

令和元年5月17日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03644

研究課題名(和文) ミリ波帯偏波VLBI観測によるブラックホールジェットの収束機構の解明

研究課題名(英文) Approaching the creation mechanism of black hole jet using mm-VLBI polarimetry

研究代表者

萩原 喜昭 (Hagiwara, Yoshiaki)

東洋大学・文学部・教授

研究者番号：60399300

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：活動銀河の中心にある巨大ブラックホール近傍から噴出するジェットの生成・加速・収束の様子を捉えるためには、ジェット周辺の磁場構造をジェットが光学的により薄くなるミリ波帯で直接撮像することが重要である。その実現には、ジェットの根元周辺の磁場を高い空間分解能で連続的に撮像する超長基線電波干渉計(VLBI)が必要である。本課題では、まずVERAを構成する2局の電波望遠鏡の受信機を整備し、偏波受信観測を可能にした。さらにVERAと韓国VLBI網を結合して、日韓5局の望遠鏡を結合した偏波VLBI網を新たに立ち上げ、43ギガヘルツ帯でのブラックホール・ジェットの定常的な高空間分解能での観測に道筋を付けた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

巨大ブラックホール最近傍からのガスの噴出流であるジェットは銀河全体の明るさに比して桁違いの光度で輝き、宇宙における最もダイナミックなエネルギー現象である。その噴出メカニズムを捉えるのは、現代天文学の解決すべき問題の一つである。ジェットが生成されるブラックホールの周囲を取り巻く環境の研究は、ブラックホール自体の存在やその基本的な性質をより明確化すると考えられる。ブラックホールが、現在の宇宙の構造と共に、138億年の歴史の中でどのように作られてきたかを知ることは、人類共通の根源的な問題に直接アプローチすることにつながるといえよう。

研究成果の概要(英文)：In order to reveal the creation, acceleration, and collimation mechanism of jets ejected from the vicinity of super massive black hole at the center of active galactic nuclei, it is important to execute direct imaging of magnetic field structure around the base of the jets at millimeter wavelengths, where the jets are optically thinner. To achieve this, it is necessary to monitor the jet base using very long baseline radio interferometer (VLBI) with the highest spatial resolution.

In this program, the receivers of the two radio telescopes of the NAOJ VERA were developed to enable simultaneous dual polarization reception at 43 GHz (7 mm). Furthermore, by combining the two VERA telescopes and three telescopes in Korea, we have organized a VLBI network capable of polarization observation based on international collaboration. This is a definite step forward in VLBI monitoring of jets from super massive black hole.

研究分野：電波天文学

キーワード：ブラックホール ジェット 磁場 活動銀河核

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

活動銀河核 (AGN) ジェットは、莫大なエネルギー生成源として宇宙に大きな影響を与えていると考えられており、その解明は宇宙の進化の理解にとり極めて重要である。ジェットは、AGN の中心に存在する巨大ブラックホールの最近傍から噴出すると考えられている。ジェットの生成・加速には磁場の関与が推測されており、また数光年に渡るジェットの伝搬には螺旋磁場構造が関わることが、スペース VLBI (超長基線電波干渉計) 「はるか」や米国 VLBA (Very Long Baseline Array) によるミリ秒角以下での分解能の観測で明らかになっている。

ジェットがその根本付近で細く絞り込まれる、収束に関しても磁場の寄与が推定されているが、定量的に明らかにした研究はなく、未解決の問題である。ジェットが光学的により薄くなる高周波数帯で、ジェットの内部の磁場分布を調べることが本問題の解決には必要であると考えられる。一方、ミリ波帯での偏波 VLBI 観測は VLBA による研究が主であるが、高頻度かつ高解像度で観測でき、「機動性のある観測」が可能な「ミリ波帯偏波 VLBI 網」の構築が期待されている。

