

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17H01102

研究課題名（和文）理論シミュレーションで解明する巨大ブラックホールの起源

研究課題名（英文）Theoretical Study on Formation of Supermassive Black Holes

研究代表者

大向 一行（Omukai, Kazuyuki）

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：70390622

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,800,000円

研究成果の概要（和文）：巨大ブラックホール（BH）の種形成のシナリオとして巨大星の直接崩壊が有力である。従来は外部からの紫外線と始原組成のガスが必要とされたが、条件が厳しすぎて形成されるBH数が不足していた。そこで、微量の重元素を含むガスからの星形成過程を数値シミュレーションした。重元素が微量の場合、星団が形成されるが、重元素量が太陽の1/1000以下の場合、最も大きな星は10万太陽質量以上の巨大な星となり直接崩壊により種BH形成が可能となることが分かった。この新しいシナリオに基づいて宇宙論的シミュレーションを行い、期待される閾値の金属量の下で実際に巨大BHの種をまかなうことが可能であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的には、巨大ブラックホールの種形成のメカニズムとして、巨大星の直接崩壊がより強固な可能性となったといえる。その具体的な過程が明らかとなったことで、将来の観測的検証や探査における重要な指針となるだろう。また巨大ブラックホールは銀河形成においても重要な役割を果たしており、その形成過程の理解は、銀河の星形成史の解明に寄与する。また巨大ブラックホールは天文学を専門としない人たちにも非常に人気のあるトピックであり、その起源の解明は社会的にも非常に意義深いといえる。

研究成果の概要（英文）：One of the plausible scenarios for the seed formation of supermassive black holes (BHs) is the direct collapse of massive stars. Previously, it was believed that external ultraviolet radiation and primordial gas composition were necessary, but the conditions were too stringent, resulting in a shortage of formed BHs. We conducted numerical simulations of star formation from gas containing trace amounts of heavy elements. When trace amounts of heavy elements were present, stellar clusters formed, and it was found that when the heavy element abundance was less than 1/1000th of the Sun's, the most massive stars became gigantic stars with over 100,000 solar masses, leading to direct collapse and the formation of BH seeds. Based on this new scenario, we performed cosmological simulations, demonstrating that it is possible to generate the sufficient seeds of supermassive BHs under the expected threshold metallicity.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：ブラックホール 星形成 銀河形成

## 1. 研究開始当初の背景

標準宇宙論における冷たい暗黒物質による構造形成論は非常な成功をおさめ、銀河・銀河団など宇宙の諸階層の起源に関し、現在ある程度標準的なシナリオが描かれるようになってきている。しかしながら、銀河中心に普遍的に存在する巨大ブラックホール(SMBH)の起源をこの全体像のどこに位置づければよいのかいまだ全く不明であり、現代天文学に残された最大の謎の一つとなっている。

研究開始時において、既に観測的に赤方偏移7、すなわちビッグバン後10億年以下の宇宙に10億 $M_{\odot}$ を超えるSMBHが存在することが分かっていた。このような短期間で、このように巨大なブラックホール(BH)が形成されたという事実は、数あるSMBH形成シナリオのうち、可能なものを選別する上で役に立つ。これを受け、SMBH形成に関する理論的研究が現在も世界的に活況を呈している。

### (1) SMBHの種となるBHの形成

SMBHは、種となるBHがまず形成された後、その成長により最終的に超大質量となったものと考えられている。種BHの起源として、以下の2つの可能性がそれまで主に考察されてきていた。

一つは初代星残骸シナリオである。我々の理論シミュレーション結果によると、始原ガス(ビッグバン元素合成時に生成されるH、Heと微量のLiからなるガス)から形成される初代星の質量は典型的には数10-100 $M_{\odot}$ であるが、中には1000 $M_{\odot}$ に及ぶものもあることが分かった。しかしながら、たとえ種BHが1000 $M_{\odot}$ であったとしても、その後の質量獲得がエディントン限界降着率(降着流への輻射力が重力を上回らない、すなわちBH光度がエディントン限界以下であるための最大降着率)で制限されているとすると、観測されているような短時間でSMBHに成長することは非常に困難である。

