

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 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22540247
 研究課題名（和文）
 活動銀河核多波長モニターデータベースと活動銀河核変光・放射機構の研究
 研究課題名（英文）
 A study of radiation and flux variation mechanisms of active galactic nuclei using databases of multi-wavelength monitoring observations
 研究代表者
 峰崎 岳夫（MINEZAKI TAKEO）
 東京大学・大学院理学系研究科・助教
 研究者番号：60292835

研究成果の概要（和文）：

活動銀河核の多波長にわたる光度変化を利用して、巨大望遠鏡をもってしても画像に分解できない活動銀河核の内部構造に迫った。過去最大の可視近赤外線変光データをもとにダストトーラス内縁半径の光度依存性とその分散を定量的に示し、これまでより現実的な想定に基づきダストトーラスの変光モデルを構築し、観測データと比較した。紫外線可視多波長変光データの解析により、降着円盤の多波長変光の性質を明らかにし、現象論的な変光機構を提案した。

研究成果の概要（英文）：

We investigated inner structure of active galactic nuclei (AGNs) by using their flux variations, which is quite compact and unable to be resolved even by giant telescopes. We presented the radius-luminosity relation for the innermost dust torus that surrounds the black hole and the accretion disk in an AGN based on the largest light-curve dataset of optical and near-infrared monitoring observation. Then, we constructed a realistic model of light-curve reverberation for the dust torus, and compared the model with the observations. We also investigated the spectral variation during flux variation of the UV-optical continuum emission, and proposed the possible emission- and flux-variation mechanisms of the central accretion disk.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	700,000	210,000	910,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

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、クエーサー、活動銀河核、変光、可視近赤外線、ダスト

1. 研究開始当初の背景

活動銀河核とは銀河の中心部の極めて小さい領域において太陽光度の 1000 万～100 兆倍に達する巨大な放射が生じる天体現象で、太陽質量の 10 万～100 億倍の質量をも

つ巨大ブラックホールへのガス降着によって開放される位置エネルギーが降着円盤によって放射に変換されていると考えられている。銀河進化との関連が予想されるなど現代天文学の重要課題である活動銀河核現象

であるが、実は巨大ブラックホールの起源と成長、銀河内の星間ガスのブラックホールへの供給機構、そして活動銀河核現象による銀河形成・進化へのフィードバック機構など、未解決の問題が山積している。

活動銀河核の研究を困難にしている理由のひとつは活動銀河核の放射領域のみかけの大きさが極めて小さく巨大望遠鏡であろうとも活動銀河核は点源にしか見えないため、撮像して詳細に構造を調べられないことにある。しかし活動銀河核の一般的な性質の一つである放射強度の時間変動(すなわち変光現象)を利用してその内部構造や放射機構を探ることができ、実際我々は東京大学口径2m望遠鏡を用いて多数の活動銀河核の可視近赤外線多波長モニター観測を遂行し、変光現象を利用した **echo mapping** という手法によって、活動銀河核のダストトラス構造を調べ、ダストトラス内径が降着円盤光度の平方根におよそ比例していること、広幅輝線領域の外側にダストトラスが存在することを明らかにしてきた(Minezaki et al. 2004; Suganuma et al. 2006)。

2. 研究の目的

我々が遂行してきた可視光・近赤外線波長域の大規模活動銀河核のモニター観測データをまとめ、多波長で観測された変光データの相関関係を調査し、また理論的な光度変動モデルを構築して観測データと比較することにより、活動銀河核のダストトラスおよび降着円盤の構造、放射・変光機構を解明することを目的とする。

ダストトラス研究に関してより具体的には、可視近赤外線光度曲線の遅延解析と理論モデルの構築により、ダストトラスの幾何学的構造の詳細、**clumpy** な構造が予想されるトラス中のダスト雲の自己遮蔽効果およびダストトラス内縁/広幅輝線領域でのダスト生成可能性、これらの性質の光度依存性を明らかにすることが目的である。

降着円盤研究に関してより具体的には、X線、紫外線、可視多波長光度曲線の解析から、変光現象のタイムスケールや多波長光度相関を明らかにし、これを通じて降着円盤の放射モデルおよび変光機構を明らかにすることが目的である。

3. 研究の方法

我々が遂行してきた可視光・近赤外線波長域の大規模活動銀河核のモニター観測データをまとめ、これまでの我々の研究を拡張する。

活動銀河核のダストトラスは降着円盤からの紫外線可視放射を吸収して赤外線を放射している。したがって可視変光と近赤外線変光の遅延時間は、降着円盤からの光がダ

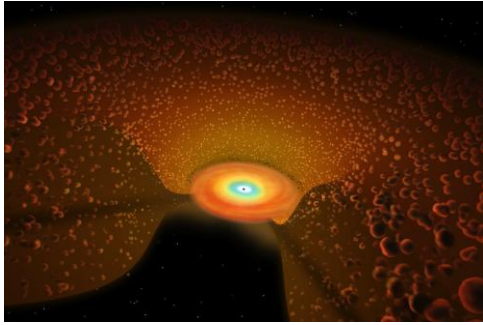
ストトラスにまで到達する時間であり、すなわち遅延時間からダストトラス内縁半径を評価することができる。データ解析を進めることで多数の活動銀河核について広い高度範囲においてダストトラス内縁半径の光度依存性を評価し、トラス内縁半径の光度相関における分散、とくに何かの物理パラメータに付随して系統的なずれの有無を調べる。同時に、より現実的な想定に基づいたダストトラスモデルで可視変光に対する近赤外線変光の応答モデルを構築する。このモデルによりトラス内縁半径の光度相関および分散、系統的な差を調べるほか、光度曲線応答の伝達関数のパラメータ依存性を調べ、観測された光度曲線と比較することで活動銀河核ダストトラスの物理パラメータを評価する。

