

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19540238

研究課題名 (和文) 超広視野赤外線撮像で探る赤方偏移砂漠

研究課題名 (英文) Greening the Redshift Desert by Wide-Field Infrared Imaging

研究代表者

本原 顕太郎 (MOTOHARA Kentaro)

東京大学・大学院理学系研究科・准教授

研究者番号：90343102

研究成果の概要 (和文)：

我々は、すばるディープフィールド 0.25 平方度にあたる近赤外線撮像観測を UKIRT/WFCAM を用いて行い、そのデータより $z\sim 2$ 銀河のカatalogを製作した。これを用いて $z\sim 2$ の星形成銀河のクラスタリングを探り、この時代の星形成銀河が近傍の渦巻銀河に進化して行く可能性が高いことを示した。また、この時代の受動的進化をしている銀河は質量の小さいものが少なく、 10^{11} 太陽質量よりも軽い楕円銀河はまだ形成過程にある可能性を示唆した。さらにすばる望遠鏡/MORICS による近赤外線分光観測からこれら銀河の詳細な性質を探り、 $z\sim 2$ 時代ではすでに星形成がかなり進んでおり、星間ガスの重金属汚染が我々近傍の銀河並みに進んでいることを明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：

We have carried out NIR wide-field imaging of the Subaru Deep Field (0.25 sq. degree) by the UKIRT/WFCAM instrument, and created a catalog of $z\sim 2$ galaxies. Utilizing this catalog, we measured the clustering properties of $z\sim 2$ star forming galaxies and found that these galaxies will evolve into present-day spiral galaxies. Deficiency of less-massive passive galaxies at $z\sim 2$ is also found, suggesting the elliptical galaxies with stellar mass less than $\sim 10^{11}$ solar mass are still under their formation phase. Following Subaru/MOIRCS NIR spectroscopy showed that the metallicity in these galaxies are as high as that in the present-day local galaxies, indicating that these galaxies have already experienced quite much amount of star-formation activities, and their inter-stellar gas has polluted by heavy elements.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：光学赤外線天文学、銀河天文学

1. 研究開始当初の背景

近年の可視域での大規模サーベイによって、宇宙年齢が現在の 20%以下である赤方偏移 (z) が 3 を超えるような高赤方偏移の銀河種族が多数発見されてきた。しかしながら、これは主に静止波長紫外線のライマンブレイク ($\sim 1000\text{\AA}$) を検出する手法によって行われるため、このライマンブレイクが地上観測できなくなる $1 < z < 2.5$ では大規模なサーベイサンプルの作成が困難であった。そのため、 $z \sim 2$ 銀河の系統だった観測はまだ進んでいない状況で、特にこれら銀河の物理的性質 (星質量、金属量、ガス量、ダスト量など) の包括的理解はほとんど進んでいなかった。

しかしながら、種々の観測から、現在の宇宙の星質量の半分以上が $z = 1 \sim 3$ の間に形成されたことが明らかになって来ており (Dickinson et al. 2003)、この時代の銀河形成/進化を包括的に把握するのは、極めて重要である。観測の難しさから「砂漠」と呼ばれるこの赤方偏移を如何に「緑化」するかが課題であった。

2. 研究の目的

本研究では、近赤外線撮像によりすばるディープフィールド(SDF)の $z \sim 2$ 銀河のサンプルを作成し、その性質を可視から電波までの多波長観測によって明らかにする。

これにより、以下の 2 点に迫るのが主な目的である。

- (1) 星形成銀河(sBzK)の性質、及びに銀河の星質量形成史
- (2) 楕円銀河の形成の過程を受動的段階にある銀河(pBzK)から探る

3. 研究の方法

近赤外 K バンドデータと深い可視 B,z バンドを併せてバルマーブレイク/4000Å ブレイクを検出することによって $z = 1 \sim 2.5$ の銀河を効率よく、ダスト吸収の影響を受けずに選出でき (Daddi et al. 2004)、これら銀河は BzK 銀河と呼ばれている。即ち、B-z と z-K の色色図を用いることによりダスト吸収の影響なく $z = 1 \sim 2.5$ の星形成中の銀河(sBzK)と星形成を終えた、楕円銀河に進化すると想定される受動的進化段階に入った銀河(pBzK)を選出できる。

