

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：62616

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2018～2021

課題番号：18KK0090

研究課題名（和文）地球規模電波望遠鏡ネットワークで挑む巨大ブラックホールジェット生成機構

研究課題名（英文）Revealing the formation of relativistic jets in supermassive black holes using global VLBI networks

研究代表者

秦 和弘（Hada, Kazuhiro）

国立天文台・水沢VLBI観測所・助教

研究者番号：60724458

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,200,000円

研究成果の概要（和文）：巨大ブラックホールから噴出するジェットの発生機構の解明は天文学における最難問の1つである。本研究では、日本・韓国・中国を含む東アジアおよびイタリアと共同で地球規模の電波望遠鏡ネットワークを形成し、M87をはじめとする巨大ブラックホール天体のジェット発生領域を高い視力で詳しく高頻度モニター観測した。その結果、ブラックホールからわずか20倍程度の重力半径で超光速運動を検出するなど、これまで考えられていたよりも大きな初速度を示唆する観測結果を得た。本研究結果は、ジェットの発生メカニズムにスピンや磁場が関与していることを強く示すものであり、ブラックホールの多様な活動性の理解を前進させるものとなった。

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ブラックホールは宇宙で最もミステリアスな天体であり、その姿や性質の解明には極めて高い視力を持った電波望遠鏡による観測が重要である。本研究では日本を含む東アジアや欧州と協力し、地球規模の電波望遠鏡ネットワークを形成してブラックホールジェットの発生メカニズムに新たな知見をもたらすなど、宇宙最大の謎の1つに迫る学術的意義の大きな研究成果を得た。また研究期間中の大部分が世界的なパンデミックに見舞われたが、そうした状況においても宇宙の謎の解明という人類共通の目標に向かって世界各国の研究者が一致団結して知のフロンティアを広げることができたことは社会的にも大変意義あるものとなった。

研究成果の概要（英文）：Elucidating the generation mechanism of jets ejected from supermassive black holes is one of the most difficult questions in astronomy. In this study, we formed a global radio telescope network jointly with East Asia including Japan, South Korea, China, and Italy, and densely monitored some nearby powerful jet sources such as M87. We obtained results suggesting a larger initial velocity than previously thought, such as detecting superluminal motion of the jet within about 20 gravitational radii from the central black hole. This implies that a black hole spin and magnetic fields play a key role in generating powerful jets, and the study overall advances the understanding of the diverse activities of supermassive black holes.

研究分野：電波天文学

キーワード：電波天文学 ブラックホール ジェット VLBI 活動銀河核

## 1. 研究開始当初の背景

「活動銀河核からの相対論的ジェットはいかにして光速近くまで加速され、細く絞込まれるのか？」これが本研究課題の核心をなす問いであり、現代天文学において約半世紀に渡る難問である。2000年代からの数値実験の進展により、理論的には「磁場駆動型モデル」が最有力候補として注目されてきた(eg, Komissarov 2009)。本モデルによると、ブラックホール(BH)近傍で増幅された磁場がジェットを駆動し、徐々に運動エネルギーに転換することで、BH近傍約 $z \sim 10-10000$  シュバルツシルト半径( $R_s$ )の距離にかけて流れの加速と収束が始まると言われている。よってあらゆる装置の中で最高分解能を誇るVLBIでこの領域を直接撮像し、その形状や運動を精密測定することが生成機構解明に向けて重要である。

このような状況において、2010年代からはEvent Horizon Telescope (EHT)など新しいVLBI観測網が登場し、ジェット観測はホライズンスケールでの直接探査が本格化しつつある。とりわけ最近傍の活動銀河ジェットM87ではここ数年で「収束形状」の探査が飛躍的に進み、磁場駆動モデルを支持する観測結果が得られ始めている(Hada et al. 2016)。

それにもかかわらず、収束と並び鍵を握るジェット「加速領域」に関する観測的理解は未だ進んでおらず、理論との直接比較には至っていない。その最大の原因は、「数桁の空間スケールに渡る加速領域を撮影できるだけの感度と画質」を備え、かつ「相対論的運動を正確に追尾できるだけの高頻度・占有的なモニター」が可能なVLBI観測網が存在しなかったからである。

