

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03699

研究課題名(和文) 水素とヘリウムの超微細構造線観測による宇宙再電離期の電離光子源判別法の検証

研究課題名(英文) A method for identifying ionizing sources of reionization focusing on hyperfine structures of H and He

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではまず、天体のスペクトルタイプに応じた水素・ヘリウムの電離構造を解くための宇宙論的輻射輸送コードの開発を行った。これを用いた再電離シミュレーションにより水素とヘリウムの超微細構造線の空間分布が天体の種別に強く依存することを示した。さらに、通常のシミュレーションでは分解が困難な宇宙で最初の星「初代星」を光源とするサブグリッドモデルを構築し、再電離シミュレーションに組み込むことに成功した。また、実際にオーストラリアの電波望遠鏡MWAの観測により、再電離期の21cm線のパワースペクトルに関して当時としては最も強い制限を設けた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自身が開発したシミュレーションコードで得た結果は、将来の観測との直接比較によりこれまで決定的な証拠がなかった宇宙再電離の光源種別を判別できると期待している。またシミュレーション結果は多くの研究者と共有しており、すでに様々な宇宙再電離の観測との比較や今後の観測予言に用いられており今後もこの分野の研究に大きく貢献できると考えている。MWAの観測で得た21cmパワースペクトルの上限は、すでにくいつかの再電離モデルを棄却しており、その意味で学術的意義は大きい。さらに今後の次世代電波望遠鏡での21cm線の直接検出へ向けた問題点の洗い出しができた点においても重要な役割を果たした。

研究成果の概要(英文)：First I have developed a cosmological radiative transfer code by which the distributions of ionized hydrogen and helium depending on the spectrum type of ionizing sources can be solved. The simulation results show that the spatial correlation between HI and HeII strongly depends on the type of ionizing sources. Furthermore we have developed a sub-grid model of the first stars for simulations of reionization. In addition, we have put the most strong upper limit on the 21cm power spectrum during the epoch of reionization by observations with MWA.

研究分野：天文学

キーワード：宇宙再電離 輻射輸送 電波観測

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙ははじめ高温プラズマ状態であったが、一旦中性化し、その後宇宙年齢 10 億年頃までには再び電離状態となっていることが様々な観測から明らかになっている。この過程は宇宙再電離と呼ばれ起きたことは確実であるが「いつ」「どのように」「どのような天体によって引き起こされたかは明らかでない。

近年では中世水素の超微細構造遷移で放射される 21cm 線の観測によって宇宙再電離の詳細を明らかにしようとする研究が盛んである。実際に赤方偏移された 21cm 線の空間分布が検出できれば宇宙再電離が時間的・空間的にどのように進んだかは明らかにできると期待される。しかし、残る 1 つの問題である電離光子源の正体については判別が困難である。2020 年代後半には次世代電波望遠鏡である Square Kilometre Array (SKA) が迫っており再電離期の 21cm 線検出が現実味を帯びる今、電離光子源を判別する手法を提案することは非常に重要である。

### 2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究の目的は、電離光子源を判別する手法を提案し、自らが行う最先端の輻射輸送シミュレーション結果とオーストラリアに運用される電波望遠鏡 Murchison Widefield Array (MWA) の観測結果の比較から電離光子源の種別に制限を設けることであった。実際には MWA が想定したスペックに満たないことや現地への渡航が困難となったことから数値シミュレーションによる理論モデルの精密化やシミュレーション結果を用いた様々な観測との比較・予言を主な目的とした。また MWA プロジェクトのメンバーとして参加し、再電離期の 21cm 線パワースペクトルの観測的制限に貢献する。

### 3. 研究の方法

水素とヘリウムは電離に必要な光子のエネルギーがことなるため、天体のスペクトルに応じて電離水素・電離ヘリウムの空間分布が異なると考えられる。この事実を利用し、水素とヘリウムの超微細構造遷移線の観測から電離光子源種別を判別するのが本研究のアイデアであるが、そのためには天体のスペクトルに応じて宇宙再電離過程を精密に解く宇宙論的輻射輸送コードの開発が不可欠となる。本研究ではまず、この計算を可能とする計算コードの開発を行う。シミュレーション結果は、様々な観測との比較や理論予言に用いる。

