

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05037

研究課題名(和文) すばる望遠鏡超広視野観測で探る近傍銀河の形成進化史

研究課題名(英文) The formation and evolution of nearby galaxies studied with Hyper Suprime-Cam on the Subaru Telescope

研究代表者

小宮山 裕 (Komiya, Yutaka)

国立天文台・ハワイ観測所・助教

研究者番号：20370108

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：すばる望遠鏡超広視野CCDカメラによって得られた近傍銀河観測データの解析において問題となっていた背景光の差引、混雑領域における恒星の測光方法、光学系に起因するゴーストの処理などに着目し、最適なデータ解析方法の研究を行った。また、この最適化された手法に基づいて近傍銀河の解析を行い、アンドロメダ銀河ハローに存在する恒星ストリームの詳細を導出するとともに、こぐま座矮小銀河の連星比率を推定するなど、新たな観点から近傍銀河の形成進化史研究を行った。

研究成果の概要(英文)：The data analysis procedure which is optimized for the studies of nearby galaxies using Hyper Suprime-Cam on the Subaru Telescope is investigated. The key points in the data analysis which are specific to the analysis of nearby galaxies include (1) the subtraction of background light, (2) stellar photometry in crowded fields, and (3) the reduction of ghosts in the image due to reflections of telescope optics. Based on the optimized data analysis procedure, the formation and evolution of nearby galaxies is studied in detail from new points of view: that are the detailed study of stellar stream in the halo of Andromeda galaxy and the estimate of binary fraction in Ursa Minor dwarf spheroidal galaxy.

研究分野：銀河天文学

キーワード：画像処理 近傍銀河

### 1. 研究開始当初の背景

近傍銀河は銀河を個々の星に分解して観測することが可能であり、銀河の形成進化を恒星進化学理論に基づいて詳細に解明できるという点で重要な観測対象である。2014年より、すばる望遠鏡の新観測装置「超広視野 CCD カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC)」の共同利用が開始された。近傍銀河はその見かけの大きさから HSC を用いて研究を行うのに最適な観測対象であり、すばる望遠鏡の集光力と高解像度を併せ持つ HSC の登場により、近傍銀河研究は大きな進展を迎えたと期待されている。

しかし、共同利用開始時には、HSC 標準画像処理パイプラインは完成していたものの、天体検出・測光方法などが近傍銀河研究には十分には対応しておらず、画像解析手法の確立が急務になっていた。

### 2. 研究の目的

本研究の第一目的は、HSC によって取得された近傍銀河の観測画像から十分な精度を持つ測光カタログを(半自動で)作成する手法を確立することである。

また、本研究により確立された手法によって作成された測光カタログに基づいて、近傍銀河の形成進化史研究を進めていくことは本研究の最終的な目的である。特に、今まで詳細には調べられてこなかった銀河周辺部に着目し、どのような星生成史を持つ星種族で構成されているか、それらの星種族が銀河全体の中でどのような分布を持っているかなどを明らかにすることで従来とは異なる観点から研究を進めていく。

また、今まで観測が行われてきた銀河本体・中心部についても HSC 画像の深さを生かした研究を進めていくことができる。例えば、今までごく限られた範囲でしか調べられていなかった主系列星の研究や淡く広がった HII 領域の研究など、従来の研究からさらに一歩踏み込んだ研究を行うことが可能である。このような研究の広がりの可能性も念頭において、広い視野を持って研究を進めていく。

### 3. 研究の方法

HSC によって取得された近傍銀河の観測画像を解析するうえで問題として挙げられていることは以下のような項目である。

近傍銀河など大きな構造があった時の背景光の差し引き

近傍銀河など混雑領域における恒星の測光方法の最適化

低表面輝度構造を検出する際のゴーストの処理

画像解析法の(半)自動化

本研究では各項目について研究を進めることによって近傍銀河解析法の確立を目指す。そして、最後にその結果として近傍銀河への適用例をまとめる。

### 4. 研究成果

#### 背景光差し引き法の改善

HSC は 104 枚の CCD から構成されており、標準画像解析パイプラインでは一次処理として個々の CCD ごとに背景光の差し引きを行っている。しかし、CCD 一枚の大きさは約 6x12 分角であり、近傍銀河など大きな天体がある領域では背景光の差し引きをうまく行うことができていなかった。このため、近傍銀河解析に特化した手法の開発が必要であった。