このためにまず、UKIRT3.8m 望遠鏡に搭載された超広視野近赤外線カメラ WFCAM による近赤外線撮像観測を行う。具体的には UKIRT 日本人共同利用枠への観測提案を行い、観測時間を確保する。

これにより、上記手法により $z=1 \sim 2.5$ 銀河を

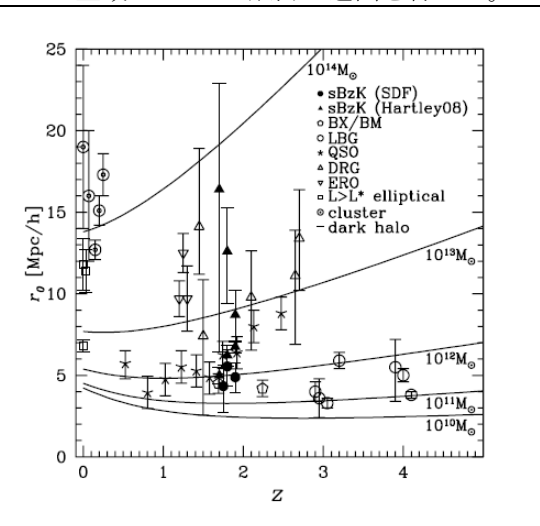
選出し、その空間分布や数密度を調べる。また、可視・赤外多バンドデータに銀河スペクトルモデルによるフィットを行うことで、個々の銀河の星質量、ダスト量、星形成率、年齢などを算出し、 $z \sim 2$ 時代の銀河の包括的な統計的性質を明らかにし、現在の宇宙との違いを探る。

さらにすばる望遠鏡の共同利用時間などに応募し、個々の銀河の近赤外線多天体分光観測を行うことで、より正確な星形成率や金属量を測定する。また、電波 CO 観測を行い、可視赤外では明らかにできない、星の原材料となっている水素ガスの量の測定を行う。これらの観測により、個々の銀河が現在とどのように異なっているのかを明らかにする。

4. 研究成果

(1) 近赤外線広視野撮像観測

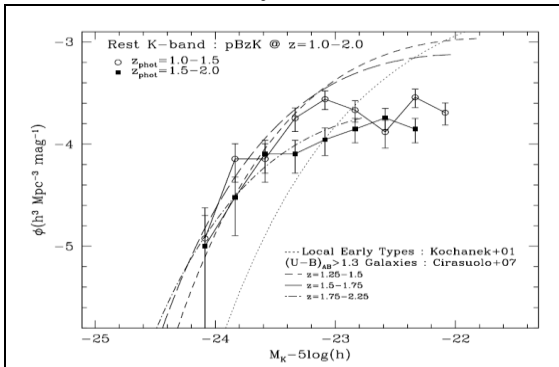
本研究の一番の核となる WFCAM による近赤超広視野撮像観測の提案は、2005 年に 2 夜、2007 年に 2 夜、2008 年に 2 夜、2009 年に 3 夜、2010 年に 4.5 夜の合計 13.5 夜の観測時間を獲得することができた。天候にあまり恵まれなかったこともあり、実際に観測できたのは 6 夜程度であったが、最終的に K バンドで SDF の視野(0.25 平方度)のほぼ全域を覆うとともに、視野の 6 割以上の領域では近赤外 JHK3 バンドすべてで十分な深さのデータを得ることに成功した。これより SDF 全域での BzK 銀河の選出を行った。



