

## S-310-25号機搭載ダブルプローブによる スポラディックE層中の電界測定

山本 衛<sup>1</sup>・Robert F. Pfaff<sup>2</sup>・深尾 昌一郎<sup>1</sup>

Measurement of electric field in Sporadic-E layer by using a  
double probe sensor on board of the sounding rocket S-310-25

By

Mamoru YAMAMOTO<sup>1</sup>, Robert F. PFAFF<sup>2</sup> and Shoichiro FUKAO<sup>1</sup>

**Abstract:** In-situ measurements of the DC and low frequency wave electric field in and around a sporadic-E layer were conducted with a double probe sensor (EFD-P) with the sounding rocket S-310-25. The rocket was launched at 23:00 (JST) on August 26, 1996 from Uchinoura, while ground-based radars observed intense quasi-periodic (QP) backscatter echoes associated with the sporadic-E layer region. When analyzed in conjunction with simultaneous plasma number density measurements, the in-situ data set reveals a complex electrodynamic associated with the sporadic-E layer that includes a variety of physical processes. The electric field data show (1) large, localized DC electric fields ( $\sim 20$  mV/m) within narrow altitude regions near 125 km associated with plasma density depletions; (2) distinct, sinusoidal variations of  $\pm 3$  mV/m between 130 – 170 km that correspond to horizontal wavelengths of about 25 km and may be associated with gravity waves; and (3) comparison between in-situ electric field and Doppler velocity of FAI radar echoes showed reasonable agreement, assuming the relationship of  $E \times B$  drift.

### 概 要

観測ロケットS-310-25号機搭載のダブルプローブ電場観測装置(EFD-P)を用いて行われた、夜間のスポラディックE層周辺の電界ベクトルの直接観測結果を報告する。ロケットは、種子島南部に設置されたレーダーからE領域イレギュラリティの準周期エコーが観測される条件下で、1996年8月26日23時0分(JST)に内之浦から打上げられた。データは同時に観測された電子密度の高度プロファイルとの比較のもとに解析され、以下の結果が得られた。観測された電界には、(1) 高度125 km付近の数ヶ所において20 mV/mを越える大きな極大(厚さ数km)が存在し、それらは電子密度の極小と良く一致した、(2) 高度130 kmから170 kmにおいて水平波長25 km程度の大気重力波によるとみられる電界の変動が観測された、(3) またレーダーで観測されたE領域イレギュラリティエコーの平均ドップラー速度とEFD-Pで観測された電界強度は、 $E \times B$ ドリフトの関係を裏付け

---

<sup>1</sup>京都大学超高層電波研究センター, <sup>2</sup>NASA/ゴダード宇宙飛行センター

る一致を示した。

**重要語：**スプラディックE層，電界測定，ダブルプローブ，E領域イレギュラリティ，ロケット観測

## 1. はじめに

スプラディックE層（Es層）は，多様なプラズマ物理及び中性-プラズマ相互作用によって発生する現象であって，そこに働く電界の働きは本質的に重要である．大規模な電磁力学的な視点から言えば，例えば，DC電場はEs層の生成と維持のために重要であるのみならず，Es層内にも分極電界という形で現れる．夜間のEs層に見られる顕著な電子密度の不均一構造は，恐らく中性大気によって影響を受けた分極作用に起因するものであって，分極電界と密接に関係づけられる．更にEs層は，いわゆる沿磁力線イレギュラリティ（Field-Aligned Irregularity; FAI）の発生する領域でもある．我々はMUレーダーをはじめとする観測によって，中緯度域のE領域FAIの振舞いを明らかにしてきた（Yamamoto他，1991）．それらはEs層電子密度の強い高度勾配に電界が加わった時に生じるグラディエント・ドリフト不安定に起因すると考えられている（Riggin他，1986）．またFAI中に発見された準周期（Quasi-Periodic; QP）エコーについては，中性大気中の大気重力波によって高度変調（変形）を受けたEs層に分極電界が発生するために生じるとのモデルが提唱されている（Woodman他，1991; Tsunoda他，1994）．しかしながら，現在までのレーダーを主とする観測は，FAIの生成機構を考える上で重要な，電界の振舞いを明らかにする点で不十分であった．そこで今回，SEEK（Sporadic-E Experiment over Kyushu）キャンペーンでは，その中心的観測課題として，打上げられた2機の観測ロケットの両方によって電界測定が実施された（Fukao他，1998; 深尾他，本号）．本報告では，観測ロケットS-310-25号機に搭載されたダブルプローブ（EFD-P）によって行なわれた，夜間のEs層付近の電界測定結果について報告する．

