

坊の不可解な行動を理解するのは非常に厄介で、プラズマ物理の大問題のひとつとなっています。

磁気リコネクションとプラズモイド

磁気リコネクションによって磁気圏尾部はどのようなダイナミックな構造変化をすることでしょうか。近年、地球物理学での観測研究方法は、複数の人工衛星や地上での観測網を利用した総合解析に移ってきていますが、それでも基本的には点と点での観測なので本当はグローバルな磁気圏の構造がどのように変化したかを論ずるのは非常に難しいところがあります。しかしこれまで蓄積されてきた多くの傍証により図3-5のような構造変化が起きているだろうと考えています。磁気圏尾部での活動が静かで特に激しい変化のない時は図3-5aのようにになっているプラズマシートが、ある時、地球の半径にして15倍から30倍程度の所で磁気リコネクションが起きて図3-5bのようなプラズマシートの構造変化を起こし、特に磁気圏の尻尾の方では磁気リコネクションによって吐き出された熱いプラズマが巨大な塊となって秒速数百 km 以上の速い速度で流れ出します。このプラズマの塊を「プラズモイド」と呼びます。このプラズモイドは磁気リコネクションの情報をたっぷり含んでいるので磁気リコネクションのメカニズムを知る上でも非常に大切な現象です。ジオテイル衛星で捉えたプラズモイドは後でまた述べます。

さて、磁気嵐と呼ばれる地上での激しい磁場の

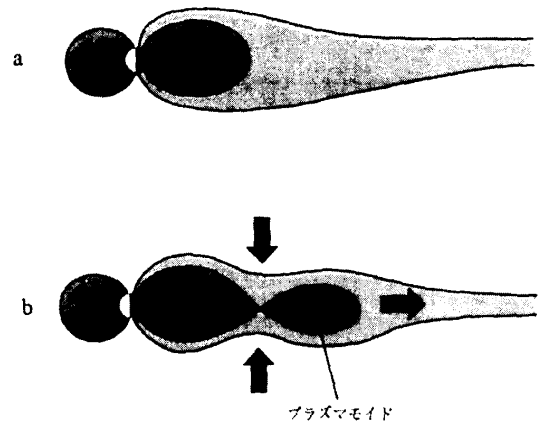


図3-5 磁気圏尾部でのプラズモイドの発展

変化からいつ磁気圏尾部で磁気リコネクションが起きたかを知ることが出来ませんが、磁気圏尾部での人工衛星のプラズモイドの出現時刻と地上での磁気嵐の発生時刻とは非常によい相関があり、プラズモイドが磁気リコネクションによって作られているのはかなり確かな事だといってよいでしょう。

また、数分程度の短時間で急激に成長する磁気リコネクションによるプラズモイドは MeV 程度の高エネルギーの粒子を伴うこともあり、どのようにして通常のプラズマシートでの数 keV の温度から MeV まで粒子が加速されるのかは、磁気圏物理としてだけでなく高エネルギー天体プラズマ物理としても非常に面白い研究テーマです。

それでは、次の章ではいくつかのテーマに分けて実際のジオテイルの観測結果を眺めてみることにします。大自然の中での非常に不思議なプラズマの振る舞いを御覧頂けるかと思えます。(星野真弘)

4. 地球の尻尾では何が起きているか

引き伸ばされた地球の尻尾

地球の磁場は太陽風を遮る役目を果たしています。昼間側では地球半径の10倍程度の距離で太陽風をせき止め、地球の気は金星や火星のように直接太陽風にさらされる事はありません。一方夜

側の磁場は太陽風により変形され、彗星の尾と同じように太陽と反対側に長く引き伸ばされた尻尾を形成しています。この地球の磁場で支配される領域を「地球磁気圏」と呼んでいます(図4-1)。磁気圏という名称は、磁場がプラズマの運動を決め、いわばプラズマの運動に対して座標のような役割

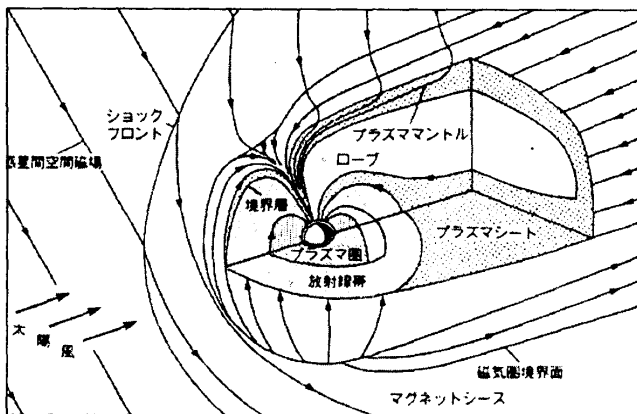


図4-1 地球磁気圏の詳しい構造

をしていることに由来します。従って、GEOTAILで磁場を測ることにより磁気圏の尻尾（磁気圏尾部）が引き伸ばされている様子がよくわかります。

観測を紹介する前に地球の磁気圏の各部に付けられている名前を紹介しましょう。まず、太陽風との境界が磁気圏境界面、その内側が地球のテリトリーです。地球近傍で双極子型の磁場の形状がよく保たれている所は内磁気圏とも呼ばれ、プラズマ圏や放射線帯（バンアレン帯）があります。夜側に長く引き伸ばされた尻尾の磁力線は、北側では地球向き、南側では反地球向きで、ともにローブと呼ばれています。ローブのプラズマは非常に希薄です。北側のローブと南側のローブが接する領域は非常に熱いプラズマで満たされていて、プラズマシートと呼ばれています。

それでは磁気圏尾部の地球半径の200倍にあたる距離のところで観測された磁場の様子を見てみましょう。図4-2には太陽方向(x)、東西方向(y: +が夕方方向)、南北方向(z)の磁場の3成分が示されています。ざっと見て分かることは、 B_x は $\pm 10\text{nT}$ 程度で大きく変動していますが、他の成分はゼロを中心に \pm 数nT以内におさまっています。このデータは磁力線は引き伸ばされた様子とともにGEOTAIL衛星がどこにいるかをよく表しています。 B_x が $-8 \sim -10\text{nT}$ で変動が少ない時間帯は、 B_y ,

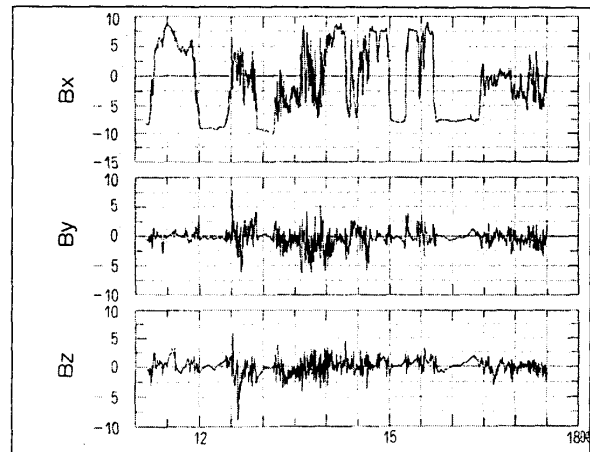


図4-2 1993年6月7日の尾部の磁場

B_z とも殆どゼロで変化がありません。これは磁力線が反太陽方向を向いており、南側のローブ領域に衛星がいる事を示しています。また、 B_x が $5 \sim 8\text{nT}$ になり、 B_y や B_z がゼロ付近の留まっている時間帯もあります。この時間帯には、GEOTAIL衛星は北側のローブ領域にいた事になります。

このデータをよく調べると、いろいろと面白い事がわかります。約6時間の間に、衛星が南北のローブを何度も往復している事、ローブの間を移動する際に磁場強度の非常に小さい領域（磁気中性面）を通過する事、さらに B_x の符号が速やかに逆転する場合と3成分とも激しい変動が観測される場合がある事です。GEOTAIL衛星はこの時遠地点付近にいたため、衛星の位置は地球に対して殆ど動かないので、衛星の軌道運動により南北のローブ領域を往復したとは考えられません。従って、太陽風の方向の変化で吹き流しのよう引き伸ばされている磁気圏尾部が、太陽風の方向の変化によりはためているか、地球方向から来るプラズモイドの運動による変化を観測したものか、という解釈ができます。例えば、12:30から13:00にかけて観測された B_z の北向きから南向きの変化は、プラズモイドの到着を示す変化であることが分かっています。

