# 2-2 東南アジア域における電離圏観測: SEALION プロジェクトの現状 と今後の展望

## 2-2 Ionospheric Observations in the Southeast Asia: Current Status and Future Perspective of the SEALION Project

### 津川卓也 HOZUMI Kornyanat

TSUGAWA Takuya and HOZUMI Kornyanat

低緯度電離圏において主要な電離圏じょう乱現象であるプラズマ・バブルの生成・伝搬機構の 研究を目的に、東南アジア域電離圏観測網 (SEALION)を構築してきた。衛星測位等の電波伝搬へ 影響を与えるプラズマ・バブルは、準天頂衛星システム等の高度な衛星測位技術が交通、輸送、 建設、農業等の様々な分野で利用が進む中、その正確な監視や予測に対するニーズがますます高 まってきている。東南アジアの国々においても宇宙天気への興味が高まるにつれ、新たに電離圏 観測を開始する国がでてくるなど、東南アジア域での電離圏観測ネットワークが拡大しつつある。 本稿では、SEALION プロジェクトにおける最近の研究成果のレビューとして現状を紹介するとと もに、今後の展望について述べる。

We have conducted the SouthEast Asia Low-latitude IOnospheric Network (SEALION) to study the generation and propagation mechanisms of plasma bubbles. Because plasma bubbles can affect the radio propagation for satellite positioning, there is a growing need for realtime monitoring and accurate forecast of plasma bubbles, as advanced satellite positioning technologies, such as QZSS, are increasingly used in various fields. In recent years, the interest in space weather has been increasing in Southeast Asian countries, and the ionospheric observation network in this region is expanding, with some countries starting new ionospheric observations. In this paper, the current status of the SEALION project is presented as a review of recent research results, and future prospects are discussed.

### 1)はじめに

太陽からのX線や極端紫外線(EUV)により、地球 の超高層大気の一部は電離されたプラズマ状態になっ ており、電離圏と呼ばれている。電離圏プラズマの定 常状態は、光電離、イオンと電子の再結合、プラズマ の移流(磁力線方向の拡散、E×Bドリフト、中性大 気ドラッグ)のバランスによって決定され、高度 300 km付近にプラズマ密度の極大が形成される。電 離圏の主要な電離源は基本的には太陽からの電磁波に よるため、プラズマ密度は太陽天頂角に依存して日出 とともに増加し、昼間に極大になった後に夜間にかけ て減少するという1日周期の規則的な時間変化をする。 また、太陽天頂角に応じて低緯度ほどプラズマ密度が 高くなる傾向があるが、磁気赤道付近においては、両 半球の磁気赤道からやや離れた領域にプラズマ密度分 布の極大(赤道異常)が出現する。 赤道異常は、中性大気の風と磁場の作用により形成 される東向きダイナモ電場の影響で、磁気赤道域で上 昇した電離圏プラズマが、重力の作用により磁力線に 沿って高緯度側へ拡散するために形成される。磁気赤 道域の日没後には、電離圏F領域の下部において、局 所的にプラズマ密度が低い領域が、磁力線に沿う「泡」 のように発生するプラズマ・バブルと呼ばれる現象が しばしば現れ、磁力線に沿って南北方向に広がりなが ら、東方向へ伝搬する。プラズマ・バブルは、プラズ マ密度が低いだけでなく、様々な空間スケールの不規 則構造を内包しており、その内部や周辺を通過する短 波帯から極超短波帯の電波伝搬に影響を与える。

GPS に代表される測位衛星からの電波(極超短波) は、電離圏を通過する際にプラズマ密度に応じて遅延 するため、近年広く利用されている全地球測位システム (Global Navigation Satellite System: GNSS)の誤差 要因となる。プラズマ・バブルによる局所的なプラズ

観測サイト (ID)	地理座標		磁気座標 **		磁気伏角 *** (dip angle, °)		玉
	緯度 (°N)	経度 (°E)	緯度 (°N)	経度 (°E)	2005 年	2020年	
Chiang Mai (CMU)	18.76°	98.93°	9.33	171.95	24.323	26.299	タイ
Korat (RUTI)	14.99°	102.12°	5.52	174.95	16.094	18.178	タイ
Bangkok (KMI*, KMIT)	13.73°	100.78°	4.29	173.63	13.172	15.311	タイ
Chumphon (CPN)	10.72°	99.37°	1.33	172.19	6.054	8.269	タイ
Kototabang (KTB)	-0.20°	100.32°	-9.54	172.90	-19.606	-17.526	タイ
Vientiane (NUOL*, NUO2)	17.94°	102.63°	8.45	175.49	22.620	24.584	ラオス
Bac Lieu (BCL)	9.30°	105.71°	-0.17	178.41	3.031	5.188	ベトナム
Cebu (CEB)	10.35°	123.91°	1.26	163.68	5.744	6.998	フィリピン
Phuket (PKT*)	8.09°	98.32°	-1.26	171.09	-0.292	1.945	タイ
Phuket (PTC*)	7.90°	98.39°	-1.45	171.15	-0.746	1.491	タイ
Phu Thuy (PHT*)	21.03°	105.96°	11.49	178.70	29.062	30.823	ベトナム
Hainan (HAN*)	19.53°	109.13°	10.00	178.27	26.022	27.769	中国

