

## Geotail 衛星の 2008—2012 年の観測計画

Geotail の運用延長期間においては、(1) 定評のある高性能観測を磁気圏の未観測領域において実施、(2) 一部観測機器の設定を変更し次世代観測に向けた高時間分解能観測に挑戦、(3) 定評のある高性能観測を 2007 年に打ち上げられた NASA・THEMIS などとの共同観測という枠組みで実施し、磁気圏ダイナミクスの多点観測を充実した形で実施する。特に、THEMIS との共同観測には、Geotail の軌道が真に THEMIS 編隊の観測を支援（あるいは、場合によっては逆の関係にもなる）する形にあるので、添付したサポート・レターに見られるように全世界の研究者からの強い期待が寄せられている。

### 1.1. はじめに

Geotail 衛星は、磁気リコネクション、衝撃波、渦乱流、プラズマ中の波動粒子相互作用など宇宙プラズマ物理学の基礎的物理過程を、地球磁気圏において精密な現象「その場」での観測から解明するという、宇宙空間物理学の特徴を生かしながら、その成果がより広い宇宙科学分野へと波及する観測を行ってきている。Geotail 衛星は地球を 5.2 日で周回する楕円軌道 ( $9 \times 30 R_E$ ) にあるが、その長軸が公転ともに磁気圏に対して回転することで、その探査領域は、太陽風、磁気圏シース (Magnetosheath)、磁気圏前面境界面 (Dayside Magnetopause)、磁気圏境界領域 (LLBL, Low-Latitude Boundary Layer)、磁気圏近尾部という磁気圏物理学にとって重要な観測領域をすべて網羅している。

Geotail 衛星に搭載されている観測機器は、15 年を経た 2007 年の時点でも、現在観測を継続している欧州の Cluster-II 衛星や 2007 年に打ち上げられた米国の THEMIS 衛星と比較しても、世界最高水準の観測性能を有している。この間、宇宙プラズマ物理学においては、イオンと電子が一体の流体として運動するとする磁気流体力学 (MHD) レベルの理解から、イオンと電子が分離して運動することにより Hall 物理レベルでの理解、さらに、イオンと電子の粒子性を考えた物理レベルでの理解へと進んでいる。Geotail 衛星の観測は、イオンの粒子としての振舞を十分に分解できる観測レベルであり、Hall 物理レベルでの理解に大きく貢献してきた。さらに、波動との相互作用という見地から、電子の粒子性を考えた物理レベルでの理解へも端緒を開いてきた。

宇宙プラズマ物理学が粒子レベルでの根源的理解へと研究分野の目標を進化させつつある今、精密な「その場」観測の重要度は高まる一方であり、この研究トレンドをリードしたという過去の功績においても、今後とも現役でその十分に高性能観測を続行し磁気圏ダイナミクスの多点観測の充実を担う役割についても、Geotail 衛星に対する世界からの注目は高い。

宇宙プラズマでは、電子・イオン・MHD の 3 つのスケールの物理過程がそれぞれ独立にではなく各レベル間が密接に連動し、粒子性が支配する物理過程が磁気圏のような大きな MHD スケールの現象を規定するとともに、大きな MHD スケールの中で粒子性が発動する、という連携が起きる。このような、各スケール間の結合過程 (Cross-Scale Coupling) を理解することが、地上のガスとは全く異なる振る舞いを示す宇宙プラズマの本質に迫る道であることがわかってきた。この中からおよそ 10 年後の次世代観測が企画されつつあり、その一方で、その時期までに既存の衛星でなされるべき準備が考案されてきた。この背景をふまえ、Geotail 衛星によるこれからの観測は、従来の研究をさらに進展させると同時に、新たな研究へと展開させなければならない。新たな研究は次の 3 つの方向性で特徴付けることができる：

- (1) 新しい観測領域の開拓
- (2) 新しい観測モードによる観測
- (3) 新しい手法による観測

これらの研究の方向性による観測目標は、次の太陽活動度極大期を含む 2008—2012 年の最低 5 年間の観測期間によって成果が期待できると考えられる。以下にこの 3 つの観点からの研究計画の概要を示す。

## 1.2. 新しい観測領域の開拓

Geotail 衛星の軌道は当初、磁気圏尾部の磁気リコネクションを観測するために、磁気圏尾部赤道面(プラズマシート)に長期滞在するように設計された(図 1.1-2、図 1.1-3、図 3.2-1 を参照)。軌道制御のための燃料がなくなったために、軌道制御をやめた 1999 年以後、軌道は、主に月による摂動のため太陽と地球を結ぶ線を中心に回転するようになった。このため、磁気リコネクションが起きる領域に継続して滞在する時間は短くなる一方、磁気リコネクションが起きる領域を斜めに通過する面白い軌道を持つことになった。現在の磁気リコネクションの研究の課題の 1 つとして、従来の理論研究が東西方向の一様性を仮定した 2 次元モデルをもとにしてきたが、イオンと電子の分離した運動からでてくる Hall 物理過程の当然の帰結として、磁気リコネクションの 3 次元的構造を調べることである。Geotail 衛星の軌道の変化は、この研究への寄与が期待できる。

さらに、この軌道の変化により、Geotail 衛星はより磁気圏尾部の高緯度領域にも滞在するようになってきている(図 3-2.2 を参照)。磁気圏尾部の高緯度領域の磁気圏ローブ (tail lobes) は、プラズマが磁気圏尾部の赤道面に比べて、低温で希薄なプラズマで満たされている。したがって、従来の衛星の観測機器は、このようなプラズマを観測するのに適したものではなかった。Geotail 衛星のプラズマ観測機器は、地球磁気圏

の遠尾部の低温で希薄なプラズマも観測できるように設計されているので、図 3.2-3 に示すように、従来に比べて精度の高い観測ができています（Geotail 衛星の観測により、地球磁気圏の遠尾部には低温で高密度のプラズマが存在することが確認された）。すでに、磁気圏ローブ（tail lobes）およびその境界面付近で、新しいプラズマ領域が存在することを示す観測が行われている（図 3.2-4 を参照）。