ところで地球の磁場の尻尾は一体どこまで伸び

ているでしょうか。GEOTAIL が観測する 100 万 km 程の距離では安定した磁気圏尾部が観測されています。地球から数千万 km 離れた所で観測されたという報告例もあります。なぜ、太陽風はこのように長く地球の磁場を引き延ばせるのでしょうか。

磁力線は「ゴムひも」に例える事ができて外から力を加えない限り出来るだけ縮まろうとします。もしも太陽風が無ければ、地球から出た磁力線は縮まろうとする力と磁力線同志が反発する力が釣り合った所で双極子型となります。地球に長い磁場の尻尾があるという事実は、太陽風から何らかの物理機構で境界面を通して反太陽向きの力が磁気圏に加わっている事を意味します。一方、磁場を従えたプラズマで乱れ・粒子間衝突が非常に少ない時は「磁場凍結の原理」が成り立ちます。このような状態では、「起源の異なる磁場・プラズマは混じり合わない」事になります。太陽風プラズマは太陽に起源を持ち、地球磁気圏の磁場は地球に起源を持ちますので、「簡単には混じり合わない」事になります。このままでは、太陽風の流れの力が磁気圏には取り込まれません。境界面では乱れが存在して「磁場凍結の原理」が破られているか、別の物理機構で運動量が取り込まれている筈です。

2つの考えが出されています。ひとつは太陽風中の磁場（惑星間磁場）と磁気圏中の磁場が磁場再結合によってつながっていることが原因であるとするものです。このモデルに従えば、太陽風の運動量は磁力線を通して非常に効率よく磁気圏に取り込まれます。（これを「開いた磁気圏モデル」とも呼んでいます。）GEOTAIL 衛星は磁気圏尾部の内部で太陽風に似た密度の高いプラズマを見つけていますが、このモデルに都合のよい事実です。なぜなら、太陽風自身もつながった磁力線に沿って容易に磁気圏に侵入できるからです。もうひとつのモデルは、境界面での乱れを通して太陽風の運動量を取り込もうというものです。境界面をはさ

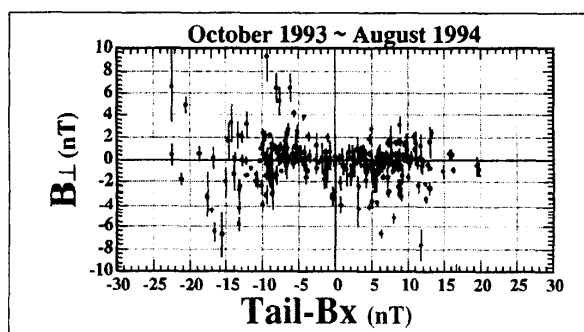


図4-3 尾部側の磁場強度と境界面に垂直な磁場成分

んで磁気圏の内外には速度の急峻な勾配があります。この勾配のためにケルビン・ヘルムホルツ (KH) 不安定が励起されて、磁気圏側に運動量が取り込まれるのではないかと、いうものです。（この考え方を「閉じた磁気圏モデル」と呼びます。）この不安定性は「磁場凍結」が成立する「理想的な磁気流体」でも起こり運動量を輸送します。勿論「理想的な磁気流体」ではプラズマ自身が太陽風から磁気圏に取り込まれる事はありません。尾部での高密度プラズマの観測はこのモデルに対しては否定的な事実です。

開いた磁気圏モデルによれば、尾部でも磁力線は磁気圏の境界面を貫いてつながっているはずですが、一方、閉じた磁気圏モデルでは、境界面は波打ってはいるものの境界面を貫く磁力線は必要ありません。GEOTAIL 衛星の観測ではどうなっているでしょうか。図4-3は横軸に尾部側の磁場強度、縦軸に境界面に垂直な磁場成分をプロットしたものです。殆どの場合垂直成分の大きさは 1nT 以下と非常に小さく、磁力線がつながっているという証拠にはなりません。また、これらの場合には境界面が非常に薄く（水素イオンのラーマー半径程度）、そこで流速が急激に変化しているので、KH 不安定による運動量輸送が有効に働いているとも思えません。

しかし、尾部での磁気圏境界面はシャープで簡単に識別できる場合ばかりでなく、磁場もプラズマも広い幅にわたって複雑に変化していてどこに

境界面があるのかははっきりしない場合もしばしば観測されています。太陽風から磁気圏への運動量輸送が有効に働いているのは、多分このような場合なのでしょう。位置も幅も簡単に決められない境界面をどのように調べるかが、「磁気圏尾部の形成と維持」という基本問題を解決するための鍵を握っているようです。

(國分征・山本達人)

大きく渦まく磁気圏のプラズマ

磁気圏のプラズマは大きなスケールで流れ、渦巻いています。

磁気圏の尻尾の遠いところでは、プラズマは地球と反対の向きに流れています。流れを作っているのは太陽風です。太陽風は磁気圏のわきをかすめて太陽系の果てに向かって流れ去るとき、粘性や磁場の力で磁気圏の中のプラズマを引きずって流れさせます。磁気圏の尾部の磁力線は、この流れのために引き伸ばされているのです。

しかし衛星が地球に近付くと、流れが逆に地球向きになっていることがしばしば見られます。流れの向きが逆転するのは、尾部の中で磁気リコネクションが起きるからです。引き伸ばされた磁力線がリコネクションによってつながって短い長さの磁力線になると、ゴムひものように縮まろうとする磁力線の性質があらわれて地球向きの流れが

生じます。GEOTAIL衛星の観測によると、地球からの距離が地球半径の150倍より大きいところでは地球向きの流れは稀にしかみられません。それよりも内側では地球に近付くにつれて頻度を増します。プラズマが昼間側と尾部にまたがる大きな渦を描いて一回りする時間は、10時間から20時間ぐらいです。

尾部の中でのリコネクション過程はいつも同じように進行しているのではなく、ときどき沢山の磁力線が急激につながることがあります。このような時にはリコネクションの起きるところ（磁気X点）より地球側には速い流れが津波のように押し寄せて磁気圏嵐（サブストーム）と呼ばれる嵐が起きています。また、それより遠いところでは地球と反対の方向にループの形を持つ磁力線が高速で放出されます。この磁力線ループをプラズモイドといいます。磁気圏の中に存在する大スケールのプラズマの流れは磁気圏の構造を決める重要な要素であるとともに、エネルギーの担い手としても大事な役割を果たしています。磁気圏の中の流れの様子は、太陽風のなかの磁場（惑星間空間磁場：IMFと称します）が北向きか、南向きかで違います。GEOTAIL衛星は、IMFが南向きのときの運動は上に記したような大きな渦になっているのに、北向きの時の流れはほとんどどこでも反地球向きだけであることを見付けました。IMFが

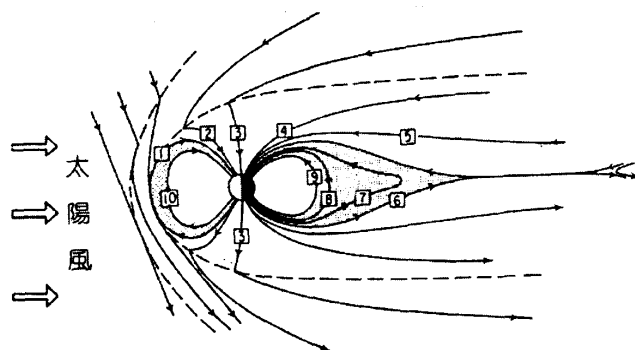


図4-4 IMF（惑星間空間磁場）が南向きのとき

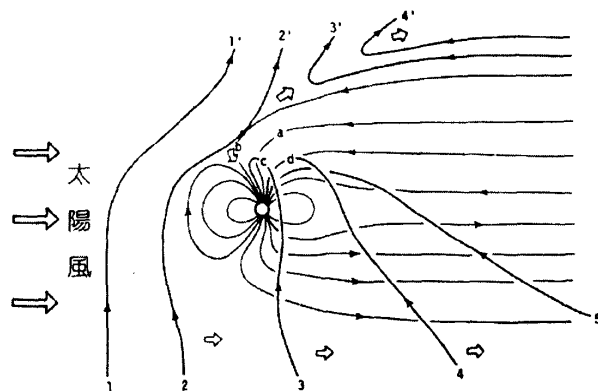


図4-5 IMF（惑星間空間磁場）が北向きのとき

北向きの状態のもとでは、磁気圏の尾部で磁気リコネクションが起きず、地球向きの流れができないのです。

この違いは、もとをただせば、太陽風によって磁気圏の昼間側で流れが作られるときに、IMFの方向が大きな影響を与えるためです。IMFが南向きの時は磁気圏の境界面の低緯度領域でIMFと地球磁場がリコネクションを起こして流れを作るのに対して、北向きの時は高緯度でリコネクションがおきます。これが、尾部に引き伸ばされる磁力線の性質に相違を生じさせ、尾部の中でリコネクションが起きる場合と起きない場合ができるのです。

