

EXOS-D 衛星により観測された電場

早川 基¹⁾・岡田 敏美²⁾・鶴田浩一郎¹⁾
河野 祐一¹⁾・松岡 綾子¹⁾

Electric field measurement on the EXOS-D satellite

By

H. HAYAKAWA, T. OKADA, K. TSURUDA, Y-I, KOHNO,
and A. MATSUOKA

Abstract: Electric field detectors (EFD) on the EXOS-D satellite measure the vector electric field by both the standard double probe technique (EFD-P) and the newly developed ion beam technique (EFD-B). The EFD-P system has proved to provide high quality data due to the direction of the antennas which is always perpendicular to the sun-earth direction regardless the spin phase of the satellite. The EFD-B system has not yet been fully operated and we are waiting for an orbital phase suitable for the beam experiment. This paper describes the instrumentation of both systems, and preliminary observational results obtained by the EFD-P such as the Langmuir characteristics of the probe in the plasmasphere and the convection electric field in the auroral ionosphere.

概 要

EXOS-D 衛星に搭載された電場計測器 (EFD) では電場のベクトル測定を従来より標準的に用いられているダブルプローブ法 (EFD-P) と今回新たに開発されたイオンビーム法 (EFD-B) の2種類によって行うようになっている。2対のアンテナが常に太陽方向に垂直な平面内にあるため、EFD-P システムでは非常に良質なデータが得られている。EFD-B システムは未だ完全には作動させておらず、現在は実験を行うのに適した軌道条件待ちを行っている。本論文では両システムの構成及び EFD-P により得られたプラズマ圏内部でのプローブのラングミュア特性、オーロラ電

¹⁾ 宇宙科学研究所

²⁾ 名古屋大学空電研究所

離層における対流電場等について述べる。

1. はじめに

EXOS-D 衛星は 1989 年 2 月 21 日 23 時 30 分（世界標準時）に鹿児島宇宙空間観測所より軌道傾斜角 75 度、近地点 274 km、遠地点 10,500 km、周期 212 分の準極軌道に打ち上げられた。この衛星は太陽指向のスピンの軸を持ち、毎分 7.5 回転のスピンをしている。この衛星には電離圏・磁気圏物理の基本量の 1 つである静電場を測定するために電場計測器 (EFD) が搭載されている。

EFD ではダブルプローブ法 (EFD-P) とイオンビーム法 (EFD-B) の 2 種類の方法により別々に 2 次元の電場計測を行うようになっている。EFD-P には数々の衛星に採用されているダブルプローブ法を使用し、また EFD-B には EXOS-D 衛星のために新たに開発されたイオンビーム法 [1] を採用した。この方法では磁場に垂直に射出したリシウムイオンがほぼ 1 ジャイロ周期後に戻ってくるまでの飛翔時間計測 (TOF) を行い、1 スピンに 2 回磁場に垂直な電場のベクトル測定を行う。EFD-B による測定は EFD-P による測定よりも高い精度が期待できるが、時間分解能は EFD-P の方が高いため、両者による同時計測は準静的電場計測における精度の向上をもたらすものと期待される。

2. 機器構成

本章では、EFD-P、EFD-B 両システムのシステム構成を順を追って示す。EFD 全体としては、図 1 に示すような機器構成になっている。

2. 1 EFD-P システム

対になったプローブ間の電位差を測定し、実効長で割ることによりプローブの方向の電場を得る。実効長は必ずしもプローブの中心間の距離とは一致しないので、低緯度で得られた実験結果を元に経験的に決める必要がある。

磁場に平行な電場は存在しないという仮定を行うことにより、2 対のプローブの観測から磁場に垂直な平面内の電場ベクトルを求めることができる。EFD-P システムは、プローブ、プリアンプ、及び電子回路から構成される。EFD-P には衛星と 1 個のプローブの間の電位差を測定するシングルプローブモードと、1 対のプローブ間の電位差を測定するダブルプローブモードの 2 種があり、各々最大 60 V、120 V の電位差を 16 ビットの分解能で測定することができる。バイアス電流はアンテナ周辺のシース抵抗を最小にするために、2 対のアンテナの各々に供給できるようになっている。また、バイアス電流を変化させることにより、アンテナのラングミュア特性を測定できるようにもなっている。

2. 1. 1 プローブ

2 対の長さ 30 m のワイヤアンテナを 2 つの波動観測器 (VLF と PWS) と共用でプローブとして用いている。アンテナの配置は図 2 に示すように衛星のスピンの軸に垂直な平面内で互いに直行しており、このおかげで対のアンテナ間の光電子放出量は良く釣り合い、放出量

