

## SEEK キャンペーン観測期間の山川における中間圏風と スポラディックE層の同時観測

五十嵐 喜良<sup>1</sup>・小川 忠彦<sup>3</sup>・丸山 隆<sup>1</sup>・西牟田 一三<sup>2</sup>  
M. F. Larsen<sup>4</sup>・山本 衛<sup>5</sup>・深尾 昌一郎<sup>5</sup>

### Simultaneous observations of mesospheric winds and sporadic E layer at Yamagawa during the SEEK campaign

By

K. IGARASHI<sup>1</sup>, T. OGAWA<sup>3</sup>, T. MARUYAMA<sup>1</sup>, I. NISHIMUTA<sup>2</sup>,

M.F. LARSEN<sup>4</sup>, M. YAMAMOTO<sup>5</sup> and S. FUKAO<sup>5</sup>

**Abstract:** Observations of mesospheric winds with a MF radar and sporadic E (Es) layer with an ionosonde at Yamagawa during the SEEK campaign are presented in relation to lower thermospheric winds, E region field-aligned irregularities, and in situ electron density. We compare with the mesospheric winds, TMA observations and in-situ electron density measurements during the periods of the S-310-26 and S-310-25 rocket experiments. For the rocket experiment on August 21, 1996, the wind profiles at the altitudes of 84 - 134 km, obtained by combining the MF radar and TMA observations, indicate that there are a remarkable wind shear in the zonal component at around 97 km. This altitude is comparable to peak electron density altitude 97.7 km measured by the rocket and h'Es detected by the ionosonde. During the S-310-26 rocket experiment gravity waves with short periods were not obtained from MF radar winds. For the rocket experiment of the S-310-25 on August 26, 1996 we found active gravity waves having periods of 7.7, 10.7, and 15.2 min in the meridional components at 88 km. These periods seem to be related to the 5-10 min periods of the quasi-periodic echoes detected simultaneously with a VHF radar. We also discuss the movement of Es patch.

#### 概 要

SEEK キャンペーン観測期間に、山川電波観測所で行ったMFレーダ及びイオノゾンデによる中間圏・下部熱圏風及び電離層観測結果について報告する。1996年8月21日打ち上げのS-310-26号機及び8月26日打ち上げの25号機の打ち上げ期間について、山川の地上観測結果とロケット観測による電子密度計測やTMA実験との比較結果について検討する。TMA実験による下部熱圏風の観測と山川MFレーダの観測結果を組み合わせ、高度

---

<sup>1</sup>郵政省通信総合研究所, <sup>2</sup>通総研・山川電波観測所, <sup>3</sup>名古屋大学太陽地球環境研究所, <sup>4</sup>クレムソン大学,  
<sup>5</sup>京都大学超高層電波研究センター

84 km - 134 km までの風の高度プロファイルが求められた。高度 100 km 以下の両者の結果を用い、約 97 km 付近に顕著なウインドシアが見いだされた。この高度は、S-310-26号機上昇時に、インピーダンスプローブにより測定された電子密度のピーク高度 97.7 km に一致する。S-310-26号機の打ち上げ時には、MFレーダにより高度 88 km において顕著な短周期の波動は見いだされなかった。

S-310-25号機の打ち上げ時には、MFレーダで求めた高度 88 km における風のスペクトル解析により、7.7, 10.7, 15.2分の比較的短周期の波動が見いだされた。これは、VHFレーダで観測されるFAIの準周期エコー（QPエコー）強度の変動周期 5 - 10分によく一致する。また、パッチ状のEs層の移動速度についての観測結果を示す。

**重要語：** MFレーダ, イオノゾンデ, スポラディックE層, FAI, ウインドシア

## 1. はじめに

スポラディックE層に伴う中緯度の沿磁力線不規則構造（FAI）は、これまでVHFレーダを用いて研究されてきた。日没後に現れる準周期（QP）レーダエコーは、大気重力波によるEs層の高度変調により生成されるとの理論があるが、観測による検証はされておらず、QPエコー、Es層、大気重力波の同時観測結果は報告されていない。そこで、SEEKキャンペーン観測に際して、山川電波観測所では、MFレーダによる中間圏・下部熱圏風の連続観測及び15分ごとの電離層観測を行い、ロケットとの同時観測を行った。これらの山川における地上観測結果と、FARレーダ観測、下部熱圏風を測定するTMAロケット実験、ロケットによる電子密度の直接測定との比較解析を行った。

