

5. 磁気圏と太陽風の境界

昼側磁気圏境界面

ジオテイルは現在近地球周りの軌道に投入され、磁気圏尾部だけではなく昼側の磁気圏の探査も頻繁に行っています。我々が特に興味を抱いているのは、太陽風と磁気圏が接する境界面での相互作用の物理過程であり、どのようにして太陽風の運動量が磁気圏側に運ばれるかです。古くは Dungey(1961)が磁力線の繋ぎ換えリコネクション

によって太陽風のプラズマが直接磁気圏に入ってくるというモデルを提唱しましたが、その後の ISEE 衛星等の観測によって、実際にその様なプロセスが存在する証拠が見つかってきました。幸いなことに高い時間・空間分解能を持った粒子計測器と電場、磁場の計測器の組み合わせ、さらに磁気圏境界面に沿った軌道を持つジオテイルは、昼側境界面において過去の衛星以上の成果を出しつつあります。以下に述べるのはリコネクションが

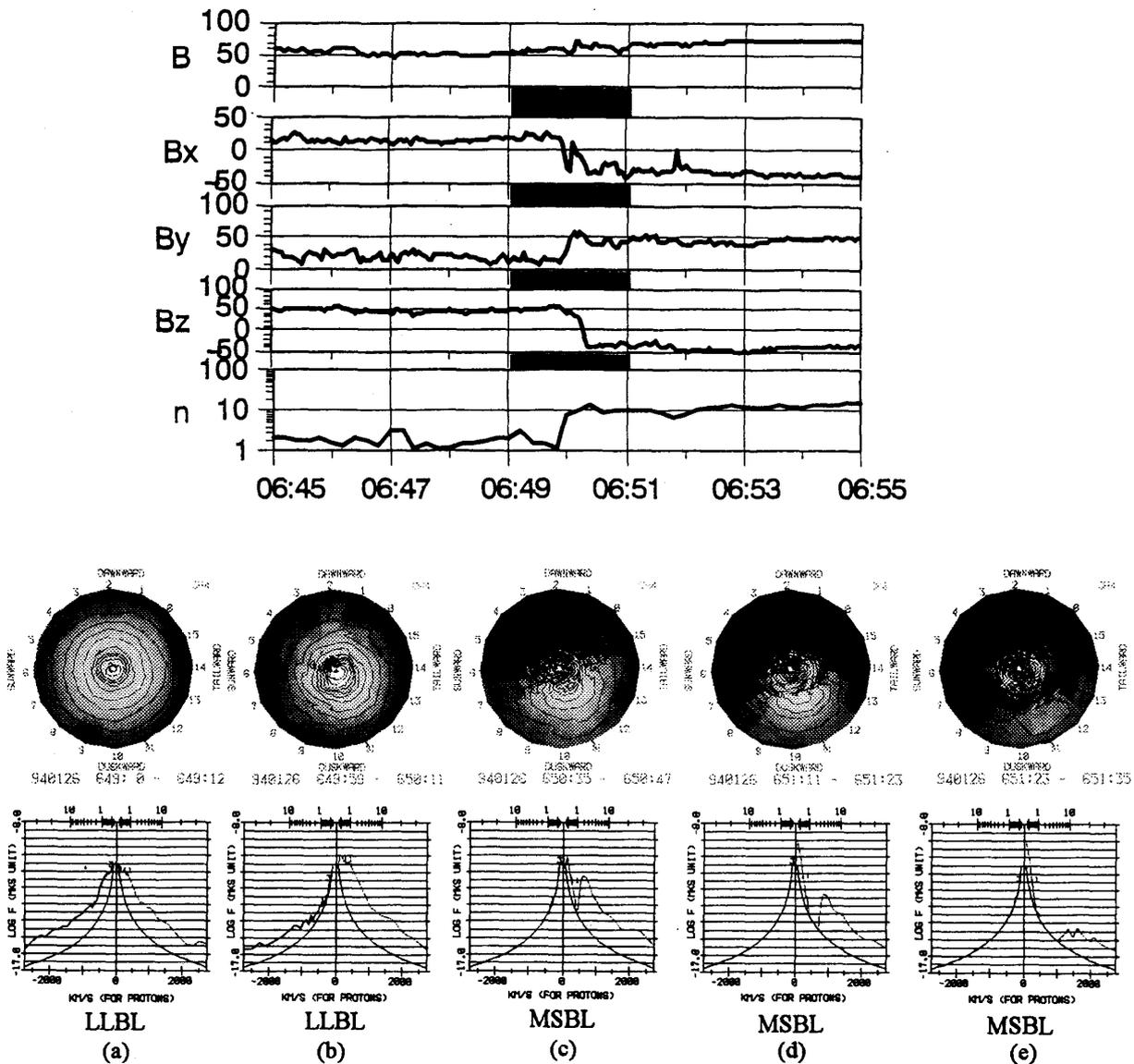


図5-1 1994年1月26日の磁場とイオン密度のデータ

起こっている位置を同定する事に成功した観測の1例です。

観測は1994/1/26 06:49-06:52UTにかけて行われました。衛星は磁気赤道面より2地球半径(R_E)北側を飛行中であり、磁気圏境界面を内側から外側に通過した。図5-1の上図に6:45から6:55までの磁場の大きさ(B , 単位はnT), その太陽方向の成分(B_x), 夕方方向の成分(B_y), 北向き成分(B_z), そして一番下の段にはイオンの密度($/cc$)を示しました。6:50に磁場が磁気圏の内側を示す北向きから太陽風側を示す南向きに変化し、イオンの密度も一桁上がっています。下図上段に示すプロットは衛星のスピ平面内での2次元のイオン速度分布函数(左手が太陽方向, 上が朝方方向)です。この下に、磁力線に沿った1次元のイオン分布函数を示します(磁力線の方向は2次元の図でセクター番号3-11)。横軸は速度(km/s), 縦軸は位相空間密度です。左から右へと時間が進行しています。