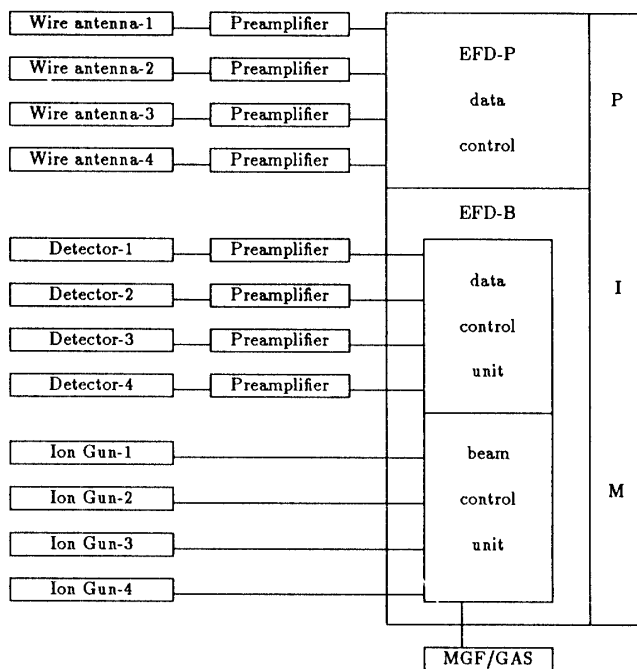


図1 電場計測器の機器構成 ダブルプローブシステム (EFD-P) イオンビームシステム (EFD-B) とから成る。

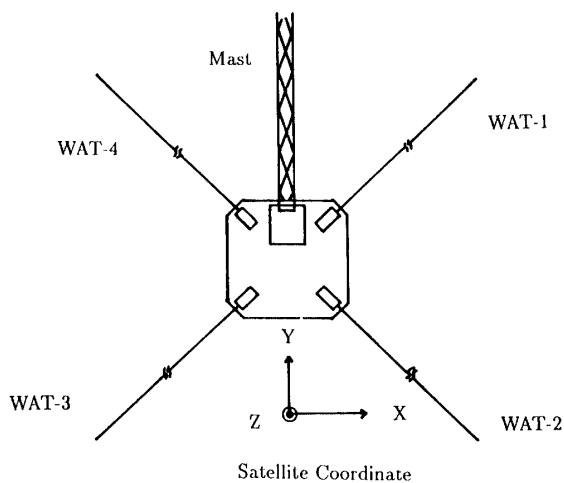


図2 衛星座標系に置けるワイヤアンテナの配置. 4本のアンテナは X-Y 平面内に位置し, WAT1-3系と WAT2-4系は互いに直交している。

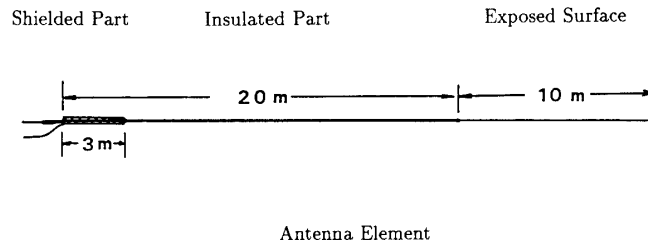


図3 アンテナの構造. 外側10mは電極がむき出しになっており, 残りの20mはテフロンの膜で覆ってある. 衛星側3mの部分は, 導電性のメッシュで覆われており, 衛星の構体と3.3Mオームの抵抗を介して接続されている.

