

平成30年6月28日現在

機関番号：62611

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06213

研究課題名(和文) 脈動するオーロラに対する中間圏大気の化学的応答の理解

研究課題名(英文) Chemical response of neutral atmosphere to pulsating aurora

研究代表者

高橋 透 (Takahashi, Toru)

国立極地研究所・研究教育系・研究員

研究者番号：40759833

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではオーロラ降下粒子による電離に伴ったナトリウム密度減少のメカニズムをEISCATレーダーとナトリウムライダーの同時観測結果から調査した。その結果、オーロラ降下粒子による中性大気の電離によって生成されたNO⁺、O₂⁺とナトリウム原子との電荷交換反応がナトリウム密度減少のメカニズムであることを明らかにした。また、ナトリウムライダーを改良することで、0.2秒でのナトリウム密度観測を実現し、EISCATレーダーとの高速同時観測を行った。これにより、脈動オーロラの明滅周期と同調したナトリウム密度変動の調査を行なった。

研究成果の概要(英文)：We use simultaneous observations from the sodium lidar and EISCAT radar to quantitatively evaluate Na density depletion during the extended period of the pulsating aurora (PsA). In this study, we revealed that this depletion is the consequence of charge transfer reactions between Na atoms and molecular ions (NO⁺ and O₂⁺) produced by high-energy electron precipitations PsA. Furthermore, the temporal resolution of the sodium density observed with the sodium lidar has been improved from 5 sec to 0.2 sec. The high speed observation of the sodium lidar and EISCAT allow us to evaluate the sodium density depletion harmonized with the PsA.

研究分野：電離圏物理学

キーワード：脈動オーロラ ナトリウムライダー EISCATレーダー

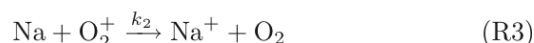
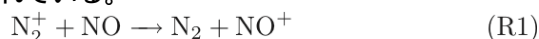
1. 研究開始当初の背景

太陽風のエネルギーは、オーロラ電子の降下やオーロラ電流系の強化などの形で極域の地球大気に注入される。エネルギーの入力に対する地球大気の物理的・化学的応答の把握は、太陽から地球大気へ供給されるエネルギーの散逸を理解する上で欠かすことができない。これまでの研究では、ディスクリートオーロラ内部の温度上昇や、オーロラアーク近傍における中性風速の変動が報告されてきた(Kurihara et al., 2006; Kosch et al., 2010)。これらの現象は、主として、オーロラ電流によるジュール加熱や、磁気圏電場の印加に伴うイオンドラッグなどの物理的プロセスによって駆動されていると考えられているが、それらの物理過程のみでは、現象のすべてを説明できないことが分かっている。これは、中性大気の応答、特にその動的な応答特性の形成に対する、化学的プロセスの貢献を定量的に評価せず、その寄与が未解明な点に本質的に起因する。

近年、オーロラ電子の降下に伴って、中間圏のナトリウム密度が減少することが報告され(Heinselman et al., 1998)、高度 100 km 以下の領域では、中性大気の変動に化学的プロセスが密接に関与していることが指摘され始めている。しかし、化学的応答の時間特性(エネルギー入力に対する応答速度)については、観測の時間分解能の制約のために理解が不十分なままである。

中間圏のナトリウム密度は大気波動や乱流によって常に変動を受けている。これらの寄与と区別するためには、地球大気へのエネルギー入力が準周期的に行われる事例について、化学的応答の時間特性を調べていくことが望ましい。本研究でターゲットとする脈動オーロラは、磁気圏での波動粒子相互作用によって電子が数秒から数十秒の周期で電離圏に降下することで、準周期的な明滅を示す現象である。脈動オーロラを作り出す電子のエネルギーは高く(最高 200 keV, Miyoshi et al., 2015)、100 km 以下の高度を効率的に電離する。本研究では、数十秒周期で明滅する脈動オーロラに対する中間圏大気の化学的応答、特に応答が内包する早い時間変動を、光、電波、レーザーによるリモートセンシングと理論的考察を組み合わせ、定量的に解明する。

中間圏においてナトリウムの密度変動を作り出す化学反応とその反応速度は、Plane et al. (2004)による室内実験によって示されている。



オーロラ電子降下による電離で、 N_2^+ へと O_2^+ が生成される。 N_2^+ は瞬時(約 0.01 秒)に R1 により消滅し NO^+ に変換される。 NO^+ と O_2^+ が R3 の反応により、Na と電荷を交換することで、

