

# 活動銀河中心核を近赤外域で探る ～その手法の構築と候補天体の探索～



高 妻 真次郎

〈中京大学国際教養学部 〒470-0393 愛知県豊田市貝津町床立 101〉

e-mail: skouzuma@lets.chukyo-u.ac.jp

活動銀河中心核は、とても明るく、幅広い波長域で観測される天体として知られている。その異常な明るさのため、宇宙が生まれて間もないような非常に遠方であっても観測することができ、活動銀河中心核を探しさまざまなサンプルを集めることは、それ自身の性質や進化のみならず宇宙の進化などを調べるうえでも重要な役割を果たす。筆者らは、天体カタログのアーカイブデータを利用し、近赤外域の“色”に基づいて活動銀河中心核の候補天体を絞り込むための手法を考案し、さらにその手法を用いて新たな候補天体を抜き出した。本稿では、候補天体を絞り込む手法とその妥当性、得られた候補天体の性質などについて紹介する。

## 1. はじめに

写真乾板を使った天体観測が始まったのが、150年ほど前のことである。それまでの肉眼による観測とは異なり、天体の姿を画像のデータとして残すことが可能になった。1970年代に入り、電荷結合素子 (Charge Coupled Device; CCD) が登場すると、天文学はさらに進展していく。写真乾板ではできなかった赤外線などの他波長での撮像も可能としたのに加え、観測データをデジタルデータとして保存することができるようになった。観測データのデジタル化は、また、いっそう良質かつ大量のデータを、画像やカタログなど多種多様な“アーカイブデータ”として容易に保存・蓄積することを可能とした。近年では、この大量かつ良質なアーカイブデータを主体的に活用した研究がますます増え、それらを扱うための基盤としてヴァーチャル天文台 (Virtual Observatory; VO) の構築なども世界各国で行われている<sup>1)</sup>。

本稿で紹介する研究では、天体カタログのアー

カイブデータ (カタログアーカイブ) が主要な役割を果たす。カタログとは、天体の位置や明るさなどに関する情報を系統的にまとめた天体リストのことである。全天の撮像観測によって得られた天体をまとめたもの、同種の天体をまとめたものなど、さまざまな形態での天体カタログが存在する。筆者らは、このようなカタログをいくつか組み合わせることで利用することにより、活動銀河中心核の新たな探索手法の構築とそれを用いた探索を行った。

## 2. 活動銀河中心核 (AGN) を探す

### 2.1 活動銀河中心核とは？

銀河には、1,000億個ほどの恒星が集まっている。銀河からやってくる光は、これら恒星の光を足し合わせたものである。しかし、銀河の中には、恒星以外のエネルギー源で明るく輝くものが存在する。それは、銀河の中心にある大質量ブラックホールに周囲のガスが落ち込むことによって、銀河中心部のほんのわずかな領域だけで、通常の銀

河一つ分以上の明るさで輝く。中心部で活発な活動をしていることから、そのような天体は活動銀河中心核 (Active Galactic Nucleus; AGN) と呼ばれる。

AGN は、非常に莫大なエネルギーを生み出しており、電波から X 線までのほぼ全波長域にわたって強い放射をする。そのため、非常に幅広い波長域で、しかも遠方にあるものでも観測することができる。AGN の中でも、ひとときわ明るい (銀河全体の 100 倍以上の明るさをもつ) AGN はクエーサーと呼ばれ、遠方宇宙にたくさん存在する。遠方にあるクエーサーは、赤方偏移<sup>\*1</sup>によりスペクトル全体が赤い (波長が長い) ほうへ大きくシフトし、本来よりも赤く見えるという特徴をもつ。