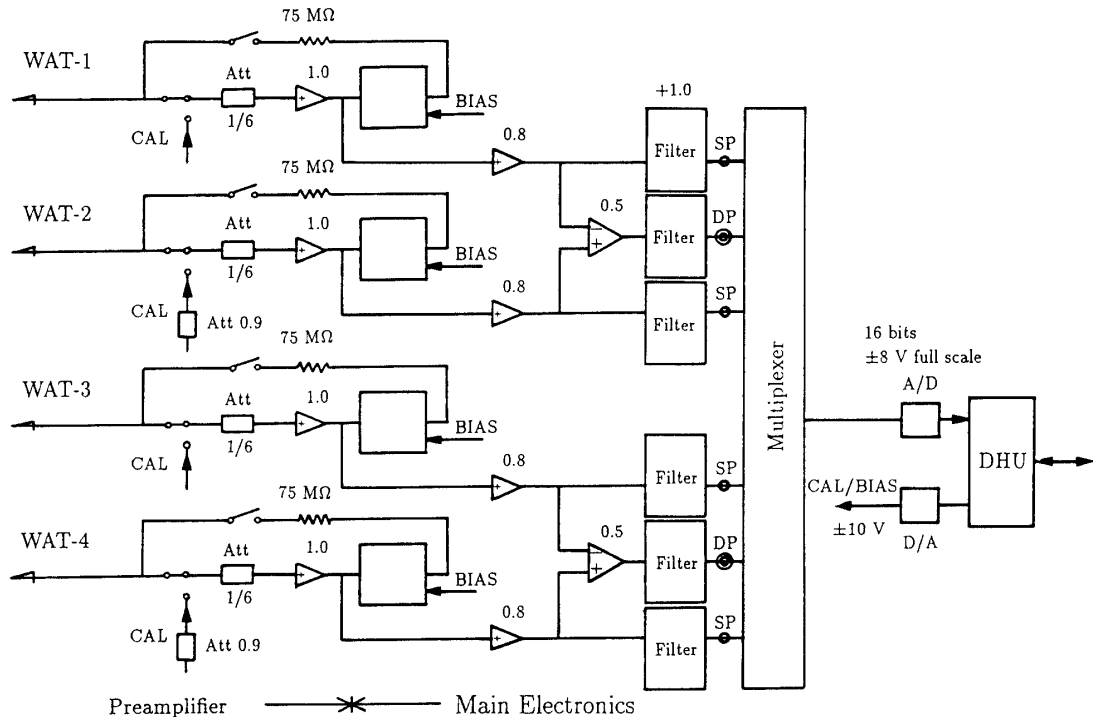


図4 プリアンプ部と電子回路部のブロック図. バイアス電流は75Mオーム, 較正用信号は100kオームの抵抗を介して供給される.

の差に起因する偽の電場を小さく押えることができている.

各々のアンテナは図3に示す構造となっており, 先端の10mが電場計測のプローブとして用いられる. 残りの20mはテフロンを薄くコートしてあり周辺のプラズマと絶縁をとっている. 根元の3mは導電性のメッシュで被ってあり, 3.3Mオームの抵抗を介して衛星に接続されている. このアンテナの構造は, 衛星からの雑音を減らすだけでなく, アンテナが帯電することによる低エネルギー粒子観測 (LEPとSMS) への悪影響を抑える事にも効果があると期待される.

2. 1. 2 プリアンプ

プリアンプはアンテナの根元にある箱の中に伸展用のモーターとともに収納されており、アンテナと衛星との間の電位差は、1,000 Mオームの高抵抗を介してプリアンプで測定される。プリアンプ部と電子回路部とのブロック図を図4に示す。

2. 1. 3 電子回路

電子回路部にローパスフィルター、バイアス電流、キャリブレーション回路、及びデータ処理回路部が含まれている。

各々のプローブからの信号は、ローパスフィルターによって高周波成分を除去された後16ビットのデジタルデータに変換される。

バイアス電流は75 Mオームの抵抗をかいしてアンテナに供給され、その電流値は地上からのコマンドによって $\pm 0.13 \mu\text{A}$ の範囲を7ビットの分解能で変化させる事ができる。また最適なバイアス電流値を調べるためにバイアス電流を変化させ、アンテナのラングミュア特性を調べる掃引モードが用意されている。このモードは、バイアス電流をそれまでの値から $\pm 0.13 \mu\text{A}$ の範囲で上下に4回掃引した後元の値に戻して終了する。掃引モードにおけるバイアス電流の変化を図5に示す。掃引モードを実行中はシングルプローブモードのデータの

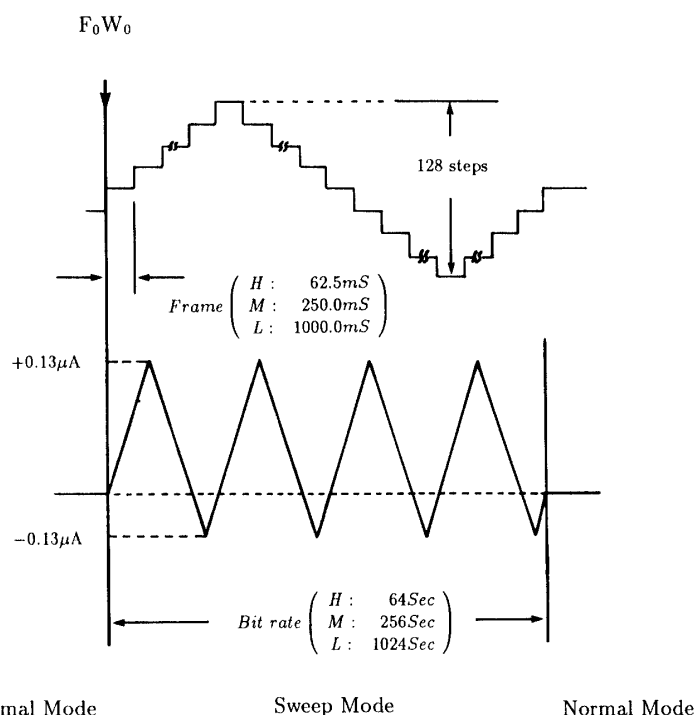


図5 掃引モードにおけるバイアス電流の変化。掃引はフレーム0のワード0から開始され、4フレーム毎に離散的に変化する。1掃引したのち通常の観測モードに自動復帰する。掃引は通常の観測モードのバイアス値から開始され、元の位置に戻って終了する。

