

# 地球，惑星，太陽，宇宙における 電磁流体のダイナミクス

寺沢 敏夫<sup>1</sup>

## 1. はじめに

宇宙の物質の99%以上は電離した気体状態、プラズマ状態にあることはよく知られている。地球・惑星中心核（の外側の部分）は液体だが、電気伝導度が高い金属状態にあり、電磁気的な性質はプラズマとよく似ている。一般に宇宙の物質は静止状態にはなく、自転、公転、熱対流などの様々な運動状態にあるが、電気伝導度の高い流体が乱流状態にあると、自発的に磁場が発生する（ダイナモ効果）ので、こうした流体の振舞は電磁流体力学により記述されることになる。素粒子から原子、分子に至るミクロな世界の共通言語が量子力学であるように、電磁流体力学は宇宙のマクロな物質の世界を記述するための共通言語であると言える。しかし、これまで電磁流体力学は各個別分野の内部でいわば方言として話されており、少し分野が異なると、話が通じないくらいがあった。このような状況を打破するため、標記のテーマで春の地球惑星科学関連学会合同大会の合同シンポジウムを企画した。これは「方言性」を克服し、電磁流体力学を標準語化する試みであったとも言えるだろう。共催学会は惑星科学会、地球電磁気・地球惑星圏学会、地震学会の合同大会メンバー学会に加え天文学会であった。主催者側からひいき目に見たところでは概して好評で、第一回

目の企画としては成功したといえよう。あいにく、ポスターセッションなどパラレルにいくつかのセッションが走っており、何人かの方に出席できないで残念である由のコメントをいただいた。このテーマは地球惑星科学から天体物理学、物理学に及ぶ広い範囲に及ぶもので、すぐ隣接する分野の間では科研費によるシンポジウムなどが行われ、交流があるものの、全分野をカバーできるような研究会はこれまで行われてこなかったことが、関心を呼んだ理由であると考えている。時間が3時間半に限られており、招待講演のみで構成することにしたため、一般講演は残念ながら含めることができなかった。同様の理由で、電磁流体というからには当然含まれるべき核融合プラズマの分野も削らざるを得なかった。以下ではこのシンポジウムにおける講演からいくつかのトピックを紹介したい。本稿をまとめるにあたり各講演者の講演予稿を参考にさせていただいたことを記し、感謝の意を表したい。

またシンポジウムの組織は東工大理・本蔵義守氏、国立天文台・柴田一成氏との共同作業によったものである。

## 2. 電磁流体とダイナモ過程 （東工大理・松島政貴氏）

シンポジウムの最初の講演は地球・惑星ダイナ

<sup>1</sup> 東京大学理学部地球惑星物理学教室

モ理論の現状紹介であった。先に述べた自発的磁場発生機構は宇宙に普遍的に見られるもの（ダイナモ作用）であるが、その詳細はこれまで明らかでなかった。その理由はダイナモ問題の高度な非線型性によるもので、解析的手段だけでは扱いに制約（定常性の仮定、境界条件の単純化など）がありすぎて具体的な問題を取り扱うことが困難であったからである。

ダイナモ問題の基礎方程式は磁場  $\mathbf{B}$  の時間変化を電場  $\mathbf{E}$  の空間回転と結び付ける誘導方程式（ファラデーの法則）,

$$\partial \mathbf{B} / \partial t = -\text{rot} \mathbf{E} \quad (1)$$

および電場、電流  $\mathbf{J}$ 、流体運動（速度  $\mathbf{V}$ ）の関係を与えるオームの法則,

$$\mathbf{E} = \eta \mathbf{J} - \mathbf{V} \times \mathbf{B} \quad (2)$$

である（ $\eta$  は電気伝導度）。これは静止した導体内部のオームの法則  $\mathbf{E} = \eta \mathbf{J}$  に、運動の効果  $[-\mathbf{V} \times \mathbf{B}]$  を付け加えたものである。

さて、電磁流体が乱流状態にあるとき、速度場  $\mathbf{V}$  を

$$\mathbf{V} = \langle \mathbf{V} \rangle + \delta \mathbf{V} \quad (3)$$

と表わそう。ここに  $\langle \mathbf{V} \rangle$  はゆっくりした変動をする平均場であり、 $\delta \mathbf{V}$  は乱流運動に関係した速い変動分（揺らぎ成分）であるとする。

