

# HSCで探る中間赤方偏移銀河

田中賢幸

〈国立天文台 〒181-8558 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: masayuki.tanaka@nao.ac.jp



Hyper Suprime-Camによるすばる戦略枠プログラムは大規模な撮像サーベイである。本稿では撮像サーベイにおいて欠かせない測光的赤方偏移をまず紹介し、次に比較的近傍の銀河サイエンスのハイライトをまとめたい。サーベイの準備段階から現在までさまざまな苦労があり、思うことをちりばめながら書いてみたいと思う。

## 1. はじめに

Hyper Suprime-Cam (HSC) のすばる戦略枠プログラム<sup>1)</sup> (以下、HSCサーベイ) のプロポーザル準備に、私が本格的に参加したのは2010年のことだった。当時、ドイツから帰国したばかりで、日本の動向にうとかった私ではあったが、すばるで最大のサーベイを実行すべくコミュニティーが動き出していたところで、あまり深く考えずとりあえず首を突っ込んでおこうと、私も手を動かした記憶がある。振り返ってみると随分前のこのように感じるが、当時準備していたサーベイが今まさに進行中で、このように天文月報の特集が組まれるまでになるとは感慨深いものがある。そして、まさか自分がここまでこのサーベイにどっぷりと漬かってしまうとは、当時の私には想像がつかなかったことである。

そんな私が僭越ながら本稿で測光的赤方偏移と、比較的低赤方偏移の銀河サイエンスについて紹介したい。他の稿でも述べられていると思うが、HSCサーベイではサイエンステーマごとにワーキンググループ (WG) が形成されている。測光的赤方偏移は一つのWGであるが、銀河サイエンスはテーマが広いのでおおよそ $z \sim 2$ を境に遠方と近傍に分かれていて、近傍はさらに $0 < z < 2$ の近傍

銀河と天の川銀河WGに分かれている。本稿で解説するのは私がWG代表をつとめていた、 $0 < z < 2$ の中間赤方偏移銀河進化WGのサイエンスである。WG代表はもう一人いて、Alexie Leauthaud (現在カリフォルニア大学サンタクルーズ校) と二人で協力してWGを取りまとめていたのであるが、本稿では日本語の書ける私が執筆させていただくことにする。Alexieならもしかしたら日本語 (ひらがな) で書けるのかもしれないが。

本WGのほかには比較的近傍の銀河に注目したWGとして銀河団WGがある。当然ながらサイエンスは大きく重複していて、どの論文をどちらの稿で紹介するかは難しい問題だが、月報編集長が苦心して割り当てをしてくれたので、ここではそれに大筋で従いたい。ただ、その割り当てからさらに一部の論文を銀河団WGに移したので、本稿で紹介する論文の数は実はかなり少ないのだが、折角の機会なので私の苦労話を入れながらゆるゆると書き進めていきたいと思う。言いわけがましいことを書くのもよくないのだが、今回は思うように時間が取れず締切間際になって焦り、HSC共同研究グループ (HSCコラボレーション) の会議に向かう飛行機の中で書いているのである。

## 2. 測光的赤方偏移

HSCサーベイは言うまでもなく撮像サーベイで、HSC画像にはさまざまな距離にいる大量の銀河が写る。われわれがこのデータから直接測定できるのは、銀河の見た目の明るさや、見た目の大きさといった情報である。しかし、サイエンスにおいてわれわれが欲しい情報は、絶対光度や物理的な大きさだ。この見た目の情報を物理情報に焼き直す場合に必要なのが、天体までの距離情報となる。距離（～赤方偏移）はしばしば分光観測で測定することができるが、分光観測は一般に非常に時間のかかる観測で、HSCの画像に大量に写る銀河の赤方偏移を一つ一つ測るのは現実的には不可能である。そこで、複数のフィルターを用いた撮像データで得られる銀河の色情報から、銀河までの距離をおおざっぱに推定するという、測光的赤方偏移がHSCでは重要になる。HSCでは測光的赤方偏移WGもちろんあって、コラボレーションの皆さんにはたいへん申しわけないことに、そちらのWG代表も私であった。これはいろいろ苦労した思い出のあるWGである。

### 2.1 人に仕事をさせる方法

測光的赤方偏移WGは、サーベイが始まる前から本格的に手を動かした唯一のWGではないだろうか。すばる戦略枠プログラムのプロポーザルでは、提案するサイエンスが実際にできることを示すために、測光的赤方偏移の精度の評価をする必要があった。しかしながら、サーベイ前にHSCのデータは存在しない。そこで、既存のデータでHSCのシミュレーションデータを作り、そこに測光的赤方偏移コードを走らせて精度を推定する、ということをしてWGとして行った。

