

## 3-2-6 SEALION の新たな展開—全天イメージャによる大気光観測

### 3-2-6 *New Observational Deployments for SEALION —Airglow Measurements Using All-Sky Imagers*

久保田 実 石井 守 津川卓也 上本純平 陣 英克  
大塚雄一 塩川和夫

KUBOTA Minoru, ISHII Mamoru, TSUGAWA Takuya, UEMOTO Jyunpei, JIN Hidekatsu, OTSUKA Yuichi, and SHIOKAWA Kazuo

#### 要旨

情報通信研究機構 (NICT) が進める東南アジア域における電離圏観測網 (SEALION) 構築の一環として、新たな観測機である大気光全天イメージャ (ASI) が 2010 年 2 月にタイ・チェンマイに設置される。ASI は電離層 F 層付近に発光層を持つ大気光を撮像することにより、プラズマバブル等の電離圏擾乱の 2 次元構造や時間発展を観測することができる。東南アジア域では既に 2002 年より名古屋大学太陽地球環境研究所 (STE 研) がインドネシア・コトタバンにて ASI 観測を開始している。本論文ではこのコトタバンの ASI と、SEALION のイオノゾンデ、GPS 受信機の観測データから得られた、プラズマバブルの発生、発達、移動についての詳細な描像を示す。また、この結果をもとに、新たに導入する ASI に必要な機能や、この ASI を用いた観測計画について議論する。

As a part of SEALION project which is an ionospheric observation network developed by National Institute of Information and Communications Technology (NICT), we will install a new instrument, the airglow all-sky imager (ASI), in Chiang Mai, Thailand on February 2010. Imaging observation of airglows emitting at the same altitude as F layer of ionosphere, enables us to investigate two-dimensional distribution and time evolution of ionospheric disturbances like a plasma bubble. In Southeast Asia, the Solar-Terrestrial Environment Laboratory (STEL), Nagoya University has already started the ASI observation in Kototabang, Indonesia, where is near the magnetic conjugate point of Chiang Mai. In this paper, we show a detailed process of plasma bubble event using observational data of the ASI, ionospheric sounders (ionosondes) and GPS-receivers. We also discuss about functions required for the new ASI, and observation plans in Chiang Mai.

#### [キーワード]

大気光, 電離圏, プラズマバブル, 大気重力波  
Airglow, Ionosphere, Plasma bubble, Gravity wave

## 1 まえがき

赤道異常帯において酸素原子 630.0 nm 大気光を撮像観測すると、図 1 に示すような大気光の黒い影のような現象を観測することがある。この黒い影 (大気光発光強度が著しく減少している部分) は多くの場合、東にドリフトし、木の幹のように

枝分かれし、それぞれの幹の幅は 100 km 前後である。この現象は、本特集でも繰り返し論じられているプラズマバブルによって引き起こされており [1][2]、太陽活動の活発期には、日本国内でもしばしば観測される。

大気光全天イメージャ (ASI) を用いたプラズマバブルの観測は、1980 年頃から行われている ([3]

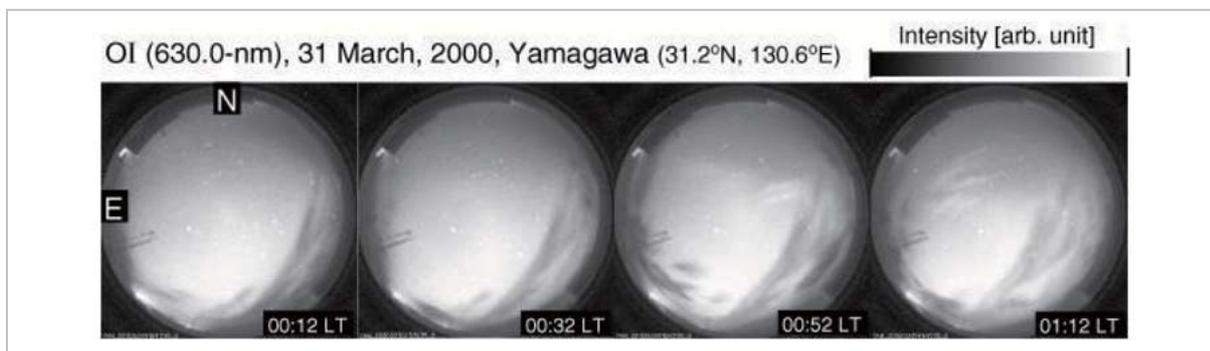


図1 山川観測所で観測されたプラズマバブル

など)。ASIを用いた観測からは、プラズマバブルの形状、プラズマバブルのドリフト速度や、成長の様子を見てとれる。近年は、光学系の進歩により、プラズマバブルの微細な構造や成長過程を観測し、プラズマ不安定との関係を探る研究がなされている[4][5]。また文献[6]では、磁気共役点にあたる日本の佐多とオーストラリアのダーウィンにおけるプラズマバブルの同時観測に成功し、南北両半球のプラズマバブルに厳密な共役性が成り立っていることを確認している。