$\delta \mathbf{V}$  に伴って磁場、電場にも(1), (2)を通じて揺らぎ成分が生ずる。今、興味があるのは揺らぎ成分ではなく、ゆっくりと変動する磁場  $\langle \mathbf{B} \rangle$ 、電場  $\langle \mathbf{E} \rangle$  であるとしよう。この時、(1), (2)の平均をとって

$$\partial \langle \mathbf{B} \rangle / \partial t = -\text{rot} \langle \mathbf{E} \rangle \quad (1')$$

$$\langle \mathbf{E} \rangle = \eta \langle \mathbf{J} \rangle - \langle \mathbf{V} \rangle \times \langle \mathbf{B} \rangle - \langle \delta \mathbf{V} \times \delta \mathbf{B} \rangle \quad (2')$$

と書き直せる。 $\langle \mathbf{J} \rangle$  は磁場  $\langle \mathbf{B} \rangle$  に伴うゆっくりした変動部分の電流である。 $-\langle \delta \mathbf{V} \times \delta \mathbf{B} \rangle$  は乱流の揺らぎ成分による起電力を表わし、揺らぎ成分の統計量の鏡映対称性の破れに起因するものである。

Krause and Raedler に始まる電磁流体力学平均場理論の下では、この項を  $-\alpha \langle \mathbf{B} \rangle$  と書き直す（ $\alpha$  効果と呼ばれる）。すなわち(2')を

$$\langle \mathbf{E} \rangle = \eta \langle \mathbf{J} \rangle - \langle \mathbf{V} \rangle \times \langle \mathbf{B} \rangle - \alpha \langle \mathbf{B} \rangle \quad (2'')$$

と書く。多くのダイナモのモデルでは流体運動と  $\alpha$  効果の係数の分布を物理的考察により予め仮定し、その仮定のもとで(1'), (2'')を解く。このように、与えられた速度場の下での磁場の発展を追いかける立場を運動学的ダイナモ理論と呼ぶ。

さて、磁場が発生するとローレンツ力  $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$  が流体に働きもとの流体運動を変化させるから、厳密には速度場の変化を取り入れるべきである。この速度場への反作用を自己無撞着に取り入れ、乱流場の揺らぎ成分を含めて直接(1), (2)を解く立場は電磁流体力学的ダイナモ理論と呼ばれ、運動学的ダイナモより一段高度な立場である。

最近、地球・惑星ダイナモ、太陽・恒星ダイナモ、銀河ダイナモの各方面で研究の急速な進展が報告されているのは、スーパーコンピュータの発達により、現実に近いシステムで運動学的ダイナモ・モデルを解くこと、さらに、単純な境界条件の下では電磁流体力学的ダイナモの立場での数値実験が可能になったことが大きい。理論計算結果の検証のために観測データとの付き合い合わせが必要であるが、地球ダイナモについては現在・過去の地磁気観測、古地磁気データによる逆転の記録、さらには地震波観測による地球内部構造の詳細な決定が可能といった特長を生かすことができる。講演で引用された松島氏自身の最近の結果（[1], 図1参照）も、ダイナモの理論計算と地球中心核外核の流体運動推定を組み合わせた興味深いものであった。（今回のシンポジウムでは時間の都合で太陽ダイナモ、銀河ダイナモについての講演をお願いすることができなかったのは残念であった。）

