

磁気回転不安定性によるブラックホール降着流の角運動量輸送機構の解明

町田 真美

九州大学大学院理学研究院物理学部門

川島 朋尚

自然科学研究機構国立天文台理論研究部

工藤 祐己

鹿児島大学理学部

1. はじめに

はくちょう座 X-1 などの X 線連星や活動銀河中心核で観測される莫大なエネルギー放射は、中心のブラックホールの回りに形成される降着円盤におけるエネルギー解放によって説明することができる。降着円盤のエネルギー源は回転するプラズマが角運動量を失って中心天体に落下する際に解放する重力エネルギーであり、角運動量輸送は磁気回転不安定性(MRI, Balbus & Hawley 1991)によって生成される磁気乱流が担っていると考えられている。すなわち、MRI は降着円盤におけるダイナミクスとエネルギー変換メカニズムの本質を担っていると考えられる。しかし依然として MRI 駆動ダイナモによる磁場増幅と降着円盤システム全体に与える影響については十分に理解されていない。その原因はシミュレーションの空間解像度にある。

MRI による角運動量輸送に関する数値実験は、円盤の一部を取り出した局所計算(Hawley et al. 1995, Matsumoto et al. 1995, Sano et al. 2004, Sorathia et al. 2012 他)、降着円盤全体を計算領域に含む非相対論的な大局的計算(Matsumoto et al. 1999, Hawley et al. 2000, Machida et al. 2000 他)や相対論的な大局的計算(Gammie et al. 2003, De Villiers et al. 2005, McKinney et al. 2012 他)で多数行われてきているが、MRI の成長率が最大になる波長を十分に解像できる領域は非常に限られていた。そのため、高空間分解能が担保できる降着円盤の一部を取り出す局所計算において、MRI の飽和を調べる研究が続いた。局所計算において、鉛直方向重力を考慮しない場合、空間解像度を高くすると局所的な乱流によって磁場が散逸してしまうこと、そのために MRI の最大成長波長を十分分解できる解像度であっても MRI によって生成される磁場強度の値は飽和しないことが報告された(Sano et al. 2004 他)。その後の多数の研究により、流体粘性と磁気年生の比である磁気ブランドル数が飽和値に大きな影響を与える事が指摘されている(Minoshima et al. 2015)。一方、鉛直方向重力を考慮した局所計算の場合、流体粘性を考慮せずとも磁場が飽和する事が知られている(Simon et al. 2011 他)。これらの研究は、磁場生成と維持は、系を特徴付ける典型的な長さが必須である事を示唆する。

降着円盤全体を計算領域に含む大局的計算は、局所計算ほどの高空間分解を達成できないため、鉛直重力を考慮した数値計算であっても、解像度依存性の問題が残っている。Hawley et al. (2013)は、一般相対性理論の効果を模した Pseudo-Newtonian ポテンシャルを用いて降着円盤内の MRI の乱流に関する収束テストを行った。この論文では $(N_r, N_\phi, N_z)=(512, 128, 512)$ メッシュ($dr=0.078r_s$ (r_s はシュバルツシルト半径)、 $d\phi=0.0123[\text{rad}]$)を最高解像度とし、それ以下の空間解像度のシミュレーション結果と比較している。その結果、角運動量輸送パラメータ α に相当する磁気ストレスとガス圧の比は、メッシュ数への依存性はあまりみられない事が示された。しかし、質量降着率や鉛直磁場と方位角方向磁場のエネルギー比などは、最高解像度の結果とそれより少ないメッシュ数で異なっており、収束しているかは未だ判然としない。また、彼らの計算では、方位角方向の計算領域が $0 < \phi < \pi/2$ であるために、最も効率率的に角運動量輸送を行う事ができる方位角方向波数 $m=1, 2$ のモードを追う事ができない。

