

Hyper Suprime-Cam の結像性能

宮崎 聡

〈国立天文台先端技術センター総合研究大学院大学 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: satoshi@naoj.org



Hyper Suprime-Camは、すばる望遠鏡の主焦点に搭載される可視光カメラであり、直径1.5度角という広視野を有している。口径8 m以上の望遠鏡でこのような広視野を実現した例は他になく、探査的観測において幅広い分野で科学的成果をもたらしている。本稿では、HSCの特徴である高い結像性能が、いかにして実現され、検証されているのかを解説する。

1. はじめに

すばる望遠鏡広視野カメラHyper Suprime-Cam (HSC)は、2014年2月に本格的な科学観測を開始した。観測時間の約半分は一般共同利用観測に、残りの半分の時間は、われわれが申請して採択されたすばる戦略枠 (Subaru Strategic Program: SSP, 高田昌広氏の稿参照) によるサーベイに使われている。このSSPデータによる初期科学成果は、2018年1月に発行されたPASJの特集号において発表され、月報の本特集でそれら成果の一部が紹介がされている。現在もHSCは高い稼働率を誇り、2018年11月は1カ月のうち、3週間以上がHSCでの観測に割り当てられている。多くの人々に使っていただけて、HSCの開発者の一人としてたいへんうれしく思っている。

HSC開発組は、ハード開発、ソフト開発、望遠鏡改修、観測計画検討までを含めた60名近くの大グループで、これに三菱電機、キヤノン、浜松ホトニクス等の企業の技術者が加わる。これらの技術者・科学者の創意と工夫のおかげで、HSCは完成し、日々観測ができています。開発時に、これだけ多くの方々にご参加いただけたのは、「大望遠鏡で、できる限り広視野撮像を行おう！」という、開発目標のわかりやすさにあったように思う。

HSCの企画に際して、私が最重要条件として掲げたのは、「結像性能を、すばる初代広視野カメラSuprime-Camより落とさない」ということだった。私を含め、多くの人が興味をもっていた弱重力レンズ効果の観測で、結像性能は本質的に重要であったからである。また、「少しボケるが、広く撮れるカメラの実現を目指す」では、多くの人に計画に興味をもってもらうことは難しいとも考えた。

このように、目標設定をしたものの、実際どのように実現したらよいのかは、当初、皆目見当もつかなかった。本稿では、目標の結像性能を実現するために行った技術検討について、できるだけ時系列に沿って紹介し、その性能がどのように検証されているかについて説明する¹⁾。最後にこれが、どのような科学成果に結びつきつつあるかについて、一例を紹介したい。

2. 広視野補正光学系

すばるの主鏡は球面に極めて近い双曲面であるが、この主焦点で観測を行うためには、双曲面で生じる光学収差を補正するための、「補正光学系」が必要になる。双曲面主鏡用の実用的な広視野補正光学系 (Wide Field Corrector; WFC) を、初めて考案したのは米国のWynneである。キット

ピークの口径3.8 m望遠鏡用に設計された光学系では、3枚の同一硝材（BK7）の球面レンズの組み合わせ（triplet）で、球面、コマ、非点、倍率色収差という、3次までの収差は補正できることを示した²⁾。ただし、より高次の収差のために、 D_{80} （80%のエネルギーが含まれる円の直径）で評価した結像性能は0.5秒角から1秒角にとどまり、また、単一硝材のため補正される波長範囲は限定的であった。もちろん、キットピークのシーイングは1秒角以上であり、また当時の主流の検出器である写真乾板は、短波長側の狭い波長範囲で感度が高かったため、必要にして十分な性能を有していた。

