

機関番号：13902

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2010

課題番号：19540282

研究課題名(和文) ブラックホール磁気圏における高エネルギー輻射発生機構

研究課題名(英文) High-energy Radiation Generation in Black Hole Magnetosphere

研究代表者

高橋 真聡 (TAKAHASHI MASAOKI)

愛知教育大学・教育学部・教授

研究者番号：30242895

## 研究成果の概要(和文)：

活動銀河中心核，コンパクトX線天体，ガンマ線バーストにおける「超高エネルギー放射機構」，その活動性の源としての「ブラックホール・エンジン」について，一般相対論的磁気流体力学の枠組みで研究した。具体的にはブラックホール周りの磁気圏について，曲がった時空と周辺磁気プラズマとの相互作用について研究した。特にブラックホール磁気降着流の条件を整備し，衝撃波発生条件を明らかにした。興味深い結果として，「衝撃波形成によってブラックホール回転エネルギーが輻射エネルギーに転換可能」であることを示した。

## 研究成果の概要(英文)：

I have studied the mechanism of 'ultra-high-energy radiation' originated near a black hole (BH). I have also discussed a model of BH engine as the source of activity for their astronomical objects in the framework of general relativistic magneto-hydro dynamics (GRMHD). In this research, specially, I have made clear the conditions for the GRMHD accretion onto a BH, and the conditions for the GRMHD shock in accretion. I showed a very interesting result that the extracted energy of the rotating BH by electromagnetic process can convert to the thermal energy at the shock front.

## 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	330,000	1,430,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数理系科学

科研費の分科・細目：物理学，素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ブラックホール，一般相対論，磁気流体力学，磁気圏，活動銀河核，ガンマ線バースト，衝撃波，高エネルギー輻射

## 1. 研究開始当初の背景

活動的銀河中心核，コンパクトX線天体，ガンマ線バースト現象は，その領域のサイズに比して膨大なエネルギーを放出している。また，非常に短いタイムスケールの時間変動を示す。これらの天体のいくつかにおいては，実際に膨大な質量の集中も観測されており，

これら天体の活動性の背景にブラックホールの存在（現状では「ブラックホール候補天体」と呼ばれる）が示唆されている。従来の研究においては，非相対論の枠組みにおける流体力学（近年では輻射流体）が駆使されてきた。

本研究では，この強重力の極限的環境

を生み出す「ブラックホール」について、本当に存在するのか、またどのような天体現象を発現しうるのか、についての研究を進めた。既に先人たちの研究により、実際に様々な天体観測から、ブラックホール“候補”の存在は指摘されている。しかしそれらは、いまだ間接的な状況証拠と言わざるを得ず、“ブラックホールの時空構造”そのものの解明に迫るものではない。いまや一般相対論による扱いが不可欠な段階に来ており、この分野の整備が不可欠となっている。

一方でまた、強重力下の時空構造の天体観測的解明は、「一般相対論の検証」とも密接に関連し、天文学と物理学の両面において重要なテーマなのである。

## 2. 研究の目的

ブラックホール周りの時空情報を観測的手法により得るための理論的準備を行う。この目的のため、ブラックホール近傍での高エネルギー輻射の生成（実際の観測量となる）について研究した。第一段階目標としては、ブラックホールのごく近傍に、高温プラズマ領域が形成可能か否かを明らかにする。そのような領域が可能であれば、そこからの高エネルギー輻射の放射が期待できることになる。次の段階としては、高温プラズマ領域の性質・発生条件について調べることになる。さらには、安定性／不安定性の解析により時間変動の周期を探る、および期待される放射スペクトルについての考察、という道筋を設定した。

