

降着円盤から噴出する磁気タージェット

加藤 成 晃

〈筑波大学計算科学研究センター 〒305-8577 つくば市天王台 1-1-1〉

e-mail: ykato@ccs.tsukuba.ac.jp

これまでの磁気流体ジェット研究は、大局磁場によって加速するジェットに着目していました。しかし、さまざまな天体で、大局磁場が存在するかどうかは明らかではありません。そこで筆者は、円盤内部で作られる磁場に注目した研究を行い、円盤から自発的に形成される磁気タワーによって、ジェットが噴出することを発見しました。本稿では、この磁気タワー型宇宙ジェットという、筆者の新しい磁気流体ジェット理論研究をご紹介します。

1. はじめに

「ジェット」という言葉を知っていますか？—大型旅客機は、燃料を燃やしてできた熱風をエンジンの噴出孔から噴き出すことによって、空を飛ぶことができます。このように高速で噴き出す物質の流れをジェットと呼びます。実は、原始星、マイクロクェーサー、活動銀河中心核といった天体には、毎秒数百キロメートルから光速と同じぐらいの超高速で噴出するジェットが存在します。これを宇宙ジェットと呼びます。

ジェットと言えば、絶叫マシンとしてお馴染みの「ジェットコースター」。何の関係もないように見える宇宙ジェットとジェットコースターですが、意外なことに物理的な共通点があります。どちらも重力がエネルギー源になっているのです。そこで宇宙ジェットをジェットコースターになぞらえて、筆者の研究をご紹介します。

1.1 降着円盤とは？

読者がよく知っている銀河は、星、ガス、塵などがたくさん集まってできた円盤状の天体です。同じ様に、星やブラックホールの周りに、ガスや塵が円盤状に集まってできる天体があります。この円盤は、外側では遅く内側では速く回転してい

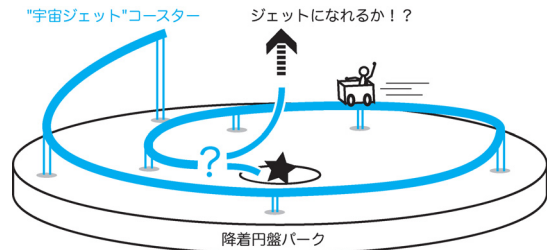


図1 ジェットコースターは、重力エネルギーを運動エネルギーに変換する。降着円盤では、重力エネルギーが他のエネルギー（運動、熱、光、磁場など）に変換される。宇宙ジェットも、重力エネルギーの一部を使って噴出すると考えられている。

て、重力と遠心力が大体釣り合うようになっています。もし円盤に粘性があれば、内側と外側で摩擦が働いて、内側は減速し外側は加速し、力のバランスが崩れて、内側の物質は内へ、外側の物質は外へ移動します。その結果、内側の物質は重力で回転速度を増し、逆に外側は回転速度が減ります。こうして、物質の一部が星やブラックホールに降り積もる（降着する）ことができます。このような円盤を降着円盤と呼びます。

ちょうどジェットコースターが高いところから滑走し速さを増すのと同様に、降着円盤では、星

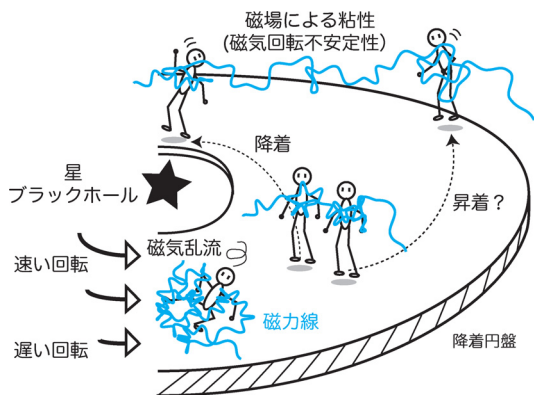


図2 磁気乱流と磁場による粘性の模式図。磁場による粘性によって、一部の円盤物質が降着する。

やブラックホールに近づくほど、重力によって降り積もる速さが増します。このように重力エネルギーが他のエネルギーに変換される降着円盤は、宇宙物理学における重要な天体の一つです。そして降着物質の一部が、途中で噴出することによって、宇宙ジェットができると考えられています(図1参照)。私の研究課題は、どうして物質が降着円盤から噴出できるのかを解明することです。