1980年代に入ると、マウナケアやチリ高原などの観測適地に、口径8-10 mの大望遠鏡の建設計画が、日・米・欧それぞれで立ち上がる。このころから検出器としてCCDが使われ始め、より幅広い波長範囲で高感度観測が可能になっていた。米国のEppsは1984年にカリフォルニア大学10 m望遠鏡（後のKeck望遠鏡）用に、Wynneのtripletを元にWFCを設計した。それは、直径30分角の視野全面で、 D_{80} が0.25秒角程度の結像性能を実現していた³⁾。これは、2面に非球面を入れ、高次収差を抑制した効果による。硝材はすべて機械強度が高く大型化ができる石英を用いている。しかしながら、第一レンズの直径が85 cm、全長が140 cmと非常に大型で、しかも色収差を可視光の全域では抑えることができないため、青用と赤用の二組を用意する必要があった。この製造上の困難さもあってか、Keck望遠鏡では主焦点観測は構想から外され、このWFCは実際に作られることはなかった。

そのようななか、日本では成相恭二氏らが、Japan National Large Telescope（JNLT: 後のすばる望遠鏡）用に、WFCの検討に取り組んでいた。最終的な結像性能に寄与するのは、WFCの残存収差だけでなく、望遠鏡の追尾や光学機器間の設置誤差も考えなければならない。このため、WFC

には、 $D_{80} < 0.2$ 秒角と、Eppsのデザインより厳しい目標を設定した。彼らは、軸上での球面収差の色による補正不完全（以下、球面収差の色収差と呼ぶ）と、視野端での高次の非対称収差が相反する関係にあることを示し、非球面を採用することで、両者のバランスを取る工夫をした⁴⁾。また、開発されたばかりの低分散ガラスFPL51を採用すれば、球面収差の色収差が抑えられるうえに、青用、赤用を作らなくても波長350から1,000 nmまでの幅広い波長範囲の補正が可能であることを示した⁵⁾。こうして、初代Suprime-CamのWFC設計の原型が成相氏らにより生み出された（図1）。

ただ、この設計で用いられているFPL51は、直径60 cm程度あり、この大きさのものは製造実績がないことが問題であった。また、大気分散補正系（Atmospheric Dispersion Corrector; ADC）として、従来から使われてきた回転プリズムを挿入すると重量も増し、実際に製造するのは困難にみえた。そのころ、キヤノンの光学エンジニアである^{たけし}武士邦雄氏が検討グループに参加する。彼らは、第1と第2レンズに使われていたFPL51をBK7に置き換え、FPL51は後段の小径レンズに移した。当然、球面収差の色収差が出るが、これは第1, 2レンズを焦点面に近づけることで抑えた。しかし、次は上述したように視野端での高次収差が強く発生する。これを非球面を巧みに使うことで、抑えることに成功した。さらに、武士氏は横移動方式ADCを考案する。これは、平凹クラウ

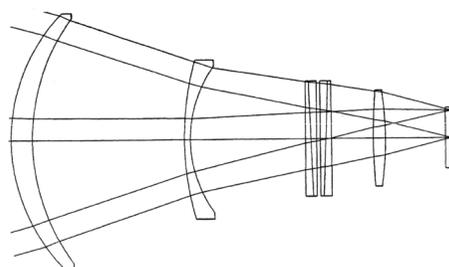


図1 成相らによる初代すばる主焦点補正光学系の原型。

ンガラスのレンズと平凸フロントガラスのレンズを、両球面で貼り合わせたもので、このペアの横移動が回転プリズムと同等の役割を果たすことに武士氏は気づいたのである。さらに、中間の球面の曲率半径は、収差抑制にも使え、さらなる結像性能向上を可能にした。このように、大幅な小型化（第1レンズの直径は約50 cm）・高性能化を果たしたWFC⁶⁾は、実際にキヤノンにより製造され、世界に先駆けて、8 m望遠鏡による30分角の広視野高解像度撮像を可能にしてくれた（図2）。なお、初代すばる主焦点補正光学系の開発については成相氏の月報記事⁷⁾も参照されたい。

後継機HSCの視野は、計画当初は直径2度と設定していた。この数字にあまり確たる根拠はなかったが、米国のLarge Synoptic Survey Telescope (LSST) 計画では、3枚鏡を組み合わせ3度角の視野を目標としており、それに少しでも近い値を目標にしたかったのだと思う。最大径をもつ第一レンズの硝材としては、機械強度を考慮すると石英が最適だったが、炉の大きさで製造可能な体積が決まることを知った。強度的に十分な厚さ（10 cm以上）を確保すると、製造可能な最大径はおおよそ直径1.2 mであることがわかった。これでは2度角を実現するには、明らかに寸法が足りない。そこで、視野端でのケラレは許すことにした。広い天域を観測する場合、望遠鏡の視野を変えながら撮影していく。このとき、測光のゼロ点を合わせるために、隣合う画像同士が、少しずつ重なるようしている。このため、重なりのある視

