

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400229

研究課題名(和文) 巨大ブラックホールの宇宙論的進化にみられる超臨界降着効果

研究課題名(英文) Effects of supercritical accretion on the cosmological growth of supermassive black holes

研究代表者

嶺重 慎 (Mineshige, Shin)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：70229780

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：古典的限界を超えてコンパクト天体にガスが降り積もる「超臨界降着」という現象がある。われわれはこの問題に先駆的な輻射流体シミュレーションにより取り組み、ブラックホールの宇宙論的成長過程に関わる以下の課題に取り組んだ。1. 輻射フィードバック効果によりブラックホールから中性ガスアウトフローが噴出することを発見し、2. コンプトン散乱により変形されたX線スペクトルを計算して謎とされた特異な硬X線観測スペクトルを説明し、3. バイナリーブラックホールの超臨界降着シミュレーションを実行した。また派生した話題として強磁場中性子星への超臨界降着シミュレーションを実行し、超高光度X線パルサーの正体を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have been working on multi-dimensional radiation-hydrodynamic simulations of supercritical accretion, accretion flow onto compact objects at rates exceeding the classical limit, and have so far clarified its various unique features, such as clumpy outflow. Here, we focus on the effects of supercritical accretion on the cosmological evolution of black holes, and (1) found eruption of neutral outflow from an intermediate-mass black hole via radiation feedback, (2) reproduced the enigmatic hard X-ray spectra by calculating deformation of spectra by multiple Compton scatterings, and (3) performed numerical simulations of accretion onto binary black holes. Finally, we also clarified the central engine of the Ultraluminous X-ray pulsars by calculating the flow dynamics of supercritical accretion column.

研究分野：ブラックホール天文学

キーワード：ブラックホール天文学 降着流 アウトフロー 輻射流体力学 輻射輸送 パルサー X線分光 一般相対性理論

1. 研究開始当初の背景

ブラックホールと銀河の共進化やダウンサイジングの発見に触発され、巨大ブラックホールの宇宙論的進化に注目が集まっている。赤方偏移 7.1 (宇宙年齢 ~ 8 億歳) で、既に約 20 億倍の太陽質量をもつブラックホールがあったこと (Mortlock et al. 2011) は一種、驚きであり、超臨界降着があったことが示唆されている。その観測的特徴は何だろうか。

われわれは 2005 年から先駆的にこの問題に取り組み、放射の緩やかなピーミングや高速 ($\sim 0.1c$) でクランプ状のアウトフロー噴出など、いくつもの新しい知見を大局的輻射流体/輻射磁気流体シミュレーションで示してきた (Ohsuga et al. 2005, Takeuchi et al. 2013)。図 1 にこうして明らかにされた超臨界降着・噴出流の模式図を示す。

しかしそれまでの計算に、降着が生み出す輻射による圧力や周辺ガスのコンプトン加熱によるフィードバック効果など、ブラックホール成長の現場で本質となる環境効果はまったく考慮されていなかった。

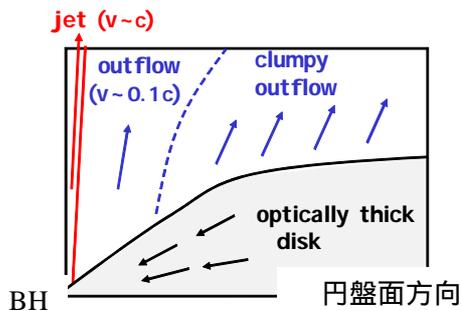


図 1 超臨界降着・噴出流の模式図

宇宙論的文脈で、~100太陽質量の種族星起源の種ブラックホールはどのように太っていくのだろうか (Madau & Rees 2001)。構造形成や銀河合体のシミュレーションが盛んになされているが、未だブラックホール降着流を分解するまでに至っていない (Newton & Kay 2013)。単独の種ブラックホールへの球対称降着過程はよく調べられており、輻射フィードバック効果により周囲のガス温度が上昇して

ボンディ降着率が下がり、ブラックホール降着率はエディントン降着率の 3 桁以下になることが示されている (Wang et al. 2006)。もっとも降着率の減少は中心光度の低下を引き起こす。するとフィードバック効果は抑えられて再び降着率が上昇するという「間欠的降着」の可能性もあり (Ostriker et al. 1976) 論争が続いている。

