

天体の回転が駆動する星風について

— 電磁流体力学を使わない説明の試みと少しばかりのコメント —

柴田 晋平

<山形大学・理学部 〒990-8560 山形市小白川町 1-4-12>

e-mail: shibata@sci.kj.yamagata-u.ac.jp

磁場による星風のコリメーションと加速に関する今回の月報誌上での議論は大変有益と思う。ただ、一般読者には専門的すぎてわかりにくい部分があるよう思ったので、電磁流体力学の用語を用いずに「遠心力風」の機構を説明できないか、本論では試みた。そして、わずかながら議論の解決の足しになりそうな補足のコメントをした。

岡本さんの天文月報の論文¹⁾をきっかけにいわゆる「遠心力風の問題」についての関心が高まり、一挙に問題解決の仕事が日本から出れば、と願う一人として筆を執った。いわゆる遠心力風の問題にかかわった研究を私も少ししたが、本質的解決は非常に重い問題なので、興味があるにもかかわらず、研究時間がとれないまま今日にいたっている*。まずは、電磁流体力学の概念を使わずにこの論争の在りかを探してみたい。

1. 電磁流体力学の概念を避けた星風問題の解説の試み

中心天体の回転が駆動する星風の基本メカニズムは、軸対称の場合は図1に示す電池につながれた回路におけるエネルギー伝達と開放に類似している。つまり、中心天体は回転する磁石でこれが起電圧を供給し、周りにプラズマがあると、これが導体であるため回路を形成する（星の周りが真空なら回路が成立しないので軸対称の時はエネルギーを開放しない）。

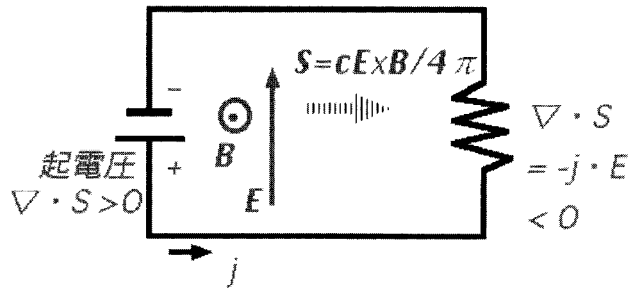


図1 電池でつながれた抵抗を含む回路におけるエネルギーの流れの概念図。電磁的エネルギーの流れはポインティングベクトル $S = cE \times B / 4\pi$ で表され、 $\nabla \cdot S > 0$ が湧き出しでエネルギー源、 $\nabla \cdot S < 0$ が吸い込みでエネルギーの変換（この場合は熱化）を意味する。

ポインティングフラックス $S = cE \times B / 4\pi$ がエネルギーの流れであり、 $\nabla \cdot S = -j \cdot E < 0$ のところでエネルギーが開放される。ここで、 E 、 B は電磁場、 j は電流密度である。図1の回路ではジュール熱が発生することになるが、星風理論でよく使われる理想MHD条件（電気抵抗→0）では、電磁

*このところ、地方大学はその目的を高度技術者養成に置かれ、また、地域社会への貢献が重視されている。その結果、天文学や数学などの基礎研究への圧力が強く、研究時間の確保はますます難しくなっている。

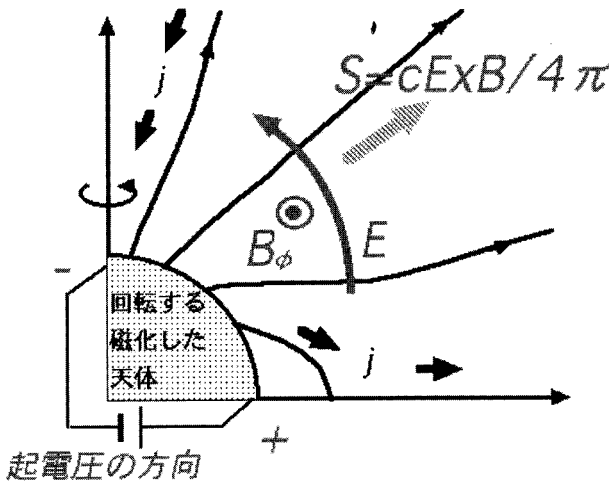


図2 回転する天体の周りの様子。周りのプラズマは天体とともに回転し、回転する導体の領域が広がる。電流が流れ、外向きの電磁エネルギーの流れSが発生する。

エネルギー流束の吸い込み $\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}$ はプラズマの加速に行く。

