

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23740144

研究課題名(和文)高赤方偏移銀河団の統計的研究

研究課題名(英文)Statistical Analysis of High Redshift Galaxy Clusters

研究代表者

田中 賢幸(Tanaka, Masayuki)

国立天文台・ハワイ観測所・特任助教

研究者番号：50589207

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：銀河の形成と進化は銀河を取り巻く環境に大きく依存する。その起源を遠方銀河団の統計的研究から明らかにすることが本研究の目標である。X線と可視・近赤外データを用いた手法で遠方銀河団探査を行ったところ、約95億年前の小質量銀河団を発見した。この銀河団は現在の宇宙における典型的な質量の銀河団の祖先であるが、95億年前にもかかわらず、すでに星形成をやめた早期型銀河で支配されていたことは非常に興味深い。また、105億年前の原始銀河団の研究も進め、早期の銀河形成を示唆する結果が得られた。これらから、非常に初期の段階から銀河は環境の影響を受けていたことが示唆される。

研究成果の概要(英文)：The formation and evolution of galaxies are dependent on environments within large-scale structure. In order to understand physical processes driving the environment-dependent galaxy evolution, we aim to perform a statistical analysis of distant galaxy clusters. We searched for distant clusters by using both X-ray and optical-nearIR data and confirmed a low-mass cluster of galaxies at 9.5 billion years ago. This cluster is likely a progenitor of today's cluster of typical mass, but interestingly, the cluster is dominated by quiescent early-type galaxies. We also studied a proto-cluster located at 10.5 billion years ago and our results hint at an accelerated formation of cluster galaxies. These results suggest that environments play an important role since an early phase of galaxy formation and evolution.

研究分野：銀河形成・進化

キーワード：銀河団 銀河形成・進化

### 1. 研究開始当初の背景

銀河の形成・進化は銀河を取り囲む環境に依存していることが知られている。しかしながら、その物理的な素過程は観測的な理解が進んでおらず、長年における問題となっていた。その鍵となるのは遠方銀河団であるが、遠方銀河団は非常に数密度が低い為、天体発見自体が難しく、確認されている遠方銀河団の数が非常に限られていることが、我々の理解を妨げる要因の一つとなっていた。我々は X 線と可視・近赤外データを組み合わせた手法を新たに開発し、いわゆるディープフィールドを深く広く探査することで、赤方偏移 1.62 における当時の最遠方銀河団を 2010 年に発見した。ここを皮切りに遠方銀河団サイエンスはにわかに活発となり、この分野での主導権を握るためにも、世界に先駆けた遠方銀河団の統計的研究が急務となった。

### 2. 研究の目的

銀河形成は宇宙初期の密度揺らぎが重力的に成長したもので、本質的に統計的な天体である。銀河団は数密度の低い天体だが、その中で銀河形成・進化を探るにはやはり統計的研究が必要不可欠である。そこで、我々の開発した X 線と可視・近赤外データを併用する手法を様々なディープフィールドに適用し、広い天域を探査することで遠方銀河団の統計的サンプルを構築し、その中の銀河種族を詳細に調べ、高密度領域における銀河形成進化を観測的に理解することを目的とした本研究がスタートした。もちろん、この分野をリードすることも重要で、我々自身の記録を超える最遠方銀河団の発見も大きな目標の一つである。

### 3. 研究の方法

銀河団探査にはいくつかの手法がある。空間的に広がった X 線を捕らえるものや、可視・近赤外測光データを用いて赤い銀河の集中を捉えるもの、または測光的赤方偏移を用いて、ある赤方偏移における銀河の密度超過を探るもの等である。それぞれの手法は、特に検出限界ぎりぎりの遠方天体を狙う場合には、しばしば誤検出を伴う。そこで、我々は X 線による広がった X 線検出と可視・近赤外データを用いた赤い銀河の超過を探る手法を組み合わせることで、検出限界ぎりぎりまで比較的誤検出の少ない手法を開発した。これが我々の遠方銀河団の探査手法である。