(西田 篤弘)

プラズモイドの構造

プラズモイドは地球の半径30倍程度の所に発生する夜側磁気圏の加速領域で生成され、惑星間空間に吹き出す高温プラズマの塊です。図4-6はGEOTAILが磁気圏尾部（地球の半径の50程の距離）において、プラズマ粒子計測器および磁場計測器が観測したプラズモイドの例です。上から順に、磁場の南北成分 B_z 、電子 ($60 \text{ eV} < E < 38 \text{ keV}$) とイオン ($32 \text{ eV} < E < 40 \text{ keV}$) のエネルギー束のスペクトルを示します。初期に、 B_z が極く僅かながら正の値を示していますが、プラズモイドの通過に伴い、大きく正に振れて、次に負に変化しています。これは、プラズモイドに伴う磁力線がループ状の構造をしているからであると考えられます。電子やイオンによって、プラズモイドの到着を知る時は、この例の様に、エネルギーの高い電子が先に現れ、短時間で、そのエネルギーが減少する構造（エネルギー分散構造）がみられます。僅かに遅れて観測されるイオンについても同様のエネルギー分散構造が見られます。これは、プラズモイドが、高速のイオンビームの層と、

さらに外側にまで広がった高速電子の層によって、すっぽりと包まれている事を示唆しています。また、プラズモイドを取り巻く層の中で、エネルギーの低いイオン ($E < 0.1 \text{ keV}$) がプラズモイドの内部に入って行くに従ってエネルギーを上昇させていますが、これはプラズモイドの境界でローブの粒子がなんらかの加速を受けていることを示しています。

一方、プラズモイド本体は、内部が高温の電子とイオンで満たされています。密度は 1 cm^{-3} あたり0.1個で周囲のローブ領域よりも低下しています。その様な構造が、平均流速 $\sim 700 \text{ km/秒}$ の高速で地球と反対方向に運動しています。注目すべき点は、プラズモイドの内部が周囲よりも密度が低くなっているため、本来、スローショックと呼ばれる構造が安定に作られる条件を満たしていない事です。プラズモイドの境界が、何と呼ぶべき構造なのか、また、どの様な機構で、ローブからやって来る粒子が加速されるのか、この点を明確にしなければなりません。

また、先程、簡単のために、プラズモイドがル

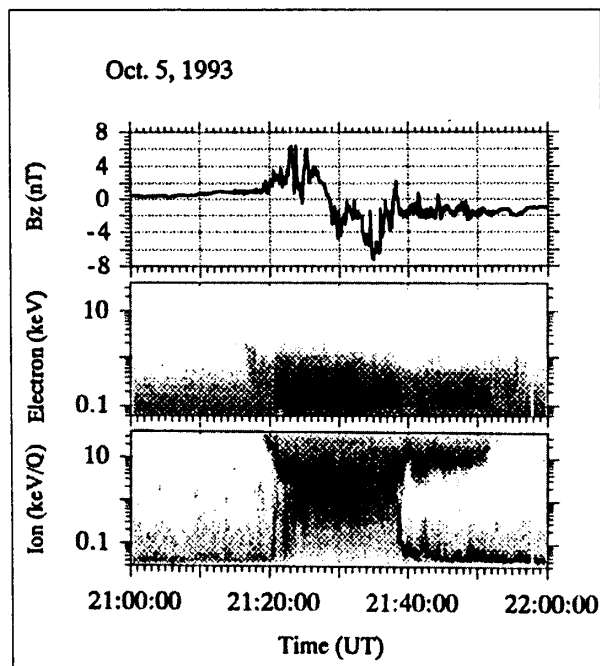


図4-6 プラズモイドの構造を示す1993年10月5日のデータ

ープ状の磁場構造を持っているとしました。それは、いわば、プラズモイドの内部に、輪の形をした閉じた多数の磁力線が詰まっている様な形を想定しています。しかし、実際には、図4-6に示していない磁場の東西成分 B_y がゼロでない値をもつため、磁力線がコイルの様な螺旋形をしていて、両端が外の世界につながっている状況も予想されます。問題となる B_y 成分が、どの様にして作られるのか、また、本当にプラズモイドが磁力線を介して外の世界につながっているのかという点も、現在、われわれが関心を寄せているテーマです。

プラズモイドは温度の高いプラズマによって構成されていて、地球の磁気圏に過剰に蓄積された質量やエネルギーを外の世界に持ち去る上で重要な役割を担っています。もともとは、太陽風を源とするエネルギーであるが、この様な形で磁気圏全体で大規模な変化を遂げてエネルギー解放を行っているのです。(町田 忍, 西田篤弘)

尾部の中の衝撃波

磁気圏尾部に蓄えられたエネルギーが磁気リコネクション過程で解放される時、「遅いモード」磁気音波の衝撃波が出来ます。図4-7にX点から4方向に延びる衝撃波が示されていますが、プラズマは磁気圏尾部の上下から流れ込み、衝撃波を通過して左右に流れ出します。衝撃波に流れ込む前を上流、通った後を下流と呼びますが、プラズマは衝撃波を上流から下流に通過する過程で、運動エネルギーを得ます。GEOTAIL 衛星が実際に衝撃波を通過した例を見てみましょう。図4-8は上から磁場の強さ、プラズマの速度、プラズマの密度、そして温度を示しています。図中に up, down と書いてある区間はそれぞれ衝撃波の上流、下流を示しています。磁場の大きさは上流の方が強く、プラズマの流れる速さや温度は下流の方が大きくなっており、磁場エネルギーが運動エネルギーに変換さ

れていることがわかります。

このような観測は、今迄にも米国の ISEE 3 衛星で行われていましたが、磁場と電子の観測しか行われていませんでした。GEOTAIL 衛星では磁場はもちろんイオンと電子両方の観測を行い、初めて磁気衝撃波の存在を確認しました。

更に磁気衝撃波周辺の特徴的なイオンの分布が GEOTAIL 衛星の観測で初めて明らかになりました。ここで注目したいイオンの分布が2つあります。一つめは上流から下流にかけて次第にエネルギーが増加する accelerated cold ions と呼んでいるイオンです(図4-7参照)。これらのイオンはもともと衝撃波の上流にあった、速度や温度の低いイオンが衝撃波を通過する過程で加速されたものと考えられます。これらのイオンは磁力線にほぼ垂直な方向に運動しながら加速され、衝撃波下流にある速度や温度の高いイオンと次第に混ざっていきます。この加速過程を詳しく研究することによ