もう少し詳しく星風の形成過程を見て行こう。電気的な良導体である星の周りのプラズマは、電磁誘導作用によって星と共に回転しようとする。中心天体のみならず、周りのプラズマが共に回転をはじめ。起電圧をもった回転導体の Territories の拡大である。共回転体がなぜ広がり、どこまで広がるかができるかは以下に示すように定常的な回転エネルギーの開放を仮定すれば理解できる。

高い電気伝導性のために共回転プラズマ中の電場は磁場に沿ってはスクリーンされ、その結果、電場は磁場に垂直になる: $\mathbf{E} = -\mathbf{u}_c \times \mathbf{B}/c$, ここで、 $\mathbf{u}_c = \Omega \mathbf{r} \sin \phi$ は共回転速度、 Ω は星の自転角速度、 \mathbf{r} は回転軸からの距離を意味する。これは共回転電場とよばれる。このあたりの式はやや電磁流体的になってしまったが、よく知られた $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトでプラズマは共回転していると考えてよい。定常的なエネルギーの流れがどのように起こるかと言うと、図2のような赤道方面から出て極方面から戻ってくる電流系、そしてそれに伴って生じるトロイ

ダルな磁場 \mathbf{B}_ϕ が形成されると、電磁エネルギー流束 $\mathbf{S} \propto \mathbf{E} \times \mathbf{B}$ が図に示さるよう外向きに発生することで実現する。エネルギー源は中心天体の回転エネルギー $E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} I \Omega^2$ である。ここで、 I は星の慣性モーメントである。回転エネルギーの放出は同時に角運動量の放出を伴っている。簡単な関係式、

$$\frac{dE_{\text{rot}}}{dt} \equiv I \Omega \dot{\Omega} = \Omega \frac{d(I\Omega)}{dt} = \Omega \dot{L} \quad (1)$$

があるので、角運動量損失率 \dot{L} はエネルギー放出率の厳密に Ω^{-1} 倍であることがわかる。この角運動量を運び出すために共回転の Territory を拡大する必要があった。回転体の半径を大きくすることで大きな角運動量が持ち出される。そうしないと、システムは定常的にエネルギーを開放することができない。

回転体の半径 \mathbf{r}_A は次のようにして見積られる。もしほとんどのエネルギー・角運動量が電磁場で持ち出されるとすれば、角運動量の流れは $(S/c) \mathbf{r}_A$ であり、この Ω 倍がエネルギーの流れ S になることが条件なので、 $\Omega (S/c) \mathbf{r}_A = S$ と置いて、共回転が終わる半径 $\mathbf{r}_A \approx c/\Omega$ と見積られる。電磁場によるエネルギーの流れは光子の流れと見なせるので、光子のエネルギー $h\nu$ が、角運動量 (運動量 $h\nu/c$ と腕の長さ \mathbf{r}_A の積) の Ω 倍に等しいと置いても $\mathbf{r}_A \approx c/\Omega$ を得る。この半径は共回転速度が光速になる半径で「光(円柱)半径」と呼ばれる。これは相対論的星風の場合になる。具体的な天体ではパルサーがこの場合にあたる。プラズマの静止質量エネルギー密度が、磁場のエネルギー密度よりずっと小さいとき相対論的になる。プラズマの役割は回転導体のサイズを c/Ω まで大きくしたことである。

密度の高いプラズマが角運動量を運ぶ担い手になるときは、より小さな半径で十分角運動量を運べる ($\propto \rho v_\phi \mathbf{r}_p v_p \approx \rho \Omega^2 \mathbf{r}_p^3$) ので、(1) 式の条件から $\Omega \mathbf{r}_A \approx B_p / \sqrt{4\pi \rho} = v_p$ という条件がえられ、

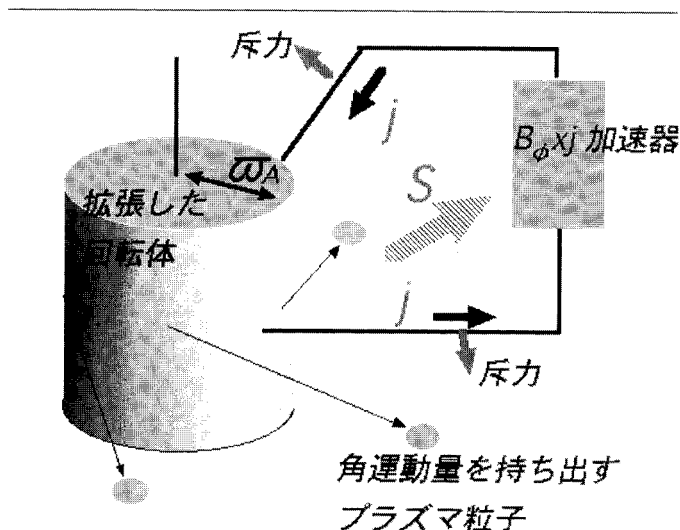


図3 腕の長さを長くした回転体は必要な角運動量を持ち出す。これは、回転体と回路の差動回転を保証し、回転体からエネルギーが抜き取られ、回路で消費される。回路を流れる電流には斥力が働く。これがコリメーションと反コリメーションの起源である。

