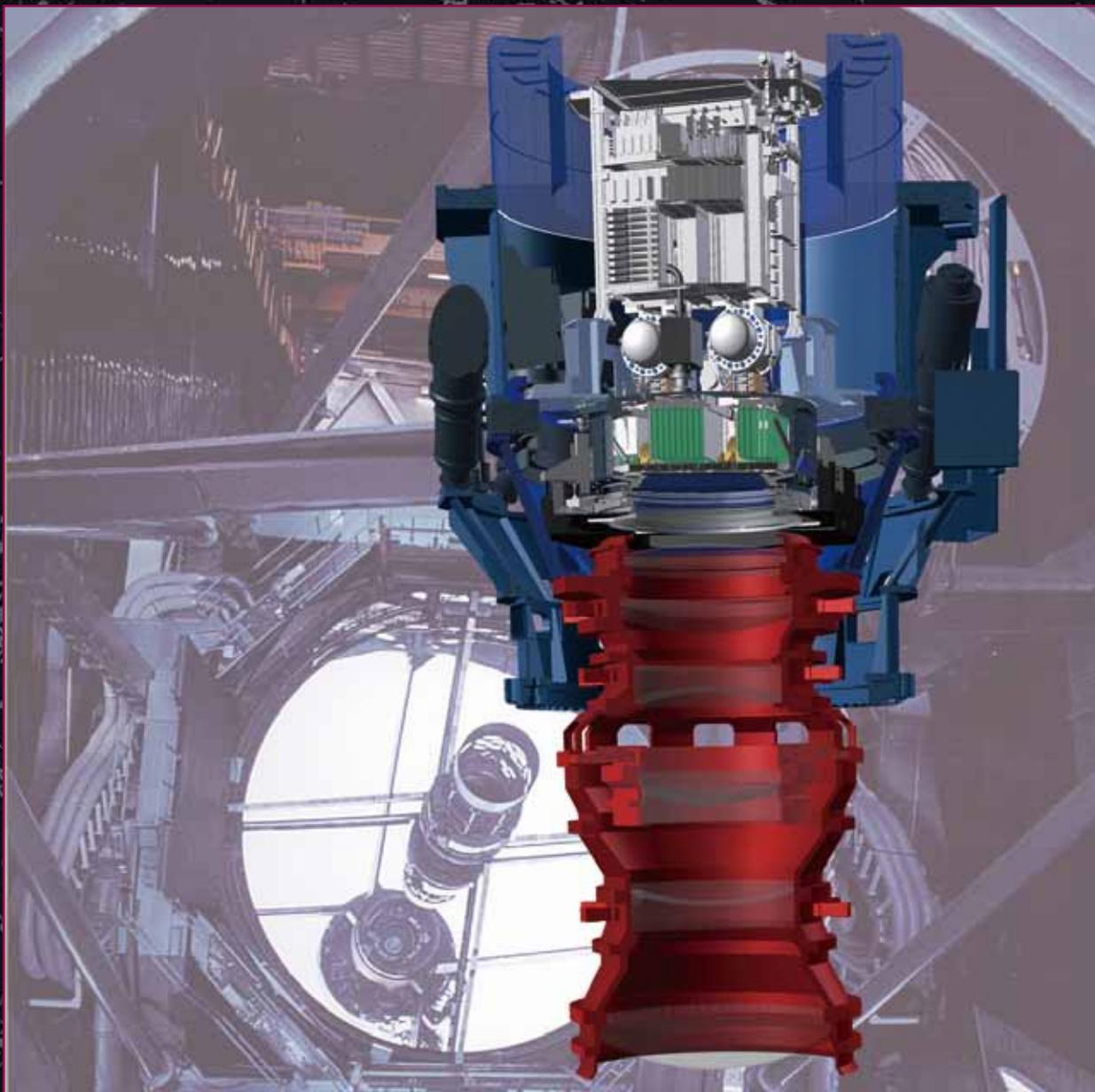


国立天文台ニュース

National Astronomical Observatory of Japan

2013年11月1日 No.244

特集 すばる望遠鏡HSC開眼！



- ★ I. はじめに～Hyper Suprime-Cam開発の背景と意義～／II. HSC解体新書／III. HSC開発ファクトリー／IV. HSCを支えるハイ観測所スタッフの活躍／V. すばる望遠鏡主焦点カメラの30年／VI. HSC開発でお世話になったメーカーの紹介／VII. HSCが切り拓く先端サイエンス／VIII. おわりに～Hyper Suprime-Cam完成を迎えて～

- 祝！国立天文台野辺山の見学者300万人達成！

11
2013

- 表紙
- 国立天文台カレンダー

03 特集 すばる望遠鏡 HSC 開眼！

- 04 I. はじめに～Hyper Suprime-Cam開発の背景と意義～
- 06 II. HSC解体新書
HSCの組み立てとすばる望遠鏡への取り付け
- 09 III. HSC開発ファクトリー
 - ① CCD200個を検査する
 - ② CCD読み出しエレクトロニクス
 - ③ CCDデューワーの開発
 - ④ HSCのフィルター交換機構の開発
 - ⑤ HSC用大型フィルター+SHフィルターの開発
 - ⑥ 制御系の開発
 - ⑦ 望遠鏡への搭載作業
 - ⑧ HSCの縁の下のサポート
番外編 HSC開発部考える係の男、その名は川野元
 - ⑨ M31～きれいな画像ができるまで～
- ★HSCが撮像したM31のワイド画像ギャラリー
 - ⑩ソフトウェアグループの紹介
- 22 IV. HSCを支えるハワイ観測所スタッフの活躍
- 25 V. すばる望遠鏡主焦点カメラの30年
- 24 VI. HSC開発でお世話になったメーカーの紹介
- 26 VII. HSCが切り拓く先端サイエンス
 - ① 宇宙論・重力レンズ
 - ② 銀河進化
 - ③ 太陽系小天体
- 50 VIII. おわりに～Hyper Suprime-Cam完成を迎えて～

31 おしらせ

- 祝！ 国立天文台野辺山の見学者300万人達成！

- 編集後記
- 次号予告

32 シリーズ 国立天文台アーカイブ・カタログ20

トロートン・シムス製24吋経緯儀

—— 中桐正夫（天文情報センター特別客員研究員）



表紙画像

すばる望遠鏡の新しい主焦点カメラ「Hyper Suprime-Cam」のCG断面図。背景はすばる望遠鏡（主鏡部）と主焦点カメラ「Suprime-Cam」。

背景星図（千葉市立郷土博物館）
渦巻銀河M81画像（すばる望遠鏡）

●平成26年度 国立天文台共同開発研究等およびNAOJシンポジウムの公募のおしらせ

・平成26年度 国立天文台共同開発研究等の公募のおしらせ

<http://jouhoukoukai.nao.ac.jp/kouryuu/koubo/kyodokaihatsu/index.html>

・平成26年度 NAOJシンポジウムの公募のおしらせ

<http://jouhoukoukai.nao.ac.jp/kouryuu/koubo/naojsympo/index.html>

国立天文台カレンダー

2013年10月

- 1日（火）運営会議
- 10日（木）先端技術専門委員会
- 11日（金）4次元シアター公開／観望会
- 15日（火）幹事会議
- 18日（金）三鷹・星と宇宙の日（プレ開催）
- 19日（土）三鷹・星と宇宙の日
- 24日（木）安全衛生委員会
- 26日（土）4次元シアター公開／観望会
- 29日（火）幹事会議／OB・OG会

2013年11月

- 5日（火）太陽天体プラズマ専門委員会
- 8日（金）4次元シアター公開／観望会
- 19日（火）幹事会議
- 23日（土）4次元シアター公開／観望会
- 27日（水）～29日（金）プロジェクトウィーク
- 28日（木）安全衛生委員会
- 29日（金）防災訓練

2013年12月

- 5日（木）運営会議
- 10日（火）天文データ専門委員会
- 13日（金）幹事会議／4次元シアター公開／観望会議
- 20日（金）電波専門委員会
- 26日（木）安全衛生委員会
- 28日（土）4次元シアター公開／観望会

H S C すばる 特集 開眼！望遠鏡



すばる望遠鏡には、主鏡から約15mの位置に「主焦点 (Prime Focus)」があり、他の大口径望遠鏡の中では唯一、その主焦点で広視野・高解像度の観測が可能です。それを実現する観測装置として、長年、主焦点カメラ「Suprime-Cam (シュプリーム・カム)」が活躍してきましたが、今回、その7倍の広視野を誇る新主焦点カメラ「Hyper Suprime-Cam (HSC/ハイパー・シュプリーム・カム)」が完成し、本格的な観測をはじめました。この特集では、HSCの全貌をご紹介します。

協力
Hyper Suprime-Cam (HSC)
プロジェクト
(ハワイ観測所)



特集・すばる望遠鏡・新主焦点カメラ HSC (Hyper Suprime-Cam)



I. はじめに ~ Hyper Suprime-Cam 開発の背景と意義 ~

宮崎 聡 (ハワイ観測所/先端技術センター・HSCプロジェクト長)

●加速膨張する宇宙の観測

宇宙膨張が発見されたのは1930年代である。その膨張の速度は次第に減速するだろうと、長い間素朴に考えられていた。宇宙膨張のようすを決めるのは重力であるが、重力には引力しかないからである。ところが1990年代後半のIa型超新星の観測から、現在の宇宙膨張は加速しているらしいことが明らかになってきた。加速を実現するには、斥力をもつようなエネルギー（ダークエネルギーと名付けられた）が存在するか、重力法則を変更するかしなければならないが、いずれにせよ大発見であった。実際、この発見をしたチームには2011年にノーベル物理学賞が授与された。

この問題を解決するには、宇宙膨張の時間変化を、これまでより詳細に調べる必要がある。いくつかの方法が提案されているが、なかでも、弱重力レンズ効果を用いた方法が最も有望であると考えられている。宇宙膨張と天体の形成の進行度の間には強い関係がある。宇宙膨張が速ければ、物質（そのほとんどがダークマター）が集まる時間がなく天体の形成は遅れる。一方、宇宙膨張が遅ければ、天体は速く形成される。このように、天体の形成の進行を計測すると、これを宇宙膨張の歴史に焼き直すことができる。ただし、天体のほとんどが、光を発しないダークマターで構成されているため、普通の観測方法では全貌は捉えられない。

●弱重力レンズ効果を捉える

そこで、弱重力レンズ効果を用いる。ダークマターの集まり（つまり天体）があると、それより遠方にある銀河の像は、重力レンズ効果により変形を受ける。逆にこの変形量を調べることで、ダークマターがどのように分布しているかを調べることができる。天空の広い領域で銀河を観測し、形状を計測、系統的な歪み情報を抽出して、前景にある天体の形成の進行度を調べ、宇宙膨張史を求める。

これから「ダークエネルギーの強さと性質（どのように時間変化するか）」を推定することができる。この観測を実現するためには、広い天域を捜索し、数10億光年より遠方の暗い銀河の形状を精密に計測する必要がある。つまり、「大望遠鏡に取り付けた高い結像性能を持つ広視野カメラ」が必要で、すばる望遠鏡の主焦点カメラ（Suprime-Cam）がこの目的に最適であった。

Suprime-Camは東京大学の岡村定矩先生、国立天文台の関口真木先生により、すばる望遠鏡の第一期装置として企画・提案された。「口径が8~10m級の望遠鏡の役割は、既知天体の分光観測と大口径を活かした補償光学による高解像度赤外線撮像の二つである」、というのが欧米の標準的な考え方であった。古典的な「可視光による撮像観測」の優先順位は低く、欧米では採用されなかった。撮像は宇宙望遠鏡で行うべきだ、と言うわけである。ところが日本では、その時々合理性より、調和を重んじ、長い目で物事をとらえる気風のおかげか、Suprime-Camの企画は最後まで残り、実現することになった。弱重力レンズ効果を用いた観測に興味を持っていた私は、開発の途中から参加させていただいた。

●「Suprime-Cam」から「Hyper Suprime-Cam (HSC)」へ

蓋を開けてみると、Suprime-Camはそのユニークさから、すばるの主力観測装置の1つとなった。しかしながら、ダークエネルギーを研究テーマにしたとき、観測すべき天域の広さは1000平方度以上、と見積もられ、視野角0.2平方度以下のSuprime-Camで掃天するのは、困難である。

そこで、我々は、高い結像性能は維持したまま、有効視野を7倍以上に拡大するHyper Suprime-Cam (HSC)を企画・設計し、開発を行ってきた。2002年から数年かけて、概念設計を行って

たが、これが完了するころ、当時ハワイ観測所長であった唐牛宏先生や、東京大学物理学教室の相原博昭先生の賛同を得ることができ、2006年からメーカーを交え、開発プロジェクトが本格化した(24・25ページ参照)。さらに、東大数物連携宇宙研究機構の村山斉先生の強力な支援を受け、台湾中央研究院・米国プリンストン大学という国際パートナーも加わり、ハード・ソフトを分担して開発を行ってきた。

国立天文台では、検出器・読み出し回路・冷却容器・シャッター・フィルター、フィルター交換装置という、カメラの主要部分の開発を担当した。また、データ解析ソフトウェアの中核拠点として、解析ソフト開発を行い、さらにはそのデータを公開するためのソフト開発も行っている。本特集では、これらの開発を担当した人々等自身が、その内容や意味を紹介している(6~23ページ参照)。

●ダークエネルギーの強さの時間変化を探る

HSCによる観測は、すばる望遠鏡「戦略枠」として2014年2月より5年かけて行われる予定である(26ページ参照)。ダークエネルギーの強さの時間変化があるかどうかを調べることが、この観測の最大の目標である。変化するということは、その背景に新たな物理的な実体があることを意味し、現代物理学の体系を拡張する必要がある。ダークエネルギーの性質をより詳細に調べるためには、さらに大規模な観測が必要となる。

一方、その特性として、時間変化がない可能性もある。この場合は、「そこにあることは分かるが、調べる手がかりがないもの」として扱わざるを得ない、物理学にとっては、より深刻な問題となる。理論的に強い指導原理がまだ確立されていない分野であるため、いろいろ手探りで進まざるを得ないが、逆にそこが新鮮でおもしろいと言える(26~29ページ参照)。

●よりよい観測システムへ

一方、HSCは同時に一般共同利用観測にも供される予定である。広視野探査的な観測では、これまで1週間かかっていたことが1晩でできることになる。戦略枠用に用意しているデータマネージメントソフトウェアを流用して、画像データ解析もオンライン・オンサイトで、できるだけ進められるように準備している。もう21世紀でデジタルカメラ全盛の時代なのだから、カメラは撮影したらすぐに結果が確認できないとおもしろくない。ユーザーの皆さんにご協力をいただきながら、観測システムをよりよいものに改善していきたい。

HSC (Hyper Suprime-Cam) 解体新書

HSCは直径1.5度の視野を116枚という多くのCCDで覆い尽くす、すばる望遠鏡主焦点に取り付けられる10億画素のCCDカメラです。では、HSCは一体どのようにできているのでしょうか？そして、どのような技術により実現したのでしょうか？その中身を徹底解剖してみましょう。

小宮山 裕 (ハワイ観測所)



