

EXOS-D サーチコイル観測

国分 征¹⁾・高見 雅和¹⁾・林 幹治¹⁾
福西 浩²⁾・木村 磐根³⁾

EXOS-D Search Coil Observations

By

S. KOKUBUN¹⁾, M. TAKAMI¹⁾, K. HAYASHI¹⁾
H. FUKUNISHI²⁾, I. KIMURA³⁾

Abstract: Triaxial search coil measurements of ELF waves have been made for the first time at the polar orbiting low-altitude satellite EXOS-D (Akebono). A preliminary survey of realtime telemetry data received at Kogoshima Space Center reveals the existence of a variety of plasma waves in the frequency range around the ion gyrofrequencies near the equatorial region of the deep plasmashere. It is confirmed that electromagnetic noise with a multiple band-structure, reported previously, are present above the helium gyrofrequency. We found that two types of ELF waves are observed at altitudes of 2000–6000km in the low latitude region.

Waves with linear polarization in the plane perpendicular to the ambient magnetic field, having a large field-aligned component, are frequently observed in the frequency between proton and helium gyrofrequencies. In some cases the intensity of waves is found to be largest around the magnetic equator. Another type of waves with a dominant electric field component are observed in two distinct bands below and above the helium gyrofrequency in the evening sector.

はじめに

1989年2月に打ち上げられ [あけぼの] 衛星には、ELF帯波動の観測を目的として、極

¹⁾ 東大理

²⁾ 東北大理

³⁾ 京大工

軌道衛星としては初めて3軸サーチコイル磁力計が搭載された。磁気圏におけるプラズマ波動については、これまで多くの観測があるが、ELF帯の磁場成分をベクトルの測定した例は殆ど報告されていない。最近興味ある観測成果を上げているDE-1/2やVIKING衛星でも、磁場の測定は1成分のみである [Hultqvist, 1987; Gurnett and Inan, 1988]。ここでは、[あけぼの]衛星からの実時間データの初期的な解析結果として、プラズマ圏赤道付近におけるELF帯プラズマ波動について報告する。

10 Hz から数 100 Hz にわたる周波数帯にバンド構造を持った電磁波が磁気赤道付近に存在することは初期の衛星観測で確認されている [Russell et al., 1970; Gurnett, 1976]。しかしながらベクトル的な場の測定が行われなかったため、偏波などのプラズマ波動としての基本的な特性については必ずしも明かではない。極域においては、沿磁力線電流に伴う現象として、広帯域低周波ノイズ (broadband low-frequency noise) が顕著なELF帯ノイズとして知られている。Weimer et al., [1985] によれば、これらのノイズは、波動ではなく衛星が空間的に変化している沿磁力線電流系の中を横切ることにより生じる変動とされている。彼等の観測では、電場、磁場のスペクトルや偏波についての同時観測データが調べられていないので、この結論を確かめるためにはさらに詳しい解析が必要である。

[あけぼの]衛星の遠地点は、観測の初期には南半球にあったため、いまのところ極域のデータの解析はほとんど進んでいないので、この報告では、主に磁気赤道付近で観測された波動現象について述べる。

