

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03698

研究課題名（和文）輻射とガス流によるフィードバック効果の解明

研究課題名（英文）Study on AGN feedback effect through the outflows and radiation

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・教授

研究者番号：60513447

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：クェーサーによるフィードバック効果を、アウトフローがホスト銀河に与える影響（小スケール）と、紫外輻射が銀河間物質に与える影響（大スケール）に分けて検証した。その結果、1）アウトフローの速度変化が小さい（あるいは頻度が低い）こと、2）光度の大きいクェーサーほど放出速度が大きいこと、3）アウトフローは最大で銀河周辺物質が存在する100kpcスケールにまで到達しうること、4）クェーサー近傍の銀河間物質の電離状態は個々の環境に依存すること、などを確認した。これらの結果は、いずれもクェーサーが周囲に大きく影響を及ぼしていることを示唆する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

遠方宇宙に存在する明るい銀河中心領域（クェーサー）は、その莫大なエネルギー放出を通して周辺領域に影響（フィードバック）を及ぼしている。本研究では、この影響を大小二つのスケールに分けることによって詳細に調査した。小スケール・フィードバックで重要な役割を果たすアウトフローについては、長期モニター観測で明確な加速傾向が得られなかったにも関わらず、別の解析では100kpcスケールにまで到達する可能性があるという驚くべき結果が得られた。一方、紫外輻射による大スケール・フィードバックは、個々のクェーサー環境に強く依存する可能性があることが分かった。

研究成果の概要（英文）：We examined the feedback effects of quasars by dividing them into the small-scale effect of outflow on the host galaxy and the large-scale effect of UV radiation on the intergalactic medium. We obtained the following results: 1) velocities of outflow winds rarely change, 2) quasars with higher luminosity tend to have larger outflow velocities, 3) outflow winds can reach up to 100 kpc scale in circum-galactic medium, and 4) the ionization state of the intergalactic medium near the quasars depends on the individual environment. All these results suggest that quasars indeed have significant feedback effects on their surroundings.

研究分野：天文学

キーワード：AGNアウトフロー クェーサー吸収線 クェーサー近接効果

1. 研究開始当初の背景

遠方宇宙に存在する明るい銀河中心核 (クェーサー) は、自身を包み込む銀河 (ホスト銀河) の成長のみならず、その周辺領域 (銀河間空間) の物理状態にも影響を与える。クェーサーによる莫大な輻射圧によって外向きに加速されるガス流 (アウトフロー) ^[文献①] は、ホスト銀河の星間物質の加熱・擾乱を通して星形成を抑制する (小スケール・フィードバック効果)。一方、クェーサーからの紫外輻射そのものは、周辺の銀河間物質の電離状態に影響を与える (大スケール・フィードバック効果)。このように、全宇宙的な星形成史、電離史を探るうえで、これらふたつのフィードバック効果の理解は欠かせない。大小フィードバック効果の概要、および残された課題を以下にまとめる。

(1) 小スケール・フィードバック効果

クェーサー中心にある巨大ブラックホール (BH) の質量と、そのホスト銀河の楕円成分の質量の間には、明確な相関があることが知られている ^[文献②]。しかし、スケールにして最大 10 桁も異なる両者がいかに影響を及ぼし合っているのかはいまだに明らかになっていない。その解明の鍵を握るのがアウトフローである。アウトフローの存在はおよそ 2 割のクェーサーのスペクトル上にみられる幅の広い吸収線 (Broad Absorption Line, 以下 BAL) の検出により観測的に確認されている。これまでの研究によって、ほとんどの BAL は数年のタイムスケールで明確な時間変動を示すことが分かっている。ところがアウトフローの変動は吸収線の強度と形状にのみ見

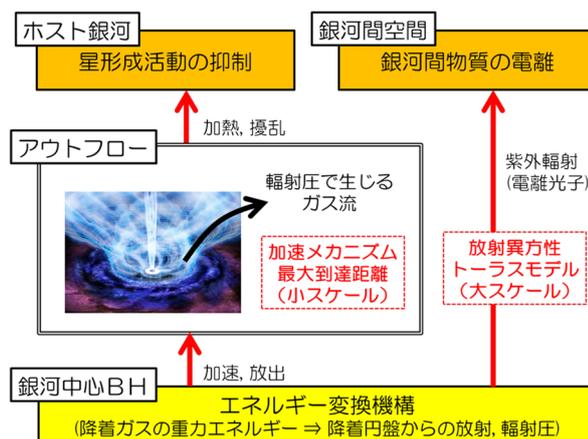


図1：アウトフロー (小スケール) と紫外輻射 (大スケール) による AGN フィードバック効果の概念図

られ、肝心の視線方向の加速がはっきりと確認されていない ^[文献③]。このことは、輻射圧で加速されることを前提としている既存モデルの根底を揺るがす大問題となっている。