### 2. 研究の目的

AGN ジェットの生成・加速・収束には、ブラックホール近傍で増幅された磁場が関与するという理論モデルが提唱されている一方、中心の高速ジェットの外側をやや低速のジェットが支えるという spine-sheath (芯と鞘) 構造が VLBI 観測により示されており、このような多層構造がジェット収束に関与している可能性もある。ジェットの収束が「磁場」なのか、あるいは「多層構造」によるのかの結論は、偏波 VLBI 観測によるジェット内部の磁場構造の解明が一つの手段である。VLBI 観測で得たジェットの根元の磁場構造の時間変化と 3 次元磁気流体シミュレーションとを比較し、ジェット生成の仕組みに関わる収束機構について定量的に明らかにするのが目的であるので、本研究では次を実施する。

- (1) 直線偏波の向きで磁場の投影成分を、ファラデー回転で視線方向の磁場成分を測定することでジェットの根元 (ブラックホールから数百シュバルツシルト半径以下) の 3 次元磁場構造を明らかにする。
- (2) ジェットの生成と収束を確実に捉えるために、ジェットがまさに降着円盤周辺から噴出するフレア直後の数日以内の撮像を実施する。

### 3. 研究の方法

本研究を進めるにあたり、まず我々は、定常的に観測を開始して間もない日韓 VLBI ネットワーク (KaVA) の偏波受信システムを強化し、「機動性のある観測」を KaVA で可能にすることが、ジェット収束問題の解決につなげていく近道だと考えている。

本研究前半 (1) では、国立天文台 VERA の水沢局 (岩手県奥州市) と入来局 (鹿児島県薩摩川内市) の 20m 望遠鏡 2 台に波長 7 ミリ帯 (周波数: ギガヘルツ (GHz)) の偏波観測用の受信機を設置し、韓国 VLBI ネットワーク (KVN) の波長 7 ミリ帯で偏波観測可能な 3 台の 21m 望遠鏡と結合し、計 5 局を一体的に運用できるように観測・相関処理システムを整備し、本研究後半 (2) - (3) の科学観測に向けて準備することとする。

研究の方法を、実施する順に以下にまとめた。

- (1) VERA 2 局の 20m 鏡に搭載する観測周波数帯から直接にアナログ→デジタル変換を可能にする、22GHz (1.3cm) 帯及び 43GHz (7mm) 帯で動作する超高速サンプラー (OCTAD) を開発する。OCTAD の導入より既存のシステムから周波数変換器 (ダウンコンバーター: DC)、ベースバンドコンバーターが不要になり、観測周波数帯から直接サンプリングが可能になる。また、従来は左円偏波のみ受信可能であった VERA の受信機を、左右両円偏波で同時に受信可能になる。
- (2) ジェットの根本付近、巨大ブラックホール近傍から噴き出すフレア (増光) 直後の様子を高頻度、高解像度で偏波観測する。
- (3) Hada et al. (2011) で我々が確立した方法により、多周波数での VLBI 観測によりブラックホールの位置を決める。さらに、ジェット下流側の形状を決めるために、センチ波帯での観測も東アジア VLBI (EAVN) にて行う。
- (4) (2) と (3) で得るデータに基づき、磁気流体シミュレーション結果と比較・照合し、ジェット収束機構を明らかにする。

### 4. 研究成果

本研究では次を実施した。

- (1) ミリ波 43GHz 帯において、VERA 水沢局と入来局の右旋円偏波受信器を完成させ、左右両円偏波を受信可能な干渉計システムを完成させた (図 1)。本研究開始後に当初予定した 40-50GHz 帯では超高速 AD サンプラーが動作しないことが判明した。そのため、同周波数帯で動作する周波数ダウンコンバーター (周波数変換器、図 2) を自作で製作し完成させ、上記 2 局の 20m 鏡にそれぞれに設置して、左右両円偏波同時観測を可能にした。一方、20-30GHz 帯では動作することが確認できていた超高速サンプラーを入来局 20m 鏡の受信機システム内に導入し、周波数変換後のデジタル信号処理・伝送系を

整備した(図 3)。上記システムが既設の水沢局 20m 鏡と合わせ、22GHz 帯では両円偏波同時受信かつ超広帯域観測を、超高速サンプラー (OCTAD) による、直接サンプリングで可能にした。

