

磁気流体アウトフローの研究を概観する — コリメーションのパラダイム —

工藤 哲 洋

〈国立天文台 天文学データ解析計算センター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉
e-mail: kudoh.takahiro@nao.ac.jp

磁気流体アウトフローの理論的研究をコリメーションという観点から概観しました。代表的な研究論文を紹介した後、「磁気流体アウトフローはコリメーションする」というパラダイムが成立している背景をまとめました。その後、パラダイムに対する反論研究を紹介し、最後に私の考えている今後の課題を書きました。

1. はじめに

岡本 功さんの天文月報3月号の記事「宇宙ジェット—あるパラダイムの終焉—」¹⁾が出た後、桜井隆さんがそれに反論する記事を天文月報に投稿しました。そして、その草稿を主だった磁気流体アウトフローの日本人研究者に流し、他に反論のある人は一緒に投稿しませんか、との呼びかけがありました。当初、私は「岡本さんの研究でパラダイムが終焉するというのは言いすぎではないか」と感じてはいましたが、自分の研究を用いて直接反論することができないので、原稿は投稿しないで議論のゆくえにだけ注目しようと思っていました。ところが、岡本さんの研究について新田伸也さんと議論しているうちに、新田さんから、「分野外の人にも問題点をよりよく理解してもらうために、磁気流体アウトフローの理論的研究の現状をまとめた記事を書かないか」と強く勧められました。この記事はそうにして生まれたものです。

岡本さんはこの分野を開拓してきたパイオニアの一人ですから^{2), 3), 4)}、その方が「磁気流体アウトフローはコリメーションしない」と発言する影響は大きいと思います。この天文月報付録では複数の人が岡本さんの記事に対して反論やコメントをしています。この記事がそのような議論を理解す

る助けとなれば幸いです。

本文の構成は次の通りです。まず、最初に磁気流体アウトフローの研究分野を概観するため、解析手法によって主な研究を分類しました。天文学の分類なら天体別に分類するのが普通ですが、今回のテーマに関しては手法別の分類が役に立つと思ってそのようにしました。次に、「磁気流体アウトフローはコリメーションする」というパラダイムが成立している背景をまとめ、その後、パラダイムに対する反論研究を紹介しました。そして、最後に私の考えている今後の課題を書きました。

2. 磁気流体アウトフローの研究概観

ここでは磁気流体アウトフローの研究を概観するためにその解析手法にしたがって研究を分類します。実際には解いている方程式系は同じなので、条件が同じなら結果はひとつに収束するはずですが、しかし、複雑な方程式を近似なしで解くことは難しいので、近似の仕方によっていろいろなアプローチが存在します。そして、アプローチによって得手不得手があります。

2.1. 定常軸対称

多くの研究では簡単のため、アウトフローが時間的に変化しないこと(定常)、また、アウトフロー

を放出する天体の回転軸に関して回転対称であること(軸対称)を仮定します。(磁気流体アウトフローは回転している天体から放出されます。)しかし、その近似だけではまだ磁気流体力学の方程式から解を得ることが難しいので、多くの研究ではさらに近似を行います。以下に代表的な方法を述べます。

●遠方でのみ漸近的に成り立つ方程式を解く

アウトフローが噴出されている天体から十分遠くに離れた所でのみ成り立つ方程式を解く方法です。岡本さんの研究⁵⁾がこれにあたります。また、岡本さんの記事の中で批判されていた、Heyvaerts と Norman の研究⁶⁾もこれです。相対論的な研究として富松彰さんの研究⁷⁾や新田伸也さんの研究⁸⁾があります。この近似を使うと解析的に研究できるというメリットがありますが、反面、天体の近くでのアウトフローと矛盾なくつながるのかが明確ではありません。解析的な研究の他に、遠方でのみ数値的に解を求めた研究もあります^{10), 11), 12)}。

