

すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ“HSC”

江崎 豊*
遠藤 真*

Hyper Wide-field Prime Focus Camera "HSC" for Subaru Telescope

Yutaka Ezaki, Makoto Endo

要 旨

すばる望遠鏡は、三菱電機が製造取りまとめを行った世界最大級の光学赤外線望遠鏡で、建設以来、世界最高レベルの性能を発揮し、多くの成果を上げている。

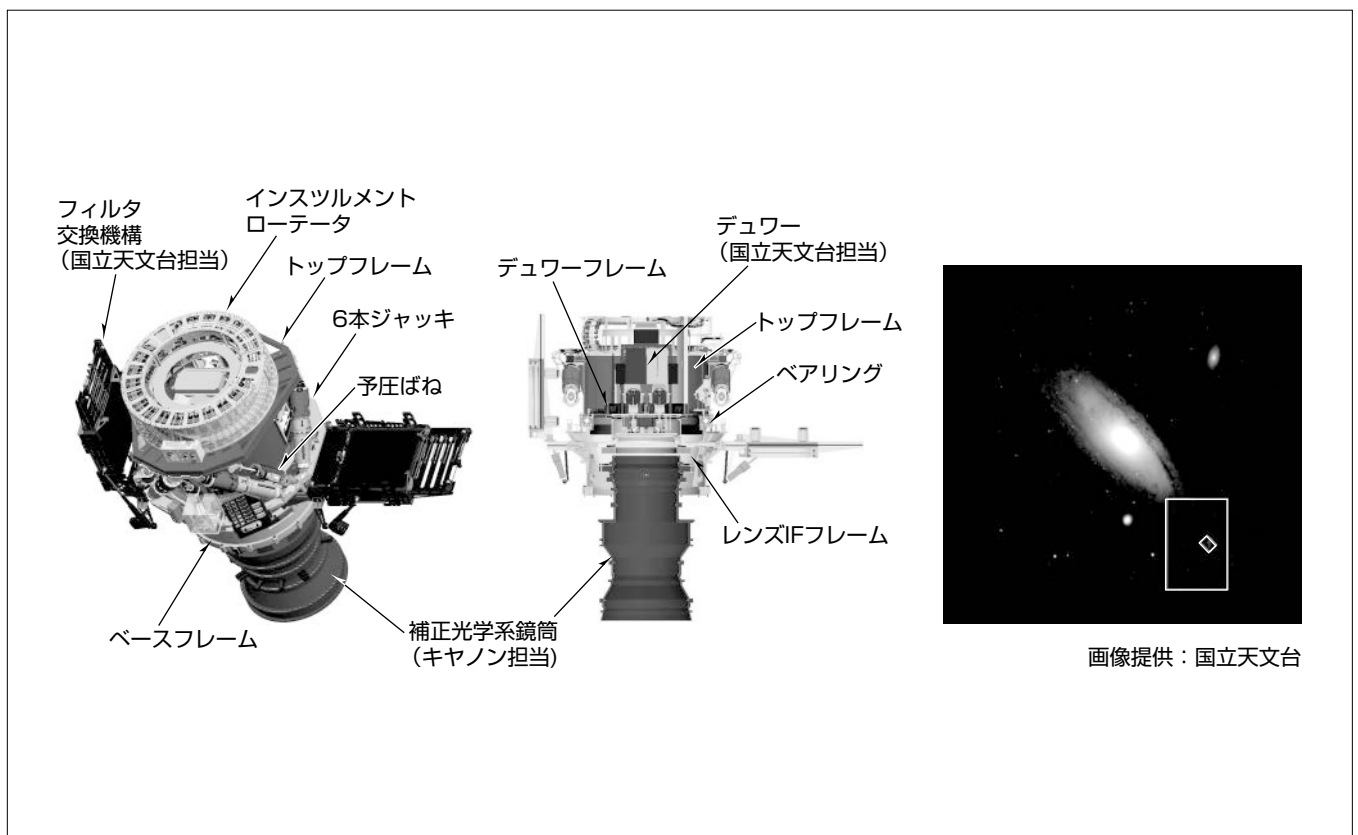
HSC(Hyper Suprime-Cam)計画は、すばる望遠鏡の主焦点部に広視野化したカメラを搭載することによって、サーベイ観測によるダークエネルギー計測を早期に実現することを目的とするプロジェクトである。2007年から基本設計を開始し、2013年7月16日、新主焦点ユニットを国立天文台に納入した。また、7月31日には、HSCが捉えたアンドロメダ銀河の画像が国立天文台によって公開された。