しかし、これまで想定されていた球対称降着ではフィードバック効果は過大評価されることを指摘しておきたい。なぜなら、ガスの降着する向きと輻射の出る向きは動径方向逆向きで、必ず衝突するからである。非等方輻射を起こす円盤降着では、事情が異なる。すなわちガス降着は円盤面方向から、輻射は円盤面に垂直方向へと棲み分けが起こるためフィードバック効果は抑えられる。この棲み分けのため、超臨界降着は可能となる。

超臨界円盤降着過程を調べるには多次元大局的輻射流体シミュレーションしか手がないが、これは世界的に見てもまだ未開拓の地平である。

ブラックホールからの噴出流といえば、従来、細く絞られた高速のジェットのことであったが、ジェットをとりまく広い領域から、光速の 10~20% の速さで飛び出すアウトフローが今、注目されている (Tombesi et al. 2010)。速度は速くはないが運ぶ質量は多く、周囲に大きなインパクトを与えうるのである。そのアウトフロー噴出を、降着流 (円盤) も含めたシミュレーションで例証したのはわれわれだけである。

未だ世界の追随を許していないシミュレーションの実行により、超臨界降着流起源のアウトフローはブラックホール成長にどう影響し、どのように観測されるか。

過去の研究で培われた技法や経験をふまえ、巨大ブラックホールの宇宙論的成長の理解に欠けている最後の 1 ピースをうめるべく新プロジェクトを提案する。

2. 研究の目的

本研究計画は、宇宙論的ブラックホール進化の文脈において、超臨界降着が産み出す輻射やアウトフローの観測的特徴およびそれが周囲へ与える影響を定量的に見積もることにより、巨大ブラックホールの成長過程の、決定的に理解が欠けているステージを明らかにするものである。具体的課題は3つある。

1. ブラックホール成長初期の超臨界降着

従来より領域をはるかに広げて大局的輻射・輻射磁気流体シミュレーションを実行し、周囲への輻射フィードバック効果を定量化して、継続的な超臨界降着が可能かどうか、可能な場合はその理由は何かを調べる。

2. 超臨界降着流の観測可能性

部分電離したアウトフローは中心光を吸収し特異なスペクトルを生み出す。臨界降着流の連続・線スペクトル形状やその変動に見られる特徴を明らかにする。

3. バイナリーブラックホールの超臨界降着

バイナリーブラックホールへの降着過程を流体シミュレーションで調べ、間欠的なガス降着流が産み出す間欠的なクランプ状アウトフローの観測可能性を議論する。

ブラックホールの宇宙論的成長というと、どの教科書にもエディントンリミットの記述があり、超臨界降着が実現するという事実の認知度はまだまだ低い。逆にいうとそれはチャンスで、われわれが独走する課題追求により、世界の常識が大きく塗り替えられる可能性がある。

3. 研究の方法

1. ブラックホール成長初期の超臨界降着

超臨界降着流の大局的2次元輻射流体・輻射磁気流体シミュレーションを、従来より計算ボックスをボンディ半径(その中でブラックホールが卓越する)まで広げて実行する。

そこでコンプトン加熱および輻射圧の効果により、周囲のガスがどのような影響を受けるか、円盤の回転軸からの角度の関数として定量化し、円盤面からの継続的な超臨界降着が可能かどうかを調べる。

研究のポイントは、中心領域から特定の方向へ飛び出したアウトフローの影響が、どこまで広範囲に浸透するかを正確に見積もることに集中する。

2. 超臨界降着流の観測可能性

高光度降着流からの高温アウトフローは、円盤からの軟X線を逆コンプトンによって特異な硬X線スペクトルを生み出す。この過程をモンテカルロ法により、ブラックホール質量・降着率毎に調べる。

並行して、アウトフローは、軟X線領域においては鉄などの重元素による、青方偏移したX線吸収スペクトルを生み出す。このようすを、MONACOコード(ジオメトリを考慮してX線詳細スペクトル計算することができる; Odaka+2011)を用いて進める。

