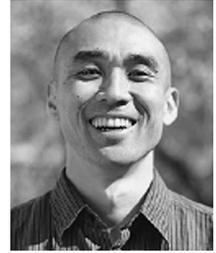


磁気乱流駆動型降着円盤風の数値実験

鈴木 建

〈名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 〒464-8602 名古屋市千種区不老町〉
e-mail: stakeru@nagoya-u.jp



本稿では、われわれが取り組んでいる降着円盤での磁気乱流と乱流駆動型円盤風の数値シミュレーションについての研究成果を、苦労話を交えつつ紹介する。

1. 端 緒

この研究に取り組み始めたのは2007年頃のことである。それまで私は、太陽風や恒星風駆動の磁気流体数値実験に取り組んでいた^{1), 2)}。一方でこれらの太陽/恒星風駆動の数値実験は、天体表面から上空まで大きく減少する密度構造の変化を解くため、1次元的な磁束管内方向のみのエネルギーや物質の輸送を取り扱ったものであった。しかしながら、恒星の外層では波動乱流によるエネルギーの輸送^{3), 4)}が重要な役割を果たすとの指摘もあり、このような乱流機構を解くために不可欠な、3次元空間での数値実験を行うことの必要性を痛感していたのもこの頃であった。

そこで数カ月間を掛け、1次元数値計算コードを3次元化した。コード作成後にまずすべきことは、テストに継ぐテストである。作成直後のプログラムがまともに動くことは、10中8-9どころか、10,000中9,999ない。そこで波動の伝播、衝撃波管、輪ゴム状磁気ループの移動、点状爆発などのさまざまなテスト計算をコードにやらせ、堅牢な数値実験コードを作り上げていく必要がある。そのようなテストの一つとして、降着円盤の一部分に計算領域をおくシアリングボックス近似に基づく磁気回転不安定性⁵⁾の数値実験⁶⁾⁻⁹⁾を行ったのが2008年頃のことである。

2. 円 盤 風 ?

ここでも他のテストと同じく何百回、何千回もの計算のクラッシュ（不正終了）を経て、ようやく順調に磁気回転不安定性による磁場強度の増加が見えるようになってきた。しかしどうやっても理解できない困った現象が起きていた。それは計算領域内の質量がどんどん減ってしまうということである。計算では、中心星の重力の円盤に垂直な方向の成分を考慮しており、円盤内の密度は赤道面から表面へといくに従って減少するようになっている。これと同時に、円盤表面からの物質の流れ出しを許容した境界条件を設定しているため、計算領域内の質量が減っていくこと自体は不自然ではない。しかし、その量が多過ぎるのである。どれくらい多いかというと、遠方から降着してきた物質のほとんどが中心星に降着せずに、円盤風で飛び去ってしまうぐらいの量なのである。

この時点ではテスト計算ということもあり、使用しているメッシュの数が一般的な観点から見ると少ないものであった。数値実験では、メッシュの数を増やし計算の解像度を上げると、結果がガラリと変わるという困ったことが日常茶飯事のように起きる。今回の場合もメッシュ数が足りないため、このようなおかしい結果が出たのではないかと疑い、より高解像度の計算をやらすには気が済まなくなってきた。当初は恒星風の計算のためのテス

