

## HLLD 法を用いた降着円盤の大局的シミュレーション

小川 崇之 (千葉大学)

利用カテゴリ XT4MD ・ SX9MD

成果の概要を記入してください。必要に応じてページを加えても構いませんが、pdf のファイルサイズの上限は 2MB とします。降着円盤において、磁場は磁気応力による角運動量輸送、それに伴う質量降着、磁気エネルギーの散逸によるガスの加熱、磁気流体ジェットなど、降着円盤の構造や状態遷移に重要な役割を果たしている。このような降着円盤の高解像度な大局的磁気流体 (MHD) シミュレーションを行うには、ロバストかつ精度の高い計算方法が求められる。Machida et al. (2003, 2006, 2008) では、降着円盤の大局的 3 次元 MHD シミュレーションを行い、磁気エネルギーの散逸による X 線フレアや、ブラックホール降着円盤の状態遷移などの問題に適用してきた。また降着円盤において非軸対称性が発達し、トーラスが三日月状に変形しつつ磁場を増幅すること、蓄積された磁気エネルギーの解放によって、磁場増幅と磁気エネルギーの解放を繰り返す鋸歯状振動を示すことなどを明らかにしてきた。しかし、従来の我々が用いてきた計算方法は、Modified Lax-Wendroff 法であり、数値振動を引き起こしやすく、また数値拡散も大きなものであった。

そこで我々は、数値振動、数値拡散の小さな高解像度のシミュレーションを行うために、基礎解法として HLLD 法 (Miyoshi and Kusano 2005)、磁場の計算方法として flux-CT 法 (Balsara and Spicer 1999, Gardiner and Stone 2005) に基づく多次元磁気流体シミュレーションコードの実装および検証をおこなってきた。

### 1. シミュレーションコードの実装

近似リーマン解法的一种である HLLD 法は、Roe 法 (P.L.Roe 1981) と比較して、密度や圧力が負にならない正值性をもち、計算時間も短く、解像度も同等程度である。そのため実装の容易さ、計算効率、ロバスト性より HLLD 法を実装した。多次元磁気流体シミュレーションでは、磁場の発散が 0 に保たれない問題が知られている。この問題の解決方法として、projection 法 (Brackbill and Barnes 1980)、divergence cleaning 法 (Dedner et al. 2002)、CT 法 (Evans and Hawley 1988) などの補正方法があるが、CT 法の改良型である flux-CT 法 (Gardiner and Stone 2005) は、実装が容易で、磁場の発散を丸めの誤差に抑える事ができ、陽的に磁場の計算を行え、比較的ロバストである事から実装した。高次精度化法として、PLM (Colella and Woodward 1984) を実装した。また HLLD 法の実装において、Alfven 波と fast 波が縮退する場合の判別式の改良をおこなった。

### 2. シミュレーションコードの検証

、衝撃波管問題 (Ryu and Jones 1995)、Alfven 波の斜め伝播 (Toth 2000)、Orszag-Tang Vortex (Toth 2000)、磁気流体ジェット (Kudoh et al. 1998) など他にも多くのテスト計算をおこなった。これらの結果は、先行研究の結果と一致しており、同シミュレーションコードが正しく実装されている事を示している。さらに MPI を用いた並列化を行って国

立天文台 XT4 への実装を行い、3次元カーテシアン座標系での、磁気流体ジェットのスミュレートを行った。磁気流体ジェットのスミュレーションでは、軸対象の初期条件を用いたにも関わらず、4本腕の非軸対称的な時間発展をした。これは、カーテシアン座標系を用いたために、z軸を円盤の回転軸としたときに、速度、磁場のx、y成分が空間2次精度を持つ場合には、x、y軸上では極値をとるため Godunov の定理により、常に軸上で1次精度に落ちてしまうためと考えられる。同様の問題は、有限振幅の Alfvén 波の伝播のスミュレーションでも知られており、この場合も同様に、波の極値で精度が落ちるために、振幅がダンプしてしまう。この問題を解決するために、補間方法の改良をおこない、Alfvén 波の伝播をスミュレーションし、振幅がダンプしないことを確認した。現在同様の手法を円盤のスミュレーションに適用している。

これらのスミュレーションコードの実装と改良および、磁気流体ジェットのスミュレーション結果を修士論文としてまとめ提出した。現在、カーテシアン座標系で生じた問題を解決するために、円筒座標系スミュレーションコードでのスミュレーションを行っている（上述にあげた解決法は、非軸対象な成長を弱めるが、円筒座標と比べると、非軸対称性は多少成長してしまうため）。円筒座標系スミュレーションでは、カーテシアン座標とはまた異なる問題として、軸が特異点となるため、軸上での計算が困難である。これは、軸上では、速度や磁場の半径方向成分、方位角成分の定義ができないことによるため、軸上では、カーテシアン成分で計算することで解決する。また軸付近では、方位角方向成分が極めて小さくなってしまうため、クーラン条件から決まる時間ステップが小さくなりすぎる問題がある。これを解決するために、多層格子法を実装中である（多層格子法を用いることで、軸付近のメッシュを間引く）。