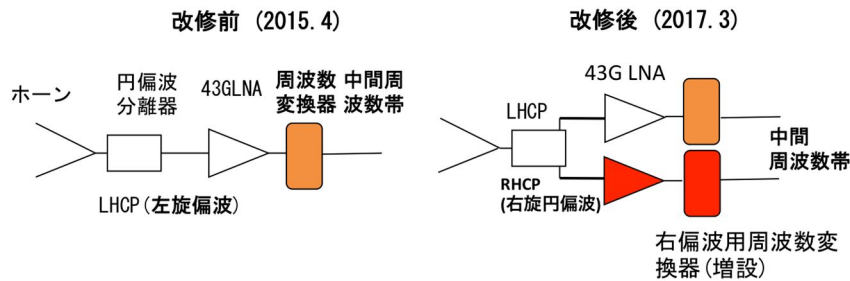


図 1 VERA20m 電波望遠鏡の受信機ブロックダイアグラム。左が改修前、右が改修後のブロックダイアグラムで、右円偏波用の 43 ギガヘルツ帯周波数変換機が本研究により製作され、各望遠鏡に増設された。本改修により、ミリ波帯での左右両偏波同時受信が可能になった。

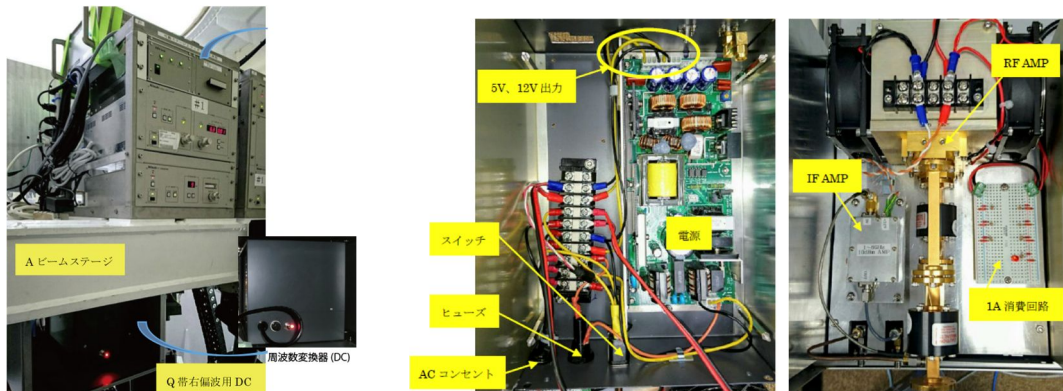


図 2 水沢 20m 望遠鏡上部機器室内、受信機台 (A ビームステージ) 下に設置された周波数変換器 (DC; 左図) とその内部構造 (右図: 電源部 (左半分) と回路部 (右半分))。内部で、43GHz 帯 (RF) から中間周波数帯 (IF) へ周波数変換される。

(2) VERA 水沢局と入来局間で、干渉計としての性能を確認するための左右両円偏波同時受信観測を行い、干渉計フリンジがほぼ予想された感度で検出されたことを確認した。その後、VERA 同 2 局と韓国 KVN 3 局の 21m 鏡との間で両円偏波同時受信して、干渉計としてのシステム試験観測を、韓国天文研究院との国際連携により行った。その結果平行・交差偏波のフリンジをほぼ全 10 基線で検出して、KaVA の計 5 局で VLBI 偏波観測をミリ波 43GHz 帯で初めて可能にした。22GHz 帯でも試験観測を実施し、22、43GHz 両周波数帯で偏波 VLBI 観測が国際協力のもと、可能なことを示した (図 4)。

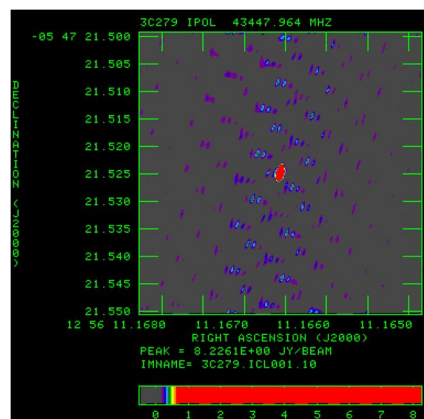


図 3(左) VERA 入来局に設置した、超高速 AD サンプラー (OCTAD)。

図 4(右) KaVA の試験観測による、活動銀河核 3C279 のジェット (中心の赤いピーク) の 7mm 帯全強度 (左右偏波各成分を平均して求めた) マップ。マップ上の空間分解能は、およそ  $1.6 \times 0.6$  ミリ秒角。