本研究では、第一段階目標のため、ブラックホールへの磁気流体流中に生じる衝撃波についての理論モデルを構築した。さらに、その形成の条件等について明らかにした。

## 3. 研究の方法

(1) 一般相対論的磁気流体をブラックホール時空に適用して、ブラックホールを取り巻く磁気プラズマがどのように降着するかを研究を進展させる。ブラックホールへの降着流は、ブラックホールの重力によって加速され、磁気音速点を通過した後に（亜音速から超音速へと加速された後に）事象の地平面を通過しなければならない。ブラックホール降着流解のための基本方程式（定常解）は、磁気音速点にて発散するという数学的構造をもつため、物理的な降着流解を記述するためには、発散を押さえるための「臨界条件」が課せられることになる。この臨界条件は、降着流解のパラメータに制限を与えることになる。その条件を明らかにし、物理的意味付けを考察することが本研究の第一段階となる。

(2) 上記の磁気音速点を通過した磁気降着流に対して、衝撃波形成のための条件（ランキン=ユゴニオ条件）を課す。超磁気音速から亜磁気音速に減速した流れは、再び磁気音速点を通過しなければならないので、衝撃波を伴うブラックホール降着流解には更なる制限が課せられる。

(3) 衝撃波を含む定常ブラックホール磁気降着流解を定式化する。求める解は、与えられた時空、与えられた磁場配位の課程の元で、5つのパラメータ（降着プラズマのエネルギー・角運動量・エントロピー・降着率、磁気圏の角速度）で特徴づけられる。

(4) 定式化したシステムに対して、幅広いレンジでのパラメータ・サーチを行い、定常解が存在する条件を明らかにする。

(5) 衝撃波面に生じる高温プラズマに対して、その性質を探る。衝撃波の強さ、温度上昇、磁化率の変化など。

(6) 安定性についての考察を行い、観測されている時間変動との擦り合わせについて検討する。具体的には、定式化した公式を線形化し、安定性／不安定性について評価する。また、数値シミュレーションによって衝撃波面のダイナミクスについて研究する（共同研究が必要）。

(7) 高温プラズマ領域の温度、密度、磁場強度についてのモデルを構築し、期待される輻射のスペクトルを評価する。また、重力レンズ効果を加味し、発生した輻射のうちどの程度が（ブラックホールに吸い込まれずに）遠方の我々に対する観測量となりうるかを見積もる。

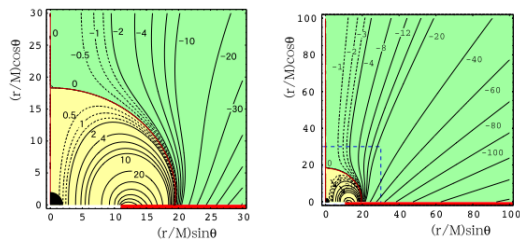
## 4. 研究成果

研究の方法「(1)ブラックホールへの遷音速磁気降着流解における磁気音速点での臨界条件の解析」について、どのような物理量をもつ降着流がブラックホールへと降着可能となるか明らかにした。加速され亜音速から超音速に遷移する磁気降着流（遷磁気音速流）を記述するための解には、いくつかの物理パラメータ（エネルギー、角運動量、磁気圏角速度、ガス降着率、エントロピー、磁場形状、など）が含まれる。磁気音速点での臨界条件は、これらのパラメータに制限を与えるのだが、従来の解析手法においては、遷磁気音速流解を得るために、非常に煩雑なパラメータ・サーチが必要であった。我々は、＜論文1＞で、磁気音速点での発散を方程式内に繰り込む手法を開発し、煩雑な手段無しに磁気音速流解を発見することに成功した。これにより、どのような条件で磁気プラズマがブラックホールに降着可能かを明らかにした。降着プラズマは、質量エネルギーと同時に角運動量をブラックホールに持ち込むが、それによるブラックホールのスピン（自転速

さ)の進化についても議論した。ブラックホールのスピンの実際の進化については、プラズマの落とし方、すなわち降着ガス円盤モデルとの擦り合わせが必要となるが、我々の研究は、ブラックホール周りの降着円盤への内側の境界条件についての制限を与えることに相当する。

