

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05383

研究課題名（和文）超臨界降着天体からのアウトフローとX線による観測可能性

研究課題名（英文）Investigating outflow properties from super-critical accretor through X-ray observation

研究代表者

嶺重 慎（Mineshige, Shin）

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：70229780

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：かつてブラックホールに落ち込むガスの量には上限があると言われていたのだが、その限界を超えて超臨界降着が実現すること、そのとき生み出された電磁波放射の力により多量のガスが噴き出すことが近年のシミュレーションでわかってきた。われわれはさらに精度を上げたシミュレーションを実行し、超臨界降着流の観測的特徴や、宇宙初期にブラックホールが急成長する条件を明らかにした。またブラックホール周囲の時空構造やガスの流れ、磁場構造を求める方法論を開拓した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「ブラックホールは吸い込むだけで、何も生み出さない、役に立たない」とは世間の常識である。しかし近年のシミュレーション研究は、ブラックホールこそ宇宙最大のエネルギー供給源であることを示してきた。本研究では、最も効率よくエネルギーを生み出している超臨界降着流に注目し、エネルギー放出の詳細を最新シミュレーションで調べた。本研究を継続することにより、ブラックホールは宇宙の中でどのような役割を担っているのか、という謎解決の端緒がつかめるだろう。

研究成果の概要（英文）：On the contrary to the classical belief that there exists a maximum limit to the gas accretion rate onto a black hole, recent simulation studies have established that supercritical accretion exceeding the classical limit is feasible and that powerful outflow is driven by strong electromagnetic wave radiation from the flow. We performed more sophisticated simulations, finding observational signatures of supercritical accretion and the conditions for the rapid growth of seed black holes in early universe. We have also developed the methodologies to investigate the space-time structure, gas flow dynamics, and magnetic field configurations around black holes.

研究分野：天文学

キーワード：ブラックホール天文学 ブラックホール成長 X線天文学 シミュレーション 電波天文学 輻射流体力学 偏光・偏波 アウトフロー

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

ブラックホールに落ち込むガス流(ブラックホール降着流)はいくつかのモードをもっている。1970年代に確立した「標準降着円盤モデル」はそのうちの一つを記述するもので、数々の観測的検証をパスしてきた代表的モデルである。しかしこの標準円盤モデルは、ガス降着率が極端に低くても高くても破綻することが知られている。前者の場合、ガスは高温となり、激しく変動しながらブラックホールに落ちていく(「高温降着流」あるいは「輻射非効率降着流」とよばれる)。後者の場合は多量のガスが一気に落ち込むことにより強い電磁波が生み出され、その力(輻射圧)がガス降着を抑止することが知られている。そのため降着円盤の光度にはエディントン光度と呼ばれる古典的限界が存在することが知られていた。

われわれは2005年から先駆的に大局的輻射流体シミュレーションに取り組み、二次元効果により古典的限界を超えた「超臨界降着」が実現すること、電磁波輻射は緩やかなピーミングを受けて光度はエディントン光度を超えること、クランプ状のアウトフローが噴出することなど、新知見をいくつも見いだしてきた。さて現実宇宙のどこで超臨界降着は起きているのだろうか。

超臨界降着が起きている現場としてわれわれが目にしたのは、超高光度X線源(ULX)である。これは10太陽質量のエディントン光度( $\sim 10^{39} \text{ J s}^{-1}$ )を超えて光るコンパクトX線源であり、その正体は、太陽質量の数百倍超の質量をもつ中間質量ブラックホールへの亜臨界降着か、たかだか太陽質量の数十倍の質量のブラックホールへの超臨界降着か、論争が続いていた。しかしULXにパルサー(中性子星)が発見されるに至り、超臨界降着説に軍配があがった。

こうして超臨界降着研究は新時代に入った。さらに多くの場面で超臨界降着流が起きている可能性がある。その観測的証拠をつかみ、周囲へのインパクトを定量化することが喫緊の課題となった。また、他の降着モードとの関係や噴出流を生み出すメカニズム解明も重要課題である。