(3) 日韓 VLBI KaVA の計 5 局での偏波 VLBI 観測において、観測後の相関処理から、ユーザーにデータが渡るまでの一連の観測パスを今回初めて通した。今後、M87 など、活動銀河核ジェット研究における最重要天体の偏波撮像のモニター観測を「占有的」に可能にする準備が

完成したことになる。本研究により、「機動性のある観測」が可能な「偏波用」VLBI ネットワークを国際協力で構築した。

## 5 . 主な発表論文等

( 研究代表者、研究分担者、連携研究者、及び研究協力者には下線 )

[ 雑誌論文 ] ( 計 13 件 )

Sasada, Mahito; Jorstad, Svetlana; Marscher, Alan P.; 他 12 名, “ Optical Emission and Particle Acceleration in a Quasi-stationary Component in the Jet of OJ 287 ”, The Astrophysical Journal, 2018, Volume 864, 67, 11pp ( 査読有 )

DOI: 10.3847/1538-4357/aad553

Hada, Kazuhiro; Doi, Akihiro; Wajima, Kiyooki; D'Ammand, Filippo; Orienti, Monica; Giroletti, Marcello; Giovannini, Gabriele; Nakamura, Masanori; Asada, Keiichi, “ Collimation, Acceleration, and Recollimation Shock in the Jet of Gamma-Ray Emitting Radio-loud Narrow-line Seyfert 1 Galaxy 1H0323+342 ”, The Astrophysical Journal, 2018, Volume 860, 141, 12pp ( 査読有 )

DOI: 10.3847/1538-4357/aac49f

Hagiwara, Yoshiaki; Doi, Akihiro; Hachisuka, Kazuya; Horiuchi, Shinji, “ Searches for H<sub>2</sub>O masers towards narrow-line Seyfert 1 galaxies ”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 2018, Volume 70, 54, 8pp ( 査読有 )

DOI: 10.1093/pasj/psy046

Hada, Kazuhiro; Park, Jong Ho; Kino, Motoki; Niinuma, Kotaro; Sohn, Bong Won; Ro, Hyun Wook; Jung, Taehyun; Algaba, Juan-Carlos; Zhao, Guang-Yao; Lee, Sang-Sung; Akiyama, Kazunori; Trippe, Sascha; Wajima Kiyooki; Sawada-Satoh, Satoko; Tazaki, Fumie; Cho, Ilje; Hodgson, Jeffrey; Lee, Jeong Ae; Hagiwara, Yoshiaki; 他 18 名, “ Pilot KaVA monitoring on the M87 jet: Confirming the inner jet structure and superluminal motions at sub-pc scales ”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 2017, Volume 69, 71, 10pp ( 査読有 )

DOI: 10.1093/pasj/psx054

Moriyama, Kotaro; Mineshige, Shin; Takahashi, Hiroyuki R., “ High-frequency Quasi-periodic Light Variations from Arc-shaped Gas Clouds Falling onto a Black Hole ”, The Astrophysical Journal, 2017, Volume 850, 56, 14pp ( 査読有 )

DOI: 10.3847/1538-4357/aa92cb

Cho, Ilje; Jung, Taehyun; Zhao, Guang-Yao; Akiyama, Kazunori; Sawada-Satoh, Satoko; Kino, Motoki; Byun, Do-Young; Sohn, Bong Won; Shibata, Katsunori, M.; Hirota, Tomoya; Niinuma, Kotaro; Yonekura, Yoshinori; Fujisawa, Kenta; Oyama, Tomoaki, “ A comparative study of amplitude calibrations for the East Asia VLBI Network: A priori and template spectrum methods ”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 2017, Volume 69, 87, 16pp ( 査読有 )

