

HSCで探る巨大ブラックホールと活動銀河核



長尾 透¹, HSC-AGN Working Group

〈¹ 愛媛大学宇宙進化研究センター 〒790-8577 愛媛県松山市文京町 2-5〉

e-mail: ¹ tohru@cosmos.ehime-u.ac.jp

視野の広さと感度の高さを兼ね備えたすばる望遠鏡Hyper Suprime-Cam (HSC) を用いた可視光広域撮像サーベイは、暗くて数密度が低い活動銀河核 (AGN) を探査するには最適な観測です。HSC サーベイの初期データを用いて、多数の国内外の研究者がさまざまな種族の AGN を系統的に探査した結果、各種 AGN の統計的性質や新たな描像が徐々に明らかになってきました。ここでは、活動銀河核およびそのエネルギー源である巨大ブラックホールについて、HSC サーベイによってどんなことがわかってきたのかをご紹介します。

1. はじめに

今は昔、すばる望遠鏡が共同利用観測を開始したのは2000年のことでした。このすばる望遠鏡の素晴らしい初期成果の熱もまだ冷めやらぬ2003年に、光赤外分野の将来計画について考える検討会が発足し、当時まだ大学院生だった私もサイエンス検討班の活動銀河核 (AGN) グループの議論に加えていただく機会があったのは、本当に幸いなことでした。次に取り組むべき計画は地上超大型望遠鏡か、それともスペース望遠鏡か、という熱い議論が各サイエンス課題ごとに行われましたが、和田桂一氏 (現鹿兒島大) がチーフだった AGN グループでは、そのどちらとも異なる提言を行いました。「すばる望遠鏡のような広視野をもつ8 m級の地上望遠鏡を占有的に使用し、1,000平方度級の高感度広域サーベイを行って、新たなパラメータスペースで AGN サンプルを構築すべし」という提言です。当時の私には、そんな夢のようなサーベイが実現する日がくるなどは想像もできませんでしたが、「広さと深さを兼ね備えたサーベイ」が必要であることは検討会での議論から明

らかでした。そしてこれ以降、当時のすばる望遠鏡の主力カメラだった Suprime-Cam を使えば数十平方度のサーベイなら可能かもしれないといった議論 (これは現放送大の谷口義明氏により Subaru Wide-Field AGN Survey, 略して SWANS と名づけられました) や、COSMOS 天域 (ハッブル宇宙望遠鏡による宇宙進化サーベイがカバーする領域) の約2平方度の Suprime-Cam データを用いた可視光キューサー探査^{1), 2)} (これは現国立天文台の池田浩之氏による、小規模ながらも先駆的な研究でした) など、今から思い返せば Hyper Suprime-Cam (HSC) による AGN サーベイにつながるさまざまな取り組みが行われ、徐々に可視光広域 AGN 探査に向けた国内の機運が高まってきました。

HSC プロジェクトが発足し、HSC すばる戦略枠観測 (HSC-SSP) に向けたサーベイ立案の検討が開始されると、SWANS 検討チームを発展的に解消して国際化する形で HSC-AGN ワーキンググループ (WG) のコアが形成されるようになりました。この HSC-AGN WG は発足当初は筆者 (長尾透) とプリンストン大の Michael Strauss 氏がチェアとして全体のとりまとめを行い、2018



図1 2018年11月に東北大学で開催したHSC-AGN WGのミーティング集合写真。2009年の初回会議から数えて10回目となるこのHSC-AGN WG会議には、53名の研究者が参加しました。

年からはStrauss氏に代わり現京都大の鳥羽儀樹氏が筆者と共にWGの運営にあたってきています。2009年から毎年行ってきているWGミーティングには毎回30名以上の参加者があり、これに加えて1-2カ月ごとに開催しているテレコンにも常に10-20名の参加者があり、さまざまなアイデアの検討や、HSCデータと組み合わせるべき多波長データの状況についての情報交換などを継続して行ってきています*1(図1)。こうした継続的な活動が功を奏し、米国アパッチポイント天文台などによるスローンデジタルスカイサーベイ(SDSS)よりも数等級も高感度なHSC-SSPサーベイが2014年3月に開始されてからは、HSC-AGN WGからさまざまなインパクトある成果が創出されています。そこで本稿では、HSC-SSPサーベイの初期データからAGNおよびそのエネルギー源である巨大ブラックホールについて、どのような結果が得られたか、ご紹介させていただきます。

2. 塵に覆われた活動銀河核

HSC-SSPサーベイ開始前に私が感じていた大きな不安の一つに、SDSSと違ってHSC-SSPでは少なくとも当面は分光スペクトルの情報なしでサイエンスを進めなければいけないが果たしてそんな

ことが可能なのだろうか、ということがありました。この問題の解決法として、HSC以外のサーベイで取得され公開されている多波長でのデータをHSCデータと組み合わせることで、スペクトルエネルギー分布(SED)の情報を利用する、ということが考えられます。

