「どこ吹く風？―プラズマ流の漸近構造に関する論争について―」

新田伸也
〈総合研究大学院大学数物科学研究科天文科学専攻／国立天文台理論天文学研究系
〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉
e-mail: snitta@th.nao.ac.jp

天体からのプラズマ流は，エネルギーや角運動量の輸送に深く関わっており，系の力学的進化を議論するために大変重要なものである．しかし，その基礎的な部分についてすら，研究者間で統一的な見解に達していないことは，あまり知られていないかもしれない．天文月報2000年3月号の岡本 功氏の論文「宇宙ジェット―あるパラダイムの終焉―」に対する桜井 隆氏の反論論文中にある問いかけ「磁場を持ち回転する天体一つだけを真空中に置いて，定常MHD風を吹かせたとき，流れは漸近的にどのような構造を作るのか？」に関して，筆者の持論に基づいてコメントする．

1．混戦模様

岡本氏の見解[1]は，いくつかあり得る選択肢のうちの一つを拡大解釈して，それが唯一の選択であるかのように主張している，と筆者には感じられる．一方，桜井氏の主張は，中心天体から有限の距離の構造に関する議論を，より巨大な構造の議論に演繹しているが，筆者は，無限遠方での漸近的振る舞いを考察するには，別の視点が必要だと考えている．すなわち，筆者は第3の説を展開する．

桜井氏は，反論論文中で，この問題について「純粋に理論的に決着のつく問題であり，答えは一つ」と述べている[2]．筆者も全く同意する（ただし，後に述べるが，ある記述を付け加えれば，の話である）．おそらく他の研究者も同意するだろう．それにも関わらず，現在の世界各国の研究者の動向からすると，この問題に対する見解は統一されていない．細かい部分まで気にすると，むしろ，研究者の数だけ異なる意見があると言えるくらいだ．20年近くに渡る論争は，まだ決着の気配すら見せてはいない．今回の論争からも，この分野の国内の数少ない研究者（5，6人程度か？）の間ですら意見が全く異なっていることがわかる．このシンプルな問題に対して，なぜこうまで意見がばらつくのだろうか？

この点について，筆者は2つの原因があると考えている．まず，この問題の基礎方程式（Grad-Shafranov方程式とWind方程式）のひとつであるGrad-Shafranov方程式（Trans-field方程式）がとんでもなく難解で，様々な簡単化や仮定をしなくては解けないことに原因がある．必然的に多様なアプローチが生じることになり，論争の種となる．これは，単純に解法の難しさというだけでなく，数学的に完全な問題設定をすること自体が困難である（Tricomiの問題と呼ばれている），という非常に根深い困難であり，これこそがこの問題の本質であると言える．

2点目は，それぞれの研究者の問題意識が微妙にずれている可能性である．ここで議論すべきなのは，定常解の無限遠方での漸近的振る舞いである．例えば，ある研究者が，有限距離の動的解に関する考察で得た直感を元にして，議論を無限遠に拡張しようとすると，実は有限距離の議論に終始してしまい，もともと漸近解を議論してきた研究者

と議論がかみ合わなくなってしまっている，ということはないだろうか．

前者については誌上対決での解決は望めないので，本論文では後者について議論しよう．

2．漸近領域の構造

2.1 漸近領域とは

本論文では，定常かつ中心天体の回転軸に対して軸対称な構造だけを考える．この簡単化は問題の本質を捉えるために有効である．中心天体から遠く離れた領域を考察しやすくするために，新しい座標を導入する．2次元極座標（r，θ）の動径 r を，$\rho \equiv 2/\pi\ \tan^{-1}(r/r_L)$ で定義される新しい座標 ρ で置き換え，新しい座標系（ρ，θ）を考える．ここで，θ は回転軸からの角度を表し，r_L は任意に選べる長さの単位である（通常，この分野では，light cylinder radius と呼ばれる長さを単位にする）．こうすると，中心 $r=0$ は $\rho=0$ に，無限遠方 $r\to\infty$ は $\rho\to 1$ に対応し，無限遠方を考え易くなる．すなわち，天体を中心とする無限大の空間の全領域は，（ρ，θ）平面での半径1の単位円で表される．赤道 $\theta=\pi/2$ に関して南北対称であることも仮定しているので，$0\leq\rho<1$ かつ $0\leq\theta\leq\pi/2$ の1/4円だけを考えればよい（図1参照）．