そこで、より大質量の種BHをいきなり形成する機構として、直接崩壊シナリオが近年注目されている。これは特殊な環境において、数 $10^5 M_{\odot}$ の超大質量星を形成し、その一般相対論的重力崩壊により、数 $10^5 M_{\odot}$ の種BHを形成しようというアイデアである。そのような環境として、非常に強い紫外線輻射場中での高温(8000K)の大質量始原ガス塊などが考えられている。この場合にも通常の星形成と同様、雲の収縮の結果、まず中心部に小さい原始星が形成され、その降着成長により星が形成されるが、その際の降着率が約 $1M_{\odot}$ /年と巨大である。もし降着がこの割合で継続するならば、星はその寿命が尽きる前に、超大質量となる。これに関して、定常降着を仮定して原始星の進化計算を我々が行ったところ、このような大降着率のもとでは、原始星の半径は膨張して有効温度が低くなるため、輻射によって降着は妨げられないことが分かった。その結果、最終的に $10^5 M_{\odot}$ を超えるBHが形成されることが示された。

### (2) 種BHのSMBHへの成長

いずれのシナリオでも、種BHの誕生後、SMBH形成に至るには更なる急成長が必要である。これを可能にするような機構として、超臨界ガス降着が提案されている。これはBHへの降着率が大きい場合に、光学的に厚い降着流に輻射が捕捉される結果、外側に伝播しなくなるために起こる。この際、BH周りの円盤の存在のため、輻射の放出は極方向に強くなり、円盤方向の降着はあまり妨げられず、エディントン限界を超える降着率が実現される。

超臨界降着はBH近傍の降着流に対する輻射磁気流体シミュレーションでもこの領域への

十分な質量の供給があれば実際に起こることが示されている。このような BH + 円盤系への質量供給は、それよりずっと大スケールの(ボンディ)降着半径近傍における、中心 BH からの輻射の非等方性により実現されることも分かってきた。もし、超臨界降着が宇宙初期銀河環境で可能であれば、種 BH 形成シナリオとして、直接崩壊のみならず、初代星残骸の場合でも、観測されているような短時間の SMBH 形成が可能となるかもしれない。

しかしながら、これらの研究は個々の過程をつぎはぎ的に、やや都合のよいパラメータを取った場合に起こりえるということを実証したに過ぎず、統一的な SMBH 形成シナリオの構築はいまだ初歩的な段階にとどまっていた。宇宙論的な初期条件から始めて、個々の過程が有機的に結合し、最終的に  $10^6 M_{\odot}$  の BH が誕生するという全体像は全く明らかになっていなかったのである。

## 2 . 研究の目的

この現状を打破して、SMBH 形成の標準理論を確立するために、以下の 3 つの課題に取り組む。

- (1) 直接崩壊における種 BH 形成過程に関して、重元素量を考慮した数値シミュレーションを実施し、それにより超大質量星形成が可能となる条件とその重力崩壊により形成される種 BH 質量を解明する。
- (2) 種 BH へのガス降着過程を BH 近傍(重力半径程度)とガス供給率を決める銀河スケールをつなぐの中間スケールでの数値計算により、初期銀河環境における BH の超臨界降着による成長が可能となる条件を見出し、その実現可能性を考察する。
- (3) 上記の結果に対して、宇宙論的構造形成シミュレーションの結果をもとに初期宇宙での SMBH 種族の宇宙論的進化を予言する。また電磁波・重力波による SMBH 形成過程の観測的検証に向けた予言を行う。

## 3 . 研究の方法

巨大ブラックホール(SMBH)の形成過程を、化学反応を組み込んだ輻射流体シミュレーションを中心とした数値的手法により解明する。宇宙初期銀河中の雲の収縮から始めて、

