

昭和基地共鳴散乱ライダーで観測された地磁気静穏時の スプラディック Ca⁺層

江尻 省^{1,2}, 西山 尚典^{1,2}, 津田 卓雄³, 津野 克彦⁴, 古城 侑季⁵, 齊藤 昭則⁵, 西岡 未知⁶, 中村 卓司^{1,2}, 阿保 真⁷, 川原 琢也⁸, 小川 貴代⁴, 和田 智之⁴

¹ 国立極地研究所 (〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3)

² 総研大・極域科学コース (〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3)

³ 電気通信大学 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)

⁴ 理化学研究所・RAP (〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1)

⁵ 京都大学 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

⁶ 情報通信研究機構 (〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1)

⁷ 東京都立大学 (〒190-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

⁸ 信州大学 (〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1)

Sporadic Ca⁺ layer observed with a resonance scattering lidar at Syowa during quiet geomagnetic conditions

Mitsumu K. EJIRI^{1,2}, Takanori NISHIYAMA^{1,2}, Takuo TSUDA³, Katsuhiko TSUNO⁴, Yuki KOJO⁵,
Akinori SAITO⁵, Michi NISHIOKA⁶, Takuji NAKAMURA^{1,2}, Makoto ABO⁷, Takuya KAWAHARA⁸,
Takayo OGAWA⁴, and Satoshi WADA⁴

¹ NIPR., 10-3, Midoricho, Tachikawa, Tokyo 190-8518

² SOKENDAI., Polar Science, 10-3, Midoricho, Tachikawa, Tokyo 190-8518

³ UEC Tokyo, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585

⁴ RIKEN, RAP, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198

⁵ Kyoto Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo, 191-0065

⁶ NICT., 4-2-1, Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795

⁷ Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo, 191-0065

⁸ Shinshu Univ., 4-17-1 Wakasato, Nagano, Nagano 380-8553

Abstract: As a part of a prioritized project of the Antarctic research observations, a new resonance scattering lidar system with frequency-tunable alexandrite laser was developed and installed at Syowa Station (69°S, 40°E) by the 58th Japan Antarctic Research Expedition (JARE 58). Density profiles of calcium ion (Ca⁺) in the mesosphere and thermosphere were successfully observed in September and October in 2017 and 2018. A sporadic Ca⁺ layer descended from 170 km to 110 km was observed at 19:00 - 21:30 on September 13, 2017. At the same period, a descending Es layer was seen in a summary ionogram obtained by ionosonde. We will discuss a possibility, which the sporadic Ca⁺ layer was generated by vertical shear of horizontal wind as well as in the mid-latitude, using neutral wind data from the GAIA model.

Key Words: Resonance scattering lidar, Antarctic, Es layer, Mesosphere and Lower-Thermosphere

1. はじめに

カルシウムイオン (Ca⁺) は、中間圏・下部熱圏 (MLT: Mesosphere and Lower Thermosphere) 領域に存在する金属イオンの中で唯一地上からライダー観測が可能な金属イオンであるが、その観測地域は北半球の中低緯度に限られていた。中緯度帯においては、MLT 領域の金属イオンは、中性大気の水平風、特に東西風の鉛直シアにより薄層に集められ、スプラディック E (Es) 層の形成に大きく寄与することが知られている。共鳴散乱ライダーによる Ca⁺密度観測は、非干渉散乱レーダーと同等かそれ以上の高度時間分解能で Es 層の微細構造を捉えることができるため^{1,2)}、中性大気-プラズマ結合過程の観測的解明に資することが期待されている。一方、極域の Es 層は宇宙からの高エネルギー粒子降込みの影響が大きく、特にオーロラサブストーム発生時に、それに伴う降下電子によって生じることが知られている。昭和基地のイオゾンデ観測でもしばしば観測されており、数 keV-100 keV 程度のエネルギーを持つ電子の降下量の増大を反映した層である可能性が高いと考えられている³⁾。一方、地磁気静穏時の Es 層については観測報告例が少なく、特徴や成因はよく分かっていない。最近、地球全大気モデルによる Es 層の全球分布予測により、頻度は低いものの、中緯度と同様のメカニズムで Es 層が形成される可能性があることが示され⁴⁾、地磁気

