

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：62616

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2023

課題番号：20K22373

研究課題名（和文）最も若い銀河における星および金属の形成に関する観測的研究

研究課題名（英文）Observational study of star-formation and chemical enrichment in the youngest galaxies

研究代表者

中島 王彦（Nakajima, Kimihiko）

国立天文台・科学研究部・特任助教

研究者番号：80875534

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、次世代観測装置ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（JWST；2022年科学運用開始）による初期宇宙天体の直接観測研究を見据え、その準備研究を実施した。初期宇宙の対応天体として、近傍宇宙において金属量が極めて低く、形成後間もない銀河を対象にその特性を明らかにするため、研究代表者が率いるプロジェクトで大規模探査を行った。得られた知見と観測手法を活用し、JWSTの初期観測データを用いて初期宇宙の天体の直接観測研究を展開した。特に、酸素・窒素・炭素の存在比の観測を通じ、宇宙の元素合成史と天体進化の謎に迫る高インパクトな研究をいち早く行うことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、宇宙の初期段階における銀河の形成と元素合成の進化に関する理解を深める上で重要な貢献を果たした。酸素や窒素の存在比の高精度測定により、初代銀河の特性や元素合成のプロセスに関する新たな知見が得られたことは、宇宙論や天文学の基礎研究において重要な進展である。また、これらの成果は、JWSTや次世代観測装置を活用した未来の天文学研究における指針となる。さらに、研究成果が一般社会にも広く認知されたことにより、宇宙科学への関心を高め、科学教育や啓蒙活動の一助となる社会的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：Through this program, I conducted preparatory research in anticipation of direct observational studies of the early universe using the next-generation James Webb Space Telescope (JWST), which began scientific operations in 2022. I initiated a large-scale survey targeting nearby galaxies with extremely low metallicity and recently formed stars as analogs for early universe objects. This research aimed to elucidate their characteristics and develop observational approaches applicable to distant cosmic objects.

Utilizing the properties and observational techniques refined through this local galaxy project, I advanced direct observational studies of early universe objects with the early release data from JWST. Notably, I successfully conducted high-impact research by observationally constraining the abundance ratios of oxygen, nitrogen, and carbon with respect to hydrogen, addressing fundamental questions about the universe's chemical enrichment history and the evolution of cosmic objects.

研究分野：銀河天文学

キーワード：銀河進化 化学進化 初代銀河 星形成

1. 研究開始当初の背景

宇宙の歴史を解き明かすことは、生命の起源に迫ることでもある。炭素、窒素、酸素などのヘリウムより重い元素(金属)は、宇宙初期には存在せず、星の内部での核融合反応によって初めて生成された。多くの星が生まれては死ぬというサイクルを繰り返すことで、宇宙の中でようやく蓄積された金属が生命を創り出し、私たちの生活を支えている。

特に重要な課題は、138億年の宇宙の歴史の中で最初に星が形成された「初代銀河」の研究である。初代銀河は、宇宙の天体形成史の始まりを象徴する重要な天体であり、宇宙に最初に金属を供給する源でもある。理論シミュレーションによれば、宇宙誕生後数億年で初代銀河が形成されたと考えられているが、その形成・進化過程にはまだ多くの謎が残されている。このため、観測を通じて初代銀河の性質を明らかにすることが、現代の天文学において急務となっている。

宇宙で「遠くを見ることは過去を見ること」になるため、非常に遠方の宇宙を観測することで、130億年以上前の宇宙の姿やそこで誕生している天体を直接調べることが可能である。実際、初代銀河の直接観測を大きな目標とし、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)や30m級の大型地上望遠鏡(例:TMT)などの大規模プロジェクトが進められている。しかし、超遠方の初代銀河は非常に暗いため、得られる観測データは限られている。初代銀河の性質を正しく理解するためには、これらの観測装置を最大限に活用するための知識を積み重ねることが必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、非常に遠方の宇宙を観測する代わりに、より近傍の宇宙で誕生後間もない最も若い銀河を探し出し、初代銀河の対応天体としてその性質を深く理解することである。ここで得られる知見を基に、将来のJWSTやTMTを用いた初代銀河の直接観測研究のアプローチを確立することを目指す。

3. 研究の方法

(1) 近傍の極低金属量銀河の大規模探査および特性理解

Hyper Suprime-Cam (HSC)による大規模データは、すばる望遠鏡による300晩以上の観測で得られる1400平方度の超広域撮像データである。この広く深いHSC撮像データを用いることで、近傍の形成後間もない非常に金属量の少ない若い銀河(極低金属量銀河)を探査できることにいち早く着目した。極低金属量銀河は形成後間もないため、若い星が卓越しており、その結果、若い大質量星によって電離された星間物質から非常に強い輝線が観測される(図1)。この特徴的なスペクトルをHSCの複数の波長バンドの撮像データで捉えることで、若い銀河の大規模な探査が可能となる。図2は、HSCで観測される様々な天体の色のモデル予想結果である。ここでは、太陽金属量の10%以下を極低金属量の定義とする。強い輝線の影響で、極低金属量銀河は他の天体とは異なる色の組み合わせを示すが、非線形な境界線のため、従来の単純な色選択では信頼性の高い極低金属量銀河サンプルの構築は困難である。

