

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04029

研究課題名(和文) 超高空間分解能観測を基軸とした活動銀河核構造マルチスケール探査

研究課題名(英文) Multi-scale investigation of active galactic nuclei with super-high spatial resolution observations

研究代表者

岸本 真 (Kishimoto, Makoto)

京都産業大学・理学部・教授

研究者番号：00733354

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：今世紀初頭から、銀河の形成・進化と、各銀河中心の巨大ブラックホールの成長・進化が、密接に関連していると考えられるようになった。このいわゆる「共進化」の根源は、中心核から外へ向かうガスの流れ、アウトフローにあるのではないかと考えられてきた。そこで、長基線赤外線干渉計を用いて超高空間分解能観測を行い、このアウトフロー構造の中心部を直接分解することを試みた結果、これまでの銀河系外天体の赤外線観測で世界最高の空間分解能を達成。中心核の1光年スケールのガスの広がりが、電波ジェットに垂直になっていることを直接確認した。10-100光年スケールでの結果と合わせ、アウトフローの構造がかなり見えてきたと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

銀河とは宇宙の基本的構成要素であり、銀河の形成と進化はまさに宇宙の歴史そのものである。これが各銀河の中心の巨大ブラックホールと共進化してきたとすれば、巨大ブラックホールの形成・進化は宇宙の歴史の大きな一部であると言ってよいだろう。本研究では、この共進化の根源を解明すべく、中心核の直接撮像を、赤外線干渉計を用いて進めてきたが、ついに、系外銀河の赤外線観測で世界最高の空間分解能を達成することに成功した。こうした研究をさらに推し進めることで、宇宙の構造形成の歴史の重要な部分を解明することができるのではないかと考えている。

研究成果の概要(英文)：The formation and evolution of galaxies are now believed to be closely related to those of supermassive black holes at the center of each galaxy. Fundamentally, this 'co-evolution' probably originates from the outflow of the innermost gas close to the nucleus. Here we try to spatially resolve this innermost region using long-baseline interferometry in the infrared. In fact, we have now achieved the highest spatial resolution for an extragalactic object in the infrared. The result directly confirms that the innermost 1-light-year-scale gas distribution is perpendicular to the jet structure observed in the radio. Together with the structures observed at 10-100 light-year scales, we have made significant progress in understanding the nature of this nuclear outflow.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：巨大ブラックホール系の構造 活動銀河中心核の物理 高空間分解能観測 光赤外干渉計

## 1. 研究開始当初の背景

西暦 2000 年代初頭から、宇宙の基本構成要素である銀河の形成・進化と、各銀河中心の巨大ブラックホールへの質量降着（活動銀河核、AGN [Active Galactic Nucleus] 現象）、すなわち巨大ブラックホールの成長・進化が、ほぼ間違いなく、密接に関連していると考えられるようになった。一方で、多様な様相を見せる AGN 現象を説明する鍵は、中心部の赤道方向を覆い隠すいわゆる「トーラス」構造であると、1980 年代後半以降、様々な観測から信じられている。

「トーラス」つまり、中心部にドーナツ状の構造があると信じられているのではあるが、しかし、そもそもこの「トーラス」とは物理的に何なのか、長年の観測にも関わらず、実はよくわかっていない。多くの観測によると、これは幾何学的にかなり厚い（つまり半径方向の大きさに対して同程度の高さを持つ）と考えられるのであるが、そうした「構造を膨らませるもの」が物理的に何なのか、よくわからないのである。

中心核にはおそらく巨大ブラックホールを取り囲む「降着円盤」と呼ばれる円盤状のものがあり、主に電波で観測されるジェット状の構造はこれに垂直に出ているのだらうと想像されている。この円盤の回転軸およびそれに沿ったジェットが、系の軸にあたるものと思われる。トーラスはこれらの少し外側にあり、降着円盤からの紫外線を効率よく吸収するダスト粒子（星間空間にある、砂粒のような、重元素を多く含む固体微粒子）を含むガスで構成されると考えられる。このダストはこの紫外線に暖められて、赤外線を強く発していると思われるので、赤外線で観測すればその姿を直接捉えることができるはずである。また、中心核からある半径以内ではダストは高温になりすぎて ( $>1500$  K) 溶けてしまうので（この半径はダスト溶融半径と呼ばれる）、中心部ではリング状になっていると思われるのであるが、このトーラス最内縁部を直接空間分解した例はこれまでなかった。

