

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)
yokoyama@rish.kyoto-u.ac.jp

研究分担者：陣 英克 (情報通信研究機構)
jin@nict.go.jp.jp
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)
sinagawa@nict.go.jp
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)
liu.peng.35a@st.kyoto-u.ac.jp
担当：機械学習による電離圏擾乱現象の検出

湯谷 樹生 (京都大学生存圏研究所)
yutani.tatsuki.65s@st.kyoto-u.ac.jp
担当：高精細プラズマモデルの実行

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り、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 NO^+ (E 領域) と O^+ (F 領域) の2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 88-1270km、緯度方向に約 20 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) :

プラズマバブル発生の日々変動の原因を明らかにするために、背景の条件を少しずつ変化させたシミュレーションを多数実行し、プラズマバブル発生への寄与が大きいパラメータの調査を行った。具体的には、東西方向の電場の振幅と時間変化、初期状態における電離圏高度、電離圏下部に与える初期変動の振幅等を変化させ、プラズマバブル発生の有無の閾値を理解することを試みた。また、それぞれの条件の下で、プラズマバブルの要因と考えられている Rayleigh-Taylor 不安定の線形成長率を計算し、プラズマバブル発生の有無と成長率の値との比較を行った。例として、F 領域下部の密度勾配が急峻な高度が 250 km、300 km、400 km の位置する場合の線形成長率の高度分布を図 1 に示す。電離圏高度が上昇している場合に成長率が高くなり、シミュレーションを進めた結果、活発なプラズマバブルが成長したことが示された。

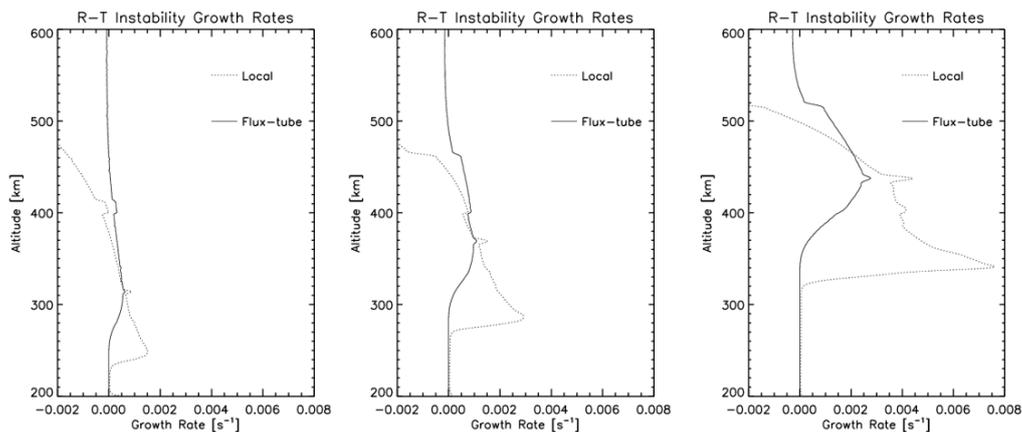


図 1: 初期高度が異なる場合の Rayleigh-Taylor 不安定の線形成長率の高度分布。点線が局所的なパラメータで計算した値、実線は磁力線に沿って積分した値を示す。左から、密度勾配が急峻な高度が 250 km, 300 km, 400 km の場合。

図 2 に、電離圏 E 領域の電子密度を変化させた場合のプラズマバブルの成長と線形成長率の高度分布を示す。磁力線に沿って積分した線形成長率は、 $\Sigma F / (\Sigma E + \Sigma F)$ のファクタ

一が掛かるため、E 領域の密度が増加すると成長率は減少する。実際、E 領域の密度を 3 倍とした場合の結果と比較すると、プラズマバブルは 2 時間以内に高高度まで成長する様子は見られなかった。一方、線形成長率の値の差は 0.001s^{-1} 程度であり、僅かな成長率の差が大きな違いをもたらすことが明らかとなった。プラズマバブル発生の日々変動の差はわずかな成長率の差によってもたらされている可能性があることが示された。

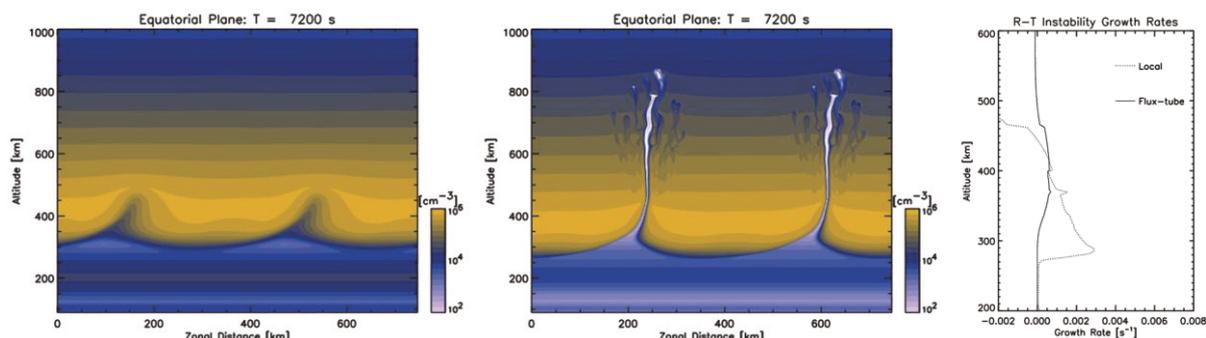


図 2: E 領域の電子密度を変化させた場合のプラズマバブルの成長と線形成長率の高度分布。左図は E 領域の電子密度を 3 倍にした場合。

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. Jiang, C., L. Wei, T. Yokoyama, R. Tian, T. Liu, and G. Yang, Modeling of Multi-Ion Plasma Bubbles in the Equatorial Ionosphere, *J. Geophys. Res. Space Physics*, **128**, e2023JA031753, doi:10.1029/2023JA031753, 2023.
2. Rino, C., T. Yokoyama, and C. Carrano, A three-dimensional stochastic structure model derived from high-resolution isolated equatorial plasma bubble simulations, *Earth, Planets and Space*, **75**, 64, doi:10.1186/s40623-023-01823-6, 2023.

(口頭)

1. Yokoyama, T., H. Jin, and H. Shinagawa, Multi-Scale Simulation of Equatorial Plasma Bubbles with GAIA Model, XXXVth International Union of Radio Science General Assembly and Scientific Symposium [Sapporo: August 2023] (Invited).
2. Yokoyama, T., Y. Uneyama, P. Liu, and M. Yamamoto, Automatic scaling of foF2 and foEs from ionograms obtained at Shigaraki MU Observatory, Asia Oceania Geosciences Society 20th Annual Meeting [Singapore: August 2023] (Invited).
3. Liu, P., T. Yokoyama, and M. Yamamoto, Spatiotemporal Sequence Prediction of Global Ionospheric Total Electron Content Map Based on Deep Learning Recurrent Neural Network, XXXVth International Union of Radio Science General Assembly and Scientific Symposium [Sapporo: August 2023].
4. 横山 竜宏, 采山 裕紀, 劉 鵬, 山本 衛, 信楽イオノゾンデ観測を用いた機械学習によるスポラディック E 層の自動検出と統計解析, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会 [千葉市/Hybrid: 2023 年 5 月]