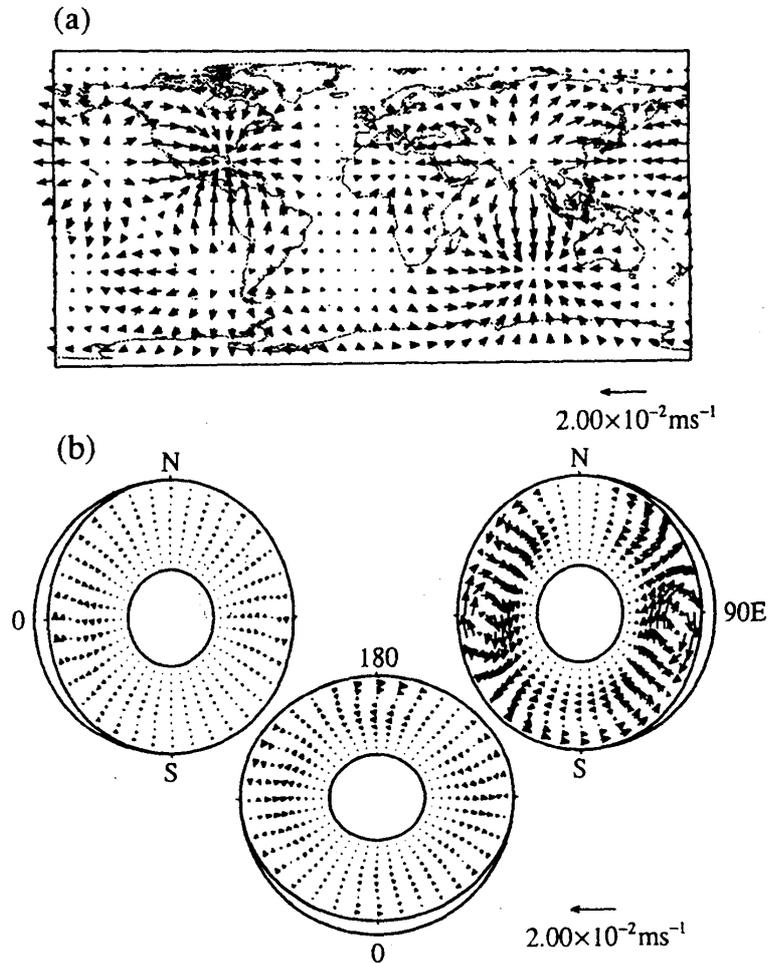


図1. 地磁気変動のデータから、ダイナモ問題の基礎方程式を元にして得られた地球中心核（外側部分）内の流体運動の推定。（a）は水平成分分布，（b）は赤道面（中央）と子午面（左右）内の速度分布 [1].

### 3. 新・乱流ダイナモ基礎理論 （東大生産研・吉沢徴氏）

上に述べたようにこれまでの運動学的ダイナモ理論では  $\alpha$  効果が本質的であった。吉沢理論は新・運動学ダイナモ理論というべきもので、これに加えクロス・ヘリシティ効果，すなわち，

$$\langle \mathbf{E} \rangle = -\langle \mathbf{V} \rangle \times \langle \mathbf{B} \rangle + \eta \langle \mathbf{J} \rangle - \alpha \langle \mathbf{B} \rangle + \gamma (\nabla \times \langle \mathbf{V} \rangle) \quad (4)$$

の  $\gamma (\nabla \times \langle \mathbf{V} \rangle)$  項の重要性を主張する。ここで  $\nabla \times$

$\langle \mathbf{V} \rangle$  は平均場の渦度である。吉沢氏の結果は精密な乱流理論の結果に基づきクロス・ヘリシティ効果の定量的な算定を与えるもので、今後の応用が注目される。講演では、宇宙におけるジェット現象に新理論を適用した興味深い結果が引用された ([2], 図2)。

前節に述べた電磁流体力学的ダイナモ・モデルでは揺らぎ成分の時間変化を含めてフルに3次元を扱うので  $\alpha$  効果，クロス・ヘリシティ効果についての仮定が不要である反面，膨大な計算量を必

