# **2-4 電離圏局所シミュレーション** 2-4 Ionospheric High-resolution Simulation

#### 横山竜宏

YOKOYAMA Tatsuhiro

赤道域に特有なプラズマバブルと呼ばれる電離圏じょう乱現象は、局所的なプラズマ密度の不 規則構造を伴い、電波の振幅、位相の急激な変動(シンチレーション)が生じるため、GPS等によ る電子航法に障害を及ぼすことが知られている。このような電離圏じょう乱の発生機構を解明し、 発生を事前に予測することが、科学・実用の両面から求められている。電離圏局所シミュレーショ ンの開発は、そのようなじょう乱現象を再現し、発生の日々変化を予測し、その影響について定 量的な評価を目指すものである。本稿では、現在までのモデル開発の歴史的経緯、今後の研究課 題とその展望について述べる。

Equatorial plasma bubble (EPB) is a well-known phenomenon in the equatorial ionospheric F region. As it causes severe scintillation in the amplitude and phase of radio signals and degrades electronic navigation systems such as GPS, it is important to understand and forecast the occurrence of EPB from a space weather point of view. High-resolution ionospheric simulation models have been useful tools to understand the generation mechanism of EPB, to forecast day-to-day variability of EPB occurrence, and to evaluate its impact on radio propagation quantitatively. Historical background of model development, recent research activities, and future prospects will be reviewed in this paper.

# 1 まえがき

宇宙開発が急速に進む中、衛星通信、航法の安定的 な利用が強く求められている一方、宇宙環境そのもの の理解は十分とは言い難い。地球の超高層大気(高度 100-1,000 km)は、太陽からの強力な紫外線の影響を 受けて、大気の一部が電離した状態(プラズマ)で存在 しており、電離圏と呼ばれている。電離圏は、下層大 気と宇宙空間をつなぐ遷移領域であり、多くの人工衛 星が周回する領域であると同時に、衛星電波が遅延等 の影響を受ける伝搬経路でもある。GPS等を利用した 高精度、高信頼度の測位、航法が実用化されつつあり、 電離圏による電波の伝搬遅延の影響は、要求される精 度に対して相対的に大きくなっている。その補正のた めに、電離圏の物理過程の理解、現状把握、そしてそ の予測が強く求められている。

赤道域においては、下層大気(対流圏)における活発 な対流活動が、様々な時間・空間スケールの大気波動 を引き起こし、赤道域特有の電離圏現象を生み出して いる。特に深刻な電波障害の原因となる現象として、 プラズマバブルと呼ばれる現象が古くから知られてい る[1]。プラズマバブルは、電離圏下部の密度成層が不 安定化して低密度領域が泡のように上昇する現象であ り、その泡の内部は非常に不安定な不規則構造で満た されているため、電波伝搬に大きな影響を及ぼす。し かしながら、日々変化するプラズマバブルの発生を事 前に予測する手段は現時点においては皆無である。赤 道付近を航行する航空機・船舶にとって、衛星航法を 阻害するプラズマバブルの影響は深刻であるため、プ ラズマバブルの発生を事前に予測し、その方向にある 衛星を利用しない等の回避策を取る必要がある。宇宙 天気予報の精度向上に向けて取り組むべきプラズマバ ブルに関する課題としては、(1)発生の有無を決定する 要因の解明、(2)成長から衰退までのプロセスの理解、 (3) 電波伝搬に及ぼす影響の定量的評価、等が挙げら れる。これらの課題の解決のために、電離圏局所シ ミュレーションが非常に有用である。ここでは、赤道 電離圏を対象とした局所シミュレーション開発の歴史 的経緯と現状、今後の展望について述べる。シミュ レーションモデルの詳細については Yokoyama[2] に 示されているので、こちらも参照されたい。

## 2 赤道スプレッド F とプラズマバブル

イオノゾンデを用いた電離圏観測が開始されてまも なく、ペルーのHuancayoにおける観測で、高度約 200-500 kmの範囲で観測されるF層のトレースが通 常よりもレンジ方向や周波数方向に「広がって」見える 現象が発見された[3]。これは、F層が一様な成層構造 ではなく、空間的に不規則な構造を持っているためで あり、赤道域で観測されるものは特に「赤道スプレッ ドF」と呼ばれるようになった。この不規則構造の生 成要因として、レイリー・テイラー不安定によるF層 の不安定化が提唱された[4]。レイリー・テイラー不安 定は、軽い流体が下層に、重い流体が上層に存在する 場合に生じる不安定現象であり、電離圏ではF層の電 子密度がピークとなる高度よりも下部で成長率が正と なる。しかし、ペルーのJicamarcaに建設されたVHF レーダーによる観測から、赤道スプレッドFに伴う



