

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 24 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011 ～ 2012

課題番号：23740159

研究課題名（和文） 深宇宙撮像データを用いた宇宙初期の銀河形成進化の研究

研究課題名（英文） Study on galaxy formation and evolution at the early universe based on deep imaging data

研究代表者

古澤 久徳 (FURUSAWA HISANORI)

国立天文台・ハワイ観測所・助教

研究者番号：10425407

研究成果の概要（和文）：すばる望遠鏡による広視野深撮像データと公開近赤外線データを組み合わせ、赤方偏移 7 の星形成銀河探査を行った。観測領域 2 平方度から 6 個の非常に明るい星形成銀河候補を検出し、それらを既存データに追加して近紫外光度関数を求めた。これにより明るいデータ点が増え、赤方偏移 7 の星形成銀河光度関数はシェヒター関数ともべき関数とも矛盾しないことが分かった。また、前後 3 億年で明るい銀河の有意な光度進化は認められなかった。

研究成果の概要（英文）：We perform very deep imaging over 2 square degree blank fields with Subaru/Suprime-Cam. Combining the optical data with publicly available near-infrared imaging data, we detect in total 6 candidates of star-forming galaxies at redshift 7. It is shown that the resultant UV luminosity function of galaxies are well fitted by either of the conventional Schechter function or a double-power law function, with no significant evolution in the bright end during 0.3 Giga-years of this cosmic era, with the aid of the newly added bright-end sample.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：遠方銀河、銀河進化、宇宙論

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙の主要構成天体である銀河の形成と進化の歴史を理解する上で、赤方偏移 7（ビッグバンから 7 億 5 千万年後）の時代の銀河の個数分布を正確に知ることが重要だが、次のような不定要素があった。

(1) 1 平方度を超える広い天域を深い限界等級で観測したデータセットが存在せず、赤方偏移 7 の星形成銀河を効率よく検出し議論するための銀河サンプル数が不足していた。

(2) 特に静止系の紫外光度が明るい（近紫外等級  $< -21.5$ ）希少な星形成銀河のサン

ルが決定的に不足しており、赤方偏移 7 の銀河の光度関数の全等級範囲での形状の理解が進んでいなかった。そのため、その時代前後の銀河の光度・個数進化、星形成史、宇宙再電離史に対して強い制限が得られていなかった。

## 2. 研究の目的

(1) すばる望遠鏡による広くて非常に深い探査データを生成する。それを用いて可視光観測で到達できる最遠方（赤方偏移 7）の星形成銀河サンプルを検出・構築する。

(2) 赤方偏移 7 の星形成銀河の個数分布の

統計的性質をこれまでよりも高い精度で明らかにすることで、銀河形成史と宇宙再電離史に新たな知見を与える。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究で取得・解析したすばる望遠鏡による2平方度のzバンド深宇宙探査データと赤外線のパブリックデータ (UKIDSS/UDS、およびUltraVISTA サーベイ) を組み合わせ、広さと深さを兼ね備えた新たなデータセットを構築する。本研究のデータと、地上赤外線望遠鏡による2つの公開広視野撮像サーベイの実現によって初めて、赤方偏移7の近紫外光度が大きい銀河種族を効率よく検出し統計的に論じることができるデータセットが実現する。

(2) このデータセットにより、赤方偏移を受けた遠方星形成銀河のスペクトルにみられる銀河間中性水素雲による強い吸収帯 (ライマンブレイク) を  $9000 \text{ \AA} \sim 1.1 \mu\text{m}$  の波長域で捉えることで、赤方偏移7の星形成銀河候補を抽出する。

(3) この時代の銀河の近紫外光度関数を求め、銀河・星形成史を論じる。

### 4. 研究成果

(1) 対象天域である各1平方度の2領域を、すばる望遠鏡の主焦点広視野撮像カメラ (Suprime-Cam) を用いて4視野ずつ撮像した。限られた観測時間の範囲で、各視野に約15時間以上ずつを投じる深い撮像を行った (ただし、計8視野のうちUDS領域の2視野は、天候条件などが悪かったため各8時間程度の積分となった)。

