

SEEK キャンペーンにおける DC 電場観測

野田 寛大¹・中村 正人¹・平原 聖文²・吉川 一朗¹
岩上 直幹¹・深尾 昌一郎³・山本 衛³

DC electric field measurement in the SEEK campaign

By

H. NODA, M. NAKAMURA, M. HIRAHARA, I. YOSHIKAWA,

N. IWAGAMI, S. FUKAO and M. YAMAMOTO

Abstract: The “Sporadic E Experiment over Kyushu” (SEEK) campaign was carried out in August, 1996 to make clear the generation mechanism of the quasi-periodic echo (QPE), which is particular form of the Field Aligned Irregularity (FAI) in the midlatitude E region. The electric field measurement is important to study the generation mechanism of the QPE. In this report we will show results of the DC electric field measurement with the Electric Field Detector - Beam experiment (EFD-B) onboard the sounding rocket S-310-26.

The sounding rocket S-310-26 was launched at 00:30 (JST) 21 August, 1996. The EFD-B detected return beams 68 times at the altitude of around 170 km from X + 168 s to X + 241 s. 28 data sets among them were useful. The largest of the electric fields was 11 mV/m and the average was 6 mV/m. This value is much larger than that in the ordinary condition of midlatitude E region. It is also larger than the value estimated in the assumed scenario of the QPE generation by ~ 10 mV/m.

The spatial scale of 4 km electric field fluctuation in direction was observed, assuming that the Es was modulated by the AGW. The difference of the electric field direction between the results of the VHF radar observation and that of the EFD-B was apparent, so the possibility was also pointed out that the mapping along the magnetic field lines is not realized under the QPE situation. The magnetic field data was consistent with the model field within 0.25 %.

概 要

Sporadic E Experiment over Kyushu (SEEK) キャンペーンは中緯度電離圏E領域に存在する沿磁力線イレギュラリティー (Field Aligned Irregularity; FAI) のうち、準周期的エコー (Quasi-Periodic (QP) echo) と呼ばれるエコー形態を持つ現象の生成過程解明を目的としたキャンペーンであり、1996年8月に実施された。本論文ではキャンペーン期間中に行われた観測ロケットS-310-26号機搭載のビーム法による電場観測器 (Electric Field

¹東京大学理学部, ²立教大学, ³京都大学超高層電波研究センター

Detector-Beam experiment; EFD-B) を用いた電場観測の結果を報告する。

それまでのレーダー観測による結果から、E領域に突発的に現われるスプラディックE層(Es層)が大気重力波によって高度変調を受け、電荷の分極により1~2 mV/m程度の電場ができ、電場によりドリフト運動をする際にイオンと電子で中性粒子との衝突周波数が異なるために生ずるプラズマ不安定現象によりQPエコーが生成されると考えられている。従ってQPエコーの生成過程を解明する上で電場観測は極めて重要である。

EFD-Bはイオンビームを磁力線に垂直に打ち出して磁力線のまわりを旋回した後ロケットに再び戻って来るイオンビームの飛翔時間(Time of Flight; TOF)を測定することにより電場ドリフトの量を見積もり電場を測るセンサーであり、イオン銃、検出部、電子回路部から構成される。ビームには加速したリシウムイオンを用い、そのビーム強度を変化させることにより変調をかける。検出部ではビームのエネルギー分別および検出、増幅を行い、電子回路部で量子化等を行いデータセットを作成する。地上に送信されたデータのビーム変調を地上で復調することでビームの飛翔時間を算出し電場を計算する。また、TOFから磁場の絶対値も計算できる。

観測ロケットS-310-26号機は1996年8月21日0:30(JST)に打ち上げられ、EFD-Bは打ち上げ後X+168秒からX+241秒までに高度170 km付近で68個のデータを取得した。ここでXは打ち上げ時刻を表す。そのうち28個が有効なデータであり、電場強度は大きいもので11 mV/m、平均で6 mV/mであった。この値はE領域に通常存在する1 mV/mの電場およびQPエコー生成モデルで示されていた1.7 mV/mよりもはるかに大きいものである。電場方向については、Es層が大気重力波による変調を受けたと考えると空間周期が約4 kmの変動が観測された。また、高度100 km付近の地上レーダーでの観測と電場の方向に異なる部分が多いという結果となり、QPエコー現象では電場を磁力線に沿ってマッピングすることができないという可能性も指摘された。磁場データはモデル磁場と0.25%以内で一致した。

重要語：QPエコー、SEEK、EFD-B、TOF、電場計測

1. 序

FAI (Field Aligned Irregularity) は磁力線に沿う方向に電子密度の不均一が生ずる現象である。1960年頃より極域、赤道域でレーダーおよびロケット観測による研究が発展してきた。FAIは赤道域では赤道エレクトロジェット、また極域でもオーロラエレクトロジェットに伴って生成し、そのレーダースペクトルの形態からtwo-stream instabilityやgradient drift instabilityというプラズマ不安定現象に起因する現象であると考えられた [Fejer and Kelley, 1980]。

1970年頃より中緯度でも電離圏のレーダー観測が始まり、中緯度E領域FAIは中緯度Es層と関連が深く、その生成過程はgradient drift instabilityによると考えられた。それまでの中緯度における観測は数例に限られていたが [Eckland et al., 1981, Tanaka and Venkateswaran, 1982, Keys and Andrews, 1984]、1984年には京都大学超高層電波研究センターが滋賀県甲賀郡信楽町に建設したUpper and Atmospheric radar (MUレーダー)による観測が始まり、中緯度でも本格的な観測が開始された。レーダーエコー強度を時間およびレーダーの視線方向距離でプロットすると視線方向速度が一定になるエコーが準周期的に観測されることが分かり、これはQuasi Periodic echo (QPエコー)と名付けられた [Yamamoto et al., 1991]。赤道域や極域ではこのような現象の観測例がないことから、QPエコーは中緯度、特に日本やその周辺で特有な現象であると考えられている。

QPエコーは深夜前に良く観測され、エコー領域は高度95 kmから140 kmであること、またレーダー視線方向の速度(レンジレート)が-60 km/sから-90 km/sではほぼ一定のものが2分から10分の時間周期、5 kmか

ら15 kmの空間周期を持つこと、等の特徴があることが観測から分かった [Yamamoto et al., 1994, Tsunoda et al., 1994].