3. バイナリーブラックホールの超臨界降着

バイナリーブラックホールへのガス降着過程をメッシュ法による計算コードを用いて行う。具体的にはドイツ・キール大学グループが開発したcurvilinear grid法(計算メッシュを境界構造に合わせて張り直すことで精度よい計算を行うもの; Illenseer & Duschl 2006)による流体コードを使わせてもらう。なお、このコードには輻射過程は入っていないので、シミュレーションで輻射場を計算し、その輻射場を母体に、ガスがどのように輻射力を受けて、どの方向にどれくらい飛び出すかを計算する。

4. 研究成果

1. ブラックホール成長初期の超臨界降着

輻射フィードバックによる物質の化学組成(電離状態)変化を調べるための新サブ

ーチンを導入して降着流の輻射流体・輻射磁気流体シミュレーションを実行した。

まず、ブラックホール質量が太陽質量の千～数万倍の場合につき、等方放射で領域全体が輻射電離されて降着率がエディントンよりはるかに小さくなることを確認した。その後、輻射の非等方性を入れ、円盤面垂直方向に輻射が抜けやすい効果を入れたところ、その方向に電離ガスが飛び出し「ホットアウトフロー」を形成すること、一方でそれに垂直面方向からガスが超臨界降着することを確認できた(図1)。

さらにブラックホール質量が太陽質量の10万倍を超えると、従来知られていたホットアウトフローとは別種の、中性ガスアウトフロー(ワームアウトフロー)が噴出することを発見した。以上の内容につき論文執筆し、投稿した(Takeo+2017)。

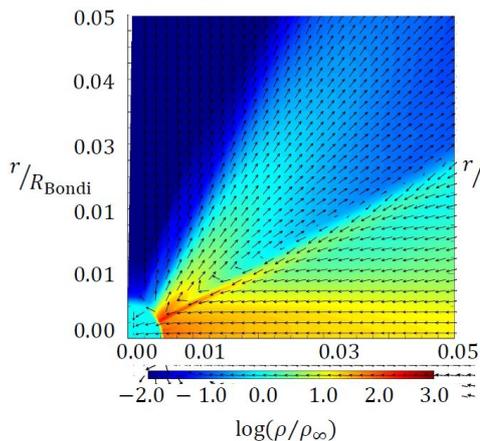


図1：非球対称フィードバックが駆動する 10^3 太陽質量ブラックホールへの超臨界降着流。密度コントラストを表し、図のスケールはボンディ半径($R_{\text{Bondi}} \sim$ パーセク)で規格化した。(Takeo+2017)。

2. 超臨界降着流の観測可能性

まずは、超臨界降着流を、さまざまなパラメータ(ブラックホール質量およびガス流入率)に対し実行し、アウトフローがどの程度飛び出すかを丁寧にシミュレーションした。その結果、降着率が臨界値を超えるほど、

アウトフローに行く割合が増えること(図2)また見る角度により大きく見え方が異なることを見いだした。これは、従来の亜臨界降着流に基づくアウトフローの見積もりは過小評価であることを意味する。結果を得て、論文にまとめ、PASJ誌に発表した(Ogawa+2017)。

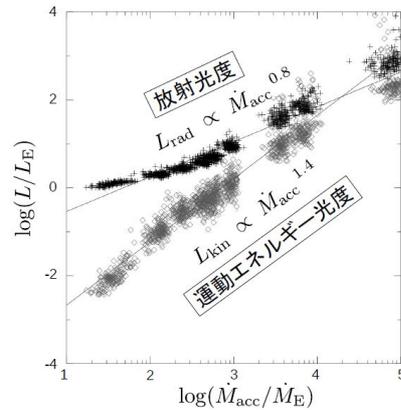


図2：降着率と輻射光度 L_{rad} 及び運動エネルギー光度 L_{kin} の関係(Ogawa 投稿準備中)。横軸単位は臨界値(L_E/c^2)。

ついて、高光度降着流が生み出す、X線領域でのコンプトン散乱により変形された連続光スペクトルをモンテカルロ法によって計算し、見込み角度によってスペクトルが大きく変わることに、硬X線領域でべき型スペクトルをもつ超過成分が発生することを示した。この結果は、最新のULX(超高光度X線源)の観測をみごと再現した(図3)。