図1 Woodman 博士により提唱されたプラズマバブルの概念図 [6]

3mスケールの不規則構造はF層ピーク高度より上部 でも観測されることが明らかとなり、レイリー・テイ ラー不安定では説明できないと考えられるようになっ た[5]。

この問題を解決したのが、「プラズマバブル」の概念 である。図1に示すように、電離圏下部の非常に低密 度の領域が泡のように非線形成長することで、電離圏 上部にまで到達できると推測した[6]。Ronald Woodman 博士は、Jicamarca レーダーによる赤道スプレッ ドFの観測からこのプラズマバブルの概念を着想した のであるが、この時点で実際の現象をほぼ正確に表現 できているのは驚くべきことである。

# 電離圏局所シミュレーションの3 歴史と現状

## 3.1 2次元シミュレーション

Woodman 博士によって提唱されたプラズマバブル の非線形成長による電離圏上部での不規則構造の生成 は、ほぼ同時期に別の目的で開発が進められていた数 値シミュレーションモデルを応用することで、低密度 領域がF層ピーク高度よりも上部にまで到達する様子 が再現され、プラズマバブルの概念が広く認められる こととなった [7]。図2に、赤道電離圏の局所シミュ レーションモデルにより初めて再現されたプラズマバ ブルの成長過程を示す[8]。磁気赤道上空では地球磁場 が水平北向きであるため、東西-鉛直の二次元断面を 計算領域とすると、磁力線は計算領域全体に対して垂 直となり、二次元直交座標系において磁力線直交成分 の運動のみを扱えばよいので非常に都合がよい。この 特徴により、2次元シミュレーションモデルは1990年 代にかけて大きく発展し、プラズマバブルの様々な特 徴を再現することに成功した。ただし、磁力線が高緯 度に向かって湾曲して電離圏E領域と結合する効果は 含まれないため、南北両半球のE領域をそれぞれ1層



図2 2次元シミュレーションにより初めて再現された、プラズマバブルの発達の様子[8]



図3 両半球の電離圏 E 領域をそれぞれ積分した層として与えた3層モデルで再現した、時間とともに西に傾くプラズマバブルの発達の様子 [9]

でモデル化し、3層結合モデルとしたものも開発された[9]。このモデルにより、図3に示すようにプラズマ バブルが伝搬とともに西に傾く様子が再現された。

## 3.2 3次元シミュレーション

上述の東西 – 鉛直断面における2次元シミュレー ションモデルでは、計算領域に直交する南北方向に 沿って全てのパラメータが一様であることを暗に仮定 している。プラズマバブルの形状等の定性的な理解に は有用であったが、現実に近い環境の下での発生の有 無、成長速度、電波伝搬への影響等の定量的な評価は 困難であった。磁力線は高緯度に向かって湾曲し、電 子密度は赤道異常帯において最大値を取り、中性大気 の風速や密度等の様々なパラメータが緯度変化を示す ことから、現実に近いシミュレーションを行うために は3次元シミュレーションの開発が必須であった。

2000年代に入ると、計算機性能の向上により、赤道 電離圏を3次元空間として扱うモデルの開発が試みら れ始めた。初期のモデルでは、磁力線平行方向の有限 な導電率のため、プラズマバブルの成長は2次元シ ミュレーションから推定されていた値よりも遅くなる 可能性があることが示された[10][11]。その後、Huba らによって開発されたモデルにより様々な成果が発表 され[12ほか]、3次元シミュレーションの有用性が認識 されることとなった。このモデルは、全球電離圏モデ ルとして開発されていた SAMI3 を改良したものであ る。計算領域を全球ではなく限られた経度範囲に制限 し、空間分解能をプラズマバブルが再現できる程度に まで高めることで、SAMI3で用いられていた従来の計 算スキームのままプラズマバブルを再現することが可 能となった。

筆者らは、2013年頃から赤道電離圏の局所シミュ レーションモデルの開発に着手した。既に海外では複 数のモデルが開発済みであったが、いずれもプラズマ バブルの輪郭のみが再現されていただけであり、その 内部の1 km 以下のスケールの微細構造を再現可能な モデルは存在しなかった。実際の衛星航法に用いられ ている周波数帯の電波にシンチレーションを引き起こ すのは、300-400 m スケールの不規則構造であること から、このスケールの不規則構造を再現し、電波伝搬