これらの特徴をもとにWoodman et al. [1991] は2, 3層のEs層が大気重力波によって2, 3 km程度の高度変調を受け、磁力線にはほぼ平行になった面でプラズマ不安定が起こる事によってQPエコーが生成されると説明した。また, Tsunoda et al. [1994] はWoodman et al. [1991] が提唱した数枚のEs層の変調ではなく、一枚のEs層が15 km程度まで高度変調を受け、そこに分極電場が生成されてプラズマ不安定が起きると考えた。

分極電場生成のシナリオは以下のようなものである。高度100 km付近では高度が高いほどPedersen伝導度が高い為、ある一本の磁力線を考えた場合に高度が異なる場所ではイオンの速度が異なり、その磁力線は正または負に帯電する。一方で電子は磁力線方向及び電場に垂直な方向にしか動けないので電場に平行な方向にできた電荷の分離を打ち消すことができず、分極電場が生成される。するとEs層の南側の斜面で [図1] に示すように2段階のgradient-drift instability [Sudan et al., 1973] が生ずることによってレーダー視線方向に準周期的な構造が生成される。

Tsunoda et al.のモデルは地上からの観測を良く説明するが、実際に大気重力波により効率よく15 kmもの大振幅でEs層が変調されるのかどうか、分極電場が本当に生成されるか、等を検討する必要がある。

SEEK (Sporadic E Experiment over Kyushu) は地上観測とロケット観測を同時に行ない、QPエコーの生成過程を解明することを目的とした日米共同研究キャンペーンである。地上観測では種子島に設置したFAR (Frequency Agile Radar) レーダーと呼ばれる可搬型VHFレーダーで内之浦東方100 km, 高度100 kmを観測し、QPエコーの出現を監視する。同時にアイオノゾンデで電離圏電子密度を測定し、Es層の強度を監視する。

計画では、FARレーダーでQPエコーの出現を確認した後、観測ロケットS-310-26号機を電離層内に打ち上げ、さらに15分後に同じ場所に同S-310-25号機を打ち上げる。それぞれのロケットには [表1] に示す観測機器が積まれている。電子密度測定ではEs層の存在 (NEI) およびゆらぎ (PWP) を、電場測定ではイレギュラリティーに伴う大規模DC電場 (EFD-B) およびAC電場 (EFD-P) を、TMAではEs層生成および高度変調に重要な役割を果たすと考えられる中性風を観測する。これらの物理量を同時観測することにより、Es層およびQPエコーの生成過程の理解が飛躍的に進むことが期待される。

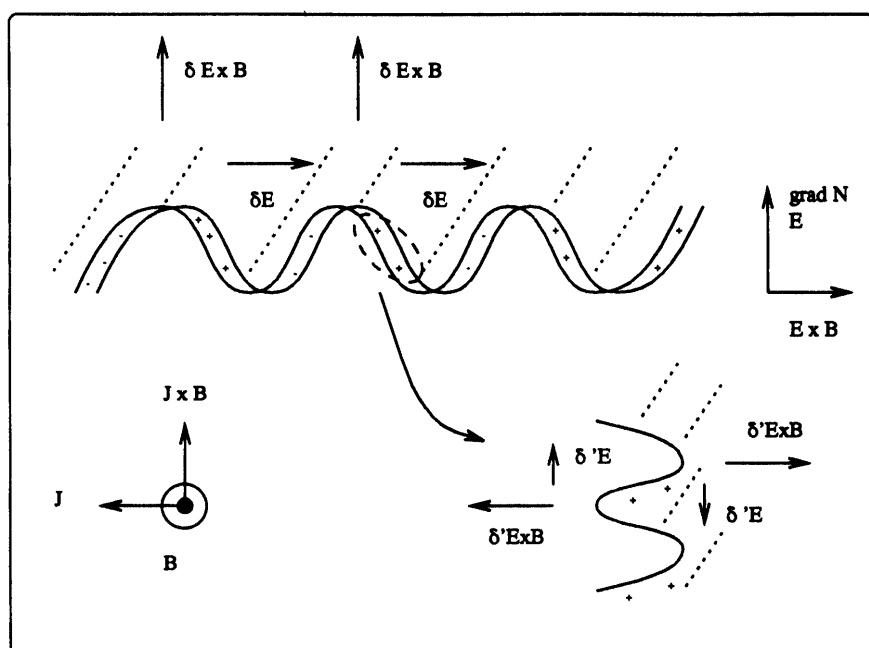


図1 二段階の gradient drift instability の模式図

表1 観測ロケットS-310-25, 26号機に搭載されたセンサー

S-310-25号機		
略称	名称	観測対象
PWP	プラズマウェーブプローブ	電子密度ゆらぎ
NEI	インピーダンスプローブ	背景電子密度
FLP	ラングミュアプローブ	電子温度
EFD-P	ダブルプローブ	電場のゆらぎ
MGF	磁力計	磁場 (姿勢検出)
STS	スターセンサー	(姿勢検出)
S-310-26号機		
略称	名称	観測対象
FED-B	ブーメランプローブ	背景電場
NEI	インピーダンスプローブ	背景電子密度
TMA	TMA canister	中性風
GA	地磁気姿勢計	(姿勢検出)
STS	スターセンサー	(姿勢検出)