DOI: 10.1093/pasj/psx090

Ogawa, Takumi; Mineshige, Shin, 他 3 名, “ Radiation hydrodynamic simulations of a super-Eddington accretor as a model for ultra-luminous sources ”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 2017, Volume 69, 33, 10pp ( 査読有 )

DOI: 10.1093/pasj/psx006

Moriyama, Kotaro; Mineshige, Shin, “ New Method for probing Kerr space-time based on imaging observation of in-falling gas blob ”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 2016, Volume 68, L6, 6pp ( 査読有 )

DOI: 10.1093/pasj/psw019

Hagiwara, Yoshiaki; Horiuchi, Shinji; Doi, Akihiro; Miyoshi, Makoto; Edwards, Phil, “ A Search for Submillimeter H<sub>2</sub>O Masers in Active Galaxies: The Detection of 321 GHz H<sub>2</sub>O Maser Emission in NGC 4945 ”, The Astrophysical Journal, 2016, Volume 827, 69, 6pp ( 査読有 )

DOI: 10.3847/0004-637X/827/1/69

Fujinaga, Yoshitaka; Niinuma, Kotaro; Kimura, Atsushi; Fujisawa, Kenta; Oyama, Tomoaki; Mizuno, Syota; Kono, Yusuke, 他 6 名, “ The discovery of new AGN candidates within the field of Fermi unassociated  $\gamma$ -ray sources ”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 2016, Volume 68, 70, 14pp ( 査読有 )

DOI: 10.1093/pasj/psv026

Moriyama, Kotaro; Mineshige, Shin, “ New Method for black-hole spin measurement based on flux variation from an infalling gas ring ”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 2015, Volume 67, 106, 19pp ( 査読有 )

DOI: 10.1093/pasj/psv074

Hagiwara, Yoshiaki; An, Tao; Jung, Taehyun; Rho, Duk-Gyoo; Zhang, Ming; Hao, Longfei;

Fujisawa, Kenta; Yonekura, Yoshinori, 他 3 名, “Current Status of the EAVN Experiments”, Publications of The Korean Astronomical Society, 2015, Volume 30, 2, 641-643

Hagiwara, Yoshiaki; Edwards, Philip G., “High-resolution Imaging of Water Maser Emission in the Active Galaxies NGC 6240 and M 51”, The Astrophysical Journal, 2015, Volume 815, 124, 6pp (査読有)

DOI: 10.1088/0004-637X/815/2/124

〔学会発表〕(計 15 件)

恒任 優、嶺重 慎他 “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”, 日本天文学会 2019 年春季年会, 2019 年 3 月 16 日, 法政大学 小金井キャンパス

萩原 喜昭他 “日韓 VLBI による、43GHz 帯偏波 VLBI 試験観測経過報告及び活動銀河核ジェット収束機構の研究”, 日本天文学会 2019 年春季年会, 2019 年 3 月 15 日, 法政大学 小金井キャンパス

萩原 喜昭他 “VERA43GHz 帯両偏波化と KaVA 偏波試験観測の進捗状況”, 2018 年度 VLBI 懇談会シンポジウム, 2019 年 12 月 2 日, 熊本大学 黒髪キャンパス

萩原 喜昭他 “VERA43GHz 帯用両偏波受信システムの開発と活動銀河核ジェットの生成・収束機構の研究”, 日本天文学会 2018 年秋季年会, 2018 年 9 月 20 日, 兵庫県立大学 姫路工学キャンパス

小山 友明他 “VERA-upgrade 計画の進捗 III”, 日本天文学会 2018 年秋季年会, 2018 年 9 月 20 日, 兵庫県立大学 姫路工学キャンパス

恒任 優、嶺重 慎他 “活動銀河核におけるシンクロトロン偏光輻射輸送計算”, 日本天文学会 2018 年秋季年会, 2018 年 9 月 20 日, 兵庫県立大学 姫路工学キャンパス