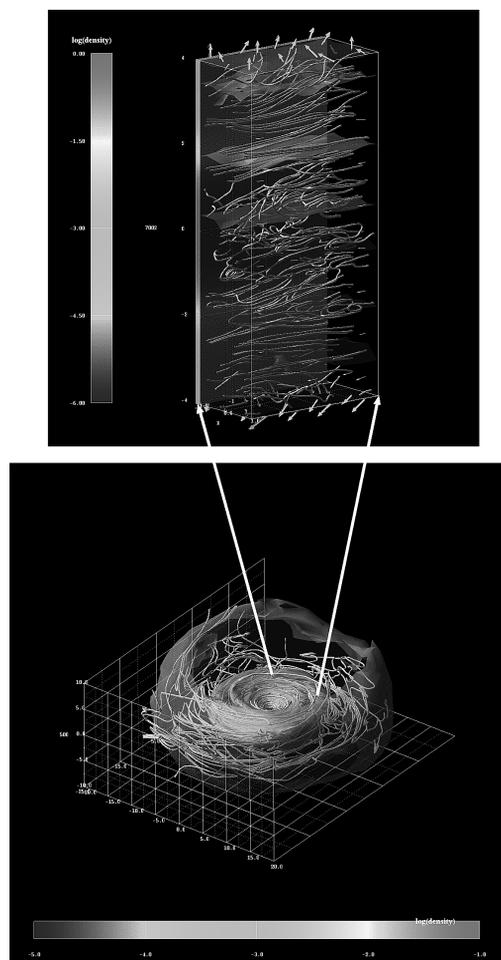


図1 降着円盤の磁気流体シミュレーションの一例。上が円盤の局所部分を切り取ったシアリングボックス近似の結果であり、下が大局的円盤の結果。いずれの図においても、色が密度の等値面を、白色が磁力線を表している。上図のみ速度場を矢印（上下表面領域のみ強調している）で示しているが、上下面より物質が流れ出しているのがわかる。

トの予定であったが、期せずして降着円盤業界に足を踏み入れることになってしまったのである。

降着円盤業界を外野から眺めると、海外、国内を問わず多くの研究者がおり、活況を呈しているようであった。このような研究者人口の多い業界からはできるだけ距離をおきたいというのが本心であったが、このときはどうせプログラムのバグ

取りだけで論文にはならないだろうという予断もあり、物理的に正しそうな計算が長時間安定に走る計算コードを作り上げたいという欲求だけで突っ走ってしまった。結局このまま現在まで抜け出せなくなり、ハマってしまっている。

話を戻そう。とにかくもっと高解像度の計算を行いたい。ここでCfCAのCray XT4の登場である。当時は共有メモリーのマシンで小粒な並列計算をOpenMPを使って見よう見真似で走らせていたぐらいのスキルしかなかったが、このマシンをはじめ今後大規模スカラー並列マシンが全盛になることが予想され、MPIを使った分散メモリー用の並列化を行い、計算を走らせることにした。

3. 円盤風！

解像度を上げた計算でもやはり計算領域内の質量はどんどんなくなり、そのなくなり方も上記のテスト計算とたいして変わらないことが判明した。エネルギー輸送の状況を詳細に調べてみると、円盤内部で磁気回転不安定性により乱流状態の磁場が増幅し、ここに磁気浮力に起因するパーカー不安定性¹⁰⁾も相まって、乱流的磁場に伴うポインティング流束が上空へと流れ¹¹⁾、上空への物質の流れを駆動していることがわかった。すなわち、磁気乱流駆動型の円盤風により物質が流れ出し（図1の上図）、計算領域内の物質がどんどんなくなっていたのである。これは私がそれまで取り組んできた太陽風^{12), 13)}と何だか似ている。太陽風の場合は表面对流層により複雑な構造の磁場が生成され、さらにアルフベン波の形でポインティング流束が上向きに流れ、最終的に太陽風が駆動されている。今回の円盤風も複雑な構造の磁場のポインティング流束を統計的に平均すると上空を向いており、これが円盤風の駆動源となっている。

ではこのような円盤風駆動機構は議論されているのだろうか？ いろいろと調べてみたものの、そのものずばりを指摘し議論した論文はないよう

であった。円盤風駆動というBlandford-Payne¹⁴⁾に代表される、大域的にそろうた磁場による磁気遠心力風がよく調べられている¹⁵⁾。しかし、ここで述べたような乱流磁場による円盤風駆動は、他の研究者らの計算でも見えているようなのである^{16), 17)}が、なぜかこれらの論文ではほとんど触れられずに議論から抜け落ちてしまっている。彼らの論文では主眼が円盤風以外にあるということもあるが、計算領域からの早期の物質の損失はその計算の信頼性を損なわせるという要素もあるため、意図的に避けられていたという側面もあったのではないかと、個人的には考えている。また、磁気遠心力駆動の円盤風モデルでは、円盤風の質量流束（質量放出率）の決定には円盤風の根元の密度を何らかの形で規定してやる必要がある。今回われわれが数値実験で見た現象は、円盤風の根元の密度を仮定なしに決めることができ、このような観点から乱流駆動型と磁気遠心力駆動型の円盤風は相補的な役割を果たしうるということもできる。

