

レイリーテイラー不安定による赤道電離圏プラズマバブルの発生

Generation of Equatorial Ionospheric Plasma Bubbles by Rayleigh-Taylor Instability

湯村 翼 Yumura Tsubasa

北海道大学理学部地球科学科 惑星物理学研究室 4年

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、非干渉性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。

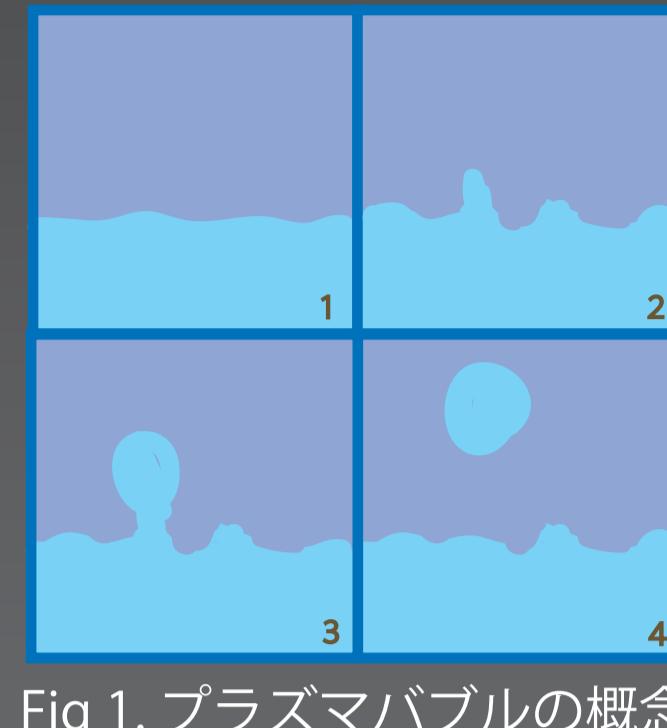


Fig 1. プラズマバブルの概念

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。概念の理解のため、プラズマ密度がそれぞれ n_1, n_2 ($n_1 < n_2$) の2層大気を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。

