

1. 序

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）



図1-1 「ようこう」軟X線望遠鏡が見た太陽

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、太陽に近づくとき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る前面では磁場が押し縮められ形になると共に、地球の夜側では逆に引き延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1-3にある

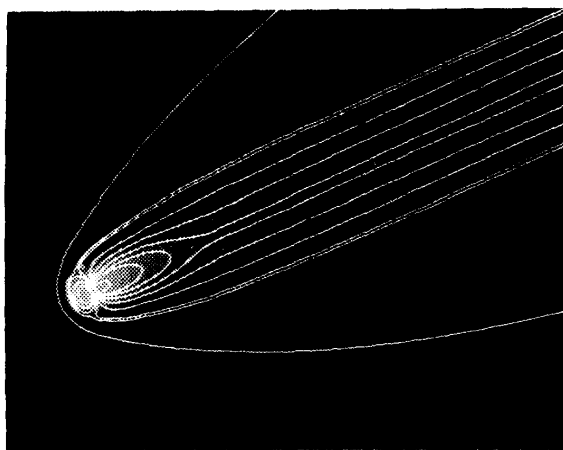


図1-2. 太陽光に吹き流される地球磁場（彗星の尾に相似的に重ねてある）

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も長く、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も大きく、日本の電力消費量に匹敵します。このよう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夜側に伸びています。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。電流は広い領域に互って流れており、そのエネルギーはとても大きなものです。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、この磁気中性面付近には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次元的には磁気圏尾部赤道域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も大きなものです。エネルギーを吸い込んでプラズマシートのプラズマは、熱くなっているようです。

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

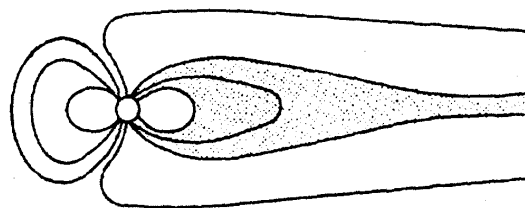


図1-3. 地球磁気圏の断面図（中央の濃いところがプラズマシート）

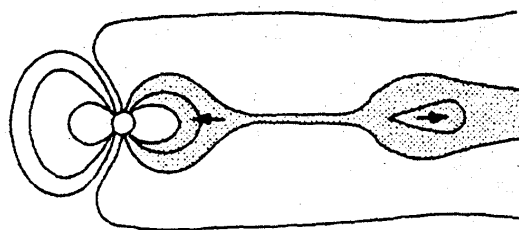


図1-4. リコネクションによるプラズモイドの発生

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せんが、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行きます。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。この国際協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 衛星の軌道とミッション機器

磁尾停留と月

GEOTAIL衛星はその名の通り地球磁気圏の尾部を探る衛星で、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時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