

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14530

研究課題名（和文）大規模すばるHSC・赤外線衛星データで探る銀河とブラックホールの環境依存性の起源

研究課題名（英文）The environmental dependance of galaxy/BH growth studied with Subaru and infrared archival data

研究代表者

久保 真理子 (Mariko, Kubo)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：40743216

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：電波銀河やすばる望遠鏡で選ばれた $z\sim 6$  クエーサー領域のWISE、プランク等赤外線望遠鏡アーカイブデータ解析から、 $z\sim 6$ までの遠方銀河高密度領域=原始銀河団の平均的な総赤外線放射を解明した。これにより、幅広い宇宙史に渡り原始銀河団領域では典型的に隠れた銀河形成ブラックホール進化があることがわかった。また個別原始銀河団の近赤外線分光観測等から、原始銀河団として最遠方の楕円銀河、活動銀河核がまさに星形成を抑制している銀河団楕円銀河を同定し、原始銀河団における銀河の激動的進化期の様子を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではアーカイブデータを用いて原始銀河団中遠赤外線放射の大規模調査を行い、その隠れた銀河形成・ブラックホール降着率の進化を初めて統計的に解明した。先行研究では精度が低かった中間赤外線解析も高精度化し、現在稼働中のどの望遠鏡にも困難な中遠赤外線の目となる手法を実証したことは、今後の遠方銀河研究において高い意義を持つ。2023年に打ち上げが予定されるユークリッド望遠鏡やルービン天文台、ローマン宇宙望遠鏡で得られる銀河団原始銀河団カタログにより、より多様な銀河環境について統計的研究を展開することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：We showed the dramatic evolution of galaxies in protoclusters based on wide and deep imaging surveys and detailed observations of individual protoclusters. The average infrared emission from a protocluster at  $z < 6$  was constrained using the catalog of radio galaxies and QSOs selected using the Subaru telescope and infrared archival data from WISE and Planck. It shows a significant obscured star formation and BH growths in protoclusters across cosmic time statistically. The most distant giant elliptical and a giant elliptical with active galactic nuclei, which likely quench star formation, in a protocluster ( $z \sim 3$ ) were confirmed.

研究分野：銀河形成進化

キーワード：銀河形成進化

## 1. 研究開始当初の背景

銀河が劇的に進化したとされる 100 億年以上遠方の宇宙では、アルマなどのサブミリ波望遠鏡によって、塵に隠された爆発的星形成銀河がしばしば見つかっている。銀河形成進化史を解明するには、こうした可視光だけでは見えず、塵からの赤外線再放射で観測されるような隠れた星形成銀河や活動銀河核の検出が不可欠である。また、現在の銀河の性質には、銀河団は巨大楕円銀河が占める環境依存性があり、現在の銀河の星種族を鑑みると 100 億年を超える遠方で楕円銀河が現れ始めたことが期待される。よって銀河進化の解明には、遠方宇宙の多様な環境の多様な銀河種族の様子を解明する必要があるが、遠方銀河高密度領域＝原始銀河団の多波長観測はまだほとんど行われていなかった。とりわけ、遠赤外線帯(数 100 ミクロン)は現在稼働中の望遠鏡さえない。

## 2. 研究の目的

プランク衛星等の中遠赤外線アーカイブデータ、すばる望遠鏡大規模探査等で発見された赤方偏移  $z=1\sim 6$  原始銀河団大規模カタログを組み合わせ、その平均的中遠赤外線放射を検出し、隠れた銀河形成・ブラックホール進化史を解明する。また、個々の原始銀河団銀河の詳細な近赤外分光観測などから、原始銀河団で巨大楕円銀河がいつ生まれたか、どのように星形成が抑制されたかを解明する。

## 3. 研究の方法

- (1) すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC)大規模探査等で発見された 100 領域を超える原始銀河団候補について、プランク衛星、WISE 衛星等による中遠赤外線全天観測アーカイブのスタック解析を行い、平均的な中遠赤外線放射を解明する。
- (2) アタカマ宇宙論望遠鏡で発見された重力レンズではないとされるミリ波源のアルマ望遠鏡フォローアップ観測から、最もダスティな  $z>4$  原始銀河団を探索する。
- (3) 既知の原始銀河団の楕円銀河候補、活動銀河核の近赤外線分光観測から、楕円銀河の星形成史や星形成抑制メカニズムを探る。