本来は、このシミュレーション結果を実際の MWA の観測と比較することである程度の電離光子源種別に制限を設ける予定であったが上記の理由によりそれは叶わないため、さらなる理論モデル構築を行う。具体的にはこれまでは計算コストの問題で直接計算に組み込むことが困難であった初代星からの放射を組み込むためのサブグリッドモデルを構築し、宇宙論的スケールの大規模シミュレーションに組み込む。

MWA でのヘリウム観測は不可能であるが、従来予定されていた通り中世水素の 21cm 線の観測は可能であり、正式メンバーとして MWA プロジェクトに参加し、21cm 線の観測を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 宇宙論的輻射輸送コードの開発

目的達成のため、放射源のスペクトルに応じて宇宙再電離をシミュレートするための宇宙論的輻射輸送コードの開発を行った。図 1 はその計算結果である。放射源が銀河のような数万 K 程度の黒体放射に近い場合、HI と HeII の空間分布は反相関になるのに対し、活動銀河核のような Hard なスペクトルの天体が放射源の場合、HeIII まで電離されるため、HI と HeII は似たような空間分布を示すことを明らかにした。MWA の観測結果との直接比較は叶わなかったが来たる次世代電波望遠鏡 SKA による観測ではその検出が期待され、シミュレーション結果との比較から電離光子源の種別を判別できると期待できる。

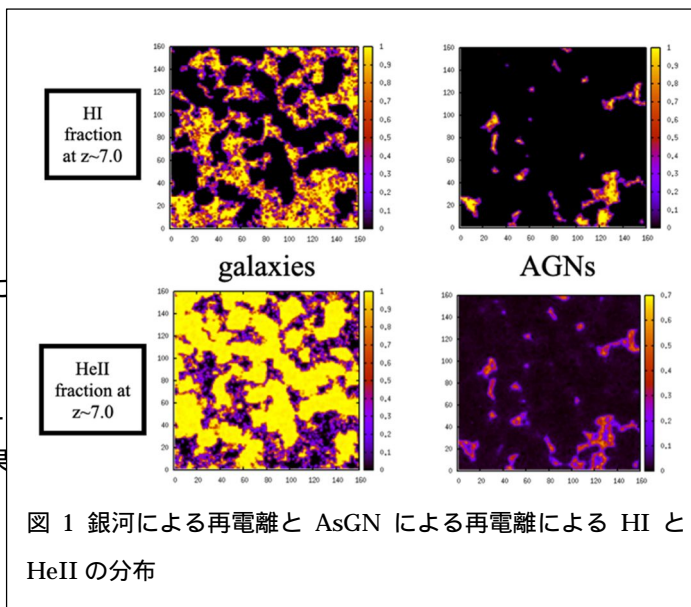


図 1 銀河による再電離と AGN による再電離による HI と HeII の分布

#### (2) シミュレーション結果の応用

作成したシミュレーションコードでは銀河間物質の電離状態だけでなく銀河間ガスによる減光を考慮した高赤方偏移銀河の空間分布まで計算されている。これを用いて様々な観測との比較

や今後の観測に向けた観測可能性の検証を行った。例えば、観測されるライマンアルファ輝線銀河の個数密度とシミュレーション結果の比較から、赤方偏移  $z=7$  での宇宙の中性水素割合の制限を行った。また、ライマンアルファ輝線天体と 21cm 線の相互相関の検出可能性も検証し、前景放射の除去ができれば MWA でも相互相関シグナルの検出が可能であることも示した。

近年注目される機械学習を用いた研究も行い、観測されるライマンアルファ輝線銀河の分布とそのときの中性水素の分布の対応関係を学習させ、観測される銀河分布から中性水素分布を予言する試みを行った。予言された中性水素分布は実際の中性水素分布をよく再現することを示した(図 2)。