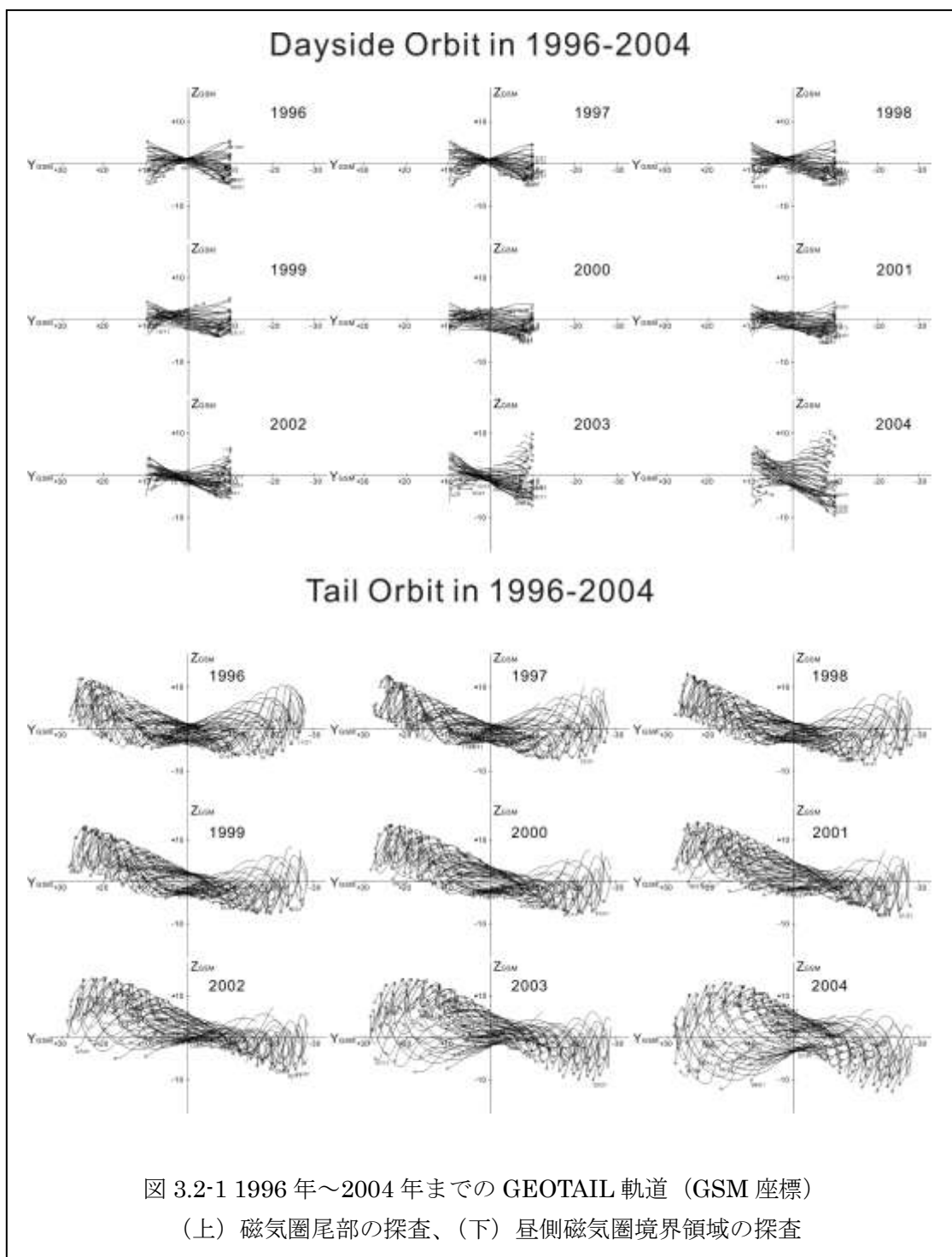


図 3.2-1 1996 年～2004 年までの GEOTAIL 軌道（GSM 座標）  
 (上) 磁気圏尾部の探査、(下) 昼側磁気圏境界領域の探査

さらに、磁気圏尾部と太陽風の境界領域を、高緯度まで探査できるようになってきている。この境界領域での太陽風のプラズマの磁気圏への流入に関しては、太陽風の磁場の方向により、流入が起きる領域が高緯度に偏るであろうことが、理論的に予想されている。磁気圏尾部の両側（夕方側と朝側）の南北高緯度という4つの領域での探査が可能となることで、まず理論の検証をする必要がある。これは基本的な問題でありながら、このような4つの領域での十分な観測は、これまで実施されていない。

軌道面の変化は、地球磁気圏の前面での磁気リコネクションの観測にも有利に働く。地球磁気圏前面の磁気リコネクションの研究では、「どのような条件によりどこで起きるか (component merging vs. anti-parallel merging)」、「何が継続時間を決めているか (quasi-steady vs. transient)」が、大きな課題である。ここでも、太陽風の磁場の方向や変動が鍵となっていると考えられている。太陽風磁場方向が動くことで磁気リコネクション領域が動く、しかも、磁場の東西成分が強い場合には、赤道面から大きく離れる、という理論予想がある。これも基本的な問題でありながら、十分なサーベイから