加えて近年、同様の乱流状の構造を扱う問題である太陽の対流層研究において極めて重要な発見があった。数値計算の分解能を上げると小スケールの乱流運動が卓越して磁場が散逸するが、さらに解像度を上げると小スケール乱流によって増幅された磁場が乱流運動を抑制して実効的な粘性を高め、大スケールの磁場構造が生成、維持されることが明らかになったのである(Hotta et al. 2016)。差動回転円盤における MRI の成長と円盤ダイナモについても高解像度の計算を行えば同様に小スケールの乱流から大局構造を誘起する事が期待されるが、これまでの大局的な計算において、そのような兆候は見られない。このことは、これまでよりも高い空間解像度で降着円盤シミュレーションを実施することの必要性を強く示唆している。

2. 数値計算手法と初期条件

本課題は、降着円盤全体を計算領域に含む大局的な 3 次元磁気流体数値実験を行っている。基礎方程式は散逸性の磁気流体方程式を用い、太陽フレアの数値計算で用いられる異常抵抗モデルを採用している(Yokoyama & Shibata 1994)。数値計算コードは、宇宙プラズマ用の電磁流体公開コードである CANS+の円筒座標系コードを用いている(Matsumoto et al. 2018)。CANS+では、HLLD 近似リーマン解法を用いた有限体積法を採用し、Flux の補間に MP5 法を適用する事で空間 5 次精度を担保している。また、時間方向の積分は、TVD ルンゲクッタ法を用いて 3 次精度を保証している。磁場のガウスの法則を保つために、9wave 法を用いた divB クリーニングを行っている。CANS+は MPI と openMP のハイブリッド並列を実装しており、本課題でもハイブリッド並列で数値計算を行っている。

数値計算の初期条件として、重力・遠心力・ガス圧勾配・磁気圧勾配が釣り合った角運動量一定の回転平衡トーラスを仮定している(Okada et al. 1996)。ここでは、トーラスは $15r_s$ に圧力中心を持ち、磁場は、初期状態では方位角方向成分のみを持つとする。このトーラスを、静止した希薄なハローの中に置く。中心ブラックホールの重力ポテンシャルは、擬ニュートンポテンシャルを用いる事で一般相対論的效果を近似している。ガスは断熱を仮定しており、自己重力は無視している。このような平衡状態に対して、速度に摂動を与えて、その時間進化を追っている。本課題では、規格化のユニットとして、圧力中心の位置での半径、回転速度を採用している。そのため、 $15r_s$ を規格化半径、その位置でのケプラー回転速度を規格化速度としている。初期のプラズマ β (ガス圧と磁気圧の比)は 100 を仮定し、規格化半径でのコロナの密度は

トーラスのガス密度の 10^{-4} としている。

本研究課題では、磁気エネルギーや質量降着率に対する方位角方向の解像度の依存性を調べる。この数値計算は、円筒座標系を用いているため、特に方位角方向の空間解像度が動径方向、鉛直方向に比べて低くなる傾向にある。そこで、本課題では、特に方位角方向の空間解像度の違いが結果にどのように影響を与えるかを調べる。計算領域は動径方向、鉛直方向にそれぞれ $130r_s$ 、方位角方向を 2π としている。メッシュ数は、 $(N_r, N_\phi, N_z) = (256, N_\phi, 512)$ とし、 N_ϕ のメッシュ数により、低解像度 (32)、中解像度 (64)、高解像度 (128) の 3 モデルを検討する。

