

## 小特集 宇宙プラズマシミュレーションの現状と展望

# 6. 重力回転プラズマ円盤のグローバルダイナミクス

町田真美

独立行政法人自然科学研究機構 国立天文台理論研究部

(原稿受付: 2007年6月22日)

重力中心を回転するガス円盤(降着円盤)が解放する重力エネルギーは、活動銀河中心核、X線連星、原始星などの様々な天体で観測されるX線放射やジェット等の激しい活動性の起源になっている。本章では、大局的な3次元磁気流体数値実験によって調べた降着円盤の性質について紹介する。さらに数値実験によって新たにわかった機構によって、中心天体がブラックホールであるX線連星の最近のX線観測結果を説明できることも紹介する。

### Keywords:

accretion disk, black hole physics, MHD simulation, magnetic reconnection, x-ray observation

## 6.1 はじめに

原始星・X線連星・活動銀河中心核などは、ジェットやフレア等の激しい活動性を示すことが知られている。これらの活動性は電波からγ線まで幅広いエネルギー帯で観測されている。中心天体の種類やその重力ポテンシャルの深さは様々だが、共通する点は狭い領域から非常に大きなエネルギーが放出されていることである。例えば、非常に遠方にある活動銀河の一つであるクェーサーからは、太陽系程度の大きさ(10<sup>13</sup> m)の領域から毎秒10<sup>39</sup> Wものエネルギーが放出されている。このエネルギーは通常銀河が単位時間あたりに放出する全エネルギーの数百から数千倍に相当する。このように狭い領域から大きなエネルギーを放出する活動性の起源は中心天体の周りを回転しながら落下するガス円盤(降着円盤)中で解放される重力エネルギーにあると考えられている。

回転しているガスを中心に落とすためには、角運動量を外向きに運ぶための摩擦(粘性)が必要になる。降着ガスから角運動量を抜き取る機構は長い間はつきりとしなかったため、降着円盤モデルはガス圧に比例する粘性ストレスを仮定することで構築されてきた[1-4]。1990年代初めに、磁気回転不安定性の重要性が指摘され、角運動量輸送機構についての理解が進化した[5]。その後、行われた3次元磁気流体数値実験は、磁気回転不安定性が磁気乱流を生成し角運動量輸送の起源となりうることを示した。本章では、最近の系内X線連星の観測結果と降着円盤の磁気流体数値実験結果を比較し、X線観測にみられる特徴的な振る舞いを説明できることを示す。活動銀河中心核とX線連星では、ブラックホール質量の差だけスケール変換すれば説明できる共通の性質が多々ある。このため、X線連星の時間進化を知ることで、活動銀河中心核の性質もある程度理解できる。

### 6. Global Dynamics of the Rotating Plasma Disks

MACHIDA Mami

## 6.2 X線スペクトルの特徴と状態遷移

X線衛星によりX線連星に関する詳細な観測結果が得られている。その結果、おおまかに2つのスペクトル状態があることがわかっている。一つは軟X線で放射される降着円盤からの黒体放射成分が卓越するソフト状態である。ソフト状態は黒体放射の重ね合わせで説明できることから、この状態の降着円盤は光学的に厚く幾何学的に薄い円盤(標準降着円盤)であると考えられている。もう一方のスペクトル状態はスペクトル全体が冪分布を示し、数百KeVでカットオフを持つハード状態である。ハード状態の降着円盤は光学的に薄く幾何学的に厚い移流優勢円盤(ADAF)であると考えられている。ハード状態のX線光度は激しい時間変動を示し、数秒の時間間隔でX線ショットと呼ばれるフレア現象がある。また、定常的なアウトフローが観測されることが多いことも知られている。

X線連星の増光(アウトバースト)時には、この2つのスペクトル状態を行き来するスペクトル状態遷移が観測される。最近の観測から、アウトバースト前半のハード状態からソフト状態の遷移の間には、これまでの降着円盤モデルでは説明できない光学的に薄く非常に明るい状態[6-8]があることがわかってきた。図1はソフト状態、ハード状態のエネルギースペクトルの模式図とX線連星のアウトバースト中の時間進化、および降着円盤の熱平衡曲線の模式図である。これらの観測例と対応する降着円盤モデルの数値実験結果を次節で紹介する。

