

統合観測 FERIX-2 による中緯度電離圏 *E-F* 領域相互作用に関する研究

青木 裕一

京都大学生存圏研究所 レーダー大気圏科学分野 山本研究室

1 はじめに

中緯度電離圏 E 領域、F 領域において各種のプラズマ不安定構造が明らかになっている。E・F 領域に共通する現象に、沿磁力線イレギュラリティ (Field aligned irregularities; FAI) がある。これはプラズマ密度の粗密構造が磁力線直交方向に成長する現象である。電離圏内部では、磁力線並行方向の導電率が高く、分極電場がほとんど減衰せずに数百 km にわたって伝播するため、E・F 領域のプラズマ構造には電磁気的な相互関係があると予想されてきた。

2004 年に FERIX (F- and E- Region Ionosphere Coupling Study) 観測が実施された。この観測で、E・F 領域 FAI が同時に同一視野に捉えられ、両者の発生位置が同一であり、主として西向きに伝播することがわかった。中緯度電離圏には磁力線に沿って殆ど減衰なしに伝わる電界を介して強い相互作用が働いていることが強く示唆される。しかしながら、電界の生成域が E 領域と F 領域のどちらであるか等、重要な問題が未解決のまま残された。そこで今回、2007 年 5～9 月の期間に F 領域-E 領域 FAI 相互作用の解明を目指した統合観測 FERIX-2 を実施した。

2 観測概要

2004 年の FERIX 観測では、可搬型である下部熱圏プロファイラーレーダー (LTPR; Lower Thermosphere Profiler Radar) を山形県酒田市に設置して、E 領域の FAI を観測し、MU レーダーから 5 ビームドップラー観測と 16 ビームパワー観測の組み合わせで F 領域の FAI を観測した。

今回の FERIX-2 観測では、レーダーによる新たな観測手法として、MU レーダーと LTPR 観測の両方にレーダーイメージングを導入した。これによってエコー領域の空間分布と時間変化を比較し、F-E 領域 FAI の詳細構造を明らかにできる。また、LTPR からの電波を同期受信できる受信専用システムを新潟市間瀬に新設し、LTPR からの電波を用いたバイスタティック・レーダー観測を行った。これによって E 領域 FAI の観測領域を拡大すると共に、2 方向からのドップラー速度が観測できる。さらに GPS-

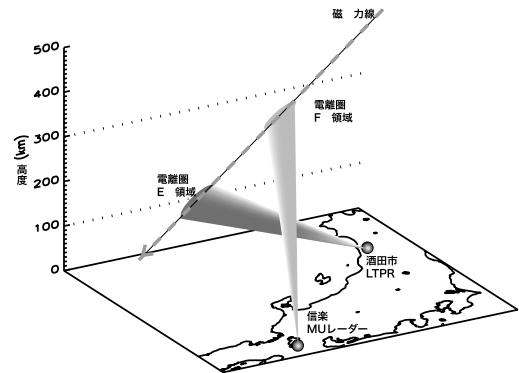


図 1: 観測概念図

TEC 観測を用いて、F 領域の中規模 TID を調べ、MU レーダー、LTPR 観測との比較を行った。

3 観測結果

2007 年 7 月 10 日の同時刻における MU レーダーイメージング観測結果を図 2 に、LTPR 観測結果を図 3 に示す。図 2、図 3 の東西に走る 5 本の線は、酒田での高度 100km～120km における磁力線直交線を示しており、LTPR 観測結果 (図 3) において、酒田での磁力線直交線の下にある東西に走る 2 本の線は、新潟から見た高度 100km と高度 110km における磁力線直交線を示している。上下に走る 4 本の線は MU レーダーのビーム方向を表している。

3.1 MU レーダーイメージング観測

MU レーダーイメージング観測では、MU レーダー 5 ビーム観測のうち真北から東に向かって 4 ビーム分をプロットした。E 領域 FAI の観測結果と比較するため、図 2 ではイメージを磁力線に沿って高度 100km に投影している。FERIX-2 期間中のデータ解析により、F 領域 FAI は図 2 のように北西-南東に伸びる長い波面状構造を持ち、いくつかの小領域から形成される例が観測された。時間が進むにつれ北西-南東構造全体は西方へ伝播し、構造を形成する一つ一つの小領域は北西へ動いていく様子が観察できた。

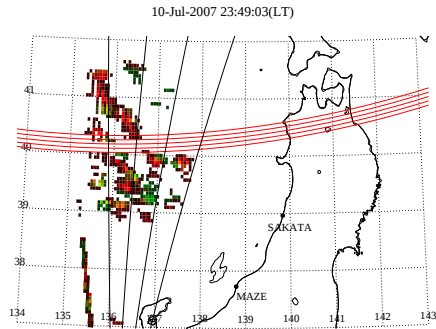


図 2: MU レーダーイメージング観測結果
(2007 年 7 月 10 日 23:49:03 ~ 23:51:07 JST)

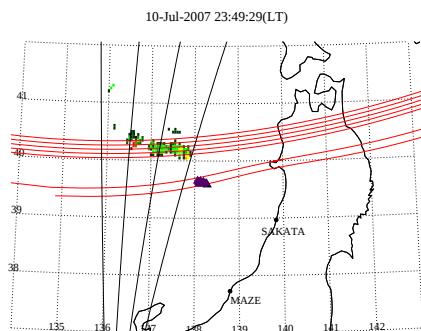


図 3: LTPR 観測結果
(2007 年 7 月 10 日 23:49:00 ~ 23:49:30 JST)