## 2. 研究の目的

本研究では最近傍かつ最重要BHジェット天体M87を対象に、ミリ波で行われる根元のEHT観測に合わせて、EATING VLBI ネットワーク (East Asia To Italy Nearly Global VLBI)でジェットの高頻度モニター観測を行い、EHTとEATING VLBIデータを相補的に活用することでジェット加速領域・機構の観測的解明を目指す。

## 3. 研究の方法

EATING VLBIとは、日本・韓国・中国・イタリアが現在共同で構築を進める新しいグローバルセンチ波VLBI観測網であり、東アジア及びイタリアに分布する電波望遠鏡群を統合し、高感度・高画質・機動性に優れた世界屈指のセンチ波VLBI観測網を実現するプロジェクトである。本研究ではEATING VLBIを用いてM87ジェット定常的に観測し、また特にEHTキャンペーンの時期には観測頻度を高めることで、ジェット速度場の高精度計測を試みた。

## 4. 研究成果

研究期間前半(2018年10月~2020年3月)については、イタリア・韓国・中国の共同研究者と協力し、M87のEATING VLBI観測を年間10回以上、コンスタントに実施することに成功した。これほど高頻度・定常的にモニター観測ができたのはグローバル基線を持つVLBIとしては世界初の成果であった。EATINGデータの解析は相関処理や位相・振幅のキャリブレーションで困難を極めたが、研究代表者はボローニャ電波天文学研究所及び上海天文台、新疆天文台に滞在し、共同研究者と一緒にデータの慎重な分析を進めることで克服し、M87ジェット根元のマップを初めて取得することに成功した。一方EHTは当初予定されていた2019年3月、2020年3月の観測が中止になるなどこちらも不運が続いたが、本研究に先立ち2017年に取得していたM87のデータについて、BHシャドウ撮影論文を出版した。秦・田崎は国際チーム主要メンバーとして貢献し、スパースモデリングはBH画像の復元手法の1つとして採用された。本成果は記者発表を行い、研究者のみならず広く一般社会にも大きな反響をもたらし、秦・田崎とも数多くの招待講演を行なった。またEHTとして基礎物理学ブレイクスルー賞も受賞した。

一方研究期間後半(2020年4月~2022年3月)は新型コロナウイルスによる世界的パンデミックの影響により、当初予定していた海外研究機関への渡航などが全てキャンセルになるなど、研究計画を大きく変更せざるを得ない大変厳しい状況の連続であった。それでも、EATING VLBIはコロナ禍でも運用が可能な局が参加してリモートでM87観測を継続するなど、新たな工夫を重ねて新しいデータを引き続き得ることができたのは大きな進歩であった。その結果、BH近傍約20 $R_s$ 以内の場所で超光速運動を検出した。これまで超光速運動が測定されていた場所(~200 $R_s$ )よりもはるかに上流であり、ジェットがこれまで考えられていたよりも大きな初速度を持つことを示唆している。本研究成果は現在共同研究者のG. Giovannini教授とともに査読論文にまとめているところである。

また本研究課題のパスファインダーとして過去に取得していたEAVN/EATING観測データについても解析が順調に進み、特に2017年に取得されたEHTとEAVNを含む多波長合同観測キャンペーンの観測成果は査読論文として出版された。本成果は秦が国際多波長チームの論文取りまとめ役の一人として主要な役割を果たしたものであり、記者発表も行うなど、EHTとEAVN/EATINGの合同研究のインパクトを示す重要な成果となった。また、田崎がこれまで大