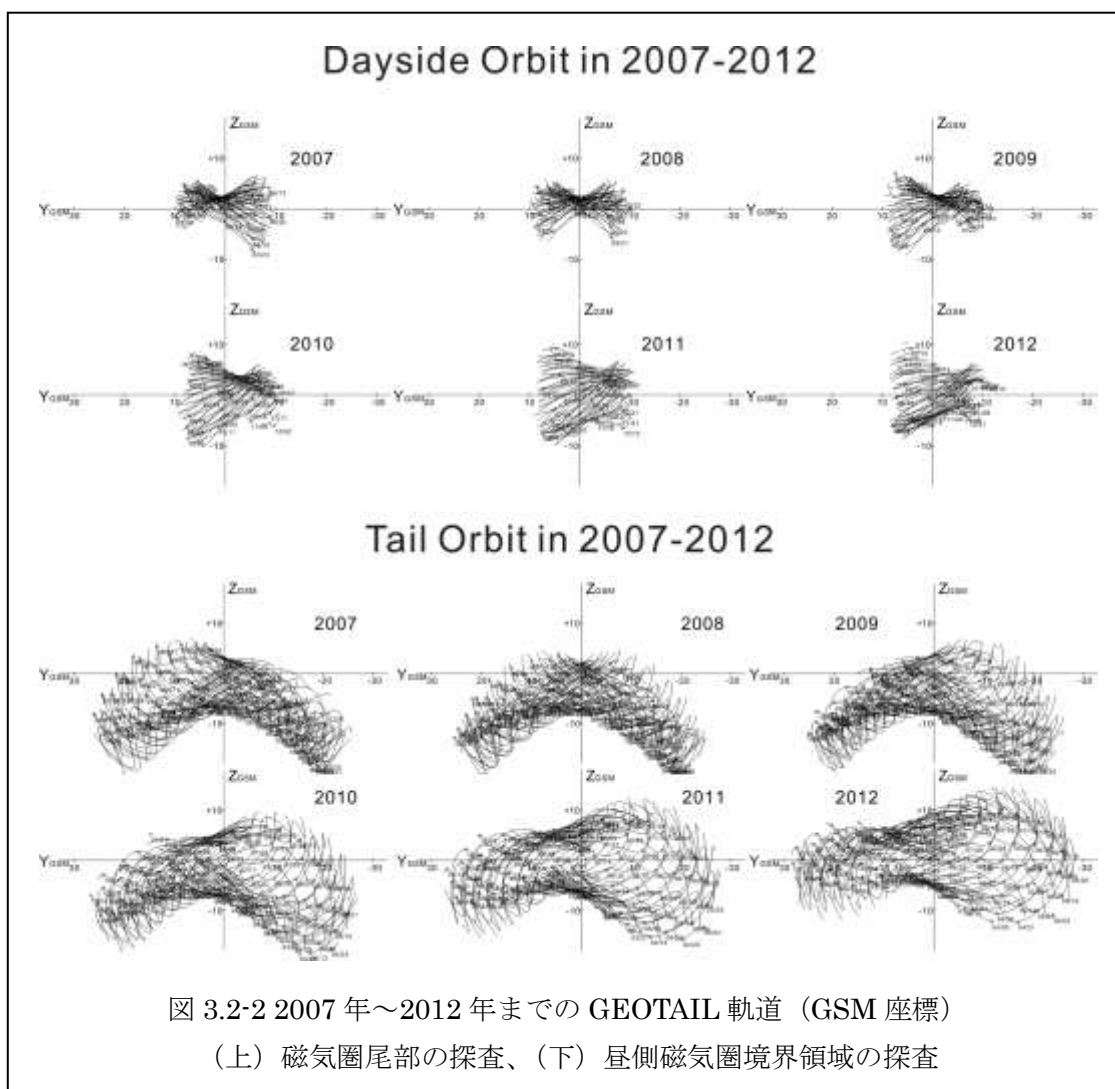


図 3.2-2 2007 年～2012 年までの GEOTAIL 軌道 (GSM 座標)  
 (上) 磁気圏尾部の探査、(下) 昼側磁気圏境界領域の探査

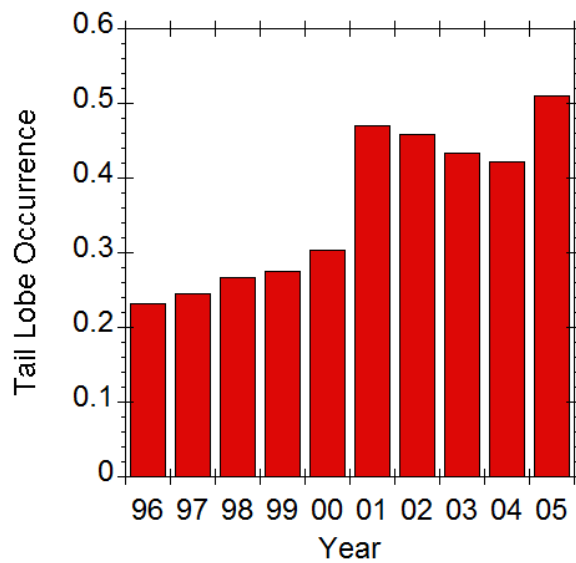


図 3.2-3 1996 年～2005 年にかけての磁気圏ローブの観測頻度の推移

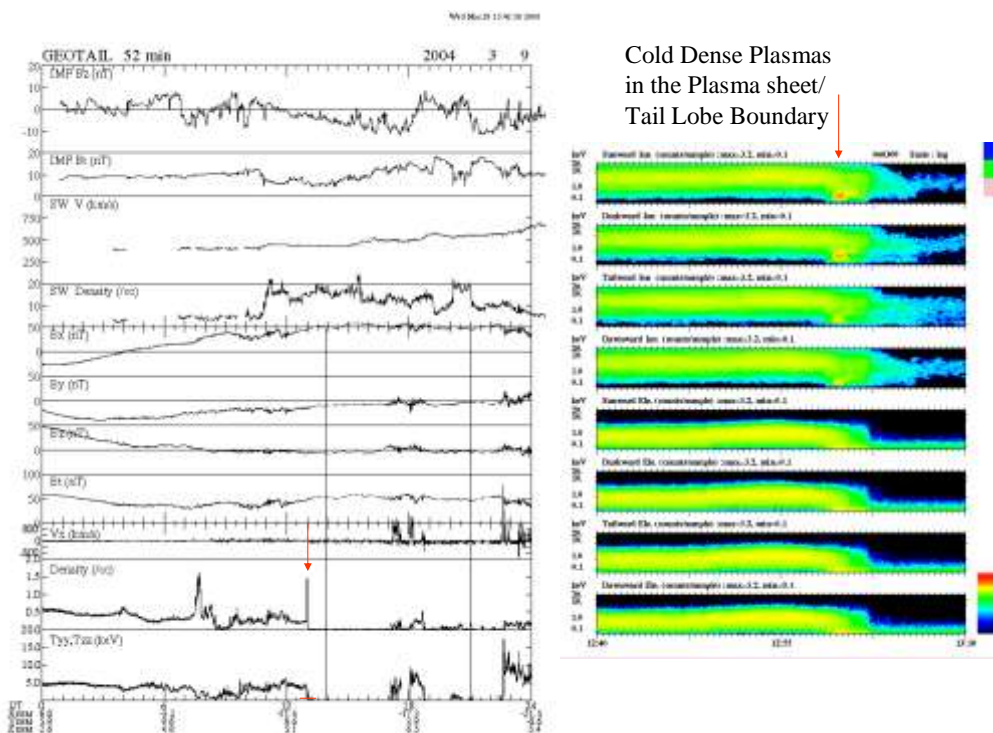


図 3.2-4 磁気圏ローブとプラズマシートの境界面付近で観測される低温高密度プラズマの観測例

の確実な結論は得られていない。従来の Geotail 衛星の観測は赤道面付近に限られてきたが、今後は磁気圏前面の両側（夕方側と朝側）の南北高緯度という 4 つの領域での探査が可能となり、この研究課題への取り組みが可能となってきた。図 3.2-1、図 3.2-2

