

降着円盤の大局的 3 次元磁気流体数値シミュレーション

千葉大学理学部物理学科 松元亮治

プロジェクト ID : nrm08

円筒座標系 3 次元の磁気流体 (MHD) コードを用いて降着円盤の大局的な 3 次元 MHD 数値シミュレーションを実施した。初期条件は Okada et al.(1989) によって求められた方位角磁場を持つ MHD トーラスの平衡解である。前回までのプロジェクトでは理想 MHD 方程式を解いてトーラスの時間発展を追跡し、(a) 初期磁場が弱い場合、トーラス内部が乱流的になり、ガス圧と磁気圧の比 β の平均値が 10 程度の準定常状態に至ること、また、パーカー不安定性により磁束が流出し、浮上磁気ループからなる円盤コロナが形成されること (Machida et al. 2000)、(b) 角運動量輸送のパラメータ α の値が $\alpha = 0.01 - 0.1$ になること、(c) 計算結果をもとに、電流密度が高い領域で異常電気抵抗が発生するというモデルを用いて円盤内部でのジュール加熱率から X 線強度を求めたところ、ブラックホール候補天体に類似した $1/f^\alpha$ ノイズ的な時間変動が得られる (Kawaguchi et al. 2000) という結果を得た。しかしながら、シミュレーションに電気抵抗の効果が含まれていなかったため、磁気リコネクションに伴う円盤プラズマの加熱、加速機構をセルフコンシステントに扱うことはできていなかった。

今年度のプロジェクトではまず、円盤内部での磁気リコネクションを扱うために誘導方程式およびエネルギー式に異常抵抗の項を含めた散逸性 3 次元 MHD 数値実験を行った。異常抵抗としては電流密度 J を用いて $v_d = J/\rho > v_c$ の場合に $\eta = (1/R_m)[(v_d - v_c)/v_c]^2$ の電気抵抗が発生するというモデルを採用した。図 1 左図に方位角方向の磁場に貫かれた初期に $\beta_0 = P_{gas}/P_{mag} = 1000$ の角運動量一定のトーラスにおいて電気抵抗のないモデル (T3) と $v_c = 300$ 、 $R_m = 1000$ の異常電気抵抗が加わるモデル (T3E300) における磁気エネルギーの空間平均 $\langle B^2/(8\pi P_0) \rangle$ の時間変化を示す。 P_0 は初期トーラスの最大圧力である。磁気エネルギーは増加したのち、トーラス物質が質量降着によって失われるにつれて減少している。異常抵抗があるモデルとないモデルで大きな差はみられない。局所的なガス圧と磁気圧の比の空間平均 $\beta = \langle 8\pi P/B^2 \rangle$ の値は 5 - 10 になる。図 1 右図に降着円盤モデルの角運動量輸送パラメータ α に対応するマクスウェルストレスの空間平均 $\alpha_B = \langle -B_r B_\phi/(4\pi P_0) \rangle$ の時間変化を示す。電気抵抗を加えたモデルでは α_B の値はやや小さくなり $\alpha_B \sim 0.008$ 程度の値が得られた。図 2 左図は電気抵抗を含めたモデル (T3E300) におけるジュール加熱率 ηJ^2 の空間積分値の時間変化の図である。理想電磁流体計算結果をもとに加熱率を推定した Kawaguchi et al.(2000) の結果と同様な $1/f$ ノイズ的な変動がみられる。図 2 右図は磁気リコネクションによって加熱された領域 ($T > 0.5$) における $\rho^2 T^{1/2}$ の空間積分値の時間変化を示し、磁気リコネクションに伴う X 線強度の時間変化に対応する。ジュール加熱率そのものに比べて変動の振幅は小さいがやはり $1/f$ ノイズ的な変動を示すことが確認された。

今回のプロジェクトで我々が行ったシミュレーションでは放射冷却の効果は計算に含まれていない。したがって、これらのシミュレーションは光学的に薄い低光度降着流に対応している。近年、低光度活動銀河及びブラックホール候補天体の Low-State のモデルとして移流優勢降着流 (ADAF) が注目されている。我々は、3 次元 MHD 数値実験の結果は α