表1 SEALION 観測サイト

\* 観測終了

\*\*IGRF-13 モデルにより導出した磁気座標

\*\*\*IGRF-13 モデルにより導出した高度 350 kmの磁気伏角

マ密度の増減は、一般的な1周波単独測位等で利用さ れる電離圏遅延モデルでは補正できずに大きな測位誤 差を引き起こすほか、より高精度な測位を実現する相 対測位 (ディファレンシャル測位) においても、基準点 との間の電離圏遅延の空間勾配が誤差要因となり得る。 GNSS への電離圏の影響は、電波の伝搬遅延に加えて、 プラズマ不規則構造に由来する受信信号強度の不規則 な変動がある。「電離圏シンチレーション」と呼ばれる この現象が発生すると、GNSS 受信機による衛星信号 のロックが難しくなり、極端に強い場合にはロック損 失を引き起こす。日本の準天頂衛星システムによるセ ンチメートルレベルの測位サービス等、更に高度な衛 星測位技術が交通、輸送、建設、農業等の様々な分野 において利用が進む中、衛星測位に影響を与えるプラ ズマ・バブルの正確な監視や予測に対するニーズがま すます高まってきている。

プラズマ・バブルの生成原因は、基本的には電離圏 F領域下部のレイリー・テイラー不安定と考えられて おり、電離圏高度が高く、プラズマ密度の高度勾配が 強いほど、成長率が高くなる傾向がある。また、プラ ズマ・バブルの発生頻度は、日没線と地球の磁力線の 偏角が一致する時期に大きくなるため、顕著な季節及 び経度依存性があり、日本を含む東アジア域において は、春と秋に発生頻度が大きくなる。プラズマ・バブ ルの発生については、このような基本的な生成メカニ ズムや傾向は明らかになっているが、大気波動による 不安定のシーディング (seeding、不安定のきっかけ) の効果や、電離圏下部のプラズマ密度の南北非対称が プラズマ・バブル発生を抑制する効果[1]も影響してお り、プラズマ・バブルが、いつ、どこで発生するかを 正確に予測することは難しいのが現状である。高度な 衛星測位技術の安定利用に資するプラズマ・バブルの 監視・予報のためには、プラズマ・バブルの成長につ ながる電離圏の状態やプラズマ・バブルの発生そのも のを監視する電離圏観測網を整備するとともに、長期 観測データを生かした AI による発生予測など、新た な予測技術の開発も進めて行くことが重要である。

本稿では、SEALION プロジェクトにおける電離圏 観測網と最近の研究成果についてレビューするととも に、今後の展望について述べる。

### 2 SEALION プロジェクトの現状

#### 2.1 観測網

NICT では、プラズマ・バブルの生成・伝搬機構の 研究を目的に、東南アジア各国の協力の下、東南アジ

ID	観測機器						
	VIIE	EMOW	C		十年半		
マー ダー	イオノ ゾンデ	TEC 観測	TEC・シン チレーション 観測	シンチレーショ ン観測	磁力計	人x元 イメー ジャー	
CMU		2004-	2006-				2010– 2013*
RUTI			2018-				
KMI*			2002-2019*				
KMIT			2017-				
CPN	2020-	2003-	2004-	2019-			
KTB		2004-					
NUOL*			2019-2020*				
NUO2			2020-				
BCL		2004-		2014-			
CEB		2000-		2013-			
PKT*				2013-2021*		2006- 2021*	
PTC*				2006-2011*			
PHT*		2005- 2011*			2007-2010*		
HAN*					2007-2009*		

表 2	SEALION 各観測サー	イトにおける観測機	器 (2021 年 7 月現在)
-----	---------------	-----------	------------------

\* 観測終了

ア域電離圏観測網(SouthEast Asia Low-latitude IOnospheric Network: SEALION) を構築してきた[2]。 SEALION は、東経 100°の子午線及び磁気赤道に近い 観測点に設置された主要観測機器である FM-CW (frequency modulated continuous wave) 型イオノゾンデ 及び GPS/GNSS 受信機、磁力計、大気光カメラなど 様々な観測機器で構成される。SEALION プロジェク トの開始以降、運用の自動化・省力化、観測サイトの 耐雷対策、老朽化した観測機器の整理・更新等を進め つつ、より高精度なプラズマ・バブルの観測のため、 2020年1月タイ・チュンポンにプラズマ・バブル観測 用 VHF レーダーを設置するなど観測網の強化を進め てきた。また、東南アジア諸国の宇宙天気に対する ニーズや関心が高まっていることを受け、2021年4月 タイのラジャマンガラ工科大学イサン (RMUTI) 及び ラオスのラオス国立大学 (NUOL) など、新たな協力機 関が参加して観測網の拡大が進められつつある。 SEALION 観測サイトで得られたデータは、リアルタ イムで NICT へ転送され、プラズマ・バブルを含めた 東南アジア域の電離圏状況を把握するために利用され ている。これまで SEALION プロジェクトとして観測 を実施してきた観測サイト及び観測機器を図1、表1 及び表2にまとめる。これらのデータは、過去のもの