これから半径 ω_A がわかる。ここで、 v_p は子午面内の速度。この半径は流れの速度 $v_p \sim \Omega \omega_A$ がその Alfvén 速度に等しくなる所になっている。

共回転が終わると、その外 $\omega > \omega_A$ ではプラズマの運動は基本的には慣性運動（等速直線運動）である。このとき、方位角方向の速度成分は $v_\psi \propto 1/\omega \rightarrow 0$ である。

図3に於て、発電体 (ω_A の内側の共回転プラズマ) にたいして回路部分 (ω_A の外側) が回転していない、つまり差動回転があることがエネルギーを取り出すことの必要条件である。もし回路が一緒に回ったら、起電圧は取り出せなくなってしまう。 ω_A の外がわでプラズマが回転しない ($v_\psi \rightarrow 0$) ことはこのような重要な意味を持っている。

このようにして半径 ω_A の大きさの回転体が起電力を提供し、その回転体から伸びた電流回路において電磁エネルギーが開放されることになる。この電流回路でのエネルギー開放が実際の星風の中で

どのようにして起こるのが、今回の論争の中心課題になっている。電磁エネルギー流束 ($S = (\Omega \times \omega_\psi / 4\pi) B_p$) がプラズマのエネルギーに100%変換されるのか？、(あるいは無限速まで電磁的エネルギーのままなのか)、プラズマの流れ・磁場の形状はどうなるのか？(回転軸にコリメートするのか?) 図3の回路の働き方を明らかにしようとしているのである。

とはいっても、非相対論の場合はプラズマが角運動量を担って $\Omega \omega_A$ のスピードで流れ出ている、これが全体のエネルギーの半分近くを持ち出している。外側の回路で開放するエネルギーは残りの部分である。

相対論の場合は問題は深刻で、共回転体からプラズマがどの程度

のエネルギーを持ち出すかすらわからない。実際、精密な計算はないため、まだ、だれも何も言えない。今回の議論で時々話題にのぼる2つの単極磁場を張り合わせたモデル(初めから開いた磁場形状を持っている: 以下、Split monopole と呼ぶ)を用いた2次元MHDシミュレーションでは、相対論の場合、プラズマの加速・角運動量を持ち出しはほとんどなく、電磁場がほとんどのエネルギーと角運動量を持ち出している²⁾。

桜井さんの計算³⁾では、全ての電磁エネルギー流束はプラズマに転化されている。これは図1の回路の場合と似ている(電気的なエネルギーは回路で100%消費される)。図3を見ると、加速器の中に入ったプラズマは、(電流) × (紙面に垂直な磁場) の電磁力で外向きに加速することがわかる。

回路の図からわかるように二つの電流は互いに反対向きなので、斥力を及ぼし合う。極側の入ってくる電流は軸側に、出て行く電流は赤道面方向

に力を受けている。岡本さんが指摘しているコリメーションと反コリメーションの力は、回路モデルの二つの電流の斥力として理解できる。

2. わずかなコメント

議論を整理するためにいくつかのコメントをしたい。

●非相対論的な風と相対論的な風はしっかり区別しなければならない。

非相対論の場合は ω_A の外で卓越する力は磁気力 $j_{\parallel} \times B_{\phi}$ で、その相手をするのは慣性力しかない。したがって、必然的に流線は曲がることになる。相対論の場合は磁気力に加えて静電気力 qE も卓越する（回転起電力による電荷分離した正負の空間電荷が引き合う）。したがって、磁気力と方向が逆である。実際、電気力と磁気力がバランスして磁力線が放射状の直線の（曲がらない）解がある。このように、相対論的な場合は軸に沿ったコリメーションは自明ではない。Bogovalov²⁾ の計算は電気力の影響を良く表している。彼の計算（Split monopole が使われている）では、コリメーションはほとんどなく、プラズマの加速・角運動量の持ち出しはほとんどない²⁾。

