

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：34407

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287034

研究課題名(和文) すばるHSC観測と宇宙再電離大規模シミュレーションによる電離度マップの描画

研究課題名(英文) Mapping of ionization degree based on Subaru/HSC observations and cosmic reionization simulation

研究代表者

井上 昭雄 (Inoue, Akio)

大阪産業大学・デザイン工学部・准教授

研究者番号：30411424

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,700,000円

研究成果の概要(和文)：観測的宇宙論最大の課題である宇宙再電離を理解するため、銀河間水素電離度を描画する新手法を開発した。すばる望遠鏡Hyper Suprime-Cam (HSC)による観測と、再電離数値シミュレーションにもとづくライマン輝線銀河(LAE)モデルを利用する方法である。LAEシミュレーションは査読付き学術論文に成果を出版した。HSC観測は5枚のHSC用狭帯域フィルターを用いたすばるインテンシブプログラムCHORUSに拡張した。並行して、赤方偏移3付近の原始銀河団領域の銀河間水素、赤方偏移3付近の銀河の電離光子放射率、原始銀河のスペクトルモデル、高赤方偏移銀河の酸素の観測という多数の研究成果を挙げた。

研究成果の概要(英文)：To understand cosmic reionization, one of the greatest problems in the modern observational cosmology, we have developed a novel method for mapping the ionization degree of the intergalactic hydrogen. The method is based on the observations with the Hyper Suprime-Cam (HSC) at Subaru Telescope and a large-scale numerical simulation of reionization including a theoretical model of Lyman alpha emitters (LAEs). The LAE simulation has been published in a refereed journal. The Subaru/HSC observational part has been extended to a larger framework using 5 custom-made narrowband filters for HSC, a Subaru Intensive Program called CHORUS (Cosmic Hydrogen Reionization Unveiled with Subaru). In parallel, a number of research papers were published as an outcome of this project: Intergalactic hydrogen in/around a redshift  $\sim 3$  proto-cluster of galaxies, ionization emissivity of galaxies at redshift  $\sim 3$ , spectral modeling of primordial galaxies, and oxygen observations from high redshift galaxies.

研究分野：天文学

キーワード：宇宙再電離 光学赤外線天文学 銀河形成 銀河進化

### 1. 研究開始当初の背景

ビッグバンから 38 万年後の宇宙再結合で宇宙全体の主要な元素である水素が一旦中性化する。その後、天体形成の結果として放射された電離紫外線により、銀河間空間の水素が再び電離状態となる。これを宇宙再電離と呼ぶ。宇宙再電離は、現代天文学、特に、観測的宇宙論におけるホットピックの一つである。宇宙再電離の時期は、赤方偏移  $z=6$  10 程度とおおまかには分かっているが、詳しい電離史や光源の特定には未だ至っていない。初代星や初代銀河が有力な光源とみなされているが、低光度の活動銀河核 AGN の寄与も未だ議論されている。このように、宇宙再電離は初代星や初代銀河の形成、初代 AGN の形成と深くかかわっている。

### 2. 研究の目的

宇宙再電離解明への課題は、再電離史、電離度の時間進化の特定、再電離光源、主要な電離光源の特定、再電離トポロジー、電離度の空間分布の特定という 3 点にまとめられる。本研究では、特に  $z=6$  について、宇宙再電離完了期である赤方偏移  $z=6.6$  の時代の電離度空間分布を世界で初めて描画することを目的としている。これにより、主要光源についても制限できる。すなわち、恒星の大集団である銀河が主要光源の場合は電離光子の平均自由行程が短く、天体周囲から電離が進む Inside-out 様式になると考えられるが、AGN 降着円盤が主要光源の場合は、X 線なども放射されるため、電離光子平均自由行程が長くなり、天体から離れた低密度で再結合の遅い場所から電離が進む Outside-in 様式になる可能性がある。将来の 21 センチ線観測による中性/電離水素分布の直接描画に先駆けて、これを行なうことが本研究の目的となる。

### 3. 研究の方法

本研究は、ライマン輝線銀河(LAE)とライマンブレイク銀河(LBG)の空間分布の違いを元に、銀河間電離度マップを作成する。ライマン輝線は銀河周囲の中性水素量に敏感なので、中性領域では LAE が存在しても観測されにくく、電離領域では LAE の実際の個数が観測される。一方、LBG は連続光のブレイクで選択されるため、銀河周囲の中性水素量にさほど依存しない。これにより、LBG の分布はダークマターハロー分布、すなわち、物質密度分布を良くトレースする。したがって、LAE/LBG 個数比は、物質密度分布で規格化された電離(もしくは中性)水素量、つまり、電離度(もしくは中性度)を良くトレースすると考えられる。

すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC) を用いたすばる戦略枠プログラム(HSC-SSP)により、 $z=6.6$  の LAE 探査が行なわれている。本研究では、 $z=6.6$  の LBG を効率よく選択するための HSC 用特製中帯域フィルター IB945

を装着した観測を実施する。SSP の LAE 探査結果と本研究の LBG 探査結果を組み合わせ、LAE/LBG 個数比の空間分布、電離度マップを描画する。

LAE/LBG 個数比から電離度(もしくは中性度)に換算するためには、LAE のモデルが必要である。そこで、宇宙再電離数値シミュレーションを実施し、それを用いた LAE モデルの構築を並行して行なう。具体的には、京コンピュータで計算した約 170 共動メガパーセク立方のボックス中のダークマター分布の時間進化を元に、宇宙論的輻射輸送計算を実行して宇宙の電離度進化を計算する。その中で LAE がどのように観測されるのかモデル化を行なう。

### 4. 研究成果

すばる望遠鏡 HSC による IB945 観測について、連携研究者の大内正己(東京大学)、柏川伸成(国立天文台)と、研究協力者である嶋作一大(東京大学)また、他の共同研究者らと議論していく過程で、他の複数の狭帯域フィルターと組み合わせたすばる望遠鏡インテンシブプログラムを提案し、宇宙再電離の 3 課題に対してより包括的にアプローチする方が、科学的価値が高いとの結論を得た。そこで、IB945 に加えて、NB387, NB527, NB718, NB973 の 4 枚、合計 5 枚のフィルターを用いたインテンシブプログラム CHORUS (Cosmic Hydrogen Reionization Unveiled with Subaru)を組織し、すばる望遠鏡に提案した。結果として、2017 年 1 月からの 2 年間で 13 夜の観測時間を獲得することができた。CHORUS を着実に遂行するために、本課題を引き継ぐ基盤研究 A 課題を提案し、2017 年度から 4 年間の計画で採択された。

宇宙再電離数値シミュレーションと LAE モデルの構築に関しては、宇宙再電離輻射輸送計算の土台となる、ダークマター構造形成の大規模 N 体シミュレーションが、連携研究者の石山智明(千葉大学)により実行された。次に、各ダークマターハローの電離光子放射率および電離光子スペクトルのモデル化のため、高空間分解能の数値輻射流体銀河形成進化計算にもとづく“レシピ”の作成が、連携研究者の長谷川賢二(名古屋大学)により行われた。これに関して、天文学会を中心に多数の学会発表を行なった。この宇宙再電離数値シミュレーションを受け、その中で LAE モデルの構築とすばる望遠鏡 HSC 観測の初期成果と比較を行なった研究は、最終的に雑誌論文(1)として出版された。

並行して、宇宙再電離、銀河間媒質、遠方銀河に関する多数の研究を行なった。これらの成果は宇宙再電離期の銀河のモデル化や、すばる望遠鏡の観測結果解釈の基礎となるものとなる。各成果の一覧を以下に示す。

赤方偏移  $z=3$  付近の銀河間中性水素量に関する研究成果(論文 2, 9)

赤方偏移  $z=3$  付近の銀河の電離光子放射率に関する研究成果 (論文 3, 4, 6, 11)

宇宙再電離期やそれより以前の時代に存在すると考えられる初代銀河のスペクトルモデルに関する研究成果 (論文 5, 7, 10, 12)

宇宙再電離期の銀河からの酸素輝線の観測に関する研究成果 (論文 8)

#### 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 12 件)

(1) Inoue, Akio K.; Hasegawa, Kenji; Ishiyama, Tomoaki; Yajima, Hidenobu; Shimizu, Ikkoh; Umemura, Masayuki; Konno, Akira; Harikane, Yuichi; Shibuya, Takatoshi; Ouchi, Masami; Shimasaku, Kazuhiro; Ono, Yoshiaki; Kusakabe, Haruka; Higuchi, Ryo; Lee, Chien-Hsiu SILVERRUSH. VI. A simulation of Ly emitters in the reionization epoch and a comparison with Subaru Hyper Suprime-Cam survey early data  
Publications of the Astronomical Society of Japan, 印刷中  
査読有

(2) Mawatari, Ken; Inoue, Akio K.; Yamada, Toru; Hayashino, Tomoki; Otsuka, Takuya; Matsuda, Yuichi; Umehata, Hideki; Ouchi, Masami; Mukae, Shiro  
Imaging of diffuse H I absorption structure in the SSA22 protocluster region at  $z=3.1$   
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.467, pp.3951-3962 (2017)  
DOI: 10.1093/mnras/stx038  
査読有