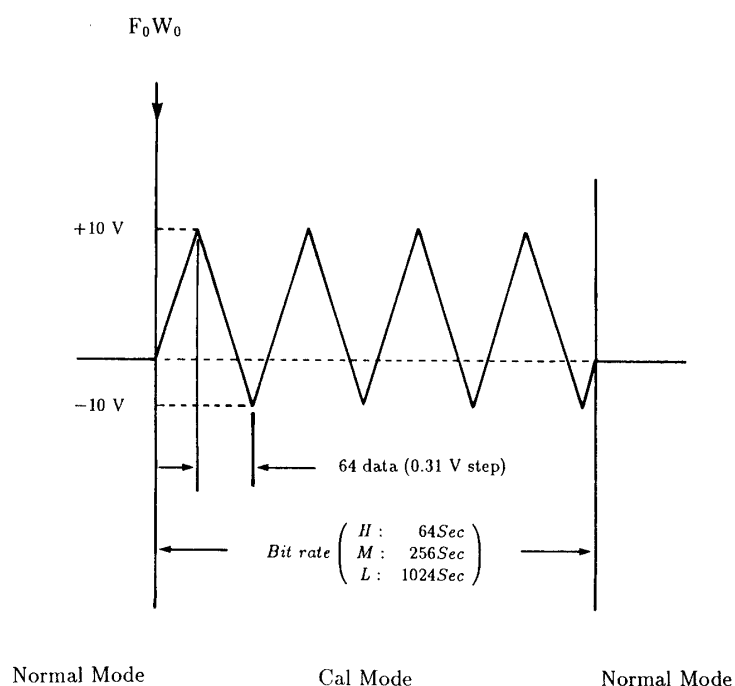


図6 較正用信号の印加パターン。較正用信号はフレーム0のワード0から開始し、掃引モードと同様の変化し、8掃引終了後自動的に通常の観測モードに復帰する。較正信号はダブルプローブモードの較正も行えるように、ワイヤアンテナ1と2には±10V、ワイヤアンテナ3と4には±9Vの電圧が印加される。

み取得される。

系全体としての利得の校正は図6に示すように100kオームの抵抗を介して±10Vの範囲で電圧を変化させる事により行われる。ダブルプローブモードのデータが0にならないようにWAT3とWAT4にはWAT1とWAT2の0.9倍の電圧がかけられるようになっている。利得の校正中はシングルプローブモードのデータは4つのアンテナの各々について8フレームに1回ずつ取得され、ダブルプローブモードのデータは2組のアンテナのデータが各々8フレームに2回ずつ得られる。

データ処理回路部ではその時々モードに応じてテレメーターに16ビットのデータを送出する。

2.2 EFD-Bシステム

イオンビーム法では磁場に垂直に打ち出したリシウムイオンが再び同じ場所に戻ってくるまでの時間が周辺の磁場、電場強度に従って変化する事を利用してビームの飛行時間計測(TOF)を行い、磁場・電場の強度を求める。このとき衛星の姿勢とビームの打ち出し方向を知る事によって磁場・電場をベクトル量として求める事ができる。TOFを行うためにビームには疑似ランダム信号と方形波を混合した変調がかけられている。イオンビーム法の詳細

は別のところ [1] [2] で述べてあるので、ここでは省略する事にする。

EFD-B システムは、4個のリシウムイオン銃・4個のリシウムイオン検出器・データ処理などを行う電子回路とから構成される。

2. 2. 1 リシウムイオン銃

各々のイオン銃は衛星座標の X-Z 面内の1つの象限をカバーし、2つの銃が1つにまとめられ、衛星の上下面に位置している。リシウムイオン源としては熱解離型の β -Eucryptite を傍熱型のヒーターとともに用いている。イオン銃の性能としては、500 eV のビームを数度の拡がりで視線方向に対して ± 45 度の偏向を行えるようになっている。各々のイオン銃の視線方向は衛星のスピンの軸に対して 45 度傾いているので常に X-Z 面内で磁場に垂直な方向にビームを打てるようになっている。また、ビームの強度は最大 $0.5 \mu\text{A}$ であり、地上からの命令によって変更することが可能である。イオン銃の構造図を図 7 に示す。

2. 2. 2 リシウムイオン検出器

イオン銃と同様に、衛星座標の X-Z 面内の1つの象限をカバーし、2つが1つにまとめられ、衛星の上下面に位置している。方位角方向には ± 30 度、上下角方向には 90 度の視野角を持っており、500 eV のシリウムイオンに対してスピンの軸に垂直な方向から 30 度以内では約 0.3 cm^2 それ以外では約 0.05 cm^2 の有効面積を持っている。イオン検出器の構造図を図 8 に示す。

