

宇宙科学研究所

1995.1 No. 166

特集：オーロラの源をさぐる  
— GEOTAILが見た  
地球のしっぽ —

## '95年頭の挨拶

所長 秋葉 録二郎

明けましておめでとう御座います。みなさま、お健やかに新年をお迎えのことと存じます。昨年は宇宙科学研究所としては衛星の打ち上げがなく、衛星データの解析やM-Vロケットの開発など将来へ向けての地道な努力に終始した時期でありましたが、宇宙についての話題としてはH-IIの打ち上げ成功や向井千秋さんの宇宙飛行など盛り沢山でありました。自然現象ではありましたが、シューメイカ・レビー彗星の木星への衝突は一般市民の小天体への関心を高める機会ともなりました。

また、宇宙科学研究所、ならびにわが国宇宙開発の将来にとって大きな意味を持つ長期ビジョン懇談会の報告が7月に取り纏められました。この長期ビジョンは従来の発展との連続性を前提として描かれました。それによれば、30年後には月面基地の建設、それを利用した月のあるいは月からの科学観測が可能となるであろうとの期待の下に、

宇宙科学研究所と宇宙開発事業団とのより密接な協力関係が要望されております。

さて、本年は1、2月において長年の懸案であった2つの回収型無重力実験衛星EXPRESS, SFUがいよいよ打ち上げとなります。前者は内之浦から最後のM-3S II型による打ち上げ、また後者はH-IIでの打ち上げと言う意味でも特記されます。また、M-V開発と1号機で打ち上げを予定しているMUSES-Bは最終年度の仕上げの段階を迎えます。以後今世紀中の大型計画として月・火星の探査機、次期X線天文衛星などでは従来にも増した複雑な国際関係の下での取組が必要となってまいります。このような時期、研究所職員一同一層の研鑽努力を期しておりますが、一方、宇宙科学研究所の一連の強化策が早期に実現することを心から念願しております。

明けましておめでとうございます。昨年実施しましたアンケートでは多くの方からご意見を頂き、皆様の期待を強く感じております。紙面の一層の充実に努める所存でありますので宜敷くお願い致します。

さて、今回はGEOTAIL衛星の特集をお送り致します。満を持し過ぎていささか大部となりましたが、新しい発見に満ちた力作をお楽しみ下さい。

### 1. 序 — 磁気圏の尻尾で何が起きているのか? —

#### ◆太陽から吹いてくる風

地球が現在の様に暖かく、そして多くの命に満ち溢れているのは、豊かなそして安定した太陽からの光の為です。可視光で見る太陽の光球は、この様にとっても安定していますが、X線で見ると様相が一変しています。X線は太陽の外層大気=コロナから放射されます。宇宙科学研究所が打ち上げた「ようこう」衛星がX線で撮影した太陽像には、コロナで発生する大小さまざまな爆発現象がいくつも捉えられています。ピカピカ輝く比較的寿命の短い無数の小爆発現象を観測する一方、大きな規模で明るく輝く活動域コロナの連続的膨張や、コロナの中に浮かんでいるプロミネンス（紅炎）の爆発的上昇も多く捉えました。巨大なガスの塊りが、この爆発現象に伴って周囲の空間に放出される姿も見い出されました。流れ出すスピードは、400km/秒以上もあり時には1000km/秒に達



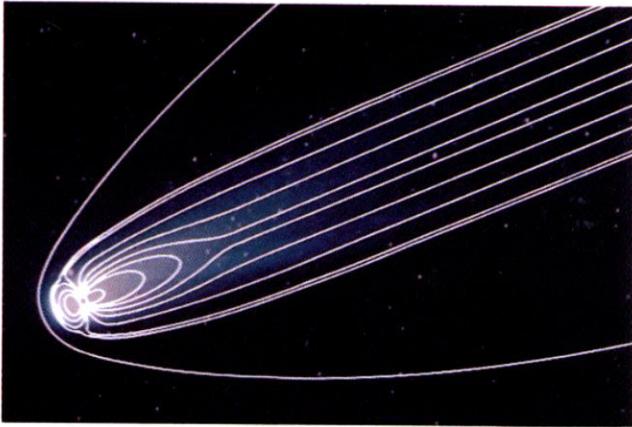
「ようこう」軟X線望遠鏡が見た太陽

する事もあります。

太陽から大気の一部が周囲の宇宙空間に向けて流れ出しているであろうと、予言をした人がいます。パーカーという人で、ロケットや人工衛星が飛ぶ以前の時代です。太陽の外層大気（コロナ）は、太陽から放射されているX線や紫外線により電離し、プラズマと呼ばれる状態になっています。パーカーはコロナの大気は太陽の重力で押えておくことが出来ないと考えたのです。宇宙時代になった1961年、太陽から吹いて来るこのプラズマの流れ（太陽風）を、人工衛星が初めて測る事に成功しました。パーカーは静かな太陽風を考えていましたが、スピードは激しく変化し、密度も大きく変化していました。又、高速の太陽風が太陽表面に見られる特殊な領域から流れ出している事も分かり、激しく吹きすさぶ太陽風の真の姿が捉えられました。

#### ◆科学衛星が発見した地球のしっぽ

地球は、ご存知のように大きな磁石になっていますが、凄まじい太陽風が地球に押し寄せて来るとどのような事が起こるのでしょうか？ヒントになるのは、彗星のしっぽです。彗星は、太陽に近づくと本体から多量のガスを出すようになります。太陽の光が強くなって、それまで冷え固まっていた氷などが蒸発を始めるためです。飛び出したガスは太陽紫外線によって電離し、電気を帯びた粒子すなわちプラズマになります。このプラズマが太陽風により下流に流されてしっぽを作ります。地球の場合は、磁場が太陽風とぶつかる事になり、電磁流体力学の理論に立って磁場の変形を考える事が出来ます。その結果、太陽風が地球にぶつか



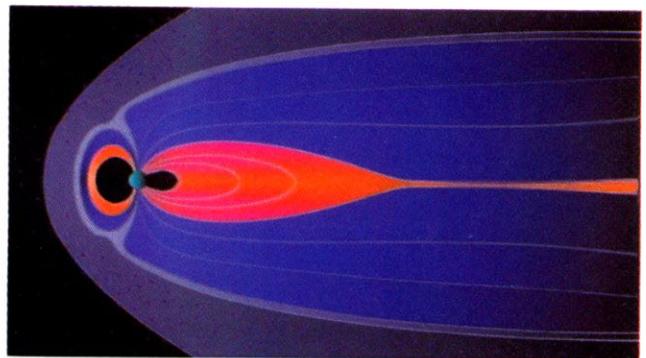
太陽風に吹き流される地球磁場  
 〈彗星の尾に重ねてある〉

る前面では磁場が押し縮められた形になると共に、地球の夜側では逆に引き伸ばされた構造になります。つまり、地球もしっぽを持つ事になります。1964年、人工衛星の観測からこの事は実証されました。アメリカのネス達のグループが、地球周辺の磁場の構造を明らかにしたのです。その後、他の衛星による観測結果も得られ、現在では、図にあるように長いしっぽを持った形になっている事が知られていて、「地球磁気圏」と呼ばれています。地球磁気圏のしっぽはとて長く、2000万kmのかなたまで伸びているという報告もあります。又、直径は20万km程度あります。地球磁気圏がさえぎる太陽風のエネルギーはとて大きく、日本の電力消費量に匹敵します。この様な大きなエネルギーの一部は、地球磁気圏の中に侵入し、壮大な規模でのエネルギーの蓄積、解放を引き起こす事になるのです。

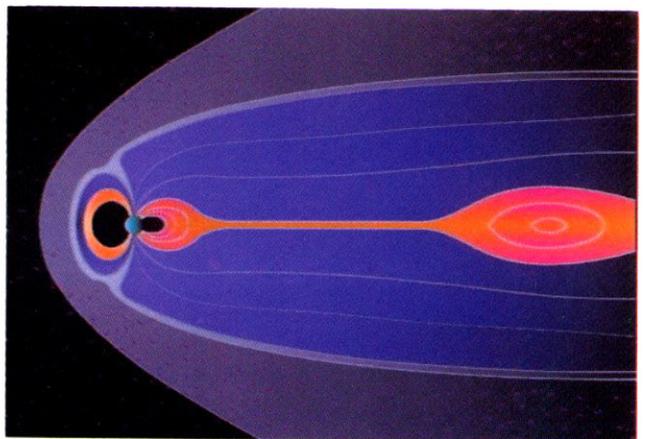
#### ◆磁気圏のしっぽは、巨大なポンプ

地球磁気圏のしっぽは、太陽風が地球の磁力線を無理やりに引っ張って作ったものですから、そこにはエネルギーが蓄えられます。ゴムひもが長く引き伸ばされている様子と良く似ていますが、実際は磁場の変形（ひずみ）と言う形でエネルギーは蓄えられています。再び、磁気圏のしっぽの図を見て戴くと、北半球の高緯度に根っこを持つ磁力線が、磁気圏尾部北側の領域を夜側に伸びていっています。これとは対称的に、南半球の高緯度に根を持つ磁力線は、磁気圏尾部南側の領域を伸びていっています。これらの磁力線は互いに反

対の方向を向いているので、両者が接する赤道面では、互いに打ち消し合って、磁場のほとんど無い磁気的に中性な面が出来る事になります。この磁気中性面は実際に観測されていて、その厚さは数百km程度、磁場の強さは1ナノテスラ（地表面での磁場の強さの数万分の1）以下になっています。磁気圏尾部がこの様な形をとっていると言う事は、磁気中性面を西向きに電流が流れている事を示します。電流は広い領域に亘って流れており、そのエネルギーはとて大きなものです。冒頭に磁場のエネルギーと言いましたが、これは赤道面に電流が流れていると言う事を別の表現で言ったものです。一方、この磁気中性面をはさんで高温のプラズマが溜っている事が、人工衛星の観測から発見されました。プラズマは3次的には磁気圏尾部赤道面に広くシート状に分布している事から、この領域はプラズマシートと呼ばれています。プラズマの持つエネルギーはとて大きなものです。太陽風のエネルギーを吸い込んでプラズマシートのプラズマは、熱くなっています。



地球磁気圏の断面図  
 〈中央の赤い部分がプラズマシート〉

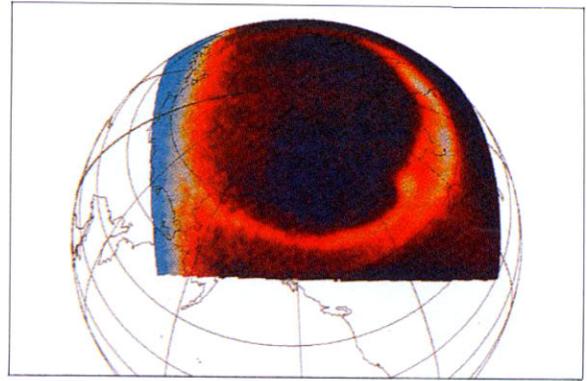


リコネクションによるプラズモイドの発生

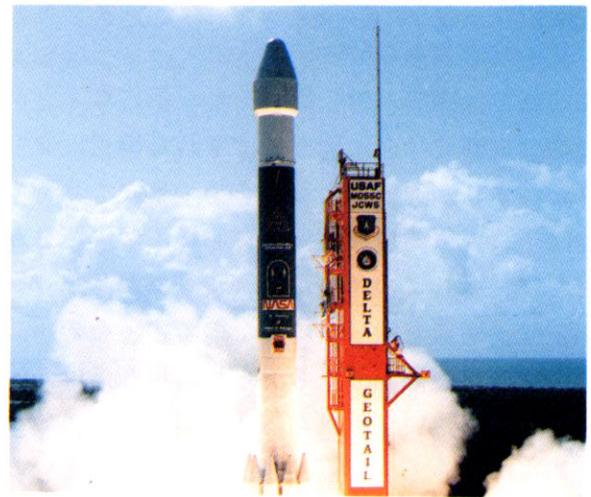
磁気圏のしっぽは、巨大なポンプのようです。蓄えられたエネルギーは、間隔をおいて解放されます。まさに、ポンプのようにエネルギーを吸い込んだり、吐き出したりしています。放出されるエネルギーは $10^{22}$ エルグに達する事もある大変大きなエネルギーです。爆発が起こる場所は地球の夜側20万km程度の所で、月と地球のまん中あたりです。この時、プラズマシートは大きくくびれ、ちぎれるものと考えられています。そして、地球と反対の方向に大きなプラズマと磁力線の塊（プラズモイドと呼ばれています）が飛んでいきます。あとで詳しく述べますが、このエネルギーの解放は、磁気再結合（リコネクション）という物理過程により起こるものと考えられています。

#### ◆GEOTAIL 衛星の目的

GEOTAIL（ジオテイル）衛星が、磁気圏尾部で明らかにしようとしている事柄は、おおよそ以下の4つに大別出来ます。その一つは、太陽風から尾部へのエネルギーと粒子の流入のメカニズムについてです。太陽風のプラズマの一部は地球の磁場の壁を貫いて内部に入り込み、プラズマシートに貯められます。第2の事柄は、尾部の中で起こっている粒子の加熱メカニズムについてです。プラズマシートのイオンは太陽風よりも高い温度を持っていますがこれは何故なのでしょう？第3の事柄は、プラズマシートで起こるエネルギーの解放についてです。一体何がきっかけになってエネルギーの解放が起こるのか？これは、リコネクションがどのような時に起きるのか？という事でもあります。第4の事柄は、「あけぼの」高度で見られる現象と、尾部内のプロセスとの関係です。磁気圏のしっぽで解放されたエネルギーのほとんどは、そのまま地球と反対の方向に流れ去っていきますが、残りの部分（数分の一）は地球めがけて押し寄せて来ます。高速の電子を生んで、それが極域の大気に飛び込んでオーロラを光らせたり、さらにエネルギーを得て、放射線帯粒子になるものも出てきます。オーロラの発生の謎について「あけぼの」は今も観測を続けていますが、そのエネルギーの源になっている磁気圏のしっぽでの観測



「あけぼの」が見たオーロラ



GEOTAIL 衛星の打ち上げ

との比較が必要です。

GEOTAIL衛星は以上の目的を持って、1992年7月24日に打ち上げられました。そして、今も磁気圏のしっぽで、そこに繰り広げられている壮大なエネルギー現象を、最新の観測装置で調査しています。この特集号ではGEOTAIL衛星によってこれまで明らかにされて来た事柄を皆様にご理解戴くよう、幾つかのテーマに分けて執筆しました。それぞれは、独立している事柄ではなく、磁気圏のしっぽで起こっている壮大なエネルギー現象をさまざまな側面から見ているものです。と同時に、ますます謎が深まっていった事柄もあります。研究は、これから諸外国がGEOTAIL衛星と相呼応して打ち上げる衛星群との共同観測の場へと進んでいきます。広大な地球磁気圏の鍵になる領域を複数の衛星で同時に観測しようとするプロジェクトが進行しています。ISTP計画と呼ばれるこの国際共同研究計画についても述べる事に致します。

（西田篤弘，小原隆博）

## 2. GEOTAIL衛星の軌道

### ◆磁尾停留と月

GEOTAILはその名の通り地球磁気圏の尻尾を探る衛星で、月までの距離の4倍近い約140万kmまで行って、尻尾の先の方をなるべく長い間観測しなければなりません。この要求を軌道設計の観点から見ると、まず打ち上げ能力が充分あると仮定して、衛星軌道の遠地点がこのくらい遠方であれば、衛星の速度は極めて遅く長期間の観測という要求は自動的に達成可能となります。問題は「磁尾停留」(じおている)即ち、軌道の遠地点を常に磁気圏の尻尾の中に停留させることが難しいことです。尻尾は常に太陽と地球を結ぶ線の延長上に伸びているのに対し、地球周回衛星軌道は地球を中心とした慣性空間に固定されていますから、図