森山 小太郎、嶺重 慎他 “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”, 日本天文学会 2018 年秋季年会, 2018 年 9 月 20 日, 兵庫県立大学 姫路工学キャンパス

小山 友明他 “VERA-upgrade 計画の進捗 II”, 日本天文学会 2018 年春季年会, 2018 年 3 月 15 日, 千葉大学 西千葉キャンパス

Hagiwara, Yoshiaki, “Probing Circumnuclear Region of AGN with Masers” (招待講演), ALMA Long Baseline Workshop, 2017 年 10 月 4 日, 京都メルパルクホール

Hagiwara, Yoshiaki, “Probing circumnuclear region of AGN with masers”, Black Hole Astrophysics with VLBI: Past, Present, and Future, 2017 年 3 月 29 日, 国立天文台 三鷹

Hada, Kazuhiro, “The East Asian VLBI Network”, Black Hole Astrophysics with VLBI: Past, Present, and Future, 2017 年 3 月 29 日, 国立天文台 三鷹

Hagiwara, Yoshiaki, “High-resolution imaging of H<sub>2</sub>O maser towards the type 2 Seyfert NGC1068”, 日本天文学会 2017 年春季年会, 2017 年 3 月 16 日, 九州大学 伊都キャンパス

萩原 喜昭他 “43GHz 帯 VERA 両偏波化の現状”, 2016 年度 VLBI 懇談会シンポジウム, 2016 年 12 月 27 日, 山口大学 吉田キャンパス

萩原 喜昭他 “水沢・入来局 43GHz 帯受信機両偏波化に向けて”, 2015 年度 VLBI 懇談会シンポジウム, 2015 年 12 月 24 日, 東洋大学 白山キャンパス

萩原 喜昭他 “活動銀河におけるサブミリ波帯 H<sub>2</sub>O メーザー探査 II”, 日本天文学会 2015 年秋季年会, 2015 年 9 月 10 日, 甲南大学 岡本キャンパス

〔図書〕(計 1 件)

嶺重 慎, 「ブラックホール天文学」新天文学ライブラリー 第 3 巻, 日本評論社, 2016, 304 ページ

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 河野 裕介

ローマ字氏名: KONO YUSUKE

所属研究機関名: 国立天文台

部局名: 水沢 VLBI 観測所

職名: 助教

研究者番号(8桁): 00370106

研究分担者氏名: 藤澤 健太

ローマ字氏名：FUJISAWA KENTA

所属研究機関名：山口大学

部局名：時間学研究所

職名：教授

研究者番号(8桁)：70311181

(2)連携研究者

連携研究者氏名：小山 友明

ローマ字氏名：OYAMA TOMOAKI

所属研究機関・部局名・職名：国立天文台・水沢V L B I観測所・特任専門員

研究者番号：70425403

連携研究者氏名：秦 和弘

ローマ字氏名：HADA KAZUHIRO

所属研究機関・部局名・職名：国立天文台・水沢V L B I観測所・助教

研究者番号：60724458

連携研究者氏名：本間 希樹

ローマ字氏名：HONMA MAREKI

所属研究機関・部局名・職名：国立天文台・水沢V L B I観測所・教授

研究者番号：20332166

連携研究者氏名：米倉 寛則

ローマ字氏名：YONEKURA YOSHINORI

所属研究機関・部局名・職名：茨城大学・理学部・教授

研究者番号：90305665

連携研究者氏名：嶺重 慎

ローマ字氏名：MINESHIGE SHIN

所属研究機関・部局名・職名：京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：70229780

連携研究者氏名：新沼 浩太郎

ローマ字氏名：NIINUMA KOTARO

所属研究機関・部局名・職名：山口大学・大学院創成科学研究科・准教授

研究者番号：30434260

(3)研究協力者

研究協力者氏名：鈴木 駿策

ローマ字氏名：SUZUKI SYUNSAKU

所属研究機関・部局名・職名：国立天文台・水沢V L B I観測所・研究技師

研究協力者氏名：笹田 真人

ローマ字氏名：SASADA MAHITO

所属研究機関・部局名・職名：広島大学・宇宙科学センター・特任助教

研究者番号：10725352

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。