も含めて、SEALION ウェブサイト(https://aer-ncweb.nict.go.jp/sealion/)にて利用可能である。

#### **2.2** 最近の研究成果

ここでは、SEALION を利用した赤道域電離圏及び プラズマ・バブルに関する最近の研究成果のうち、赤 道異常、プラズマ・バブル、AI による電離圏変動予測 に関するものを紹介する。

#### 2.2.1 赤道異常

昼間側の電離圏においては、中性大気の風と磁場の 作用により生じた東向き電場により、磁気赤道付近の 電離圏プラズマは上向きのE×Bドリフトにより上昇 する。上昇した電離圏プラズマは、地球の重力と圧力 勾配力により、磁力線に沿って磁気赤道から遠ざかる ように高緯度・低高度方向に拡散する。このE×Bド リフトと拡散の効果の組み合わせにより、赤道噴水効 果と呼ばれるプラズマの噴水状の動きが発生する。こ の効果により、磁気赤道から両半球に15度程度離れた 領域に極大を持つプラズマ密度の高い領域、赤道異常 が形成される。赤道異常は、磁気嵐時等に強くなる昼 間側の東向き電場に応じて高度・緯度的に発達し、し ばしば日本の南部など中低緯度域まで発達することが ある。また、赤道を横断する中性大気風により南北半 球で非対称となるなど、様々な要因により時間・空間 的に変動しており、その正確な規模や構造を予測する ことが難しい。プラズマ・バブルの成長率に影響する プラズマ密度の高度勾配や、プラズマ・バブルの発生 を抑制する下部電離圏プラズマ密度の南北非対称は、 赤道異常の発達や南北非対称性とも密接に関係してい るため、赤道異常の構造や変動を正確に捉えるととも に、そのメカニズムを明らかにすることは、プラズマ・ バブルの発生予測のためにも重要である。

赤道異常を含む電離圏変動を観測するため、SEALION プロジェクトでは、東経 100°の磁気子午面の磁気赤道 付近 (チュンポン)と磁気共役点付近 (チェンマイ、コ トタバン)、さらに磁気赤道の東西方向の観測網として バクリウ、セブの5サイトにおいて、FMCW 型イオノ ゾンデを設置している。FMCW 型イオノゾンデは、15 分ごとに 2-30 MHz の電波を連続的に送信し、電離圏 下部からの反射波を受信することで、電離圏下部のプ ラズマ密度の高度プロファイルを得ることができる[3]。 観測結果として得られるイオノグラムから、電離圏F 領域の見かけの高度(h'F)と電離圏のプラズマ密度が 最大になる高度(hmF2)などのパラメータが導出され、 赤道異常の研究に利用される。見かけの高度 h'F は、F 領域の電離圏エコー・トレースから容易に導出可能で あるが、昼間においては F 領域より下部の電離圏にお ける電波伝搬遅延の影響により実際の電離圏高度との 乖離が大きくなるため、電離圏高度の指標とするのは 夜間に限られる。昼間側の電離圏高度の指標としても 利用可能な hmF2 は、イオノグラムから読み取れる F 領域臨界周波数(foF2)と伝送特性パラメータである M3000 指数を用い、Shimazaki の式から算出する[4]。

赤道異常の南北非対称性には、赤道横断中性風と赤 道噴水効果の強さの相互作用が重要な役割を果たして いる。Watthanasangmechai et al. [5] は、SEALION イ オノゾンデの観測データに加え、低軌道衛星のビーコン 信号を利用して算出した全電子数(TEC)データを利用 し、タイ-インドネシア地域における赤道異常の南北非 対称性の時間的変化の詳細な特徴を報告した。本研究



(a) 2012 年 3 月 11 日 21:20-21:40 LT において COSMOS2463 衛星の ビーコン信号より導出。(b) 2012 年 3 月 27 日 00:16-00:39 LT におい て COSMOS2454 衛星のビーコン信号より導出 [5]。



図 3 赤道横断中性風の指標となる地磁気共役点(チェンマイ、コトタバン) の電離圏高度変化の二重差 二重差(km)は南北方向の風速(m/s)と読み替えられ、正(負)の符号 は北向き(南向き)方向に対応する[5]。

では、2012年3月の1か月間のデータを解析し、TEC の緯度プロファイルとして導出された赤道異常は、 10:30 LT 頃から発達し始め、14:30 LT 頃に両半球に おける極大の緯度幅が最大となること、また、両半球に

