

Es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 S-310-46号機プロジェクト

齊藤 昭則、松岡 彩子、坂崎 貴俊 (京都大学大学院理学研究科)

阿部 琢美、齋藤 義文 (宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所)

石坂 圭吾 (富山県立大学工学部)

田川 雅人、横田 久美子 (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)

小嶋 浩嗣、栗田 怜、横山 竜宏 (京都大学生存圏研究所)

村田 直史 (宇宙航空研究開発機構)

斎藤 享、高橋 透 (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)

中田 裕之 (千葉大学大学院工学研究科)

Huixin Liu、木暮 優 (九州大学大学院理学研究院) 西山 尚典 (国立極地研究所)

Elucidation of the generation process of sporadic E layers by simultaneous observation of the neutral and ionized atmospheres: S-310-46 rocket project

A. Saito, A. Matsuoka, T. Sakazaki (Kyoto University, Graduate School of Science), T. Abe, Y. Saito (Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science), K. Ishisaka (Toyama Prefectural University, Faculty of Engineering), M. Tagawa, K. Yokota (Kobe University, Graduate School of Engineering), A. Kumamoto (Tohoku University, Graduate School of Science), H. Kojima, R. Kurita, T. Yokoyama (Kyoto University, Research Institute for Sustainable Humanosphere), N. Murata (Japan Aerospace Exploration Agency), S. Saito, T. Takahashi (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), H. Nakata (Chiba University, Graduate School of Engineering), Huixin Liu M. Kogure (Kyushu University, Graduate School of Science), and T. Nishiyama (National Institute of Polar Research)

1. 実験目的と概要

本実験は、2024年夏期に、内之浦からS-310-46号機ロケットにより、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・磁場の直接観測を行うものである。その目的は以下の3つである:

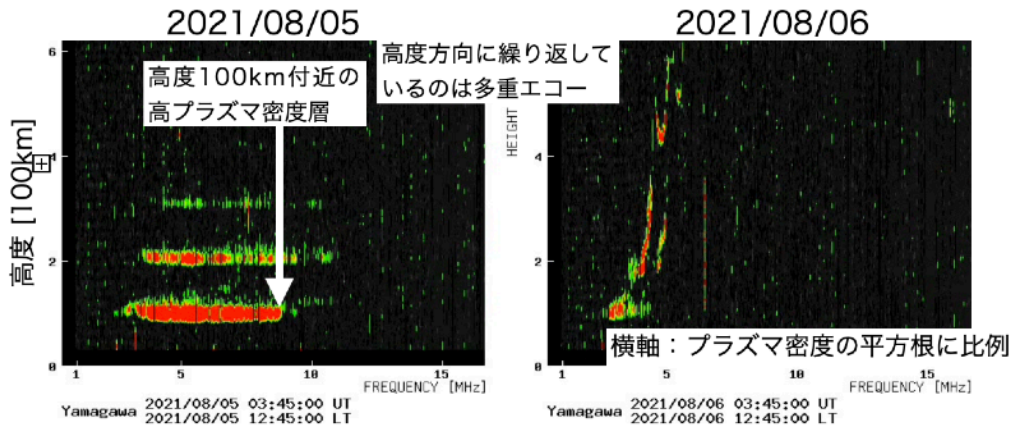


図1：NICT山川観測所アイオノゾンデによる観測(左)2021年8月5日12:45JSTの観測。最大周波数が8MHzを超える強いEs層が高度100km付近に現れている(右)2021年8月6日12:45JSTの観測。Es層は見られない。

- (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付近に出現するスプラディック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プラディック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11～14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・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。

2. スプラディック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に、情報通信研究機構(NICT)山川観測所（鹿児島県）のイオノゾンデによるEs層の観測例を示した [WDC for Ionosphere and Space Weather]。縦軸は高度、横軸は反射波の周波数を示している。反射波の周波数はその反射高度のプラズマ密度の平方根に比例しており、この観測により、プラズマ密度の高度分布を測定することができる。左図は、2021年8月5日12:45JSTの観測であり、高度100km付近に周波数方向に伸びた強度の強い反射波が見られるが、これがEs層である。この最大周波数は8MHzを超えている。高度200km付近と300km付近にも同様の層が見られるが、これは、高度100kmのEs層で反射された電波がさらに地上で反射し再び（あるいは三度）Es層で反射されることで起こる多重エコーである。右図は1日後の2021年8月6日の同時刻である12:45JSTの観測だが、この時間にはEs層は観測されていない。このように、Es層の出現確率の高い夏期においてもEs層の出現の変動は大きく、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生成量の変動によるものではなく、生成されたプラズマの集積・発散によるものと考えられている。また、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い。

3. S-310-46号機観測ロケット実験

2024年の夏期に、内之浦からS-310-46号機ロケットにより、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11～14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）

これらの観測によって、電離圏におけるイオン速度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。また、電離圏における電流を決める要素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。また、測定される物理量相互の関係から計測の精度・信頼性の評価をすることもできる。

現象に関する打ち上げ条件としては、観測領域に近いNICT山川観測所のイオノゾンデ・データをリアルタイムに監視し、Es層がある基準値を超えた場合にEs層の発生と判断して打ち上げを行う。この際に、基準値としては出現確率から5MHzが検討されているが、過去の観測データに基づいたさらなる検討が必要である。

4. 開発の状況

S-310-46号機プロジェクトは、2022年9月に安全審査を受け、2022年11月に計画会議を行い、2023年3月に設計会議を行う予定である。搭載観測機器が多いことから搭載性に関する検討と調整を進めている。プラズマと中性大気の同時計測を目的としているため搭載観測機器がS-310ロケットとしては多くなっているが、同時に計測することで、観測していない物理量を「逃げ道」とすることなく、物理過程を議論することが可能になるため、これらの多数の機器の同時搭載による同位置・同時計測は必須である。また、他の緯度域・高度域、月や他の惑星での中性・プラズマ計測に向けた検証実験ともなる。

5. まとめ

本実験は、2024年夏期に、内之浦からS-310-46号機ロケットにより、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、本実験で対象とする地球中緯度電離圏におけるスポラディック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」の直接計測へ展開を進める。

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>
- Andoh, S., Saito, A., and Shinagawa, H. (2022). Numerical simulations on day-to-day variations of low-latitude Es layers at Arecibo. *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL097473. <https://doi.org/10.1029/2021GL097473>
- WDC for Ionosphere and Space Weather, National Institute of Information and Communications Technology, <https://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/ISDJ/index-E.html>