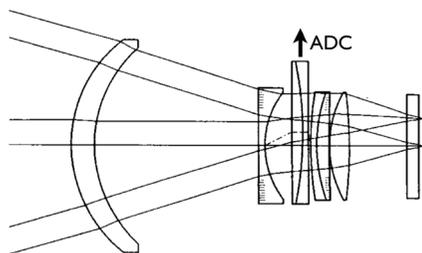


図2 武士らによる初代すばる主焦点補正光学系。

野端では合計の積分時間は長くなるので、ケラレの影響は軽減すると考えた。

この程度のアウトラインを決めて、2002年の夏、再び武士氏に相談に伺った。武士氏はキヤノンを定年退職後、岡本光学加工所に移られていた。武士氏や岡本光学の方々が、HSCに非常に興味をもってくださり、光学検討を引き受けてくださった。大型非球面レンズでどの程度の非球面度まで製造可能かなどの基礎情報が十分でなかったこともあり、検討は困難を極めた。保守的な条件で設計した場合、焦点距離を3割ほど伸ばせば、設計解はありそうであったが、並べるCCDセンサ数のことを考えると、焦点面をあまり大きくしたくなかった。球面収差の色収差を減らすために第一レンズのパワーはできるだけ弱くする、その結果生ずる視野端での高次収差を抑えるために、最大径をもつ第一レンズの第2面を非球面とする、コマ収差の色収差を取るために、後段のレンズに非球面係数の大きいレンズを採用するなど、攻めの設計条件を採用することで、約2年くらい検討の後に、要求仕様を満たす光学設計が完成した⁸⁾。

その次の段階として、製造可能性の検討をより詳細に行おうとしていた矢先、たいへん悲しいことに武士氏は急逝されてしまった。その後、望遠鏡への搭載方法の検討の結果、視野直径2度のカメラは搭載が不可能であることがわかり（3章参照）、視野直径を1.5度角まで減らすことになった。その検討は成相氏が引き受けてくださった。ハワイ観測所の田中陽子氏と協力して、視野を狭めることによって得た自由度を使い、レンズの非球面度を下げたり、像面湾曲を取り除くなどの改良を施していただいた。これにより製造の可能性があがり、またCCDの焦点面への配置も格段に楽になった。

2005年ころから、Gemini望遠鏡に提案されていた、Wide Field Multi Object Spectrograph (WF-MOS) という大型分光器計画を、HSCの拡張としてすばる望遠鏡で実現する構想が本格化した

(WF MOSはPrime Focus Spectrograph; PFSと名を変えて、現在東京大学IPMUが中心となって開発中である)。これにより、幅広い波長域を同時に観測することになるため、ADCの追加が必須となった。ADC用に回転プリズムを挿入しても、結像性能は劣化しないことは確認できたが、総重量が4割程度以上増加してしまうことが問題であった。

一方、2006年の夏ころから、キャノンの現役光学技術者が、製造工程を考慮した設計を行うために参加してくれることになり、これまで行ってきた設計を引き渡した。しばらくした後に出てきた設計は、われわれを驚かせた。5枚のレンズに2枚貼り合わせのADCを組み合わせた構成は、武士氏が設計した初代の補正光学系の構成と、全く同じだったのである(図3)。大型化が可能な硝材には制限があるため、設計で使われている硝材は異なり、収差補正の思想は同じではないとは思いますが、武士氏の導きを感じた。また、キャノンの設計には、凸レンズに非常に大きな非球面が採用されていた。光学方式による検査が難しいため凸レンズに非球面を入れるのは通常避けるが、高精度な接触式検査装置(A-ruler)を実用化していたキャノンでは、導入が可能だったようだ。球面からの乖離が5 mmを超えるような大きな非球面も採用されていて、われわれが「攻め」と仮定していた設計条件のはるか上をいていたのにも驚かされた。こうして、1.5度角の視野で製造公差

