

天体回転プラズマシミュレータの開発

千葉大学理学部 松元 亮治

天体現象は実験室では実現困難な極限的な状況で発生することが多い。このため、実験室での実験に代わる方法として数値シミュレーションが有力な研究手法となる。本開発研究では、並列化された3次元磁気流体コードのプラットフォームに自己重力、放射冷却、熱伝導などのモジュールをプラグイン形式で接続したシミュレータを開発し、「あすか」、「ようこう」等のX線天文衛星によって観測されているX線放射を伴う激しい天体活動現象の3次元磁気流体数値実験を実施してX線スペクトルの時間変動等を求め、観測と比較することを目標として研究開発を行った。

角運動量を持った物質が天体に落下する際に形成される円盤は降着円盤と呼ばれ、回転物質の持つ重力エネルギーを解放することによって活動銀河中心核(クエーサー等)をはじめとする種々の活動的現象のエネルギー源になっていると考えられている。近年、差動回転プラズマ中で成長する磁気不安定性によって生成、維持される磁気乱流が角運動量輸送及び重力エネルギーの解放に本質的な役割を果たしていることが明らかになってきた。

天体現象においては重力の効果のために大きな密度勾配が存在し、このような領域を安定に計算するためには種々のノウハウを要する。我々のコードは降着円盤からの磁気的なジェット形成の大局的シミュレーション(内田・柴田モデル)で使用された実績を持つ磁気流体コードをもとに、重力の効果も含めて、円盤全体を含む大局的シミュレーションを世界ではじめて可能にしたものである。この磁気流体コードはベクトル並列計算機向きに最適化されており、90%以上の並列化効率を達成している。今回のプロジェクトでは、このプラットフォームにプラグインする各種モジュールの開発と、シミュレーション結果の可視化処理、GUIを用いたユーザーインターフェースの開発を進めてきた。図1にシミュレータの概念図を示す。

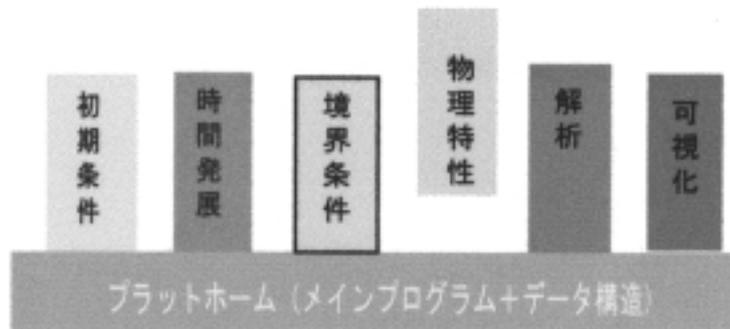


図1 天体回転プラズマシミュレータの概念図：プラットフォームとプラグインするモジュール

自己重力部分についてはデカルト座標系でのICCG法を用いたポアソンソルバーを作成し、70%以上の並列化効率を達成した。また、球座標、円柱座標のソルバーの開発を進めている。熱伝導モジュールにおいては磁力線方向に依存する非等方的な熱伝導率を扱うことができるBiCG Stab法によるソルバーを開発した。太陽フレアに代表される磁気リコネクションをシミュレートするため、非一様な電気抵抗を扱う電気抵抗モジュールも作成した。また、結果の可視化処理について、AVSを用いた自動的なムービー作成等のモジュールを開発した。

開発した「天体回転プラズマシミュレータ」を用いた3次元シミュレーション結果の一例をカラー図に示す(Machida et al. 2000, *Astrophys. J. Letters in press*)。計算の初期条件は初期に方位角方向の磁場に貫かれた回転トーラスの平衡解とし、 $200^{\circ} \times 64^{\circ} \times 240$ グリッドを用いて15並列のVPP300を使用して約20回転の計算を行った。トーラス内部で磁気乱流が発達して角運動量が効率的に輸送され、トーラス物質が円盤状に中心天体に降着すること、角運動量輸送率が観測から推定されていた値と一致すること、円盤内部は磁気圧がガス圧の10%程度の準定常状態に至るが、磁気圧優勢な領域がフ