## 2. 研究の目的

本研究プロジェクトでは、世界最先端の輻射流体シミュレーションを軸として、以下の3つの課題(1)~(3)にとりくんだ。さらに2019年4月にEHT(Event Horizon Telescope)による巨大ブラックホールM87の画像が公開されたのを受け、関連した課題(4)を追加した。

### (1) 超臨界降着流の大局的構造と観測可能性

従来の輻射流体シミュレーションには、計算領域のサイズや初期条件依存性に課題があった。そこで従来より計算領域をはるかに広げてシミュレーションを実行し、周囲への輻射フィードバック効果を定量化して、継続的な超臨界降着が可能かを調べる。また、超臨界降着流は多量のガスを周囲にクランプ状に放出することを先に示したが、それは、どのようなユニークな観測的特徴が現れるのか、確かな知見を得ることも目的の一つである。

### (2) 宇宙初期ブラックホール成長

8億歳( $z \sim 7.1$ )の初期宇宙で約20億倍の太陽質量をもつブラックホールが発見されている。短期間で巨大ブラックホールまで成長するには超臨界降着が不可欠である。しかしブラックホール近傍からの輻射が周囲のガスを温める「輻射フィードバック」効果のため、ガス供給率は高まらなるとされていた。しかし多次元効果によりその困難は回避される可能性がある。そこで多次元シミュレーションを実行して、初期宇宙において超臨界降着が実現する条件を定量化する。

### (3) バイナリーブラックホールへの降着

ブラックホールがペアとなって系をつくるバイナリーブラックホールは、ブラックホール合体の前段階である。合体に伴って、多量のガスが、二つのブラックホールに落ち込むと予想され、その結果、超臨界降着流が発生する。それはどのように観測されるだろうかを解明する。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

#### (4) ブラックホールに落ち込むガス

一般相対性理論によると、ブラックホール時空は(電荷を除き)質量とスピンのみで一意的に記述できる。これを観測的に実証することが究極の目標ではあるが、その第一ステップとして、ブラックホールにガスがプロブ(塊)状となって落ちていく様子を EHT で観測したとして、どの程度の精度でスピンの決定ができるだろうか? また高速アウトフロー(ジェット)噴出の磁場駆動モデルの検証を行うためには、ジェット根元の磁場構造の決定が本質だが、超高分解能偏波観測により、どの程度の精度で磁場構造が決定できるのかを定量的に明らかにする。

### 3. 研究の方法

課題(1)~(4)ごとに最適された計算コードを用いてシミュレーションを実行した。

- (1) Ohsuga+2005 で開発された磁気流体シミュレーションコードを用いてガスダイナミクス計算を行う。さらにそのガス流が生み出す輻射スペクトルをモンテカルロ法により計算する。
- (2) 水素・ヘリウム化学反応も考慮した 2 次元輻射流体力学計算コードを新しく開発し、ボンディ半径(数パーセク)からブラックホールへのガス降着過程を解く。
- (3) ドイツ・キール大学の Illenseer 氏の開発したコードを用いてバイナリーブラックホールへのガス降着率を計算し、その一部が噴出流となるとしてその観測可能性を議論する。
- (4) ガス落下運動および輻射輸送を解く一般相対性理論的コード(開発済み)を用いて落下ガス雲からの輻射光度変動を計算する。また、既存の一般相対論的磁気流体計算データを元に偏波輻射輸送の式を解き、EHT 観測で予想される偏波イメージを計算する。

### 4. 研究成果

#### (1) 超臨界降着流の大局的構造と観測可能性

降着流・噴出流の構造を丁寧に調べ(図 1 左)輻射スペクトルを計算したところ、硬 X 線観測で知られていたべき型スペクトルを見事再現した(Kitaki+17, 図 1 右)。さまざまなブラックホール質量、降着率ごとに降着・噴出流構造を調べその全体的傾向を明らかにし、1 次元モデルのスリム円盤モデルと比較したところ、よい一致をみることがわかった(Kitaki+18)。

