

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18H03717

研究課題名(和文) 銀河形成の加速と減速を司る物理過程の実証的解明

研究課題名(英文) Revealing the physical processes that accelerate and decelerate galaxy formation

研究代表者

児玉 忠恭 (KODAMA, Tadayuki)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：80343101

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,900,000円

研究成果の概要(和文)：本課題ではまず高感度の中分散グリズムを作成し、すばる望遠鏡の近赤外線装置 MOIRCS に実装した。そして共同利用観測で遠方の2つの大質量銀河のスペクトルを取得し、星形成活動が終了して間もないことがわかった。現在論文を準備中である。その後MOIRCSは2年間、他の装置と入れ替えられ使えなくなったが、その間は他望遠鏡の同種の分光器を用いて、原始銀河団銀河の近赤外線分光観測を行った。その結果、若い原始銀河団では系統的に金属量が系統的に低く、ガス降着が活発なためと解釈された。本課題で雇用した研究員と共同で進め、2本の査読論文にまとめた。また多くの研究会で講演を行った(10件の国際会議招待講演を含む)。

研究成果の学術的意義や社会的意義

まず新しいグリズムを制作してMOIRCSに搭載することで、すばる望遠鏡に高感度の近赤外線分光器を実現したことは、遠方銀河の研究にとって大きな進展である。その装置を使って得られた、(1)100億年前の大質量銀河が星形成活動を止めた直後である結果は、宇宙初期に星形成を止める機構が必要であるということを示唆した。また(2)若い原始銀河団の小質量銀河が金属量が低いという結果は、外からガスが降着して薄まったと解釈できることから、銀河団の初期段階はガスの降着が盛んであったことを示唆する。これらの結果は共に銀河の形成・進化に新しい知見をもたらした。社会的には基礎科学として国民の好奇心を掻き立てる意義がある。

研究成果の概要(英文)：We constructed new grisms with high sensitivity for MOIRCS instrument on Subaru. We obtained spectra of two massive galaxies at high redshift, and revealed that those are recently quenched galaxies. A paper is in preparation. MOIRCS was hibernated for 2 years because of a replacement by other instrument. During that period, we used similar spectrographs on other telescopes, and observed 2 protoclusters, and found that gaseous metallicity is lower in young protoclusters due probably to dilution of metals by vigorous gas accretion. We conducted these works with a postdoc hired by this grant, and 2 refereed papers were written (one is accepted). Moreover we made presentations in many international conferences including 10 invited talks by Kodama.

研究分野：銀河形成、銀河進化、銀河団形成、銀河団進化

キーワード：近赤外線分光観測装置 銀河形成・進化 星形成史

1. 研究開始当初の背景

宇宙における星形成活動すなわち銀河の形成は、宇宙誕生後 30 億年をかけて赤方偏移 2 (105 億年前)あたりで最盛期を迎え、その後現在までに 30 分の 1 にまで大きく減衰する。特に質量の大きな銀河ほど星形成活動が不活発になっていることが、様々な観測から分って来ている。しかしながら、このような宇宙における銀河形成の初期の加速とその後の減衰及び終息の過程は、現象としては認識されていても、それを司る物理機構については未だ大きな謎となっている。銀河の内部で起こる内的効果と周環境が及ぼす外的効果とがあると考えられているが、その実態は未解明である。この解明には近赤外線での遠方銀河の分光観測によって、星形成史を探ることが鍵を握るが、当時のすばる望遠鏡の近赤外装置 MOIRCS に搭載されていたグリズムは、ピーク効率 が 70%代と低く高精度の観測が困難状況であった。

2. 研究の目的

上記の星形成の加速と減速の機構の解明のために、銀河の星形成活動が、いつの時代に、どのような環境で、どのくらいのタイムスケールで加速しその後減衰するのか、またその時の銀河の質量、形態や中心核の活動性はどうなっているか、などを観測的に明らかにすることを目的とする。そのためには、遠方銀河の分光観測を系統的に行い、爆発的な星形成活動を持つ銀河と、星形成活動が止まりつつある、または止まった直後の銀河をスペクトルの特徴を捕えることによって同定しその性質を調べる。これにより現代銀河天文学の最大の謎である宇宙初期の銀河形成の加速とその後の減衰及び終息の過程を司る物理機構を、実証的に明らかにすることを目指す。