3. 結果

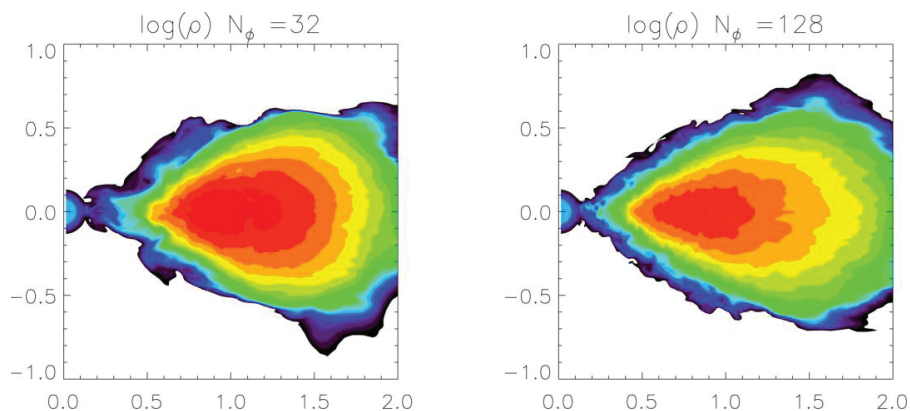


図 1：密度断面図

r-z 面の密度断面図を示す。左は低解像度モデル、右は高解像度モデル

図 1 に回転軸を含む面 (r-z 面) の密度断面図を示す。この結果は、初期 t-トーラスの圧力中心 ($15r_s$) で約 19 回転した時の結果である。質量降着はトーラス表面から生じやすい傾向にあるため、降着ガスと静水圧平衡コロナとの間で速度シアが生じる。このため、一般にトーラス表面ではケルビン・ヘルムホルツ不安定性が成長する。本課題では、動径方向の空間解像度は固定されているが、高解像度モデルでは、トーラス表面のケルビン・ヘルムホルツ不安定による揺らぎは、より短波長の成分が成長しているのがわかる。一方、低解像度モデルは、大きな揺らぎとなっているため、中心近傍の降着ガスに上下非対称性が現れている。さらに、動径方向外側に膨張する様が見て取れる。密度断面図の高密度領域の分布を見ると、高解像度モデルの結果では、高密度領域が内側に移動していることがわかる。これは、低解像度モデルよりも早い質量降着が生じていることを示唆している。トーラスガスの質量降着は、MRI による角運動量の外向きの輸送に起因している。密度断面図から、予想通り方位角方向解像度の違いによって、角運動量輸送率に違いが生じることが推測される。

図 2 に質量降着率の時間進化を示す。ここで、質量降着率は鉛直方向に $z = \pm 7.5r_s$ の範囲を通過した質量で評価している。左は、半径 $r = 0.26r_0 = 4r_s$ 、右は半径 $r = 0.6r_0 = 9r_s$ の円筒面を通過する質量降着率である。黒線、破線、グレー線はそれぞれ低解像度モデル、中解像度モデル、高解像度モデルの結果を示している。横軸は、規格化半径の位置での回転数を示す。

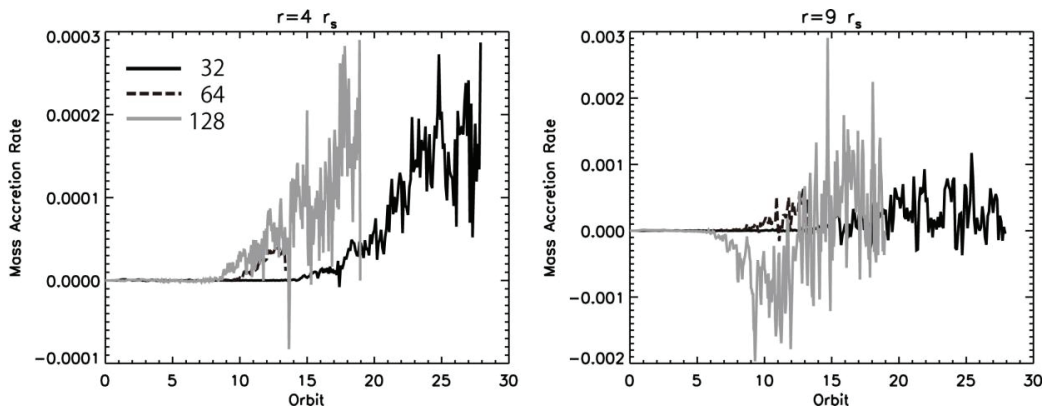


図 2 : 質量降着率の時間発展

質量降着率の時間進化を示す。横軸は規格化半径の位置での回転数、縦軸は質量降着率である。黒線が低解像度モデル、破線が中解像度モデル、グレーが高解像度モデルの結果を示している。質量降着率は、高さが赤道面対称に $7r_s$ の領域を通過する流束で測定しており、左が $r=4r_s$ 、右は $r=9r_s$ の面を通過する正味の質量降着率に相当する。