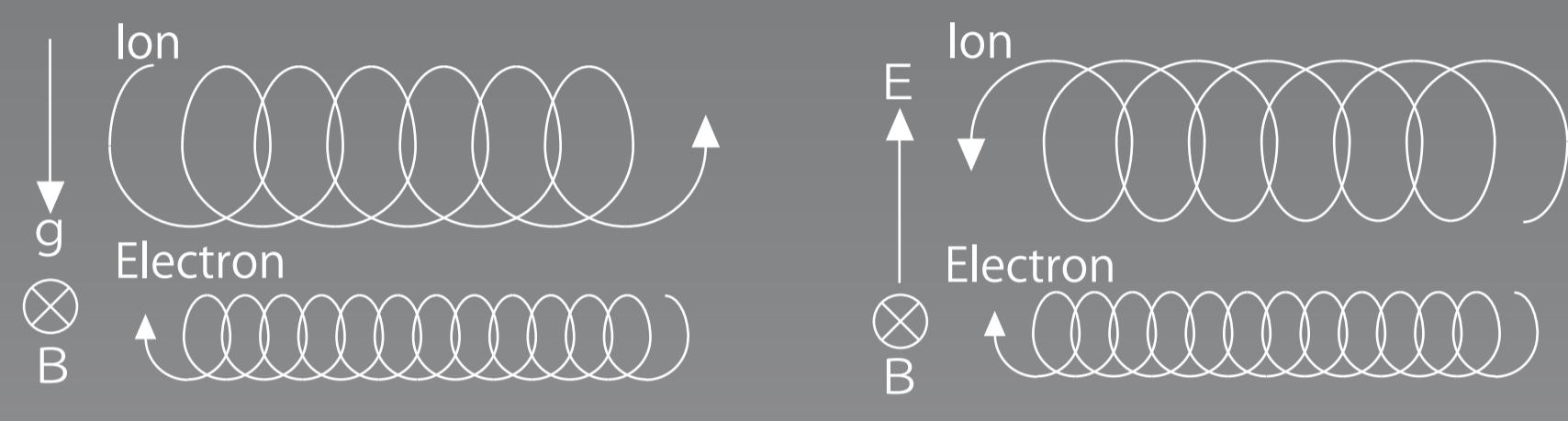


Fig 2. 重力ドリフトとEXBドリフトの概念

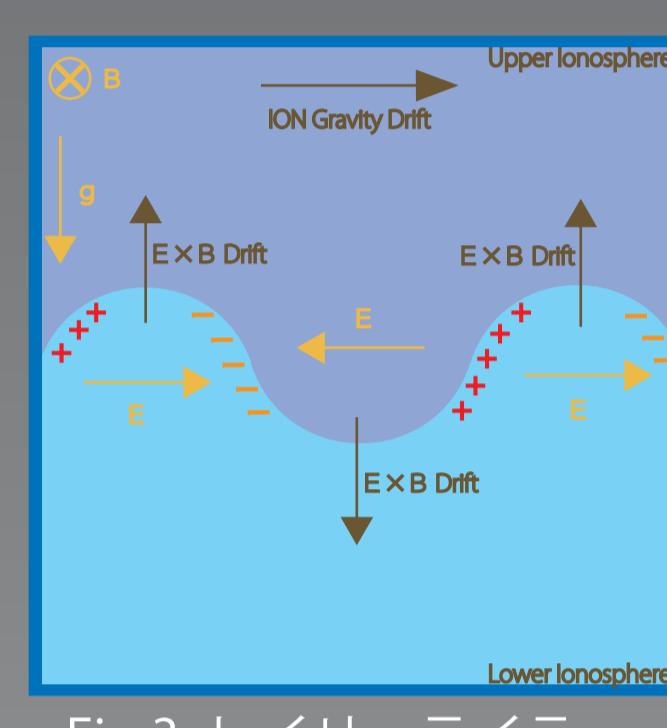


Fig 3. レイリーテイラー不安定の構造

2. 数値シミュレーションモデル

2.1 方程式

微小擾乱によって発生した微小電場のみを考え、イオン粒子の連続の式と電流の式を解く。

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

粒子の速度と電流は

$$\mathbf{V}_i = \frac{M\nu_{in}}{eB^2} \mathbf{E} + \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} + \frac{M}{eB^2} \mathbf{g} \times \mathbf{B} \quad \mathbf{V}_e = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$$
$$\mathbf{J} = ne(\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_e) = \sigma_p \mathbf{E} + \frac{ne}{B\Omega_i} \mathbf{g} \times \mathbf{B}$$

で与えられる。これらを(1),(2)に代入すると

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{Mg}{eB} \frac{\partial n}{\partial x} - \frac{1}{B} \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial n}{\partial z} = 0$$
$$\frac{eg}{\Omega_i} \frac{\partial n}{\partial x} - \frac{e^2 \nu_{in}}{M\Omega_i^2} \left[\frac{\partial n}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial n}{\partial z} \frac{\partial \phi}{\partial z} + n \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) \right] = 0$$

となり、2つの式を未知数 n と ϕ について解く。ただし、 ν_{in} はイオン-中性大気衝突周波数、 $\Omega_i = \frac{eB}{M}$ はイオンの回転周波数である。

2.2 電離圏鉛直プロファイル

中性大気とプラズマ大気の鉛直温度構造は IRI (International Reference Ionosphere) モデルによって求める。このシミュレーションでは緯度 0° 、経度 135° での 1983 年 12 月 21 日の正午、夕方、深夜の鉛直温度構造を用いた。中性大気の密度は静水圧平行の式

$$n_n(z) = n_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right)$$

に従う。ただし H はスケールハイト $H = \frac{k_B T_n}{m_n g}$ である。また、イオン-中性大気衝突周波数は $\nu_{in} = \frac{C}{\sqrt{A}} (n_n + n_i)$

