示唆されました[11]。酸素発生活性は680 nmに加えて705 nm付近にもピークを持ち、740 nm付近まで観測されました。光化学系IIの励起エネルギー680 nmと705 nmの差を温度に換算すると500℃ほどになります。この大きなエネルギー差を乗り越える高効率のアップヒル型のエネルギー移動メカニズムは、光合成分野だけでなく量子力学的な観点からも興味深い現象です。

私は極地研から中央大学へ所属が移ったタイミングで、ナンキョクカワノリに見られる遠赤色光利用型光合成の詳細を明らかにするために、生化学的な実験を進めることにしました。光合成の光捕集とエネルギー移動の詳細を解析するためには、光捕集アンテナタンパク質を分析する必要があります。私は生化学的な手法を用いてナンキョクカワノリの葉緑体に存在する光合成タンパク質を大きさや電荷の違いによって分けていき、最終的に遠赤色光に吸収を持つ光捕集アンテナタンパク質を精製することに成功しました[12]。これは新規のタンパク質でしたので、*Prasiola crassa* far-red light harvesting chlorophyll binding protein complexの略でPc-frLHCと名づけました。

精製したタンパク質は707 nmにピークを持つ顕著な吸収帯を持ち、色素分析からクロロフィルaとb、2種類のカロテノイドを結合していること

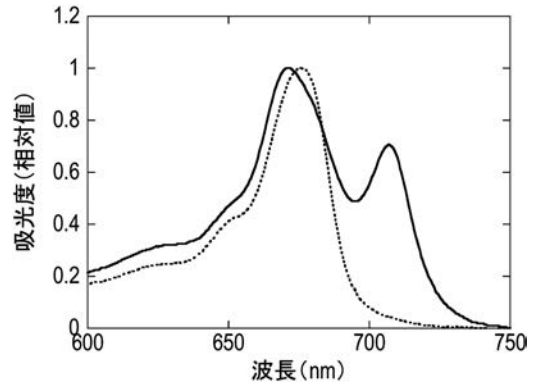


図3 光合成タンパク質の吸収スペクトル。ナンキョクカワノリから精製した遠赤色光捕集アンテナタンパク質 (Pc-frLHC) (実線) と光化学系IIの吸収スペクトル (破線)。

がわかりました (図3)。どの色素も単独では可視光にしか吸収を持ちませんが、クロロフィルaは2分子が接近することで2量体化すると、吸収が長波長にシフトすることが知られています。このため、タンパク質に結合したクロロフィルの一部が多量体化して遠赤色光に吸収を持っていると考えました。色素間のエネルギー移動の方向は、タンパク質に結合した色素の空間配置で調整されています。色素は、周りの色素やアミノ酸の影響でエネルギーレベルが変化し、色素間の距離と配向 (向き) によって、励起エネルギーの移動のしやすさが変化します。私達はナンキョクカワノリのPc-frLHCの立体構造を明らかにするために、クライオ電子顕微鏡を用いた解析を行いました。

### 構造解析

タンパク質はアミノ酸が一行に結合してできるペプチド鎖がアミノ酸同士の相互作用によって折りたたまれたり螺旋構造を取ったりすることで複雑な立体構造を形成しています。タンパク質の機能は構造と密接に関わっています。タンパク質の構造解析は放射光を用いたX線構造解析により発展してきました。X線構造解析はタンパク質の結晶にX線を照射して得られる回折パターンから原子の空間配置を計算する方法で、結晶化が難しい

タンパク質は解析することができませんでした。しかし2010年代後半から急速に普及したクライオ電子顕微鏡によるタンパク質構造解析により、タンパク質の結晶化が少なく少量のタンパク質でも解析ができるようになり、様々な試料に用いられるようになりました。ナンキョクカワノリのように希少で取り扱いにくい生物のタンパク質複合体の構造解析ができるようになるとは、研究を始めた当初は想像できませんでした。

Pc-frLHCの構造解析は、私がアストロバイオロジーセンターに特任研究員として在籍していた2019年に、高エネルギー加速器研究機構の千田俊哉センター長協力の下で同施設のクライオ電子顕微鏡を用いて行われました。サンプル確認のための試し撮りで、タンパク質が丸いドーナツのような形をしていることがすぐにわかりました。何度か分解能を高めるための条件検討を行い、三度目に訪問した際のサンプルで高い構造モデルを取得することができました(図4A)。ドーナツ構造は、11個の同じタンパク質がリング状に結合してできており、1つのタンパク質には11個のクロロフィルと2つのカロテノイド(ビオラキサンチンとロロキサンチン)が結合していました。11個のクロロフィルのうち3つが互いに接近して3

量体構造を取っており、励起子相互作用の計算からこの3量体クロロフィルが遠赤色光に吸収を持つ長波長クロロフィルであることが示唆されました(図4B)。遠赤色光は3量体クロロフィルに吸収された後、周囲のクロロフィルにアップヒル型のエネルギー移動で伝達されているはずです。アップヒル型のエネルギー移動がPc-frLHC内で起きているかどうかを調べるために、740 nmのレーザーパルス光でPc-frLHCの長波長クロロフィルを励起した際のエネルギー移動を解析したところ、680 nmに励起エネルギーを持つクロロフィルへ移動したエネルギーがクロロフィル蛍光として検出されました。つまり、Pc-frLHC内でアップヒル型のエネルギー移動が確かに起きていることが示されました。励起エネルギーはその後、Pc-frLHCから別のクロロフィル結合タンパク質へ渡され、最終的に光化学系IIへ移動していると思われます(図5)。

#### 赤外線利用型光合成の潜在性

ナンキョクカワノリのほかにPc-frLHCと同じようなタンパク質を持つ生物はいないのでしょうか? Pc-frLHCを形成する11個のタンパク質のアミノ酸配列を同定し、データベース上で似たタンパク質を持つ生物を検索すると、ナンキョクカワ

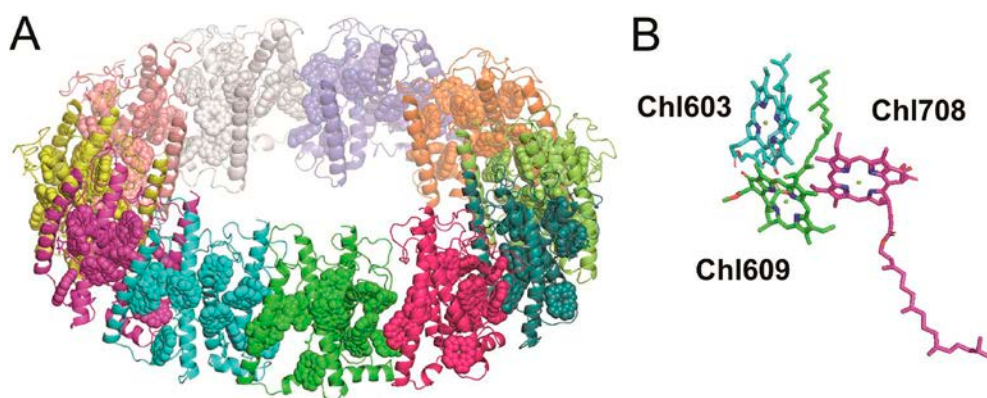


図4 Pc-frLHCの立体構造モデル。ナンキョクカワノリから精製したPc-frLHCの立体構造モデル(A)と励起子相互作用の計算から遠赤色光吸収色素として同定された3量体クロロフィル(B)。Pc-frLHCを形成する11個のタンパク質を異なる色の濃さで示した(オンライン版はカラー表示)。タンパク質に結合しているクロロフィルはポルフィリン環の構造のみを表示した。3量体クロロフィルは11個のタンパク質に1つずつ存在する。

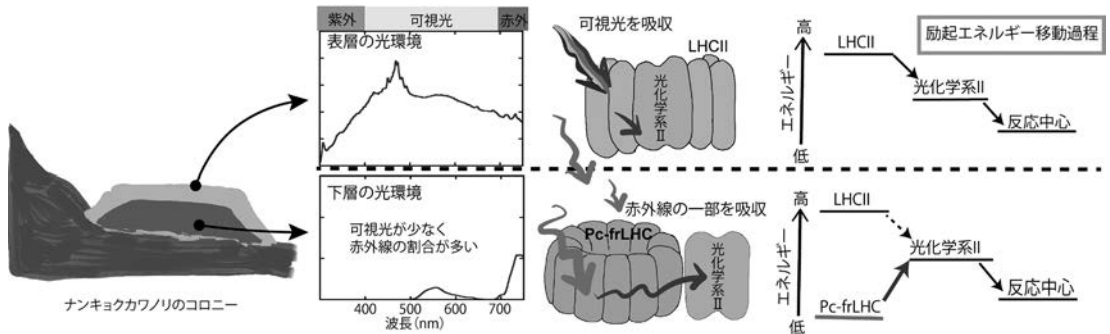


図5 南極の露岩にあるナンキョクカワノリコロニーの光環境と光合成メカニズム。Pc-frLHCはナンキョクカワノリ内部で発現し、アップヒル型のエネルギー移動メカニズムで遠赤色光を利用することでコロニー内部の光合成生産量を増加させている。

ノリが属する緑藻のトレブクシア藻綱というグループにPc-frLHCとよく似たタンパク質を持つ藻類が見つかりました[13]。これらの藻類の光合成特性はまだあまり調べられていませんが、トレブクシア藻綱には遠赤色光で光合成を行うことができる種が複数存在しているようです。

なぜトレブクシア藻綱で遠赤色光を利用する光合成メカニズムが獲得されたのでしょうか？それは、トレブクシア藻綱には陸上に生育する気生藻が多いことと関係があるかもしれません。藻類は水中で進化を遂げてきました。遠赤色光は可視光に比べて水に吸収されやすいため、水深10 mより深い環境ではほとんど利用できません。水中では遠赤色光を光合成に利用するメリットはあまりなかったはずですが、しかし、オゾン層が十分に形成され生物の陸上への進出が可能になると、一部の藻類は浅瀬や陸上環境に生育範囲を広げました。ちょうど現在の南極の陸上環境のように、水がときどき供給される砂礫や岩盤の上にコロニーやバイオロジカルソイルクラスト（藻類や微生物やコケなどが砂と共に堆積して固まったもの）が形成されていたと思われます。このように生物が重なり合った構造の内部環境は、陸域で初めて経験することになった有害な紫外線や強光、乾燥を避けることができるため生存に有利だったと思われます。しかし可視光が限られ赤外線が卓越する

環境であったために長波長を利用する光合成メカニズムが獲得されたのではないかと考えています(図5)。

## 6. おわりに

最初の問いに戻りますが、M型星周りの惑星における生物の進化は地球とどの程度異なるのでしょうか？仮に地球と同じように海が存在していた場合、生物が水中で進化することを想定すると、結局赤外線より可視光の方が水中での割合は大きくなるので、地球と同じような光合成生物の進化が起きるのかもしれません。ナンキョクカワノリのコロニーの下層に到達する光は、M型星が放つ光のスペクトルの形とよく似ています。M型星周りの惑星で酸素発生型光合成生物が進化するとしたら、ナンキョクカワノリと同じような光合成メカニズムを持つ可能性もあるかもしれません。

今後、ナンキョクカワノリのアップヒル型励起エネルギー移動を含む遠赤色光利用型光合成メカニズムの解明を目指して研究を続けていきます。また、シアノバクテリアと真核藻類に見られる2つの異なる遠赤色光利用型光合成の「効率」について様々な角度から検証し、M型星周りの光環境で光合成由来の酸素が検出される可能性を探っていききたいと思います。

## 謝 辞

ここで紹介したナンキョクカワノリに関する研究は、国立極地研究所の工藤栄博士、伊村智博士、中央大学の小池裕幸博士、兵庫県立大学の菓子野康浩博士、東北大学の柴田穰博士、秋田県立大学の原光二郎博士、東京農業大学の高市真一博士、高エネルギー加速器研究機構の千田俊哉博士、川崎政人博士、安達成彦博士（現筑波大学）、守屋俊夫博士、国立遺伝学研究所の豊田敦博士、島根大学の大谷修司博士、岡山大学の高橋裕一郎博士、小澤真一郎博士、基礎生物学研究所の亀井保博博士、西出浩世博士、皆川純博士、など多くの方との共同研究により進められました。研究の一部は、科研費 [JP24770030, JP17K19431, JP22K06380 (小杉), JP19H03187 (柴田), JP23H02504 (菓子野), JP21H05040, JP23H04960 (皆川), JP16H06279 (PAGS)], 国立研究開発法人日本医療研究開発機構 (AMED) のBINDS [JP20am0101071, 22ama121001 (千田)] および住友財団 [151376 (小杉)] からの助成と、国立極地研究所 [31-29 (菓子野), AAS6006 (小杉)], 自然科学研究機構基礎生物学研究所の共同研究支援 [15-604, 17-702, 18-506, 19-704 (小杉)], 自然科学研究機構生命創成探究センター特別共同研究 [22-S6, 23-S7, 24-S4 (小杉)] およびアストロバイオロジーセンタープロジェクト研究 [AB281025 (小杉)] の支援を得て行われました。この場を借りて深く感謝申し上げます。

## 参 考 文 献

- [1] Miyashita, H., et al., 2006, *Nature*, 383, 402
- [2] Chen, M., et al., 2012, *FEBS Lett.*, 586, 3249
- [3] Li, Y., et al., 2014, *Front. Plant Sci.*, 5, 67
- [4] Itoh, S., et al., 2015, *Plant Cell Physiol.*, 56, 2024
- [5] Fujita, Y. and Ohki, K. 2004, *Plant Cell Physiol.*, 45, 392
- [6] Kotabová, E., et al., 2014, *Biochim. Biophys. Acta Bioenerg.*, 1837, 734
- [7] Bina, D., et al., 2014, *Biochim. Biophys. Acta Bioenerg.*, 1837, 802
- [8] Bina, D., et al., 2019, *Biochim. Biophys. Acta Bioenerg.*, 1860, 111
- [9] Wolf, B.M., et al., 2018, *Photosynth. Res.*, 135, 177
- [10] 小杉真貴子, 他, 2020, *光合成研究*, 30, 19
- [11] Kosugi, M., et al., 2020, *Biochim. Biophys. Acta Bioenerg.*, 1861, 148139
- [12] Kosugi, M., et al., 2023, *Nat. Commun.*, 14, 730
- [13] Kosugi, M., 2024, *Front. Plant Sci.*, 15, 1409116

### Infrared-driven Photosynthesis by Uphill Excitation Energy Transfer in an Antarctic Alga

Makiko KOSUGI

*National Institute for Basic Biology, NINS, 38 Nishigonaka, Myodaiji, Okazaki, Aichi 444-8585, Japan*

**Abstract:** Oxygen derived from photosynthesis is one of the candidates for biosignatures. We focus on photosynthetic organisms that live in environments where infrared light is dominant, and by clarifying their photosynthetic mechanisms, we are exploring the possibility of oxygenic photosynthesis on planets around M-type stars. *Prasiola crista* uses far-red light for photosynthesis through uphill excitation energy transfer. We introduce the characteristics and mechanisms of photosynthesis that have been revealed so far.

# 高速電波バースト (Fast Radio Bursts) の 起源を明らかに —台湾 BURSTT の紹介



後藤



橋本



正岡

後 藤 友 嗣<sup>1</sup>・橋 本 哲 也<sup>2</sup>・正 岡 滉 翔<sup>3,4</sup>

〈<sup>1</sup> 台湾国立清華大学天文研究所 〒30013 台湾新竹市東區光復路二段 101 號〉

〈<sup>2</sup> 台湾国立中興大學物理學系 〒40227 台湾台中市南區興大路 145 號〉

〈<sup>3</sup> 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

〈<sup>4</sup> 国立天文台水沢 VLBI 観測所 〒023-0861 岩手県奥州市水沢星ガ丘町 2-12〉

e-mail: <sup>1</sup>tomo@gapp.nthu.edu.tw, <sup>2</sup>tetsuya@phys.nchu.edu.tw, <sup>3</sup>hmasaoka@ecc.u-tokyo.ac.jp

わずか数ミリ秒の間に巨大なエネルギーを放出する高速電波バースト (Fast Radio Burst: FRB) は毎日何千回も起っているにもかかわらず、いまだにその物理起源は解明されないままとなっている。研究が進まない主な原因は (1) 位置決定精度が足りず母銀河を同定できないこと, (2) リピーターと単発型を区別するのが難しいこと, 及び, (3) 多波長観測の難しさ, にあった。この3つの問題を同時に解決するための新しい電波干渉計 Bustling Universe Radio Survey Telescope in Taiwan (BURSTT) の建設が台湾と日本を含む共同チームで進められている。本稿では, FRBの研究に飛躍的進歩をもたらすと期待されている BURSTT について解説したい。

## 高速電波バースト (FRB) とは？

2013年に発表された Thornton et al. [1] の論文は衝撃的であった。ミリ秒という非常に短い時間スケールで観測を行うと、宇宙空間で突如として強力な電波バースト [2] が多数発生していることが明らかになったのである。その数は、毎日何千個にも及ぶと推定された。しかも、その起源は不明。新しい研究分野の誕生を予期させる論文であった。

これらの電波バーストは高速電波バースト (Fast Radio Burst: 以降FRB) [2] と呼ばれ (図1), わずか数ミリ秒の間に巨大なエネルギーを持った電波パルスが空の上で突然現れる天体現象であ

る。その短い間で放出されるエネルギーは典型的には太陽が3日間で放出する量に匹敵し [3], 最も明るいものでは太陽の30年分にもおよぶ [4]。非常に短い時間に巨大なエネルギーが放射されるため、いわゆる輝度温度 (電波の明るさを黒体放射を仮定した時の温度として近似的に表したもの) は  $10^{30}$  K よりも高い [3]。しかし、熱的な放射 (黒体放射) の場合、コンプトン散乱により  $10^{12}$  K を超えると電子が光子と相互作用してエネルギーを奪われ、放射が抑制される (コンプトン抑制)。したがって、これほど高い輝度温度を実現するためには非熱的な放射かつ、電波の位相 (電波の山谷) がそろっていなければならない。これは例えばレーザー光のような放射でコヒーレント放射