込みでも、 $D_{80}=0.2$ 秒角以下を達成する補正光学系が、再びキャノンにより作られた⁹⁾。

3. HSCの構造設計

2度角の補正光学系に解がありそうであるとはわかったころから、ハワイ観測所の土井由行氏とともにカメラの構造の検討を始めた。望遠鏡の仰角を変化させると、望遠鏡構造自体が変形し、主焦点部は主鏡の光軸からずれる。カメラ機構部はアクチュエーターを内蔵し、この光軸ズレを補正する必要がある。また、重力方向の変化によるカメラ内部の変形も、結像性能を有意に劣化させないように、既定値以下に抑える必要がある。

2度角の補正光学系は、硝材だけで600 kg、鏡筒にチタン合金を使うと約900 kgで総重量が1,500 kgと推定された。初代の補正光学系は鏡筒とレンズ込みで170 kgであったが、これと比較すると格段に重い。この重量物はなるべく、その重心近くで保持し、その上に焦点部を載せるのが自然だと考えた。図4が、われわれが最初に提案した構想図である。

望遠鏡のトップリング(筒頂)からスパイダーを介して中央に設置されている筒頂内環がある(表紙の写真を参照)。Suprime-Camなどの主焦点観測装置はその上側から、副鏡は下側から内環に挿入されて固定される。望遠鏡の汎用性を確保するために、このインターフェイスは変更できなかった。しかし、内環の内径は1 m、鏡筒の最大外径は1.5 m程度で、もはや上側から挿入できない。しかもアクチュエーターの設置が難しかった。そこで、図4のように、内環を拡大し、二重構造とし、外側(図中IH-O)と内側(IH-I)を6個のアクチュエーターで接続し、姿勢制御用のヘキサポッドを構成することとした。IH-Oが望遠鏡に対して固定、IH-Iを動くようにする。そして、IH-Iの構造を従来の内環と同じ機械インターフェイスにして、既存の副鏡を受け入れられるようにした。HSCを搭載する場合は、下から

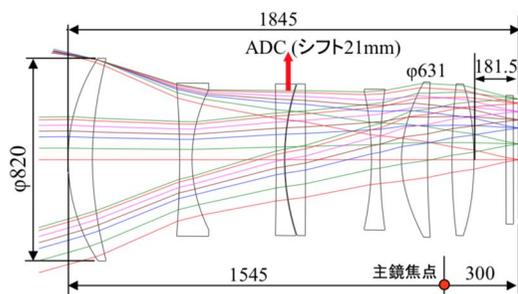


図3 HSCの補正光学系。

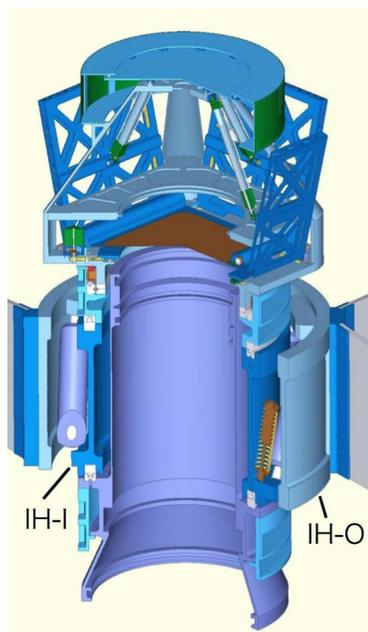


図4 視野2度のときのHSC構造案。

レンズをIH-Iに挿入・固定し、焦点部はIH-Iの上側に固定することとした。また、これを実現するためには、トップリング部を大幅に作り替える必要があるため、材料をCFRP（炭素繊維強化プラスチック）に変更することで、この部分の軽量化を図り、全体として重量増加を抑えることを提案した。

