

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 29 日現在

機関番号： 1 4 3 0 1
 研究種目： 基盤研究 (B)
 研究期間： 2 0 1 0 ~ 2 0 1 2
 課題番号： 2 2 3 4 0 0 4 5
 研究課題名 (和文) ブラックホール合体における降着流ダイナミクスと放射特性の研究

研究課題名 (英文) Study on Accretion Flow Dynamics and Emission Properties
 in Black Hole Merger

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 7 0 2 2 9 7 8 0

研究成果の概要 (和文) :

- (1) ブラックホールのペア、バイナリーブラックホールへのガス降着流を、質量、連星系軌道の離心率、円盤面の傾き角を変えて計算し、放射特性を明らかにした。
- (2) バイナリーブラックホールモデルに基づきシミュレーションを実行して輝線プロファイルを計算し、観測の非対称なダブルピーク・プロファイルを再現した。
- (3) ブラックホール合体時に予想される超臨界降着流の大規模輻射磁気流体シミュレーションを実行し、クランピーアウトフローの証拠を見いだした。

研究成果の概要 (英文)

- (1) We simulated gas flow onto binary black holes (pair of black holes) for given black hole masses, orbital eccentricities, and tilt angles of the disk, thereby clarifying their emission properties.
- (2) We calculated emission line profiles based on the SPH simulations of binary black holes, and reproduced observed, asymmetric double-peak profiles.
- (3) We performed global radiation-magnetohydrodynamic simulations of supercritical accretion flow, which is expected to occur in black hole mergers, and found an evidence of clumpy outflow.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2011 年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2012 年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
年度			
総計	13,100,000	3,930,000	17,030,000

研究分野：天文学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：ブラックホール、ガスダイナミクス、放射過程

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、宇宙の構造形成における巨大ブラックホールの役割が注目されている。宇宙開闢後数億年には太陽質量の10億倍の巨大ブラックホールが存在していたこと、ほとんど全ての銀河に巨大ブラックホールが存在しており、その質量はホストの銀河バルジの光度や速度分散と相関していることが判明している。銀河とブラックホールが共に進化していることが示唆されている。一方で、銀河自体は、やや小さい構造の合体により形成されたことも分かっている。

この両者を結びつけると、銀河同士の合体に伴い、その中心の巨大ブラックホール同士も合体して大きくなったということになる。巨大ブラックホール同士が合体して一つになるまでの間、安定したバイナリーブラックホールの段階を経ることが理論的に予想されている。実際、パーセクあるいはサブパーセクスケールの間隔をもつバイナリーブラックホールの存在が示唆されている。しかし未だ確証はない。バイナリーブラックホールを電磁波観測で検出する方法論が確立していないことが一因である。

(2) われわれは今まで、巨大バイナリーブラックホール系のSPHシミュレーションを行い、そのダイナミクスを明らかにしてきた(Hayasaki+2007, 2008)。バイナリーブラックホールの周囲を回転する円盤(外周円盤)から落ちるガスが各ブラックホール周囲に降着円盤を形成し、3重円盤システムを形成する(図1)。その放射特性は未解明の課題であった。

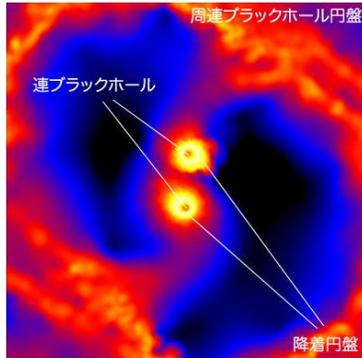


図1 バイナリーブラックホール系の三重円盤モデル。カラーコントラストはガス密度(黒が低密度、赤が高密度に相当)。ブラックホールを取り囲む外周円盤からガスがブラックホールに流れ込む(Hayasaki et al. 2008)。

(3) 活動銀河核に観測される幅広い輝線の約1割はダブルピークを示すことが知られている。その起源は、回転運動ということもあるが、それでは非対称な輝線プロファイルは説明できない。そこで、バイナリーブラックホールという可能性が浮上した。しかし、その現実的で系統的な研究はほとんどなされていない。