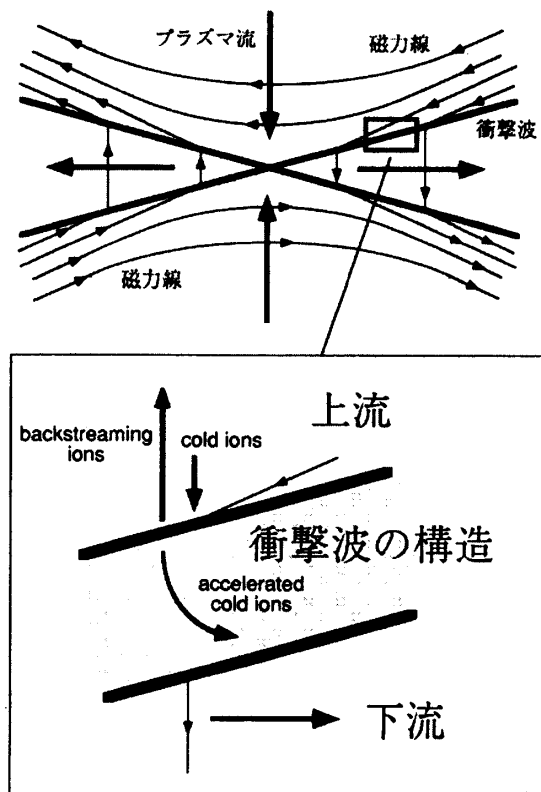
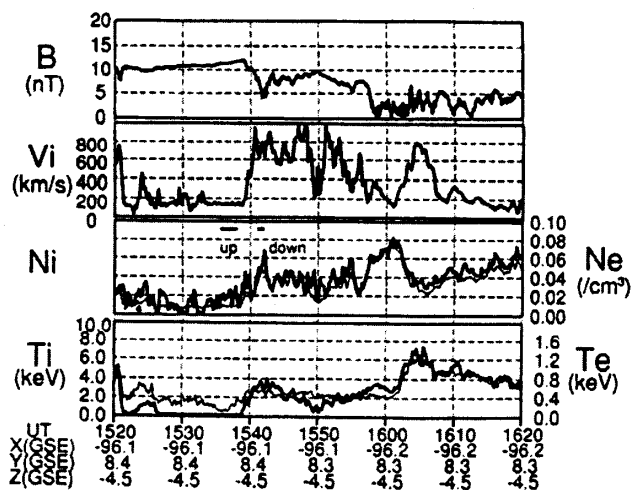


図4-7 磁気リコネクションからの衝撃波



1994年1月14日

図4-8 GEOTAILが衝撃波を通過したとき（1994年1月14日）のデータ

って衝撃波の細かい構造を明らかにできるものと期待しています。もう一つは上流付近に見られる非常にエネルギーの高いイオンの分布で backstreaming ions と呼んでいるものです（図4-7参照）。このイオンは衝撃波から上流側へ向かって流れていることがわかりました。これは、衝撃波に流れ込む低エネルギーイオンの流れの方向と反対であり、衝撃波の上流には対向して流れる2つのイオン群が存在することを示しています。宇宙空間のプラズマは非常に衝突頻度の小さい無衝突プラズマですが、これらの対向して流れる2つのイオン群は、無衝突プラズマ中に衝撃波を作り出す原因を担っている可能性があります。

このように GEOTAIL 衛星の観測によって磁気衝撃波の存在が確認されましたが、今後は衝撃波のより細かい構造や性質の解明へと研究が進んでいくことになります。

(斎藤義文)

プラズモイドの形

リコネクションが起きると、引き伸ばされたゴムのようにはりつめていた磁気圏のテイルの磁

力線は、ちぎれて後方（反太陽方向）に飛び去ります。ちぎれて輪のようになった磁力線に囲まれた熱いプラズマの塊がプラズモイドですが、まだ誰もその全体像を見た人はいません。GEOTAIL 衛星はもう何百回もこのプラズモイド（の一部）を突っ切って観測していますので、それらの多数の観測を重ね合わせて全体像を浮かび上がらせる作業が進行中です。全体像の解釈には、観測、理論両面からのアプローチが必要ですが、プラズマ現象が非線形であるために、計算機シミュレーションも非常に有効です。ここでは、シミュレーションから最近作られたプラズモイドの描像について少し紹介しましょう。

最近わかってきたのは、「プラズモイドは磁力線によって囲まれている」というイメージよりも、「波の波面によって囲まれている」といったイメージの方が正しいという事です。プラズモイドは、その飛び去るスピードが非常に速い（秒速約1000kmにも及ぶ）ために、プラズマのなかに強く波を起こします。丁度、空気中を「超音速」で飛ぶ物体が衝撃波を作るように、「超磁気音速」で飛ぶプラズモイドも、衝撃波を作ります。ただ、空気中と違うのは、プラズマの中を伝わる波が、速進波（「速いモード」の磁気音波）、アルフベン波、遅進波（「遅いモード」の磁気音波）と3種類あり、まわりの磁場の状態によって、それぞれの波の伝わる方向や速さが変わる事です。そのため、衝撃波

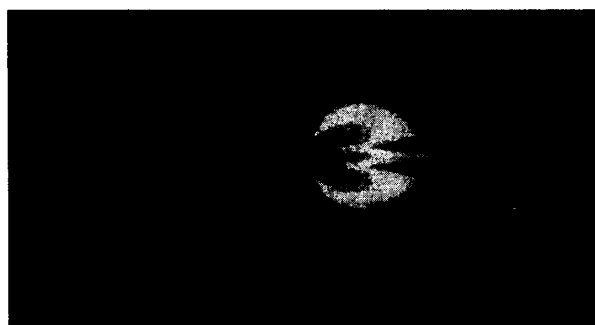


図4-9 プラズモイド中の圧力分布。左端で起こったリコネクションの結果生成されたプラズモイドが成長しながら右方へ伝搬する。横のスケールは地球半径の約100倍。

の種類や形まで、伝わって行く領域の状態によって大きく変わり、空気中のように単純には行きません。特に、テイルの真ん中には、プラズマ密度の高いプラズマシートがあるため、それとの相互作用が問題になります。

シミュレーションを行なってみると、プラズマシートの厚みを大きく越えるところまでプラズモイドが成長すると、プラズマシートを挟み込む蟹の鉗のような形で発達していきます。プラズモイド内外の圧力分布の図を見て下さい。図4-9の左(地球方向)から高速で飛んできたプラズモイドが、右から伸びてきているプラズマシートを挟み込む、もしくは飲み込むような形で右に進んでいきます。プラズモイドをふちどる境界の部分は、遅進波の衝撃波面になっていて、プラズマシートと接する前面からプラズモイドの中央に向けて、ぐっと折れ曲がっています。これは、プラズマシートの存在によって、遅進波の速度が大きく影響を受けているせいであることがわかりました。さらに、プラズモイドの中央には、プラズマシートとの衝突によって、非常に圧力の高い部分(黒く見える部分)が生じています。このようなコアの存在は、最近のGEOTAIL衛星の観測からも示唆されています。GEOTAIL衛星の観測により次々と新しい事実が見つかっていますので、それらの解決のためにも、これから、観測とシミュレーションの比較が楽しみになって来ました。

(前沢 洸)

プラズモイドの発生

前に述べてあるように、磁気圏嵐が起きるとプラズモイドが作られると考えられますが、はたして実際にそうなっているのでしょうか。このことを調べるには、地上で磁気圏嵐がいつ起こったかを知り、その後にプラズモイドが来るかどうかを調べればよいわけです。ところが、磁気圏嵐が始

った時刻を正確に決めることは、なかなか難しいことです。一番よい方法は、人工衛星「あけぼの」で撮影されたオーロラの写真から、オーロラが急激に明るく激しく運動を開始した時刻を知ることです。しかしながら、「あけぼの」は極軌道衛星なので、四六時中オーロラを監視しているわけではありません。地上でのオーロラや地磁気の変動の観測はどうしてもその観測範囲が限られていて、磁気圏嵐の始まりの正確な時刻は決めにくいという欠点があります。

ここで登場する強力な援軍は、天気予報でおなじみの静止気象衛星「ひまわり」です。「ひまわり」は、雲の写真を撮るほかに、高エネルギー(> 2 MeV)の電子強度の観測もおこなっています。実は、「ひまわり」のそばを通っている磁力線は、オーロラの光っているところの近くの地表に根元をもち、磁気圏嵐の時に磁場が特徴的な変化をすることが既に知られています。この磁場の変動にともなって、電子の強度が変動します。具体的には、電子の強度が減少した後、急激に増加した時が磁気圏嵐の始まりに対応します。「ひまわり」での電子の強度の変動は、この衛星が夜側にいる時なら、ほとんどの磁気圏嵐を見逃さずに、かつ、かなり正確に磁気圏嵐の始まりの時刻を教えてください。そこで、気象庁気象衛星センターからいただいた電子のデータを調べて、まず磁気圏嵐の開始の時刻のリストを作っておきます。次に、GEOTAIL衛星のプラズマのデータを調べて、プラズモイドがいつ来たかを決めます。

