

すばるの現在と今後：科学運用と戦略枠

児玉 忠 恭

〈東北大学大学院 理学研究科 天文学専攻 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3〉

e-mail: kodama@astr.tohoku.ac.jp



すばる望遠鏡が過去20年に渡って世界第一線の科学的成果を挙げて来られたのは、ひとえに国立天文台、特にハワイ観測所のスタッフの望遠鏡の安定運用のための献身的な努力と、全国そして海外にも展開する広いユーザーコミュニティの皆さんの科学運用面での協力、そして様々な独創的なアイデアによる有効な科学利用のお陰である。しかし国際競争が厳しさを増す中、すばる望遠鏡の予算は減る一方で、これからも世界の望遠鏡に伍して顕著な成果を出し続けるためには、これまで以上に戦略的な科学運用が重要性を増してきている。本稿では、すばる20周年にあたり、たまたますばる科学諮問委員会(SAC)の委員長をしていた私が、このお題で執筆依頼を受けたので、すばる望遠鏡の現在そして将来の科学運用について少し考えてみたいと思う。ただしこれはあくまで個人的な所感であり、決してSACを代表するものでないことをお断りしておく。

すばるのお家芸

すばる望遠鏡の強みって何ですか？と国内外の研究者に聞くと、恐らく十中八九の人が「広視野」というキーワードを口にするだろう。「視野が広い」というと、一般の人は博識とでも連想するだろうが、もちろんここでは一度に見られる天域の広さであり、現在満月7個分を一度に見渡せるすばるの視野は8-10メートル級望遠鏡の中で断トツの一番である。もちろん視野の広さ以外の特長を持った優れた装置もあるのだが、やはりすばるといって広視野のイメージが際立っていると言えるだろう。世界一頑丈な望遠鏡を作り、その先端の主焦点に乗用車3台分(3トン)もの重量の装置を吊り下げられるように設計・改造したそのこだわりは素晴らしく、その先見の明に大いに敬意を覚えるし、甲斐あったと胸を張って言えるだろう。Suprime-Camから始まりHyper Suprime-Cam(HSC)と、もうその上の形容詞がなくなるほどのイカつい(でもタイポっぽい)名前

の是非はともかくとして、前者が第一期の主力装置として活躍してすばるの評価を不動のものとし、今や後者へとしっかりバトンが引き継がれている。実際前人未踏のサーベイが進行中である。これらはともに可視光カメラであるが、近赤外線でもMOIRCSとFMOSという広視野の撮像、分光装置も作られ活躍した。FMOSはすでに退役したが、こちらでもPFSという夢の巨大な主焦点分光器にバトンを引き継いでいて、完成間近に迫っている。そしてその先に計画されているのが、地表層補償光学GLAOを使った広視野赤外線サーベイ計画(ULTIMATE)である。これはカセグレン焦点で14分角の視野を実現する計画である。したがって今から10年後のすばる望遠鏡は、暗夜は主焦点に可視光のHSCとPFS(一部近赤外も可能)が交互に取り付けられ、明夜は可変副鏡に交換してカセグレンでULTIMATEの近赤外装置が主に働くといった運用が行われているかもしれない(図1)。かくして良い意味で歴史は繰り返し、広視野はすばるのお家芸であり、今後もす

