

## 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24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20684021

研究課題名（和文） 低緯度電離圏不規則構造のレーダー・イメージング観測

研究課題名（英文） Radar imaging observations of the field-aligned irregularities at low-latitude ionosphere

研究代表者

大塚 雄一 (OTSUKA YUICHI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授

研究者番号：40314025

研究成果の概要（和文）： インドネシアにおいて VHF レーダーを用いて電離圏 E 及び F 領域の沿磁力線不規則構造 (Field-Aligned Irregularity; FAI) の連続観測を行い、FAI 発生頻度の地方時、季節及び太陽活動度依存性や伝搬特性、ドリフト速度などの統計的性質を明らかにした。特に、これまで研究されてこなかった、低太陽活動期に発生する真夜中過ぎ FAI の特性を明らかにし、その生成機構がプラズマバブルおよび中規模伝搬性電離圏擾乱に起因し得ることを示した。

研究成果の概要（英文）： We have analyzed E- and F-region field-aligned irregularities (FAIs) observed by a VHF backscatter radar with an operating frequency of 30.8 MHz in Indonesia and revealed statistically local time, seasonal, and solar activity variations of the FAI occurrence rates. Propagation characteristics and drift velocities of the FAIs are also investigated. Especially, we have studied the post-midnight F-region FAIs and suggested that the post-midnight FAIs are likely associated with either plasma bubbles or medium-scale traveling ionospheric disturbances (MSTIDs).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	13,000,000	3,900,000	16,900,000
2009年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
総計	17,400,000	5,220,000	22,620,000

研究分野：超高層大気

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：超高層物理学，地球電磁気，地球観測，リモートセンシング，電離圏

## 1. 研究開始当初の背景

赤道域電離圏における沿磁力線不規則構造 (Field-Aligned Irregularity; FAI) のレーダー観測は、1960年代から米国の研究者らを中心にペルー・ヒカマルカの大型レーダーを用いて行われてきた。2001年には、京都大学がインドネシア・スマトラ島に赤道大気レーダー (EAR) を建設し、アジア域で初めて赤道域の F 領域 FAI を観測した。EAR サイトは、地理的には赤道直下に位置するが、地磁気緯度は 10°S であり地磁気的には”低緯度”にあ

たる。

本研究代表者は、EAR サイトにおいて 2006年2月から VHF 帯 (送信周波数 30.8MHz) のレーダーを用いた E 領域及び F 領域 FAI の観測を行い、5-8 月の真夜中過ぎに発生原因が不明の F 領域 FAI エコーを発見した。このように真夜中過ぎに発生する FAI は、低緯度電離圏特有の現象と考えられるが、これまでこのような FAI に関する研究は世界的にも皆無であった。

## 2. 研究の目的

低緯度域に発生する電離圏 FAI の出現特性を明らかにし、その生成機構を解明することを目的とする。特に、インドネシアにおいて5-8月の夜半過ぎに出現するF領域FAIの発生メカニズムを解明することを目的の一つとする。

## 3. 研究の方法

インドネシアのコタバンにおいて、VHFレーダーによるE領域及びF領域FAIの連続観測を行い、以下の研究項目を実施する。

1) FAIの発生メカニズムを明らかにする上で背景のプラズマ密度構造との比較は重要である。VHFレーダーによる多ビーム観測によりFAIの空間構造を広範囲にわたって観測し、イオンゾンデ・データと比較することにより電離圏構造とFAIとの関係を調べる。

2) 赤道域においても中緯度においても電離圏E領域とF領域の電磁力的結合は非常に強く、その相互作用は各領域におけるプラズマ密度擾乱の発生に重要な役割を果たしていることが明らかになっている。本研究においても、VHFレーダーを用いたE領域FAIの観測を実施し、F領域FAIとの関連を調べる。

## 4. 研究成果

### (1) F領域FAIの発生頻度

これまでにVHFレーダーによって観測されたF領域FAIのデータを解析し、FAIエコー発生頻度の季節・地方時変化を調べた。本研究では、高度200kmから540kmまでのSN