とした。ただし A は大気の 1 粒子平均質量、定数 C は SI 単位系で 3.3×10^{19} である。

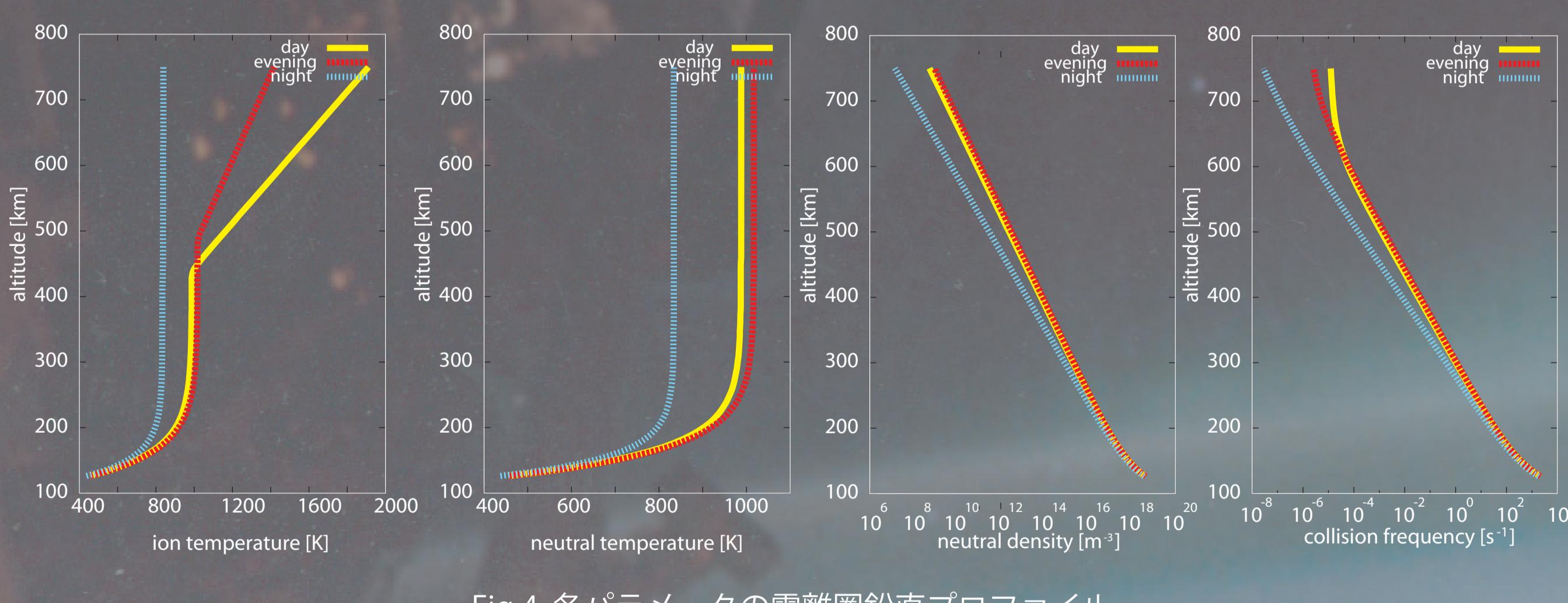


Fig 4. 各パラメータの電離圏鉛直プロファイル

2.3 初期条件

低高度電離圏では高エネルギー粒子の流入によるプラズマの電離生成の影響は小さいので、イオン密度の鉛直方向の初期値は Chapman 関数

$$n(z) = n_p \cos \chi \exp \left[1 - \frac{z - z_p}{H} - \frac{\exp(-\frac{z-z_p}{H})}{\cos \chi} \right]$$