## 2. 研究の目的

そこで、本研究はまず、この「ダスト溶融領域」を空間的に直接分解することを目指してきた。上記のような推測が正しければ、ダスト溶融領域はジェットに垂直な方向、すなわち巨大ブラックホール系の軸に垂直な、赤道方向に広がっていると考えられる。しかし、ここで問題になるのは、もしこうした溶融領域を内縁部にもつ「トーラス」が、赤道方向に進む光を吸収してしまうならば、その系を赤道方向から観測したのではそもそも中心部を直接見ることはできないと予測される。そこで、私たち地球上の観測者がたまたま極方向から見ていると思われる巨大ブラックホール系をターゲットにする。こうした AGN は Type 1 AGN と呼ばれる。一方、赤道方向から見ていると思われる AGN は Type 2 と呼ばれるものである。

実は、歴史的には話が少し逆で、そもそも可視域の分光スペクトルで、明るく青い連続光と幅の広い輝線（速度幅  $5000\text{km/sec}$  程度）を見せるものが Type 1、連続光が赤くて弱く幅の狭い輝線（速度幅  $500\text{km/sec}$  程度）しか見せないものが Type 2 と呼ばれていた。ところが、実は Type 1 AGN も Type 2 AGN も本質的には同じ天体で、見る方向が違うだけとする、いわゆる「統一モデル」が提唱され、その際に、中心の明るく青い連続光を放つ光源（おそらくは降着円盤と思われるもの）と広輝線を放つ領域を赤道方向に取り囲む「トーラス」の存在が仮定されたのである（Antonucci & Miller 1985）。したがってこの赤道方向に広がるダスト溶融領域の確認は、統一モデルにおける基本的な幾何学構造を直接確認する第 1 歩となる。

## 3. 研究の方法

この中心核最内縁部の大きさは、間接的にはあるが、可視・赤外 reverberation 観測により大きさがある程度わかっている。すなわち、降着円盤から来るとされる可視・紫外光は時間的に大きく変動しているが、この変動が遅れて赤外線の変動に現れる（近傍の AGN で、遅れは数ヶ月程度）という現象が知られている（たとえば Suganuma et al. 2006）。これは、中心部が周りのダストを暖めており、かつ、ダスト溶融半径までダストフリーの領域があるということを示唆している。すると、この時間変動の遅延時間  $\Delta t$  から、ダスト溶融半径の大きさを  $c \cdot \Delta t$  ( $c$  は光速) として求めることができる。すると、こうして遅延時間を測ることのできた銀河に対して、その銀河までの距離を用いれば、ダスト溶融半径の角サイズを見積もることができる。

こうして見積もってみると、近傍の AGN でも、ダスト溶融半径は 1 ミリ秒角を切るということがわかっている。また、上述のように、ダスト溶融領域は赤外線を放つ領域であり、ダスト溶融温度が  $\sim 1500$

K 程度であるなら、観測波長帯としては  $2\mu\text{m}$  帯が最適となる。つまりこの近赤外線において、1 ミリ秒角を切る空間分解能を達成する必要がある。JWST よりも 2 桁近く分解能を上げる必要があり、このためには、単一望遠鏡ではなく、基線（望遠鏡どうしの距離）が数百メートル規模の赤外干渉計が必要となる。現在、こうした条件を満たすのは米国カリフォルニアにある CHARA 干渉計のみである。本研究では、まずこの CHARA 干渉計を用いた観測を目指す。

6 個の望遠鏡をもつ CHARA 干渉計は、さまざまな望遠鏡のペアで観測できるので、ターゲットとする巨大ブラックホール系の軸に対してさまざまな方向に対する大きさを測ることができ、ダスト溶融領域の形を捉えやすい。しかし一方で、各望遠鏡の口径が 1 m であり、AGN のような、系内天体に比べてかなり暗い系外天体の観測は非常に困難である。そこで、CHARA 観測所では、補償光学システムの構築と改良が進められてきており、本研究の研究期間内で 6 個のうち 5 個の望遠鏡で補償光学装置が稼働するようになった。本研究ではこうした補償光学装置に加え、これまで自ら開発してきた暗い天体のためのデータ解析ソフトウェアを用いてデータ解析を進めてきた。

