

機関番号：62616

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20740115

研究課題名（和文） 多次元輻射磁気流体シミュレーションによる超巨大ブラックホールの形成過程の研究

研究課題名（英文） Formation Mechanism for Supermassive Black Holes through Multi-dimensional radiation Magnetohydrodynamic Simulations

研究代表者

大須賀 健 (OHSUGA KEN)

国立天文台・理論研究部・助教

研究者番号：90386508

研究成果の概要（和文）：空間2次元の大局的輻射磁気流体シミュレーションコードを新たに開発し、ブラックホール周囲のガス円盤およびジェットを調べた。ブラックホールへのガス降着率の大きさに応じ、ガス円盤が三種の全く異なる構造を示すことを、一つの数値コードで実証することに成功した。これは世界初の成果である。円盤からは多様なジェットが噴出するが、特に輻射圧で加速されローレンツ力で絞るという新型ジェットを発見したことは重要である。

研究成果の概要（英文）：We performed the global 2D-radiation magnetohydrodynamic simulations of the accretion disks and jets around black holes. Three distinct accretion disks are for the first time reproduced by one numerical code. Especially, we found a new type jet: radiatively-driven, magnetically-collimated jet.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：ブラックホール、ガス円盤、ジェット、数値計算

## 1. 研究開始当初の背景

巨大ブラックホールの形成・進化過程はよくわかっていない。はるか遠方の宇宙で既にクェーサーが輝いている事実は、ブラックホールが大量のガスを短期間に吸い込んで急速成長したことを意味する。一方、近傍宇宙の巨大ブラックホールの成長速度は非常に小さい。ブラックホールの成長を促進・停止させるメカニズムを明らかにし、ブラックホールの成長・進化過程を解明することが宇宙物理学の重要な研究課題となっていた。

ブラックホールは、周囲のガスを吸い込んで成長する。よって、巨大ブラックホールの

成長・進化過程を解き明かすためには、ブラックホール周囲のガスのダイナミクスを調べる必要がある。ブラックホール周囲には、降着円盤が形成され、ジェットが噴出していると考えられているので、円盤およびジェットのメカニズムを個別にではなく、同時に矛盾なく解明しなければならない。しかし、そういった研究はまだ黎明期にあった。

また、ブラックホールの成長は銀河の進化とも関連している可能性が指摘されていた。銀河中心の巨大ブラックホールと、銀河の質量に比例関係が見つかったのである。これは巨大ブラックホールが成長する際、つま

りブラックホールがガスを吸い込む際に発生する輻射やジェットが、母銀河の進化に何らかの影響を与えた可能性を示唆する。しかし、肝心のブラックホール周囲での現象がよくわかっていないため、これ以上の議論はできない状態であった。

以上のような理由で、ブラックホール周囲の降着円盤やジェットを、より現実的に調べることが必要となっていた。

## 2. 研究の目的

多次元輻射流体シミュレーションを用い、ブラックホール周囲の現象を解き明かすのが本研究の目的である。これは世界的に見てもまだ行われておらず、まさに世界に先駆ける研究である。

1970年代に始まった降着円盤の研究は、1次元解析モデルによって大きく発展してきた。Shakura & Sunyaev (1973)によって提唱された標準円盤モデルに加え、質量降着率が極めて小さい場合に適用できるライアフ (Narayan & Yi 1994)、逆に、質量降着率が極めて大きい場合のモデルであるスリム円盤 (Abramowicz et al. 1988) を適用することで、観測される輻射スペクトルを大筋で説明することに成功した。しかし、これらはあくまで物理素過程を近似的に扱ったモデルであるため、現実的には多次元モデルを構築する必要がある。

多次元計算による研究は1990年代から始まった。輻射を無視した磁気流体計算 (Matsumoto 1999 など)、磁場を無視した輻射流体計算 (Ohsuga et al. 2005 など) がそれである。しかし、現実的には輻射も磁場も無視するわけにはいかないため、多次元輻射磁気流体計算の必要性が強く認識されていた。磁気流体計算や輻射磁気流体計算は、それだけでも高度な研究課題であるが、輻射磁気流体計算は最も高度な研究課題である。近年の計算機の発展により、いよいよ可能となってきた。

## 3. 研究の方法

本研究では、スーパーコンピュータを駆使し、空間2次元の大局的輻射磁気流体シミュレーションを行う。

そもそも降着円盤では、角運動量の輸送が起こらないとガスはブラックホールに吸い込まれない。しかし、角運動量輸送の起源が不明であったため、 $\alpha$ モデルと呼ばれる現象論モデルを用いて研究が進められてきた。しかし近年、磁場による効果で角運動量輸送が起こることがわかってきた。よって、重力や流体に加え、磁場の発展を解くことは極めて重要である。