そこで鳥羽氏は、2009年にNASAが打ち上げた中間赤外線宇宙望遠鏡WISEの全天撮像データをHSCデータと組み合わせることで、中間赤外線で非常に明るく可視光でたいへん暗いdust-obscured galaxies(DOGs)と呼ばれる銀河種族を探查することを提案しました。中間赤外線で見ると可視光で暗いということは、活発なエネルギー源が塵の奥深くに隠されて存在することを意味します。そのエネルギー源とは爆発的星形成か、AGNか、あるいはその両方だと考えられます。広く信じられている(がまだ確定はしていない)AGNの進化モデルとして、ガスと塵を豊富にもつ銀河同士が合体をして爆発的な激しい星形成を生じさせ、角運動量を失ったガスが銀河中心部に落ち込んで塵に覆われたAGNが生じ、そのAGNの激しい活動によって周囲のガスと塵が吹き払われて光学的に薄いキューサーとなる、というシナリオ(図2)があります³⁾。DOGはまさにこの銀河合体後の塵に覆われた爆発的星形成とAGNの段階に相当する天体種族と考えられ、特に巨大ブラックホールの質量成長の観点で重要視されていますが⁴⁾、これまではSpitzer宇宙望遠鏡の中間赤外線データを用いて限られた探查体積でしか調査されていませんでした。可視光で暗い天体を広領域で探查する、というテーマはまさに感度の高さと広い視野を併せ持つHSCにはうってつけの課題といえます。

HSC-SSPサーベイの初めてのチーム内リリースは2014年9月、サーベイ開始から半年経ってか

*1 HSC-AGN WGは現在も活発に活動を続けていて、新たな参加者を常に募集しています。専門とする波長帯や観測・理論の別を問わず、HSCを用いたAGNと巨大ブラックホールの研究にご関心をお持ちの方は、お気軽にご連絡ください。

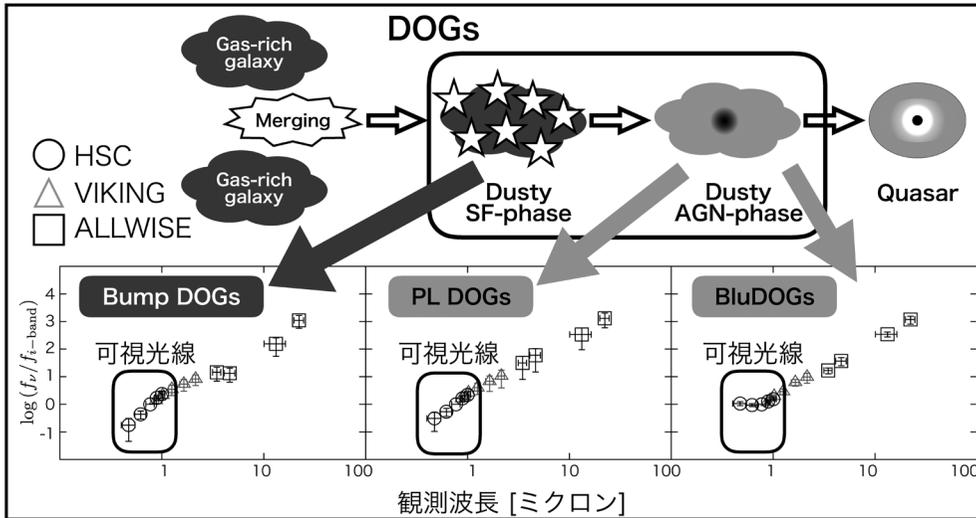


図2 銀河合体によるAGN進化のシナリオ^{3),4)} (上段) と、その各段階に対応させる形で示した、SEDによるDOGsの分類⁷⁾ (下段). 高感度のHSCデータにより、可視光で暗いDOGsのSEDを詳しく調査できるようになりました. 星形成(SF)が支配的なBump DOGs, AGNが支配的なPower-law (PL) DOGsのいずれにも見られないblue excessが見られるDOGs (BluDOGs)は、塵が吹き飛ばされつつある段階に相当するのかもしれませんが.

らのことでした. このデータ公開を受け、鳥羽氏はDOGsの調査を開始しました. 約9平方度という限られた視野の広さではありましたが、これまでの多くのDOGs探査に比べると広く、また以後のHSC-SSPサーベイで大規模サンプルを作るためのプレスタディとしても重要な取組でした. 調査の結果、48天体のDOGsが選択されました. ESOのパブリックサーベイであるVIKINGの近赤外線データも組み合わせることで、選択したDOGsの可視光から中間赤外線のSEDを見たところ、6割以上がAGN的なSEDを示していたため、DOGsに注目することで塵に覆われた活発なAGNを効率良く選択できることがわかりました. また、過去の狭くて深いDOGs探査の結果も合わせてDOGsの光度関数を調査したところ、銀河に見られるシェヒター関数的ではなく、AGNと同様に高光度側でもべき乗関数的になっていることがわかり、明るいDOGsが巨大ブラックホールの質量成長と密接に関わっていることが示唆されました⁵⁾. HSC-SSPサーベイが順調に進み、100平

方度を超すデータがチーム内にリリースされるようになると、鳥羽氏は4,000を超すDOGsを選択し、そのサンプル数を活かしてDOGsの天球上での分布に関する自己相関関数を調査しました. その結果、DOGsが典型的には $10^{13.5} M_{\odot}$ 程度の質量をもつダークマターハローに存在する傾向を示すことがわかりました. この情報から、DOGsという天体現象が継続するタイムスケールの典型値が比較的短く、数千万年であると推定することができます. 銀河合体という派手な現象のプロセスにおいて僅かな期間に見られる興味深い進化段階がDOGsという天体種族に対応しているのだ、という描像がHSCによりわかってきたのです⁶⁾. この興味深い進化段階にあるDOGsについてさらに知見を深めるため、愛媛大学の登口暁氏がDOGsのSEDを詳細に調査したところ、HSC-SSPサーベイで見つかったDOGsのうち2%程度のSEDに興味深い特徴が見られました. HSCの短波長側の測光値がblue excess, すなわち長波長側からのSEDの外挿に比べ顕著なフラックス超過を