- (1) 超大質量星の形成とその重力崩壊による種ブラックホール(BH)の形成、
- (2) その後のガス降着による種 BH の成長

までをそれぞれ計算する。これらの結果を統合して、

- (3) 宇宙論的な SMBH 形成史の全体像構築

につなげる。これにより SMBH がいつ、どこで、どのように形成・成長したのか知ることができる。このシナリオを将来の電磁波・重力波観測により検証するため、観測的性質の予言も行う。

### (1) 直接崩壊による種 BH の形成に関して

直接崩壊が起こるような紫外線が強い環境における雲の収縮から開始して、原始星の形成と降着進化を一貫して計算することで形成される超大質量星の質量ならびに種 BH の質量を見積もる。また、どのような条件のもと、実際に直接崩壊による種 BH 形成に至るのかを解明する。

## 強い紫外線により H<sub>2</sub> 分子が解離した雲の収縮と原始星形成過程

我々は以前の研究で、このような雲では大規模な分裂が起こらず単一の大きな塊として収縮することを見出していた。しかしながら、これは典型的と思われる一つの場合に対して計算したにすぎず、実際の環境には密度や形状、角運動量、紫外線量などに幅がある。また、ガスが始原組成ではなく、微量な重元素を含む場合に、どのような天体が形成されるかも明確ではない。そこで同様な輻射・化学過程を考慮した 3 次元流体数値計算を、多様な環境において収縮する雲に対して行うことで、分裂過程の環境依存性を調べ、雲が分裂せずに単一の大質量の塊として収縮する条件を見出す。

### 原始星形成後の降着進化と種 BH 形成

ここでは、形成された原始星が周囲のガスの降着により超大質量となり、BH へと重力崩壊する過程を調べる。周囲の降着流に対する輻射流体計算と中心星に対する進化計算を組み合わせたシミュレーションを行い、中心原始星が超大質量星へと成長するまでの進化を追う。これにより、中心星は実際に超大質量となりえるのか、また最終的に重力崩壊により形成される BH の質量はいくらかを見積もる。中心星の他にも星周円盤の分裂により伴星が生まれ、連星や星団に進化する場合も考えられる。その際には、中心星以外の星からの輻射も無視できなくなるので、それらからの輻射も考慮しつつ、どのような系に進化するのかを調べる。

### (2) ガス降着による BH 成長に関して

初期銀河環境に置かれた種 BH が、周囲のガスの降着により質量を増加させる割合を見積もることが目的である。特に、エディントン限界降着率を超えるような超臨界降着が実現される環境はどのようなものかを解明する。具体的には、最終的な BH への降着率が定まる、BH 近傍小スケールでの降着流と、BH とその周囲の降着円盤からなる系への降着率が定まる、大スケール(降着半径程度)とをつなぐスケールに対する輻射流体シミュレーションを実行する。それにより BH の成長率の環境依存性、特に超臨界降着が可能な環境はどのようなものかを調べる。

### (3) SMBH 形成史の全体像構築に関して

以上の(1)(2)における結果を統合し、宇宙初期における SMBH 形成過程の全体像を明らかにする。

まず、宇宙論的な構造形成シミュレーションにより、通常の初代星形成が起こるダークハローおよび、強い紫外線に照射された直接崩壊による超大質量星形成が起こるダークハローそれぞれの内部でのガス雲形成を追跡する。具体的には種 BH 形成を考慮した大規模構造形成シミュレーションを行う。結果として、初期宇宙での SMBH の質量関数、空間分布、合体率、キューサーとして明るく輝いている BH の割合、SMBH と母銀河の関係(共進化)などを理論的に予言することができる。

## 4. 研究成果

### (1) 直接崩壊による種 BH の形成に関して

種ブラックホール形成の有力なシナリオである直接崩壊が可能な条件として、これまでは外部からの強い紫外線輻射の照射および材料となるガスが始原組成であることが必要と考えられてきた。この条件は厳しすぎるため、形成される種ブラックホールの数が十分大きくはないという困難があった。そこで、その当否を調べるため、紫外線の照射のもとでの微量の重元素を含むようなガスからの星形成過程を 3 次元数値流体シミュレーションにより解析し、直接崩壊の前駆体である超大質量星の形成条件を吟味した。重元素が微量に存在する