図1 FRBをBURSTTで観測するイメージ図。FRBは毎日数千回も発生しているがその物理起源は未だ解明されていない (credit: Tomo Goto)。

と呼ばれる特殊な放射メカニズムが関係していると考えられている [3]。

観測的にFRBには2つのタイプが存在することが知られている。1つは一度だけバーストが起る「単発型」で、もう1つは空の同じ場所から何度も繰り返しバーストが来る「リピート型」である [3]。これら2つのタイプが異なる起源を意味するのか、あるいは同じ起源天体から見掛け上このような違いが現れるだけなのかはいまだ決着のつかない問題として議論されている [3]。いずれにしてもその物理起源はいまだ解明されておらず、これを解明することは天文学の最重要課題の1つとなっている。

## これまでの研究の弱点

従来のFRB観測には以下に述べる3つの問題点があり、物理起源の解明が進まない原因となっている。

### 弱点1. 不十分な位置決定精度

先行研究 [5] ではFRBが発見されても位置決定精度が不十分で、追観測を含めたその先の研究に進めないことが最大の問題点であった。一例を挙げると、今日までに最大数のFRBを検出したのはカナダのCHIME望遠鏡であるが、その位置決定精度は30分角程度しかなく、母銀河を特定す

### 従来の観測



### BURSTT



図2 FRBの位置決定精度の概念図。(左)以前の望遠鏡は位置決定精度が30分角程度(大円)と悪く、どの銀河が発生源が特定することが難しかった。(右)台湾のBURSTTでは、位置決定精度は1秒角以下(小円)に向上し、母銀河を確実に特定できる。これは、起源天体の理解に画期的な進歩をもたらす。

るには不十分であった (図2, The CHIME/FRB Collaboration 2021 [5])。FRBのうち、リピート型については後ほど大型の電波望遠鏡で追観測を行い位置を決定することが可能であるが [6]、FRBのうち観測されるリピート型は数パーセントのみであり [5]、大多数の単発型のバーストについては位置決定ができないままとなっていた。位置が決定できなければ、FRBがどの天体から来たのかかわらず、その正体を突き止めることができない。この問題を解決するため、FRBを検出するのと同時にその位置を特定することのできる観測装置が待ち望まれていた。

### 弱点2. 狭い望遠鏡視野

FRBの多くは銀河系外宇宙から来ていることが知られており [1]、空の上では一様に起こっていることがわかっている [7]。つまりFRBを検出するためには空の上でいつどこから来るかわからないものを、たった数ミリ秒のタイミングで見つけなければならないことになる。CHIME望遠鏡は約200平方度という視野をもって多数のFRBを検出してきたが [5]、それでもこの視野は北天全体のたったの1%にしかすぎない。この1%視野の外で起こったFRBについては検出することができない (図3)。つまり、相当数のFRBが観測されないまま見逃されてきたことになる。

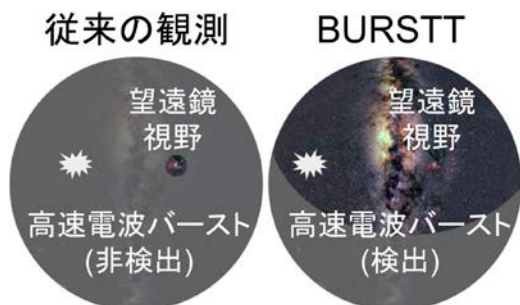


図3 FRB観測における望遠鏡の視野の概念図。(左)従来の望遠鏡の視野は狭く、その外側(灰色)で起こったバーストを検出できない。(右)BURSTTは従来の望遠鏡よりも遥かに大きな視野を持ち、基本的には北半球の空のどこで起こっても検出することができる。

この問題は単に多数のFRBを見逃しているというだけではなく、その起源を明らかにするうえで非常に重大な問題となっている。というのも先に述べた単発型のFRBが本当に単発だったのか、あるいはリピート型のバーストのうち、偶然望遠鏡の観測期間に視野内に入っていた1つのバーストだけしか検出できなかったのか判別できないからである。つまり、現在の狭い視野による限られた観測では単発型とリピート型を正しく切り分けることができない。この問題を解決するには、天空の大きな領域を一度にカバーし、モニター観測をすることができる非常に広い視野を持った観測装置が必要である。

### 弱点3. 多波長観測／マルチメッセンジャーとのミスマッチ

FRBの理論的研究は非常に盛んで、これまでに50以上もの理論モデルが提案されている[8]。生き残っているモデルはそのどれもが基本的にはFRBの特徴である「ミリ秒で起こる高エネルギーなコヒーレント電波放射」を説明することができる。そのため、電波観測だけからFRBの理論モデルを強く制限することが困難な状況になっている。

この状況を打開することができると期待されるのが多波長観測である。理論モデル、特に放射メ

カニズムの違いは電波以外に現れると期待されている[9]。代表的なモデルとして、パルサー型磁気圏モデルやガンマ線バースト型モデルなどが提案されている[10]。パルサー型磁気圏モデルの一例として、起源天体(マグネター等)の磁気圏において相対論的速度で運動する粒子からの放射によってFRBが起こると提案されている[10]。ガンマ線バースト型モデルでは起源天体の爆発現象の際に放出されるアウトフローがその外側を取り囲むガスと相互作用し、相対論的な衝撃波が形成され、そこでFRBが発生すると考えられている[10]。一般にガンマ線バースト型モデルの方が(他波長を含めた)エネルギー総量が高いため、パルサー型磁気圏モデルよりも明るいガンマ線／X線／可視光対応天体が期待されている(ただし、逆コンプトン散乱の有無によってはパルサー型磁気圏モデルの方が明るい可視光放射がみられる可能性もある)[10]。

これらに加えて、FRBの起源天体の一つとして連星中性子星合体が候補として挙げられている[11]。この場合はFRBと同時に重力波や可視光でのキロノヴァが発見されることが期待されている。

このように、多波長観測とマルチメッセンジャー観測はFRBの放射メカニズムとその正体を突き止める上で非常に重要である。しかしながら、FRBと同時に起こった他波長でのイベントが明確に検出されたのは銀河系内のマグネター[12,13]の例のみである[14-16](執筆時点2025年2月)。その理由として、これまでに検出されているFRBの多くが遠方宇宙(典型的に約50億光年の距離[5])で発見されていることが挙げられる(図4)。

例えば重力波のうち、電磁波の期待される中性子星合体の検出は現在はまだ近宇宙に限られており(<6億光年)[17]、このような重力波検出を遠方宇宙に拡張することは容易ではない。ガンマ線、X線の望遠鏡にも感度に限界があることは同じである。このため、FRBのマルチメッセンジャー観

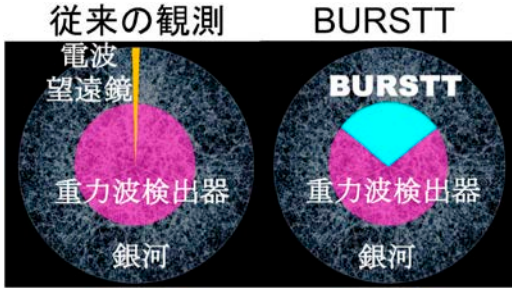


図4 FRBと重力波の観測領域の概念図。中心の観測者から見た時の宇宙の領域と銀河の分布（多数の白点）を示す。（左）従来の電波望遠鏡による観測（狭い三角形）は主に遠方宇宙を見ており、近傍をくまなく探す重力波の観測（球）との間で重なる部分がほとんどない。（右）BURSTT（扇状の領域）は重力波の観測する領域と重なる部分が遥かに大きい。

測を可能にするためには、まず近傍宇宙でFRBを見つける必要がある。

## BURSTT新望遠鏡計画

これら3つの弱点を同時に克服し、FRB研究にブレイクスルーをもたらすと期待されているのが台湾で建設中のBustling Universe Radio Survey Telescope in Taiwan (BURSTT)である[18]。

0. BURSTTを可能にした1つのアイデアは図5に示すような小型のアンテナを多数設置することにより非常に安価に電波干渉計を実現することである。このような小型の電波アンテナはネット通販でも購入できるような汎用で安価なものであり、従来のパラボラアンテナを用いた電波望遠鏡に比べて大幅なコストダウンを実現した。この工夫により台湾の限られた研究予算の中でも欧米の巨大望遠鏡にも匹敵する性能を引き出すことが可能になった。

1. BURSTTではこのような小型アンテナを多数備えたステーションを図6のように台湾国内数ヵ所に設置することにより、数百キロの基線長を確保し、1秒角以下の位置決定精度を実現する。1秒角以下の位置決定精度があれば、検出される



図5 台湾南投サブステーションのアンテナ群の一部（写真は設置作業中のもの）。



図6 台湾国内のBURSTTサブステーション。福山（256台）、南投、緑島（それぞれ64台）のアンテナはすでに設置済み。

ほぼ全てのFRBに対して位置を特定し、バーストの起こった銀河（母銀河）を同定することができる。母銀河が同定されればFRBの研究は飛躍的に進むことが期待される。

2. BURSTT望遠鏡は100度もの視野角を持っており、この視野角内で起こった検出感度以上のFRBはすべて検出することができる。これだけの広視野でモニター観測ができれば、ほぼ全てのリピート型を同定できるはずである。これまで曖昧であったリピート型と単発型がはっきりと区別できるようになり、物理的起源もそれぞれクリアに同定できるようになると期待される。単発型のほぼ100%が連続的に観測すればリピート型であるという説も提唱されており[19]、BURSTTによる

検証が待たれる。

3. 広い視野をモニター観測することで、近傍で発生する明るいバーストを検出することができる。明るいバーストは、他の波長や重力波でも明るいため、多波長観測が飛躍的に進み、前述の理論モデルに対する制約が得られると期待される。カナダのCHIME望遠鏡で検出されているFRBは典型的に約50億光年の距離から来ている [5]。BURSTTはその約1/10の距離から来るFRBを多く検出することができる [18]。これは重力波においては約10倍強い信号、多波長観測においては約100倍明るいイベントに対応し、これまでよりも遥かに容易にFRBを観測できるようになると期待される。

これら3つの利点から、BURSTT望遠鏡はFRB研究を飛躍的に前進させると期待されている。

## BURSTTの建設状況

執筆時点（2025年2月）において、台湾福山のBURSTTのメインステーションには256台、南投と緑島のサブステーションにそれぞれ64台のアンテナが設置され、観測を始めている。これまでにフリンジ観測とパルサーの検出に成功し、FRBの初検出がすぐにも期待される状況である。今後アンテナの数を徐々に増やしていくことが計画されており、最終的には約2000台までアンテナを増やす予定である。

## BURSTTの海外拡張計画

BURSTTはまさに稼働し始めたところでいささか気の早い話ではあるが、すでにBURSTT望遠鏡の海外への拡張計画も動き始めている。台湾国内では基線長はせいぜい数百kmに限られるが、海外にサブステーションを設置すれば一気に数千kmまで拡張することができ、0.1秒角以下の解像度を実現することができる。これだけの解像度があれば、母銀河を特定するだけでなく、母銀河の中のどこでFRBが起こったのかまで特定するこ



図7 BURSTT小笠原サブステーションのアンテナ群（手前）。台湾のBURSTTメインステーションと干渉計として使用すれば、その基線長は2000kmとなり、FRBの位置決定精度は0.1秒角以下となる。

とができる。そうなれば物理起源の特定に一気に近づくはずである。BURSTTの特徴は安価なアンテナを多数設置することにより、低コストで干渉計を実現することにあるため、まさに海外に進出するのにうってつけである。

海外進出の初めての試みとして、小笠原のVERA観測所と共同で敷地内に16台のアンテナを設置させていただいた（図7）。小笠原は離島であるため携帯電話やテレビからの電波ノイズが少なく、BURSTTのサブステーションを設置するのに理想的な環境である。台湾からの基線長は約2000kmもあり、明るいFRBに対して0.1秒角の位置決定精度を実現できる予定である。すでに太陽のフリンジ検出に成功し、現在パルサーの観測データを解析中である。尽力いただいた共同研究者の国立天文台VERA観測所の本間所長、並びにVERA小笠原観測所の皆様には大変感謝している。なお、小笠原ステーションは近い将来、32台、64台とアンテナを増やす予定である。

小笠原を成功例として、海外サブステーションはインド、タイ、ハワイ等にも建設を模索している。東西方向のみの長基線だけではビームが歪んでしまうため、南北方向に基線を伸ばすことも重要だ。日本の皆様にも、サブステーション建設に

協力いただける方がおられたらぜひご連絡をいただきたい。

## 建設における苦労話

筆者らの研究はこれまでデータ解析をして論文を出版するというスタイルであったため、望遠鏡の建設に携わるのは初めての経験であった。自分で予算を取って、自分の望遠鏡を作るという作業に興味気味に参加したのはよかったが、実際に数十のアンテナを設置するのはなかなかの重労働であった。ほとんどの作業は、土台を作り、運搬してネジで固定して、ケーブルを繋げるという単純な作業であるが、台湾の炎天下の中で作業をしていると汗びっしょりで、意識もうろうとしてくる。限られたスケジュールの中、黙々と働いてくださった学生、ポスドクの方々には頭の上がらない思いである。

また小笠原でのアンテナ設置作業の際には、船が出航直前に故障し、東京で足止めになってしまった。その際に臨時滞在を受け入れてくださった国立天文台の廿日出さんには大変感謝している。

天文学で公開されている観測データは、どの望遠鏡のデータも建設者の汗と工夫に支えられたものだと実感すると、解析も丁寧に行わなければと身の引き締まる思いである。

## 将来への期待

2025年度はBURSTTは本格稼働を開始し、年間100個にもおよぶFRBを検出し、位置を特定する予定である。現在までに位置が特定されているFRBは全部合わせても100個[20-22]に満たないため、このサンプルはFRBの研究を大きく推進させることが期待される。そうなればアンテナを設置した苦労も報われる思いである。2025年がFRB研究の飛躍の年となるよう期待して、筆をおきたい。

## 謝 辞

BURSTTプロジェクトは卓越領航研究計画のサポートを受けております。PIのUe-Li Pen氏並びにBURSTTプロジェクトチームの皆様には感謝いたします。また、BURSTT小笠原サブステーションの建設をサポートしてくださった国立清华大学火種研究計画、建設に尽力して下さっている国立天文台VERA観測所長本間希樹様、VERA小笠原観測所の皆様、並びに中央研究院天文及天文物理研究所(ASIAA) Shih-Hao Wang様に深く感謝致します。また、原稿をチェックして下さった国立中興大学山崎翔太郎様、和田知己様に感謝致します。

## 参考文献

- [1] Thornton, D., et al., 2013, Science, 341, 53
- [2] Lorimer, D. R., et al., 2007, Science, 318, 777
- [3] Petroff, E., et al., 2019, A&AR, 27, 4
- [4] Ryder, S., et al., 2023, Science, 382, 294
- [5] The CHIME/FRB Collaboration, 2021, ApJS, 257, 59
- [6] Chatterjee, S., et al., 2017, Nature, 541, 58
- [7] Josephy, A., et al., 2021, ApJ, 923, 2
- [8] Platts, E., et al., 2019, Elsevier BV, 821, 1
- [9] Yang, Y.-P., et al., 2019, ApJ, 878, 2
- [10] Zhang, B., 2020, Nature, 587, 45
- [11] Totani, M., 2013, PASJ, 65, L12
- [12] 山崎翔太郎, 2019, 天文月報, 112, 375
- [13] The CHIME/FRB Collaboration, 2020, Nature, 587, 54
- [14] Bochenek, C., et al., 2020, Nature, 587, 59
- [15] Younes, G., et al., 2021, Nat. Astron., 5, 408
- [16] Li, C., et al., 2021, Nat. Astron., 5, 378
- [17] <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/archives/1650> (2022/05/15)
- [18] Lin, H.-H., et al., 2022, PASP, 134, 094106
- [19] Yamasaki, S., et al., 2024, MNRAS, 527, 4
- [20] Bhandari, S., et al., 2022, AJ, 163, 69
- [21] Law, C., et al., 2024, ApJ, 967, 29
- [22] <https://ecommons.cornell.edu/server/api/core/bitstreams/fee91717-9c94-458a-9a1a-9ef468563ed7/content> (2024/12/21)



## Unveiling the Origins of Fast Radio Bursts: An Introduction to Taiwan's BURSTT Tele- scope

Tomotsugu GOTO<sup>1</sup> Tetsuya HASHIMOTO<sup>2</sup> and  
Hiroto MASAOKA<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Astronomy, National Tsing Hua University, No. 101, Section 2, Kuang-Fu Road, East District, Hsinchu City, Taiwan 30013*

<sup>2</sup>*Department of Physics, National Chung Hsing University, No. 145, Xingda Rd., South Dist., Taichung, 40227, Taiwan*

<sup>3</sup>*The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

<sup>4</sup>*Mizusawa VLBI Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, 2-12 Hoshigaoka, Mizusawa, Oshu, Iwate 023-0861, Japan*

**Abstract:** Fast Radio Bursts (FRBs) are millisecond-duration bursts of radio waves with unknown physical origins. The lack of progress in understanding FRBs is due to three main challenges: 1) insufficient localization precision to identify host galaxies, 2) difficulty in distinguishing between repeater and single-burst types, and 3) the challenge of multi-wavelength observation. The Bustling Universe Radio Survey Telescope in Taiwan (BURSTT) is a new radio interferometer being developed by a team including Taiwan and Japan to address these three issues simultaneously. BURSTT utilizes a large number of small, inexpensive antennas to achieve high sensitivity and a wide field of view. This design enables sub-arcsec localization of FRBs, identification of host galaxies, and differentiation between repeater and single-burst types. Furthermore, the wide field of view increases the likelihood of detecting nearby, bright FRBs suitable for multi-wavelength follow-up observations. The BURSTT project has deployed antennas at several sites in Taiwan and is expanding internationally, with a station in Ogasawara, Japan. The telescope is expected to detect and localize hundreds of FRBs each year, significantly advancing the field and providing crucial data for understanding the physical mechanisms responsible for these enigmatic events.

