

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01941

研究課題名（和文）輻射磁気流体計算に基づく活動銀河中心核状態遷移過程の解明

研究課題名（英文）Study of State Transition Process in Active Galactic Nuclei based on Radiation Magnetohydrodynamic Simulations

研究代表者

松元 亮治（Matsumoto, Ryoji）

千葉大学・大学院理学研究院・名誉教授

研究者番号：00209660

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：活動銀河中心核の増光時における軟X線放射領域の形成機構を解明するため、巨大ブラックホールへの降着率が球対称降着流の上限光度に対応する降着率の10%程度まで上昇した場合の大局的3次元輻射磁気流体シミュレーションを実施した。その結果、(1)ブラックホール近傍の高温の硬X線放射領域の外側にトムソン散乱に対して光学的に厚く、コンプトン冷却された領域が形成されること、(2)この領域で方位角方向の磁場が強められ、円盤が磁気圧で支えられること、(3)赤道面上下で磁場方向が反転した磁束管が融合して磁気エネルギーを解放することにより円盤が加熱され、軟X線を放射する温度に保たれることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

活動銀河中心核のうち、広輝線が観測される1型と観測されない2型の間を遷移する Changing Look 活動銀河核の増光時に観測される軟X線放射領域の形成機構を明らかにすることができた。また、この領域がセイファート銀河やクェーサー等の明るい活動銀河で観測される軟X線放射源であることが示唆された。加えて、X線分光撮像衛星XRISMに搭載する分光器とX線CCDカメラ Xtend の開発を進めた。2023年にXRISM衛星の打ち上げおよび初期運用を行い、初期成果の創出に向けて着実に観測が続けられている。

研究成果の概要（英文）：Global three-dimensional radiation magnetohydrodynamic code have been applied to simulate the accretion flow onto a super-massive black hole in active galactic nuclei. The structure and time variability of the accretion flow are studied when the accretion rate increases up to 10% of the Eddington accretion rate. The results show that (1) A Thomson thick and Compton-cooled region is formed outside the high-temperature hard X-ray emitting region near the black hole, (2) The azimuthal magnetic field is amplified in this region and the disk is supported by magnetic pressure, and (3) Magnetic flux tubes with reversed magnetic field directions above and below the equatorial plane merge and heat the disk by releasing the magnetic energy, The disk temperature is maintained at 0.1-1 keV.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：活動銀河中心核 ブラックホール 降着円盤 X線観測 輻射磁気流体計算

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 活動銀河中心核 (AGN) には M87 のような低光度 AGN と可視光・紫外線で明るいセイファート銀河やクェーサー等がある。両者の違いは巨大ブラックホールへの質量降着率の大小に起因すると考えられる。低光度活動銀河中心核では、ブラックホール降着流における輻射冷却を無視できるため扱いが簡単で、一般相対論的な 3 次元磁気流体シミュレーションが実施され、Event Horizon Telescope によって撮像されたブラックホール近傍の電波画像との比較等が行われてきた。しかし、セイファート銀河やクェーサーについては、可視光で観測される輝線放射領域についての研究が行われてきたものの、ブラックホール近傍の降着流の構造やダイナミクスへの理解は進んでいなかった。

(2) 活動銀河中心核において、可視光で幅の広い輝線が観測される 1 型と観測されない 2 型の間の状態遷移が観測され、Changing Look 現象として注目されている。本研究の分担者である野田らは Changing Look 現象を示す活動銀河中心核の X 線観測から、光度が球対称降着流の上限光度であるエディントン光度の 1% よりも小さい時には硬 X 線が卓越するが、増光してエディントン光度の数% より明るくなると軟 X 線超過成分が観測されるようになることを見出した (Noda and Done 2018)。この研究を通して、状態遷移時には硬 X 線を放射する高温降着流と軟 X 線放射領域が共存していること、降着率増加に伴う軟 X 線放射領域の形成機構を解明することが、セイファート銀河やクェーサーの活動性を理解する鍵になることが示唆されていた。

