

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 23 年 5 月 12 日現在

機関番号： 82645  
 研究種目： 基盤研究(C)  
 研究期間： 2009 年度～2011 年度  
 課題番号： 21540250  
 研究課題名(和文) 急成長しているブラックホールをもつ活動銀河核の VLBI 直接撮像による観測的研究  
 研究課題名(英文) Observational Studies of the active galactic nuclei with rapidly growing black holes by direct imaging using VLBI  
 研究代表者  
 土居 明広 (DOI, AKIHIRO)  
 独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教  
 研究者番号：90403641

研究成果の概要(和文)： 急激に成長している銀河中心ブラックホールと考えられる Broad Absorption Line Quasar (BALQSO) と Narrow-Line Seyfert 1 Galaxy (NLS1) の活動性を、超長基線電波干渉計 (VLBI) を用いて初めて系統的に直接撮像によって明らかにする研究計画を実行した。その結果、これらのブラックホールについて、これまでにはなかった電波帯からのアプローチとかつてない空間スケールで迫り、ブラックホールから数光年の現象について、相対論的ジェットやアウトフロー、システムの傾きや年齢等、進化段階にある活動銀河核の撮像に重要な示唆を与える結果を得た。

研究成果の概要(英文)： We conducted the first systematic VLBI studies of broad-absorption line quasars and narrow-line Seyfert 1 galaxies, which are believed to be driven by rapidly growing supermassive black holes. Our unique approach from radio observations at unprecedented angular resolutions has provided very crucial results about the vicinity of these black hole systems. The results impact the current pictures of relativistic jets, outflows, and their inclinations and ages of active galactic nuclei on an evolutionary phase.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 21 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
平成 22 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
平成 23 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：ブラックホール、活動銀河核、ジェット、アウトフロー、VLBI、電波

1. 研究開始当初の背景

あらゆる銀河の中心に、超巨大質量ブラックホールが存在していると考えられる。ブラックホール質量と銀河質量の間には強い相関関係が発見されており、両者が影響を及ぼし合いながら共進化してきたことを意味

している。共進化のメカニズムについての有力な説は、

- (1) 銀河合体イベントで誘発された星形成活動が、ブラックホールへの質量供給を促進する
- (2) 急激な質量供給により誘発されたブラックホール天体のアウトフロー(質量

放出)活動が銀河のガスを吹き飛ばし、星形成活動を抑制する

これを繰り返すというものである。これには傍証やシミュレーションによる示唆はあるのだが、観測的には確立はされていない。理由の1つには、急激な質量供給を受け急成長しているブラックホールについて観測が乏しいことにある。共進化に重要な役割を果たしていると期待される、ジェットやアウトフローについての調査が不可欠である。

しかし、このような活動銀河核の種族は、電波帯では暗く、研究はほとんどされていなかった。科学研究費の援助を受けた以前の研究(若手研究B:平成18-19年度)により、独自の高精度観測技術を確認し、世界で初めて Very-Long-Baseline Interferometer (VLBI) の 1/1000 秒角の空間分解能を用いた撮像試験観測に成功、これらの種族が十分に研究可能な対象であることを確かめていた。これを踏まえて、VLBI 観測による本研究計画を立案した。

## 2. 研究の目的

急激に成長している銀河中心ブラックホール (Narrow-Line Seyfert 1 Galaxies: 以下 NLS1, Broad-Absorption Line Quasars: 以下 BALQSO) に焦点をあて、その質量放出の活動性を「直接撮像によって」明らかにする。これまでのスペクトルと時間変動の情報に加え、新たな次元の情報「空間構造の情報」を得るために、数光年スケールの現象に初めて直接的にアプローチする。具体的な調査項目は、

- (1) ジェット (シンクロトロン放射源) とアウトフロー (自由-自由吸収体) の3次元構造
- (2) ジェットのエネルギー測定から質量放出のエネルギー効率を推定
- (3) 多数の天体についての系統的な調査から導き出されるこの種族の一般的描像