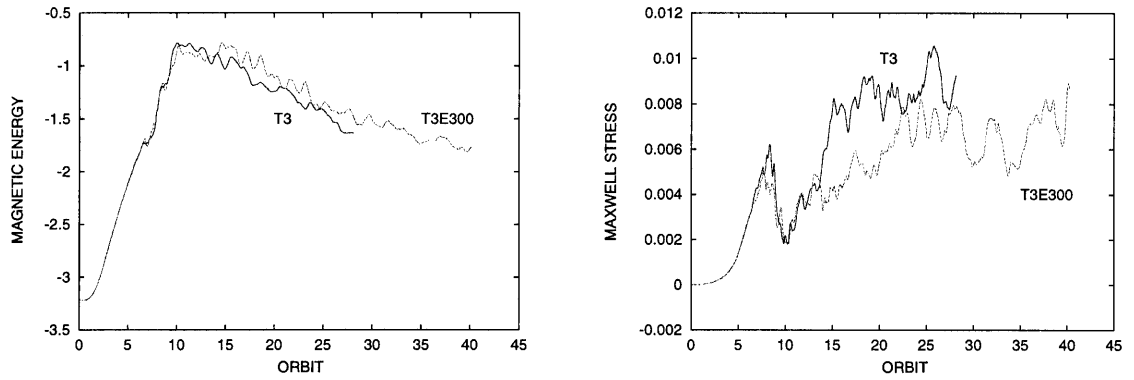


図 1: 左図：磁気エネルギーと初期トーラスの最大圧力 P_0 の比の時間変化。横軸の単位はトーラスの回転時間。モデル T3 は初期に $\beta = P_{gas}/P_{mag} = 1000$ かつ電気抵抗がない場合、モデル T3E300 は初期に $\beta = 1000$ かつ $v_c = 300$ 、 $R_m = 1000$ の異常抵抗がある場合。右図：マクスウェルストレスの空間平均 $\alpha_B = \langle -B_r B_\phi / (4\pi P_0) \rangle$ の時間変化。

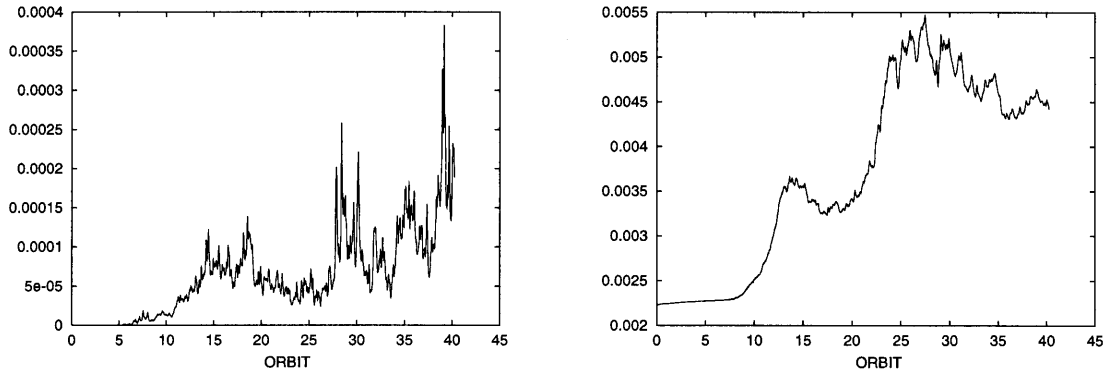


図 2: 左図：モデル T3E300 における空間積分したジュール加熱率 ηJ^2 の時間変化、右図：モデル T3E300 における X 線強度の時間変化。 $T > 0.5$ の領域の $\rho^2 T^{1/2}$ の空間積分値を示す

粘性を仮定した ADAF モデルと一致するのではないかと予想していた。ところが、シミュレーションから得られた降着円盤の動径構造を解析してみたところ、密度分布、温度分布等は ADAF とは異なり、最近、Igumenshchev and Abramowicz (2000) らによって提唱された Convection Dominated Accretion Flow (CDAF) に近いことがわかった (Machida et al. 2001)。Igumenshchev らは α 粘性を仮定した流体数値計算により、 α の値が小さい場合に円盤子午面内の環流 (対流) が発生して動径構造が ADAF とはずれてくることを示している。我々の 3 次元 MHD 計算では角運動量輸送がセルフコンシステントに求まるため α のような現象論的パラメータを仮定する必要がない。このような直接 3 次元数値実験によって ADAF とは異なる構造が得られたことは、ADAF モデルの根幹を揺るがす重大な結果である。

