

# Suprime-Cam が見た近傍銀河の姿

小宮山 裕

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: komiyama@subaru.naoj.org



2017年5月、Suprime-Cam（シュプリーム・カム）は最後の観測を終え、18年間の活躍に幕を下ろしました。数々の分野で成果を上げてきたSuprime-Camは、見掛けの大きさが大きい天体で構成される近傍銀河分野でも、その広い視野と良好な星像を活かして、多くの近傍銀河の姿を明らかにしてきました。本稿ではSuprime-Camが見た近傍銀河・近傍宇宙の姿を振り返ることで、開発初期から20有余年をともに歩んできた“友”への送る言葉としたいと思います。

## 1. はじめに

このぼんやりと白い銀河を

大きないい望遠鏡で見ますと、

もうたくさんの小さな星に見えるのです。

ジョバンニさんそうでしょう\*1

宮沢賢治が銀河鉄道に乗って星界に旅立ってから67年—Suprime-Camが完成し、共同利用開始が目前に迫ってきた2000年の春、観測装置製作グループに与えられた保証時間（Guaranteed Time）に私が提案したのは銀河を恒星に分離して観測できる局所銀河群の矮小銀河の観測でした。そこからSuprime-Camと近傍銀河と私の関係が始まったのです。当時の私は、Suprime-Camの前身であるモザイクCCDカメラ<sup>1)</sup>で撮られたかみのけ座銀河団に所属する矮小銀河の観測研究で学位を取得した直後でした。銀河というものは

点光源ではない輝度分布をもった天体であると学んできた私が、銀河というものを点光源である恒星の集合体としてとらえる（いうならば星の研究をするような）観測提案を行うようになったのですから、そこにはそれなりの理由があるのです\*2。

さらに時代を遡り1997年の夏の京都、国際天文学連合（International Astronomical Union; IAU）の総会にかみのけ座銀河団の矮小銀河の表面測光の結果をもってノコノコと出かけた私は、ハッブル宇宙望遠鏡（Hubble Space Telescope; HST）の成果に思いっきり衝撃を受けたのでした。HSTの撮像データから局所銀河群の矮小銀河を恒星に分離して測光し、得られた色等級図を恒星進化理論から導かれる色等級図と比較することによって銀河の進化史を解き明かす一局所銀河群の矮小銀河の進化史が手に取るように示されたEva K. Grebelさんの美しい発表<sup>2)</sup>は、銀河の色指数（カラー）\*3しか進化史に関する情報をもたないもの

\*1 宮沢賢治『銀河鉄道の夜』より。

\*2 モザイクCCDカメラの近傍銀河団の観測で育った岡村定矩先生の門下は、超新星（土居守さん・安田直樹さん）、遠方銀河（嶋作一大さん・柏川伸成さん）など別分野への進展を目指したことや、有本信雄さん・児玉忠恭さん・森正夫さんなど銀河化学進化研究を専門としていた方々が私の周りに多かったという「環境効果」が大きく効いていたとも思います。

\*3 モザイクCCDカメラの観測から求まるのは銀河全体を積分した色指数がメインで、頑張って銀河内部の色分布を求めたのがやっとだったのです。

の、なんとかしてかみのけ座銀河団の矮小銀河の形成進化史に迫ろうとしていた私を打ちのめすには十分すぎるものでした。まさに、「大きないい望遠鏡」で見た銀河は全く違うものとして観測されるということをジョバンニさんと同じく実感したのでした。

こうしてすっかり物理に根差した厳密で美しい恒星進化理論とその応用としての銀河進化研究に魅了された私は自らその研究ができないだろうかと考えてみたのです—私たちはすばる望遠鏡と Suprime-Cam という新たな「大きないい望遠鏡」を使ってユニークな観測ができるようになる—これが唯一の希望\*4。Suprime-Cam の視野は HST の約 100 倍もあり、基本的に見掛けの大きさが大きい近傍銀河の研究には有利なこと、さらにすばる望遠鏡の集光力と良好な星像を組み合わせれば、他の地上望遠鏡では達成できないレベルで銀河を恒星に分離した観測を実現でき、HST に迫るユニークな結果を生み出せるに違いない—そう考えて Suprime-Cam が完成したときの観測計画を練り始めたのです。こうして3年間の臥薪嘗胆を重ね、捲土重来を期したのが Suprime-Cam による局所銀河群銀河の観測提案だったのでした\*5。

ということで Suprime-Cam の完成によって近傍銀河の研究に深く関わるようになった私でしたが、多くの共同研究者に恵まれて銀河系から近傍銀河団まで、Suprime-Cam によるさまざまな近傍銀河の研究に携わることができました。本稿では Suprime-Cam によって行われた近傍銀河の観測研究の代表的な例を紹介し、Suprime-Cam の見た近傍銀河の姿を振り返っていこうと思います。なお、多くの観測例を取り上げることに努め

ましたが、必ずしもすべての観測を網羅できているものでないこと、また、各々の研究の詳細までには踏み込めていないこともご了解いただきたいと思います。

## 2. 銀河系

あいつなんか あいつなんか  
銀河系まで 飛んでいきゃいいのに\*6

2000 年代にサーベイが本格化したスローン・デジタル・スカイ・サーベイ (Sloan Digital Sky Survey; SDSS) によって銀河系の研究、特に銀河系のハローの研究は大幅に進展しました (例えば文献<sup>3), 4)</sup> など)。これは、希薄なハローに存在する恒星をとらえるためには広い視野が必要であり、SDSS が 10,000 平方度という全天の 4 分の 1 にも及ぶ広い視野をそれまでより 2-3 等級深く観測したことが大きかったのです。このようなか、広視野とはいえ 0.25 平方度しか視野をもたない Suprime-Cam は決して銀河系研究に適した観測装置とは言えません。では、どのような観測を行い、銀河系の姿に迫ってきたのでしょうか？

一つのカギはマウナケアとすばる望遠鏡の組み合わせによってもたらされる良好な星像、つまり解像度にあります\*7。数年の時間間隔がある同領域の二つの画像を見比べれば天球面上での移動速度が速い星を検出でき、固有運動情報を得ることができるのです。これら移動速度が速い星を選ぶことで太陽など銀河回転に乗ったディスク星ではなくハロー星など特殊な星をサンプルすることができる—このような考えのもと、Michael W. Richmond さんらはすばる深撮像領域 (Subaru

