

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K13968

研究課題名（和文）大質量銀河形成を支配する電波ジェットの実体解明

研究課題名（英文）Unraveling the Nature of Radio Jets Governing the Formation of Massive Galaxies

研究代表者

山下 拓時（Yamashita, Takuji）

国立天文台・ハワイ観測所・特任研究員

研究者番号：20800759

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,300,000円

研究成果の概要（和文）：大質量銀河は宇宙初期には既に形成されたことが示されており、更なる質量成長を停止させる機構の候補として電波銀河の放つ電波ジェットがある。しかしこれまで遠方宇宙の電波銀河探索自体が進んでおらず、大質量銀河形成と電波ジェットの関係の理解は不十分であった。本課題はすばる望遠鏡Hyper Suprime-Camサーベイデータと広域電波探査データを用いて、初期宇宙における電波銀河の探査を開拓し、宇宙初期の大質量銀河形成と電波ジェットとの関係を明らかにするものである。本課題において赤方偏移4以上の遠方電波銀河サンプルを初めて構築し、分光観測追観測を実施した。遠方電波銀河が付随する大規模構造を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の宇宙に存在する全星質量の多くを占める大質量銀河の形成と進化を解き明かすことは天文学の一大課題である。本研究では、最新のすばる望遠鏡Hyper Suprime-Camサーベイデータと電波サーベイデータを活用することで、高赤方偏移での電波銀河サンプル構築方法を確立した。本研究が先駆けとなり、本手法による遠方電波銀河探査と関連する研究が国内外で始動し、停滞していた遠方電波銀河探査を打開することができた。

研究成果の概要（英文）：The nature of massive galaxies suggests that they were already formed in the early universe, and radio-jets emitted by radio galaxies are strong candidates for the mechanism that halts their further mass growth. However, exploration of radio galaxies in the distant universe has been limited so far, and the understanding of the relationship between the formation of massive galaxies in the early universe and radio-jets has been inadequate. This research aims to pioneer the exploration of radio galaxies in the early universe using data from the Subaru Hyper Suprime-Cam survey and wide-field radio surveys, in order to elucidate the relationship between the formation of massive galaxies in the early universe and radio jets. In this project, we constructed, for the first time, a sample of distant radio galaxies with a redshift of 4 or higher and conducted follow-up spectroscopic observations, revealing the large-scale structures associated with these distant radio galaxies.

研究分野：天文学

キーワード：銀河 活動銀河核 ブラックホール 電波 赤外線 大規模データ

## 1. 研究開始当初の背景

どのようにして銀河が現在の姿になるに至ったのかを理解することは天文学の根本的な課題である。とりわけ質量の大きい大質量銀河 (星質量  $M_* \geq 10^{11}$  太陽質量) と呼ばれる種族は、現在の宇宙に存在する全星質量の約40%を占める主構成要素となっているが、その形成・進化過程の解明には課題が残っている。可視光・赤外線帯での深宇宙観測によって、大質量銀河の半数以上は赤方偏移4以降 (宇宙誕生から15億年後: 大質量銀河形成の黎明期) に形成されたことが分かっている。しかし、宇宙初期に形成した大質量銀河は、現在に至るまでに質量をさらに増大していくはずだが、そのような超大質量銀河は観測されていない。このことは、大質量銀河の形成後速やかに、質量成長 (すなわち星形成活動) を抑制する何らかの機構が存在していたことを強く示唆している。最も有力な機構は、大質量銀河に付随した電波ジェットによる「負のフィードバック」である。電波ジェットは銀河中心部に存在する活動銀河核 (AGN) から放出される。強力な電波ジェットが輸送する力学的エネルギーは銀河内及び周囲のガスに注入され、ガス雲がこれ以上収縮し星を形成するのを妨げる。結果として、大質量銀河の質量成長は止まる。この効果は、近傍宇宙で観測的に確認されているが、大質量銀河形成の黎明期 (赤方偏移 > 4) で、電波ジェットが大質量銀河形成にどのように相互作用していたかは未だまったく分かっていない。