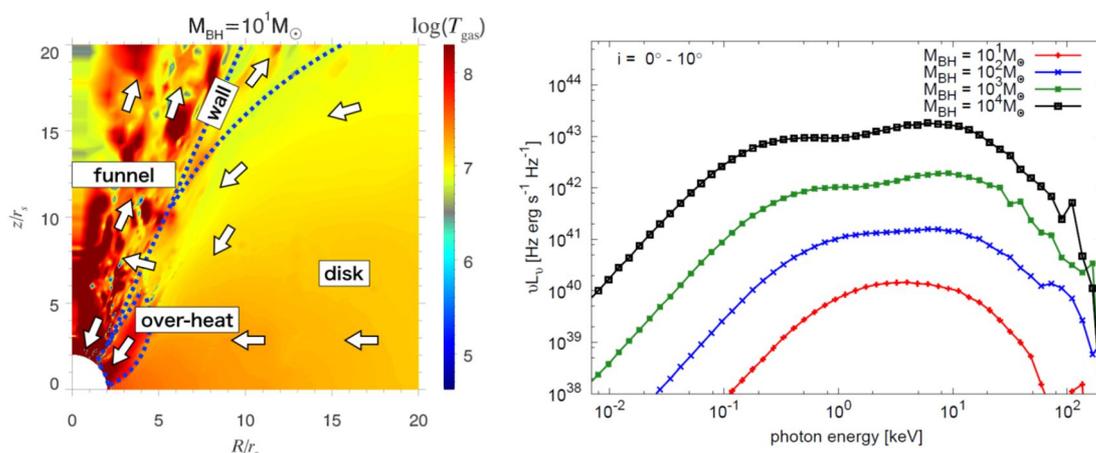


図 1:(左)ブラックホール近傍のガス流。(右)輻射スペクトル(原典は Kitaki+17)。

ブラックホールへの大局的なガスの流れ込み過程を探る第一歩として、内側境界を従来の計算より ~2 桁広げ、かつ内側の領域で、従来の(ブラックホール近傍まで解いた)計算結果を再現する境界条件を見いだした。それを新しく内側境界条件とすることで、従来の計算より 2 桁計算領域を広げた計算に成功した。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

クランプ状アウトフローの3次元磁気流体シミュレーションデータのフラクタル解析を実行し、中心部で均一な構造が、まず膜状(2次元)に分裂し、さらに膜が細かいひも状の断片(1.6次元)に分かれるようすを明らかにした(図2)。

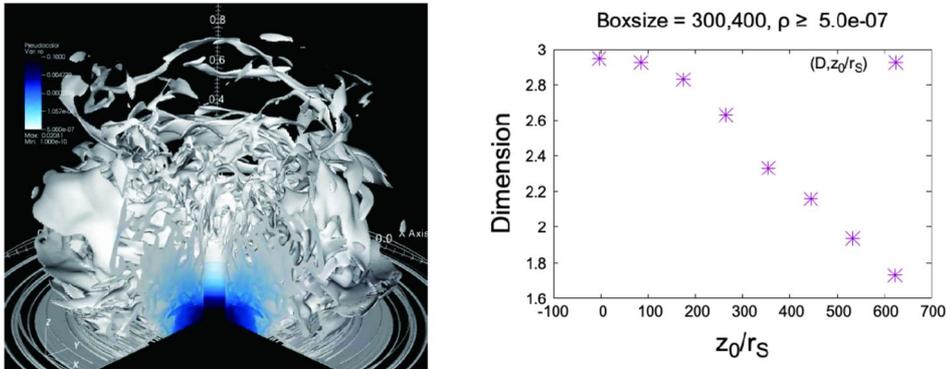


図2(左)クランプ状アウトフローの鳥瞰図(Kobayashi+2018)。(右)クランプ状アウトフローのフラクタル次元の変化(論文準備中)。

### (2) 宇宙初期ブラックホールの成長

比較的小質量( $10^3 \sim 10^6$  太陽質量)のブラックホールに、ボンディ半径からガスがどのような割合で降り積もっていくかを2次元輻射流体で明らかにした。その結果、2次元効果により超臨界降着が実現しうること、これも巨大ブラックホール形成の一つの有力な説となることを実証した。

同様の計算を、新しく内側領域からの非等方的アウトフローを導入して行った。アウトフローが出る方向のガスを吹き飛ばされることにより、アウトフローが弱い角度からの降着流がより強まり超臨界降着流が起きやすくなることが分かった(図3)。