\*4 もちろん分光観測とか別の方法もあったでしょうが、Suprime-Cam を製作することに大学院時代の半分の時間を投入した人間としては Suprime-Cam で勝負したいと思った次第です。

\*5 とはいえ、HST の成果は偉大な金字塔であり、Suprime-Cam でそれを凌駕することはなかなか難しいことです。

\*6 キャンディーズ『銀河系まで飛んで行け!』より、共同研究者であり近傍銀河分野の偉大な先達である千葉柁司さんのテーマソング。

\*7 最良で半値幅 0.4 秒角、平均 0.7 秒角という像が得られています。

Deep Field; SDF) とすばる XMM 深撮像領域 (Subaru XMM-Newton Deep Field; SXDF) の5-6年の時間間隔をもつデータからそれぞれ99個、69個の有意に移動している(毎年0.025-0.186秒角)星を検出しました<sup>5), 6)</sup>。移動速度と星の色指数の解析からこれらの星は白色矮星やハローの主系列星が主なものの、ハローの金属量の低い準矮星 (Subdwarf) と考えられるものや非常に晩期型の星 (M9またはL2のスペクトル型をもつ矮星) まで含まれていることがわかったのです。毎年0.025秒角という移動量は5年で0.125秒角に当たり、これはSuprime-Camのピクセルサイズの約半分に当たります。マウナケアとすばる望遠鏡の組み合わせがなかったらこのような微小な移動量の検出は難しかったです。SDSS等と比較すれば非常に視野は狭いのですが、ペンシルビーム的にハロー星を調べられたことはたいへんユニークであったと言えるでしょう。また、Richmondさんは固有運動情報を使わず星の色指数のみを使ったハロー星の研究も行っています<sup>7)</sup>。

もちろん、銀河系内の個別天体を深く撮像することによって新たな知見も得られています。例えば、惑星状星雲M 57の周囲に見つかった花びら状に二重に広がった淡い構造の発見<sup>8)</sup>(本誌表紙画像参照)、球状星団NGC 2419の赤色巨星分枝星は異なる二つの星種族から構成されていることの発見<sup>9)</sup>などを取り上げることができます。これらの観測はSuprime-Camの広視野深撮像能力に加えて狭帯域フィルターを組み合わせることによって実現されたものです。また、Helmut JerjenさんらはSDSSによっておとめ座方向に発見された恒星密度超過領域の観測を行い、そこでの星種族の性質・距離をいて座矮小銀河による恒星

ストリーム<sup>\*8</sup>と比較しました。星種族の類似性はあるものの距離の相違性から、おとめ座超過領域はいて座矮小銀河起源ではないことを指摘しています<sup>10)</sup>。彼らの観測ではSuprime-Camの深撮像能力を生かして転向点よりも暗い主系列星を多数観測できたことが本質的でした。

以上のようにSuprime-Camは最近傍の銀河である銀河系についても新たな切り口からその姿を明らかにしてきたのです。

### 3. 局所銀河群銀河

銀河をはなれ イスカンダルへ

はるばるのぞむ 宇宙戦艦ヤマト<sup>\*9</sup>

1章で述べたように、局所銀河群銀河の研究は銀河を恒星に分離して観測できるハッブル宇宙望遠鏡の登場により飛躍的に進展しました。そのような状況でSuprime-Camはどのような観測データを提供するのでしょうか? 図1にHSTとSuprime-Camによって得られたしし座II矮小楕円体銀河 (Leo II) の色等級図を比較してみました。同等の積分時間では明らかにHSTの方が深い観測データを得られるのですが、Suprime-Camは広い視野を見ているため図にプロットされる恒星の数が多くなり、色等級図上の特徴をより鮮明にとらえることができるようになります。これは裏を返せば、銀河内部での場所による星種族の相違に迫れることを意味します。また、視野の広さはHSTでは観測効率の悪い銀河周辺部などの探査に威力を発揮することにもなるわけです。

研究例の一つとして、私の思い出と絡めて矮小不規則銀河NGC 6822を取り上げます。この銀河は銀河本体(約15分角)の周りに約1度に渡っ

\*8 銀河系を周回する衛星銀河や球状星団の中には銀河系の強い潮汐力を受けてバラバラに破壊されつつあるものがあります。このような過程にあるものは恒星がその軌道上にばらまかれ、帯状(ストリーム状)に分布するので「恒星ストリーム」(Stellar Stream)と呼ばれています。いて座ストリーム (Sagittarius Stream) は銀河系周りの恒星ストリームの中で最大のものです。

\*9 『宇宙戦艦ヤマト』主題歌より。イスカンダルは局所銀河群銀河である大マゼラン雲にある惑星なのだそうです。

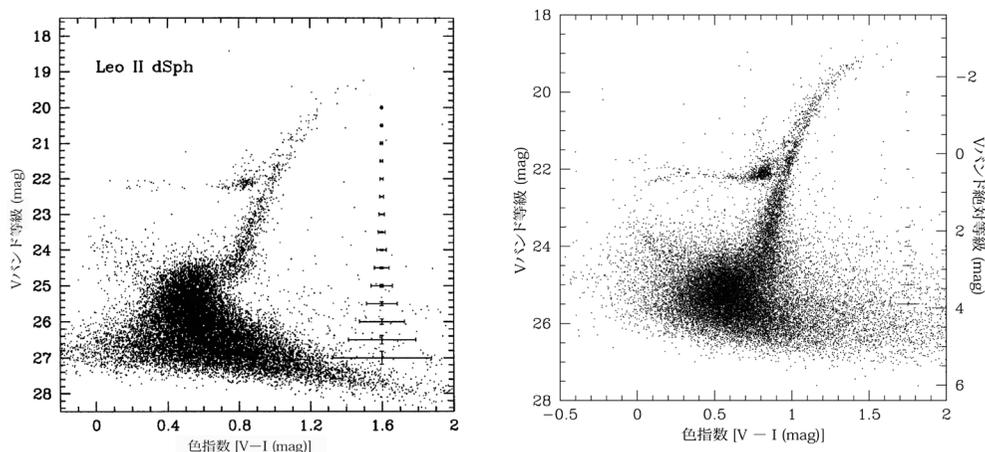


図1 しし座II矮小楕円体銀河 (Leo II) の色等級図の比較. 左がHST<sup>11)</sup>, 右がSuprime-Camによるもの<sup>17)</sup>. 積分時間の違い (HST=4,800秒, Suprime-Cam=3,900秒) を考慮してもHSTのほうが深いのですが, Suprime-Camは広い領域をカバーしているため星の数が多く, 色等級図上の特徴がよくわかります.