(2) 大スケール・フィードバック効果

クェーサーからの紫外輻射 (電離光子) の影響は、視線方向において、クェーサー近傍数 Mpc 以内にある銀河間物質の電離状態が上がる (中性水素の存在比が下がる) ことによって確認されている (視線近接効果) ^[文献④]。もしクェーサーからの輻射が等方的であれば、この効果は視線方向でも確認されるはずである。この「視線近接効果」の有無は、天球上で近接している投影ペアクェーサーを用いて確認することが可能である。ところが BAL を持たない小離角ペアクェーサーに対しては、クェーサー近傍における視線方向の中性水素の存在比は減少するどころか、むしろ増えていることが分かっている ^[文献⑤]。この「逆」近接効果とも呼べる傾向はクェーサーからの輻射が非等方的であることをほのめかすものであり、宇宙再電離史を探るうえで重要な結果であるが、その原因は解明されていない。

2. 研究の目的

本研究では、クェーサーからのアウトフローと紫外輻射が、ホスト銀河 (小スケール) と銀河間空間 (大スケール) にどのような影響 (フィードバック効果) を及ぼすのかを、アウトフローに対する最高精度の加速度測定、及び、BAL をもつペアクェーサーを用いた「逆」近接効果の有無を通して解明することを目的とする。以下、それぞれの詳細をまとめる。

(1) 小スケール・フィードバック効果

従来の観測でアウトフローの視線速度の変化が確認されなかった最大の理由は、BAL の形状にある。線幅が広く滑らかな形状をもつ BAL は吸収強度の変動に対しては敏感だが、視線速度 (波長方向) の変動に対しては極めて鈍い。そこで本研究では、速度方向の変動に非常に敏感な線幅の小さい吸収線 (Narrow Absorption Line, 以下 NAL) を利用して加速度測定を行う。NAL に対する長期モニター観測を行い、加速メカニズムの解明をめざす。また加速度が検出された場合は、アウトフローの光源距離を正確に見積もることが可能である。このテーマは、アウトフローが本当に星間空間まで到達できるのか (ホスト銀河に影響を及ぼし得るのか) を直接的に検証する初の試みといえる。

(2) 大スケール・フィードバック効果

キューサーの接線方向に対する「逆」近接効果の原因として、最も有力視されているのがダストトラスによる電離光子の遮蔽である。これは、我々が観測しているキューサーは全て降着円盤を face-on の方向から見ている 1 型であり、接線方向の輻射はダストトラスに遮られて過度な電離を免れているというアイデアである。しかしこのシナリオの検証には降着円盤の勾配の情報が必要である。そこで本研究では、降着円盤の勾配の指標として、edge-on (2 型) に近い方向から見ている可能性が高い BAL の有無を利用して輻射の異方性を探る。もしこのアイデアが正しければ、BAL キューサーの接線方向では通常近接効果 (すなわち過電離状態) が観測されるはずである。このテーマは、キューサーからの紫外輻射の異方性を、BAL キューサーを利用したユニークな方法で検証する試みである。

3. 研究の方法

本研究を遂行するためには、長期高分散分光モニター観測、及び BAL を含む投影ペアキューサーの分光観測が必要である。これらはアーカイブデータの利用、或いはすばる望遠鏡による新規観測により取得可能である。また本研究に必要な各種ソフトウェアは、すでに我々のグループによって開発済みである。本研究の具体的な計画、および到達目標をテーマごとに以下にまとめる。

(1) 小スケール・フィードバック効果

視線速度変化に敏感な NAL を用いることにより、BAL を用いた先行研究^[文献⑥]より 2 桁高い精度で、アウトフローの加速度測定を行う。アウトフローの加速度は輻射圧と重力の影響を受けるが、このうち前者が支配的である場合、可視光での観測が容易な赤方偏移 3 付近のキューサーに対する典型的な物理量を仮定すると、波長分解能数万の高分散スペクトルに対する検出限界以上の視線速度差が生じるのに、静止系で約 4 年 (観測系で 15 年以上) の間隔があれば十分との結果が得られる。2000 年頃からケック望遠鏡で取得されはじめた高分散スペクトルのアーカイブデータと、我々がすばる望遠鏡で再取得したデータを用いれば、数天体に対する長期高分散分光モニター観測が可能となる。その結果、アウトフローの主要な加速機構と、その最大到達距離を見積もることが可能となる。