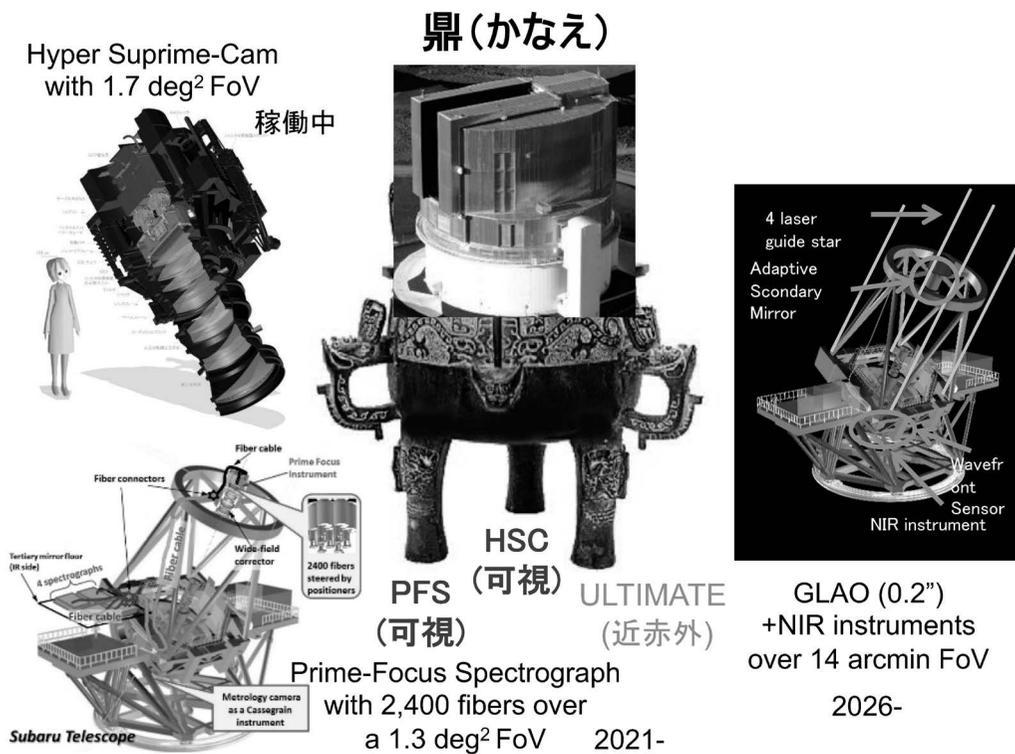


図1 すばる望遠鏡の近未来：3つの鍵となる広視野観測装置

ばるが在る限りそうあり続けるであろう。

それをどう生かすか？

ではその宝をこれまでどのように生かしてきたのか、そして今後どう生かしていくべきであろうか？

まずすばる望遠鏡完成直後のSuprime-Camの時代はどうだったかという点、その当時はまだ現在の戦略枠プログラム（下述）はなく、観測所が装置グループと協力して主導するプロジェクトが組織された。SDF (Subaru Deep Field) とSXDS (Subaru-XMM Deep Survey) という二つの大型プログラムである。この最初期から既に観測時間を集中投資しレガシーと呼べるサーベイをすばるが主導して進めたことは大変意義深かった。数密度の低い超遠方天体の発見や、空間的に広がった銀河団やダークマターの大規模構造サーベイなど

が行われ、これまでの知見を大きく拡張する発見が相次いだ。SXDSはX線のXMM-Newton衛星観測だけでなく、イギリスのUKIRTの近赤外超広視野カメラWFCAMのUKIDSSサーベイとも連携してUDS (UKIDSS-Ultra Deep Survey) フィールドと広く呼ばれるようになり、そのお陰で現在も世界中のさまざまなサーベイが集中する有名天域の一つとして発展的に存在し続けていることは大変喜ばしい。一方でSDFは当時は華やかだったものの、現在は海外はもとより国内ですら忘れられつつある領域で少し寂しいのも事実である。この経験は、独自路線に固執して突っ走るだけでなく、海外の強力なサーベイと密に連携することの重要性を物語っている典型例とも言えるであろう。

戦略枠プログラム（SSP）の開始

HiCIAOというコロナグラフと補償光学を使った赤外装置が立ち上がるのに合わせて、すばる小委員会（現すばる科学諮問委員会；SAC）などで重点的に議論された結果、すばる戦略枠観測プログラム（SSP: Subaru Strategic Program）というものが2009年から開始されることになった。国立天文台ハワイ観測所のホームページに定義があるので抜粋する。

（抜粋開始）すばる望遠鏡「戦略枠」とは、他の追随を許さないユニークな観測装置（またはその組み合わせ）を用い、個人または個別グループの研究課題を超えて、長期にわたるまとまった観測を行うもので、これによってすばる望遠鏡の成果を世界により強く発信するとともに、当該分野でサイエンスのリーダーシップを確立することを目的とするものである。ハワイ観測所プロジェクトおよびSACが責任を持ってこれを推進する。戦略枠にふさわしい課題としては、次のような範疇のものが挙げられる。