静穏時には極域でも Es 層を通して中性大気-プラズマ結合課程の議論が可能ことが示唆された。今回、我々が世界で初めて観測に成功した地磁気静穏時の極域熱圏スボラディック Ca⁺層について、同時観測を行っていたイオノゾンデによる Es 層観測や、全地球大気モデル (GAIA) による熱圏風速や大気密度を使って地磁気静穏時の極域スボラディック Ca⁺層の成因を調べた。

2. 観測とモデル

2.1 波長可変共鳴散乱ライダーによる Ca⁺観測

国立極地研究所で開発した波長可変共鳴散乱ライダーは、送信系に波長可変のアレキサンドライト・リングレーザーと第 2 高調波発生器を用いている。インジェクション・シーダーの波長を波長計で制御することで、基本波 (768-788 nm)、第 2 高調波 (384-394 nm) のうち任意の波長のレーザーパルスを得ることが可能であるため、K, Fe, Ca⁺それぞれの共鳴散乱線 770.11 nm, 386.10 nm, 393.48 nm に同調させた観測を行った。繰り返し約 25 Hz で、出力は 0.05-3.0 W。共鳴散乱光は、有効口径 82 cm のナスミス式望遠鏡で集光し、光電子増倍管で受信した。2017 年 3 月から 2018 年 10 月まで昭和基地 (69°S, 40°E) で行った観測のうち、2017 年 9 月 13 日に行った Ca⁺密度観測で、高度約 170 km から 110 km におよそ 2.5 時間で下降するスボラディック Ca⁺層が観測された (Fig. 1)。

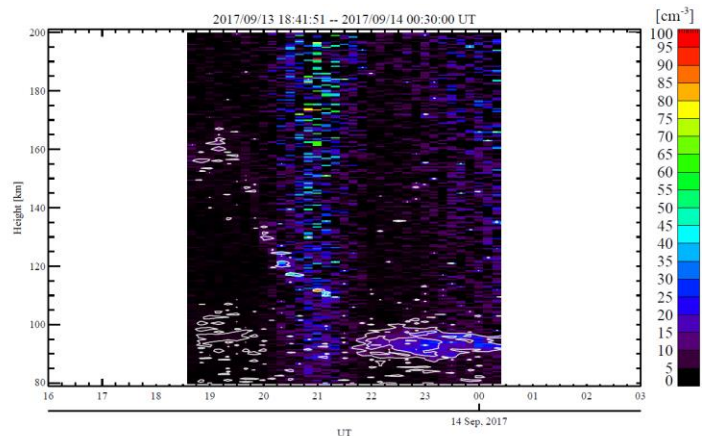


Fig. 1 Height-time cross-section of Ca⁺ density observed at Syowa Station on September 13, 2017.

2.2 イオノゾンデ観測

電離層観測の定常的安定運用を目的として情報通信研究機構 (NICT) が開発したイオノゾンデ (FMCW 方式) は、2009 年に第 51 次南極地域観測隊によって昭和基地に導入され、テスト観測を経て、2016 年 1 月より低電力型の新システムで運用されている。2018 年 10 月に一部欠測があったものの、2017 年 9 月、10 月および 2018 年 9 月においては継続的に観測が行われており、15 分ごとに取得されたイオノグラムが利用可能なデータとして、電離圏・宇宙天気に関する世界資料センター (WDC for Ionosphere and Space Weather) を通して一般に公開されている。

2.2 全大気圏電離圏結合モデル GAIA (Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy)