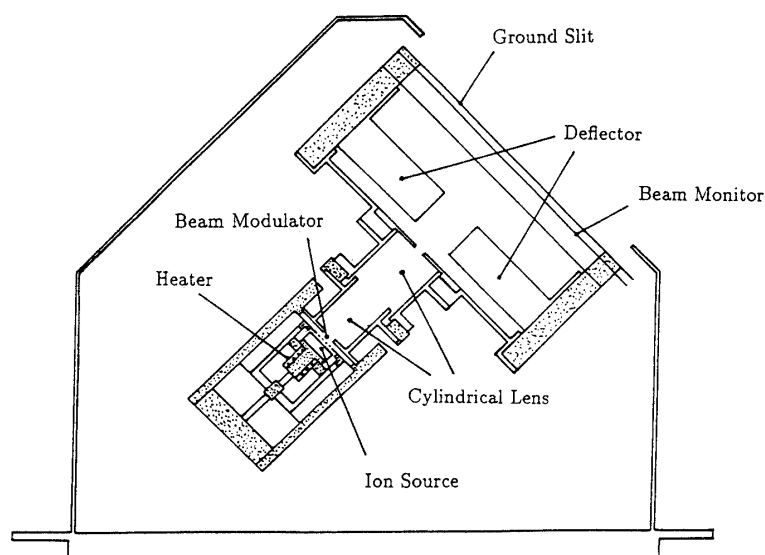


図 7 イオン銃の構造図。イオン銃はヒーター部、ビーム変調用円盤、円筒型レンズ、偏向板、電流モニター、及びスリットから成る。ヒーター部では、リシウムイオン源はヒーター自身とは電氣的に絶縁されている。

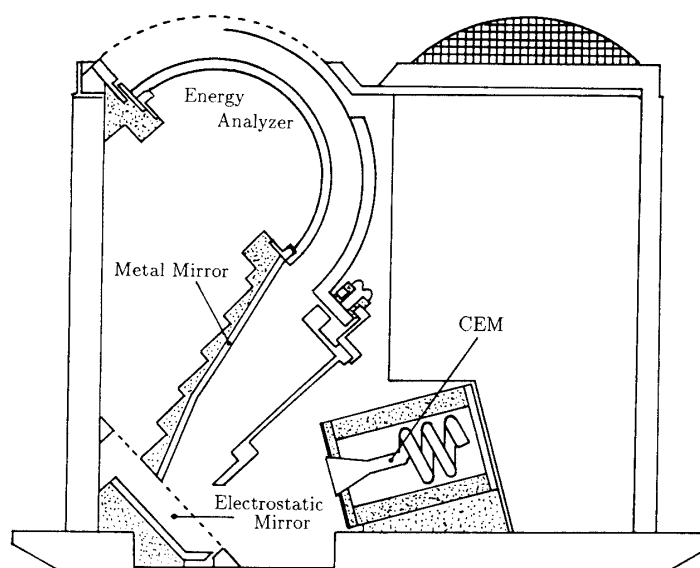


図8 イオン検出器の構造図。イオン検出器はエネルギー分析器，白金メッキされた金属面鏡，静電形ミラー，及び粒子検出器から成り，上下方向には90度，方位角方向には±30度の視野角を持つ。

2. 2. 3 電子回路

ビームの変調用の信号の生成，ビームの打ち出し角の制御，戻りビームの検出，電場の導出に必要な各種データの取得，及びテレメーターへの送信を行う。ビームの打ち出し角の制御は磁場計測器または地磁気姿勢系のいずれか一方のデータをもとに行う。どちらのセンサーのデータを用いるかは地上からのコマンドによって決定される。4個のイオン検出器の出力はビームの打ち出し方向に応じて2つの信号にまとめられ，ビームの変調に用いている方形波との相関をとる事により戻りビームの検出を行う。戻りビームを検出すると，その時点での各種パラメーターの値を取得すると同時にその前後の信号を記録し，地上に送信する。これらのデータを地上で解析する事により電場ベクトルが求まる。

3. 初期観測結果

3. 1 プラズマ圏内部でのV×B電場

図9にEFD-Pによってプラズマ圏内部で得られた生のデータ波形を示す。上段にはワイヤアンテナ1と3（WAT-3）のダブルプローブモードのデータ，下段にはワイヤアンテナ2と4（WAT2-4）のデータが示してある。どちらも衛星の回転に伴うきれいなサイン波形を示している。似たような波形は地球の共回転電場以外には自然の電場が存在しないと思われる場所のほとんどで観測されている。従ってこのきれいなサイン波形は衛星が磁場中を動く事によるV×B電場と共回転電場を合成したものであると考えられる。