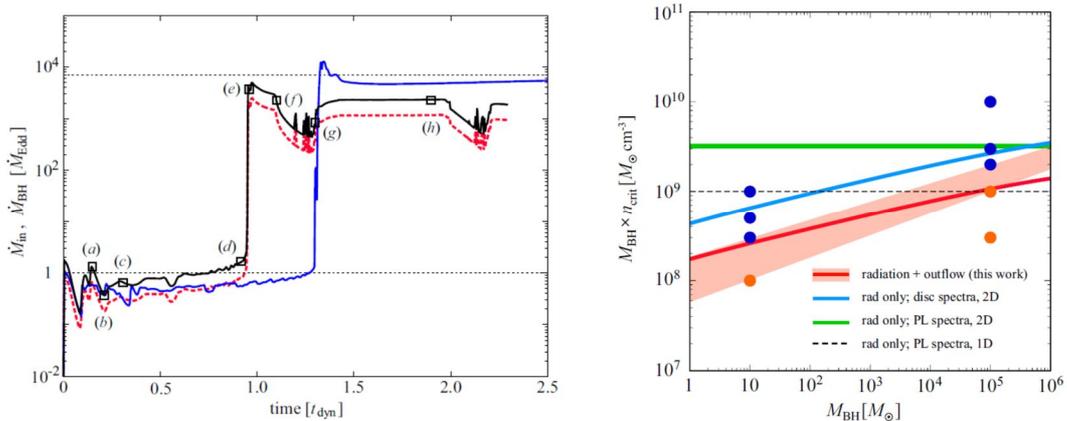
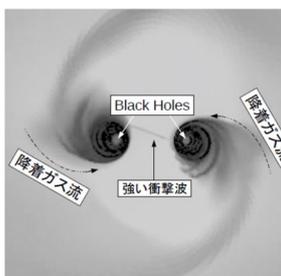


図3:(左)宇宙初期ブラックホール成長曲線の例。ある時点で二次元分離の相転移が起こり超臨界降着が実現する。(右)臨界降着条件を示す図(原典はTakeo+20、投稿中)。

### (3) バイナリーブラックホールへの降着



バイナリーブラックホールには、多量のガスが両ブラックホールに注ぎ込むことにより、それぞれにおいて超臨界超臨界降着流が生み出される可能性がある(図4)。各ブラックホール近傍からは輻射圧駆動型アウトフローが飛び出しているはずで、両者がぶつくと衝撃波を形成して電波やX線で光ることになる。その値を大まかに見積もるとエディントン光度程度の光度をもつことがわかった。

図4(上図)バイナリーブラックホールへのガス降着を表す密度等高線(投稿準備中)。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

(4) ブラックホールに落ち込むガス

ブラックホールに落ち込むガスリングの、EHT を想定した模擬観測を実行し期待される光度曲線を計算した (図 5)。これに「重ね合わせショット」テクニックを用いて、どの程度の精度でブラックホールスピンの決定できるかを調べた。0.5 以下のロースピンでは不定性が大きいですが、0.9 以上のハイスピンでは精度よくスピンの決まることがわかった。

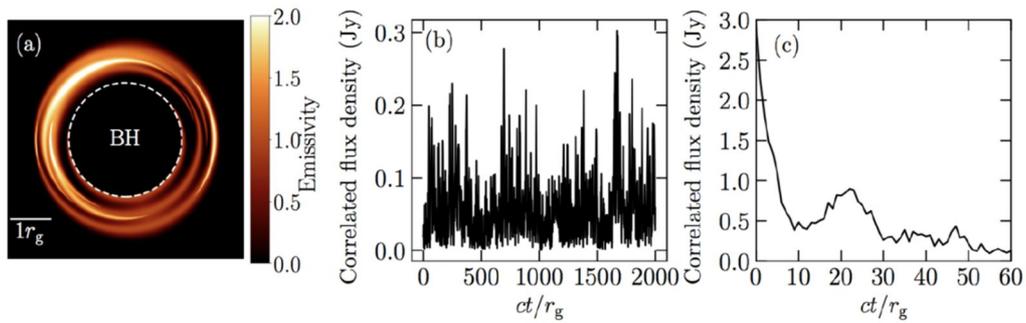


図 5 : (左) ブラックホールへのガス降着シミュレーションが描き出した密度等高線の図。(中) フレアの光度曲線 (間欠的降着の例)。(右) 中図のフレアピークを合わせてフレアを足し合わせた作った「重ね合わせショット」光度曲線 (原典はいずれも Moariyama+19)。