●自己相似解を求める

どの磁力線も幾何学的に相似形になっていることを仮定して方程式を解きます。この業界の先駆けとなった Blandford と Payne の研究¹³⁾がこれです。実は、Blandford と Payne が得た解は、遠方で破綻することが知られています。ただし、その後の研究で遠方でも破綻しない解があることがわかりました^{14), 15), 16), 17)}。この近似を使うと偏微分方程式を常微分方程式に置き換えることができるので計算が楽になります。しかしその反面、相似形という強い制限からすべての種類の形状を再現できるわけではありません。

●磁力線の形状を仮定して流れを解く

磁力線の形状を仮定してその磁力線の間を流れるアウトフローを計算する方法です。この業界の古典的な研究である Weber と Davis の太陽風の研究¹⁸⁾がこれです。私(工藤哲洋)と柴田一成さんの研究(原始星)^{19), 20)}、高橋真聡さんと柴田晋平

さんの研究(パルサー)²¹⁾もこれにあたります。この近似はアウトフローの加速について詳しく調べるときには有効です。ただし、仮定した磁力線形状が力学的に可能かどうかはこれだけではわかりません。(仮定した形状で加速するアウトフローの解がないとわかれば、その形状を棄却することはできます。)

●近似なしでフルに定常軸対称の方程式を解く

非常に難しいけれども、近似をしないで方程式を解いている研究もあります。岡本さんに批判されていた桜井隆さんの研究^{22), 23)}がこれにあたります。解析的に解を得るのは極めて困難で、桜井さんの研究も数値計算です。いまの所、桜井さんの研究以外では成功していません。

2.2. 非定常

定常状態であることを仮定しないで、時間発展の問題として研究する方法です。この種の研究では必ず初期条件が必要となります。ほとんどが数値シミュレーションによる研究です。研究は大きく3つに分類できます。

●根元自由型

アウトフローが吹き始める根元(例えば降着円盤)の時間発展もアウトフローと同時に解く方法です。有名な内田豊さんと柴田一成さんの研究^{24), 25)}、松元亮治さん(活動銀河)²⁶⁾、林満さんらの研究(原始星)²⁷⁾がこれです。私もここ数年この方法で研究を行っています²⁸⁾。小出真路さんらによる一般相対論的な研究²⁹⁾もこれです。また最近、富阪幸治さんが分子雲の収縮からアウトフローの生成までを一気に計算しましたが³⁰⁾、それもここに分類されます。アウトフローが吹き出すとその反作用をうけて円盤が降着し、結果として定常状態にはなりません。天体近傍のダイナミックな変化をきちんと追跡できる反面、長時間計算するのが難しいのでアウトフローの伝播領域が天体の近傍に限られてしまいます。そのため、遠方で

のコリメーションの様子を議論するのはまだ困難です。しかし、最近、私たちはこれまでよりも遠方までアウトフローが伝わる計算を始めています³¹⁾。

●根元固定型

アウトフローが吹き出す根元を固定して(円盤や恒星を回し続けて)時間発展の解を求める方法です。数年前に雑誌「Nature」に掲載され有名になった Ouyed と Pundritz の研究(原始星)^{32), 33)}や Meier らの研究(活動銀河)³⁴⁾がこれにあたります。降着円盤から吹き出すアウトフローの場合、境界条件を固定する方法はあまりいい近似ではないのですが(本当は角運動量を失って降着するはずだから)、そうすることによって比較的長時間の計算が可能となり、アウトフローが遠方まで伝わる様子を計算できます。ある種の境界条件の下では、定常的な解に落ち着くことが知られていますので、定常解を時間発展の計算から求める手法としても有効です^{35), 36), 37)}。

●ジェット流入型

根元から超音速のジェットを流入させてその伝播を調べる方法です。藤堂 泰さんらの研究³⁸⁾があります。この方法は最初からコリメーションしたジェットがあると仮定して、ショック形成やジェットの安定性などを議論する研究なので、今回のテーマからは少し外れます。

3. コリメーションのパラダイム

「磁気流体アウトフローはコリメーションする」というパラダイムが成立している背景を簡単にまとめ、それに反対する研究を紹介しました。

3.1. パラダイム

以下の説明は、Heyvaerts と Norman の研究⁶⁾および、Chiueh と Li と Begelman の研究³⁹⁾を基にしています。まず磁気流体アウトフローが、遠方で