こう書くともっともな感じに読めてしまうのだが、これは実は手間のかかる作業である。当然ではあるが、通るともわからないプロポーザルに大量の時間を投入するのは誰もがいやなことで、そこを何とかWGメンバーを鼓舞して手を動かし

てもらうのは、今思い起こしてもたいへんな作業であった。今も別の装置で似たような状況にある気もするのだが、まだプロジェクトがちゃんと動き出す保証がない段階で、人にボランティア仕事をしてもらうのは非常に難しい。単に仕事を振っても、もちろんやってくれやしない。読者の皆様には自分がたまたまこういう作業を仕切る立場になってしまったとして、どうするかぜひ一度考えていただきたい。

いろいろやり方はあるのかもしれないが、私は自分が率先して手を動かすことで、他のメンバーにも頑張ってもらおうという作戦に出た。「俺の背中を見ろ」というアニキ的なやり方である。私の性格にはあまり合っていないのだが、今思い起こしてみても悪くない作戦であった。が、当然大量の時間を投資することになった。WG代表は損な役回りだどついつい思ってしまうのだが、それでも何とかそれでメンバーについてきてもらい、シミュレーションをこなし、プロポーザルに結果を書き込み、無事にそれが通ったときには妙にほっとしたものだ。しかし、そのときはその後待ち受けるさらなる困難など知る由もなかった。

### 2.2 人に仕事をさせる方法：テイク2

実際にサーベイが始まりデータが出てくると、実際の測光的赤方偏移の推定作業が待っている。シミュレーションではなく本物のHSCデータに対して推定するのだ。これは内部向けデータリリースごとにする必要があり、ユーザーの皆さんが手ぐすね引いて出来上がりを待っているものなので、速やかに計算をしなければならない。計算に必要なデータをまとめ、メンバーに配り、計算よろしくお願いします、と依頼するものの、これもまたどうしてタイムリーには対応してもらえないものである。もちろん一部の方々にはタイムリーに対応いただいて（例えば西澤淳さんや峯尾聡吾さん）、たいへんありがたい思いをしたが、全員が残念ながらそうではない。測光的赤方偏移WGのメンバーに、時間に余裕のある大学院生は

おらず、すべてポスドク級の人々であった。人のために何かする時間があれば、自分の仕事をした年頃である。こんな仕事はなにはともあれ後回し、という扱いを受けるのは当然であった。

しかしWG代表としては何とかあまり遅くならず、測光的赤方偏移をHSCコラボレーション全体に公開しなければならぬ。ここでも自分が率先的に動くというのは実践したのだが、それに加えてメールでつきまわるといった原始的な手段にも出た。WGメンバーは非常に嫌な思いをしたと思うが、他にスマートな方法が思いつかなかったのである。われながらアイデアのないWG代表であったと反省している。このような作業において、いかに人のモチベーションをあげて仕事を手際よく行ってもらうかは、私の永遠のテーマになりつつある。難しい問題だ。

このように偉そうに書いてはいるものの、私自身が他のことで手が回らないことも多々あり、結果としてコラボレーション全体への公開が非常に遅くなってしまったことが何度かあった。申しわけない限りである。そして一番やってしまったと思ったのが、第一回全世界向けデータリリース(Public Data Release 1; PDR1)である。2017年2月に世界に向けてHSCの処理済みデータを初公開したのであるが、メインのHSCデータに加えて測光的赤方偏移も同時リリースしようとしていたところ、私一人のミスで一部の測光的赤方偏移データが間に合わなかったのである。それはその後の追加リリースで世に出るのであるが、これにはわれながらへこんでしまった。ただ、これは事前に見つけるのが非常に難しいミスであったことは、負け惜しみとして書いておく。

### 2.3 測光的赤方偏移WGの集大成

このようにいろいろあったものの、サーベイ開始前から5年以上にわたる作業の集大成として測光的赤方偏移のリリース論文<sup>2)</sup>をまとめられたのは良かったと思っている。私の個人的な苦勞話だけをつらつらと書くのも良くないので、その論