年度	月	実行 夜数	観測 可能率	実観測 夜数
2021	4 月	3.5	30%	1.0
2022	3 月	2.5	0%	0.0
	5 月	2.5	0%	0.0
	12 月	2.5	10%	0.3
2023	4 月	2.5	40%	1.0
	12 月	2.5	0%	0.0
合計		16		2.3

表 1: 本研究期間内の CHARA 干渉計を用いた観測夜数

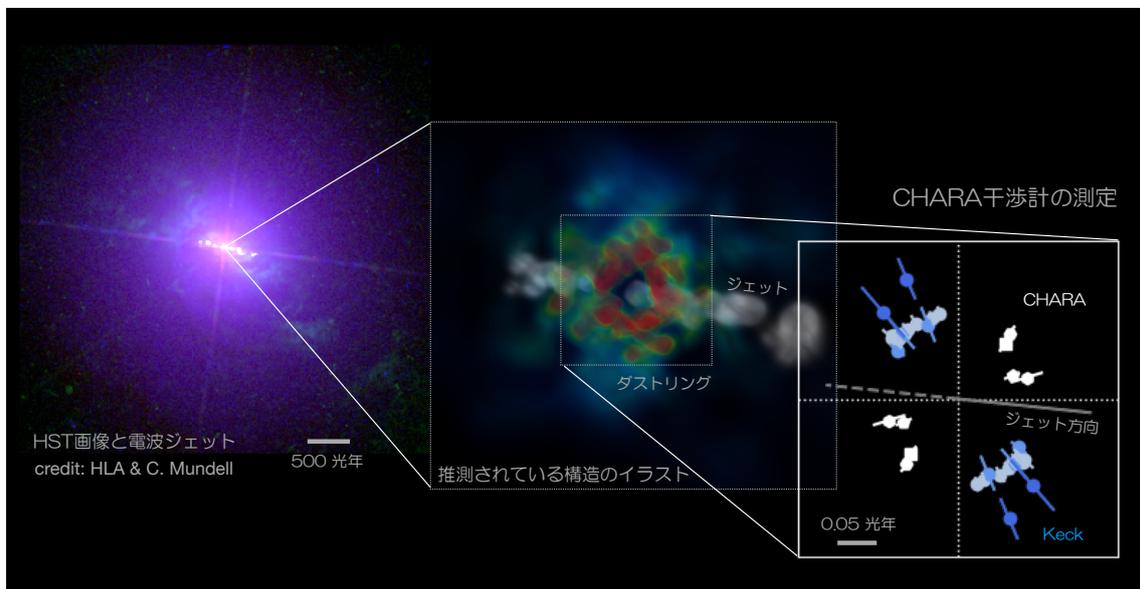


図 1: 左: HST (Hubble Space Telescope) による Type 1 AGN NGC4151 の可視光観測画像 (RGB 合成) に電波ジェットの等高線マップ (白色; C. Mundell 氏提供; Mundell et al. 2003) を重ねたもの。真ん中: 中心部付近のガス分布の想像図 (赤色がダスト溶融領域で、その周りの少し広がった領域が緑色、電波ジェットが白色で示されている)。右: CHARA 干渉計観測によるサイズ測定 (白色; Kishimoto et al. 2022) と Keck 干渉計による短基線観測からの推測サイズ (Kishimoto et al. 2013)。リング状になっていると思われるダスト溶融領域がジェット方向とほぼ垂直に分布している。

#### 4. 研究成果

こうした体制で、本研究期間で16夜の観測時間を確保して観測に臨み(表1)、ついに250 mの長基線で、最も明るいType 1 AGN(天体名はNGC4151)を観測することに成功した。これは実質的に1ミリ秒角を切る空間分解能を赤外線観測で得たことになり、銀河系外天体の光赤外線観測で世界最高の分解能を達成したことになる。2021年の観測結果についてはすでに論文を出版しており(Kishimoto et al. 2022)、これはNHKテレビや多くの新聞、webニュースで報道された。