なお、ロケット打ち上げ期間は、通信総合研究所の電離層観測ネットワーク（IONET）により本所にリアルタイムで送られてきた電離層観測結果を、種子島のFARレーダサイト及び内之浦のロケット打ち上げの管制センターに、インターネットによりリアルタイム配信し、スポラディックE層の発生情報を知らせることにより、ロケット打ち上げの発射のタイミングを決めるのに参考となる観測データのリアルタイム提供も行った。また、山川電波観測所では、SEEKキャンペーン観測期間に、FPIによる中間圏風の観測及び夜光観測も行われた。

## 2. 観測結果

### 2.1 MFレーダ装置

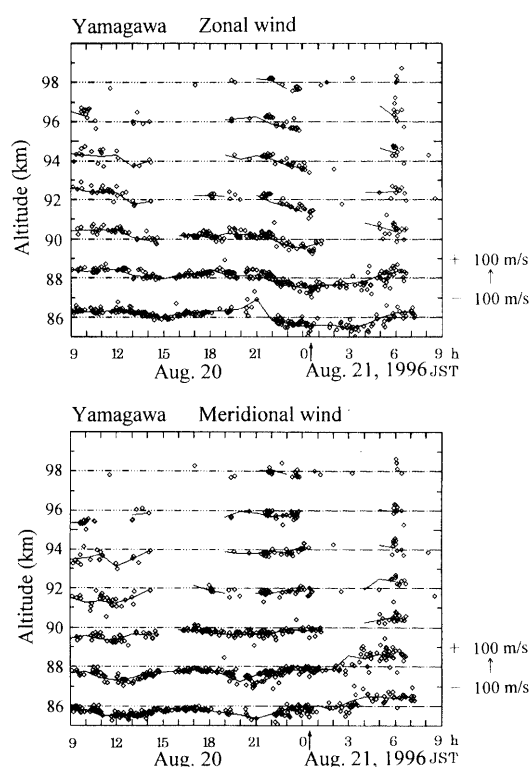
MFレーダ装置は、中波帯の電波を用いたパルスレーダで、中間圏・下部熱圏領域の風速・風向を求めることができる。ピーク電力 50 kw のパルス電波を送信空中線 1 基から送信し、1 辺 180 m の頂点に配置したクロスダイポール型の受信空中線 3 基を用い、SA法により、高度 60 km - 100 km の風を、高度分解能 2 km、時間分解能 2 分で、連続して観測することができる。観測結果は、FCA法により解析され風ベクトルを求める。このレーダの主要諸元を第 1 表に示す [Igarashi et al., 1996]。

### 2.2 S-310-26号機打ち上げ時の観測結果

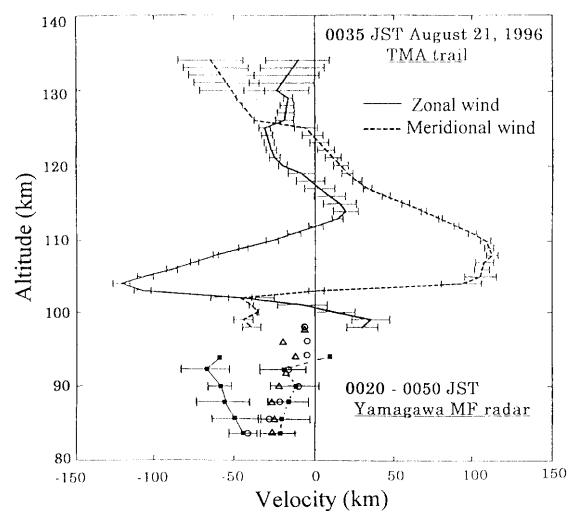
第 1 図に、2 分平均値の東西風、南北風の観測結果を示す。S-310-26号機は、1996年 8 月 21 日の 0 時 30 分に打ち上げられた。ロケットの飛翔中は、高度 96 km 以上では、風のデータは得られなかった。高度 94 km 以下では、東西風成分に、大気重力波によるものと思われる周期 60 - 70 分の波動が見いだされた。ロケット打ち上げ時の、00時 20分 JST から 00時 50分 JST まで、30分平均した風の高度プロファイル、21時 00分 JST から 6 時間平均した風の高度プロファイルと TMA 実験による風のプロファイルを組み合わせたものを第 2 図に示す [Larsen et al., 1997]。高度 94 km から 98 km までの風のデータが欠落しているが、内挿すると約 97 km 付近に、

