

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23244025

研究課題名(和文)次世代大規模探査とシミュレーションで挑む宇宙再電離

研究課題名(英文) Exploring the Cosmic Reionization by the Next Generation Surveys and Numerical Simulations

研究代表者

大内 正己 (Ouchi, Masami)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：40595716

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,300,000円

研究成果の概要(和文)：技術的に難しいすばるHSC用狭帯域フィルター2枚(NB921およびNB973)を作成した。さらにHSC戦略探査の観測時間の獲得に貢献した。作成した狭帯域フィルターの観測で従来の約100倍の $z\sim 7$ のLAEを検出して統計量(光度関数、相関関数)を求め、大規模シミュレーション結果と比較する研究に道をひらいた。一方で、既得および新規取得の広領域撮像・分光データに基づき、 $z\sim 7$ 銀河のLy $\alpha$ 放射確率が急激に減少し(Ono et al. 2012)、Ly $\alpha$ 光度密度の進化が加速していること(Konno et al. 2014)を世界に先駆けて明らかにし、 $z\sim 7$ で中性水素が急増する宇宙再電離史を示した。

研究成果の概要(英文)：We have made two Subaru/HSC narrowband filters, NB921 and NB973, that are difficult to be fabricated, and contributed to obtain the observing time for Subaru Strategic Program. Observations with these two narrowband filters allow us to study the cosmic reionization with the statistical quantities of luminosity/correlation functions derived from the sample of  $z\sim 7$  LAEs that is about 100 times larger than the previous studies, and to compare these physical quantities with the numerical simulations. On the other hand, we have revealed the late reionization history of the increasing neutral hydrogen at  $z\sim 7$ , for the first time, from the rapid decrease of Ly $\alpha$  emitting galaxy fraction (Ono et al. 2012) and the rapid evolution of Ly $\alpha$  luminosity densities at  $z\sim 7$  based on the combination of the previously and newly obtained imaging and spectroscopic data.

研究分野：銀河天文学

キーワード：宇宙再電離 銀河形成

## 1. 研究開始当初の背景

広視野、高感度の可視撮像を実現する、世界的にユニークなすばる望遠鏡 **Suprime-Cam** (Miyazaki et al. 2002) がファーストライトを迎えてからおよそ 10 年がたった。先行装置であるケック望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡、VLT 望遠鏡の撮像装置より約 10 倍の探査能力を誇る **Suprime-Cam** は、世界をリードする研究結果を数多く出した。特に、**Suprime-Cam** に狭帯域フィルターを搭載することで、高赤方偏移の **Lya** 輝線を出す星形成銀河 (**Lya emitter**; **LAE**) を高い効率で検出し、 $z=7$  の最遠方銀河の発見 (Iye et al. 2006)、**LAE** による宇宙再電離の検出 (Kashikawa et al. 2006, Shimasaku et al. 2006)、 $z\sim 6$  の最遠方銀河団/大規模構造の発見 (Ouchi et al. 2005) など他望遠鏡グループではなし得なかった結果を得た。ここに挙げた各論文の被引用数は 100 を超えており、**Nature** 誌に掲載された論文も含まれる。そして現在もなお探査は続けられ、より深く広いデータから系統的に  $z=3-6$  の銀河進化を調べた研究 (Ouchi et al. 2008; 出版から僅か 2 年で被引用数 100 超)、広領域探査により意図せず発見された  $z=6.6$  の巨大 **Lya** ガス雲 (Ouchi et al. 2009a; 国立天文台共同利用観測の過去 2 年間の成果のうち代表的結果と認定) など引き続き当該分野を牽引している。その結果、国際研究会の招待講演の依頼は後を経たず、研究代表者 (大内) だけでも年間平均 3 件程度 (review/plenary talk を含む) を海外で行っている。