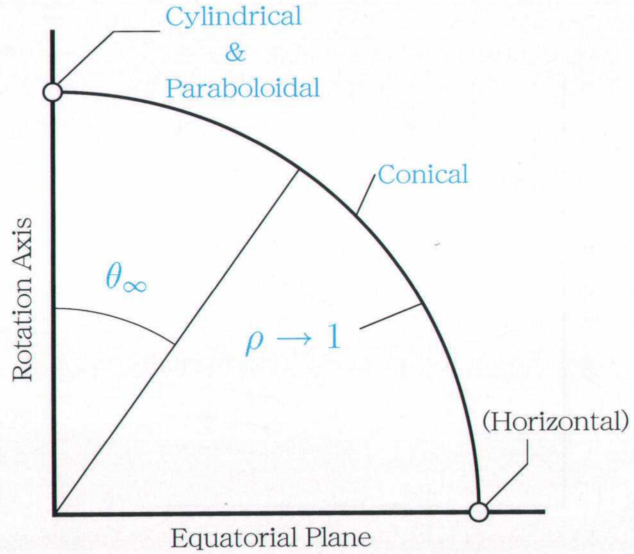

図1：漸近解の分類．（ρ，θ）平面を用いての厳密な分類を示す．この図では，円柱解と放物解は区別できないが，$\rho\to 1$ となるにしたがって，回転軸からの距離 $r\sin\theta\to const.$ となるものが円柱解で，$r\sin\theta\to\infty$ となるものが放物解である．

今，一本の流線を考え，この流線が $\rho\to 1$（無限遠）となったときの角度を θ_∞ と書こう．岡本氏と桜井氏の論争においてしばしば出てくる，「流れが回転軸方向に収束するかどうか」とは，次のように分かり易く言い換えられる．すなわち，ある流線が $\theta_\infty=0$ となる場合には「回転軸方向に収束する」と言い，$\theta_\infty>0$ となる場合には「回転軸方向に収束しない」と言う．ここで注意してもらいたいのは，「収束するか否か」は，有限距離での流線の振る舞いを指しているのではなく，無限遠方（上記単位円の円周）での最終的な到達角度を指しているということである．したがって，有限距離において，流線が回転軸方向にたわんでいたとしても，最終的にどの角度に漸近するかを見極めないと収束については言及できない．この円周を漸近領域と呼ぶ．今問題にしているのは，上述の円の内部で流れが作る構造ではなく，流れが円周のどこに漸近するかである[注1]．

2.2 漸近解の分類

漸近領域での流線構造を研究する分野では，以

注1）岡本氏は別の基準（流線の曲率の符号の違い）で収束を議論している．今回の誌上討論で「収束」，「コリメーション」という述語が出てきた場合，どういう意味で使われているかをわきまえていないと混乱するので，注意して欲しい．

注2）この分野の代表的論文である Heyvaerts Norman[3)]での分類に従った．

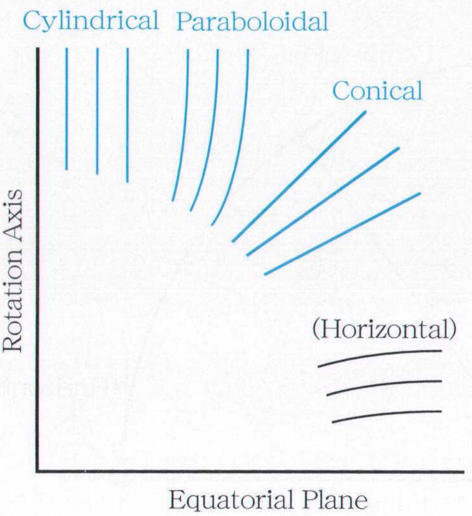

図2：各解のイメージ．(r, θ) 平面を用いて，各解の幾何学的なイメージを説明する．このような図では，有限距離での様子しか描けないので，正確な情報を伝えることはできない．大切なことは，この絵で得た感覚から無限遠方での各解の様子をイメージすることである．