2. 機 器

[図2] に観測装置の概念図を示す。EFD-Bはイオン（電子）ビームを飛翔体から磁場に垂直に打ち出し、ビームがgyro運動をして飛翔体に再び戻る際に受ける $E \times B$ ドリフトの影響をビームの飛翔時間（Time of Flight; TOF）を測ることによって見積もり（TOF法）、電場を測るセンサーである。ビームはロケットの1スピンにつき2度戻り、その時のTOFは電場ドリフトの影響を受けて $T_+ = T_g (1 + \Delta)$ 、 $T_- = T_g (1 - \Delta)$ のように、すなわちgyro周期よりも少しだけ長くまたは短くなる。機器はイオン銃、検出系、電子回路部から構成される。イオンビーム強度を8次のPNコードとクロックを組み合わせたパターンで変調し、ビームに時刻情報を与える。検出系（エネルギー分析器およびchannel electron multiplier; CEM）にて戻りビームを検出しプリアンプで増幅した後、電子回路部を通り5msごとの粒子のカウント数（トータルカウントデータ）と8ms長の戻りビーム列（バーストデータ）の2種類のデータを地上に送信する。トータルカウントデータはEFD-B ONの後常にデータを取得し、バーストデータは戻りビームが閾値以上のカウント数になった時のみその前3ms分とその後5ms分の計8msの戻りビーム列のみをデータとして取得する。地上にて戻りビームの自己相関をとってパターンを復調することによりTOFを測定する [詳細はNakamura *et al.*, 1987を参照]。また、[表2] にEFD-Bの諸元をまとめておく。

2.1 SEEKにおける電場観測の概要

第1章で述べた様に、Tsunoda *et al.*のQPエコー生成モデルでは大規模分極電場がQPエコーの生成に重要な役割を果たすと考えられる。EFD-Bはこの様な大規模DC電場を0.1 mV/m程度の高精度で測定することが可能である。

夜間E領域の背景電場はF層ダイナモ理論から導かれる1 mV/mの北向き電場であるとし、モデルに従って

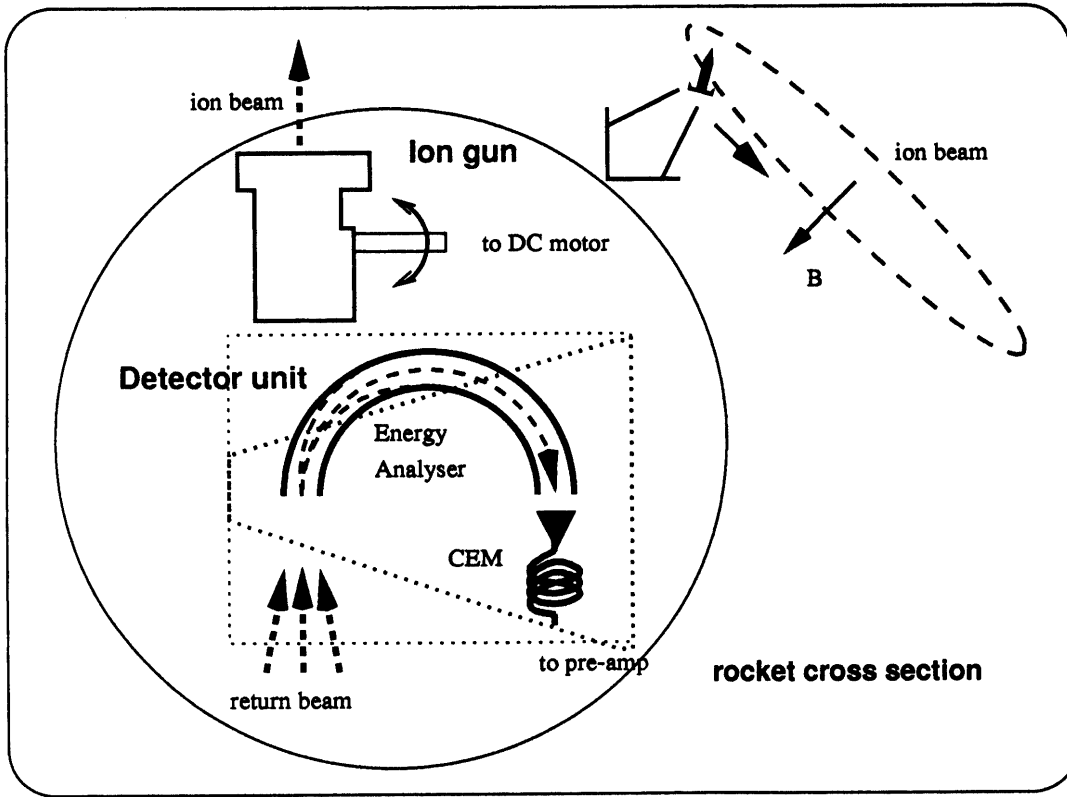


図2 EFD-B概念図. 円内はロケット機軸に垂直な平面内で見えたEFD-Bの概念図である. イオン銃は磁力線に垂直になるよう磁力計のデータをもとにDCモーターで制御される. 戻ってきたイオンビームはエネルギー分析を経てCEMにて検出され, プリアンプで増幅後電子回路部に送られる

表2 EFD-B諸元

寸法	イオン銃	40 × 30 × 51 [mm]	
	検出系 (質量分析部)	130 × 87 × 100 [mm]	
消費電流	(電源)	+ 18 V	- 18 V
	回路 on	220 mA	150 mA
	ヒーター on	320 mA	170 mA
	検出器 on	380 mA	170 mA
	イオン銃 on	450 mA	170 mA
	モーター on	600 mA	300 mA
総重量	6 kg (エレキ部含む)		

Es層の変調に伴って生成される電場を±0.7 mV/mとして重ね合わせると北向きに最大1.7 mV/m, 最小0.3 mV/mの電場が観測されることになる [Tsunoda et al., 1994]. また, 太陽活動度が低い夏の夜間でのMUレーダーによるドップラー速度観測に基づく背景電場の見積もりによると [Fukao et al., 1991b, Oliver et al., 1993, Tsunoda et al., 1994], 西向きドリフト速度の最大値25 m/sから背景電場が1 mV/m程度である.

