

光リモートセンシングによる金属層の動態調査: オーロラ粒子による影響

Investigations on the metallic layers utilizing optical remote sensing: auroral particle effects

津田卓雄,¹ 中村卓司,² 江尻省,² 西山尚典,² 阿保真,³ 津野克彦,⁴ 野澤悟徳,⁵ 川原琢也,⁶
川端哲也,⁵ 斎藤徳人,⁴ 和田智之,⁴ C. M. Hall,⁷ 高橋透,² J. Gumbel,⁸ J. Hedin⁸

T. T. Tsuda,¹ T. Nakamura,² M. K. Ejiri,² T. Nishiyama,² M. Abo,³ K. Tsuno,⁴ S. Nozawa,⁵ T. D. Kawahara,⁶
T. Kawabata,⁵ N. Saito,⁴ S. Wada,⁴ C. M. Hall,⁷ T. Takahashi,² J. Gumbel,⁸ and J. Hedin⁸

¹ 電通大, ² 極地研, ³ 首都大, ⁴ 理研, ⁵ 名古屋大, ⁶ 信州大, ⁷ ノルウェー北極大, ⁸ スtockholm大
¹UEC, ²NIPR, ³TMU, ⁴RIKEN, ⁵Nagoya Univ., ⁶Shinshu Univ., ⁷UiT, ⁸Stockholm Univ.

Metallic atom and ion layers, such as Na, K, Fe, and Ca⁺ layers, exist in the mesosphere and lower thermosphere (MLT). The height range corresponds to the ionospheric *D* and *E* regions, and in the polar regions energetic particles precipitating from the magnetosphere can often penetrate into the *E* region and even into the *D* region. Therefore, the influence of energetic particles on the metallic atom and ion layers is of interest regarding changes in atmospheric composition accompanied by auroral activity or geomagnetic activity.

In order to measure the metallic atom and ion layers in the upper atmosphere, we have utilized optical remote sensing techniques using resonance scattering in the metallic atoms and ions. One of the optical remote sensing techniques is laser-induced resonance scattering, so-called resonance scattering lidar, and we have been conducting such lidar observations in Arctic and Antarctic. Another is resonance scattering of the sunlight, which recently has been observed by spectrograph onboard satellites. Based on these observational data, we have investigated metallic layer responses to auroral activity. In the presentation, we will introduce our recent results [Tsuda *et al.*, 2013, 2017; Takahashi *et al.*, 2017].

1. はじめに

中間圏・下部熱圏 (MLT) 領域には流星由来の金属原子、金属イオン (Na, K, Fe, Ca⁺ など) が分布しており、金属層と呼ばれている。極域へと降り注ぐ磁気圏からのオーロラ高エネルギー粒子は、MLT 領域の高度範囲 (電離圏 *D*, *E* 領域に相当) へと侵入し得ることが知られているが、オーロラ粒子が金属層に与える影響についてはあまりよく知られていない。

例えば、オーロラ粒子が Na 層に与える影響に関する先行研究では、“Na 密度 増加説”と“Na 密度 減少説”という相反する説が提案されている状況にある。また、これらの先行研究は全て事例研究であり、統計的な調査が行われ

ていない。更には、Na 以外の金属組成に関してはオーロラ粒子の影響に関する先行研究は皆無である。

本課題への取組みとして、北極と南極で進めている金属層のライダー地上観測、及び低軌道人工衛星による金属層のグローバル観測を活用し、オーロラ粒子が金属層に与える影響について調査を進めている。本発表では、我々の最近の調査、及び研究成果 [e.g., Tsuda *et al.*, 2013, 2017; Takahashi *et al.*, 2017] について紹介する。

2. 北極ライダー観測: 事例解析

北極域のノルウェー、トロムソ (北緯 69.6 度, 東経 19.2 度) で Na 共鳴散乱ライダー観測を進めている。Na ライ

オーロラ粒子に伴うNa層の変動

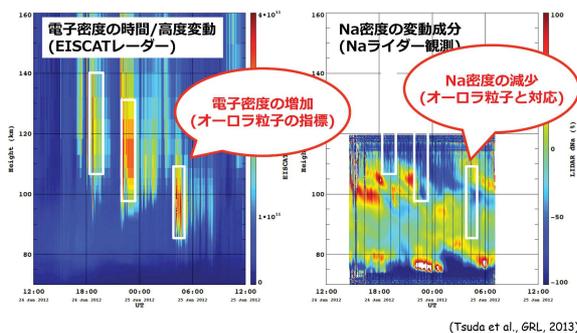


Figure1 Height-time distributions of the electron density (left) and the Na density deviation (right) observed on 24–25 January 2012.

