

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04831

研究課題名（和文）形成期の銀河間を繋ぐガスネットワーク構造の研究

研究課題名（英文）Research for the Cosmic Web in the early Universe

研究代表者

松田 有一（Matsuda, Yuichi）

国立天文台・アルマプロジェクト・助教

研究者番号：20647268

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 18,380,000円

研究成果の概要（和文）：100億年以上前の宇宙では、物質の多くはリボンのようなフィラメント状の構造（宇宙網）を作っており、それが銀河やブラックホールなどのもととなるガスの供給源と考えられている。しかし、そのような構造に存在しているガスはあまり光を発しないため、これまでの観測では捉える事は難しかった。我々は、すばる、アルマ望遠鏡による宇宙網地図作りを進め、さらに、すばる望遠鏡用に新たな光学フィルターを製作し、広範な地図作りに向けて、観測を推進した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

初期宇宙では銀河やブラックホールなどのもととなる水素ガスは宇宙網と呼ばれる網の目構造のパイプの中を流れて、網の目の結び目に向かって流れ込んでいると考えられており、その性質を調べることで天体形成の謎を解明するための鍵となる。我々は、すばる望遠鏡、アルマ望遠鏡を含む世界中の巨大望遠鏡群を使って、世界で初めて、形成期の銀河を繋ぐガスネットワーク構造の観測に成功した。さらに、すばる望遠鏡の超広視野カメラ用に製作した特注光学フィルターを使って、より広範囲でガスネットワークを観測して、銀河が形成される時代の宇宙における宇宙網の地図作成を進める。

研究成果の概要（英文）：We made a special narrow-band filter NB0497 for Subaru/HSC. Based on this filter, we are undertaking Lyman-alpha observations of the cosmic web in and around the well-studied SSA22 protocluster at redshift  $z=3.09$  as a Subaru Intensive program. Our program is scheduled from 2021 to 2023 and the total observation time is 98 hours. We also obtained CFHT U-band time as an international joint research project. We analyzed old Subaru/Keck Lyman-alpha imaging data and found a hint of Mpc-scale filamentary structure connecting massive galaxies toward this protocluster. We proceeded ALMA and VLT/MUSE observations to confirm this structure and published the first result on Science Journal.

研究分野：銀河形成

キーワード：銀河形成 宇宙網

## 研究課題名「形成期の銀河間を繋ぐガスネットワーク構造の研究」

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙網(コズミックウェブ)は、冷たい暗黒物質の重力進化による構造形成パラダイムから予言される Mpc スケールを超えるネットワーク構造である(図1左図)。赤方偏移  $z=3$  を超えるような銀河形成期の宇宙では、全バリオンの8割は宇宙網に沿って分布しており、銀河はその網の目の接点に向かって流れ込むガスによって形成されると考えられている(図1右図)。これまで主に明るい背景天体の水素の吸収線系を用いた観測的研究により、形成期の銀河の周囲に Mpc までひろがるガス構造が存在することがわかってきた。しかし、背景天体の数密度が低いため、このガス構造がどのような形状を持つのかはまだ良くわかっていなかった。また、水素ライマンアルファ輝線を用いた観測的研究により、巨大水素ガス雲と呼ばれる 100kpc スケールに広がったガス天体が見つかったが、そのサイズは大質量銀河のハローサイズと同程度であり、Mpc スケールのガスネットワーク構造を捉えることはまだできていなかった。

### 2. 研究の目的

銀河形成期における宇宙網の性質を明らかにすることは、現在の観測天文学における大きな目標の一つになっている。特に、「銀河はどこでどのように形成されたのか」を理解するために、銀河へのガスの供給源と考えられている宇宙網の観測的研究が重要である。形成期の銀河の激しい星形成活動を維持するためには、星の材料となる冷たいガスを周囲から絶えず供給する必要がある。銀河は宇宙網の接点で形成されるため、暗黒物質ハローの平均密度よりも周囲から突き刺さるネットワーク構造の密度のほうが高く、ガスはその構造に沿ってジーンズ長程度の幅の流れを作り、加熱されずに中心部まで自由落下すると考えられている。本研究では、形成期の銀河間を繋ぐガスネットワーク構造の性質を明らかにし、ネットワーク構造から銀河へのガス降着過程を調べる。