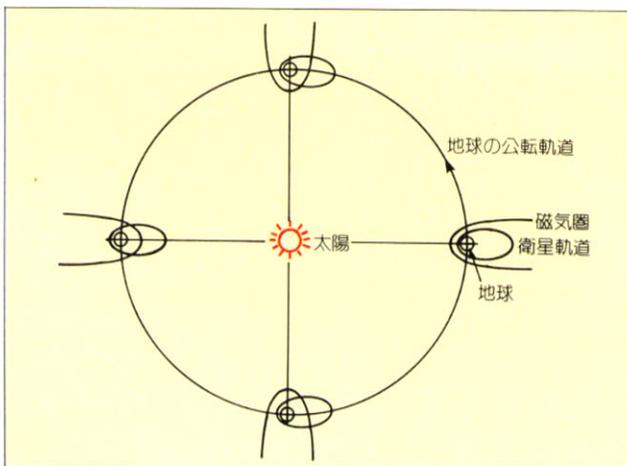


図1 衛星軌道と磁気圏尾部

1に示したように、最初に遠地点を尻尾に入れるようにしても、地球の公転と共にその方向はどんどんずれてしまいます。この自然の摂理に衛星搭載の推進系を以て逆らうには莫大な燃料が必要であり全く不可能と言っても過言ではありません。

ところが、我々はツキに見放されてはいませんでした。天の配剤と言うべきか、地球には月があり、この月の重力を利用して軌道変更する「二重月スウィングバイ」の技術を使えば、打ち上げ用燃料を節約して衛星を遠方に送り込めるとともに、図2に示したように衛星軌道軸の方向を地球の公転と同期して変化させ、遠地点を常に地球の夜側に停留させることが出来ます。GEOTAILでは、約2年間の磁尾停留のために計14回もの月スウィングバイが必要とされましたが、例えば1回の月スウィングバイでの代表的速度変化量約1 km/秒(月の公転速度)を重量1トンの衛星に搭載した

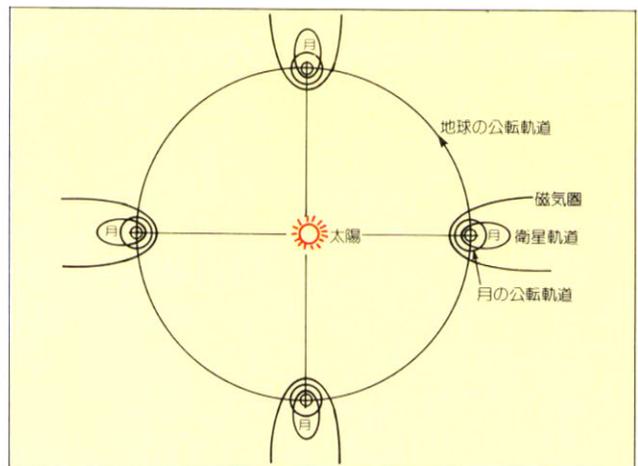


図2 月スウィングバイを利用して衛星軌道を常に磁気圏の中に入れる

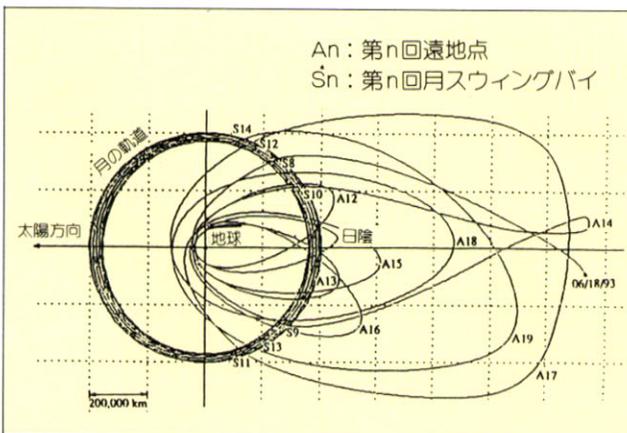


図3 GEOTAIL遠尾部フェーズでの軌道(太陽と地球を結ぶ線を固定した座標系で表示。黄道面に投影)

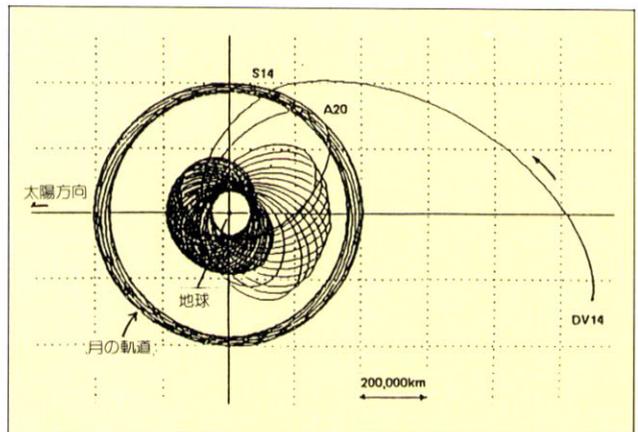


図4 GEOTAIL近尾部フェーズでの軌道(太陽と地球を結ぶ線を固定した座標系で表示。黄道面に投影)

比推力200秒の推進系で行おうとすると、それだけで約400kgの燃料が必要となることから、最近はやりの「ムーン・パワー」無しではこのミッションが成り立たないことが判ります。

GEOTAIL衛星は、地球に比較的近い磁気圏尾部を観測する目的で宇宙研が計画したOPEN-J衛星と、尾部深奥部探査用にNASAが計画したGTL衛星を一つの衛星に統合、日米協力で進めることとなったもので、その軌道も打ち上げから約2年間は遠地点を約140万kmとして尻尾の先を探る期間（遠尾部フェーズ）と、その後遠地点を約20万kmに下げて磁気リコネクションの起きる現場や地球に比較的近い尻尾の部分に直接観測する期間（近尾部フェーズ）に分けて計画されました。

図3は1993年6月半ば以降の遠尾部フェーズでの実際のGEOTAILの軌道を、二重月スウィングバイによって遠地点が地球の夜側にあることを分かり易く示すため、太陽と地球を結ぶ線を固定した座標系で表したものです。この軌道は打ち上げ

前に計画されたものとは若干違っていますが、それは打ち上げ後、観測機器の一つであるLEPに生じたラッチアップを解除するため衛星を意識的に月の陰に入れ、一旦衛星の全電源をオフにするという離れ業を演じた結果です。現在GEOTAILは既に2年間の遠尾部フェーズを終え、近尾部フェーズに移行しています。余談ながら、GEOTAILでの14回、「ひてん」での11回の月スウィングバイに「さきがけ」による2回のスウィングバイを加え、日本はスウィングバイ実施回数ではダントツで世界一となっています。

図4は近尾部フェーズに於ける軌道ですが、これも打ち上げ後の観測結果から当初の20万km付近のみならず地球から30万km付近の尻尾の振る舞いも興味深いことが判ったため、遠尾部からの軌道遷移を2回に分け、1995年2月までは遠地点を約30万kmとし、その後さらに20万kmまで降ろすことになっています。

（上杉邦憲）

## 9月1日の日陰オペレーション

1993年9月1日深夜、GEOTAIL衛星の打ち上げ後はじめての日陰（但し、近地球周回衛星と違って月の陰）の最中にバッテリーを衛星電源システムから切り放すというウルトラCのオペレーションが行われました。いうまでもなく、そのとき太陽光エネルギーはありませんから衛星全体を一度仮死状態にしたのです。初期観測直後にラッチアップしてしまったプラズマ観測装置（LEP）を回復させるにはこれが唯一の方法であるというのが検討ワーキング・グループの結論でした。そのために、打ち上げ前の軌道計画には無かった日陰を臼田局からの可視時間のちょうど真ん中に生じさせるように2ヵ月前の6月中旬の軌道変更によって特別に作ったのでした。

当日、相模原衛星管制センター、臼田、内之浦にはGEOTAIL衛星や地上系システムに熟知した宇宙研やメーカーのベテランが駆けつけ、万全の体制が敷かれました。できる限りの検討を重ねてきたとはいえ、やはり未経験のオペレーションです。一種異様な雰囲気があります。22時34分（日本時間）少しずつ太陽電池の出力が落ち始め

ました（半影の開始）。搭載の観測装置、共通機器の大半をコマンドで正常にオフ。本影終了3分前の23時25分、ついにバッテリー切り離しのコマンドを送信、電波が途絶える。約10分間、なんと長かったことか。衛星が半影に出てきて太陽電池出力の上昇に伴って徐々に電波強度が復帰、更に数分おいて安定したところでコマンドを送信、PCMテレメーターの復調器がロック。衛星の状態をチェック、目的としていたLEPのラッチアップ解消に成功したことが確認されました。

翌日から本格的に搭載機器の再立ち上げ作業が始まり、すべて消えてしまったプログラムの再ロードに約2週間を要しましたが、その最後として9月14日、LEPの観測が再開されました。ラッキーなことに、この時のLEPの観測データは大変ユニークで面白く関係者一同興奮したものでした。その後も順調に観測を続けており、磁気圏尾部の構造とダイナミクスに関して多くの新しい知見をもたらしつつあります。

最後に、この特殊オペレーションのためにご協力いただいた多くの方々にあらためて感謝します。  
（向井利典）

### 3. 地球の尻尾を測る — ミッション機器の紹介 —

GEOTAIL衛星が観測ターゲットとしている磁気圏や太陽風は「プラズマ」の世界です。

地球周辺のプラズマは高温のガスで、それを構成している個々の粒子は電気を帯びた電子とイオンから成っています。磁気圏のプラズマシートの温度は数千万度にもなっていますが、粒子の数密度は1cm<sup>3</sup>当たり1個あるかないかの極めて希薄なものです。このような希薄な高温ガスの中では粒子どうしの衝突の確率は極めて低く、熱平衡に達するのは容易ではありません。なかには、平均値から並外れて高いエネルギーを持つ粒子が作られています。磁気圏で何が起きているかを調べるためにはこれら電子とイオンがどのようにしてこのような高エネルギーにまで加速されるのかを調べることになります。個々の粒子は電気を帯びていますので、その加速のメカニズムには電場や磁場の構造と時間的な変化が重要な鍵をにぎっています。場の時間的な変化は波動となって周辺に伝搬しますので、その伝搬経路を探ることによってある種のリモートセンシングにも使えます。すなわち、プラズマ粒子（電子およびイオン）、高エネルギー粒子、電場、磁場、波動の観測は宇宙プラズマを調べるための五つ道具です。GEOTAIL衛星にはプラズマと高エネルギー粒子の観測装置について日米双方のものがそれぞれ1セットずつ搭載されましたので、実際には七つ道具が搭載されました（表1参照）。

プラズマ粒子、高エネルギー粒子、電場、磁場、波動の観測はロケット・衛星を用いた宇宙観測が

表1

観測装置	主任研究者
磁場	國分 征（名大STE研）
電場	鶴田 浩一郎（宇宙研）
プラズマ	向井 利典（宇宙研）
プラズマ	L.A.Frank (Iowa Univ)
高エネルギー粒子	道家 忠義（早稲田大）
高エネルギー粒子	D.Williams (A.P.L.)
波動	松本 紘（京都大）

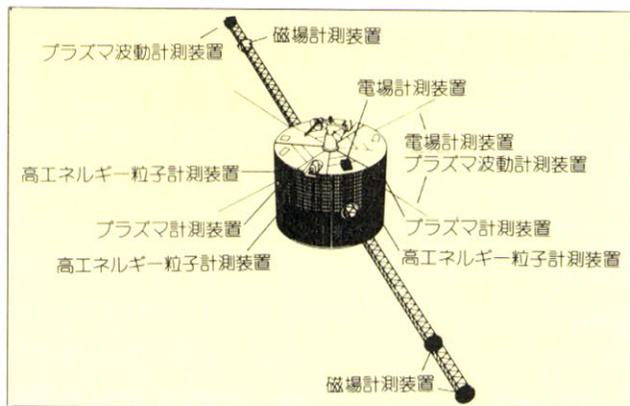
始まって以来、特に米国では長い歴史があります。この分野は日本の宇宙観測分野でも一番経験豊富なグループであり、波動観測は日本のお家芸であります。その他の観測は米国に比べると15~20年遅れのスタートでした。しかし、日本の観測技術もこれまでのEXOSシリーズでの経験を通して大きく発展し、いまや世界のトップレベルに肩を並べるようになってきました。さらに、GEOTAILでは最近の技術的な発展を取り入れて、それぞれの観測装置でさまざまなアイデアがちりばめられています。

衛星本体の形状は直径2.2m、高さ1.6mの円筒状で、円筒部の外面には太陽電池が貼り巡らされています。打ち上げ時の重さは約1トン、これまでに宇宙研が上げた衛星としては最大のものでした。打ち上げ時と断わったのは、姿勢軌道制御用の燃料約360kgを搭載していたからで、これまでにその3/5を消費しています。衛星外表面のいくつかの切り欠き穴からは姿勢センサーや粒子観測センサーが外に顔を出したり、長さ6mの磁力計センサー用伸展マスト2本や電場・波動観測用の50mのワイヤーアンテナ4本が伸び出すようになっています。これらの伸展物が軌道上できちんと伸展するかどうかはもちろん大きな関心事でした。実際、最初の伸展オペレーションの途中でワイヤーアンテナの内の1本が途中で引っかかって伸びなくなったのです。しかし、これは想定していたことの一つで、いったん戻して再伸展することで事無きを得ることができました。一方、磁力計用マストの伸展の方はもっと大変で、衛星のスピン周期制御をしながらの大騒ぎの末ようやく完全伸展することができました。スムーズにいかなかった原因は真空摩擦によるもので、「ふよう」や米国の木星探査機「ガリレオ」にも前例があって十分にその対策を検討していたはずですが、将来に対する教訓を得るといふ冷や汗ですんだのは幸運というほかありませんでした。

もう一つ特筆すべきことは電磁クリーニング対策です。磁力計センサーをマストの先端につけて衛星本体から離すのは衛星からの人工的な磁場擾乱の影響を軽減するためですが、一方、衛星本体や搭載するサブシステムが発生する電磁ノイズも

できるだけ小さくするために規制値を設定して様々な対策が練られました。例をあげると、太陽電池が発生する電圧が外に漏れないように導電性コーティング付きカバーガラスを採用するとか、磁場発生の原因となる電流ループ面積を少なくするために電流のリターンをホット側に沿わせるとか、また、個々のサブシステム毎に規制値の範囲に収まっているかどうか日夜に互って入念な対策と試験が繰り返されました。書けば簡単なことのように思えますが、実際は、波動観測や磁場観測の担当者と関係メーカーの努力は大変なものでした。その結果、GEOTAIL衛星は電磁的にも世界で最もクリーンな衛星に仕上がったのです。

このようにして、国際的ワークショップにおいてGEOTAILの観測結果を米国の某有名教授が溜息をつきながら見ていたとかいう噂が飛ぶぐらい、GEOTAILはすばらしい衛星になりました。これもひとえに、長年に亙る諸先生方のご指導、ベス



