

日本がリードする モザイク CCD カメラの開発

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



口径8.2 mのすばる望遠鏡には、直径1.5度の視野をもつモザイク CCD カメラ、Hyper Suprime-Cam (HSC) が搭載され、探査観測が行われている。本稿ではモザイク CCD カメラ開発の歴史を振り返る。

1. 天体観測用モザイク CCD カメラ

1980年代初頭ころから、天体観測用光検出器として、CCDが使われるようになった。従来の写真乾板より、10倍以上高感度で、光に対する線形性が高かったからであるが、欠点もあった。受光面の大きさである。大型望遠鏡の焦点面は直径10-50 cmと広く、写真乾板はそれに合わせて大面積のものが特注されていた。一方、CCD受光面は、当初1 cm角程度しかなく、暗い天体を撮像できるものの、広い天域を探索する観測には不向きであった。

同じころ、CCDは家庭用ビデオなどをはじめ、広く使われるようになり、半導体製造技術の向上に伴い、雑音や感度の面で性能は劇的に改善していった。ところが、撮像システム全体のコストを抑えるために、CCDは小型化・画素の微細化が進み、天文学者の期待とは逆に、受光面積はどんどん狭くなっていた。そこで、CCDを自分たちで設計し、半導体メーカーに製造委託する天文学者のグループが出てきた。ハーバード・スミソニアン天文台の天文学者、John Geary氏がその代表例である¹⁾。自分たちの望むフォーマット、画素サイズ、アンプ配置に基づき、AutoCAD (市販の機械CAD) を用いて設計し、これを Ford Aerospace

(当時、後のLoral) 等の半導体製造会社に送り製造委託していた。外部回路との接続用の電極を素子のある辺に集約し、残りの辺は素子端近くまで画素を作り込み、隣接する素子とのギャップを最小にするバタブル (buttable) という形状の CCD を最初に開発したのも、彼らのグループである。これにより、2,048×2,048 (2k2k) 画素の2辺バタブル CCD を、2×2で配置したモザイク CCD がハワイ大学天文学研究所 (UH/IfA) で開発され、口径3.6 mのカナダ・フランス・ハワイ望遠鏡 (CFHT) の主焦点に搭載された²⁾。

一方、これら米国における努力とは全く独立に、日本において、国立天文台の関口真木氏・東京大学の岡村定矩氏のグループが、大面積モザイク CCD カメラを開発していた³⁾。彼らは、リスクが高い専用 CCD の開発は避け、1 cm角程度の小型 CCD を多数並べるというアイデアを採用した。バタブル CCD ではないため、素子間のすき間は大きくなるが、すき間の面積が、受光面の面積よりも狭ければ、望遠鏡の指向をずらしてすき間を埋めることができ、広域探索には支障がない。5×8=40個の素子を載せたモザイク CCD カメラは、開発当時世界最大の受光面積をもち、木曾のシュミット望遠鏡、カナリー諸島の4 m望遠鏡 (WHT) に搭載され、さまざまな観測に使われた。

この開発を機に、多数のCCDの受光面を必要な焦点深度内に配置するための組み立て技術や、CCD読み出し回路の技術が国立天文台に蓄積されていった。また、関口氏らは読み出し回路の標準化と、その研究者への配布も行い、日本全体の可視光観測技術の向上に大きく貢献した⁴⁾。

2. UH8Kカメラ

ハワイ大学天文学研究所(UH/IfA)では、Gerry Luppino氏が2,048×4,096(2k4k)の3辺バツタブルCCDを、4×2に配置する8Kモザイクカメラの開発に1994年頃から取り組んでいた。IfAにおけるカスタムCCD開発の実際を学ぶべく、私はこの時期IfAに学振海外特別研究員として籍をおいていたので、この8Kモザイクの開発にも参加することができた⁵⁾。ウェハーから切り出されたCCD素子が大学の研究室に送られてくるが、それをモリブデンを削り出して作ったキャリアにシートエポキシで接着、その後、ボンダーを使って素子とパッケージを結線する。大学院時代、実験の研究室にいたので、装置作りの経験はあったが、素子のパッケージングまで、自分たちでやるものとは思っていなかった。この素子の性能評価を筆者は任されたが、そこでもさらなる驚きを経験した。「性能が出ていない!」⁵⁵Feを用いて電荷転送効率を計測したが、-65℃まで冷却するとX線イベントがほとんど流れてしまって、転送効率が計測不能…。製造ロットにより、ときおりこのようなことが発生するらしかった。Luppino氏に報告すると、さして気にする様子もなく、「今回は温度を高め設定してしのごう」ということになった。暗電流は気にしなくてもよいのか?とも思ったが、CFHTでの初観測の日が間近に迫っており、ほかに手はなかった。

出荷直前までシャッターやフィルター交換装置などを作ったりしていたが、当日の朝に急いでパッキング、ピックアップトラックに乗せてホノルル空港に持ち込み、自分たちも飛行機でヒロ

へ、そこでもトラックを借りて、Aloha Cargoのハンガーで荷受けし、そのままマウナケア山頂に運び込んだ。CFHTの主焦点に取り付け、観測が始まったものの、途中でシャッターの開閉機構が不調になり、交代でCFHTの主焦点に乗り込んで、カメラの脇に座り、シャッターのアシストをする事態となった。極寒のマウナケアで、望遠鏡とともに振り回され、スピーカーから次々と出される「はい、読み出し終了、シャッターリセットしてー」などの指示に従う。大学院時代に飛行機や船で気球を追いかけてたりなどと、幅広い経験をしてきたつもりだったが、可視光での天体観測もなかなかたいへんなものだというのを学んだ。