強力な電波ジェットを持つ銀河は「電波銀河」として知られている。電波銀河の母体は大質量銀河であることが分かっており、電波帯で極めて明るく輝く。電波銀河は遠方宇宙における大質量銀河と電波ジェットの関係を調べる上で唯一無二の天体である。しかしながら、初期宇宙における遠方電波銀河の研究はその天体の探査自体が前世紀以降停滞が続いており、研究開始当初では発見されている赤方偏移4以上遠方電波銀河は高々13天体に留まっていた。大質量銀河の形成史を理解するためには、遠方電波銀河の探査を大規模に推進する必要があった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、大質量銀河の形成・進化過程を電波ジェットとの相互作用の観点から明らかにすることである。そのためには遠方電波銀河のサンプル構築が必要不可欠であるため、この構築から目指す。構築した遠方電波銀河サンプルを用いて、遠方電波銀河の星形成活動への電波ジェットからの「負のフィードバック」を調査する。また、遠方電波銀河の数密度進化の調査から統計的にフィードバックの影響を評価する。

## 3. 研究の方法

遠方電波銀河の探査は、既存の広域電波探査データFIRSTに最新のすばる望遠鏡HSCサーベイデータを組み合わせ行う。HSCサーベイデータにライマンブレイク法を適用し遠方天体を選出し、FIRSTデータから電波で明るい天体として遠方電波銀河候補を選出する。この手法により遠方電波銀河の大規模な探査を初めて可能にする。その後、選出した遠方電波銀河候補に対して大型望遠鏡による追観測を実行し、正確な赤方偏移を決定することで遠方電波銀河サンプルを構築する。本手法を用いてYamashita et al. (2020)では赤方偏移4.7に存在する遠方電波銀河の発見に成功しており、本手法の実行可能性を実証済みである。

従来、電波データのみで探査されていた遠方電波銀河であるが、電波データのみではサンプルの電波ジェット特性に対し強いバイアスが生じることが課題であった。しかし、HSCサーベイデータを基本とする本手法は電波ジェット特性に対して無バイアスであり、独自性が高い。さらに、広域探査の可視光HSCデータを用いていることから、発見した遠方電波銀河の星質量などの母銀河情報及び、周囲の銀河環境情報が直ちに取得できることが強みである。

## 4. 研究成果

### (1) 遠方電波銀河候補の分光追観測

すばる望遠鏡HSCサーベイデータとFIRST電波サーベイアーカイブデータを用いて赤方偏移4以上の遠方電波銀河候補を14天体選出した。選出した全天体に対してすでに米国JVLA電波干渉計にて高解像度撮像データを取得できていること、高解像度データによって真にHSC源と位置が

対応していることを確認している。また、このうち3天体は分光アーカイブデータから赤方偏移 $z=4$ であることを確認した。

この候補天体のうち観測が可能な赤経帯にある7天体に対して、すばる望遠鏡での分光観測時間を取得し、赤方偏移決定を目的とした観測を初年度冬季に実施した。観測データの解析の結果、検出した水素輝線から少なくとも3天体は目標であった赤方偏移 $z=4$ の電波銀河であることが判明し、さらに1天体は暫定的に赤方偏移がおよそ4.5の天体であることが分かった。本観測による赤方偏移同定成功率はおよそ43-57%となる。本サンプルはHSCサーベイ初期のデータを用いているため、今後公開される最終サーベイデータを用いると、およそ40天体の遠方電波銀河が赤方偏移同定できる見込みである。これは当初知られていた遠方電波銀河の数を大きく増やし統計的な研究を可能にすることが期待できる。この観測結果は日本天文学会2022年秋季年会にて発表した。また、詳細なデータ解析結果とともに投稿論文として発表準備中である。