(3) Micheva, Genoveva; Iwata, Ikuru; Inoue, Akio K.; Matsuda, Yuichi; Yamada, Toru; Hayashino, Tomoki  
Searching for candidates of Lyman continuum sources - revisiting the SSA22 field  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.465, pp.316-336 (2017)  
DOI: 10.1093/mnras/stw2700  
査読有

(4) Micheva, Genoveva; Iwata, Ikuru; Inoue, Akio K.  
Lyman continuum leaking AGN in the SSA22 field  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.465, pp.302-315 (2017)

DOI: 10.1093/mnras/stw1329

査読有

(5) Zackrisson, Erik; Binggeli, Christian; Finlator, Kristian; Gnedin, Nickolay Y.; Paardekooper, Jan-Pieter; Shimizu, Ikkoh; Inoue, Akio K.; Jensen, Hannes; Micheva, Genoveva; Khochfar, Sadegh; Dalla Vecchia, Claudio  
The Spectral Evolution of the First Galaxies. III. Simulated James Webb Space Telescope Spectra of Reionization-epoch Galaxies with Lyman-continuum Leakage  
The Astrophysical Journal, Vol.836, article id. 78, 12 pp. (2017)  
DOI: 10.3847/1538-4357/836/1/78  
査読有

(6) Nakajima, Kimihiko; Ellis, Richard S.; Iwata, Ikuru; Inoue, Akio K.; Kusakabe, Haruka; Ouchi, Masami; Robertson, Brant E.  
A Hard Ionizing Spectrum in  $z=3-4$  Ly Emitters with Intense [O III] Emission: Analogs of Galaxies in the Reionization Era?  
The Astrophysical Journal Letters, Vol.831, article id. L9, 6 pp. (2016)  
DOI: 10.3847/2041-8205/831/1/L9  
査読有

(7) Shimizu, Ikkoh; Inoue, Akio K.; Okamoto, Takashi; Yoshida, Naoki  
Nebular line emission from  $z > 7$  galaxies in a cosmological simulation: rest-frame UV to optical lines  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 461, pp.3563-3575 (2016)  
DOI: 10.1093/mnras/stw1423  
査読有

(8) Inoue, Akio K.; Tamura, Yoichi; Matsuo, Hiroshi; Mawatari, Ken; Shimizu, Ikkoh; Shibuya, Takatoshi; Ota, Kazuaki; Yoshida, Naoki; Zackrisson, Erik; Kashikawa, Nobunari; Kohno, Kotaro; Umehata, Hideki; Hatsukade, Bunyo; Iye, Masanori; Matsuda, Yuichi; Okamoto, Takashi; Yamaguchi, Yuki  
Detection of an oxygen emission line from a high-redshift galaxy in the reionization epoch  
Science, Vol. 352, pp.1559-1562 (2016)  
DOI: 10.1126/science.aaf0714  
査読有

(9) Mawatari, K.; Inoue, A. K.; Kousai, K.; Hayashino, T.; Cooke, R.; Prochaska, J. X.; Yamada, T.; Matsuda, Y.  
Discovery of a Damped Ly Absorber at  $z=3.3$  along a Galaxy Sight-line in the SSA22 Field

The Astrophysical Journal, Vol.817,  
article id. 161, 7 pp. (2016)  
DOI: 10.3847/0004-637X/817/2/161  
査読有

(10) Zackrisson, Erik; González, Juan;  
Eriksson, Simon; Asadi, Saghar;  
Safronek-Shrader, Chalcance; Trenti,  
Michele; Inoue, Akio K.  
Primordial star clusters at extreme  
magnification  
Monthly Notices of the Royal Astronomical  
Society, Vol.449, pp.3057-3063 (2015)  
DOI: 10.1093/mnras/stv492  
査読有

(11) Vanzella, E.; de Barros, S.;  
Castellano, M.; Grazian, A.; Inoue, A. K.;  
Schaerer, D.; Guaita, L.; Zamorani, G.;  
Giallisco, M.; Siana, B.; Pentericci, L.;  
Giallongo, E.; Fontana, A.; Vignali, C.  
Peering through the holes: the far-UV  
color of star-forming galaxies at  $z \sim 3-4$   
and the escaping fraction of ionizing  
radiation  
Astronomy & Astrophysics, Vol. 576, id.  
A116, 13 pp. (2015)  
DOI: 10.1051/0004-6361/201525651  
査読有