2005年の冬ころから、望遠鏡を作った三菱電機の技術者にも、検討に参加していただけるようになったが、トップリングごとCFRPに作り替えるのは、予算的にも工期的にも、非現実的であることを伝えられた。それでは、ということで提案したのが、図5の構造である。これは、内環は既存のまま使い、ヘキサポッドは他に場所がないので上部に移動する。補正光学系は下側から挿入し、上部構造と締結する。ヘキサポッドで上から焦点部・鏡筒部を吊り下げるこの構造は、機械的なモーメントアームが長い。このため強度確保のために、全体重量が5,000 kg程度になってしまうことが欠点で問題であった。これだけの重量物を

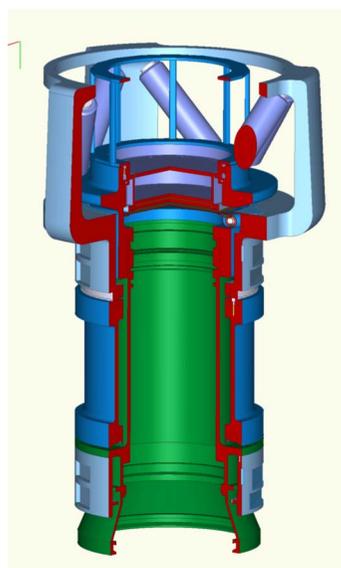


図5 既存内環を使うことを前提としたHSC構造案（視野2度）。

主焦点に搭載すると、望遠鏡の指向精度を維持できない可能性が指摘された。この段階で、さすがに2度案は実現が困難であることを悟らざるをえなかった。

そこで、視野を1.5度に減らして、われわれが提案したのが、図6の構造である。最大重量物の鏡筒の重心に近いところで把持するほうがよいと考え、内環の内側にヘキサポッドを設置してある。鏡筒内部に設置するため、小型で高出力のアクチュエーターが必要だということで、国立天文台の台長留置金を獲得し、ハーモニックドライブ社と共同で試作を行った。

2006年夏ころから、三菱電機に本格的に技術検討を依頼したところ、出てきた案は、図7のようなものであった。これは、図5に近く、ヘキサポッドを上部に設置した吊り下ろし案である。われわれの図6案と試作したアクチュエータでは、出力にマージンがなく、また絶対的位置決め精度も十分でない判断された。確かに内環の外側に設置するのであれば、十分な能力をもつ大きなアクチュエータを作ればよい。吊り下ろし方式では

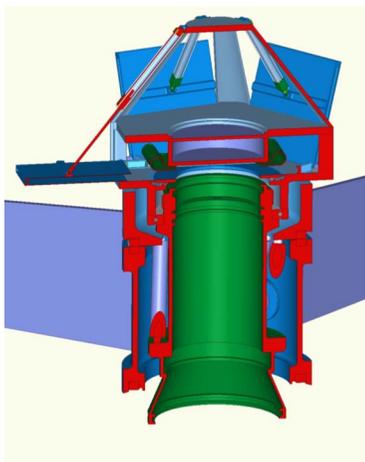


図6 視野1.5度のHSC 構造案.

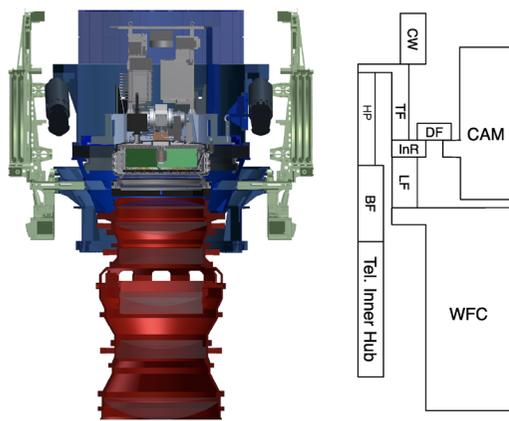


図7 視野1.5度のHSC 最終構造案の断面図(左). 右図にその構成要素の名称を表示している。(Tel. Inner Hubは望遠鏡の内環を示すが、左図には描かれていない.)