3. 研究の方法

まず、遠方銀河の精度良いスペクトルを取得できるようにするため、現在の MOIRCS 装置に使われている分光素子グリズムを、感度の高いものを作成して置き換えることから始める必要がある。そこで、理研で当時加工開発されたグリズムを導入する。高い波長分散 ($R=3000$) を持ちながら、ピーク効率 96.5%、バンド平均でも 90%台という驚異的な透過性を実現できる。

次に遠方銀河の静止系可視域のスペクトルを取得する。なぜならその波長域は、構成する星種族や星形成率、電離領域の物理状態など物理情報の宝庫だからである。様々なスペクトル線の解析から、特に次の二つの鍵となる種族に着目して星形成活動の強度やその変化のタイムスケールなどの物理量の導出を行う。

(1) 星形成活動が活発になっている銀河： $H\alpha$ 輝線の強度は優れた星形成率の指標として知られる。しかしながら爆発的な星形成を行なっている時は、大量に生成されるダストによって輝線が吸収され強度が弱まるため補正が必要である。そこで現在最も信頼できる方法として知られる水素バルマー線同士の輝線強度比 ($H\beta/H\alpha$) を用いた補正を行う。ほとんどの星形成銀河は主系列と呼ばれる星質量と星形成率の間のほぼ比例関係に載るが、そこから星形成率が大きい側に逸脱する銀河として検出することができる。また同時に求まる比星形成率 (星形成率/星質量) 及びこれらの銀河の存在率から星形成が活発なフェーズの継続時間を推定することができる。また、 $H\alpha$ のすぐ隣にある $[NII]$ 輝線を捉え、輝線強度比 ($[NII]/H\alpha$) を取ることで、ガス中に含まれる金属量を推定することができる。金属は重く若い星の中で作られてガスに放出されるため、それまでの銀河中の星形成史を反映している。また金属の少ないガスが外から流入すると薄まるため、ガス降着率も反映している。

(2) 星形成を止めつつあるまたは止めた直後の銀河：スペクトルに現れる強い水素バルマー吸収線は、ごく最近に星形成活動が止まった兆候であり、その強度(等価幅)からは星形成を終えてからの時間及び、減衰する直前に爆発的な星形成活動を伴っていたかどうかなどの情報が得られる。またこのような転換期の真最中または直後の銀河の存在率からは星形成活動の減衰から終息に至るタイムスケールを知り、物理過程に大きな制限を与えることができる。また銀河中心核の強い活動性の影響(内的要因)でガスが吹き飛んで星形成活動が止まったのか否かを判別するために、様々の輝線比を使った中心核強度(電離状態)の診断も行う。また銀河の相互作用(外的要因)が原因かも調べるため、銀河の環境や形態(相互作用の有無)も調べる。

以上の解析を本課題の特長である豊富な銀河サンプルに基づいて行い、銀河の赤方偏移、質量、環境の関数として定量化して調べることによって、「いつ」「どのような環境」において「どのような銀河」に「何が原因」で「どのようなタイムスケール」で星形成活動が活発化したり減衰・終息したりするのかを、これまでにない統計で明確に理解する。

4. 研究成果

(1) まず本課題で作成したグリズムを搭載したすばる望遠鏡の MOIRCS 装置を用い、共同利用観測の時間を獲得して、赤方偏移 $z=2$ (100 億年前) 近辺の 2 つの大質量銀河のスペクトルを取得し、解析を行った。その結果、共に星形成活動が急激に減衰した兆候(強いバルマー吸収線)を確認し、

これらの大質量銀河が爆発的な星形成活動の後に、急速に星形成をやめたことを突き止めた。この結果は、このような昔に大質量銀河で星形成を抑制する物理機構が必要なことを意味する重要な結果である。現在論文を執筆中である (Mao et al. 2023)。