(4) バイナリーブラックホールからの放射特性を調べるとき、基本となるのは、シングルブラックホールからの放射スペクトルである。観測データが積み重ねられ、ほぼ統一理解が存在するといえるというもの、唯一の例外はエディントン光度付近の降着・噴出流である。観測例も少なく理論解明もまだまだであるが、バイナリーブラックホールの進化を考える上で重要なパスである。ブラックホール合体時には一度に多くのガスがブラックホールに飛び込んで、ガス降着率はエディントン限界光度を与える臨界降着率をはるかに超えることが予想されるからである。そのような超臨界降着流はどのようなアウトフローを示すのか、またそれはどのような放射特性をもつのか。喫緊の研究課題である。

(5) 以上まとめると、バイナリーブラックホールという切り口でブラックホール研究を新展開することにより、新しいブラックホール像が得られる確かな見通しがでてきた。ブラックホールなどコンパクト天体の合体による重力波放射が近未来に検出されることが濃厚になった今、機は熟しているといえる。

2. 研究の目的

<目的>本研究の目的は、上記の研究背景に鑑み、バイナリーブラックホールに関係したガス降着過程をさまざまなケースに対応して計算し、それに特有な電磁波放射特性を明らかにすることである。このことにより、ブラックホール成長を観測的に検証するための方法論を確立することが最終目標である。

バイナリーブラックホールの進化は、大きく3段階に分けられる：(i) ブラックホールが周囲の星々との力学的摩擦により互いに接近する段階、(ii) 重力的にハードに束縛されたバイナリーを形成する段階、(iii) 両ブラックホールが重力波を放出しながら合体し単一のブラックホールとなる段階である。このうち本計画では、(ii)や(iii)の段階で特徴的な電磁波放射特性を見だしバイナリーブラックホール探査の新指標を提供する。

<特色>巨大ブラックホールの宇宙論的進化は、宇宙進化を理解する上で欠かせないキーワードである。また巨大ブラックホールの合体は、強い重力場のもので一般相対論の実験室という側面ももっている。巨大ブラックホールの合体の検出には重力波が最有力であることは論を待たないが、ノイズの中から微かなブラックホール合体の重力波パターンをクリアに取り出すまでには時間がかかると予想される。ブラックホール合体に特徴的な電磁波放射特性が明らかになれば、ブラックホール合体を重力波とは独立に電磁波で検出することが可能になり、われわれのブラックホール進化に関する知見が飛躍的に向上し、物理学の発展にも大きく寄与するであろう。

3. 研究の方法

(1) バイナリーブラックホールのSPHシミュレーション

バイナリーブラックホールへのガス降着に関する過去の研究をふまえ、以下の要領で、さらに発展させたSPHシミュレーションを行った。

- 二つのブラックホールは質点として扱い、与えられた長半径(a)、軌道離心率(e)の楕円軌道をケプラー運動させる。
- バイナリーブラックホールの共通重心から $rin+0.05a$ の距離にある点からガスを角運動量をもって定常注入し、ブラックホールのつくる重力ポテンシャル中を運動させる。ここで rin は円盤の初期内縁半径である(表1)。ガスの自己重力は無視する。ガスは、与えられた角運動量にみあう半径の円軌道を周回し、やがて外周円盤を形成する。
- 外周円盤中のガスは、粘性の働きで角運動量を失いやがて内縁へと達する。円盤内縁でガスは、ブラックホールからの潮汐力を受けてさらに角運動量を失い、ブラックホールへと落ちてゆく。

ブラックホールへのガス降着率は、バイナリーブラックホールの軌道運動に依存する。軌道が楕円の場合は、軌道周期毎に、ブラックホールが周バイナリーブラックホール円盤に接近するため、降着率は軌道周期で変動する。