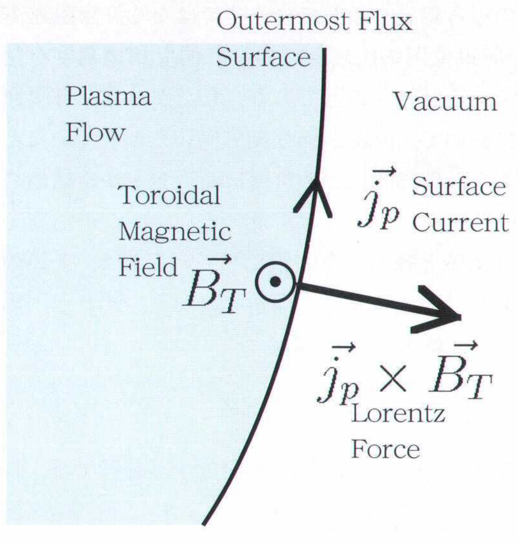

図3：輪郭が生じたときの，流れの外縁部の様子．「力の釣り合い」と「電流の収支」を同時に満たすことはできない．

下の用語によって構造を区別している[注2]．$\rho \to 1$ となるにしたがって，回転軸からの距離 $r \sin\theta \to const.$ となるものを円柱解（asymptotically cylindrical），$r \sin\theta \to \infty$ かつ $\theta \to 0$ となるものを放物解（asymptotically paraboloidal），$\theta \to$ const (> 0) となるものを円錐解（asymptotically conical）と呼ぶ（図1参照）．もう一つ，$\rho \to 1$ となるにしたがって $\theta \to \pi/2$ となる水平解（asymptotically horizontal）があるはずだが，これは実現しないことが示せる[3),4)]ので，ここでは考慮しない．ただし，通常これらの用語には英語が使われており，日本語の呼称は筆者がこの論文のために考えたものである．これらの呼称は，流線の幾何学的形状をうまく表している（絵を描いてみると，なぜこう呼ばれるのかが容易に理解できる．図2参照）．すなわち，「収束する」解には円柱解と放物解の2つがあり，「収束しない」解は円錐解である．もう一度念を押しておくが，これら3種類の解は，無限遠方において流線の漸近する位置によってのみ区別される．

3．収束するのか？しないのか？

3.1 電流を無限遠にまで運ぶ流れの場合

今回の論争のキーの一つは，「流れの中の電流は，流れの中で閉じるべきか否か？」である．岡本氏は「閉じるべき」との立場で議論したが，筆者は，後に議論するように，桜井氏同様「閉じなくても良い」と考えている．閉じない場合には，流れが電流を無限遠にまで運ぶ．まず，この場合に限って考察する．

今回の論争で問題になっている「全ての流線が収束する」場合のうち，中心天体から始まる流線が，$\rho \to 1$ かつ $0 < \theta \leq \pi/2$ の部分を満していない状態（通常，「宇宙ジェット」という言葉から想像されるような，真空中にプラズマの柱が立っている状態）は，以下の理由により非現実的である．この場合，風には，中心天体から始まる一番外側（低緯度側）の流線によって定義される輪郭が存