ただ、取得された、0.6秒角のシーングで30分角の広視野をカバーした画像は、非常に印象的であった。Luppino氏はIfAのIsabera Gioia氏とともに、重力レンズ効果によるアークの探査をEMSS銀河団の観測により系統的に行ってきた。この時期に、たまたまNick Kaiser氏がサバティカルでカナダからIfAに来ていた。Kaiser氏は弱重力レンズ効果による暗黒物質分布研究の先駆けの一人であったが、彼が開発したばかりのソフトウェアツールで画像を処理すると、銀河団からのレンズ信号が浮かび上がり、大きな刺激を受けた。CCDの電荷転送効率の不良がわかったとき、UH8Kプロジェクトは終わってしまうのではないかと私は思ったが、回避方法を考え、システムをまとめ上げ、体を張って観測をして、最先端の研究を行う。リスクを取って進むフロンティアとはこういうところなのか、と強く感じた。

一方、IfAではMITのリンカーン研究所(MIT/LL)とのCCD共同開発がほぼ同時期に始まっていた。MIT/LLは、大面積受光面と低雑音アンプを同時に実現しており、天文業界では主にX線用CCDとして、使われていた。日本でもあすか衛星(その後のすざく衛星も)で採用されていた。可視光用の素子も作られていたが、主に地球観測

用で、天文用途の実績はなかった。IfAで2k1k (24 μm 角画素)のサンプル素子の評価を行ったが、電荷転送効率は -100°C でも良好で、読み出し雑音も50 kHzと低速で読み出せば1.7 e rmsを達成、事前に聞かされていた高性能が確かめられた。空乏層の厚みも40 μm 程度あるため、長波長側の量子効率も波長800 nmで90%以上と、極めて高感度であった。一方、400 nmという短波長側では、感度が急速に劣化し、また、アニール用のレーザー照射の後が、レンガの壁模様に残っており、改善の余地があった。しかしながら、全体として、MIT/LL素子は極めて有望であった。素子のフォーマットをUH8Kで採用した2k4k 3辺バッタブルと定めた。また、IfAの呼びかけに応じ、Keck, AAT, CFHT, ESOとともに、われわれ国立天文台も開発コンソーシアムに参加することにした。

3. すばる主焦点カメラ Suprime-Cam

「2. 広視野撮像JNLTの目玉である主焦点の撮像観測装置として、可視と近赤外のそれぞれモザイク撮像器が提案された。」これは1990年12月に行われたJNLT観測機器ワークショップの集録にある、京都大学の舞原俊憲氏によるまとめの1節だが、大口径に広視野を組み合わせたという画期的なアイデアは、当初からすばるの主軸として位置づけられていたことがわかる。望遠鏡もその方針に沿って、比較的大型の装置を主焦点に取り付けられるような設計になっていた。対して、同時期に計画が進んでいた口径がほぼ同じ8.2 mのGemini望遠鏡では、風による振動などの低次の像の乱れは、補償光学で除去すればよいという設計思想だったため、主焦点で安定した像を実現することは困難であった。この主焦点に可視の撮像装置を提案していたのが、モザイクCCDカメラで実績を積んでいた、岡村氏と関口氏である。UH8Kカメラを通じて広視野撮像に興味をもっていた筆者も、帰国後にこのSuprime-Cam (関

口氏により命名)の開発プロジェクトに参加させていただいた。

すばるの主焦点は、直径30分角の有効視野をもち、これは実寸で150 mmとなる。これをカバーする大型素子の開発が、プロジェクトの課題の一つであった。1990年の半ば以降になると、50 mm角程度の受光面をもつ大型CCDが入手できるようになっており、例えば米Tektronix社(後にSITE社として独立)から2k2k CCDが市販されていた。このCCDを4個モザイクにしたBTCと名づけられたカメラがベル研のTony Tyson氏らにより開発され、CTIOの4 m主焦点に搭載された⁶⁾。また、30個をモザイクにした大型カメラが、スローンデジタルサーベイ(SDSS)用に、関口氏らの協力の下、プリンストン大学で開発された⁷⁾。このCCDは、素子表面のポリシリコン層における反射と吸収を避けるために、素子の裏面から光を入射させる、裏面照射型であり、高感度を実現していた。このため、1,000万円前後の高価格にもかかわらず、多くの天文台が導入に動いていた。しかしながら、この素子はバッタブルではなく、またピクセルが24 μm 角と大きく、すばる主焦点用にはスケールが合わずそのままでは使えなかった。SITE社も小ピクセル素子の需要は認識しており、われわれがMIT/LLに出した仕様と同型の、2k4k 3辺バッタブルで15 μm 角画素の素子開発に着手していた。また、英国のEEV社でも、画素の大きさは13.5 μm とやや小さいものの、同型の2k4k 3辺バッタブル素子の開発開始がアナウンスされた。Luppino氏がUH8Kカメラで策定したこのフォーマットが天文業界のデファクトスタンダードとなり、1996年頃から開発競争が始まったのである。