これを行うためには、多波長データのそろっているいわゆるディープフィールドを狙う必要がある。こういった領域は全天で数領域あり、遠方銀河団を狙うには十分な広さと深さになっている。また、すでに多くの分光観測もされていて、我々で分光追観測をする必要が必ずしもないことも利点である(実際、後

述する赤方偏移 1.61 の小質量銀河団はすでに公開されている分光赤方偏移を用いて確認した)。さらに、ハッブル宇宙望遠鏡による高解像度のデータがしばしば存在するので、これを用いた銀河の形態や物理的大きさの研究ができることも大きな利点である。

それと平行して、我々が今まで進めてきた原始銀河団研究も進める。原始銀河団は銀河団の祖先で、進化を追って銀河団銀河を調べる際には極めて重要な天体である。赤方偏移 2.2 の原始銀河団は我々が今まで研究を進めてきていて、本研究の主目的である遠方銀河団探査と相補的となる研究対象である。

### 4. 研究成果

#### (1) X 線銀河団

人類の持つ最も深い X 線、可視・近赤外データは Chandra Deep Field South (CDFs) にある。このフィールドを上述した手法で解析したところ、赤方偏移 1.6 付近に小質量の銀河団候補を発見した (Tanaka, Finoguenov, et al. 2013, PASJ, 65, 17)。このフィールドにはすでに多くの分光データが存在していて、我々自身で分光追観測をすることもなく銀河団の赤方偏移を 1.61 と確認し、非常に素早く論文にできたのは特筆すべき点である。

図 1 にその銀河団の画像を示す。この銀河団は非常に小質量の銀河団 ( $\sim 3 \times 10^{13}$  太陽質量) で、現在の宇宙にいる典型的な銀河団の祖先にあたる天体である。そういった形成初期段階にある銀河団は近傍銀河団と大きく違う性質を持っていてもおかしくないが、非常に驚くべきことにこの小質量銀河団には星形成をしている銀河はほとんど存在せず、多くは星形成をしていない銀河であった。ハッブル宇宙望遠鏡の高解像度画像からこれらの銀河は早期型銀河であることも確認できた。すなわち、近傍銀河団同様、銀河団には約 95 億年前でも星形成をしていない早期型銀河が数多く存在したのである。

他のフィールドにおいても同様に銀河団カタログを作成し (Erfanianfar et al. 2013, ApJ, 765, 117 など)、それらをまとめて銀河団における星形成活動が時間とともにどう進化してきたかを赤方偏移 0 から 1.5 にかけて統計的に調べた (Ziparo et al 2013, MNRAS, 434, 4089, Ziparo et al. 2014, MNRAS, 437, 458)。銀河団内での星形成活動は赤方偏移 1.62 の銀河団ではフィールドと比べて活発になっているという論文が出版され話題になったが (Tran et al. 2010, ApJ, 719, L126)、我々の用いた統計サンプルでは、低赤方偏移と比べて星形成は多少活発になるが、そのような逆転現象は起きていないようであった。これは統計サンプルを用いることの重要性

