

活動銀河中心核の近赤外域での時間変動をさぐる

高妻 真次郎¹⁾

¹⁾ 中京大学

Revealing the near-infrared variability of Active Galactic Nuclei

Shinjiro KOUZUMA ¹⁾

Abstract

We introduce our past and future works about a variability study of Active Galactic Nuclei (AGNs). AGNs are tremendous energetic sources, of which energy is generated by accretion onto a central supermassive black hole. Variability is a characteristic property of AGNs, which is observable over a wide wavelength band that ranges from x-ray to radio wavelengths. However, the majority of AGNs exhibit rapid and apparently random variability, and the variability of AGNs has been studied by examining the ensemble variability V . We have examined near-infrared ensemble variability of AGNs, and demonstrated that near-infrared variability properties are different from known optical variability properties. We describe the details and an attempt to reveal physical processes behind the near-infrared variability properties.

Key Words: Active Galactic Nuclei, near-infrared variability, astronomical catalogs

1 はじめに

1.1 活動銀河中心核 (AGN) とは？

銀河には1000億個ほどの恒星があり、それら恒星の光の集まりが銀河全体の輝きとして観測されている。しかし、銀河のなかには、そのほんのわずかな中心領域だけで、銀河ひとつ分以上の明るさで輝くものがある。そのような銀河の中心部は、活動銀河中心核 (Active Galactic Nucleus; AGN) と呼ばれ、莫大なエネルギーを放つ天体として知られている。

AGNの莫大なエネルギーは、中心の大質量ブラックホールに周囲のガスが降着してゆく過程で生じる。典型的なAGNの100倍以上もの明るさをもつAGNはクエーサーと呼ばれ、 $10^6 M_{\odot}$ を超えるような超大質量ブラックホールが中心に存在すると考えられている。クエーサーは特に、遠方宇宙 (初期宇宙) に多く存在しており、クエーサーを探索し、その性質を調べることは、クエーサー自身の性質だけでなく、宇宙の進化を明らかにしていくうえでも重要な役割をはたす。

AGNの観測的な特徴は多彩で、クエーサーをはじめ、セイファート銀河やブレイザー、電波銀河など、その種類も非常に多様である。現在では、それらの観測的な特徴の違いは、中心部のブラックホールの質量とブラックホールを取り巻く降着円盤やダストトラスを見込む角度の違いによって説明されている (図1)。

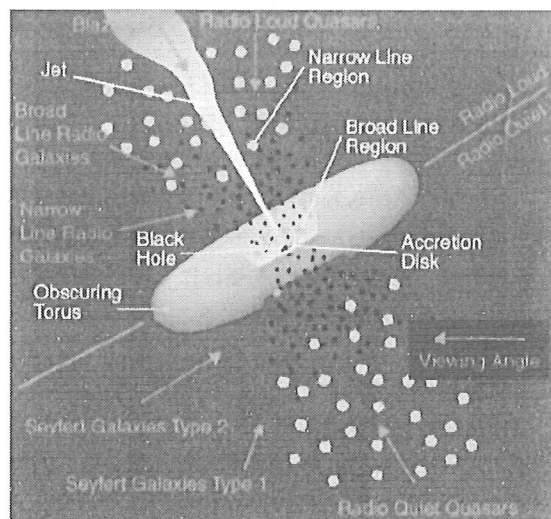


図1 : AGNの想像図¹⁾。どの方向からこの系を見るかによって、観測的に分類されているさまざまな種類のAGNを説明できる。

1.2 AGNの時間変動

明るさの時間変動は、AGNの代表的な特徴のひとつであり、電波からX線にわたるほぼ全波長域で時間変動を示す。変動振幅は比較的小さく、変動のタイムスケールは数ヶ月から数年におよぶ。しかし、変動の振幅や周期に、あきらかな規則性をみることはできない。図2は、セイファート銀河として知られるNGC 5548

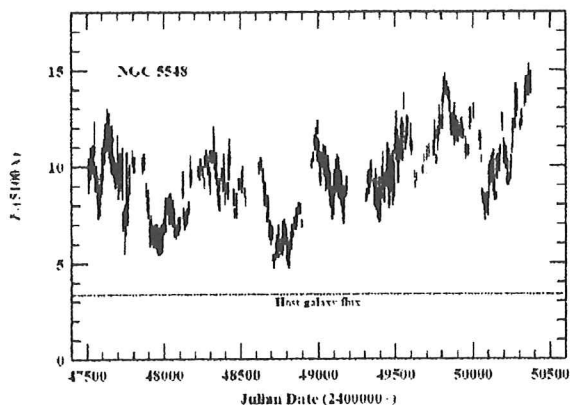


図2 : NGC 5548の1988年から1996年にかけての可視光 (5100 Å) での光度曲線²⁾。ランダムな変動を示していることがわかる。

の光度曲線であり、この図からもAGNの変動の不規則性が見てとれる。AGNのこのような不規則な変動の特性を調べるためには、後述するEnsemble variabilityとして定義される物理量がしばしば利用される。