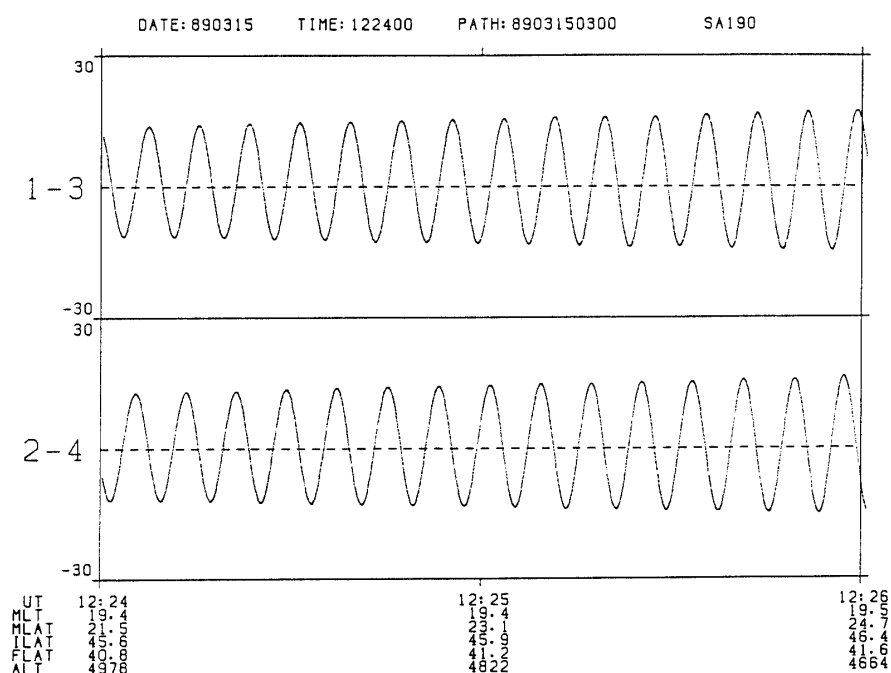


図9 EFD-Pにより1988年3月15日に観測された電場データ。上段にはワイヤアンテナ1-3のデータ、下段にはワイヤアンテナ2-4のデータを示す。

3.2 ワイヤアンテナの実効長

静穏時の中緯度プラズマ圏においては衛星の運動による $V \times B$ 電場と共回転電場以外には電場が存在しないと考えられるので観測値と計算値を比較する事によりワイヤアンテナの実効長を求めることができる。4月6日の11時15分前後に得られたデータを計算値と比較した結果WAT1-3及びWAT2-4のそれぞれに対して52.2 m及び54.1 mの実効長を得た。これらの値はアンテナ先端の電極の中心間の距離51.2 mに近いものであるが、時にはこれよりも小さな値を示す事もある。一方球プローブの実効長に関してはPedersenら[3]がISEE1衛星で太陽風中での観測をもとに予測値の0.7という値を出している。ワイヤアンテナの実効長に対する周辺プラズマのパラメタの影響については現在調査中である。

3.3 プローブのシース抵抗

これまでの議論ではプリアンプの入力抵抗に比べてプローブのシース抵抗は十分に小さいものと仮定してきた。シース抵抗はプラズマの密度や温度に依存して変化するがプローブのラングミュア特性を測る事で推定ができる。低緯度のプラズマ圏内部で測定した掃引モードのデータを図10に示す。図を見て明らかのように掃引モードの出力バイアス電流に対して非線形に変化している。あるバイアス電流に対するシース抵抗はその点での傾きで与えられる。図中の矢印はバイアス電流を流さない点であり、この点でのシース抵抗は4.0 Mオームであった。この値はプリアンプの入力抵抗である1,000 Mオームに比べて十分小さいのでたとえバイアス電流を流さなくともシース抵抗は観測に支障をきたすほどの誤差は与えない事がわかった。

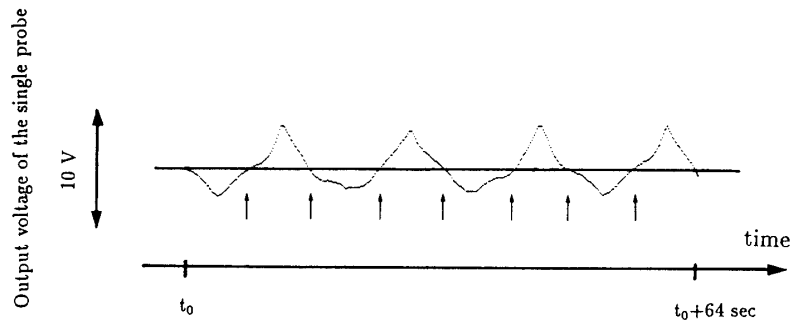


図10 中緯度プラズマ圏内で得られたプローブのラングミュア特性.

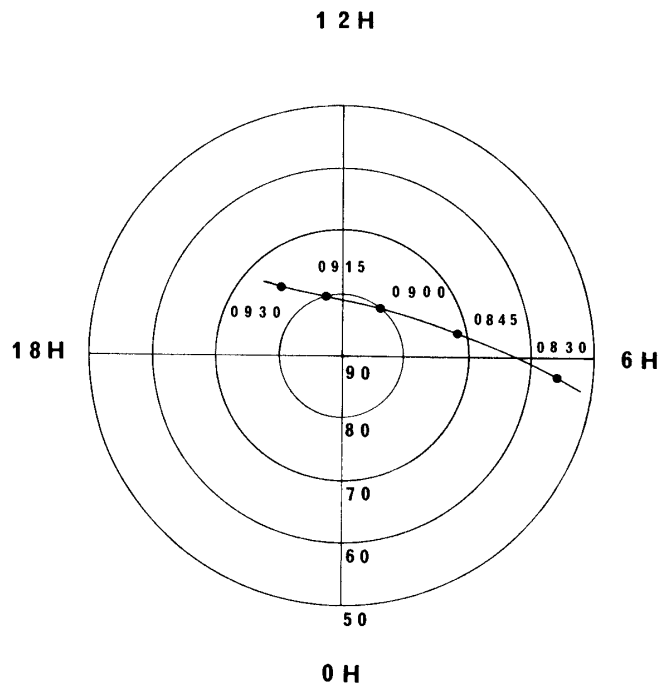


図11 1989年4月5日の南半球に於ける衛星の軌道.

