ISSN 0915-8863

自然科学研究機構

国立天文台ニュース

National Astronomical Observatory of Japan

2019年2月1日 No.307

特集 HSCが拓く宇宙
前編

- 宇宙の姿を一挙に写し取るHSCの大活躍／HSCの画像が撮れるまで／HSC-SSPのデータ解析と公開／HSC-SSPの観測計画と実行／HSCによる太陽系小天体研究／HSCが拓く銀河系と近傍宇宙／中間赤方偏移銀河の観測
- 第9回DTAシンポジウム「ダークマターハロー研究会」開催報告
- 講習会「Python+Jupyter notebookによる光赤外天文データ解析入門」開催報告
- 「秋の文化財イベント」報告

2
2019

NAOJ NEWS 国立天文台ニュース

CONTENTS

●表紙
●国立天文台カレンダー

03 特集
HSCが拓く宇宙　前編

●宇宙の姿を一挙に写し取るHSCの大活躍 —— すばるちゃん

Ⅰ　HSCによる観測—HSCのハード・ソフト・プラン—

○HSCの画像が撮れるまで——小宮山 裕（国立天文台ハワイ観測所）

●HSC-SSPのデータ解析と公開
○HSC-SSPのデータ解析・公開
——古澤久徳（国立天文台天文データセンター／ハワイ観測所）
○HSC-SSPデータ解析チームにインタビュー——インタビュアー／ランドック・ラムゼイ
★HSC-SSPのデータ解析の手順

●HSC-SSPの観測計画と実行
○HSC-SSPの観測計画と実際の観測——田中賢幸、尾上匡房（国立天文台ハワイ観測所）
○実際の観測現場のようす…を対話形式でご紹介

Ⅱ　HSCの科学的成果—太陽系から宇宙論の観測まで—

1　太陽小天体の観測
○HSCによる太陽系小天体研究——寺居 剛（国立天文台ハワイ観測所）

2　銀河系と近傍宇宙の観測
○HSCが拓く銀河系と近傍宇宙——千葉柾司（東北大学）

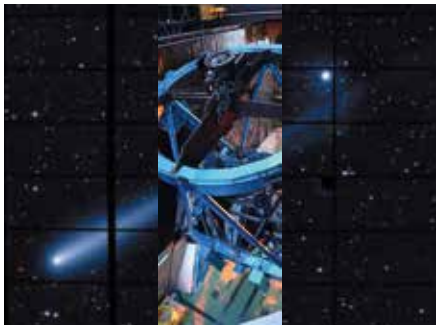
3　中間赤方偏移銀河の観測
○すばるで辿る銀河の世界の100億年——林 将央（国立天文台ハワイ観測所）
○HSCデータで浮かび上がる40億光年彼方の超銀河団——小山佑世（国立天文台ハワイ観測所）
○銀河団における銀河の運命——西澤 淳（名古屋大学）

●後編のおしらせ

27 おしらせ
●第9回DTAシンポジウム「ダークマターハロー研究会」開催報告
白崎正人（理論研究部）
●講習会「Python＋Jupyter notebookによる光赤外天文データ解析入門」開催報告
亀谷和久（天文データセンター）
●「秋の文化財イベント」報告　根本しおみ（天文情報センター）
●平成30年度永年勤続者表彰

31 編集後記／次号予告

32 連載「国立天文台・望遠鏡のある風景」11
太陽塔望遠鏡（アインシュタイン塔／国の登録有形文化財・三鷹地区）
撮影：飯島 裕



表紙画像
すばるの主焦点に装着されたHSCとHSCが撮像したアイソン彗星

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）

2019年は国際天文学連合（IAU）設立100周年にあたります。1月号から表紙に記念のロゴを入れています（https://www.iau-100.org/logos）。

国立天文台カレンダー

2019年1月
- 5日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 10日（木）幹事会議
- 11日（金）4D2Uシアター公開＆観望会（三鷹）
- 12日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 15日（火）運営会議
- 19日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 25日（金）幹事会議
- 26日（土）観望会（三鷹）
- 31日（木）プロジェクト会議

2019年2月
- 2日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 8日（金）4D2Uシアター公開＆観望会（三鷹）
- 9日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 12日（火）科学戦略委員会
- 16日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 21日（木）幹事会議
- 23日（土）観望会（三鷹）
- 27日（水）プロジェクト会議

2019年3月
- 2日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 8日（金）4D2Uシアター公開＆観望会（三鷹）
- 9日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 11日（月）運営会議
- 12日（火）幹事会議
- 16日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 20日（水）幹事会議
- 23日（土）観望会（三鷹）
- 28日（木）プロジェクト会議

特　集

HSCが拓く宇宙

前編　2020年代の広視野サーベイ観測をリードする「すばる望遠鏡 超広視野主焦点カメラHSC」のすべて

協力
ハワイ観測所・HSCチーム

2012年のファーストライト後、すばる望遠鏡の主力観測装置として活躍中の超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam（HSC：ハイパー・シュプリーム・カム）の大特集を前編（2月号）、後編（3月号）と2号に分けてお送りします。視野直径1.5度（面積で1.8平方度）という、口径8mクラスの望遠鏡の中では圧倒的な広視野を誇るHSC。そのケタはずれのサーベイ観測がもたらす多彩な成果をご紹介しましょう。

★HSCが撮像したこの画像には、いろいろな天体が写っています。形がよく分かるような近傍の銀河から、遠くにいるため赤方偏移の効果で赤く見えている銀河までさまざまな銀河が写っていることが分かります。画像右側にある青い伸びた線状の天体は移動速度の速い太陽系の小惑星です。その他明るい点源は、大部分が銀河系の星ですが、クエーサーや太陽系の最果てにある準惑星のような天体なども含まれているかもしれません。暗い点源になると、遠方にあって空間分解のできない銀河も混じってきます。

宇宙の姿を一挙に写し取るHSCの大活躍

宇宙をたいへん広く深く写し取ることのできるHSCの観測フィールドは、天文学の全領域に及びます。すばる望遠鏡記事のナビゲータとしておなじみの「すばるちゃん」に、今回も登場してもらって、太陽系小天体から観測的宇宙論の研究まで多岐にわたる特集のおおまかな流れを説明してもらいましょう。

HSCってすごいっ！

すばるちゃん
（ハワイ観測所）

こんにちは。私、今年でなんと20歳です。近所の山が噴火したり、ハリケーンがやってきたり、あれやこれや最近いろいろありましたが、それにも負けずに元気でやっています。

前に私が「超一広い視野が自慢の主焦点超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam（HSC）」といって紹介したHSCなんだけど（2016年7月号p08をご覧ください）、長いこと観測を続けて広い空を観測して（すばる戦略枠観測：HSC-SSP★01）、いろいろなことが分かってきたんだって。それをまとめて本にしたら★02、ななんと900ページくらいになったんだって。

それで、その本の中身ってどうなの？ って聞いてみたら、HSCのことに詳しいお兄さんお姉さんたちが教えてくれたのがこのニュース記事なの。HSCってどんな仕組みのカメラなの？（p06参照）、HSCで撮られた画像データをどうやって研究に使えるようにするの？（p08参照）、なんていうキホンのお話から始まって、どんな観測をしているの？（p14参照）ということまで教えてもらったの。私が好きなのは観測をしているお兄さんたちのおしゃべり（p16参照）。私も一緒に焼肉食べたいな。それからHSCで分かってきたことのお話がたくさん続きます（p18から3月号）。いろいろな国の人、若い人からそうでもない人まで活躍してて、HSCの人たちって本当にすごいっ！

ところで、たくさんのこと教えてもらって、私が一番びっくりしたのは、1枚の画像の中にさまざまな天体が同時に写っているということ（p03画像参照）。このページにHSCで観測される天体たちの絵と解説が書いてあるけれど、太陽系の中をふよふよ漂っている小さな小惑星から、気の遠くなるほどはるか遠く宇宙の果て近くにいる銀河までが一度に観測できているなんてすごいことじゃない？ そして、小惑星と銀河って地球からどれくらい離れたところにいるの？ って聞いてみたら、またびっくり。その距離は、ななんと1000000000000000倍も違うんだって。うーん、そんな広い宇宙が1枚の画像に詰まってるんだ…。「1枚のHSC画像でも2度、いや3度以上もおいしい」なんていう言葉にも納得です。これからどんな新しいことが見つかってくるんだろう？ ワクワクしながら私もがんばろっと！

★01：「すばる戦略枠観測（HSC-SSP）」は、HSCをすばる望遠鏡に取り付けて300夜使う観測プロジェクトで、現在進行中！ 詳しくは14ページへ。

★02：日本天文学会『欧文研究報告誌』70巻「HSC特集」（2018年1月発行 https://academic.oup.com/pasj/issue/70/SP1）。戦略枠観測の約1/3が終わった時点のデータに基づく観測成果がまとめられています（p26参照）。

2　銀河系

銀河というと、渦巻や楕円といった形を思い描きますが、銀河系や近傍銀河は恒星の集合体として観測されます。恒星一つ一つの明るさ・色などの情報を使って、銀河系の構造を調べたり、銀河系を周回するとても暗い銀河を発見したりすることができます。
（詳しくはP. 20へ）

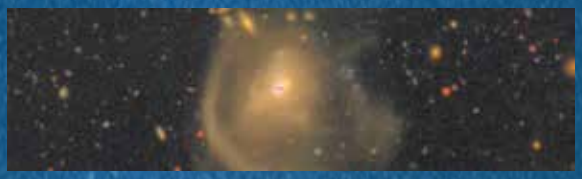
●HSCの観測成果の解説は、図のような6つの分野に分けてご紹介します。この前編では1から3まで、後編（3月号）では、4から6までの記事をそれぞれ掲載します。

6　重力レンズ

強い重力レンズ現象はなかなか見つからない珍しいものなのですが、広い視野をサーベイするHSCはその発見に一役買っています。
（詳しくは3月号・後編で）

4　高赤方偏移銀河

銀河の色情報や狭帯域フィルターを使った観測により、高赤方偏移銀河を選別することが可能になります。HSCの登場によって、高赤方偏移銀河は統計研究までもができるようになってきました。
（詳しくは3月号・後編で）



3　中間赤方偏移銀河

HSCの多色測光データからは個々の銀河の赤方偏移を推定することができます（測光的赤方偏移）。多数の銀河が観測される中間赤方偏移帯では、活発に星生成活動をしている銀河から活動を終えてしまった銀河まで、様々な銀河をとらえ、その進化を探ることができるのです。
（詳しくはP. 22）

5　活動銀河

銀河中心部に活発に活動するブラックホールを持つ活動銀河やクエーサーもHSCによって統計的な研究ができるようになってきました。
（詳しくは3月号・後編で）

1　太陽系天体

一般に天体の天球上での位置は時間が経ってもほとんど変化しないものですが、太陽系の天体は例外です。数分から数日経つと天球上での位置が変わることから、異なる時刻に撮られた画像を見比べることによって太陽系天体を選別することができます。HSCによって多数の太陽系天体が見つかるので、統計研究が進められています。
（詳しくはP. 18）

6　宇宙論

弱い重力レンズ現象を使った宇宙論研究はHSC-SSPの主科学目標として設定されました。マウナケアとすばる望遠鏡がもたらす良質な星像によって、弱い重力レンズ現象の検出効率は向上します。HSCの広い視野と組み合わせることで、他のサーベイの上を行く観測研究が実現されているのです。
（詳しくは3月号・後編で）

次のページからHSCのデータがどのように取得されているかを見ていきましょう。

I HSCによる観測

HSCのハード・ソフト・プラン

HSCの多彩な観測成果の数々をご紹介する前に、①HSCのメカニズムの概要、②観測データの解析と公開、③観測プランニングの3項目を概観しておきましょう。広範囲の星空をサーベイしながら一度に膨大な量の観測データを取得するHSCの運用は、通常の観測と比べて、より高度に練り上げられた観測計画とその実施、そして後処理が重要となります。

●最初に「①HSCのメカニズムの概要」をご紹介します。HSCは、「すばる望遠鏡」に取り付けられる世界最高性能の観測装置ですが、身近な道具に例えれば、超特大の広角デジタルカメラということになります。

HSCの画像が撮れるまで

小宮山 裕
(国立天文台ハワイ観測所)

HSCは主鏡口径8.2mのすばる望遠鏡主焦点に取り付けられた画素数8億7千万という巨大CCDカメラです。新たに作られた広視野補正レンズによって、視野直径1.5度(面積で1.8平方度)という8m級望遠鏡の中では圧倒的な広視野の観測が可能になり、その焦点面には800万画素CCDが116個取り付けられ、マイナス100℃に冷却されて観測に使われています。ここでは主なパーツと撮像のプロセスについてご紹介します。

まず、撮像の準備段階として「①フィルター交換」「②主焦点ユニットの調整」を経て、すばる望遠鏡の口径8メートルの主鏡で反射された光が主焦点に集められて(③)、「④広視野補正レンズ」、そして「⑤シャッター+フィルター」を通って、HSCの心臓部「⑥CCDデュワー」でデジタル画像データに変換されます。このデータが「⑦専用コントローラー」によってコンピュータへ高速転送されます。HSCは、主に3台のコンピューターで制御されていて、このうち2台が104枚の研究用CCDのデータ読み出しに使われています。そして、残りの1台が多目的コンピューターとして、自動追尾や光学調整、ステータス取得などを行っています。これら3台のコンピューターはお互いに通信していて、さらに望遠鏡制御コンピューターや観測制御システムとも協調しながら、観測全体をスムーズに進めて行きます。

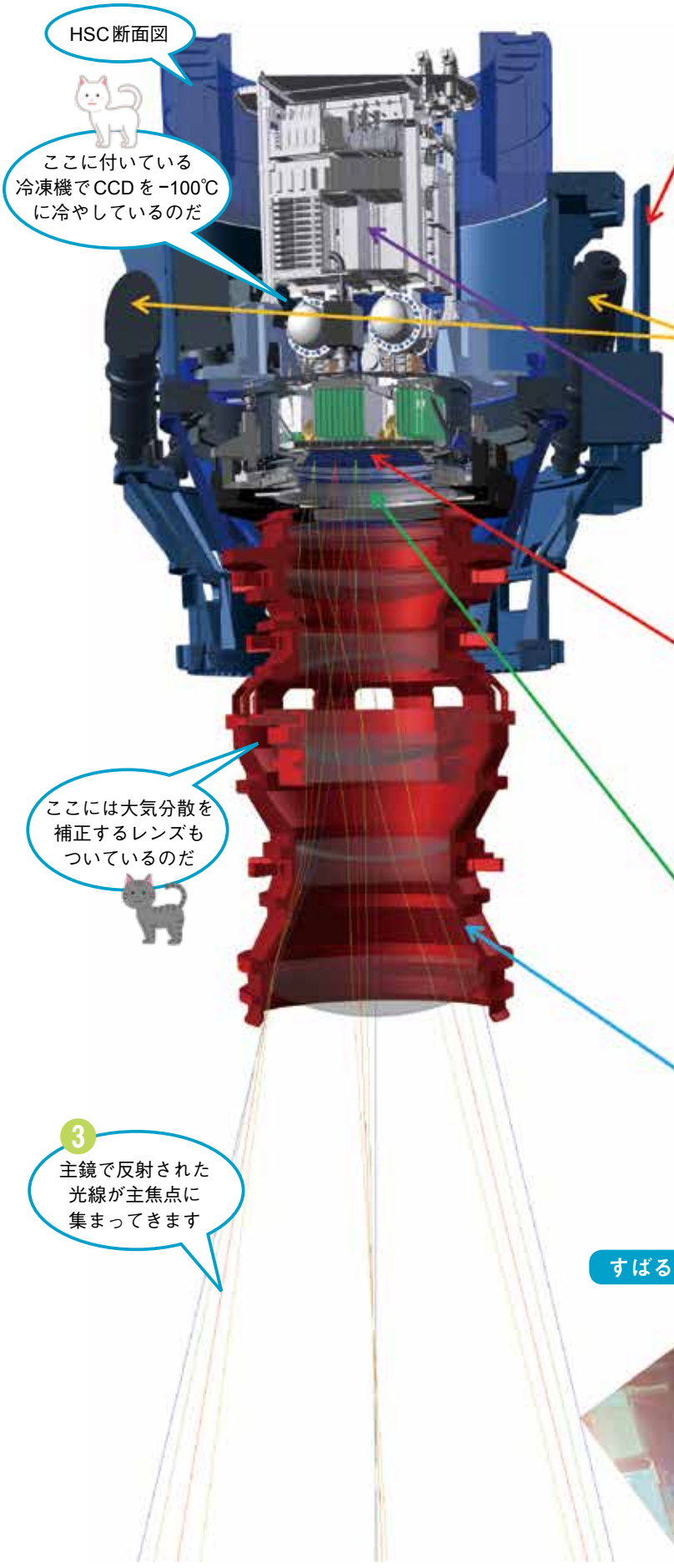
07ページに、わかりやすい概念図を掲載しました(上記の丸数字と対応しています)。これを見ると、HSCが超特大の広角デジタルカメラであることが、よくお分かりいただけると思います。

取り付け前のHSCの広視野補正レンズ。その巨大さがわかります。

★HSCの装置のより詳しい解説は「国立天文台ニュース」2013年11月号、あるいはhttps://hsc.mtk.nao.ac.jp/ssp/instrument_jp/をご覧ください。

