

# 降着円盤の磁気流体乱流

鈴木 建\*

平成 26 年 3 月 31 日

## 概要

本発表では、降着円盤における磁気回転不安定性により励起される磁気乱流についての我々の磁気流体力学直接数値実験の結果を紹介する。

## 1 はじめに

天体周囲にガスが存在する場合、角運動量の軸に垂直な面に降着円盤がしばしば形成される。例えば、若い星周囲に形成され惑星がやがて作られる原始惑星系円盤や、ブラックホール周囲に形成される降着円盤がその代表例である。降着円盤ではその名の通り、物質が中心天体に落ち込んでいることが観測的にも分かっている。一方で、一旦動力学的平衡を保った降着円盤が形成されると、中心天体への物質の降着のためには、動径方向へ角運動量輸送が必要となる。この角運動量輸送には粘性が主要な役割を果たすはずであるが、天体現象においてはそのスケールの大きさから、分子粘性に対するレイノルズ数は非常に大きくなり、角運動量輸送に主要な役割を果たすことはできない。かわりに、降着円盤ガスの少なくとも一部分は乱流状態となっており、その実効的な乱流粘性が角運動量の輸送を担っていると考えられている [e.g., 7]。乱流の起源としては様々なものが提案されているが、そのうちの有力なもの 1 つに磁気回転不安定性がある [14, 4, 1]。本発表では、磁気回転不安定性の物理過程理解のための直接数値実験を用いた我々の研究成果についていくつか紹介する。

## 2 数値実験のセットアップ

我々の計算では理想磁気流体を解く直接数値実験の手法を用いる。非圧縮近似は仮定せず圧縮性波動についても直接解くため、スペクトル法を用いることはできず、衝撃波捕捉法であるゴドノフ法を用いる [5, 13]。磁気乱流の微細構造を分解するための局所計算 [6, 3, 9] や、大局構造を調べるための計算がこれまでに数多くなされている [8, 2] (図 1)。本研究でもこれら 2 つの手法による数値実験を行なっているが、我々の手法の大きな特色

\*名古屋大学 大学院理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻 理論宇宙物理学研究室; stakeru@nagoya-u.jp

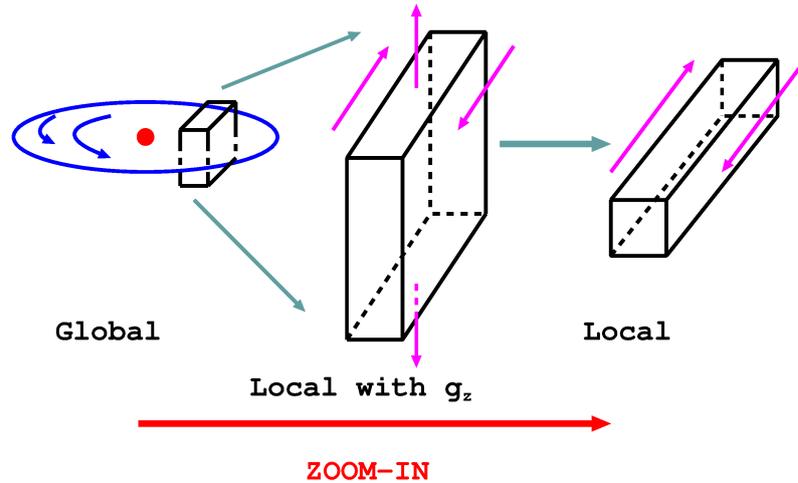


図 1: 様々な種類の降着円盤の数値実験. 左の円盤の(ほぼ)全体を計算領域に入れた数値実験では, 大局的な流れなどが取り扱える反面, 詳細な乱流構造が解像できないため, そのような微細構造を解像したい場合は, 右側のような局所計算を用いる.

として, これまでほとんど取り組まれてこなかった, 円盤に垂直な磁場を考慮した計算を行なっていることが挙げられる.

### 3 いくつかの結果

紙面の都合上, 結果の詳細に関しては我々のこれまでの論文 [10, 12, 11] を参照頂きたい. ここでは円盤風と磁場の時間進化についての結果を紹介する.

図 2 は局所計算と大局計算のスナップショットである. 乱流的な磁場が形成されていることが見てとれる.

図 3 は回転角方向の磁場の時間進化を表わしている. 局所計算, 大局計算のいずれにおいても, 磁力線の方向がある程度周期的に切り換わっていることが分かる. この周期性は特に局所計算においてよく見えているが, より具体的に磁力線の形状を示すと, 図 4 のように上下反対称に入れ替わっている. 一方で, 大局計算においてはこの周期性が大局的な流れにより乱されており, 上下面の反対称性が常に保持されている訳ではないようである.

