

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05036

研究課題名(和文) 3次元輻射磁気流体力学計算による多種多様なブラックホール噴出流の統合理論の構築

研究課題名(英文) Study of various black hole outflows by three-dimensional radiation-magnetohydrodynamics 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：ブラックホールおよび中性子星周囲をターゲットとした大規模数値シミュレーションを実施し、超臨界円盤からは連続光による輻射力で、亜臨界円盤からは束縛-束縛遷移吸収による輻射力で加速されたアウトフローが噴出することを解明した。また、発生したガス噴出流が流体不安定で小さなガス片に分裂することも突き止めた。強磁場中性子星の場合は、磁極からガスが降着することも示した。活動銀河核やX線連星で観測されるアウトフローや光度変動を説明できる新たな理論モデルを構築したのである。

研究成果の概要(英文)：By performing numerical simulations, we investigated inflow-outflow structure around black holes and neutron stars. We revealed the outflows are launched via the radiation forces for the electron scattering when the accretion rate of the disk is larger than the Eddington rate and for the bound-bound absorption in the case of the near-Eddington disks. We also indicated that the radiatively outflows are fragments into many gas clumps. It was found that the mass accretes onto the vicinity of the magnetic poles when the central object is the magnetized neutrons stars. Our new results can explain the outflows and luminosity variation observed in the active galactic nuclei and X-ray binaries.

研究分野：宇宙物理学理論

キーワード：ブラックホール 降着円盤 アウトフロー 数値シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

ブラックホール周辺から噴出するガス噴出流は、星間ガスの加熱や圧縮を通じて、周囲の星形成や母銀河の進化に甚大な影響を与えると考えられる。

ガス噴出流は、ブラックホール周囲の降着円盤から噴出していると考えられるが、その構造も加速機構もよくわかっていない。多様な速度、密度、立体角を持つものが報告されているので、加速機構も噴出元である降着円盤の性質も多様であると考えられる。したがって、どのような状況でどういったメカニズムでガスが噴出するのか、多種多様なガス噴出流を全て解明する必要がある。

また、近年の観測によって、ブラックホール候補天体の一部が中性子星であることが判明したため、中性子星周囲でのガス降着・噴出現象の解明も、ブラックホールと並んで重要な研究課題となっている。

### 2. 研究の目的

上記のように、ブラックホールの成長および周囲の構造形成・進化において重要な、ブラックホールや中性子星周囲で生じるガス噴出流の構造とその噴出メカニズムを解明することが本研究の目的である。

降着円盤から吹き出すガス噴出流は、ジェットと円盤風に大別することができる。ジェットは、円盤の回転軸方向に細く絞られた高速な流れであり、円盤風は回転軸から比較的離れた方向に吹き出す流れである。どちらも輻射や磁場、もしくはガス圧で加速されている可能性があるが、本研究では円盤が明るく輝く状況で働く輻射加速に着目して、ガスの噴出条件および噴出流の構造を調べる。

ガスの噴出によって降着円盤の構造も変化することになるので、噴出流と合わせて降着流も調べる必要がある。つまり、ブラックホールおよび中性子星周囲の降着・噴出流を合わせて調べるのである。

### 3. 研究の方法

研究には大規模な数値シミュレーションを用いる。輻射輸送と流体力学を同時に解く輻射磁気流体力学、さらには磁場も合わせて解く輻射磁気流体力学シミュレーションを駆使して、降着・噴出流の構造を解明する。

ブラックホールや中性子星の近傍を扱う際は、重力を正しく扱うために一般相対性理論を組み込んだシミュレーションを行う。また、必要に応じて極めて高い空間分解能のシミュレーションを実施する。ガス噴出流は流体不安定で分裂する可能性があり、分裂片の構造を解明するには十分な分解能が必要だからである。

加えて、上記流体シミュレーションで得られた結果を観測データと比較するため、輻射輸送計算を実施して輻射スペクトルを理論的に求め、それを実際の観測データと比較する。理論と観測を直接比較することで理論モ

デルを検証するのである。

### 4. 研究成果

一般相対論的な輻射磁気流体力学シミュレーションにより、超臨界降着円盤（光度がエディントン光度を超える円盤）から強力なジェットが噴出することがわかった（図1）。このジェットは光速の30-40%程度の速度を持ち、その加速メカニズムは電子散乱による輻射力である。また、ブラックホールの自転のエネルギーが磁場を介して降着円盤を加熱することもわかった。加熱されたガスは効率的にX線を出すと予想され、謎に包まれているX線の放射機構を解明する可能性がある。