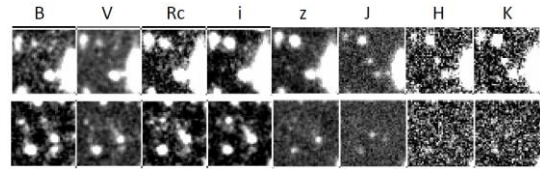
各視野は約150ショットの画像からなるが、これらを30ショットずつのサブセットに分割して画像合成 (モザイクング) を行うことで、限界等級  $z(\text{AB})=27.2$  等 (1.5秒開口;  $5\sigma$  信頼レベル) を達成し、これまでにない広さと深さを合わせ持つデータセットを構築した。

(2) 本研究のzバンド深データと、既存の可視光データ、および各天域について一般公開された近赤外線データ (UDS-DR8:  $J=24.9\text{AB}$ , UltraVISTA-DR1:  $J=24.7\text{AB}$ ) を組み合わせ、非常に赤い ( $z-J > 2.5$ ) 銀河を選定した。さらに、それらから可視光で検出されず近赤外波長でフラットなスペクトルを持つ天体を数値と目視により確認することで銀河系内の晩期型矮星の混入を排除した。その結果、約2平方度の観測領域から信頼度の高い赤方偏移7の銀河候補を新たに6個 (UDS: 2個, UltraVISTA: 4個) 検出した (図1、図2)。

これらは全て静止系の近紫外光 ( $1500 \text{ \AA}$ ) で  $-21.5$  等より明るく、このような活発な星

形成銀河はまだ分光確認例が数個以下である (特に  $-22$  等より明るい天体の確実な分光例はない) ため、銀河形成史の研究にとって重要なサンプルの追加となる。

(UDS 領域の候補天体)



(UltraVISTA 領域の候補天体)

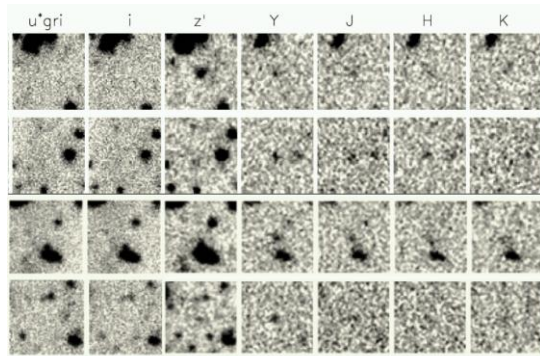


図1. 高赤方偏移銀河候補の各バンド画像。UDS領域(上2段)とUltraVISTA領域(下4段)で発見された、信頼度の高い全6個の候補天体を示した。赤方偏移を受けたライマンブレイクがzバンドに入る為、zバンドより左側(短波長)の画像には対応天体が認められない。

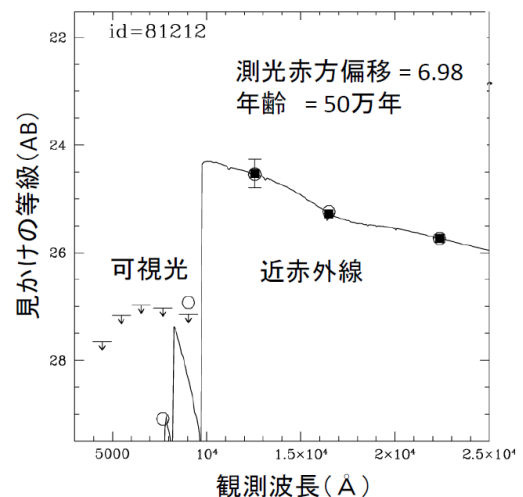


図2. UDS領域の候補天体 (図1の一番上) の測光値とモデルスペクトルとの比較例。赤方偏移 $\sim 7$ の非常に若い銀河のスペクトルでよくフィットされる。

(3) UltraVISTA領域で見つかった4個の高赤方偏移銀河サンプル画像を合成 (スタッ

ク) することで信号の信頼レベルを上げ、各バンドの等級を求めた。これに基づいて静止系近紫外光のスペクトルの傾きを測定したところ、周波数に対して比較的フラットなスペクトル ( $f_{\nu} \propto \lambda^{-2.0}$ ) と矛盾しなかった。この結果からは、これらの明るい星形成銀河が、近年可能性を示唆されている「極端に金属量が少ない状態」にあるとは認められず、より低赤方偏移で見ついている非常に青い星形成銀河に近い星形成の物理状態を持つのもかもしれない。

