拠点課題ID: EX20505

3次元シミュレーションによる スポラディックE層の 日・季節変動の物理機構の解明

安藤 慧¹, 齊藤 昭則¹, 品川 裕之²

Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto, Japan
 National Institute of Information and Communication Technology, Tokyo, Japan

スポラディックE層の概観

スポラディックE層 (Es層)

- ▶ 電離圏E領域(高度100-130 km)に生じる 金属イオン(Fe+,Mg+,Ca+)の高密度層
- 衛星測位精度低下や 地上通信電波の異常伝播の原因
- ▶ 構造や密度の突発的な変動を有する





イオノゾンデによるEs層の観測



東西風の鉛直方向シアによる層形成

(高度100-130 km間)



半日周期の大気潮汐波による

Es層の発生機構の模式図



✓北向き地球磁場中をイオンが東西中性風に流される
 ✓ローレンツ力によって、イオンが鉛直運動を示す
 ✓イオン鉛直運動が収束する地点でEs層が生じる

✓電離圏下部の東西風シアは潮汐波によって生じる
✓Es層は半日・日周期の構造を持つ

Es層強度の時刻依存性

- <u>日出後と日入後</u>に多く発生
 - ✓半日潮汐波の影響
 - ✓日出と日入で発生頻度が異なる
 - → 朝に隕石降込が多いため 朝方の方が密度が高い?

But

<u>観測場所によって朝方の頻度は多くない.</u> 隕石による説明では,場所によって 異なる理由が説明できない. Es層臨界周波数s ≥ 10 MHzのEs層の発生率



Es層出現率の季節依存性

- ▶夏半球において出現率が高い
 - ✔ 北半球:日本周辺や大西洋上空が特に高い
 - ✔ 南半球:オーストラリア周辺や東太平洋上空が特に高い



[Wu et al., 2005, 改変]

ES層発生の季節依存性

▶ 隕石の降り込みとEs層の強度に相関がある[Haldoupis et al., 2007]



[[]Haldoupis et al., 2007]

But 流星入射量は春秋で異なるが, foEsの平均的大きさは春秋ほぼ同じ → 風などによる物理過程もかなり重要なのでは?



- 観測によって捉えられたEs層構造の日々変動を初めて再現
 - ✓ 複数のEs層の同時発生数
 - ✓ Es層の発生高度の高低
 - ✓ Es層の寿命







本研究の目的

- ▶ Es層の発生率や水平伝播方向などの季節依存性や地方時依存性の物理機構の解明
- ▶ 数値計算結果の統計解析によって未解決問題へアプローチする

本研究の意義

- ▶ Es層はVHF帯・HF帯の電波を利用する防災無線や航空航法無線などの異常伝播の 原因となるため,その発生・形成機構の解明が進み,発生予報の実現が望まれている.
- ▶ Es層と中性大気波動の関係性に関する知見が深まれば、観測が困難な電離圏下部の 中性大気の情報をEs層から抽出できる.



高度方向

- ▶ 85-130 km: 500 m分解能
- ▶ 130-220 km: 500 m から2 km分解能

経緯度方向

- ▶ 30度 × 30度: 0.25度 分解能
- イオノゾンデ観測との比較のため、
 計算領域の中心を東京都国分寺に設定



30 132 134 136 138 140 142 144 146 148



・ 連続の式:
$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = -N_i \nabla \cdot V_i - V_i \cdot \nabla N_i + P_i - L_i$$

• 運動方程式:
$$e(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{V}_i \times \boldsymbol{B}) + M_i \boldsymbol{g} - \frac{\nabla (N_i k_B T_i)}{N_i} + M_i \nu_{in} (\boldsymbol{V}_n - \boldsymbol{V}_i) = 0$$



※添字iはイオン, nは中性粒子を示す.	
• N:数密度	•V:速度
• P, L:化学生成率, 消失率	• T:温度
• B:地球磁場	• M:質量
• g:重力加速度	
 ν_{in}:イオン-中性粒子間の衝突周波数 	
• <i>k_B</i> :ボルツマン定数	

境界条件と適用スキーム

- ▶ 境界条件
 - ✓ 領域上端のNO⁺, O⁺₂, Ca⁺密度: 拡散平衡を仮定
 - ✔ それ以外の物理量:ノイマン境界条件
- ▶ 適用スキーム
 - ✔ 移流項:CIP法 [Yabe et al., 1991]を適用.
 - ✔ 化学反応: 陰解法

イオン組成と中性大気

プラズマを構成するイオン

- ✓ 化学過程・輸送過程の双方に寄与
 O⁺, O₂⁺, NO⁺, Ca⁺
 ✓ 化学過程にのみ寄与
 - N+, N₂+
- 中性大気組成,中性風速度
 - ✓ NRLMSIS-00 : N_2 , N, O₂, O, T_N
 - ✓ GAIAモデル: \vec{V}_n
- ▶ CaとCa+の初期高度分布(右図)
 - ✓ Plane et al. [2018]を参考にして, 右図の高度分布で水平一様に分布させた



モデル内での季節変動の再現

- ▶ Ca原子のInjection Rate(IR)の導入
- ▶ 金属原子の輸送も解く

$$\frac{\partial N_{Ca}}{\partial t} + \nabla (N_{Ca}\vec{V}_n) = P_{Ca} - L_{Ca} + I_R$$

- ・AST: 小惑星帯
- ・HTC: 長周期ハレー彗星
- JFC: Jupiter-Family Comets

各金属原子のInjection Rate



[Carrillo-Sánchez et al., 2016]