図(a,b)は衛星が磁気圏境界面の内側(Low Latitude Boundary Layer: LLBL)にあり、磁気圏起源の温度の高い粒子分布と、太陽風起源の温度の低い分布の混合した等方的なイオン分布が見られます。図(c)ですでに衛星は境界面を通過し Magnetosheath Boundary Layer(MSBL)にいます。ここでは太陽風起源のプラズマ(図中央部分)と磁気圏起源のプラズマ(500km/sより速い速度領域)がはっきりと分離されていることが分かります。図(d),図(e)と時間が進むにつれ衛星は境界面から離れていったと考えられますが、それに伴い、磁気圏起源の分布にみられる低い速度域における粒子数の落ち込みが顕著になっています。これは、有限な領域から電場ドリフトをしてきた粒子に特徴的な現象で Velocity Filter Effect と呼ばれています。この場合、有限な領域とは磁気圏境界面であり、領域の境界はリコネクションが起きている場所です。ここでは示しません電場、磁場の大きさ、また境界面と衛星

の相対速度が別の方法で決定でき、これらの情報と粒子数の落ち込みが起こる速度(図cでは500km/s, 図dでは700km/s)から、リコネクションは衛星の北側4.8 R_E の位置で起きていた事を示すことが出来ます。衛星のいた位置を考えに入れますと、これは磁気赤道面から約7 R_E の位置にあたります。これまで、特に太陽風磁場が南向きの時に起こるリコネクションの場所について様々な議論がありましたが、この例は磁気赤道面からかなり離れた所でもリコネクションが起こる事を観測から直接示したものです。(中村正人)

朝側磁気圏境界面の方向とその時間変動

GEOTAIL 衛星は地球磁気圏尾部を観測することがその主目的ですが、昼側の磁気圏境界面に対しても過去の衛星と異なる新しい観測を可能とするような特徴を備えており、その一つは衛星の軌道特性にあります。GEOTAIL の軌道は、1995年2月までその遠地点が磁気圏尾部に留まるように制御されてきました。それに対応して近地点は昼間側にあったのですが、その近地点通過の幾つかでは、衛星が磁気圏境界面を通過するように軌道が設定されました。図5-2はそのような軌道の一