からわかるように 2008 年を中心として、2004-2007 年には主に夕方側、2009-2012 年には主に朝方側を探索することになり、2012 年までの運用継続によって朝夕の南北高緯度領域の探索を一通り行うことができる。

### 1.3. 新しい観測モードによる観測

地球周辺のプラズマ環境のダイナミック・レンジは広い。Geotail 衛星搭載のプラズマ観測機器においては、低温高密度の太陽風プラズマを観測する期間と高温低密度の磁気圏プラズマを観測する期間では観測モードを切り替えてきた。これは観測機器保護の意味もあった。最近の試験的観測から、高温低密度の磁気圏プラズマを観測するモードで低温高密度の太陽風プラズマの観測を行い、磁気圏と太陽風の境界（磁気圏境界）の構造をより精密に観測することが可能であることがわかってきた。このため、磁気圏境界付近での観測モードの設定を変更することにより、新たな観測機器としての機能を果たすことが可能になっている。これにより、異なる性質をもつプラズマ境界面での物理過程、たとえば、最近理論的な進展が著しいケルビン・ヘルムホルツ不安定による渦の生成と崩壊、プラズマの輸送、などについてのより精密に観測できると期待できる。後で述べる NASA・THEMIS 計画との共同において磁気圏境界の物理は大きなターゲットであり、この観測機器運用方針更新の意義は高い。

電場測定機器（EFD-B）に付属した電子ビーム検出器は、約 7 ミリ秒という高い時間分解能を有している。この

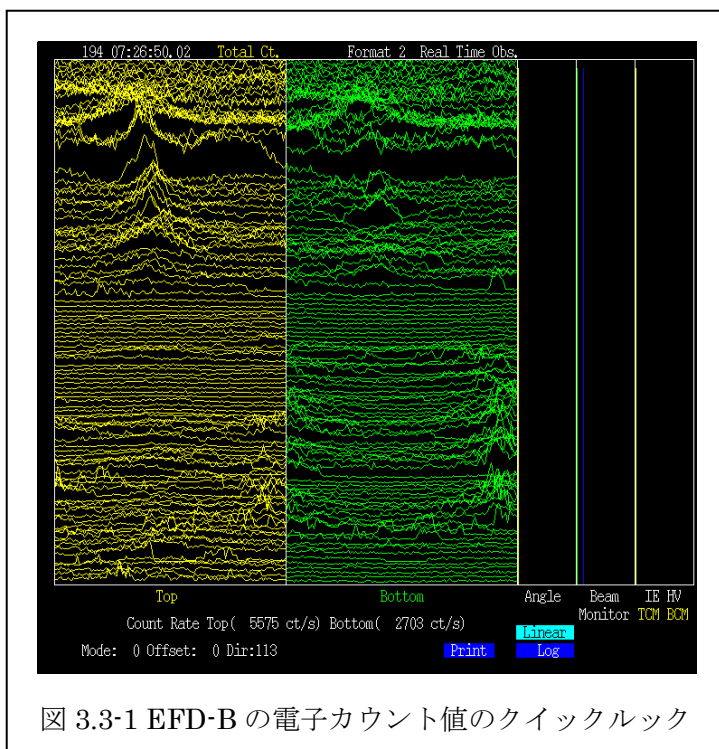


図 3.3-1 EFD-B の電子カウント値のクイックルック

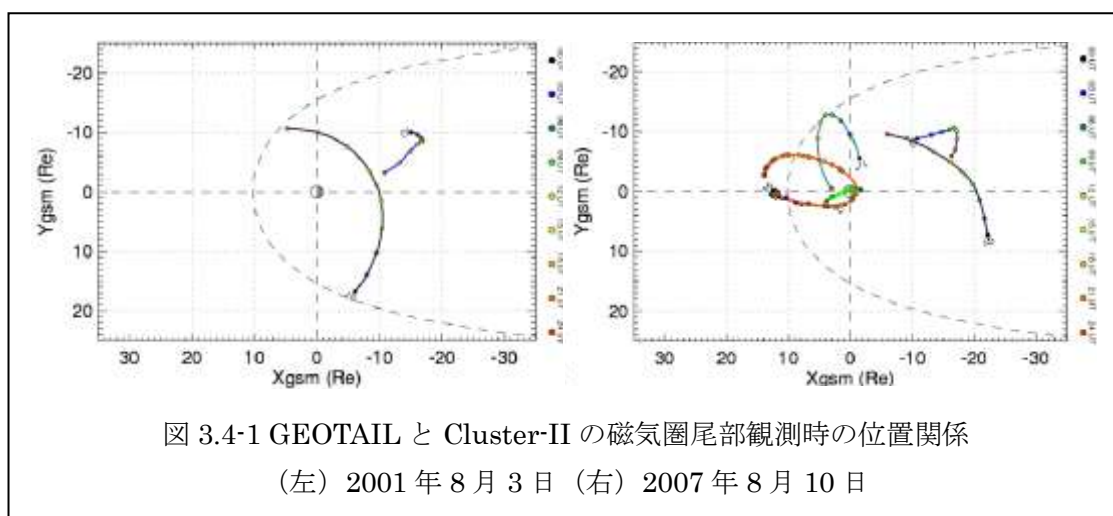
観測機器を自然電子の観測装置として転用し磁気圏尾部のプラズマシートと磁気圏ローブの境界付近に存在する電子ビームとそれにとまなうプラズマ波動の研究に活用することが始まっている。この高時間分解能観測は、日本の次世代の磁気圏探査衛星 SCOPE (Scale COupling in the Plasma universE) において電子の物理を本格的に探る観測の前哨となる。したがって、新規の機器開発への基礎資料とすることも期待している。