この磁場の時間進化には, 円盤内の鉛直方向のガスの流れが重要な役割を果たしている. 図 5 は, 大局円盤計算の断面図である. 流れ場 (矢印) を見ると, 複雑な構造を持った流れ出し (円盤風) が起きていることが分かる. 円盤内の磁気乱流圧によりこの円盤風が駆動されており, 磁気回転不安定性により駆動された磁気乱流は, 動径方向の角運動量輸送だけでなく, 鉛直方向の流れにも大きな役割を果たしているということを意味している.

図 6 は, ここまでの結果をまとめた磁場の時間発展の模式図である. 最初に設定した縦方向の磁場 (左図) が磁気回転不安定性により増幅される (中図). この増幅と合わせて鉛

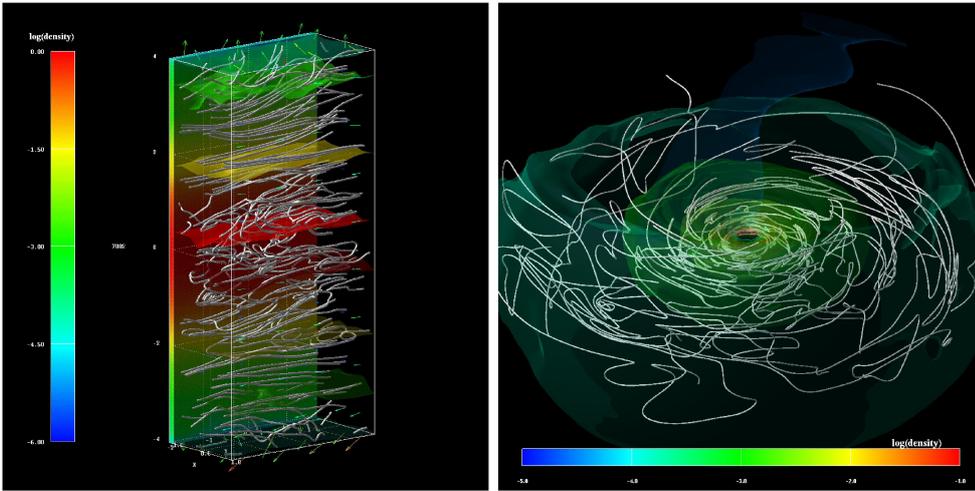


図 2: 降着円盤の局所領域 (左) と大局的 (右) な数値実験. 線は磁力線を表し, 色は密度の等値面を示す.

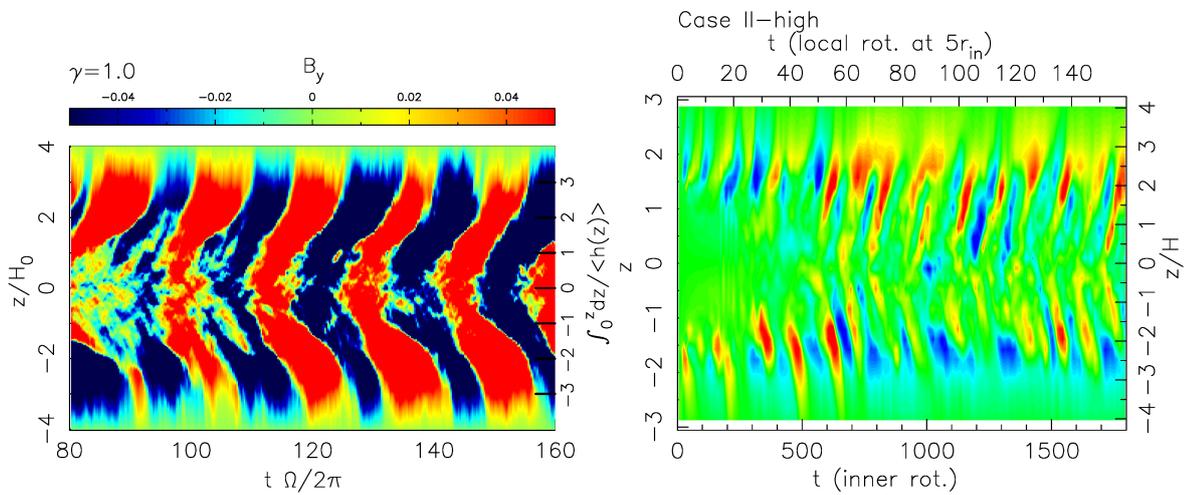


図 3: 回転角方向の磁場の時間 (横軸)-鉛直方向 (縦軸) 図. 左が局所計算のもので, 右が大局計算のものである.

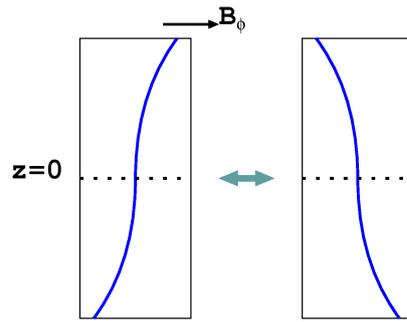


図 4: 円盤の回転角方向の磁力線の典型的な時間進化. 大局計算の場合は, 必ずしもこのパターンが保持されている訳ではない.

