

## 天体の電磁流体现象のシミュレーション—— ジェット, ループ, フレア

内 田 豊\*・柴 田 一 成\*\*・松 元 亮 治\*\*\*

近年の電波, X線等による天文学の発展は, 夜空に見慣れた星以外にもさまざまな形で, それまで我々には見ることの出来なかった現象が存在していることを示した. その中で, 際だったものとして, 様々な活動天体がある. 活動天体とは, 爆発的に大きなエネルギーの解放を起こしたりする天体で, 光でも見えるが電波やX線ではさらに華々しい変化を示し, 極めて強い放射を出したり, 激しい運動を示すものが多い. これらの中には超新星のようなものもあるが, 一般に非常に高温のプラズマや, 高エネルギー粒子を生ずる高度に非熱的な現象発生の部分には磁場を伴ったプラズマの激しい動的現象が関与していると考えてよく, 究極のエネルギー源が重力であるか核エネルギーであるかによらず, 直接的には磁場が絡んでいる. このような動的現象を扱う電磁流体力学-プラズマ物理学は電波天文学, X線天文学の基礎を与えるものといってもよいであろう.

### 1. はじめに——天体電磁体現象

以下では上記のような現象のうち, 磁場を持つ天体の形成にともなう双極ジェット現象, 銀河や質量降着円盤の活動性, 星(太陽)の活動性, 等を取り上げて考えて見よう. このような問題は2次元, 3次元の時間依存非線形偏微分方程式系をフルに取り扱わねばならず, ここ数年にコンピューターの発達と共に登場して来た“数値シミュレーション”をアプローチの手段として用いている. これは実験室で実験をしてみるものの出来ない天文学現象について正しい機構を求めるためにいろいろな仮説を試してみるための新しい強力な手段となって行くのである. この関係で特に天文学分野におけるスーパーコンピューターの必要を訴えたい.

### 2. 宇宙ジェット

#### (A) 星形成にともなう双極分子ジェット

真っ暗な暗黒星雲の奥深くで起こる星の誕生について手掛かりが得られて来たのは, ミリ波の一酸化炭素電波線等での観測で, 形成中の星から互に反対の二方向に超・超音速でCOガスが噴出していることが分かったことによる. 重力で丸い星が出来るのに何故特別な二方向にこんな超音速でジェットが放出されているのか謎であった. これに関しては, 星をとり囲む降着円盤の極方向に穴が開いていて球対称星風が二方向に方向づけられて流出するというモデル等が考えられて来たが, 内田・柴田(1985)は双極流と星間磁場との観測されている関係に着目して, 磁場が重要な役割を果たす新しいモデルを提案した. すなわち, 磁場を持つ雲から星が出来るプロセスに遡って考えてみると, 大局磁場は, その中で

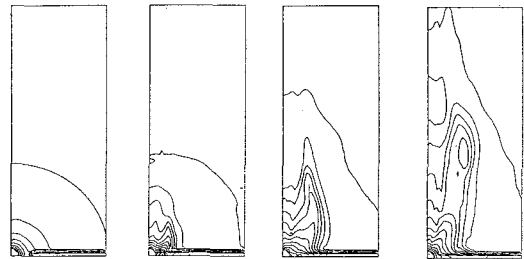


図1 星形成域からの分子双極流の電磁流体力学2.5次元シミュレーション(内田・柴田, 1985): 密度コントア. 縦軸は流れの軸, 中間円筒型でスピニングしている.

星と降着円盤が出来てくる中心に凝集した凝集雲の所で絞られて砂時計型になるだろう. 円盤中に生ずる微分回転によって磁場が捻ねられて連続的に作られ送り出されて行く非線形捻ねアルフヴェン波(磁場捻ね波)がこの砂時計型の上下をピンチ効果で絞って, 円筒形の領域を作っていく. この捻ね波は円盤の外層大気を通る時にガスをヘリカルな流れとして押し出して行く(図1). このような非線形電磁流体プロセスは大型計算機による精密シミュレーションによって初めて可能となった. この磁場を導入した我々のモデルでは流れは中空で, しかもスピニングすることになり, それまでのモデルと異なっている. これが観測で見分けられるのではないかと内田達(1987)は野辺山で代表的双極流 L1551 を観測した. その結果, 幸運なことに, 実際これらの特徴が見つかった. 中心星からの星風では, 特に角運動量は説明できないので, この結果, 磁場モデルが非常に有利となった.