在することになる．今考えている問題では，風の外側は真空である．したがって，風の輪郭（真空と風との境界）での力の釣り合いを満たすようにしなくてはならない．また，この輪郭となる流線は，電流の収支を満たすよう[2]に，風本体中の電流とは逆向きに流れる面状の電流層となっていなくてはならない．この部分には，面電流によって輪郭を膨張させる向き（低緯度方向）に Lorentz 力がかかる．赤道面にできる電流層の場合には，南北半球の流れが接して押しつけあうことで力の釣り合いを保てる．逆に，押しつけ合っているのでプラズマの密度が高く，そのため強い電流を流し得ると言い換えることもできる．しかし，今考えている極域にできる風の輪郭については，外側が圧力ゼロの真空であるために，風の輪郭では，膨張する力も収縮する力も存在できず，したがって，膨張する Lorentz 力を生じさせてしまう逆向きに流れる面電流の存在は許されない（図 3 参照）．つまり，全ての流線が「収束する」構造では，その輪郭において，「力の釣り合い」と「電流の収支」という二つの条件を同時に満たすことはできないと言える．したがって，このような解は，真空中には存在できないと考えるべきである（周囲が圧力ゼロの真空でなく，有限の圧力の星間ガスに満たされているなら，有限の外圧との力の釣り合いとなり，実現可能と思う）．

筆者の主張は，「収束する流れ（円柱解または放物解）」の外側（低緯度側）には，これを支えるために，同じ中心天体から始まる「収束しない流れ（円錐解）」が必要である，ということである[5]．これは，極域に円柱解または放物解が存在するためには，低緯度側に円錐解をあてがってやる必要性を示している（同じ理由で，放物解だけで作られる構造も，その芯の部分の境界（高緯度側）で不都合となり，放物解の内側（芯）には円柱解が必要である）．この場合，南北半球の円錐解の間には赤道面電流層が必然的に存在する．この面電流は，風の中を分布して流れる電流と逆向きであり，量的にはちょうど収支が取れており，系全体での電荷保存が満たされる．この解は，「一部の流れは回転軸方向に収束するが，残りは収束しない」複合解である．結論だけを見ると，岡本氏の主張[1]とよく似ているが，その根拠や具体的な解は異なるものを考えているので，全く別の主張であることを強調しておきたい．

収束する流れと収束しない流れに質量流束や磁束，エネルギー流束がどのように分配されるかは，まだ明らかにできていない．筆者は，これら流束の分布には中心領域の個性が大きく影響すると予想している．ジェット状の流れや円盤状の流れなど，流れの全体像の多様性は，中心領域の個性の違いと関係しているのかもしれない．

この円柱解と円錐解の複合については，しばしば，「形が違うのだから，合わせられないのでは？」という質問を受ける．今考えているのは，無限遠方の極領域（$\theta \to 0$）であることを思い出して欲しい．この領域では，円柱解の最外縁と円錐解の最内縁は，ともに回転軸に平行な円筒面なのである．したがって，「同じ形」の組み合わせである．

上述の流れの輪郭に関する議論での例外は，放物解で無限遠方の全領域（ただし $\theta = \pi/2$ と $\theta = 0$ を除く開区間）を埋め尽くしている場合である．例えば，放物解の自己相似解（例えば contopoulos 1995[6]）がこれに当たる．この場合，上述の輪郭は存在せず，したがって輪郭での問題も生じない．赤道面には電流層（流れ中の電流とは逆向き）が生じ，系全体では電荷保存を満たしている．

整理すると，無限遠にまで流れが電流を運ぶ場合には，（1）円柱解と円錐解の組み合わせ，または，（2）円柱解と円錐解の間に放物解を挟んだもの，（3）無限遠の全領域を放物解で満たしたもの，の 3 種類の場合が，真空中に吹き出してゆく流れの作る構造の可能性として生き残る．このうち，（2）については，放物解は円柱解や円錐解とはうまく共存できないように感じている[5]．しかし，これはかなり単純化した議論の結果であるので，今後の研究の進展で印象が変わるかもしれない．し

たがって，現在，筆者は「一部が収束し，残りは収束しない」（1）または「全てが収束する」（3）が可能な選択だと考えている．このうちのどちらが実現するのかについては，結論は出ていない．筆者は，この両方の場合が現実に起こっており，中心天体近傍の個性（例えば，単独の恒星やパルサーの場合と，ブラックホールの周囲に降着円盤が付随する場合など．偏微分方程式の境界条件に対応する．）の違いによって，（1）か（3）かが決まると考えている．この選択問題の解決のためには，個々の定常解を議論するだけでは不十分で，エネルギー原理に基づく比較考察や，解の安定性の議論などを用いて詳細に吟味する必要があるだろう．

