

天体における磁気回転不安定性

国立天文台 柴田一成 (Kazunari Shibata)

1 はじめに

磁気回転不安定性 (magneto-rotational instability) とは、差動回転する磁気流体に普遍的に起こる不安定性のことで、磁場による角運動量輸送が原因で発生する。もともと Velikov (1959) によって発見されたもので、Chandrasekhar (1961) の分厚い本にも記載されている。ただし、磁場があるとどんなに弱くても (軸対称摂動に対する) レイリーの安定条件

$$d/dr(r^2\Omega) > 0$$

は成立せず、

$$d/dr(\Omega) > 0$$

が新たな安定条件となる、ということくらいしか書かれていないので、ごく最近まで、その重要性に気付かれることがなかった。

天体現象、とくに降着円盤における磁気回転不安定性 (図 1) の重要性に最初に気付いたのは、Balbus and Hawley (1991) であり、Chandrasekhar (1961) の本以来、実に 30 年ぶりのことであった。もっとも Chandrasekhar の時代には降着円盤という概念そのものが未成熟であったから、Chandrasekhar がその重要性に気付かなかったのも無理はない。

降着円盤 (accretion disk) とは、天体 (恒星やブラックホール) の近くに遠方からガスが落ち込んできたときにできる天体の周りの回転円盤のことである。回転しているのは、もちろん、角運動量がゼロでないからであり、角運動量を失わない限り、ガスは永遠に天体に落下 (降着) できない。したがって、いかにして回転円盤から角運動量をぬきさりガスを中心天体に降着させるか?、が問題となる。

降着円盤の天体における重要性が認識されるようになったのは、1960 年代後半 - 70 年代前半頃のことである。当時、X 線天文学の発展によって X 線星が発見され、それが中性子星やブラックホールへのガスの降着による重力エネルギーの解放で説明できるのではないか、ということで、降着円盤という概念が発展した。しかし、実は良く考えてみると、降着円盤が現れるのは X 線星に限らない。恒星やブラックホール形成そのものも降着円盤を経由している。そもそも角運動量をもたないガスなど、この宇宙には存在しないからである。われわれの住む地球ですら、もともとは惑星系を作った原始太陽系円盤という降着円盤を経由してきているのだ。この円盤から効率良く角運動量をぬいて、ガスを中心に落下させないと我々の太陽は生まれてくれない。

ということで最近20年ほどの天体物理学では、降着円盤中のガスからいかにして角運動量をぬきさってガスを降着させるか、が大問題となっていた。当初は、回転円盤が惑星運動のようにケプラー回転（つまり差動回転）するだけで流体シア不安定性が起きて乱流状態になるのではないか、その乱流粘性によって角運動量が輸送できるのではないか、とわりと安易に考えられていた。しかし、ケプラー円盤は軸対称摂動に対しては安定（レイリー条件を満たす）だし、非軸対称摂動の場合でも、ちゃんと計算してみると、不安定にするためには円盤には動径方向に境界が必要（境界で音波を反射させることが必要）であることが判明し (e.g., Kato 1987)、さらに、なんとか不安定にできても非線形発展まで計算してみると観測が説明できるくらい大きな粘性が出てこないことがわかった (e.g., Kaisig 1989)。これが1980年代の終わり頃の状況だった。そういう息詰まった状況の頃に、降着円盤への応用を明確にうたった Balbus-Hawley (1991) の磁気回転不安定性の「再」発見が出たから、これはビッグニュースとなり、二人は学会の寵児となった。（この不安定性がしばしば Balbus-Hawley instability と呼ばれるゆえんである。）もっとも時代も良かった。Balbus-Hawley (1991) では、線形解析しただけ（降着円盤では磁場がかなり弱くても不安定性が起ることを示し粘性の起源になりうることを予想しただけ）だったが、そのすぐ後の Hawley-Balbus (1991) の論文では、非線形の2次元MHDシミュレーションがなされ、大きな実効的粘性が発生することが示されたからである（図2参照）。その後、この不安定性に関する線形解析や非線形シミュレーションの論文が山のように出て（今も出つつあり）、まだ残された問題は数多いものの、この不安定性が降着円盤における粘性の起源を説明する最も有力な機構である、という点では、ほぼ決着がついたと考えられる (Balbus and Hawley 1998 のレビューを参照)。