(2) 大スケール・フィードバック効果

BAL キューサーと一般のキューサーの接線近接効果を比較してキューサー近傍にみられる「逆」近接効果の原因を探るとともに、大スケール・フィードバックの異方性の有無を確認する。具体的には、投影視線間距離が 1Mpc 未満のペアキューサーを SDSS キューサーカタログから探し、さらに手前のキューサーのみが BAL を持つという条件を加えてキューサーサンプルを構築する。背後のキューサーのスペクトルを利用して、手前のキューサー近傍の銀河間物質の中性水素量を吸収線から測定する。その結果、キューサーからの輻射の異方性の有無、及び、その原因を探ることが可能となる。

4. 研究成果

本研究課題に関して以下の結果を得るとともに、学術論文 7 本、学会・研究会発表 10 件を通して広く国内外に公表した。

(1) キューサーによる小スケール・フィードバック効果を探るべく、視線速度変化に敏感な NAL を用いた AGN アウトフローの加速度測定を行った。その結果、BAL を用いた先行研究よりも測定精度を 2 桁以上も向上させることに成功した。すばる望遠鏡をはじめとする 8~10 メートル級望遠鏡の高分散分光器で、10 年以上 (キューサー静止系では 3~5 年程度) の時間間隔を空けて複数回観測された 6 天体に対し、それぞれのスペクトル上で検出された NAL の位置をモンテカルロ法を用いて詳細に比較した。その結果、 3σ 以上の有意な速度変化は見られず、加速度に対する上限値 (~ 0.7 km/s/yr) を得るにとどまった。視線速度に変化が見られなかった理由としては、①、

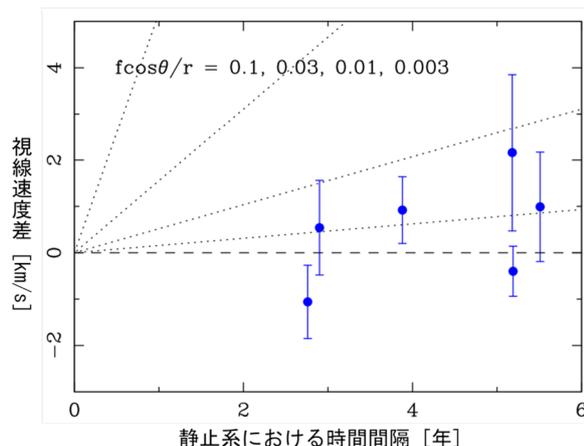


図 2 : 6 天体で検出された NAL の視線速度変化

すでに終端速度に達している、②. 我々の視線にはほぼ直交する向きに動いている、③. 加速は常に起こっているわけではない、④. クェーサー光度に対する輻射効率が予想よりも小さい、などが考えられる。シナリオの絞り込みにはサンプルを増やす必要がある。しかし一部のNALは、銀河・銀河間物質によってもたらされるため、確実にアウトフローに起源を持つNALを同定するには「部分掩蔽解析」という特殊な解析を行う必要がある。そこで欧州南天天文台VLTで取得されたクェーサー73天体の高分散分光スペクトルを詳細に解析したところ、少なくとも38%のクェーサーが一つ以上のクェーサー起源のNALを持つこと、即ちアウトフロー起源のNALが普遍的なものであることを確認した（学術論文2本、研究発表1件）。

- (2) アウトフローの加速機構の最有力候補は輻射圧である。つまり、光度が大きいクェーサーほどアウトフローが生じやすく、またその力学的エネルギー（すなわち放出速度）も大きいことが予想される。そこで、最大光度($L_{bol} > 10^{47}$ erg/s)を有するクェーサー40天体に対するBAL探査を行ったところ、BALの検出率は24%程度であり、一般的な光度を有するクェーサーに対する検出率(10~15%)よりも有意に高いことを確認した。また、BALの放出速度も有意に大きく、中には光速の15%にまで加速されているものも検出された。この結果はアウトフローの放出メカニズムに対して輻射圧が支配的な役割を果たしていることを示唆する（学術論文1本）。
- (3) アウトフローがどの程度の距離にまで到達できるのかは、AGNフィードバックを定量的に評価するうえで欠かせない情報である。そこで、BALをもつクェーサー11天体の高分散分光データを解析したところ、およそ3割のクェーサーがBALに加えてNALも有することが分かった。BALとNALが同一視線上で同時に検出されるというこの結果は、両者の違いがアウトフローを見込む角度の違いのみを反映しているという従来のモデル（角度依存説）を否定するものである。また一部のNALガスは光源から100kpc程度以上も離れている可能性があるため、アウトフローはホスト銀河のみならず、その周囲の銀河周辺物質にもフィードバック効果を及ぼす可能性があることを確認した（論文1本、研究発表3件）。
- (4) 大スケール・フィードバックを調査すべく、スペクトル上にBALを有する近接ペアクェーサー19天体に対して、すばる望遠鏡による観測を試みた。期間中3回、観測時間の確保し成功したが、悪天候、地震、COVID-19の影響で計画していた観測を完遂することが出来なかった。一方で、これらのペアクェーサーに対するスローン・デジタル・スカイ・サーベイ(SDSS)の分光データを利用してBAL近傍の吸収構造を調べたところ、BALに対応する中性水素の吸収が強いものと弱いものが存在した。BALクェーサー近傍の銀河間ガスの電離状態は画一的なものではなく、個々の環境に依存する可能性が高いといえる。