おける極大の中心がほぼ磁気赤道付近にあることを明 らかにした。赤道異常の日々変化については、昼間側で は地磁気じょう乱に伴い発生する東向き電場に対応し て非常に発達すること、また赤道異常の南北非対称性 の急激な変化があることがわかった。南北非対称性の 急激な変化は、東向き電場の影響で非常に発達した赤 道異常が、複雑な時間変動をする背景の中性大気風に より引き起こされていると考えられる。夜間では赤道異 常の南北非対称性の急激な変化は顕著に現れていない が、子午線方向の中性大気風の影響により、南北非対称 性が顕著に見られることがある。図2は、2012年3月 11日(a)及び27日(b)の夜間における TEC 緯度プロ ファイルを示しているが、前者においては南半球側で、 後者においては北半球側でそれぞれ反対半球よりも TEC の極大が大きい南北非対称性が見られる。図3は、 無風条件でのモデル計算によって得られたh'Fと観測値 h'Fとの差分(Δh'F)を地磁気共役点のチェンマイ、コト タバンそれぞれで算出し、コトタバンの Δh'F からチェ ンマイの Δh'F を引いたもの (二重差) である。この高度 変化の二重差(km)は、赤道を横断する子午線方向の中 性大気風の指標として風速(m/s)と読み替えられ、正 (負)の符号は北向き(南向き)方向に対応する[6]。この イオノゾンデを用いた赤道横断中性大気風の推定手法 の妥当性は、ファブリ・ペロー干渉計によって計測され た中性大気風データとの比較により定量的に評価され ている[7]。図 2(a) 及び(b) に示された TEC 極大の南北 非対称性は、それぞれ図3(a)及び(b)の北向き及び南 向き中性大気風に対応していることがわかる。このこと から、夜間の南北非対称性は赤道横断中性大気風が主 要な役割を果たしていることを示唆している。

#### 2.2.2 プラズマ・バブル

プラズマ・バブルは、前述したように磁気赤道に近 い低緯度域において日没後に発生する現象であり、そ の発生メカニズムとして電離圏F領域下部のレイ リー・テイラー不安定が知られている。レイリー・テ イラー不安定の成長率は、電離圏におけるイオンと中 性大気粒子の衝突周波数が小さくなる高高度ほど、ま たプラズマ密度の高度勾配が強いほど高くなる。磁気 赤道付近の日没後の電離圏では、電離圏F領域高度の 中性大気風によるダイナモ効果により東向き電場が急 激に増大する pre-reversal enhancement と呼ばれる現 象が発生し、上向きE×Bドリフトにより電離圏高度が 上昇するとともに急峻なプラズマ密度の高度勾配が生 じる。その結果、磁気赤道付近の日没後では、レイ リー・テイラー不安定が成長しやすい条件となり、電 離圏下部の低密度プラズマが急激に上昇し、電離圏 F 領域のプラズマ密度が局所的に極端に低くなるプラズ マ・バブルが形成される。プラズマ・バブルは磁力線



図 4 GPS-TEC 変動成分の経度(横軸)-時間(縦軸)関係図 黒矢印は1つ目のプラズマ・バブルクラスター(PBB#1)の西方向への 伝搬を示す。黒破線矢印は2つ目のプラズマ・バブルクラスター (PBB#2)の伝搬方向を示しており、PBB#1と同じ傾向を示している。 PBB#1と PBB#2の間の水平距離は1000 km となる[11]。

に沿う構造となり、磁気赤道域での高高度への発達に 伴い、磁力線方向に数千km、東西方向に数十kmから100kmの規模にまで発達する。プラズマ・バブル 境界付近のプラズマ密度は、水平方向数十km以内で 1%以下にまで減少する[8]。また、プラズマ・バブル の内部は、プラズマ密度の減少以外に、二次的な不安 定により数 cmから数百kmの広い空間スケールのプ ラズマ不規則構造を伴うことが多い[9]。プラズマ・バ ブルの発生は、太陽活動依存性があり、太陽活動が活 発な時期に非常に発生数が大きい。また、経度により 異なる季節依存性があり、アジア域での発生は、3月 の春分と9月の秋分に二つのピークがある。

近年の太陽活動極小期の観測において、プラズマ・ バブルの発生時間は、日没後だけでなく、真夜中以降 にも観測されることが明らかになってきた。真夜中以 降に観測されるプラズマ・バブルは、プラズマ不規則 構造を内包するか否かの二つのタイプに分類される。 不規則構造を含むものについては、6月の夏至付近で 多く発生しており、生成メカニズムとして、レイリー・ テイラー不安定あるいは子午線方向の中性大気風によ る電離圏 F 領域の上昇が候補として考えられる[10]。 真夜中以降に観測される不規則構造を持たないプラズ マ・バブルは、日没後に発生した「fresh」なプラズマ・ バブルが、発生場所から真夜中過ぎまで観測点上空に 移動してきた「fossil」なプラズマ・バブルであると考え られる。「fossil」なプラズマ・バブルは、小規模なプラ ズマ・バブルが含まれるクラスターとして現れること が多い。Watthanasangmechai et al. [11] は、衛星ビー コン受信機、地上 GPS 受信機網及び SEALION イオノ ゾンデデータを用いて、2012年3月6日の夜明け前に クラスター状のプラズマ・バブルを観測した。図4に