## 2. 観測方法

観測ロケットS-310-25号機に搭載されたEFD-Pの概念図と主要諸元を，それぞれ図1と表1に示す．EFD-Pでは，十字形に突き出された4本のブーム（全長4 m）の先端に取り付けられた合計4つの金属球（直径4.4 cm）間の電位差を測定することによって，電界ベクトルとその変動を観測した．電位差の測定は $10^{12} \Omega$ 以上という非常に高い入力インピーダンスを持つ電子回路によって行なわれ，表1に示すように全ての金属球間の電位差を16 bitのA/D変換器でデジタルデータに変換して地上に送信した．多くの電位差の組み合わせのうち，4 mブーム両端のデータが1600 Hzという最も高いサンプル周期で収集された．同ロケットにはまた固定バイアスのラングミュアプローブであるプラズマ波動観測装置（PWP，ロケット先端に設置）と，インピーダンスプローブによる電子密度観測装置（NEI）が搭載された．

S-310-25号機は1996年8月26日23時0分（JST）に内之浦からほぼ東向きに打ち上げられた．（ロケットの観測項目や飛跡については深尾他（本号）が詳しい．）ロケットが発射後約60 kmに達した時に，外壁に取り付けられた4枚のドアが順次開けられ，高度80 kmでブーム伸展が開始され，全長4 m（片側2 m）まで伸展された．高度約90 kmから有効なデータが取得されはじめ，ロケットは発射後211秒後には高度約180 kmの最大高度に達した．図1に示すように，飛行中のロケット姿勢は，スピン周期が1.2秒であり，スピン軸は地球磁力線に対して約48度の方向を中心として，半頂角が9.4度で周期が191秒の歳差運動を行なった．これらの姿勢データは，ロケットに搭載された地磁気センサー（MGF）とスターセンサー（STS）を用いて精度約1度で求められたものである（Pfaff他，1998）．

