

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 3日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22403011

研究課題名（和文） インド・東南アジア・太平洋の広域観測による

赤道スプレッドF現象の日々変動の解明

研究課題名（英文） Study of day-to-day variability of equatorial Spread-F based on large-area observations over India, southeast Asia, and Pacific

研究代表者

山本 衛（YAMAMOTO MAMORU）

京都大学・生存圏研究所・教授

研究者番号：20210560

研究成果の概要（和文）：

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、近年の高度な衛星利用、特にGPS測位に悪影響を与え得る。本研究では、未だ謎の深いESFの日々変動を中心として、アジアから太平洋にわたる広域に各種のレーダー・大気光観測装置・衛星ビーコン受信機等による観測網を構築して国際共同研究を展開した。ESFの日々変動に関して、午後の時間帯に発生する波長数百kmの大規模波動構造（Large-Scale Wave Structure; LSWS）が日没と共に振幅を増大し、ESF発生に結びつく様子を見出した。また太陽活動度が低い時期には、夜半過ぎにESF類似の現象が発生することを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Equatorial Spread-F (ESF) is a one of the most intense ionospheric disturbance that causes severe scintillation to the satellite-ground communications, and degradation of the GPS locations. In this study we deployed large-area observation network of the ionosphere from Asia and Pacific regions by means of radars, nightglow imagers, and satellite-ground beacon receivers. We investigated yet-unknown day-to-day variability of ESF, and found that the ESF is generated from the enhanced Large-Scale Wave Structure (LSWS) of the ionosphere. We also found detailed behavior of ESF at post-midnight period that enhances under the low-solar conditions.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2011年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2012年度	1,400,000	420,000	1,820,000
総計	13,000,000	3,900,000	16,900,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：赤道スプレッドF現象・衛星ビーコン観測・アジア太平洋・国際共同研究

1. 研究開始当初の背景

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。それらは電離圏を通過する電波伝搬に大きく影響する。例えばGPS測位は、民間航空管制に応用されるなど重要性が高まっているが、電離圏擾乱に

起因する精度低下が深刻な問題である。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もあり、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。

赤道スプレッドF現象 (Equatorial Spread-F;

以下では 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、例えば VHF レーダーで観測できる。ESF は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。また ESF には太陽活動度への依存性が顕著であること、磁気嵐に呼応して発生することなどが知られている。ESF の動態が更に明らかになり、発生予測の点でブレークスルーが進めば、GPS 測位を利用した次世代の航空管制や高度な衛星システムの安定運用等、社会に貢献するところが極めて大きい。以上のような背景のもとで、本研究では ESF を中心として、低緯度電離圏の構造と変動について多角的に研究を進めた。

2. 研究の目的

京都大学生存圏研究所がインドネシア西スマトラ州で観測を続ける赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar; EAR)、名古屋大学太陽地球環境研究所が展開する大気光イメージャとファブリ・ペロー干渉計 (FPI と略記)、(独) 情報通信研究機構がタイ・ベトナム等に展開するイオノゾンデ観測も SEALION、研究代表者ら開発してきた衛星ビーコン受信機網を活用し、東南アジア域中心とする国際的な共同観測によって未解明の ESF 日々変動の発生機構を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

東南アジアのタイ・インドネシア・ベトナムを中心として整備してきた電離圏観測網に、米国のグループ他が展開する観測網を追加することで領域を飛躍的に拡大し、インドー東南アジアー太平洋にわたる電離圏の変動と ESF の発生状況を国際共同研究した。独自開発したデジタルビーコン受信機 GRBR (GNU Radio Beacon Receiver) を増設し、低緯度観測に特化した C/NOFS 衛星、あるいは FORMOSAT-3/COSMIC 等の極軌道衛星からのビーコン波を利用して電離圏 TEC を観測した。本研究で構築された広域観測網の広がりを図 1 に示す。これらの観測と研究は、同時期に実施された文部科学省科学技術戦略推進推進費 (国際共同研究の推進)「インドネシア宇宙天気研究の推進と体制構築」(2010~2012 年度、代表：山本衛) が実施した EAR による低緯度電離圏の長期連続観測と協同して推進された。