図1がその結果をまとめたものである。図で左右方向(天球上では東西方向)に輝線領域や電波ジェットが広がる様子が100光年スケールで観測されているが(図1左)、この中心部の0.1光年スケールのダスト溶融領域がついに分解されたのである(図1右)。Keck干渉計による短い基線での観測(すなわち空間分解能がそれほど高くないもの)からの推測と、CHARAでの長基線観測で可能になった実際の測定結果とをあわせて、ダスト溶融領域が中心部のジェットとほぼ垂直に分布していることが確認された。

上に述べたように、可視光と近赤外の変動に時間遅延が観測されていることから、中心部にダストのない領域があるはずであり、したがって、ダスト溶融領域は軸と垂直にリング状に分布していると推測される。つまりこれはダストリングと呼ぶべき領域で、いわゆる統一モデルで提唱された「トーラス」の最内縁部であると思われる、これを直接確認した意義は大きい。また、こうした円盤状の領域の存在は、そのさらに内側に存在する中心核部分がやはり円盤状になっていることを示唆する。

こうした1光年スケールの赤道方向への分布とは対照的に、10光年、100光年スケールでは、ガスは確実に極方向に広がっている。また、100光年スケールでガスが中心部から放射状に100–1000 km/sで運動している様子が観測されており、こうした場合は、撮像分光データからガスの3次元分布が再構成できることを示した論文を出版した(Miyauchi & Kishimoto 2020)。これと同じ方法を、CHARA干渉計で観測したType 1 AGN NGC4151のHSTデータに適用し、100光年スケールでの3次元分布の導出を行なった(図2)。するとやはり極方向に砂時計型に広がる様子が描き出され、その極軸は視線方向に対して約40度程度傾いている。これは、CHARA干渉計で見た構造が、3D空間の円状構造を天球面に投影して楕円に見えているものとする、視線角度が約40度となることとちょうど一致する結果である。

同様に、10光年スケールでも、ガスが極方向に広がっている様子が見えてきており(Hoenig et al. 2012, 2013; Leftley et al. 2021)、これは、100光年スケールでの極方向のガスの流れ、アウトフローとつながっていると考えるのが妥当であろう。CHARAで見た赤道方向の構造と、10-100光年スケールの極方向構造は、おそらく中心核からアウトフローが赤道方向には低速度、極方向には高速度になっている結果なのではないかと考えている(Kishimoto et al. 2022)。こうした構造探査をさらに進め、このアウトフローが「トーラス」および銀河との共進化を担うフィードバック機構の両面を合わせ持つ、という仮説の検証を今後進めていく予定である。