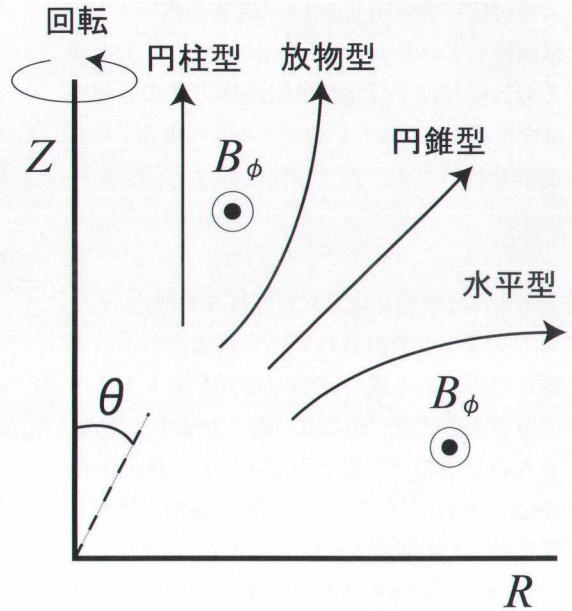


図1：遠方での磁力線形状の模式図。円柱座標 (R, ϕ, Z) における (R, Z) 面(ポロイダル面)での磁力線(および流線：定常軸対称では磁力線に一致)が描かれています。中心天体の回転が図の方向のとき磁力線は奥から手前方向にたなびきます。その結果、上向きのポロイダル磁場を考えると、回転によって生じるトロイダル磁場 B_ϕ は、奥から手前に向かう向きに生じます。図中、 θ は Z 軸から計った角度を表します。

どのような形状を持つ可能性があるかを分類します。図1にその模式的な形状を描きました。なお、定常で軸対称のときは図の (R, Z) 面(ポロイダル面)で磁力線と流線が一致します。

●円柱型

Z が大きくなるにつれ、 R が一定値に漸近する形状です。 Z 軸からの角度 θ で考えると、 Z が大きくなるにつれ θ はゼロに漸近します。コリメーションしている形状という、この形状のことを思い浮かべる人が多いのではないのでしょうか。

●放物型 I

例えば、遠方で $Z \propto R^\alpha$ ($\alpha > 1$) となる形状です。 $\alpha = 2$ でない場合も含めて放物形状と呼びます。円柱型との違いは Z が大きくなるにつれ、 R も大

きくなる点です。ただし、 Z が大きくなるにつれ θ はゼロに漸近しますのでこれもコリメーションしている形状として分類されます。ここで、 α がすべての磁力線で同じ値の時を便宜状「放物型 I」と名づけます。

●放物型 II

上と同様に、遠方で $Z \propto R^\alpha$ ($\alpha > 1$)となるような形状です。ただし、ここでは α が磁力線ごとに異なる値をもっているものを考えます。便宜状これを「放物型 II」と名づけます。例えば、回転軸近くの磁力線が $Z \propto R^{6.5}$ ような形状となり、赤道面に近い磁力線が $Z \propto R^{1.1}$ のような形状となるものです。この形状はその幾何学的性質から自己相似解では得られません。

●円錐型

遠方で $Z \propto R$ となる形状です。角度 θ で考えると、 Z が大きくなるにつれ θ は一定値に漸近します。この形状はコリメーションしているとはいいません。

●水平型

R が大きくなるにつれ、 θ が90度に漸近する形状を、「水平型」と名づけます。この形状もコリメーションしているとはいいません。

上で示した形状のうち、「水平型」の磁力線の間を流れるアウトフローは遠方まで続かないことが示せます。おおざっぱな物理的説明は次のようになります。今、天体が回転しているので磁場のトロイダル成分(B_ϕ)が生じます。そのトロイダル成分の作る磁気張力(磁力線が輪ゴムのように縮まろうとする力)は回転軸に向かう方向です。水平型のアウトフローの場合、その力を減速力としてまともに真正面から受けることとなります。結局、水平型の場合は他の加速力がその減速力に打ち勝つことができず、アウトフローが有限の距離で終わってしまうのです。