成熟してきた台湾の天文学

## Academia Sinica, Institute of Astronomy and Astrophysics (ASIAA)

中央研究院天文及天文物理研究所 (台湾, 台北)

<https://www.asiaa.sinica.edu.tw/>

松下聡樹 (研究員), 大橋永芳 (研究員)

読者の皆さんは、台湾の天文学と聞いてどんな印象を持たれるであろうか？筆者らがまだ学生やポスドクだった30年ほど前は、台湾の天文学研究はまだ創世記にあたり、世界的には全く注目されていなかった。そんな中、台湾の数少ない天文学者Typhoon LeeやChi Yuanらと中国系アメリカ人の天文学者、Frank ShuやFred Lo, Paul Hoらが協力してASIAAを開所、約30年前にはスミソニアン天文物理研究所 (Smithsonian Astrophysical Observatory; SAO) が当時建設中の世界初のサブミリ波干渉計Submillimeter Array (SMA)に参加するようになり、台湾の天文学は急速に発展することとなる。当時、台湾には電波天文学を専門とする天文学者は少なく、日本の野辺山電波観測所やSMAなどで修行した数多くの日本人を含む、主にアジア人がASIAAのファカルティーやポスドクとして採用された。それ以来、アルマ望遠鏡やすばる望遠鏡のような世界的大規模プロジェクトに関わり、その一方で、グリーンランド望遠鏡やTransneptunian Automated Occultation Survey (TAOS I & II) など台湾が主導するプロジェクトも進めてきている。今では世界各地からASIAAに人々が集まるのみならず、海外や台湾国内で学位を取得した台湾人の活躍も目覚ましい。ASIAAは正に世界をリードする研究所になりつつある。ここでは急成長を遂げているASIAAの現状を紹介したい。

ASIAAでは電波天文学、光赤外天文学、そし



図1 台湾大学構内にあるASIAAが入っている建物の外観。10階から14階と地下1階から3階がASIAA。他には台湾大学天文物理研究所などが入っている。

て理論天文学をカバーし、宇宙論、近傍及び遠方銀河、ブラックホール、星・惑星形成及び進化、そして小惑星といった、様々な研究が個人ベースで波長横断的に進められている。その一方で、研究所のプロジェクトとして望遠鏡の建設・運用、また様々な望遠鏡に搭載される観測装置の研究・開発にも力を入れており、電波受信機、SISチップ、分光計、撮像カメラなどを提供している。個々の研究者は、研究所プロジェクトで建設・開発された望遠鏡や観測装置を主に用いて研究を進めている。したがって研究者はそれぞれの個人研究だけ



図2 2024年にASIAA諮問委員会の会議が開催された時の委員と所員の集合写真。

でなく、観測所プロジェクトへの貢献も期待されている。研究所にはファカルティー28名を含む研究者、技術系職員、事務員等合わせて約200人が働いており（これに加え、約50名の学生がいる；2025年6月現在）、特に研究者は世界各地から来ている。公用語は中国語だがビジネス言語は英語なので、事務員含めてほぼ全員が問題なく英語で会話でき、所内で中国語を話す必要はない。

研究所プロジェクトとしては、電波望遠鏡の建設・運用、及び観測を支える装置開発が最大規模を誇る。SMA、アルマ望遠鏡、James Clerk Maxwell Telescope (JCMT) の建設や装置開発、また運用の一部を担っている。台湾が主導するグリーンランド望遠鏡プロジェクトは台湾が参加しているSMA、アルマ望遠鏡、JCMTや他の世界に散らばるミリ波サブミリ波望遠鏡と協力して地球規模の超長基線干渉計 (VLBI) を形成し、イベント・ホライズン・テレスコープ (EHT) や Global Millimeter VLBI Array (GMVA) としてブラックホールシャドウや降着円盤、その周辺から噴出されるジェットの撮像に邁進している。特にグリーンランド望遠鏡は世界最北に位置し、

これらの撮像には欠かせない1台となっている。また、台湾主導の一番新しいプロジェクトである Bustling Universe Radio Survey Telescope in Taiwan (BURSTT) は高速電波バーストの観測及び位置測定を目指して建設中である。これらに加え、デジタルバックエンドの開発も世界最先端を走っており、Roach2 Digital Back-End (R2DBE) は Square Kilometre Array (SKA) をはじめ世界中の電波観測所で使われている。

光赤外天文学を支える研究所プロジェクトとしては、すばる望遠鏡の Hyper Suprime-Cam (HSC) と Prime Focus Spectrograph (PFS) の開発参加が大きな目玉だ。これに加え、最近 Extremely Large Telescope (ELT) の Mid-infrared ELT Image and Spectrograph (METIS) の開発にも関わっている。台湾が主導するプロジェクトとしてはTAOS IIがある。これは1.3 mの光学望遠鏡3台をメキシコの San Pedro Mártir に設置し、専用の高速カメラで一度に1万個の恒星を20 Hzで観測することにより、太陽系外縁天体による恒星の掩蔽を検出し、太陽系外縁天体のサイズ分布を測定するプロジェクトである。元々は数年前に建設が終了して観測が始まっているはずであったが、新型コロナウイルス感染症の影響で建設がしばらくストップし、コロナ後の現在、建設終了に向かって邁進しているところである。

研究分野としては、星・惑星形成がASIAAでは一番大きく、後述の理論も含めて10名のファカルティーとそれを超える数のポスドクやリサーチ・アシスタントが研究に従事している。ASIAAでは電波干渉計のプロジェクトに長年関わってきたこともあり、比較的小さなスケール（エンベロープから円盤スケール）に焦点を当てた研究が盛んである。その一方で、近年ではJCMTへの参加もあり、分子雲コアからフィラメントスケールの研究も行われるようになってきている。特に、JCMTに搭載された Submillimetre Common-User Bolometer Array 2 (SCUBA2) と

サブミリ波偏波計POL-2とPOL2を用いたダストの偏波観測が大々的に進められており、比較的大きな分子雲スケールの磁場の研究が目覚ましい。

ここ最近伸びてきているのは、宇宙論と銀河形成・進化の分野である。元々在籍しているスタッフに加え、海外で修行した若手の台湾人が台湾に戻ってきて活躍している。すばる望遠鏡のHSCを用いた銀河団、弱い重力レンズ、大規模構造などの研究は特筆にあたる。それ以外にも他の光赤外望遠鏡、そしてアルマ望遠鏡やJCMTのデータを使い、観測的な研究、特に遠方銀河の研究が行われている。近傍銀河の研究は主にMapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory (MaNGA)とアルマ望遠鏡を使って行われている。

理論天文学に関しては、上記したような観測プロジェクトとうまく組んで（特に星・惑星形成やブラックホール、宇宙論）研究をしているメンバーが多い。その一方、超新星爆発や太陽系外惑星、ダストなど、理論系独自の研究を行っているメンバーもいる。

ここで、ASIAAが位置する台北での生活について触れよう。まずは食生活。基本は中華料理で、日本人にもなじみの深いご飯類、麺類、餃子類が主食（中華圏では餃子は主食である）で、日本人が中華料理と聞いて想像するようなものが主菜・副菜となる。また台北は大都市なので、様々な国のレストランがあり、日本食料理店も数多く

存在し、日本のデパートも進出しているので、食事に関してはほとんど問題がない。最近では日本のラーメンが大人気で、有名店の支店も数多く存在する。気温に関しては、台北の夏は蒸し暑いと以前はよく言われていたが、最近では日本も気温が高くなってきているので（20年以上台北に住んでいるが、40度を超えたのは1度しかない）、現在は大差ないと言っていいだろう。給与レベルも以前は台湾の方が明らかに低かった（ほぼ半分だった）が、現時点ではかなりの円安の影響もあり、それほど差はなくなった。言語も、もちろん中国語が話せれば全く問題がないが、台北の場合、若者のほとんどが英語を話せるので、店に行っても苦労することはほとんどない。台湾人は基本親日なので、日本人だからと言って負い目を感じることはほとんどない。非常に快適に生活できる場所である。

最後に、ASIAAは毎年年末にポスドクの募集をしており、興味がある方はぜひ募集してほしい。また、ファカルティも毎年募集しているので、ファカルティポジションを探している方はぜひトライしてもらいたい。ASIAAのホームページ（本記事のタイトル部分に記載）を見れば上記の情報に加え、どのような研究者や技術者がいて、どのような事を行っているのかが調べられるので、ポスドクやファカルティポジションに興味がある方は、直接その人に連絡することもお勧めする。

# 日江井榮二郎氏ロングインタビュー第5回： 日食観測（1）



高橋慶太郎

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

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

日江井榮二郎氏のインタビューの第5回です。今回と次回で日食観測について詳しく話を聞いていきます。皆既日食は普段観測できないコロナや彩層を観測できる貴重な機会です。多くの国で観測隊が結成されました。しかし皆既日食が観測できる場所は非常に限られておりまた僻地であることが多いため、観測装置の準備から移動、観測基地設置まで多大な準備が必要でした。いくつかの日食観測に参加し、「日食病」になってしまった日江井氏に日食観測に関する貴重な経験、そして魅力を存分に語っていただきます。特に2035年9月2日に日本の北陸地方から関東地方にかけて起こる皆既日食をぜひ多くの人に見てもらいたいとのことです。

## ●スワロフでの日食観測

高橋：前回まで2回にわたって乗鞍コロナ観測所の歴史や観測などの様子を詳しく伺いました。今回は日食の観測のお話を聞いていきたいと思います。日食も太陽研究にとって大事な手段でしたよね。川口市郎先生からもある程度伺っていますが（天文月報2016年第6～8号）、当時日食観測というのは大きなプロジェクトでとても大掛かりな準備をして臨んだ、ということですね。

日江井：まず、あなた自身は皆既日食をご覧になったことがありますか？

高橋：ええと、皆既日食はないですね。部分日食ならありますけど。

日江井：そうですか。それじゃあコロナは見られなかったんじゃない？

高橋：そうですね、結構暗くなりましたけど、コロナは見られなかったと思います。

日江井：皆既とね、部分日食は雲泥の違いなんですよ。でもあの異様な雰囲気というのはご存知

ですね。

高橋：独特の雰囲気はありましたよね。子供達と一緒に見るというイベントだったんですけど。

日江井：皆既日食なんてのは明るかったのが急に暗くなるからびっくりするわけですよ。ティコ・ブラーエは14歳のときに皆既日食に出会って、黒い太陽の周りに赤い炎を見たのがきっかけで天文を志すことになったそうです。それから日本書紀にも書かれてるんです。推古天皇36年で、なんか日食があるとあんまりいいことが起こらないとかいうようなことがあって、実際にこのときは日食の5日後に天皇が亡くなった、なんて書いてある。日食は皆びっくりするので、世界中でかなり昔から記録があるんですよ。

高橋：そうなんです。天岩戸の話も日食だと言われていますよね。先生が最初に日食観測に行ったのはいつなんですか？

日江井：1958年です。スワロフ島っていう太平洋の小さな島で、ニュージーランド領の無人島なんです。どうして無人島かというと、11月くら

いにこころへんの海が荒れるんだそうです。そうすると島全体が水没しちゃって人が住めないというようなことで無人島、だけど時々ヤシのコブラ(椰子実)を取りに人が来るとかいうことでしたね。

(地図を見ながら)ここに日本があってスワロフ島がここ(図1)。本当はまっすぐ行けばいいんだけど、このとき太平洋で水爆の実験があったね。その知らせを無線で受けてこれはあぶないっていうんでそこを避けたんです。それでまずこのラロトンガに行ってニュージーランドの役人と一緒にスワロフ島へ行っただけです。それでスワロフに1ヵ月いて、帰りはハワイに寄ってこう帰ってきたわけです。だから行くのに1ヵ月で、スワロフに1ヵ月滞在して、帰ってくるのに1ヵ月だから合計3ヵ月(笑)。

**高橋:** 行く前から観測装置の準備もするわけですよね?

**日江井:** 我々は1年から1年半かけたかなあ。

**高橋:** そんなにですか。では行くなって決まったのは、結構前だったってことなんですね。

**日江井:** それが大変だったんですよね。決まったのはそれこそ1年くらい前のまさにギリギリじゃないかなあ。出かけたのは1958年ですが、1956

年、2年前に日本学術会議の日食研究連絡委員会が開かれて、萩原雄祐先生が委員長だったんです。それでいろいろな研究機関から観測目的が出て議論されて、どこに行くか話し合われたんですね。それで日本学術会議を通してニュージーランド政府に折衝が行われて、1957年、1年前だな、スワロフで観測する許可を得たというからね。

**高橋:** 学術会議で議論されたわけですか。日食はとても重要な研究だとみなされていたということですね。

**日江井:** はい、そうなんです。そもそも日本での天体物理的な日食の観測が始まったのは寺尾(寿)先生からだと思ってるんですよ。1887年、明治20年に日食があって、日本では新潟から、福島、栃木、群馬、茨城あたりに皆既帯が通ったんです。その観測に寺尾先生たちが行かれて、アメリカからもトッド(D. P. Todd)が来ました。面白いのは、日食観測をする一般の人に向けた心得というのが官報に記載してあるんですね。これがよく書かれていて、起草した方はおそらく皆既日食をよく知っている外国の人と話し合ったんだろうと思います。これを読んだ多くの人がコロナのスケッチをしまして、約70名の人がスケッチを東京天文台に送ってくれたんですね。それは今でも大切に保管されています。

そのあたりから日本での日食観測がだんだん進んだんじゃないかと思います。日食観測というのは日本にいいところがあれば外国から観測に来たり、あるいは我々が外国へ行ったりして、国際交流というのがあるんですよ。太陽の彩層だとかコロナっていうのは日食のときでないとわからないというようなことで、遠いところものともせずに出かけたんです。人間の知りたいという欲求はすごいなって。

**高橋:** 便利なところで起こることは滅多にないわけですよね。

**日江井:** それで観測は大掛かりといえは大掛かりで大変だった。やっぱりムスケルアルバイトって

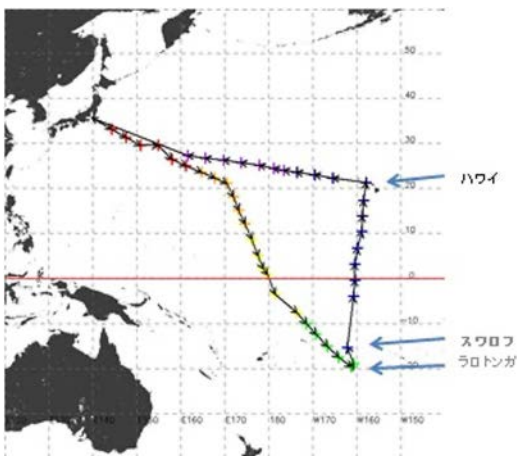


図1 船の航路(『1958年スワロフ島皆既日食観測記』より)。

いうくらい、体をかなり使うわけですね。当時、私なんかが行ったときには望遠鏡の土台のコンクリートをセメントと砂と砂利と1:3:5で混ぜるとかというのを土建屋さんに聞いたりして自分でやったりしてね。そんなふうに使って、私は日食観測が行われるとなると、前から体を鍛えるようなこともやりましたよね（笑）。私がこれまで行った日食はこれです（表1参照）。

**高橋:** ずいぶんたくさん参加されてますね。最初のスワロフの日食観測が1958年で、先生が東京天文台に就職されたのが1955年ですね。

**日江井:** そうですね。だから3年後くらい、若いときです。

**高橋:** 1年以上前から準備をしていたということなのでわりと就職してすぐだと思いますが、どうして行くことになったんですか？

**日江井:** 末元（善三郎）さんがですね、日江井を連れて行って自分の助手として使いたいと思ったんでしょね。無人島なんだから体のがっちりした人にというんで、選んでくれたのかなど。

表1 日江井氏が観測に行った日食のリスト。

#### 皆既日食

- 1958/10/12 スワロフ島
- 1962/2/5 ニューギニア島ラエ
- 1963/7/21 網走
- 1966/11/12 ペルー
- 1973/6/30 モーリタニア
- 1983/6/11 インドネシア
- 1988/3/18 小笠原
- 1991/7/11 ハワイ
- 1994/11/3 パラグアイ
- 1995/10/24 インド
- 1999/8/11 トルコ
- 2002/12/4 オーストラリア
- 2006/3/29 トルコ
- 2009/7/22 硫黄島沖
- 2012/11/13 ニュージランド沖
- 2016/3/9 グアム沖
- 2017 アメリカオレゴン州

#### 金環日食

- 2012/5/20 福島沖
- 部分日食（小学生時代）
- 1941/9/21 東京
  - 1943/2/5 東京

**高橋:** 先生の方から興味がありますとか、そう言ったわけじゃないんですか？

**日江井:** もうそんなことは言える身分じゃないんですよ（笑）。当時、日食観測に行けるなんて、思いもしなかった。

**高橋:** では末元さんから声がかかって。

**日江井:** いえ、野附（誠夫）先生からです。末元さんは分光部に属してたんですが、当時はセクショナリズムというか、まだ部課制が強くてね。天文台の中で壁があって結構厳しかったんですよ。だから末元さんが太陽物理部の部長の野附先生のところに話に行き、まあ野附先生も日食の観測に行ってるからね、日江井に観測に行かせるのはいいだろうという了解をされたんじゃないかしらと思っています。もし私が行けばですね、その準備期間とか観測に行っている間、乗鞍にコロナの観測にも行けないし、太陽物理部としては大変なわけですね。

**高橋:** じゃあ野附先生はそういう研究に理解があったってということなんですね。

**日江井:** 理解してくれましたね、ありがたいことに。前にも申し上げたように、太陽物理部には教官が野附先生、長澤（進午）先生、西（恵三）さんと私と4人だったですね。それから技官が大勢、三十何人もいて交代でルーティン観測をしていたわけです。そういう雰囲気の中で野附先生はよく許してくれたですね。私は三鷹でフレアを監視する眼視観測のルーティンもやってましたから、それをやりつつ日食観測の準備の手伝いをして、だんだんだんだんこっちの日食の観測の仕事が多くなりましてね。

