

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13578

研究課題名（和文）非常に大きな輝線等価幅を示す銀河で探る銀河形成初期段階における星間ガスの性質

研究課題名（英文）The ISM properties of extremely strong emission line galaxies discovered with Subaru/HSC

研究代表者

矢部 清人 (Yabe, Kiyoto)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任研究員

研究者番号：60749480

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：すばる望遠鏡超広視野撮像カメラHyperSuprime-Cam (HSC) を用いて得られた大規模撮像データに基づき、 $z=0.3-0.9$ において非常に大きな輝線等価幅 ( $[OIII]5007>1000A$ ) を持つ銀河の探査とそのフォローアップ分光観測を行った。これらの強輝線銀河は同様の赤方偏移にあり同程度の星質量を持つ普通の星形成銀河に比べ、星形成率が非常に大きく、低金属量であることが明らかになった。また、極めて高い  $[OIII]/[OII]$  輝線比を示し、stacking解析の結果HeII輝線が検出されたことも考え、このような銀河種族ではX線連星が重要な寄与をしている可能性が示唆される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではすばる望遠鏡HSCによって得られた大規模撮像データを有効利用し、銀河形成進化の鍵となるような特異な銀河種族の探査とその性質の調査を行った。これまでに行われている同様の赤方偏移での研究と比べ、非常に大きな輝線等価幅を示す銀河種族を発見し、それらが極めて特異な星間物質の状態を示していることを明らかにした。また、X線連星が銀河の性質に大きな寄与をしている可能性があること明らかにした。これらの銀河種族の系統的な研究は、銀河形成進化モデルの発展のみならず、連星進化モデルの発展にも繋がる成果である。

研究成果の概要（英文）：We discovered extremely strong emission line galaxies (with the rest equivalent width of  $[OIII]5007>1000A$ ), based on the large photometric data obtained by using Subaru Hyper Suprime-Cam (HSC). According to the follow up spectroscopy, these galaxies have large star formation rate and low metallicity compared to normal galaxies at similar redshift and mass range. These galaxies also show extremely strong  $[OIII]/[OII]$  emission line ratio and HeII emission line is detected according to the spectral stacking analysis, which imply that X-ray binary systems may play important role in these galaxies.

研究分野：銀河天文学

キーワード：銀河天文学 銀河形成 銀河進化 星間物質 すばる望遠鏡 光赤外天文学

## 1. 研究開始当初の背景

銀河天文学における最大の課題は、多様な銀河がどのように形成され進化したかを解き明かすことである。特に、ガスから星が生まれ銀河へと成長する過程で介在する複雑なバリオン物理を解き明かすために、宇宙初期における形成途中の銀河の星間ガスの性質を詳細に調べることが重要な研究課題となっている。近年、観測技術の向上により、高赤方偏移にある銀河が発見され、その性質を統計的に調査する観測的研究が進みつつある。例えば、星形成率、星質量 (Madau & Dickinson 2014, ARAA, 52, 415)、星間ガス中の金属量 (Zahid et al. 2013, ApJL, 771, L19) や電離状態 (Kewley, Maier, Yabe, et al. 2013, ApJL, 774, L10) を測定し、その赤方偏移進化を調べる試みが行われているが、赤方偏移  $z = 7$  (宇宙年齢 7 億年) を超える時代で発見されて銀河 (Oesch et al. 2015, ApJL, 804, L30) における星間ガスの詳細な性質を分光学的に調べるのは既存の望遠鏡・装置ではほぼ不可能である。

そこで、別のアプローチとして、宇宙初期の銀河と似た性質を持つ銀河をより低赤方偏移で詳細に調べるとい研究が行われている。Green Pea (GP) 銀河 (Cardamone et al. 2009, MNRAS, 399, 1191) や Luminous Compact Dwarf (LCD) 銀河 (Izotov et al. 2011, ApJ, 728, 161) などは、非常に強い [Oiii]  $\lambda 5007$  輝線等価幅 (100-1000Å)、低星質量 ( $10^8 - 10^{10} M_{\odot}$ )、低金属量 ( $12 + \log(O/H) = 7.5 - 8.4$ )、小サイズ ( $r_{\text{eff}} < 5 \text{kpc}$ )、[Oiii]  $\lambda 5007/H\beta$  が高いなどの性質を持つ。また、孤立した環境下にいることから、ごく最近 collapse した DM ハローにおける若い銀河種族だと考えられ、宇宙初期の形成初期段階の銀河と同様の性質を持つ銀河だと考えられる。これらの銀河種族は数密度が低いため、広視野の撮像データが必要不可欠である。主に Sloan Digital Sky Survey (SDSS) など中小口径望遠鏡を用いた広視野サーベイデータをもとに発見されてきたが、限界等級が浅いため、ごく低赤方偏移 ( $z < 0.4$ ) に限定され、星質量も  $10^8 M_{\odot}$  程度までしかトレースできていない。より低星質量でより輝線等価幅の大きく、より高赤方偏移の銀河を発見し、時間進化に迫るためには、より深い広視野撮像データの取得が必要となる。

