

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01137

研究課題名（和文）電波・可視光偏光モニターとVLBI撮像を組み合わせたジェットの磁場構造解明

研究課題名（英文）Clarifying magnetic fields in AGN jets by radio and optical polarimetry together with VLBI images

研究代表者

亀野 誠二（Kameno, Seiji）

国立天文台・アルマプロジェクト・教授

研究者番号：20270449

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）：活動銀河核ジェットの磁場構造を解明するために、電波・可視光による偏光モニター観測とVLBI撮像観測を組み合わせる研究である。ALMAを用いて40 GHzから343 GHzまでの5周波数で間隔10日以下の頻度で46天体のモニター観測を継続観測しており、<https://www.alma.cl/-skameno/AMAPOLA/>にて公開している。このモニター観測天体のうち、偏波角が90度以上の大角度変化を示した3天体について、磁場構造の発展を空間的に解明するために、東アジアVLBIにて撮像モニター観測、かなた望遠鏡で可視光モニターを開始した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

AMAPOLAはミリ波・サブミリ波帯における唯一の偏波モニタープログラムで、総天体数2079天体、うち10日以下の高頻度観測天体46天体、40 GHzから343 GHzまでの周波数範囲など、世界最高の質・量を提供している。急激な偏波成分の増光現象や偏波角の変化事象をATel (Astronomer's Telegram) に報告し、X線偏光観測衛星IXPEとの協調観測でAGNジェットの磁場構造伝播を解明するなど、活動銀河核ジェットの一般的な磁場の性質を理解する研究に貢献している。ミリ波・サブミリ波帯の偏波校正の品質検査にも利用され、電波天文学における偏波計測精度向上に貢献している。

研究成果の概要（英文）：We are carrying a polarization monitoring program to clarify the magnetic field structure inside AGN jets. By compiling radio and optical polarization monitoring coupled with VLBI imaging polarimetry, we probe propagation of magnetic field structure in the jet stream. We have conducting ALMA polarization monitoring for 46 sources at the frequencies of 40 GHz, 97 GHz, 155 GHz, 233 GHz, 343 GHz and publicizing in <https://www.alma.cl/-skameno/AMAPOLA/>. We identified three AGNs that shows swing of the polarization angle by > 90 degrees, and started VLBI polarization imaging and optical monitoring.

研究分野：天文学

キーワード：活動銀河核 偏光 ジェット 磁場構造 活動銀河核ジェット 多波長偏光観測 時間変動

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 活動銀河核 (Active Galactic Nuclei : AGNs) にはジェットを噴出する天体が見られる。AGN ジェットは相対論的エネルギーを持つ細く絞られたプラズマ流であり、その生成・加速・収束機構の解明は天体物理学の重要課題である。AGN ジェットはシンクロトン放射が卓越することから磁場が加速・収束機構に関与していると考えられており、ジェットに沿った螺旋状の磁場構造を示唆する偏波観測も得られている。偏波観測は AGN ジェットの磁場構造を調べる唯一の観測手法である。

(2) 偏波観測はそれに特化した観測装置と較正が必要であり、シンクロトン放射が光学的に薄くなるミリ波・サブミリ波帯での偏波観測は限定的であった。AGN ジェットを空間的に分解できる超長基線干渉計 (Very Long Baseline Interferometry : VLBI) の偏波観測は、センチ波帯では確立していたがミリ波帯 VLBI では較正方法が十分な精度が得られていなかった。

(3) 2013 年に開所したアタカマミリ波サブミリ波大型干渉計 (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array : ALMA) は、フラックス密度の較正目的で多数の標準電波源を 10 日以下の頻度でモニターしている (Grid Survey 観測)。Grid Survey は偏波モードで観測されているが、従来は全フラックス密度 (Stokes I) のみが整約され公開されていて、Stokes Q, U, V は計測されていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、活動銀河核ジェットの生成・加速・収束機構を担う磁場構造を、多波長偏波モニター観測および撮像観測によって解明することである。シンクロトン放射が薄くなるミリ波・サブミリ波帯での偏光モニター観測によって、磁場構造の変動を捉える。これを、シンクロトロン一次放射の短波長端である可視光の偏光変動と比較することで、磁場構造変動の応答関数を得て、ジェットの磁場構造を解明する。さらに、VLBI 偏光観測によって磁場構造を空間的に分解し、時間分解された磁場構造と比較して伝播速度を調べる。

## 3. 研究の方法

(1) ALMA によるミリ波・サブミリ波帯偏波モニター観測 (AMAPOLA) : Grid Survey のデータから Stokes Q, U, V を算出するために、Analytic Matrix for ALMA POLArimetry (AMAPOLA) コードを開発し、40 GHz - 343 GHz (波長 7 mm - 0.85 mm) の 5 周波数で 46 天体を 10 日以下の頻度でモニターする。