A. 歴史的サーベイ観測

高いサーベイパワーを持つ観測装置を用いて、得られる科学的成果のみならず、取得されるデータそのものが日本、および世界の天文学者にとって利用価値が高い場合、とくに、個別の割付でなく、深さ、視野、などの面で、戦略的かつ系統的な計画が非常に有効である場合。

B. 重要で明確な目的をもつ系統的観測

ユニークな観測装置を用いて、天文学における重要、かつ明確な目的に添って、個別の課題を超えて系統的かつ長期的な観測が必要な場合。

（抜粋終わり）

このように戦略枠は新しい装置が立ち上がる時期に合わせて、レガシー価値の高い大型プログラムを真っ先に重点的に実行しようというもので、ユーザー（主に装置グループ）からの要望に応じ

て公募される。一般共同利用にインテンシブプログラムというのがありますが、それに収まらない規模のものである。審査は他の一般共同利用プログラムに比べてさらに厳格に行われており、まずSACで選んだ国内外の有識者による予備審査から始まり、ハワイ観測所、すばる望遠鏡観測時間割当委員会（TAC）、SACで技術審査（体制を含む）、科学審査、総合審査が全て行われて最終的に決定される。SSPは推進母体の申請チームだけでなく、日本全国の興味を持つ研究者（もちろん大学院生も含む）が参加できるオールジャパン体制になっており、SSPのデータをとある新しいアイデアで活用して研究がしたいと名乗りを上げれば、その人を中心に興味を持つ人が集まってチームを結成して推進することができる。このようなオープン体制もこのレガシーデータを最大限活用するために非常に有効な仕組みである。

第一回目のSSPは、当時の新しいPI装置であるHiCIAOに対して公募され、補償光学による直接高解像撮像によって系外惑星や原始惑星系円盤を探索するプログラム（SEEDS）が採択され、2009年から2015年までの120晩をかけて実行された。これは上で述べた広視野という方向とは違うが、日本（すばる）が世界に率先して高解像度の直接撮像観測を牽引し、円盤の隙間や渦巻き構造を示すなど視覚的にも大きなインパクトのある結果を生み出した。

次のSSPがFMOSという主焦点の近赤外線ファイバー分光器を使う、FastSoundと呼ばれた赤方偏移サーベイで、遠方銀河の大量サンプル（4000個）の後退速度を測定し、その分布を詳しく調べることにより構造形成のスピードに制限を与え、そこから宇宙論パラメーターに制限を与えるという課題であった。これはまさに8-10 m級望遠鏡で当時最大視野を誇る赤外線分光器が可能にした課題である。

そしてその次のSSPがHSCという主焦点超広視野可視光カメラで300晩もの観測時間を費やす

最大規模の撮像サーベイであり、2013年に開始してまだ継続中である。浅くて広いWIDE（1400平方度）、深くて狭いDEEP（27平方度）、非常に狭いが極めて深いUltra-DEEP（視野分3.5平方度）の3つのクラスのサーベイを組み合わせたものである。他の望遠鏡や多波長の様々な観測がなされていて、よく知られ研究されている天域を覆い尽くすように設定されており、世界中の天文学者にとってレガシー価値は非常に高い。もちろんのことながら非常に稀な天体（超遠方銀河や、遠方銀河団、遠方AGNなど）の圧倒的な統計サンプルを構築したり、宇宙の大規模構造をマッピングしたりと、様々な独創的な研究がなされている。広視野を売りにするすばるの真骨頂ともいえるプロジェクトであり、今続々と論文が出版されている途上である。ちなみにHSC-SSPはハワイで稀にみる長期間の悪天候に見舞われ、想定を超える夜を失ってしまった。そこで最近30晩の追加申請がなされ、その高いレガシー価値を鑑みSACで認められた。

そして最も新しく、まだ始まったばかりのSSPが、IRDという新しいPI装置を使い、低温の星の赤外線高分散分光を行って視線速度を高い精度で測定し、その時間変化から系外惑星を発見しようというプロジェクトである（ドップラー法）。全部で175晩の申請の内とりあえず70晩が採択された。究極の目的は、世界中がこぞって探している地球型系外惑星を見つけることで、その成果が期待されている。