一方、輻射による冷却効率の違いは、降着円盤の多様性を生み出すと考えられる。実際、

既出の標準円盤、ライアフ、スリム円盤は放射冷却効率が異なっている。輻射冷却の効率で円盤の温度や厚みが変わり、放射スペクトルにも影響が出る。実際、ブラックホール連星や銀河中心核では、多様な輻射スペクトルが観測されている。したがって、輻射輸送も扱う必要がある。

また、磁場や輻射はジェットの加速や収束にも影響を与える可能性があるため、円盤とジェットを合わせて解くためには、ますます無視するわけにはいかない。

ブラックホール降着円盤およびジェットの輻射磁気流体シミュレーションは、世界に先駆ける研究であるため、数値コードは独自に開発する必要がある。数値計算コードは、大型並列計算機で効率よく稼働するように工夫を施す。また、輻射磁気流体計算の膨大な計算量を抑え、実現可能な計算とするため、Flux-limited diffusion (FLD) 近似を採用する。また、2次元軸対称、赤道面对称を課す。これらの近似や対称性は、将来的に外す予定である。実際の計算には、国立天文台が有するスーパーコンピュータ、Cray XT4 を用いる。

## 4. 研究成果

世界で初めて、ブラックホール周囲の降着円盤およびジェットの大局的2次元輻射磁気流体シミュレーションに成功した。

従来の研究では、限られた降着率 (即ち、標準円盤、ライアフ、スリム円盤のうちのいずれか一つ) しか扱うことができなかったが、輻射磁気流体計算では、ブラックホール周囲に必要なおよそ全て (相対論を除く) の物理プロセスを取りこんでいるため、あらゆる降着率で円盤およびジェットを調べることが可能である。計算の結果、質量降着率の違いによって、大きく形状の異なる3種の円盤が形成されることがわかった。

質量降着率の大きな状況では、輻射圧優勢な円盤が形成される。強いガス圧によって円盤の厚みは大きくなる。円盤内のガスは乱流状態になりながら徐々にブラックホールに近づき、吸い込まれる。また、円盤内部に満ち溢れた光子の大半が、ガスもろともブラックホールに吸い込まれるという現象 (光子捕獲) が起こるが、それでも円盤の光度はエディントン光度を超える。これはスリム円盤の多次元バージョンである。

一方、質量降着率が中程度の場合には、光学的に厚く、幾何学的に薄い円盤が現れる。効率的な輻射冷却が起こるため、円盤の温度も圧力も下がり、幾何学的に薄くなるのである。これは標準円盤に対応する。ただし、ブラックホールの近傍では光学的に薄くなる現象も確かめられた。

質量降着率が極めて小さな場合には、超高温で分厚い円盤が形成される。光学的に薄く、

輻射冷却がほとんど効かないため、円盤内の圧力は高いまま維持されるからである。ライブの2次元バージョンと言える。

また、本研究ではいわゆる $\alpha$ モデルを採用せず、磁場を正しく解くことで角運動量輸送および粘性加熱を計算している。その結果を $\alpha$ モデルと比較し、 $\alpha$ モデルが妥当なモデルか否かを検証した。結果、赤道面付近にのみ着目すると、角運動量輸送効率はおおよそ全圧（ガス圧と輻射圧の和）に比例することがわかった。 $\alpha$ 定数に読み替えると0.01以下という小さな値となる。ただし、粘性加熱率の空間分布を調べると、ガス圧や輻射圧には比例せず、磁気圧に比例する傾向がみられた。やはり、 $\alpha$ モデルを用いた研究には限界があるという結論である。

我々が行った輻射磁気流体計算では、円盤と同時にジェットも解いている。そもそもジェットは長年にわたって研究されてきたにもかかわらず、その加速、収束メカニズムはまだよくわかっていない。

これまで考えられてきたモデルは大きく分けて二つあり、輻射圧駆動型ジェットと、磁気圧駆動型ジェットがある。磁気圧駆動型ジェットは、磁場の効果で加速と収束を同時に達成しようというものであるが、マイクロキューサーで観測されているような、パワフルなジェットを説明できない。一方、輻射圧駆動型ジェットはパワーは十分だが、収束メカニズムにかけているという欠点がある。

そのような背景の中、我々の研究は新たなジェットモデルを解明した。質量降着率の大きな円盤から噴出するジェットを詳細に解析したところ、輻射圧で加速し、磁場の効果（ローレンツ力）で収束するジェット（輻射磁気流体ジェット）が噴出することを確認できたのである（図1）。

この新型ジェットの最高速度は光速のおよそ半分程度である。銀河系内のマイクロキューサー（SS433やGRS1915+105）で観測されるパワフルなジェットを説明できる可能性がある。この結果は、2010年10月に国立天文台において記者発表を行った。多くの紙面で紹介され、ニュートンや日経サイエンスといった科学雑誌に取り上げられた。