(3) 光学的に薄い場合の輻射冷却を考慮した 3 次元磁気流体シミュレーションによって、低光度状態から高光度状態への遷移中に、降着円盤が方位角方向の磁束を保ちつつ冷えて鉛直方向に収縮することにより方位角方向の磁場が強まり、磁気圧で支えられた状態に遷移することが示されていた (Machida et al. 2006)。低光度ブラックホール降着流では回転軸付近に集められた鉛直磁場により円盤が支えられる Magnetically Arrested Disk (MAD) モデルが注目されていたが、より光度の高い円盤は方位角磁場によって支えられている可能性がある。このような降着円盤について、輻射と磁気流体の相互作用を考慮した計算が必要になっていた。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究の第 1 の目的は、降着率変動に伴う状態遷移中の AGN 降着流の構造と時間変動を大局的な 3 次元輻射磁気流体シミュレーションによって明らかにすることである。ブラックホール降着流の 3 次元計算は、円盤が幾何学的に厚く数値的に解像しやすいエディントン降着率 (エディントン光度に対応する降着率) の 1% 以下の RIAF (光学的に薄い高温トラス) とエディントン降着率以上の超臨界降着流について実施されてきた。本研究では降着円盤研究の中心課題とも言えるエディントン降着率の 10% 程度の場合の計算を実施する。セイファート銀河の増光時に対応するこの降着率の計算によって、活動銀河中心核 1-100AU 領域の構造や時間変動を解明し、AGN の研究にブレークスルーをもたらすことを目指す。

(2) 本研究の第 2 の目的は、X 線分光撮像衛星 XRISM との連携をはかることである。XRISM は、鉄の K 輝線群 (6.4-7keV) の帯域で高い有効面積 ( $\sim 400\text{cm}^2$ ) を持つことが特徴であり、鉄の K 輝線を用いてブラックホール降着流・噴出流の運動や電離度についての情報を得ることができる。RIAF と軟 X 線放射領域の境界ではプラズマ温度が 1-10keV になるため、鉄の K 輝線観測からこの領域の運動を求めることを目指す。

### 3. 研究の方法

(1) 1 次モーメント法に基づくカーメトリックの一般相対論的輻射磁気流体コード UWABAMI (Takahashi et al. 2016)、及びこれを非相対論化することによって高速化した高次精度 3 次元輻射磁気流体コード CANS+R を用いて、AGN 降着流の面密度が RIAF の上限を超えた場合の時間発展を計算した。輻射過程としては熱制動放射とコンプトン散乱を考慮し、振動数積分した輻射エネルギー密度と輻射流束の時間発展を磁気流体の時間発展と連立させて解いた。CANS+R を用いた計算では一般相対論的効果は擬ニュートンポテンシャルによって近似した。まず、輻射冷却を含めずに計算して準定常状態の RIAF が形成された後、輻射冷却を考慮し、輻射冷却によって降着流が鉛直方向に収縮して低温高密度領域が形成される過程をシミュレートした。

(2) シミュレーションから得られた温度、密度分布をもとに、コンプトン散乱を考慮した一般相対論的なモンテカルロ輻射輸送計算を実施して輻射スペクトルを計算するコード RAIKOU (Kawashima et al. 2023) を開発し、輻射スペクトル計算を可能にした。

(3) 年 2 回程度分担者、研究協力者を集めたミニワークショップを開催し、情報交換を行った。特に X 線分光撮像衛星 XRISM 打ち上げに向けた進捗状況を確認し、初期観測に備えた。

#### 4. 研究成果

(1) 状態遷移中のブラックホール降着流の構造と時間変動を解明するため、CANS+R を用いて、エディントン降着率の 10% の場合の大局的 3 次元輻射磁気流体シミュレーションを実施した。ブラックホールの質量は  $10^7 M_\odot$  とした。その結果、ブラックホール近傍の高温領域と共存する、輻射冷却された  $10^7\text{K}-10^8\text{K}$  の領域が  $r=20-40r_s$  ( $r_s$  はシュバルツシルト半径) に形成されること、この領域が輻射圧優勢になると円盤振動が励起されることが明らかになり、*Astrophysical Journal* に論文を出版した (Igarashi et al. 2020)。

(2) 上記の計算ではコンプトン冷却を考慮していなかったため、輻射冷却された領域の温度は Changing Look AGN の軟 X 線放射領域の温度 ( $10^6\text{K}-10^7\text{K}$ ) より 1 桁高くなっていた。そこで、CANS+R にコンプトン冷却の効果を組み込んで 3 次元輻射磁気流体計算を行った (Igarashi et al. 2024)。

図 1 にコンプトン冷却あり、初期降着率がエディントン降着率の 10% (モデル M01: 左図)、30% (モデル M03: 中央)、コンプトン冷却なし、初期降着率がエディントン降着率の 10% (モデル NC: 右図) について、輻射冷却された領域が形成された後の方位角平均した密度、温度、輻射エネルギー密度の分布を示す。密度の図の等高線はトムソン散乱に対する光学的厚さ、輻射エネルギー密度の図の白い実線は輻射流束の流線を示す。