#### (B) 星形成に関連したその他の流れ

星形成過程で磁場が重要ということになれば, 関連現象にも磁場の影響を考えてみる価値がある. ここでは紙数の関係でふれられないが, 星形成の盛んな大質量雲とそれから延びるストリーマー構造, 光学ジェットとハー

\* 東大理・天文 Yutaka Uchida, \*\* 愛知教大・地学 Kazunari Shibata, \*\*\* 千葉大・教養 Ryoji Matsumoto: Magnetohydrodynamical Simulations in Astrophysics—Jets, Loops, and Flares

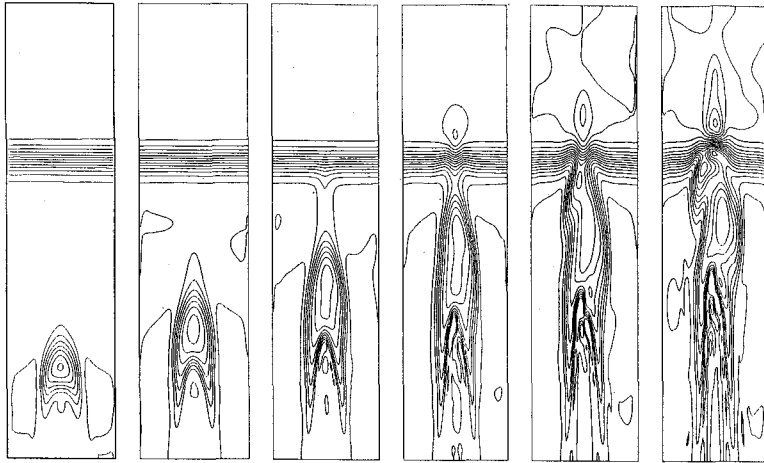


図2 磁場に沿った光学ジェットへのヘリカル不安定の3次元計算(藤堂 他, 1990: 密度コントラスト). ジェット前面の電磁流体衝撃波が密度の高い雲に出会うと  $B_z$  がたまってヘリカル不安定が成長する.

ピック・ハロー天体などの星形成域の現象についても電磁流体現象である証拠が見られ、これらについても電磁流体数値シミュレーションを行なっている(藤堂 他, 1990)が、面白い結果が出始めている(図2)。

### (C) 活動銀河核からの電波ジェットローブ

活動銀河核からの電波ジェット+ローブは電波天文の創始期から知られている“宇宙ジェット”である。内田、浜武らは電磁流体方程式の相似則から、これらも分子双極流と同種の形成機構による可能性を指摘し、これらのジェット+ローブも銀河形成に伴う同様な磁場のアクションで生じる可能性があることを示した。これがガスの角運動量を取り去って、中心まで落下させ、ついには中心のブラックホール周辺のコンパクト円盤となると、磁場が  $10^2$  ガウス、平均密度  $10^{18}/\text{cm}^3$  にも達する。この状況でも電磁流体力学相似則からいうと、星形成と似たことが起こることが分かる。この場合、磁気捻れ波の速度は数万  $\text{km/s}$  以上となり、ピンチされた軸磁場はヘリカル不安定で螺旋構造を作ることがあり、3C 449 のような歳差で説明がつかない非対称構造を持ったものの説明を与える。

この場合、磁気モデルではジェット形成の反作用として源の円盤は磁気ブレーキを受け、中心への物質降着は激しくなり、中心天体でのエネルギー解放の高まりを説明することが出来る。クエーサーは原始銀河の中心で形成中のブラックホール周辺円盤からの“双極流”ということになる。

### 3. 銀河、降着円盤における磁気現象

前節の終りに述べたように、銀河円盤も電磁流体現象に関係し、藤本らは銀河ダイナモを考えている。銀河円盤からハローにかけての中性水素ガスの分布を調べると大小さまざまなループやフィラメント状の構造が見られ、太陽表面のプロミネンス等を彷彿とさせる。これらの中には超新星爆発で出来るものもあるが、ダイナモ効果で発生した磁場に支配されるガスの運動を反映して