## 3. 研究の方法

急成長しているブラックホールは、存在比としては少数派である。我々は、これらの天体を特に選び出したサンプルについて、世界で初めての系統的な観測的調査を、しかも直接撮像という強力な手法でおこなう。

研究手法: 本研究の観測データに必要な観点は、

- (1) 多周波観測による連続波スペクトル解析
  - (2) 連続波撮像による構造の空間分解
  - (3) 多数天体についての系統的調査
- であり、前述の3つの具体的な調査項目にそ

れぞれ対応した調査になる。(1)のスペクトル解析では、非熱的なジェットを取り巻く熱的なアウトフローガスの量や空間分布・構造のスケールを推定し、さらにジェットプラズマの放射年齢の推定から、活動銀河核の活動年齢を調査する。(2)の構造分解からは、非熱的ジェットの放出軸 (=降着円盤の回転軸)の測定、放出スピードの推定、ジェットプラズマのエネルギー密度の測定をおこない、重要な「質量放出のエネルギー効率」を決定する。(3)の系統的調査からは、個体差に関わらずこの種族に共通した性質を抽出し、急激に成長するブラックホールの持つ一般的性質を導き出す。

観測装置: これらに適切な観測装置を、国内外の VLBI 網から選択する。詳細な撮像に適した米国の VLBA は、少数の興味深い天体を徹底的に調査する場合に利用し、(1)と(2)の研究をおこなう。長時間(約200時間)に及ぶ系統的な調査には、我々自身が運用に関与しアクセスしやすい Japanese VLBI Network (JVN)を用い、(1)と(3)の研究をおこなう。

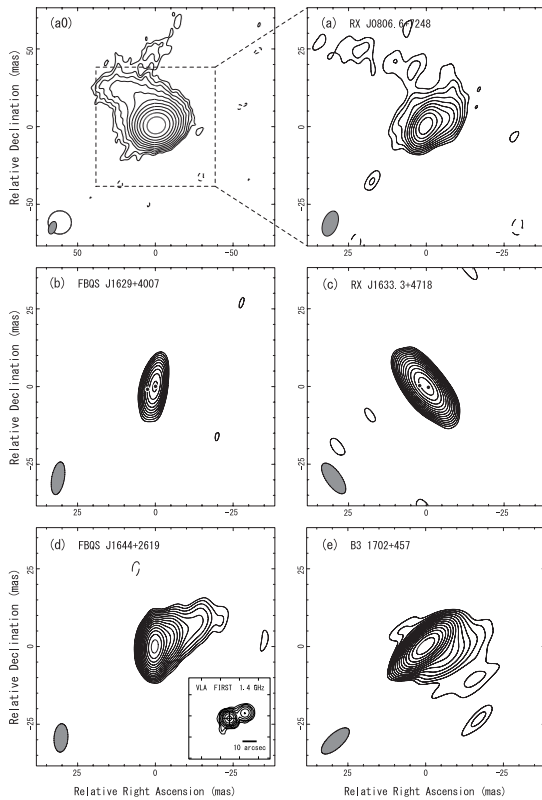
観測天体サンプル: 若手研究Bで実施した試験観測の結果を基に、有効な VLBI データが確実に取得できると見込める天体群に設定した:

- (1) Radio-Loud NLS1 (8天体)
- (2) nearby Radio-quiet NLS1 (8天体)
- (3) SDSS-BALQSO (23天体)
- (4) BALQSO 詳細観測サンプル4天体

## 4. 研究成果

本研究によって、急激に成長していると考えられる活動銀河種族の NLS1 と BALQSO について、初めて電波帯の性質、および数光年の空間スケールでの性質に関して、重要ないくつかの観点から明らかにすることができた。これはユニークな切り口からの情報提供であり、当該分野に対し、非常に重要な貢献をしたと考えられる。