きな貢献をしてきた EHT2017 年観測の偏光データの成果についても出版され、大きな注目を浴びた。また、本科研費を使用して秦がイタリア滞在中に IRA 研究者と新たにスタートした EAVN による遠方レーザーの合同研究成果も査読論文として出版されるなど、国際共同研究の裾野を更に広げることができた。総じて、研究期間の大部分がパンデミックに見舞われ国際共同研究としては大変厳しいものとなったが、それでも各国の共同研究者が工夫を凝らして観測を継続し、新たな研究成果を創出することができたことは大変意義のあるものであった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計28件（うち査読付論文 28件 / うち国際共著 25件 / うちオープンアクセス 12件）

|   |                           |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名<br>MAGIC Collaboration, Hada Kazuhiro, 他17名  | 4. 巻<br>510               |
| 2. 論文標題<br>Multiwavelength study of the gravitationally lensed blazar QSO B0218+357 between 2016 and 2020                                   | 5. 発行年<br>2021年           |
| 3. 雑誌名<br>Monthly Notices of the Royal Astronomical Society   | 6. 最初と最後の頁<br>2344 ~ 2362 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/mnras/stab3454  | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する              |
| 1. 著者名<br>Cho Ilje, Hada Kazuhiro (15番目)、Tazaki Fumie (27番目)、他63名   | 4. 巻<br>926               |
| 2. 論文標題<br>The Intrinsic Structure of Sagittarius A* at 1.3 cm and 7 mm   | 5. 発行年<br>2022年           |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal   | 6. 最初と最後の頁<br>108 ~ 108   |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/ac4165  | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する              |
| 1. 著者名<br>Park Jongho, Asada Keiichi, Nakamura Masanori, Kino Motoki, Pu Hung-Yi, Hada Kazuhiro, Kravchenko Evgeniya V., Giroletti Marcello | 4. 巻<br>922               |
| 2. 論文標題<br>A Revised View of the Linear Polarization in the Subparsec Core of M87 at 7 mm   | 5. 発行年<br>2021年           |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal   | 6. 最初と最後の頁<br>180 ~ 180   |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/ac26bf  | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する              |
| 1. 著者名<br>Cui Yu-Zhu, Hada Kazuhiro (2番目)、Tazaki Fumie (12番目)、他74名  | 4. 巻<br>21                |
| 2. 論文標題<br>East Asian VLBI Network observations of active galactic nuclei jets: imaging with KaVA+Tianma+Nanshan                            | 5. 発行年<br>2021年           |
| 3. 雑誌名<br>Research in Astronomy and Astrophysics  | 6. 最初と最後の頁<br>205 ~ 205   |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/1674-4527/21/8/205  | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する              |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Kino Motoki, Niinuma Kotaro, Kawakatu Nozomu, Nagai Hiroshi, Giovannini Gabriele, Orienti Monica, Wajima Kiyooki, D'Ammando Filippo, Hada Kazuhiro, Giroletti Marcello, Gurwell Mark | 4. 巻<br>920             |
| 2. 論文標題<br>Morphological Transition of the Compact Radio Lobe in 3C 84 via the Strong Jet-Cloud Collision  | 5. 発行年<br>2021年         |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal Letters  | 6. 最初と最後の頁<br>L24 ~ L24 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/2041-8213/ac24fa   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する            |

