

機関番号： 13601

研究種目： 若手研究 (B)

研究期間： 2009 ~ 2010

課題番号： 21740150

研究課題名 (和文) 活動銀河核から吹き出すアウトフローガスの幾何学的構造の解明

研究課題名 (英文) Geometrical structure of outflowing gas from active galactic nuclei

研究代表者

三澤 透 (MISAWA TORU)

信州大学・全学教育機構・講師

研究者番号： 60513447

研究成果の概要 (和文) : 遠方銀河の中心核であるクェーサーは、アウトフロー (放出) ガスを通して莫大なエネルギーを宇宙空間に解放し、周囲の星間・銀河間空間に大きな影響を与えている。放出ガスはクェーサーのスペクトル上に吸収線という形で検出される。最大10年に渡る吸収線のモニター観測、光電離モデルの適用、偏光スペクトルの新規取得を通し、(a) 吸収線の時間変動率は線幅に依存し、その原因は高電離の遮蔽物質にあること、(b) 放出ガスは過去に激しい星形成を経験している可能性があること、などを突き止め、その幾何学的構造に対する知見を得た。

研究成果の概要 (英文) : Quasars, active galactic nuclei at distant universe, have quite important consequences to interstellar and intergalactic media through their outflowing winds with enormous energy. The winds are detected as absorption profiles on the spectra of quasars. Based on monitoring observations over ~10 years, photoionization modeling, and new acquisition of a polarization spectrum, we discovered interesting properties of the winds such as (a) variability of absorption profile depends on their line widths and (b) the winds have experienced an intense star forming activity in the past, and expanded the knowledge of their geometrical structures.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,600,000	480,000	2,080,000

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： クェーサー吸収線、活動銀河核、降着円盤、アウトフローガス

1. 研究開始当初の背景

従来、クェーサーの研究は主に「輝線」をとらえる分光観測によって進められてきた。しかし輝線は光源の不定性という致命的な問題を抱えていた。一方、「吸収線」を用いる手法は、背景光源が何であれ、その視線上に存在するクェーサー近傍のガスだけを他

者の影響を受けることなく効率良く検出することができるため注目を集めている。

およそ10%のクェーサーで検出されるBroad Absorption Line (BAL) とよばれる吸収線は、その線幅の大きさ (視線速度幅にして約2,000 km/s以上) から容易にクェーサーとの関係を連想させるため、放出ガスの研

究に利用されてきた。BAL は、我々の視線が放出ガスの流れと平行な位置関係にあるときに検出されるという見方が一般的である。もし、我々の視線が放出ガスを横切っていない場合は、BAL の代わりに Narrow Absorption Line (NAL) とよばれる線幅が高々 500 km/s 程度以下の細い吸収線が検出されると考えられている。NAL の線幅はガスの熱運動程度で再現できることから、従来はそのすべてがクェーサーとは無関係な、銀河、あるいは銀河間ガスによる吸収線であると考えられてきた。ところが、NAL の検出頻度が背景光源であるクェーサーの諸性質（たとえば電波強度、スペクトルの形状など）に依存することが明らかになったため、その一部（最大で 36%）はクェーサーに起源を持つことが分かってきた。

クェーサーに付随する NAL (以下、付随 NAL) への注目度が日に日に高まる中、アーカイブデータを用いた統計的解析により、約半数のクェーサーが少なくともひとつの付随 NAL を持つことが自身の研究により明らかになった。この結果は、(1) すべてのクェーサーを取り巻く立体角のおよそ 50% が付随 NAL 吸収体で覆われている、あるいは (2) 約半数のクェーサーが完全に付随 NAL 吸収体で覆われている、ことを示唆する。しかしこの結果は、赤方偏移 2 ~ 4 付近に存在する極めて明るいクェーサーのみをサンプルとしているため、放出ガスのひとつの側面を見ているにすぎないかもしれない。BAL と付随 NAL による放出ガスの諸性質を調べるためには、よりパラエティーに富んだクェーサーのサンプルが不可欠である。