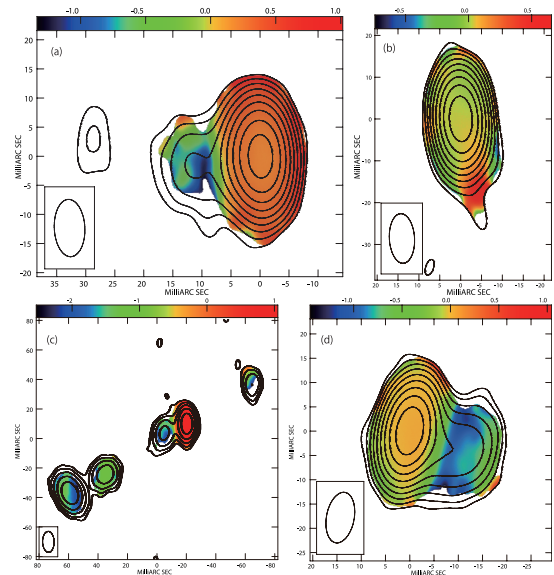
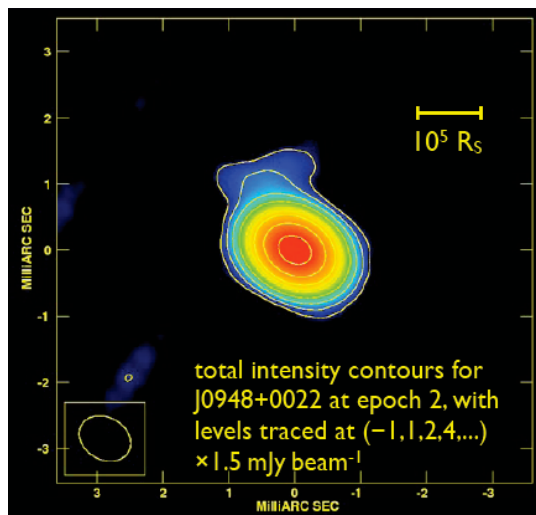
(1) BALQSO について、世界で初めて VLBI による系統的調査をおこなった。その結果、これまで信じられてきたような、降着円盤を横から見たキューサーという描像を覆し、上から見たキューサーも混在していることを突き止めた。また、非熱的なジェット現象が、熱的なアウトフローと共存したシステムも存在しうることを観測的に示した。また、電波源のサイズを測定し、年齢の推定に資するデータとなり、若い電波源であるという BALQSO のもう一つの描像を示唆する結果を報告した。大学 VLBI 連携観測事業が運営する Japanese VLBI Network のサブレイである光結合ネットワークを用いた超広



帯域 VLBI 網 OCTAVE の高感度な観測性能が、本成果を生み出す鍵となった。この成果は、OCTAVE が生み出した最初の科学成果となった (Doi et al. 2009)。

(2) NLS1 について、世界で初めて VLBI による系統的な撮像調査をおこなった。その結果、まだ成長する前の非常に小さなブラックホールでさえ、非常に高輝度な非熱的ジェットを生成している観測的証拠を得た。ジェットを見込む角度やジェットの色を測定し、ブレイザーのような性質を示す NLS1 の存在を確認した (Doi et al. 2011)。

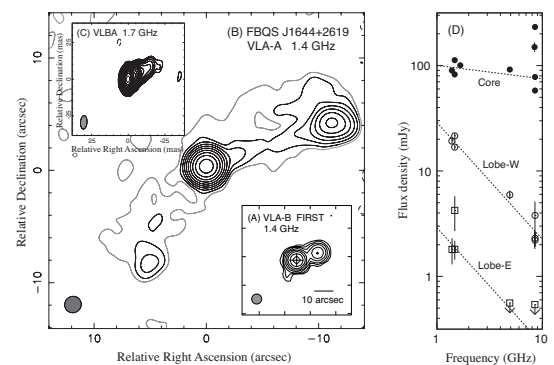
(3) Fermi ガンマ線観測衛星が NLS1 からのガンマ線を検出し、上記に示したようなブレイザーのような性質が広く認識され、この研