3.1.1 円錐解の可能性について

桜井氏が述べている，「回転によって赤道付近に堆積する円周方向磁場の圧力（フープ・ストレス）によって，流れが極方向に押し上げられる」，ということは筆者も受け入れる．しかし，このフープ・ストレスは，中心天体近傍の磁気遠心力によって水平解になろうとする流れを，遠方において赤道面に堆積した磁力線の磁気圧によって円錐解（放物解や円柱解ではなく）になるように持ち上げる働きをすると考えている．これは Heyvaerts と Norman[3] の議論で，水平解が禁止されたことに対応している．桜井氏と見解が異なるのは，このフープ・ストレスは，流れの相対論効果によって生じる静電力と最終的には打ち消し合い，中心領域はともかく，遠方においてまで流線を極方向にたわませることはないと考えているからである．この静電力の効果については，筆者の見解が強く出ており，広く受け入れられているわけではない．この論文の主題とは異なるので，詳しくは述べないが，光速に比べて十分に遅い流れであっても，回転軸からの距離が（light cylinder radius に比して）非常に大きくなると，特殊相対論的な効果（静電力）を考えることが必要になる，と筆者は主張している．

基礎方程式を漸近展開すると，$\theta \neq 0$ での無限遠方では，これら2力が，他のあらゆる力よりも卓越し，支配的になることがわかる．実際，フープ・ストレスと静電力が釣り合った円錐解は，基礎方程式（Grad-Shafranov 方程式と Wind 方程式）を満たす解として存在する[8), 9)]．

3.1.2 電流層の存在について

岡本氏の議論によると，風の中で電流は閉じていることが自然だということである．しかし，桜井氏が指摘しているとおり，太陽風中には赤道面電流層の存在が観測的に確認されている．地球軌道付近でも顕著な磁場配位の不連続が観測されることから，この電流層は，太陽風全体のかなり中心付近で既に発生していると考えられる．プラズマについて巨視的な扱いしかしない MHD 近似の範囲では，このような不連続の存在自体は不都合ではない．この点に関しては，岡本氏は必要以上に強い条件を課して解を求めたと考えられる．

もちろん，太陽風中の電流層は，我々が本来議論しようとしている漸近領域での電流層ではなく，有限距離の現象である．問題は，この電流層が，今，問題として取り上げている無限遠方まで続き得るか否かである．太陽系外周部での磁場配位の観測ができれば，電流層の存在と，その中を流れる電流量の，太陽からの距離による変化などが明らかになり，有用な情報となるであろう．太陽風中の電流層は，MHD 理論での特性長である Alfvén 半径（水星軌道よりも内側）よりも，はるかに外側まで続いているので，この太陽風電流層存在の事実は，漸近領域での電流層の存在を正当化する材料になっていると思う．また，前述の解（2）のように，反平行になった磁場配位（この配位は，回転によって生じた円周方向磁場で作られる）が両側から押しつけられるような状態になっていれば，電流層はどこにでも生じ得る．したがって，現段階では，赤道面電流層を含む解を，一般的ではないとしたり排除する正当な理由はないと思う．この点については桜井氏を支持する．

3.2 電流を無限遠にまで運ばない流れ

放物解には，流れが無限遠にまで電流を運ばない場合がある（current-free paraboloidal）[4), 10)]．電流を無限遠に運ばない放物解を（4）とする．このような流れだけで構成される場合には，面状の電流層は生じないので，無限遠方の全領域を満たしていてもいいし，満たさずに輪郭を持っても問題は生じないだろう．この解は，流れが初期に持つ磁場エネルギーの全てを流れの運動エネルギーに変換する特徴を持っている．例えば，パルサー風はこのような性質を持つらしい事[11)]から，（4）は注目されている．なお，桜井氏は，反論論文中で赤道面電流層を正当化しているが，彼自身の数値解[7)]は，無限遠方では赤道面電流層を含まない解（すなわち current-free paraboloidal）のようである（本論文の主題からそれるため，詳細な議論は割愛する）．この点では，岡本氏との対立は本来無用のものだったかもしれない．