観測装置の概要とデータ処理

この観測は、[あけぼの]における磁場観測の一部として行われているもので、3軸サー

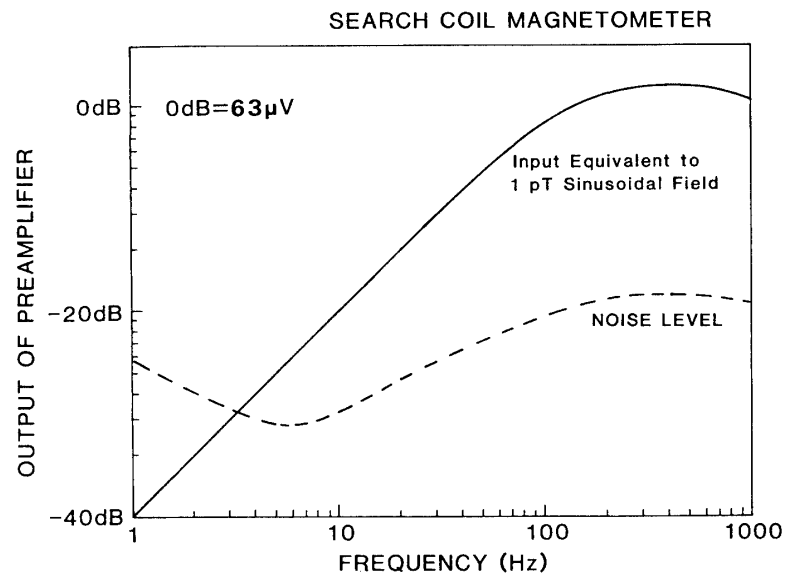


図1 サーチコイルプリアンプ系の周波数特性。振幅1pTのサーチコイル入力信号に対するプリアンプの出力を示す。破線はノイズレベル。

チコイルによる測定により、ELF帯の磁場変動の様相を詳細に調べることが目的としている。計測システムについては、Fukunishi et al., [1990] 及び Kimura et al., [1990] を参照されたい。100 Hz あるいは 50 Hz 以下の波形のデジタル伝送のため、サンプルレイト 320 Hz (wide mode; one component) と 160 Hz (narrow mode; three components) の2つのモードを設けている。通常は 160 Hz モードで運用されている。また、両モードともスピンの面内の電場成分 (Ex) の同時測定が行われている。

図1には、サーチコイルセンサープリアンプ出力の周波数特性を示す。測定の対象となる 100 Hz 以下の周波数領域では、ほぼ時間微分に比例する出力が得られる。

スピン軸は太陽指向であるため、波動の性質を詳しく調べるためにはデスピが必要である。このため、フラックスゲート磁力計のデータを用いて沿磁力線座標を定め、沿磁力線座標を基準としてスペクトルを求めた。磁力線に垂直な平面内の成分については、スペクトルを左回りと右回りの回転成分 (回転スペクトル) に分解して f-t スペクトルを求めた。