(図 1) 様々な赤方偏移にわたる銀河種族の相関長。SDF の sBzK が黒丸で示されている。

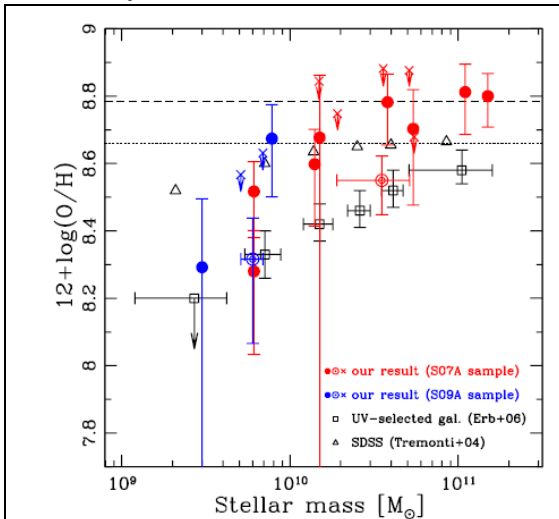
これら sBzK 銀河分布の二体相関関数より、クラスタリング解析を行った結果、比較的質量(10^{10-11} 太陽質量)の sBzK 銀河はそれが

含まれているダークマターハロの質量は 10^{12} 太陽質量程度と比較的少なく、今後、近傍の普通の（渦巻）銀河に進化してゆく可能性が高いことが明らかになった(図 1 : Hayashi et al. 2007, 林将央博士論文)。また、質量分布を調べたところ、受動的進化段階に入った銀河(pBzK)は静止波長で K バンド等級が暗い、すなわち低質量のものが近傍に比べて極めて少ないことが明らかになった(図 2 : Motohara et al. 2007)。これは、楕円銀河の形成が大質量のものから先に進み、 $z=1.5$ 付近ではまだ 10^{11} 太陽質量よりも軽い楕円銀河が形成されつつある段階にあることを示している。



(図 2) pBzK の光度関数。明るい(重い)ものは近傍(破線)と同じくらいあるが、軽いものが一桁近く少ない。

(2) 近赤外線分光観測: $z \sim 2$ 銀河の金属量 銀河の重金属(窒素、酸素等)元素は星内部の核融合反応や超新星爆発で作られる。そのため、これらの元素量はその銀河がどのような星形成活動を経てきたを探る重要なプローブである。



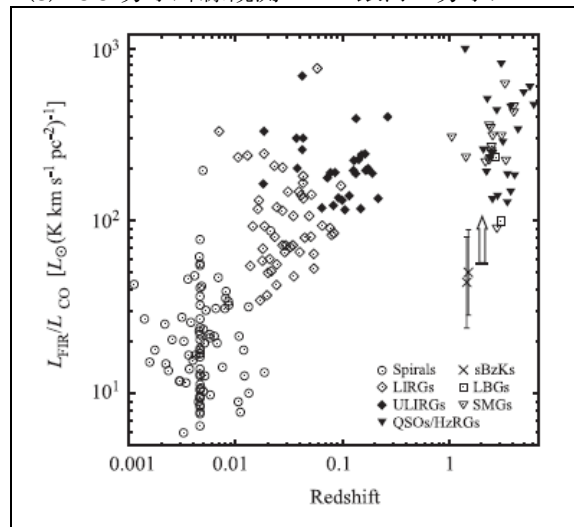
(図 3) 各種銀河の星質量-金属量関係。赤と青が分光した SDF の sBzK 銀河。白四角が $z \sim 2$ の紫外線選択銀河。三角が近傍の銀河。

そこで SDF の sBzK 銀河の近赤外線分光観測をすばる望遠鏡の赤外線多天体分光器

MOIRCS で行い、結果 28 天体から赤方偏移した可視輝線(水素、窒素、酸素の電離輝線)を検出した。これら天体の赤方偏移は $z=1.2-2.1$ に分布し、改めて BzK の手法が $z \sim 2$ 銀河の選定に有効であることを示した。さらに、これら輝線比より個々の銀河の金属量を評価した。