3.2 LTPR イメージング観測とバイスタティック観測

図 3 の観測結果では、酒田 LTPR によるイメージング観測、新潟 LTPR 受信システムによるバイスタティック観測の結果を示している。この結果から新潟でのバイスタティック観測により E 領域の観測領域を拡大できていることが確認できる。

イメージング観測から、E 領域 FAI は高度 100 km 付近に東西に広がった構造と北西-南東構造を持つ例が観測され、F 領域 FAI のエコー分布と比較した場合、E 領域 FAI は F 領域 FAI 北西-南東構造の端に分布する。さらに E 領域エコーが F 領域エコーを取り囲むように分布する例がいくつも確認できた。

3.3 GPS-TEC 観測とドリフト速度の比較

2007 年 7 月 10 日の GPS-TEC 観測による F 領域の中規模 TID と LTPR 観測による E 領域 FAI の比較結果を図 4 に示す。LTPR による観測は RTI プロット (ドップラー速度) で表し、GPS-TEC 観測は

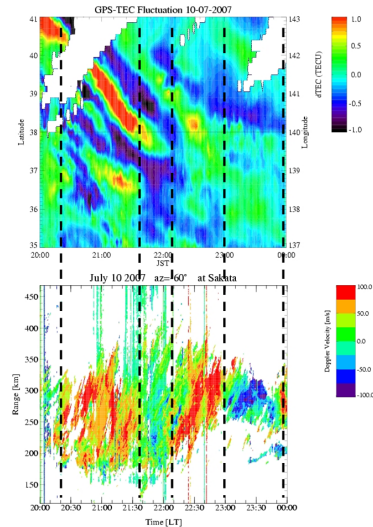


図 4: E 領域 FAI と F 領域中規模 TID との比較
(2007 年 7 月 10 日 20:00:00 ~ 24:00:00 JST)

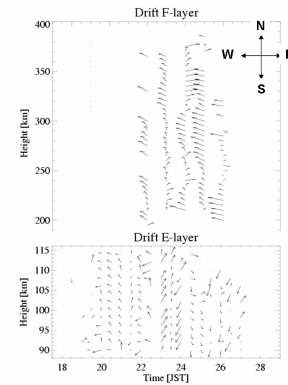


図 5: E 領域 FAI と F 領域 FAI のドリフト速度の比較

ケオグラム表示している。この図のように、TEC 減少領域が南西伝搬している時間と E 領域エコー位置のドップラー速度の成分との対応例が観察できた。

次に F 層と E 層のドリフト速度の比較を図 5 に示す。これらは MU レーダー多ビーム観測と LTPR バイスタティック観測から求めた。F 層のドリフトの向きは概ね北西であるが、23 時以降からは高度方向に見ると不規則な波面を持つ様子がわかる。一方 E 層のドリフト速度は 22 時頃までは概ね北西を向いているが、22 時以降、風速場が激しく変動している様子が観察された。

4 まとめ

2007 年 5 月 ~ 9 月の期間、MU レーダー、酒田 LTPR、新潟 LTPR 受信専用システムによって同一磁力線上の E-F 領域 FAI の同時観測を行った。

酒田・新潟 LTPR バイスタティック観測から、E 領域において広範囲なエコー分布を求め、MU レーダーによる F 領域イメージング観測との比較から、E-F 領域 FAI の空間構造を詳細に比較した。さらに GPS - TEC 観測による中規模 TID との対応関係を調べた。

E-FAI は高度 100km 付近で磁力線直交線上に東西に広がった分布と北西-南東構造を持つ分布が観測され、様々な LTPR イメージング観測によってドップラー速度が混ざっている様子が観察できた。

F-FAI は北西-南東に伸びる長い波面状構造を持つ。また波面は空間スケールが 10 - 30km の様々なドップラー速度が混ざる小領域から形成され、少領域は北西へ伝搬していく様子が今回の MU レーダーイメージング観測によってさらに明らかにされた。

E 層と F 層でスケールの違いが指摘されていたが、今回の観測では F-FAI にも E-FAI と同程度 (数 10km スケール) の細かな構造が発見され、両者の空間分布は E-FAI と F-FAI が隙間を埋めるように分布する例が多く観測された。これらの結果は、外部電場に対してできる分極電場の向きが E 層と F 層で 90 度違うことが考察として考えられるが、両者の相互関係についてさらなる解析が期待される。

参考文献

[1] S. Saito, M. Yamamoto, H. Hashiguchi, and A. Maegawa, Observation of three-dimensional structure of quasi-periodic echoes associated with mid-latitude sporadic-E layers by MU radar ultra-multi-channel system *Geophys. Res. Lett.*, *33*, L14109, 2006.

[2] D. L. Hysell, Radar imaging of equatorial F region irregularities with maximum entropy interferometry *Radio Science*, *31*, 1567-1578, 1996.

[3] Susumu Saito, Mamoru Yamamoto, Hiroyuki Hashiguchi, Akinori Maegawa, and Akinori Saito, Observational evidence of coupling between quasi-periodic echoes and medium scale traveling ionospheric disturbances *Annales Geophysicae*, 2007

[4] D. L. Hysell, R. F. Woodman, Imaging coherent backscatter radar observations of topside equatorial spread F *Radio Science*, *32*, 2309-2320, 1997.