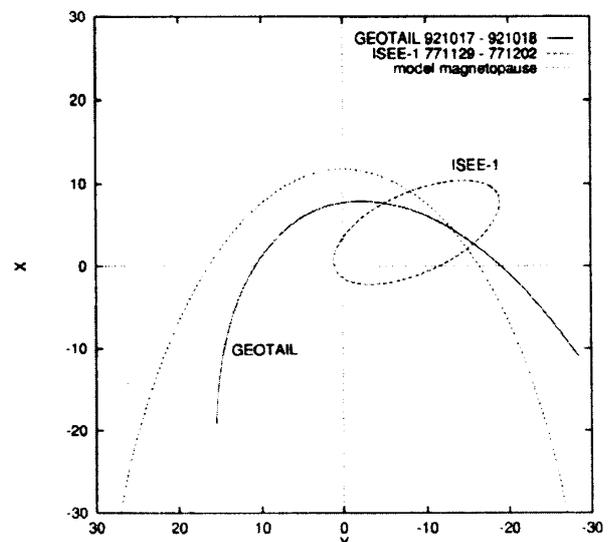


図5-2 磁気圏境界面を通過するGEOTAILの軌道

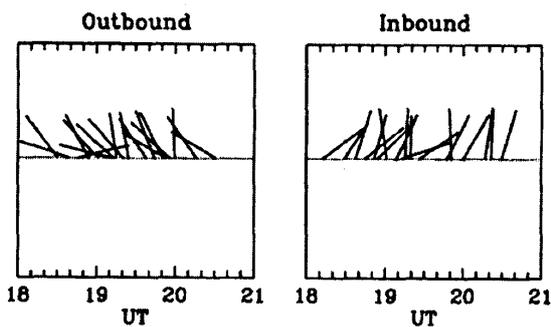


図5-3 境界面の方向

例です。比較の為に、過去に境界面観測を行なった衛星 ISEE-1 (米) の軌道の一例も併せて示し、また、モデルによる磁気圏境界面も示しました。この図で、ISEE-1 の軌道が境界面に対し垂直に近いのに対し、GEOTAIL の軌道は平行に近くなっています。このような軌道は過去の衛星には無かったものであり、長時間に亘る境界面近傍の観測を可能にしました。その結果、境界面の時間的変動が今までより明瞭に観測されています。

その一例として、GEOTAIL が図5-2 で示した軌道を取った時には、図上の軌道とモデル境界面とが交わる近辺の3時間の間に衛星が磁気圏に入りを繰り返し、通算45回以上も磁気圏境界面を通過したのが観測されました。これほど多くの連続的観測は GEOTAIL が初めてで、それは上記の軌道の特徴に負う所が大きいのです。

この現象についてより詳しく知る為に、我々は各磁気圏境界面通過時の磁場データから境界面の法線方向を調べました。具体的には、磁場の「湧き出し無し」の性質から境界面に垂直な磁場成分は一定ですので、逆に磁場データからそのような方向を見つけるという事をしました。その結果が図5-3です。左図は衛星が磁気圏を出る場合、右図は衛星が磁気圏に入る場合、と分けて表示しました。図の横軸は図5-2のモデル境界面に平行な方向(左が太陽方向)、縦軸は垂直な方向(上が外向き)、となっており、また、横軸は同時に時間軸でもあ

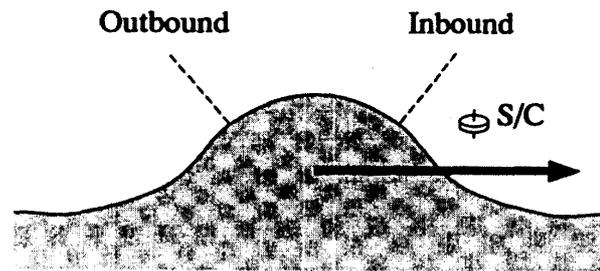


図5-4 境界面の構造

ります。すなわち、各法線単位ベクトルの原点が横軸の時間に対応しています。この図は、磁気圏に入る時と出る時とで境界面の方向に系統的な差がある事を明瞭に示しています。この系統性は、境界面が局所的に変形しておりそれが反太陽方向に進んでいると考えれば理解出来ます(図5-4)。この成因は、局所的磁気リコネクション、もしくは境界面での流れのシアーによる不安定性と考えられ、今後多数の例を解析することによって、太陽風条件への依存性などから成因を明らかに出来るものと期待されます。

(河野英昭)

境界層を詳しく見ると

磁気圏境界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、その二つのものがお互いにま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、磁気圏境界のすぐ内側で太陽風と磁気圏プラズマのまじりあった領域(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でなのです。

まずここで、物がまじるといっているのはどういうことかを考えてみます。分子レベルでみれば、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お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く混ぜ合わせることができるのです。

話を磁気圏境界に戻しましょう。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。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・波動相互作用がそ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、磁気圏境界では何なのでしょう。磁気圏境界は、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1km以下の長さを正確に表現しながら、10000km以上の空間ス