て広がった中性水素ガスをまとった銀河であることが知られていました. 星の素となる水素があれば星は生まれるはず—そう考えてこの中性水素雲に付随する星を探そうとする観測がいくつか行われてきたのですが, それまで有意な検出例はありませんでした. そこでSuprime-Camの登場です. 観測から得られた色等級図にははっきりと年齢数億歳以下の若い星の存在が示され, しかもそれは中性水素雲の分布を忠実になぞっていたのです<sup>12)</sup>. つまり, NGC 6822を取り巻く中性水素雲の中でも星が生まれることが分かり, 銀河の星生成活動の新たな現場を示すことができたのです.

私はこの結果をもってこれまたノコノコとローウェル天文台で開催された研究会に参加しました. この研究会は局所銀河群銀河の研究を牽引してきたPaul W. Hodgeさん<sup>\*10)</sup>の業績を記念して開かれた研究会だったのですが, そんなことはつゆ知らずに参加して, なんかいろいろ詳しく聞いてくる紳士がいるなあと思ったらそれがHodge

さんだったという研究会でした. 研究会のサマリーはもちろんHodgeさんがまとめたのですが, NGC 6822についてのSuprime-Camの結果は電波干渉計による観測の結果<sup>13)</sup>と合わせて大きく取り上げてくれたのです. そのとき初めて1997年の京都の借りを返せたような気持ちになったものです. ありがとう, Suprime-Cam.

その他の局所銀河群銀河の観測例も多数ありますが<sup>14)-21)</sup>, Suprime-Camの観測によってわかってきたことを大胆にまとめてしまうと, 以下の2つに集約されます.

- 小さな系ゆえに単純だろうと考えられていた矮小銀河の構造も意外と複雑で, 広がったハロー成分やより小さなサイズの構造が銀河外縁部に存在することが多くの銀河で確認されました.
- 銀河周辺部に比べて中心部にはより若い, あるいは金属量の高い星種族が存在していて, 銀河中心部ではより長く星生成活動が続いて

<sup>\*10)</sup> 京都のIAU総会でGrebelさんが見せていた印象的なPopulation Boxという星生成史を示す時間・金属量・星生成率の3次元空間図はHodgeさんの発案したものでした. ちなみに, Hodgeさんのお気に入り銀河はNGC 6822のようで, Hodgeさんの著書の表紙に採用されています (Suprime-Camの画像ではないですが).

いたことが示唆されます。

もちろんこれらに加えて、それぞれの銀河に個別の特徴も明らかにしてきました。

また、SDSSによって多数発見されてきた銀河系の衛星銀河である非常に暗い矮小銀河(Ultra Faint Dwarfs; UFD)の性質の解明にもSuprime-Camは大きく貢献しました<sup>22)–26)</sup>。SDSSのデータには明るい赤色巨星分枝星が数十個程度しか写っていないためUFDの特徴を調べるためには不十分であり、より深い撮像データを取得し解析に使える星の数を稼ぐ必要があるからです。広い視野と深撮像能力を併せ持つSuprime-Camはまさにそのような用途にはうってつけであり、多くのUFDの構造パラメーターや星種族の研究に大きな力を発揮したのです。日本では岡本桜子さんがこの研究を進めて成果を上げました。

さらに、局所銀河群3番目の大銀河であるM33の全面マッピングもSuprime-Camによって行われました。Suprime-Camをもってしても8ポイントングが必要なのですが、銀河中心部から外縁部まで均質なデータを得ることができるため、多くの研究に利用できるものとなっています<sup>27), 28)</sup>。また、すばる望遠鏡のホームページ<sup>\*11</sup>からはM33を自由自在にパン・ズームして見ることができます。M33を隅々まで見てみると、興味深い天体が見つかるかもしれません。

#### 4. アンドロメダ銀河 (M31)

アンドロメダのくもは

さかなのくちのかたち<sup>\*12</sup>

我々から約700 kpc (230万光年)先にあるアンドロメダ銀河(M31)は銀河系とともに局所銀河群を構成するメンバーの2トップであり、古

くから多くの観測が行われてきました。M31は銀河をその外側から観測することができるという点で銀河系とは相補的な存在であり、渦巻銀河の形成進化を探る上では重要な銀河であり続けてきました。当然ながら、その見掛け上の大きさからもSuprime-Camの格好のターゲットとなるわけです。銀河系で見ついていた恒星ストリームがM31で見つかればそれらを俯瞰してとらえることができ、その数や軌道などが手に取るようにわかり、階層的構造形成理論による銀河形成を直接検証できる場となる—当時、国立天文台で爪を研いでいた千葉柁司さんの頭の中にはこのようなアイデアがあり、その観測計画はSuprime-Camの完成まで温められていたのですが……。

2001年、Rodrigo A. Ibataさんらの観測によりM31のハロー南東部に顕著な恒星ストリームが発見されたのです<sup>29), \*13</sup>。金属量が低く古い赤色巨星分枝星は特徴的な色指数・絶対等級を持つことから、色等級図からM31に所属する赤色巨星分枝星を選び出すことができ、それらの空間分布を描くことができるわけです。Giant Streamと呼ばれるようになるこの恒星ストリームはその表面輝度が比較的明るかったため(図2参照)、主鏡口径2.5 mのアイザック・ニュートン望遠鏡(Isaac Newton Telescope; INT)を使ったM31南東部の一部の観測データからも何とか発見することができたのです。Suprime-Camを使ってより深いデータが得られればさらに表面輝度の低い恒星ストリームも検出することができる—こうしてM31のハローの観測を提案することになったのです。しかし、M31のハローは“さかなのくちのかたち”として形容される銀河本体を超えてあまりにも広大であり、Suprime-Camをもってしてもその全容を捉えるには観測時間が十分ではあ