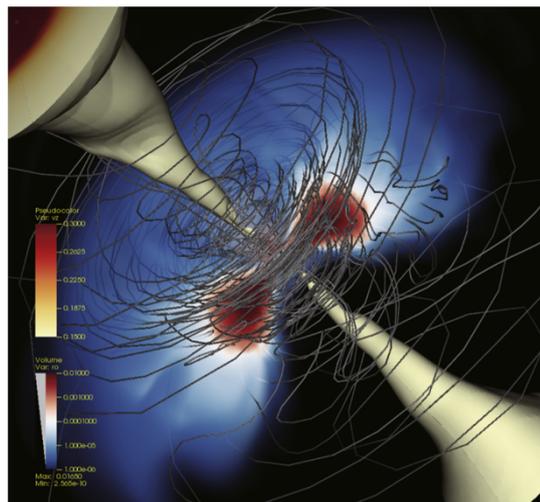


図1：一般相対論的輻射磁気流体力学計算で得られた降着円盤（赤）とジェット（白）

また、超臨界降着円盤からは、回転軸から離れた方向に円盤風が吹き出し、それが小さなシート状に分裂することがわかった（図2）。分裂のメカニズムは輻射優勢領域におけるレイリー・テイラー不安定と考えられる。この分裂片が観測者の視線を横切ることによる光度変動のタイムスケールは、恒星質量ブラックホールの場合でおよそ10秒であり、これは超高光度X線源の観測事実と合致する。

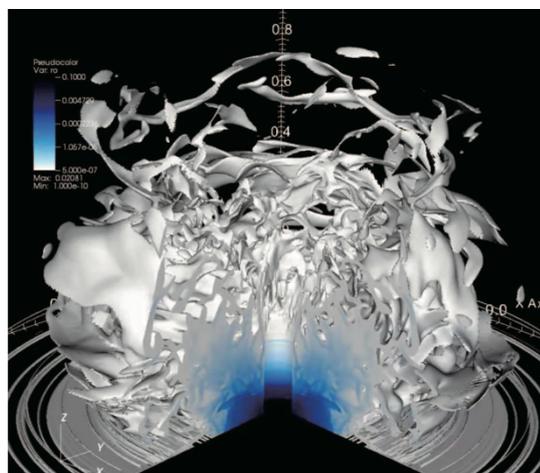


図2：高分解能シミュレーションで得られた分裂する円盤風

中心天体が強磁場中性子星の場合、ガスが赤道面に沿って落下できないことも一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションで実証した。この場合、中性子星の磁極付近にガスが降着することになる(図3)。明るく輝く降着柱が形成され、中性子星の自転によってパルスが観測される可能性を示唆したものである。なお、超高光度X線源の一部でX線パルスが検出されており、本結果は有力な理論モデルとなっている。

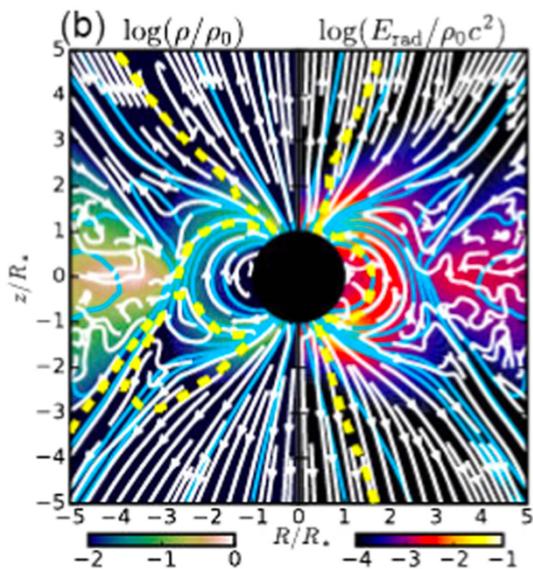


図3：中性子星(中心の黒い円)の磁極付近に形成される明るく輝く降着柱

加えて、垂臨界降着円盤からは、金属元素の束縛-束縛遷移吸収による輻射力(ラインフォース)で円盤風が吹き出すことがわかった(図4)。これはラインフォースを加えた輻射流体シミュレーションによって得られたもので、活動銀河核で観測されているガス噴出流のエネルギー・運動量放出率と円盤光度の関係を再現することに成功した。