スタック画像の近紫外光度から見積もった星形成率は1年あたり30~100太陽質量であり、大量に星を生成しているフェーズにあると考えてよい。

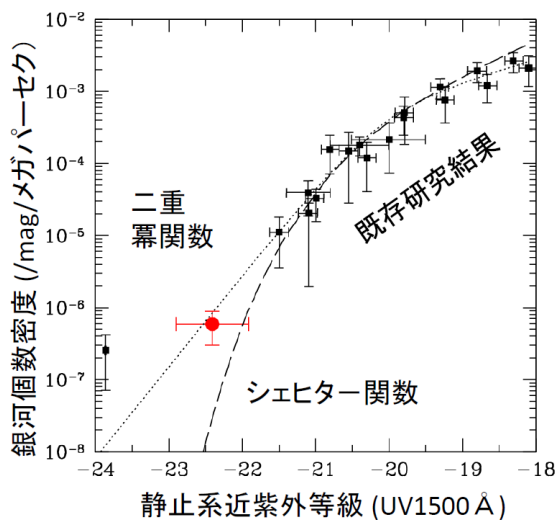


図3. 赤方偏移7星形成銀河の近紫外光度関数。本研究の結果は誤差棒付の赤点、既存のより暗い等級範囲で行われた研究結果が誤差棒付の黒点で記されている。鎖線は従来のシェヒター関数の結果であり、点線は今回の結果得られた二重冪関数のフィット結果。赤点は、Bowler等(2012)の結果にUDS銀河候補を加えて更新した。

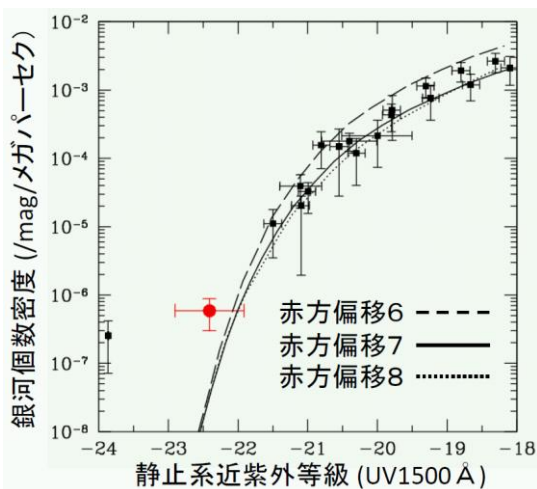


図4. 星形成銀河の近紫外光度関数の進化。軸の意味とデータ点は図3と同様。既存研究による赤方偏移6~8のシェヒター関数の結果を上書きした。

(4) 新しいデータセットにより検出した赤方偏移7の星形成銀河候補を用いて、静止系紫外光(1500Å)の光度関数を求めた。

① 光度関数の形状と星形成、宇宙再電離について(図3)

本研究で見付かった6個の天体がすべて真の赤方偏移7の星形成銀河だとすると、近紫外等級<-22での個数密度は単位メガパーセクあたり  $6 \times 10^{-7}$  個となった。これは、より暗い等級範囲で行われた既存の同赤方偏移の光度関数の結果と誤差棒の範囲で矛盾しない。

既存研究によるシェヒター関数の予想値(McLure等2010など)では、1平方度あたり約1個の明るい銀河(等級<-22)しか検出されない。したがって、今回の1平方度あたり3個の検出個数は、光度関数の紫外最大光度(星形成を非常に活発に行っている銀河)の個数密度がこれまでの予想値より3倍程多い可能性を残しているが、サンプル数不足のため、誤差棒が大きく結論づけることはできない。

一方で、今回のデータの追加により、光度関数全体の形状は、経験的に光度関数をよく表すと考えられているシェヒター関数だけではなく、冪関数を二つ合成した関数形(以下、二重冪関数)でもよくフィットされることが分かった。

