

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 16 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05020

研究課題名(和文) クェーサーの活動性の変動とその起源の解明

研究課題名(英文) Study on variability mechanisms of quasar activity

研究代表者

三澤 透 (Misawa, Toru)

信州大学・学術研究院総合人間科学系・准教授

研究者番号：60513447

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：クェーサー中心にある降着円盤から輻射圧などで噴き出すガスの流れ(アウトフロー)にみられる時間変動の起源として注目されている「電離状態変動シナリオ」を、その補助機構も含めて観測的に検証した。その結果、アウトフローによる吸収強度がクェーサー光度とリンクしていることや、レンズクェーサーを用いた多視線観測の結果からアウトフローガスが視線間距離よりも小さな構造を持つことなどを突き止めた。これらは自己遮蔽効果を補助機構とする電離状態変動シナリオを支持するものであるが、ガス運動による効果も無視できないことも明らかになった。

研究成果の概要(英文)：AGN outflow wind, a gas stream from the accretion disk of quasar central engines that are accelerated by radiation pressure, shows time variability, although its origin is not clearly understood. We verified one of the most plausible scenarios for the variability (variability ionization scenario; VIS) through unique observations. Our observations suggest a) variability pattern in outflow wind and quasar luminosity are synchronized and b) an outflow wind has the internal structure whose physical scale is smaller than separation distance between sightlines of two lensed images of quasars. These results support the VIS scenario with a self-shielding effect as an additional mechanism, although the gas motion of outflow wind could partially contribute to the change of outflow wind.

研究分野：数物系科学

キーワード：AGNアウトフロー クェーサー吸収線

### 1. 研究開始当初の背景

クェーサーは、銀河進化とその成長を追う上で重要なファクターとなる「化学進化」と「星形成活動」を制御している。このことは、クェーサー中心にある巨大ブラックホール (BH) の質量と、そのクェーサーをもつ銀河 (ホスト銀河) の力学的性質が相関関係を有することからも明らかである。しかしスケールにして 10 桁も異なる両者が如何にして影響を及ぼしあっているのかは分かっていない。その解明の鍵となりうるのが、アウトフロー (降着円盤から輻射圧などによって外部に加速されるガス流) である。アウトフローはエネルギーや重元素とともに、あらたなガス降着の邪魔になる角運動量を持ち去るため、クェーサー自身の進化に対しても不可欠な要素である。

アウトフローの存在は、約 15% のクェーサーのスペクトル上にみられる幅の広い (FWHM > 2,000 km/s) 吸収線 (Broad Absorption Line; BAL) の検出により観測的に確認されている。近年、この BAL が激しい時間変動を示すことがわかってきた。一連のエネルギー変換システムの集大成として放出されるアウトフローが変動するということは、クェーサー活動の複雑性を物語るのみならず、近傍宇宙への影響も時間と共に激しく変化することをほのめかす。このように、その変動傾向を通じたアウトフローの全貌解明は極めて重要であるといえる。

BAL が激しい時間変動を示す理由として、今まで様々なシナリオが提案されてきた。しかし、BAL クェーサーに対する度重なる高分散分光モニター観測にもかかわらず、その絞り込みには成功していない。その最大の理由は BAL の構造にある。BAL は極めて強い吸収であり、吸収線内部の情報がほとんど失われてしまうため、吸収線フィットによるガスの物理量 (柱密度、速度幅など) の評価は絶望的である。その結果、吸収線変動シナリオの絞り込みはおろか、吸収体のガス密度や光源からの距離といった基本的な情報の取得もままならない状況である。時間変動の解明には新しい手法が必要であることは明らかである。

### 2. 研究の目的

本研究課題の目的は、線幅の小さい吸収線を用いるユニークな手法をもとに、アウトフローの変動傾向およびその起源を解明し、宇宙で最大規模の光源であるクェーサーの活動性を解明することである。

近年、BAL とは異なるアウトフロー起源の吸収線が次々と発見されている。例えば幅の狭い (FWHM < 500 km/s) 吸収線 (Narrow Absorption Line; NAL) は、従来その全てが

クェーサーとは無関係な手前にある物質 (銀河・銀河間物質) による吸収線だと考えられてきたが、波長分解能の向上と共に、その一部がアウトフローに起源を持つことが明らかになってきた。実際、アウトフローに起源をもつ NAL は、約半数のクェーサーで検出されている。加えて、BAL と NAL の中間的な線幅をもつ mini-BAL とよばれる吸収線も発見されている。NAL と mini-BAL は、高分散分光によって吸収線の内部構造を完全に分解することができるため、物理量の評価が可能である。また BAL とは異なる視線方向の情報を有すると考えられるため (図 1)、アウトフローの全貌解明には欠かせない。実際に、特定の mini-BAL に対する集中的な観測を行ったところ、その変動はアウトフローガスの電離状態の変動と深くかかわっている可能性が高いことが分かっている。そこで本研究課題では、3 種類の独立した観測によって、このシナリオ (電離状態変動シナリオ) を徹底的に検証し、クェーサー活動の指標でもある「アウトフローの時間変動」の原因の解明をめざす。