1.2 プラズマと磁気流体力学

宇宙ジェットを研究するには、降着円盤で何が起こっているのかを知る必要があります。降着する物質は、円盤の内側と外側の速さの差で生じた摩擦によって高温のプラズマになります。プラズマには磁場を作ったり、磁力線に巻き付く性質があるので、降着円盤を研究するには、プラズマと磁場の流れを扱う磁気流体力学(MHD)が必要になります。

近年、MHD研究によって、降着円盤ではプラズマと磁場が空間的にも時間的にも入り乱れた、磁気乱流状態になることが明らかになりました。その結果、今までよく分からなかった円盤の粘性の原因が、降着円盤内部に存在する磁場であることが分かったのです。降着円盤は密度が希薄なプラズマなので、読者が日常生活で体験する摩擦

表1 天体の周囲にある降着円盤の大きさに対して、ジェットはとても長い。縦横比は、ジェットの長さで降着円盤の大きさの比を表す。

| 天体 | 原始星 | マイクロクェーサー | 活動銀河核 |
|-----|------------------|---------------------|------------------|
| 大きさ | ~100 AU | ~10 ⁵ km | ~1 pc |
| 長さ | ~1 pc | ~1 AU | ~1 Mpc |
| 縦横比 | ~10 ³ | ~10 ³ | ~10 ⁵ |
| 速さ | 数百 km/s | 光速の10% | ~光速 |

は、ほとんど効きません。つまり、降着する物質の流れは、磁場によって支配されているのです(図2参照)。それならば、一宇宙ジェットも磁場によって噴出するのではないか?—と考えるのは自然です。このような理由から、私は宇宙ジェットのMHD研究を行っています。

1.3 宇宙ジェット研究の魅力

さまざまな天体で観測されている宇宙ジェットの特徴をまとめてみましょう(表1)。宇宙ジェットは、中心天体の重力圏から脱出できる程度の速さで噴出し、中心天体の周囲にある降着円盤の大きさと比べてとても長い構造をしています。この宇宙ジェットが、共通する物理メカニズムによって噴出するとしたら、驚くべき発見です。しかも、星やブラックホールの周りには降着円盤から噴出する宇宙ジェットは、天体の起源や進化に大きな影響を与える重要でハデな天体現象です。—もし宇宙観光ツアーがあれば、星の生まれる現場や巨大なブラックホールがある銀河中心などの観光スポットで、宇宙ジェットは見応えのあるショーとなるに違いありません—。どうして宇宙ジェットが噴出するのか、知りたいと思いませんか?

以下、2節ではこれまでの宇宙ジェットのMHD研究をまとめます。3節では筆者の新しい宇宙ジェット研究成果を紹介し、4節でまとめます。

2. 磁気流体 (MHD) ジェット研究の歴史

Blandford と Lovelace は、1976 年、それぞれ独立に磁場によってジェットが噴出するという仮説 (モデル) を提唱しました^{1),2)}。その後、Blandford と Payne は、針金のような強い磁力線が降着円盤の回転によって振り回された結果、遠心力によってジェットが噴出するというモデルを提唱し³⁾、宇宙ジェットの MHD 研究が始まりました。

内田 豊と柴田一成は、1985 年、比較的弱い磁力線が降着円盤を貫いている場合、円盤の回転でねじられた磁力線の磁気圧によって、ジェットが噴出するというモデルを提唱し、磁気流体 (MHD) シミュレーションで実証しました⁴⁾。MHD シミュレーションとは、コンピューターを用いて MHD 方程式を数値的に解き、MHD 現象を再現 (シミュレート) することです。このような先駆的な研究によって、世界各地で宇宙ジェットの MHD 研究が活発に行われるようになりました。

ところで宇宙ジェットには、「噴出」、「加速」、「収束」、「伝播」、「安定性」の五つの謎があります。これまで多くの研究者が、これらの謎を解く MHD ジェット理論を構築しようと試みてきました。どのような磁場構造を最初に想定するかによって、MHD ジェットモデルは二つに分類できます。