第1表 山川MFレーダの主要諸元

中心周波数	1.955 MHz
送信出力	50 kW (ピーク電力)
周波数帯域幅	27 kHz
送信パルス幅	30 $\mu$ s
受信機数	3台
サワール間隔	2 km 毎
パルス繰り返し周波数	40 Hz (日中), 80 Hz (夜間)
コヒーレント積分回数	32回 (日中), 16回 (夜間)
1 データセットの積分数	256回 (通常)
位相符号化	無し
送信空中線	2 対のダイポールアンテナ (エレメントの長さ: 78 m)
受信空中線	3 基のクロスダイポール (エレメントの長さ: 77 m, 一辺の長さ 185 m の正三角形の頂点にクロスダイポールの中心がくるように配置)



第1図 1996年8月20日-21日に、MFレーダにより観測された風の時系列プロット (S-310-26号機の打ち上げ時刻は、1996年8月21日0時30分JST)

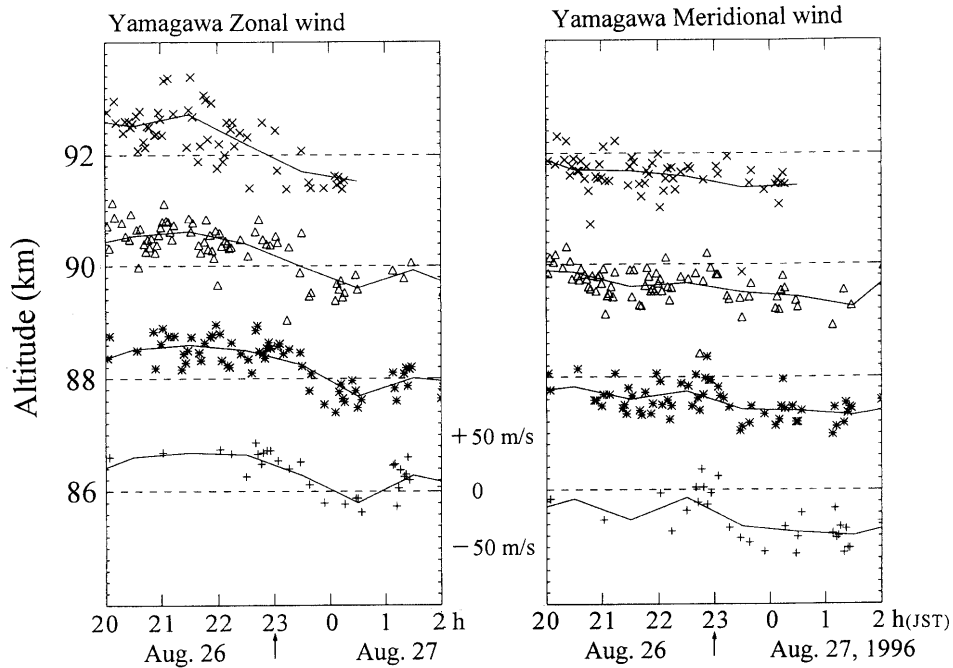


第2図 MFレーダにより求めた風と、TMA実験により求めた風を組み合わせて求めた風の高度プロファイル。実線は東西風、波線は南北風、○印と△印は、21時00分から6時間平均した風の東西成分及び南北成分