MIT/LL, SITE, EEVの3社のどこが開発に成功するかわからない。すばるのファーストライトは3年後に迫っていて、Suprime-Cam開発に遅れは許されない。そこでわれわれは、日本の浜松ホトニクス社に大型CCDの開発を依頼することとした。同社とは、1993年ころより、裏面照射型

CCDの開発可能性を議論してきており、試作品の評価等を行わせてもらうなど、共同開発の下地はすでにできていた。こちらもフォーマットは、2k4k 3辺バタブル（15 μm 角画素）にそろえた。

Suprime-CamのCCD読み出しエレクトロニクスと冷却デューワーは、関口氏の指導により完全内製で行った。筆者はCCDに直結するアナログフロントエンド回路を担当したが、基板の配線引き回しまで自分で行う関口流から、学ぶことは多かった。冷却デューワーなどの機械系は、岡村氏の学生であった、小宮山裕氏が指導を受けつつ担当した。デジタル回路は名古屋大学の佐藤修二氏の学生だった中屋秀彦氏が担当した。また、大型CCDを冷却板上に平坦に並べる技術は、同じく岡村氏の学生であった仲田史明氏の創意と執念で完成した⁸⁾。このほか、フィルター自動交換装置、シャッター、望遠鏡とインターフェイスする筐体の設計・開発を進め1998年初頭には、Suprime-Camの形がほぼ見えてきた。

一方、CCDであるが、この頃には、SITe社とEEV社からも裏面照射型素子が購入できるようになっていたため、これらを手し、MIT/LLの評価素子と並べて実験室で評価した⁹⁾。この結果、MIT/LLの長波長側での高い量子効率と低雑音特性が、EEV社は500 nm以下の短波長側で高い量子効率が、SITe社はその両者を平均したような量子効率を有することがわかった。ただ、SITe社の出力アンプは、感度が低く、2分以上かけて読み出さないと実用的な雑音レベルまで下がらないことがわかった。これらの結果を受け、すばるの光3装置（Suprime-Cam, FOCAS, HDS）のCCD担当者と協議した結果、青側の感度を優先するHDSはEEV社のCCDを導入を決め、Suprime-CamとFOCASはMIT/LLの素子を採用する方針とした。

MIT/LLの素子の評価はLick天文台で一括して行うことになっていて、結果のクロスチェックのためにいくつかの素子を国立天文台でも評価して

いた。この評価結果はコンソーシアムに入っている6機関に送られ、順番に選んでいくという方式で、公平に分配されていった。ところが、MIT/LLでの製造が遅れていた。電荷転送効率不良が発生したロットがあったからである。しかし、このため、1999年初頭のカセグレン焦点でのファーストライトまでには、CCDがどうい間に合わなくなった。そこで、当時のプロジェクトリーダーの海部先生に事情を説明し、ファーストライト用にSITeのCCDを購入するための予算を組んでいただいた。MIT/LL用の予算もすでに措置していただいていたわけだから、非常に心苦しかったが、観測時間に穴をあけるわけにはいかなかった。こうして、迎えたファーストライトだが、初代Suprime-Camの焦点面は、図1に示したように、MIT/LL製2個とSITe社製4個という前代未聞の構成となってしまった。それでも1999年1月4日に、ほかの装置に先駆けて、すばるの光を受けることができた。アンドロメダ銀河の腕のほんの一部を写した画像ではあったが、シーイングは0.5秒角台であり、高い望遠鏡性能が確認された。また、一般ブランクフィールドでも25等より暗い銀河が数分間の積分であっさり写っており、大口径の威力を見た。

その後、同年7月に望遠鏡主焦点が使えるよう

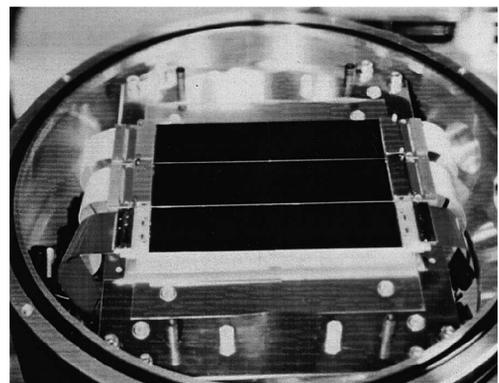


図1 最初期のSuprime-Camの焦点部。MIT/LL素子が間に合わず、SITe社の素子4個とMIT/LLの素子2個を配置した。

になり、Suprime-Camも本来の視野で撮像できるようになった。視野中心を望遠鏡側に設置されたカメラを使い、基本的な光学調整を行い、Suprime-Camの画像から光軸外で見られる非点収差を定量化して、焦点面の傾きを調整した。視野全面で合焦位置が同じであることを確認し、設計どおりモザイクCCDの平面性が実現できていることがわかった¹⁰⁾。

一方、CCDの置き換えは、MIT/LLから素子が到着するごとに、数次にわたり行い、2001年4月ようやく10個の素子を封入し、最終形とすることができた。Suprime-Camで観測して、ご自分でデータ解析をされた方はご存じだと思うが、角に配置していた1個の素子は、ほかの素子の6割ほどの感度しかない。あるロットの素子は反射防止膜の生成に不向きがあり、感度が設計値に届かなかった。このような素子も使用しなければならぬほど、Suprime-CamのCCD開発は際どかった。

