

岡本 功氏の論文 「宇宙ジェットーあるパラダイムの終焉ー」に 反論する

桜井 隆

〈国立天文台太陽物理学研究系 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: sakurai@solar.mtk.nao.ac.jp

天文月報 2000 年 3 月号の岡本功氏の論文、「宇宙ジェットーあるパラダイムの終焉ー」に対し反論を展開する。磁場を持つ回転天体からの外向きの流れが回転軸方向に収束するのは、磁場のトロイダル成分が赤道面に最も蓄積することからの自然な帰結である。岡本氏が棄却した赤道面での電流層は、形成されると考えられる。太陽風がよい例である。

1. はじめに

天文月報 2000 年 3 月号 134 ページの、岡本功さんの論文「宇宙ジェットーあるパラダイムの終焉ー」¹⁾は、岡本さんがここ数年の間精力的に研究を進めてこられた、回転流体からの磁気流体 (MHD) 流のコリメーションに関する力作でした。その主張である、「回転流体からの MHD 流は磁気的力によって回転軸方向に収束することはない」については、岡本さんが「パラダイム」と呼んだように、収束すると考えている人が大勢いるわけです。特に、パラダイムを作った中心人物の一人として論文中でローマ字表記で Sakurai と書かれていた、かくいう私としても、自分の主張を明らかにしておきたいと思い、この論文を書くことにしました。このテーマについては岡本さんと何回か議論し、岡本さんの退官記念研究会の集録²⁾にも書いたので、今回再び天文月報に論文を書くことについては、多少ためらいもありました。文章にすると、言葉尻をとらえて批判するという泥試合になりがちだからです。ただ、岡本さんの論文を見て、これが全貌であると天文月報の読者が判断するとすれば、それは一方的すぎるので、別の立場からの

意見表明があってもよいと考えました。

2. なぜ流れは回転軸に収束するのか

まず、なぜ流れが回転軸方向に収束すると多くの人が考えるかについて、まとめておきます。数値計算の結果そうになったとか、数式を変形して行くとそうなるのかといったのでは、多くの人が信じるといふ事態には普通なりません。物理的に簡単明瞭な説明があるからこそ、定説となり得たわけです。

中心天体近くでは、磁場の形は、閉じた磁力線 (中心天体に両足がある磁力線) と開いた磁力線 (無限遠にまで達する磁力線) の部分からなります。図 1 は太陽の閉じたコロナ磁場と太陽風の磁力線を表したもの³⁾ですが、実はこの両方を含む定常流の解法はまだ確立していません。理想的な MHD (電気抵抗をゼロとする) では解が一意に決まらないため、電気抵抗がゼロでないことをあらわに考慮しなければならない一方、解は電気抵抗の大きさには (ほとんど) よらないと予想されること、がこの問題の難しい点です。従って、簡単なモデルでは、中心天体からある程度離れて、磁場がすべて開いた形となったと仮定して話を始めます。スプリット・モノポール・モデル (図 2) はその例