に及ぼす影響を定量的に評価することを目的として新 たなモデルの開発を行った[13]。このモデルは、中緯 度帯に多く発生するスポラディックE層とそれに関連 する電離圏不規則構造を対象とした数値モデルを改良 したものである [14]。スポラディック E 層は非常に薄 く密度の高い層であり、電子密度の空間勾配が非常に 大きい。この空間勾配を保持したまま計算を進めるた めに、非常に高い空間分解能を持つ座標系に CIP 法と 呼ばれる数値スキームを適用することで、スポラ ディックE層のシミュレーションを可能としていた。 プラズマバブルの壁面では、スポラディック E 層と同 程度の急峻な電子密度勾配を持つことから、この中緯 度電離圏モデルを赤道域に適用するための改良を加え ることで、非常に複雑な内部構造を含むプラズマバブ ルを再現することに成功した[13]。図4に再現された プラズマバブルの一例を示す。このモデルに High-Resolution Bubble (HIRB) モデルと名付けた。HIRB モデルを利用して、プラズマバブルの構造の東西非対 称性[15]、鉛直風によるプラズマバブルのシーディン グ効果[16]が示された。また、内部の微細構造を詳細 に解析した結果、過去の観測ロケットや人工衛星観測 から推定された不規則構造のパワースペクトルとよく 一致することが明らかとなった[17]。



現在までにプラズマバブルの生成機構と成長過程に

ついては、シミュレーション研究により多くの事実が 明らかとなってきた。しかし、宇宙天気予報として最 も重要である日々の発生予測については現状ではほぼ 不可能な状況である。また、電波伝搬に及ぼす影響の 定量的評価も重要な課題である。以下では、現在進め ている研究開発項目について紹介し、電離圏局所シ ミュレーションの今後の展望について述べる。

#### 4.1 電離圏全球シミュレーションとの結合

プラズマバブル発生の日々変化は、様々な背景の要 因で決定されていると考えられるが、局所シミュレー ションではそのような全球規模の要因を全て含ませる ことは不可能である。一方、全球の大気圏電離圏を計 算領域とするGAIAモデルでは、空間分解能は数十km 程度が限界であり、プラズマバブルを直接再現するこ とは現状では困難である。そこで、両者を階層的に結 合し、プラズマバブルの発生を自己無撞着に予測でき る数値モデルを開発し、発生の条件を解明することを 目指している。下層大気の変動と地磁気活動の影響を 含めた数値モデルを構築し、定性的な季節・経度・地 方時依存性による予測モデルから脱却することで、実 利用に資するプラズマバブル予報モデルへの発展を視 野に含める。図5に階層化電離圏モデルのイメージを 示す。

この結合モデルの実現に向けて、まず HIRB モデル の計算領域を全経度範囲に拡張し、同時にプラズマバ ブルを再現できる分解能を併せ持つモデルの開発を 行った。電離圏の電場は、電離圏内を流れる電流の非



図5 階層化電離圏モデルのイメージ図

発散条件を満たすように決定される。したがって、地 球規模のダイナモ電場とプラズマバブルの成長に寄与 する微細なスケールの電場は、同時に決定されるべき である。そこで、プラズマバブルが主に発生する日没 時刻付近を HIRB モデルと同程度の高解像度、その両 側の経度域に徐々にグリッド間隔を広げた不等間隔グ リッド領域を設け、その他の領域を GAIA モデルと同 程度の低解像度とする座標系を設定する。この座標系 において、経験モデルから得られた電子密度分布、中 性風速分布を与え、同時にプラズマバブルの種となる 初期密度変動を与えることで、全球規模のダイナモ電 場と小規模のプラズマバブルを同時に再現することが 可能となった[18]。この不等間隔グリッドモデルを GAIA モデルに導入することで、日々変化する電離圏 の様々な条件の下でのプラズマバブルの発生の有無に ついて検討することが可能となることが期待される。

#### 4.2 中緯度帯に及ぼす影響

強い磁気嵐が発生した時など、日没時に東向き電場 が急速に発達すると、非常に高高度にまで発達するプ ラズマバブルが発生することがある。プラズマバブル の低密度構造は磁力線に沿った構造を持つため、磁気 赤道上空で高度2,000 kmに達するようなプラズマバブ ルは、沖縄や九州地方上空の中緯度域にまで到達する ことがある[19]。このような場合、日本付近を航行する 航空機や船舶が利用する測位衛星や短波通信に影響を 及ぼすため、中緯度域にまで到達するプラズマバブル を再現可能なシミュレーションモデルが必要である。

従来の HIRB モデルでは、磁気赤道上空における計 算領域の上端を高度約1,200 kmに設定していた。この 高度を通る地球磁場は磁気緯度約 20 度付近の電離圏