4. 研究成果

(1) ESF 日々変動の要因

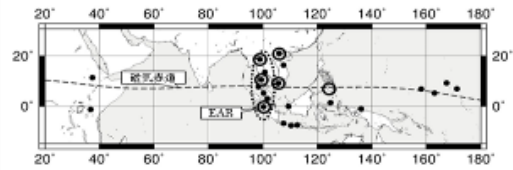


図 1 広域観測網の水平配置図。衛星ビーコン受信機観測点を小さな●で示し、EAR/SEALION/OMTI の配置を大きな○で示す。

日没直後に発生する ESF については、従来は毎日の日没前後に発生する Pre Reversal Enhancement (PRE) と呼ばれる電離圏の高度上昇によって発生するものと考えられてきたが、実際の ESF 発生には日々変動がある。日々変動の説明としては以下の 3 つのモデルが提唱されているが圧倒的な支持を得たものはない。

モデル 1 「赤道低緯度電離圏の南北半球対称性」: 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 発生に至ると考える。南北対称性は ESF の季節変化の原因とされるが、日々変動に対する検証は少ない。南北対称性が乱れる原因として中性大気 (電離がなく電気的中性を保っている大気成分) の南北風が指摘されている。

モデル 2 「Large-scale wave structure (LSWS)」: LSWS は電離圏 F 領域下部に現れる東西波長数百 km の電子密度の波状構造であり、ESF 日々変動との相関が良いとされる。LSWS の発生・成長の理論基盤として中性風速シアに伴う collisional shear 不安定が提案されている。

モデル 3 「中性大気波動」: ESF 日々変動が、下層大気から上方伝搬して来る中性大気波動 (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。統計による関連付けの例はあるが直接的な証拠がまだ不十分である。

上記のうちモデル 2 に関して、LSWS はイオノゾンデ等による検出が困難で観測例が希少であったが、本研究開始までの段階で、地上のビーコン観測受信機 GRBR と C/NOFS 衛星を利用した TEC 観測が LSWS 研究の有力な手段となることが明らかになっていた。そこで本研究では、GRBR 観測網を用いた LSWS の解明を主たる研究対象とした。

まず論文⑩では、太平洋の磁気赤道付近に東西に並ぶ Pohnpei, Kosrae, Majuro 各島に GRBR を設置し、日没前後の TEC 値の変動を捉えて LSWS の振幅が日没後に増大する様子を明らかにした。Pohnpei に設置された HF レーダーによって測定された電離圏高度と比

較を行っている。2009年9月12日の観測例では、日没後の電離圏上昇 PRE が観測されなかったにもかかわらず、TEC 値で捉えられた LSWS の増大に呼応して ESF が発生した事例を報告した。イベント解析ではあるが、ESF の発生に関して PRE よりも LSWS の効果が重要である可能性を示唆しており、上記のモデル2を強化する結果を得た。

続いて論文⑦では、ESF の日々変動のモデル2に取り上げられる LSWS について、ベトナム南部の Bac Lieu, Ho Chi Minh, Nha Trang に設置された GRBR をもとに詳しい解析を実施した。解析例においては LSWS の発生時刻は午後の時間帯で太陽天頂角が 85 度程度の状況である。Bac Lieu のイオノゾンデ (SEALION 観測網に含まれる) から、日没前後の電離圏の上昇つまり PRE の発生が確認された。LSWS は PRE の時間帯に振幅を増大し、ESF の発生につながっていく。ESF に伴うビーコン電波のシンチレーションは、LSWS が東に向かって減少していく経度帯に特徴的に発生していた。これらの結果は従来の研究結果を支持するものであるが、LSWS の発生時刻が日没のはるか以前であることが確認された点が新しい。ESF の発生シナリオとしては、下層大気で発生した大気重力波が上方伝搬して電離圏に LSWS を形成し、これが ESF につながるという見方を示した。

