

## アウトフローガスとクェーサー光度の時間変動の関連性

堀内 貴史 (信州大学大学院 総合工学系研究科)

### Abstract

クェーサーの降着円盤からは、主に輻射圧によって、アウトフローガスが高速度で放出されている。アウトフローガスは降着円盤から角運動量を取り除き、中心部への新たなガスの降着を促進するため、クェーサーの成長には欠かせない重要な要素である。

アウトフローガスの研究ではスペクトル上の幅の広い吸収構造 (BAL) が従来用いられてきた。しかし近年では、アウトフローガス由来の線幅の狭い吸収構造 (NAL) や、BAL と NAL の中間的性質を有する mini-BAL も用いられている。アウトフローガスの吸収線は一定の時間間隔をあけて観測したときに、変動を示す場合があるが、その原因は解明されていない。時間変動の原因として、現段階で最も有力な機構が、電離状態変動シナリオである。この機構はクェーサーの光度変動がアウトフローガスの電離状態に変化を及ぼした結果、アウトフローガスに変動をもたらすというものである。激しい時間変動を示す BAL に関しては、このシナリオの正当性は賛否が分かれている。

本研究では電離状態変動シナリオの検証を、mini-BAL, NAL クェーサーに対して行った。紫外・可視域で mini-BAL, NAL クェーサーの光度変動と吸収線の変動をモニターするために、105cm シュミット望遠鏡/KWFC と 188cm 望遠鏡/KOOLS を用いた。観測は mini-BAL の典型的な変動期間 (数週間から、数ヶ月) を上回る、2 年間に渡り年に 4 回の頻度で行った。クェーサーの光度曲線とそれをもとにした Structure Function により光度変動の大きさを調べたところ、mini-BAL においては先行研究との比較により、光度変動のみを起源とする、電離状態変動シナリオを支持する可能性があることが分かった。

## 1 Introduction

クェーサーの降着円盤からの輻射圧 (Murray et al. 1995; Proga et al. 2000) によって吹き出すアウトフローガスは、降着円盤から角運動量を取り去り、新たなガスの降着を促進するため、AGN の成長に不可欠な要素である。さらに、エネルギー・運動量・金属量の豊富なガスを銀河間空間に放出するため、宇宙の化学進化にも影響を及ぼす。また、近傍の星間・銀河間領域における星形成活動を抑制し、銀河進化にも影響を与えるため、この点においても研究対象として重要である。従来アウトフローガスの研究には、クェーサーのスペクトル上にみられる幅の広い吸収構造 (BAL; Weymann et al. 1991,  $\text{FWHM} \geq 2000 \text{ km/s}$ ) が使われてきた。しかし近年では、モデルフィットによる物理量 (柱密度、速度幅等) の評価が可能な幅の狭い吸収線 (NAL,  $\text{FWHM} \leq 500 \text{ km/s}$ ) や、両者の中間的な性質を持つ mini-BAL も利用されている。BAL に対してはすでに確認されている時間変動が、NAL,

mini-BAL にも見られるのかを確認すべく、Subaru, Keck, VLT などを用いた 12 個のクェーサー (NAL, mini-BAL を含むものがそれぞれ 6 天体) の高分散分光モニター観測 (分解能  $R \geq 30000$ ) が過去 10 年以上に渡って行われている。その結果、mini-BAL のみが明らかな時間変動を示すことが明らかになった (Misawa et al. 2014 submitted, 図 1,2)。時間変動の理由として以下の 3 つが考えられる: 1) 連続光領域に対する視線に対する放出ガスの横断; 2) 散乱物質による散乱光の時間変化 (すなわち掩蔽率の変動); 3) 放出ガスの電離状態の変動 (例えば CIV が CV に変化することによる CIV 吸収の減少)。クェーサー HS1603+3820 にターゲットを絞り、mini-BAL の詳細なモニター観測および偏光観測を行った先行研究によれば、1) 吸収線の構造を維持したまま強度が変動している (Misawa et al. 2007)、2) 散乱光にみられる偏光率は最大わずか 0.6% 程度であること (Misawa et al. 2010) が知られている。前者はシナリオ 1 を、

