

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04014

研究課題名（和文）新世代サーベイ観測による巨大ブラックホール進化の研究

研究課題名（英文）Evolution of super massive black holes studied with new generation survey observations

研究代表者

寺島 雄一（Terashima, Yuichi）

愛媛大学・理工学研究科（理学系）・教授

研究者番号：20392813

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、巨大ブラックホールの進化を理解するさいに鍵となる天体である、隠された活動銀河核（Active Galactic Nuclei）と激しく質量降着の起こっている AGN の探索を、新世代の多波長サーベイデータを用いて行い、その性質を明らかにした。特にeROSITA衛星によるX線サーベイとWISE衛星による赤外線サーベイを組み合わせた、大量の塵に覆われた銀河サンプルの構築と統計的性質の調査、XMM-Newton衛星のサーベイカタログを用いた軟X線と紫外線で明るく、激しい質量降着を起こしている巨大ブラックホールサンプルの構築とその統計的性質の調査を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

銀河の中心に存在する巨大質量ブラックホールは、宇宙の様々なスケールにおいて周辺に大きな影響を与えていることがわかってきている。そのため、宇宙の進化を理解するには、巨大ブラックホールの性質と進化を網羅的に理解することが必須になっている。本研究では、巨大ブラックホールの進化を理解するさいに鍵となる天体である、大量の塵に隠された活動銀河核（Active Galactic Nuclei）と激しく質量降着の起こっている AGN の大規模サンプルを構築しその統計的性質を明らかにした。これらは、巨大ブラックホールの形成過程の理解する基礎になる重要なものである。

研究成果の概要（英文）： We searched for obscured active galactic nuclei (AGNs) and highly accreting AGNs, which are key populations to understand the evolution of super massive black holes, by using new generation multi-wavelength surveys. We selected dust obscured galaxies by combining the eROSITA X-ray survey and WISE infrared survey and studied their statistical properties. We also created a sample of soft-Xray and ultraviolet bright AGNs, which are likely to be highly accreting AGNs, and summarized their statistical properties.

研究分野：X線天文学

キーワード：ブラックホール 銀河 活動銀河核 X線 赤外線

## 1. 研究開始当初の背景

銀河の中心に存在する巨大質量ブラックホールは、宇宙の様々なスケールにおいて周辺に大きな影響を与えていることがわかってきている。そのため、宇宙の進化を理解するには、巨大ブラックホールの性質と進化を網羅的に理解することが必須になっている。巨大ブラックホールの進化を理解するさいに鍵となる天体は、隠された活動銀河核(Active Galactic Nuclei; AGN) や激しく質量降着の起こっている(=質量を急激に獲得しつつある)AGNである。

2019年7月に打ち上げに成功したX線サーベイ衛星eROSITA や「すばる」望遠鏡超広視野主焦点カメラ(Hyper Suprime-Cam; HSC)、過去20年以上にわたるさまざまなX線や紫外線のアーカイブ観測データを用いて、重要な種族の大規模サンプルを構築し、その統計的な性質を明らかにすることで、それらの天体の巨大ブラックホール進化における位置付けを理解することが重要である。

## 2. 研究の目的

新世代サーベイ観測と、過去の大規模アーカイブデータを組み合わせることで、隠されたAGN種族と、激しい質量降着が起こっているAGNの探索を行い、その統計的な性質を明らかにする。

## 3. 研究の方法

隠されたAGN種族の探索にはX線と赤外線データの組み合わせが有効である。X線(特に硬X線)は透過力が高く、大量の物質に隠された天体であっても、X線放射を検出することができる。また、大量の塵に隠された天体は、塵が放射を受けることで温まり赤外線を放射する。この組み合わせにより塵に隠されたAGNサンプルを構築した。

激しい質量降着が起こっているAGNは、硬X線の比べ、相対的に軟X線や紫外線で明るいことが知られている。そこで、軟X線でのスペクトルの傾きが急(高エネルギー側に向かって急激に暗くなる)天体や、紫外線がX線に比べて相対的に明るい天体を選び、サンプルを構築した。

## 4. 研究成果

### (1) 塵に覆われたAGN

eROSITA衛星、すばるHSC、WISE衛星のデータを用いて極端に赤外線で明るい極大光度赤外線銀河を発見し、その性質を報告した。1天体は、可視[OIII]輝線の形状から大規模なアウトフロー(噴出流)を起こしていることがわかり、銀河と巨大質量ブラックホール間の相互作用の現場である可能性について議論した。また、別の天体は赤外線ですべて明るい( $10^{14}$ 太陽光度)、Extremely luminous infrared galaxy (ELIRG)とよばれる稀な種族であった。これらの種族は、大面積のサーベイ観測によって発見が可能になってものである。

