

赤道プラズマバブルの数値シミュレーション

Numerical Simulation of Equatorial Plasma Bubble

* 湯村 翼
渡部 重十

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所本部
北海道大学大学院 理学院 宇宙物理学専攻

Abstract

赤道プラズマバブルとは赤道上空で電離圏下部のプラズマ大気が高高度へと運ばれ電離圏にプラズマ密度の希薄な箇所が生じる現象である。プラズマバブルの成長過程についてはレイリーテイラー不安定の機構を用いて説明することができる。発生源については現在議論がなされているが、下部大気による影響が注目される。

下部大気の影響について考えるために、中性大気風の影響を考慮するプラズマバブルモデルを構築した。シミュレーション結果は、バブル成長の特徴を再現している。低高度で遅い成長速度が高高度へ上昇するにつれて大きくなり、成長のタイムスケールも観測に一致する。また、ピークの位置が上昇すると成長が著しく早まることが示された。風の影響は、中性大気が希薄な高高度ではあまり見られず、低高度で顕著となる。

1. Introduction

1.1 赤道プラズマバブル

赤道上空の電離圏では、赤道スプレッドFと呼ばれるプラズマ密度の不規則構造が生じることが知られている。イオノゾンデ観測による研究ではその詳細は未解決であったが、非干渉レーダー観測による研究の始まりによって電離圏下部の低密度プラズマが高高度へ上昇しているという考え方方がまとめられ、低高度のプラズマが泡のように上昇するこの現象を“プラズマバブル”と呼んだ。バブルは電離層下部の密度勾配が大きく密度構造が不規則になりやすい日没後に発生しやすい。プラズマバブルによって電離圏にプラズマ密度の不規則な箇所が生じ、電波通信に障害を与える。

1.2 レイリーテイラー不安定

プラズマバブルの発生を説明できる機構としてレイリーテイラー不安定が有力視される。レイリーテイラー不安定はプラズマが鉛直方向に正の密度勾配を持つときに重力によって発生する不安定である。概念的理解のため、プラズマ密度がそれぞれ n_1, n_2 ($n_1 < n_2$) の2層大气を2次元で考える。まず、重力ドリフトによりイオンは図の右向き、電子は左向きに移動している。このときに微小な振動を仮定すると、電荷の分極に偏りが出来る。電荷の偏りによって発生する電場で $E \times B$ ドリフトがおこりイオンと電子は不安定をさらに成長させる方向へと移動することになる。

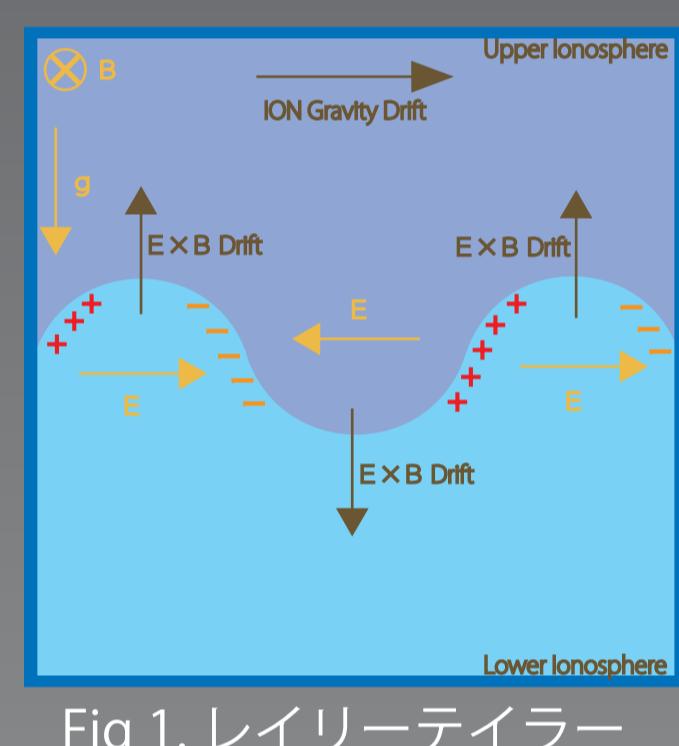


Fig 1. レイリーテイラー不安定の構造

2. Model

2.1 方程式

風の影響を考慮したプラズマバブル発生のモデル構築に次の方程式系を用いる。

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla n = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$$

