

## b. 太陽系プラズマ研究系

### 「GEOTAIL」の運用

教授	向井利典	教授	上杉邦憲	教授	中谷一郎
前所長	西田篤弘	教授	鶴田浩一郎	助教授	早川 基
教授	川口淳一郎	助教授	橋本正之	助教授	齋藤義文
助手	松岡彩子	助手	篠原 育	助手	笠羽康正
		客員教授	松本 紘	客員助教授	平原聖文

日米共同で開発を進めてきた「GEOTAIL」は1992年7月24日に米ケープ・カナヴェラルからデルタ型ロケットによって打ち上げられた。「GEOTAIL」の観測目的は、太陽風から磁気圏尾部へのエネルギー流入や、尾部に貯えられたエネルギーの爆発的な解放のメカニズムを研究することである。搭載機器は磁場計測器(日)、電場計測器(日)、プラズマ計測器(日,米)、高エネルギー粒子計測器(日,米)、プラズマ波動計測器(日)である。1994年11月まで衛星の遠地点は夜側にあり、月軌道より遠方の遠尾部の観測を行った後、遠地点を50Reに下げ、さらに1995年2月には30Reまで下ろしてサブストーム関連現象研究の体制を整えた。近地球軌道に入ってから、長時間日陰が発生しているが、その対処のための特別OPを用いて問題なくきりぬけている。他のISTP衛星(米国のWIND, POLARの両衛星及びロシアのINTERBALL-TAIL衛星)との共同観測をIACGキャンペーンを軸として

精力的に行っている。

#### 「GEOTAIL」による磁気圏プラズマの観測

教授	向井利典	京大・理	町田 忍	助教授	齋藤義文
前所長	西田篤弘	客員教授	星野真弘	客員助教授	平原聖文
				東大・理	寺沢敏夫

「GEOTAIL」に搭載されている低エネルギー粒子観測装置（LEP）は、初期観測で素晴らしい結果を見せた直後に電子回路の一部がラッチアップするという不慮の事故のために観測不能の状態が続いていたが、1993年9月1日に行われた特殊オペレーションによって回復し、9月中旬から観測を再開した。その後、磁気圏尾部及びその境界面、磁気圏前面の境界層、衝撃波、磁気シース領域、上流の太陽風におけるプラズマ観測から多くの新しい現象が発見され、同衛星に搭載されている他の観測装置をはじめ、他衛星/地上観測との同時観測による共同研究が行われている。所内教官が中心になって行った研究概要は他項にも述べられているが、その他に特記すべき研究項目を挙げると、例えばプラズマシート境界層近傍のプラズマ波動現象、昼間側の低緯度境界層、磁気圏境界面における磁力線再結合過程、上流の湾型衝撃波、等の研究が本プラズマ観測データを用いて行われている。

#### 磁気圏サブストーム時の磁気圏尾部における粒子加速の研究

教授	向井利典	京大・理	町田 忍	東大・理	寺沢敏夫
助教授	齋藤義文	前所長	西田篤弘	客員教授	星野真弘
		教授	前澤 洵	客員助教授	平原聖文

磁気圏サブストームの発生の際、磁気圏尾部においてプラズモイドと呼ばれる高温プラズマ流が作られることは既に「ISEE-3」衛星の観測等でも観測されているが、プラズマ粒子の3次元速度関数の詳細が「GEOTAIL」に搭載されている低エネルギー粒子観測装置（LEP）によって観測されている。その結果、プラズモイドの構造、生成/発展、運動について新しい事実が観測され、特に磁力線再結合の兆候であるX型磁気中性線の直接的証拠と思われる観測結果を発見した。その結果と計算機シミュレーションとの対比から磁気リコネクションの物理過程に関する研究が大きく進展した。

#### 磁気圏尾部電流の研究

教授	向井利典	助教授	齋藤義文	大学院学生	浅野芳洋
----	------	-----	------	-------	------

磁気圏尾部において、朝方から夕方側に尾部を横切る電流が磁気中性面に流れていることは磁場観測の結果から明らかであるが、「GEOTAIL」による電子とイオンの速度差から求めることを試みている。ローブ磁場の観測結果はシート面全部にわたる全電流を示しているのに対し、後者は局所的な電流であるので、その比から電流層の厚みを評価した結果、磁気圏サブストームの発生時に尾部の電流層が局所的に薄くなり、電流密度が異常に高くなり、不安定が発生するという理論的な推定を観測的に実証することに成功した。これらの結果は、電子とイオンの速度差に起因するホール効果が重要な役割を果たしていることを示している。

#### 「あけぼの」(EXOS-D)によるオーロラ粒子観測

教授	向井利典	京大・理	町田 忍	通信総研	小原隆博
助教授	齋藤義文	神戸大	賀谷信幸	通信総研	佐川永一
通信総研	三宅 亘	客員助教授	平原聖文	極地研	江尻全機
		極地研	山岸久雄	極地研	宮岡 宏