Na の密度が減少していると考えられる。このプロセスにより、オーロラによる電離が発生した場合、Na 密度は 10 秒で数%程度減少すると予想される。このことから、脈動オーロラの明滅に伴うナトリウム密度の増減を観測によって明らかにし、上記の化学反応式で見積もられる減少量と比較することで、オーロラの発生に伴う中性大気の化学的応答を解明することが可能と考えられる。

2. 研究の目的

太陽風エネルギーの入力に伴い、地球大気は加熱や風速変動といった物理的応答と、組成変化に代表される化学的応答の双方を示す。これまで、物理的応答のみが注目され、化学的応答、特にその時間変化を定量的に取り扱った研究が行われてこなかった。本研究では、数十秒周期で明滅する脈動オーロラに伴う、中間圏・下部熱圏の電子密度、ナトリウム密度の変動を秒オーダーのリモートセンシング観測によって捉え、その時間変化をコントロールする化学過程を観測的・理論的に明らかにする。これにより、太陽風エネルギーの入力に伴う、地球大気の化学的応答の素過程、特にその反応の時定数に関する定量的な理解を得ることを目指す。

3. 研究の方法

本研究は以下の 4 つの手順で研究を進める。

1. ナトリウムライダー観測装置のアップグレード

脈動オーロラに同調したナトリウム密度変動、中性大気温度変動を捉えるためには、1 秒毎のデータサンプリング、及び送信波長の切り替えが必要となる。しかし、現行のナトリウムライダーは最速で 5 秒のデータサンプリングしか行うことができない。そこで、データ保存系と観測プログラムを改良することで、1 秒以下のデータサンプリングを実現する。また、高速データ保存・転送に対応したストレージを導入し、高速観測のためのシステムを装備する。

2. ナトリウムライダーと EISCAT レーダーの同時観測

ノルウェー・トロムソにおいて、改良されたナトリウムライダーと EISCAT レーダー、全天カメラによる脈動オーロラの同時観測を実施する。オーロラ電子は磁力線に沿って降下するため、ナトリウムライダー、EISCAT レーダーは沿磁力線 1 方向観測を行う。脈動オーロラの発生、及びその形態・空間分布の把握のために、同じ観測サイトに設置されており、0.25-1.0 秒の時間分解能で撮影する全天カメラ群(国立極地研究所所有)による観測も実施する。

3. 脈動オーロラとナトリウム密度の時間変化の比較・考察

EISCAT レーダー、ナトリウムライダー、全天カメラによって得られた電子密度データとナトリウム密度データの直接比較を行い、事前に想定している電荷交換反応によってナトリウム密度減少が起きていたか明らかにする。

4. 研究成果

初年度にナトリウムライダーのアップグレードを行なった。レーザー送信系、データ保存・取得系の見直しを行ったところ、データを受信機から抜き出し、保存する過程で遅延が生じ、1秒以下の運用が行えていないことが明らかになった。そこで、申請者はデータ保存用にストライピングでのデータ保存が可能な RAID システムをナトリウムライダーの観測系に組み込んだ。さらに、観測プログラムを高速観測に耐えうる構成に再構築した。このアップグレードによって、ナトリウムライダーのサンプリングが最速で0.2秒で行えるまで改善した。

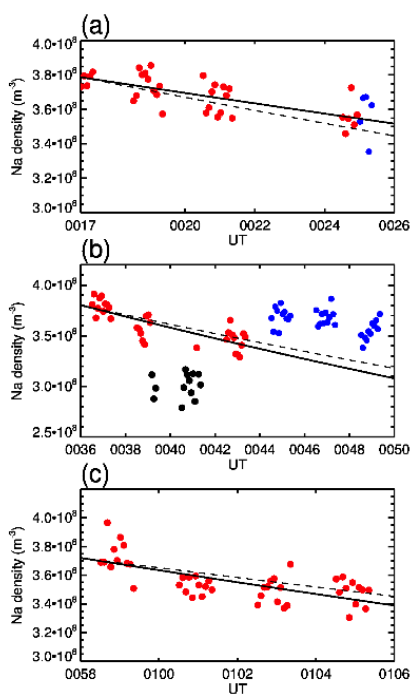


図 1. ナトリウム密度減少。黒の実線は観測データを最小二乗法でフィット、黒の点線は電荷交換反応で減少すると考えられるナトリウム密度。

これと並行して、オーロラ降下粒子によるナトリウム密度減少のメカニズムを明らかにするために、2012年1月に観測されたEISCAT レーダーとナトリウムライダーの同時観測データを解析した。EISCAT レーダーで観測された電子密度の増大量と中性大気-電子間に働く化学反応プロセスから Na 密度を減少させると考えられている NO^+ 、 O_2^+ の分布を推定した。推定された NO^+ 、 O_2^+ 密度とナトリウムライダーで観測された Na 密度の変動量を比較した。これにより、ナトリウム密度