図 2 左からわかるように、図 1 の密度断面図から想定された通り、高解像度モデルは、中心に近い領域で、早い質量降着率の立ち上がり見られ、中解像度、低解像度と質量降着の開始が遅れていることが見て取れる。一方、図 2 右では、高解像度モデルは、10 回転までの間は、正味の値では外向きの角運動量輸送をしており中心に落下するものはごく一部である事がわかる。しかし、中解像度、低解像度の結果は、そのような正味外向きに輸送される傾向は見られず、遠方から順に落下している。今回の数値計算で得られた結果の範囲では、高解像度モデル、中解像度モデルとも質量降着は未だ準定常状態にいたって無いため、さらに数値計算を進める必要がある。しかし、低解像度モデルでは、25 回転以降、準定常状態となっている。

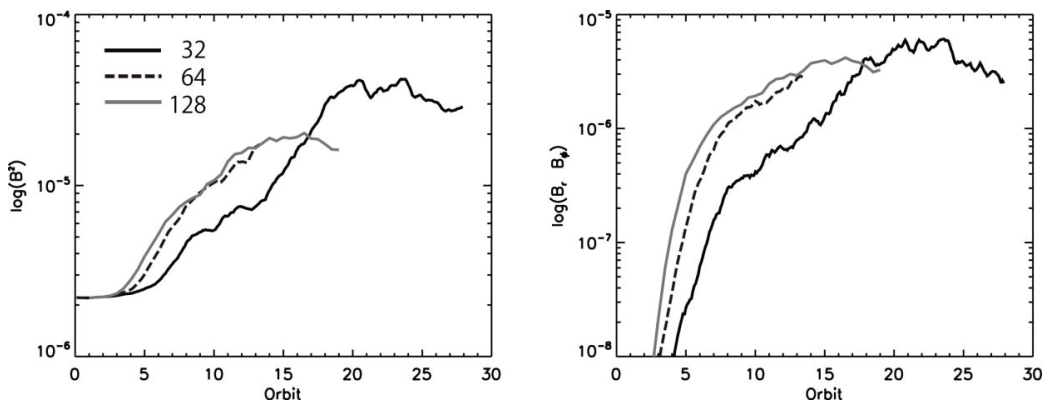


図 3 : 磁気エネルギーの時間発展

体積平均した磁気エネルギー(左)と Maxwell 応力の非対角成分(右)の時間発展を示す。平均領域は、 $9 < r < 13$, $|z| < 5$, $0 < \phi < 2\pi$ の範囲である。実線、破線、点線はそれぞれ高解像度モデル、中解像度モデル、低解像度モデルに相当する。

図 3(左)に磁気エネルギーの時間進化の図を示す。実線、破線、グレーは低解像度モデル、中解像度モデル、高解像度モデルの結果である。磁気エネルギーは動径方向に $9 < r < 13$ 、鉛直方向に対称に $|z| < 5$ 、方位角方向に 2π の範囲で平均化している。その結果、高解像度モデルの方が、立ち上がりが早く、短時間で磁場が生成され始めている事がわかる。MRI は小さな波数であっても成長可能であるため、小スケールの摂動をとらえる事ができる高解像度モデルが早く成長を始める。線形段階においては、成長率に相当する傾きは高解像度、中解像度はほぼ等しい値を示すが、低解像度は他のモデルと比べ成長率が低い傾向にある。しかし、非線形成長フェーズに入ると、高解像度モデルの方が早く散逸し、飽和値が小さくなる事が示された。この結果は、太陽の対流層の数値計算で示される空間解像度を中程度によくすると、小スケール乱流によって磁場が散逸し、大局的な磁場を生成しにくくなる傾向と一致している。高解像度モデルの質量降着率は準定常状態か否かが判別できなかったが、磁気エネルギーの時間進化をみると、高解像度モデルも準定常状態に達しているとみられる。図 3(右)は、Maxwell 応力の非対角成分の時間進化を示す。これは、ガス圧で規格化すると角運動量輸送率に相当する。準定常状態に達したときには、磁気エネルギー同様、低解像度の方が高い値を示している。しかし、低解像度の場合の磁気エネルギーの飽和値が、高解像度の結果の 2 倍であるのに対して、Maxwell 応力の非対角成分は、1.5 倍程度の差となっている。これは、各成分の最大性長波長が、空間解像度に線形に比例していないことを示唆している。