プラズマバブルの中では電子密度が減少するとともに、様々なスケールの電子密度不連続構造が発達している[7]。この中を通過する測位衛星電波にはシンチレーションが生じ、測位精度を劣化させ、時には受信障害の原因ともなる。SEALIONの構築は、このように衛星測位に大きな影響を与えるプラズマバブルの発生や到来の予測技術確立を目的としている。

プラズマバブルの発生頻度に季節依存性や太陽活動依存性があることはこれまでの研究で明らかになっている([8]など)。しかしながら、プラズマバブル発生の日日変動の要因については明らかになっていない。また、プラズマバブルは磁気赤道付近で発生するが、その後、より高緯度側へ発達するものと発達しないものがある。この違いが何に起因するかの議論もまだ十分とは言えない。プラズマバブル予報の実現に向けて大きく前進するためには、これらのメカニズムの解明が必要である。

これまでの研究では、プラズマバブルの発生メカニズムに東西波長数 100 km の大規模大気波動が関与していることを示唆する報告がある[9][10]。F層高度にこのような大規模波動が存在するなら

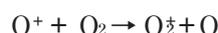
ば、これはASIでも観測可能なはずである。本論文では、ASIを用いた電離圏観測の原理を紹介し、ASI観測によって得られるプラズマバブルの詳細な描像を示すとともに、ASIによる大規模大気波動観測の可能性や観測計画について議論する。

## 2 ASIの観測原理と装置概要

### 2.1 大気光を用いた電離層観測の原理

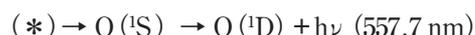
地上からの電離層の観測に使用される代表的な大気光は酸素原子 630.0 nm、557.7 nm、777.4 nm であり、これらの励起メカニズムは以下のように表される([11]–[13]など)。

OI630.0 nm :

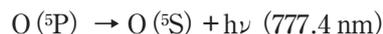
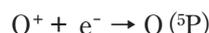


(\*)  $\rightarrow O(^1D) \rightarrow O(^3P) + h\nu$  (630.0 nm)

OI557.7 nm :



OI777.4 nm :



これらの反応式を見て分かる通り、酸素原子 630.0 nm、557.7 nm 大気光の励起は、電離圏 F 層の主要な構成イオンである  $O^+$  と中性大気である酸素分子の衝突反応に支配される。また、酸素原子 777.4 nm 大気光の励起は、 $O^+$  と電子の衝突反応に支配される。この励起反応の違いは、図 2 に模式的に示すように、それぞれの発光高度の違いとなって現れる。つまり、酸素原子

630.0 nm、557.7 nm 大気光は F 層のピーク高度よりも 50 km ほど下に発光のピークを持つのに対し、酸素原子 777.4 nm 大気光は F 層のピーク高度付近で最も強く発光する。従って、これらの発光を使えば、異なる 2 つの高度での電離圏の情報を得ることができる。

電離圏中でプラズマバブルが発生すると、その場の  $O^+$  と電子が急減するため、大気光発光強度も弱くなり、大気光イメージ中では図 1 で示したような黒い影のように観測される。逆に言えば、発光強度の変化から電離圏電子密度の変動を知ることができることになる。但し、酸素原子 630.0 nm、557.7 nm 大気光の励起は中性大気密度にも依存するため、電離圏 F 層の高度が変化することによっても発光強度が変化する [14]。また、酸素原子 557.7 nm 大気光は、別の励起メカニズムで高度 95 km 程でも発光するため、解釈には注意を要する。