AGN にまつわる謎はいまだにいくつもある。AGN の莫大なエネルギーは大質量ブラックホールへの質量降着によって生み出されるが、なぜそれほど莫大なエネルギーを定常的にしかも長期間にわたって放ち続けることができるのかはよくわかっていない。そもそも、中心部のブラックホールや AGN 自身がどのように進化してきたのかについても、明確な解答は得られていない。さらに、クエーサーはひとときわ明るく、遠方であっても他の天体と比べ観測しやすいことから、できるだけ遠方にあるものを探すことにより、宇宙の初期や進化などに関する謎を解き明かすためのヒントにもなると考えられている。

このような謎を解明するためには、さまざまな AGN を探すとすることが不可欠である。AGN を探索し、多種多様なサンプルを集め、それらをさらに詳しく調べることによって、AGN 自身の

性質や進化の解明のみならず、宇宙の進化なども調べていくことができる。

## 2.2 “色” を使って探す

天体の種類を特定するためには、通常、分光観測をしてスペクトル (波長ごとの光の強度の分布) を調べる必要がある。しかし、分光観測は測光観測 (ある波長帯での明るさを測る観測) と比べると、労力的・時間的な手間がかかってしまう。そこで、測光観測によって得られたデータのみから、天体の “色” (二つの異なる波長帯での等級間の差し引き) を調べ、その色の特徴から天体の種類を推定し、選抜する手法がある。それは、色選択と呼ばれる。色選択の際には、異なる二色を算出したうえで二色図と呼ばれる図の上にプロットし、その位置から天体がどのような色をもつのかを調べることが多い。あらゆる種類の天体が色選択により抜き出せるわけではないが、AGN については、可視光での色選択の手法が昔から知られていた<sup>2)</sup>。近年では、中間赤外線などいくつかの波長域での色選択も利用されている<sup>3), 4)</sup>。近赤外線では、可視光と組み合わせた色を用いた手法<sup>5), 6)</sup>はあるが、近赤外域の色のみを使った色選択の手法を明示しているものはなかった。

この研究ではまず、カタログにある AGN を、近赤外線のカatalogと組み合わせて AGN の近赤外域での等級データを取得し、それらを使って AGN を近赤外線の色選択する方法を新たに考察・検証した。さらに、近赤外・X 線の全天カタログを用いて両波長域で明るい天体を抽出し、得られた天体に前述の色選択を施すことにより、新たな AGN の候補天体を抜き出した。

\*1 宇宙膨張で空間が引き伸ばされることによって、光の波長も引き伸ばされる (長くなる) 現象。波長が長くなるために、光を発した時点での天体の色よりも赤く見える。どれくらい長くなったのかは  $z$  を使っても表され、光を発したときの波長 ( $\lambda$ ) に対する伸びた波長の割合 ( $z \equiv \Delta\lambda/\lambda$ ) によって定義される。これは、時刻  $t$  での宇宙の大きさを表すスケールファクター  $a(t)$  を用いて、 $1+z = a(t_0)/a(t_e)$  ( $t_e$  は天体が光を発した時刻、 $t_0$  は光を観測した時刻) と表すことができる。天体までの距離が遠ければ、 $z$  の値も大きくなる。