そこで本研究では、機械学習を導入し、極低金属量銀河の複雑な色情報を正確に解析して、HSCの大規模データから選択する手法を確立する。既に分光されているSDSSデータをテストサンプルとし、様々なアルゴリズムを検討して最適な選択手法を開発する。これまでに近傍で10天体しか見つかっていない極低金属量銀河の研究を本研究で飛躍的に進展させる。

得られる極低金属量銀河に対して、分光観測を含む様々な波長での追観測を行い、星および星間物質の特性を明らかにすることで、若い銀河での星形成のメカニズムに迫る。一連の研究を通じて確立される形成初期段階の銀河の選択手法および星種族・星間物質の特性に基づき、宇宙初期の銀河の直接観測計画を提案する。

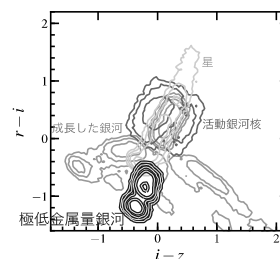
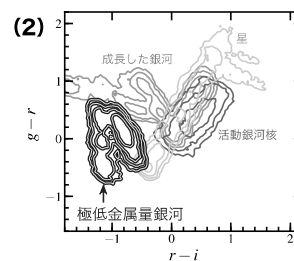
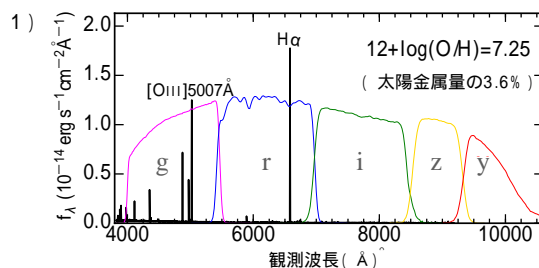


図1: 極低金属量銀河のスペクトル例 (Kojima et al. 2020, ApJ, 898, 142)。弱い連続光の上に、非常に強いH α や[O III]等の輝線が確認できる。g, r, i, z, yがHSCの5つの撮像バンドの波長域を表す。rバンドに強いH α 輝線が入るため、(g - r)や(r - i)といった色が特徴的となる。図2: 様々な天体のHSC色分布のモデル予想。極低金属量銀河を選ぶためには、複数の色情報をもとに非線形の選択境界線が必要となる。

(2) 初代銀河の直接観測へ向けた準備研究

JWST は 2021 年 12 月に打ち上げに成功し、順調に進めば 2022 年夏頃から科学運用を開始する予定である。この望遠鏡は遠方宇宙の観測に最適化されており、これまで観測がほぼ不可能であった初代銀河の形成時代(宇宙誕生後数億年)にまで遡り、天体を探査することが可能となる。JWST の観測に先立ち、どのような観測方法を用いることで初代銀河を探査できるのかを理解することは重要である。

本研究課題では、JWST を用いた初代銀河の直接観測に向けた準備研究として、光電離モデルを用いた初代銀河の観測予想スペクトルを作成する。この予想スペクトルを基に、どのような観測を通じてこれらの初代天体を同定できるのかを調査し、JWST 時代に備える。

4. 研究成果

(1) 極低金属量銀河の研究

予想される様々な天体のモデルを深層ニューラルネットワークに学習させることで、HSC の色に応じて天体をクラス分けする機械学習選択手法を確立した (Kojima, .., Nakajima et al. 2020, ApJ, 898, 142)。その選択手法を実際のすばる望遠鏡 HSC の大規模データに適用することで、27 個の極低金属量銀河候補天体を見つけることに成功した。さらに、決定木モデルを活用した LightGBM による選択手法を試したところ、さらに 3 天体の極低金属量銀河候補を見つけることができた (Nishigaki, .., Nakajima et al. 2023, ApJ, 952, 11)。追分光観測を実施することで、少なくとも 12 天体は太陽金属量の 10%以下の極低金属量であることが確かめられている (Nakajima et al. 2022, ApJS, 262, 3; Isobe, .., Nakajima et al. 2022, ApJ, 925, 111)。これまでに知られている最も低い金属量の記録を更新することもできた (Kojima et al. 2020)。これらの極低金属量銀河を活用することで、以下の重要な成果を得ることができた。