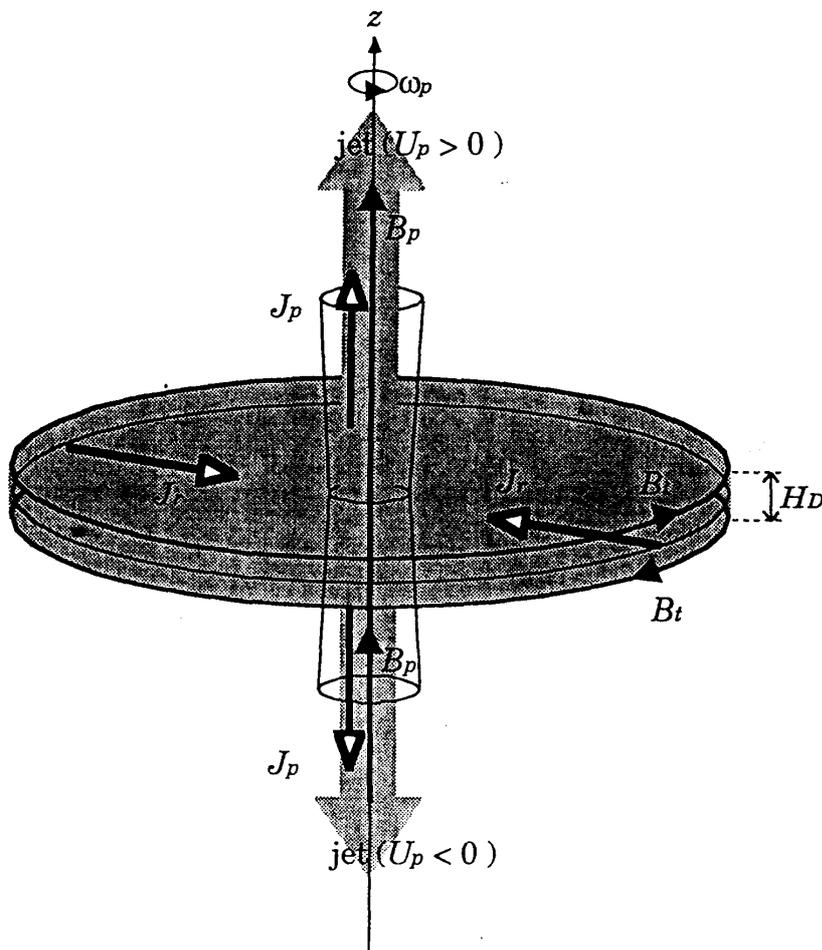


図2. クロス・ヘリシティ効果に基づくダイナモ作用の宇宙におけるジェット現象への応用. 双極流と磁場配位を描いたもの [2].

要とする。スーパーコンピュータによりかなりの計算が実現したとはいえまだまだ計算能力の限界による取り扱いの制約も大きい。吉沢理論のような基礎理論からのアプローチは電磁流体力学的ダイナモからのアプローチと相補的なもので、両者の発展からダイナモ問題の更なる理解が得られると期待できるだろう。

#### 4. 磁力線再結合過程 (名大理・前沢冽氏)

磁力線再結合過程は地球惑星磁気圏、太陽フレアなどにおける爆発的磁気エネルギー解放において重要な役割を担っていると考えられている機構である。近年観測手段が進歩し、観測結果が蓄積

するにつれ、磁力線再結合過程が自然界に存在すること自体はもはや否定することは出来ない事実となってきた（太陽での証拠については後の常田氏の講演紹介でも述べる）。

電磁流体力学によれば、電磁流体内の磁力線はその線上にある流体要素と共に張力をもった実体（例：ゴム紐）のように振る舞う。これが真空中の磁力線と大きく異なる点である。（真空中の磁力線は実体ではなく、各点での磁場の方向をつないだ仮想的な線に過ぎないから、例えばその運動を論ずることは意味がない）。電気伝導度無限大の理想電磁流体においては流体要素と磁力線の同一性は完璧である（磁力線凍結定理）から、図3の(a)の1対の磁力線が(b)のように移り変わることはない。

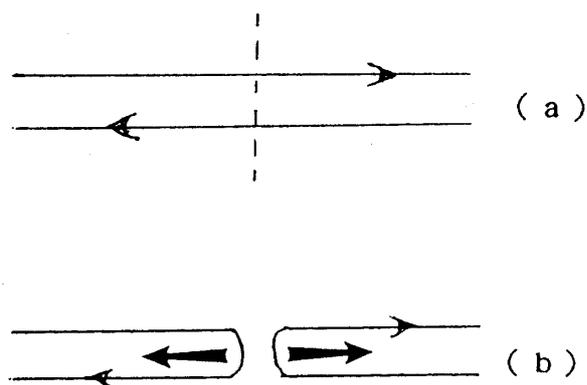


図3. 磁力線再結合過程により (a) の反平行磁場配位が (b) の再結合した磁場配位に移行する。これに伴い再結合部の電磁流体は元の磁場方向に平行もしくは反平行の方向に加速される。