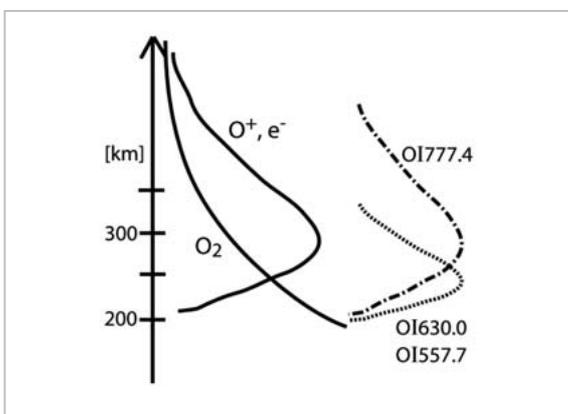


図2  $O^+$ 、電子、酸素分子の高度分布と、大気光発光高度プロファイルについての模式図

## 2.2 ASI装置概要

ASI 本体は、一般的に、対物レンズとして魚眼レンズを使用し、 $180^\circ$  の全天視野を得ている。これにより、観測点を中心とする半径数 100 km の範囲を一度に観測することができる。対物レンズを通過した光はテレセントリックレンズによって一旦平行光にされ、干渉フィルターによって分光された後、受光装置内に焦点を結ぶ。干渉フィルターは 5~6 チャンネルのフィルターターレット上に装着されており、チャンネルを切り替えることにより複数の波長での観測が可能となる。受光装置には背面照射型 CCD 素子を用いた冷却 CCD カメラを採用して高感度化及び取り扱いの簡便性をはかっている。シャッターの開閉、フィルターの切り替え、撮像、データ保存といった観測のための操作は ASI 制御用のパーソナルコンピュータ上で走るプログラムによって操作され、与えられたスケジュールに従ってチャンネルを切り替えながら連続して撮像を行う。図 3 に 1 台の ASI で、ほぼ同時(時間差 5 分以内)に撮像された 2 種類の大気光と背景光の観測例を示す。

この図には左から、酸素原子 630.0 nm 大気光、酸素原子 557.7 nm 大気光、背景光の全天イメージが並べてあるが、それぞれの画像には全く違う現象が現れている。630.0 nm 大気光イメージには、南西側にプラズマバブルが現れているのが見てとれる。一方、557.7 nm 大気光にはプラズマバブルは明瞭には現れておらず、むしろ天頂から東側にかけて淡い波状構造が見られる。このようなパターンは、E 層高度の大気重力波に特有のものである。また、背景光チャンネルにはプラズマバブ

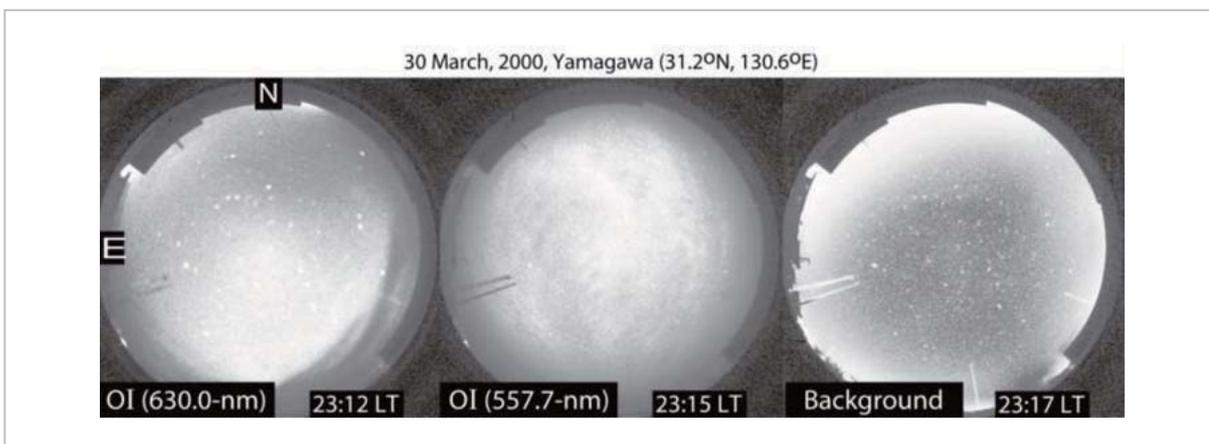


図3 山川観測所で観測された 2 種類の大気光と、背景光の全天イメージ

ルの構造も、波状構造も見られず、ただ多数の星が写るのみである。これは、前者2枚のイメージに見られる構造が、雲によるものではないことの証拠である。

NICTでは波長ごとに焦点を調整する機能を付加したASIを開発している[15]。また、国立極地研究所の較正施設[16]で得た較正データを基に、大気光の絶対強度を導出する手法も確立している[17]。このNICTのASIはチェンマイ大学ならびに名古屋大学太陽地球環境研究所(STE研)と共同で2010年2月にタイ・チェンマイのシリントン観測所(緯度北緯18.8度、東経98.9度、伏角緯度12.7度)に設置され、定常的な観測を開始する予定である。

### 3 コトタバンのASIを用いた事前調査

東南アジア域においては、既に2002年より、インドネシア・コトタバン(南緯0.2度、東経100.3度、伏角緯度-10.1度)においてSTE研のASI[18][19]が稼働しており、既に6年分のデータが蓄積している。コトタバンとチェンマイは、おおよそ磁気共役の関係にある。このデータを調査して得られた、顕著なプラズマバブルイベントについて、SEALIONの他の観測データとともに総合的な解析を試みた。