ブラックホールの電波偏波イメージ

M87 の EHT 観測を念頭に、既存の一般相対論的 MHD シミュレーションデータ (Nakamura+18) を元に予想される偏波マップを作成した。偏波は磁場形状の状態を携えてくるという意味で、ジェット磁場駆動モデルの検証に不可欠である。先行研究では、シンクロトロン放射は直線偏波が圧倒的に強いことから、円偏波についてはあまり調べられていなかった。

計算実行したところ、直線偏波はプラズマ内を伝搬中にファラデー変換を受けることにより本来もっていた情報が失われることが分かった。これでは磁場形状に関する情報を得ることはできない。しかし円偏波は、直線偏波とは対照的に、ファラデー変換によりかえって強められ、磁場構造につき本質的な情報をもって観測者に届くことを定量的に示すことができた (図 6)。

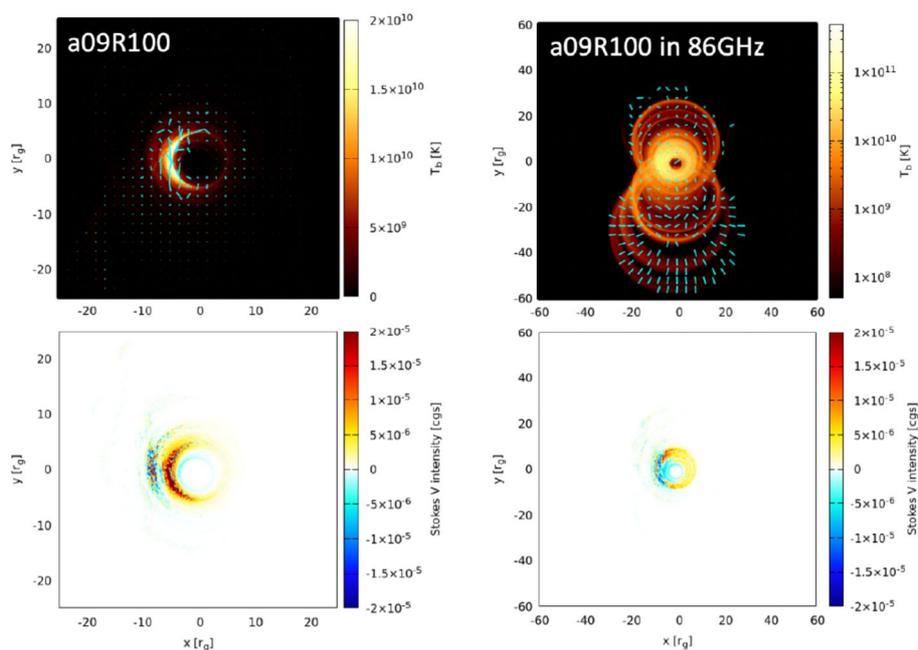


図 6 EHT で予想される電波イメージ + 直線偏波ベクトル (上) とその円偏波画像 (下)。それぞれ左図はスピン 0.5、右図はスピン 0.9 のケースである (原典は Tsunetoe+20)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tsunetoe, Yuh; Mineshige, Shin; Ohsuga, Ken; Kawashima, Tomohisa; Akiyama, Kazunori	4. 巻 72
2. 論文標題 Polarization imaging of M 87 jets by general relativistic radiative transfer calculation based on GRMHD simulations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Pub. Astron. Soc. Japan	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) 10.1093/pasj/psaa008	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 Moriyama, Kotaro; Mineshige, Shin; Honma, Mareki; Akiyama, Kazunori	4. 巻 887
2. 論文標題 Black Hole Spin Measurement Based on Time-domain VLBI Observations of Infalling Gas Clouds	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astrophys. J.	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) 10.3847/1538-4357/ab505b	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 488
2. 論文標題 Super-Eddington growth of black holes in the early universe: effects of disc radiation spectra	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mon. Notices Roy. Astron. Soc.	6. 最初と最後の頁 2689-2700
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz1899	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 Mon. Notices. Roy. Astron. Soc.	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 -