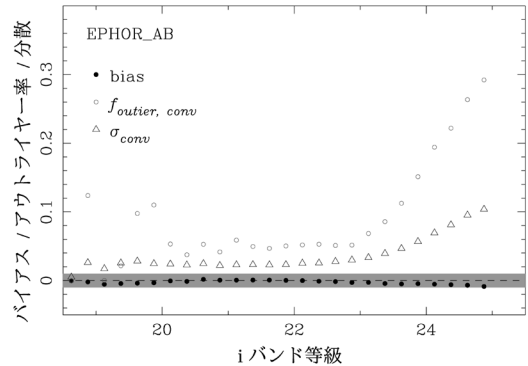


図1 測光的赤方偏移の精度を*i*-bandの明るさの関数として描いてある。正解だと思っている赤方偏移に対して、黒塗りの丸が計算した測光的赤方偏移の系統的なずれ(バイアス)、白抜き丸が測光的赤方偏移を大きく間違えた外れ値の割合(アウトライヤー率)、そして三角が分散である。*i*=24ぐらいまでであれば、だいたいどのサイエンスでもできるようないい精度である。

文から少し科学的な図を出そう。例として、峯尾聡吾さんによるコードで計算した測光的赤方偏移の精度を図1に示す。これは最近流行りの機械学習を使って計算した測光的赤方偏移で、われわれの使ったコードの中で最も良い精度を出したものの一つである。*i*<24の銀河であれば、外れ値が10%程度とだいたいどのようなサイエンスでも使えるような良い精度を達成している。余談ではあるが、この精度はプロポーザルを書く前に走らせたシミュレーションとおおまかに同じような精度になっていて、一人でこっそりどうれしく思っているところである。他のメンバーの計算した測光的赤方偏移もすべて公開されている。手前味噌だが星質量や星形成率といった物理量も出しているコードもあるので<sup>3)</sup>、ぜひご活用いただきたい。

### 2.4 Public Data Release 1

先ほどPDR1について少し触れたので、ちょっと脱線してみようと思う。PDR1は国立天文台三鷹のHSCチームの全員で一丸となってこなした大仕事で、きちんとドキュメントをそろえ、データを評価し、データベースやその他のツールを用

意して万人に使えるものを提供した、本物のデータリリースだと自負している\*1。その一環としてデータリリース論文を執筆したのであるが、これも非常に時間を要し苦勞した論文である。しかしながら、データリリースの重要性がコラボレーション内であまり認識されていないのか、その論文の100名強の共著者のうち、読んでコメントを送ってくれたのがたったX人であった。このXは具体的に書くのは憚られるが、何と1桁の数字である。さすがにそれはないのではないかと、いう気持ちは研究会の講演等で話をしてきてはいるのだが、私は一生忘れない（許さない）と思う。そんなデータリリース論文も、公開から1年少々にして早くも引用回数が100を超えている。PDR2ではデータリリース論文の重要性がもっと広く認識してもらえると良いのだが。

### 3. 輝線銀河

話を元に戻そう。

HSCサーベイの一つの特徴は、狭帯域フィルターを使った観測である。これは他のDark Energy Survey\*2やLarge Synoptic Survey Telescope\*3といった競争相手のサーベイでは行われない観測で、近傍から遠方の輝線銀河を探索するうえで非常に強力である。狭帯域フィルターは、Wide, Deep, UltraDeepと三つあるサーベイレイヤーのうち、Deep, UltraDeepでのみ使われている（詳しくは文献1を参照）。しかしながら、これらを足し合わせると20平方度以上にわたって、深い狭帯域フィルターのデータができる。今までの観測と比べて、深さ、広さともにユニークである。

林将央さんらはこの狭帯域フィルターのデータから、赤方偏移約0.4から1.5までのH $\alpha$ , [O III], [O II] 輝線を強く出している銀河のサンプルを構築した<sup>5)</sup>。図2にそれぞれの輝線銀河の空間分布