このように戦略枠は際立った特長を最大限に生かし、他の追随を許さないサーベイを可能にしてきており、日本の天文学を世界第一線に押し上げ、現在のすばるの高い地位を築きあげることに大きく寄与したと言えるであろう。

すばるは今後どうなる？ どうする？

現在すばるでは上述のHSC, IRDに加え、ハワイ観測所発の独創的なアイデアで開発された高コ

ントラストコロナグラフと補償光学を組み合わせたSCEXAOというPI装置が稼働を開始している。この新装置の開発と系外惑星からの熱放射を捕える探査に、世界中が注目していることも追記しておく。

まだ始まったばかりで結果が出ていないSSPもあるが、上述のようにこれまで戦略枠は論文も量産されれば狙い通りの成功を収めてきた。一方で世界は常に進化し続け、広視野観測も我々すばるだけのお家芸ではなく、特に近い将来に激しい世界競争に晒されるのは確実である。また2030年代には30m望遠鏡（TMT）が控えており、今後限られた予算の中ですばるとTMTをどうやって共存させていくのかが問われている。このような状況の中、我々は今後すばる望遠鏡をどのように科学運用していくべきであろうか？

科学技術・学術審議会の学術研究大型プロジェクトに関する作業部会の報告書では、すばる望遠鏡の計画推進に当たっての留意事項として、以下のような指摘がなされているので抜粋する。

（抜粋開始）TMTが竣工するまでの間、すばるが世界最先端の望遠鏡群の一つであることに鑑み、日本の世界的な競争力の維持、向上につながるよう、すばるの持つ特徴、強みを最大限発揮して最先端の成果を目指す具体的な科学目標の早期設定が必要である。

科学目標の達成に向け、すばるの機能維持・向上、観測装置の開発、観測データの取得と解析、それらに基づく研究、それぞれのバランスにおいて、限られた予算、人員に配慮しつつ、何がどこまで必要なかを明らかにすることが望まれる。

また、この検討の中では、サイエンスの面に限らず、国内外の諸機関との連携協力を進めて外部資金の更なる獲得を図ることや、直面する施設・設備の老朽化対策、TMTとの一体的な運用に向けたハワイ観測所の体制の見直しなども勘案されるべきである。

更に、TMTの竣工後、大規模学術フロンティ

ア促進事業の枠組みから外れることが見込まれていることを視野に入れ、ハワイ観測所としてすばるとTMTの両望遠鏡を一体的に運用する観点から、引き続き、互いの役割分担を進めるとともに、すばるの主焦点への特化による運用の簡素化、及び海外諸国との共同による運用負担の更なる軽減を図るなど、効率的な運営体制を構築する必要がある。
(抜粋終わり)

これらの方向性をどう実現していけば良いか？

世界は大規模サーベイ時代

すばるをはじめ、現在世界は大規模サーベイ時代に突入している。まず撮像に関しては、米NSFのLSST（チリ；可視光・近赤外）、欧州ESAのEuclid（スペース；可視・近赤外）、米NASAのWFIRST（スペース；可視・近赤外）が圧倒的である。LSSTは南天を中心にすばるHSC-SSPの10倍規模の多色サーベイを行う予定である。そしてEuclid・WFIRSTは波長を $2\mu\text{m}$ まで伸ばして宇宙から走査観測を行う。これらはいずれも2020年代前半から中盤にかけて行われる。

また分光探査では、後述のすばるPFSが2021年に立ち上がる予定であるが、同様の多天体分光機能を持つDESI（4 m, キットピーク）が先んじて2020年から宇宙論サーベイ（BAO）を行い、ESOのMOONS（8 m, VLT）も2023年から銀河進化や銀河考古学の大規模分光サーベイを行うことになっており、宇宙の地図がどんどん描かれ、その住民である銀河や星の性質が詳細に調べられる時代がもうそこまで来ている。

ついにPFSがすばるにやってくる

このような時代の中、すばるにも2021年に待つに待ったPFSがやってくる。9億ピクセルに総重量が3トン以上もある、すばる望遠鏡の次期目玉装置である。主焦点に配置されるファイ