(2) AMAPOLA で偏波角 (EVPA) の大きな変動が見られた天体について、東アジア VLBI 網で偏波観測を行い、ジェット内の磁場構造を空間的に分解して、偏波角変動の起因となったジェット成分を特定する。

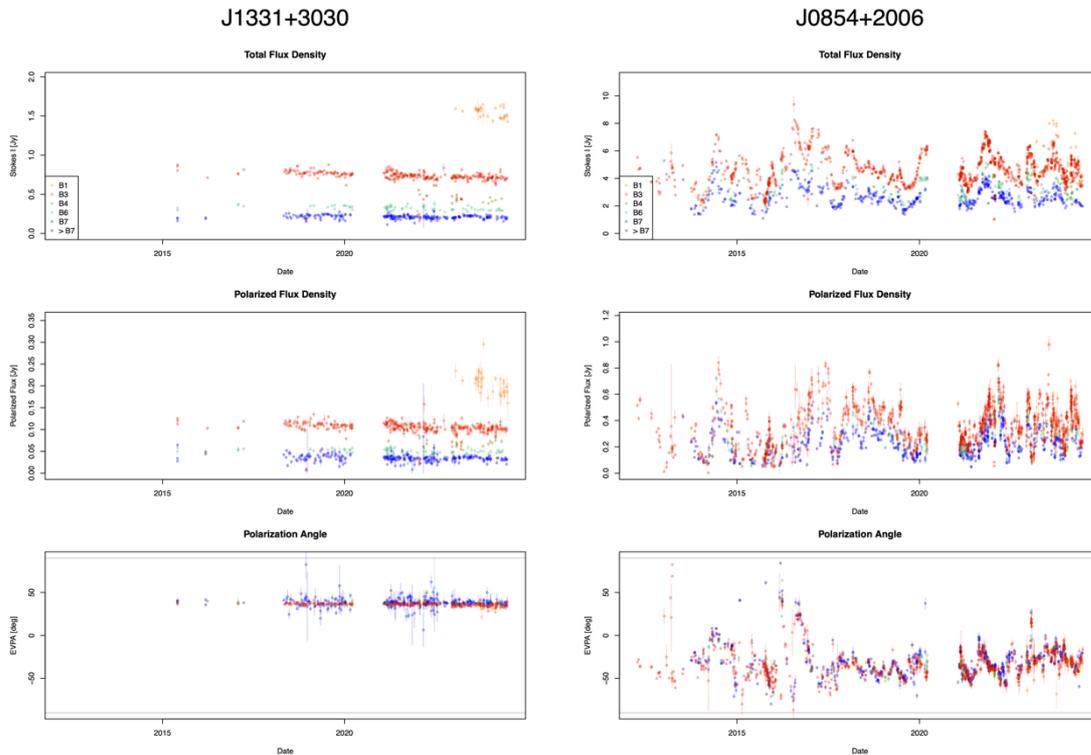
(3) 偏波角 (EVPA) の大きな変動が見られた天体について、かなた望遠鏡で偏光観測を行い、可視光とミリ波・サブミリ波帯との偏波変動を比較して応答関数を求め、VLBI 観測で得られた磁場構造と比較し、磁場構造の伝播を調べる。

## 4. 研究成果

(1) AMAPOLA によって、2012 年 - 2024 年の Grid Survey データ全てにおいて Stokes parameter を求め、web サイトで公開している。

<https://www.alma.cl/~skameno/AMAPOLA/>

AMAPOLA はミリ波・サブミリ波帯における唯一の偏波モニタープログラムで、総天体数 2079 天体、うち 10 日以下の高頻度観測天体 46 天体、40 GHz から 343 GHz までの周波数範囲をカバーし、延べ観測数は 571224 天体・周波・回に及ぶ、世界最高の質・量を提供している。ミリ波・サブミリ波帯の一般的な偏波観測の較正に必要な較正天体の選択および較正の品質検査に用いられ、電波天文学における偏波較正の手法を確立し精度を向上させるなど、電波天文学に広く貢献している。



AMAPOLA による偏波モニター結果の例。横軸は観測日。3つのパネルは上から全フラックス密度 (Stokes I), 直線偏波成分 ( $P = \sqrt{Q^2 + U^2}$ ), および偏波角 (EVPA) を示す。色は周波数に対応し、B1 (40 GHz : 橙), B3 (97.5 GHz : 朱), B4 (155 GHz : 茶), B6 (233 GHz : 緑), B7 (343 GHz : 青) を指す。左は偏波成分が安定しているクェーサー J1331+3030 (3C 286)。右は激しい変動を示すブレイザー J0854+2006 (OJ 287)。