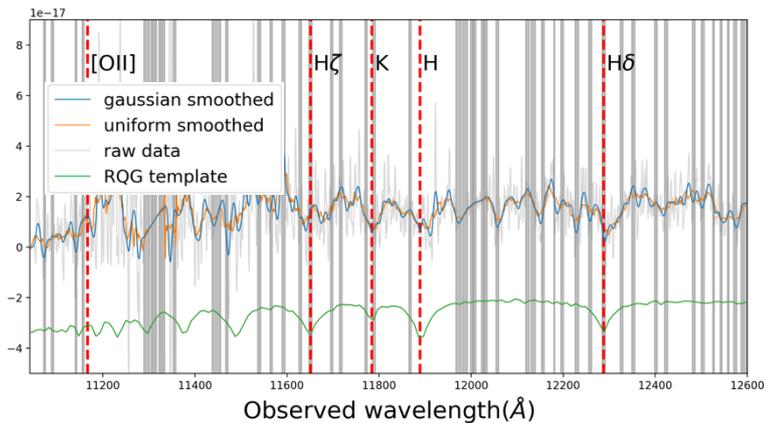


図 1 : 本課題で作成したグリズムを搭載した MOIRCS で観測した $z \sim 2$ (100 億年前) の大質量銀河のスペクトル。水素バルマー線の $H\delta$ の強い吸収線が検出され、その強度から、この銀河では星形成が最近急速に終息したことが示唆される。

(2)その後、グリズムを搭載したMOIRCS装置は2年間の間、他の持ち込み装置に一時的に置き換えられたため休眠した。その間は、同種の近赤外多天体分光器であるケック望遠鏡のMOSFIRE装置やVLTのKMOS装置を用いた分光観測を進めた。同じく $z=2$ (100億年前) 近辺にある二つの原始銀河団領域に存在する星形成銀河について、スペクトルの輝線診断によってガスの金属量を系統的に測定することに成功した。その結果、比較的成熟した原始銀河団では、一般フィールドにある銀河と同じ金属-星質量関係を示すが、若いフェーズの原始銀河団においては、特に小質量の銀河において系統的に金属量がフィールド銀河に比べて低いことを発見した。この結果は、若い原始銀河団では周辺構造からの金属量の低いガスの降着が活発なため、金属量が薄まっていると解釈することができる。この結果は、同じ銀河団において低質量銀河が系統的に活発な星形成活動をしている (ガスの降着が活発であるため) とする我々の先行研究と整合的であることもわかった。これらの研究は本課題で雇用した研究員と共同で進め、研究成果は二本の査読論文にまとめ、一本は受理され、あと一本は査読中である (Perez-Martinez et al. 2022; 2023)。

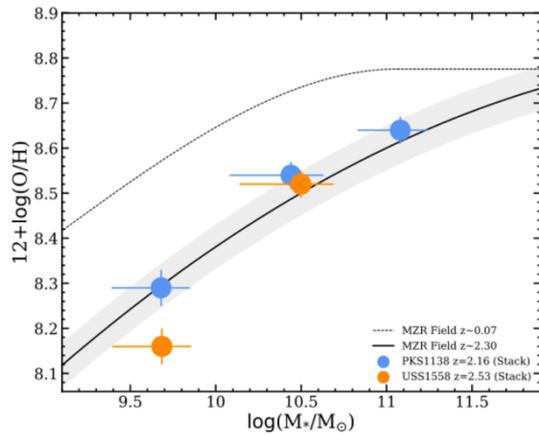


図 2 : Keck 望遠鏡の MOSFIRE と VLT の KMOS でそれぞれ観測された $z=2$ 近辺の二つの原始銀河団 (それぞれ USS1558 と PKS1138) の銀河の電離ガスの金属量を星質量 (太陽質量単位) と比較したもの。実線は同じ時代の一般フィールド銀河に見られる星質量-金属量関係を表す。小質量側で、進化段階が若いと考えられる USS1558 銀河団では、金属量が系統的に低いことがわかる。これは激しいガスの流入により金属量が薄まっていることを示唆する。