## 2. 研究の目的

直径 1.5 度の視野を持つ、すばる望遠鏡可視広視野撮像カメラ HyperSuprime-Cam (HSC) を用いた大規模サーベイ (Subaru Strategic Program: SSP) では、1000 平方度以上の領域において  $r_{\text{limit}} \sim 26 \text{ AB}$  等 (HSC-Wide)、約 26 平方度において  $r_{\text{limit}} \sim 27 \text{ AB}$  等 (HSC-Deep)、約 3 平方度において  $r_{\text{limit}} \sim 28 \text{ AB}$  等 (HSC-Ultradeep) という撮像データが取得されている。本研究では、これらのデータを用い、 $z = 0.3 - 0.9$  において非常に大きな輝線等価幅 ( $> 1000 \text{ \AA}$ ) を持つ銀河の探査を行うことを目的とする。さらに発見された天体の可視近赤外分光フォローアップ観測などを行うことで、星間ガスの電離状態や化学的性質など詳細な物理的性質の調査を行う。

輝線比を用いた電離状態の測定により電離源の推定を行い、例えば初期質量関数 (IMF) への制限や活動銀河核 (AGN) による寄与などを明らかにする。また、GP 銀河などの例を見ても、

これらの銀河は非常に低金属量であると考えられるが、星質量-金属量関係などを同じ赤方偏移にある普通の星形成銀河と比較し、銀河の化学進化モデルの検証を行う。このような銀河は、より低赤方偏移で見つがっている GP 銀河や LCD 銀河などと宇宙初期の生まれたての銀河とを繋ぐという意味で非常に重要な銀河種族であると考えられる。これらの銀河の物理的性質の赤方偏移進化を調べることで初期の宇宙での銀河の性質を類推することが可能であり、現在の様々な銀河形成進化モデルへ時間軸を追った制限が可能になる。

### 3. 研究の方法

#### (1) HSC 撮像データを用いた強輝線銀河の選択手法の確立:

HSC-SSP の大規模撮像データを用い、強い輝線により広帯域フィルターの明るさが超過する効果を利用し、非常に大きな輝線等価幅 ( $>1000\text{\AA}$ ) を持つ銀河の選択を行う。定量的には、2 色図上で選択を行い、r, i, z バンドで超過する天体を探すことで、それぞれ  $z \sim 0.3, 0.6, 0.8$  における強輝線銀河が選択できる。普通の銀河と強輝線銀河とを分ける選択基準は、次に述べる分光追観測による赤方偏移や輝線等価幅などの測定結果を考慮し、より効率的に選択できるような基準を見つける。得られたサンプルの数密度や明るさや色などの測光学的性質を調査し、近傍の GP 銀河などとの比較を行い、赤方偏移進化について議論する。

#### (2) 分光追観測による強輝線銀河の諸性質の調査:

上述の手法で構築されたサンプルの可視近赤外分光フォローアップ観測を行い、金属量や電離状態などの星間ガスの性質を調査する。水素のバルマー線や複数の酸素イオン輝線 ([OII]  $\lambda$  3727, [OIII]  $\lambda$  4363, [OIII]  $\lambda$  4959, 5007) を用いて、電離ガスの金属量を測定する。また、[OIII]  $\lambda$  5007/[OII]  $\lambda$  3727 などの輝線比を用いて、電離状態の調査を行い、光電離モデルなどを用いて、電離源に関する考察を行う。複数のバルマー輝線を用いることで、星形成率やダスト減光量などが正確に測定できると期待される。また、輝線の効果も含めた SED fitting からより正確な星質量の測定が可能である。同じ赤方偏移にある通常の銀河と比べ、輝線フラックスが非常に大きいため、比較的短時間で [OIII]  $\lambda$  4363 を含む輝線を高 S/N で検出できることが期待される。国内外の理論研究者と協力し、このような非常に強い輝線を持つ銀河が現在の宇宙論的シミュレーションや銀河形成・進化モデルの枠組みの中で説明できるかを調べる。また、金属量や電離状態の赤方偏移進化から、化学進化モデル、光電離モデルなどへの制限を与える。