ねこでも分かる

HSCの画像が撮れるまで

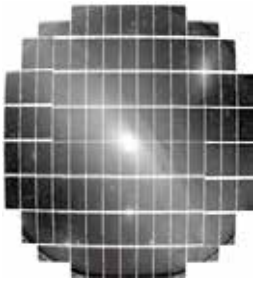


1 フィルター交換機構を動かしてCCDデュワーの前に観測に使うフィルターを装着します。フィルター交換機構はフィルター6枚を保持でき、観測中は必要に応じてフィルターを交換します。写真は交換動作中の交換機構。

2 主焦点ユニットについている6本のアクチュエーターを動かして、レンズとCCDデュワーが主鏡に正対するように調整します。

7 画像データはここにある専用コントローラーから遠隔コンピューターへ高速転送されます。

6 HSCの心臓部、CCDデュワーです。入射光は最終的に直径約50 cmの焦点面に並べられた116個のCCDに集まり、デジタル画像へと変換されます。一回の露出で撮れる画像は右図のような白黒画像です。



カラー画像は合成して作るのだ

5 CDデュワーの前にはシャッターとフィルターが配置されます。フィルターは観測に必要な波長帯の光だけを透過させます。シャッターを開閉させることにより、望みの積分時間の画像を得ることができます。

4 入射光は広視野補正レンズを通過しながら補正されて、焦点面（＝CCD面）にシャープな像を結びます。

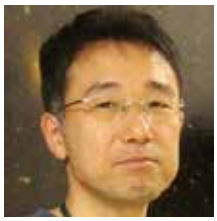
ねこイラスト：いらすとや

HSC-SSPのデータ解析と公開

ここでは、観測データの解析と公開の概要と、実際にその業務に携わっているスタッフのインタビューをご紹介します。日進月歩のデータサイエンスの世界の中で、HSCの観測成果をフルに引き出すための地道な作業が続けられています。

HSC-SSPのデータ解析・公開

古澤久徳
（国立天文台 天文データセンター／ハワイ観測所）



こんにちは、HSCデータ解析＆公開チームです。私たちの役割は、HSCによるすばる戦略枠観測（SSP）の共同研究の中で、①データを解析するためのソフトウェアを開発し、②データを解析して科学研究や教育にすぐ利用できる形にした上で、③科学データアーカイブを構築して、そうした処理済みデータをSSPの共同研究者や全世界の利用者に提供することです。データ解析ソフトウェアの開発は国立天文台、東京大学カブリIPMU、プリンストン大学の国際共同チームで行っています。国立天文台チームは2019年1月現在9人体制ですが、開発や解析の実施、アーカイブ構築だけでなく、計算機設備の準備・維持を含めた運用や、そのサービスの内容とSSP・一般共同利用観測者のデータ解析に関するヘルプデスク業務までチーム内で協力分担して行っています。

実はこうしたチーム紹介記事を書くのは初めてではありません。5年ほど前の国立天文台ニュース（2013年11月号）でHSCの特集が組まれ、ソフトウェアチームの共同開発体制とデータ解析の概要をご紹介しました。当時はまだHSCの試験観測の真っ只中で、私たちもデータの特性を調べたり、初期の解析ソフトウェアを実データに対して何とか動くものにしたりと追い込みの時期でした。

●SSP観測開始からのできごと

新たにご報告すべきことは，まず2014年3月にHSCの共同利用観測が始まったことです。SSPの広視野サーベイ観測も同時に始まり（本特集の田中さんの記事p.14を参照）、紆余曲折を経ながらも着実にデータを撮り貯め6年目に入ろうとしています。

また、実際に科学研究用のデータ解析を行い処理済みデータを公開できたこと、そこから一連の科学成果が発表されたことも大きなステップです。私たちは、データ解析ソフトウェアと科学データアーカイブの開発を進め、半年から1年に1回のペースでこれまでに7回のSSP共同研究者向けのデータリリースを行いました。さらに2017年2月には、全世界の一般ユーザー向けにPublic Data Release（PDR1）を公開しました。このサービスは画像ファイルや天体カタログのほか、画像ビューワ（図01）なども含み、データ公開サイト（https://hsc-release.mtk.nao.ac.jp）でユーザ登録すればどなたでも利用できますのでぜひHSCデータに触れてみて下さい（3月号・後編で、詳しい解説をお届けする予定です）。

HSCのデータ解析とは、単純に言えば9億画素のデジタルカメラの画像データから写っている天体の情報を取り出す、ということです。まず104個あるCCDごとに観測装置の個性に起因する感度特性やノイズなどを補正して、天体の座標や明るさ（等級）を較正します。それらを一枚の画像として足し合わせた上で、そこに写っている個々の天体を検出して明るさや形状といった情報を測定し、天体情報のリスト（天体カタログ）を作ります（p.12の手順を参照）。私たちはほぼデータリリースの度に、最新のソフトウェアで数十テラバイト（TB）の生データを処理し直し500TBを超える結果を生成しています。測定する天体数はのべ4億に達し、最終的には300億に及ぶ時系列の天体測定情報を取り扱う計画です。このような大量のデータを適時に処理して提供するために計算機システムやソフトウェアの工夫を続けていますし、膨大な天体の中から興味深い一群をさくっと取り出せるようなデータベース技術やユーザインターフェースの試験開発などのR＆Dも進めています。

●チームの目指すところ

あらためて5年前の記事を見直してみると、私たちHSCデータ解析＆公開チームの目指すところは当時から変わりません。HSCのデータをレガシーと呼べるところまで利用価値を高め、それを基軸にデータサイエンスを展開することです。そのためにはSSP完了後も、データ解析手法や較正の改善を続け、新たなデータも取り込みながら、データの有用性を上げていく必要があります。近年私たちは次期すばる望遠鏡分光装置PFSの開発にも参加し、HSCの処理済みデータと有機的に連動したHSC＋PFS科学データアーカイブを作ろうとしています。その成功のためには、長期のプロジェクトとして継続的に中堅・若手がハードとソフトの知恵を結集し、データを深く理解しながら科学データアーカイブを作っていくこと、そしてチームに経験・技術を蓄積していくことが極めて重要と考えています。

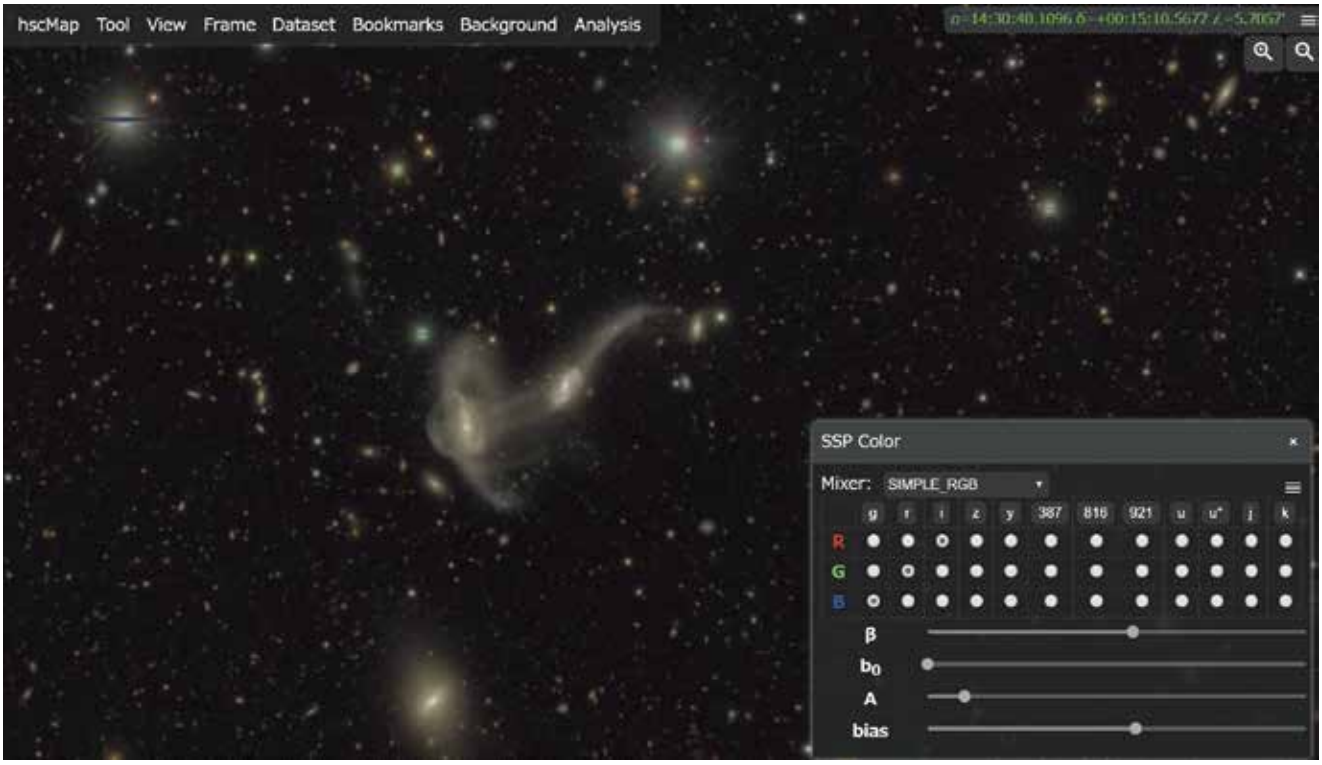


図01　HSCデータリリース用画像ビューワhscMapとHSC処理済み画像。

HSC-SSP データ解析チームにインタビュー

ご覧いただいたように、HSCでは膨大な観測データが生み出されるため、その管理・解析・公開も並大抵ではありません。ここでは、生データから最終のカタログ製作までの一連の流れ（パイプライン）を担当するHSC-SSP・データ解析チームのみなさんにお話を伺いました。

インタビュアー：ラムゼイ・ランドック（天文情報センター）

○ランドック：HSCの観測にはSSPと一般共同利用観測が含まれています。この2つは同じデータ解析パイプラインを使っているのですか。

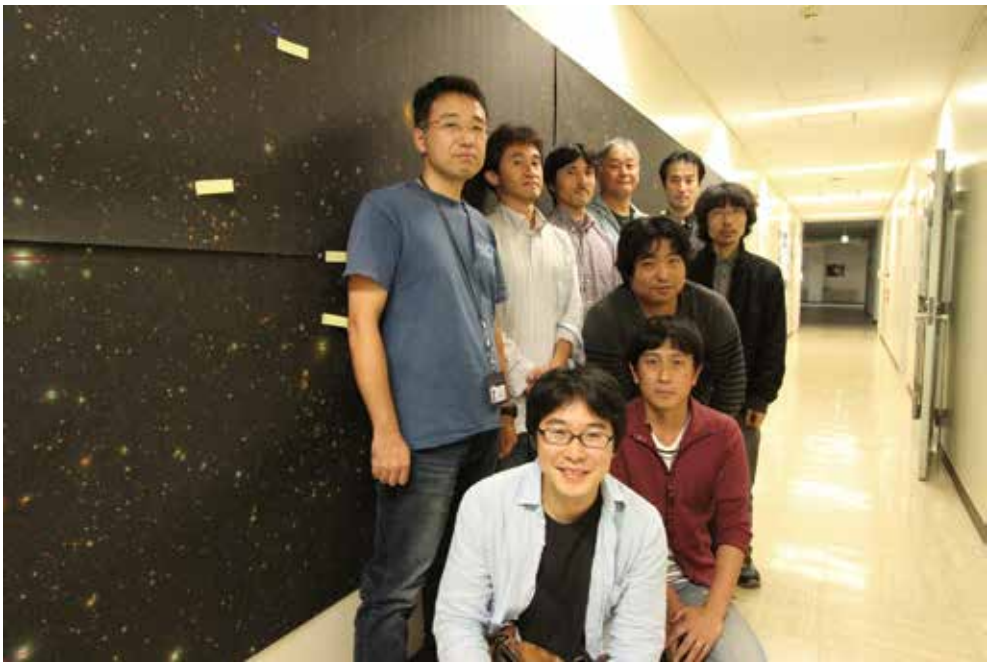
●古澤：基本的には同じものを使っていらっしゃる方が多いです。もちろんハワイ大学の観測者とか、かなり特殊なターゲットを狙っている方などには、それを使わずに独自の解析をされている方もいます。ただ、このチームは実はハワイ観測所共同利用のHSCデータ解析のヘルプデスクも兼ねていまして、そこで提供しているサービスとしては基本的にはSSPと同じパイプラインがちゃんと一般共同利用でも使ってもらえるようになる、ということを目指してやっています。

○ランドック：そして、SSPにはワイド、ディープ、ウルトラディープの3つの観測階層があります（p.14参照）。これら3つの観測は特徴が違いますが、データ解析はどうやって区分けしているのでしょうか。

●古澤：どの階層のデータに対しても、使っているパイプラインは実は同じです。ただし、それぞれのデータセットは別々に処理しています。最近のデータリリースでいうと、ワイド階層は他の2階層とは完全に別扱いにしています。ワイド階層は非常に広い視野をできる限り均一な深さで撮っているので、それだけは一つのプロダクトとしてまとめて作ります。それに対して、ウルトラディープとディープ階層は、特に深い撮像をしたいという観測なので、これらについてはあるデータを全部集めてそれを足し上げる、つまり、できる限り深いデータを作る、ということをしています。

○ランドック：パイプラインについてもう少し詳しく説明してもらえますか。マウナケアの観測サイトでデータが取られてから研究者が科学研究を行うまでにどのようなプロセスがありますか。

●古澤：まず、HSCの観測でデータを取得します。すると、



インタビューにご参加いただいたスタッフのみなさん。後列（壁寄り）左から：古澤、山田、瀧田、高田、大倉。前（右）列前から：小池、田中、池田、峯尾です。

一度すばる望遠鏡の観測制御システムにデータが流れて、そこから二手に分かれます。一つは生データのすばる望遠鏡公式データアーカイブであるSTARSです。もう一つは、観測現場にクイックルック・簡易データ解析を行うためのオンサイト計算機システムがありまして、そちらにデータが同時に流れます。それで、STARSに保存されたデータは三鷹にあるMASTARSというミラーアーカイブに転送されます。我々はこのMASTARSからデータをとってきて解析をしています。実際にどのデータを解析しようか、ということについては、オンサイトの簡易解析システムで得られた情報をあわせて判断しています。そこからがパイプラインが実際に走る場所になるのですが、それは池田さんに説明してもらいましょう。

●池田：まずはパイプラインで作業できるように生データの情報を専用のデータベースに登録する作業があります。その次にキャリブレーション（較正）用のデータ★01を作ります。それらをさらにデータベースに登録して、その後にこのキャリブレーションデータを使ってCCDごとのデータ処理を行い、続いて処理済みのCCDデータを集めて相互関係を調べるモザイキングと呼ばれる処理をします。さらに、視野を横断した背景光パターンを取り除くためのスカイフレームを作って、それらをCCDデータから引き去ります。その後、CCDデータを足し合わせて一枚絵の深い画像を作ります★02。深い画像が出来たら直ちにそこに写っている天体を検出します。ここまでの作業はデータを撮った観測フィルター（バンド）ごとに行って、最終的に複数フィルターの天体検出情報を集め、複数フィルターの画像に対して天体を測定します。こうすることで、最終的にマルチバンドの天体カタログが出来ます。それをデータベースに投入することで、各研究者がデータベースから欲しい天体情報を取り出して論文作成のための解析をしてもらう、というような流れになっています（P.12参照）。

★01　バイアス引きやフラットフィールディングなどCCDデータを補正するためのデータ

★02　スタックまたはcoadd画像と呼ばれる

○ランドック：このチームは天体カタログを作っているならば、研究者の仕事をもう全部やってしまっているようなものではないでしょうか。

●古澤：いろいろ考え方があると思うので適宜突っ込んでもらえるといいのですが、キャリブレーションはサイエンスにかなり直結するというか、ほぼサイエンスの一部でもあると思っています。下手をするとサイエンスの目的によってはキャリブレートの仕方を変えなければいけないこともあるので、ある意味、そこの責任を感じながら、プロダクトを作っています。

○ランドック：（2013年11月号のHSC特集の記事を見ながら）ここにあるような広報画像と科学研究用の画像を作るためのデータ解析では同じものを使っていますか。

●古澤：基本的に同じですが、研究で使う場合に一番ケアしているのは個々の天体をちゃんと正しく測れるか。ちゃんと物理量として妥当な値を我々が抽出できているか、再現性もあるか、ということだと思います。だから、研究用のデータ解析は必ずしもここに載っているようなきれいで滑らかな絵ができれば良いというスタンスではありませんが、出来上がる画像のピクセルサイズやピクセル数は同じですね。

●小池：でも研究者が広報で使われているのと同じサイズの画像を直接解析するということはないと思います。研究者はSSPのデータ配布サイトにアクセスして画像ファイルの欲しいところだけを切り出すこともできますし、そうしなくて

も、データ配布サイトの画像は4000×4000ピクセルくらいの適度な大きさになっています。研究者はこれらの小さいサイズの画像を使うことが出来ます。広報ではこれらの画像をつなぎ合わせてもっと大きい画像を使っています。

○ランドック：ちょっとおもしろいですね。テレビがやっと4Kになったけれども、HSCの視野をばらばらにしたあとの小さい画像のサイズが4Kなのですね。では、次に、データ・パイプライン開発に関する国際協力者との関係を説明してくれませんか。