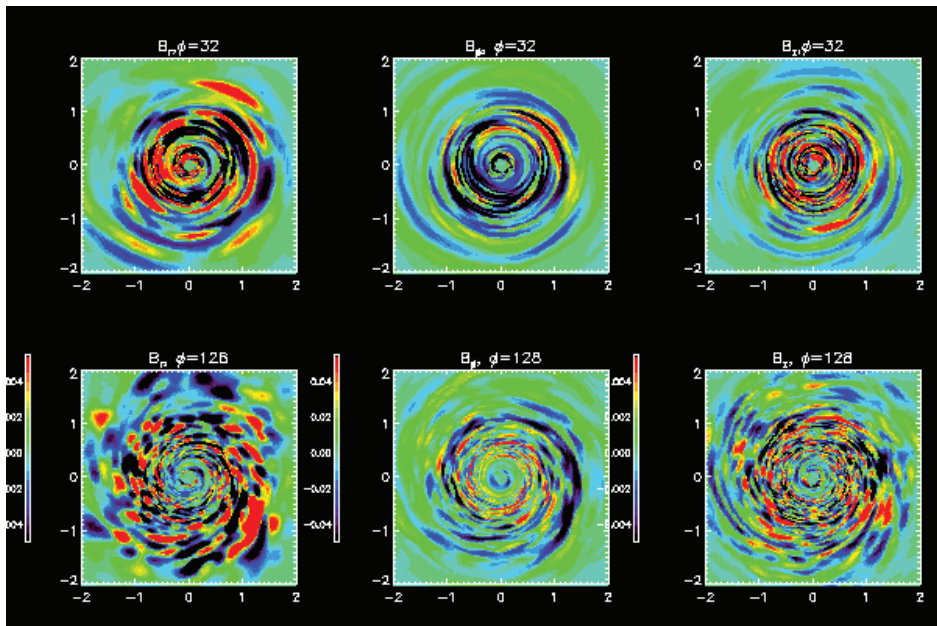


図 4：赤道面磁場分布

時刻 $t=180t_0$ の赤道面上の磁場分布。カラスケールは磁場の向きと大きさを示す。上段は低解像度モデル、下段は高解像度モデルの結果を示す。左から順に、動径方向成分、方位角方向成分、鉛直方向成分の結果を示す。

図 4 に赤道面上の磁場分布を示す。上段は低解像度モデル、下段は高解像度モデルである。

低解像度の結果は、3成分の方位角方向波数が同程度であるのに対して、高解像度モデルでは、動径方向、鉛直方向成分により細かな構造が表れている一方、方位角方向波数は8程度で空間分解能への依存性が低いことがわかる。この結果が、磁気エネルギーとMaxwell応力非対角成分の解像度依存性の違いに現れている。この課題では、方位角方向の解像度のみを変化させているが、鉛直方向、動径方向波数に対しても高空間分解の結果では、高周波数が表れている。以上の結果から、空間解像度を上げると、小スケールの乱流を生成し、局所的に散逸するために磁気エネルギー、質量降着率ともに、飽和値は低下する傾向にある事がわかる。