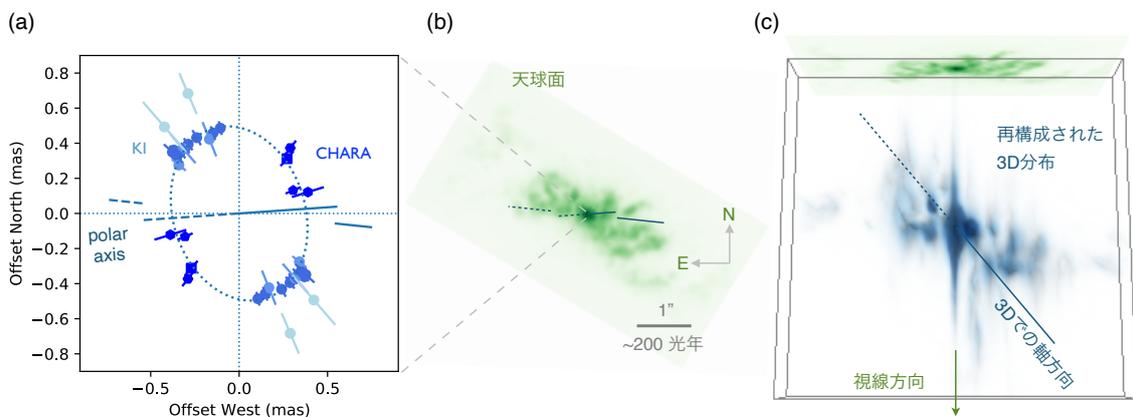


図2: (a) 図1右に示した結果を、楕円フィット(点線)の結果とともに示したもの。(b) HSTによる2階電離酸素輝線の画像。(c) HSTデータを用いて3次元構造を再構築したもの。Kishimoto et al. 2022より。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 9件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kishimoto Makoto, Anderson Matthew, ten Brummelaar Theo, Farrington Christopher, Antonucci Robert, Hoenig Sebastian, Millour Florentin, Tristram Konrad R. W., Weigelt Gerd, Sturmman Laszlo, Sturmman Judit, Schaefer Gail, Scott Nic	4. 巻 940
2. 論文標題 The Dust Sublimation Region of the Type 1 AGN NGC 4151 at a Hundred Microarcsecond Scale as Resolved by the CHARA Array Interferometer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 28 ~ 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac91c4	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 Stalevski Marko, Gonzalez-Gaitan Santiago, Savic Dorde, Kishimoto Makoto, Mourao Ana, Lopez-Rodriguez Enrique, Asmus Daniel	4. 巻 519
2. 論文標題 Dissecting the active galactic nucleus in Circinus - III. VLT/FORS2 polarimetry confirms dusty cone illuminated by a tilted accretion disc	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3237 ~ 3256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac3753	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 Kakkad D, Stalevski M, Kishimoto M, Knezevic S, Asmus D, Vogt F P A	4. 巻 519
2. 論文標題 Dissecting the active galactic nucleus in Circinus - IV. MUSE-NFM observations unveil a tuning-fork ionized outflow morphology	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5324 ~ 5332
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac3827	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 GRAVITY Collaboration et al.	4. 巻 669
2. 論文標題 Toward measuring supermassive black hole masses with interferometric observations of the dust continuum	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A14 ~ A14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202244655	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 GRAVITY Collaboration et al.	4. 巻 648
2. 論文標題 The central parsec of NGC 3783: a rotating broad emission line region, asymmetric hot dust structure, and compact coronal line region	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A117 ~ A117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202040061	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 Leftley James H., Tristram Konrad R. W., Hoenig Sebastian F., Asmus Daniel, Kishimoto Makoto, Gandhi Poshak	4. 巻 912
2. 論文標題 Resolving the Hot Dust Disk of ES0323-G77	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 96 ~ 96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abee80	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 Lira P, Kishimoto M, Goosmann R W, Campos R, Axon D, Elvis M, Lawrence A, Peterson B M, Robinson A	4. 巻 507
2. 論文標題 Spectropolarimetry of NGC3783 and Mrk509: Evidence for powerful nuclear winds in Seyfert 1 Galaxies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 579 ~ 593
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1751	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 Miyachi Ryuji, Kishimoto Makoto	4. 巻 904
2. 論文標題 Velocity-inverted Three-dimensional Distribution of the Gas Clouds in the Type 2 AGN NGC 1068	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 149 ~ 149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abc264	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 GRAVITY Collaboration, Amorim A., Bauboek M., Brandner W., Clenet Y., Davies R., de Zeeuw P. T., Dexter J., Eckart A., Eisenhauer F., Foerster Schreiber N. M., Gao F., Garcia P. J. V., Genzel R., Gillessen S., Gratadour D., Hoenig S., Kishimoto M., et al.	4. 巻 643
2. 論文標題 The spatially resolved broad line region of IRAS 09149-6206	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A154 ~ A154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202039067	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

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Kishimoto Makoto
2. 発表標題 The CHARA Array observations of AGN dusty structure at hundred micro-arcsecond scales
3. 学会等名 Observing the Universe in Motion: 5 Years of GRAVITY (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Kishimoto
2. 発表標題 Infrared polarimetry of AGNs
3. 学会等名 AGN and Polarimetry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020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
研究協力者	テンブルームラー テオ  (ten Brummelaar Theo)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	アンダーソン マシュー  (Anderson Matthew)		
研究協力者	ホーニヒ セバスティアン  (Hoenig Sebastian)		
研究協力者	アントヌッチ ロバート  (Antonucci Robert)		

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			
英国	University of Southampton			
ドイツ	Max Planck Inst. Extraterrestrial Phy.	European Southern Observatory	Max Planck Inst. fuer Radioastronomie	
米国	University of California, Santa Barbara	Georgia State University	Space Telescope Science Institute	他1機関
チリ	European Southern Observatory	University of Chile		
フランス	Observatoire de la Cote d'Azur			