一方、質量降着率の非常に小さな状況では、磁気圧駆動がジェットが発生することがわかった。また、パワーは弱いものの、幾何学的に薄い円盤（標準円盤に対応）からもガスが噴出することがわかった。標準円盤からはガスが噴出しないというのが常識とされてきたが、これを覆す結果である。近年の観測では、標準円盤からのガス噴出が示唆されている。

以上のように、世界に先駆けてブラックホール降着円盤およびジェットの多次元輻射磁気流体計算を実行した。多様な円盤を再現

することに成功し、従来の円盤粘性モデルの妥当性を評価、そして新型のジェットモデルを発見したのが本研究の成果である。

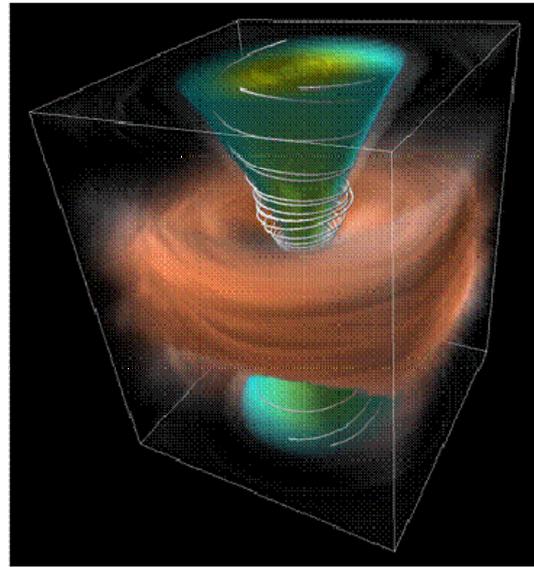


図1：輻射磁気流体ジェット（緑）。極めて明るく輝く円盤（茶）の輻射力がガスを加速し、磁場（磁力線が白線）の効果で収束している。

#### 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7件）

- ① K. Ohsuga, S. Mineshige, Global Structure of Three Distinct Accretion Flows and Outflows Around Black Holes through Two-Dimensional Radiation-Magnetohydrodynamic Simulations, *Astrophysical Journal*, in press, 査読あり
- ② S. Takeuchi, K. Ohsuga, S. Mineshige, A Novel Jet Model: Magnetically Collimated, Radiation-Pressure Driven Jet, *PASJ Letters*, 62, 43-47 (2010), 査読あり
- ③ K. Tomida, K. Tomisaka, T. Matsumoto, K. Ohsuga, M. N. Machida, K. Saigo, Radiation Magnetohydrodynamics Simulation of Proto-stellar Collapse: Two-component Molecular Outflow, *Astrophysical Journal Letters*, 714, 58-63 (2010), 査読あり
- ④ Y. Kato, M. Umemura, K. Ohsuga, Three-dimensional Radiative Properties of Hot Accretion Flows onto the Galactic Centre Black Hole, *MNRAS*, 400, 1742-1748 (2009), 査読あり

- ⑤ S. Takeuchi, S. Mineshige, K. Ohsuga, Modified Slim-Disk Model Based on Radiation-Hydrodynamic Simulation Data: The Conflict Between Outflow and Photon Trapping, PASJ, 61, 4, 783-790 (2009), 査読あり
- ⑥ T. Kawashima, K. Ohsuga, S. Mineshige, D. Heinzeller, H. Takabe, and R. Matsumoto, New Spectral State of Supercritical Accretion Flow with Comptonizing Outflow, PASJ, 61, 769-776 (2009), 査読あり
- ⑦ K. Ohsuga, S. Mineshige, M. Mori, and Y. Kato, Global Radiation-Magnetohydrodynamic Simulations of Black Hole Accretion Flow and Outflow: Unified Model of Three States, PASJ Letters, 61, 7-11 (2009), 査読あり

[学会発表] (計4件)

- ① 大須賀健、嶺重慎、Sub-Eddington円盤の大局的輻射磁気流体シミュレーション；光度と内縁半径の時間変動、日本天文学会、筑波大学、2011年3月16-19日
- ② 大須賀健、嶺重慎、森正夫、加藤成晃、竹内駿、富田賢吾、降着円盤の輻射磁気流体力学モデル；円盤およびアウトフローの力学構造、日本天文学会、山口大学、2010年3月24-27日、
- ③ 大須賀健、嶺重慎、森正夫、加藤成晃、大局的輻射磁気流体計算によるブラックホール降着・噴出流の構造の解明、日本天文学会、大阪府立大学、2009年3月24-27日
- ④ 大須賀健、加藤成晃、森正夫、嶺重慎、ブラックホール降着・噴出流の大局的2次元輻射磁気流体シミュレーション、日本天文学会、岡山理科大学、2008年9月11-13日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大須賀 健 (OHSUGA KEN)  
国立天文台・理論研究部・助教  
研究者番号：90386508

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

該当なし