コンプトン冷却を考慮したモデルでは、ブラックホール近傍の  $10^{10}\text{K}$  程度の温度の高温降着流の外側、 $r=30-60r_s$  にトムソン散乱に対して光学的に厚く、温度が  $10^6-10^7\text{K}$  の軟 X 線放射領域が形成されること、この領域からの輻射が卓越することがわかった。モデル M01 では光度はエディントン光度の 1% 程度、モデル M03 ではエディントン光度の 8% 程度になる。また、M03 では  $r > 50r_s$  での赤道面温度が  $10^5\text{K}$  になり、紫外線放射が強くなることもわかった。このシミュレーション結果により、Changing Look AGN の光度がエディントン光度の 1% 以上に増光すると輻射スペクトルに軟 X 線超過成分が出現するという観測結果を説明することができた。なお、コンプトン冷却を考慮しない場合には図 1 右図のように冷却領域の温度が高すぎて観測を説明できない。

シミュレーション結果を解析した結果、輻射冷却された領域からの輻射エネルギーと冷却領域内縁 (RIAF との境界) から動径方向外向きに輸送される磁気エネルギーが釣り合っていることがわかった。図 2 にシミュレーション結果の模式図を示す (Igarashi et al. 2024)。赤い実線は磁力線である。降着によって  $r=20r_s$  付近にある RIAF 境界の密度が高まり、輻射

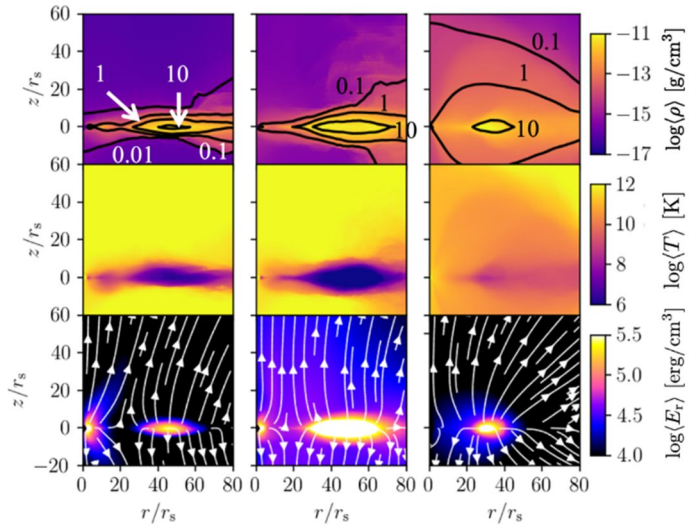


図 1 巨大ブラックホール降着流の 3 次元輻射磁気流体計算結果。左: モデル M01、中央: モデル M03、右: モデル NC (Igarashi et al. 2024)。上図の等高線はトムソン散乱に対する光学的厚さ。下図の白線は輻射流束の流線。

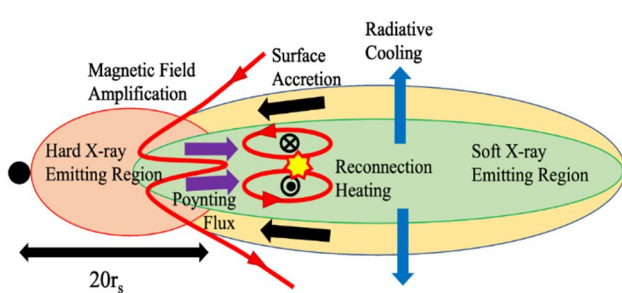


図 2 輻射磁気流体シミュレーション結果の模式図 (Igarashi et al. 2024)。赤い実線はポロイダル面内の磁力線。ブラックホール近傍の高温領域 (RIAF) からは硬 X 線が放射される。RIAF 境界で強められた磁場のエネルギーが動径方向外向きに輸送され、磁気リコネクションによってプラズマを加熱する。

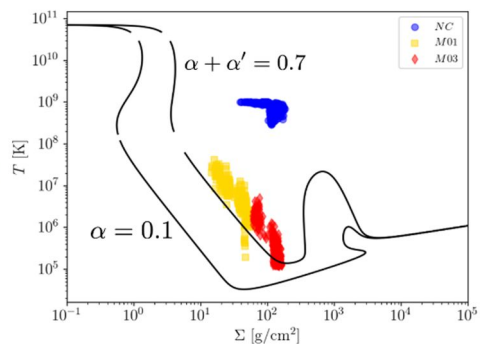


図 3 方位角磁場によって支えられた降着流の  $r=40r_s$  での熱平衡解 (実線) とシミュレーション結果 (Igarashi et al. 2024)。横軸は表面密度、縦軸は温度。点はシミュレーション結果 (黄: M01, 赤: M03, 青: NC)。