## ●フラッシュスペクトル

**高橋:** 日食観測の準備というのはどういう準備をしたんですか？

**日江井:** とにかく分光器でスペクトルを撮ると。だから分光器を作るわけですね。あなたもご存知だと思いますけども、分光器ってのは光を分け

るためのグレーティング（回折格子）を使います。それを精密に観測しなきゃいけないから、レンズの性能を確認するためにナイフエッジテストという方法でレンズの焦点の鋭さを調べたりもするんです。昼間だと揺らぎがあるからダメなんで、夜みんな帰って静かになった後、廊下の端っこでこうやってナイフエッジをやっているいいレンズかどうかを調べて、それからグレーティングを置いたりしてですね、かなり前から準備をいたしました。

**高橋:** そういう装置でどういう分光観測をしたんですか？

**日江井:** 何をやったかというところでですね、フラッシュスペクトルを撮ったんですね。

**高橋:** フラッシュスペクトルというのは？

**日江井:** 光球とコロナの間に彩層っていう薄い層があって、普段は吸収線を形成する場所なんです。月が太陽本体を隠して彩層を見ることができるようになると暗線が輝線となって現れるんですね。それでフラッシュスペクトルと呼ばれています。光球の方がずっと明るいから皆既日食のときにしか観測できないんです。

それで当時、その彩層の温度がよくわからなかったんですが、レッドマンという人がですね、彩層の温度は30,000度とか40,000度とか高いよと言ってたんです。なぜかっていうと、レッドマンが1940年に南アフリカの日食で観測したスペクトルを解析したら、スペクトルの輝線のプロファイルの幅が広がった。これは温度幅であると。するとその幅からいって30,000度とか40,000度だということなんですね（Redman, 1942）。

**高橋:** なるほど、光球が6,000度くらいですから、だいぶ高いわけですね。

**日江井:** 一方、末元さんは、いやそんな高くはないはずだと。それで末元さんはケンブリッジのレッドマンのところへ行きまして、いろいろ議論したんだそうです。1952年にまた皆既日食がありまして、今度はスーダンのハルツームでフラッ

ッシュスペクトルを観測して、そのデータを使って彩層の温度を調べたら1万度以下となったんですね（Redman & Suemoto, 1954）。

**高橋:** だいぶ違いますね。

**日江井:** なぜそのような違いが生じたかっていうと、観測方法の違いだったんですね。皆既日食のフラッシュスペクトル観測には、分光器にスリットを使う方法と使わない方法があるんです。1940年のレッドマンの観測はスリットなしでした。皆既直前の太陽は細い細い三日月の形になってそのまま分光器のスリットのようなものになるので、スリットを使わずに観測したんですね。でもスリットのない分光器だと、細い彩層と言っても彩層の厚みが輝線幅に入り込むので、本来の輝線幅に彩層の厚さが加わっちゃうんです。

ならスリットのある分光器を使えばいいじゃないかとなるわけですが、観測時のシーイングで彩層が揺れちゃうんですね。角度1秒の揺れは彩層の700 kmに相当します。シーイングは普通2〜3秒角ですから、どの高さのデータかはっきり決まらないんです。一方、スリットのない観測方法では、月が彩層を隠す速さは1秒間で角度約0.2秒、彩層で140 kmです。彩層のスケールハイトは約100 kmですから、適切な時間分解能で観測すれば高さの確定したデータが得られる。でも彩層の厚みが輝線幅に入るという欠点がある。

**高橋:** なるほど、一長一短があるわけですか。

**日江井:** だから観測された高さが確実に、彩層の厚みが輝線幅に影響しないように薄い厚みにすれば、彩層本来の輝線幅が得られるはずなんです。そのために私たちが採用したのがグレーディングインシデンス、スリットのない分光器でしかも彩層の厚みを薄くする斜入射法です。これは末元さんが考えたんですけど、なかなかうまいアイデアでね（Suemoto & Hiei, 1959）。

彩層の厚みを細くする方法はウッドの光学の本に書かれていますが、入射光を非常に浅い角度で回折格子に入れるんです。そうすると景色が縮小

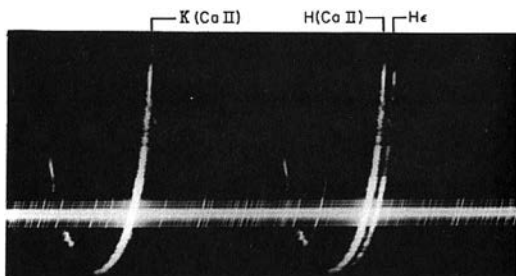


図2 斜入射法による彩層スペクトル（『1958年スワロフ島皆既日食観測記』より）。

されたことになる。スワロフの観測では彩層を5分の1に縮めたんですね。フラッシュスペクトルの画像が円ではなく、楕円になっているのはそのためです（図2参照）。それを解析した結果、やっぱり彩層の温度はそんなに高くないということがわかったわけです。

**高橋:** 本来の幅はもっと狭かったってということなんですか？

**日江井:** 狭かったわけです。だからレッドマンが測った幅は、彩層の厚さの影響を取りきれてなかったってということになったわけですね。このグレージングインシデンスはなかなかいいアイディアなんで、オランダの日食隊（京都の難波（收）さんも隊員）たちが日食観測に行くときにこれを使いましたね。だからフラッシュの撮り方としてはこれが一番いいんじゃないかなあと、我々は思ってます。でもその後こういうフラッシュを撮る人はいなくなりましたね。というよりもフラッシュを撮らなくてもスペースからEUVでやるようになりましたから。だからこれが最後。ただこういう立派なスペクトルがあるから、今、学生にお願いして昔撮ったフラッシュスペクトルをスキャンしてもらってます。

**高橋:** じゃあその1年間の準備ってというのはそういう分光器を作ったということですね。

**日江井:** まず分光器を作って、それからカメラを作ったんですね。準備ってというのはそういう観測装置関連と、logistics関連とがあるんです。観測地

をどこにするか、現地の気象、治安、宿泊、それから観測地までの観測員や荷物の運搬、通関などの情報取得をする。そのために、国際的にはIAUの中にIAU Working Group on Solar Eclipsesっていうのが作られて、私も後でそのChairmanをしましたが、そこと連絡を取ります。国内的には学術会議に日食委員会があって、そこを通して外務省の関係部署と連絡を取るんですね。

## ●日食の魔物

**日江井:** それで、日食というものには魔物が住むと言われてましてね。

**高橋:** そうなんですか。どういうことですか？

**日江井:** 皆既日食で急に暗くなると頭が真っ白になっちゃうわけですよ。だからよくアマチュアの人から聞くのがですね、最初は部分食の写真を撮って、部分食は明るいから黒い減光フィルターをかけてるわけです。それで皆既になったら暗いコロナを撮るためにそれを取らなきゃいけないんだけど、取るのを忘れて写真を撮ったりですね。あるいは皆既になるとうわーっという騒いだりしてですね、気違いのようになるんですね。人間っていうのはそういうことになってしまう。だから頭が白くならないためにですね、何時何分何秒には何をするという手順を練習でもう体に染み付かせるというのを一生懸命やりましたよ。皆既の前は何をしたらいいか、皆既の後はどうするか、と色々あるわけです。皆既中に秒を声に出すのも有効ですね。また後で話しますが、1994年に明星大学の学生とパラグアイの皆既日食の観測に出掛けたとき、学生は秒カウントの合唱をしたんですね。それで素晴らしいコロナ像を撮影してくれましたね。

スワロフ島のときには末元さんと私と二人で、手順盤をこうカメラの前に置いておいてね、そこには何秒には何をしてって書いてあるんです（図3参照）。それで二人で秒を合唱しながらカメラを操作しました。当時はコンピューターがない

| 時間  | 動作        | 回数  |
|-----|-----------|-----|
| 0   | 1 駒場      | 0   |
| 30  | 1 駒場      | 10  |
| 60  | 1 駒場      | 20  |
| 90  | 1 駒場      | 30  |
| 120 | 1 駒場      | 40  |
| 145 | モーター入     | 50  |
| 160 | フラッシュ     | 60  |
| 180 | ---       | 70  |
| 0   | ---       | 80  |
| 10  | 取扱入れ      | 90  |
| 35  | モーター切     | 100 |
| 82  | 1 駒場      | 110 |
| 85  | 手廻しシャッター開 | 120 |
| 95  | 手廻しシャッター閉 | 130 |
| 130 | モーター入     | 140 |
| 155 | 取扱 抜く     | 150 |
| --- | ---       | 160 |

図3 動作表 (日江井氏提供)。

から人間がやるわけですね。この手順を体の中に入れる。頭ではいけないんだ。体に入れるようにしてね。そうして魔物を寄せ付けないようにして、何秒のときには何をする、何秒のときには何をするというのをやって体に染み込ませる。そのためにも早くに装置を作らなきゃいけないんですが、もうさんざん練習しましたよ。最後は夢の中でも何秒で何をするかっていうのが出てきました。

**高橋:** 日江井先生の役割はどういうものだったんですか？

**日江井:** 末元さんと二人で一緒にフラッシュスペクトルを撮ったんですが、末元さんが4000 Åを含む短波長側、私が6000 Åを含む長波長側の分光器を担当しました (図4)。シーロスタットを使ってカメラ2台でデータを取ったわけですね。分光器室でもですね、皆既日食になると温度がぐっと下がりますからね。そうすると物が縮んだりして、フォーカスが変わったりするんです。するとグレーティングが影響を受けるから、グレーティングを二重箱にして等温に保つようにしたりですね (図5)。

それからこのシーロスタットっていうのも非常に良くできててですね、第2接触と第3接触の位置が分光器に対して同じ位置になるようにセットをするんですね。それからシーロスタットが少なくとも5分間は太陽をちゃんと追っかけるようにというコントロールをしなきゃいけない。今のように電氣的なものじゃなくて、時計仕掛けといっ



図4 現地で練習中の末元氏 (左) と日江井氏 (右) (『1958年スワロフ島皆既日食観測記』より)。



図5 分光器入射部、箱の中にはグレーティングやレンズがある (『1958年スワロフ島皆既日食観測記』より)。

てですね、重りでものを動かすんですよ。20分おきに重りを上にあげてね。だからそのスピードをコントロールするのが大変だね。まさにアナログの世界、人間がやる世界でした。

**高橋:** 全部手作業で。

**日江井:** それから皆既の時刻は水路部の方がスワロフ島の位置を観測で調べて求めてくれました。それで無線によって時報を受けたんです。でも予報は数秒くらい違うことがありますからね、実際には月に隠された太陽の細いカプスの長さを末元さんが観測して、観測開始の合図をされたんです。

**高橋:** このときはちゃんと晴れたわけですか？

**日江井:** 晴れた。セカンドは晴れて、サードの方はちょっと曇って、また後で晴れた。セカンドは

完全に晴れてね。

高橋: セカンドとかサードっていうのは?

日江井: ああ、ごめんなさい。太陽と月が最初に接触するのが第1接触です。それから部分日食になって太陽がだんだん隠れていって、完全に隠される瞬間が第2接触、これをセカンドと言っていました。それで今度は逆側で接触して皆既が終わる瞬間が第3接触、サードです。それからだんだん隠される部分が減って行って部分日食の終わりが第4接触です。だから第2接触と第3接触の間にコロナを見ることができるわけなんですよね。

高橋: ではセカンドというのは第2接触で、そのときには晴れたということなんですネ。

日江井: そうです。セカンドが晴れてサードのときにちょっと雲が出た。この日は午前中、日食になる前にちょっと雲が流れて嫌だなと思ってたんです。ところが第2接触が近くなったら雲が晴れてね。ずうっとよく見えましたね。そのときに長時間露出してコロナを撮りました。これはいいデータが取れました。実は私はこのスペクトルを使ってドクターを取った。ドクター論文をこれで書いたんです。だからねえ、まあ大変なことだったですねえ、日食は。曇られれば1年とか1年半の時間のロスが出るわけです。しょうがないんですけど。

高橋: さっきの手順書の何秒に何をしたいなのがありましたけど、本番もちゃんとそれ通りにいったんですか?

日江井: いったんですよね。今だったらね、全部コンピューターでやれるわけですよ。我々の場合には全部自分の体で覚え込んで、予定通りに全部進みました。それでセカンドとサードの間にコロナを撮影する10秒の露出があったんです。このときにね、分光室のテントから外へ出て、カウンントしながらコロナがどんな格好かを見たんです。

高橋: 直接目で見たってことですか?

日江井: そうです。それがものすごく印象的だったんです。数秒ですけども、時間をカウントし

ながらちらっとコロナを目で見てね、それでやっとああコロナっていうのはこんな格好かっているのがわかった。生き生きした美しい姿でね。それを見たせいで日食病になっちゃったわけだけでもね。

## ●日食病

高橋: その日食病っていうのはどういうことなんですか?

日江井: 日食病っていうのは、その後日食があるっていうと、もう尻が落ち着かなくてですね。どっか行こう行こうっていう気になっちゃうわけで(笑)、それが日食病。

高橋: やっぱいいデータが取れたからってことですか?

日江井: いいデータを取れたのもありますしですね、皆既のときに肉眼で見たらコロナの筋が生き生きと見えたんです。それで私自身驚いたわけですよ。コロナの姿は皆既が起こるその場所とその時間しか見ることができないわけですからね、辺鄙なところでも厭わず出掛けたくなるわけです。それが日食病。もちろん写真も撮るわけですけど、やっぱり肉眼で見るのと写真は違っててですね。今でこそ画像処理が良くなってコロナの筋の画像が撮れるようになりましたけど昔はそうではなかったし、それからやっぱり普段は見えないものが見えるという感動っていうのは、実際に体験する以外には人に伝える言葉が見つかりませんね。だから全然違うんです。

高橋: そうなんですか。コロナって肉眼でそんなにはっきり見えるんですか?

日江井: 見えますよ。まあ双眼鏡で見るのが一番いいんですが、私はそのときは双眼鏡なんか持つ余裕なかったんで、「印象的なものはむしろ短い時間見るとかえって眼底に残る」ってそんなことがどこかに書いてありましたけど、そんなんで私の眼底に残っちゃったんですね。わずか2、3秒しか見られなかったと思いますけどね。

**高橋:** 皆既日食の継続時間が2分47秒って書いてありますね、そんなに短いんですね。

**日江井:** そうです。その間コロナは見られるんですが、彩層は薄くて消えちゃいますからせいぜい10秒間くらいでしょうか。その短い間にこのフラッシュスเปクトルをパシャパシャパシャパシャ撮りましてね、今だったらCCDカメラを向けておけばすむんですよ。でもその当時はフィルムでしょう。そのフィルムとカメラが今も残っています。こんな大きなカメラですけども、府中光機に作ってもらって、それがタワー（アインシュタイン塔望遠鏡）の地下に置いてあります。そのカメラを作るのにですね、府中光機に頼んだんですがもう職工さんがいなくてですね、末元さんと私で午前中はいろいろな準備をして、午後は府中光機の府中の工場へ自転車で40分くらいかかって行ったんです。とにかく早く作らなきゃいけない。というのは船ですからねえ、船が出航しちゃうたらもうどうしようもないですから、遅れるわけにはいけないのでね、一生懸命作って、だからやすり掛けの手伝いもしましたよね。それで間に合わせて。

**高橋:** その準備が実って観測は成功して、肉眼でもコロナを見ることができて、日食病になってと。

**日江井:** だからね、肉眼で見るとコロナが生き生きしてるわけですよ。それで次は2035年、能登半島から、新潟、群馬、栃木あたりで皆既日食が見られるんです。2035年9月2日、日本のみなさん見てくださいよ。それというのもですね、やっぱり自然現象のすごさというのを人々がわかってくれることが大事なんじゃないかと。つまり僕は子供の頃ね、東京でしたけども天の川が見えたり星が見えたりしてですね、きれいだと思うと同時に怖さを感じました。畏怖を感じた。つまり自分のコントロールのどうにもならない何かがあるというのを無意識に感じてね。それがですね、今だと街では星が見えないから、そういう畏

怖という畏れとそれからこうなんか祈らんばかりの、自分の力ではどうにもならないというのを感じる、本能的に感ずることが少ないのではないかなど、私は思ってるのです。だからそういう気持ちを持ってもらうのが大事なんじゃないかなあと考えておましてね。2035年には皆さん見てよ見てよと言ってるわけ。

**高橋:** なるほど、では次は僕もぜひ見たいと思います。

## ●スワロフへの船旅

**高橋:** ところでスワロフへの船旅はどんな感じだったんですか？

**日江井:** 船旅は…、私は船に弱くてね。東京湾を出るときに台風になっちゃって、木更津沖に泊まって停泊したんです。陸に上がりたかったけどそうはさせてくれなくてね。それから太平洋に出て、でも1週間経つと慣れましてね。面白かったですよ。僕ら船旅の間、何もすることないですからね。船員ていうのはよく働くんですよ。向こうにスクールがありそうになると船はそっちに向かっていって、僕らは裸になってこう体に水を浴びる。とにかく水が大事ですからね。風呂はあるんだけど、薄い醤油色になっちゃってね。それでまあひと月使って向こうへ行ったわけです。

船はどうしたかっていうとですね、文部省が考えてくれたようです。北大の水産学部の船というのが遠洋航海に出るんだそうで、その当時、水産学部は船乗りを養成する学校ですからね。学生を船に乗せてマグロを捕るんですよ。外洋に行ってマグロを捕る練習をさせる、練習船なんですよ。我々はそれに乗って行ったんです。600トンばかりの小さな船でね、だから波が大きいと波の方が高くてですね、沈んじゃうんじゃないかと思った。でも面白かったな（笑）。遠くに時々鯨が見えたり、それからトビウオがヒューっと飛んできたりね。それで帰りは延縄漁法っていうですね、紐で結ばれたこんなガラス球をぱーっと投

