

衛星ビーコン観測による電離圏大規模波動構造と

赤道スプレッド F 現象の観測

山本 衛・Smitha V. Thampi (京都大学生存圏研究所)

大塚雄一(名古屋大学太陽地球環境研究所)

津川卓也・上本純平・石井 守 (情報通信研究機構)

Roland T. Tsunoda (SRI International)

1. 背景

電離圏には様々な時間・空間スケールを持つ波動・擾乱現象が存在する。赤道スプレッド F 現象 (Equatorial Spread-F、ESF と略記、プラズマバブルとも呼ばれる) は電離圏の最も強い擾乱の一つであり、太陽活動度の活発期に増大する。ESF は、磁気赤道付近の日没後の電離圏下部に生じた密度低下域が、レイリー・テラー不安定によって拡大しながら高度千 km 以上まで急速に拡大する現象であり、電離圏擾乱の中で最も活発な現象として赤道低緯度電離圏研究のホットトピックであり続けてきた。しかしながら ESF を誘発する「種」が未解明で、日々変動の予測ができない。更に全球的には、ESF 活動度には大きな経度依存性があり、特にアフリカ地域で特異的に発生頻度が高いことも未解明である。これらの諸点でブレークスルーが進めば、社会に貢献するところが極めて大きいため、世界的に研究推進の機運が高まっている。

ESF は電離圏を通過する電波伝搬に大きく影響する。GPS 測位は、民間航空管制への応用が始まるなど社会インフラとして重要性が高まっているが、電離圏擾乱によって測位精度が低下したり測位ができなくなったりという悪影響が懸念されている。また高度 400 km 以上の電離圏は、国際宇宙ステーションを含む諸衛星が飛翔する領域である。電離圏は、衛星の周辺環境さらには新たな人類生存環境としても重要性が高まっている。

京都大学生存圏研究所 (以下では RISH) では、インドネシア共和国コトタバに位置する赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar; EAR) を用いて ESF を研究してきた。現在では、名古屋大学太陽地球環境研究所 (以下では STEL) や情報通信研究機構 (以下では NICT) によって、タイ・インドネシア・ベトナムなどに広がる電離圏観測網も整備されている。本研究では、我々のこれまでの研究を概観するとともに、最近の研究トピックである ESF の日々変動に対する研究計画を紹介する。

2. 赤道スプレッド F 現象の観測例と日々変動のモデル

ESF が日々変動を引き起こす要因について、現在、以下の 3 つのモデルが提起されている。

モデル 1. 「赤道低緯度電離圏の南北半球対称性」: ESF の発生には日没に伴って発生する強い分極電界が必要であり、電離圏の南北半球間の対称性が高いとき、分極電界が強まり ESF 発生に至る。この機構は ESF 頻度の季節変化の説明として有効であることが知られており (Nishioka et al., 2008)、インドの衛星ビーコン観測からは、電離圏全電子数 (Total Electron Content; TEC) の南北半球対称性と ESF の発生の相関を利用した ESF 発生予報が試みられている (Thampi, et al., 2006)。南北半球対称性が乱れる要因として、中性大気 (= 電離がなく電気的中性を保っている大気成分) の南北風が考えられているが、低緯度域の熱圏風の観測例はほとんどない。

モデル 2. 「Large-scale wave structure (LSWS)」: LSWS は電離圏 F 領域下部に現れる、電子密度分布が東西波長数百 km で上下に波打つという波状構造であり、ESF 日々変化との相関が良好であるとされる (Tsunoda, 2005)。LSWS の発生・成長に関する理論的基盤としては、中性風速シアに伴う collisional shear 不安定が提案されている (Hysell et al., 2004)。ただし観測例が非常に少ないという、解決すべき問題が残されている。

モデル 3. 「中性大気波動」: ESF 発生の日々変動は、下層大気から上方伝搬してきた中性大気中の大気波動 (おそらく大気重力波) が電離圏 F 領域下部を変調することによるという説が以前より唱えられている (Kelley et al., 1981)。統計による関連付けは行われている (Ogawa et al., 2009) が、直接的な証拠がまだまだ不十分である。