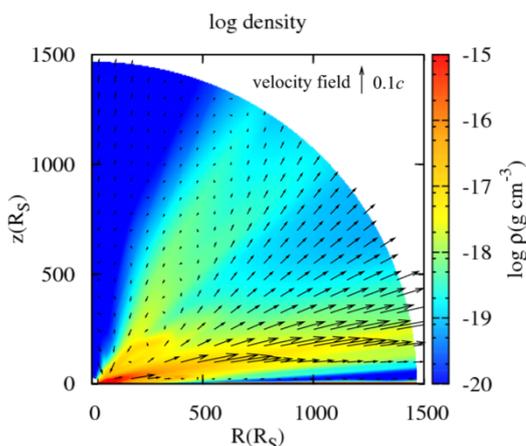


図4：ラインフォースで加速される円盤風

## 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 13 件)

- ① Takeo, E., Inayoshi, K., Ohsuga, K., Takahashi, H. R., & Mineshige, S. 2018, MNRAS, 476, 673; Rapid growth of black holes accompanied with hot or warm outflows exposed to anisotropic super-Eddington radiation, 査読あり, DOI:10.1093/mnras/sty264
- ② Kobayashi, H., Ohsuga, K., Takahashi, H. R., Kawashima, T., Asahina, Y., Takeuchi, S., & Mineshige, S. 2018, PASJ, 70, 22; Three-dimensional structure of clumpy outflow from supercritical accretion flow onto black holes, 査読あり, DOI: 10.1093/pasj/psx157
- ③ Takahashi, H. R., Mineshige, S., & Ohsuga, K., 2018, ApJ, 853, 45; Supercritical Accretion onto a Non-magnetized Neutron Star: Why is it Feasible?, 査読あり, DOI: 10.3847/1538-4357/aaa082
- ④ Kitaki, T., Mineshige, S., Ohsuga, K., & Kawashima, T., 2017, PASJ, 69, 92; Theoretical modeling of Comptonized X-ray spectra of super-Eddington accretion flow: Origin of hard excess in ultraluminous X-ray sources, 査読あり, DOI: 10.1093/pasj/psx101
- ⑤ Takahashi, H. R. & Ohsuga, K., 2017, ApJL, 845, L9; General Relativistic Radiation MHD Simulations of Supercritical Accretion onto a Magnetized Neutron Star: Modeling of Ultraluminous X-Ray Pulsars, 査読あり, DOI: 10.3847/2041-8213/aa8222
- ⑥ Moriya, T., Tanaka, M., Morokuma, T., Ohsuga, K., 2017, ApJL, 843, L19; Superluminous Transients at AGN Centers from Interaction between Black Hole Disk Winds and Broad-line Region Clouds, 査読あり, DOI: 10.3847/2041-8213/aa7af3
- ⑦ Asahina, Y., Nomura, M., & Ohsuga, K., 2017, ApJ, 840, 25; Enhancement of Feedback Efficiency by Active Galactic Nucleus Outflows via the Magnetic Tension Force in the Inhomogeneous Interstellar Medium, 査読あり, DOI: 10.3847/1538-4357/aa6c5f
- ⑧ Ogawa, T., Mineshige, S., Kawashima, T., Ohsuga, K., Hashizume, K., 2017, PASJ, 69, 33; Radiation hydrodynamic simulations of a super-Eddington accretor as a model for ultra-luminous sources, 査読あり, DOI: 10.1093/pasj/psx006
- ⑨ Nomura, M. & Ohsuga, K., 2017, MNRAS, 465, 2873; Line-driven disc wind model

for ultrafast outflows in active galactic nuclei - scaling with luminosity, 査読あり, DOI: 10.1093/mnras/stw2877