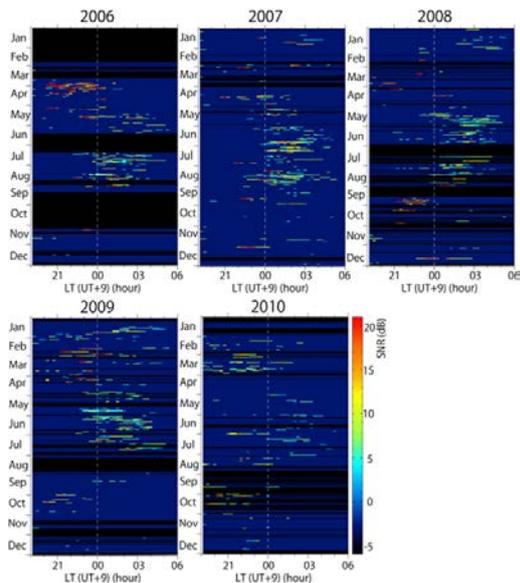


図1: インドネシア・コタバンにおいてVHFレーダーで観測された2006-2010年におけるF領域FAIエコーのSN比の地方時・季節変化。高度200kmから540kmのSN比を平均した。5-8月の真夜中過ぎにFAIエコーが頻繁に観測されていることが分かる。

比を平均した。図1に、南向きビームで得られたFAIエコー強度の季節・地方時変化を示す。図中の黒い部分は、データ欠測を表す。図より、FAIエコーは、2006年3-5月の真夜中前と2006年から2009年の5-8月における真夜中過ぎに頻繁に観測されていることが分かる。真夜中過ぎFAIの発生頻度は、太陽活動度が非常に低かった2007-2009年において高いことから、太陽活動度と逆相関があることが明らかになった。

### (2) 真夜中過ぎFAIと電離圏ピーク高度との関係

コタバンとほぼ同緯度にあり、磁気赤道に位置するタイのチュンポンに設置されたイオンゾンデ・データを活用し、電離圏F領域のピーク高度を調べた。その結果、5-8月の2100-0200LT付近にピーク高度が極大をもつことが明らかになった。このF層ピーク高度の季節・地方時変化は、FAIの発生頻度とよく一致しており、F層高度の上昇がFAIの発生に関連していると考えられる。F層高度が上昇すると、プラズマバブルの発生原因であるRayleigh-Taylor(R-T)不安定の成長率が大きくなる。しかし、通常、夜間においてプラズマのExBドリフトは下向きであるため、R-T不安定の成長率は負となり、不安定は成長しない。夜間において、不安定が成長するためには、重力によるドリフト速度 $g/\nu$  ( $g$ は重力加速度、 $\nu$ はイオンと中性大気の衝突周波数)が、下向きExBドリフトの大きさを上回る必要がある。本研究では、磁気赤道のチュンポンで観測されたF層ピーク高度の値

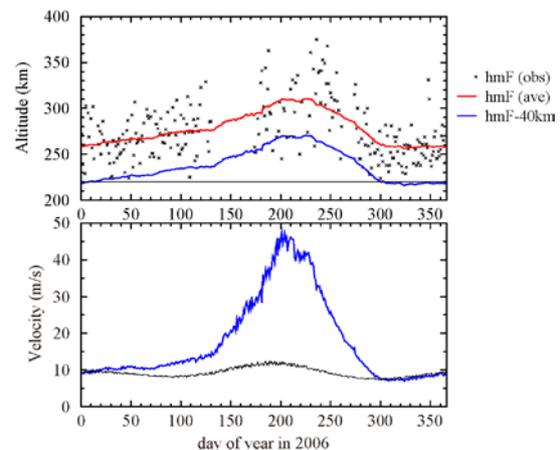


図2: (上) タイのチュンポンに設置されたイオンゾンデで観測されたF層ピーク高度の季節変化。×印は、00時における各日の観測値、赤線は、90日移動平均値を示す。(下) 重力によるドリフト速度の季節変化。青線は、F層ピーク高度より40km低い高度(上図の青線)における値であり、黒線は高度220kmにおける値である。

を用いて R-T 不安定が起こるか、定量的に調べた。その結果、平均的には 10-20m/s 程度である鉛直方向の ExB ドリフトに比較して、 $g/v$  が 5-8 月には大きくなることが明らかになった。この結果は、真夜中過ぎの FAI がプラズマバブルに起因するものであることを示唆している。