[あけぼの] の遠地点は、当初南半球にあったので、極域データの解析にはほとんど手が

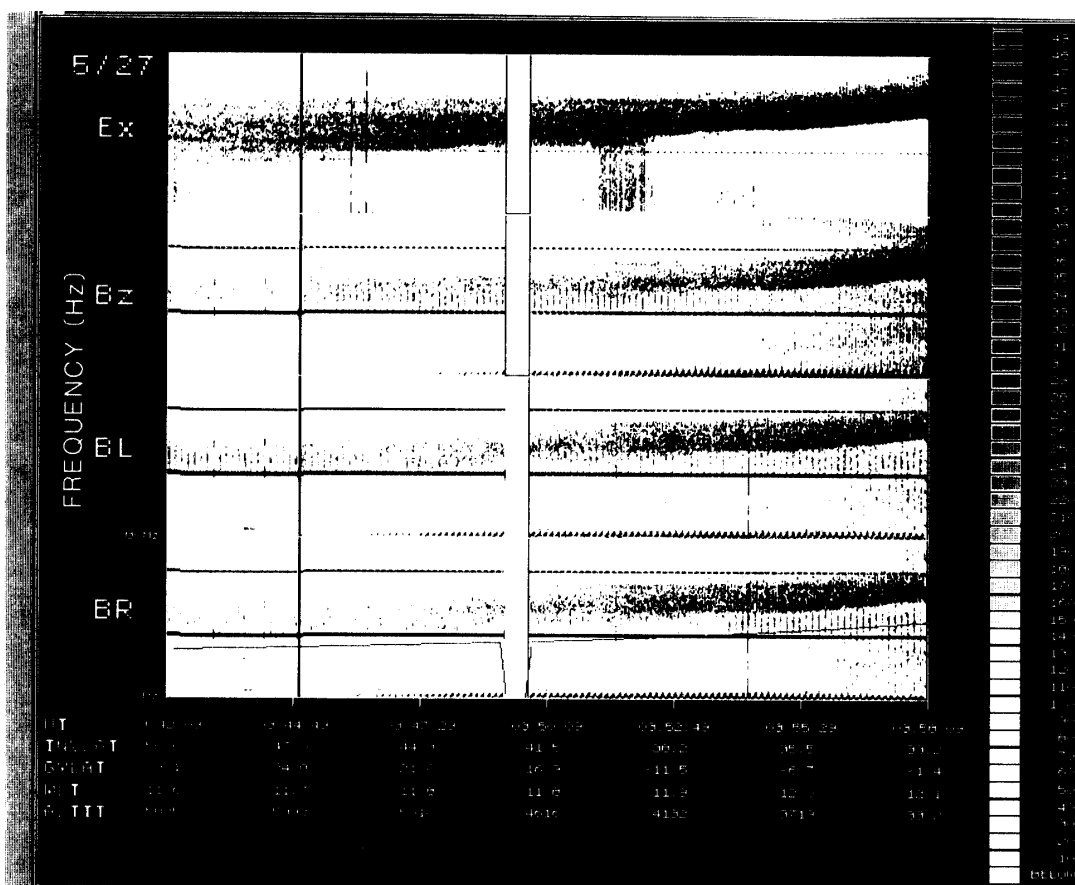


図2 赤道付近に観測された ELF 帯波動のスペクトル例。上から、スピン面内の電場 (Ex)、磁場に平行な成分 (Bz)、左周り (BL) 及び右周り (BR) 成分が示されている。電場とともに磁場成分も観測される例 (type 1)。BR ベクトル中の実線はヘリウムの旋回周波数を表す。32 及び 64 Hz のラインスペクトルは衛星本体からの干渉ノイズである。

ついていない。これまでの解析では、内之浦 (KSC) で受信された実時間データの処理を主に行ってきたので、以下の議論では赤道付近で得られたデータの解析結果が主となる。

ELF 帯波動のスペクトル

極域では、粒子降下や沿磁力電流と密接に関わる広帯域低周波ノイズがしばしば観測されることを確認したが、ここでは、赤道領域で観測される波動に焦点をあてて検討する。図2に示す例では、電場成分、磁場成分ともヘリウムの旋回周波数 (f_{He^+}) とプロトンの旋回周波数 (f_{p}) の間に波動が観測されているが、磁場成分が強く低周波側の急峻に落ちるスペクトルが特徴である。このカットオフ周波数は、衛星の高度変化による磁場強度の増大と共に増加している。また、左回り成分 (BL) と右回り成分 (BR) のスペクトル強度はほぼ等しく、偏波は直線的であることを示している。磁場に平行な成分 (BZ) は他の成分に比べ大きい。この例では赤道上空までのデータが得られていないが、後に示すように統計的には赤道で 30° 以内の領域で観測されているようである。以下、図2と同様な特徴を持つスペクトルの波動を type 1 と呼ぶ。