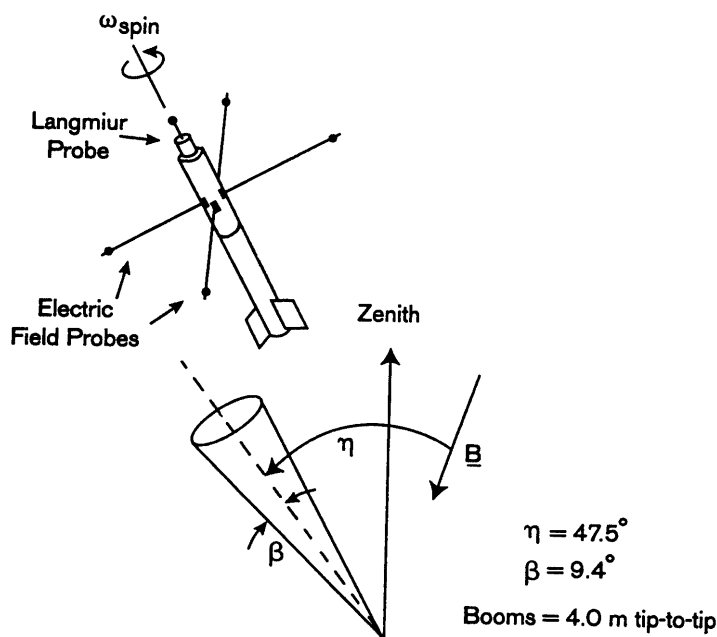


図1 S-310-25号機搭載ダブルプローブ (EFD-P) の概念図とロケットの飛行姿勢

表1 観測ロケットS-310-25号機搭載ダブルプローブ (EFD-P) の主要諸元

| 項目    | 仕様  |
|-------|---|
| センサー部 | 伸展ブーム先端の金属球 (直径44.45 mm), 4個<br>入力インピーダンス: 約 $10^{12} \Omega$   |
| ブーム機構 | 伸展時の長さ (両側全長) 4 m, 2台<br>ロケット発射後67秒後と68秒後に伸展開始 (高度約80 km)   |
| テレメータ | 16 bit デジタル・データ転送, 10チャンネル<br>V12, V34: $\pm 2.27V$ p-p, 1600 サンプル/秒<br>V34, V31, V32, V41: $\pm 2.27V$ p-p, 200 サンプル/秒<br>V1S, V2S, V3S, V4S: $\pm 18.17V$ p-p, 100 サンプル/秒<br>(添字の1~4はプローブの番号, Sはロケット本体を示す.<br>例えばV12はプローブ1と2の間の電位差を示す)<br>8 bit アナログ・データ転送<br>ブーム伸展モニタ (2チャンネル) |

### 3. 観測結果

図2に本観測で得られた直交する2組のダブルプローブ間の電位差の時系列データを示す。ここに示されるデータは、ロケットから観測された「生の」電位差であり、1.2秒のスピンの周期に同期したサイン波形が最も顕著に現れている。電位差の最も大きな成分は、速度  $V$  をもって地球磁力線  $B$  を横切って飛ぶロケットに現れる、 $V \times B$  電界によって生じる。実際、EFD-P自身は、外部電界を  $E$  とするとき、電界  $E + V \times B$  を測定することになる。図2の上図は直交する電位差データから求めた各時刻における電位差の大きさの時系列であり、ここに