### (3) 真夜中過ぎ FAI の伝搬方向

5 方向のレーダー・ビームで観測された FAI の発生時刻の時間差から、FAI の東西方向の伝搬速度を求めた。図 3 に、2006-2010 年の 5-8 月に観測された真夜中過ぎ FAI の東西伝搬速度の頻度分布を示す。観測された真夜中過ぎ FAI のうち、46%は西向きに、14%は東向きに伝搬することが分かった。残りの 40%は、FAI 発生にビーム間の時間差が顕著で無く、伝搬速度が決められなかったものである。赤道域における F 領域プラズマのドリフト速度は、平均的には、夜間において東向きである。成長した後のプラズマバブルは、背景のプラズマとほぼ同じ速度で伝搬すると考えられることから、平均的には、プラズマバブルは夜間を通して東向きに伝搬するはずである。しかし、本研究の結果は、真夜中過ぎ FAI は西向きに伝搬するものが多いことを示しており、FAI がプラズマバブルに伴って発生しているという考え方に反する。一方、中緯度では、電離圏電子密度の波状構造である中規模伝搬性電離圏擾乱 (MSTID) に伴って FAI が発生している。この中緯度における MSTID 及び FAI は、北(南)半球において南西(北西)方向に伝搬する。真夜中過ぎの FAI が西方向に伝搬するものが多いことから、中緯度の MSTID 及び FAI がコトタバン(地磁気緯度 10 度)でも観測されている可能性が考えられる。

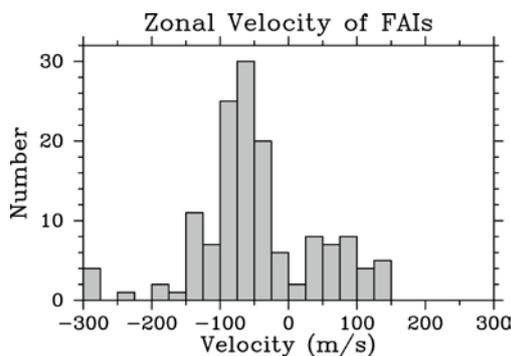


図 3: 2006-2010 年の 5-8 月に観測された真夜中過ぎ FAI の東西伝搬速度(東向きが正)の頻度分布。

### (2) E 領域 FAI

VHF レーダーによって観測された E 領域 FAI のデータを解析し、FAI エコー発生の高

度、季節、地方時変化を調べた。季節を夏(5-8 月)、冬(11-2 月)、分点時(3-4, 9-10 月)に分類して求めた、E 領域 FAI エコー発生頻度の地方時・高度変化を図 4 に示す。図より、FAI エコーは顕著な地方時依存性を示し、午前中(7-12LT)及び日没後から真夜中にかけて(18-24LT)に発生頻度が高いことが分かる。午前中に発生する FAI エコーは、時間とともに高度が下がる傾向が見られる。FAI エコーは、7LT において高度約 100km にあり、9LT では高度約 90km にあることから、FAI エコーが下降する位相速度は 5km/h と見積もられる。同様の傾向は、約 12 時間後の 19-24LT にも見られ、半日周期の大気潮汐波が FAI 発生に関係している可能性が示唆される。

図 5 に、南向きのレーダービームにおいて得られたドップラー速度の地方時・高度変化

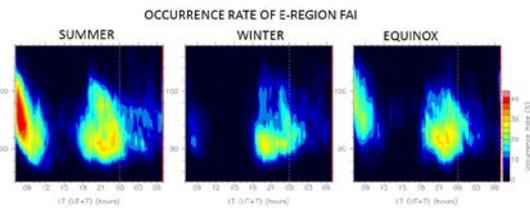


図 4: VHF レーダーで観測された 2007 年における E 領域 FAI エコー発生頻度の地方時・高度変化。左から、夏(5-8 月)、冬(11-2 月)、分点時(3-4, 9-10 月)の結果。

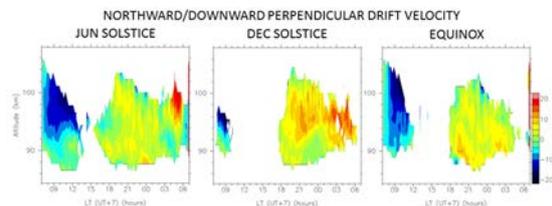


図 5: VHF レーダーで観測された 2007 年における E 領域 FAI エコーの磁力線直交北/下向きドップラー速度の地方時・高度変化。左から、夏(5-8 月)、冬(11-2 月)、分点時(3-4, 9-10 月)の結果。