こうして運用に入ったSuprime-Camは、結像性能・検出効率ともに期待どおりの性能を発揮した。わかりやすい成果の一つは、遠方銀河探査であろう。2000年前後には、ライマンブレイク法や狭帯域フィルターによる遠方銀河を同定する手法が開発されており、より多くのサンプルを集めることが望まれていた。当時CFHTなどの4 m級望遠鏡にも、Suprime-Camと同程度の視野の広さをもつカメラが搭載されていた。主鏡の面積比は約4倍なので、彼らが4倍望遠鏡時間を集約すれば、すばるに追いつけたか、と言うとそうではなかった。900 nmくらい長波長までいくと、MIT/LL CCDの量子効率も市販されていたCCDの約2.5倍以上あった。つまり彼らが10倍以上時間をかけても、Suprime-Camには届かなかったのである。この時代のすばるによる高赤方偏移銀河探査の成功は、MIT/LL素子に支えられたと言ってよいだろう。MIT/LLとの共同開発プロジェクトを率いたLuppino氏に感謝したい。

4. Hyper Suprime-Cam

1990年代の後半に、Ia型超新星の観測から、宇宙の加速膨張が確実視されるようになり、その原因を探ることが観測的宇宙論の中心課題になった。観測から統計的に有意な結論を導くためには、1,000平方度を超える広い領域を観測する必要がある。視野0.2平方度のSuprime-Camでは、10年以上かかり、現実的ではなかった。実際、欧米では数平方度角以上視野をもつ観測システムの計画が立案されつつあった。Suprime-Camで弱重力レンズ効果を用いた暗黒物質分布のマッピングを行っていた私たちも視野が足りないことを痛感しており、すばるで次に何ができるかの検討を始めた。

Suprime-Camの視野は、補正光学系で規定されていたので、視野を拡大するためには、光学系を大型化する必要がある。ほかで立案されていた計画に比べ、十分な競争力を有するために、設計目標を直径2度と設定した。設計要件として、重力レンズ解析に用いる550 nmより長波長側の結像性能は、Suprime-Camより劣化させることは絶対許さず、その代わりに、視野端にかけてのケラレは許すこととした。この新型カメラは、大規模なサーベイでの使用が前提であり、観測天域を互いに重なり合うように設定していけば、ケラレはほとんど問題にならないと考えた。550 nm以下の結像性能については、もともとのシーイングが統計的に悪い傾向にあることを考慮して仕様を緩めることとした。Suprime-Camの補正光学系の最終設計をした元キャノンの光学エンジニア、武士邦雄氏に相談し、光学系の実現可能性を探った。その結果、研磨や組み立ての可能性は未知だが、結像性能の要件を満たす直径2度の解がありそうだということがわかってきた。最大径の第一レンズは合成石英として機械強度を高める。調査したところ、大きさ直径1.2 mで、厚さが20 cm程度のレンズを作るための硝材は、調達可能であるこ

ともわかった。

補正光学系の設計で焦点距離 f を短くできれば、それだけ焦点面の物理直径は小さくできるが、とてもそのような余裕はなく、むしろ f は長くする必要があった。これは、焦点面が視野の拡大比以上に大きくなることを意味し、必要な CCD 数が増える。Suprime-Cam で採用した MIT/LL の素子は基本性能は高かったものの、性能のばらつきがあり、非常に苦労した。とても 100 個以上の素子の調達は見通せなかった。また、CCD はプロジェクトの成否を握る基幹部品であるから、今回こそは国産でいかなければならないと考えた。浜松ホトニクスとの共同開発は、2k4k CCD 3 辺バッタブルの CCD を完成させていたが⁹⁾、これを裏面照射化する手前の段階で時間切れとなってしまう、1998 年秋頃で止まっていた。

浜松ホトニクスの賛同を得て、CCD 共同開発プロジェクトが再始動できたのだが、Suprime-Cam に搭載した MIT/LL 素子と同等品を作ってもおもしろくない。何かしら特徴がある素子を作りたいかった。そうすれば、仮に新型カメラ計画が実現しなくても、後生にまた何かが残せると考えた。そこで注目したのが、米ローレンス・バークレー研究所 (LBNL) で Steve Holland 氏らにより研究が進められていた、完全空乏型 CCD である¹¹⁾。シリコン内での光の吸収長は、長波長側で急速に長くなる。このため長波長の光は、空乏層で吸収されずに透過してしまい量子効率が低下する。このため、量子効率を改善するためには、空乏層を厚くする必要がある。近年素材技術の向上により欠陥が非常に少ない高抵抗 (10 k Ω ·cm 以上) の N 型ウェハが得られるようになってきた。これを用いてシリコン基板全体を完全に空乏層とする。構造は、加速器実験でも使われる PIN フォトダイオードに近い。また、高感度化に加え、厚くすることにより機械的安定性が増し、裏面照射化工程での歩留まりの向上も期待できた。