これまでの観測で type 1 とともに比較的良好に見られたスペクトルは、図3に見られるよ

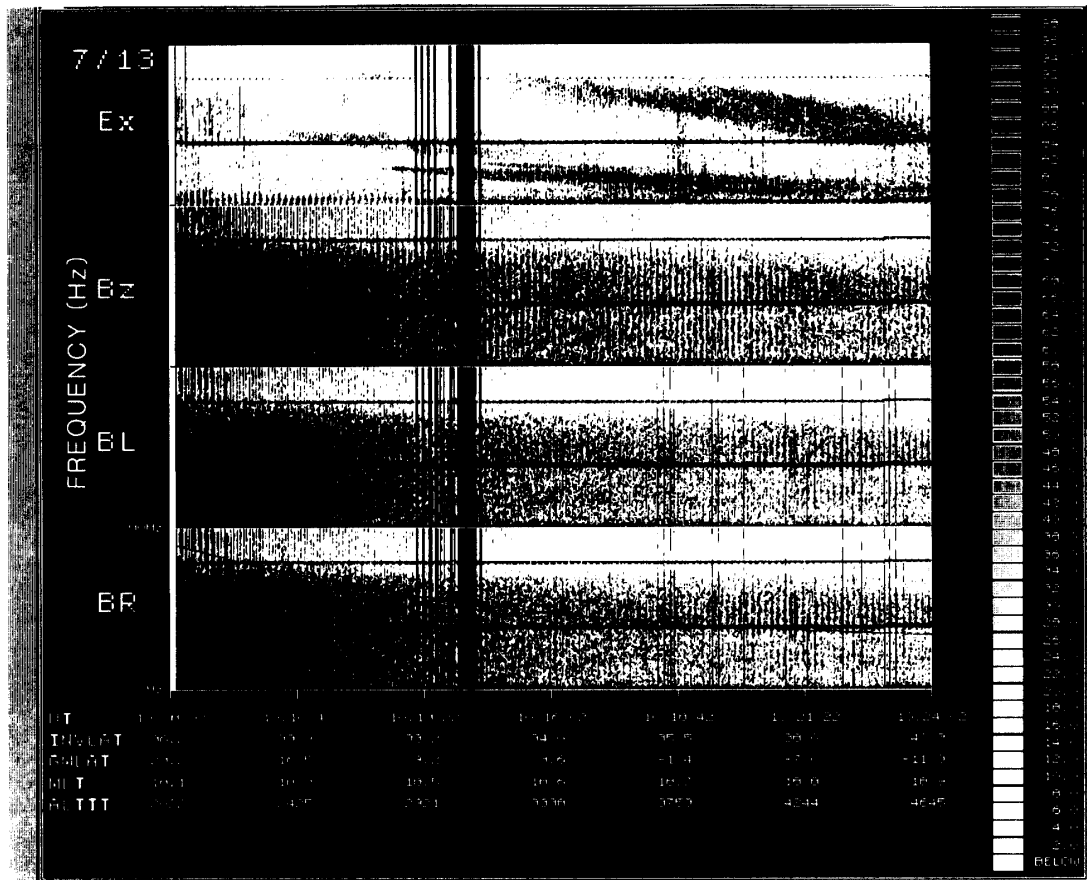


図3 ヘリウムの旋回周波数の上下に2つのバンドが現れ、磁場成分が非常に小さいELF放射の例 (type 2)。

うなもので、電場成分が卓越し、type 1 に比べると磁場成分は非常に小さい波動である。この波動は f_{cHe+} を挟んで低い周波数域と高い周波数側と2つに分かれて現れる。低周波側のカットオフは酸素イオンの旋回周波数 (f_{o+}) よりは大い。

このほか、Russell et al. [1970] や Gurnett [1976] が報告しているバンド構造をもつ波動も観測されている。図4のスペクトルはバンド構造が顕著に現れているもので、高度8,800 km 付近で観測された。電場成分、磁場成分とも f_{cp} の上下にわたってマルチバンド構造が見られる。強度の最大は、磁気赤道にはなかったが、波動は赤道を挟んだ限られた領域で観測された。このタイプの波動は、10月に入り [あけぼの] の遠地点が赤道に近づくにつれて観測されるようになった。

発生領域

観測が始まって以来まだ日が浅いため、波動が観測される領域の分布を統計的に確定するほどのデータが得られていないが、約半年間のデータを調べた結果について以下簡単に述べる。図5には、type 1 が観測された軌道を示した。図の右側は、地方時依存性を見るためのプロットであり、赤道面への投影を示す。左側には、子午面への投影を示す。KSC で受信された限られた実時間データの調査のため、地方時の全てについて均等なデータがないので