本研究で採用した方法は、背景光は HSC の視野内であまり大きな変化をしないことを仮定し、低次の関数を用いて視野全体の背景光をフィットしたのちに個々の CCD での背景光を計算し差し引く方法である。図 1 に本手法を使った場合の改善具合を示した。標準画像解析パイプラインでは、図 1 左のように、大きな銀河の周辺では背景光を多く見積もって差し引いてしまう。本研究の手法を使うことにより、このような背景光の引き過ぎは改善され、図 1 右のように正しく銀河からの光を測定することが可能となった。

なお、最新の HSC 画像解析パイプラインでは、本手法と同等の差し引き法がオプションとして採用されるようになった。

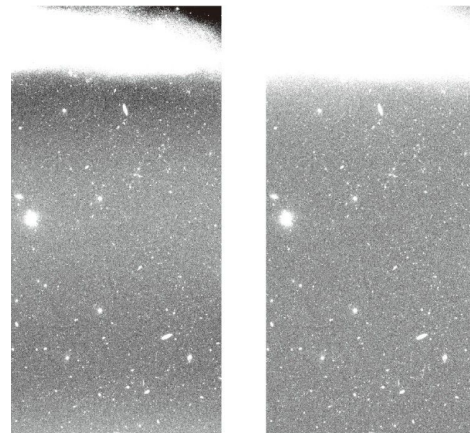


図 1 背景光の差し引き法改善前(左)と改善後(右)の画像

#### 混雑領域における恒星測光法

近傍銀河のような混雑領域にある星を測光することは困難であるが、有効な手法の一つとして PSF 測光法が挙げられる。いくつかの PSF 測光ソフトウェアが存在するが、その得失を理解しておくことは近傍銀河研究を行う上で重要である。

本研究ではシミュレーション画像や実際の画像に星(PSF)を埋め込んだ画像を用いて、DAOphot、SExtractor+PSFEx、hscPipe4 の 3 つの PSF 測光ソフトウェアの性能評価を行った。例えば、こぐま座矮小銀河中心部の画像データに PSF を埋め込んだ画像を用いて測光ソフトウェアごとに星検出率(Completeness)と星分類の完全性を等級の関数として測定したものが図 2 である。各種

性能評価によって分かったことをまとめると下記ようになる。

- 星検出率(Completeness)や混雑領域での測光精度などを見ると、長く使われ続けている DA0phot が優秀である。ただし、開口補正(Aperture Correction)を解析画像ごとに求めなければならない、処理に時間がかかる、などという不利な点はある。また、実行パラメータをユーザーが初期設定しなければならない点は自動化を行う際に問題になるケースがあると考えられる。
- SExtractor は処理速度も早く、あまり細かい設定をしなくても検出・測光ができるように設計されている。あまり混雑していない領域の解析には有効かも知れない。
- hscPipe は HSC のデータの統合解析ソフトウェアであり、一次データ処理から測光までをほぼ全自動で行えることは大変魅力的である。しかし、銀河の形状測定を精度よく行うので対応の時間がかかる。また星検出率(Completeness)が低い点なども問題となる。

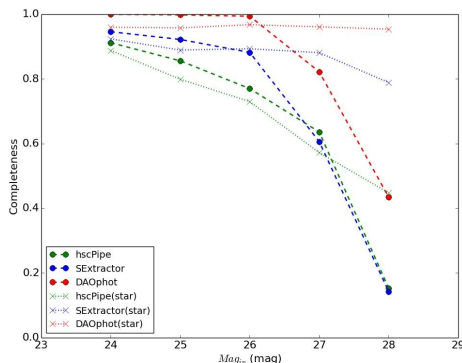


図 2 測光ソフトウェアごとに星検出率(Completeness:実線)と星分類の完全性(破線)を等級の関数としてまとめたもの。

### ゴーストの処理

HSC 画像解析への理解が進むにつれて、非常に表面輝度の低い天体を検出する際に主焦点補正光学系に起因するゴーストが問題となることが分かってきた。特に狭帯域フィルターを使った観測データにはゴーストが顕著に現れてくるため、これらの除去が新たな課題となった。

本研究では、画像上でのゴーストの出現位置はゴースト源となる星の位置から光学計算によって求めることができるため、最終画像合成を行う前に個々の画像上に写るゴーストの位置を計算し、ゴーストをマスクしてから最終画像合成を行うことでゴーストを除去する方法を開発した。図 3 にゴーストが除去された画像の例を示す。この処理により低表面輝度天体の検出率や測光精度は格段