特集・HSC II

01・補正光学系

すばる望遠鏡の主鏡で反射された光は主焦点に集光するが、そのままでは光軸から遠ざかるに従って光学収差が大きくなり、星像はどんどんボケてしまう。この光学収差を補正し、広い視野に渡ってシャープな星像を生み出すのが補正光学系である。HSCの補正光学系は7枚のレンズから構成されており、各レンズの片面は非球面に加工されている。最大径84cmのレンズを25nm (RMS) という加工精度で製作する技術が補正光学系製作の鍵となっているが、レンズ硝材の内部品質も結像性能に効いてくるため、均質性の優れた硝材の製作も重要である。また、軽量化のため、レンズを支える鏡筒は高剛性・低熱膨張・軽量なセラミック(コージライト)で製作されている。このように補正光学系には様々な最先端技術が盛り込まれているのである。

● 大気分散補正光学系

天体からの光は地球大気を通過する際に屈折するが、屈折率が波長に依存するため、焦点面での結像位置が波長ごとに異なり、結果として星像が伸びてしまうという効果がある(大気分散)。



[主な仕様]
大きさ：全長 2.5m、直径 1m
重さ：1t
レンズ：7枚 (うち2枚は大気分散補正用) / 非球面 7面
結像性能 (D80)：0.23秒角 (r-band・光学系単体・高度角30度以上の最悪値)
透過率：90% (r-band)

これを補正するため補正光学系の2枚のレンズが望遠鏡高度角に従って動き、この大気分散を打ち消すのである。

02・主焦点ユニット



[主な仕様]
大きさ：全長 2m、最大直径 1.6m
重さ：1.8t
フォーカス位置決め精度：1.5μm
ローテーター回転精度：3秒角

観測対象天体の位置に応じて望遠鏡は時々刻々とその姿勢を変えるため望遠鏡構造の重力変形がおこり、主鏡光軸に対して主焦点(取り付け部)の位置・傾きはどんどん変化していく。シャープな星像を得るためには、補正光学系とCCDカメラを望遠鏡の姿勢によらず主鏡光軸へ正対させる機構が必要である。同時にすばる望遠鏡のような経緯台式望遠鏡では、天体追尾をしていくと望遠鏡焦点部では(望遠鏡

構造に対して)視野が回転してしまうため、これを補正する必要がある。これらを行うのが主焦点ユニットである。主焦点は主鏡より上にある焦点であるため、望遠鏡への確実な固定、堅牢な動作などが求められる。

● 6本ジャッキ

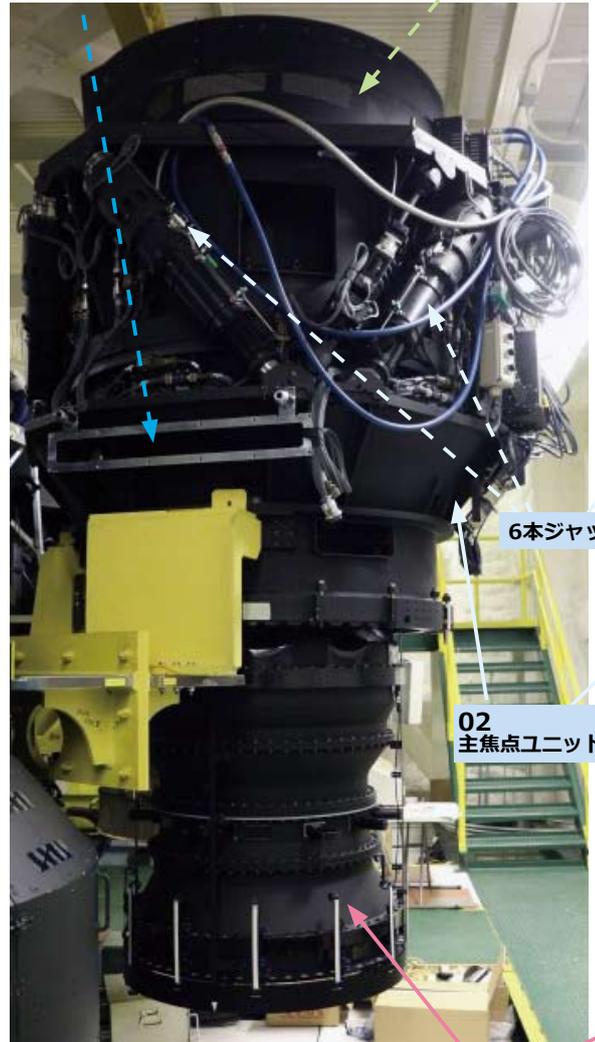
補正光学系・CCDカメラは6本のジャッキによって支えられている。これらのジャッキが伸縮することにより、補正光学系・CCDカメラは望遠鏡主焦点取り付け部に対して6自由度を持って動くことが可能であり、主鏡光軸へ正対させフォーカスを合わせることができるのである。補正光学系・CCDカメラを含めた約2.2トンもの重量物を数マイクロンの精度で精密に動かす技術がシャープな星像を得るために必須なのである。

● ローテーター

視野回転を補正するために主焦点ユニット内にはベアリングとギアと高精度回転エンコーダーで構成されるローテーターが備えられている。必要とされる回転角精度3秒角は二つの駆動モーターの制御で実現している。

フィルター挿入口
(写真ではフィルター交換機構スタッカーが付いていないため見える)

ケーブル巻取



6本ジャッキ

02
主焦点ユニット

01
補正光学系

05・コンピュータ群・ソフトウェア

01~04で紹介する機器はすべてコンピュータで制御・監視されている。CCDカメラではCCD読出しと周辺機器制御監視のために3台のコンピュータを使用している(12ページ・HSC開発ファクトリー⑥)。また、HSCで撮られた画像データは即座に簡易解析され、その情報が観測へとフィードバックされる。さらに、画像データはオフラインでパイプライン処理され、処理済み画像が自動的に生成されるようになっている(20ページ・HSC開発ファクトリー⑩/14ページ・HSC開発ファクトリー⑨)。こういった解析用コンピュータ群・ソフトウェアもHSCの重要なコンポーネントである。

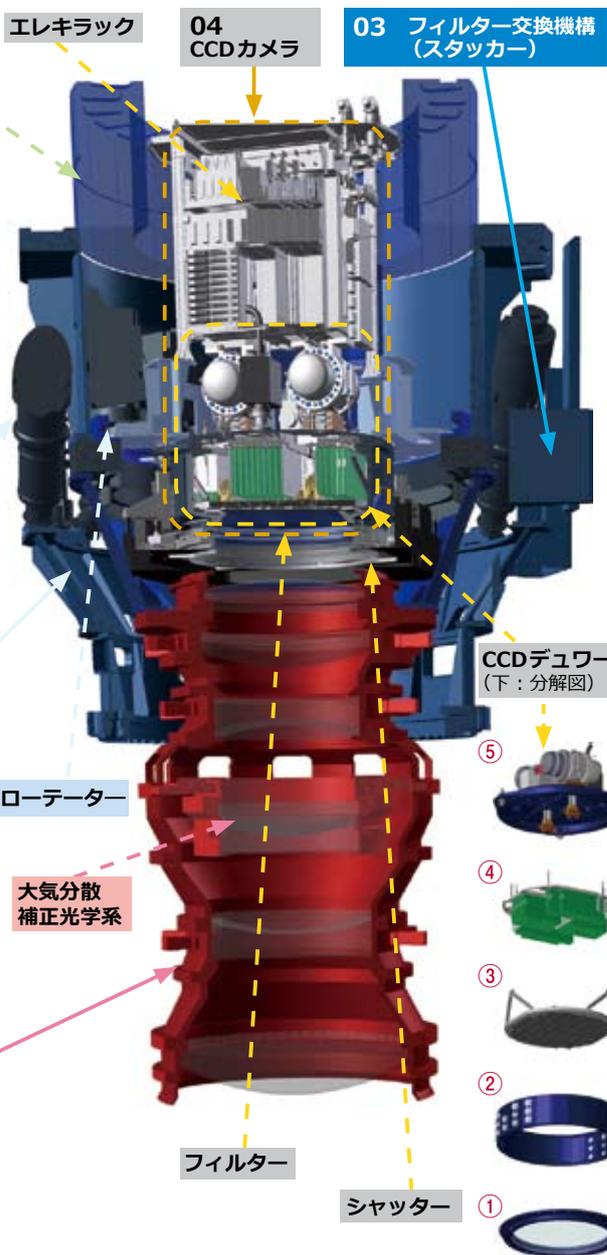
03・フィルター交換機構

HSCはCCDデューワー前に装着されたフィルターを交換しつつ観測を進めていく。フィルターは主焦点ユニット外側に取り付けられたスタッカーに3枚ずつ合計6枚格納されている。観測時は光路を遮らないように垂直に格納されているスタッカーであるが（写真左側の状態）、フィルター交換時にはこのスタッカーが展開し（写真右側の状態）、スタッカー内のエレベーターという上下移動機構で3枚のフィルターのうち1枚を選

択し、スタッカー内にある駆動装置がフィルターをCCDデューワー前へ押し込む（あるいは引き出す）ことによってフィルターを交換する。さらにCCDデューワー前に送り込まれたフィルターは、CCDデューワーに取り付けられた固定機構によってCCDとの位置関係が一定になるように確実に固定される。1枚10kgを超えるフィルターを完全にリモート制御で確実に交換することが要求される、複雑なコンポーネントである（11ページ・HSC開発ファクトリー④）。



[主な仕様]
 大きさ：全長 2m
 重さ：300kg
 格納フィルター枚数：6枚
 交換時間：約 10分



CCD デューワーの内部構造

5つの主要パーツから構成されている。

①窓：均質性の良い合成石英でできた窓を採用している。安全のためにその厚さは37mmにもなる。

②サイドウォール：窓を支えるとともにCCDの信号をCCDデューワー外部へ取り出すフィードスルーが取り付けられている。

③焦点面アセンブリ：高剛性・高熱伝導性を持つ炭化ケイ素でできた基板上にCCD116枚が取り付けられた焦点面アセンブリ。焦点面構造は中空ステンレスのトラス構造で後部アセンブリのベースフランジへ接続されている。

④デューワー内 CCD 読み出しエレクトロニクス：CCDデューワー内に入れられた CCD 読み出し用アナログ回路 28 枚は焦点面アセンブリの直後に置かれている。ここで CCD から転送されてきたアナログ信号がデジタル信号へと変換される。

⑤後部アセンブリ：焦点面アセンブリを冷却する冷凍機 2 台を配置した裏ぶたとベースフランジからなる構造。ベースフランジは CCD デューワー組み立ての基準となる高剛性の構造で、主焦点ユニットとのインターフェース部である。

04・CCD カメラ

補正光学系を通った光は直径 50 cm の焦点面に結像する。ここに取り付けられるのが CCD カメラである。CCD カメラは、CCD が多数並べられた真空デューワー、CCD 読出しなどの各種エレクトロニクスを積んだラック、入射光を遮り露出時間をコントロールするシャッター、特定の波長の光のみを通すフィルターから構成されている。

● CCD デューワー

直径 50 cm の焦点面に到達した光をなるべく無駄なく検出できるように、4面近接設置可能な完全空乏型 CCD（9ページ・HSC 開発ファクトリー①）が 116 枚（撮像用 104 枚＋光学調整・ガイド用 12 枚）、隣との間隔 0.3mm で焦点面をくまなく覆うように並べられている。CCD に蓄積された光は CCD 背面に置かれた CCD 読出し回路によって電圧信号へと変換され、さらに A/D 変換されたあと、デジタル信号として 100m 以上離れた観測制御棟に置かれた制御コンピュータへと高速転送される（10ページ・HSC 開発ファクトリー②）。CCD は -100℃ に冷却されることにより熱雑音が抑えられ、天体からの微弱な信号の検出が可能になっている。このために、CCD は真空に引かれた



CCD が 116 枚並んだ焦点面。

CCD デューワーの中に断熱されて置かれ、50 W の排熱能力を持つパルスチューブ冷凍機 2 台で冷却されている。一方、補正光学系の作る像面からフォーカス方向に CCD が 30 ミクロンずれただけで星像が悪化してしまうため、CCD を支える構造は高剛性であることが望ましい。断熱性と高剛性、この二律背反をいかにバランスさせるかが CCD デューワー設計の鍵となっている（10ページ・HSC 開発ファクトリー③）。

● エレキラック

CCD デューワーのすぐ後ろには各種制御機器が取り付けられたラックが置かれている。CCD 読出し回路やデータ転送カード、CCD 駆動電源が主要コンポーネントであるが、それらに加えて、冷凍機の制御電源・温度制御コントローラー、イオンポンプの制御電源、電源管理装置、CCD カメラのステータス（各箇所温度・デ



[主な仕様]

大きさ：全長 1.3m、CCD デューワー直径 70cm、最大直径 1m
 重さ：320kg
 焦点面直径：50cm
 CCD 全画素数：10 億画素 (1 Gpixel)
 CCD 読出し時間：20 秒
 データ量：1 ショットあたり 2 Gbyte

ューワー内真空度・冷却水量など）を把握するための機器が取り付けられている（12ページ・HSC 開発ファクトリー⑥）。

● シャッター

天体から来る光量を正確に測定するためには、露出時間を正確にコントロールできるシャッターが必要である。HSC は、二つの膜が交互に開口を遮ることでシャッターとして機能する、巻取り式のシャッターを採用している。一方から開口を遮っている膜が開き露光を開始し、他方から膜が閉まり開口を遮ることによって露光を停止する。このようなメカニズムによって、焦点面内での露出時間の一様性 1%、露出時間精度 0.01 秒という精度を保ちつつ、最短露出時間 1 秒を達成している。

● フィルター

HSC は、CCD デューワー前に特定の波長の光のみを通すようなフィルターを装着し、観測を進めていく。このフィルターは直径 60 cm という大きさであることに加えて、透過中心波長一様性 ±3 nm、50% 透過波長精度 ±5 nm (r-band) という精度が要求される。このようなフィルターの製作は HSC 計画開始当初は技術的に難しかったが、現在は十分な精度を持つ物が製作されるようになった（★11ページ・HSC 開発ファクトリー⑤を参照）。



★以上のように、HSCはさまざまなコンポーネントから成り立っています。8ページでは、それらをひとつに組み立てて、すばるへ取り付け作業のようすを紹介します。さらに、各コンポーネントの開発の詳細は、9～21ページのⅢ「HSC開発ファクトリー」をご覧ください。

HSC の組み立てとすばる望遠鏡への取り付け

小宮山 裕 (ハワイ観測所)

2012年5月。マウナケア山頂すばる望遠鏡にHSCの各コンポーネントが集結し、組み立て作業が開始された。ここでは、組み立てとすばる望遠鏡への取り付けのようすをご紹介します(12ページHSC開発ファクトリー⑦も参照)。