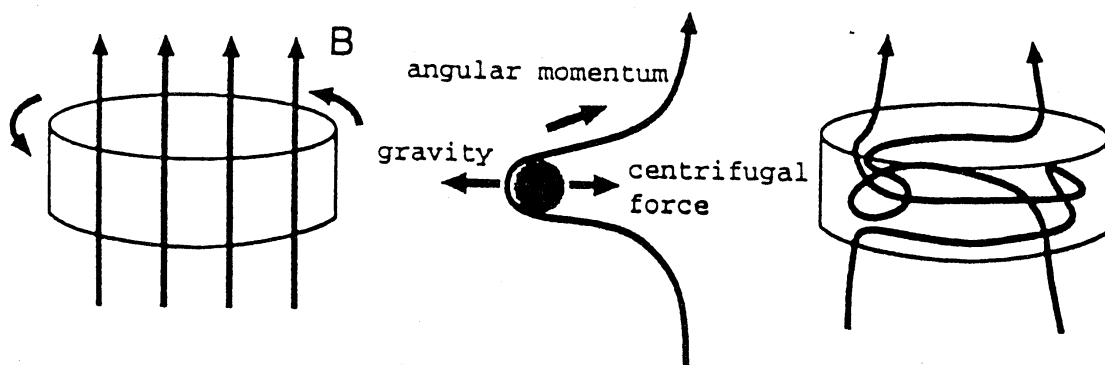


図 1: 降着円盤における磁気回転不安定性の概念図 (Tajima and Shibata 1997, p. 324 より)

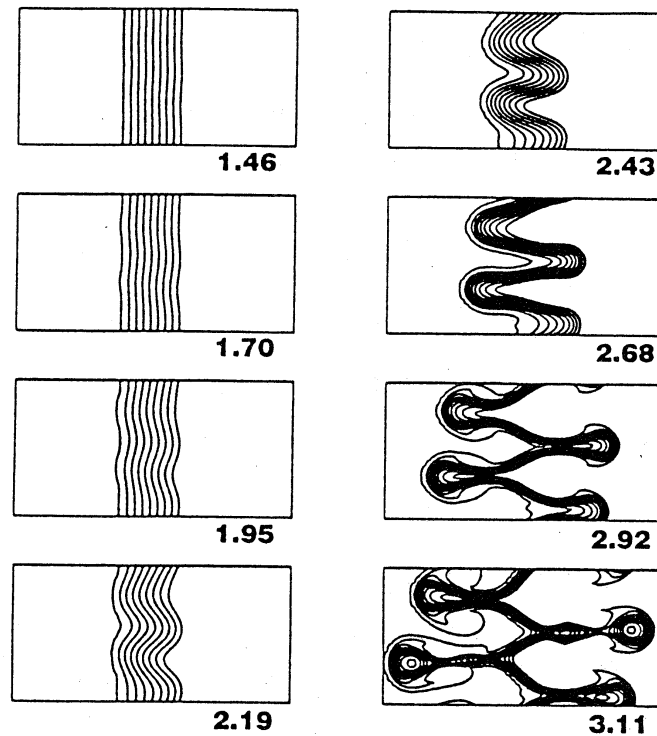


図 2: 磁気回転不安定性の非線形発展 (Balbus and Hawley 1998 より)。ケプラー回転する円盤中の局所座標系 (縦方向が z 、横方向が r) における、2次元軸対称 MHD シミュレーションの結果。磁力線の時間発展。数字は円盤の回転周期を単位とする時間を表す。