可視域での変動メカニズムとしては、銀河中心核付近の超新星爆発や爆発的星形成³⁾、重力レンズ効果⁴⁾など、いくつかのモデルが提唱されているが、降着円盤の不安定性によって生じる⁵⁾というモデルが有力である。

時間変動を利用して、AGNの候補天体の選択が行われることもある。その他の選択方法として、2つの異なる波長帯での等級差によって表される天体の色を利用した方法がよく知られているが、この手法は母銀河からの光の影響を受けやすい。一方で、時間変動を利用した選択は、母銀河の影響を受けにくく、色選択では見逃されるようなAGNを選出することもできる。

2 時間変動のさぐり方

2.1 Ensemble Variability

前述のように、AGNの時間変動において、その振幅や周期にあきらかな規則性はみられない。そこで、以下の式によって定義されるEnsemble variability (V) と呼ばれる指標が、AGNの時間変動を特徴づける量として利用される。

$$V = \sqrt{\frac{\sum_i^N \Delta m_i^2 - \sum_i^N \sigma_i^2}{N}}$$

ここで、 Δm_i および σ_i は*i*番目の天体の等級差とその等級誤差、 N は天体数をあらわす。通常、Ensemble variabilityは、静止系波長や赤方偏移、光度、静止系での時間間隔など、なんらかの物理量の関数となる。たとえば、赤方偏移についてのEnsemble variabilityを得たければ、赤方偏移を適当な値(たとえば0.1)ごとに区切り、その各区内に含まれる天体に対して

Ensemble variabilityを計算する。

静止系での時間間隔 (Rest-frame time lag) に対する関数は特にStructure Function (SF) とも呼ばれ、AGNの時間変動のタイムスケールの特徴を調べるための重要な指標となる。1.2節に挙げたような変動モデルでは、SFの傾斜が理論的に予測されており、観測的に得られる傾斜と比較することによって、各モデルの妥当性が議論されてきた。さらに、その他のさまざまな物理量との相関を調べることによって、AGNの変動メカニズムを探ることのみならず、放射領域の特徴や物理過程を明らかにしたり制限をかけるうえで重要な役割をはたす。

AGNの時間変動を調べる方法は、大きく分けて2通りある。一つ目は、同じ天体を一定期間モニター観測することだ。しかし、この方法では、調べられる天体数が限られるうえ、長期間にわたる変動をみるためにはその期間分の時間を要する。二つ目は、数多くのAGNの統計的な変動特性をさぐる方法である。この方法では、十分な数のAGNサンプルがあれば、一つの天体あたり2epoch分の等級しか得られなかったとしても、変動特性を調べることができる。次節で紹介する、我々の行った近赤外域での変光特性の調査は、後者のように多数のAGNサンプルを用いることで行っている。

2.2 時間変動の先行研究

AGNの時間変動についての研究は、可視域においては以前より活発に行われてきており、Ensemble variabilityとなんらかの物理量との間の相関が正なのか負なのか、といったことに主に焦点が当てられ議論されてきた。一部の相関関係では、サンプルの違いによって、正と負のいずれの相関関係も報告されている。先行研究によって得られた結果のなかで、共通するものとしては、以下のようなものがある。

- 静止系波長とは負の相関
- 光度とは負の相関 (図3)
- 静止系の時間間隔 (SF) とは正の相関 (図4)

a)については、可視域での変動だけではなく、紫外域から近赤外域にわたる波長域においても成立することが以前から知られている。b)とc)は、個々の天体のモニター観測やAGNの統計サンプルの双方によって得られている結果である。特に、c)におけるSFの傾斜は、AGNの変動モデルによって得られる理論的な傾斜と比較され、変動モデルの妥当性を調べるためにしばしば利用されている。