しかし、現実の電磁流体では電気伝導度は高くても有限であるから、(a)の破線で示した領域で磁力線と流体要素の凍結が破れ、(a)→(b)への移行、磁力線再結合が可能である。(b)のような状態のゴム紐はパチンコとなって再結合部の物質を加速する

だろう。磁力線再結合に伴う電磁流体の加速効果はこのゴム紐の振る舞いとよく似ている。加速がどの程度かはその速度まで働くかは磁場強度と電磁流体の密度で決まり(アルフェン速度)、磁気圏や太陽コロナなどでは秒速数百～数千kmにも達する。

地球磁気圏においてはこのような磁力線再結合過程が

- (ア) 太陽風磁場と地球磁場の接する昼間側磁気圏界面、
- (イ) 太陽風により引き伸ばされてできる磁気圏尾の中央部

の2箇所では働いていると考えられており、その物理過程を詳細に研究することが、現在の人工衛星 GEOTAIL 観測計画の中心的テーマになっている [3].

ところで、これまでダイナモ問題と磁力線再結合問題は別の場所で論じられることが多かったように感じられるが、両者には密接な繋がりがある。

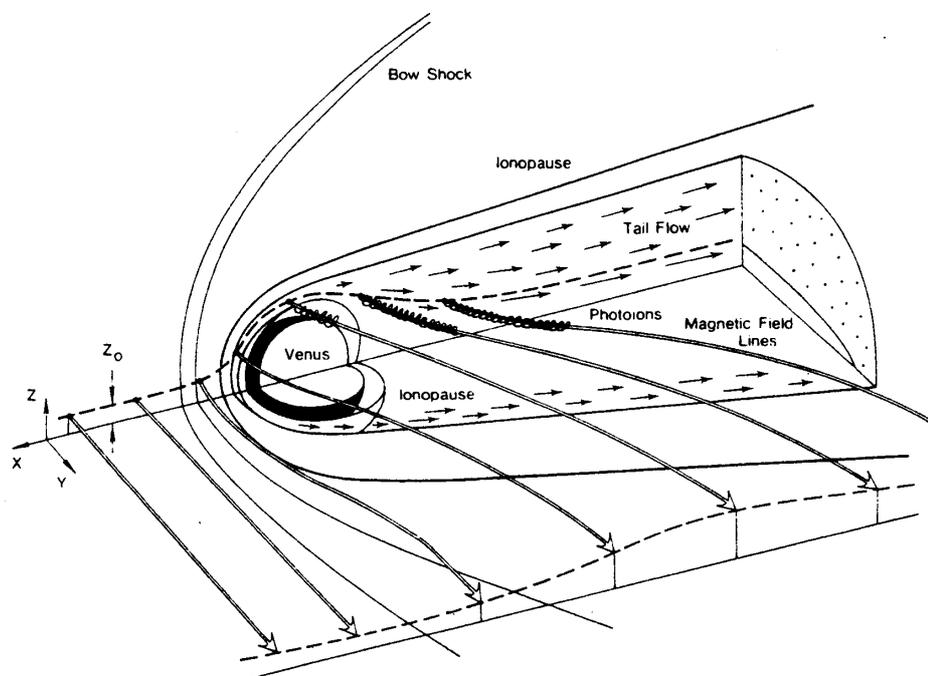


図4. 金星の誘導磁気圏の尾。太陽風磁場が金星電離層との相互作用により一時的に金星近傍に捕捉されるため、磁力線が巻きついて尾ができる [5].

例えば、(2)のオームの法則で  $\alpha$  効果を含めない場合、軸対称系では定常磁場を維持することは不可能である (Cowling の反ダイナモ定理 [4])。この定理は実は磁気中性線のトポロジーの問題であり、一方、磁力線再結合問題は磁気中性線の生成に関するものである。また非定常ダイナモ過程では磁力線の生成・消滅が問題となるが、これは O 型磁気中性線における磁力線再結合過程と本質的に同じ問題である。