HSCは大きく分けて、カメラ部、補正光学系、主焦点ユニットの3つの要素で構成されており、当社は主焦点ユニットを担当した。新主焦点ユニットは、望遠鏡の筒頂部に

に取り付けられる。補正光学系やカメラユニットなどで構成される約2.2トンの構造物を6本のジャッキで支え、この6本のジャッキが協調しながら、さらに、望遠鏡とも連動して伸縮することで、望遠鏡の傾きの変化によるたわみを補正し、主鏡に対する距離、横ずれ、傾きの5軸の位置合わせを数 μm の精度で行っている。また、望遠鏡の回転にあわせてカメラユニットを回転させるインストルメントローテータを備え、追尾に伴う視野回転を約2.2秒角の精度で補正している。これらの装置が望遠鏡と協調してカメラユニットや補正光学系を駆動することで、シャープな星像の実現に寄与している。

本稿では、新主焦点ユニットの技術と、実現への課題と対策について述べる。

特集
I



新主焦点ユニットとHSCが捉えた画像

左に示すのが新主焦点ユニットの外観と断面である。右に示すのが、HSCが捉えたアンドロメダ銀河の画像である(枠内は従来の主焦点カメラの視野)。

1. ま え が き

すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラHSCはこれまでの主焦点カメラの7倍の視野を確保し、ダークエネルギーの計測を目的とする世界最高性能^(注1)のサーベイカメラである。当社は、この重さ数トンのカメラ全体を数 μm の位置精度で制御しながら望遠鏡上で安定した観測姿勢を保持するための機構を開発し、シャープな星像の実現に寄与している。本稿ではその技術概要について述べる。

(注1) 2013年7月31日現在、当社調べ

2. HSC計画概要

2.1 すばる望遠鏡の強み

すばる望遠鏡(図1)は、単一鏡の望遠鏡では世界最大級の光学赤外線望遠鏡であり、当社が製造取りまとめを行った。口径8mクラスの望遠鏡では、世界で唯一^(注2)主焦点を持ち、広視野・高解像度の観測ができることが特長である。

従来のすばる主焦点カメラ(Suprime-Cam)は、34分角 \times 27分角(およそ満月1個分)の視野を持ち、当時は世界最高の探査能力で、最遠方銀河の検出、重力レンズ現象を用いたダークマター分布の測定、銀河団の大規模構造の観測等、大きな成果を上げてきた。

(注2) 2013年7月31日現在、当社調べ

2.2 HSC計画

一方で、1990年代の後半に宇宙の加速膨張が観測され、その原因となるダークエネルギーが大きな研究課題となった。

Suprime-Camを使ってダークエネルギー研究を進める観測計画が検討されたが、従来のSuprime-Camの能力では、研究に十分なデータを集めるまでに50年以上もかかることが分かり、より高効率(広視野)の観測装置が必要となった。

HSC計画は、すばる望遠鏡の主焦点部を改造し、広視

野化したカメラを搭載することによって、サーベイ観測によるダークエネルギー計測を早期に実現することを目的とするプロジェクトである。

3. 新主焦点ユニット

3.1 装置の構成

HSCは、すばる望遠鏡の筒頂部に取り付ける、いわば巨大なデジタルカメラである(図2)。大きく分けて、カメラユニット、補正光学系、主焦点ユニットの3つの要素で構成されており、当社は主焦点ユニット及び望遠鏡本体の改造を担当した。

図3に主焦点ユニットの外観、断面を示す。

主焦点ユニットは、ベースフレームで望遠鏡に固定される。トップフレームの下部にベアリングがあり、その外輪からレンズIFフレームを介して、補正光学系鏡筒を取り付けている。

補正光学系鏡筒は、レンズの材料と熱膨張率を合わせるため、また鏡筒を軽量化するために、コージライト(セラミックの一種)が採用されており、そこに熱応力を及ぼさないため、レンズIFフレームには低熱膨張のインバー合