次に、赤外線ですべて明るい銀河種族のX線での性質を統計的に整理し報告した。eROSITA衛星による140平方度のサーベイ領域とWISE衛星による中間赤外線( $22\ \mu\text{m}$ )を組み合わせ、X線で検出された692天体と、X線で検出できなかった7088天体からなる赤外線銀河のサンプルを構築し統計的な性質をまとめた。X線で検出できた天体の82%は大量の塵をともなったAGNと考えられる。また、67%は赤外線光度が $10^{12}$ 太陽光度以上、24%は赤外線光度が $10^{13}$ 太陽光度以上という、ひじょうに光度が高い天体を効率的に選択できた。

さらに、赤外線ですべて明るいDust Obscured Galaxyとよばれる種族のうち、特に青い可視光の色を持つ特異な天体の可視分光の結果について発表した。分光の結果、幅の広いCIV輝線が強く見られ、可視光で青く見える原因の一部であることがわかった。また、この結果は、多くの塵を含む天体でありながら、幅の広い輝線が存在することを示しており、従来のAGNの統一モデルでは解釈することが困難な興味深い天体であるといえる。また、質量降着率を求めたところ、すべての天体で高い降着率(光度がエディントン光度を超えている)であり、これらの種族が質量の急成長が起こっている、巨大ブラックホール進化の重要な段階にあることがわかった。

(2) XMM-Newton衛星によるX線とWISE衛星による中間赤外線データを用いて、大量の物質に隠された活動銀河核の系統的探査を行なった。その中で、軟X線では明るく視線上の物質による吸収の兆候が見られないにもかかわらず、硬X線(5 keV)以上で強く吸収を受けている、きわめて特異なAGNを発見した。さまざまな傍証から、これらの天体は質量降着率が高いことが示唆された。このような巨大ブラックホール進化に重要な局面にある天体は、硬X線で比較的暗いた

め、従来の観測で見つけられてこなかったものが、今回の大規模な探索によりはじめて見つかったと考えられる。

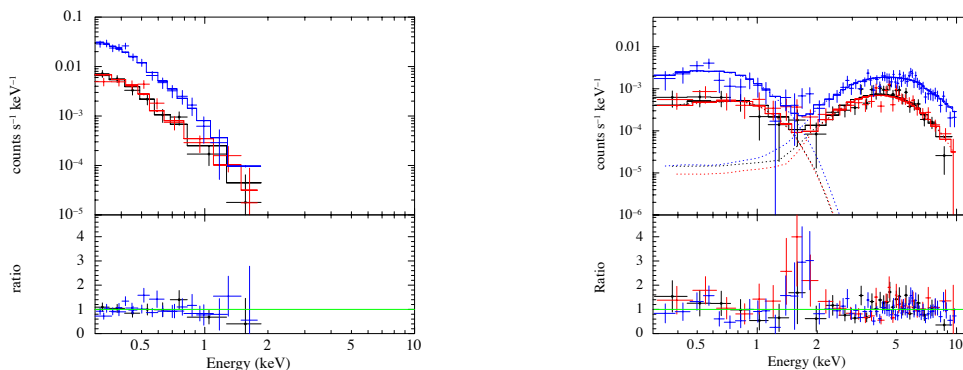
(3) XMM-Newton 衛星の X 線と紫外線データを組み合わせ、軟 X 線と紫外線で明るく、激しく質量降着を起こしており質量が急激に成長している AGN のサンプルを作成した。XMM-Newton 衛星の Serendipitous source catalogue を用いて、軟 X 線(0.2-0.5 keV と 0.5-1.0 keV)でのハードネス比が小さいものを選択し、これまでに詳細な解析が報告されていない 37 天体の X 線スペクトルを解析し、さまざまな特徴を持つ AGN を発見した。

通常の AGN の X 線スペクトルは、べき(光子指数)が 1.8 程度のべき関数が支配的であり軟 X 線で 0.1-0.2 keV 程度の黒体放射で近似できる成分が見られることが多い。今回選択した天体の中には、軟 X 線でのべきが 3-5 と極端に急なもの、黒体放射成分がべき関数成分に比べて相対的にひじょうに強いもの、軟 X 線では吸収の兆候がなく急なスペクトルをしているにもかかわらず硬 X 線で顕著な吸収を受けたもの、といったこれまでに知られていなかった特異なスペクトルを示す AGN を多く発見した。特に軟 X 線でべき 5 という極端に急なスペクトルを示した天体は、検出されて 3 年後以降は全く X 線放射が検出されないという、突発天体的な性質も示した。