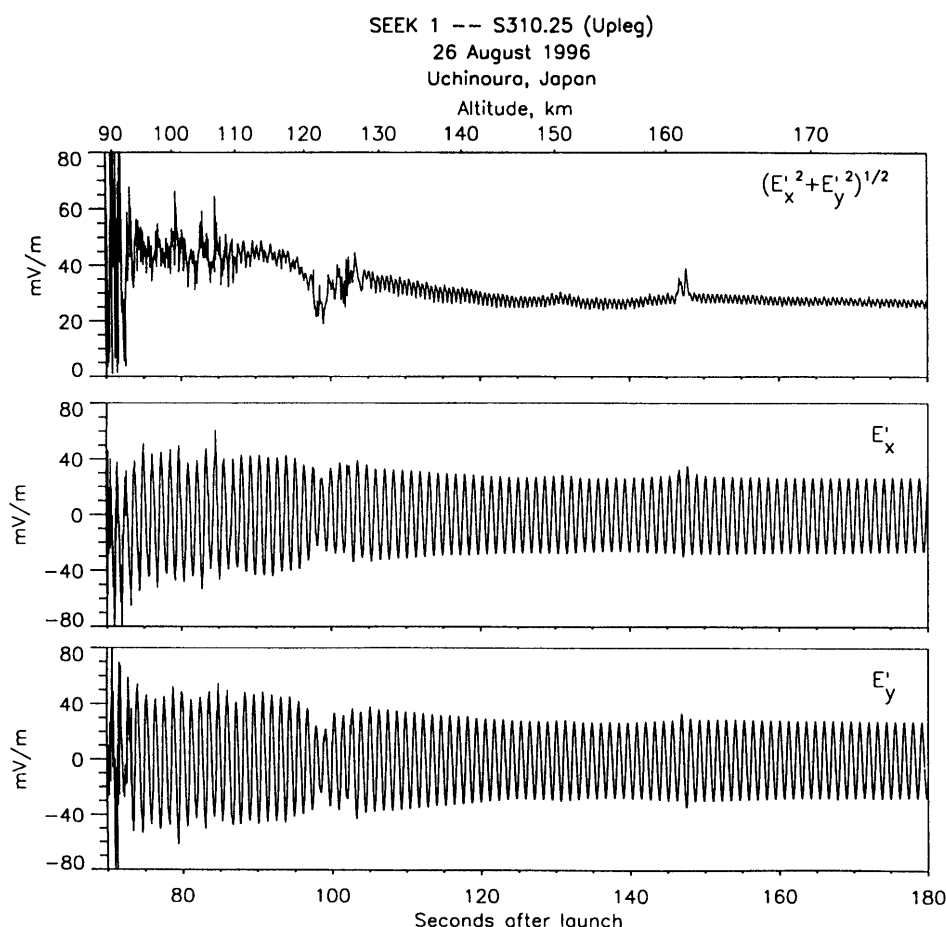


図2 EFD-Pの2組のダブルプローブから得られた観測データ。上図に電位差の大きさを示し、中図と下図に直交するそれぞれの電位差データを示す。

現れる変動から、外部電界にかなり大きな変動があることがただちに分かる。

以上の電位差データから、ロケット飛行データと姿勢データを用いて  $V \times B$  成分を取り除いた。EFD-Pではスピン軸に直交する平面内の電位差のみを測定するが、電離圏内の良好な仮定として  $E \cdot B = 0$  (つまり磁場平行の電界成分は存在しない) と考えられることから、適当な座標変換を施してロケット飛行中の各点における電界ベクトルの推定を行った。以上のデータ解析の過程では、地球磁場データとして IGRF モデルを利用した。図3に結果として得られたロケット上昇時の電場ベクトルの高度分布を示す。図4では、さらに電界の大きさ  $|E|$  の高度分布を、同ロケット搭載のPWPで観測された電子密度分布 (Mori and Oyama, 1998; 森, 本号) と共に示す。電子密度分布のプロファイルには、例えば高度100 km, 113 km, 125 km付近などに規則的な楕型の切れ込みが見られるが、これらはPWPにおいて11.6秒毎に行なわれたバイアス電圧のスイープの影響である点に注意が必要である。