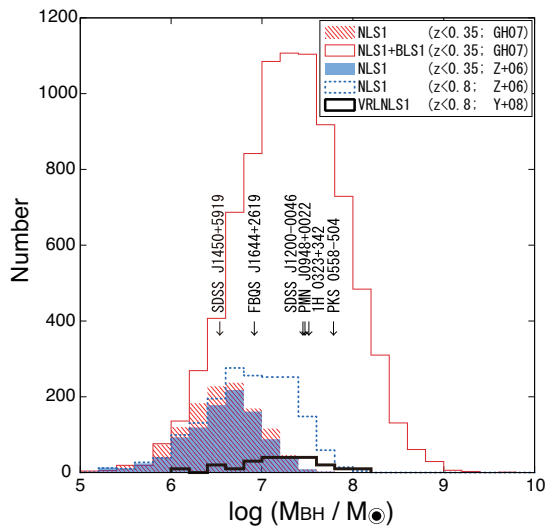


究分野はさらに興隆することになった。パイオニアであった我々の研究チームは、国際的な観測キャンペーンに協力し、我々の以前の観測をより強く確認する結果を得た (Abdo et al. 2009, Giroletti et al. 2011)。

(4) BALQSO について、興味深い 4 天体を、米国の VLBA を用いて詳細に観測した。その結果、3 天体はブレイザーのような性質を示すことを発見し、降着円盤を上から見ていることを確認した。一方で、1 天体は若い電波源としての性質を示すことがわかり、さらに過去数 10 万年にわたって断続的に活動を繰り返している兆候を見出した (林 et al. 2011, 2012)。まだサンプルは少ないが、このような、ブラックホール近傍の現象を直接的に示す観測例は、これまで提唱されてきた BALQSO の 2 つの描像に対し、決定的な示唆を与えるものである。今後、サンプルを増やし、調査を継続してゆくことが大変重要である。

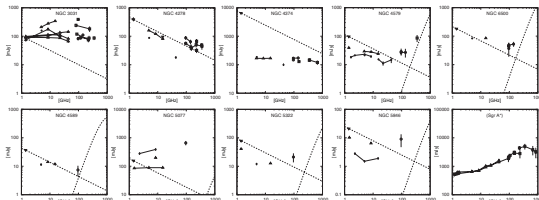
(5) Fermi で検出された NLS1 の正体は、ブレイザーであろうと解釈されたが、AGN 電波源の統一モデルでは、横から見た対応種族として電波銀河が存在するはずであったが、そのような NLS1 の存在は知られておらず、謎となっていた。我々は、VLA FIRST サー





ベいのデータを洗い出し、NLS1 の種族の中に、電波銀河のような大規模な電波構造をもつNLS1 が6つ存在することを見出した。これはNLS1 も統一モデルを用いて解釈できる現象であることを示しており、根源的な描像に結論を与える報告となった(土居 et al. 2012)。

(6) その他に、関連する研究テーマとして、若い近傍電波銀河におけるガンマ線放射起源を探るための VLBI 観測研究(Nagai et al. 2011)や、対照的な現象を示す近傍の低光度活動銀河核(成長しきったブラックホールの残骸と考えられる)の電波スペクトルの観測的研究(Doi et al. 2011)についても成果が生まれ、NLS1 に見られた現象との比較対象として考察した。



これらの成果は、当初の予定通り、6つの査読付の学術論文として出版され、いくつかの学会発表でも成果を報告された。

##### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Doi, Nagai et al., “Millimeter Radio Continuum Emissions as the Activity of Supermassive Black Holes in Nearby Early-type Galaxies and Low-luminosity Active Galactic Nuclei”, *AJ*, 査読有, Vol.142, 2011, Id.167, DOI: 10.1088/0004-6256/142/5/167