バーで天体からの光を取得し、望遠鏡横の特設部屋に置かれた分光器へと光を伝送して分光する。HSCに匹敵する視野（1.3度）を誇り、2400個ものファイバーで一網打尽に天体を分光することができる夢のような装置である。これまで4 m級望遠鏡では類似装置があったが、8 m級の望遠鏡では初の快挙である。東大Kavli-IPMUを中心に、7か国・地域の12機関が開発に参加している。このパートナーの多さ自体がこの装置への世界中からの注目度の高さを物語っていて、まさに垂涎の装置なのである。

そしてこの最新装置を完成と同時にスタートダッシュで使いこなし、世界に先んじて独創的な成果を最大限上げるために、300-360夜規模の戦略枠プログラムが満を持して準備されている。すばるではこれまでにない巨大な国際チームであるので、内部での調整や統率が大変であることは想像に難くないが、国内外の世界第一線の研究者が先導して着々と準備を進めている。

しかしながら、上述のような世界情勢を考えると、PFSのSSPはこれまでのSSPと同等の扱いで進めて果たしていいのだろうか？ 至上命題は、類似プロジェクト（DESI, MOONS）との国際競争に勝ってインパクトのある成果を真っ先に上げること、次世代の広視野撮像サーベイ（LSST, Euclid, WFIRST）と連携した分光サーベイを実行し共同で独創的な成果を上げることである。そのためにどうすればいいか？ これまでもSSPは他の一般共同利用観測に優先して夜を配分し実行されてきたのであるが、競争力を最大限高めるためには、さらなる「加速運用」という選択肢はないだろうか？ 現在SACでは、国立天文台長からの諮問を受けて、PFSの初期重点加速運用の可能性について議論を始めている。

この議論において注意しないといけない点は、当然ながらSSP以外の一般の個別観測プログラムを圧迫することである。SSPの運用が開始された時、コミュニティーを代表するSACで様々な議

論が行われ、SSPと一般共同利用プログラムとの適切なバランスについて方針が決定された。それは一般共同利用プログラムに、科学運用時間の少なくとも40%を確保するというものであった。SSPは日本全国の研究者が参加できるため、日本のコミュニティが割を食うことは原理的には無いのであるが、各SSPによって恩恵を受ける研究分野が限られること、SSPでカバーされない中小規模な研究も当然ながら極めて相補的で重要であること、他の装置を使った観測時間が過度に圧迫されないこと、などの様々な観点から議論され決定された。そしてこの方針はこれまでのSSPでは厳密に守られ運用されてきた。

しかし今議論しようとしているPFS-SSPの重点加速運用は、この原則を見直す必要が生じる可能性もゼロではないため、得失を定量的に評価し、ユーザー・コミュニティの理解も得ながら、慎重に検討・議論していく必要がある。観測所による今後約10年間の夜数シミュレーションも参照しながら検討したい。実際重点的に観測されるHSC-SSPの中心フィールド(COSMOS, UDS)が見える季節では夜数が足らず、PFS-SSPの割合を増やそうにも、そもそも限界に達している可能性があるからだ。

この問題は多くの要素が複雑に絡み合っているため、簡単な解はなく、検討に難航が予想される。しかし大切なことは、今後も10年、20年とすばる望遠鏡が際立ったサイエンス成果を創出して研究者や一般国民を魅了し続け、世界でも第一線であり続けることである。この原点を常に頭を中心に据えながら、コミュニティと一緒に慎重に、しかしスピード感を持って考えていきたいと思う。

すばるの国際共同運用

今すばるが直面するもう一つの大きな課題は、残念ながらお金の問題である。すばるを擁する光赤外コミュニティは現在さらに大きなTMTプ

ロジェクトを国際共同で進めており、すばるとの予算的な両立が大きな課題となっており、そのためにはすばるの運用費を縮減することが絶対条件となっているのだ。しかしながら内部努力で改善できる範囲を超えており、海外パートナーを呼び込んですばるを共同運用することによって、日本が負担する運用費を減らすしか方法がないのが現状である。そこでこの度SACとハワイ観測所と国立天文台執行部とで密に協議しながら国際共同運用の枠組みを策定し、それを実行に移す決断を行った。日本だけの資金で建設し、これまでその大部分の時間を日本だけで使ってきた国産望遠鏡にとって、この決断は大きいものである。取っ掛かりは経済的な観点からある意味後ろ向きに検討が始まった国際化かもしれないが、昨今のアカデミアでも見られるグローバリズムの流れを考えると、むしろこの方向は自然である。世界にある最先端の望遠鏡群は、それぞれの強みを持って棲み分け、役割分担をし、全体として多様な機能をカバーしようという考え方で、今や多くの研究者がそのような考え方を強く意識し始めていると思う(有本氏稿参照)。これによって重複機能を軽減できるので、装置と運用のコストダウンおよび効率化を図ることもできるだろう。そして開かれた運用を行って、ユーザーの相互乗り入れを可能にし、国際的な共同研究を促進することができるであろう。