後者はシナリオ 2 を否定する結果である。そこで本研究では、mini-BAL の時間変動の原因として、最も有望な電離状態変動シナリオの検証を行っている。このシナリオはキューサーからの入射光の強度が変化してアウトフローガスの電離状態に変化を与えるというものである。BAL をもつキューサーに対しては、連続光と吸収強度の変動に相関関係が見られないことがすでに確認されている (Gibson et al. 2008)。しかし一方で、両者の相関が確認される結果もあり (Trevese et al. 2013)、BAL キューサーの電離状態変動シナリオの正当性は賛否が分かれている。本研究では、観測的に排除されていない NAL, mini-BAL の電離状態変動シナリオを検証して NAL と mini-BAL の発生場所に要求される環境の違いを突き止めることを目的とする。

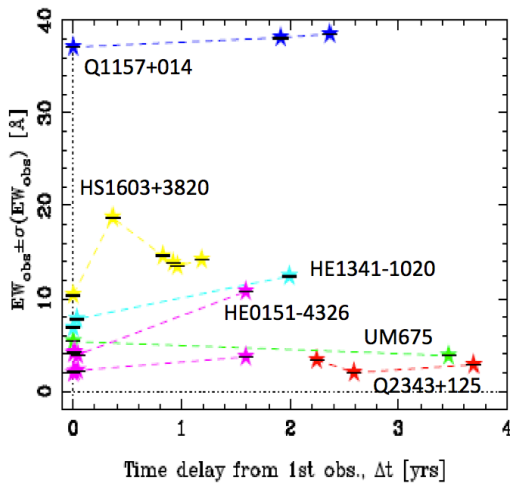


図 1: キューサーの静止系における CIV mini-BAL の等価幅のモニター観測結果 (Misawa et al. 2014, submitted)。mini-BAL をもつサンプルは明らかな変動が確認されている。

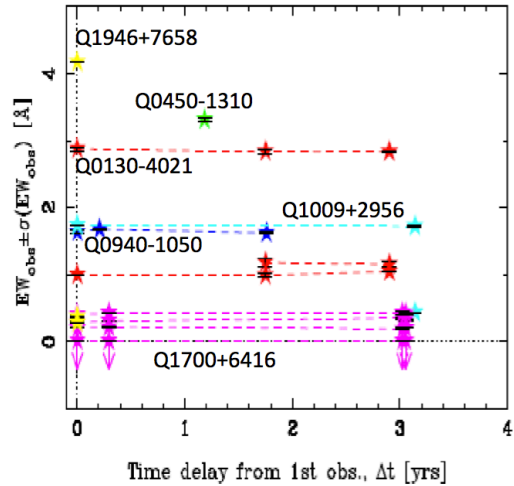


図 2: キューサーの静止系における CIV NAL の等価幅のモニター観測結果 (Misawa et al. 2014, submitted)。NAL をもつサンプルは変動が確認されない。

## 2 Methods and Observations

NAL と mini-BAL を持つキューサー (赤方偏移が  $2 \leq z \leq 3$  の mini-BAL キューサー 4 個と NAL キューサー 5 個の計 9 個) の光度変動傾向と吸収線の変動の時間的な相関を調べるべく、日本での観測が可能なキューサー 9 天体 に対する測光モニター観測を木曾シュミット 105cm 望遠鏡/KWFC (filter: SDSS u,g-band 及び i-band) を用いて月 1 回あるいは 3ヶ月に 1 度の頻度で行なった。また、可視域の分光観測を岡山 188cm 望遠鏡/KOOLS を用いて年 4 回の頻度で行った。測光モニター観測に関して言えば、もし mini-BAL キューサーにのみ大きな光度変動が見られれば、電離状態変動シナリオが mini-BAL に対して適応できる可能性が高い。この場合、mini-BAL, NAL は異なるクラス、あるいはフェーズにあるキューサーを見ていると考えられる。一方、両者の光度変動に有意な差がない場合はキューサーの光度変動は吸収線の時間変動の主要な原因ではないことになる。

### 3 Results

我々はに 2 年間にわたり、測光・分光同時モニター観測を実施した。サンプルクェーサーの光度変動傾向を確認すべく、mini-BAL, NAL クェーサーの光度曲線を描いた (図 3,4,5)。その結果、クェーサー HS1603+3820 に mini-BAL クェーサーで最も大きな 0.3mag(u-band) の光度変動が確認された。また、mini-BAL クェーサー UM675 で 0.22mag(g-band) の変動が確認された。一方で、NAL クェーサーの光度変動の最大値は Q1700+6416 の 0.2mag(u-band) に留まった。また全体として、短波長側の方が大きな光度変動を示すことが確認された。この結果は多くの先行研究 (e.g. Giveon et al. 1999, Vanden Berg et al. 2004) と矛盾のないものであるが、すなわち、mini-BAL, NAL クェーサーともに明るくなると青くなるということを示している。光度曲線に関する Structure Function(di Clemente et al. 1996)

$$S_1(\Delta\tau) = \sqrt{\frac{\pi}{2} \langle |\Delta m(\Delta\tau)|^2 + \langle \sigma_n^2 \rangle} \quad (1)$$