図 3 に初期に $\beta_0 = 100$ の理想電磁流体モデルの 3 次元 MHD 数値実験結果を示す。図 3(a)、(b) はそれぞれ、10 回転後、20 回転後の密度分布と流束ベクトル ($r\rho\mathbf{v}$)、図 3(c) はこの間の時間平均を示す。子午面内の環流が発生していることがわかる。電気抵抗を含めた計算では磁気リコネクションによる加熱が加わるため動径方向のエントロピー勾配が維

持され、対流運動が続く。図4左図はモデル T3E300 における 28 回転後の密度分布と流束ベクトル、右図は 22 回転から 28 回転までの時間平均である。

これらの結果は 2000 年 12 月に開催された Texas Symposium on Relativistic Astrophysics 等で発表され、電気抵抗を含めた場合の計算結果を現在、投稿準備中である。MHD 降着流からの放射スペクトルを求め、ADAF モデルとの違いの有無を明らかにすることは今後の課題である。

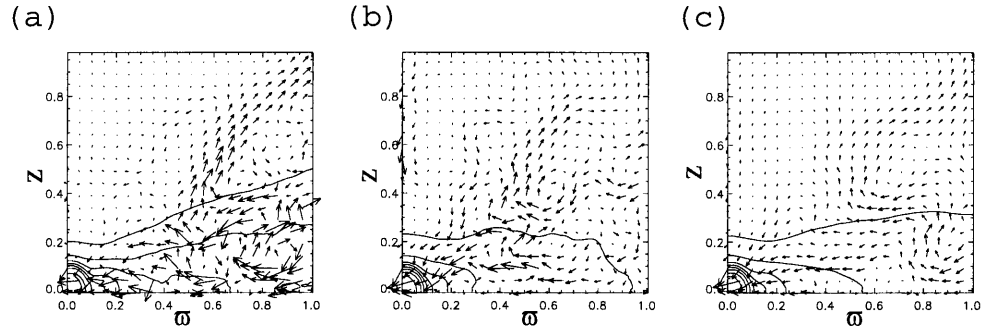


図 3: 初期に $\beta_0 = 100$ の方位角磁場に貫かれたトーラスにおける子午面内の密度分布 (実線) と流束ベクトル $r\rho\mathbf{v}$ (矢印)。電気抵抗がない場合の 3 次元 MHD 計算結果。(a)10 回転後、(b)20 回転後、(c)10 回転から 20 回転の間の時間平均。

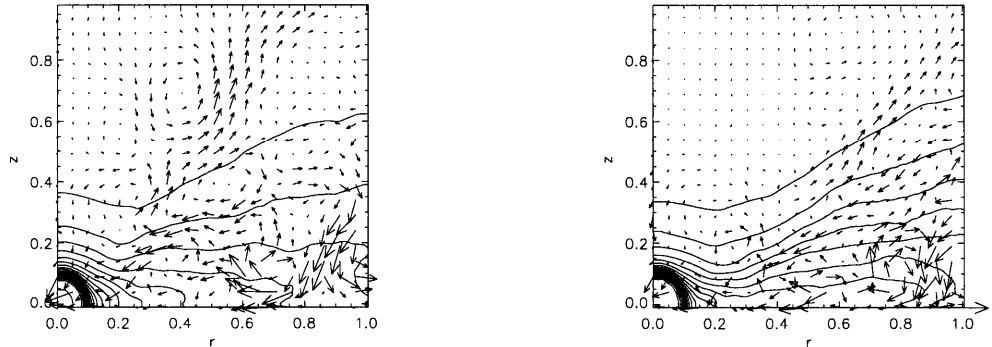


図 4: 異常電気抵抗を仮定したモデル T3E300 における子午面内の密度分布と流束ベクトル。左図：28 回転後、右図：22-28 回転の平均

参考文献

- [1] T. Kawaguchi, S. Mineshige, M. Machida, R. Matsumoto, and K. Shibata, “Temporal $1/f^\alpha$ Fluctuations from Fractal Magnetic Fields in Black-Hole Accretion Flow”, PASJ, 52, L1-L4 (2000)
- [2] M. Machida, M.R. Hayashi, and R. Matsumoto, “Global Simulations of Differentially Rotating Magnetized Disks: Formation of Low- β Filaments and Structured Coronae”, ApJ Letters, 532, L67-L70 (2000)
- [3] M. Machida, R. Matsumoto and S. Mineshige, “Convection-Dominated, Magnetized Accretion Flows into Black Holes”, PASJ, 53, L1-L4 (2001)