2 磁気回転不安定性とは

さてでは、磁気回転不安定性とはどんな不安定性だろうか？ 直感的に理解するために良く引き合いに出されるのは、地球の周りの異なる軌道半径をまわる2台の人工衛星 (スペースシャトル) にゴムひもをつけるたとえである。(人工衛星がプラズマ、ゴムひもが磁力線である。) 低軌道をまわる人工衛星は回転速度が速いので外側の人工衛星をゴムひもで引っ張ろうとするが、高軌道衛星は遅いので、低軌道衛星は一瞬「減速」される。減速すると遠心力が弱くなって重力に引っ張られて落下する。するとさらに低軌道にうつるから回転速度は結局速くなり、ますます高軌道の衛星との速度差が大きくなって、ブレーキが大きくなり、どんどん落下していく。(大気摩擦で人工衛星が落下するのと同じ理屈。) 高軌道衛星には、これと逆の過程が働いてどんどん外側の高軌道にうつっていく。というわけで、こういうシステムは不安定であることがわかる。不安定性の原因はゴムひも (磁力線) による角運動量輸送である。

非圧縮流体を仮定し、ケプラー円盤 ($\Omega \propto r^{-2/3}$) 中に局所座標系 (z -方向が円盤に垂直方向) をとり、 z -方向に一様磁場を仮定して (図1参照)、局所摂動 perturbation

$\propto \exp(ikz - i\omega t)$ を与えると次のような分散関係式を得る (e.g., Balbus-Hawley 1991)。

$$(\omega^2 - k^2 V_A^2)^2 - \kappa(\omega^2 - k^2 V_A^2) - 4\Omega^2 k^2 V_A^2 = 0$$

ここで、 $V_A = B/(4\pi\rho)^{1/2}$ は Alfvén speed、 $\kappa = (2\Omega/r)d(\Omega r^2)/dr$ はエピサイクリック振動数である。物理的には、第2項はコリオリ力、第3項は磁気張力を表す。これより、不安定の必要条件は、

$$d\Omega^2/dr < 0$$

であること、また不安定性は長波長でのみ起こること、

$$k < k_c = 3^{1/2}\Omega/V_A$$

がわかる。さらに最大成長率は、

$$\omega \sim k_c V_A/2 \sim \Omega$$

程度となって、回転のタイムスケールで不安定性が発達する。どんなに磁場が弱くても (V_A が小さくても) 十分小さな波長をとりさえすれば不安定性は起こる。この後者の結論は重大である。これまで降着円盤では磁場は弱いから無視してよいと思われていたのが、どんなに弱くても無視してはいけない、ということになったからである。磁場嫌いの降着円盤業界に衝撃をもたらしたのはいうまでもない。

3 残された課題

講演では、磁気回転不安定性に対する抵抗の効果と saturation mechanism (Sano 1998, Sano et al. 1998)、非線形3次元シミュレーションの現状 (Hawley et al. 1995, Matsumoto and Tajima 1995, Brandenburg et al. 1995, Stone et al. 1996, Matsuzaki et al. 1997) を紹介し、最後に宇宙ジェットとの関連 (Uchida and Shibata 1985, Shibata and Uchida 1986, Matsumoto et al. 1996, Matsumoto and Shibata 1997, Kudoh et al. 1998) や降着円盤活動 (Shibata et al. 1990) との関連を述べた。詳しくは、参考文献を参照していただきたい。

残された重大な課題は、以下の通りである。

- 3次元グローバルシミュレーションによる saturation mechanism の解明
- この不安定性によるダイナモ機構の解明 (降着円盤では、この不安定性によってダイナモが起こっていることがほぼ確からしくなってきた)
- 降着円盤活動 (コロナ、フレア、ジェット) との関連の解明
- 銀河円盤への応用

参考文献

Balbus, S. A. and Hawley, J. F. (1991) ApJ 376, 214.

