

共鳴散乱ライダーによるスποラディック E 層の鉛直構造観測 Vertical profiling of sporadic E (Es) layer by a resonance scattering lidar

*江尻省¹、津田卓雄²、西山尚典¹、阿保真³、中村卓司¹
*Mitsumu K. Ejiri¹, Takuo T. Tsuda², Takanori Nishiyama¹, Makoto Abo³, Takuji Nakamura¹

[1] 国立極地研究所、[2] 東京電気通信大学、[3] 首都大学東京
[1] National Institute of Polar Research, [2] The University of Electro-Communications,
[3] Tokyo Metropolitan University

Abstract: We are developing a new resonance scattering lidar system with a frequency tunable laser and plan to install and operate it at Syowa (69S), Antarctica. The lidar will observe temperature profiles and variations of minor constituents such as Fe, K, Ca⁺, and aurorally excited N₂⁺.

1. はじめに

地球大気の高高度 90~140 km に広がる電離圏 E 領域は、大気の大気電離度がわずかに 10⁻⁷ 程度しかないので、中性大気が電離大気（プラズマ）に与える影響が極めて大きい領域である。この領域で特異な現象として古くから知られているスポラディック E (E_s) 層は、突発的に現れる電子密度の非常に高い層で、無線通信電波の伝搬を不安定にする原因としてもよく知られている。最近のロケット観測や GPS-TEC 観測等から、E_s 層には水平層状の平板的構造のほか、パッチ構造や幅が狭く細長い構造など、様々な構造があることが示されつつあるが [e.g., Kurihara et al., 2010; Maeda and Heki, 2014]、詳細構造やその時間発展については未だに良く分かっていない。E_s 層の生成には、電子との再結合反応の遅い金属イオンが、背景の中性風シアによって集積することが必要とされる。これらの金属イオン中でカルシウムイオン (Ca⁺) の密度は電子密度によく比例することが、Raizada 等 [2012] による米国アレンゴでの IS レーダーと Ca⁺ 共鳴散乱ライダーの同時観測で示されたが、北米では発生頻度が低い E_s 層内においても同様の比例関係が成り立っているかどうかは自明ではない。

本講演では、2014 年 8 月 21 日に国立極地研究所（立川市）で共鳴散乱ライダーによって観測された高度 80-130 km の Ca⁺ 密度プロファイルの時間変化を、情報通信研究機構（NICT）が運用する国分寺のイオノゾンデによって観測された E_s 層の電子密度変動と比較することによって、両者の関係を明らかにすると共に、この日の E_s 層の空間構造と時間発展を議論する。

2. 観測

2.1 イオノゾンデによる E_s 層観測

2014 年 8 月 21 日は日本上空では E_s 層が発生しており、東京上空を観測している国分寺 (35.7N, 139.5E) のイオノゾンデでも一晩中 E_s 層が観測された。イオノゾンデの観測周期は定常観測で 15 分、観測周波数範囲 1~30 MHz の一回の周波数掃引時間は 15 秒で GPS 衛星により同期が取られている。図 1 に観測された E_s 層の臨界周波数 (foEs) と遮蔽周波数 (fbEs) の時間変化を示した。図

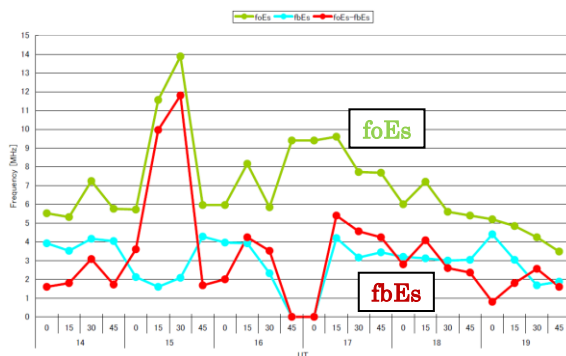


Fig. 1 Temporal variations of E_s parameters, such as foEs, fbEs, and (foEs - fbEs), observed by an ionosonde at Kokubunji, Tokyo, Japan on 21 August 2014.

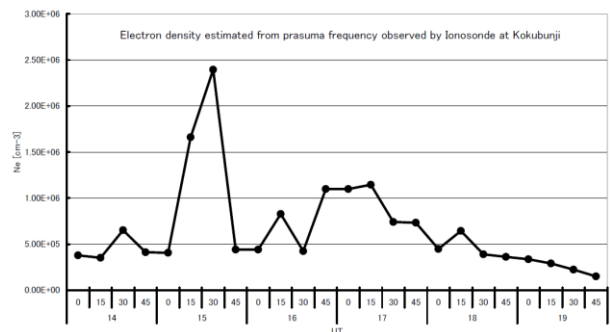


Fig. 2 Temporal variations of peak electron density in the E_s layer estimated from observed foEs.