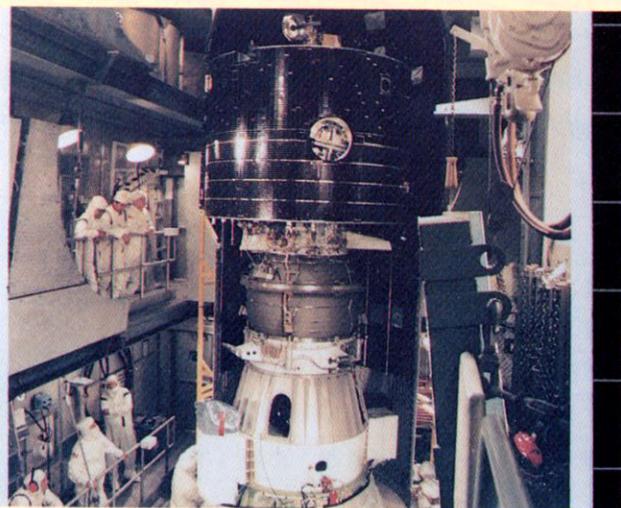
トを尽くして下さったメーカーの方々、大学院生他多くの関係者の努力のお陰だと思います。また、この分野では初めて行われた本格的な日米共同プロジェクトを通じて米国の同業者から有形無形に多くのことを教えられました。やはり、米国の層の奥は深いと感じたのは筆者だけではないでしょう。これがPLANET-Bをはじめ将来の衛星計画に生かされ、また一段とすばらしい観測ができることを信じています。  
(向井利典)

## ケネディ宇宙センターでの作業

GEOTAILのフライトオペレーションが1992年5月からケネディ宇宙センターで行われました。日本からのLSO (Launch Site Operation) 班は、5月7日に現地入りし、翌8日の開梱作業から始まり、直ちに衛星の最終チェック、電気系地上支援装置の組立と検査などが実施されました。6月5日には観測グループ (PI) が到着、輸送後初めての詳細動作チェックも正常に終り、テレメトリ・データのDSN局との適合試験と、順調に作業が進められました。6月19日からは、ESA-60 (Explosive Site Area) へ移動、ヒドラジンの注入、スピンバランス、軌道投入モータPAM-Dへの結合に入りました。Thunder storm (激しい雷と雨) で作業日程の遅れに影響をしないように、早朝に作業がシフトされたハードスケジュールを何とかこなし、7月14日の未明、GEOTAILはロケット発射塔LC-17へ移動、デルタIIロケットの3段目へ無事に結合されました。

その後、ロケット側との打ち上げ時間読み合わせのリハーサルも良好に終わり、24日、10時26分 (現地時間) リフト・オフ。LSO班は約1時間半

後、キャンペラ局で受信したテレメトリ・データを復調。衛星に支障のないことが確認され、3カ月に渡る射場オペレーションを無事に終了しました。今回の射場作業は言葉の違いによるコミュニケーションの誤解など環境の異った場所で進める難しさもありましたが、支援してくれた現地スタッフとLSO班の努力によって、GEOTAILプロジェクトを容易に進める協力体制に向けられた結果の成功でありました。  
(横山幸嗣)



デルタIIロケットへ組付けられたGEOTAIL衛星

## 4. 磁気リコネクション とは何だろう

### ◆磁場とプラズマの運動

磁気圏尾部で起きる磁気リコネクション（磁気再結合）のお話をする前に、まず高温低密度のプラズマ中での磁場とプラズマの動きから説明しようと思います。

磁場の方向を繋いでできる仮想的な磁力線はゴム管にたとえてイメージすることができます。地球磁場の磁力線は太陽風プラズマによって引き伸ばされていますが、磁力線が引き伸ばされていることは磁場の張力が強くなり磁場のエネルギーが磁気圏尾部にため込まれていることに相当しています。小学校の理科実験でエナメル線に電池で電流を流して電磁石を作ったことを思い出してみてください。太陽風が電池の役割を果たし磁気圏尾部に磁場を発生させてエネルギーを蓄えています。そして、そこでは磁場とプラズマが相互作用して様々な物理現象を生み出します。

磁場とプラズマの運動をゴム管にたとえてお話ししましたが、今度はプラズマ物理の言葉で言い換えてみます。まず、荷電粒子は磁場の回りを運動しています。その運動方向は荷電粒子の回転運動によってできる電流が元の磁場を弱める方向になるよう運動し、プラスの電荷をもったイオンとマイナスの電荷を持った電子は磁場の回りを逆方向に回転します（図1）。磁場の回りの運動は、エネルギーの高い粒子ほど速い速度で回転します。温度が高いプラズマは速い速度で、冷たいプラズマはゆっくりした速度で回転します。そして、磁力線方向には粒子の持つ熱速度に応じて行ったり来たり勝手気ままな複雑な運動をしています。しかし、プラズマは磁力線を横切って運動することは禁じられています。プラズマが磁場に直角方向に運動するときは磁力線も同時に運動すると考えます。これはプラズマ物理では「磁場とプラズマの凍結運動」と呼び大切な概念の一つです（図2）。太陽風によって磁力線が引き伸ばされたのも、磁場とプラズマの凍結運動の結果の現れです。

しかし、時々プラズマが暴れてこの凍結運動の掟を破ることがあり、磁力線を溶かしたり切ったりすることがあります。暴れん坊のプラズマが磁気圏尾部で引き伸ばされている磁力線を切断してしまうと、磁力線というゴム管が急激に縮み、磁気圏尾部に蓄えられていた磁場のエネルギーは一度に解放されてしまいます。そして、エネルギーを得たプラズマは地球に向かって飛んできて北極や南極で色艶やかに輝くオーロラ現象を導くことになります。

ところがこの暴れん坊のプラズマでも守らなければならない厳しい掟があります。それは、磁力線はどこまでいっても途切れることなく一本の繋がった線になっていなくてはいけないという決まりです。それはN極だけ又S極だけのモノポールと呼ばれる素粒子が存在しないからです。そして磁力線を切断するときは、切断後すぐに磁場の極性も合うように必ず別の磁力線に繋ぎ変えなくてはなりません。

### ◆磁気圏尾部での磁気リコネクション

暴れん坊のプラズマが、磁力線を溶かしたり、また磁力線の一部を溶かして別の磁力線と繋ぎ変えたりする性質は、ゴム管に火を近づけて溶かしたり、一部を溶かしたゴム管を即座に別のゴム管と繋げ直したりすることに対応させてもよいでしょう。確かに磁場が溶けるときは暴れん坊のプラズマは高温になっています。磁場が溶けることをプラズマ物理では「磁場の拡散」といいます。磁場の拡散領域では、ジュール加熱により磁場のエネルギーが熱エネルギーに変換されています。「磁気リコネクション」または「磁力線再結合」とは、磁力線を溶かして別の磁力線への繋ぎ替える過程のことです。図3に示してあるのが磁気リコネクション過程の模式図ですが、図3aの2本の異なった磁力線のゴム管チューブが、ある時一部で磁場の拡散が起きて繋ぎ換えを起こし図3bのようにトポロジーを変えます。図3aでの「赤」と「青」の異なった磁力線のチューブに詰まっていたプラズマは、磁気リコネクションによって混合されます。

図3cのように、もし2本の磁力線が同方向の磁

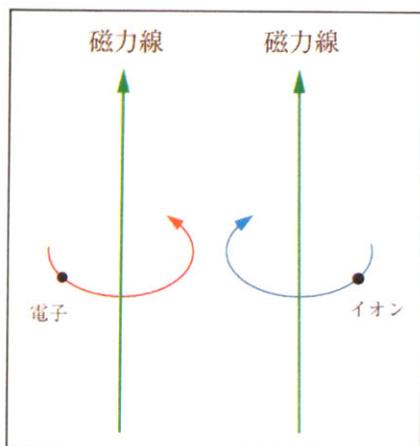


図1 磁場中でのプラズマの運動

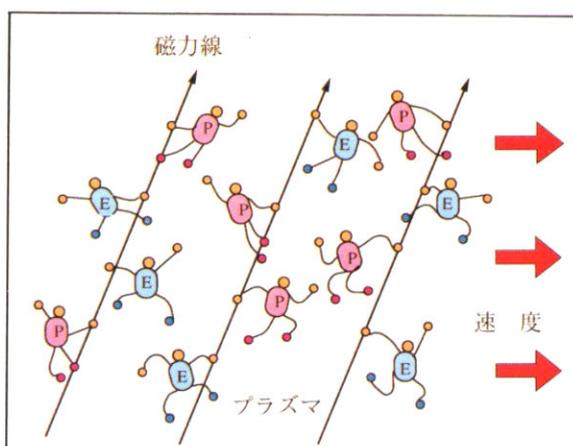


図2 磁場とプラズマの凍結運動

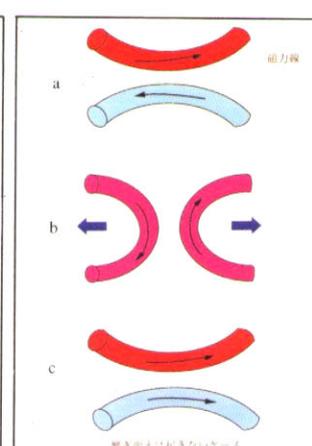


図3 磁気リコネクション過程

場の方向を持っていたときは、磁気リコネクションは起きません。この基本的概念は、1960年頃に Giovannelli教授やDungey教授が提唱したもので、宇宙プラズマ現象では非常に重要な役割を果たしています。例えば、「ようこう」でお馴染みの太陽コロナでのフレアに伴う現象も、磁気リコネクションと深く関わっていることが知られています。磁気リコネクションは、磁気圏尾部だけでなく、地球の昼間側の太陽風プラズマ領域と地球磁気圏領域の境界層でも重要になります。そこでは、地球磁気圏起源のプラズマと太陽風起源のプラズマの混合という過程が大切になります。

磁場の極性が反転する「磁気中性面」で磁気リコネクションが起きると、「U」字型に曲がった磁力線は丁度ゴム管が縮もうとするように、「磁場とプラズマの凍結運動」によりプラズマを引き連れて磁力線が縮む方向に運動し始めます。このときプラズマは加速されて速度を得るわけですが、磁気圏尾部ではその速度は秒速数百kmにも達します。このエネルギーの源は磁気圏尾部で引き伸ばされていた磁力線の張力であり、その張力は太陽風によって作られていたわけですから、磁気リコネクションのプラズマ加速のエネルギーは太陽風が源であると言えます。

さて、図3aから図3bにトポロジーが変化するとき、磁力線の形はちょうどアルファベットの「X」の形をしています。そして、その中心は磁場の拡散が起きて磁力線を繋ぎ変えが進行している場所で、「磁気リコネクションのX点」と呼びま

す。そこでは、ジュール加熱によりプラズマが加熱されているはずですが、もし「X点」が存在しないのなら磁気リコネクションは起きないのでから、磁気圏尾部に蓄えられた急激な磁場エネルギーの解放に始まり、その高エネルギー粒子の地球極域への振り込み、そしてオーロラ現象へと繋がる過程は存在しないことになります。「X点」は物理的にも非常に重要な領域にもかかわらず、これまでの衛星ではX点領域の詳しい観測はなくGEOTAIL衛星での成果が期待されます。

ところで磁気リコネクションが発達してくると、磁気中性面に向かって流れ込んでくるプラズマの速度が増してプラズマ中での音速を越えることがあります。すると超音速ジェット機の前面に形成される衝撃波と同じようにプラズマ中では「磁気音波の衝撃波」が発達して、そこでは激しいプラズマ加熱が起きます。図4に示したのは、磁気リコネクションが発達して衝撃波が出来た状態の模式図ですが、大きさはおよそ縦が地球半径の10倍程度、横が50倍程度で磁気圏尾部の一部を切り取

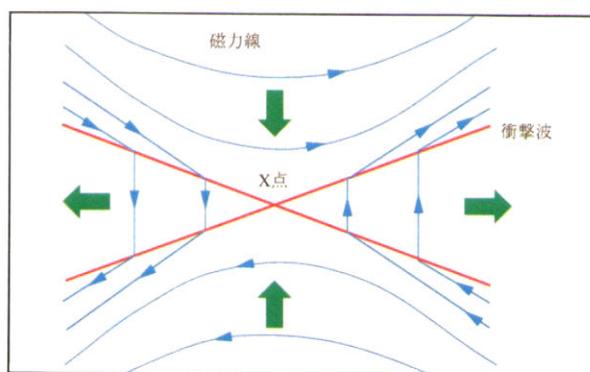


図4 磁気リコネクションと衝撃波

った図とお考え下さい。図中央にあるのが磁場の繋ぎ換えを起こしている磁場の拡散領域の「X点」です。プラズマは上の方からまた下の方から磁気中性面の方向に向かって流れてきますが、流れ込んできたプラズマは方向を変え磁気中性面の近傍では左右の方向に向かって流れ出します。磁気リコネクションが発達してきて上下の境界から流れ込んでくるプラズマの流速がプラズマ中での「遅いモード」とよばれる磁気音波の速度を超えると、図4に示してあるようなX点から延びる4つの衝撃波が形成されて、そこで急激な速度変化が起きます。その衝撃波面のところでは磁力線が鋭く「く」の字に曲がっているので磁力線の張力によるプラズマ加速も一段と効率を増します。磁気圏尾部に溜め込まれた磁場のエネルギー解放プロセスとして、衝撃波は非常に重要な役割を果たすでしょう。この衝撃波は実際GEOTAIL衛星で観測されており、その詳細な構造は後で示します。

ところで磁気リコネクションが磁気圏尾部で起きていることは確立された概念だと言っていると思いますが、現在の研究の焦点は、いつどのような条件が満たされたときにどこで磁気リコネクションが起きるのか、また磁力線を溶かす磁場の拡散過程はどのようになっているのか、という問題に移ってきています。とくに磁場の極性が反転する磁気中性面での磁場の拡散は暴れん坊の少数のプラズマ達の振る舞いによるもので、その暴れん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のでしょうか。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5のような構造変化が起きて

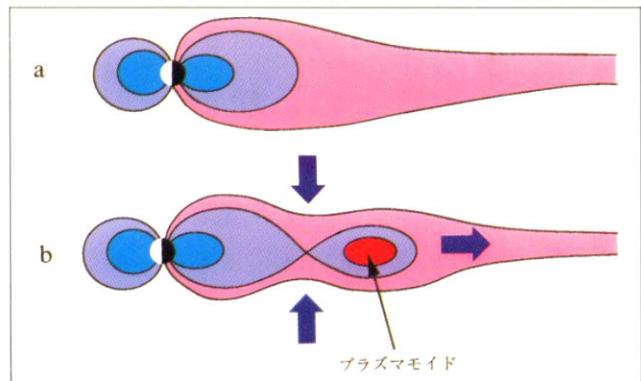


図5 磁気圏尾部でのプラズモイドの発展

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。プラズモイドにはリコネクションによって作られた磁力線ループが含まれています。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。GEOTAIL衛星で捉えたプラズモイドは、後でまた述べます。

さて、磁気圏嵐と呼ばれる地上での激しい磁場の变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すが、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圏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つてよいでしょう。

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。

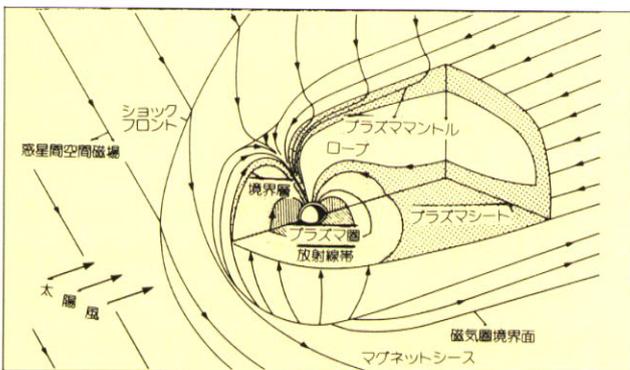
(星野真弘)