示しているのです⁷⁾。DOGsは可視光が中間赤外線に比べて顕著に暗く、極めて深く塵に覆われた天体種族だと考えられていたため、このSEDは非常に不思議です。こうした天体はDOGsの中でも塵がまさに吹き飛ばされつつあり、塵に覆われたAGN光の一部が漏れ出し始めているような天体なのかもしれないと考えられ、BluDOGsと名づけられましたが(図2)、その詳細を知るためには分光観測の結果を待つ必要があります。

AGN活動と銀河合体现象の関係をさらに調査するため、プリンストン大学のAndy Goulding氏はHSCの高い空間分解能(点源の半値幅がiバンドで0.6秒角程度)を活かして、HSC画像の解析から銀河合体の兆候を捉えようとしていました。前述のWISEで取得された中間赤外線データと可視光データを組み合わせ、DOGsほどではないにせよ中心核が塵に隠されているAGNを選択し(赤方偏移 $0.1 < z < 0.9$ の範囲で約2,500天体)、その母銀河が合体の兆候を示す形をしているかを調べたのです。ここで、何千天体もの銀河が合体の兆候を示すかどうかを、一つひとつ目で確認しているのは、判断の客観性が保証できませんし、なにより時間がかかりすぎます。そこでGoulding氏は機械学習の手法を活用して、合体銀河とそうではない銀河を自動分類しました。星質量が同程度になるように作った比較サンプル(AGN活動を示さない銀河)に対しても同様の分類をして、銀河合体の兆候を系統的に調べた結果、銀河合体の兆候を示す銀河はそうでない銀河に比べて2倍から7倍程度もAGNをもつ割合が高いことがわかったのです。これはまさに、銀河合体という現象がAGN活動、すなわち巨大ブラックホールの質量成長に重大な影響を及ぼしていることを観測的に示している結果だといえます⁸⁾。

HSC-SSPデータから隠されたAGNに迫るための方法として、WISEの中間赤外線データと組み合わせる以外にも、エックス線データと組み合わ

せる解析が考えられます。愛媛大の寺島雄一氏は、1999年にESAが打ち上げたエックス線宇宙望遠鏡XMM-Newtonがこれまでに取得したデータに偶然映っているエックス線源をすべて収集したカタログ(3XMM-DR6)⁹⁾とHSC-SSPデータとを組み合わせることで、エックス線では明るいのに可視光では非常に暗い天体を選び出しました¹⁰⁾。具体的には、XMM-NewtonのEPIC-PN検出器で70カウント(積分時間にもよりますが非常に大雑把には2-10 keVで 10^{-14} erg s⁻¹ cm⁻²程度に相当)以上検出されているにもかかわらず、HSCのiバンドで23.5等よりも暗いものを53天体発見しました。このうち44天体はエックス線と可視光のフラックス比が $F_{2-10\text{ keV}}/F_{i\text{ band}} > 10$ を満たし、extreme X-ray/optical sources (EXOs)と分類されるような極端なSEDを示しています。これらの天体の赤外線から可視光にかけてのSEDは、塵に覆われたAGNという解釈で良さそうに見えるのですが、一方でこれらについてエックス線スペクトルを見てみると奇妙な事実に気づきます。というのは、可視光がエックス線に比べて極端に暗いにもかかわらず、エックス線スペクトルから示唆される中性水素の柱密度がさほど大きくないのです($N_{\text{H}} \sim 10^{20.5-23.5}$ cm⁻²)。もちろんこの結果は、エックス線で強く検出されているという選択条件のバイアスを受けていますので、実際には選択条件から漏れた天体に中性水素の柱密度がもっと大きなAGNが大量に存在するのかもしれませんが、しかし、バイアスを受けたサンプルとはいえ、その正体が何者なのかは気になるところです。今後の詳細研究が待たれるところですが、ひょっとすると塵とガスの相対組成比が標準的な値から大きく異なる天体がHSCによって見えてきたのかもしれない。

3. 塵が晴れた活動銀河核: クェーサー

前章で述べた銀河合体によるAGN進化モデル

(図2)を信じると、塵に覆われたAGNが(BluDOGsのような段階を経て?)塵が晴れたAGN, すなわちクェーサーに進化すると考えられます. クェーサーの静止系可視光(あるいは紫外線)スペクトルからは巨大ブラックホールの質量が推定できるため, 遠方クェーサーは巨大ブラックホールの進化を研究するうえで極めて興味深いターゲットです. 特に赤方偏移が6を超す初期宇宙においてクェーサーを探索する取組は, 巨大ブラックホールの形成理論に強い制限を与えるのみならず, 宇宙再電離研究の観点でも重要です. HSC-SSPサーベイでは, Subaru High-*z* Exploration of Low-luminosity Quasars (SHELLQs)と銘打って現愛媛大学の松岡良樹氏がこの課題をリードし¹¹⁾⁻¹³⁾, その華々しい成果に対して2017年度の日本天文学会研究奨励賞が授与されたのは記憶に新しいところです. SHELLQsの詳細については天文月報の別記事¹⁴⁾にまとめられているので, ぜひそちらもご覧いただきたいところですが, このSHELLQsの月報記事が出版されてからの進展として, SHELLQsによる赤方偏移6でのクェーサー光度関数の結果が出版されたことは, ここで言及しておくべきと思われる. HSC-SSPサーベイは過去のSDSS等に比べると格段に暗いクェーサーまで検出できるため, 幅広い光度をカバーする必要がある光度関数計測を行うにはSHELLQsのような研究が極めてユニークなのです. 図3に示された赤方偏移6におけるクェーサー光度関数を見ると, SHELLQsのデータによりべき乗関数の折れ曲がりの様子が明瞭に示され, 暗い側での光度関数の傾きがかなりフラットになっていることがわかります. これはSDSSなど過去のクェーサー探索で検出限界以下だったような暗いクェーサーが実は大量に存在するという可能性を棄却するもので, クェーサーが宇宙再電離の光源として主要な役割を果たしていないことが明らかになりました¹⁵⁾. なお, SHELLQsで見つかった赤方偏移6を超す低光度クェーサーについて近赤外線分光観測を行い巨大ブラックホ-