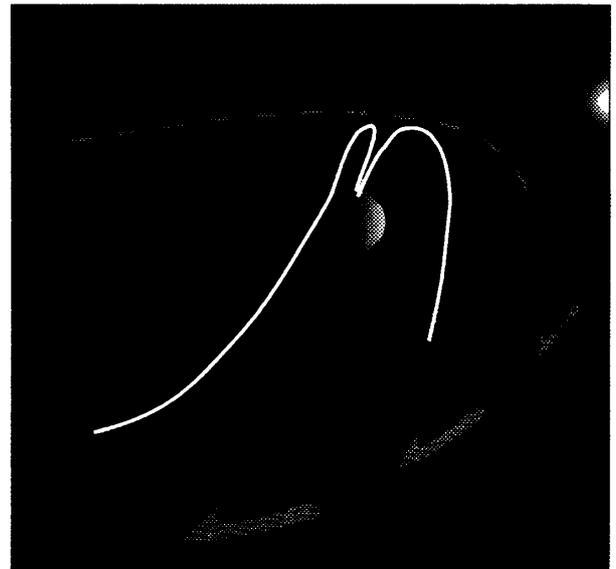


図5-5 磁気圏境界層の描像

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5-5)は、外側には太陽風プラズマが磁力線を後ろに引き延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)

2000万kmまで伸びる地球の尻尾

GEOTAIL衛星と同じ時期に、ずっと離れた場所で地球磁気圏の尻尾を観測した日本の探査機があります。それは1985年に、ハレー彗星の探査のために打ち上げられた「さきがけ」です。

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5-6)。2000万km付近を観測した他の衛星は磁場観測を行っておらず、イオンの量や種類から「尻尾があるのではないか」と推定するにとどまっていた。

地球を遠く離れ、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、同年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、観測に成功しました。(ISAS ニュース No.131, p2-p6 参照。) これまでの探査機と大きく異なることは、磁場・プラズマ・波動の3つの観測装置が揃って観測を行なったことです。

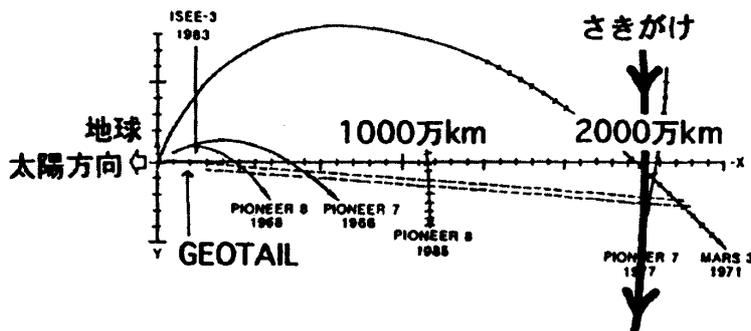


図5-6 地球を固定した座標系で描いた黄道面内の「さきがけ」の軌道。左側が太陽方向。

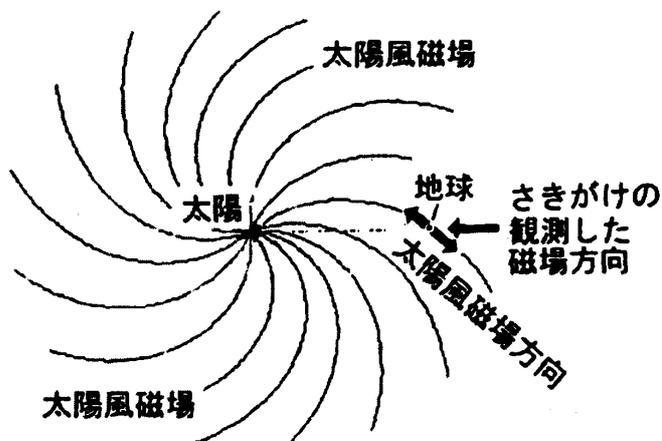


図5-7 太陽に起源をもつ惑星間空間磁場は、太陽の自転のため渦巻き状になる。

惑星間空間の磁場は太陽に起源を持っているので、太陽自転のために地球に対して45度斜めになっているのが普通ですが、「さきがけ」が地球の真後ろで観測した磁場は、24時間以上にわたってほぼまっすぐ太陽方向を指していました(図5-7)。これはまさに太陽風に吹き流された「地球の尻尾」独特の磁場の向きです。「地球の尻尾ではなにがおきているか」の項の図を見てもわかるように、地球の尻尾では、北極につながる磁場なら「まっすぐ太陽向き」、南極につながる磁場なら「まっすぐ反太陽向き」となります。ですから「さきがけ」は、北極につながる磁場のはるか下流の部分を観測したと考えられるわけです。これを確認するには、尻尾の外にいる他の探査機の観測結果と比べて見るのが一番ですが、この時はGEOTAILも仲良く地球の尻尾の中にいたため、対照実験とはなりませんでした。そうはいつても、惑星間空間磁場がこれほど長い期間まっすぐ太陽向きとなることは非常に稀ですから、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。太陽風の速度が大きいときなどは惑星間空間でも波動強度が強くなる場合がありますが、その場合よりも周波数の範囲が広い(高周波側に広い)ことが特徴です。