図4はコトタバンのASIで観測された2006年1月29日の酸素原子630.0nm大気光の変動である。14:30 UT(21:30 LT)から15:45 UT(22:

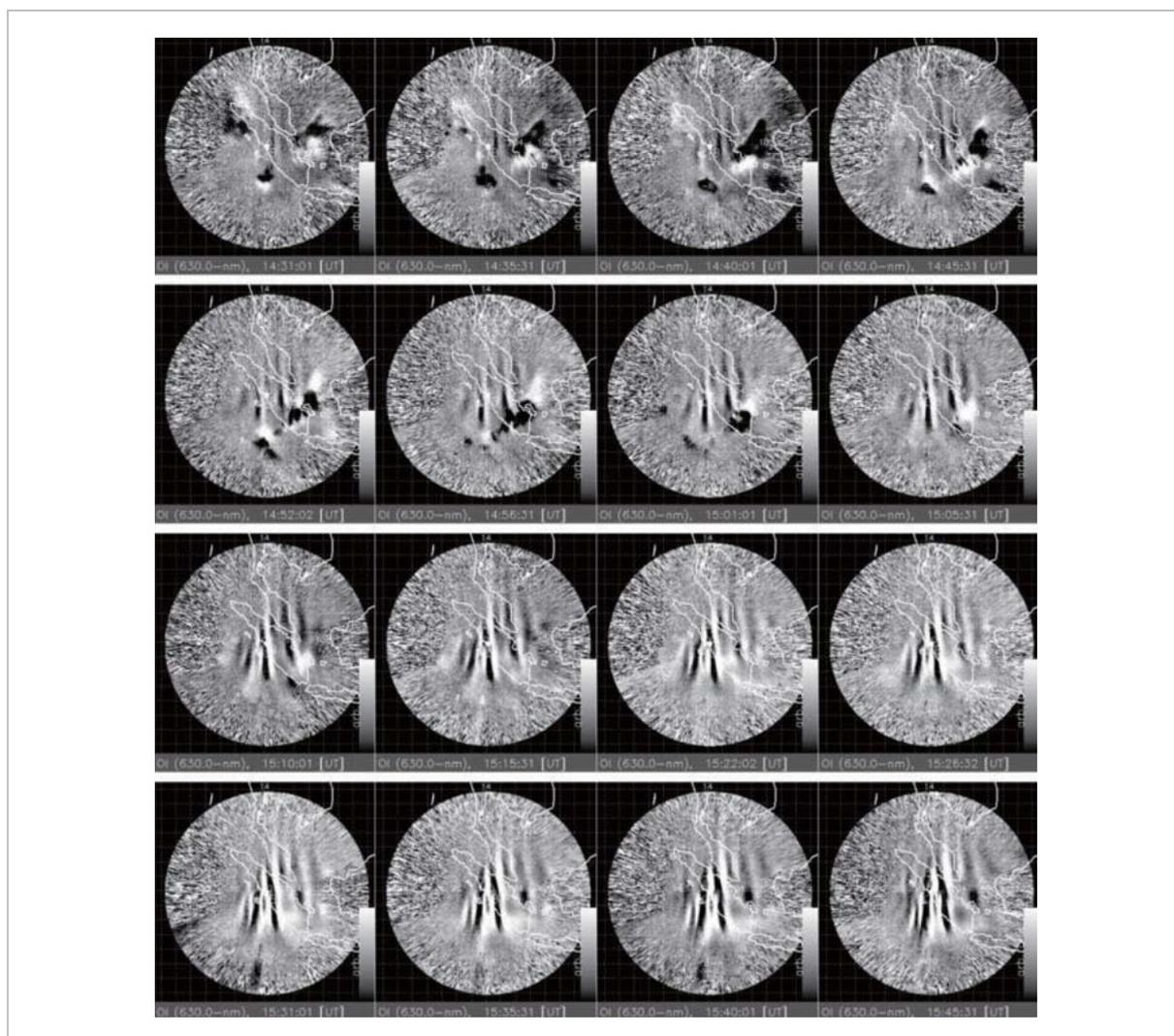


図4 コトタバンのASIによるプラズマバブルの観測例(2006年1月29日)

45 LT)にかけての、ほぼ6分毎の画像データが示されている。

それぞれのパネルは、大気光変動を強調するために、大気光強度の1時間平均からの残差をとり、それをコトタバンを中心とする地図上にマッピングしてある。プラズマバブルは21:30 LTより少し前にコトタバンの上空やや東寄りにも出現し、その後擾乱領域を西に拡大させつつも、構造自体は東にドリフトしている。この図から見てとれる東向きドリフト速度は約110 m/sであり、この値はこれまでに報告されている衛星観測やGPSシンチレーション観測から得られたプラズマバブルのドリフト速度とも整合する([20]-[22]など)。このプラズマバブルはその後、15 UT (24 LT)頃に縮小に転じたが、夜明け前の22 UT (5 LT)頃まで継続して観測された。