さて以上のように求められる電界ベクトルの測定には、いくつかの誤差要因が潜んでいる。それらのうち、考えられる2つの大きな要因は次の通りである。

1. ロケットの回りのシースおよびウェークによって引き起こされるDC電界成分。これによる誤差は、電子密度が低くプラズマのデバイ長が長い状況で生じやすい。

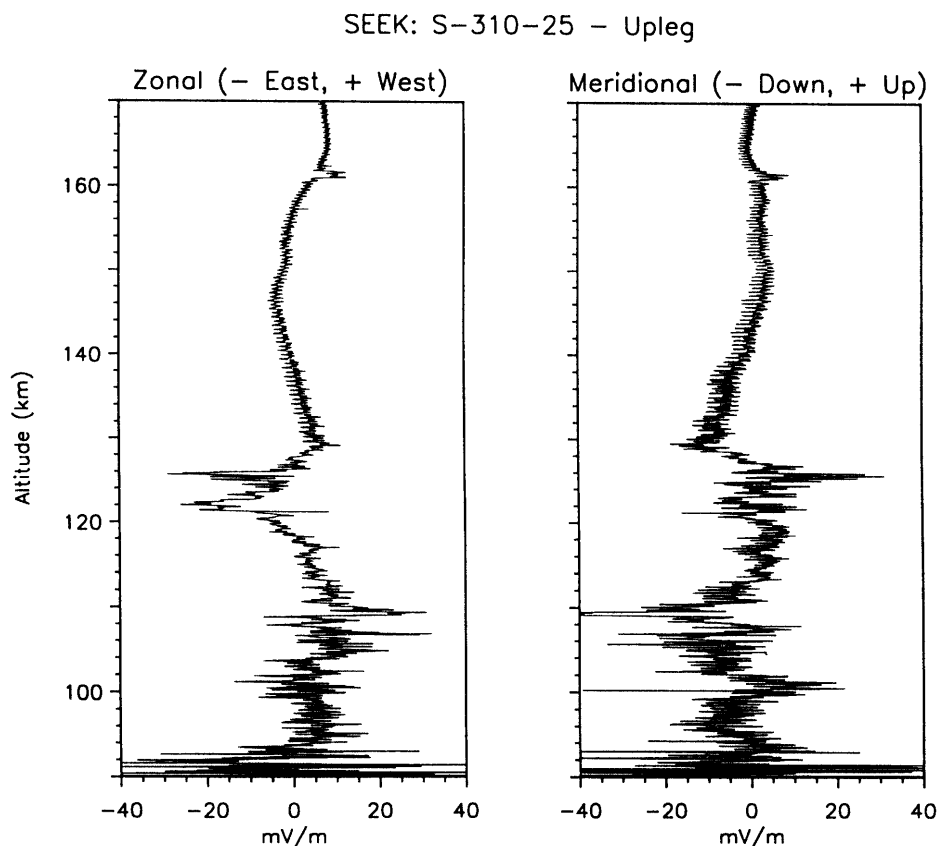


図3 ロケット上昇時のDC電界の高度分布。左図が地球磁場直交の東西方向成分（西向きを正とする）、右図が南北方向成分（北向き（上向き）を正とする）を示す。

2. ダブルプローブがロケットのウェークの中を回転するために生じる周期的な電界の変動。これは特に分解能の高いDC電界の構造を議論するとき問題を生じる。特にロケットのスピン軸方向の電界成分が  $E \cdot B = 0$  の条件から間接的に求められることから、この成分に現れやすい。

よって図3及び図4に示す観測結果について議論を行うときには、これらの影響についても考慮が必要である (Pfaff他, 1998)。

まず図3及び図4の高度100 kmから115 km付近に注目すると、電界ベクトルの成分はおおむね西向きであり、10 mV/mを越える大きさの電界が観測されたことがわかる。ただしPWPで観測された高度103 kmの電子密度のピーク付近においては電界は比較的小さい値を示した。この高度域では、電界の細かい変動成分が卓越しており、Es層に伴うプラズマ不安定現象が発生していたと考えられる。観測された電界の大きさは、最大では高度109 kmにおいて40 mV/m以上となっている。この驚くべき値が存在するとすれば、磁気赤道域に見られるような2流体不安定現象が発生しているはずであるが、このロケット観測時のレーダー観測データにはそのような証拠は見つかっていない。この値は上に示した2番目の理由による過大な見積りであろうと考えられる。ただし10～20 mV/m程度の電界ベクトルは正しく観測されたものと考えている。次に120 kmを越える高度に注目すると、122 kmと125 kmにおいて20 mV/mを越える電界のピークが存在し、PWPの電子密度プロファイルには、同じ高度において電子密度の減少が見られる。この高度においてはイオンは磁化されていると考えられるため、プラズマ不安定が発生することは難しいと思われる。しかしながらプラズマの減少が磁力線に沿っ