げて、紐にはこんな釣り針がついてそこにイワシをくっつけてマグロを捕るんですね。その実習を学生にさせてました。それを僕らも見えてたんですね。午前3時くらいからやってですね、マグロを捕って。私はピンチョウマグロっていうのを初めて見たんですけど、捕りたてっていうのはきれいですねえ。それからサメが揚がってくると、サメは食べるもんじゃないから掛矢でバーンと頭をぶん殴ってね。人によってはサメの歯が欲しいだとかいう人はサメの歯を取って、またそれ流してね。そんな船乗りの生活もしました。

**高橋:** それで1ヵ月かけて行って、また1ヵ月かけて帰ってきたわけですね。現地ではコンクリートで台を作るとか、そういう準備でやっぱり1ヵ月くらいかかったと。

**日江井:** まず無人島ですから、どこに観測地を作ればいいのかわからない。現地へ入ってみるとヤシの木ばかり。だから一緒に行ったニュージーランドの役人に許可を得てヤシの林を伐採したんですね。それを学生さんや船乗りがものすごく手伝ってくれた。船乗りっていうのは非常に有能ですからね、いろんな知恵があって瞬く間に観測地を作ってくれた。

**高橋:** 学生さんや船乗りさんたちもだいぶ協力してくれたわけですね。

**日江井:** そうなんです。それから荷物を船から運ばなきゃいけない。でも島のまわりはサンゴ礁だから、600トンの船とはいっても海が浅いから近づけなくて、内火艇っていう小さな船で荷物運んでもらうの。大変だったですね、運ぶのね。それも全部学生さんと船乗りがやってくれて、その間に僕らはコンクリートを練って作ってた。そして観測が終わったら、帰るときにモニュメントを作ってね、そこにヤシの実を置いて、それで帰ってきたんですね。だからまあ今頃はヤシの林になってるに違いないと思いますけどね。

**高橋:** 寝起きするのはテントか何かですか？

**日江井:** テントテント、テント生活ですよ。

**高橋:** 日江井先生と末元さん以外はどういう方が観測に行ったんですか？

**日江井:** (資料を見ながら) 東京天文台から行ったのは末元さん、田鍋(浩義)さん、それから山下(泰正)さん、清水実さん、加藤(正)さん、橋本(清)さんと私で7人ですね(図6)。京都大学からは3人、東北大学からは加藤(愛雄)さんと高窪(啓彌)、赤祖父(俊一)、佐藤(直宣)と。赤祖父さんっていうのは前にも言いました、オーロラの大家なんですけど、一緒に行きましてね。赤祖父さんたちは天文じゃなくて地球物理だから、日食の陰になると地球の周りの電流が変わって、磁場が変わってっていうのを測った。だから彼らはその装置を置くだけで暇なんです。あっちこっちぐるぐる散歩して周ったり我々を手伝ってくれたりしてました。それから報道関係が2人入ってるんですね。船員は学生さんを含めて62名、計81名の総員で出かけたんです(図7)。

**高橋:** 結構な大人数ですね。それぞれの大学で別々の観測をされたっていうことなんですか？

**日江井:** そうです。東京天文台でも末元・日江井はフラッシュ、田鍋・清水は黄道光、山下・加藤正はコロナ観測です。橋本君てのは工場の人なんですけど、我々を手伝ってくれたんです。2人では大変だからね。とにかくモノっていうのは現地で



図6 東京大学・東京天文台の7名の観測員(『1958年スワロフ島皆既日食観測記』より)。上段左より末元善三郎、田鍋浩義、日江井榮二郎、山下泰正、下段左より加藤正、橋本清、清水実。



図7 観測地の整備完成後の写真、観測員、船員、学生（『1958年スワロフ島皆既日食観測記』より）。

壊れるわけですよ。そのときにすぐ直してくれてね。そのために金工材、修理材料も持って行きました。だから日食ってのはもう一大イベント、なんか天文台ごと移るみたいですよ。

それがうまく書いてあるのが中谷宇吉郎先生の記事なんです。なかなかいいことが書いてありましてね。中谷宇吉郎という人は顔が広いから、北海道で日食があったときに（1936年）、イギリスから来たストラットンなんて大先生たちの面倒をみてたわけですよ。そのときに自分も手伝った。だいたい観測する場所は辺鄙なところですから、機械が壊れたらとにかく自分で直さなきゃいかん。そういうことができるようにポータブルな工場を持って行くんだというようなことが書いてありましてね。

**高橋:** 中谷宇吉郎も日食観測に行ってたんですね。

**日江井:** だから我々もとにかくいろんなことを想定して準備しましたですね。科学衛星でも上へ行ったら本当に何もできないからそれこそ大変ですよ。だからものすごく準備します。まあそういう点では日食の方が手出しができるだけいいわけですが、手出しができるように人事を尽くしましたですね。まあそんなことで今思うとですね、やっぱり人間というのはそういう観測しなきゃいけないとなると、遠くといえども出かける。知の

探究心が強いとか、それが表れてますね。天文だけでなく物理だってそう、科学者は全部そうでしょう。

## ●ラエでの日食観測

**高橋:** 日食ってそれなりに頻繁に起こっていますが、ある度に観測が行われているんですね。

**日江井:** 結構行ってるんだよね。私はスワロフの次にニューギニアに行って、ペルーに行って、それからインドネシアに行ってモーリタニアに行ってハワイに行くと。天文台をやめて明星大学に行ってから学生を連れてパラグアイに行っていンドに行って…。まあそれくらい日食病になった。

**高橋:** 毎回大変な準備をして行くわけですね。

**日江井:** そうですね、そのときによっていろいろですけども。そうだ、この機会に言っておこう。私が観測で一番残念に思ってるのは1962年、ニューギニアのラエなんです。

太陽の吸収線っていうのは皆既日食のときには、彩層の輝線として観測されるんですね。どんなふうな輝線になるかというのは分子、原子、イオンによって違うんですが、それまで僕らはK線やH $\alpha$ をそれぞれ含む800 Åの波長幅のフラッシュスペクトルは取ってたんだけど、その間にあるヘリウムやマグネシウムなどの輝線は観測してなかったんです。だから可視域の全波長のフラッシュスペクトルを撮りたい。そのためにはエッセルグレーティング（高次の回折光を利用するために粗く溝が刻まれた回折格子で、一度に広い波長域のスペクトルを得ることができる）を使うといいんです。

**高橋:** もっとたくさんの輝線を観測したい。

**日江井:** はい、でも従来のグレーティングを使っても、分散能をスワロフ島のと同じ2.3 Å/mmにすると、3600–6600 Åの波長域は1.3 mという長いカメラになってしまうんです。だから、スペクトル波長域を短く取って短冊のように上下に並べ

る。そのためには各スペクトルの幅を細くする。つまり観測する領域が狭まる。だからエッセルグレーティングを使う分光器だと、広い場所を観測することはできないけど可視域の広いスペクトルが撮影可能になるんですね。そういうことを計画しまして、実際に行いました。

**高橋:** 分光器を変えたわけですね。

**日江井:** はい、それで今度は私がリードしてもう1人の相棒と2人で分光器を組み立てた。エッセル分光器が撮影するフィルムっていうのは幅24 cm、長さ12 cmでとても大きいんです。そこで富士フィルム会社をお願いして、赤に感光するようなフィルムを作ってもらいましてね、100フィートのロールフィルムを作ってもらったわけですよ。それで東京天文台でエッセル分光器を組み立てて、スワロフのときみたいにさんざん練習しました。夢の中でも何時何分何秒にどんな動作をするっていうのが出てくるほどです。

**高橋:** また大変な練習をして。

**日江井:** そのときは私がカメラ動作をして、相棒がシーロスタットを担当しました。エッセル分光器だとスリットが短いので、太陽像を動かして第2接触の場所と第3接触の場所を分光器のスリット上にもってくるんです。そのためにシーロスタットの第二鏡を動かす。練習のときには、赤経方向の回転ネジを何回、赤緯方向の回転ネジを何回動かせば、それができるということを訓練してきた。それでニューギニアに行ってからでも訓練してたんですが、数日たったときに相棒がネジを動かすのは大変だと言うんですね。だから替わってくれて。カメラの方も大変なだけだね。それに今までの練習もありますから、変更はしないほうがよいとは思ってたんだけど、相棒は皆既日食が初めてだったんで、緊張をしているのかと思って、その提案をのんだんです。

**高橋:** 現地に行ってから言われたんですか？

**日江井:** そうそう、行ってからね、相棒にそう頼み込まれたから替わったんです。だから替わっ

て、何回も何回も練習をしました。ラエは湿度が高くて、分光器室は暑くて大変でしたね。アメリカ隊は大型車に分光器を組み立てて、しかも冷房がきいていてね、羨ましいと思いましたね。

**高橋:** それはすごいですね。

**日江井:** それで皆既日食の当日、早朝は雨で天候が悪かったけれど、だんだん雲が薄くなって皆既のときには晴れてきたんです。だからこれはよい観測ができるぞと思いましたね。それで予定通りに秒を2人で合唱しながら、相棒は分光器室に入って、私はシーロスタットの位置に待機しました。私は外にいましたから急に暗くなるのを感じまして、予定通り観測を開始したんですね。そして数秒たってですね、「日江井さん、なんかおかしいよ」って叫び声が聞こえたんです。私はすっ飛んで分光器室に入ってね、フィルムが絡まって動かないって言うから、暗がりですけどカメラの裏ブタを開けて、何とか直そうとしました。だけどどうしてもフィルムが動かない。皆既時間の2分間、祈るような気持ちで動かそうと努力したんですが、結局フィルムがはさまって動かなくなっちゃってダメだったんです。

**高橋:** そうなんですか。

**日江井:** どうして失敗したかというんですね、1つにはニューギニアの湿気です。湿気があってフィルムがくっつき易かった。それよりも、暗室内とはいえ、カメラには外から光が入っちゃいけないから、黒い布をかけていたんです。その布が、フィルムがぐるぐる回るバネのところにはさまっちゃった。その布がはさまって回転を止めちゃったんだろうと、暗室の中は真っ暗だからね、はさまってしまっても見えないですからね。

**高橋:** 本当に真っ暗になっちゃうわけですね。

**日江井:** 真っ暗になる。真っ暗な中で操作するようなものです。いやあ、これは本当に残念なことをしたなあと思っています。エッセルのグレーティングでフラッシュスペクトルを撮るというのは世界のどこでもやってなかったからね、ぜひ撮

りたかったんです。皆既が終わってみんなは満足顔でしたけど、私は非常に悔しかったですね。アメリカ隊の隊長ダン（R. B. Dunn）氏から、握手を求められたんですが、私は手を出せませんでした。

それで、次はペルーに行ったんですね。今度はよい観測ができました。いいスペクトルのデータが撮れてね、田中捷雄君の博士論文にもなりました。

（第6回に続く）

## 謝 辞

本活動は天文学振興財団からの助成を受けています。

## A Long Interview with Prof. Eijiro Hiei [5]

Keitaro TAKAHASHI

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

**Abstract:** This is the fifth article of the series of a long interview with Prof. Eijiro Hiei. In this article and the next, he talks about solar eclipse observations in great detail. A total solar eclipse offers a rare opportunity to observe the corona and chromosphere, which are normally unobservable, and observation teams were formed in many countries to take advantage of it. However, the locations from which a total solar eclipse can be seen are extremely limited and often in remote areas, requiring extensive preparation—including the transport of instruments, travel arrangements, and the setup of observation bases. Prof. Hiei, who has participated in many eclipse expeditions and jokingly refers to himself as having ‘eclipse fever,’ will share with us the challenges, invaluable experiences, and unique allure of eclipse observations. He especially hopes that as many people as possible will witness the total solar eclipse that will occur on September 2, 2035, visible from the Hokuriku to Kanto regions of Japan.

## 追悼 平山淳先生

## 平山淳先生略歴

1934年4月24日：東京，信濃町に生まれる  
 1957年3月：東京大学理学部物理学科天文学課程卒業  
 1959年3月：東京大学大学院数物系研究科天文学専門課程修士課程修了  
 1961年6月：同 博士課程中退，東京大学東京天文台助手に採用  
 1964年6月：東京大学より理学博士の学位授与  
 1971年5月：助教授に昇任  
 1973年4月～1977年3月：日本天文学会庶務理事  
 1982年8月：教授に昇任  
 1988年7月：国立天文台太陽物理学研究系教授に配置換  
 1988年4月～6月：東京大学東京天文台長事務取扱，東京大学評議員  
 1988年7月～1992年3月：国立天文台企画調整主幹  
 1989年4月～1991年3月：日本天文学会副理事長  
 1992年4月～1994年3月：国立天文台太陽物理学研究系研究主幹  
 1995年3月：国立天文台を定年退職  
 1995年4月：東京大学名誉教授，国立天文台名誉教授，明星大学情報学部教授  
 2004年3月：明星大学を定年退職  
 2025年3月5日：ご逝去 従四位瑞宝小綬章

教育関係では，明星大学へ移られる前に  
 1973年1月～1988年6月：東京大学大学院理学系研究科において課程担当  
 1992年4月～1995年3月：総合研究大学院大学数物科学研究科に併任  
 国内の各種委員会では  
 1978年7月～1994年9月：日本学術会議天文学研究連絡委員会日食専門委員会委員  
 1990年2月～1994年1月：測地学審議会委員  
 1991年9月～1994年9月：日本学術会議宇宙空間研究連絡委員会委員  
 1993年4月～1994年3月：総合研究大学院大学評議員  
 などを務めたほか，1979年～1998年の間，国際学術誌である *Solar Physics* 誌の編集顧問を務めた。



平山淳先生（2007年，ご長男・平山洋氏提供）

## 平山淳さんを偲びて

日江井榮二郎（国立天文台名誉教授）

「山は人を育てる」これは乗鞍コロナ観測所の山麓、長野県安曇村村長福島清毅氏の言。平山さんは、手足を動かすより頭脳を働かせる学究の徒であるにもかかわらず、ほぼ300日の日々を乗鞍コロナ観測所に勤務しました。体操部で鍛えた身体とはいえ、冬場は皆と一緒に水の補給のために雪を担いだり、無線・エンジン・炊事などの職員と1ヵ月寝食を共にしました。研究はそれを支える多くの人々のお陰であることが体に沁み込んだことでしょう。東京天文台の先生から自分自身の研究に専念するようにと助言を受けたにもかかわらず、技官と共著の論文発表を続けていました。

天文台に助手として入台した時、3号官舎で私と机を並べました。その官舎は、塔望遠鏡へ行く道の角にあった居住用の建物で、その一部を改装してオフィスにし、壁を隔てて隣は田中幸明さん夫妻が住んでいました。そのオフィスが太陽活動の眼視観測をする技官10名ほどの居室でした。同室の観測者達と、観測してきた活動現象の話をしたり、自分の研究を続けたり、昼には碁を打ったりと、皆と楽しく話をしていました。

1962年のニューギニア・ラエと1966年のペルー・アレキパの皆既日食には一緒に出掛けま

した。その後、バルーン、ロケット、科学衛星と太陽観測のほぼあらゆる機器に携わりました。どの観測の場合にも、与えられた観測手段で、何を観測目標であるべきかを熟慮し、実際的には何ができるのか、何しかできないのかを共同観測者と打合せて観測を行っていました。10 cm コロナグラフでは、イケア・セキ彗星の近日点通過時の直接像写真を撮り、太陽コロナ中を通過する彗星の変動を調べ、バルーンの観測では、白斑の研究を発表しました。「ようこう」衛星の国際共同観測では、持ち前の見識さと鷹揚さを使い分け、常田君を激励して、立派な太陽X線コロナ像を取得しました。文化も慣習も異なる人との親密な信頼関係は、当時しばしば開かれていたパーティにより醸し出されたと思われます。

25 cm クーデ型コロナグラフ製作の時には、日本光学の技術者と実りの多い討議を重ねました。平山さんは貴重な意見を述べ、その真摯さと親密さが伝わり、完成後不具合が生ずると、ニコンの技術者が土曜・日曜でも乗鞍まで出向き、修理をしてくれるようになりました。

ペルー日食で取得されたフラッシュ・スペクトルや、アインシュタイン塔望遠鏡、コロナグラフで観測されたプロミネンスのスペクトルを使って独創的な研究を行い、「プロミネンスの平山」として様々な国際会議に招待されました。その後、太陽磁場に関心を持ち、「ようこう」のX線画像や乗鞍で撮影された2リボン・フレア画像を眺めながら、CSHKP（Carmichael, Sturrock, Hirayama, Kopp, Pneuman）モデルとして知られるフレアモデルを創り上げました。世界中いたるところに知人友人がいました。特にCALTECHのH. Zirinはもともと故・田中捷雄さんを後継者にしたかったようですが、平山さんとはよき議論の相手であり、互いに尊敬し信頼し合っていました。Zirin



乗鞍コロナ観測所にて、2000年10月  
米畠和香子さん（元明星大学生）提供

が亡くなったときには、Zirin夫人から鄭重な自筆手紙を受け取るほどでした。

雲南で開かれた日中共同研究最終日、ダンスパーティーとなったとき、平山さんと踊りたかった中国女性が多くいました。平山さんのおしゃれで、パイプを持つ姿は多くの人を惹きつけました。

東京天文台から国立天文台への移行時、企画調整主幹として、ご苦勞の多い時を持たれたこともありましたが、緯度観測所との合併には、職階制の異なる2機関の円滑な融合に努力をしました。

国立天文台を定年退職後、明星大学の青梅校に移り、再び顔を合わせることでなりました。当時同大学は皆既日食の観測のために学生と出かけることが多く、1998年のヴェネズエラの皆既日食、1999年のフランスの皆既日食観測には、私は大学での仕事のために現地に行けないので、平山さんに観測指導を頼みました。約40名の大学生を連れて行ってくれました。平山さんは学生の面倒をよくみだし、学生も慕っていました。明星大学に来てから、若返ったようでした。学生は素直でかわいいと言い、学生も、あかぬけておしゃれな先生に魅かれていました。当時の学生が社会に出て進路に迷いが出た時、平山先生に相談した、その時の助言で、今日の明るい道が開けたというOBもいるほどです。