図5は、このプラズマバブルが発生している最中16:00 UT (23:00 LT)のSEALIONのイオノグラムやGPS-TEC等の観測結果を並べた、SEALION総合解析パネルの一例である。

SEALIONの観測点や観測装置の概要は文献[1]に記されている。この日は、STE研によるコトタバンASIの他、チュンポン(タイ)、コトタバン、バクアリウ(ベトナム)にてイオノゾンデ観測が、チェンマイ、チュンポン、コトタバンにてGPS-TEC観測が行われていた。図5を見ると、3地点のイオノグラムは全てスプレッドFの状態を示し、GPS-ROTIも増大している。(サマリイ

オノグラムやGPS-TEC & ROTIパネル上の桃色の線は、この時の時刻、16 UT (23 LT)を示している)。サマリイオノグラムからは、電離圏F層高度の時間変化が見て取れるが、16 UT (23 LT)は、チュンポンでは高度が下がっている途中、コトタバンでは高度がほぼ下がり切ったところであるように見える。

我々はこの様式で、観測データについて時間を追ってアニメーション表示できる解析ツールを作成し、イベントの詳細解析に用いている。このツールを使って得られた、この晩のプラズマバブルイベントの経過を図6にまとめた。

図6からは、一連のプラズマバブルイベントであっても、装置によって見え方(例えば現象の継続時間)がかなり異なることが分かる。この装置による見え方の違いについての詳しい議論は別の機会に譲る。

#### 4 タイ・チェンマイへのASIの導入とその観測ターゲット

この観測例からも分かるとおり、ASIはプラズマバブルの出現を敏感に捉え、またその成長や移動について詳細に観測できるユニークな観測装置である。しかし、観測のチャンスが天候や月明かりの状態に左右される難点がある。特に、気候区分が熱帯雨林に分類されるコトタバンは晴天日が少なく、6年間(約2200晩)のうち6時間以上晴

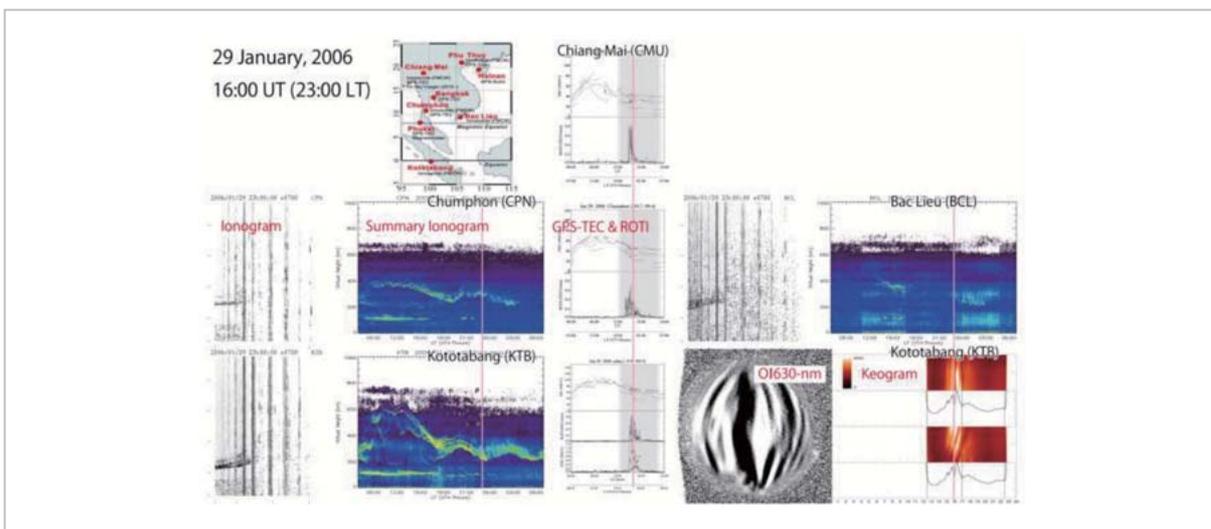


図5 2006年1月29日16:00 UTにおけるSEALION総合解析パネル

れて観測できたのは 62 晩のみであった。

前述の通り我々は 2010 年 2 月に、コトタバンとは磁気共役の関係にあるタイ・チェンマイのシリントン観測所(緯度北緯 18.8 度、東経 98.9 度、伏角緯度 12.7 度)に、新たに ASI を設置する。チェンマイの気候区分はサバナ気候であり、これにより観測日の大幅な増加が期待される。