## SEEK S-310-25 Upleg -- Japan

26 August 1996

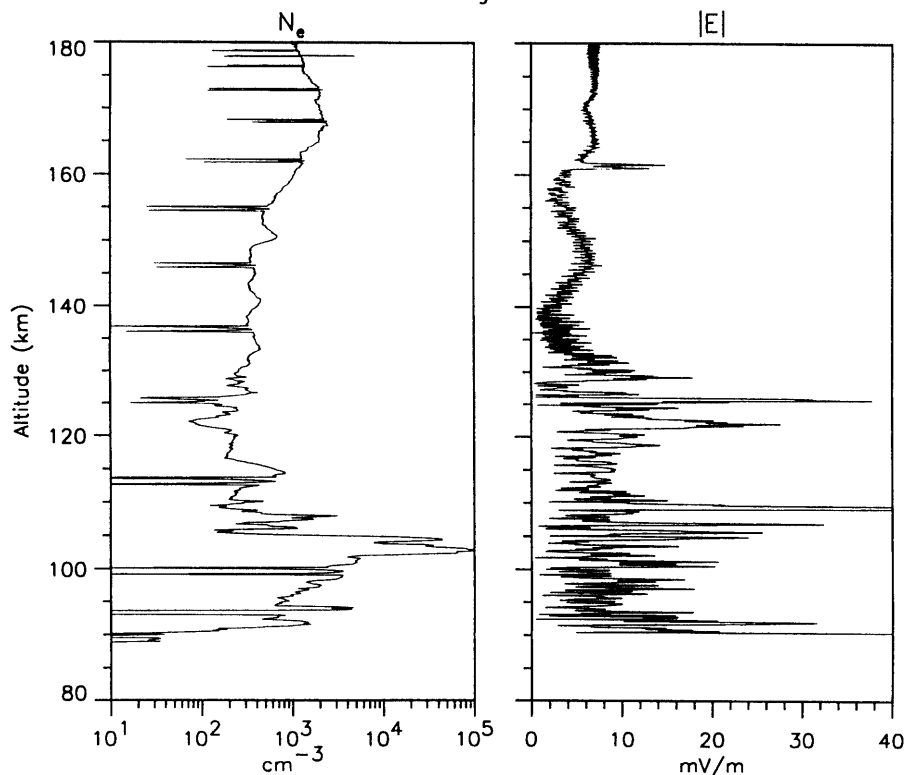


図4 PWP観測で得られた電子密度（左図）とEFD-Pで観測された電界の大きさ（右図）の高度分布．（PWP観測データはMori and Oyama（1998）による．）

て存在するならば、観測されたような大きな電界と電子密度の勾配によってプラズマ不安定現象の存在が期待できる（Pfaff他，1998）。

図3及び図4に示される電界分布のうち、最も興味深い現象は高度130 kmから170 kmの高度域に観測されるゆるやかな変動である。これは特に図4の|E|のプロファイルに高度波長15 km程度（観測された|E|の変動周期としては25秒程度）で±3 mV/m程度の変動として現れている。変動は主として東西方向成分に現れているが、電子密度分布には影響は見られない。Pfaff他（1998）はこの原因を大気重力波に伴う分極電界としている。恐らく下層の大気重力波によって発生した分極電界が磁力線に沿ってこの高度まで伝搬したものを観測したものと思われ、電界の変動周期から内部重力波の水平波長は25 km程度ではないかと推定される。

重力波によると見られる電界変動は160 km以上の高度においては減衰し、電界はほぼ一様に西向きとなっている。このようなDC電場の振舞いは上記の誤差要因の内の1番目によるものと考えられ、推定された電場の信頼性は高度が上がると共に失われて行く。ただし高度160 kmにおける5 mV/m程度の東向き電界のピークについては、この値がロケットの2～3スピンにわたって（つまり数kmにわたって）観測されていることが指摘される。この部分において特に他のロケット搭載機器との干渉は見られず、ロケット本体のポテンシャルにも変動は見られないため、ここでは結論できないが、この電界の極大は実際に存在した可能性が高い。

最後に、SEEKにおける他の観測との比較として、種子島に設置されたFrequency Agile Radar（FAR）データとの比較を試みる。FARは種子島南部に設置された可搬型レーダーであり、SEEKにおいては2機の観測ロケット打上げ条件であるFAI準周期エコーの検出に用いられた（Fukao他，1998；深尾他，本号）。レーダーによるFAI観測では、一般にレーダーエコーの示す平均ドップラー速度が、観測点の電界によるE×Bドリフトと