●古澤：HSCは国立天文台がコアとなって始まったプロジェクトで、その装置を開発していく中で、データ解析もちゃんとプロジェクトの一部としてやりましょうという考えが当初からありました。そのためのソフトウェアを作っていかなければいけないので、プリンストン大学や東大・カブリIPMUなど国内外の機関と協力して開発しています。共同開発者であるプリンストン大学のチームがLSST★03の正式パートナーのため、LSSTのソフトウェアチームとは彼らを通して協力する形で開発をしてきています。

★03　Large Synoptic Survey Telescope。口径8.4mの可視光望遠鏡で9.6平方度の広視野を持つ米国主導で建設中のサーベイ望遠鏡プロジェクト。

●田中：あとは、台湾がコラボレーションに入っていまして、SSPの共同研究は日本とプリンストンと台湾という枠組みになっています（日本人研究者であればどなたでも共同研究者として参加できます）。台湾チームはフィルター交換機構で貢献しています。HSCのサーベイは可視光の観測ですが、そこに紫外のUバンドデータを撮るから一緒にやりましょうという感じでCFHT（カナダ・フランス・ハワイ望遠鏡）のグループも共同研究に参加しています。同様に、近赤外のJHKデータを撮るということでアリゾナ大のチームとも一緒に仕事をしてきています。

○ランドック：HSCの解析となると、これより大きなデータがほぼありません。とするとビッグデータの観点（AIやデータベース計算機等）から何か面白い話がありますか。

●古澤：AIという意味では、いろいろと天文学との取っかかりは出てきているフェーズだと思います。例えば、photo-z★04ではAIはもう既に導入している部分があります。ただ、ビッグデータの処理とAIという部分では、我々は非常に興味を持ってはいるんですが、現状でまだ何か導入しているというわけではありません。大きなデータの持ち方とか取り出し方という面では、データベースの分散処理などの工夫をする取り組みはあります。Citus（サイタス／★05）とか。

★04　測光データのみから天体の赤方偏移を推定する方法

★05　データベース管理システムであるPostgreSQLの拡張機能の一つでデータベース表の情報を分割して複数の計算機に分散して格納できる。

●瀧田：そうですね、今 Citus というものを試しています。これは、データベースを1か所で持って1CPUで全部の相手をするのではなくて、複数の計算機、ストレージに情報を分散して持ち、問い合わせに対してそれぞれの計算機で検索して最後にまとめることでより高速に応答しましょうというものです。

●古澤：データベースだけではなくて、データ解析の部分でも、もう分散しなければやっていられないというのはあって、デフォルトで行っています。

○ランドック：そのへんの問題解決の取り組みについてもう少し詳しく聞かせてください。

●古澤：データベースの高速化はかなり進めたのではないかと思います。当初のデザインとはかなり変えたでしょう。その辺のところで他に何か。

●高田：以前と同じ形である状態がもうないぐらいどんどん変わったね。ものすごく進歩している。こちらの知識も含めて、いろいろなものも増えているし…。さまざまな人がどんどん新しく入ってきて、その人が新しいものを導入し、さらに新しい人が…というふうにそれを繰り返していくので。

●山田：最初はパイプラインから出てきた天体のカタログを生の値のままデータベースの方に放り込んで、それをデータベース上で変換したものを提供データにしようとしていたので、変換には時間がかかりました。でも今は出てきた天体カタログのファイルを読んで、単位などを変換しながらデータベースに放り込んでいます。あとはテーブルの構造、データベースのテーブルのインデックスあたりも、細かいところを調整して速くなるようにしたところはあります。そのへんの改善は主に峯尾さんがやってくれました。

●古澤：当初、データベース作成に1か月ぐらいかかったのがもう1週間かからなくなったのでは。実際はもう少しかかっているとは思うけど。

●瀧田：データ量が増えてますからね。

●山田：今、2倍ぐらいですからね。

HSCのコントロールサーバー。

●大倉：昔の量だったら、きっとあっという間に終わっているでしょうね。

●古澤：ある時点で、オーダーで短縮したのです。

●峯尾：データベースにデータを入れるための時間は、一時期は40日くらいかかっていたでしょうか。それが10倍速くなりました、でも最近はまたデータ量が増えてきたので、今の全データを入れるには、2週間とかではないでしょうか。

●高田：データベースソフトの限界とかいうのを知ったのも今回が初めてだったような気がする。（峯尾君が）1600以上カラム入りませんと教えてくれたときに、そんなことがあるのかと初めて知ったしね。

●山田：天体の明るさや形状を測定した値を含むカタログを全てデータベースに放り込むと、700カラム以上の情報がフィルターごとにあって、全フィルターあわせて5000カラム以上になるけれども、それをデータベースに放り込もうと思っても、今の我々が使っているデータベースのシステムだと、そのままでは一つのテーブルに収まらない。それで分割をして入れているんです。

○ランドック：すごい量ですね。ではみなさん、一言ずつ。

●田中：ぜひデータを使ってください。そして論文を書いてください。

●小池：私はhscMapというSSPで撮ったデータをグーグルマップみたいに眺められるものを作ったのですけれども、それは研究者でなくても眺めていたら楽しいと思うので、見てください。よろしくお願いします。

●池田：これまでのラージ・サーベイと言われるものと比べても、とても深くて広いデータになっていますので、ぜひ使ってください。

●峯尾：私は、特に…。みなさんに私たちの作ったものを使っていただければ。

●古澤：大倉君は我々が今メンテしなければいけない計算機のほぼ全体のお守りをしていまして、多分、天文台の職員の中で一番計算機をたくさん見ている人の一人ではないでしょうか。レスポンダーというだけではなくて、ちゃんとメンテナンスする、そういう設備があって初めてデータリリースが実現しているということも、天文台の人たちにはよく知っておいてほしいです。

●大倉：そんなに大したことではないです。

○ランドック：今、何台のお守りをしているのですか。

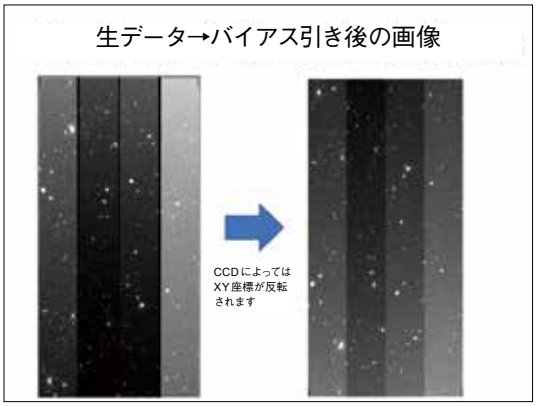
●古澤：前に数えたら、100ぐらいはありました。

●高田：このカメラ自体がすごく高性能で、地上の望遠鏡でありながら、こんなに視野が広くて、しかもこれだけばちっと視野の端っこまできれいに高解像度で安定して写るカメラはやはりないのです。それがすばる望遠鏡の性能とこのカメラの性能によるもので、日本のいろいろな力が結集した、お金もちゃんとかけて作ったものなので、ぜひともそのデータはいろいろな人に見てもらいたいと思います。もちろん研究にはすごくいっぱい使ってほしいけれども、小池君が一生懸命作ったhscMapで画像をスクロールさせたりして夜空を旅するのも非常に面白いので、ぜひ楽しんでもらいたいです（3月号・後編で、詳しい解説をお届けする予定です）。

HSC-SSPのデータ解析の手順

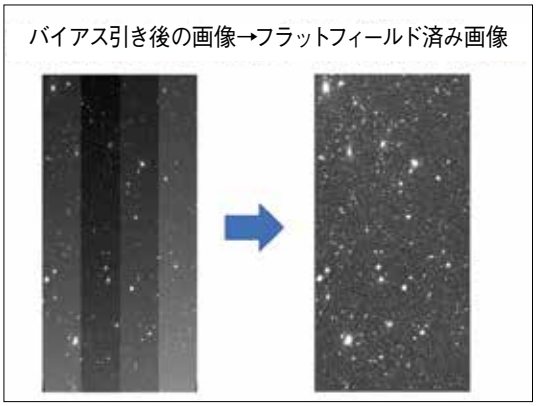
HSCの膨大な生データを効率よくカタログ化する解析・公開の流れを図解で説明してみましょう。

1



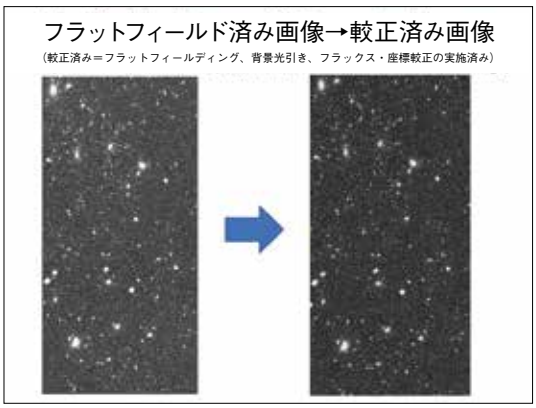
この段階では、未処理データ（生データ）からデータ読み出し時に加えられたバイアスと呼ばれる信号の下駄成分を引き去り、不要な領域を切り取ります。一部のCCD画像は反転し画像の向きを実際の空に合わせます。

2



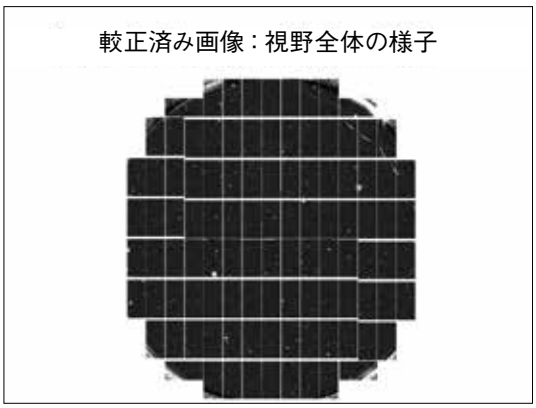
次にピクセルごとの感度ムラの補正（フラットフィールディング）を行います。段差などが消えて天体が詳細に見えるのが分かります。補正用のデータは光源で一様に照らしたドームの天井を撮ることで得られます。

3



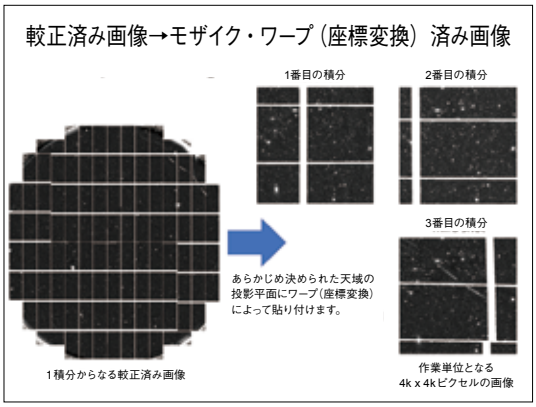
背景光を引き去り天体を検出測定し、画像に写る天体と外部参照カタログを比較することでCCD内の天球座標や1カウントが何等級に相当するのかを決定します（較正）。これでCCDごとに行う処理は完了です。

4



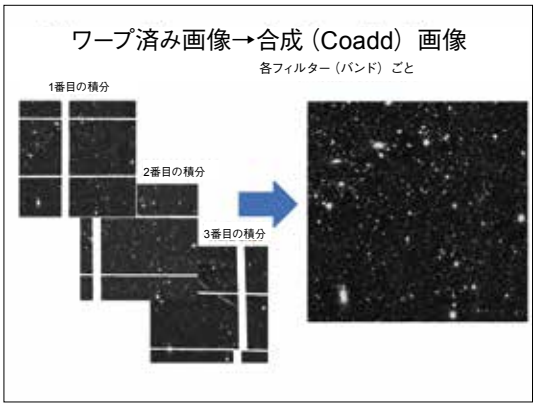
CCDごとの解析で得られた較正済みのCCD画像をHSCの視野の通りに並べた様子です。次からは各積分の画像を合成するための処理が始まります。

5



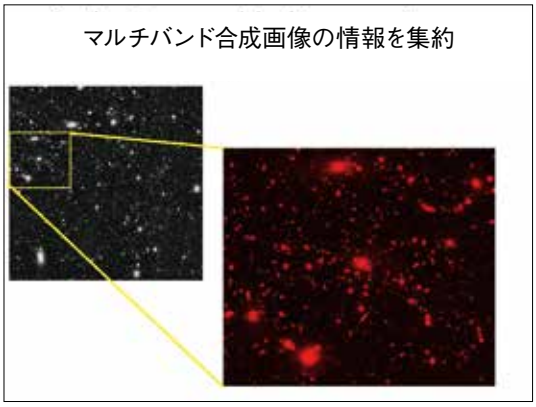
較正済みCCDに写る天体の座標と明るさの情報を使って、複数積分のCCD画像間の位置や明るさの関係を決定します（モザイキング）。その情報を使って共通の座標系を持つように各画像を変換（ワープ）します。

6



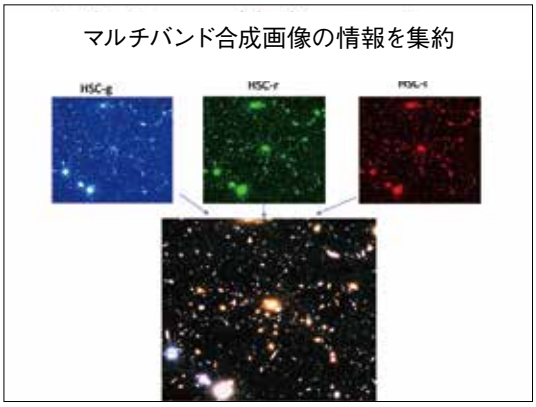
ワープ処理で、どの積分画像を見ても同じ天体は同じ座標を持つようになります。あとはそれらの画像の平均値を取るように合成して信号ノイズ比を上げます。この際ゴーストや衛星痕などの外れ値は取り除かれます。

7



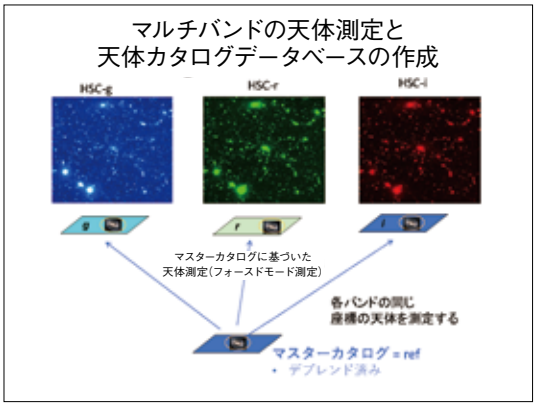
ここまでの作業は各バンドごとに行います。次はいよいよ複数のバンドの合成画像を集めて天体の情報を取り出す作業です。

8



ちなみに広報で使われるような綺麗な擬似カラー画像は3つのバンドの合成画像をうまく重ね合わせることで作られています。

9



天体をマルチバンドの情報を使って整合的に測り最終カタログを作ります。まず各バンド画像に写る天体のリストを集約し、それぞれについて各バンドの画像に戻って明るさや形を測り直します。

10

HSC-SSPでは、こうして作られた最終カタログは科学研究に用い易いようにデータベースに格納されます。天体情報を効率的に取り出せるような検索・データ取得のインターフェースが提供されています。

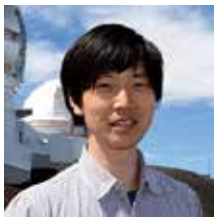
HSC-SSPの観測計画と実行

ここでは、SSPの観測がいかに計画され、どのように実行されているかを解説します。計画の部分ももちろん大切ですが、実際の観測の話題の方が人間味があって面白いので、そこに重点を置いた内容をご紹介します。

HSC-SSPの観測計画と実際の観測

田中賢幸
（国立天文台ハワイ観測所）

尾上匡房
（国立天文台ハワイ観測所／マックスプランク天文学研究所）



●サイエンス目標とサーベイデザイン

サーベイのデザインは、もちろんどういうサイエンスをするかで決まります。SSPサイエンスの柱は大きく3つあって、①弱い重力レンズ効果を用いた宇宙論、②銀河進化、そして③初期宇宙です。①は深さよりもとにかく広い領域を必要とします。一方、③は深さ優先で、多少狭い領域でもサイエンスができます。②はその中間で、比較的深いデータを数十平方度オーダーで必要とします。このように、それぞれのサイエンスに最適なデータというのは異なるのです。

そこで、我々はそれらを全て実現するために、3つのお互いに相補的なサーベイレイヤーを用意しました。一つはWideレイヤー。これは比較的浅い露出で約1400平方度を掃こうという野心的なレイヤーです。次はDeepレイヤーで、2時間程度の露出を約25平方度に渡って取得します。銀河進化サイエンス向けのレイヤーですね。HSCのフィルターの紹介は装置の記事（p.06参照）でありましたが、Deepでは広帯域フィルターに加えて、狭帯域フィルターでも観測します。強い輝線を出している、星形成銀河を捉えるためです。最後はUltraDeepレイヤーで、広帯域、狭帯域それぞれのフィルターで10時間前後の露出を目指し、初期宇宙の銀河を捉えます。このように3つの異なる広さと深さを持ったレイヤーをウェディングケーキのように重ねることで、全てのキーサイエンスを実現しようとしました。