を用いる。ただし χ は太陽天頂角、 n_p と z_p は $\chi=0^\circ$ のときの

プラズマピークの密度と高度である。

Chapman 関数で求めた鉛直構造に対し

経度方向に依存する初期微小振動を与える。正弦波形に最大 ± 1% の範囲で

密度を増減させる。

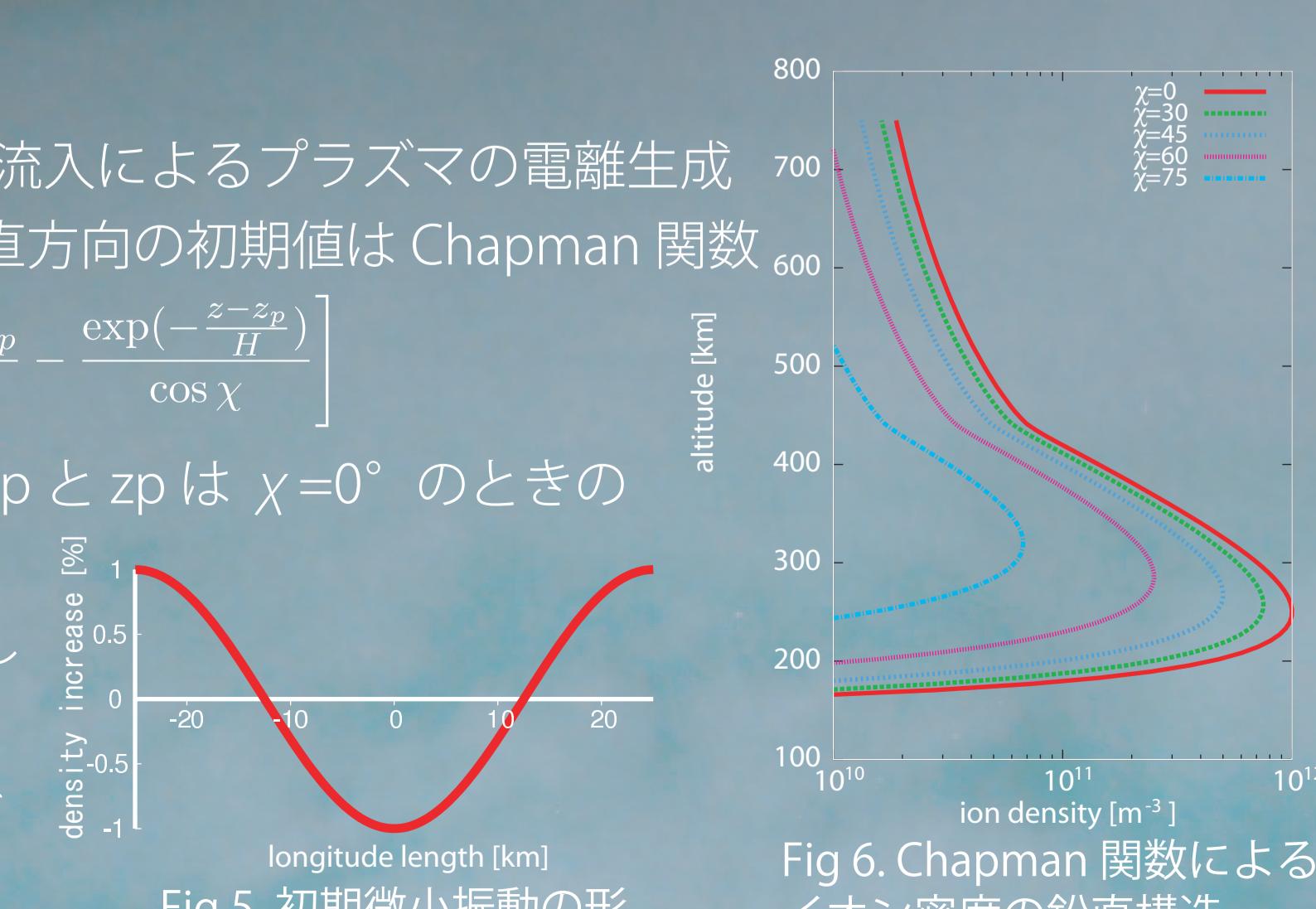


Fig 5. 初期微小振動の形

3. 計算結果

3.1 プラズマバブルの再現

夕方の温度構造、太陽天頂角 60° 、 $n_p=1.0 \times 10^{12} [\text{m}^{-3}]$ $z_p=300 [\text{km}]$ で実行し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。