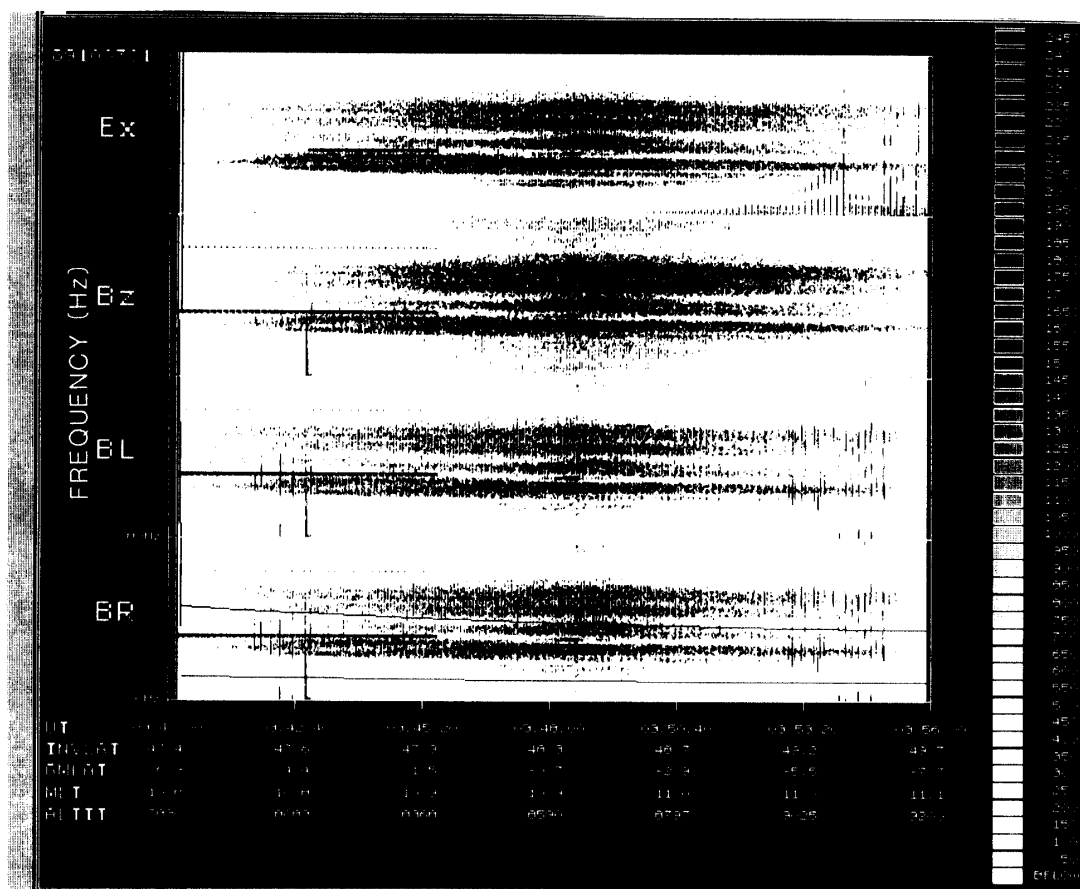


図4 ラインスペクトルが重なって現れる赤道ノイズの f - t スペクトル。

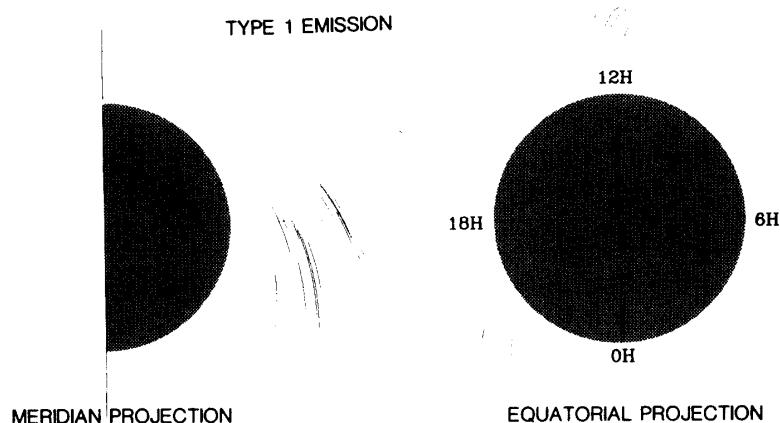


図5 type 1 波動が観測された軌道の分布.

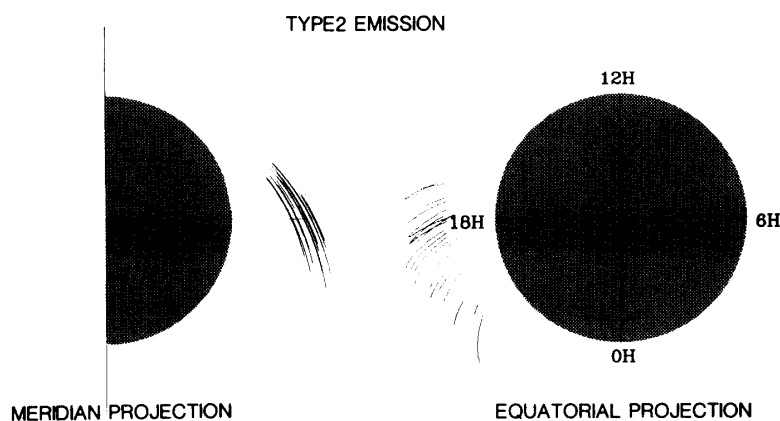


図6 type 2 波動が観測された軌道の分布.