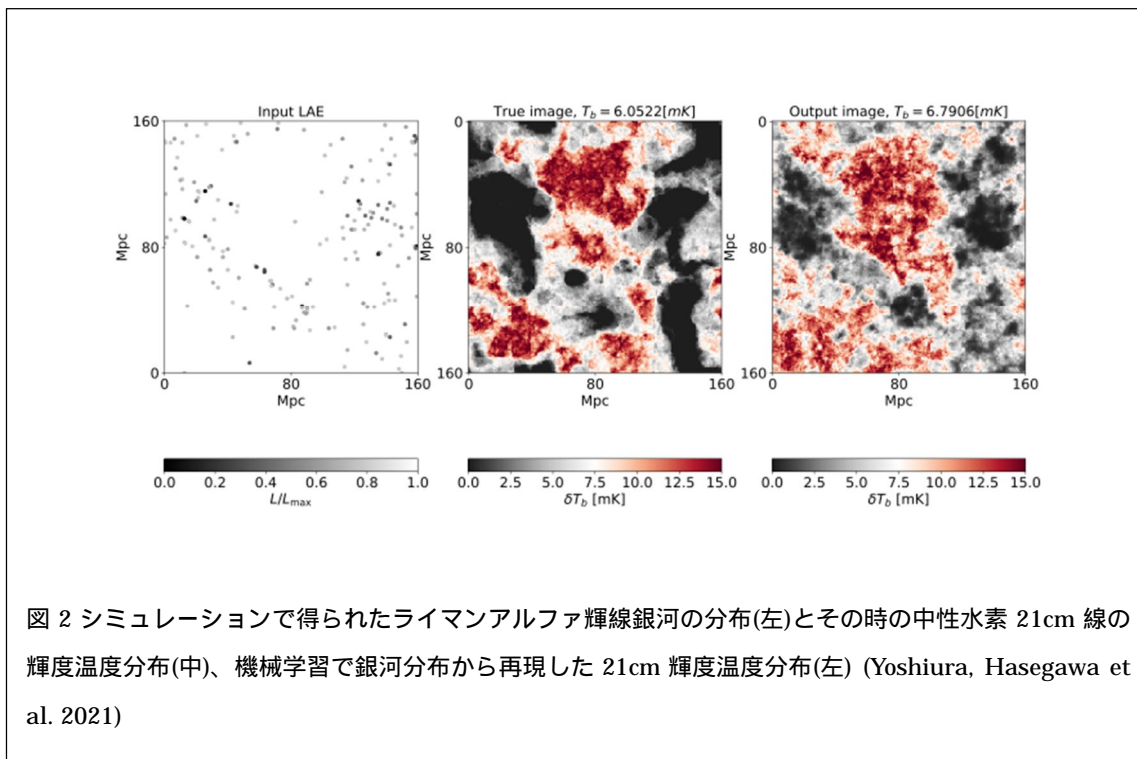


図 2 シミュレーションで得られたライマンアルファ輝線銀河の分布(左)とその時の中性水素 21cm 線の輝度温度分布(中)、機械学習で銀河分布から再現した 21cm 輝度温度分布(右) (Yoshiura, Hasegawa et al. 2021)

### (3) 大領域再電離シミュレーションのための初代星サブグリッドモデル構築

典型的な宇宙再電離の様子をシミュレートするには非常に大きな計算領域が必要となるが、一方で宇宙初期に形成される天体は非常に小さなスケールであり、これら 2 つのスケールを同時に満たすシミュレーションは非常に困難である。本研究では、高分解能の輻射流体シミュレーションによって初代星周囲の電離構造を詳細に解き、これをモデル化することで大領域のシミュレーションのサブグリッドモデルとして組み込むことに成功した。このモデルでは従来考慮されていなかった初代星質量に依存した電離光子放射率が考慮されており、初代星質量の違いが宇宙初期の 21cm 線空間分布にどのような影響を与えるかを初めて示した。

また、初代星は現在の星と比べて放射スペクトルがハードであると考えられおり、これは加熱を引き起こすと考えられるが、これまでの計算では無視されていた。

今回開発したサブグリッドモデルではこの加熱効果を考慮しており、これまでのモデルと比べて 21cm 線の輝度分布が大きくことなる可能性があることを指摘した(図 3)。ただし、これは初代星から放射された電離光子のうちどれだけの割合が銀河間に漏れ出すかに強く依存する。現在はこのモデルはさらに改良を行い論文投稿準備中である。