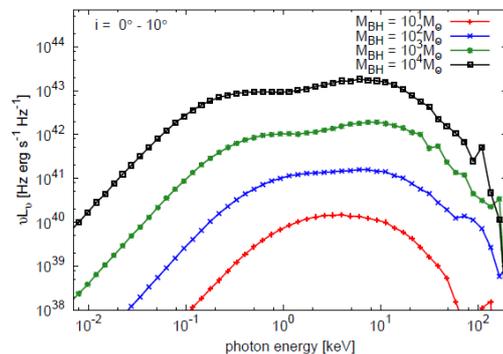


図3：ブラックホール質量ごとの超臨界降着スペクトル。硬X線領域でべき成分が表れ、ULXの最新観測を説明した(Kitaki+2017)。

並行して連携研究者の大須賀健氏および高橋博之氏（ともに国立天文台）と共同研究でブラックホールおよび中性子星の一般相対論的磁気輻射流体シミュレーションに取り組み、データを使ってブラックホールに落ちこむガスリングの運動と輻射光度変動を定量的に明らかにし、論文にまとめ、査読雑誌に投稿した（Moriyama+2017）。

3. バイナリーブラックホールの超臨界降着

バイナリーブラックホールに、周囲にあるガスがどのように降着するかを調べるためメッシュ法シミュレーションを実行して、ブラックホール近傍のガス流構造を明らかにした（図4）。

2つのブラックホールそれぞれに吸い込まれるガス流がぶつかることで、強い衝撃波がたつことがわかった。さらにこのデータをもとに、輻射場を解いて、アウトフローが3次元的にどのように噴出するかを、テスト粒子を用いて調べた。現在、論文にまとめつつある。

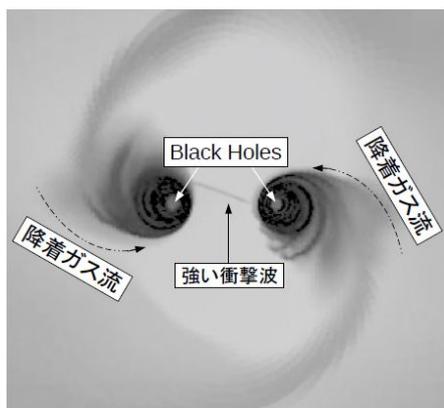


図4：バイナリーブラックホールへのガス降着シミュレーション。図は密度コントラストを表す（Iijima+投稿準備中）。

4. 超臨界パルサー：強磁場中性子降着

最後に、これらの研究を推進中に派生したテーマについて面白い結果を得たので述べる。ULXの中に強いX線パルスを出す天体

が見つかった（Bachetti+2014）。これは、強磁場中性子星に多量のガスが降り込んで光っている天体としか考えられない（ULXパルサーとよばれる）。われわれは強磁場中性子星の降着コラムへの超臨界降着流の輻射流体シミュレーションを実行した。すなわち、計算ボックスを降着コラムにみたてた円錐形とし、上部からガスを落として超臨界降着を実現した。その結果、多量のガス降着に伴い発生した多量の輻射は降着コラム側面から効率よく抜け出するため、継続的超臨界降着が可能となることがわかった。これは超高光度X線パルサーの起源をみごと説明する。得られた結果を論文にまとめ、査読雑誌に出版した（図5：Kawashima+2016）。

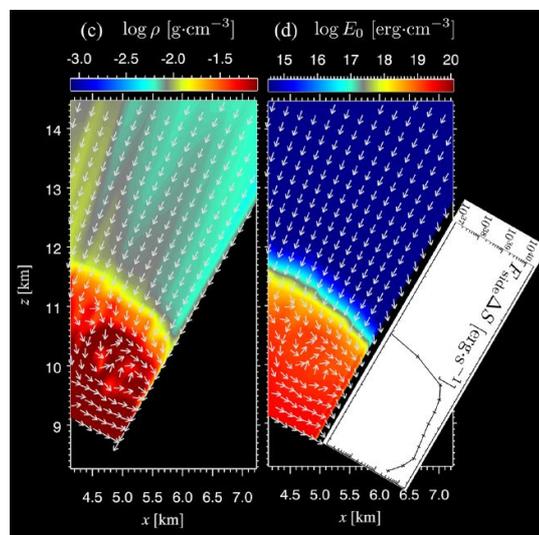


図5：強磁場中性子星の超臨界降着流シミュレーション。左図はガス密度、右図は輻射エネルギー密度のコントラスト。上方から自由落下したガスは11kmあたりで衝撃波を起こし、多量の輻射をコラム側面から出す（Kawashima+2016）。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