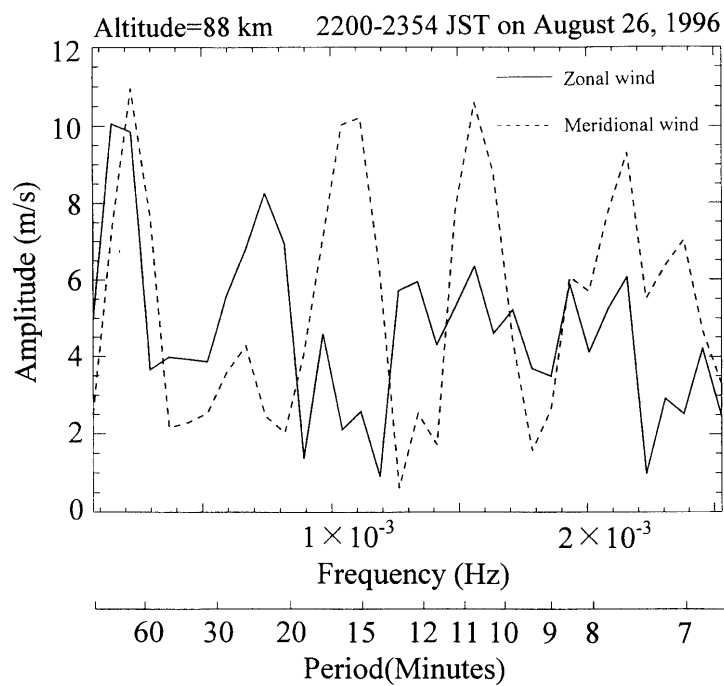
ウインドシアが存在することが推定される。ロケット実験のインピーダンスプローブ (NEI) による電子密度測定によると、上昇時に、高度 97.7 km に電子密度のピークがあることが観測された [Yamamoto *et. al.*, 1997]。ウインドシアによる Es 層の形成を示唆する結果である。

### 2.3 S-310-25号機打ち上げ時の観測結果

第3図に、ロケット打ち上げ時の東西風、南北風の2分平均値を示す。1996年8月26日23時JSTに打ち上げられたS-310-25号機の観測期間前後に、東西風及び南北風の各成分に、約60～70分周期の変動がみられる。



第3図 1996年8月26日～27日に、MFレーダにより観測された風の時系列プロット (S-310-25号機の打ち上げ時刻は、1996年8月26日23時00分JST)

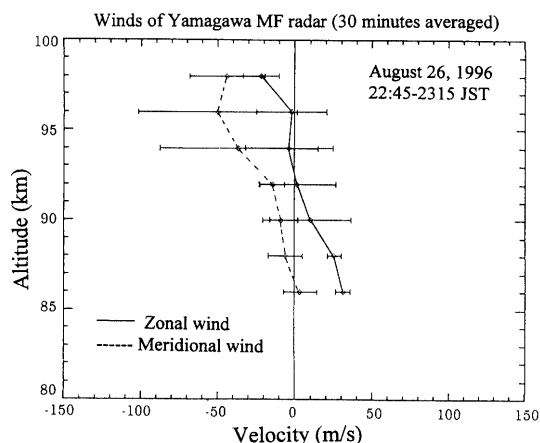


第4図 S-310-25号機打ち上げ前後の期間 (22時00分～23時54分) で、高度88 kmの風の周波数スペクトル解析結果。東西風では22分の成分が顕著、南北風の短期周期成分では7.7, 10.7, 15.2分が顕著。