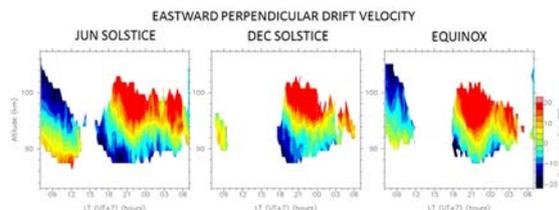


図 6: VHF レーダーで観測された 2007 年における E 領域 FAI エコーの東向きドップラー速度の地方時・高度変化。左から、夏(5-8 月)、冬(11-2 月)、分点時(3-4, 9-10 月)の結果。

を示す。ここでは、2007年一年間に得られたドップラー速度を平均した。また、東西に走査したレーダービームで得られたドップラー速度から磁力線直交東西成分を求めた(図6)。ドップラー速度は、日中において上向き、夜間では下向きとなることが分かる。また、ドップラー速度の東西成分は、高度94kmを境にエコー領域の上部と下部とで方向が異なることが分かる。エコー領域上部では、日中は西向き、夜間は東向きとなっており、F領域における電場によるExBドリフトと同様の傾向を示している。一方、エコー領域の下部では、ドップラー速度の向きは反転している。これらの結果は、低高度においてプラズマは、中性大気との衝突によってほぼ中性大気と同じ速度で動くが、高高度では衝突周波数が小さくなるため、電場によるExBドリフトの影響が強く表れるためと考えられる。

#### 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 8件)

- (1) Otsuka, Y. (2012), 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" in press (査読有り).
- (2) Otsuka, Y., K. Shiokawa, M. Nishioka and Effendy (2012), VHF Radar Observations of Post-Midnight F-Region Field-Aligned Irregularities over Indonesia during Solar Minimum, Indian Journal of Radio and Space Physics (IJRSP), 41, 199-207 (査読有り).
- (3) Otsuka, Y., N. Kotake, K. Shiokawa, T. Ogawa, T. Tsugawa, and A. Saito, Statistical Study of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances Observed with a GPS Receiver Network in Japan, Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere IAGA Special Sopron Book Series, 2011, Volume 2, Part 3, 291-299, DOI: 10.1007/978-94-007-0326-1\_21 (査読有り)
- (4) Balan, N., J. Y. Liu, Y. Otsuka, S. Tulasi Ram, and H. Luhr (2012), Ionospheric and thermospheric storms at equatorial latitudes observed by CHAMP, ROCSAT, and DMSP, J. Geophys. Res., 117, A01313, doi:10.1029/2011JA016903 (査読有り).
- (5) Yokoyama, T., M. Yamamoto, Y. Otsuka,

M. Nishioka, T. Tsugawa, S. Watanabe, and R. F. Pfaff (2011), On post-midnight low-latitude ionospheric irregularities during solar minimum: 1. Equatorial Atmosphere Radar and GPS-TEC observations in Indonesia, J. Geophys. Res., 116, A11325, doi:10.1029/2011JA016797 (査読有り).

(6) Yokoyama, T., R. F. Pfaff, P. Roddy, M. Yamamoto, and Y. Otsuka (2011), On post-midnight low-latitude ionospheric irregularities during solar minimum: 2. C/NOFS observations and comparisons with the Equatorial Atmosphere Radar, J. Geophys. Res., 116, A11326, doi:10.1029/2011JA016798 (査読有り).

(7) Makela, J., and Y. Otsuka (2011), Overview of Nighttime Ionospheric Instabilities at Low- and Mid-Latitudes: Coupling Aspects Resulting in Structuring at the Mesoscale, Space Sci. Rev., DOI 10.1007/s11214-011-9816-6 (査読有り).

(8) Thampi, S. V., M. Yamamoto, R. T. Tsunoda, Y. Otsuka, T. Tsugawa, J. Uemoto, and M. Ishii (2009), First observations of large-scale wave structure and equatorial spread F using CERTO radio beacon on the C/NOFS satellite, Geophys. Res. Lett., 36, L18111, doi:10.1029/2009GL039887 (査読有り).