1989年2月22日に打ち上げられた「あけぼの」には、オーロラ粒子の加速機構の解明を主たる目的とした低エネルギー粒子観測器（LEP）が搭載されている。LEPの主要機能は、電子（10eV～16keV）及びイオン（13eV/e～20keV/e）のエネルギー・ピッチ角分布を測定し、イオンについてはその質量分析を行うことである。また、波動、粒子相互作用の研究の為、粒子フラックスのHF及びVLF帯における変動スペクトルの計測も行う。現在まで、



がっていることを意味し、それは同時に太陽風が磁力線に沿って内部に侵入することを意味する。さらに、リコネクションによって逆に地球から切り離された磁力線の存在も検証され、そのような事象のおこる空間分布から、今までは考えられてなかった南向き IMF と尾部ローブ領域の磁場のリコネクションの可能性が強く示唆された。

#### 遠方磁気圏尾部の構造

教授 前澤 洵 特別共同利用研究員 長谷川洋 名大・理 堀 智昭

「GEOTAIL」が遠方尾部の軌道にいた時のデータを用いて、遠方尾部内のプラズマ分布および磁場の分布を調べた。尾部は惑星間空間磁場の  $y$  成分の符号の正負によって逆向きにねじれている。このねじれは、磁気圏境界面で磁気リコネクションが起こっていることで説明できる。ねじれの角度は、惑星間空間磁場の  $z$  成分が正のときの方が負のときより大きく、惑星間空間磁場が北向きの時も磁気圏境界でさかんに磁気リコネクションが起こっていることを示している。

#### 地球近傍のプラズマシート内部および境界層で観測されるイオンビーム

教授 前澤 洵 名大・理 藤岡 晋 教授 向井利典

地球磁気圏のプラズマシートとローブの境界には、しばしば磁力線に沿ったイオンビームが存在することが知られている。このビームは磁気リコネクションが起こっている領域（いわゆる磁気中性線近傍）で磁力線方向に加速された粒子が観測点まで磁力線に沿って飛来するものと思われる。粒子が飛来する間に、磁力線はローブ領域からプラズマシート領域にゆっくりと運動するため、磁力線方向の粒子速度の違いにより特徴的な速度の空間分布をもつビームの層が境界に形成される。「GEOTAIL」によって得られたデータを解析することにより、このような特徴をもつイオンビームの存在が確認されたが、同時にこれとは明らかに性質の異なるイオンビームが、地球近くのプラズマシートの深いところで起きることが明らかになった。新たに見出されたビームは、その速度空間分布の特徴から、電離層から上向きに加速された電子ビームであると解釈するのが妥当であり、解析を進めている。

#### 宇宙太陽発電所用マイクロ波無線送電に関するプラズマ非線形応答の研究

客員教授 松本 紘

人類を未来のエネルギー危機から救う手段の一つとして、宇宙太陽発電が有望である。これは、宇宙空間に巨大な太陽電池板を築きマイクロ波によって、そこで発電されたエネルギーを地上に伝送しようとするものである。本研究は主として、送受電アンテナの設計やマイクロ波と電離層の相互作用に関する問題を計算機モデリング及びシミュレーションやロケット実験によって解析する。また宇宙空間プラズマを通過するエネルギー伝送用のマイクロ波ビームの送受電システムの開発をする。

#### 科学衛星による宇宙空間探査とデータ解析

客員教授 松本 紘 教授 鶴田浩一郎 教授 向井利典

「GEOTAIL」に搭載された「プラズマ波動観測装置」の主任研究員（PI）として、わが国や米国 IOWA 大学の共同研究者を取りまとめる一方、「GEOTAIL」から伝送される宇宙プラズマ波動のデータ解析を担当している。波動データと他の機器の情報を組み合わせ、磁気圏尾部のミクロ物理の研究を行う。また、「のぞみ」のプラズマ波動受信機による火星プラズマ圏のミクロプロセスの研究を行う。

#### 計算機実験と理論解析

客員教授 松本 紘

スーパーコンピューターを用い、大規模な宇宙プラズマ現象の計算機実験を行う。具体的なテーマとしては、宇宙空間プラズマ中におけるカオスの研究、磁気圏尾部の広帯域静電ノイズを構成している非線形孤立静電波の研究などを行う。