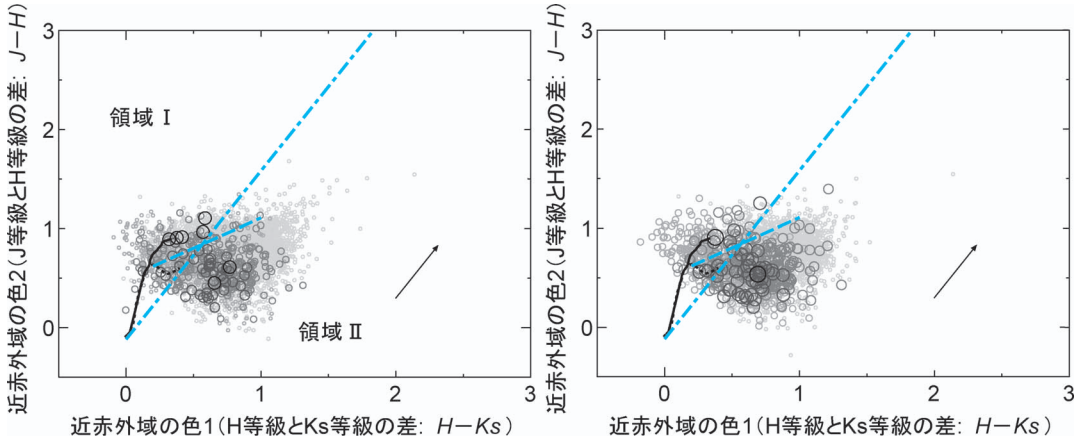


図1 AGNの近赤外線二色図上での分布。左の図がQuasars and Active Galactic Nuclei カタログ、右がSDSS-DR 5 Quasar カタログのAGN。色の濃さおよびマークの大きさは、赤方偏移の大きさを表す。恒星（実線：巨星，点線：主系列星）の分布は曲線，古典的Tタウリ型星の分布は破線によって示されている。矢印は赤化ベクトル<sup>7)</sup>を表し，星間物質などから吸収を受けて減光されると，その減光量に応じて，天体の位置がこの矢印と平行な方向に移動する。したがって，一点鎖線よりも下の領域に，恒星が分布することはほとんどないと考えられる。

### 3. 近赤外域でのAGNの色

AGNの近赤外域での色を調べるために，まず，AGNとしてすでに知られているものについて近赤外線での対応天体を探した。既知AGNのサンプルとしては，Quasars and Active Galactic Nuclei カタログ (12th Ed.) および SDSS (Sloan Digital Sky Survey) の観測によって得られた SDSS-DR5 Quasar カタログの二つのカタログのAGNを利用した。これらは，AGNのカタログとしては収録天体数が多く，合わせて延べ20万個近くのAGNが載っている。これら二つのカタログにあるAGNは，ほとんどが可視光観測によって発見されているため，近赤外線での明るさに関する情報は含まれていない。そこで，近赤外域の三つのバンド ( $J$ :  $1.25 \mu\text{m}$ ,  $H$ :  $1.65 \mu\text{m}$ ,  $K_s$ :  $2.16 \mu\text{m}$ ) で全天の撮像観測を行った 2MASS (Two Micron All Sky Survey) の点源カタログを利用し，AGNカタログの各天体が 2MASS カタログのどの天体に対応するのかを調べることで，AGNの近赤外線での対応天体を見いだした。なお 2MASS カタログ

には，全天に分布するおよそ4億7千万近くもの近赤外線源が収録されており，天体の位置をはじめとして各バンドでの等級値やその測光精度などが載せられている。ここで，対応天体として抜き出したのは，各カタログの天体の位置座標がある範囲内で一致したものである。このように，二つのカタログを相互比較し，一方のカタログ中の天体が他方のカタログのどの天体に対応するのか調べることを cross-identification とか cross-match と呼んだりする。2MASS カタログには，上記3バンドでの等級値が載せられているので，それらを用いて個々のAGNの近赤外域の2色， $H-K_s$  と  $J-H$  を算出し，二色図上にプロットした (図1)。

さて，天体のスペクトルが一意に決まれば，二色図上での位置も一意に決まる。したがって，スペクトルが類似したもの (例えば，同種の天体など) であれば，二色図上で同じような領域に分布し，その位置が大きく外れることは基本的にはない。恒星 (巨星・主系列星) や古典的Tタウリ型星の分布はすでに知られており<sup>8), 9)</sup>，図の中にも曲線と線分によって示している。しかし，同じ種

表1 領域IおよびIIに分布するAGNの数. 1刻みの赤方偏移ごとに数え上げている. 一部のAGNの赤方偏移は, カタログの中には記載されていなかった. カッコ内の数値は割合(%)を表す.

