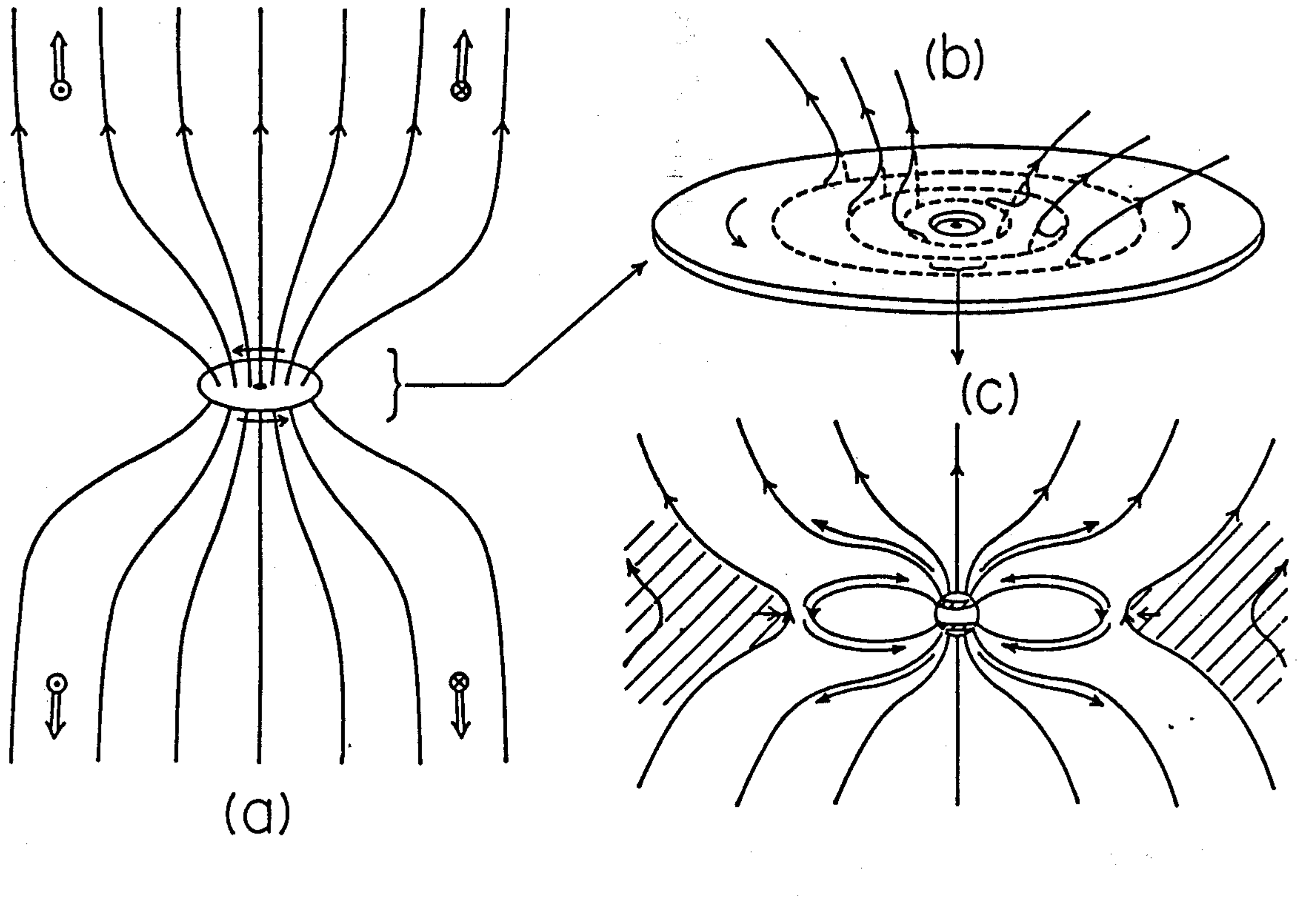
THE ASTRONOMICAL HERALD 1985 Vol.78 No. 9

ISSN 0374-2466

天文月報 9

日本天文学会



恒星形成領域のCO双極流と小規模ジェットの形成に関する新しい解釈の概念図

宇宙ジェットの磁気流体加速機構
——恒星形成域双極流への応用——

柴 田 一 成*・内 田 豊**

1. はじめに

宇宙にはスケールの異なる様々な階層で類似の状況(例えば重力中心のまわりを回るガス円盤)が存在する.これらの諸階層のガス円盤に付随してやはり対応したスケールで類似の形状や性質をもつジェット現象が存在する場合が,最近次第に明らかになってきた.ここで,ジェットというのは,狭い立体角中を高速で噴出するガス流のことである.

例えば,銀河スケールでは,活動銀河(クェーサーや電波銀河など)に付随した電波ジェットがよく知られている.電波ジェットは,活動銀河中心核から銀河の回転軸にほぼ平行な正反対の二つの方向へ対になって噴出している.ジェットの先端には,古くから有名な二つ目玉電波源がある.これについては,中心に超大質量ブラックホールが存在し,その周辺に落ち込んで来たガスが降着円盤(アクリーションディスク)を形成していると考えるモデルが提唱されているが,ジェットの加速機構などその詳細は解明されておらず,そこで起こっている事はまだ謎につつまれている.このジェットを含む銀河中心核活動は,宇宙で最も激しい現象の一つであり,また,銀河の形成及び進化とも関係があると考えられるので,その解明は現代天文学における最重要課題の一つとなっている.(アクリーションディスクについては,天文月報 1983 年 4 月号福江氏,同 5 月号松元氏の記事を参照されたい.また,関連したジェットについても,同 1984 年 3 月号に福江氏の解説がある.)

我々の銀河系の中心部でも,活動銀河の中心に比べるとずっと規模は小さいながらも活動現象が観測され始めている.この稿の関係でとりわけ興味深いのは,最近,祖父江と半田によって発見された銀河中心電波ローブである.これは,クェーサーや電波銀河に付随している電波ジェットと同じように銀河面に垂直方向に噴出するジェットの形状をしており,銀河スケールのジェットの低エネルギー版プロトタイプではないかと考えられている.これについては,稿をあらためて述べる.(天文月報では,1984 年 8 月号に,祖父江氏自身による解説がある.余談であるが,この銀河中心電波ローブのことを Sky and Telescope 誌(1984 年 12 月号 p. 497)は,Japanese Radio Lobe と呼んでいる.)