極低金属量範囲における銀河に含まれる金属量の測定手法の確立: 金属の進化を探るうえで、初期宇宙の銀河における金属量の測定は鍵となる。JWST によってこのような研究は大きく進展すると考えられるが、その一方で、初期宇宙の銀河で予想される低い金属量を正確に測定する手法が未確立であり、JWST 観測の解釈に不確実性が生じる恐れがある。そこで、本研究では近傍で見つかった極低金属量銀河の良質なスペクトルを用い、銀河内のガスにおける水素に対する酸素存在比 (O/H) の測定手法を極低金属量範囲まで含めて初めて確立した (Nakajima et al. 2022)。これにより、酸素の存在比を正確に測定できるようになり、将来の JWST 観測を正しく解釈し初期宇宙における元素の生成プロセスに迫ることが期待される。

若い銀河の金属組成比から迫る星形成: 近傍の極低金属量銀河の良質なスペクトルを活用することで、酸素以外の重要な元素である窒素や鉄等の存在比を求めることができた (Kojima, .., Nakajima et al. 2021, ApJ, 913, 22; Isobe, .., Nakajima et al. 2022, ApJ, 925, 111)。その結果、酸素存在比の最も低い極低金属量銀河の中で鉄と酸素の存在比 (Fe/O) が高くなる傾向を見出した。通常、鉄は Ia 型超新星というタイムスケールの長い星の爆発現象によって供給されるが、極低金属量銀河は生まれて間もない若い銀河であるため、他の解釈が必要となる。化学進化モデルを用いることで、若い銀河の中で 140 太陽質量以上の大質量星が形成され、それらが対不安定型超新星 (PISNe) として爆発したとする説を新たに提案するに至った。この成果は、初期宇宙における大質量星形成を調べる観測アプローチに繋がるものである。

若い銀河の電離スペクトル: 極低金属量銀河のスペクトルの中には、非常に高い電離エネルギーを必要とする輝線である HeII や [NeV] が観測される天体が存在する。これらの高電離エネルギーに相当する光子は通常の星形成では生成されないため、隠された高エネルギー天体の存在が示唆される。その正体を探るため、高電離輝線を含めた複数の輝線を光電離モデルで総合的に説明する MCMC 法で解析し、電離スペクトルの性質に迫った。その結果、極低金属量銀河の中には、若い星形成に加え、中間質量ブラックホールのような高エネルギー天体が存在する可能性が示された (Umeda et al. 2022, ApJ, 930, 37; Hatano et al. 2024, ApJ, 966, 170)。

上記の成果を含め、研究代表者が率いた極低金属量銀河探査である EMPRESS プロジェクトは、本研究課題実施期間中に計 12 本の査読済み論文を発表し、形成後間もない銀河の特性解明および JWST 研究へ向けた準備研究として重要な成果を残した。

(2) 初代銀河検出のための判別方法の提唱

JWST の登場により、銀河形成研究の究極の目標である初代銀河の観測研究が可能となることを見据え、観測を解釈する理論研究を展開した。金属を含まない初期の星々である「種族 III の星」からなる初代銀河に加え、直接崩壊して誕生する初代ブラックホールから予想される電離輝線を光電離モデル理論計算で求め、それぞれの天体を他の成長した天体と見分けて判別する方法を提唱した (Nakajima & Maiolino 2022, MNRAS, 513, 5134; 図 3)。特に、電離ヘリウムの再結合線 HeII の等価幅 (連続光に対する輝線の強さ) を活用することで、初代銀河に含まれる種族 III の星の質量分布 (初期質量関数) に制限を加えることができる点を明確化した。これにより、観測と理論を融合することで、始原ガスからの天体形成に関する貴重な情報を引き出せることを示した。

(3) JWST による初期宇宙の銀河の直接観測研究

JWST が 2022 年夏に科学運用を開始し、初期観測データを提供し始めると、研究代表者はその分光観測データを評価し、より高い精度を実現するデータ整約手法をいち早く確立した。この整約手法を用い、これまで酸素の存在比を調べることがほぼ不可能であった 120 億年以前の遠方の宇宙の銀河を 138 個発見し、それらの酸素の存在比(O/H)を Nakajima et al. 2022 論文の手法を用いて精度高く測定することに成功した (Nakajima et al. 2023, ApJS, 269, 33; 図 4)。その結果、131~133 億年前の宇宙 (宇宙年齢にして 5~7 億年、赤方偏移 $z=8\sim 10$) における銀河で酸素に代表される重い元素の合成が急激に進み、現在の宇宙に見られるような豊富な金属が約 130 億年前には既に作られていた証拠が得られた。本研究成果は、研究代表者が主発表者となり『初期の宇宙で急激に酸素が増加した痕跡を捉える』として記者会見において成果発表が行われ、専門的な学術界に留まらず、NHK や主要新聞に取り上げられるなど、一般社会にも広く認知されている。