おもしろいことに、プラズマ観測器では通常の太陽風と変わらない速度、密度、温度が示されました。これは太陽風と地球磁気圏の境界面でプラズマがどのように混じりあっているのか(あるいはいないのか)、地球からどれほど離れると混合が進むのか、などを

考える上で、貴重なヒントを与えてくれる結果といえるでしょう。

(中川朋子)

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ぐとしましょう。いま、GEOTAIL 衛星が夜側の磁気圏尾部から、昼側の磁気圏境界付近に飛翔してきました。この時、カラオケ装置のスピーカーからチイチイチという可愛い小鳥のさえずる歌声が聞こえてくるではありませんか。あたかも小鳥が合唱しているように聞こえることからこれはコーラスと名付けられています。また、時にはガオーと言うライオンの鳴き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。それが昼側の GEOTAIL の軌道に近いことから、打ち上げ以来、昼側の全ての軌道においてコーラスが観測されています。では、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、電波の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る方向が調べられます。

さて、コーラスの観測結果を見て頂きましょう。

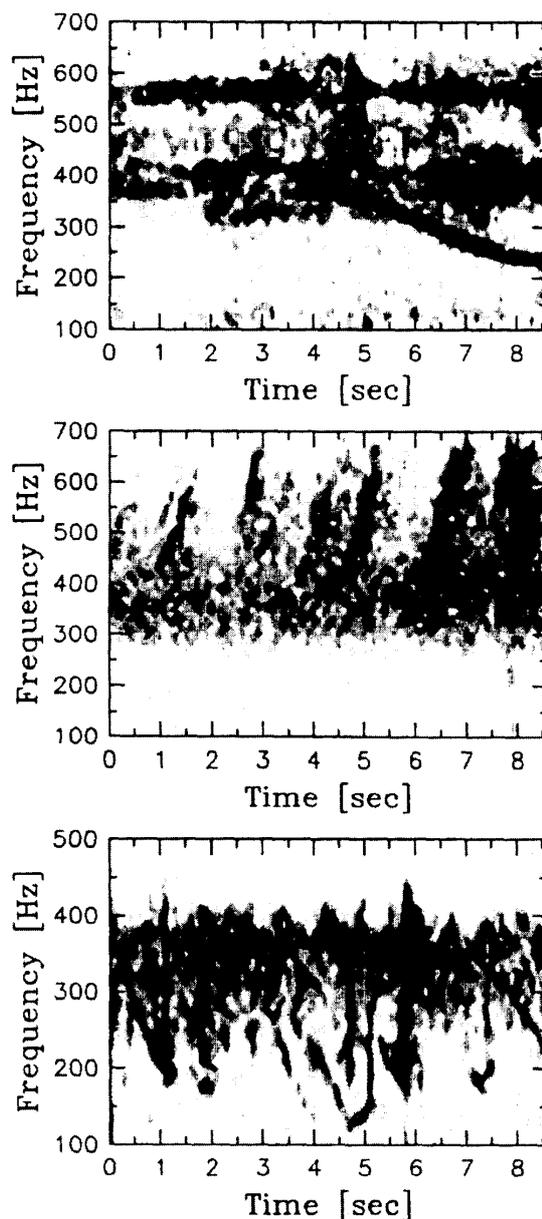


図5-8 GEOTAIL 搭載波形捕捉器で観測されたコーラスのスペクトル

(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5-8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(時間一周波数特性: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。強度は色の濃淡で表されています。これらを耳で聴くとチイチイチとなるわけです。図5-9には波形観測から解