## 「GEOTAIL」のダブルプローブ電場計測器データの評価

教授	鶴田浩一郎	助手	松岡彩子	教授	向井利典
助教授	早川 基	助教授	齋藤義文	京大・理	町田 忍

ダブルプローブ法は、飛翔体から伸展した1対のアンテナのそれぞれの先端における電位の差を測ることにより電場を計測する手法である。現在運用中の衛星では、「GEOTAIL」及び「あけぼの」においてこの方法を用いた電場計測を行っている。「あけぼの」の観測領域のように数十個/ccのプラズマ密度を持つ空間においては、プローブの周囲にできるシース（電子雲）のサイズがアンテナ長に比べて十分に小さいため、比較的簡単な手法によって測定値を較正することが出来る。一方「GEOTAIL」の観測領域である磁気圏遠尾部や磁気圏を取り囲む太陽風領域等の0.1~10個/cc程度のプラズマ密度を持つ空間では、実際の電場からの計測値のずれはシースを形成する電子の振る舞いにより大きく左右される。「GEOTAIL」に搭載されたダブルプローブのデータを、同じく「GEOTAIL」に搭載されている磁場計測器・粒子計測器のデータから計算される $-V \times B$ 電場と比較することにより、シース中の電子が計測に与える影響について研究を行っている。

## 飛翔体搭載用中性ガス質量分析器の開発

教授	鶴田浩一郎	助教授	早川 基
----	-------	-----	------

地球及び惑星の上層大気を研究する上で、中性ガスの質量、密度、平均速度、温度等を測定する技術が必要であるが、現在のところ満足のいく計測装置がない。特に、酸素を主体とする金星、地球、火星の上層の大気の測定には、装置の壁面に吸着した酸素との2次元的な反応物質である酸素分子、酸化窒素の分離が難関となる。我々は、過去のプラズマ計測技術の拡張として、飛行時間測定、位置検出技術を併用することによってこの難関を切り抜けるアイデアを得た。実験室試験用モデルの試作を行いチェンバー内の残留ガスの温度計測が可能であることを検証した。

## 「のぞみ」観測研究

教授	鶴田浩一郎	教授	中谷一郎	教授	向井利典
教授	前澤 洌	助教授	早川 基	PLANET-B 開発チーム	

火星には十分大きな固有磁場が存在しない為に、火星の上層大気は太陽風に直接さらされている。このため、太陽風による大気のはぎとりが起きているものと考えられる。強い固有磁場を持つ地球で起きている、磁気圏を介しての太陽風との相互作用と対を成す基本的な相互作用の形態である。無磁場惑星大気と太陽風の相互作用は比較惑星学的観点からも、惑星大気の進化の観点からも重要な研究課題である。火星に周回衛星を送り、火星上層大気的基本的な物理量の測定をすることを目的に、「のぞみ」の開発を行った。「のぞみ」は1998年7月に打ち上げられ、2回の地球スイングバイを経て1999年10月火星に到着する予定であったが2回目のスイングバイ時の不具合で火星到着は2004年1月となった。この間、太陽系空間の観測を続け、2004年以降に火星の観測を開始する。

## 「あけぼの」による極域現象の研究

教授	鶴田浩一郎	前所長	西田篤弘	教授	向井利典
助教授	早川 基	通信総研	小原隆博	東大・理	中村正人
		助教授	齋藤義文	助手	松岡彩子

1989年2月打ち上げ以来、「あけぼの」は順調に飛行を続けている。我々は、電場計測器、プラズマ粒子計測器を搭載し観測を実行すると同時に衛星の運用、観測データの処理に関するマネジメントを担当している。現在研究が進められている主な研究課題に以下のものがある。

- ・極冠域の対流電場の太陽風磁場依存性に関する研究
- ・午後側サブオーロラ帯の高速流の研究
- ・オーロラ帯上空で見られる磁場に平行な電場による粒子加速の研究
- ・降下イオンと大規模対流の関係に関する研究

## ・オーロラ粒子加速域と磁気圏構造に関する研究

1992 年度には「GEOTAIL」が打ち上げられ「あけぼの」との同時観測も可能となった。「GEOTAIL」は磁気圏尾部の現象の発生源近くで観測し、一方「あけぼの」は極域現象として磁気圏の下端での観測を行うことによって磁気圏の理解を一層進めることが出来る。これに関連して観測データを有機的に利用する目的で比較的小規模にまとめた科学データベース (SDB) の製作を進めている。

## 「GEOTAIL」搭載電子ブーメラン法による電場計測

助教授	早川 基	教授	鶴田浩一郎	東大・理	中村正人
				京大・工	松井 洋

「GEOTAIL」には我々が開発した電子ブーメラン法による電場計測器が搭載されている。この方法は現在のところ宇宙空間内の大部分の場所で最も精度良く電場を測定できると考えられている。「GEOTAIL」が近地点付近 ( $\sim 9R_E$ ) にいる時に電子ブーメラン法による電場計測器を運用する事により、地球近傍における電場の低周波変動成分に関しての研究を行っている。