一つは宇宙ジェットの長さと同じ程度の磁場構造 (大局磁場) によって、ジェットが噴出するという「大局磁場ジェットモデル」です。もう一つは、逆に宇宙ジェットよりもはるかに小さい磁場構造 (局所磁場) によって、ジェットが噴出するという「局所磁場ジェットモデル」です。以下では、それぞれの MHD ジェット理論の生い立ちを簡単にご紹介します。

2.1 大局磁場ジェットモデル

大局磁場ジェットモデルは、加速メカニズムの

違いによって二つに分類できます。一つは磁場が強い場合、円盤の回転によって磁力線が振り回された結果、磁気張力と遠心力 (磁気遠心力) で円盤物質を吹き飛ばすという磁気遠心力加速モデル³⁾。もう一つは磁場が弱い場合、円盤の回転により磁力線がねじられて作られた回転角方向磁場 (トロイダル磁場) の磁気圧で円盤物質を吹き飛ばす磁気圧加速モデル⁴⁾です。どちらのメカニズムで MHD ジェットは加速されるのか、これまで活発な議論が行われてきました。

工藤哲洋と柴田一成は、1997 年、円盤近傍では磁気遠心力加速され、アルフベン速度を越えると磁気圧加速されることを明らかにしました⁵⁾。さらに、磁気圧加速される領域では、トロイダル磁場の磁気張力によって細長く収束することも分かりました。このように大局磁場を想定した場合、MHD ジェットは、磁気遠心力と磁気圧の両方で加速されていることが分かりました。これが大局磁場ジェットモデルです。

大局磁場ジェットモデルは、浅田圭一らの電波観測によって明らかになった活動銀河核ジェット内部のねじれた (ヘリカル) 磁場構造をよく説明できます⁶⁾。しかし、宇宙に点在する活動銀河核に、ジェットを噴出できるような大局磁場が存在することを説明する理論はなく、大局磁場の起源が明確ではありませんでした。さらに「大局磁場が存在しなければ、ジェットが噴出できない」というパラダイムが生じ、原始星、マイクロクエーサー、活動銀河核などの異なる空間スケールのジェットを説明しにくくなりました。

大局磁場ジェットモデルをたとえて言うなら、図 3 左のように、どこからか垂らされたロープを使って、ジェットコースターから飛び出すような状況です。

2.2 局所磁場ジェットモデル

磁場の起源という大問題を回避するため、局所的な磁場によって加速される局所磁場ジェットモデルの研究も行われていました。ここで述べる局

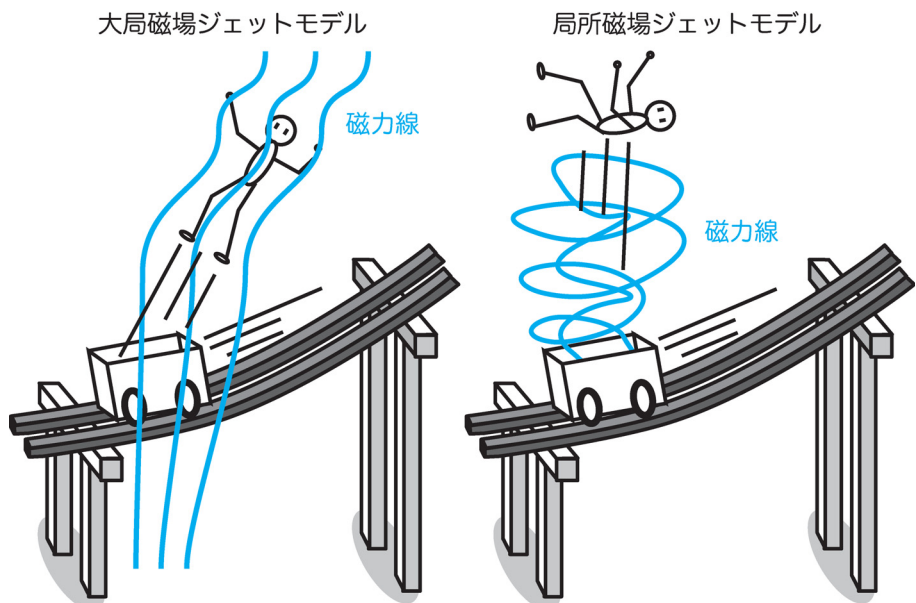


図3 大局磁場ジェットと局所磁場の違いの模式図：どこからかぶら下がっているロープのようなもので飛び出したり（左）、針金を車輪の回転でゼンマイのようにねじってできたバネのようなもので飛び出すのと似ている（右）。