シリントン観測所における新たな ASI を用いた観測は 2010 年 2 月の設置以降、基本的に満月期(満月前後の計 10 日間)を除いた毎日実施する。観測波長は以下の 5 種類で、それぞれを 15 秒～2 分程度の積分時間で撮像する。

- 酸素原子 630.0 nm 大気光…電離圏 F 層下部の観測
- 酸素原子 777.4 nm 大気光…電離圏 F 層ピーク付近の観測
- OH Meinel 帯…中間圏界面領域(高度 87 km 付近)の大気重力波の観測
- ナトリウム D 線…中間圏界面領域(高度 92 km 付近)の大気重力波の観測
- 背景光(572.3 nm)

観測の時間分解能(撮像間隔)は 6 分程度(OH Meinel 帯のみ 3 分程度)とする。観測データのうちサマリデータはネットワーク経由で日本の NICT に転送するが、容量の大きい生データに関

しては郵送になる見込みである。今後、NICT において観測データの処理プログラムを整備し、観測時間や観測波長、晴天状況、サマリデータ等は SEALION のウェブサイト等で公開する予定である。

新たな ASI を用いて我々は、電離圏擾乱のみならず、大規模大気波動の検出にも挑戦したいと考えている。文献[9]や文献[10]が示唆する、プラズマバブル発生に寄与する大気波動の東西波長は 800 km ほどである。ASI は中間圏界面領域(~高度 100 km)に対しては直径 800 km 以上、F 層高度に対しては直径 1500 km 以上の視野範囲を一度に観測することができる。視野範囲の大きさから言えば、ターゲットの大規模大気波動の観測は十分に可能である。

大規模大気波動を観測するために、視野の大きさ以外に重要なのは、星像や天の川、背景光などを適切に補正した高品質な大気光画像を得ることである。なぜなら、これらの補正処理の善し悪しが、大規模大気波動の検出に必要な二次元 FFT 等の解析精度に大きく影響するからである。星像除去のためには、星ができるだけシャープに写っている方が有利であり、この点については、新たな ASI に付加された焦点調整機構が効果的に働くと期待される。