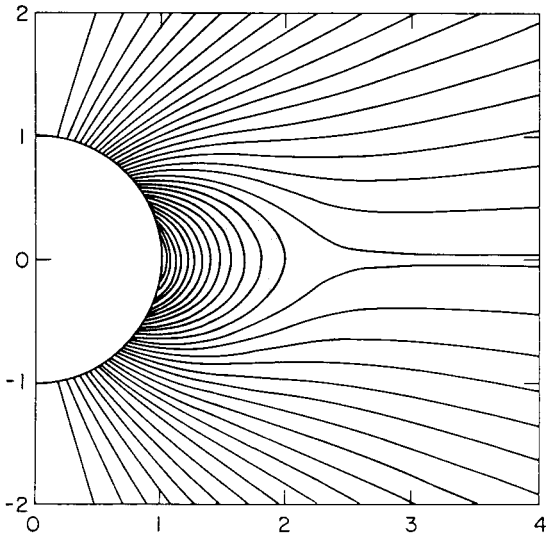


図1 太陽コロナの閉じた磁場と、太陽風の開いた磁力線³⁾。

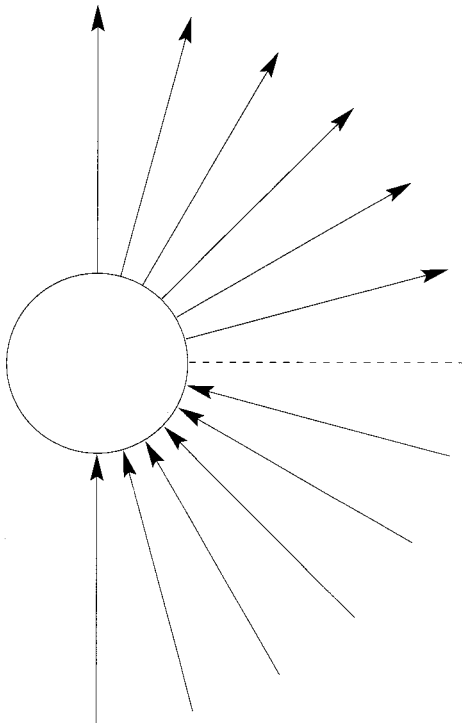


図2 スプリット・モノポール・モデル。赤道面に電流層をおく。

で、磁力線の形状はモノポールとし、磁力線の向きを赤道面の上下で逆にします。

中心天体から十分遠方では、ガスの圧力や遠心力は小さくなり、磁場のトロイダル成分（円筒座標 r, ϕ, z では ϕ 成分）が主たる力で、これと流れの慣性の釣り合いから流れの形が決まります。磁場の動径成分は距離 r について r^{-2} で減少しますが、磁場の ϕ 成分は r^{-1} でしか減少しないので、遠方では主たる成分になり、どんどん磁力線はらせん状に巻き付いていきます。

この事情は赤道面だけでなくどの緯度 λ でもおこりますが、緯度が高いところほど、実効的な回転速度は係数 $\cos \lambda$ がかかるので、トロイダル成分の蓄積は弱くなります。特に回転軸上ではトロイダル成分は0でなければなりません。このような状況下では、赤道面で最も大きいトロイダル磁場の圧力が流れを赤道面から離れるように曲げます。中緯度帯ではこのトロイダル磁場の磁気圧に加えて、磁気張力も回転軸に向かって働くので、流れは赤道面から離れ回転軸へ向かいます。これが磁気コリメーションの基本メカニズムです⁴⁾。

「遠心力により、流れは赤道面へ向かって吹き流されるのが自然」という岡本さんの主張は、中心天体の近傍ではありうるかもしれませんが、遠方では遠心力は無視でき、従って漸近的に回転軸へ向かう流れの形成は、「不自然」ではありません。一方、赤道が全く回転しておらず、中緯度から高緯度は回転しているといった、不自然な星を考えれば、トロイダル磁場の蓄積は中緯度で最大となり、流れは中緯度を起点に、極および赤道へ向かって発散するように流れるのではないかと推察できます。

上に述べた磁気コリメーションの説明は、自己相似解では成り立ちません。自己相似解では、回転軸は特異点で磁場のトロイダル成分が発散します。従って、磁気圧は回転軸から離れる向きに働き、張力との大きさ関係によって、流れを回転軸方向へも赤道方向へも曲げられます。実際、Bland-

ford&Payne の相似解⁵⁾で仮定されたディスク面での磁束分布を使って、回転もプラズマもない真空中の磁場を計算すると、これも回転軸方向へ曲がった磁力線を持ちます。ディスクの外のほうにたくさん磁束があるために、磁力線がこういう形をとるのです。そして Blandford&Payne の相似解は、この真空磁場よりコリメーションが弱いので、回転と磁場の効果は、彼らの相似解では、コリメーションを妨げる向きに働いていることがわかります⁶⁾。

3. 電流層の導入は是か非か

岡本さんは Trans-field 方程式から、磁力線の曲がる向きと沿磁力線電流（子午面内で磁力線に平行に流れる電流）の向きとの関係を導き、例えば中心天体の北半球 ($\lambda > 0$) で磁場が外向きのとき、磁力線が回転軸方向に曲がる部分では電流は内向き、赤道方向に曲がる部分では電流は外向き、という結論を得ました⁷⁾。中心天体の回転により後方へなびくように曲がるトロイダル磁場と、沿磁力線電流の作るローレンツ力の向きが、そのように流れを曲げようとするからです。従って、あらゆる部分で磁力線が回転軸方向に曲がるとすると、電流はすべて内向きとなります。中心天体の南半球 ($\lambda < 0$) で磁場が内向きのときも同じ議論が成り立ち、すべての磁力線が回転軸方向に曲がると、電流はすべて内向きとなります。これでは、中心天体に電荷が溜まってしまうので、正しい解ではない、という主張です。

先に述べたスプリット・モノポール・モデルでは、赤道面に接触不連続面（いいかえれば電流層）があります。この部分を流れる電流は、電流層上下の磁場の不連続から求めることができ、動径方向外向きに電流が流れていることがわかり、しかもその大きさは赤道面以外から流れ込む全電流をちょうど打ち消すようになっています。ですから、電荷の蓄積という非物理的現象は起こりません。従って、解の中に電流層のような不連続をおいてよいのかどうか、が焦点となります。

さてここで、「ウィンド領域ではコリメーションの精密なモデルを作るのに、赤道面では単に面電流が流れればよいというのは片手落ち」との批判に対する私の考え方を述べます。ポイントは2つあります。