\*11 [https://www.naoj.org/Pressrelease/2009/01/22/j\\_index.html](https://www.naoj.org/Pressrelease/2009/01/22/j_index.html)

\*12 宮沢賢治『星めぐりの歌』より。

\*13 このとき、千葉さんの頭の中にはキャンディーズの『銀河系まで飛んで行け!』がこだましていたに違いないと想像しています。

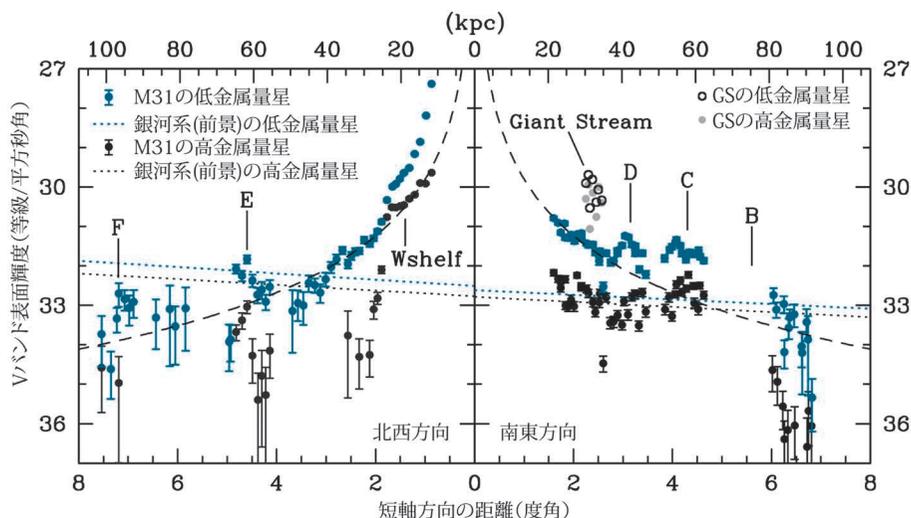


図2 色等級図から選ばれたM31に所属する(主に)赤色巨星分枝星の短軸方向の表面輝度プロファイル<sup>35)</sup>。赤色巨星分枝星を金属量の低いもの(青:  $-2.31 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.71$ )と高いもの(黒:  $-0.71 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.0$ )に分けて表しています。銀河本体(短半径で約0.3度角)より十分外側のハローは破線で表される滑らかなプロファイルに所々に恒星ストリーム(図中、英字ラベルで示した部分)が載っているようなプロファイルで表されることが分かります。Ibataさんらによって発見されたGiant Stream(GS; 白抜き丸と灰色丸)や銀河系の星の表面輝度(青点線と黒点線)も同時にプロットしてあります(画像提供: 田中幹人氏)。

りません。そのため、M31の短軸方向を連続的に観測する計画にせざるをえませんでした。その後、M31のハローの研究ではIbataさんらのグループと双壁をなすカリフォルニア大学リック天文台のPuragra Guhathakurtaさん率いるグループとの共同研究が始まり、千葉さんを主提案者とする観測提案が採択され観測が実行されたのは2004年のことでした<sup>\*14</sup>。

しかし、Ibataさんのグループも決して手をこまねいていたわけではなく、INTによる観測をさらに推進するとともに<sup>31), 32)</sup>、主鏡口径3.6mのカナダ・フランス・ハワイ望遠鏡(Canada France Hawaii Telescope; CFHT)と広視野カメラMegaCamを使ったさらなる広域サーベイを実行し、新たな恒星ストリームやM31の衛星銀河の発見を重ねていき、M31のハロー構造が次々と明らかにされていったのです<sup>33), 34)</sup>。Suprime-Camは

世界最高級のサーベイ能力をもつカメラだと自負していましたが、このときは観測時間を投入しなければ結果が出てこないことに歯がゆい思いも同時にもったものでした。

さて、2008年に3夜の追加観測(主提案者: 田中幹人さん)を加えて、Suprime-Camによる観測をまとめたものが図2になります<sup>35), 36)</sup>。この図は色等級図から選ばれたM31に所属する(主に)赤色巨星分枝星の短軸方向の表面輝度分布を示したものです。銀河の外側に向かって滑らかに暗くなっていく表面輝度分布の中にいくつかの恒星ストリームがピークとして見られます。半径8度という広い領域に渡り、33等級毎平方秒角という非常に暗い表面輝度まで探査されていることは特筆に値します。夜空の明るさ(表面輝度)は大抵20-22等級毎平方秒角ですので、空の明るさよりも10,000倍も暗いものを見ていることにな

\*14 ちなみに観測夜はちょうどペルセウス座流星群の極大日と重なっていたため、画像には時たま流星が写っていたのです。副産物として流星の論文が家正則さん主導で書かれたのでした<sup>30)</sup>。

るわけなのですが、このような低表面輝度は星を個々に検出することで迫ることができるのです。個々の星という意味では前景にある銀河系の星のうち、たまたま色等級図上でM 31の赤色巨星分枝星と同じ場所に位置するような星の混入も問題になってきます。図から見て取れるように混入してくる銀河系の星の表面輝度も同程度であり、33等級毎平方秒角は赤色巨星分枝星をプローブとした手法では（少なくともM 31では）ほぼギリギリということになります。Suprime-Camの観測データによってM 31のハローの短軸方向プロフィールはその到達最深部まで探ることができたとと言えます。

さて、ここまではM 31のハローの話をしてきたわけですが、M 31本体そのものについてもSuprime-Camによって新たな知見を得ることができます。そのような研究の一例として、小平桂一さんが主導して行ったコンパクト星団の一連の研究を取り上げることができます<sup>37)-40)</sup>。Suprime-Camの高空間分解能を生かすことにより、それまでは球状星団だと思われていた星団の多くがその構造から散開星団と判明するなどコンパクト星団の素性に迫りました。またH $\alpha$ 線を透過させる狭帯域フィルターを用いた観測データからコンパクト星団の星生成活動についてもまとめられており、M 31の星団やディスクの研究に貴重なデータを供しています。

小平さんは論文発表当時、総合研究大学院大学の学長を、その前は国立天文台長を務めておられました。そのような重責を背負った多忙な日々の中でも研究を忘れずに、天文学者として新しい価値を生み出そうとするその「学者魂」に多くの人が深い感銘を受けました。