## 1.4. 新しい手法による観測

Geotail 衛星の観測の新規性として、太陽地球系エネルギー国際共同研究 (International Solar Terrestrial Physics) の衛星群の1つであるために、ほぼ継続的に太陽風の観測が継続されていたことがある。これにより、エネルギーの入力を常にモニターしながら、磁気圏の中でのどのような物理過程が起きているかを把握することができ、大きな成果を挙げてきた。これは、異なる領域間 (太陽風と磁気圏) での観測の比較の成功、という言い方も出来よう。しかし、入力されるエネルギーは同じでも、磁気圏内の各領域では、異なった物理過程が進行する。従来は、1つの衛星の観測を統計的に解析することにより、磁気圏内の各領域での物理過程は把握してきた。現在では、多点に衛星を展開して、磁気圏内の各領域、さらには、同じ領域内での少し離れた地点における多点同時観測が重要な観測手法となってきた：時空発展するプラズマ・ダイナミクスを本格的には把握したいのであれば、当然ではあるが。

2000年に打ち上げられた Cluster-II 衛星は、4つの衛星を比較的短い距離 (数千 km) を保ち編隊飛行させることにより、空間構造を把握しながら時間変化を追跡すること (時空分離) を目指している。Geotail 衛星は、この編隊の外側でのデータを提供し、協同することができる。例えば、Geotail 衛星と Cluster-II 衛星とは、磁気圏尾部を南北で挟んだ位置での観測により磁気リコネクションの空間構造を研究している (Nakamura et al., 2004)。今後も、このような研究が発展させることが可能である。

Cluster-II 衛星は、遠地点は 19 倍の地球半径の大きな極軌道に投入されている。Cluster-II 衛星の遠地点は毎年秋 (8-10 月) に磁気圏尾部方向に来て、2001年にはほぼ赤道面にあったものが、年々南に移動していく。したがって、磁気圏尾部を通過する距離は、年々地球に接近していく。Cluster-II 衛星と Geotail 衛星の同時の磁気圏尾部での観測は、2001年には Cluster-II 衛星がより遠方の磁気圏尾部で観測し、2010年には地球からほぼ同距離、それ以後は、Cluster-II 衛星がより地球に近い磁気圏尾部を



観測することとなる。このように、Cluster-II 衛星との同時観測は、磁気圏近尾部ダイナミクスの様相が地心距離に対してどのように依存するかをきわめて明確に示す多点観測を可能にしている（図 3.4-1）。

2007 年に打ち上げられた THEMIS 衛星は、5 つの衛星による編隊観測である（図 3.4-2）。3 機、1 機、1 機がそれぞれ遠地点  $10R_E$ （地球半径）、 $20R_E$ 、 $30R_E$  の軌道にあり、4 日ごとに遠地点上で一直線上に並ぶように軌道設計されており、特に磁気圏近尾部ダイナミクス（サブストームの時空発展）の多点観測を狙っている。以下に具体的に述べるように、Geotail 衛星とはいろいろな位置関係を取り、多様な研究課題について多点観測による共同研究が期待できる。



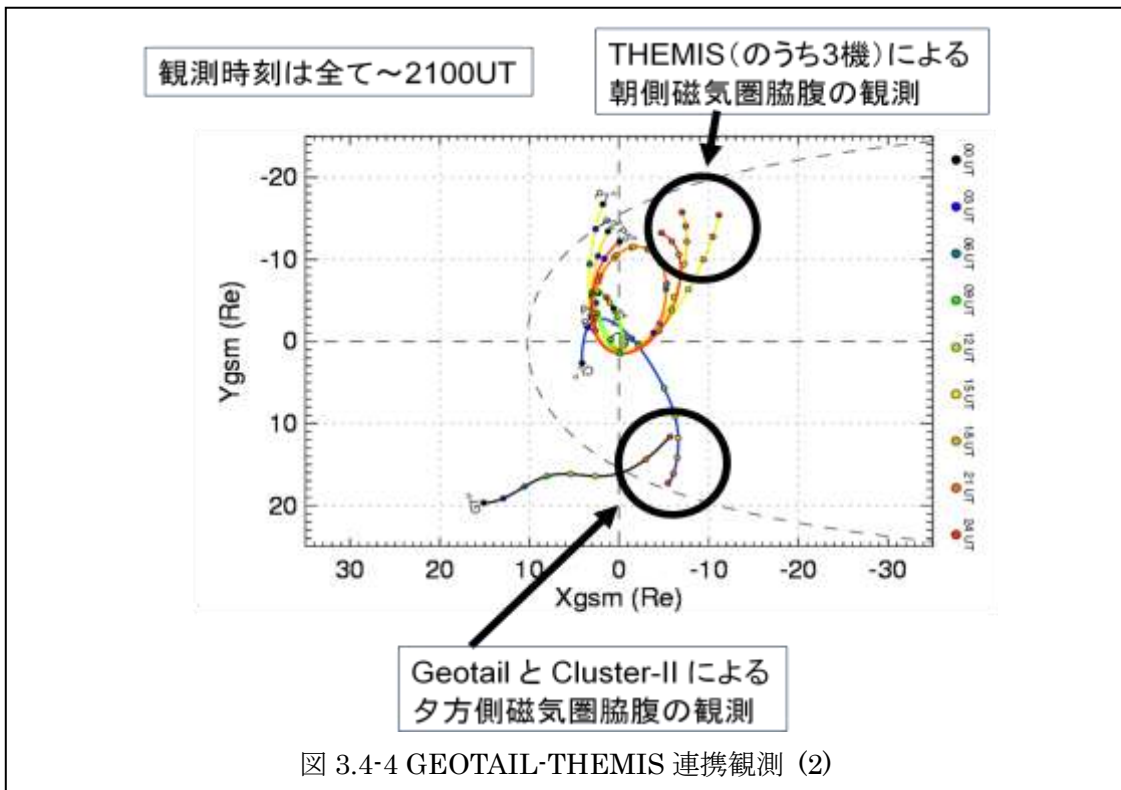
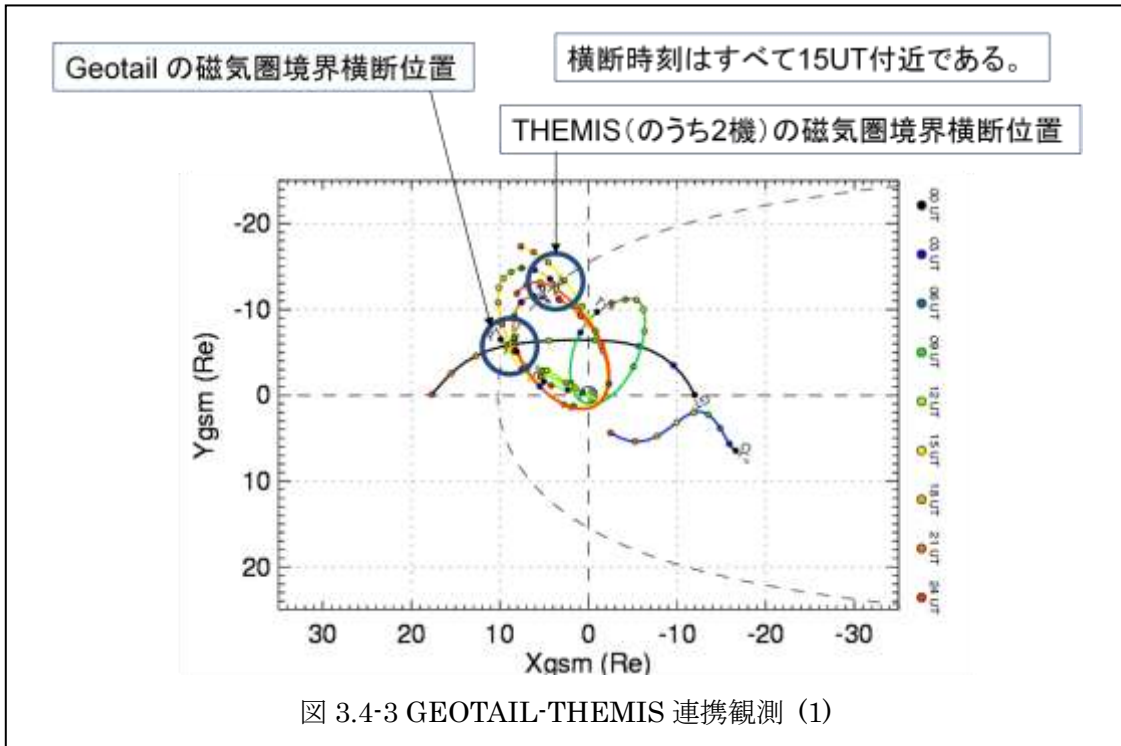
図 3.4-2 NASA THEMIS 衛星