(1) 巨視的 MHD の扱いにおいては、電流層の内部構造は問わず、その両側で圧力平衡が成り立っていけばよしとします。電流層の中身、例えば電流層の外側の磁気圧を支えるのに十分なプラズマが電流層内部にあり得るかどうかが、は仮定します。この状況は衝撃波の取り扱いと似ています。流体近似においては、衝撃波の内部構造は問わず、ランキン・ユゴニオの関係式が成り立てばよしとします。これを成り立たせるだけの十分な散逸機構（粒子間衝突）は仮定します。粒子密度の低い系では、衝撃波の内部構造を決めることそのものが問題となる、無衝突衝撃波の扱いになりますが、これは流体近似の守備範囲外です。

(2) 岡本さんは、電流層（電流の体積密度が無限大になる）がなく、電流の体積密度がどこでも有限の解が正しい解であると主張します。しかし本来、電流層のあるなしは方程式を解けば決まるのであって、どちらかを選べるということはないはずです。仮想的に、双極子磁場を持った、回転していない星を考えてみます。コロナは高温でなく、従って星風は吹かず、静的大気があるとします。次に、コロナの温度を次第に上げていって、星風が吹くようにします。高緯度帯では容易に星風ができますが、低緯度帯では磁場が流れを抑えます。このとき、図1のような構造ができ、赤道面に電流層ができるのでしょうか、それとも双極子磁場をそのまま引きずり出したような、電流層のない構造となるのでしょうか？

前にも述べたように、この問題の確立した解法はないのですが、しかし身近に実例があります。太陽からの流れ（太陽風）において、太陽近傍では

閉じた磁場領域と開いた磁場領域が並存しますが、太陽から太陽直径ほど離れば磁力線はすべて開き、しかも赤道面に電流層ができます。電流層の厚さは地球近傍では数千 km で、これは太陽直径 (140 万 km) や太陽地球間距離と比べて十分薄い構造です。このような薄い構造ができるのは、究極的には、太陽風プラズマの電気伝導度が高いため、狭い範囲で磁場の向きを逆転させなければならぬからです。

この例から類推されるように、電流層ができるかどうかは、中心天体の近くの、磁場と流れの相互作用が大きい部分で決まり、流れの遠方での漸近的振る舞いをみても電流層の形成の可否は決められません。恒星風の場合のように、基本磁場構造が双極子磁場であれば、太陽風と同様、電流層は形成されると私は考えます。降着円盤のような配位では、この点はまだはっきりしませんが、ともかく、電流層ができるかどうかは問題設定が与えられれば決まるものです。

電流層ができるかどうかと、流れが回転軸に収束するかどうかは、上に述べたように別の問題です。電流層の形成は中心天体の近傍で決まり、電気伝導度の高い系では必ずできるのではないかと思っています (証明できていませんけれども)。流れの回転軸への収束は遠方での漸近的振る舞いであり、2 節で述べたように、赤道が回転していないような変な天体でない限り、流れはあらゆる場所で回転軸方向へ曲がると思います。

4. 最後に

本論文では、終始磁気コリメーション説の弁護をしましたが、実際のすべての天体ジェットの形成

が磁気コリメーションによると主張するつもりはありません。例えば、中心天体のすぐ近くに密度の高いトーラスがあつて、流れがそれにおつかつてしまふならば、無限遠までの解を適用することができないからです。非定常性、理想 MHD 近似の破綻などが重要となる場面もあるでしょう。しかし、真空中に恒星一つだけをおいて、コロナを形成させ定常 MHD 恒星風を吹かせたとき、流れが回転軸に収束するのか、そうでないのかは、純粹に理論的に決着のつく問題で、答えは一つです。

参考文献

- 1) 岡本 功, 天文月報 2000 年 3 月号, p.134
- 2) Sakurai T., 1999, in 'Outflows from Astrophysical Objects', eds. Tanikawa K., Nitta S., Kudoh T., Kaburaki O. (National Astronomical Observatory, Japan) p.77
- 3) Pneuman G.W., Kopp R.A., 1971, Solar Phys. 18, 258
- 4) Sakurai T., 1985, A&A 151, 121
- 5) Blandford R.D., Payne D.G., 1982, MNRAS 199, 883
- 6) Sakurai T., 1987, PASJ 39, 821
- 7) Okamoto I., 1999, MNRAS 307, 253

Comments on I.Okamoto's Article 'Ending of One Paradigm for Astrophysical Jets' Takashi SAKURAI National Astronomical Observatory

Abstract: I.Okamoto claimed in his recent article in the Astronomical Herald that the widely accepted view of the collimation of outflows from rotating magnetized objects is a misconception. Here we argue in favor of the magnetic collimation, elucidating its physical mechanism. The current sheet in the solution which Okamoto rejected as artificial will form, as we witness in the solar wind.