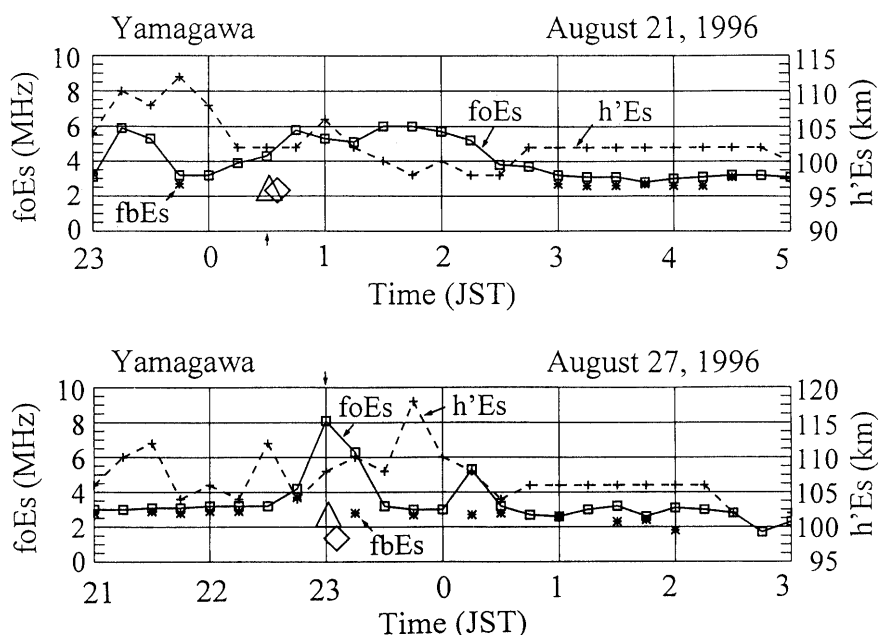
この風に、短周期の風の成分が重ねあわされているものと考えられる。短周期成分を同定するため、22時から23時54分までの期間について、Lomb-Scargelの方法による周波数解析を行った結果を、第4図に示す。短周期成分として、東西風成分では、8 m/s以上の強度で周期22分の成分が顕著である。南北成分では、7.7分、10.7分、15.2分の成分が見いだされた。これは、E層高度におけるプラント・バイサラ周期（約5分）の2倍～3倍である。この周期は、24.515 MHzのFARで観測されたQPエコーの周期5～10分とよく一致するように思われるので、大気重力波により、何らかの変調を受けていることを示唆する結果である [Fukao et al., 1997]。第5図に、S-310-25号機の打ち上げ前後の22時45分～23時15分の30分平均した風の高度プロファイルを示す。85 kmから95 kmまで、S-310-26号機の打ち上げ時に比べると、顕著な風のシアは見られず、ゆるやかに変化している様子が分かる。インピーダンスプローブによる電子密度計測結果によると、ロケット上昇時及び下降時において、各々102.9 km及び101.6 kmにスポラディックE層によるピーク電子密度が観測されている [Yamamoto et al., 1997]。高度100 km以下では、スポラディックE層が観測されなかったため、ウインドシアは無いとするMFレーダによる観測結果と矛盾しない。