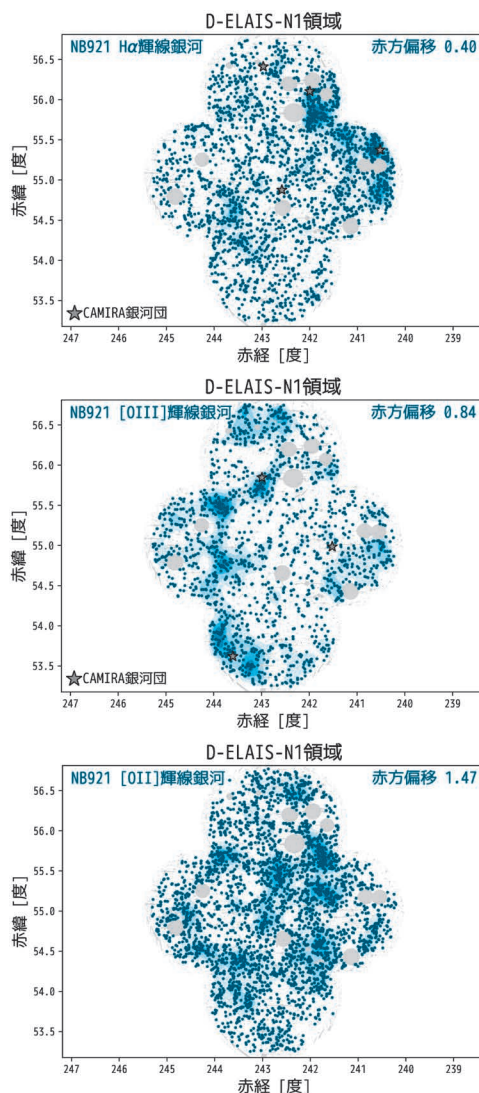


図2 ELAIS-N1領域における、H $\alpha$  (上), [O III] (中), [O II] (下) 輝線銀河の空間分布。それぞれの赤方偏移における大規模構造が見て取れる。赤い銀河の分布から得られた銀河団サンプル<sup>7)</sup>が星印で示されている。他の領域や他の輝線の図は文献5を参照。

を示す。それぞれの赤方偏移において、顕著な大規模構造が見て取れる。広い視野を観測するHSC

\*1 <https://hsc-release.mtk.nao.ac.jp/>

\*2 <https://www.darkenergysurvey.org/>

\*3 <https://www.lsst.org/>

ならではある。このような大規模構造は、銀河がその周囲を取り巻く環境にどのように影響を受けながら進化してきたのかを探る絶好のデータとなる。本稿では紹介はしないが、銀河団の稿で紹介されている小山佑世さんらによるそのような研究があり、そちらを参照されたい<sup>6)</sup>。现阶段でのサーベイ面積は16平方度であるが、今後さらに広がる予定でさらなる成果が期待される。輝線銀河ではないが、同様に銀河団銀河の性質を調べた論文も他に数編あり<sup>8),9)</sup>、そちらも是非参照していただければと思う。

さらに、狭帯域データからさまざまな輝線の光度関数を描くことができる。これは銀河の星形成活動の進化を探るうえで非常に基本的な量で、やはりHSCならではの統計を活かしたいサイエンスとなる。図3にH $\alpha$ 輝線の光度関数を示す。先行研究とよく一致した光度関数であるが、統計誤差は圧倒的に小さくなっている。とりわけ明るい輝線銀河の統計は格段に良くなった。しかし一方で、フィールドごとの光度関数のばらつきも顕著に見えていて、HSCの視野をもってしても複

数のフィールドを探索することの重要性を再確認する。宇宙の大規模構造はやはり大きい。

#### 4. Ultra Diffuse Galaxies

広帯域フィルターも負けてはいない。すばる望遠鏡の大きな口径を活かし、HSCのデータは非常に深いデータとなっている。近年、近傍宇宙で非常に淡く大きく広がった銀河(Ultra Diffuse Galaxy<sup>10)</sup>)が再発見され、大きな注目を集めているが、このような銀河もHSCが得意とするところである。

Johnny Grecoさんらはこのような淡く広がった銀河の系統的な探索の過程で、とりわけ淡く大きく広がった銀河を発見した<sup>11)</sup>。図4にその画像を示す。すぐ近くに同じような大きさの普通の銀河があるので、この銀河がどれだけ淡いかがわかるだろう。面輝度は一平方秒角当たり $g \sim 26.4$ などで、浅い観測での検出は難しいと思われる。きちんと理由を聞いたことがないが、この銀河はSumo Puffと名づけられている。おそらくは非常に大きく淡く広がっていることをイメージしたのだと思われる。この銀河がもともと淡く広がった銀河なのか、それとも潮汐相互作用の結果こうなったものなのか、今のところはわからないが、

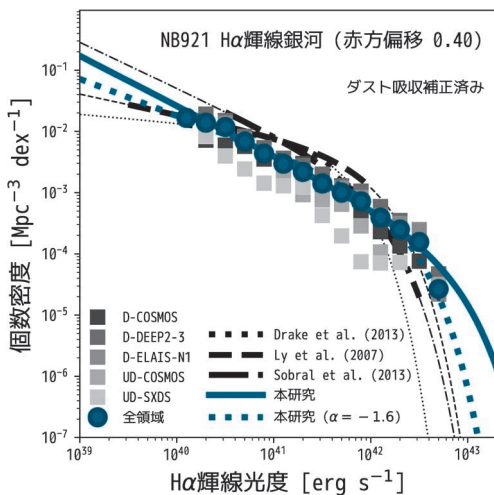


図3  $z=0.4$ におけるH $\alpha$ 光度関数<sup>5)</sup>。フィールドごとのばらつきが、この広さを掃いたとしてもまだ顕著に見えている。明るいH $\alpha$ 銀河の統計は飛躍的に良くなった。