イラメント状に形成されること、磁束が円盤表面に浮上して太陽表面に類似した磁気ループ構造を形成すること、回転軸方向のアウトフローが生じることなどが明らかになった。図2に、計算結果をもとにX線強度の時間変化を求めた結果と時間変動のパワースペクトルを示す(Kawaguchi et al. 2000, Publ. Astron. Soc. Japan in press)。白鳥座X-1等のブラックホール候補天体に特徴的にみられるX線強度の激しい時間変動、 $1/f$ ノイズ的なパワースペクトルが再現されている。初期に円盤を貫く鉛直磁場がある場合、回転軸方向にコリメートされ、非軸対称不安定性の成長にともなってヘリカルな構造を持つジェットが噴出することも示された。

以上のように、「天体回転プラズマシミュレータ」はX線天文衛星、電波衛星等による観測と直接比較することができる計算結果を生み出しつつある。今回新たに追加した自己重力、熱伝導等のモジュールを利用することにより、銀河中心核円盤、星形成領域等、より広い範囲の活動的天体のシミュレーションが可能になった。(巻末カラー図3)

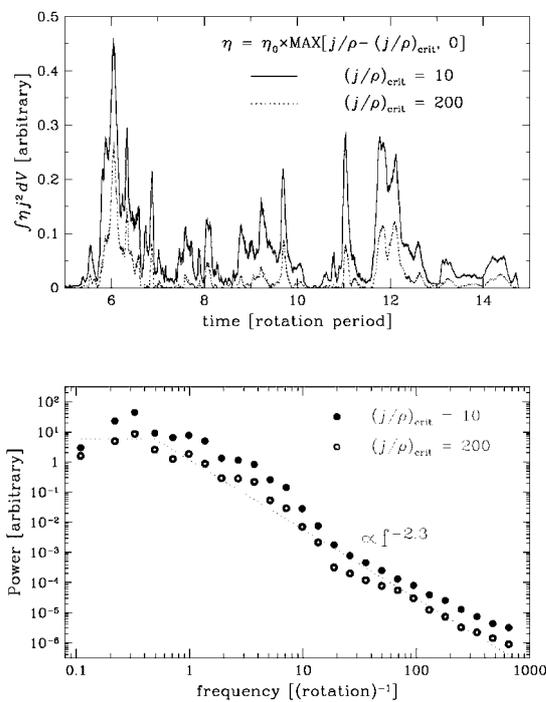


図2 数値実験結果から推定したX線強度の時間変動と時間変動のパワースペクトル

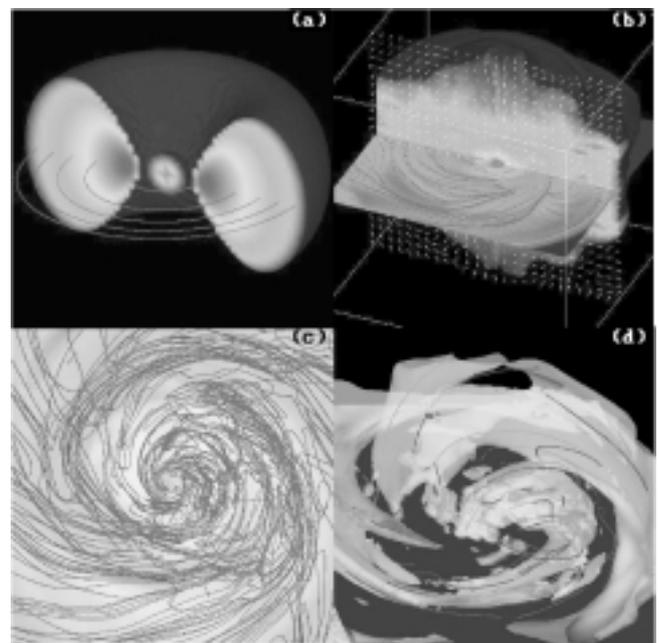


図3 初期に方位角方向の磁場に貫かれた回転トーラスの3次元磁気流体シミュレーション結果。初期に角運動量一定、ガス圧と磁気圧が等しい場合の結果。

- (a)初期条件。カラスケールは密度分布。赤い実線は磁力線。
- (b)6.2回転後の密度分布と磁力線。矢印は速度ベクトル。
- (c)6.2回転後の赤道面の密度分布(カラスケール)と赤道面に投影した磁力線(赤い実線)。
- (d)7.5回転後の円盤表面付近の磁場強度の等値面(黄色)と磁力線(赤い実線)。