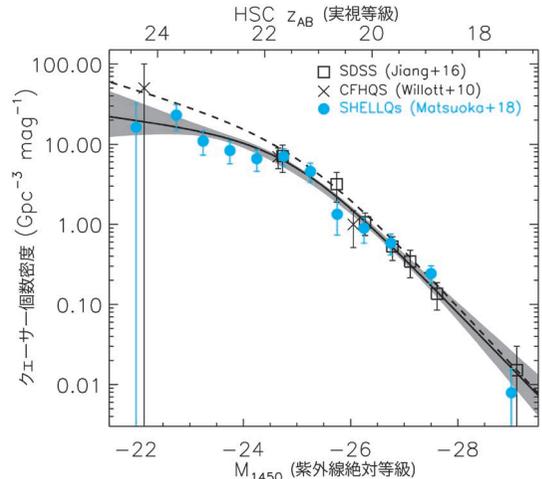


図3 SHELLQsクェーサー(青丸印)と既知の高光度クェーサー(白抜き四角印)などを合わせた110天体から導出された, 赤方偏移6でのクェーサー光度関数¹⁵⁾. フィッティング結果と 1σ の不定性の範囲を実線と網掛けで示しています.

ル質量を測定するという取組を, 現マックスプランク研究所の尾上匡房氏がリードされています. その成果については, ぜひ天文月報の別記事¹⁶⁾をご参照ください.

SHELLQsで見つかった低光度クェーサーについて, アルマ望遠鏡を用いたミリ波帯でのフォローアップ観測も順調に進みつつあります. 可視光・近赤外線の観測がAGNからの放射を捉える一方, ミリ波帯の観測では[C II]輝線により母銀河の力学的質量を, また静止系遠赤外線連続波放射により母銀河における星形成活動を, それぞれ計測することができます. 赤方偏移が6以上のクェーサーのミリ波帯観測はこれまでもある程度の天体数について行われてきていますが, 過去の観測の多くはSDSSで発見されたような極めて明るい天体で, その時代の宇宙に存在していたクェーサーの中でも例外的なものに相当する可能性が指摘されていました. クェーサーの母銀河についての普遍的な描像に迫るためには, SHELLQsで見つかったような低光度のクェーサーはまさに

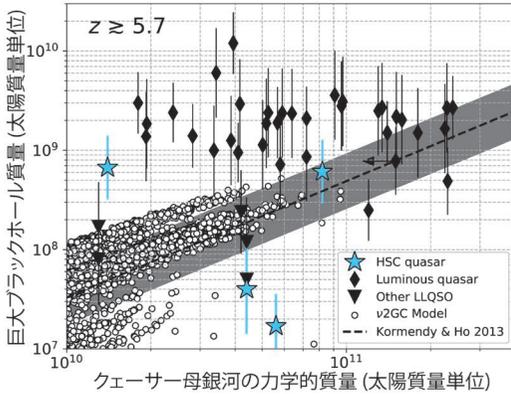


図4 クェーサーの巨大ブラックホール質量と母銀河の力学的質量との比較図¹⁷⁾。青星印がSHELLQsクェーサー、黒三角印が他の低光度クェーサー、黒菱形印が高光度クェーサー(いずれも赤方偏移6程度のもの)。黒破線と網掛けは近傍宇宙での関係¹⁸⁾。小さな丸印は準解析的モデル(v²GC)^{19), 20)}による、赤方偏移6での理論予想²⁰⁾。

うってつけのターゲットなのです。そこで現国立天文台の泉拓磨氏はアルマ望遠鏡のサイクル4観測公募にSHELLQsクェーサーのミリ波観測を提案し、四つの天体について観測を行いました。各天体当たり20から200分ほどの積分時間で、[C II]輝線と遠赤外線連続波放射がSDSSクェーサーよりもはるかに暗いクェーサーすべてから明瞭に検出されました¹⁷⁾。アルマ望遠鏡の威力たるや、恐るべしです。検出された連続波強度からターゲットの赤外線光度(静止系で8-1,000ミクロンの光度を積分したもの)を見積もると、 $(2-10) \times 10^{11} L_{\odot}$ 程度となり、SHELLQsクェーサーの母銀河がいわゆる超高光度赤外線銀河(ULIRG)よりも暗い高光度赤外線銀河(LIRG)程度の銀河であることがわかります(星形成率に換算すると20-100 $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 程度に相当)。また、[C II]輝線の速度幅は半値幅で200-400 km s^{-1} 程度で、放射領域のサイズや見込み角の推定値なども合わせて考慮すると、力学的質量として $(1-8) \times 10^{10} M_{\odot}$ という値が見積もられます。この力学的質量と光赤外の情報が