## 5. 地球の尻尾では 何がおきているか

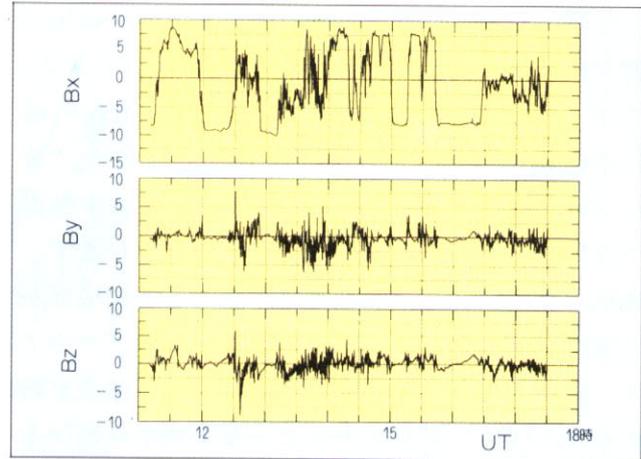
### ◆引き伸ばされた磁力線

地球の磁場は、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磁気圏を形作ります。磁気圏という名は、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をしていることに由来します。したがって、磁場を測ることにより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。GEOTAIL衛星が磁気圏の尾部でどのような変化を観測したかを紹介する前に、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。まず磁気圏境界面、この内側が地球のテリトリーです。長く引き伸ばされている磁力線は、北側では地球向き、南側では反地球向きです。共にローブと呼ばれています。北側のローブと南側のローブが接する領域はとても熱いプラズマで満たされている事から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倍に当たる距離のところで観測された磁場の変化の様子を見てみましょう。上図には、太陽方向(x)、東西方向(y：+が夕方方向)、南北成分(z)、の磁場の3成分が示されています。ざっと見てわかることは、 $B_x$ は $\pm 10\text{nT}$ (ナノテスラ)程度大きく変動していますが、他の成分は、ゼロを中心として数nT以内におさまっています。このデータは磁力線が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、 $-8\sim-10\text{nT}$ で変動の少ない時間帯には、 $B_y$ 、 $B_z$ ともほとんどゼ



地球磁気圏の詳しい構造



1993年6月7日の尾部の磁場

ロで変化があまりありません。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入っていることを示しています。また、 $B_x$ が $+5\sim 8\text{nT}$ になり、 $B_y$ や $B_z$ がゼロ付近に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こととなります。このデータをよく調べると、いろいろ面白いことがわかります。約6時間の間に衛星が、南北のローブを何回も行ったり来たりしていること、ローブの間を移動する際に磁場が非常に小さくなる領域(磁気中性面)を通過すること、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ことです。

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ほとんど動かないので、衛星の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。したがって、太陽風の方向の変化で吹き流しのように引き伸ばされている尾部が、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いくつかの解釈ができます。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わかっています。以上、磁場データをもとに尾部の磁場が引き伸ばされた様子やその変化についてお話ししましたが、尾部で起こっている様々な現象については、他のテーマの解説を参照してください。(國分 征)

### ◆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づくと、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が、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。

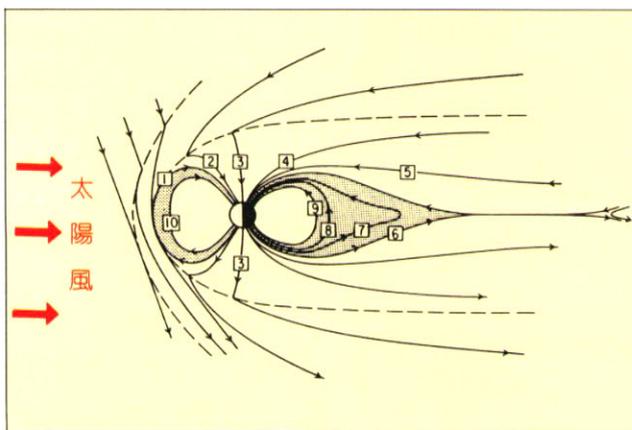
尾部の中でのリコネクション過程はいつも同じよう進行しているのではなく、ときどき沢山の磁力線が急激につながることがあります。このような時にはリコネクションの起きるところ（磁気

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）と呼ばれる嵐がおきています。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。磁気圏の中に見られ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大きな要素になっているとともに、エネルギーの担い手としても重要な役割を果たしています。

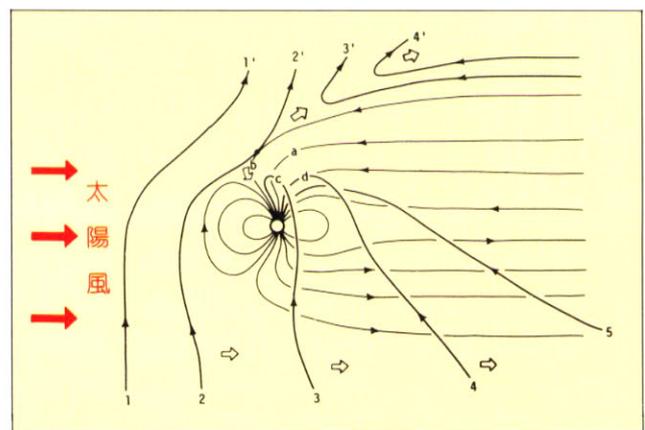
磁気圏の中の流れの様子は、太陽風のなかの磁場（惑星間空間磁場：IMFと称します）が北向きか、南向きかで違います。GEOTAIL衛星は、IMFが南向きのときには上に記したような大きな渦が作られているのに、北向きの時の流れはほとんどどこでも反地球向きだけであることを見付けました。IMFが北向きの状態のもとでは、磁気圏の尾部で磁気リコネクションが起きず、地球向きの流れができないのです。

この違いは、もとをただせば、磁気圏の昼間側で太陽風によって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起きます。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）



IMF (惑星間空間磁場) が南向きのとき



IMFが北向きのとき

### ◆プラズモイドの構造

下図は磁気圏の尻尾で観測されたプラズモイドの例です。この観測を行ったとき、GEOTAIL衛星は地球の半径の約150倍の距離にいました。横軸は時間を示し、下のパネルは磁場のBz成分、つまり地球磁場の北向きを正とする成分の時間変化を示します。21時20分から約10分間のあいだにBzは特徴的な変化を示し、いったんプラスになってからマイナスになっています。これがプラズモイドの磁場で、プラスとマイナスの組み合わせはプラズモイドが磁力線のループ構造を持っている事を示しています。

上の2つのパネルは12秒毎に観測された電子とイオンのエネルギースペクトルです。エネルギーの範囲は約100eVから約40keVまでで、プラズモイド中ではフラックスが強く、色が青から黄、赤に変わっています。この図から、プラズモイドが高温のイオンや電子を含んでいることがわかります。もとの観測はもっと詳しく、イオンや電子のスペクトルが方向によってどう違うかも測っていますので、プラズモイドが約1000km/秒という速い速度で地球と反対の方向に流れていることがわかります。

さて、さらによく見ると、スペクトルにはさまざまな構造があります。例えば、衛星がプラズモ

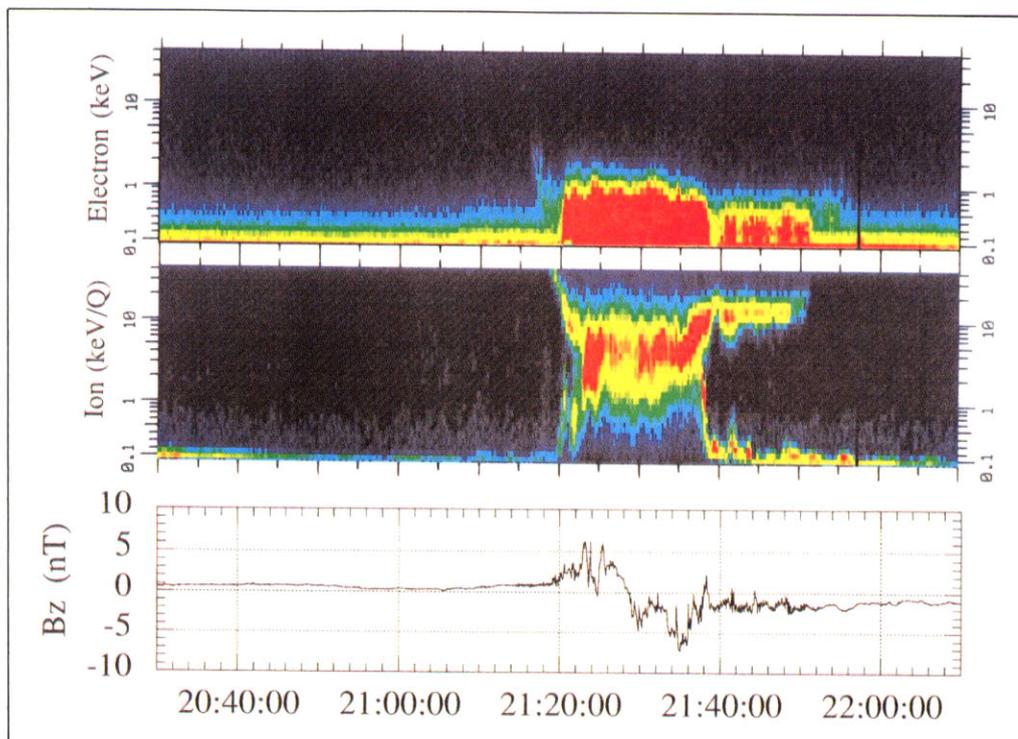
イドに入ることのイオンのスペクトルには、エネルギーが非常に低いレベルから急激に高まっている成分と、非常に高いエネルギーから下降している成分があります。電子のフラックスの増加は、イオンよりも少し早く始まっています。一方、プラズモイドから出るところでも、イオンには高エネルギーと低エネルギーの2つの成分が見られます。このようなスペクトル構造は、リコネクションの起きる磁気X線の近傍やプラズモイド周辺でおきる加速過程を反映しています。その一つは「遅いモード」の磁気音波ショックによる低エネルギー成分の加速です。高エネルギー成分の作られる原因としては、磁気X線領域での加速と、「遅いモード」の磁気音波ショック面からの反射が考えられます。

プラズモイド中の磁場は、上に述べたループ構造に加えて、ループの面に直角方向の成分を持っていることがあります。このような場合には、磁力線は螺旋状になっていると考えられますが、この螺旋構造がなぜ作られるのか、どのくらいの空間スケールを持っているのか、また磁力線を介してプラズモイドが外の世界につながっているのかどうか、と言う点も、現在、重点的に研究されている問題です。

プラズモイドには温度が数千万度という高温

のプラズマが閉じ込められているわけですから、惑星間空間に大量のエネルギーを持ち去ります。もとは太陽風からもらって蓄えたエネルギーですが、それを蓄えすぎて、このような形でほとんどを惑星間空間へ戻します。一方、地球側の磁気圏や電離層に解放される部分は、大規模な磁気圏嵐を作りだします。あたかも磁気圏が息づいているかのようです。

(町田 忍, 西田篤弘)



1993年10月5日

### ◆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開放される時、「遅いモード」磁気音波の衝撃波が出来ます。第4章の図4に、X点から延びる4つの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、衝撃波を通過した例を見てみましょう。図1に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います。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判ります。

このような観測は、今迄にも米国のISEE3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イオンの速度分布関数がGEOTAIL衛星の観測で、初めて明らかになりました。図2は図1で示した磁気衝撃波の周辺のイオンの分布をEnergy-Timeダイアグラムと呼ばれる形式で示したものです。横軸に時間、縦軸にイオンのエネルギーをとって、イオンの数をカラー

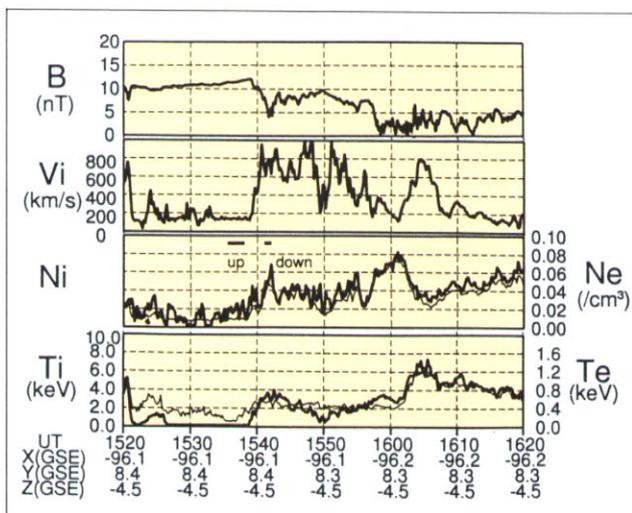


図1 1994年1月14日

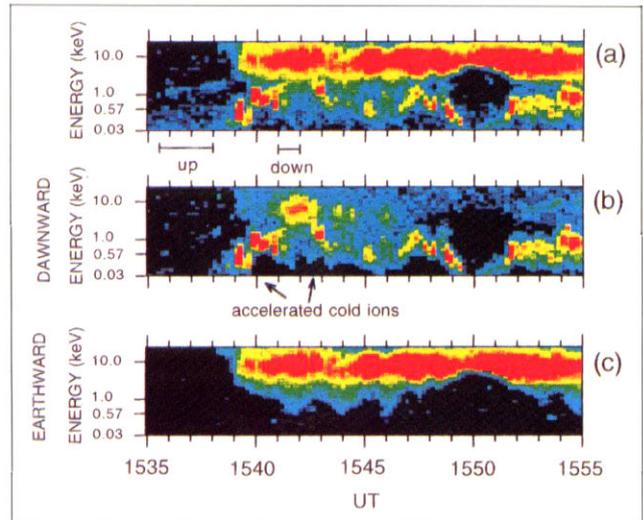


図2 1994年1月14日

コードで描いたものです。up, down は再び衝撃波の上流、下流を示しています。ここで注目したいイオンの分布が2つあります。ひとつ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 です。これらのイオンは、もともと衝撃波の上流にあった低エネルギーの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。この加速過程の詳しい研究は衝撃波の細かい構造を明らかにしてくれます。ふたつ目は上流付近に見られる非常にエネルギーの高い

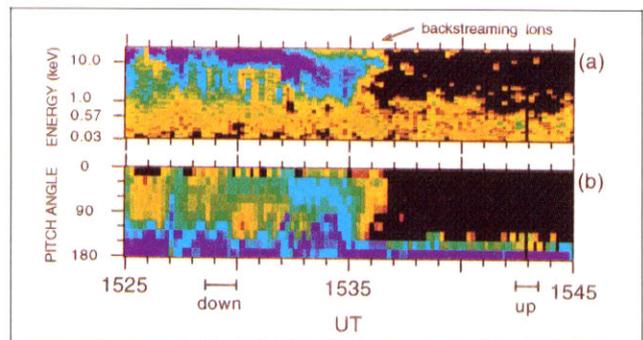


図3 1994年1月17日

イオンの分布でback streaming ionsと示したイオンの分布です(図3参照)。このイオンは衝撃波から上流側へ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粒子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。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、今後はより細かい構造や性質の解明へと研究が進んで行く事になります。(斎藤義文)

## ◆プラズモイドの姿

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、熱いプラズマのかたまりがプラズモイドですが、まだだれもその全体像をみた人はいません。GEOTAIL衛星はもう何百回もこのプラズモイド（の一部）をつつ切って観測していますので、それらの多数の観測を重ねあ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ことです。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にもおよぶ）ために、プラズマのなかに強く波を起こします。ちょうど空気中を「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ことです。そのため、衝撃波面の種類や形まで、伝わってい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いきません。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に、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こ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カラー図を見てください。図の