図4-10には、1993年4月21日の14-17UTに「ひまわり」で観測された粒子の変動(上段のパネル)とGEOTAILで観測された磁場の変動(下段のパネル)とを示しています。上段のパネルのELと示した線は > 2 MeVの電子のフラックスを、P1と示した線は、それより低いエネルギーの電子のフラックスを、表わしています。1500UT頃から粒子の

フラックスが減少していきます。これは、地球半径の6.6倍という地球に近い静止衛星軌道付近の磁気圏尾部の粒子のたくさんある領域(plasma sheet)が薄くなり、衛星が相対的に磁気圏尾部の粒子のたくさんある領域から外へ出ていくようになるためです。この時間(growth phaseと呼ぶ)に、磁気圏嵐のためのエネルギーが磁気圏尾部に蓄積されていきます。1520UTに電子のフラックスが急激に増加しています。この時刻が、磁気圏嵐の開始(substorm onsetと呼び、この時刻以後のオーロラ活動の活発な40分程度をsubstormのexpansion phaseと呼ぶ)時刻に対応しています。この粒子のフラックスの増加は、磁場の形状が変わり、薄くなっていた磁気圏尾部の粒子のたくさんある領域が厚くなったことの結果です。

GEOTAILでの磁場の変動を見てみましょう。BXは、赤道面で太陽方向成分、BYは赤道面で18時の方向成分、BZは北向き成分、BTは磁場の強

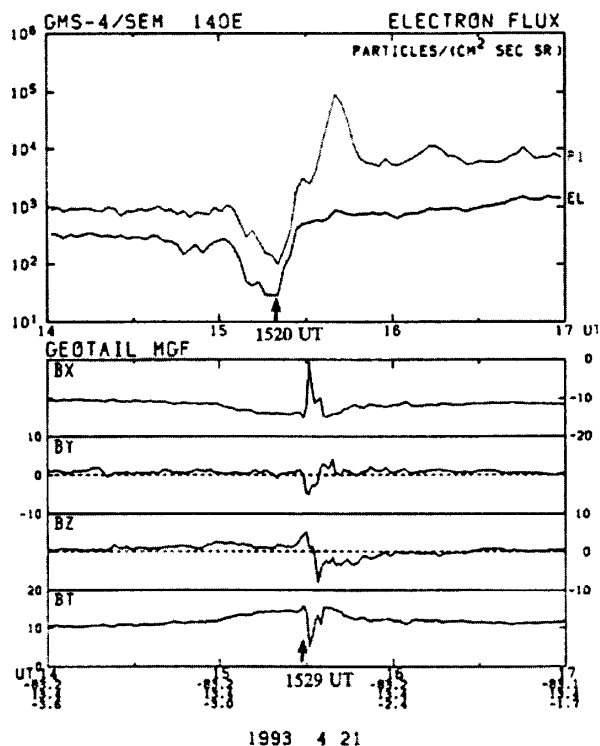


図4-10 1993年4月21日の14-17UTに「ひまわり」で観測された粒子の変動(上段のパネル)とGEOTAILで観測された磁場の変動(下段のパネル)

さを示しています。BXは、-10 nT程度ですが、マイナスということは、磁気圏尾部の赤道面の南側にいることを示しています。1529UTから数分間にわたって、磁場の強さが減少していることがわかります。このとき、GEOTAILでの粒子のデータを調べてみると、反地球向きに流れる粒子のかたまり、プラズモイド、に遭遇していることがわかります。したがって、この磁気圏嵐では、その開始時刻から9分ほど後に、プラズモイドが地球半径の83倍の距離の磁気圏尾部に到達したことになります。

このような観測から、磁気圏嵐が起こると図4-11のようなことが、磁気圏尾部で起きていると考えられます。ここでは、GEOTAILが地球半径の200倍程度の磁気圏尾部にいるとしています。まず、磁気圏嵐開始前($T < 0$, growth phase)には、地球に近いところの磁力線がひきのばされ、粒子のつまった領域は薄くなっていきます。磁気圏

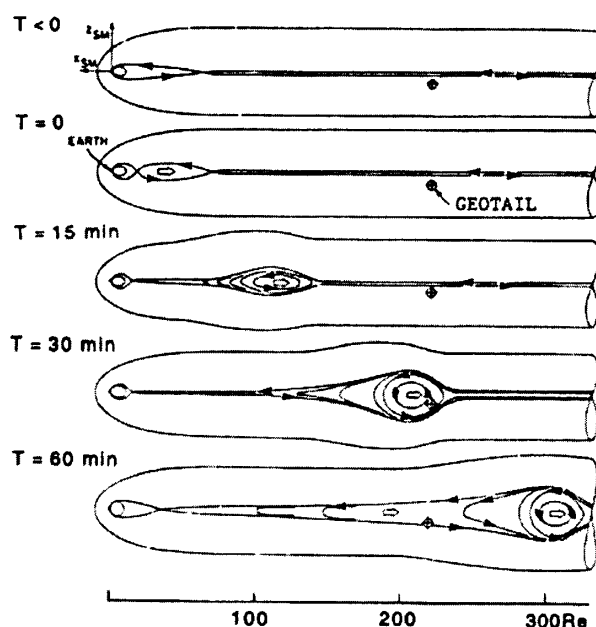


図4-11 磁気圏嵐のときの磁気圏尾部でのプラズモイドの発生

嵐開始時(T=0)には、地球に近い部分で磁気リコネクションが起き、プラズモイドが形成されます。このプラズモイドは、15分後には、地球半径の100倍程度のところに達し、30分後には、GEOTAILを包み込み、さらに、反地球向きに流れていきます。この図にあるように、磁場の方向はプラズモイドの前半分では北向きになり後半分では南向きになります。この様子は、図4-10のGEOTAILでの磁場のBZ成分が、最初にプラスの北向きになり、その後マイナスの南向きになる変動(bipolar structure)でわかります。

この例では、GEOTAILは地球半径の83倍のところにはいましたが、地球からいろいろな距離での観測された95個の磁気圏嵐について調べた結果を図4-12に示します。ここでは、横軸に地球半径を単位としたGEOTAIL衛星の地球からの距離、縦軸に磁気圏嵐開始からプラズモイドの到着までにかかった時間を分単位で、示してあります。個々の磁気圏嵐については、時間差はいろいろですが、GEOTAIL衛星が地球から遠くにあるほど、プラズモイドの到着まで時間がかかることがわかり、図4-11で示したようにプラズモイドが反地球向きに飛んでいくことがわかります。この傾向は図に示した直線によって代表させることができます。この直線が横軸と交わる場所は、時間差がゼロと

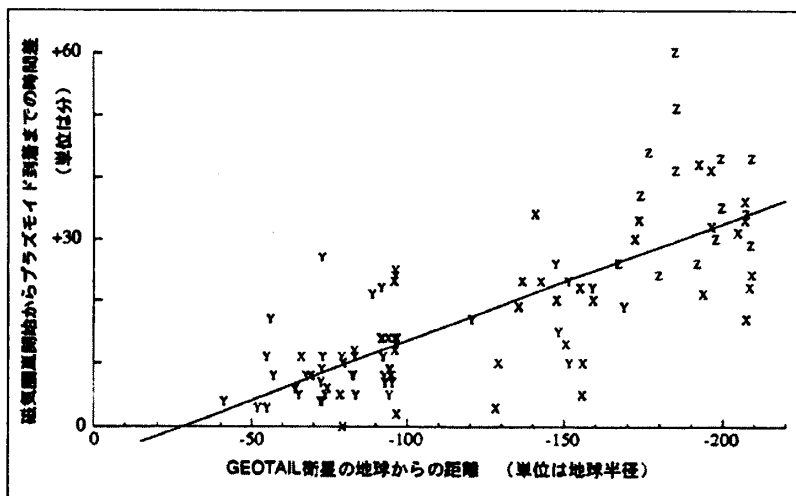


図4-12 GEOTAILの位置とプラズモイド到着時間

なり、プラズモイドが発生したところ、すなわち、磁気リコネクションが起きた場所と考えられます。この図によれば、ほぼ地球半径の30倍程度のところとなります。また、直線の傾きから平均的なプラズモイドの反地球向きの運動の速度がわかりますが、それはほぼ560km/sであることもわかります。