場合はダスト冷却に伴うガスの分裂により星団が形成され、構成する星たちは競争的に周囲のガスを獲得して成長するものの、重元素量が太陽金属度の 1/1000 以下の場合には最も大きな星はその中心に存在して、ほぼ独占的に他より多くのガスを降着して成長し、10 万太陽質量以上の巨大な星となり重力崩壊することが分かった(「超競争的降着」)。このように強い紫外線に照射される環境では、通常、ガスが微量の重元素を持っているとかがえられるので、この新しいシナリオを考えることで、これまでの始原ガスの場合に比べて多くの種ブラックホールを生成できると予想される(Chon & Omukai 2020: 研究成果(3)も参照)。

最初の数値シミュレーションでは、熱進化を単純化していたが、形成される原始星からの輻射のフィードバックによる影響も考慮するため、輻射過程や化学反応といった詳細な物理過程も含む 3 次元数値流体シミュレーションを実施した。その結果、形成される星団中の小質量星の質量分布は星からの輻射フィードバックによって強く影響を受けるものの、大質量側はあまり影響を受けないことが分かった。特に、超大質量星形成はフィードバックがある場合でも可能であることが示され、我々の仮説が正当であることが示唆された(Chon & Omukai in prep.)。

## (2) ガス降着による BH 成長に関して

種ブラックホールから観測されているような巨大ブラックホールへと成長する過程、特に巨大ブラックホールに成長できる可能な条件を解明するために、エディントン限界降着率を超えて成長する「超臨界降着」が実現するかどうかに関して調べた。一般にガス降着の際には、それに伴い輻射が放出されるために周囲のガスへ輻射力、加熱などのフィードバックが働く。しかしながら中心ブラックホールの周りに円盤などにより影がある場合には、あまりフィードバックを受けない領域から効率よく降着が進むことが期待される。この条件を解明するため 2 次元の輻射流体計算を実行した。その結果、影の内部へは加熱された影の外部からの影響はあまり及ばず、結果的にほぼ効率の高いボンディ降着率を実現されることが示された。一方で降着流がある程度角運動量を持っている場合には降着円盤の外側にガスが滞留してしまい効率よく降着できなくなる。そのため超臨界降着の実現のためには初期の角運動量が小さいか、もしくは円盤の粘性パラメータが 1 に近い必要があることがわかった。このようなシナリオが実現される状況としては種ブラックホールが初期銀河中にしばらく漂って降着成長した後中心部に動的摩擦により落ち込んでいく場合などが考えられる(Sugimura et al. 2018)。

また、ブラックホールの降着成長に関して輻射流体シミュレーションを行った。巨大ブラックホール周りには降着円盤が存在するが、そこからの質量損失が大きいと、ブラックホールの成長が阻害されることとなる。そこで、吸収線駆動の円盤風に着目し、それによる質量損失率の中心ブラックホール質量およびガス重元素への依存性を解析した。その結果、ブラックホール質量が太陽の一億倍を超えるほど大きく、また重元素量が太陽近傍程度高くない限り、このような円盤風による質量損失は深刻ではないことが分かった。これは宇宙初期に観測されているような巨大ブラックホールの成長において、円盤風は大きな妨げとはならないことを意味する(Nomura, Omukai & Ohsuga 2021)。