以下、もう少し具体的に説明しましょう。図01にサーベイ領域を示します。サーベイやサイエンスの詳細な説明はオフィシャルウェブサイト（https://hsc.mtk.nao.ac.jp/）もご覧ください。

○Wideレイヤー

主に天の赤道に近い領域にあり、GAMAといったような分光サーベイや、VISTA-VIKINGのような近赤外データのある領域と重複が大きくなるようにデザインされています。そういった外部データを有効活用し、より多くのサイエンスをしたいからです。一つ北に外れたストライプがありますが、そこはHectomapと呼ばれる分光サーベイが行われている領域です。これらを合わせ、トータルで約1400平方度を目指しています。露出は広帯域フィルターで10〜20分と短めですが、それでもすばる望遠鏡なので他のサーベイと比べてずっと深く届きます。図02に深さと広さの絵を示しましょう。既存のサーベイと比べてより深い、新しいパラメタ空間を掃いていることがわかります。このレイヤーは広さを活かしたサイエンスに向いていて、例えば天の川の周りの矮小銀河探しや遠方のクエーサー探しが行われています。先で述べたように、一番のモチベーションは弱い重力レンズ効果を調べることで、そのためにこのレイヤーでは、銀河の形状測定で用いるiバンドをシーイングがいい時にのみ観測するようにしています。なんと、取得されたデータの典型的なシーイングは0.6秒。競争相手のDark Energy Surveyでは典型的なシーイングが約1秒なので、この差は非常に大きいです。我々のサーベイのウリの一つです。

○Deepレイヤー

銀河進化サイエンスでは多波長データを必要とします。また遠方銀河を調べるために比較的深いデータも必要とします。HSCは可視光撮像装置なので、Wideレイヤー同様、多

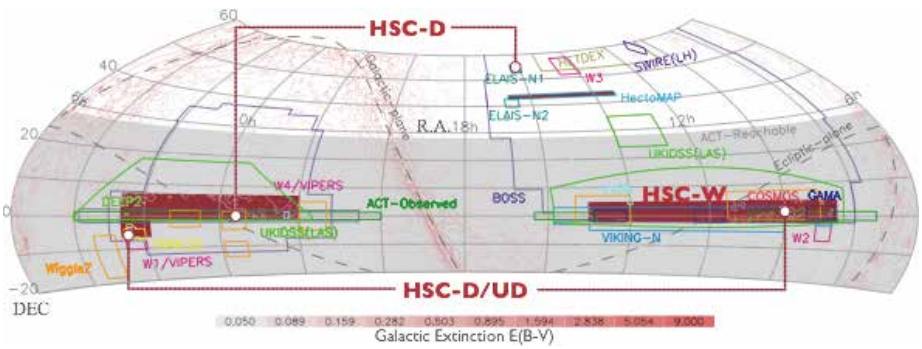


図01　サーベイ領域の地図。混みいった絵ですが、濃い赤で示した領域がサーベイ領域です。Deep、UltraDeepの領域は線で印をつけてあります。今までに行われてきた分光サーベイや多波長サーベイも色分けされて示されています。

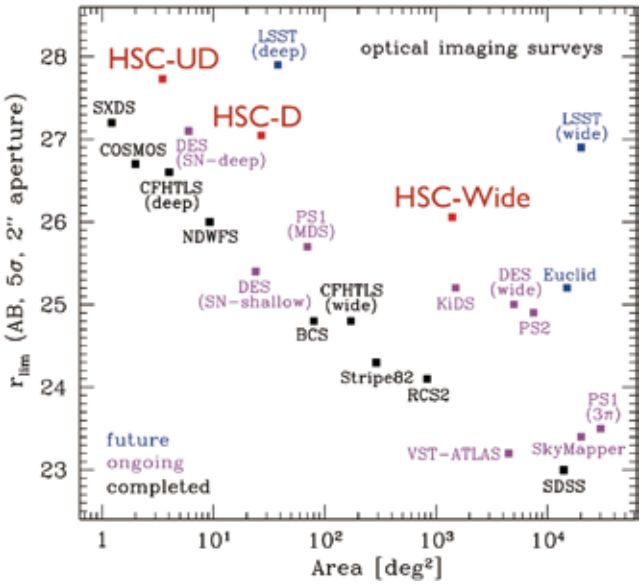


図02　現在までのサーベイを深さと広さの観点からまとめた図。赤でHSCを示している。今までのサーベイよりも深く、新しいパラメタ空間を探査していることがわかる。LSSTはさらにこの上を行くのですが、実際にそこに到達するまでは10年はかかります。

波長データを得るために外部のサーベイとの重複を必要とします。観測効率やCosmic variance★01の観点から観測領域を4つに分けて、それぞれの領域で7平方度程度を広帯域フィルター、狭帯域フィルターの両方で2時間程度観測します。HSCのような広いサーベイは他の波長ではあまり行われてこなかったので、多波長データがサーベイ当初は不完全でした。しかし、サーベイ開始後、CFHTを用いたuバンドサーベイ（CLAUDS）やUKIRTを用いた近赤外サーベイがSSPとタイアップで行われ、広くて深い多波長データが揃いつつあります。

○UltraDeepレイヤー

初期宇宙を観測するには何よりも深い露出が必要です。そこで、COSMOSとSXDSという有名な領域をとにかく深く撮る、というのがこのレイヤーで、露出時間は広帯域、狭帯域フィルターともに何と10–20時間です。もはや隙間がないぐらいに銀河が多く写り、非常に迫力のある画像が得られています。たくさんの露出を撮ることになるので、うまい時系列で観測することで遠方の超新星探査もできるようにもしています。一石二鳥ですね。

●現在の進捗状況

さて、このようなサーベイ計画ですが、執筆時点で観測夜数の3分の2ほどを消費し、着々と観測は進んでいます。しかしながら、2017年冬から2018年春にかけての悪天候の影響（だけではないのですが）で、予定の7割程度の進捗率にとどまっています。さらに、その後の火山性地震の影響で観測時間そのものがない状態が続いていました。しかし、2018年11月からついに観測を再開しました。観測戦略の見直しも議論されていて、少しでも予定の広さ・深さに到達できるように努力をしています。

●測光的赤方偏移

編集部の方から依頼があったので、測光的赤方偏移にも触れましょう。HSCは撮像装置です。画像には近くの天体から遠くの天体までたくさん写りますが、この画像から直接得られる情報は天体の見た目の大きさや見た目の明るさです。実際に我々がサイエンスをする際には、これらの情報を物理的な大きさや絶対等級、といった量に変換をする必要があります。その変換には天体までの距離情報が必要なのですが、距離の測定には通常分光観測が必要になります。しかしながら、この分光観測は非常に時間のかかる観測で、かつ暗い天体には適用できません。画像には大量の暗い天体が写っていますので、分光観測以外のお手軽な方法でたくさんの銀河までの距離を推定する必要があります。そこで登場するのが測光的赤方偏移です。

例えばgバンドで観測をしたとします。このフィルターは5000Å付近の光を通します。近くの天体に対してはこの波長付近の光をそのまま見ることになるのですが、遠方の天体に対しては宇宙膨張により波長が伸びる効果で、それよりも短い波長の光をgバンドで観測することになります。つまり、我々は異なる距離にいる銀河に対して、異なる波長の光を見ることになります。その結果、異なる距離にいる天体は、異なる見た目の色を示すことになります。これを逆に利用してやって、見た目の色から天体までの距離を推定するのが、測光的赤方偏移です。

これは近年の宇宙論サーベイでは必須の技術になっていて、特集後編で紹介される予定の暗黒物質や暗黒エネルギーの研究でも使われています。銀河の場合も当然頻繁に使われていて、距離のみではなく星質量といった物理量も計算できるので、非常に役に立ちます。HSCではこの測光的赤方偏移を研究するワーキンググループがあって、コラボレーション全体に計算した測光的赤方偏移を公開する作業をデータリリース毎に行なっています。私（田中）はこのWGリーダーをしばらくしていたのですが、これは本当に大変な作業で、この苦労・心労を綴った記事が天文月報に近日出ます。是非ご一読ください。

★01　宇宙の中での銀河の分布は非一様で、銀河が少ない領域や、銀河が多く集まった銀河団のような領域があります。狭い領域を観測してしまうと大規模構造の影響を受け、観測領域が宇宙の典型的な領域ではないことがあり得ます。そこで、観測領域を4つに分けることで、その影響を少なくしようとしたのです。

図03　三鷹からリモート観測中の様子。モニターを見ながら観測をします。写真には写っていませんが、テレビ会議システムで山頂とも繋がっており、山頂のサポートアストロノマーと密に連絡を取りながら観測を進めます。さらに専用のslackチャンネルで他の方々からもサポートがあります。

実際の観測現場のようす

…を対話形式でご紹介

サーベイが始まって4年以上が過ぎましたが、ここ1年半ほどの観測は三鷹の学生が主に観測を回してきました。当事者の方々の努力と苦労が読者の皆様に伝わるように、とある4人の対話形式でお伝えしたいと思います。本当はもっと多くの方々やハワイ観測所の皆様が貢献してくれたのですが、今回はこのメンバーでお届けします。

まず我々がSSP観測を担当することになったきっかけですが、これは半強制だったような…。

院生室に さんが直接きましたね。

あれ。皆さん、観測したくてしょうがないかと思っていたんですが。天文台の学生の皆さんにお願いしたのは自分一人で考えて観測できる人員を増やしましょう、という考えからです。それまでは外部の方を毎回三鷹に読んでリモート観測をしてもらっていましたが、サーベイをずっと引っ張ってきてくれた 先生にあまりにおんぶに抱っこ状態だったので。

あれを100晩くらい一人でやっておられたと考えると恐ろしいですね。

でしょ。 君は10晩もやっていないのに、散々に言われました。最近は、某研に声をかけてみましたがほぼ全員にスルーされました。

となると現状の観測体制はしばらく続きそうなんですね。

そうですね。やっと覚えてくれても、いなくなってしまう人が今年は多かったので。ハワイ観測所の皆さんにはqueue対応などなど大変お世話になっております。あの人たちがいなければ、今の我々はないでしょう。ハワイ観測所の皆さんに感謝です。

学生が観測を実際に担当してみて苦労している点はどこらへんでしょう？　私個人的には、何百人も関わる大プロジェクトの観測を任されるのはなかなかのプレッシャーです。それに観測では天候の判断やトラブル対応など経験が物を言う場面が多いので、それが無い院生にとっては難しい。

個人的にはフィルター交換の判断が難しかったです。だいたい さんや さんらにリモートで指示を仰いでいましたが。あとは微妙な天気の時の待機時間ですかね。

観測経験があまりないために、観測システムの把握や画像データの良し悪しの判断に慣れるのが時間かかりました。個人としては良い経験だと思いますが。

難しい判断も多かったと思いますが、いい経験と言っていただけると嬉しいです。

特に天候の予測は難しいですよね。

いや、予測は何夜やっても難しいですよ。あれを先にやっておけばよかったか、などなど後悔は今でもいっぱいあります。ある程度柔軟な対応ができるようなプランニングとか心構え（というか単なる慣れ）が必要なのでしょうね。でもまぁ、そうやって苦労して撮ったデータが、皆さんの論文になっているわけです。感慨深いでしょ。

自分はHSCデータしか使ってないと言っても過言ではないので、とてもありがたいです。

感慨はまあなくはないです。

そういえば労いに焼肉奢ってくれるって話ありませんでしたっけ？

うーん、したような気もするけど。行って…みま…す…か…。

やった、ありがとうございます！

ん、観測の苦労話がなぜ焼き肉の話になるんだ？おかしいぞ。

SSP観測経験が自身の研究にどのように役立っているか、という点についてはどうでしょうか？　私は装置や観測に詳しくなったことでHSCデータの扱いは以前より楽になった気がします。あとGAMA09やVVDSなどのサーベイ領域の名称に詳しくなりますね。

自分はSSP観測に関わる前までは観測の知識がほぼなかったので、知識を得られたという意味で研究や観測提案に役立っているかなと思っています。他には自分だけで観測するなんてことはないですし。

最近は実際に観測に行く機会も減ってきているので、自分一人で観測する経験は貴重かも。

OPE fileの形式とかすばるのインターフェースとかは多少わかるようになりました。

8m級で学生が10晩以上の観測経験を積めるのはやっぱり大きいですね。SSPで観測の基礎を叩き込まれるのは大変良い教育だと感じます。

他の8m級はほとんどリモートですしね。

経験と、あとは生画像を見る機会がある、というのはいいのかも。cosmic rayとかsatellite trailとかいろいろ楽しいのが画像には乗っていて、それは途中で処理されて大部分は無くなるんですが、最終画像だけ見ているとなかなか気づかないかも。

今後のSSP観測への具体的な期待や改善して欲しい点などはありますか？

とにかく観測日の天気が良いといいなぁという事ですかね。雲で観測できず待っている時の虚しさは大きいですから。

火山と天気がこれ以上暴れないことを祈っています。

うーん、我々にはどうにもできないことだらけな気が…でもまぁ、観測ってそういうものだってことですね。

後は大きなトラブルなく無事にHSC-SSPが完了することを祈るばかりですね。では最後に一言ずつ。まずはHSC-SSPの観測が若手の裏方的な活躍に支えられていることは是非皆さんに知って頂きたいですね。

そうね、ハワイの人達や今までの さん達の活躍も。

学生身分でここまで大きなプロジェクトに関われることはあまりないと思うのでこれからも頑張ります。

ではお疲れ様でしたー。

SSP観測が無事に終われば焼き肉に行きましょう。

お疲れ様でした。

お疲れ様でした。

●犬＝尾上匡房さん、フクロウ＝田中賢幸さん、カピバラ＝竝木茂朗さん、リス＝伊藤慧さんでした。ところどころ出てくるハシビロコウはサーベイを初めから引っ張ってくれている、安田直樹さんでした。他にも現在までの観測を担ってくれた多くの方々と、ハワイの皆様の努力でSSPは成り立っています。
イラスト出典：「いらすとや」（https://www.irasutoya.com/）

Ⅱ HSCの科学的成果

太陽系の観測から宇宙論まで

超広視野と高感度によって観測されたHSC-SSPの500 TBにも達するリリースデータには、じつにさまざまな天体情報が大量に写りこんでいます。このお宝データをもとに、身近な太陽系から高赤方偏移銀河の観測まで、さまざまな研究が行われています。前編では「太陽系小天体」「銀河系と近傍銀河」「中間赤方偏移銀河」の3項目を紹介します。

1 太陽系小天体の観測

私たちから近距離にある太陽系の天体ですが、小惑星や彗星などの始原的な太陽系小天体は、小さくて暗いものも数多くあるため、稀有な天体の探索や多くのサンプルを必要とする統計的な観測でHSCは力を発揮します。

HSCによる太陽系小天体研究

寺居 剛
（国立天文台ハワイ観測所）

●太陽系小天体

太陽系小天体とは太陽の周りを公転する天体のうち惑星、準惑星、およびそれらの衛星を除いた天体の総称で、小惑星や彗星などが含まれます。我々の太陽系には大小様々な小天体が無数とも言えるほどに存在しています。これらは太陽系初期に形成され惑星を作る材料になった「微惑星」の残存物であると考えられています。それらの多くは惑星に比べてあまり強い変成を受けていない「始原的」な天体であるため、それらを詳しく調べることによって太陽系の歴史を探るための様々な手掛かりを得ることができます。広い視野と高い感度を持ち合わせるHSCは、太陽系小天体の研究にも威力を発揮します。特に希少な天体の探索や、多数のサンプルを必要とする統計的な研究には最適な観測装置と言えるでしょう。

●太陽系外縁天体

太陽系小天体には地球にごく近い軌道のものからはるか遠方に分布するものまで多様な種類がありますが、中でも海王星軌道（日心距離30天文単位）以遠の領域に群集する「太陽系外縁天体」はホットな研究トピックの1つです。太陽から遠く離れた低温環境にあるため初期環境の情報を保持しているという化学的な側面に加え、惑星から受けた重力摂動の痕跡が軌道構造などに強く反映されているという力学的な観点からも、外縁天体は大変重要な小天体集団であると言えます。特に、木星から海王星までの巨大惑星の軌道が動径方向に変化したことにより広範囲の小天体に大規模な力学進化を引き起こしたとされる「惑星移動モデル」の解明に極めて有用な手掛かりをもたらすと期待されています。

これまでに2000個以上の外縁天体が発見・登録されていますが、それらの形成過程や力学進化、化学進化、衝突進化などには不明な点が数多く残されており、さらなる研究の進展が求められています。遠方にあるため大変暗く、観測が困難な天体ですが、HSCを使えば多数の外縁天体を効率良く捉えることができます（図01）。それらの軌道要素分布、色指数（カラー）分布、サイズ分布（光度関数）、自転周期分布などを調査するにはまさに打って付けの装置であり、すでに世界中の研究者によってたくさんの外縁天体観測が実施されています。