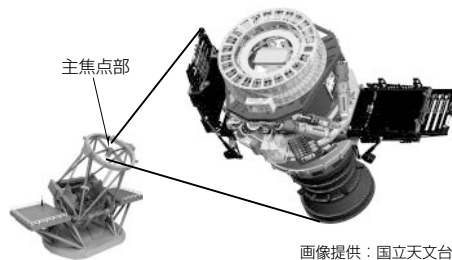


図2. 望遠鏡に搭載された主焦点ユニット

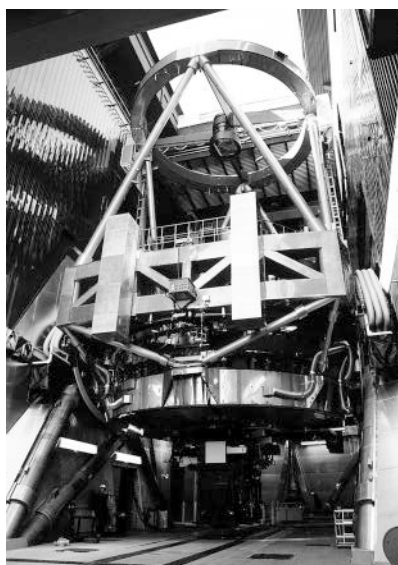


図1. すばる望遠鏡(画像提供：国立天文台)

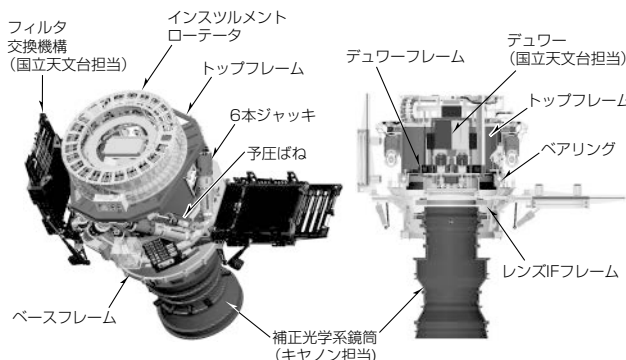


図3. 主焦点ユニット

金を採用した。

カメラユニットはベアリングの内輪：回転側から、デューフレームで補正光学系鏡筒の真上に支持されている。この部分は、軸回りに回転可能であり、回転させる装置をインスツルメントローテータと呼んでいる。トップフレームから先の部分は、合計で約2.2トンの重さになるが、これを6本のジャッキで支えている。

次に述べる6本ジャッキやインスツルメントローテータが、望遠鏡と協調してカメラユニット、補正光学系を駆動することによって、静止した画像を撮ることが可能になっている。

3.2 6本ジャッキ

望遠鏡で星を追尾すると、望遠鏡の重力方向に対する傾きが徐々に変化する。この変化によって望遠鏡のたわみ方が変わり、主焦点ユニットと主鏡の相対位置関係がずれていき、像がぼけてしまう。

このずれを補正するのが、6本ジャッキの役割である(図4)。

6本のジャッキが協調しながら、さらに、望遠鏡とも連動して、伸び縮みすることによって、主鏡に対し、(主焦点ユニットの)距離、横ずれ、傾きの5軸のずれを補正している。このジャッキは自社開発したもので、駆動系、検出系配置の最適化によって、数 μ mの駆動精度を実現している。