4. まとめ

降着円盤で成長する磁気回転不安定性の空間解像度依存性を調べるために、散逸性磁気流体数値計算を行った。本研究課題においては、先行研究において計算コストがかかることから最も空間解像度の低く設定されていた方位角方向のメッシュ数に着目し、大局的な降着円盤における質量降着率、磁気エネルギーの増幅と飽和、物理量の空間分布の方位角方向の空間解像度依存性を調べた。その結果、空間解像度が高いモデルの磁気エネルギーは、早く増幅を開始するが、磁気エネルギーの飽和値は低くなる傾向にある事がわかった。これは、高解像度とすることで、小スケールの乱流を追う事が可能になるため、小スケールでの磁気散逸が優勢となり結果的に大局的な強い磁場構造ができにくい事を示している。この傾向はHotta et al. (2016)における太陽ダイナモと似ており、より空間解像度が高い計算を実施すれば小スケールの乱流が形成されつつも再び大局的な磁場も形成されることが予想され、降着円盤におけるダイナモ機構の本質に迫れると期待される。近年急速な発展を見せた太陽ダイナモ計算との類似性に着目することで降着円盤における磁場増幅の空間解像度依存性を調べた数値実験は本研究が初めてであり、今回の結果を踏まえた大規模数値実験を「京」で開始したところである。

また、今回の数値実験では、方位角方向の空間分解能のみを細かくし、鉛直方向、動径方向は固定している。しかし、鉛直方向の乱流構造も方位角方向の空間分布と相関し、方位角方向に小スケールを追う事のできる場合には、動径方向・鉛直方向にも小スケールの乱流を生成する事もわかった。そのため、準定常状態に達した後は、角運動量輸送率が低下し、質量降着率は高解像度モデルのほうが低くなりそうである。この傾向は、円盤の一部を取り出す局所的な計算と似た傾向にある。しかし、さらに大規模な数値実験を実施すれば、高解像度な場合に大局的磁場が形成されることで質量降着率が高くなる可能性があり、降着円盤におけるダイナミクスとエネルギー開放率に関する新たな知見が得られると期待される。

謝辞

本研究課題は、平成29年度東京大学情報基盤センター「若手・女性利用者推薦」(前期・後期)の支援の元進められた。数値計算はOakforest-PACSを用いて行っている。本研究の成果をもとに、平成30年度HPCI利用研究課題において、京の通年の利用が採択された。ここに謝意を表する。

参考文献

- De Villiers, J.-P., Hawley, J. F., Krolik, J. H., & Hirose, S. 2005, ApJ, 620, 878
- Gammie, C. F., McKinney, J. C., & Toth, G. 2003, ApJ, 589, 444

- Hawley, J. F., Gammie, C. F., & Balbus, S. A. 1995, ApJ, 440, 742
- Hawley, J. F. 2000, ApJ, 528, 462
- Hawley, J. F., Richers, S. A., Guan, X., & Krolik, J. H. 2013, ApJ, 772, 102
- Hotta, H., Rempel, M., & Yokoyama, T. 2016, Science, 351, 1427
- Machida, M., Hayashi, M., & Matsumoto, R. 2000, ApJ, 532, L67
- Matsumoto, R., & Tajima, T. 1995, ApJ, 445, 767
- Matsumoto, R. 1999, in *Astrophysics and Space Science Library*, Vol. 240, *Numerical Astrophysics*, ed. S. M. Miyama et al. (Dordrecht: Springer Science), 195
- Matsumoto, Y. et al. submitted to PASJ
- McKinney, J. C., Tchekhovskoy, A., & Blandford, R. D. 2012, MNRAS, 423, 3083
- Minoshima, T., Hirose, S., & Sano, T. 2015, ApJ, 445, 767
- Okada, R., Fukue, J., & Matsumoto, R. 1989, PASJ, 41, 133
- Sano, T., Inutsuka, S., Turner, N. J., & Stone, J. M. 2004, ApJ, 808, 54
- Simon, J. B., Hawley, J. F., & Beckwith, K. 2011, ApJ, 730, 94
- Sorathia, K. A., Reynolds, C. S., Stone, J. M., & Beckwith, K. 2012, ApJ, 749, 189
- Yokoyama, T., & Shibata, K. 1994, ApJ, 436, L197