2. 研究の目的

クェーサーに起源を持つ吸収線 (BAL および付随 NAL) を用いた放出ガスの諸性質（検出率、柱密度、体積密度、クェーサーからの距離および放出速度など）と、クェーサーの諸性質（可視光強度、電波強度、X 線強度、スペクトルタイプ、赤方偏移など）の比較から、放出ガスの幾何学的構造、およびその物理的・化学的性質を解明することを目的とする。本研究課題で取り組む具体的な目標を以下にまとめる。

- (1) 様々な光度をもつクェーサーサンプルを用いて統計的解析を行う。実際に、漏斗状の構造を持つと考えられている放出ガスの開放角がクェーサーの明るさに依存するという研究も報告されている。可視高分散分光データが大量に必要なため、過去にすばる望遠鏡、Keck Telescope、あるいは Very Large Telescope (VLT) で取得された利用可能なすべてのデータをア

ーカイブから検索するところから始める必要がある。なかでも VLT のアーカイブには多数の利用可能なデータが存在していると考えられる。

- (2) セイファート銀河に付随する放出ガスを検出し、その統計的性質を調べる。降着円盤に対する見込み角と、放出ガスの関係を調べる上で、勾配がある程度予想できるセイファート銀河は理想的なターゲットとなる。例えば、近傍の I 型と II 型のセイファート銀河を 10 天体程度ずつ観測できれば、クェーサーでは得ることが難しい降着円盤の勾配との関係を探ることが可能となる。もし放出ガスが、降着円盤に平行な構造をもっていれば輻射圧の効果が、U 字形の構造をもっていれば磁気遠心力の効果が卓越していることがいえる。もちろん両者の貢献度はクェーサーの諸性質にも依存すると考えられる。近傍の天体であるセイファート銀河の観測にはハッブル宇宙望遠鏡 (HST) による紫外高分散分光観測が不可欠であるため、鋭意、観測時間の獲得に努める。
- (3) BAL の発生頻度についてはクェーサーの性質（可視域での色、電波強度、可視-X 線強度比など）に依存することが知られている。そこで、過去の電波サーベイ観測や、Suzaku、Chandra、XMM-Newton による X 線分光観測に基づく多波長観測データを駆使した解析を行う。

3. 研究の方法

BAL はクェーサーを edge-on の方向から見たときに受かるというのがほぼ定説であったが、このシナリオに明らかに矛盾する観測結果も提唱されはじめている。もはや BAL を観測するだけでは放出ガスの理解は進まない。そこで、クェーサーに起源を持つもうひとつの吸収線 (付随 NAL) に焦点を当てる。BAL の観測だけでは埋めきれなかった放出ガスの理解を進めるとともに、その幾何学的構造に決着を付けることを目的とした研究計画を以下にまとめる。

- (1) 無バイアスサンプルによる統計的解析：VLT で公開されているすべてのクェーサーの高分散（分解能 $R \sim 40,000$ ）分光データ（200 天体以上）を解析し、そのスペクトル上に存在する NAL を検出する。対象とする吸収線は C IV、Si IV、N V の 3 つを選択。これらは 2 重共鳴吸収線（すなわち、吸収線同定の信頼度が高い）であり、 $\text{Ly}\alpha$ よりも長波長側に位置するため、銀河間ガスに起源を持つ $\text{Ly}\alpha$ forest とのブ

レンドを避けられるからである。この時点ではまだ、銀河・銀河間ガスによる吸収線と、クェーサーに起源を持つ吸収線（付随 NAL）が混在しているが、以下に述べる「部分掩蔽解析」により両者を分離することが可能である。クェーサーの光度や赤方偏移の分布に偏りが無い VLT のアーカイブデータを用いることにより、付随 NAL の諸性質（放出速度、検出率など）とクェーサーの諸性質（可視光度、電波・X 線強度、およびその強度比など）との比較が可能となる。相関関係の解明には主成分解析が有効だと考えられるが、事前に期待される傾向としては以下の様なものが挙げられる：