さらに、「円錐型」と「放物型 I」に関しても適切な形状ではないと考えられています。それは、この形状を全部の空間で満たそうとした場合、回転

軸に近づくにつれて磁場のトロイダル成分(B_ϕ)が発散することが示されるからです。

その結果、実現する可能性のある形状として残されたものは「円柱型」か「放物型 II」ということとなります。両者とも Z が大きくなるにつれ θ がゼロに漸近するので、これらの形状が力学的に可能であれば、「磁気流体アウトフローはコリメーションする」といえることが言えます。それぞれ磁力線をコリメーションさせている力を解析すると、(先ほど水平解の時に議論した)磁場のトロイダル成分の作る磁気張力が重要な働きをしていることがわかります。円柱型の場合は、磁気張力が遠心力などの外向きの力と釣り合いその形状が保たれます。放物型 IIの場合は、磁気張力に加えて磁気圧もコリメーションを引き起こす力となって働き、それらの力がアウトフローの慣性力と釣り合って放物形状を作ります。

ここで、前節で示した主な研究論文で得られている磁力線の形状を表1にまとめてみました。表をみると、多くの結果で「円柱型」と「放物型 II」が実現していることがわかります。この結果はアウトフローを噴出している天体には関係ありません。多くの研究でコリメーションした形状が示され、それらの結果は上で述べた説明と矛盾していません。つまり、天体の回転によって生じた磁場のトロイダル成分(B_ϕ)の作る磁気ローレンツ力(磁気張力と磁気圧)によってコリメーションした形状が実現されています。このような研究背景から「磁気流体アウトフローはコリメーションする」というパラダイムが成立していると私は理解しています。

3.2. アンチテーゼ

表中、新田さん⁹⁾と岡本さん⁵⁾の結果がパラダイムに反対する結果(アンチテーゼ)となっています。ただし、それぞれの論点は大きく異なります。以下でこの2つの研究について簡単に紹介します。

表 1

論文	遠方での磁力線形状	解析手法	天体
Heyvaerts & Norman (1989)	円柱型または放物型 II	遠方での漸近的解析解	任意の天体
Chiueh, Li & Begelman (1991)	円柱型または放物型 II	遠方での漸近的解析解 (相対論的)	任意の天体
富松 (1994)	放物解 II	遠方での漸近的解析解 (相対論的)	任意の天体
Shu et al.(1995)	放物型 II	遠方での漸近的数値解	X-wind モデル
Begelman & Li (1994) 他 ¹²⁾	放物型 II	遠方での漸近的解析解 及び数値解 (相対論的)	任意の天体
Ostriker (1997) 他 ^{14), 16)}	円柱型	自己相似解	降着円盤
Sauty & Tsinganos (1994)	円柱型	自己相似解	恒星
桜井 (1985, 1987)	放物型 II	フルに定常軸対称の 方程式を解いた	恒星 降着円盤
Bogovalov & Tsinganos (1999)	放物型 II	非定常 (根元固定) + 遠方での定常数値解	恒星
Ouyed & Pudritz (1999) 他 ^{35), 36)}	円柱型または 放物型 II	非定常 (根元固定)	降着円盤
柴田と内田 (1986) 他 ^{26), 28)}	円柱型	非定常 (根元自由)	降着円盤
新田 (1997)	円柱型と円錐型の 組み合わせ	遠方での漸近的解析解 (相対論的)	任意の天体
岡本 (1999)	円錐型?	遠方での漸近的解析解	任意の天体 (主に恒星)

主な研究論文で得られた遠方での磁力線形状. 表中で, 有限領域の計算 (自己相似解, 桜井さんの解, 非定常の計算結果) に関しては, 計算された範囲内における最も遠方での結果を書きました. その際, 論文に具体的にどのような形状に漸近するかが書かれていないものについては, アウトフローの性質から私が推定しました. また, 回転軸における発散 (回転軸上を流れる電流) を許せば円錐型や放物型 I も力の釣り合いを満たす解が知られているのですが, それは割愛しました. 新田さんと岡本さんの研究がパラダイムに反対する結果を主張しています. ただしそれぞれの論点は大きく異なります.