衛星ビーコン観測の問題点のひとつは、TEC の絶対値の推定手法である。論文④では GRBR 観測網からの C/NOFS 衛星観測の際の基本となる、データ解析手法を確立した。ビーコン観測からの直接の観測量は TEC 値の相対変動値であり、絶対値への変換を行うためには観測データのオフセット量を正しく推定することが必要である。従来から有効とされている手法は、隣接した2つの受信機が同領域の TEC を測定するとき、測定値が一致すると仮定して行う「2地点法」である。本論文では、これを C/NOFS 衛星のビーコン観測に適用したとき、間違った結果が得られる場合があることを明らかにした。C/NOFS 衛星から求められる TEC は低緯度地域の経度分布であるが、「東西波長数百 km の大振幅の変動が現れる」ことから隣接する受信機が同一の TEC を計測するという仮定が成り立たない。TEC 経度分布は、一方で 1000km 以上にわたる観測領域全体にわたってはほぼ一定あるいは直線的な分布を示すことが多い。そこで論文④では、1つの受信機データのみを用いるが、TEC 経度分布が緯度に対して1次元分布すると仮定してオフセット量の推定する「1地点法」を開発した。この手法による TEC 絶対値の推定結果をイオノゾンデと C/NOFS 衛星から求めた TEC 推定値と比較することで、妥当性を検証した。この手法は、設置間隔が広い GRBR 観測網を用いた

C/NOFS 衛星観測に非常に適している。実際の解析例から、日没前後に現れる LSWS の東西波長が 300~600km であることを明らかにした。またひとつの LSWS 波形を3つの離れた受信点から再現することに成功し、現象の緯度方向の広がりが増大された。また LSWS が ESF 発生に結びついた例については、ESF に伴うシンチレーションが、TEC が東向きに減少する領域に集中する様子を明らかにした (図2)。

論文⑤では、ベトナム南部の Bac Lieu (北緯 9.2 度、東経 105.6 度) に設置された GRBR による LSWS と ESF の発生状況について詳細に報告した。午後から日没の時間帯にかけて LSWS が発生し、Bac Lieu 上空と東側の領域において ESF によるシンチレーションが観測された。一方でタイの Chumphon (北緯 10.7 度、東経 99.4 度) に設置された SEALION イオノゾンデ観測では ESF の発生はなかった。これから、ESF 発生領域が経度方向に比較的狭い地域に限られることが明らかとなった。論文①においては、イオノグラムに現れる多重反射エコー (サテライト・トレースとも呼ばれる) の形態を詳細に解析した。同時に得られた GRBR による LSWS 観測との比較から、イオノグラムの多重反射エコーが LSWS の形態を反映して発生するとの結論を得ている。

GRBR 観測網は、EAR のある東経 100 度付近では北から順に Chiang Mai, Bangkok, Chumphon, Phuket, EAR サイトと 5 地点が南北に位置しており、磁気緯度 ±10 度 (地理緯度では北緯 20 度から赤道まで) の領域をカバーしている。極軌道をもつ衛星を用いることで、C/NOFS 衛星とは異なり電離圏 TEC の緯度構造 (南北構造) を調べることができる。しかしながら TEC 絶対値の推定手法についての検討が未熟であった。論文④においては、C/NOFS 衛星を用いた経度構造 (東西構造) の特徴を利用することで、1地点からの