### 4. 研究成果

HSC-SSP の撮像データを用いて強い輝線を示す候補銀河の選択を行った。図 1 に示すように、近傍の GP 銀河の典型的なスペクトルから高赤方偏移で予想される色軌跡を普通の銀河やクエーサーの色軌跡や銀河系内の恒星の色などと比較することで、最適な選択基準を構築した。また、この銀河サンプルの一部について、Gemini 望遠鏡 GMOS とすばる望遠鏡 FOCAS を用いて分光フォローアップ観測を行った。解析の結果、計 32 天体について強い酸素の輝線 ([OIII]  $\lambda$  5007) が検出され、そのうち 6 天体は  $1000\text{\AA}$  以上の非常に大きな輝線等価幅を示すことが分かった。また、8 天体について、金属量を精度良く測定するために必要な弱い酸素の輝線 ([OIII]

$\lambda$  4363) が有意に検出された。図 1 に分光フォローアップで観測した天体も示したが、この選択基準が有効であることが確認できる。

これらの強輝線銀河は同様の赤方偏移にあり同程度の星質量を持つ普通の星形成銀河に比べ、星形成率が非常に大きく、全体的に低金属量であることが明らかになった。一部についてはいわゆる extremely metal poor 銀河に分類されるほど極めて金属量が低い天体であった。また、極めて高い [OIII]/[OII] 輝線比を示し、高赤方偏移のライマンアルファ輝線天体と同程度の値であることが明らかになった (図 2)。光電離モデルとの比較により、このような輝線比を説明するためには高い電離パラメータが必要であることが示唆される。このような得意な輝線比を実現する電離源の特定が重要であるが、連星を考慮した特異な条件での光電離モデルを用いると、このような極めて高い [OIII]/[OII] 輝線比を説明することができることが分かった。

また、得られた天体のスペクトルを足し合わせる stacking 解析を行うと、ある程度の不定性は残るものの、ヘリウム輝線 (HeII4868) が有意に検出された。通常の星形成銀河にあるような星の温度では、HeII 輝線の放射に十分な電離光子を作り出すことはできない。この輝線の由来はいくつか議論されており、例えば Wolf-Reyet 星などの非常に高温な星種族の存在が考えられる。また、X 線連星による高エネルギー X 線なども HeII 輝線の由来の有力な候補と考えられている (Schaerer et al. 2019, A&A 622, L10)。実際、連星を考慮した特異な条件での光電離モデルを用いると、このような極めて高い [OIII]/[OII] 輝線比を説明することができる。

このような特異な輝線比を示す原因の追求は本研究において本質的であり、今回のサンプルのような低金属量な星形成銀河と X 線連星との関係が重要であると考えた。そこで、近傍の銀河カタログと X 線源カタログを用い、個々の X 線連星とそれが付随する銀河の系統的なカタログを構築した。との関係を金属量などの母銀河の性質と X 線光度などの X 線連星の性質との関係を調べた。母銀河の星質量、星形成率、X 線連星が寄与する X 線光度を調べたところ、これらの間に普遍的な関係が存在することが明らかになった (Inoue, Yabe, & Ueda 2021, PASJ, 73, 1315; 図 3)。また、金属量を星形成率で規格化した X 線光度と比較した結果、両者の間には緩やかな反相関が見られることが分かった。これは X 線連星の形成に母銀河の金属量が深く関わっていることを示唆している。これらの結果は今後、連星進化モデルの発展に寄与する結果となると思われる。

本研究で調べた強輝線銀河はすばる望遠鏡 Prime Focus Spectrograph (PFS) の良い観測ターゲットになると考えられるが、観測可能性や期待される科学的成果についても検討し、現在検討中の宇宙論および銀河進化研究において想定されている天域において選択可能であり、露出時間も短時間で済むことからサーベイ計画を変更せずに一部のファイバーを利用することで実現可能であることが分かった。ただし限られたデータから高 S/N のスペクトル実際に得るためには、データを処理するパイプラインの開発が重要である。このような特異な銀河種族の探索とその性質の調査は、その発展として機械学習などを用いた極低金属量銀河探索へと繋がっている。

