

# 高赤方偏移におけるクェーサー光度関数の導出に向けた コンプリートネスの評価

仁井田 真奈 (愛媛大学大学院 理工学研究科)

## Abstract

超巨大ブラックホールの形成進化を明らかにするためには、各時代のクェーサーの光度関数（単位体積、単位等級あたりの個数分布）を求めることが重要である。先行研究により各時代でのクェーサー光度関数が導出され、クェーサーの個数密度の進化が分かってきた。しかし、高赤方偏移のクェーサーの個数密度は観測の難しさから不確定なことも多い。また、光度関数を正確に求める上で重要な要素にコンプリートネス（選出したいクェーサーを候補天体の中から選出できる割合）がある。従来の光度関数の導出方法では、光度に依らず一定の形状のクェーサースペクトルを用いてコンプリートネスが計算されてきた。しかし、クェーサースペクトルは低光度のものほど輝線の等価幅が大きいという光度依存性を持つため、光度によって二色図上でのカラーの振る舞いが異なり、コンプリートネスも異なる可能性がある。したがって正確なクェーサー光度関数の導出には、クェーサースペクトルの光度依存性がコンプリートネスに与える影響の調査が必要である。

そこで我々は、クェーサースペクトルの光度依存性がクェーサーのカラーやコンプリートネスに与える影響について調査を行なった。まず、Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) クェーサーカタログのデータから得た 43,860 個のクェーサーサンプルを用いて、光度ごとに二色図上でのカラーの振る舞いを調べた。その結果、低光度のクェーサーほどカラーが選出領域に入りやすいことが分かった。さらに光度ごとに作成したモデルスペクトルを用いてコンプリートネスを計算した結果、低光度のスペクトルを使った場合の方がコンプリートネスが大きいという傾向が判明した。これらの結果から、これまでの光度関数はクェーサースペクトルの光度依存性に起因する系統的な誤差を含んでいることが示唆され、より正確な光度関数を求めるためにはスペクトルの光度依存性を考慮した上で光度関数の導出を行なう必要があることが分かった。

## 1 Introduction

活動銀河核は超巨大ブラックホールをエネルギー源として明るく輝く天体であり、クェーサーはその中でも最も明るいクラスの天体である。クェーサーは超巨大ブラックホールの成長に密接に関わっているので、クェーサーの各時代における光度関数を調べることで、超巨大ブラックホールの進化を明らかにすることができる。したがって、超巨大ブラックホールの進化に迫るためには、クェーサー光度関数を正確に導出することが重要である。

これまでのクェーサー光度関数の研究から、赤方偏移によって光度ごとのクェーサーの個数密度が異なることが分かかってきた (図 1)。また、光度ごとにクェーサーの個数密度の赤方偏移進化を調べた結果、

高光度のクェーサーほど早期に個数密度のピークを迎えている (図 2)。これは、クェーサーの光度と超巨大ブラックホールの質量が比例関係にあると仮定すると、大質量の超巨大ブラックホールほど早期に成長のピークを迎えることを意味する。したがって超巨大ブラックホールの進化の正しい理解には、幅広い赤方偏移と光度範囲でのクェーサー光度関数の導出が必要である。特に、超巨大ブラックホールの進化の初期段階に迫るためには高赤方偏移におけるクェーサー光度関数の研究が必要である。したがって、本研究では  $z \sim 4$  の光度関数について調査する。

また、光度関数をより正確に導出するためにはコンプリートネスの正しい評価が重要となる。クェーサーを選出する際、様々な誤差の効果でクェーサーが選出条件から外れる場合がある。したがって正確

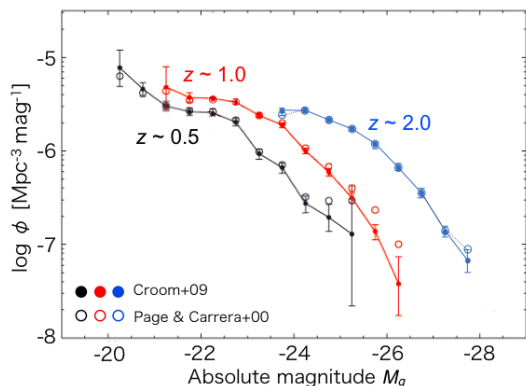


図 1: 2dF-SDSS LRG And QSO (2SLAQ) survey により得られた  $z \sim 0.5, 1.0, 2.0$  のクェーサー光度関数 (Croom et al. 2009)。