## 6.3 降着円盤の数値実験

### 6.3.1 移流優勢円盤とハード状態

降着円盤の数値実験に基づく研究は放射の効果が無視できる移流優勢円盤から始まった。移流優勢円盤は円盤からの黒体放射成分が見られないことからハード状態に対応し

ていると考えられている。弱い磁場を持つ光学的に薄く高温な回転ガス円盤に、摂動を加えてその後の時間進化を調べた。初期条件として仮定したガス円盤は、ドーナツ型のトーラス形状をしており、中心から距離  $50 r_g$  ( $r_g$ : シュバルツシルト半径, 10太陽質量のブラックホールを仮定した場合には  $1 r_g$  は約 30 km) の所でガス密度を最大とした。この計算では、光速,  $1 r_g$  をそれぞれ基準速度, 基準長さとして規格化している。そのため、10太陽質量のブラックホールを仮定した場合には、10000計算単位時間が実時間の1秒に対応する。

図2は計算結果の一例で、(a)方位角方向,  $4 < r < 10$ ,  $0 < z < 1$  ( $r$  は中心からの距離,  $z$  は鉛直方向高さ) に平均を取った磁気エネルギー, (b)磁気ストレス, (c)  $r=2.5$  で測定した質量降着率の時間発展のグラフである。この結果から、初期に弱い磁場を持つ回転円盤では、回転の時間スケールで成長する磁気回転不安定性によって磁気乱流が生じること、初期に弱い磁場はガス圧と磁気圧の比が10程度になるまで増幅された後、円盤最内縁付近の時間スケールで数百回転時間安定に維持されること、磁気乱流の作る

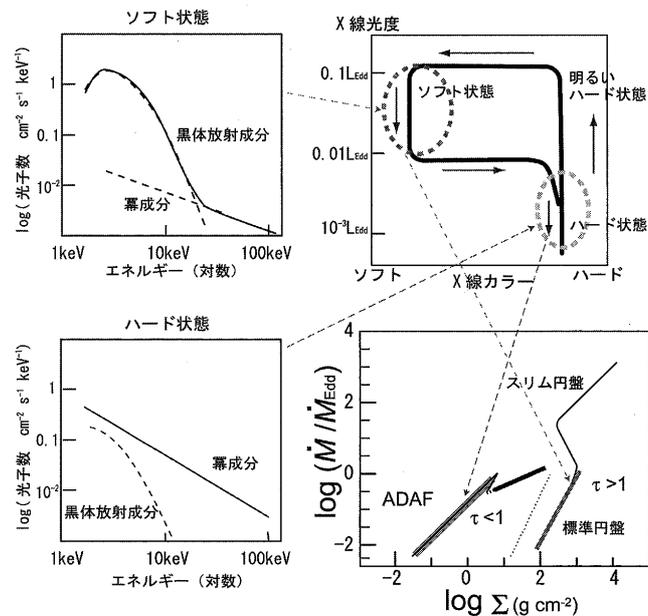


図1 ブラックホール候補天体のエネルギースペクトルとアウトバーストのX線カラー(ハードネス)ー光度関係の模式図。  $L_{\text{edd}}$  はエディントン光度を表す。右下の図は降着円盤の熱平衡曲線の模式図。横軸は表面密度, 縦軸は降着率,  $\tau$  は光学的厚さを表す。破線は対応するX線状態と降着円盤モデルの対応を示している。

磁気応力によって効率的な角運動量輸送が生じること等が明らかとなった[9-11]。また、質量降着率は時間平均するとほぼ一定になるが、短い時間で考えると非常に激しい時間変動を示すことがわかった。これは、ガスは一様に降着するのではなく、間欠的にガス塊となって中心天体に降着することを示している。ハード状態のX線光度は激しい時間変動を示し、そのパワースペクトルは  $1/f^a$  ノイズ的になる。X線光度は磁気リコネクションによって解放される磁気エネルギーの変動によって変化すると仮定して、数値計算結果から得られたジュール加熱率のパワースペクトルを求めたところ、その分布は白鳥座X-1同様  $1/f^a$  分布を示し、加えて10Hz付近に折れ曲がりができること等がわかった(図3)[12]。