### 3. 研究の方法

形成期の銀河間を繋ぐガスネットワーク構造をとらえるために、すばる望遠鏡超広視野カメラ HSC を用いて、以前の観測でガスネットワーク構造の兆候が見つかった SSA22 領域  $z=3.1$  原始銀河団に対して高感度水素ライマンアルファ撮像観測を行う。この観測用に、高い透過率を持ち、中心波長とバンド幅の一樣性が全面で保たれている特注の狭帯域フィルターを製作する。完成したフィルターは国立天文台先端技術センターに設置されている HSC フィルター用透過率測定器を用いて性能評価を行う。また、撮像観測で見つかったガスネットワーク構造に対して、可視光面分光観測を含む、多波長追観測を行い、その3次元分布や運動状態を明らかにする。

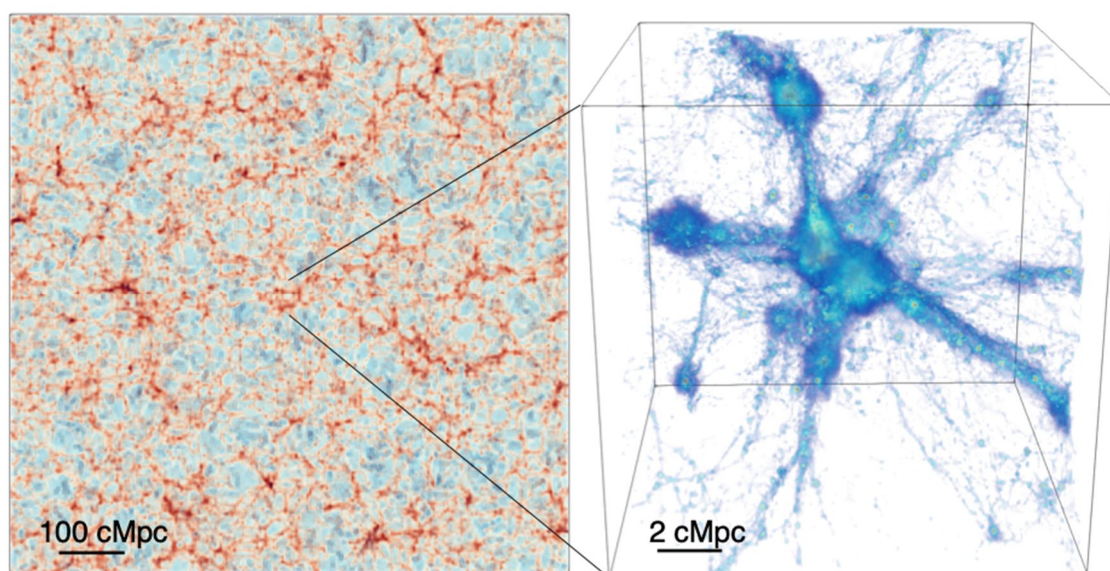


図1 : Yajima et al. (2021)による冷たい暗黒物質モデルに基づく構造形成数値シミュレーションから理論的に予言される赤方偏移  $z=3$  の宇宙における暗黒物質の網の目構造(宇宙網、左図)とガスネットワーク構造(右図)。