赤方偏移	Quasars and AGN カタログ			SDSS-DR5 Quasar カタログ		
	領域I	領域II	計	領域I	領域II	計
$0 < z \leq 1$	1,671 (27)	4,480 (73)	6,151	222 (11)	1,869 (89)	2,091
$1 < z \leq 2$	238 (47)	265 (53)	503	222 (47)	249 (53)	471
$2 < z \leq 3$	67 (25)	197 (75)	264	38 (19)	165 (81)	203
$3 < z \leq 4$	7 (16)	36 (84)	43	9 (18)	41 (82)	50
$4 < z \leq 5$	5 (71)	2 (29)	7	1 (50)	1 (50)	2
合計	1,998 (29)	4,970 (71)	6,968	500 (18)	2,317 (82)	2,817

類の天体であっても, 二色図上での位置が大きくずれることがある. 星間物質による吸収を受けたときである. 星間吸収の強さは光の波長に依存し, 可視光や赤外線では波長が長いほど吸収の影響は小さい. そのため, 赤い光よりも青い光の方が強く吸収され, 結果として, 天体の色が赤くなる. これは赤化と呼ばれる. 赤化を受けると, 図に示した矢印(赤化ベクトル)と平行な方向に天体の位置が移動していく. したがって, 天体の位置が赤化ベクトルと平行な方向に動くことはあっても, 垂直な方向には基本的には動かない. つまり, 天体が恒星(黒体放射)や古典的Tタウリ型星であれば, 図1の中の二つの線分により囲まれる右下の領域(領域II)には分布しないと考えられる. この境界線を, AGNを他の天体と区別するための条件(色選択の条件)として考えた.

図1を見ると, ほとんどのAGNが恒星の分布から外れ, 領域IIのほうに分布していることがわかる. 表1に, それぞれの領域に分布する天体がいくつあるのか数え上げたものをまとめた. この表からわかるように, 二つのカタログともに, 70%以上のAGNが領域IIに分布している. つまり, この境界線によって, 7割近くあるいはそれ以上のAGNを恒星やTタウリ型星と区別できるといえる.

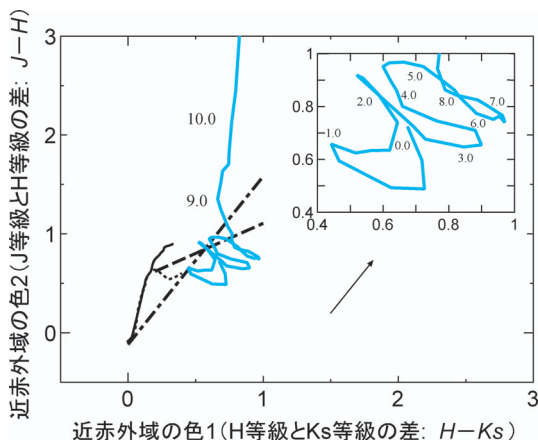


図2 SDSS クエーサーの平均的なスペクトルによって得られた, 赤方偏移によるクエーサーの色の変化. 赤方偏移がおよそ8以下では, ほぼ領域IIのほうに分布していることがわかる.

#### 4. 検証: 似た色をもつ天体はないか?

では, 領域IIに分布する天体はほかにはないのだろうか? 次に, この色選択の条件の妥当性を検証した. まず, SDSSの観測によって発見されたクエーサーの平均的なスペクトル<sup>10)</sup>を用い, 赤方偏移の値によってクエーサーの近赤外線での色がどのように変化するかを調べた(図2). すると, 赤方偏移が8よりも小さいものは, 図1の大半のAGNが分布する位置とほぼ同じような位置に分布することがわかった.

表2 領域IおよびIIに分布する天体の数. カッコ内の数字は全体に対する割合(%)を示す.