プラズモイドがどこでできたかを推定する方法として、もう一つあります。プラズマの観測からはプラズマが全体としてどの程度の速度で動いているかがわかります。これをプラズモイドの速度と考えることができます。いくつかのプラズモイドについて調べてみますと、300 km/sから1000 km/sの速度で磁気圏尾部の遠方へ飛んでいっていることがわかります。この速度に、前に調べておいた磁気圏嵐開始からプラズモイド到着までの時間をかければ、どの程度の距離をプラズモイドが飛んできたかがわかります。GEOTAIL衛星の位置がわかっていますので、どこでプラズモイドが発生したかが推定できます。このような方法によってもやはりプラズモイドは、ほぼ地球半径の30倍程度のところでできていることがわかります。

GEOTAIL衛星は、これまで磁気圏尾部の地球半径の50倍より遠くを主に観測してきました。したがって、ここに述べた磁気圏嵐の時に地球半径の

ほぼ30倍のところでは磁気リコネクションが起きてプラズモイドが作られるということは、遠いところでの観測による推定です。GEOTAIL衛星は1994年11月に、地球半径の50倍までの磁気圏尾部がよく観測できる軌道に移りました。したがって、これからは、まさに磁気リコネクションが起きてプラズモイドが作られるようすが観測されるものと期待されます。

(長井嗣信)

ブーメラン法で見た磁気圏

地球の磁気圏にはローブと呼ばれる大変プラズマの密度の低いところがあります。このローブでのプラズマの運動特に磁場に垂直な方向のプラズマの運動が磁気圏全体のダイナミクスを知る上で大変重要であると考えられています。磁気圏内でのプラズマの運動を調べるにはプラズマを測る計測器を使い直接測るのが一番良いのですが、ローブではプラズマの密度が大変低く、直接測るのが困難なので電場と磁場を測る事によってプラズマの運動を推測する事が行われています。これは磁気圏の内部では、磁場に垂直な方向のプラズマの運動は、磁場及び電場と密接に関連しており、これら3つの内の2つが測定できれば他の1つは求められると考えられている事からです。

人工衛星で電場を測るには衛星から一対以上の長い電極を伸ばし、その両端の電位差を測定するダブルプローブ法と呼ばれる方法が一般的です。ところで、プラズマ中に物を置くとその物の影響が周辺に及びます。この影響がどのくらい遠くまで及ぶかは回りのプラズマの密度と温度によって決まります。ローブではプラズマの密度が低い為に、この影響の及ぶ範囲が電極の長さよりもはるかに遠いところにまで及んでしまいます。GEOTAIL 衛星以前の衛星ではプローブ法によるローブでの電場の測定はしっかりした校正が出来なかった事もあり、測定結果をあまり信用してもらえませんでした。プローブ法の欠点を除去し、ローブのようにプラズマの密度が大変低い領域でも電場が測れるようにと12年ほど前から開発を始めたのがブーメラン法です。ブーメラン法の原理等につきましては、過去ISASニュースに3度ほど(No. 49, No. 72 及びNo. 162) 記事がありますのでそちらを参考にして頂くことにして、ここでは省略させていただきます。

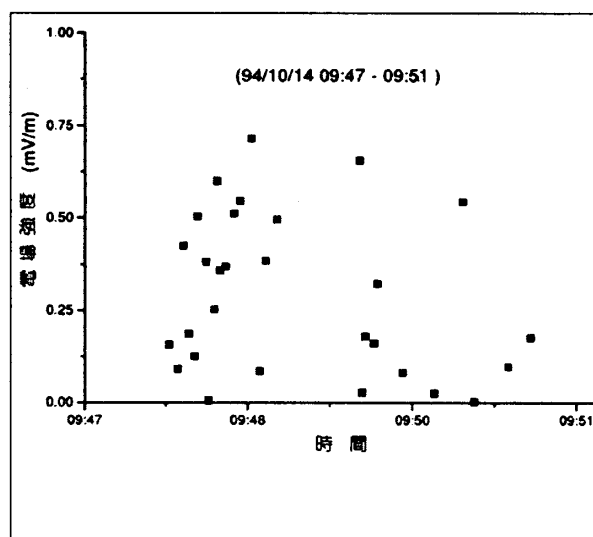


図4-13 ブーメラン法で観測された電場強度の変化

私達がGEOTAIL 衛星用のブーメラン法を設計したときには先にも述べたように参考として使える信頼に足るローブでの電場計測が無かった為、地球に近い衛星(高度数千キロ)で測られた極冠域での電位差を磁気圏尾部のサイズで割った物を基本に考え「まあ最大で0.5mV/m程度で普通は0.3mV/mも無いぐらいだろう」と考えていました。またこれは私だけがそう思っていたのかもしれませんが、測定されるであろう電場に関してはかなり静的なイメージを持っていました(つまりあまり激しい変化が無い)。ところがあにはからんや、ブーメラン法を運用して解った事は、(これは他の観測機からも良く解りますが)磁気圏は実にダイナミックな変化をしているという事でした。その1例を図4-13に示します。この例は93年の10月14日に地球の後ろ約110万キロのローブで得られたものです。ここに示してあるのはわずか4分弱の電場強度のデータですが、この間にも強度が大幅に変化(しかも値もとても大きい!)しているのが見て取れると思います。(この絵からでは分かりませんが、実はこの間に方向すら逆転しています。)最初にこのようなデータが取れたときには何か間違っているのではないかと思わず疑ってしまった

ものです。GEOTAIL 衛星の観測から「GEOTAIL 衛星以前は磁気圏をこんな風に思っていたんだねー」といえるような成果が出るのではないかと思っている今日この頃です。

(早川 基)

太陽フレアとの対比

磁気圏内に起こる爆発的なエネルギー解放現象、サブストームは太陽風から取り込まれたエネルギーが一度磁場エネルギーの形で磁気圏尾に蓄積され、それが限界を越えると一気に解放され急激なオーロラの増光、プラズモイドの形成などを引き起こすものでした。

蓄積された磁場エネルギーの解放過程という点で磁気圏のサブストーム現象と太陽X線観測衛星「ようこう」が対象とする太陽フレアは共通点を持っていますが、最近明らかになったのは、より詳細な物理機構についても共通点があることです。前のセクションで述べられているように、GEOTAILの観測から、磁気圏尾では「X点」領域の近くでプラズマが加速されジェットになって吹き出しています。「X点」領域から反地球向きに吹き出した

ジェットはプラズモイドの原因となり、一方、地球向きに吹き出したジェットは地球方向にエネルギーを運び、オーロラ現象を引き起こしています。太陽フレアの場合には、直接エネルギー解放領域の構造を観測することはできませんが、間接的にリコネクション過程とそれに伴うジェットの存在が結論されています。

図4-14は「ようこう」の観測したループ状フレアの軟X線像(エネルギー0.2~2 keV)と、同時に観測された硬X線(33-53keV)の強度分布です(図は名古屋大学太陽地球環境研究所増田智博士の好意により収録)。この観測により明らかになったのは、硬X線領域が強い領域は軟X線で光っている領域の上空にあることです。この説明として、次のようなシナリオ(図4-15)が提唱されています。これらの領域の更に上空にあるリコネクション領域から放出されたプラズマのジェットがまずループにぶつかったところで電子(数十keV)を加速し、その電子が硬X線を作りだします。ジェットのエネルギーはループにそって下部の太陽大気にも伝わり、そこで加熱された大量のプラズマがループ内を満たし軟X線で明るく輝くこととなります。(残念なが