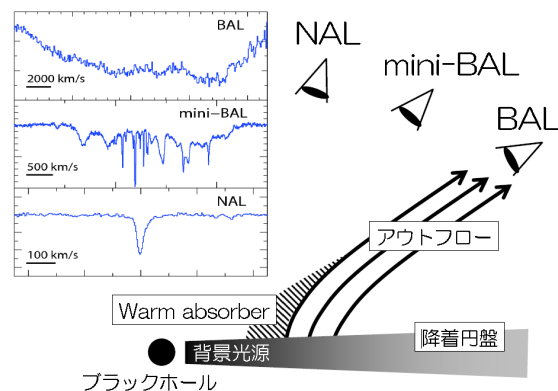


図 1 : アウトフローの構造と各吸収線の位置関係

### 3. 研究の方法

アウトフローの時間変動の原因を、3 種類の観測 (可視高分散分光モニター観測、測光・分光同時モニター観測、可視・X 線同時分光モニター観測) を通して確定する。これらの観測結果をもとに、現在の最有力シナリオである「電離状態変動シナリオ」を、遮蔽効果を取り入れた 2 つのサブシナリオ (後述) も含めて検証する。また、光電離モデルを通してアウトフローの物理的状態を詳細に調べるとともに、NAL だけが変動しない理由を突き止める。これらの結果をもとに、アウトフローの見込み角の違いを反映している BAL, mini-BAL, NAL の共通点、相違点を比較しつつ、その時間変動の全貌の解明を目指す。本研究課題は以下の 2 段階で進める。

- (1) 最初のステップとして、オリジナルの電離状態変動シナリオを検証する。mini-BAL, NAL をもつクェーサーに対す

る測光・分光同時モニター観測を通し、クェーサー光度（すなわち電離光子密度）と吸収強度（特定の電離状態にあるイオンの存在量）の相関の有無を確認する。東京大学・木曾 105cm シュミット望遠鏡/KWFC を用いた mini-BAL クェーサーの測光モニター観測、および、国立天文台・岡山 188cm 望遠鏡/KOOLS を用いたクェーサーの分光モニター観測を継続し、クェーサー光度がアウトフローガスの電離状態に直接的に与える影響を調べる。クェーサー光度と吸収強度の同時モニター観測のデータを、複数の mini-BAL/NAL クェーサーに対して揃える。BAL 以外のクェーサーに対する両者の相関については過去に観測例がないため、本研究が最初の試みとなる。

- (2) 続いて、電離状態変動シナリオに対する補助機構の存在を検証する。BAL に対するクェーサー光度と吸収強度の相関については、肯定する結果と否定する結果が混在しており状況は混沌としている。この問題を解決すべく、2つのサブシナリオが提案されている。「変動する遮蔽物質シナリオ」は、光源の周囲に光学的厚さが変動する遮蔽物質が存在すれば、そこを通過する電離光子の量が変動し、より下流にあるアウトフローガスの電離状態を変化させることが出来るというものである。X線観測で検出される電離されたガス（いわゆる warm absorber）が遮蔽物質の候補として注目されている。このサブシナリオは、可視・X線同時分光モニター観測によって、アウトフローによる吸収と遮蔽効果の相関を調べることにより検証できる。一方、アウトフローガスの自己遮蔽効果によっても、後方のガスの電離状態を変化させる可能性がある。これがもう一つの「変動する自己遮蔽シナリオ」と呼ばれるものである。ただし、自己遮蔽を有効に働かせるためには、アウトフロー自身のガス密度が十分に大きくなければならない。典型的な mini-BAL クェーサーを仮定すると、その値は  $10^7 \text{ cm}^{-3}$  程度となる。この場合、対応する個々のアウトフローガスのサイズは  $10^{-4} \text{ pc}$  程度となる。このシナリオから予想されるアウトフローの内部構造は、一部のシミュレーションで再現されているような高密度でサイズの小さい塊状のガスの集合体ということになる。このサブシナリオは光電離モデルの適用により検証可能である。我々の可視高分散分光モニター観測のデータは、いずれも波長分解能 30,000 程度以上で取得されたものであり、吸収構造がほぼ完全に分解されている。内部構造が完全に失われる BAL と異なり、mini-BAL/NAL に対しては各吸収成

分に対する光電離モデルの適用が可能である。光電離モデルから評価される物理量は、ガス密度、サイズ、電離パラメータ、金属量、温度、乱流の大きさ、と多岐にわたる。さらにこれらの物理量の時間変化を追うことも可能である。