3.3 インスツルメントローテータ

インスツルメントローテータはカメラユニットの回転方向の補正機構である。

すばる望遠鏡の架台は、経緯台方式であるため、星を追

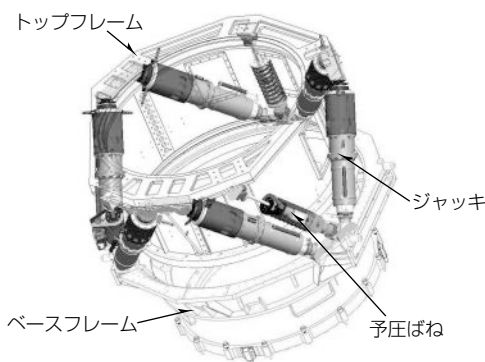


図4. 6本ジャッキ機構

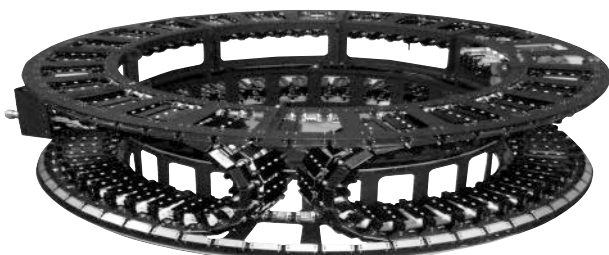


図5. ケーブル巻取機構

尾する間に星像が画面の中央を中心にして回転する視野回転という問題がある。静止した画像を撮るためには、望遠鏡の回転にあわせてカメラユニットの方を回転させる。

HSCの場合、広視野化によって焦点面が大径化しており、回転駆動の誤差が視野端の像劣化に及ぼす影響が大きくなるため、高い駆動精度が求められたが、2台のモータを対向させて、ガタをなくすアンチバックラッシュ方式や光学式検出器の採用を含む、駆動系・検出系の最適設計によって、回転駆動の精度は約2.2秒角を実現している。

3.4 ケーブル巻取機構

インスツルメントローテータの固定側と回転側の間には、サーキュラーチェーン式のケーブル巻取機構(図5)を設け、カメラユニットへの、電源線、信号線、光ファイバ、冷却水、エア配管等は、全てこのケーブル巻取機構を通してている。

この方式のケーブル巻取機構自体は、他分野の装置にも使用例があるが、望遠鏡に搭載する場合、取付け姿勢が天頂向きからほぼ水平まで変化するという独特の要求があり、ケーブルの重さを支え、スムーズにケーブルをガイドするように、磁石の吸着力を利用している(特許出願中)。また、万が一の巻取機構の動作異常時に、機械的に過負荷状態を検出して、インスツルメントローテータの駆動を止める過負荷検知機構を備えている。

4. 実現への課題と対策

4.1 主焦点ユニット

4.1.1 省スペース化・軽量化

表1に示すとおり、HSCでは補正光学系が従来よりも大型化している。一方、主焦点ユニットへの制限質量(3,000kg)は従来と変わらない。この重量物を組み込みながら、望遠鏡に搭載可能な装置とするため、主焦点ユニットの大幅な省スペース化・軽量化が求められた。

実現に向けては、各部位に目標質量を割り付け、軽量化のアイデア(例：ジャッキ外筒をチタン化)を出し、その場合の性能、限界質量を一つ一つ構造解析で評価し、軽量化を図った。

4.1.2 補正光学系鏡筒の熱応力の緩和

当初レンズIFフレームはアルミで製作する予定であったが、補正光学系鏡筒に、コーズライト(セラミックの一種で低熱膨張)が採用され、組み込み時から温度が10℃変化するだけでも、熱応力で即時破壊することが分かり、構造・材料の検討が必要となった。

表1. 補正光学系鏡筒の寸法、質量

	S-Cam(従来品)	HSC(従来比)
視野角直径	0.5°	1.5°(3倍)
鏡筒直径	600mm	970mm(1.6倍)
長さ	730mm	1,675mm(2.3倍)
質量	175kg	893kg(5.1倍)

対策として、レンズIFフレームを低熱膨張の材料で製作し、熱膨張係数をコージライトに近づけて熱応力を低減した。

材料の候補として、CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)とインバーを検討し、部分試作まで実施したが、フレームが複雑な形状で積層欠陥が発生するなどのリスクを考慮して、インバーを採用した。

4.1.3 補正光学系とカメラユニットの相対変位

望遠鏡と同様、主焦点ユニット自身も傾きの変化によってたわみ方が変化する。その結果、補正光学系とカメラユニットの相対位置関係がずれ、結像性能悪化の原因となる。主焦点ユニットは、この相対変位に対する補正手段を持たないため、ユニットの剛性設計が重要である。