これら以外にも $z=1.5$ の銀河団銀河の近赤外線分光観測も Keck/MOSFIRE を用いて行い、 $z=2$ のものと比較し、星質量-金属量関係が赤方偏移と共に進化する様子も捉えている。この成果も現在論文を執筆中である (Adachi et al. 2023)。

また、これら全ての結果は、国内外で開催された多くの銀河形成・進化にまつわる研究会で口頭発表 (研究代表者の10件の国際研究会招待講演を含む) を行い、広く宣伝し、関連研究者と広く議論を行うことができた。

なお雇用した研究員は、研究期間の業績が世界的に認められ、2023年6月からスペインでステータスの高いマリキュリーフェローに採択された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計38件（うち査読付論文 32件 / うち国際共著 28件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|------------------------------|
| 1. 著者名 Shimakawa, R., 8 authors, Kodama, T., 1 author | 4. 巻 503 |
| 2. 論文標題 Subaru Hyper Suprime-Cam excavates colossal over- and underdense structures over 360 deg^2 out to $z = 1$ | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society | 6. 最初と最後の頁 3896-3912 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab713 | 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 Koyama, Y., 2 authors, Kodama, T., 5 authors | 4. 巻 503 |
| 2. 論文標題 A Planck-selected dusty proto-cluster at $z = 2.16$ associated with a strong overdensity of massive H α -emitting galaxies | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters | 6. 最初と最後の頁 L1-L5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/slab013 | 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 Jin, S., 17 authors, Kodama, T., 9 authors | 4. 巻 652 |
| 2. 論文標題 COALAS. I. ATCA CO(1-0) survey and luminosity function in the Spiderweb protocluster at $z = 2.16$ | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics | 6. 最初と最後の頁 id.A11, 23 pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202040232 | 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 Aoyama, K., Kodama, T., 6 authors | 4. 巻 924 |
| 2. 論文標題 The Environmental Dependence of Gas Properties in Dense Cores of a Protocluster at $z \sim 2.5$ Revealed with ALMA | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 id.74, 13 pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac34fa | 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 - |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Yajima, H., 4 authors, Kodama, T., 11 authors | 4. 巻 509 |
| 2. 論文標題 FOREVER22: galaxy formation in protocluster regions | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society | 6. 最初と最後の頁 4037-4057 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab3092 | 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 Jian, H.-Y., 9 authors, Kodama, T., 5 authors | 4. 巻 926 |
| 2. 論文標題 Star Formation Properties of Sloan Digital Sky Survey BOSS Void Galaxies in the Hyper Suprime-Cam Survey | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 id.115, 13 pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac448b | 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 Jian, H.-Y., 9 authors, Kodama, T., 2 authors | 4. 巻 894 |
| 2. 論文標題 Redshift Evolution of Green Valley Galaxies in Different Environments from the Hyper Suprime-Cam Survey | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 id.125, 14pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab86a8 | 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 Gu, L., 5 authors, Kodama, T., 2 authors | 4. 巻 638 |
| 2. 論文標題 Implications of the mild gas motion found with Hitomi in the core of the Perseus cluster | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics | 6. 最初と最後の頁 id.A138, 15pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201936437 | 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 Asano, T., Kodama, T., 18 authors, SWIMS team | 4. 巻 899 |
| 2. 論文標題 Environmental Impact on Star-forming Galaxies in a z=0.9 Cluster during the Course of Galaxy Accretion | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 id. 64, 14pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab9dfb | 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 Yamaguchi, Y., 11 authors, Kodama, T., 9 authors | 4. 巻 72 |
| 2. 論文標題 ALMA twenty-six arcmin ² survey of GOODS-S at one millimeter (ASAGAO): Millimeter properties of stellar mass selected galaxies | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan | 6. 最初と最後の頁 id. 69, 23pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psaa057 | 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 Tadaki, K., 7 authors, Kodama, T., 12 authors | 4. 巻 901 |
| 2. 論文標題 Structural Evolution in Massive Galaxies at z=2 | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 id.74, 23 pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abaf4a | 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 Onodera, M., 5 authors, Kodama, T., 3 authors | 4. 巻 904 |
| 2. 論文標題 Broadband Selection, Spectroscopic Identification, and Physical Properties of a Population of Extreme Emission-line Galaxies at $3 < z < 3.7$ | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 id.180, 23 pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abc174 | 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 Inoue, A., 26 authors, Kodama, T., 3 authors | 4. 巻 72 |
| 2. 論文標題 CHORUS. I. Cosmic HydrOgen Reionization Unveiled with Subaru: Overview | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan | 6. 最初と最後の頁 id.101, 17 pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psaa100 | 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 Suzuki, T. L., Onodera, M., Kodama, T., 8 authors | 4. 巻 908 |
| 2. 論文標題 Dust, Gas, and Metal Content in Star-forming Galaxies at $z \sim 3.3$ Revealed with ALMA and Near-IR Spectroscopy | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 id.15, 14 pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abd4e7 | 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 Lee, M., 3 authors, Kodama, T., 3 authors | 4. 巻 909 |
| 2. 論文標題 Revisited Cold Gas Content with Atomic Carbon [C I] in $z = 2.5$ Protocluster Galaxies | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 id.181, 14 pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abdbb5 | 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 Koyama, S., 8 authors, Kodama, T., 4 authors | 4. 巻 874 |
| 2. 論文標題 Do Galaxy Morphologies Really Affect the Efficiency of Star Formation During the Phase of Galaxy Transition? | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 id. 142, 13pp |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab0e75 | 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 Tadaki, K., Kodama, T., 13 authors | 4. 巻 71 |
| 2. 論文標題 Environmental impacts on molecular gas in protocluster galaxies at z~2 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan, | 6. 最初と最後の頁 id. 40, 10pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz005 | 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 - |