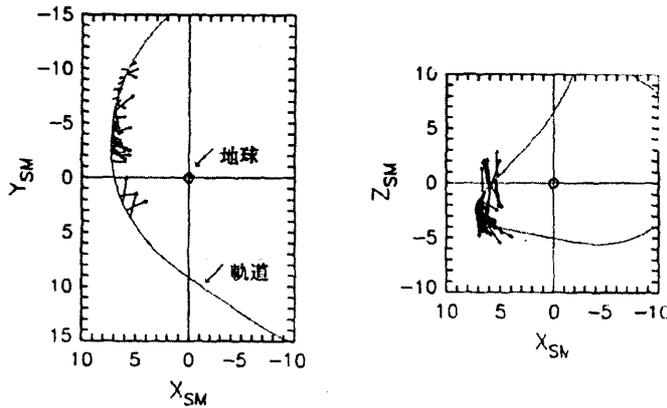


図5-9 磁気座標系におけるコーラスの伝搬方向(矢印)
(左) 磁気赤道面内(X-Y) (右) 磁気子午面内(X-Z)

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(ここでは、 $X > 0$ が太陽方向、 $Z > 0$ が磁北の方向を表しています)。コーラスは午前側で発生しやすく(左図)、また矢印が $Z=0$ (磁気赤道面)付近で反転(右図)していることから磁気赤道の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きています。

(長野 勇, 八木谷 聡)

磁気圏がつくる衝撃波

太陽風は流速数百 km/s、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5-10にはGEOTAIL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5-10の平均的な位置から外れて変動することになります。

図5-11はGEOTAIL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5-10の平均的位置から太陽方向へ20地球半径近くも寄っています。上の段に示したのは磁場の強度です。太陽風側では10~12ナノテスラ程度であったのが、衝撃波の下流側では16~20ナノテスラ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。白~黒の濃淡により、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

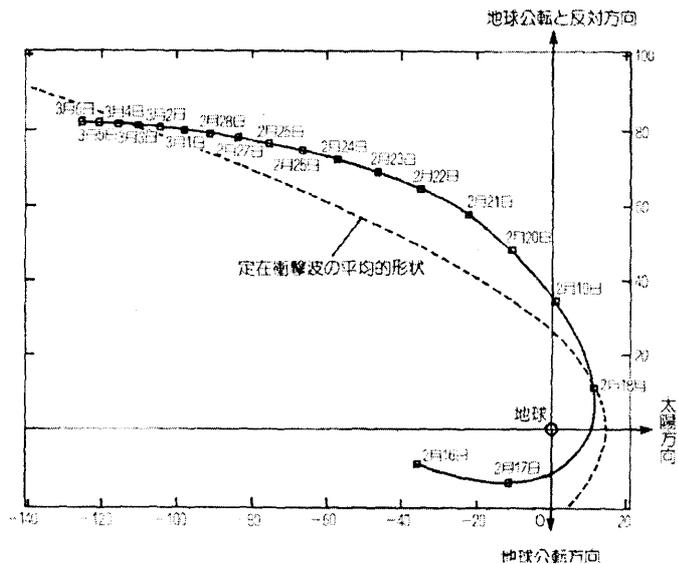


図5-10 1994年2月16日より3月6日までのGEOTAILの軌道(実線)と定在衝撃波の平均的形状(点線)。□は毎日0時UTにおける位置(座標軸の単位は地球半径)。

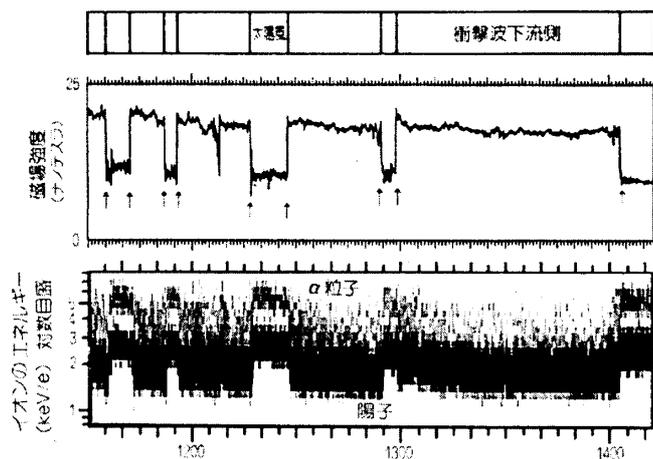


図5-11 1994年2月22日の磁場とイオンの観測。上段に定在衝撃波を横切った時刻を↑で示した。

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 α 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

いるのが分かります。(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は何回も定在衝撃波を横切っていますが、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/s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、たとえばエネルギー10の15乗eV程度までの銀河宇宙線は超新星の衝撃波によって加速されたと考えるのが定説ですが、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)

6. 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通り越して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おりません。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