#### 4. 研究成果

本研究課題に対し以下の結果を得るとともに学術論文 6 本、学会・研究会発表 14 件を通して広く国内外に公表した。

- (1) 国内の望遠鏡（木曾 105cm シュミット望遠鏡、岡山 188cm 望遠鏡）を用いて mini-BAL/NAL クェーサーに対する測光・分光同時モニター観測を行った。その結果、BAL クェーサーと同様に、mini-BAL クェーサーに対してもクェーサーの光度変動とアウトフローによる吸収強度の変動が僅かな時間差をもってリンクしていることを突き止めた（図 2）。この結果は「電離状態変動シナリオ」を支持するものである。一方で、光度変動の大きさが吸収強度の変動を説明できるほどには大きくないことも分かった。さらに、吸収線の時間変動が乏しい NAL クェーサーに対しても mini-BAL クェーサーと同程度の光度変動が確認された。これらの結果は、クェーサーの光度変動だけがアウトフローによる吸収線の強度を決めているわけではなく、何らかの補助的な機構が働くことを示唆する。本研究により、BAL のみならず mini-BAL/NAL に対しても単純な電離状態変動シナリオは採用できないことが分かったが、アウトフローに対する見込み角の違いを反映した BAL, mini-BAL, NAL に対して共通の傾向がみられたことは、アウトフローの幾何構造を含めた統一的な理解を進めるうえで重要な結果であるといえる（学術論文 1 本、研究発表 2 件）。

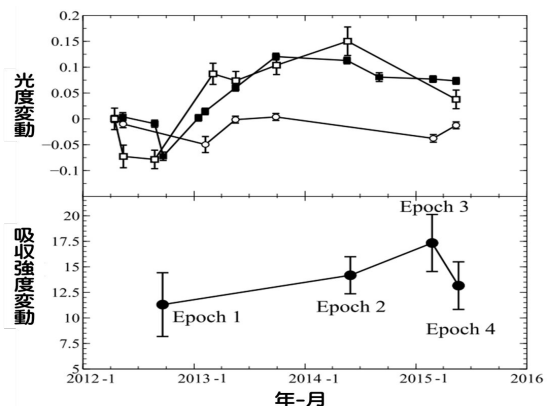


図 2 : Mini-BAL クェーサー HS1603+3820 に対する長期測光分光モニター観測の結果 (Horiuchi et al. 2016, PASJ, 68, 48)。

- (2) 電離状態変動シナリオを補足するために、補助機構（塊状の吸収物質による自己遮蔽効果の変動）を取り入れたシナリオが提案されている。このシナリオでは吸収ガスのサイズが問題となる。クェーサーの光源近くで過電離を避けるためには自身のガス密度は極端に大きく、同時にガスサイズは極端に小さくしなければならない。しかし個々のガスサイズの見積もりは困難であり、とくに視線方向の広がりについては単視線の情報しか得ることができない分光観測では不可能である。そこで我々は、大離角レンズクェーサー SDSS J1029+2623（最大離角 22.5 秒）を用いた多視線分光観測を行った。その結果、放出速度が小さい（すなわち光源からの距離が小さい）アウトフローが 2 視線でほぼ共通の吸収構造を持つのに対し、放出速度が 1,000 km/s よりも大きいアウトフロー吸収は一方の視線でしか検出されないことが分かった（図 3）。この結果は、アウトフローの個々のガスサイズが、レンズ像の視線間距離よりも小さいことを意味する。アウトフローガスの光源からの距離として典型的な値である 1 pc を仮定すると、レンズ像の視線間距離は 0.0001 pc 程度となる。つまりアウトフローは小スケールで高密度のクランピー構造を持つ可能性があり、これが自己遮蔽を実現しているのかもしれない。ガスサイズに対するより強い制限を加えるために、小離角レンズクェーサー SDSS J1001+5027（離角 2.8 秒）に対しても同様の観測を行ったところ、やはり視線間で僅かに異なる吸収構造が検出された。しかし、詳細な幾何構造の解析から、この吸収構造の違いは視線方向によるものではなく、アウトフローガス内部の時間変動に起因するものであることが明らかになった。結果的に、自己遮蔽モデルをサポートする付加的な結果とはならなかったが、その複雑な時間変動のパターンから、単純な電離状態の変動だけでは説明できず、ガス運動による効果も必要であるという新たな知見を得ることに成功した（学術論文 2 本、研究発表 5 件）
- (3) もう一つの補助機構（アウトフローの根元に存在する warm absorber の光学的厚さの変動）を検証するために、当初の計画では可視・X線同時モニター観測を実行、あるいはアーカイブデータの利用を計画していたが、まずは mini-BAL/NAL を有するクェーサーが保持する warm absorber の諸性質を確認することが先決であると判断し、特定の NAL クェーサー HS 0810+2554 に対する集中的な X線解析を行うことにした。Chandra および XMM-Newton で取得されたデータを解析