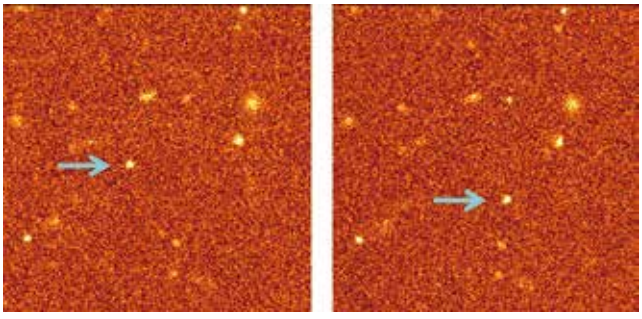


図01　HSCの撮像データから検出された外縁天体（矢印）。

我々もHSCによって取得されたデータを使って外縁天体研究を進めています。最初に実行したのが外縁天体のカラー分布測定です。太陽系小天体は可視光波長域では主に太陽光反射で光っていますが、これまでの観測から外縁天体の可視光カラーは太陽光に類似のものからかなり赤いものまで多様であることが知られています。この“赤さ”は、天体表面が含有する特定の氷分子が太陽風の照射を受けて赤化したことによるものと推測されており、太陽から遠く表面温度が十分に低い天体はそのような氷分子を保持し続けることができますが、太陽に近いと熱せられて失われてしまいます。そのため、天体間のカラーの違いは形成領域の違いを反映していると考えられるのです。

我々はHSCによる「すばる戦略枠（SSP）サーベイ」で得られた膨大なデータの中から複数のフィルターで撮像された既知の外縁天体を探し出し、それらのカラーを測定しました。30個の外縁天体から多色カラーを得ることができ、その分布を精査したところ、軌道傾斜角（黄道面に対する軌道面の角度）が小さな（6度未満）天体は短波長側（約0.8μm未満）で顕著に赤い天体が卓越しているのに対し、軌道傾斜角が大きな天体では太陽光と同等もしくはやや赤い程度のものが多いことがわかりました（図02）。このことから、前者は形成されてからずっと低温環境に、後者は過去により温度の高い場所にあったと考えられます。様々な観測事実や数値シミュレーションによる研究から、低軌道傾斜角の天体は現在の位置に近い領域で形成されたのに対し、高軌道傾斜角天体の多くはもっと太陽に近い領域で形成された後に惑星の重力作用によって外側へ移動した、とするモデルが有力視されており、本結果はこのシナリオと整合的です。また、木星と海王星の軌道間に分布する「ケンタウルス族」天体が高軌道傾斜角の外縁天体と類似のカラー分布を持つことも我々の解析から確認されました。両者の起源が同じであることを示唆するもので、短周期彗星の前身とされるケンタウルス族天体がどのような過程を経て現在の軌道になったのかを知る重要な手掛かりになります。今後、さらに多くのデータを使用してこれらの天体の軌道とカラーの関連性をより詳細に調べ、それらが経験した力学進化と化学進化の歴史を明らかにしたいと思っています。

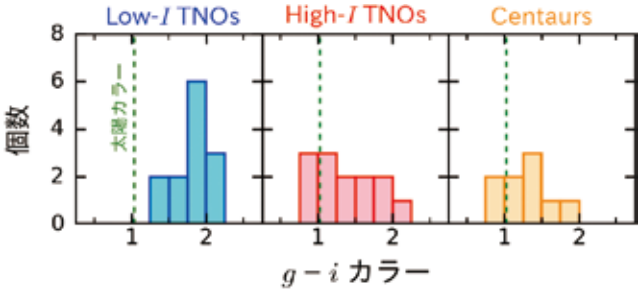


図02　測定されたｇ－ｉカラー分布。左：低軌道傾斜角（6度未満）の外縁天体、中央：高軌道傾斜角（6度以上）の外縁天体、右：ケンタウルス族天体。点線は太陽カラー。

●木星トロヤ群

先にも述べた通り、太陽系初期に起こった惑星移動にともなって外惑星領域の小天体が大きな軌道変化を経験したと考えられています。その痕跡を探るための研究対象として、外縁天体と並んで重要視されているのが「木星トロヤ群」です。「トロヤ群」とは惑星軌道面上の安定な平衡点である「ラグランジュ点」のうち、惑星の公転運動方向の前方と後方にあるL4点およびL5点周辺に位置する小天体群で、特に木星には多数のトロヤ群天体が見つかっています。これらがどこで形成され、どのようにして木星ラグランジュ点に捕獲されたのか、まだはっきりしたことはわかっていません。近年のモデルでは、木星周辺で形成されたのではなく、もっと外側の領域にあった小天体が惑星移動の際に内側領域へ運ばれて捕獲された、というシナリオが有力です。それが事実なら、木星トロヤ群は外縁天体（の一部）と起源が同じということになります。

これを確かめるのに有効なのが天体の大きさと個数の関係である「サイズ分布」です。直径数十キロメートルより小さいサイズ範囲では、小天体間の相互衝突に伴う破壊現象が頻繁に起きています。ある規模の衝突で天体が破壊されるかどうかはその天体の「衝突破壊強度」に左右され、そしてこの強度は天体質量によって変化します。この変化の特性によってその天体集団がもつサイズ分布の形状が決まるのです。したがってサイズ分布の形状を測定することにより、その天体集団の衝突破壊強度特性を調べることができます。この特性は天体内部の物性に依存するため、起源が同じ天体集団であれば類似のサイズ分布形状をもつと考えられます。

我々は2015年3月にHSCによる木星トロヤ群サーベイを実施し、直径がおよそ1〜30 kmのトロヤ群小惑星631個を検出しました。データ解析の結果、それらのサイズ分布は直径1〜10 kmの範囲で単一のべき乗則に従うことがわかりました（図03）。この特徴は波状のサイズ分布をもつ小惑星帯（メインベルト）の天体とは明らかに異なるもので、両者の起源が同じものではないことを強く示唆しています。小惑星帯と木星軌道はそれほど離れてはいないため、木星トロヤ群天体は別の場所で形成されたと考えるのが妥当でしょう。これをより確かにするためには外縁天体のサイズ分布と比較する必要があります。

HSCは小天体のサイズ分布観測にとって間違いなく世界最強の観測装置です。HSCのデータを十分に活かし、次の目標に向かって着実に研究を進めていきたいと思います。

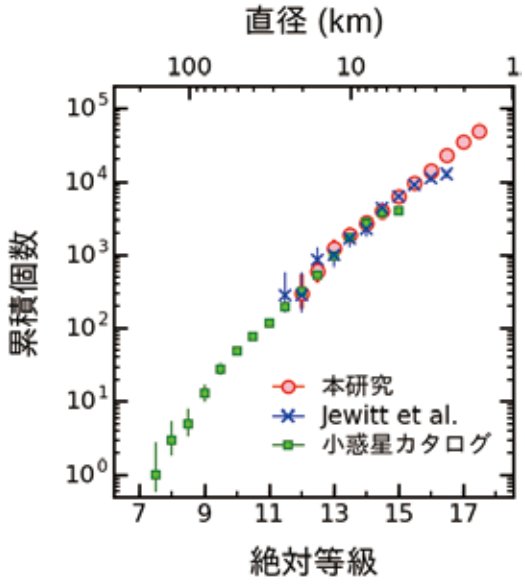


図03　木星トロヤ群L4天体の累積サイズ分布。天体直径の算出には反射率0.07を仮定。

2 銀河系と近傍宇宙の観測

銀河系や近傍銀河では、その恒星の一つ一つをHSCで捉えることができます。そこから、天の川銀河の歴史を詳しく調べられます。さらに近くの衛星銀河の観測からは、一般的な銀河進化のプロセスを探ることもできます。

HSCが拓く銀河系と近傍宇宙

千葉柾司
（東北大学）

私たちの住む銀河系のような銀河は、いつどのように形成され、どのような進化を経て現在見られる構造に至ったのでしょうか。銀河の周りにある暗黒物質は一体どのように分布し、銀河の形成と動力学進化にいかなる役割を果たしているのでしょうか。銀河の形成進化を研究する方法は大きく2つに分けられます。ひとつは、宇宙の彼方にある生まれたばかりの銀河をたくさん観測し、その構造やダイナミクスを調べることです。いろいろな時代の銀河の様子を組み合わせて、銀河の形成進化の過程を追跡します。もうひとつは、銀河系やアンドロメダ銀河などに代表される近傍銀河に対して、個々の恒星、特に年齢が古い恒星系の空間・速度分布と恒星が持つ化学元素組成を調べることです。これらの化石情報により、それぞれの銀河の過去を追跡することが可能になります。HSCはこの2つの方法のどちらにも重要な貢献をしています。本稿では後者について述べます。

近傍銀河の研究で本質的な点は、銀河をひとつひとつの恒星に分解し、それぞれの性質を詳しく調べることです。この目的にはHSCは最適です。その広い視野で一度にたくさんの恒星に関する測光データが撮れるからです。また、その優れた解像度から点源である恒星を分離できますし、すばる望遠鏡の口径と組み合わせて暗い恒星まで検出が可能になります。

●新たな衛星銀河の発見

近傍銀河の研究にて行う基本的な方法は、分離された恒星をいわゆる色・等級図（HR図に対応するもの）にプロットして、恒星の種類やその進化段階を決めることです。さらに、恒星進化の理論と比較して、恒星の年齢分布、すなわち恒星の形成史を各銀河について導出することができます。この色・等級図を用いた方法は大変有力で、遠方銀河の研究ではできないものです。また、逆に色・等級図上での恒星の特徴的な分布から、銀河系のハローなどに未知の衛星銀河や球状星団を見つけ出すこ

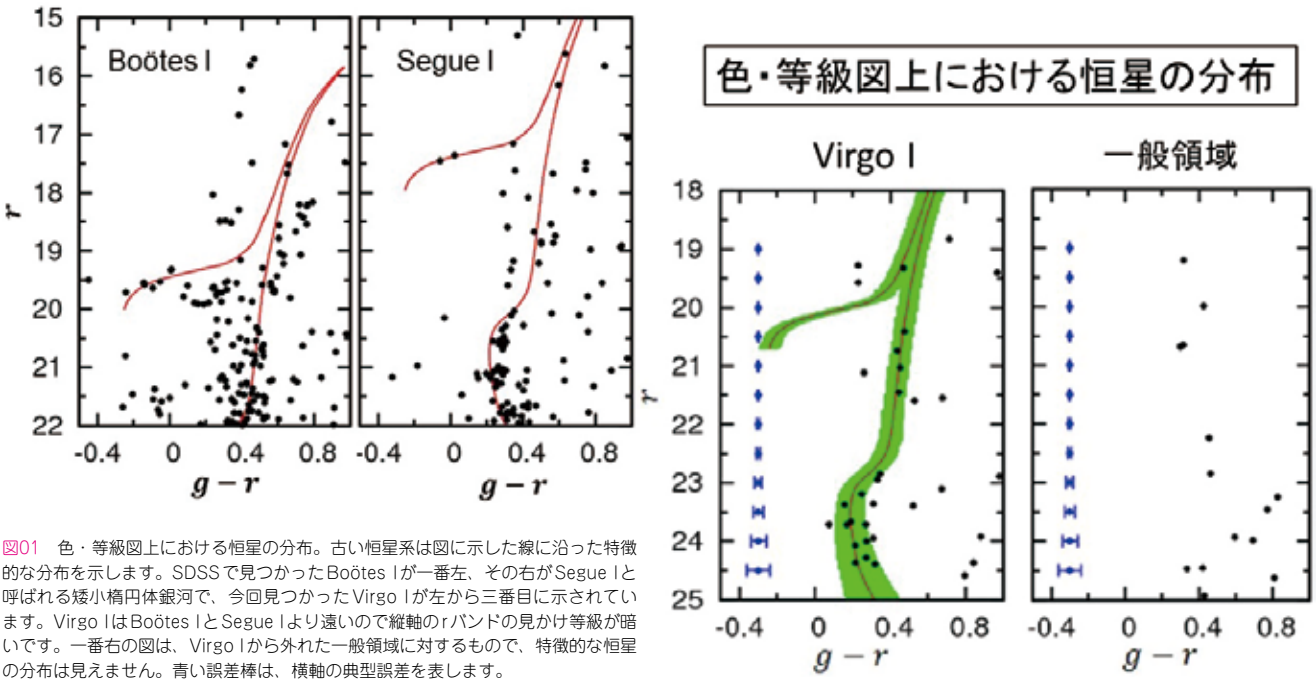


図01　色・等級図上における恒星の分布。古い恒星系は図に示した線に沿った特徴的な分布を示します。SDSSで見つかったBoötes Iが一番左、その右がSegue Iと呼ばれる矮小楕円体銀河で、今回見つかったVirgo Iが左から三番目に示されています。Virgo IはBoötes IとSegue Iより遠いので縦軸のrバンドの見かけ等級が暗いです。一番右の図は、Virgo Iから外れた一般領域に対するもので、特徴的な恒星の分布は見えません。青い誤差棒は、横軸の典型誤差を表します。

ともできます。

図01にこの方法によって私たちが見つけた銀河系の新しい衛星銀河Virgo Ⅰの例と、以前にSloan Digital Sky Surveyの探査で見つかったBoötes ⅠとSegue Ⅰの場合の色・等級図を示します。gとrバンドを用いた図になっており、フィッティングで用いた等時曲線とその誤差範囲が緑で示されています。Virgo Ⅰから少し離れた一般領域での恒星分布もプロットされており、等時曲線のような分布を示さないことがわかります。また、Virgo Ⅰで緑の領域に入っている恒星の空間分布をみると、統計的に有為な密度超過をしていることが分かりました（図02）。Virgo ⅠはSegue Ⅰなどと比べて恒星の数がとても少なく、実際、可視光での絶対等級は−0.33等級と大変暗いです。また、半径が153光年と（同等の明るさの球状星団よりも）大きな広がりを持っていることから、矮小楕円体銀河とよばれる星間ガスを持たず面輝度が暗い銀河のひとつであることが分かりました。ちなみに、この銀河はすばる戦略枠プログラム（Subaru Strategic Program：SSP）で行った観測データから見つかりました。同様な方法で、これまでのSSPのデータからさらに2個の矮小楕円体銀河と1個の球状星団の候補を発見できました。

銀河系がいったい何個の衛星銀河を持っているのかは、実は暗黒物質の正体と密接に関わっています。暗黒物質が相互の重力で集まってダークハローとよばれる暗黒物質の塊ができ、その中に星間ガスが落ち込んで星が生まれ小さな銀河ができます。これらが合体・降着を繰り返しながら銀河系のような銀河ができると考えられていますが、銀河系の周りに小さなダークハローに囲まれた衛星銀河が何個存在しているかは、暗黒物質となる素粒子の質量に依存します。つまり、HSCのサーベイでいったい何個衛星銀河が発見されるかで、暗黒物質の正体に重要な制限を付けることができる訳です。これまでの発見率を分析すると、標準理論である冷たい暗黒物質粒子の予言と大きくはずれていないようですが、最終結論はサーベイが終了するまで確定できません。

このほかに、私たちはHSCを用いて、青色水平分枝星とよばれる恒星を用いた銀河系ハローのマッピング、銀河系における恒星ストリームとよばれる過去の小銀河合体履歴の探査、アンドロメダ銀河や他の近傍銀河のハローマッピングなども進めています。このように古い恒星系をHSCで見つけて銀河の過去、特に小銀河合体の歴史を導こうとしています。

●種族Ⅲの探査計画

現在準備中の研究も紹介しましょう。銀河系を作っている恒星は主に種族ⅠとⅡに分類されます。ところが、宇宙最初に形成された種族Ⅲとよばれる第一世代の恒星の存在が考えられており、金属量がゼロでスペクトルが吸収線なしのツルツルであると思われます。このような恒星は一般に質量が大きくて直ぐに寿命を迎えると思われていましたが、最近の理論計算によれば小質量の恒星もあり今でも生きていて銀河系の中に存在する可能性があるようです。では、このような恒星はどこにあるのでしょう？　バルジ？　ハロー？　矮小楕円体銀河？　この探査に向けて、一個一個の恒星のスペクトルを撮るという方法もありますが、大変時間がかかるのと暗くて遠い恒星は対象外になってしまいます。

そこで私たちのグループでは、測光観測によってこのような超金属欠乏星の候補天体を探査する計画を立てています。そのために、HSC用の狭帯域フィルター2枚（NB395、NB430）を準備中です。NB395は395 nmに中心波長を持ち、CaのHK線に合わせています。このラインは恒星の金属量[Fe/H]の決定によく使われており、超金属欠乏星を見つけるのに最適です。また、NB430は波長430 nmのCH線に合わせていて、Cの存在量、特に鉄との比[C/Fe]を決めることができます。超金属欠乏星の中には、[Fe/H]がとても少ないのに[C/Fe]が多いものがあるからです。私たちは、これらの狭帯域フィルターと他の広帯域フィルターを組み合わせて、HSCを用いて系統的な測光サーベイを行い、超金属欠乏星の候補天体を一網打尽に見つけたいと考えています。さらに、すばるや30 m望遠鏡TMTで分光フォローアップし、詳しい化学組成を決めると共に、このような種族Ⅲがどのような状態で生まれたのか明らかにしたいと考えています。