01



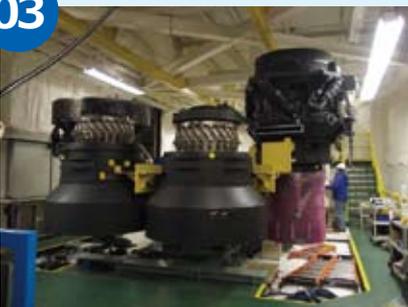
補正光学系と主焦点ユニットのドッキング。輸送用ジグから取り出された補正光学系(左上)は右下の精密調芯台へ乗せられる。その後、主焦点ユニット(中央上)が八角の台座ごと補正光学系の上にかぶせられる。精密調芯台で主焦点ユニットと補正光学系の精密な位置決めを行い、数ミクロンの精度でお互いを結合する。一つ一つの取り付けジグが大きく、主鏡蒸着を行うドーム1階エリアが組み立て作業で占有された。

02



ドッキングを終えた補正光学系と主焦点ユニットはドーム4階TUE階へ運ばれ、他の副鏡とともにトップユニット選択装置(Unit Selector)に乗せられ待機している。ここでCCDカメラの取り付けが行われる。CCDカメラは一旦トップユニット選択装置の遙か上側まで引き上げられ、主焦点ユニットの中へ上から吊り込まれていく。TUE階待機時は補正光学系鏡筒がむき出しになってしまうため、赤いパルスシートで保護されている。

03



TUE階で望遠鏡への搭載を待つHSCと他の副鏡。

04



HSCに取り付けられたフィルター交換機構。フィルター交換機構は本来HSCが望遠鏡主焦点に搭載された後に取り付けられるが、望遠鏡搭載前にTUE階で動作試験を行った。

05



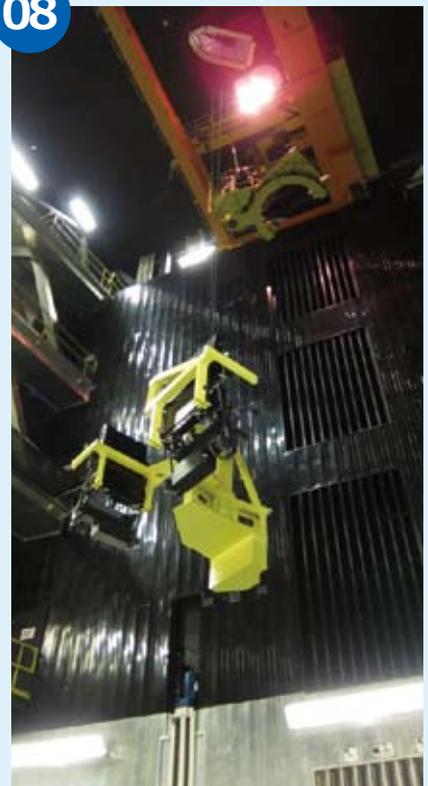
TUE階(左側壁の外側)からトップユニット交換装置(黄色のロボットアーム)へ受け渡されるHSC。この後、HSCは望遠鏡のトップリングを乗り越えて主焦点へと向かう。

06



主焦点部に到着したHSC。主焦点部には副鏡や主焦点観測装置取り付け用の環状構造物(筒頂内環)があり、この中へ補正光学系鏡筒が挿入されていく。クリアランスは±15mmととてもシビアで、HSCの搭載は非常に緊張を要する作業である。

08



HSCが望遠鏡に搭載された後、フィルター交換機構は専用の取り付けジグに乗せられて、主焦点へと運ばれ取り付けられる。

09



フィルター交換機構の取り付け。HSCへの固定やケーブル接続など、時にはトップユニット交換装置から身を乗り出しての作業が必要である。

10



主焦点に搭載されたHSC。



特集・HSC III HSC開発ファクトリー



II章「HSC解体新書」で紹介したように、HSCはハード・ソフトを含めたさまざまなコンポーネントからできています。ここでは、それぞれの担当者による詳しい開発のようすをお届けします。15～19ページは、HSCで撮像したM31（アンドロメダ大銀河）の見開きワイド画像です。HSCが誇る大口径・広視野・高解像度の優れた性能をご堪能ください。

- ① CCD200 個を検査する
- ② CCD 読出しエレクトロニクス
- ③ CCD デュワーの開発
- ④ HSC のフィルター交換機構の開発
- ⑤ HSC 用大型フィルター + SH フィルターの開発
- ⑥ 制御系の開発
- ⑦ 望遠鏡への搭載作業
- ⑧ HSC の縁の下のサポート
- ⑨ M31 ～きれいな画像ができるまで～
- ⑩ ソフトウェアグループの紹介

M31（アンドロメダ銀河）の見開きワイド画像

番外編 HSC 開発部考える係の男、その名は川野元

HSC 開発ファクトリー① CCD200 個を検査する

鎌田有紀子（先端技術センター）



HSCに載せる CCD116個の検査は2009年の秋から始めました。検査の目的は「納品された CCD が仕様を満たしているか否かを確認すること」、「CCD1つ1つの特性を把握すること」です。検査項目は、感度・直線性・暗電流など8項目にわたるので、1つの CCD を検査するためには約9時間が必要でした。また、CCDは1つ1つ少しずつ特性が異なるため、精度の高い観測を目指す HSC では、全数検査を行うことが必要でした。

当時は既に Suprime-Cam で HSC と同型の CCD10 枚が順調に動いていました。その検査時には大きなトラブルが無かったので、HSC の CCD 検査には気が遠くなる思いをしながらも、「数が多いだけでなんとかなるだろう」と、楽観的に考えていました。

ところが検査を始めると「静電気で壊してしまう」、「CCD に傷をつけて壊してしま

う」、「CCD の表面を汚してしまふ」などのトラブルが起きました。CCD は高価なものなので、検査開始から半年経った頃には私の顔は青ざめていました。毎週行われていた会議で「実験室で起こることは、本番の搭載時にも起こる可能性がある。安易な対策ではダメだ」という叱咤を受け、作業環境や作業服などを徹底的に見直して検査を続けました。おかげでトラブルは徐々に減りました。HSC に載せる 116 個の CCD の準備が



検査のようす。私が CCD の開発に加わってから約10年の歳月が経ちました。検査した CCD の数は、200個をゆうに超えます。

整い、デュワーに載せることが出来たのは2011年の秋でした。焦点面に敷き詰められた CCD とそれらで撮影された銀河の画像を見た時、心から安堵したのは言うまでもありません。

HSC 開発ファクトリー② CCD 読出しエレクトロニクス

中屋秀彦 (先端技術センター)

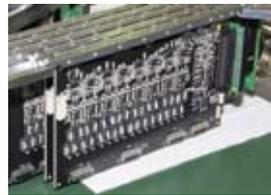


サイエンス CCD を読み出すエレクトロニクスは国立天文台、東大、KEK と共同で開発しました。特徴は 116 個の CCD に備わる 464 信号出力全てを約 5e の読み出しノイズで高精度に読み出すこと、そして高速モードでは 10 秒間隔で連続してデータ取得を実現するところにあります。またこの高性能システムを主焦点の限られたスペースに収まるコンパクトサイズで実現したことも HSC には必要不可欠でした。

HSC の画像データは 1 枚あたり約



デジタル回路部。



アナログ回路部。

2 GByte あります。116 個の CCD を同時に制御しながら画像データを 10 秒間隔で連続して取得し制御棟へ送り出すデジタル回路部は、国立天文台で養われてきた MESSIA システムのノウハウと高エネルギー分野で実績のある通信モジュール (SiTCP) を組み合わせ、大学院生 3 名が活躍することで実現することができました。

低ノイズ高精度を実現するアナログ回路部は、これまですばる望遠鏡装置で実績のある MFront2 と呼ばれる回路を元に設計しました。HSC を実現するために最も困難だったことが、このアナログ回路部を真空常温部に配置することでした。HSC の真空配置エレクトロニクスは天文用装置としては世界

最大規模になりますが、真空常温部に配置することで真空側と大気側を接続する結線数を最小限に減らすことができ、サイズがコンパクトになるだけでなく断線や真空漏れの危険を減らし信頼性が向上します。また全ての CCD からの結線を一律に短くできるため安定した読み出し性能を確保することができました。しかしながら真空中では対流による放熱ができないため特別に熱伝導の良い多層アルミコア基板と呼ばれる新しい技術を採用する必要がありました。これには真空を悪くするアウトガスを出さないよう材質、製造方法、組立方法に様々な工夫を凝らしました。完成したアナログ回路基板による真空度試験では HSC に搭載した際に -7 乗 Torr 台を期待できる結果を得て、HSC の真空度維持に悪影響がないことを確認し実現にこぎつけました。

HSC 開発ファクトリー③ CCD デュワーの開発

大淵喜之 (先端技術センター)



球面座金と格闘するわたし。

CCD デュワーの構造・熱設計を担当した大淵です。CCD デュワーは (メカ的には) 2 つの重要な機能を持っています。1 つは望遠鏡の姿勢が変化しても 116 個の CCD が光軸に対して正確なアライメントを保ち続けること。2 つめは CCD を長時間安定して -100°C に冷やし続けることです。実はこの 2 つの要求は、同時に満足しようとするとは相反した答えになってしまいます。低温構造体の設計ではよくある話ですね。ガッチリ固定しつつも熱は出来るだけ伝えない…そ

こで CCD デュワーでは 116 個の CCD を支える部分の構造をごく薄い壁を持った管 6 本を使ったトラス構造とすることで解決しています (右下図)。このトラス構造と大出力の PT 冷凍機 2 機で満足する性能の CCD デュワーが完成しました。

こうやって書くと実にあっさり完成したように聞こえますが、現実には試作から搭載品の完成まで試行錯誤が結構ありました。その中で一番記憶に残っているのが CCD デュワーの取付 I/F 部に使った球面座金の調整作業です。CCD デュワーはその構造から取付時に歪みが発生するとアライメントが大きく狂ってしまいます。そこで CCD デュワーとカメラの結合部のボルトに球面座金というものを採用して歪みを打消す設計にしました。ところがこの球面座金が思ったように機能しなくて大変でした。凸と凹の球面ペアがスムーズにズレて締結されることが重要なのですが何度やっても上手くいかず……。いろいろな潤滑剤を試して何十

回も着脱試験しました。結合部のボルトは M16 なんていう大きなサイズで全身の筋肉を使って締め上げます。たぶん試験が終わるまでに 300 回近く着脱したんじゃないかな。しかも数日で。最終的に最も信頼性があったのはタミヤ模型のオイルでした。さすが世界のタミヤです。

私にとって CCD デュワーはたくさんの事を教えてくれた思い出深い装置です。これから始まる観測運用で多くの成果が上がる事を心からお祈りします。



CCD 取付前の CCD 取付基板 (コールドプレート)。6 本の薄肉管トラス構造で断熱保持されている。写真奥には分解された冷凍機、CCD 読み出しエレキなども見られる。

HSC 開発ファクトリー④ HSC のフィルター交換機構の開発

浦口史寛 (先端技術センター)



ハワイ観測所山麓施設で動作確認中の様子。展開した格納部の間に位置決め部が見える。



主焦点ユニットに取り付け、動作確認をしている様子。左手側の格納部が展開中。

フィルター交換機構 (FEU) は、観測中にフィルター交換を可能にする装置で、国立天文台と台湾中央研究院をはじめとする研究者・技術者からなるチームによって共同開発されました。

FEU は光軸上で位置決めを行う「位置決め部」と、フィルターを格納する「格納部 (スタッカー)」との2つの部分からなります。位置決め部は主焦点ユニットのカメラ部に設置され、焦点面の CCD に対し 10 ミクロンの位置精度でフィルターを固定します。格納部は、合計 6 枚のフィルターを格納し、フィルターを選択する機構と、選択したフィルターを光軸上に挿入または退避する機構を備えます。この格納部は、主焦点ユニットのスペースおよび重量の制限により、独立した構造となっており、それがこの装置特有の困難を生み出しています。

まず、フィルターが2つの構造を行き来するためには、双方を高い繰り返し精

度で位置決めしなければなりません。格納部は観測の度に着脱されるので、取り付けの際には細心の注意が払われます。ハワイ観測所のスタッフは、決して良いとは言いがたい作業性のなか、毎回ベストを尽くして精度を維持してくださっています。

つぎに、主焦点ユニットと格納部は独立した駆動系をもっているため、それらが誤動作すると事故になりかねません。そこで何重かの安全機能がハードウェア・ソフトウェアに組み込まれています。その安全機能は開発途中で追加されたものが多いたのですが、台湾のチームはいつも真摯に対応してくれました。彼らとは激しい議論も繰り返しましたが、みなりの温厚な人柄に救われたことも数えきれません。

以上、開発の困難は多かったのですが、その分 FEU の今後の活躍にご期待いただけたらと思います。

HSC 開発ファクトリー⑤ HSC 用大型フィルター+SH フィルターの開発

川野元 聡 (ハワイ観測所)



● HSC 用大型フィルターの開発

HSC の広視野は大きな結像面積が支えています。そのため、焦点付近に配置されるフィルターも大型のものが必要とされます。HSC で使用されるフィルターは直径 600 mm、有効口径 576 mm とこれまでにない大きさです。このようなフィルターを製造するにあたって、大型の色ガラスフィルターが製造されていないことと、大型の基板を貼り合わせるのが難しいことの二つの困難がありました。これらの問題を避けるため、HSC のフィルターは基板 1 枚の両面に構成された干渉膜だけでその透過特性・阻止特性の性能を出す方針としました。もちろん大型のフィルター全面で特性は一様でなければなりません。開発当初はこの目標はかなり挑戦的でしたが、各メーカーさんに努力頂いて 2011 年頃には広帯域フィルターが完成し始めました。難易度

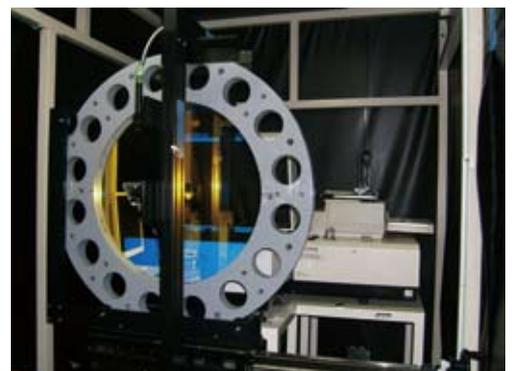
の高い狭帯域フィルターの製造も 2012 年頃から安定してきて現在に至ります。

● HSC 用シャックハルトマン (SH) フィルターの開発

まず、SH フィルターの開発は当初現在東大天文センターの諸隈さんが主導していて多大な貢献があること、また制御に関しては現在広島大学の内海さんによる所が大きいことを記しておきます。

SH 装置とは、主鏡面の歪みを補正するために HSC の焦点付近で星からの光の波面を測定するためのものです。現行主焦点カメラでは波面測定専用の光学系が配されていますが、HSC では本体の大型化のために付随装置の設置場所がありません。そのため、フィルターが挿入される厚み 40 mm

程度のスペースに波面測定用の光学系や参照光源などを配置した『SH フィルター』と称する装置をフィルターの代りに設置することで、観測装置の他の部分に影響を与えることなく波面測定が可能になりました。試験観測の結果、現行主焦点カメラの波面測定装置と同等の測定精度を持つことが確認されています。