## 4. 研究成果

初期宇宙の広視野高感度宇宙網観測に向けて、HSC に搭載する専用狭帯域フィルターNB497 を製作した。このフィルターは宇宙網が最も観測しやすいと考えられる SSA22z=3.1 原始銀河団の赤方偏移された水素ライマンアルファ輝線に合わせて設計されている。製作は日本真空光学に依頼し、フィルターの性能評価は国立天文台ハワイ観測所の川野元聡氏の協力を得て行った。フィルターはハワイ観測所に輸送後、運用試験を経て、共同利用観測で利用可能な狭帯域フィルターの一つとして S20B 期より公開された (図 2 左図、すばる共同利用 HSC のウェブページ)。

米国、英国、イタリア、カナダの共同研究者らと共にすばるインテンシブプログラムとして HSC/NB497 による超高感度水素ライマンアルファ輝線撮像観測提案を作成し、S20B 期に申請するも不採択であった。計画を練り直し S21A 期に申請した提案は採択され、2021 年から 2023 年にかけて 98 時間の観測が行われることになった。多波長観測の一環として、カナダフランスハワイ望遠鏡による同じ領域をカバーする紫外線 (U バンド) 観測の提案も採択され 2021 年から観測が行われる予定である。

遠方銀河と宇宙網に関する研究成果として 17 篇の査読付き学术论文を出版した。その中でも Mpc スケールのガスネットワークを直接捉えた世界初の研究成果として、以前のすばる望遠鏡のシュプリームカム (S-Cam) で得た SSA22 領域のライマンアルファ輝線観測データを再解析し、原始銀河団中心部に見えてきた宇宙網の兆候に対して、ケック望遠鏡 LRIS データの解析、および、アルマ望遠鏡と欧州南天天文台 VLT/MUSE による追観測を行い、サイエンスに論文を出版した (図 2 右図、Umehata et al. 2019)。また、ターゲットの領域は異なるが、 $z=2.84$  の超高光度クエーサーの周囲の水素ライマンアルファ輝線撮像観測データの解析を行い、クエーサー周囲のライマンアルファ輝線で光るガス構造とライマンアルファ銀河でトレースされる大規模構造を明らかにした (Kikuta et al. 2019)。

### 参考文献

Yajima et al., 2021, PASJ, in press (arXiv: 2011.11663)  
<https://www.subarutelescope.org/Observing/Instruments/HSC/>