	マイクロエーサー	激変星	低質量X線連星	若い星々
領域I	16 (84)	245 (75)	11 (73)	27 (93)
領域II	3 (16)	82 (25)	4 (27)	2 (7)
合計	19	327	15	29

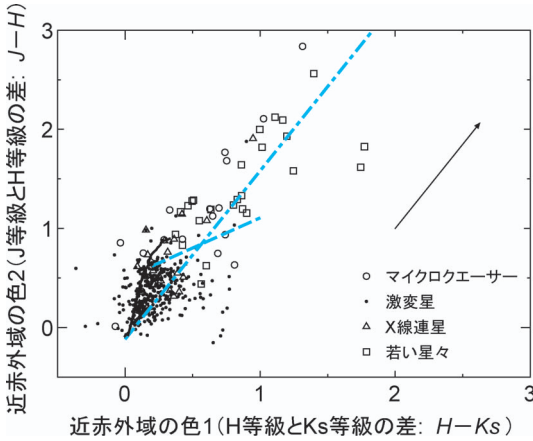


図3 4天体(マイクロエーサー, 激変星, X線連星, 若い星々)の二色図上での分布. 領域IIよりも領域Iのほうに多くの天体が分布していることがわかる.

次に, 近赤外線での色が類似しそうな4天体(マイクロエーサー, 激変星, 低質量X線連星, 大質量の若い星々)の分布が, AGNと同じものになるかどうかを調べた. サンプル天体は三つのカタログから抽出し, それらを2MASSカタログとcross-identificationすることで, 近赤外域での等級データを取得した. 得られた等級値を使い, サンプル天体を二色図上にプロットしたものが図3である. 表2では, 領域IとIIにそれぞれの程度分布しているのかを数え上げている. サンプル数が少ない天体もあるが, 領域IIに分布するものは多くても3割ほどであることがわかる.

さらに, 通常の銀河についても, その分布がどのようなになるのかを調べた. ここでは, 渦巻銀河のスペクトル<sup>10)</sup>を用いて, 赤方偏移による色の变化をシミュレートした(図4). 赤方偏移が1の銀河がわずかに領域IIにかかっているものの, 全

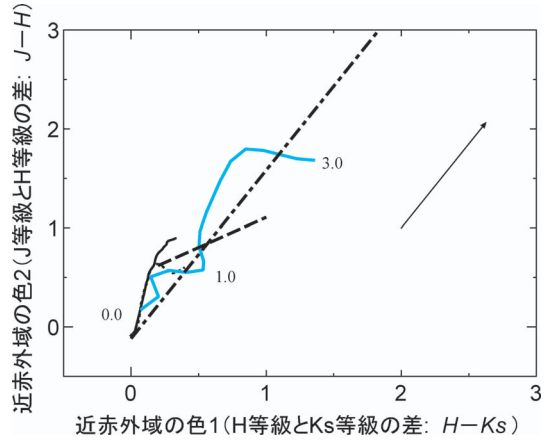


図4 赤方偏移による渦巻銀河の色の変化. 赤方偏移1あたりで一部が領域IIに突き出ているが, 通常の銀河では, これほど遠くにある場合はとても暗く, 2MASS程度の限界等級ではほとんど観測されないと考えられる.

体として恒星とおおむね類似した分布であるといえる.

以上のことから, 筆者らの提示した色選択の条件は, AGNを別の天体と取り違える可能性のほうが低く, 大半のAGNを他の天体とうまく区別できることがわかった.

### 5. 新たなAGN候補天体の抜き出し

色選択は, あくまでも簡易的に候補天体を抜き出す手法であり, 目的の天体を確実に抜き出せるわけではない. そこで, 色選択に加え, 他の何らかの条件を課すことにより, さらに蓋然性の高い候補天体を抜き出すことができる.