(12) Sugimura, K.; Omukai, K.; Inoue, A.  
K.  
The critical radiation intensity for  
direct collapse black hole formation:  
dependence on the radiation spectral shape  
Monthly Notices of the Royal Astronomical  
Society, Vol.445, pp.544-553 (2014)  
DOI: 10.1093/mnras/stu1778  
査読有

〔学会発表〕(計13件)

(1) 井上昭雄、長谷川賢二、石山智明、矢島  
秀伸、清水一紘、梅村雅之、今野彰、播金優  
一、澁谷隆俊、大内正己  
宇宙再電離期のライマン 輝線銀河シミュ  
レーションとすばる Hyper SuprimeCam  
探査結果の比較  
日本天文学会 2017 年春季年会  
2017 年 3 月 16 日 ~ 18 日 九州大学

(2) 長谷川賢二、石山智明、矢島秀伸、井上  
昭雄  
輻射性フィードバックを考慮した大規模再  
電離シミュレーションとその応用例  
日本天文学会 2017 年春季年会  
2017 年 3 月 16 日 ~ 18 日 九州大学

(3) 馬渡健、井上昭雄、山田亨、他  
SSA22 原始銀河団領域における広範囲に渡  
る中性水素ガス密度超過

日本天文学会 2016 年秋季年会  
2016 年 9 月 14 日 ~ 16 日 愛媛大学

(4) Mawatari K., Inoue A. K., et al.  
Discovery of a Damped Ly $\alpha$  absorber at  
 $z=3.3$  along a galaxy sight-line in the  
SSA22 field  
46th Saas Fee Course  
2016 年 3 月 13 日 Saas Fee City Hall

(5) Mawatari K., Inoue A. K., et al.  
Discovery of a Damped Ly $\alpha$  absorber at  
 $z=3.3$  along a galaxy sight-line in the  
SSA22 field  
Subaru Users' Meeting FY2015  
2016 年 1 月 19 日 KKR ホテル熱海

(6) 馬渡健、井上昭雄、他  
銀河視線で発見された  $z=3.3$  DLA の性質  
初代星・初代銀河研究会  
2015 年 12 月 1 日 草津セミナーハウス

(7) 馬渡健、井上昭雄、他  
Lyman Break 銀河スペクトル中に発見された  
赤方偏移 3.3 の Damped Ly $\alpha$  system  
日本天文学会 2015 年秋季年会  
2015 年 9 月 9 日 甲南大学

(8) 長谷川賢二、石山智明、井上昭雄、他  
輻射性フィードバックを考慮した再電離シ  
ミュレーション  
CfCA ユーザーズミーティング  
2015 年 9 月 7 日 ~ 8 日 水沢 VERA 観測所

(9) 長谷川賢二、石山智明、井上昭雄、他  
宇宙再電離期における紫外線フィードバ  
ックの銀河・銀河間物質への影響  
第二回銀河進化研究会  
2015 年 6 月 3 日 ~ 5 日 名古屋大学

(10) 長谷川賢二  
大規模再電離シミュレーションの為のサブ  
グリッドモデルの開発  
日本天文学会 2015 年春季年会  
2015 年 3 月 21 日 大阪大学

(11) 長谷川賢二、井上昭雄、石山智明  
輻射流体的フィードバックを考慮した新し  
い再電離シミュレーション  
SKA-Japan ワークショップ 2015  
2015 年 3 月 5 日 国立天文台三鷹

(12) 井上昭雄  
遠方銀河に関する HST, Subaru, ALMA の最近  
の成果と将来展望  
初代星・初代銀河研究会  
2015 年 1 月 19 日 ~ 21 日 東北大学

(13) 長谷川賢二、井上昭雄、石山智明  
再電離シミュレーションコードの開発とそ

れを用いた再電離期における 21cm 線分布の  
計算

初代星・初代銀河研究会  
2015年1月19日～21日 東北大学

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井上 昭雄 (Inoue, Akio K.)  
大阪産業大学・教養部・准教授  
研究者番号：30411424

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

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

柏川 伸成 (Kashikawa, Nobunari)  
国立天文台・TMT推進室・准教授  
研究者番号：00290883

長谷川 賢二 (Hasegawa, Kenji)  
名古屋大学・理学研究科・特任助教  
研究者番号：20536627

石山 智明 (Ishiyama, Tomoaki)  
千葉大学・統合情報センター・准教授

研究者番号：90616426

### (4) 研究協力者

嶋作 一大 (Shimasaku, Kazuhiro)  
東京大学・理学系研究科・准教授

清水 一紘 (Shimizu, Ikkoh)  
大阪大学・理学研究科・特任研究員

馬渡 健 (Mawatari, Ken)  
大阪産業大学・教養部・博士研究員