他にも、X 線強度が大きく変動(およそ 10 倍かそれ以上)した AGN のスペクトル変化の系統的解析も行った。これらの結果を総合すると、X 線スペクトル形状の極端な変動は、突発天体的なきわめて大きな強度変動を示す場合に見られる傾向があることがわかった。

さらに、紫外線と X 線の明るさの比較を行い、質量降着率が大きい場合に見られるように、紫外線が相対的に明るいことも明らかにした。これにより、質量降着率が大きい AGN を効率的に選択できていることがわかった。

(1)(2)(3)の結果から、巨大ブラックホールの進化(質量成長)を理解するために重要な、質量降着率の大きい AGN の系統的探索には、吸収を受けた種族については X 線と赤外線、吸収をあまり受けていない種族については紫外線と軟 X 線による大規模サーベイを行うことが、効率的であると考えられる。



図(左) J121035.0-393123 の X 線スペクトル。軟 X 線スペクトルはべき 5.3 の急なべき関数であらわされる。2000 年の観測で検出され、2003 年から 2015 年の観測では検出されなかった突発天体の可能性が高い AGN。(右) J221425.6-165947 の X 線スペクトル軟 X 線で明るいにもかかわらず、2 keV 以上では  $9 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$  の吸収を受けた特異な AGN。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Toba Yoshiki, Brusa Marcella, Liu Teng, Buchner Johannes, Terashima Yuichi, Urrutia Tanya, Salvato Mara, Akiyama Masayuki, Arcodia Riccardo, Goulding Andy D., Higuchi Yuichi, Inoue Kaiki T., Kawaguchi Toshihiro, Lamer Georg, Merloni Andrea, Nagao Tohru, Ueda Yoshihiro, Nandra Kirpal	4. 巻 649
2. 論文標題 The eROSITA Final Equatorial-Depth Survey (eFEDS). An X-ray-bright, extremely luminous infrared galaxy at $z = 1.87$	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 L11 (9pp.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202140317	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 Niida, M. et al.	4. 巻 904
2. 論文標題 The Faint End of the Quasar Luminosity Function at $z \sim 5$ from the Subaru Hyper Suprime-Cam Survey	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id.89 (14pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abbe11	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 Tashiro, M.S. et al.	4. 巻 11444
2. 論文標題 Status of x-ray imaging and spectroscopy mission (XRISM)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 11pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2565812	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 該当する

1. 著者名 Loewenstein, M. et al.	4. 巻 11444
2. 論文標題 The XRISM science data center: optimizing the scientific return from a unique x-ray observatory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 16pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560840	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 該当する

1. 著者名 Terada, Y. et al.	4. 巻 11444
2. 論文標題 Detail plans and preparations for the science operations of the XRISM mission	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 20pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560861	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 該当する

1. 著者名 Kameno Seiji, Sawada-Satoh Satoko, Impellizzeri C. M. Violette, Espada Daniel, Nakai Naomasa, Sugai Hajime, Terashima Yuichi, Kohno Kotaro, Lee Minju, Mart?n Sergio	4. 巻 895
2. 論文標題 A Massive Molecular Torus inside a Gas-poor Circumnuclear Disk in the Radio Galaxy NGC 1052 Discovered with ALMA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 73 ~ 73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab8bd6	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 Terada Yukikatsu, et al.	4. 巻 7
2. 論文標題 Detailed design of the science operations for the XRISM mission	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 42pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.7.3.037001	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 Brusa M., Urrutia T., Toba Y., Buchner J., Li J.-Y., Liu T., Perna M., Salvato M., Merloni A., Musiimenta B., Nandra K., Wolf J., Arcodia R., Dwelly T., Georgakakis A., Goulding A., Matsuoka Y., Nagao T., Schramm M., Silverman J. D., Terashima Y.	4. 巻 661
2. 論文標題 The eROSITA Final Equatorial-Depth Survey (eFEDS)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A9 ~ A9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202141092	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 Toba Y., et al.	4. 巻 661
2. 論文標題 The eROSITA Final Equatorial-Depth Survey (eFEDS)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A15 ~ A15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202141547	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 Mori K., et al.	4. 巻 12181
2. 論文標題 A broadband x-ray imaging spectroscopy in the 2030s: the FORCE mission	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 12pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2628772	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 該当する