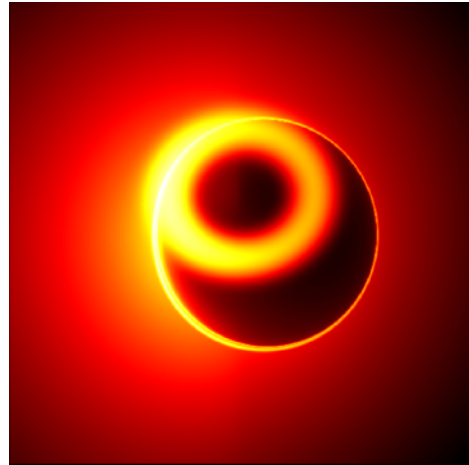
研究の方法「(2)ブラックホール磁気降着流中の衝撃波発生条件」および「(3)衝撃波発生を伴う降着流解の定式化」については、その詳細を、<論文1>の解析技法により、臨界条件を繰り込んだ表式として執筆中である(本研究の研究期間終了時)。衝撃波の発生の解析は、我々のグループで従来から進めているのだが、臨界点の取り扱いについての新手法の導入により、磁気降着流に生じる衝撃波発生についての解析が大いに進んだ。

その結果、ブラックホールの回転エネルギーを電磁氣的機構によりブラックホール外部の磁気圏に抽出し、そのエネルギーを衝撃波面でプラズマの熱エネルギーとして解放するシナリオが構築できた。加熱されたプラズマによる高温領域からは、降着円盤モデルでは説明できない超高エネルギー輻射を生み出す可能性がある。ブラックホール磁気圏における磁場分布には未だ明らかにされていない点もあるのだが、現状での理解では、降着円盤表面とブラックホールとをループ状に繋ぐ形状(下図:Tomimatsu & Takahashi,



2001)がもっともらしい。この場合、衝撃発生条件を満たす磁力線がある特定のものがあつたとすると、その磁力線に関してのみ、高温プラズマ領域が出現する。これはあたかも、「オーロラ」のような形体であろう(右上図参照)。オーロラ現象は地球のみならず、木星や土星でも観測されており、磁気圏活動性の一つの現れである。ブラックホールの場合にもオーロラが可能であり、しかもそのエネルギー源がブラックホールの自転に由来しているというアイデアは興味深く、<論文4>として公表した。

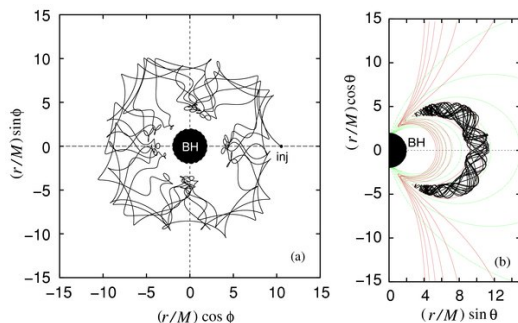
磁気圏における活動性には様々なものがあるが、<論文2>では「ブラックホール磁気圏に捕らえられたプラズマの運動」について、その奇妙な振る舞いを調べた。地球磁気圏の場合も、「バンアレン帯」が高エネルギープラズマを磁気圏内に補足しているが、ブラックホール磁気圏においても同様の構造が可能である。ただし、磁気圏内でのプラズ



ブラックホール・オーロラ。ブラックホール磁気降着流が作る衝撃波面が、オーロラ状に輝く(共同研究者:高橋芳太氏によるシミュレーション)

マが閉じ込め領域は(降着円盤が作る)磁場の形状に依存する。興味深い結果としては、磁場により補足されたプラズマ(荷電粒子)の運動がカオス軌道になっていたことが挙げられる(下図参照)。このことは磁場の存在によりブラックホール時空がもつ対称性が破られることに由来していた。それ自体はカオス現象の発生機構を思えば、当然のようにも思えるのだが、より興味深い事象として、ブラックホールの自転効果が(磁場の存在により破れた)対称性を復活させる傾向を生み出すことを発見した。すなわち、自転速度の遅いブラックホール磁気圏の場合においては、初期条件によらず、荷電粒子の運動はカオスを示すのだが、自転速度が速い場合には(時空の引きずり効果が有効に効いているときには)、カオス軌道が現れる頻度は減り、レギュラー軌道が増えてくる。時空の引きずりの効果を理解する上で興味深い結論と言える。