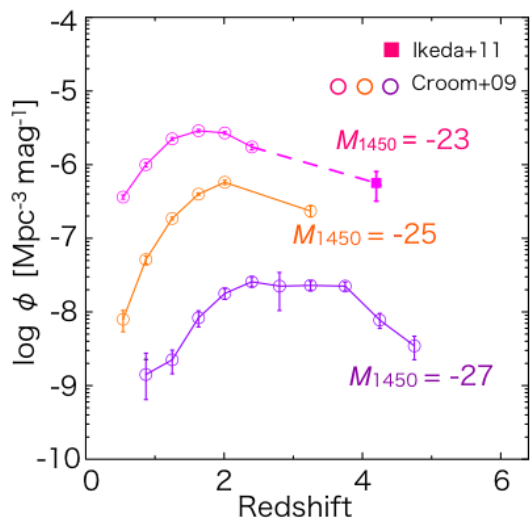


図 2:  $M_{1450} = -23, -25, -27$  のクェーサー個数密度の赤方偏移進化 (Ikeda et al. 2011)

な光度関数の導出のためには、赤方偏移や等級の関数として計算したコンプリートネスを用いて選出条件から外れるクェーサーの割合を補正する必要がある。従来のコンプリートネスの計算方法では、光度に依らず平均的なクェーサースペクトルをモデルスペクトルとして使用してきた。しかし、クェーサースペクトルにはボールドウィン効果等の光度依存性がある。ボールドウィン効果とは、低光度のクェーサーほど C IV や  $\text{Ly}\alpha$  輝線等の等価幅 (EW) が大

きいという効果である (Baldwin 1977)。従来の方法では、クェーサースペクトルの光度依存性がコンプリートネスに影響を与える可能性について考慮していない。したがって、より正しい光度関数の導出には、クェーサースペクトルの光度依存性がコンプリートネスに与える影響の調査が必要である。そこで我々は、光度ごとにモデルスペクトルを作成してコンプリートネスを評価することで、スペクトルの光度依存性がコンプリートネスに与える影響を調査した。

## 2 Methods

まず、クェーサースペクトルの光度依存性がカラーに与える影響について調べた。Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) クェーサーカタログのデータ 87,822 個から、 $2 < z < 5$  の 43,860 個のクェーサーサンプルを用いて光度ごとに平均的なスペクトル (コンジットスペクトル) を作成した (図 3)。各光度のスペクトルから EW(C IV) の平均値と分散を測定し、コンジットスペクトルにボールドウィン効果が現れていることが確認できた。

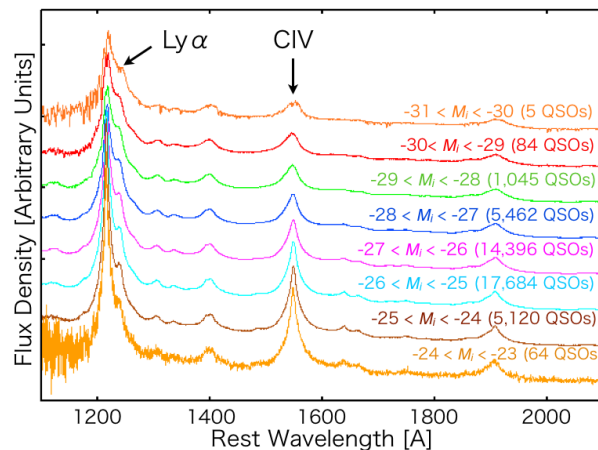


図 3: BOSS クェーサーカタログから光度ごとに作成したコンジットスペクトル。横軸は静止波長を表す。括弧内に各光度範囲におけるクェーサーの個数を示した。

次に、モデルスペクトルの作成を行なった。まず、クェーサーの連続光は  $f_\nu \propto \nu^{-\alpha_\nu}$  と表すことができ

る。ここで、 $\alpha_\nu$  は Sloan Digital Sky Survey (SDSS) で得られたクエーサースペクトルから計算された平均値 0.46 (Vanden Berk et al. 2001) と分散 0.30 (Hunt et al. 2004) を基に Gauss 分布していると仮定する。EW(C IV) についても各光度において測定した平均値と分散を基に Gauss 分布していると仮定することで、モンテカルロシミュレーションによって光度ごとに 1000 個のモデルスペクトルを作成した。C IV 以外の輝線については、C IV との相対的な強度比を固定して取り入れた (Vanden Berk et al. 2001)。また、 $z > 0$  では銀河間物質中の中性水素による吸収を考慮した (Madau 1995)。