$$\mathbf{V}_j = \frac{m_j \nu_{in}}{q_j B^2} \mathbf{E}' + \frac{\mathbf{E}' \times \mathbf{B}}{B^2} + \frac{m_j}{q_j B^2} \mathbf{g} \times \mathbf{B} - \frac{k_B T_j}{q_j B^2 n} (\nabla n \times \mathbf{B}) + \frac{1}{1 + \kappa_j^2} \mathbf{U} + \frac{\kappa_j}{1 + \kappa_j^2} \frac{\mathbf{U} \times \mathbf{B}}{B}$$

$$\mathbf{J} = ne(\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_e)$$

ただし

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B}$$

$$\kappa_j = \frac{q_j B}{m_j \nu_{jn}}$$

2.2 条件設定

■経度、高度の2次元赤道平面

- 経度方向 50 km
- 高度 100 ~ 600 km

■格子 : 100 × 100

■イオン O+

■初期条件

- ・ プラズマ密度 : IRI
- ・ 中性大気密度² : 静水圧平行
- ・ 中性大気温度、プラズマ温度 : IRI

■境界条件

- ・ 経度方向 : 周期境界条件
- ・ 高度方向 : $\partial n / \partial z = 0$

■初期状態に微小な密度擾乱を与える

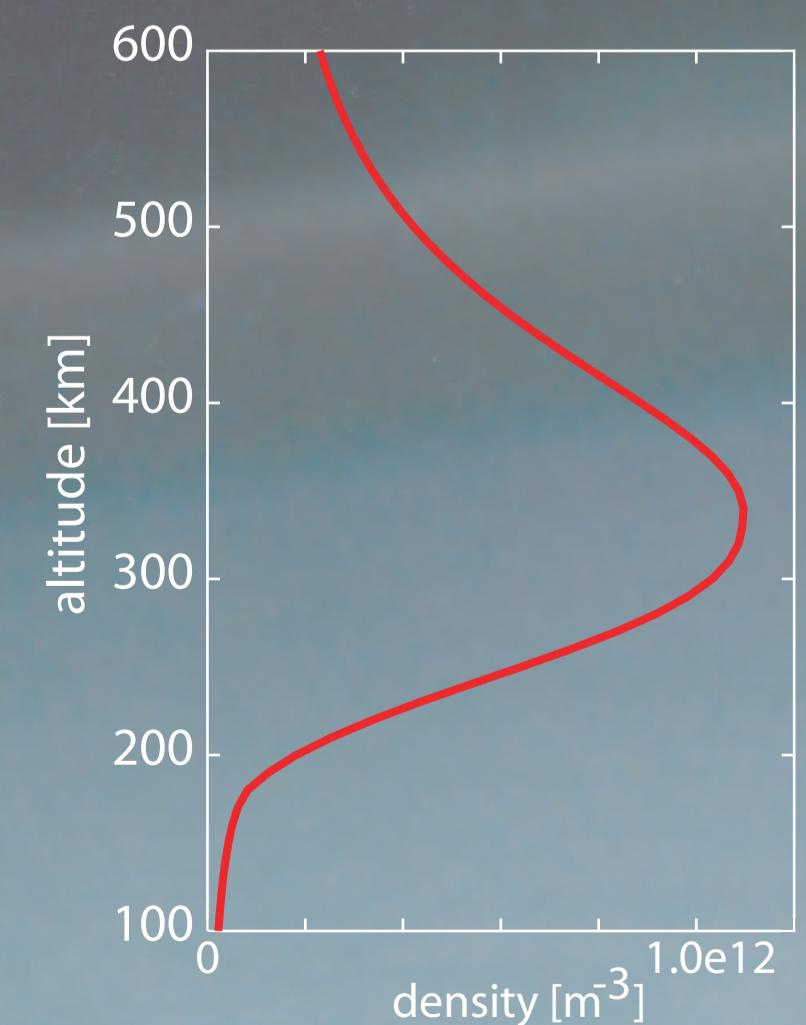
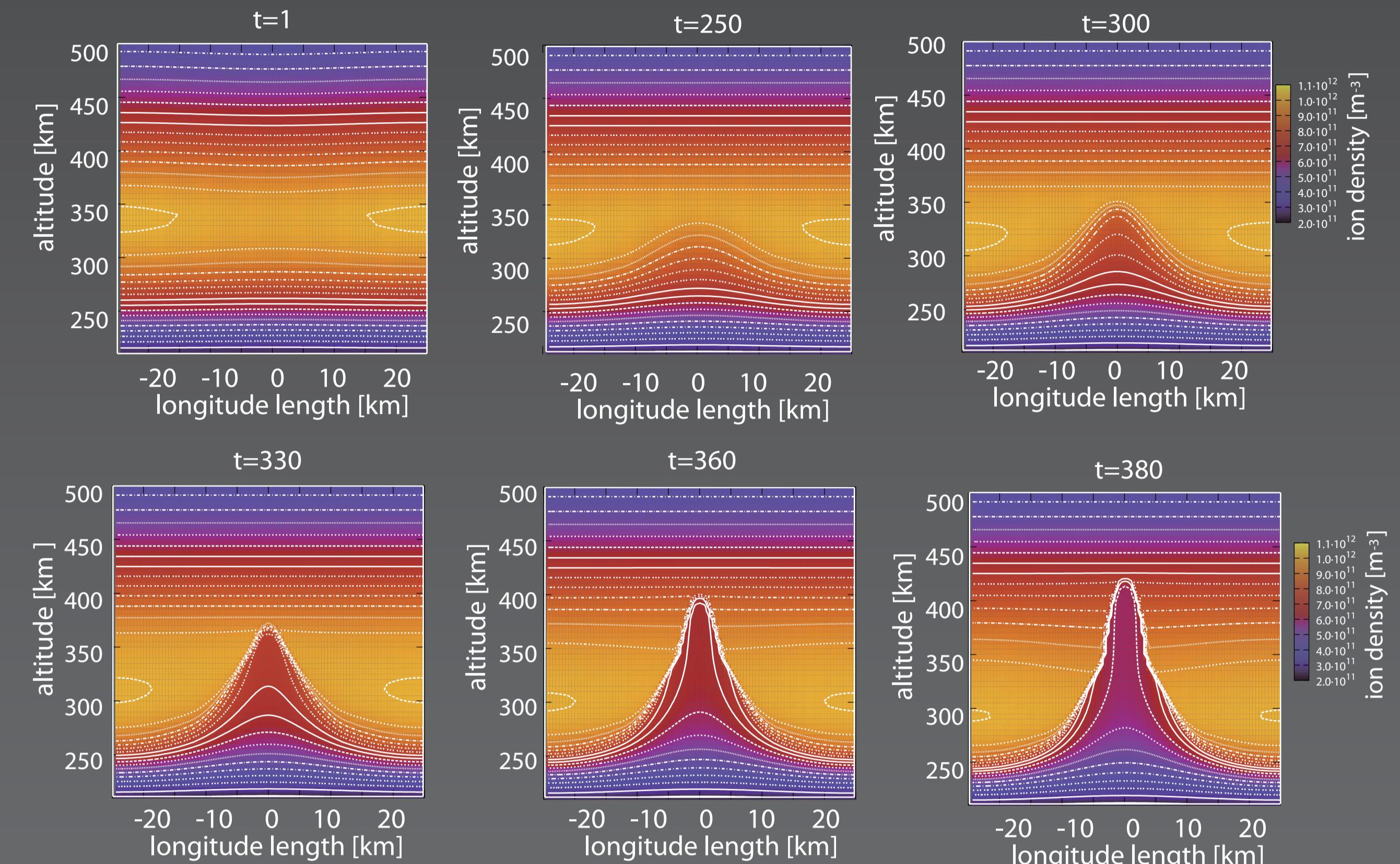