## NASAの愉快的仲間達

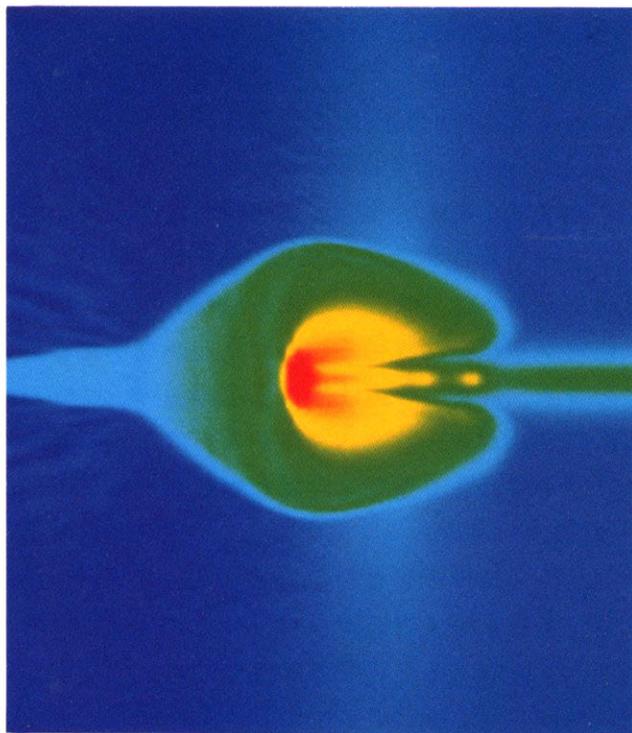
GEOTAIL衛星を通して、実に多くのアメリカの人たちと付き合うことになりました。NASAの3つのセンター、ヘッドクォーター、研究所、大学などの友人を数えてみると、顔を思い出すだけでも50人以上になります。打合せで議論をした人を含めるとたぶん100人を越えるでしょう。とくにNASAのゴダード飛行センターのISTPオフィスとは、格別親しくなりました。ここのシステムマネージャーのMac Grant氏に筆者が送った電子メールの数は、1500本を越えています。彼と連日、技術情報を交換しながら、面白いことに気づきました。電子メールをうまく使うと彼の地と当地との時差のために、大変能率のよい作業が可能なことです。すなわち当方が、朝オフィスに出てみると、Macから技術上の厄介な質問が来ているのが普通で、これに対し1日かけて検討して、その結果を帰宅する前に電子メールにたたき込み、併せてこちらからの質問も送ります。ちょうど筆者が、帰宅する頃、Macが彼の地で、出勤し、当方の回答と質問を読むことになる訳です。彼は（当方が、夜寝ている間に）1日かけて検討し、彼の帰宅前

に同じく回答と質問を送り出します。かくして、昼夜が逆の地球上の2つの地点で、2シフトの「徹夜」の検討が続くことになります。毎朝出勤直後に“Dear Ichiro”で始まるレターを読み、毎晩、帰宅直前に“Dear Mac”で始まるレターを書くのが、すっかり習慣となりました。当方が出張で、2～3日メールをサボるとMacからは、病気ではないかと安否を気遣うレターが来始め、1週間も黙っていると、入院でもしたかと、宇宙研の他の人に問い合わせが来ます。

無味乾燥な技術情報の交換の合間には、日常のちょっとした、出来事を知らせたり、冗談を言い合うのが常で、Macのアメリカ流のセンス溢れるユーモアを大いに楽しみました。ある年の4月1日のメールで、「当方は、6カ月の休暇をとって、家族と南フランスで暮らすため、明日から連絡がとれなくなるが、悪しからず」という、冗談を送ったことがあります。敵もさるもの「私も妻と参加するから待っていてほしい」との平然とした返事。ところが後で聞くと、実は私のメッセージの直後、ISTPのオフィスは、パニック状態で、誰かがエイプリルフールに気づくまでは、今後の体

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こむ、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淡い水色の境界の部分には、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部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、非常に圧力の高いコア部分（赤い色の部分）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非常に楽しみになりました。

（前沢 洌）



プラズモイド中の圧力分布をカラーで表現した図。赤が最大、紺が最小値を示す。図の左端で起こったりリコネクションの結果生成されたプラズモイドが生長しながら右方へ伝播する。横のスケールは地球半径の約100倍。

制につき可成り深刻な議論をしたということ、これも電子メールの常連Bob Callensという気のいい男が漏らしてくれて、私は一人で笑い転げた次第。

GEOTAIL衛星の日米両グループにとっては、昨今問題になっている経済摩擦とも無関係に楽しい付き合いをすることができ、ささやかな異文化交流が果たせたことは望外の幸せでした。（中谷一郎）



## ◆プラズモイドの発生

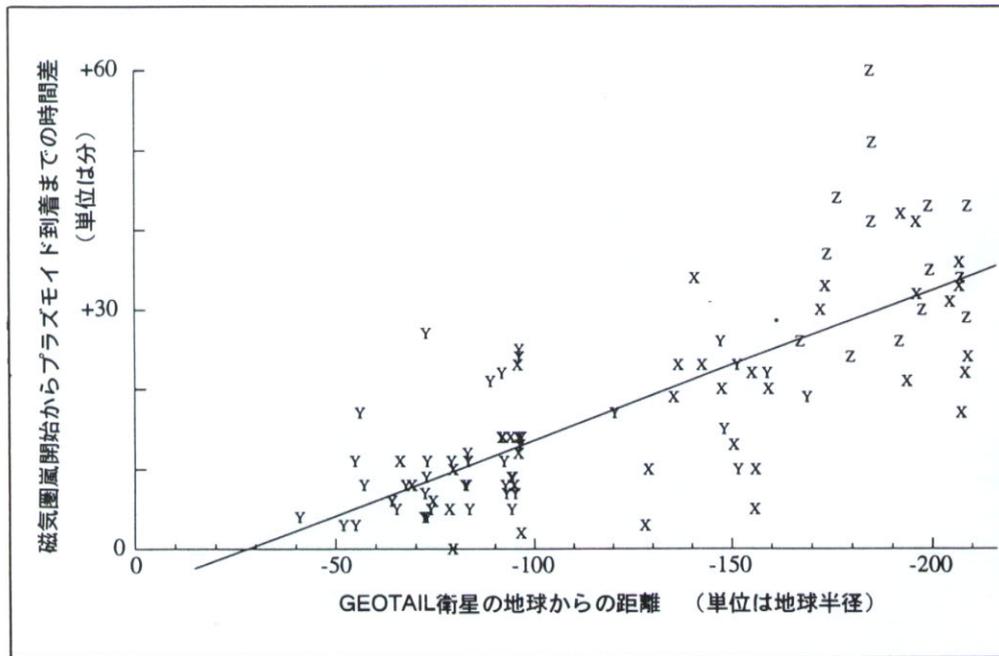
前に述べてあるように、磁気圏嵐が起きるとプラズモイドが作られると考えられますが、はたして実際にそうなっているのでしょうか。このことを調べるには、地上で磁気圏嵐がいつ起こったかを知り、その後にプラズモイドが来るかどうかを調べればよいわけです。ところが、磁気圏嵐が始まった時刻を正確に決めることは、なかなか難しいことです。一番よい方法は、人工衛星「あけぼの」で撮影されたオーロラの写真から、オーロラが急激に明るく激しく運動を開始した時刻を知ることです。しかしながら、「あけぼの」は極軌道衛星なので、四六時中オーロラを監視しているわけではありません。地上でのオーロラや地磁気の変動の観測はどうしてもその観測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。「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

えてくれます。そこで、気象庁気象衛星センターから提供され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。

このようなことを、95個の磁気圏嵐について調べた結果を図に示します。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分かります。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、時間差がゼロとなり、プラズモイドが発生したところと考えられます。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、直線の傾きからプラズモイドの速度がわかりますが、それはほぼ560km/秒であることもわかります。

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。

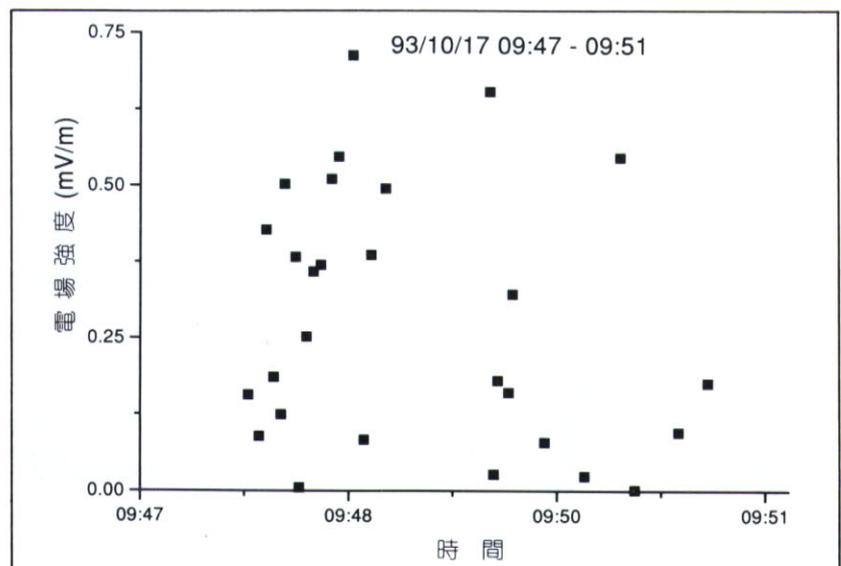
(長井嗣信)

#### ◆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、特に磁場に直角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も行われています。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周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えらませんでした。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。

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まし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km)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例を下図に示します。この例は93年の10月17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」と言えるような成果が出るのではないかと考え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部に蓄積され、それがある限界を越えると一気に解放され急なオーロラの増光、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衛星の観測から、磁気圏尾部では磁気「X点」領域の近くでプラズマが

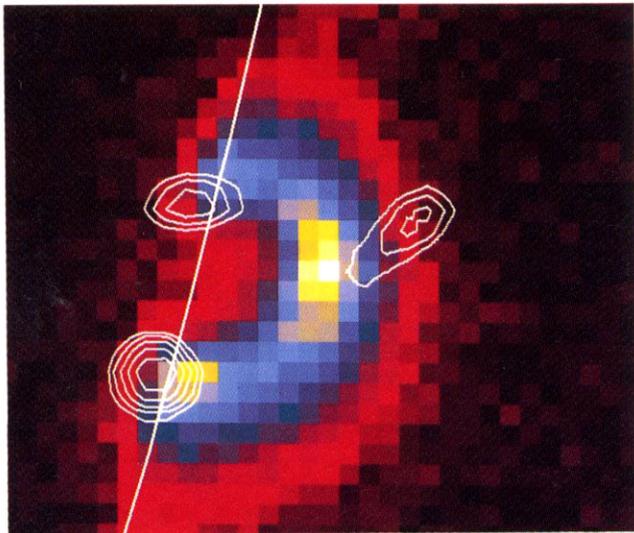


図1

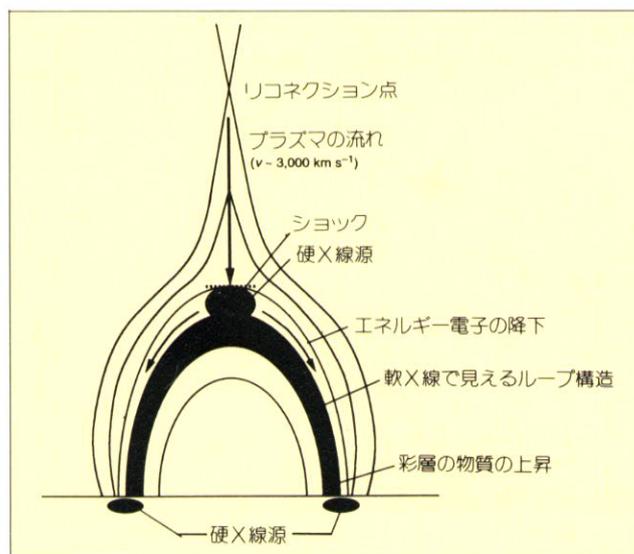


図2

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、間接的に磁気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1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。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2）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運動エネルギーが熱エネルギーに転化され、1億度以上の超高温プラズマが作られ、硬X線を放射します。そこからループに沿って下方に伝わった高エネルギー電子によって温められた高密度の彩層の物質が上昇し、ループ内を満たし、軟X線で明るく輝くことになります。（残念ながら、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部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。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ことで磁気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」(300.0kHz) 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。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。オーロラはご存知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。

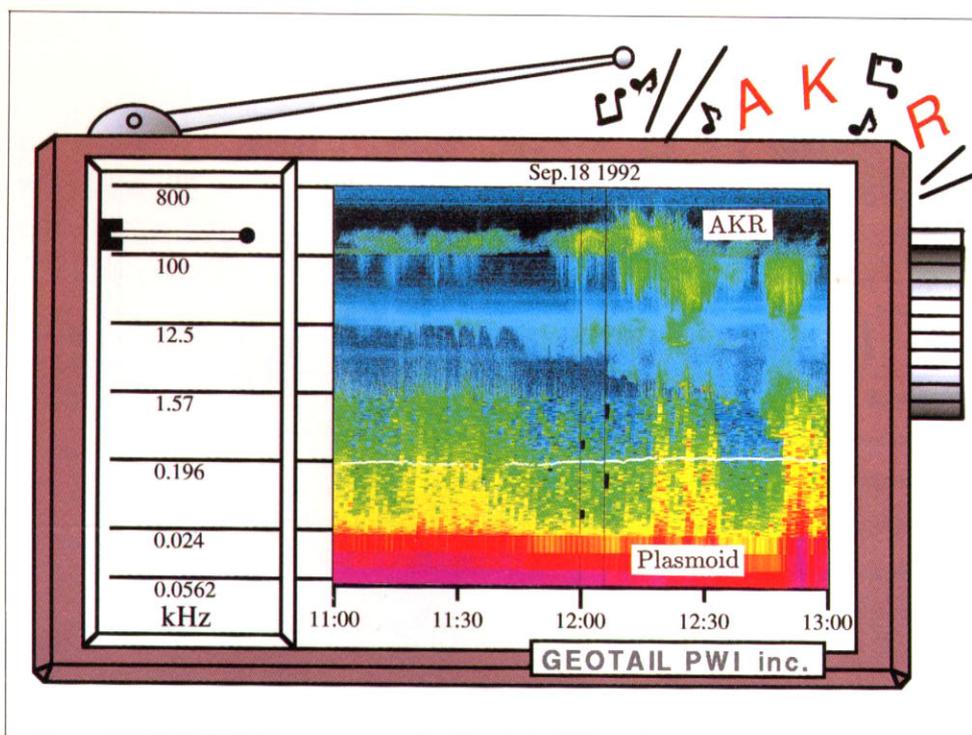
オーロラを光らせるのは磁気圏の尾部から大気に降り込む高速の電子ビームですが、この電子ビームが発信する電波がAKRです。磁気圏の尾部はAKR電波の伝播にとってダクトのような役割をはたすので、AKR電波は発生領域から遠く離れたGEOTAIL衛星でもはっきりと受信されます。実際にGEOTAIL衛星で受信された例を図に示しま

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300[kHz](図の矢印)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、地上で例えれば「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