Es層の高度変調により分極電場が生成されると予想される高度は110 km付近であり, この高度での平均自由行程が8 m, それに対してイオンのgyro半径が180 mなので衝突が無視できない. そのためビームが戻らずEs

層内での電場は直接測定できないが、磁力線方向の電気伝導度が高いことからこの電場が磁力線にそって漏れ出すと考えられるので、Es層の磁力線に沿った上空でEs層に存在する電場を観測することが可能である。イオンの平均自由行程を考えると高度140 km以上でビームが戻る事が予想される。なお、1987年のロケット実験では2 μ Aのビーム電流を用い高度140 km以上で十分な戻りビームフラックスが検出されている [Nakamura *et al.*, 1987]。

モデルによるとEs層は高度方向に15 km程度の高度変調を受けるため水平方向の構造も同程度と考えられ、イオンの旋回半径(約180 m)よりも構造は十分に大きいと考えられる。従って、EFD-BではEs層変調に伴う大規模DC電場を測定する事が可能であり、モデルおよびレーダー観測による見積りから電場強度の分解能は0.1 mV/m程度が要求される。

実際には、電離圏では磁場が ~ 40000 nTと強く、東向きにロケットが飛ぶと30 mV/m程度(実際の電場の10倍以上)の $V \times B$ 誘導電場ができるため、この電場を精度良く見積もる事も重要となる。

2.2 システムの設定

この節ではEFD-Bシステムの設定を述べる。

(a) ビームエネルギー

高度100 km付近(磁束密度 4.2×10^4 nT)で $V \times B$ 電場が30 mV/m程度となるので、 $E \times B$ ドリフト速度は1 km/sとなる。TOF法ではイオンビームの旋回軌道が真円に近い場合に限りTOFから電場が決定できるので、発射されるイオンの速度がドリフト速度よりも十分に大きい必要がある。イオン初速度を $\sim 1.0 \times 10^3$ km/sとし、これに相当するイオン銃の加速電圧を390 Vにした。このとき旋回半径は 1.8×10^3 mとなり観測対象の構造スケールより充分小さくなる。

(b) 戻りビームのカウント数

相関解析の際カウント数がどれくらいあれば充分かということはビーム出力を決定する上で重要な点であり、計算機上でシミュレーションを行なった。16320 bit(8 ms長)の疑似信号列を作り、カウントレートおよび全信号列のうちのノイズの割合をパラメータとして与え、疑似信号の変調パターンを復元するのにどれだけのカウントレートが必要かを見積もった。その結果を[表3]に示す。ノイズは乱数を発生させて与えた。

例えばノイズが1.0%の場合、カウントレートが 1.3×10^4 cps以上であれば自己相関係数が0.0132以上となり、戻りビームのパターンの復元ができるということを示す。

表3 ノイズをパラメータとした時の相関解析可能な最低のカウントレートのシミュレーション結果

ノイズ (%)	最低カウントレート (cps)	自己相関係数
0.00	1.5×10^3	1.47×10^{-3}
0.01	3.2×10^3	3.19×10^{-3}
0.05	3.9×10^3	3.92×10^{-3}
0.10	5.2×10^3	5.21×10^{-3}
0.50	8.1×10^3	8.09×10^{-3}
1.00	1.3×10^4	0.0132

(c) ビームの広がり量とビーム量の見積り

地磁気姿勢計(Geomagnetic Attitude sensor; GA)の情報をもとに、DCモーターを用いてイオン銃の打ち出し方向を制御する。モーターの精度が位相によって異なるため、予めイオンビームに縦方向の広がりを持たせビームの一部が必ず磁場に垂直になるようにする。この要請からこの方向には片側 5° の広がりが必要である。また、戻りビームは自己相関をとるのに十分な長さが必要になるので横方向にも広がりを持たせる必要がある。8 msの戻りビーム長に対応する角度は片側 1.3° である。

表4 ビーム量が $1 \mu\text{A}$ の場合の高度に対する1秒あたりのカウント数

高度 (km)	平均自由行程 (m)	衝突回数 (回)	ビーム電流 $1 \mu\text{A}$ に対応する カウント (cps)
130	8.4×10^1	13	24
140	1.8×10^2	6.1	2.6×10^4
150	3.3×10^2	3.3	3.8×10^5
160	5.3×10^2	2	1.4×10^6

磁力線を含む平面内で磁力線直交方向に対して $\pm \alpha$ 、それに垂直な方向に $\pm \beta$ の広がりを持たせたビームは旋回運動を行なった後はその断面は楕円となり、その断面積は $S_b = \pi (T_g v_o \alpha) (T_g v_b \beta)$ で表される [Tsuruda et al., 1983]. ここで S_b : ビームの面積, T_g : 旋回周期, v_b : ドリフト速度である. $\alpha = 5^\circ$, $\beta = 1^\circ$ のビームでは S_b は $5.8 \times 10^5 \text{ cm}^2$ となり、ビーム電流が $1 \mu\text{A}$ の時、検出器の面積 1 cm^2 に入ってくる粒子数は中性粒子との無衝突を仮定した場合には $1.1 \times 10^7 \text{ cps}$ となる. ここで標準大気モデル [CIRA 1972] の大気密度を用いて中性粒子との衝突の効果を入れると高度別の平均自由行程、旋回周期 ($\sim 11 \text{ ms}$) 内での衝突回数および毎秒のカウント数は [表4] のようになる. ただし、一度の衝突で検出器に到達可能なイオンビームが $1/e = 0.37$ 倍になるとして計算した. [表4] より、高度 140 km 以上でカウントが $2.6 \times 10^4 \text{ cps}$ 以上になる. 2周 gyro運動をした後に戻って来るビームをノイズとして考えると、高度 140 km での値について衝突を考慮して計算するとノイズは 0.3% 程度になるので、[表2] と比較して十分な戻りビームが検出されると考えられる. 従ってビーム電流量は $1 \mu\text{A}$ 程度があれば充分である.