した結果、放出速度が  $0.1c \sim 0.4c$  と極めて高速なアウトフローを検出した。さらに Fe 輝線付近には P-Cygni profile が検出された。後者の結果からは吸収ガスの掩蔽率が 0.6 以上であるという結果を得た。このように、NAL クェーサーにおいて energetic な warm absorber が検出されたことは、BAL, mini-BAL, NAL といった紫外吸収線と X 線 warm absorber の密接な関わりを示唆するものである（査読論文 1 本）

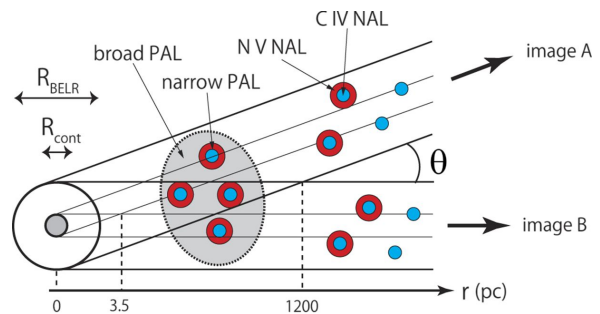


図 3：重力レンズクェーサーを用いたアウトフローの多視線観測の概念図。視線が重ならない場合に限り、吸収構造の違いを検出できる (Misawa et al. 2016, ApJ, 825, 25)。

## 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)

Toru Misawa, Naohisa Inada, Masamune Oguri, Jane C. Charlton, Michael Eracleous, Suzuka Koyamada, Daisuke Itoh, “Spectroscopic Observations of the Outflowing Wind in the Lensed Quasar SDSS J1001+5027”, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 854, Issue 1, 2018, article id. 69, 14 pp. DOI:10.3847/1538-4357/aaa66e

Takashi Horiuchi, Toru Misawa, Tomoki Morokuma, Suzuka Koyamada, Kazuma Takahashi, Hisashi Wada, “Optical variability properties of mini-BAL and NAL quasars”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol. 68, Issue 4, 2016, article id. 48, 19 pp. DOI:10.1093/pasj/psw044

Toru Misawa, Cristian Saez, Jane C. Charlton, Michael Eracleous, George Chartas, Franz E. Bauer, Naohisa Inada, Hisakazu Uchiyama, “Multi-Sightline Observation of Narrow Absorption Lines in Lensed Quasar SDSS J1029+2623”, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 825, Issue 1, 2016, article id. 25, 19 pp.

DOI:10.3847/0004-637X/825/1/25  
G. Chartas, M. Cappi, F. Hamann, M. Eracleous, S. Strickland, M. Giustini, T. Misawa, “ The Wide-angle Outflow of the Lensed  $z = 1.51$  AGN HS 0810+2554 ”, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 824, Issue 1, 2016, article id. 53, 14 pp.  
DOI:10.3847/0004-637X/824/1/53

〔学会発表〕(計 14 件)

Toru Misawa, Michael Eracleous, Jane C. Charlton, Naohisa Inada, Masamune Oguri, “ Physical Properties of Narrow and mini-Broad Absorption Line Systems (招待講演) ”, European Week of Astronomy and Space Science 2017, 2017 年

堀内 貴史, 三澤 透, 小山田 涼香, 和田 久, 伊東大輔, 諸隈 智貴, “ ケーサーのアウトフローに見られる時間変動傾向の起源 ”, 日本天文学会 2017 年春季年会, 2017 年

Toru Misawa, “ Multi-Sightline Observation of the Outflow Winds in Lensed Quasar SDSS J1029+2623 (招待講演) ”, Workshop on Theoretical Astronomy 2016, 2016 年

T. Misawa, C. Saez, J. C. Charlton, M. Eracleous, G. Chartas, F. E. Bauer, N. Inada, H. Uchiyama, “ Resolving the Internal Structure of the Outflow Winds from Gravitationally Lensed Quasars ”, East-Asia AGN Workshop 2016, 2016 年

堀内 貴史, 三澤 透, 小山田 涼香, 高橋 一馬, 和田 久, 諸隈 智貴, “ 分光モニター観測によるケーサーアウトフローガスの調査 ”, 日本天文学会 2015 年秋季年会, 2015 年

Toru Misawa, “ Multi-Sightline Observation of Outflow Winds in Lensed Quasars (招待講演) ”, IGM Tomography Workshop 2016, 2016 年

三澤透, “ TMT 時代の高分散分光データを用いた銀河/AGN 研究 (招待講演) ”, 第 3 回銀河進化研究会, 2016 年

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三澤 透 (MISAWA, Toru)  
信州大学・学術研究院総合人間科学系・准教授  
研究者番号： 6 0 5 1 3 4 4 7