いるものもあるだろう。系外銀河では渦状腕に沿って約 1 kpc 毎に星形成の盛んな領域が針金に通したビーズ玉のように並んで見えるものもある。星間ガスはどのようにして集められるのであろうか? パーカーは1966年に発表した論文で次のような機構を提案した。銀河赤道面に平行な磁場を持って力学的平衡にある円盤で、赤道面より上では磁力管の一部を少し持ち上げると、磁力管内のガスは重力に引かれて落下し、その部分はまわりより軽くなる。軽くなった部分に働く浮力が磁力線の曲がり度で引き止めようとする張力より大きいと磁力管はさらに持ち上げられ、ガスは谷間に集められてしまう(これをパーカー不安定という)。これが最も成長しやすいのは円盤の厚さの10倍程度の波長であり、銀河円盤では1 kpc 程度である。

前節でも述べたように、磁場は星形成域、矮新星、X線連星、銀河中心核などの降着円盤の活動やジェットの発生にも関係しているらしい。加藤-堀内(1986)は降着円盤における磁気乱流をモデル化して角運動量輸送率やエネルギー発生率を求めることを試みたが、一番の問題は円盤表面にどれだけの磁束が洩れ出るかであった。そこで松元、堀内、柴田、花輪はこの基礎過程としてパーカー不安定の非線形発展を数値シミュレーションで調べることにした。それ以前には計算機パワーの不足もあって線形解析しかなかったが、スーパーコンピュータがこれを可能にしてくれた。

図3がその計算例である。この計算では中心天体の重力しか考えていないが、自己重力円盤でも定性的には変わらない。図に示した時刻では既に不安定は成長して磁力線の谷間にガス密度の高い部分が成長している。解は赤道面に対称ではないが、これは故堀内敏朗君が行なった線形解析で見いだされた重要な点で、赤道面対称な変形より成長しやすいのである。非線形数値シミュレーションを行なってみて始めて明らかになったこともある。それは磁力線に沿って落下したガスが円盤に突入するところで衝撃波が生ずることである。これは計算の分解能

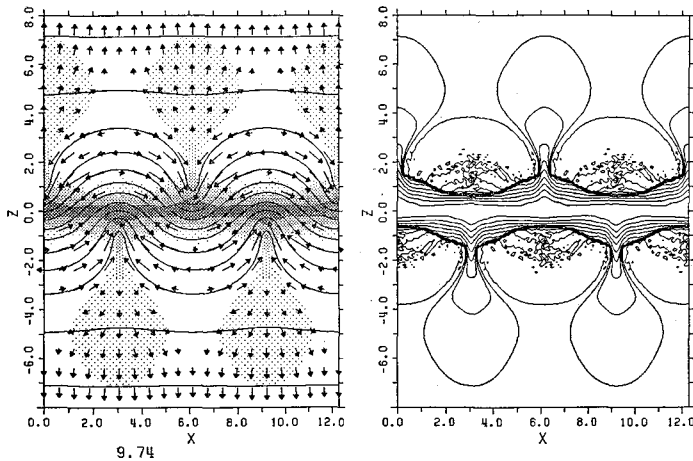


図 3 ガス円盤におけるパーカー不安定のシミュレーション (松元 他, 1988, PASJ 40 171 より転載). 左は磁力線 (実線), 密度分布 (濃淡), 速度分布 (矢印), 右は密度の等高線をあらわす.

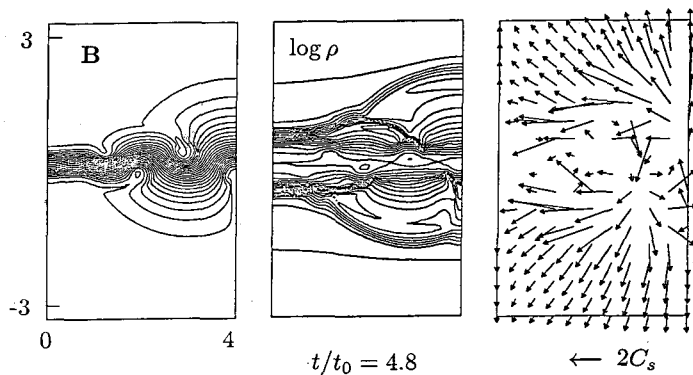


図 4 低温円盤と高温ハローの 2 層からなる円盤におけるパーカー不安定 (松元 他, 1990). 中心天体からの距離を  $r_0$  としてハロー遷移層の高さ  $0.8r_0$ , ハローと円盤の温度比 25, 赤道面で  $\beta = 1$  の場合の磁力線, 等密度線, および速度分布.