3.2.1. 新田さんの研究

前述した通り、円錐型だけで全部の空間を満たそうとした場合、回転軸に近づくにつれ磁場のトロイダル成分が発散します。そこで新田さんは、回転軸近傍には円柱型を考えその外側に円錐型をおくという2つの形状の組み合わせを考えました。新田さんの研究によれば、このような組み合わせの解は無限遠方で力の釣り合いを満たすことが示されています。この組み合わせが可能だとすると、円錐型が許されることになるので「必ずしもコリメーションしない」ということになります。(これまでの研究を完全に否定するものではなく、円錐型が可能であることを主張する説です。) この組み合わせ形状が天体の近くから連続的に発生することを示すことが新田さんの2本目の学位論文のテーマになっていると伺いました。(詳しくは本誌新田さんの記事参照⁴⁰⁾。)

3.2.2. 岡本さんの研究

岡本さんが示した問題点は結果的に、「電流がどのように流れているかをきちんと考察せよ」ということではないかと思えます。電流をつないでいった線(電流線)は湧き出したり吸い込まれたりせず閉じた構造を持ちます。ですから、 (R, Z) 面内(ポロイダル面内)において、入ってくる電流もあれば出て行く電流もあるはずで、磁場が回転によって奥から手前にたなびいているとき($B_\phi < 0$ の時)、入ってくる電流(j_p)と B_ϕ の作る磁気ローレンツ力($j_p \times B_\phi$)は磁力線をコリメーションさせる方向に働きますが、逆に出て行く電流の作る磁気ローレンツ力は磁力線をコリメーションさせない方向に働きます^{脚注1)}。よって、すべての磁力線

がコリメーションしているとする電流は入ってくるばかりになるからおかしいのではないかというのが岡本さんの主張だと思います。(すべての磁力線がコリメーションするのではなく、コリメーションする磁力線もあるが、同時にコリメーションしない磁力線もあるはずという主張です。)

確かに、すべての磁力線がコリメーションしている場合には、円柱型の場合も放物型IIの場合もアウトフローの領域で電流は入ってくるばかりになります^{脚注2)}。しかし多くの人は、電流線がアウトフローの領域だけで閉じている必要はないと考えています。アウトフローの領域から入ってきた電流は赤道面にできる電流層や降着円盤を通して外向きに運ばれていると考えています。(詳しくは本誌桜井さんの記事参照⁴¹⁾。)

コリメーションしない方向に曲げられた磁力線の間を流れるアウトフローは遠方まで続かないのではないかと思います。漠然とした考えですが、双極子磁場のような閉じた磁場形状を保ちながらアウトフローが吹いている場合なら岡本さんの提案した電流分布が可能かもしれません。ただ厳密にいうと、そのようなアウトフローを実現させるためには、非定常性⁴²⁾かあるいは電気抵抗を含めた磁気流体力学^{43), 44)}が必要となります。

3.3. 今後の展開

いろいろな議論が出てくる背景として、結局「天体の近くから遠方まで近似なしで定常軸対称の磁気流体方程式を解いた研究」が今のところ桜井さんの研究しかない点があげられると思います。そして、このことがこのテーマの難しさを物語っています。実はFrank Shuが自らのX-windモデル⁴⁵⁾を使って挑戦しようとしたのですが、不完全なものに

脚注1：放物型IIと同様に、遠方で磁気ローレンツ力とアウトフローの慣性力とが釣り合う状態を考えます。この時、慣性力がコリメーションさせない方向に働く磁気ローレンツ力と釣り合うためには、磁力線は上に凸に(コリメーションしない方向に)曲がっていなければならないこととなります。

脚注2：ポロイダル磁場が上向きで、天体の回転が北極からみて反時計周りの時、電流は入ってくる向きになります。円柱型の場合はほぼ磁力線に平行に、放物型IIの場合は磁力線を斜めに横切るように流入します。