示された GPS-TEC 変動成分の経度-時間関係図から、 二つのプラズマ・バブルクラスターが観測されており、 両者の水平距離が1,000 km であることがわかる。各プ ラズマ・バブルクラスター内に含まれる小規模プラズ マ・バブル構造の間隔は50kmであり、高解像度バブ ルモデル(HIRB)[12]によるシミュレーション結果と も良く一致していた。電離圏下部の上昇面におけるプ ラズマ・バブルのシーディングの位置が、同一クラス ター内のプラズマ・バブルの密度勾配や到達可能高度 において重要な役割を果たしている可能性が指摘され た。また、このプラズマ・バブルクラスターが検出さ れたのは04:00 LT 以降であり、これまでに報告され ていた真夜中過ぎのプラズマ・バブルの消失時刻 (03:00-04:00 LT)[13][14]よりも遅い時間帯であった。 プラズマ・バブルの到達高度が高いほど、消失時間が 遅くなることが予想され、プラズマ・バブルの消失メ カニズムの解明に資する成果である。

プラズマ・バブルの発生と下層大気の活動との関係 についても新たな知見が得られた。Ajith et al. [15] は、 インドから東南アジアの経度域における複数の地上観 測データを用いて、2014年7月28日に観測された発達 したプラズマ・バブルについて報告した。図5に示す ように、通常はプラズマ・バブルの発達が見られない 季節に、pre-reversal enhancement の異常な増強が見 られ、その後、経度方向の広い範囲でプラズマ・バブ ルが観測された。この pre-reversal enhancement は、 赤道から離れた電離圏 E 領域における赤道方向の中性

大気風と赤道ジェット電流の経度方向の勾配の増大が 関与していることが示された。日没後の電離圏高度上 昇と電離圏下部の子午線方向の中性大気風の両方が、 2014年7月20-31日の間、一貫して準2日周期のプラ ネタリー波のような変動を示し、28日に最大の振幅と なっていた。下層大気からのプラネタリー波が、局所 的な中性大気風系と電離圏 E 領域の導電率を変化させ、 季節外れの日没後の強い pre-reversal enhancement と プラズマ・バブルの発達につながった可能性が示唆さ れた。Dutta et al. [16] は、インドから東南アジア域に おける 2015 年から 2016 年の春秋の観測で、GNSS の L帯シンチレーションが極めて減少していることを見 出した。2015年から2016年の冬に記録された異常なエ ルニーニョ・南方振動(ENSO)と準2年周期振動が、シ ンチレーションを引き起こすプラズマ・バブルの抑制 に一部寄与している可能性が示唆された。Ajith et al. [17] は、インドネシアに設置された EAR レーダーを 用い、2013年4月8-9日に、200-250km間隔の周期的 な強いプラズマ・バブルの発生を日没前に観測した。 図6に示すように、両日とも、チュンポンのイオノゾ ンデ観測による電離圏F領域の見かけの高さ(h'F)が 日没前に高くなっており、プラズマ・バブルの発生に 伴うスプレッドFが発生していた。この日はサイクロ ンの中心がインドネシア経度域の地磁気赤道付近で観 測されており、GPS を利用した TEC 観測と電波掩蔽観 測により、サイクロンの強い対流活動から大気重力波 が励起されて上空へ伝搬し、その水平波長は約300 km



3.5 Z014 年 / 月 Z8 日イント及び東南アシア域で説明されに今郎外れの強い pre-reversal ennancement とフラスマ・ハフル (左上) Bac Lieu (ベトナム) 及び (右上) Tirunelveli (インド) のイオノゾンデ観測による電離圏高度 (h'F)、 (下) Kototabang の EAR で観測されたプラズマ・バブルのエコー [15]。

であることを確認した。この大気重力波が、観測され た周期的なプラズマ・バブルのシーディングにつな がった可能性があると考えられる。また、大気重力波 に伴う分極電場が、電離圏F領域を上昇させ、日没前 のプラズマ・バブル発達させた可能性も指摘された。

#### 2.2.3 AI による電離圏予測

近年、様々な研究・産業分野で問題解決のツールと して、人工知能(AI)技術の利用が急増している。電離 圏の予測では、非線形挙動を解くことができる誤差逆 伝搬型フィードフォワードニューラルネットワーク (NN)が用いられることが多く、例えば、中村 ほか[18] は、長期間の国分寺上空における電離圏観測データを 利用し、東京上空の24 時間先までの電離圏変動予測 モデルについて報告している。SEALION による観測



図6 2013年4月の磁気赤道直下のチュンポン(タイ)イオノゾンデ観測に よる電離圏F領域の見かけの高さ(h'F)の変化 緑と赤の線は、それぞれチュンポン上空のE領域とF領域の日没を示 す。灰色点線はプラズマ・バブルの発生に伴うスプレッドFを示 す[17]。