を示していて、我々の研究の方向性の正しさが証明される結果であった。

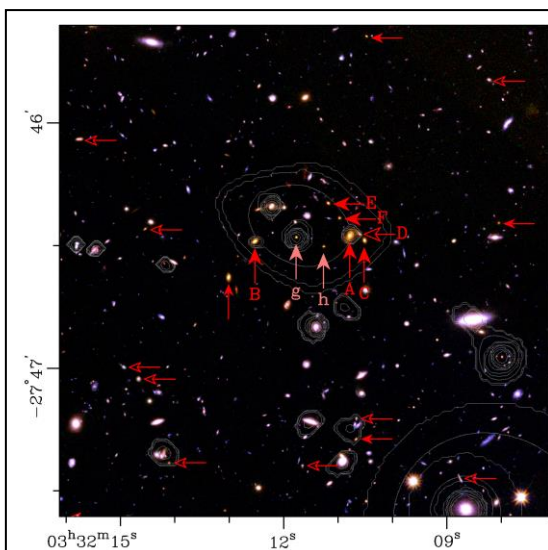


図 1: 赤方偏移 1.61 にある低質量銀河団。等高線で X 線の強度を表し、矢印でこの銀河団に属すると思われる天体を示している。

これらの銀河団カタログは様々な用途に使われていて、例えば X 線で選択した活動銀河核の研究 (Tanaka et al. 2012, PASJ, 64, 22, Oh et al. 2014, ApJ, 790, 43) や非熱的 X 線放射の研究 (Vibor et al. 2012, 423, 2735)、さらには弱い重力レンズ効果の研究 (Taylor et al. 2012, ApJ, 749, 127, Ford et al. 2012, ApJ, 754, 143, Schmidt et al. 2012, ApJ, 744, L22) にも用いられている。

## (2) 原始銀河団

これらの X 線銀河団と相補的な原始銀河団 (通常 X 線は検出されない) の研究も推し進めた。赤方偏移 2.2 にある原始銀河団 PKS1138 にある多波長データを用いて、形成過程にある銀河団銀河の性質を調べた。ここですばる望遠鏡の MOIRCS という近赤外分光器を用いて、原始銀河団銀河の静止系可視光のスペクトルを得ることで、これらの銀河の形成タイムスケールに強い制限をつけることができた (Tanaka et al. 2013, ApJ, 772, 113)。

図 2 に星形成をしていない原始銀河団銀河の平均スペクトルを示す。すばるを用いたとしても、こういった観測は非常に難しく、精度のいいスペクトルを得にくい。しかし、このスペクトルから原始銀河団の巨大銀河は 10 億年以下のタイムスケールで赤方偏移 4 前後で形成されたことが示唆された。これは近傍宇宙の銀河の詳細な解析と整合的な結果である。しかし、赤方偏移 2.2 という銀河の形成期にかなり近い時代に得た制限で、非常に意義が大きい。あまり統計的優位性は现阶段では高くないが、フィールド銀河と比べて形成時期が早いという示唆も得られている。現在、さらなる分光データも得られているが、

新しいデータで確認できれば非常に興味深い結果である。

さらに、ハッブル宇宙望遠鏡のデータから、こうした原始銀河団銀河はフィールド銀河と比べてわずかながら物理的な大きさが大きいという示唆が得られた (Zirm, Toft, Tanaka 2012, ApJ, 744, 181)。また、ダストに隠された星形成をしている銀河も多いようである (Koyama et al. MNRAS, 428, 1511, Dannerbauer et al. 2014, A&A, 570, A55)。原始銀河団が先に述べた X 線銀河団と異なる性質を持っているのは面白い。これは、銀河団はその形成期には活発な星形成をするものの、一旦重力的につぶれると星形成が抑制されることを示唆しているのかもしれない。

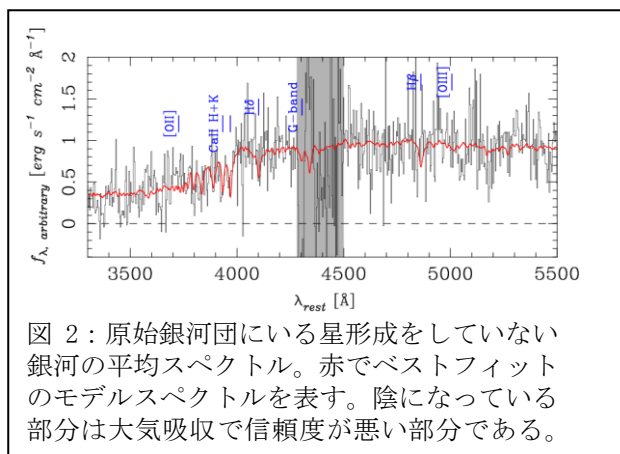


図 2: 原始銀河団にいる星形成をしていない銀河の平均スペクトル。赤でベストフィットのモデルスペクトルを表す。陰になっている部分は大気吸収で信頼度が悪い部分である。