#### ● 磁気圏境界面ダイナミクスの多点観測

Geotail 衛星と THEMIS との共同観測は、磁気圏境界面でのダイナミクスとそれが磁気圏大規模構造に及ぼす影響を（統計描像ではなく）同時観測から検証することを初めて可能にする。この視点から面白いと思われる衛星位置関係は以下の通りである。

- 衛星が太陽直下点から様々な角度（太陽天頂角）の位置にあり、例えば、境界面で発生した渦が後方に流されるにつれてどのように成長し、それがどのような大規模効果をもたらすのかについて実証する。Geotail-THEMIS 連携においては、図 3.4-3 のような配置があることが予測軌道からわかっている。
- 境界層構造が昼側と夜側では大きく異なることが統計描像から浮かんではいないが、曖昧である。Geotail-THEMIS 連携においては、片方が昼側、もう片方が夜側の磁気圏境界を、ほぼ同時に横断する事例があることが予測されており、境界層構造の昼夜相違に関する知見が得られることが期待できる。
- 境界層構造が朝側と夕方側で異なることも統計描像から浮かんでおり、特に、夜側におけるその非対称は大規模プラズマ輸送の解明とリンクする重要な課題である。Geotail-THEMIS 連携においては、図 3.4-4 のように Geotail（この事例で