研究代表者の構築した分光サンプルを精査することで、初期宇宙の 3 天体に対して酸素以外の重要な元素である窒素および炭素の存在比の測定に成功した (Isobe, .., Nakajima et al. 2023, ApJ, 959, 100)。特に、窒素の存在比が近傍では見られないほど高い傾向が見出された。様々な天体現象によって予想される元素合成の理論予想 (Watanabe, .., Nakajima et al. 2024, ApJ, 962, 50) と比較することで、豊富な窒素ガスの起源として超大質量星やブラックホールの存在が新たに示唆された。

JWST を用いた研究は、国際競争の激しい中、研究代表者を含む研究チームは上記の元素合成に関わる論文を含め計 12 本の論文を査読国際誌にて発表済みであり、本分野において国際的に存在感を示している。

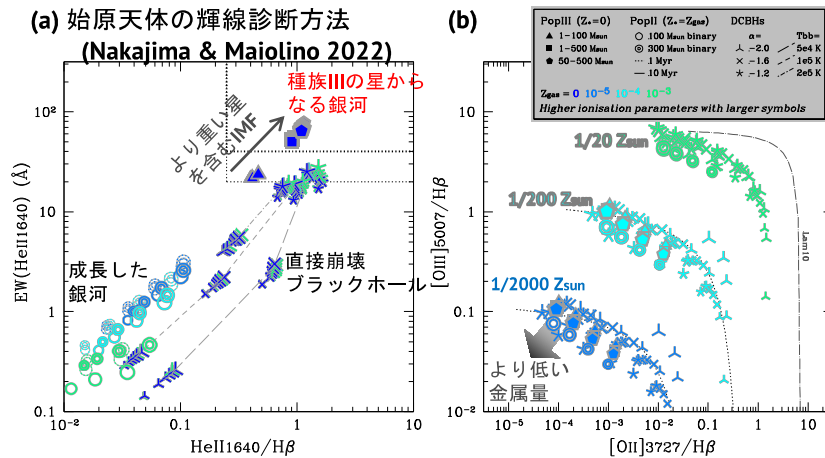
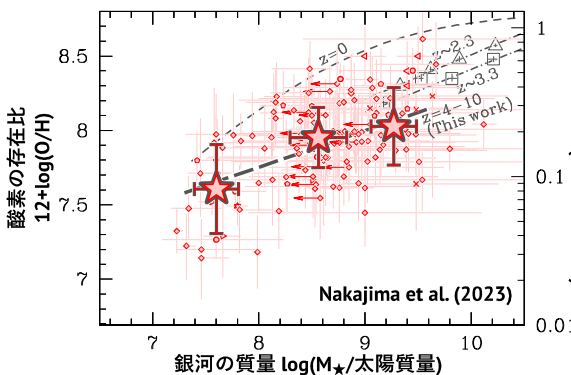


図 3 : Nakajima & Maiolino (2022) で得られた光電離モデルによる初代天体の輝線診断例。Hell 輝線の等価幅を用いた (a) パネルが種族 III の星からなる初代銀河を他の種族 (初代ブラックホールである直接崩壊ブラックホールや成長した銀河) と見分ける良い指標となる。金属輝線を組み合わせた (b) パネルは、金属量 (始原具合) の推定に活用する。

(a) 銀河の質量 - 重元素量関係



(b) 宇宙の重元素量進化

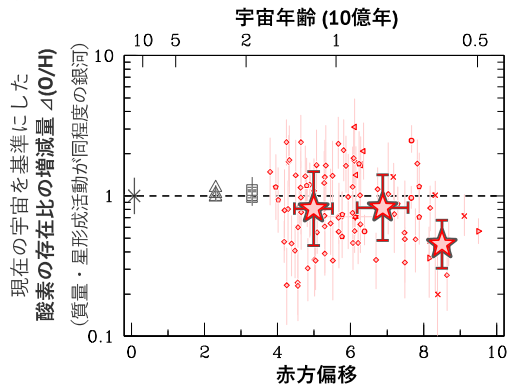


図 4 : Nakajima et al. (2023) で得られた初期宇宙の重元素量分布 (a) およびその進化 (b)。赤の小さいシンボルが本研究で得られた赤方偏移 $z=4\sim 10$ の 138 個の個別の銀河の結果、大きな星印が平均点。 (b) において、銀河の質量および星形成率が同程度の銀河同士で比較した結果、131~133 億年前の宇宙 (宇宙年齢にして 5~7 億年、赤方偏移 $z=8\sim 10$) における銀河で酸素に代表される重元素合成が急激に進み、現在の宇宙に見られるような豊富な重元素が約 130 億年前には既に作られていた証拠が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計34件（うち査読付論文 34件 / うち国際共著 23件 / うちオープンアクセス 34件）