|   |                        |
|---|------------------------|
| 1. 著者名<br>Chamani W., Savolainen T., Hada K., Xu M. H.  | 4. 巻<br>652            |
| 2. 論文標題<br>Testing the magnetic flux paradigm for AGN radio loudness with a radio-intermediate quasar | 5. 発行年<br>2021年        |
| 3. 雑誌名<br>Astronomy and Astrophysics  | 6. 最初と最後の頁<br>A14-1-28 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1051/0004-6361/202140676   | 査読の有無<br>有             |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する           |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Komossa S, Grupe D, Parker M L, Gomez J L, Valtonen M J, Nowak M A, Jorstad S G, Haggard D, Chandra S, Ciprini S, Dey L, Gopakumar A, Hada K, Markoff S, Neilsen J | 4. 巻<br>504               |
| 2. 論文標題<br>X-ray spectral components of the blazar and binary black hole candidate OJ 287 (2005-2020)  | 5. 発行年<br>2021年           |
| 3. 雑誌名<br>Monthly Notices of the Royal Astronomical Society  | 6. 最初と最後の頁<br>5575 ~ 5587 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/mnras/stab1223   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する              |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>EHT Multi-wavelength Science Working Group et al.  | 4. 巻<br>911             |
| 2. 論文標題<br>Broadband Multi-wavelength Properties of M87 during the 2017 Event Horizon Telescope Campaign | 5. 発行年<br>2021年         |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal Letters  | 6. 最初と最後の頁<br>L11 ~ L11 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/2041-8213/abef71   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する            |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Goddi, C., EHT Collaboration et al.                                   | 4. 巻<br>910             |
| 2. 論文標題<br>Polarimetric Properties of Event Horizon Telescope Targets from ALMA | 5. 発行年<br>2021年         |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal Letters                                     | 6. 最初と最後の頁<br>L14 ~ L14 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/2041-8213/abee6a                            | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する            |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>The Event Horizon Telescope Collaboration et al.  | 4. 巻<br>910             |
| 2. 論文標題<br>First M87 Event Horizon Telescope Results. VIII. Magnetic Field Structure near The Event Horizon | 5. 発行年<br>2021年         |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>L13 ~ L13 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/2041-8213/abe4de  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する            |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>The Event Horizon Telescope Collaboration et al.                          | 4. 巻<br>910             |
| 2. 論文標題<br>First M87 Event Horizon Telescope Results. VII. Polarization of the Ring | 5. 発行年<br>2021年         |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>L12 ~ L12 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/2041-8213/abe71d                                | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する            |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Park Jongho, Hada Kazuhiro, Nakamura Masanori, Asada Keiichi, Zhao Guangyao, Kino Motoki | 4. 巻<br>909           |
| 2. 論文標題<br>Jet Collimation and Acceleration in the Giant Radio Galaxy NGC 315                      | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal  | 6. 最初と最後の頁<br>76 ~ 76 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/abd6ee   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する          |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Wielgus, M., EHT Collaboration et al.  | 4. 巻<br>901           |
| 2. 論文標題<br>Monitoring the Morphology of M87* in 2009-2017 with the Event Horizon Telescope | 5. 発行年<br>2020年       |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal  | 6. 最初と最後の頁<br>67 ~ 67 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/abac0d                                       | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する          |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Hada Kazuhiro, Niinuma Kotaro, Sitarek Julian, Spingola Cristiana, Hirano Ayumi                          | 4. 巻<br>901         |
| 2. 論文標題<br>Millimeter-VLBI Detection and Imaging of the Gravitationally Lensed $\gamma$ -Ray Blazar JVAS B0218+357 | 5. 発行年<br>2020年     |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal  | 6. 最初と最後の頁<br>2 ~ 2 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/abaab1   | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する        |

|   |                           |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Doi Akihiro, Kino Motoki, Kawakatu Nozomu, Hada Kazuhiro                    | 4. 巻<br>496               |
| 2. 論文標題<br>The radio-loud narrow-line Seyfert 1 galaxy 1H 0323+342 in a galaxy merger | 5. 発行年<br>2020年           |
| 3. 雑誌名<br>Monthly Notices of the Royal Astronomical Society                           | 6. 最初と最後の頁<br>1757 ~ 1765 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/mnras/staa1525                                    | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Kravchenko E., Giroletti M., Hada K., Meier D. L., Nakamura M., Park J., Walker R. C. | 4. 巻<br>637           |
| 2. 論文標題<br>Linear polarization in the nucleus of M87 at 7 mm and 1.3 cm                         | 5. 発行年<br>2020年       |
| 3. 雑誌名<br>Astronomy and Astrophysics  | 6. 最初と最後の頁<br>L6 ~ L6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1051/0004-6361/201937315   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する          |