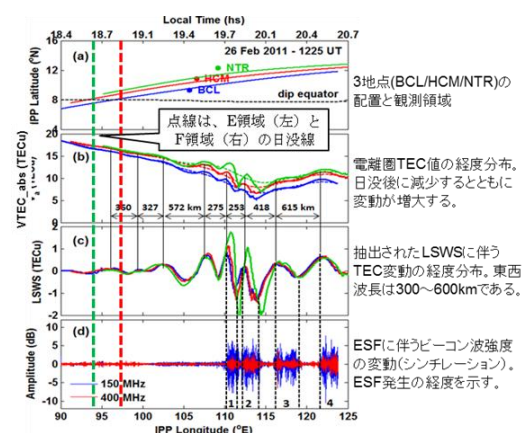


図2 C/NOFS 利用の衛星ビーコン観測 (ベトナム南部) による LSWS の経度構造と ESF の関連の観測例。(論文④)

データのみによるオフセットの推定が可能であった。しかしながら緯度±10度の範囲では TEC 値が全体として大-小-大という分布を示すことが明らかであって同様の手法は利用できなかった。そこで5地点からの TEC 推定値が緯度方向になめらかに連続するように5点のオフセット値を決める解析手法を開発した。またオフセット値の初期値を周辺に位置する GPS 受信機からの TEC 値を用いて事前に推定しておく手法も開発した。全体としては地理緯度で北緯 28 度から南緯 13 度までの広大な領域にわたる電離圏構造が得られ、南北半球の電子密度の増大が非対称性を示すことが明らかとなった。この解析手法によって、今後は電離圏の緯度構造と ESF の関連を精査することが可能となる。

以上まとめると、本研究では ESF 日々変動の原因としてモデル 2 の有効性を示すことができた。ただし他のモデルについての検証が途上である。今後は極軌道衛星を用いたモデル 1 の検証を進める必要がある。

(2) 夜半に発生する ESF

ESF の発生は通常は電離圏高度の日没直後に集中し、磁気嵐に伴う低緯度域への電界進入に伴う ESF 発生も知られている。ところが最近では、太陽活動度が低い時期に、真夜中以降の時間帯における ESF の発生が報告されている。論文⑨では、EAR による多ビーム観測とスマトラ島を中心とする GPS 観測結果をもとに真夜中以降に発生する ESF の性質を調べた(図 3)。中緯度の日本にある MU レーダーで観測される F 領域イレギュラリティエコーとの類似性が高く、エコー領域が西方に伝搬する(日没後の ESF が示す東方伝搬

とは逆である)。このタイプの ESF は真夜中付近で急激な高度上昇を伴って発生しその後下降に転じる。中緯度域に特有の中規模伝搬性電離圏擾乱 (Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbance; MSTID) と同様の空間構造を示すことが明らかとなった。発生原因として、真夜中付近の赤道向きの中性風速(収束流)が示唆された。このタイプの ESF について、さらに論文⑩では C/NOFS 衛星からの直接観測と EAR 観測の比較研究を実施した。C/NOFS 衛星が直接測定する電界が EAR 観測で見出される ESF の西方伝搬と整合的であること、EAR イレギュラリティエコーと C/NOFS が加速する電子密度の減少域がおおむね一致することが明らかにされ、真夜中過ぎの ESF が MSTID をきっかけとして発生している可能性が指摘された。しかしながら他の成因を示唆する結果も得られている状況である(論文③)。更に論文②により、真夜中過ぎの ESF の発生が太陽活動度と逆相関を持つことが確かめられた。

(3) 電離圏緯度構造の衛星観測

電離圏の空間構造を明らかにするために、630nm 大気光のイメージング観測は有効な手段である。大気光イメージング観測は主に地上から行われていたが、論文⑧では、FORMOSAT-2 衛星に搭載された光学観測器 ISUAL (Imager of Sprites: Upper Atmospheric Lightning) を使い、初めて 630nm 大気光のリム方向のイメージング観測に成功した。ISUAL は通常は天底観測を行っているが、2006-2008 年の 14 晩にリム観測を行った。その結果、赤道付近及び南緯 30 度付近の中緯度に大気光の増光帯が見られることが明ら