浜松ホトニクスは PIN フォトダイオードの製

造実績も多く、高抵抗シリコンへのプロセスの経験が豊富だから、開発に大きなリスクはないのでは、と最初は期待を込めて楽観視していた。実際、最初に作ってもらった 1,024 \times 256 (24 μ m 角画素) の表面照射素子は、アンプ雑音はやや高かったものの、150 μ m 程度の厚さを実現し、量子効率もそれに応じて波長 1 μ m で 30% と大きく改善していた。次に裏面照射型 CCD の開発に移ったのだが、この初期ロットは暗電流が非常に高いことがわかった。調査したところ、裏面工程の最初のシリコンを薄くする工程で、重金属による汚染が起こっていることがわかった。汚染イオンを回収するゲッターリング層を追加し、その厚みの最適化をするなどのプロセスの見直しを図ることで、暗電流を抑え込むことに成功した。また、反射防止膜の最適化も進み短波長側の感度も従来品を大きく上回ることができた。512 \times 512 (24 μ m 角画素) の小型素子ではあったが、完全空乏型 CCD に必要な要素技術は完成させることができた。なお、完全空乏型 CCD 開発については、途中から同じく国産を目指す、X 線グループとの共同開発になった。京大の鶴剛氏、阪大の常深博氏らのグループと協力して素子評価を行ったり、技術情報の交換をすることができた。フォーマットは異なるが、構造が同じ CCD がひとみ衛星に搭載された。

これら、新カメラ開発に重要な二つの課題 (大型補正光学系と CCD) に加え、姿勢制御装置を含む筐体の構造やシャッターなどの機械系検討をハワイ観測所のエンジニアである土井由行氏に行ってもらい、さらに大型フィルターの製造可能性に関する調査結果なども加え、支援を受けた科研費の報告書として、新型カメラの提案書をまとめた¹²⁾。幸い、当時のハワイ観測所長であった唐牛宏氏や東京大学の物理学教室の相原博昭氏らに興味をもっていただくことができた。そして 2006 年唐牛氏を代表とする特定領域科研費が採択されると、新型カメラを Hyper Suprime-Cam

(HSC) と名づけ、本格的な技術検討に入ることができた。

望遠鏡への搭載方式は、望遠鏡製造メーカーである三菱電機に依頼したが、提案書どおりに1.2 mの第一レンズを搭載するためには、望遠鏡トップリングの作り替えと交換が必要になり、コストが現実的ではないことがわかった。このため、現在の主焦点取り付けインターフェイスを維持することとし、それに合わせて視野は2度から1.5度程度まで縮小することになった。それでも直径0.5度角の現行主焦点に比べ9倍の広さであるため、この変更は受け入れることとした。これに合わせて補正光学系の再設計を行う必要がでてきたが、オーストラリアのPeter Gillingham氏、初代補正系を武士さんとともに設計された成相恭二氏、ハワイ観測所の光学エンジニア田中陽子氏らにより、基礎となる設計が固まり、これが光学系の製造を担当してくれたキャノンの光学設計者に引き継がれた。最終的には、Wynneのトリプレットに横シフト型の大気分散補正系(ADC)を組み合わせ、ADCで発生した色収差を取るレンズペアをさらに追加するという構成に収まったが、実はこれは硝材は異なるものの、初代補正系の構成と全く同じであった。武士・成相両氏の設計の確かさに驚かされた。

一方、2k4k 4辺バッタブルCCDの開発であるが、平坦な受光面を実現するために、組み立て工程において若干の開発要素があった。われわれもSuprime-Camで開発した組み立て技術を供与し、冷却基板とのインターフェイス部等、一部部品の製造も担当した。2008年初頭にはすべての仕様を満たす10個の素子が国立天文台に届けられ、これを新造したSuprime-Camの真空デュワーに封入し、すばる望遠鏡に搭載、試験観測を行った。この時も、Suprime-Camは現役で観測者に使われていたので、仮に新カメラに不具合があった場合には、1週間以内に元の構成に戻せるように配慮した。試験観測の結果、検出効率の大幅な改善

が確認され、また特段問題は見当たらなかったため、そのまま共同利用に供した。新しく開発したCCDを、いきなり8 m望遠鏡でテストすることは、普通なかなかできないことだろう。観測所やコミュニティーの方々に信用していただけたからだと思うが、われわれは非常に恵まれた開発環境を与えられていたと思う。このSuprime-CamのCCDアップグレードはわりと好評で、投稿されるプロポーザル数の首位の座を、赤外線多天体分光装置MOIRCSから奪還した。

このころ、東京大学Kavli IPMUの所長の村山齊氏がPIとなり、HSCと補正光学系を共有する主焦点多天体分光器(PFS)の計画を立ち上げられた。同時に、国立天文台台長の観山正見氏から、HSCとPFSプロジェクトに大きなサポートをいただき、開発プロジェクトを完遂するための必要条件が整った。

補正光学系と望遠鏡インターフェイス部以外の焦点面装置については、国立天文台のスタッフが中心となり設計・製作の責任を負った。大型冷却デュワーについては、Suprime-Camで経験を積んだ小宮山氏が大淵善之氏とともに、機械・熱設計を詰め、製造図面まですべて内製で行い、組み立ても自分たちで行った。CCD読み出しエレクトロニクスについては、やはりすばるの各装置で経験を積んできた中屋氏が中心となり設計を行い、バックエンドの高速デジタル回路については、KEKの内田智久氏・田中真伸氏、東大の相原研の協力を得て、完成させた。大型フィルター交換機構については浦口史寛氏が、基本設計を行った。これは、製造については、台湾の共同開発機関に委託したが、納品されたものは、長期安定性などでさまざまな不具合が発生した。これを浦口氏が引き取り、責任をもって実用になるものへとめあげた。フィルターや全体のシステム設計を担当してくれたのは、川野元聡氏である。主鏡面検査装置(シャックハルトマンセンサー)もカメラ側でもつ必要があり、フィルターの代わり