射冷却によって降着流が鉛直方向に収縮、磁束保存により方位角磁場が強まる。このため、この領域は方位角磁場による磁気圧で支えられ、円盤は幾何学的に薄い標準円盤には遷移せず方位角磁場によって支えられた降着円盤の定常解に近づく。図3の実線がこの定常解をあらわす (Igarashi et al. 2024)。表面密度  $<1 \text{ g/cm}^2$  の解が RIAF、 $>10^3 \text{ g/cm}^2$  の解が標準円盤とスリム円盤、その間を結ぶ実線が磁気圧優勢解。冷却領域のマクスウェルストレスから求めた角運動量輸送率  $\tau = 0.1$  の解は温度が低すぎてコンプトン冷却を考慮した場合のシミュレーション結果 (黄、赤) を説明できない。RIAF 境界の  $r=20r_s$  付近で強められた磁場のエネルギーが  $r=40r_s$  まで輸送されてから熱化していると考えて加熱率を  $\eta = 0.7$  と見積もるとシミュレーション結果を説明することができる。

(3) ブラックホールの回転の効果を調べるため、一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションを実施し、ブラックホールの回転速度が上がるにつれて、噴出するジェットの内容成分が輻射エネルギー優勢から磁気エネルギー優勢になることを示した。また、電子温度とイオン温度の違いを考慮した一般相対論的 2 温度磁気流体コードを構築した。これにより、電子温度を求めることが可能になり、シミュレーション結果から輻射スペクトルを計算して観測される輻射スペクトルと直接比較できるようになった。また、非相対論的な場合の電子・イオン 2 温度磁気流体コードを用いて活動銀河中心核ジェット伝播シミュレーションを行い、ジェットを包むコクーンの電波強度と周辺の熱的 X 線強度の違いが電子温度とイオン温度の差に起因することを明らかにした。

(4) 活動銀河中心核降着流の状態遷移を観測的に捉え、降着流やその周辺の物質の構造を明らかにすることを目的に、質量降着率が数年で激しく変化する 1 型活動銀河中心核の X 線と可視・紫外光の同時観測データの解析を進めた。その結果、光度がエディントン光度の約 1% を超える明るさで軟 X 線が卓越し、円盤周囲の電離吸収体が激しく時間変化することを見いだした。Changing-Look AGN NGC 3516 の 2 型の暗い時間帯における X 線-可視光同時モニタデータ解析を進め、細い Fe-K $\alpha$  輝線の有意な強度変動を捉え、連続光に対する時間遅延が  $\sim 10$  日と決定できた (Noda et al. 2023)。これは、広輝線が観測されない 2 型に遷移した時間帯にも、降着円盤に質量を供給する役割を果たす広輝線領域に物質が残り続けることを意味し、Changing-Look AGN の状態遷移の理解につながる重要な結果となった。加えて、X 線分光撮像衛星 XRISM の X 線 CCD カメラ Xtend の開発を進め、衛星熱真空試験において、衛星に搭載した状態で X 線 CCD カメラが良い性能を発揮できることを確認した。

(5) XRISM 衛星に搭載する分光器の開発を進め、単体試験において分光性能が十分であることを確認した。2023 年に XRISM 衛星の開発と打ち上げおよび初期運用を行い、定常運用に安定に移行し、初期成果の創出に向けて着実に観測が続けられている。その他、公開データを用いた観測的研究についても進展した。

(6) 将来の精密 X 線分光に向けて、X 線分光器単体の性能試験と検出器較正を行い、要求性能を満たすことを確認できた。また、次世代の精密 X 線分光器の読み出し方式の実証実験も行い、分光器の性能を最大限に引き出して、原子分子の分光に関する実験的な成果をあげることにも成功した。

(7) シミュレーション結果に基づく状態遷移時の輻射スペクトル計算は、本研究期間内に終わることができなかった。「富岳」を用いて実施中の高解像度の計算結果に基づいてスペクトル計算を実施し、XRISM 衛星等による観測と比較していきたい。

