

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540267

研究課題名(和文) 巨大ブラックホール近傍の構造と進化：未解明領域の降着とフィードバック過程

研究課題名(英文) Structures around supermassive black holes and their evolution - feedback and feeding

研究代表者

和田 桂一 (WADA, KEIICHI)

鹿児島大学・理工学研究科・教授

研究者番号：30261358

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：銀河中心の巨大ブラックホール近傍10パーセクから降着円盤領域にかけての空間スケールで6桁にわたる領域の構造を解明するべく理論的研究を行った。高精度の3次元輻射流体計算等により、降着円盤からの強い輻射による加熱と輻射圧によって、星間ガスのアウトフローが発生することを明らかにした。このアウトフローは、巨大ブラックホールの活動性の起源である「質量降着」(ガスの内向きの流れ)を妨げない。アウトフローは非定常かつ非一様であり、その進化の結果、「遮蔽トーラス」が自然に形成されることを示した。降着円盤の領域では輝線で駆動された高速のアウトフローが形成され、幅広い吸収線を持つクェーサーの種族の起源に迫った。

研究成果の概要(英文)：We have theoretically investigated structures and dynamics of the ISM around super massive black holes in galaxies. Using three-dimensional radiation-hydrodynamics simulations, we confirmed that non-steady and non-uniform outflows are generated due to the radiation pressure and heating. This outflow does not prevent from accreting materials toward the galactic center. We also found that a part of failed outflows naturally form an obscuring torus, which has been postulated to explain observed properties of AGNs. The radiation-driven outflows are ubiquitous over a large dynamic range, for example, we found that strong line-driven winds are formed from the accretion disk, and this consistently explains broad-absorption line quasars.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：銀河 輻射流体力学 クェーサー

## 1. 研究開始当初の背景

ほとんどの銀河の中心に存在していると考えられている、太陽質量の100万~10億倍もの「巨大ブラックホール」の形成のメカニズムは未解決の重要問題である。特に、その成長に重要な物質の降着と、降着の結果、周囲にどのような力学的／化学的影響を与えるか、というフィードバックの理論は、本質的に非線形・非平衡・多次元過程であり、関連する空間スケールのレンジが大きすぎることもあり、ほとんど進展していない。その解明には巨大ブラックホール近傍領域の星間ガスの構造が重要だが、観測的にも断片的な情報しかなく、物理過程に基づいた統合的な理論の構築が求められている。

一方、多くの銀河に存在する活動的銀河中心核（AGN）は、巨大ブラックホールがエネルギー源であるというパラダイムが確立されている。近年、AGNと銀河の「宇宙論的共進化」が注目をあびている。本研究は、銀河スケールでの中心領域への質量供給と巨大ブラックホールへの降着率の関係、アウトフローや輻射性フィードバックは降着過程にどのような影響を与えるかという共進化理論の根幹の問題に答えを出すことを最終目標にしている。ここで得られる結果は、銀河やAGNに関わる多くの観測的・理論的研究と密接に関係する。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、主に以下を明らかにする。

- (1) 巨大ブラックホール近傍の  $R < 0.001$  パーセクで予想される「輝線で駆動されたウィンド」生成のメカニズム
- (2)  $0.001$  パーセク ~  $10$  パーセク領域：X線放射を受けたトーラス領域星間ガスの分布、組成、ダイナミクス

また、これらの理論的結果を、近傍AGNや高赤方偏移のクェーサーの統計的観測につなげるために、「準解析的モデル」への組み込みを行うために、観測量（SED等）の計算を行う。

## 3. 研究の方法

巨大ブラックホール近傍は、広いダイナミク

スレンジに渡って様々な物理過程による複雑なプロセスの相互作用により、複雑かつダイナミックな構造をしていると考えられている。そこで、計算をいくつかのスケールに分けて進める。各スケールの計算コードは既の実績のある輻射流体力学コード、もしくは輻射磁気流体力学コードを用いる。降着円盤からの輻射を考慮した非平衡化学進化過程を3次元コードに組み込み、アバんだンスの3次元分布を求める。また、輻射圧のみ考慮した単純化した物理モデルによって、広いパラメータ範囲での振る舞いを調べる。銀河スケールからの質量供給過程は、粒子法をベースとした計算手法を用いる。計算結果を総合的に考察し、巨大ブラックホール近傍の構造を考慮したクェーサーの宇宙論的進化モデルの構築と、すばる望遠鏡の新広視野カメラによるAGN撮像サーベイプロジェクト（SWANS）と連携し、その理論モデルへの組み込みをはかる。

## 4. 研究成果

(1) 各年度の研究成果：

① 2011年度

1) 大須賀、野村らとBH近傍の $0.001$ パーセクで予想される「輝線で駆動されたウィンド」の3次元構造や、アウトフロー率を求めるために、和田が開発した3次元RHDコードに、AGNからの輻射を考慮した、輝線駆動ウィンドを組み込み、テスト計算を行った。