[学会発表] (計 54件)

- (1) 大塚雄一、横山竜宏、塩川和夫、小川忠彦、山本衛、インドネシアにおけるF領域沿磁力線不規則構造のレーダー観測(ポスター)、日本地球惑星科学連合2008年大会、幕張、2008年5月25-30日。
- (2) 大塚雄一、水谷徳仁、小川忠彦、インドネシアにおけるE領域沿磁力線不規則構造のレーダー観測(口頭)、第124回地球電磁気・地球惑星圏学会、仙台、2008年10月9-12日。
- (3) Otsuka, Y., T. Ogawa, and Effendy, VHF radar observations of nighttime F-region field-aligned irregularities over Kototabang, Indonesia (oral), 12th International Symposium on Equatorial Aeronomy (ISEA-12), Crete, Greece, May 18-24, 2008.
- (4) Otsuka, Y., T. Ogawa, and Effendy, VHF Radar Observations of Nighttime F-Region Field-Aligned Irregularities Over Kototabang, Indonesia (oral), Asia Oceania Geosciences Society 2008, Busan, Korea, June 16-20, 2008.
- (5) Otsuka, Y., T. Ogawa, and T. Tsugawa, Relationship between medium-scale

- traveling ionospheric disturbance and sporadic E layer activities in summer night over Japan (oral), Asia Oceania Geosciences Society 2008, Busan, Korea, June 16-20, 2008.
- (6) Ogawa, T., Y. Miyoshi, Y. Otsuka, and T. Nakamura, Equatorial GPS Ionospheric Scintillations Over Indonesia and Their Relation to Atmospheric Waves, Asia Oceania Geosciences Society 2008, Busan, Korea, June 16-20, 2008.
- (7) 大塚雄一, 塩川和夫, 小川忠彦, Effendy, 電離圏沿磁力線不規則構造の VHF レーダー観測及びファブリ・ペロー干渉計開発の現状 (口頭), 第 3 回赤道大気レーダーシンポジウム, 第 129 回生存圏シンポジウム, 宇治, 2009 年 9 月 10-11 日.
- (8) Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Ogawa, and Effendy, VHF Radar Observations of Nighttime F-Region Field-Aligned Irregularities Over Kototabang, Indonesia (poster), 2009 Joint Assembly, Toronto, Ontario, Canada, May 24-27, 2009.
- (9) Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Ogawa, and Effendy, VHF Radar Observations of Nighttime F-Region Field-Aligned Irregularities Over Kototabang, Indonesia (invited), Asia Oceania Geosciences Society (AOGS), Singapore, August 11-15, 2009.
- (10) Balan, N., K. Shiokawa, and Y. Otsuka, Super Plasma Fountain and Ionospheric Storms (oral), Asia Oceania Geosciences Society (AOGS), Singapore, August 11-15, 2009.
- (11) Balan, N., K. Shiokawa, and Y. Otsuka, T. Kikuchi, F3 Layer as an Indicator of Prompt Penetration Electric Field (oral), Asia Oceania Geosciences Society (AOGS), Singapore, August 11-15, 2009.
- (12) Balan, N., D. Vijaya Lekshmi, V. Sreeja, K. Shiokawa, Y. Otsuka, T. Kikuchi, and M. Yamamoto, Positive ionospheric storms: 2 - Comparison with observations and IRI (oral), IRI2009 Workshop, Kagoshima, Japan, November
- (13) Balan, N., V. Sreeja, I. S. Batista, K. Lynn, K. Shiokawa, Y. Otsuka, T. Kikuchi and S. Alex, F3 layer as an indicator of prompt penetration electric field (oral), IRI2009 Workshop, Kagoshima, Japan, November 2-7, 2009.
- (14) Mizutani, N., Y. Otsuka, K. Shiokawa, T. Yokoyama, M. Yamamoto, A. K. Patra, T. Maruyama, M. Ishii, Occurrence statistics and drifts of daytime 150-km echoes studied using observations from the Equatorial Atmosphere Radar in Indonesia and ionosonde network (poster) AGU Fall Meeting, San Francisco, December 14-18, 2009.
- (15) Otsuka, Y., K. Shiokawa, and K. Yumoto, Effects of ionospheric irregularities and disturbances on GNSS (oral), The first Asia Oceania Region Workshop on GNSS, Bangkok, Thailand, January 25-26, 2010.
- (16) Otsuka, Y., T. Ogawa, Effendy, VHF Radar Observations of Nighttime F-Region Field-Aligned Irregularities Over Kototabang, Indonesia (oral), Regional CAWSES-II MLT Meeting, Singapore, March 8-9, 2010.
- (17) 大塚雄一, 塩川和夫, 小川忠彦, インドネシアの 31MHz レーダーによる電離圏沿磁力線不規則構造の観測 (口頭), 日本地球惑星科学連合 2010 年大会、幕張、2010 年 5 月 23-28 日.
- (18) 大塚雄一, 塩川和夫, 小川忠彦, インドネシアにおける夜間 F 領域沿磁力線不規則構造の VHF レーダー観測 (口頭), 第 128 回 地球電磁気・地球惑星圏学会、那覇、2010 年 10 月 30 日-11 月 3 日
- (19) Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Ogawa, and Effendy, VHF Radar Observations of Field-Aligned Irregularities in Indonesia (Invited), Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2010, Huderabad, India, 5-9 July, 2010.
- (20) 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.
- (21) Otsuka, Y., T. Ogawa, and Effendy, VHF radar observations of nighttime F-region field-aligned irregularities over Kototabang, Indonesia (oral), AP-RASC'10, Toyama, Japan, 22-26 September, 2010.
- (22) Otsuka, Y., Perkins and gradient drift instabilities (invited), Workshop Coupling between the Earth's atmospheric and Plasma environments, Bern, Switzerland, Sep 27 - Oct 1, 2010.
- (23) Otsuka, Y. et al., Optical and Radio Observations of Ionospheric Irregularities in Indonesia (invited), 2010 International Workshop on Space Weather in Indonesia, Bandung, Indonesia, December 1-3, 2010.
- (24) Otsuka, Y. et al., Equatorial