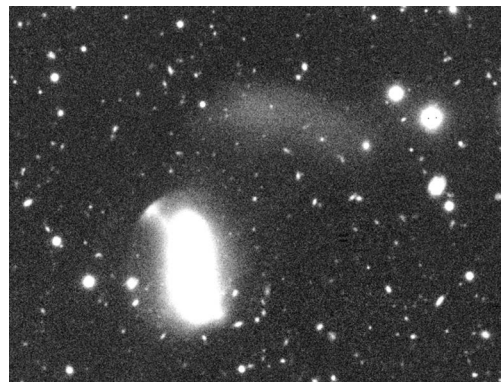


図4 Sumo Puffと名づけられた、大きく淡く広がった銀河(中央やや上)の*i*-band画像。印刷でうまく写らなければ、それだけ淡い天体だということである。

このような天体がHSCで多く発見され、現在分光観測も進んでいる。こういった銀河の起源を探るうえで、HSCが重要な貢献をできるのかもしれないと期待している。

またPASJ特集号の論文ではないのでここでは詳細に述べないが、Sumo Puffのある意味対極にあるような、超巨大銀河の形成を探る研究もSong Huangさんらを中心に進められている<sup>12)</sup>。巨大銀河は銀河の衝突合体が成長を促したとされており、その情報は淡く広がった銀河のハローにあると考えられている。そこもまたHSCが威力を発揮するテーマで、今後の進展が楽しみである。

さらにもう一つの発展として、同様に淡く広がった銀河の潮汐ストリームなどから、銀河の衝突合体が銀河進化に及ぼした影響を調べるプロジェクトも進んでいる。巨大銀河ほど衝突合体が多かったという現在の銀河形成シナリオを観測的に定量評価しようという試みである。もともとは普通のサイエンスプロジェクトとして始まったのであるが、今まで日本ではあまり行われてこなかったcitizen science（市民天文学）プロジェクトへと生まれ変わりつつある。現在、国立天文台天文情報センターの白田-佐藤さんらを中心に、プロトタイプの作成や科学館での実証実験をしているが、近い将来に一般の人々を巻き込んだサイエンスへ発展させる予定である。こちらもご期待いただきたい。

## 5. 今 後

HSCサーベイは計画の3分の2を終えたところで、ラストスパートに入っている。2018年前半の悪天候や、火山活動による地震などで、ここに来て大幅にペースダウンしてしまっているが、これにめげず最後まで駆け抜けたと思っている。ここで紹介した比較的近傍の銀河サイエンスは、サーベイの広さと深さを活かした面白いサイエンスで、今後も大きく発展するだろう。私は中間赤方偏移銀河進化WGと測光的赤方偏移WGの代

表は引退したが、私がつけてきた僅かばかりの流れや勢いを現在の代表がどんどん大きくしてくれることを期待してやまない。これで少しは肩の荷が下りて楽になれると思っていたが、次は小宮山編集長とともに天の川銀河WGの代表をすることになってしまった。人生甘くない。

読み返してみるときちんとしたサイエンスの紹介になっていないうえに、少々脈絡のない文章になってしまったのだが、どうかご容赦いただきたい。パソコンに向かいながら現在まで至る苦勞の数々を思い出してしまったのである。真っ暗になった機内で書いたからかもしれない。

## 参考文献

- 1) Aihara, H., et al., 2018, PASJ, 70, S8
- 2) Tanaka, M., et al., 2018, PASJ, 70, S9
- 3) Tanaka, M., 2015, ApJ, 801, 20
- 4) Aihara, H., et al., 2018, PASJ, 70, S4
- 5) Hayashi, M., et al., 2018, PASJ, 70, S17
- 6) Koyama, Y., et al., 2018, PASJ, 70, S21
- 7) Oguri, M., et al., 2018, PASJ, 70, S20
- 8) Jian, H.-Y., et al., 2018, PASJ, 70, S23
- 9) Nishizawa, A. J., et al., 2018, PASJ, 70, S24
- 10) van Dokkum, P. G., et al., 2015, ApJ, 798, L45
- 11) Greco, J. P., et al., 2018, PASJ, 70, S19
- 12) Huang, S., et al., 2018, MNRAS, 475, 3348

## HSC Science on Galaxies at Intermediate Redshifts

Masayuki TANAKA

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

Abstract: We present highlights from the low-intermediate redshift galaxy science from the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program.