終わってしまいました⁴⁶⁾。桜井さんの研究でも、もっと回転速度が大きい場合には解が得られなかったと伺っています。天体から十分離れたところだけで解を得るのは比較的容易なのですが、天体の近くから遠くまですべてを含めて解を得るのが難しいのです。

近似なしのフルの方程式を解くという意味では定常問題ではなく、実は非定常数値シミュレーションからのアプローチのほうが簡単です。(しかも、非定常なので定常に比べてより近似が少ない方法です。) 実際、内田さん、柴田さんたち(工藤も含む)の研究ではフルに方程式が解かれています。しかし、この種の研究ではアウトフローの伝播領域が天体に近いところに限られてしまいます。その理由は、時間発展の問題として解いているので、アウトフローが遠方まで伝播するのに時間がかかるためです。桜井さんの計算領域に対しておおよそ10万分の1くらい小さな領域で計算されています。現在の非定常数値シミュレーションの計算結果と遠方での漸近的な解析結果との間にはまだ大きなギャップがあり、非定常数値シミュレーションによって遠方のコリメーションを議論するのはまだ困難です。

最近、Bogovalov と Tsinganos³⁷⁾は、最初に非定常数値シミュレーション(根元固定型)で天体の近くを解き、ほぼ定常状態になったら、次にその計算の結果得られた一番外側の値を境界条件として定常の方程式を遠方まで解く、という方法を用いました。これは天体の近くから遠くまでを解くための有効な方法の一つだと思います。

いずれにせよ、今後の研究を展開させるためには、遠方での漸近的解析や自己相似解ではなく、(たとえ難しくても)天体の近くから遠方までを近似なしで解を求める研究が、色々な状況に応じて複数行われる必要があると感じています。

4. 最後に

最後に、実際の天体へ応用するとき重要な点の一つ簡単に述べます。放物型IIの性質として、すべての磁気エネルギー(ポインティングフラックス)をアウトフローの加速に用いることができる点があげられます。この性質は他の形状にない放物型IIの特徴です。しかし、放物型IIは非常にゆっくり(logスケールで)コリメーションするものしか知られていません^{脚注3)}。(同時に、磁気エネルギーから運動エネルギーへの変換もゆっくりです。)一方、円柱型の場合は短いスケールでコリメーションする解が知られていますが、加速に使われない磁気エネルギーが遠方まで残ってしまいます。実際に観測されている宇宙ジェットが、これら磁気流体アウトフローの性質と矛盾なく説明されるかどうかを定量的に調べる必要があります。

私自身のこのアウトフローのコリメーションというテーマへの貢献としては、非定常数値シミュレーションの計算を長時間行いアウトフローをできるだけ遠方まで追跡する、ということを考えています。今はおもに降着円盤からのアウトフローを「根元自由型」で計算していますが、恒星風の場合なら「根元固定型」でもよいと考えています。国立天文台に来年導入予定のスーパーコンピュータを用いれば、流れの速度が磁気音速を超えた領域の数十倍は計算できるのではないかと見積もっています。そのあたりまで計算できれば、非定常数値シミュレーションの結果を漸近解の性質と比較しながら議論することが可能になると考えています。

謝辞

この原稿を書くことを強く勧めてくださった新田伸也さんに感謝します。また原稿の草稿に対してコメントをいただいた、新田伸也さん、小出真

脚注3: アウトフローの速度が大きいほど(相対論的な場合など)特にゆっくりとコリメーションします^{12), 37)}。これはアウトフローの慣性力が大きくなるためです。