自慢げに趣味について話すことは嫌っていましたが、しかし音楽の造詣は深く、私共がレコード盤で楽しんでいたときに、平山さんはプロが使うようなテープ式の音響装置を持っていました。ミュンヘンにいた時には、1年に30回もオペラを、特にモーツァルトの魔笛を何回も聴きに出かけたと珍しく自賛的に話してくれました。

肇子夫人を亡くされてから10年になります。夫人は品があり、知も情も豊かで、精神的に平山さんを支えてきた方でした。麻布の天文学教室近くの国際文化会館の図書室に勤められていました。結婚直後、家内の方が給料が上で、家内に養われているようだと言いながら話してくれまし

た。ニューギニア日食の時、ラエまで観測機材と一緒に観測員も、鹿児島大学のかごしま丸に連れて行って頂きました。出航直後シケに会い、多くの人が食事を摂れませんでした。船は電報の送受信ができます。出航後1週間ほどして、平山夫人から電報が入りました。「嘔吐は3度にして、頑張ってください……」と。その後、シケでなくなったこともあります。平山さんは食事を摂れるようになり元気になりました。ペルー日食時には、観測終了後、平山さんは、帰国の途中リマから米国西部の天文台視察に向かいました。当時外国出張の旅費は大変貴重でしたが、これも奥様の尽力のお陰と聞きました。野川公園に隣接した新宅を訪ねた折、2階の部屋の机に、桜の花びらがひらひらと入ってきました。ここは気持ちよいところですと素直に喜ぶ平山さんの美しい笑顔が忘れられません。奥様を亡くされた後、ケータリングからの食事は、自分の好き嫌いにかかわらず、栄養のある食事が摂れるので助かると哀感を押さえて話してくれました。

亡くなる1ヵ月前に、彼の住んでいる部屋を訪れました。机上にはTVと共に、奥には趣味の芸術や小説などの本が5〜6冊かさねてあり、手前には太陽関係の本が5冊ほどあり、Aschwandenの本を指さし、この本はいい本だと話してくれました。最後まで太陽研究のことを考えていました。お別れの握手の手は柔かく温かった。

平山さんはひらやまファミリーの一員であり、鷹揚としていて、些末な事柄の話には、脳への通信が止まってしまうようです。末端のことには気に掛けず、“忘れた”という言葉が返ってきます。しかし議論をし、関心が湧くと、驚くほどの記憶力が蘇ってきます。常に物事の本流は何かに関心を持ち、それに最後まで脳を使っていたようです。

この世の別れは、人に迷惑をかけず、鮮やかに去っていきました。

ご冥福をお祈りします。

## 平山淳先生 追悼

柴田一成 (京都大学名誉教授)

平山淳先生と初めてお会いしたのは、おそらく1977年の12月に飛騨天文台で太陽研究会が開かれたときだったのではないと思う。私はまだ京大理学研究科修士課程（宇宙物理学専攻）の1回生だった。研究会では、平山先生は例によってパイプをくわえながら、ぎょろっとした目つきで、容赦のない皮肉たっぷりのコメントや質問を発表者に浴びせていた。世界的な太陽物理学者という評判もあって、近寄りがたい雰囲気「怖い先生」というのが第一印象だった。その印象とは裏腹に、私は長髪で服装もいがかげんな恰好で、世界的な大先生の前で（怖気ついているくせに）全然敬意も緊張感もない発表をした。当時、太陽の浮上磁場に興味があり、その観測のレビューを発表したのである。論文の数は少なかったが、世界の関連研究は網羅したという自信はあった。そしたら平山先生も私の発表を聞いてちょっと感心したかのような質問をされたので、大先生に評価してもらえたのかもしれないと、嬉しかったことを覚えている。

しかし、平山先生の「怖い印象」は、なかなか改善されなかった。当時の京大宇宙物理教室の院生から見ると、そもそも（平山先生のいる）東京天文台そのものが「怖い」のだ。その中でもトップクラスの研究者で、かつ、あの風貌だからなおさら怖い。東京天文台で、例外的に「怖くない」研究者は、（故）内田豊先生だった。内田先生は、お会いするたび満面の笑顔で、一緒に共同研究しようと、誘って下さっていた。そのうち、内田先生は平山先生と同年でライバル関係にあることがわかってきた。

私は1981年に博士課程2年中退で幸運にも愛知教育大に助手として就職したのだが、それ以来、内田先生と天体電磁流体現象、太陽フレアや宇宙ジェットのコンピュータシミュレーション共

同研究を開始した。それで、しょっちゅう東京天文台（三鷹）に出張することになり、平山先生にお会いする機会も増えた。当時は内田先生はフレアのアンチ・リコネクション説を提唱していた。平山先生は正統派リコネクション説である。私は内田先生と共同研究していたから当然、アンチ・リコネクション説である。研究会で私がシミュレーションの結果を発表すると、平山先生は「シミュレーションは素晴らしいが、アイデアが悪い」とほめられているのか、けなされているのか、わからないコメント。内田先生にその話をすると、「平山さんは僕の論文をリジェクトしたんだよ」と、Solar Physicsに投稿してリジェクトされた論文の原稿をくださった。レフェリーコメントには「内田ほどの研究者がこんなレベルの低い論文を出してよいのか」と書いてあったという。内田先生は「レフェリーをやっつけよう！」が口癖だった。もっとも平山先生は「僕はレフェリーじゃないよ」とのこと。真相は不明である。

そのうち内田先生が「君を東京天文台に助手として引っ張りたい」と言い出した。この話には紆余曲折があり、内田先生にはご迷惑をおかけした



2006年7月22日 中国北京で開催されたCOSPAR会議の際。

が、最終的に、東京天文台が国立天文台に改組されたのちの1991年に私は国立天文台に助教授として異動した。ようこう衛星が打ち上げられた直後で、私はようこう衛星の研究チームに所属して太陽軟X線観測運用チームを率いて科学成果を出すことに貢献する、というのが仕事だった。それまで観測的研究などしたことがなかったのだが、このとき最も強く私を引っ張ってくださったのが、実は平山先生だった。平山先生から国立天文台への異動を誘われたとき、「私は観測をしたことがなく実験・観測装置が扱えないのですが、それでも良いのですか？」と答えたら、「いいよ、いいよ、コンピュータが使えたら十分」という返事だった。内田先生も、故小杉先生も一緒に国立天文台への異動を応援してくださったのだが、最も強く私を推してくださったのが、平山先生だった。平山先生がおられなかったら、国立天文台に異動することも、ようこうチームに参加すること

も（さらに、ひのでチームに属することも）なかったであろう。ひょっとしたら太陽研究もやめていたかもしれない。その意味では平山先生は私の人生の最大の恩人と言えるかもしれない。

1991年に国立天文台に異動してから1999年に京大に異動するまで8年間、平山先生には様々な面でお世話になった。ようこう衛星は世界最高の太陽X線映像をもたらし、フレアのリコネクションの証拠を次々と暴き出した。にもかかわらず内田先生はアンチ・リコネクション説の立場を変えなかった。いつしか、内田-平山論争は、内田-柴田論争へと変わっていった。その頃になると平山先生の皮肉たっぷりの目つきのパイプ姿は、怖いどころか、むしろ愛嬌たっぷりの姿に見えていたのだから、人生とは本当におもしろい。

平山先生に最大限の感謝をささげて、私の追悼の辞としたい。

## 平山淳先生の思い出

常田佐久（千葉工業大学 天文学研究センター所長）

平山淳先生のご業績やご経歴は他の方が書いておられるので、ここでは走馬灯のようによぎる思い出をいくつか書くことにする。

1981年に打ち上げられたSOLAR-A「ようこう」は当初スピニング衛星とし、すだれコリメーターの技術を用いた硬X線望遠鏡を主観測装置とすることが大勢の意見だった。ミッション内容決定の直前で、斜入射光学系を用いた軟X線望遠鏡の提案をしたが、平山さんから「今からそんなことを言い出すと混乱する」とのコメントをいただいた。その真意は、「よく関係者と調整しろ」ということであつたと思う。その後この提案が通り、軟X線望遠鏡の搭載が決定し、平山さんがPIとなったが、実際の開発は私に任せてくださった。心配もあつたと思うが、口をいっさい挟むことなく見

守っていただき、大変ありがたかった。X線天文学から転じて太陽観測衛星開発を全力で指揮された小川原嘉明先生には、いつも感謝しておられた。また、日米設計会議の際には、米国側PIのローレン・アクトン博士（元宇宙飛行士）やチームのメンバーをしばしば自宅に招いて労われ、日米のチームが終始よい関係であつた理由の一つは、平山さんのこのような細やかなお気遣いによるものであつたと思う（写真1）。日本の宇宙科学の黎明期に飛躍をもたらした「ようこう」の開発の一コマである。

「ようこう」衛星が打ち上げられると、コロナの磁気ループが軟X線画像でよく見えるようになり、いわゆるスケーリング則が成り立っているかが話題になった。スケーリング則は、Rosner-

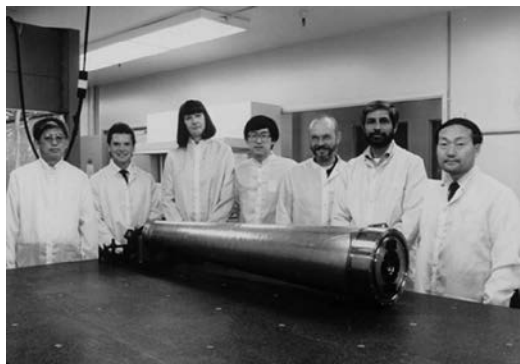


写真1 SOLAR-A「ようこう」衛星搭載の軟X線望遠鏡エンジニアリングモデルを前に、1980年代末にカリフォルニア州パロアルトにて、左端が日本側責任者の平山淳先生、真ん中が筆者、その右隣が米国側責任者のLoren Acton博士、右端がSOLAR-A開発総責任者の小川原嘉明先生。

Tucker-Vaianaが提案した磁気ループの最大温度と長さ、圧力を関係づけるものだった。私もこれに興味を持ち、大学院生の論文のテーマとしたが、平山さんは、「スケーリング則をいつまでも議論しているようでは明日はない。もっと大きなことに取り組んでほしい。自分の名前のついた法則を作れ」と激を飛ばした。このハツとさせられる発言で、私は研究の方向性を少し変えた。

「ようこう」が終わり、SOLAR-B「ひので」の議論が始まると、平山さんは可視光望遠鏡の提案を主導した。太陽観測の大型光学望遠鏡は、NASAも躊躇した難物である。平山さん達はリオ

フィルターによる高解像度の画像を重視したが、私は磁場計測のための偏光分光器も一緒に搭載することを主張した。リソースが極端に限られる状況であったが、結局、両方を搭載する理想の望遠鏡となった。私は可視光望遠鏡のPIに任命され、トップダウンで主鏡の口径を0.5 mと決定した。口径が小さすぎると少し批判が出たようだが、平山さんは「現実的な口径とし望遠鏡がちゃんとできることが大切」と言ってくださった。

国立天文台を退官後は磁気リコネクションなどの基本的な問題に取り組んで、次から次へと論文を書いておられた。ドラフトができると読んでほしいとお持ちになるのだが、難解な論文がわかるわけもなく、毎回不義理をした。また、これよりずっと若いころ、Solar Physics誌の100巻記念号に太陽物理の世界のリーダーが寄稿したが、平山さんは日本人で唯一著者に選ばれ、プロミネンスについての総説を書かれた。これは評判の高い論文となった。平山さんは、私にほんの一部を書いて共著者になるように何度も言ってくださったのだが、忙しさのあまり、これも実らなかった。このようなわけで、平山さんとは共著論文があまりないままになってしまったのは残念である。

ご葬儀のとき、ご長男の洋さんから、「父が家で一番よく名前を出して話題にしていた一人が、常田さんで」と、評価してくださっていたことを知り、たいへん光栄であった。心よりご冥福をお祈りいたします。

## 「ひのとり」何?それ?といわれないように!

渡邊鉄哉 (国立天文台名誉教授)

平山淳先生は、肇子夫人ともども、私の中学・高校の、それぞれ18年、17年上の先輩にあたり、私が大学院生の頃より今日に至るまで、研究の師

として、仲間として、親しく声をかけて戴き、議論と助言と励ましとをして戴いたように思います。

初めて先生とお話したのは、私が修士2年に

なった昭和51年春のことです。一場所は、三鷹や乗鞍ではなく、三陸（大気球観測所）でありました。当時はまだ口径10 cmの気球望遠鏡で、高分解能観測に最後まで敵したゴンドラの振り子運動を、撚り戻しと2軸可動鏡の制御を以って格闘されていた頃のはずなのに、その先に拮据する太陽物理学の将来を見通しているような物言いに、同窓の後輩は、大いに感化されたような気がします。

平山先生が私の直上の上司になったのは、昭和61年のことです。分光部は昭和57年11月に発足しましたが、西恵三先生ご退官後には、今風にいえば「JNLT（すばる）準備室」が銀河系部に異動したため、実質的に「SOLAR-A（「ようこう」）推進室」として、部長に平山先生が就任されて、新たな出発をしたことになります。その前の年、西ドイツより帰国した私は、今後の研究について、solar or stellarの狭間で揺れていた時期でもあり、調布の忘年会で飲んだ後に、その会のメンバーではなかった平山先生のご自宅（境南町）に押し掛け、結局、一晩泊めて戴くという不始末をしでかしたこともありました。今から思えば、年末の深夜、突然の来訪にも関わらず、嫌な顔ひとつせずに、管を巻く酔っぱらいに付き合い、最終的には、決断の後押しになる助言と応援を戴い

た先生ご夫妻には、感謝以外の何もありません。

昭和63年、平山先生は最後の東京大学東京天文台長事務取扱に就任され、7月発足の国立天文台では、企画調整主幹になられました。分光部は、太陽物理学研究系の太陽活動部門として編成されることになりましたので、所属としては、当該研究系部門の教授となられたことになります。

平成3年飛翔の第14号科学衛星「ようこう」では、搭載の軟X線望遠鏡（SXT）の主任研究者（PI）を務められましたが、「Know-Nothing-PI」と自虐的に自称されながらも、プロジェクト推進の傍らで、ご自身のフレアモデルが観測的に確立されていくのを、ほくそ笑んで(?) おられたことと思います。都立野川公園正門脇に構えた新邸宅には、国内の、また在留・来訪の外国人の研究者を頻繁に招き、若手を大いに啓発されたことと思います。更に、「ようこう」飛翔直後から、次期太陽観測衛星（SOLAR-B）計画の立案にも積極的に関与をされ、特に「口径1 m 光学望遠鏡」の搭載を提案されたことは、もうひとつの若手啓発を体現されたものと思います。

平成27年に肇子夫人が逝去されてからも長い間、一人暮らしで研究を続けられていましたが、徐々に天文台へ来られる回数も減ることとなり、令和5年の夏に、介護付き老人ホームに入居され



図1 退職祝賀会：平山淳先生と肇子夫人。左は当時の国立天文台長 小平桂一先生（平成7年4月21日 於 竹橋会館—KKRホテル東京）



図2 IAU Colloq. 144（スロヴァキア開催）への往路、MSSL/UCL（英国）での研究打ち合わせを前に Severn Bridge を望む展望台にて（平成5年9月18日、撮影は故・川上肇氏）

ることとなりました。

昨年、このところ「ひのとり」(「ASTRO-A」)のデータを見直している旨の報告を申し上げたところ、表題のようなご助言を戴きましたが、これが最期のものとなりました。この文に込められた

様々の歴史的な想いと将来への意味合いを考えながら、私なりに今後の糧にして行きたいと思っています。

平山先生、ありがとうございました。どうぞ、ごゆっくりお休みください。

## 平山先生を偲んで

原 弘久 (国立天文台教授)

先生とは小平桂一元台長のご自宅でのパーティで初めてお会いした。東工大ドイツ語ゼミの小平ウタ先生の研究室の書棚に、小平桂一先生のご著書を偶然見つけたのがきっかけだ。ウタ先生は天文学に関心のあった私を天文学者の集まる場へと招いて下さった。そのパーティでの平山先生との会話の中で、2年後に打ち上げが予定されていたSOLAR-A衛星計画を知ることとなった。大学院では実験物理学に進もうかと考えていたところだったが、子供の頃の天文少年の想いが蘇り天文学分野へと進むことに決めた。平山先生とは誕生日は1日違い、学生の頃には器械体操をしていたという共通項があることを知り、不思議な縁を感じた。

修士課程の2年間は、国立天文台研究棟(北)3階にある、先生の研究室の片隅で研究を開始した。最初の研究は先生の研究のお手伝いのようなもので、太陽光球で観測される白斑の構成要素である微細磁束管についてだった。仮定した微細磁束管からの大気放射を計算して観測と比較し、SOLAR-B衛星の磁場観測で後に明らかになった微細磁束管の大気構造を推定しようというものだった。

先生の研究室で教科書や論文を読んでいると、先生の部屋をふらっと訪れて、ソファでしばらく話をされて帰っていく研究者に数多く遭遇した。ときどき向かいの部屋から現れる末元名誉教授、米国から訪問された巨大なFeldman先生、若か

りし日の柴田先生の印象が強い。

大学院1年生の秋頃からは、常田先生のもとでSOLAR-A衛星の軟X線望遠鏡の試験データの確認作業に関わるようになり、宇宙研に繋く通った。この頃の平山先生は、まだSOLAR-A衛星が打ち上がっていない状況で、SOLAR-Bに繋がる光学望遠鏡を搭載した衛星計画を研究室で構想されていた。

私は博士課程に入ると研究棟(南)にある部屋に移ることになり、平山先生と会う機会が減ったが、衛星データで書いた修士論文の発展型の研究を一本先生協力のもとで地上の観測装置を使って進める中で、研究棟(北)に出向いて平山先生と研究内容について数多く議論した思い出がある。