| | |
|--|------------------------------|
| 1. 著者名 Maier, C., Hayashi, M., Ziegler, B., Kodama, T. | 4. 巻 626 |
| 2. 論文標題 Cluster induced quenching of galaxies in the massive cluster XMMXCS J2215.9-1738 at z~1.5 traced by enhanced metallicities inside half R200 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics | 6. 最初と最後の頁 id. A14, 8 pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201935522 | 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 Namiki, S., 6 authors, Kodama, T., 4 authors | 4. 巻 877 |
| 2. 論文標題 A Spectroscopic Study of a Rich Cluster at z = 1.52 with Subaru and LBT: The Environmental Impacts on the Mass-Metallicity Relation | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 id.118, 10pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab1b6c | 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 Yamaguchi, Y., 12 authors, Kodama, T., 10 authors | 4. 巻 878 |
| 2. 論文標題 ALMA 26 arcmin ² Survey of GOODS-S at 1 mm (ASAGAO): Near-infrared-dark Faint ALMA Sources | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 id. 73, 8 pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab0d22 | 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 Suzuki, T. L., MInowa, Y., Koyama, Y., Kodama, T., 4 authors | 4. 巻 71 |
| 2. 論文標題 Extended star-forming regions within galaxies in a dense proto-cluster core at $z = 2.53$ | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan | 6. 最初と最後の頁 id. 69, 12pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz047 | 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 Lee, M., 6 authors, Kodama, T., 7 authors | 4. 巻 883 |
| 2. 論文標題 A Radio-to-millimeter Census of Star-forming Galaxies in Protocluster 4C 23.56 at $z = 2.5$: Global and Local Gas Kinematics | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 id. 92, 21 pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab3b5b | 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, M., 8 authors, Kodama, T., 4 authors | 4. 巻 887 |
| 2. 論文標題 Planck Far-infrared Detection of Hyper Suprime-Cam Protoclusters at $z=4$: Hidden AGN and Star Formation Activity | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 id.214, 20pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab5a80 | 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 Hayashi, M., Koyama, Y., Kodama, T., 8 authors | 4. 巻 71 |
| 2. 論文標題 The whole picture of the large-scale structure of the CL1604 supercluster at $z=0.9$ | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan | 6. 最初と最後の頁 id. 112, 19pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz097 | 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 Boehm, A., 2 authors, Kodama, T., 4 authors | 4. 巻 633 |
| 2. 論文標題 Kinematics of disk galaxies in (proto-)clusters at $z = 1.5$ | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics | 6. 最初と最後の頁 id.A131, 11 pp. |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201935527 | 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 Minowa, Y., 6 authors, Kodama, T., 5 authors | 4. 巻 11203 |
| 2. 論文標題 ULTIMATE-Subaru: enhancing the Subaru's wide-field capability with GLAO | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE | 6. 最初と最後の頁 id. 112030G |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560539 | 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 Hayashi Masao, Tadaki Ken-ichi, Kodama Tadayuki, Kohno Kotaro, Yamaguchi Yuki, Hatsukade Bunyo, Koyama Yusei, Shimakawa Rhythm, Tamura Yoichi, Suzuki Tomoko L. | 4. 巻 856 |
| 2. 論文標題 Molecular Gas Reservoirs in Cluster Galaxies at $z=1.46$ | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 118 ~ 118 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aab3e7 | 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 - |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Zeballos M, Aretxaga I, Hughes D H, Humphrey A, Wilson G W, Austermann J, Dunlop J S, Ezawa H, Ferrusca D, Hatsukade B, Ivison R J, Kawabe R, Kim S, Kodama T, Kohno K, Montana A, Nakanishi K, Plionis M, Sanchez-Argelles D, Stevens J A, Tamura Y, Velazquez M, Yun M S | 4. 巻 479 |
| 2. 論文標題 AzTEC 1.1mm observations of high- z protocluster environments: SMG overdensities and misalignment between AGN jets and SMG distribution | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society | 6. 最初と最後の頁 4577 ~ 4632 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1714 | 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 Wang Tao, Elbaz David, Daddi Emanuele, Liu Daizhong, Kodama Tadayuki, Tanaka Ichi, Schreiber Corentin, Zanella Anita, Valentino Francesco, Sargent Mark, Kohno Kotaro, Xiao Mengyuan, Pannella Maurilio, Ciesla Laure, Gobat Raphael, Koyama Yusei | 4. 巻 867 |
| 2. 論文標題 Revealing the Environmental Dependence of Molecular Gas Content in a Distant X-Ray Cluster at $z=2.51$ | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 L29 ~ L29 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aaeb2c | 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 Shimakawa Rhythm, Koyama Yusei, Rottgering Huub J A, Kodama Tadayuki, Hayashi Masao, Hatch Nina A, Dannerbauer Helmut, Tanaka Ichi, Tadaki Ken-ichi, Suzuki Tomoko L, Fukagawa Nao, Cai Zheng, Kurk Jaron D | 4. 巻 481 |
| 2. 論文標題 MAHALO Deep Cluster Survey II. Characterizing massive forming galaxies in the Spiderweb protocluster at $z=2.2$ | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society | 6. 最初と最後の頁 5630 ~ 5650 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty2618 | 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 Hatsukade B., Kohno K., Yamaguchi Y., et al. (29 more authors). | 4. 巻 70 |
| 2. 論文標題 ALMA twenty-six arcmin ² survey of GOODS-S at one millimeter (ASAGAO): Source catalog and number counts | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan | 6. 最初と最後の頁 1~20 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy104 | 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 Koyama Yusei, Shimakawa Rhythm, Yamamura Issei, Kodama Tadayuki, Hayashi Masao | 4. 巻 71 |
| 2. 論文標題 On the different levels of dust attenuation to nebular and stellar light in star-forming galaxies | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan | 6. 最初と最後の頁 1~15 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy113 | 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 - |

