

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05299

研究課題名(和文)クエーサー吸収線系から探る原始銀河と周辺域の環境

研究課題名(英文)Quasar absorption systems as a probe of the galaxy and the circum galactic medium

研究代表者

大越 克也 (Okoshi, Katsuya)

東京理科大学・基礎工学部教養(長万部)・准教授

研究者番号：50453832

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：我々の住む銀河系はどのように生まれ、進化してきたのだろうか？銀河内では、星内部で重元素は作られ、超新星爆発等により銀河外の銀河間空間へガスが運ばれ、その後、ガスが冷えて再び銀河内に流入する、という銀河内外で物質循環を繰り返す。本研究では、銀河周辺域ガスをクエーサーという天体のスペクトルを利用して考察した。その結果、銀河周辺域ガスは、中性水素と金属の空間分布に強い相関があり、銀河周辺域に広く分布している。また、高い中性水素密度を示す周辺域ガスをもつ銀河は典型的な銀河より低い星形成率をもつことが判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

天文学では、我々の住む銀河系が、いつ誕生し、どのように進化をして現在の姿になっているかを解明することが重要な問いである。宇宙には、銀河系と似た銀河が数多く存在し、現代の大型望遠鏡によって、宇宙初期に遡って銀河の進化過程を詳細に観測できるようになった。本研究では、すばる望遠鏡などの大型望遠鏡を駆使して、原始銀河の周辺域ガスの物理的・化学的特性を調べることにより、銀河がどのように進化してきたのかという問いに対して有益な示唆を与えることができた。

研究成果の概要(英文)：We have investigated an evolutionary relation between galaxy and the circum-galactic medium (CGM) through quasar absorption systems, Damped Lyman-alpha (DLA) absorption systems, which exhibit the highest HI column densities in the universe, and metal absorption systems. Our main results are as follows:

(1) At redshift  $z=1-2$ , the quasar absorption systems in the CGM show a strong correlation between the HI column densities and the low-ion column densities (e.g., MgII) with a scale within about 10 kpc. The multiple absorption systems indicate that the CGM extends up to a scale of about 500 kpc which is larger than the halo size of typical galaxy. (2) Our surveys for DLA galaxies on the Subaru/Keck observations put constraint on an upper limit of the star formation rates of  $1.0 M_{\odot}/\text{yr}$ .

Further investigation based on statistically significant sample size is required by carrying out both radio and optical/infrared surveys for DLA galaxies.

研究分野：天文学

キーワード：クエーサー吸収線系 銀河形成 銀河間物質

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

銀河内では、重元素は星内部で合成され、超新星爆発などで銀河外へガスとして運ばれ、その後、ガスが冷えることにより銀河内に再び流入するという銀河内外で循環を繰り返すことが知られている。銀河形成・進化過程を理解するには、銀河と銀河間ガスの中で、ガスや金属がどのように循環しているのかを明らかにしなければならない。しかし、銀河の形成・進化過程は銀河周辺域物質と密接に関連しているにもかかわらず、銀河外に広範囲に拡がっており、低い密度のために星形成活動も乏しく、その空間分布(「どこまで拡がっているのか?」)や特性(「銀河内のガスと、どのような違いがあるのか?」)は未知な部分が多いことが知られている。

### 2. 研究の目的

本研究課題の目的は、クエーサー吸収線系を「銀河周辺域ガス」、クエーサー吸収線系母銀河を「周辺域ガスを生ずる銀河」として捉え、銀河周辺域物質に関して、その空間的な分布といった物理的特性や、付随する金属吸収量などの化学的特性から、「銀河周辺域環境が銀河進化に及ぼす役割を解明する」ことである。

### 3. 研究の方法

銀河内(ディスクなど)における高密度ガスのような星形成が盛んな領域とは異なり、銀河周辺域ガスは、星形成率が相対的に低いことが予想される。このことから、ガス自体を観測するには、背景にある背景光源のスペクトルに生じる吸収線を調べることが最適である。本研究では、注目する銀河の周辺域にある背景クエーサーの吸収線系に注目した。