#### 2.4 イオノゾンデ観測

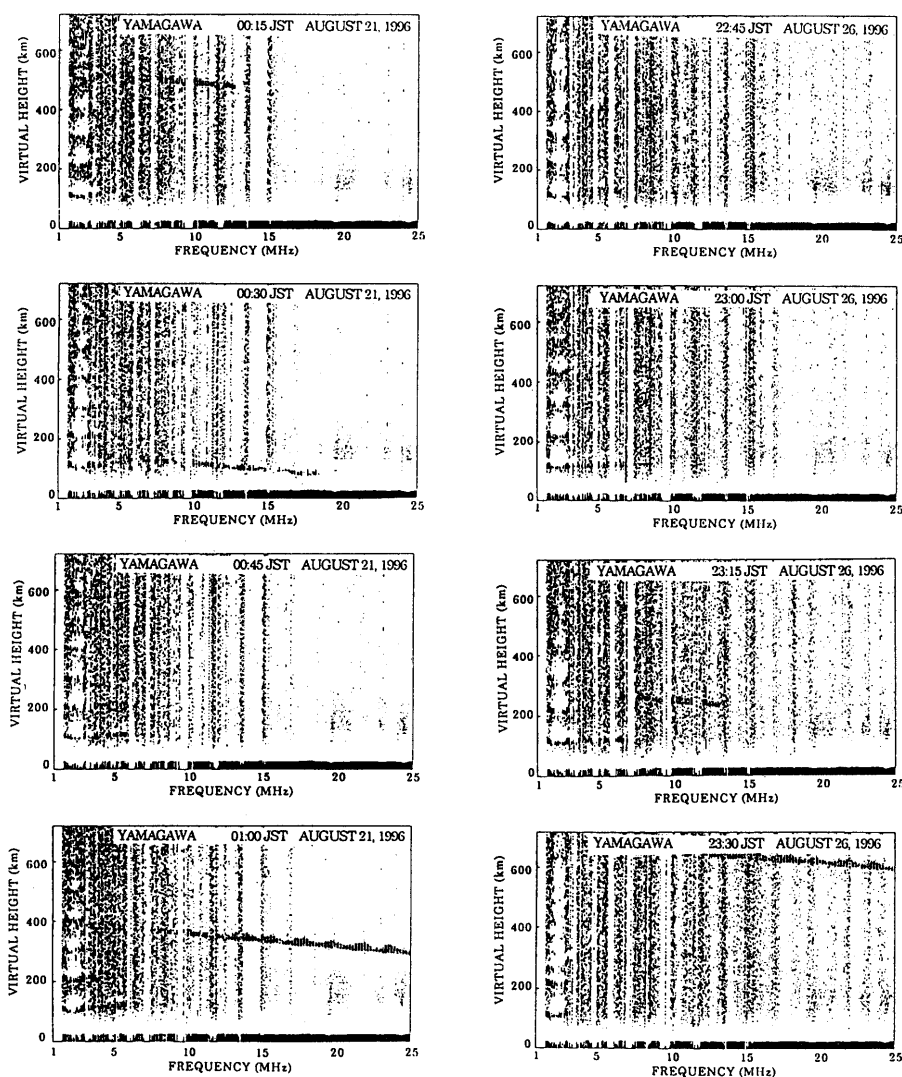
山川電波観測所の電離層観測結果を、第6図に示す。ロケット打ち上げ時の連続イオノグラムは、第7図に示す。S-310-26号機の発射時のEs層の見かけの高度は、102 kmである。ロケットで観測されたEs層の高度は、上昇時には97.7 km（厚さ約2 km）で、下降時には100.3 kmであった。電離層観測装置（イオノゾンデ）の高度の読みとり精度は、2 kmであるので、誤差範囲内では、一致している。ロケットの上昇時と下降時のEs層の高度の差は、0.6 kmである。S-310-25号機の発射時のEs層の見かけの高度は、108 kmである。



