

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

であれば、衛星の速度は極めて遅く長時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)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2-1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もって逆らうには、莫大な燃料が必要で不可能とい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、地球には月があります。この月の重力を利用して軌道を変更する「二重月スイングバイ」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こめるとともに、図2-2にしめた様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事が出来ます。GEOTAILでは、約2年間の磁尾停留のために計14回もの月スイングバイが必要とされましたが、例えば1回の月スイングバイでの代表的速度変化量約1km/秒(月の公転速度)を重量1トンの衛星に搭載した比推力200秒の推進系で行なおうとすると、それだけで約400kgの燃料が必要になる事からも、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事が、わかります。

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になったもので、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、尾部の先を探る期間(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

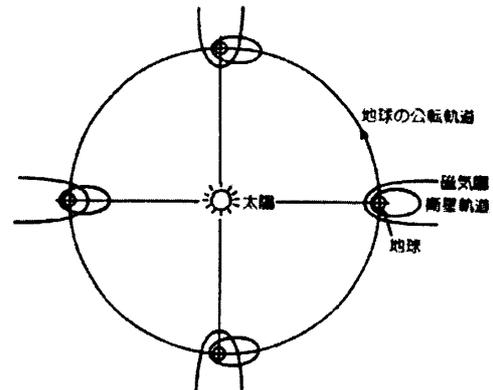


図2-1. 衛星軌道と磁気圏尾部

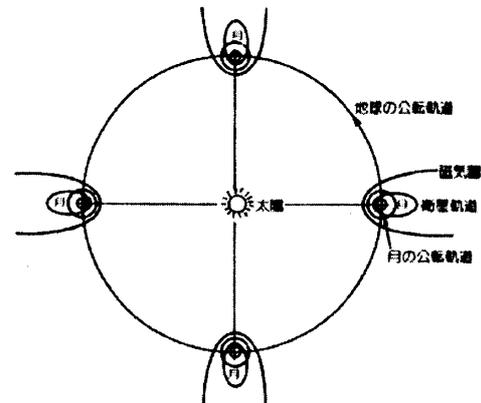


図2-2. 月スイングバイを利用して衛星軌道を常に磁気圏の中に入れる

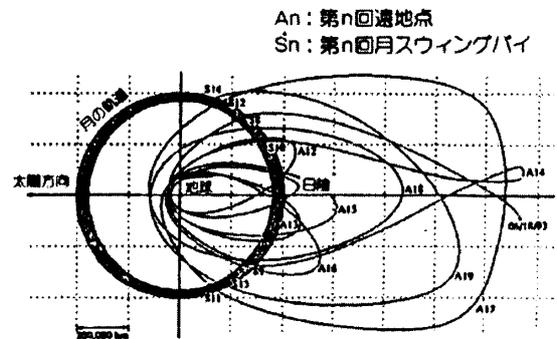


図2-3. GEOTAIL 遠尾部フェーズでの軌道(太陽と地球を結ぶ線を固定した座標系で表示。黄道面に投影)

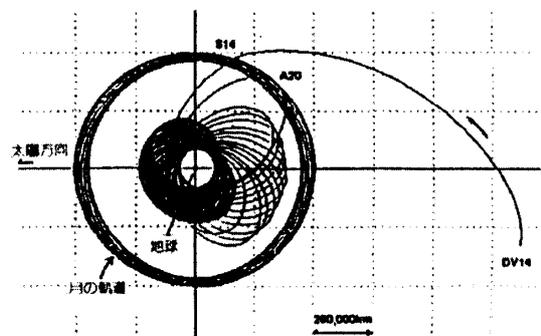


図2-4. GEOTAIL 近尾部フェーズでの軌道(太陽と地球を結ぶ線を固定した座標系で表示。黄道面に投影)

球に比較的近い尻尾の部分を直接計測する期間(近尾部フェーズ)に分けて計画されました。

図2-3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、二重月スイングバイによって遠地点が地球の夜側にある事をわかりやすく示すため、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回の月スイングバイに「さきがけ」による2回のスイングバイを加え、日本はスイングバイの実施回数ではダントツで世界一になっています。

図2-4は近尾部フェーズにおける軌道ですが、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付近の尻尾の振舞いも興味深い事が判ったため、遠尾部からの軌道の遷移を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)

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てた電子とイオンからなっています。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^3 当たり1個あるか無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

粒子同志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。中には、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為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いエネルギーにまで加速されるのかを調べる事になります。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握っています。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(電子及びイオン)、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為の5つの道具です。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7つ道具が搭載されました(下表参照)。

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でも一番経験が豊富な分野であり、波動観測は日本のお家芸であります。が、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来ました。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

観測装置	主任研究者
磁場	園分 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(京大)