2)  $0.001$ パーセク ~  $10$ パーセク領域：X線放射を受けたトーラス領域星間ガスの分布、組成を明らかにするため、3次元RHDコードに、輻射圧、X線加熱を組み込み、国立天文台SX-9で計算を行い、輻射フィードバックによる新しい構造を発見した。オランダ、カプティン研究所（フローニゲン）のSpaans教授らと、この領域の化学進化計算コードをRHDコードに組み込む検討を行った。ドイツMPE研究所（ガルヒン）のSchartmann博士と上記のトーラスが発するスペクトルエネルギー分布の計算を行った。

3) 銀河スケールから銀河中心領域：銀河-銀河相互作用およびバーによる銀河中心領域への質量供給の物理を明らかにするため、ASURAコードを改良し、銀河中心核周りのトーラスでの星形成、超新星爆発によるエネルギーフィードバック、中心BHへの質量降着の計算ができるようになった。ASURAコードを用いて、銀河-銀河相互作用の際に、複数の中心核ができるメカニズムを示して、出版した。

- 4) 川勝らと巨大ブラックホールの宇宙論進化モデル(Kawakatu & Wada 2008, 2009)を改良し、クェーサーの光度進化についての理論モデルを構築した。
- 5) 銀河円盤の渦巻構造の動的平衡構造にして初めて明らかにし、出版した(Wada et al. 2011)。

### ② 2012年度

- 1) 中心核近傍 1 パーセク～10パーセク領域: X線放射を受けたトーラス領域星間ガスの分布、組成を明らかにするため、3次元RHDコードに、輻射圧、X線加熱を組み込み、国立天文台および東北大学のスーパーコンピュータSX-9で輻射流体計算を行い、radiation driven fountain (輻射駆動噴水) という新しいメカニズムによる準定常なトーラス構造が自然に形成されることを示し、Wada (2012) として出版した。
- 2) 大須賀、野村らとBH近傍の降着円盤領域において、輝線によって駆動された高速ウィンドの構造を理論的に調べ、BAL (Broad Absorption Line) quasarとの関係を明らかにした。多次元輻射流体計算コードの開発、テスト計算を行った。
- 3) 重力多体一流体計算によって銀河円盤における動的渦巻き構造の出現のメカニズムを明らかにした(Baba et al. 2012)。
- 4) 川勝らと巨大ブラックホールの宇宙論進化モデル(Kawakatu & Wada 2008, 2009)を改良し、クェーサーの光度進化についての理論モデルについての議論を引き続きおこなった。すばる望遠鏡/HSCによる広域サーベイ観測 (SWANS) の解析と比較する準解析モデル (SNAWS) への組み込みについて、「SWANS理論班会議」等で議論、検討を進めた。国際天文学連合総会(北京)、台湾ASIAA、韓国ソウル国立大学、韓国済州島等で招待講演を行い、研究成果の発表を行った。

### ③ 2013年度

- 1) 中心核近傍 1パーセクから10パーセク領域: X線放射を受けたトーラス領域星間ガスの構造を決める新しいメカニズムとして、前年度に発表したradiation-driven fountain (輻射駆動噴水) に関して、中心BHの質量、光度の依存性を東北大学のスーパーコンピュータ等を用いて調べた。
- 2) Lyden大学のMeijerink博士が来日し(11月)、和田の輻射流体計算コードへの化学進化計算コードの組み込み作業を鹿児島大学において共同で行い、テスト計算を実施した。

- 3) Max-Planck研究所(MPEガルヒン)に出張滞在し(7月、11月)、radiation-driven fountainモデルに基づいた3次元モンテカルロ法によるSED計算等を行い、論文出版準備を行った。
- 4) すばる望遠鏡/HSCによる広域サーベイ観測 (SWANS) の解析と比較する準解析モデル (SNAWS) への、われわれの理論計算の組み込みについて、「SWANS理論班会議」(江田島、御茶ノ水大学、理研神戸)等で議論、検討を進めた。
- 5) 北海道大学、マックスプランク天文学研究所(ドイツ、ハイデルベルグ)、国立ソウル大学(韓国)で開催された国際会議において招待講演を行い、研究成果の発表を行った。

### (2) 得られた成果の国内外におけるインパクト

今回の研究により、巨大ブラックホール近傍領域の星間ガスの3次元構造とそのダイナミクス、そして関連する重要な物理過程が明らかになった。これは銀河スケールからの質量供給率と、巨大ブラックホール領域への降着率の関係と時間変動に大きく関わる。降着率を時間積分することで巨大ブラックホールの成長史が得られる。そのフィードバックが銀河形成に与える影響も評価できる。これはX線宇宙背景放射の起源の解明にとっても重要である。銀河進化の準解析モデルと組み合わせることで、統計データ(光度関数など)に焼き直すことで、現在、進行中のSubaru/HSCによる広域サーベイによる高赤方偏移でのクェーサーの統計的性質結果と比較することができる。これにより、これまでの同様の理論的な研究を大きく進展させることができる。