第5図 S-310-25号機打ち上げ時の、MFレーダによる30分平均した風速の高度プロファイル



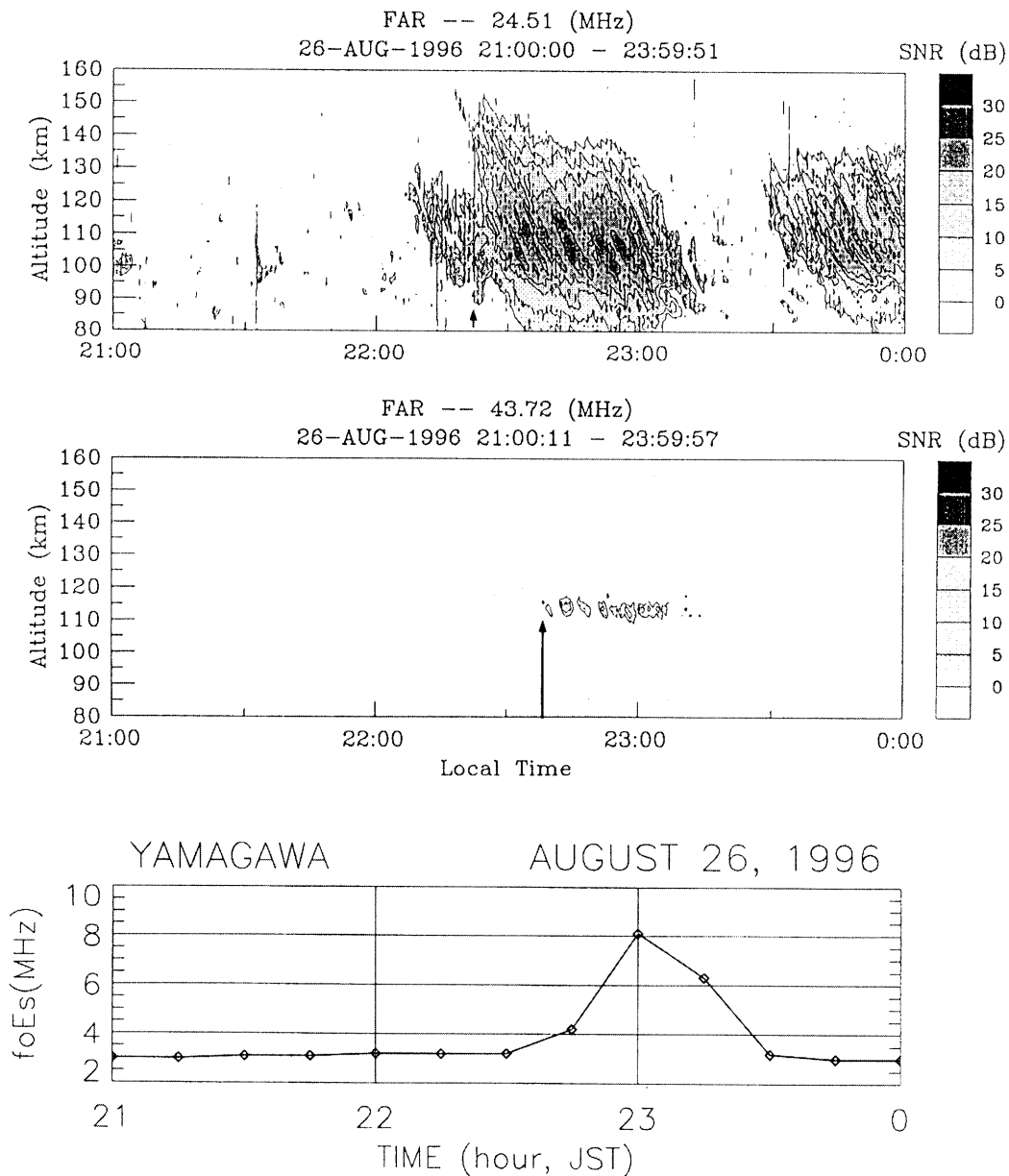
第6図 foEsとh'Esの時系列プロット及びfbEs, ロケット観測により求めた電子密度のプラズマ周波数 (△: 上昇時, ◇: 下降時)



第7図 ロケット発射時の連続イオノグラム

ロケットで観測されたEs層の高度は、上昇時には102.9 km（厚さ約1 km）で、下降時には101.6 kmであった。ロケットの上昇時と下降時のEs層の高度差は、1.3 kmである。イオノソンの観測高度との差は、イオノソンの高度分解能、観測地点の違いにより説明できる。次に、ロケットにより観測された電子密度とイオノゾンデにより観測されたfbEs（スポラディックE層の遮蔽周波数、すなわち、Es層が透明になり始める最低の正常波周波数）の比較について述べる。第6図にfoEsとfbEsを示す。S-310-26号機の打ち上げ時の、ピーク電子密度は、上昇時には $7.6 \times 10^4 / \text{cm}^3$ で、下降時には、 $6.7 \times 10^4 / \text{cm}^3$ である。山川におけるfoEsは、4.2 MHz ( $2.2 \times 10^5 / \text{cm}^3$ )で、ロケット観測よりは、約3倍大きい。この違いは、イオノゾンデとロケット観測の測定場所の違い及びイオノゾンデ観測は、最も高い電子密度を検出することによるものと考えられる。S-310-25号機により測定されたEs層の電子密度は、上昇時に $9.3 \times 10^4 / \text{cm}^3$ 、下降時には $2.2 \times 10^4 / \text{cm}^3$ である。一方、イオノゾンデで観測したロケット打ち上げ時刻（23時00分JST）に最も近い23時15分のイオノグラムのfbEsは、2.8 MHz ( $9.7 \times 10^4 / \text{cm}^3$ )であり、ロケット観測と良く一致する [Smith, 1970]。

