

昼間スポラディック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 (京都大学大学院理学研究科)
阿部 琢美 (宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所)
松岡 彩子 (京都大学大学院理学研究科)
石坂 圭吾 (富山県立大学工学部) 齋藤 義文 (宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所)
田川 雅人 (神戸大学大学院工学研究科) 熊本 篤志 (東北大学院理学研究科)
斎藤 享 (電子航法研究所) 西岡 未知 (情報通信研究所)
細川 敬祐 (電気通信大学大学院情報理工学研究科)
横山 竜宏 (京都大学生存圏研究所) Huixin Liu (九州大学大学院理学研究院)

Elucidation of the generation process of daytime sporadic E layers by simultaneous observation of the neutral and ionized atmospheres

A. Saito (Kyoto University, Graduate School of Science), T. Abe (Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science), A. Matsuoka (Kyoto University, Graduate School of Science), K. Ishisaka (Toyama Prefectural University, Faculty of Engineering), Y. Saito (Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science), M. Tagawa (Kobe University, Graduate School of Engineering), A. Kumamoto (Tohoku University, Graduate School of Science), S. Saito (Electronic Navigation Research Institute, M. Nishioka (National Institute of Information and Communications Technology), K. Hosokawa (The University of Electro-Communications, Graduate School of Informatics and Engineering), T. Yokoyama (Kyoto University, Research Institute for Sustainable Humanosphere), Huixin Liu (Kyushu University, Graduate School of Science)

1. 実験目的と概要

本実験提案は、2024年夏期に、内之浦からS-310ロケットにより、高度90-130kmにおけるスポラディックE層（金属イオン層）を形成する中性大気・プラズマ大気・風・電場・磁場の直接観測を行うものである。その目的は以下の3つである：(1) 中性粒子とプラズマの相互作用が重要な現象を、ロケット実験による直接観測と、数値モデル・地上観測との組み合わせで解明し、予測につなげる (2) 中性粒子、プラズマ、電磁場の直接計測パッケージを完成する (3) 将来の展開のための人材育成を行う。

対象とする現象は中緯度域高度100km付近に出現するスポラディックE層である。その名の通り突発的な様相を示すこの現象の原因と考えられている中性大気と

プラズマ大気の相互作用の解明は、電波伝搬障害などの社会システムに影響を与えているスποラディックE層の予報につながる。また、中性粒子とプラズマの相互作用が重要な現象は幅広く存在するが、両者の同時観測が困難なため、その解明は十分に進んでいない。本実験では、世界的にもEs層の出現頻度の高い東アジア域に位置する日本南部において、Es層の出現頻度の高い夏期の地方時12~14時にS-310ロケットの上昇時・下降時の高度90~130kmにおいて、中性大気・プラズマ大気・風・

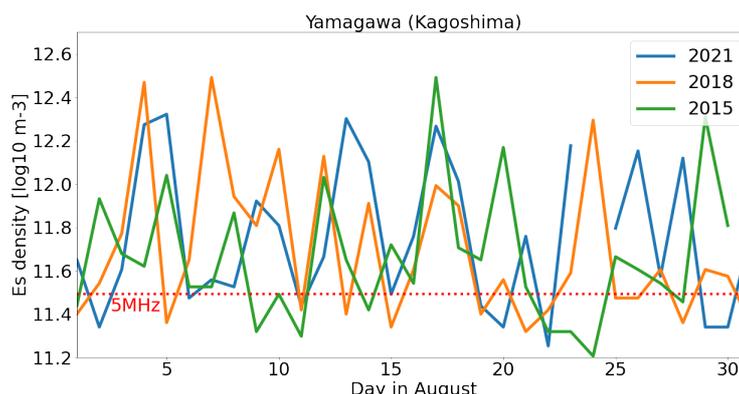


図1：NICT山川観測所の8月のLT12-14のEs層最大プラズマ密度

電場の総合的な直接計測を行う。この地方時は、Es層が発達しながら高度105km付近に到達し、中性大気とプラズマ大気の相互作用が強くなっていると予想される時間帯であり、数値モデルによる予測と組み合わせることにより電場と風のEs層の形成における寄与が明らかにできる。このロケットによる直接計測に加えて、多地点における地上観測を実施し、ロケットで観測されたEs層の時間発展と空間的広がり、航空機航法などの社会システムに用いられる電波の異常伝搬への影響の評価を行う。