ブラックホール磁気圏においてカオス軌道が生じることについて、天文学の視点からは、高エネルギー宇宙線の発生が示唆される。ブラックホール近傍ということで、エネルギーの源には困らないが、特定の粒子のみが極めて膨大なエネルギーを獲得して超高エネルギー宇宙線となりうるのかについては定



ブラックホール磁気圏中の荷電粒子の運動。カオス軌道になっている。(Takahasi & Koyama 2009)

かではない。通常の場合、個々の荷電粒子は他の荷電粒子と衝突することでエネルギーを交換し、マクスウェル分布をするだろう。しかしながら、カオス軌道が実現している状況においては、パワー・ロー的な分布を示すことが核融合プラズマの研究により示唆されている。ブラックホールの場合の研究は今後の課題であるが、パワー・ロー分布を示すのであれば、超高エネルギーにまで加速された荷電粒子が相当数存在すると期待できる。ブラックホール磁気圏におけるカオス軌道の研究は、新たなテーマ（ブラックホール環境での宇宙線起源）を喚起するかもしれない。

さて、ブラックホール降着流における衝撃波モデルにおける次のステップとしては、解放された熱エネルギー（および電磁場エネルギー）が衝撃波面や降着流において、どのような輻射に転換するかモデル構築することになる。研究の方法(4)および(5)の内容については、通常の衝撃波から類推できる範疇の結果が得られているものの（現在論文執筆中）、よりいっそうの理解を導くためには、研究の方法(7)レベルの「降着円盤モデルとの融合」「ブラックホール磁気圏の数値シミュレーション」へと拡張する必要がある。これらは今後の課題として、継続的に研究を進展させる必要がある。

なお、研究の方法「(6)衝撃波の安定性／不安定性（時間変動）」については、本研究で導出した磁気流体降着流の基礎方程式系を線形摂動の手法により取り扱い、現在解析中である。

観測的ブラックホール時空研究のためには、本研究と他の関連分野との研究の融合も不可欠になる。この目的のため、勉強会や学会シンポジウムを企画し、総括的研究分野への橋渡しを推進した。観測家との交流も進み、ブラックホールの直接観測的検証に向けての計画作りを進めている。

## 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 高橋真聡, ブラックホール磁気圏, 科学 (岩波書店), 81, 2011, 327-329, 査読無
- ② Rohta Takahashi & Masaaki Takahashi, Anisotropic radiation field and trapped photons around the Kerr black hole, *Astronomy & Astrophysics*, 513, 77-84, 2010, 査読有
- ③ Masaaki Takahashi & Rohta Takahashi, Black Hole Aurora Powered by a Rotating Black Hole, *Astrophysical Journal Letter*,

- 714, L176-L180, 2010, 査読有
- ④ 高橋真聡, ブラックホール磁気圏と時空, *天文月報* (日本天文学会), 1, 8-19, 2010, 査読無
- ⑤ Masaaki Takahashi & Hiroko Koyama, Chaotic Motion of Charged Particles in an Electromagnetic Field surrounding a Rotating Black Hole, *Astrophysical Journal*, 693, 472-485, 2009, 査読有
- ⑥ Masaaki Takahashi & Akira Tomimatsu, Constraints on the Evolution of Black Hole Spin due to Magneto-hydrodynamic Accretion, *Physical Review*, D78, 023012 (1-16), 2008, 査読有
- ⑦ Numerical Study of Stationary Black Hole Magnetosphere-Toward Blandford-Znajek mechanism by fast rotating black holes”, Y. Takamori, M. Takahashi 5 番目, 他 4 名, *AIP Conf. Proc.* (2008). 査読無