## 「のぞみ」搭載低エネルギーイオン計測器による星間空間ヘリウムの観測

助教授	早川 基	教授	向井利典	助教授	齋藤義文
東大・理	寺沢敏夫	東大・理	中村正人	東大・理	野田寛大

我々の太陽系には周辺の星間空間から中性の星間ガス (主として水素とヘリウム) が流れ込んできている。この内の水素ガスは太陽光の輻射圧の為に太陽の近傍まで入って来る事が出来ないがヘリウムガスはこれに打ち勝ち内側まで入ってくる。このヘリウムガスが太陽風中のプロトンと電荷交換を行って出来るヘリウムイオンを観測する事で、星間ガス中のヘリウムの速度・密度などの情報を得る事が出来る。この目的の為に我々は「のぞみ」搭載の低エネルギーイオン計測器を用いてこの星間空間ヘリウムガス起源のピックアップイオンの観測を行ない、ヘリウムガスの密度・温度等の推定を行った。

## 「GEOTAIL」による Magnetosheath 中の電磁流体波動の研究

助手	松岡彩子	ロンドンイェールカレッジ	D. J. Southwood	教授	向井利典
----	------	--------------	-----------------	----	------

Magnetosheath (磁気圏さや) における、イオンのジャイロ運動の周期より長い周期を持つ波は、太陽風と磁気圏の相互作用を考える上で重要な役割を持っている。過去の研究により、この領域の波動については Alfvén 波と Slow Mode 波の 2 つのモードの存在が確認されていたが、波のモードを推定する手掛かりとして磁場データと密度データしか無かったので、実際にはモードが決定できない場合がほとんどであった。本研究では「GEOTAIL」により観測された磁場データと密度データに加え、モーメントデータも用いて Whalen 関係と呼ばれる Alfvén 波だけに特有の関係の有無を調べ、Alfvén 波が少なくとも 40% 以上の確率で広い周波数域にわたって存在することを示した。また、Alfvén 波の観測される頻度は磁気圏さや中の位置に大きくは依存しないが、この波によって運ばれるエネルギーの方向は常に反太陽方向であり、従って波の発生源は磁気圏さやの上流域であり、波は減衰しないまま下流まで伝播していることがわかった。更に、波の振幅は磁気圏境界面に平行な方向に最大であること、プラズマ温度の異方性により厳密には Whalen 関係とはずれが生じていることを明らかにした。

## 「GEOTAIL」と「あけぼの」の間での電場のマッピング

助手	松岡彩子	ロンドンイェールカレッジ	D. J. Southwood	教授	向井利典
				助教授	早川 基

極域の電離層には大規模なプラズマの対流が起こっていることが知られている。この対流は、太陽風中の電場が磁気圏を介して電離層に伝わって起こると考えられている。従って大局的には電離層内の対流にマッピングされる対流が磁気圏内で観測されるはずである。しかし、実際の磁気圏尾部では大規模な対流に対応する電場よりもはるかに大きな電場が、激しい時間変動を伴っていることが観測される。本研究では、グローバルなプラズマ対流の

ゆっくりした時間変動が電離層へ伝播する機構を説明するために、長い時間周期（10分以上）を持つ Alfvén wave の伝播について考察しモデルを構築した。その結果、遠磁気圏における電場変動の高周波成分は、低高度では減衰すること、周波数に依存する伝播の遅延が起こることが示された。構築したモデルを、「あけぼの」と「GEOTAIL」により同時に測られたデータにあてはめて比較したところ、本モデルは実際のデータをよく説明することが示された。

#### 「のぞみ」運用計画立案システムの開発

助教授 早川 基                      助手 松岡彩子                      助手 笠羽康正  
「のぞみ」運用チーム

火星の上層大気と太陽風との相互作用等の未解明の現象を明らかにするために、1998年7月に日本初の火星探査衛星「のぞみ」が打ち上げられた。「のぞみ」には14の科学観測機器が搭載されており、その運用は臼田を主局とする地上からのコマンド送信、OPにより行われる。また火星周回軌道に入った場合の地球との電波通信の遅延が最大40分かかることから、衛星には高度な自動化・自立化のシステムが採用されているが、衛星の正常な運用のためにはなおOPの使用が欠かせない。衛星の安全を保ちつつ科学機器を最大限有効に運用するための計画立案システム（ISACS-PLN）の開発・改善を行い、打ち上げ当初より実運用にも供し、実績をあげている。

#### 「のぞみ」搭載磁力計データの評価と解析

助手 松岡彩子                      「のぞみ」MGF班

1998年7月に打ち上げられた「のぞみ」には、火星における太陽風と上層大気の相互作用を解明する上で重要な磁場データを取得する目的で3軸フラックスゲート磁力計が搭載されている。「のぞみ」の打ち上げ後より断続的に磁力計による磁場観測を行い、良好なデータを取得している。「のぞみ」は火星軌道投入までの5年余り、地球軌道と火星軌道との惑星間空間を観測するが、この間は基本的に連続して磁場データを取得する予定である。このデータをもとに磁力計の各軸のアライメントを算出し、磁場データを絶対系へ変換するための基礎パラメータを得る。また、「のぞみ」磁力計は弱磁場計測を目的としており、探査機本体による磁場干渉に対しては打ち上げ前に様々な対策を行っているが、特に伸展マストを収納している状態ではある程度の磁場干渉は避けることができない。この磁場干渉の影響を正確に算出し、宇宙空間の磁場成分のみを抽出する手法を確立する。