## (3) SMBH 形成史の全体像構築に関して

(1) で見いだされたように強い紫外線輻射場の照射された銀河ハロー中では、ガスがたとえ微量の重元素持っていたとしても生まれて来る星団内での超競争的降着により超大質量星が形成され、それが直接崩壊により中質量の種 BH となることが分かった。そこで、実際にどれくらいの数の種ブラックホールが形成されるのかを調べるため、宇宙論的シミュレーションを実施した。具体的には宇宙論的 N 体シミュレーションと銀河進化の半解析モデルを組み合わせて、直接崩壊シナリオを通じて形成された種ブラックホールを保持するハローの割合を推定した。以前の研究では、直接崩壊は始原的元素組成のガスを含むハローに限定されていたが、今回はある閾値以下の金属量のハローでも直接崩壊が発生するものとした。ここで閾値の金属度は我々の研究の方法(1)でのシミュレーション結果をもとに、0 から太陽金属度の 1000 分の一まで変化させた。また同じハロー内の星からの紫外線放射の影響も考慮した。その結果、低い閾値金属量では内部放射の存在により種ブラックホールの数密度は減少し、逆に高い閾値金属量の際には増加させることがわかった。また、シミュレーションから期待される閾値金属量程度で実際に宇宙に存在する巨大ブラックホールの種を形成可能であることが示された(Chiaki et al. 2023)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計43件（うち査読付論文 43件 / うち国際共著 22件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nakauchi Daisuke, Omukai Kazuyuki, Susa Hajime	4. 巻 502
2. 論文標題 Ionization degree and magnetic diffusivity in star-forming clouds with different metallicities	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 3394 ~ 3416
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab248	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 Sadanari Kenji Eric, Omukai Kazuyuki, Sugimura Kazuyuki, Matsumoto Tomoaki, Tomida Kengo	4. 巻 505
2. 論文標題 Magnetohydrodynamic effect on first star formation: pre-stellar core collapse and protostar formation	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 4197 ~ 4214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1330	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 Sassano Federica, Schneider Raffaella, Valiante Rosa, Inayoshi Kohei, Chon Sunmyon, Omukai Kazuyuki, Mayer Lucio, Capelo Pedro R	4. 巻 506
2. 論文標題 Light, medium-weight, or heavy? The nature of the first supermassive black hole seeds	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 613 ~ 632
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1737	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 Nomura Mariko, Omukai Kazuyuki, Ohsuga Ken	4. 巻 507
2. 論文標題 Radiation hydrodynamics simulations of line-driven AGN disc winds: metallicity dependence and black hole growth	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 904 ~ 913
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab2214	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 Tagawa Hiromichi、Haiman Zoltan、Bartos Imre、Kocsis Bence、Omukai Kazuyuki	4. 巻 507
2. 論文標題 Signatures of hierarchical mergers in black hole spin and mass distribution	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 3362 ~ 3380
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab2315	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 Abe Makito、Yajima Hidenobu、Khochar Sadegh、Dalla Vecchia Claudio、Omukai Kazuyuki	4. 巻 508
2. 論文標題 Formation of the first galaxies in the aftermath of the first supernovae	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 3226 ~ 3238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab2637	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 Chon Sunmyon、Omukai Kazuyuki、Schneider Raffaella	4. 巻 508
2. 論文標題 Transition of the initial mass function in the metal-poor environments	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 4175 ~ 4192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab2497	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 Tanikawa Ataru、Yoshida Takashi、Kinugawa Tomoya、Trani Alessandro A.、Hosokawa Takashi、Susa Hajime、Omukai Kazuyuki	4. 巻 926
2. 論文標題 Merger Rate Density of Binary Black Holes through Isolated Population I, II, III and Extremely Metal-poor Binary Star Evolution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 83 ~ 83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac4247	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 Chon Sunmyon, Ono Haruka, Omukai Kazuyuki, Schneider Raffaella	4. 巻 514
2. 論文標題 Impact of the cosmic background radiation on the initial mass function of metal-poor stars	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 4639 ~ 4654
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac1549	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 Matsukoba Ryoki, Tanaka Kei E I, Omukai Kazuyuki, Vorobyov Eduard I, Hosokawa Takashi	4. 巻 515
2. 論文標題 Protostellar-disc fragmentation across all metallicities	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 5506 ~ 5522
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac2161	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 Sadanari Kenji Eric, Omukai Kazuyuki, Sugimura Kazuyuki, Matsumoto Tomoaki, Tomida Kengo	4. 巻 519
2. 論文標題 Non-ideal magnetohydrodynamic simulations of the first star formation: the effect of ambipolar diffusion	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 3076 ~ 3090
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac3724	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 Chiaki Gen, Chon Sunmyon, Omukai Kazuyuki, Trinca Alessandro, Schneider Raffaella, Valiante Rosa	4. 巻 521