データが長期間蓄積されてきたことにより、日本に比 べて変動が激しい東南アジア域の電離圏予測について も、AI 技術の適用が可能になってきた。

SEALION のデータに AI を適用した最初の試みと して、Watthanasangmechai et al. [19] は磁気赤道に近 いチュンポンの GPS-TEC の予測に、中間層 1 層の誤 差逆伝播型フィードフォワード NN を適用した。この NN 予測モデルでは、チュンポンにおける 2005 年から 2009 年の GPS-TEC データを学習に利用し、NN の入 カパラメータには年通算日 (day number)、時間 (hour number)、太陽黒点数を採用している。図7に示すよ うに、予測結果を観測結果及びIRI-2007モデルと比較 して検証した結果、利用可能なデータ量が限られてい るという制約がある中で、本予測モデルは、学習する ことが難しい春分や夏至など TEC が大きく変動した 場合でも予測できることが示された。一方で、予測誤 差の原因としては、TEC の大きな日々変動やプラズ マ・バブルの発生等が指摘され、今後の改善の課題と された。

Wichaipanich et al. [20] は、Watthanasangmechai et al. [19] が開発した NN による予測手法を東南アジアに おけるイオノゾンデ観測データへ応用し、地磁気共役 点であるチェンマイとコトタバン、磁気赤道に近い チュンポンの3地点の foF2予測を実施した。本 NN予 測モデルでは、第 23 及び 24 周期の太陽活動サイクル を含む 2004 年 1 月から 2013 年 12 月までの foF2 デー タを利用した。また、入力パラメータとして 2 種類の 太陽活動度指数と地磁気指数を追加するなど改良を加 えた。本 NN 予測モデル及び IRI-2012 モデルについて、 それぞれ実際の観測値との差を用いた二乗平均平方根 誤差 (RMSE)を導出し、両モデルの予測誤差を比較検 証した。比較結果の一例として、図8に3地点におけ る本 NN 予測モデル、IRI モデル (CCIR と URSI オプ



図7 2005 年から 2009 年の 5 年間におけるチュンポン上空、12:30 LT の GPS-TEC 観測値、NN による TEC 予測値、 IRI-2017 モデルによる TEC の比較 [19]



ション)の地方時別予測誤差を示す。本 NN 予測モデ ルは、夜間よりも昼間の方が観測値と誤差が少なく、 全体的には IRI モデルよりも正確な予測結果を出力し ていることがわかった。夜間の誤差が大きい原因の一 つとしては、夜間に発生するプラズマ・バブルの影響 によるものと考えられ、NN 予測モデルの更なる改善 が必要である。

Thammavongsy et al. [21] は、プラズマ・バブルが 発生した場合にイオノゾンデで観測されるレンジタイ プのスプレッド F (RSF)の予測に、中間層 3 層の誤差 逆伝播型フィードフォワード NN を適用した。本 RSF 予測モデルでは、入力パラメータとして年通算日、季 節、地理緯度、太陽活動指数、地磁気指数を含む。チュ ンポンにおける 2013 年から 2015 年までの 3 年間の RSF データを用いて学習し、2016 年のデータセットを 用いて予測性能を検証するとともに、IRI-2016 モデル による RSF 発生率との比較を行った。その結果、本 RSF 予測モデルでは、利用可能なデータが限られてい る場合でも、98.3 % の精度で予測できていることが確 認された。図9に示すように、IRI-2016 モデルによる RSF 発生率では、すべての季節において過大評価して いる場合が多く、本 RSF 予測モデルに優位性がある。 一方、プラズマ・バブル発生が多い春分(3月)や秋分 (9月)の予測率は、夏至(6月)より精度が落ちており、 改善の余地があることが示された。

# 3 まとめと今後の展望

本稿では、SEALION プロジェクトにおける電離圏 観測網の現状と、SEALION を利用した赤道異常、プ ラズマ・バブル、AI による電離圏変動予測に関する最 近の研究成果について紹介した。赤道異常の南北非対 称性の発達には、赤道を横断する子午線方向の中性大 気風が重要な役割を示していることが明らかになった。 地磁気じょう乱に伴う東向き電場により昼間の赤道異 常が急激に発達した際には、背景の中性大気風の影響 で急激な南北非対称性の変化も見られた。プラズマ・ バブルについては、発生しやすい季節や時間帯以外の



より得られたチュンポンの 2016 年各月における RSF 発生率の比較 [21]。

イベントについて、その発生要因について考察した。 夜明け前に観測されたプラズマ・バブルのシーディン グの位置は、同一クラスター内のプラズマ・バブルの プラズマ密度勾配と到達高度に関与している可能性が 指摘され、消失メカニズム解明にもつながる成果が得 られた。また、通常は発達することがない時期におけ るプラズマ・バブルの発達にプラネタリー波が寄与し ている可能性や、磁気赤道付近の下層大気からの強い 大気重力波が電離圏の日没前にもプラズマ・バブルの シーディングにつながった可能性など、プラズマ・バ ブルの発生に下層大気の活動が大きく影響しているこ とが示唆された。基本的なプラズマ・バブルの発生メ カニズムに加え、これまでプラズマ・バブルは発生し にくいと考えられていた季節や時間帯に発生するプラ ズマ・バブルの詳細を明らかにしていくことは、発生 メカニズムの未解明な部分を明らかにしていく上で重 要な資料となり、より精度の高いプラズマ・バブルの 発生予測につながることが期待できる。長期間蓄積さ れてきた SEALION 観測データに AI 技術を適用し、 低緯度電離圏の変動やプラズマ・バブルを予測する試 みも実施された。AI 技術の一つである NN を用いた予 測モデルは、広く使われている IRI モデルよりも予測 性能の有意性が示された。今後、AI による予測性能を 向上させるためには、学習データの量を増やすことや、 新しい有効な入力パラメータを追加することに加え、 近年発展が著しい AI の新しい手法を SEALION デー タに適用していくことが必要である。