3. 4 極域での対流電場

図11に示すように南半球の極冠域内部を衛星が朝方から夕方へと横切ったときに観測された電場の観測例を図12に同時に観測された磁場を図13に示す(磁場のデータはMGF班の御好意による). 図12ではGSE座標が用いられているが, 図13ではX軸はGSEと同じ方向であるが, 残りの2軸はGSEのY及びZ軸とは必ずしも一致しない. 図12において衛星が朝方のオーロラ帯を通過したときにYは負にZは正に強い電場が観測された. 磁場データとの比較から, この電場の増大の低緯度及び高緯度側の境界はそれぞれ領域2及び領域1の沿磁力線電流に対応する事が分かった. また領域2沿磁力線電流に対応して強い電子の降下が見られる. 電場は8時40分頃に方向を変えそれ以降は緯度81度地方時11時24分に達するまでY成分はさほど変化していない. 図14に示すようにこれらの観測は電場の朝

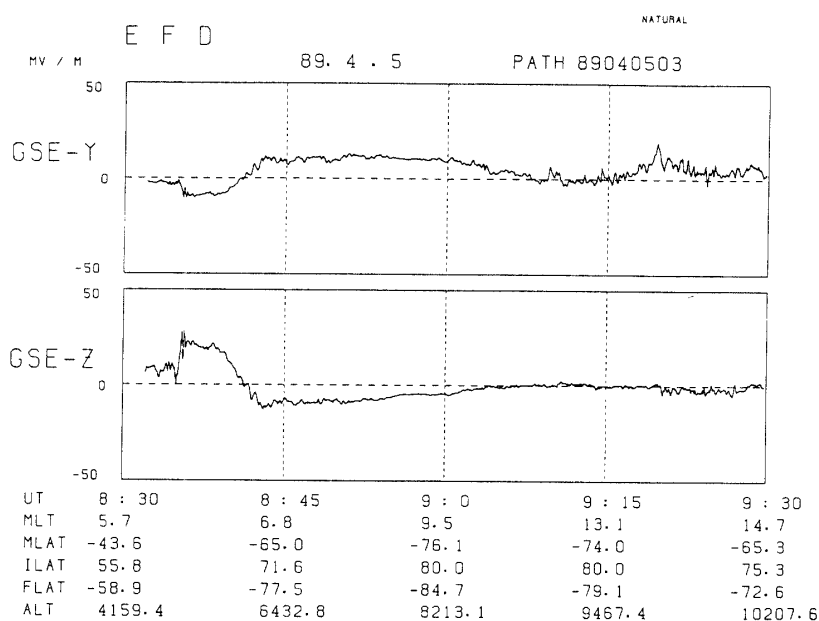


図12 図11の時間に得られた電場データ。上段はGSE座標のY軸を、下段はZ軸を示してある。沿磁力線電流と磁気圏の対流に関連する強い電場が極域で観測された。

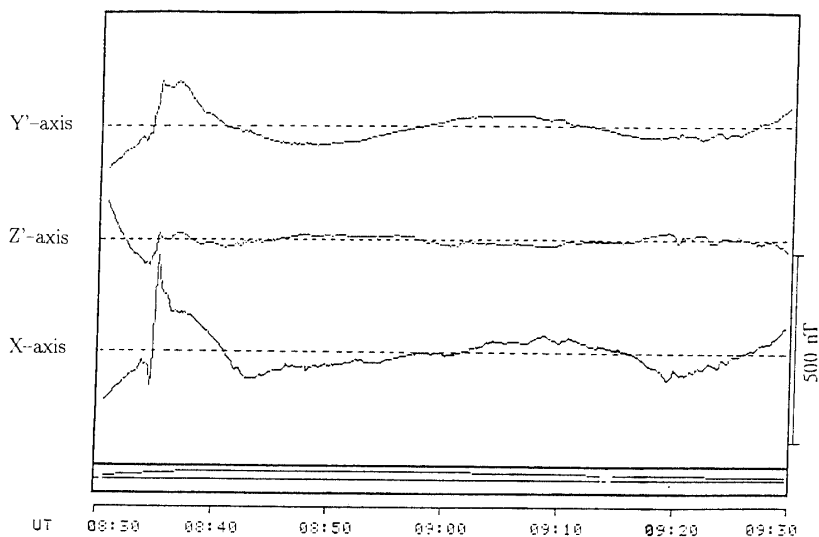


図13 図12に対応する磁場データ。X軸は太陽方向で、Y・Z軸は右手系をなすように決められている。(この図はMGF班の好意による。)

