

レーダーによる中緯度 E/F 領域 FAI の観測

山本 衛 (京都大学宙空電波科学研究センター)

1. はじめに

京都大学宙空電波科学研究センターでは、MU レーダーを初めとした観測によって、中緯度域の電離圏イレギュラリティ(Field-Aligned Irregularity = FAI)の振舞いを明らかにしてきた。滋賀県甲賀郡信楽町(北緯 34.9 度, 東経 136.1 度, 磁気緯度 25 度)において 1984 年から運用を続けて来た MU レーダーは、周波数 46.5 MHz のモノスタティック・ドップラー・レーダーであり、直径約 100m の略円型アクティブ・フェーズド・アレイ・アンテナによって高速のビーム走査が可能である。MU レーダーによる FAI 観測においては、アンテナビームを北へ天頂角 50~60 度の方向へ向けて地球磁力線に直交させることによって、レーダー波長の半分(3.2 m)のスケールの FAI からの反射エコーの観測が可能となる。従来、磁気赤道域やオーロラ帯に比べて比較的「静か」であるとされていた中緯度域においても、活発な FAI が存在することが明らかになってきた。

2. E 領域 FAI

電離圏 E 領域からの FAI エコーは、E 領域高度の日没後と日出後の時間帯に多く現れる(図 1 参照)。また、エコーの出現頻度は夏季に多く冬季に少ないことも報告されている。このうち主に日出後から午前 10 時頃までの時間帯に現われるエコーは、発生高度が 90~100 km であって時間的に継続的に現れることから、「連続エコー(Continuous Echo)」と呼ばれ、平均エコー強度は大きくない。一方、日没後に観測されるエコーは、連続エコーに比べてエコー強度の最大値が極めて大きいとともに、時間・高度変化が大きいという特徴を持つ。このエコーは主に 100 km 以上の高度に現れ、エコー強度が 5~15 分の周期で変化することから、「準周期エコー(Quasi-periodic Echo)」と呼ばれる。準周期エコーは、観測ビーム内においてエコーの出現レンジが時間とともにレーダーに向かって近づいて来るといった興味深い振舞いを示すことから、その空間構造と発生機構を明らかにするべく研究が行われてきた。

E 領域 FAI の観測は、MU レーダーの他小型レーダーを用いて行われてきた。初期には MU レーダーの北方約 40km の地点に米国 SRI International の FAR (Frequency Agile Radar)を設置し MU レーダーとの同時観測から準周期エコーの水平構造が研究された。1996 年と 2002 年に行われた、宇宙科学研究所の観測ロケット観測と地上観測装置を組み合わせた SEEK (Sporadic-E Experiment over Kyushu 2)においても、FAI エコーの検出には種子島からの小型 VHF レーダー観測が利用された。信楽 MU 観測所においても、2000 年に、下部対流圏プロファイラーレーダー (Lower Thermosphere Profiler Radar = LRPR)を設置して、E 領域 FAI の長期観測や流星エコーを用いた中性風速と FAI の比較を実施している。E 領域 FAI の準周期エコーの

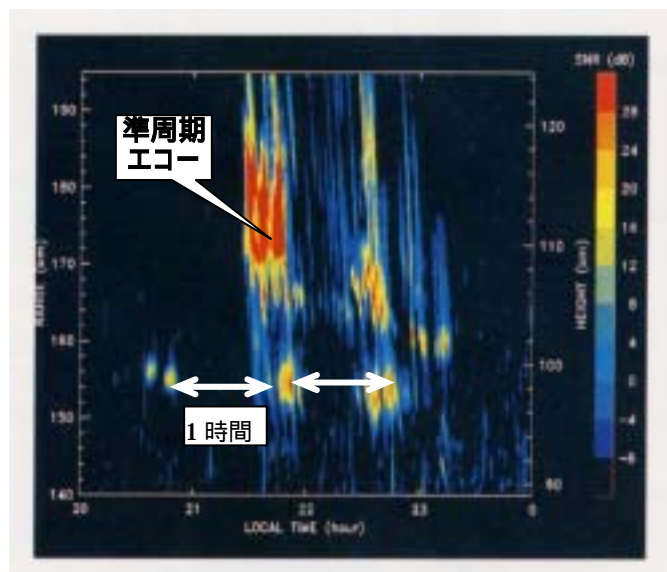


図 1 MU レーダーで観測された E 領域 FAI エコー

発生については、 E_s 層中の電子密度の不規則構造に中性風速が作用して分極電界が生じ、その反映として準周期構造が現れると考えているが、その 3 次元空間構造や中性風との関連などについての理解について更に研究を進めたい。また図 1 に示すように FAI エコーの出現には 1 時間程度の周期性も見られるが、まだ深い理解は得られていない。

