

## スプラディック $\text{Ca}^+$ 層の時空間構造 ～層高度の短周期変動～

#山川 梓<sup>1)</sup>, 江尻 省<sup>1,2)</sup>, 中村 卓司<sup>1,2)</sup>, 西山 尚典<sup>1,2)</sup>, 津田 卓雄<sup>3)</sup>, 阿保 真<sup>4)</sup>, 津野 克彦<sup>5)</sup>, 小川 貴代<sup>5)</sup>, 和田 智之<sup>5)</sup>

(<sup>1)</sup> 総研大, (<sup>2</sup>) 極地研, (<sup>3</sup>) 電通大, (<sup>4</sup>) 都立大, (<sup>5</sup>) 理研

## Spatiotemporal structure of a sporadic $\text{Ca}^+$ layer ~ short-period height variation ~

#Azusa Yamakawa<sup>1)</sup>, Mitsumu K. Ejiri<sup>1,2)</sup>, Takuji Nakamura<sup>1,2)</sup>, Takanori Nishiyama<sup>1,2)</sup>, Takuo T. Tsuda<sup>3)</sup>, Makoto Abo<sup>4)</sup>, Katsuhiko Tsuno<sup>5)</sup>, Takayo Ogawa<sup>5)</sup>, Satoshi Wada<sup>5)</sup>

(<sup>1</sup>) The Graduate University for Advanced Studies, (<sup>2</sup>) National Institute of Polar Research, (<sup>3</sup>) University of Electro-Communications, (<sup>4</sup>) Tokyo Metropolitan University, (<sup>5</sup>) RIKEN

Sporadic E layers (EsL) occurring in the ionospheric E region at altitudes of 90-150 km are thin layers with very high electron density (a few kilometers thick), that also contain abundant metallic ions. EsL cause radio communication disturbances in the HF/VHF bands. Therefore, elucidation of the mechanisms of EsL formation and evolution is important. In the mid-latitude region, EsL have been understood to be formed by convergence of metallic ions in the ionospheric E region due to the vertical shear of neutral horizontal winds and the geomagnetic field. However, observation of the spatiotemporal structure of EsL is limited, and their morphological variations and evolutions remain unclear. The primary source of metals in the ionospheric E region is meteors, and there are layers of metallic atoms and ions such as iron, magnesium, sodium, calcium, and so on. Among them, calcium ion ( $\text{Ca}^+$ ) is the only metallic ion that can be observed from the ground by resonance scattering lidar.

The National Institute of Polar Research (NIPR) developed a frequency-tunable resonance scattering lidar and conducted  $\text{Ca}^+$  observations in Tachikawa, Japan (2014-2016) and at Syowa Station in the Antarctic (2017-2018). The lidar transmitter was based on an injection-seeded, pulsed alexandrite ring laser for 768-788 nm (the fundamental wavelengths) and a second harmonic generation (SHG) unit for 384-394 nm (the second harmonic wavelengths). The laser wavelengths can be tuned into the  $\text{Ca}^+$  resonance wavelength (393 nm) by a wavelength meter that is calibrated using a wavelength-stabilized He-Ne laser. The average laser output at the  $\text{Ca}^+$  resonance wavelength was approximately 80 mW, and the repetition rate was ~25 Hz.

In this study, we analyzed a sporadic  $\text{Ca}^+$  layer observed on September 1, 2016 at Tachikawa (35.7° N, 139.4° E), and investigated the periodic height variation of  $\text{Ca}^+$  layer, that was found at altitudes of 99-101 km between 15:55-16:20 UT. The  $\text{Ca}^+$  density profiles had height and time resolutions of 165 m (smoothed from 15 m resolution data) and 5 s, respectively. We derived the centroid altitude of each  $\text{Ca}^+$  density profile and fitted its temporal variation with a sinusoidal curve. From this fitting, the vertical displacement amplitude and the observed (ground-based) oscillation period were estimated to be 170 m and 7.5 minutes, respectively. Then, the dispersion relation of internal gravity waves and the relation between ground-based and intrinsic frequencies were subsequently applied, in order to determine gravity wave parameters such as horizontal wavelength and phase velocity that could account for the observed oscillation. Vertical wavelength and the background wind speed was assumed, the latter of which was considered referring to the JAWARA reanalysis data of corresponding time and altitude. Our investigation suggested that the wave propagation direction was in the same direction as the background wind rather than the opposite direction, when the observed oscillation is caused by internal gravity waves.

高度 90-150 km の電離圏 E 領域に散発的に発生するスプラディック E 層 (Es 層) は、電子密度の非常に高い薄層 (層厚数 km) であり、金属イオンを多く含むことで知られている。Es 層は短波・超短波通信において通信障害を引き起こすため、その発生や強度変動の予報が求められている。そのため Es 層の生成と消長の機構を明らかにすることは重要である。中緯度帯における Es 層の成因については、中性水平風の鉛直シアと地球磁場の効果により、この領域に多く存在する金属イオンが収束することであると理解されている。一方で、Es 層の空間構造を観測する手段は限られており、その形状変化と消長については依然として不明な点が多い。電離圏 E 領域に存在する金属の主な供給源は流星であり、鉄、マグネシウム、ナトリウム、カルシウムなどの金属原子およびイオン層が存在する。その中で地上から共鳴散乱ライダーによって観測可能な金属イオンはカルシウムイオン ( $\text{Ca}^+$ ) のみである。

国立極地研究所は、 $\text{Ca}^+$  密度観測が可能な波長可変共鳴散乱ライダーを開発し、2014-2016 年に立川で、2017-2018 に南極の昭和基地で観測を行った。観測に用い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トリミングレーザーと第 2 高調波発生器を用い、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) および第 2 高調波 (384-394 nm) の任意の波長のレーザーパルスを得ている。 $\text{Ca}^+$  共鳴波長における平均レーザー出力は約 80 mW、繰り返し周波数は約 25 Hz であった。このライダーを使った立川 (35.7° N, 139.4° E) での観測では、微細構造の中に背景の中性風によって引き起こされたと考えられる  $\text{Ca}^+$  の波状構造 (高度 91-97 km) や、中性大気の流れに反応して形成されたと考えられる  $\text{Ca}^+$  の周期的な鉛直変位 (高度 100-101 km) 等が報告されている [江尻他, 2019]。しかしその構造の成因についての詳細な議論は行われていなかった。

そこで本研究では、2016 年 9 月 1 日の 14:03-19:41 UT に行われた  $\text{Ca}^+$  密度観測の中で、15:55-16:20 UT に高度

99-101km で観測されたスボラディック  $\text{Ca}^+$  層の周期的な高度変化の詳細を調べた。解析に用いたデータの距離分解能は 165m(15 m ごとのデータを平滑化した)、時間分解能は 5 秒であった。 $\text{Ca}^+$  密度の各時刻におけるプロファイルの重心高度を求め、その時間変化に正弦波をフィッティングすることで、鉛直変位の振幅は 170 m、観測周期 (対地周期) は 7.5 分と求められた。この振動現象が内部重力波によって引き起こされたものであると仮定し、とり得る重力波のパラメーターを求めた。具体的には、鉛直波長を仮定し、さらに大気再解析データ JAWARA を参考にして対象時刻と高度における背景風速の範囲を設定した。その上で、内部重力波の分散関係式および対地周波数と固有周波数の関係式を適用し、観測された振動を説明し得る水平波長や位相速度といった重力波パラメーターを導出した。その結果、観測された振動が内部重力波によるものである場合、その波動は背景風と同じ向きに伝搬していたものと示唆された。