重力変形が大きすぎるのではないかと意見してみたが、三菱電機の伊藤昇氏に、「いくら変位しても、計測して直せばよいのです。」と言われ、納得した。こうして、三菱電機の構造案に基づく視野1.5度のHSCを開発することが決定した。

図7をもう少し説明する。Tel. Inner Hubが内環の断面で、この上にベースフレーム(BF)が載る。その上にヘキサポッド(HP)用のアクチュエーターが乗り、トップフレーム(TF)を支えて

いる。トップフレームの下部には、視野回転を補償する装置(InR)の回転ベアリングボックスがつく。ベアリングの内側が動き、ここに取り付けられているデューフレーム(DF)を介して焦点装置(CAM)が搭載される。一方InRの固定側には、レンズフレーム(LF)を介して、補正光学系(WFC)が設置されている。

構造システムの設計の考え方は概略以下のとおりである¹⁾。ヘキサポッドは、位置決め精度を数 μm 程度を達成するように、高精度で作る¹⁰⁾。視野中央に設置した波面検査装置によりコマ収差を計測すると、WFC光軸と主鏡(M1)光軸の並進ずれが推定できる。また、HSCの視野全面の星の形状から非点収差を計測でき、これによりWFC光軸とM1光軸の傾きが推定される。このようにWFCの並進ずれと傾きは計測できるので、高精度ヘキサポッドを使えばWFCは正しく設置できる、と考える。あとは、内部の機械構造を正しく設計し、WFCとCAMの相対位置が変化しないようにすればよい。InRのベアリングボックスはLFとDFに比べて格段に剛性が高いため、ほぼ無変形と考えてよく、LFとDFの剛性を調整して、仰角を倒したときに生じる並進ずれと傾きが同じになるようにすれば、WFCとCAMの間の相対位置は変化しないことになる。有限要素法(FEM)の計算によれば、仰角を90から30度まで傾けたときに、WFCとCAMとも並進ズレは200 μm 程度、傾きは約30秒角発生することがわかった。この部分は、結像性能を決める要の部分であったため、筐体が完成後、CAM本体とWFC相当のウェイトを取り付けて、それを実際に傾けてみた。そして、並進ズレ・傾きを実測し、FEM計算と大きな違いがないことを確認した後に、ハワイに出荷した。

4. 星像解析による設計の検証

2012年8月にHSCは初めて望遠鏡に取り付けられて、ファーストライトを迎えた。ただ、この

時は機械系の調整が主目的であったため、光路中のフィルター部分に波面検査装置を搭載した。このため、視野全面での観測は不可能であったが、波面検査装置の空いた部分に直径5 cmほどの穴をあけ、そこに光学フィルターを設置して、部分的に天体画像を撮影できるようにしておいた。視野中心に明るい星を導入して波面を計測しながら、ピントやカメラの並進ズレ等を補正していくと、0.58秒角という、ますますの星像が得られることがわかった。ところが、同時に撮影した視野の端では0.8秒角よりも大きかった。もちろん、光軸に対する傾きは視野中心の波面検査装置では計測できていないので、補正していなかったが、仮に傾きだとすると、3分角ほど傾いていないと説明がつかない。一緒に立ち上げ作業をしていた三菱電機の担当者に聞くと、3分角も機械のゼロ点がずれているとは考えられない、と言う。どこかで何か重大な間違いをしてしまったか、と大きな不安が駆られたが、視野全面での撮影を行える次の観測を待つしかなかった。

少し間があいたが、2013年1月に、通常のフィルターを挿入し、視野全面で非点収差のパターンを調べたところ、果たして、3分角程度確かに傾いていることがわかった。これをヘキサポッドで調整すると、期待どおりの結像性能が視野全面で得られ、胸をなで下ろすことができた。図8に科学運用が始まってからの約2年間で得られた仰角とシーイングの関係を示した（波長はおよそ800 nmのHSC-iバンド）。点線は天頂観測時にシーイングが0.36秒角だった場合の、仰角依存性の推定値がプロットしてある。データ点の下端のエンベロープは、ほぼこの推定値に沿って分布している。これは仰角の変化で発生する機器間の光軸ズレが、設計値内に収まり、結像性能に影響していないことを示している。SSP観測では、HSC-iバンドを重力レンズ解析で使うことにしているため、シーイングのよい日に優先して撮影することになっている。図8左の大きい黒点がSSP観測時の