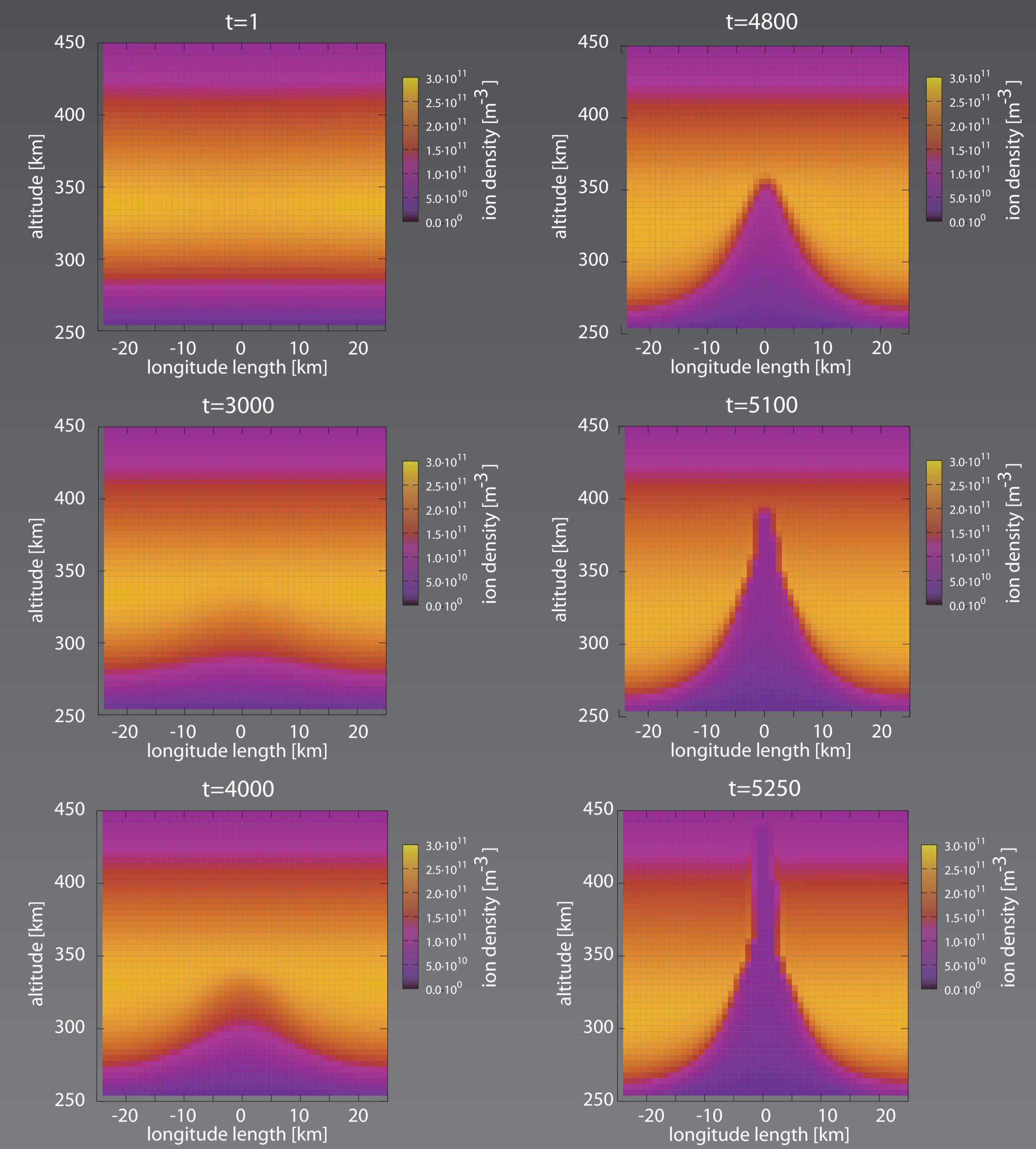


Fig 7. シミュレーションで再現したプラズマバブルの成長過程

3.2 パラメータを変えた結果

各パラメータを変化させてシミュレーションを実行しその違いを考察した。

- 初期微小振動の形: ほぼ影響しない
- 初期微小振動の大きさ: バブル成長のタイムスケールには影響しない
- 温度: 夜型の温度構造の方がバブルの成長が早い
- 太陽天頂角: 大きく影響する、太陽天頂角が大きいとバブルの成長は著しく早く太陽天頂角が小さいとバブルは発生しない
- プラズマピークの高度: 大きく影響する、ピークの高度が高いとバブルの成長は著しく早くピークの高度が低いとバブルは発生しない
- プラズマピークの密度: ほぼ影響しない

4. Conclusion

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 5000 秒であるが、約 4000 秒までは密度変化がほとんど起こっておらず、残りの 1000 秒でバブルが急激に成長していることを考えると実際の観測で得られるバブルの成長のタイムスケールに一致する。

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大きく影響しており、そして温度構造も影響している。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。

このモデルの課題は、まずペダーセン電流を含めることである。ペダーセン電流によって $E \times B$ ドリフトが起こりさらに不安定を生み出す。それから、現在はイオンと中性大気は $O+$ と N_2 のみで構成されていると仮定しているが、高高度では N_2 よりも O が卓越し、 $H+$ も質量が小さく機動度が大きいので無視できない存在である。また、イオンの電離生成については太陽紫外放射による光電離生成のみを考えているが、特に高高度では高エネルギー粒子の流入による衝突電離生成も重要となる。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。

5. References

- 荒川忠一, 1994, 数値流体工学, 東京大学出版会, pp. 48-73.