| | |
|---|------------------|
| 1. 著者名 Macuga Michael, Martini Paul, Miller Eric D., Brodwin Mark, Hayashi Masao, Kodama Tadayuki, Koyama Yusei, Overzier Roderik A., Shimakawa Rhythm, Tadaki Ken-ichi, Tanaka Ichi | 4. 巻 874 |
| 2. 論文標題 The Fraction of Active Galactic Nuclei in the USS 1558-003 Protocluster at z=2.53 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 54 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab0746 | 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 Suzuki Tomoko, Glazebrook Karl, Schreiber Corentin, Kodama Tadayuki, Kacprzak Glenn G., Leiton Roger, Nanayakkara Themiya, Oesch Pascal A., Papovich Casey, Spitler Lee, Straatman Caroline M. S., Tran Kim-Vy, Wang Tao | 4. 巻 936 |
| 2. 論文標題 Low Star Formation Activity and Low Gas Content of Quiescent Galaxies at z = 3.5-4.0 Constrained with ALMA | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 61 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac7ce3 | 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 Mao Zhiying, Kodama Tadayuki, Perez-Martinez Jose Manuel, Suzuki Tomoko L., Yamamoto Naoaki, Adachi Kouta | 4. 巻 666 |
| 2. 論文標題 Revealing impacts of stellar mass and environment on galaxy quenching | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics | 6. 最初と最後の頁 A141 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202243733 | 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 Morokuma-Matsui Kana, Bekki Kenji, Wang Jing, Serra Paolo, Koyama Yusei, Morokuma Tomoki, Egusa Fumi, For Bi-Qing, Nakanishi Kouichiro, Koribalski Barbel S., Okamoto Takashi, Kodama Tadayuki, et al. | 4. 巻 263 |
| 2. 論文標題 CO(J = 1-0) Mapping Survey of 64 Galaxies in the Fornax Cluster with the ALMA Morita Array | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series | 6. 最初と最後の頁 40 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ac983b | 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 Liu D., Foerster-Schreiber N. M., Genzel R., Lutz D., Price S. H., Lee L. L., Baker A. J., Burkert A., Coogan R. T., Davies R. I., Davies R. L., Herrera-Camus R., Kodama T., Lee Minju M., Nestor A., Pulsoni C., Renzini A., Sharon C. E., Shimizu T. T., Tacconi L. J., Tadaki K. i., & Uebler H. | 4. 巻 942 |
| 2. 論文標題 An ~600 pc View of the Strongly Lensed, Massive Main-sequence Galaxy J0901: A Baryon-dominated, Thick Turbulent Rotating Disk with a Clumpy Cold Gas Ring at $z = 2.259$ | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 98 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aca46b | 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 Perez-Martinez J M, Dannerbauer H, Kodama T, Koyama Y, Shimakawa R, Suzuki T L, Calvi R, Chen Z, Daikuhara K, Hatch N A, Laza-Ramos A, Sobral D, Stott J P, Tanaka I | 4. 巻 518 |
| 2. 論文標題 Signs of environmental effects on star-forming galaxies in the Spiderweb protocluster at $z=2.16$ | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society | 6. 最初と最後の頁 1707-1734 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac2784 | 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18件（うち招待講演 16件 / うち国際学会 16件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kodama, T. |
| 2. 発表標題 Superb Wide-field Imaging Multi-colour Survey with 18 filters (SWIMS-18) |
| 3. 学会等名 Massive galaxies and clusters in the early Universe (Nanjing; zoom) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kodama, T. |