確定的なことはいえないが、はっきりした地方時依存性はないようである。緯度的な分布では、赤道を挟んで 30° 程度の範囲で観測されるとしてよさそうである。

図6は図5と同様な軌道のプロットをtype 2の波動について示したものである。type 2の波動は、type 1に比べ観測領域にはっきりした特徴が見られる。地方時でいえば、16時から20時にかけて限られた領域で観測されている。また、観測領域の中心が赤道にあるとすることができる。しかしながら、限られた地方時で観測される特性については、データをさらに増やした上で結論を出すべきであるかもしれない。type 2波動は、7月の中旬ほぼ毎日のように観測されたが、その後は軌道が変化したためかほとんど観測されていない。

赤道付近で観測されるこれらの波動現象はどのような条件の下に起こるであろうか。これまで K_p 或は柿岡の K 指数を調べた限りでは、地磁気活動との関連はあまりはっきりしない。概して静穏な時に観測されるが、地磁気活動が活発になった時でも観測される。

1989年は、3月の大磁気嵐以後、頻繁に磁気嵐が発生しているので、プラズマ圏の底に当るような領域で観測されるこれらの波動の励起機構を探るためには、磁気嵐との関連を詳しく調べることも重要かも知れない、この点は今後の問題として残されている。

まとめ

[あけぼの] 衛星の観測開始以来、約9カ月間のデータを調べた範囲で、プラズマ圏 $L = 1.5 \sim 2.5$ 領域には様々な形の ELF 帯放射現象が存在することが明らかになった。これまでの観測では、赤道付近 $L = 2 \sim 5$ の領域にバンド状の高調波構造の顕著な放射が知られていたが、同様な放射現象は [あけぼの] によっても確認された。このバンド構造は、 f_{cp} と f_{cHe+} の間の周波数帯迄広がっていることが明らかになった。このタイプの波動は、イオン Bernstein モード放射と考えられており、この解釈を支持する粒子観測も報告されている [Gurnett and Inan, 1988]。この観測では、赤道域 $L = 2$ 付近においてこのタイプの現象の存在をようやく確認したところであり、さらに詳しい解析が必要である。

[あけぼの] 観測により、これまで報告されていない f_{cp} 以下の周波数域に特徴的なスペクトル構造を持つ波動の存在が明らかになった。ここで type 1 とした波動は、プロトン及びヘリウムの旋回周波数の間に現れ、磁場成分も大きく直線偏波の波動である。type 2 とした波動は、ヘリウム旋回周波数の上下に電場成分の強いスペクトルとして観測される。表 1 にこれらの波動の特性をまとめておく。

これら波動は、酸素イオンやヘリウムイオンに関連したイオンサイクロトロン波と考えられるが、発生機構についてはさらにデータを増やし解析を進めたうえで検討する予定である。

表 1 赤道域 ELF 波動の特性

	TYPE 1	TYPE 2
Spectrum	one band	two bands
Frequency	between Ω_{He+} and Ω_{H+}	above and below Ω_{He+}
Polarization	almost linear	not well-defined
Intensity	dominant along the magnetic field	small magnetic field components electrostatic mode ?
Occation	dominant in the afternoon	MLT: 17~21h
location	$\lambda = \pm 30^\circ$ 0.3~1.0Re	0.5~0.9Re

参考文献

- Fukunishi, H., R. Fujii, S. Kokubun, K. Hayashi, T. Tohyama, Y. Tonegawa, S. Okano, K. Yumoto, M. Sugiura, I. Aoyama, T. Sakurai, T. Saito, T. Iijima, A. Nishida and M. Natori, Magnetic field observations on the Akebono (EXOS-D) satellite, *J. Geomag. Geoelectr.* in press, 1990.
- Gurnett, D.A., Plasma wave interactions with energetic ions near the magnetic equator, *J. Geophys. Res.*, **81**, 2765–2779, 1976.
- Gurnett, D.A. and U.S. Inan, Plasma wave observations with the Dynamic Explorer 1 spacecraft, *Rev. Geophys.*, **26**, 185–316, 1988.
- Hultqvist, B., The VIKING project, *Geophys. Res. Lett.*, **14**, 379–382, 1987.
- Kimura, I., K. Hashimoto, I. Nagano, T. Okada, M. Yamamoto, T. Yoshino, H. Matsumoto, M. Ejiri and K. Hayashi, VLF observations by the Akebono (EXOS-D) satellite, *J. Geomag. Geoelectr.*, in press, 1990.
- Russell, C.T., R.E. Holzer and E. Smith, OGO 3 observations of ELF noise in the magnetosphere, 2. The nature of equatorial noise, *J. Geophys. Res.*, **75**, 755–768, 1970.
- Weimer, D.R., C.K. Goertz, D.A. Gurnett, N.C. Maynard, and J.L. Burch, Auroral zone electric fields from DE 1 and 2 magnetic conjunctions, *J. Geophys. Res.*, **90**, 7479–7494, 1985.