- ブラックホールに引き寄せられたガスは、しばらくブラックホールの周りを回転した後、粘性の働きで徐々に角運動量を失いブラックホールへ降着する。

- 今まで行った計算は、等質量ブラックホールのケースのみであった。しかしながら、一般にはブラックホール質量は異なるはずである。そこで、質量比をいくつか変えて、バイナリーブラックホールへの降着過程を調べる。さらに、楕円軌道のケースもいくつか調べる。

- 今まで行った計算では、ブラックホールの軌道と、それを取り巻く円盤が、同一平面上にあることを仮定していた。しかしながら、より一般には、軌道面と円盤面は、互いに異なるはずである。そこで、二つの面のなす角度を変えて(図2)、ガスダイナミクスの違いを調べ、それぞれ光度変動を計算する。

・モデルパラメータを表1に示す。共通パラメータは、軌道長半径 $a=0.01\text{pc}$ 、軌道周期 $P=9.4\text{年}$ 、ブラックホール質量和=一億倍の太陽質量である。

Model	$q \equiv M_2/M_1$	e	r_{in}/a	(β, γ)
A1	1.0	0.0	1.68	(0,0)
A2	1.0	0.0	1.68	$(\pi/6, \pi/2)$
A3	1.0	0.0	1.68	$(\pi/4, \pi/2)$
A4	1.0	0.0	1.68	$(\pi/6, 0)$
B1	1.0	0.5	2.50	(0,0)
B2	1.0	0.5	2.50	$(\pi/6, \pi/2)$
B3	1.0	0.5	2.50	$(\pi/4, \pi/2)$
B4	1.0	0.5	2.50	$(\pi/6, 0)$
C1	0.5	0.5	2.50	(0,0)
C2	0.5	0.5	2.50	$(\pi/6, \pi/2)$
C3	0.5	0.5	2.50	$(\pi/4, \pi/2)$

表1：計算した11モデルのパラメータ

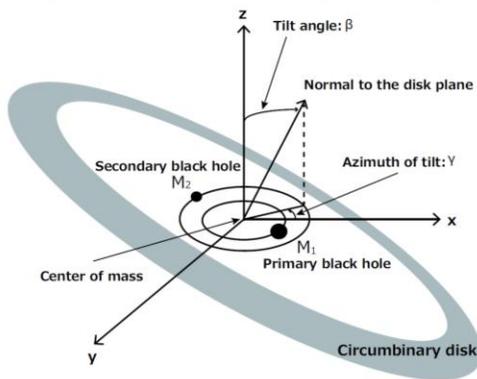


図2：計算した幾何形状と角度パラメータ

(2) ダブルピーク輝線プロファイルのSPHシミュレーション以下の要領で、一つのブラックホールの周りの円盤構造が、相棒のブラックホールによる潮汐力でどう変形するか、SPHシミュレーションで計算し、輝線プロファイル変動を求める。

- バイナリーブラックホールを、ある距離だけ離してケプラー回転させる。軌道離心率は、簡単のため、ゼロとする。

- 重い方のブラックホールの周りに、外からガス粒子を、角運動量をもって入れ込み、その周りを回転させる。

- 重いブラックホールと軽いブラックホールの質量比を $q=0.10$ とすると、重いブラックホールの周りの円盤は潮汐不安定により、楕円に変形して、かつ、その長軸は歳差することが知られている。それを確認し、歳差周期を求める。

- 円盤上各点において、運動するガス粒子がある波長 λ の電磁波を放射するとして、遠方の観測者が観測する輝線プロファイルを計算する。観測者は、ガス運動に起因するドップラーシフトをした波長の光を受け取るため、輝線プロファイルは広がって見える。

- 各点における放射強度は、半径を r として $r^{-3/2}$ に比例すると仮定した。

これらのプロセスに従い、輝線プロファイルが、バイナリーブラックホール軌道運動のフェイズ毎に、どう変わっていくかを逐次計算する。モデルパラメータを表2に示す。ここで M は、二つのブラックホールの質量和である。