## 5. 近傍銀河

ぼくらは銀河の星つぶだよ

遙かな銀河の星つぶだよ<sup>\*15</sup>

局所銀河群を超えると次の銀河群は約3 Mpc以遠にあるため、銀河のみかけの大きさが小さくなり、特に銀河本体を星つぶに分離する観測は空間分解能・到達等級ともになかなか難しくなってきます。そのため、恒星がまばらで観測がしやすい銀河外縁部やハロー構造の研究や、球状星団やH II領域など明るい天体を手掛かりとした観測研究が増えてきます。例えば、銀河外縁部やハローの観測研究例として、Michael K. BarkerさんらによるM 81<sup>41)</sup>やNGC 2403<sup>42)</sup>、田中幹人さんらによるNGC 55<sup>43)</sup>、Caroline FosterさんらによるNGC 4651<sup>44)</sup>の観測例を挙げることができます。これらの観測により、バラエティーに富む近傍銀河外縁部の姿が明らかにされました。また、幸田仁さんらによるM 83の観測では、狭帯域フィルターを用いてXUVディスク<sup>\*16</sup>のH II領域のH $\alpha$ 輝線強度を測定し、紫外光強度と比較することにより初期質量関数に制限を与えています<sup>45)</sup>。球状星団を手掛かりとする研究としては、Christina BlomさんらによるNGC 4365の研究<sup>46)</sup>やJean P. BrodieさんらによるNGC 3115の研究<sup>47)</sup>が挙げられます。また、幸田仁さんらは近傍銀河NGC 6503のデータから衛星銀河を発見し、その性質を詳細に調べています<sup>48)</sup>。このようにSuprime-Camは恒星のみならず球状星団やH II領域などさまざまなプローブを使った手法により近傍銀河の観測研究を支えてきました。

その中で、特筆したいのはDavid Martínez-DelgadoさんらによるNGC 4449の観測です<sup>49)</sup>。この銀河は大マゼラン雲と同規模で大きめの矮小銀河

\*15 原田郁子『銀河』より。

\*16 紫外線宇宙望遠鏡 (Galaxy Evolution Explorer; GALEX) によって発見された、銀河本体のディスクより広がった紫外線で観測されるディスク。GALEXの観測により多くの銀河がXUVディスクを持つことが分かってきました。

なのですが、その外縁部には何やら淡い構造が存在することが知られており、これが恒星ストリームではないかと言われていました。そこで登場したのがSuprime-Camというわけです。Suprime-Camの観測によりこの淡い構造は星の集まりであることが確認されたのです。ひとつび星に分離されれば赤色巨星分枝の先端の明るさ<sup>\*17</sup>からこの淡い構造までの距離を推定することができ、その距離はNGC 4449とほぼ同じことからNGC 4449との相互作用が示唆され、その引き延ばされた形状から恒星ストリームとみなしてよさそうなことが確認されたのです。つまり、大きな矮小銀河であるNGC 4449の潮汐作用を受けてさらに小さな矮小銀河が破壊され飲み込まれつつある姿を初めて捉えることができたのです。そして、さまざまな方法によりストリームの質量も推定され、NGC 4449に対して1/50程度の星質量（と1/10程度の力学質量）であろうことが指摘されています。

標準的な構造形成理論に従えば、このような構造の合体集積は小さな構造でも起こっていることが示唆されていましたが、そのような観測例はそれまでありませんでした。Suprime-Camの観測により、実際に矮小銀河のスケールでも合体集積が起こっていることを観測的に鮮明に示したのは顕著な成果であったと言えるでしょう。

## 6. 近傍銀河団・銀河群

*I miss you, I miss you*

1億光年のはてにもとどいて<sup>\*18</sup>

われわれに最も近い銀河団であるおとめ座銀河団はわれわれから約17 Mpc、かみのけ座銀河団は約100 Mpcとかなり距離があるため、銀河を恒星に分離して観測することは極めて難しくなりま

す。そのため、球状星団や惑星状星雲、H II領域など明るい天体を手掛かりとした観測研究や銀河そのものの統計的研究が行われてきています。例えば、田村直之さんらの研究ではSuprime-Camの観測データからおとめ座銀河団領域の球状星団を検出し、球状星団の光度関数を調べるとともに、その空間分布から球状星団のほとんどは巨大楕円銀河（この研究の観測領域ではM 87とNGC 4552）に付随していて、銀河間球状星団（Intra-Cluster Globular Clusters）とされるものは少ないことを指摘しています<sup>50), 51)</sup>。また、岡村定矩さんらの一連の研究では、おとめ座銀河団の赤方偏移に合わせた [O III], H $\alpha$ 線を透過させる狭帯域フィルターを用いておとめ座銀河団領域の惑星状星雲を検出し、銀河に付随していない惑星状星雲から淡い光成分（Diffuse Light）として観測される銀河間星成分の光度を見積もり、それが銀河団銀河の総光度の約10%であることを示しました<sup>52)-55)</sup>。

また、銀河そのものの統計的研究として王道である光度関数も、Neil Trenthamさんらによる近傍銀河群の研究<sup>56)</sup> や山野井瞳さんらによるうみへび座銀河団<sup>57)</sup> やかみのけ座銀河団の研究<sup>58)</sup> として進められてきました。Suprime-Camにより絶対等級-10等級という深さまで研究が押し進められ、光度関数に見られる特徴的なへこみや環境依存性などが指摘されています。

また、近傍銀河団といったら八木雅文さん吉田道利さんらによるH $\alpha$ 線を使った一連の研究を抜きには語れません。H $\alpha$ 線を透過させる狭帯域フィルターを用いて銀河から放出される水素ガスのH $\alpha$ 輝線を検出することによって、銀河団という高密度環境下での激しいガス剥ぎ取り過程を明らかにしてきたものです<sup>59)-63)</sup>。剥ぎ取られたガスから新たに星が生まれているもの、ひたすら

<sup>\*17</sup> Tip of Red Giant Branch (TRGB) と呼ばれています。TRGBの絶対等級はある程度以上の年齢をもつ星種族については金属量にあまりよらず、ほぼ一定の値を取ることが知られており、TRGBの見掛け等級からその天体までの距離を求めることができます。