金属量と銀河の星質量の関係を調べると、 $z \sim 2$ にある紫外線で選択された銀河に比べて有意に金属量が多く、近傍銀河とほぼ同様の関係が得られた(図 3 : Hayashi et al. 2009, 林将央博士論文)。この結果は、 $z \sim 2$ でも既に過去にかなりの星形成が進んでおり、近傍と変わらない多量の重元素が星間空間に放出されたことを意味する全く新しい結果であり、大きな注目を集めた。

(3) CO 分子輝線観測: $z \sim 2$ 銀河の分子ガス



(図 4) 種々の銀河の星形成効率。SDF の sBzK は矢印で示されている。その左となりの×が $z=1.4$ の sBzK。赤方偏移 1 以上の天体は上記 3 天体以外はすべて QSO などの特殊な天体である。

これら銀河で星の素になるガスはどの程度存在するかを探るため、 $z=2.044$ に同定された sBzK の野辺山電波干渉計 + 4.5 m 電波望遠鏡による CO(3-2) 分子輝線の観測を行った。この時点で BzK の観測は 2 例のみであり、いずれも $z=1.4$ にある銀河の CO(2-1) 輝線によるものであったため、この試みは普通の銀河としては最も遠方の観測の試みでもあった。残念ながら CO 輝線の検出はできず、上限値しか与えることができなかったものの、これにより分子ガスに対する星形成率の比の下限值を与えることができた(図 4 : Hatsukade et al. 2009)。

この比は分子ガスから度の程度の効率で星形成が行われるかの指標であり、 $z \sim 2$ では近傍の普通の銀河に比べてこの効率が高いという示唆が得られた。BzK 銀河は一般に通常の渦巻銀河と同様にディスクでの定常的な

星形成を行っていると考えられているが、星形成効率が低いということはそのディスクで非常に効率の高い星形成を達成する機構がある可能性を示しており、興味深い結果である。

以上のように、UKIRT/WFCAMによるSDFの近赤外線撮像観測をベースとして、 $z \sim 2$ 銀河のさまざまな観測を行い、この時代の銀河形成の様子を描き出すことに成功したのが、本研究の最大の成果である。

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 7 件)

- ① Ly, C., M. A. Malkan, T. Treu, J.-H. Woo, T. Currie, M. Hayashi, N. Kashikawa, K. Motohara, K. Shimasaku, and M. Yoshida, “Lyman Break Galaxies at $z \sim 1.8-2.8$: GALEX/NUV Imaging of the Subaru Deep Field”, *Astrophysical Journal*, 査読有, Vol. 697, pp.1410-1432 (2009)
- ② Hatsukade, B., D. Iono, K. Motohara, K. Nakanishi, M. Hayashi, K. Shimasaku, T. Nagao, Y. Tamura, M. A. Malkan, C. Ly, and K. Kohno, “A Search for Molecular Gas toward a BzK-selected Star-forming Galaxy at $z=2.044$ ”, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 査読有, Vol. 61, pp.487-491 (2009)
- ③ Hayashi, M., K. Motohara, K. Shimasaku, M. Onodera, Y. Katsuno Uchimoto, N. Kashikawa, M. Yoshida, S. Okamura, C. Ly, and M. A. Malkan, “Star Formation Rates and Metallicities of K-selected Star Forming Galaxies at $z \sim 2$ ”, *Astrophysical Journal*, 査読有, Vol. 691, pp.140-151 (2009)
- ④ Sumiyoshi, M., S. Oshige, T. Totani, K. Glazebrook, M. Akiyama, T. Morokuma, K. Motohara, K. Shimasaku, M. Yoshida, M. Hayashi, N. Kashikawa, and T. Kodama, “Testing the Target Selection for Future Spectroscopic BAO Surveys by SDF and SXDS Data”, *ASP Conference Series*, 査読無, Vol. 399, p.487 (2008)
- ⑤ Hayashi, M., K. Motohara, K. Shimasaku, M. Onodera, Y. K. Uchimoto, N. Kashikawa, and M. Yoshida, “Near-Infrared Spectroscopy of BzK Galaxies with