以上はそれぞれ特徴ある説ではあるが、圧倒的なコンセンサスを得たものはまだない。

3. これまでの研究成果

図 1 に EAR による FAI 観測の例を示す。EAR の多ビーム観測機能を活用することで、FAI の時間変化と空間構造の分離が可能となった。図 1 の点線で囲まれた範囲の FAI エコーは観測領域内で発生して成長しながら東向きに伝搬して行く。この FAI の発生時刻は日没直後 (図の最西側ビームの Terminator 線のすぐ右側で発生) である。EAR 観測領域内で生じた ESF に限った統計解析を行うことによって、通常の ESF の発生が、磁気赤道付近の F 領域高度の日没に極めてよく一致することが明らかにされている (Yokoyama et al., 2004)。

ESF 日々変動の解明に向けて、様々な取り組みが始まっている。特筆すべきは、米国が 2008 年に打上げた衛星 C/NOFS (Communication/Navigation Outage Forecasting System) である。同衛星は「ESF が通信・測位に与える悪影響の予測の研究」を主任務として、地理緯度範囲 $\pm 13^{\circ}$ 、高度 400~850 km の軌道

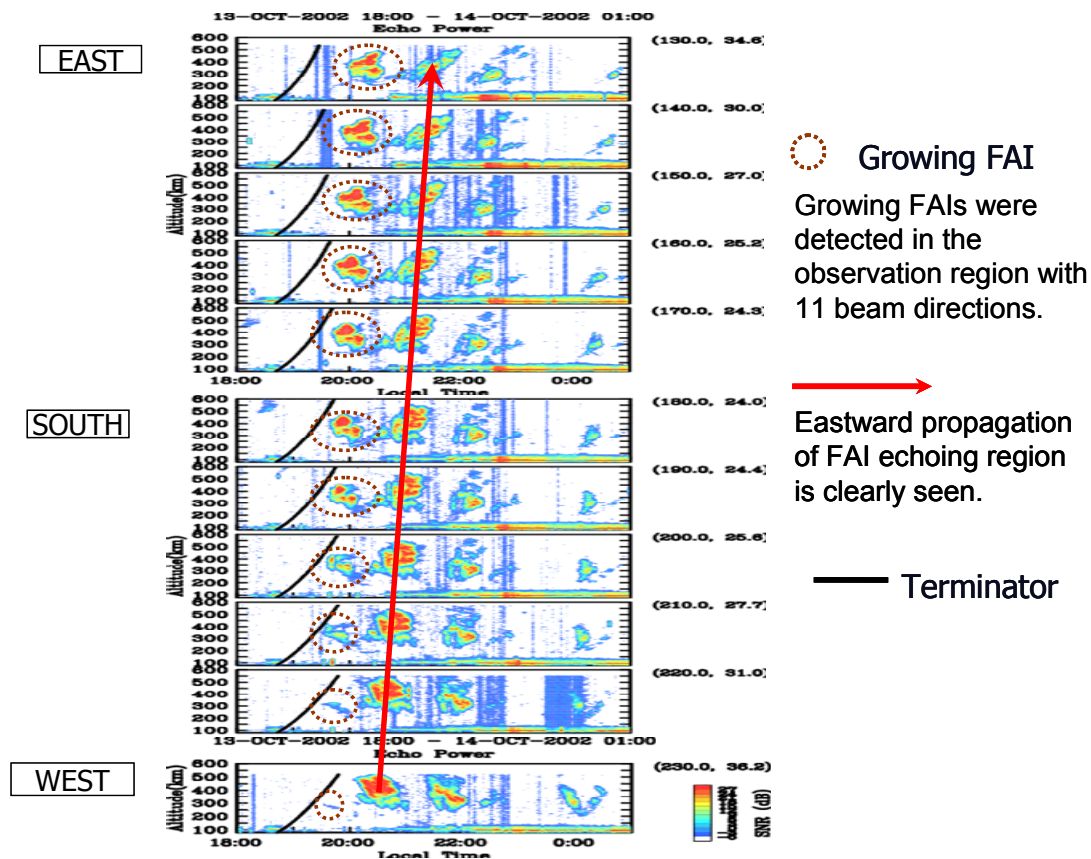


図1 EAR 多ビーム観測で捉えられた FAI エコーの例。点線で示すエコーは EAR 観測領域の日没直後に発生し、成長しながら東に伝搬する。他の FAI エコーは、観測領域の西側から侵入してきたものである。

上で観測を行っている。RISH・STEL・NICT が東南アジア域に構築した地上観測網との協同によって、ESF 日々変動の解明が期待される。また最近では、RISH では極めて安価かつ高性能の衛星ビーコン観測用デジタル受信機 GNU Radio Beacon Receiver (以下では GRBR) が開発されており (Yamamoto, 2008)、東南アジア域で実際の観測を開始し、急速に研究成果を挙げている。図2に GRBR を用いてベトナム・バクリウで観測された C/NOFS 衛星利用の TEC 観測と EAR サイトにある STEL の VHF レーダー観測の比較を示す。