#### 「Bepi-Colombo MMO」搭載磁力計の検討

助手 松岡彩子                      Bepi-Colombo/MMO MGFワーキンググループ

これまでの水星周辺の磁場観測は、マリナー10による2回のフライバイによるもののみで、水星磁気圏の形状・ダイナミクスを決定するには至っていない。水星の磁気圏探査衛星である「Bepi-Colombo/MMO」による磁場観測では、水星の磁気圏はどんな形をしているのかという基本的な課題からまず解明していかなければならない。「Bepi-Colombo/MMO」搭載の磁場測定システムとして、衛星本体から5m程度のブームを伸展し、その先端と途中にそれぞれ3軸のフラックスゲート磁力計を載せたものを考えている。フラックスゲート磁力計は、日本では「さきがけ」「あけぼの」「GEOTAIL」「のぞみ」他ロケット等での実績があり、また国際的にも広く採用されている。ブームを用いるのは、磁場測定上深刻な問題となる、衛星本体からの磁場の干渉をなるべく小さくするためであり、磁力計を2つ搭載するのは、磁場干渉の評価を容易にするためである。水星周辺の厳しい熱環境下でも磁場を精度よく測るための要件を検討し、基礎的な実験を行なっている。

#### 「GEOTAIL」による地球磁気圏近尾部磁気衝撃波の研究

助教授 齋藤義文                      教授 向井利典                      京大・理 町田 忍  
東大・理 寺沢敏夫                      前所長 西田篤弘

地球磁気圏尾部において磁気リコネクションが起き、X-typeの磁気中性線が存在する場合、X-typeの磁気中性線を囲むプラズマシートとロープの境界はslow-mode shockとなることが理論的に予測されていたが、これまでの

磁気圏尾部探査衛星「GEOTAIL」の観測によって地球磁気圏遠尾部のプラズマシートとロープの境界が slow shock になっている場合のあることが観測的にも確認された。「GEOTAIL」は運用初期の地球磁気圏遠尾部を観測する軌道から、地球磁気圏近尾部を観測する軌道に入りこれまでに約6年間の地球磁気圏近尾部のデータが得られている。この期間のデータを解析することによって地球磁気圏近尾部のプラズマシートとロープの境界も slow-mode shock となる場合のあることがわかったが、それと同時に地球磁気圏近尾部の非常に地球に近い場所のプラズマシートとロープ境界は slow-mode shock とは同定できないことも明らかになった。

#### 「のぞみ」搭載 PSA-ISA (イオンエネルギー分析器) による太陽風の研究

助教授	齋藤義文	助教授	早川 基	教授	向井利典
		京大・理	町田 忍	京大・理	寺沢敏夫

1998年7月に打ち上げられた「のぞみ」には、火星周辺イオン、太陽風イオンなどのエネルギー分析を行うイオンエネルギー分析器 (PSA-ISA) が搭載されている。火星到着までの約4年間、地球 - 火星の惑星間空間における太陽風の観測を行う。地球 - 火星間での太陽風の観測は、CME (Coronal Mass Ejection) の観測を含めていくつかの観測テーマが考えられる。これまでのところ、「GEOTAIL」搭載低エネルギーイオンエネルギー分析器 (LEP-EAi) との太陽風の同時観測を行った他、月スイングバイ時には太陽風イオンと同時に、太陽風イオンが月表面から反射されたと考えられるイオンの観測結果も得られている。

#### 「SELENE」搭載視野角掃引型電子・イオンエネルギー分析器の開発

助教授	齋藤義文	助教授	早川 基	教授	向井利典
助手	浅村和史	大学院学生	横田勝一郎	京大・理	町田 忍
				客員助教授	平原聖文

宇宙空間におけるプラズマの観測は、地球の電離層に始まり地球周辺の空間そして太陽系の他惑星周辺へとその領域を広げつつある。これらの様々な宇宙空間の多くの領域は熱的に非平衡、非定常なプラズマで満たされており、そのプラズマの自由エネルギーが宇宙空間における電磁的環境の変動を生み出している。人工飛翔体を用いてプラズマの三次元分布を高い時間分解能、高い角度分解能で直接観測することはこれらのプラズマの起源、移動、変化を理解して宇宙空間の電磁的環境、基礎的なプラズマ物理の諸過程を解明する上で非常に重要である。従来、プラズマエネルギー分析器は数秒の周期でスピンを行うスピン型の衛星に搭載されてきた。しかし今後惑星探査を進めていくにあたり三軸制御の非スピン型衛星にプラズマエネルギー分析器を搭載する必要が生じるものと考えられる。この場合、できる限り少ない重量で三次元の観測視野を確保するには、観測器自体が広い (例えば半球面:  $2\pi$ ) 視野を持つ必要がある。本研究は2004年度打ち上げ予定の「SELENE」に搭載する、観測視野方向を電氣的に掃引することによって  $2\pi$  の視野を確保するプラズマエネルギー分析器の開発を行うものである。