Umehata et al. 2019, Science, 366, 6461, 97

Kikuta et al. 2019, PASJ, 71, L2

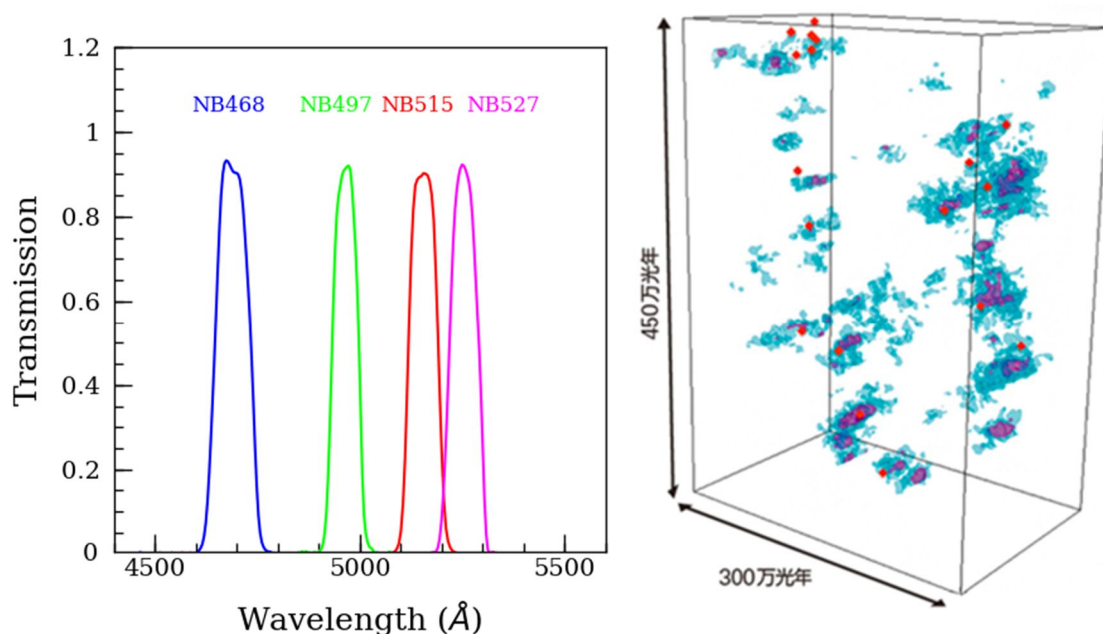


図 2 : すばる HSC 用に製作した NB497 フィルター (左図の緑色、すばる共同利用 HSC ウェブページ)、SSA22  $z=3.1$  原始銀河団の中心領域で見つかったガスネットワークの 3 次元構造 (青色) と銀河 (赤色) の位置関係 (右図、Umehata et al. 2019)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 15件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Mukae Shiro, Ouchi Masami, Cai Zheng, Lee Khee-Gan, Prochaska J. Xavier, Cantalupo Sebastiano, Ono Yoshiaki, Zheng Zheng, Nagamine Kentaro, Suzuki Nao, Silverman John D., Misawa Toru, Inoue Akio K., Hennawi Joseph F., Matsuda Yuichi, et al.	4. 巻 896
2. 論文標題 Three-dimensional Distribution Map of HI Gas and Galaxies around an Enormous Ly Nebula and Three QSOs at $z = 2.3$ Revealed by the HI Tomographic Mapping Technique	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 45 ~ 45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab8db7	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 Harikane Yuichi, Ouchi Masami, Inoue Akio K., Matsuoka Yoshiki, Tamura Yoichi, Bakx Tom, Fujimoto Seiji, Moriwaki Kana, Ono Yoshiaki, Nagao Tohru, Tadaki Ken-ichi, Kojima Takashi, Shibuya Takatoshi, Egami Eiichi, Ferrara Andrea, Gallerani Simona, Hashimoto Takuya, Kohno Kotaro, Matsuda Yuichi, et al.	4. 巻 896
2. 論文標題 Large Population of ALMA Galaxies at $z > 6$ with Very High [OIII] 88 $\mu\text{m}$ to [CII] 158 $\mu\text{m}$ Flux Ratios: Evidence of Extremely High Ionization Parameter or PDR Deficit?	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 93 ~ 93
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab94bd	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 Simpson J M, Smail Ian, Dudzeviit U, Matsuda Y, Hsieh B-C, Wang W-H, Swinbank A M, Stach S M, An Fang Xia, Birkin J E, Ao Y, Bunker A J, Chapman S C, Chen Chian-Chou, Coppin K E K, Ikarashi S, Ivison R J, Mitsuhashi I, Saito T, Umehata H, Wang R, Zhao Y	4. 巻 495
2. 論文標題 An ALMA survey of the brightest sub-millimetre sources in the SCUBA-2 COSMOS field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3409 ~ 3430
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa1345	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 Mitsuhashi I., Matsuda Y., Smail Ian, Hayatsu N. H., Simpson J. M., Swinbank A. M., Umehata H., Dudzeviit U., Birkin J. E., Ikarashi S., Chen Chian-Chou, Tadaki K., Yajima H., Harikane Y., Inami H., Chapman S. C., Hatsukade B., Iono D., Bunker A., Ao Y., Saito T., Ueda J., Sakamoto S.	4. 巻 907
2. 論文標題 FIR-luminous [CII] Emitters in the ALMA-SCUBA-2 COSMOS Survey (AS2COSMOS): The Nature of Submillimeter Galaxies in a 10 Comoving Megaparsec-scale Structure at z=4.6	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 122 ~ 122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abcc72	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 Birkin Jack E, Weiss Axel, Wardlow J L, Smail Ian, Swinbank A M, Dudzeviit U, An Fang Xia, Ao Y, Chapman S C, Chen Chian-Chou, da? Cunha E, Dannerbauer H, Gullberg B, Hodge J A, Ikarashi S, Ivison R J, Matsuda Y, et al.	4. 巻 501
2. 論文標題 An ALMA/NOEMA survey of the molecular gas properties of high-redshift star-forming galaxies	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3926 ~ 3950
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa3862	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 Xia An Fang, Simpson J. M., Smail Ian, Swinbank A. M., Ma Cong, Liu Daizhong, Lang P., Schinnerer E., Karim A., Magnelli B., Leslie S., Bertoldi F., Chen Chian-Chou, Geach J. E., Matsuda Y. et al.	4. 巻 886
2. 論文標題 Multi-wavelength Properties of Radio- and Machine-learning-identified Counterparts to Submillimeter Sources in S2COSMOS	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 48 ~ 48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab4d53	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 Hayashino T, Inoue A K, Kousai K, Kashikawa N, Mawatari K, Matsuda Y, Tejos N, Prochaska J X, Iwata I, Noll S, Burgarella D, Yamada T, Akiyama M	4. 巻 484
2. 論文標題 Enhancement of HI absorption associated with the z = 3.1 large-scale proto-cluster and characteristic structures with AGNs sculptured over Gpc scale in the SSA22 field	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5868 ~ 5887
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz388	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 Hill Ryley, Chapman Scott C, Scott Douglas, Smail Ian, Steidel Charles C, Krips Melanie, Babul Arif, Berg Trystyn, Bertoldi Frank, Gao Yu, Lacaille Kevin, Matsuda Yuichi, Ross Colin, Rudie Gwen, Trainor Ryan	4. 巻 485