C/NOFS 衛星の飛行にそって観測された TEC から、経度約 5 度 (約 500 km) の東西波長を持つ大規模な電子密度構造が観測される、これは上記のモデル 2 で言う LSWS を捉えたものと考えられる。この LSWS に対応して、VHF レーダーによって ESF エコーが観測された (Thampi et al., 2009)。

4. 観測網の充実

図3にインドから太平洋にかけての ESF 観測点の分布を示す。ベトナム・タイ・インドネシアの観測点は、上記のように RISH・STEL・NICT の整備による。このうち NICT のラジオゾンデ網は SEALION (South East Asia Low Latitude

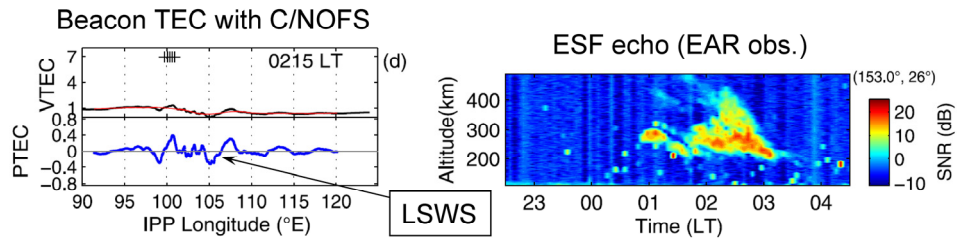


図2 C/NOFS 衛星利用のビーコン観測（ベトナム・バクリウ）で得られた LSWS（左図）。同時にインドネシア・コトタバンの VHF レーダーで強い ESF エコーが観測された（右図）。

Ionosphere Observation Network）と呼ばれている。STEL はチェンマイ（タイ）とコトタバン（EAR サイト）にファブリペロー干渉計を設置して熱圏風の観測を、今まさに始めようとしている。これらに加えて、米国 SRI International では太平洋上の島々に VHF レーダー及びイオノゾンデ各 1 台と数台の衛星ビーコン受信機からなる観測網を構築中であり、2010 年にはインド南端とホーチミン（ベトナム）に衛星ビーコン受信機を設置予定である。インドには電離圏の研究者が多くおり、観測研究が盛んである。本研究では、GRBR 観測点を数箇所追加することによって観測網を拡充し、図 3 に示すように、経度範囲約 100 度×緯度範囲約 20 度（磁気赤道の周辺±10 度）に広がる地上観測網を完成しようとしている。ESF の発生頻度がアフリカの経度域において特異的に大きいことから、この解明に向けた研究努力が米国の研究者を中心に始められている。本研究では、関係グループと提携してアフリカにも GRBR 観測点を設置することを目指している。