ともかくひょうたんから駒のような形で、論文になりそうな題材が転がり出てきた。しかし数値実験の結果をそのまま信じて、「降着円盤では周囲のガスは中心天体までは降着せず、円盤風でほとんどが流れ出してしまう」ということを大々的に主張するのは問題がありそうであった。というのも、上でも述べたとおりこの計算では降着円盤の一部分を切り取った局所シアリングボックス近似を行っており、多量の円盤風が流れ出す原因のうちのいくばくかの部分は、この近似の限界を意味しているような気がしていたからである。また、そもそも円盤風を駆動するおおもとのエネルギーは、中心星へと落ち込む物質が解放する重力エネルギーであり、物理的に考えても「中心天体まで降着せず円盤風で流れ出す」という主張は問題がある。端的に言う、自分で自分の計算結果を信じられないのである。そこで「局所近似した円盤では多量の円盤風が吹き出す模様である」ということを慎重かつ注意深く説明した¹⁸⁾うえて、

論文の主題を降着円盤の一種である原始惑星系円盤のガスの散逸への応用という面におくという戦略を取った^{19), 20)}。これらの論文^{18), 19)}は、その筋の人々には物議を醸したようで、約3年後にわれわれの計算結果の信憑性を議論する論文が、異なる複数のグループから出された²¹⁾⁻²³⁾。現状では、われわれが主張したような局所計算における乱流的磁場に伴うポインティング流束駆動型の円盤風は、質量流束の定量性などの詳細については不定性が大きい、定性的な駆動機構は正しいようであるというコンセンサスが得られている。

4. 本当に乱流駆動円盤風は吹くか？

このような大きな質量流束の円盤風は、実際の天体でも実現されるのであろうか？ 円盤の局所部分を切り取ってきってしまったことによる幻想なのではないだろうか？ という懸念が、心の中でどんどん大きくなってきた。やはり、大局的な数値実験をしないことには気になって仕方がない。計算しよう。が、ここからが本当の苦勞一境界条件との戦い—の始まりであった。

降着円盤はその名のとおりの円盤状の物質であり、その上空にはあまり物質が存在せず、広い意味でコロナと呼ばれる低密度領域が存在していると考えられている。一方で、われわれ（や他の多くのグループ）が用いている陽的な数値解法は、低密度領域を解くのがなかなかたいへんである。波—すなわち情報—の伝播速度であるアルフベン速度が速くなるため、計算の時間ステップが進まなくなり、長時間の円盤進化を解くのに膨大な時間が掛かるようになる。さらに、ガスのエネルギーに比較して相対的に磁場のエネルギーが大きくなるため、桁落ちが発生しやすくなり、密度（や温度）が負になる運の悪いメッシュが登場したりする。その結果、これらの物理量の平方根を使っているアルフベン速度（や音速）が虚数(!)で計算不能となりSegmentation Faultが出て計算がクラッシュしてしまう。このような事態

を避けるため、密度（や温度）の底値を丸め誤差値よりもかなり大きめに設定するという泥縄的対応がほぼすべての磁気流体数値コードで取られている。これに加えて、上空部分にある程度の密度と温度をもつコロナ領域を最初からおき²⁴⁾、計算が安定に走る方策を取られることもよくある。円盤の一般的性質を調べる場合は、このような初期コロナの設置もさほど問題にならないと思われるが、円盤をガス圧により上空から抑えつけることになり表面からの物質の流れ出しを抑制する効果として働くため、今回のような円盤風を扱うのにはあまり使いたくない方法である。