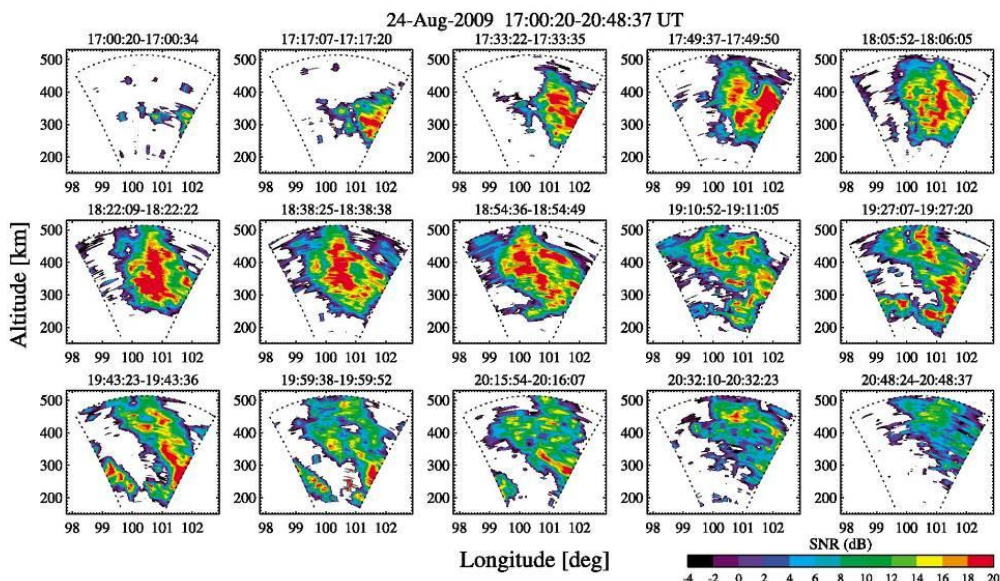


図 3 EAR 多ビーム観測で捉えられた真夜中過ぎの ESF の形状と時間変化。(論文⑨)

かになった。ISUAL の観測と同時刻・場所を観測していた FORMOSAT-3/COSMIC 衛星と CHAMP 衛星に電子密度の観測データと比較したところ、ISUAL の大気光増光領域と同緯度に電子密度の増大が観測された。

続いて論文⑫では、ISUAL を用いて 630nm 大気光のリム方向のイメージング観測を行い、初めて宇宙から、電離圏擾乱の一種である中規模伝搬性電離圏擾乱 (Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbance; MSTID) の観測に成功した。2007 年 5 月 16 日地方時 0 時付近のダーウィン上空におけるリム観測によって得られたデータを解析することにより、まず大気光発光強度の高度分布を推定し、発光のピーク高度が 220km であることを明らかにした。ISUAL による観測と同時刻において、ダーウィンに設置された全天大気光イメージャーによって 630nm 大気光のイメージング観測が行われ、水平波長約 300km で北東から南西にのびる波面をもち、北西方向に約 100m/s で伝搬する MSTID が観測された。この MSTID の水平構造から大気光変動の三次元分布をモデル化し、衛星リム観測により観測されるべき画像を生成した。この画像を ISUAL による観測画像と比較したところ、発光ピークの位置・形状が良く一致することが分かった。以上の結果は、衛星からの大気光観測によって電離圏の構造や MSTID を初めとする波動が観測可能であることを示すものであり、衛星からの大気光衛星観測が電離圏の三次元構造の推定に有効な観測手段であることを証明した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 27 件)