以上示したように、GPS 測位精度の悪化などの点で社会的な要請が高い ESF の日々変動の解明に向けて研究強化が進んでいる。本研究では、RISH・STEL・

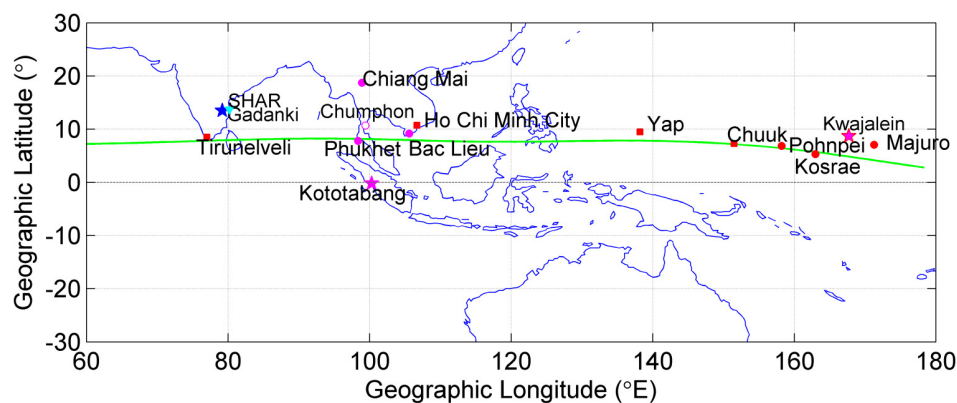


図3 インドから太平洋にかけての ESF 観測地上観測網。タイ・ベトナム・インドネシアを中心として RISH・STEL・NICT による観測網が構築されている。太平洋上の観測点は米国 SRI International による。インドの研究グループによる観測研究も盛んに行われている。

NICT の協同観測、さらには国際研究協力によってこの問題にチャレンジして行く。

参考文献

- Hysell, D. L., and E. Kudeki, Collisional shear instability in the equatorial F region ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **109**, A11301, doi:10.1029/2004JA010636, 2004.
- Kelley, M., M. Larsen, C. LaHoz, and J. McClure, Gravity Wave Initiation of Equatorial Spread F: A Case Study, *J. Geophys. Res.*, **86**, 9087-9100, 1981.
- Nishioka, M., A. Saito, and T. Tsugawa, Occurrence characteristics of plasma bubble derived from global ground - based GPS receiver networks, *J. Geophys. Res.*, **113**, A05301, doi:10.1029/2007JA012605, 2008.
- Ogawa, T., Y. Miyoshi, Y. Otsuka, T. Nakamura, and K. Shiokawa, Equatorial GPS ionospheric scintillations over Kototabang, Indonesia and their relation to atmospheric waves from below, *Earth Planets Space*, **61** (4), 397-410, 2009.
- Thampi, S. V., S. Ravindran, T. K. Pant, C. V. Devasia, P. Sreelatha, and R. Sridharan, Deterministic prediction of post - sunset ESF based on the strength and asymmetry of EIA from ground based TEC measurements: Preliminary results, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L13103, doi:10.1029/2006GL026376, 2006.
- Thampi, S. V., M. Yamamoto, R. T. Tsunoda, Y. Otsuka, T. Tsugawa, J. Uemoto, and M. Ishii “First observations of large-scale wave structure and equatorial spread F using CERTO radio beacons on the C/NOFS satellite”, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L18111, 2009.
- Tsunoda, R. T., On the enigma of day - to - day variability in equatorial spread, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L08103, doi:10.1029/2005GL022512, 2005.
- Yamamoto, M., Digital beacon receiver for ionospheric TEC measurement developed with GNU Radio, *Earth Planets Space*, **60** (11), e21-e24, 2008.
- Yokoyama, T., S. Fukao, and M. Yamamoto, “Relationship of the onset of equatorial F region irregularities with the sunset terminator observed with the Equatorial Atmosphere Radar” *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L24804, 2004.