そこで円盤をできるだけ上空の高いところまで解くものの、コロナまでは計算領域に含めないような設定を用いることにした。円盤の厚みは中心天体から離れると大きくなるため、図2にあるような球座標の一部分を計算領域とし、円盤表面の境界に波動と物質が流れ出す境界条件²⁵⁾を課すという方針を取った。しかしこれが難しい。頑張っただけで計算領域を広くすると、円盤表面の境界付近で上で述べた低密度に起因する計算のクラッシュが頻発し、全く計算が進められない。一方で安全策を取って計算領域を小さくすると、物質の流失を過大評価する傾向にある流れ出し境界条件の影響が強くなり、円盤内のガスがすぐなくなってしまふ。どこまで計算領域を取れば良いのかが、計算をしてみないとわからないのである。さらに困ったことに、自前のデスクトップマシンで

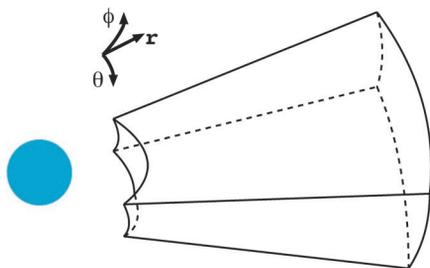


図2 大局計算に用いる計算領域。なお、回転角方向には実際は全周もしくは半周の計算領域を確保している(図1の下図)。

行ったテスト計算と、CfCAのXT4や京大基礎物理学研究所のSR16000で行う本番の高解像度計算で、適切な計算領域が違いそうなこともわかった。計算結果が、解像度に依存してしまっているということである。

計算を走らせ始めて数日すると計算がクラッシュし、少し時間を戻して泥縄的に処方箋をあて、途中から計算をリスタートさせるといふようなことを何度も繰り返すうちに、だんだん嫌になってきてほかの仕事にかまけて放置するというようなサイクルが続いた。2010年から計算を開始したのだが、1年、2年と経ち、このままお蔵入りになってしまうのかと絶望的な感じになってきた。が、計算機使用に際し膨大な空調/電気代が掛かっており、最低限論文は出さないとマズい。計算コードは泥縄の処方箋が各所にあてられ満身創痍の状態であったが、CfCAの計算機がリプレイスでXT4からXC30アテルイへと速くなり使い勝手も良くなったこともあり、円盤の内縁が1,000-2,000周するまでの計算が何とか終わった。もう2013年になっていた。ようやく論文を書く段階になったが、全然気分が乗ってこない。通常論文を書く場合、伝えたい結果がありその結果のために物語を書くように論理を構築していくと、どんどん気分も乗ってくる。しかし、今回は肯定的な目玉となるような結果がなく、以下に述べるよう、さらに混迷を深めるような結果を出してしまっている。数行書いては心が折れてしばし放置し、数日してまた数行書くという状況であった。もう仕方がないので、数値データを余すことなく掲載したうえで、虚心坦懐にデータの説明をするだけにしてほかの研究グループにも解釈を試みてもらうような書き方に徹した²⁶⁾。要は「物語」はあきらめ、「現状報告レポート」に徹するということである。

さて結果である。件の円盤風はどうなったか？ 質量流束が局所円盤計算の半分ぐらいに弱くなった。局所計算では、円盤がその場所で5-10

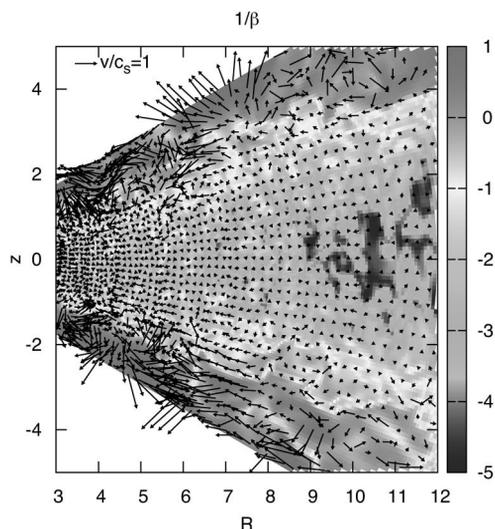


図3 大局計算の円盤の断面図。色はガスのエネルギーに対する磁場のエネルギーの比の対数。矢印は速度場。円盤風が吹き出している場所と、休止している場所があることがわかる。