本研究では、重力レンズ効果を受けて複数の像をもつクエーサーやバイナリークエーサーに注目し、複数のクエーサー吸収線系(銀河周辺域ガス)とそれに付随する母銀河(星形成領域)を同定・比較し、銀河周辺域ガスの物理的・化学的進化を調べた。

### 4. 研究成果

#### (1) 銀河および周辺域環境の進化過程

銀河周辺域環境が銀河形成・進化過程に与える役割を考察した。銀河形成・進化過程は、銀河内における星の進化過程の最終段階で生じる超新星爆発などによる銀河外への「ガスの流出」、および、銀河周辺域に存在する冷たい銀河間物質が銀河の重力による銀河内への「ガスの流入」に極めて大きく影響されることが予想される。この銀河内外の間でやりとされる銀河周辺域物質を調べることは重要である。ここでは、すばる望遠鏡や Keck 望遠鏡といった大型望遠鏡を駆使して、複数の背景クエーサーの面分光観測を実施し、クエーサー吸収線系の物理的・化学的特性を調べた。その結果、赤方偏移  $z=1-2$  において、銀河周辺域ガスは、中性水素と金属イオンの空間分布(例えば、10 kpc 程度)の間には強い相関があり、高い中性水素密度( $>10^{20} \text{ cm}^{-2}$ )をもち、柱密度比(0.1-600)が大きな周辺域ガスをもつ銀河は典型的な Ly 輝線天体より低い星形成率( $<10 \text{ M}_{\text{sun}}/\text{yr}$ )をもつことが判明した(e.g., Okoshi et al. 2019)。

一方、信州大学を中心とした研究グループと共同研究を実施し、既知の複数クエーサーのアーカイブデータを使用し、主に銀河周辺域物質内の様々な電離状態をもつ金属イオンによる吸収線の観測的特性から銀河周辺域環境を考察した。具体的には、数秒角の離角をもつ 13 個の重力レンズクエーサースペクトルに現れる約 300 本の金属吸収線を用いて、銀河間物質の空間分布や電離状態を調べた。その結果、金属吸収線の出現頻度や等価幅の違いから、(a) 赤方偏移  $z=1-2$  における銀河周辺域ガスの多くは、少なくとも 500kpc 以上拡がっている傾向にあり、(b) 吸収体が離散的に分布している場合、そのサイズは 1kpc 以下であることが必要であることがわかった(Koyamada et al. 2017)。本研究成果は、赤方偏移  $z=1-2$  における電離度に応じた金属吸収線系のサンプルを、従来よりも格段に増やすことにより、統計的に有意な銀河周辺域における金属イオンの空間分布に対して示唆を与えたという点で意義あるものである。

#### (2) 銀河及びクエーサー吸収線系形成モデルによる銀河および周辺域環境の進化過程

中性水素吸収線系の起源と進化に注目することにより、銀河進化過程における原始銀河周辺域ガスの役割を解明するために、数値シミュレーション(2GC)によって作成された銀河カタログに基づくクエーサー吸収線系理論モデルによる考察を行った。これは、「京」コンピュータによる現時点で最も大規模なスケールにおける数値計算結果に基づく銀河形成・進化モデルであるため、銀河形成はもとより、銀河を取り巻く周辺域環境や大規模構造の進化過程の考察に最も適したものである。本課題に関しては、典型的な銀河の多様な特性と同時

に、強い吸収線を生じるような多量の中性水素をもつ銀河の観測的特性（質量分布、光度関数など）を説明するには、どのようなモデルが最適であるか（どのような物理・化学過程が重要な役割を果たしているのか）を考察した。