#### 「SELENE」搭載 LEF-TOF 型質量分析器の開発

助教授	齋藤義文	助教授	早川 基	教授	向井利典
助手	浅村和史	大学院学生	横田勝一郎	京大・理	町田 忍
				客員助教授	平原聖文

近年、地上からの光学観測によって月や水星の大気にナトリウム、カリウムなどの元素がかなりの量で含まれていることが明らかとなってきた。これらの大気は天体表面を起源とするものと考えられているがその定量的な分布や時間変動を明らかにし、成因を特定するためには人工飛翔体を用いた天体周辺空間におけるプラズマのエネルギー質量分析の結果を待たざるを得ない。このような地球外天体周辺におけるイオンのエネルギー質量分析には、高質量数のイオンの質量を十分な精度で分解可能であるような質量分析器の開発が必須である。LEF (Linear Electric Field) TOF 型イオン質量分析器は従来用いられてきた TOF 型の質量分析器やその他の質量分析器に比べてはるかに高い質量分解能 ( $m/\Delta m \sim 50$ ) を実現することが可能である。本研究は2004年度打ち上げ予定の「SELENE」に搭載する LEF TOF 型イオン質量分析器の開発を行うものである。

## 高時間分解能によるカスプ領域プラズマの研究

助教授 齋藤義文 大学院学生 田中宏樹 助手 浅村和史  
 大学院学生 石井真一 教授 向井利典

SS520-12号機観測ロケットは2000年12月にノルウェーのスバルバード島から極域昼側のカスプ領域に向けて打ち上げられた。この観測ロケットに、電子とイオンのエネルギー分析を行う観測器 LEP-ESA/ISA を搭載し、カスプ領域におけるプラズマの観測を行った。LEP-ESA/ISA は  $10\text{eV}/q \sim 10\text{keV}/q$  のエネルギー範囲の電子・イオンを20ミリ秒という非常に高い時間分解能で測定することができる。この観測器によって得られたデータを解析した所、1秒以下の時間巾のエネルギー分散を持った電子が周期的に降り込むという現象を発見した。この現象は今回の高時間分解能によって初めて明らかとなったものであり、これらの電子は地上から約5000km程度の高度で電子が加速され、ロケット高度まで降下してきたものであることがエネルギー分散から推定できた。

## 時間差計測型円形1次元位置検出MCPアノードの開発

助教授 齋藤義文 大学院学生 田中宏樹 助手 浅村和史  
 教授 向井利典

地球をはじめとする惑星の電離圏ならびに惑星磁気圏、惑星間空間において荷電粒子の3次元的な分布を高い時間分解能で測定することは、荷電粒子の起源を明らかにして起源となる領域の情報を得るために必要不可欠である。高い時間分解能でプラズマの計測を行う場合、短いサンプリング時間の間に十分多いカウントレートを得る必要がある。このことは高いカウントレートまで対応可能な荷電粒子の検出器が必要となることを意味している。このために、荷電粒子の検出器であるMCP (Micro Channel Plate) と組み合わせて使用するアノードとして、マイクロストリップラインを用いて2つの電極に発生する電荷の検出時間差を計測することで荷電粒子の入射する位置を検出する時間差計測型円形1次元位置検出アノードの開発を行っている。将来的にはアノードの2次元化も検討しており地球をはじめとする惑星の電離圏ならびに惑星磁気圏、惑星間空間における高時間分解能荷電粒子観測にも使用する予定である。

## 「SELENE」搭載用極端紫外光望遠鏡の開発

助手 吉川一朗 東大・理 中村正人 客員助教授 平原聖文

我々は、月探査周回衛星「SELENE」に搭載する極端紫外光望遠鏡UPI (Upper Atmosphere and Plasma Imager) から、地球プラズマ圏の撮像を試みる。地球プラズマ圏からの散乱光は非常に微弱なため、どの程度まで検出器固有のノイズを軽減できるかが観測の成否を決めると言える。我々は、米国ガリレオ社から低ノイズ型MCPを購入し、ノイズの特性、パルスハイト分布とそれらの経年変化、温度依存性などを詳細に調査し、従来型MCPとの比較を現在行っている。