(d) 検出器の視野角

射場 (鹿児島宇宙空間観測所, KSC) に於ける磁場の伏角は約 45° なので、磁力線とロケット機軸のなす角は垂直打ち上げの場合約 45° 、 15° の歳差運動が加わった時に最大で 60° 程度になることが予想される. これはエネルギー分析器に最大で上下 60° の方向からイオンが入射することを意味する. 従ってエネルギー分析器の上下方向の視野は $\pm 60^\circ$ 程度が必要となる. またスピン方向の視野はロケットのスピン周期に依存する. イオン銃と検出系はロケット回転方向に 180° 離れて取り付けるので、イオンが戻るまでに機体が視野角以上に回転してしまうと戻りビームが検出できない. 予定スピン周期は 1.1 秒程度であり、イオンの TOF が 11 ms 程度なのでその間に機体は 3.6° 程回転する. また周期が 0.5 秒の場合は 7.9° 回転する. 従って多少のスピン周期のずれに対応するために、スピン方向の視野は少なくとも 5° 以上が必要である.

(e) イオン銃の打ち出し方向制御

磁力線とロケット機軸のなす角はロケットの歳差運動を考慮すると最大で 60° になるので、(d)と同様にイオン銃がロケット機軸に垂直な方向から上下に $\pm 60^\circ$ 動けるように設計した.

3. S-310-26号機による電場観測

観測ロケット S-310-26号機は1996年8月21日0:30 (JST) に鹿児島宇宙空間観測所 (KSC) から方位角 94° (地理的真東より 4° 南向き)、上下角 75° で打ち上げられた. 歳差角 16.0° 、スピン周期はほぼ 1.1 秒であった. [図3] に軌道データを示す. 打ち上げ後 207 秒に最高高度 177 km に達し、 421 秒後に内之浦東方海上に落下した.

EFD-B は $X + 118$ 秒にイオン源ヒーターが ON になり、 $X + 120$ 秒でエネルギー分析器の高圧、 $X + 126$ 秒に

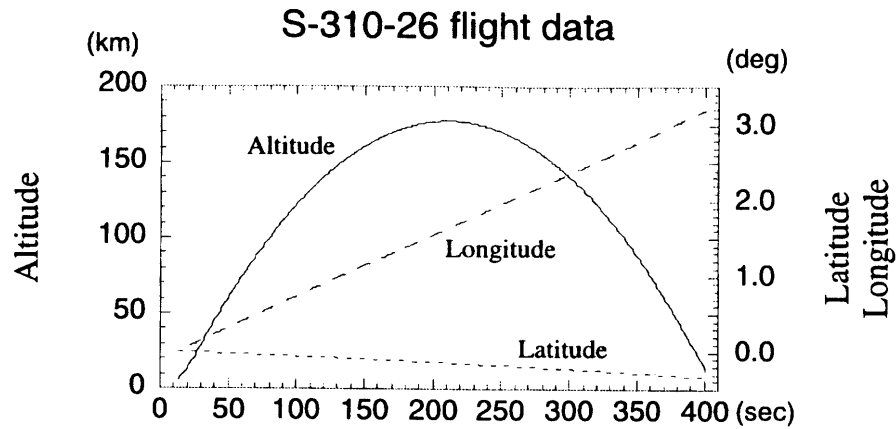


図3 S-310-26号機のフライトデータ

イオン銃，CEMの高圧およびプリアンプがONになり測定を開始した．最初のバーストデータをX+164秒に取得し，X+241秒までに68個のバーストデータを取得した．X+284秒には中性風観測のためのTMA（トリメチルアルミニウム）の放出が始まり，イオンとTMAの衝突周波数が高くなりトータルカウントはほぼ0になった．

〔図4〕はトータルカウントをロケットのスピングごとに区切ってプロットしたものである．横軸はスピンの一周分であり，縦軸が打ち上げからの経過時間である．図中のアスタリスク(*)は一スピンで T_+ と T_- が同時に決定できた事を示す．

3.1 Time of Flight (TOF) の決定

EFD-Bでは8 ms (16320 bit) 長の戻りビームの自己相関を地上で取り，ビームに加えられた変調を復調することによりTOFを決定する．得られた68個のバーストデータについて相関解析を行なった結果，戻りフラックスが少なかったためにデータによっては十分な相関のピークが見られなかった．そこで，TOFはほぼ $V \times B$ 電場の大きさで決まるため，相関係数のピークが周囲のものよりも20%以上度高く， $V \times B$ に対応するTOFと得られたTOFが0.1 ms (40 mV/mに相当) 以下であるデータに限って使用した．

以上のように決定したTOFを〔図5〕に示す．点線は真中が T_+ ，上下がそれぞれ， $V \times B$ 電場のみが存在するとして計算した T_- ， T_+ である．尚， T_+ を求める為の磁場はInternational Geomagnetic Reference Field 1995 (IGRF95) モデルを用いた．