所的な磁場というのは、磁力線が降着円盤内部に閉じ込められていたり、星と円盤または同一円盤内を結ぶような形状で、星や円盤と同じぐらいの大きさの磁場構造を想定しています。このような局所磁場は、星や円盤に電流が流れることによって、自然に作り出すことができるので、磁場の起源を心配する必要はありません。さらに円盤内部に磁場があれば、円盤の回転によってねじれて、ぐるぐる巻きの強いトロイダル磁場が作られると考えられます。このように磁場を作ったり強めたりするメカニズムをダイナモと呼びます。多くの研究者は、ダイナモによって生成・増幅した局所磁場の磁気圧によってジェットが噴出できないだろうかと考えました。これが局所磁場ジェットモデルです。

しかし、最近になるまで、円盤内部における現実的なダイナモ理論が知られていませんでした。しかも、トロイダル磁場が卓越したジェットのような細長い構造は、磁気流体力学的に不安定で維

持することが困難であり、観測されている大規模な宇宙ジェットを説明できないと考えられていました。このような経緯で、磁場の起源は明らかではないけれども、大局磁場ジェットモデルが受け入れられていました。

局所磁場ジェットモデルをたどって言うなら、ジェットコースターの車輪の回転を利用してバネを絞り、図3右のように、バネの力で飛び出すような状況です。

2.3 磁気タワー解と大局磁場

視点を変えて、ジェット内部の大局磁場構造はどうあるべきかという研究も行われていました。Lynden-Bell と Boily は、1994年、磁場がとても強い場合に成り立つ Force-Free 近似を用いて、星と降着円盤とを結ぶ巨大な磁気ループの自己相似解を初めて計算しました⁷⁾。その結果、磁気ループは細長い構造ではなく、風船のように膨らんだ構造になることが分かりました。

この結果は、1996年、林 満らの MHD シミュ

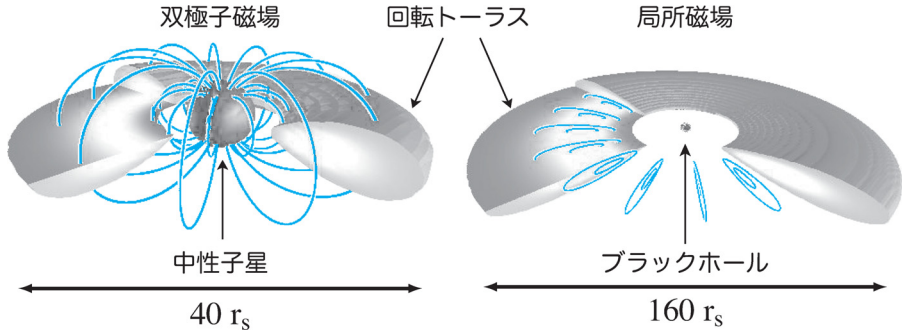


図4 計算を始める前の最初の状態. 双極子磁場をもつ中性子星と回転トーラス (左), ブラックホールと局所磁場が閉じ込められている回転トーラス (右). 実線は磁力線, 回転トーラスのグレースケールは密度 (淡いほど, 高密度) を表し, 分かりやすいように内部が見えるようにしている. r_s はシュバルツシルト半径である. 図示されていないが, 星, ブラックホール, 回転トーラスの周囲は, 等温で高温低密度なコロナがある.

レーションによって実証されました⁸⁾. 星と降着円盤を結ぶ磁気ループは, 円盤の回転で捻れて風船のように膨張し, 半回転程度で磁気リコネクションを起こすことが分かったのです. 磁気リコネクションは, 太陽表面で発生する爆発現象, いわゆる太陽フレアの起源であると考えられています. この巨大な磁気フレア現象は, 原始星における高いエネルギーをもつ X 線放射の有望なモデルです. しかし磁気フレアによってアウトフローは発生するが, 収束したジェットではありませんでした.