- ① 高光度のクェーサーでは放出ガスが薄く円盤に並行になるため、(BAL だけでなく) 付随 NAL の検出率も（特に face-on のときに）下がる
- ② 主要なガス加速源が輻射圧である場合は、クェーサー光度と付随 NAL 吸収体の最終到達速度の間に相関が見られる。これは BAL に対しても期待される傾向である。
- (2) HST の紫外高分散分光器を用い、近傍セイファート銀河の分光観測を行う。遠方クェーサーは、その光度の大きさから観測が容易でサンプルを集めやすいという利点がある一方で、降着円盤の勾配の情報を得ることが難しい。今までにセイファート銀河に対する付随 NAL の検出例はないため、例え予備調査となろうともその結果は十分意味がある。
- (3) アーカイブ、あるいは新規観測によるデータの確保が済み次第、2 次的な解析作業に入る。付随 NAL に対する具体的な解析の流れはすでに確立されており、大きくわけて以下の 3 つのステップに分けられる。
- ① 部分掩蔽解析：原子物理理論により 2 重共鳴吸収のふたつの吸収線の強度比は 2 : 1 になることが期待されるが、まれにこの比が 2 よりも小さいものがある。これは、吸収体が背景光源（すなわちクェーサー）を視線方向に対して完全に覆っていないことによる光の「もれだし」によると考えられる。吸収体が視線方向に対しクェーサーを覆っている比率（掩蔽率 C_f ）は、規格化されたスペクトル上における 2 重吸収線の各成分の残余フラックス (R_b , R_r) のみから評価することが可能である（図 1）。銀河・銀河間に存在するガスは一般に数 kpc スケールに達するため、部分掩蔽を起こさない。掩蔽率が 1 より小さい吸収線を探すことが、放出ガスによる吸収線（付随 NAL）の同定につながる。

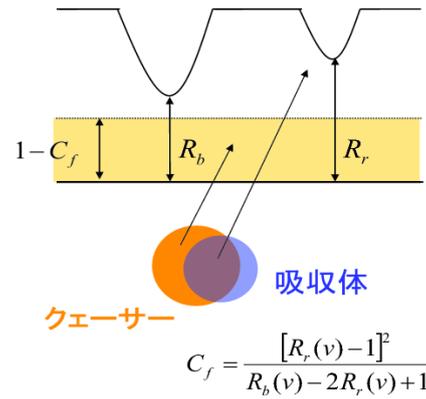


図 1：部分掩蔽解析

- ② 光電離モデル：BAL はその内部電離状態に応じて 3 つのサブカテゴリーに分類される：(i) 高電離ガスのみを持つ一般的なもの (HiBAL)、(ii) さらに低電離ガス（たとえば Mg II）を含むもの (LoBAL)、(iii) さらに Fe II を含むもの (FeLoBAL)。BAL にみられるこのような内部電離状態の複雑性が付随 NAL にもみられるかどうかは極めて興味深い。間接的に NAL の電離状態が BAL と比較して「低い」ことが、すでに自身の研究により示唆されている。そこで、この種の解析では多用されるコード (Cloudy) を用いた光電離モデルを適用し、放出ガスの電離状態を詳細に調べる。吸収線のモデルフィットから、金属量、電離パラメータ（電離光子と電子の存在比）をフリーパラメータとした光電離モデルまでを自動的に行うコードがすでに開発されているため、作業時間の大幅な短縮が見込める。
- ③ シミュレーションとの比較：観測から期待される最もふさわしい放出ガスのモデルは、最終的にはシミュレーションと比較する必要がある。過去のシミュレーションでは放出ガスの上方にフィラメント状の構造が形成されることが知られており（図 2）、これが、本研究課題の対象である付随 NAL をもたらしている可能性が高い。今後、初期境界条件の導入をなるべく抑えた、より一般的なシミュレーションとの比較が望まれる。

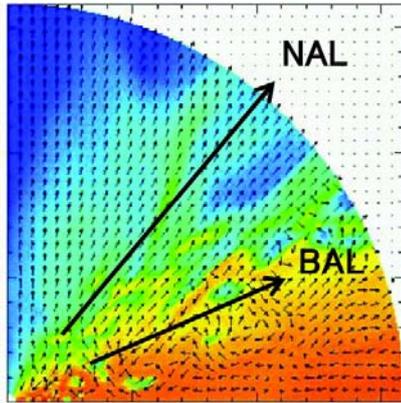


図2：シミュレーションとの比較 (Ohsuga et al. 2005, ApJ, 628, 368)