・ [Mineshige, S., Ohsuga, K.](#) 査読あり

“Outflow Launching Mechanisms” *Space Sci. Rev.* **183**, 353-369 (2014)

DOI: [10.1007/s11214-013-0017-3](https://doi.org/10.1007/s11214-013-0017-3)

- ・Moriyama, K., Mineshige, S. 査読あり
 “New method for black-hole spin measurement based on flux variation from an infalling gas ring” PASJ, **67**, id.106 (2015)
 DOI: [10.1093/pasj/psv074](https://doi.org/10.1093/pasj/psv074)
- ・Kimura, M., Kawanaka, N., & Mineshige, S. 査読あり
 “How does a secular instability grow in a hyperaccretion flow?” PASJ, **67**, id 101 (2015)
 DOI: [10.1093/pasj/psv070](https://doi.org/10.1093/pasj/psv070)
- ・Jiao C.-L., Mineshige, S., Ohsuga, K. & Takeuchi, S. 査読あり
 “Comparison between Radiation-Hydrodynamic Simulation of Super-critical Accretion Flows and a Steady Model with Outflows” ApJ, **806**, id.93 (2015)
 DOI: [10.1088/0004-637X/806/1/93](https://doi.org/10.1088/0004-637X/806/1/93)
- ・Kawashima, T., Mineshige, S., Ohsuga, K., Ogawa, T. 査読あり
 “A radiationhydrodynamics model of accretion columns for ultra-luminous X-ray pulsars” PASJ, **68**, id. 83 (2016)
 DOI: [10.1093/pasj/psw075](https://doi.org/10.1093/pasj/psw075)
- ・Moriyama, K., Mineshige, S. 査読あり
 “New method for probing Kerr space-time based on imaging observation of in-falling gas blob” PASJ, **68**, id. 6 (2016)
 DOI: [10.1093/pasj/psw019](https://doi.org/10.1093/pasj/psw019)
- ・Sasada, M., Mineshige, S., Yamada, S., Negoro, H. 査読有り
 “Understanding the general feature of microvariability in Kepler blazar W2R 1926+42” PASJ **69**, id.15 (2017)
 DOI: [10.1093/pasj/psw119](https://doi.org/10.1093/pasj/psw119)
- ・Ogawa, T., Mineshige, S., Kawashima, T., Ohsuga, K., Hashizume, K. 査読有り
 “Radiation hydrodynamic simulations of a super-Eddington accretor as a model for ultra-luminous sources” PASJ **69**,- (2017)
 DOI: [10.1093/pasj/psx006](https://doi.org/10.1093/pasj/psx006)

[学会発表](計 7件)

- ・ Mineshige, S. & Ohsuga, K. “Numerical

Simulations of Super-Eddington Accretion Flow and Outflow” *ULXs and their environments* (Strasbourg, France, 2016年6月13-16日)

- ・嶺重 慎「ブラックホール研究～今昔物語から将来へ」高宇連シンポジウム(名古屋大学、2017年3月9日～11日)
- ・S. Mineshige “Overview on Black Hole Accretion Flow and Outflow” Black Hole Astrophysics with VLBI symposium (国立天文台、2017年3月27日～29日)
- ・竹尾英俊「多次元超臨界降着による宇宙初期の巨大ブラックホール形成」日本天文学会(九州大学、2017年3月16～19日)
- ・北木孝明「超臨界降着流のラインスペクトルの輻射輸送計算」日本天文学会(九州大学、2017年3月16～19日)
- ・森山小太郎「ブラックホールへ落下するスパイラルガス雲の運動と放射特性」日本天文学会(九州大学、2017年9月16～19日)
- ・川島朋尚「強磁場中性子星の超臨界降着柱の構造」日本天文学会(九州大学、2017年3月16～19日)

[図書](計 1件)

- ・嶺重 慎『ブラックホール天文学』(日本評論社) 302p (2016)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

嶺重 慎 (MINESHIGE, Shin)
 京都大学・大学院理学研究科・教授
 研究者番号：70229780

(2) 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