<sup>\*18</sup> Salyu『飽和』より。本稿で扱っている近傍銀河団はこのオーダーの距離のものです。

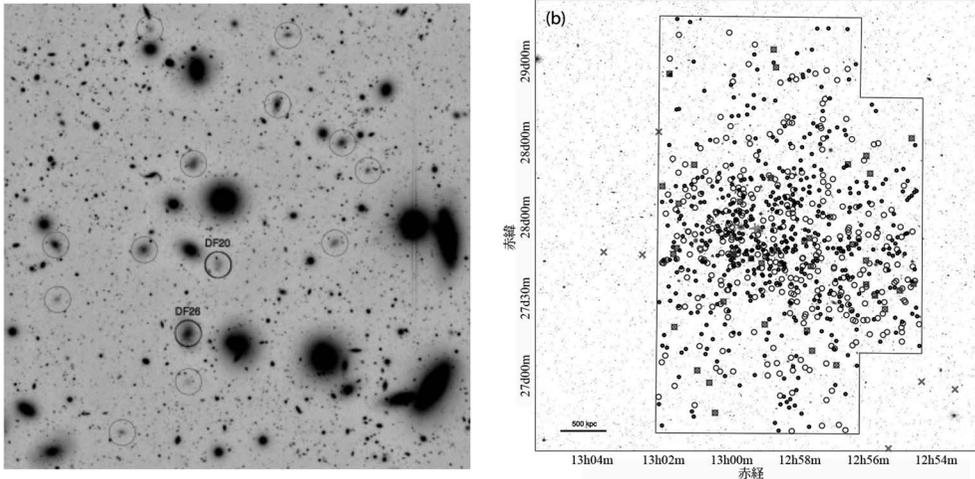


図3 (左): かみのけ座銀河団中心部の Suprime-Cam 画像. UDG (丸で囲まれたもの) が非常に淡い銀河であることがわかったとともに van Dokkum さんらが見つけたもの (DFの表示があるもの) と同程度からさらに暗いものも Suprime-Cam の画像からは見つかってきています. (右): UDG の空間分布図. van Dokkum さんらによる UDG サンプル (×印) ではよくわからなかったが, Suprime-Cam サンプル (丸印: 銀河系に匹敵する大きなサイズのものは大きな丸, 小さなものは黒丸で表してあります) は数が増えたために銀河団に対して中心集中した分布をしていることが明らかになり, UDG は銀河団由来のものであることがわかってきたのです (画像提供: 八木雅文氏・幸田仁氏).

真っ直ぐに伸びているもの, 等々その性質はバラエティーに富んでいることを示しています.

さらに, 本特集の吉田道利さんの記事<sup>64)</sup>にもあるように, すばる望遠鏡のアーカイブデータの中では Suprime-Cam のデータの利用率が圧倒的であり, 多くの論文がアーカイブデータから生み出されています. 一つの例としてかみのけ座銀河団の超暗黒銀河 (Ultra Diffuse Galaxies; UDGs) の研究例を取り上げましょう. この新たなカテゴリーの銀河は, 2015年の Pieter G. van Dokkum さんらによるかみのけ座銀河団の観測論文によって一躍着目されるようになりました<sup>65)</sup>. 銀河系に匹敵する大きさをもちながらその明るさは非常に暗い淡い銀河が, 銀河団という重力作用的に過酷な環境下で破壊されずに多数生き残っているためには暗黒物質が支配的な銀河でなければならぬ—このような興味深い点が指摘され, UDGs は

一躍研究の最前線に上がってきたのです.

この状況を受けて幸田仁さんらはすばる望遠鏡のデータに思い当たります. van Dokkum さんらのデータは市販の望遠レンズ<sup>\*19)</sup>を装着した多数のカメラ・アレイによって得られたデータであり, 8.2 m のすばる望遠鏡のデータであればその観測データの質は格段に良くなります. Suprime-Cam によって撮られたかみのけ座銀河団の広域データがアーカイブされていたため, UDG サンプルを一気に 854 個にも増やすことができ, UDGs が銀河団に起因するものであることを明確に示すことができたのです<sup>66), 67)</sup> (図3). Suprime-Cam のデータにより, UDG についてさまざまな統計的な議論ができるようになったとともに, van Dokkum さんらの観測ではわからなかった個々の UDG の形状などについても議論ができるようになった画期的な成果だったと言える

\*19) キヤノン社製の 400 mm f/2.8 レンズ. 奇しくも Suprime-Cam 用の主焦点補正レンズと同じキヤノン社製です.

でしょう。

その他、紹介できなかった近傍銀河群、銀河団についての研究<sup>68), 69)</sup> もありますし、本Suprime-Cam特集では詳しく紹介できなかった児玉忠恭さん<sup>70)-72)</sup>、仲田史明さん<sup>73), 74)</sup>、田中賢幸さん<sup>75)-78)</sup>、小山佑世さん<sup>79), 80)</sup>らによる近傍よりははるかに遠い中間赤方偏移帯の銀河団研究<sup>\*20</sup>も多数あることを、参考文献を挙げることで紹介に代えさせていただきます。

## 7. Suprime-Cam と広報

天文を 考え顔の 蛙かな<sup>\*21</sup>

Suprime-Camと近傍銀河のタグはすばる望遠鏡の広報にも大変役立ってきました。研究成果発表に加えて、定期的に近傍銀河（銀河系内天体も含む）の画像が公開されてきており、かに星雲（M 1）、オメガ星雲（M 17）、ひまわり銀河（M 63）、ろくぶんぎ座 A（Sextans A）、NGC 2403、NGC 6946、ステファンの五つ子（Stephan's Quintet: HCG 92）などさまざまな近傍銀河がすばる望遠鏡のホームページ<sup>\*22</sup>に花を添えてきました。また、「ビジュアル天文学 宇宙へのまなざし すばる望遠鏡天体画像集」<sup>81)</sup>には三裂星雲（M 20）、IC 10、NGC 253といった画像も掲載されています。この写真集の中の約半分はSuprime-Camの画像で占められており、さらにその約半分が近傍銀河および銀河系内天体であることからSuprime-Camと近傍銀河と広報の相性のよさがよくわかることと思います。蛙の天文思索を深めるにも大いに役立っていることと思います。