1. 著者名 Chen Nuo, Motohara Kentaro, Spitler Lee, Nakajima Kimihiko, Momose Rieko, Kodama Tadayuki, Konishi Masahiro, Takahashi Hidenori, Kushibiki Kosuke, Kono Yukihiro, Terao Yasunori	4. 巻 964
2. 論文標題 Multiple Emission Lines of H Emissioners at $z \sim 2.3$ from the Broad- and Medium-band Photometry in the ZFOURGE Survey	5. 発行年 2024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/ad20cc	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 Watanabe Kuria, Ouchi Masami, Nakajima Kimihiko, Isobe Yuki, Tominaga Nozomu, Suzuki Akihiro, Ishigaki Miho N., Nomoto Ken'ichi, Takahashi Koh, Harikane Yuichi, Hatano Shun, Kusakabe Haruka, Moriya Takashi J., Nishigaki Moka, Ono Yoshiaki, Onodera Masato, Sugahara Yuma	4. 巻 962
2. 論文標題 EMPRESS. XIII. Chemical Enrichment of Young Galaxies Near and Far at $z \sim 0$ and 4-10: Fe/O, Ar/O, S/O, and N/O Measurements with a Comparison of Chemical Evolution Models	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 50 ~ 50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ad13ff	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 Xu Yi, Ouchi Masami, Isobe Yuki, Nakajima Kimihiko, [and 49 more]	4. 巻 961
2. 論文標題 EMPRESS. XII. Statistics on the Dynamics and Gas Mass Fraction of Extremely Metal-poor Galaxies	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 49 ~ 49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ad06ab	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 Harikane Yuichi, Nakajima Kimihiko, Ouchi Masami, Umeda Hiroya, Isobe Yuki, Ono Yoshiaki, Xu Yi, Zhang Yechi	4. 巻 960
2. 論文標題 Pure Spectroscopic Constraints on UV Luminosity Functions and Cosmic Star Formation History from 25 Galaxies at $z_{\text{spec}} = 8.61-13.20$ Confirmed with JWST/NIRSpec	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 56 ~ 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ad0b7e	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 Nakajima Kimihiko, Ouchi Masami, Isobe Yuki, Harikane Yuichi, Zhang Yechi, Ono Yoshiaki, Umeda Hiroya, Oguri Masamune	4. 巻 269
2. 論文標題 JWST Census for the Mass-Metallicity Star Formation Relations at $z = 4-10$ with Self-consistent Flux Calibration and Proper Metallicity Calibrators	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 33 ~ 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/acd556	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 Isobe Yuki, Ouchi Masami, Tominaga Nozomu, Watanabe Kuria, Nakajima Kimihiko, Umeda Hiroya, Yajima Hidenobu, Harikane Yuichi, Fukushima Hajime, Xu Yi, Ono Yoshiaki, Zhang Yechi	4. 巻 959
2. 論文標題 JWST Identification of Extremely Low C/N Galaxies with $[N/O] > 0.5$ at $z = 6 - 10$ Evidencing the Early CNO-cycle Enrichment and a Connection with Globular Cluster Formation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 100 ~ 100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ad09be	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 Harikane Yuichi, Zhang Yechi, Nakajima Kimihiko, Ouchi Masami, Isobe Yuki, Ono Yoshiaki, Hatano Shun, Xu Yi, Umeda Hiroya	4. 巻 959
2. 論文標題 A JWST/NIRSpec First Census of Broad-line AGNs at $z = 4-7$: Detection of 10 Faint AGNs with $M_{BH} = 10^6 - 10^8 M_{sun}$ and Their Host Galaxy Properties	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 39 ~ 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ad029e	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 Trussler James A A, Conselice Christopher J, Adams Nathan J, Maiolino Roberto, Nakajima Kimihiko, Zackrisson Erik, Austin Duncan, Ferreira Leonardo, Harvey Tom	4. 巻 525
2. 論文標題 On the observability and identification of Population III galaxies with JWST	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5328 ~ 5352
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad2553	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 Isobe Yuki, Ouchi Masami, Nakajima Kimihiko, Harikane Yuichi, Ono Yoshiaki, Xu Yi, Zhang Yechi, Umeda Hiroya	4. 巻 956
2. 論文標題 Redshift Evolution of Electron Density in the Interstellar Medium at $z = 0-9$ Uncovered with JWST/NIRSpec Spectra and Line-spread Function Determinations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 139 ~ 139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acf376	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 Llerena M., Amorin R., Pentericci L., Calabro A., Shapley A. E., Boutsia K., Perez-Montero E., Vilchez J. M., Nakajima K.	4. 巻 676