岡本氏は，この，電流を無限遠に運ばないタイプの解を議論しているが，彼の場合には，上述の分類での円錐解である[注3]．従来の議論では，電流を無限遠に運ばないのは，ある特殊な放物解に限られ，円錐解は必ず電流を無限遠に運ぶ，と結論されていた[4)]ので，周囲に困惑を与えている．

3.3 まとめ

桜井氏の提起した問題を思い起こしてみよう．「磁場を持ち回転する天体一つだけを真空中に置いて，定常 MHD 風を吹かせたとき，流れは漸近的にどのような構造を作るのか？」の問いに対する筆者の回答は，「中心領域での境界条件を与えれば，その境界条件に対するこの問題の答えは一つ」である．境界条件をいろいろと変化させたとき，解は上記（1）円柱解と円錐解の組み合わせ，（3）無限遠の全領域を放物解で満たしたもの，または（4）電流を無限遠に運ばない放物解，の間を不連続に変化するのかもしれない．ただし，（4）については，無限遠での電流分布に関して，（1）や（3）の解とは全く性質が異なっているため，（1）や（3）とは根本的に異なった状況でしか実現しないのかもしれない．

4．岡本氏の説について

岡本氏が天文月報 2000 年 3 月号で展開した説[1)]について，現段階で筆者は同意しない．岡本氏の解は，漸近領域での解の分類で言えば，明らかに円錐解である（方程式を $r\to\infty$ なる極限において漸近展開したときの，最低次の振る舞いに関して）．従来の研究によると，円錐解では，必ず流れが電流を無限遠方にまで運ぶことになっている[3), 4), 8)]．しかし，岡本氏の解では，電流は無限遠に達するまでに全て閉じてしまうと言う．岡本氏の漸近的に円錐状になる解は，従来の円錐解（これも漸近的に円錐形状になるという意味であることに注意．この意味で，両者の区別はできないはずである．）の議論のような最低次の振る舞いだけでなく，より高次の次数の効果まで考慮していると解釈できるが，このような高次の振る舞いが，最低次の振る舞いを全く変えてしまう（最低次の議論では必ず存在した電流が，高次を含めて議論すると消えてしまう）ほど影響することはあり得ないはずである．したがって，岡本氏は従来とは全く違う円錐解を発見した，と主張しているように思われるが，これは，例えば Heyvaerts と Norman[3)]の議論と矛盾している．Heyvaerts と Norman や Chiueh et al.[4)]の議論は，大部分が普遍的な定理を証明した上での客観性のある議論となっている．筆者は，彼らが最も強く

注 3）この点の見解が岡本氏と筆者の間で食い違っているが，彼の主張している流線の漸近領域での到達位置（有限の角度 $\theta_\infty = \mathit{finite}$ になっている）から判断する限り，岡本氏の解は円錐解であると筆者は確信している．本論文第 4 章参照のこと．

主張したい部分「全ての流線は収束する」には否定的であるが，彼らの主観が入らない，それ以外の部分については信用している．したがって，これらの議論の結果と矛盾する岡本氏の議論は不可解に思える．

従来の議論では，流線の漸近形状をあらかじめ何種類か仮定して，流れの構造を決めるGrad-Shafranov方程式（Trans-field方程式）を満たすような構造を求め[注4]，その場合の電流分布を議論して結論に至ってきた．岡本氏は，先に電流分布を仮定して（岡本氏自身は，仮定ではなく当然の要請であると考えているようだ），その分布を実現する流線の漸近形状を決めている．両者の議論は，同じ方程式（見かけは違っても，その表す本質が同じ）を使っている以上，同じ結論に至って然るべきだと思える．