2. 論文標題 The SCUBA-2 web survey: I. Observations of CO(3-2) in hyper-luminous QSO fields	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 753 ~ 769
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz429	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 Morokuma-Matsui Kana, Morokuma Tomoki, Tominaga Nozomu, Hatsukade Bunyo, Hayashi Masao, Tamura Yoichi, Matsuda Yuichi, Motogi Kazuhito, Niinuma Kotaro, Konishi Masahiro	4. 巻 879
2. 論文標題 ALMA Observations of Molecular Gas in the Host Galaxy of AT2018cow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L13 ~ L13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab2915	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 Kubo Mariko, Toshikawa Jun, Kashikawa Nobunari, Chiang Yi-Kuan, Overzier Roderik, Uchiyama Hisakazu, Clements David L., Alexander David M., Matsuda Yuichi, Kodama Tadayuki, Ono Yoshiaki, Goto Tomotsugu, Cheng Tai-An, Ito Kei	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 214 ~ 214
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 Simpson J. M., Smail Ian, Swinbank A. M., Chapman S. C., Chen Chian-Chou, Geach J. E., Matsuda Y. et al.	4. 巻 880
2. 論文標題 The East Asian Observatory SCUBA-2 Survey of the COSMOS Field: Unveiling 1147 Bright Sub-millimeter Sources across 2.6 Square Degrees	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 43 ~ 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab23ff	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 Umehata H., Fumagalli M., Smail I., Matsuda Y., Swinbank A. M., Cantalupo S., Sykes C., Ivison R. J., Steidel C. C., Shapley A. E., Vernet J., Yamada T., Tamura Y., Kubo M., Nakanishi K., Kajisawa M., Hatsukade B., Kohno K.	4. 巻 366
2. 論文標題 Gas filaments of the cosmic web located around active galaxies in a protocluster	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 97 ~ 100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aaw5949	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 Kikuta Satoshi, Matsuda Yuichi, Cen Renyue, Steidel Charles C, Yagi Masafumi, Hayashino Tomoki, Imanishi Masatoshi, Komiyama Yutaka, Momose Rieko, Saito Tomoki	4. 巻 71
2. 論文標題 Ly view around a $z = 2.84$ hyperluminous QSO at a node of the cosmic web	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 L2 ~ L2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz055	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 Tamura Yoichi, Mawatari Ken, Hashimoto Takuya, Inoue Akio K., Zackrisson Erik, Christensen Lise, Binggeli Christian, Matsuda Yuichi, Matsuo Hiroshi, Takeuchi Tsutomu T., Asano Ryosuke S., Sunaga Kaho, Shimizu Ikkoh, Okamoto Takashi, Yoshida Naoki et al.	4. 巻 874
2. 論文標題 Detection of the Far-infrared [OIII] and Dust Emission in a Galaxy at Redshift 8.312: Early Metal Enrichment in the Heart of the Reionization Era	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 27 ~ 27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab0374	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 Moriwaki Kana, Yoshida Naoki, Shimizu Ikkoh, Harikane Yuichi, Matsuda Yuichi, Matsuo Hiroshi, Hashimoto Takuya, Inoue Akio K, Tamura Yoichi, Nagao Tohru	4. 巻 481
2. 論文標題 The distribution and physical properties of high-redshift [OIII] emitters in a cosmological hydrodynamics simulation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L84 ~ L88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/sly167	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 Kato Yuta, Matsuda Yuichi, Iono Daisuke, Hatsukade Bunyo, Umehata Hideki, Kohno Kotaro, Alexander David M, Ao Yiping, Chapman Scott C, Hayes Matthew, Kubo Mariko, Lehmer Bret D, Malkan Matthew A, Michiyama Tomonari, Nagao Tohru, Saito Tomoki, Tanaka Ichi, Taniguchi Yoshiaki	4. 巻 70
2. 論文標題 A high dust emissivity index for a CO-faint galaxy in a filamentary Ly nebula at $z = 3.1$	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 L6-1 ~ L6-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy087	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 Hashimoto Takuya, Laporte Nicolas, Mawatari Ken, Ellis Richard S., Inoue Akio K., Zackrisson Erik, Roberts-Borsani Guido, Zheng Wei, Tamura Yoichi, Bauer Franz E., Fletcher Thomas, Harikane Yuichi, Hatsukade Bunyo, Hayatsu Natsuki H., Matsuda Yuichi, Matsuo Hiroshi, Okamoto Takashi et al.	4. 巻 557
2. 論文標題 The onset of star formation 250 million years after the Big Bang	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 392 ~ 395
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-018-0117-z	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