- ② Doi, Asada, Nagai, “Very Long Baseline Array Imaging of Parsec-scale Jet Structures in Radio-loud Narrow-line Seyfert 1 Galaxies”, *ApJ*, 査読有, Vol.738, 2011, Id.126, DOI: 10.1088/0004-637X/738/2/126
- ③ Giochetti, Doi, Nagai, et al. “Global e-VLBI observations of the gamma-ray narrow line Seyfert 1 PMN J0948+0022”, *A&A*, 査読有, Vol.528, 2011, 11-14, DOI: 10.1051/0004-6361/201116639
- ④ Nagai, Doi, Fujisawa, et al., “VLBI Monitoring of 3C 84 (NGC 1275) in Early Phase of the 2005 Outburst”, *PASJ*, 査読有, Vol.62, No.2, 2010, 11-15, <http://ads.nao.ac.jp/abs/2010PASJ...62L..11N>
- ⑤ Abdo, Doi, Nagai, et al., “Multiwavelength Monitoring of the Enigmatic Narrow-Line Seyfert 1 PMN J0948+0022 in 2009 March-July”, *ApJ*, 査読有, Vol.707, Issue 1, 2009, 727-737, DOI: 10.1088/0004-637X/707/1/727
- ⑥ Doi, Fujisawa et al., “VLBI Detections of Parsec-Scale Nonthermal Jets in Radio-Loud Broad Absorption Line Quasars”, *PASJ*, 査読有, Vol.61, No.6, 2009, 1389-1398 <http://ads.nao.ac.jp/abs/2009PASJ...61.1389D>

[学会発表] (計 8 件)

- ① 土居明広,永井洋 et al., “狭輝線セイファート1型銀河の電波銀河の発見”, 日本天文学会, 春季年会, 2012年3月19日, 龍谷大学
- ② 林隆之,土居明広,永井洋 et al., “降着円盤風を持つクェーサーに付随する非熱的ジェットの再帰的活動性”, 日本天文学会, 春季年会, 2012年3月20日, 龍谷大学
- ③ 羽賀崇史,土居明広 et al., “VLBA 多周波位相補償アストロメトリで推定される NGC 4261 のブラックホール位置と吸収物質”, 日本天文学会, 春季年会, 2012年3月20日, 龍谷大学
- ④ 土居明広, et al., “VLBA 多周波位相補償観測による Mrk 348 における核周プラズマの発見と水メガメーザー源との位置関係”, 日本天文学会, 秋季年会, 2011年9月22日, 鹿児島大学
- ⑤ 萩原喜昭,土居明広,蜂須賀一也, “狭輝線1型セイファート銀河の22GHz H<sub>2</sub>Oメーザー探査”, 日本天文学会, 秋季年会, 2011年9月22日, 鹿児島大学
- ⑥ 土居明広, et al., “VLBI 多周波位相補償

観測により明らかになった Mrk 348 における自由--自由吸収領域と水メーザーの関係”, 日本天文学会, 春季年会, 2011年3月17日, 筑波大学

- ⑦ 林隆之, 土居明広, 永井洋 “電波で明るい BAL クェーサーの VLBA による多周波偏波観測”, 日本天文学会, 春季年会, 2011年3月19日, 筑波大学
- ⑧ 土居明広, 藤澤健太, et al., “Broad Absorption Line/Giga-hertz Peaked Spectrum クェーサー?: Japanese VLBI Network による VLBI 多周波観測”, 日本天文学会, 秋季年会, 2009年9月14日, 山口大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

土居明広 (DOI, AKIHIRO)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙  
科学研究所・助教  
研究者番号: 90403641

### (2) 研究分担者

永井洋 (NAGAI, HIROSHI)  
国立天文台・ALMA 推進室・研究員  
研究者番号: 00455198

### (3) 連携研究者

藤澤健太 (FUJISAWA, KENTA)  
山口大学・時間学研究所・教授  
研究者番号: 70311181