恒星スケールでは,銀河スケールの電波ジェットや二つ目玉電波源をそのままスケールダウンさせたようなジェットあるいは二つ目玉電波源が,銀河系内の天体である SS 433, Sco X-1, などの近接連星系で見つかっている.これらの近接連星系では,片方の星が縮退星(中性子星かブラックホール)であると考えられており,もう一方の普通の星から流れこんできたガスが中性子星あるいはブラックホールに落ち込む時に,やはり,アクリーションディスクを形成していると考えられている.諸々の性質を考えるとこれらのジェット現象はまさに銀河ジェットのミニチュア版と言ってよいのではないかと思われる.また,やはり銀河系内の対象であるが,種々の恒星の形成領域においても,エネルギーは低いながらも類似の特性を持つ双極流が,最近,続々と見つかってきている.恒星は星間雲が収縮して形成されるが,そのとき多かれ少なかれ星間雲は角運動量を持っているので,収縮雲は円盤状になる.最終的には,円盤の中心部付近に一つあるいは複数個の原始星が生まれる.そのときまだ周囲に残っているガス円盤——原始太陽(恒星)系星雲——が,アクリーションディスクを形成しており,上のいくつかの対象と類似の状況を作り出しているのであるが,そこで発見されたのが,まさにこの回転円盤の回転軸に平行に両方向に噴出している双極流だったのである.

以上のように,銀河と恒星というスケールの全く異なる(4~6 桁違う)階層で,類似の性質を持つジェットが存在している.これらの銀河-恒星スケールのジェットは総称して宇宙ジェット (Astrophysical Jet) と呼ばれる.宇宙ジェットは,上述したように,その根元に回転ディスク(降着円盤)を持ち,ジェットの軸がディスクの回転軸に平行であるというのが,共通する大きな特徴である(図 1).宇宙ジェットは,特徴ある形状と,現象の激しさのゆえに,その形成の問題は十分興味深いものであるが,更にそれが異なる階層で共通して見られるという普遍性や,天体(恒星と銀河)の形成との密接な関係等から見ても,天文学上の重要性は極めて大きいと思われる.

本稿では,これらのうち最近観測が進んで最も その詳細が良くわかってきた恒星形成領域の双極流について,

* 愛知教育大 Kazunari Shibata
** 東京天文台 Yutaka Uchida: A Magnetodynamic Mechanism for the Acceleration of Astrophysical Jets—Application to Bipolar Flows in Star Forming Regions—

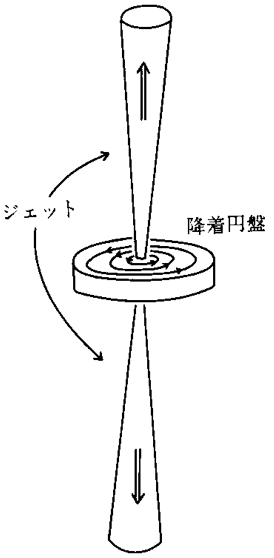


図 1 宇宙ジェットの概念図．宇宙ジェットは，降着円盤の回転軸に平行な正反対の二つの方向に噴出しているのが，大きな特徴である．

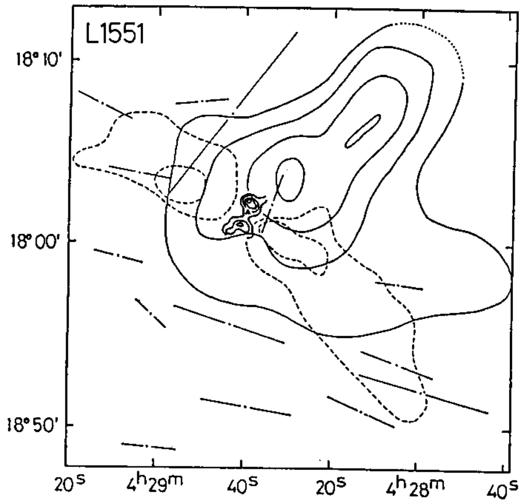


図 2 L 1551 の CO 双極流（破線）(Snell et al., 1980, Ap. J. 239, L 17) と海部らによって発見された回転円盤 (Kaifu et al., 1984, Astron. Astrophys. 134, 7)．三角印▲は，赤外線源 IRS-5 の位置を示す．一点鎖線は周辺の星間磁場の方向を示している．

その観測的知見を手短かにまとめ，内田と柴田が提唱してきた宇宙ジェットの磁気流体モデルを適用したこれらの観測事実の新しい解釈を述べてみたい．

2. 恒星形成領域の双極流及び関連する現象の観測事実

恒星形成領域の双極流の明確な形での最初の発見は，1980 年にスネル達によってなされた．彼らは，おうし座の L 1551 という名の暗黒星雲中にある原始星 (IRS 5) の周辺を CO 分子輝線 (115 GHz) で，調べることにより，IRS-5 を中心に北東及び南西へのびる細長い（約 1 pc）ジェット状のガス流（速度約 15 km/s）を発見した（図 2）．原始星 (IRS-5) から正反対の二つの方向へ流れ出しているように見えるので双極流というわけである．その後，類似の双極流がやはり他の恒星形成領域で続々と発見されており，その数は 30～40 例にのぼる．（天文月報では，1984 年 11 月号に，川辺氏達が双極流天体である NGC 2071 と GL 490 について解説をしている．）CO 輝線で観測された双極流のおよその長さは，0.1～4.0 pc，速度は 10～50 km/s，質量は 0.3～100 $M_\odot$（太陽質量）である．