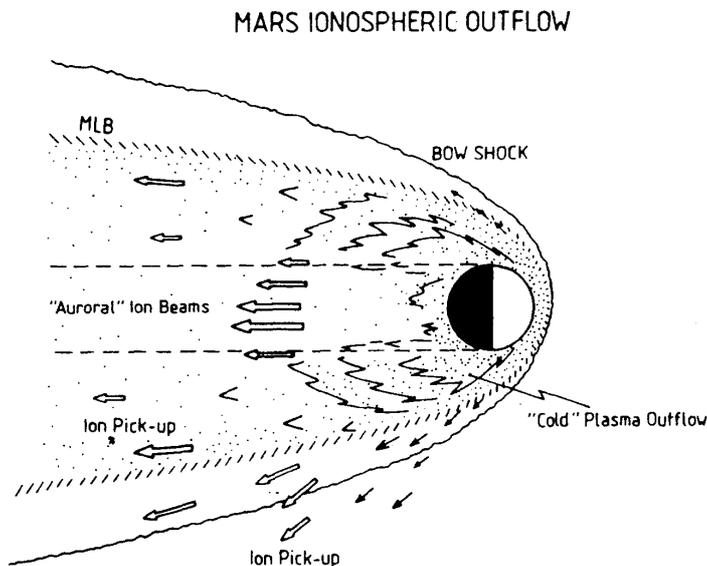


図5. 火星からのイオン（酸素イオン）流出の概念図。著者達は地球のオーロラ帯上空におけるイオンの上向き加速機構になぞらえて“オーロラ”イオン・ビームと称しているが、物理的機構はまだ解明されたわけではない [6]。

## 5. 火星・金星の誘導磁気圏 (通信総合研究所・丸橋克英氏)

太陽系内の天体はしっかりした自己磁場を持つ太陽、水星、地球、木星、土星、天王星、海王星と、全く自己磁場を持たないか、あっても非常に弱い (観測限界以下である) 金星、火星、彗星、小惑星、月の2種類に分かれる。惑星の中で冥王星はまだ探査されていないのでどちらに属するか不明である。水星や木星など、自己磁場をもつ惑星は地球磁気圏と似た固有の磁気圏を持つことが実証されている。一方、磁場を持たない天体であっても大気を持つ金星、火星、彗星の場合には太陽風の磁力線が大気外層部の電離した部分との相互作用により一時的に捕捉されてやはり磁気圏 (誘導磁気圏と呼べる) が形成され、磁気圏の太陽と反対側には磁気圏尾が長く伸びている ([5], 図4)。丸橋氏にはアメリカのパイオニア・ビーナス号の観測により明らかになった金星磁気圏のダイ

ナミクス、旧ソ連のフォボス2号により一部が明かにされた火星磁気圏のダイナミクスについて Review していただいた。興味深いいくつかのトピックがあるが、例えば、火星の磁気圏尾への大気起源の酸素イオンの流出現象 ([6], 図5) では、その流出量が火星大気の進化にも影響を与えるかも知れないほどのものであり、現在その機構の解明が研究のターゲットとなっている。有力な仮説は磁気圏尾における磁力線再結合機構に関連した現象であるとするものである。また、火星・金星の昼間側では惑星電離層と太陽風が直接接しており、太陽風内の電磁流体力学的現象が電離層を通じて下層の中性大気の物理現象と結びついている。

## 6. 太陽における電磁流体现象 (東大理・常田佐久氏)

「ようこう」の軟X線望遠鏡(SXT)により長い間謎につつまれていた太陽フレアのメカニズム、

太陽コロナのダイナミクスにヒントが得られつつある。常田氏の講演ではここ2年間に得られた最新の太陽像を手際よくまとめていただいた。そのいくつかを次に述べる。(詳しくは、たとえば[7]参照)。

フレアに伴う磁場エネルギー解放の証拠：図6にフレア前の捩れた磁力線構造(a)が、フレア後には比較的まっすぐな構造(b)に変化しているのが見られる。この磁場構造の変化に伴い、 $7 \times 10^{31}$  エルグ程の磁場エネルギーが解放されたことが推定される [8]。