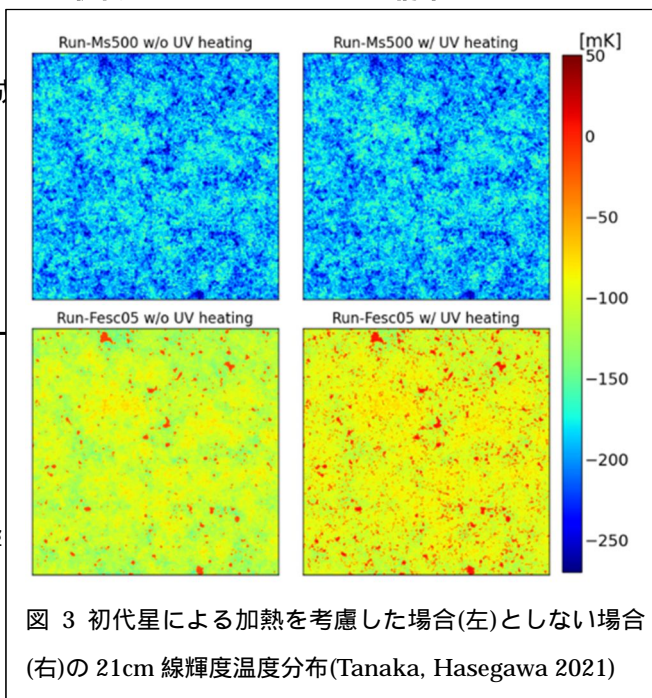


図 3 初代星による加熱を考慮した場合(左)としない場合(右)の 21cm 線輝度温度分布(Tanaka, Hasegawa 2021)

### (3) MWA による再電離期 21cm 線パワースペクトルの制限

オーストラリアで運用中の SKA 先行期 MWA のプロジェクトに正式メンバーとして参加した。再電離期の 21cm 線の検出までは至らなかったが、パワースペクトルの上限を設けることに成功した(図 4)。MWA での現状の観測やそれ以降の他の観測による制限では、極端に銀河間ガスが加熱され、高温になるような再電離モデルなどは棄却される。