2.1節でも述べたように, AGNは非常に幅広い波長域で観測される. 特に, AGNはX線でも非常に明るく, X線源のほとんどはAGNであると

考えられている。そこで、X線と近赤外線で明るい天体に対し、近赤外線の色選択を施すことにより、蓋然性の高いAGN候補天体の抜き出しを試みた。

筆者らはまず、赤外線源かつX線源である天体を探すことから始めた。X線源としては、X線天文衛星ROSATの全天サーベイ観測によって得られた、全天のX線源をまとめたカタログの天体を用いた。ROSATの全天カタログはX線源の明るさによって2種類に分けられており、比較的明るいX線源はBright Source Catalog (BSC)、暗いX線源はFaint Source Catalog (FSC)の中にもまとめられている。

二つのROSATカタログと2MASSカタログの中のそれぞれの天体の位置を相互参照し対応天体を同定することで、赤外線・X線で明るい天体を抜き出した。さらに、抽出された天体に上述の近赤外線での色選択を施し、AGNの候補天体を選抜した。その結果、得られた候補天体の数は、15,974 (BSC: 5,273, FSC: 10,701) 天体である。収録天体数の多い六つのAGNカタログを用い、得られた候補天体がすでにAGNとして知られているか否かを確認したところ、3,061 (BSC: 2,053, FSC: 1,008) 天体がAGNとしてすでに知られているものであった。

## 6. 候補天体の性質

候補天体の多くが本当にAGNであるならば、これらはAGNと類似した性質をもつはずである。そこで次に、さらにいくつかのカタログを用いることで、得られた候補天体の多波長における統計的な性質を調べた。

まず始めに、他波長での対応天体の有無を調べた。ここでは、可視光、近赤外線、電波のカタログとのcross-identificationにより、対応天体を同定している。なお、利用したカタログは、可視光ではSDSS、近赤外線ではDEep Near-Infrared Survey of southern sky (DENIS)、電波ではFaint Images of

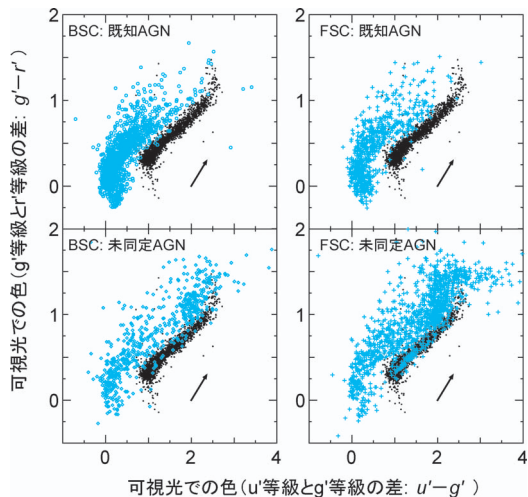


図5 SDSS カタログの等級値を用いた二色図。青い点がAGN候補天体、黒い点が恒星、矢印が赤化ベクトルを表す。BSCのほうは、ほぼすべての候補天体が恒星とは異なる分布を示している。一方で、FSCのほうは、大半が恒星とは分離されているものの、BSCと比べると多くの天体が恒星の存在する領域に分布している。したがって、FSCによって得られた候補天体の中には、実際にはAGNでないものも比較的多く含まれている可能性がある。

the Radio Sky at Twenty-centimeters (FIRST) および 1.4 GHz National radio astronomy observatory Very large array Sky Survey (NVSS) である。

得られた対応天体のそれぞれの波長帯での明るさを利用して、候補天体の統計的な性質を調べたところ、いくつかの性質がわかった。それらを以下に簡単に列挙する。

- 可視光で暗いAGNが多い
- 可視光での二色図上での分布が既知AGNと類似していた
- 近赤外線波長で変光を示すものがいくつかあった
- 電波、近赤外線、X線強度の間に既知AGNと類似した相関があった