#### <引用文献>

- Noda, H., and Done, C., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 480, 2018, 3898-3906  
Machida, M., Nakamura, K.E., Matsumoto, R., *Publ. Astron. Soc. Japan* 58, 2006, 193-202  
Takahashi, H.R., Ohsuga, K., Kawashima, T., Sekiguchi, Y., *Astrophys. J.* 826, 2016, 23 (9pp)  
Kawashima, T., Ohsuga, K., Takahashi, H.R., *Astrophys. J.*, 949, 2023, 101 (30pp)  
Igarashi, T., Kato, Y., Takahashi, H.R., Ohsuga, K., Matsumoto, Y., Matsumoto, R., *Astrophys. J.* 902, 2020, 103 (15pp)  
Igarashi, T., Takahashi, H.R., Kawashima, T., Ohsuga, K., Matsumoto, Y., Matsumoto, R., *Astrophys. J.*, 2024 in press  
Noda, H., et al. *Astrophys. J.* 943, 2023, 63 (13pp)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計38件（うち査読付論文 37件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 29件）

1. 著者名 Igarashi, T., Takahashi, H.R., Kawashima, T., Ohsuga, K., Matsumoto, Y., Matsumoto, R.	4. 巻 -
2. 論文標題 Radiation MHD Simulations of Soft X-ray Emitting Regions in Changing Look AGN	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	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) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sakai Yusuke, Yamada Shinya, Sato Toshiki, Hayakawa Ryota, Higurashi Ryota, Kominato Nao	4. 巻 951
2. 論文標題 Richardson Lucy Deconvolution with a Spatially Variant Point-spread Function of Chandra: Supernova Remnant Cassiopeia A as an Example	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 59 (7pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acd9b3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tomohisa Kawashima, Ken Ohsuga, and Hiroyuki R. Takahashi	4. 巻 949
2. 論文標題 RAIKOU (来光): A General Relativistic, Multiwavelength Radiative Transfer Code	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 101 (30pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acc94a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kouki Nakamura, Takahiro Miyoshi, Chiho Nonaka, Hiroyuki R. Takahashi	4. 巻 83
2. 論文標題 Relativistic resistive magneto-hydrodynamics code for high-energy heavy-ion collisions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 229 (17pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-023-11343-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Noda Hirofumi, Mineta Taisei, Minezaki Takeo, Sameshima Hiroaki, Kokubo Mitsuru, Kawamuro Taiki, Yamada Satoshi, Horiuchi Takashi, Matsumoto Hironori, Watanabe Makoto, Morihana Kumiko, Itoh Yoichi, Kawabata Koji S, Fukazawa Yasushi	4. 巻 943
2. 論文標題 Narrow Fe-K Reverberation Mapping Unveils the Deactivated Broad-line Region in a Changing-look Active Galactic Nucleus	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 63 (13pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aca963	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Taichi Igarashi, Yoshiaki Kato, Hiroyuki, R. Takahashi, Ken Ohsuga, Yosuke Matsumoto, Ryoji Matsumoto	4. 巻 362
2. 論文標題 Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Soft X-ray Emitting Regions in Active Galactic Nuclei	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Astronomical Union	6. 最初と最後の頁 76-81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1743921322001557	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 Pflugradt Janek, Ichikawa Kohei, Akiyama Masayuki, Kokubo Mitsuru, Vijarnwannaluk Bovornpractch, Noda Hirofumi, Chen Xiaoyang	4. 巻 938
2. 論文標題 Finding of a Population of Active Galactic Nuclei Showing a Significant Luminosity Decline in the Past $\sim 10^3$ - $10^4$ yr	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 75 (15pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac8ff3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kimura Shigeo S., Toma Kenji, Noda Hirofumi, Hada Kazuhiro	4. 巻 937
2. 論文標題 Magnetic Reconnection in Black Hole Magnetospheres: Lepton Loading into Jets, Superluminal Radio Blobs, and Multiwavelength Flares	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L34 (10pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac8d5a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Mori Koji, Tomida Hiroshi, Nakajima Hiroshi, Okajima Takashi, Noda Hirofumi, et al.	4. 巻 12181
2. 論文標題 Xtend, the soft x-ray imaging telescope for the x-ray imaging and spectroscopy mission (XRISM)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 SPIE proceedings Space Telescopes and Instrumentation 2022: Ultraviolet to Gamma Ray	6. 最初と最後の頁 121811T
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2626894	査読の有無 無
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 Aoto Utsumi, Ken Ohsuga, Hiroyuki R. Takahashi, Yuta Asahina	4. 巻 935
2. 論文標題 Component of Energy Flow from Supercritical Accretion Disks Around Rotating Stellar Mass Black Holes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 26 (11pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac7eb8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hayakawa Ryota. Yamada Shinya. Suda Hirotaka. Ichinohe Yuto. Higurashi Ryota. Sakemi Haruka. Machida Mami. Ohmura Takumi. Katsuda Satoru. Uchiyama Hideki. Sato Toshiki. Akamatsu Hiroki. Axelsson Magnus	4. 巻 74
2. 論文標題 X-ray hot spots in the eastern ear of the supernova remnant W50 and the microquasar SS433 system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 510-520
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuh Tsunetoe, Shin Mineshige, Tomohisa Kawashima, Ken Ohsuga, Kazunori Akiyama, Hiroyuki R. Takahashi	4. 巻 931
2. 論文標題 Investigating the Disk-Jet Structure in M87 through Flux Separation in the Linear and Circular Polarization Images	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 25 (26pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac66dd	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -



1. 著者名 Daikang Yan, Joel C. Weber, Kelsey M. Morgan, Abigail L. Wessels, Toshiyuki Azuma, Shinya Yamada, Nancy Paul, Guojie Bian, et al.	4. 巻 31
2. 論文標題 Transition-Edge Sensor Optimization for Hard X-ray Applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	6. 最初と最後の頁 2100505 (5pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2021.3059972	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 Chibueze, James O., Sakemi, H., Ohmura, T., Machida, M., Akamatsu, H., Akahori, T., Nakanishi, H., Parekh, V., van Rooyen, R., Takeuchi, T. T.	4. 巻 593
2. 論文標題 Jets from MRC 0600-399 bent by magnetic fields in the cluster Abell 3376	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 47-50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-021-03434-1	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 Ohmura T. Ono K. Sakemi H. Tashima Y. Omae R. Machida M.	4. 巻 910
2. 論文標題 Continuous Jets and Backflow Models for the Formation of W50/SS 433 in Magnetohydrodynamics Simulations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 149 (13pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abe5a1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryo Nakata, Kiyoshi Hayashida, Hirofumi Noda, Tomokage Yoneyama, Hironori Matsumoto, Masatoshi Imanishi	4. 巻 73
2. 論文標題 Spatially resolved X-ray spectroscopy of the archetype type 2 active galactic nucleus NGC 1068 with Chandra	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 338-349
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -



1. 著者名 S. Yamada et al.	4. 巻 92
2. 論文標題 Broadband high-energy resolution hard x-ray spectroscopy using transition edge sensors at SPring-8	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 013103, 15pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0020642	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 T. Igarashi, Y.Kato, H. R. Takahashi, K. Ohsuga, Y.Matsumoto, R. Matsumoto	4. 巻 902
2. 論文標題 Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Sub-Eddington Accretion Flows in AGN: Origin of Soft X-ray Excess and Rapid Time Variabilities	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 103 (15pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abb592	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuta Asahina, Hiroyuki R. Takahashi, Ken Ohsuga	4. 巻 901
2. 論文標題 A Numerical Scheme for General Relativistic Radiation Magnetohydrodynamics Based on Solving a Grid-based Boltzmann Equation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 96-116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abaf51	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Y. Nakashima, S.Yamada(7/17名) et al.	4. 巻 117
2. 論文標題 Low-noise microwave SQUID multiplexed readout of 38 x-ray transition-edge sensor microcalorimeters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 122601, 5pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0016333	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180件（うち招待講演 29件 / うち国際学会 61件）