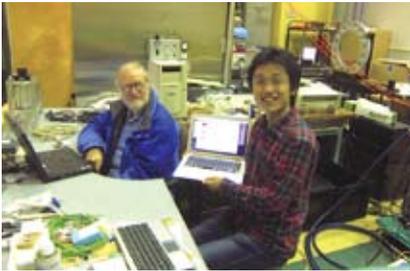


HSC-g フィルターの測定の様子。円形枠の内側がフィルターで、透過光が青緑・反射光が黄色に見える。

HSC 開発ファクトリー⑥ 制御系の開発



内海洋輔 (広島大学)



Taitさんと博士論文を提出する直前の筆者。

私は制御系ソフトウェアの開発を担当しています。開発はハワイ観測所のソフトウェアエンジニアであるTaitさんと共同で進めています。HSCとひとことで言っても様々な装置の集合体です。イメージセンサーである116枚のCCDは大きな真空容器に入れられ、イオンポンプで真空を維持して断熱しつつ、冷凍機を運転して温度制御し-100度を保ちます。カメラにはシャッターも必要です。またプロの天文観測にはイメージセンサーに届く光の色を選別するフィルター

も必要で、その交換機構も必要になります。これらを制御するための制御系コントローラはエレキラックと呼ばれる部分に詰め込まれ、真空容器の後ろに配置されています。

すべてのカメラユニット制御系ハードウェアは専用のプライベートLANを通して一般的なプロトコルで通信できるようになっています。すばるの主焦点部にあるPOpt2ユニットから伸びる光ファイバーが観測制御棟1階の計算機室まで届いていて、そこに設置されたOBCPと呼ばれる計算機に接続されています。OBCPから命令を送ればHSCの内部の様子がわかったり、実際にシャッターを切って天体写真を撮ったりすることができるようになるわけです。

HSCは、現行Suprime-Camの10倍の数のCCDを扱うので、単純に考えると10倍処理時間がかかってしまうことになります。研究者としてはできるだけ

観測時間を無駄にしたくないので、効率をあげる工夫をしました。中屋さん達が開発した高速なCCD読み出し回路(10ページ・HSC開発ファクトリー②参照)に、高速な計算機とストレージを接続し、ハードウェア性能を最大限まで使い切れるようにソフトウェアにはマルチスレッド技術や非同期処理を積極的に採用しました。その結果Suprime-Camよりも短い間隔での積分が可能になりました。



山頂に設置された制御系計算機群。CPUもハードディスクも並列に動作して、116枚のCCDを処理します。

HSC 開発ファクトリー⑦ 望遠鏡への搭載作業



小宮山 裕 (ハワイ観測所)

すばる望遠鏡の主焦点部には副鏡・主焦点観測装置(Suprime-CamやFMOS、HSC)などの様々なトップユニットを装着することができる。トップユニットを交換することで様々な観測に対応することが可能となり、様々な波長・観測モードで観測を行うことができるのだ。しかし、このトップユニット交換作業は非常に大変な作業である。主鏡から遙か15mも上の主焦点部で命綱一本に身を預けトップユニット交換装置に乗って位置確認、ケーブルのつなぎ込みなどの気を遣う作業が続く。主鏡の真上という緊張感、気圧の低い山頂環境、夜間予想気温に冷却された寒いドーム内という条件がこの作業の困難さに拍車をかけている。

HSCの搭載時にはさらに難題が加わる。HSCの場合は、補正光学系は主焦点部にあるトップユニット取り付け用環状構造体(筒頂内環)の内部に挿入

される。筒頂内環の内径は1mだが、補正光学系鏡筒の最大径は970mm。つまりクリアランスはわずかに±15mmしかないのである(8ページの組み立て時の写真も参照)。このクリアランスで鏡筒を約1.5m挿入していかなければならない。しかも補正光学系鏡筒はセラミック製。どこかにゴツンとぶつけたらクラックが発生・進展する危険性ははらんでいる。このような息を飲む緊張の搭載作業、私などはプレッシャーに押しつぶされてしまいそうであるが、ハワイ観測所のスタッフは素晴らしいチームワークで着実かつテキパキと搭載作業を進めていく。まさに神業である。

また、HSCが望遠鏡に搭載された後はフィルター交換機構の取り付け作業が待っている。位置決めやHSCユニットへの固定、ケーブル接続作業など、時にはトップユニッ

ト交換装置から身を乗り出での作業が必要である。下を見れば遙か彼方に床が見え目がくらむ。そんな場所での作業も堅実にこなしてしまうハワイ観測所のスタッフには頭が上らない。

すばる望遠鏡主焦点に搭載されたHSCを見かけたら、大変な搭載作業を経てあそこにHSCが取り付けられているのだな、と思いを巡らせていただければと思う。



取り付け作業のようす。

HSC 開発ファクトリー⑧ HSC の縁の下のサポート

上清初枝 (ハワイ観測所)・石塚由紀 (東京大学)



(左・石塚 / 右・上清)

私たちはプロジェクト事務を担当しています。業務の内容は、予算管理、物品購入・旅費申請手続き、勤務時間管理などです。他に、台内各所にいらっしゃるプロジェクトの皆さんへ、納品物や郵便物を届けています。また、必要に応じて、輸送の手配や会議の準備をすることもあります。

物品購入手続きは日常的な業務のひとつですが、「来週までに必要」と依頼された品物が入手困難な部品で、全国津々浦々、地方の小さな商店から海外にまで在庫を探し、何とか希望の納期に間に合わせる事ができたときは、ほっとしました。また、当初より予算が不足していたので、主焦点搭載のための大型予算が獲得できた時は、記者発表より早くその事実を確認して、シャンパンで乾杯した

ものです。他に思い出すのは、科研費の報告書類が多く、しかも出来上がるのがいつもギリギリなので、締め切り当日に文科省へ持参したり、配送業者へ自転車で駆け込んだことなどです。

そんな、たくさんの思い出が詰まったHSCが完成して、ハワイへの旅立ちを見送った日、現地で会うのは老後の楽しみと思っていましたが、その後、出張の機会を得て、山頂でWFCやPOpt2も間近に見ることができて、大変感動しました。その時「HSCに組み込まれた配管部品のどれか1つにでも、名前を書いておけばよかった…」と思いました(笑)。

いろいろな思い出がありますが、事務員である私たちを、プロジェクトの一員として思ってくださいていることを、とてもうれしく感じています。そして、時

間や予算の制約の中でベストなものを作るために、様々な工夫や努力をしていらっしゃる皆さんの姿を身近に拝見し、専門的な技術や知識でサポートすることはできませんが、いつも「応援したい」という気持ちで、仕事をしています。



ファーストライトの時間にお祝いとして鎌田さんと3人で贈ったお花。

HSC 開発ファクトリー・番外編 HSC開発部考える係の男、その名は川野元

内海洋輔 (広島大学)

「雨ニモマケズ、風ニモマケズ、高山にも、夜勤にも負けぬ、だいたい丈夫な身体を持ち、欲ハナク、あまり怒らず、イツモシズカニワラッテイル、毎食インスタントみそ汁とKTA(地元のスーパー)で買ったサンドイッチを食べ、HSCのあらゆることを、ジブンヨカンジョウニ入レズニ、ヨクミキキシワカリ、そして忘れずにメモをとりレポートにまとめる……」。

この記事の小宮山さんからまかされて頭を悩ませていたときに、ソフト係の小池さんから「アメニモマケズとか載せとけば」というアイデアをもらいました。そんな冗談があっさり受けられるほど、川野元さんはアメニモマケズの主人公のようにHSCの最前線部隊で身を粉にして活躍してきました。戦場のような現場でおこる技術的検討課題を冷静に分析して、微笑みながら解決策を示し、HSCの完成に大きく貢献して来ました。川野元さんが分析し、まとめたレポートの数は、正確な数はよくわかりませんが、5

年で100報を超えたいと思います。川野元さんはすばるの第一期装置の一つである高分散分光装置HDSの制作に携わり、それを使った研究を進めてきたので「イメージング観測をやったことがない」と言いながらも、幅広い範囲をカバーし、光学系から機械系、検出器、そして解析に至るまで様々なことを考えて来ました。そんなわけで川野元さんは、ミンナニ「考える係」トヨバレ、たまにほめられ、いつも頼られるようになったわけです。そういうひとに私もなりたいたいわけですが、なかなか先は長そうです。

ただ、食生活はどうかした方が…。ハワイ滞在中、夜勤の時は毎日違う食事が支給されるのでまだいいとして、昼勤務の時の毎食はほとんど

同じメニューで、パサパサのサンドイッチを朝昼夜でわけて食べていました。今も一年の大部分をハワイで暮らし、おそらく毎日KTAに通い、同じものを買って食べて暮らしていることが容易に想像がつきます。何度言ってもなかなか受け

入れてもらえませんが、これだけはセットクニマケテ、健康に留意していつまでも頼れる「考える」係であり続けていただけたらと思います。



考えてた川野元さんを横から邪魔して撮ったときの図。



計算機をいじってデバッグ中。

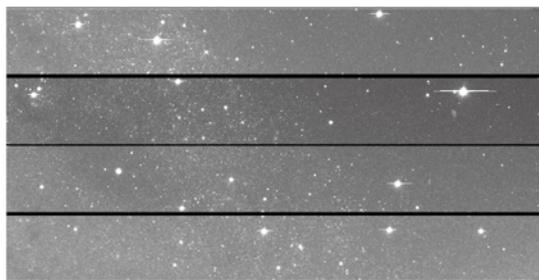


●ここではHyper Suprime-CamのCCDが出力した生画像からM31（アンドロメダ大銀河）の画像を作り出すまでの工程を具体的に紹介します。データ解析については20～21ページもご参照ください。

スタート!

step 01 生画像

この画像はM31を撮影した時のあるCCDから得られた生画像です（Hyper Suprime-Camでは1度の撮影でこのような画像が104枚得られます）。1枚のCCDから出力された生画像はこのように星の写っている4つの領域が黒い帯で分かれています。これらの4つの領域はCCDの4つのデータの読み出し口に対応しており、それぞれの読み出し口では受光素子からの電荷読み出し時にアナログデジタル変換の都合上で必要な値が足されています（バイアスと呼ばれる）。そのバイアスの値が各領域で違うため、領域間で明るさの段差ができてます。



step 02 バイアス補正

各領域の間の黒い帯からその読み出し口のバイアスの値がわかります。各領域でそのバイアスの値を引き、黒い帯を取り除き繋げるとこの画像のようになります。



step 03 フラット補正

次に白い一様な板を撮影した画像（ドームフラットと呼ばれる）で先の画像を割り算します。これにより周辺減光、光路上のゴミ等の影、CCDの感度ムラなどの補正することができます。



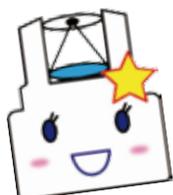
ドームフラット（左）とフラット補正済み画像（右）。

step 04 ブルーミング補完

先の画像では明るい星の左右に白く潰れた領域がのびていました。これを上下の色の情報で補完します。



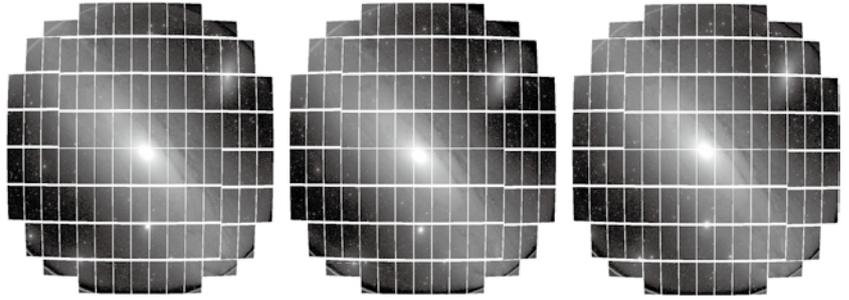
自然なイメージになってきたよ





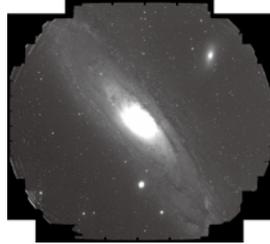
step 05 モザイク、再投影

画像に写っている星の位置から画像が空のどこを写しているか正確に計算します。その計算結果を元に画像を天球のある一点に接している平面へ投影した画像を作ります。ここで並んでいる3つの画像は視野の中心はそれぞれ違いますが、どれも同じ天球上の1点に接する平面へ投影したものです。

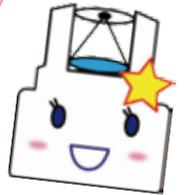


step 06 スタック

先の3つの画像はそれぞれ視野の中心が少しズレているので、これらを重ね合わせることで、1ショットではデータがなかったCCDの隙間を埋めることができます。

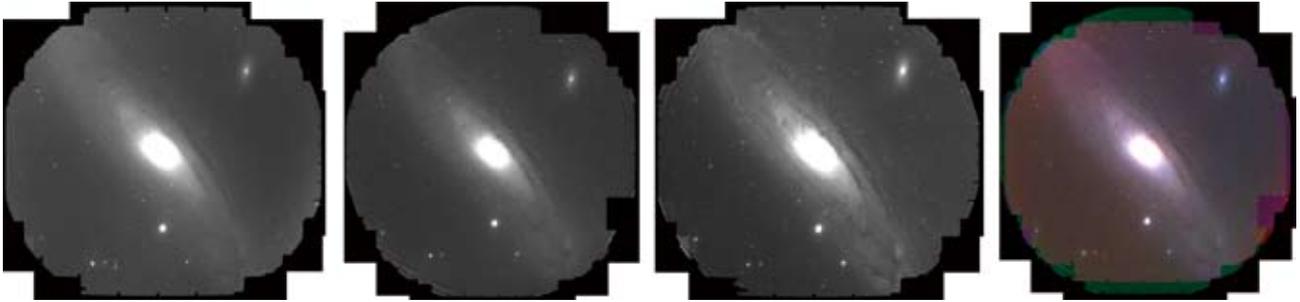


隙間が埋まってとても大きな一枚のイメージになったね



step 07 カラー合成

いままでのプロセスはあるフィルターに関してのものでした。フィルターとはカメラに届く光の波長の領域を制限するものです。今回のM31はi, r, gと呼ばれる3つのフィルターで撮影が行われました。以下の画像は左からそれぞれi, r, gのフィルターで撮られた画像についてstep 06のスタックまで行ったものです。フィルターによって微妙に明るくなっている場所が違いますね？ これらの3つの画像の各ピクセル値を色空間に対応させることでカラー画像を作ります（右端の画像）。



step 08 色調整

step 07で作ったカラー画像をさらに見栄えが良くなるよう、色合いを調整します。これで完成です！



完成！

●では、以上のプロセスを経て完成したM31の画像をワイド版でご紹介します。14、19の両ページをめくって、すばるHSCの広視野撮像能力のすばらしさをご堪能ください。



■ HSC 1ショット 2GB のデータ解析

●撮ってみたら“やっぱり大きかった”

HSCは言うなれば巨大なデジタルカメラです。1回シャッターを切るとカメラの視野角(1.5度)のデジタル画像が得られます。ただし家電デジカメとは異なり、画像を1回撮るたびにその焦点面を埋め尽くした104個のCCDのデジタル画像が個別に作られます(9億画素で2ギガバイト相当!)。私たちは300夜をかけてHSCで1000平方度超の天域を観測する計画を掲げていますので、その完了時には全観測バンドで290万個のCCD画像~45テラバイト(TB)を処理することになり、処理済みデータは300TB以上に達します。HSCデータ解析の目的は、この膨大なCCD画像データを天文学研究に使えるように校正処理して共同研究者に提供することなのです。