2. F 領域 FAI

MU レーダーによる F 領域 FAI の観測では、最下層の波動構造の上部に数 100~km 規模の巨大な「泡(plume)」が成長すると言うダイナミックな空間構造が発見されている。F 領域 FAI のエコー強度は比較的弱いため、小型レーダーでは観測困難であり、現在まで中緯度域で F 領域 FAI を詳しく観測できる装置は MU レーダーをおいて他にない。中緯度 FAI エコーはスプレッド F 現象との相関が高く、太陽活動度と逆相間の関係を示すことが知られている。また MU レーダーの IS 観測との切り替え観測から、FAI エコーは、F 領域電離圏の高度が上昇するとき電子密度最大高度よりも下の高度域に発生することが明らかになっている。更に 630nm 大気光や GPS 受信機網から得られる TEC 水平分布に現れる波状構造と MU レーダーで観測される FAI エコーの相関も高い。F 領域 FAI についても、中性大気中の重力波による seeding 効果がしばしば指摘されるが、観測的な証拠は不十分なままであり、今後の研究進展が期待される。

2. E 領域 F 領域 FAI の同時観測

中緯度電離圏における FAI 発生に関しては、上述のように分極電界の作用がクローズアップされている。電離圏内では、分極電界は地球磁力線に沿って数百 km 以上にわたってほとんど減衰なしに伝播しうするため、当然 E 領域 FAI と F 領域 FAI の間には相互の関係が予想される。しかしながら、この相互関係の厳密な観測は大きな困難を伴っている。一つは F 領域 FAI エコーが比較的微弱であるため、MU レーダークラスのレーダーを用いなければ十分な感度の観測が不可能なことである。MU レーダーを用いれば E/F 領域両方で磁力線に直交する方向の観測は可能であるが、それぞれの領域を通る磁力線は異なってしまう(図 2 参照)。

そこで今回、2004 年 5~8 月の期間に、信楽 MU 観測所の LTPR を山形県酒田市に設置し、MU レーダーの F 領域 FAI 観測領域を通る磁力線上に位置する E 領域 FAI を 2 つのレーダーで同時観測することを計画している。現在までに酒田市におけるレーダー観測場所を確保済みであり、無線局免許の取得にむけて作業を進めている。中緯度域において今まで明らかではなかった、電離圏 E 領域と F 領域の電界を通じた相互作用の実態が明らかにされると期待される。また電離圏は下層大気から流入する大気波動によって大きな影響を受ける。本研究の成果は、地球大気の力学的な上下結合の新たな様相を明らかにすることにつながる点で意義が大きい。

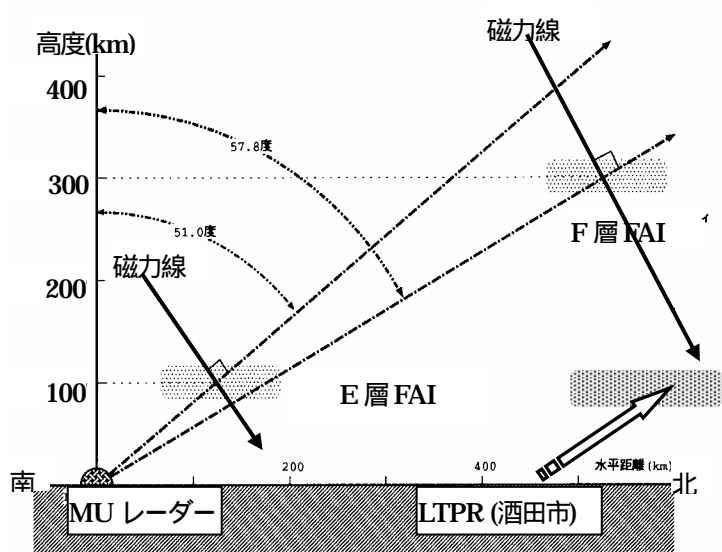


図 2 同一磁力線上の E・F 領域 FAI 同時観測概念図