

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間： 2007～2009  
 課題番号： 19740113  
 研究課題名 (和文) 広帯域 X 線スペクトル観測によるブラックホール降着流のエネルギー解放バランスの解明  
 研究課題名 (英文) X-ray spectral study of blackhole accretion disks

## 研究代表者

久保田 あや (KUBOTA AYA)  
 芝浦工業大学・システム理工学部・准教授  
 研究者番号： 00391938

研究成果の概要 (和文)：ブラックホール (BH) は物質を降着する過程で重力エネルギーの解放により、X線ガンマ線として大量のエネルギーを宇宙空間に放出する。本研究では、X線天文衛星「すざく」によって得た、広帯域X線スペクトルに基づき、物質のエネルギー解放が質量降着・質量放出にどのようにバランスするかがどのように変化するかを定量的に評価した。また、降着円盤内部構造を考慮した理論モデルを構築し、実データとの比較・検証から、降着流の理解において、乱流や照り返しなどの要素が重要となってくる可能性を示した。

研究成果の概要 (英文)： Accretion disks around blackholes emit X-ray into the space. We utilized the Suzaku wide band data of several black holes, and evaluated how gravitational energy was released around black holes. We also calculated theoretical (optically thick) accretion disk models, which take disk vertical structure into account, and tested them with the Suzaku data of a high state black hole. Then we found that there is a missing key parameter, which plays an important role in the disk vertical structure.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	600,000	3,700,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

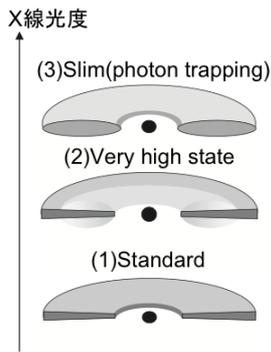
キーワード：X線天文学、ブラックホール、降着円盤、質量降着、質量放出、「すざく」衛星

## 1. 研究開始当初の背景

BH 降着流による X 線  $\gamma$  線放射は、10keV 以下の光学的に厚い降着円盤からの熱的な放射に加えて、1MeV にまで伸びる非熱的な放射が主要な部分を担う。それまでの研究により、光学的に厚い降着円盤については、(1) 標準降着円盤が成立し、放射による重力エネルギー

解放が優勢な状態、(2) 高温もしくは非熱的な電子による逆コンプトン散乱が卓越し、硬 X 線～線放射が優勢となる very high 状態、(3) さらに光子捕獲等により放射が有効でなくなるスリム型降着円盤、という 3 つの状態ではほぼ完全に理解できていた。

残る最大の課題は、1 MeV までの非熱的な硬



X線γ線放射である。これはBH固有の放射であるにも関わらず、特徴的なエネルギースケールを持たないことから、放射の起源および幾何学的配置はいまだに未解明である。一方、ジェットや降着円盤風といった質量

放出現象は、しばしば降着流に付随して報告されており、特にX線スペクトルの共鳴吸収線から示唆される円盤風は、高い降着率状態で定常的に存在し、降着によるエネルギー解放の理解に重要な役割を持つことが明らかになってきた。じっさい、吸収線のエネルギーから吸収体の青方偏移が測られた場合には、降着円盤における質量降着や質量放出にひじょうにより制限が付き、恒星質量BHであるGRS1915+105や4U1630-472、GR01655-40、明るい中性子星のGX13+1 (Ueda et al. 2004, ApJ, 609, 325)などでは質量降着に匹敵するほどの巨大な質量放出が確認されている。こうした観測事実は、円盤風が降着円盤のたんなる付属物ではなく、降着物質の重力エネルギー解放、および降着流の安定性に寄与する重要な要素であることを示していた。