●天文学研究のためのデータ処理

HSCによる天文学研究で主に必要な処理済みデータは、校正済みの画像と天体カタログです。前者は、目的天域のCCD画像をフラットフィールドなどのカウント補正処理の後つなぎ合わせて画素ごとのS/N比を上げ、座標と等級の校正を施した画像のことです。後者は、その画像から天体を検出し(図1)、各天体ごとに位置、等級、形状情報の測定値

を載せたリストのことです。以下に処理上の工夫から2点ご紹介します(14+19ページも参照)。

(1) PSF測定と測光校正

信頼のおける天体検出と正確な天体光度測定のためには、画像上の点光源の輝度分布(PSF)を知る必要があります。HSCデータ解析パイプラインは、SDSSでの経験を基に、PSFをCCD内座標の関数として測定します。これにより、再現性1%に達する星状天体の光度測定が可能になります。また、検出天体からSDSSカタログ天体を同定し、座標&等級校正を自動で行います。

(2) モザイクングによる校正の改善

CCD画像を1枚に繋ぎ合わせる手続きをモザイクングと呼び、HSCの先代Suprime-Camのデータ解析でもお馴染みの作業です。しかしHSCはその広視野と多素子のため歪曲収差の取り扱いが容易ではありません。そこでHSCモザイクングでは、高次項まで含めて画素座標を天球座標に変換する方法を用います。複数ショットに写った同じ天体の位置が一致するように画素と天球座標の関係を解き直すことで座標校正を改善します(図2)。同様に、天体光度の一致具合を

見ることによってフラットフィールド誤差の見積りも試みています。

●レガシーなHSCデータを目指して

HSCの処理済みデータはリリースを繰り返すごとにその信頼性と完成度を高めていきたいと考えています。着実なサーベイ遂行と効率的なデータリリースの

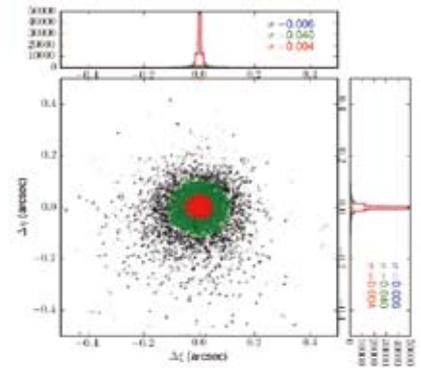


図2 モザイクングによる位置校正。素性の良いデータに対して赤経赤緯方向に10ミリ秒角を切る天体位置の一致度(赤点)を達成できる。

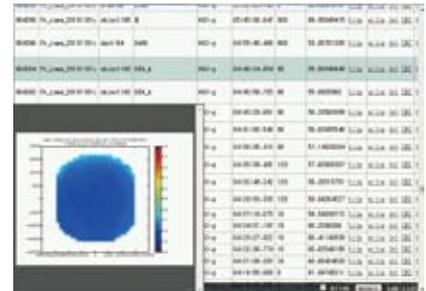


図3 HSCの試験観測で取得したデータを直ちに自動簡易処理することで得られた測定結果を表示するウェブ画面。クイックルック画像やシーイング、星の伸び具合などがショットごとにインタラクティブに確認できる。

ため、観測時に簡易解析によるデータ評価をしてデータの素性を記録し、解析時の参考情報にするシステムの開発も行っています(図3)。

●よもやま話——〇〇の壁より高い? 測光精度5%の壁——

これまで日本人を中心としたすばる望遠鏡の可視光サーベイでは測光精度5%というのが統計的研究でよく言われる(私の?)基準でした。ところがHSCの国際共同研究では5%では満足しない猛者がたくさんと初めての経験。改めて5%超えの測光精度に頭を捻ると、フラットフィールド誤差、対象天体の色に依存する効果、外部参照カタログの理解など、これまでやり過ぎても問題なかった要素が目白押し。時々夢にバンド感度曲線が出てきてうなされ、目が覚めると子供に顔を蹴られてたりして……。

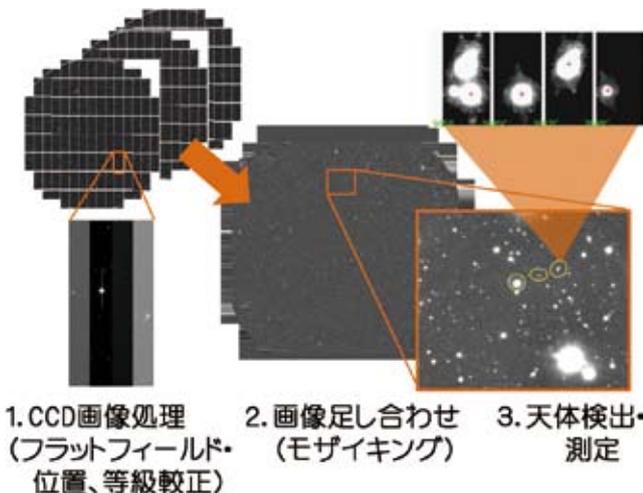


図1 HSCデータ解析の概念。CCDごとに校正処理を行いそれらを繋ぎ合わせた画像上で天体を検出・測定する。

■データ解析ソフトウェア開発担当者の紹介

●HSCデータ解析ソフトウェアは、共同チームで開発されています

HSCのデータ解析ソフトウェアの開発は、国立天文台のHSCサブプロジェクトをはじめとする国内外機関の共同チームで行われています。台外のメンバーは東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構（カブリIPMU）、プリンストン大学を含み、初期の作業に高エネルギー加速器研究機構（KEK）も参加しました。このページに直接名前の記載のない多くの関係者の協力を得ています。主なメンバーからこの共同開発に関わる思いをコメントしていただきました。

国立天文台チーム



★国立天文台

高田唯史、小池美知太郎、大倉悠貴、古澤久徳、山田善彦（以上、写真左からの並び順）

300夜に及ぶHSCの戦略枠観測が生み出す膨大なデータから、科学的成果を最大限に引き出せるようにデータを料理するのが私たちの役割です。そのためには、科学的に正しく較正・整約されたデータを、出来る限り早く効率的に提供することが重要です。私たちは、すばる望遠鏡に最も近い場所で観測装置とデータ解析の間をつなぐという立場からこの課題に取り組んできました。その開発項目は、観測装置の特性を処理手順に反映する取り組み、観測支援のためのデータ評価ソフトウェア開発、共同研究者に安定して較正済みデータを提供するためのシステム構築などに渡ります。これらの活動は、装置開発の一部であると同時に、共同研究者たちの様々なニーズを汲み取り、研究に直接使われるデータ提供という形で彼らに伝える作業でもあります。また、共同開発ゆえの強み、おもしろさ、難しさも実感しています。このやりがいのある開発を粘り強く進めることで、レガシーと呼ばれるHSCデータアーカイブの構築を目指したいと思います。

東京大学カブリIPMU チーム



★東京大学 カブリIPMUの主要メンバー
安田直樹、Steve Bickerton、峯尾聡吾、片山伸彦（写真左から）

HSCサーベイは日本のグループが主導して行う初めての大規模撮像サーベイ観測で、そのソフトウェア開発に参加できたことを非常にうれしく思います。統計的解析に耐えうるデータ処理をするには、ハードウェアの特性を理解し、それに最適化された処理をする必要があります。また、サーベイ観測で得られるデー

タは大量になるので、効率的に人の手を煩わせることなく処理が進むようにパイプライン処理をする必要があります。そのような意味で、HSCのハードウェアを開発している天文台のチームとSDSSで豊富な経験を持つプリンストン大学のチームが協力して開発を進めたことは非常に有意義であったと思います。カブリIPMUにもSDSSなどの大規模サーベイに関わった研究者が多くおり、ソフトウェアの解析結果の検証などでこれからも貢献していきたいと考えています。

プリンストン大学チーム



★プリンストン大学の主要メンバー
Robert Lupton、Paul Price、Jim Bosch、宮武広直、Craig Loomis（写真左から）

すばるのような強力な望遠鏡で新しい観測装置を立ち上げることはいつも楽しく興奮するものです。特にそれがHSCのような素晴らしい装置であればなおさらです。先の2回のエンジニアリング観測ではカメラの視野全体にわたって星像サイズ0.5秒角の画質を達成しました。そのデータを処理することで、私たちは自分がいかに天文学的に偉大な機会に立ち会っているのか、またそれがいかに挑戦的な営みであるかを実感しました。HSCの戦略枠観測は、これまで行われ

たのような観測プログラムとも質的に異なる、そして優れた(!)データを生み出すでしょう。その中で私たちは、国立天文台やカブリIPMUなどの研究者とともに、観測装置、望遠鏡、そしてそこから得られるデータを適切に処理するアルゴリズムを理解し、最先端の科学的成果を上げられることを期待しています。（※筆者による翻訳）

2013年1～2月のエンジニアリング観測でデータ解析に勤しむ最中、閉店間際のヒロフードコートに駆け込み食事を調達する安田氏とLupton氏。ショーケースは空っぽ（筆者撮影）。



HSCを支えるハワイ観測所スタッフの活躍

HSCのような新しい観測装置が無事ハワイ観測所の山麓施設に到着し、その後すばる望遠鏡に取り付けられて観測スタンバイとなるまでには、ハワイ観測所スタッフのさまざまな苦労と活躍があります。そのようすを紹介しましょう。



特集・HSC IV

山頂への道



小宮山 裕 (ハワイ観測所)

①



ハワイ観測所山麓施設に到着した CCD カメラの荷物。

すばる望遠鏡に取り付けられる観測装置は、山頂へ上げられる前にレビューを受け、ハワイ観測所の承認を得てから山頂の望遠鏡施設へと運ばれます。HSCも例外ではなく、ハワイに送られた CCD カメラは一旦ヒロ市内にあるハワイ観測所山麓施設で展開・組み立てを行い、動作確認・性能確認を行うことになりました。

2012年4月13日、到着した荷物は4tトラック1台に一杯①。荷物の通関・受け取り担当の事務の方々には驚いたことでしょう。これら大量の荷物を、観測装置グループの人々が中心となって、観測所内のシミュレーター室に展開しました②。展開する場所の確保、厳重に梱包された木箱の開梱、クレーンでの荷物の移動や組み立て作業、実験に必要な冷却水や乾燥空気の手配等々、様々な作業を担当してくれました。また、CCDカメラの制御コンピューター群も3台、それに加えて大容量のRAID等もあり結構なボリュームなのですが、コンピューターグループ・観測装置ソフトグループなどの協力の下、組み立て・設定が進められ、ヒロでの動作確認・性能確

認を円滑に進めることができました③。

2012年5月29日。レビュー当日は、観測所各部門の代表が集まりました。まずは会議室でHSCの諸性能の確認から始まり、様々な質問やコメントをもらいました。その後、実際にCCDカメラを皆で囲んで実見が行われました。取り付けられた各種サブ装置の役割の説明をしたり、メンテナンス・安全性・改良箇所など多岐にわたる質問・議論が繰り返されました④。そして宿題をもらいつつもレビューをパスし、山頂輸送へのゴーサインが出されました。

レビュー後からは山頂輸送へ向けての準備が始まりました。BSITと呼ばれる山頂輸送専用のトラックに乗せる際には、あらかじめ作ってあった固定用ブラケットの穴位置が合わなくて、急遽ハワイ観測所の工場で作直してもらうなどトラブルもありましたが、何とかBSITへ積み込むことができました⑤。

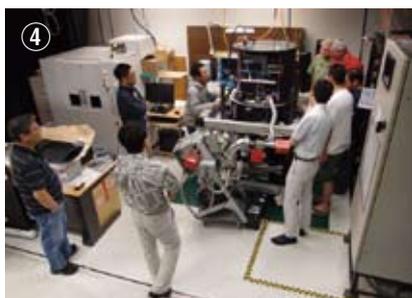
そして、2012年6月1日。三鷹にいるメンバーから送られてきた深大寺の交通

安全お守りをBSITに取り付け、CCDカメラは山麓を出発。BSITの運転に熟練したスタッフの運転で慎重に輸送され、無事に山頂に到着しました⑥⑦。

こうして振り返って見ると、山頂到着後の総合組み立て(8ページ)・望遠鏡搭載作業(12ページ)・実際の観測を含め、ハワイ観測所スタッフの様々な協力があって初めてHSCは観測を開始することができたのだ、と改めて気付かされました。HSCの開発を登山に例えれば、ハワイ輸送から観測までは9合目からの道程。最も苦しい時期の援軍は頼もしい限りでした。ハワイ観測所スタッフの大いなる協力で改めて感謝し、本稿の結びとしたいと思います。



ハワイでも無事に CCD カメラが組み立てられ、ほとと一息の HSC グループメンバー。



レビュー後半の CCD カメラ実見の様子。ハワイ観測所スタッフの鋭い目で様々な部分をチェックされました。



シミュレーター室で BSIT に搭載される CCD カメラ。山頂への道中に BSIT 荷台に濡れ込んだ雨水がかからないように、CCD カメラはラップされて輸送されました。



マウナケア山頂の望遠鏡施設へ到着する BSIT。



上図の赤丸部の写真。三鷹から送られてきた深大寺の交通安全お守りが取り付けられていました。

②



シミュレーター室に展開された CCD カメラの荷物。シミュレーター室の3割くらいのスペースを使って組み立て・調整が進められました。

すばる望遠鏡主焦点カメラの30年

広視野を誇るすばる望遠鏡の主焦点カメラ (Suprime-Cam) は、他の8メートル級の大口徑望遠鏡にはない、たいへんユニークな観測装置です。HSCの先代カメラである Suprime-Camの開発に携わった成相恭二名誉教授にその製作の経緯を振り返っていただきます。



特集・HSC V

すばる望遠鏡主焦点カメラ (Suprime-Cam) の開発

成相恭二 (国立天文台名誉教授)



反射望遠鏡の視野は小さいので、まず広い視野を持つカメラを使って観測する天体を特定して、それを望遠鏡で観測することが昔から行われて来た。パロマーの200インチ望遠鏡と48インチシュミットカメラの組み合わせは著名である。日本での大望遠鏡計画が始まった時にプロジェクトの中の最年長者である山下泰正先生は「我々の望遠鏡で観測できる暗い天体を探することができる補助望遠鏡は世界に存在しない。だから同じ望遠鏡に広視野のカメラを作らなければならない」と考えていた。

そこでWynneの設計した3枚構成の主焦点補正系などを参考にしながら、主焦点カメラの設計を始めたのである。山下さんに依ると「3次収差まで補正するとすれば倍率色収差、軸上色収差、球面収差、コマ、非点収差、像面湾曲の6つを0にして、望遠鏡との合成焦点距離を指定値にすると言う7つの条件がある。レンズが3枚あると曲率半径が6つ、レンズ間隔が2つで8つの変数が使えるので同一硝材を使った解はあるだろう」と言うわけで、山下さんは4次方程式を解いて薄レンズ解の答えを出し、私がPC9800上のBASICで書いた反射の法則とスネルの法則だけを計算する200行程度の自作のプログラムoptikを走らせて何枚ものスポット図を描いた。1985年頃の事である。それから多くのことがあった。