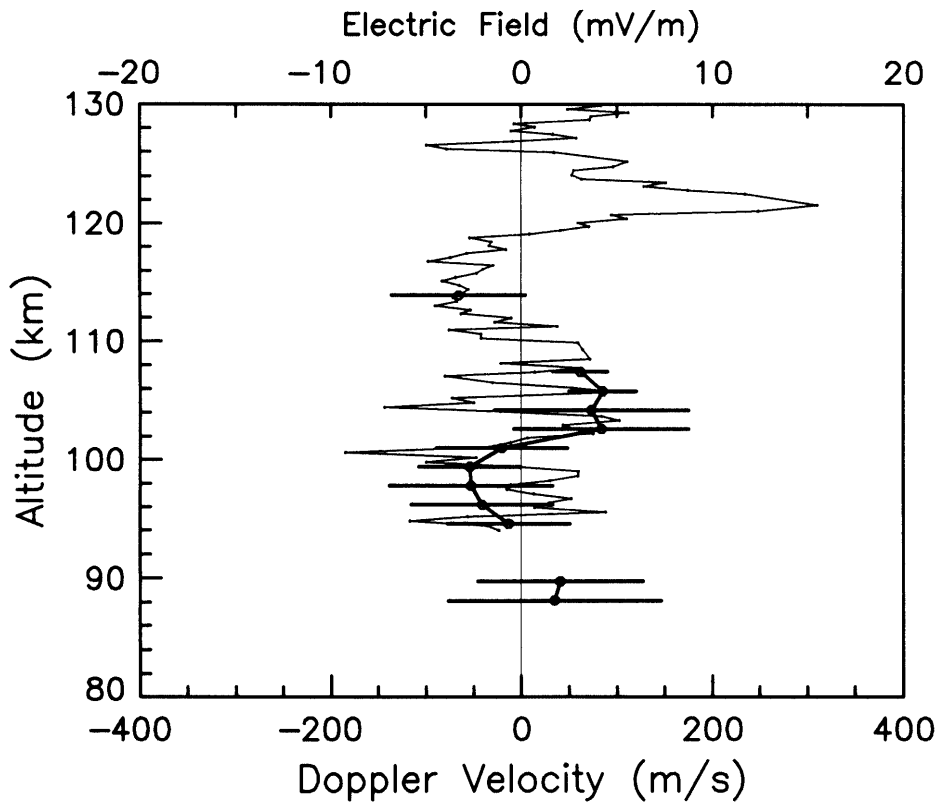


図5 EFD-Pで観測された電界（細線）と種子島のFARで観測されたFAIエコーのドップラー速度（太線、横棒はスペクトル幅を示す）の比較。FAIエコーの示すドップラー速度が概ね $E \times B$ ドリフトに対応することから、 $B = 5 \times 10^4$  nTと仮定して、観測された電界のFARアンテナレーダビーム直交方向成分との比較を行った。

一致する（例えばTsunoda他，1994）。そのため図5に示すように、観測ロケットS-310-25号機打上げ時のFAR観測データからエコーの平均ドップラー速度を求め、一方、EFD-P観測データに関してFARのアンテナビームに直交する電界成分を算出して比較を行った（Yamamoto他，1998；山本他，本号）。ここでは $B = 5 \times 10^4$  nTと仮定して、ドップラー速度をプラズマの $E \times B$ ドリフトと対応するようにプロットしている。またEFD-P観測結果のうち、40 mV/mを越える異常値は取り除いた。結果として、特に100 km以上の高度範囲において、FARの示すドップラー速度はEFD-P観測結果から推定されるプラズマの $E \times B$ ドリフトと良く一致した。FARデータに付した横棒は、FAIエコーの示すドップラー速度スペクトル幅に対応しており、それぞれの高度における電界の変動範囲に近い。実際、FARの距離分解能は3 km程度であってEFD-Pの分解能に比べて劣っているため、EFD-P観測結果の示す細かい高度変化はFARにおいては観測領域内のドップラー速度の分布幅として観測されたと考えられる。深尾他（本号）が示すように、EFD-PとFARの観測領域は水平距離で数十km離れているために、2つの観測は同時観測とは言えない。しかしながらこのときのFAIエコーの振舞いは、エコー領域が準周期的に何度も発生して降下するというQPエコーの特徴をよく現わしていた。このため図5に見られる一致は、空間的に離れた観測点において、同様の波動構造がくり返し現れていたことを明らかにしたと考えられる。

#### 4. まとめ

以上示したように、本実験においては、日本上空の夏季の夜間に見られるEs層内部およびその周辺の電界の振舞いについて、ダブルプローブを用いた観測に成功した。本実験の結果をまとめると、まず10 mV/mを越える大きさの電界のピークが数多く見られたことが挙げられる。このような大きな電界は観測ロケットS-310-26

号機に搭載されたブーメラン観測 (EFD-B) にも現れており (Nakamura 他, 1998; 野田他, 本号), FAI エコー (特に準周期エコー) が現れている条件下では, Es 層に大きな分極電界が存在することが明らかとなった. また Es 層の中心高度である 100 km 付近においては, プラズマ不安定現象によると見られる短波長の不規則な電界変動が観測された. さらに高度 130 km から 170 km においては, 水平波長 25 km 程度と推定される大気重力波による電界の変動が観測された. EFD-B によっても, 波長数 km の電界変動が観測されている (野田他, 本号). 最後に EFD-P で観測された電界と FAR で観測された FAI エコーのドップラー速度の比較を試み, 両者が良く一致することが明らかにされた.