ただし、(1)に関しては研究期間中盤に、すばる望遠鏡 HSC で探索した銀河の面密度超過に基づく原始銀河団カタログを用いる予定であったが、研究期間内に得られた原始銀河団カタログにはまだ不定性があり、初期データリリースを用いた先行研究を大きく超える成果を出すことが難しいことが判明した。そのため、ややサンプルに偏りがあるが確度の高い原始銀河団領域候補である、明るい遠方電波銀河、 $z>5$  クエーサー周辺領域をターゲットとした。

## 4. 研究成果

- (1)  $z=1-3$  における原始銀河団の隠れた銀河ブラックホール進化  
原始銀河団研究の黎明期から、明るい電波銀河は原始銀河団の良いトレーサーとして知られている。分光同定された明るい電波銀河のアーカイブデータに基づき、 $\Delta z=0.5$ あたり 100-300 個の電波銀河カタログを再構築した。電波銀河を中心とした領域のプランク衛星、WISE 衛星アーカイブ画像を切り出し、スタック解析(画像の平均合成)を行い、原始銀河団の平均的な赤外線放射の進化を解明した(図 1)。これにより、初めて  $z=1\sim 3$  にわたる原始銀河団の星形成史の進化がわかった(図 2)。研究代表者の  $z\sim 4$  原始銀河団に対する同様の先行研究(Kubo et al. 2019, ApJ, 887, 214)で示唆していた、形成中のブラックホール、活動銀河核由来の中遠赤外線放射も強く超過していることを確かめた。また、低赤方偏移の原始銀河団ではブラックホール降着率が星形成率を卓越している可能性を示した。これらの研究成果は、国際研究会で発表しており、令和 5 年度に査読誌に投稿する。
- (2)  $z\sim 6$  QSO 周辺領域における密度超過の検出  
すばる望遠鏡などから得られた  $z\sim 6$  クエーサー周辺領域についても同様の解析を行い WISE、Planck での検出から、 $z\sim 6$  クエーサー周辺に平均的に密度超過があることを示した。最も遠方で、クエーサーが典型的に密度超過領域に存在することを初めて示した成果である。WISE は静止系可視光に相当し、すでに多くの大質量銀河が  $z\sim 6$  密度超過領域に存在することを示している。本研究成果は令和 5 年度に査読誌に投稿する。

(3)  $z \sim 5$  のダスティな原始銀河団の系統的調査

アタカマ宇宙論望遠鏡で発見された、重力レンズ天体以外のミリ波源のアルマ望遠鏡を用いた高分解能観測を行うことで、それらが銀河高密度領域であることを示した。既存の多色のデータを組み合わせ、 $z \sim 5$  の大質量銀河群候補であることがわかり、すばる望遠鏡でのフォローアップ観測提案が採択された。今後これらの観測結果をもとに査読誌に論文を投稿する。

(4)  $z \sim 3$  原始銀河団の巨大楕円銀河の分光同定と、巨大楕円銀河における活動銀河核アウトフローの解析

Keck 望遠鏡 MOSFIRE を用いた近赤外分光観測等から、原始銀河団として最遠方の巨大楕円銀河を同定した。分光スペクトルに基づく星形成史の解析から、おそらく宇宙年齢 10 億年の頃には 10 の 11 乗太陽質量以上の星質量を獲得し、急激に星形成を止めたものと考えられる。銀河団領域における急激な大質量銀河形成を示している。また、別の巨大楕円銀河で活動銀河核を持つものに強いアウトフローを発見した。母銀河のスペクトルから、この銀河は星形成抑制後十分時間が経っており、活動銀河核は星形成がある程度抑制されたのちに再稼働し、星形成抑制の維持あるいは完了のために働いたことを示唆している。これらの研究結果は *Astrophysical Journal* 誌に 2 本の査読付論文として出版された。