岡本氏は，従来の議論は根本的に間違っていると言うが，その指摘は観念的であり核心をついていないように感じられる[注5，6]．つまり，同じ土俵での議論になっていないために噛み合わず，混乱を生じている[注7]．今後，より詳細に，噛み合った議論が為されることを期待する．

先の天文月報記事[1)]では，岡本氏の説で決着を見たかのように書かれていたが，現段階では，岡本氏の説は多くの研究者に受け入れられているとは言えない．まだまだ議論は続くものと思っている．

注4）岡本氏の表現では，「TF Eq.をバイパスしている」[12)]，とされているが，これはTF Eq.に矛盾しているとの誤解を与えかねない．HeyvaertsとNormanやChiueh et al.，筆者らもTF Eq.を基礎方程式の一つとし，これとの整合性を保って議論を行っている．もちろん，筆者が求めた円錐解[8)]はTF Eq.を満たしている．

注5）例えば，HeyvaertsとNorman[3)]に対する批判において，流線方向の運動方程式（Wind方程式，またはベルヌーイ積分）から（本来，流線を横切る方向の力の平衡によって決まるはずの）流線形状に関する情報を引き出したことが間違いである，と岡本氏は主張している．しかし，流れの構造は，Wind方程式とGrad-Shafranov方程式（Trans-field方程式）の連立方程式によって決定されるものであるから，方程式の一つであるWind方程式を満たさない流線形状（水平解）は，必要条件を満たしていない，と言うことで排除され，したがって，Wind方程式だけを用いても，可能な構造をある程度議論することができる」，というHeyvaertsとNormanの論理は，筆者には自然に受け入れられるものである．これを元にして，彼らは「少なくとも，円錐解以上に極方向に収束しなくてはならない」と述べている．さらに円錐解での電流分布に関する議論を加え，「円錐解も不合理」であり，従って，「必ず収束すべし」との結論に至った．筆者は，「少なくとも，円錐解以上に極方向に収束しなくてはならない」には同意するが，この電流分布に関する議論および，そこから導かれた結論には同意しない[5)]．

注6）岡本氏は，従来のいくつかの研究に対して，因果律の観点からも批判的である．まず，筆者は，定常解における因果律の議論は，本来無意味であることを指摘する．さらに，以下では，定常解に至るまでにあるはずの時間発展を考慮したときの議論から，定常流のどこに境界条件を課しても良いことを主張する．ここで議論しようとしている定常解とは，文字通り未来永劫変化しない状態ではなく，風が天体から吹き始めた後の時間発展の結果として最終的に到達できた定常状態のことを指していると考えるべきである．したがって，このような定常解は，それに至るまでの時間発展の履歴を残しているはずである．このような場合，例え超音速の流れ中においても，因果律を破ることなく，「過去の下流域」の情報が，「未来の上流域」に影響することはあり得る．時間発展の初期に上流域において，定常解になるための微細な調整をあらかじめ完全に行わない限り，いきなり定常解が実現することはない．例えば，上流域での調整が不完全であったために超音速流の下流域で流線が交差するようなことになれば，衝撃波が発生する．この衝撃波は，超音速流を遡って上流域にまで伝播する．つまり，衝撃波が，下流域での不合理の発生を上流域に伝え，結果として上流域の流れが変化する（ここでは，単なる例として衝撃波発生を不合理として扱っている．実際には，衝撃波の存在が不合理かどうかは問題によって異なる．）．このような相互作用によって上流域の状態が次第に変化し，系全体が定常状態に近づいて行く．このように，時間発展の結果として実現された定常状態は，流れの全領域に渡って不合理を生じないように，長い時間をかけて自己調節された結果である．つまり，定常解の漸近構造も，自己調節の中で自然に決められたものである．加えて，数学的な立場で言えば，方程式は超音速領域では双曲型（初期値問題）であるが，この方程式は，流れ中のどこに境界条件（数学用語を正しく用いるなら，「初期値面」と言うべき）を与えても解くことができる．どこに境界条件を与えようと，定常状態を表す方程式の解が得られたなら，その解は，今考えている定常問題の解である．したがって，全体に渡って不合理の無い構造になるように，超磁気音速流の下流である漸近領域に境界条件を設定することは，長い時間に渡る自己調節の結果を境界条件で表現して，定常問題として解を求めるための合理的な方法の一つであり，因果律に反することはない，と筆者は考えている．