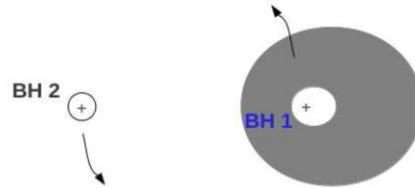


図3：バイナリーブラックホールからの輝線プロファイル計算の概念図

	$M(M_{\odot})$	P (days)	a (pc)	q
Model 1	10^5	7230.875	0.017	0.1
Model 2	10^6	12856.516	0.054	0.1

表2：モデルパラメータ

(3) 超臨界降着流の輻射磁気流体シミュレーション

シングルブラックホールへの超臨界降着流の輻射磁気流体シミュレーションを、計算領域を広げて実行する。

- 計算領域は、従来の計算（半径・高さのサイズ~100シュバルツシルド半径）の5倍の、500シュバルツシルド半径まで広げた。
- 巨大ブラックホールを座標の原点におき、その周りに、弱い磁場で貫かれたトーラスを設置する。初期磁場はポロイダル成分のみで、プラズマ β （ガス圧と磁気圧の比）は10とした（図4上）。
- まず輻射項を入れずに、トーラス中心がブラックホールの周りを4.5回転する間、磁気流体計算を走らせる。その後、輻射に関する項をフルに入れて計算を実行する（図4下）。

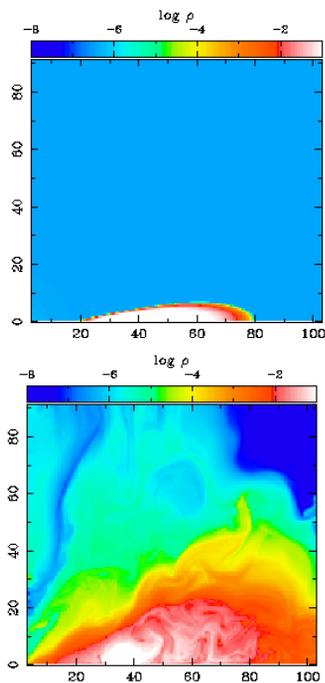


図4 初期トーラス(上)と3.5回転後(下)の密度コントア。青→緑→黄→赤の順で高密度に。

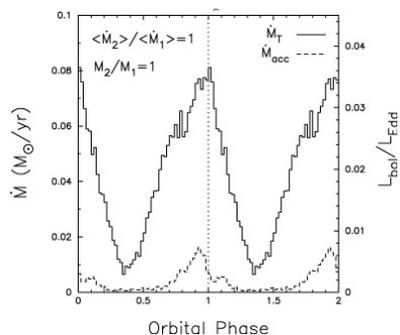


図5 外周円盤からバイナリーブラックホールへの質量輸送率(実線)と、各ブラックホールへ降着率(破線)と対応する光度(右軸)。

4. 研究成果

(1) バイナリーブラックホール系のSPHシミュレーション

まずは、例として等質量ブラックホールで、 $e=0.5$ の軌道離心率をもつケース（モデルB1に対応、但しSPH粒子が少ない計算例）でふるまいを概観する。

各ブラックホールの周囲に形成された円盤の、ブラックホールの軌道運動に伴う構造変化を計算したところ、軌道周期ごとのシングルピークの降着曲線が得られた（図5）。注目すべきは、ブラックホール同士が最も近づく点（フェーズ0）で質量輸送率が最大になる（図5の実線）。ガスのはぎとりは、ブラックホールが最も外周円盤に近づくフェーズ0.5で最大となる。そのはぎとられたガスがブラックホールへと落下するのに、およそ0.5軌道周期の時間がかかるのである。

外周円盤からのガスは、角運動量のバリアをあまり感じずに、かなりの部分がダイレクトに中心ブラックホールへ降着する。こうして粘性時間より短い時間での降着が実現する（図5の破線）。したがって、ブラックホール近傍からでないといけないX線放射も、周期的に変動することが判明した。

図6は、全11モデルの光度（降着率）変動曲線である。左から右へ、モデルA ($q=1, e=0$)、モデルB ($q=1, e=0.5$)、モデルC ($q=0.5, e=0.5$)に相当し、それぞれのコラムで、一番上の曲線が軌道傾斜角0の場合、下にいくに従い、傾斜角が増加している（詳細は表1参照のこと）。