Subaru/MOIRCS”, *ASP Conference Series*, 査読無, Vol.399, p.282 (2008)

- ⑥ Motohara, K., M. Hayashi, K. Shimasaku, M. Yoshida, N. Kashikawa, and T. Kodama, “Deep- and Wide-field K-band Imaging of the Subaru Deep Field: Implications for Galaxy Formation at $z \sim 2$ ”, *ASP Conference Series*, 査読無, Vol.399, p.274 (2008)
- ⑦ Hayashi, M., K. Shimasaku, K. Motohara, M. Yoshida, S. Okamura, and N. Kashikawa, “Luminosity dependent clustering of star-forming BzK galaxies at redshift 2”, *Astrophysical Journal*, 査読有, Vol. 660, pp.72-80 (2007)

[学会発表] (計 8 件)

- ① 五十嵐創、河野孝太郎、本原顕太郎、嶋作一大、塚越崇、廿日出文洋、中島王彦、井上裕文、川村雅之、高木俊暢、田村陽一、伊王野大介、川辺良平、江澤元、中西康一郎、Grant Wilson、Min S. Yun、David Hughes、『1.1 mm AzTEC MAPでのスタッキング解析によるsBzK銀河の星質量と星形成率の関係』、日本天文学会 2010 年春季年会 (広島大学)
- ② 中島王彦、嶋作一大、林将央、本原顕太郎、五十嵐創 (東京大学)、柏川伸成 (国立天文台)、M. A. Malkan、C. Ly、『Subaru Deep Fieldにおける1.6 μ m bumpを用いた銀河選択』、日本天文学会 2009 年秋季年会 (山口大学)
- ③ 五十嵐創、河野孝太郎、本原顕太郎、田村陽一、廿日出文洋、井上裕文、田代素子、川村雅之、川辺良平、江澤元、中西康一郎、Grant Wilson、Min S. Yun、David Hughes、他AzTEC/ASTEチーム、『AzTEC/ASTEによるSubaru Deep Field領域でのサブミリ波銀河探査』、日本天文学会 2009 年春季年会 (大阪府立大学)
- ④ 廿日出文洋、本原顕太郎、河野孝太郎、林将央、伊王野大介、中西康一郎、『Search for molecular gas in a BzK-selected star-forming galaxy at $z = 2.044$ 』、日本天文学会 2008 年秋季年会 (岡山理科大学)
- ⑤ 林将央、本原顕太郎、嶋作一大、小野寺仁人、内一・勝野由夏、柏川伸成、岡村定矩、Chun Ly、M. A. Malkan、『 $z \sim 2$ におけるK-selected星形成銀河の星形成率と金属量』、日本天文学会 2008 年秋季年会 (岡山理科大学)
- ⑥ 本原顕太郎、林将央、嶋作一大、吉田真希子、柏川伸成、児玉忠恭、『すばるディープフィールドに見る $z \sim 2$ passive

galaxy 進化』、日本天文学会 2008 年秋季年会（岡山理科大学）

- ⑦ 住吉昌直、大重俊輔、戸谷友則、K. Glazebrook、秋山正幸、本原顕太郎、諸隈智貴、柏川伸成、児玉忠恭、嶋作一大、吉田真希子、林将央、『SDF、SXDF 銀河を用いた BAO 探査に対する示唆』、日本天文学会 2008 年春季年会（国立オリンピック記念青少年総合センター）
- ⑧ 林将央、本原顕太郎、嶋作一大、小野寺仁人、内一・勝野由夏、吉田真希子、柏川伸成、岡村定矩、『MOIRCS を用いた BzK 銀河の近赤外分光観測』、日本天文学会 2007 年秋季年会（東海大学）

〔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

<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kmotohara/wfcam/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

本原顕太郎（もとはらけんたろう）
東京大学・理学系研究科・准教授
研究者番号：90343102

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

嶋作一大（しまさくかずひろ）
東京大学・理学系研究科・准教授
研究者番号：00251405