## 地球プラズマ圏の撮像に関する研究

助手 吉川一朗 名大・理 山下廣順 東大・理 中村正人

「のぞみ」に搭載した極端紫外光望遠鏡を用い、地球プラズマ圏の撮像を行った。この観測は、プラズマ圏に存在する  $\text{He}^+$  が共鳴散乱する太陽光を検出するリモートセンシング法であるが、実際に観測に成功したのは今回が初めてである。今回の成功により我々は、今後のプラズマ圏撮像計画に必要な光学系の技術を習得しただけでなく、科学的に沢山の知見を得た。例えば、プラズマが密に詰まった領域の広がりは今まで我々が持っていた“Closed Convection line”の概念で説明がつくことを確認したが、密度が比較的希薄な領域の広がりには磁気圏内のかなり広い領域 (10Re) 程度まで広がっていることを明らかにした。

## 火星大気中に存在するHeの数値計算

助手 吉川一朗 名大・理 山下廣順 東大・理 中村正人

火星大気中のHeの全量は火星の内部活動度の歴史を反映していると考えられる。現在、火山地形の研究から火

星にはごく最近にも火山活動があったとする説の正否が問われているが、大気中に存在する He の全量が解ればこの問題を解決する糸口が見つかるはずである。

我々は、過去の衛星観測から得られた火星内部に含まれる放射性元素のデータから、火星大気中に存在する He の全量に関する数値計算を行っている。He の全量測定は、「のぞみ」に搭載された極端紫外光望遠鏡によって行われる予定であり、そのデータの予測を予め行うことが目的である。

#### 惑星間空間 He I (58.4nm), He II (30.4nm) の測定

助手 吉川一朗 名大・理 山下廣順 東大・理 中村正人

「のぞみ」では火星への遷移軌道中に、惑星間空間に存在する He<sup>+</sup> と He から散乱光を測定している。He<sup>+</sup> は恒星間空間から流れ込んできた He が太陽光によって電離したものと太陽風中の He<sup>++</sup> が恒星空間の H と荷電交換を行ってできたものの混合と考えられる。過去の観測によれば太陽風中の He<sup>++</sup> には大きな変動が見られるので、惑星間空間からの光の強度を知ることは、上記の予測される 2 つの過程がどの程度の割合で起こっているかの検証となる。同時に、この観測は火星や地球で観測を行う際の背景光の見積もりをする上でも意義がある。

#### オーロラ粒子加速領域内の電流・電圧関係に関する研究

大学院学生 諸岡倫子 教授 向井利典 助手 松岡彩子  
東北大 福西 浩 京大・理 町田 忍 通信総研 長妻 努

極域地方にオーロラを発生させる電子は、地球磁気圏のプラズマシートを起源とし、電離層に存在する磁力線方向の電場によって加速されて電離層に降り込む事が知られている。

同じ領域に流れ込む上向きの沿磁力線電流は沿磁力線電場の発生に深く関わると考えられている為、オーロラ粒子加速領域での電流・電圧の量的関係は古くから議論の対象となっている。「あけぼの」の粒子観測器、磁場計測器を用いて、オーロラ粒子加速領域に於ける沿磁力線電流電圧関係に関する研究を行い、以下のことが明らかになった。

1. 粒子加速領域内での電流・電圧関係は従来与えられるモデル式で計算した値とは一致せず、実際の電流はモデル値よりも数倍から十数倍程度大きいことが多い。
2. モデルより実際の電流が大きい値を示すのは、主に加速された電子だけでなく、もっと低エネルギーの電子も電流のキャリアーになっているためである。

また、このような低エネルギー電子は観測領域の中でよく観測されている。

モデル計算値が実際の電流を説明できないのは、モデルが「加速領域は時間的には一定である」と仮定していた事によると考えられる。加速領域内で電流の新たなキャリアーとなる低エネルギー電子の存在は、時間的定常電場モデルでは説明することはできなかったが、最近では加速領域が時間・空間的に激しく変化している為であると説明されている。

また、近年注目されているオーロラ現象の季節変動に関しても、オーロラ粒子加速領域が夏は 6,000km 以上の高高度に出現するのに対し、冬には 6,000km 以下の低高度で出現するという新たな性質も見い出された。この高度変化は電離層付近のプラズマ密度の季節変化が関係していると考えられる。これらは、加速領域中を観測できる軌道を持つ「あけぼの」ならではの結果である。

#### 火星上層大気と太陽風の相互作用

大学院学生 陣 英克 教授 向井利典 教授 前澤 洸  
通信総研 田中高史

火星探査衛星「のぞみ」の火星到着に備え、計算機シミュレーションを用いた理論的手法により、火星上層大気と太陽風の相互作用に関する研究を行っている。

昨年度までの研究は、火星と太陽風の相互作用において重要な問題のひとつである、ピックアップイオンのダイナミクスを扱った。火星大気起源の酸素原子が、幾つかのメカニズムで電離し、太陽風に持ち運ばれていく(ピッ