そこで Lynden-Bell は, 1996 年, 磁気ループの周囲に有限の圧力をもったプラズマが存在すれば, 磁気ループは周囲のガス圧力によって収束し, 降着円盤の回転軸方向に伸びた, 細長い円筒状のヘリカル磁場構造をもつ磁気タワー解が存在することを示しました⁹⁾. この磁気タワーこそが, ジェットを形成する大局磁場の正体であると彼は考えたのです. しかし, 磁気タワーを形成・維持する物理過程が不明で, 磁気タワー構造の安定性を検証できませんでした.

2.4 磁気回転不安定性と局所磁場ジェットの発展

MHD 研究に大きな転機が訪れたのは, 1991 年, Balbus と Hawley による磁気回転不安定性

(MRI) の発見です¹⁰⁾. 降着円盤内部に少しでも弱い磁場が存在すれば, MRI によって磁気エネルギーが増幅することが分かりました. その後, 多くの MHD シミュレーションによって, 磁気エネルギーはプラズマの熱エネルギーの 1-10% 程度に保れた磁気乱流状態が維持されることが分かりました. MRI が効き始めるのに要する時間は, 円盤が 1 回転する時間程度しかかからないので, MRI は局所磁場ジェットモデルに必要な不可欠である, 効率的なダイナモ機構になります.

MRI の研究が進むにつれて, 局所磁場ジェットモデルが注目され始めました. Turner らと工藤哲洋らは, 空間構造の軸対称性を仮定した MHD シミュレーションを行い, 降着円盤内部の局所磁場から MRI によって非常に強いトロイダル磁場が生成された結果, 局所磁場ジェットが噴出することを明らかにしました^{11), 12)}. このジェットは, 大局磁場ジェットと同様に, トロイダル磁場の磁気張力によって, 細長く収束します.

このように局所磁場ジェットが噴出する場合もあることが, 明らかになってきました. しかし局所磁場によって, どのようなジェットが噴出するのかが明確ではありませんでした.

たとえば言うなら, ジェットコースターから飛び出すためのバネを絞る方法が分かったけれど一

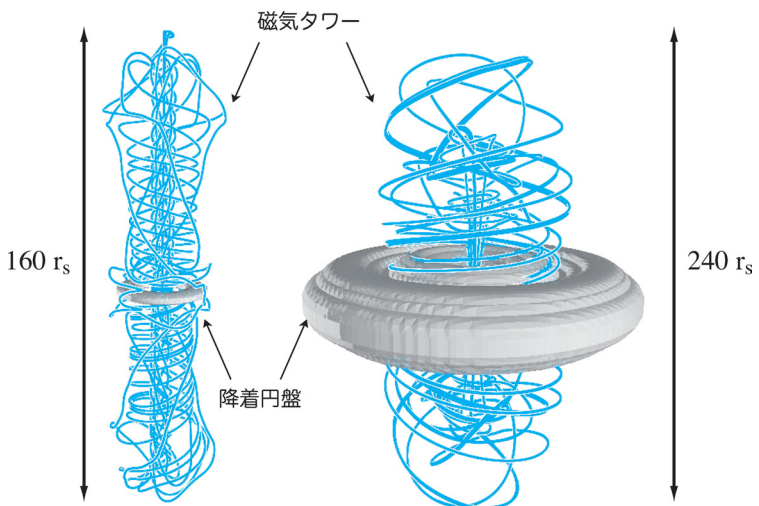


図5 計算した後の状態。中性子星の磁気圏から噴出する磁気タワージェット（左図）。ブラックホール周辺にある降着円盤から噴出する磁気タワージェット（右図）。グレースケールは密度の等値面。磁気タワーの縁側はトロイダル磁場が卓越し、中心部分はポロイダル磁場が卓越している。ジェットの速度は、光速の10-50%程度である。

本当に飛び出せるのかどうか？ どんなふうに飛び出すのか？—がよく分かっていないのです。大雑把に言えば、これこそが筆者の研究テーマになります。

3. 磁気タワー型宇宙ジェットの研究

だんだん、複雑なハナシになってきましたが、実はとても単純な問題が残されています。まず大局磁場の起源は何か？ そして局所磁場ジェットが噴出するのか？ どういう特徴があるのか？ です。どんな磁場構造であろうと、ジェットの五つ謎を解決する理論モデルを作らなくてはなりません。そのためには、降着円盤、ジェット、磁場構造の時間進化を数値的に解いて調べるMHDシミュレーションが最良の方法です。ここでは、これらの問題を解決する筆者のMHDジェット研究について紹介します。