- ⑩ Kawashima, T., Mineshige, S., Ohsuga, K., & Ogawa, T., 2016, ApJ, 68, 83; A radiation-hydrodynamics model of accretion columns for ultra-luminous X-ray pulsars, 査読あり, DOI: 10.1093/pasj/psw075
- ⑪ Takahashi, H. R., Ohsuga, K., Kawashima, T., & Sekiguchi, Y., 2016, ApJ, 826, 23; Formation of Overheated Regions and Truncated Disks around Black Holes: Three-dimensional General Relativistic Radiation-magnetohydrodynamics Simulations, 査読あり, DOI: 10.3847/0004-637X/826/1/23
- ⑫ Nomura, M., Ohsuga, K., Takahashi, H. R., Wada, K., & Yoshida, T., 2016, PASJ, 68, 16; Radiation hydrodynamic simulations of line-driven disk winds for ultra-fast outflows, 査読あり, DOI:10.1093/pasj/psv124
- ⑬ Ohsuga, K. & Takahashi, H. R. 2016, ApJ, 818, 1620; A Numerical Scheme for Special Relativistic Radiation Magnetohydrodynamics Based on Solving the Time-dependent Radiative Transfer Equation, 査読あり, DOI: 10.3847/0004-637X/818/2/162

[学会発表] (計 31 件)

- ① 高橋博之, 大須賀健, 小川拓未 “振動数依存型一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションコードの開発”, 日本天文学会, 2018年3月14-17日, 千葉大学(千葉県・千葉市)
- ② 川島朋尚, 大須賀健, 高橋博之 “超臨界降着するブラックホールと中性子星の輻射スペクトル比較”, 日本天文学会, 2018年3月14-17日, 千葉大学(千葉県・千葉市)
- ③ 野村真理子, 岡朋治, 山田真也, 竹川俊也, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, “超新星残骸 W44 超高速分子雲の起源 II: 磁気流体シミュレーション”, 日本天文学会, 2018年3月14-17日, 千葉大学(千葉県・千葉市)
- ④ 竹尾英俊, 稲吉恒平, 大須賀健, 高橋博之, 嶺重慎, “ブラックホールの超臨界成長・円盤スペクトルの効果”, 日本天文学会, 2018年3月14-17日, 千葉大学(千葉県・千葉市)
- ⑤ 朝比奈雄太, 大須賀健 “ジェットによる ULX バブル形成のシミュレーション”, 日本天文学会, 2017年9月11-13日, 北海道大学(北海道・札幌市)
- ⑥ 朝比奈雄太, 高橋博之, 大須賀健 “一般

相対論的多次元ボルツマン輻射磁気流体コードの開発”, 日本天文学会, 2017年9月11-13日, 北海道大学(北海道・札幌市)

- ⑦ 川島朋尚, 大須賀健 “観測的可視化のための一般相対論的輻射輸送コードの開発”, 日本天文学会, 2017年9月11-13日, 北海道大学(北海道・札幌市)
- ⑧ 高橋博之, 大須賀健 “一般相対論的輻射磁気流体計算による中性子星への超臨界降着とアウトフロー形成機構”, 日本天文学会, 2017年9月11-13日, 北海道大学(北海道・札幌市)
- ⑨ 高橋博之, 嶺重慎, 大須賀健 “中性子星への超臨界降着は可能か?”, 日本天文学会, 2017年9月11-13日, 北海道大学(北海道・札幌市)
- ⑩ 小林弘, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, 川島朋尚, 嶺重慎 “超臨界降着円盤から吹き出すクランピーアウトフローの3次元輻射流体シミュレーション”, 日本天文学会, 2017年9月11-13日, 北海道大学(北海道・札幌市)
- ⑪ 野村真理子, 大須賀健, Chis Done, “ライソフォース駆動型円盤風による SMBH 進化の自己制御機構”, 日本天文学会, 2017年9月11-13日, 北海道大学(北海道・札幌市)
- ⑫ 小川拓未, 嶺重慎, 川島朋尚, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太 “ULX と ULS の統統合モデル”, 日本天文学会, 2017年9月11-13日, 北海道大学(北海道・札幌市)
- ⑬ 北木孝明, 嶺重慎, 大須賀健, 川島朋尚 “超臨界降着流のスペクトルの振る舞いと硬 X 線の起源”, 日本天文学会, 2017年9月11-13日, 北海道大学(北海道・札幌市)
- ⑭ 竹尾英俊, 稲吉恒平, 大須賀健, 高橋博之, 嶺重慎 “多次元効果を考慮したブラックホールの超臨界成長・アウトフロー”, 日本天文学会, 2017年9月11-13日, 北海道大学(北海道・札幌市)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 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

高橋 博之 (TAKAHASHI HIROYUKI)  
国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト・特任助教  
研究者番号：80613405

川島 朋尚 (KAWASHIMA TOMOHISA)  
国立天文台・理論研究部・特任研究員  
研究者番号：90750464

### (4) 研究協力者

該当なし