クアップされる)量と、そのピックアップイオンの火星近傍における軌道を計算し、ピックアップイオンの速度分布関数や火星周辺における空間分布を調べた。その結果、以下のことが明らかになった。

1. マグネトシースで特に電子衝突反応や、熱的成分の酸素原子がソースとして効き、大量の酸素原子が電離して太陽風にピックアップされている。
2. マグネトシース起源のピックアップイオンは、バウショックを超えて上流にやってき、火星周辺のプラズマ環境に重要な影響をもたらす。
3. ピックアップイオンの運動量の付加を考慮にいたした(太陽風とピックアップイオンの)混合プラズマ流速ベクトルが、火星近傍で非対称に分布しているため、火星周辺のプラズマ環境に非対称的な構造を作り得るということが明らかになった。特にバウショックの形成、下流領域の構造に影響が及ぶであろうと思われる。
4. 太陽風に持ち運ばれていくピックアップイオンの総量は、太陽風と電離層の境界の高度、また付近の構造に大きく左右される。

しかし、この計算で得られた結果は過去の衛星観測より小量であるため、ピックアップ以外の酸素の流出過程があると思われる。

#### 「INDEX」搭載用理学機器開発

客員助教授	平原聖文	助手	浅村和史	助手	笠羽康正
助教授	齋藤義文	教授	向井利典	東北大・理	坂野井健
東北大・理	岡野章一	極地研	岡田雅樹	教授	齋藤宏文

2003年に宇宙開発事業団のH-IIAロケットのピギーバック衛星として打ち上げられる予定の小型衛星「INDEX」には、今後の小型衛星技術開発に向けた工学的試験に加え、その軌道と姿勢制御を活かした理学観測計画が提案・承認されている。その理学観測計画の目的は「オーロラ微細構造の解明」であり、高度約700kmで太陽同期軌道にあり3軸姿勢制御機能を有した「INDEX」を用いて、地球極域領域において今までに例を見なかった画期的な観測を行い、未だ解明されていないオーロラ生成とそのダイナミクスに関する新しい知見を得るというものである。その特徴的な観測器としては「多波長・単色オーロラカメラ」と「電子・イオンエネルギー分析器」がある。これまでの衛星計画で達成された事のない高い空間分解能を持つオーロラカメラにより微細なオーロラ構造とその動きを観測すると同時に、常に磁力線を粒子分析器の平面状視野内に捕捉する事によって、従来方式であるスピン利用型の角度分布測定を制限を取り払い、ほとんど瞬時にオーロラ粒子のエネルギー・ピッチ角分布観測を行う。また、衛星近傍のプラズマ環境を調べるラングミュアプローブ式の観測器をも搭載する。2000年度は、主に「INDEX」に搭載する理学観測機器の開発の為、理学機器と衛星システムとのインターフェース仕様の調整・決定、及び各理学観測機器と、観測機器制御・取得データ処理を司る電子回路部の機械モデル・熱モデル、及びFM品の設計・製作を行った。また、衛星システム試験としての機械的インターフェース試験・振動実験の後、熱真空試験への準備を完了した。

#### サブストームに伴い地球磁気圏プラズマシートへ流出する多成分電離圏起源イオンの観測

客員助教授	平原聖文	東大・理	関華奈子	大学院学生	風間洋一
				教授	向井利典

磁気圏尾部での電磁場配位の急激な再構成と磁気圏プラズマとの相互作用により引き起こされるサブストーム現象は、地球電離圏高度でのオーロラ発生と極域電離圏高度でのイオンの加熱・加速と深く関わっている。これまでの磁気圏尾部での衛星観測により、サブストーム時に多量の電離圏起源イオンが流れ出している事が、それらの組成分析を基に同定されてきた。同様に、「GEOTAIL」の最近の観測データを調査したところ、プラズマシートでの磁気圏プラズマの加熱・加速現象と、ダイポラリゼーションと呼ばれる磁気圏磁力線形状の劇的な変化に伴い、電離圏からの流出イオンのエネルギー・ピッチ角分布の変化が詳細に観測されている事が分かった。それらの解析結果は、磁力線に平行方向へのイオン加速機構が地球近傍で電離圏起源イオンに作用した事を示しており、プラズマシートへの電離圏イオン供給プロセスの一つであり低高度に分布すると考えられてきた沿磁力線電場による電離圏

イオンの加速機構として解釈出来る．ここで得られた「GEOTAIL」観測データによる電離圏起源イオンの急激なエネルギー変化や詳細なピッチ角分布の情報は，電離圏起源イオンの加速・加熱機構と，それらのサブストームとの関連を調べる上で，これまでの衛星観測では得られた事のない貴重な観測データである事が示された．