① キヤノンの松居吉哉先生に光学設計を教わり、optikに減衰最小二乗法 (DLS法)、3次収差、FederによるSkew rayの式を組み込んだ。

② 大気分散補正が必要であると言うのでEppsに倣って直視プリズム2枚を回転させるADCを組み込んだ。この頃にはoptikはTurbo-Pascalに書き換えて1200行くらいになっていた。

③ 視野直径24'なら目処が着いたが、東大天文の岡村定矩さんに「絶対に30'は必要」と言われ、眠れない夜が続いた。

④ ある日、非球面を使えば自由度が増えて視野を拡大した設計が出来ることに気が付き、早速第1レンズに組み入れた。収差が改良されただけでなく、第1レンズのパワーが減り、撓みによる性能低下の心配が減った。

⑤ その頃キヤノンには文部省の研究費で作られた第1号の非球面研磨機があり、それを使えば300mm φまでの面は磨けます、と言われた。

⑥ 球面収差の色収差を取るのが難しかった。主鏡の焦点距離が15mとカメラ等に比べて桁違いに大きいために出て来た問題である。これは低分散ガラスを使って克服できた。

⑦ オハラ工場見学に行ったら羽部さんに「そのガラスは世界中で一番大きいもので100mm φです。しかし、日本が世界一の望遠鏡を作るために必要なら200mm φでも300mm φでも作ってみましょう」と言われた。

⑧ ある日、武士さんがアッペ数の異なるレンズを貼り合わせて平面にしたものを平行移動させるシフト式ADCの設計案を見せてくれた。これを採用することによって全体を小型化しながら性能も良くした現在の主焦点補正系が製作されている (武士邦雄、松居吉哉、成相恭二、伴 箕吉の発明として特許出願された)。

⑨ optikはワークステーション上のC言語で書き換えられ、4000行くらいになっていた。

⑩ ある時、結果が奇妙な振る舞いをしていて、その原因が単精度計算であるための桁落ちにあることが分かるまで数日

かかった。大望遠鏡なのでスケールが大きいためにおきた事だった。

⑪ すばると関係のない事ではあるが、隣室にいた平山 淳さんのためにoptikを使って一晩で太陽観測衛星「ようこう」の軟X線カメラの設計の改良をして上げた。

1992年に望遠鏡の建設が始まり、私がハワイ島に長期出張することになったので光学設計はキヤノンの武士邦雄さんにお任せした。非球面も低分散ガラスも後ろにある小さいレンズで使われたようである。1998年、すばるのファーストライトの翌年にSuprime-Camも完成した。その後の活躍は目覚ましいものがあり、初期設計に関わった者として大変誇りに思っている。赤外域の狭帯域フィルターを用いた遠方銀河探査にはほんとうに感心した。

そして、視野直径90'と言うHSCの開発についても一言。視野30'であればほど苦勞したのだからそんな物が出来るわけが無いと最初は思っていた。しかし宮崎聡君の強い希望に武士さんが応えて視野直径120'の設計をしたのである。この鍵は瞳位置の変更にあった。瞳を主鏡に置く代わりに、ケラレは許すけれどカメラの第1レンズを瞳にすることによって広い視野が可能になったのであった。武士さんの力量をもって2年かかったそうである。武士さんはその完成間際に倒れて、そのまま亡くなられた。

2012年、ついにHSCが完成した。望遠鏡搭載のための制限から視野直径は90'に変更されたが、その優れた性能は、この特集記事でおわかりいただけることだろう。初代のすばる主焦点カメラの設計を始めてから30年近く、HSCの製作をキヤノンの現設計陣が引き継ぐ前に少しだけそのお手伝いできたのは嬉しい思い出である。

HSC開発でお世話になったメーカーの紹介

HSCを構成するさまざまなコンポーネントの開発は、どれも容易なものではなく、国立天文台先端技術センターによる研究開発に加えて、日本の数多くのメーカーの支援によって完成できたものです。ここでは、開発でお世話になったメーカーを紹介します。



特集・HSC VI

さまざまなメーカーの熱意と叡智が詰まった HSC

宮崎 聡・小宮山 裕・中屋秀彦 (ハワイ観測所)

● HSCの基幹部品は、CCD・補正レンズ・筐体（姿勢制御を含む）だが、これはそれぞれ、浜松ホトニクス、キヤノン、三菱電機に製作していただいた。この3社以外にも極めて多くのメーカーの方々にお世話になった。ここではそのうち数社を取り上げて紹介させていただき、最後に表にまとめて謝意を表したい。

● 富士電機株式会社

スペースが限られていて、アクセスが容易でない主焦点部に取り付けられた CCD カメラをいかにして -100°C まで冷却するか？ これは 18 年前の Suprime-Cam 開発当時からの課題であった。Suprime-Cam は、エアコンで有名な D 社のスターリング・サイクル式冷凍機を採用した。この冷凍機はコンパクトな上に電気を送るだけで冷却ができ、主焦点で使用するには最適なものであった。しかし、2003 年、残念ながら D 社は冷凍機事業から撤退してしまった。

途方に暮れる我々に救いの手を差し伸べてくれたのが富士電機である。富士電機はスターリング・サイクル式冷凍機よりメンテナンス性に優れたパルスチューブ式冷凍機に豊富な経験を有していた。最初はスペース効率やリモート制

御の点で採用は難しいと思われたが、技術検討や実証実験を重ね、2005 年、Suprime-Cam で正式採用されることとなった。その後、FOCAS のアップグレード時にも採用されるなど、富士電機のパルスチューブ式冷凍機はすばる望遠鏡に欠かせない冷凍機となった。

HSC の開発がスタートし、大能力の冷凍機が必要となった時も、パルスチューブ式冷凍機の大型化・性能

向上が第一候補と考えられた。HSC では能力の向上に加えて軽量コンパクト化、ノイズ対策、数々のインターフェース制約などがあり、様々な技術開発要素があったが、「すばる望遠鏡 (HSC) に富士電機の冷凍機以外が使われるのは嫌



プロトタイプ CCD デュワーに取り付けられる冷凍機。

なんです！」と言っていただき、多くの技術者や実験設備を投入し、様々な無理難題に答えてくれた。このように富士電機の皆さんの熱いハートに支えられて、HSC 用の冷凍機が完成したのである。

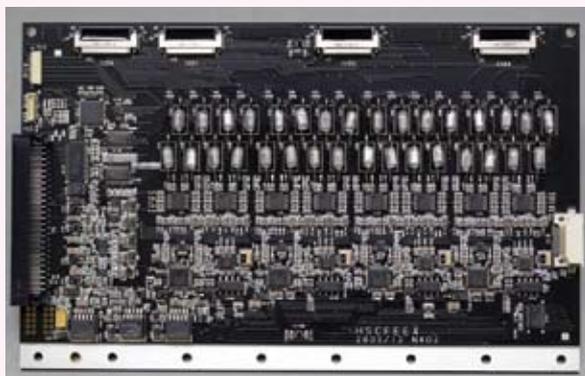
(文/小宮山 裕)

● TSS 株式会社

TSS は電子回路基板を自社内で設計から生産まで行っている相模原にある会社である。HSC のサイエンス CCD 用アナログ回路基板は、HSC カメラデュワー内の真空常温部に配置される高熱伝導基板となっており、TSS が製造した。この基板は特別に熱伝導が良く真空を悪化させるアウトガスを出さないことが必要とされた。

事前の各社への見積りは順調ではなかったが、唯一リスクシェアとしてリーズナブルな金額で引き受けてもらうことができた。真空常温配置を実現するため、厚

さ 2 mm の高熱伝導アルミコア、総基板厚 3 mm を全貫通するビアを用いた 8 層多層基板を採用し、絶縁材料には熱伝導が良い特殊材料を用いたり、ビアホールには樹脂を埋めて表面積を減らすアウトガス対策など様々な工夫を施した。これら一つ一つは既存技術やこれまでの延長ではあったが、全てを組み合わせた熱対策基板は過去に例がなく、試行錯誤が必要なチャレンジングなものであった。主焦点の限られたスペースで全 CCD を



サイエンス CCD を低ノイズで読み出す真空常温配置アルミコア多層基板。

低ノイズで読み出すためには、真空常温配置を実現したこの基板は不可欠なものである。

(文/中屋秀彦)

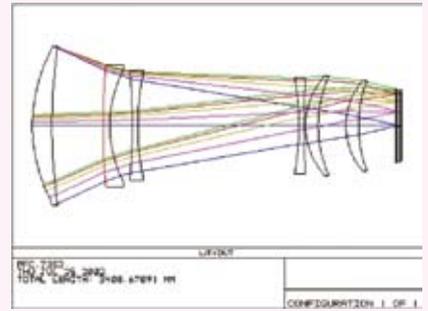
● 岡本光学加工所

成相先生（23ページ参照）と共にSuprime-Camの補正光学系を設計された武士（たけし）さんは、キャノンを定年退職後、岡本光学加工所（以下岡本光学）に移られた。そこで、HSCの新光学系の検討の依頼を岡本光学にお願いすることにした。2002年6月のことである。

当初は直径2度角を目指していたので、単純に考えると、Suprime-Camの4倍、つまり直径2mの第一レンズが必要であった。調べて見ると、硝材の調達が困難であることが分かり、ケラレを許して第一レンズ径を1.2mとすることとした。しかしそれでも80% Encircled Energy Diameterを0.3秒角以下という仕様を満たすには、焦点距離を今より3割ほど伸ばさなければならない（すると焦点面が大きくなってしまふ）。そこで、鏡で折

り返す方法なども検討してみたが、入りそうにない、など、検討開始当初は見通しが全く立たなかった。それでも、球面収差の色差を消すために、第一レンズのパワーを弱くし、さらに第一レンズの凹面に非球面を導入、倍率の色収差を消すために後部レンズを色消しにし、コマの色収差を取るために後群に非球面を導入するなど、「攻め」のデザインルールを取り入れることで、2004年春には仕様を満たす設計ができた。悲しいことに武士さんは2005年7月に急逝された。ただ、武士さんの設計は、成相さんの手を経て、キャノンの現役の設計陣に引き継がれ、現実化した。光学系の一部のレンズは岡本光学で研磨していただいた。

岡本光学では光学系の設計・製作だけではなく、技師長の高橋さんに多くのご指導をいただいた。大型光学系の鏡筒の製造・調整を行う海外メーカーや、ソルゲルというコーティング方法に取り組んでいらっしゃる大阪工大の吉田先生を紹



武士さんにより考案された最初のHSC補正光学系デザイン。

介していただき、HSC光学系の概念設計を十分な情報を元に、進めることができるようになった。高橋さんは、この光学系を全て自分たちの手で製作することをスコープに入れていた。ひるも我々に、「名古屋大学の佐藤先生は全部自分でやる。それに比べて、天文台の先生は、だらしない」と、実的に確なご指摘を頂いたりもした。「次のプロジェクトではそうしたい」と固く心に誓った。

（文／宮崎 聡）

■ HSC 開発でお世話になったその他のメーカー

装置	メーカー名	パーツ
CCD関連	有明マテリアル（現 黒崎播磨）	CCDパッケージとコールドプレートの間に 入れるセラミックブロック
	山形オイルシール	CCをエレクトロニクスを接続するフレキシブルケーブル
	アルトナー、アデコ	CCD検査補助者の派遣
エレクトロニクス	東興電気	FEE基板組立
	昭和電子工業	FEE試験治具製造
	三陽サーキット	CCDチェッカー製造
	ジー・エヌ・ディー	BEE製造
冷却デューワー	京セラ	SiCのコールドプレート
	日本真空光学	入射窓（硝材は旭硝子）
	中尾精機	ほとんどの構造部品・アライメント治具
	中村工業	各種部品加工
SHフィルター	MRJ	機械系製造を担当
	岡本光学加工所	コリメータレンズ製造
	オプティカルソリューションズ	マイクロレンズアレイ
フィルター	日本真空光学	r, Haフィルターの製造
	Barr Associates（MATERION, フジトク）	iフィルターの製造
	朝日分光	g z Yフィルターの製造
光学系	オハラ	i線ガラス
	コーニング	合成石英
	京セラ	コーズライト鏡筒（セラミック）
制御系	CTS、Dell、Fujitsu	制御用計算機システム
その他	ハーモニック・ドライブ・システムズ、安川電機、日機装	概念設計時にお世話になった
	日本通運、阪急阪神エクスプレス、THK	輸送

■ 巡り会いに支えられて

● HSCのような一品物の科学計測装置の開発においては、技術的リスクの高いものについては、先端技術センターの技術スタッフが、内製で思考錯誤しながら作っていくのだが、それでも、いくつかのものはスキルと製造装置を持つ会社に頼らざるを得なかった。技術的に難易度の高い仕事を、前向きにとらえ、また、HSCプロジェクトそのものに興味を持っていただき、開発リスクを引き受けて下さる会社に我々は巡り会えた。日本には、優秀な技術を持ち、小回りが効く規模の会社が数多くある。世界を見回してみても、なかなか有難いことだと思う。（文／宮崎 聡）



特集・HSC VII

HSC が 切り拓く 先端 サイエンス

この章では、HSC が挑む主なサイエンス・テーマについて紹介します。今後、HSC を用いたさまざまな観測が予定されていますが、とくに重点が置かれているが「はじめに」でも触れられた「ダークエネルギー」の正体を解明するための観測です。これは「すばる望遠鏡戦略枠 (Subaru Strategic Program)」にも採択された大型サーベイ計画で、その成果が大いに期待されています。

- ① 宇宙論・重力レンズ
- ② 銀河進化
- ③ 太陽系小天体

★すばる戦略枠 (Subaru Strategic Program)

すばる望遠鏡のマシントimeが優先的に与えられる観測プログラムのこと。「歴史的サーベイ観測」や「重要で明確な目的をもつ系統的観測」が公募によって採択される。第1回戦略枠が、HiCIAOを使ったSEEDS (シーズ) プロジェクト、第2回戦略枠が、FMOSを使ったFastSound (ファストサウンド) プロジェクト、そして第3回戦略枠が、HSC プロジェクトである。2014年2月より5年間、300夜を確保して観測が行われる予定である。なお、「すばる望遠鏡戦略枠 (Subaru Strategic Program)」の詳細は次号12月号の特集記事を参照のこと。

HSCが切り拓く先端サイエンス① 宇宙論・重力レンズ

浜名 崇 (理論研究部)



宇宙背景放射、遠方Ia型超新星爆発、銀河団の数計測、バリオン音響振動スケールの測定、弱い重力レンズパワースペクトラム計測といった複数の観測プロジェクトにより宇宙論はここ20年で大きく進展しました。現在では、インフレーション・ビックバン・冷たい暗黒物質・暗黒エネルギーによって記述される標準的宇宙モデルが確立し、それを記述する6パラメータ（ハッブルパラメータ、バリオン密度、冷たい暗黒物質密度、宇宙定数、密度揺らぎの振幅、密度揺らぎのパワースペクトラムの冪指数）の全てが良い精度で制限されています。今日の宇宙論の中心的課題は標準的宇宙モデルが抱える未知の要素を解明する事です。それはすなわち、インフレーションの物理機構やニュートリノ質量、暗黒物質や暗黒エネルギーの正体の理解です。これらはどれも基礎物理の発展に直接的に繋がる課題でもあります。研究者がどのような手段でそれら課題に取り組むかは、各々のアイデア次第ですが、HSCは、研究者にこれら課題に挑戦する多くのチャンスを与えてくれます。実際、HSCサーベイの研究課題提案では宇宙論に関係する研究が数十提案されています。その多くが重力レンズ効果を応用するものです。