近赤外域では、個々の天体の変動特性についてはNeugebauerらの研究⁷⁾、統計的な特性についてはEnyaらの研究⁸⁾などがあるものの、先行研究の数は可

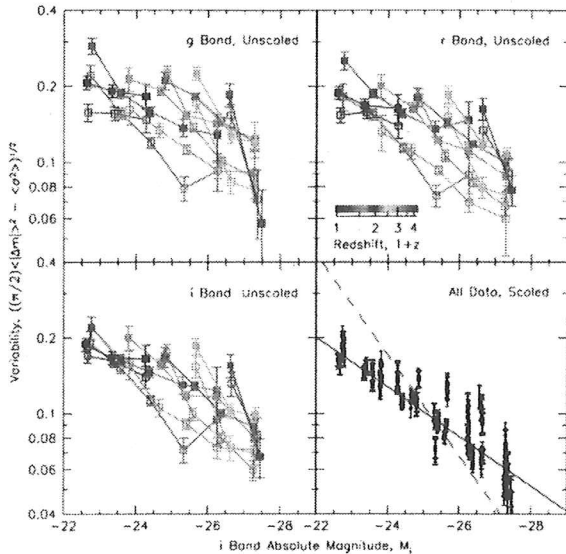


図3：絶対等級（光度）（横軸）とEnsemble variability（縦軸）との相関⁶⁾。明るいAGNほど変動が小さくなっている。

視域のものに比べると少なく、十分に調べられているとは言い難い。

3 我々の研究

我々は、これまでの研究ではあまり焦点のあてられていなかった近赤外域での時間変動について、十分な数のAGNサンプルを利用して詳しく調べた。詳細は高妻ら⁹⁾にあるが、この節では、その内容の一部について紹介する。

3.1 変動AGNを抽出する

まず、近赤外域で変動を示すAGNサンプルを得るため、以下の2つのカタログの天体を利用した。

- The catalog of Quasars and Active Galactic Nuclei (13th Edition)¹⁰⁾
- SDSS-DR5 quasar catalog¹¹⁾

これらはともに10万天体以上のAGNが掲載されており、AGNカタログの中でもサンプル数が非常に多いカタログである。なお、これらのカタログ中の天体は、ほとんどが可視光で確認されているAGNである。これらサンプルAGNの（複数の）近赤外線等級を得るために、AGNカタログを以下の近赤外線カタログとcross-identifyし、各AGNの近赤外域での対応天体を探し出した。

- Two Micron All Sky Survey (2MASS)
- The Deep Near Infrared Survey of the Southern sky (DENIS)
- The UKIDSS Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS)

なお、2MASSは全天サーベイであるが、DENISは北天、UKIDSSは南天のみをサーベイ観測しているため、一つのAGNについて得られる近赤外線等級は2epoch分

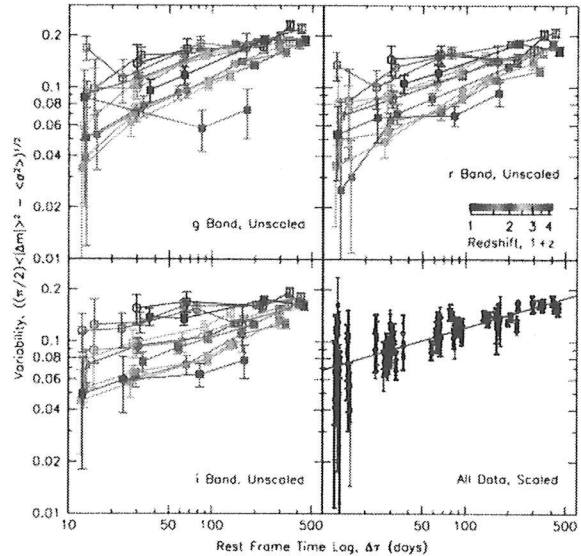


図4：静止系での時間間隔（横軸）とEnsemble variability（縦軸）との相関⁶⁾。Structure Functionとも呼ばれる。SFの正相関は、多くの研究によって確認がされている。

となる。

さて、変動AGNとして抜き出した天体は、得られた2つの等級値の差が、両カタログの測光誤差の総和よりも大きいものである。この際、各天体の等級値は十分に信頼性のあるもの、また、カタログの違いによる測光値のずれは補正している。これらの作業をJ、Kの各バンドで行い、最終的に、のべ5000天体近くを変動AGNとして抽出することができた。

3.2 変動AGNの性質

我々は、可視域の先行研究でなされてきたように、得られた変動AGNの変動特性をいくつかの物理量との相関をみることによって、その詳細な性質を精査した。ここでは、その特徴的な性質のいくつかについて紹介する。

まず、光度とSFに関しては、可視域と近赤外域では明白な逆の相関の関係がみられた（図5）。つまり、光度との相関においては、明るいAGNほど近赤外域での変動が大きく、また、静止系での時間間隔は長いほど近赤外域での変動が小さくなる傾向にあった。

光度との正の相関については、以下のような解釈ができる。川口ら¹²⁾による理論計算の結果では、近赤外域での変動は、近赤外線を主に放射するトーラスが薄いほど大きくなる。さらに、より明るいAGNほど薄いトーラスをもつという、Lawrence¹³⁾などによるreceding torusモデルを仮定すれば、明るいAGNほど近赤外域での変動が大きくなることが説明できる。