作成したモデルスペクトルごとに、各赤方偏移でのカラー ( $g-r$ ,  $r-i$ ) を計算し、 $i = 22.0$  として  $g, r$ -band 等級を計算した。そして、すばる望遠鏡の Suprime-Cam による COSMOS 領域の  $g, r, i$ -band の画像に求めた等級の点源を埋め込んだ後、SExtractor で検出・測光を行ない、カラーを再計算した。最後に画像に埋め込んだ 1000 個の点源の内、二色図上で選出領域に入っている天体の割合を計算することで、コンプリートネスを評価した。

### 3 Results

まず、クエーサースペクトルの光度依存性が二色図上でクエーサーカラーに与える影響について調べた。3 つの光度範囲 ( $-31 < M_i < -30$ ,  $-27 < M_i < -26$ ,  $-24 < M_i < -23$ ) の平均的なスペクトルについて、各赤方偏移でのカラー ( $z \sim 4$ ) を二色図 ( $g-r$  vs.  $r-i$ ) 上にプロットした (図 4)。選出領域に対するカラーの振る舞いを比較すると、定性的には低光度の平均的なクエーサーほど選出領域に入りやすいことが分かった。

次に、光度ごとのコンポジットスペクトルを用いてコンプリートネスの比較を行なった。作成したコンポジットスペクトルから光度範囲が  $-31 < M_i < -30$  と  $-24 < M_i < -23$  のスペクトルを用いて、 $i = 22.0$  として  $z \sim 4$  のコンプリートネスを計算した (図 5)。2 つの光度のコンプリートネスを比較した結果、低光度のクエーサースペクトルの方がより高いコンプリートネスの値を示すことが分かった。

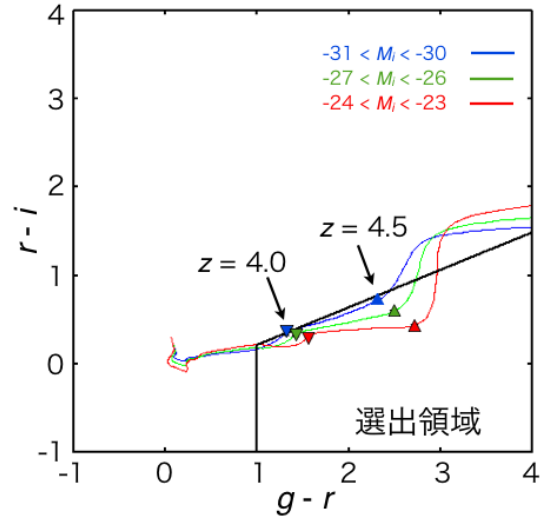


図 4: 二色図 ( $g-r$  vs.  $r-i$ ) 上における光度ごとの平均的なスペクトルの各赤方偏移でのカラーの振る舞い。観測された点源からクエーサーを星と区別するために、クエーサーとして選出する天体のカラーの条件として  $z \sim 4$  での選出領域を示した (Ikeda et al. 2011)。 $z = 4.0, 4.5$  でのカラーの位置を記す。

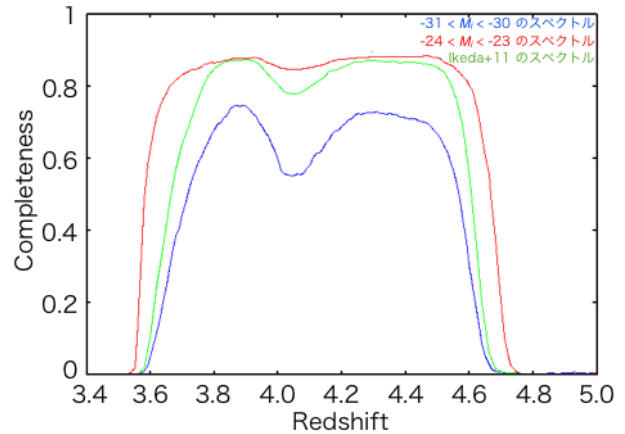


図 5: 光度ごとのコンポジットスペクトルを用いて今回我々が計算したコンプリートネスと、光度に依らず平均的なスペクトルを用いて計算したコンプリートネス (Ikeda et al. 2011)。全て  $z \sim 4$  の選出条件に対する、 $i = 22.0$  とした時のコンプリートネス。