本課題では、クエーサー吸収線系のうち、高い中性水素密度 ( $>10^{20} \text{ cm}^{-2}$ ) をもつ Damped Lyman system (DLA) に注目した。これは、星形成の材料である中性水素を最も多く保持することが知られた天体であり、これを調べることにより、銀河形成過程における星形成に中性水素ガスがどのように影響を及ぼすのかを考察することが期待できることが知られている。特に、赤方偏移  $z \sim 0$  に多数存在する DLA は、中性水素質量が  $10^9$  太陽質量をもつことが、このクエーサー吸収線系理論モデルで予想されている (e.g., Okoshi et al. 2005, 2010)。ここでは、最新の「京」コンピュータによる数値シミュレーション ( $2\text{Gc}$ ) によって作成された銀河カタログ (シミュレーションを行ったサイズ  $\sim 1.1 \text{ h}^{-1}\text{Gpc}$ ) をもとに、太陽質量の  $10^8$  倍以上の中性水素質量をもつ近傍銀河の質量分布則を再現できるリファレンスモデルを構築できた (Makiya et al. 2016)。また、銀河形成過程における活動銀河核・Super massive black hole の果たす役割を調べ、銀河形成期における Black hole へのガス膠着率等に制限がつき、初期段階における銀河形成過程に新しい示唆が与えられた (Shirakata et al. 2019)。さらに、クエーサー吸収線系の母銀河と強い相関がある H 輝線天体の分布する周辺域環境の違いによる分布則の差異を定量的に調べた。これにより、銀河進化過程における原始銀河の周辺域環境の差異が光度分布関数に与える影響に関して新しい示唆が得られた (Ogura et al. 2020)。この H 輝線天体は大量の中性水素を含むことが知られており、銀河周辺域との間で、ガスの循環に伴う中性水素量および星形成率に大きく影響されることが予想され、H 輝線天体および中性水素吸収線系を調べることにより、銀河周辺域物質の銀河進化過程に果たす役割の解明が期待される。これらの本研究成果は、将来的にクエーサー吸収線系と銀河の関連性を視野に入れながら、多様な銀河の観測的特性を説明できる理論モデルを構築できたという点で意義あるものである。この成果を踏まえ、今後取得される多様な観測データとの比較検証できるようなクエーサー吸収線系と銀河周辺域物質に関する理論的考察を重ねるために重要な成果であるといえる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Okoshi Katsuya, Minowa Yosuke, Kashikawa Nobunari, Koyamada Suzuka, Misawa Toru   | 4. 巻<br>14              |
| 2. 論文標題<br>Multiple Absorption Systems in the Lines of Sight to Quadruply Lensed Quasar H1413+1143 As a Probe of the Circumgalactic medium around Dwarf Galaxy  | 5. 発行年<br>2019年         |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of the International Astronomical Union   | 6. 最初と最後の頁<br>305 ~ 308 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1017/S1743921318006683   | 査読の有無<br>無              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |
| 1. 著者名<br>Ogura Kazuyuki, Nagashima Masahiro, Shimakawa Rhythm, Hayashi Masao, Kobayashi Masakazu A. R., Oogi Taira, Ishiyama Tomoaki, Koyama Yusei, Makiya Ryu, Okoshi Katsuya, Onodera Masato, Shirakata Hikari | 4. 巻<br>895             |
| 2. 論文標題<br>Quantifying the Effect of Field Variance on the H Luminosity Function with the New Numerical Galaxy Catalog ( 2GC)   | 5. 発行年<br>2020年         |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal   | 6. 最初と最後の頁<br>9 ~ 9     |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/ab8631  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |
| 1. 著者名<br>Nagashima Masahiro, Enoki Motohiro, Ishiyama Tomoaki, Kobayashi Masakazu A. R., Makiya Ryu, Ogura Kazuyuki, Okamoto Takashi, Okoshi Katsuya, Oogi Taira, Shirakata Hikari                               | 4. 巻<br>14              |