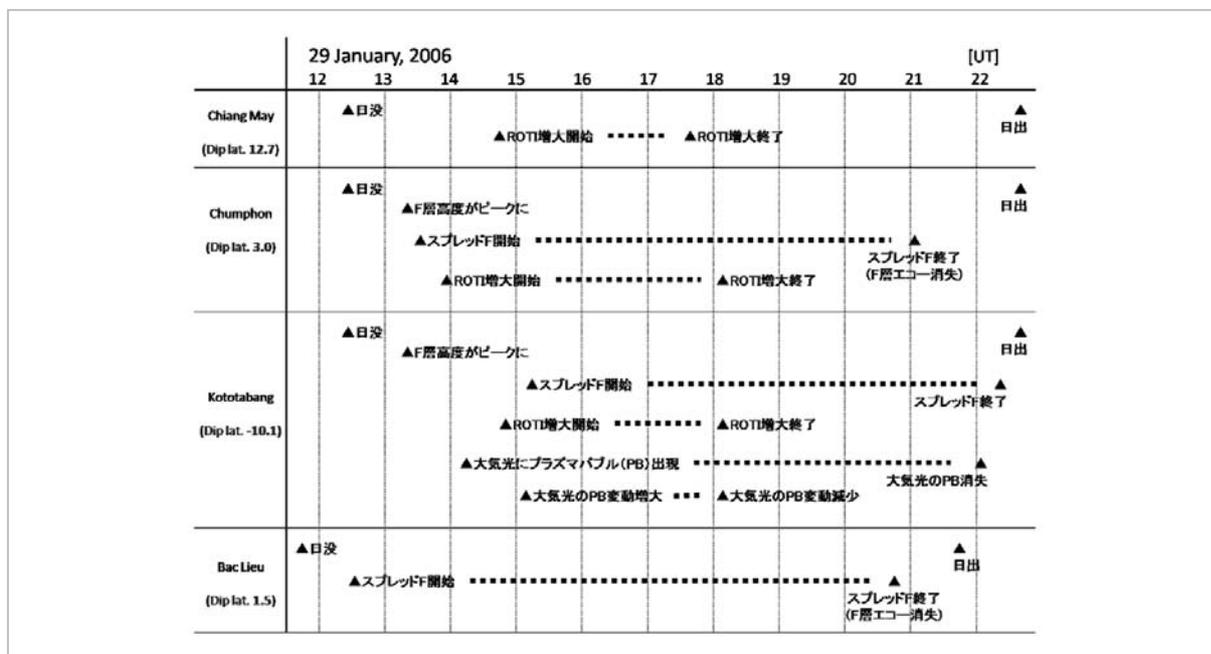


図6 2006年1月29日のプラズマバブルイベントの経過

上記5チャンネルのうち、OH Meinel 帯とナトリウム D 線は、中間圏界面領域の大気重力波を観測するのに適している。文献[23]では、日本の鹿児島において、大気光の ASI 観測データから、この領域を伝播する水平波長 700 km ほどの大気重力波を検出しており、この手法は低緯度域における大規模大気波動の検出にも適用できる。一方、酸素原子 630.0 nm 大気光と酸素原子 777.4 nm 大気光の観測からは F 層領域の情報が得られるが、この大気光には、プラズマバブルなどの電離圏擾乱起源の大気光強度変動と、中性大気起源の大気光強度変動の両方が重なってくる。このため現象の解釈には注意を要するが、もし ASI 観測データから F 層領域の大規模大気波動が検出できれば、プラズマバブル発生メカニズムの解明に大きく貢献することになる。

## 参考文献

- 丸山隆, 齋藤享, 川村眞文, 野崎憲朗, 上本純平, 津川卓也, 陣英克, 石井守, 久保田実, "SEALION プロジェクトの概要と初期解析結果", 情報通信研究機構季報, 本特集号, 3-2-1, 2009.
- 齋藤享, 丸山隆, 石井守, 久保田実, "短波赤道横断伝播と GPS シンチレーションによるプラズマバブル観測", 情報通信研究機構季報, 本特集号, 3-2-8, 2009.
- M. Mendillo, and A. Tyler, "Geometry of depleted plasma regions in the equatorial ionosphere", J. Geophys. Res., 88 (A7), 5778-5782, 1983.
- J. J. Makela, M. C. Kelley, and M. J. Nicolls, "Optical observations of the development of secondary instabilities on the eastern wall of an equatorial plasma bubble", J. Geophys. Res., Vol.111, A09311, doi:10.1029/2006JA011646, 2006.
- J. J. Makela and E. S. Miller, "Optical observations of the growth and day-to-day variability of equatorial plasma bubbles", J. Geophys. Res., Vol.113, A03307, doi:10.1029/2007JA012661, 2008.
- Y. Otsuka, K. Shiokawa, T. Ogawa, and P. Wilkinson, "Geomagnetic conjugate observations of equatorial airglow depletions", Geophys. Res. Lett., 29 (15), 1753, doi:10.1029/2002GL015347, 2002.
- Y. Otsuka, K. Shiokawa, T. Ogawa, T. Yokoyama, M. Yamamoto, and S. Fukao, "Spatial relationship of equatorial plasma bubbles and field-aligned irregularities observed with an all-sky airglow imager and the Equatorial Atmosphere Radar", Geophys. Res. Lett., 31, L20802, 10.1029/2004GL020869, 2004.
- M. Nishioka, A. Saito, and T. Tsugawa, "Occurrence characteristics of plasma bubble derived from global ground-based GPS receiver networks", J. Geophys. Res., Vol.113, A05301, doi:10.1029/2007JA012605, 2008.
- Roland T. Tsunoda, "On the enigma of day-to-day variability in equatorial spread F", Geophys. Res. Lett., Vol.32, L08103, doi:10.1029/2005GL022512, 2005.

## 5 むすび

SEALION の一環として、2010年2月にタイ・チェンマイのシリントン観測所に設置される予定の大気光全天イメージャ (ASI) について、以下の点を論じた。

- ASI の観測原理を紹介し、実際の観測例から、ASI とイオノゾンデや GPS 受信機を組み合わせた観測が、プラズマバブルの詳細な描像を得るうえで有効であることを示した。
- タイ・チェンマイに新たに設置する ASI の仕様や観測計画、その期待される効果を示した。
- 今後は、プラズマバブル発生メカニズムへの寄与が示唆されている大規模大気波動の検出が、ASI 観測の重要なターゲットであり、また、我々の ASI がそのために必要な観測精度を備えていることを示した。