### (3) 今後の展望

本基盤研究は、今後より広範囲の共同研究を必要とする研究の基礎となる。特に多波長の観測データとの比較により、AGN近傍の物理の解明、ブラックホール成長史の解明へとつなげる。次年度以降、基盤研究Bなどより大型の研究助成を申請する。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- ① Junichi Baba, Takayuki R. Saitoh, and Keiichi Wada, Dynamics of Non-Steady Spiral Arms in Disk Galaxies, *Astrophysical Journal*, 査読有、763, 46 (2013)

DOI: 10.1088/0004-637X/763/1/46

② Hajime Susa, "The Mass of the First Stars", The Astrophysical Journal, 査読有、Volume 773, 185-192 (2013)

DOI: 10.1088/0004-637X/773/2/185

③ Ken Oshuga, "Clumpy Outflows from Supercritical Accretion Flow", Takeuchi, S., Oshuga, K., Mineshige, S., 査読有、PUBLICATIONS OF ASTRONOMICAL SOCIETY OF JAPAN 65, 88-99 (2013)

④ Mariko NOMURA, Ken OHSUGA, Keiichi WADA, Hajime SUSA, and Toru MISAWA, Modeling Line-Driven Disk Wind for Broad Absorption Lines of Quasars 査読有、PUBLICATIONS OF ASTRONOMICAL SOCIETY OF JAPAN, 65, 40 (2013)

10.1093/pasj/65.2.40

⑤ Keiichi Wada, Radiation-driven Fountain and Origin of Torus around Active Galactic Nuclei, 査読有 Astrophysical Journal 758, 68(10p) (2012)

DOI: 10.1088/0004-637X/758/1/66

⑥ Hidenori Matsui, Takayuki R. Saitoh, Junichiro Makino, Keiichi Wada, Kohji Tomisaka, Eiichiro Kokubo, Hiroshi Daisaka, Takashi Okamoto, & Naoki Yoshida, ORIGIN OF MULTIPLE NUCLEI IN ULTRALUMINOUS INFRARED GALAXIES, 査読有、Astrophysical Journal 746, 26 (2012)

DOI: 10.1088/0004-637X/746/1/26

⑦ Keiichi Wada, J. Baba, T.R. Saitoh, Interplay between Stellar Spirals and the ISM in Galactic Disks, 査読有、Astrophysical Journal 735, 1 (2011)

DOI: 10.1088/0004-637X/746/1/26

[学会発表] (計10件)

① 和田桂一, "Interaction between non-steady spirals and the ISM", The Impact of Galactic Structure on Star Formation, 2014年2月17-21日 Hokkaido

University, Sapporo

② 和田桂一, "Dynamics of the ISM in Galactic Spirals", 7th Korean Astrophysics Workshop/Dynamics of Disk Galaxies, 2013年10月20-23日、Soul National University, Seoul, Korea

③ 和田桂一, "Dynamical Picture of the ISM", Phases of the ISM, MPIA Summer Conference, 2013年7月29日-8月1日、Heidelberg, Germany

④ 和田桂一, "Theoretical model of feeding and feedback", 2012年12月18日-12月20日、Super Massive Black Holes in the Universe: The Era of HSC Survey, Matsuyama,

⑤ 和田桂一, "Stellar and radiative feedback on the ISM around AGNs", TIARA Workshop on Star Formation and its Environment in the Center of Galaxies, 2012年11月12日-11月16日、Hsinchu, Taiwan,

⑥ 和田桂一, "Star Formation around AGNs and feedback", Star Formation in Galaxies, 2011年6月19日-6月24日 Ringberg, Germany,

[図書] (計2件)

① 福江純、梅村雅之、和田桂一  
日本評論社  
宇宙流体力学の基礎  
2014年、356ページ(1-356)

② 谷口義明、和田桂一  
丸善出版、  
巨大ブラックホールと宇宙  
2012年、182ページ(1-182)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

和田 桂一 (WADA, Keiichi)

鹿児島大学・理工学研究科・教授

研究者番号：30261358

(3) 連携研究者

大須賀 健 (OHSUGA, Ken )

国立天文台・理論研究部・助教

研究者番号：90386508

川勝 望 (KAWAKATSU, Nozomu)

呉工業高等専門学校・発達科学部・准教授

研究者番号：30450183

須佐 元 (SUSA, Hajime)

甲南大学・理工学部・教授

研究者番号：00323262