| 2. 論文標題<br>Evolution of dwarf galaxies in a semi-analytic galaxy formation model  | 5. 発行年<br>2019年         |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of the International Astronomical Union   | 6. 最初と最後の頁<br>491 ~ 494 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1017/S1743921318005471   | 査読の有無<br>無              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |
| 1. 著者名<br>Okoshi Katsuya & Ogura Kazuyuki   | 4. 巻<br>1               |
| 2. 論文標題<br>Current Status of QAL (1) - Quasar Absorption Line System -  | 5. 発行年<br>2019年         |
| 3. 雑誌名<br>Cosmic Shadow 2018 ~クエーサー吸収線系でみる宇宙~   | 6. 最初と最後の頁<br>1-6       |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし  | 査読の有無<br>無              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|  |                    |
|--|--------------------|
| 1. 著者名<br>Ogura Kazuyuki & Ogura Kazuyuki  | 4. 巻<br>1          |
| 2. 論文標題<br>Current Status of QALs (2)---Star-forming galaxies, environments and DLAs | 5. 発行年<br>2019年    |
| 3. 雑誌名<br>Cosmic Shadow 2018 ~クエーサー吸収線系でみる宇宙~  | 6. 最初と最後の頁<br>7-10 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし   | 査読の有無<br>無         |
| オープンアクセス<br>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<br>-          |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Shirakata, H., Okamoto, T., Kawaguchi, T., Nagashima, M., Ishiyama, T., Makiya, R., Kobayashi, M. A. R., Enoki, M., Oogi, T., Okoshi, K. | 4. 巻<br>482             |
| 2. 論文標題<br>The New Numerical Galaxy Catalogue ( 2GC): properties of active galactic nuclei and their host galaxies                                 | 5. 発行年<br>2019年         |
| 3. 雑誌名<br>MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY  | 6. 最初と最後の頁<br>4846 4873 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/mnras/sty2958  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|   |                      |
|---|----------------------|
| 1. 著者名<br>Koyamada, S., Misawa, T., Inada, N., Oguri, M., Kashikawa, N. & Okoshi, K.                      | 4. 巻<br>851          |
| 2. 論文標題<br>Resolving the Internal Structure of Circumgalactic Medium Using Gravitationally Lensed Quasars | 5. 発行年<br>2017年      |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal   | 6. 最初と最後の頁<br>88 100 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/aa9a3a  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