と結合しているため、中緯度域にまで到達するプラズ マバブルを再現することはできなかった。そこで、計 算領域の上端を2,500 kmまで引き上げ、電離圏上部に おける主要なイオン組成である水素イオンをシミュ レーションモデルに追加することで、急速に高高度ま で成長するプラズマバブルの再現を可能とした。図6 に計算結果の南北断面図と中緯度域における高度 400 km での電子密度分布を示す。大気光観測で見ら れるような枝分かれしたプラズマバブルがはっきりと 確認できる。どのような条件の下でこのような巨大な プラズマバブルが発生するのかについては今後の研究 課題である。

### 4.3 電波伝搬に及ぼす影響の定量的評価

プラズマバブルが電波伝搬に影響を及ぼすことはこ れまでに述べたとおりである。プラズマバブル発達に 伴い、電離圏下部の等密度線は大きく歪み、短波帯の 伝搬に影響を及ぼす。一方、プラズマバブル内部の不 規則構造は VHF 帯から L 帯にかけての衛星電波にシ ンチレーションを引き起こし[20]、また VHF 帯の電波 を散乱させることで赤道横断伝搬の原因にもなる [21]。 プラズマバブル内部の電子密度分布は、観測ロケット や人工衛星により古くから観測が行われてきたが [1ほか]、いずれも軌道に沿った1次元の観測であった ため、プラズマバブル内部の3次元構造については不 明なままであった。HIRB モデルでは、磁力線直交方 向の空間分解能を200mにまで向上させた計算が可能 となっており、更なる改良を加えることで、シンチ レーションを引き起こすスケールの不規則構造を直接 再現することが可能となるであろう。

短波無線通信や宇宙天気利用者のために短波帯の電 波伝搬シミュレータ HF-START が情報通信研究機構 で開発されている [22]。HF-START は、IRI モデルや GAIA モデルから得られる3次元電子密度分布を入力 として与えることで、任意の2地点間での短波帯電波 の伝搬を推定できるモデルである。現状ではプラズマ バブル程度の空間スケールの電子密度変動には対応し ていないが、空間分解能を向上させ、HIRB モデルの 結果を入力として与えることで、プラズマバブル発生 時の短波帯電波の伝搬を推定可能となることが期待さ れる。一方、VHF 帯やL帯のシンチレーションにつ いても、高分解能 HIRB モデルの結果を利用すること で、定量的な評価が可能となる。電子密度分布の空間 スペクトルを正確に計算した結果、過去のロケットや 人工衛星による観測と非常に良い一致を示し、実際の 1 km 以下のスケールの不規則構造が精度良く再現さ れていることが明らかとなった[17]。HIRB モデルで再 現されたプラズマバブル内部の微細構造を位相スク リーンモデル等の電波伝搬モデルに与えることで、成 長したプラズマバブルによるシンチレーションを定量 的に評価できるようになることが期待される。

## 5 まとめ

1970年代に開発がスタートした電離圏局所シミュ レーションは、計算機性能の進化とともに大きな発展 を見せ、プラズマバブルの形態学的様相についてはか なりの点が明らかにされてきた。一方、宇宙天気予報 として最も重要な発生の日々変化の理解とその予測に ついては、現状では未だにほぼ不可能な状況である。 発生の季節・経度変化や、赤道異常帯の広がりと発生 の関係など、定性的かつ統計的な指標は存在するもの の、日没時刻を迎えた時点で、この後プラズマバブル が発生するかどうかを判断する指標は皆無である。

日々の発生予測を実現するためには、赤道域におけ るリアルタイム観測を充実させると同時に、その観測 データを同化して取り込める全球 – 局所階層化結合モ デルを開発し、計算結果を電波伝搬予測モデルに与え るという、複合的かつ挑戦的な研究課題に取り組まな ければならない。

#### 謝辞

本研究は日本学術振興会科研費16 K17814, 20 K04037の助成を受けたものです。本研究の成果(の 一部)は京都大学生存圏研究所「先端電波科学計算機実 験装置(A-KDK)」を利用して得られたものです。

