

すばる3時代

宮崎 聡^{1,2}

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

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

e-mail: satoshi@naoj.org



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

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

1. すばる望遠鏡の観測装置：ファーストライトから現在まで

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

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

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

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

表1 これまでのすばる望遠鏡の観測装置

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

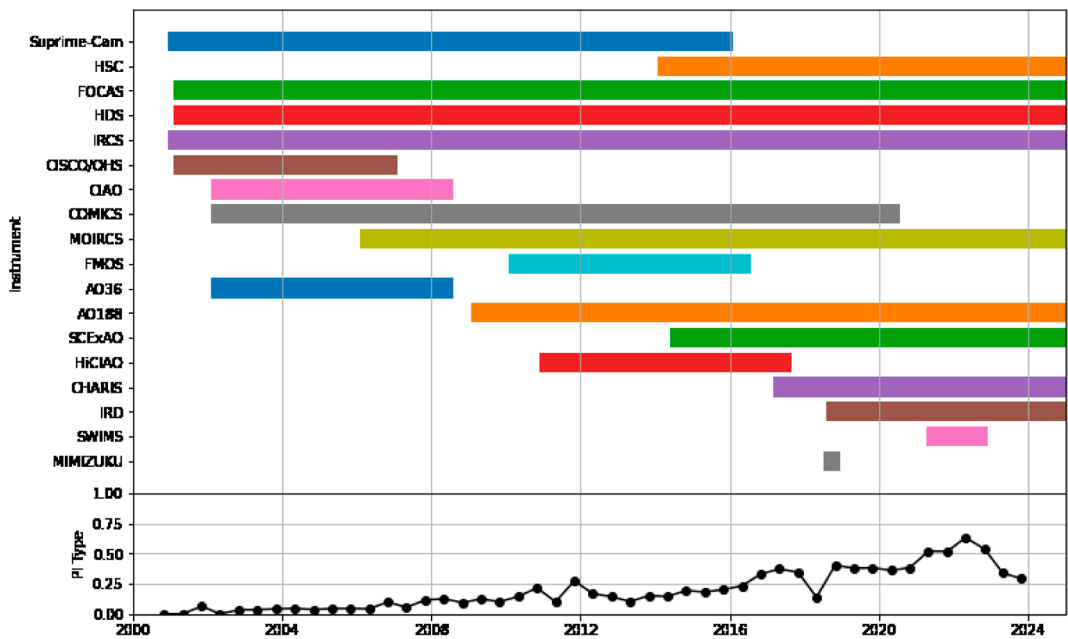


図1 すばる望遠鏡の観測装置の歴史。右端に達している装置は、現在運用中のものである。最下段MIMIZUKUをのぞいて、全て共同利用装置である。SCEXAO以下は、PI型の装置であり、図下段にPI型装置が共同利用で用いられる割合の推移を示している（本文参照）。

研究成果があがると引退し、その運用期間はおよそ6-7年である。

PI型と分類される装置は、装置開発グループ

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

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

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

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

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

2. これからの観測装置

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

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

表2 これからのすばる望遠鏡の観測装置

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

3. すばる3時代の観測装置

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

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

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

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

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

4. すばる3時代の望遠鏡運用

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

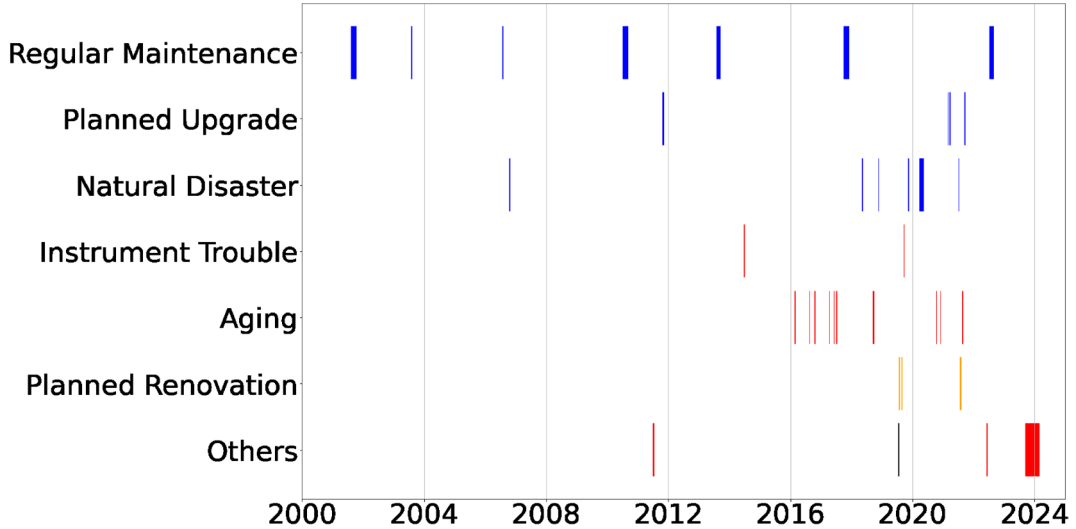


図2 望遠鏡運用休止期間の原因別履歴. 一日以上休止した場合をカウントし、夜の一部分が休止した場合は含まれていない。また、曇天による休止も含まれない。

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

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

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

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

4.1 予想される運用経費や人員削減への対応

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

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

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

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

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

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

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

5. ま と め

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

参考文献

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

Phase Subaru 3

Satoshi MIYAZAKI

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

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

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