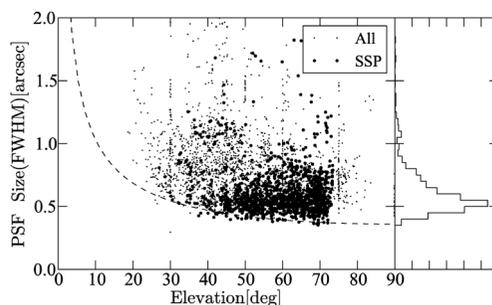


図8 HSC-iバンドで記録された、仰角とシーイングの関係。大きい点はHSC-SSP観測時のデータ。

データであり、右側に星像の大きさ分布を示した。最頻値で0.56秒角と、非常に高い結像性能を示している。ライバルのDark Energy Survey (DES) では、1秒角を少し超えると報告されているので、われわれは大きなアドバンテージを有していることがわかる。

結像性能をさらに詳しくみるために、900 μm ほどフォーカス位置をずらした画像を解析した。この場合星像は、カメラ本体による中央遮蔽によりドーナツ状になる。この像を再現するように光線追跡を用いて、瞳（主鏡）における波面を推定し、この大きさをツェルニケ係数 a_i で表現してみた。ツェルニケ係数でフォーカスずれを表すのは a_4 であり、設計値からのズレの波面誤差を Δa_4 と表記することにする。これの視野位置依存性を $\Delta a_r(x, y) = \Delta a_4(0, 0) + \Theta^x y + \Theta^y x$ のように、位置の1次関数で表すことにすると、 (Θ^x, Θ^y) は最良像面からの傾きの大きさの目安を与える。図9(a)に仰角を変えて計測した (Θ^x, Θ^y) を示した¹⁾。 Θ^x は、望遠鏡の仰角軸の周りの回転を表し、仰角を変えたときに変化しやすい量である。実際、仰角が90から30度に下がったとき、最良像面からのずれがおよそ15秒角ほど増加している。FEM計算では傾きは30秒角ほど発生すると予想されていたが、同程度以下に抑えられていることがわかる。 Θ^y は仰角変動では動かないはずであるが、約5秒角変動している。これは、この計測手法の

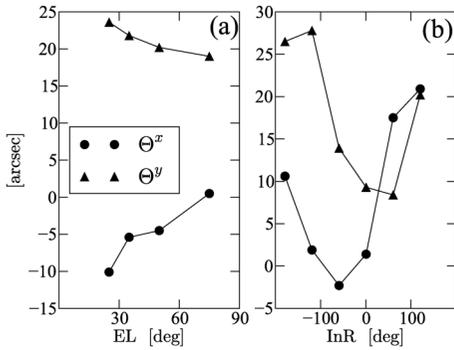


図9 最良像面からの傾きの仰角依存性 (a) と視野回転角依存性 (b).

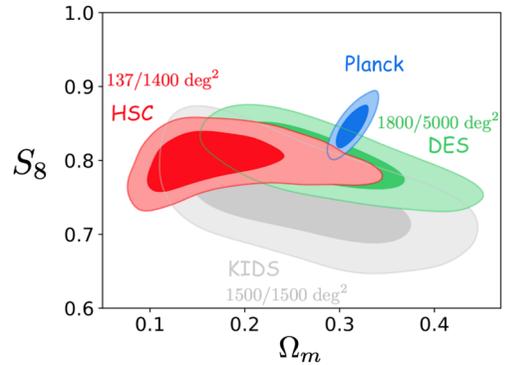


図10 HSCの最初のデータリリースに基づく宇宙論パラメータの制限.