また、この実験のために開発される中性・プラズマ同時直接観測機器群は、将来の再使用ロケットによる繰り返し観測（極域、中緯度域、赤道域）、探査機による月・惑星起源粒子の直接観測、超低高度衛星による大気抵抗・プラズマ変動の観測などへ利用される事を目指している。さらに、この実験を通して、将来の衛星・観測ロケット実験を担う人材の育成も目的とする。

2. スポラディックE層

突発的な振る舞い：高度90~130kmの電離圏E領域は、中性大気が支配的な地球大気圏から、プラズマが支配的な宇宙空間への遷移領域であり、異なる運動方程式に支配される流体が混在するため、複雑かつダイナミックな変動が生じている。中緯度域において、その変動は、幅広い周波数のレーダー（イオノゾンデ）電波を強

く反射するsporadic E(Es)層として数十年にわたり観測されている。

図1は、情報通信研究機構(NICT)山川観測所のイオノゾンデで観測されたEs層の最大プラズマ密度データである。本ロケット実験での打ち上げの基準として設定しているEs層反射波最大周波数 (foEs) 5MHzを赤点線で示している。実線は2015年、2018年、2021年の8月の各日の地方時12時から14時の間のEs層最大プラズマ密度を示しているが、日によって大きく変動し、1日の違いで10倍程度の差が見られることも頻繁に起こっている。プラズマの生成原因である太陽からの放射には、このような強い日々変動がないことから、この変動はプラズマの集積・発散によるものと考えられている。また、中性大気の変動においてもこのような強い日々変動はないと予想されており、この集積・発散は、中性大気とプラズマの結合過程によって強い変動が作られると推定されているが、その物理過程の解明は十分には進んでいなかった。

数値モデルの発展と課題：近年、このプラズマ大気と中性大気の両者が寄与するEs層の形成・発展の物理過程について、プラズマ大気と中性大気を含めた3次元数値モデルによる研究が進められている [Andoh et al., 2020, Andoh et al., 2021]。数値モデルから得られたEs層の日々の変動の再現は、東京でのカルシウム・イオン・ライダーによる金属イオン層の高度分布時間変化の観測や、プエルトリコ・アレシボレーダーによる電子密度高度分布時間変化の観測と整合的であり、中性大気とプラズマの結合過程を3次元で捉えることで、現象の特性が再現できることが明らかになってきた。また、従来はEs層の形成には風によるイオンの運動のみが支配的と考えられていたが、昼間のEs層において、高層から下降するEs層の発達には電場が必要であることが数値モデルからは予想された。また、Es層は東西風の向きが変わる高度で形成されることが考えられているが、電場によってEs層の位置がその高度よりも高い高度に移動することも予想されている。この物理過程は風・電場・電子密度の同時観測のみによって検証可能であり、さらに電場は風を起電力として電流を介して生じるため、電流と電気伝導度（中性大気密度・組成）の観測が全体像の解明には不可欠である。

3. 提案観測ロケット実験

2024年に、内之浦からS-310ロケットにより、高度90-130kmにおけるスポラディックE層（金属イオン層）を形成する中性大気・プラズマ大気・風・電場・磁場の直接観測を行う。本ロケット実験計画の観測対象は電離圏に発生するスポラディックE層であるため、その存在を確認した状態で打上げを行うことが必要であり、NICT山川観測所のイオノゾンデの観測データを使用してEs層の存在を確認する。打上げ時期と時刻はEs層の出現確率の高い夏期、地方時12~14時を予定している。計測される物理量と測定機器(略称)は以下である：

中性大気

大気組成：中性大気質量分析器（NMS）

大気密度・速度：中性大気密度・風計測装置（IOG）

プラズマ大気

イオン組成・温度・速度：イオンドリフト速度測定器（IDV）

プラズマ密度：インピーダンスプローブ（NEI）

電子温度・プラズマ密度：ラングミュアプローブ（FLP）

電場：電場観測装置（EFD）

磁場：磁場観測器（MAG）

中性大気温度は大気密度の高度分布から推定することが可能であり、以下の式で表される電離圏におけるイオン速度 \mathbf{v}_i を決める要素を全て測定することが可能であり、プラズマの集積・発散の支配過程を同定することができる。