Ionospheric Scintillations and Zonal Irregularity Drifts Observed with Closely-Spaced GPS Receivers in Indonesia (oral), SEALION International Symposium 2011, Bangkok, Thailand 27-28 January 2011.

- (25) 大塚 雄一、西岡未知、塩川和夫、長妻努、津川卓也、Effendy、Septi Perwitasari、インドネシアにおける真夜中過ぎ電離圏擾乱のVHFレーダー及びバイオゾンデ観測(口頭)、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、幕張、2011 年 5 月 22-27 日。
- (26) 西岡未知、大塚雄一、塩川和夫、津川卓也、Patrick. A. Roddy、東南アジア地域における地上・衛星観測データを用いた電離圏全電子数の緯度分布と電離圏擾乱出現との相関の解明(ポスター)、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、幕張、2011 年 5 月 22-27 日。
- (27) 大塚雄一、西岡未知、塩川和夫、山本衛、赤道大気レーダーで昼間に観測された高度 150 km 沿磁力線不規則構造の研究 (ポスター)、第 130 回 地球電磁気・地球惑星圏学会、神戸大学、2011 年 11 月 3 日~6 日。
- (28) Nishioka, M., Y. Otsuka, T. Tsugawa, and K. Shiokawa, Study on night-time F-region irregularities using a VHF radar, ionosondes, and ground-based GPS stations in Southeast Asia (Poster), CEDAR-GEM Joint Workshop, Santa Fe, New Mexico, 26 June - 1 July, 2011.
- (29) Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Nagatsuma, T. Tsugawa, S. Perwitasari, et al., VHF radar and ionosonde observations of post-midnight irregularities in Indonesia (Invited), International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) 2011, Melbourne Australia, 28 June - 7 July, 2011.
- (30) Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Nagatsuma, T. Tsugawa, Effendy, and S. Perwitasari, VHF radar and ionosonde observations of post-midnight irregularities in Indonesia (Invited), Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2011, Taipei, Taiwan, August 8-12, 2011.
- (31) Nishioka, M., Y. Otsuka, K. Shiokawa, T. Tsugawa and P. Roddy, Study on Latitudinal Profile of TEC and Its Relationship with Plasma Irregularity Occurrence Over Southeast Asia (Poster), Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2011, Taipei, Taiwan, August 8-12, 2011.
- (32) Otsuka, Y. et al., Optical and Radar Observations of Plasma Bubbles over Indonesia: Recent Results (Invited), International Workshop on Space Weather

in Indonesia, Bandung, Indonesia, 21 September, 2011.

- (33) Otsuka, Y., K. Shiokawa, M. Nishioka, and Effendy, Post-midnight field-aligned irregularities observed with a VHF radar at Kototabang, Indonesia (Invited), American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2011, San Francisco, USA, 5-9 December, 2011.
- (34) Otsuka, Y., D. Fukushima, K. Shiokawa, M. Kubota, T. Tsugawa, M. Nishioka, T. Nagatsuma and Effendy, Optical and Radar Observations of Ionospheric Irregularities in Indonesia and Thailand: Recent Results (Invited), The 1st Asia-Oceania Space Weather Alliance (AOSWA) Workshop, Chiang Mai, Thailand, 22-24 February, 2012.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

<http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/vhfr/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大塚雄一 (OTSUKA YUICHI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授  
研究者番号：40314025

### (2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者 なし