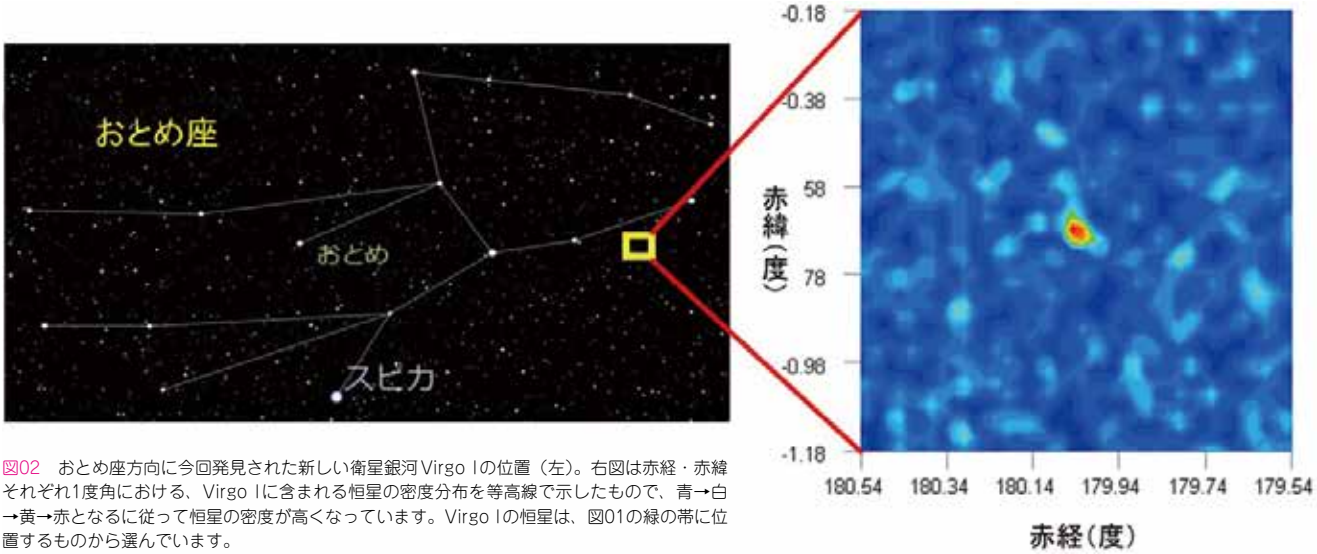


図02　おとめ座方向に今回発見された新しい衛星銀河Virgo Ⅰの位置（左）。右図は赤経・赤緯それぞれ1度角における、Virgo Ⅰに含まれる恒星の密度分布を等高線で示したもので、青→白→黄→赤となるに従って恒星の密度が高くなっています。Virgo Ⅰの恒星は、図01の緑の帯に位置するものから選んでいます。

3 中間赤方偏移銀河の観測

HSC-SSPがその真価を十二分に発揮するのは、多数の銀河をサーベイし統計的な解析によって新たな知見を得る研究分野です。比較的近距離の中間赤方偏移銀河をさまざまな波長で観測することで宇宙の謎に挑む研究を紹介します。

すばるで辿る銀河の世界の100億年

林 将央
(国立天文台ハワイ観測所)

●多様な観点から探る銀河の成り立ち

HSCすばる戦略枠（SSP）サーベイでは銀河の研究も盛んに行われています。この記事では、現在から約100億年前の宇宙（赤方偏移で言えば2より近傍の宇宙）に存在する銀河の研究に焦点を当てて紹介します。

銀河の研究の最終目標の一つは、初期宇宙で生まれた銀河がどのように成長して今日の姿になったのか、その成長過程を理解することです。約100億年前は多くの銀河が活発に恒星を作り出している銀河の活動期であり、そこから現在にかけて銀河は徐々に星形成活動を弱めて成熟期へと移っていきます。現在の宇宙に見られる多種多様な銀河の姿が形成された時期であり、銀河の成り立ちを明らかにするには重要な時代と言えます。これまでにも、SDSSサーベイに代表されるような広い領域を観測したサーベイは存在しましたが、銀河研究におけるHSC-SSPサーベイの特徴は、すばる望遠鏡の視野の広さかつ集光力、ナローバンドというユニークなフィルターを用いて観測されたデータが挙げられます。これらの強みを活かして、様々な観点から研究者は銀河の成り立ちの謎に迫っています。観測領域が広ければ広いほど、大質量銀河や低金属量の若い銀河のような個数密度の小さな珍しい銀河種族の発見が可能になります。また、銀河は非一様な分布をしており（銀河の大規模構造と呼ばれます）、銀河が密集している領域である銀河団や銀河群に存在する銀河と、数密度が疎な領域に存在する銀河とでは、その性質に違いがあることが知られています。そのため、あらゆる環境を網羅して銀河の性質を調べることが必要不可欠で、観測領域の広さはとても重要です。例えるならば、東京だけで人口調査を行っても東京に住む人々にバイアスがかかった日本人の姿しか見えず、北海道から沖縄まで様々な地域も調査して初めて日本人全体を理解できるのと似ています。

集光力は、遠くの天体の観測、暗い天体の観測、および、個々の銀河の淡い構造の観測の結果に直結します（図01）。また、ナローバンドは非常に狭い範囲の波長域の光だけを透過するフィルターで、星形成銀河のスペクトルの特徴である輝線を撮像データで捕らえるのに有効です。これらの特徴を活かして、大質量銀河の100 kpcにも及ぶ淡い恒星ハロー成分の分布

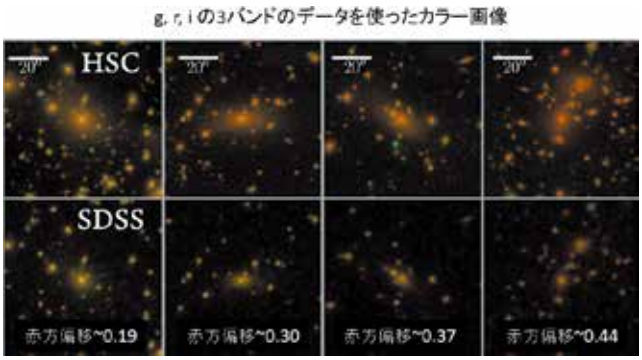


図01　Huang, S., et al., 2018, MNRAS, 475, 3348 の図01の引用です。大質量銀河のHSCすばる戦略枠サーベイ Wide領域データとSDSSデータを比較しています。HSCデータのほうが3~4等深いデータのため、大質量銀河の広がった淡い構造まで良く見えます。

から銀河の構造の成り立ち、面輝度が非常に低い銀河（Ultra Diffuse Galaxies）の発見とその性質の調査、約80億年前までの時代（赤方偏移で1.1より近傍の宇宙）に存在する銀河団の探査、それら銀河団銀河に含まれる星形成を止めた銀河の割合の時間進化、輝線銀河の大規模構造の探査と光度関数、約40億年前の時代（赤方偏移で0.4の宇宙）の星形成銀河の性質の環境依存性、といった研究の初期成果が論文で発表されています。さらに、低金属量の若い銀河の探査やそれらの天体の分光追観測、研究者ではない方々が銀河の形態を目視で分類し銀河どうしの合体や相互作用の兆候を示す銀河を探す市民参加型プロジェクト、深層学習の画像認識技術を利用して約8億天体もの銀河の複雑な形態を機械が分類するプロジェクトも進んでいます。多岐にわたる研究が行われているのがこの時代に存在する銀河の研究の特徴です。初期成果の中から、私が主導したナローバンドデータを用いた輝線銀河探査についてさらに詳しく解説します。

●ナローバンドデータによる銀河の国勢調査

HSC-SSPサーベイの最初の公開データ（PDR1）には、Deep/UltraDeep領域において計画されている4つのナローバンド観測のうち、2つのナローバンド（NB816とNB921）の撮像データが含まれています（図02）。領域の広さは、NB816データが

5.7平方度、NB921データが16.2平方度となっています。これまでのナローバンド撮像サーベイの中で最も広い領域を探査したデータの一つです。このHSCデータを用いて、約92億年前までの6つの時代（赤方偏移では1.5より近傍の6つの異なる赤方偏移に相当）における輝線銀河を選び出すことができます。

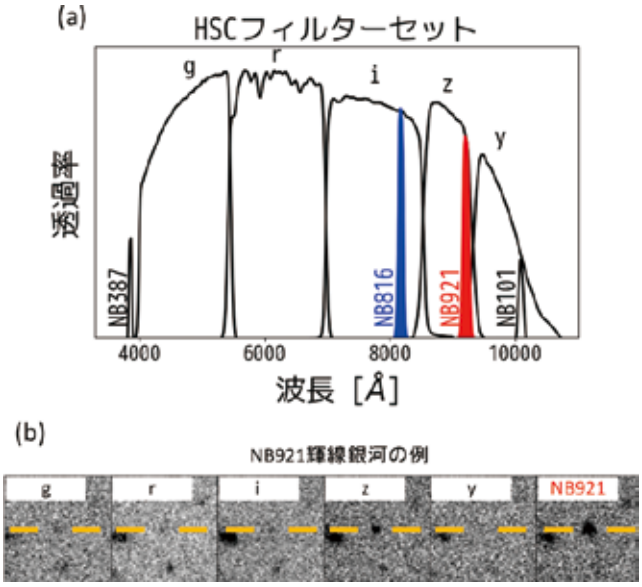


図02　(a) HSC-SSPサーベイで使われるフィルターセットです（Hayashi, M., et al, 2018, PASJ, 70S, 17の図01を編集しています）。観測計画のある4つのナローバンドのうち、現在公開されているデータでは、NB816とNB921の二つのナローバンドデータを利用できます。(b) NB921ナローバンドで特に明るい輝線銀河の例です。5つのブロードバンドデータと比べて、NB921ナローバンドで明るく、輝線がこのナローバンドに入ってきていることが分かります。

輝線銀河は、主に星形成活動を行っている銀河であり、その星形成活動の活発さに比例して銀河の静止系の特定の波長に強い輝線を放射します。強い特徴的な輝線を挙げますと、Hα輝線の場合は6563Å、[OIII]輝線の場合は5007Å、[OII]輝線の場合は3727Åとなります。遠方銀河の星形成領域から放射された輝線は我々に届くまでに赤方偏移を受けて、より長い波長帯で観測されることになります。この輝線を8177Åで捕らえるのがNB816フィルターであり、9214Åで捕らえるのがNB921フィルターになります。その結果、赤方偏移で0.25と0.40の約8000個のHα輝線銀河、赤方偏移で0.63と0.84の約9000個の[OIII]輝線銀河、赤方偏移で1.19と1.47の約1万7000個の[OII]輝線銀河を選び出すことができました。先行研究と比べて、観測領域の広さ、輝線銀河の天体数の多さがこの研究成果の売りです。

図03はNB921データを使って選ばれたHα輝線銀河の光度関数で、その時代の宇宙において、ある光度を持つ銀河がどのくらいの数密度で存在しているのかを表しています。これは日本の人口の実態を把握するために実施される国勢調査の銀河版であり、銀河の成長過程を理解するうえで最も基礎的な統計データの一つです。広視野データのおかげで、光度関数の明るい側まで精度よく明らかにすることができています。先行研究で行われていたような数平方度の領域の探査では銀河の数密度のばらつきが大きく、銀河の平均的な性質を議論するのには不十分であることも分かります。HSCの誇る様々な環境を網羅した輝線銀河データだからこそ、銀河の性質の環境依存性を詳しく調べることも可能になっています。

今後、HSC-SSPサーベイが進むと、26平方度にわたるナローバンドデータが得られます。また、HSCすばる戦略枠サーベイと同じ領域を別の複数のナローバンドで観測するプロジェクトも進んでいます。さらに広い領域で、より細かい時間間隔で星形成銀河の国勢調査が可能になりますので、さらなる銀河研究の進展をご期待ください。

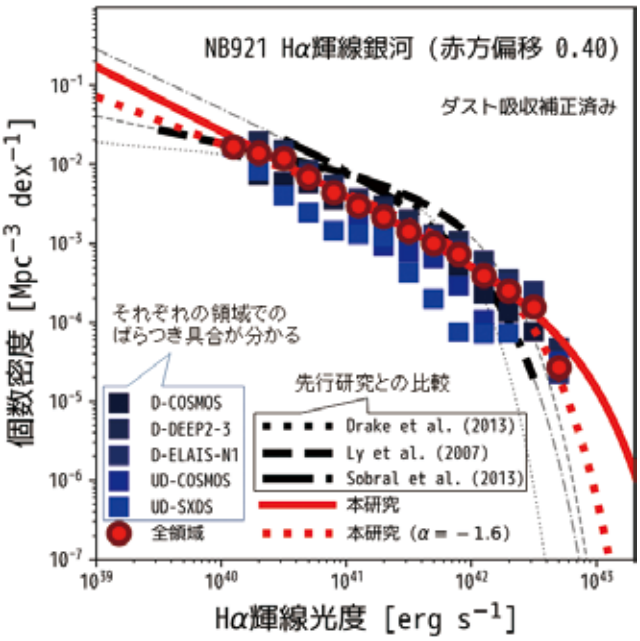
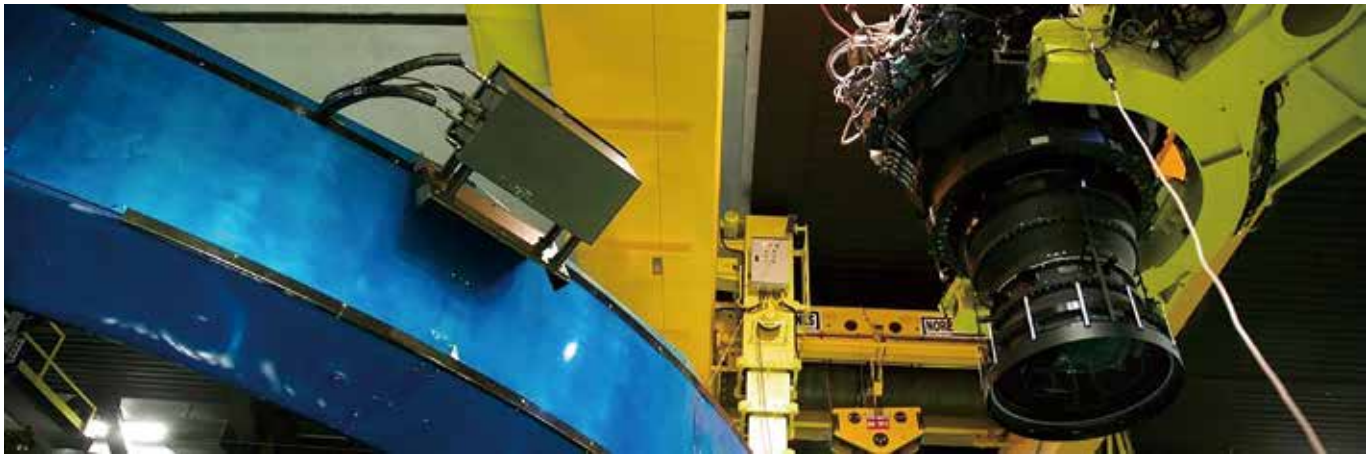


図03　NB921ナローバンドを使って選ばれた約40億年前の宇宙（赤方偏移で言えば0.4の時代）のHα輝線銀河の光度関数です（Hayashi, M., et al, 2018, PASJ, 70S, 17の図17を編集しています）。あるHα輝線光度を持つ銀河がどのくらいの数密度で存在するかを表す統計データです。いわば、銀河の国勢調査ともいうべきものです。



HSCデータで浮かび上がる40億光年彼方の超銀河団

小山佑世
（国立天文台ハワイ観測所）

ここではHSCのナローバンドデータを用いた銀河団研究の例をご紹介します。林さんの記事（p.22参照）でも解説されているように、ナローバンドを使うことで特に星形成を活発に行っている銀河の性質を詳しく調べることができます。ナローバンドの利点は、ある狙った距離にある輝線銀河を観測視野全面から「もれなく」選出できることです。これによって銀河団周辺に複雑に広がった宇宙の大規模構造を一度に捉えることができます。また、ナローバンドを使えば輝線銀河を選ぶだけではなく、個々の銀河が出す輝線の強度を測ることができます。たとえば以下で注目するHα輝線は、銀河内部の星形成領域（若い星の周りの電離領域）から放たれる水素の輝線で、その強度は銀河の「星形成率」に比例します。視野内に写り込んだ何千〜何万もの天体についてHα輝線の強度を一度に測定し、それを星形成率に焼き直すことで、銀河団や銀河群などさまざまな環境下の銀河で起きている星形成活動の詳細を効率よく調べることができるのです。

図01は、HSCディープ・フィールドの一つであるDEEP2-3領域に見つかった40億光年彼方の超銀河団です。色のついた等高線は、銀河のカラーの情報から40億光年の距離にあると期待される銀河の分布です。CL1/CL2と印をつけた二つの銀河団が中心に鎮座し、その周辺には約50メガパーセクにも広がる巨大な構造が広がっています。光の速さで移動しても端から端まで辿り着くのに1億年以上かかる距離ですから、そのスケールの大きさに圧倒されますね。

さて再び図01を見てください。この研究の主役であるナローバンド（NB921）で選び出された赤方偏移0.4のHα輝線銀河（約3000天体）が黒点でプロットされています。ここでは、このHα輝線銀河を詳しく調べることで見えてきた興味深い結果を二つ紹介します。

まず一つ目は、Hα輝線銀河の「色」についての調査結果です。上で述べたようにHα輝線銀河は活発に星形成を行っている銀河と考えられますから、若い星の色が卓越して青い色をしているはずです。しかし図02（a）に示すように銀河団中心近くのHα輝線銀河は他の銀河に比べて赤い色をもつことが見えてきました。さらに調べてみると、この「赤いHα輝線銀河」は青い銀河に比べて星質量が大きく、また星形成率も高いことも分かりました。銀河団環境にいわゆる「赤い銀河（星形成をしていない銀河）」が多く存在することは近傍宇宙ではよく知られた事実ですが（25ページの西澤さんの記事も参照してください）、星形成銀河にかぎった場合でもこれと同じような傾向があったのです。これは銀河団という環境が銀河の進化（とりわけ銀河の星形成活動と質量集積）を加速していることを示しているのだと私たちは考えています。