ら推定した巨大ブラックホール質量¹⁶⁾とを比較すると、興味深いことがわかります(図4)。近傍宇宙では、銀河のバルジ成分の星質量と中心核にある巨大ブラックホールの質量の間に強い正の相関があり^{18), 21)}、銀河と巨大ブラックホールの共進化を示唆する重要な関係と考えられていますが、これまでの明るい高赤方偏移クェーサーのミリ波帯観測からは、この両者の関係が近傍宇宙での関係からずれているのではないかと指摘がありました。ところが今回、低光度クェーサーに着目すると、高赤方偏移でも近傍宇宙での関係と系統的には変わらないことがわかったのです。恐らく、これまで報告されていた高赤方偏移における質量関係のずれは、これまでの研究のターゲットとして質量の大きな巨大ブラックホールが選択的に調べられていたというバイアスに起因するのではないかと考えられます。サイクル5以降の観測データも合わせて、今後はさらに統計的な観点からこの調査が進むものと期待されます。

赤方偏移6以遠の話が続きましたが、もちろんHSC-SSPデータはそれよりも低い赤方偏移でのクェーサー探査にも絶大な威力を発揮します。特に赤方偏移4あたりでは、SHELLQsで調べていたような赤方偏移6以遠に比べると大幅にクェーサーの個数密度が高く、また銀河間ガスによる吸収の効果を活かしたドロップアウト法をクェーサー選択に利用できます(赤方偏移3以下ではHSCバンドだけでドロップアウト法を利用することは困難です)。そこで東北大学の秋山正幸氏は、遠方クェーサーを大量に発見するには最適な赤方偏移帯である $z \sim 4$ に注目し、ドロップアウト法を用いたクェーサー探査を行いました。その結果、約340平方度の探査面積で $3.6 < z < 4.3$ にある1,666天体のクェーサーを測光的に選択しました。このサンプルとSDSSクェーサーを合わせて描かれた赤方偏移4のクェーサー光度関数を図5に示します。先に述べた赤方偏移6の光度関数(図3)とよく似た形をしていて、暗い側での傾きがフラット

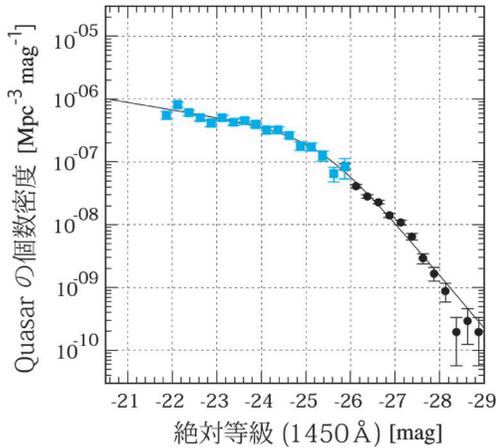


図5 赤方偏移4でのクェーサー光度関数²²⁾。明るい側のクェーサーサンプルはSDSS(黒丸), 暗い側のサンプルはHSC-SSP(青四角)によるもの。

になっているのが印象的です²²⁾。冒頭の章で述べた、HSC-SSPサーベイ開始前にCOSMOS天域の2平方度のデータを使い頑張って30天体程度のクェーサーサンプルを作り、光度範囲を二つだけに分けて必死で赤方偏移4のクェーサー光度関数を調査していた¹⁾頃を思い出すと、まさに隔世の感があります。

赤方偏移4では、クェーサーに加えてAGN活動を示さないような星形成銀河も、ライマンブレイク法により選択できます(そのように選ばれた銀河をライマンブレイク銀河, LBGといいます²⁾)。東北大のWanqiu He氏は、赤方偏移4程度のクェーサー901天体とLBG 25,790天体をHSC-SSPデータから選択し、より明るいSDSSクェーサー342天体も組み合わせることで、赤方偏移4のクェーサーとLBGの相互相関関数を調査しました。具体的には、赤方偏移4の明るいSDSSクェーサーと暗いHSCクェーサーのそれぞれについて、質量成長の振る舞いが理論的によくわかっているダークマターハローのクラスタリング強度に比べてどの程度強くクラスタリングしているかを示すバイ

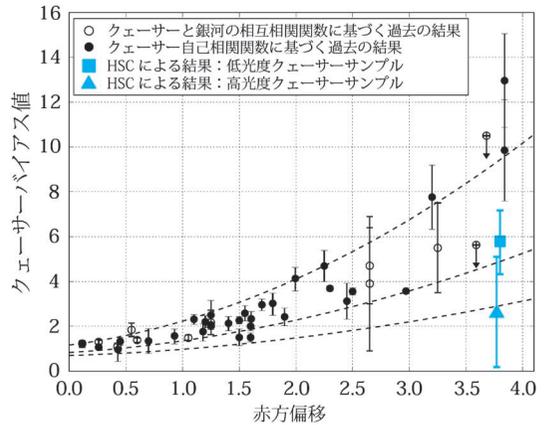


図6 赤方偏移の関数として示された、クェーサーのバイアス値。青塗りのデータ点がHSC-SSPの結果で、下側が明るいサンプル(三角印)、上側が暗いサンプル(四角印)。丸印は過去の研究結果で、白抜き丸印は相互相関関数から、黒塗り丸印は自己相関関数から得られた結果。破線は、下側から上側に向かって、質量が 10^{11} 、 10^{12} 、 $10^{13} h_{70}^{-1} M_{\odot}$ のダークマターハローのバイアス進化²⁴⁾。