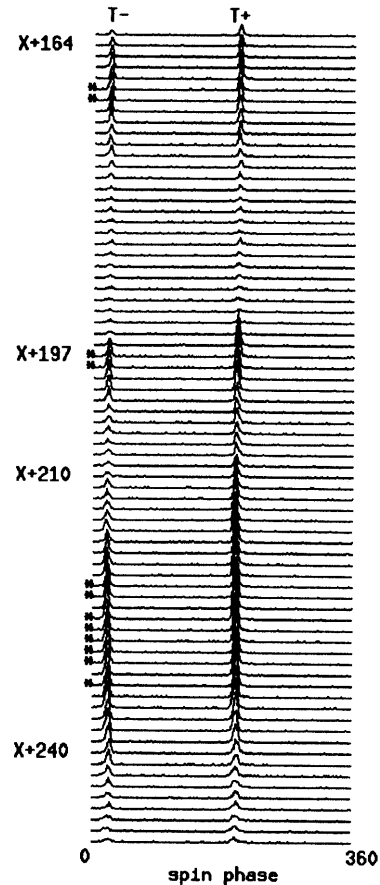


図4 スピンで区切ったトータルカウントデータ．縦軸が打ち上げ時刻からの経過時間，横軸はスピン位相角である

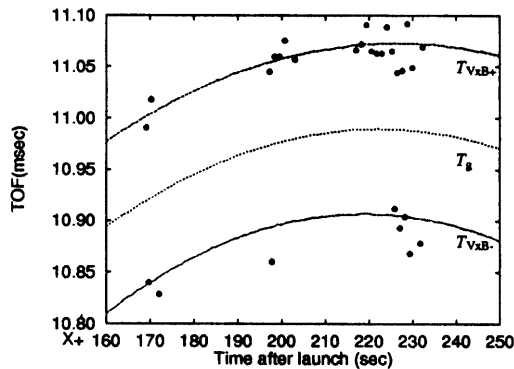


図5 TOF. 縦軸がTOF (ms), 横軸は打ち上げからの経過時間 (s) である

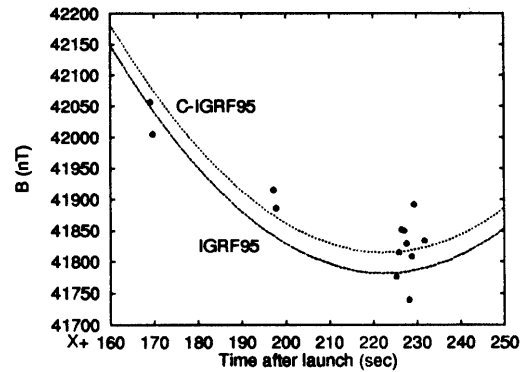


図6 磁場のデータ. 点が T_+ , T_- から決定した磁場を表し, 実線はIGRF95より計算したモデル磁場の磁場強度, 破線はEFD-Bが得たデータによりIGRF95を補正したモデル磁場を表す

3.2 磁場

磁場はロケットの1スピンの T_+ と T_- の両方が得ら

れたものについて計算される. 結果を [図6] に示す. 破線はIGRF95により計算したモデル磁場である. 観測とIGRF95は0.25%以内で良く一致していることが分かる. 磁場変化は滑らかであると仮定し, EFD-Bで得られた結果を用いてモデル磁場を最小自乗法で補正したところ33 nTであった. 補正後のモデル磁場 (Corrected-IGRF, C-IGRF) も [図6] に示す.

3.3 電場ベクトル

イオンビームが戻るのは毎スピンに二度であり, この方向は磁場に垂直な平面内で $E \times B$ 方向から等しい角度だけ傾いている. 従って戻りビームが放出された瞬間の2方向のイオン銃の方向が分かれば電場ベクトルの方向がわかる.

そのために電場ベクトル方向の決定には (1) ロケットの姿勢 (2) 戻りビームの方向を知る必要がある.

ロケットの姿勢はGAおよび星姿勢検出器 (Star Sensor, 以下STS) より決定する. GAはロケット機軸に対して平行, 垂直方向の2成分の磁場を測定し, これよりロケット回転の位相角がわかる. また, STSは星を検出することにより3次元絶対空間内でのロケット機軸方向を検出する.

戻りビームの方向は戻りフラックスが最大になる時刻から求める. まずトータルカウントをガウス分布関数でフィッティングしてフラックスがピークをとる時刻を求める. ビームの放出時刻はこれより旋回周期分 ($T_s = 10.959$ ms, スピン角で 3.37°) だけ遡った時刻であるので, この時刻とロケット姿勢, スピン位相角からビームの放出方向を求めた [図7].

次に電場強度の決定方法について述べる. 1スピンで T_+ , T_- の2個の戻りビームが得られたもの (以下ペアと称する) についてはそれらだけで電場強度を決定することができるが, 片側のみのデータが多いので電場強度決定には次の方法を用いた. (1) T_+ , T_- のペアから磁場強度を求める (2) 得られた磁場強度を用いてIGRF95を補正する (3) T_+ , T_- のいずれか片方と補正した T_s から電場強度を求める.

ペアから求めた磁場とIGRFモデルからのずれは33 nTであり, この分 T_s を補正した後に電場強度を計算した. この補正はTOFに対しては約1%程度であるが, 電場は $(T_+ - T_-)$ に比例する量なので実際には磁場の補正による誤差はかなり大きくなる. この誤差については後の3.4で述べる.

軌道データの一秒値の差分を取って速度ベクトル V を求め, IGRF95を用いてロケット軌道での磁場ベクトルを計算した. これらから $V \times B$ を計算し, 観測された電場からベクトル的に差し引いて電離層に存在する電場を計算した [図8].

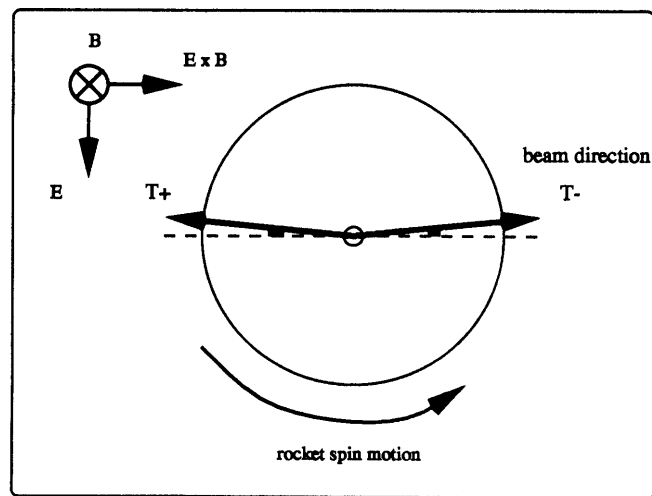


図7 イオンビームの放出方向と電場、磁場方向の関係. T_+ , T_- はそれぞれTOFが T_+ , T_- となるビーム放出方向である. これらは $E \times B$ 方向に平行な方向 (点線) から等しい角度をなす

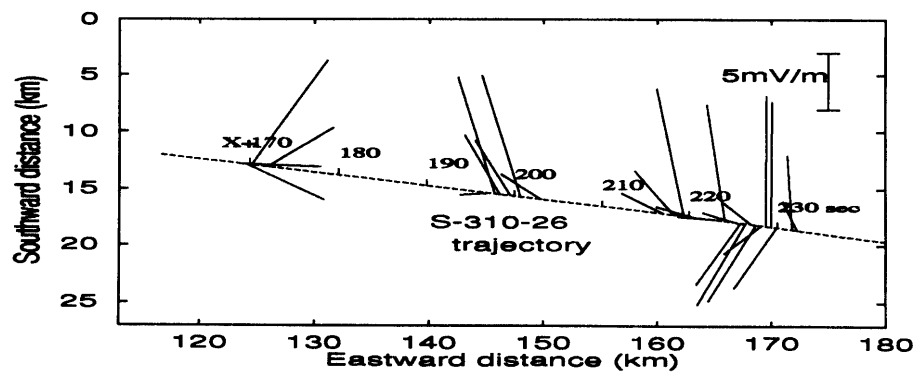


図8 横軸は地理的な東, 縦軸は南を示す. 点線はロケット軌道を平面上に投影したものであり, 打ち上げ後の時刻を示してある. そこから伸びる直線が電場ベクトルである.