S-310-25号機の観測期間に現れたEs層は、移動性のパッチ状のEs層である可能性が高い。FARの周波数24.51 MHzと43.72 MHzのエコー強度と山川のイオノゾンデのfoEsの時系列プロットを第8図に示す。FAIエコ



第8図 S-310-25号機打ち上げ時に、FARにより観測されたFAIエコーと山川のfoEsの時系列表示プロット

と山川でのEs層の現れる時間の違いから、移動速度を推定すると、西向きに約60～85 m/sの速度成分を持つことがわかった。小泉 [1969] が、Es層のドリフト特別観測実験により求めた、Es層の平均的な移動速度の統計処理結果によると、夜間では西向きに約70 m/sの速度で移動するEs層が卓越すると結論している。今回FAIエコーを用いて推定したドリフト速度は、これまで観測されたパッチ状のEs層のドリフトの平均速度に一致している。

### 3. むすび

SEEK キャンペーン観測に参加し、山川電波観測所で、イオノゾンデ観測及びMFレーダ観測による同時観測を行い、夜間に現れる沿磁力線不規則構造 (FAI) に伴うQPレーダエコー、Es層、大気重力波の関係について比較解析を行った。MFレーダとTMA観測を組み合わせ求めて高度84 km～134 kmまでの風の高度プロファ

イル，電子密度の直接計測結果から，ウインドシアの高度とEs層の発生高度がほぼ一致することが見出された。S-310-25号機による実験中に，高度88 kmにおけるMFレーダの風のスペクトル解析から求めた7 - 20分の短周期の重力波について考察した。この結果，24.515 MHzのFARレーダで観測された周期5 - 15分のQPエコーは，短周期の大気重力波の影響を受けている可能性が示唆された。しかし，S-310-26号機の際は，明瞭な短周期成分が，MFレーダにより見いだされなかったため，さらに詳細な比較解析を進める必要がある。また，S-310-25号機のロケット実験時に観測されたEs層は，夜間の移動性のパッチ状Es層で，その速度は西向きで約60 - 85 m/sの速度成分を持つことが，イオノゾンデとFARによる観測結果の比較から求められた。

#### 参 考 文 献

- Fukao, S., M. Yamamoto, Roland T. Tsunoda, H. Hayakawa, and T. Mukai, The SEEK (Sporadic-E experiment over Kyushu) campaign, submitted to *Geophys. Res. Lett.*, 1997.
- Igarashi, K., I. Nishimuta, Y. Murayama, T. Tsuda, T. Nakamura, and M. Tsutsumi, Comparison of wind measurements between Yamagawa MF radar and the MU radar, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 15, 3341, 1996.
- Koizumi, T., Some characteristics of the Es layer in Japan, *J. Radio Res. Labs.*, **16**, No. 83/84, 17, 1969.
- Larsen M.F., S. Fukao, M. Yamamoto, R. T. Tsunoda, K. Igarashi, and Mas. Yamamoto, The SEEK chemical release experiment: Observed neutral wind profile in a region of sporadic E, submitted to *Geophys. Res. Lett.*, 1997.
- Smith, L.G., A sequence of rocket observations of night-time sporadic-E, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **32**, 1, 247, 1970.
- Yamamoto Masa., T. Ono, H. Oya, R. T. Tsunoda, M. F. Larsen, S. Fukao and M. Yamamoto, Structures of sporadic-E observed with an impedance probe during SEEK campaign, submitted to *Geophys. Res. Lett.*, 1997.