アス値と呼ばれる量を導出したのです²⁴⁾。図6にその結果を示していますが、統計的有意性は微妙ですが暗いクェーサーのほうが明るいクェーサーよりも強いクラスタリングを示している、すなわち周囲によりたくさんの銀河が群れているような環境に存在するようにも思われます。これまで明るいクェーサーのほうがクラスタリングが強いという指摘もあったため²⁵⁾、HSCの結果はたいへん興味深いものといえます。また、このクラスタリング解析の結果からは、HSCクェーサーのような低光度クェーサーのAGN活動の典型的タイムスケールが数百から数千万年程度であることが示唆されます。AGN活動とはすなわち巨大ブラックホールの質量降着に対応する現象ですので、このような解析から巨大ブラックホールの質量成長の様子について徐々に描像が明らかになってきたといえます。

²²⁾ HSC-SSPサーベイによるLBGなどの高赤方偏移銀河についての研究成果は、天文月報の本HSC特集に掲載されている、東京大の大内正己氏による別記事「HSCが拓いた遠方銀河の統計天文学」²³⁾もぜひご参照ください。

赤方偏移4におけるクェーサーの環境について、違った切り口からの研究結果についてもご紹介しましょう。これまでの研究から、明るいクェーサーは銀河団のように銀河数密度が局所的に高くなっているような環境に多く見られるという報告があり、高赤方偏移クェーサーが遠方銀河団を探索する際の目印として使えるのではないかという議論がありました。そこで総合研究大学院大学の内山久和氏は、HSC-SSPで選択された赤方偏移4のLBGサンプルから選ばれた179の原始銀河団²⁶⁾、*2とSDSSで既に分光同定されている赤方偏移4のクェーサー151天体が空間的にどう関係しているかを調査しました²⁷⁾。その結果、予想に反して、クェーサーが銀河団中に見られやすいといった傾向は特に確認されませんでした。それどころか従来の描像とは逆に、明るいクェーサーは銀河団中には見られにくいという傾向が見えてきました。そうすると、高赤方偏移クェーサーは遠方銀河団の目印としては役に立たないということになるのでしょうか。この問題について、尾上氏が興味深い発見をしています。尾上氏が着目したのは、HSC-SSPサーベイでカバーされている範囲内に2組存在する、高赤方偏移クェーサー同士の「ペア・クェーサー」です。実はこの2組のペア・クェーサーは、単独で存在するクェーサーとは異なり、いずれも銀河数密度が局所的に高くなっている場所に存在することがわかったのです²⁸⁾ (図7)。今後HSC-SSPサーベイのさらに広範囲なデータがリリースされれば、こうした高赤方偏移のペア・クェーサーの環境をより多く調査することができ、原始銀河団探索の目印としてペア・クェーサーが有効かどうかについても明らかになってくることでしょう。

一方、国立天文台の白崎裕治氏は、より詳細な調査が可能な比較的低赤方偏移のクェーサーに着目してクェーサーのクラスタリング解析を行いました。具体的には、白崎氏はSDSSの分光観測によりすでに巨大ブラックホールの質量が測定されて

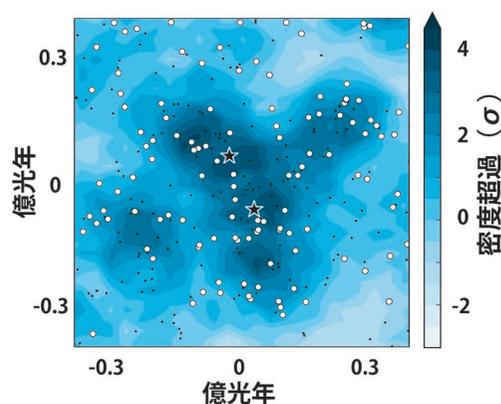


図7 ある赤方偏移3.6のペア・クェーサーの周辺環境。星印がクェーサーの位置、白丸が $i < 25$ magの明るいLBG、黒点が $i > 25$ magの暗いLBG。コントアはLBGの空間分布から見積もった銀河数密度が同じ赤方偏移での典型的な値からどれだけ超過しているかを示しています²⁸⁾。

いて赤方偏移が $0.6 < z < 3.0$ の範囲にあるクェーサー6,166天体とHSC-SSPサーベイで検出された周辺銀河との間での相互相関関数を計測したのですが、その際にクェーサーの周辺銀河を青い銀河と赤い銀河に分けて相互相関関数を導出したのです。そうして周辺銀河のクラスタリングの強さがクェーサーの巨大ブラックホール質量とどのように関係するかを調べたところ、興味深いことに、赤い銀河に注目した場合にだけ、クラスタリング強度と巨大ブラックホール質量との間に正の相関が見られたのです²⁹⁾。このことは、質量が $10^8 M_{\odot}$ を超える巨大質量ブラックホールの周辺数メガパーセクの範囲にわたって、銀河の進化が進んで赤い色を示すようになった銀河の割合が多くなっていることを意味します。銀河と巨大ブラックホールの進化が相互に関係をしているという共進化を示唆する新しい観測的兆候が見えてきたといえるでしょう。