にロードするというアイデアを出し、実際に設計を行ったのが、諸隈智貴氏（現在は東京大学に移籍）である。このとき大学院生であった、内海洋輔氏はHSCカメラの各要素を監視・制御のソフトを担当し、カメラが一つのシステムとして働くようにまとめあげてくれた¹³⁾。また、浜松ホトニクスから送られてくる200個近いCCDを、2年近い歳月をかけて、一つひとつ丁寧に低温下で性能評価し、高さの非一様性などを計測する責任をもってくれたのが、完全空乏型CCDの開発の最初期から参加してくれていた鎌田有紀子氏である。

これらのユニットが2011年の終わりころまでにすべて完成し、国立天文台先端技術センター(ATC)において、最終的な組み上げを行った。最後の山場は、116個のCCDの冷却デュワー内への搭載である。11月下旬に約1週間かけてCCD搭載とデュワーの組み上げを行った。実は、この本番の前に、エンジニアリング素子を用いて、組み立ての予行演習を数度行い、素子破壊を起こさない安全な組み立て手順を確立してから臨んだ最終組み上げだった。が、エレクトロニクスを接続、冷却をしてみると、464チャンネルあるうちの3チャンネルほどから、出力が確認できなかった。同一素子にあるほかのチャンネルからは出力されているので、当該チャンネルのアンプの周辺が静電破壊されたようだ。故障の原因はわからなかったが、静電ブローワーを増やすなど、対策をより強化し、故障した素子を交換することとした。バタブル素子は、素子周辺に保護がないので、隣接する素子との衝突は許されない。組み立て時は、端から順に並べていったので、ある程度余裕があったが、交換のためモザイクの真ん中から素子を取り出すには、特別の治具を作らなければならなかった。ここが、ATCの強みで、大淵氏がすぐに設計してくれ、あっという間にマシンショップから治具ができあがってきた。素子を交換し、再びCCDとエレクトロニクスの結線と

デュワーの組み立てを行う。チャンネル数が多いので、ほぼ2週間にわたる仕事である。再組み立て完了後、再び冷却して試験してみるものの、今度は別の素子が壊れていた…賽の河原で石を積み上げているような気持ちに誰もがなった思う。ところが、不調になったCCDの場所を調べて見ると、2回の組み立てとも、すべて冷凍機のコールドヘッドが設置してある付近に集中していることに気づいた。デュワー組み上げの最終段階で、コールドヘッドとコールドプレートを接続しているが、このときに人の手を差し入れている。この際、付近のCCD読み出し回路基板に接触して、静電破壊を引き起こしているのではないかと推定した。そこで、基板に金属板でシールドを施し、さらに人の手を入れなくても締結できるような工具を考案・自作して、再び素子の交換に臨んだ。3回目の組み立て後の読み出し試験では、すべてのCCDが完動していることがわかり、一同本当に胸をなでおろした。こうして組み上げた検出器ユニットは、2012年3月にハワイに出荷することができた。この間、常田佐久氏をセンター長とするATCには、大クリーンルームが震災後の修理で使えない時期に、貴重な実験スペースを間借りさせていただいたり、全面的な支援を受けた。ATCがなかったらHSCは作れなかった。

取得した画像データを解析処理する計算機システムは、Suprime-Camのときは観測者任せであったが、HSCでは、数年にわたる観測期間に取得されるデータ量を考えると成り行きに任すわけにはいかなかった。また、観測中の装置の健全性を評価するためにも、リアルタイム性の高いデータ解析システムの構築が必要であった。そこで、解析ソフトもハードウェア開発と平行して進めた。ここでは、HSC開発プロジェクトに参加してくれたプリンストン大学のRobert Lupton氏らが開発していた、LSST用の解析システムのプロトタイプを基盤として採用することとした。これに欠けていた複数CCDのモザイク処理を行

う部分を、東京大学 Kavli IPMU の安田直樹氏が開発した。Suprime-Cam のリアルタイム解析システムで経験を積んでいた古澤久徳氏が、分散処理部の構築等を担当し、HSC用のモニターシステムを開発した。また同氏は、後述する SSP サーベイデータの解析責任者を務めてくれている。処理済みのデータを共同観測者らに配信するためのデータベースシステムは、高田唯史氏が中心となり、山田善彦・峯尾聡吾両氏らと構築した。小池美知太郎氏は、リアルタイム処理の結果を整理・表示するシステム、解析済みの画像データを表示するためのビューワ (hscView) の開発を行った。

これら、ハードウェアシステム、ソフトウェアシステムを準備して、すばる望遠鏡での試験観測に臨み、2013年1月から約1年かけて、立ち上げ調整を行った。この間も、実に多くのトラブルや問題に直面したが、開示できる時効はまだ来ていないと思われることが多々あるので、詳細は省略する。ただ、M31の画像(図2)を見たときは、14年前のすばるファーストライト時に撮ったM31のほんの一角を思い出し、ようやくここまでこられたかと、一時疲れを忘れた。すべてのトラブルを、観測所現場スタッフの大きな支援と、強いチームワークで乗り切り、2014年3月から本格的なサーベイ観測と共同利用観測を開始した。設計どおりの高い結像性能が達成されており、常時ほぼシーイングリミットの観測が実現している。また、露出と露出の間のデッドタイムは Suprime-Cam よりも短い30秒程度で、観測効率も向上している。また、リアルタイム処理システムと、ナイトログ機能を備えた観測者支援システムは、経験豊富なハワイ大学の観測者からも好評を得ている。