## 謝 辞

東京大学の岩上助教授と東海大学の高橋教授には, それぞれスターセンサー (STS) と磁界センサー (MGF) によるロケット姿勢決定の点で御協力いただいたことに感謝する. また EFD-P のエレクトロニクス部分の設計・製作・調整は, Systems Unlimited 社 (米) の Steve Powell 氏によって行なわれた. 本研究の一部は文部省科学研究費補助金 (国際学術研究 08044074; 基盤研究 (B) (2) (一般) 07454117) の援助を受けて行なわれた.

## 参 考 文 献

- Fukao, S., M. Yamamoto, R. T. Tsunoda, H. Hayakawa, and T. Mukai, The SEEK (Sporadic-E Experiment over Kyushu) campaign, *Geophys. Res. Lett.*, in press, 1998.
- 深尾 昌一郎, 山本 衛, R. T. Tsunoda, 早川 基, 向井 利典, SEEK (Sporadic-E Experiment over Kyushu) キャンペーン—観測ロケット S-310-25 号機, 26 号機を中心とした中緯度 E 領域イレギュラリティの総合観測—, 宇宙科学研究所報告, 本号, 1998.
- Mori, H. and K.-I. Oyama, Sounding rocket observation of sporadic-E layer electron-density irregularities, *Geophys. Res. Lett.*, in press, 1998.
- 森 弘隆, S-310-25 号機による夜間 Es 層の電子密度不規則構造の観測結果, 宇宙科学研究所報告, 本号, 1998.
- Nakamura, M., H. Noda, I. Yoshikawa, N. Iwagami, M. Hirahara, M. Yamamoto, and S. Fukao, DC electric field measurement in the SEEK campaign, *Geophys. Res. Lett.*, in press, 1998.
- 野田 寛大, 中村 正人, 平原 聖文, 吉川 一期, 岩上 直幹, 深尾 昌一郎, 山本 衛, SEEK キャンペーンにおける DC 電場観測, 宇宙科学研究所報告, 本号, 1998.
- Pfaff, R. F., M. Yamamoto, P. A. Marionni, H. Mori, and S. Fukao, Electric field measurements above and within a sporadic-E layer, *Geophys. Res. Lett.*, in press, 1998.
- Riggin, D., W. Swartz, J. Providakes, and D. Farley, Radar studies of long-wavelength waves associated with mid-latitude sporadic-E layers, *J. Geophys. Res.*, **91**, 8011, 1986.
- Tsunoda, R., S. Fukao, and M. Yamamoto, On the origin of quasi-periodic radar backscatter from mid latitude sporadic-E, *Radio Sci.*, **29**, 349, 1994.
- Woodman, R., M. Yamamoto, and S. Fukao, Gravity wave modulation of gradient drift instabilities in mid-latitude sporadic-E irregularities, *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 1197, 1991.
- Yamamoto, M., S. Fukao, R. Woodman, T. Ogawa, T. Tsuda, and S. Kato, Mid-latitude E region field-aligned irregularities observed with the MU radar, *J. Geophys. Res.*, **96**, 15943, 1991.
- Yamamoto, M., T. Itsuki, T. Kishimoto, R. T. Tsunoda, R. F. Pfaff, and S. Fukao, Comparison of E-region electric fields observed with a sounding rocket and a Doppler radar in the SEEK campaign, *Geophys. Res. Lett.*, in press, 1998.
- 山本 衛, Miguel F. Larsen, 深尾 昌一郎, S-310-26 号機からの TMA 放出による中性大気風速の観測, 宇宙科学研究所報告, 本号, 1998.