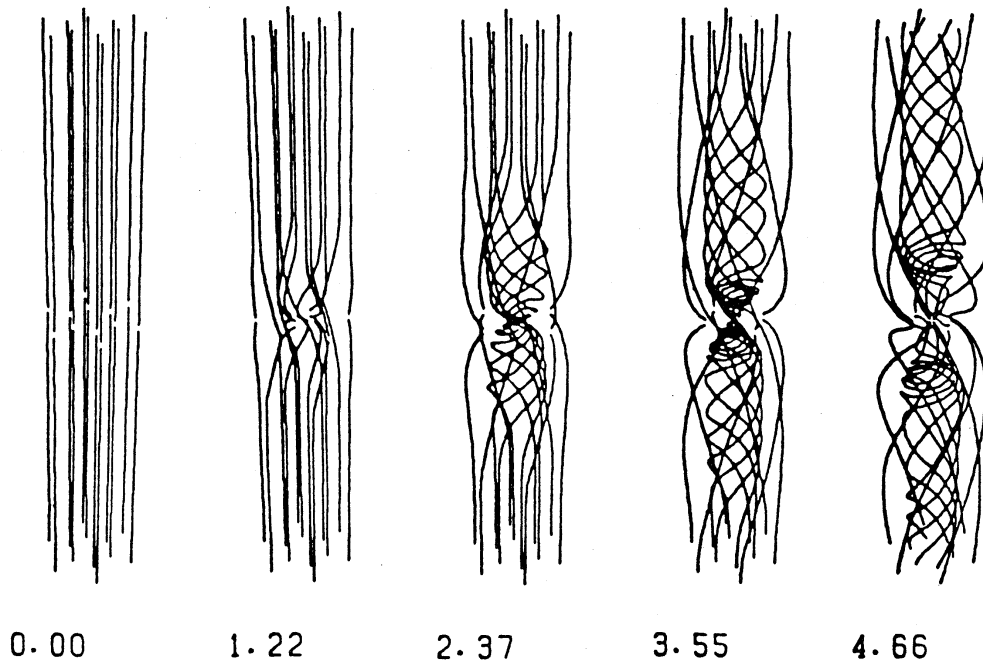


図 3: 宇宙ジェットの MHD シミュレーション (Shibata and Uchida 1990 より)。磁力線の 3 次元構造 (2 次元軸対称計算に基づく) の時間発展。中心付近に降着円盤があって回転しながら中心に落下し磁力線を引きずっていく。それとともなう捻れアルフベン波が伝播しているのがわかる。また少し遅れて超音速ジェットが中心付近から上下に噴出している。なお、この MHD ジェット生成機構の基本的な物理は、磁気回転不安定性の物理とほとんど共通である。(特に磁場が弱い場合は全く同等と言って良い。その意味では、私はすでに 1984-85 ころに、降着円盤で磁気回転不安定性が起こることを知っていたと言える！しかし、磁場が弱い場合は数値誤差の影響ありとして、計算結果をあまりまじめに考えなかったのだ。逃した魚は大きい！

- Balbus, S. A. and Hawley, J. F. (1998) *Rev. Mod. Phys.*, 70, 1.
 Brandenburg, A., Nordlund, A., Stein, R., and Torkelsson, U. (1995) *ApJ* 446, 741.
 Chandrasekhar, S. (1961) *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*, Dover.
 Hawley, J. F. and Balbus, S. A. (1991) *ApJ* 376, 223.
 Hawley, J. F., Gammie, C. F. and Balbus, S. A. (1995) *ApJ* 440, 742.
 Kaisig, M. (1989) *A&A* 218, 89.
 Kato, S. (1987) *PASJ* 39, 645.
 Kudoh, T., Matsumoto, R., and Shibata, K. (1998) *ApJ* Nov. issue, in press.
 Matsumoto, R. and Tajima, T. (1995) *ApJ* 445, 767.
 Matsumoto, R. et al. (1996) *ApJ* 461, 115.
 Matsumoto, R., and Shibata, K. (1997) *IAU Colloq. No. 163*, p. 443.
 Matsuzaki, T. et al. (1997) *IAU Colloq. No. 163*, p. 766.
 Sano, T. (1998) Ph. D. Thesis, U. Tokyo.

- Sano, T., Inutsuka, S., Miyama, S. M. (1998) ApJ Let, in press.
- Shibata, K., Tajima, T., and Matsumoto, R. (1990) ApJ 350, 295.
- Shibata, K., and Uchida, Y. (1986) PASJ 38, 631.
- Shibata, K., and Uchida, Y. (1990) PASJ 42, 39.
- Stone, J. M., Hawley, J. F., Gammie, C. F. and Balbus, S. A. (1997) ApJ 463, 656.
- Tajima, T., and Shibata, K. (1997) Plasma Astrophysics, Addison-Wesley, Massachusetts.
- Uchida, Y., and Shibata, K. (1985) PASJ 37, 515.
- Velikhov, E. P. (1959) JETP 36, 1398.