2. 論文標題 Direct-collapse black hole formation induced by internal radiation of host haloes	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 2845 ~ 2859
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad689	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 Chon Sunmyon, Omukai Kazuyuki	4. 巻 494
2. 論文標題 Supermassive star formation via super competitive accretion in slightly metal-enriched clouds	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 2851 ~ 2860
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa863	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 Vorobyov Eduard I., Matsukoba Ryoki, Omukai Kazuyuki, Guedel Manuel	4. 巻 638
2. 論文標題 Thermal evolution of protoplanetary disks: from -cooling to decoupled gas and dust temperatures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A102 ~ A102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202037841	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 Vorobyov Eduard I., Elbakyan Vardan G., Omukai Kazuyuki, Hosokawa Takashi, Matsukoba Ryoki, Guedel Manuel	4. 巻 641
2. 論文標題 Accretion bursts in low-metallicity protostellar disks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A72 ~ A72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202038354	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 Fukushima Hajime, Hosokawa Takashi, Chiaki Gen, Omukai Kazuyuki, Yoshida Naoki, Kuiper Rolf	4. 巻 497
2. 論文標題 Formation of massive stars under protostellar radiation feedback: very metal-poor stars	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 829 ~ 845
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa1994	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 Fukushima Hajime, Yajima Hidenobu, Sugimura Kazuyuki, Hosokawa Takashi, Omukai Kazuyuki, Matsumoto Tomoaki	4. 巻 497
2. 論文標題 Star cluster formation and cloud dispersal by radiative feedback: dependence on metallicity and compactness	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 3830 ~ 3845
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa2062	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 Nakauchi Daisuke, Inayoshi Kohei, Omukai Kazuyuki	4. 巻 902
2. 論文標題 Pulsation-driven Mass Loss from Massive Stars behind Stellar Mergers in Metal-poor Dense Clusters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 81 ~ 81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abb463	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 Tagawa Hiromichi, Kocsis Bence, Haiman Zoltan, Bartos Imre, Omukai Kazuyuki, Samsing Johan	4. 巻 907
2. 論文標題 Eccentric Black Hole Mergers in Active Galactic Nuclei	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L20 ~ L20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/abd4d3	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 Matsukoba Ryoki, Vorobyov Eduard I, Sugimura Kazuyuki, Chon Sunmyon, Hosokawa Takashi, Omukai Kazuyuki	4. 巻 500
2. 論文標題 Disc fragmentation and intermittent accretion on to supermassive stars	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 4126 ~ 4138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa3462	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 Tagawa Hiromichi、Kocsis Bence、Haiman Zoltan、Bartos Imre、Omukai Kazuyuki、Samsing Johan	4. 巻 908
2. 論文標題 Mass-gap Mergers in Active Galactic Nuclei	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 194 ~ 194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abd555	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 Chon Sunmyon、Hosokawa Takashi、Omukai Kazuyuki	4. 巻 502
2. 論文標題 Cosmological direct-collapse black hole formation sites hostile for their growth	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 700 ~ 713
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab061	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 Matsukoba Ryoki、Takahashi Sanemichi Z、Sugimura Kazuyuki、Omukai Kazuyuki	4. 巻 484
2. 論文標題 Gravitational stability and fragmentation condition for discs around accreting supermassive stars	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 2605 ~ 2619
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty3522	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 Nakauchi Daisuke、Omukai Kazuyuki、Susa Hajime	4. 巻 488
2. 論文標題 Ionization degree and magnetic diffusivity in the primordial star-forming clouds	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 1846 ~ 1862
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz1799	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 Mitani Hiroto, Yoshida Naoki, Omukai Kazuyuki, Hosokawa Takashi	4. 巻 488