剛性設計では、相対変位の結像性能への影響を考慮して、変位の配分値を設定し、軽量化や熱応力緩和の要求と両立するように構造解析を繰り返して構造を決定した。

実機での検証は、望遠鏡搭載状態を模擬するよう、主焦点ユニットを傾けて相対変位を測定、解析結果と比較し、配分値を満たしていることを確認した。

4.2 望遠鏡本体の改造

4.2.1 望遠鏡の追尾性能の維持

4.1.1項のとおり、主焦点ユニットとしては軽量化に努めたが、望遠鏡としては搭載質量が増えるため望遠鏡の追尾性能の劣化が懸念された。

追尾性能への影響を把握するため、望遠鏡の構造モデルに新主焦点ユニットに相当する質量を付加したモデルで応答解析を行い、従来の望遠鏡モデルと比較した。

その結果、EL(エレベーション)軸周りの釣合いが取れていれば、鏡筒全体の質量が増加しても、追尾性能にはほとんど影響がないことが分かった。この結果に基づき、望遠鏡の鏡筒にEL軸周りの釣合いが取れるようカウンタウェイトを取り付け、駆動試験を実施し、ステップ入力、ランプ入力に対する応答によって、架台駆動制御装置側で制御パラメータを調整することなく従来と同等の追尾性能を確認した。

4.2.2 制御装置、機器間配線の共有

6本ジャッキやインスツルメントローテータは、制御棟にある制御装置から制御されるが、これらの制御装置と主焦点ユニットを接続するケーブルは全て、望遠鏡のAZ(アジマス)/ELのケーブル巻取を通る。事前調査の結果、これらのケーブル巻取には空きスペースがほとんどなく、また巻取を増設して新たにケーブルを敷設することも困難であることが分かった。

工事による運用停止期間を短縮するには、制御装置とケーブルを既存のトップユニットと共用できるかが鍵であった。

対策としては、各制御装置の負荷率を確認、新規製作が必要か、既存品の改修で実現可能かを見極め、新規製作すべきものについては、HSC計画への参画前に計画していた制御装置の更新計画を見直し、既存のトップユニットと

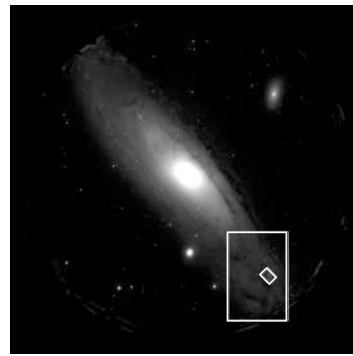


図6. HSCが捉えたアンドロメダ銀河の画像 (画像提供: 国立天文台)

新主焦点ユニットで共用できる制御装置を新主焦点ユニットの導入と同時に完成させた。

4.2.3 運用停止期間の分散

設計当初、望遠鏡改造から、新主焦点ユニットの据付調整、性能確認までの作業期間を試算したところ、工事による観測運用停止期間は約3か月の見込みであった。長期間連続して望遠鏡の運用を停止することは許容されないため、望遠鏡の改造工事を2010年に主鏡蒸着作業と並行して行い、主焦点ユニットの据付調整は2011年から開始するようにスケジュールを見直し、運用停止期間を分散した。

5. む す び

新主焦点ユニットの開発は、2007年から基本設計を開始し、工場での組立・試験や現地での試験調整を経て、2013年7月16日、国立天文台に納入した。

また、7月31日には、HSCが捉えたアンドロメダ銀河の画像(図6)が公開された。図中の枠は従来の主焦点カメラの視野を示す。従来よりもはるかに広い視野で鮮明な画像が得られていることが分かる。

今後は、2014年から5年間にわたる観測が計画されている。空の広い領域、かつ遠い宇宙にある暗い銀河までくまなく観測する、言わば“宇宙の国勢調査”によって、ダークエネルギーの正体に迫る観測が期待されている。

参 考 文 献

- (1) すばる望遠鏡トピックス, 新型の超広視野カメラが開眼, ファーストライト画像を初公開
http://subarutelescope.org/Topics/2013/07/30/j_index.html
- (2) HSCプロジェクト(国立天文台ホームページ)
http://subarutelescope.org/Projects/HSC/j_HSCProject.html
- (3) 林 正彦: すばる望遠鏡の観測成果, 日本物理学会誌, **63**, No.2, 86~92 (2008)
- (4) 宮崎 聡: すばるで観測する宇宙の暗黒成分, 日本物理学会誌, **63**, No.2, 112~119 (2008)