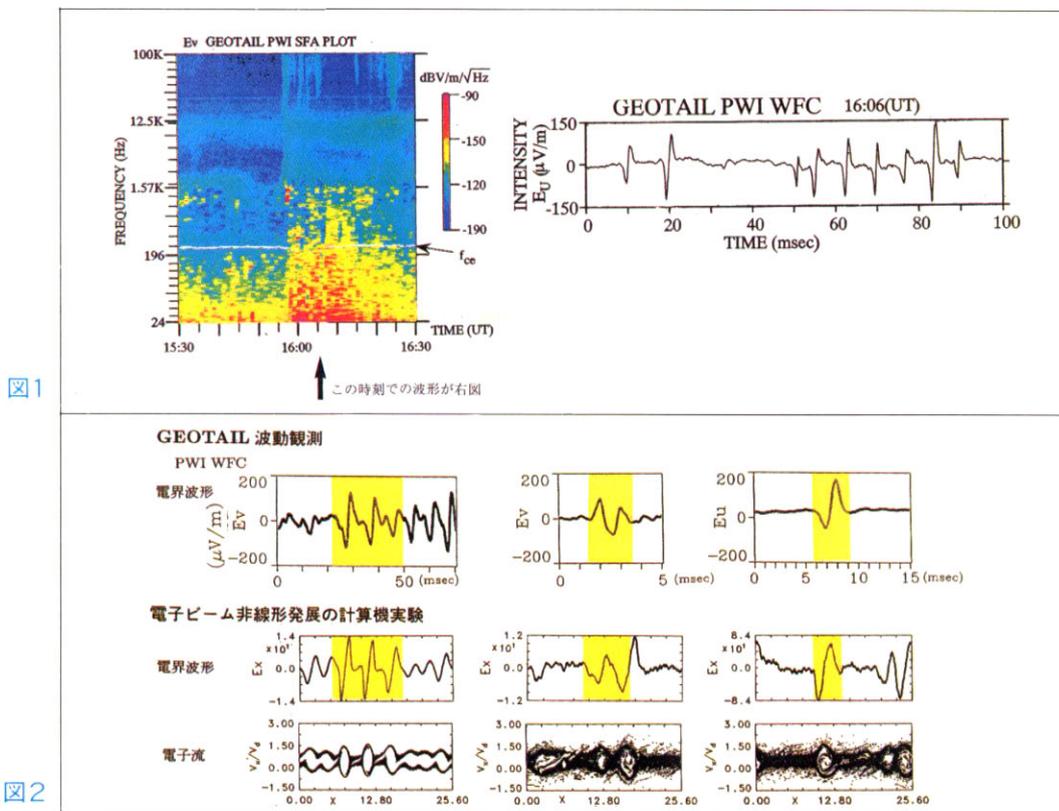
GEOTAIL衛星には、波の受信機が搭載されていて、宇宙空間のプラズマの小波やざわめきを聞くことができます。

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1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カラーコードで表し、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1の左側)。図1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

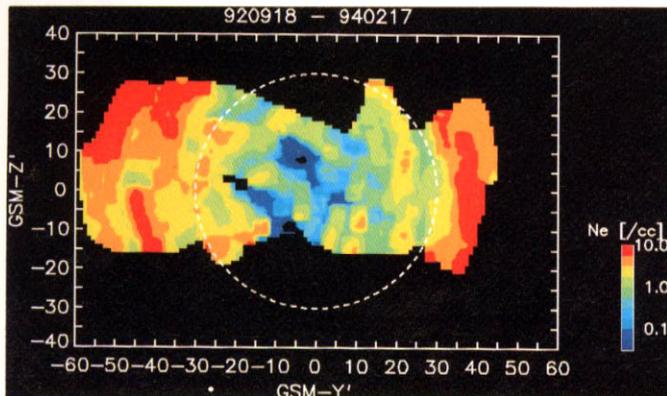
い(図では赤い)波が見られます。これらの波はこのスペクトルの特徴から広帯域静電波(BEN)と呼ばれていました。静電波というのは普通の電波と異なり、磁界成分が全くなく、電界だけからなっている波です。このBENは尾部プラズマの中央平面に横たわるプラズマシートと呼ばれる領域の境界層(プラズマシート境界層:PSBL)で、しばしば見られます。BENの成因について、これまで様々な理論が提唱されてきましたが、もうひとつ決定的な観測事実もなく、謎とされていたのです。

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2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ようにな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」ということもあり得ますね。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3)。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)

図3 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。赤い色はプラズマの密度が高いことを表していて、外側で特に赤く、内側で赤が薄いことがわかります。これは、色の薄いところが地球の磁気圏、色の赤いところが地球磁気圏の外側での境目がはっきり見えている様子がわかります。

## 日米協力、ことの始まり

GEOTAIL衛星計画は大型の日米協力プロジェクトです。宇宙科学研究所が衛星の開発を担当し、NASAが打ち上げを担当しました。観測機器は約3分の2を宇宙科学研究所が、約3分の1をNASAが受け持ちました。

ことの始まりは十数年前に遡ります。1970年代の末、米国の研究者が中心になってワーキンググループを作り、4機の衛星による衛星ネットワークで太陽風からオーロラや放射線帯にいたるエネルギーの流れを総合的に観測する計画(OOPEN計画)を練っていました。私もメンバーの一人でし



たが、米国の衛星計画に知恵を出すだけではいかにももの足らず、日本独自の衛星によってこの観測計画に参加したいと思いました。そこで尾部のリコネクション領域の研究を主目的とするOPEN-J衛星を提案し、ワーキンググループを1979年に発足させました。OPENとは「地球周辺のプラズマの起源」の略語です。

こうしてM-3S II型による打ち上げを想定して第二次案まで作成していたところ、1983年の5月、NASAのOPEN計画関係者の訪問を受けました(写真)。当時のNASAは今と比べれば羽振りがよかったです。それでも4機の衛星から成る大型計画の承認を得るのは難しいので、4機のうちの1機をOPEN-Jと統合することによって計画の実現性を高めたい、という提案を持ってきたのです。4機の衛星のうちどれと統合するかが大きな問題でしたが、まだ本格的な観測が行われていない尾部の遠隔領域を観測するGTL衛星と一緒に、最初の2年間は遠尾部を観測し、その後はOPEN-Jの計画軌道に降ろして観測を行うというGEOTAIL衛星の構想に合意が得られた時には、夢のようなプロジェクトを実行できる喜びに胸が震えました。(西田篤弘)

## 6. 磁気圏と太陽風の境界

### ◆ 昼側の磁気圏境界面

GEOTAIL衛星は地球磁気圏尾部を探索する為に打ち上げられた衛星ですが、チャンスは少ないながらも昼側の磁気圏を探索する事も重要な仕事としています。特に太陽風と地球磁気圏が接している所を昼側磁気圏境界面と呼び、この領域で起きている事を調べる事は大きな興味の対象です。境界面では、特に太陽風中の磁場が南向き、すなわち地球磁場と反平行になった時、磁気リコネクション(第4章を参照)が起これ、太陽風中のプラズマと磁気圏のプラズマが入り混じります。この過程がなぜ大切かと言いますと、地球の勢力範囲である磁気圏に太陽風の運動量やエネルギーを注入する役割を担っていると考えられるからです。GEOTAIL衛星がこの境界域を内側から外側に向かって移動した時、特にイオンの速度分布函数がどのように変化するかを図で説明しましょう。

ここでお見せする例(1994年1月26日6時49分~6時51分UT)では図の左上に示されている様に、GEOTAIL衛星はリコネクションの「X点」の南側2Re(地球半径)を横切ったと考えられています。ここでは図の左手が太陽側、右手が磁気圏です。図の右上に6時45分から6時55分までの磁場の大きさ(B, 単位はnT), その太陽方向の成分

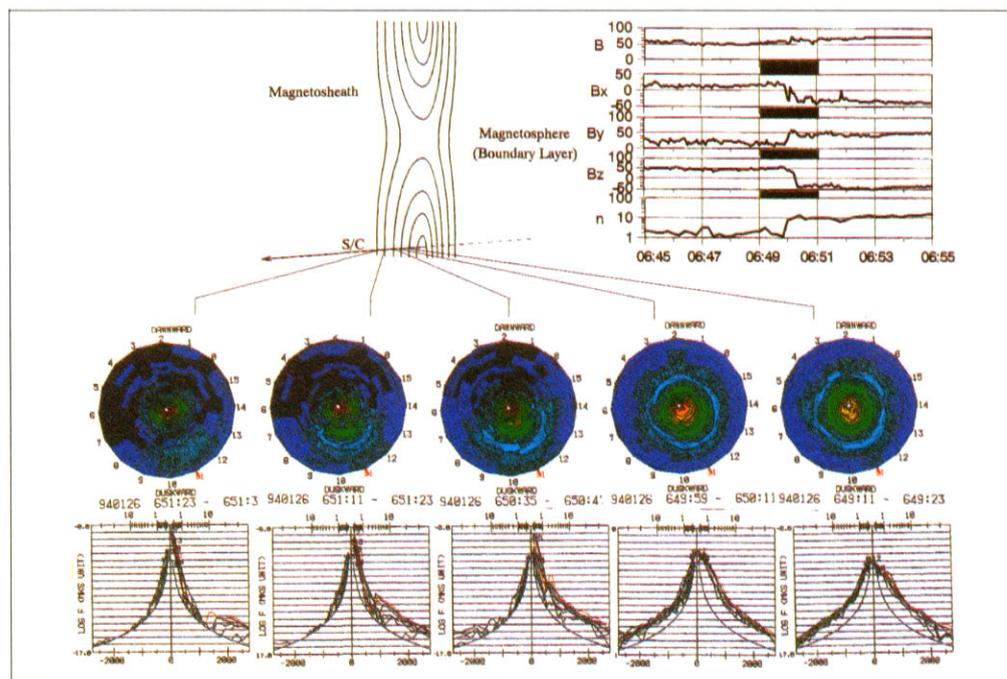
(Bx), 夕方方向の成分(By), 北向き成分(Bz), そして一番下の段にはイオンの密度( $/\text{cm}^3$ )を示しました。丁度6時50分頃に磁場が北向き(磁気圏の内側を示す)から南向き(太陽風側)に変化し、イオンの密度も一桁跳ね上がっている所がGEOTAIL衛星が境界域を通過した事を示しています。

図の下側に示してある円形のプロットは衛星のスピン平面内でのイオンの速度分布函数(左手が太陽方向, 上が朝方方向)を表わしています。5つの図中、左側にいく程時間が進行しています。また衛星のスピンを $22.5^\circ$ ずつに分けて、この分布を1次元で表わしたものが最下段の図です。特に磁力線に沿った面で切った分布を赤と緑で示しました。

右側の2枚の図はGEOTAIL衛星がまだ磁気圏の中にいた時のもので、磁気圏の暖かい粒子分布と、太陽風の冷たい分布の混合した等方的なイオン分布が見られます。中央の図ではGEOTAIL衛星は境界面を通り太陽風側に出ています。分布の中央に高い山の様にそびえるのが太陽風の冷たいイオンで、これと比べると境界面の内側ではこれが熱化されていた事が分かります。1次元の分布図でこの山の右側にあるピークは、この成分が磁気圏境界面です。太陽側に反射されたもの、またその右に続く暖かな成分は磁気圏から漏れ出して来たイオンの成分です。左の2枚の図に示されるように、

磁気圏より漏れ出したイオンには観測されるエネルギーに下限があり、この値がGEOTAIL衛星が境界面から離れるに従って大きくなっていきます。詳しい説明は別の機会に譲りますが、このような速度分布がある事が昼側磁気圏境界面において磁気リコネクションの起きている有力な証拠となっています。

(中村正人)

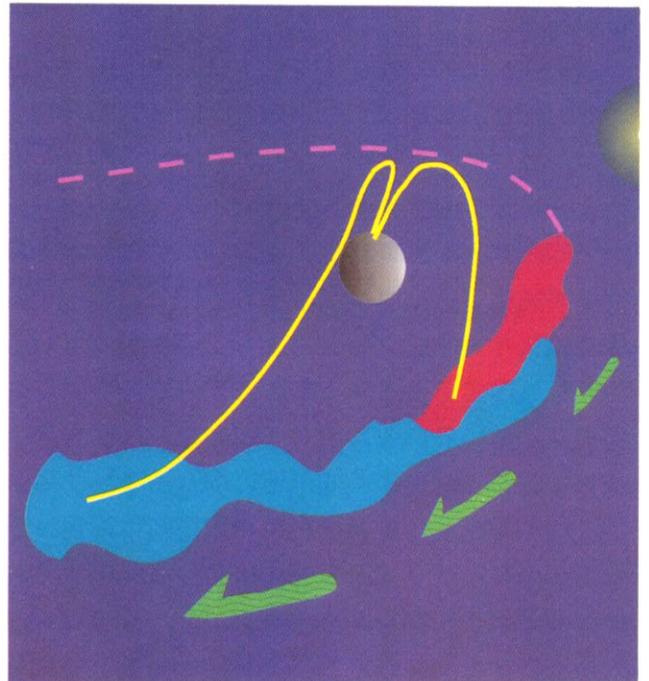


## ◆境界層を詳しく見ると

磁気圏境界面は太陽風プラズマと地球磁気圏プラズマが接する領域です。異なるものが接している場合は、その2つのものがお互いに混じりあってしまうことは日常生活においてしばしば経験します。このことから考えると、磁気圏境界面のすぐ内側で太陽風と磁気圏プラズマの混じりあった領域（磁気圏境界層）ができていることは当然のように思えますが、実はこの混合層の生成メカニズムは磁気圏物理に残された大きな謎の一つなのです。

まずここで、物が混じるというのはどういうことかを考えてみます。分子レベルで見れば、これは物質Aの分子の隣に物質Bの分子があり、その隣には物質A分子があり、というように互いに入り組んだ状態になっていることです。このような状態は、分子同士の衝突によって分子拡散が起こることによってもたらされます。ところが、この拡散過程は衝突による酔歩の結果ですので、効率が悪く、すばやく混ぜ合わせることができません。さて、我々は、例えばコーヒーにクリームを混ぜる場合などに、スプーンでかきまぜたりしますが、これは実は、かきまぜて複雑な流れのパターンをつくり出して、コーヒーとクリームの接する界面の表面積を増やしてやっているのです。このとき、たとえ界面に垂直な方向の混合が分子拡散によるゆっくりとしたものであっても、大きな界面面積のおかげで、大規模な体積ですばやい混合ができるのです。

話を磁気圏境界面に戻しましょう。すべての振舞が磁気流体的で凍結の原理が成り立っているとすれば、もともと違う磁力線に凍結されていた太陽風と磁気圏プラズマは混合しません。これは、分子同士の衝突がなければ分子拡散がおこらず、混ぜ合わせもおこらないことに相当します。しかし、ほとんど真空中で実際の粒子同士の衝突が起きない宇宙空間では、粒子・波動相互作用が衝突の役割を果たします。それではかきまぜることにあたるのは、磁気圏境界面では何なのでしょう。磁気圏境界面は、太陽風と磁気圏プラズマが接す



る面ですが、太陽風が高速で反太陽方向に流れ、磁気圏プラズマが止まっていることから、これは同時に速度勾配層でもあります。このような速度勾配層では、ちょうど鳴門海峡のように、大規模な渦の流れができることが期待できます。この渦によって境界面が複雑に巻き込まれ、そのことによりすばやく混ぜ合わせがおこなわれている、と考えられます。

この仮説を検証するには、数値シミュレーションが有力ですが、電子慣性長という1 km以下の長さを正確に表現しながら、1万 km以上の空間スケールにわたる渦の流れの発展を追わねばならず、現在の計算機能力をこえています。そこで、様々な近似・工夫をして研究がなされています。