| 2. 発表標題 Superb Wide-field Imaging Multi-colour Survey with 18 filters (SWIMS-18) |
| 3. 学会等名 Super-IRnet Seminar (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kodama, T. |
| 2. 発表標題 HSC ² +PFS ² , SWIMS and ULTIMATE surveys of galaxy clusters at 0.5<z<5 |
| 3. 学会等名 GOGREEN/GCLASS Data Release and Workshop (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kodama, T |
| 2. 発表標題 Quenching history of galaxies at z<2 probed by PFS ² |
| 3. 学会等名 GOGREEN/GCLASS Data Release and Workshop (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kodama, T. |
| 2. 発表標題 Discussion on evolutionary scenarios |
| 3. 学会等名 Protoclusters: galaxies in confinement (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 児玉 忠恭 |
| 2. 発表標題 Formation of proto-clusters and massive high-z galaxies |
| 3. 学会等名 初代星・初代銀河研究会2020 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 児玉 忠恭 |
| 2. 発表標題 SWIMS-18, PFS ² , and ULTIMATE-K |
| 3. 学会等名 我が国の赤外線広視野観測サイエンスの戦略と展望 (日本) (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kodama, T |
| 2. 発表標題 Transition of gas accretion mode to clusters at z~2 |
| 3. 学会等名 Tracing Cosmic Evolution with Clusters of Galaxies (Italy) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 児玉 忠恭 |
| 2. 発表標題 HSC distant cluster search (HSC ²) and future prospects with PFS ² |
| 3. 学会等名 The 3rd HSC-X cluster workshop (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kodama, T. |
| 2. 発表標題 Gas and Star formation in proto-clusters at z>1.5 and the future prospects |
| 3. 学会等名 First galaxies, first structures (France) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kodama, T., et al. |
| 2. 発表標題 Synergetic studies of distant clusters between Canada and Subaru |
| 3. 学会等名 Wide Field Astronomy in Canada (Waterloo, Canada) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kodama, T., et al. |
| 2. 発表標題 Cluster Science with ELTs |
| 3. 学会等名 EARly Science with ELTs (EASE) (Vienna, Austria) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kodama, T. |
| 2. 発表標題 Galaxy cluster formation revealed by Mahalo-Subaru and Gracias-ALMA |
| 3. 学会等名 Chile-Japan Academic Forum 2018 (Nikko, Japan) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kodama, T., et al. |
| 2. 発表標題 Galaxy quenching explored with HSC2, PFS2, and ULTIMATE-K |
| 3. 学会等名 Panchromatic and Panoramic Studies of Galaxy Clusters (Taipei, Taiwan) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kodama, T., et al. |
| 2. 発表標題 Big and sharp eyes on galaxy cluster formation and evolution across cosmic times |
| 3. 学会等名 Extremely Big Eyes on the Early Universe (Kashiwa, Japan) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kodama, T., et al. |
| 2. 発表標題 Accelerated galaxy formation and quenching in distant clusters |
| 3. 学会等名 Alvio80 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kodama, T., et al. |
| 2. 発表標題 Rise and Fall of Star Formation in Clusters/Proto-clusters |
| 3. 学会等名 ESA-ESO workshop: Euclid Galaxy Evolution (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kodama, T., et al. |
| 2. 発表標題 Remaining Key Questions on Galaxy Cluster Formation and Evolution |
| 3. 学会等名 In situ view of galaxy formation 2 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|---|
| 研究代表者ホームページ http://mahalo.galaxy.bindcloud.jp 研究代表者のホームページ http://mahalo.galaxy.bindcloud.jp |
|---|