●次に理想 MHD の体系で解が存在するかどうか分からないということがある。

これはむしろ数学的興味で、おおまかな風の振る舞いの理解に影響しないかもしれないが、問題を解くときに注意を払う必要がある。

子午面内の磁場構造を得ようと思えば、磁場の流線にたいする 2 階の楕円・双曲混合型の偏微分方程式を解かねばならない。 ω_A よりも外に在る一つの面（Fast critical surface）の内側の解を一旦決めると、その外は双曲型なのであとは外に向かって無限遠まで解を延長して行けばよい。しかし、このような解の延長がはたして矛盾なく無限遠まで続けられるかは自明ではない。実際、Mestel と私が近似的にこの方程式を解いたときには解が途中で求められなくなり、散逸過程を挿入して初めて無限遠まで解を求めることができた⁴⁾。理想 MHD の方

式系の定常解は散逸を要求することが多く、回転駆動された星風のばあいも散逸が解を決定する上で重要である可能性が高い。

●外に向かって出て行く電流と戻ってくる電流の別れ目（岡本さんの論文で P_n ）がどこに来るかが一つの争点になっている。

始めから Split monopole の磁場を仮定しないで、中心にダイポール磁場をおいて、この別れ目がどこにくるのか。この点に関しては 鷲見と柴田の数値シミュレーションが参考になるかも知れない⁵⁾。この計算では軸方向へのコリメーションと赤道面への圧縮の両方が観察される。分水嶺は赤道面から 20 度くらいになっている（ $20\omega_A$ のところで）。このシミュレーションでは、陽に数値粘性は入っていないが、グリッドを切ったことによる散逸はもちろん存在する。しかし、赤道の薄い電流層の部分の変化は極めてゆっくりしているために、実施した計算時間内には赤道部分は定常解には至っていない。厚い赤道層は単に定常状態になっていないためかもしれない。

●空間構造の議論では、質量流束、エネルギー流束、角運動量流束の角分布を区別して議論する必要がある。簡単にジェットと言う言葉は使えない。

この注意はこの問題に携わっている研究者にとっては自明であると思うが、関連研究の中で結果を引用する時に注意したい点である。

上記鷲見と柴田の数値計算の結果によると、回転軸まわりと赤道で質量流束（mass flux）の増加がみられる（disk wind - polar wind 構造）。これは回転軸側のコリメーションと赤道側の反コリメーションで質量が集められたためであるが、星風の速度は回転軸と赤道でむしろ遅くなっている。コリメーションは磁力線とプラズマが回転軸方向に集められることであって、ジェットとして加速されることとは別なので区別する必要がある。 $20\omega_A$ くらいのところで見ると、流れはやや円柱対称的で、回転軸の近傍をのぞいて万遍なくエネルギーの流れが分布し、角運動量の流れは赤道面近傍で増加している。

プラズマの流れを外向きに加速することは、どんどん電流が閉じて行くことを意味する。図3では回路の素子（加速器の部分）で加速している。コリメーションは加速が起こる前に最大で、加速が100%起こり、完全に電流が閉じると、その外では子午面内の電流がなくなるので、電流同志の斥力もなくなりコリメーションもない。従って、加速とコリメーションの程度は図3のような簡単な図式でははっきりしない。

●熱駆動力により風が吹くときと回転により風が駆動されるときの違いもはっきりさせないと混乱すると思う。

鷲見と柴田の計算でもコロナの熱駆動力の方がやや回転駆動力より勝っており、回転駆動力が卓越したときの構造はまだ解けていない。

誰も実際解いていない問題なので、確信が持てないが、赤道の電流層（current sheet）の厚さについては、熱駆動力で閉じた磁場が開かれるときは極く薄い電流層になることが予想されるが、外圧（熱）が関与せず磁気力と慣性だけで決まる構造でどれだけの厚さになるかは自明ではないと思う。

参考文献

- 1) 岡本 功, 2000, 天文月報, 93 3, 134
- 2) Bogovalov S. V., 1998 Astronomy Letters, 24, 321-331 "Magnetic Collimation of Astrophysical Winds"
- 3) Sakurai T., 1985 AA 152 121
- 4) Mestel L., Shibata S., 1994 MNRAS 271 621
- 5) Washimi H., Shibata S., 1993 MNRAS 262 936

On the wind driven by magnetic rotating stars

— an attempt to give an explanation without using concepts of magnetohydrodynamics, and comments on the controversial —

Shinpei SHIBATA

Department of Physics, Yamagata University

Abstract: This issue is a good opportunity to understand the problem of collimation and acceleration of the magnetic wind. However, the discussions are sometimes difficult to general audience. In this paper, I am attempting to explain the basic process discussed without using any concepts of magnetohydrodynamics. In addition, I put some of my comments which are hopefully helpful to resolve the present controversial.