一方，双極流の根元付近，すなわち，原始星の近傍に存在すると予想されていた原始太陽（恒星）系星雲を最初に明確な形で発見したのは，我が国の海部達で，1983 年（論文出版年は 1984 年）のことであった．海部達は，野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて，L 1551-IRS-5 の近傍を CS（硫化炭素）分子輝線（49 GHz）で観測した結果，半径約 0.1 pc，回転速度約 0.35 km/s，質量約 2 $M_\odot$ の回転ガス円盤を発見した．この回転ガス雲が予想されていた原始太陽（恒星）系星雲である．（その発見のいきさつや観測結果の詳細等については，岩波科学 1983 年 12 月号 p. 754 に海部氏による解説がある．）また，この観測から，回転ガス雲の回転軸が双極流とほぼ平行であることがわかった．3 節で述べるように，原始星から等方的に吹き出した強い恒星風が回転ガス雲の内壁によって絞られて双極流が出来るのではないかという理論が出されていたが，これは一応それを裏付けるものと考えられた．

ここで，少し，原始星そのものの最近の観測の発展についてふれておこう．生まれたばかりの星あるいは原始星と考えられる天体が非常に活動的であるのは古くから知られていた．その一つに T Tau 型として分類されている変光星の一種がある．これは，主系列に到達する直前の星と考えられている．T Tau 型星は，可視光，電波，X 線放射等で種々の活動を示している．例えば，RW Aur という名の T Tau 型星では，水素バルマー輝線（Hα 輝線）に，−300 km/s と +240 km/s と大きくシフトした二つの成分があり，10 分の時間スケールの変動を示す．また，アインシュタイン衛星等の X 線観測によれば，このような T Tau 型星の多くのものは X 線でも数分の時間変動を示し，その放射域は Hα 放射域より星の表面に近いという普通の星と逆の不思議な配位となっていることが吸収の様子からわかっている．T Tau 型星の回転速度は約 30 km/s と小さいことがわかっているので，この Hα 輝線のシフトは実際に物質の流入，流出が共存していることを示すと考えられる．この場合，物質の流入というのは，星に落ちきらずに周囲に残っていたガス（すなわち，原始太陽（恒星）系星雲中のガス）が，T Tau 型星に落下しつつある状態，つまり，降着に対応していると言って良いであろう．一方，物質の流出の方は，太陽風のような恒星風に対応しているのではないかと考えられた．双極流の起源としてスネル達や海

部達によって考えられた，原始星の強い恒星風というのは，ここで述べたようなガス流出のことであろう．但し，T Tau 型星のガス流出は，Hα 線の観測データに基づいていることに注意すべきである．つまり，そのような Hα 線放射温度（~1 万度）のガス流出は，太陽風のような熱い（~100 万度）コロナの溢出によるいわゆる熱恒星風とは異なるものである．このように T Tau 型星のガス流出は，それ自身の加速機構も問題として残されている．さらに，ガスの流入と流出が共存しているという観測事実や，アインシュタイン衛星等のX線観測から明らかにされた新事実（例えば，Hα 放射（~1 万度）ガスより内側にX線源が存在しているらしいこと）は，謎をより深いものにしている．

ところで，この T Tau 型星から直接流出している Hα 線で見えるガス流が，CO 分子線で発見された双極流の直接の源なのであろうか？ これに関して，最近明らかになって来た重要な観測事実は，T Tau 型星あるいは原始星（赤外線源）に付随している小規模ジェットの発見である．ムントとフリードは，光学望遠鏡（カラアルト 2.2 m 鏡）を用いて IRS 5-L 1551 をはじめとするいくつかの原始星を詳しく観測した結果，長さ約 0.01 pc，速度約 200 km/s のジェットが原始星から放出されていることを見つけた．同様な小規模ジェットは，VLA による高分解電波（連続波）観測でも得られている．（例えば，コーエン達の VLA 観測によれば，L 1551 の双極流の根元（IRS-5）には，約 0.001 pc すなわち約 200 天文単位の長さのジェット構造が見られ，これは CO 分子で観測された双極流とほぼ平行である．）これらの小規模ジェットは温度約一万度，速度約 200 km/s であるという点で，T Tau 型星表面近くのガス流出の観測データとよく一致しているので，T Tau 型星からのガス流出によって形成されたジェットといって良いであろう．このように，小規模ジェットの温度，速度等は CO 双極流のそれと全く異なるが，ほぼ平行に並んでいるという観測事実は，一見これらが CO 双極流の直接の源であることを示唆しているかのように見え，単純にそう考えている人もある．しかし，後述するように筆者達の描像は少し異なる．というのは，CO 双極流による質量流出率が約 $10^{-5}\,M_{\odot}$/yr なのに対し，小規模ジェットのそれは約 $10^{-7}\,M_{\odot}$/yr とかなり小さいし，針のように小さい小規模ジェットが自身が広がることなくその何十倍もの領域に運動量を伝えることは考えにくいからである．

3. 恒星形成域双極流の理論的解釈の歴史的経過

筆者達の理論的描像を述べる前に，これまで提出された双極流の理論モデルのうちおもなものを概観しておこう．但し，それらのモデルは前節の観測事実がすべて出そろってから提出されたものでは必ずしもないし，また，一節で述べたように，恒星形成域双極流と銀河スケールの電波ジェットとの間に顕著な相似性が存在するということから，活動銀河の電波ジェットのモデルとして考えられた機構をそのまま双極流のモデルに適用するというような場合があったことや，あるいは，最近では宇宙ジェットすべてを個々の状況を検討することなしに一度に説明しようとするモデルなども提出されていること，等を注意しておきたい．