Fig 2. IRIによる鉛直イオン密度プロファイル

3. Result

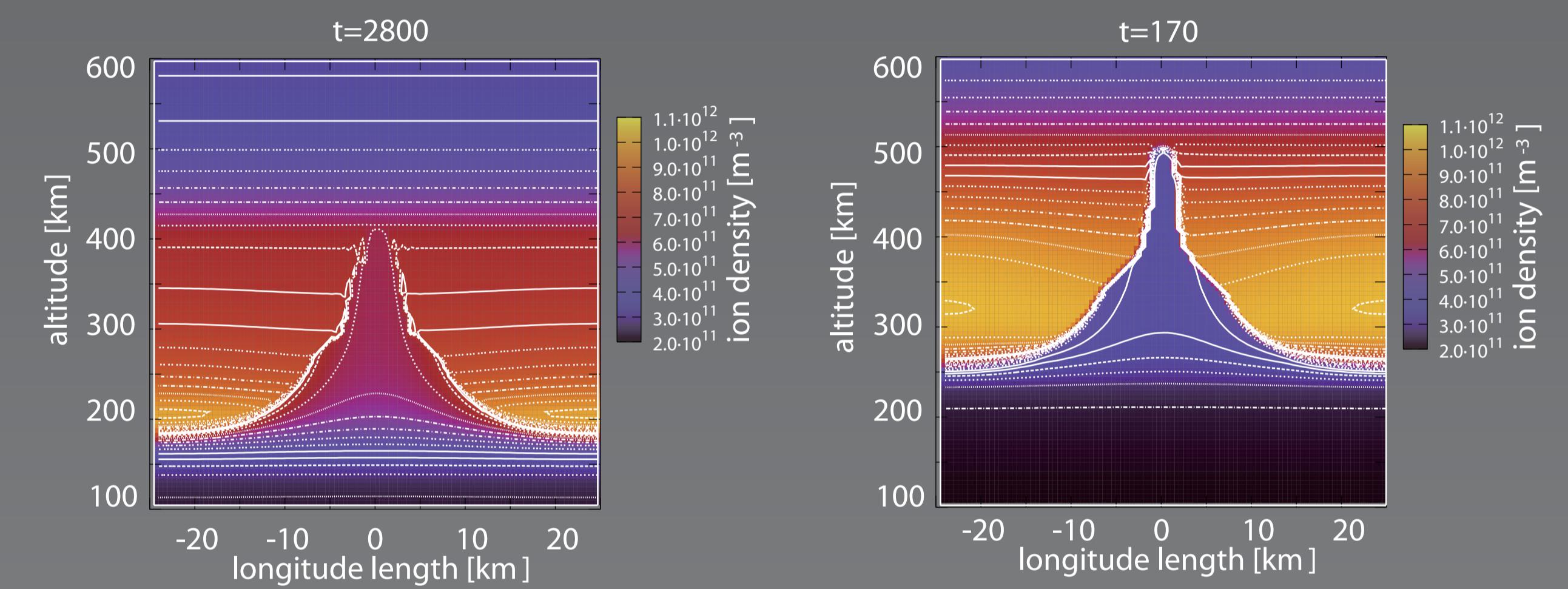
3.1 プラズマバブル成長過程

夜型の温度構造、風なし、初期微小振動の密度振幅 ± 1 %の条件で行った数値シミュレーションでプラズマバブルの成長過程を再現した。



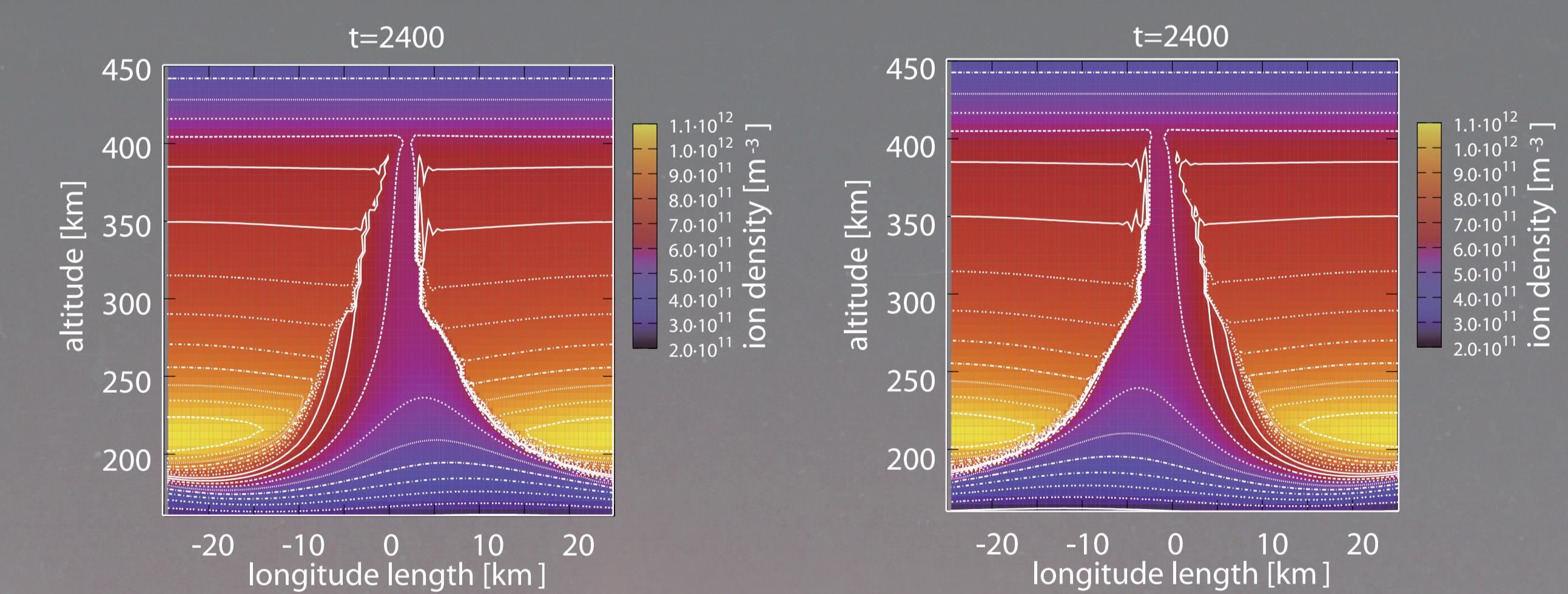
3.2 高度依存性

上記の条件に加え、初期のイオン密度構造を 50 km 上下動させシミュレーションを行った。



3.3 風の影響

イオン密度構造を 50 km 下げ、中性風を加えた。左図が西風を、右図が東風を風速 100 m/s で与えた結果である。



5. Discussion

再現したプラズマバブルからその特徴を見る。初期振動が起こってからバブルがピークを越えて高高度まで到達するのは約 400 秒であった。実際の観測で得られるバブルの成長のタイムスケールと比較しても妥当であると考えられる。

パラメータを変えて行ったシミュレーションでは、プラズマバブルの発生にはまずピークの高度が非常に大きく影響しており、ピークの高度が上昇するとバブルの成長速度は早まる。これは中性大気との衝突がイオンの移動を妨げていることより得られる結果であろう。温度構造の影響も、中性大気のスケールハイトを考えると同様である。いずれの特徴からも昼間よりも夜間のほうがバブルが成長しやすいという事実に一致した結果を得る。初期微小振動の形と振幅を変えた結果からは特徴的な変化は得られなかった。

中性大気風の影響は高高度ではあまり見られず、低高度でより顕著に現れる。低高度での中性大気の振る舞いがプラズマバブルに影響を与える可能性に肯定的な結果である。今回のシミュレーションでは一様な風の場を与えるのみに留まったが、局所風なども含め中性大気風の影響についてはより詳細な理解が求められる。

モデルの課題としては、光化学反応等によるイオンの生成消滅、イオン種類の考慮などが挙げられる。初期微小振動については任意に与え様々なパターンを試したが、例えば大気重力波などの現実に即した現象として与えられる工夫が必要である。