

Suprime-Cam から Hyper Suprime-Cam へ、 そしてその先へ



宮崎 聡

〈国立天文台先端技術センター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: satoshi@naoj.org

1999年から2017年まですばる望遠鏡の主力観測装置の一つとして活躍した Suprime-Cam, その後継機として2014年から稼働を始めた Hyper Suprime-Cam, それぞれの世界の中での位置づけを整理し、今後の方向性を議論する。

1. Suprime-Cam という企画

本特集の数々の記事で紹介されたとおり, Suprime-Cam は18年以上という長きにわたり, すばる望遠鏡においてさまざまな観測に活躍した装置だった。これは, ひとえに, 「大望遠鏡における広視野高解像度撮像」という企画が「ユニーク」だったからだと思う。岡村先生が記事¹⁾の中で, 1990年代初頭にあった「主焦点の危機」について触れていたが, これも発想が「ユニーク」すぎて, 周囲の賛同を得るのに苦労されたのだと思う。私は, 開発の後期になってから Suprime-Cam プロジェクトに参加させていただいたので, この時期のころはあまり知らなかったのだが, 岡村先生らが「何か新しい天体を発見をするための望遠鏡を作る」という信念を貫かれ, また小平先生や海部先生といった計画のリーダーがそれを受け入れてくださり, 企画が実現したのだろう。ライマンブレイク銀河 (LBG) やライマン輝線銀河 (LAE) の発見より以前の話であり, 遠方天体の可視光による撮像探査に疑問符が付きつつあったところだから驚かされる。しかし, この「ともかく, 人がやっていなことをやるのだ。」という決意のもとに, 先達の方々が地図のない世界に踏み出してくださったおかげで, 私たちは, すばらしいさまざま

な機会を得ることができた。

前例がないということは, 独自の技術開発が必要であることを意味する。大望遠鏡は鏡筒を短くするために, 主鏡 F 比が小さくなるよう設計されるが, これにより補正光学系の設計が難しくなる。アイデアでこれを解決したという話を, 成相先生が紹介されている²⁾。また, F 比が小さいと焦点深度が浅くなり, 焦点面検出器 (CCD) に高い平坦性が要求される。複数の大面積 CCD を $30 \mu\text{m}$ 程度の焦点深度内に配置するための技術開

表1 可視光広視野カメラの比較。主鏡の口径 [m]^{*1}。主鏡の面積に視野の広さをかけたもので探査観測のスピードの目安になる^{*2}。CCDの厚さ^{*3} Thinは薄型で(厚さ $t \sim 10 \mu\text{m}$)、DD (Deeply Depleted) は $t = 40 \sim 80 \mu\text{m}$ 程度、FD (Fully Depleted) は $t > 200 \mu\text{m}$ 。厚いほうが長波長の光への感度が向上する。おおよそのメディアンシーング (FWHM 秒角) を示した^{*4}。2台目の望遠鏡が2017年末現在立ち上がりつつある^{*5}。

Camera	D ^{*1}	A Ω ^{*2}	CCD ^{*3}	Seeing ^{*4}	F.L.
SDSS	2.5	23	Thin	~ 1.0	1998
MegaCam	3.6	9.6	Thin	~ 0.6	1999
Suprime-Cam	8.2	13	DD \rightarrow FD	~ 0.6	1999
Pan-STARRS	1.8	15 \rightarrow 30 ^{*5}	DD	~ 1.0	2006
DECam	4.0	30	FD	~ 1.0	2012
HSC	8.2	91	FD	~ 0.6	2012
LSST	6.5	348	DD	—	—

発については、仲田氏が紹介してくれている³⁾。主焦点は光路中にあるため、狭い筐体に冷却デューワー、冷凍機等、各種機器をパッケージングする必要があるが、これらについては小宮山氏⁴⁾が担当した。

表1に、主要な可視光広視野カメラをまとめた。A Ω は探査観測の効率の指標である。スローンデジタルサーベイ (SDSS) は20世紀に作られたカメラの中では突出したA Ω を有しており、取得されたデータが天文学研究に与えているインパクトはハッブル宇宙望遠鏡に匹敵するとされ⁵⁾、企画の筋の良さが際立つ。