( $\Delta m(\Delta\tau)$ : 観測期間間隔  $\Delta\tau$  における光度変動,  $\sigma_n^2$ : 観測期間  $t_1, t_2$  における測光誤差の平方和, ブラケットは複数のクェーサーの光度変動、測光誤差を平均化するという意味である) を描いたところ、NAL クェーサーに比べ、mini-BAL クェーサーの方が時間経過と共に大きな光度変動傾向を示すことが確認された (図 6)。

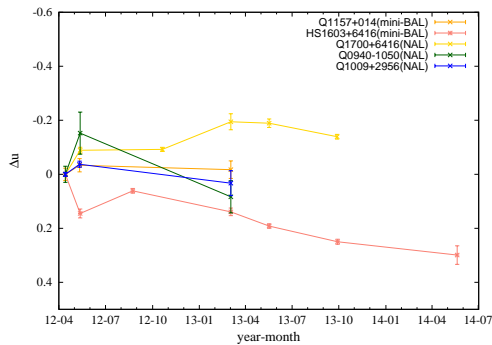


図 3: u-band におけるサンプルクェーサーの光度変動。横軸は観測開始からの経過時間 (年-月) を表し、縦軸は光度変動を表す。色の違いはサンプルクェーサーの違いを表す。

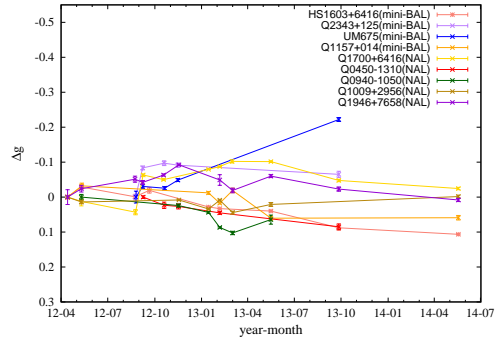


図 4: g-band におけるサンプルクェーサーの光度変動。

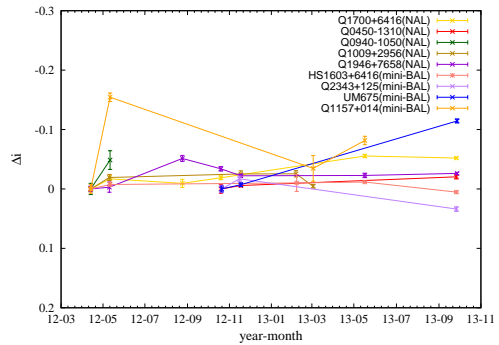


図 5: i-band におけるサンプルクェーサーの光度変動。

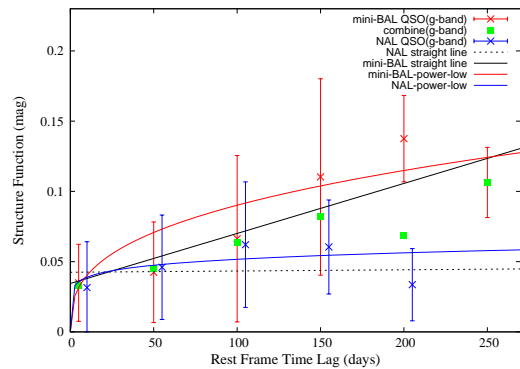


図 6: g-band における Structure Function(SF)。赤と青のデータ点はそれぞれ mini-BAL, NAL クェーサーのデータ点を表す。緑のデータ点は mini-BAL, NAL クェーサーの全てのデータ点を合わせたものである。実線と点線はそれぞれ mini-BAL, NAL クェーサーの SF に対する回帰直線を表し、赤と青の曲線はそれぞれ、べき乗則でフィッティングした SF である。