SFの負の相関からは、以下のことがいえる。SFは

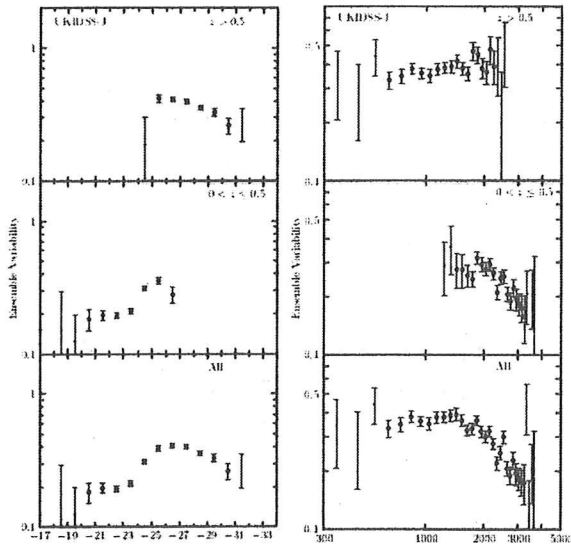


図5：近赤外域での変動特性の一例⁹⁾。UKIDSSのJバンドで得られた変動AGNに対するもので、Ensemble variabilityと絶対等級（光度）（左側）、静止系での時間間隔（右側）との相関を示す。上段が可視域、中段が近赤外域、下段が双方を合わせたもの。可視域と近赤外域での相関が逆になっていることが見てとれる。

自己相関関数と関係¹⁴⁾しており、SFが負の相関をもつということは、より長いタイムスケールで光度曲線が自己相似形になることを意味する。つまり、短いタイムスケールでは非周期的な変動を示す一方で、より長いタイムスケールではより周期的な変動を示すことが期待される。

AGNの電波強度が、可視域での変動との間に正の相関をもつことは先行研究によって知られているが、我々は、近赤外域での変動とも正の相関をもつことを確認した。特に、電波と可視光とのフラックス比によって定義されるradio loudnessとの間には、強い正の相関関係がみられた（図6）。川口ら¹²⁾は、近赤外域での変動とradio loudnessとの間に正の相関があることを理論的に予想しており、我々の結果によって、その理論予想を観測的に確認することができたといえる。

4 今後へ向けて

我々は多数のAGNサンプルを用いて、AGNの統計的な変動特性を調べた。その結果、可視域と近赤外域での性質の一部がまったく異なることを示した。これは、AGNの可視光と近赤外線の主な放射領域が異なることを示唆する。今後としては、これらの性質が、個別の天体においてもみられるものなのかについても確認していく必要がある。また、負の相関をもつSFについても、理論的な側面から、どのようなメカニズムによってその相関が実現されるのかを調べていく。

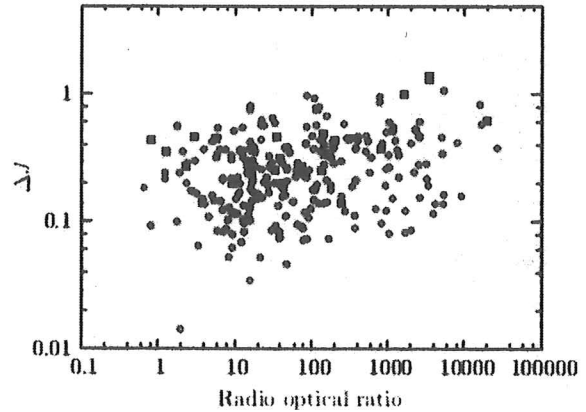


図6：電波と可視光のフラックス比（横軸）とJバンドでの変動幅（縦軸）との相関⁹⁾。正の相関関係が見てとれる。

参考文献

- 1) <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/images/epo/gallery/agns/index.html>
- 2) Peterson, Proc. of Advanced Lectures on the Starburst-AGN Connection, 2001.
- 3) Terlevich et al., MNRAS, 255, 713, 1992.
- 4) Hawkins, Nature, 366, 242, 1993.
- 5) Kawaguchi et al., ApJ, 504, 671, 1998.
- 6) Vanden Berk et al., ApJ, 601, 692, 2004.
- 7) Neugebauer et al., AJ, 97, 957, 1989.
- 8) Enya et al., ApJS, 141, 45, 2002.
- 9) Kouzuma & Yamaoka, ApJ, in press.
- 10) Véron-Cetty & Véron, A&A, 518, A10+, 2010.
- 11) Schneider et al., AJ, 139, 2360, 2010.
- 12) Kawaguchi & Mori, ApJ, 737, 105+, 2011.
- 13) Lawrence, MNRAS, 252, 586, 1991.
- 14) Simonetti et al., ApJ, 296, 46, 1985.

(2011年12月17日受付, 2012年3月1日受理)