MegaCamは口径3.6 mのカナダ・フランス・ハワイ望遠鏡 (CFHT) 用に開発された、1度角の視野を有するカメラである。Suprime-Camと同時期に開発された。視野の広さがSuprime-Camの4倍あるため、A Ω で比べるとそれほど大きな差はない。また、結像性能も遜色なく、Suprime-Camの強力なライバルであったことがわかる。差はCCDで、Suprime-CamはMITのリンカーン研究所が開発した空乏層が40 μm のDD CCDを採用していた。40個というCCDを必要としたMegaCamは、市販されていた薄いCCDを使うほかなかった。DD CCDは波長800 nm程度で量子効率が約3倍高く、LAEなどの高赤方偏移天体探査では、Suprime-Camが高い競争力を発揮できた^{6),7)}。また、弱重力レンズ探査においても、波長800 nm付近を含むiバンドでの観測が重要であり、MegaCamに大きく差をつけることができた⁸⁾。2008年には浜松ホトニクスと共同開発したFD (Fully Depleted) CCDに置き換えて、波長1,000 nmにおいてDDの2倍感度向上を果たし、さらに差を広げることができた。

カナダのCrabtree氏が行った、各望遠鏡ごとの論文出版数の比較分析がある⁹⁾。地上光赤外線望遠鏡の1台当たりの論文出版数では、UKIRT (口径4 m)、Keck (10 m)、VLT (8 m)、CFHT (3.6 m) に続き、僅差ではあるが、すばるは5位



写真1 すばる主焦点カメラの構想を練られた岡村先生 (左) と小平先生 (右)。

に甘んじている。これはどうしたことだろうか？ CFHTやUKIRTなどの中型望遠鏡は2000年代に入ると、戦略的に、大規模な汎用探査観測へと運用の軸足を移した。そこで得られた天体カタログを元にした研究が、数多く結実しているのだろう。1970年代に作られた両望遠鏡と異なり、完成したばかりのすばる望遠鏡を、汎用探査観測に使うという決断を当時「すばる」はできたはずはなかったが、望遠鏡と装置の不利を、運用方法の工夫で乗り越えてきた、CFHTとUKIRTのしぶどきは、賞賛に値する。また、30 m望遠鏡時代のすばる望遠鏡の運用を考えるうえでも、示唆的である。

2. Hyper Suprime-Camの位置づけ

1990年代終わりころに、宇宙の加速膨張が確実視されるようになり、宇宙論研究に、実験物理学を含む広い分野の研究者の注目が集まるようになった。こうした流れの中で、表1に示した、Pan-STARRS, DECam, LSSTといった、米国の計画が立案されてきた。Pan-STARRSは、ハワイ大学のKaiser, Tonry, Luppino先生などが企画したプロジェクトで、口径1.8 mの望遠鏡ながら、7平方度という巨大な視野をもつカメラを搭載し、望遠鏡1台でSuprime-CamのA Ω をしのぎ、これを4台まで増やすという計画であった。また、DECam, LSSTは米国の高エネルギー実験物理学家が軸にな

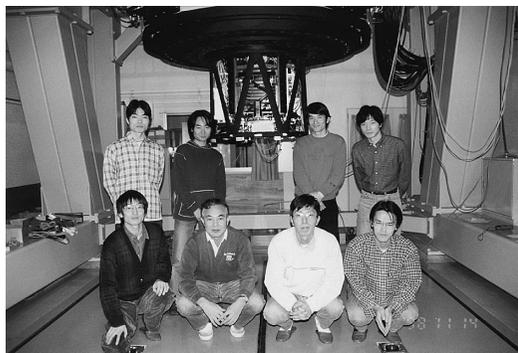


写真2 国立天文台先端技術センターでの組み立てを終えて、試験中のSuprime-Camの前に撮った記念写真。ハワイへ出荷する1998年11月の撮影。前列左から、土居さん、岡村さん、筆者、木村さん。後列左から仲田さん、小宮山さん、関口さん、嶋作さん。

り立案された。ベンチマークに使われたわれわれも、Hyper Suprime-Camのコンセプトを固めていたが、幸いなことに多くの方の支持を得て、予算措置をいただき、開発に乗り出すことができた¹⁰⁾。また、SDSSを主導した、プリンストン大学の研究者も開発に参加してくれた。Gunn先生なんて、私にとっては、伝説上の人物だったが、まさか一緒に働けるとは思っていなかった。ソフトチームを率いるLupton先生にも大いに刺激を受けている。その結果、表1のような立ち位置につけることができ、現在のところ、他カメラに比べて、大きな優位性を確保している。また、6年にわたる汎用大規模探査観測も2014年から行っている。その初期成果もまとめられつつあり、欧文報告PASJに特集号が予定されている(2018年2月発刊予定)。

谷口先生が記事⁶⁾の巻頭で述べられていたように、Suprime-Camは「スプリーム・カム、シュプリーム・カム、シュプライム、エス・カム」とさまざまな呼ばれ方をしていた。Suprime-Camの名付け親は関口先生だったと記憶しているが、確かに少し読みづらかった。ただ、さまざまな愛

