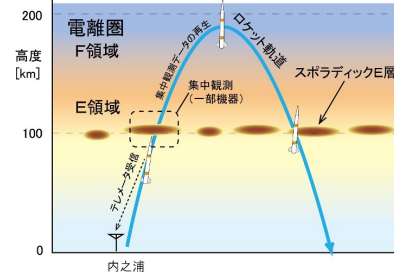


昼間スプラディックE層形成過程の 中性大気とプラズマ大気の同時観測による解明

齊藤 昭則(京大)、阿部 琢美(JAXA)、石坂 圭吾(富山県大)
田川 雅人(神戸大)、熊本 篤志(東北大)、齋藤 義文(JAXA)
松岡 彩子(京大)、斎藤 享(ENRI)、西岡 未知(NICT)
細川 敬祐(電通大)、横山 竜宏(京大)、Huixin Liu(九大)

内之浦からS310ロケットにより、高度90-130kmにおいて、中性大気・プラズマ大気・風・電場・磁場の直接観測を行い、昼間の中緯域電離圏における高密度層であるスプラディックE (Es) 層の形成過程を解明することを目的とする



この実験の意義は以下の3点

- (1) 地上からの遠隔2次元観測で捉えている昼間Es層の直接観測
- (2) 数値モデルによるEs層形成過程の予測の検証
- (3) 中性大気・プラズマ大気の直接計測パッケージの完成

過去の内之浦Es層ロケット実験に対する本実験の特徴

- (1) 中性大気・プラズマ大気の主要な全ての物理量を直接計測する初めての観測
- (2) 昼間はEs層内部の電磁気的な不安定性が発達していないため、Es層の生成機構そのものを解明するのに適している
- (3) 電場と風的作用が逆方向であり、両者の寄与の評価がしやすい
- (4) 近年発展したGNSS受信機網等による2次元の地上観測との比較が可能

過去の関連実験に関する位置付け：内之浦Es層ロケット実験

Es層を対象とした内之浦からのロケット実験は、S-310-26号機・S-310-25号機（1996年）、S-310-31号機・S-310-32号機（2002年）、S-310-38号機（2008年）、S-520-27号機・S-310-42号機（2013年）、S-520-29号機（2014年）と行われている

- ・Es層への関心が高く、研究が続けられている理由
 - 中性大気・プラズマ大気の相互作用が複雑な振る舞いを起こしている、という科学的な意義
 - 電波伝搬障害を起こしている、という実利的な意義
- ・これまでのEs層ロケット実験はいずれも夜間あるいは日没後、日の出前のEs層を対象
 - 夜間のEs層内では電磁気的な不安定性が発達しており興味深い
 - 中性風の測定は化学放出を用いており、昼間ではその撮影が困難
- ・今回は、これまで夜ばかり測定しているから昼に測定する、というのではない

2

意義 (1) 地上からの遠隔2次元観測で捉えている昼間Es層の直接観測

GNSS受信機網による昼間Es層の2次元観測が進んできた。夜間は高層の変動（MSTIDなど）の存在のため検出できないが、昼間はE層の構造を観測できていると推定されている。ただし、高度方向に積分した観測量（全電子数）の変動量の測定のため、どのような鉛直構造なのかは分からない

- ・細長い構造はどのように形成されるのか？
- ・細長い構造がない所にはEs層は存在しないのか？

→ 生成原因が大気潮汐波だと考えるとEsの領域が限定されていることは説明ができない

3

4

意義 (2) 数値モデルによるEs層形成過程の予測の検証

全大気モデルGAIAによる中性風を入力として、3次元電離圏モデルによりEs層の生成と発展の日々変動が再現され始めている。 [Andoh et al., 2020]

昼間のEs層について数値モデルから予想される電場・風との関係を測定で検証する。（これらは地上からの遠隔観測では測定できない）

昼間のEs層の形成と発展における電場と風の寄与についての数値モデルからの予想：

- ・ 昼間のEs層において、高層から下降して発達するEs層の形成には電場が必要
- ・ Es層の位置が電場によって東西風の向きが変わる高度（シア高度）よりも高い高度に移動している
- ・ 低高度の停滞しているEs層は中性風によって輸送されている
- ・ Es層は、多層でありGNSS観測で見られるような狭い水平領域には限定されない

意義 (1) 地上からの遠隔2次元観測で捉えている昼間Es層の直接観測

- ・ 航空機航法用VHF電波（およそ100MHz）の異常反射が昼間Es層に伴って広範囲・高頻度に起こっていることが明らかになった [Hosokawa et al., 2021]
- ・ 日本は世界的にもEs層が活発な領域であり、同じ航法システムでも北米などとは異なる環境となっている
- ・ 従来考えられているよりも高い周波数の電波の反射はどのような電子密度構造により起こっているのか