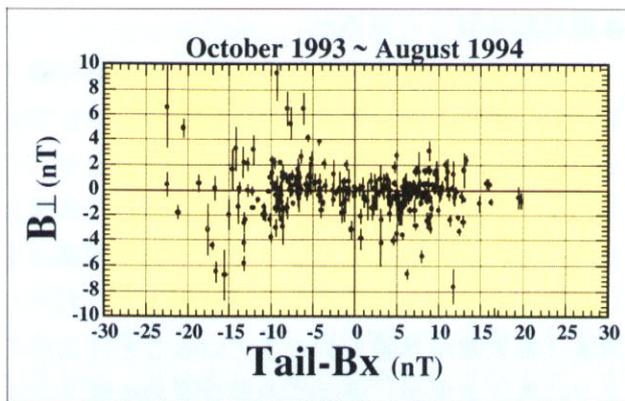
理論的には、単純な混合の素過程すら完全には理解できないでいますが、GEOTAIL衛星データから得られる磁気圏境界層の描像（図）は、外側には太陽風プラズマが磁力線を後ろに引き伸ばしながら流れる層があり、内側には太陽風と磁気圏プラズマの混合層がある。そこでは、流れはほとんどなく、また、電子が磁力線方向に加熱されている。一部は電離層に降り込んでオーロラを光らせているだろう、といった3次元性まで盛り込んだ複雑なものです。今後の研究により、理解が進むのが楽しみです。（藤本正樹）

## ◆尻尾をつくるメカニズム

磁気圏に尾部が存在することは、太陽風が地球の磁力線を引き伸ばしていることを示しています。「磁力線を引き伸ばす」メカニズムはいったいどのようにして働くのでしょうか。

二つの考えが出されています。ひとつは太陽風の中の磁場（惑星間空間磁場）と磁気圏の中の磁場が磁気リコネクション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、太陽風の流れの力（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。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、これはこのモデルに都合が良い事実です。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。もう一つのモデルは、境界面の乱れを通して太陽風の運動量を取りこもうというものです。境界面をはさんで、磁気圏の内と外には速度のシアがあります。このシアのためにケビン・ヘルムホルツ（KH）不安定が励起されて、磁気圏側に運動量を取り込まれるのではないかと、いうものです。

第一のモデルによれば、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。GEOTAIL衛星の観測ではどうなっているのでしょうか。図は横軸に尾部側の磁場強度、縦軸に境界



面に直角な磁場成分をプロットしたものです。殆どの場合、直角成分の大きさは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、実は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はなく、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。（山本達人）

## 電磁干渉とのたたかい

宇宙空間で物理量を測定する事が科学衛星の目的です。良質のデータを取得するために、まずは測定器自身のノイズレベルの軽減に多くの労力を費やしていきます。しかし、測定したい物理量が微弱になっていくと、「そこに人工衛星が存在すること自体が測定量に対し大きな影響を与える事になります。GEOTAIL衛星で測定する地球磁気圏尾部領域での磁場は約10nT（地球表面の1/4000程度）と非常に微弱です。従って、衛星自身に磁石やコイルがあると多かれ少なかれ測定量に影響を与える事になります。微弱なプラズマ波動を測定

する時もこの事が問題になります。人工衛星内には太陽電池・バッテリー・電子回路・バルブ等多数の制御素子が存在して磁場・電磁場観測に影響を与えます。GEOTAIL衛星では、静磁界・電磁波動ノイズの軽減を目的として、宇宙科学研究所としては初めての本格的な地上電磁干渉試験が実施されました。

機器単体の非動作状態に於ける残留磁場の測定、動作状態に於ける漏洩磁場・放射ノイズの測定が、宇宙科学研究所・飛翔体環境試験棟・磁気遮蔽室にて実施されました。同様の試験は衛星組立後も衛星システムEMC試験（衛星本体を磁気遮蔽室に入れての試験）として、1次噛合・総合試験を通

## ◆2000万kmまで伸びる地球の尻尾

太陽系の惑星間空間を観測してきた「さきがけ」は、打ち上げから7年後の1992年に再び地球と巡り会い、その年の9月26日から27日にかけて地球から2000万kmの距離で地球磁気圏の尻尾を通過し、その観測に成功しました。

地球の尻尾がどれほど遠くまで伸びているかは長い間の疑問でした。地球の尻尾を証明するには磁場を観測することが重要ですが、この種の観測としてはパイオニア7号の600万kmがこれまでの最高記録でした(図1)。2000万km付近を観測した他の衛星は、イオンの量や種類から「尻尾があるのではないか」と推定していましたが、「さきがけ」はこれを磁場・プラズマ・波動の3観測装置で捉えることに成功しました。(詳しくはISAS

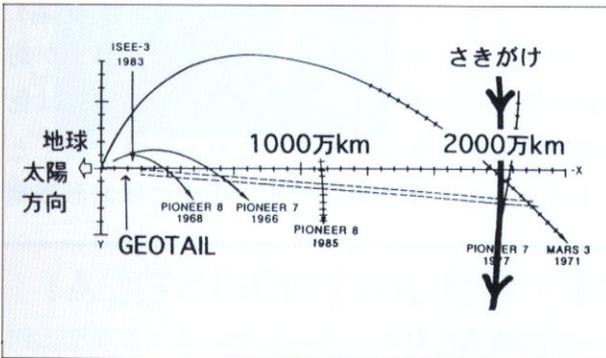


図1 地球を固定した座標系で描いた黄道面内の「さきがけ」の軌道。左側が太陽方向。

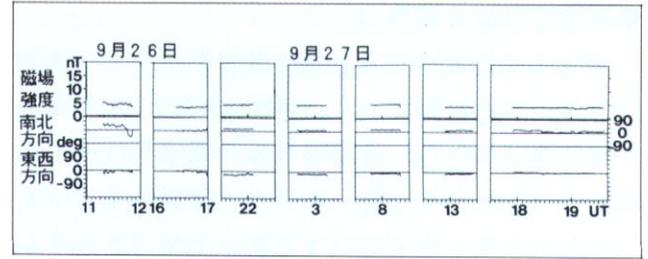


図2 「さきがけ」の観測した磁場。  
南北方向・東西方向とも、0度が太陽方向。

ニュースNo.131, P 2~P 6をご覧ください)。

得られた磁場データ(図2)は、ほぼまっすぐ太陽方向を指していますが、これが太陽風に吹き流された「地球の尻尾」独特の磁場の形です。周辺の太陽風磁場は太陽自転のために太陽方向に対して45度斜めになっているのが普通で、これほど長期間太陽向きとなることは稀ですから、地球磁気圏の尻尾であることはほぼ確実といえるでしょう。この間、波動観測器も100~2800Hzの広い周波数域において、通常の太陽風中よりずっと強い波動を記録しています。一方、プラズマ観測器は通常の太陽風と変わらない速度、密度、温度を示しており、太陽風と地球磁気圏の境界面におけるプラズマの混合過程を示す、面白い結果となっています。

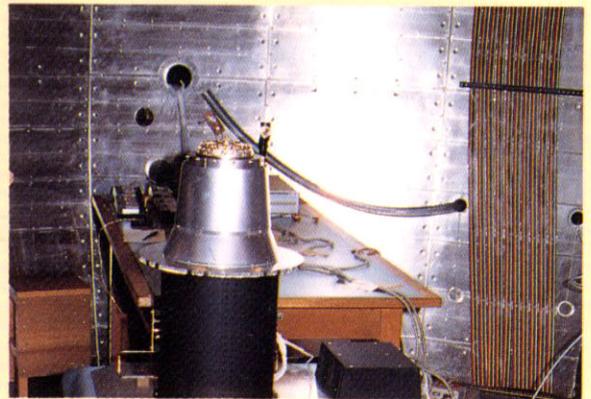
(中川朋子)

し計5回、その前後での機器単体の試験も含めると総計100回程度は実施されました。

試験の中で規制値以上のノイズが発見されると、その対処方法の検討がなされます。漏洩磁場のある機器が発見されるとそのシールドを施します。擬似的なアンテナを形成している機器が発見されるとその電磁放射を軽減する策を施します。その最大は、衛星内部の電気計装の全面見直しでした。

こうした地上試験を通して打ち上げられたGEO TAIL衛星では、地上試験の予想以上に衛星からの静磁場・波動ノイズが非常に小さい事が確認されました。これは、ひとえに関係研究者・メーカーの本衛星計画の科学目的への理解と、衛星ノイズ退治

に対する多大なる努力によるものです。GEO TAIL衛星は過去にない電磁的に非常にクリーンな衛星とする事が出来たと言えます。(山本達人)



磁気遮蔽室での電磁干渉試験

## ◆天空にひびく歌声

GEOTAIL衛星のアンテナ出力をカラオケ装置につないだとしましょう。いま、GEOTAIL衛星が磁気圏尾部から、昼間側の磁気圏境界付近に飛翔しています。この時、カラオケ装置のスピーカーからチイチイチイという可愛い小鳥のさえずる歌声が聞こえて来るではありませんか。あたかも合唱しているように聞こえることからコーラスと名付けられています。また、時にはガォーと言うライオンの鳴き声に似た声も聞こえることがあります。コーラスは主に地球の磁気赤道面に発生する電波であることが知られています。それが昼間側のGEOTAILの軌道に近いことから、打ち上げ以来、昼間側の全ての軌道において、コーラスが観測されています。天空の小鳥やライオンがいつどうして合唱し始めるのでしょうか？

コーラスの実態を明らかにする前に、まず電波について簡単に説明しましょう。カラオケのマイクに発生する電流は音波（空気の振動）によるものでありますが、アンテナに流れる電流は電波に

よるものです。電波には音波と違って、方向と大きさ（ベクトル）があり、一本のアンテナだけでは電波の正体を正確に調べることはできません。そこで、GEOTAIL衛星には、電界と磁界の各ベクトルを測るために、片側50mの直交に配置したアンテナ2対と直交3軸に配置したサーチコイルが搭載され、電界、磁界の波形を記憶して観測する装置があります。我々はこれを波形捕捉器と呼んでいます。波形捕捉器により、電波の偏り、波面の方向、そして電波のエネルギー密度とその流れ方向が調べられます。

さて、コーラスの観測結果を観て頂きましょう。図1に波形捕捉器で捕らえた3種類のコーラスのスペクトル（時間-周波数特性：声の声紋に相当します）を示します。それらは、時間とともに周波数が低くなるフォーリングトーン、高くなるライジングトーン、そしてそのスペクトルの様子が釣り針に似たフックタイプからなります。強度は色の違いで表わされています。これらを耳で聴くとチイチイチイとなるわけです。図2には波形観測

## GEOTAIL裏話 — アンテナに奇音発生 —

GEOTAIL衛星の打ち上げを数ヵ月後に控えた試験たけなわのある日のこと、衛星に搭載されている通信アンテナ用モーターの回転音がおかしい？との指摘がベテラン試験担当者から出されました。さらに詳しく調べると、モーターの電流、摩擦力とも回転音と同期して上昇していることが判りました。GEOTAIL衛星はスピン型衛星なので、大量の観測データを送るのに、通信用アンテナを衛星と反対方向に回転させ、いつも地球局方向に向ける必要があります。この装置に万一のことが起こると、せっかく取得した観測データは回収不能となり、事実上ミッション終了となってしまいます。さっそく製造メーカーである米国B社に問い合わせると、問題無しとの回答が返されました。GEOTAIL側はこれに納得せず、追加データを取得し再度問い合わせたところ、確実に評価するには送り返してもらう以外に方法がないと連絡してきたのです。時間的に押し詰まっていることと製造メー

カー側の確実な対応を求めるために、システム担当メーカーとISAS試験担当者が現地に出向いて、現物を前に膝詰め談判することになりました。現地での様々な試験と設計担当者を交えての白熱した議論の末、問題のモーターはGEOTAIL担当者の立ち会いの下で徹底的に分解調査され、疑わしいところは部品交換や再調整が行われました。打ち上げを控えての貴重な時間を費やして行われた一連の改修を終えた時、米国側のベテラン技術者も、このモーターは最善の状態にチューニングされたと言い切りました。また、運用中には温度勾配はなるべく避けた方が安全であるとの結論も出され、直ちに衛星の熱設計に反映されました。様々な事情から殆ど冗長構成を持ってないISASの衛星がこれまで多くの貴重な成果を上げて来ることが出来た背景には、この例で見られたような試験段階での徹底した洗い出しが功を奏しているものと思います。

（橋本正之）

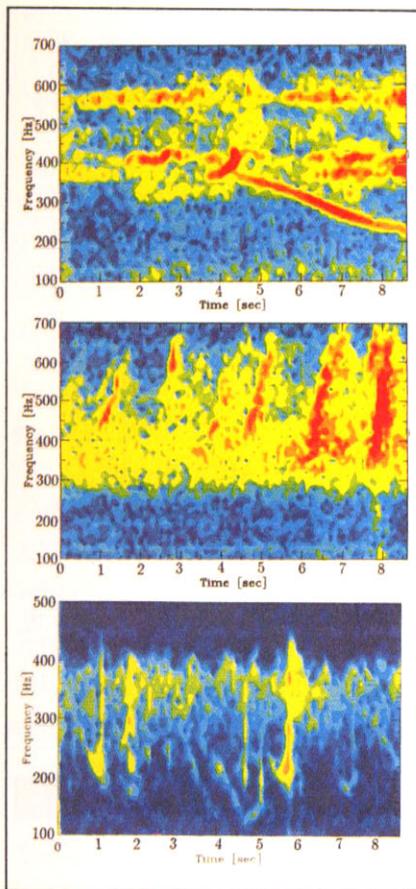
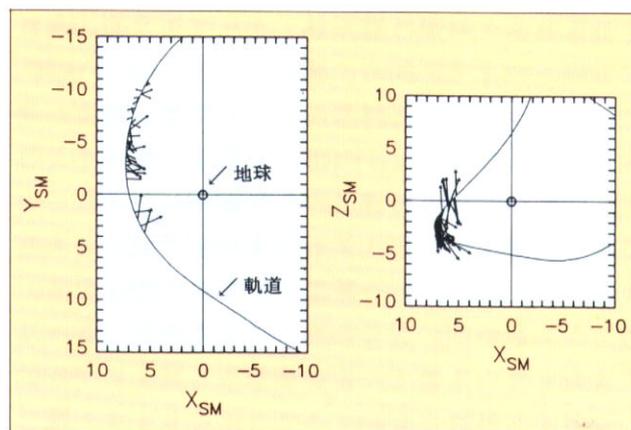


図1  
GEOTAIL搭載波形捕捉器で観測されたコーラスのスペクトル  
(上)フォーリングトーン  
(中)ライジングトーン  
(下)フックタイプ

図2  
磁気座標系におけるコーラスの伝搬方向(矢印)  
(左)磁気赤道面内(X-Y)  
(右)磁気子午面内(X-Z)