- (2) AMAPOLA に基づいて、偏波で急激な増光現象や偏波角変動現象を検出し、ATel (Astronomer's Telegram) にアラートを報告した。
  - ATel#11572 3C 279
  - ATel#14385 3C 379
  - ATel#14781 4C +29.45
  - ATel#14847 PKS 0420-014
  - ATel#14952 OJ 287
- (3) 世界初の X 線偏光観測衛星 IXPE との協調観測によって、世界で初めてミリ波・サブミリ波帯と X 線の同時偏光観測を、ブレイザー天体 BL Lac に対して実施した。X 線での偏光率は上限値 12.6%, 赤外線での偏光率が 7-17%, サブミリ波 343 GHz での偏光率は 3.6-3.9% であった。赤外線とサブミリ波の偏波角はほぼ一致した。X 線の偏光が赤外線の偏光率より低いことから、X 線の放射は陽子シンクロトロンではなく、電子によるシンクロトロン自己コンプトン散乱が支配的であると考えられる。
- (4) AMAPOLA で偏波角が 2 週間以内に  $90^\circ$  以上変動する現象を、J0006-0623, OJ 287, 3C 454.3 の 3 つのブレイザー天体で検出した。これらの天体に対して東アジア VLBI で撮像観測を実施し、現在解析中である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 18件 / うちオープンアクセス 16件）

1. 著者名 Sawada-Satoh, Satoko ; Kamenno, Seiji ; Trippe, Sascha	4. 巻 664
2. 論文標題 Circumnuclear dense gas disk fuelling the active galactic nucleus in the nearby radio galaxy NGC 4261	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 id.L11, 6 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202244047	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 Chiong, Chau-Ching; Nakamura, Fumitaka; Kamenno, Seiji; et al.	4. 巻 12190
2. 論文標題 Extended Q-band (eQ) receiver for Nobeyama 45-m Telescope	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 id.12100 9 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2629811	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 Middei, Riccardo; Liidakis, Ioannis; Kamenno, Seiji; Nagai, Hiroshi; Sasada, Mahito; Fukazawa, Yasushi; Uemura, Makoto; et al.	4. 巻 942
2. 論文標題 X-Ray Polarization Observations of BL Lacertae	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 id.L10, 14 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aca281	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 Kamenno, Seiji et al.	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 id.156, 10 pp
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 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 Kameno, Seiji et al.	4. 巻 75
2. 論文標題 ALMA detection of 321 GHz water maser emission in the radio galaxy NGC 1052	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 pp.L1-L5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psad011	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 Fukazawa, Yasushi; Matake, Hiroto; Kayanoki, Taishu; Inoue, Yoshiyuki; Finke, Justin	4. 巻 931
2. 論文標題 High-energy Emission Component, Population, and Contribution to the Extragalactic Gamma-Ray Background of Gamma-Ray-emitting Radio Galaxies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id.138, 19 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac6acb	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 Seiji Kameno, Paulo Cortes, Edward Fomalont, et al.	4. 巻 14781
2. 論文標題 J1159+2914 (4C +29.45, Ton 599) mm/sub-mm flare	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astronomer's Telegram	6. 最初と最後の頁 1-1
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 無
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 Seiji Kameno, Paulo Cortes, Edward Fomalont, et al.	4. 巻 14847
2. 論文標題 J0423-0120 (PKS 0420-014) : The third stage of mm/sub-mm flare	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astronomer's Telegram	6. 最初と最後の頁 1-1
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 無
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 Seiji Kamenno, Paulo Cortes, Edward Fomalont, et al.	4. 巻 14952
2. 論文標題 J0854+2006 (OJ 287) : mm/sub-mm flare with polarization angle change	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astronomer's Telegram	6. 最初と最後の頁 1-1
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 無
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 Kamenno 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 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 Kamenno Seiji, Harikane Yuichi, Sawada-Satoh Satoko, Sawada Tsuyoshi, Saito Toshiki, Nakanishi Kouichiro, Humphreys Elizabeth	4. 巻 75
2. 論文標題 ALMA detection of 321?GHz water maser emission in the radio galaxy NGC?1052	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 L1 ~ L5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psad011	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 Sawada-Satoh Satoko, Kawakatu Nozomu, Niinuma Kotaro, Kamenno Seiji	4. 巻 75
2. 論文標題 Very long baseline interferometry imaging of H2O maser emission in the nearby radio galaxy NGC?4261	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 722 ~ 731
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psad032	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 Shimojo Masumi, Bastian Timothy S., Kamenno Seiji, Hales Antonio S.	4. 巻 299
2. 論文標題 Observing the Sun with the Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA): Polarization Observations at 3 mm	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Solar Physics	6. 最初と最後の頁 id.20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11207-024-02265-3	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 Kamenno Seiji, Harikane Yuichi, Sawada-Satoh Satoko, Sawada Tsuyoshi, Saito Toshiki, Nakanishi Kouichiro, Humphreys Elizabeth, Impellizzeri C M Violette	4. 巻 76
2. 論文標題 Sub-parsec-scale jet-driven water maser with possible gravitational acceleration in the radio galaxy NGC?1052	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 340 ~ 352
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psae015	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 Imai Hirosh, Kamenno Seiji	4. 巻 ISSN: 2642-4339
2. 論文標題 HINOTORI and its perspective	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 XXXVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), held 19-26 August 2023 in Sapporo, Japan, Published by IEEE	6. 最初と最後の頁 id.234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/URSI_GASS57860.2023.10265583	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 Kamenno Seiji	4. 巻 alma2023
2. 論文標題 Probing AGN Molecular Torus via Emission, Absorption, and Polarization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ALMA at 10 years: Past, Present, and Future	6. 最初と最後の頁 id.34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5281/zenodo.10246966	査読の有無 無
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 Kameno Seiji	4. 巻 alma2023
2. 論文標題 AMAPOLA: ALMA Polarization Monitoring for Calibrator Sources	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ALMA at 10 years: Past, Present, and Future	6. 最初と最後の頁 id.73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5281/zenodo.10245760	査読の有無 無
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 Kneissl, Ruediger; Plarre, Kurt; Radiszcz, Matias; Verdugo, Celia; Guzman, Andres; Dent, William; Kameno, Seiji; Nowajewski, Priscilla; Sawada, Tsuyoshi	4. 巻 alma2023
2. 論文標題 Operational Aspects of ALMA Flux Density Calibration	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ALMA at 10 years: Past, Present, and Future	6. 最初と最後の頁 id.55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5281/zenodo.10246997	査読の有無 無
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