に向上することとなった。このゴースト処理法は HSC 標準画像解析パイプラインにも取り入れられ、様々な画像データに適用されることとなった。

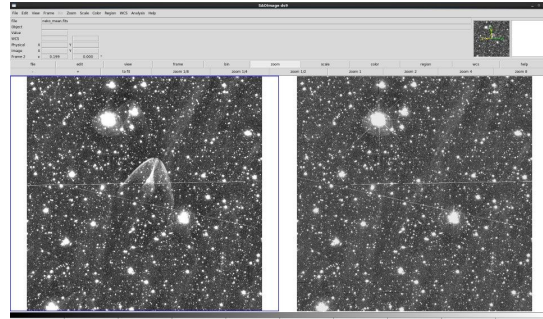


図 3 彗星状ゴースト除去前(左)と除去後(右)の合成画像の例

### 画像解析法の自動化

HSC のような大量データを扱う際には、ユーザーの判断をなるべく排除し、ある程度自動的に解析が進むような自動化が必要となってくる。また、DA0phot などでは PSF 作成の際に星の取舍選択がユーザーに任せられている部分もあり、これが自動化を難しくしていた。本研究では、最初にデータの質を表すいくつかのパラメータを手動で測定・確認した後はほぼ自動的に解析が進むようにスクリプト化を図った。これによりデータ解析をスムーズに進めることができるとともに、データ解析の再現性も確保できるようになった。

### 実際のデータへの適用：アンドロメダ銀河(M31)ハローの解析

我々はすばる望遠鏡 HSC を用いて M31 のハロー北西領域の約 9.2 平方度のサーベイ観測を行った。この領域には、過去に M31 に降着した矮小銀河が潮汐破壊された痕跡である恒星ストリーム (NW Stream) が存在していることが別の観測から分かっていた。HSC を使うことで検出限界が従来の観測より深くなり、数多く存在する Red Clump (RC) 星までを検出することができるようになり、NW Stream の詳細構造や NW Stream を構成する星種族を知ることが可能となった。

まず、RC 星を使った距離推定から、NW Stream は我々から見て M31 の背後約 70 kpc に位置し、南側の方が M31 本体に近いことが推定された。この新たな位置情報が加わることで、M31 本体への最接近距離など NW Stream の軌道は強く制限されることが軌道シミュレーションから分かった。また、数の多い RC 星を使うことにより NW Stream の数密度分布の詳細構造が明らかになってきた。その断面形状は半値幅約 25 分角 (5.7 kpc) のガウス分布で近似できるが、南西側に多少ゆがみを持つようである。Stream に沿った方向には数々の凹凸が見られ、Stream

の途切れる箇所(ギャップ)も見つかるなど、複雑な形状を持っていることが分かった(図 4)。今後はこのような NW Stream の軌道・形状を再現するシミュレーションが実行され、NW Stream の素性ととも M31 のハローの形成進化が解明されることが期待される。

また、色等級図の解析からは、NW Stream を構成する星種族とは異なる星種族が観測領域南側に広がって分布していることが明らかになった。これは今まで知られていなかった、NW Stream よりもさらに淡い別の構造が観測領域に存在していることを示唆しており、今後のフォローアップ観測が待たれている。

本観測は、本研究の目的の一つである銀河周辺部(ハロー)の観測に基づいた近傍銀河の形成進化史研究の一例であり、本研究で開発された手法はこのような研究に有効であることを示すことができた。

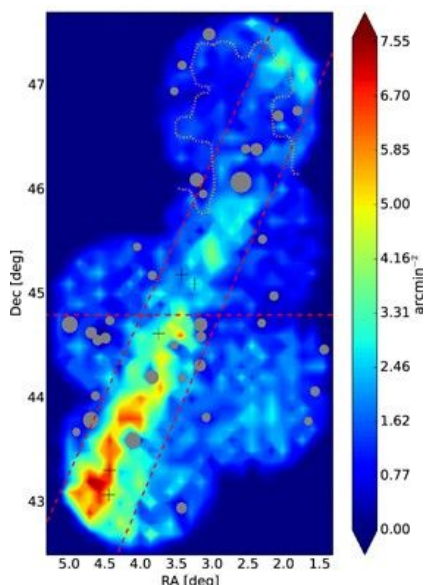


図 4 RC 星の空間数密度分布。最南東端から北西へ向かうにつれ RC 星の数は減少していきギャップを迎える。本観測で初めて存在が示唆されるようになった構造は、ストリーム外の南西部などに見られる淡い数密度超過領域として見て取れる。