|  |                   |
|--|-------------------|
| 1. 著者名<br>Hada Kazuhiro  | 4. 巻<br>8         |
| 2. 論文標題<br>Relativistic Jets from AGN Viewed at Highest Angular Resolution | 5. 発行年<br>2019年   |
| 3. 雑誌名<br>Galaxies   | 6. 最初と最後の頁<br>1~1 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3390/galaxies8010001                        | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>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<br>-         |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Park Jongho, Hada Kazuhiro (2番目)、Fumie Tazaki (21番目)、他36名  | 4. 巻<br>887           |
| 2. 論文標題<br>Kinematics of the M87 Jet in the Collimation Zone: Gradual Acceleration and Velocity Stratification | 5. 発行年<br>2019年       |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal  | 6. 最初と最後の頁<br>147~147 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/ab5584   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>The Event Horizon Telescope Collaboration   | 4. 巻<br>875         |
| 2. 論文標題<br>First M87 Event Horizon Telescope Results. VI. The Shadow and Mass of the Central Black Hole | 5. 発行年<br>2019年     |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>L6~L6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/2041-8213/ab1141  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する        |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>The Event Horizon Telescope Collaboration   | 4. 巻<br>875         |
| 2. 論文標題<br>First M87 Event Horizon Telescope Results. V. Physical Origin of the Asymmetric Ring | 5. 発行年<br>2019年     |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>L5~L5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/2041-8213/ab0f43  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する        |



|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>The Event Horizon Telescope Collaboration  | 4. 巻<br>875         |
| 2. 論文標題<br>First M87 Event Horizon Telescope Results. III. Data Processing and Calibration | 5. 発行年<br>2019年     |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal Letters  | 6. 最初と最後の頁<br>L3~L3 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/2041-8213/ab0c57                                       | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する        |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>The Event Horizon Telescope Collaboration                                 | 4. 巻<br>875         |
| 2. 論文標題<br>First M87 Event Horizon Telescope Results. II. Array and Instrumentation | 5. 発行年<br>2019年     |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>L2~L2 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/2041-8213/ab0c96                                | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する        |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>The Event Horizon Telescope Collaboration  | 4. 巻<br>875         |
| 2. 論文標題<br>First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole | 5. 発行年<br>2019年     |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal Letters  | 6. 最初と最後の頁<br>L1~L1 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/2041-8213/ab0ec7   | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する        |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Nokhrina E E, Gurvits L I, Beskin V S, Nakamura M, Asada K, Hada K                          | 4. 巻<br>489             |
| 2. 論文標題<br>M87 black hole mass and spin estimate through the position of the jet boundary shape break | 5. 発行年<br>2019年         |
| 3. 雑誌名<br>Monthly Notices of the Royal Astronomical Society   | 6. 最初と最後の頁<br>1197~1205 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/mnras/stz2116   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する            |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Takahashi Kazuya, Toma Kenji, Kino Motoki, Nakamura Masanori, Hada Kazuhiro       | 4. 巻<br>868           |
| 2. 論文標題<br>Fast-spinning Black Holes Inferred from Symmetrically Limb-brightened Radio Jets | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal   | 6. 最初と最後の頁<br>82 ~ 82 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/aae832  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する          |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Nakamura Masanori, Asada Keiichi, Hada Kazuhiro (3番目), Fumie Tazaki (21番目)、他17名 | 4. 巻<br>868             |
| 2. 論文標題<br>Parabolic Jets from the Spinning Black Hole in M87                             | 5. 発行年<br>2018年         |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal   | 6. 最初と最後の頁<br>146 ~ 146 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/aaeb2d                                      | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する            |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Issaoun S., Johnson M. D., Blackburn L., Brinkerink C. D., Mocibrodzka M., Chael A., Goddi C., Marti-Vidal I., Wagner J., Doeleman S. S., Falcke H., Krichbaum T. P., Akiyama K., Bach U., Bouman K. L., Bower G. C., Broderick A., Cho I., Crew G., Dexter J., Fish V., Gold R., Gomez J. L., Hada K., 他20名 | 4. 巻<br>871           |
| 2. 論文標題<br>The Size, Shape, and Scattering of Sagittarius A* at 86 GHz: First VLBI with ALMA   | 5. 発行年<br>2019年       |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal  | 6. 最初と最後の頁<br>30 ~ 30 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/aaf732   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する          |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Park Jongho, Hada Kazuhiro, Kino Motoki, Nakamura Masanori, Ro Hyunwook, Trippe Sascha   | 4. 巻<br>871             |
| 2. 論文標題<br>Faraday Rotation in the Jet of M87 inside the Bondi Radius: Indication of Winds from Hot Accretion Flows Confining the Relativistic Jet | 5. 発行年<br>2019年         |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal  | 6. 最初と最後の頁<br>257 ~ 257 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/aaf9a9   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する            |