そうこうしているうちに、たいへん幸運なことに国立天文台の助手として着任することとなった。先生が退職されるまで直属の部下となった。先生が退職された後もときおり電話がかかってきて、「ようこう」となったSOLAR-A衛星の成果であるとか、SOLAR-B衛星の開発状況などについてご自宅で報告することになった。

修士課程の学生の時分から、野川公園の横にある先生のお宅にはかなりの回数うかがった。奥様には本当によくしていただき、おいしい料理を何度もふるまっていた。高校時代に知り合った知人の母親と奥様が仲のよい友達であることを後で知り、ここでも不思議な縁を感じた。

退職された後も先生は論文執筆をしようと格闘



1994年4月の原が国立天文台に着任した頃、SOLAR-B衛星の光学望遠鏡の検討のために客員教授として滞在されたTitle氏（中央）とともに、左端が平山先生、右側で中腰なのが原、右端は桜井隆氏。

され、私はもととなった論文原稿を電子投稿する手伝いに呼ばれてお宅にうかがうこともあった。その際も奥様には暖かく迎えていただいた。奥様が亡くなられた後に執筆されたSolar Physics誌向けの最後の論文については、投稿までのお手伝いとなり、受理までの手続きは桜井先生にお願いすることになってしまった。論文受理を亡くなられる前に確認され、喜ばれたということを聞いて安堵した。先生は奥様が亡くなられた三月に旅立っていかれた。

平山先生、どうぞ安らかに眠り下さい。

## 平山先生から習ったこと 萩野正興・米畠和香子・西村美恵（元明星大学）

### 明星大学での指導

平山淳先生は萩野が1998年に明星大学の修士課程に入った時には日江井榮二郎先生の研究室で学生の研究指導をされていました。その頃、指導を受けた3人が平山先生最後の弟子代表として書かせて頂きます。

### 平山先生との研究生活（萩野）

私が平山先生と初めて研究をしたのは、1998年8月の乗鞍コロナ観測所で25 cm コロナグラフを使った太陽（静的）プロミネンスでの重水素の観測でした。この観測を始める直前に平山先生は、Beckers (1975) が重水素と水素との比の上限を  $2.5 \times 10^{-7}$  と見積もった論文を引き合いに「こっちは文明の利器 CCD だから、フィルムのBeckersに負けるな!」と言われました。結果、重水素は検出されず、Beckersにも及びませんでした。平山先生は曇って観測ができなくなったお昼前に起きてきて、パイプをふかしながら「なかなか簡単ではないということですよ」とまるで他人事のようにでした。

最後に施設でお会いした時にもっていったペルー日食のフラッシュスペクトルのスキャンを見せると、短波長から次々と輝線の波長と元素を言われました。「これぐらいじゃなきゃダメですよ」と誇らしげにニヤリとされました。最後に平山先生流の天文学者としての生き様を教えて頂きました。

### 恩師に導かれた3年間（米畠）

平山先生には1998年から3年にわたり、多大なご指導をいただきました。卒業論文では太陽黒点が大きいほど磁場が強いことを確かめるため、葛飾区郷土と天文の博物館で半年間観測しました。磁場強度は高分散分光器で  $6302.5\text{\AA}$  のゼーマン効果から、黒点面積は160 cm 投影板でのスケッチから求めました。修士論文では1999年のトルコ皆既日食でフラッシュスペクトルの偏光観測を指導して頂きました。日食帯がトルコの危険地域ということで平山先生は他の学生を引率しフランスで観測されました。この観測から連続光、コロナ緑線、 $H\beta$ 線、 $\text{He D}_3$ 線の偏光度を導出し、彩層の高さと偏光度の関係や水素とヘリウムの存在比についても指導して頂きました。データを最

大限活用して結果を導く重要性を教えてくださいました。平山先生の手書きコメントぎっしりの修論原稿を見返すと、丁寧かつユーモア交じりの（時には厳しい）ご指導を思い出します。

## 先生、焦りましたよ！（西村）

平山先生とは、1999年の明星大学のフランス日食観測団にご一緒させていただいたのが、出会いの始まりでした。1999年の「フラッシュスペクトルの偏光観測」を引き継ぎました。2001年アフリカ皆既日食でも観測を実施しました。そこ

で得られたデータを使い、平山先生にご指導いただき卒業論文を完成させることができました。不器用な私に先生は優しく根気強く教えてくださったのを覚えています。

また、卒業後も2006年のトルコ皆既日食では一緒に参加させていただき、旅の良い思い出となっています。トルコでは、皆既日食の観測後に現地で出発時間になっても先生が現れず、宿をくまなく探しました。結果、日江井先生のお部屋で何やら熱心に会話されていて、時間をすっかり忘れていたようです。平山先生らしい思い出です。

## 平山先生の思い出

桜井 隆（国立天文台名誉教授）

### 太陽フレア

私が初めて平山先生の講義を聴いたのは、1973年夏学期で修士1年の時です。フレアやプロミネンス、コロナ加熱などについての講義で、図1は講義の初日に描かれた、フレアとはなんぞや、という説明の図です。まだパワーポイントや液晶プロジェクターなどはなく、印刷物を用意したり、オーバーヘッド・プロジェクター（これもほとんど死語ですが）用の透明シートを用意する先生もいましたが、多くは講義ノートに基に板書、それを学生がノートに取る、という時代でした。

先生の有名なフレアモデルの論文[1]は1973年4月投稿、11月改訂となっているので、ちょうど講義と並行して原稿執筆・改訂中だったことになります。そのモデルの図も板書され、写し取りました。この論文は現在、ADSで被引用数が1000を超えており、衛星搭載装置の論文などを別に出せば突出した被引用数といえます。

### プロミネンス

プロミネンスの分光学的研究は平山先生のライ

フワークともいえるもので、Solar Physics誌の第100巻記念号にレビュー論文[2]を執筆されています。特に水素に対するヘリウムの存在比を求めるには、温度が高すぎると水素が全部電離してしまい、低すぎるとヘリウムのスペクトル線が見えないので、1万度くらいのプロミネンスが一番いいのだとおっしゃっていました。多くのプロミネンスのデータを元に出された値は15%くらいで、一般に言われる10%とはかなり異なり、一時は、これで宇宙論も大改訂！と意気込んでおられまし

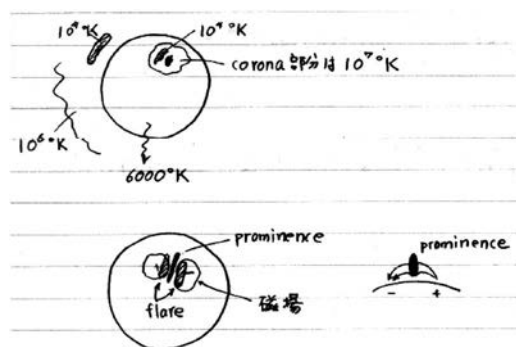


図1 平山先生の講義で取ったノート（1973年4月）。修士1年なので多分忠実に写したはず。

た。その後、何らかのメカニズムで、太陽本体に比べプロミネンスではヘリウムが選択的に濃縮されているのかな、と考え直されたようです。

## 白斑と太陽総放射

ひので衛星の可視光望遠鏡による高解像度観測に繋がる、気球による観測には1970年代から挑戦され、白斑の明るさが太陽の中心から縁へ向かってどう変化するかを、当時としては最高の精度で求めました[3]。しかしそれに留まらず、これで太陽全体の明るさの変動もわかるはず、と目星を付け、当時大学院生だった西川淳氏（現在、国立天文台TMTプロジェクトで高コントラスト撮像を担当中）を指導して、人工衛星搭載の太陽総放射計の観測結果を再現して見せました[4]。太陽変動の地球への影響は今では大きな研究テーマですが、ここでも平山先生の研究は時代を先取りしていました。

## 研究以外の思い出

まだ東京天文台の時代、私の研究室の本棚に小津安二郎監督の「東京物語」のポスターを貼っていたら、「あ！こんな昔の映画見てるの？」といわれたこと、海外に1年以上いたボストンとミュンヘンとどちらが良かったかと聞かれ、「どちらもそれぞれに良かった」と答えたところ、「あ！ローマの休日でオードリー・ヘップバーンもそう言ったよ」といわれたこと、など、映画にまつわる会話を思い出します。

## 回顧録

Solar Physics誌では、著名な太陽物理学者に回顧録の執筆を依頼してきました。平山先生にも2年前に依頼がされましたが、編集者側といろいろ行き違いがあったようで、「どうなっているのか」というお叱りのお電話をいただき、ご自宅に一

度、介護施設に入られてから二度伺いました。「原稿がパソコンの何処にあるのかわからない」、「改訂原稿のアップロード方法がわからない」等々の難関をクリアし、本年2月に出版されました[5]。図2はそこに書かれている、「ようこう」の次の衛星で搭載検討中のリオ・フィルター用の方解石結晶を中国から調達できるかどうかの視察を兼ねた出張の時のものです。

この回顧録を印刷してお持ちしようとしていた矢先、ご逝去の報を受けました。倒れられたその晩、病室でご子息から、「論文は出たので明日桜井さんが持ってきます」と伝えられると、「よし！」とガッツポーズをされたそうです。もし更に増補改訂すべき点がありましたら、天国から指令してくださいね。



図2 北京（1992年、IAUコロキウムNo. 141）にて、左からリオ・フィルターの神様 Alan Title 氏、桜井、平山先生、宇宙研・小川原先生、北京天文台・艾国祥（Ai Guoxiang）教授（後に中国国家天文台初代台長）。

## 参考文献

- [1] Hirayama, T., 1974, Solar Phys., 34, 323
- [2] Hirayama, T., 1985, Solar Phys., 100, 415
- [3] Hirayama, T., et al., 1984, NASA Conference Publication, 2310, 59
- [4] Nishikawa, J., 1990, ApJ, 359, 235
- [5] Hirayama, T., 2025, Solar Phys., 300, 11



## シリーズ現代の天文学18 アストロバイオロジー

田村元秀・井田茂・田近英一・山岸明彦（編）

日本評論社 A5版 328頁 定価3,000円＋税

教科書  
お薦め度  
5  
☆☆☆☆☆

近年、系外惑星を含め、アストロバイオロジー関連の一般書をよく見るようになりました。単著のものであれば、研究者自身の視点から系外惑星やアストロバイオロジーの分野を概観しつつ、自身の研究分野の紹介やその後の展開などについて紹介していくものが多い印象です。さらに、子ども向けに書かれた本も出てきました。それらに対しこの本は、各分野のスペシャリストたちがそれぞれの分野を執筆し（もちろん単著のものもその分野のスペシャリストですが）、それでいて互いの章を参照しつつ、全体を読み進められる構造になっており、まさにアストロバイオロジー分野の教科書となるものだと思います。

まず、みなさんは「アストロバイオロジー」と聞いてどういった研究分野を連想されるでしょうか。「系外惑星」や「太陽系内惑星探査」などが連想しやすいかもしれません。また、生命の材料物質ができる分子雲や星・惑星形成も関連すると気づく方もいると思います。一方、天文学にどっぷり浸かっている人の方が、生物学との関連がわかりにくいかもしれません。生物を構成している物質の多くは星の中で合成されたり、生命の必須元素の一部は超新星爆発の際に誕生することは知っていたとしても、生き物の中に入った時点でそれ以上は深く考えないことも多いと思います。この本では、それらを地続きに紹介し、それこそ宇宙史から生命まで、天文学の中の非常に多岐にわたる分野がアストロバイオロジーという分野に関連しているということが紹介されています。「シ

リーズ現代の天文学」という本の性質上、主な視点は天文学からのものであり、生物学における側面は探査・観測可能なものが主ですが、その中でも天文学の教科書ではほぼ見ることのない細胞の構造図や、量子生物学における最新の研究と地球磁場との関係など、生物学の文脈でも非常に多岐にわたる研究がアストロバイオロジーに関連することが垣間見えます。

ある研究者は、「天文学は証拠の少なすぎるミステリーだから面白い」と評し、なるほど思っていたことがあります。星の光を頼りに遙か遠くの天体の性質を調べるなど、確かに情報は限られています。これと同じ言い方をすれば、アストロバイオロジーは「証拠が1つしかないミステリー」と言えるかもしれません。地球上の生命の多様性は数100万種（もしくはそれ以上）と言われる中、宇宙における生命の多様性は、地球一つだけです。このたった一つの証拠を精査し、同時に宇宙における生命の兆候を探し出すことで、「生命とは何か」という根本的な問いに答えるための糸口を探ることが、アストロバイオロジーという分野の裏テーマでもあります。

この本では、その糸口になる前の真綿のようなものが詰まっています。それを紡いで太い糸にするため、ご自身の専門分野を問わず、アストロバイオロジーに興味のあるみなさんに読んでいただきたいと思います。

日下部展彦（アストロバイオロジーセンター）

# 日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

## *Understanding the Epoch of Cosmic Reionization II*

氏 名：影浦優太（東京大学宇宙線研究所 M1  
（渡航当時））

渡航先：イタリア セスト

期 間：2025年1月11～19日

本渡航では、イタリア北東部のセストで行われた国際研究会“Understanding the Epoch of Cosmic Reionization II”に参加し、“Unveiling a Late and Rapid Cosmic Reionization History through Lyman-alpha Emission from ~600 Galaxies Observed by JWST”という題目で口頭発表を行った。研究会では、キューサーや銀河、21 cm線など様々な手法を用いた宇宙再電離の研究や、宇宙再電離期の銀河の性質に関わる観測・理論の第一人者が集まり、活発な議論が行われた。

私はジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）で観測された赤方偏移 $z\sim 5-14$ の銀河のライマンアルファ（Ly $\alpha$ ）輝線測定に基づき、宇宙再電離史を調べる研究を行っている。再電離が進行していない遠方宇宙では、Ly $\alpha$ 輝線は銀河間物質中の中性水素に吸収されるため、遠方銀河のLy $\alpha$ 輝線強度の統計的調査を行うことで宇宙再電離の進行史を推定することができる。私はJWSTで観測された最大規模の銀河サンプルを用いて再電離史を調べ、 $z\sim 7-14$ における高い中性水素割合から、再電離が遅い時代から急激に始まるという結果を得た。また、理論モデルとの比較により、近傍と遠方で電離光子脱出率に大きな進化がなければ観測された再電離史の説明が難しいという問題を明らかにした。本渡航の直前に研究結果をまとめて論文投稿し（Kageura+25 in press）、研究会ではこの論文に基づいて発表を行った。発表後には、Ly $\alpha$ 輝線銀河の赤方偏移進化や理論モデルとの比

較について、多くのご質問をいただいた。また、私が研究するLy $\alpha$ 輝線銀河以外にも、キューサーや21 cm線など、様々な手法を用いた宇宙再電離史の推定について、最新の研究結果から多くの知見を得ることができた。

研究会はアルプスの山中にあるオーストリアとの国境付近の小さな村で開催され、スキーリフトに近いホテルが会場だった。研究会中は私を含め多くの参加者が会場のホテルに宿泊しており、ホテルのレストラン内の一角が研究会参加者に割り当てられていたため、朝夜の食事の際にも幅広い参加者と議論や交流の場を持つことができた。

研究会には宇宙再電離の第一人者が多く集まり、私の研究に直接関係する多くの研究者と議論をすることができた。Charlotte Mason氏とは、Ly $\alpha$ 輝線観測からベイズ推定により宇宙再電離史を推定する手法や、Ly $\alpha$ 輝線観測を用いた再電離研究の将来計画について議論を行った。研究会の主催者であるAndrei Mesinger氏とは、私が再電離史の推定に用いているシミュレーションコード21 cmFASTの最近の開発状況について教えていただき、観測結果と理論モデルの比較について議論を行った。Andrea Ferrara氏やPratika Dayal氏とは遅く急激な再電離の理論的な起源について議論を行い、本研究会の後に別の研究会でもお会いしてさらに議論を深めることができた。このほかにも多くの参加者と議論を行った。

国際研究会での口頭発表はこれが初めてであった。本研究会には私の他に学生の参加者がおらず心細さはあったものの、多くの経験豊富な研究者と交流をすることができた。また、ありがたいことに自身の発表の後には良い発表だったと多くの人に声をかけていただいた。一方で、最前線の研究者の議論にはついていけない部分もあり、Ly $\alpha$

以外の幅広い手法やシミュレーションなど、自分自身の研究内容以外の幅広い知見の重要性を痛感した。本研究会は私自身の研究内容と密接に関わるもので、これほど多くの関連分野の第一人者と議論できる機会は滅多にないと思われる。本渡航

で得られた学びを今後の研究に活かし、宇宙再電離の理解をさらに深めていきたい。最後に、本渡航をご支援いただいた早川幸男基金、関係者の皆様に深く感謝申し上げます。大変ありがとうございました。



写真 イタリアの山中にある研究会会場の様子

## 日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

### *Observations with the Subaru Telescope, and Oral Presentations at Seminars*

氏 名：柳澤広登（東京大学宇宙線研究所 M2（渡航当時））

渡航先：アメリカ ハワイ州

期 間：2025年1月10～15日

本渡航では、すばる望遠鏡による観測、およびセミナーでの口頭発表を行いました。以下に本渡航の内容を報告させていただきます。

私は修士1年の時に、ビッグバン元素合成（BBN）において作られたヘリウムと水素の存在比である原始ヘリウム存在比（YP）を求める研究を始めました。BBNは、宇宙膨張・宇宙マイクロ波背景放射とともにビッグバン宇宙論を支える三つの柱と言われる観測結果ですが、近年の観

測技術の向上にも関わらず、あまり議論がなされていませんでした。そこで私は、BBNで主に作られる元素であるヘリウムに注目しました。YPは、多くの近傍銀河のヘリウムと水素の存在比  $\text{He}/\text{H}$  と、酸素と水素の存在比  $\text{O}/\text{H}$  を求め、BBNでOが作られないことを利用して、 $\text{O}/\text{H}=0$  における  $\text{He}/\text{H}$  を推定することで求められます。そのため、正確なYP測定のためには  $\text{O}/\text{H}$  が非常に低い領域にある銀河である極金属欠乏銀河（extremely metal-poor galaxy; 以下 EMPG）を多数観測する必要があるのですが、過去の観測では EMPG がほとんど使われておらず、系統誤差の大きい結果になっていました。そこで、EMPGの個数を増やしてより正確にYPを測定し、ビッ

グバン宇宙論の検証, さらにはそれを超えた宇宙論を制限することを目標として, 研究を進めていました. すばる望遠鏡の観測は元々修士1年の秋(2023年11月)に予定されており, 解析手法の確立や系統誤差の評価を進め, 観測ターゲットの選定も行っていたのですが, 直前になってすばる望遠鏡の主鏡に問題が出てしまい, 観測が中止になってしまいました. 今回の渡航は, その観測が1年延期されてようやく実現したものになります.

