

地球シミュレータを用いた降着円盤と宇宙ジェットの磁気流体数値実験

Magnetohydrodynamic Simulations of Accretion Disks and Jets by Using the Earth Simulator

○松元亮治, 千葉大理, 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33, E-mail: matumoto@astro.s.chiba-u.ac.jp

加藤成晃, 筑波大計算科学, 〒305-8577 つくば市天王台 1-1-1, E-mail: ykato@ccs.tsukuba.ac.jp

町田真美, 国立天文台理論, 〒181-8588 三鷹市大沢 2-21-1, E-mail: mami@th.nao.ac.jp

Ryoji Matsumoto, Chiba University, 1-33 Yayoi-Cho, Inage-ku, Chiba 263-8522

Yoshiaki Kato, Tsukuba University, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577

Mami Machida, National Astronomical Observatory, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588

We present the results of global three-dimensional magnetohydrodynamic (MHD) simulations of accretion disks formed around a gravitating object. We applied a resistive MHD code CANS (Coordinated Astronomical Numerical Software) implemented to the Earth Simulator. High resolution MHD simulations in Cartesian coordinates enabled us to study the stability of magnetically driven outflows ejected from accretion disks. We also present the results of global simulations which show the growth of non-axisymmetric structures both in jets and in accretion disks

1. はじめに

天体に落下するガス流が形成する回転円盤（降着円盤）は、ブラックホール候補天体等で観測される激しいX線強度変動、ジェット噴出などのエネルギー源になっていると考えられている。我々は円盤全体を計算領域に含めた大局的な3次元磁気流体シミュレーションにより、降着円盤の形成から質量噴出に至る過程をシミュレートした。このようなグローバル計算は、地球シミュレータに代表される高速・大記憶容量の計算機の出現によってはじめて可能になったものである。

2. シミュレーションコード

シミュレーションコードとしては科学技術振興機構の計算科学プロジェクト (ACT-JST) で我々が開発した天体回転プラズマの大局的3次元磁気流体 (MHD) シミュレーションプログラム ARPS (Astrophysical Rotating Plasma Simulator)、及び、これを発展させてより多くの天体現象に適用可能にした汎用宇宙磁気流体シミュレーションソフトウェア CANS (Coordinated Astronomical Numerical Software) を用いた。いずれのコードも MPI を用いて並列化されており、地球シミュレータの 64 ノード (512PE) を用いた場合の並列化効率が 50 % を越えている。CANS ではカーテシアン、円筒、球座標系から座標系を選択することができる。また、シミュレーションスキームとして modified Lax-Wendroff 法、Roe 法、CIP-MOCCT 法の中から適切なスキームを選択することが可能になっている。

3. シミュレーションモデル

初期条件としては中心天体の重力場中で回転平衡状態にあるトーラスを採用した。トーラスの初期角運動量分布は $L \propto \varpi^a$ によって与えた。ここで ϖ は動径座標である。今回報告するシミュレーションでは円盤密度が十分小さく円盤が光学的に薄い高温円盤を扱い、放射冷却は無視した。また、イオンと電子の温度は等しいと仮定した。トーラスの外には高温の球対称ハローを置いた。磁場は初期に回転軸方向の場合と方位角方向の場合を扱う。前者では回転軸付近の電流分布がジェットの安定性に影響する。このため、カーテシアン座標系を採用した。初期トーラスの密度が最大になる半径が $r_0 = 10$ のときの計算領域は $-100 < x, y, z < 100$ とし、中心天体付近で格子点間隔が小さくなる非一様格子を用いた。メッシュ数は 400^3 である。境界には自由境界条件を適用し、 $r < 2$ で重力ポテンシャルをソフトにすることにより $r = 0$ の特異性を除いた。初期に方位角

磁場に貫かれたモデルでは円筒座標系を採用した。中心天体がブラックホールの場合のシミュレーションは、擬ニュートンポテンシャル $\psi = -GM/(r - r_g)$ により一般相対論的効果を近似した。ここで r_g はシュバルツシルト半径である。この場合は $r = 2r_g$ に吸収境界条件を置いた。非軸対称モードの成長を調べるため、方位角方向の速度に非軸対称な揺らぎを与えてシミュレーションを実施した。

4. シミュレーション結果

初期に回転軸方向の磁場に貫かれたモデルではトーラスの回転に伴って磁力線が捻られ、トーラスからハローに角運動量が輸送される。このため角運動量を失ったトーラス物質が落下し、磁力線を砂時計状に変形する。磁力線が回転軸となす角度が増えるにつれ、円盤物質は磁気遠心力によって加速されて流出する。この流れは方位角磁場によるピンチ力によって回転軸方向に絞こまれ、コリメートされたジェットになる。3次元性は非軸対称構造の成長にあらわれる。コロナ磁場が弱く $\beta > 1$ の場合、アウトフローがアルベン速度程度まで加速された領域で磁力線の捻れが大きくなり、電流駆動のキンク不安定性が成長してジェットの軸が湾曲する。しかしながらキンク不安定性の成長はジェットを破壊するには至らず加速が続く。

初期に円盤を貫く回転軸方向の磁場がない場合、コリメートされたジェットの噴出は顕著でなくなるが円盤表面付近から円盤コロナに磁束と物質が流出する。この機構により形成されるアウトフローではポロイダル面内の磁力線方向が一定ではなく、ストライプ状になる。このため円盤物質の降着が続いても回転軸付近に磁束が蓄積されることはない。

初期のトーラス温度を下げたモデルでは、より高温の場合と比べて角運動量輸送率が低下し、シュバルツシルト半径の 10 倍程度の領域に内側トーラスが形成される。このトーラスで 1 本腕の非軸対称構造が成長するとともに方位角磁場が増幅され磁気エネルギーが蓄積される。この磁気エネルギーが磁気リコネクションによって解放された後、再び磁場が強められ、磁気エネルギー、降着率などが鋸歯状に振動する。振動数はブラックホールの質量が太陽質量の 10 倍の場合、5Hz 程度になる。この振動は、より高周波の降着円盤内縁領域の準周期振動 (QPO) を励起することがわかった。