今すばるは、TMTのパートナー国でもある中国、カナダ、インドなどと国際共同運用の交渉を進めている。将来(つまりTMT)を共有する国の方が協力しやすいし、将来を見据えた戦略的な共同研究を促進しやすいと期待するからである。また自由度を増し、敷居を下げ、そして機動性を高めるために、パートナーの単位は国だけではなく、大学や研究所、またそれらのコンソーシアムにまで拡大して受け入れることも考えられている。

本稿を書いている段階では、まだどの国際パー

トナーとも協定まではたどり着いていないが、手応えのある相手は着実に出てきている。今後の進展を是非とも期待したい。

TMTとの連携

最後に、すばるとTMTとの連携について少しコメントしておきたい。我々研究者にとってみれば、すばる望遠鏡とTMTは相補的で共になくってはならないというのは共通の認識であろう。というのも単に口径が違うだけでなく、装置をはじめその役割や特長が大きく異なっているからだ。しかしながらこのロジックで他分野や国民の理解を得るのは難しい。すばるの後継機がTMTなんだから、TMTができればすばるは退役するべきと思われるのは無理もないことであろう。実際上述したようにTMTへ向けてすばるの予算は大幅に減らされてきており、このままでは運用が成り立たなくなる日も待たないで近付いて来ている。そこでなんとか存続させるためにも国際共同運用という話になっているわけである。

この窮状を周辺学会や政府、国民に伝えるには、わかりやすい説明が必要である。上で見てきたように、すばるはその広視野を生かして、稀で面白い天体を探したり、統計的なサンプルを構築したりすることに長けている。一方TMTは見つけた天体を分光してスペクトル解析から様々な物理量を求めたり、高い解像度で空間分解して内部構造を調べたりするなど、その性質を詳しく調べることが主要な役割である。特に、突発天体のようにすばるで見つけてから、できるだけ早くTMTでフォローアップ観測しないといけない天体については、すばるとTMTが同時に稼働し、かつ同じ（または近い）場所にあることが必須である。我々天文学者はこのような説明を、将来の科学政策を決定することになる隣接分野の研究者をはじめ、政府役人、国民に対して丁寧に行い、理解を得ていく必要がある。しかも今直ぐにである。まさにそのような目的意識と危機感を持つ

て、現在「すばる+TMTサイエンスブック」を光赤外コミュニティーで鋭意作成中であり、熊本大学で開催された2019年秋季年会でも「すばる+TMT」という企画セッションが設けられたばかりである。このような活動を通して、すばるとTMTの共存の道を何とか探り、実現したいものである。

最後に

私は大学院を修了して直ぐにイギリスで3年半ポスドクをしたが、その滞在中に待望のすばる望遠鏡が完成し、タイミングよく帰国して最初のユーザーの一人として使わせていただいて、現在に至っている。まさにすばるによって育ててもらった最初の世代である。したがって、少しでもこの恩返しをしたいという思いで現在SAC委員長を務めさせていただいている。すばるを生き生きとした形で次の世代に引き継ぐことができればと願いながら。

Subaru Telescope, Present and the Future: Science Operation and the Subaru Strategic Program

Tadayuki KODAMA

Astronomical Institute, Tohoku University, 6-3 Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan

Abstract: Subaru telescope has been continuously producing world-leading scientific outcomes for 20 years. However, we are now facing a difficult situation where world competitions with other facilities get severer while the budget for Subaru is decreasing. In order to keep Subaru remain at the world forefront, more strategic operation is critical. As a present chair of the Subaru science advisory committee (SAC), I will give some thoughts on the present and the future of science operation of Subaru. It should be noted, however, that the contents of this article are basically my personal views and do not represent the SAC.