〔学会発表〕（計 28 件）

- ① 三好真, 高橋真聡, 他 27 名, サブミリ波 VLBI による強重力場での相対論検証計画, 日本天文学会, 2011 年 3 月 19 日, 筑波大学
- ② 高橋真聡, Observational Study of Black Hole Spacetime in Galactic Center, Sgr A\* (招待講演), 国立天文台研究集会「銀河中心 Sgr A\* の観測的ブラックホール時空研究」(招待講演), 2011 年 3 月 7 日, 東京大学駒場
- ③ 高橋真聡, アルフェン点と負エネルギー BH 降着流 (招待講演), 「第 4 回ブラックホール磁気圏勉強会」研究会, 2011 年 2 月 28 日, 大同大学
- ④ Masaaki Takahashi, Black Hole Aurora and Energy Extraction from a Black Hole, The Ins and Outs of Black Hole, 2010 年 11 月 15 日, アナポリス (米国)
- ⑤ 高橋真聡, ブラックホール・オーロラとエネルギー引き抜き (招待講演), 研究会「重力・幾何・素粒子」, 2010 年 9 月 28 日, 大阪市立大学
- ⑥ 三好真 & 高橋真聡, 他 19 名, 最早ブラックホール結像装置: キャラバン-sub3, 日本天文学会, 2010 年 9 月 24 日, 金沢大学
- ⑦ 三好真 & 高橋真聡, 他 19 名, 最早ブラックホール結像装置: キャラバン-sub2, 日本天文学会, 2010 年 3 月 25 日, 広島大学
- ⑧ 高橋真聡, ブラックホール磁気降着流における等温衝撃波形成, 日本天文学会, 2010 年 3 月 25 日, 広島大学
- ⑨ 高橋真聡, 一般相対論の直接検証: ブラックホール・シャドールの直接撮像と重力波の検出: まとめと総合質疑討論 (招待講演), 日本物理学会, 2010 年 3 月 21 日,

- 岡山大学
- ⑩ 高橋真聡, ブラックホールへの定常降着流, 「第3回ブラックホール磁気圏勉強会」研究会(招待講演), 2010年3月1日, 大阪市立大学
- ⑪ Masaaki Takahashi, 'Black Hole Aurora' powered by a Rapidly Rotating Black Hole, Probing Strong Gravity near Black Holes, 2010年2月15日, ブラハ
- ⑫ Masaaki Takahashi, Black Hole Aurora powered by a Rotating Black Hole, The Nineteenth Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 2009年12月2日, 立教大学
- ⑬ 高橋真聡, ブラックホール磁気圏, 宇宙磁気流体力学のフロンティア(招待講演), 2009年11月17日, 京都大学
- ⑭ 高橋真聡, 相対論的宇宙プラズマシンポジウム: 一般相対論的理想MHDとブラックホール磁気圏(招待講演), 日本物理学会, 2009年9月26日, 熊本大学
- ⑮ 三好真 & 高橋真聡, 他6名, ブラックホール解像望遠鏡「ほらいずん」によるその観測的時空研究, 日本物理学会, 2009年3月30日, 立教大学
- ⑯ 高橋真聡, ブラックホール磁気圏における荷電粒子のカオスの挙動, 日本物理学会, 2009年3月30日, 立教大学
- ⑰ 三好真, 高橋真聡, 他6名, 銀河中心ブラックホール Sgr A\* を解像する南半球サブミリ波 VLBI ネット: ほらいずん望遠鏡構想, 日本天文学会, 2009年3月24日, 大阪府立大学
- ⑱ 高橋真聡, 「ブラックホール時空」観測に向けて, 日本天文学会, 2009年3月25日, 大阪府立大学
- ⑲ 高橋真聡, ブラックホール磁気圏レビュー, 「第2回ブラックホール磁気圏勉強会」研究会(招待講演), 2009年2月21日, 名古屋大学
- ⑳ 高橋真聡, ブラックホールスピンの決まり方, 「巨大ブラックホール研究会: 最新の動向と課題」研究会, 2009年1月21日, 京都大学
- 21 高橋真聡 & 小山博子, 荷電粒子のカオスの挙動におけるブラックホール・スピンの効果(II), 日本天文学会, 2008年9月13日, 岡山理科大学
- 22 孝森洋介, 高橋真聡, 他, Force-Free ブラックホール磁気圏の数値的な解析 II, 日本物理学会, 2008年3月25日, 近畿大学
- 23 小山博子 & 高橋真聡, 荷電粒子のカオスの運動における, ブラックホールスピンの効果, 日本物理学会, 2008年3月25日, 近畿大学
- 24 高橋真聡, 何が問題なのか? (定常解), 「第1回ブラックホール磁気圏勉強会」