称で呼ばれるようになったのは、観測者がそれぞれにSuprime-Camに愛着を感じてくれたからだったのかもしれない。Hyper Suprime-Camのときは混乱を避けるためにと思い、HSCという略称を多用してきたが、いらないことをしてしまった。ただ、すでに「ハイパー(たん)」という愛称も聞こえ始めた。Suprime-Camなみに愛称が増えたとき、Hyper Suprime-Camは成功だったと言えるのだろう。

3. これから

2020年代に入ると、LSSTが完成し、10年に渡る大規模探査観測が計画されている。20,000平方度に渡る観測データは、地上からの可視光観測の決定版になることは間違いない。10倍以上のAQの違いは圧倒的で、すばる望遠鏡には、新たな戦略が求められる。

PFSという分光器が開発中で、それを重点的に使っていくというのは一つの戦略だが、せっかく、すばる望遠鏡は、地上ではこれ以上期待出来ないほど、結像性能が高いのだから^{*6)}、それが生きる撮像観測を捨てざるを得ない。また、分光観測でも他のDESI等、強力なライバルがいるだろう。

LSSTのフィルターは、光学設計の都合でメニスカス球面となっている。このためフィルターの膜厚一様性の確保が難しく、膜数が多い狭帯域フィルターの作製は困難であると考えられている。また、F比がすばるより小さくビームの広がり角が大きく、加えてCCDの画素の大きさが $10\mu\text{m}$ と小さいこともあり、厚いCCDを使えない。このため、狭帯域フィルターを使った高赤方偏移天体の探査等では、すばる望遠鏡は引き続き一定の存在感は示せるだろう。

「ともかく、人がやっていなことをやるのだ。」という、すばるスピリッツに立ち戻ると、時間変

*6) これを実現するために多くの労力と資金が費やされた。

動する天体の探査はおもしろい可能性の一つである。LSSTでも時間変動天体探査は意識されていて、1回の積分は、15秒程度と短く、画像読み出しは数秒以内に完了する設計になっている。これに勝るには、1秒程度以下のサイクルで読み出しが行えるCMOSセンサーを使う必要がある。東京大学木曾観測所において、キャノンのCMOSを使ったカメラが稼働を始めており¹¹⁾、天体観測へのCMOSの採用例が増えつつある。われわれのグループも、さらなる大面積、高量子化を目指して、浜松ホトニクスとの共同センサー開発を再開した。大望遠鏡と組み合わせれば、単位時間当たりの集光量が増えるため、時間変動のより短い天体の探査が可能となり、暗さ-変動の速さのパラメータスペース上で、新しい領域を狙える。TMTとの組み合わせれば、さらにユニークな観測ができるだろう。TMT・LSST時代に世界の中で埋没してしまわないように、CFHTやUKIRTがかつてそうしたように、われわれも、しぶとく戦略を練らなければならない。

謝 辞

Suprime-Camの17年以上にわたる稼働を実現してくれたのは、ハワイ観測所で運用に携わって下さった方々です。未完成品だったカメラを、少しずつ改良して安定運用を可能にしてくださいました。歴代のサポートアストロノマー小宮山さん、古澤さん、仲田さん、寺居さん、機械エンジニアの土井さんに感謝します。柏川先生の記事⁷⁾を拜見するまで、天文台にきた当時の自分がどのような様子だったかを忘れていました。当時の実

験ノートに、当時の様子を表すイラストが残っていたので、今回の原稿のポートレートとして使わせていただきました。右手にもっているのがCCDです。関口先生のお弟子さんだった木村さんが書いてくださったものです。ありがとうございました。

参考文献

- 1) 岡村定矩, 2017, 天文月報, 110, 768
- 2) 成相恭二, 2017, 天文月報, 110, 777
- 3) 仲田史明, 2018, 天文月報, 111, 161
- 4) 小宮山裕, 2018, 天文月報, 111, 93
- 5) Madrid, J. P., & Macchetto, F. D., 2009, BAAS, 41, 913
- 6) 谷口義明, 2017, 天文月報, 110, 781
- 7) 柏川伸成, 2018, 天文月報, 111, 11
- 8) 岡部信広, 2018, 天文月報, 111, 18
- 9) Crabtree, D. R., 2016, SPIE, 9910, 991005-1
- 10) 宮崎聡, 2017, 天文月報, 110, 48
- 11) 酒向重行, 2017, 天文月報, 110, 42

From Suprime-Cam to Hyper Suprime-Cam and Beyond

Satoshi MIYAZAKI

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

Abstract: We overview impacts of Suprime-Cam and Hyper Suprime-Cam to the world-wide astronomical community in order to speculate future direction of Subaru's instrumentation.