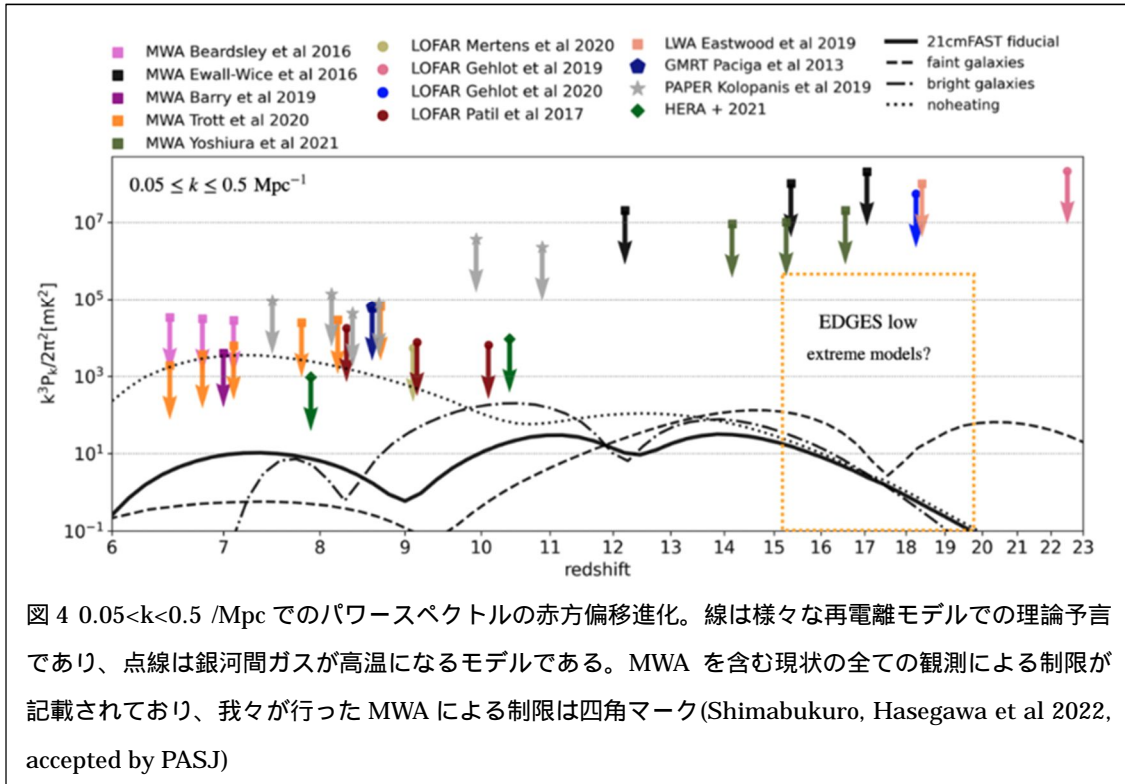


図 4  $0.05 < k < 0.5 \text{ /Mpc}$  でのパワースペクトルの赤方偏移進化。線は様々な再電離モデルでの理論予言であり、点線は銀河間ガスが高温になるモデルである。MWA を含む現状の全ての観測による制限が記載されており、我々が行った MWA による制限は四角マーク(Shimabukuro, Hasegawa et al 2022, accepted by PASJ)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 23件 / うち国際共著 12件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tanaka Toshiyuki, Hasegawa Kenji	4. 巻 502
2. 論文標題 Modelling population III stars for seminumerical simulations	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 463 ~ 471
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab072	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 Zhang Zheng et al.	4. 巻 37
2. 論文標題 The impact of tandem redundant/sky-based calibration in MWA Phase II data analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Australia	6. 最初と最後の頁 e045
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/pasa.2020.37	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 Furugori Kunihiko, Abe Katsuya T, Tanaka Toshiyuki, Hashimoto Daiki, Tashiro Hiroyuki, Hasegawa Kenji	4. 巻 494
2. 論文標題 The 21-cm signals from ultracompact minihaloes as a probe of primordial small-scale fluctuations	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 4334 ~ 4342
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa1033	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 Kubota Kenji, Inoue Akio K, Hasegawa Kenji, Takahashi Keitaro	4. 巻 494
2. 論文標題 Detectability of 21-cm signal during the epoch of reionization with 21-cm-Lyman- emitter cross-correlation ? III. Model dependence	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 3131 ~ 3140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa979	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 Trott Cathryn M et al.	4. 巻 493
2. 論文標題 Deep multiredshift limits on Epoch of Reionization 21-cm power spectra from four seasons of Murchison Widefield Array observations	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 4711 ~ 4727
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa414	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 Kubota Kenji, Inoue Akio K, Hasegawa Kenji, Takahashi Keitaro	4. 巻 494
2. 論文標題 Detectability of 21-cm signal during the epoch of reionization with 21-cm-Lyman- emitter cross-correlation ? III. Model dependence	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 3131 ~ 3140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa979	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 Torotti Cathryn M., Kenji Hasegawa et al.	4. 巻 493
2. 論文標題 Deep multiredshift limits on Epoch of Reionization 21cm power spectra from four seasons of Murchison Widefield Array observations	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 4711 ~ 4727
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa414	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 Kirihara Takanobu, Hasegawa Kenji, Umemura Masayuki, Mori Masao, Ishiyama Tomoaki	4. 巻 491
2. 論文標題 Discrimination of heavy elements originating from Pop?III stars in z?= 3 intergalactic medium	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 4387 ~ 4395
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz3376	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 Li W., Kenji Hasegawa, et al.	4. 巻 887
2. 論文標題 First Season MWA Phase II Epoch of Reionization Power Spectrum Results at Redshift 7	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 141 ~ 141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab55e4	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 Torotti Cathryn M., Kenji Hasegawa ,et al.	4. 巻 36
2. 論文標題 Gridded and direct Epoch of Reionisation bispectrum estimates using the Murchison Widefield Array	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Australia	6. 最初と最後の頁 id.023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/pasa.2019.15	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 Torotti Cathryn M., Kenji Hasegawa, et al.	4. 巻 486
2. 論文標題 Robust statistics towards detection of the 21cm signal from the Epoch of Reionization	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 5766 ~ 5784
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz1207	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 Higuchi Ryo, Ouchi Masami, Ono Yoshiaki, Shibuya Takatoshi, Toshikawa Jun, Harikane Yuichi, Kojima Takashi, Chiang Yi-Kuan, Egami Eiichi, Kashikawa Nobunari, Overzier Roderik, Konno Akira, Inoue Akio K., Hasegawa Kenji, Fujimoto Seiji, Goto Tomotsugu, Ishikawa Shogo, Ito Kei, Komiyama Yutaka, Tanaka Masayuki	4. 巻 879
2. 論文標題 SILVERRUSH. VII. Subaru/HSC Identifications of Protocluster Candidates at $z \sim 6.7$ : Implications for Cosmic Reionization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 28 ~ 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab2192	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 Ando Rika, Nishizawa Atsushi J, Hasegawa Kenji, Shimizu Ikkoh, Nagamine Kentaro	4. 巻 484