を上げて初めて見えてきた。衝撃波を通り過ぎてガス運動が止まり静水圧平衡に近づく“彩層”部分は細密計算がなければ詳細は分からなかったろう。

銀河円盤や降着円盤を取り巻いて高温ハローが考えられているが、それらが飛散してしまわないのはなぜだろうか？ 図 4 がこれを示している。円盤から浮上した磁気ループは膨張を続けるが、磁気ループの様子や谷間に落ち込みつつあるガスの様子などは中性水素分布の観測結果にかなり似ている。ハローは実はこういうループの集合ではないだろうか？

#### 4. 太陽浮上磁場とフレア

太陽磁場は対流層のダイナモ機構で作られると考えられており、パーカー、吉村などによるアプローチがあるが、ここではそれによって生じた磁場が表面に出てくるプロセスについて考えてみたい。原理的に前節の銀河円盤での不安定と同じ過程をパーカーは既に 1955 年に太陽について提案している。

このパーカーの考えは受け入れられたが、その詳しい取扱いはスーパーコンピュータの登場を待たねばならなかった。柴田達は最近スーパーコンピュータを用いて磁束浮上の 2 次元シミュレーションに成功した。図 5

は始め光球の底にあった磁束がどのように彩層、コロナに膨張していくかを示している。初期状態としてはパーカー不安定性に対して不安定な  $\beta \equiv (\text{ガス圧}/\text{磁気圧}) = 1$  の場合である。磁束の真ん中部分に小さいじょう乱を与えると磁気浮力が増大してループ状に浮上が始まり、ますます勢いよく浮上していく。  $t/\tau = 58.5$  (約 20 分後) の頃には 6000 km 程の高さになり上昇速度は 10~15 km/s, ループに沿っての最大の落下速度は 30~50 km/s となり、上昇ループ (アーチフィラメント・システムと呼ばれる) の観測を良く説明する。また、足元の衝撃波加熱は磁束浮上領域の明るいブラージュを説明すると思われる。

図 6 は落下してきたガスや内部から浮上して来た熱いガスが光球付近で放射冷却する効果を取り入れたケースである (野沢 他, 1990)。このモデル計算によって太陽物理の謎の一つであった“磁束の孤立と集中”が磁束の浮上に伴うダイナミクスで自然に説明出来ることが判った。つまり対流層から浮上したとき 600 ガウス程度の磁場が、磁束中の冷却により 1500 ガウス程度の強くて細い磁束管に変身し、周りには弱い磁場しか残らないことが判った。