そこで、重力レンズ効果を用いた宇宙論研究とHSCで期待される成果について解説します。一般相対性理論によれば重たい物体があると時空が歪み、そこを通過してきた光の軌跡はその物体が無かった場合に比べ曲がったように観測されます。また銀河のように広がりを持つ天体の像は歪められます。遠方銀河の姿を重力レンズを通して見たときの歪みを観察してレンズ天体の性質を調べというのが、宇宙論研究における重力レンズ効果の代表的な応用例です。重力レンズ効果が宇宙論研究者に重宝されるのは、その現象には重力のみが関与しているという単純さのためです。このため電磁波観測より直接的に暗黒物質についての情報を得る事ができます。例えば、重力レンズ効果を用いることで銀河団のような巨大な構造の物質分布を調べる事が出来ま

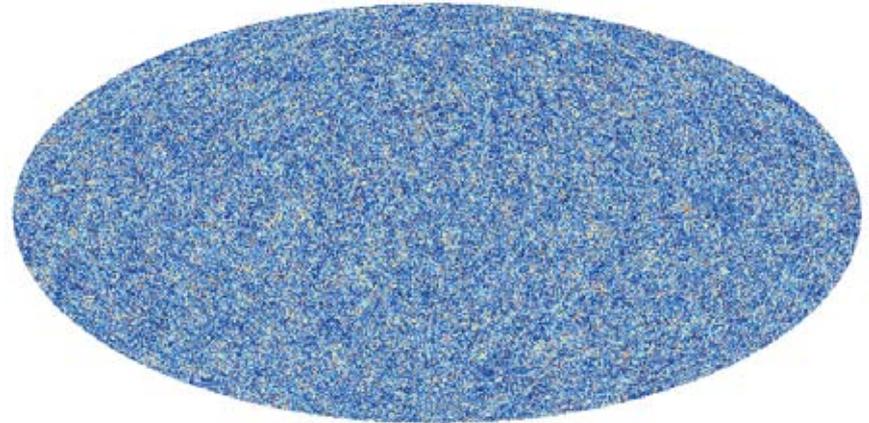


図1 全天の重力レンズ密度場、赤が高密度で青が低密度の領域を表す。

す。これを理論的に予想される分布と比べる事で暗黒物質モデルの検証を行う研究が計画されています。また、暗黒エネルギーは、構造の形成進化を妨げるので、銀河団の数密度が宇宙年齢とともにどのように変化しているか調べることで、暗黒エネルギーの巨視的性質を特徴付けるパラメータに制限を付けることが出来ます。こういった研究には、多くの銀河団を検出するための広い視野と、遠方の暗い銀河像を正確に測定するための高い集光力と優れた結像性能が要求されます。他の望遠鏡と比べHSCはこれらの点において優れた性能を有しているため、重力レンズ効果を応用した研究で他の計画より優れた成果をあげる事が出来ると期待されています。

HSCの開発関係者がHSCを完成させるために多大な労力をつぎ込んできたことは本特集の他の記事で述べられていますが、宇宙論研究者もHSCを用いた研究を成功させるために多くの基盤研究を行ってきています。その一例として全天重力レンズ数値シミュレーションを紹介します。重力レンズ現象は銀河団などの非線形成長を経た構造が関与しているため、その観測結果の正しい理

解のためには数値シミュレーションが必須です。またHSCサーベイは千平方度以上の領域に渡って行われるのでその領域をカバーするシミュレーションが必要です。これを実現するために、私は全天重力レンズ数値シミュレーションプログラムを開発し、現在国立天文台CfCAの大型計算機XC30を用いて計算を実施しています。図1、2は、この計算で得られた全天の重力レンズ密度場です。この計算では全天に渡る密度場を0.5分という高解像度で再現出来ています。私たちは、こういった理論的道具とHSC観測データを組み合わせ、宇宙論の課題に挑もうとしています。

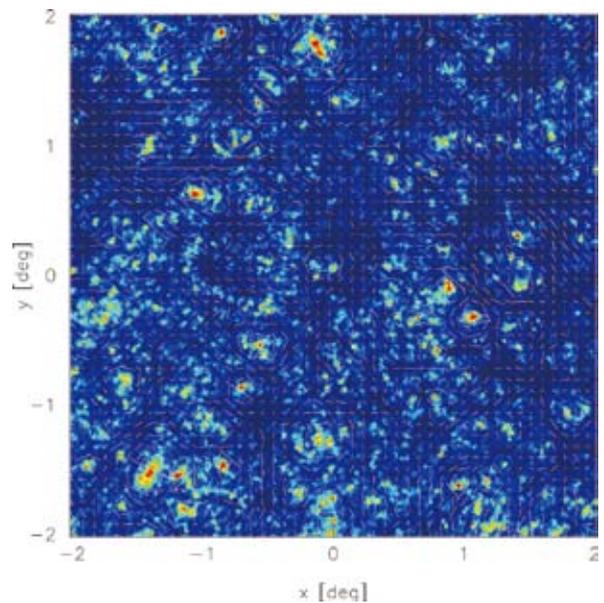


図2 図1の4×4度平方度領域の拡大図、白線は潮汐場を表す。

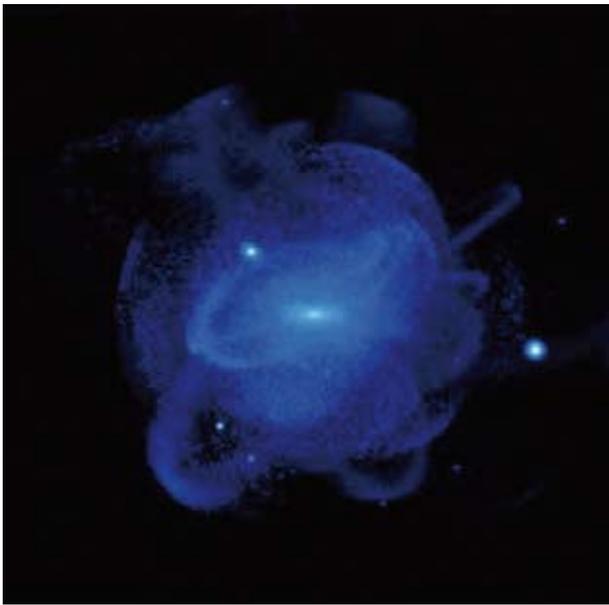


図1 天の川サイズの銀河の形成シミュレーション (Bullock & Johnston, 2005, ApJ, 635, 931)。多くの降り積もってきた銀河がハローの中で潮汐ストリームをなしています。

HSCで観測できる天体は、天の川の星から遠方の銀河まで実に多種多様です。もちろんその天体全てがサイエンスの対象で、これらをもとにした銀河進化サイエンスという非常に広大な研究領域になります。数字オーバーを恐れずに主なサイエンスに触れていきたいと思えます。ここでは詳細に立ち入りませんので、興味のある方はHSCホワイトペーパーをご覧ください。

まずは天文学における究極のケーススタディの一つである天の川銀河から出発しましょう。現在主流となっているCDMモデルは、銀河が衝突合体を繰り返し成長していったことを示唆します。数値計算ではその痕跡である数多くの潮汐ストリームが存在することが予測されており(図1)、広い天域を深く掃くHSCサーベイでは未だ知られていない天の川のストリームが見つかることが期待されます。関連して、天

の川に付随する新しい矮小銀河の発見も重要なサイエンスです。

次に天の川を離れて近傍銀河に目を向けましょう。多くの銀河サイエンスがあるのですが、一つおもしろいものとして早期型銀河の形成が挙げられます。近年の観測では、 $z \sim 2-3$ 前後で非常に重くてコンパクトな銀河ができてこれがコアをなし、より小さな銀河が衝突合体することで、楕円銀河の外側を徐々に形成していく可能性が示唆されていま

す。HSCで観測される数多くの早期型銀河をスタックすることで、その外側が時間とともにどのように形成されてきたのかを探ることができます。非常にタイムリーなサイエンスでしょう。

さらに遠方、例えば $z > 1$ の銀河となると、近赤外データが欲しくなります。HSCのディープフィールドではそういった近赤外サーベイがある領域を選んでいるので、例えばBzK銀河といった色選択された銀河種族を未だかつてない統計精度で調べることができます。また、測光的赤方偏移もそれなりの精度ができることが期待されますので、より一般

的な手法での銀河研究も可能です。

AGNもHSCサイエンスの一つの柱です。実は、HSCのデータだけから一般的なAGNを見つけるのは難しいのですが、例えばAGNの時間変光をとらえる手法があります。また、公開されている電波や中間赤外といったデータを使うことも可能です。そうして選んだAGNとホスト銀河との関係はおもしろいテーマです。銀河とブラックホールの共進化がしばしば議論されますが、本当に手を取り合って進化してきたのでしょうか？

最後に8mという大口径を生かして最遠方の銀河・QSOを探るサイエンスも目玉の一つです。銀河の群れ具合から、宇宙初期における銀河とダークマターハローとの関係が未だかつてない精度でわかるでしょう。QSOは最遠方QSOの記録更新に期待がかかります(図2)。宇宙の中性度を測るいい天体でもあるので、宇宙の再電離史に迫ることも興味深いでしょう。すばるの大きさとHSCの広さの両方を生かしたテーマです。

天の川から最遠方銀河までざっとかいつまみましたが、他にも重力レンズと合わせた銀河サイエンスもあり、とても全てに触れることはできません。いろいろなサイエンスができるんだなあ、と思っていただければそれでもう十分このページを読んでいただいた意味があります。今後のHSCのサイエンスにご期待ください。

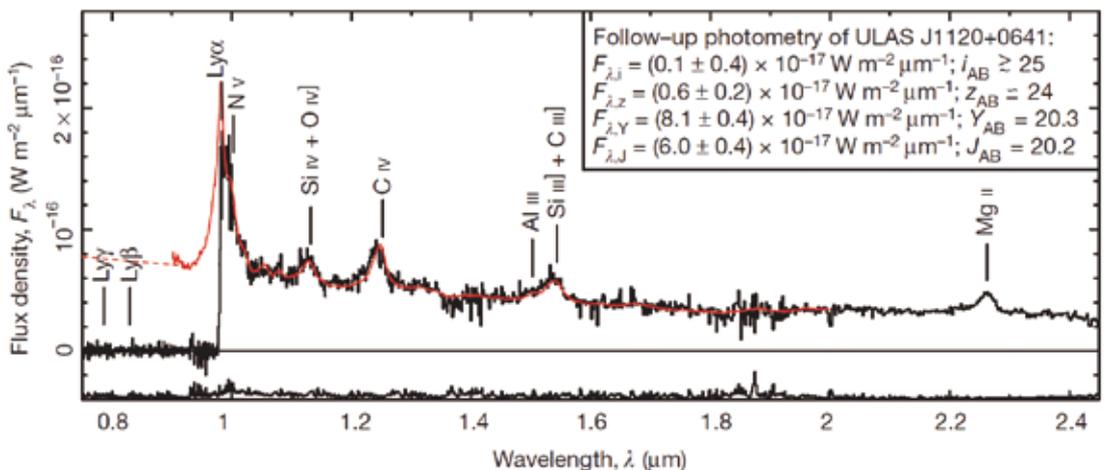


図2 現在最遠方の $z=7$ QSOのスペクトル(Mortlock et al. 2011, Nature, 476, 616)。HSCでこれよりも遠方のQSOを見つけたいところです。

HSCが切り拓く先端サイエンス③ 太陽系小天体

寺居 剛 (ハワイ観測所)



太陽系には惑星や準惑星の他に、無数の小天体が太陽の周りを回っています。それらは惑星形成の材料となった「微惑星」の生き残り、もしくはその破片であり、太陽系の起源と進化を探るための様々な手掛かりを私たちに与えてくれます。近年、原始惑星系円盤やデブリ円盤の高感度・高解像度観測が盛んに行われ、太陽系と系外惑星系との比較がより詳細に議論されつつある中で、その重要性はますます高まっています。

太陽系小天体は位置が時々刻々と変化する「移動天体」であるため、それらを効率的に捉えるには広い天域をカバーするサーベイ観測が有効です。8メートル級の大型望遠鏡の中で唯一広視野撮像が可能であるすばる望遠鏡Suprime-Camは微小惑星や海王星軌道の外側領域に分布する「外縁天体」(図1)の観測に威力を発揮し、これまでに数々の成果を挙げています。しかし、今なお未解明な研究課題がたくさん残されており、さらなる大規模観測が必要とされています。HSCはこれまで困難だった、暗くて個数密度の低い小天体グループに対して抜群的観測能力を有しており、小天体研究を大きく進展させると世界中から期待されています。

特に注目されているのが、太陽系進化史の中で最大のイベントとも言われる「惑星大移動」のモデル構築・検証です。木星から海王星までの巨大惑星は、現在よりもコンパクトな領域内で形成さ

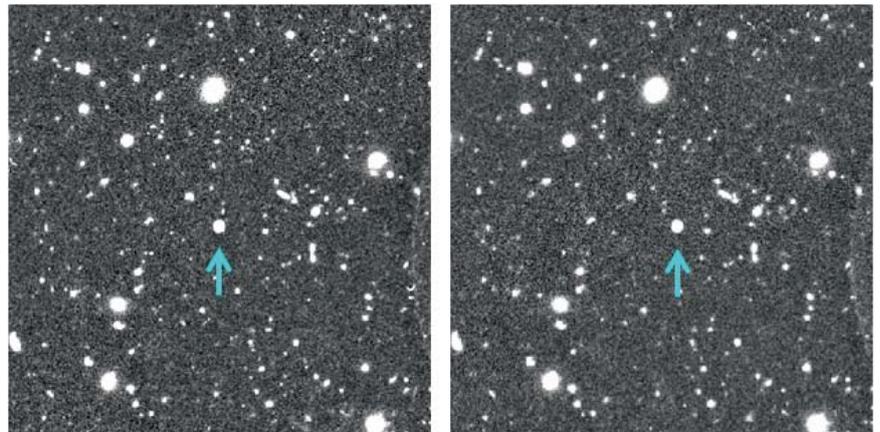


図1 Suprime-Cam 画像から検出された外縁天体。

れ、その後、微惑星との重力相互作用によって木星軌道は内側に、土星から海王星の軌道は外側に移動したと考えられています(図2)。この惑星大移動は周囲の小天体に強い重力摂動を与え、それらの軌道を内側・外側の領域へ散乱させます。特に海王星によって運ばれた小天体が、惑星のラグランジュ点L4・L5付近に位置する「トロヤ群」や、外縁天体の一部を構成しているのではないかと指摘されています(図3)。