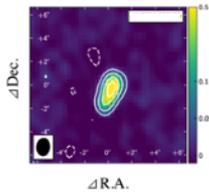


図1：遠方電波銀河候補のJVLA高解像度電波画像。

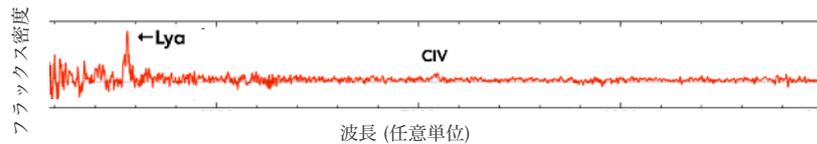


図2：本研究のすばる望遠鏡分光追観測によって赤方偏移同定した赤方偏移 $z=4$ の遠方電波銀河の分光スペクトル。静止系紫外線領域の $\text{Ly } \alpha$ 及びCIV輝線を検出し赤方偏移を決定した。

## (2) 電波銀河周囲の銀河環境

本サンプルの赤方偏移 $z=4$ の遠方電波銀河サンプルを用いて、遠方電波銀河周囲の銀河密度環境を調査した。HSCサーベイデータを用いた本課題の利点の一つとして、遠方電波銀河サンプル構築とともに周囲の銀河情報も同時に取得できる点があり、密度環境調査はこの利点を活用したものである。調査結果は、暗い電波銀河はその時代の平均的な銀河よりも銀河が密集した環境下に存在することを示し、さらに付随するハローの質量も比較的大質量であることも明らかにした。このことは、暗い遠方電波銀河は現在の宇宙で見られる大質量銀河団へと進化することを示唆するものである。この結果は投稿論文として発表した (Uchiyama, Yamashita et al., 2022a, c)。さらに、本手法を応用し低赤方偏移での電波銀河の周辺環境調査も調査し、遠方電波銀河の特性を低赤方偏移電波銀河と比較することで特徴づけることを可能にした (Uchiyama, Yamashita et al., 2022b)。