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、3本の学術論文、3件の学会発表を通して、広く国内外に公表した。

- (1) 時間変動解析：VLT をはじめとする 10m 級望遠鏡で高分散分光観測が複数回行われている 12 個のキューサーのスペクトルを、アーカイブから取得、あるいは自身で観測し、付随 NAL の時間変動の傾向を調べた。その結果、NAL のなかでも速度幅が 500km/s をこえる、比較的線幅の大きいもの（これらは通常 mini-BAL と呼ばれる）が明らかな時間変動を示す（図 3）のに対し、線幅が 500km/s 未満の典型的な NAL は数年スケールではほとんど不変であることを突き止めた。時間変動の原因としては、(i) 塊状のガスの運動、(ii) 電離状態の変化、などが考えられる。他にも（後述するように）散乱物質の存在や、光学的厚さが変化するシート状の高電離ガスなども考えられるが、いずれにしても吸収線の線幅と時間変動傾向の相関関係は、放出ガスの構造を探る上で鍵となる。

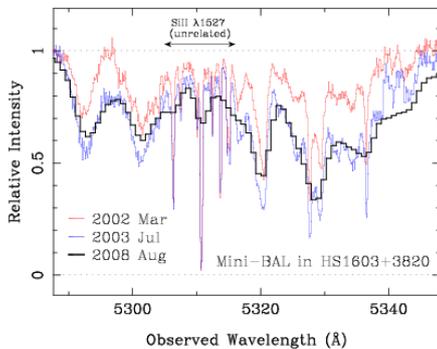


図3：キューサーHS1603+3820に見られる mini-BAL の時間変動 (Misawa et al. 2010, ApJ, 719, 1890)

- (2) 紫外分光観測：膨大な量を誇る HST のアーカイブデータから利用可能なものを検索する作業が完了していないため、HST への新規観測提案は見送ることにした。しかし（放出ガスではなく）銀河間物質をとらえることを目的とした極めて関連性の高い観測については、研究責任者 (PI) として HST/COS による観測時間の確保に成功した。
- (3) 付随 NAL の電離状態の解明：上記(1)のモニター観測に用いた NAL のうち、特にクオリティの高いデータが取得できた 3 天体について、Cloudy を用いた光電離モデルを適用した。光電離モデルはパラメータが多く（金属量、電離パラメータ、元素組成比など）、また Voigt Profile でフィットされる吸収成分ごとに行う必要があるため極めて根気のいる作業となる。共同研究者であるペンシルベニア州立大学のスタッフ、大学院生とともにこれらの解析に取り組み、付随 NAL を対象とした光電離モデルとしては過去に例をみない精度での結果を得ることに成功した。少なくとも太陽の 10 倍以上の金属量を持つことや、電離状態が極めて高いことなどを突き止めた。天体がキューサーとして認識されるようになる前に起こった激しい星形成活動が、高い金属量の原因である可能性を主張し、論文として報告した (Wu et al. 2010, ApJ, 722, 997)。
- (4) 偏光観測による時間変動の原因解明：一部の BAL あるいは付随 NAL に見られる時間変動の原因が、キューサー近傍に存在する散乱物質による散乱光の強度変化に起因する可能性が過去の論文で指摘されていた。そこで、当初の計画には含まれていなかったが、散乱物質の効果を検証すべく、現在モニター観測を継続中のキューサー HS1603+3820 に対して、すばる望遠鏡による偏光分光観測を行った。その結果、散乱光モデルが要求する 10% 程度の高い偏光度が吸収線領域においてさえ認められなかった（図 4）ことから、すくなくともこのキューサーに対しては、散乱光モデルが棄却できることを確認した。代替案として、光学的厚さが変動するシート状の高電離ガスを提案し、論文として報告した (Misawa et al. 2010, ApJ, 719, 1890)。