CO 双極流が発見されて，すぐに，提出されたモデルは，前述したように，原始星から等方的に流れ出す恒星風を原始星のまわりの回転円盤にドーナッツ状にあいた軸方向の穴の内側で絞るという考えである．原始星から流れ出た恒星風は，赤道面内は濃いガスの存在のために減速されるが，回転軸方向にはガスは殆んど存在しないので，恒星風は回転軸方向に容易に流出できるというわけだ．具体的なモデルは，1982 年にケーニゲルによって与えられた．類似の機構は，すでに 1974 年に，ブランドフォードとリースによって銀河スケールの電波ジェットのモデルで考えられている．（双対排出機構 —twin exhaust mechanism— として有名である．）最近は，このモデルの一種の変形として，厚い降着円盤の回転軸に沿ってできる空洞で流れを細く絞るというモデルが一般的になってきている．但し，恒星形成域双極流の場合，中心天体からの光の放射圧による加速では双極流を十分に加速できないことが観測データから明らかにされている（双極流の観測される運動量供給率≫中心天体からの光の放射圧による運動量供給率）し，前述のように太陽風のような熱的溢出による流出は観測の Hα 放射温度（~1 万度）では起こり得ないし，また，大きな質量流出量（小規模ジェットの場合ですら $10^{-7}\,M_{\odot}$/yr，CO 双極流そのものの場合 $10^{-5}\,M_{\odot}$/yr）を熱的加速で行なうことを考えるとコロナの密度が大きくなりすぎ，それはX線観測と矛盾するので，そもそも物質流出の源の部分については全く未解決のままであると言ってよい．

このモデルの変形として，中心天体から供給されるガスやエネルギーが定常的な恒星風の形を取らずに，非定常な爆風波の形をとると考えるモデルもある．この場合も，やはり，回転ディスクの平べったい密度分布によって回転軸の方向に細長くのびたジェットが形成されるというわけである．しかし，爆風波の起源が未知のままに残されているのは恒星風の場合と同様である．さらに，恒星風にしろ，爆風波にしろ，いずれの場合でも，回転円盤あるいは降着円盤の密度構造だけで細く絞られた流れが本当に形成可能なのだろうか？ 最近の電波観測で見えて来た降着円盤は中心星付近では薄くなっていてとても流れをブロックできそうに思えない．

回転円盤で絞るという考えに対して，今迄に唱えた人は少ないが磁場による力を利用する説もある．磁場を考慮すると，太陽表面のジェット現象で見られるように，流れのコリメーションが可能となる．元々，銀河スケールの電波ジェットの説明にも磁場の効果を取り入れるという考えはいくつかあった．古くは，活動銀河について 1970 年代前半のピディントン，オゼルノイ，スタロック，らの定性的提案があり，最近では，ブランドフォードとペインが 1982 年に定常流仮定のもとではあるが，かなり定量的な MHD 遠心力風モデルを提出している．電波銀河よりずっと新しくわかってきた CO 双極流に関しては理論は少ないが，1983 年にドレインが原始星自身の磁場が自転によってヘリカルにねじられ，そのねじられた磁場の圧力によって CO 双極流を加速するという半定量的モデルを考えた．同年に，プドリッツとノーマンは，回転ディスクを貫く磁場とディスクの回転の相互作用の結果発生する定常 MHD 遠心力風モデルを考え，ほぼ同じ頃，内田と柴田はこれと独立に降着円盤を貫く磁場と収縮しつつある円盤の回転との相互作用の結果回転軸方向にジェットが噴き出されるという非定常 MHD ジェットモデルを考えた．内田と柴田のモデルはプドリッツ・ノーマンの論文より遅れたがジェットのダイナミックスをフルに扱っている．次節では，この内田と柴田のモデルを簡単に紹介しよう．

4．磁場を伴う回転円盤の非定常降着による宇宙ジェット形成モデル（内田・柴田のモデル）

1 節でも述べたように，宇宙ジェットの一つの大きな特徴はその根元付近に降着円盤が存在することである．降着円盤中ではガスが回転しながら中心天体に次第に落ち込んでいくので，その時に解放された重力エネルギーが，宇宙ジェットを含む領域（銀河中心核，近接連星系，星形成領域）の種々の活動のエネルギー源となっていると予想される．解放された重力エネルギーをいかにしてジェットの加速につなげ，また，同時にいかにして円盤の回転軸に平行な二つの方向へ細く絞るか，が大きな問題である．内田と柴田は，この加速とコリメーションの過程で磁場が重要な役割を果たしているのではないかと考えて，以下のような宇宙ジェットのモデルを提出した（図 3）．

初期（$t=0$）に，重力中心のまわりを回転しながら落下しつつある円盤があるとする．もし，磁場が円盤を垂直に貫いていたならば，落下しつつある円盤は磁力線を徐々に中心方向に引っ張り，同時に回転によって磁力線を ϕ 方向へねじる．生成されたねじれが元のポロイダル磁場に沿って円盤の上下にほどけていく時に，円盤のガスが磁気力によって上下に加速され双極ジェットが形成される，というモデルである．このモデルに基づいて MHD 数値シミュレーションを試みたところ，確かに顕著なジェットが形成されることがわかった．このモデルでは，ジェットの究極のエネルギー源は落下円盤の解放した重力エネルギーである．また，ジェットは磁場によってコリメートされるだけでなく，磁場によるローレンツ力で加速もされる．

[なお，この問題はスケールフリーな問題であることに注意されたい．つまり，問題そのものは基礎方程式を無次元化することにより，いくつかのパラメータ（今の問題では，$R_1=(V_s/V_k)^2$，$R_2=(V_A/V_k)^2$，$R_3=(V_{\rm rot}/V_k)^2$，$R_4=(T_c/T_d)$，ただし，V_s は音速，V_k はケプラー速度，V_A はアルフベン速度，$V_{\rm rot}$ は円盤の初期回転速度，T_c と T_d はそれぞれコロナと円盤の温度）によって決まる問題となり，これらのパラメータが同じで，かつ，諸量の相対的座標についての分布が相似的であればスケールが全く異なる銀河スケールの電波ジェットでも，恒星形成域双極流でも似た現象が起こる．]

図 4 と図 5 は，上で述べたモデルに基づく非定常 2 次元 MHD 数値シミュレーションの結果を示す．計算は，回転ディスクの回転軸のまわりに軸対称を仮定してお