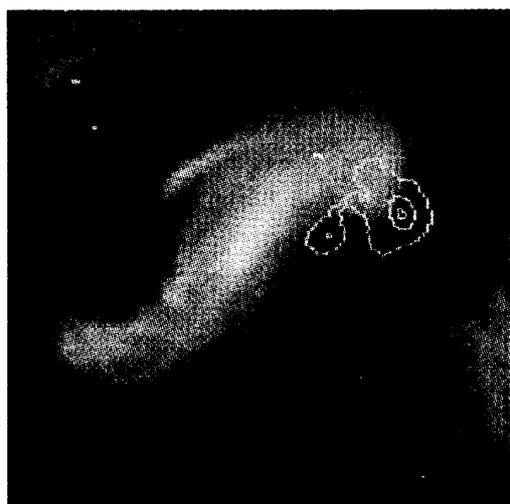
コロナの構造変化と磁力線再結合：コロナの磁場については、1973年のスカイラブのX線画像から、殆ど変化のない静的な世界という印象が一般的に受け入れられていた。ところがSXTの画像をつないでつくったムービーにより、コロナ磁場が数分から数時間のスケールで大規模な構造変化を繰り返していることが発見された。この観測は、コロナの磁場が、磁力線再結合過程により磁場構

造を次々と変化させていったことを示している。この過程は爆発的なエネルギー解放を伴わないが、X線で明るく輝く温度までのプラズマの加熱を引き起こしている。

細い磁力管はなぜ存在するのか？：SXTの画像はまた、明るい磁力管がどれも非常に細いことを示している。太陽活動が静穏である時には、太さが数秒角(太陽全体は約30分角)しかなく、長さが太陽半径近い表面を低く這うような磁力線さえ見える。この発見は光球からコロナに浮上した磁力管は自分自身の磁気圧により薄く広がってしまうとするこれまでの考えでは説明できない。

## 7. 銀河・星間空間における電磁流体現象 (名大理・花輪知幸氏)

渦巻き銀河のガス円盤は平均で数 $\mu$ ガウスの磁場に貫かれている。その磁場は星間空間において重力・回転・圧力とともにさまざまな活動的現象の主な担い手となっている。その現象は、銀河全



(a)



(b)

図6. 「ようこう」によるフレア発生領域のX線像(1991年12月5日0239UTフレア)。(a)フレア9時間前、および(b)6時間後。明るい筋が磁力線に対応している。

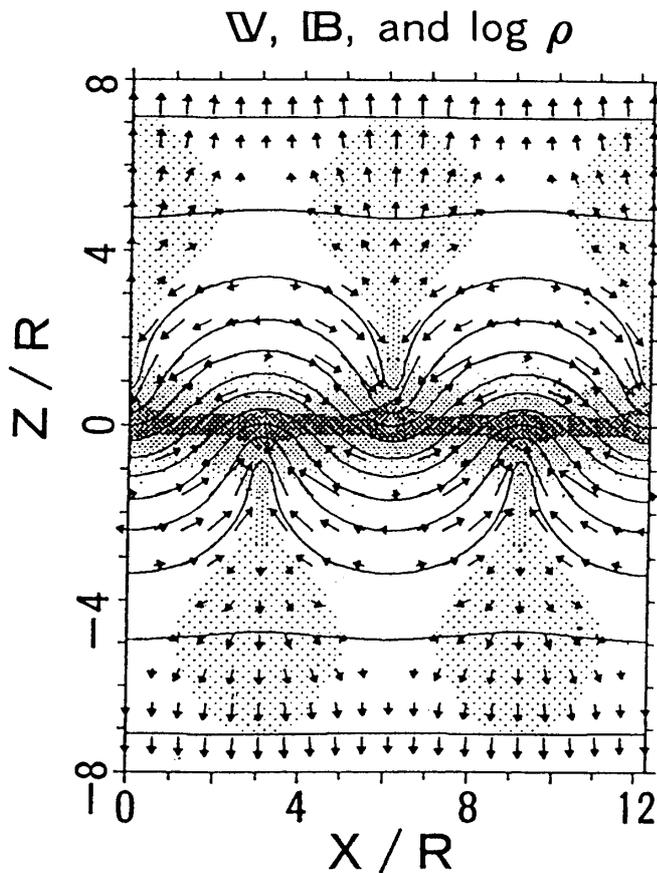


図7. パーカー不安定性の数値実験結果. 始め銀河円盤内に磁力線が閉じ込められていても, その状態は不安定平衡であるので, やがて磁力線は銀河円盤から浮き上がり, それに伴ってガスの流れが発生している. 実線は磁力線, 矢印はその場所におけるガスの速度のベクトル, 濃淡表示はガスの密度を示す. X座標を銀河円盤内, Z座標をそれに垂直な方向(局所的な重力場の方向)にとる. 長さは銀河面の厚さRにより規格化されている[9].