4. 進化末期の活動銀河核：電波銀河

図2に示した、銀河合体によるAGN進化シナリ

オの話に戻りましょう。銀河合体の後、塵が晴れてキューサーの段階までたどり着いたら、その後はどうなるのでしょうか？ 前の章で見た赤方偏移4のキューサーのクラスタリング解析の結果を踏まえると、キューサーという段階は長くは続かないはずです。恐らくはキューサー活動に起因する激しいアウトフロー現象などにより母銀河からガスがなくなり、巨大ブラックホールへのガス供給量も減少すると思われます。この際、シンクロトロン放射により電波帯で明るく輝く「電波ジェット」が巨大ブラックホール近傍で形成される場合があると考えられています。こうした電波ジェットを有するAGNは電波銀河と呼ばれ、銀河合体によるAGN進化シナリオの最終段階として議論されることがあります³⁾。この電波銀河について研究するため、NRAOの大型電波干渉計VLAを用いて1.4 GHz帯で行われた広域電波サーベイであるFIRSTのデータがしばしば注目されます。ただし、SDSSとFIRSTを組み合わせた研究の結果を見ると、FIRSTの点源の半分以上についてSDSSの可視光対応天体が見つかっていないのです³⁰⁾。SDSSで見えていないFIRST電波源の正体を明らかにするには、SDSSよりも十分感度が高く、かつ探査面積も広い可視光サーベイが必要です。そこで現国立天文台の山下拓時氏はHSC-SSPのデータとFIRSTのデータのマッチングを取り、SDSSの観測限界よりも可視光で暗いような電波銀河の実態解明を試みました（この取組はWide and Deep Exploration of Radio Galaxies with Subaru HSC、略してWERGSと名づけられています）。図8に、HSC-SSPとFIRSTでマッチングを取ったサンプルの特徴を示しています。横軸に*i*バンド等級を取っていますが、SDSSではきちんと調べられなかった*i*>21.3の暗い範囲にも大量の電波銀河（および電波で明るいキューサー）が存在することが確認できます。また、縦軸に電波強度と可視光強度の比（radio loudness）を取っていますが、SDSSとFIRSTの組み合わせでは調べ

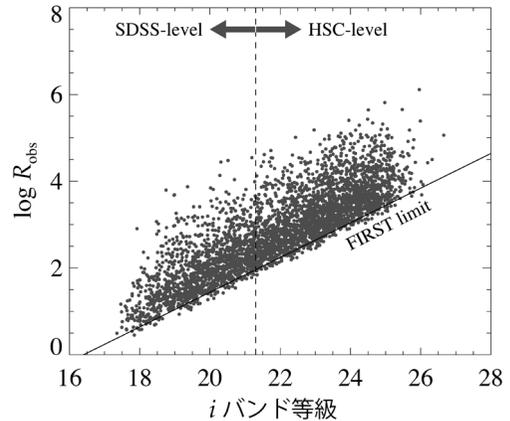


図8 WERGSのサンプルに含まれる電波銀河と（電波で明るい）キューサーのradio loudnessを、可視光の*i*バンド等級の関数として示したものの、*i*=21.3よりも暗い電波銀河は、SDSSでは調べられておらずHSC-SSPで初めて明らかになったもの。斜め直線の右下部は、FIRSTの観測限界により見えていないパラメータスペースに対応します³¹⁾。

られなかったような非常にradio loudnessの大きな電波銀河がWERGSで新しく見えてきたことがわかります。これらの電波銀河について、HSC 5バンドの測光情報を使って求められた測光的赤方偏移（ここではMizuki³²⁾というコードで求められたもの）を見てみると、SDSSで検出できる程度の明るい電波銀河が赤方偏移0.8程度までしか見えていなかったのに対して、WERGSで初めて見えてきた暗い電波銀河は赤方偏移1.5程度まで分布し、HSC-SSPによって電波銀河の大規模サンプルをより遠方宇宙に拡大できたことがわかります³¹⁾。構築したサンプルの実態に迫るため、WERGSで見つかった電波銀河に対する多波長でのさまざまなフォローアップ観測や詳細解析が目下進行中で、結果が待ち遠しいところです。

5. 活動銀河核の理論モデル

サーベイ結果からさまざまな統計量が得られてきたときに、しばしばその物理的解釈に悩まされ

ることになります。こういう場合に頼りになるのが理論シミュレーションによる研究ですが、AGNは宇宙における数密度が低いために、例えばAGN相関関数のような統計量をシミュレーションしようとするに巨大な計算体積が必要になり、困難が生じます。この困難を克服するため、ダークマターハローの進化計算を参照しつつバリオンに関わる部分は適宜モデル化を行うことで、高速に計算を行って各種統計量を導出するという手法があります(準解析的モデル)。HSC-AGN WGでは早くからこうした準解析的モデルの重要性を認識し、和田氏が音頭を取って年に1-2度の理論班検討会を各地で継続的に開催することで、多くの理論研究者にご参加いただいてHSCサーベイのアウトプットと比較可能な理論予測をどのように用意していくかという検討を重ねました。その結果の一部が、図4に示された ν^2 GCの理論予測です^{19), 20)}。このようなHSC-SSPサーベイの観測結果との比較のみならず、例えばSHELLQsの分光フォローアップ観測の提案を行う際などにも、この理論班の活動は大活躍をしました。今後HSC-SSPサーベイの観測天域が拡大してさまざまな統計量の精度が向上すると、その物理的解釈のために理論モデルがますます重要性を増すものと思われま

6. 今後に向けて

このように、HSC-SSPサーベイによってAGN・巨大ブラックホールに関する新たな知見が次々に得られつつあります。しかし、ここで示した研究はまだHSC-SSPサーベイで取得が予定されているデータの半分以下しか使わずに行われたものです。HSC-SSPサーベイは現在も観測が進行中であり、最終的に得られる1,000平方度を上回るデータを用いれば、さらに統計的精度を向上させた解析が期待されます。また、実はここまで述べたほぼすべての研究はHSC-SSPの“Wide”と呼ばれるサーベイに基づくものとなっています。HSC-SSPには“Wide”に加えて“Deep”および