2. 論文標題 Ionized gas kinematics and chemical abundances of low-mass star-forming galaxies at $z \sim 3$	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A53 ~ A53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202346232	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 Nishigaki Moka, Ouchi Masami, Nakajima Kimihiko, Ono Yoshiaki, Rauch Michael, Isobe Yuki, Harikane Yuichi, Narita Kanako, Zahedy Fakhri, Xu Yi, Yajima Hidenobu, Fukushima Hajime, Hirai Yutaka, Kim Ji Hoon, Inoue Shigeki, Kusakabe Haruka, Lee Chien-Hsiu, Nagao Tohru, Onodera Masato	4. 巻 952
2. 論文標題 EMPRESS. XI. SDSS and JWST Search for Local and $z=4-5$ Extremely Metal-poor Galaxies (EMPGs): Clustering and Chemical Properties of Local EMPGs	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 11 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/accf14	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 Isobe Yuki, Ouchi Masami, Nakajima Kimihiko, [and 49 more]	4. 巻 951
2. 論文標題 EMPRESS. IX. Extremely Metal-poor Galaxies are Very Gas-rich Dispersion-dominated Systems: Will the James Webb Space Telescope Witness Gaseous Turbulent High- z Primordial Galaxies?	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 102 ~ 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acc87	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 Ono Yoshiaki, Harikane Yuichi, Ouchi Masami, Yajima Hidenobu, Abe Makito, Isobe Yuki, Shibuya Takatoshi, Wise John H., Zhang Yechi, Nakajima Kimihiko, Umeda Hiroya	4. 巻 951
2. 論文標題 Morphologies of Galaxies at $z > 9$ Uncovered by JWST/NIRCam Imaging: Cosmic Size Evolution and an Identification of an Extremely Compact Bright Galaxy at $z \sim 12$	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 72 ~ 72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acd44a	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 Aihara Hiroaki, AlSayyad Yusra, Ando Makoto, [and 64 more, including Nakajima Kimihiko]	4. 巻 74
2. 論文標題 Third data release of the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program	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 247 ~ 272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab122	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 Xu Yi, Ouchi Masami, Rauch Michael, Nakajima Kimihiko, Harikane Yuichi, Sugahara Yuma, Komiyama Yutaka, Kusakabe Haruka, Fujimoto Seiji, Isobe Yuki, Kim Ji Hoon, Ono Yoshiaki, Zahedy Fakhri S.	4. 巻 929
2. 論文標題 EMPRESS. VI. Outflows Investigated in Low-mass Galaxies with $M_{\text{star}} = 10^4 - 10^7 M_{\text{sun}}$: Weak Feedback in Low-mass Galaxies?	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac5e32	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 Umeda Hiroya, Ouchi Masami, Nakajima Kimihiko, Isobe Yuki, Aoyama Shohei, Harikane Yuichi, Ono Yoshiaki, Matsumoto Akinori	4. 巻 930
2. 論文標題 EMPRESS. VII. Ionizing Spectrum Shapes of Extremely Metal-poor Galaxies: Uncovering the Origins of Strong HeII and the Impact on Cosmic Reionization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac602d	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 Nakajima K, Maiolino R	4. 巻 513
2. 論文標題 Diagnostics for PopIII galaxies and direct collapse black holes in the early universe	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 5134 ~ 5147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac1242	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 Nakajima Kimihiko, Ouchi Masami, Xu Yi, Rauch Michael, Harikane Yuichi, Nishigaki Moka, Isobe Yuki, Kusakabe Haruka, Nagao Tohru, Ono Yoshiaki, Onodera Masato, Sugahara Yuma, Kim Ji Hoon, Komiya Yutaka, Lee Chien-Hsiu, Zahedy Fakhri S.	4. 巻 262
2. 論文標題 EMPRESS. V. Metallicity Diagnostics of Galaxies over $12+\log(O/H)=-6.9-8.9$ Established by a Local Galaxy Census: Preparing for JWST Spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ac7710	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 Matsumoto Akinori, Ouchi Masami, Nakajima Kimihiko, and 42 more	4. 巻 941
2. 論文標題 EMPRESS. VIII. A New Determination of Primordial He Abundance with Extremely Metal-poor Galaxies: A Suggestion of the Lepton Asymmetry and Implications for the Hubble Tension	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac9ea1	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 Curti Mirko, D' Eugenio Francesco, Carniani Stefano, [and 30 more, including Nakajima Kimihiko]	4. 巻 518
2. 論文標題 The chemical enrichment in the early Universe as probed by JWST via direct metallicity measurements at $z=8$	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 425 ~ 438