深田佳成, 2004, 惑星と太陽風の相互作用, 北海道大学理学部地球科学科 卒業論文
J. T. Houghton, 2002, The Physics of Atmospheres Third Edition, Cambridge University Press, p. 287.
J. V. Eccles, 1999, Geophysically Realistic Models of ESF Plasma Plumes, Ionospheric Effects Symposium, pp. 545-553
丸山隆, 2002, 電離圏不規則構造, 通信総合研究所季報, 48, No.3, pp. 143-155.
Michael C. Kelley, 1987, The Earth's Ionosphere, Academic Press, pp. 1-63, 113-185.
M. J. Keskinen, S. L. Ossakow, and B. G. Fejer, 2003, Three-dimensional nonlinear evolution of equatorial ionospheric spread-F bubbles, Geophysical Research Letters, 30, No.16.
恩藤忠典, 丸橋克英, 2000, 宇宙環境科学, オーム社出版局, pp. 1-26, 71-126.
R. J. Goldston, and R. A. Rutledge, 1995, Introduction to Plasma Physics, Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, pp. 311-323.
S. J. Bauer, 小山孝一郎訳, 1999, 惑星電離圏の物理, 宇宙科学研究所, pp. 1-41.
坂下志郎, 池内了, 1996, 新物理学シリーズ 30 宇宙流体力学, 培風館, pp. 61-68.
棚橋隆彦, 1995, 電磁熱流体の数値解析, 森北出版, pp. 221-227.
W. Baumjohann, and R. A. Treumann, 1997, Basic Space Plasma Physics, Imperial College Press, pp. 11-30, 47-72.