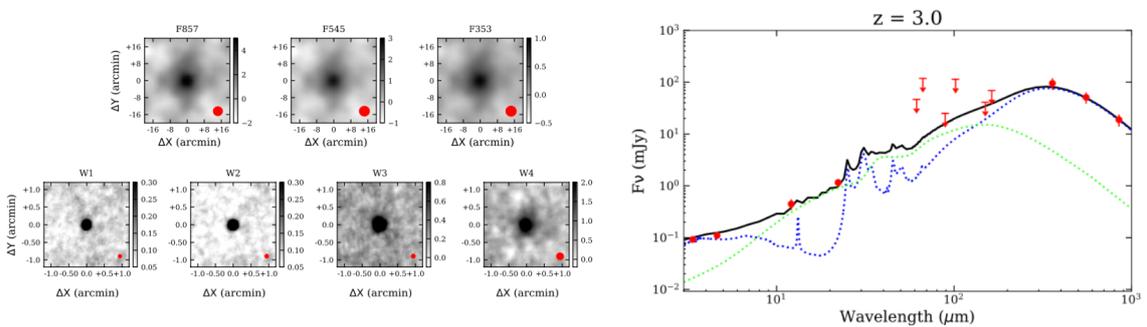


図 1:  $z = 3$  電波銀河の平均合成画像 (上段: Planck 350–850 $\mu\text{m}$ 、下段: WISE 3–20  $\mu\text{m}$ ) と得られた中遠赤外線スペクトルエネルギー強度分布 (赤丸)。星形成銀河 (青) と活動銀河核 (緑) の合成モデル (黒太線) に合う形状をしている。