プラズマ・バブルにより発生する電離圏遅延の変化 や電離圏シンチレーションは、衛星測位技術に影響を 与える。Tongkasem et al. [22]の調査では、1 周波 GNSS 測位の誤差は、通常水平方で1.8 m、垂直方向で 2.3 m であるが、プラズマ・バブル発生時の誤差は最 大で11.4mに達したことが報告されている。日本の準 天頂衛星システムなど高度な衛星測位技術が日本や東 南アジアを含む世界の様々な分野において利用が進む 中、プラズマ・バブルを正確に監視・予測し、安定し た測位を実現する方策が求められている。そのために は、プラズマ・バブル構造を正確に観測し、どの衛星 - 受信機経路がプラズマ・バブル構造の影響を受けて いるかを特定して、個々の GNSS 測位技術への影響を 検証することが必要である。プラズマ・バブルの発生・ 伝搬とその正確な構造を捉えるため、2020年1月タ イ・チュンポンに VHF レーダーを設置した(図10)。こ の VHF レーダーは、東西 90 m の敷地内に等間隔に設 置した18台の八木アンテナで構成されるレーダーシ ステムで、39.65 MHz の電波を上空に発射し、プラズ マ不規則構造で散乱(ブラッグ散乱)されるエコーを捉 えることで、プラズマ・バブルの正確な構造を観測す るものである。今後、観測モードの調整とデータ解析 を進めるとともに、磁気赤道に設置された GNSS 受信 機も利用してプラズマ・バブルの測位結果への影響を 検証し、高度な衛星測位技術の安定利用に貢献してい きたい。

### 謝辞

現在、宇宙天気に関わる SEALION 観測の一部は、 総務省からの委託業務「電波伝搬の観測・分析の推進」 に基づき実施されています (R1-0155-0112, R2-0155-0133)。SEALION による観測は、タイ、インドネシア、 ベトナム、フィリピン、ラオス各国の研究機関や大学 との共同で進められています。タイのモンクット王工



図 10 タイ・チュンポンに設置された VHF レーダー

科大学ラカバン、チェンマイ大学、ラジャマンガラ工 科大学イサン、インドネシア国立航空宇宙研究所、ベ トナムのハノイ地球物理研究所、フィリピンのサンカ ルロス大学、ラオス国立大学、インドネシアのスマト ラ島における EAR レーダー施設を運用する京都大学 生存圏研究所の方々に大きな支援と協力を頂いている ことに感謝します。SEALION に関わる運用及び研究 開発においては、石井守電磁波伝搬研究センター長、 西岡未知主任研究員、Septi Perwitasari 研究員、浜真 一有期研究技術員、直井隆浩有期研究技術員、永原政 人有期研究技術員、中山健司参事、石橋弘光元主任研 究員、丸山隆協力研究員にご支援いただきました。ま た、チュンポン VHF レーダー設置については、名古 屋大学の大塚雄一准教授及び電子航法研究所の斎藤享 上席研究員に多大なご協力いただきました。心より感 謝申し上げます。

#### 【参考文献】

- 1 齋藤享, 丸山隆, "プラズマバブルの発生における赤道横断熱圏風の効 果." 情報通信研究機構季報, vol.55, nos.1-4, 2009.
- 2 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, vol.55, nos.1-4, 2009.
- 3 野崎憲朗, "MCW イオノゾンデの開発,"情報通信研究機構季報, vol.55, nos.1-4, 2009.
- 4 Shimazaki T., "World-wide daily variations in the height of the maximum electron density of the ionospheric F2 layer," J. Radio Res. Lab., vol.2, no.7, pp.85–97, 1995.
- 5 Watthanasangmechai K., M. Yamamoto, A. Saito, T. Maruyama, T. Yokoyama, M. Nishioka, and M. Ishii, "Temporal change of EIA asymmetry revealed by a beacon receiver network in Southeast Asia," Earth Planets and Space, vol.67, no.75, pp.1–12, 2015. doi:10.1186/s40623-015-0252-9
- 6 Maruyama T, Saito S, Kawamura M, and Nozaki K, "Thermospheric meridional winds as deduced from ionosonde chain and equatorial latitudes and their connection with mid-night temperature maximum," J. Geophys. Res., vol.113, A09316, 2008. doi:10.1029/2008JA013031
- 7 西岡未知, 丸山隆, 大塚雄一, 津川卓也, 石橋弘光, 塩川和夫, 石井守, "イ オノゾンデおよびファブリ・ペロー干渉計によって観測された子午面熱 圏風の比較," 南極資料, vol.57, no.3, pp.357–368, 2013.
- 8 McClure, J.P., W.B. Hanson, and J.H. Hoffman, "Plasma bubbles and irregularities in the equatorial ionosphere," J. Geophys. Res., vol.82, pp.2650–2656, 1977.