5. HSCによる撮像サーベイ

筆者は重力レンズ探査がやりたくてHSCを作った。国立天文台の浜名崇氏、東京大学の高田昌広氏・大栗真宗氏らこの分野で強力な宇宙論屋

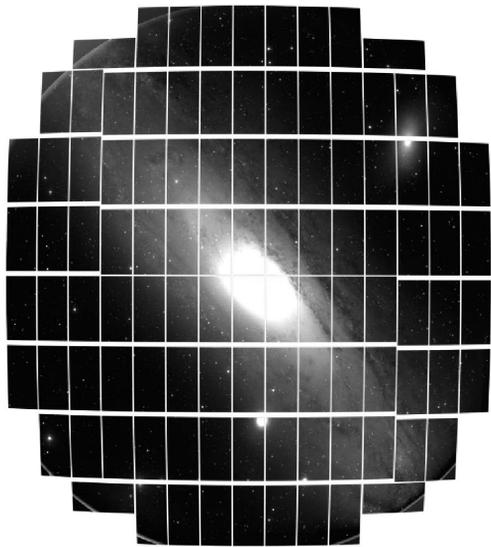


図2 HSCで撮影したアンドロメダ銀河 (M31)。

の方々とともに観測計画を考えていたが、数百晩に及ぶすばるの観測時間を、宇宙論分野だけで取することは難題であった。東京大学の須藤靖氏が「オールジャパン体制で事に当たるべし」と方針を示され、銀河、活動銀河核、太陽系天体といった幅広い分野の研究者の方々がこれに賛同してくださり、一致団結してプロポーザルを書くこととなった。宇宙論や遠方クェーサーの探査を主目的とした広視野のサーベイに加え、DeepとUltra Deepの2段階の深いサーベイも組み合わせ、より幅広い研究分野に対応することとした。このプロポーザルは幸い2013年5月にすばる戦略枠プログラム (SSP) として無事採択された。オールジャパンという方針はプロポーザル採択後も貫かれており、日本人であればいつでも誰でも共同研究者になれデータにアクセスできることとしている。

HSCの現地での運用は、サポートサイエンティストである、仲田氏、寺居剛氏、越田進太郎氏、François Finet氏に委ねられている。SSPの観測は長期に渡るため、一晚に二人ほどが観測当番として、主に三鷹のリモート観測室から参加し、サ

ポートサイエンティスト諸氏の助けを借りながら、遂行している。観測のスケジューリングはこれまでのところ安田氏が一手に引き受けてくれている。現時点で1年半ほどが経過したが、観測はほぼ予定どおり進んでおり、5年の観測完了後に広視野サーベイは当初目標の1,300平方度程度はカバーできる見通しである。

取得されたSSPデータの解析は、国立天文台・Kavli IPMU・プリンストン大学で手分けして行い、これを古澤氏のグループが国立天文台三鷹に集約し、ほぼ半年に一度のペースで共同研究者向けに公開されている。公開データの評価は田中賢幸氏が取りまとめ、リリースノートの形で情報を提供している。2016年夏の段階で100平方度程度の天域のデータを公開したが、これを使い、多重重力レンズ天体¹⁴⁾、非常に暗い矮小銀河¹⁵⁾、高赤方偏移クェーサー¹⁶⁾などの希少天体の発見や、近赤外線データとの組み合わせで、ダストに包まれ可視光で暗い銀河の探査¹⁷⁾等に力を発揮し始めている。

現段階では、宇宙論的な議論ができるほどデータ量はそろっていないが、データの質は非常に有望であることがすでに示されている。HSCは2013年1月から開始したエンジニアリング観測では、おおよその光学調整が済んだあとに、実観測を想定して1時間ほどの露出をかけた画像も取得していた。この画像には、調整不足によりやや非点収差が残っていたが、撮影された22万個の遠方銀河の形状を精密に計測して、WL解析により暗黒物質の分布図を作成してみた¹⁸⁾。暗黒物質が集中している場所には、その重力に引かれて銀河が多く集まっているはずである。実際、多色データを用いて、色-明るさ図と空間上の集まり方を用いて銀河団を同定してみると、暗黒物質のかたまりの場所には、すべて光学的見つけた銀河団が付随していることがわかり、HSCで作成した暗黒物質分布図の信頼性が確認された。図3の上段はAbell 781（赤方偏移は0.3）という銀河団の領域