- ① Tsunoda, R. T., S. V. Thampi, T. T. Nguyen, and M. Yamamoto, On validating the relationship of ionogram signatures to large-scale wave structure, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 査読有, in press, doi:10.1016/j.jastp.2012.11.003, 2012.
- ② Otsuka, Y., K. Shiokawa, M. Nishioka and Effendy, VHF Radar Observations of Post-Midnight F-Region Field-Aligned Irregularities over Indonesia during Solar Minimum, *Indian Journal of Radio and Space Physics (IJRSP)*, 査読有, 41, 199-207, 2012.
- ③ Nishioka, M., Y. Otsuka, K. Shiokawa, T. Tsugawa, Effendy, P. Supnithi, T. Nagatsuma, and K. T. Murata, On post-midnight field-aligned irregularities observed with a 30.8-MHz radar at a low latitude: Comparison with F-layer altitude near the geomagnetic equator, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 117, A08337, doi:10.1029/2012JA017692, 2012.
- ④ Sudarsanam, Tulasi Ram, M. Yamamoto, R. T. Tsunoda and S. V. Thampi, On the application of differential phase measurements to study the zonal large scale wave structure (LSWS) in the ionospheric electron content, *Radio Sci.*, 査読有, 47, RS2001, doi:10.1029/2011RS004870, 2012.
- ⑤ Smitha V. Thampi, and M. Yamamoto, Evolution of plasma bubbles over Vietnam region observed using the CERTO beacon on 1 board C/NOFS satellite, *Indian Journal of Radio and Space Physics*, 査読有, 2011-SP-IJRSP-004, 41, 233-239, 2012.
- ⑥ Otsuka, Y., Seasonal and Local Time Variations of E-Region Field-Aligned Irregularities Observed with 30.8-MHz Radar at Kototabang, Indonesia, Special issue of *International Journal of Geophysics, "Low-latitude Mesosphere, Thermosphere and Ionosphere"*, 査読有, vol. 2012, 695793, doi:10.1155/2012/695793, 2012.
- ⑦ Tsunoda, R. T., M. Yamamoto, T. Tsugawa, T. L. Hoang, S. Tulasi Ram, S. V. Thampi, H. D. Chau, and T. Nagatsuma, On seeding, large-scale wave structure, equatorial spread F, and scintillations over Vietnam, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 38, L20102, doi:10.1029/2011GL049173, 2011.
- ⑧ Adachi, T., Y. Otsuka, M. Yamaoka, M. Yamamoto, K. Shiokawa, A. B. Chen, and R.-R. Hsu, First satellite-imaging observation of medium-scale traveling ionospheric disturbances by FORMOSAT-2/ISUAL, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 38, L04101, doi:10.1029/2010GL046268, 2011.
- ⑨ Yokoyama, T., M. Yamamoto, Y. Otsuka, M. Nishioka, T. Tsugawa, S. Watanabe, and R. F. Pfaff, On post-midnight low-latitude ionospheric irregularities during solar minimum: 1. Equatorial Atmosphere Radar and GPS-TEC observations in Indonesia, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 116, A11325, doi:10.1029/2011JA016797, 2011.
- ⑩ Yokoyama, T., R. F. Pfaff, P. A. Roddy, M. Yamamoto, and Y. Otsuka, On post-midnight low-latitude ionospheric irregularities during solar minimum: 2. C/NOFS observations and comparison with Equatorial Atmosphere Radar, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 116, A11326, doi:10.1029/2011JA016798, 2011.
- ⑪ Tsunoda, R. T., Bubenik D. M., Thampi, S. V., and Yamamoto, M., On large-scale wave structure and equatorial spread F without a

post-sunset rise of the F layer, Geophys. Res. Lett., 査読有, 37, L07105, doi:10.1029/2009GL042357, 2010.

- ⑫ Adachi, T., M. Yamaoka, M. Yamamoto, Y. Otsuka, H. Liu, C.-C. Hsiao, A. B. Chen, and R.-R. Hsu, Midnight latitude-altitude distribution of 630-nm airglow in the Asian sector measured with FORMOSAT-2/ISUAL, J. Geophys. Res., 査読有, 115, A09315, doi:10.1029/2009JA015147, 2010.

