

# 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

Integration of high-resolution plasma bubble model and whole atmosphere-ionosphere model

**研究代表者：**横山 竜宏 (京都大学生存圏研究所)

**研究分担者：**陣 英克 (情報通信研究機構)  
担当：全球大気圏電離圏モデル (GAIA) の開発・実行

品川 裕之 (情報通信研究機構)  
担当：全球大気圏電離圏モデル (GAIA) の開発・実行

劉 鵬 (京都大学生存圏研究所)  
担当：機械学習による電離圏擾乱現象の検出

HUANG Chun-Yen (京都大学生存圏研究所)  
担当：全球大気圏電離圏モデル (GAIA) の高解像度化

陰山 裕貴 (京都大学生存圏研究所)  
担当：高精細プラズマモデルの実行

水澤 匠 (京都大学生存圏研究所)  
担当：中緯度電離圏モデルの実行

## **研究目的 (Research Objective):**

電離圏のプラズマは、その運動が中性大気との衝突によって強く支配されているため、中性大気と電離大気の相互作用を解明することは電離圏の物理過程を理解する上で非常に重要である。特に、下層大気で励起された大気重力波は、電離圏高度で大きな振幅を持つため、電離圏の変動に重要な役割を果たすと考えられている。また、局所的なプラズマ密度の不規則構造を伴う電離圏擾乱が発生した場合には、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。このような電離圏擾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。本研究では、特に深刻な障害の原因となる赤道スプレッド F (プラズマバブル) の生成機構解明と発生予測を目指し、低緯度電離圏数値モデルを用いたプラズマバブル生成に関する研究を実施する。全球の大気圏電離圏結合モデルである GAIA モデルに高分解能のプラズマバブルモデルを階層的に結合させることを最終的な目標とする。

## **計算手法 (Computational Aspects):**

地球電離圏は弱電離プラズマ気体であり、地球磁場と中性大気との衝突の影響によ

りイオンと電子は異なった運動を示し、導電率に異方性を持つ。従って、イオンと電子の2流体を考慮する必要がある、イオンと電子の速度差から得られる電流密度の発散が0となる条件から電離圏内で発生する電場を求めることができる。その電場を用いてイオン速度を求め、プラズマ密度の連続の式から1時間ステップ後のプラズマ密度分布を更新する。現在までに開発されてきた High-Resolution Bubble (HIRB)モデルに改良を加えることで、全経度範囲をカバーする数値モデルの作成を目標とする。正イオンとして  $\text{NO}^+$ (E 領域)、 $\text{O}^+$ (F 領域)、 $\text{H}^+$ (電離圏上部) の3種類を与える。磁気赤道を中心とするダイポール座標系を用い、磁気赤道上で高度約 90-3000km、緯度方向に約 35 度の計算領域を確保する。空間分解能は最大 200m まで向上させることが可能であるが、本研究では多数の計算を実行して比較することが目的のため、空間分解能は1km程度と設定し、短時間でシミュレーションが実行できるようにした。

### 研究成果 (Accomplishments) :

今年度は、システム G を利用した機械学習による電離圏観測データの解析を中心に行った。信楽 MU 観測所におけるイオノゾンデ観測データに対して機械学習モデルによる自動読み取りを実現し、高い精度で読み取りが行えていることを確認した。また、スプレッドFと呼ばれるプラズマバブルに起因するイオノグラム上の擾乱現象の自動検出を行い、スプレッドFの定量的評価手法を確立した。

2022 年に発生したトンガ沖海底火山噴火による電離圏変動の再現に引き続き取り組んだ。南北両半球が磁力線によって結合されたモデルを利用し、噴火に起因する鉛直風による電離圏変動の計算を行った。その結果、噴火直後の電離圏変動はある程度再現できることを確認した。今後は、非静水圧モデルによる噴火時の中性風の出力を取り込み、噴火の数時間後に確認された南北共役性を持つ電離圏変動の再現を目指す。