3.1 MHDシミュレーションと初期モデル

シミュレーションの身近な例は、ある時刻の雲や気圧の分布を調べて、未来の雲の動きを予測する天気予報が挙げられます。MHDシミュレー

ションでは、雲の動きではなく密度、運動量、エネルギー、磁場の時間進化を予測します。そしてある時刻の雲や気圧の分布の代わりに、星やブラックホールの周りがあるガスの空間分布や磁場構造をあらかじめ仮定します。これを初期モデルと言い、計算を始める最初の状態を決めるのです。

筆者は初期モデルとして、ガスの空間分布は力学平衡状態の回転トーラスを採用しました（図4参照）。磁場構造は、星とブラックホールで、それぞれ異なる形状を仮定しました。星の場合は、地球がもつ磁場構造と同じような双極子磁場で、上が北極で下が南極に対応しています。ブラックホールの場合は、Hawleyによって考案された回転トーラス内部に閉じ込められた子午面（ポロイダル）磁場を採用しました¹³⁾。

初期モデルで筆者が最も注目した箇所は、星、ブラックホール、回転トーラス以外の部分、いわゆるコロナと呼ばれている部分です。これまでのMHDシミュレーションでは、適当に温度が一樣（等温）で高温・低密度なガスを仮定してしま

た。しかし、磁気タワー解のような大局磁場構造を考える場合、コロナの物理構造を考慮する必要があることに気づいたからです。

3.2 磁気タワージェットの特徴

さっそく一百問は一見にしかず一筆者の計算結果をご覧ください(表紙カラー図と図5参照)。星とブラックホールの周りにある降着円盤から、細かい部分は異なりますが、同じようににねじれた磁場構造をもつ磁気タワーを噴出することが明らかにになりました。

図5左のように、中性子星と降着円盤を結ぶ磁気ループ周囲のコロナの圧力を調整した結果、磁気ループがねじれて膨張し、円盤の回転軸方向へ延びた磁気タワー構造が形成されることを、筆者は世界で初めて明らかにしました¹⁴⁾。このMHDシミュレーションは、軸対称性を仮定していましたが、Lynden-Bellが示した磁気タワー解が存在することを実証した新しい研究です。

図5右のように、ブラックホール周囲にある降着円盤内部に閉じ込められた局所磁場からも磁気タワーが形成することを、筆者は世界で初めて明らかにしました¹⁵⁾。この3次元MHDシミュレーションでは、空間構造の対称性を仮定していません。すなわち実際の宇宙に近い状態でも、局所磁場によって磁気タワーが形成することが分かりました。詳しく調べると、最初に強い磁場を与えるとジェットは必ず噴出します。しかし、最初に弱い磁場を与えると、コロナの圧力を上げたり下げたりすることによって、ジェットが噴出したり噴出しなかったりすることが分かりました。これは実際の天体でも、降着円盤があればジェットが必ず噴出するわけではないことを説明できます。

たとえて言えば、最初から強いバネをもっていれば、必ずジェットコースターから飛び出せるけれど、弱いバネをもっていると、ジェットコースターの周りの状況によって飛び出せない場合があります。

3.3 磁気タワージェットの特徴

磁気タワージェットは、磁気タワーの磁気圧によってジェットを加速しています。筆者の計算では、光速の10-50%程度の速度をもつことが分かりました。さらに、この磁気タワーは周囲のコロナの圧力で支えられています。すなわち、磁気張力で収束する大局磁場ジェットとは違い、磁気タワージェットは周囲のコロナの圧力で収束しているのです。コロナの圧力が強ければ、磁気タワーはより細長く収束します。しかし、MRIによって作られる円盤内部の磁場の平均的な強さは、円盤の圧力の1-10%程度であるので、これよりもコロナの圧力が強過ぎると、磁気タワーは円盤から噴出できなくなり、磁気タワージェットは噴出しません。