[学会発表] (計 44 件)

- ① 山本衛, 萩行憲輔, Tulasi Ram Sudarsanam, Roland Tsunoda, 東南アジア及びアフリカの衛星ビーコン観測から明らかにされた赤道スプレッドF現象の性質, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 幕張メッセ, 幕張, 2012 年 05 月 20-25 日
- ② Otsuka, Y., D. Fukushima, K. Shiokawa, M. Kubota, T. Tsugawa, M. Nishioka 他, Optical and Radar Observations of Ionospheric Irregularities in Indonesia and Thailand: Recent Results, The 1st Asia-Oceania Space Weather Alliance (AOSWA) Workshop, Chiang Mai, Thailand, February 22-24, 2012. (招待講演)
- ③ Otsuka, Y., K. Shiokawa, M. Nishioka, and Effendy, Post-midnight field-aligned irregularities observed with a VHF radar at Kototabang, Indonesia, American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2011, San Francisco, USA, December 5-9, 2011. (招待講演)
- ④ Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Nagatsuma, T. Tsugawa, S. Perwitasari 他, VHF radar and ionosonde observations of post-midnight irregularities in Indonesia, International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) 2011, Melbourne, Australia, June 28 - July 7, 2011. (招待講演)
- ⑤ 山本衛, 津川卓也, 長妻努, 大塚雄一, Roland Tsunoda, Sri Kaloka, 他, Study of equatorial Spread-F with GNU Radio Beacon Receiver (GRBR) network in Asia, Pacific and Africa, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 幕張メッセ, 幕張, 2011 年 5 月 22-27 日.
- ⑥ Yamamoto, M., S. V. Thampi, T. Tsugawa, T. Nagatsuma, Y. Otsuka, and R. Tsunoda, Study of equatorial Spread-F with satellite beacon network in Asia and Pacific regions, 2010 The Meeting of the Americas, Foz do Iguacu, Brazil, August 8-12, 2010. (招待講演)
- ⑦ Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Ogawa, and Effendy, VHF radar observations of nighttime F-region field-aligned

irregularities over Indonesia (invited), AGU 2010 Spring Meeting, Foz do Iguassu, Brazil, 8-12 August 2010. (招待講演)

- ⑧ Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Ogawa, and Effendy, VHF Radar Observations of Field-Aligned Irregularities in Indonesia (Invited), Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2010, Hyderabad, India, July 5-9, 2010. (招待講演)
- ⑨ Yamamoto, M., S. V. Thampi, T. Nagatsuma, M. Ishii, Y. Otsuka, K. Shiokawa, and R. Tsunoda, Network of satellite beacon experiment for the study of equatorial Spread-F for Asia and Pacific regions, International Beacon Satellite Symposium, Barcelona, Spain, June 7-11, 2010. (招待講演)

[その他]
ホームページ等

www.rish.kyoto-u.ac.jp/~yamamoto/KB10
www.rish.kyoto-u.ac.jp/isw/
www.rish.kyoto-u.ac.jp/digitalbeacon/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 衛 (YAMAMOTO MAMORU)
京都大学・生存圏研究所・教授
研究者番号：20210560

(2) 研究分担者

齊藤 昭則 (SAITO AKINORI)
京都大学・理学研究科・准教授
研究者番号：10311739
大塚 雄一 (OOTSUKA YUICHI)
名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授
研究者番号：40314025
橋口 浩之 (HASHIGUCHI HIROYUKI)
京都大学・生存圏研究所・准教授
研究者番号：90293943

(3) 連携研究者

塩川 和夫 (SHIOKAWA KAZUO)
名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授
研究者番号：80226092
石井 守 (ISHII MAMORU)
(独) 情報通信研究機構・電磁波計測研究センター・推進室長
研究者番号：20359003
丸山 隆 (MARUYAMA TAKASHI)
(独) 情報通信研究機構・上席研究員
研究者番号：80359017
斎藤 享 (SAITO SUSUMU)
(独) 電子航法研究所・航法システム領域・主幹研究員
研究者番号：40392716