このような **Suprime-Cam** 観測による研究を進める中で宇宙再電離と銀河形成に対する新たな疑問が出てきた。宇宙を満たす水素の中性度 ( $x_{\text{HI}}$ ) の見積もりは、赤方偏移 6 以下は **QSO** の **Gunn-Peterson** テスト (**GP test**)、6 付近は **Gamma ray burst** (**GRB**)、10 以上は宇宙背景放射 (**WMAP**) から求められているが、宇宙再電離史で鍵となる赤方偏移 7 付近では  $1\sigma$  の弱い上限しか与えられていない。 $z=6.6$  の **LAE** の **Lya** 光度関数は、 $z\sim 6$  から暗くなっているもののその変化が急激ではない。このため、**Lya** に対する銀河間物質の中性水素の **Lya** ダンピングウイング (**DW**) の吸収が大きくなり、 $x_{\text{HI}}$  は比較的小さいと報告されている (Ouchi et al. 2010)。**LAE** の **Lya** 光度関数を理論モデルと比較することで、 $z=6.6$  で  $x_{\text{HI}}=0-40\%$  ( $1\sigma$  範囲) という制限が得られている。つまり、 $z=6.6$  の水素の大半は電離されていることが示唆されている。これに対して、**Suprime-Cam** やハッブル宇宙望遠鏡の最新装置 **WFC3** により得られた星形成銀河の紫外線 (**UV**) 光子の放射密度は、宇宙を電離するのに必要な量の  $1/3$  かそれ以下しかないと見積もられている。 $z=6.6$  で、電離光子の放射量が非常に少ないにも関わらず、何故宇宙を満たす水素の大半が電離されているのだろうか? 可能性としては、中性度の測定の統計エラーが大きい

め、 $z=6.6$  付近で本当は大半の水素が中性なのかもしれない。それとも電離光子の放射量が誤って小さく見積もられており、実際は電離光子脱出率が低赤方偏移から増大していたり (Ouchi et al. 2009b)、銀河のダストが限りなくゼロに近い (e.g. Bouwens et al. 2010)、観測できない暗い矮小銀河が予想以上に多い (e.g. Yan et al. 2004) ためかもしれない。それとも、これはもっと重大な物理現象の示唆かもしれない。例えば暗黒物質の対消滅や大量の原始ブラックホールが存在して宇宙再電離プロセスに寄与している可能性も否定できない (Ricotti & Ostriker 2004)。 $x_{\text{HI}}$  の測定精度は現在のところ統計で決まっており、**Suprime-Cam** を桁で上回る広領域観測無しには解決できない。この疑問に加え、**Suprime-Cam** では行えなかった重要課題も残されている。宇宙再電離のプロセスである。宇宙再電離は、銀河間ガスの高密度領域から始まり void 領域に伝搬していくのか (inside-out; Furlanetto et al. 2004)、その逆であるのか (outside-in; Miralda-Escude et al. 2000)、さらには最近のモデルで提唱されているような中間密度領域が最後に電離されるのか (filament-last; Finlator et al. 2009) といった根源的問題は手つかずである。電離の空間分布 (トポロジー) は **Lya DW** の吸収度の疎密を与えるため、観測される **LAE** の分布 (相関関数) に如実に反映される (McQuinn et al. 2007)。**LAE** の広領域観測が有用である。ただ、 $z=6.6$  では電離領域の典型的な大きさが 100Mpc 強と予想されるため、それを桁で上回る広領域観測が必要だが、**Suprime-Cam** では無理である。

## 2. 研究の目的

このように、**Suprime-Cam** による研究が進展した結果、宇宙再電離と銀河形成がもたらす電離光子の収支に関して大きな矛盾が見つかった。さらに、宇宙再電離の根本的な疑問である電離プロセス (空間的な電離の伝搬) に至っては、何ら手がかりが得られていない。

## 3. 研究の方法

**Suprime-Cam** よりさらに 10 倍もの探査度を誇る次世代装置 **Hyper Suprime-Cam** が 2012 年から稼働した。我々は **HSC** 用の 0.9-1.0 $\mu\text{m}$  域の狭帯域フィルター **NB921** と **NB973** を作成し、深宇宙観測を行った。これにより計 30 平方度 (共動長で一辺  $\sim 1\text{Gpc}$ ) という宇宙論規模の範囲で従来の 10-100 倍の **LAE** を  $z\sim 7$  で検出する。**HSC** による宇宙再電離史への制限、特にトポロジーの測定は本研究代表者が発案・提唱した独自のものである。これはプリンストン大学を含めた **HSC** 深探査計画で主目標の 1 つに掲げられるまでに至った。また、広視野撮像装置を使った

DES や LSST 計画等では光学系(f 比)の問題や時間的制約で、狭帯域観測は行えない。さらに LOFAR など現状の 21cm 輝線観測ではトポロジーの測定が出来るほどの精度は無い。