二つ目は、Hα輝線銀河どうしが接近したときに何が起こるか？　という調査の結果です。図02（b）には、各Hα輝線銀河の星形成活動の活発さ（「単位星質量あたりの星形成率」という量で表します）と自分自身にもっとも近いHα輝線銀河までの距離の関係を示しました。星形成銀河どうしが接近すれば重力的な相互作用によって星形成活動が活性化されることが予想されます。実際、比較的低質量の銀河（図の青線）ではたしかに予想通り銀河と銀河が近づくほど星形成活動が活発になるようです。しかし大質量銀河（図の赤線）では、その傾向が逆になっているのは驚きでした。その理由はまだ分かりません。しかし大事なことは、HSCによって輝線銀河の大サンプルが構築され、このような解析が初めて可能になったことです。今回の研究で見えてきたさまざまなヒントをもとに、次のステップではHSCの全サーベイデータをフルに活用して調査を拡大し、銀河進化と銀河環境の関係を一つずつ明らかにしていきます。

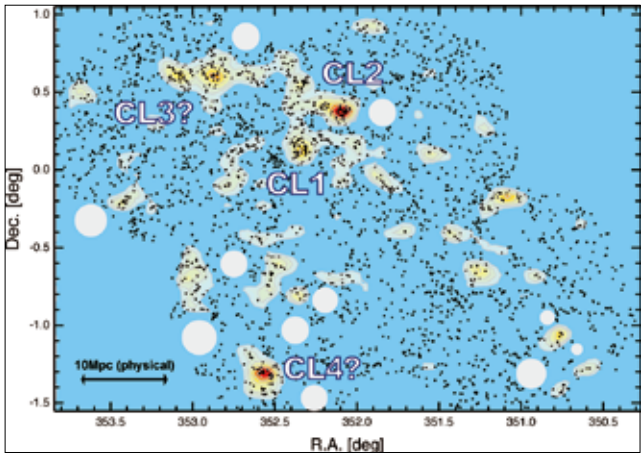


図01　HSCディープ・フィールドの一つ、DEEP2-3領域に広がる40億光年彼方の宇宙大規模構造。銀河の色に基づいて選択された銀河団メンバー銀河の分布を等高線で、ナローバンド（NB921）で選択された約3000個のHα輝線銀河を黒点で示しています。CL1/CL2と印をつけた二つの近接銀河団を中心に、サーベイ領域全体に広がる巨大な構造が見て取れます。図中の薄い灰色の円は明るい星をマスクした領域です。

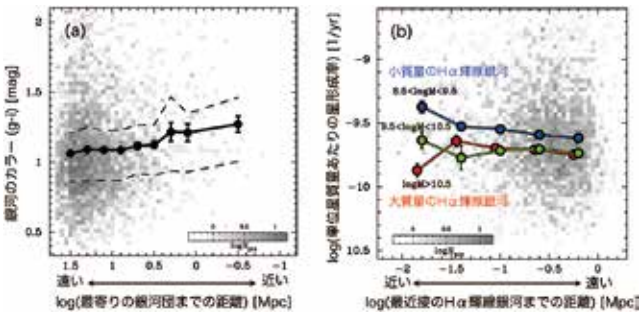


図02　（a）DEEP2-3領域のHα輝線銀河の色と、各銀河からCL1/CL2のうち近い方の銀河団までの距離の関係。銀河団の中心に近づくほどHα輝線銀河の色が赤くなっていく様子が分かります。（b）Hα輝線銀河の星形成活動の活発さ（単位星質量あたりの星形成率）と自分自身にもっとも近いHα輝線銀河までの距離の関係。小質量銀河では銀河どうしが近づくほど星形成活動が高まるようすが見て取れますが、大質量銀河ではその関係が逆転しているように見えます。

銀河団における銀河の運命

西澤 淳
（名古屋大学）

銀河が十数個〜百個程度集まったものを銀河団と言います。銀河団は宇宙で最大のビリアル化した力学系の構造で、宇宙大規模構造の構造形成を理解するうえでも、銀河進化を理解するうえでも重要な舞台となります。HSCの非常に優れた測光観測によって、これまでにない精度で銀河団の時系列進化を理解することが可能になってきました。銀河団ができ始めた頃、銀河団を構成するメンバー銀河の多くは青く若い渦巻き銀河であったと考えられます。その銀河内には多くのガスが存在し、星形成が活発に起こっていました。しかし、ひとたび銀河が銀河団に降着してくると、銀河団内のガスと相互作用をすることで、星形成活動が阻害されます。最も強く効いてくるのは、銀河団ガスの圧力による銀河ガスの剥ぎ取り（stripping）と、銀河に冷たいガスがもはや降着しなくなることによる燃料切れによるquenching（strangulation）です。敵陣に突入した部隊が、食料を没収された挙句に兵糧攻めにされるという、非常に過酷な状況に追い込まれるわけです。

さて、追い剥ぎにあった銀河の末路はどうなるでしょうか。食料がない部隊はやがて死に絶えてしまいますが、銀河でも同じことです。星形成活動もほとんど起こらない、死にゆく銀河ということになります。このような銀河は青から徐々に赤色に変遷していきますが、この赤い銀河を色等級図で見ると、一筋の綺麗な線上に乗ることが知られています。これをRed-Sequence銀河（以降RS銀河）と呼びます。RS銀河は銀河団の外側のフィールドにも存在しますが、特に銀河団内で特徴的に出現する銀河であることから、無数にある銀河分布の中から銀河団を探し出すのにしばしば利用されます。図01は銀河団銀河を色等級図で分類したものです。斜め水平方向に引いた実線と破線の周辺に分布しているのがRS銀河です。一方、破線より下に分布している銀河はblue-cloud銀河と呼ばれ、銀河団に降着して間もない、まだ星形成が活発に起こっている銀河です。RS銀河はほぼ質量を一定に保ちますが、近隣の銀河と衝突合体を繰り返してより大質量の銀河へと成長します。合体した銀河は色等級図では、RSの直線に乗りながら左斜め上方へと移動していきます。これまでRSは色等級図では直線上に分布していると考えられてきましたが、暗い側（図の右端）まで見てみるとその関係は直線からやや下方に下がっていることがわかりました。これは青い銀河がRS銀河に変遷している途中の段階が見えている可能性があり、今後より詳細な調査が必要になります。

ここで銀河の銀河団内部での力学的進化についても考えてみましょう。銀河団は周辺よりも重力場が強い領域なので、絶えず銀河やダークマターが降り注いでいます。降着した銀河は銀河団中心部を通過し、また外縁部まで行って戻ってくるという運動を繰り返しますが、銀河団の質量増加のため、また、途中の銀河団ガスとの摩擦、力学的な摩擦などによって、元の位置

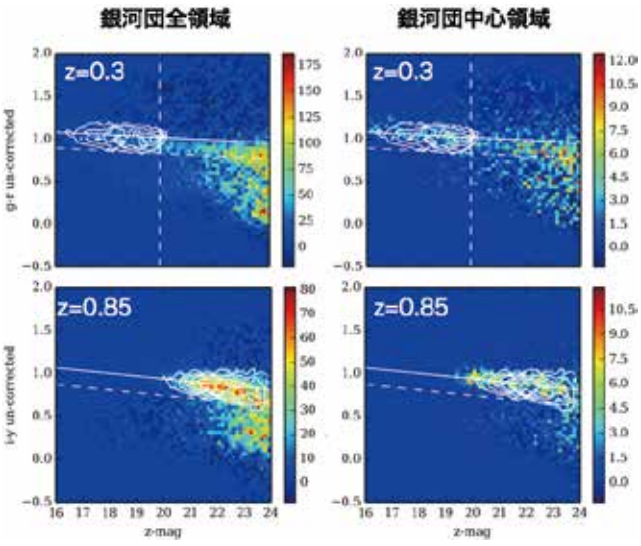


図01　銀河団銀河の色等級図。青い銀河は中心部で少なく、赤い銀河は時間とともに数が増えてくる。

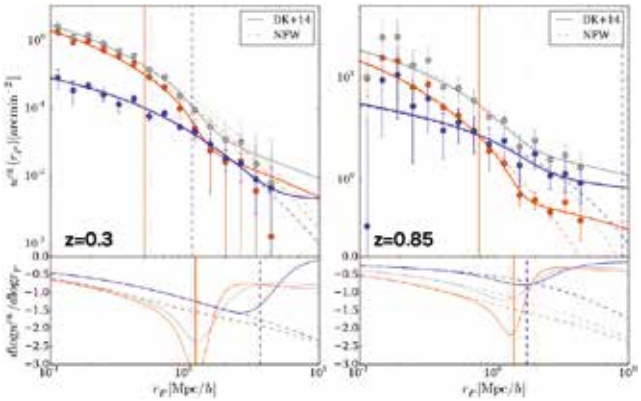


図02　銀河団銀河の動径方向分布。高赤方偏移では青い銀河（紫点）が卓越しており、低赤方偏移では、赤い銀河（橙点）が卓越している。また、銀河団中心部では赤い銀河が卓越している。質量プロファイルの微分（下パネル）が急激に落ち込んでいる部分がスプラッシュバック半径。

まで戻ってくることはできません。そして時間をかけてゆっくり銀河団中心部へと落ちてきます。一回目に戻ってきた遠点はスプラッシュバック半径と呼ばれ、銀河団半径の明確な定義として用いられます。図02ではHSCで観測した測光的銀河のみの情報からこのスプラッシュバック半径の兆候が確認できます。また、青い銀河と赤い銀河の銀河団内での動径方向分布を比べてみると、高赤方偏移から低赤方偏移にかけて赤い銀河が中心部により集中してきていることがわかります。このようにHSCによって非常に暗い銀河まで正確に色を測定することで、銀河団内部での銀河の進化の描像とともに、銀河団の力学進化の新たな理解への扉が開かれました。今後は形成期直後の銀河団の様子を探るため、より高赤方偏移の銀河団についても、HSCと多波長のデータを組み合わせた解析を行う予定です。

●「HSCが拓く宇宙・前編」は、いかがでしたでしょうか。次号3月号では特集「HSCが拓く宇宙・後編」をお送りします。前編に続いて「Ⅱ HSCの科学的成果―太陽系から宇宙論の観測まで」の「4.高赤方偏移銀河の観測」「5.AGN（活動銀河核）の観測」「6.重力レンズ銀河の観測」の各章を解説して、現在までのHSCの科学的成果の全貌をお伝えします。さらに「Ⅲ HSCと市民天文学―hscMapの開発・公開と市民天文学への活用・展開」の章では、読者のみなさん自身がHSCの観測成果を気軽に楽しんだり、もっと踏み込んで研究活動に参加することのできるツールや仕組みをご紹介します。

●HSCの成果をより専門的に知りたい方は『天文月報』（日本天文学会発行）の2019年2月号（から4月号の3号にわたって）「HSC特集」が掲載されていますので、ご参照ください。また、日本天文学会欧文研究報告誌70巻HSC特集（2018年1月発行 https://academic.oup.com/pasj/issue/70/SP1）には、戦略枠観測の約1/3が終わった時点でのデータに基づく観測成果がまとめられています。約1000ページもある大冊で自立可能です（右画像）。

第9回DTAシンポジウム「ダークマターハロー研究会」開催報告

白崎正人（理論研究部）

2018年8月27日と28日の2日間、第9回DTAシンポジウム「ダークマターハロー研究会」を国立天文台・三鷹キャンパスで開催しました。このシンポジウムでは、我々が日頃観測できる銀河や銀河団をすっぽりと覆っているものの光では見えないダークマターハローに焦点を当て、世界的に活躍するダークマターハローの研究者4名による招待講演を軸に、ダークマターハローの現象論的なモデルを概観し、特徴的な性質がいかにして観測的に実証されるか、また基礎物理学に基づいて理解できるかを幅広く議論することを主な目的としました。

観測計画の大型化と統計解析の精密化に伴い、ここ十年ほどで宇宙大規模構造の研究分野は、オーダー評価の時代を抜け、精密科学の時代に突入しつつあります。Wilkinson Microwave Anisotropy Probe（WMAP）による宇宙マイクロ波背景放射の観測、Sloan Digital Sky Survey（SDSS）による巨大銀河地図の作成など、科学的に見て大きなブレイクスルーを経験し、蓄積された経験は次世代の観測計画に引き継がれようとしています。ヨーロッパ諸国が主導するPlanck衛星によるマイクロ波観測、米国が主導する銀河撮像観測「Dark Energy Survey」、我ら日本が誇るすばる望遠鏡を用いた銀河撮像分光観測「SuMIRE」など、世界中で大型観測が進む非常に活発な研究分野です。将来必ずやってくるビッグデータの到来を心待ちにしつつ、ふと我に返ると一抹の不安がよぎります。それは、「我々は将来の観測結果を解釈するのに十分な理論モデルを持っているのだろうか」という懸念です。すばる望遠鏡が順調に銀河撮像観測を進める中、理論研究として残された課題を広く認識する必要があるように思われました。そのような折、DTAシンポジウムを開催する機会をいただき、ややマニアックではあるが、大規模構造のビルディングブロックとも言えるダークマターハローに焦点を当てた研究会をやってみようと思いたったのです。

マニアックな題材である故、参加人数が少ない心配もありましたが、蓋を開けてみれば、合計27名の参加者が集まりました（画像）。参加者の内訳は、学生が12名、ポスドクが5名、スタッフが10名でした。2日間に渡り、4つの招待講演と11の一般講演が執り行なわれ、終始和やかな雰囲気で、議論が進められました。研究発表は、大規模数値計算が予言するダークマターハローの性質を概観することから始まり、これまでの観測結果についての現状整理、さらには期待されるダークハローの性質を将来観測でどのように制限するか、精密化されたダークマターハローモデルはダークエネルギーやインフレーションの物理モデルの峻別に利用できるかなどが議論されました。本シンポジウムでは、一般講演の時間を30分と比較的長めにとり、講演者が伝えたいことを目一杯話してもらうように配慮しました。11の一般講演のうち、7つが学生によるものだったこともあり、30分という講演時間は聴衆の誤解を減らすという意味で適切だったように思います。

本シンポジウムを終えて、大きな期待が感じられた部分として、機械学習との連携の可能性が挙げられます。大規模な数値実験で得られるダークマターハローの統計的な性質を機械学習的なアプローチでノンパラメトリックにモデル化することで、より直接的に観測結果と理論モデルを比較する可能性が、宮武広直特任助教（名古屋大学）の招待講演で触れられました。10年後の未来、ビッグデータ解析がありふれた時代では、機械学習に基づいた方法論がダークエネルギーやインフレーションなどの新物理を開拓するのかもしれません。

●本シンポジウムの世話人は、白崎正人と浜名 崇（理論研究部）で、参加者の皆様のご協力もあり、特に大きな問題が生じることなく、成功裏に全プログラムを終えることができました。サポートして頂きました理論研究部、シンポジウムの参加者の皆様に感謝いたします。なお、研究発表の一部は研究会ホームページ（https://sites.google.com/view/darkhalo2018）でご覧いただけます。

講習会「Python＋Jupyter notebookによる光赤外天文データ解析入門」開催報告

亀谷和久（天文データセンター）

天文データセンターでは、講習会「Python＋Jupyter notebookによる光赤外天文データ解析入門」を2018年8月30日（木）と31日（金）の2日間の日程で国立天文台三鷹キャンパス南棟共同利用室において開催しました★01。講師は一橋大学の中島康准教授にお願いしました。中島氏は、これまですばる望遠鏡等の観測データ処理や赤外線望遠鏡の観測データ処理ソフト開発において豊富なご経験があり、光赤外天文データ解析に精通されています。今回の講習会は、光赤外天文データ解析の標準ツールであるIRAFの機能をPython言語のPyRAFモジュールを用いて呼び出し、これをJupyter notebook環境で使用することで一連の解析を効率化し、それと同時に解析の記録をインタラクティブに実行可能な形で残す方法を身に付ける内容です。Pythonは近年様々な分野で利用されているプログラミング言語ですが、天文学でも便利なライブラリが豊富なこともあり観測データ解析など多くの場面で使われています。一方、Jupyter notebookは、ノートブックと呼ばれる形式でプログラムを記述することができ、その実行結果やコメント等の一連の流れを記録することができるのが特長です。

昨年度に2回開催した同内容の講習会（■）では、受講者の募集を開始した直後に定員が埋まるほどの人気でした。別の講習会のアンケートでも再開催を望む声もありました。今回もその人気は健在で、定員を優に超える方から応募いただきました。そのため応募時に書いていただいた受講動機などを頼りに学生を中心に定員の12名を選抜しました。残念ながらお断りせざるを得なかった方々には大変申し訳無いのですが、会場の端末数等の都合によるものですのでご理解いただければ幸いです。当日は都合のため欠席となった1名を除く11名の受講者の皆さんにご参加いただきました。その内訳は、学部生3名、修士課程4名、博士課程1名の大学院生、その他3名でした。