このように大局磁場の有無ではなく、円盤内部のダイナモとコロナの物理状態によって、ジェット噴出の可否やジェットの収束が決まることが明らかになりました。筆者の計算した時間内で、磁気タワージェットは、星やブラックホールの大きさの数十倍から数百倍まで伝播し、安定に存在しています。すなわち円盤内部の磁場が噴出することによって、自発的に大局的なヘリカル磁場構造を形成する。これが磁気タワー型宇宙ジェットモデルです。

4. ま と め

本稿では、双極子磁場や局所磁場の二つの異なる磁場構造から、同じような磁気タワー構造が作られることを明らかにしました。これは降着円盤のダイナモで作られた磁場が、磁気圧によって円盤から噴き出し、細長い円筒状のヘリカル磁場構造を作るからです。この磁気タワー型宇宙ジェットは、「大局磁場がなければ、ジェットが噴出しない」というパラダイムを吹き飛ばしてしまう新しい磁気流体ジェット研究の一例です。最近、世界各地で行われたMHDシミュレーションによって、原始星の磁気圏や回転するブラックホールか

ら噴出する、さまざまな磁気タワージェットが実証されてきています。

このように筆者の提唱する磁気タワー型宇宙ジェットは、ジェットの五つの謎を説明できるだけでなく、原始星、マイクロクェーサー、活動銀河中心核などのさまざまな天体に適用できる理論モデルです。今後は、輻射輸送や熱伝導などの個々の天体のリアルな物理状態を取り入れたMHD研究を行い、ジェットの噴出の可否やジェットの収束にかかわるコロナの物理状態が、どのようにして決まるのかを明らかにする必要があります。本研究によって、宇宙ジェットの統一モデルの研究に新しい知見が得られると期待しています。

謝 辞

本稿は千葉大学大学院で行った学位論文研究に基づいており、指導教官の松元亮治教授、また筆者を京都大学基礎物理学研究所の受託院生として受け入れて指導してくださった嶺重 慎教授に深く感謝いたします。ほかにも柴田一成教授（京都大学）、宮路茂樹助教授（千葉大学）をはじめ、多くの方々にご助力、ご助言をいただきました。この場で御礼申し上げます。本研究は、国立天文台データ解析センター共同利用スーパーコンピューターを用いた、大規模シミュレーションプロジェクトで得られた成果です。素晴らしい計算機資源を提供していただいたことに心から感謝しております。また計算結果の可視化は、京都大学情報メディアセンターのLinux版AVS/Expressを利用しました。

参 考 文 献

1) Blandford R. D., 1976, MNRAS 176, 465

- 2) Lovelace R. V. E., 1976, Nature 262, 649
- 3) Blandford R. D., Payne D. G., 1982, MNRAS 199, 883
- 4) Uchida Y., Shibata K., 1985, PASJ 37, 515
- 5) Kudoh T., Shibata K., 1997, ApJ 474, 362
- 6) Asada K., et al., 2002, PASJ 54, 39
- 7) Lynden-Bell D., Boily C., 1994, MNRAS 267, 146
- 8) Hayashi M. R., Shibata K., Matsumoto R., 1996, ApJ 468, L37
- 9) Lynden-Bell D., 1996, MNRAS 279, 389
- 10) Balbus S. A., Hawley J. F., 1991, ApJ 376, 214
- 11) Turner N. J., Bodenheimer P., Rózycka M., 1999, ApJ 524, 129
- 12) Kudoh T., Matsumoto R., Shibata K., 2002, PASJ 54, 267
- 13) Hawley J. F., 2000, ApJ 528, 462
- 14) Kato Y., Hayashi M. R., Matsumoto R., 2004, ApJ 600, 338
- 15) Kato Y., Mineshige S., Shibata K., 2004, ApJ 605, 307

Formation of Magnetic-Tower Jets in Magnetohydrodynamic Accretion Flows

Yoshiaki KATO

Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan

Abstract: The previous study of astrophysical jets has been concentrated on the effects of large-scale magnetic fields permeating accretion disks. However, the existence of such global magnetic fields is not evident in many astrophysical objects. Instead, the magnetic fields, generated in the disks as a result of magneto-rotational instability, can create jets accelerated by the magnetic pressure of the magnetic-tower. We describe our attempt to explore the magnetic-tower jet solution as a unified model of astrophysical jets.