ハード状態のその他の観測的特徴として、白鳥座X-1で観測されるX線ショットがある。この現象はX線光度が数十-数百ミリ秒で指数関数的に増光し、その後数十ミリ秒

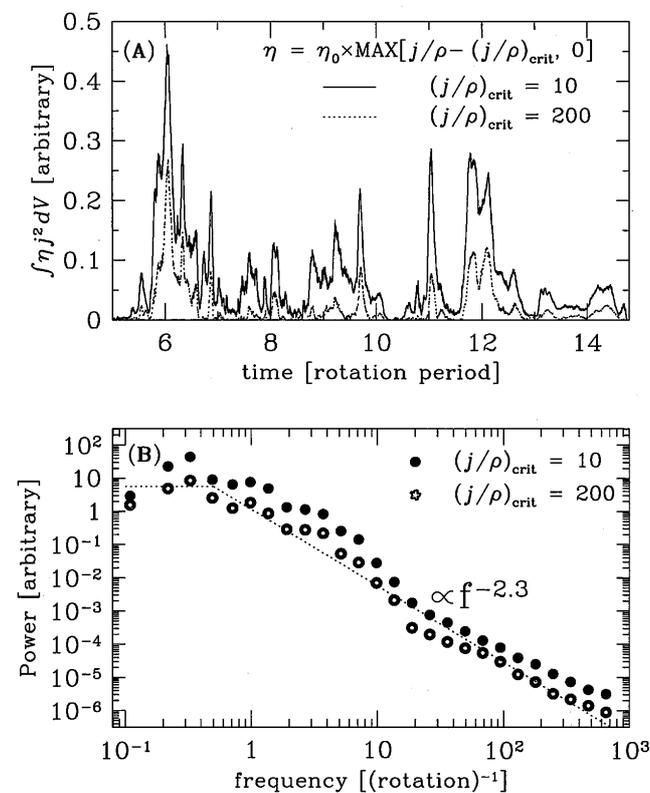


図3 ジュール加熱率の時間進化とそのパワースペクトル[12]。

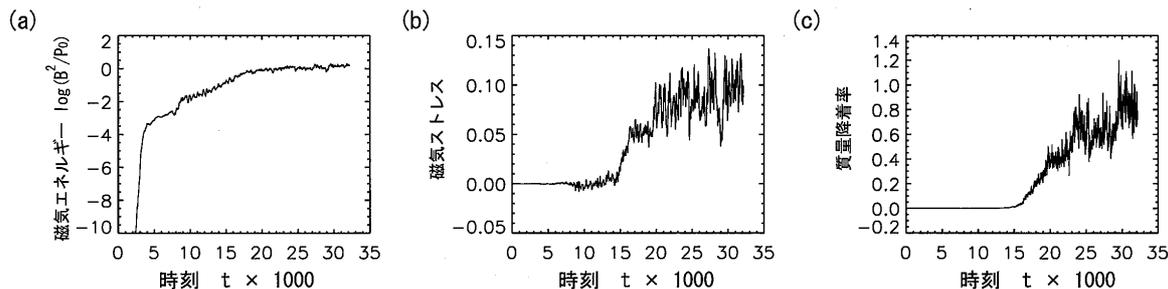


図2 (a)磁気エネルギー, (b)磁気ストレス, (c)質量降着率の時間発展。(a), (b)はともに  $4 < r < 10$ ,  $0 < z < 1$  の領域で方位角方向に平均を取った値を示している。(c)は  $r=2.5$ ,  $0 < z < 1$  の円筒を通過する量を測定して質量降着率を求めている。