本課題研究によって、可視光大規模サーベイを軸とした遠方電波銀河探索の手法を複数の天体で実証することに成功し、本手法を確立した。HSCサーベイで発見した遠方電波銀河についても、その特性を特徴づけることができた。今後はさらに広範囲の可視光サーベイデータと電波データを用いて更にサンプル数を拡大し、数密度の光度依存性や近傍宇宙との比較から遠方電波銀河の進化を調査していきたい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Uchiyama Hisakazu, Yamashita Takuji, Toshikawa Jun, Kashikawa Nobunari, Ichikawa Kohei, Kubo Mariko, Ito Kei, Kawakatu Nozomu, Nagao Tohru, Toba Yoshiki, Ono Yoshiaki, Harikane Yuichi, Imanishi Masatoshi, Kajisawa Masaru, Lee Chien-Hsiu, Liang Yongming	4. 巻 926
2. 論文標題 A Wide and Deep Exploration of Radio Galaxies with Subaru HSC (WERGS). VI. Distant Filamentary Structures Pointed Out by High-z Radio Galaxies at $z \sim 4$	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 76 ~ 76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac441c	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 Komugi Shinya, Toba Yoshiki, Matsuoka Yoshiki, Saito Toshiki, Yamashita Takuji	4. 巻 930
2. 論文標題 Detection of Extended Millimeter Emission in the Host Galaxy of 3C 273 and Its Implications for QSO Feedback via High Dynamic Range ALMA Imaging	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 3 ~ 3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac616e	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 -
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 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 -
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 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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 山下拓時
2. 発表標題 GREX-PLUSによる電波銀河観測
3. 学会等名 GREX-PLUS サイエンス検討会 FY2021（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内山 久和（愛媛大）、山下 拓時（国立天文台）、長尾 透、久保 真理子、鍛冶澤 賢（愛媛大）、市川 幸平、登口 暁（東北大）、鳥羽 儀樹（京都大）、石川 将吾（国立天文台）、川口 俊宏（尾道大）、川勝 望（呉高専）、Chien-Hsiu Lee (NOIRLab), and WERGS members
2. 発表標題 A Wide and Deep Exploration of Radio Galaxies with Subaru HSC (WERGS): $z = 0.3 - 1.4$ の電波銀河周辺環境の統計的理解
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuji Yamashita
2. 発表標題 Radio galaxies in the early universe found in Subaru HSC-SSP
3. 学会等名 ALMA-J Seminar（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内山 久和（愛媛大）、山下 拓時（国立天文台）、利川 潤（Bath univ.）、柏川 伸成（東京大）、市川 幸平（東北大）、久保 真理子、長尾 透、鍛冶澤 賢（愛媛大）、鳥羽 儀樹（京都大）、伊藤 慧、Yongming Liang（総研大）、川勝 望（呉高専）、小野 宜昭、播金 優一（宇宙線研）、今西 昌俊（国立天文台）、Chien-Hsiu Lee (NOIRLab)
2. 発表標題 A Wide and Deep Exploration of Radio Galaxies with Subaru HSC (WERGS): $z \sim 4$ の暗い電波銀河周辺環境の統計的理解
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下拓時, WERGS コラボレーション
2. 発表標題 高赤方偏移電波銀河の分光追観測
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内山久和, 山下拓時, 長尾透, 鍛冶澤賢, 松岡良樹, 久保真理子, 小野宜昭, 利川潤, 市川幸平, 川勝望, 鳥羽儀樹, 今西昌俊, 伊藤慧, 川口俊宏, Chien-Hsiu Lee, 齋藤智樹
2. 発表標題 A Wide and Deep Exploration of Radio Galaxies with Subaru HSC (WERGS): $z = 4.72$ の電波銀河周辺環境
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本優太, 長尾透, 久保真理子, 内山久和, 山下拓時, 鳥羽儀樹, 登口暁, 播金優一, 小野宜昭
2. 発表標題 赤方偏移 4 における遠方電波銀河の探査と性質調査
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuji Yamashita, Wanqiu He, Kohei Ichikawa, Bovornpratch Vijarnwannaluk, Hisakazu Uchiyama, Tohru Nagao, Yuta Yamamoto, and WERGS collaboration
2. 発表標題 WERGS project status and follow-up observations
3. 学会等名 Tracing the SMBH growth: outlook beyond the HSC-SSP, and future collaborations (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名	Yuta Yamamoto, Tohru Nagao, Kubo Mariko, Hisakazu Uchiyama, Takuji Yamashita, Yoshiki Toba, Akatoki Noboriguchi, Yuichi Harikane, Yoshiaki Ono
2. 発表標題	A new z~4 radio galaxy survey with HSC-SSP and VLA/FIRST
3. 学会等名	Tracing the SMBH growth: outlook beyond the HSC-SSP, and future collaborations (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	Hisakazu Uchiyama, Takuji Yamashita, et al.
2. 発表標題	A Wide and Deep Exploration of Radio Galaxies with Subaru HSC (WERGS): Co-evolution of Radio Galaxies and the Surrounding Galaxies at Various Cosmic Epochs
3. 学会等名	Tracing the SMBH growth: outlook beyond the HSC-SSP, and future collaborations (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	Kohei Ichikawa, Itsna Khoirul Fitriana, Takuji Yamashita, Hikaru Fukuchi, Masayuki Akiyama, Yu-Yen Chang, Andrew Battisti, Elisabete da Cunha, WERGS team, HSC-Joint catalog team
2. 発表標題	Radio galaxy catalog in the Subaru/HSC Joint catalog field
3. 学会等名	Tracing the SMBH growth: outlook beyond the HSC-SSP, and future collaborations (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	Yuta Yamamoto, Tohru Nagao, Hisakazu Uchiyama, Takuji Yamashita, Yoshiki Toba, Mariko Kubo, Akatoki Noboriguchi, Yoshiaki Ono, Yuichi Harikane, and the WERGS team
2. 発表標題	The Nature of New z~4 High-z Radio Galaxies from HSC-SSP and VLA/FIRST
3. 学会等名	Subaru Users Meeting FY2022 (国際学会)
4. 発表年	2023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			
英国	University of Bath	University College London		
米国	NSF's NOIRLab			
その他の国・地域	ASIAA			