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac2737	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 Harikane Yuichi, Ouchi Masami, Oguri Masamune, Ono Yoshiaki, Nakajima Kimihiko, Isobe Yuki, Umeda Hiroya, Mawatari Ken, Zhang Yechi	4. 巻 265
2. 論文標題 A Comprehensive Study of Galaxies at $z \sim 9-16$ Found in the Early JWST Data: Ultraviolet Luminosity Functions and Cosmic Star-Formation History at the Pre-reionization Epoch	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/acaaa9	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 Y. Ono, R. Itoh, T. Shibuya, M. Ouchi, Y. Harikane, S. Yamanaka, A. Inoue, T. Amagasa, D. Miura, M. Okura, K. Shimasaku, I. Iwata, Y. Taniguchi, S. Fujimoto, M. Iye, A. Jaelani, N. Kashikawa, S. Kikuchihara, S. Kikuta, M. Kobayashi, H. Kusakabe, C. Lee, Y. Liang, Y. Matsuoka, R. Momose, T. Nagao, K. Nakajima, K. Tadaki	4. 巻 911
2. 論文標題 SILVERRUSH X: Machine Learning-aided Selection of 9318 LAEs at $z = 2.2, 3.3, 4.9, 5.7, 6.6,$ and 7.0 from the HSC SSP and CHORUS Survey Data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abea15	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 T. Kojima, M. Ouchi, M. Rauch, Y. Ono, K. Nakajima, Y. Isobe, S. Fujimoto, Y. Harikane, T. Hashimoto, M. Hayashi, Yu. Komiyama, H. Kusakabe, J. H. Kim, C.-H. Lee, S. Mukae, T. Nagao, M. Onodera, T. Shibuya, Y. Sugahara, M. Umemura, K. Yabe	4. 巻 913
2. 論文標題 EMPRESS. II. Highly Fe-enriched Metal-poor Galaxies with ~ 1.0 (Fe/O)sun and 0.02 (O/H)sun: Possible Traces of Supermassive (>300 Msun) Stars in Early Galaxies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abec3d	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 Moriya Takashi J, Chen Ke-Jung, Nakajima Kimihiko, Tominaga Nozomu, Blinnikov Sergei I	4. 巻 503
2. 論文標題 Observational properties of a general relativistic instability supernova from a primordial supermassive star	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 1206 ~ 1213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab622	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 Kashiwagi Yuri, Inoue Akio K, Isobe Yuki, Nakajima Kimihiko, Ouchi Masami, Ozaki Shinobu, Fujimoto Seiji, Ono Yoshiaki, Kojima Takashi	4. 巻 73
2. 論文標題 Subaru/FOCAS IFU revealed the metallicity gradient of a local extremely metal-poor galaxy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1631 ~ 1637
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab100	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 Schaerer D., Izotov Y. I., Worseck G., Berg D., Chisholm J., Jaskot A., Nakajima K., Ravindranath S., Thuan T. X., Verhamme A.	4. 巻 658
2. 論文標題 Strong Lyman continuum emitting galaxies show intense CIV1550 emission	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 L11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202243149	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 Y. Isobe, M. Ouchi, A. Suzuki, T. Moriya, K. Nakajima, K. Nomoto, M. Rauch, Y. Harikane, T. Kojima, Y. Ono, S. Fujimoto, A. K. Inoue, J. H. Kim, Y. Komiyama, H. Kusakabe, C.-H. Lee, M. Maseda, J. Matthee, L. Michel-Dansac, T. Nagao, T. Nanayakkara, M. Nishigaki, M. Onodera, Y. Sugahara, Y. Xu	4. 巻 925
2. 論文標題 EMPRESS. IV. Extremely Metal-poor Galaxies Including Very Low-mass Primordial Systems with $M^* = 10^4\text{-}10^5 M_{\text{sun}}$ and 2%-3% (O/H): High (Fe/O) Suggestive of Metal Enrichment by Hypernovae/Pair-instability Supernovae	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac3509	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 T. Kojima, M. Ouchi, M. Rauch, Y. Ono, K. Nakajima, Y. Isobe, S. Fujimoto, Y. Harikane, T. Hashimoto, M. Hayashi, Y. Komiyama, H. Kusakabe, J. H. Kim, C.-H. Lee, S. Mukae, T. Nagao, M. Onodera, T. Shibuya, Y. Sugahara, M. Umemura, K. Yabe	4. 巻 898
2. 論文標題 Extremely Metal-poor Representatives Explored by the Subaru Survey (EMPRESS). I. A Successful Machine-learning Selection of Metal-poor Galaxies and the Discovery of a Galaxy with $M^* < 10^6 M_{\text{sun}}$ and 0.016 Zsun	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aba047	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 K. S. S. Barrow, B. E. Robertson, R. S. Ellis, K. Nakajima, A. Saxena, D. P. Stark, M. Tang	4. 巻 902
2. 論文標題 The Lyman Continuum Escape Survey: Connecting Time-dependent [OIII] and [OII] Line Emission with Lyman Continuum Escape Fraction in Simulations of Galaxy Formation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/abbd8e	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 G. Micheva, G. Ostlin, J. Melinder, M. Hayes, M. A. Oey, A. K. Inoue, I. Iwata Ikuru, A. Adamo, L. Wisotzki, K. Nakajima	4. 巻 903