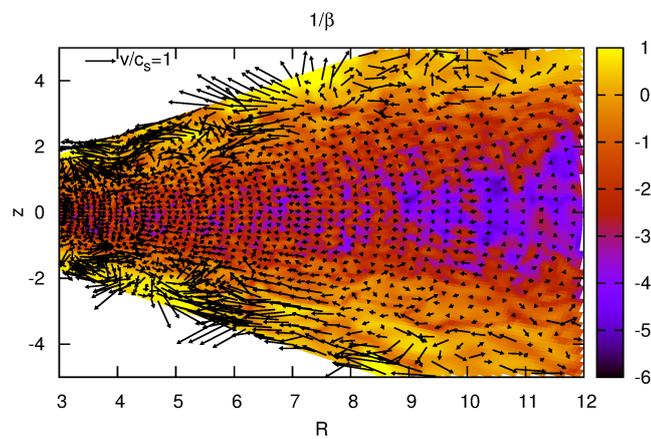


図 5: 大局計算の流れ場 (矢印) と, ガス圧で規格化した磁気圧 (色) の分布図.

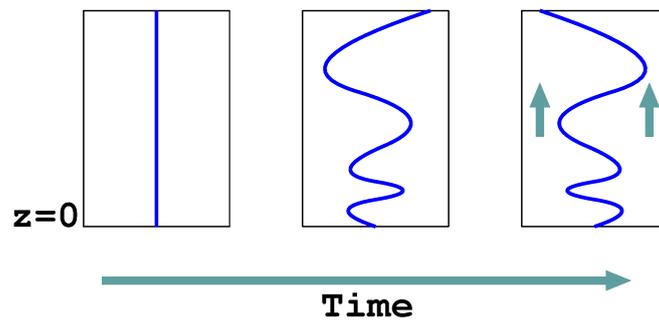


図 6: 磁力線の時間進化の模式図. 円盤の赤道面より上の半分の領域を描いている.

直方向の流れも発生し、この流れに乗って磁場も流れ出していく(右図)。結果として、回転角方向の磁場も図3,4で見たような切り替わりが発生することになる。

## 謝辞

本研究の計算には、国立天文台XT4,XC30、並びに、京都大学基礎物理学研究所SR16000を使用している。また本研究は、科研費(22684006)によりサポートされている。

## 参考文献

- [1] S. A. Balbus and J. F. Hawley. A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. I - Linear analysis. II - Nonlinear evolution. *ApJ*, 376:214–233, July 1991.
- [2] K. Beckwith, J. F. Hawley, and J. H. Krolik. Transport of Large-Scale Poloidal Flux in Black Hole Accretion. *ApJ*, 707:428–445, December 2009.
- [3] A. Brandenburg, A. Nordlund, R. F. Stein, and U. Torkelsson. Dynamo-generated Turbulence and Large-Scale Magnetic Fields in a Keplerian Shear Flow. *ApJ*, 446:741, June 1995.
- [4] S. Chandrasekhar. *Hydrodynamic and hydromagnetic stability*. Oxford: Clarendon, 1961.
- [5] S. K. Godunov. A Difference Scheme for Numerical Solution of Discontinuous Solution of Hydrodynamic Equations. *Math. Sbornik*, 47:271–306, 1959.
- [6] J. F. Hawley, C. F. Gammie, and S. A. Balbus. Local Three-dimensional Magnetohydrodynamic Simulations of Accretion Disks. *ApJ*, 440:742, February 1995.
- [7] D. Lynden-Bell and J. E. Pringle. The evolution of viscous discs and the origin of the nebular variables. *MNRAS*, 168:603–637, September 1974.
- [8] M. Machida, M. R. Hayashi, and R. Matsumoto. Global Simulations of Differentially Rotating Magnetized Disks: Formation of Low- $\beta$  Filaments and Structured Coronae. *ApJ*, 532:L67–L70, March 2000.
- [9] R. Matsumoto and T. Tajima. Magnetic viscosity by localized shear flow instability in magnetized accretion disks. *ApJ*, 445:767–779, June 1995.
- [10] T. K. Suzuki and S.-i. Inutsuka. Disk Winds Driven by Magnetorotational Instability and Dispersal of Protoplanetary Disks. *ApJ*, 691:L49–L54, January 2009.

- [11] T. K. Suzuki and S.-i. Inutsuka. Magnetohydrodynamic Simulations of Global Accretion Disks with Vertical Magnetic Fields. *ApJ*, 784:121, April 2014.
- [12] T. K. Suzuki, T. Muto, and S.-i. Inutsuka. Protoplanetary Disk Winds via Magnetorotational Instability: Formation of an Inner Hole and a Crucial Assist for Planet Formation. *ApJ*, 718:1289–1304, August 2010.
- [13] B. van Leer. Towards the ultimate conservative difference scheme. V - A second-order sequel to Godunov's method. *Journal of Computational Physics*, 32:101–136, July 1979.
- [14] E. P. Velikhov. . *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 36:1398, 1959.