誤差によるものか、構造の非対称成分が影響していることが考えられるが、いずれにせよ結像性能に与える影響は小さい。図9(b)に視野回転補償装置の回転角を変化させた時の結果を示した。こちらは振幅10秒角程度の正弦曲線を示していることがわかる。これは、CAMがWFCに対して10秒角傾いて設置されていることを示唆する。CAMの設置時に適切な厚みの薄板を入れれば消せるが、結像性能への影響が小さいので、今のところそのままにしている。

5. おわりに

Suprime-Cam並みの結像性能維持し、できるだけ視野を拡大することを目標に、どのようにHSCの開発を進めてきたかを紹介した。その成果は、hscMap (小池美知太郎氏の稿参照)¹¹⁾を通じて公開している天体画像で直接確かめられるし、PASJ特集号等で発表されているさまざまな成果につながっている。最近も、一つ興味深い成果を発表することができた¹²⁾。大規模構造による弱重力レンズ効果は、距離が近い銀河の形状に相関をもたらすが、それを解析して求めた宇宙論パラメータへの制限が図10に示してある。横軸が現在の物質の密度を表す Ω_m 、縦軸が現在の大規模構造の発達の度合い(質量コントラスト)を表すパラメータ S_8 である(梅津敬一氏らの稿参

照)¹³⁾。

赤方偏移 $z=1,000$ における宇宙マイクロ波背景放射の観測から推定されるパラメータがPlanckと表記された等高線になる。宇宙項を含み曲率ゼロの標準的な宇宙モデルを仮定して、アインシュタインの重力理論が正しいとすると、現在の値はこの場所にくるはずである。一方、HSCで $z<1.5$ の大規模構造の観測から求めたのがHSCと書かれた等高線である。まだエラーが大きいため、Planckの結果と異なるかどうかは判別できない。一方、DESと書かれた等高線は、DESが発表している結果で、ほぼHSCと同程度の大きさの誤差を示していることがわかる(図中KIDSは、口径2.6 mの望遠鏡による結果で、1,500平方度のサーベイがすでに完了している)。

注目すべきはHSCの結果は137平方度に基づく結果で、DESの結果はそれより10倍も広い1,800平方度に基づく結果であるという点である。これはHSCは、暗く見かけの大きさの小さな銀河の形状が計測できていることと、より遠方の銀河まで観測できていることの相乗効果である(高赤方偏移のほうがレンズ効率が高く、信号のSNが上がることが知られている)。大型望遠鏡における、広視野・高解像度撮像の威力がここに現れている。結像性能にこだわってきてよかった。DESは今後広さは2.8倍にしかない見通しだ

が、HSCは10倍近くに広がる予定である。このため、最終的なパラメータの制限の厳しさはHSCが上回るだろう。今後の観測がますます楽しみになってきた。

参考文献

- 1) Miyazaki, S., et al., 2018, PASJ, 70, S1
- 2) Wynne, C.G., 1968, ApJ, 152, 675
- 3) Epps, H., et al., 1984, in IAU Colloquium 79, (Cambridge University Press), 519
- 4) Nariai, K., et al., 1985, Ann. Tokyo Astron. Obs., 20, 4, 431
- 5) Nariai, K., 1992, Publ. Natl. Astron. Obs Japan, 2, 557
- 6) Takeshi, K., 2000, Ph.D Thesis, SOKENDAI: the Graduate University for Advanced Studies, Kana-gawa, Japan
- 7) 成相恭二, 2017, 天文月報, 110, 777
- 8) Komiyama, Y., et al., 2004, SPIE, 5492, 525
- 9) Matsuda, T., et al., 2010, In proceedings ODF '10, 19S1-09, 25
- 10) Ezaki, Y., & Endo, M., 2014, Mitsubishi Denki Giho, 88, 115
- 11) 小池美知太郎, 2019, 天文月報, 112, 113
- 12) Hikage, C., et al., 2018, PASJ, submitted (arXiv: 1809.09148)
- 13) 梅津敬一他 2019, 天文月報, 112, 117

Image Quality of Hyper Suprime-Cam

Satoshi MIYAZAKI

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

Abstract: Hyper Suprime-Cam (HSC) is an optical imager that is designed and built for the prime focus of Subaru Telescope. The field of view of HSC is 1.5 degree in diameter which is uniquely wide among 8-m class telescopes. This enables to explore unprecedented parameter spaces in the survey program and is delivering new science results. In this manuscript, we will review how the superb image quality of HSC has been realized and evaluated.