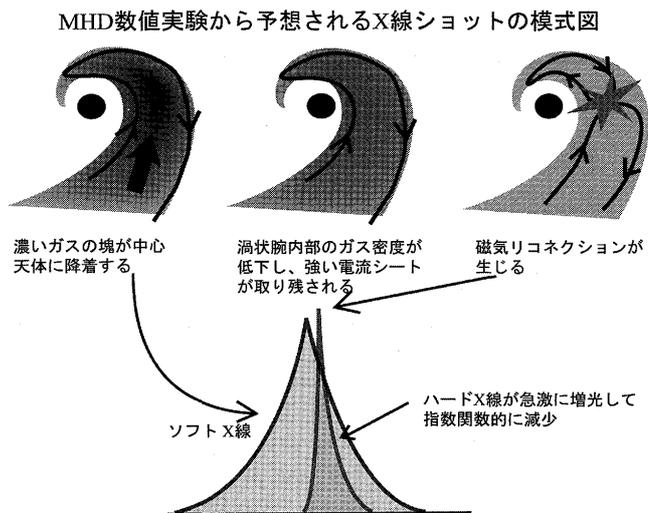


図4 (上)MHD数値実験から予想されるX線ショットの模式図, (下)対応するX線光度の時間進化[24].

で急激に減光する現象で、数秒間隔で起こる。同様のX線光度の増減光がArk564などの狭輝線セイファート銀河でも観測されている[13]。このX線ショットのモデルの一つとして降着円盤最内縁近傍で生じる磁気再結合のモデルがある。図4上に機構の模式図を示す。磁場に凍結した角運動量を失ったガスは磁場を引きずりながら中心に落ち込む。この時、ガス塊の作る渦状構造に沿って磁力線方向が反転するため、非常に強い電流フィラメントができる。ガス塊は降着円盤中を落下する際に軟X線を放出する。ガス塊がブラックホールに完全に吸い込まれると軟X線は減少する。と同時に電流フィラメント内は希薄になるため磁気再結合が生じ硬X線を放出する。観測されるX線ショットはピーク前後で時間対称に見えるが、実際には異なる成因によってX線を放射している複雑な現象であると考えられている[14]。図4下図はガスが中心天体に降着していく際に放射されるX線の時間進化の模式図である。薄い灰色が軟X線のX線スペクトル時間進化を示し、濃い灰色は硬X線を示している。軟X線は中心に降着するガスからの熱放射と考えられるためガス塊の落下にそった比較的長時間の変化をするのに対して、硬X線はガス塊が中心天体に降着した後に生じる磁気リコネクションによって放射されるため、軟X線のピークの後に短時間の変動を生じることを示している。

この他の特徴として、ブラックホールX線連星のハード状態では定常ジェットが存在が示唆されている。数値計算からは、移流優勢円盤では円盤内縁付近より磁気圧駆動型のジェットが形成され、その速度は内縁での回転速度程度であることが示されている[15]。ブラックホール近傍では、ガスの運動は光速の数%に達するため相対論の効果が重要になってくる。この数年で、ブラックホールが回転している場合の降着円盤構造とジェットの関係についても研究が進んできている[16,17]。