ちょっとパラメータを変えるだけで、多岐にわたる変動が得られる。特に、モデルA1をのぞき、周期振動が得られる。また、軌道周期でシングルピークを示すもの、ダブルピークを示すもの、2つ以上のピークを示すもの、さまざまである。特に、上に示したように、軌道離心率を比較的多くとると、シングルピークを示す傾向がある。それは、周期的にブラックホールが外周円盤に接近することで説明される。一方、離心率は小さいが、傾斜角を増すと、2つかそれ以上のピーク数を示す場合がでてくる。ダブルピークは、傾斜角をあげると、バイナリーブラックホールが、外周円盤に接近する機会が、1周期に2回あることに起因している。それ以上のピークを示すケースについては、その原因は特定できなかった。複雑な円盤-ブラックホール相互作用が起きている可能性がある（モデルA1については外周円盤内の共鳴により長周期振動が表れるとの報告がある）一方で、SPH粒子数が十分でないことに起因する統計的なふらつきである可能性も払拭できない。今後の課題である。以上の結果を、Hayasaki et al. (2013b)にまとめ、発表した。

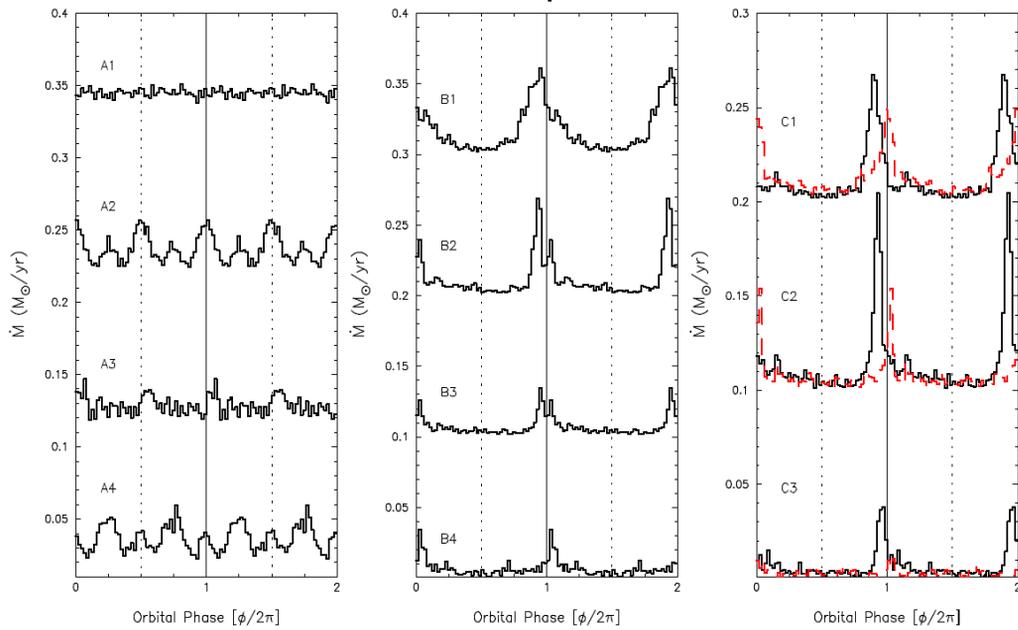


図6：計算した全11モデルの降着率変動曲線。横軸は軌道フェーズである。

(2) ダブルピーク輝線プロファイル

奇妙なダブルピーク輝線プロファイルを、バイナリーブラックホールの潮汐ポテンシャル中を運動する輝線放射ガスの回転運動で説明するモデルをたてSPHシミュレーションを実行した。

図7に、密度コントアの時間変化を示す。これは回転系で示してあり、左の枠外にもう一つのブラックホールが固定されている。楕円にのぼされた円盤の軸が少しずつ動いている。このガスからの輝線プロファイルを図8に示す。予想通り、非対称なプロファイルが表れることが確認できた。このプロファイルは、円盤の歳差運動に伴い、ゆっくりと変化することも確認した (M. Hilmy 修士論文、京都大学)。