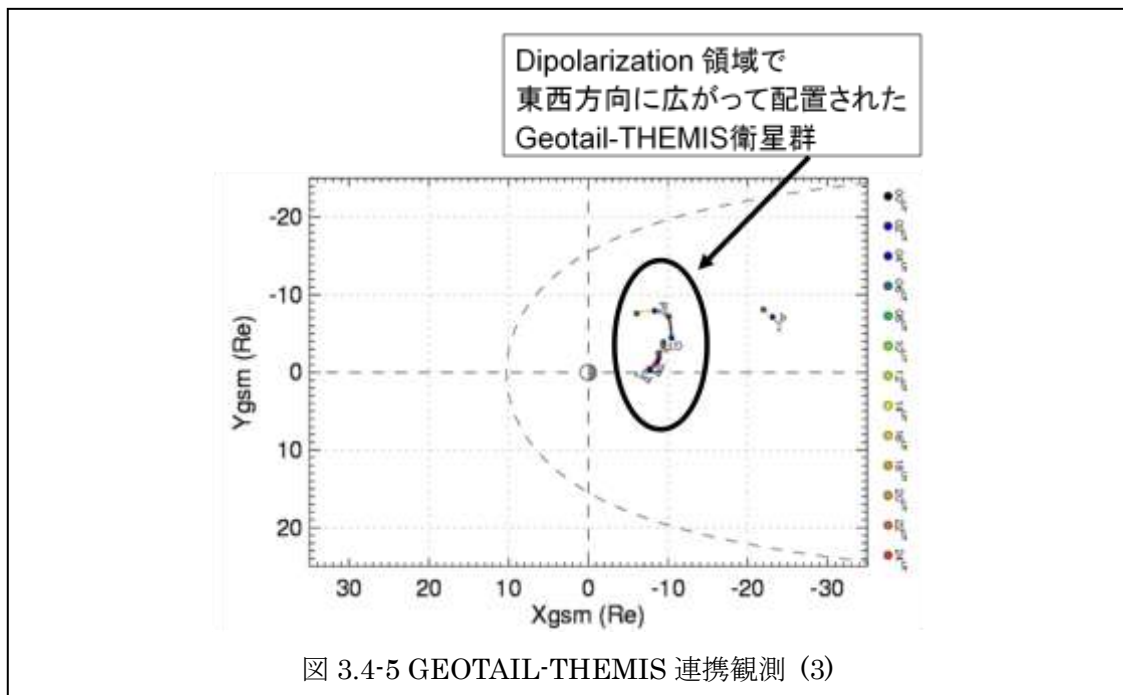


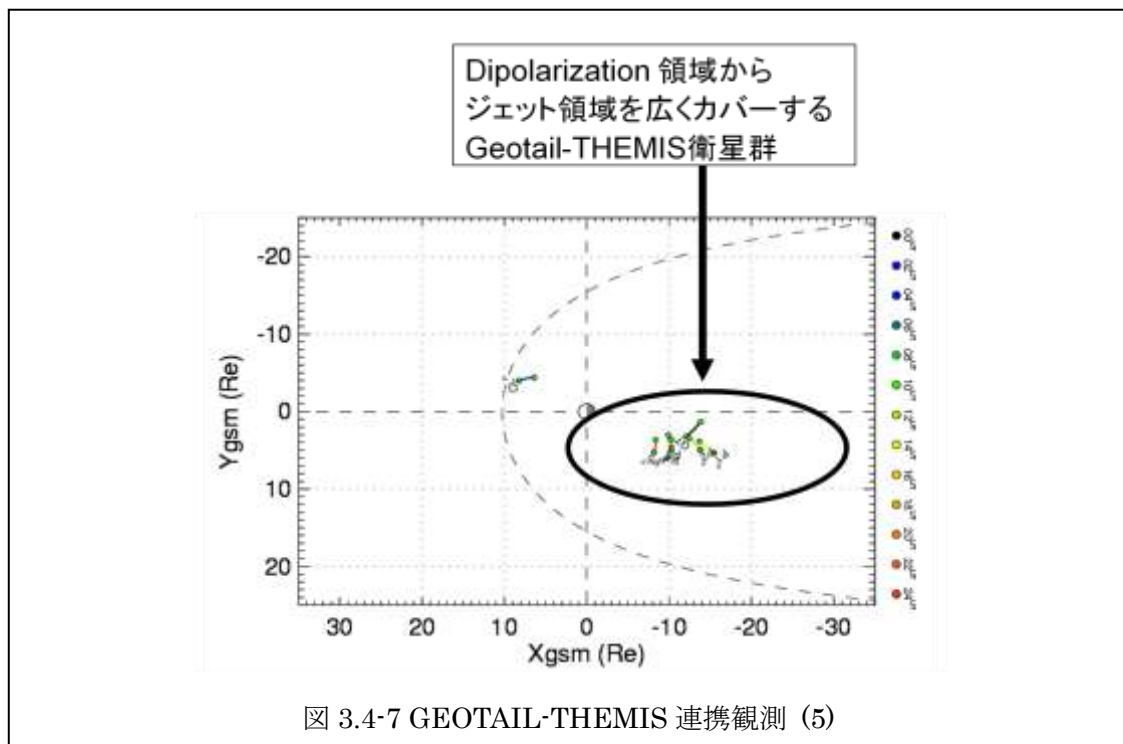
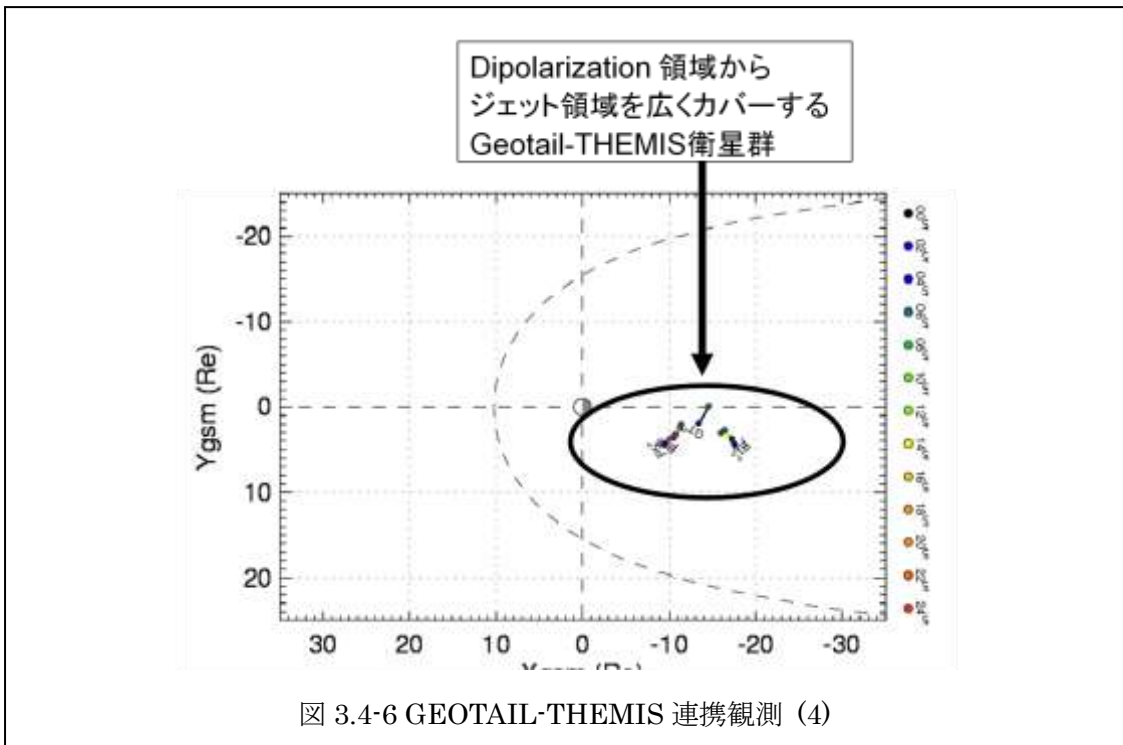
は、さらに Cluster-II) が夕方側、THEMIS が朝側の磁気圏境界層を同時観測することが予測されており、IMF が北向き時の冷たく濃いプラズマシートの形成問題に迫ることが可能になると考えられる。

- 磁気圏尾部ダイナミクスの多点観測

THEMIS ミッションの主目的は、磁気圏尾部における基本擾乱過程である「サブストーム」の時空発展を 5 機編隊から把握することである。サブストームにおいては、地心距離 20~25 地球半径から地球向きに飛んでくるとされるジェットと、地心距離 10 地球半径での dipolarization と呼ばれる磁力線形状変形過程との関係（因果関係、前後関係）が鍵となる。THEMIS の編隊形状は、この問題の解決に最適化して注意深く設計されており、4 日ごとに真夜中で 5 機が動径方向に一直線に並び、時間的な前後関係・擾乱の伝播方向が把握できるようになっている。ただし、太陽-地球方向に平行に一直線となるのは真冬だけである、しかも、興味深いのは動径方向への伝播だけではなく、東西方向への空間発展である。Geotail 衛星の軌道は THEMIS のそれと絡まるようになっているので、以下のような利点を期待することが出来る。