2. 論文標題 Redshift space distortion of 21cm line at $1 < z < 5$ with cosmological hydrodynamic simulations	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 5389 ~ 5399
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz319	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 Kubota Kenji, Yoshiura Shintaro, Takahashi Keitaro, Hasegawa Kenji, Yajima Hidenobu, Ouchi Masami, Pindor B, Webster R L	4. 巻 479
2. 論文標題 Detectability of the 21-cm signal during the epoch of reionization with 21-cm Lyman emitter cross-correlation I	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2754 ~ 2766
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1471	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 Yoshiura S, Line J L B, Kubota K, Hasegawa K, Takahashi K	4. 巻 479
2. 論文標題 Detectability of 21 cm-signal during the Epoch of Reionization with 21-cm-Lyman-emitter cross-correlation II: Foreground contamination	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2767 ~ 2776
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1472	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 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	4. 巻 70
2. 論文標題 SILVERRUSH. VI. A simulation of Ly emitters in the reionization epoch and a comparison with Subaru Hyper Suprime-Cam survey early data	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 55-84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy048	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 Tanaka Toshiyuki、Hasegawa Kenji、Yajima Hidenobu、Kobayashi Masato I N、Sugiyama Naoshi	4. 巻 480
2. 論文標題 Stellar mass dependence of the 21-cm signal around the first star and its impact on the global signal	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1925 ~ 1937
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1967	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 Ando Rika、Nishizawa Atsushi J、Hasegawa Kenji、Shimizu Ikkoh、Nagamine Kentaro	4. 巻 484
2. 論文標題 Redshift space distortion of 21-cm line at $1 < z < 5$ with cosmological hydrodynamic simulations	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 5389 ~ 5399
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz319	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 Minoda Teppei、Hasegawa Kenji、Tashiro Hiroyuki、Ichiki Kiyotomo、Sugiyama Naoshi	4. 巻 6
2. 論文標題 Thermal Sunyaev-Zel'dovich Effect in the IGM due to Primordial Magnetic Fields	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Galaxies	6. 最初と最後の頁 143 ~ 143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/galaxies6040143	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 Sakamoto Hina、Ahn Kyungjin、Ichiki Kiyotomo、Moon Hyunjin、Hasegawa Kenji	4. 巻 930
2. 論文標題 Probing the Early History of Cosmic Reionization by Future Cosmic Microwave Background Experiments	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 140 ~ 140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac6668	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 Trott C M et al.	4. 巻 507
2. 論文標題 Constraining the 21cm brightness temperature of the IGM at $z = 6.6$ around LAEs with the Murchison widefield array	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 772 ~ 780
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab2235	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 Yoshiura Shintaro, Shimabukuro Hayato, Hasegawa Kenji, Takahashi Keitaro	4. 巻 506
2. 論文標題 Predicting 21cm-line map from Lyman- $\alpha$ emitter distribution with generative adversarial networks	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 357 ~ 371
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1718	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 Yoshiura S, et al.	4. 巻 505
2. 論文標題 A new MWA limit on the 21cm power spectrum at redshifts $z \sim 13$	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 4775 ~ 4790
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1560	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7件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Kenji Hasegawa
2. 発表標題 Development of a novel EoR simulation code and its applications
3. 学会等名 East Asia SKA science workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川賢二
2. 発表標題 GM理論研究のレビュー
3. 学会等名 Galaxy-IGM workshop 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川賢二
2. 発表標題 SKAによるCD/EoRサイエンス
3. 学会等名 SKA-Japan シンポジウム2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川賢二
2. 発表標題 21cm線で探る宇宙初期の構造形成と宇宙再電離
3. 学会等名 初代星初代銀河研究会2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷川賢二
2. 発表標題 宇宙の夜明けから再電離が起こるまで：これまでの理解と残された課題
3. 学会等名 第31回理論懇シンポジウム「宇宙物理の標準理論：未来へ向けての再考」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷川賢二
2. 発表標題 2020年代の電波観測で期待される宇宙初期サイエンスの進展
3. 学会等名 宇宙電波懇談会シンポジウム2018「電波天文学の将来サイエンス」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷川賢二
2. 発表標題 East Asia VLBI Networkを用いた宇宙再電離サイエンス
3. 学会等名 「銀河進化と遠方宇宙」2019
4. 発表年 2019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		
オーストラリア	University of Sydney	University of Melbourne	