回転する周期の準周期的な円盤風が吹き出していたが、大局計算ではより間欠性が強くなり、休止するような状態のものもあり（図3）、これが円盤風の質量流束の減少につながっていた。大局円盤では動径方向の各場所で回転数が異なる一方で、動径方向の領域は物質の流れや磁力線でつながっている。このような動径方向の関連性は大局計算で初めて考慮されることであり、この効果が円盤風の強い間欠性を引き起こしていると思われるのであるが、ではなぜその効果が時間的に平均した円盤風を強めるのではなく、弱めるのかということについては、まだ理解できていない。

5. 新たな問題

大局計算では、円盤風以外にもさまざまな面白い現象を解析することができる。そのうちの 하나가、動径方向の物質の流れと磁力線の動きの関係である。天体の周囲の磁束の時間進化は、難しくも面白い問題である。例えば星形成の際には、磁束を質量の降着とともに中心天体に引き込んでしまうと、その後の恒星で観測される磁場強度を大

きく越えてしまうため、磁束を外側に逃がす必要がある²⁷⁾。逆に中性子星やブラックホールなどの高密度天体周囲の降着円盤では、強いジェット駆動のために、磁束が中心天体近傍に集まるほうが望ましいようである²⁸⁾。星形成時に形成される原始惑星系円盤と、高密度星周囲の降着円盤では温度や密度などの物理状態が異なり、磁場とガスの結合度合も違ってくる。その相違によって、異なった天体での異なった磁束の動く向きが説明できる可能性もあるが、現在まで多くの仕事が行なわれている²⁹⁾⁻³²⁾ものの最終的な結論はよくわかっていない。さらに難しいのは、温度が高く十分な電離度が得られ磁場がガスに凍結（理想磁気流体近似と呼ばれる）していると考えられる場合においても、乱流の影響により磁力線がつなぎ変わり、磁場とガスで別の動きをする可能性も指摘されている³³⁾。本計算では、理想磁気流体近似を仮定しているため、このような磁束に対する乱流の影響を数値データから読み取ることが可能である。

図4では、ガスと磁束の動径 (r) 方向の速度を比較している。ガスの速度構造は、内側部分は中心天体方向に降着し外側部分は外側に動くという、降着円盤ガスの拡散現象の教科書的な進化³⁴⁾を示している。対して磁束は乱流による磁力線のつなぎ変えの結果、ガスとは全く異なる動きをしていることがわかる。赤道面付近の磁束は外向きと内向きが場所ごとに小刻みに入れ替わっている。一方で、表面付近の磁束は、中心天体の方向に流れ込んでいる。表面付近と赤道面での磁束の動きの違いは、この領域の間で磁力線が3次元的につなぎ変わっていることを示している。結局わかったことは、磁場とガスが凍結している理想磁気流体の場合でも、乱流的な磁力線のつなぎ変えにより磁束の動きはガスの流れとは違うということである。しかしながら、乱流磁場の効果が磁束の動きに与える効果は複雑であり、結局のところその向きはどのように決まっているのかよくわからない。われわれの行った大局計算は、さらなる

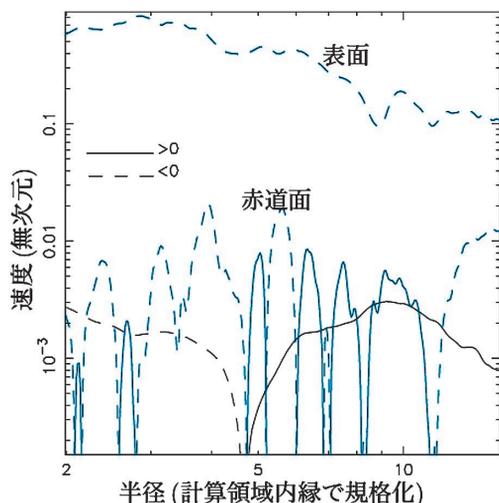


図4 動径座標 (r) に対する, 長時間平均したガス (黒線) と磁束 (青線) の r 方向の速度. 破線は中心天体方向への降着を, 実線は中心天体から逆の外向きとなっていることを表している. ガスの速度は円盤全体を積分したものであり, 磁束の速度は赤道面と表面付近のそれぞれについて表示している.