“Ultradeep”というサーベイがあり、探査面積こそ少し狭くなりますが“Wide”よりもさらに高感度なデータが利用可能です。特に“Ultradeep”では、HSC-SSP実施期間に何度も繰り返し同じ天域が観測されるため、天体の可視光強度の時間変動を調査することができます。この時間変動の情報から、従来の色選択などでは選択することが難しい低光度AGNを系統的に探査しようという検討も現在進行中で、結果が待ち望まれます。さらに強力にAGN研究を推進するためには、広域エックス線サーベイとの協力が鍵となりますが、前述のXMM衛星を用いたextended XMM-LSS (XXL) というサーベイとHSC-SSPサーベイの間で重複する約25平方度について、両サーベイチームで協力して研究を進めようという国際協力の動きも進行中です。これに加えて、ドイツとロシアの共同ミッションであるeROSITA衛星が(本稿執筆時点では)2019年内に打ち上げられる予定で、かつてない高感度でのエックス線全天サーベイが予定されています。HSC-SSPチームではこのeROSITAチームとも国際共同研究を開始しようとしています。まさにHSC-SSPを軸としてさまざまな国際的ミッションとのコラボレーションが拡がりつつあるといえるでしょう。そしてHSC-SSPサーベイが完了した際には、すばる望遠鏡は次世代広視野多天体分光器Prime Focus Spectrograph (PFS)を用いた分光サーベイを行うことが検討されています³³⁾。HSC-SSPサーベイで観測されたAGNについてPFSによって系統的にスペクトルが得られれば、巨大ブラックホールの質量や電離ガス領域の物理化学状態など測光情報だけではわからない物理量を計測することができ、格段にAGNと巨大ブラックホールの理解が深まると期待されます。そのため、PFSサーベイの準備としてもHSC-SSPサーベイをしっかりと完遂させることが必要です。

謝 辞

ここで紹介したさまざまな研究はすべて、国立天文台ハワイ観測所・HSCプロジェクト・HSC-AGN WGなどの多くの皆様のご尽力があって実現したものです。関係者の皆様に深く感謝いたします。スペースの関係上、お世話になったすべての方々のお名前を挙げられないことをご容赦いただければと思います。

参考文献

- 1) Ikeda, H., et al., 2011, ApJ, 728, L25
- 2) Ikeda, H., et al., 2012, ApJ, 756, 160
- 3) Hopkins, P. F., et al., 2008, ApJS, 175, 356
- 4) Dey, A., et al., 2008, ApJ, 677, 943
- 5) Toba, Y., et al., 2015, PASJ, 67, 86
- 6) Toba, Y., et al., 2017, ApJ, 835, 36
- 7) Noboriguchi, A., et al., 2018, ApJ, submitted (arXiv: 1803.09951)
- 8) Goulding, A. D., et al., 2018, PASJ, 70, S37
- 9) Rosen, S. R., et al., 2016, A&A, 590, 1
- 10) Terashima, Y., et al., 2018, PASJ, 70, S36
- 11) Matsuoka, Y., et al., 2016, ApJ, 828, 26
- 12) Matsuoka, Y., et al., 2018, PASJ, 70, S35
- 13) Matsuoka, Y., et al., 2018, ApJS, 237, 5
- 14) 松岡良樹, 2018, 天文月報, 111, 760
- 15) Matsuoka, Y., et al., 2018, ApJ, 869, 150
- 16) 尾上匡房, 2018, 天文月報, 111, 684
- 17) Izumi, T., et al., 2018, PASJ, 70, 36
- 18) Kormendy, J., & Ho, L. C., 2013, ARA&A, 51, 511
- 19) Makiya, R., et al., 2016, PASJ, 68, 25
- 20) Shirakata, H., et al., 2019, MNRAS, 482, 4846
- 21) Magorrian, J., et al., 1998, AJ, 115, 2285
- 22) Akiyama, M., et al., 2018, PASJ, 70, S34
- 23) 大内正己, 2019, 天文月報, 112, 146
- 24) He, W., et al., 2018, PASJ, 70, S33
- 25) Shen, Y., et al., 2009, ApJ, 697, 1656
- 26) Toshikawa, J., et al., 2018, PASJ, 70, S12
- 27) Uchiyama, H., et al., 2018, PASJ, 70, S32
- 28) Onoue, M., et al., 2018, PASJ, 70, S31
- 29) Shirasaki, Y., et al., 2018, PASJ, 70, S30
- 30) Helfand, D. J., et al., 2015, ApJ, 801, 26
- 31) Yamashita, T., et al., 2018, ApJ, 866, 140
- 32) Tanaka, M., et al., 2018, PASJ, 70, S9
- 33) Takada, M., et al., 2014, PASJ, 66, R1

Studies of Active Galactic Nuclei and Supermassive Black Holes with Subaru/HSC Tohru NAGAO¹ and the HSC-AGN WG

¹ *Research Center for Space and Cosmic Evolution, Ehime University, Bunkyo-cho 2-5, Matsuyama, Ehime 790-8577, Japan*

Abstract: Wide and deep imaging observations with a new wide-field optical camera of the Subaru Telescope, Hyper Suprime-Cam (HSC), are powerful to study active galactic nuclei (AGNs). From the initial data of the Subaru Strategic Program (SSP) survey with HSC, interesting new results have been reported for various populations of AGNs. In this article, we review new discoveries about the nature of AGNs and supermassive black holes obtained from the HSC-SSP survey.