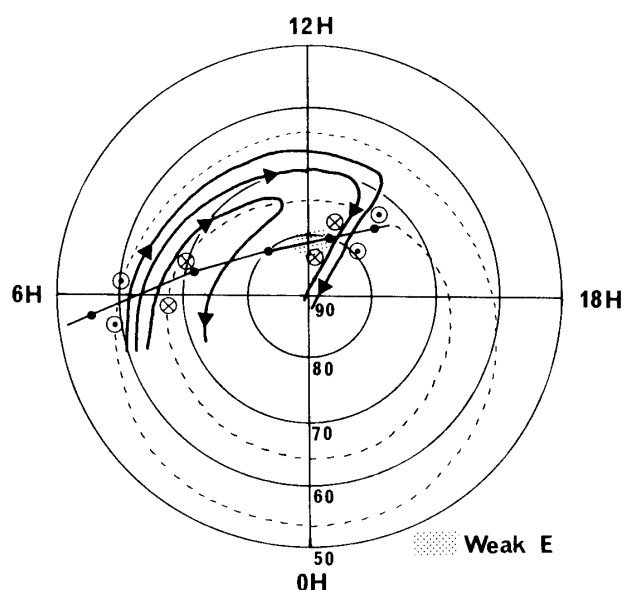


図14 図12の電場データから考えられる等電位線。点線はオーロラ帯を示し、・と×の入った円は各々上向きと下向きの沿磁力線電流を示す。変動を伴った微弱な電場が観測された領域を影を付けて示してある。

一夕面内への投影は領域1と領域2電流の間では赤道向きであり極域では夕方向きであることを意味する。観測された電場のY成分とZ成分の関係は電場は磁場に垂直であるという考え方と一致している。

カスプ領域における粒子降下に対応すると思われる電場の変動が9時7分から9時20分にかけて観測されそれ以後は電場の増大がみられている。実際9時18分から25分にかけて1 KeV以下の電子の強い降下が観測されている。変動する強い電場が中程度の強さの沿磁力線電流のペアに挟まれていることに注意してほしい。これらの観測は、正午のすぐ午後側に極域へと入り込む強い流れがあることを示している。この流れは反太陽向きであり、西向きへとねじれている。このような極域を横切る流れの集中とねじれとは太陽風中の磁場(IMF)の向きの影響によって起こることが知られている[4]。今回観測された特徴はIMFのY成分が負の時に期待されるものである。

図12と図13とを比較してみると、電場の変動と磁場の変動がよい対応を示していることが分かる。似たような相関がIsraelevichら[5]によって発見されている。

4. まとめ

EXOS-D衛星に搭載されたダブルプローブはきわめて良質の電場の計測を行っている。中緯度プラズマ圏内での観測から実効長が測定され、電極の中心間の物理的な距離に近い値が得られた。プローブのラングミュア特性からプローブのシース抵抗が測定された。その結果はバイアス電流を流さなくとも十分信頼のおける測定ができる程度の小さなものであった。

朝方から夕方側の極域を通過する軌道についての電場の解析を行ったところ、朝方側では赤道向きの強い電場が領域1と領域2電流の間に集中しており、領域1電流の極域側では夕方向きのわりあい一様な電場が存在した。正午頃の領域ではカスプ構造に関連すると思われる変動がみられ、午後側ではIMFのY成分が負であると思われる構造が観測された。また、電場と磁場の変動の間にはよい相関が見られた。

謝 辞

EXOS-Dプロジェクトチームの全員に感謝いたします。快くデータを使わせて頂いたMGF班及びLEP班の方々に感謝致します。また、機器開発に当たり有益な助言をいただいた東京大学物性研究所の村田博士並びに東京都立大学の金子博士にこの場をお借りしてお礼を申し上げます。なお、センサー部は三鷹光器株式会社、電子回路部は明星電気株式会社によって設計・製作された。

参 考 文 献

- [1] Tsuruda, K., H. Hayakawa, and M. Nakamura, A method of DC electric and magnetic measurement in the ionosphere using time of flight technique of collimated charged particle beams, ISAS Res. Note, 218, 1983.
- [2] Nakamura, M., H. Hayakawa, and K. Tsuruda Electric Field Measurement in the Ionosphere Using the Time-of-Flight Technique, J. Geophys. Res., 94, pp 5283-5291, 1989.
- [3] Pedersen, A., C.A. Catell, C.-G. Falthammar, V. Formisano, P. -A. Lindqvist, F. Mozer, R. Torbert, Quasistatic electric field measurements with spherical double probes on the GEOS and ISEE satellites, Space Sci. Rev., 37, pp. 269-312. 1984.
- [4] Heppner, J.P. and N.C. Maynard, Empirical high-latitude electric field models, J. Geophys. Res., 92, 4467, 1987.
- [5] Israelevich, P.L., I.M. Podgorny, A.K. Kuzmin, N.S. Nikolaeva, and E.M. Dubinin, Convection and field-aligned currents, related to polar cap arcs, during strongly northward IMF (11 January 1983), Planet. Space Sci., 36, 1317, 1988.