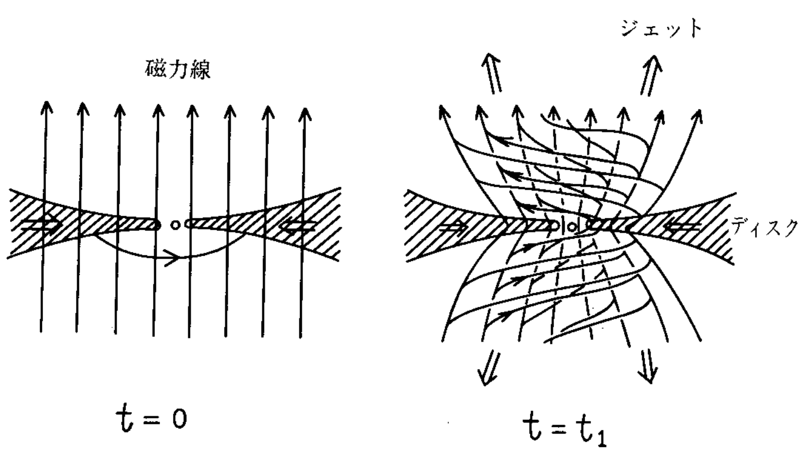


図 3　内田と柴田によって考えられた宇宙ジェットの磁気流体モデルの概念図．

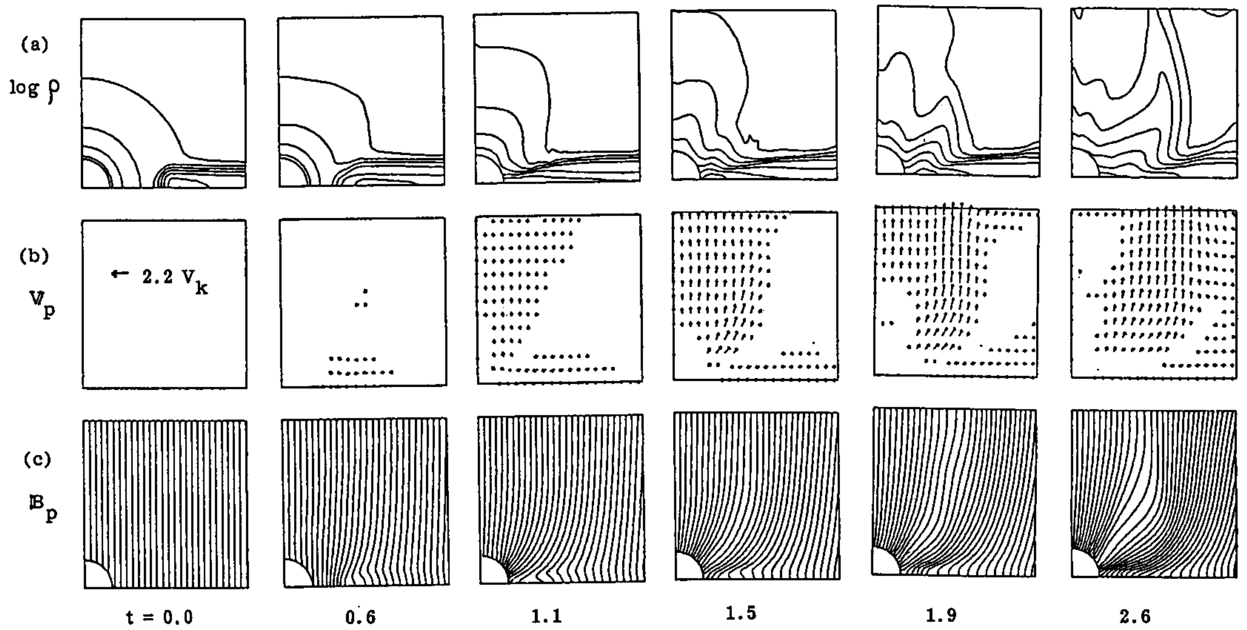


図 4 2次元軸対称 MHD 数値シミュレーションによって得られた宇宙ジェットのモデル (Uchida and Shibata, 1985, Publ. Astron. Soc. Japan, 37, No. 2). (a) は密度分布, (b) はポロイダルな速度ベクトル (V_r, V_z), (c) はポロイダルな磁力線 (B_r, B_z), をそれぞれ表わしている. 下の数字は自由落下時間を単位にとった時間を示す.

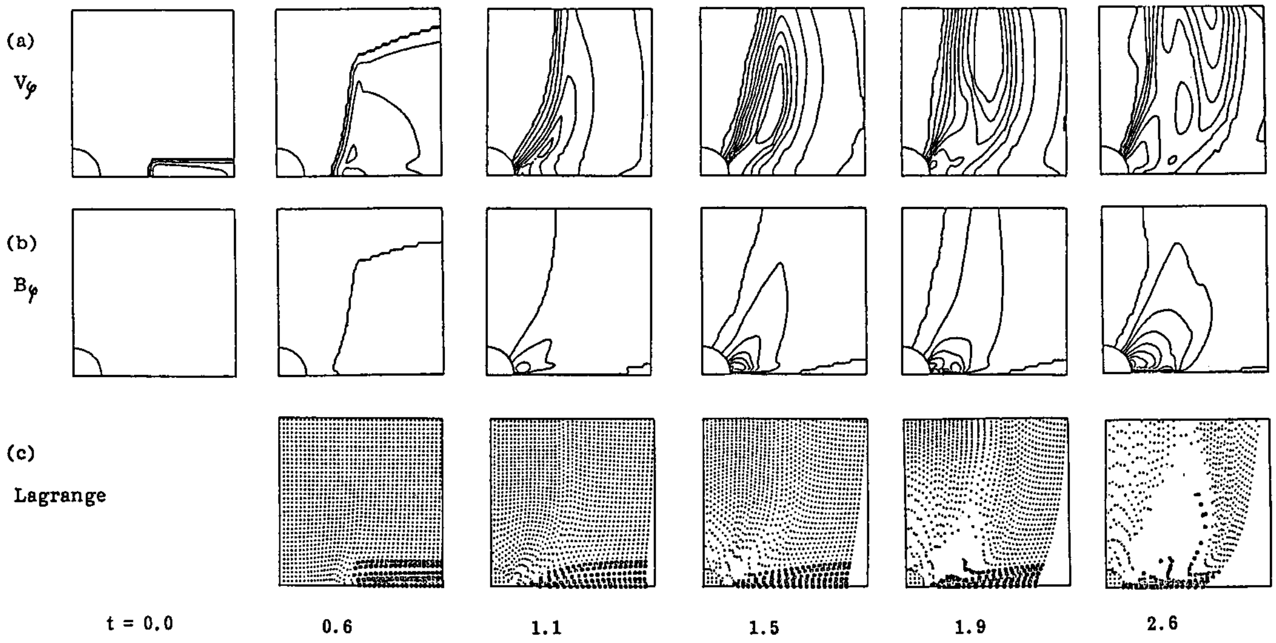


図 5 図4と同じ例の数値シミュレーションの結果. (a) はトロイダル速度 (V_ϕ) の大きさの分布, (b) はトロイダル磁場 (B_ϕ) の強度分布, (c) は初期に一様に分布させたテスト粒子の位置の時間変化 (一種のラグランジュ表現) を示す.