- 10 Smitha V. Thampi, Mamoru Yamamoto, Roland T. Tsunoda, Yuichi Otsuka, Takuya Tsugawa, Junpei Uemoto, and Mamoru Ishii, "First observations of large-scale wave structure and equatorial spread F using CERTO radio beacon on the C/NOFS satellite", *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 36, L18111, doi:10.1029/2009GL039887, 2009.
- 11 B. A. Tinsley, and J. A. Bittencourt, "Determination of F region height and peak electron density at night using airglow emissions from atomic oxygen", *J. Geophys. Res.*, 80 (16), 2333--2337, 1975.
- 12 B. A. Tinsley, A. B. Christensen, J. Bittencourt, H. Gouveia, P. D. Angreji, and H. Takahashi, "Excitation of oxygen permitted line emissions in the tropical nightglow", *J. Geophys. Res.*, 78 (7), 1174-1186, 1973.
- 13 R. Link, and L. L. Cogger, "A reexamination of the O I 6300AA nightglow", *J. Geophys. Res.*, 93 (A9), 9883-9892, 1988.
- 14 M. Kubota, H. Fukunishi, and S. Okano, "Characteristics of medium- and large-scale TIDs over Japan derived from OI 630-nm nightglow observation", *Earth Planets Space*, 53, 741-751, 2001.
- 15 久保田実, 石井守, 大山伸一郎, 村山泰啓, "CRL 全天型大気光イメージャのこれまでの成果と今後の研究課題", *通信総合研究所季報*, Vol.48, No.2, 145-154, 2002年6月.
- 16 S. Okano, S. Takeshita, and M. Taguchi, "Absolute calibration system at NIPR for aurora/airglow measurements using a 1.9-m integration sphere", *Proc. 24th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Method*, 30, 333, 1998.
- 17 M. Yamamoto, M. Kubota, S. Takeshita, M. Ishii, Y. Murayama, and M. Ejiri, "Calibration of CRL all-sky imagers using an integrating sphere", *Advances in Polar Upper Atmosphere Research*, 16, 173-180, Sep,2002.
- 18 K. Shiokawa, Y. Katoh, M. Satoh, M. Ejiri, T. Ogawa, T. Nakamura, T. Tsuda, and R. H. Wiens, "Development of optical mesosphere thermosphere imagers (OMTI)", *Earth Planets Space*, 51, 887-896, 1999.
- 19 K. Shiokawa, Y. Otsuka, and T. Ogawa, "Propagation characteristics of nighttime mesospheric and thermospheric waves observed by optical mesosphere thermosphere imagers at middle and low latitudes", *Earth Planets Space*, 61, 479-491, 2009.
- 20 T. Ogawa, E. Sagawa, Y. Otsuka, K. Shiokawa, T. I. Immel, S. B. Mende, and P. Wilkinson, "Simultaneous ground-and satellite-based airglow observations of geomagnetic conjugate plasma bubbles in the equatorial anomaly", *Earth Planets Space*, 57, 385-392, 2005.
- 21 Y. Otsuka, K. Shiokawa and T. Ogawa, "Equatorial Ionospheric Scintillations and Zonal Irregularity Drifts Observed with Closely-Spaced GPS Receivers in Indonesia", *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.84A, pp.343-351, 2006.
- 22 S. Saito, T. Maruyama, M. Ishii, M. Kubota, G. Ma, Y. Chen, J. Li, C. H. Duyen, and T. L. Truong, "Observations of small- to large-scale ionospheric irregularities associated with plasma bubbles with a transequatorial HF propagation experiment and spaced GPS receivers", *J. Geophys. Res.*, Vol.113, A12313, doi:10.1029/2008JA013149, 2008.
- 23 M. Kubota, S. Kawamura, M. Abo, Y. Koizumi, Y. Murayama, M. Yamamori, K. Shiokawa, Y. Otsuka, M. Uchiumi, K. Igarashi, T. Abe, K.-I. Oyama, and N. Iwagami, "A fast-propagating, large-scale atmospheric gravity wave observed in the WAVE2004 campaign", *J. Geophys. Res.*, Vol.111, Issue: D21, Article No.D21110, 2006.



久保田 実

電磁波計測研究センター宇宙環境計測  
グループ主任研究員 博士（理学）超  
高層大気物理

右井 守

電磁波計測研究センター推進室室長  
博士（理学）  
超高層大気物理学



津川卓也

電磁波計測研究センター宇宙環境計測  
グループ専攻研究員 博士（理学）超  
高層大気物理

上本純平

電磁波計測研究センター宇宙環境計測  
グループ専攻研究員 博士（理学）超  
高層大気物理



陣 英克

電磁波計測研究センター宇宙環境計測  
グループ専攻研究員 理学博士  
超高層大気物理

大塚雄一

名古屋大学太陽地球環境研究所電磁気  
圏環境部門助教 博士（工学）  
超高層大気物理



塩川和夫

名古屋大学太陽地球環境研究所教授  
博士（理学）  
超高層物理学

電離圏電波伝播に関する研究開発 / 電離圏不規則構造とSEALIONプロジェクト / SEALIONの新たな展開 / 全天イメージャによる大気光観測