体をみわたす10kpc ( $\sim 3 \times 10^{19}$  m)の磁場構造から, 星形成領域に典型的な0.1pc ( $\sim 3 \times 10^{14}$  m)での電磁流体现象まで様々なスケールに亘っている.

系外銀河の観測から, 銀河の大局的な磁場は若い星の集まりである渦状腕に沿っていることが知られている. また磁場の強度はCO輝線電波強度とよい相関がある. CO輝線は密度の高い分子ガスから放射されるので, その強度は星を生み出す密度の高いガス雲の量に比例すると考えられる. これらの観測事実は銀河磁場が星形成の活動性と深い関わりを持っていることを示している.

銀河円盤にみられるスパークや泡と呼ばれる小さな構造もまた銀河磁場と関連がある. これらの構造の一部は超新星爆発によるものだが, いくつかのものは銀河磁場と重力によって作られる. 銀河

円盤内の磁力線は磁気浮力の作用で浮上し膨張する(パーカー不安定性[9], 図7参照). 磁力線の浮上に伴ってガスが流れ, 浮上した磁束管の根本にはガスの塊が作られる. この流れによってスパークが作られ, またガス塊は巨大分子雲の起源となる.

さらに小さなスケールにおいても磁場構造とガス分布の間にはよい相関が見られる. 分子雲の中には平均密度(1立方cmあたり1個)より1万倍以上密度の高い分子雲クランプやコアが存在する. それらの典型的な大きさは0.1–1.0pc ( $3 \times 10^{14}$ – $3 \times 10^{15}$  m)である. これらのクランプやコアは分子雲から形成され, 新しい星を生み出す直接の母体と考えられているが, その形成・進化の過程には磁場が重要な役割を果たしていると考えられている.

## 8. まとめに代えて

第1回目のシンポジウムが好評であったので、また続けていきたいと考えている。ただなにもぶんに広い領域にまたがる「学際」性を持ったトピックであるだけに、コンパクトなサイズにまとめるには知恵が要りそうである。そんなことを考えながら原稿をまとめている段階で、来年7月の木星とシューメーカー・レヴィ彗星(1993e)の衝突が「噂」から確実な予測へと進化し、電子メールにより感じられる惑星コミュニティの雰囲気がいかに熱気を帯びてきた。衝突して加熱・爆発が起きるのは中性大気の深いところだろうが、爆風が電離層から磁気圏へ吹き抜ければ磁気圏も大荒れになると予想される。木星磁気圏の活動は数kHz～数十MHzの電波帯(プラズマ集団相互作用による電波放射, 電波天文衛星観測, 地上観測), 数GHzのシンクロトロン放射帯(地上観測), 赤外線(水素分子イオン $H_3^+$ ; ハワイ・マウナケア天文台など), X線(「あすか」などのX線天文衛星), といったさまざまな周波数帯で監視されているが, この衝突現象は自然が中性大気とプラズマ

大気との相互作用に関する格好の実験室を与えてくれる訳であり, あと一年でどれだけ有効な観測を組織できるか自然との知恵比べである。

## 参考文献

- [1] 松島政貴, 本蔵義守, 1992: *J. Geomag. Geoelectricity* **44**, 521-553.
- [2] 吉沢徹, 1993: *Astrophys. J.* 印刷中, 1993.
- [3] 西田篤弘, 1993: 日本物理学会誌 **48**, 458-460; 寺沢敏夫, パリティ11月号, 1993.
- [4] P. H. Roberts and D. Gubbins, 1987: *Geomagnetism*, Chap. 2, edited by J. A. Jacobs, 185-249, Academic Press, New York.
- [5] L. M. Zeleny and O. L. Vaisverg, 1982: *Kosmich. Issled.* **20**, 604.
- [6] R. Lundin et al. 1990: *Geophys. Res. Letters* **17**, 873-876.
- [7] 常田佐久, 1992: 科学 62 巻8号 480-487.
- [8] 桜井隆ほか, 1992: *Publ. Astron. Soc. Japan* **44**, L123.
- [9] 松本亮, 柴田一成, 1990: *KEK Progress Report* **89**, 293-307.