## 2. 研究の目的

ブラックホール (BH) 降着流は、物質を降着する過程で、莫大な重力エネルギーを宇宙に解放する。この解放は、(1) 光学的に厚い降着円盤による熱的な軟X線放射、(2) 降着円盤の周囲に形成されると考えられている非熱的もしくは高温のコロナによる硬X線ガンマ線放射、(3) 円盤風の形成による質量放出という3つの形で行われる。本研究では、「すざく」衛星による広帯域X線スペクトルデータに基づき、理論モデルの検証を行い、質量降着の低い状態から高い状態まで、物質のエネルギー解放がこれら3つにどのようにバランスするかがどのように変化するかを定量的に評価し、これら3つを制御する鍵となる物理量に制限をつけることを目的とした。

## 3. 研究の方法

下記に述べるように、「すざく」衛星の観測による定量的なスペクトル評価と円盤モデルの内部構造を理解するための理論モデルの検証という二つの柱で研究を進めた。

### (1) 観測による定量的評価

私自身が開発に深く携わった「すざく」衛星は、10 keV 以下で良好なエネルギー分解能

と空間分解能をもつX線 CCD カメラ (XIS) と、徹底した低バックグラウンドにより 10-600 keV の硬X線領域に世界最高の高感度を誇る硬X線検出器 (HXD) によって、降着円盤の熱的な放射 (XIS)、非熱的な硬X線放射 (HXD)、高電離の共鳴吸収線 (XIS) を総合的に観測できる画期的な衛星である。本研究では、BH降着流のエネルギー解放バランスを理解するため、質量降着率の低い low 状態、比較的降着率が高く、標準降着円盤がなりたつ high 状態、降着率が非常に高い very high 状態について、「すざく」衛星で詳細なスペクトル観測を行った。その観測データに基づき、低エネルギーの降着円盤、高エネルギーのコロナ、円盤風由来の吸収線のパラメータをX線光度にたいしてどのように成長するかを定量的に評価している。

### (2) 降着円盤構造の理解

光学的に厚い降着円盤は、高降着率状態において、エネルギー解放の主要な部分を担い、Shakura Sunyaev (1973) による標準降着円盤モデルは high 状態に観測される円盤スペクトルを非常に良く再現することが明らかになっている。しかし、標準降着円盤モデルが不安定となる理論予測と現実の安定な円盤との矛盾に見られるように、円盤の内部構造自体の正確な理解は実現されていない。円盤の不安定性は円盤周辺の高温度コロナの生成とも深く関わることから、円盤内部を理解することは今後のブラックホール研究に欠かせない。本研究では、観測データの解析と並行し、降着円盤の理論研究者らと協力し、降着円盤の詳細な理論計算を行い、理論モデルを観測データにたいして検証を行っている。

## 4. 研究成果

### (1) ブラックホール降着流の総まとめ

イギリスの C. Done および M. Gierlinski と共同で BH からの X 線放射に関するレビュー論文を執筆し、Astronomy and Astrophysics Review に招待論文として掲載された (論文⑩)。本論文では、観測される降着円盤からの軟X線放射、高温および非熱的コロナからの硬X線放射を理論描像と照らしあわせ、その放射機構を 2007 年までの観測と理論に照らして総まとめし、現在、ブラックホールX線観測の基本となる論文の一つとして広く参照されている。

### (2) 低降着流状態のブラックホール

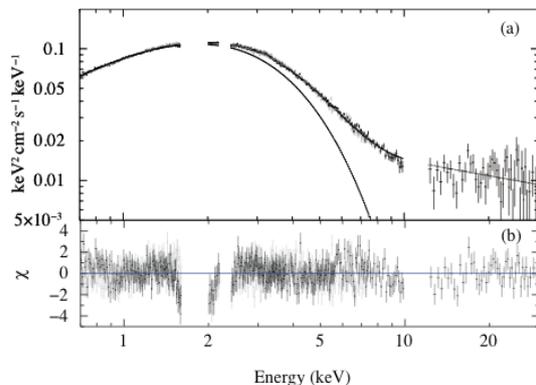
「すざく」衛星のサイエンスワーキンググループで観測した二つの恒星質量 BH、GRO J1655-40、Cygnus X-1 の解析をすすめ、査読付き論文として牧島らと共に共著で出版した (論文⑦⑨)。これらの論文では硬X線放射の詳細を理解するとともに、「すざく」衛