- ・ THEMIS とあわせて全 6 機が、dipolarization 領域において東西方向に広がった配置をとり、dipolarization というサブストームの要素に関しては、時空発展をかなりのレベルで把握することが可能になる（図 3.4-5）。
- ・ THEMIS とあわせて全 6 機が、dipolarization 領域とジェット領域に配置され、両者の前後関係がより確実に把握できるようになる（図 3.4-6、図 3.4-7）。とくにジェットの幅はそれほど大きくないと予想されており、THEMIS の外側 2 機に加えて Geotail が加わることは、ジェットの振る舞いを確実に把握する確率を高める上で重要である。





- 同様に、ジェット・ダイナミクスに関する知見を高めるには、動径方向と同時に東西方向の空間構造把握を行う必要があるが、そのためには最低3機が必要である。THEMISの外側2機とGeotailの連携があって初めてこれは可能となり、かつ、そのような観測機会はきわめて豊富にあることが予測軌道からわかっている。

また、2009年以降の THEMIS 編隊外側 2 機に現在と同じ役割を期待することは困難な見込みである。というのは、現状軌道では長期日陰が見込まれ、大きな変更を余儀なくされるためである。特に THEMIS の遠地点が尾部にある期間には、Geotail 衛星は、その軌道が似ていることから、THEMIS 外側機の代用を勤めることが可能である。THEMIS 内側 3 機の編隊観測に背景情報を付加し磁気圏近尾部ダイナミクスの解明に資するという意味で、2009年以降の Geotail 衛星の意義は高い。

なお、多点観測、すなわち、多くの衛星データを参照する作業は、たいへんに手間のかかるものであり、それを効率的に進めるツールを提供する必要がある。我々 Geotail チームは、THEMIS の打ち上げに先駆けて、DARTS に Conjunction Event Finder (CEF) というページを開発し、世界の研究者が多点観測データを効率的に相互参照できる仕組みを提供している。今後、THEMIS の観測が本格化すれば、少なくとも 10 機 (Geotail=1, Cluster=4, THEMIS=5) 以上のデータを相互参照して磁気圏ダイナミクスを解明するチャンスが十分にあり得るわけで、そもそもそのチャンスを逃さないこと、さらには、その際に必要なデータを取りこぼしなく調査できること、という機能を CEF は備えつつある (図 3.4-8)。

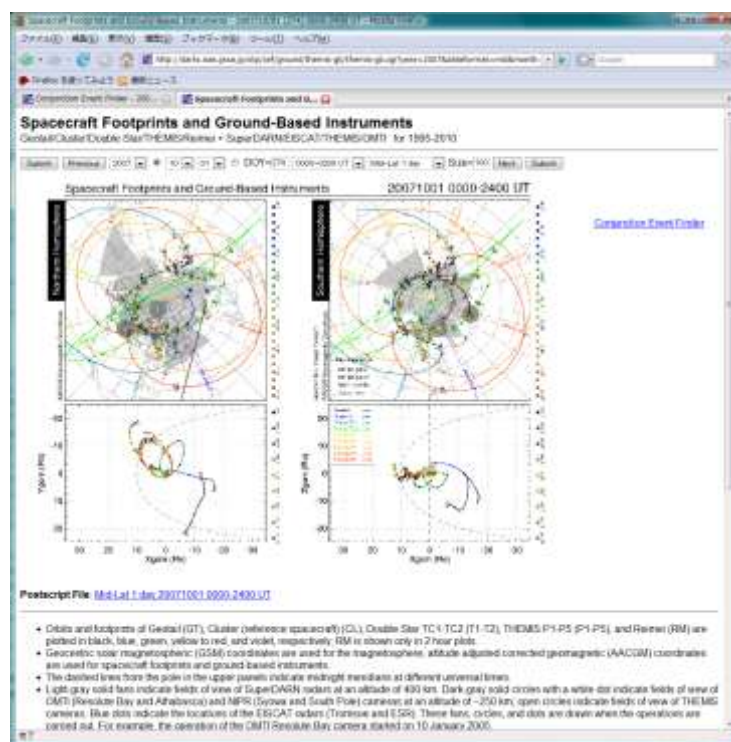


図 3-4.8 Conjunction Event Finder (CEF) 多衛星軌道閲覧画面

<http://darts.isas.jaxa.jp/stp/cef/cef.cgi>

## 1.5. その他の研究の展開

- (1) 2007年9月に月探査衛星 **SELENE** が打ち上げられた。**SELENE** による月プラズマ環境観測を最大限に活かすためにも、地球に近い位置での太陽風のモニターとしての **Geotail** 衛星の観測は重要である。もちろん、**SELENE** も地球磁気圏に入る期間があり、同時観測が期待できる。
- (2) 2011年は太陽活動極大期にあたり、地球に大きな影響を及ぼす太陽活動（コロナ質量放出、などによる大規模な擾乱）が増加する。これらの太陽活動により地球周辺宇宙空間が乱される現象を「宇宙天気」(**Space Weather**)として、将来の人類の宇宙進出も視野に入れながら研究がなされてきている。太陽風の観測は、現在定点モニターとして **ACE** 衛星により地球から約 220 倍の地球半径の上流の位置（ラグランジュ点）での観測が行われているが、地球への影響を正しく知るためには、より地球に近いところでの太陽風モニターが必要であることがわかっている。**Geotail** 衛星は、この「宇宙天気」の研究への基礎観測を提供することにもなる。
- (3) また、2000年前後の太陽活動極大期には、太陽風密度が大幅に下がり太陽風が音速に近くなる（マッハ数 $\sim 1$ ）という現象がしばしば見られた。この際には、衝撃波通過後のシースでの流れパターンや磁気圏境界形状などにおいて興味深い現象があることが、**Geotail** 観測などで見出されている。2011年太陽活動極大期においても同様に観測を行い、低マッハ数領域での太陽風-磁気圏相互作用の全貌を明らかにすることも面白い課題である。