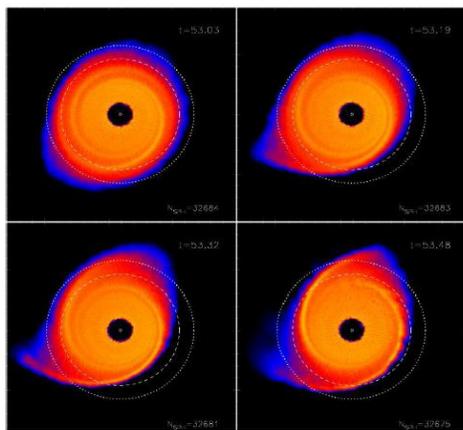


図7 歳差するブラックホール円盤 (密度コントアで示す)

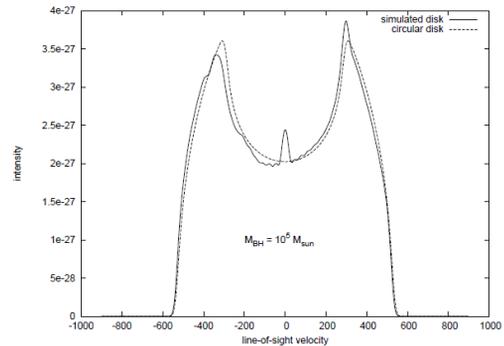


図8 計算された非対称な輝線プロファイル (実線)。点線は軸対称円盤からの対称な輝線プロファイル。

(3) 超臨界降着流の輻射磁気流体シミュレーション

今回、広い計算領域をとったシミュレーションにより、超臨界降着流からのアウトフローに関し、新しい知見が得られた。すなわち、アウトフローは、ブラックホールから200シュバルツシルド半径の距離を過ぎるあたりから、急にクランプ状の不均一構造を示し始めたのである (図9)。

一般に、強い圧力 (すなわち加速度) の下にあるガス層は、加速度方向に密度が低下するとレーリー・テラー不安定となる。すなわち、非均一構造が発生する。しかし、今回、みられたクランプ構造は、それだけではなく、輻射流体力学不安定も関与しているようだ。実際、詳しく調べてみると、この200シュバルツシルド半径というスケールは光学的厚みが1になるスケールに相当し、また、密度の自己相関関数をつくってみるとクランプの幅は ~ 10 シュバルツシルド半径で光学的厚み ~ 1 となることがわかった。

以上の知見から、クランプは、レーリー/テラー不安定が種をつくるものの、最終的なスケール決定には、輻射流体力学的不安定が深く関与していることが疑われる。このクランプ構造の現象について論文にまとめた (Takeuchi et al. 2013)。

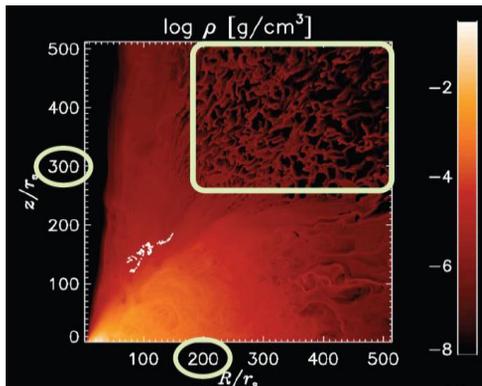


図9 超臨界降着流からうみだされる不均一な(クランプ状の)アウトフロー

5. 主な発表論文等(研究代表者、研究担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計10件、全て査読有)