路さん, 横山央明さん, 桜井隆さん, 岡本功さん,
柴田一成さんに感謝します。

参考文献

- 1) 岡本 功, 2000, 天文月報, 93, 3, 134
- 2) Okamoto I., 1975, MNRAS 173, 357
- 3) Okamoto I., 1978, MNRAS 185, 690
- 4) Kennel C.F., Fujimura F.S., Okamoto I., 1983, Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics 26, 147
- 5) Okamoto I., 1999, MNRAS 307, 253
- 6) Heyvaerts J., Norman C.A., 1989, ApJ 347, 1055
- 7) Tomimatsu A., 1994, PASJ 46, 123
- 8) Nitta S., 1994, PASJ 46, 217
- 9) Nitta S., 1997, MNRAS 284, 899
- 10) Shu F., Najita J., Ostriker E., Shang H., 1995, ApJ 455, L155
- 11) Begelman M.C., Li Z-Y., 1994, ApJ 426, 269
- 12) Li Z-Y., 1996, ApJ 473, 873
- 13) Blandford R.D., Payne D.G., 1982, MNRAS 199, 883
- 14) Contopoulos J., Lovelace R.V.E., 1994, ApJ 429, 139
- 15) Ostriker E.C., 1997, ApJ 486, 291
- 16) Li Z-Y., Chiueh T., Begelman M.C., 1992, ApJ 394, 459
- 17) Sauty C., Tsinganos K., 1994, A&A 287, 893
- 18) Weber E.J., Davis L.Jr., 1967, ApJ 148, 217
- 19) Kudoh T., Shibata K., 1995, ApJ 452, L41
- 20) Kudoh T., Shibata K., 1997, ApJ 474, 362
- 21) Takahashi M., Shibata S., 1998, PASJ 50, 271
- 22) Sakurai T., 1985, A&A 152, 121
- 23) Sakurai T., 1987, PASJ 39, 821
- 24) Uchida Y., Shibata K., 1985, PASJ 37, 515
- 25) Shibata K., Uchida Y., 1986, PASJ 38, 631
- 26) Matsumoto R., Uchida Y., Hirose S., Shibata K., Hayashi M.R., Ferrari A., Bodo G., Norman C., 1996, ApJ 461, 115
- 27) Hayashi M.R., Matsumoto R., Shibata, K., 1996, ApJ 486, 37
- 28) Kudoh T., Matsumoto R., Shibata, K., 1998, ApJ 508, 186
- 29) Koide S., Shibata K., Kudoh, T., 1999, ApJ 522, 727
- 30) Tomisaka K., 1998, ApJ 502, L163
- 31) Kudoh T., Matsumoto R., Shibata K., 1999, in Proc. Star Formation 1999, ed. Nakamoto T. (Nobeyama Radio Observatory) p.286
- 32) Ouyed R., Pudritz R.E., Stone J.M., 1997, Nature 385, 409
- 33) Ouyed R., Pudritz R.E., 1999, MNRAS 309, 233
- 34) Meier D.L., Edgington S., Godon P., Payne D.G., Lind, K.R., 1997, Nature 388, 350
- 35) Ustyugova G.V., Koldoba A.V., Romanova M.M., Chechetkin V.M., Lovelace R.V.E., 1999, ApJ 516, 221
- 36) Krasnopolsky R., Li Z-Y., Blandford R.D., 1999, ApJ 526, 631
- 37) Bogovalov S.V., Tsinganos K., 1999, MNRAS 305, 211
- 38) Todo Y., Uchida Y., Sato T., Rosner. R., 1993, ApJ 403, 164
- 39) Chiueh T., Li Z-Y., Begelman M.C., 1991, ApJ 377, 462
- 40) 新田伸也, 2000, 天文月報, 93, 9 付録, 532
- 41) 桜井隆, 2000, 天文月報, 93, 8, 477
- 42) Washimi H., Shibata S., 1993, MNRAS 262, 936
- 43) Kaburaki O., 1989, MNRAS 237, 49
- 44) Kudoh T., Kaburaki O., 1995, Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics 80, 103
- 45) Shu F., Najita J., Ostriker E., Wilkin F., Ruden S., Lizano S., 1994, ApJ 429, 781
- 46) Najita J.R., Shu F.H., 1994, ApJ 429, 808

Magnetically Driven Outflows

— The Paradigm of Collimated Outflows —

Takahiro KUDOH

Astronomical Data Analysis Center, National Astronomical Observatory, Mitaka, Tokyo 181-8588, JAPAN

Abstract: The study of magnetically driven outflows is reviewed from the viewpoint of the collimated outflows.