- 9 M.C. Kelley, R.C. Livingston, C.L. Rino, and R.T. Tsunoda, J. Geophys. Res., vol.87, 5217, 1982.
- 10 Otsuka Y., "Review of the generation mechanisms of post-midnight irregularities in the equatorial and low-latitude ionosphere," Prog. Earth Planet Sci., vol.5, 57, 2018. https://doi.org/10.1186/s40645-018-0212-7
- 11 Watthanasangmechai K., M. Yamamoto, A. Saito, R. Tsunoda, T. Yokoyama, P. Supnithi, M. Ishii, and C. Yatini, "Predawn plasma bubble cluster observed in Southeast Asia," J. Geophys. Res. Space Physics, vol.121, pp.5868–5879, 2016. doi:10.1002/2015JA022069
- 12 Yokoyama, T., H. Jin, and H. Shinagawa, "West wall structuring of equatorial plasma bubbles simulated by three-dimensional HIRB model," J. Geophys. Res. Space. Physics, vol.120, pp.8810–8816, 2015. doi:10.1002/2015JA021799
- 13 Otsuka, Y., K. Shiokawa, and T. Ogawa, "Disappearance of equatorial plasma bubble after interaction with mid-latitude medium-scale traveling ionospheric disturbance," Geophys. Res., Lett., vol.39, L14105, 2012. doi:10.1029/2012GL052286
- 14 Shiokawa, K., Y. Otsuka, J. W. K. Lynn, P. Wilkinson, and T. Tsugawa, "Airglow-imaging observation of plasma bubble disappearance at geomagnetically conjugate points," Earth Planets and Space, vol.67,no.43, 2015. doi:10.1186/s40623-015-0202-6
- 15 Ajith, K. K., S. Tulasi Ram, B. A. Carter, S. Sathish Kumar, M. Yamamoto, T. Yokoyama, S. Gurubaran, S. Sripathi, K. Hozumi, K. Groves, and R. G. Caton, "Unseasonal development of post-sunset F-region irregularities over Southeast Asia on 28 July 2014: 2. Forcing from below?," Prog. Earth Planet Sci., vol.5, 60, 2018. https://doi.org/10.1186/s40645-018-0218-1
- 16 Dutta, Barsha, Bitap Raj Kalita, P. K. Bhuyan, S. Sharma, R. C. Tiwari, K. Wang, K. Hozumi, T. Tsugawa, T. Yokoyama, M. Le Huy, and T. T. H. Pham, "Spatial features of L-band equinoctial scintillations from equator to low midlatitude at around 95°E during 2015–2016," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol.123,Issue 9, pp.7767-7788, 2018. https://doi.org/10.1029/2018JA025533
- 17 Ajith, K. K., Li, G., Tulasi Ram, S., Yamamoto, M., Hozumi, K., Abadi, P., and Xie, H., "On the seeding of periodic equatorial plasma bubbles by gravity waves associated with tropical cyclone: A case study," Journal of Geophysical Research: Space Physics,vol.125, e2020JA028003, 2020. https://doi.org/10.1029/2020JA028003
- 18 中村真帆, 丸山隆, 師玉康成, "ニューラルネットを用いた東京上空における電離圏変動の予測システム," 情報通信研究機構季報, vol.55, nos.1-4, 2009.
- 19 Watthanasangmechai K, Supnithi P, Lerkvaranyu S, Tsugawa T, Nagatsuma T, and Maruyama T, "TEC prediction with neural network for equatorial latitude station in Thailand," Earth Planets and Space, vol.64, pp.473–483, 2012. doi:10.5047/eps.2011.05.025
- 20 Wichaipanich N, Hozumi K, Supnithi P, and Tsugawa T, "A comparison of neural network-based predictions of foF2 with the IRI-2012 model at conjugate points in Southeast Asia," Adv. Space Res., vol.59,pp.2934–2950, 2017. https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.03.023
- 21 Thammavongsy, P., Supnithi, P., Phakphisut, W., Hozumi, K., and Tsugawa, T., "Spread-F prediction model for the equatorial Chumphon station, Thailand," Advances in Space Research, vol.65, pp.152-162 2019. doi: https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.09.040
- 22 Tongkasem,Napat, Lin M. M. Myint, Pornchai Supnithi, Tharadol Komolmis, and Kornyanat Hozumi, "The disturbance effects on single frequency GPS positioning at low geomagnetic latitude stations in Thailand," ITC-CSCC 2020, Nagoya (Online Conference), July 3–6, 2020.



津川卓也 (つがわ たくや) 電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター 宇宙環境研究室

室長 博士 (理学) 超高層大気物理



#### HOZUMI Kornyanat (ほづみ こんにゃなっと)

電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター 宇宙環境研究室 テニュアトラック研究員 博士(情報学) 超高層大気物理