活動銀河核の降着円盤はよりブラックホールに近い、中心ほど表面温度が高く、放射領域と放射波長のあいだに相関がある。このため降着円盤からの紫外線可視連続放射について異なる波長での変光の性質から、降着円盤での放射機構を探ることができる。アウトバースト的な変光に伴いある温度の黒体放射のスペクトルが生じる場合には、その変光機構は光学的に厚い高温の領域を生じさせる局所的な現象であると推測できる。この手法をマグナム望遠鏡によって蓄積された活動銀河核の可視多波長変光データに適用するだけでなく、スローンデジタルスカイサーベイのデータなど、高赤方偏移にある活動銀河核をターゲットとすることで紫外線放射の変光現象および多波長相関を調べる。さらにRXTE衛星によるX線長期モニター観測データと可視多波長変光データとの相関を調べ、降着円盤の放射・変光機構としてとくに可視変光がX線放射強度変動を起源とするX-ray reprocessingモデルの適否を明らかにする。

4. 研究成果

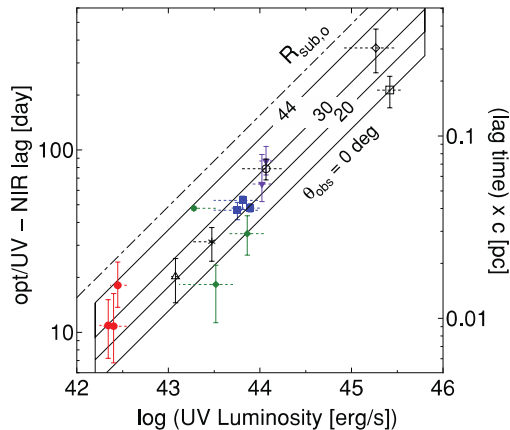
(1) 東京大学マグナム2m望遠鏡で観測した近傍セイファート銀河17天体の可視近赤外線多波長モニターデータを用いて、過去最大の系統的なダストトラス内径測定データをまとめ、活動銀河核降着円盤光度(可視波長)との相関を評価し、天体ごとの分散の原因を考察した。また降着円盤光度の直接的指標となる可視光度との相関だけでなく、硬X線光度や[OIV] 25.89 μm 輝線光度との相関も調べた。これらの光度指標はダストによる減光の影響が小さく、2型活動銀河核やダストに埋もれた活動銀河核のダストトラス内径を評価するのに有用である。これらの結果は論文として投稿中である(Koshida et al. submitted)。

(2) より現実的な想定に基づき、降着円盤放射の変光に対するダストトラス放射の変光の応答の理論モデルを構築した。ダストトラスは clumpy な構造を仮定し、ダスト雲による遮蔽および自己遮蔽を考慮した。また降着円盤放射の非等方性を取り入れた。



ダストトラス内部構造の想像図

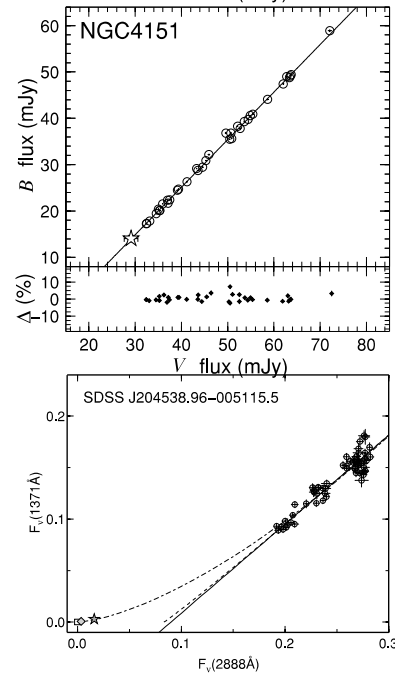
このモデルに基づき、ダストトラスの内縁半径について新しい予想を提示し、観測データと一致することを示した。さらに理論的予測として、可視変光に対する近赤外線変光の応答の遅延時間が活動銀河核ごとに分散する可能性を示し、とくに活動銀河核を観測者が見込む角度に依存することを示した。これらの理論的な予想は今後の観測データの吟味によって明らかになっていくと期待される (Kawaguchi and Mori 2011, 2012)。また今後の研究として、理論モデルから予想された応答関数を観測データと直接比較することで、ダストトラスの物理パラメータについて検証していくことを検討中である。