星搭載の硬 X 線検出器による解析手法の道筋をたてることができた。特に、後者の論文では逆コンプトン散乱を担う高エネルギー電子が 2 温度モデルで記述できることを示し、低質量降着状態のブラックホールのスペクトルのひな形を得ることができた。

### (3) 臨界降着流状態のブラックホール

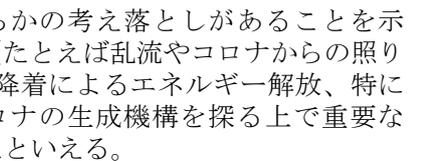
Very high 状態は高エネルギーコロナと低エネルギー円盤の両者が重要な役割を果たす状態である。このような状態は、「すざく」の精度のよい広帯域スペクトル観測が鍵となった。「すざく」が観測した very high 状態は GRS1915+105 を除けば、GX339-4 という天体のみであるが、山田らとともにこの観測データに基づき、very high 状態の円盤とコロナの幾何学的配置を決定しつつある (論文②および、準備中の論文)。

### (4) 標準降着円盤の内部構造



PI として「すざく」で観測を行った BH 天体 LMC X-3 の high 状態の観測データ (上図) に基づき、Davis らとともに円盤内部構造の詳細な理論計算を行った。得られたスペクトルから降着円盤の内部構造を精査した結果、理論的に考えられる吸収端構造 (下図) が観測データには

全く存在しないことを示しはじめて示した (論文①)。これは現在我々が標準的に用いている標準降着円盤の理解にお



いてなんらかの考え落とししがあることを示しており (たとえば乱流やコロナからの照り返し等)、降着によるエネルギー解放、特に円盤とコロナの生成機構を探る上で重要な知見を得たといえる。

### (5) 円盤風の生成要因

(4) で述べた LMC X-3 の観測では、この天体

が典型的な high 状態であるにも関わらず、円盤風由来と考えられる吸収線が検出されないことを示した。この結果から、円盤風形成が単に質量降着率によって決まるものではないことが明らかになり、円盤風による質量放出には、元素組成比、磁場といった降着率以外の要素が重要な役割を果たす可能性が高まった。

(6) 超光度 X 線天体と中質量ブラックホール  
超光度 X 線天体は恒星質量 BH から超巨大質量 BH への進化を理解する上で重要である。磯部、宮脇らとともに、二つの超光度 X 線天体 (ULX) NGC2403 source 3 および M82 X-1 のすざくの観測から、ULX でも恒星質量 BH と同様に状態遷移をすること、また逆コンプトン散乱が重要であることを示し (論文④⑤)、BH の連続スペクトルを理解する上で貴重な結果を得ることができた。

### 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 10 件)

- ① Kubota, Aya, Done Chris, Davis Shane W., Dotani Tadayasu, Mizuno Tsunefumi, Ueda Yoshihiro, Testing Accretion Disk Structure with Suzaku Data of LMC X-3, The Astrophysical Journal, Vol. 714, pp. 860-867 (2010) 査読あり
- ② Yamada, S.; Makishima, K.; Uehara, Y.; Nakazawa, K.; Takahashi, H.; Dotani, T.; Ueda, Y.; Ebisawa, K.; Kubota, A.; Gandhi, P." Is the Black Hole in GX 339-4 Really Spinning Rapidly?" The Astrophysical Journal Letters, Volume 707, Issue 2, pp. L109-L113 (2009) 査読あり
- ③ Terashima, Yuichi; Gallo, Luigi C.; Inoue, Hirohiko; Markowitz, Alex G.; Reeves, James N.; Anabuki, Naohisa; Fabian, Andrew C.; Griffiths, Richard E.; Hayashida, Kiyoshi; Itoh, Takeshi; Kokubun, Norihide; Kubota, Aya; Miniutti, Giovanni; Takahashi, Tadayuki; Yamauchi, Makoto; Yonetoku, Daisuke, "X-Ray Spectral Variability of the Seyfert Galaxy NGC 4051 Observed with Suzaku" Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol. 61, No. SP1, pp. S299-S316 (2009) 査読あり
- ④ Isobe, Naoki; Makishima, Kazuo; Takahashi, Hiromitsu; Mizuno, Tsunefumi; Miyawaki, Ryouhei; Gandhi, Poshak; Kawaharada, Madoka; Senda,