$$q(\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}) - m_i \nu_{in}(\mathbf{v}_i - \mathbf{u}_n) = 0$$

$$\nu_{in} = \frac{8}{3\sqrt{\pi}} n_n \left[\frac{2k(T_i + T_n)}{m_i} \right]^{1/2} [A' + 3.96B' - B' \log_{10}(T_i + T_n)]^2$$

q : 電荷 \mathbf{E} : 電場 \mathbf{B} : 磁場 m_i : イオン質量 \mathbf{u}_n : 風

ν_{in} : イオン中性衝突周波数 n_n : 中性大気密度 T_i : イオン, 中性大気温度

T_n : 中性大気温度 A', B' : 定数 [Schunk and Nagy, 2009]

また、電離圏における電流は $\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u}_n \times \mathbf{B}) = \sigma_p \mathbf{E}'_{\perp} - \sigma_H \mathbf{E}'_{\perp} \times \mathbf{b}$ で表される。この電気伝導度は以下のようになり、これらも測定される物理量から導出可能であり、風による電場と電離圏電流の形成の評価を行うこともできる。

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

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

実験時期の評価のために、NICT山川観測所のイオノゾンデの観測で、JST12時から14時の間に打ち上げ条件（Es層反射波最大周波数foEsが5MHzより大きい）を満たす日の2003年から2021年における出現頻度を図2に示した。出現頻度は夏至を中心として高く、6月が81%、7月が76%、8月が63%、9月が20%となる。夏季のロケット実験実施時期においては6月あるいは7月の実施が望ましいが、8月打ち上げの場合でも2日に1回の頻

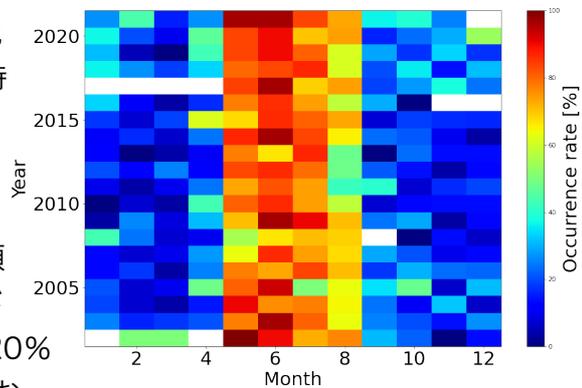


図2：NICT山川観測所のスプラディックE層の月ごとの発生確率

度で条件を満たす。ただし9月にかけて出現頻度は低下するため、8月の場合は前半での実施が必要である。

4. まとめ

本実験提案は、2024年夏期に、内之浦からS-310ロケットにより、高度90-130kmにおけるスプラディックE層（金属イオン層）を形成する中性大気・プラズマ大気・風・電場・磁場の直接観測である。近年発展が進んだ数値モデル・地上観測と組み合わせることで、電場の寄与、3次元構造の時間発展、衝突による中性大気・プラズマ大気相互作用が明らかにでき、社会システムに影響を与える電波伝搬異常の予測にも応用が可能である。

本実験のために新たに開発される中性大気質量分析器(NMS)、中性大気密度・風計測装置 (IOG)、イオンドリフト速度測定器(IDM)を、実績のある観測機器と組み合わせることで、これまで一部の物理量のみが計測され、仮定を用いることで解釈されてきた中性大気とプラズマ大気について同時にその場計測することが可能となる。この測定装置群を用いた観測は、中性粒子とプラズマが混在し、それらの相互作用が重要となる現象の解明に貢献できる観測であり、本実験提案で対象とする地球中緯度電離圏におけるスプラディックE層だけでなく、超低高度衛星 (SLATS後継機)、再使用ロケット、超小型月・惑星探査機等に搭載することによって、様々な「中性粒子とプラズマの相互作用が重要な現象」の直接計測へ展開することを期待している。

参考文献

- Andoh, S., A. Saito, H. Shinagawa, and M.K. Ejiri (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>
- Andoh, S., A. Saito, A., and H. Shinagawa (2021). Temporal evolution of three-dimensional structures of metal ion layer around Japan simulated by a midlatitude ionospheric model. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2021JA029267. <https://doi.org/10.1029/2021JA029267>
- Schunk, R. W, and A. F. Nagy (2009). *Ionospheres, Physics, Plasma Physics, and Chemistry*, Cambridge University Press