## (3) 予想外の発展

こういったスペクトル解析から得た技術はもともと予測していない方向へも発展した。その一つは活動銀河核 (AGN) の研究である。AGN は通常 X 線や可視・近赤外スペクトルから得られる輝線比による診断により同定されるが、我々はこの技術をもとに、スペクトルの連続光と輝線を独立に解析する、という全く新しい視点で新しい AGN 同定方法を開発した (Tanaka 2012, PASJ, 64, 36, Tanaka 2012, PASJ, 64, 37)。輝線比診断では通常 4 本の輝線を必要とし、強い AGN でないと適用できないが、この新しい手法は輝線 1 本でできるため、非常に弱い AGN まで見つけることができる。さらに、輝線においてホスト銀河と AGN を分離することができるので、両者の関係を調べる上では理想的な手法である。もちろん、非常に強い AGN には適用できないなど制限もあるが、今後も活用できる手法である。

もう一つの発展は測光的赤方偏移である。これは基本的にスペクトル解析の簡易版のようなもので、銀河の見目の色や明るさから銀河の赤方偏移を推定するという技術で、銀河サイエンスには必要不可欠のものである。従来は観測された銀河のスペクトルをテンプレートとして用いることが多かったが、あえて種族合成モデルによるスペクトルを使

うことで、モデルから出てくる星質量や星形成率といった物理量に事前確率をベイズ統計に基づいて叩き込むことができ、それにより精度のいい測光的赤方偏移が得られることを発見した(Tanaka 2015, ApJ, 801, 20)。赤方偏移に加え、銀河の物理性質も同時かつ整合的に推定できることから、現在、日本が一丸となって進めている Hyper Suprime-Cam による大規模撮像サーベイで中心的に使われているコードとなっている。

最後に本研究を総括すると、遠方銀河団の統計的探索という目的はおおよそ達成できていると思われる。もちろん、最遠方銀河団の発見ができなかったことや、赤方偏移 1.5 を越える銀河団のサンプルがまだ統計サンプルと呼べる大きさには至っていないなど達成できなかった点もあり、今後も遠方銀河団の研究は継続する。CDFs において人類の持つ最も深い X 線銀河団カタログをつい先日論文文化したが(Finoguenov, Tanaka et al. 2015, A&A, 576, 130)、その後も新しいデータは常に入ってきていて、現在は COSMOS フィールドにおける銀河団カタログの改訂作業中であるし、原始銀河団の非常に深いスペクトルも解析中である。今後入ってくる更なるデータをもとに、本研究の目的を完全に達成できるよう今後も努力する。

## 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 45 件)

- ① Finoguenov, A., Tanaka, M., et al (ほか 25 名). 2015, *Astronomy & Astrophysics*, 780, 58, “Ultra-deep catalog of X-ray groups in the Extended Chandra Deep Field South” 査読有, DOI: 10.1051/0004-6361/201323053
- ② Tanaka, M., 2015, *Astrophysical Journal*, 801, 20, “Photometric Redshift with Bayesian Priors on Physical Properties of Galaxies”, 査読有 DOI: 10.1088/0004-637X/801/1/20
- ③ Ziparo et al. (30 人中 8 番目), 2014, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 437, 458, “Reversal or no reversal: the evolution of the star formation rate-density relation up to  $z \sim 1.6$ ”, 査読有, DOI: 10.1093/mnras/stt1901
- ④ Santos, J. S., Altieri, B., Tanaka, M., et al. (他 7 名), 2014, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 438,

2565, “Star formation in the cluster CLG0218.3-0510 at  $z = 1.62$  and its large-scale environment: the infrared perspective”, 査読有, DOI: 10.1093/mnras/stt2376