- 研究会(招待講演), 2008年3月1日, 名古屋大学
- 25 Hiroko Koyama & Masaaki Takahashi, Characterization of Chaotic Motion of a Charged Particle in a Kerr Black Hole, JGRG(一般相対論と重力), 2007年12月3日, 名古屋大学
- 26 Masaaki Takahashi & Akira Tomimatsu, Constraints to Evolution of Black Hole Spin due to Magneto-hydrodynamic Accretion, JGRG(一般相対論と重力), 2007年12月3日, 名古屋大学
- 27 Masaaki Takahashi, Chaotic motion of Charged Particles in a Black Hole Magnetosphere, YITP Workshop on Quasi-Periodic Oscillations and Time Variabilities of Accretion Flows, 2007年11月22日, 京都大学基礎物理研究所
- 28 高橋真聡 & 小山博子, 荷電粒子のカオスの挙動におけるブラックホール・スピンの効果, 日本天文学会, 2007年9月28日, 岐阜大学

〔図書〕(計1件)

高橋真聡, 「相対性理論がわかる」, 技術評論社, 2011, (総ページ数) 191

〔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〕

研究会主催・ホームページ等

- ① 「第1回ブラックホール磁気圏勉強会」研究会(2008年3月)を主催
- ② 「第2回ブラックホール磁気圏勉強会」研究会(2009年2月)を主催  
[http://gravity.phys.nagoya-u.ac.jp/~kobayashi/BH\\_Magnetosphere2/Top.html](http://gravity.phys.nagoya-u.ac.jp/~kobayashi/BH_Magnetosphere2/Top.html)
- ③ 日本学術振興会: ひらめき☆ときめきサイエンス「ブラックホール」ってどんな天体?(2009年7月)を開催

[http://www.jsps.go.jp/hirameki/07\\_kako\\_ji/sshi\\_program\\_h21.html](http://www.jsps.go.jp/hirameki/07_kako_ji/sshi_program_h21.html)

- ④. 「第3回ブラックホール磁気圏勉強会」研究会(2010年3月)を主催  
<http://www.phyas.aichi-edu.ac.jp/~takahasi/BHmag2010/>
- ⑤. 物理学会シンポジウム「一般相対論の直接検証: ブラックホール・シャドールの直接撮像と重力波の検出」(2010年3月)を主催  
[http://www.phyas.aichi-edu.ac.jp/~takahasi/GR\\_BH/](http://www.phyas.aichi-edu.ac.jp/~takahasi/GR_BH/)
- ⑥. 日本学術振興会: ひらめき☆ときめきサイエンス「宇宙にブラックホールは実在するのか?」(2010年7月)を開催  
[http://www.jsps.go.jp/hirameki/ht2000\\_jisshi/b-10ht22102.pdf](http://www.jsps.go.jp/hirameki/ht2000_jisshi/b-10ht22102.pdf)
- ⑦. 「第4回ブラックホール磁気圏勉強会」研究会(2011年2月: 大同大学)を主催  
<http://www.phyas.aichi-edu.ac.jp/~takahasi/BHmag2011/>
- ⑧. 国立天文台研究集会「銀河中心 Sgr A\* の観測的ブラックホール時空研究」(2011年3月: 東大駒場)を主催  
<http://www.phyas.aichi-edu.ac.jp/~takahasi/SgrA2011/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高橋 真聡 ( TAKAHASHI MASA AKI )

愛知教育大学・教育学部・教授

研究者番号: 30242895

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: