

# 南極昭和基地での金属イオン共鳴散乱ライダー観測

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

<sup>1</sup>国立極地研究所 (〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3)

<sup>2</sup>電気通信大学 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)

<sup>3</sup>理化学研究所 (〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1)

<sup>4</sup>首都大学東京 (〒190-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

<sup>5</sup>信州大学 (〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1)

## Observation of metal ion layer by a Resonance Scattering Lidar at Syowa in Antarctic

Mitsumu K. EJIRI<sup>1</sup>, Takanori NISHIYAMA<sup>1</sup>, Takuo TSUDA<sup>2</sup>, Katsuhiko TSUNO<sup>3</sup>, Takuji  
NAKAMURA<sup>1</sup>, Makoto ABO<sup>4</sup>, Takuya KAWAHARA<sup>5</sup>, Takayo OGAWA<sup>3</sup>, and Satoshi WADA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>NIPR, 10-3, Midoricho, Tachikawa, Tokyo 190-8518

<sup>2</sup>UEC Tokyo, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585

<sup>3</sup>RIKEN, RAP, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198

<sup>4</sup>Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo, 191-0065

<sup>5</sup>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 minor constituents such as iron (Fe), potassium (K), and calcium ion (Ca<sup>+</sup>) in the mesosphere and lower-thermosphere region were successfully observed in 2017 and 2018. This was the first-time detection of Ca<sup>+</sup> layers in the polar region. We will show preliminary results of the Ca<sup>+</sup> layer observations at Syowa Station.

**Key Words:** Resonance scattering lidar, Antarctic, Metal layers, Mesosphere and Lower-Thermosphere

## 1. はじめに

高度 80-150 km に広がる中間圏・下部熱圏 (MLT: Mesosphere and Lower Thermosphere) 領域は、地球大気と宇宙空間の境界領域である。この領域では、流体として振る舞いが支配的な地球の中層大気 (中性大気) と電磁気学的振る舞いが顕著な超高層大気 (電離大気) の間で、力学的エネルギーや物質の交換が活発に行われている。極域では、太陽からの高エネルギー粒子が地球大気に降込むことにより、オーロラに代表されるような激しい大気現象を伴ったエネルギーの流入や大気組成の変化が引き起こされている。このような電離大気と中性大気の相互作用を定量的に理解するためには、基礎的なデータとして密度や温度の鉛直分布、及びその時間変化を知る必要があるが、特に極域では観測が決定的に不足している。我々は、MLT の金属原子 (カリウム: K、鉄: Fe) やイオン (カルシウムイオン: Ca<sup>+</sup>) の密度や温度の鉛直分布を観測する波長可変型共鳴散乱ライダーを開発し、2017 年 1 月に南極昭和基地 (69.0S, 39.6E) に設置、2018 年 10 月末まで観測を行った。

Ca<sup>+</sup> は、MLT 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、スポラディック 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<sup>+</sup> 密度観測は、非干渉散乱レーダーに匹敵する解像度で Es 層の微細構造を捉えることができるため<sup>1,2)</sup>、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。極域では、宇宙からの高エネルギー粒子降込みの影響が無視できないが、地球全大気モデルによる Es 層の全球分布予測によると、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<sup>3)</sup>。今回、我々は、世界で初めて極域での Ca<sup>+</sup> ライダー観測に成功した。

## 2. 波長可変共鳴散乱ライダーによる Ca<sup>+</sup>観測

### 2.1 波長可変共鳴散乱ライダー

国立極地研究所で開発した共鳴散乱ライダーのブロック図を図1に示す。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<sup>+</sup>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。

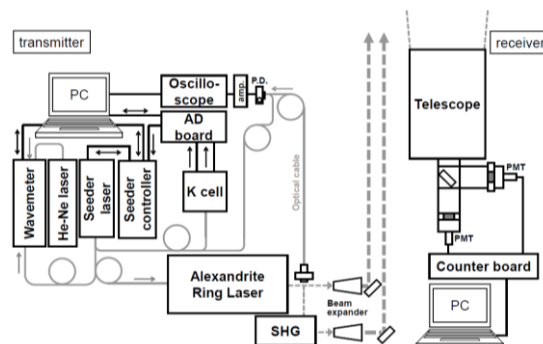


Figure 1. Block diagram of the frequency-tunable resonance scattering lidar system.

### 2.2 昭和基地での Ca<sup>+</sup>観測

2017年3月から2018年10月にかけて南極昭和基地で波長可変共鳴散乱ライダーによる、Fe、K、Ca<sup>+</sup>の密度およびMLT温度の観測を行った。Ca<sup>+</sup>層については、2017年9月13日、10月2、3、19日と2018年9月15日、10月6日の合計6晩で観測に成功した。6晩とも、Ca<sup>+</sup>密度が明瞭に観測されたのは90-100 kmの高度領域で、高度100 km以上にはほとんど見られなかった。Ca<sup>+</sup>密度の夜間平均プロファイルを図2(a)に示す。色の違いは観測日の違いを表している。観測されたCa<sup>+</sup>層の平均的な形状は、高度約94 kmで密度最大 (11 cm<sup>-3</sup>) になる、半値全幅約7 kmの単層で、中緯度帯で観測されるE<sub>s</sub>層の形状とは異なる、比較的厚い層であった。高度80-120 kmのCa<sup>+</sup>密度の積算値 (カラム量) の時間変化を図2(b)に示した。一晩の間には1×10<sup>6</sup> - 3×10<sup>7</sup> cm<sup>-2</sup>で変化していたが、夜間平均の日々変動は4×10<sup>6</sup> - 1.6×10<sup>7</sup> cm<sup>-2</sup>で、6晩の平均値は~1×10<sup>7</sup> cm<sup>-2</sup>だった。

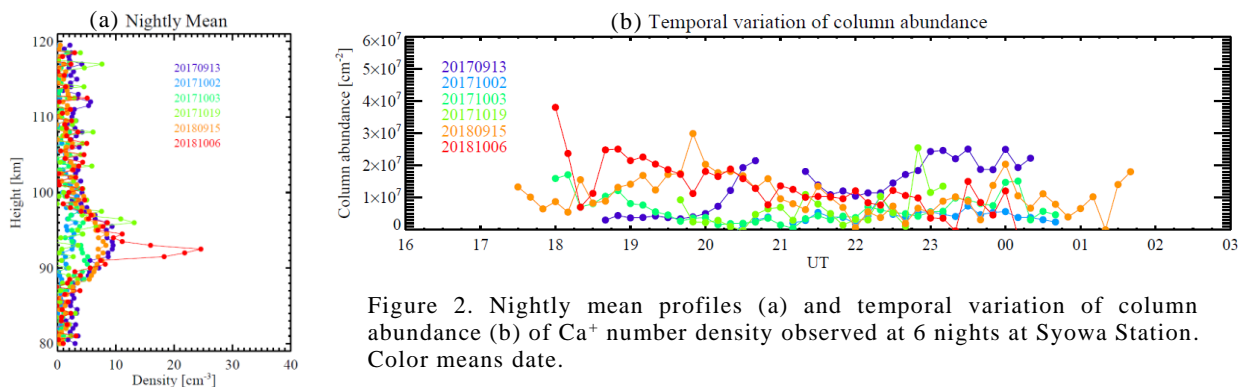


Figure 2. Nightly mean profiles (a) and temporal variation of column abundance (b) of Ca<sup>+</sup> number density observed at 6 nights at Syowa Station. Color means date.

## 3. 議論と今後の展望

昭和基地で観測されたCa<sup>+</sup>層の特徴を明らかにするために、1997-1998年にKühlungsborn (54N)<sup>4)</sup>で、2016年に立川(36N)で観測されたの春のCa<sup>+</sup>層と比較した。100 km以上の高高度では、中緯度帯ではしばしば観測されるE<sub>s</sub>層に対応するCa<sup>+</sup>層 (スボラディックCa<sup>+</sup>層) が、昭和基地では見られなかった。一方100 km未満のCa<sup>+</sup>層の平均的な形状は良く似ていた。カラム量は、立川でスボラディックCa<sup>+</sup>層が観測された2016年3月3日でも一晩の変化は3×10<sup>6</sup> - 4×10<sup>7</sup> cm<sup>-2</sup>で、昭和基地での観測結果と同程度であった。これに対して、全球大気モデル (WACCM-Ca) で予測されたCa<sup>+</sup>カラム量の緯度ごとの季節変化<sup>5)</sup>では、昭和基地の緯度帯(69S)の9-10月は~20×10<sup>7</sup> cm<sup>-2</sup>で、観測の20倍も大きな値になっていた。モデルの予測値は、北半球中緯度においても過大評価であることが指摘されているが、立川の緯度帯(36N)ではおよそ5倍で、南極域の方が過大評価の度合いがかなり大きいことが分かった。この理由の一つとして、極域特有の現象である宇宙からの高エネルギー粒子の降込みによって引き起こされる化学反応の影響が無視できない可能性が考えられる。昭和基地で定常観測されている磁場変動とCa<sup>+</sup>密度変動を比較して両者の関連を調べたが、地磁気活動度の上昇に伴うCa<sup>+</sup>層の変化は明確では無かった。

昭和基地では、直上のMLT領域への高エネルギー粒子の降込みをより直接的に捉えることが出来るリオメータ観測も行われている。今後、リオメータによる銀河電波雑音吸収 (CNA) の観測データとCa<sup>+</sup>密度

プロファイルの時間変化を比較することで、粒子降込みの影響をより詳しく調べる予定である。また、Ca<sup>+</sup>の供給源である流星数の変化や、大気波動によるCa<sup>+</sup>密度変動への影響も、昭和基地のMFレーダー観測、および近隣の観測基地であるDavis基地の流星レーダー観測などを用いて調べる予定である。

#### 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) 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, doi:10.1002/2016JA023778.
- 4) Gerding M., Alpers M., von U. Zahn, Rollason RJ, Plane JMC (2000) The atmospheric Ca and Ca+ layers: midlatitude observations and modeling, *J. Geophys Res.* 105:27131–27146. <https://doi.org/10.1029/2000JA900088>
- 5) Plane, J. M. C., Feng, W., Gómez Martín, J. C., Gerding, M., Raizada, S. (2018) A new model of meteoric calcium in the mesosphere and lower thermosphere., *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 14799-14811.