(カラー図は巻末資料参照)

天体回転プラズマシミュレータの開発

千葉大学理学部 松元 亮治

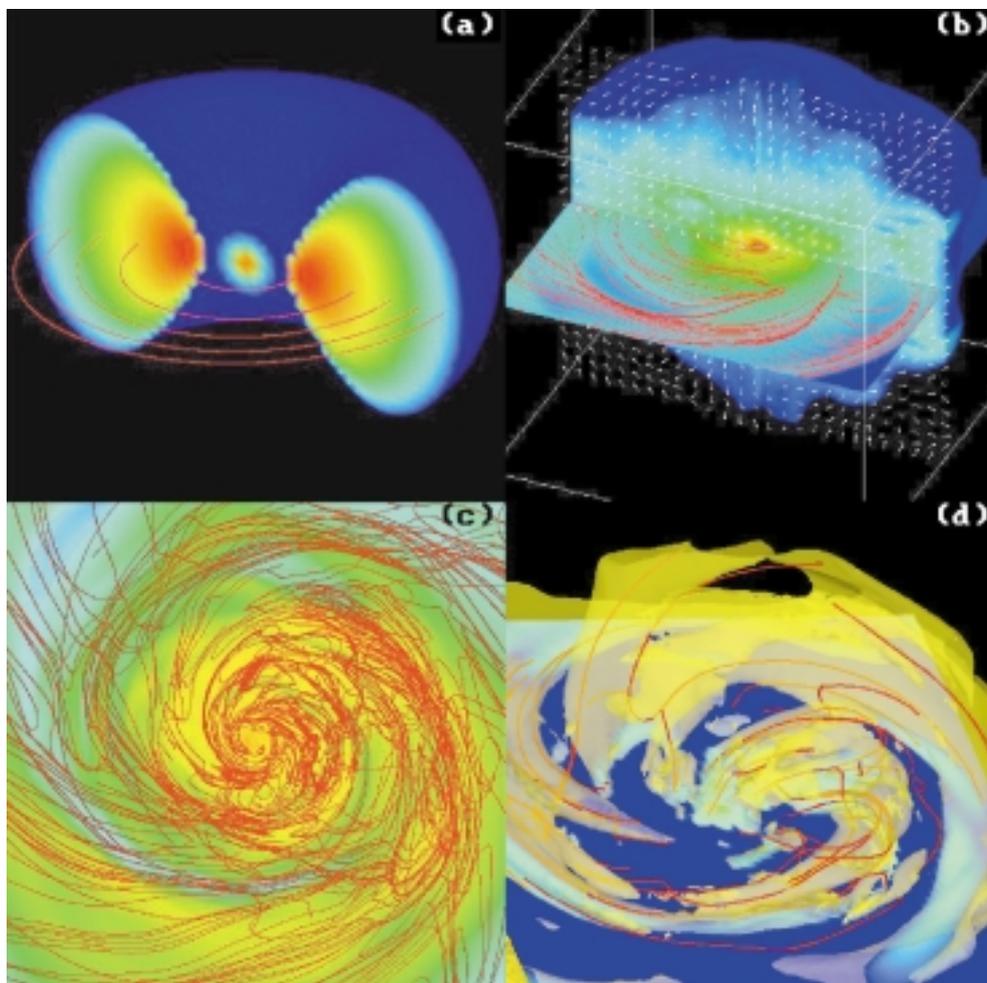


図3 初期に方位角方向の磁場に貫かれた回転トーラスの3次元磁気流体シミュレーション結果。初期に角運動量一定、ガス圧と磁気圧が等しい場合の結果。

(a)初期条件。カラースケールは密度分布。赤い実線は磁力線。

(b)6.2回転後の密度分布と磁力線。矢印は速度ベクトル。

(c)6.2回転後の赤道面の密度分布(カラースケール)と赤道面に投影した磁力線(赤い実線)。

(d)7.5回転後の円盤表面付近の磁場強度の等値面(黄色)と磁力線(赤い実線)。

これは平成12年3月9日に開催した
計算科学技術活用型特定研究開発推進事業
研究報告会（主催 科学技術振興事業団）
の予稿集から抜粋したものです。