り, 図は子午面 (円筒座標系における $r-z$ 面) 内における, 密度, 速度, 磁力線の分布の時間発展を表わす. 左端の $t=0$ が初期条件を表わしており, 具体的には, 次のようなものである. すなわち, 球対称点源重力ポテンシャル中の赤道面 ($z=0$) 近傍をケプラー速度以下の回転速度で (回転収縮中の) 低温高密度の等温ガス円盤が回転しており, その上下には高温希薄な等温コロナが静水圧平衡にあるとする. さらに, 回転軸に平行で一様な磁場がディスクとコロナを貫いているとする. 図の例では, $R_1=3\times10^{-3}$, $R_2=7.6\times10^{-3}$, $R_3=0.64$, $R_4=400$, となっている.

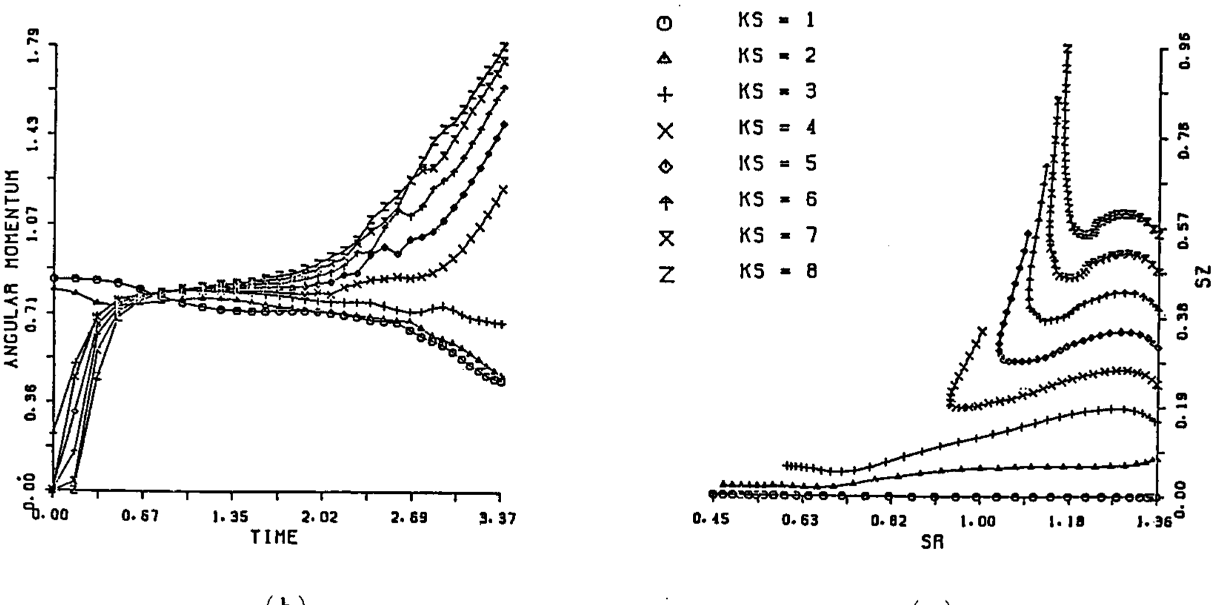
まず, ディスクは回転しながら重力中心へ向かって落下する. $t=0.6$ (単位は円盤内縁での自由落下時間) では初期の一様なポロイダル磁場が回転ディスクによって引っ張られたために発生した磁場のねじれ (ϕ 成分) が磁力線に沿ってアルフベン波として伝播しているのがわ

かる．この過程で，ディスクは角運動量を奪われ，より深い重力ポテンシャルの谷へ落下し続けることが可能になる．（これに反して角運動量が保存されておれば，ディスクは遠心力の増大によってバウンスして元の位置に戻る．）ディスクが中心に落下するにつれてディスク近傍の磁場のねじれは増大し，その B_ϕ の勾配が大きくなった $t=1.5$ あたりからねじれにともなう $J\times B$ 力によってディスク表面付近のガスが上下へ加速されだす．$t=2.6$ あたりでは，中空円筒のジェットが吹き上げられるのがよくわかる．ジェットの速度は局所的なアルフベン速度のオーダーである．（これは，また，ディスクのケプラー速度のオーダーでもある．）ジェットは次第に加速され脱出速度を越える．また，ジェットはヘリカルな回転運動を持ち，ジェットの根元あたりはその回転速度は z 方向の速度と同程度である．ジェットの根元付近では，B_ϕ は B_z の数倍であるが，上方のねじれがほどけていく領域では B_ϕ/B_z は小さくなり，その結果，ジェット中では B_ϕ はほぼ B_z に等しくなっている．ディスク中の大部分のガスは磁場を引っぱりながら中心に落下する．ジェットとして放出されるのはディスクの表面付近の比較的希薄なガス（ディスクの全質量の 10% 程度）である．同様にして，ディスクの落下によって解放された重力エネルギーのおよそ1割程度がジェットの運動エネルギーとなる．