### 6.3.2 ハード-ソフト状態遷移と磁気圧優勢円盤

前節でも述べたように、ハード状態からソフト状態への遷移途中にはこれまでに提唱されている円盤モデルには当

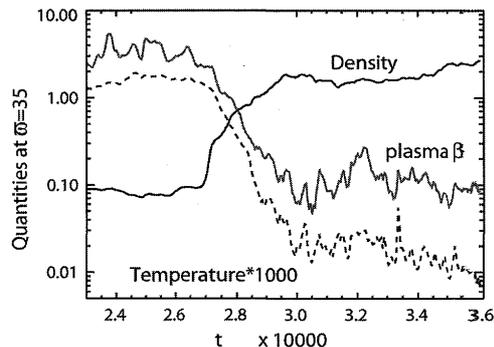


図5 熱不安定になった降着円盤における $r=35$ での方位角方向に平均した密度、温度、プラズマ $\beta$ の時間発展。

てはまらない光学的に薄く非常に明るい中間状態があることが知られている。我々は、ハードな状態からソフトな状態への遷移に着目した3次元MHD数値計算を世界で初めて行い、状態遷移時に観測される非常に明るい中間状態を説明することを試みた[18]。この計算では、光学的に薄い状態からの進化を考えているので光学的に薄い場合の熱制動放射項を冷却項として仮定している。図5は $r=35$ で測定した方位角方向に平均を取った密度、温度、プラズマ $\beta$ (ガス圧と磁気圧の比)の時間進化のグラフである。放射冷却によってガス温度がある程度まで低下すると熱不安定性により降着円盤内部の温度が一気に低下し( $t=27000$ 頃)、鉛直方向に収縮して低温・高密度の状態になる。ガスは磁場と凍結しながら収縮するため円盤内部では磁気リコネクションによって乱流磁場構造から方位角方向に揃った磁場構造が形成されるとともに、磁気圧は上昇していく。図5からもわかるように、 $\beta=0.1$ 程度で円盤の温度低下、磁場強度増幅は飽和して、準定常状態になり磁気圧優勢な低温円盤が形成される。図6はプラズマ $\beta$ の等値面の空間分布

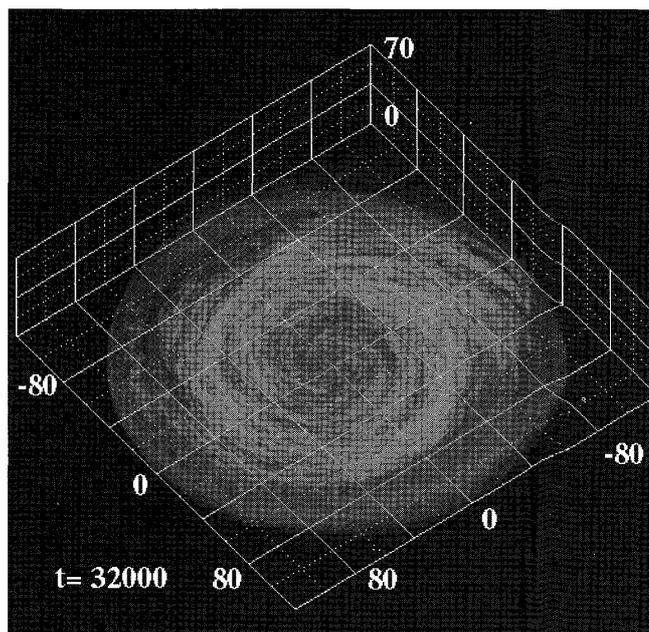


図6 プラズマ $\beta$ の等値面、薄いグレーが $\beta=1$ 、濃いグレーは $\beta=10$ 。

を示した図である。薄いグレーの領域は $\beta = 1$ の面である。この図から $r \geq 20$ の領域で、磁気圧優勢で薄い円盤が形成されていることがわかる。また、磁気圧優勢領域を取り巻くようにガス圧優勢な領域が分布している。この領域は磁気圧優勢円盤と比べると一桁以上高温のコロナになっている。また、 $r < 10$ の領域では、高温でガス圧優勢な状態が残っていることもわかる。この磁気圧優勢円盤は熱的・力学的に安定な平衡解であり、これまで知られていない新たに発見された安定解である。また、磁気圧優勢円盤は光学的に薄い状態にあるのでスペクトルは寡分布を示すハード状態と同じ傾向を示すがその明るさはエディントン光度の10%以上にまで上昇することが可能であることも示された[19]。

#### 6.4 まとめと今後の課題

本稿では、X線連星で観測されるスペクトル状態にはそれぞれ、そのスペクトルを説明できる降着円盤モデルが存在すること、数値実験によってその非線形進化を追跡できるようになってきていることを紹介した。ここでは、X線連星を例としたが、これは中心ブラックホール質量が小さいゆえに系の時間進化が早く進むことにより、多くの詳細な観測例が揃ってきているためである。しかし、数値計算で進化を追っている時間は、10太陽質量のブラックホールを仮定した場合には数秒程度に相当する時間にすぎない。X線連星のアウトバーストの場合には1回のアウトバーストに数十から数百日の時間がかかり、数値計算ではまだアウトバースト全体の進化を一度に追うことはできない。また、ここではまだ考慮していない熱伝導などもソフト状態では重要になってくると考えられている。