Na密度減少メカニズムの検証

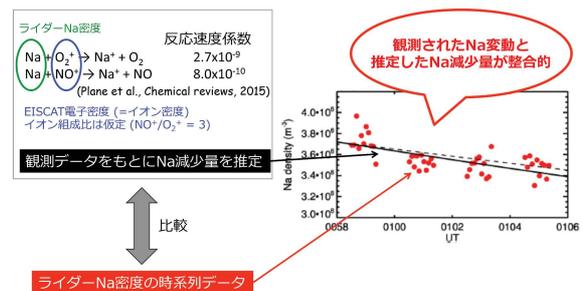


Figure2 Comparison between the observed (red) and estimated (black) Na depletions.

ダー観測では、Na 共鳴線 (D₂ 線, 589 nm) に波長同調したレーザーを上空の Na 層に照射して共鳴散乱を起こす。その Na 共鳴散乱光を計測することで、Na 密度の情報を得ることができる。

2012 年 1 月 24–25 日の観測事例において、Na ライダーと EISCAT レーダー (欧州非干渉散乱レーダー) の同時観測に成功した。Na ライダー観測から Na 密度の時間・高度変化を得ると同時に、EISCAT 観測では電子密度 (オーロラ粒子の指標) の時間・高度変化を同定した。その結果、オーロラ粒子に伴う顕著な Na 密度の減少を捉えた (Figure 1 参照)。以上のように、オーロラ粒子と Na 密度減少のクリアな一対一対応を見出した [Tsuda et al., 2013]。

続いて、Tsuda et al. [2013] で見出したオーロラ粒子による Na 密度減少のメカニズムについて詳細な調査を行った。具体的には、先行研究 “Na 密度減少説” で提案されていたメカニズム (電荷交換反応) について検証する為、電荷交換反応による Na 密度減少速度を観測データに基づいて推定し、観測された Na 密度減少速度と比較した (Figure 2 参照)。その結果、両者はおよそ一致することが判明した。従って、観測された Na 密度減少のメカニズムとして、電荷交換反応が主要な寄与を及ぼしていたと考えられる [Takahashi et al., 2017]。

3. 低軌道人工衛星観測: 統計解析

ライダー地上観測を活用した事例解析と並行して、低軌道人工衛星観測データを用いた統計解析を進めている。Odin/OSIRIS はスペクトログラフによって地球リム方向をスキャン観測する。太陽光による Na 共鳴散乱光を計測し、Na 密度の情報を得ることができる。

本調査では、2004–2010 年の Odin/OSIRIS Na 密度データを収集し、オーロラ活動による Na 層の応答を調べる為、地磁気活動度 (AE 指数) によってデータを分類・比較した (Figure 3 参照)。その結果、オーロラ活動静穏時と比較して、活発時には両極で Na 密度が減少する傾向にあることを見出した。この結果は、先の事例解析 [Tsuda et al., 2013; Takahashi et al., 2017] の結果とも整合的であり、オーロラ粒子に対する Na 層の基本的な応答は “Na 密度の減少” であり、“Na 密度の増加” ではないということが統計的な調査から判明した [Tsuda et al., 2017]。

現在は Envisat/SCIAMACHY (Odin/OSIRIS と同種の観測を実施) の Na 密度, Mg 密度, Mg⁺ 密度データの解

析に着手しており、Na 以外の金属組成についても調査・研究を展開していく予定である。

4. 南極ライダー観測: 今後の展開

南極観測計画の一環として、波長可変共鳴散乱ライダー計画 (Figure 4 参照) を進めてきた。アレキサンドライトレーザーを採用し、基本波 770–786 nm, 倍波 385–393 nm の範囲で波長可変、複数の大気組成の共鳴線に同調することが可能であり、MLT 領域に分布する K (770 nm), Fe (386 nm), Ca⁺ (393 nm) の観測に活用する。

2012 年度までに、送信部、受信部、制御部の基本構成を完了し、以降は国内試験観測を実施しながらシステムの整備・最適化を行ってきた。2013 年 1 月には K ファーストライト, 2013 年 8 月には Fe ファーストライト, 2014 年 8 月には Ca⁺ ファーストライト に成功している。2016 年度には、開発したライダーシステムを南極昭和基地 (南緯 69.0 度, 東経 39.6 度) へ投入した。2017 年 2 月までに輸送・設置を終え、3 月には K ファーストライト に成功している。昭和基地において継続的な観測を実施し、K, Fe, Ca⁺ についての調査に取り組むことを予定している。

参考文献

- Takahashi, T., K. Hosokawa, S. Nozawa, T. T. Tsuda, Y. Ogawa, M. Tsutsumi, Y. Hiraki, H. Fujiwara, T. D. Kawahara, N. Saito, S. Wada, T. Kawabata, and C. Hall (2017), Depletion of mesospheric sodium during extended period of pulsating aurora, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, 1212–1220, doi:10.1002/2016JA023472.
- Tsuda, T. T., S. Nozawa, T. D. Kawahara, T. Kawabata, N. Saito, S. Wada, Y. Ogawa, S. Oyama, C. M. Hall, M. Tsutsumi, M. K. Ejiri, S. Suzuki, T. Takahashi, and T. Nakamura (2013), Decrease in sodium density observed during auroral particle precipitation over Tromsø, Norway, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 4486–4490, doi:10.1002/grl.50897.
- Tsuda, T. T., T. Nakamura, M. K. Ejiri, T. Nishiyama, K. Hosokawa, T. Takahashi, J. Gumbel, and J. Hedin (2017), Statistical investigation of Na layer response to geomagnetic activity using resonance scattering measurements by Odin/OSIRIS, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 5943–5950, doi:10.1002/2017GL072801.

オーロラ活動に対するNa層の応答

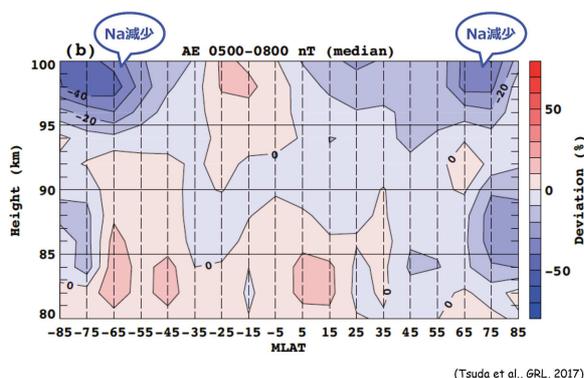


Figure3 Height-MLAT (magnetic latitude) distribution of the Na density deviation during the aurorally or geomagnetically active periods.

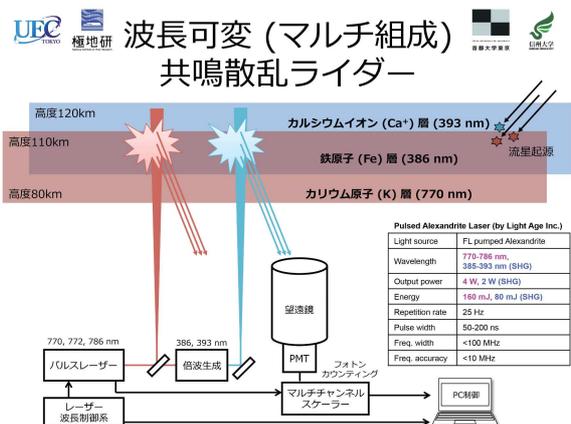


Figure4 Frequency-tunable resonance scattering lidar system installed in Syowa, Antarctic.