[学会発表] 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Seiji Kameno
2. 発表標題 Jet-Torus Interaction in the Radio Galaxy NGC 1052
3. 学会等名 Torus2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 亀野誠二
2. 発表標題 電波銀河NGC 1052におけるSO吸収線による分子ガストーラスの温度計測
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会S18a
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Seiji Kameno
2. 発表標題 Jet-Torus Interaction in the Radio Galaxy NGC 1052
3. 学会等名 Torus2022 ( 国際学会 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Seiji Kameno
2. 発表標題 Sub-mm water maser in the radio galaxy NGC 1052
3. 学会等名 Black hole astrophysics with VLBI 2024 ( 国際学会 )
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Seiji Kameno
2. 発表標題 Kobayashi's Unwritten Interferometry Insights
3. 学会等名 40 Years Evolution of Radio Interferometry in Japan ( 国際学会 )
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>AMAPOLA Analytic Matrix for ALMA POLArimetry  <a href="https://www.alma.cl/~skameno/AMAPOLA/">https://www.alma.cl/~skameno/AMAPOLA/</a>  AMAPOLA Analytic Matrix for ALMA POLArimetry  <a href="https://www.alma.cl/~skameno/AMAPOLA/">https://www.alma.cl/~skameno/AMAPOLA/</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	永井 洋 (Nagai Hiroshi) (00455198)	国立天文台・アルマプロジェクト・准教授  (62616)	VLBI撮像・観測・撮像解析処理
研究分担者	笹田 真人 (Sasada Mahito) (10725352)	東京工業大学・科学技術創成研究院・特任助教  (12608)	光赤外線偏光モニター:かなた望遠鏡による観測・データ解析
研究分担者	植村 誠 (Uemura Makoto) (50403514)	広島大学・宇宙科学センター・准教授  (15401)	光赤外線偏光モニター:かなた望遠鏡による観測・統計モデル構築
研究分担者	深沢 泰司 (Fukazawa Yasushi) (60272457)	広島大学・先進理工系科学研究科(理)・教授  (15401)	光赤外線偏光モニター:かなた望遠鏡による観測・データベース整備
研究分担者	秦 和弘 (Hada Kazuhiro) (60724458)	国立天文台・水沢VLBI観測所・助教  (62616)	VLBI撮像・観測・撮像解析処理
研究分担者	紀 基樹 (Kino Motoki) (70531234)	工学院大学・工学部・講師  (32613)	理論モデル構築:光赤外線と電波の変動遅延からショック領域の磁場構造モデルを構築

## 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