ベストフィットの二重冪関数は、暗い等級域で急な傾き(肩=-4.2)を示す。この二重冪関数を仮定して、この時代のライマンブレイクを示す星形成銀河からの全紫外光度を見積もると、シェヒター関数からの予測に比べて積分等級範囲に応じて3~4割程度大きくなる。この結果は、この時代の星形成銀河の宇宙再電離の発生源に対する寄与が、これまで予想されていたよりも大きかった可能性を示唆している。

② 光度関数の進化について(図4)

今回の近紫外光度関数の結果を既存研究と組み合わせ、赤方偏移6から8にかけての光度関数の進化を調べた。その結果、赤方偏移6から7(約1.6億年)にかけて暗い銀河の個数進化の兆候は見られるが、明るい銀河の光度進化については期間を通して非常に小さいか、進化していなかった。この結果は、この約3億年の時代範囲で、銀河における星形成の効率が(少なくとも一番活発に星形成を行う種族の中では)さほど変化していないことを示唆している。

しかし、同じ光度域(等級<-22)の銀河について直接比較出来る先行研究は、赤方偏移

6に一例あるのみで、赤方偏移8の結果では観測の限界により本研究より4.5倍暗いサンプルしか用いていない。

上記①②ともその議論のためには明るい等級域の光度関数の形状理解が必要だが、確実に分光確認された同赤方偏移の明るい星形成銀河がまだ存在せず、サンプル数不足により光度関数の誤差棒も大きいため、強い結論を得るためには、今後もサンプルを増やし、確実に光度関数の形状とその進化を理解する必要がある。

(5) UltraVISTA サーベイ領域で見つかった4候補天体については、すばる望遠鏡の可視分光装置(FOCAS)の観測時間を獲得し、各4時間程度ずつの分光追観測を行った。その結果、どの候補天体にも低赤方偏移天体の混入を示すスペクトルの特徴は見当たらず、本研究のサンプルに明らかな人的混入がないことが分かった。

また、追観測を行ったうちのひとつの天体には信号有意度が低いものの輝線が検出されており、これがライマン $\alpha$ ならば赤方偏移7の銀河の確認となる(図5)。スペクトルのモデルフィッティングの結果からは、この銀河の星形成率は1年あたり30-50太陽質量と見積もられており、銀河内のダスト量が比較的低い若い銀河と推定される。

これら高赤方偏移候補天体のスペクトルの特徴から赤方偏移を確定し、星形成の物理状態を論じるのが今後の目標だが、スペクトルの信号の有意度をより上げるために、UDS領域の候補天体を含めて引きつづき追観測の申請を進めている。

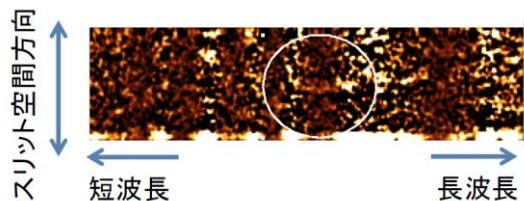


図5. 赤方偏移7銀河候補の分光観測による、波長9900Å近辺の2次元スペクトルの様子。画像の右側が長波長、左側が短波長、上下方向がスリットの空間方向に相当する。まだ積分時間が不足しているためノイズレベルが大きいですが、白丸で囲った領域に有意な輝線が検出されている。

## 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5件)

- (1) Bowler, R. A. A., Dunlop, J. S., McLure, R. J., McCracken, H. J.,

Milvang-Jensen, B., Furusawa, H., Fynbo, J. P. U., Le Fèvre, O., Holt, J., Ideue, Y., Ihara, Y., Rogers, A. B., and Taniguchi, Y., Discovery of bright  $z=7$  galaxies in the UltraVISTA survey, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Vol. 426, 2012, pp. 2772-2788  
DOI: 0.1111/j.1365-2966.2012.21904.x

[学会発表] (計1件)

- ① 古澤 久徳, Status of HSC data analysis pipeline、国際研究会「Supermassive Black Holes in the Universe: The Era of the HSC Surveys」、2012年12月18日、愛媛大学(愛媛県)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

古澤 久徳 (FURUSAWA HISANORI)  
国立天文台・ハワイ観測所・助教  
研究者番号: 10425407

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

該当なし