なかでも個人的に印象深いものはNGC 6946（本誌表紙画像参照）です。この銀河は2008年のすば

る望遠鏡観測体験企画の一環として撮られたものでした。しかし、ちょうどその期間はSuprime-CamのCCD置き換えの直後であり、いろいろと予期せぬたいへんさがあったのです<sup>\*23</sup>。まずは体験企画の割り当て時間にはトラブル発生で観測ができないままタイムオーバー。そのあとの観測者のご厚意でなんとかデータを撮ることができたものの、撮られたデータにはFITSヘッダーの情報に不足があったりして、そのままでは解析ソフトが動かず。参加学生には画像解析をしてもらわなければならないので、いろいろだましましやってみてなんとか解析ができるようになり、最終的には見事な画像となったときにはほっとした、そんな思い出のある画像だったりするのです。他の銀河に比べて色鮮やかに見えてしまうのはひいき目のせいかもしれませんが、NGC 6946、蛙の目から見てもとても美しい銀河だと思います。

## 8. おわりに

ほらあなたにとって

大事な人ほどすぐそばにいるの<sup>\*24</sup>

2011年の冷却水漏れ事故<sup>82)</sup>以降Suprime-Camは復活までに時間を要するとともに、後継機のHyper Suprime-Cam（HSC）の立ち上げもあり、徐々に引退の雰囲気が出てきていたのですが、ついに2017年の5月を最後に引退の時を迎えました。太陽系内の小天体から宇宙の夜明けの銀河まで様々な天体を見てきたSuprime-Camは、最後にNGC 7479という近傍銀河を見て、静かにその目を閉じたのでした。

Suprime-Camの引退後も近傍銀河研究はHSCに引き継がれています。HSTからSuprime-Cam

<sup>\*20</sup> 銀河団銀河の進化と環境効果を明らかにした、これまたSuprime-Camの視野の広さを生かした多数の研究でした。

<sup>\*21</sup> 小林一茶句。

<sup>\*22</sup> [https://www.naoj.org/Gallery/j\\_index.html](https://www.naoj.org/Gallery/j_index.html)

<sup>\*23</sup> あとから振り返ると、そんな立ち上げ直後の微妙な時期の観測装置を体験企画で使うな、ということだったわけですが。

<sup>\*24</sup> MONGOL800『小さな恋のうた』より。

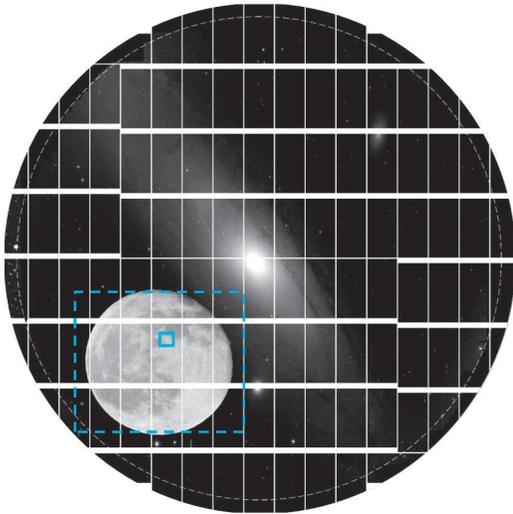


図4 HSC, Suprime-CamとHSTの視野の比較。HSCの焦点面に取り付けられた116枚のCCDは視野直径1.5度(白破線)を完全にカバーし、HST(青実線)、Suprime-Cam(青破線)と比べて圧倒的に広い視野を一度に撮像することができます。スケールが分かるように背景にはM 31と満月を配置しました。

へは視野の広さで約100倍のジャンプがあったわけですが、HSCの登場によってさらにまた1桁視野が広がることから、さらに質の異なる研究の進展が望めます(図4)。実際にHSCの観測から、銀河系の衛星銀河候補2天体(おとめ座I矮小銀河<sup>83)</sup>とくじら座III矮小銀河<sup>84)</sup>の発見をはじめとして、M 81銀河群<sup>85)</sup>やNGC 4631<sup>86)</sup>の銀河考古学などさまざまな研究が進められてきています。また、M 31ハローの探査もHSCによって進められており、M 31の恒星ストリームの詳細な形状を求めるとともに新たな低表面輝度構造の存在を示すなど、M 31ハローの新しい姿を明らかにしつつあります<sup>87)</sup>。さらに、今後、主焦点ファイバー多天体分光器(Prime Focus Spectrograph; PFS)もすばる望遠鏡の観測装置ラインアップに加わり、多数の恒星の分光観測に基づく研究も可能となり、近傍銀河研究もさらに進展することでしょう。Suprime-Camが発展させてきた近傍銀

河研究は、今後もますます目が離せないものになっていきそうです。

大事な人(銀河)ほどすぐそばにいる—Suprime-Camの最終観測に際し、気を引き締めて新時代の近傍銀河研究に取り組んでいこうと決意を新たにした2017年初夏でした。

## 謝辞

本稿に書かれているすべての科学的成果はSuprime-Cam開発グループ・ハワイ観測所の皆さんをはじめとする多くのすばる望遠鏡関係者や協力企業の皆さんのお力添えなしには実現できなかったものです。一人ひとり名前を挙げることはできませんが、皆様のご協力に感謝いたします。本稿の執筆にあたっては共同研究者の千葉さん田中さん八木さん幸田さん山野井さんに記事内容を確認していただくなど、たいへんお世話になりました。長年の研究においては、時にわがままに猛進し、時に落ち込みくじけそうになる私を励まし支えてくれたすべての皆さんに感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 岡村定矩, 2017, 天文月報 110, 768
- 2) Grebel E. K., 1997, IAUJD 2E, 12
- 3) Belokurov V., et al., 2007, ApJ 658, 337
- 4) Jurić M., et al., 2008, ApJ 673, 864
- 5) Richmond M., et al., 2009, PASJ 61, 97
- 6) Richmond M., et al., 2010, PASJ 62, 91
- 7) Richmond M., 2005, PASJ 57, 969
- 8) Komiyama Y., et al., 2000, PASJ 52, 93
- 9) Lee Y.-W., et al., 2013, ApJ 778, L13
- 10) Jerjen H., et al., 2013, ApJ 769, 14
- 11) Mighell K. J., Rich R. M., 1996, AJ 111, 777
- 12) Komiyama Y., et al., 2003, ApJ 590, L17
- 13) de Blok W. J. G., Walter F., 2000, ApJ 537, L95
- 14) de Blok W. J. G., Walter F., 2006, AJ 131, 343
- 15) Vansevičius V., et al., 2004, ApJ 611, L93
- 16) McConnachie A. W., Arimoto N., Irwin M., Tolstoy E., 2006, MNRAS 373, 715
- 17) Komiyama Y., et al., 2007, AJ 134, 835
- 18) McConnachie A. W., Arimoto N., Irwin M., 2007, MNRAS 379, 379
- 19) Sanna N., et al., 2010, ApJ 722, L244
- 20) Casetti-Dinescu D., Girard T., 2016, MNRAS 461, 271