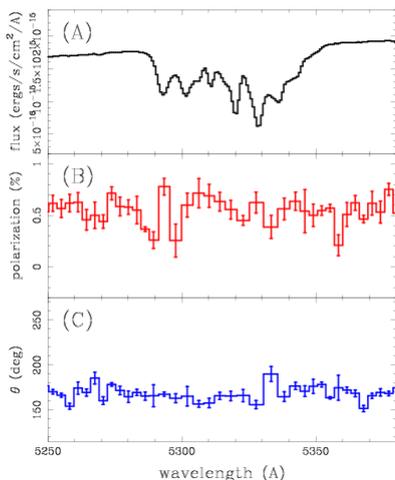


図4：偏光分光観測の結果—スペクトル(A)、偏光度(B)、偏光角(C)
(Misawa et al. 2010, ApJ, 719, 1890)

上記(1)～(4)の結果をもとに、放出ガスの幾何学的構造およびその諸性質に対する以下の様な知見を得た(図5)。

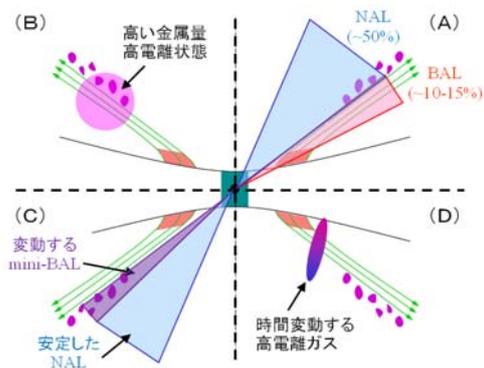


図5：放出ガスの幾何学的構造とその諸性質：(A) BALとNALの発生場所、(B) 放出ガスに見られる高い金属量と電離状態、(C) 吸収線幅と変動性の関係、(D) 時間変動をもたらすシート状の高電離ガス。

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3件)

- ① Toru Misawa, Koji S. Kawabata, Michael Eracleous, Jane C. Charlton, Nobunari Kashikawa, A Spectropolarimetric Test of the Structure of the Intrinsic Absorbers in the Quasar HS 1603+3820,

The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 719, Issue 2, 2010 pp.1890-1895

- ② Jian Wu, Jane C. Charlton, Toru Misawa, Michael Eracleous, Rajib Ganguly, The Physical Conditions of the Intrinsic N V Narrow Absorption Line Systems of Three Quasars, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 722, Issue 2, 2010 pp.997-1012

- ③ G. Chartas, J. C. Charlton, M. Eracleous, M. Giustini, P. Rodriguez Hidalgo, R. Ganguly, F. Hamann, T. Misawa, D. Tytler, High velocity outflows in narrow absorption line quasars, New Astronomy Reviews, 査読有, Vol. 53, Issue 7-10, 2009, pp.128-132

[学会発表] (計3件)

- ① 三澤透、稲田直久、大須賀健、Poshak Gandhi、小波さおり、高橋芳太、川原田円、多視線分光観測によるクェーサーアウトフローガス内部構造の解明、日本天文学会2011年春季年会(筑波大学)、2011年3月16日(震災により予稿のみ)、S12a
- ② M. Eracleous, T. Misawa, J. C. Charlton, G. Chartas, R. Ganguly, P. Rodriguez Hidalgo, F. Hamann, Probing the Origin of Intrinsic Absorption Lines (NALs and mini-BALs) in the Spectra of Luminous Quasars, 第215回アメリカ天文学会年会(ワシントンD.C.), #359.01, Bulletin of the American Astronomical Society, 2010年1月6日, Vol. 42, p.545
- ③ 三澤透、川端弘治、柏川伸成、Michael Eracleous, Jane C. Charlton、偏光分光観測によるクェーサーアウトフローガス構造解明の試み、日本天文学会2009年秋季年会(山口大学)、2009年9月14日、S08a

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三澤 透 (MISAWA TORU)
信州大学・全学教育機構・講師
研究者番号：60513447