共通するのは、AGNとして未確認の候補天体が既知のAGNと類似した性質を示していたことで

ある。その傾向は、FSCよりもBSCによって得られた候補天体に強く見られた。

さて、上述した性質の中でも特に、可視光(SDSS)の二色図上での分布に顕著な特徴が現れたので、簡単に紹介しよう。SDSSの天体カタログは、可視光の五つのバンド( $u'$ : 0.36  $\mu\text{m}$ ,  $g'$ : 0.48  $\mu\text{m}$ ,  $r'$ : 0.62  $\mu\text{m}$ ,  $i'$ : 0.76  $\mu\text{m}$ ,  $z'$ : 0.91  $\mu\text{m}$ )での観測によって得られたものであるが、そのうち $u'$ ,  $g'$ ,  $r'$ の3バンドを使った二色図上で、AGNと恒星の分布が分離されることが知られている<sup>11)</sup>。そこで、それら3バンドを利用して、得られた候補天体を可視光での二色図上にプロットしてみた(図5)。図5から、既知AGNが恒星の分布から分離されていることがわかる。なお、この分布は、先行研究におけるAGNやクエーサーの分布とほぼ同じである。さらに、AGNとして未確認の候補天体についても、そのほとんどが既知AGNと同じように分離されている。このことから、得られた候補天体の多くがAGNである可能性が高いことが強く示唆される。

## 7. 今後への応用

クエーサーのような非常に遠方に存在するAGNは、赤方偏移が大きくなるにつれ可視光では暗く赤外域では明るくなっていく。したがって、そのようなAGNを探し出すためには、可視光だけではなく赤外域での観測を利用して探索することも必要となる。本稿で紹介した近赤外域での色選択は、そのように可視光で暗く赤外域で明るくなるような天体に対して、有効に活用できると考えられる。さらに、ここで紹介したように、近赤外域での色選択に加えて他の条件を課すことで、蓋然性のより高い候補天体の抜き出しができるであろう。そして、この手法を別のあるいは将来の近赤外域での大規模サーベイ観測などに適用すれば、さらに多くのAGNサンプルを集めることも期待できる。

## 謝 辞

本稿の内容は、筆者の投稿論文<sup>12), 13)</sup>および九州大学大学院在籍時にまとめた博士論文に基づくものです。指導教員であった山岡 均先生には、多岐にわたり本当にお世話になり、感謝し尽くせません。また、愛媛大学の谷口義明氏には、博士論文執筆の際に多くの有益なコメントをいただきました。この場を借りて、感謝申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) 水本好彦, 2002, 天文月報 95, 253
- 2) Sandage A., 1965, ApJ 141, 1560
- 3) Lacy M., et al., 2004, ApJS 154, 166
- 4) Stern D., et al., 2005, ApJ 631, 163
- 5) Warren S. J., Hewett P. C., Foltz C. B., 2000, MNRAS 312, 827
- 6) Glikman E., et al., 2004, ApJ 607, 60
- 7) Rieke G. H., Lebofsky M. J., 1985, ApJ 288, 618
- 8) Bessell M. S., Brett J. M., 1988, PASP 100, 1134
- 9) Meyer M. R., Calvet N., Hillenbrand L. A., 1997, AJ 114, 288
- 10) Polletta M., et al., 2007, ApJ 663, 81
- 11) Anderson S. F., et al., 2007, AJ 133, 313
- 12) Kouzuma S., Yamaoka H., 2010, A&A 509, A64
- 13) Kouzuma S., Yamaoka H., 2010, MNRAS 405, 2062

### Search for AGNs in Near-Infrared —Method and Search Using the Method— Shinjiro KOUZUMA

*School of International Liberal Studies, Chukyo University, Toyota 470-0393, Japan*

**Abstract:** We have proposed near-infrared color selection criteria to extract Active Galactic Nuclei (AGNs). By examining the validity of our color selection, it was found that most of AGNs can be differentiated from stars and several types of objects using the color selection. In addition, we extracted new AGN candidates using the color selection. Statistical properties of the extracted candidates are consistent with properties of known AGNs. Accordingly, most of the candidates are expected to be real AGNs. It should be noted that astronomical catalogues have played a crucial role in this study.