〔学会発表〕 計27件（うち招待講演 20件 / うち国際学会 13件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Kazuhiro Hada  |
| 2. 発表標題<br>Event Horizon Telescope Observations of Supermassive Black Holes |
| 3. 学会等名<br>East Asian ALMA Science Workshop 2022 (招待講演) (国際学会)              |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Kazuhiro Hada   |
| 2. 発表標題<br>High-resolution view of collimation and acceleration regions of nearby AGN jets |
| 3. 学会等名<br>Extragalactic jets at all scales (Jets2021) (招待講演) (国際学会)                       |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>秦和弘                         |
| 2. 発表標題<br>巨大ブラックホールでの電波観測最前線          |
| 3. 学会等名<br>28th ICEPP Symposium (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2022年                        |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>秦和弘                       |
| 2. 発表標題<br>巨大ブラックホールの超高解像度電波観測       |
| 3. 学会等名<br>ブラックホールジェット・円盤風研究会 (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2022年                      |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>秦和弘                                   |
| 2. 発表標題<br>超高解像度電波観測で明かすSMBHの実態                  |
| 3. 学会等名<br>超巨大ブラックホール研究会：その実態・影響・起源の解明に向けて（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2021年                                  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>秦和弘   |
| 2. 発表標題<br>AGN Observations with Next-generation Radio Interferometers     |
| 3. 学会等名<br>Linking the science of large interferometers in the 2030s（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>秦和弘                              |
| 2. 発表標題<br>ミリ波VLBIによる巨大ブラックホール観測            |
| 3. 学会等名<br>(サブ)ミリ波単一鏡の革新で挑む、天文学の未解決問題（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2021年                             |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>秦和弘  |
| 2. 発表標題<br>JCMT-VLBI超高解像度ミリ波観測で探る超巨大ブラックホール                               |
| 3. 学会等名<br>ワークショップ 北半球で口径最大焦点面装置とって充実サブミリ波単一鏡 JCMTを使ってみよう and 使い倒そう（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Kazuhiro Hada   |
| 2. 発表標題<br>Munti-wavelength Observations of M87"   |
| 3. 学会等名<br>Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Kazuhiro Hada  |
| 2. 発表標題<br>WL updates on M87 and AGN: Low-energy (radio/mm) perspective |
| 3. 学会等名<br>EHT Collaboration Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)                 |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>秦和弘   |
| 2. 発表標題<br>Event Horizon Telescopeによるブレーザー3C279の20マイクロ秒角スケールイメージング |
| 3. 学会等名<br>日本天文学会 2020秋季年会   |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>田崎文得                    |
| 2. 発表標題<br>ブラックホール画像化              |
| 3. 学会等名<br>2020年度画像電子学会年次大会 (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2020年                    |