1. 著者名 Eguchi S., et al.	4. 巻 12181
2. 論文標題 Xappl: software framework for the XRISM pre-pipeline	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 7pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2629316	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 該当する

1. 著者名 Noboriguchi Akatoki, Nagao Tohru, Toba Yoshiki, Ichikawa Kohei, Kajisawa Masaru, Kato Nanako, Kawaguchi Toshihiro, Matsuhara Hideo, Matsuoka Yoshiki, Onishi Kyoko, Onoue Masafusa, Tamada Nozomu, Terao Koki, Terashima Yuichi, Ueda Yoshihiro, Yamashita Takuji	4. 巻 941
2. 論文標題 Extreme Nature of Four Blue-excess Dust-obscured Galaxies Revealed by Optical Spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 195 ~ 195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aca403	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 Kameno Seiji, Sawada-Satoh Satoko, Impellizzeri C. M. Violette, Kohno Kotaro, Mart'n Sergio, Espada Daniel, Nakai Naomasa, Sugai Hajime, Terashima Yuichi, Lee Minju M., Kawakatu Nozomu	4. 巻 944
2. 論文標題 Probing the Jet-Torus Interaction in the Radio Galaxy NGC 1052 by Sulfur-bearing Molecules	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 156 ~ 156
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acb499	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 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 13件)

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・XRISM extragalactic compact team
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 松本浩典・山崎典子・満田和久・篠崎慶亮・前田良知・粟木久光・坪井陽子・江副祐一郎・山口弘悦・佐藤浩介・中嶋 大・深沢泰司・大橋隆哉・上田佳宏・寺島雄一・太田直美・馬場 彩・海老沢研・寺田幸功・鶴剛・常深 博
2. 発表標題 X線天文衛星Athena計画の現状
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 中澤知洋ほか
2. 発表標題 広帯域X線の高感度観測衛星 FORCE : ミッション提案とサイエンス目的の深化
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺田幸功ほか
2. 発表標題 XRISM衛星科学運用に向けた準備進捗2020年度
3. 学会等名 第21回宇宙科学シンポジウム（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本浩典ほか
2. 発表標題 X線天文衛星計画Athenaの現状
3. 学会等名 第21回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中澤知洋ほか
2. 発表標題 広帯域X線の高感度観測衛星 FORCE：2020年度のミッション部および衛星システム検討の進化
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森 浩二ほか
2. 発表標題 軟X線から硬X線の広帯域を高感度で撮像分光する小型衛星計画FORCEの現状(1)
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会（国際学会）
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 寺島雄一ほか
2. 発表標題 軟X線で明るいAGNの新しいサンプルの構築とそのX線スペクトル
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 滝沢風佳・寺島雄一
2. 発表標題 軟X線強度が大きく変化したAGNのX線スペクトル変動
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森 浩二ほか
2. 発表標題 軟X線から硬X線の広帯域を高感度で撮像分光する衛星計画 FORCE の現状(14)
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中澤知洋ほか
2. 発表標題 広帯域X線の高感度観測衛星 FORCE : 2022年秋におけるミッション提案の現状
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Terashima, Y
2. 発表標題 Soft X-ray bright AGNs selected from serendipitous XMM-Newton sources
3. 学会等名 COSPAR 2022 44th Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Terashima, Y.
2. 発表標題 Soft X-ray bright AGNs selected from serendipitous XMM-Newton sources
3. 学会等名 What drives the growth of black holes (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mori, K., et al.
2. 発表標題 A broadband x-ray imaging spectroscopy in the 2030s: the FORCE mission
3. 学会等名 SPIE Space Telescopes and Instrumentation 2022: Ultraviolet to Gamma Ray (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 米山友景ほか
2. 発表標題 X線分光撮像衛星 XRISM の科学運用準備の現状 (2)
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 林克洋ほか
2. 発表標題 X線分光撮像衛星 XRISM の科学運用に向けての模擬試験
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山田智史 ほか
2. 発表標題 X線分光撮像衛星 XRISM の観測データ処理ツールの開発状況
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森浩二ほか
2. 発表標題 軟X線から硬X線の広帯域を高感度で撮像分光する衛星計画 FORCE の現状 (15)
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会（国際学会）
4. 発表年 2023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
---------	---------