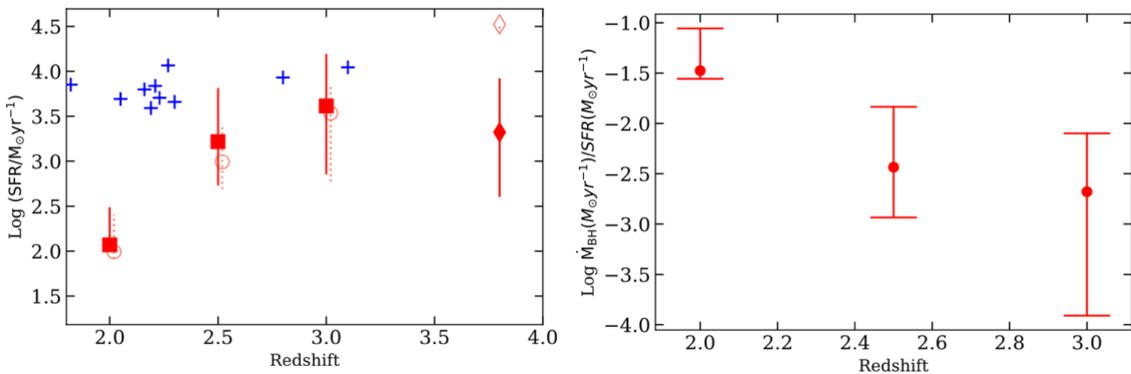


図 2: (左) 原始銀河団の総星形成率の赤方偏移進化 (赤丸)。(右) スペクトルに基づく、ブラックホール降着率と星形成率の比の進化。低赤方偏移側ほど星形成率に対しブラックホール降着率が卓越している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kubo Mariko, Umehata Hideki, Matsuda Yuichi, Kajisawa Masaru, Steidel Charles C., Yamada Toru, Tanaka Ichi, Hatsukade Bunyo, Tamura Yoichi, Nakanishi Kouichiro, Kohno Kotaro, Lee Kianhong, Matsuda Keiichi	4. 巻 919
2. 論文標題 A Massive Quiescent Galaxy Confirmed in a Protocluster at $z = 3.09$	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 6~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac0cf8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ito Kei, Kashikawa Nobunari, Toshikawa Jun, Overzier Roderik, Kubo Mariko, Uchiyama Hisakazu, Liang Yongming, Onoue Masafusa, Tanaka Masayuki, Komiyama Yutaka, Lee Chien-Hsiu, Lin Yen-Ting, Marinello Murilo, Martin Crystal L., Shibuya Takatoshi	4. 巻 899
2. 論文標題 The UV Luminosity Function of Protocluster Galaxies at $z \sim 4$ : The Bright-end Excess and the Enhanced Star Formation Rate Density	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 5~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aba269	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Uchiyama Hisakazu, Akiyama Masayuki, Toshikawa Jun, Kashikawa Nobunari, Overzier Roderik, Nagao Tohru, Ichikawa Kohei, Marinello Murilo, Imanishi Masatoshi, Tanaka Masayuki, Matsuoka Yoshiki, Komiyama Yutaka, Ishikawa Shogo, Onoue Masafusa, Kubo Mariko, Harikane Yuichi, Ito Kei, Namiki Shigeru, Liang Yongming	4. 巻 905
2. 論文標題 Faint Quasars Live in the Same Number Density Environments as Lyman Break Galaxies at $z \sim 4$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 125~125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abc47b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kubo Mariko, Umehata Hideki, Matsuda Yuichi, Kajisawa Masaru, Steidel Charles C., Yamada Toru, Tanaka Ichi, Hatsukade Bunyo, Tamura Yoichi, Nakanishi Kouichiro, Kohno Kotaro, Lee Kianhong, Matsuda Keiichi, Ao Yiping, Nagao Tohru, Yun Min S.	4. 巻 935
2. 論文標題 An AGN with an Ionized Gas Outflow in a Massive Quiescent Galaxy in a Protocluster at $z = 3.09$	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 89 ~ 89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac7f2d	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Uchiyama Hisakazu, Yamashita Takuji, Nagao Tohru, Ichikawa Kohei, Toba Yoshiki, Ishikawa Shogo, Kubo Mariko, Kajisawa Masaru, Kawaguchi Toshihiro, Kawakatu Nozomu, Lee Chien-Hsiu, Noboriguchi Akatoki	4. 巻 934
2. 論文標題 A Wide and Deep Exploration of Radio Galaxies with Subaru HSC (WERGS). VII. Redshift Evolution of Radio Galaxy Environments at $z = 0.3-1.4$	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 68 ~ 68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac77ee	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ito Kei, Tanaka Masayuki, Valentino Francesco, Toft Sune, Brammer Gabriel, Gould Katriona M. L., Ilbert Olivier, Kashikawa Nobunari, Kubo Mariko, Liang Yongming, McCracken Henry J., Weaver John R.	4. 巻 945
2. 論文標題 COSMOS2020: Discovery of a Protocluster of Massive Quiescent Galaxies at $z = 2.77$	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L9 ~ L9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/acb49b	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Uchiyama Hisakazu, Yamashita Takuji, Nagao Tohru, Ono Yoshiaki, Toshikawa Jun, Ichikawa Kohei, Kawakatu Nozomu, Kajisawa Masaru, Toba Yoshiki, Matsuoka Yoshiki, Kubo Mariko, Imanishi Masatoshi, Ito Kei, Kawaguchi Toshihiro, Lee Chien-Hsiu, Saito Tomoki	4. 巻 74
2. 論文標題 A Wide and Deep Exploration of Radio Galaxies with Subaru HSC (WERGS). IX. The most overdense region at $z \sim 5$ inhabited by a massive radio galaxy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 L27 ~ L32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac075	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 久保真理子
2. 発表標題 AGN-driven outflow in a massive quenched galaxy at high redshift
3. 学会等名 East-Asia AGN Workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久保真理子
2. 発表標題 遠方Type 2 AGN探査による銀河BH共進化の解明
3. 学会等名 FORCE 検討会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久保真理子
2. 発表標題 Ionized gas outflows from an AGN in a massive quiescent galaxy in a protocluster at $z = 3.09$
3. 学会等名 すばるUsers meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久保真理子
2. 発表標題 Ionized gas outflows from an AGN in a massive quiescent galaxy in a protocluster at $z = 3.09$
3. 学会等名 日本天文学会2021春期年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久保真理子
2. 発表標題 南極望遠鏡で探る、遠方銀河団の隠れた銀河BH形成
3. 学会等名 南極から遠赤外線-テラヘルツ波で探る宇宙 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kubo, M.
2. 発表標題 Mid to far-Infrared view of protoclusters at z-4
3. 学会等名 Protoclusters; Galaxy evolution in confinement (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kubo, M.
2. 発表標題 Mid to far-Infrared view of protoclusters at z-4
3. 学会等名 Galaxy Formation and Evolution in the Era of the Nancy Grace Roman Space Telescope (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kubo, M.
2. 発表標題 The average MIR-FIR properties of protoclusters at z ~4
3. 学会等名 Subaru Users Meeting FY2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kubo, M.
2. 発表標題 A massive quiescent galaxy confirmed in a protocluster at $z=3.09$
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kubo. M
2. 発表標題 Exploring the infrared emission from protoclusters with Euclid
3. 学会等名 Galaxy evolution with the ESA Euclid mission and the ESO telescopes (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関