ジェットを構成するガスがディスクのどのあたりから供給されたかをもっと詳しく見るためにテスト粒子の軌跡を示したのが図6(a)である．これは，初期に $r=1.36$ にあった高さの異なる8粒子の軌跡である．（注：$r=1.0$ がディスクの内縁である．）この図から，ディスク赤道面付近のガスがほとんど落下し続けることや，ディスク表面近くのガスが上方へ加速されること，等がよくわかる．このテスト粒子の単位質量当たりの角運動量の時間変化を示したのが図6(b)である．この図より，コロナ中の粒子がアルフベン波の通過によって角運動量を得ること，ディスクの角運動量が次第に減少し，密度の大きいディスク表面からの中空円筒ジェットが出始めるとさらに減少が急激となってくること，などがよくわかる．

5. 恒星形成域 CO 双極流と小規模ジェットの解釈

この節では，恒星形成領域で観測されている種々の現象をどのように解釈すれば良いかについて，筆者達が到達した一つの統一的描像を述べよう．前々節で述べた観測事実をここでもう一度復習しておくと，まず，もっとも大規模な現象では CO 輝線で見つかった CO 双極流があり，サイズは 1 pc 程度，速度は 10 km/s のオーダーである．この双極流による質量損失率は $10^{-5}\,M_\odot$/yr のオーダーであり，可視光で観測された小規模ジェット（サイズ ~0.01 pc，速度 ~200 km/s）の質量損失率（~$10^{-7}\,M_\odot$/yr）よりかなり大きい．運動量供給率（~$\dot{M}V$）で考えても同様である．従って，CO 双極流はこの小規模ジェットとは物理的に独立なものであろう．小規模ジェットは，前述したように，中心の T Tau 型星からのガス流出と考えられるから，CO 双極流はいわゆる恒星風を起源としていない，と筆者達は考える．それでは，CO 双極流はどこから供給されたのであろうか？ その答えは，前節の宇宙ジェットのモデルに示されているように



(b) (a)

図6 （右図）初期に $r=1.36$ にあった高さ（z）の異なる8粒子の位置の時間変化．（左図）同じ8粒子の単位質量当たりの角運動量の時間変化．図4と図5に示した例の場合である．

CO 双極流を形成するガスは降着円盤（いまの場合，原始太陽（恒星）系星雲）の表面から供給されたと考えるのである．CO 双極流の加速及びコリメーション機構は，前節に示されたように磁場の力に基づく．

前節で述べたシミュレーション・モデルの結果を基にして，もう少し詳しく CO 双極流の形成過程を推論してみよう．（具体的数値は，例として，L 1551 の場合の値を示す．）まず，星間雲の収縮によって回転円盤が形成される．このとき，円盤の回転軸は近傍の星間磁場にほぼ平行になっているであろう．なぜならば，収縮前の星間雲の段階の磁場による角運動量放出過程で，磁力線に垂直な角運動量成分は，平行な成分より速やかに放出されるため，星間雲の角運動量ベクトルは時間とともに磁場ベクトルに平行な方向に近づいていくからである．星間雲は遠心力と磁場の効果によって赤道面に収縮して円盤を形成する．回転円盤は，なおも磁場の作用によって角運動量を失い続けるため，円盤の中心に向かって収縮を続ける．そのため，円盤を貫いている磁力線は円盤の中心方向に引っ張られた格好になる（前節の図も参照）．この頃，円盤の半径は，約 0.05 pc（$\sim 10^{17}$ cm）である．円盤の中心部では原始星（$\sim 1\,M_\odot$）が形成されつつある．円盤中のガスがさらに中心方向へ落下して中心からおよそ 10^{15} cm（$\sim$100 AU）付近に到達したとき，円盤の回転の作用により発生した磁場の ϕ 成分にともなう磁気力によって円盤表面のガスが円盤の上下に押し出されて，これが CO 双極流の源となる．この付近（$\sim$100 AU）における円盤の回転速度，温度，粒子密度，磁場強度，ジェットの速度は，それぞれ，3～10 km/s，～10 K，10^7～10^9 cm^{-3}，3×10^{-4}～3×10^{-3} G，3～10 km/s，と推算される．ジェットは磁気力によってゆるやかな加速を受けつつ円盤から遠ざかり，円盤からおよそ 10^{18} cm（0.3 pc）の距離の付近では 10～30 km/s の速度となる．ジェットは同時に，前節の図のように，グローバルな磁場形状によってコリメートされているので，星間磁場に平行な幅約 0.1 pc の細長い双極流が形成されるというわけである．

[前節で示したジェットのモデルは，円盤の収縮，磁力線の変形，ジェットの噴出，磁場によるジェットのコリメーション等，上記のシナリオの特性をよく示してはいるが，10^{15} cm（$\sim$100 AU）から 10^{18} cm（$\sim$0.3 pc）にわたる広い領域を同時にカバーした現実的な CO 双極流モデルになっているというわけでは必ずしもないことを注意しておきたい．これは，いくつかの数値計算上の問題によるものであり，天体物理学における数値シミュレーションの分野ではよく知られた困難――すべてのスケールと物理量を現実的な値で計算しようとする同じものと，事実上，計算不可能になったりすること――と同じものである．我々は計算で示された特性が，もし 0.3 pc 幅から出発して星の近傍迄含めて計算する事が可能であれば，そのようなケースについても成り立ち，観測のリアルな状況を再現すると考えている．]

このモデルでは，磁場がきわめて重要な役割を果たしているから，双極流中及び回転円盤近傍における磁場の観測が望まれるのであるが，これは現在のところ困難のようである．ただし，L 1551 CO 双極流のあたりでは星間磁場は双極流方向にほぼ平行であることが知られており（図 2），これは他の双極流においても成り立っているようで，筆者達の描像と良く一致している．磁場の効果を観測的に明らかにする間接的方法としては，CO 双極流中の速度場にヘリカルな回転運動成分があるかどうか調べるという方法がある．前節のモデルのように，ある程度の強さの磁場があれば，ジェットは円盤近傍では円盤の回転速度と同程度あるいはそれ以上の回転速度を持つ．円盤からかなり遠ざかって CO 双極流として観測されるようになった頃には，回転速度はかなり小さくなっているが検出は可能であろう．他の理論では回転速度は持たない筈なので，もし，双極流に小さくても回転速度成分が見つかれば，磁場の存在とその重要性が決定的なものとなるであろう．