<引用文献>

- ① Murray, N., Chiang, J., Grossman, S. A., et al. 1995, *The Astrophysical Journal*, 451, 498. doi:10.1086/176238
- ② Magorrian, J., Tremaine, S., Richstone, D., et al. 1998, *Astronomical Journal*, 115, 2285. doi:10.1086/300353
- ③ Capellupo, D. M., Hamann, F., Shields, J. C., et al. 2011, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 413, 908. doi:10.1111/j.1365-2966.2010.18185.x
- ④ Bajtlik, S., Duncan, R. C., & Ostriker, J. P. 1988, *The Astrophysical Journal*, 327, 570. doi:10.1086/166217
- ⑤ Prochaska, J. X., Hennawi, J. F., Lee, K.-G., et al. 2013, *The Astrophysical Journal*, 776, 136. doi:10.1088/0004-637X/776/2/136
- ⑥ Joshi, R., Chand, H., Srianand, R., et al. 2014, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 442, 862. doi:10.1093/mnras/stu840

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Bruni G., Piconcelli E., Misawa T., Zappacosta L., Saturni F. G., Vietri G., Vignali C., Bongiorno A., Duras F., Feruglio C., Tombesi F., Fiore F.	4. 巻 630
2. 論文標題 The WISSH quasars project	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201834940	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 Culliton Chris, Charlton Jane, Eracleous Mike, Ganguly Rajib, Misawa Toru	4. 巻 488
2. 論文標題 Probing quasar winds using intrinsic narrow absorption lines	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4690 ~ 4731
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz1642	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 Misawa Toru, Eracleous Michael, Charlton Jane C., Kashikawa Nobunari	4. 巻 870
2. 論文標題 Direct Measurement of Quasar Outflow Wind Acceleration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaf0fe	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 Horiuchi Takashi, Morokuma Tomoki, Misawa Toru, Hanayama Hidekazu, Kawaguchi Toshihiro	4. 巻 159
2. 論文標題 A Comparison of Properties of Quasars with and without Rapid Broad Absorption Line Variability	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ab83f5	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 -

1. 著者名 Itoh Daisuke, Misawa Toru, Horiuchi Takashi, Aoki Kentaro	4. 巻 499
2. 論文標題 Search for intrinsic NALs in BAL/mini-BAL quasar spectra	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3094 ~ 3110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa2793	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10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 石田大、三澤透、伊東大輔、堀内貴史
2. 発表標題 MCMC 法を用いたアウトフロー吸収線の model-fit 方法の提案
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊東大輔、三澤透、石田大、堀内貴史
2. 発表標題 BAL 視線上に位置する intrinsic NAL absorber の光源距離の概算
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Misawa, M. Eracleous, J. C. Charlton, N. Kashikawa, C. Saez, G. Chartas, F. E. Bauer, N. Inada, H. Uchiyama
2. 発表標題 Properties of Narrow Absorption Line Systems in AGN Outflow
3. 学会等名 Subaru 20th Anniversary (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke Itoh, Toru Misawa, Dai Ishita, Takashi Horiuchi
2. 発表標題 Estimating a distance of intrinsic NAL absorber
3. 学会等名 Subaru 20th Anniversary (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石田大, 三澤透, 伊東大輔, 堀内貴史
2. 発表標題 mini-BAL クェーサー UM675 で見られる時間変動とその起源
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊東大輔, 三澤透, 堀内貴史, 青木賢太郎
2. 発表標題 クェーサー付随 NAL 吸収体の幾何的分布に関する調査
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
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
---------------------------	-----------------------	----

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			
米国	Pennsylvania State University			
イタリア	National Institute for Astrophysics			