#### 【参考文献】

- M. C. Kelley, "The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics," 2nd edn. Int. Geophys. Ser., vol.96, Academic Press, Boston, 2009.
- 2 T. Yokoyama, "A review on the numerical simulation of equatorial plasma bubbles toward scintillation evaluation and forecasting," Progress in Earth and Planetary Science, vol.4, article number 37, 2017. doi:10.1186/s40645-017-0153-6
- 3 H. G. Booker and H. W. Wells, "Scattering of radio waves by the F region of the ionosphere," J. Geophys. Res., vol.43, pp.249–256, 1938.
- 4 J. W. Dungey, "Convective diffusion in the equatorial F region," J. Atmos. Terr. Phys., vol.9, pp.304–310, 1956.
- 5 D. T. Farley, B. B. Balsley, R. F. Woodman, and J. P. McClure, "Equatorial spread F: Implications of VHF radar observations," J. Geophys. Res., vol.75, pp.7199–7216, 1970.
- 6 R. F. Woodman and C. LaHoz, "Radar observations of F region equatorial irregularities," J. Geophys. Res., vol.81, pp.5447–5466, 1976.
- 7 R. F. Woodman, "Spread F an old equatorial aeronomy problem finally resolved?," Ann. Geophys., vol.27, pp.1915–1934, 2009.
- A. J. Scannapieco and S. L. Ossakow, "Nonlinear equatorial spread F," Geophys. Res. Lett., vol.3, pp.451–454, 1976.
- 9 S. T. Zalesak, S. L. Ossakow, and P. K. Chaturvedi, "Nonlinear equatorial spread F – the effect of neutral winds and background Pedersen conductivity," J. Geophys. Res., vol.87, pp.151–166, 1982.
- 10 M. J. Keskinen, S. L. Ossakow, and B. G. Fejer, "Three-dimensional nonlinear evolution of equatorial ionospheric spread-F bubbles," Geophys. Res. Lett., vol.30, Issue 16, article number 1855. 2003. doi:10.1029/2003GL017418
- 11 E. A. Kherani, M. Mascarenhas, J. H. A. Sobral, E. R. de Paula, and F. Bertoni, "A three-dimensional simulation of collisional-interchangeinstability in the equatorial-low-latitude ionosphere," Space Sci. Rev., vol.121, pp.253–269, 2005. doi:10.1007/s11214-006-6158-x

- 12 J. D. Huba, G. Joyce, and J. Krall, "Three-dimensional equatorial spread F modeling," Geophys. Res. Lett., vol.35, article number 10102, 2008. doi:10.1029/2008GL033509
- 13 T. Yokoyama, H. Shinagawa, and H. Jin, "Nonlinear growth, bifurcation, and pinching of equatorial plasma bubble simulated by three-dimensional high-resolution bubble model," J. Geophys. Res. Space Physics, vol.119, pp.10474–10482, 2014. doi:10.1002/2014JA020708
- 14 T. Yokoyama, and D. L. Hysell, "A new midlatitude ionosphere electrodynamics coupling model (MIECO): latitudinal dependence and propagation of medium-scale traveling ionospheric disturbances," Geophys. Res. Lett., vol.37, article number 08105, 2010. doi:10.1029/2010GL042598
- 15 T. Yokoyama, 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
- 16 T. Yokoyama, H. Jin, H. Shinagawa, and H. Liu, "Seeding of equatorial plasma bubbles by vertical neutral wind," Geophys. Res. Lett., vol.46, pp.7088–7095, 2019. doi:10.1029/2019GL083629
- 17 C. Rino, T. Yokoyama, C. Carrano, "Dynamic spectral characteristics of high-resolution simulated equatorial plasma bubbles," Progress in Earth and Planetary Science, vol.5, article number 83, 2018. doi:10.1186/ s40645-018-0243-0
- 18 横山 竜宏, 陣 英克, 品川 裕之, 古元 泰地, "高精細プラズマバブルモデル と全球大気圏電離圏モデルの融合,"2020 年度京都大学電波科学計算機 実験共同利用研究成果報告書, vol.121, 2021.
- 19 G. Ma, and T. Maruyama, "A super bubble detected by dense GPS network at east Asian longitudes," Geophys. Res. Lett., vol.33, L21103, 2006. doi:10.1029/2006GL027512
- 20 K. C. Yeh, C.-H. Liu, "Radio wave scintillations in the ionosphere," Proc. IEEE, vol.70, pp.324–360, 1982.
- 21 田之畑一男, 栗城功, 井□政昭, 山下恭子, 坂元敏朗, "VHF 帯赤道横断伝 搬長期実験結果,"電波研究所季報, vol.26, pp.885-897, 1980.
- 22 K. Hozumi, M. Ishii, S. Saito, T. Maruyama, H. Nakata, and T. Tsugawa, "HF-START: Application in Aid of Radio Communications/Navigation," In: Electronic Navigation Research Institute (eds) Air Traffic Management and Systems III. ElWAC 2017. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol.555. Springer, Singapore, 2019. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7086-1\_19



横山竜宏 (よこやま たつひろ)

京都大学 生存圏研究所 准教授 博士 (情報学) 電離圏物理学