Atsushi; Yoshida, Tessei; Kubota, Aya; Kobori, Hiroshi, "Spectral Transitions of an Ultraluminous X-Ray Source, NGC 2403 Source 3" Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.61, No.SP1, pp.S279--S289(2009) 査読あり

- ⑤ Miyawaki, Ryohei; Makishima, Kazuo; Yamada, Shin'ya; Gandhi, Poshak; Mizuno, Tsunefumi; Kubota, Aya; Tsuru, Takeshi G.; Matsumoto, Hironori, "Suzaku Observations of M 82 X-1 : Detection of a Curved Hard X-Ray Spectrum" Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.61, No.SP1, pp.S263--S278(2009) 査読あり
- ⑥ Torii S. (32名), Kubota, A, (他46名), "The CALET mission on the ISS" Proceedings of the SPIE, Volume 7021, pp. 702114-702114-11 (2008)
- ⑦ Makishima, Kazuo; Takahashi, Hiromitsu; Yamada, Shin'ya; Done, Chris; Kubota, Aya; Dotani, Tadayasu; Ebisawa, Ken; Itoh, Takeshi; Kitamoto, Shunji; Negoro, Hitoshi; Ueda, Yoshihiro; Yamaoka, Kazutaka; "Suzaku Results on Cygnus X-1 in the Low/Hard State" Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.60, No.3, pp.585-604 (2008) 査読あり
- ⑧ Isobe, Naoki; Kubota, Aya; Makishima, Kazuo; Gandhi, Poshak; Griffiths, Richard E.; Dewangan, Gulab C.; Itoh, Takeshi; Mizuno, Tsunefumi, "Discovery of a Bright Transient Ultraluminous X-Ray Source, Suzaku J1305-4931 in NGC4945" Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.60, No.SP1, pp.S241--S250(2008) 査読あり
- ⑨ Takahashi, Hiromitsu; Fukazawa, Yasushi; Mizuno, Tsunefumi; Hirasawa, Ayumi; Kitamoto, Shunji; Sudoh, Keisuke; Ogita, Takayuki; Kubota, Aya; Makishima, Kazuo; Itoh, Takeshi; Parmar, Arvind N.; Ebisawa, Ken; Naik, Sachindra; Dotani, Tadayasu; Kokubun, Motohide; Ohnuki, Kousuke; Takahashi, Tadayuki; Yaqoob, Tahir; Angelini, Lorella; Ueda, Yoshihiro; Yamaoka, Kazutaka; Kotani, Taro; Kawai, Nobuyuki; Namiki, Masaaki; Kohmura, Takayoshi; Negoro, Hitoshi" Low/Hard State Spectra of GRO J1655-40 Observed with Suzaku" Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.60, No.SP1, pp.S69--S84 査読あり
- ⑩ Done Chris, Gierliński Marek, Kubota, Aya, Modelling the behaviour of

accretion flows in X-ray binaries. Everything you always wanted to know about accretion but were afraid to ask, The Astronomy and Astrophysics Review, Vol.15, pp.1-66 (2007) 招待論文

[学会発表] (計1件)

- ① 久保田あや、吉田健二、Chris Done、堂谷忠靖、上田佳宏、水野恒史、大須賀健、「すざく」による LMC X-3 の観測とブラックホール降着円盤モデルの検証、日本天文学会秋季年会、2009年9月 山口大学

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

久保田あや (KUBOTA AYA)

芝浦工業大学・システム理工学部・准教授

研究者番号：00391938

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：