|   |                          |
|---|--------------------------|
| 1. 著者名<br>R. Makiya, M. Enoki, T. Ishiyama, M. A. R. Kobayashi, M. Nagashima, T. Okamoto, K. Okoshi, T. Oogi, and H. Shirakata  | 4. 巻<br>68               |
| 2. 論文標題<br>The New Numerical Galaxy Catalog ( 2GC): An updated semi-analytic model of galaxy and active galactic nucleus formation with large cosmological N-body simulations | 5. 発行年<br>2016年          |
| 3. 雑誌名<br>PUBLICATIONS OF THE ASTRONOMICAL SOCIETY OF JAPAN   | 6. 最初と最後の頁<br>25-1 25-26 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/pasj/psw005   | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>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<br>-                |

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Okoshi, K   |
| 2. 発表標題<br>Absorption Systems in Lines of Sight toward Cloverleaf                          |
| 3. 学会等名<br>The blind search for hidden galaxies in an abundant line of sight (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Ogura, K., Nagashima, M., Shimakawa, R., Hayashi, M., Oogi, T., Kobayashi, M., Ishiyama, T., Koyama, Y., Makiya, R., Okoshi, K., Onodera, M., and Shirakata, H. |
| 2. 発表標題<br>Semi-analytic examination for the cosmic variance on the H $\alpha$ emitter   |
| 3. 学会等名<br>Subaru Telescope 20th anniversary, Optical & Infrared Astronomy for the Next Decade (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Ogura, K., Nagashima, M., Shimakawa, R., Hayashi, M., Oogi, T., Kobayashi, M., Ishiyama, T., Koyama, Y., Makiya, R., Okoshi, K., Onodera, M., and Shirakata, H. |
| 2. 発表標題<br>Semi-analytic model of emission-line galaxies   |
| 3. 学会等名<br>HSC-AGN face-to-face meeting #11 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>小倉和幸, 長島雅裕, 嶋川里澄, 林将央, 小林正和, 大木平, 石山智明, 小山佑世, 真喜屋龍, 大越克也, 小野寺仁人, 白方光 |
| 2. 発表標題<br>2GCによる輝線銀河モデル  |
| 3. 学会等名<br>SWANS理論班会議   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>小倉和幸, 長島雅裕, 嶋川里澄, 林将央, 小林正和, 大木平, 石山智明, 小山佑世, 真喜屋龍, 大越克也, 小野寺仁人, 白方光                                 |
| 2. 発表標題<br>The cosmic variance on the H luminosity function examined by the new numerical galaxy catalog ( 2GC) |
| 3. 学会等名<br>日本天文学会2019年秋季年会  |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>小倉和幸, 長島雅裕, 嶋川里澄, 林将央, 小林正和, 大木平, 石山智明, 小山佑世, 真喜屋龍, 大越克也, 小野寺仁人, 白方光 |
| 2. 発表標題<br>準解析的銀河形成モデル 2GCによる輝線銀河モデルから見る広視野分光探査の重要性                             |
| 3. 学会等名<br>第1回科学研究部シンポジウム 銀河赤方偏移探査による宇宙論研究会                                     |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Okoshi, K., Minowa, Y., Kashikawa, N., Koyamada, S., and Misawa, T.   |
| 2. 発表標題<br>Multiple Absorption Systems in the Lines of Sight to Quadruply Lensed Quasar H1413+1143 As a Probe of the Circumgalactic medium around Dwarf Galaxy |
| 3. 学会等名<br>International Astronomical Union, Symposium 344 `Dwarf Galaxies: From the Deep Universe to the Present' (国際学会)                                      |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Evolution of dwarf galaxies in a semi-analytic galaxy formation model   |
| 2. 発表標題<br>Nagashima, M., Enoki, M., Ishiyama, T., Kobayashi, M.A.R, Makiya, R., Ogura, K., Okamoto, T., Okoshi, K., Oogi, T., and Shirakata, H. |
| 3. 学会等名<br>International Astronomical Union, Symposium 344 `Dwarf Galaxies: From the Deep Universe to the Present' (国際学会)                        |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Okoshi, K., & Ogura, K.                                   |
| 2. 発表標題<br>Quasar Absorption Line Systems - Current Status of QALs - |
| 3. 学会等名<br>Cosmic Shadow 2018 (招待講演)                                 |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Ogura, K., & Okoshi, K.                      |
| 2. 発表標題<br>Star-forming galaxies, environments and DLAs |
| 3. 学会等名<br>Cosmic Shadow 2018 (招待講演)                    |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>小山田涼香、三澤透、稲田直久、大栗真宗、柏川伸成、大越克也     |
| 2. 発表標題<br>レンズクエーサーを用いた多視線分光観測によるCGMの内部構造の調査 |
| 3. 学会等名<br>日本天文学会2017年秋季年会                   |
| 4. 発表年<br>2017年                              |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>小山田涼香、三澤透、稲田直久、大栗真宗、柏川伸成、大越克也   |
| 2. 発表標題<br>多視線分光観測によるCGM吸収体の空間分布調査         |
| 3. 学会等名<br>CHORUS+Galaxy+IGM Workshop 2017 |
| 4. 発表年<br>2017年                            |



|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Okoshi, K.                         |
| 2. 発表標題<br>QSO Absorption System -- DLA & IGM |
| 3. 学会等名<br>Galaxy-IGM 研究会 (招待講演)              |
| 4. 発表年<br>2016年                               |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Koyamada, S., Inada, N., Oguri, M., Okoshi, K., & Kashikawa, N.                             |
| 2. 発表標題<br>Resolving Internal Structure of Circum-Galactic Medium Using Gravitationally Lensed Quasars |
| 3. 学会等名<br>Galaxy-IGM 研究会  |
| 4. 発表年<br>2016年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

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