2. 論文標題 Spectral energy distribution of the first galaxies: contribution from pre-main-sequence stars	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L64 ~ L68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/slz100	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 Sugimura Kazuyuki, Matsumoto Tomoaki, Hosokawa Takashi, Hirano Shingo, Omukai Kazuyuki	4. 巻 892
2. 論文標題 The Birth of a Massive First-star Binary	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L14 ~ L14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab7d37	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 Chon Sunmyon, Omukai Kazuyuki	4. 巻 494
2. 論文標題 Supermassive star formation via super competitive accretion in slightly metal-enriched clouds	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 2851 ~ 2860
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa863	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 Fukushima Hajime, Yajima Hidenobu, Omukai Kazuyuki	4. 巻 477
2. 論文標題 Condition for dust evacuation from the first galaxies	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 1071 ~ 1085
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty799	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 Sugimura Kazuyuki, Hosokawa Takashi, Yajima Hidenobu, Inayoshi Kohei, Omukai Kazuyuki	4. 巻 478
2. 論文標題 Stunted accretion growth of black holes by combined effect of the flow angular momentum and radiation feedback	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 3961 ~ 3975
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1298	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 Nakauchi Daisuke, Omukai Kazuyuki, Schneider Raffaella	4. 巻 480
2. 論文標題 Condition for low-mass star formation in shock-compressed metal-poor clouds	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 1043 ~ 1056
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1911	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 Nomura Mariko, Oka Tomoharu, Yamada Masaya, Takekawa Shunya, Ohsuga Ken, Takahashi Hiroyuki R., Asahina Yuta	4. 巻 859
2. 論文標題 Magnetohydrodynamic Simulations of a Plunging Black Hole into a Molecular Cloud	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 29 ~ 29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aabe32	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 Takeo Eishun, Inayoshi Kohei, Ohsuga Ken, Takahashi Hiroyuki R, Mineshige Shin	4. 巻 476
2. 論文標題 Rapid growth of black holes accompanied with hot or warm outflows exposed to anisotropic super-Eddington radiation	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 673 ~ 682
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty264	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 Kitaki Takaaki, Mineshige Shin, Ohsuga Ken, Kawashima Tomohisa	4. 巻 70
2. 論文標題 Systematic two-dimensional radiation-hydrodynamic simulations of super-Eddington accretion flow and outflow: Comparison with the slim disk model	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 id.108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy110	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 Chon Sunmyon, Hosokawa Takashi, Yoshida Naoki	4. 巻 475
2. 論文標題 Radiation hydrodynamics simulations of the formation of direct-collapse supermassive stellar systems	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 4104 ~ 4121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty086	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 Toyouchi Daisuke, Hosokawa Takashi, Sugimura Kazuyuki, Nakatani Riouhei, Kuiper Rolf	4. 巻 483
2. 論文標題 Super-Eddington accretion of dusty gas onto seed black holes: metallicity-dependent efficiency of mass growth	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 2031 ~ 2043
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty3012	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 Yue Bin, Ferrara Andrea, Pacucci Fabio, Omukai Kazuyuki	4. 巻 838
2. 論文標題 Triggering the Formation of Direct Collapse Black Holes by Their Congeners	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 111 ~ 111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa6627	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 Sugimura Kazuyuki, Hosokawa Takashi, Yajima Hidenobu, Omukai Kazuyuki	4. 巻 469
2. 論文標題 Rapid black hole growth under anisotropic radiation feedback	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 62 ~ 79
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx769	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 Sugimura Kazuyuki, Mizuno Yurina, Matsumoto Tomoaki, Omukai Kazuyuki	4. 巻 469
2. 論文標題 Fates of the dense cores formed by fragmentation of filaments: do they fragment again or not?	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4022 ~ 4033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx1129	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 Takahashi Sanemichi Z., Omukai Kazuyuki	4. 巻 472