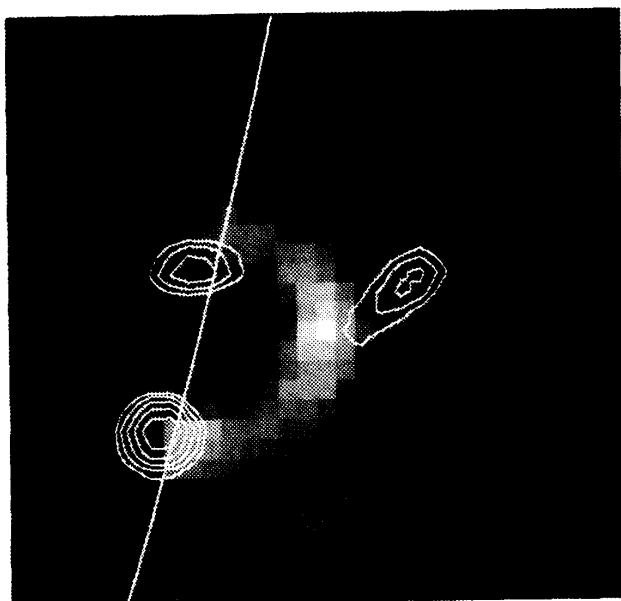


図4-14 「ようこう」の観測したループ状フレア

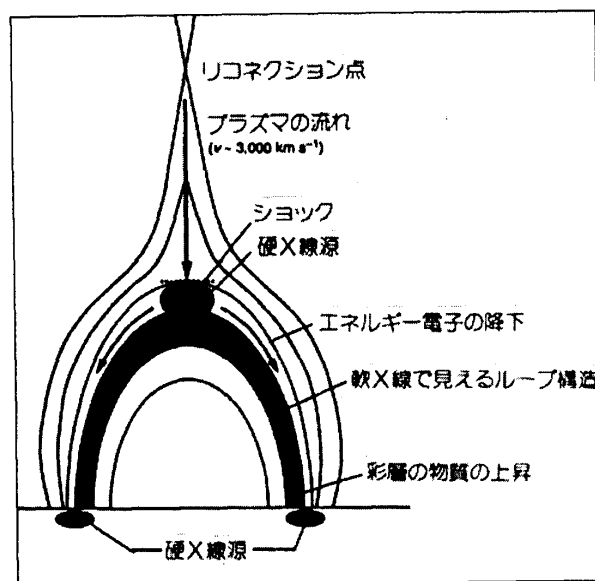


図4-15 太陽表面でのリコネクションのモデル

ら、リコネクション領域そのものはプラズマ密度が希薄で軟X線強度が弱すぎるので、これまでのところ観測できていません。) この図は地球磁気圏尾のリコネクションとそれに伴うオーロラ現象のモデルにそっくりであることが見て取れるでしょう。

地球近傍の衛星観測の持ち味はリコネクション領域の直接探査ができることですが、プラズマ分布の撮像にはまだ成功しておらず、全体像を一度にみることはなかなか困難です。一方、「ようこう」による太陽フレアの観測ではプラズマと磁場構造の全体像を容易に得ることができますが、そこで起こっている物理過程は推測するしかありません。両者の観測結果を突き合わせるによりリコネクションの物理機構に関する理解が深まると考えられ、現在、密接な共同研究が開始されようとしているところです。

(寺沢敏夫)

ラジオ放送局「地球」(300.0 kHz) 開局中

地球がラジオ波(電波)を発信する惑星だとはっきりと分かったのは今から20年程前のことです。

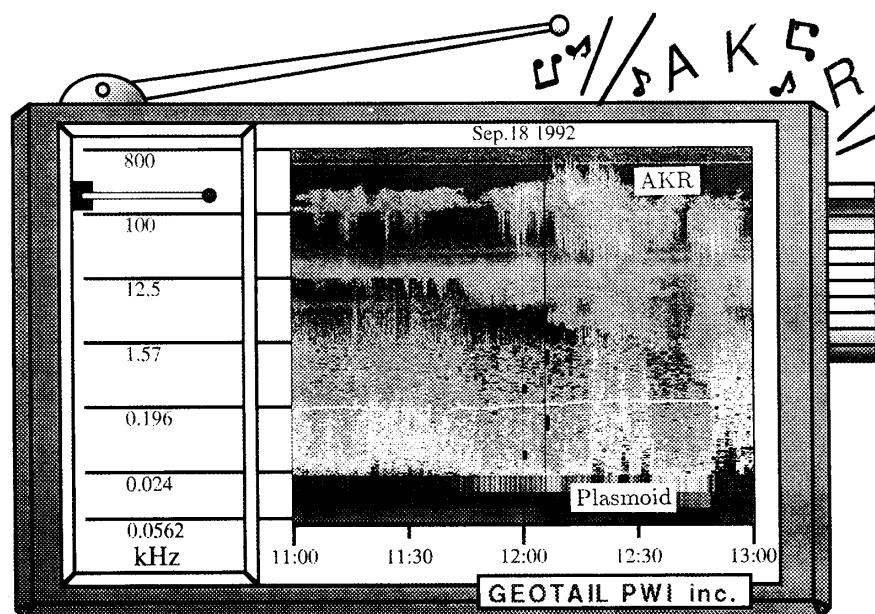


図4-16 GEOTAIL衛星で観測された電波

この電波はTKR (Tはテラ, 地球, Kはこの電波の波長, Rは放射という意味です) と命名されました。つまり地球は自ら電波を発信する「電波星」であり、いかえれば「宇宙に浮かぶラジオ放送局」だったのです。この電波の発見後研究が進み、この電波がオーロラの発生と強い関係があることがわかってきました。今ではこの電波はAKR(AはオーロラのA)と呼ばれています。オーロラはご存じの通り南北極で見られる美しい発光現象です。オーロラに関する書物はたくさん出されていますから、ここでは立ち入りませんが、オーロラから出てくるAKR電波がオーロラの活動度のモニターとしてたいへん役立つのです。

オーロラを光らせるのは磁気圏の尾部から大気に降り込む高速の電子ビームですが、この電子ビームが発信する電波がAKRです。磁気圏の尾部はAKR電波の伝播にとってダクトのような役割をはたすので、AKR電波は発生領域から遠く離れたGEOTAIL衛星でもはっきりと受信されます。実際にGEOTAIL衛星で受信された例を図に示します。

横軸は時間です。縦軸は周波数で、ちょうどラジオのチューニングに当たります。約300kHz(図4-16の矢印)に合わせるとこの電波が入ってくるわけです。

オーロラ電波AKRの情報の一つに「磁気圏嵐警報」があります。例えば、近い将来に計画されている「宇宙ステーション(プラットフォーム)」を想像してみましょう。(宇宙に人が住む、という計画は現実に一步一步進んでいます。)この様な宇宙建造物の大敵の一つと

して「磁気圏嵐」があります。磁気圏嵐は予知する事が困難な災害という点では、地上で例えば「地震」の様なもので、突如として発生し、住居に電磁的な被害を及ぼします。宇宙に住む人々はおそらく一刻も早く嵐の来る情報を知りたいと願うでしょう。実は、AKRの発信はこの磁気圏嵐の発生と大変良い相関を持っています。もう一度図4-16を見て下さい。この図で低い周波数帯の矢印で示したところに別の波動が見えます。これは他稿で詳しく説明されているプラズモイドです。プラズモイドと磁気圏嵐は深い関係があることが分かっています。プラズモイドの発生（この場合、GEOTAIL衛星による観測）の前にAKRが強くなるのがみられるでしょう。この様にしてAKRを用いることにより、磁気圏嵐や高エネルギープラズモイドの発生をある程度予測する事が可能だと考えられています。研究が進めばその予測はさらに高精度になるでしょう。この「磁気圏嵐予報」は例えば月面基地などでも有効に活用されるでしょう。

(村田健史, 松本紘)

GEOTAILの捕まえた宇宙パルス信号

GEOTAIL衛星には、波の受信機が搭載されていて、宇宙空間のプラズマの小波やざわめきを聞くことができます。この受信機が面白い波を捕まえました。まるで心電図のパルス波形のような「宇宙パルス」が見つかったのです(図4-17の右側)。「すわっ!何だこれは?」と筆者の一人(HK)が若い大学院生と興味津々で調査を続けた訳です。「宇宙人の信号?」等と冗談口をたたきながらも追求してゆくと大変面白いことが分かってきたのです。