1. 発表者名 松本洋介
2. 発表標題 相対論的磁気流体計算における反復解法の機械学習による初期値推測
3. 学会等名 日本天文学会2024年春季年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 五十嵐太一、松元亮治
2. 発表標題 状態遷移中の活動銀河核における反転磁場合体による円盤加熱
3. 学会等名 日本天文学会2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松元亮治
2. 発表標題 宇宙プラズマの活動性：研究の現状と展望
3. 学会等名 【MHD2023】宇宙プラズマの活動性～天体形成から高エネルギー現象まで～（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Machida, M., Kawashima, T., Kudoh, Y., Matsumoto, Y., Matsumoto R.
2. 発表標題 Importance of magnetic spiral arms in black hole accretion disk
3. 学会等名 CCP2023 - 34th IUPAP Conference on Computational Physics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松元亮治
2. 発表標題 ハード・ソフト状態遷移中のブラックホール降着流における逆転磁場加熱
3. 学会等名 山田研究会「宇宙における降着現象 ~活動性・多様性の源~」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野田博文 on behalf of XRISM/Xtend team
2. 発表標題 X線分光撮像衛星XRISM搭載軟X線撮像装置Xtendの開発の状況(11)
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野田博文、峯田大靖、峰崎岳夫、鮫島寛明、小久保充、川室太希、山田智史、堀内貴史、松本浩典、渡邊誠、森鼻久美子、伊藤洋一、川端弘治、深沢泰司
2. 発表標題 Fe-K 反響マッピング法を用いたNGC 3516活動銀河核構造の研究(3)
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mami Machida, Tomohisa Kawashima, Yuki Kudoh, Yosuke Matsumoto, Ryoji Matsumoto
2. 発表標題 Magnetic reconnection in accretion disk spiral arms
3. 学会等名 IRCC-AFP-Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kawashima, K. Ohsuga, H.R. Takahashi
2. 発表標題 Images and Spectra of Black hole Accretion Flows Computed by GRRT Code RAIKOU
3. 学会等名 6th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 五十嵐太一
2. 発表標題 Global Radiation MHD Simulations of the Formation of Soft X-ray Emitting Region in Changing Look AGN
3. 学会等名 The 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM9) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Matsumoto
2. 発表標題 Magnetohydrodynamic Simulations of Astrophysical Jets and Accretion Disks
3. 学会等名 Plasma Explosions in the Universe (PEU2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kawashima, K. Asano, K. Ohsuga, H.R. Takahashi
2. 発表標題 Images, Radiation and Neutrino Spectra of Black Hole Accretion Flows Computed by GRRT Code RAIKOU
3. 学会等名 The 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 R. Matsumoto, T. Igarashi, H. R. Takahashi, K. Ohsuga, Y. Matsumoto
2 . 発表標題 Global Three-dimensional Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Changing Look Active Galactic Nuclei
3 . 学会等名 33rd IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Koji Mori, Hirofumi Noda, on behalf of the XRISM/Xtend team
2 . 発表標題 Xtend, the soft X-ray imaging telescope for the X-ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM)
3 . 学会等名 SPIE2022 (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Taichi Igarashi, Yosuke Matsumoto, Ryoji Matsumoto, Yoshiaki Kato, Hiroyuki Takahashi, Ken Ohsuga
2 . 発表標題 Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of sub-Eddington accretion flows in AGN
3 . 学会等名 44th COSPAR Scientific Assembly - COSPAR 2022 (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Ryoji Matsumoto, Mami Machida, Tomohisa Kawashima, Taichi Igarashi, Yosuke Matsumoto
2 . 発表標題 Magnetic Reconnection in Black Hole Accretion Disks
3 . 学会等名 Magnetic Reconnection Workshop 2022 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 町田真美, 大村匠
2. 発表標題 富岳を用いたAGNジェット伝搬の2温度磁気流体シミュレーション
3. 学会等名 先駆的科学計算に関するフォーラム2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 町田 真美
2. 発表標題 ブラックホール天体の活動性の起源としてのプラズマの諸性質
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会 シンポジウム「プラズマサイエンスの新展開」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 五十嵐太一, 松元亮治, 加藤成晃, 高橋博之, 松本洋介, 大須賀健
2. 発表標題 逆コンプトン散乱による冷却を考慮したセイファート銀河における軟X線放射領域の輻射磁気流体シミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野田博文
2. 発表標題 XRISMの開発状況と超巨大ブラックホールサイエンスの検討
3. 学会等名 超巨大ブラックホール研究会: その実態・影響・起源の全貌解明に向けて
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryoji Matsumoto
2. 発表標題 Global MHD Simulations of Black Hole Accretion Flows
3. 学会等名 First International Conference on Computational Science & Data Analytics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yosuke Matsumoto
2. 発表標題 Plasma first-principle simulations for elucidating particle accelerations in the exascale computing era
3. 学会等名 The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taichi Igarashi, Yoshiaki Kato, Hiroyuki R. Takahashi, Ken Ohsuga, Yosuke Matsumoto, Ryoji Matsumoto
2. 発表標題 Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Soft X-ray Emitting Regions in Active Galactic Nuclei
3. 学会等名 The IAU Symposium 362 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田真也
2. 発表標題 Status of the X-ray microcalorimeter application : from molecules to exotic atoms
3. 学会等名 r-EMU Workshop 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Yosuke Matsumoto
2. 発表標題 Development of a particle-in-cell simulation code for elucidating cosmic-ray accelerations in the exa-scale computing era
3. 学会等名 AAPPs-DPP2021 as on-line Conference 5th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taichi Igarashi, Yoshiaki Kato, Hiroyuki R. Takahashi, Ken Ohsuga, Yosuke Matsumoto, Ryoji Matsumoto
2. 発表標題 Oscillations of the Soft X-ray Emitting Region of AGN Accretion Disks.
3. 学会等名 AAPPs-DPP2021 as on-line Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 峯田大靖、野田博文、峰崎岳夫、鮫島寛明、小久保充、深沢泰司、林田清、松本浩典
2. 発表標題 Fe-K 輝線反響マッピングを用いたNGC 3516活動銀河核構造の研究(2)
3. 学会等名 日本天文学会2021年度秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryoji Matsumoto, Taichi Igarashi, Yoshiaki Kato, Hiroyuki, R. Takahashi, Ken Ohsuga, Yosuke Matsumoto
2. 発表標題 Global Three-Dimensional Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of State Transitions in Black Hole Accretion Flows
3. 学会等名 XXXII IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田真也
2. 発表標題 X-ray and gamma-ray technologies in space as applied to ground-based technology
3. 学会等名 第17回AMO討論会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石崎欣尚、山田真也、他50名
2. 発表標題 X線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Resolve の開発の現状 VI
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hirofumi Noda, Chris Done, Kazuo Makishima
2. 発表標題 State Transition of SMBH Accretion Studied with X-ray and UV Monitoring
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hirofumi Noda
2. 発表標題 X-ray Studies of Supermassive Black Hole Accretion State Transition
3. 学会等名 Sandwich workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taichi Igarashi, Yoshiaki Kato, Hiroyuki R. Takahashi, Ken Ohsuga, Yosuke Matsumoto, RyojiMatsumoto
2. 発表標題 Radiation magnetohydrodynamic simulations of black hole accretion flows during hard-to-soft state transitions
3. 学会等名 Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hirofumi Noda
2. 発表標題 X-ray Studies of Supermassive Black Holes and Jetted AGNs with XRISM
3. 学会等名 Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mami MACHIDA, Tomohisa KAWASHIMA, Yuki KUDOH, Yosuke MATSUMOTO, RyojiMATSUMOTO
2. 発表標題 3D MHD Simulation to reveal angular momentum transport in an accretion disk
3. 学会等名 Black hole astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takumi Ohmura, Mami Machida
2. 発表標題 Two-temperature MHD simulations of extragalactic jets
3. 学会等名 Black hole astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroyuki R. Takahashi, K. Ohsuga, T. Kawashima, M. Nomura, Y. Asahina, A. Utsumi, A. Inoue
2. 発表標題 Relativistic radiation magnetohydrodynamic simulations of accretion disks
3. 学会等名 Black hole astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohisa KAWASHIMA, Ken. Ohsuga, Hiroyuki R. Takahashi
2. 発表標題 A general relativistic, multi-wavelength study of accretion flow and relativistic jet
3. 学会等名 Black hole astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hirofumi Noda
2. 発表標題 Constraining AGN Physics from X-ray Observations
3. 学会等名 Probing the Extragalactic Universe with High and Very High Energy Sources (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taichi Igarashi, Y. Kato, H.R. Takahashi, K. Ohsuga, R. Matumoto
2. 発表標題 Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Time Variabilities of Changing Look Active Galactic Nuclei
3. 学会等名 AAPPs-DPP2020, 4th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野田 博文、上田佳宏、海老沢研、寺島雄一、萩野浩 一、林田清、深沢泰司
2. 発表標題 X線分光撮像衛星XRISMによる超巨大ブラックホールの研究
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 町田真美、川島朋尚、工藤祐己、松本洋介、松元亮治
2. 発表標題 MHDシミュレーションによる降着円盤の渦状高エントロピー構造の形成
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>agndisk2020, Chiba University  <a href="https://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/agndisk2020/">https://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/agndisk2020/</a></p>
---