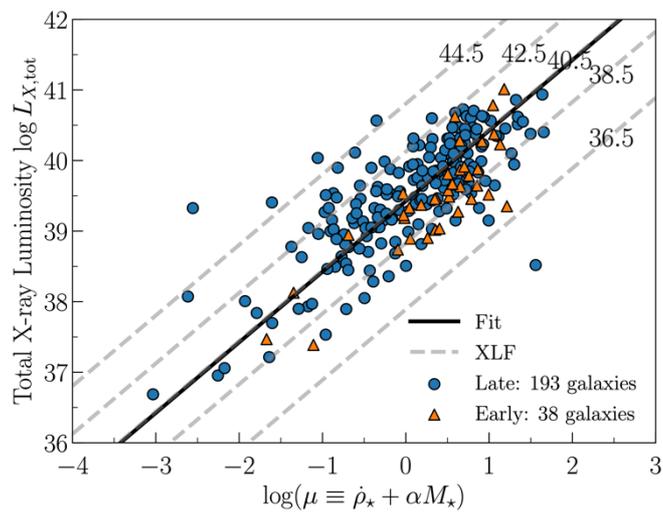
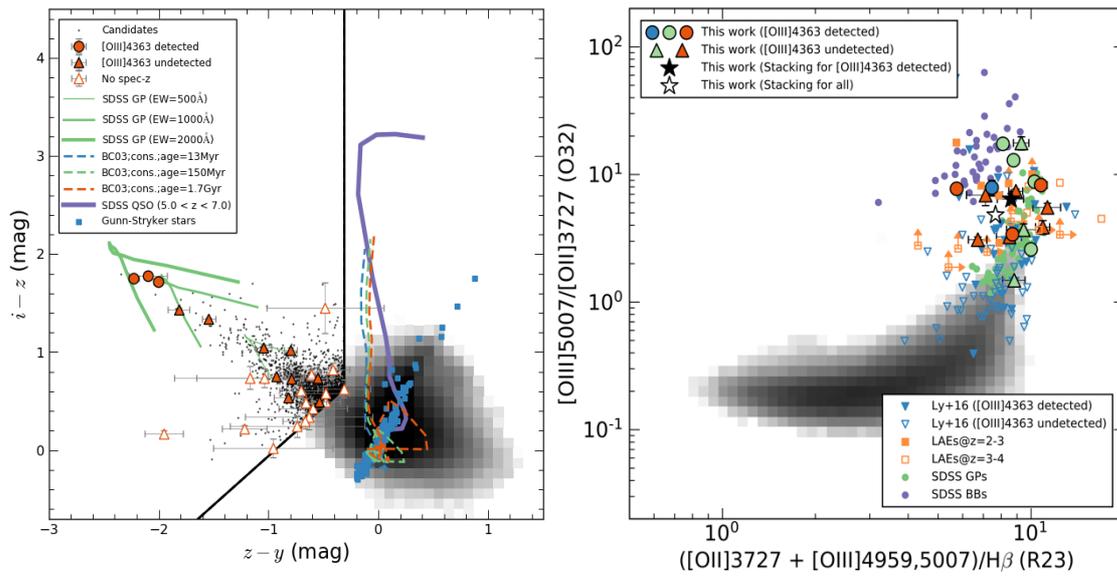