はオーロラ降下粒子によって生成された NO^+ 、 O_2^+ と Na 原子との電荷交換反応によって引き起こされた可能性を強く示唆する結果を得た。この内容は雑誌論文として出版されている。

上記の検証では、オーロラ降下粒子による電離に伴ったナトリウム密度減少のメカニズムが電荷交換反応であるということを示唆する結果を得たものより詳細な調査のためには、アップグレードしたナトリウムライダーを用いて移流などの変動をできる限り排除した観測を行うことが望ましい。これを実現するために、EISCAT レーダーと Na ライダーの同時観測(時間分解能1秒以下)を10晩合計46時間において実施した。この中で、2018年2月18日、19日、20日はオーロラ活動度が高く脈動オーロラによって高度70 km 付近まで電離が確認された。今後はこの同時観測で取得された電子密度と Na 密度データを比較することで、脈動オーロラの明滅周期に同調した Na 密度減少を抽出し、その減少が電荷交換反応によって説明できるか調査を行う予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2件)

Takahashi T., K. Hosokawa, S. Nozawa, T. Tsuda, Y. Ogawa, M. Tsutsumi, Y. Hiraki, H. Fujiwara, T. D. Kawahara, N. Saito, S. Wada, T. Kawabata, and C. Hall, Depletion of mesospheric sodium during extended period of pulsating aurora, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122, 1212-1220, doi:10.1002/2016JA023472, 2017.

Tsuda, T. T., T. Nakamura, M. K. Ejiri, T. Nishiyama, K. Hosokawa, T. Takahashi, J. Gumbel, J. Hedin, Statistical investigation of Na layer response to geomagnetic activity using resonance scattering measurements by Odin/OSIRIS, *Geophysical Research Letters*, 44, 5943-5950, doi:10.1002/2017GL072801, 2017.

〔学会発表〕(計 1件)

T. Takahashi, Keisuke Hosokawa, Satonori Nozawa, Takuo T. Tsuda, Yasunobu Ogawa, Masaki Tsutsumi, Yasutaka Hiraki, Hitoshi Fujiwara, Takuya D. Kawahara, Norihito Saito, Satoshi Wada, Tetsuya Kawabata, Chris Hall, and Hiroshi Miyooka, Depletion of mesospheric sodium during extended period of pulsating aurora: high speed sodium lidar observation, 2017 CEDAR Workshop, Keystone Colorado, Jun 20, 2017. (Poster)

T. Takahashi, K. Hosokawa, S. Nozawa, T. T. Tsuda, Y. Ogawa, M. Tsutsumi, Y. Hiraki, H. Fujiwara, T. D. Kawahara, N. Saito, S. Wada, T. Kawabata, C. Hall, and H. Miyaoaka, Depletion of mesospheric sodium during extended period of pulsating aurora, 18th EISCAT International symposium and MST15/iMST2 work shop, Tachikawa, May 27, 2017. (Oral)

T. Takahashi, T. T. Tsuda, K. Hosokawa, S. Nozawa, Y. Ogawa, M. Tsutsumi, Y. Hiraki, T. D. Kawahara, N. Saito, S. Wada, T. Kawabata, C. Hall, and H. Miyaoaka, Pulsating aurora-induced Na density depletion in the polar MLT region: high-speed sodium lidar and EISCAT radar observation, Laser Solutions for Space and the Earth, Yokohama, Apr. 21, 2017. (Oral)

高橋透, 細川敬祐, 野澤悟徳, 津田卓雄, 小川泰信, 堤雅基, 平木康隆, 藤原均, 川原琢也, 斎藤徳人, 和田智之, 川端哲也, Hall Chris, 高速ナトリウムライダー観測による脈動オーロラが引き起こすナトリウム密度変動の研究, MTI 研究集会, 国分寺, 2016年8月29日. (ポスター)

高橋透, 津田卓雄, 細川敬祐, 野澤悟徳, 小川泰信, 川原琢也, 斎藤徳人, 和田智之, 川端哲也, Hall Chris, 脈動オーロラが起こすナトリウム密度変動の研究: 高速ナトリウムライダー観測, 日本地球惑星科学連合2016年大会, 幕張, 2016年5月23日. (ポスター)

高橋透, 野澤悟徳, 細川敬祐, 津田卓雄, 川原琢也, 斎藤徳人, 和田智之, 小川泰信, 堤雅基, 川端哲也, 北極域トロムソに設置されたナトリウムライダーによる中間圏・下部熱圏大気観測, 光波センシング技術研究会, 2015年12月8-12月9日. (口頭)