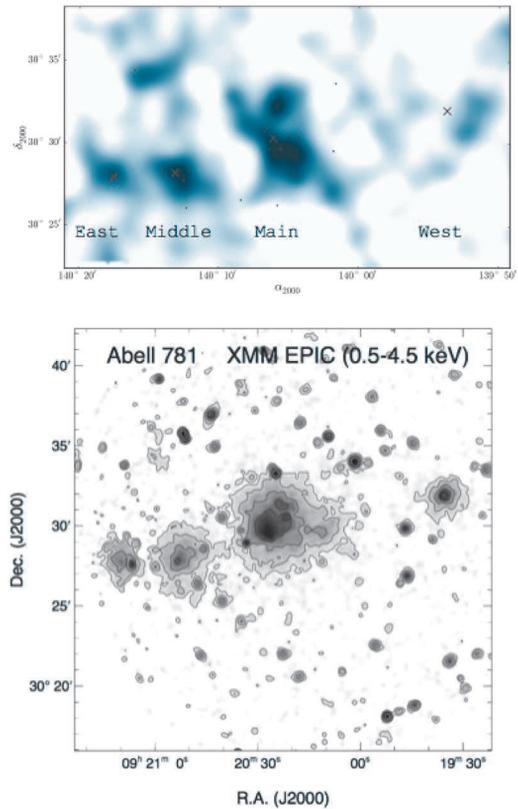


図3 HSCデータから作成した暗黒物質分布図（上）と、X線分布図（下）。

の暗黒物質分布の拡大図であり、下段は同領域でXMM衛星が撮影したX線画像である。A781はEast, Middle, Main, Westという四つのクラumpからなることがこれまで知られていたが、中央の「Main」は暗黒物質分布図でより細かい構造が観察され、さらに質量とX線の放射量の比は各クラumpでばらつきがあることもわかる。これらは、X線を放射するバリオン物理の複雑性を反映していると考えられる。両図の分解能はほぼ同じであることが見てとれ、これはWLにより銀河団スケールの天体探査が実行可能であることをよく示している。

米国のDark Energy Survey (DES) という米国のプロジェクトが、チリの4 m望遠鏡を使い、われわれとほぼ同時期に観測を進めている。HSCは

DESのカメラよりも結像性能が高く、また暗い銀河まで観測できるので、単位広さあたりの観測銀河数が多い。このため、われわれはより高解像度な暗黒物質地図を描ける。銀河団検出には、この解像度が重要で、HSCはDESに比べて有利である。大規模構造による弱重力レンズ効果（Cosmic Shear）の計測では、銀河密度の違いはそれほど影響しないので、DESとの差別化は難しいため、Peak統計¹⁹⁾等、解像度を活かしたアプローチの開拓が重要である。実験屋・理論屋が力を合わせて、観測的宇宙論の分野でユニークな貢献をした。

謝 辞

石塚由紀氏、上清初枝氏には、HSCカメラ開発中にさまざまな事務でお世話になりました。編集を担当して下さった大栗真宗氏から原稿について有益なコメントを数多くいただきました。2015年度の林忠四郎賞をいただきましたが、リスクのあるプロジェクトに飛び込んできて、一緒に（冷）汗をかいてくれた多くの仲間のおかげです。最後になりますが、ハワイ大学でお世話になったLuppino氏は、2016年3月に急逝されました。ここに哀悼の意を表します。

参考文献

- 1) Geary J. C., et al., 1990, SPIE 1242, 38
- 2) Cuillandre J. C., et al., 1995, IAUS 167, 213
- 3) Sekiguchi M., Iwashita H., Doi M., Kashikawa N., Okamura S., 1992, PASP 104, 744
- 4) Sekiguchi M., Nakaya H., Katata H., Miyazaki S., 1998, ASLL 228, 157
- 5) Luppino G. A., Mezger M. R., Miyazaki S., 1995, IAUS 167, 297
- 6) Wittman D., Tyson J. A., Bernstein G. M., et al., 1998, SPIE 3355, 626
- 7) Gunn J. E., Carr M., Rockosi C., Sekiguchi M., et al., 1998, ApJ 116, 3040
- 8) Nakata F., Miyazaki S., Okada N., Kimura M., Sekiguchi M., 2000, ASLL 252, 133
- 9) Miyazaki S., Sekiguchi M., Imi K., Okada N., Nakata F., Komiyama Y., 1998, SPIE 3355, 363 (<http://anela.mtk.nao.ac.jp>)
- 10) Miyazaki S., Komiyama Y., Sekiguchi M., Okamura S., et al., 2002, PASJ 54, 833
- 11) Holland S. E., et al., 1996, IEDM Tech. Dig., pp. 911-914.
- 12) 科研費報告書<http://anela.mtk.nao.ac.jp/hypersupprime/hsproposal2005pdf.pdf>
- 13) 内海洋輔, 2014, 天文月報107, 224
- 14) Tanaka M., Wong K. C., More A., et al., 2016, ApJL 826, 19
- 15) Honma D., Chiba M., Okamoto S., Komiyama Y., et al., 2016, ApJ, in press (arXiv: 1609.04346)
- 16) Matsuoka Y., Onoue M., Kashikawa N., Iwasawa K., et al., 2016, ApJ 828, 26
- 17) Toba Y., Nagao, T., Strauss M. A., Aoki K., et al., 2015, PASJ 67, 86
- 18) Miyazaki S., Oguri M., Hamana T., Tanaka M., et al., 2015, ApJ 807, 22
- 19) Shirasaki M., 2016, arXiv: 1610.00840

Development History of Mosaic CCD Cameras Led by Japan

Satoshi MIYAZAKI

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

Abstract: Development history of mosaic CCD camera is reviewed mainly based on the auhtor's experiences.