- 21) Okamoto S., et al., 2017, MNRAS 467, 208
- 22) Zucker D. B., et al., 2006, ApJ 650, L41
- 23) Belokurov V., et al., 2007, ApJ 654, 897
- 24) Okamoto S., Arimoto N., Yamada Y., Onodera M., 2008, A&A 487, 103
- 25) Okamoto S., Arimoto N., Yamada Y., Onodera M., 2012, ApJ 744, 96
- 26) Sand D., et al., 2012, ApJ 756, 79
- 27) Stonkutė R., et al., 2008, AJ 135, 1482
- 28) Grossi M., et al., 2011, A&A 533, A91
- 29) Ibata R., et al., 2001, Nature 412, 49
- 30) Iye M., et al., 2007, PASJ 59, 841
- 31) Ferguson A. M. N., et al., 2002, AJ 124, 1452
- 32) Irwin M. J., et al., 2005, ApJ 628, L105
- 33) McConnachie A. W., et al., 2009, Nature 461, 66
- 34) Richardson J. C., et al., 2011, ApJ 732, 76
- 35) Tanaka M., et al., 2010, ApJ 708, 1168
- 36) Fardal M. A., et al., 2012, MNRAS 423, 3134
- 37) Kodaira K., et al., 2004, PASJ 56, 1025
- 38) Šablevičiūtė I., et al., 2006, Baltic Astron 15, 547
- 39) Šablevičiūtė I., et al., 2007, Baltic Astron 16, 397
- 40) Vansevičius V., et al., 2009, ApJ 703, 1872
- 41) Barker M. K., Ferguson A., Irwin M., Arimoto N., 2009, AJ 138, 1469
- 42) Barker M. K., et al., 2012, MNRAS 419, 1489
- 43) Tanaka M., et al., 2011, ApJ 738, 150
- 44) Foster C., et al., 2014, MNRAS 442, 3544
- 45) Koda J., et al., 2012, ApJ 749, 20
- 46) Blom C., Spiliter L. R., Forbes D. A., 2012, MNRAS 420, 37
- 47) Brodie J. P., et al., 2012, ApJ 759, L33
- 48) Koda J., et al., 2015, ApJ 802, L24
- 49) Martínez-Delgado D., et al., 2012, ApJ 748, L24
- 50) Tamura N., et al., 2006, MNRAS 373, 588
- 51) Tamura N., et al., 2006, MNRAS 373, 601
- 52) Okamura S., et al., 2002, PASJ 54, 883
- 53) Gerhard O., et al., 2002, ApJ 580, L121
- 54) Arnaboldi M., et al., 2003, AJ 125, 514
- 55) Castro-Rodríguez N., et al., 2009, A&A 507, 621
- 56) Trentham N., Tully B., 2002, MNRAS 335, 712
- 57) Yamanoi H., et al., 2007, AJ 134, 56
- 58) Yamanoi H., et al., 2012, AJ 144, 40
- 59) Yoshida M., et al., 2002, ApJ 567, 118
- 60) Yagi M., et al., 2007, ApJ 660, 1209
- 61) Yagi M., et al., 2010, AJ 140, 1814
- 62) Yoshida M., et al., 2016, ApJ 820, 48
- 63) Yagi M., et al., 2017, ApJ 839, 65
- 64) 吉田道利, 2017, 天文月報 110, 766
- 65) van Dokkum P. G., et al., 2015, ApJ 798, L45
- 66) Koda J., et al., 2015, ApJ 807, L2
- 67) Yagi M., et al., 2016, ApJS 225, 11
- 68) Romanowsky A. J., et al., 2012, ApJ 748, 29
- 69) Lieder S., et al., 2013, A&A 559, A76
- 70) Kodama T., et al., 2001, ApJ 562, L9
- 71) Kodama T., et al., 2004, MNRAS 354, 1103
- 72) Kodama T., et al., 2005, PASJ 57, 309
- 73) Nakata F., et al., 2001, PASJ 53, 1139
- 74) Nakata F., et al., 2005, MNRAS 357, 1357
- 75) Tanaka M., et al., 2005, MNRAS 362, 268
- 76) Tanaka M., et al., 2006, MNRAS 365, 1392
- 77) Tanaka M., et al., 2007, MNRAS 377, 1206
- 78) Tanaka M., et al., 2008, A&A 489, 571
- 79) Koyama Y., et al., 2007, MNRAS 382, 1719
- 80) Koyama Y., et al., 2008, MNRAS 391, 1758
- 81) 国立天文台編, 2009, ビジュアル天文学 宇宙へのまなざし すばる望遠鏡天体画像集 (丸善)
- 82) 仲田史明, 2018, 天文月報 111, 3月号掲載予定
- 83) Homma D., et al., 2016, ApJ 832, 21
- 84) Homma D., et al., 2017, PASJ in press (arXiv: 1704.05977)
- 85) Okamoto S., et al., 2015, ApJ 809, L1
- 86) Tanaka M., et al., 2017, ApJ 842, 127
- 87) Komiyama Y., et al., 2017, ApJ in press (arXiv: 1712.03654)

## Nature of Nearby Galaxies Revealed by Suprime-Cam

Yutaka KOMIYAMA

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

Abstract: Subaru Prime Focus CCD Camera (Suprime-Cam) on the Subaru Telescope has brought a large number of brilliant achievements to the Subaru community in various field of astronomy during its 18 years of life. This article summarizes the observations which were carried out by Suprime-Cam for nearby galaxies, including our Galaxy and those in the nearby clusters of galaxies, and reviews what Suprime-Cam has been revealed for these galaxies.