実際のデータへの適用：こぐま座矮小楕円体銀河(Ursa Minor: UMi)の解析

我々はすばる望遠鏡 HSC を用いてこぐま座矮小楕円体銀河の観測を行った。この観測により、従来よく調べられていた赤色巨星分枝星よりも暗い主系列星の測光データを多数得ることができた。

この主系列星の測光データから色等級図を描くことにより、UMi の主系列星の連星系割合を推定することが可能となった。UMi に所属する個々の星々は単独星であるか連星であるかは見かけからは分からないが、連星の場合は質量比に応じて単独星が形作る主

系列星とは異なる色・光度を持つ。このため、色等級図上で主系列から外れた場所に位置する星がどれくらい存在するかを調べることにより連星系率を推定することが可能なのである。本研究では UMi の連星系率を 0.4 と推定することができた。

連星系率は星の視線速度観測から求められていることがほとんどだが、分光観測に適する明るい星は数が少ないことや長時間かつ複数回の観測が必要になるため、その決定精度は非常に悪かった。本研究による測光観測に基づいた推定法は、これらの推定法とは相補的であるとともに、高い決定精度で連星系率を推定可能であることを示すことができた。

以上のように、今まで調べられてきた近傍銀河の本体部分などについても、HSC 画像の深さを生かした新たな研究が可能であることを示すことができた。

## 5. 主な発表論文等(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

- Komiyama Yutaka, Chiba Masashi, Tanaka Mikito, et al., "Stellar Stream and Halo Structure in the Andromeda Galaxy from a Subaru/Hyper Suprime-Cam Survey", 2018, *Astrophysical Journal*, 853, 29, 査読あり, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa129>,  
Tanaka Mikito, Chiba Masashi, Komiyama Yutaka, "Resolved Stellar Streams around NGC 4631 from a Subaru/Hyper Suprime-Cam Survey", 2017, *Astrophysical Journal*, 842, 127, 査読あり, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa6d11>

[学会発表](計 11 件)

- 小宮山裕, 千葉 柁司, 田中 幹人, 他, 「Hyper Suprime-Cam で探るアンドロメダ銀河の恒星ストリームとハロー構造」, 2018, 日本天文学会春季年会  
小宮山裕, 「HSC 近傍銀河データの PSF 測光」, 2017, 日本天文学会秋季年会  
Komiyama Yutaka, "HSC Wide and Deep Imaging Survey for the MilkyWay Satellite Galaxies", 2017, IAU Symposium 344 Rediscovering Our Galaxy  
Komiyama Yutaka, "Binary Fraction from Hyper Suprime-Cam Deep Imaging Survey for the Local Group Dwarf Galaxies", 2017, ESO Workshop: THE IMPACT OF BINARIES ON STELLAR EVOLUTION  
小宮山裕, 川野元聡, 八木雅文, 「HSC 画像からの自動ゴースト除去 (II)

」, 2017, 日本天文学会春季年会  
Kawanomoto Satoshi, Yagi Masafumi,  
Komiyama Yutaka, “Ghost Busters:  
Subaru/HSC Ghost Analysis & Removal  
(2) Cometary ghosts”, 2017, Subaru  
Users Meeting  
Komiyama Yutaka, Yagi Masafumi,  
Kawanomoto Satoshi, “Ghost Busters:  
Subaru/HSC Ghost Analysis & Removal  
(1) Cometary ghosts”, 2017, Subaru  
Users Meeting  
Komiyama Yutaka, “Subaru Hyper  
Suprime-Cam Survey for Local Group  
Dwarf Galaxies”, 2016, The 6th Subaru  
International Conference: Panoramas  
of the Evolving Cosmos  
小宮山裕, 八木雅文, 「HSC 画像からの  
自動ゴースト除去」, 2016, 日本天文学  
会秋季年会  
小宮山裕, 「局所銀河群で探る銀河進  
化: 矮小不規則銀河 NGC6822」, 2016, 第  
3 回 銀河進化研究会@東北大学  
小宮山裕, 「HSC 大規模データの PSF 測  
光」, 2015, 日本天文学会秋季年会

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

観測成果: クジラ銀河には化石がいっぱい  
[https://www.naoj.org/Pressrelease/2017/  
08/02/j\\_index.html](https://www.naoj.org/Pressrelease/2017/08/02/j_index.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小宮山 裕 (KOMIYAMA, Yutaka)  
国立天文台・ハワイ観測所・助教  
研究者番号: 20370108