図1 (左上):  $i-z$  vs  $z-y$  2色図。近傍 GP 銀河や典型的な銀河スペクトルなどから予想される色軌跡も示している。黒実線が選択基準を示す。図2 (右上): 酸素輝線比。近傍のSDSS 銀河、GP 銀河、高赤方偏移の Lyman Alpha Emitting 銀河なども同時に示している。図3 (下): 近傍銀河における X線光度と星質量、星形成率との間の普遍的な関係。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 14件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Yuki Isobe、 Masami Ouchi、 Kimihiko Nakajima、 他46名、 Kiyoto Yabe、 Yechi Zhang	4. 巻 in press
2. 論文標題 EMPRESS. IX. Extremely Metal-Poor Galaxies are Very Gas-Rich Dispersion-Dominated Systems: Will JWST 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 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Matsumoto Akinori、 Ouchi Masami、 Nakajima Kimihiko、 他38名、 Yabe Kiyoto、 Zhang Yechi、 Yoshii Yuzuru	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 ~ 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 Naoyuki Tamura、 Yuki Moritani、 Kiyoto Yabe、 他109名	4. 巻 12184
2. 論文標題 Prime Focus Spectrograph (PFS) for the Subaru Telescope: its start of the last development phase	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2628152	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 該当する
1. 著者名 Kojima Takashi、 Ouchi Masami、 Rauch Michael、 他17名、 Yabe Kiyoto	4. 巻 913
2. 論文標題 EMPRESS. II. Highly Fe-enriched Metal-poor Galaxies with $\sim 1.0$ (Fe/O) $_{\text{sun}}$ and 0.02 (O/H) $_{\text{sun}}$ : 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 ~ 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 Isobe Yuki, Ouchi Masami, Kojima Takashi, Shibuya Takatoshi, Hayashi Kohei, Rauch Michael, Kikuchihara Shotaro, Zhang Haibin, Ono Yoshiaki, Fujimoto Seiji, Harikane Yuichi, Kim Ji Hoon, Komiyama Yutaka, Kusakabe Haruka, Lee Chien-Hsiu, Mawatari Ken, Onodera Masato, Sugahara Yuma, Yabe Kiyoto	4. 巻 918
2. 論文標題 EMPRESS. III. Morphology, Stellar Population, and Dynamics of Extremely Metal-poor Galaxies (EMPGs): Are EMPGs Local Analogs of High-z Young Galaxies?*	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 54 ~ 54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac05bf	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 Inoue Yoshiyuki, Yabe Kiyoto, Ueda Yoshihiro	4. 巻 73
2. 論文標題 A fundamental plane in X-ray binary activity of external galaxies	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 1315 ~ 1332
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab077	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 Kojima Takashi, Ouchi Masami, Rauch Michael, Ono Yoshiaki, Nakajima Kimihiko, Isobe Yuki, Fujimoto Seiji, Harikane Yuichi, Hashimoto Takuya, Hayashi Masao, 他10名, Yabe Kiyoto	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 $M^* < 10^{16} M_{\text{sun}}$ and $0.016 Z_{\text{sun}}$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 142 ~ 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, Shimakawa Rhythm, Tanaka Masayuki, Onodera Masato, Koyama Yusei, Inoue Akio K, Komiyama Yutaka, Lee Chien-Hsiu, Lin Yen-Ting, Yabe Kiyoto	4. 巻 72
2. 論文標題 A 16 deg <sup>2</sup> survey of emission-line galaxies at $z < 1.6$ from HSC-SSP PDR2 and CHORUS	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 086 ~ 086
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psaa076	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14件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 林康太、矢部清人、他5名
2. 発表標題 SuMIRe-PFS[37]: 2次元PSFモデリングに向けた解析
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 矢部清人
2. 発表標題 SuMIRe-PFS[28]: 夜間試験観測へ向けたデータ解析環境の準備状況
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 Kiyoto Yabe
2. 発表標題 Prime Focus Spectrograph (PFS): the expected performance
3. 学会等名 SUBARU TELESCOPE 20TH ANNIVERSARY
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kiyoto Yabe
2. 発表標題 Prime Focus Spectrograph (PFS): the SSP survey plan and simulations
3. 学会等名 SUBARU TELESCOPE 20TH ANNIVERSARY
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢部清人
2. 発表標題 Search for extremely strong emission line galaxies at $z < 1$ using Subaru/HSC
3. 学会等名 第5回 銀河進化研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kiyoto Yabe, Takashi Kojima, Yoshiaki Ono, Yuichi Harikane, Takatoshi Shibuya, Daichi Kashino, Rhythm Shimakawa, and HSC GP team
2. 発表標題 The ISM properties of low-mass galaxies with extremely strong emission lines at $z=0.3-0.8$ discovered with Subaru/HSC
3. 学会等名 IAU Symposium 344, DWARF GALAXIES: FROM THE DEEP UNIVERSE TO THE PRESENT (国際学会)
4. 発表年 2018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			
米国	プリンストン大学	ジョンズ・ホプキンス大学		
その他の国・地域 (台湾)	台湾中央研究院			