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 |
|-------|--|--|-------|
| 研究分担者 | 矢島 秀伸 (YAJIMA Nobuhide) (10756357) | 筑波大学・計算科学研究センター・准教授 (12102) | |
| 研究分担者 | 小山 佑世 (KOYAMA Yusei) (40724662) | 国立天文台・ハワイ観測所・准教授 (62616) | |
| 研究分担者 | 小野寺 仁人 (ONODERA Masato) (40778396) | 国立天文台・ハワイ観測所・助教 (62616) | |
| 研究分担者 | 田中 壱 (TANAKA Ichi) (70374890) | 国立天文台・ハワイ観測所・RCUH職員 (62616) | |
| 研究分担者 | 林 将央 (HAYASHI Masao) (30583554) | 国立天文台・大学共同利用機関等の部局等・研究員 (62616) | 企業に就職 |

6. 研究組織（つづき）

| | 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 |
|-------|--|---|--------------|
| 研究分担者 | 海老塚 昇 (EBITSUKA Noboru) (80333300) | 国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・ 研究員 (82401) | |
| 研究分担者 | 本原 顕太郎 (MOTOHARA Kentaro) (90343102) | 東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授 (12601) | 国立天文台に移動（教授） |

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 | | | |
|---------|-----------------------------|--|--|--|
| オーストリア | University of Vienna | | | |
| フランス | University of Paris, Saclay | | | |
| 米国 | The Ohio State University | | | |
| 英国 | University of Nottingham | | | |
| オランダ | Leiden University | | | |
| 米国 | Univ. of Texas, Austine | | | |
| カナダ | York University | | | |
| 米国 | Kansas City University | | | |
| 米国 | Caltech | | | |