2. 論文標題 Spatially Resolved C iii] 1909 Emission in Haro 11	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abddff	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 Onodera Masato, Shimakawa Rhythm, Suzuki Tomoko L., Tanaka Ichi, Harikane Yuichi, Hayashi Masao, Kodama Tadayuki, Koyama Yusei, Nakajima Kimihiko, Shibuya Takatoshi	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 180
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Inoue Akio K, Yamanaka Satoshi, Ouchi Masami, and 28 more including K. Nakajima	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 101
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sun Fengwu, Egami Eiichi, Rawle Timothy D., and 19 more including K. Nakajima	4. 巻 908
2. 論文標題 ALMA 1.3 mm Survey of Lensed Submillimeter Galaxies Selected by Herschel: Discovery of Spatially Extended SMGs and Implications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abd6e4	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 Momose Rieko, Shimasaku Kazuhiro, Kashikawa Nobunari, Nagamine Kentaro, Shimizu Ikkoh, Nakajima Kimihiko, Terao Yasunori, Kusakabe Haruka, Ando Makoto, Motohara Kentaro, Spitler Lee	4. 巻 909
2. 論文標題 Environmental Dependence of Galactic Properties Traced by Ly Forest Absorption: Diversity among Galaxy Populations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abd2af	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 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 中島王彦
2. 発表標題 Hell emission in JWST sources: A quest for clues to Population III star formation
3. 学会等名 日本天文学会2024年春季年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中島王彦
2. 発表標題 HWO に向けて: 銀河形成分野からのインプット
3. 学会等名 Habitable Worlds Observatory (HWO) 検討会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 K. Nakajima
2. 発表標題 JWST Census for the Mass-Metallicity Star-Formation Relations at $z=4-10$
3. 学会等名 Resolving the Extragalactic Universe with ALMA & JWST (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Nakajima
2. 発表標題 The quest for first galaxies in the era of JWST
3. 学会等名 Galaxy-IGM Workshop 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Nakajima
2. 発表標題 The quest for primordial galaxies and blackholes in the era of JWST
3. 学会等名 Shedding new light on the first billion year of the Universe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Nakajima
2. 発表標題 JWST study of the mass-metallicity-SFR relations at $z=4$ to 10
3. 学会等名 Observing the Evolving Universe (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Nakajima
2. 発表標題 Diagnostics for PopIII galaxies and direct collapse black holes in the early universe
3. 学会等名 Hot Topics in Astrophysics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中島王彦
2. 発表標題 GREX-PLUS: 遠方の若い低金属量銀河の探査
3. 学会等名 光赤天連シンポジウム: 2030年代にどのような戦略的中型計画を推進するのか
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中島王彦
2. 発表標題 小質量・低金属量銀河の空間分解した金属量分布
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 中島王彦
2. 発表標題 ULTIMATE 時代の近赤外線分光、面分光への期待
3. 学会等名 Subaru Users Meeting
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中島王彦
2. 発表標題 Mass-Metallicity Relation of Galaxies at $z=5-9$ with Improved Reduction and Calibration of First Batch of JWST/NIRSpec Data
3. 学会等名 日本天文学会 2023 年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中島王彦
2. 発表標題 極低金属量範囲における金属量指標
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 中島王彦
2. 発表標題 低金属量銀河の金属量推定法の再検討
3. 学会等名 研究会「金属欠乏宇宙2021」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島王彦
2. 発表標題 銀河形成と進化の観測的研究の動向
3. 学会等名 初代星・初代銀河研究会2021 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Nakajima
2. 発表標題 Extremely metal-poor galaxies as local probes of Early galaxy evolution: Preparing for JWST spectroscopy
3. 学会等名 Sesto workshop 2022: I2I: Linking galaxy physics from ISM to IGM scales (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中島王彦
2. 発表標題 GREX-PLUSで可能となる遠方の極低金属量銀河探査
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 中島王彦, R. Ellis, T. Fletcher, 岩田生, 井上昭雄, B. Robertson, M. Tang, D. Stark
2. 発表標題 LACES: 若い小質量星形成銀河からの電離光子脱出探査
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Nakajima
2. 発表標題 The Lyman Continuum Escape Survey: Ionizing Radiation from Lyman Alpha Emitting Galaxies
3. 学会等名 Subaru Users Meeting FY2020
4. 発表年 2021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
---------	---------