1 では fbEs を検出できなかった場合には 0 と表示している。fbEs と foEs の間の周波数帯の電波は E_s 層反射波と F 層反射波が共存することになり、E_s 層が半透明の性質をもっている、つまり (foEs - fbEs) が大きいほど E_s 層電子密度に大きな粗密が存在したことを意味する。この晩は一晚を通して E_s 層内に電子密度の粗密構造が存在し、特に 15:30 UT 前後にその疎密が非常に大きくなっていった。図 2 は観測された臨界周波数とプラズマ周波数から計算した、E_s 層ピークの電子密度を時系列で示している。これによると 17:00 UT 以前は時間的な変動が大きく、最大で $2.4 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ にまで激増していたのに対して、17:00 UT 以降は緩やかな減少傾向を示していた。

2.2 共鳴散乱ライダーによる Ca⁺観測

共鳴散乱ライダーによって立川 (35.7N, 139.4E) で 14 - 19 UT に観測された Ca⁺ の時間高度断面図を図 3 に示す。高度 100 - 110 km に非常に密度の高いスποラディック Ca⁺ (Ca_s⁺) 層が見られ、15 - 17 UT と 18 UT 以降にはそれぞれ高度 90 km 付近と 120 km 付近にも Ca_s⁺ 層が見られた。図 4 は Ca_s⁺ 層のピーク密度変動を時系列に表示した図であるが、イオノゾンデ観測同様、17 UT を境に極端な増減がなくなり、単調な減少傾向に変化していた。15:30 UT 付近に見られた最大密度は $\sim 1300 \text{ cm}^{-3}$ で、これは同時刻のイオノゾンデ観測結果から推定される最大電子密度の 0.05% と、先行研究より 2 桁近く小さかった。一方、Ca⁺ 密度の高度分布の時間変化を詳細に確認すると、17 UT 以前の激しい密度変動は、Ca_s⁺ 層内の不安定構造に対応していることが分かった。不安定構造の生成要因は、その形状から背景に強い中性風シアが存在した場合に生ずる K-H 不安定と、これによって生じた電子密度の粗密構造を成長させるプラズマ不安定 (ex. Perkins 不安定) が働いていることが示唆された。

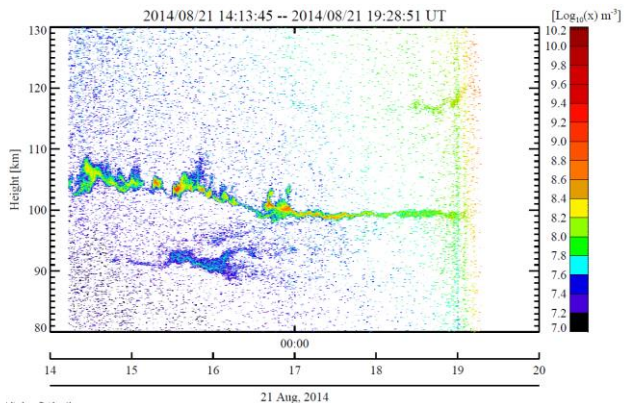


Fig. 3 Vertical distribution of Ca⁺ density as a function of time observed at Tachikawa, Tokyo, Japan on 21 August 2014.

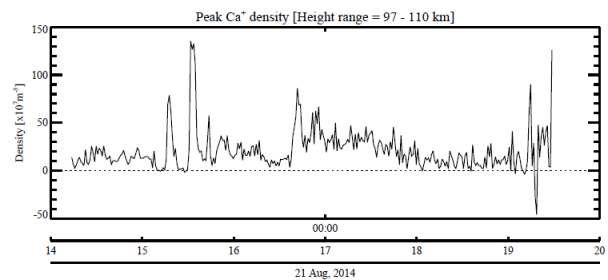


Fig. 4 Temporal variation of peak Ca⁺ density.

3. まとめ

国立極地研究所で開発中の共鳴散乱ライダーを用いて 2014 年 8 月 21 日に Ca_s⁺ 層観測を行い、電離層観測について実績のあるイオノゾンデによる E_s 層観測結果と比較した。その結果、観測された Ca_s⁺ 層のピーク密度変動は、イオノゾンデが示す E_s 層の特徴と矛盾の無い観測結果であった。ただし、その密度比 (Ca⁺/N_e) は先行研究に比べて 2 桁近く小さかった。この原因として、イオノゾンデの観測視野がほぼ全天であるのに対してライダーの観測視野が直上の極めて狭い領域に限られるため、ライダーの観測視野外に非常に密度の高い領域があった可能性が考えられる。一方で、Ca_s⁺ 層観測では鉛直構造の時間変化を追うことができるため、密度変動を生じた原因が E_s 層内で発生・成長した不安定構造であったことを明らかにすることができた。

参考文献

- Kurihara, J., et al. (2010), Horizontal structure of sporadic E layer observed with a rocket-borne magnesium ion imager, *J. Geophys. Res.*, 115, A12318, doi:10.1029/2009JA014926.
- Maeda, J., and K. Heki (2014), Two-dimensional observations of midlatitude sporadic E irregularities with a dense GPS array in Japan, *Radio Sci.*, 49, doi:10.1002/2013RS005295.
- Raizada, S., C. A. Tepley, B. P. Williams, and R. García (2012), Summer to winter variability in mesospheric calcium ion distribution and its dependence on Sporadic E at Arecibo, *J. Geophys. Res.*, 117, A02303, doi:10.1029/2011JA016953.