混迷を与える結果を出してしまったようである. 是非とも皆様のお知恵を拝借したい.

謝 辞

本研究の内容は, 犬塚修一郎氏, 武藤恭之氏との共同研究に基づくものである. 数値実験には, 国立天文台 CfCA (Cray XT4 および XC30 アテルイ) と京都大学基礎物理学研究所 (HITACHI SR16000) の計算機を使用しており, これらの計算機なしには本研究はなしえなかった. 本研究は文部科学省科学研究費補助金 (19015004, 20740100, 22864006) より援助を受けている.

参考文献

- 1) 鈴木 建, 犬塚修一郎, 2006, 天文月報99, 205
- 2) Suzuki T. K., 2007, ApJ 659, 1592
- 3) Matthes W. H., et al., 1999, ApJ 523, L93
- 4) Matsumoto T., Suzuki T. K., 2012, MNRAS 749, 8
- 5) Balbus S. A., Hawley J. F., 1991, ApJ 376, 214
- 6) Hawley J. F., Gammie C. F., Balbus S. A., 1995, ApJ 440, 742

- 7) Matsumoto R., Tajima T., 1995, ApJ 445, 767
- 8) Brandenburg A., Nordlund A., Stein R. F., Torkelsson U., 1995, ApJ 446, 741
- 9) Sano T., Inutsuka S.-i., Turner N. J., Stone J. M., 2004, ApJ 605, 321
- 10) Parker E. N., 1966, ApJ 145, 811
- 11) Machida M., Matsumoto R., 2003, ApJ 585, 429
- 12) Suzuki T. K., 2006, ApJ 640, L75
- 13) Suzuki T. K., Inutsuka S.-i., 2005, ApJ 632, L49
- 14) Blandford R. D., Payne D. G., 1982, MNRAS 199, 883
- 15) Kudoh T., Matsumoto R., Shibata K., 1998, ApJ 508, 186
- 16) Miller K. A., Stone J. M., 2000, ApJ 534, 398
- 17) Turner N. J., 2004, ApJ 605, L45
- 18) Suzuki T. K., Inutsuka S.-i., 2009, ApJ 691, L49
- 19) Suzuki T. K., Inutsuka S.-i., Muto T., 2010, ApJ 718, 1289
- 20) 鈴木 建, 武藤恭之, 犬塚修一郎, 2009, 遊星人18, 147
- 21) Bai X.-N., Stone J. M., 2013, ApJ 767, 30
- 22) Fromang S., Latter H., Lesur G., Ogilvie G. I., 2013, A&A 552, A71
- 23) Lesur G., Ferreira J., Ogilvie G. I., 2013, A&A 550, A61
- 24) Kato Y., Mineshige S., Shibata K., 2004, ApJ 605, 307
- 25) Suzuki T. K., Inutsuka S.-i., 2006, J. Geophys. Res. 111, A06101
- 26) Suzuki T. K., Inutsuka S.-i., 2014, ApJ 784, 121
- 27) Machida M. N., Inutsuka S.-i., Matsumoto T., 2007, ApJ 670, 1198
- 28) Beckwith K., Hawley J. F., Krolik J. H., 2009, ApJ 707, 428
- 29) Lubow S. H., Papaloizou J. C. B., Pringle, J. E., 1994, MNRAS 267, 235
- 30) Rothstein D. M., Lovelace R. V. E., 2008, ApJ 677, 1221
- 31) Guilet J., Ogilvie H. I., 2013, MNRAS 430, 822
- 32) Okuzumi S., Takeuchi T., Muto T., 2014, ApJ 785, 127
- 33) Lazarian A., Vishniac E. T., 1999, ApJ 517, 700
- 34) Lynden-Bell D., Pringle J. E., 1974, MNRAS 168, 603

Numerical Simulations for Accretion Disk Winds Driven by Magneto-Turbulence

Takeru K. SUZUKI

Ta Lab., Department of Physics, Graduate School of Science, Nagoya University, Furo-cho, Chigusa-ku, Nagoya 464-8602, Japan

Abstract: I would like to introduce our research on accretion disk winds driven by magneto-turbulence with some hardship stories.