2. 論文標題 Primordial protostars accreting beyond the $\tau_{\text{esc}}$ -limit: radiation effect around the star-disc boundary	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 532 ~ 541
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx1988	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 Fukushima Hajime, Omukai Kazuyuki, Hosokawa Takashi	4. 巻 473
2. 論文標題 Upper stellar mass limit by radiative feedback at low-metallicities: metallicity and accretion rate dependence	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4754 ~ 4772
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx2620	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 Fukushima Hajime, Yajima Hidenobu, Omukai Kazuyuki	4. 巻 477
2. 論文標題 Condition for dust evacuation from the first galaxies	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 1071 ~ 1085
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty799	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 Sugimura Kazuyuki, Hosokawa Takashi, Yajima Hidenobu, Inayoshi Kohei, Omukai Kazuyuki	4. 巻 478
2. 論文標題 Stunted accretion growth of black holes by combined effect of the flow angular momentum and radiation feedback	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 3961 ~ 3975
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1298	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 Nakauchi Daisuke, Omukai Kazuyuki, Schneider Raffaella	4. 巻 480
2. 論文標題 Condition for low-mass star formation in shock-compressed metal-poor clouds	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 1043 ~ 1056
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1911	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12件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Kazuyuki Omukai
2. 発表標題 Formation of very low-metallicity stars
3. 学会等名 Massive stars near and far (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 Kazuyuki Omukai
2. 発表標題 Origin of Supermassive Black Holes: Theoretical Perspective
3. 学会等名 Asia Pacific Physics Conference APPC14 Astrophysics, Cosmology, and Gravitation Sessions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuyuki Omukai
2. 発表標題 Binary Star Formation at Low Metallicities
3. 学会等名 YKIS2019 "Black Holes and Neutron Stars with Gravitational Waves" (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuyuki Omukai
2. 発表標題 From First Stars to First Black Holes
3. 学会等名 The early growth of supermassive black holes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Hosokawa
2. 発表標題 Feedback from accreting seed black holes and progenitor stars
3. 学会等名 The early growth of supermassive black holes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuyuki Omukai
2. 発表標題 From First Stars to First Black Holes
3. 学会等名 The early growth of supermassive black holes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuyuki Omukai
2. 発表標題 Status Report of A03 in FY2018: Quest for BH binary
3. 学会等名 The Second annual symposium of the innovative area "Gravitational Wave Physics and Astronomy: Genesis" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大向一行
2. 発表標題 宇宙初期の星形成におけるダストの役割
3. 学会等名 銀河の化学進化とダスト形成 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuyuki Omukai
2. 発表標題 Understanding primordial star formation: Francesco's contribution
3. 学会等名 Francesco's Legacy: Star Formation in Space and Time (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ken Ohsuga
2. 発表標題 Radiation-MHD simulations of accretion flows and outflows around black holes and neutron stars
3. 学会等名 Max-Planck/Princeton Center for Plasma Physics Workshop
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ken Ohsuga
2. 発表標題 Super-Eddington flows and spectra
3. 学会等名 ULTRA-LUMINOUS X-RAY PULSARS
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Hosokawa
2. 発表標題 Feedback from accreting seed black holes and progenitor stars
3. 学会等名 The early growth of supermassive black holes
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 大須賀 健 (監修)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 宝島社	5. 総ページ数 144
3. 書名 ノーベル賞受賞の博士が明かした! 世界一やさしいブラックホールの話	

1. 著者名 大須賀 健	4. 発行年 2017年
2. 出版社 KADOKAWA	5. 総ページ数 256
3. 書名 ブラックホールをのぞいてみたら	

1. 著者名 大須賀 健、日能研	4. 発行年 2017年
2. 出版社 講談社	5. 総ページ数 200
3. 書名 マルいアタマをもっとマルく！日能研クエスト 宇宙のふしぎ最前線！ 謎だらけの宇宙にいどむ	

〔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
研究分担者	細川 隆史 (Hosokawa Takashi)  (30413967)	京都大学・理学研究科・准教授  (14301)	
研究分担者	大須賀 健 (Ohsuga Ken)  (90386508)	筑波大学・計算科学研究センター・教授  (12102)	

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
---------	---------

イタリア	Sapienza University of Rome			
中国	KIAA, Peking University			
米国	Columbia University			
イタリア	Sapienza University of Rome	Scuola Normale Superiore, Pisa		