Toru Takahashi, K. Hosokawa, S. Nozawa, T. Tsuda, Y. Ogawa, T. Kawahara, S. Oyama, Y. Hiraki, J. Sakai, N. Saito, S. Wada, T. Kawabata, Chris Hall, Sodium density depletion during electron density enhancements by auroral particle precipitation, 第6回極域科学シンポジウム, 2015年11月16-11月19日. (ポスター)

津田卓雄, 斎藤徳人, 野澤悟徳, 川原琢也, 川端哲也, 高橋透, C. M. Hall, 和田智之, 中村卓司, 江尻省, 西山尚典, 阿保真, 津野克彦, J. Gumbel, J. Hedin, 光リモートセンシングによる超高層大気の研究, レーザー学会学術講演会第38回年次大会, 京都, 2018年1月24-26日. (口頭・招待講演)

T.D. Kawahara, S. Nozawa, N. Saito, T. T. Tsuda, T. Kawabata, T. Takahashi, S. Wada, Sapphire cell development for the daytime Na lidar observations at Tromsø, 第8回極域科学シンポジウム, 立川, 2017年12月4-8日. (ポスター)

川原琢也, 野澤悟徳, 斎藤徳人, 津田卓

雄, 和田智之, 高橋透, 川端哲也, トロムソにおけるナトリウムライダーの夏期定常観測に向けて: 単結晶サファイアを用いた磁気光学狭帯域フィルタ開発, 第142回地球電磁気・地球惑星圏学会, 京都, 2017年10月16日. (ポスター)

¹¹ 津田卓雄, 中村卓司, 江尻省, 西山尚典, 阿保真, 津野克彦, 野澤悟徳, 川原琢也, 川端哲也, 斎藤徳人, 和田智之, C. M. Hall, 高橋透, J. Gumbel, J. Hedin, 光リモートセンシングによる金属層の動態研究: オーロラ粒子による影響, 小金井, 2017年8月31日. (ポスター)

¹² 津田卓雄, 細川敬祐, 中村卓司, 江尻省, 西山尚典, 高橋透, J. Gumbel, and J. Hedin, 高エネルギー降下粒子がNa層に与える影響: Odin/OSIRIS データの統計解析, 脈動オーロラ研究集会, 名古屋, 2017年3月15-16日. (口頭)

¹³ 津田卓雄, 中村卓司, 江尻省, 西山尚典, 阿保真, 津野克彦, 野澤悟徳, 川原琢也, 川端哲也, 斎藤徳人, 和田智之, C. M. Hall, 高橋透, J. Gumbel, J. Hedin, 光学リモートセンシングによる金属原子層・金属イオン層の研究, 大気ライダー研究会, 秋葉原, 2017年2月14日. (口頭・招待講演)

¹⁴ 小川洋平, 野澤悟徳, 津田卓雄, 川原琢也, 小川泰信, 藤原均, 斎藤徳人, 和田智之, 高橋透, 堤雅基, 川端哲也, Hall Chris, Brekke Asgeir, トロムソナトリウムライダーを用いた北極域SSLの統計解析, 極域科学シンポジウム, 立川, 2016年11月. (ポスター)

¹⁵ T. T. Tsuda, T. Nakamura, M. K. Ejiri, T. Nishiyama, K. Hosokawa, T. Takahashi, J. Gumbel, and J. Hedin, Na layer response to geomagnetic activities: statistical analysis based on Odin/OSIRIS data, 第7回極域科学シンポジウム, 立川, 2016年11月. (ポスター)

¹⁶ 野澤悟徳, 川原琢也, 小川泰信, 津田卓雄, 藤原均, 斎藤徳人, 和田智之, 高橋透, 堤雅基, 川端哲也, Hall Chris, Brekke Asgeir, 北極域上部中間圏・下部熱圏における鉛直運動, 第6回極域科学シンポジウム, 立川, 2015年11月16日-11月19日. (ポスター)

¹⁷ 斎藤徳人, 野澤悟徳, 川原琢也, 川端哲也, 津田卓雄, 高橋透, 日々野辰哉, 月花智博, 和田智之, ナトリウムライダーを用いた極域超高層大気現象の観測, 第3回「光量子光学研究」, 和光, 2015年11月12日-11月13日. (口頭)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 透 (TAKAHASHI, Toru)

国立極地研究所・研究教育系・特任研究員
研究者番号: 40759833

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

細川敬祐 (HOSOKAWA, Keisuke)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・准教授

津田卓雄 (TSUDA, Takuo)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・助教

野澤悟徳 (NOZAWA, Satonori)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授

小川泰信 (OGAWA, Yasunobu)

国立極地研究所・研究教育系・准教授