X線観測では、寡スペクトルを示すハード状態よりも、降着円盤からの黒体放射の重ね合わせでそのエネルギースペクトルを説明することができるソフト状態が観測されることが多い。観測されやすいソフト状態であるが、それに対応する標準降着円盤の数値実験はなかなか行われてこなかった。これにはいくつか理由がある。第一に標準降着円盤は幾何学的に薄い構造をしているため、円盤構造を解像するために非常に細かいグリッドが必要になってくる。また標準降着円盤は光学的に厚いために、円盤内部の構造を考えるとときに輻射輸送を解かなくてはならなかった。この数年、Flux limited diffusion近似を用いた輻射を考慮した磁気流体数値実験による、光学的に厚い降着円盤の研究が始まってきたところである[20-22]。これらの計算では降着円盤の一部を取り出した3次元の局所的な数値実験を行っている。その結果、輻射圧優勢な状態でも磁気乱流による角運動量輸送は有効であることや、ガス圧優勢な標準降着円盤の周りに磁気圧優勢なコロナが形成されることなどがわかってきている。

この他、角運動量輸送率をパラメータとした2次元輻射流体数値実験も行われている[23]。この計算からは、激変星やマイクロクエーサーで観測される光度変動が降着円盤内の輻射圧に起因する不安定性によって再帰的に生じること、標準円盤時にはジェットは噴出しにくいこと等が報告されている。

#### 参考文献

- [1] N.I. Shakura and R.A. Sunyaev, *Astron. Astrophys.* **24**, 337 (1973).
- [2] R. Narayan and I. Yi, *Astrophys. J. Lett.* **428**, 13 (1994).
- [3] R. Narayan and I. Yi, *Astrophys. J.* **444**, 231 (1995).
- [4] M.A. Abramowicz, X. Chen, S. Kato, J.-P. Lasota, and O. Regev, *Astrophys. J. Lett.* **438**, 37 (1995).
- [5] S.A. Balbus and J.F. Hawley, *Astrophys. J.* **376**, 214 (1991).
- [6] S. Miyamoto, K. Kimura, S. Kitamoto, T. Dotani and K. Ebisawa, *Astrophys. J.* **383**, 784 (1991).
- [7] J. Homan and T. Belloni, *Astrophys. Space Sci.* **300**, 107 (2005).
- [8] R.A. Remillard, *astro.ph/0504129* (2005).
- [9] R. Matsumoto, *Numerical Astrophysics: Proceedings of the International Conference on Numerical Astrophysics 1998 (NAP98)*, *Astrophysics and space science library*, vol. **240**, p.195 (1999).
- [10] J.F. Hawley, *Astrophys. J.* **528**, 462 (2000).
- [11] M. Machida, M.R. Hayashi and R. Matsumoto, *Astrophys. J. Lett.* **532**, 67 (2000).
- [12] T. Kawaguchi, S. Mineshige, M. Machida, R. Matsumoto and K. Shibata, *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **52**, L1 (2000).
- [13] H. Negoro, *Progress of Theoretical Physics Supplement* **155**, 239 (2004).
- [14] M. Machida and R. Matsumoto, *Astrophys. J.* **585**, 429 (2003).
- [15] Y. Kato, S. Mineshige and K. Shibata, *Astrophys. J.* **605**, 307 (2004).
- [16] J.-P. De Villiers, J. F. Hawley and J. H. Krolik, *Astrophys. J.* **599**, 1238 (2004).
- [17] J.H. Krolik, J.F. Hawley, S. Hirose and J.-P. de Villiers, 35th COSPAR Scientific Assembly **35**, 1089 (2004).
- [18] M. Machida, K.E. Nakamura and R. Matsumoto, *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **58**, 193 (2006).
- [19] H. Oda, M. Machida, K.E. Nakamura and R. Matsumoto, *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **59**, 457 (2007).
- [20] N.J. Turner and J.M. Stone, *Astrophys. J. Suppl.* **135**, 95 (2001).
- [21] N.J. Turner, J.M. Stone, J.H. Krolik and T. Sano, *Astrophys. J.* **593**, 992 (2003).
- [22] S. Hirose, J.H. Krolik and J.M. Stone, *Astrophys. J.* **640**, 901 (2006).
- [23] K. Ohsuga, *Astrophys. J.* **640**, 923 (2006).
- [24] M. Machida: *天文月報* **98**, 83 (2005) [*in Japanese*].