#### 4. 研究成果

技術的に難しく作成困難とされてきたすばる HSC 用狭帯域フィルター 2 枚(NB921 および NB973)の作成に成功した。図 1 と 2 は完成した NB921 フィルターとその透過率曲線を示したものである。直径 600mm の基板に対して、位置毎の透過率曲線を合わせることは容易ではないのだが、図 2 から FWHM の 10% 以下の誤差で透過率曲線が揃っていることが読み取れる。

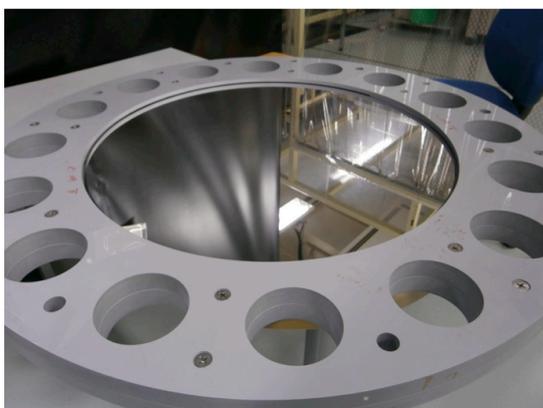


図 1 : NB921 フィルター

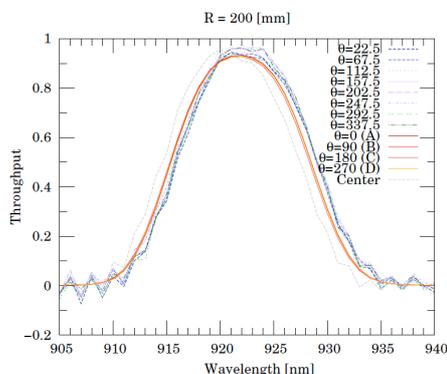


図 2 : NB921 フィルターの透過率曲線。  
R=200mm の円上角度  $\theta$  における透過率曲線の違い。

HSC の準備観測を経て、広帯域および本研究課題で作成した狭帯域フィルターによる観測を行った。多色カタログを作成して、遠方銀河選択を行い、本研究終了時まで約 4000 個の遠方銀河の検出に成功した。これらの光度関数および相関関数の解析の確立も一通り完了し、理論モデルとの比較を含めて Ono et al. および Harikane et al. による論文をまとめる段階に進んだ。一方で、既得お

よび新規取得の広帯域撮像・分光観測データに基づき、観測された  $z \sim 7$  銀河の Ly $\alpha$  光度密度の進化が加速していることを世界に先駆けて明らかにした(図 3; Konno et al. 2014, ApJ, 727, 16)。これは UV 光度密度進化と大きな違いを示し、銀河/星形成による進化では説明できないことを示唆している。これは  $z \sim 7$  付近で急激に  $x_{\text{III}}$  が増加して Ly $\alpha$  輝線が強い吸収を受けて、見えなくなっている可能性を示唆している。つまり宇宙再電離

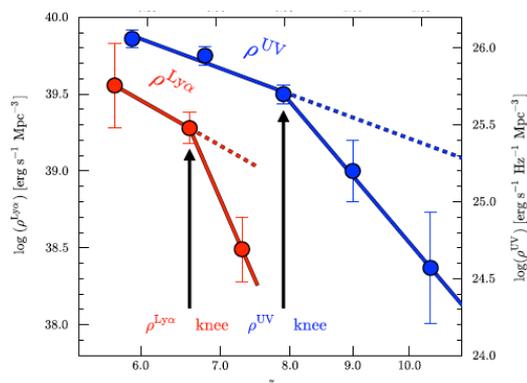


図 3 1Ly $\alpha$  光度密度の進化(赤)と UV 光度密度(青)の進化。UV 光度密度と異なり Ly $\alpha$  光度密度だけが  $z \sim 7$  付近で加速的な進化を示す(Konno et al. 2014)。

が  $z \sim 7$  を境に急激に進んでいるという結果である。一方で、これらの結果が定量的に WMAP+Planck2013 の宇宙背景放射のトムソン散乱の光学的厚みの測定量と矛盾する可能性を示していたため、我々は宇宙再電離の物理過程に関してこれまでにない強い制限を得た。一方で、2015 年に発表された Planck 衛星の観測結果(Planck2015)は、これまで得られていた WMAP 衛星よりも小さいトムソン散乱の光学的厚さを示しており、我々が得た  $z \sim 7$  での急激な宇宙再電離を支持する結果が得られ、これら 2 つの独立の結果の間に大きな矛盾が無いことがわかった。また、すばるの dropout 銀河の測光サンプルを分光フォローアップした結果 Ly $\alpha$  放射確率が  $z \sim 7$  を境に大きく減少していること(Ono et al. 2012)とも一致しているばかりでなく、inside-out の宇宙再電離史と矛盾しないことを示唆している。さらに、再電離源の天体と似ていると考えられている銀河種族(輝線天体)を赤方偏移 2 前後で調べる中で、遠方銀河のアウトフロー(Harikane et al. 2014, ApJ, 794, 129)と重元素量および電離状態(Nakajima & Ouchi 2014, MNRAS, 442, 900)、中性水素(Shibuya et al. 2014, ApJ, 788, 74)、銀河周辺物質 CGM との関係(Momose et al. 2014, MNRAS, 442, 110)などの結果を得た。以上の結果は、これまであった宇宙再電離の理解を大きく進めた。さらに、これらによって天体形成を考える上で天体と銀河間空間の関係を明らかにする重要性が認識されるように

なり、新たな研究へと発展しつつある。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

① Ishigaki, M., Kawamata, R., Ouchi, M. (以下 3 名, 3 番目), "Hubble Frontier Fields First Complete Cluster Data: Faint Galaxies at  $z \sim 5-10$  for UV Luminosity Functions and Cosmic Reionization", *Astrophys. J.* 799, 12-32, (2015), 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/799/1/12

② Konno, A., Ouchi, M. (以下 9 名, 2 番目), "Accelerated Evolution of Ly $\alpha$  Luminosity Function at  $z > 7$  Revealed by the Subaru Ultra-Deep Survey for Ly $\alpha$  Emitters at  $z = 7.3$ ", *Astrophys. J.* 797, 16-30, (2014), 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/797/1/16

③ Harikane, Y., Ouchi, M. (以下 4 名, 2 番目), "MOSFIRE and LDSS3 Spectroscopy for an [O II] Blob at  $z = 1.18$ : Gas Outflow and Energy Source", *Astrophys. J.* 723, 869-894, (2014), 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/794/2/129

④ Nakajima, K. & Ouchi, M. "Ionization state of inter-stellar medium in galaxies: evolution, SFR-M\*-Z dependence, and ionizing photon escape", *Monthly Notices of the RAS*, 442, 900-916, (2014), 査読有  
DOI: 10.1093/mnras/stu902

⑤ Momose, R., Ouchi, M. (以下 7 名, 2 番目), "Diffuse Ly $\alpha$  haloes around galaxies at  $z = 2.2-6.6$ : implications for galaxy formation and cosmic reionization", *Monthly Notices of the RAS*, 442, 110-120, (2014), 査読有  
DOI: 10.1093/mnras/stu825

⑥ Shibuya, T., Ouchi, M. (以下 9 名, 2 番目), "What is the Physical Origin of Strong Ly $\alpha$  Emission? II. Gas Kinematics and Distribution of Ly $\alpha$  Emitters", *The Astrophysical Journal*, 788, 74-87 (2014), 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/788/1/74

⑦ Ouchi, M. (以下 12 名 1 番目), "An Intensely Star-forming Galaxy at  $z \sim 7$  with Low Dust and Metal Content Revealed by Deep ALMA and HST Observations", *The Astrophys. J.*, 778, 102-113, (2013), 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/778/2/102

⑧ Yuma, S., Ouchi, M. (以下 9 名, 2 番目), "First Systematic Search for Oxygen-line Blobs at High Redshift: Uncovering AGN Feedback and Star Formation Quenching", *Astrophys. J.*, 779, 53-64 (2013) 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/779/1/53

⑨ Nakajima, Ouchi, M. (以下 4 名, 2 番目), "First Spectroscopic Evidence for High Ionization State and Low Oxygen Abundance in Ly $\alpha$  Emitters", *The Astrophysical Journal*, 769, 3-20 (2013) 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/769/1/3

⑩ Hashimoto, T., Ouchi, M. (以下 6 名, 2 番目), "Gas Motion Study of Ly $\alpha$  Emitters at  $z \sim 2$  Using FUV and Optical Spectral Lines", *Astrophys. J.*, 765, 70-84 (2013) 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/765/1/70

⑪ Ono, Y., Ouchi, M. (以下 11 名, 2 番目), "Spectroscopic Confirmation of Three  $z$ -dropout Galaxies at  $z = 6.844-7.213$ : Demographics of Ly $\alpha$  Emission in  $z \sim 7$  Galaxies", *The Astrophysical Journal*, 744, 83-95 (2012) 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/744/2/83