### 4 Discussion

各光度のコンプリートネスの違いが光度関数に与える影響を調べるため、光度に依らない平均的なス

ベクトルから計算したコンプリートネス (Ikeda et al. 2011) と比較を行なった。高光度 ( $-31 < M_i < -30$ ) と低光度 ( $-24 < M_i < -23$ ) のコンポジットスペクトルと共に、Ikeda et al. (2011) の平均的なスペクトルを用い、 $i = 22.0$  として計算したコンプリートネス ( $z \sim 4$ ) を図 5 に示した。Ikeda et al. (2011) のコンプリートネスに比べて、高光度のコンポジットスペクトルはコンプリートネスがより低く、低光度のコンポジットスペクトルはより高いことが分かった。これらの結果から、コンプリートネスの違いが光度関数に及ぼす影響を考える。図 6 に先行研究で導出された  $z \sim 4$  の光度関数を示す (Ikeda et al. 2011)。コンプリートネスの比較結果から、高光度では従来の光度関数に比べて個数密度がより大きくなり、低光度ではより小さくなることが予想される。したがってこれまでのキューサー光度関数はキューサースペクトルの光度依存性に基づく系統的な誤差を含むことが示唆され、より正確なキューサー光度関数は傾きがより緩やかであると考えられる。

## 5 Conclusion

キューサー光度関数をより正確に求めるために、キューサースペクトルの光度依存性がキューサーカラーやコンプリートネスに与える影響について調べた。BOSS キューサーカタログのデータを用いて光度ごとにコンポジットスペクトルを作成し、二色図上でのカラーの振る舞いを調べた結果、低光度のキューサーほど選出領域に入りやすいことが分かった。また光度ごとにモデルスペクトルを作成し、COSMOS 領域の画像を用いてコンプリートネスを評価した結果、低光度のキューサーほどコンプリートネスが高くなることが分かった。さらにコンプリートネスの先行研究との比較から、キューサー光度関数は従来の結果よりも傾きが緩やかになることが予想された。以上から、これまでのキューサー光度関数はキューサースペクトルの光度依存性に起因する系統的な誤差を含むことが示唆される。より正確なキューサー光度関数を求めるためには、キューサースペクトルの光度依存性を考慮した光度関数の導出が必要である。

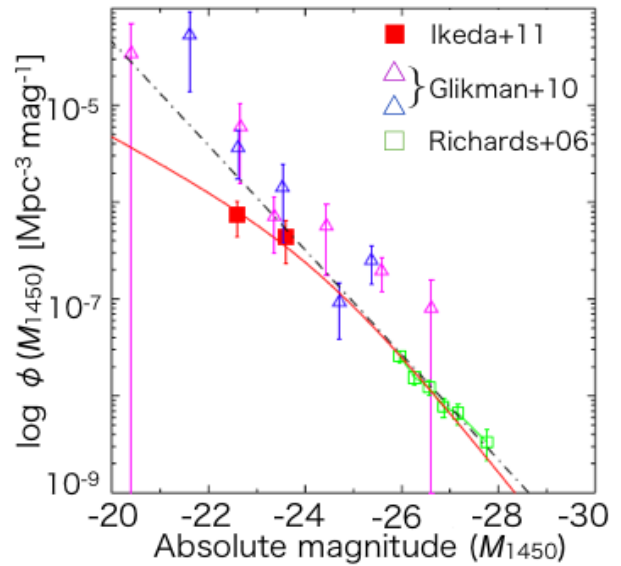


図 6: 先行研究で導出された  $z \sim 4$  のキューサー光度関数 (Ikeda et al. 2011)。 $\triangle$  (紫) は実視等級と K-correction から計算した  $M_{1450}$ 、 $\triangle$  (青) は分光データから直接計算した  $M_{1450}$  (Glikman et al. 2010)。赤の実線は Ikeda et al. (2011) と Richards et al. (2006) のデータを使ってフィットした結果で、黒の破線は Glikman et al. (2010) と Richards et al. (2006) のデータを使ってフィットした結果。

## Reference

- Baldwin, J. A. 1977, ApJ, 214, 679
- Croom, S. M., Richards, G. T., Shanks, T., et al. 2009, MNRAS, 399, 1755
- Glikman, E., Bogosavljević, M., Djorgovski, S. G., et al. 2010, ApJ, 710, 1498
- Hunt, M. P., Steidel, C. C., Adelberger, K. L., & Shapley, A. E. 2004, ApJ, 605, 625
- Ikeda, H., Nagao, T., Matsuoka, K., et al. 2011, ApJL, 728, L25
- Madau, P. 1995, ApJ, 441, 18
- Page, M. J., Carrera, F. J., 2000, MNRAS, 311, 433
- Richards, G. T., Strauss, M. A., Fan, X., et al. 2006, AJ, 131, 2766
- Vanden Berk, D. E., Richards, G. T., Bauer, A., et al. 2001, AJ, 122, 549