普通のスペクトル受信機で磁気圏の尻尾領域を測った衛星は過去にもありました。勿論、GEOTAIL衛星にもスペクトル受信機が積まれています。スペクトル受信機というのは、周波数毎の波の強さを計測します。時々刻々と変わる波のスペクトル強度を濃淡で表し、縦軸に周波数、横軸に時間の座標系にプロットすると、ダイナミック・スペクトルが得られます(図4-17の左側)。図4-17の波形は1993年1月16日16時06分頃のものですが、スペクトルでは、15時55分-16時30分にかけて最も低い周波数から2KHzまでにわたって非常に強い波が見られます。これらの波はこのスペクトルの特徴から広帯域静電波(BEN)と呼ばれてい

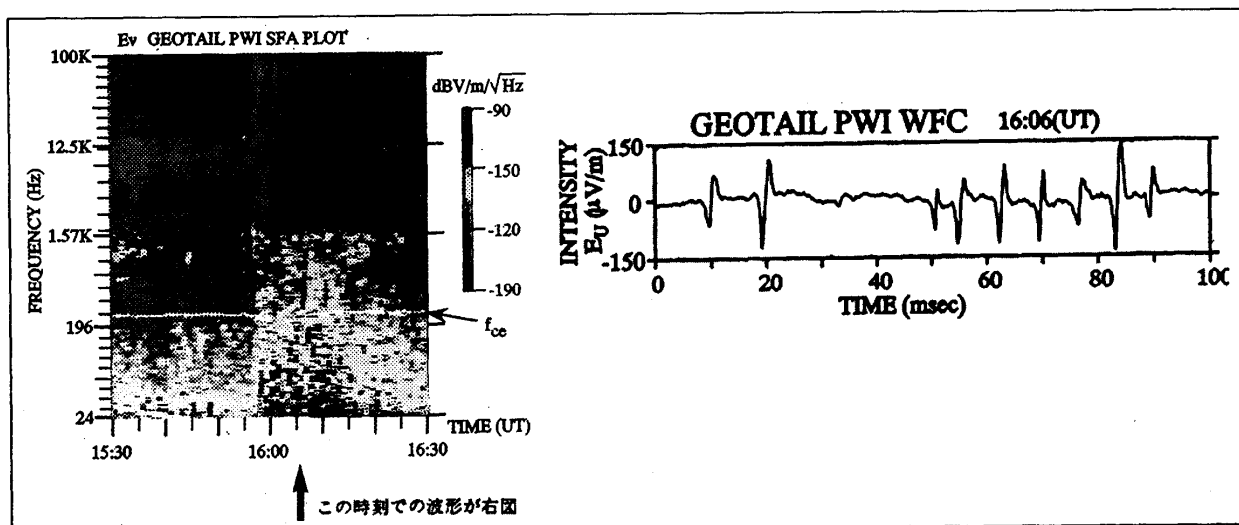
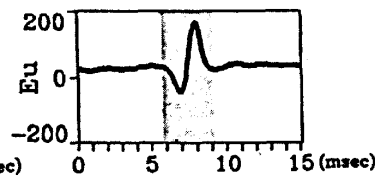
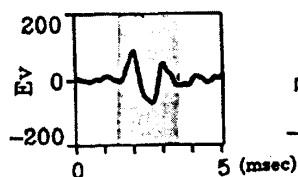
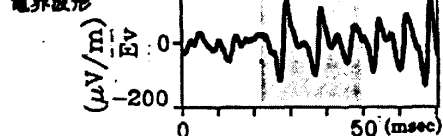


図4-17 GEOTAILで観測されたパルス

GEOTAIL 波動観測

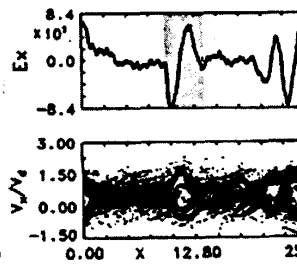
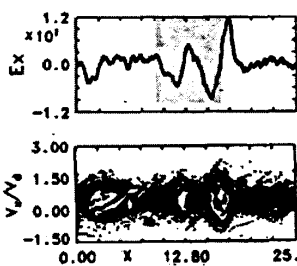
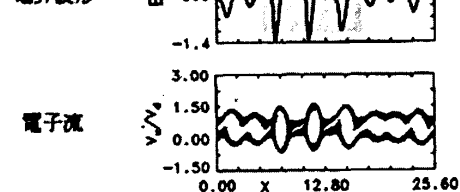
PWI WFC

電界波形



電子ビーム非線形発展の計算機実験

電界波形



電子流

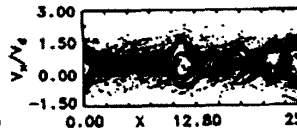
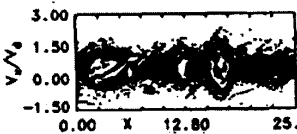
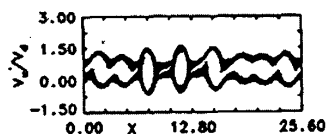


図4-18 GEOTAILで観測されたパルスと計算機実験の比較

ました。静電波というのは普通の電波と異なり、磁界成分が全くなく、電界だけからなっている波です。このBENは尾部プラズマの中央平面に横たわるプラズマシートと呼ばれる領域の境界層（プラズマシート境界層：PSBL）で、しばしば見られます。BENの成因について、これまで様々な理論が提唱されてきましたが、もうひとつ決定的な観測事実もなく、謎とされていたのです。

ところが、GEOTAIL衛星の波動受信機はスペクトル受信機以外に波の形を捕まえるWFC(Wave Form Capture)受信機も搭載されています。このWFCがBENの正体はパルス列であることを発見するのに大活躍したわけです。このパルス列の特性は、非線形プラズマ物理学にとって、大変面白いということが、GEOTAIL観測と共同歩調をとって行われた計算機実験（シミュレーション）で明らかにされました。図4-18は、GEOTAIL衛星で観測された3種類のBENの波形を計算機実験の結果と比べたものです。BENの実態は宇宙空間を走っている電子ビームとプラズマとが相互作用し、孤立した電氣的なポテンシャルの穴を作ることが示されました。平たく言うとBENはプラズマという川に浮かぶ電子の泡みたいなものとい

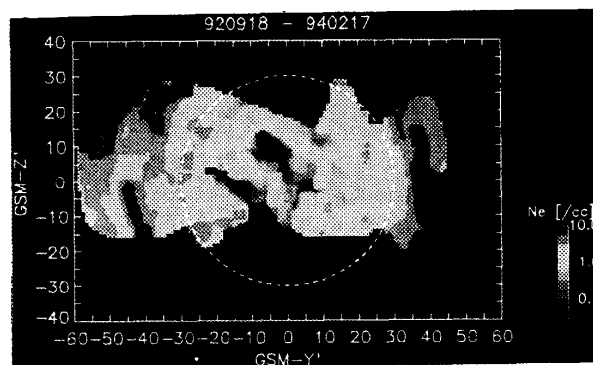


図4-19 プラズマ波動からみた地球磁気圏の境目の様子。これは太陽方向から地球の磁気圏をながめた断面図を表しています。これはプラズマ波動から求めた電子密度の分布を示したのですが、約30Reの円を境にその分布が大きく変化していることがわかります。これが、地球磁気圏の境目なのです。

うわけです。

GEOTAIL衛星の聴き耳は宇宙のパルス列以外にも沢山の面白い「波」を見つけています。「樹を見て森を見ず」という諺がありますが、「プロが見れば樹を見ても森の様子が分かる」ということでもありますね。今、プラズマ波動班では、見た「波」という樹を集めて、磁気圏の尾部領域という森の全体像を得ようという試みもなされており、成功を収めつつあります（図4-19）。今後、増々楽しいデータをGEOTAIL衛星は送り続けてくれるでしょう。

（松本紘，小嶋浩嗣）