観測によってトロヤ群や外縁天体の形成場所や軌道進化を明らかにすることができれば、惑星の初期位置や大移動の時期・期間に強い制約を与えることができます。その指標となるのが、天体直径と個数の関係(サイズ分布)や、

カラーと個数の関係(カラー分布)です。太陽からの距離によって天体の成長速度や表層に存在する氷分子種が異なるので、各小天体グループのサイズ分布・カラー分布はそれらの形成領域を反映したものになっています。どちらも詳細な調査には多数の天体サンプルが必要で、HSCによって初めてそれらを高い精度で測定することが可能になります。

この他にも、微小近地球小惑星の探査、外縁天体の自転・形状測定、バイナリー外縁天体や超遠方天体(内部オールト雲天体)の発見、メインベルト彗星の探査など、様々な研究課題が提案されています。

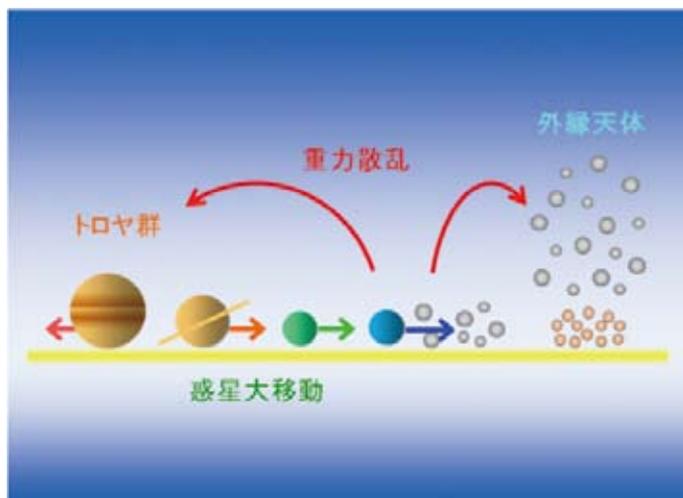


図2 惑星大移動モデルの模式図。

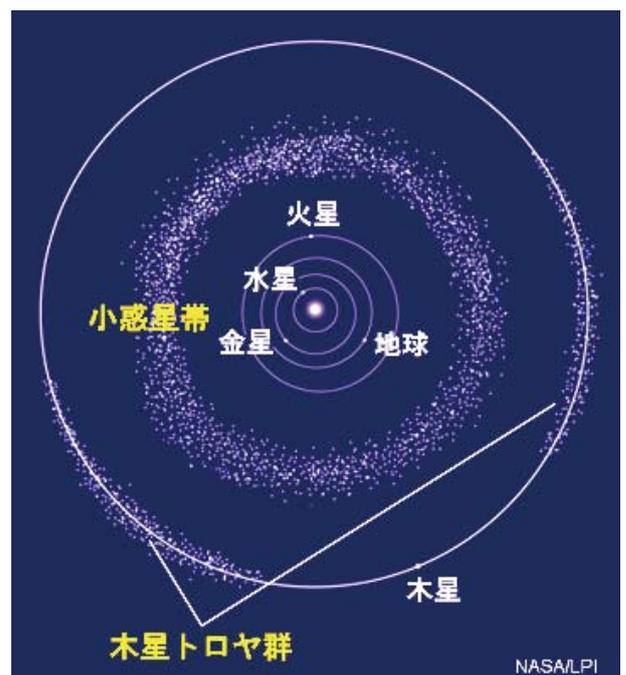


図3 太陽系内側領域の惑星および小惑星の軌道分布図。



特集・すばる望遠鏡・新主焦点カメラ HSC (Hyper Suprime-Cam)

VIII . おわりに ~ Hyper Suprime-Cam 完成を迎えて~

宮崎 聡 (ハワイ観測所/先端技術センター・HSCプロジェクト長)

●HSCが目指したもの

「世界一のカメラを作って、何かおもしろい観測をしよう」。このような単純な動機で始めたプロジェクトだが、それがHSCプロジェクトが発信する一貫したメッセージとなった。

明確なNeedsがあった。Suprime-Camは優れた性能を発揮して、高赤方偏移天体の探査に活躍していたが、弱重力レンズを使ったダークマターハローの探査では、研究目標に対して、その視野が全く不足していた。Seedsもあった。すばる望遠鏡の機械的安定性と高い結像性能は、明らかにアドバンテージであった。さらに、Suprime-Camの開発を担った大学院生が国立天文台の職員となり、開発実験センター（当時）では、新型CCDの基礎開発が浜松ホトニクスと共同で進みつつあった。

ただ、より大型の補正光学系の実現性については全く読めなかった。その検討を行うために申請したのが「2002年度すばる観測装置R&D経費」である。これがHSCのフォーマルな予算申請の第一号で、「未開拓のパラメーター空間で宇宙を見たい。2010年代は8m宇宙望遠鏡や30m地上大望遠鏡の時代となる。その中ですばるが特色を出すための一方策として、我々はHyper Suprime計画を提案する」と訴えた。幸いなことに、佐藤委員長に170万円を認めて頂き、プロジェクトをスタートすることができた。

●天文研究者と技術者のチームが生み出すもの

最終的に天文台の開発チームは、なかなかの大所帯になったが、チーム作りで苦労したことは全くなかった。技術職員を含め、いやがる誰かを無理矢理連れてくる必要は一切なかった。皆、一緒にやりたいと言って、自分の意志で来てくれた。プロジェクトのメッセージが分かりやすかったことが、一因であろうか。そんなチームだから、メンバーは自らの意志に基づき、長い期間興味を失わずに、素晴らしい仕事をしてきてくれている。私の役割は、時々起こるトラブル時に、先頭になって対処することぐらいだろうか。

中でも一番深刻だったのは、CCDを冷却デューブに搭載する段階で、一部のCCDが故障した時である。交換作業をしても、また違う場所のCCDが故障する。結局、搭載時にCCDが接続されている電子回路に人の手が触れてしまったことが原因だと分かったが、それが判明するまでは賽の河原で石を積み上げているような気がして、肝を冷やした。このトラブルシュートの時は、手探り状態が続き、CCD交換のための治具を新たに設計して作ったり、エレクトロニクスを保護する部材を作ったりと、緊急の仕事が数多く発生した。その困難な業務を遂行できたのは、先端技術センターの存在と、そこで働く技術レベルの高いスタッフの活躍であった。本当に感謝している。

ところで、観測的研究をするために装置を作ることは実験物理の研究室でトレーニングを受けた私には自然のことであったし、実際すばるの第一期観測装置は、観測する人が主体となり開発が進められ、それぞれ大成功していた。ところが、最近では、「装置が大型化したので、作る人・使う人の分業が避けられない。大型化した組織ではマネジメントが特に重要である」という話をよく聞く。確かにローバーを火星に送り込むような総予算が1000億円を越すようなプロジェクトにおいてはそのとおりだと思う。しかし、10数人ほどのプロジェクトチームが、同じように運用される必要があるのかは自明ではない。

「プロジェクトが大きくなったから、完全分業だ」と決めつけてしまうと、失うものも大きいのではないだろうか。天文学の興味を持った研究者、新しい物を作り出すことに興味を持った技術者が、一緒になって自発的に働いてこそ生まれるエネルギーがあり、協業を通じて、偶発的に次の新しい研究の種が生まれるかもしれない。HSCはこのスタイルを貫いた。それを可能にしてくれたのは、開発実験センター（小林センター長）を前身とする先端技術センター（常田センター長）という場である。

こうして完成させたカメラには、一ピクセル一ピクセルにプロジェクトメンバーの熱い想いが込められている。



そして、試験観測から本観測へ……

<http://www.naoj.org/Projects/HSC/>

祝！ 国立天文台野辺山の見学者300万人達成！

衣笠健三（野辺山宇宙電波観測所）

10月17日、国立天文台野辺山の見学者がのべ300万人に達しました。国立天文台野辺山では、1982年の野辺山宇宙電波観測所の開所とともに、当時としては他にはあまり例のなかった、施設の一般公開を実施してきました。以来31年目にして、見学者ののべ人数が300万人に達することになりました。

300万人目になったのは、静岡県在住

の山口君雄さん、晴美さんご夫妻で、信州旅行の最初に野辺山に訪れ、今回で2回目の訪問だったそうです。見学者300万人を記念して、ささやかながら「見学者300万人記念品授与式」を行いました。職員のトランペットによるファンファーレでのお迎えをしたあと、所長より認定書のほか、電波望遠鏡のSIS受信機に使用される技術を利用して作成したしおり、

石黒正人元所長サイン入りの本、野辺山特製カレンダー、マグカップなどの記念品を贈りました。その後、所長がお二人を案内して施設見学を行いました。

山口さんご夫妻は、最初はやや驚いた様子でしたが、「たいへんラッキーでした。幸先のよい、良い旅行になりそうです」とおっしゃっていました。



齋藤泰文さん、井出秀美のトランペットによるファンファーレでお迎え。



300万人目となった山口君雄さん、晴美さんご夫妻の記念写真。

編集後記

なんか変！ この秋の花粉症の時期は超一長いって感じ、ヘクシオン！（O）

約半年ぶりのチリ出張。立ち並ぶアンテナと青黒い空はいつも変わらず、夕暮れ時には金星がひととき明るく輝く。新機材を投入して、今回も写真撮影をたくさん。（h）

COSPASPAR 会議でバンコクへ。惑星科学会で石垣島へ。夏を追いかけていた初冬でした。毛穴が開くと体が軽くなるような。（e）

飛騨高山で開催された国際会議に参加。毎年各国の持ち回りでやっているもので今回で7回目。都市とは違う雰囲気や食べ物に外国からの参加者も楽しんでいただようでした。LOCの方々のおもてなしに感謝。（K）

ゴルフポストに当てようと思ってボールを蹴ってもなかなか当たらない筈。ゴルフポストに吸い込まれるように当たるシュートが量産されるフットボールの試合を見る度に、そう思います。（J）

HSC 特集号、無事に発行されてほっとしました。雨ニモマケズ、風ニモマケズ、最後まで粘り強く、なかなか集まらない原稿を待ち、組み上げた原稿レイアウトに文句を言われてもイモツモシズカニワラツテイル。そんな編集のTさんの縁の下のサポートに大変感謝しております。（κ）

いよいよアイソン彗星が近づき、正念場を迎える。どうなることか。大彗星になるのか。期待したいところである。（W）

10月号16ページの図2の解説で、行の最後に「と修正してください。」と余分な語句が誤って掲載されていました。お詫びして訂正いたします。

国立天文台ニュース NAOJ NEWS

No.244 2013.11

ISSN 0915-8863

© 2013 NAOJ

（本誌記事の無断転載・放送を禁じます）

国立天文台ニュース編集委員会

●編集委員：渡部潤一（委員長・副台長）／小宮山裕（ハワイ観測所）／寺家孝明（水沢VLBI観測所）／勝川行雄（ひので科学プロジェクト）／平松正顕（チリ観測所）／小久保英一郎（理論研究部）／岡田則夫（先端技術センター）●編集：天文情報センター出版室（高田裕行／福島英雄／岩城邦典）●デザイン：久保麻紀（天文情報センター）

★国立天文台ニュースに関するお問い合わせは、上記の電話あるいはFAXでお願いいたします。なお、国立天文台ニュースは、http://www.nao.ac.jp/naojnews/recent_issue.htmlでもご覧いただけます。

12月号は、すばる望遠鏡「戦略枠」特集と、3年ぶりに行われた主鏡メッキのようすを増ページでお送りします。

ス
ト
リ
ー
キ
ャ
ム

トロートン・シムス製24吋経緯儀

中桐正夫 (天文情報センター特別客員研究員)



図1 発見時の24吋トロートン・シムス経緯儀望遠鏡の鏡筒部。



図2 1875年の刻印。

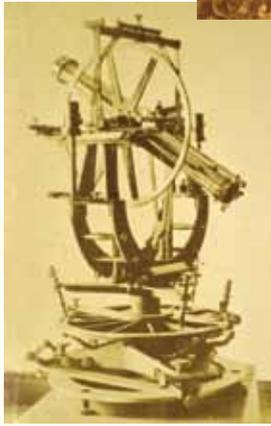


図3 24吋経緯儀の全体像。図4 国立天文台歴史館に展示されている復元された高度軸から上の部分。



図5 未発見の水平軸部分の写真。



図6 水沢VLBI観測所に現存する18吋経緯儀。



図7 国土地理院に保管されている12吋。

アーカイブ・メモ

品名：トロートン・シムス製24吋経緯儀
 製作：トロートン・シムス社(イギリス/1875年製作)
 望遠鏡：76mm 屈折望遠鏡(焦点距離914mm)
 架台：24吋(61cm 目盛環付経緯台)

所在地：国立天文台三鷹地区
 公開状況：一般公開され、見学することができます。

この24吋(インチ)経緯儀は、国立天文台最古の望遠鏡とされていたこともあるが、『東京天文台(国立天文台の前身の一つ)75周年誌』の主な機械の項、『東京天文台90周年誌』の主要設備の項、『東京天文台百年1878-1978』のいずれにも登場しない。それは、1898年(明治31年)4月27日に文部省内に設けられた測地学委員会の三鷹国際報時所が、1948年(昭和23年)に東京大学東京天文台に移管された際に、同時にこの経緯儀も移ってきたものだからと思われる。ちなみに望遠鏡の名称の最初に書かれる数値は通常は望遠鏡の口径を表すが、この場合の24吋は経緯儀望遠鏡の口径ではなく目盛環の直径である。国立天文台ニュース2012年12月号で紹介した27cm一等経緯儀と同様、経緯儀は天文観測用の望遠鏡ではなく、地図作成のため経度緯度を求める測地測量用の望遠鏡である。

この経緯儀が発見されたのは、1950年に建設された当時の本館(二)の中の電波グループが使っていた部屋であった。現在の国立天文台南棟建設のため本館(二)が取り壊される際、鏡筒のみが発見され、その際に子午儀として仮の架台が製作され、国立天文台歴史館(65cm 屈折赤道義望遠鏡ドーム)に展示されていた。その後、アーカイブ室の活動によって、この24吋経緯儀の正体が判明し、本来の架台の一部も発見されて、現在は経緯儀の一部として展示されている。

この24吋経緯儀は、1875年製でイギリスのトロートン・シムス社で製作された。同時期に、18吋経緯儀、12吋経緯儀、8吋経緯儀の合わせて4台が輸入されており、18吋経緯儀は水沢の緯度観測所(現在の水沢VLBI観測所)に、12吋経緯儀は国土地理院に現存している。

同時に輸入された大きさの異なる4台の経緯儀のそれぞれの履歴にも興味がかかるが、国立天文台の経緯儀が完全な形で残っていない事情も、その後の調査で判明した。それは、この経緯儀の鏡筒が電波グループの部屋で発見されたことと関係していた。赤羽賢治先生を中心とする草創期の宇宙電波グループが、三鷹キャンパスに6mミリ波宇宙電波望遠鏡を建設した際、当時十分な精度のエンコーダーを入手できなかったため、角度読み取りのためにこの経緯儀の直径24吋目盛環を転用したのであった。奇しくも新旧の天文学の歴史の断面が交錯した面白いエピソードといえるだろう。

くろにくる