3.4 測定誤差について

電場には強度, 方向を決定する際に生ずる誤差が含まれている.

電場強度を決定するにはTOF, 磁場モデルを用い, 方向の決定にはイオンフラックスが最大になる方向およびロケットの姿勢を用いる. さらに $V \times B$ 電場を差し引いた後の電場 (電離圏電場) には $V \times B$ 電場の決定精度 (ロケット速度) からの誤差も含まれる.

(1) トータルカウントデータのfittingに関するエラーは大きいもので0.3 ms程度であり, これはスピン位相角にして $360^\circ \times 0.3 \text{ ms} / 1.1 \text{ s} = 0.1^\circ$ に相当する. これを電場強度に直すと $30 \text{ mV/m} \times \tan(0.1^\circ) = 0.05 \text{ mV/m}$ となり, fittingエラーはTOFの1 bitの精度以下である.

(2) 電場強度の決定には補正した T_g を用いている. 電場の計算に際して $(T_g - T_+)$ という T_g に関する1次の微量が分子にあるために誤差は大きくなる. 磁場の補正が30 nTの場合, 誤差は8%程度となり, 30 mV/mの (誘導電場を含む) 電場については2.5 mV/m程度の誤差が生ずることになる.

次にロケットの姿勢から生ずる誤差について考える.

(3) GAのデータから求めたロケット位相角の精度は 1° 程度であり, (1) と同様の計算により0.5 mV/m程度の誤差を含むことがわかる. STSで決定したロケット機軸方向の誤差は 2° 程度である. 機軸が東西南北それ

ぞれに 2° ずれたとした時の電場ベクトルの終点をプロットした図を [図9] に示す。ずれの大きさはベクトルの絶対値によりかなり違うが、数 mV/m 程度である。

(4) $V \times B$ 電場については、 V の誤差が 10 m/s 程度、 B が 100 nT とすると最大で $10 \text{ m/s} \times 40000 \text{ nT} + 1000 \text{ m/s} \times 100 \text{ nT} = 0.5 \text{ mV/m}$ の誤差がある。

以上から最も効く誤差は電場強度を計算する際に仮定した磁場モデルおよびロケット機軸の決定精度に起因する (数 mV/m) が、その他位相角、 $V \times B$ も比較的大きいことがわかる。

4. 考 察

信頼度の高い電場のデータ、つまり戻りフラックスが多く、相関解析が有効であったものは得られた

68個のバーストデータの内、28個であった。戻りフラックスが充分でなかったものが存在した原因については後述する。得られた電場の特徴は (1) 電場強度が大きいもので 11 mV/m を超え、平均でも 6 mV/m 程度であった、(2) 方向は北向きのものが多く、一部南西向きのもも存在し、特に X + 217 秒から 232 秒のものに関しては 4 秒 (空間的には 4 km) の周期構造が見られた、等が挙げられる。

第4章で述べたように、 $V \times B$ 電場を引いて最終的に得られた電場には数 mV/m のかなり大きな誤差が含まれている。従って 1 ~ 2 mV/m 程度の大きさの電場はその方向、大きさは大きく変わる可能性がある。10 mV/m を超える電場に関しては誤差は相対的に小さくなるため、磁場モデルの補正を 33 nT にした場合に強度は 2.5 mV/m 以内、方向は $\arctan(2.5/30) \sim 5^\circ$ 以内で正しいと考えられる。これにさらにロケット機軸方向の推定の誤差を加えるとさらに 1 ~ 2 mV/m 程度の電場強度、 $\sim 10^\circ$ 程度の方向の不確定さが存在する事になる。

以上の誤差を考慮に入れても、得られたデータから通常 E 領域に存在する 1 mV/m 程度の Sq 電場よりもはるかに大きい電場があったことがわかる。S-310-26 号機の 5 日後に打ち上げられた S-310-25 号機搭載の double probe 法による電場観測器でも 10 mV/m 以上の電場が観測されている [山本等, 本号]。

また、ほぼ同時刻の種子島の FAR レーダーの結果によると、高度 80 km から 130 km で強いエコーが戻っており、その時のドップラー速度はレーダー視線方向から遠ざかる方向に 75 m/s 以上であった。このレーダーが高度 100 km 付近で観測していた場所と EFD-B が電場を観測した場所はほぼ同じ磁力線を通るので、磁力線方向の電気伝導度が十分に大きければ同じ電場を違う場所で観測したことになる。ところがドリフトから求められる電場方向は南東成分を持つことになり、EFD-B で得られた多くの北向きの電場とは異なる方向である。南向き成分を持つ電場は僅かに 5 点 (このうち誤差によって北向きに変わる可能性があるのは 1 点) である。一方で S-310-25 号機に搭載された double probe 法による電場観測ではその DC 成分はレーダー観測から予想される電場と良く一致する [山本等, 本号]。Double probe のデータは高度 100 km 以下から最高高度までのデータがあり、レーダー観測の高度とロケット観測の高度を合わせて電場を比較している。しかし、この結果でも違う高度では電場強度の様子がかなり異なっており、QP エコー現象では磁力線方向に電場をマッピングすることは出来ない可能性がある。この点は今後の解析により明らかにする必要がある。

次に、提唱されていたモデルの検証を試みよう。観測された電場に波のような構造が見られた事を考えると大気重力波等の波動により Es 層に何らかの変調がかかっていた可能性がある。今、Es 層の高度 (100 km) での大気重力波を考えるとその Brunt-Väisälä 周波数は 3 mHz (周期 5 分) であり、一方で観測された構造が大気重