- ① Takeuchi, S., Ohsuga, K., Mineshige, S. "Clumpy Outflow from Supercritical Accretion Flows", PASJ 65 (2013)
- ② Hayasaki, K., Saitou, H., Mineshige, S. "Binary Black Hole Accretion Flows From a Misaligned Circumbinary Disk", PASJ 65 (2013b)
- ③ Yoshida, T., Isobe, N., Mineshige, S., Kubota, A., Mizuno, T., Saitou, K. "Two Power-Law States of the Ultraluminous X-ray Source IC342 X-1", PASJ 65, id. 48 (2013)
- ④ Hayasaki, K., Yagi, K., Tanaka, T. Mineshige, S. "Gravitational wave diagnosis of a circumbinary disk", PRD. 87, id. 044051(2013a), doi:10.1103/PhysRevD.87.044051
- ⑤ Mineshige, S., Ohsuga, K., Takeuchi, S. "Disk modelling by radiation-magnetohydrodynamic simulations", EPJ Web of Conferences 39, id6005 (2012) doi:10.1051/epjconf/20123906005
- ⑥ Kawashima, T., Ohsuga, K., Mineshige, S., Yoshida, T., Heinzeller, D., Matsumoto, R. "Comptonized Photon Spectra of Supercritical Black Hole Accretion Flows with Application to Ultraluminous X-Ray Sources", ApJ 752, id. 18 (2012) doi: 10.1088/0004-637X/752/1/18
- ⑦ Ohsuga, K., Mineshige, S. "Global Structure of Three Distinct Accretion Flows and Outflows around Black Holes from Two-dimensional Radiation-magnetohydrodynamic Simulations", ApJ 738, id 2. (2011) doi:10.1088/0004-637X/736/1/2

- ⑧ Mineshige, S., Ohsuga, K., "Supercritical accretion and ULXs", Astron. Nach. 332, 402-405 (2011) doi:10.1002/asna.201011509
- ⑨ Takahashi, R., Mineshige, S. "Constraining the Size of the Dark Region Around the M87 Black Hole by Space-VLBI Observations", ApJ 729, 86-94 (2011)doi:10.1088/0004-637X/729/2/86
- ⑩ Takeuchi, S., Ohsuga, K., Mineshige, S. "A Novel Jet Model: Magnetically Collimated, Radiation-Pressure Driven Jet," PASJ 62, L43-47 (2010)

[学会発表] (計10件)

- ① 竹内駿、大須賀健、嶺重慎「超臨界降着流からのクランピーアウトフロー」、日本天文学会春季年会、2013/3/19、埼玉大
- ② 斉藤秀樹、早崎公威、嶺重慎「軌道傾斜角をもつ外周円盤からのバイナリーブラックホールへの降着流」、2013年日本天文学会春季年会、2013/3/18、埼玉大
- ③ Mineshige, S., Ohsuga, K. "Disk modeling by global radiation-MHD simulations", Tidal Disruption events and AGN outbursts, 2012/6/27、ESAC, Madrid, スペイン
- ④ Hilmy, M., 早崎公威、嶺重慎 "Broad line emissions from an accretion disk in low mass-ratio binary supermassive black holes on a circular and eccentric orbit", 2012年日本天文学会春季年会、2012/3/19、龍谷大
- ⑤ 斉藤秀樹、早崎公威、嶺重慎「質量比が小さいバイナリーブラックホールへの降着流と放射特性」、2012年日本天文学会春季年会、2012/3/19、龍谷大
- ⑥ Mineshige, S. "Shakura-Sunyaev Model for Accretion Disks: Before and After" 京都賞シンポジウム、2011/10/31、京都国際会議場
- ⑦ 早崎公威、八木絢外、田中貴浩、嶺重慎「バイナリーブラックホール周囲に形成される外周円盤の重力波観測による検出」、2011年日本天文学会秋季年会、2011/9/21、鹿児島大、鹿児島
- ⑧ Mineshige, S. "Slim-Disk Workshop: Research Projects for the near Future", Slim-Disk workshop, 2011/7/8, CAMK, Warsaw, ポーランド
- ⑨ Hilmy, M. "Broad emission line profiles of rotating disks around binary super-massive black holes in SDSS quasars", 2010年日本天文学会春季年会、2011/3/16、筑波大、つくば
- ⑩ Mineshige, S. "Supercritical Accretion and ULXs", XMM-Newton Workshop on Black Holes, 2010/5/24, ESAC, Madrid, スペイン

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: 7 0 2 2 9 7 8 0