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>田崎文得                     |
| 2. 発表標題<br>EHTによるM87ブラックホール・シャドウの撮影 |
| 3. 学会等名<br>宇宙電波懇談会シンポジウム (招待講演)     |
| 4. 発表年<br>2020年                     |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hada, K.                                      |
| 2. 発表標題<br>Results from EATING VLBI Observations for M87 |
| 3. 学会等名<br>EATING VLBI Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)       |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hada, K.   |
| 2. 発表標題<br>M87 First Event Horizon Telescope Results and The East Asian VLBI Network          |
| 3. 学会等名<br>1st mini-workshop on compact objects and multi-wave emission, Urumqi (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hada, K.  |
| 2. 発表標題<br>Overview of Multi-wavelength Working Group Status |
| 3. 学会等名<br>EHT Collaboration meeting 2019 (招待講演) (国際学会)      |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hada, K.  |
| 2. 発表標題<br>Collimation, acceleration and recollimation shock in the jet of gamma-ray emitting NLS1 galaxy 1H0323+342 |
| 3. 学会等名<br>Active Galactic Nucleus Jets in the Event Horizon Telescope Era (国際学会)                                    |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>秦和弘、崔玉竹、紀基樹、本間希樹、Bong Won Sohn、EAVN AGN Science Working Group |
| 2. 発表標題<br>M87-EHT-2017キャンペーンに同期した東アジアVLBIネットワーク観測で迫る、ブラックホール-ジェットコネクション |
| 3. 学会等名<br>日本天文学会2019秋   |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>田崎文得                      |
| 2. 発表標題<br>ブラックホール観測と画像化 史上初の成果に至るまで |
| 3. 学会等名<br>画像電子学会第290回研究会 (招待講演)     |
| 4. 発表年<br>2019年                      |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>田崎文得、秋山和徳、森山小太郎、小山翔子、笹田真人、池田思朗、永井洋、本間希樹、秦和弘、沖野大貴、浅田圭一、水野陽介、EHT Collaboration |
| 2. 発表標題<br>EHT による M87*の観測成果 IV:画像化方法の評価とリング構造の抽出                                       |
| 3. 学会等名<br>日本天文学会2019秋  |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Tazaki, F.                           |
| 2. 発表標題<br>Imaging the black hole shadow of M87 |
| 3. 学会等名<br>EAVN Workshop 2019 (国際学会)            |
| 4. 発表年<br>2019年                                 |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Tazaki, F.                              |
| 2. 発表標題<br>First Ever Image of a Black Hole        |
| 3. 学会等名<br>UK-Japan FoS Meeting 2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年                                    |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Tazaki, F.  |
| 2. 発表標題<br>Overview of the first EHT results   |
| 3. 学会等名<br>Active Galactic Nucleus Jets in the Event Horizon Telescope Era (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>田崎文得   |
| 2. 発表標題<br>First EHT Result of M87                      |
| 3. 学会等名<br>17th Mizusawa VLBI Observatory Users Meeting |
| 4. 発表年<br>2019年   |



|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>秦和弘  |
| 2. 発表標題<br>EAVN AGN SWGとVERA両偏波化の活動報告                   |
| 3. 学会等名<br>17th Mizusawa VLBI Observatory Users Meeting |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hada, K.                                     |
| 2. 発表標題<br>M87 at low/radio frequencies                 |
| 3. 学会等名<br>EHT Collaboration Meeting 2018 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hada, K.                                    |
| 2. 発表標題<br>Expanding VLBI in East Asia and AGN Science |
| 3. 学会等名<br>East Asia AGN Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

|  |
|--|
| <p>多波長同時観測でさぐるM87巨大ブラックホールの活動性と周辺構造 地上・宇宙の望遠鏡が一致団結<br/> <a href="https://www.nao.ac.jp/news/science/2021/20210414-eh1.html">https://www.nao.ac.jp/news/science/2021/20210414-eh1.html</a><br/>           イベント・ホライズン・テレスコープ・プロジェクトがM87ブラックホールごく近傍の磁場の画像化に成功<br/> <a href="https://www.miz.nao.ac.jp/eh1-j/c/pr/pr20210324">https://www.miz.nao.ac.jp/eh1-j/c/pr/pr20210324</a><br/>           揺れ動くM87巨大ブラックホールのシャドウ<br/> <a href="https://www.miz.nao.ac.jp/eh1-j/c/pr/pr20200923">https://www.miz.nao.ac.jp/eh1-j/c/pr/pr20200923</a><br/>           重力レンズクエーサーの中心部から吹き出すジェットを検出！<br/> <a href="https://www.miz.nao.ac.jp/veraserver/highlight/2020_hada.html">https://www.miz.nao.ac.jp/veraserver/highlight/2020_hada.html</a><br/>           史上初、ブラックホールの撮影に成功<br/> <a href="https://www.nao.ac.jp/news/sp/20190410-eh1/article.html">https://www.nao.ac.jp/news/sp/20190410-eh1/article.html</a></p> |
|--|

6. 研究組織

|                   | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                     | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                             | 備考 |
|-------------------|---|---|----|
| 研究<br>分<br>担<br>者 | 田崎 文得<br><br>(Tazaki Fumie)<br><br>(10800609) | 国立天文台・水沢V L B I観測所・特別客員研究員<br><br><br><br>(62616) |    |

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 |
|---------|---------|
|         |         |