装置にはさまざまなアイデアが散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、円筒部の外側には太陽電池が張り巡らされています。打ち上げ時の重量は約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す。打ち上げ時とことわったのは、姿勢制御用の燃料約360kgを搭載していたからで、これまでにその2/3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本が伸び出す様になっています。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一本が途中で引っかかって伸びなくなりました。しかし、これは想定していた事の一つで、一旦戻して再伸展することで事無きをえました。一方、磁力計用マストの伸展の方はもっと大変で、衛星のスピン周期の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出来ました。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したが、将来に対する教訓を得ると言う冷汗で済んだのは、幸運と言うほかはありませんでした。

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衛星からの人工的な磁場擾乱の影響を軽減する為ですが、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極力小さくするために基準を設定して、種々の対策が練られました。例をあげれば、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

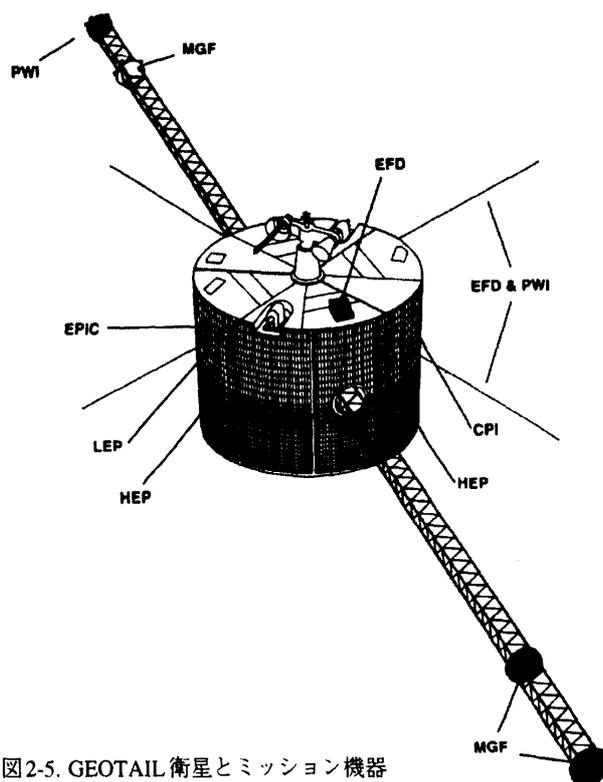


図2-5. GEOTAIL衛星とミッション機器

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。書けば簡単な事のように思えますが、実際は、波動観測班や磁場観測班とメーカーの努力は大変なものでした。その結果、GEOTAIL衛星は電磁氣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、国際ワークショップに於てGEOTAILの観測結果を米国の某有名教授がため息をつきながら見ていたと言う噂が飛ぶぐらい、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、ベストをつ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蔭だと思えます。又、この分野では初めて行な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は有形無形に多くの事を教えられました。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出来る

事を信じています。

(向井 利典)

3. 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。

磁場の接線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の風圧によって引き延ばされていますが、磁力線が引き延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3-1)。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の手気ままな複雑な運動しています。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3-2)。太陽風によって磁力線が引き延ばされたのも、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延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

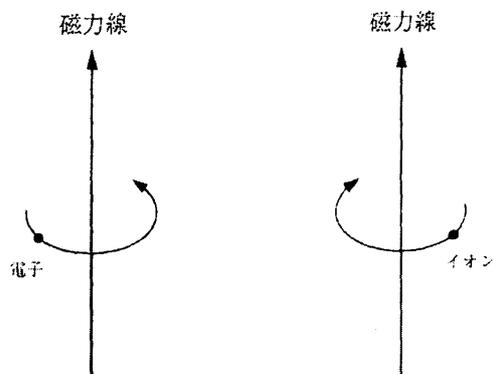


図3-1 磁場中でのプラズマの運動

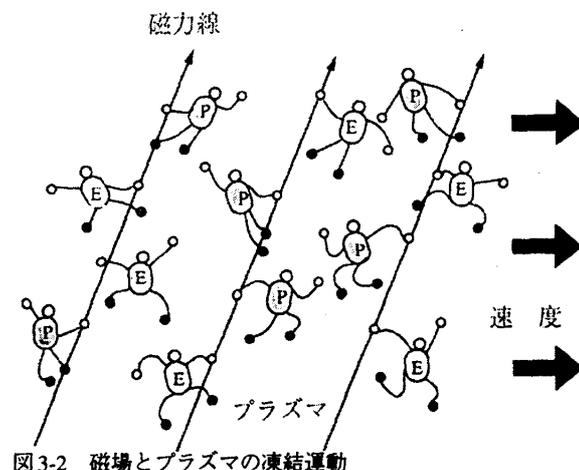


図3-2 磁場とプラズマの凍結運動