今年度は、地球温暖化の超高層大気への影響について検討を開始した。具体的には、二酸化炭素が通常の2倍程度に増加した環境下における GAIA モデルの出力を利用し、プラズマバブルの生成にどのような影響を及ぼすかについて検討を行った。線形成長率の観点からは、プラズマバブルがより多く発生するという見積もりがなされているが、今後、シミュレーションによりその見積もりについて検討を行う予定である。

### 公表状況 (Publications) :

#### (論文)

1. Ankita, M., S. Tulasi Ram, T. Yokoyama, R. T. Tsunoda, A. P. Dimri, S. Mondal, and Chinmaya. Nayak, Satellite Traces: Ionogram Signatures of bottom-side Upwelling Structures - A Simulation Study, Geophys. Res. Lett., 52, e2024GL114119. <https://doi.org/10.1029/2024GL114119>, 2025.

#### (口頭)

1. Yokoyama, T., and T. Sori, Simulation of Equatorial Plasma Bubbles Under Geomagnetic

- Storm Conditions, Asia Oceania Geosciences Society 22th Annual Meeting [Singapore: July 2025] (Invited, Oral).
2. Haruna, K., P. Liu, and T. Yokoyama, Automatic Detection and Quantitative Evaluation of Spread F Intensity Using Machine Learning, 2026 URSI-Japan Radio Science Meeting [Chofu: March 2026] (Poster).
  3. Huang, C.-Y., and T. Yokoyama, Comparisons of Rayleigh-Taylor Instability Growth Rate and Equatorial Plasma Bubble Occurrence Rate, Asia Oceania Geosciences Society 22th Annual Meeting [Singapore: July 2025] (Poster).
  4. 横山 竜宏, ランチタイムスペシャルレクチャー:宇宙大気と宇宙天気, 日本地球惑星科学連合 2025 年大会 [千葉市/Hybrid: 2025 年 5 月] (Invited, Oral).
  5. Yokoyama, T., H. Shinagawa, and T. Mizusawa Simulation study of ionospheric disturbances caused by Hunga Tonga volcanic eruption, 日本地球惑星科学連合 2025 年大会 [千葉市/Hybrid: 2025 年 5 月] (Poster).
  6. 劉 鵬, 横山 竜宏, 山本 衛, 機械学習を用いた東・東南アジアの電離圏イオノグラムの自動読取, 2025 年度 RISH 電波科学計算機実験シンポジウム [Virtual: 2026 年 3 月] (Oral).
  7. 劉 鵬, 横山 竜宏, 山本 衛, 機械学習を用いた東・東南アジアの電離圏イオノグラムの自動読取, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2025 年秋季年会 [神戸市: 2025 年 11 月] (Poster).
  8. 春名 健太郎, 劉 鵬, 横山 竜宏, 機械学習を用いたイオノグラム画像からのスプレッド F 定量評価手法の提案, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2025 年秋季年会 [神戸市: 2025 年 11 月] (Poster).
  9. 寺内 充, 劉 鵬, 横山 竜宏, 機械学習モデルを用いた信楽イオノゾンデ観測の長期統計解析, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2025 年秋季年会 [神戸市: 2025 年 11 月] (Poster).
  10. 春名 健太郎, 劉 鵬, 横山 竜宏, 機械学習を利用したスプレッド F の検出とその応用, 第 19 回 MU レーダー・赤道大気レーダーシンポジウム [Virtual: 2025 年 9 月] (Oral).
  11. 寺内 充, 劉 鵬, 横山 竜宏, 機械学習モデルを用いた信楽イオノゾンデ観測の長期統計解析, 第 19 回 MU レーダー・赤道大気レーダーシンポジウム [Virtual: 2025 年 9 月] (Oral).
  12. 春名 健太郎, 劉 鵬, 横山 竜宏, Automatic detection of spread F using machine learning and its applications, 日本地球惑星科学連合 2025 年大会 [千葉市/Hybrid: 2025 年 5 月] (Poster).
  13. 寺内 充, 劉 鵬, 横山 竜宏, Long-term Statistical Analysis of Shigaraki Ionosonde Observations Using Machine Learning Models 日本地球惑星科学連合 2025 年大会 [千葉市/Hybrid: 2025 年 5 月] (Poster).