講習会当日は、まずアイスブレイクを兼ねて講師と受講者の皆さんの自己紹介から始まりました。光赤外線観測を専門とする方が多いのは予想通りですが、さらに電波、X線、ガンマ線など様々な波長の観測データも使用される方も受講されていたようです。受講目的としては、Pythonを用いたデータ解析、画像解析、システム構築、Jupyter notebookによる自作解析プログラム管理など、多岐にわたりつつも皆さん具体的な目的意識を持って講習会に臨んでいました。

講習は、講師作成の非常に充実したテキストに沿って進みます★02。最初にJupyter notebookの起動、終了、プログラムや文章の書き方等の基本的な使い方を習得します。次にPythonの文法の基礎を理解します。そして、すばる望遠鏡の主焦点カメラで撮影された本物のデータを用いた天文データ解析に移ります。まず、PyRAFモジュールを用いて光赤外天文データ解析ソフトIRAFの機能をPythonから呼び出し、画像データの一次処理から測光パラメータを設定して測光を実行するまでを実習します。次に、今度はPyRAFを使わずにFITSの読み書き、数値計算、測光結果の可視化等を行なうため、これらに利用するPythonパッケージの使い方を習得します。最後に、関数やPythonスクリプトを自作して利用する方法も学びます。本講習会のテキストはノートブック形式で作られているため、記述されたプログラムは全てその場で実行することができることがポイントです。さらには、プログラムやパラメータを変更した場合も、実行した結果とともに記録しながら進められるためとても便利です。また、講習の区切りでは理解を補うために演習課題が課せられており、効率的に習得できるように工夫されています。今回は3回目でしたので、昨年開催した2回の経験を受けてより内容が洗練されており、演習の時間も充分に確保できていたため、受講者の皆さんが無理なく実用的な学習ができていたように感じました。

01　講義を行なう講師の中島准教授。

02　演習に取り組む受講者たち。

03　演習課題に取り組む受講者と質問に丁寧に答える講師。

講習会終了後のアンケートでは、受講者の皆さんから非常に高い評価をいただき、世話人一同胸をなで下ろしています。今回の講習会の感想として、「中島先生の楽しくわかりやすい説明で、習得できそうな気がしています。」「話を聞くだけではなく、演習の時間が長く設けられていたため、より理解を深められました。」「講習会は初めての参加でしたが、演習でつまずいても教えていただいたので、なんとかできました。」などの意見がありました。また、今回の内容を発展させたより詳しい内容や、Pythonを使用した他分野の解析についての講習会を望む声も聞かれました。アンケートでいただいた貴重なご意見は、今後の講習会に活かしていきたいと思います。

最後となりましたが、お忙しい中、充実した講習会を実施していただいた講師の中島准教授にはこの場を借りて感謝申し上げます。また、参加して頂いた受講者の皆様、および本講習会にご協力いただいた全ての方々にも感謝致します。

★01　天文データセンターではデータ解析用計算機システム（多波長データ解析システム）を提供しています。天文学やその関連分野における大学院生以上の研究者であれば基本的に利用できますので、是非ご活用ください。Pythonと各種ライブラリ、IRAF、Jupyter notebookがインストール済みです。（Jupyter notebookは三鷹キャンパス内の共同利用室の端末のみ）。詳細は以下をご参照ください。
https://www.adc.nao.ac.jp/MDAS/

★02　今回の講習会のテキスト等は、以下サイトにまとめられています。
https://gitlab.com/yas.nakajima/adc2018python
PythonやIRAFの経験がある方であれば、自習も可能な内容になっています。ご興味のある方は是非ご参照ください。

■また、今回も含めてこれまでに天文データセンターが主催した各種講習会の一覧および資料は以下に掲載しています。こちらも是非ご参照ください。
https://www.adc.nao.ac.jp/J/cc/public/koshu_shiryo.html

「秋の文化財イベント」報告

根本しおみ（天文情報センター）

01　国立天文台の「生き字引」・中桐正夫さん（特別客員研究員）による文化財のガイド。

今年も東京文化財ウィークに合わせて、国立天文台秋の文化財イベントが行われました。まず、11月3日に「文化の日ガイドツアー」を開催しました。国立天文台には一つの重要文化財と10の有形文化財がありますが、そのうちの一つを除くほぼ全ての文化財を職員ガイドの案内で見て回る、というツアーです（ゴーチェ子午環第一子午線標室は第二子午線標室と同型のため省略）。

毎年、文化の日には他の文化的施設のイベントも多く企画され、文化財好きの参加者の取り合いになっているようなのですが、今年は文化の日が土曜日だったこともあったためか参加者が少なく、募集60名のところ、47名の参加となりました。しかし、中にはわざわざ富山県から来てくださった全盲の方などもいらっしゃって、案内する方も気合が入りました。団体見学ではなく、一般の個人を募集してのガイドツアーは年に2回（文化の日と春分の日）しか開催していないのですが、毎回アンケートに「続けて欲しい」という要望が多く見られるので、これからも長く続けられればと思います。

文化の日の翌週末、10日（土）、11日（日）には「太陽塔望遠鏡特別公開」を開催しました。二日間で417名の来場者がありました。太陽塔望遠鏡は通常は外観だけの見学ですが、年に3回だけ内部を公開しています。「三鷹・星と宇宙の日」と、文化財ウィークの土日、そして春休みの桜が咲く頃の土日です（太陽塔望遠鏡にはエアコンがないので、秋と春の気候が良い時に公開することにしています）。毎回、2日間で400人を超える来場者で賑わいます。主に公開に携わってくれるのは、文化財ボランティアの方々です。太陽塔望遠鏡は一棟の建物であると同時に、一台の望遠鏡でもあるというユニークな建築物です。別名「アインシュタイン塔」とも呼ばれるように、一般相対性理論が予言する重力赤方偏移を太陽の分光観測から証明しようとして建てられたものです。日本で唯一の、この魅力的な建物を理解していただくために、来場者には太陽の光がたどる道を順路として辿っていただきます。まず、塔の最上階まで登り、シーロスタットという太陽の光を地下に導く機構を見ていただきます。

02　塔望遠鏡最上階にあるシーロスタットから太陽光の旅がスタート。

次は一気に地下へ下り、そこにある主鏡が最上階のシーロスタットから降ろされてくる太陽光を受け、さらに副鏡で反射され、直角に曲げられるところを見ていただきます。直角に曲げられた太陽光は隣の分光器室へ、わずかな隙間であるスリットを通って送り込まれます。最後には暗い分光器室に入り、プリズムで分光され、終（つい）に太陽スペクトルが映し出されるまでの太陽光の旅を、来場者は要所要所で解説を聞きながら見ていきます。スペクトルを見せるため、地下分光器室は常に明かりを半分消して、スペクトルが映る、かつては乾板があった場所を暗くしています。

03　かつては乾板があった場所に映し出される太陽スペクトル。

その横で、高校の物理の授業のように簡易分光器を使った「スペクトルとは何か？」がわかる実験をしています。

04　簡易分光器を使って白色光のスペクトルを見る。

今年来られたお客様の中には、「イギリスの分光器を作る会社で働いているので、こんな風に分光器が使われていて嬉しかった」と言ってくださる方がいました。また、「今回で3回目です」と、毎回違う友人（初めて天文台に来る人）を誘って来てくださる方もいました。こんな根強いファンがいてくださるのも、太陽塔望遠鏡の魅力に加えて、対応してくださっている文化財ボランティアの方々の熱意のお陰と思います。

最後に一つ、ご紹介したい太陽塔望遠鏡の話題があります。5月の終わりころ、太陽塔望遠鏡の周りでは何百頭という白い蝶★が飛び交います。人気もなく、静寂に包まれた太陽塔望遠鏡の周りを無数の蝶が静かに舞う様子はとても幻想的です。毎年発生するのかはわかりませんが、ぜひ一度ご覧になることをお勧めします。

★　美しいイメージで読んでほしくて蝶と書きましたが、本当はキアシドクガという無毒の蛾らしいです。

おしらせ NO.04

第1回「宇宙の謎に挑む国立天文台プレスツアー」開催
First NAOJ International Media Tour Held in November

都築寛子 Hiroko Tsuzuki（天文情報センター Public Relations Center）

2018年11月15日、19日の両日、第1回「宇宙の謎に挑む国立天文台プレスツアー」と題して、三鷹キャンパスでの初めてのプレスツアーを開催しました。国立天文台のプレスの認知度を高めたい、そして国際広報としては国立天文台の海外での認知度をあげたいという意図で企画したものです。

日本にいる海外プレスの中には英語が分かる記者もいれば、（特にアジア圏など）日本語は分かるけれど英語は分からない記者もいます。そこで2日間に分けて、日本語版と英語版を1日ずつ行うことにしました。

今回のプレスツアーは、午前中は施設見学（4D2U ドームシアター、太陽フレア望遠鏡、先端技術センター）と貴重資料紹介、午後は講演会、夜は懇談会＋観望会という流れです。講演会は、「すばる望遠鏡 限界への挑戦ー大型光学赤外線望遠鏡、20年の軌跡と未来ー」というテーマで、林 左絵子氏、宮崎 聡氏、田村 元秀氏、青木 和光氏の4名の研究者による講演を行いました。早朝の午前9時から夜7時半までの丸一日、丸ごと国立天文台を味わってもらうツアーでした。

日本語版の参加者は32名、英語版の参加者は3名でした。ちょうどインパクトのあるニュースが発表された日だったためか、英語版に関しては直前キャンセルのプレスも出てしまい、初めてのプレスツアーとしてはほろ苦いスタートでした。しかし、参加された記者の方からの評判はいいものでした。先端技術センターでは、最先端の天文観測機器の部品を作る工場やクリーンルームなど、普段は公開されていない、ものづくりの現場を案内しました。記者の一人からは「ALMAの受信器など普段なかなか見られないものを研究者の解説付きで見られたのが良かった」と語っていました。

また、天文台はカメラマンにとっても魅力的な対象のようでした。太陽フレア望遠鏡の見学では、撮影日和だったということもあり、プレスの方達も熱心に写真を撮っていました。貴重資料紹介でも、あるカメラマンはお昼ごはんも食べずに、1冊ずつ丁寧に写真を撮影していました。

本ツアーの成果として、すばる望遠鏡20周年や講演者に関する記事が新聞に掲載されたことが挙げられます。また、通信社のカメラマンが撮影した太陽フレア望遠鏡、先端技術センター、貴重資料の動画もニュースサイトに掲載され、真っ青な空に白く輝く太陽フレア望遠鏡はとても見映えがいいものでした。後日、新聞社の論説委員による

On November 15 and 19, 2018, the NAOJ International Media Tour was held for the first time at the NAOJ Mitaka Campus. The tour on November 15 was conducted in Japanese, and the tour on November 19 was conducted in English.

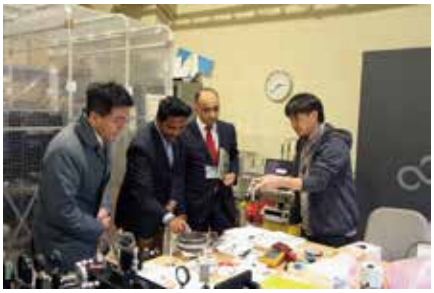
The theme was “Subaru Telescope: 20 Years Wishing Upon a Star.” The Subaru Telescope is an optical-infrared telescope with an 8.2 m monolithic primary mirror. It saw first light on January 4, 1999, and celebrated its 20th anniversary when the tours were held. We hosted a guided tour of the facilities and an exhibition of Japanese historical documents in the morning, held lectures about the Subaru Telescope in the afternoon, and had a social mixer party and a stargazing party at night.

We hosted 32 members of the media during the Japanese tour and three guests during the English tour. They enjoyed the tour, and many media featured the Subaru Telescope in their newspapers. In addition, movies from our Mitaka Campus facilities (Solar Flare

林左絵子氏の講演の様子。
Dr. Hayashi explaining the Subaru Telescope

太陽フレア望遠鏡の格納庫にて、熱心にメモを取りながら話を聞く取材陣。
The media hearing about the Solar Science Observatory inside the hanger

国立天文台のものづくり現場での取材の様子。
Interview at the Advanced Technology Center



先端技術センターにて現在開発中の装置を説明中（英語版プレスツアー）。
A chance to see (and touch!) an instrument currently under development (English version media tour)

貴重資料に関する追加取材もあり、貴重資料の魅力も再認識しました。
　海外の参加者には大使館参事官もいましたが、本ツアーをきっかけに大使館職員20名程の国立天文台見学が予定されています。今後もプレスツアー、海外出展などでのつながりを大事にして国際広報を進めていきたいと思っております。
●最後に今回のプレスツアーは、多くの部署や関係者の協力の下、開催しました。ご協力をいただいた皆様には、この場をお借りして感謝を申し上げます。

Telescope and Advanced Technology Center) and Japanese historical documents were uploaded on the news sites.

We haven't decided whether we will have a press tour again, but we would like to keep publicizing NAOJ inside and outside of Japan.

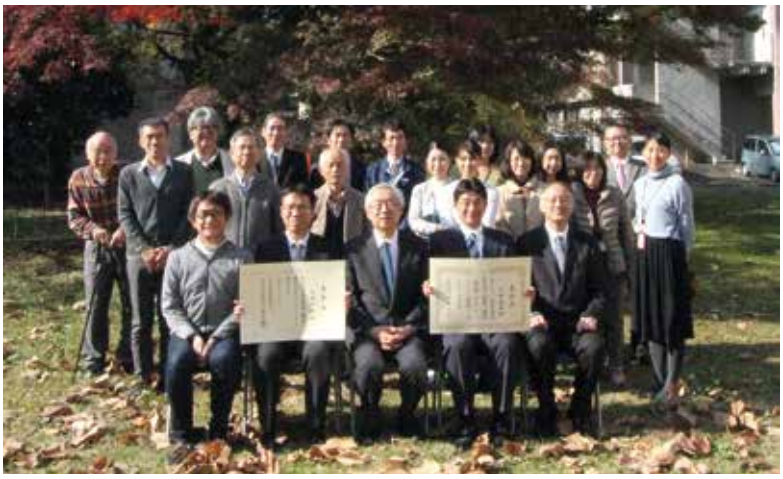
2018 11 28

おしらせ NO.05

平成30年度永年勤続表彰式

　平成30年度の永年勤続者表彰式が2018年11月28日に行われました。都合により1名が欠席し、2名での表彰式となりました。所属長をはじめ職員が参列する中、常田台長の式辞の後、各人に表彰状授与並びに記念品が贈呈されました。永く天文台を支えてこられ、表彰された方は、次の3名です。

吉田道利教授（ハワイ観測所）
今西昌俊助教（ハワイ観測所）
石橋和哉課長（事務部研究推進課）



前段左から井口副台長、石橋さん、常田台長、今西さん、渡部副台長。

編集後記

息子の5歳の誕生日。去年までは親が勝手にお祝いしている感じでしたが、今年は息子自身がプレゼントやケーキに色々と期待をしているところに成長を感じました。(G)

冬の岩手から台湾出張。荷物を減らすべく思い切って厚着なしで旅立ったはいいが、岩手に戻ってきた瞬間大きく後悔することに。こういう出張はいつも悩まされます。(は)

ASTEのためチリ、アタカマ出張中。例年のボリビアンウインターと呼ばれる雨季が始まった。このところ、2日に1度はサンペドロ・デ・アタカマの町で夕方に雷雨が降る。山の上は今のところ、雪が降っても昼にはとける。大雪にならないことを祈っています。(I)

天文学の未来を支えるさまざまな望遠鏡計画が紹介されるシンポジウムに参加。2020年代・2030年代に、天文学はどんな宇宙を見せてくれるでしょうか。(h)

5歳の女の子に叱られる番組に出たら、すごい反響で驚きました。大人気番組だったのですね。惰性か…(e)

年度末は会議や事務仕事の締切もあり、毎年なかなか大変なのだが、今年度から大学の博論・修論の審査も加わりました。読むのは大変ですが、学生さんの努力の成果を見せてもらえるのは醍醐味です。(K)

オリオン座が上がるようになったと思ったら明け方には、もうさそり座が。。。季節もあっというまに過ぎていく。(W)

国立天文台ニュース
NAOJ NEWS

No.307　2019.2
ISSN 0915-8863

© 2019 NAOJ
（本誌記事の無断転載・放送を禁じます）

発行日／2019年2月1日
発行／大学共同利用機関法人 自然科学研究機構
国立天文台ニュース編集委員会

〒181-8588　東京都三鷹市大沢2-21-1
TEL 0422-34-3958（出版室）
FAX 0422-34-3952（出版室）
国立天文台代表 TEL 0422-34-3600
質問電話 TEL 0422-34-3688

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）／石井未来（TMT推進室）／秦 和弘（水沢VLBI観測所）／勝川行雄（SOLAR-C準備室）／平松正顕（チリ観測所）／小久保英一郎（理論研究部／天文シミュレーションプロジェクト）／伊藤哲也（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／ランドック・ラムゼイ）●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、https://www.nao.ac.jp/naoj-news/でもご覧いただけます。

次号予告

3月号は、2月号の前編に続いて「超広視野主焦点カメラHyper Suprime-Cam（HSC：ハイパー・シュプリーム・カム）」の特集・後編をお送りします。科学的成果だけでなく、市民天文学の利用法もご紹介。お楽しみに！

NAOJ photo sketch

国立天文台

望遠鏡のある風景 11

太陽塔望遠鏡（アインシュタイン塔／国の登録有形文化財・三鷹地区）

撮影：飯島 裕