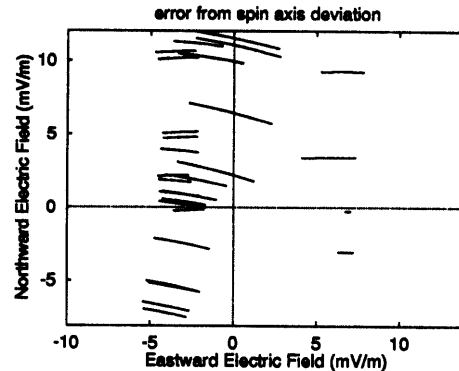


図9 ロケット機軸が方位角、天頂角それぞれ $\pm 2^\circ$ ずれたと仮定した時の電場ベクトルの誤差。横軸、縦軸はそれぞれ電場の東西、南北方向成分であり、電場ベクトルの始点を原点、ベクトルの終点をつないで表示してある

力波でかつ時間変動であったと仮定するとその周波数は200 mHz (周期4秒)となりこの仮定に反する。従って観測された構造は波数 $2.5 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ (波長4 km)の空間変動を見ていたと考えられる。一方Tsunoda *et al.*のモデルでは重力波変調の空間周期が10 km程度であり、また電場の大きさも数倍異なるが、観測結果からはこのモデルを支持しないとは言い切れない。

また、電場がこのように大きいものであった理由は未だ明らかではない。

戻りビームフラックスが減少した原因はイオン銃をGAの情報をもとに磁場に垂直に制御するためのDCモータに遅れが生じており、さらに遅れ方が一様ではなく位相によって異なっていたためである。ビームフラックスが減少したX+241秒の直後に磁力線とロケットのなす角(磁力線角)の変化率が負から正に変わっており、元々遅れがあったモータはGAからの情報に追従できなくなったと思われる。X+173秒からX+196秒、X+203秒からX+216秒の間もフラックスが減少しているが、こちらはモータの遅れが位相に依存するためにちょうど悪い状況になっていたと考えられる。

以上の事を考慮に入れ、今後EFD-Bによる電場観測をする際の注意点を挙げる。戻りフラックスが充分でなく、 T_{\parallel} 、 T_{\perp} のうちの一方しか得られない可能性を考えると、誤差の観点からはnTのオーダーの決定精度を持つ磁力計を同時に搭載することが望ましい。戻りフラックスが充分で T_{\parallel} 、 T_{\perp} を同時に得る事ができた場合にはお互いにcalibrationをすることができる。また、戻りフラックスを増やしてTOFデータを多く取るためにはイオン銃制御用モータの能力を上げるかイオン銃自体を軽量化して磁力線に対する追従を良くするか、あるいはビーム幅をさらに広げるかのいずれかをする必要がある。さらに、スピンによる時間遅れの影響を除くためにはGEOTAIL衛星、EXOS-D衛星(あけぼの)等で実施されたように二組のイオン(電子)銃、検出系を搭載することが望ましい。

5. ま と め

SEEKキャンペーン中に観測ロケットS-310-26号機に搭載されたEFD-B (Electric Field Detector - Beam experiment)による中緯度電離圏の電場観測を行った。ロケットはQPエコーが地上レーダーで観測されている時刻に打ち上げられ、高度170 km付近で10 mV/m以上の電場を観測した。電場方向は波数 $2.5 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ (波長4 km)の波動構造を示した。しかし、電場方向は地上レーダーから予想された高度100 km付近のものとは異なり、このことからQPエコーが受かっている時は磁力線に沿った電場のマッピングができないという可能性があるが、今後の詳細な解析が必要である。強い電場の原因は未だ明らかでなく、マッピングの問題と合わせ今後さらなる研究が必要である。

参 考 文 献

- Ecklund, W. L., D. A. Carter, and B. B. Balsley, Gradient drift irregularities in the midlatitude sporadic E, *J. Geophys. Res.*, **86**, 858–862, 1981.
- Fejer, B. G., and M. C. Kelley, Ionospheric Irregularities, *Rev. Geophys.*, **18**, 401–454, 1980.
- Keys, J. G., and M. K. Andrews, Gravity wave and sporadic-E echo signatures on VHF backscatter radar systems, *Planet. Space Sci.*, **32**, 1455–1462, 1984.
- Nakamura, M., H. Hayakawa, and K. Tsuruda, Electric field measurement in the ionosphere using the time-of-flight technique, *J. Geophys. Res.*, **94**, 5283–5291, 1989.
- Oliver, W. L., Y. Yamamoto, T. Takami, S. Fukao, M. Yamamoto, and T. Tsuda, MU radar observations of ionospheric electric fields, *J. Geophys. Res.*, **98**, 11, 615, 1993.
- Pfaff, R. F., M. Yamamoto, and P. Marionni, Electric field measurements within a sporadic-E layer, *Geophys. Res. Lett.*, *submitting*.
- Sudan, R. N., J. Akinrimisi, and D. T. Farley, Generation of small-scale irregularities in the equatorial electrojet,

J. Geophys. Res., **78**, 240–248, 1973

Tanaka, T., and S. V. Venkateswaran, Characteristics of field-aligned E-region irregularities over Iioka (36° N) Japan, I, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **44**, 381–393, 1982.

Tsunoda, R. T., S. Fukao, and M. Yamamoto, On the origin of quasi-periodic radar backscatter from midlatitude sporadic E, *Radio Science*, **29**, 349–365, 1994.

Yamamoto, M., N. Komoda, S. Fukao, R. T. Tsunoda, T. Ogawa, and T. Tsuda, Spatial structure of the E region field-aligned irregularities revealed by the MU radar, *Radio Science*, **29**, 337–347, 1994.

山本衛, Robert F. Pfaff, 深尾 昌一郎, S-310-25号機搭載ダブルプローブによるスホラディックE層中の電界測定, 宇宙科学研究所報告, 本号, 1998.