5

意義 (3) 中性大気・プラズマ大気の直接計測パッケージの完成

中性大気

大気組成：中性大気質量分析器

大気密度・速度：中性大気密度・風計測装置

（大気温度は電子温度あるいは密度の高度分布から推定可能）

プラズマ大気

プラズマ密度：インピーダンスプローブ

イオン組成・速度：イオンドリフト速度測定器

電子温度・プラズマ密度：ラングミュアプローブ

（イオン温度は電子温度から推定可能）

電場：電場観測装置

電流：磁場観測器

高度90km-130kmは、大気圏と宇宙空間の境界領域で、プラズマは低高度では高頻度の衝突のため中性大気に捉われているが、高高度では無衝突となり電場に支配される。その間では、電子とイオンの速度差が生じるため電流が発生する。

8

意義 (3) 中性大気・プラズマ大気の直接計測パッケージの完成

これまでの中性風計測に用いられていた化学放出は、高い高度範囲での計測が可能であるが、撮影のための地上観測点の展開が必要、昼間の観測が困難、他のその場計測と観測位置が違う、という問題があった。

電離真空計による風速の測定が高度110km以下では科学放出で測定された風速と概ね一致することがNASAによる2013年のWallops島でのロケット実験で示された（リチウム放出は日本のグループが実施） [Pfaff et al., 2020]

これにより、中性大気・プラズマ大気の主要な全ての物理量を直接計測する初めてのロケット実験が実施できる目処がたった

7

本実験では、イオン速度の式も電流の式の両辺の計測が可能であり、モデルの不確定性へ逃げることなく、高度とともに変化するこれらの物理量の関係性を評価できる

イオン速度 $0 = n_i q (\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}_0) - n_e m \nu_{in} (\mathbf{v}_i - \mathbf{u}_n)$

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{U}_n + \frac{\kappa_i}{B(1 + \kappa_i^2)} (\mathbf{E} + \mathbf{U}_n \times \mathbf{B}) + \frac{\kappa_i^2}{B^2(1 + \kappa_i^2)} (\mathbf{E} + \mathbf{U}_n \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}$$

$$\kappa_i \equiv \frac{q_i B}{m_i \nu_{in}} = \frac{\omega_{ci}}{\nu_{in}}$$

130km < 高度 $v_{j\perp} \sim \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$ $v_{in} = \frac{8}{3\sqrt{\pi}} n_n \left[\frac{2k(T_i + T_n)}{m_i} \right]^{1/2} [A' + 3.96B' - B' \log_{10}(T_i + T_n)]^2$

100km < 高度 < 130km $v_{j\perp} \sim \frac{q_j}{m_j \nu_{jn}} (\mathbf{E}_\perp + \mathbf{U} \times \mathbf{B}) + \mathbf{U}_\perp$ T_n : N_n の高度勾配から推定、 T_e から推定
 高度 < 100km $v_{j\perp} \sim \mathbf{U}_\perp$ T_i : T_e から推定

電離圏内の電流 $\mathbf{E}' \equiv \mathbf{E} + \mathbf{U}_n \times \mathbf{B}$

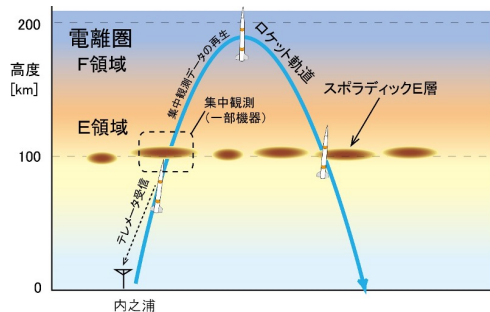
$$\mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{U}_n \times \mathbf{B}) = \sigma_p \mathbf{E}'_\perp - \sigma_H \mathbf{E}'_\perp \times \mathbf{b}$$

$$\sigma_p = n_i q_i \frac{\kappa_i}{B(1 + \kappa_i^2)} - n_e q_e \frac{\kappa_e}{B(1 + \kappa_e^2)}$$

$$\sigma_H = n_i q_i \frac{\kappa_i^2}{B(1 + \kappa_i^2)} - n_e q_e \frac{\kappa_e^2}{B(1 + \kappa_e^2)}$$

実験の方法

- (1) 使用ロケット：S-310 型観測ロケット
ガスジェット方式による姿勢制御装置の搭載を希望
- (2) 打ち上げ場所：内之浦宇宙空間観測所
- (3) 実験時期：2023年度夏季を希望
- (4) 実験時刻：ロケット打ち上げ時刻は Es 層の出現確率の高い 13-14 時を希望する。これは絶対条件ではなく、他の条件により困難な場合は調整が可能。打ち上げ時には、情報通信研究機構 (NICT) のイオノゾンデを使用して Es 層の存在を確認する