全大気圏電離圏結合モデル GAIA は、地上から超高層大気領域までを境界なくつなぎ、中性大気と電離大気との相互作用を扱う物理モデルで、中間圏・熱圏・電離圏領域の変動の再現と予測を目的に開発が進められている。中性大気密度 (O₂, N₂, O) や水平風、鉛直風、中性大気温度、本研究で利用したデータセットは、国立研究開発法人情報通信研究機構、九州大学、成蹊大学による GAIA プロジェクトから提供されたものである。

3. 高緯度スボラディック Ca⁺層の成因

スボラディック Ca⁺層が観測された夜は、昭和基地での地磁気観測データから磁氣的に静穏であった。従って、スボラディック Ca⁺層の生成や時間変動に対する電場の影響は無視できる。一方、昭和基地で同時観測を行っていたイオノゾンデによって得られたサマリーイオノグラムには臨界周波数 (*foEs*) 2-3 MHz 程度の Es 層が見られた。これは、磁気緯度 70.5°に位置する昭和基地上空では地球磁場の伏角が -64°と、日本など中緯度帯と比べて傾きが大きいにもかかわらず、中緯度と同様に水平風の鉛直シアによる金属イオンの収束が Es 層の成因であった可能性を示唆している。昭和基地上空の地球磁場の伏角 (*I*) と偏角 (*D*) に対するイオンの鉛直ドリフト速度 (*w_i*) は、式①⁵⁾で見積もることができる。

$$w_i = \frac{r_i \cos D \cos I - \sin D \sin I \cos I}{1 + r_i^2} \times U - \frac{r_i \sin D \cos I + \cos D \sin I \cos I}{1 + r_i^2} \times V + \frac{r_i^2 + \sin^2 I}{1 + r_i^2} \times W \quad \dots \textcircled{1}$$

ここで *U*, *V*, *W* は中性の東西風、南北風、鉛直風で、*r_i* はイオンのジャイロ周波数と中性大気粒子との衝突周波数の比である。これらを GAIA による中性風および中性大気密度データで与えて、昭和基地上空で

の Ca^+ の w_i を見積もった。 Ca^+ 層の消長には Ca^+ の寿命が長いことから Ca^+ 密度フラックスの収束発散を見積もることが重要と考えられる。しかしながら、 Ca^+ の高度分布は未知のところが多く、議論は単純ではない。ここでは、最近の数値モデルで比較的推定が容易な鉛直イオンドリフト速度の変動に焦点を当てその消長を議論する。

謝 辞

本観測研究は、南極観測事業第IX期重点研究観測および JSPS 科研費 15K13575, 21K18315 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Raizada, S., Tepley, C. A., Williams, B. P., & García, R. (2012). Summer to winter variability in mesospheric calcium ion distribution and its dependence on Sporadic E at Arecibo. *Journal of Geophysical Research*, 117(A2), A02303. <https://doi.org/10.1029/2011JA016953>
- 2) Ejiri, M. K., Nakamura, T., Tsuda, T. T., Nishiyama, T., Abo, M., She, C.-Y., et al. (2019) Observation of synchronization between instabilities of the sporadic E layer and geomagnetic field line connected F region medium-scale traveling ionospheric disturbances. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, 4627–4638. <https://doi.org/10.1029/2018JA026242>
- 3) 渡邊穰次, 石井 守, 松田佳久 (2008), イオノゾンドを用いたオーロラサブストーム時の電離圏変動, 南極資料, Vol. 52, No. 3, 409-420.
- 4) Shinagawa, H., Y. Miyoshi, H. Jin, and H. Fujiwara (2017) Global distribution of neutral wind shear associated with sporadic E layers derived from GAIA, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, 4450–4465, <https://doi.org/10.1002/2016JA023778>.
- 5) Yu, B. K., Xue, X. H., Yue, X. N., Yang, C. Y., Yu, C., Dou, X. K., et al. (2019). The global climatology of the intensity of the ionospheric sporadic E layer. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(6), 4139–4151. <https://doi.org/10.5194/acp-19-4139-2019>