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 三橋一輝
2. 発表標題 赤方偏移 4.6 の大規模構造におけるサブミリ波銀河の性質
3. 学会等名 日本天文学会 2021年 春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松田有一
2. 発表標題 アルマ望遠鏡による $z=3$ 巨大水素ガス天体のサブミリ連続波観測
3. 学会等名 日本天文学会 2017年 秋季年会
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 Yuichi Matsuda
2. 発表標題 The environment of submillimetre galaxies
3. 学会等名 SMG20 - Twenty years of Submillimetre Galaxies: Star-forming galaxies at high redshifts. (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuichi Matsuda
2. 発表標題 ALMA observations of Lyman alpha blobs at z=3.1
3. 学会等名 Tokyo Spring Cosmic Lyman-Alpha Workshop (Sakura CLAW) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuichi Matsuda
2. 発表標題 ALMA observations of galaxy proto-clusters at z=3-6
3. 学会等名 East-Asian ALMA Science Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2020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
研究協力者	梅畑 豪紀 (Umehata Hideki)  (60783678)	理化学研究所  (82401)	

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
研究協力者	山田 亨 (Yamada Toru)  (90271519)	宇宙航空研究開発機構  (82645)	

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	ダーラム大学			
米国	カリフォルニア工科大学	プリンストン大学		
カナダ	Dalhousie University			