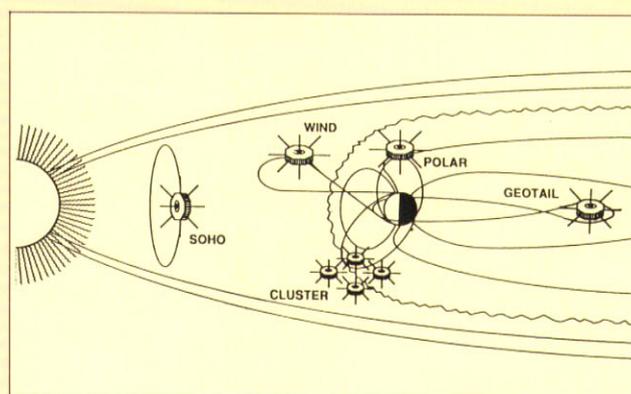
から解析したコーラスの伝搬方向を磁気赤道面内と磁気子午面内の衛星軌道上に矢印で示します。コーラスは午前側で発生しやすく(左図), また矢印が $Z=0$ 付近で反転(右図)していることから磁気赤道近くで発生していることも確認されました。粒子計測器のデータと波動データの比較から、天空の小鳥やライオンは地球磁気圏のプラズマを食べて歌声をあげていることも判って来ています。  
(長野 勇, 八木谷 聡)

## IACGとGEOTAIL衛星

磁気圏の尻尾に貯えられているエネルギーは太陽風からもたらされたものであり、一方オーロラや放射線帯粒子のエネルギーは尻尾からやってきます。したがって、GEOTAIL衛星の観測データを生かすためには、太陽風の中や地球の極域の上空などを飛ぶ衛星と同時に観測を行うことが望まれます。

当初、GEOTAIL衛星は米国の衛星ネットワーク計画と連携するものとして企画されたのですが、その後この計画は拡大され、NASAだけでなくヨーロッパのESAやロシアのIKIの衛星を含む大きな国際共同プロジェクトに発展しました。日米欧露の宇宙科学研究機関が構成するIACGという組織がこのプロジェクトの調整にあたり、共同観測キャンペーンを展開しようとしています。

GEOTAIL衛星とともにネットワークを組む他の衛星は、1994年末から約1年の間につぎつぎに打ち上げられることになっています。すでに94年



11月には太陽風を観測するウインド衛星(NASA)が打ち上げられました。95年3月には尾部の高緯度領域をねらうインターボール・テイル衛星(IKI)が打ち上げられます。引きつづいて太陽観測衛星ソホ(ESA)、高緯度磁気圏観測衛星ポーラー(NASA)、磁気圏のマイクロ構造探査衛星クラスター(ESA)の打ち上げが予定されています。

すでに活躍中の「あけぼの」や「ようこう」とも手を携えて、GEOTAIL衛星はIACGの衛星たちと共同観測を進めます。  
(西田篤弘)

## ◆磁気圏がつくる衝撃波

太陽風は流速数百km/秒、マッハ数=(数~数十)の超音速の流れであり、地球や惑星の磁気圏にぶつかるとその前面に定在衝撃波の壁を作りだします。定在衝撃波の位置は太陽風のマッハ数と磁気圏の大きさで決まりますが、地球から太陽へ向かう方向では地球中心から地球半径の15倍程度、それと垂直な方向では地球半径の25倍程度のところにあります(この位置は地球磁気圏境界面から更に数地球半径ほど外側になります)。衝撃波の壁を通るとき太陽風は遅く熱くなって亜音速の流れに変換されます。同時に衝撃波の後ろ側(下流側)では、プラズマや磁場も圧縮され密度・強度が増大します。図1にはGEOTAIL衛星の1994年2月下旬の軌道に重ねて過去の衛星観測で得られている定在衝撃波面の平均的形状を破線で描いてあります。太陽風のマッハ数は一定なものではなく、数分から数時間、数日のさまざまな時間スケールで変動しているため、定在衝撃波も図1の平均的な位置から外れて変動することになります。図2はGEOTAIL衛星による観測例を示しますが、観測された定在衝撃波の位置は図の平均的位置から太陽方向へ20地球半径以上も寄っています。上の段に示したのは磁場の強度です。太陽風側では10~12nT(ナノテスラ)程度であったのが、衝撃波の下流側では16~20nT程度に増大しているのが分かります。また、下の段は太陽風イオンのエネルギー・時間タイアグラムと呼ばれるもので、縦軸に観測されたイオンのエネルギーをとり、横軸に時間をとります。青~赤の色により、ある時間間隔(この例では1.1ミリ秒間)に指定したエネルギーを持つイオンが何カウントやってきたかを表現しています。静電型測定器を用いているので縦軸のエネルギーは電荷当たりエネルギーkeV/eで表現されています。太陽風側に太い筋と細い筋が2筋見えるのはそれぞれ、陽子と $\alpha$ 粒子(2価のヘリウムイオン)です。定在衝撃波の下流ではこれらのイオンは加熱され幅が広がっているのがわかります(下流では静電型測定器だけではイオンの種類を分解することはできません。磁石・飛行時間計測を組み合わせた質量分析器の出番となります)。GEOTAIL衛星は何回も定在衝撃波を横切っ

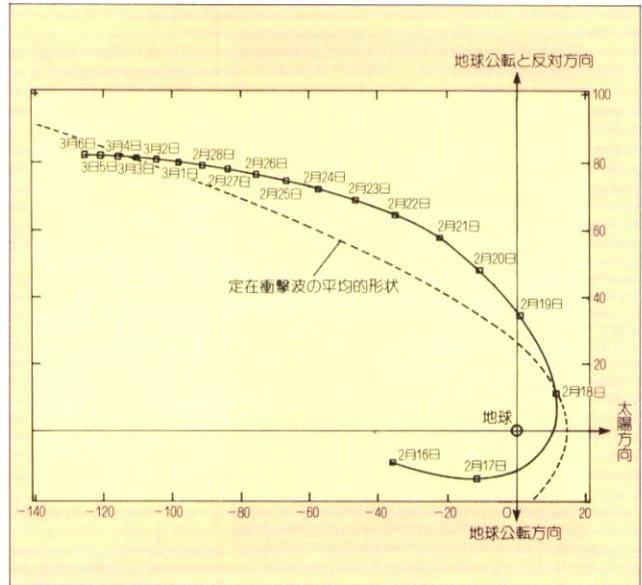


図1 1994.2.16~3.6のGEOTAILの軌道(実線)と定在衝撃波の平均的形状(点線)。□は毎日0時UTにおける位置(座標軸の単位は地球半径)。

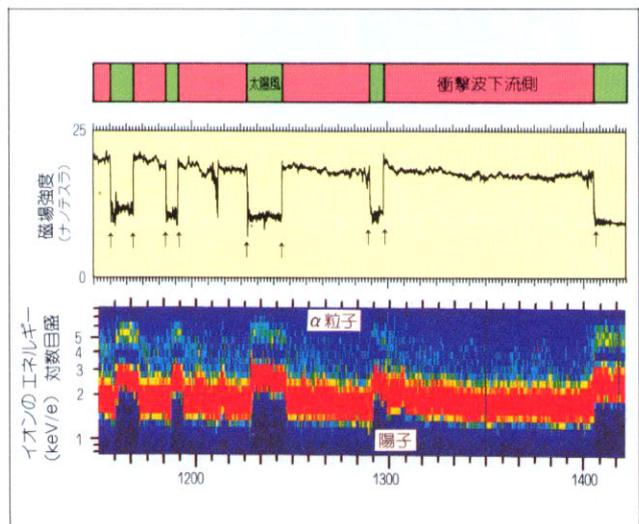


図2 1994年2月22日の磁場とイオンの観測。上段に定在衝撃波を横切った時刻を↑で示した。

ていますが、これは上に述べた位置の変動によると考えられます。詳しい解析によるとこの変動に伴う衝撃波面のはためきの速度は200km/秒に達することもあります。衝撃波による粒子の加熱・加速現象は天体現象に普遍的に見られるものですが、直接観測を行って理論モデルの検証が行えるのは地球近傍の衝撃波しかありません。この意味で地球定在衝撃波は天体物理学の実験室として大きな意味を持っています。

(寺沢敏夫)

## 7. 他の惑星では

GEOTAIL衛星が調べている地球の磁気圏は、太陽風によって作られています。太陽風は海王星や冥王星を乗り越えて、100天文単位(AU)以上まで広がっていると考えられています。他の惑星の周囲にも、地球のような磁気圏が出来ているのだろうか、という疑問が出てきます。太陽風の速度は、太陽近くでの条件で大きく変わります。しかし、一旦加速されてからは太陽からの距離によらず、略一定の速度で吹き出しています。太陽風の密度は太陽からの距離の2乗で減少しますので、太陽風が運んでいる運動量やエネルギーは太陽光と同じように、太陽からの距離の2乗に反比例して減少していきます。太陽に一番近い水星では、地球の6.7倍、木星では約4%の太陽風エネルギーの流れを太陽に面した単位面積で受けています。この太陽風エネルギーを惑星がどのように受け止めるかは、惑星が磁場を持っているかどうかで大きく異なります。磁場は惑星の大きさを越えて、その外側に広がっています。そのため、太陽風か

ら見ると、磁場を持った惑星は実際の惑星より大きく見えることとなります。太陽風から見た地球の半径は、実際の地球半径より20倍ほど大きく見えています。地球の隣の金星は、大きさや重さが地球と殆ど同じ惑星ですが、磁場は持っていません。そのため、太陽風から見た金星は、地球に比べてずっと小さな惑星に見えています。1999年に、私共の探査機PLANET-Bが到着する火星も、充分大きな固有磁場は持っていません。磁場の無い惑星では、太陽風は大気上層部の電離層によって押し止められます。太陽風の動圧と電離層の圧力のバランスで、太陽風との境界が地表から数100kmの高度に形成され、太陽風はそれ以上惑星に近づくこと無く流れ去るものと、考えられていました。実際に、探査機で調べた結果によると、太陽風と惑星大気との関係はもう少し複雑で、太陽風の勢力が強くなると太陽風が惑星大気層深く侵入したり、大気上層部をはぎとり運び去っていくことが、はっきりしてきました。また、惑星によって乱された太陽風の流れが作る一種の磁気圏が、惑星の周囲に作られることもわかっています。太

### シューメーカー・レビー第9彗星 — 木星衝突 観測始末記

1994年7月17~22日世界中の眼を集めつつ、シューメーカー・レビー第9彗星が木星に衝突しました。普段は地球周辺を徘徊して電波を漁っているGEOTAIL衛星も木星を見つめました。実は我々プラズマ波動観測班で受信している800kHz以下の電波では、木星は地球と太陽に次いで明るい星なのです。我々京大超高層電波研究センターでは、特別に臼田でデータ再生をしてもらい、衛星のスピンのよるアンテナ回転によって受信強度が変化するのをうい、素早く木星電波を探す手はずを整えました。

さて17日。夕方研究室に集まると、テレビでは既に東北大のデカメータ波やハッブル宇宙望遠鏡の観測結果が流れていました。電話で時報を流したりして(これが妙に緊張感をあおるのですね)衝突時刻を待ちます。地球からのオーロラ電波が常ならず強く、普通なら喜ぶところが本当に邪魔でした。いつもは静かなくせに。衝突の時刻になると、電波強度の変化を大勢でよってたかって調

べます。一週間この調子で頑張ったのですが、木星電波の明確な強度変化は確認されていません。可視赤外域では衝突の痕跡がはっきり見えたが、かの莫大なエネルギーも残念ながら低周波電波には向かわなかったようです。高エネルギー電子起源のシンクロトロン放射が増大したり、K核衝突の際には衝突地点からはるか離れた北極付近からX線が観測されたりと、高エネルギー粒子が木星磁気圏に供給されたのは確かなようですが、上方の高度では大きな擾乱はなかったようです。でも、電離層に反射され地上から観測できない低周波電波の観測結果を報告できたことは、大きな寄与だったと思います。

今回の“惑星探査”はGEOTAIL衛星の本業ではありませんが、現在PLANET-Bの準備が進行中であり、日本が本格的な惑星探査に乗り出す時代がすぐそこに来ています。そのささやかな一歩であった、と思う日がくるでしょう。

(小嶋浩嗣, 笠羽康正)

	平均的な太陽風のエネルギー (地球を1として)	惑星の断面積 (地球を1として)	太陽風が感じる惑星の断面積 (*を基準)	惑星がさえぎる太陽風のエネルギー(ワット)
水星	6.7	0.14	1.01	$2.2 \times 10^{11}$
金星	1.9	0.9	0.98	$6.1 \times 10^{10}$
地球	1.0	1.0 *	400	$1.3 \times 10^{13}$
火星	0.43	0.28	0.33	$4.6 \times 10^9$
木星	0.04	125	$3.1 \times 10^6$	$4.1 \times 10^{15}$

陽風から見た障害物の大きさを表す物差しとして、太陽風の中に出来る衝撃波の位置が使えます。これによると、火星は実際より大きく見えていることがわかります。火星に固有の磁場があるのではないかという考えの一つの根拠になっています。これらの問題の多くは、PLANET-Bの観測で間もなくはっきりしてくるものと考えられます。

地球の磁場は、太陽風や宇宙線に対する巨大なバリアー「磁気圏」を作って、我々を有害な宇宙線から守っていると、言われます。しかし、これは、良く考えると正しくないことがわかります。地球の磁気圏が受け止めている太陽風のエネルギーは、磁場の無い地球が受け止めるエネルギーの約400倍、磁気圏が受け止めたエネルギーの約1割が磁気圏に取り込まれ、オーロラや放射線帯に形を変えていくわけです。400の1割が40であることを考えると「磁気圏」は、とんでもない「くわせもの」のバリアーだということになります。バリアーどころか太陽風から40倍もの大きなエネルギーを取り込んで、これをいろいろな形、たいていは有害な高エネルギーの粒子に変換する工場として働いていたことがわかります。水星、木星、土星といった磁場を持った惑星では、惑星固有の磁場が強ければ強いほど広い面積で太陽風のエネルギーを受け止め、惑星の系内のエネルギーとして取り込み、これを様々な形に変換している磁気圏が形成されます。水星では、地球の20分の1程度のミニ磁気圏が形成され、大きな太陽風エネルギーを受けて、高いエネルギー密度のもと、短い特性時間でエネルギー変換過程が進行していると考えられます。木星には地球の100倍程度の巨大な

磁気圏が、形成されています。太陽からの大きな距離にもかかわらず、木星磁気圏が取り込んでいる太陽風エネルギーは地球の300倍以上あります。しかし、木星の速い自転速度と多量のガスを放出している衛星イオンの存在は、木星磁気圏を独特なものとしています。衛星イオから放出された重イオンの雲には自転速度に近づけるような電磁力が働きます。速い自転速度を得たイオンの雲は、遠心力によって外に向かって流れ出そうとします。実際の木星磁気圏の大きさは、太陽風の圧力で決まる大きさの倍程度もあり、自転に伴う遠心力が、重要な要素として働いていることが分かります。木星では、自転エネルギーが磁気圏プラズマ過程の主なエネルギー源となっていて、太陽風エネルギーが主なエネルギー源である地球磁気圏とは異なった磁気圏であるともいえます。GEOTAIL衛星による地球磁気圏の研究は、地球とは異なった条件にあるこれらの惑星磁気圏の研究に、足場を与えることになるだろうと考えられます。

(鶴田浩一郎)



私が、GEOTAIL計画(当時は、OPEN-J計画)を聞いたのは、学生の頃でした。その後、メンバーに加えて戴く幸運に恵まれ、更に今回、特集号の編集に携わる事が出来ました。GEOTAIL衛星は青空のあなたの世界で仕事をし、この特集号に納めきれない程の多くの成果を生んでいます。順次、今後のISASニュースで取り上げていく計画です。

(小原隆博)

ISASニュース No.166 1995.1.

ISSN 0285-2861

発行：宇宙科学研究所(文部省) ☎229 神奈川県相模原市由野台3-1-1 TEL 0427-51-3911

The Institute of Space and Astronautical Science

◆ISASニュースに関するお問い合わせは、庶務課法規・出版係(内線2211)までお願いいたします。