[学会発表] (計 15 件)

① Ouchi, M. "Early Galaxy Formation Uncovered by ALMA, HST, and Subaru Surveys", 於 3D2014: Gas and stars in galaxies: A multi-wavelength 3D perspective, ガルヒン (ドイツ), (2014)

② Ouchi, M. "Cosmic Reionization Probed by the Census of High- $z$  Galaxies", 於 The Formation and Growth of Galaxies in the Young Universe, オーバーグループ (オーストリア), (2014)

③ Ouchi, M. "Cosmic Reionization Probed with High- $z$  Galaxies", 於 The first billion years of galaxies and black holes, セスト (イタリア), (2014)

④ Ouchi, M. "Ly $\alpha$  Emitters: Evolution and Connection with the Other Galaxy Populations", 於 EWASS2014, From local galaxies to the reionisation epoch: the Universe as seen in Lyman alpha, ジュネーブ (スイス), (2014)

⑤ Ouchi, M. "ALMA's View of High Redshift Galaxies", 於 EA ALMA Science Workshop 2014, 濟州島 (韓国), (2014)

⑥ Ouchi, M. "TMT Synergies with Subaru

HSC+PFS and Other Facilities”, 於 The TMT Science Forum, ツーソン(アメリカ)、(2014)

⑦ Ouchi, M “Can Star-Forming Galaxies at  $z \sim 7-10$  be Major Sources of Reionization? | Hubble Frontier Fields to the WISH Project”, 於 Joint WISH First Galaxies International Workshop, マルセイユ (フランス)、(2014)

⑧ Ouchi, M “Exploring the Epoch of Reionization by ALMA, HST, and Subaru/HSC Surveys”, 於 Lyman Alpha as an Astrophysical Tool Workshop, ストックホルム (スウェーデン)、(2013)

⑨ Ouchi, M “Exploring the Cosmic Dawn with TMT”, 於 Thirty Meter Telescope Science Forum, コナ (アメリカ)、(2013)

⑩ Ouchi, M “Exploring the Cosmic Dawn by Deep ALMA and HST Observations”, 於 COSMIC DAWN AT RINGBERG, リングバーク (ドイツ)、(2013)

⑪ Ouchi, M “Reionization History and Physical Processes Indicated from the Census of Galaxies at  $z > 7$ ”, 於 Beatrice M. Tinsley Research Scholar Lecture, オースティン (アメリカ)、(2013)

⑫ Ouchi, M “Lya Emitters and their Connection with Other Galaxies”, 於 EWASS2012, The picture of galaxy evolution painted with Lyman alpha, ローマ (イタリア)、(2012)

⑬ Ouchi, M “Reionization History and Physical Processes Indicated from the Census of Lya Emitters at  $z \sim 7$ ”, 於 American Astronomical Society 220th Meeting, アンカレッジ (アメリカ)、(2012)

⑭ Ouchi, M “Subaru-Keck Survey for Galaxies at  $z \sim 7$ ”, 於 Swinburne Keck Science Workshop, メルボルン (オーストラリア)、(2012)

⑮ Ouchi, M “Large Area Survey for Lya Emitters at  $z \sim 7$ ”, 於 New Horizons for High Redshifts, ケンブリッジ (イギリス)、(2011)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://cos.icrr.u-tokyo.ac.jp/publication.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大内正己 (OUCHI, Masami)  
東京大学宇宙線研究所・准教授  
研究者番号：40595716

### (2) 研究分担者

梅村雅之 (UMEMURA, Masayuki)  
筑波大学計算科学研究センター・教授  
研究者番号：70183754

森正夫 (MORI, Masao)  
筑波大学計算科学研究センター・准教授  
研究者番号：10338585

林野友紀 (HAYASHINO, Tomoki)  
東北大学ニュートリノ科学研究センター  
共同研究者  
研究者番号：10167596

### (3) 連携研究者

嶋作一大 (SHIMASAKU, Kazuhiro)  
東京大学大学院理学系研究科・准教授  
研究者番号：00251405

井上昭雄 (INOUE, Akio)  
大阪産業大学教養部・准教授  
研究者番号：30411424

柏川伸成 (KASHIKAWA, Nobunari)  
国立天文台光赤外研究部・准教授  
研究者番号：00290883