ここまでくれば、浮上磁場に伴うフレアもあと一歩で

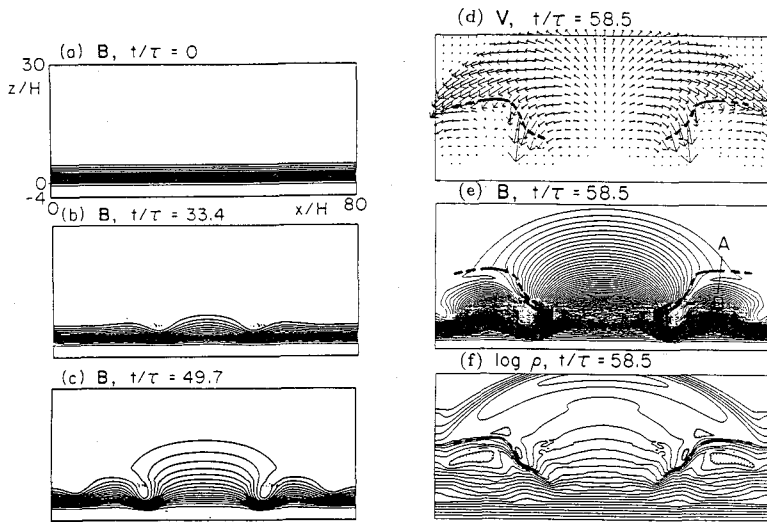
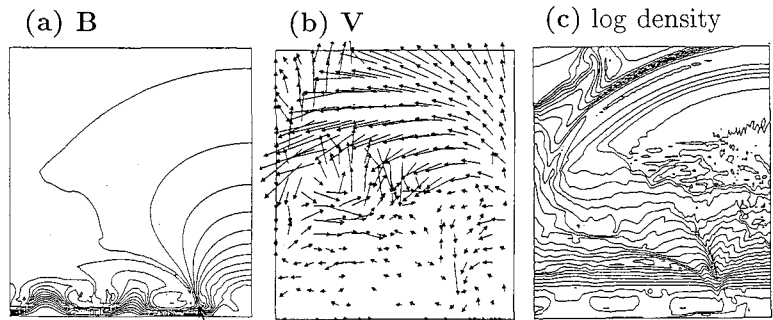


図5 始めに光球の底にあった磁束がどのように彩層-コロナに出てくるかを2次元電磁流体シミュレーションにより調べたもの。(a)~(c), (e)は磁力線, (d)は速度場, (f)は密度分布(柴田 他, 1989, Ap. J. 345 584 より転載)。

図6 光球における放射冷却を入れた場合。(a)磁力線, (b)速度場, (c)密度分布。図5に比べて1/8の細かいメッシュを用いている(野沢 他, 1990)。



説明出来るかもしれない。磁気エネルギーの熱化時間(磁力線のつなぎ替えの時間尺度)が電気伝導度が良くスケールの大きいプラズマに対しては非常に長くなってしまったため、短時間で大きなエネルギー解放が起こるフレア現象の説明にはこれまで非常な困難があった。最近内田と柴田はこの点をうまく回避する(磁場のつなぎ替えを必要としない)新しい機構を提案した。これは光球下で対流などにより捻られた磁束管が浮上し、既に浮上したループの中央部に向かって磁場の捻れ成分が崩れ込む形でエネルギーを送り込む。ループ・トップ付近で衝撃波、磁場捻れ成分のダイナミカルな消滅等によりエネルギー変換が起こる、というモデルで、2.5次元数値シミュレーションで取り扱われた。現在、浮上磁束中のガスの落下により、フレアの立ち上がりがもっと急になる機構を調べている。これは、より本格的に3次元で取り扱えば、磁気ループがヘリカル不安定を起こして飛び散るケースなども扱える筈である。

5. おわりに

天体電磁流体現象の解明は、スーパーコンピュータを必要としている天文学の諸問題の中の典型的なものといえよう。天文学の状況では、重力のもとに複雑な磁場

構造と角運動量を持ったガスが、簡単な対称性を持たず、捉えどころのない感じの大きな自由度で激しい運動をしている。これが面白い法則性を持ついろいろな現象を示すので、その解明には従来の線形解析、平衡、定常の扱いは間に合わない。ここにコンピューターの長足の進歩があって意外に早く可能になって来たのが、数値シミュレーションで、これは現在はまだ容量、速度共にまだ黎明期だが、かなり近い将来、理論面の主な手段となって行くことは疑いない。物理、化学の諸領域で今計算×物理、等の名前で分野が新しく提案されつつあるが、これは一回生起で我々がその時間経過のすべてを見ることの出来ない宇宙現象の分野で過去・未来を知るための最も特色あるものとなり得るのではないだろうか? 今、日本はコンピューターに関しては世界で最も有利な立場に立っている。これを活かせば天文学の要といえる領域の一つで世界をリードできるし、現に始めているといってよい。天文・天体物理分野の中核研究所としての国立天文台が全国関連研究者が自由に利用出来るスーパーコンピュータを備えて、21世紀に向かって、このあたりの研究領域でも我が国の研究が世界をリードするものとなっていくよう、バックアップして欲しいと考えている。