ダストトラス内縁半径の光度依存性の観測結果 (プロット; Suganuma et al. 2006) とモデルの予想値 (斜線)

(3) 東京大学マグナム 2m 望遠鏡で観測した近傍セイファート銀河のうち、ハッブル宇宙望遠鏡による高空間分解能撮像データの存在する 11 天体に注目し、それらの可視多波長モニターデータを用いて、セイファート銀河の可視連続放射は変光によらず変化しな

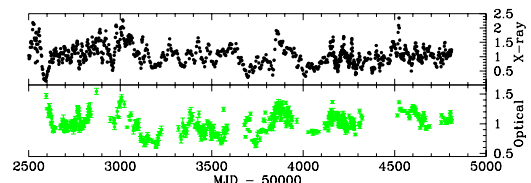
いことを示し、降着円盤放射の変光が局所的なバーストのような現象によるものではないことを示した。一方、スローンデジタルスカイサーベイのデータベースから Stripe82 領域における可視多波長のモニター観測データを抽出、再解析し、大質量ブラックホールを持つクエーサーの紫外線連続放射スペクトルは、放射が明るくなるとスペクトルが青くなることを示した。両方を合わせて考えると、活動銀河核の降着円盤放射の変光は大域的な質量降着率の変動で現象論的に説明できると考えられる。



紫外線可視連続放射の異なる 2 バンドのフラックス間の光度相関。上図: 近傍セイファート銀河の可視波長域のデータ、下図: クエーサーの紫外線波長域のデータ

今後、スローンデジタルスカイサーベイのデータベースをもとに、数千個の活動銀河核の紫外線可視連続放射の変光フラックスの波長依存性を調べ、降着円盤の放射・変光モデルをより詳しく検証する予定である。

また、NGC4051 を始め多くの活動銀河核では X 線放射と可視放射の変光は時間的によく相関しており、互いの放射機構の密接な関係を示唆している (Sakata et al. 2010, 2011; Breedt et al. 2010)。



近傍セイファート銀河 NGC4051 の X 線 (黒) および可視 (緑) の光度曲線

今後、新たにすざく衛星と共同で観測を行い、複数あると言われている活動銀河核のX線放射成分のうち、何が降着円盤と緊密に関係しているかを調べていく予定である。

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 13 件)

- ① T. Kawaguchi and M. Mori, “Near-infrared Reverberation by Dusty Clumpy Tori in Active Galactic Nuclei”, *The Astrophysical Journal*, 737, 2011, 105-119; 査読有り; DOI [10.1088/0004-637X/737/2/105](https://doi.org/10.1088/0004-637X/737/2/105)
- ② Y. Sakata, T. Minezaki et al., “Ultraviolet Continuum Color Variability of Luminous Sloan Digital Sky Survey QSOs”, *The Astrophysical Journal*, 731, 2011, 50-62; 査読有り; DOI [10.1088/0004-637X/731/1/50](https://doi.org/10.1088/0004-637X/731/1/50)
- ③ T. Kawaguchi and M. Mori, “Orientation Effect on the Inner Region of Dusty Torus of Active Galactic Nuclei”, *The Astrophysical Journal*, 724, 2010, L183-186; 査読有り; DOI [10.1088/2041-8205/724/2/L183](https://doi.org/10.1088/2041-8205/724/2/L183)
- ④ E. Breedt, T. Minezaki et al., “Twelve years of X-ray and optical variability in the Seyfert galaxy NGC 4051”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 403, 2010, 605-619; 査読有り; DOI [10.1111/j.1365-2966.2009.16146.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.16146.x)
- ⑤ Y. Sakata, T. Minezaki et al., “Long-Term Optical Continuum Color Variability of Nearby Active Galactic Nuclei”, *The Astrophysical Journal*, 711, 2010, 461-483; 査読有り; DOI [10.1088/0004-637X/711/1/461](https://doi.org/10.1088/0004-637X/711/1/461)

[学会発表] (計 31 件)

- ① T. Kawaguchi, “Innermost Structure and Near-Infrared Emission of AGN Dusty Tori”, *Torus Workshop 2012*, 2012. 12. 04-06, U of Texas, San Antonio, USA
- ② T. Kawaguchi, “Emission from AGN Dusty Tori and a Wandering BH”, *AGN Workshop 2012 in Jeju*, 2012. 09. 12-14, Ramada Hotel Jeju, Korea
- ③ 峰崎 岳夫、川口 俊宏他, 「活動銀河核変光の紫外線可視放射の多波長相関」, HSC 活動銀河核探査によるサイエンス研

究会, 2011. 11. 18, 京都大学, 京都

- ④ T. Kawaguchi and M. Mori, “Near-Infrared Emission from Dusty Clumpy Tori in AGNs”, *Through the Infrared Looking Glass*, 2011. 10. 03-05, Pasadena, USA

6. 研究組織

(1) 研究代表者

峰崎 岳夫 (MINEZAKI TAKEO)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号: 60292835

(2) 研究分担者

川口 俊宏 (KAWAGUCHI TOSHIHIRO)

山口大学・理工学研究科・助教

研究者番号: 60433695