取得データ量が多く観測のサンプリングレートが比較的高くない観測器については高度90-120km で集中観測を実施しデータを媒体に記録し、高高度でテレメータによりデータを再生する等の工夫を行う予定

過去の関連実験に関する位置付け：2013年米国でのロケット実験 [Pfaff et al., 2020]

中性大気については経験モデルを使っているものの、電流の式の両辺の直接測定を昼の中緯度域で初めて行った観測

- (1) 中緯度では傾いた磁力線により高度方向に等電位が予想されるにも関わらず電場に強い高度変化が見られる
- (2) 電流の式の両辺から出した電流のピーク高度が明らかにずれていて、両者がバランスしていない

→ 中性大気とイオンドリフトも計測することで全ての主要物理量の比較する

搭載機器

1. イオンドリフト速度測定器
2. 電場観測装置
3. 中性大気密度・風計測装置
4. インピーダンスプローブ
5. 中性大気質量分析器
6. 磁場観測器
7. ラングミュアプローブ

開発スケジュール

年度	2020				2021				2022				2023			
	四半期		4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	
実験提案	提案		審査													
全体スケジュール					計画会議	設計会議	確認会議					計器合わせ	ロケット打上げ	データの解析		
搭載機器開発			予算申請	基礎検討	設計・製作				環境試験							

将来計画との関係

・装置開発

この実験による中性大気密度・風計測装置、中性大気質量分析器、イオンドリフト速度測定器の3つの観測機器の開発により、中性・プラズマ大気測定群が完成する

・複数日観測

Es層は下層大気の変動によると推定される日々変動が知られており、複数日観測でその下層大気の影響を明確にできる

・他の地域での観測

電場が支配的な高緯度域での中性-プラズマ結合の解明

・衛星観測

衛星に搭載し、低地球軌道、超低高度軌道で全球測定を行う

13

まとめ

内之浦からS310ロケットにより、高度90-130kmにおいて、中性大気・プラズマ大気・風・電場・磁場の直接観測を行い、昼間の中緯度域電離圏における高密度層であるスプラディックE (Es) 層の形成過程を解明することを目的とする

中性大気 **大気組成**：中性大気質量分析器

大気密度・速度：中性大気密度・風計測装置

プラズマ大気 **プラズマ密度**：インピーダンスプローブ

イオン組成・速度：イオンドリフト速度測定器

電子温度・プラズマ密度：ラングミュアプローブ

電場 電場観測装置

電流 磁場観測器

以下の3つの意義を持つ：

- (1) 地上からの遠隔2次元観測で捉えている昼間Es層の直接観測
- (2) 数値モデルによるEs層形成過程の予測の検証
- (3) 中性大気・プラズマ大気の直接計測パッケージの完成

15

人材の育成・社会との関わり

・人材の育成

経験豊かな装置PIが学生や若手研究者と連携することで、準備・実験を行うことを想定しており、将来のロケット実験、衛星観測の機器開発に携わる人材を育成することを目指している。また、数値モデルの開発においても学生や若手研究者の参加を計画している

・社会との関わり

Es層は通信・放送・測位に用いられる電波の伝搬障害を起していることが知られており、本実験の結果はそれらの電波伝搬異常の監視と予測に貢献できる。

また、地上観測の電波受信機網に一般からの参加してもらうことも検討中

14

References

- Andoh, S., Saito, A., Shinagawa, H., and Ejiri, M.K., (2020). First simulations of day-to-day variability of mid-latitude sporadic E layer structures. *Earth Planets Space* 72, 165, <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01299-8>.
- Hosokawa K, Kimura K, Sakai J, Saito S, Tomizawa I, et al. (2021). Visualizing sporadic E using aeronautical navigation signals at VHF frequencies. *J. Space Weather Space Clim.* 11, 6. <https://doi.org/10.1051/swsc/2020075>.
- Maeda, J., T. Suzuki, M. Furuya, and K. Heki (2016). Imaging the midlatitude sporadic E plasma patches with a coordinated observation of spaceborne InSAR and GPS total electron content, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 1419–1425, doi:10.1002/2015GL067585.
- Pfaff, R., Larsen, M., Abe, T., Habu, H., Clemmons, J., & Freudenreich, H., et al. (2020). Daytime dynamo electrodynamics with spiral currents driven by strong winds revealed by vapor trails and sounding rocket probes. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL088803. <https://doi.org/10.1029/2020GL088803>.
- Yamamoto, M., T. Itsuki, T. Kishimoto, R. T. Tsunoda, R. F. Pfaff, and S. Fukao (1998), Comparison of E region electric fields observed with a sounding rocket and a Doppler radar in the SEEK Campaign, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1773–1776, doi:10.1029/98GL01055.

16