さて，CO 双極流は以上のように原始太陽（恒星）系円盤の表面付近から磁場の力が介在して加速されたと考えて説明されるが，小規模ジェット（～T Tau 型星ガス流出）の方はどう考えればよいのだろうか？　これに関して，すでに内田は 1983 年に一つのモデルを提案している．（もちろん，当時は小規模ジェットは知られていなかったため，T Tau 型星のガスの流出，流入やそれに関連する諸現象のモデルとして提出された．）すなわち，磁場を持つ星間雲が収縮して原始星が形成されると，星の近傍では，最終的には，5～10 星半径のあたりに磁気中性リングができ，その外側に原始星に落ちきれずに残っていたガス（すなわち，降着円盤中のガス）がリングの外側の磁場でささえられたような状況が出現する（図 7＝表紙参照）．リングの外側にためこまれたガスの質量がある限界を越えると，その重みでガスはリングを押しつけ，その結果，星に足を持つループと円盤を貫く磁力線の間で磁気リコネクションが起る．このようにして，ガスが星を貫く磁束中に移ると，ガスは磁力線に沿って星の表面まで落下することが可能になり，最終的に数 100 km/s の速度で星の表面に激突する．激突による衝撃波が落下ガス中を外向きに伝播するときに，落下ガス流の尾部のガスを最終的にやはり数 100 km/s の速度で外向きに磁軸の方向に吹き飛ばし，T Tau 型星からの極方向へのガス流出を形成する．ガスの落下と流出の道筋は磁気再結合により分けられた強い磁場によってへだてられているので，流出入のガスは混じることな

く共存しうる．このようにして，T Tau 型星のガス流入と流出の共存が説明され，また，X線を発生する高温域が Hα 放射ガスの内側にあることなども自然に説明されるのである．さらに，流出したガスは回りの強い磁場によってもとの星間磁場に平行な両極の方向へコリメートされて，やはりヘリカルな内部運動を持つ小規模ジェットが形成されるというわけである．具体的な数値計算は，内田と柴田によって 1984 年に発表された．

以上をまとめると，CO 双極流は降着円盤中のガスの落下によって解放された重力エネルギーの一部が，円盤の回転と磁場の相互作用の産物であるヘリカルにねじれた磁場を媒介にして，円盤から両極方向に噴出するガス流の運動エネルギーへと変換されることによって形成され，一方，小規模ジェットは，円盤の一番内側の原始星に面した縁から円盤中のガスが強い磁場による制御を受けつつ落下し，その時解放された重力エネルギーのやはり一部が，反跳衝撃波によって吹き飛ばされるガス流出の運動エネルギーに変換されることによって形成される．いずれにしても，エネルギー源は質量降着によって解放された重力エネルギーであるが，降着が起こる場所の重力ポテンシャルの深さの違いによって，単位質量当たりのエネルギーの大きさが両者で異なり，これが比較的高エネルギー（温度 ～1 万度，速度 ～200 km/s）な小規模ジェットと，低エネルギー（温度 ～10K，速度 ～10 km/s）な CO 双極流という違いをつくっている．また，磁場が重要な働きを演じているという点も共通しているが，その演じ方は上述のようにかなり異なっている．

6. おわりに

本稿では，宇宙ジェットの一例として恒星形成領域の双極流をとりあげ，内田と柴田が提唱してきた宇宙ジェットの磁気流体モデルに基づく観測事実の新しい解釈を述べてみた．文中でも繰り返し述べたように，内田と柴田のジェットモデルは実はスケールによらないので，無次元パラメータの値が類似で，かつ，物理量の空間分布が相似的であれば，恒星形成域双極流だけでなく，スケールの異なる他の現象，例えば，祖父江と半田によって発見された銀河中心電波ローブにも適用可能であろう．この銀河中心電波ローブへの応用については，稿をあらためて書くことにしたい．また，SS 433 や活動銀河中心核等の縮退物体（中性子性やブラックホール）に付随している高エネルギージェットに対しても同じ機構が適用できる筈であるが，これについては，相対論的取り扱いなどシミュレーションモデルの一歩進めた取扱いを試みつつある．

〈呈内容見本〉

天文月報

――全37冊・明治41年～昭和19年――

日本天文学会編〈復刻版〉限定300部

A4判（1～10巻）B5判（11～37巻）クロス装・上製函入

ハレー彗星の接近など天文学への関心が高まるなかで，歴史ある本誌は，日本天文学の比類ない証人として貴重な資料を満載する．お求め易い分割払方法もあります．

第1回配本	1～10巻	（明41～大6年）発売中	揃85000円
第2回配本	11～20巻	（60年9月刊行）	揃95000円
第3回配本	21～30巻	（61年4月刊行）	揃95000円
第4回配本	31～37巻	（61年9月刊行）	揃63000円

飯島忠夫著作集〈全4冊・復刻版〉

1 補訂支那古代史論	A5・810頁	9800円
2 支那暦法起原考	A5・624頁	7500円
3 支那古代史と天文学	A5・334頁	4800円
4 天文暦法と陰陽五行説	A5・354頁	5500円

雨量報告

――全7冊・明治34年～昭和20年――

中央気象台編〈復刻版〉限定300部

A4判　クロス装・上製函入〈6月より毎月1冊刊行〉

水利用・土木開発・防災などに貴重なデータ！各地の測候所，観測所など，旧満州・樺太・朝鮮・台湾・南洋を含む数千ヵ所における降水観測の成績を編纂する．

各府県別に観測所名，海抜，位置，河川流域を示し，各年各月の総雨量，各年の最多日量，雨天日数などの平均値を掲げ，年度によっては雨量図（色刷）を附している．

1	（明治34年～明治43年）	19000円
2	（明治44年～大正 9 年）	19000円
3	（大正10年～大正14年）	17000円
4	（大正15年～昭和 5 年）	17000円
5	（昭和 6 年～昭和10年）	14000円
6	（昭和11年～昭和15年）	14000円
7	（昭和16年～昭和20年）	14000円

113 東京都文京区本郷6-16-2
電話03(815)1072/振替東京4-39120

第一書房