- ⑤ Oh, S., et al. (9 人中 5 番目), *Astrophysical Journal*, 790, 43, “The Active Galactic Nucleus Population in X-Ray-selected Galaxy Groups at  $0.5 < z < 1.1$ ”, 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/790/1/43
- ⑥ Tanaka, M., et al. (他 8 名), 2013, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 65, 17, “An X-Ray Detected Group of Quiescent Early-Type Galaxies at  $z = 1.6$  in the Chandra Deep Field South”, 査読有, DOI: 10.1093/pasj/65.1.17
- ⑦ Erfanianfar, G., Finoguenov, A., Tanaka, M., et al (他 19 名), 2013, *Astrophysical Journal*, 765, 117, “X-Ray Groups of Galaxies in the AEGIS Deep and Wide Fields”, 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/765/2/117
- ⑧ Tanaka, M., et al. (他 9 名), 2013, *Astrophysical Journal*, 772, 113, “On the Formation Timescale of Massive Cluster Ellipticals Based on Deep Near-infrared Spectroscopy at  $z \sim 2$ ”, 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/772/2/113
- ⑨ Ziparo, F., et al. (30 人中 8 番目), 2013, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 434, 3089, “The lack of star formation gradients in galaxy groups up to  $z \sim 1.6$ ”, 査読有, DOI: 10.1093/mnras/stt1222
- ⑩ Zirm, A., Toft, S., Tanaka, M., 2012, *Astrophysical Journal*, 744, 181, “Internal Structure of Protocluster Galaxies: Accelerated Structural Evolution in Overdense Environments?”, 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/744/2/181
- ⑪ Tanaka, M. et al. (他 51 名), 2012, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 64, 22, “X-Ray Groups of Galaxies at  $0.5 < z < 1$  in zCOSMOS: Increased AGN Activities in High Redshift Groups”, 査読有, DOI: 10.1093/pasj/64.2.22
- ⑫ Tanaka, M., 2012, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 64, 36, “A Method of Identifying AGNs Based on Emission-Line Excess and the Nature of Low-Luminosity AGNs in the Sloan Digital Sky Survey. I. A New Method”, 査読有, DOI: 10.1093/pasj/64.2.36
- ⑬ Tanaka, M., 2012, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 64, 37,

“A Method of Identifying AGNs Based on Emission-Line Excess and the Nature of Low-Luminosity AGNs in the Sloan Digital Sky Survey. II. The Nature of Low-Luminosity AGNs”, 査読有, DOI: 10.1093/pasj/64.2.37

[学会発表] (計 21 件)

- ① Tanaka, M., “Subaru Hyper Suprime-Cam Survey”, 国際研究会「Future Directions in Galaxy Cluster Surveys」、2014年6月24日、パリ(フランス)
- ② Tanaka, M., “Direct Measurements of the Formation Timescale of Massive Cluster Ellipticals Based on Deep NearIR Spectroscopy at  $z \sim 2$ ”, 国際研究会「Multiwavelength-surveys: Galaxy Formation and Evolution from the early universe to today」、2014年5月15日、ドブロフニク(クロアチア)
- ③ Tanaka, M., “Photometric Redshift with Bayesian Priors on Physical Properties of Galaxies”, 国際研究会「Photometric Redshifts for Large Scale Surveys」、2013年9月5日、台北(台湾)
- ④ Tanaka, M., “Quiescent early-type galaxies in  $z > 1.5$  groups”, 国際研究会「Growing-up at high redshifts: from proto-clusters to galaxy clusters」、2012年9月10日、マドリード(スペイン)
- ⑤ Tanaka, M., “Quiescent early-type galaxies in  $z > 1.5$  groups”, 国際研究会「IAU 28th General Assembly Special Session 2: Cosmic evolution of groups and clusters of galaxies」、2012年8月20日、北京(中国)
- ⑥ Tanaka, M., “Quiescent early-type galaxies in  $z > 1.5$  groups”, 国際研究会「IAP-Subaru Joint International Conference: Stellar Populations across Cosmic Times」、2012年6月26日、パリ(フランス)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中賢幸 (TANAKA, Masayuki)  
自然科学研究機構 国立天文台・ハワイ観測所・特任助教  
研究者番号：50589207

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：