## 4 Discussion

本研究においては、mini-BAL ケーサー HS1603+3020 と UM675 にそれぞれ 0.3mag(u-band)、0.22mag(g-band) の光度変動を確認している。UM675 に関して言えば、u-band でのデータは取得できていないが、より短波長側では 0.22mag より大きい変動 (0.3mag 以上) が期待される。Trevese et al. (2013) では、BAL ケーサー APM 08279+5255( $z=3.87$ ) での 0.3 mag 程の光度変動と BAL の変動がリンクしていることが確認された。この結果は電離状態変動シナリオをサポートする結果である。すなわち、本研究において mini-BAL ケーサーの電離状態変動シナリオを支持する可能性は十分あり得ることがわかった。さらに、ケーサーの典型的な光度変動の大きさは数ヶ月、数年でそれぞれ 0.1, 0.5 mag(Webb & Malkan 2000) なので、今後の観測でさらに大きな光度変動を見せる可能性がある。また、mini-BAL, NAL ケーサーごとの Structure Function を描いたところ mini-BAL ケーサーの方が時間と共に大きな時間変動を示すことが分かった。しかし、我々のサンプルにおいては mini-BAL ケーサーよりも平均的に NAL ケーサーの方が明るい (mini-BAL ケーサー:  $z \sim 2.3$  で  $V=16.9$ ; NAL ケーサー:  $z \sim 2.8$  で  $V=16.2$ ) もとなっている。つまり、Structure Function は光度変動の振幅と光度の反相関係 (e.g. Cristiani et al. 1997; Vanden Berk et al. 2004) を単に反映しているだけの可能性がある。多数のケーサーサンプルの光度変動の解析を行った Wilhite et al. (2008) と我々の mini-BAL ケーサーの Structure Function(g-band) との比較を行ったところ、consistent であることが分かった。このことは、mini-BAL ケーサーは特別大きい光度変動傾向をないことを示唆する。現時点では、mini-BAL ケーサーの電離状態変動シナリオを支持すると断言はできないが、可能性は十分に伺えることが分かった。今後は電離状態変動シナリオの正当性をより強固にするために、サンプルケーサー吸収線強度の変動と光度変動の相関を確かめる必要がある。

## 5 Conclusion

本研究では 2 年間に渡り、mini-BAL, NAL ケーサーの測光・分光同時モニター観測を行ってきた。ケーサーの光度曲線を描いたところ、mini-BAL ケーサー HS1603+3020 と UM675 に特に大きな光度変動 (それぞれ、u-band : 0.3mag, g-band : 0.22mag) が確認された。mini-BAL, NAL ケーサーごとの Structure Function を描いたところ mini-BAL ケーサーの方が時間と共に大きな時間変動を示すことが分かった。mini-BAL ケーサーにおいて、先行研究との光度変動の比較を行った。その結果、ケーサーの光度変動のみを起源とする、電離状態変動シナリオを支持する可能性が伺えることが分かった。

## Reference

- Cristiani S., Trentini S., La Franca F., Andreani P., 1997, *A&A*, 321, 123
- di Clemente, A., Giallongo, E., Natali, G., Trevese, D., & Vagnetti, F. 1996, *ApJ*, 463, 466
- Gibson R. R., Brandt W. N., Schneider D. P., & Gallagher S. C., 2008, *ApJ*, 675, 985
- Misawa, T., Charlton, J. C., Eracleous, M., 2014, submitted
- Misawa T., Eracleous M., Charlton J. C., & Kashikawa N., 2007b, *ApJ*, 660, 152
- Misawa T., Kawabata K. S., Eracleous M., & Charlton J. C., Kashikawa N., 2010, *ApJ*, 719, 1890
- Murray N., Chiang J., Grossman S. A., & Voit G. M., 1995, *ApJ*, 451, 498
- Proga D., Stone J. M., & Kallman T. R., 2000, *ApJ*, 543, 686
- Trevese, D., Saturni, F. G., Vagnetti, F., Perna, M., Paris, D., & Turriziani, S. 2013, *A&A*, 557, 91
- Vanden Berk, D. E., Wilhite, B. C., & Kron, R. G., et al. 2004, *ApJ*, 601, 692
- Webb W., Malkan M., 2000, *ApJ*, 540, 652
- Weymann, R. J., Morris, S. L., Foltz, C. B., & Hewett, P. C. 1991, *ApJ*, 373, 23
- Wilhite, B. C., Brunner, R. J., Grier, C. J., Schneider, D. P., & vanden Berk, D. E. 2008, *MNRAS*, 383, 1232