1. 著者名 Mizumoto, Misaki; Moriyama, Kotaro; Ebisawa, Ken; Mineshige, Shin; Kawanaka, Norita; Tsujimoto, Masahiro	4. 巻 70
2. 論文標題 Can the relativistic light-bending model explain X-ray spectral variations of Seyfert galaxies?	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Pub. Astron. Soc. Japan	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) 10.1093/pasj/psy032	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 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 Pub. Astron. Soc. Japan	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) 10.1093/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 Kobayashi, Hiroshi; Ohsuga, Ken; Takahashi, Hiroyuki R.; Kawashima, Tomohisa; Asahina, Yuta; Takeuchi, Shun	4. 巻 70
2. 論文標題 Three-dimensional structure of clumpy outflow from supercritical accretion flow onto black holes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Pub. Astron. Soc. Japan	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) 10.1093/pasj/psx157	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 Hiroyuki R., Mineshige Shin, Ohsuga Ken	4. 巻 853
2. 論文標題 Supercritical Accretion onto a Non-magnetized Neutron Star: Why is it Feasible?	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astrophys. J.	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) 10.3847/1538-4357/aaa082	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 Ogawa Takumi, Mineshige Shin, Kawashima Tomohisa, Ohsuga Ken, Hashizume Katsuya	4. 巻 69
2. 論文標題 Radiation hydrodynamic simulations of a super-Eddington accretor as a model for ultra-luminous sources	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Pub. Astron. Soc. Japan	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) 10.1093/pasj/psx006	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 Moriyama Kotaro, Mineshige Shin, Takahashi Hiroyuki R.	4. 巻 850
2. 論文標題 High-frequency Quasi-periodic Light Variations from Arc-shaped Gas Clouds Falling onto a Black Hole	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astrophys. J.	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) 10.3847/1538-4357/aa92cb	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 Kitaki Takaaki, Mineshige Shin, Ohsuga Ken, Kawashima Tomohisa	4. 巻 69
2. 論文標題 Theoretical modeling of Comptonized X-ray spectra of super-Eddington accretion flow: Origin of hard excess in ultraluminous X-ray sources	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Pub. Astron. Soc. Japan	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) 10.1093/pasj/psx101	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 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 恒任 優
2. 発表標題 M87ジェット地平面町域の構造解明輻射輸送計算によるEHT偏波イメージの理論予測
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森山小太郎
2. 発表標題 EHTによるSgr A*への落下ガス雲の直接撮像を用いたブラックホールスピンの測定
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 嶺重 慎
2. 発表標題 Radiation-Hydrodynamical Simulation and Slim Disk Model
3. 学会等名 Slim Disc Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 恒任 優
2. 発表標題 偏光の一般相対論的輻射輸送計算による活動銀河核ジェットの構造解明
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 北木孝明
2. 発表標題 超臨界降着の大域計算
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 北木孝明
2. 発表標題 スリム円盤モデルは正しかったのか？
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹尾英俊
2. 発表標題 円盤スペクトルが超臨界降着に与える影響
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 恒任 優
2. 発表標題 活動銀河核におけるシンクロトロン偏光輻射輸送計算
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森山小太郎
2. 発表標題 ブラックホールへの落下ガス雲のVLBI直接撮像を想定したスピン測定法
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森山小太郎
2. 発表標題 ブラックホールへ間欠的に落下するガス雲の光度変動と偏光の関係
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 川中宣太
2. 発表標題 ブラックホール超臨界降着流に付随するコロナからのX線放射スペクトル
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 竹尾英俊
2. 発表標題 ブラックホールの超臨界成長・円盤スペクトルの効果
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 水本岬希
2. 発表標題 X-ray reverberation lags due to AGN winds
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2017年～2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 嶺重 慎	4. 発行年 2019年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 216
3. 書名 ファーストステップ 宇宙の物理	

〔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
連携 研究者	大須賀 健  (Ohsuga Ken)  (90386508)	筑波大学・計算科学研究センター・教授    (12102)	