観測は二晩かけて行われました. 初日は天候に恵まれ, 半夜の観測で6天体も観測することができました. これまで三鷹からのリモートでEMPG観測に何度か参加してきたのですが, これほどスムーズに多くの銀河を観測できたのは初めてでした. 自分が選んだ天体を実際に観測するというのは非常に楽しいものだと感じました. 二日目は残念ながら曇りでデータは得られませんでした, 観測の楽しさと厳しさの両方を知ることができたという意味で, 非常に良い経験になっ

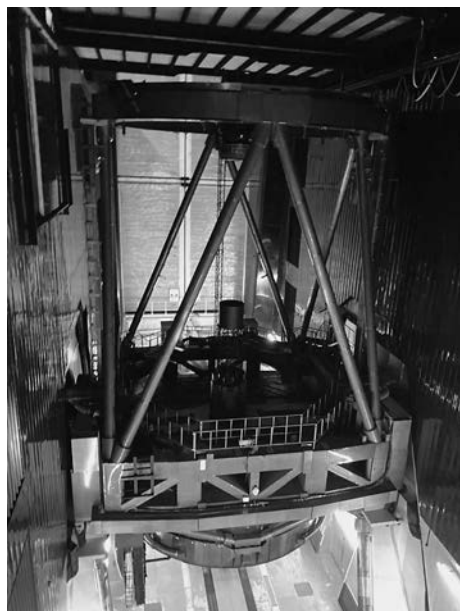


写真 すばる望遠鏡を見下ろした写真. 主鏡・主焦点などが写っている.

たと思います. また, 曇りで観測ができない間に, サポートアストロノマーの田中壺さん, 指導教員の大内正己さん, 共同観測者の松本明訓さんと, すばる望遠鏡での新しい観測について議論をさせていただき, 先日そのアイデアをもとにすばる望遠鏡に観測提案を出すことができました. データは得られなかったものの, 今後の研究にも繋がる議論ができ, 大変有意義な時間でした. なお, 一日目に得られたデータは, 現在準備中の論文(Yanagisawa et al. 2025 in prep.)にまとめ, 査読論文に投稿する予定です.

また, 田中さんのご協力で, 日没前にはすばる望遠鏡内部を見学させていただきました. 画像では見たことがあったし, 望遠鏡の原理も知ってはいたつもりだったのですが, 実際に自分自身の目で見たすばる望遠鏡は, 想像を遥かに超えていました. まず, その大きさに圧倒され, 次にこの巨大な装置を精密に制御する技術に衝撃を受けました(写真). さらに, すばる望遠鏡が25年間も天文学分野で第一線の装置として活躍している裏では, 多くの人々が日々整備を行ってくださっているということも知りました. 私が観測を行って, 得られたデータで研究ができるということは, これらの人々の弛まぬ努力のおかげであるということを知り, 感謝の気持ちを忘れずに研究をしなければならぬ, と痛感しました.

観測の翌日は, ヒロの山麓施設でのセミナーで口頭発表を行いました(写真). すばる望遠鏡の観測が中止になっていた時期に私がジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)のデータで行った遠方銀河のHe/Hに関する研究を紹介するとともに, すばる望遠鏡によるHe/H研究についても議論を行いました. 特にJWSTで見つかった遠方銀河のバルマー輝線比異常に関する研究(Yanagisawa et al. 2024, ApJ, 974, 180)については多くの質問を頂き, 興味を持っていただけたことを嬉しく思いました. 中には私が持っていなかった視点からの質問もあり, 今後の研究にも繋

がる議論ができたと思います。

上述のように大変実りある経験ができたのは、早川幸男基金のご支援のおかげです。今回の経験を今後の研究に活かし、より良い研究ができるよ

う精進してまいります。本渡航をご支援いただいた日本天文学会、早川幸男基金、関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

## Hayakawa Satio Fund

### 早川幸男基金とは

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

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

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

### 早川幸男基金ホームページ

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

### 寄贈図書リスト

- ① 天文学者が1を知ると、宇宙は10の謎を投げかけてくる、田中雅臣 津村耕司 編著、佐藤文衛 前原裕之 守屋堯 榎山和己 著、四六判、260

ページ、1,980円＋税、河出書房新社

- ② 星のギリシア神話研究 星座を彩る物語と文化 エーゲ海の風、早水勉、星ナビ編集部 編、A4 変形版、208ページ、2,545円＋税、KADOKAWA

## 月報だより

月報だよりの原稿は毎月20日に締切り、翌月に発行の「天文月報」に掲載いたします。ご投稿いただいた記事は、翌月初旬に一度校正をお願いいたします。

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

### 人事公募

#### JAMSTEC Young Research Fellow 2026

JAMSTEC Young Research Fellow 2026公募を開始いたしました。

自然科学・工学分野の博士号取得5年以内の若手研究者を募集する制度です。

JAMSTECの研究開発環境を活用することで、自身の研究課題をより卓越した業績へと発展させ、国際的に活躍する自立した研究者として飛躍することが期待されます。

■募集人員：約5名

■勤務地：国立研究開発法人海洋研究開発機構 以下の研究拠点のいずれか

- ・横須賀本部 神奈川県横須賀市夏島町2番地15
- ・横浜研究所 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173番地25
- ・むつ研究所 青森県むつ市大字関根字北関根690番地
- ・高知コア研究所 高知県南国市物部乙200（高知大学物部キャンパス内）

■専門分野：自然科学・工学全般

■応募締切：2025年8月3日

■問合せ先：

国立研究開発法人海洋研究開発機構

人事部人事任用課 採用担当 [jyrf2026@jamstec.go.jp](mailto:jyrf2026@jamstec.go.jp)

詳細は募集要項をご確認ください。

※本公募の募集要項は英文のみとなります。

<https://www.jamstec.go.jp/recruit/j/jyrf/>

### 賞の推薦

#### お茶の水女子大学賞： 第13回湯浅年子賞募集要項

設立趣旨

湯浅年子賞は、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構（KEK）が日仏共同事業として運営する Toshiko Yuasa Laboratory（TYL）の協力を得て、湯浅年子博士の自然科学及びその関連分野への功績を記念して設立した賞で、お茶の水女子大学賞の1つとして位置づけられている。

目的

湯浅年子賞は、本学及びその前身校において数多くの女子学生を育て、フランスにおいては長年にわたって優れた原子核の実験的研究を行い、国際的に活躍した日本初の女性自然科学者である湯浅年子博士の遺志が若い世代に受け継がれることを願い、自然科学の諸分野において顕著な業績を挙げた女性を顕彰することを目的とする。

賞の種別

- (1) 金賞 物理学とその関連領域分野における業績が著しく顕著であり、国内あるいは国外において、既に高い評価が確立している女性を顕彰する。
- (2) 銀賞 物理学とその関連領域分野における業績が特に顕著であり、近い将来当該分野において、国際的に活躍する女性になると認められる者を顕彰する。

受賞対象者

次の(1)、(2)両方を満たす者。

- (1) 物理学とその関連領域分野において顕著な研究業績を挙げた者。また、物理学とその関連領域分野の社会的普及活動あるいは同分野の女性研究者を増大させる活動において、顕著な業績を挙げた者

も受賞対象者とする。

- (2) 日本国籍を有する者または日本において高等教育を受けた者。

#### 授与

受賞者には、賞状及び副賞のメダルを授与する。(メダルは大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構が日仏共同事業として運営するToshiko Yuasa Laboratoryより授与される。銀賞受賞者は、Toshiko Yuasa Laboratoryによりフランスに招聘される。)授賞式は2026年2月17日予定。

#### 審査方法

書類審査(書類審査合格者に対して面接審査を行う場合がある。)

#### 応募方法

他薦に限る。以下の書類(形式自由)を、推薦者より提出する。

- (1) 推薦書 被推薦者の業績タイトル、推薦理由、賞の種別(金賞、銀賞)、推薦者の住所、氏名[フリガナ]及びメールアドレスを記載すること。
  - (2) 被推薦者の履歴書(写真貼付)
  - (3) 被推薦者の業績一覧(論文(審査の有無別)、著書、招待講演、学会発表、その他に分類すること)主たる業績3点以内に○印を付けること。
  - (4) 被推薦者の主たる業績を表す資料3点以内
- (1)～(4)のPDFファイルを下記のメールアドレスに送ること。

なお、PDFファイルにしがたい資料は郵送による提出も可能。

#### 提出締切

2025年9月5日(金)(17時必着)

#### その他

- (1) 応募書類の提出後、その記載事項を変更することや補充することは認められません。提出された応募書類の内容が事実と異なる場合、当該応募は無効となります。
- (2) 提出された応募書類は返却しません。
- (3) お茶の水女子大学は、面接審査のための旅費は負担しません。
- (4) 応募書類に虚偽が発見された場合は、授賞後であっても授賞を取消すことがあります。
- (5) 応募書類を受領後に確認メールを送付するので、メール送信後3日以上(土日祝、夏季一斉休業期間である8月12日～18日を除く)受領確認のメールが届かない場合には、お問い合わせください。

本件に関する問い合わせ・提出先

〒112-8610 東京都文京区大塚2丁目1番1号

国立大学法人お茶の水女子大学 広報・ダイバーシ

ティ推進課 ダイバーシティ推進担当

E-mail: Ocha-Prize@cc.ocha.ac.jp 電話: 03-5978-5336

## 令和7年度『東レ理科教育賞』および『東レ理科教育賞・企画賞』募集

“東レ理科教育賞”は、中学・高校の理科教育に携わる先生方を表彰するユニークな事業です。応募要領をご覧のうえ、どうぞ奮ってご応募ください。

#### 【東レ理科教育賞】

対象: 中学校・高等学校レベルでの理科教育における新しい発想と工夫考案にもとづいた教育事例(教育の現場で実績のあるもの)。

褒賞: (1) 東レ理科教育賞文部科学大臣賞(東レ理科教育賞の中で特に優れているもの)賞状、銀メダルおよび副賞賞金100万円、(2) 東レ理科教育賞賞状、銀メダルおよび副賞賞金70万円、(3) 東レ理科教育賞佳作(東レ理科教育賞に次ぐもの)賞状および副賞賞金20万円、(4) 東レ理科教育賞奨励作(東レ理科教育賞および佳作とは別に、理科教育上広く普及を奨励するもの)賞状および副賞賞金20万円、を合せて10件程度選定。

応募手続: 9月29日(月)正午までに専用ウェブフォームにて事前申込みの上、所定の応募用紙(申請書)に必要事項を記入し、PDF形式に変換して応募専用メールアドレス宛てに送信。

応募締切日: 2025年9月30日(火) 必着。

応募要領URL:

<https://www.toray-sf.or.jp/awards/education/application.html>

#### 【東レ理科教育賞・企画賞】

対象: 中学校・高等学校レベルでの理科教育における新しい発想と工夫考案にもとづいた企画・開発。

褒賞: 賞状および副賞賞金10～20万円(10件程度選定)。

応募手続: 9月9日(火)正午までに専用ウェブフォームにて事前申込みの上、所定の応募用紙(申請書)に必要事項を記入し、PDF形式に変換して応募専用メールアドレス宛てに送信。

応募締切日: 2025年9月10日(水) 必着。

応募要領URL:

[https://www.toray-sf.or.jp/awards/education/application\\_plan.html](https://www.toray-sf.or.jp/awards/education/application_plan.html)

#### 【両賞共通】

応募資格: 中学校・高等学校の理科教育を担当、指導、または研究する方。応募要領参照(6月下旬に昨年度の受賞作品集とともに全国の中学校、高等学

校、高等専門学校の学校長経由理科担当教諭宛などに送付。ウェブサイトにも掲載）。応募用紙はウェブサイトからダウンロードしてください。

【お問合せ】公益財団法人東レ科学振興会

〒103-0021 東京都中央区日本橋本石町3-3-16

Tel: 03-6262-1656 Fax: 03-6262-1901

## 朝日新聞・朝日新聞文化財団：

### 2025 年度朝日賞候補者

2025 年度朝日賞候補者募集についてご案内いたします。

なお、学会推薦による応募であるため、本会にて提出書類を審査の上、推薦いたします。

日本天文学会 事務所

〈対象〉

学術、芸術などの分野で傑出した業績をあげ、わが国の文化、社会の発展、向上に多大の貢献をされた個人または団体。原則として年度賞とし、毎年1月から12月までの業績。長年にわたる業績を対象とすることもあり。

〈助成金額及び採択数〉

ブロンズ像と副賞500万円。1件。

〈推薦要項〉

推薦票を学会へ請求し、必要事項を入力の上メールにて提出してください。

請求・提出先：学会事務長 <jimucho@asj.or.jp>

〈締切〉

2025年8月12日(火) (学会締切)

〈問い合わせ先〉

賞に関して：朝日新聞社 朝日賞事務局 (asahiprize@asahi.com)

学会推薦関係：学会事務所

## 編集委員会より

### 天文月報表紙デザイン案大募集！

天文月報では、次の一年間の表紙デザインを常時募集しております。毎年8月31日に締め切り、一年間で集まった作品を対象に、翌年の表紙デザインを選考します。詳しくは下記募集要項をご確認ください。応募はプロ・アマチュア、会員・非会員問わずどなたでも受け付けておりますので、多くの方からの応募をお待ちしております。

〈募集概要〉

・採用作品掲載期間は毎年1号（12/20発行）～12号（11/20発行）の12ヶ月（12回分）です。

・表紙は題字（『天文月報』の文字）、号数、日本天文学会のロゴマーク、記事タイトル、カラー画像（毎月変更）および背景イラストで構成されます。すべての配置を含めたデザインをお願いいたします。

・毎号違うイラストでも、同じデザインで色違いでも構いません。具体例は過去の天文月報をご覧ください。天文月報のホームページのバックナンバー

<https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/backnumber>

■募集要項・天文月報投稿用アップローダーに、表紙デザイン案の画像ファイル、およびそのコンセプトをお送りください。

・カラー：CMYK

・ファイル形式：不問

・雑誌のサイズ：B5判タテ（182ミリ×257ミリ）

・締切り：2025年8月31日

・送り先：天文月報編集委員会天文月報投稿用アップローダー

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

ユーザー名：geppou パスワード：toukou

■応募規定

・募集する作品は、応募者が作成した未発表のオリジナル作品に限りします。

・作品の中に第三者が著作権等の権利を有している著作物等を利用していないものとします。

・採用された場合、納品された表紙の著作権（著作権法第27条及び第28条に規定する権利を含む。）は日本天文学会天文月報編集委員会に帰属します。

・採用された場合、表紙に使用したオリジナル原画の著作権（著作権法21条から26条の3に規定する権利。）は日本天文学会天文月報編集委員会に帰属します。

・採用された場合、著作者が表紙に使用したオリジナル原画を他の目的で使用する際は、事前にその旨を日本天文学会天文月報編集委員会に知らせ、転載許可を取ってください。

・応募にあたりご提供いただいた個人情報、本要項による採用作品の通知のためのみに使用します。

・採用された方には、規定の謝礼をお支払いします。（24万円/1年分（税込み・毎月払い））

・問い合わせ先

問い合わせフォーム：<https://www.asj.or.jp/jp/contact/>

eメール：[geppou@asj.or.jp](mailto:geppou@asj.or.jp)

表紙デザイン募集サイト

<https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/design/>

---

## 訂 正

---

- ・天文月報7月号の月報だよりにより、本来掲載されるべき人事公募記事が事務的な手違いにより掲載されませんでした。掲載できなかった人事公募記事は、次のとおりです。

文教大学教育学部理科専修（地学） 教授，准教授または講師  
1名の公募

関係の皆様には多大なるご迷惑とご心配をおかけしましたこと，心よりお詫び申し上げます。

なお，当該人事公募情報は，6月27日付けでオンライン版に掲載するとともにtennetで配信いたしました。

- ・天文月報7月号月報だよりp.448の訃報におきまして，「木暮智一氏」は「小暮智一氏」の誤りです。お詫びして訂正いたします。

## 天文月報 118巻9月号 主な掲載予定記事

ASTRO NEWS: XRISM ニュース (4) 観測速報その3

アストロバイオロジーセンター10周年特集 (3): 多色同時撮像カメラ MuSCAT シリーズ 10年の歩み【成田憲保】

EUREKA: 天の川銀河中心にある分子雲の“速度計測”【酒井大裕】

天球義: 福井工業大学学部生による手作り望遠鏡を用いたパルサー観測報告【宮本祐介ほか】

〈シリーズ〉海外の研究室から: 太陽の家ハレアカラから太陽観測【阿南徹】

〈シリーズ〉天文学者たちの昭和: 日江井榮二郎氏ロングインタビュー [第6回] 日食観測 (2)【高橋慶太郎】

編集委員: 日下部展彦 (編集長), 岡本文典, 小山翔子, 志達めぐみ, 鈴木大介, 高橋葵, 田中壱, 谷川衝, 鳥海森, 中島亜紗美, 信川久実子, 橋本拓也, 福島肇, 藤澤幸太郎, 宮武広直, 宮本祐介, 守屋堯

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

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

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

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

振込口座: 郵便振替口座00160-1-13595 日本天文学会

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

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

会費には天文月報購読料が含まれます。

©公益社団法人日本天文学会2025年 (本誌掲載記事は無断転載を禁じます)