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	松本 洋介  (Matsumoto Yosuke)  (20397475)	千葉大学・大学院理学研究院・准教授    (12501)	

## 6. 研究組織 (つづき)

	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	山田 真也 (Yamada Shinya)  (40612073)	立教大学・理学部・准教授  (32686)	
研究分担者	町田 真美 (Machida Mami)  (50455200)	国立天文台・科学研究部・准教授  (62616)	
研究分担者	野田 博文 (Noda Hirofumi)  (50725900)	大阪大学・理学研究科・助教  (14401)	
研究分担者	高橋 博之 (Takahashi Hiroyuki)  (80613405)	駒澤大学・総合教育研究部・講師  (32617)	

	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
研究協力者	大須賀 健 (Ohsuga Ken)		
研究協力者	川島 朋尚 (Kawashima Tomohisa)		
研究協力者	朝比奈 雄太 (Asahina Yuta)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	中村 賢仁  (Nakamura Kenji)		
研究協力者	五十嵐 太一  (Igarashi Taichi)		
研究協力者	大村 匠  (Ohmura Takumi)		
研究協力者	根来 均  (Negoro Hitoshi)		
研究協力者	久保田 あや  (Kubota Aya)		

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			
英国	Durham University			
オランダ	SRON			
ナイジェリア	North West University			