5．あとがき

筆者は，今回の論争において第3の立場を取ることを明らかにした．しかし，この自説にも，まだいくつもの問題点があることを認識している[注8]．正直な話，こんなシンプルな問題であるにも関わらず，万人が確信を持って受け入れられる答えは，まだ誰も見出してはいない，と考えている．だからこそ，筆者は答えを求め続けているし，この研究を完結させることによって，もう一つ博士号（あわよくば，何かの賞でも）を取りたいと思い，努力を続けている．

この論文の推敲に当たっては，国立天文台の工藤哲洋氏のコメントが大変有益であった．工藤氏のご協力に感謝する．

参 考 文 献

1）岡本 功, 2000, 天文月報, 93, 3, 134
2）桜井 隆, 2000, 天文月報, 93, 8, 447
3）Heyvaerts J., Norman C., 1989, ApJ, 347, 1055
4）Chiueh T., Li Z., Begelman M. C., 1991, ApJ, 377, 462
5）Nitta S., 1997, MNRAS, 284, 899
6）Contopoulos J., 1995 ApJ, 446, 67
7）Sakurai T., 1985, A&A, 151, 121
8）Nitta S., 1994, PASJ, 46, 217
9）柴田晋平, 2000, 天文月報, 93, 9 付録, 540
10）Tomimatsu A., 1994, PASJ, 46, 123
11）Kennel C.F., Coroniti F.V., 1984, ApJ, 283, 694
12）岡本 功, 2000, 天文月報, 93, 9 付録, 556
13）工藤哲洋, 2000, 天文月報, 93, 9 付録, 520

The answer is blowing in the magnetized wind — on the controversy of the asymptotic structure of plasma outflows —

Shin-ya Nitta[1,2]
[1]*Department of Astronomical Science, The Graduate University for Advanced Studies, Osawa 2-21-1, Mitaka 181-8588, Japan*
[2]*Division of Theoretical Astrophysics, National Astronomical Observatory of Japan, Osawa 2-21-1, Mitaka 181-8588, Japan*

Abstract: Magnetized plasma outflow is a fundamental process for energy and angular momentum transport, and is important to discuss the evolution of mechanical systems. However, opinions are divergent, even on fundamental subjects, e.g., the collimation. While so-called "hoop stress paradigm" for collimation of magnetized outflows is widely accepted, there is still room for disagreement about detailed structure of the plasma flow based on concrete solutions. The author also believes that I. Okamoto' s opinion published in the Astronomical Herald is overemphasized. I here comment on this subject based on my own research.

注7）岡本氏の論文では，従来，この分野の研究での述語としてほぼ定着している用語に対して，別の意味で同じ用語を用いている場合がある．一例を挙げれば，今回の論争のキーワードである「コリメーション（収束）」とは，元は普通名詞であるが，この分野では漸近領域での構造を議論するための専門用語としての特別の意味（無限遠方での流線の到達位置で区別する．本論文2.2節や工藤氏の解説記事[13)]を参照のこと.）が確立している．この用語の意味は，Heyvaerts と Norman や Chiueh et al., 桜井氏[2)]，工藤氏[13)]，筆者など多くの研究者では共通であるが，岡本氏は異なる意味（流線の曲率の符号の区別）で用いている．このような，議論の準備段階ではあるが，根幹に関わる部分ですら不一致のまま議論を続けると，お互いの誤解が次第に増幅する危険性を感じる．このため，従来の知識体系を持った研究者が岡本氏の論文を読もうとすると，非常に混乱し，岡本氏の主張の真意がわかりにくくなっている．時間的に後から出てきた主張である岡本氏の論文では，混乱を避けるために，別の用語を用いるべきであった．

注8）最大の課題は，もっと内側の領域への接続を議論することである．これは非常に困難なことであるが，避けては通れない．